

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	宮里心一
Author(English)	SHIN-ICHI MIYAZATO
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3533号, 授与年月日:2001年4月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3533号, Conferred date:2001/4/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる
塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究

宮里 心一

概要

塩害および中性化の影響を受けたコンクリート部材中の鉄筋腐食に関する研究は多い。ただしその多くは、欠陥の存在を無視したあるいは考慮していないコンクリート部材を対象としている。しかしながら、実在するコンクリート部材の多くは、ひび割れや打継目等の欠陥を有する。これらの欠陥が存在する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食は、その進行速度が速いにも関わらず、定量的な検討が不足しているのが現状である。このため、本研究では、欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食、主としてマクロセル腐食について検討を行うこととする。

本研究の目的は、次に示す通りである。

- ① 鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化による腐食について、モデル供試体を用いた実験により、形態（マクロセル腐食とミクロセル腐食）と速度を、統一した基準でかつ網羅的に検討する。その結果を基に、マクロセル形成機構およびその速度に影響を及ぼす主な要因を明らかにする。
- ② 鉄筋コンクリート部材の具体的な欠陥部（曲げひび割れ部、断面修復部およびコールドジョイント部）の腐食形態と腐食速度を、上記①の結果に基づき評価する。
- ③ 既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じている腐食の速度を、非破壊試験により現場で定量的に推定する手法を提案する。この手法を用いて、30～40年間供用された既存鉄筋コンクリート構造物中の腐食速度を評価し、上記②の結果を検証する。

以下に本研究の構成を示す。

第1章では、背景を述べ既往の研究を整理した上で、本研究の目的、意義および構成を示す。

第2章では、第3章から第8章までの実験を遂行するに当たり、マクロセル腐食速度の測定方法を開発する。第2節では、供試体を用いる実験におけるマクロセル腐食速度の測定方法を開発する。すなわち、分割鉄筋を埋設した供試体を用いる測定方法の開発を行う。第3節では、供試体のみならず既存鉄筋コンクリート構造物中でのマクロセル腐食速度を測定する方法を開発する。すなわち、非破壊試験と電気回路を組み合わせた測定方法の開発を行う。

第3章から第8章では、鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる腐食の形態と速度を評価する。第3章から第5章では塩害による腐食を対象とし、第6章から第8章では中性化によ

る腐食を対象とする。

第3章では、モデル欠陥部に生じる塩害による腐食の形態と速度を検討する。第2節の実験的検討では、欠陥の存在を考慮した上で、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとし、腐食の形態と速度を明らかにする。また、第3節の解析的検証では、欠陥の存在を考慮した上で、塩化物イオンの供給条件、コンクリートの水セメント比をパラメータとし、第2節の結果を検証する。この際、欠陥の存在、コンクリートの酸素透過量、コンクリート抵抗、鉄筋の分極抵抗を input data とし、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を output data とするモデルを構築する。

第4章では、塩分環境下のコンクリート部材の代表的な欠陥部である曲げひび割れ部および断面修復部の打継目近傍に生じる塩害による腐食の形態と速度を評価する。第2節では、曲げひび割れ部に生じる塩害に伴う腐食の形態と速度を評価する。第3節では、断面修復部の打継目近傍に生じる塩害に伴う腐食の形態と速度を評価する。

第5章では、第2章第3節で開発された方法を用い、既存鉄筋コンクリート構造物の曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度を算定し、第4章の結果を検証する。ここでは、実際に30年間供用されている鉄筋コンクリート造橋上部工を対象とし、曲げひび割れ部に生じる塩害による腐食の形態と速度を評価する。

第6章では、モデル欠陥部に生じる中性化による腐食の形態と速度を検討する。ここでは、欠陥の存在を考慮した上で、二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとし、腐食の形態と速度を明らかにする。

第7章では、中性化の影響を受けるコンクリート部材の代表的な欠陥部である曲げひび割れ部およびコールドジョイント部に生じる腐食の形態と速度を評価する。第2節では、曲げひび割れ部に生じる中性化に伴う腐食の形態と速度を評価する。第3節では、コールドジョイント部に生じる中性化に伴う腐食の形態と速度を評価する。

第8章では、既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じる中性化による腐食の形態と速度を評価する。ここでは、実際に35年間供用されている鉄筋コンクリート造建物を対象とし、コールドジョイント部に生じる中性化による腐食の形態と速度を評価する。

以上の結果を基に、第9章では、マクロセル形成機構およびその速度に影響を及ぼす主な要因を整理する。第2節では、塩害による腐食と中性化による腐食の比較を行う。第3節では、腐食形態と腐食速度に影響を及ぼす主な要因を明らかにする。

以上の検討をまとめ、第10章で結論を示す。主な結論は次の通りである。

- (1)塩害の影響を受けるコンクリートにおいて、欠陥が存在する場合、水セメント比が高いほどマイクロセルを形成する傾向にあり、水セメント比が低いほどマクロセルを形成する傾向にある。これに伴い、水セメント比が低い場合には欠陥箇所における局所的な腐食が生じ、水セメント比が高い場合よりも腐食速度は促進されることもある。以上のことから、欠陥が存在する場合、コンクリートの水セメント比が低いことは、必ずしも塩害による鉄筋腐食の抑制効果に優れているとは言えないことが判明した。
- (2)中性化の影響を受けるコンクリートにおいて、欠陥が存在する場合、水セメント比に拘わらずマクロセルが形成される。また、水セメント比が高いほど腐食速度は促進される。以上のことから、欠陥が存在する場合、中性化によるコンクリートの鉄筋腐食に対する耐久性は、水セメント比が低いほど優れることが判明した。
- (3)塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度と比較して速い。

SYNOPSIS

The objective of this study was to clarify comprehensively the corrosion cell formation pattern (macro-cell and micro-cell) and the rate induced by chloride and carbonation in concrete with defects. Therefore, first the basic investigation was done using mortar specimen with the model defects. Herein, three important factors that increased steel corrosion were investigated in detail. These factors were: 1) supply of chloride ion or carbon dioxide, 2) supply of water and oxygen, and 3) water-cement ratio of mortar. Next the applied investigation was done using concrete specimen with the defects such as bending cracks or joints. Herein, the influences of the existence of cracks and the variation of water cement ratio on the corrosion cell formation pattern and the rate were investigated. In addition the practical examination was done using the existing reinforced concrete structures with bending cracks or joints. Herein, the method which estimated the macro-cell corrosion rate near the defects in existing reinforced concrete by the non-destructive tests in the field was proposed. Using this method, the corrosion cell formation pattern and the rate in existing reinforced concrete structures used for 30 - 40 years were evaluated. The results indicate that, in the case of chloride-induced corrosion, decreasing the water-cement ratio (0.3) increased the activity of macro-cell corrosion. Increasing the water-cement ratio (0.7), on the other hand, increased the activity of micro-cell corrosion. Therefore, in the presence of defects, corrosion rate was promoted even at a low water-cement ratio. The study also revealed that, in the case of carbonation-induced corrosion, macro-cell corrosion was formed regardless of the water-cement ratio. But, the corrosion rate decreased with decreasing the water-cement ratio. Finally, the study proved that corrosion rate induced by chloride was higher than that induced by carbonation.

目次

第1章 序論	1
1-1 背景	2
1-2 既往の研究の整理	4
1-2-1 鉄筋の腐食	4
1-2-2 コンクリート部材中鉄筋のマクロセル腐食	9
1-2-3 非破壊試験を用いたコンクリート部材中鉄筋の腐食診断	12
1-2-4 既存コンクリート構造物中鉄筋のマクロセル腐食調査	13
1-3 目的	14
1-4 意義	15
1-5 構成	16
参考文献	19
 第2章 マクロセル腐食速度測定方法の開発	 22
2-1 はじめに	23
2-1-1 背景	23
2-1-2 目的	23
2-1-3 構成	23
2-2 分割鉄筋を用いた方法	25
2-2-1 測定方法の構築	25
2-2-2 測定例	30
2-3 非破壊試験と電気回路を組み合わせた方法	36
2-3-1 測定方法の構築	36
2-3-2 測定例	40
2-4 まとめ	47
参考文献	48
 第3章 モデル欠陥部に生じる塩害によるマクロセル腐食	 49
3-1 はじめに	50
3-1-1 背景	50
3-1-2 目的	50
3-1-3 構成	51
3-2 実験的検討	52
3-2-1 実験概要	52
3-2-2 実験結果	59
3-3 解析的検証	70

3-3-1 解析概要	70
3-3-2 解析結果および考察	90
3-4 まとめ	94
参考文献	95
第4章 曲げひび割れ部および打継部に生じる塩害によるマクロセル腐食	96
4-1 はじめに	97
4-1-1 背景	97
4-1-2 目的	97
4-1-3 構成	97
4-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食	99
4-2-1 実験概要	99
4-2-2 曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	110
4-2-3 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	127
4-3 断面修復部の打継目近傍に生じるマクロセル腐食	145
4-3-1 実験概要	145
4-3-2 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	151
4-3-3 打継目の種類が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	155
4-3-4 外部環境の相違が腐食速度に及ぼす影響	167
4-4 まとめ	173
参考文献	175
第5章 既存構造物の欠陥部に生じる塩害によるマクロセル腐食	176
5-1 はじめに	175
5-1-1 背景	177
5-1-2 目的	177
5-1-3 構成	178
5-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食	179
5-2-1 実験概要	179
5-2-2 実験結果	181
5-3 まとめ	186
参考文献	187
第6章 モデル欠陥部に生じる中性化によるマクロセル腐食	188
6-1 はじめに	189
6-1-1 背景	189

6-1-2	目的	189
6-1-3	構成	189
6-2	実験的検討	190
6-2-1	実験概要	190
6-2-2	実験結果および考察	193
6-3	まとめ	202
	参考文献	203
第7章	曲げひび割れおよび打継部に生じる中性化によるマクロセル腐食	204
7-1	はじめに	205
7-1-1	背景	205
7-1-2	目的	205
7-1-3	構成	205
7-2	曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食	207
7-2-1	実験概要	207
7-2-2	曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	211
7-2-3	水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	224
7-3	コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食	233
7-3-1	実験概要	233
7-3-2	水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響	235
7-3	まとめ	238
	参考文献	239
第8章	既存構造物の欠陥部に生じる中性化によるマクロセル腐食	240
8-1	はじめに	241
8-1-1	背景	241
8-1-2	目的	241
8-1-3	構成	241
8-2	コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食	243
8-2-1	実験概要	243
8-2-2	実験結果	244
8-3	まとめ	247
第9章	欠陥部に生じる腐食の形態と速度	248
9-1	はじめに	249
9-1-1	背景	249

9-1-2 目的	249
9-1-3 構成	249
9-2 塩害による腐食と中性化による腐食の比較	251
9-2-1 腐食形態の比較	251
9-2-2 腐食速度の比較	252
9-2-3 まとめ	256
9-3 マクロセル腐食に影響を及ぼす要因の整理	257
9-4 まとめ	264
第10章 結論	265
10-1 各章で得られた結果の整理	266
10-2 全体の結論	269
謝辞	
付録	
2-3に関するプログラム	i
3-3に関するプログラム	iv
5-2に関するプログラム	xi

第1章 序論

1-1 背景

1-2 既往の研究の整理

1-3 目的

1-4 意義

1-5 構成

1-1 背景

わが国を初め先進国の社会基盤施設は、これまでにかなりの量が整備され、膨大なストックを抱えるに至っている。一方発展途上国では、社会基盤施設が不足しており、その建設は急務となっている。これらの社会基盤施設を形成する最も重要な材料の一つとして、コンクリートが挙げられる。コンクリート構造物を含めた社会基盤施設では、その施設に要求される社会的必要性が存続する限り、維持管理を行いつつ供用を継続する必要がある。このような背景の中、来たる 21 世紀に向け、コンクリートの耐久性には多くの関心が向けられ、活発な研究が行われてきた。しかしながら、残念なことに、一部の特に鉄筋コンクリート構造物では、比較的早期に劣化が進行している場合がある。例えば、図 1-1-1 に、昭和 59 年に行なわれた実構造物調査の結果を示す¹⁻¹⁾。これによれば、建設から 15～20 年経過した多くの施設において、コンクリート中鉄筋の腐食が進行していることが認められる。

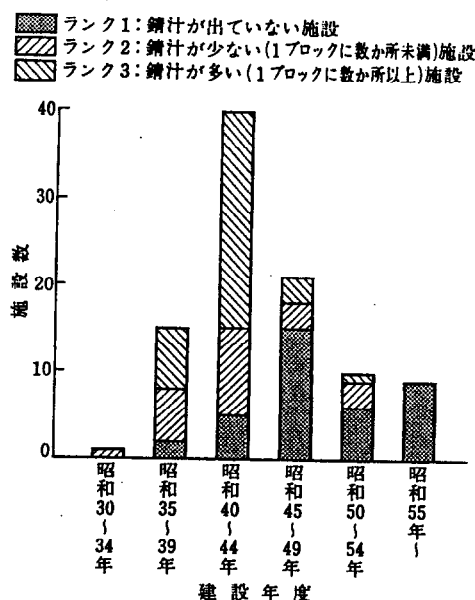


図 1-1-1 栈橋の錆汁溶出状況

一般にコンクリート中の鉄筋は、強アルカリ環境下にあるため、表面は不動態皮膜で覆われており、電気化学的に安定な状態である。しかしながら、鉄筋表面に塩化物イオンが

浸透すると、あるいは二酸化炭素の浸透により鉄筋周囲のコンクリートが中性化すると、不動態皮膜は破壊し、腐食する可能性が高まる。また、コンクリート中の一般の鉄筋腐食は湿食と呼ばれ、腐食の進行には酸素と水の供給が必要である。コンクリート構造物は、かぶりにより、腐食要因となる塩化物イオン、二酸化炭素、酸素および水の浸透が抑制されている。しかしながら、コンクリートにひび割れや打継目等の欠陥が存在すると、それらを経由し腐食要因となる物質が鉄筋まで容易に浸透することとなる。その結果、コンクリートの欠陥部に位置する鉄筋では、腐食が発生する。

次節にて詳細を示す通り、コンクリート中鉄筋の腐食には、腐食セルの形成に基づく分類として、マクロセル腐食およびミクロセル腐食の2種がある。マクロセル腐食とは、連続する鉄筋において腐食要因となる物質の供給が部分的に異なる場合に生じ、アノード反応が卓越する部分（以後、「アノード部」と称す。）とカソード反応が卓越する部分（以後、「カソード部」と称す。）が明らかに区別できる腐食を指す。一方、ミクロセル腐食とは、狭い範囲においてアノード部とカソード部がともに存在する腐食を指す。すなわち、アノード部とカソード部は区別されず、腐食は一様に進行する。以上の通り、マクロセル腐食とミクロセル腐食は異なる形成機構である。したがって、実存するコンクリート部材中における全ての鉄筋腐食に対して、腐食形態と腐食速度を整理するためには、マクロセル腐食とミクロセル腐食を区別し評価する必要がある。特に、欠陥が存在するとマクロセル腐食の影響が大きいと考えられている。このため、供用中の鉄筋コンクリート構造物を維持管理する上で、どの構造物のどの部分でどの程度の速度でマクロセル腐食が進行するかを知っていると、重点的な検査等を行うことが可能となり効果的である。また、長期にわたり供用される鉄筋コンクリート構造物を設計する際に、マクロセル腐食の発生および進行を考慮しなければ、構造物の耐久性の過大評価を招き極めて危険な状態になる。

1-2 既往の研究の整理

本節では、本研究に関連する既往の研究について整理する。1-2-1では、鉄筋の腐食形成機構に関する基本概念を示す。1-2-2では、コンクリート部材中鉄筋のマクロセル腐食に関する既往の研究を整理する。1-2-3では、既存コンクリート構造物中鉄筋の腐食について、現在行われている測定方法を列挙する。1-2-4では、実態調査についての事例を挙げる。以上のことを踏まえ、コンクリート中鉄筋のマクロセル腐食に関して、従来行われてきた研究では未解明な点を整理する。

1-2-1 鉄筋の腐食

1-2-1-1 鉄筋腐食に関わる電気化学的反応^{1-2), 1-3), 1-4), 1-5)}

一般にコンクリートの空隙中における水溶液のpHは12.5以上で、高アルカリ水溶液として存在している。このような強いアルカリ環境のもとでは、鉄はその表面に不動態皮膜と呼ばれる、1~3nm厚の水和酸化物($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)からなる薄い酸化皮膜が形成されており、腐食作用から保護されている。しかしながら、コンクリート中にある種の有害成分が侵入すると鉄は活性態となり腐食しやすい状態となる。鉄の不動態皮膜を破壊する有害成分には、ハロゲンイオン(Cl^- , Br^- , I^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})、または硫化物イオン(S^{2-})などの陰イオンがある。これらのうち、塩化物イオンはその作用が最も強く、しかもコンクリート中に含有される機会が多い。このため、コンクリート中鉄筋の腐食に対する最も有害なイオンと考えられている。また、アルカリ成分の溶出や中性化によってコンクリートのアルカリ度が低下することによっても鉄は活性態となり、腐食しやすい状態となる¹⁻⁵⁾。

活性態にある鉄では、水と酸素の作用によって腐食が進行する。すなわち鉄表面では、電子2個を母材中に残して鉄がイオン化するアノード反応(酸化反応)と、このアノード反応により生じた電子を消費するカソード反応(還元反応)とが、式(1-2-1)および式(1-2-2)の様に進行し、両反応が組み合わさった式(1-2-3)に示される $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が鉄表面に析出する。この化合物は溶存酸素によって酸化し $\text{Fe}(\text{OH})_3$ になる。これらの関連を概念的に、図1-2-1に示す¹⁻⁶⁾。

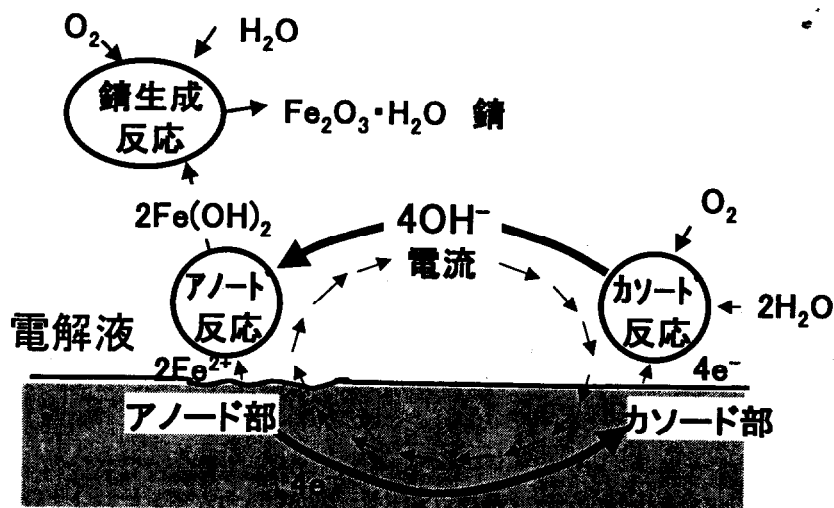
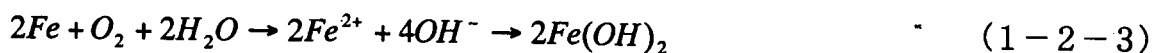
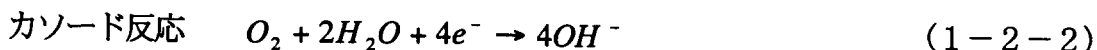


図1-2-1 腐食セルの概念図

引き続き、この化合物は水を失って $FeOOH$ または Fe_2O_3 (赤さび) となり、また一部は酸化不十分のまま Fe_3O_4 (黒さび) となって、鉄表面にさび層を形成する。鉄のさび層は多孔質であるため、たとえ厚く生成しても、腐食を抑制する効果が小さく、下地の鉄表面では腐食が絶えず進行する。また、さびは鉄より大きな体積 (約 2.5 倍; 図1-2-2 参照) を占めるので、その膨張圧がかぶりコンクリートのひび割れと剥離を引き起こし、ひび割れが腐食の進行をさらに促進させる結果を招く。

以上に示す通り、腐食反応においては、種々の電荷を持つイオンが関与しており、このことが電気化学反応と呼ばれる所以である。よって、腐食量は電気量で表すことができ、例えば腐食電流密度が約 $100 \mu A/cm^2$ の場合、次式に示す通り侵食度は $1.16mm/年$ となる。

$$\frac{100 \times 10^{-6} (A/cm^2)}{96500 (C)} \cdot \frac{55.85 (g/mol)}{7.86 (g/cm^3) \cdot 2} \cdot 60 (sec) \cdot 60 (min) \cdot 24 (hour) \cdot 365 (day) = 0.116 (cm/year) = 1.16 (mm/year)$$

(1-2-4)

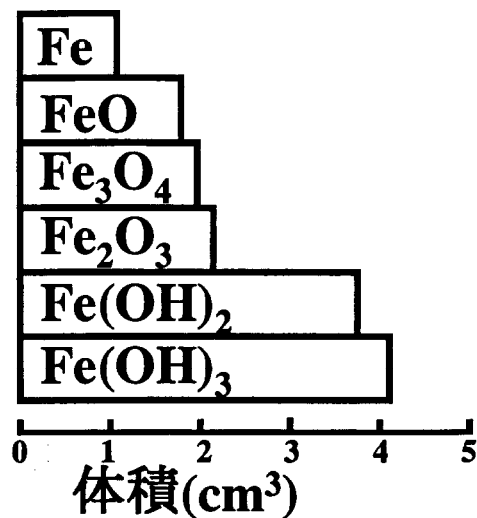


図1-2-2 腐食生成物の体積比

1-2-1-2 pH および塩化物イオン濃度の相違が鉄筋腐食の発生および進行に及ぼす影響

鉄筋が十分な不動態に守られているか、あるいは腐食を生じやすい活性態にあるかは、その鉄筋が接触している水溶液の pH の相違により大きな影響を受けることが知られている。図1-2-3¹⁻⁷⁾によれば、コンクリート内部の溶液のように pH が 10 以上の高アルカリ域では、水溶液の pH の減少と共に、鉄の腐食速度は増加することがわかる。

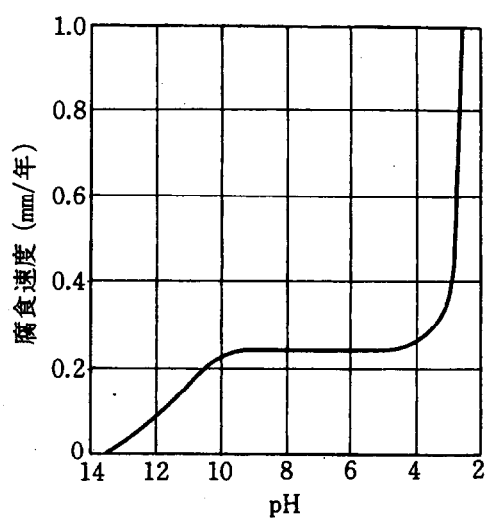


図1-2-3 溶液の pH と鉄筋の腐食速度

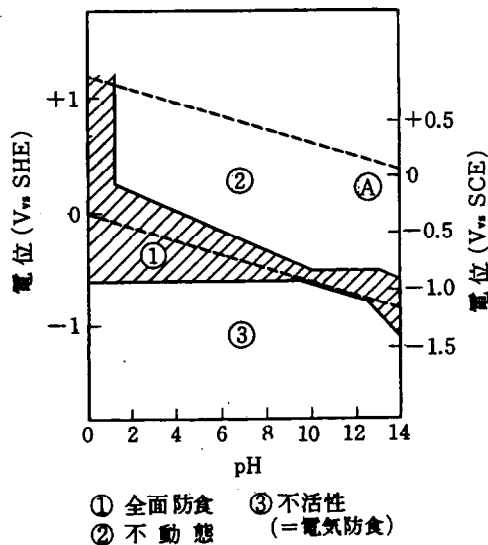


図1-2-4 Cl^- を含まない溶液中
における鉄の電位-pH 図

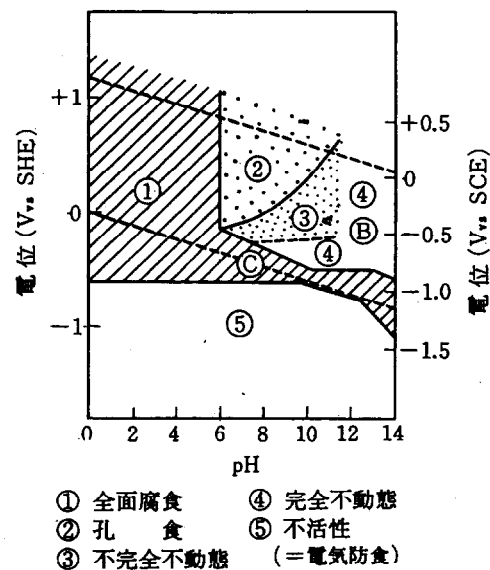


図1-2-5 Cl^- を含む溶液中における
鉄の電位-pH 図

Pourbaix は、塩化物イオンを含まない溶液と含む溶液において、鉄の電位と液の pH をパラメータとした実用的な電位-pH 図を作成している¹⁻⁸⁾。図1-2-4は塩化物イオンを含まない溶液中、また図1-2-5は 0.01mol/l の塩化物イオンを含む溶液中における鉄の電位-pH 図である。

これらの図によれば、塩化物イオンの影響を受けない環境下において、pH が高ければ、内部鉄筋の腐食は起こりにくいことが認められる。また、塩化物イオンが存在する、あるいは pH が低下すると、腐食が生じる可能性が高いことが認められる。

大即ら^{1-9), 1-10)} は、モルタル中での鉄筋のアノード分極曲線から不動態領域の有無を判断している。これによると、塩化物イオン含有量が多いほど不動態皮膜はなくなる傾向にあることが確認されている。具体的には、モルタル質量の 0.15% (3.45kg/m^3) 以下では 80% 以上の場合が不動態皮膜を有するのに対し、それ以上になると不動態が存在する確率は急激に低下し、50% 程度以下になると記されている。また、不動態皮膜がないと判断される供試体で最小塩化物イオン含有量のものは 0.05% (1.15kg/m^3) である、と記されている。これらの値 0.05% および 0.15% は、通常のコングリート中のモルタル量を 1500kg/m^3 と仮定すると、 0.75kg/m^3 および 2.25kg/m^3 に相当する。また、宮川¹⁻¹¹⁾ は、鉄筋コンクリート供試体を用い、塩化物イオン含有量と鉄筋腐食の関係を評価している。これによると、発錆面積が顕著な上昇を見せる場合は 2.5kg/m^3 の塩化物イオン含有量以上

であり、塩化物イオンの影響としては $1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$ の間にその境界値があるとしている。この 1.2 および 2.5kg/m^3 という値は、大即ら¹⁻⁹⁾、¹⁻¹⁰⁾ および吉田ら¹⁻¹²⁾ が報告している結果と同等である。さらに、セメント質量に対する比で示すと、それぞれ 0.3% および 0.6% 程度となり、フリーデル氏塩としてセメントに固定される塩化物イオン量 0.4% 前後の値となっている。以上のことから、コンクリート質量に対する塩化物イオン含有量が約 1kg/m^3 以下であれば鉄筋の不動態皮膜は存在し、一方、 2.5kg/m^3 以上であれば活性化する可能性が高いことがわかる。なお、土木学会では、鉄筋腐食を引き起こす限界塩化物イオン含有量として、 1.2kg/m^3 を目安としている¹⁻¹³⁾。

森永¹⁻¹⁴⁾ および佐伯ら¹⁻¹⁵⁾ は、中性化がモルタル中铁筋の腐食に及ぼす影響について検討している。その結果、鉄筋周囲のモルタルが中性化した場合、鉄筋が腐食することを確認している。また、腐食速度は中性化の進行程度他に、周囲の湿度の影響も受けている。

1-2-1-3 コンクリート中铁筋の分極曲線¹⁻³⁾

腐食速度は鉄の電位－電流密度曲線、すなわち分極曲線から評価することができる。アルカリ溶液中で鉄をアノードとして電位を貴方向へ変化させ、そのとき流れる電流を測定すると、アノード分極曲線が得られる。鉄のアノード分極曲線は、一般に図1-2-6のABCDEの形状をなす。AB電位域では鉄は活性態を示し、電位の上昇とともに溶解が増大するが、CD電位域では鉄は不動態化し、ほとんど溶解しない。またDEでは酸素ガスの発生が起こる。しかしながら、コンクリート中の鉄は当初から不動態化しているので、図の破線部が現れず、自然電位Fから始まる実線FDEの曲線が得られる。コンクリート中に塩化物イオンが存在すると、 E_c 電位において電流が増大し、腐食が発生する。この腐食が発生し始める臨界電位を腐食電位という。腐食は鉄の電位が腐食電位であるとき発生し、このとき腐食箇所の内部がアノード、外部がカソードとなった電池を形成して進行する。同時に腐食箇所の内部では、アノード反応の進行により、塩化物イオン濃度が高くなり、また腐食生成物(FeCl_2)の加水分解により液のpHが低くなるため、鉄の溶解が促進される。

1-2-2 コンクリート部材中鉄筋のマクロセル腐食

1-2-2-1 腐食形態（マクロセル腐食とミクロセル腐食）

腐食電池（腐食セル）の形態は、マクロセルとミクロセルに大別される。一般的に、アノード部（アノード反応が優先的に生じる部分）とカソード部（カソード反応が優先的に生じる部分）が明らかに異なる部分に存在する電池（セル）をマクロセルと呼ぶ。一方、

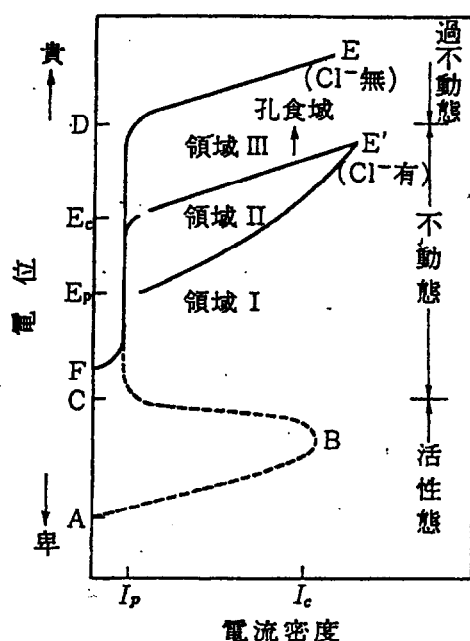


図1-2-6 鉄筋の電位－アノード電流密度曲線

アノード部とカソード部がほぼ同じ部分に位置し、明確に両者の位置を区別することができない電池（セル）をミクロセルと呼ぶ。

ここで、分極曲線を用い、マクロセルが形成されると腐食速度が増進する理由を示す。図1-2-7に、マクロセルが形成する場合とミクロセルが形成する場合の、アノード分極曲線およびカソード分極曲線を示す。マクロセルおよびミクロセルが形成する場合に関わらず、不動態は破壊していると仮定する。したがって、アノード分極曲線の形状は同様となる。一方、カソード分極曲線は、マクロセルが形成する場合とミクロセルが形成する場合で異なる。上述の通りミクロセルは、アノード部とカソード部が同じ場所で形成するセルである。すなわち、ミクロセルは1～2 cm 以下の狭い範囲で形成されるセルである。したがって、一つのセルにおけるカソード部の面積は狭い。すなわち、カソード部に供給

される酸素量は制限され、カソード分極曲線の勾配はきつい。そのため、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点が示す腐食電流は小さい。一方、マクロセルは、アノード部とカソード部が数 10cm 以上離れた場所で形成するセルである。この場合、特に不動態皮膜の破壊が激しい部分のみがアノードになり、残りの多くの部分はカソードになる。したがって、一つのセルにおけるカソード部の面積は広い。すなわち、カソード部に供給される酸素量は多く、カソード分極曲線の勾配は緩い。そのため、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点が示す腐食電流は大きい。このような機構によりマクロセルが形成する場合はミクロセルが形成する場合と比較して腐食速度が増進すると思われる。

このマクロセルは、不均一性の原因により、濃淡電池および活性不動態電池に分類される。

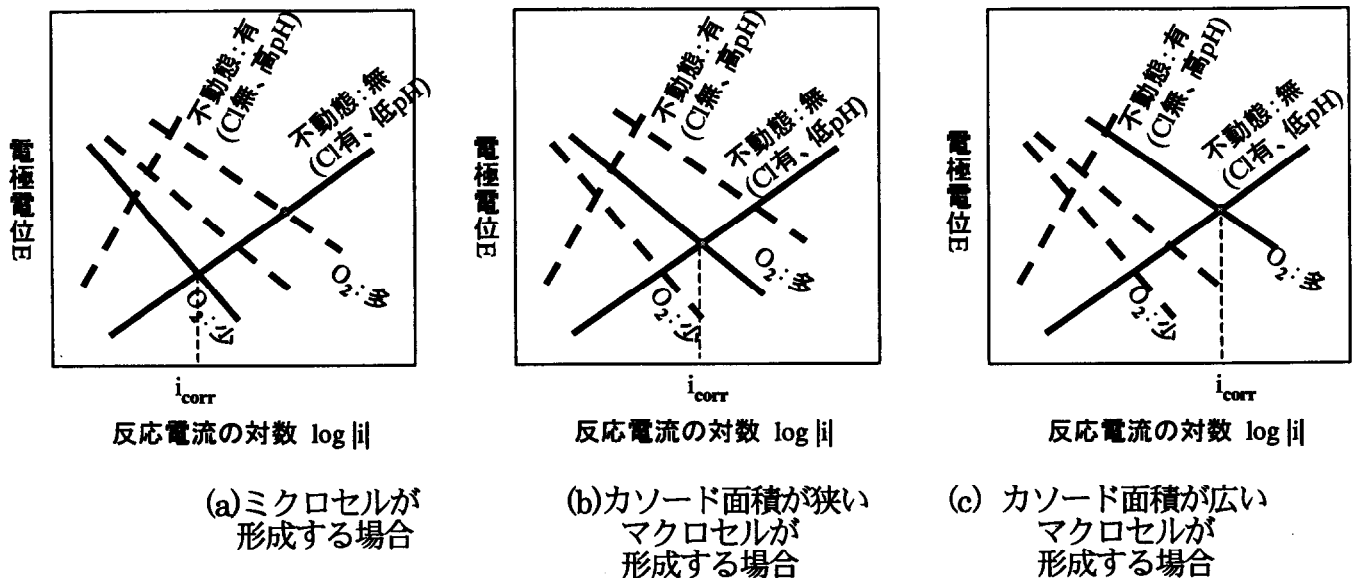


図 1-2-7 分極曲線を用いたマクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度の関係

1-2-2-2 濃淡電池 (物質の濃度差により生じる腐食)

コンクリート中において、塩化物イオン含有量あるいは中性化の進行程度が部分的に異なる場合がある。塩化物イオン含有量が多い部分および中性化が進行した部分がアノードになり易い。一方、酸素濃度が高い部分がカソードとなり易く、これによって腐食電池 (セル) が形成される。したがって、塩分環境下の鉄筋コンクリート部材では、塩化物イオン含有量あるいは酸素濃度の相違による濃淡電池が発生すると考えられている。一方、中性

化の影響を受けるコンクリート部材では、pH あるいは酸素濃度の相違による濃淡電池が発生すると考えられる。

濱田ら¹⁻¹⁵⁾は、断面修復が施された鉄筋コンクリート梁供試体を用い、補修効果を評価した。その結果、既設コンクリート部材に塩化物イオンが含まれている場合、既設部材側がアノード部、補修（断面修復）部材側がカソード部となるマクロセルが形成され、断面修復部と接する既設部材中の鉄筋が腐食することを確認した。この現象は P.Schießl ら¹⁻¹⁷⁾、Andrade ら¹⁻¹⁸⁾、大野ら¹⁻¹⁹⁾、小林¹⁻²⁰⁾ および佐伯ら¹⁻²¹⁾ によっても確認されており、断面修復部に生じる再腐食発生の危険性が指摘された。

1-2-2-3 活性-不動態電池（局所的な物質浸透により生じる腐食）

打継目やひび割れなどの欠陥の存在により、塩化物イオンの供給、二酸化炭素の供給あるいは酸素の供給が局所的に不均一となる。この場合、アノードになり易い部分あるいはカソードになり易い部分が局所的に存在することとなる。

宮川ら^{1-22), 1-23)}は、ひび割れがコンクリート中の鉄筋の腐食機構に与える影響を検討した。その結果、①ひび割れの存在は腐食を局所化するが、腐食領域はひび割れ部のみならず近傍を含んだ領域であること、②水セメント比は鉄筋の腐食形態を変化させる可能性があること、を確認した。

大即¹⁻²⁴⁾は、ひび割れの有無が腐食形成機構に及ぼす影響を検討した。12 の要素に分割したモデル鉄筋をコンクリート中に埋設し、各鉄筋要素の分極曲線および鉄筋要素間の電流を測定することにより、ミクロセル電流およびマクロセル電流を試算した。また、外部環境の乾湿の影響も検討した。その結果、①ひび割れの存在は、鉄筋のアノード反応のみならずカソード反応も促進させる働きがあること、②ひび割れ部は乾湿の条件によってアノード部またはカソード部と変化すること、を確認した。また、打継目がコンクリート内部の鉄筋の腐食性状に及ぼす影響について、10 年間の暴露実験に基づき検討した¹⁻²⁵⁾。その結果、打継目は構造耐力に影響を及ぼすだけでなく、内部鉄筋腐食を誘発する耐久性に関する欠陥にもなることを示した。また、欠陥部において、鉄筋の腐食が生じるが、コンクリート内部に十分な塩化物イオンが浸透した場合、欠陥と交差する鉄筋以外においても腐食が生じることを示した。

なお、コンクリートの中性化がマクロセル腐食に及ぼす影響を評価した報告は、著者が知る限りではない。

1-2-3 非破壊試験を用いたコンクリート部材中鉄筋の腐食診断

現在、コンクリート中鉄筋の腐食を非破壊的に評価する方法として、自然電位法あるいは交流インピーダンス法が用いられることが多い。自然電位法は鉄筋の腐食状態を推定するには有効である。また、交流インピーダンス法による分極抵抗は腐食速度を、さらにコンクリート抵抗は腐食環境を推定するには有効である。しかしながら、マクロセル形成時の腐食速度を定量的に判断するためには、鉄筋内部を流れるマクロセル電流を推定することが必要である。

自然電位法を用いた腐食判定基準として、ASTM C 876 では表 1-2-1 を示している。

表 1-2-1 自然電位法による腐食判定基準

鉄筋電位 E (vs 飽和塩化銀電極)	判定結果
$E > -90\text{mV}$	95%の確率で健全
$-90\text{mV} > E > -240\text{mV}$	不確定
$-240\text{mV} > E$	95%の確率で腐食

腐食電流は 1-2-2-1 に示した通り、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で表される。また、外部電流の印加による分極曲線は、腐食電位のごく近傍 ($\pm 10\text{mV}$) ではほぼ直線であることが知られている。コンクリート中においてはカソード反応が酸素の拡散過程に律速されていると考えられており、この場合この直線の勾配、すなわち分極抵抗を測定することにより、次式によって腐食電流 (腐食速度) を得ることができる。

$$i_{\text{corr}} = \left(\frac{b_a}{2.3} \right) \left(\frac{\Delta i}{\Delta E} \right) \quad (1-2-5)$$

ここで、 i_{corr} は腐食電流、 b_a はアノードターフェル係数、 Δi は外部電流、 ΔE は分極電位を示す。

しかしながら、ここで述べたものは、鉄筋表面に不動態皮膜がなく、電解液の泳動もない理想的な場合に成立する関係であって、現実には成立しにくいものである。したがって、一般的には次式の様に表されることが多い^{1-26), 1-27)}。

$$i_{\text{corr}} = k \left(\frac{\Delta i}{\Delta E} \right) = \frac{k}{R_p} \quad (1-2-6)$$

ここで、 k は換算係数、 R_p は分極抵抗を示す。

1-2-4 既存コンクリート構造物中鉄筋のマクロセル腐食調査

既存コンクリート構造物中鉄筋の腐食について、調査を行った事例は少なくない^{例えば1-28, 1-29)}。しかしながら、マクロセル腐食を考慮した調査結果は非常に少ない。

断面修復後の早期劣化の原因は、塩化物濃淡電池の形成すなわちマクロセルが形成されることによるとされている。この補修後の再劣化について、出村ら¹⁻³⁰⁾は海岸から約60mの距離にあるポリマーセメントを用いて補修された鉄筋コンクリート造建物を対象とし、実態調査を行った。その結果、ポリマーセメントのような非電導性の材料を用いて断面修復を行った場合、補修された鉄筋と連続する既存コンクリート部材内部の鉄筋において著しいマクロセル腐食が起こることを確認した。

既往のコンクリート中鉄筋の腐食に関する研究は、マクロセル腐食とミクロセル腐食を区別して評価したものが少ない。特に、どのような部材、どのような環境において、ミクロセル腐食と比較してマクロセル腐食が卓越して発生進行するかについて、明確な検討を加えた研究はない。また、マクロセル腐食が進行する部位の特定、マクロセル腐食に影響を及ぼす要因の整理等を検討した研究は著者の知る限り皆無である。さらに、実構造物におけるマクロセル腐食の実態調査も少ない。以上のことから、鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食については未解明なことが多数残されているのが現状である。

1-3 目的

以上の背景ならびに既往の研究の整理から、コンクリート部材中鉄筋のマクロセル腐食について、その形成機構と腐食速度を明らかにする必要があることが確認された。また、その結果をもとに実在する鉄筋コンクリート部材を対象とし、特に顕著なマクロセル腐食が発生し腐食速度が速い部分について具体的な評価を加える必要があることが判明した。さらには既存鉄筋コンクリート構造物を対象として、マクロセル腐食速度について実態調査を行う必要もあることが明らかとなった。したがって、本研究の目的は、以下に示す通りである。

- ① 鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化による腐食について、形態（マクロセル腐食・ミクロセル腐食）と速度を、統一した基準でかつ網羅的に検討する。その結果を基に、マクロセル形成機構およびその速度に影響を及ぼす主な要因・メカニズムを整理する。
- ② マクロセルが形成されかつ腐食速度が速いと予想される具体的な欠陥部（曲げひび割れ部、断面修復部およびコールドジョイント部）の腐食形成機構と腐食速度を、上記①の結果に基づき評価する。
- ③ 既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じている腐食の速度を、非破壊試験により現場で定量的に推定する手法を提案する。この手法を用いて、30～40年間供用された既存鉄筋コンクリート構造物中の腐食速度を評価し、上記②の結果を検証する。

1-4 意義

塩害および中性化の影響を受けたコンクリート部材中の鉄筋腐食に関する研究は多い。ただしその多くは、欠陥の存在を無視したあるいは考慮しないコンクリート部材を対象としている。しかしながら、実在するコンクリート部材の多くは、ひび割れや打継目等の欠陥を有する。これらの欠陥が存在する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食は、その進行速度が速いにも関わらず、定量的な検討が不足しているのが現状である。このため、本研究では、欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食、主としてマクロセル腐食について正面から取り組み、基礎的検討、応用的検討ならびに実用的検討を行う。その結果、今まで不明確であった腐食状況、腐食速度が明らかになる。

1-5 構成

本研究のフローを図1-5-1に示す。

第1章では、背景を述べ既往の研究を整理した上で、本研究の目的、意義および構成を示す。

第2章では、第3章から第8章までの実験を遂行するに当たり、マクロセル腐食速度の測定方法を開発する。2-2では、供試体を用いる実験におけるマクロセル腐食速度の測定方法を開発する。すなわち、分割鉄筋を埋設した供試体を用いる測定方法の開発を行う。ここでは、本研究の実験的特長である分割鉄筋を用いるに当たり、内部鉄筋の分割がマクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度に及ぼす影響を評価する。2-3では、供試体のみならず既存鉄筋コンクリート構造物中でのマクロセル腐食速度を測定する方法を開発する。すなわち、非破壊試験と電気回路を組み合わせた測定方法の開発を行う。ここでは、非破壊試験により測定された値を電気回路に代入し、既存コンクリート内部の鉄筋腐食速度を現地で定量的に算定する方法を提案検証する。

第3章から第8章では、鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる腐食の形態と速度を評価する。第3章から第5章では塩害による腐食を対象とし、第6章から第8章では中性化による腐食を対象とする。

第3章では、モデル欠陥部に生じる塩害による腐食の形態（マクロセル腐食・ミクロセル腐食）と速度を検討する。3-2の実験的検討では、欠陥部の存在を考慮した上で、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとし、腐食形態・腐食速度を検討する。また、3-3の解析的検証では、欠陥部の存在を考慮した上で、塩化物イオンの供給条件、コンクリートの水セメント比をパラメータとし、3-2の結果を検証する。この際、コンクリートの酸素透過量、コンクリート抵抗、鉄筋の分極抵抗を input data とし、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度の分布を output data とするモデルを構築する。

第4章では、塩分環境下のコンクリート部材の代表的な欠陥部である曲げひび割れ部および断面修復部の打継目近傍に生じる塩害によるマクロセル腐食を評価する。4-2では、曲げひび割れ部に生じる塩害に伴うマクロセル腐食を評価する。4-3では、断面修復部の打継目近傍に生じる塩害に伴うマクロセル腐食を評価する。

第5章では、2-3で開発された方法を用い、既存鉄筋コンクリート構造物の曲げひび

割れ部に生じるマクロセル腐食速度を算定し、第4章の結果を検証する。ここでは、実際に30年間供用されている鉄筋コンクリート造栈橋上部工を対象とし、曲げひび割れ部に生じる塩害によるマクロセル腐食の速度を評価する。

第6章では、モデル欠陥部に生じる中性化によるマクロセル腐食を検討する。6-2の実験的検討では、欠陥部の存在を考慮した上で、二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとし、腐食形態・腐食速度を検討する。

第7章では、中性化の影響を受けるコンクリート部材の代表的な欠陥部である曲げひび割れ部およびコールドジョイント部に生じるマクロセル腐食を評価する。7-2では、曲げひび割れ部に生じる中性化に伴うマクロセル腐食を評価する。7-3では、コールドジョイント部に生じる中性化に伴うマクロセル腐食を評価する。

第8章では、既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じる中性化によるマクロセル腐食を評価する。ここでは、実際に35年間供用されている鉄筋コンクリート造建物を対象とし、コールドジョイント部に生じる中性化によるマクロセル腐食の速度を評価する。

以上の結果をもとに、第9章では、マクロセル形成機構およびその速度に影響を及ぼす主な要因を整理・考察する。9-2では、塩害による腐食と中性化による腐食の比較を行う。9-3では、腐食形態と腐食速度に影響を及ぼす要因を整理・考察する。その結果を踏まえ、実在する具体的な鉄筋コンクリート部材において、マクロセル腐食の顕著な進行が危ぶまれる部位を列挙する。

以上の検討をまとめ、第10章で結論を示す。

鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究

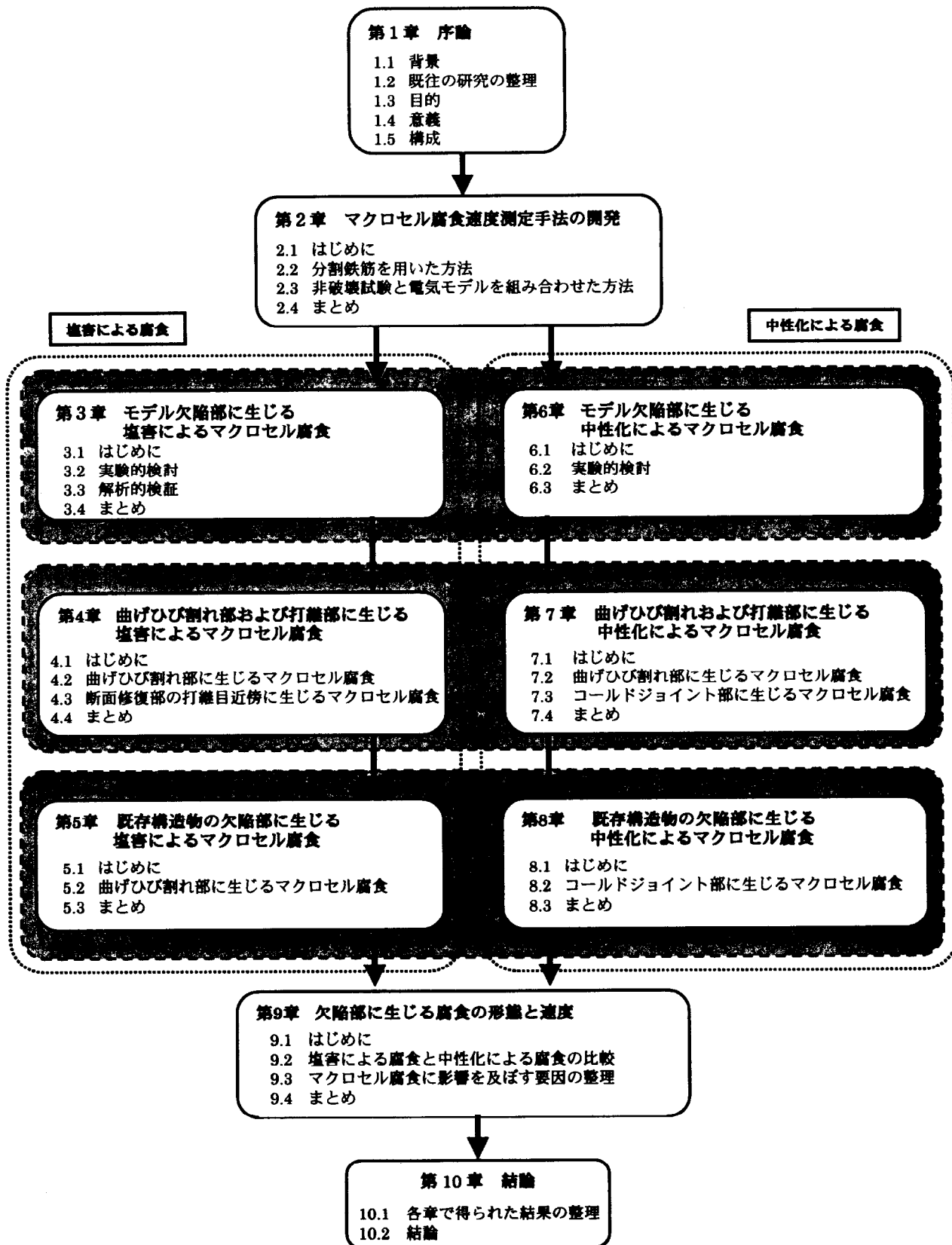


図1-5-1 本研究のフロー

第1章の参考文献

- 1) 大即信明, 鈴木慎也: 耐久性の優れたコンクリート構造物—コンクリート構造物—, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.29-39, 1986.
- 2) 腐食防食協会編: 腐食・防食ハンドブック, 丸善, 2000.
- 3) 大即信明, 樫野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版, 1986.
- 4) 大即信明: 海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1987.
- 5) 工藤矩弘: コンクリート中の鉄筋の腐食と防食, 材料と環境, Vol.42, No.7, pp.462-471, 1993.
- 6) A. W. Beeby: CONCRETE IN THE OCEANS, TECHNICAL REPORT NO.1, CRIA/UEG. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, DEPARTMENT OF ENERGY, 1978.
- 7) U. R. Evans: The Corrosion and Oxidation of Metals, Journal of Chemistry, p.1773, 1930.
- 8) M. Pourbaix: Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice, Corrosion Science, Vol.14, pp.25-82, 1974.
- 9) 大即信明, 原茂雅光, 胡信弘: モルタル中鉄筋の腐食に及ぼす暴露条件および塩素イオンの影響, セメント技術年報, No.40, pp.103-106, 1986.
- 10) 大即信明, 横井聡之, 下沢治: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, 第360号, pp.111-118, 1985.
- 11) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.
- 12) 吉田龍夫, 中島泰一, 高橋猛, 富岡貞夫, 管正春: コンクリート中の塩分含有量と鉄筋の錆に関する調査・研究, セメント技術年報, No.24, pp.242-244, 1975.
- 13) 土木学会: 平成11年版コンクリート標準示方書—耐久性照査型—[施工編], pp.11-14, 2000.
- 14) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986.

- 1 5) 佐伯竜彦, 大即信明, 長滝重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No.522/V-30, pp.55-66, 1996.
- 1 6) 濱田秀則, 福手勤, 阿部正美: 塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, No.3, Vol.2, pp.85-95, 1992.
- 1 7) P.Schiebl, W.Breit, and M.Raupach: Durability of Local Repair Measures on Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion, ACI SP-145, pp.1195-1215, 1997.
- 1 8) Andrade, C.; Maribona, I., R.; Feriú, S.; Gonzalez, J., A., and Feliu, Jr., S., The effect of macro-cells between active and passive areas of steel reinforcements, Corrosion Science, No.33, vol.2, pp.237-249, 1991.
- 1 9) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博: 電気化学的測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究(塩化物濃度の異なる電池), セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.388-393, 1990.
- 2 0) 小林孝一: 混和材を用いた高流動コンクリートの細孔構造と鉄筋腐食に関する研究, 京都大学博士論文, 1999.
- 2 1) 中村一彦, 佐伯竜彦: 補修した構造物の塩害再発メカニズムに関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.272-273, 1993.
- 2 2) 岡田清, 小柳洽, 宮川豊章: コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文報告集, No.281, pp.75-87, 1979.
- 2 3) 岡田清, 宮川豊章: コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について, セメント技術年報, No.33, pp.494-497, 1979.
- 2 4) 大即信明: ひびわれがコンクリート中の鉄筋の腐食傾向に及ぼす影響の電気化学的検討, セメント技術年報, No.39, pp.288-291, 1985.
- 2 5) 大即信明, 久田真: RCの打継目およびひびわれが鉄筋のマクロセル腐食におよぼす影響, 東工大土木工学科研究報告, No.44, pp.1-14, 1991.
- 2 6) 水流 徹, 前田 龍, 春山志郎: 交流法腐食モニターの局部腐食への適用; 防食技術, No.28, pp.638-644, 1979.
- 2 7) Ping Gu, S. Elliott, R. Hristova, J. Beaudoin, R. Brousseau, and B. Baldock: A Study of Corrosion Inhibitor Performance in Chloride Contaminated Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy, ACI MATERIALS JOURNAL, No.97, Vol.

- 5, pp.385-395, 1997.
- 28) 大即信明, 鈴木慎也: 耐久性の優れたコンクリート構造物-港湾構造物-, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.29-39, 1986.8.
- 29) C. Andrade, J. Sarria and C. Alonso : Statistical Study on Simultaneous Monitoring of Rebar Corrosion Rate and Internal Relative Humidity in Concrete Structures Exposed to The Atmosphere, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, SCI, pp233-242, 1996.
- 30) 出村克宣, 大濱嘉彦, 伊部博: 補修後 5 年を経過した鉄筋コンクリート造建物の鉄筋腐食, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム, pp.29-32, 1994.10.

第2章 マクロセル腐食速度測定方法の開発

- 2-1 はじめに
- 2-2 分割鉄筋を用いた方法
- 2-3 非破壊試験と電気回路を組み合わせた方法
- 2-4 まとめ

2-1 はじめに

2-1-1 背景

コンクリートの材料特性の一つとして、圧縮強度は高く、引張強度は低いことが挙げられる。部材において、その弱い引張部に鉄筋を配置して補強したものが鉄筋コンクリートである。すなわち、鉄筋は引張に耐えるための材料であり、実構造物中では応力を伝達すべき範囲では連続して配筋されている。

1-2「既往の研究」で説明した通り、マクロセルとはアノード部とカソード部が数 cm 以上離れた個所に位置する腐食電池（セル）を指し、アノード部とカソード部間の鉄筋中では電子が流れる。したがって、マクロセル電流は鉄筋内部を流れる電流である。そのため、もしマクロセル電流を測定しようとするのであれば、鉄筋内部を流れる電流を測定する必要がある。しかしながら、上述した通り実在するコンクリート部材中の鉄筋は連続しており、連続した 1 本の鉄筋内部を流れる電流を直接測定することは困難である。

2-1-2 目的

以上の背景を受け、本章の目的を以下に示す。①コンクリート内部に埋設される鉄筋を分割し、マクロセル電流およびマイクロセル電流を区別して定量的に測定する方法を開発する。②自然電位法および交流インピーダンス法を用いて測定した電位および抵抗値を、マクロセルの電気特性を考慮した電気回路に代入することにより、マクロセル電流を測定する方法を開発する。

2-1-3 構成

2-2 では、分割鉄筋を用いた測定方法の開発を行う。ここでは、分割鉄筋（作製方法は後述する）を内部に埋設したコンクリート供試体を用い実験的検討を行うに当たり、マクロセル腐食速度およびマイクロセル腐食速度の測定方法を開発する。2-2-1 では、測定方法を構築する。2-2-2 では、分割鉄筋を内部に埋設したモルタル供試体のマクロセル腐食速度およびマイクロセル腐食速度を測定する。特にここでは、分割鉄筋要素の単位

長さの相違がマクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度に及ぼす影響を評価する。2-3では、非破壊試験と電気モデルを組み合わせた測定方法の開発を行う。2-3-1では、コンクリート中鉄筋のマクロセル腐食機構と等価な電気回路を構築し、非破壊試験である自然電位法および交流インピーダンス法により得られた測定値を前述回路に代入し、マクロセル腐食速度を測定する方法を構築する。2-3-2では、その方法を用い、モルタル供試体の断面修復部の打継目近傍および曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食速度を測定する。その結果は、2-2にて開発された方法により算定されたマクロセル腐食速度と比較検証する。以上の結果を踏まえ、結論を導く。

2-2 分割鉄筋を用いた方法

2-2-1 測定方法の構築

2-2-1-1 分割鉄筋から成る鋼材の作製方法

分割鉄筋から成る鋼材の概略を、図2-2-1に示す。任意の長さに切断された鉄筋の両側端部にリード線をはんだ付けする。その後、エポキシ系樹脂により分割鉄筋要素間の絶縁と接続を行う。隣接する分割鉄筋要素の近接側リード線を接合することにより、電気的には一体とみなせる鋼材を作製する。

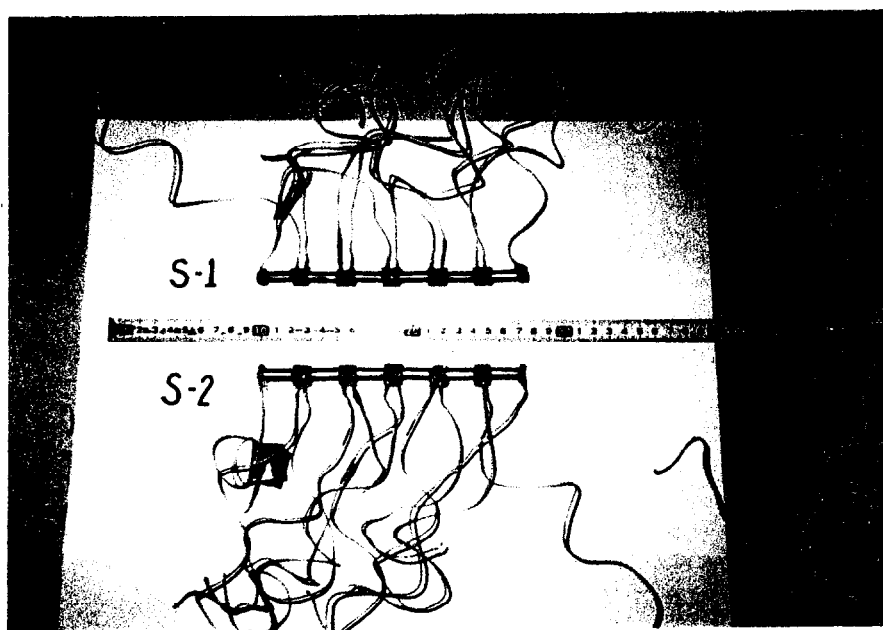


図2-2-1 分割鉄筋からなる鋼材

2-2-1-2 鉄筋を分割することの意義

1-2で説明した通り、マクロセルとはアノード部とカソード部が数 cm 以上離れた個所に位置する腐食電池（セル）を指す。すなわち、マクロセル電流はカソード部からアノード部へ向けて鉄筋内部を流れている。したがって、もしマクロセル電流を測定しようとするのであれば、鉄筋内部を流れる電流を測定しなければならない。しかしながら、2-1で示した通り既存コンクリート部材中に埋設された鉄筋は連続しており、その内部を流

ることは困難である。

このため、本研究で使用する供試体では、コンクリート内部に埋設される鉄筋を分割することにより、鉄筋内部のマクロセル電流を測定可能とする。すなわち、図2-2-2に示す様に隣接する鉄筋要素間を流れる電流は、直接鉄筋内部を流れるのではなく、その間に介される電流計を通過する様にした。これにより、マクロセル電流の測定を可能とした。

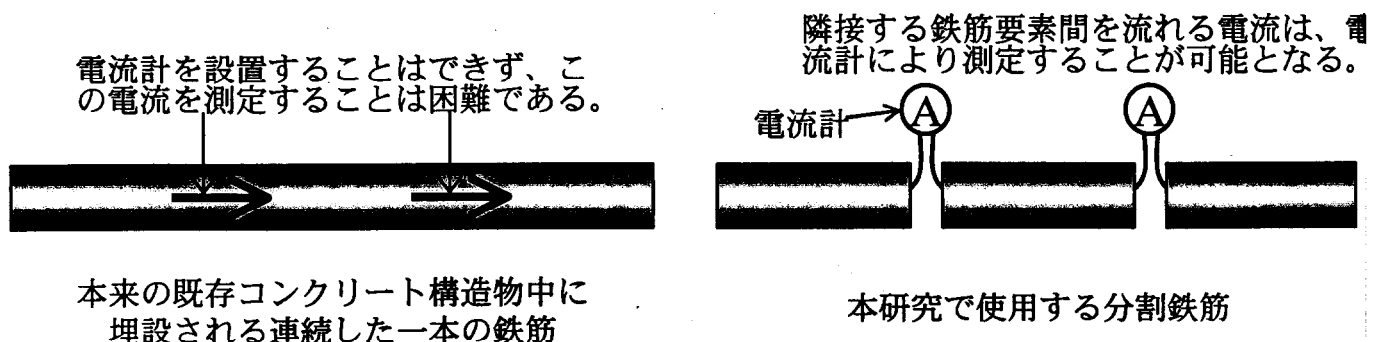


図2-2-2 連続鉄筋と分割鉄筋の相違

2-2-1-3 マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度の測定方法

本研究では、アノードとカソードが異なる鉄筋要素に跨り形成される腐食セル(回路)をマクロセルとし、それに伴う腐食をマクロセル腐食とする。したがって、マクロセル腐食速度は、異なる分割鉄筋要素間を流れる電流から推定する。一方、アノードとカソードが単一の分割鉄筋要素内に存在する腐食セル(回路)をミクロセルとし、それに伴う腐食をミクロセル腐食とする。さらに、総腐食速度は、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を合計することにより求める。2-2-1-3では、分割鉄筋要素を有する供試体を用いた場合の、各腐食速度の測定方法を検討する。

(1) マクロセル腐食速度の測定方法

隣接する分割鉄筋要素間のリード線に無抵抗電流計を介し、電流(マクロセル電流)を求める。そして、対象とする分割鉄筋要素の両端から出入する電流を合計する。この電流を、分割鉄筋要素の表面積で除することにより、分割鉄筋要素表面でのマクロセル電流密度を算定する。例えば、図2-2-3に示す鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度(a_i)は、次式で表せる。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i,i+1}}{S_i} \quad (2-2-1)$$

ここで、 S_i は鉄筋要素 i の表面積を示す。

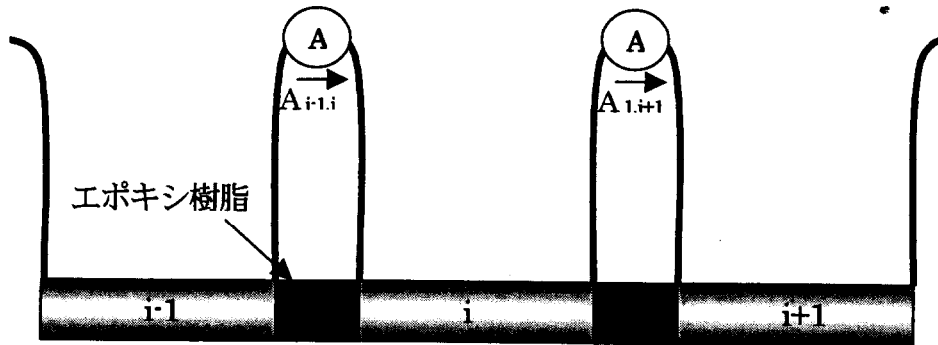


図 2-2-3 マクロセル電流の測定

そして、1-2-1-1に示した通り、腐食電流密度が $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の時、腐食速度は $1.16\text{mm}/\text{年}$ として換算し、マクロセル腐食速度を求める。なお、対象とする分割鉄筋要素がアノードの場合、電流密度および腐食速度は正として表す。一方、対象とする分割鉄筋要素がカソードの場合、電流密度および腐食速度は負として表す。

(2) ミクロセル腐食速度の測定方法

ミクロセル腐食は、概ね同等の環境に接する鉄筋において生じる均一的な腐食であり、アノード部とカソード部の鉄筋電位はほぼ等しい。ここでは、式を誘導し、ミクロセル腐食速度の測定方法について検討する。

コンクリート中铁筋の腐食反応においても、あらゆる電極に関する基本式である、Butler-Volmer の式が成立する²⁻¹⁾。

$$i = i_0 \exp \left[\frac{-\beta F \eta}{RT} \right] \quad \text{アノード側} \quad (2-2-2)$$

ここで、 β は symmetry factor であり、0.5 とすることが多い。また、 i_0 は腐食電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 R は気体定数、 T は絶対温度 (K)、 F はファラデー定数、 i は分極電流 (A)、 η は過電圧 (V) を表す。

過電圧を $-\Delta \eta$ 、それに起因する電流変化を Δi とすると、 $\eta = \eta_0 - \Delta \eta$ 、

$i = i^* + \Delta i^*$ となる。これを、式 (2-2-2) に代入すると、次式となる。

$$\begin{aligned} i = i^* + \Delta i^* &= i_0 \exp\left[\frac{-\beta F(\eta_0 - \Delta\eta)}{RT}\right] \\ &= i_0 \exp\left(-\frac{\beta F\eta_0}{RT}\right) \times \exp\left(\frac{\beta F\Delta\eta}{RT}\right) \end{aligned} \quad (2-2-3)$$

ここで、 $\beta = 0.5$ 、 $i_0 \exp\left(-\frac{\beta F\eta_0}{RT}\right) = A$ とおく。その結果、式 (2-2-3) は、次式となる。

$$i = i^* + \Delta i^* = A \cdot \exp\left(\frac{0.5F\Delta\eta}{RT}\right) \quad (2-2-4)$$

上式の右辺をマクローリン展開する。その際、ミクロセルにおいてはアノードとカソードの電位差が小さいと仮定した場合、すなわち $-\frac{RT}{0.5F} \ll \Delta\eta \ll \frac{RT}{0.5F}$ とすると、マクローリン展開後の右辺に関して、次数の大きい3項目以降を無視できる。その結果、式 (2-2-4) は次式となる。

$$i^* + \Delta i^* = A \left(1 + \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta\right) = A + A \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta \quad (2-2-5)$$

よって、定数と変数を分離し、 i^* および Δi^* を求める。

$$i^* = A = i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \quad (2-2-6)$$

$$\Delta i^* = A \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta = i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta \quad (2-2-7)$$

ここで、分極抵抗 R_p と、分極電流および過電圧の関係は次式に示される通りである。

$$\Delta\eta = R_p \cdot \Delta i^* \quad (2-2-8)$$

よって、式(2-2-7)と式(2-2-8)を比較し、分極抵抗と腐食電流の関係を求める。

$$\frac{1}{R_p} = \frac{\Delta i^*}{\Delta\eta} = i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \frac{0.5F}{RT} \quad (2-2-9)$$

したがって、ミクロセル電流は、次式の通りとなる。

$$i_0 = \frac{RT}{0.5F} \cdot \frac{1}{\exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (2-2-10)$$

よって、 $\frac{RT}{0.5F} \cdot \frac{1}{\exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right)} = K$ とおくと、ミクロセル電流は次式により示される。

$$i_0 = \frac{K}{R_p} \quad (2-2-11)$$

以上のことを踏まえ、ミクロセル腐食速度の測定は次の様に行った。はじめに、分割鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断する。この時、異なる分割鉄筋要素間では電流の出入がなく、分割鉄筋要素内では鉄筋電位が概ね一様である。この状態で、各分割鉄筋要素毎の鉄筋表面の分極抵抗を FRA(Frequency Response Analyzer)を用いた交流インピーダンス法により求める。概略を図2-2-4に示す。測定は、5000Hz から 0.0005Hz の範囲において、振幅 50mV の電圧を与えることにより行う。また、分極抵抗は、ボード線図およびコールコールプロットを用い算定する。そして、次式を用いて鉄筋要素 i のミクロセル電流密度(b_i)を算定する。

$$b_i = \frac{K}{R_{p_i} \times S_i} \quad (2-2-12)$$

ここで、 R_{p_i} は鉄筋要素 i における分極抵抗である。また K は局部腐食を対象とし検討された文献 2-2) を参考にし、0.0209(V) とする。

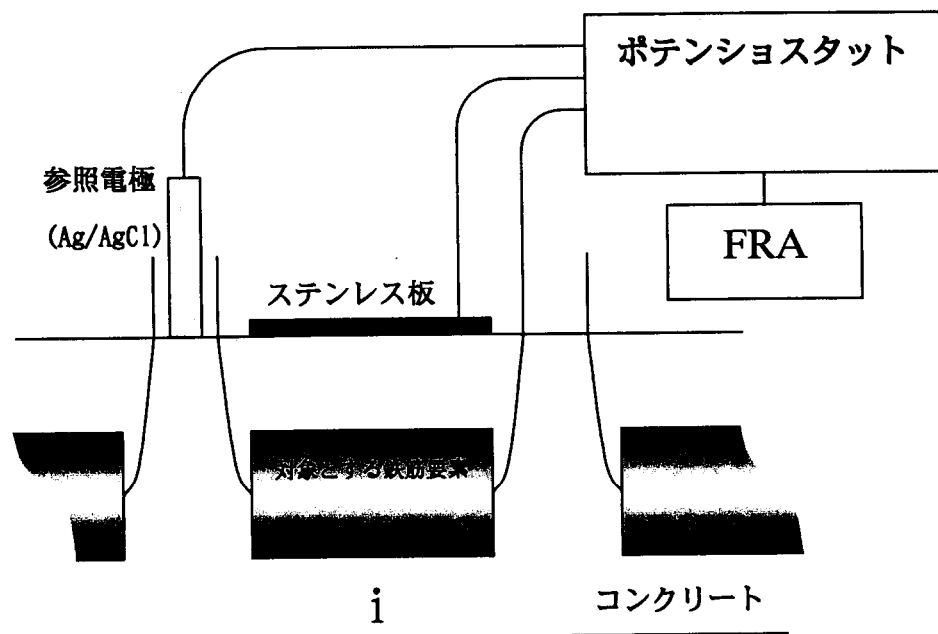


図 2-2-4 分極抵抗の測定

そして、1-2-1-1 に示した通り、腐食電流密度が $100 \mu A/cm^2$ の時、腐食速度は 1.16mm/年として換算し、マイクロセル腐食速度を求める。

2-2-2 測定例

2-2-2-1 実験概要

(1) 使用材料

セメントは、表 2-2-1 に示す物理的性質および化学成分の普通ポルトランドセメン

使用した。鉄筋は、表2-2-3に示す化学成分の鉄筋(φ9mm、SR295)を使用した。ここでは、鉄筋表面形状(凹凸等)の影響を除外するため、丸鋼のみを用いた。

表2-2-1 セメントの物理的性質および化学成分

密度 (g/cm3)	比表面積 (cm2/g)	凝 結			安定性		
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)			
3.16	3270	28.1	2-35	3-49	良		
圧縮強度(MPa)			化学成分(%)				
3d	7d	28d	MnO	SO ₃	強熱減量	全Alカリ	Cl
28.4	43.0	60.2	1.6	1.9	1.4	0.62	0.006

表2-2-2 細骨材(陸砂)の物理的性質

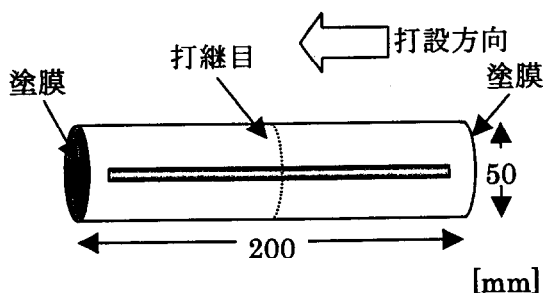
比重		粗粒率	吸水率	単位容積質量	実績率
表乾	絶乾		(%)	(kg/l)	(%)
2.60	2.54	2.59	2.20	1.74	67.1

表2-2-3 鉄筋の化学成分(丸鋼)

化学成分(%)						降伏強度 (MPa)
Fe	C	Si	Mn	P	S	
99.13	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023	354

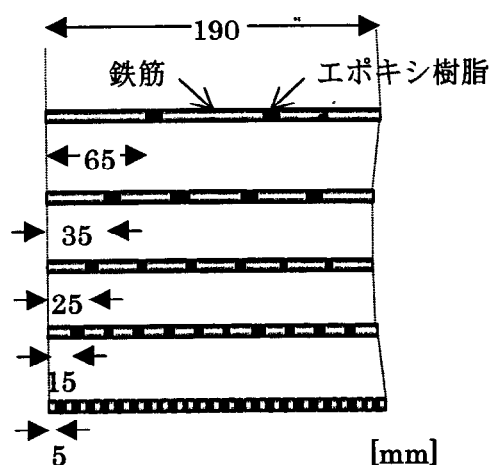
(2) 供試体概要

使用したモルタル供試体を図2-2-5に示す。分割鉄筋の要素数は3、5、7、11、23本の5水準を設定した。各ケースの分割鉄筋要素の単位長さは、65、35、25、15、5mmとした。



左側(打設方向に対して下側)モルタルを打設し 24 時間後に、レイタンスを除去し、右側(打設方向に対して上側)モルタルを打設。

(a)供試体概略図



(b)分割鉄筋概略図

図 2-2-5 供試体概要図 (モルタル)

(3) モルタルの配合および基本性状

モルタルの水セメント比は50%、S/Cは2.5とした。フレッシュモルタルのフローは180、空気量は3%とした。圧縮強度は、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を用い、28日間の湿潤養生後測定を行った。その結果、39.7MPaであった。

(4) 供試体の作製方法および暴露条件

2-2-1-1に示す通り前処理した鋼材を型枠中心に配置する。供試体の中央に打継目を生じさせるため、モルタルは2層に分けて打設した。初めに、直径50mm、高さ200mmの型枠の半分まで打設した。24時間経過後、表面のレイタンスを十分に除去し、さらに2層目を打設した。また、外部環境からの塩化物イオン、酸素および水分の浸透が、かぶりが一定である供試体の側面のみから生じる様に、脱型直後に上面と下面($\phi 5\text{cm}$)をシリコン材で塗膜した。材齢28日まで、相対湿度80%室温20℃にて湿空養生を行った。その後、24時間の塩水浸漬(NaCl3.1wt%)と24時間の乾燥(相対湿度50%)が繰り返される、腐食促進環境下に56日間暴露した。なお、室温は20℃とした。

2-2-2-2 実験結果および考察

には、各供試体中の全鉄筋要素で測定されたマクロセルアノード腐食速度およびマイクロセル腐食速度の和を示す。また、マクロセルアノード腐食速度とマイクロセル腐食速度を加えた、総腐食速度も示す。これによれば、分割鉄筋要素の単位長さの相違に関わらず、総腐食速度の和は一定であることがわかる。また、分割鉄筋要素の単位長さが短いほど、マクロセルアノード腐食速度の和は増加し、マイクロセル腐食速度の和は減少することが認められる。

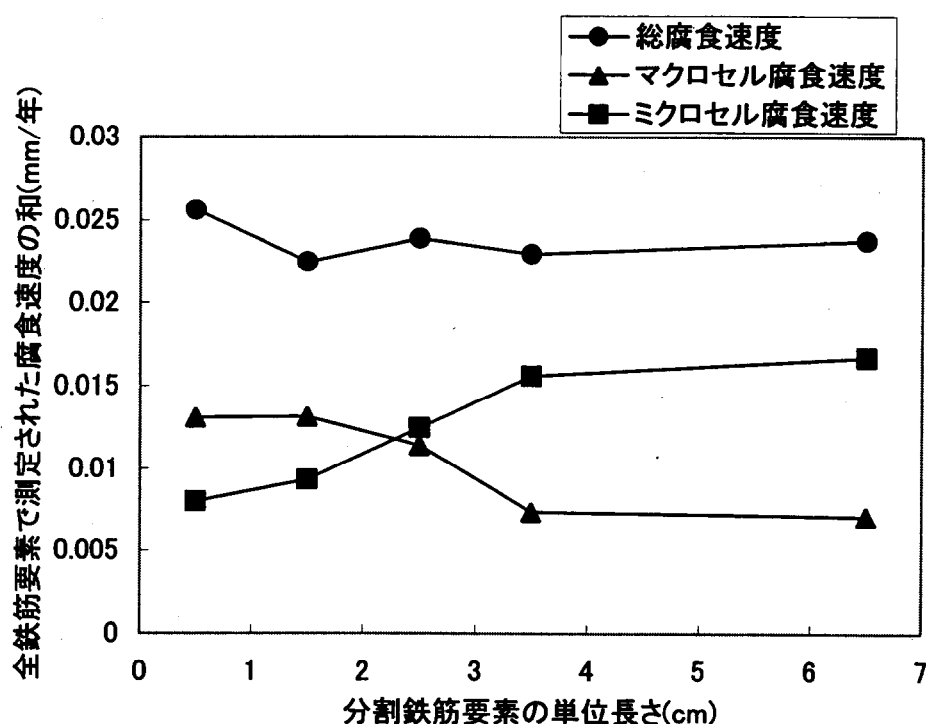


図 2-2-6 分割鉄筋要素の単位長さの相違が腐食速度に及ぼす影響

前述した通り、マクロセルとは異なる分割鉄筋要素間でアノードとカソードが形成されるセルである。一方、マイクロセルとは単一の分割鉄筋要素内でアノードとカソードが形成されるセルである。ここで、図 2-2-7 を参考にしながら、分割鉄筋が 2 本および 4 本の場合のマクロセル電流、マイクロセル電流および全腐食電流の関係を説明する。

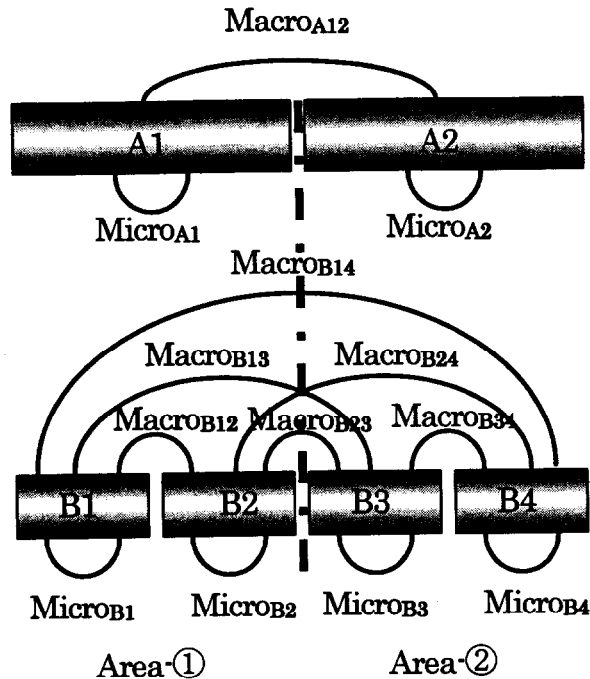


図 2-2-7 マクロセル電流およびミクロセル電流の関係

分割数によらず、任意の範囲の鉄筋に供給される塩化物イオン、酸素および水分の量は等しい。したがって、図 2-2-7 において、中心線より左側を Area-①、右側を Area-②とした場合、分割数が 2 本の場合の分割要素 A1 に供給される各種腐食要因物質と、分割数が 4 本の場合の分割要素 B1 と B2 に供給される各種腐食要因物質の和は、同等であると考えられる。同様に Area-②に関しても、分割要素 A2 に供給される各種腐食要因物質と、分割要素 B3 および B4 に供給される各種腐食要因物質の和は同等である。すなわち、B1 と B2 を組み合わせた要素を考えた場合、鉄筋腐食に関して A1 と同様の速度となるはずである。同様に B3 と B4 を組み合わせた要素を考えた場合、A2 と同等の腐食速度となるはずである。したがって、図 2-2-7 に関しては、次式の関係が成立する。

$$MICRO_{A1} = MICRO_{B1} + MICRO_{B2} + MACRO_{B12} \quad (2-2-13)$$

$$MICRO_{A2} = MICRO_{B3} + MICRO_{B4} + MACRO_{B34} \quad (2-2-14)$$

$$MACRO_{A12} = MACRO_{B13} + MACRO_{B14} + MACRO_{B23} + MACRO_{B24} \quad (2-2-15)$$

したがって、分割数が2本および4本の場合における、マクロセル電流の和を比較した場合、次式に示す通り後者が大きくなる。一方、ミクロセル電流に関しては、分割数が2本の場合が4本の場合と比較して、大きくなる。

$$MACRO_{A12} < MACRO_{B12} + MACRO_{B13} + MACRO_{B14} + MACRO_{B23} + MACRO_{B24} + MACRO_{B34} \quad (2-2-16)$$

$$MICRO_{A1} + MICRO_{A2} > MICRO_{B1} + MICRO_{B3} + MICRO_{B3} + MICRO_{B4} \quad (2-2-17)$$

また、全腐食電流に関しては、次式に示す通り等しくなる。

$$MICRO_{A1} + MICRO_{A2} + MACRO_{A12} = MICRO_{B1} + MICRO_{B2} + MICRO_{B3} + MICRO_{B4} \\ + MACRO_{B12} + MACRO_{B13} + MACRO_{B14} + MACRO_{B23} + MACRO_{B24} + MACRO_{B34} \quad (2-2-18)$$

以上のことから、本研究では分割した状態に対応してマクロセル電流とミクロセル電流を定義しているが、分割数は全腐食電流の和には影響を及ぼさないことが確認された。しかしながら、本研究におけるマクロセル電流およびミクロセル電流の定義の下では、マクロセル電流の和は分割数の増加に伴い増加し、ミクロセル電流の和は分割数の減少に伴い増加することが確認された。

2-3 非破壊試験と電気回路を組み合わせた方法

2-3-1 測定方法の構築

2-3-1-1 仮定条件

コンクリート内部の鉄筋の腐食は、電気化学的反応と考えられている。そして、鉄筋表面には電気二重層と呼ばれる薄い層があり、これを電気回路に置き換えると、抵抗とコンデンサーが並列に接続されたものと見なせる。ただし、コンクリート部材内部で形成されるマクロセルの場合、電流は一方向にのみ流れるため、コンデンサーは定常状態における腐食速度を支配する要因ではないと考えられる。したがって、モデルに組み込まないこととする。

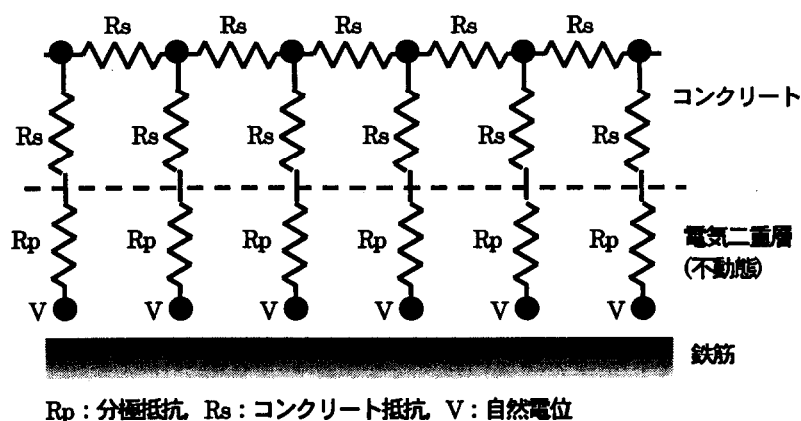


図2-3-1 鉄筋コンクリート中に形成されるマクロセルの電気回路

2-3-1-2 電気回路の構築

図2-3-1に、鉄筋コンクリート中に形成されるマクロセルの電気回路を示す。電気回路は、分極抵抗およびコンクリート抵抗により構成される。ここで、分極抵抗およびコンクリート抵抗は、既存鉄筋コンクリート部材において、非破壊試験により測定可能である。さらに、非破壊試験で測定可能な自然電位も、電気回路に代入する。ここで、次式に示すオームの法則に基づき、任意の2点間を流れる電流を算定する。

$$I = \frac{V}{R} \quad (2-3-1)$$

ここで、Iは電流、Vは電位差、Rは抵抗を表す。

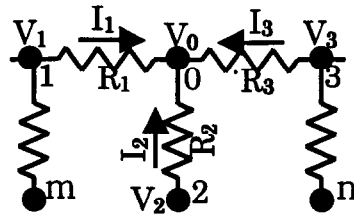


図 2-3-2 任意の点における電流の収支

また、コンクリート内部の任意の点において、隣接する点から流入する電流の和は連続条件により 0 となる。例えば、図 2-3-2 に示す点 0 においては、次式が成立する。

$$\sum_n I_i = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (2-3-2)$$

式(2-3-2)に、式(2-3-1)を代入すると、

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} = 0 \quad (2-3-3)$$

対象部材内部の全点において、式(2-3-3)に相当する式を構築する。その後、全ての式を連立方程式として、全点の電位を算定する。最後に、隣接する 2 点の電位、および 2 点間の抵抗を式(2-3-1)に代入し、2 点間を流れる電流を算定する。具体的な解析例は次に示す。

本電気回路の input data と output data を整理すると、表 2-3-1 に示す通りである。

表 2-3-1 本電気回路の input data と output data

Input data		Output data
自然電位	自然電位法	マクロセル電流
鉄筋の分極抵抗	交流インピーダンス法	
コンクリート抵抗		

注) input data の右欄は測定する非破壊試験法を示す。

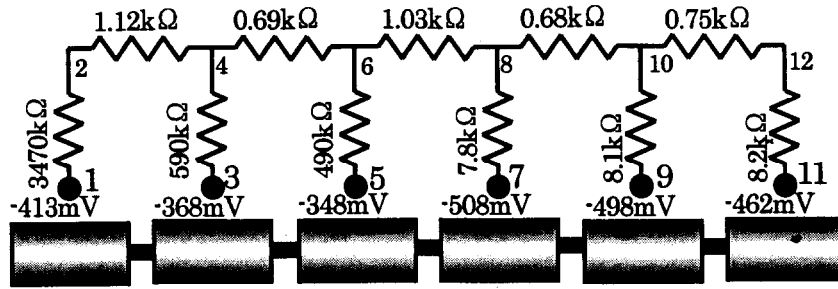


図 2-3-3 電気回路へ代入した測定値の例

2-3-1-3 電気回路を用いた解析例

図 2-3-3 を用い、具体的な解析例について説明する。初めに、測定された自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗を電気回路に代入する。次に、電気回路内の電位が未知な点 (図 2-3-3 中では、点 2, 4, 6, 8, 10, 12) における式 (2-3-3) を構築する。

$$\frac{V_1 - V_2}{R_{12}} + \frac{V_4 - V_2}{R_{42}} = 0 \quad \therefore \frac{-413 - V_2}{3470} + \frac{V_4 - V_2}{1.12} = 0 \quad (2-3-4)$$

$$\frac{V_2 - V_4}{R_{24}} + \frac{V_3 - V_4}{R_{34}} + \frac{V_6 - V_4}{R_{64}} = 0 \quad \therefore \frac{V_2 - V_4}{1.12} + \frac{-368 - V_4}{590} + \frac{V_6 - V_4}{0.69} = 0 \quad (2-3-5)$$

$$\frac{V_4 - V_6}{R_{46}} + \frac{V_5 - V_6}{R_{56}} + \frac{V_8 - V_6}{R_{86}} = 0 \quad \therefore \frac{V_4 - V_6}{0.69} + \frac{-348 - V_6}{490} + \frac{V_8 - V_6}{1.03} = 0 \quad (2-3-6)$$

$$\frac{V_6 - V_8}{R_{68}} + \frac{V_7 - V_8}{R_{78}} + \frac{V_{10} - V_8}{R_{108}} = 0 \quad \therefore \frac{V_6 - V_8}{1.03} + \frac{-508 - V_8}{7.8} + \frac{V_{10} - V_8}{0.68} = 0 \quad (2-3-7)$$

$$\frac{V_8 - V_{10}}{R_{810}} + \frac{V_9 - V_{10}}{R_{910}} + \frac{V_{12} - V_{10}}{R_{1210}} = 0 \quad \therefore \frac{V_8 - V_{10}}{0.68} + \frac{-498 - V_{10}}{8.1} + \frac{V_{12} - V_{10}}{0.75} = 0 \quad (2-3-8)$$

$$\frac{V_{10} - V_{12}}{R_{1012}} + \frac{V_{11} - V_{12}}{R_{1112}} = 0 \quad \therefore \frac{V_{10} - V_{12}}{0.75} + \frac{-462 - V_{12}}{8.2} = 0 \quad (2-3-9)$$

式(2-3-4)～(2-3-9)の独立する6つの式中において、未知数は6つ($V_2, V_4, V_6, V_8, V_{10}, V_{12}$)である。したがって、連立方程式として解くことにより、全ての点における電位が求まる。最後に、式(2-3-10)に示すように、各点間の電位差を抵抗で割り、各点間を流れる電流を求める。

$$\left. \begin{aligned} I_{12} &= \frac{V_1 - V_2}{R_{12}}, I_{24} = \frac{V_2 - V_4}{R_{24}}, I_{34} = \frac{V_3 - V_4}{R_{34}}, I_{46} = \frac{V_4 - V_6}{R_{46}} \\ I_{56} &= \frac{V_5 - V_6}{R_{56}}, I_{68} = \frac{V_6 - V_8}{R_{68}}, I_{78} = \frac{V_7 - V_8}{R_{78}}, I_{810} = \frac{V_8 - V_{10}}{R_{810}} \\ I_{910} &= \frac{V_9 - V_{10}}{R_{910}}, I_{1012} = \frac{V_{10} - V_{12}}{R_{1012}}, I_{1112} = \frac{V_{11} - V_{12}}{R_{1112}} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-10)$$

これらの内、 $I_{12}, I_{34}, I_{56}, I_{78}, I_{910}, I_{1112}$ が、鉄筋表面において流出入するマクロセル電流である。図2-3-4に推定された、マクロセル電流を示す。ここで、鉄筋表面からマクロセル電流が流出する場合、鉄筋はアノードである。一方、鉄筋表面にマクロセル電流が流入する場合、鉄筋はカソードである。したがって、図2-3-4においては、鉄筋要素DおよびEがアノードであり、鉄筋要素A、B、C、Fがカソードであると判断される。

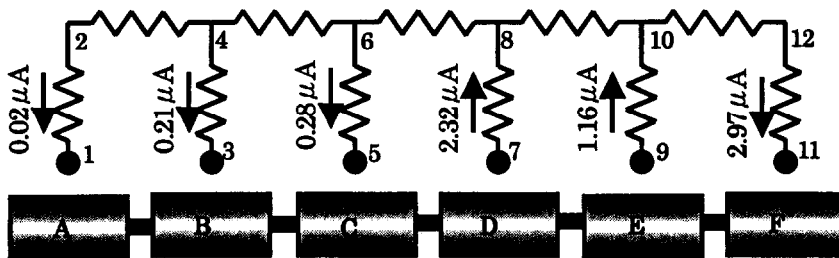


図2-3-4 電気回路を用いて解析されたマクロセル電流の例

2-3-2 測定例

2-3-2-1 実験概要

(1) 使用材料

実験に使用した材料の主な性質を表2-3-2に示す。混和剤は、水セメント比が100%のモルタルにおいて、メチルセルロース系増粘剤をセメント質量に対して、1.2%添加した。また、水セメント比が30%のモルタルにおいて、ナフタレン系高性能AE減水剤をセメント質量に対して、2%添加した。

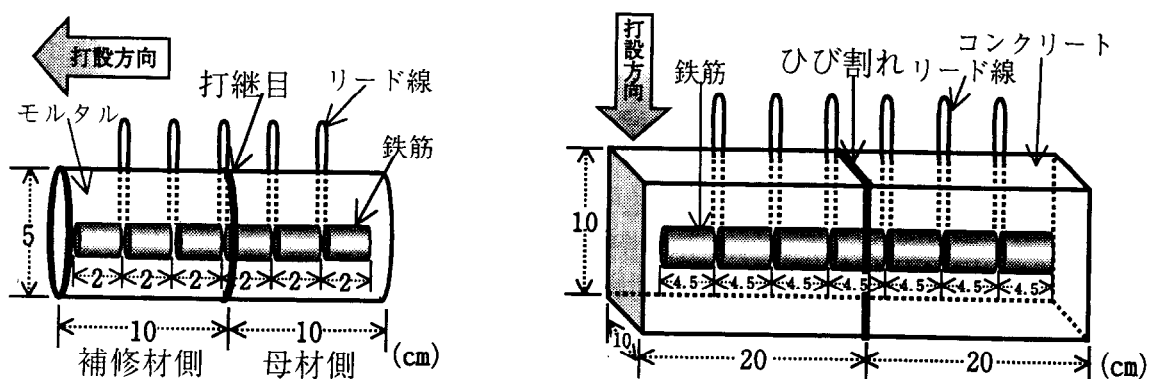
表2-3-2 使用材料の主な性質

	種類	主な性質 ^①
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
混和剤	増粘剤	セルロース系
	高性能AE減水剤	ナフタレン系
鉄筋	丸鋼 (φ9mm)	降伏強度=354MPa、Fe含有率=99.13%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材 (陸砂) の物理的性質は表2-2-2に、鉄筋 (丸鋼) の化学成分は表2-2-3に示した通りである。

(2) 供試体の作製方法

本研究で使用した供試体を、図2-3-5に示す。断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体と曲げひび割れ部を模擬した供試体の2種類である。



(a) 断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体 (b) 曲げひび割れ部を模擬した供試体

図2-3-5 モルタル供試体

1) 配合およびひび割れ幅

各供試体の水セメント比、内在塩化物イオン含有量および残留ひび割れ幅のパラメータを、表2-3-3に示す。何れの水セメント比においても、S/Cは2.5とした。

表2-3-3 配合とひび割れ幅のパラメータ

断面修復部を模擬した供試体		補修材側		母材側	
		W/C(%)	Cl(kg/m ³)	W/C(%)	Cl(kg/m ³)
	1	50	15.0	50	15.0
	2	50	0.5	50	15.0
	3	50	0.5	100	15.0
	4	30	0.5	100	15.0
	5	100	0.5	30	15.0
曲げひび割れ部を模擬した供試体		W/C(%)	残留ひび割れ幅(mm)		
	6	30	0.3		
	7	50	0, 0.1, 0.3, 0.7		
	8	70	0.3		

2) 断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体

使用した鋼材は、2-2で開発した方法によってもマクロセル腐食電流を測定するため、6本に分割した。前処理方法は2-2と同様である。打設方法を次に示す。要素番号3と4との鉄筋の中間部で打継目が生じるように鉄筋を鉛直方向に配置した型枠に、先ず補修材側モルタルを打設した。24時間後、レイタンスをワイヤブラシにより除去し、母材側モルタルを打設した。打設後24時間湿空養生を行った後脱型し、相対湿度80%室温20℃の環境中に91日間暴露した。

3) 曲げひび割れ部を模擬した供試体

鉄筋の前処理方法は2-2と同様である。ただし、鉄筋は7本の要素に分割し、各鉄筋の長さは4.5cmとした。また、曲げ補強のため、全面をエポキシ系樹脂により塗装した丸鋼を埋設した。打設方向は、鉄筋に垂直とした。打設後24時間湿空養生を行い脱型し、相対湿度80%室温20℃の環境中に28日間養生した。その後鉄筋要素4の中央を貫く位置にて3点曲げ载荷により曲げひび割れを生じさせ、ひび割れ開口部を除く5面をエポキシ系樹脂により塗装した。そして、24時間の塩水噴霧(NaCl3.5wt%、湿度90%)と60時間の乾燥(湿度50%)が繰り返される環境下に91日間暴露した。なお、腐食反応を促進させるため、室温は60℃とした。

(3) 測定方法

3ヶ月間の暴露後、測定を行った。

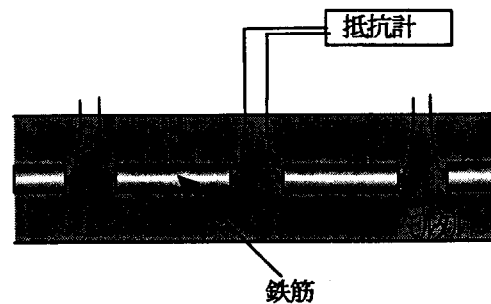


図2-3-6 鉄筋間モルタル抵抗の測定

1) 鉄筋電位の測定

照合電極に飽和硫酸銅電極を用い、鉄筋電位を測定した。

2) 分極抵抗の測定

2-2-1-3 (2) に示す方法で分極抵抗を測定した。

3) モルタル抵抗の測定

分割鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、隣接する鉄筋要素間に抵抗計を接続し、隣接する分割鉄筋要素間のモルタル抵抗を測定した。概略図を図2-3-6に示す。

4) マクロセル腐食速度の測定

2-2-1-3 (1) にて開発した方法により、マクロセル腐食速度を算定した。

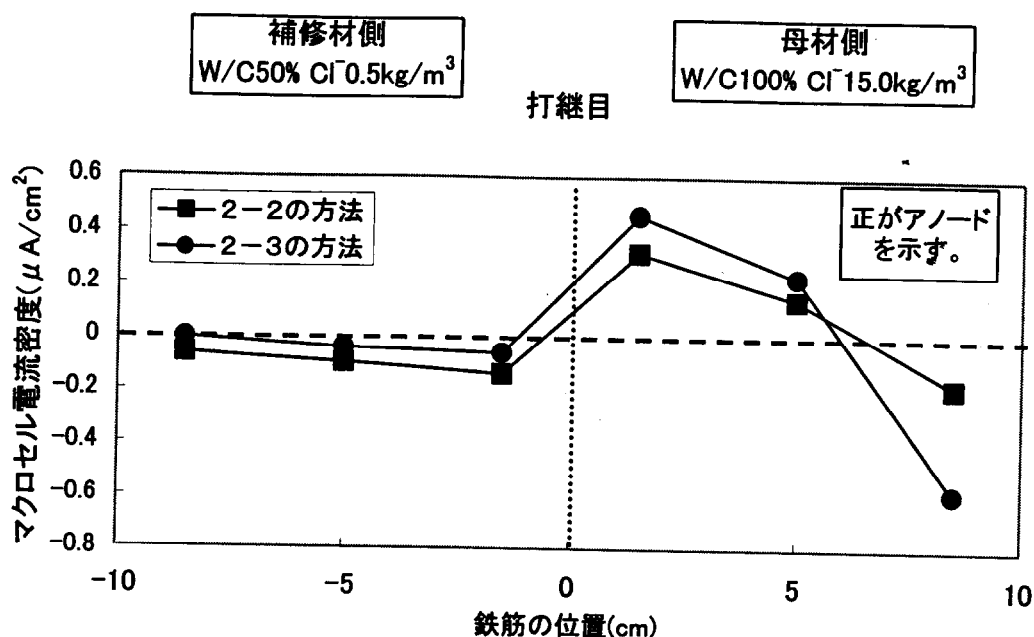


図2-3-7 マクロセル電流密度分布の比較
(断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体—その1)

2-3-2-2 断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体を用いた検討

図2-3-7および図2-3-8に、断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体におけるマクロセル腐食電流の分布形状を示す。図2-3-7は、水セメント比が50%、塩化物イオン含有量が0.5kg/m³のモルタルと、水セメント比が100%、塩化物イオン含有量が15.0kg/m³のモルタルが打ち継がれたケースである。一方、図2-3-8は、水セメント比が50%、塩化物イオン含有量が0.5kg/m³のモルタルと、水セメント比が50%、塩化物イオン含有量が15.0kg/m³のモルタルが打ち継がれたケースである。これらによると、マクロセル腐食速度に関して、本電気回路を用いた値と2-2の方法を用いた値はいずれも、塩化物イオン含有量の多い母材側の打継目近傍でアノードとなり、塩化物イオン含有量の少ない補修材側でカソードとなることが確認できる。また、両者の値は定量的に等しいことが認められる。

図2-3-9に、全供試体における、マクロセル腐食速度の本電気回路を用いた値と2-2の方法を用いた値の関係を示す。これによると、両者の相関係数(R^2)は0.78であり、概ね一致していることが認められる。したがって、本電気回路を用いた方法を適用することにより、実構造物では測定不可能な鉄筋内部を流れるマクロセル腐食速度を定量的に評価できることが明らかとなった。

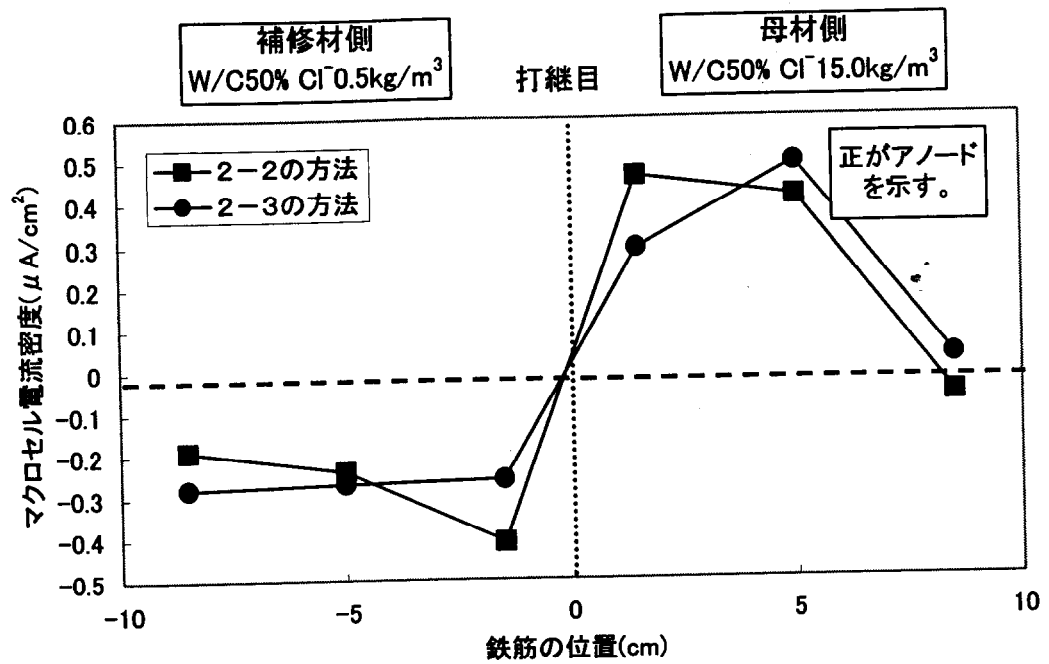


図2-3-8 マクロセル電流密度分布の比較
(断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体-その2)

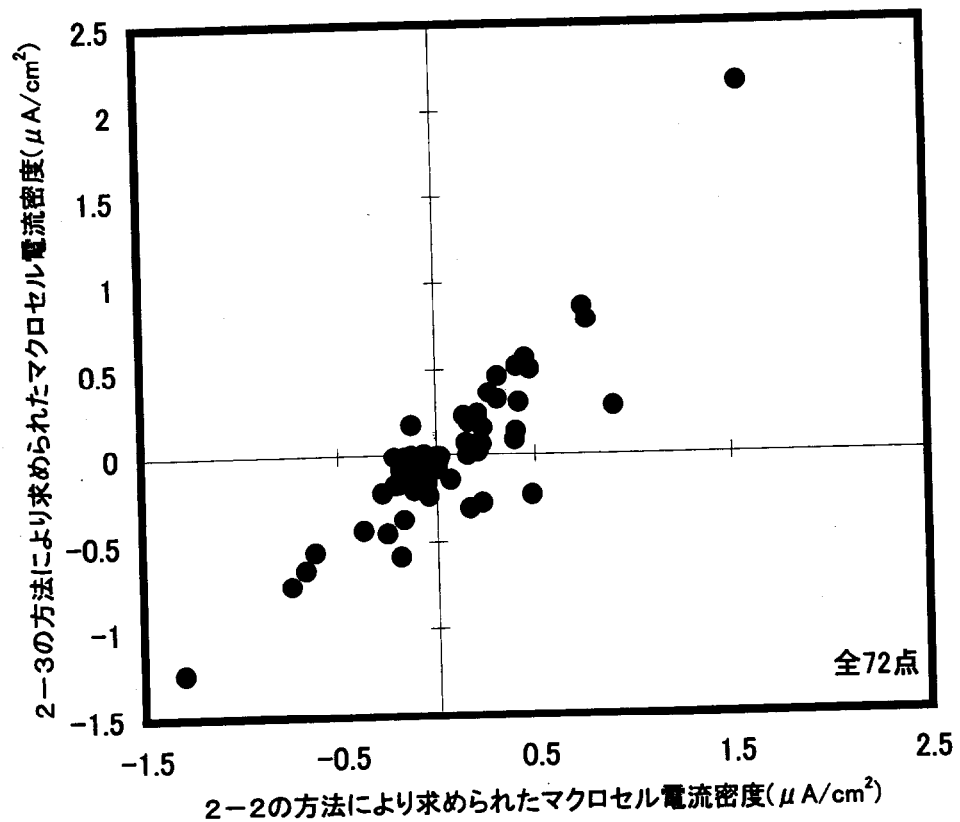


図2-3-9 マクロセル電流密度の全値比較
(断面修復部の打継目近傍を模擬した供試体)

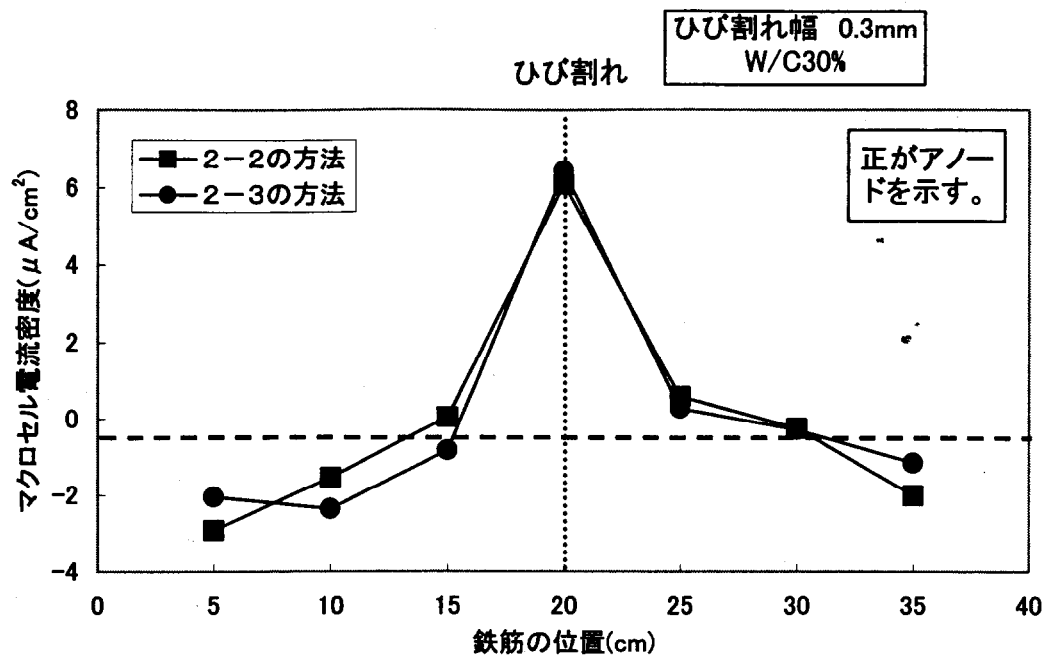


図2-3-10 マクロセル電流密度分布の比較
(曲げひび割れ部を模擬した供試体—その3)

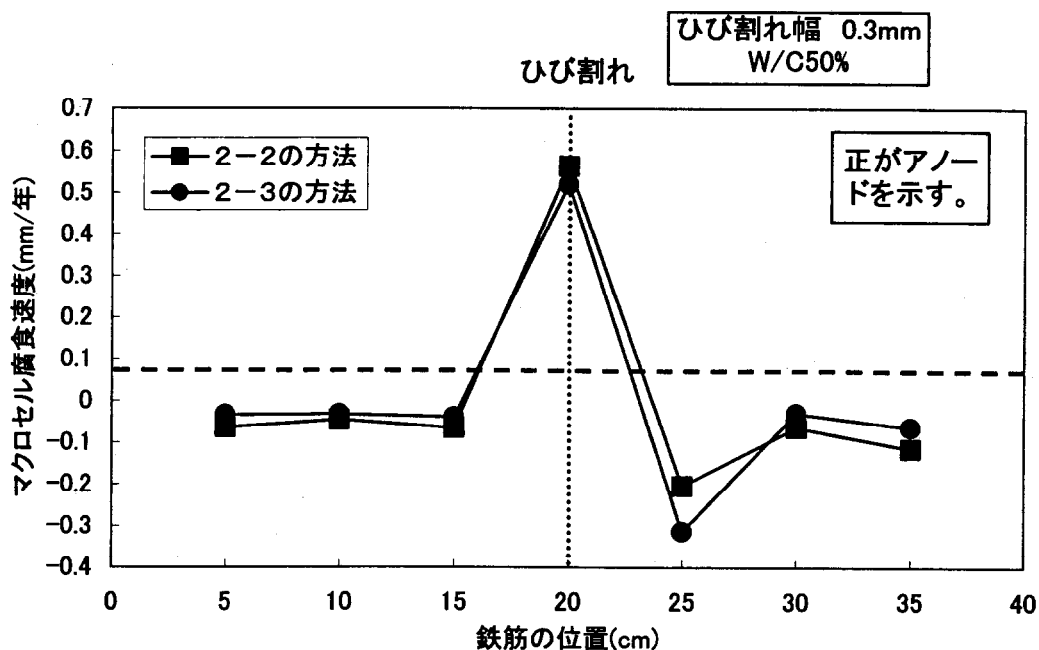


図2-3-11 マクロセル電流密度分布の比較
(曲げひび割れ部を模擬した供試体—その4)

2-3-2-3 曲げひび割れ部を模擬した供試体を用いた検討

図2-3-10および図2-3-11に、曲げひび割れ部を模擬した供試体における、マクロセル腐食速度の分布形状を示す。図2-3-10は、水セメント比が30%であり、残留ひび割れ幅が0.3mmである。一方、図2-3-11は、水セメント比が50%であり、残留ひび割れ幅が0.3mmである。これらによると、本電気回路を用いた値および2-2を用いた値はいずれも、曲げひび割れ箇所がアノードとなり、ひび割れの無い健全なかぶ

りコンクリート内部の鉄筋がカソードとなることが確認できる。また、両者は定量的に等しいことが認められる。

図2-3-12に、全供試体における、マクロセル腐食速度の本電気回路を用いた値と2-2の方法を用いた値の関係を示す。これによると、両者の相関係数(R^2)は0.58であり、概ね一致していることが認められる。したがって、本電気回路を用いた方法を適用することにより、実構造物では測定不可能なマクロセル腐食速度を評価できることが明らかとなった。

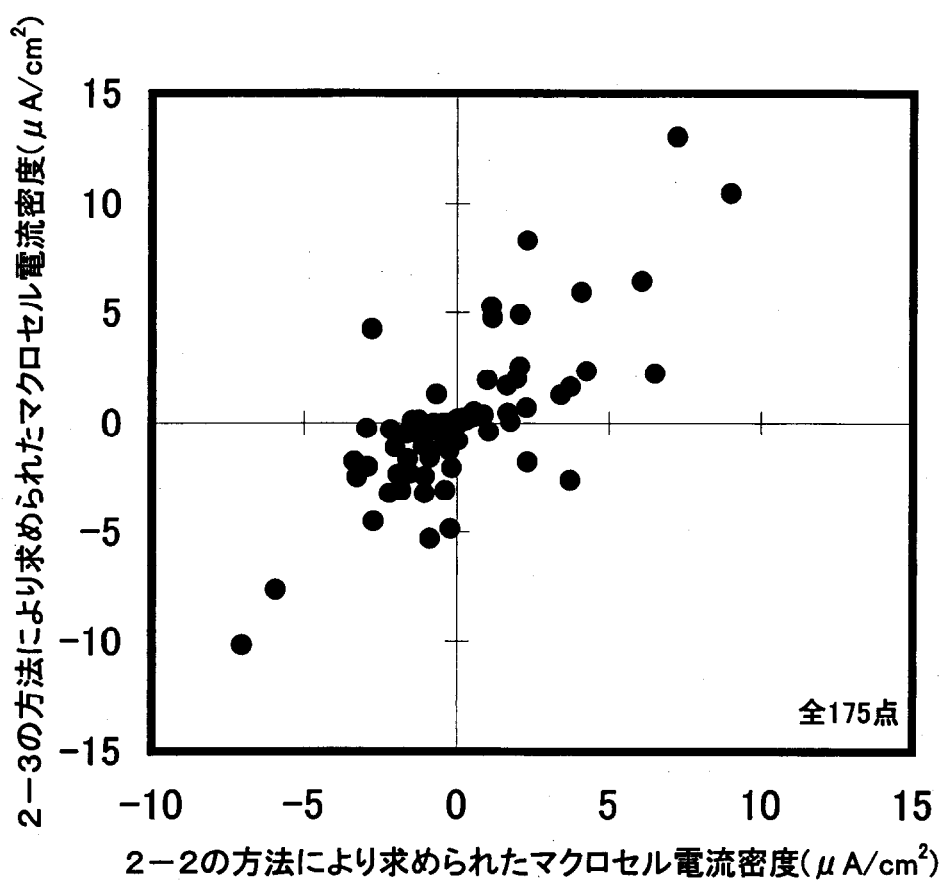


図2-3-12 マクロセル電流密度の全値比較
(曲げひび割れ部を模擬した供試体)

2-4 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 実構造物では直接測定することが不可能なマクロセル腐食速度を定量的に評価する方法を開発した。
- ② 内部鉄筋を分割した供試体を用いることにより、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を区別して評価することができた。
- ③ 非破壊試験である自然電位法および交流インピーダンス法と電気回路を組み合わせることにより、マクロセル腐食速度を定量的に推定できた。なお、電気回路では、自然電位、鉄筋の分極抵抗およびコンクリート抵抗を input data とし、マクロセル腐食速度を output data とした。
- ④ ②の方法により腐食速度を評価する場合、鉄筋の分割数の相違はマクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を加えた総腐食速度には影響を及ぼさないことが明らかとなった。ただし、分割数が多いほど、全分割鉄筋要素におけるマクロセル腐食速度の和は増加し、一方ミクロセル腐食速度の和は減少した。例えば、190mm の長さの鉄筋に対して、分割数が 11 本あるいは 23 本の場合（分割鉄筋要素の単位長さ＝15mm、5mm）、分割数が 3 本あるいは 5 本の場合（分割鉄筋要素の単位長さ＝65mm、35mm）と比較してマクロセル腐食速度の和は約 1.7 倍となり、一方ミクロセル腐食速度の和は約 3 分の 2 となった。したがって、欠陥近傍の腐食形態および腐食速度を詳細に評価するためには、分割鉄筋要素の単位長さを 15mm 以下にする必要がある。
- ⑤ ②の方法により測定されたマクロセル腐食速度と、③の方法により測定されたマクロセル腐食速度は、断面修復部の打継目近傍あるいは曲げひび割れ部を模擬するモルタル供試体を用いた実験により比較された。その結果、両者の方法により測定された値は、定量的な一致が認められた。

- 1) 腐食防食協会編：腐食・防食ハンドブック, p.20, 2000.
- 2) 水流 徹, 前田 龍, 春山志郎：交流法腐食モニターの局部腐食への適用；防食技術 28, pp.638-644, 1979.

第3章 モデル欠陥部に生じる塩害によるマクロセル腐食

- 3-1 はじめに
- 3-2 実験的検討
- 3-3 解析的検証
- 3-4 まとめ

3-1 はじめに

3-1-1 背景

これまでに、欠陥部近傍に生じる鉄筋腐食に関する研究は多数なされている。しかしながら、各研究毎に環境条件や評価方法が異なるため、腐食要因となる物質（塩化物イオン、酸素、水分）の供給条件と、腐食形態（マクロセル腐食とミクロセル腐食）および腐食速度の関係は整理されていない。

また、1-2「既往の研究の整理」で前述した様に、断面修復部の打継目近傍は、塩害による腐食が生じる欠陥部として指摘されている。したがって、本研究においても、4-3において、「断面修復部の打継目近傍のマクロセル腐食」を検討対象とする。ただし、断面修復部の打継目近傍のマクロセル腐食は、活性不動態電池の形成のみならず、塩化物濃淡電池の形成によっても生じる腐食と考えられる。すなわち、「打継目」と言う欠陥部を通じて塩化物イオンが局所的に鉄筋に供給されることのみならず、打継目を境として塩化物イオン含有量が異なることも、腐食が生じている要因と考えられる。したがって、塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる腐食に関しても、モデル供試体を用いた基礎的検討を行う必要がある。

3-1-2 目的

以上の背景を受け、本章の目的を以下に示す。

- ① 欠陥部に生じる塩害による腐食の形態と速度を、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件、コンクリートの水セメント比をパラメータとし、統一された条件でかつ網羅的に明らかにする。
- ② 塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる塩害による腐食の形態と速度を、塩化物イオン含有量、酸素および水分の供給条件、コンクリートの水セメント比をパラメータとし、統一された条件で明らかにする。
- ③ コンクリート中の酸素拡散係数、コンクリート抵抗、鉄筋の分極抵抗、鉄筋周囲の水膜厚さ、外部環境中の酸素濃度および欠陥の存在を input data とし、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を output data とするモデルを構築する。このモデルを用

い、①および②の実験的検討を、解析的検討によっても検証する。

3-1-3 構成

3-2では、実験的検討を行う。ここでは、モデル欠陥部を有するモルタル供試体を用い、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件およびモルタルの水セメント比が、腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を実験的に整理する。また、塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる鉄筋腐食の形態と速度に関しても整理する。ここでは、塩化物イオン含有量が異なるモルタルおよびコンクリートが打ち継がれた供試体を用い、モルタルおよびコンクリートの水セメント比、塩化物イオン含有量および酸素と水分の供給条件が、腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を実験的に整理する。3-3では、3-2の実験結果に対して、解析的検証を行う。この際、コンクリート中の酸素拡散係数、コンクリート抵抗、鉄筋の分極抵抗、鉄筋周囲の水膜厚さ、外部環境中の酸素濃度および欠陥の存在を input data とし、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を output data とするモデルを構築する。以上の結果を踏まえ、結論を導く。

3-2 実験的検討

3-2-1 実験概要

3-2-1-1 使用材料

実験に使用した材料の主な性質を表3-2-1に示す。骨材は、モルタル供試体には千葉県小櫃産の陸砂を、コンクリート供試体には細骨材として富士川産の川砂、粗骨材として東京都青梅産の碎石を用いた。川砂および粗骨材の物理的性質を表3-2-2に示す。鉄筋は、モルタル供試体には丸鋼を、コンクリート供試体には異形棒鋼を用いた。異形棒鋼の化学成分を表3-2-3に示す。

表3-2-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質 ^{注)}
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材(モルタル) (コンクリート)	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
	川砂	比重=2.62、F.M.=3.08、吸水率=1.73%
粗骨材	碎石	比重=2.64、F.M.=6.70、吸水率=0.68%
混和剤	増粘剤	セルロース系
	高性能 AE 減水剤	ナフタレン系
鉄筋(モルタル) (コンクリート)	丸鋼(φ9)	降伏強度=354N/mm ² 、Fe含有率=99.13%
	異形棒鋼(D10)	降伏強度=367N/mm ² 、Fe含有率=98.81%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材(陸砂)の物理的性質は表2-2-2に、鉄筋(丸鋼)の化学成分は表2-2-3に示した通りである。

表3-2-2 骨材の物理的性質

	種類	最大寸法	表乾比重	F.M.	吸水率
細骨材	川砂	5mm	2.62	3.08	1.73%
粗骨材	碎石	20mm	2.64	6.70	0.68%

表3-2-3 鉄筋の化学成分(異形棒鋼)

化 学 成 分 (%)						降伏強度 (MPa)
Fe	C	Si	Mn	P	S	
98.81	0.21	0.18	0.72	0.021	0.032	367

3-2-1-2 配合

3-2-2-1で使用したモルタルの配合は、水セメント比を30%、50%、70%の3水準とした。3-2-2-2で使用したモルタルの配合は、水セメント比を50%とした。なお、S/Cは何れの水セメント比においても2.5とした。また、3-2-2-2で使用したコンクリートの配合は、水セメント比が50%のコンクリートおよびポリマーセメントモルタルの2水準とした。なお、水セメント比が30%のモルタルには、高性能AE減水剤をセメントに対して2.0wt%添加した。一方、水セメント比が70%のモルタルには増粘剤をセメントに対して1.2wt%添加した。コンクリートの配合を表3-2-4に、ポリマーセメントモルタルの物性を表3-2-5に示す。なお、ポリマーセメントモルタルの作製に使用した、セメント、エマルジョン（強化材）および水の質量比は、169:17:19であった。

表3-2-4 コンクリートの配合と主な性質

G.max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				(g/m³)		スランプ (cm)	空気 量(%)	28日圧縮強 度 (MPa)
			W	C	S	G	減水剤	AE 剤			
20	50	44.8	165	330	803	988	945	1.3	8.5	4.9	33.6

表3-2-5 ポリマーセメントの物性

比重	28日強度 (MPa)			硬化収縮率 (%)	ブリーディング率 (%)
	圧縮	引張	付着		
2.04	35.0	22.2	2.6	-0.002	0

3-2-1-3 実験ケース

実験ケースを表3-2-6に示す。

表 3-2-6 実験ケース

(a) 3-2-2-1で行った実験のケース

No	Cl ⁻ の供給位置	水分・酸素の供給条件 ^{注)}	W/C(%)
3-2-1	欠陥	湿潤環境	30
3-2-2			50
3-2-3			70
3-2-4		乾湿繰返し環境	30
3-2-5			50
3-2-6			70
3-2-7		乾燥環境	30
3-2-8			50
3-2-9			70
3-2-10	欠陥と その近傍	湿潤環境	30
3-2-11			50
3-2-12			70
3-2-13		乾湿繰返し環境	30
3-2-14			50
3-2-15			70
3-2-16		乾燥環境	30
3-2-17			50
3-2-18			70
3-2-19	全体	湿潤環境	30
3-2-20			50
3-2-21			70
3-2-22		乾湿繰返し環境	30
3-2-23			50
3-2-24			70
3-2-25		乾燥環境	30
3-2-26			50
3-2-27			70

注) 「湿潤」は水分が多く酸素が少ない環境、「乾湿繰返し」は水分および酸素がともに多い環境、「乾燥」は水分が少なく酸素が多い環境を意味する。

(b) 3-2-2-2で行った実験のケース

No.		side-A		side-B	
		W/C(%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	W/C(%)	Cl ⁻ (kg/m ³)
3-2-28	モルタル	50	15.0	50	0.5
3-2-29					15.0
3-2-30	コンクリート	ポリマーセメントモルタル	0	50	0.5
3-2-31					2.0
3-2-32					7.0
3-2-33					15.0

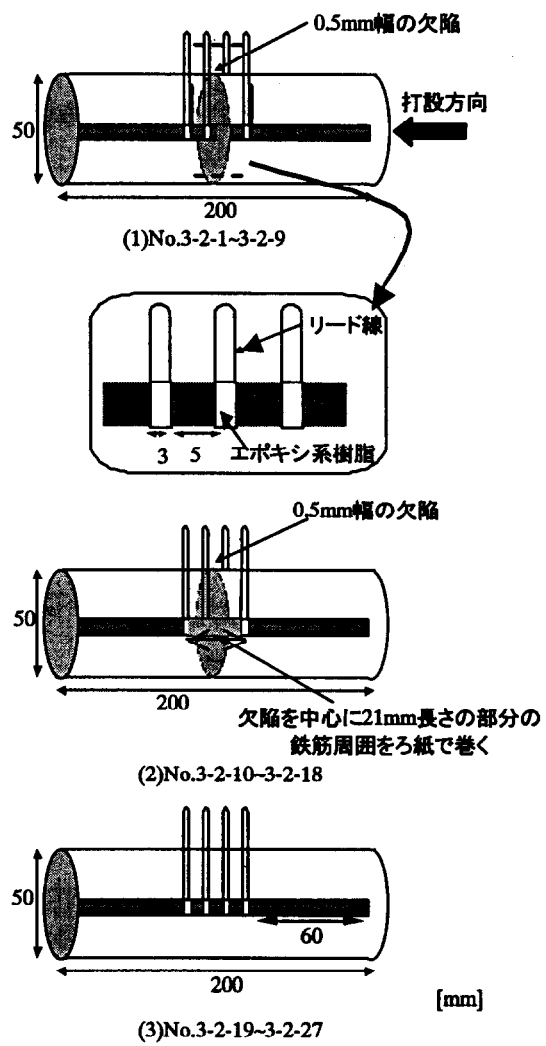
注) side-A、side-Bは図3-2-1を参照。

3-2-2-1で行った実験のケースを次に示す。水セメント比は 30%、50%、70% の 3 水準とした。塩化物イオンの鉄筋表面への供給位置を欠陥、欠陥と近傍（欠陥から 1cm 以内の範囲）、全体の 3 水準とした。水分・酸素の供給条件は、一般の外部環境を考慮し、水分が多く酸素が少ない湿潤環境、水分および酸素がともに多い乾湿繰り返し環境、水分が少なく酸素が多い乾燥環境の 3 水準とした。湿潤環境は湿度 90% 室温 20℃とし、乾燥環境は湿度 50% 室温 20℃とした。また乾湿繰り返し環境は、24 時間の湿潤状態と、60 時間の乾燥状態が繰り返される環境とした。そしてそれぞれを組み合わせた 27 水準について、各 2 本の供試体を作製した。

次に 3-2-2-2で行った実験のケースを示す。ここでは、塩化物イオン含有量が異なるモルタルあるいはコンクリート間に生じる鉄筋腐食について検討した。モルタル供試体を用いた検討では、水セメント比が 50% の供試体を用い、打継目を境とし両側部材中の塩化物イオン含有量が異なる場合、および両側とも多量の塩化物イオンが含有される場合について比較した。コンクリート供試体を用いた検討では、ポリマーセメントモルタルとコンクリート間に生じる鉄筋腐食を対象とした。ここで、コンクリートの水セメント比は 50% とし、また塩化物イオン含有量は 0.5、2.0、7.0、15.0 kg/m³ の 4 水準とした。外部環境は湿度 80% 室温 20℃とした。

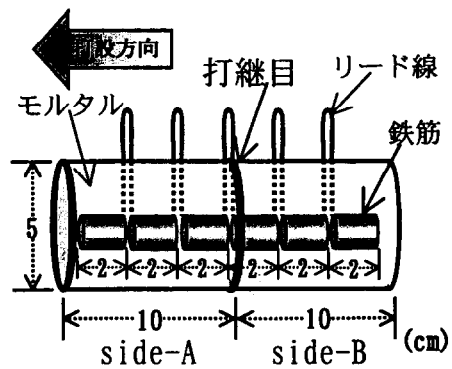
3-2-1-4 供試体概要

図 3-2-1 に供試体概要を示す。



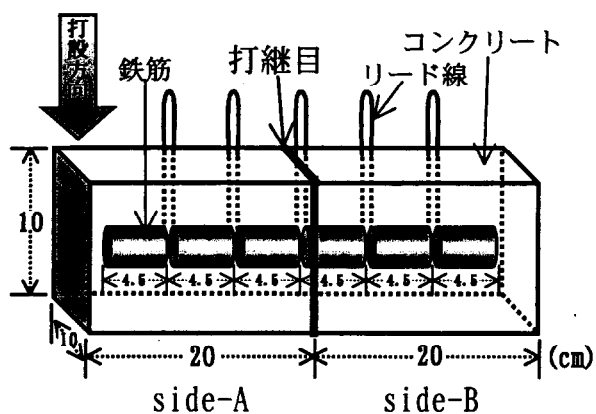
(a) 3-2-2-1 で使用したモルタル供試体

かぶり：2.0cm
分割鉄筋要素の単位長さ：2cm



(b) 3-2-2-2で使用したモルタル供試体

かぶり：4.5cm
分割鉄筋要素の単位長さ：4.5cm



(c) 3-2-2-2で使用したコンクリート供試体

図3-2-1 供試体概要図

はじめに3-2-2-1で使用した供試体について示す。5つの要素に分割された鉄筋を用いた。なお欠陥に近い位置の腐食を詳細に検討するため5つの鉄筋要素のうち中央の鉄筋要素を特に細かく分割した。すなわち、欠陥とその近傍に5mmの鉄筋要素を3本配置し、その両端に60mmの鉄筋要素が連結するようにした。ここで欠陥近傍に配置した鉄筋は2-4を踏まえ15mm以下にした。打設方法を次に示す。2-2-1に示した方法で前処理した鉄筋を型枠中心に配置した。供試体の中央に欠陥部を生じさせるため、モルタルは2層に分けて打設した。初めに、直径50mm、高さ200mmの型枠の半分まで打設した。24時間経過後、表面のレイタンスを十分に除去し、さらに2層目を打設した。このときNo.3-2-1~No.3-2-9 供試体においては打継面に厚さが0.5mmのろ紙を挟み、欠陥を有する供試体とした。また、No.3-2-10~No.3-2-18 供試体においては、打継面および欠陥部を中心に21mmの範囲の鉄筋周囲にも、ろ紙を巻いた。なおここでは、既存構造物のひび割れ近傍では特にひび割れから1cm以内の範囲において顕著な局部腐食が生じていることが観察されたことから、欠陥を中心とする約2cmの位置に塩化物イオンが供給されるようにした。さらに、No.3-2-19~No.3-2-27 供試体には、全モルタルに対して15.0kg/m³の塩化物イオンを内在させるため、NaClを溶解した水を用いて打設した。養生方法を次に示す。脱型後全ての供試体は湿潤環境中にて28日間の初期養生を行った。その後、表3-2-6(a)に示す水分および酸素の供給を行うために、湿潤養生、乾湿繰り返し養生、乾燥養生を56日間行った。なおその際、欠陥部またはその近傍へ塩化物イオンを供給するケース(No.3-2-1~3-2-18 供試体)に対しては、3.5wt%のNaCl水溶液6mlを3.5日に1回欠陥部より注入した。ただし、測定は、湿潤養生および乾湿繰り返し養生を行った供試体に対しては、湿潤養生下で行った。一方、乾燥養生を行った供試体に対しては、乾燥養生下で測定を行った。

次に、3-2-2-2で使用した供試体について示す。6つの要素に分割された鉄筋を用いた。各鉄筋要素の長さ20mmおよび45mmである。打設方法を次に示す。まずside-Aのモルタルあるいはコンクリートを打設し、24時間養生後に打継面をワイヤブラシで清掃し、その後side-Bのモルタルあるいはコンクリートを打設した。打設後24時間湿空養生した後脱型し、相対湿度80%室温20℃の外部環境中に91日間暴露した。ただし、暴露中に打継目から酸素や水分が浸入することを防ぐため、脱型直後に全ての供試体の打継目を全周に渡ってエポキシ系樹脂により10mm幅でシールした。

3-2-1-5 測定項目

2-2の方法により、マクロセル電流密度とマイクロセル電流密度を測定した。また、腐食電流の測定が終了した供試体を割裂し、内部鉄筋の腐食状態を観察した。

3-2-2 実験結果

3-2-2-1 塩化物イオンが欠陥から多量に供給されることにより生じる鉄筋腐食

(1) 腐食形態および腐食速度の判定方法

1) 腐食電気量密度の定義

56 日間の暴露期間中に流れたマクロセルアノード電流密度とマイクロセル電流密度を時間積分し、マクロセル電気量密度とマイクロセル電気量密度を求めた。さらに、それぞれを合計し総腐食電気量密度を算定した。すなわち、総腐食電気量密度とは、図3-2-2に示す面積の和である。

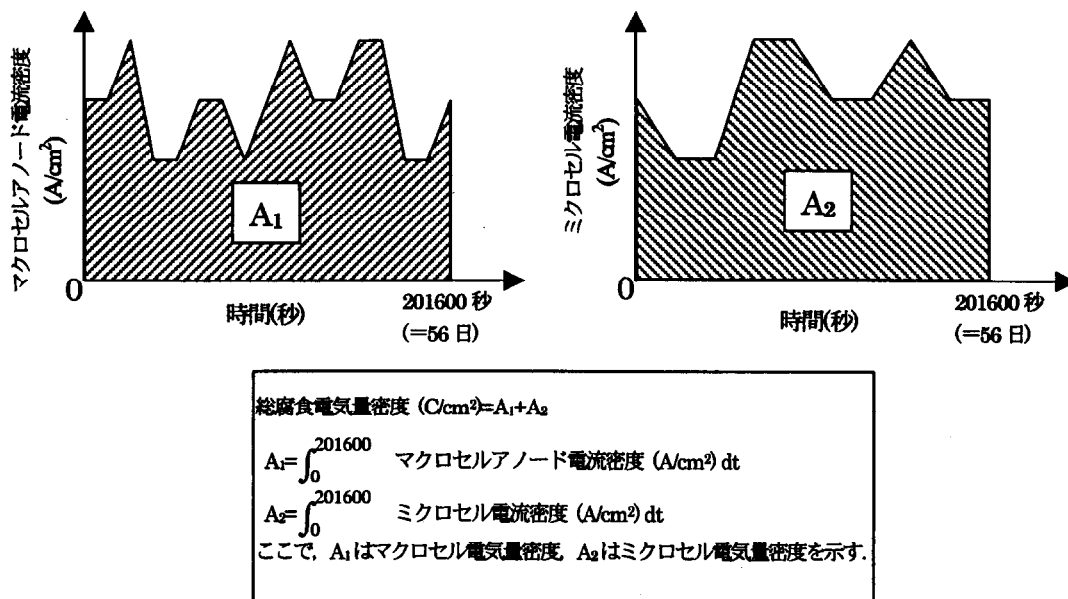


図3-2-2 総腐食電気量密度の定義

2) 判定基準

腐食形態に関する評価では①腐食位置の判定②マクロセル卓越型腐食とマイクロセル卓越型腐食の区別を行った。判定基準は①に関しては内部鉄筋の観察、および測定された総腐

食電気量密度が相対的に大きい場所を限定し、アノード部と判定した。②に関しては、マクロセル電気量密度とミクロセル電気量密度の最大値を比較し、腐食形態を判定した。ここでは明らかに両者に差がみられる場合を卓越型として基準を設けた。すなわち、「 $2/3(0.67) \geq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をミクロセル卓越型腐食とした。一方、「 $3/2(1.50) \leq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をマクロセル卓越型腐食とした。また、「 $2/3 < (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度}) < 3/2$ 」の時をマクロセル・ミクロセル併存型腐食とした。

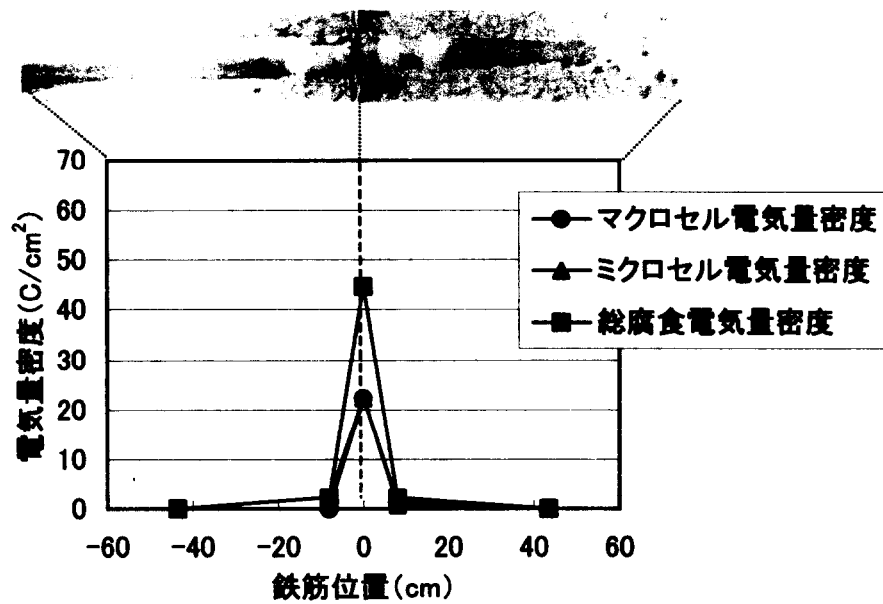
腐食速度に関する評価は、最大腐食電気量密度の値により判定した。本研究では、30年後における鉄筋耐力が健全時の70%以上残存する場合を腐食速度が遅いと定義し、一方健全時の35%以下の場合を腐食速度は速いと定義した。この値に対し、宮川らの研究³⁻¹⁾を参考にし、鉄筋腐食減少量と鉄筋耐力の関係から腐食減少率を求め、その総腐食電気量密度を逆算した。その結果56日間の総腐食電気量密度の最大値が $20\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.034\text{mm}/\text{年}$ に相当)よりも小さい場合を腐食速度が遅い、 $50\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.085\text{mm}/\text{年}$ に相当)よりも大きい場合は腐食速度が速いと判定した。なお、部材の寿命を健全時の曲げ耐力の70%に低下するまでの期間と定義した時、腐食速度の遅い場合の寿命は30年以上、速い場合の寿命は15年以内である。

3) 実験結果の測定例

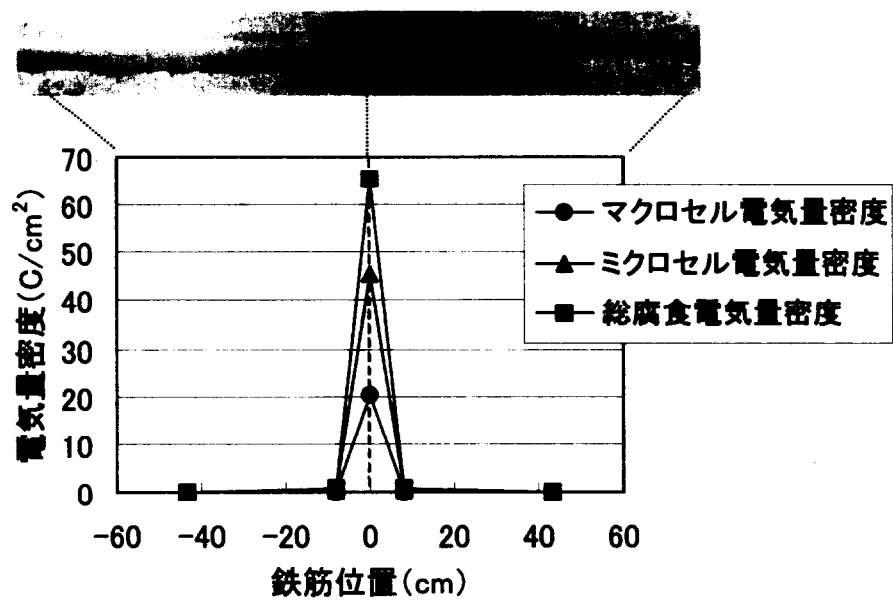
図3-2-3(a)にNo.3-2-5 供試体の腐食電気量密度分布を示す。塩化物イオンは欠陥部のみに供給され、外部環境は乾湿繰返し、水セメント比は50%である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥個所において錆びていることが認められる。また、総腐食電気量密度は欠陥個所でのみ大きくなり、 $(\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度}) = 1.0$ であることが認められる。以上のことから、欠陥個所がアノードとなるマクロセル・ミクロセル併存型腐食が発生していると判断できる。また、最大総腐食電気量密度は $44.67\text{C}/\text{cm}^2$ であり、腐食速度は速くもなく遅くもないと判断できる。

図3-2-3(b)にNo.3-2-6 供試体の腐食電気量密度分布を示す。塩化物イオンは欠陥部のみに供給され、外部環境は乾湿繰返し、水セメント比は70%である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥部において錆びていることが認められる。また、総腐食電気量密度は欠陥個所でのみ大きくなり、 $(\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度}) = 0.4$ であることが認められる。以上のことから、欠陥個所においてミクロセル卓越型腐食が発生していると判断できる。また、最大総腐食電気量密度は $65.64\text{C}/\text{cm}^2$ であり、腐食速度は速いと判

断できる。



(a) No. 3-2-5 供試体 (W/C=50%, 欠陥部, 乾湿繰り返し)



(b) No. 3-2-6 供試体 (W/C=70%, 欠陥部, 乾湿繰り返し)

図 3-2-3 欠陥部近傍の腐食電気量密度分布

(2) 腐食形態および腐食速度の整理

1) 腐食形態

図3-2-4に塩害による腐食の最大マクロセル電気量密度をまとめる。また、図3-2-5に塩害による腐食の最大ミクロセル電気量密度をまとめる。上段・中段・下段はそれぞれ水セメント比が30%・50%・70%の結果である。各段の横軸は、外部環境すなわち水分および酸素の供給条件を示す。縦軸は、塩化物イオンの供給条件を示す。図3-2-4および図3-2-5の結果を比較し、腐食形態を評価した。図3-2-6に塩害による腐食の形態をまとめる。各々の縦軸、横軸は図3-2-4と同様である。また、楕円内はアノード位置を示す。黒色部はミクロセル卓越型腐食、灰色部はマクロセル・ミクロセル併存型腐食、白色部はマクロセル卓越型腐食を示す。

これによると腐食位置に関しては、塩化物イオンが欠陥またはその近傍に浸透した場合は、その浸透箇所が腐食し、全体に浸透した場合はアノード部の定まった傾向は見られないことがわかる。これは、塩化物イオンが欠陥またはその近傍に浸透した場合、その部分での不動態皮膜の破壊が促進され、部分的にアノードになるためと考えられる。一方、塩化物イオンが全体に供給した場合は、鉄筋全体の不動態が破壊されるため、全体的にアノードになる可能性はある。ただし、酸素と水分の供給条件によってアノードの位置は変化するため、アノード部の定まった傾向は認められなかったと考えられる。

また、水セメント比が30%の時にマクロセル腐食が卓越し、水セメント比の増加に伴い、ミクロセル腐食が卓越する傾向が認められる。このことについて考察する。水セメント比が低い時は、モルタル内部における腐食要因となる物質の透過量は少ない。したがって、塩化物イオン、水分、酸素の供給量は、健全なモルタル中と欠陥で著しく異なる。その結果、両者内部に位置する鉄筋への物質供給量に偏りが生じるため、マクロセルが形成されやすいと考えられる。一方、水セメント比が高い場合は、モルタル中においても物質透過量が多い。すなわち、欠陥とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りが低減する。したがって、ミクロセルが形成されやすいと考えられる。

2) 腐食速度

図3-2-7に腐食速度の判定結果をまとめる。各段の横軸、縦軸は図3-2-4と同様である。また、楕円内の値は最大総腐食電気量密度を示す。

これによれば、全体的には水セメント比が低いほど腐食速度は遅いことが認められる。しかしながら、塩化物イオンが欠陥とその近傍に供給した時は腐食速度が速く、特に水セ

塩分の供給 Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	6.1
	欠陥部 +近傍	30.0	28.7	35.3
	欠陥部	5.4	3.6	4.1
W/C=30%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
塩分の供給 Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	2.4	5.9
	欠陥部 +近傍	18.9	22.6	25.1
	欠陥部	15.4	22.3	6.1
W/C=50%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
塩分の供給 Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	1.2	5.6
	欠陥部 +近傍	14.9	2.0	1.7
	欠陥部	1.0	20.1	0.4
W/C=70%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

単位: C/cm²
(56日間)

図3-2-4 欠陥部に生じる塩化物腐食の最大マクロセル電気量密度の整理

Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	5.8
	欠陥部 +近傍	28.5	40.7	28.5
	欠陥部	3.6	5.1	1.8
W/C=30%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	44.3	10.0
	欠陥部 +近傍	9.5	22.3	28.2
	欠陥部	5.1	22.4	21.7
W/C=50%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	19.0	7.9
	欠陥部 +近傍	41.1	16.2	54.2
	欠陥部	13.4	45.5	20.0
W/C=70%				
		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

単位: C/cm²
(56日間)

図3-2-5 欠陥部に生じる塩化物腐食の最大マイクロセル電気量密度の整理

Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	一部
	欠陥部 +近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部
	W/C=30%	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
			H ₂ O, O ₂ の供給	

Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	一部	一部
	欠陥部 +近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部
	W/C=50%	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
			H ₂ O, O ₂ の供給	

Cl ⁻ の供給	全体	腐食なし	一部	一部
	欠陥部 +近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部
	W/C=70%	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
			H ₂ O, O ₂ の供給	

腐食形態			
	マイクロセル卓越型	併存型	マクロセル卓越型

図3-2-6 欠陥部に生じる塩化物腐食の形態の整理

塩化ナトリウム

全体	0.5	1.1	12.3
欠陥部 +近傍	58.4	69.5	48.3
欠陥部	9.0	8.7	6.0
W/C=0.3	乾燥	乾湿繰返し	湿潤

H₂O, O₂の供給

塩化カルシウム

全体	0.6	40.7	12.3
欠陥部 +近傍	23.9	24.9	53.3
欠陥部	20.8	44.7	27.9
W/C=0.5	乾燥	乾湿繰返し	湿潤

H₂O, O₂の供給

塩化マグネシウム

全体	1.4	19.9	10.0
欠陥部 +近傍	56.0	16.5	55.9
欠陥部	14.4	65.6	20.5
W/C=0.7	乾燥	乾湿繰返し	湿潤

H₂O, O₂の供給

腐食速度			
	遅い		速い

単位: C/cm²
(56日間)

図3-2-7 欠陥部に生じる塩化物腐食の速度の整理

メント比が30%もしくは50%の時、マクロセルも形成された腐食の場合において、水セメント比が70%の時と比較して、腐食速度が速くなる場合があることが認められる。これは、水セメント比が低いほど、欠陥とその近傍の限られた範囲内で、腐食要因となる酸素、塩化物イオンの供給量が相対的に卓越し、局所的には腐食速度が速くなるためと考えられる。

(3) まとめ

3-2-2-1では、塩化物イオンが欠陥部から多量に供給されることにより生じる鉄筋腐食の形態と速度を検討した。得られた結論を以下にまとめる。

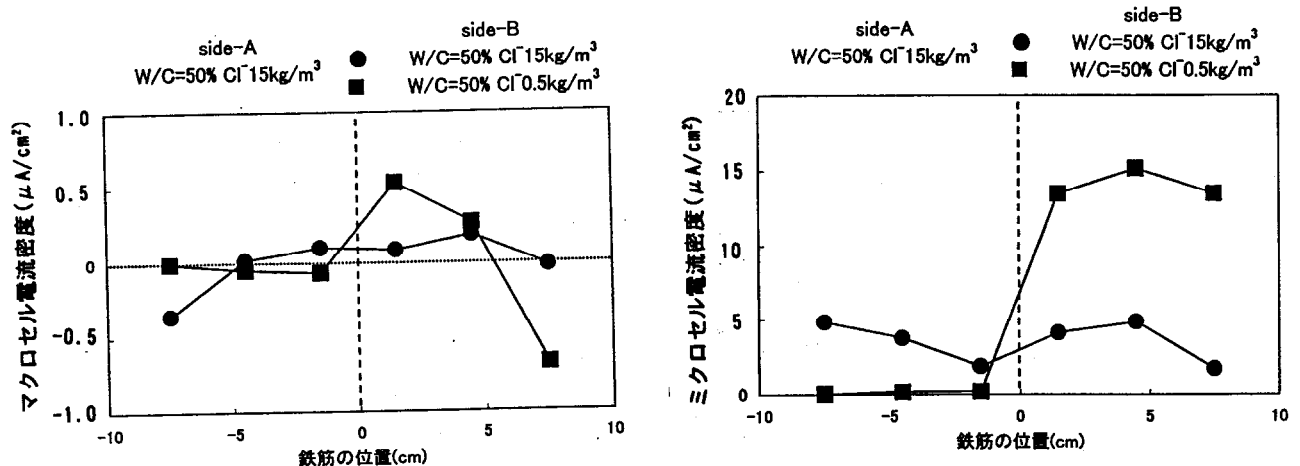
1. 腐食形態を検討した結果、次のことが明らかとなった。水セメント比が30%の時にマクロセル卓越型の腐食が発生しやすい。一方、水セメント比が高くなるに伴いミクロセル卓越型の腐食が発生する。
2. 腐食速度を検討した結果、マクロセルが形成した場合には、水セメント比が30%もしくは50%の時に、水セメント比が70%の時と比較して、腐食速度が速くなる場合がある。

3-2-2-2 塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる鉄筋腐食

(1) 塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じるマクロセル腐食発生に関する検討

モルタル供試体を用い、塩化物イオン含有量の相違がマクロセル腐食速度およびミクロセル腐食速度に及ぼす影響を図3-2-8に示す。同図は、side-A および side-B とともに、モルタルの水セメント比が50%の結果である。また side-A モルタルの塩化物イオン含有量は、 15.0kg/m^3 とし、一方 side-B モルタルの塩化物イオン含有量は 0.5kg/m^3 および 15.0kg/m^3 とした場合の測定結果である。これによれば、side-B モルタルの塩化物イオン含有量が 15.0kg/m^3 の供試体において、マクロセル腐食速度は小さく、ミクロセル腐食速度は大きいことが認められる。しかしながら、side-B モルタルの塩化物イオンが 0.5kg/m^3 の供試体においては、side-B モルタルの打継目近傍においてアノード腐食速度が促進されることが認められる。以上のことから、全体に多量の塩化物イオンが含有している場合と比較して、一部にのみ塩化物イオン含有量が多量に含有している場合が、マクロセル腐食速度は促進されることが明らかとなった。これは、全体的に塩化物イオンが含有された場合にはいずれの鉄筋においても腐食が進行しやすい状態にあり、その結果鉄筋全体で一様にミクロセル腐食が進行すると考えられる。一方、一部のモルタルのみにおいて塩化物イオン含有量が多く、他方では少ない場合、前者が後者と比較して明らかに腐食が進行しやすい環境といえる。すなわち、部分的に腐食の進行が容易な部分が存在することとなる。

したがって、前者がアノードとなり、後者がカソードとなるマクロセルが形成され、その結果マクロセル腐食速度が促進すると考えられる。



(a)マクロセル電流密度分布

(b)ミクロセル電流密度分布

注) マクロセル電流密度とミクロセル電流密度の縦軸は異なるオーダーである。

図 3-2-8 塩化物イオン含有量の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (モルタル供試体)

塩化物イオン含有量の相違がマクロセル腐食速度に及ぼす影響を図 3-2-9 に示す。同図は、side-A にポリマーセメントモルタルを使用し、side-B に水セメント比が 50%、塩化物イオン含有量が $0.5kg/m^3$ 、 $2.0kg/m^3$ 、 $7.0kg/m^3$ および $15.0kg/m^3$ のコンクリートを使用した場合の測定結果である。これによれば、side-B コンクリートの塩化物イオン含有量が $0.5kg/m^3$ および $2.0kg/m^3$ の供試体においては、マクロセル腐食速度は小さいことが認められる。しかしながら、塩化物イオンが $7.0kg/m^3$ を越える供試体においては、side-B コンクリートの打継目近傍に大きなアノード電流が認められる。このことから、1-2「既往の研究の整理」でミクロセル腐食が生じる限界塩化物イオン含有量が存在すると示した通り、マクロセル腐食に関しても、任意の塩化物イオン含有量を超えた場合には腐食が進行すると考えられる。

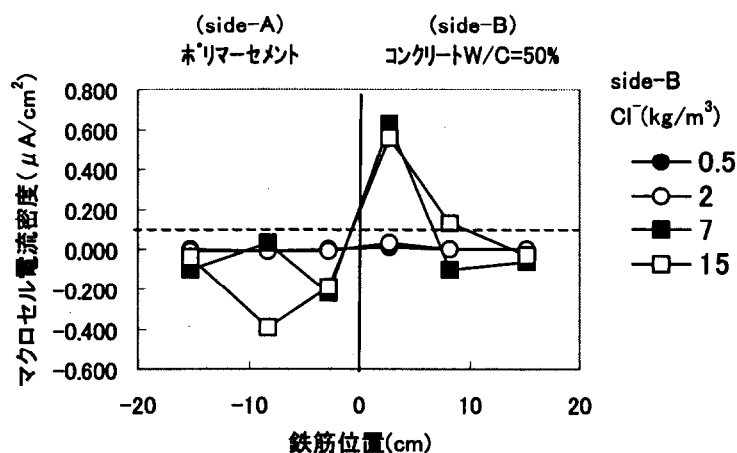


図 3-2-9 塩化物イオン含有量の相違がマクロセル電流密度に及ぼす影響
(コンクリート供試体)

(2) まとめ

3-2-2-2では、塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる鉄筋腐食の形態と速度を整理した。得られた結論を以下にまとめる。

1. 塩化物イオン含有量に相違がある部材が打ち継がれている場合、塩化物イオン含有量の多い部材内部の鉄筋がアノード、少ない部材内部の鉄筋がカソードとなるマクロセルが形成される。一方、全体に塩化物イオン含有量が多量に浸透している場合、ミクロセル腐食が進行する。したがって、全体に塩化物イオンが多量に含有されている場合より、一部にのみ塩化物イオンが多量に含有されている場合が、マクロセルが形成されるため腐食速度は速くなる。
2. 腐食が発生するためには、多量に塩化物イオンが含まれる側の部材には、マクロセル腐食発生限界量以上の塩化物イオンが含有されていることが条件である。本研究の範囲では、塩化物イオンが多量に含まれる側の部材の塩化物イオン含有量が 2.0kg/m^3 以下では顕著なマクロセルの形成は認められない。一方、 7.0kg/m^3 以上ではマクロセルの形成が認められる。

3-3 解析的検証

3-3-1 解析概要

3-3-1-1 考え方

コンクリートの欠陥の存在を考慮した上で、塩化物イオンの供給条件、酸素と水分の供給条件、水セメント比をパラメータとし、腐食形態および腐食速度を評価するモデルを構築する。

図3-3-1に、腐食速度に影響を及ぼす因子の関係を示す。ここでは、マクロセル腐食とミクロセル腐食を区別して評価するため、鉄筋を要素分割し解析することとする。また、全腐食速度は、ミクロセル腐食速度とマクロセル腐食速度の和により計算することとする。なお、分割された要素内にアノードとカソードがともに存在する腐食セルをミクロセルとし、一方、異なる要素間にアノードとカソードが跨り形成する腐食セルをマクロセルと定義する。

次に、図3-3-1中の各因子の関係を示す。ここでは、左側の因子を基に、右側の因子との関係を示す。

1-2「既往の研究の整理」で示した通り、コンクリート中の鉄筋腐食は一般にカソード反応に必要な酸素供給量により律速される。このことから、ミクロセル腐食およびマクロセル腐食はともに、カソード反応速度に制限されるとし、カソード反応速度は酸素供給量により決定される。また、マクロセル腐食速度に関しては、①カソード反応速度とともに②アノード要素とカソード要素間の抵抗も考慮することとする。すなわち、②に関してはアノード要素とカソード要素間の抵抗が小さいほど腐食速度は増加することとする。

次に、酸素供給量およびアノード要素とカソード要素間の抵抗に影響を及ぼす因子の関係を整理する。鉄筋に供給される酸素は、外部環境中からかぶりコンクリートを浸透し、さらに鉄筋周囲に存在する水膜を透過し、鉄筋に供給される。したがって、欠陥部以外ではかぶりコンクリート中における酸素透過性および水膜中の酸素透過性を考慮し、鉄筋への酸素供給量を算定する。また、欠陥部では水膜中の酸素透過性を考慮し、鉄筋への酸素供給量を算定する。なお、かぶりコンクリート中における酸素透過性は、外部環境中の酸素量、コンクリートの水セ

メント比、かぶりを考慮し決定する。一方、水膜中の酸素透過性は外部環境中の水分量を考慮し決定する。アノード要素とカソード要素間の抵抗は、A.アノード要素とカソード要素間のコンクリート抵抗および B.各要素の分極抵抗を考慮し算定する。コンクリート抵抗は、外部環境中の水分量、コンクリートの水セメント比、かぶりを考慮し決定する。分極抵抗は、塩化物イオンの供給条件により決定する。

本解析的検討では、鉄筋の塩化物腐食に影響を及ぼす最も重要な因子である、塩化物イオンの供給条件、酸素・水分の供給条件、コンクリートの水セメント比、欠陥の存在およびかぶり厚さを考慮し腐食形態と腐食速度を評価する。したがって、上記の仮定は、コンクリート中の物質移動現象あるいは鉄筋腐食機構に影響を及ぼす因子のうち、重要な項目のみを考慮し設定した。このため、一部の仮定は不十分であるが、基本的な塩化物腐食の形態と速度を評価するには第一次近似として適当であると考ええる。なお、解析で対象とする部材の設計条件、環境条件および欠陥の存在が明らかとなれば、全ての最右列の因子を決定することができる。

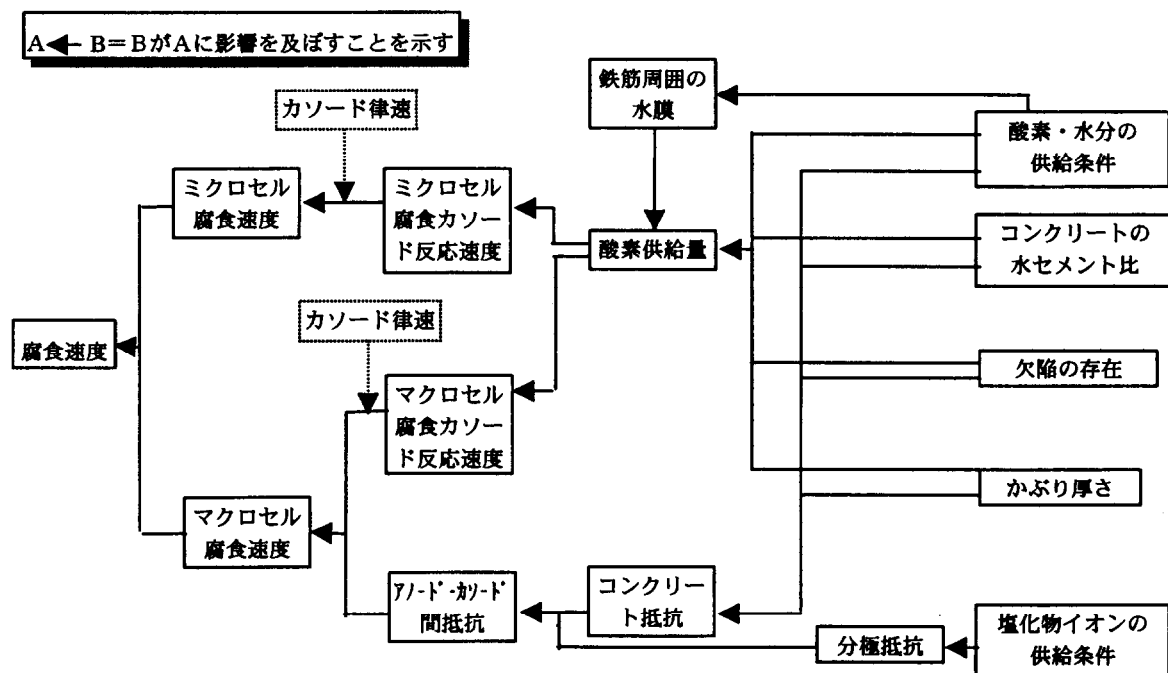


図 3 - 3 - 1 塩害による腐食速度に影響を及ぼす因子の関係

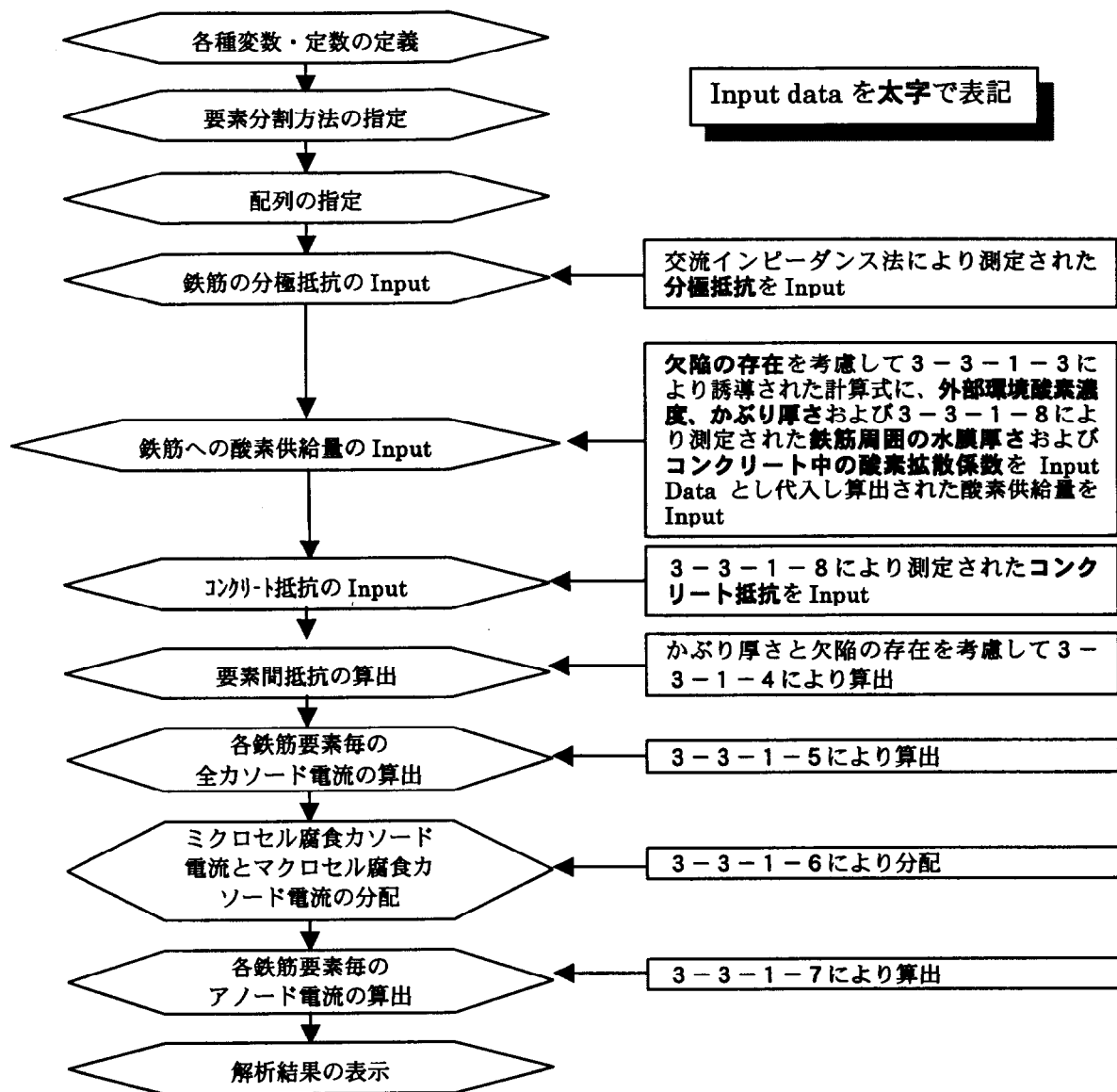


図 3-3-2 解析フロー

3-3-1-2 解析フロー

図 3-3-2 に解析フローを示す。

はじめに、各種変数および定数の定義を行う。

次に要素分割の定義を行う。

次に変数の配列を指定する。

次に各鉄筋要素毎に分極抵抗を Input する。ここでは、塩化物イオンの供給条件を考慮し分極抵抗を Input する。すなわち、欠陥から塩化物イオンが供給され

る部分、あるいはコンクリート中に多量の塩化物イオンが含有されている部分と、それら以外を区別し、実験値を参考にし分極抵抗値を代入する。なお、通常は2-2-1-3(2)に示す方法で分極抵抗を測定する。

次に鉄筋への酸素供給量を Input する。ここでは、予め実験により、鉄筋周囲の水膜厚さおよびコンクリート中における酸素の拡散係数を測定する。これらを理論的に誘導された式に代入し、鉄筋への酸素供給量を算定する。その際、欠陥とそれ以外の部分を区別して、酸素供給量を算定する。

次にコンクリート抵抗を Input する。ここでは、コンクリートの水セメント比および水分の供給条件を考慮したコンクリート抵抗の実験値を Input する。

次に鉄筋要素間の抵抗を算出する。ここでは、コンクリート抵抗と分極抵抗を組み合わせ、かぶり厚さと欠陥の存在を考慮することにより、鉄筋要素間の抵抗を算出する。

次に各鉄筋要素毎のカソード電流を算定する。

次に前述した各鉄筋要素毎のカソード電流を、マイクロセル腐食にて使用される電流とマクロセル腐食にて使用される電流に分配する。

次に各鉄筋要素毎のアノード電流を算定し、結果を表示することとする。

すなわち、本解析モデルにおける Input Data と Output Data は表3-3-1に示す通りである。

表 3 - 3 - 1 本解析モデルの Input data と output data

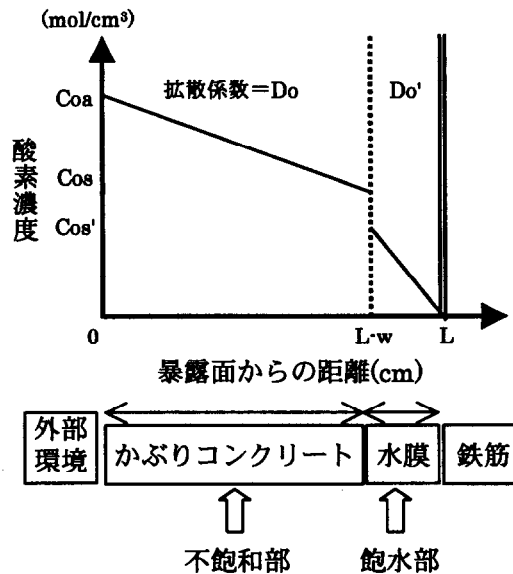
Input data	Output data
鉄筋の分極抵抗	マクロセル腐食速度
鉄筋周囲の水膜厚さ	マイクロセル腐食速度
コンクリートの酸素拡散係数	
かぶり厚さ	
外部環境中の酸素濃度	
欠陥の存在	

3 - 3 - 1 - 3 コンクリート中鉄筋への酸素供給量¹⁻²⁾

(1) 仮定

ここでは、次の条件のもと、コンクリート中鉄筋への酸素供給量を算出する。

- 1) 鉄筋表面には水膜が存在する。したがって、内部鉄筋のカソード反応で消費される酸素は、外部環境からかぶりコンクリート中を経由し、鉄筋周囲の水膜を透過し、鉄筋に供給される。
- 2) かぶりコンクリート中を透過する酸素の拡散係数は、コンクリートの水セメント比の影響を受ける。



注：ここでは理解を容易とするため、 w の距離を長くして表示しているが、実際は 0.004cm 程度である。

図 3-3-3 非欠陥部コンクリート中における酸素透過

(2) 方程式の誘導

はじめに、非欠陥部コンクリート中の鉄筋への酸素透過量を求める式を導く。図 3-3-3 に、かぶりコンクリート（本節では、コンクリート表面から鉄筋までの間における水膜以外の部分を「かぶりコンクリート」と称す。）と鉄筋周囲の水膜を考慮した、コンクリート中鉄筋への酸素透過概念図を示す。かぶりは L cm とし、鉄筋周囲の水膜厚を w cm とする。酸素濃度は、外部環境と接する暴露面で Coa 、不飽和部と飽水部の境界では、不飽和部側が Cos 、飽水部側が Cos' とする。また、鉄筋に透過した酸素は全てカソード反応で消費されるとすると、鉄筋表面での酸素濃度は 0 である。拡散係数は、不飽和部が Do 、飽水部は Do' とする。

コンクリート中の酸素の移動現象は、基本的には、Fick の拡散方程式に準じる。

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3-3-1)$$

ここで、C は酸素濃度(mol/cm³)、J は酸素移動フラックス(mol/cm²sec)、x は暴露面からの距離(cm)、D は拡散係数(cm²/sec)を示す。

酸素の移動フラックスは、かぶりコンクリート中および水膜中で等しい。したがって、式(3-3-1)は次式の通りとなる。

$$D_o \cdot \frac{C_{oa} - C_{os}}{L - w} = D_o' \cdot \frac{C_{os}' - 0}{w} \quad (3-3-2)$$

ここで、D_o はかぶりコンクリート中の酸素拡散係数(cm²/sec)、D_o'は水膜中の酸素拡散係数(cm²/sec)を示す。

次に、かぶりコンクリートと水膜の境界における酸素濃度の関係を求める。境界近傍の不飽和部側における酸素の分圧は、ボイル＝シャルルの法則により次式の通り示される。

$$P_o = C_{os} \cdot R \cdot (273 + T) \cdot 1000 \quad (3-3-3)$$

ここで、P_o は境界近傍のかぶりコンクリート側の酸素の分圧(atm)、R は気体定数(=0.082atm・l/mol/K)、T は温度(℃)を示す。

したがって、Henry の法則により、境界近傍の水膜側の酸素濃度を求めると、次式になる。

$$C_{os}' = P_o \cdot H_o(T) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{V_o} \quad (3-3-4)$$

ここで、H_o(T)は T℃における 1atm で水 1cm³ に溶解する酸素の体積(ml)、V_o は酸素 1mol の体積(=22.4l)を示す。

式(3-3-3)を式(3-3-4)に代入し、C_{os}'を求める。さらに、C_{os}'を式(3-3-2)に代入し、C_{os}を求める。算出された C_{os} を式(3-3-1)に代入し、J_o'を求める。その結果、鉄筋に供給される酸素の移動フラックス(J_o')は、次式の

通りとなる。

$$J_o' = D_o \cdot \frac{C_{oa} - \frac{w \cdot V_o \cdot D_o \cdot C_{oa}}{A + w \cdot V_o \cdot D_o}}{L - w} \quad (3-3-5)$$

$$(3-3-8)$$

ただし、 $A = (L - w) \cdot (273 + T) \cdot D_o' \cdot R \cdot Ho(T)$ である。

次に、欠陥と交差する鉄筋への酸素透過量を求める式を導く。欠陥において、鉄筋周囲の水膜までは、酸素は極めて容易に透過すると仮定する。その結果、表面酸素濃度は、不飽和部と飽水部の境界における酸素濃度と等しくなる。したがって、ひび割れ部における、水膜中の酸素移動フラックスは、次式に示す通りとなる。

$$J_o = D_o' \cdot \frac{C_{oa} - 0}{w} \quad (3-3-6)$$

ここで、 J_o は酸素移動フラックスを示す。

また、式(3-3-3)は次式に示す通りとなる。

$$P_o = C_{oa} \cdot R \cdot (273 + T) \cdot 1000 \quad (3-3-7)$$

式(3-3-7)を式(3-3-4)に代入し、 C_{os}' を求める。さらに、 C_{os}' を式(3-3-6)に代入し、 J_o を求める。その結果、鉄筋に供給される酸素の移動フラックスは、次式の通りとなる。

$$J_o = D_o' \cdot \frac{(273 + T) \cdot C_{oa} \cdot R \cdot Ho(T)}{w \cdot V_o}$$

すなわち、酸素供給量算定モデルにおける Input Data は表 3-3-2 に示す通りである。

表 3 - 3 - 2 酸素供給量算定モデルの Input data

Input data
鉄筋周囲の水膜厚さ
コンクリートの酸素拡散係数
かぶり厚さ
外部環境中の酸素濃度
欠陥の存在

3 - 3 - 1 - 4 アノード要素とカソード要素間の抵抗

(1) 仮定

ここでは、次の条件のもと、アノード要素とカソード要素間の抵抗を算出する。

- 1) アノードとカソード間の抵抗は、分極抵抗、コンクリート抵抗および鉄筋周囲の水膜の電気抵抗、を組み合わせることにより表現される。

(2) アノード要素とカソード要素間の抵抗

任意の鉄筋要素間の電気回路は、図 3 - 3 - 4 に示す等価回路で形成され则认为。ここで、分極抵抗は実験値を参考に決定する。一方、アノード要素とカソード要素間のコンクリート抵抗は、次の通り求める。ここで、アノード要素とカソード要素間のコンクリート抵抗は、①アノード要素とカソード要素間に存在するかぶりコンクリート中（不飽和部）を電気が流れる際の抵抗、および②鉄筋周囲の水膜（飽水部）を電気が流れる際の抵抗、を組み合わせ求めることとする。

①に関しては、コンクリートの水セメント比および外部環境中の水分量を制御した条件で実験を行ないコンクリート抵抗を求め、かぶりを考慮しアノード要素とカソード要素間のコンクリート抵抗を求める。②に関しては、飽水部の厚さは 3 - 3 - 1 - 8 により求め、水の液抵抗は $1.818 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ とする。なお、コンクリート中铁筋周囲の水膜は純水ではなく、多種の共存イオンを含有するが、ここでは簡単のため純水の電気伝導率より液抵抗を求める。

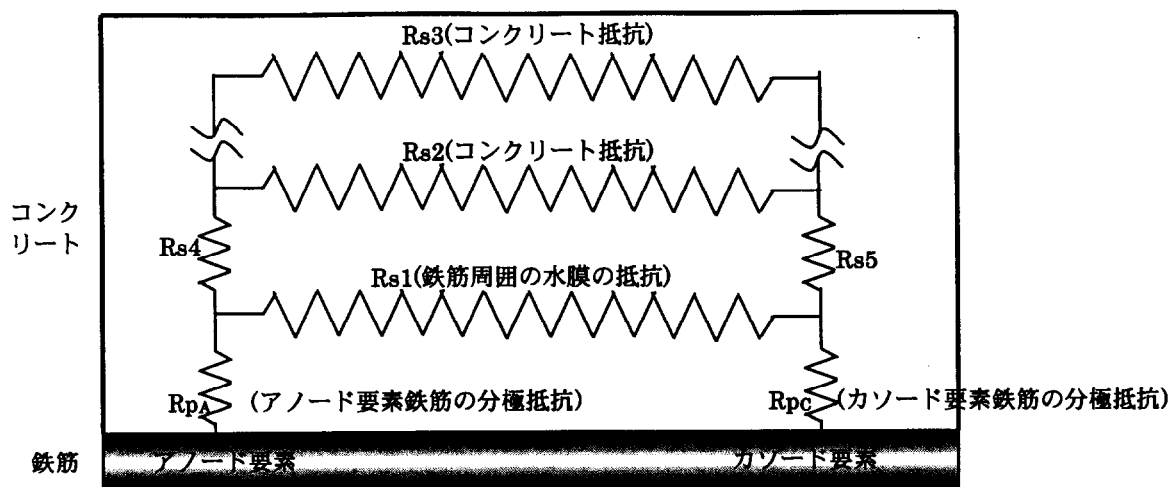


図 3 - 3 - 4 コンクリート内部で形成される腐食セルの等価電気回路

以上のことより、任意の鉄筋要素間の全抵抗は、次式の通りとなる。

$$R = R_{pA} + \sum R_s + R_{pC} \quad (3 - 3 - 9)$$

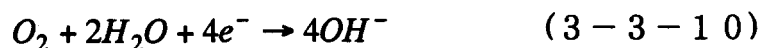
ここで、 R はアノード要素とカソード要素間の全抵抗(Ω)、 R_{pA} はアノード鉄筋要素における分極抵抗(Ω)、 R_{pC} はカソード鉄筋要素における分極抵抗(Ω)、 $\sum R_s$ はアノード要素とカソード要素間のコンクリート抵抗(水膜の抵抗を含む)を並列および直列に組み合わせて求めた値を表す。

3 - 3 - 1 - 5 鉄筋要素毎の全カソード電流

(1) 仮定

ここでは、次の条件のもと、鉄筋要素毎のカソード電流を算出する。

- 1) カソード反応の進行は、酸素供給量により律速される。
- 2) 鉄筋に供給された酸素は、次式に示すカソード反応により全て消費される。また、その反応率は 100% とする。すなわち、カソード反応により、鉄筋に供給された酸素のモル数の 4 倍の電子が消費される。



(2) 鉄筋の要素分割

本解析手法では、鉄筋を単位要素に分割する。この場合、単一の単位要素内部でアノードとカソードが存在する腐食セルと、異なる鉄筋要素間にアノードとカソードが存在する腐食セルとの2通りが考えられる。ここでは、単一の要素内で形成されるセルによる腐食を「マイクロセル腐食」と称し、異なる要素間で形成されるセルによる腐食を「マクロセル腐食」と称す。ただし、両腐食とも、カソード反応は式(3-3-10)で表される。

(3) カソード反応速度(カソード電流)と酸素透過量

(1)にて仮定した通り、カソード反応速度は、対象とする部分に供給される酸素量と比例する。また、鉄筋に到達した酸素は、(2)にて定義した「マイクロセル腐食」と「マクロセル腐食」の両者のカソード反応にて消費される。以上のことから、鉄筋に供給される酸素量と、カソード電流の関係は、次式にて表される。

$$I_c = J_o' \cdot S \cdot 4 / F \quad (3-3-11)$$

ここで、 I_c は任意の要素にて酸素が消費されることにより生じる全カソード電流(A)、 J_o' は鉄筋への酸素移動フラックス($\text{mol}/\text{cm}^2\text{sec}$)、 S は解析対象とする鉄筋要素の表面積(cm^2)、 F はファラデー定数($=96500$)を示す。

3-3-1-6 カソード電流の分配方法

(1) 仮定

ここでは、次の条件のもと、任意の鉄筋要素のカソード電流をマクロセル腐食に携わるカソード電流とマイクロセル腐食電流に携わるカソード電流に分配する。

1) 任意の鉄筋要素がカソード部となる腐食セルにおいて、対になるアノード要素は複数存在する(例えば n 個)。この時、対象とする一つのカソード鉄筋要素と全アノード鉄筋要素との間で形成される腐食セルを流れる腐食電流の和(n 個の腐食セルを流れる腐食電流の和)は、対象とするカソード鉄筋要素で消費されるカソード電流と等しい。

2) アノード要素とカソード要素間の腐食電流は、アノード要素とカソード要素

間の抵抗に反比例して流れる。したがって、対象とする一つのカソード要素から各アノード要素に流れる腐食電流は、カソード要素に関わる全てのアノード要素との間の抵抗の逆数の和のうち、対象とする腐食セルのアノード要素とカソード要素間の抵抗の逆数の割合に応じて流れる。

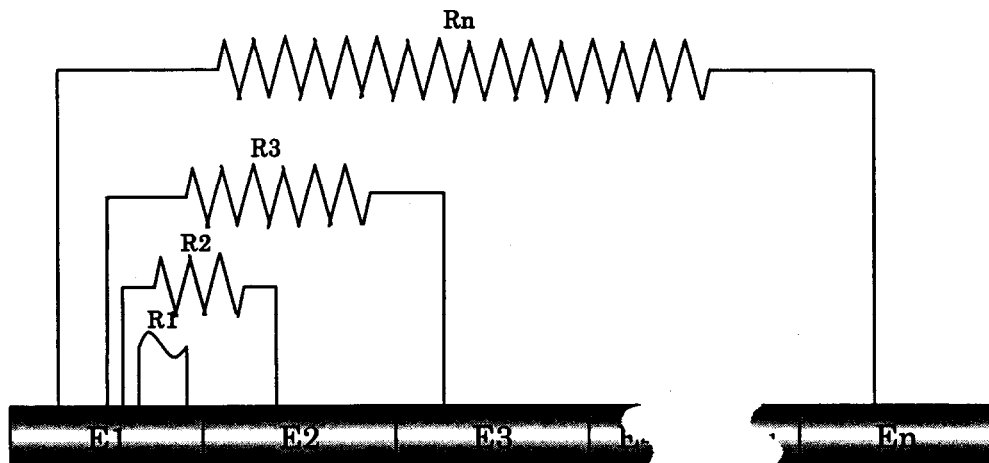


図 3 - 3 - 5 E1 がカソードとなる腐食セルの形成状況

(2) カソード電流の分配方法

(1) の 2) 項にて仮定する通り、対象とする一つのカソード要素から各アノード要素に流れる腐食電流は、カソード要素に関わる全てのアノード要素との間の抵抗の逆数の和のうち、対象とする腐食セルのアノード要素とカソード要素間の抵抗の逆数の割合に応じて流れる。すなわち、図 3 - 3 - 5 に示す通り、任意の鉄筋要素(E1)がカソードとなる腐食セルが n 個形成されたとする。この時、鉄筋要素 E1 がアノードかつカソードとなる腐食セルがマイクロセル腐食に相当する。また、鉄筋要素 E1 内にアノードとカソードを有するマイクロセル腐食のアノードとカソード間の抵抗は R_1 とする。なお R_1 は、アノードとカソード間の距離が短いため、アノードとカソード間のコンクリート抵抗は無視し、分極抵抗のみを考慮することとする。したがって、式(3 - 3 - 9)に相当する抵抗は次式にて示される。

$$R_{11} = R_{pA} + R_{pC} \quad (3 - 3 - 12)$$

ここで、 R_{11} は鉄筋要素 E1 内にアノードとカソードを有するマイクロセル腐食のアノードとカソード間の抵抗、 R_{pA} はアノード要素における分極抵抗(Ω)、 R_{pC} はカソード要素における分極抵抗(Ω)を示す。ただし、アノードおよびカソードはともに鉄筋要素 E1 であるため、 $R_{pA}=R_{pC}=R_{pE1}$ (E1 の分極抵抗)とする。

一方、鉄筋要素 E1 がアノードとなり鉄筋要素 E2～En がカソードとなる腐食セルはマクロセル腐食に相当する。また、鉄筋要素 E1 と鉄筋要素 E2 間の抵抗は R_{12} とする。なお R_{12} は、式(3-3-9)に示される様に分極抵抗、コンクリート抵抗および鉄筋周囲の水膜の液抵抗を考慮した値である。同様に、鉄筋要素 E1 と鉄筋要素 E3 間の抵抗は R_{13} 、鉄筋要素 E1 と鉄筋要素 En 間の抵抗は R_{1n} とする。

上記した抵抗に基づき、鉄筋要素 E1 がカソードとなる腐食セルにおける、対となる全てのアノードとの間の抵抗の逆数の和は、次式の通りとなる。

$$\sum \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \cdots + \frac{1}{R_{1n}} \quad (3-3-13)$$

したがって、鉄筋要素 E1 がカソードとなる全腐食電流のうち、鉄筋要素 x ($x=1 \sim n$) がアノードとなる腐食セルに流れる電流は、次式に示す割合となる。

$$\frac{I_{1-x}}{I_{CE1}} = \frac{\frac{1}{R_{1x}}}{\sum \frac{1}{R}} \quad (3-3-14)$$

ここで、 I_{1-x} は鉄筋要素 E1 がカソードとなり鉄筋要素 Ex がアノードとなる腐食セルを流れる腐食電流、 $1/R_{1x}$ は鉄筋要素 E1 と鉄筋要素 Ex 間の抵抗の逆数、 $\sum 1/R$ は鉄筋要素 E1 がカソードとなる腐食セルにおける対となる全てのアノード要素との間の抵抗の逆数の和、 I_{CE1} は式(3-3-11)より求められる鉄筋要素 E1 の全カソード電流を示す。

したがって、鉄筋要素 E1 がカソードとなり鉄筋要素 x ($x=1 \sim n$) がアノードとなる腐食セルに流れる電流は、次式に示す通りとなる。

$$I_{1-x} = \frac{1}{\sum \frac{1}{R}} \times I_{cE1} \quad (3-3-15)$$

3-3-1-7 アノード電流の算出方法

表3-3-2に、3-3-1-6により求められた各鉄筋要素間に流れる腐食電流を整理する。

表3-3-3 カソード電流マトリックス

		アノード要素					カソード電流の和
		要素1	要素2	要素3	..	要素n	
カソード要素	要素1	I ₁₋₁	I ₁₋₂	I ₁₋₃	..	I _{1-n}	I _{c1}
	要素2	I ₂₋₁	I ₂₋₂	I ₂₋₃	..	I _{2-n}	I _{c2}
	要素3	I ₃₋₁	I ₃₋₂	I ₃₋₃	..	I _{3-n}	I _{c3}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	要素n	I _{n-1}	I _{n-2}	I _{n-3}	..	I _{n-n}	I _{cn}
アノード電流の和		I _{a1}	I _{a2}	I _{a3}	..	I _{an}	

ただし、I_{x-y}とは、鉄筋要素xがカソードで、鉄筋要素yがアノードの腐食電流を表す。したがって、I_{x-y}においてx≠yならばマクロセル電流を表し、x=yならばミクロセル電流を表す。また、I_{ax}は鉄筋要素xにおける全アノード電流を示し、I_{cx}は鉄筋要素xにおける全カソード電流を示す。

表3-3-3における各鉄筋要素のカソード電流の和(I_{c1}、I_{c2}、I_{c3}、…、I_{cn})は式(3-3-11)により算出する。その結果を基に、I_{x-y}は式(3-3-15)により算出する。最後に、鉄筋要素xにおけるアノード電流I_{ax}は次式により求める。

$$I_{ax} = \sum_{i=1}^n I_{x-i} \quad (3-3-16)$$

また、鉄筋要素xにおけるミクロセル電流およびマクロセル電流は、次式のようになる。

$$I_{micro} = I_{x-x} \quad (3-3-17)$$

$$I_{macro} = \sum_{i=x} I_{i-x} \quad (3-3-18)$$

ここで、 I_{micro} はミクロセル電流、 I_{macro} はマクロセル電流を示す。

3-3-1-8 解析方法の検証

(1) 解析対象としたケース

ここでは、3-2-2で行った実験ケースを対象とし解析を行い、解析方法を検証することとする。

図3-3-6に示すモルタル部材を解析対象とする。部材寸法は、 $\phi 5\text{cm} \times 20\text{cm}$ とし、供試体中央には $\phi 0.9\text{cm}$ の丸鋼が埋設される。欠陥の影響があり、異種部材の打継ぎの影響はない。

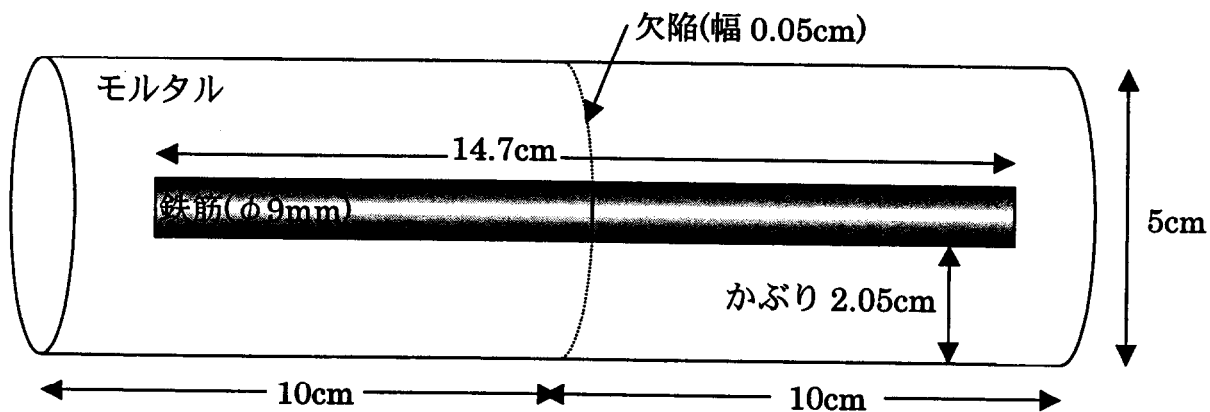


図3-3-6 3-3-1-8の解析に用いた部材概要

(2) モデルへの代入値

1) 分極抵抗

鉄筋の分極抵抗は、塩化物イオンが供給される部分と供給されない部分を区別し、実験値を参考にして代入する。モデルへ代入した分極抵抗値を表3-3-4に示す。なお、3-2-2-1において、水分・酸素の供給条件が乾燥の場合には腐食の進行が認められなかった。このため、水分・酸素の供給条件が乾燥の場合に関しては解析を行わない。

表 3-3-4 モデルへ代入した分極抵抗値

(kΩ・cm²)

		3-2-1	3-2-2	3-2-3	3-2-4	3-2-5	3-2-6	3-2-10	3-2-11	3-2-12
Cl ⁻ の供給条件		欠陥						欠陥とその近傍		
O ₂ ・水分の供給条件		湿潤			乾湿繰返し			湿潤		
.W/C(%)		30	50	70	30	50	70	30	50	70
欠陥からの距離	-7.35~-1.2cm	3291	795	16994	20962	1587	3799	4293	3196	1797
	-1.2~-0.05cm	388	498	718	3794	27	2697	4	9	1498
	-0.05~0.05cm	39	2	3699	37	5	3	4	15	1
	0.05~1.2cm	688	228	2697	295	407	3798	17	14	9598
	1.2~7.35cm	4193	6795	12995	3794	3085	1191	473	2896	1797

(kΩ・cm²)

		3-2-13	3-2-14	3-2-15	3-2-19	3-2-20	3-2-21	3-2-22	3-2-23	3-2-24
Cl ⁻ の供給条件		欠陥とその近傍			全体					
O ₂ ・水分の供給条件		乾湿繰返し			湿潤			乾湿繰返し		
.W/C(%)		30	50	70	30	50	70	30	50	70
欠陥からの距離	-7.35~-1.2cm	493	699	29945	515	557	167	987	1892	1589
	-1.2~-0.05cm	39	9	10	6798	259	5	157	137	3867
	-0.05~0.05cm	2	3	22	178	7	110	187	7	126
	0.05~1.2cm	5	4	447	2198	72	689	87	998	8196
	1.2~7.35cm	664	692	12967	605	65	117	259	1494	121

2) 鉄筋周囲の水膜厚さ

使用した供試体を、図 3-3-7 に示す。水セメント比は 50% とし、欠陥は設けなかった。56 日間の養生後、供試体を割裂した。なお、養生中、塩化物イオンの供給は行わなかった。その後、鉄筋をピンセットによりモルタル内部から取り出した。水分の蒸発を防ぐため、迅速に鉄筋の質量を測定する。その後、鉄筋周囲の全水分を蒸発させるため、鉄筋を 20℃ のデシケータ内にて 72 時間の乾燥を行い、鉄筋の質量を測定した。したがって、乾燥前後の鉄筋質量の差は、鉄筋周囲に均等に付着していた水膜の蒸発に伴う質量変化と考え、式 (3-3-19) により平均水膜厚を算定した。

得られた結果を、表 3-3-5 に示す。これより、酸素および水分の供給条件が湿潤および乾湿繰返しの場合には、鉄筋周囲の水膜厚さは概ね $4 \times 10^{-3} \text{cm}$ であることが認められる。

$$\delta = \frac{(W_b - W_a) / \rho}{d \times 3.14 \times L_s} \quad (3-3-19)$$

ここで、 δ は鉄筋周囲の水膜厚さ(cm)、 w_b は乾燥前の鉄筋質量(g)、 w_a は乾燥後の鉄筋質量(g)、 ρ は水の密度(0.9982g/cm^3)、 d は鉄筋直径(0.9cm)、 L_s は鉄筋長さ(10cm)を示す。

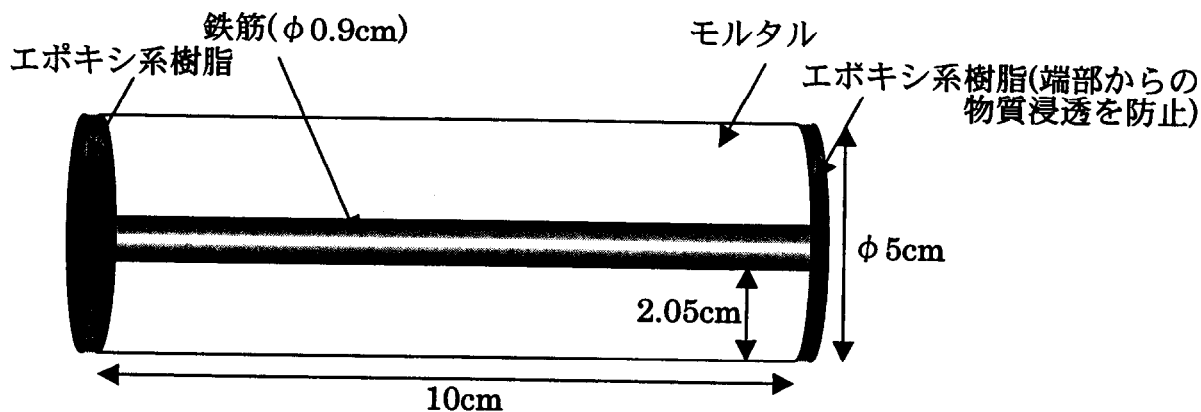


図 3-3-7 鉄筋周囲の水膜厚さ測定供試体概要

表 3-3-5 鉄筋周囲の水膜厚さ

O ₂ ・水分の供給条件	湿潤	乾湿繰返し	乾燥
水膜厚さ(10^{-3} cm)	3.7	4.3	1.5

3) 酸素供給量

式(3-3-5)あるいは式(3-3-8)を用い、鉄筋への酸素供給量を算出する。
式中の各種定数および算出結果を表 3-3-6 に示す。

表 3-3-6 酸素供給量を導く式に必要な各種定数と酸素供給量の算出結果

因子	算出基準	W/C=30%	W/C=50%	W/C=70%
T(温度)	一定	20℃		
Coa(暴露面における酸素濃度)	大気(気体) 1 mol は標準状態において 22.4l。大気の 20% が酸素。したがって、大気中の酸素量は 0.2mol/22.4l。	$8.928 \times 10^{-6} \text{mol/cm}^3$		
L(かぶり)	一定	2.05cm		
Ho(ヘンリー定数)	1atm で水 1cm ³ に溶解する酸素の体積	0.031cm ³ (20℃)		
Do(かぶりコンクリート中における酸素の拡散係数)	実験値 [10 ⁻⁸ cm ² /sec]	1.00	2.00	7.00
Do' (水膜中における酸素の拡散係数)	[10 ⁻⁸ cm ² /sec]	1.00		
w(水膜厚さ)	実験値 [×10 ⁻⁸ cm]	4	4	4
Jo'(非欠陥部コンクリート中鉄筋への酸素供給量)	式(5) [×10 ⁻¹³ mol/cm ² sec]	7.10	7.41	7.42
Jo'(欠陥部鉄筋への酸素供給量)	式(8) [×10 ⁻¹¹ mol/cm ² sec]	2.23	2.23	2.23

4) モルタル抵抗

無欠陥の φ5cm×10cm の円柱供試体を使用した。56 日間の湿潤養生後、FRA (Frequency Response Analyzer)を用いた交流インピーダンス法により、円柱供試体上面と下面間のモルタル抵抗を測定した。なお、養生中、塩化物イオンの供給は行わなかった。このため、3-2-2の実験において塩化物イオンが浸透している部分のモルタルと比較して、ここで測定された抵抗は若干大きいと思われる。モルタル抵抗を表 3-3-7 に示す。

表 3-3-7 モルタル抵抗

W/C(%)	30	50	70
モルタル抵抗(kΩ・cm)	40	20	15

(3) 解析結果と実験結果の比較方法

要素分割の長さが長いほど、物質供給量が欠陥部でのみ多量になる局所化を模

擬することが困難となる。一方、要素分割の長さが短いほど、コンピュータの容量が不足し、計算に要する時間が増加する。したがって、解析的検討では鉄筋要素の単位長さは 0.05cm とした。一方、実験的検討では鉄筋要素の単位長さは欠陥部近傍において 0.5cm、供試体端部においては 6cm とした。ここで、マイクロセル電流密度およびマクロセル電流密度を介し、解析的検討と実験的検討を比較する場合、セルの長さを統一する必要がある。したがって、セル長さを、実験的検討と同様(図 3-2-1 (a))の寸法にする。

14.7cm 長さの鉄筋に対して、単位長さが 0.01cm の鉄筋要素に分割して解析を行った。したがって、解析の結果として、1470 要素におけるマイクロセル電流密度とマクロセル電流密度が得られる。

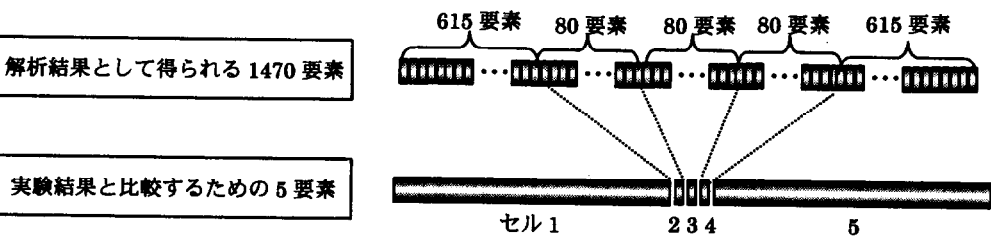


図 3-3-8 鉄筋分割要素の統合方法

表 3-3-8 に 1470 要素における腐食電流マトリックスを示す。これを図 3-3-8 に従い、5 つのセルにおける腐食電流に直す場合、各セルにおけるマイクロセル電流密度とマクロセル電流密度は、表 3-3-9 により表される。

表 3 - 3 - 8 1470 要素の腐食電流マトリックス

 $(\mu \text{ A/cm}^2)$

		アノード要素														
		1	..	615	616	..	695	696	..	775	776	..	855	856	..	1470
カ ソ ー ド 要 素	1	I ₁₋₁	..	I ₁₋₆₁₅	I ₁₋₆₁₆	..	I ₁₋₆₉₅	I ₁₋₆₉₆	..	I ₁₋₇₇₅	I ₁₋₇₇₆	..	I ₁₋₈₅₅	I ₁₋₈₅₆	..	I ₁₋₁₄₇₀
	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:
	615	I ₆₁₅₋₁	..	I ₆₁₅₋₆₁₅	I ₆₁₅₋₆₁₆ 6	..	I ₆₁₅₋₆₉₅	I ₆₁₅₋₆₉₆ 6	..	I ₆₁₅₋₇₇₅ 5	I ₆₁₅₋₇₇₆ 6	..	I ₆₁₅₋₈₅₅	I ₆₁₅₋₈₅₆ 6	..	I ₆₁₅₋₁₄₇₀
	616	I ₆₁₆₋₁	..	I ₆₁₆₋₆₁₅	I ₆₁₆₋₆₁₆ 6	..	I ₆₁₆₋₆₉₅	I ₆₁₆₋₆₉₆ 6	..	I ₆₁₆₋₇₇₅ 5	I ₆₁₆₋₇₇₆ 6	..	I ₆₁₆₋₈₅₅	I ₆₁₆₋₈₅₆ 6	..	I ₆₁₆₋₁₄₇₀
	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:
	695	I ₆₉₅₋₁	..	I ₆₉₅₋₆₁₅	I ₆₉₅₋₆₁₆ 6	..	I ₆₉₅₋₆₉₅	I ₆₉₅₋₆₉₆ 6	..	I ₆₉₅₋₇₇₅ 5	I ₆₉₅₋₇₇₆ 6	..	I ₆₉₅₋₈₅₅	I ₆₉₅₋₈₅₆ 6	..	I ₆₉₅₋₁₄₇₀
	696	I ₆₉₆₋₁	..	I ₆₉₆₋₆₁₅	I ₆₉₆₋₆₁₆ 6	..	I ₆₉₆₋₆₉₅	I ₆₉₆₋₆₉₆ 6	..	I ₆₉₆₋₇₇₅ 5	I ₆₉₆₋₇₇₆ 6	..	I ₆₉₆₋₈₅₅	I ₆₉₆₋₈₅₆ 6	..	I ₆₉₆₋₁₄₇₀
	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:
	775	I ₇₇₅₋₁	..	I ₇₇₅₋₆₁₅	I ₇₇₅₋₆₁₆ 6	..	I ₇₇₅₋₆₉₅	I ₇₇₅₋₆₉₆ 6	..	I ₇₇₅₋₇₇₅ 5	I ₇₇₅₋₇₇₆ 6	..	I ₇₇₅₋₈₅₅	I ₇₇₅₋₈₅₆ 6	..	I ₇₇₅₋₁₄₇₀
	776	I ₇₇₆₋₁	..	I ₇₇₆₋₆₁₅	I ₇₇₆₋₆₁₆ 6	..	I ₇₇₆₋₆₉₅	I ₇₇₆₋₆₉₆ 6	..	I ₇₇₆₋₇₇₅ 5	I ₇₇₆₋₇₇₆ 6	..	I ₇₇₆₋₈₅₅	I ₇₇₆₋₈₅₆ 6	..	I ₇₇₆₋₁₄₇₀
	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:
	855	I ₈₅₅₋₁	..	I ₈₅₅₋₆₁₅	I ₈₅₅₋₆₁₆ 6	..	I ₈₅₅₋₆₉₅	I ₈₅₅₋₆₉₆ 6	..	I ₈₅₅₋₇₇₅ 5	I ₈₅₅₋₇₇₆ 6	..	I ₈₅₅₋₈₅₅	I ₈₅₅₋₈₅₆ 6	..	I ₈₅₅₋₁₄₇₀
	856	I ₈₅₆₋₁	..	I ₈₅₆₋₆₁₅	I ₈₅₆₋₆₁₆ 6	..	I ₈₅₆₋₆₉₅	I ₈₅₆₋₆₉₆ 6	..	I ₈₅₆₋₇₇₅ 5	I ₈₅₆₋₇₇₆ 6	..	I ₈₅₆₋₈₅₅	I ₈₅₆₋₈₅₆ 6	..	I ₈₅₆₋₁₄₇₀
	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:	:	*	:
	1470	I ₁₄₇₀₋₁	..	I ₁₄₇₀₋₆₁₅ 5	I ₁₄₇₀₋₆₁₆ 16	..	I ₁₄₇₀₋₆₉₅ 5	I ₁₄₇₀₋₆₉₆ 96	..	I ₁₄₇₀₋₇₇₅ 75	I ₁₄₇₀₋₇₇₆ 76	..	I ₁₄₇₀₋₈₅₅ 5	I ₁₄₇₀₋₈₅₆ 56	..	I ₁₄₇₀₋₁₄₇₀

表 3 - 3 - 9 5つのセルにおけるマイクロセル電流とマクロセル電流

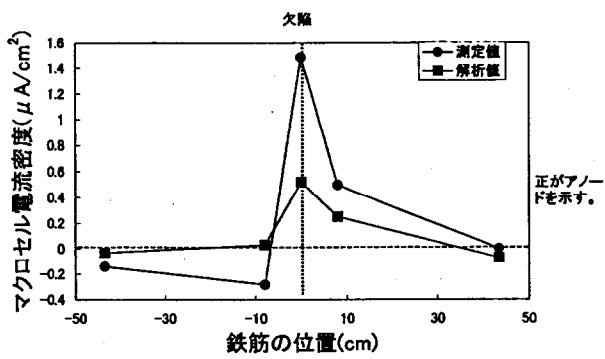
	セル 1	セル 2	セル 3	セル 4	セル 5
マイクロセル電流	$\sum_{x=1}^{615} \left(\sum_{y=1}^{615} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=616}^{695} \left(\sum_{y=616}^{695} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=696}^{775} \left(\sum_{y=696}^{775} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=776}^{855} \left(\sum_{y=776}^{855} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=856}^{1470} \left(\sum_{y=856}^{1470} I_{x-y} \right)$
マクロセル電流	$\sum_{x=616}^{1470} \left(\sum_{y=1}^{615} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=1}^{615} \left(\sum_{y=616}^{695} I_{x-y} \right) + \sum_{x=696}^{1470} \left(\sum_{y=615}^{695} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=1}^{695} \left(\sum_{y=696}^{775} I_{x-y} \right) + \sum_{x=776}^{1470} \left(\sum_{y=696}^{775} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=1}^{775} \left(\sum_{y=776}^{855} I_{x-y} \right) + \sum_{x=856}^{1470} \left(\sum_{y=776}^{855} I_{x-y} \right)$	$\sum_{x=1}^{855} \left(\sum_{y=1}^{855} I_{x-y} \right)$

(4) 解析結果と実験結果の比較

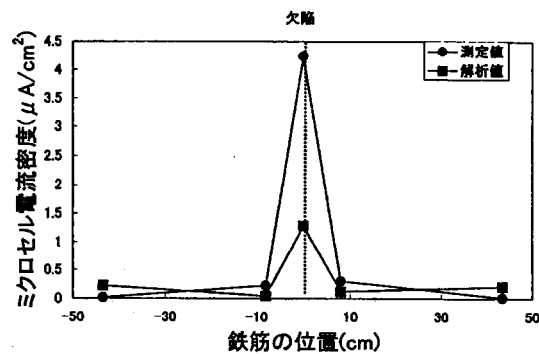
図 3 - 3 - 9 および図 3 - 3 - 10 に、暴露期間 56 日目におけるマクロセル電流密度およびマイクロセル電流密度の分布形状を示す。図 3 - 3 - 9 は、塩化物

イオンは欠陥のみに供給され、外部環境は湿潤、水セメント比は 50%の結果である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥において錆びていることが認められた。また、図 3-3-10 は、塩化物イオンは欠陥およびその近傍に供給され、外部環境は湿潤、水セメント比は 30%の結果である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥とその近傍において錆びていることが認められた。

これらによると、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度ともに、実験値と解析値は定性的に等しいことが認められる。したがって、本解析モデルを用いることにより、欠陥部に生じる塩害による腐食の形態と速度を評価することができると判断した。

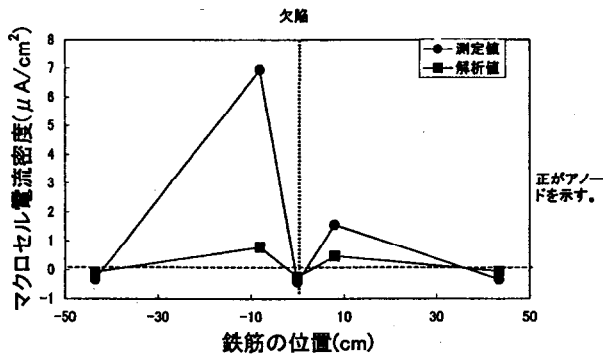


(a) マクロセル電流密度

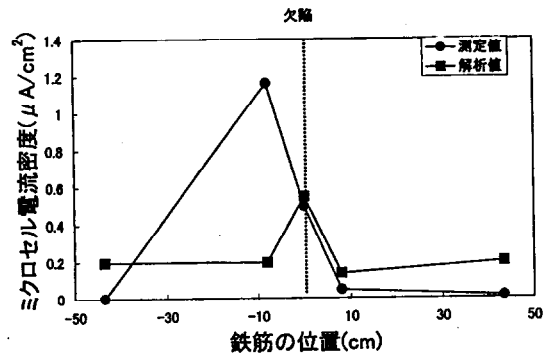


(b) ミクロセル電流密度

図 3-3-9 実験値と解析値の比較 (3-2-2 供試体)



(a) マクロセル電流密度



(b) ミクロセル電流密度

図 3-3-10 実験値と解析値の比較 (3-2-10 供試体)

3-3-2 解析結果

3-3-2-1 塩化物イオンが欠陥から多量に供給されることにより生じる鉄筋腐食

(1) 解析で対象とするケース

水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検証する。3-2-2-1では、①水セメント比が低いとマクロセル卓越型腐食が進行する、一方②水セメント比が高いとミクロセル卓越型腐食が進行することが明らかとなった。また、①の要因は、欠陥箇所とモルタル内部の鉄筋への物質供給量の偏りによると考察された。すなわち、水セメント比が低い場合、欠陥箇所とモルタル内部の鉄筋への物質供給量の偏りが大きく、マクロセル腐食が進行すると考えた。一方、水セメント比が高い場合、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への物質供給量の偏りが減少し、ミクロセル腐食が進行すると考えた。したがって、このことを検証するため、ここでは解析対象とするケースは表3-3-10に示す2通りとする。すなわち、No.3-3-1は水セメント比が低い場合を模擬し、モルタル内部への酸素供給量を少ないケースとする。その結果、No.3-3-1においては、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への物質供給量の偏りが大きい。一方、No.3-3-2は水セメント比が高い場合を模擬し、モルタル内部への酸素供給量を多いケースとする。その結果、No.3-3-2においては、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への物質供給量の偏りが小さい。なお、塩化物イオンの供給は欠陥部のみ、酸素および水分の供給は多いとする。

解析対象としたモルタル部材は図3-3-6と同様である。

表3-3-10 解析ケース

No	欠陥の影響	Cl ⁻ の影響	異種材料の打継ぎ	Cl ⁻ の供給条件	モルタル内部鉄筋への酸素供給量
3-3-1	あり	あり	なし	欠陥部のみ	少
3-3-2					多

(2) モデルへの代入値

鉄筋の分極抵抗、酸素透過量およびモルタル抵抗は、塩化物イオンが供給される欠陥部とそれ以外を区別し、実験値を参考にして代入する。モデルへの代入値を表 3-3-11 に示す。

表 3-3-11 モデルへの代入値

No.		分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)	酸素供給量 ($mol/cm^2 \cdot sec$)	モルタル抵抗 ($k\Omega \cdot cm$)
3-3-1	欠陥部以外	100	1.0×10^{-11}	20
	欠陥部	10	1.0×10^{-10}	—
3-3-2	欠陥部以外	100	2.0×10^{-11}	20
	欠陥部	10	1.0×10^{-10}	—

(2) モルタル内部鉄筋への酸素供給量の相違が

腐食形態と腐食速度に及ぼす影響

表 3-3-12 に、欠陥個所に位置する鉄筋要素におけるマクロセル腐食速度、ミクロセル腐食速度およびそれらを合計した全腐食速度を示す。これによれば、モルタル内部鉄筋への酸素供給量が多い場合、ミクロセル腐食速度は、マクロセル腐食速度と比較して速いことが認められる。一方、モルタル内部鉄筋への酸素供給量が少ない場合、マクロセル腐食速度は、ミクロセル腐食速度と比較して速いことが認められる。また、モルタル内部鉄筋への酸素供給量が少ない場合が、モルタル内部鉄筋への酸素供給量が多い場合と比較して、欠陥部の鉄筋要素における腐食速度は速いことが認められる。

すなわち、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への酸素透過量の偏りが小さい場合、ミクロセル卓越型腐食が進行することが検証された。一方、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への酸素透過量の偏りが大きい場合、マクロセル卓越型腐食が進行することが検証された。さらに、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への酸素透過量の偏りが大きい場合、欠陥部とモルタル内部の鉄筋への酸素透過量の偏りが小さい場合と比較して、欠陥部における局所的な腐食速度は促進されることが検証された。

表 3-3-12 欠陥部における腐食速度

No.	モルタル内部鉄筋 への酸素供給量	マクロセル腐食速度		ミクロセル腐食速度		全腐食速度	
		$\mu A/cm^2$	mm/年	$\mu A/cm^2$	mm/年	$\mu A/cm^2$	mm/年
3-3-1	少	0.015	0.0002	0.004	0.0000	0.019	0.0002
3-3-2	多	0.000	0.0000	0.004	0.0000	0.004	0.0000

3-3-2-2 塩化物イオン含有量が異なる部材間に生じる鉄筋腐食に関する検討

(1) 解析で対象とするケース

解析対象としたケースを、表 3-3-13 に示す。すなわち、塩化物イオンが一部にのみ多く含有される場合を評価する。ここで、欠陥の影響はないものとする。なお、酸素および水分の供給は多いとする。

表 3-3-13 解析ケース

No	欠陥の影響	Cl ⁻ の影響	異種材料の打継ぎ	Cl ⁻ の供給条件
3-3-3	なし	あり	あり	打継目を境とし、少-多

解析は、図 3-3-11 に示す部材を対象とする。部材寸法は、 $\phi 5cm \times 20cm$ とし、供試体中央には $\phi 0.9cm$ の丸鋼が埋設される。No.3-3-3 では、A 側モルタルの塩化物イオン含有量が発錆塩化物イオン量より多く、B 側モルタルの塩化物イオン含有量が発錆塩分量より少ないものとする。

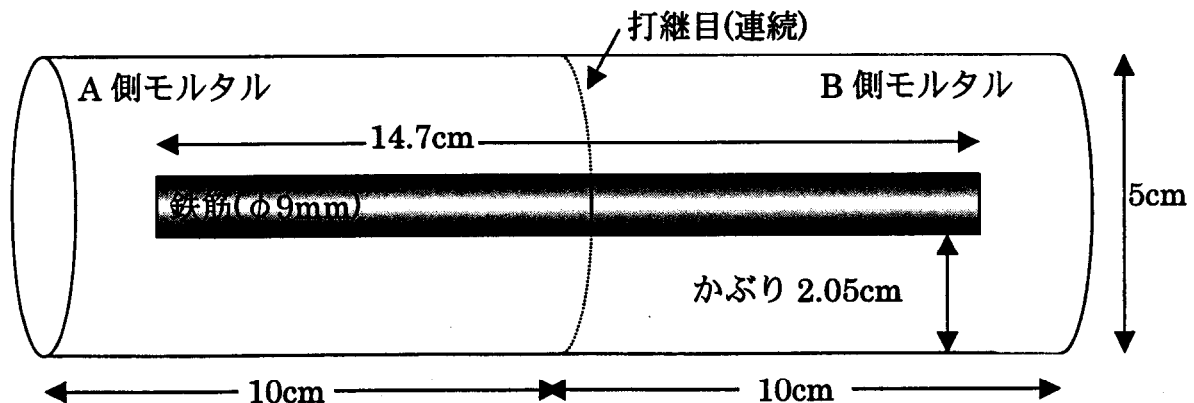


図 3-3-11 解析に用いた部材概要

(2) モデルへの代入値

鉄筋の分極抵抗、酸素透過量およびモルタル抵抗は、塩化物イオンが供給される欠陥多量に含まれる部材とそれ以外を区別し、実験値を参考にして代入する。モルタルへの代入値を表 3-3-14 に示す。

表 3-3-14 モデルへの代入値

No.		Cl ⁻ 含有量	分極抵抗 (kΩ・cm ²)	酸素供給量 (mol/cm ² sec)	モルタル抵抗 (kΩ・cm)
3-3-3	A 側	少	100	1.0×10^{-11}	20
	B 側	多	10	1.0×10^{-11}	20

(3) モルタル内部の塩化物イオン含有量の相違が腐食形態と腐食速度に及ぼす影響

表 3-3-15 に、B 側モルタル打継目近傍の鉄筋におけるマクロセル腐食速度、ミクロセル腐食速度およびそれらを合計した全腐食速度を示す。これによれば、マクロセル腐食速度は、ミクロセル腐食速度と比較して速いことが認められる。

すなわち、一部のモルタルのみにおいて塩化物イオンが多量に含有されている場合、マクロセル卓越型腐食が進行することが検証された。

表 3-3-15 打継目近傍における腐食速度

No.	塩化物イオン 含有量の相違	マクロセル腐食速度		ミクロセル腐食速度		全腐食速度	
		μA/cm ²	mm/年	μA/cm ²	mm/年	μA/cm ²	mm/年
3-3-3	有	0.009	0.0001	0.000	0.0001	0.009	0.0001

3-4 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① モルタルの欠陥部に生じる塩害による鉄筋腐食について、塩化物イオンの供給条件、水分および酸素の供給条件、モルタルの水セメント比に相違を設け、全 27 ケースの腐食形態と腐食速度を、統一した条件のもと網羅的に整理することができた。また、塩化物イオン含有量が異なるコンクリート間に生じる塩害による鉄筋腐食の形態と速度についても、整理することができた。
- ② 欠陥部に生じる塩化物腐食では、水セメント比が 30% の時にマクロセル卓越型の腐食が進行する。一方、水セメント比が高くなるに伴いミクロセル卓越型の腐食が進行する。これに伴い、水セメント比が 30% の時に水セメント比が 70% の時と比較して、局所的な腐食速度が速くなる場合がある。
- ③ 多量の塩化物イオンが全体に含有された部材中では、ミクロセル卓越型の腐食が進行する。一方、一部にのみ多量の塩化物イオンが含有された部材中では、マクロセル卓越型の腐食が進行する。特に後者では、塩化物イオン含有量が多い部材内部の打継目近傍の鉄筋が、マクロセルにおけるアノード部となる。これに伴い、一部にのみ多量の塩化物イオンが含有されている場合が、全体に多量の塩化物イオンが含有されている場合と比較して、腐食は促進される。
- ④ コンクリート中の酸素拡散係数、コンクリート抵抗、鉄筋の分極抵抗、鉄筋周囲の水膜厚さ、外部環境中の酸素濃度および欠陥の存在を input data とし、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を output data とするモデルを構築できた。このモデルを用い、上記②および③のマクロセル形成は、解析的検討によっても検証された。

- 1) 宮川豊章, 武若耕司, 出村克宣, 榊田佳寛, 守分敦郎: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 39-48, 1998.
- 2) コンクリート工学協会コンクリート構造物の補修工法研究委員会: コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書 (Ⅱ), pp.97-100, 1994.

第4章 曲げひび割れ部および打継部に生じる塩害による

マクロセル腐食

- 4-1 はじめに
- 4-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食
- 4-3 断面修復部の打継目近傍に生じるマクロセル腐食
- 4-4 まとめ

4-1 はじめに

4-1-1 背景

第3章においては、モデル欠陥部を対象として、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとして、塩化物腐食の形態と速度を検討した。その結果、欠陥部が存在する場合、低水セメント比においてはマクロセル卓越型腐食が進行し、高水セメント比ではミクロセル卓越型腐食が進行することが明らかとなった。それに伴い、低水セメント比においても、マクロセルが形成した場合には、腐食が促進されることが認められた。すなわち、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件、コンクリートの水セメント比は、腐食形態と腐食速度に影響を及ぼすと考えられる。

第3章は、モデル欠陥部を有する供試体を用いた基礎的検討であった。したがって、実構造物に対しても本研究で得られる結果を適用するためには、引き続いて具体的な欠陥部を有する部材を対象とした応用的検討が必要である。

4-1-2 目的

以上の背景を受け、本章では塩分環境下にあるコンクリートの代表的な欠陥部である曲げひび割れおよび断面修復部の打継目近傍を対象とし、腐食形態および腐食速度を評価する。本章の目的を以下に示す。

- ① 曲げひび割れ部を対象とし、ひび割れの有無およびコンクリートの水セメント比の相違が、腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を評価する。
- ② 断面修復部の打継目近傍を対象とし、塩化物イオン含有量の相違、打継目種類の相違、コンクリートの水セメント比の相違および外部環境の相違が、腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を評価する。

4-1-3 構成

4-2では、曲げひび割れ部に生じる塩害による腐食の形態と速度を評価する。ここで

は、外部環境を管理した屋内試験および鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外試験を行う。特に屋内試験では、単一の主鉄筋に着目したモルタル供試体、単一のスターラップに着目したコンクリート供試体、主鉄筋とスターラップをともに考慮したコンクリート供試体を用い、鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食の評価を行う。4-2-2では、曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。4-2-3では、コンクリートの水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。ここでは、水セメント比を3通り(30, 50, 70%)設定し、比較検討する。

次に4-3では、断面修復部の打継目近傍に生じる塩害によるマクロセル腐食を評価する。4-3-2では、打継目を境とする水セメント比の相違が、断面修復部の腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。ここでは、塩化物イオン含有量およびコンクリートの水セメント比をパラメータとし比較する。4-3-3では、打継目の種類が断面修復部の腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。その際、打継目の種類およびコンクリートの水セメント比をパラメータとし比較する。なお、ここでの打継目の種類とは、主に打継目の物質透過性に影響を及ぼす場合を考慮する。すなわち、打継目の種類の相違は、①打継目を通じての外部からの酸素の透過性、②打継目を通じての新旧部材間のイオン、電子の透過性（電気抵抗）に影響を及ぼす。4-3-4では、外部環境の相違が断面修復部の腐食速度に及ぼす影響を実験的に検討する。ここでは、外部環境の湿度および温度をパラメータとし比較する。なお、外部環境の湿度が定常的な場合と非定常的な場合の両者を評価する。

以上の結果を踏まえ、第3章の結果と合わせ、結論を導く。

4-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食

4-2-1 実験概要

4-2-1-1 使用材料

実験に使用した材料の主な性質を表4-2-1に示す。

表4-2-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質 ^{注)}
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
粗骨材	碎石	比重=2.64、F.M.=6.70、吸水率=0.68%
混和剤	減水剤・AE 剤	リグニンスルホン酸系
	高性能 AE 減水剤	ナフタレン系
鉄筋	丸鋼	降伏強度=354N/mm ² 、Fe 含有率=99.13%
	異形棒鋼	降伏強度=367N/mm ² 、Fe 含有率=98.84%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材(陸砂)の物理的性質は表2-2-2に、粗骨材(碎石)の物理的性質は表3-2-2に、鉄筋(丸鋼)の化学成分は表2-2-3に、鉄筋(異形棒鋼)の化学成分は表3-2-3に示した通りである。

4-2-1-2 配合

モルタルの配合は、水セメント比が30%、50%、70%の3通りとした。いずれの水セメント比においても、S/Cは2.5とした。

一方、コンクリートの配合および圧縮強度を、表4-2-2に示す。水セメント比は、30%、50%および70%とした。フレッシュコンクリートのスランプは8±2cm、空気量は5±1%とした。圧縮強度は、φ10×20cmの円柱供試体を用い、28日間の屋外暴露後、測定を行った。

表4-2-2 コンクリートの配合および圧縮強度

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				(g/m ³)			圧縮強度 (MPa)*
		W	C	S	G	A 剤	B 剤	C 剤	
30	39	165	550	600	963	6875	—	—	73
50	45	165	330	803	989	—	743	13.2	45
70	45	165	236	837	1032	—	637	9.4	28

注) A 剤=高性能 AE 減水剤 B 剤=減水剤 C 剤=AE 剤 ※材齢28日、屋外暴露

4-2-1-3 実験ケース

実験ケースはモルタルおよびコンクリートともに同じで、表4-2-3に示す通りである。

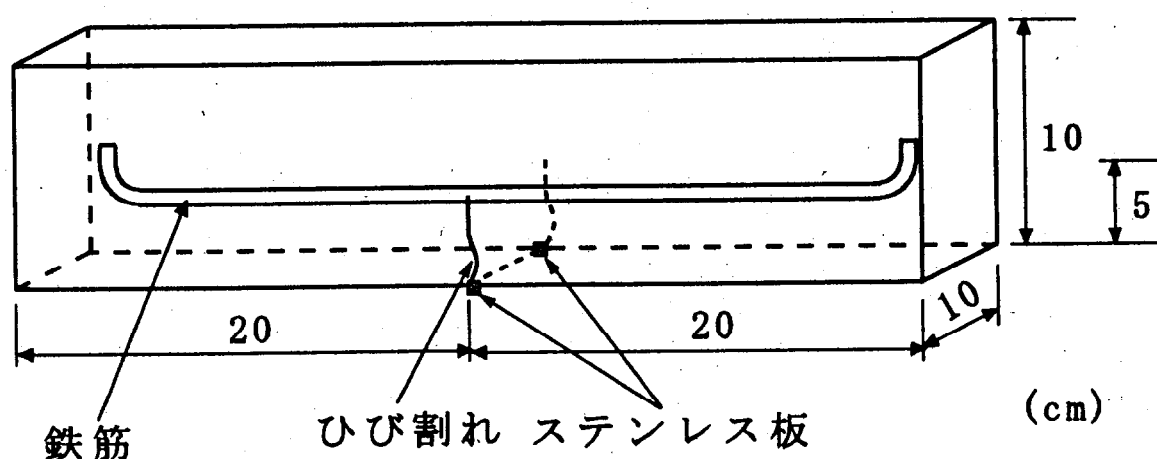
表4-2-3 実験ケース

W/C(%)	30	50	70
ひび割れなし		●	
ひび割れあり	●	●	●

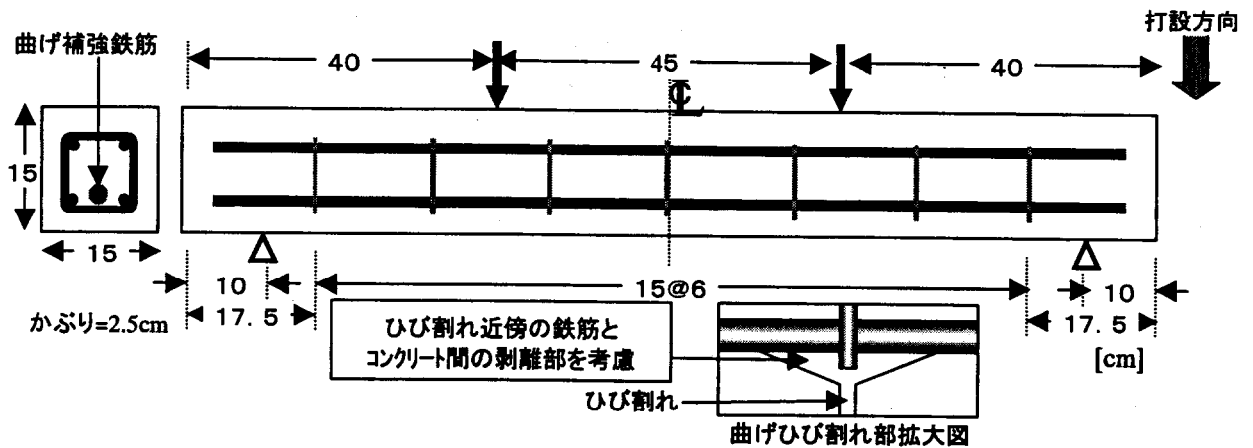
注) ●は実験を行ったことを示す。

4-2-1-4 供試体概要

本節で使用した供試体を、図4-2-1に示す。Type-A 供試体およびType-B 供試体を用いて、単一の主鉄筋に着目した屋内試験を行った。Type-A 供試体を用いて、塩化物イオン浸透分布およびモルタルと鉄筋の剥離面積を測定した。Type-B 供試体を用いて、ひび割れ部における酸素透過量あるいは鉄筋の腐食速度を測定した。Type-C 供試体を用いて、単一のスターラップに着目した屋内試験を行った。Type-D 供試体を用いて、主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験を行った。さらに、実際の梁を模擬した Type-E 供試体を用いて、屋外暴露試験を行った。



(a)Type-A 供試体



(e) Type-E 供試体

図4-2-1 供試体概要図

(1) Type-A 供試体

打設後、相対湿度 80% 室温 20℃にて湿空養生を行った。材齢 28 日目において、供試体下面の中央部に曲げひび割れを設けた。曲げひび割れは、図4-2-2に示すように、予め供試体下面に深さが約 3mm のノッチを設け、3 点曲げ载荷により生じさせた。マイクロスコプを用いひび割れ開口部を観察し、ひび割れ幅が 0.3mm に達した時点で载荷を終了し（鉄筋の引張応力=約 250MPa）、厚さが 0.1mm、幅が 5mm のステンレス板をひび割れ開口端部に挟み、曲げひび割れ幅を 0.3mm に制御した（図4-2-1（a）参照）。なお、このように曲げ载荷によりひび割れを導入することにより、曲げひび割れ近傍に生じる鉄筋とコンクリートの剥離⁴⁻¹⁾を考慮した。また、ひび割れ開口面を除く 5 面を、エポキシ系樹脂により被覆し、塩化物イオンが 1 面のみから浸透するようにした。その後、塩水噴霧（NaCl 3.1wt%、1ml/cm²/min）を伴う 24 時間の湿潤（相対湿度 90%）と 60 時間の乾燥（相対湿度 50%）が繰り返される腐食促進環境下に暴露した。なお、腐食反応を促進させるため、室温は 60℃とした。

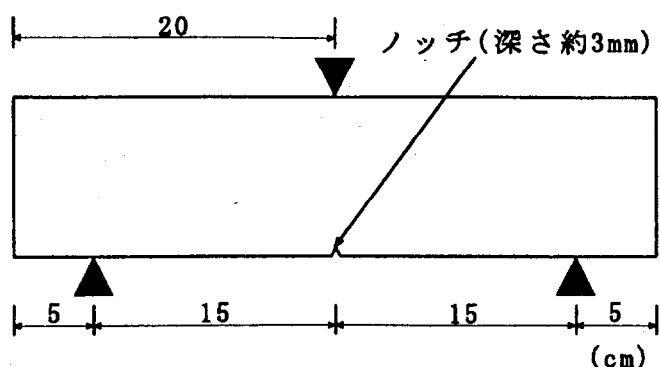


図4-2-2 曲げひび割れ作製方法

(2) Type-B 供試体

供試体内部に埋設した鉄筋を、図4-2-3 (a) に示す。使用した鉄筋は、7 本に分割した。各鉄筋の前処理方法は、2-2と同様である。ただし、リード線が付いた面を同一方向に揃え、エポキシ系樹脂によって鉄筋要素間を接続した。また、前処理が終了した鉄筋は、曲げ载荷時にリード線の付いた面が圧縮側となるよう、リード線の付いた面を上側にして型枠に設置した。さらに、酸素透過性を測定するため、一部の供試体に対しては、型枠下面にチタンメッシュを配置し、打設した。なお、全面にエポキシ系樹脂を被覆した曲げ補強鉄筋を、分割鉄筋と並列に埋設した。打設後の処理は、Type-A 供試体と同様である。

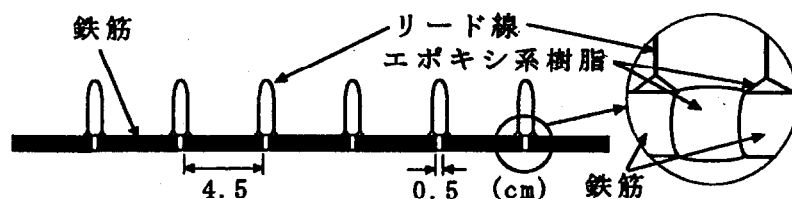


図4-2-3 (a) 内部に埋設した分割鉄筋 (Type-B 供試体)

(3) Type-C 供試体

供試体内部に埋設した鉄筋を、図4-2-3 (b) に示す。使用した鉄筋は、10 本に分割した。鉄筋の前処理は、2-2と同様である。前処理が終了した鋼材を型枠中央に配置した。また、一部の型枠には、底面に厚さが0.3mm、高さが25mm のステンレス板を設置した。24 時間の初期養生後脱型した。同時にステンレス板も除去し、ステンレス板の除

去により生じた隙間をひび割れに相当する欠陥とした。材齢 28 日まで、相対湿度 80% 室温 20℃にて湿空養生を行った。その後、Type-A 供試体と同様の腐食促進環境下に 4 週間暴露した。また、腐食促進暴露中に、外部環境からの塩化物イオンが、供試体の上面と下面(12×23cm)および 2 側面(12×28cm)からのみ浸透するよう、前面と後面(23×28cm)をシリコーン材で塗膜した。

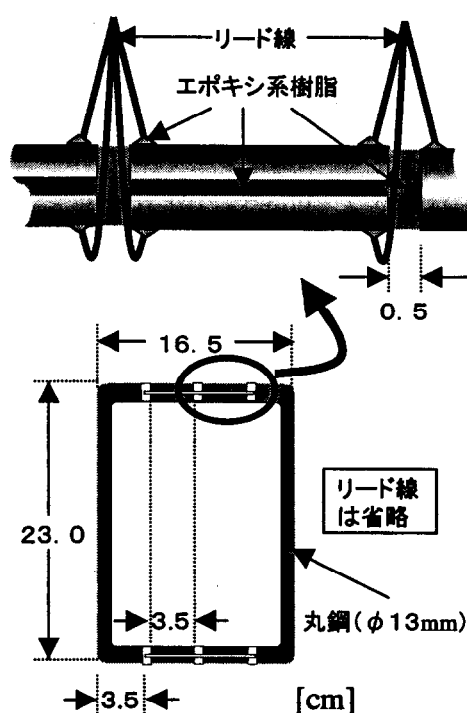


図 4-2-3 (b) 内部に埋設した分割鉄筋 (Type-C 供試体)

(4) Type-D 供試体

供試体内部に埋設した鉄筋を、図 4-2-3 (c) に示す。使用した主鉄筋は 9 本、スターラップは 8 本に分割した。鉄筋の前処理は、2-2 と同様である。主鉄筋とスターラップの接続部においては、両鉄筋間を直接電流が流れることを防止した。これによって、リード線を介し、鉄筋間を流れる電流を測定できるようにした。このため、主鉄筋とスターラップ間にビニルテープを挟み、さらに導電性の低い釣り糸を用い結合した。鉄筋は、曲げ載荷時にリード線の付いた面が圧縮側となる様にした。このため、リード線の付いた面を上側に揃え、型枠に設置した。なお、2 本の引張側主鉄筋中央に、全面をエポキシ系樹脂で被覆した曲げ補強鉄筋を設置した。Type-C 供試体と同様に、打設後 28 日間は湿空養生を行った。その後、一部の供試体に対して、60kN の荷重にて (鉄筋の引張応力=約 240MPa)、3 点曲げ載荷を行い、曲げひび割れを導入した。すなわち、Type-C 供試体の場合と、ひび割れ導入方法は異なる。その結果、Type-D 供試体のひび割れ近傍では、鉄

筋とコンクリート間の剥離(肌離れ)が生じた⁴⁻¹⁾。図4-2-4 (a) に、各供試体底面のひび割れ状況および暴露期間中の平均ひび割れ幅を示す。一般にひび割れを無外力の下で放置した場合、残留ひび割れ幅は、ひび割れ導入時と比較して減少する⁴⁻¹⁾。本節では、ひび割れ開口端部に、厚さが0.1mm、幅が5mm のステンレス板を挟み、曲げひび割れ幅を制御した。その後、Type-B 供試体と同様の腐食促進環境下に4週間暴露した。

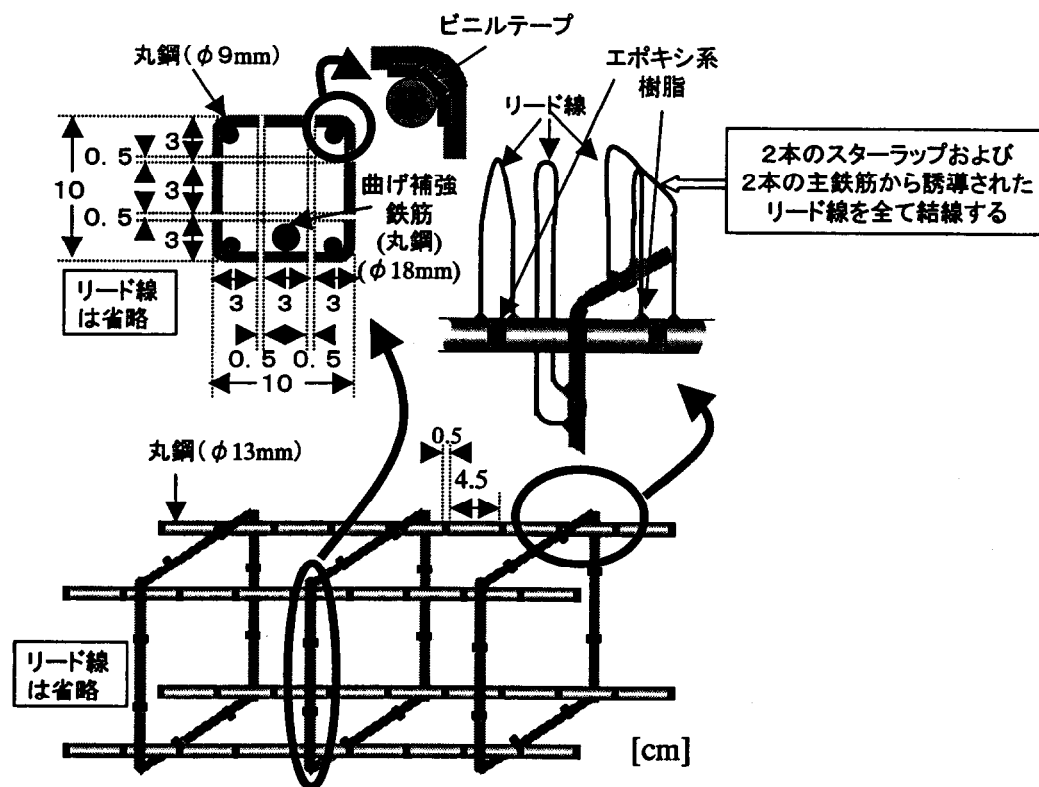


図4-2-3 (c) 内部に埋設した分割鉄筋 (Type-D 供試体)

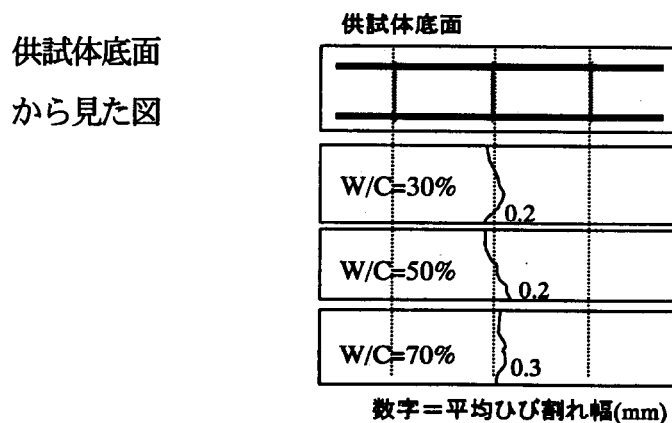


図4-2-4 (a) 底面のひび割れ状況 (Type-D 供試体)

(5) Type-E 供試体

供試体内部に埋設した鉄筋を、図4-2-3 (d) に示す。使用した主鉄筋は 15 本、スターラップは 4 本に分割した。鉄筋の前処理、打設方法および初期養生は、Type-D 供試体と同様である。曲げひび割れは、30kN の荷重にて 4 点曲げ载荷を行い導入した（鉄筋の引張応力=約 300MPa）。図4-2-4 (b) に、各供試体底面のひび割れ状況および暴露期間中の平均ひび割れ幅を示す。ひび割れは、図4-2-5 に示す治具により制御し、東京工業大学構内にて 1997 年 9 月から 13 週間屋外暴露を行った。その間、塩水 (NaCl3.5wt%) を、コンクリート底面に対して、 $2.42\text{kg/m}^2/\text{day}$ 噴霧した。

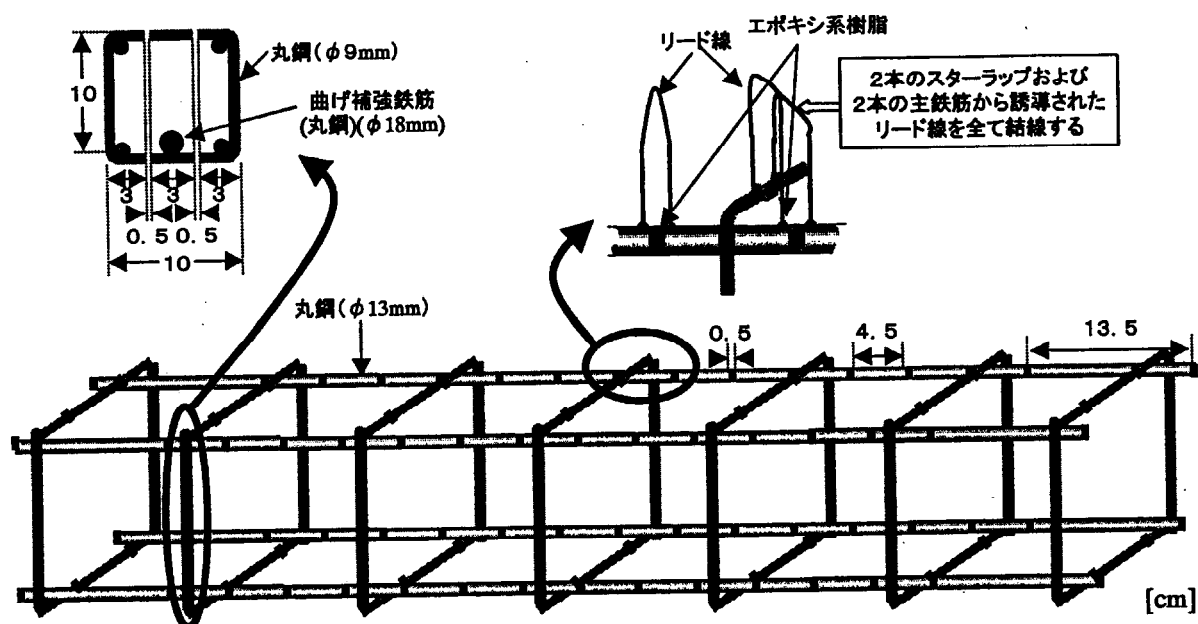


図4-2-3 (d) 内部に埋設した分割鉄筋 (Type-E 供試体)

供試体底面

W/C=30%			2.0			
W/C=50%		1.8	0.02	1.0		
W/C=70%	2.0	0.05		0.7		

数字=平均ひび割れ幅(mm)

図4-2-4 (b) 底面のひび割れ状況 (Type-E 供試体)

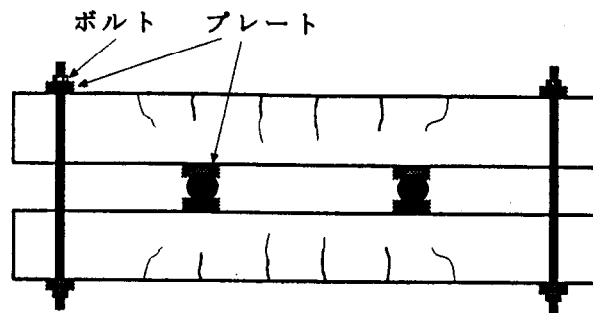


図4-2-5 Type-E 供試体の治具取り付け状況

4-2-1-5 測定項目

マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を測定した。それぞれの測定方法は、2-2と同様である。なお、3-2-2-1に示した通り、腐食速度が $2.9\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (鉄筋径9mmの場合)あるいは $4.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (鉄筋径13mmの場合)以下であれば、30年後における鉄筋耐力は健全時の70%以上を有する。一方、腐食速度が $7.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (鉄筋径9mmの場合)あるいは $10.6\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (鉄筋径13mmの場合)以上であれば、30年後における鉄筋耐力は健全時の35%以下となる⁴⁻²⁾。

(1) 酸素透過量

図4-2-6に酸素透過量の測定方法を示す。対象とする鉄筋要素とステンレス間にポテンショスタットを接続し、鉄筋を陰極、チタンメッシュを陽極として、860mVの電位差を設けた⁴⁻³⁾。これにより、対象とする鉄筋要素において、強制的にカソード反応を進行させ、カソード反応に要する酸素を鉄筋に供給させる。なお、この電位差は、予め同様の供試体のカソード分極曲線を測定し、限界電流密度となる電位であることを確認した。そして、定常状態における電流を測定し、モルタル内部を通過し鉄筋表面でのカソード反応において消費される酸素量を次式から算定した。

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{i_{\text{lim}}}{nF} \quad (4-2-1)$$

ここで、 dQ/dt は単位時間あたりの任意の鉄筋要素への酸素供給量 ($\text{mol}/\text{cm}^2\text{sec}$)、 i_{lim} は限界電流密度 (A/cm^2)、 n はカソード反応において1molの酸素と反応する電子数 ($n=4$)、

Fはファラデー定数 (=96500C/mol) を示す。

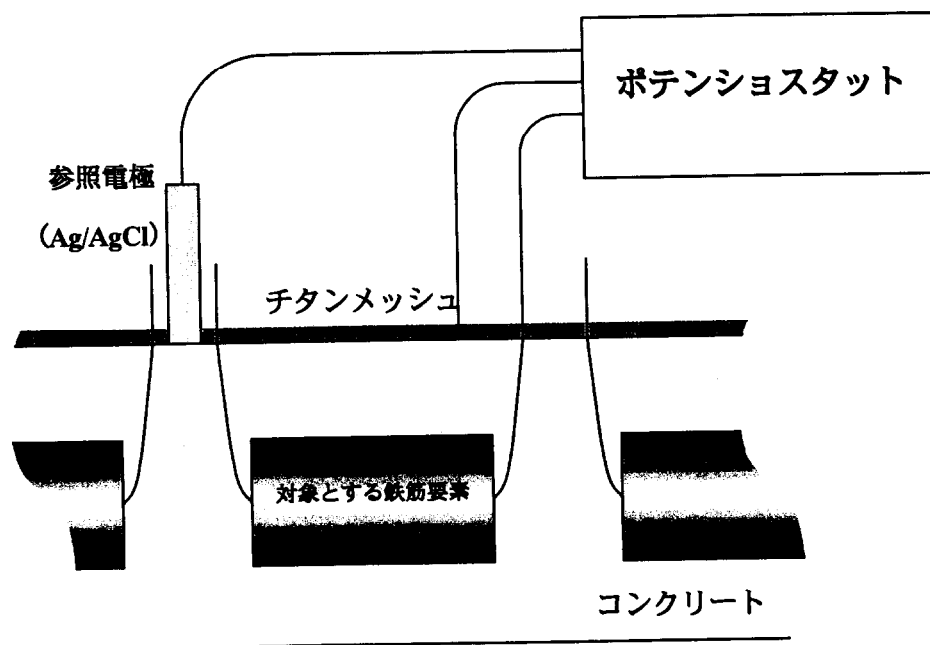


図4-2-6 酸素透過量の測定方法

(2) 腐食減量

供試体から取り出した鉄筋を、10%クエン酸二水素アンモニウム水溶液に24時間浸漬させて錆を溶解した。その後、サンドペーパーおよびワイヤブラシを用い表面の付着物を完全に除去し、鉄筋の質量を測定した。打設前の鉄筋との質量差から、鉄筋全体の腐食減量を算定した。さらに、鉄筋要素の長さで除することにより、鉄筋単位長さ当たりの腐食減量を求めた。

(3) 可溶性塩化物イオン含有量の測定

ダイヤモンドカッターにより、図4-2-7に示す、対象とする部材を切り取った。Part-Aはひび割れ近傍、Part-Bはひび割れの影響を受けないモルタル内部、Part-Cは鉄筋下面近傍である。採取した試料は質量を測定し、105℃の乾燥炉にて24時間乾燥させた。その後、乾燥した試料の質量を測定し、次式より含水率を算定した。

$$C_w = \frac{W_0 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4-2-2)$$

ここで、 C_w は試料の含水率 (wt%)、 W_0 は乾燥前の試料質量 (g)、 W_1 は乾燥後の試料質量 (g) を示す。

乾燥させた試料は、 $105\mu\text{m}$ 以下の大きさに粉碎した。この試料 10g を 100g の蒸留水に浸漬させ、 50°C の恒温槽に 24 時間保存し、その後室温が 20°C の環境中にて、水溶液の温度が 20°C になるまで保存した。この溶液中の塩化物イオン量を、塩化物イオン濃度計を用いて測定し、次式からモルタルの単位質量当たりの可溶性塩化物イオン量を算定した。

$$C_{Cl} = \frac{C_m}{10} \times \frac{100}{100 + C_w} \quad (4-2-3)$$

ここで、 C_{Cl} はモルタルの単位質量当たりの可溶性塩化物イオン量(wt%)、 C_m は測定された可溶性塩化物イオン量(%)を示す。

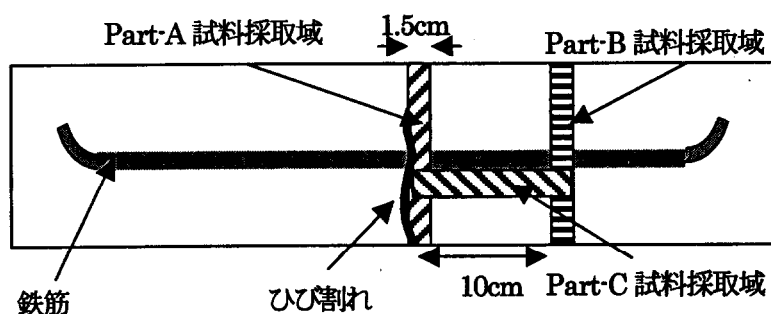


図 4-2-7 可溶性塩化物イオン含有量試験の試料採取域

(4) モルタルと鉄筋の剥離 (肌離れ) 面積の測定

ひび割れ開口部から、1%フェノールフタレインアルコール溶液を注入し、曲げひび割れおよび曲げひび割れ近傍に生じたモルタルと鉄筋の剥離部へ浸透させた。十分に乾燥させた後、供試体を割裂し、鉄筋とモルタルの付着面における変色面積を測定し、剥離面積とした。

4-2-2 曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

4-2-2-1 単一の主鉄筋に着目したモデル供試体を用いた屋内試験

ひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-8に示す。Type-B 供試体を用い、ひび割れ幅は 0.3mm、モルタルの水セメント比は 50%である。また、暴露期間は 13 週の測定結果である。

これによると、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度の何れに關しても、ひび割れがない場合は、腐食の進行は認められなかった。一方、ひび割れが存在すると、マクロセルが形成され、マクロセル電流密度は増加し、またミクロセル電流密度も増加することが認められた。

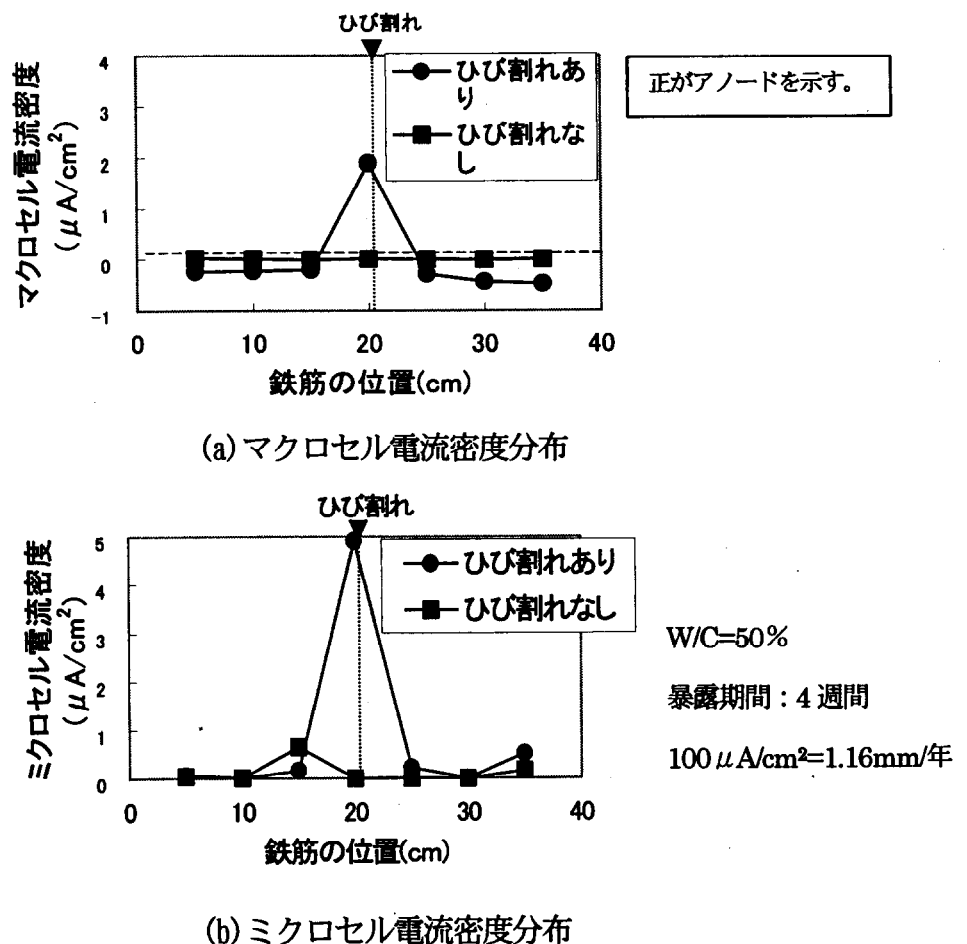


図4-2-8 ひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響（単一の主鉄筋に着目した屋内試験）

単一の主鉄筋に着目した場合、曲げひび割れの有無がマクロセル腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響をまとめる。図4-2-9は、総腐食電流密度（マクロセルのアノード電流密度とミクロセル電流密度の和）が最大となる位置と値を示す。

これによれば、ひび割れがない場合は、腐食の進行は認められなかった。一方、ひび割れが存在すると、マクロセルが形成され、腐食は進行することが認められた。

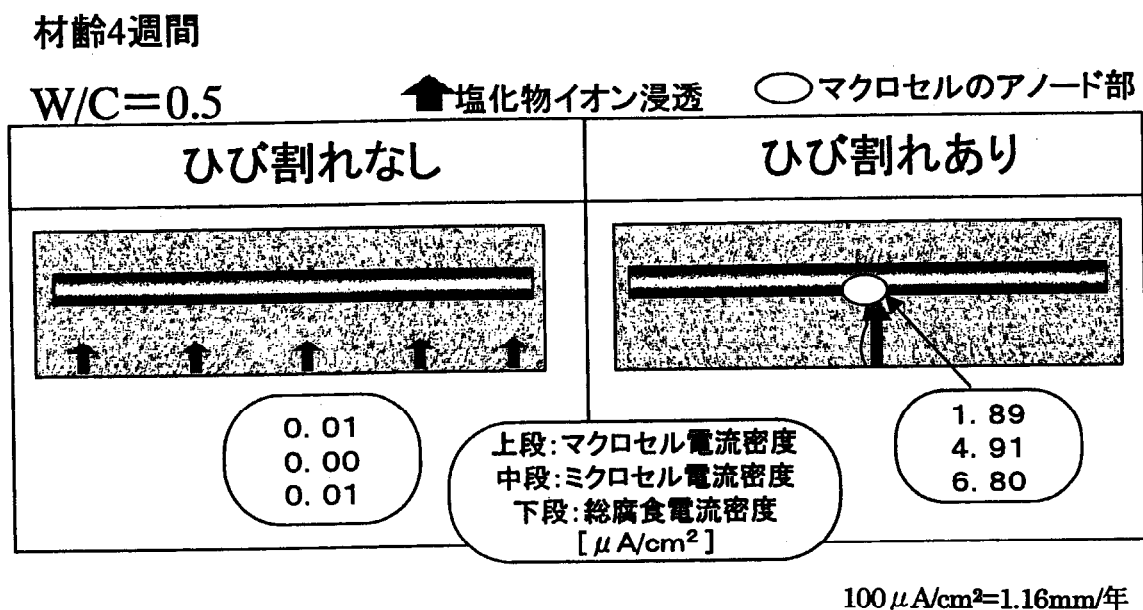


図4-2-9 ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(単一の主鉄筋に着目した屋内試験)

4-2-2-2 単一のスターラップに着目したモデル供試体を用いた屋内試験

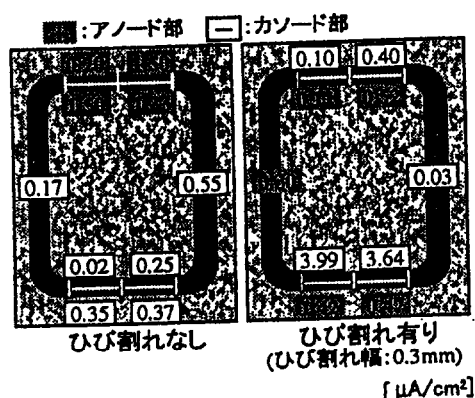
ひび割れの有無が、スターラップのマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-10に示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はミクロセル電流密度分布を表す。Type-C 供試体を用い、水セメント比は50%とした。

はじめに、マクロセル電流密度に関して、実験結果を整理する。ひび割れがない場合は、上部水平鉄筋においてアノード電流が大きくなった。一方、ひび割れが存在する場合は、上部水平鉄筋下面および下部水平鉄筋下面において、アノード電流が大きくなった。次に、ミクロセル電流密度に関して、実験結果を整理する。ひび割れがない場合、何れの鉄筋要素においても、腐食電流は小さくなった。一方、ひび割れが存在する場合、上部水平鉄筋下面および下部水平鉄筋において大きくなった。

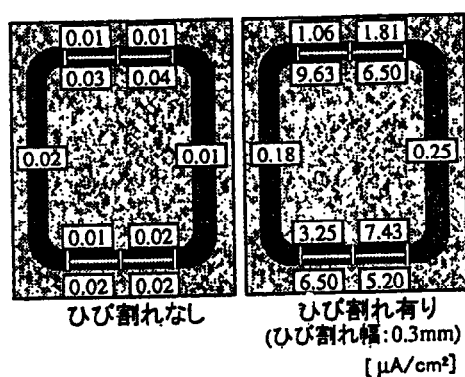
ここで、ひび割れの有無に関わらず、上部水平鉄筋において、腐食が発生する理由を考

察する。Type-C 供試体の打設方向は、図4-2-1 (c) に示す通りである。硬化コンクリートは、打設方向に沿って、上部は下部と比較して、貧配合になる⁴⁻⁴⁾。したがって、上部水平鉄筋は、下部水平鉄筋あるいは鉛直鉄筋と比較して、貧配合のコンクリートと接することとなる。貧配合となったコンクリートと接する鉄筋では、一般に腐食が進行する。したがって、上部水平鉄筋において、マクロセルのアノード部あるいはミクロセル腐食発生箇所となったと考えられる。

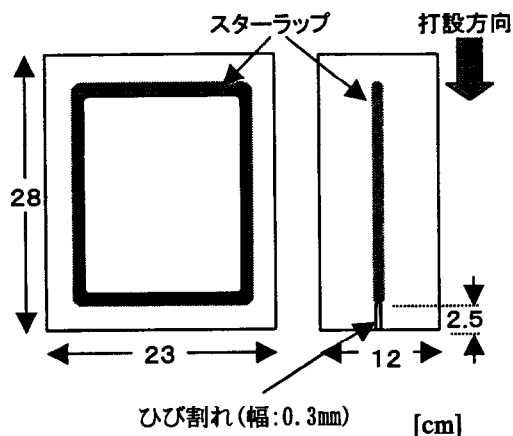
次に、ひび割れが存在する時、下部水平鉄筋において、腐食が発生する理由を考察する。Type-C 供試体において、下部水平鉄筋は、ひび割れと全面的に接する。したがって、下部水平鉄筋には、腐食要因となる塩化物イオン、酸素、水分が、多量に浸透する。その結果、下部水平鉄筋において、マクロセルのアノード部およびミクロセル腐食発生箇所となったと考えられる。



(a) マクロセル電流密度分布



(b) ミクロセル電流密度分布



$$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$$

図4-2-10 ひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一のスターラップに着目した屋内試験)

単一のスターラップに着目した場合、ひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を整理する。図4-2-11は、総腐食電流密度(マクロセルのアノード電流密度とミクロセル電流密度の和)が最大となる位置と値を示す。

これによれば、ひび割れがない場合、スターラップの上部水平鉄筋において腐食が進行することが認められた。一方、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋においても腐食が進行することが認められた。また、ひび割れが存在する場合の腐食速度は、ひび割れがない場合と比べて増進した。

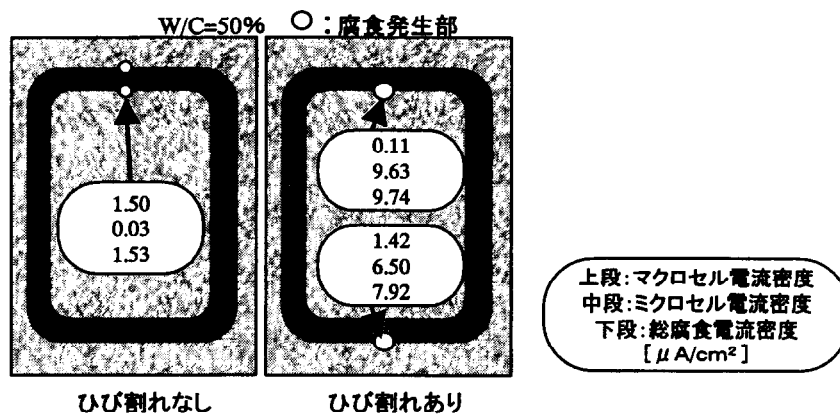


図4-2-11 ひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響（単一のスターラップに着目した屋内試験）

4-2-2-3 主鉄筋とスターラップをともに考慮したモデル供試体を用いた屋内試験

塩分環境下に存在し、ひび割れを有する既存鉄筋コンクリート梁において、腐食の発生は、スターラップと主鉄筋の接続部にて多く認められる。したがって、スターラップと主鉄筋は、腐食の発生において、相互に影響を及ぼしていると考えられた。しかしながら、従来、塩害に対する耐久性を考慮した研究・設計を行うとき、主鉄筋にのみ着目されてきた。単一の主鉄筋を対象とした、ひび割れを有する鉄筋コンクリート内部の塩化物腐食に関しては、複数の報告^{例えば4-1)、4-5)、4-6)、4-7)}がある。しかしながら、スターラップに関する腐食形成機構に関する研究は、未だなされていない。また、主鉄筋およびスターラップを共に考慮した、鉄筋コンクリート梁内部の腐食形成機構ならびに腐食速度に関する研究は、皆無である。したがって、曲げひび割れ部の腐食において、スターラップの影響を早急に解明する必要がある。以上の背景を受け、本研究では主鉄筋は基よりスターラップ

した。

ひび割れの有無が、主鉄筋とスターラップのマクロセル電流密度およびマイクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-12に示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はマイクロセル電流密度分布を表す。Type-D 供試体を用い、水セメント比は50%とした。

はじめに、ひび割れがない場合について、実験結果を整理する。マクロセルのアノード電流は、スターラップの上部水平鉄筋において、大きくなった。また、マイクロセル電流も、スターラップの上部水平鉄筋において、大きくなった。次に、ひび割れが存在する場合について、実験結果を整理する。マクロセルのアノード電流は、スターラップの上部鉄筋のみならず、ひび割れと交差するスターラップの下部水平鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋においても、大きくなった。また、マイクロセル電流は、スターラップの上部鉄筋およびひび割れと交差するスターラップの下部水平鉄筋において、大きくなった。

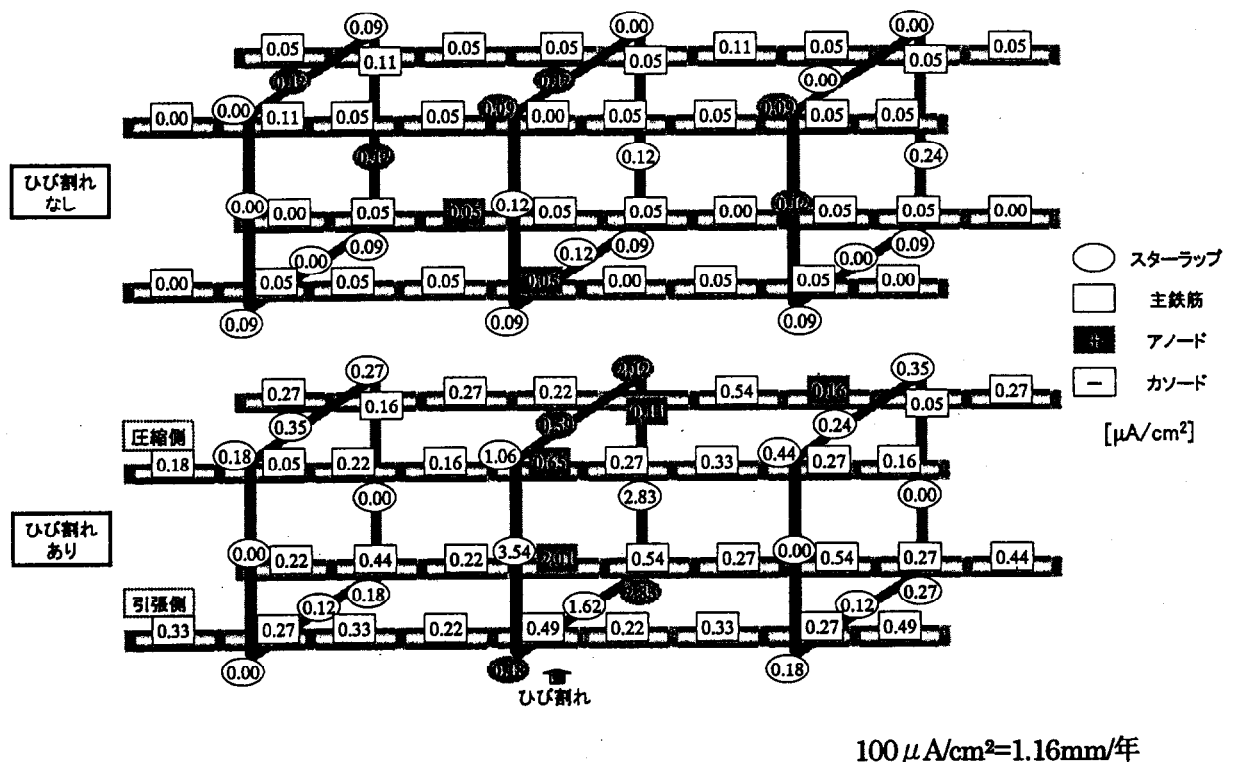


図4-2-12(a) ひび割れの有無がマクロセル電流密度分布に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

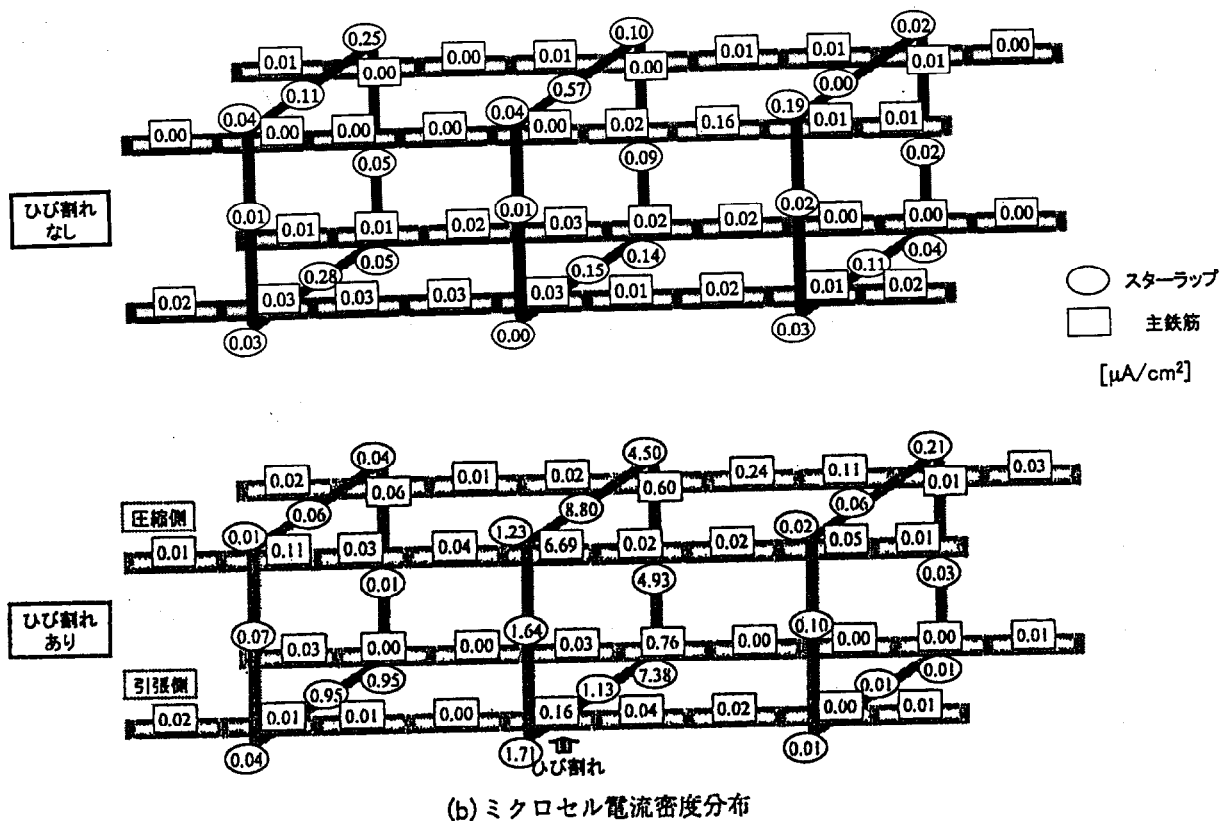


図4-2-12(b) ひび割れの有無がミクロセル電流密度分布に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

主鉄筋は基よりスターラップも考慮した場合、ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響を整理する。図4-2-13は、総腐食電流密度(マクロセルのアノード電流密度とミクロセル電流密度の和)が最大となる位置と値を示す。

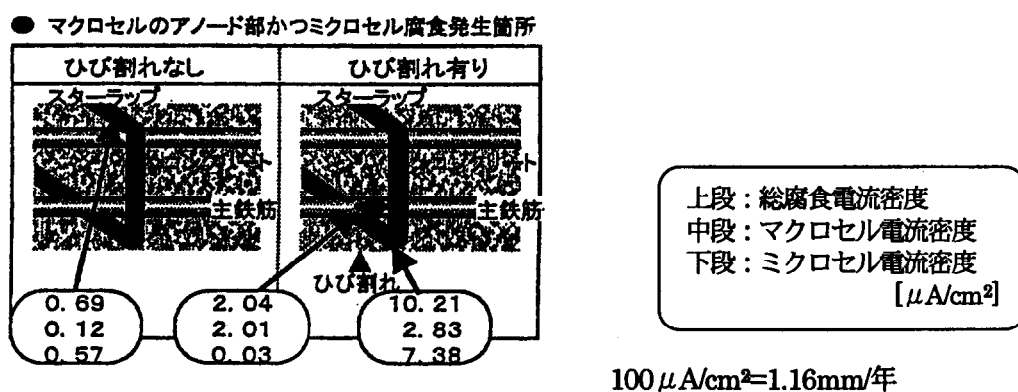


図4-2-13 ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に
及ぼす影響 (主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

これによれば、ひび割れがない場合は、スターラップの上部水平鉄筋において腐食が進行することが認められた。この時、マイクロセル電流が、マクロセル電流と比較して大きかった。一方、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋および引張側主鉄筋においても、腐食が進行した。特に、主鉄筋では、マクロセル電流が、マイクロセル電流と比較して大きくなる傾向が見られた。また、ひび割れが存在する場合は、ひび割れがない場合と比較して、腐食速度は増進した。

4-2-2-4 屋内試験の整理

4-2-2-1においては、単一の主鉄筋に着目したモデル供試体による検討を行った。4-2-2-2においては、単一のスターラップに着目したモデル供試体による検討を行った。4-2-2-3においては、主鉄筋とスターラップをともに考慮したモデル供試体による検討を行った。ここでは、それらの結果を踏まえて、曲げひび割れの有無が腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を整理する。

はじめに、ひび割れがない場合について整理する。単一の主鉄筋に着目したモデル供試体では、腐食は発生しなかった。また、単一のスターラップに着目した供試体では、上部水平鉄筋において、腐食速度は相対的に大きくなった。ただし、その絶対速度は遅かった。さらに、主鉄筋とスターラップをともに考慮したモデル供試体では、スターラップの上部水平鉄筋において、腐食速度は相対的に大きくなった。ただし、その絶対速度は、 $0.69 \mu\text{A}/\text{cm}^2 (8.0 \times 10^{-3} \text{mm}/\text{年})$ と遅かった。

次に、ひび割れが存在する場合について整理する。単一の主鉄筋に着目した供試体では、ひび割れ箇所が腐食した。単一のスターラップに着目した供試体では、ひび割れと接する下部水平鉄筋が腐食した。また、主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体では、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋および引張側主鉄筋が腐食した。すなわち、全ての試験を考慮すると、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋および引張側主鉄筋が腐食した。例えば、水セメント比が50%の場合、スターラップの下部水平鉄筋における腐食速度は、 $10.21 \mu\text{A}/\text{cm}^2 (0.12 \text{mm}/\text{年})$ であった。また、ひび割れと交差する主鉄筋において、マクロセル電流はマイクロセル電流と比較して大きかった。例えば、水セメント比が50%の場合、マクロセル電流はマイクロセル電流の約70倍となった。また、主鉄筋とスターラップをともに考慮した場合の最大マクロセル腐食速度は、主鉄筋のみ、スターラップのみを考慮した場合の最大マクロセル腐食速度の1.1倍、2.0倍となった。

主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体におけるマクロセル腐食形成機構は、主鉄筋およびスターラップをそれぞれ単一に有する供試体の実験結果より、説明することができた。

4-2-2-5 鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外試験

ひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-14に示す。Type-E 供試体を用い、水セメント比は屋内試験と同様に50%とした。

腐食形成機構について、実験結果を整理する。ひび割れがない場合、マクロセルのアノード電流密度は、上部スターラップにおいて大きくなった。一方、ミクロセル電流密度も、上部スターラップにおいて最大となった。ひび割れがある場合、マクロセルのアノード電流密度は、ひび割れ近傍のスターラップの下部鉄筋および引張側主鉄筋において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度も同様に、ひび割れ近傍のスターラップの下部鉄筋および引張側主鉄筋において大きくなった。さらに、腐食速度について、ひび割れがある場合は、ひび割れがない場合と比較して約180倍速かった。

以上のことから、ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響は、屋外試験と屋内試験で、同様な傾向を示すことが確認できた。

4-2-2-6 主鉄筋とスターラップの電氣的接続がマクロセル腐食に及ぼす影響

以上の検討を踏まえると、曲げひび割れ近傍では主鉄筋とスターラップは相互にマクロセル腐食形成機構および腐食速度に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、ここでは主鉄筋とスターラップを電氣的に接続しない場合におけるマクロセル腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響を検討する。そのため、主鉄筋とスターラップを電氣的に接続しないType-E 供試体も作製した。作製方法および養生方法は4-2-1-4(5)と同様である。ただし、スターラップにはんだ付けされたリード線と主鉄筋にはんだ付けされたリード線は、接続していない。

図4-2-15に、スターラップと主鉄筋の電氣的な接続・非接続が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を示す。長方形の中の数値が主鉄筋要素における電流密度を、楕円内の数値がスターラップの要素における電流密度を表す。

これによれば、マクロセル電流密度について、まず主鉄筋に関しては、非接続の場合、ひび割れ幅が0.02mm以外のところでは、ひび割れと交差する部分が必ずアノードになっ

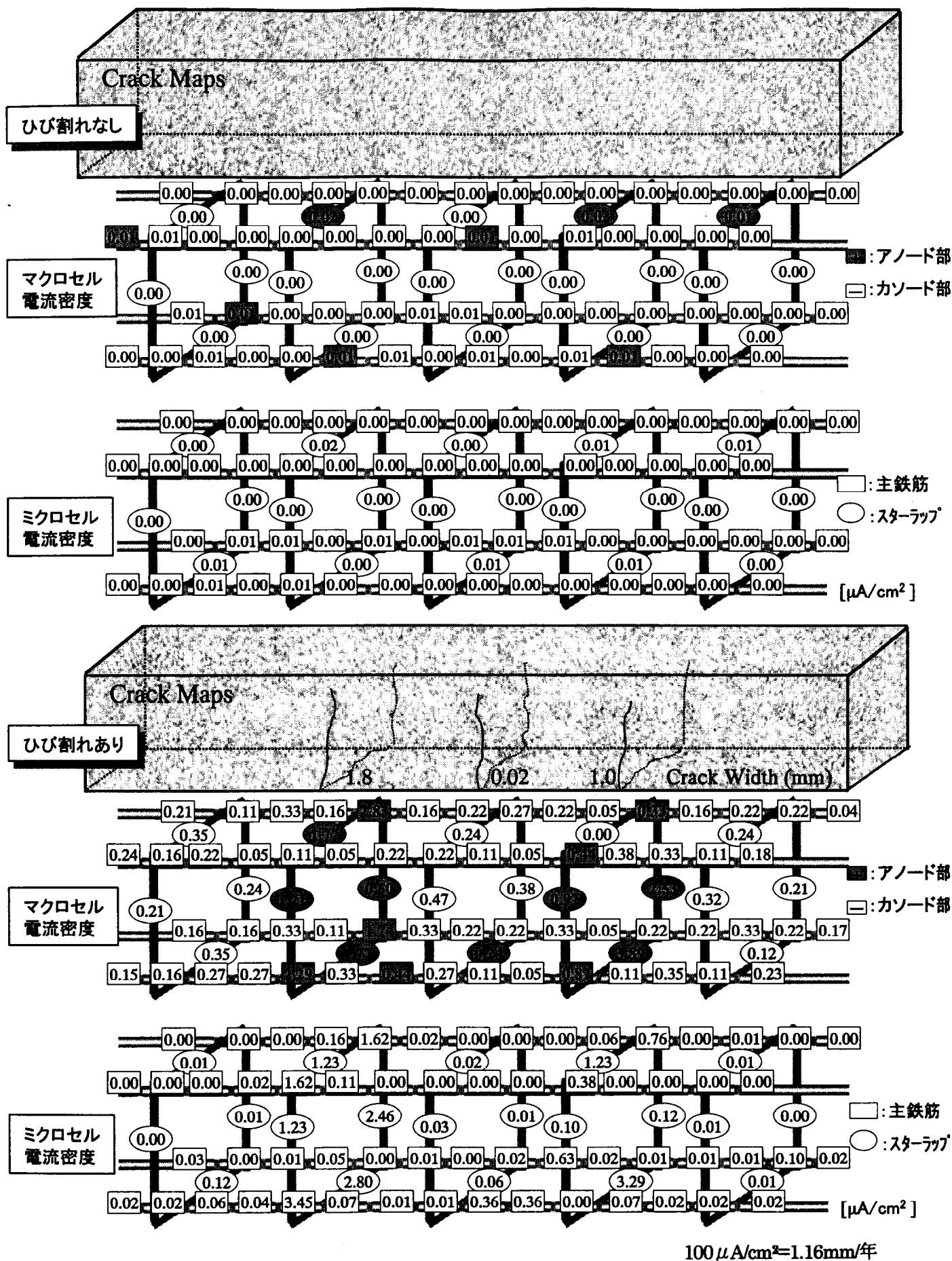
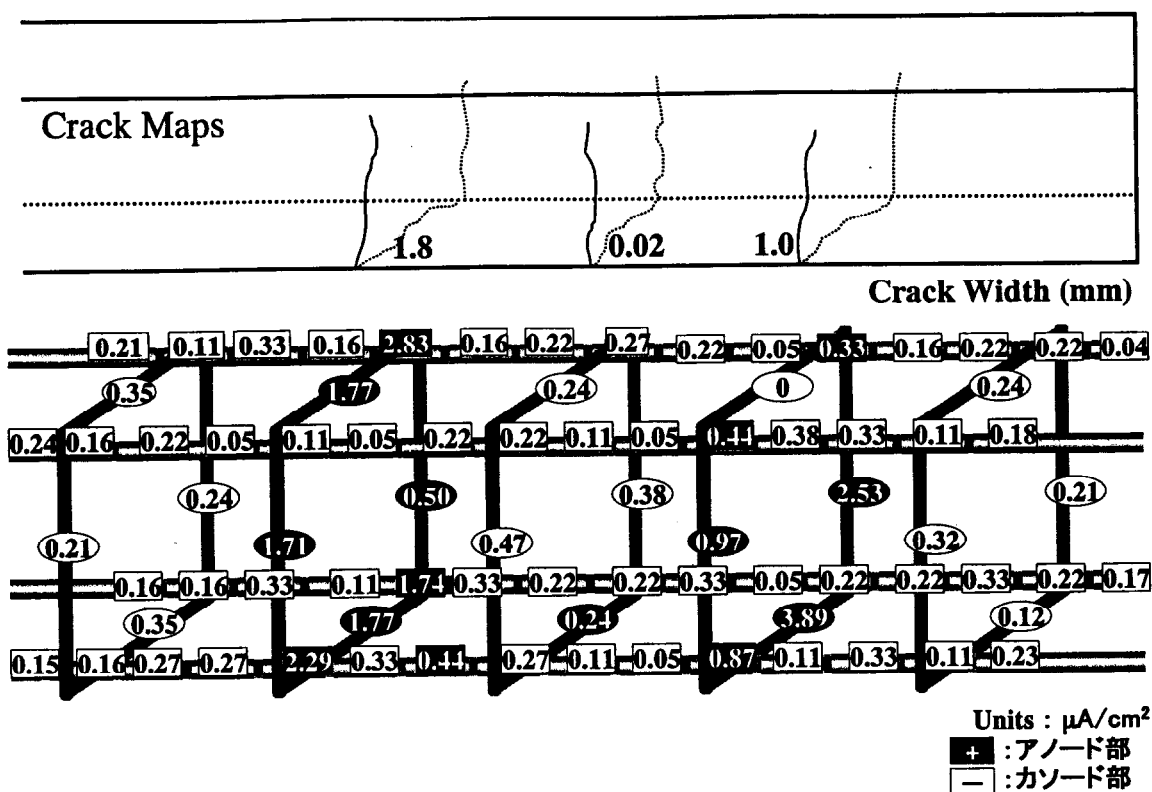
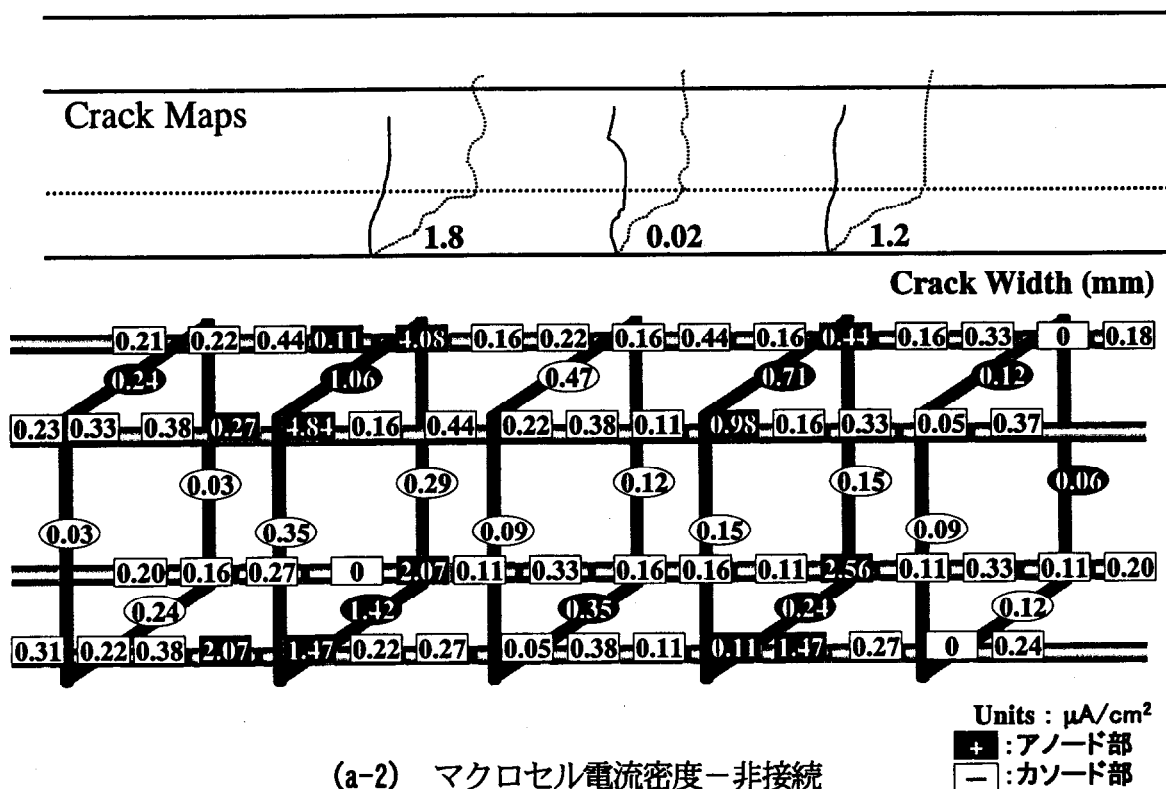


図 4-2-14 ひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響（鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外試験）



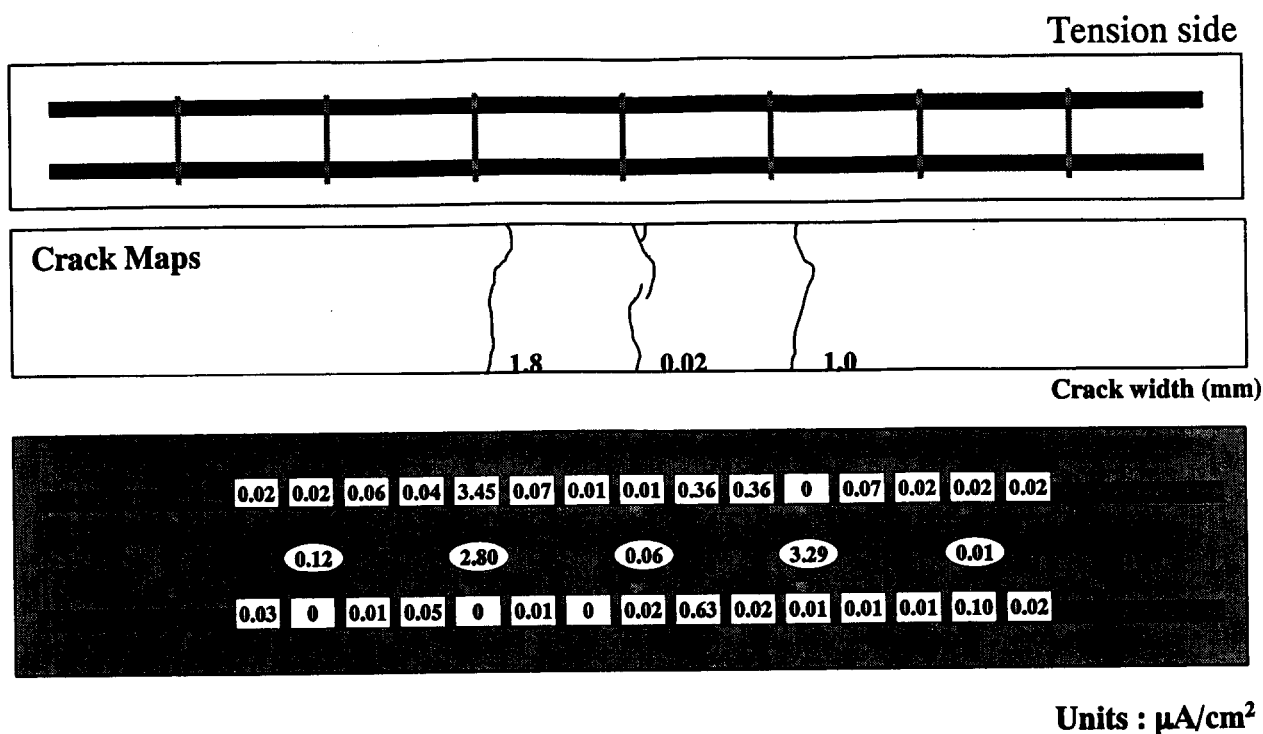
(a-1) マクロセル電流密度—接続



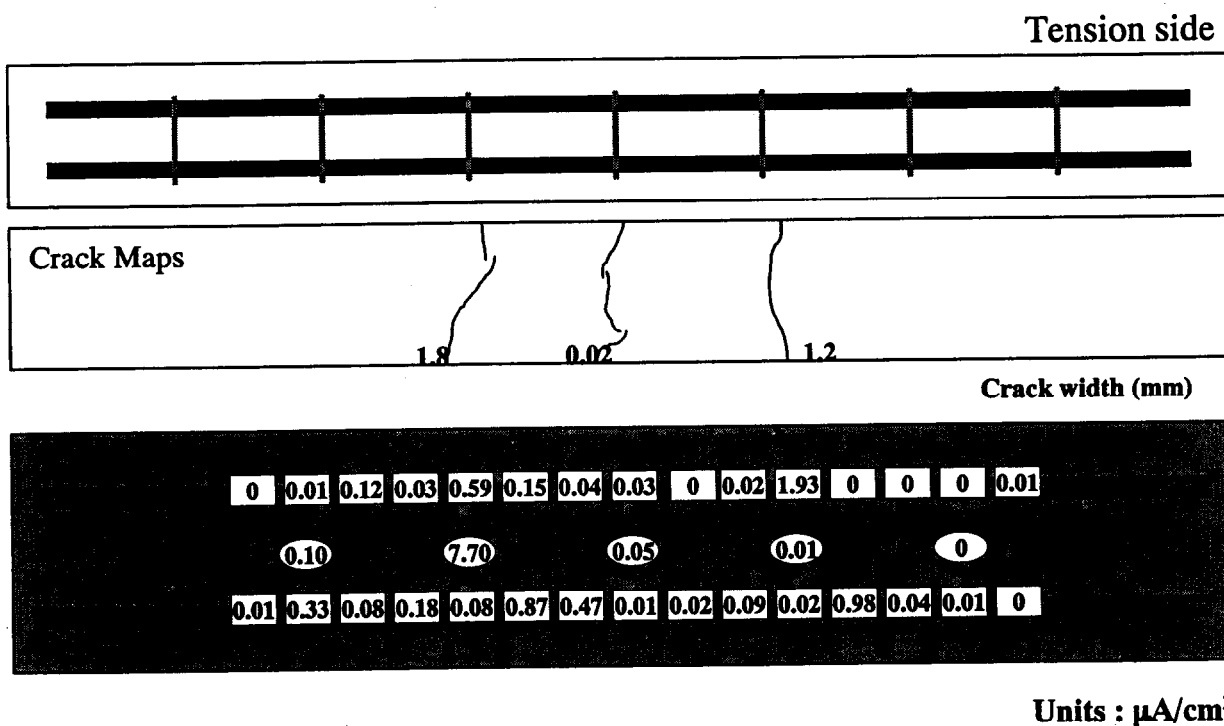
(a-2) マクロセル電流密度—非接続

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$

図4-2-15 主鉄筋とスターラップの電氣的接続がマクロセル電流密度に及ぼす影響



(b-1) ミクロセル電流密度—接続



(b-2) ミクロセル電流密度—非接続

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \approx 1.16 \text{mm}/\text{年}$

図4-2-15 主鉄筋とスターラップの電氣的接続がミクロセル電流密度に及ぼす影響

た。一方非接続の場合は、ひび割れと交差する部分がカソードになる場合もあった。スターラップについては、ひび割れ幅が0.02mmの箇所においては、接続・非接続に関わらず、

スターラップ下部がアノード、他の部分がカソードとなるマクロセルが形成された。ひび割れ幅が比較的大きい箇所では、接続の場合はスターラップ全体がアノード、主鉄筋がカソードになった。一方、非接続の場合はスターラップの上部と下部がアノード、垂直部材がカソードとなるマクロセルが形成された。また、接続の場合、非接続に比べ、マクロセルアノード電流密度が約 2.7 倍大きくとなることが確認された。

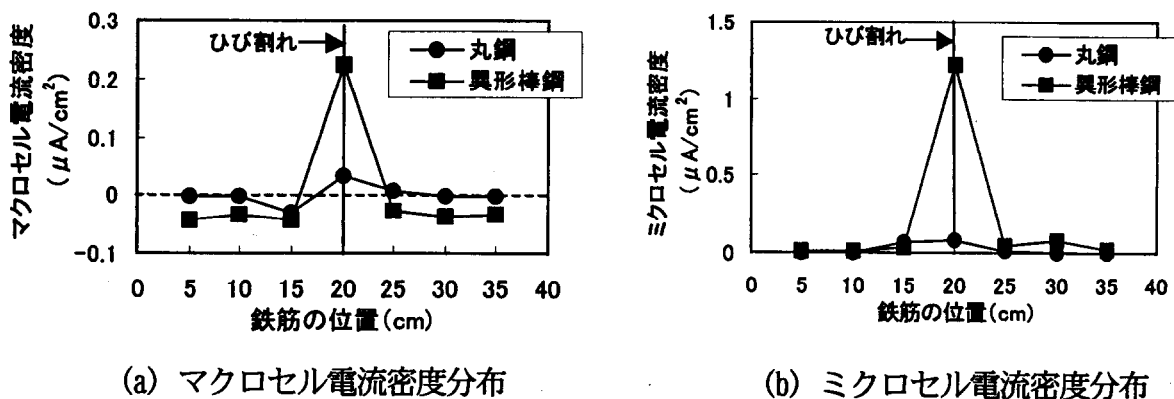
4-2-2-7 鉄筋形状の相違が及ぼす影響

以上の検討は丸鋼を用いて行った。しかしながら、日本において鉄筋コンクリート構造物に使用される鋼材の多くは異形棒鋼である。このため、異形棒鋼を用いた場合における腐食形成機構および腐食速度が、丸鋼を用いた場合と同様か否かを整理する必要がある。

(1) 単一の主鉄筋を有するモデル供試体を用いた屋内試験

鉄筋形状の相違が、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度に及ぼす影響を図 4-2-16 に示す。Type-B 供試体を用いた。コンクリートの水セメント比は 50% である。

これによれば、丸鋼および異形棒鋼を用いた何れの場合においても、曲げひび割れ箇所において、マクロセル電流密度のアノード電流が確認できた。ミクロセル電流密度も、ひび割れ箇所において大きな値を示している。したがって、鉄筋形状の相違は、腐食位置に影響を及ぼさないことが明らかとなった。ただし、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度ともに、異形鉄筋を用いた場合が丸鋼を用いた場合と比較して約 7 倍および約 150 倍大きくなった。



100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16\text{mm}/\text{年}$

図 4-2-16 鉄筋形状の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(主鉄筋に着目した屋内試験)

(2) 主鉄筋とスターラップをともに有するモデル供試体を用いた屋内試験

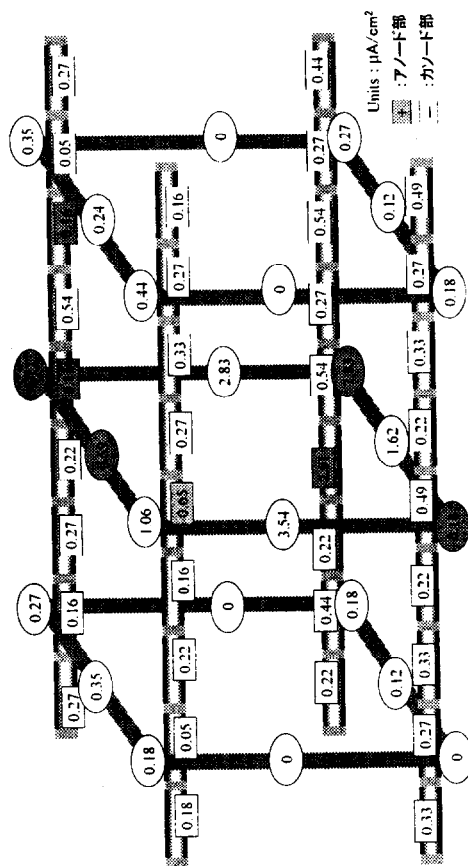
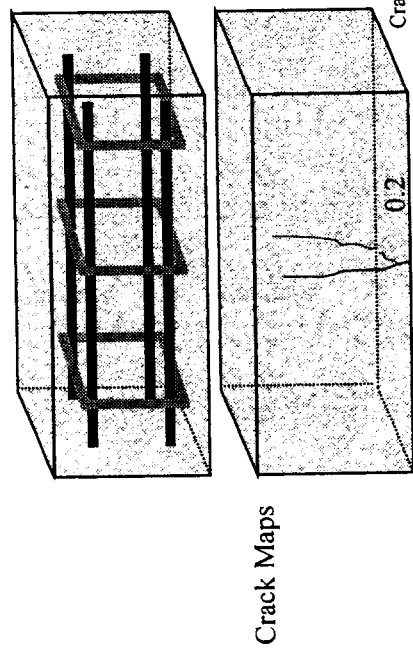
鉄筋形状の相違が、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-17に示す。Type-D 供試体を用いた。コンクリートの水セメント比は50%である。

これによれば、丸鋼および異形棒鋼を用いた何れの場合においても、曲げひび割れ箇所において、マクロセル電流密度のアノード電流が確認できた。ミクロセル電流密度も、ひび割れ箇所において大きな値を示している。したがって、鉄筋形状の相違は、腐食形成機構に影響を及ぼさないことが明らかとなった。ただし、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度ともに、異形鉄筋を用いた場合が丸鋼を用いた場合と比較して約2倍および約11倍大きくなった。

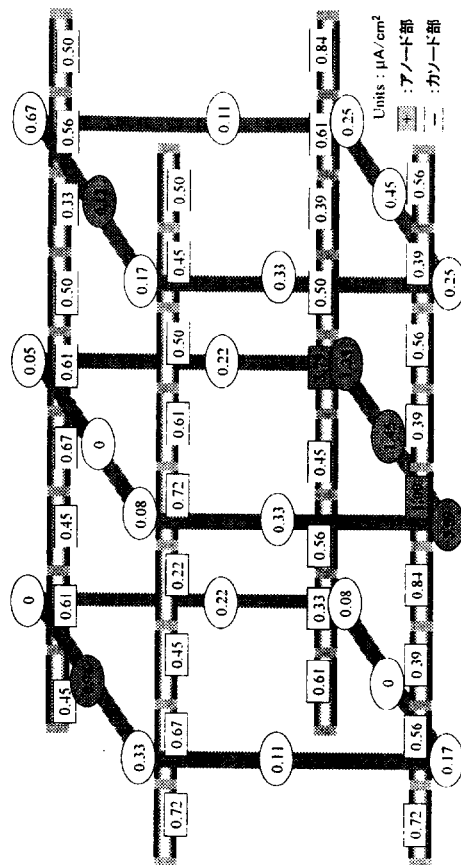
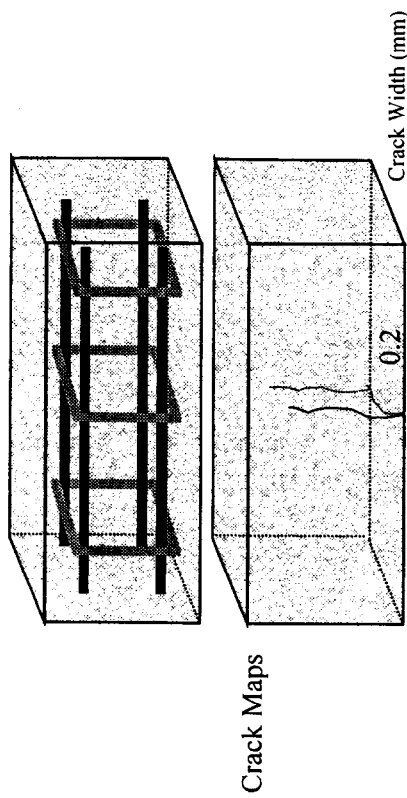
(3) 主鉄筋とスターラップをともに有する鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外暴露試験

鉄筋形状の相違が、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-18に示す。Type-E 供試体を用いた。コンクリートの水セメント比は50%である。

これによれば、丸鋼および異形棒鋼を用いた何れの場合においても、曲げひび割れ箇所において、マクロセル電流密度のアノード電流が確認できた。ミクロセル電流密度も、ひび割れ箇所において大きな値を示している。したがって、鉄筋形状の相違は、腐食形成機構に影響を及ぼさないことが明らかとなった。ただし、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度ともに、異形鉄筋を用いた場合が丸鋼を用いた場合と比較して小さくなった。これは、異形棒鋼を用いた場合、丸鋼を用いた場合と比較して、ひび割れは分散して生じた。このため、ひび割れ幅が減少し、腐食電流密度は抑制されたと考えられる。なお、単一の主鉄筋を用いた供試体および主鉄筋とスターラップをともに有するモデル供試体では、丸鋼および異形棒鋼を用いた場合のひび割れ本数およびひび割れ幅は同程度であった。



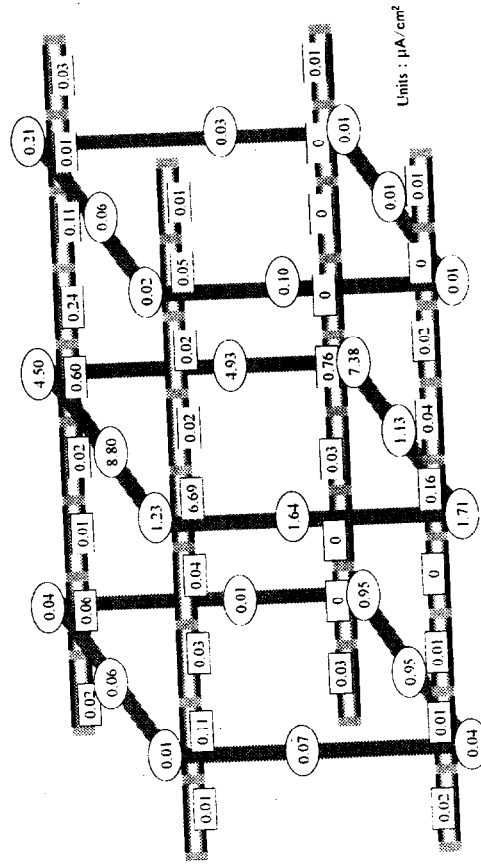
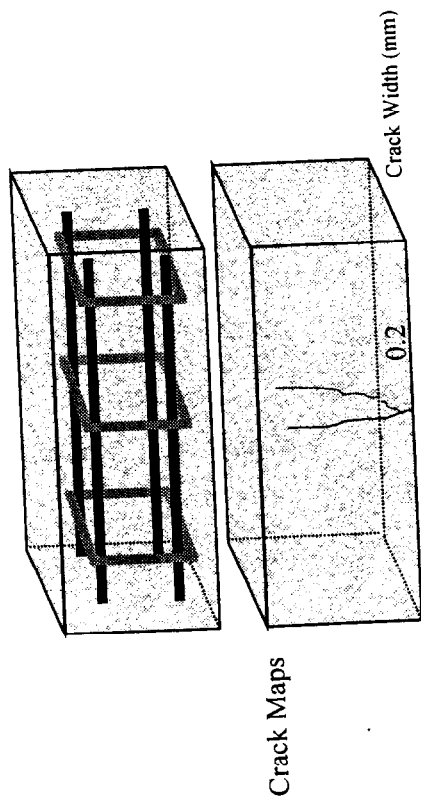
(a-1) マクロセル電流密度－丸鋼



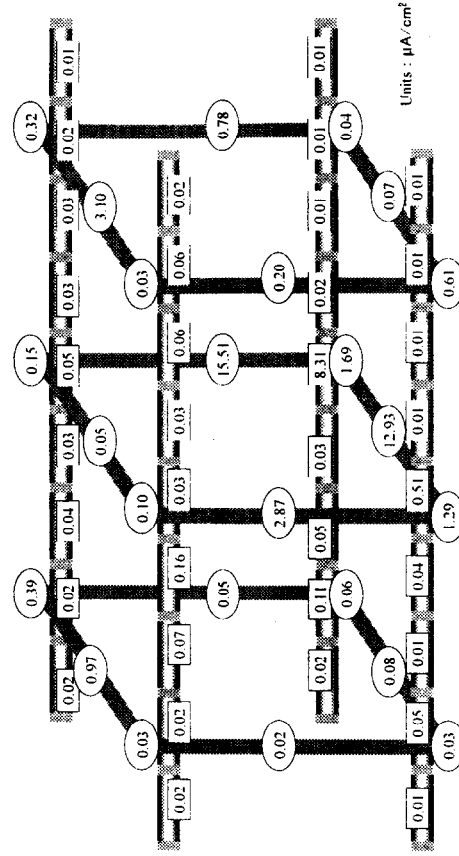
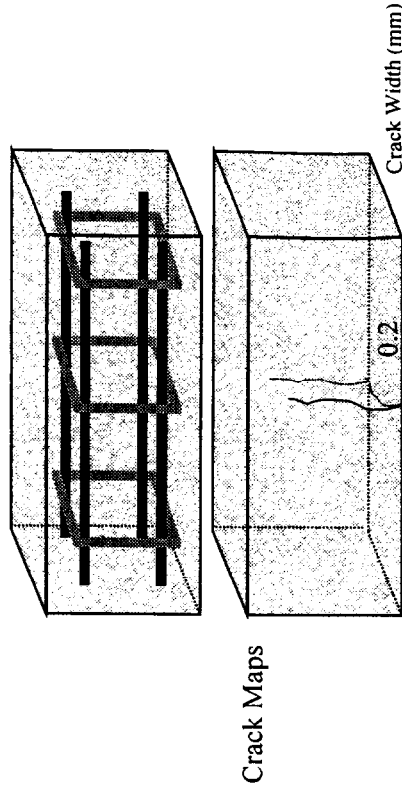
(a-2) マクロセル電流密度－異形棒鋼

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{ mm/年}$

図4-2-17(a) 鉄筋形状の相違がマクロセル電流密度分布に及ぼす影響
(主鉄筋とスタースラップをともに考慮した屋内試験)



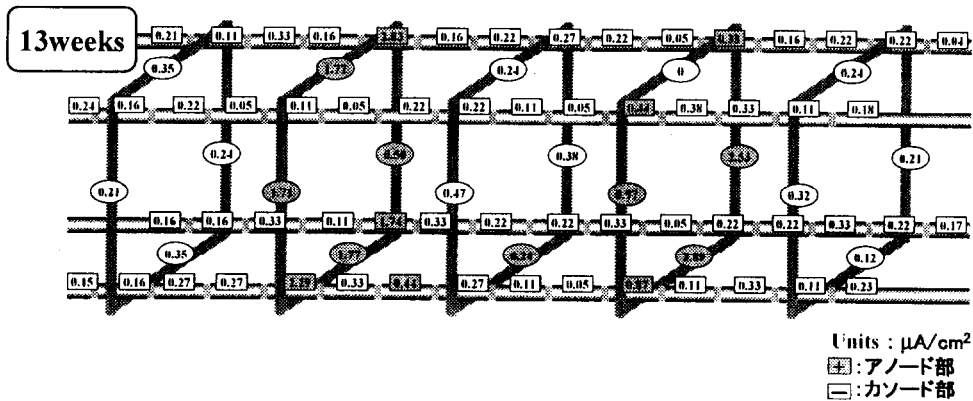
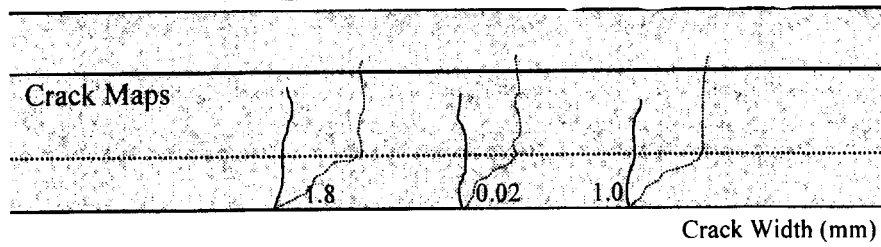
(b-1) ミクロセル電流密度－丸鋼



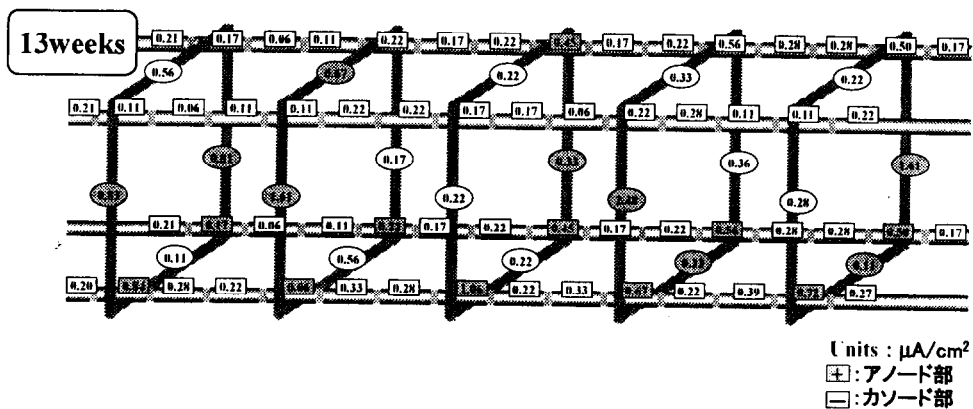
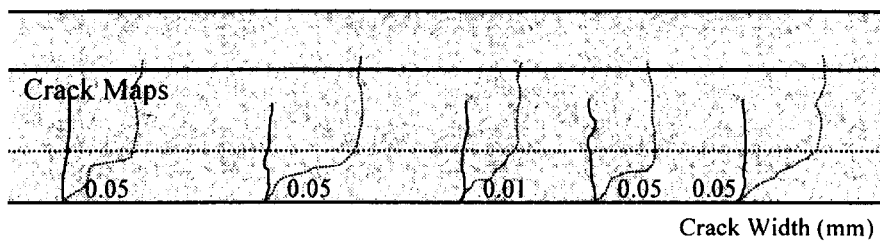
(b-2) ミクロセル電流密度－異形棒鋼

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図4-2-1 7 (b) 鉄筋形状の相違がミクロセル電流密度分布に及ぼす影響
(主鉄筋とスタースラップをともに考慮した屋内試験)



(a-1) マクロセル電流密度分布—丸鋼

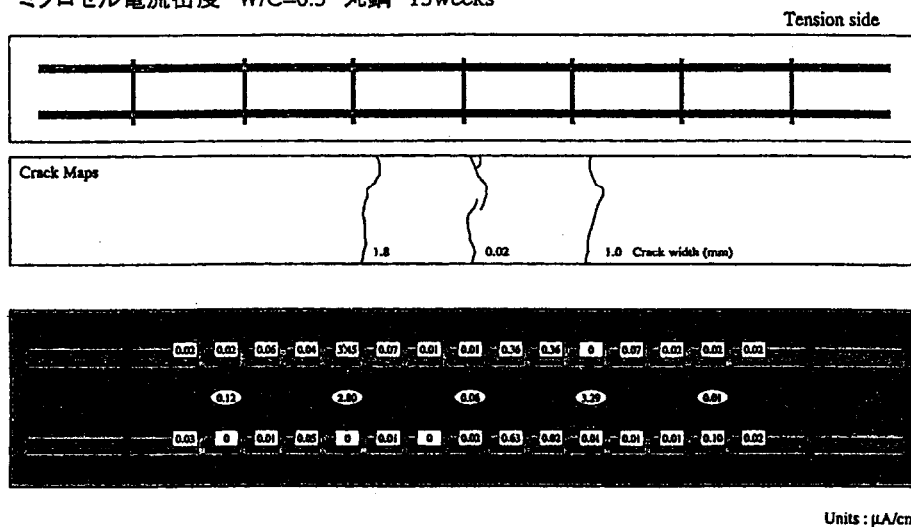


(a-2) マクロセル電流密度分布—異形棒鋼

$$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$$

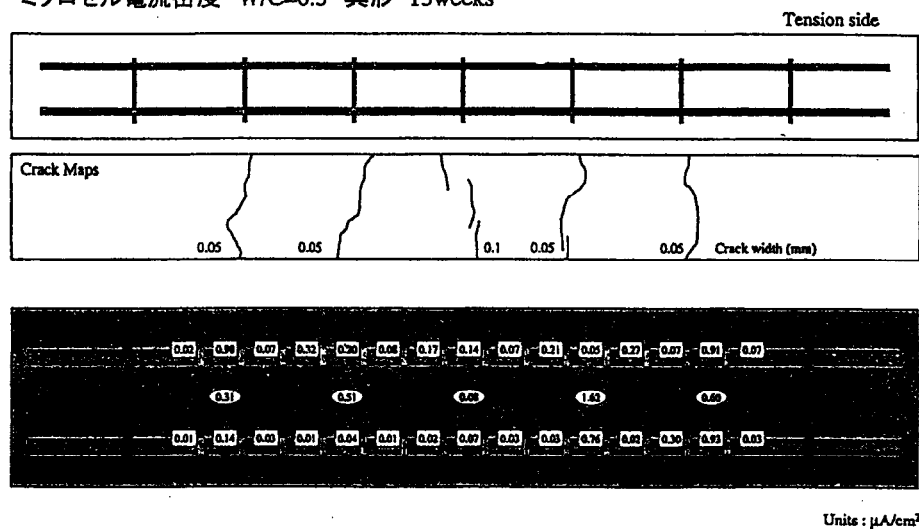
図4-2-18(b) 鉄筋形状の相違がミクロセル電流密度分布に及ぼす影響
 (鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外暴露試験)

マイクロセル電流密度 W/C=0.5 丸鋼 13weeks



(b-1) ミクロセル電流密度分布—丸鋼

マイクロセル電流密度 W/C=0.5 異形 13weeks



(b-2) ミクロセル電流密度分布—異形棒鋼

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16\text{mm}/\text{年}$

図4-2-18(b) 鉄筋形状の相違がマイクロセル電流密度分布に及ぼす影響
(鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外暴露試験)

4-2-3 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

4-2-3-1 単一の主鉄筋に着目したモデル供試体を用いた屋内試験

(1) 水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響

水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-19～図4-2-22に示す。ひび割れ幅は0.3mm、モルタルの水セメント比は30%、50%、70%である。図4-2-19は暴露期間が1週、図4-2-20は2週、図4-2-21は4週、図4-2-22は13週の測定結果である。

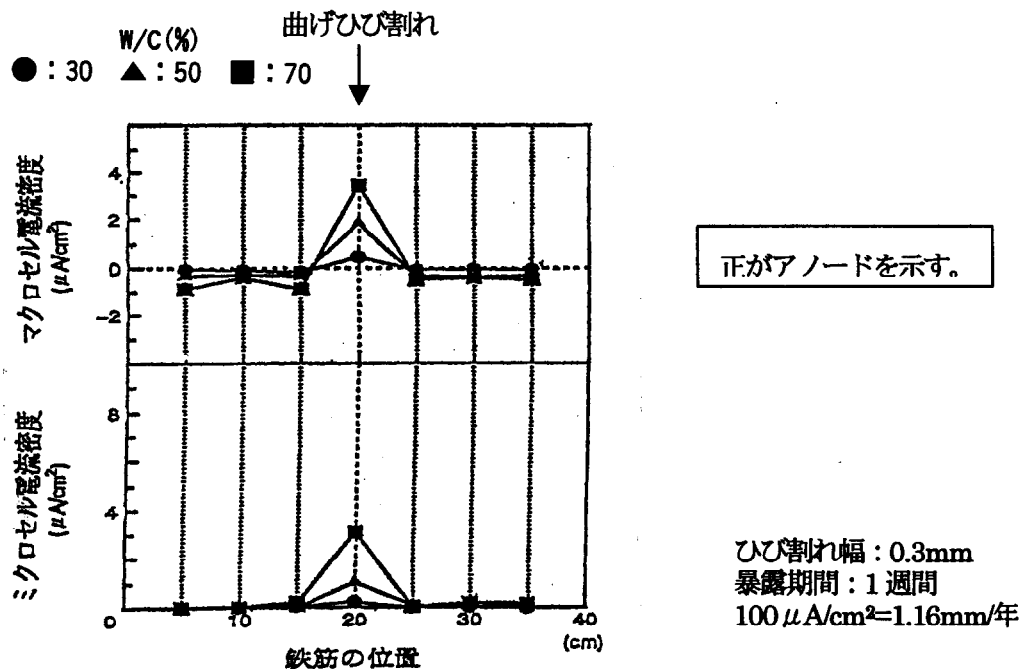


図4-2-19 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響（単一の主鉄筋に着目した屋内試験）

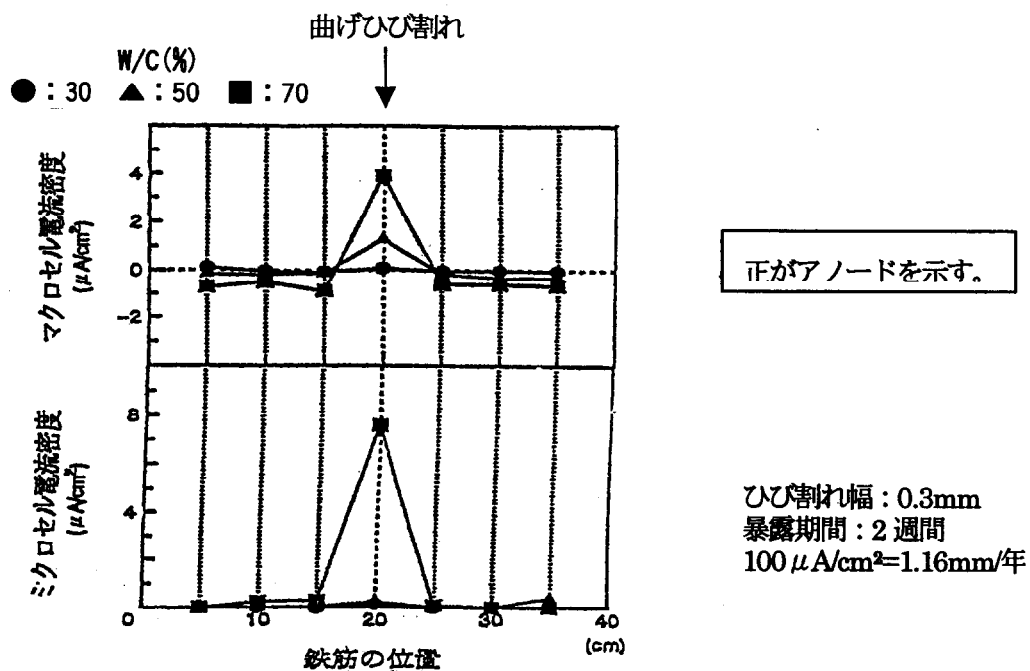


図4-2-20 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一の主鉄筋に着目したい屋内試験)

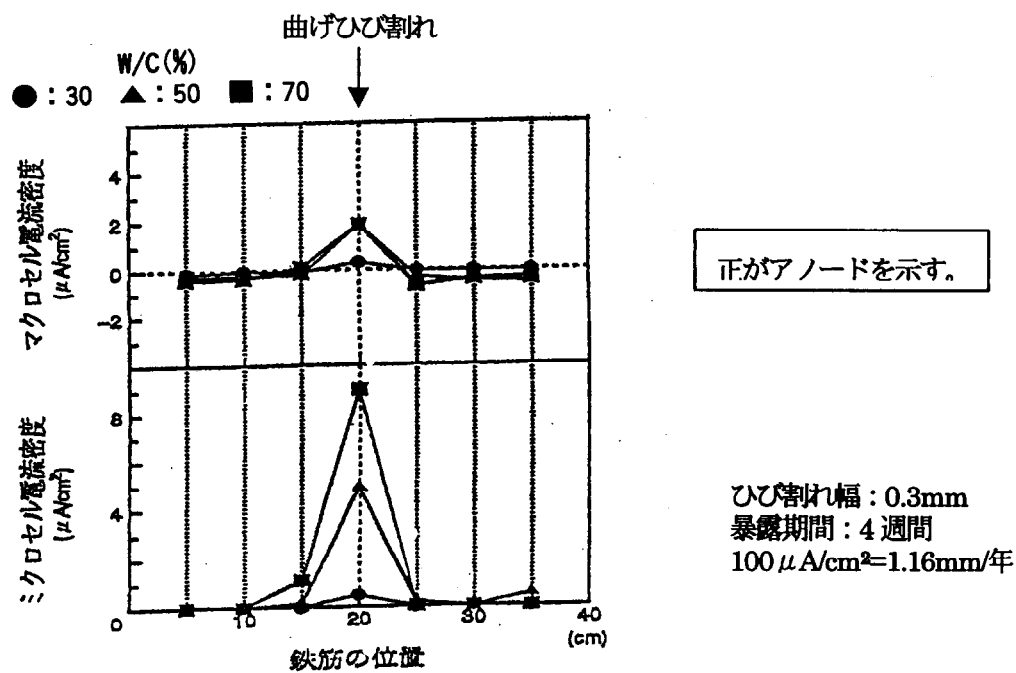


図4-2-21 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一の主鉄筋に着目したい屋内試験)

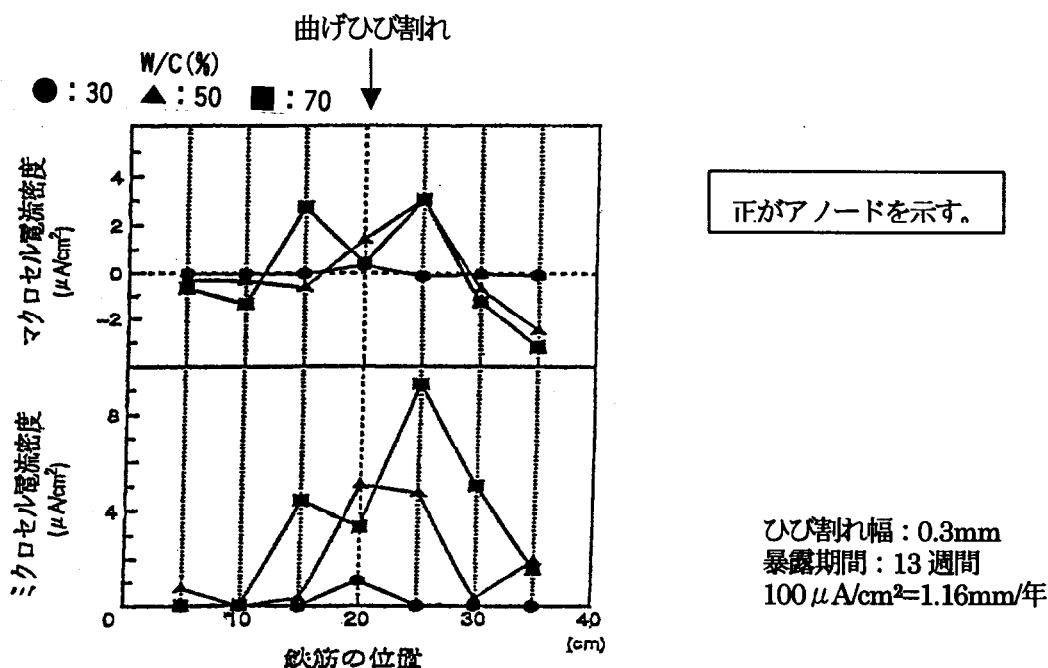
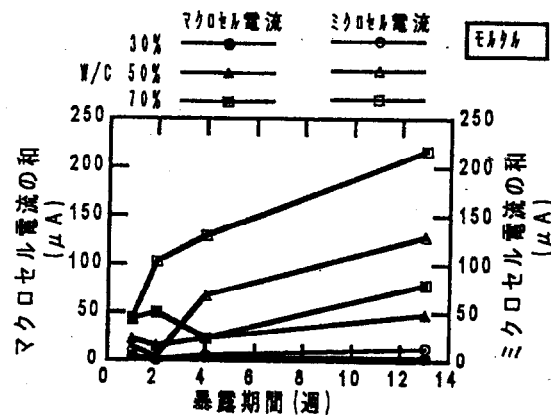


図4-2-22 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一の主鉄筋に着目したい屋内試験)

これらによると、マクロセル電流密度に関しては、暴露期間が1週および2週においては、ひび割れ箇所ではアノード電流が認められた。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍でアノード電流が認められた。また、ひび割れ箇所のアノード電流は、暴露期間が4週の場合と比較して、減少することが認められた。ミクロセル電流密度に関しては、暴露期間が1週、2週および4週において、ひび割れ箇所が大きくなることが認められた。その値は、水セメント比が高いほど増加した。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%の場合は、ひび割れ近傍の鉄筋(鉄筋の位置=25cm)でも、大きくなることが認められた。水セメント比が70%の場合は、ひび割れからさらに離れた(鉄筋の位置=30cm)鉄筋要素でも、大きくなることが認められた。また、水セメント比が30%の場合は、ひび割れ箇所でのみ、小さなミクロセル電流が確認できた。

図4-2-23に、腐食電流の和の経時変化を示す。ここで腐食電流の和とは、測定されたマクロセルアノード電流およびミクロセル電流(図4-2-19～図4-2-22中の正の電流密度とその鉄筋要素の表面積を掛けた値)を各々足し合わせたものである。こ

れによると、暴露期間に関わらず、水セメント比が高いほど、マクロセルアノード電流の和およびミクロセル電流の和は、増加することが認められた。



100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16\text{mm}/\text{年}$

図4-2-23 腐食電流の和の経時変化

以上のことから、実験結果をまとめると、次のことがわかった。マクロセルを形成するアノードとカソードの位置関係に関しては、暴露期間が短期の場合は、ひび割れ箇所のみがアノードとなった。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋がアノードとなった。ミクロセル電流の発生箇所に関しても、同様の傾向が見られた。すなわち、暴露期間が短期の場合は、ひび割れ箇所のみで、ミクロセル腐食の発生が見られた。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋においても、腐食の進行が確認された。特に、水セメント比が70%では、ひび割れから離れた鉄筋においても、腐食は発生した。

図4-2-24に、暴露期間が13週における、水セメント比の相違が腐食減量に及ぼす影響を示す。これによると、ひび割れと交わる部分の鉄筋が最も大きく、その値は水セメント比が高いほど、増加することが認められた。また、水セメント比が70%の場合は、ひび割れ近傍の部材内部の鉄筋においても、腐食減量が大きくなることがわかった。したがって、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度から想定される腐食状況と、内部鉄筋をはつりとり測定した腐食減量は、同様な傾向を示すことが確認できた。

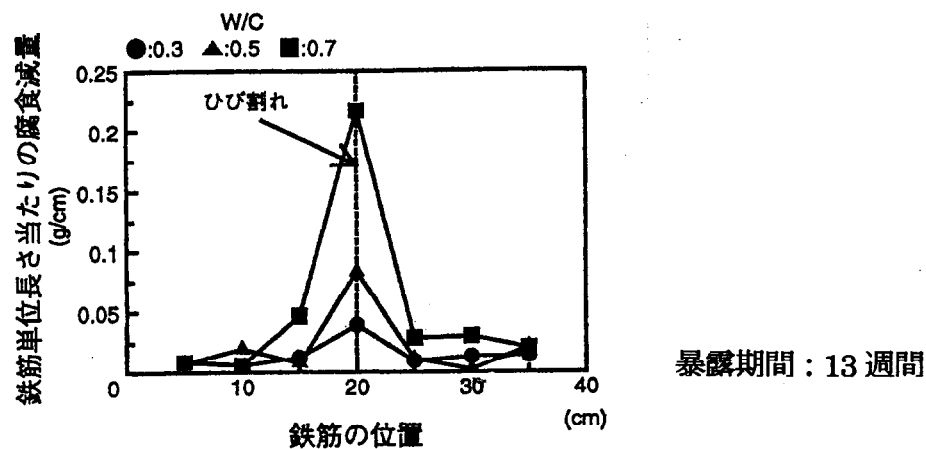


図4-2-24 水セメント比の相違が腐食減量に及ぼす影響

(2) 水セメント比の相違が物質透過性に及ぼす影響

図4-2-25～図4-2-28に、水セメント比の相違が塩化物イオン浸透量に及ぼす影響を示す。図4-2-25は暴露期間が13週におけるひび割れ近傍のモルタル中に含まれる塩化物イオン量分布、図4-2-26は暴露期間が13週におけるひび割れから離れたモルタル中に含まれる塩化物イオン量分布、図4-2-27は暴露期間が4週におけるひび割れからモルタル内部方向への鉄筋下面近傍のモルタルに含まれる塩化物イオン量分布、図4-2-28は暴露期間が13週におけるひび割れからモルタル内部方向への鉄筋下面近傍のモルタルに含まれる塩化物イオン量分布を示す。なお、図中の点線（可溶性塩化物イオン量=0.2%）以上であれば、50%以上の確率で健全な不働態は存在しない⁴⁻⁸⁾。

図4-2-25によると、ひび割れを通じて浸透する塩化物イオン量は、水セメント比が高いほど増加することが認められた。同様に、図4-2-26によると、ひび割れの影響が少ないモルタル中を通じて浸透する塩化物イオン量も、水セメント比が高いほど増加することが認められた⁴⁻⁹⁾。次に、図4-2-27と図4-2-28を比較する。暴露期間が4週においては、ひび割れ箇所のみが多量の塩化物イオンを含有していることが明らかとなった。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%および70%の場合は、モルタル内部においても、塩化物イオン含有量が多くなることが認められた。特に、水セメント比が70%の場合は、50%の場合と比較して、暴露期間が4週の時と比較した

塩化物イオン含有量の増加が多いことが認められた。一方、水セメント比が30%の場合は、ひび割れ箇所においてさえ、暴露期間が4週の時には塩化物イオンは浸透していない。また、暴露期間が13週の時は、ひび割れ箇所においてのみ塩化物イオンの浸透が確認された。

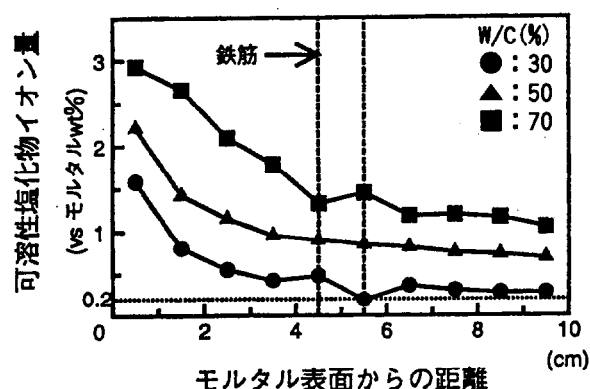


図4-2-25 暴露期間13週におけるPart-Aの塩化物イオン量

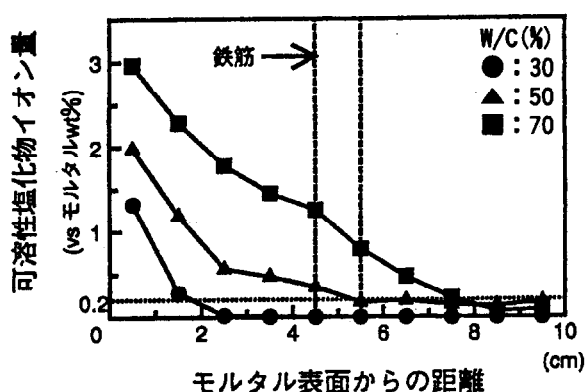


図4-2-26 暴露期間13週におけるPart-Bの塩化物イオン量

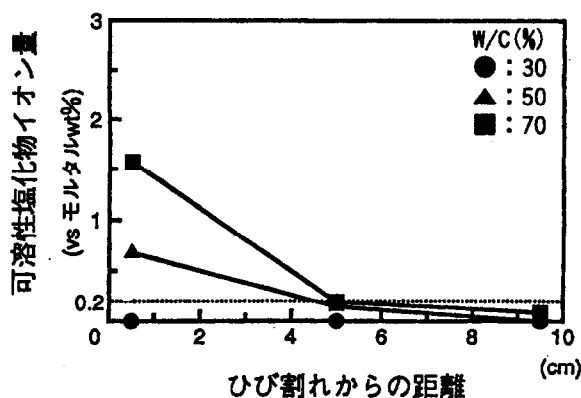


図4-2-27 暴露期間4週におけるPart-Cの塩化物イオン量

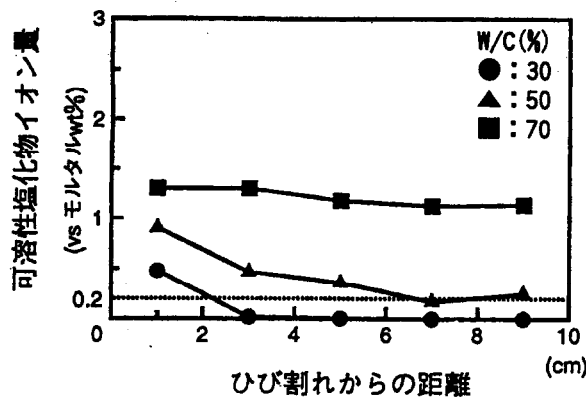


図4-2-28 暴露期間13週におけるPart-Cの塩化物イオン量

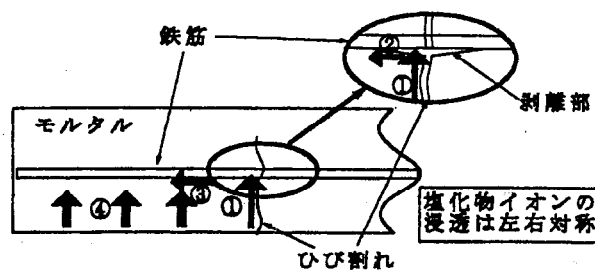


図4-2-29 塩化物イオンの浸透経路

表4-2-4 ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離面積

W/C (%)	剥離面積 (cm ²)
30	1.53
50	2.11
70	2.48

このことについて、図4-2-29を用いて考察する。塩化物イオンは、かぶりコンクリート中を浸透することと比較して、ひび割れを通じることにより、内部鉄筋に容易に浸透することができる(①)。ひび割れを通じた塩化物イオン浸透量は、図4-2-26に示す通り、水セメント比が高いほど増加する。ひび割れを通じて、外部環境から内部鉄筋近傍に到達した塩化物イオンの一部は、表面からさらに遠いひび割れ内部に浸透する。他方は、ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離部に浸透する(②)。表4-2-4に示す通り、水セメント比が高いほど、ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離面積が増加する。したが

って、水セメント比が高いほど、剥離部を浸透する塩化物イオン量は増加すると考えられる。さらに、剥離部先端に到達した塩化物イオンは、締固め時に浮上した空気泡等が貯まり多孔質となった鉄筋下面近傍のモルタルを伝わり、健全なモルタル中に浸透する (③)。以上のことより、外部環境からひび割れを通じて鉄筋表面に到達し、さらに鉄筋に沿ってモルタル内部に浸透する塩化物イオンは、水セメント比が高いほど、増加すると考えられる。さらに、図4-2-26に示す通り、水セメント比が70%では、外部環境からモルタル中を通じて鉄筋表面に浸透する塩化物イオンも、多量になることが確認できる (④)。なお、図4-2-26によれば、水セメント比が30%の場合は、13週間暴露した後においても、モルタル内部へは塩化物イオンが浸透していないことが認められる。

表4-2-5に、水セメント比と酸素透過量の関係を示す。ひび割れと交わる部分の鉄筋への酸素透過量、およびモルタル内部の鉄筋への酸素透過量を測定した。これによると、モルタル内部の鉄筋において、水セメント比が高いほど、酸素透過量が増大することが確認できる。また、ひび割れと交わる鉄筋において、水セメント比が高いほど、酸素透過量が増大することが確認できる。ここで、モルタル内部の鉄筋への酸素透過量とひび割れと交わる鉄筋への酸素透過量を比較する。何れの水セメント比においても、ひび割れを通じての酸素透過量は、モルタル中の酸素透過量と比較して、多いことが認められる。しかしながら、モルタル内部の鉄筋への酸素透過量に対する、ひび割れと交わる鉄筋への酸素透過量の比は、水セメント比が高いほど増加することが認められる。すなわち、水セメント比が高いほど、ひび割れと交わる鉄筋とモルタル内部の鉄筋への酸素透過量の偏りは大きくなる。これは、第3章におけるモデル供試体を用いた検討とは異なる。この理由は、本章で用いた供試体のひび割れは、実構造物を模擬した方法により作製したことによると考えられる。すなわち、水セメント比が低い場合は、コンクリートの引張強度が高いため、ひび割れは深部にまで伸展せず、一方水セメント比が高い場合は、コンクリートの引張強度が低いため、ひび割れは深部まで伸展する。したがって、水セメント比が低い場合は、ひび割れ箇所において物質透過性が抑制され、一方水セメント比が高い場合は、ひび割れ箇所における物質透過性が促進されることが考えられる。

表4-2-5 水セメント比が酸素透過量に及ぼす影響

W/C (%)	酸素透過量 ($10^{-10}\text{mol/cm}^2\text{sec}$)	
	ひび割れ箇所	モルタル内部
30	0.3	0.1
50	1.0	0.2
70	2.4	0.4

(3) 物質透過性と腐食形成機構および腐食速度の関係

表4-2-6に、物質透過性と腐食の関連性を整理する。

暴露期間が短期では、水セメント比が高い場合、ひび割れ箇所において腐食が発生する。これは、ひび割れと交わる部分の鉄筋のみに塩化物イオンが浸透するためと考えられる。この時、水セメント比が高いほど、ひび割れ箇所における酸素透過量が増大するため、腐食反応を促進させる。

一方、暴露期間が長期では、水セメント比が70%あるいは50%の場合は、マクロセルのアノード部と、ミクロセル腐食の発生箇所に相違が見られた。塩化物イオンはひび割れから鉄筋に沿って部材内部に浸透する。したがって、ひび割れ近傍にも、不動態皮膜の破壊を生じさせるに十分な量の塩化物イオンが浸透し、鉄筋はアノードとなりえる。この時、酸素透過量は健全なモルタル内部の鉄筋と比較して、ひび割れと交わる部分の鉄筋で多い。すなわち、多量の酸素が到達するひび割れと交わる部分の鉄筋がマクロセルのカソードになりやすい。マクロセルは、アノードとカソード間のモルタルによる電気抵抗が小さいほど、形成が容易である。したがって、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋がアノードとなるマクロセルが形成したと考えられる。また、ミクロセルに関しては、次の通りである。塩化物イオンは、短期においてすでに浸透したひび割れ箇所から、長期になると鉄筋内部に浸透する。また、水セメント比が70%の場合は、モルタル中を通じて、鉄筋表面に浸透する塩化物イオン量も多い。その結果、不動態皮膜を破壊するに十分な量の塩化物イオンが到達した鉄筋においては、ひび割れからの位置と関係なく、腐食の発生が確認された。この時、水セメント比が高いほど、モルタル内部を透過する酸素量が増加するため、腐食速度も速い。水セメント比が30%の場合は、ひび割れと交わる部分の鉄筋のみに塩化物イオンが浸透した。したがって、ひび割れ箇所で腐食が発生した。ただし、酸素透過量はひび割れ箇所およびモルタル内部の鉄筋いずれにおいても少ないため、腐食速度は遅いと考えられる。

表4-2-6 水セメント比が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響

暴露期間	水セメント比:高	水セメント比:低
短期	ひび割れ W/Cが高いほど腐食速度:速い	ひび割れ 腐食なし
長期	ひび割れ W/Cが高いほど腐食速度:速い	ひび割れ 腐食なし

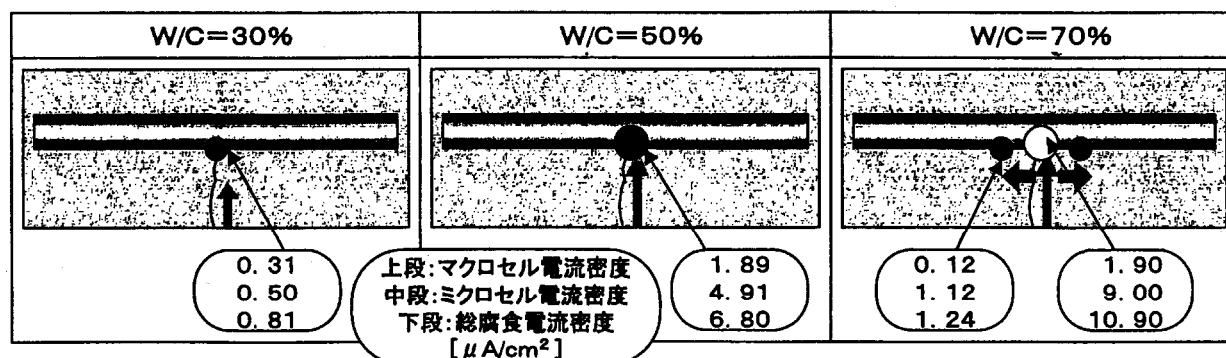
- ▲ 塩化物イオン浸透量(太いほど多い)
- △ 酸素透過量(太いほど多い)
- マクロセルのアノード部
- ミクロセルの腐食箇所

(4) まとめ

単一の主鉄筋に着目した場合、水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響を整理する。図4-2-30は、総腐食電流密度が最大となる位置と値を示す。

材齢:4週間

▲ 塩化物イオン浸透 ● マクロセルのアノード部かつミクロセル腐食発生箇所 ○ ミクロセル腐食発生箇所



$100\mu\text{A}/\text{cm}^2 \approx 1.16\text{mm}/\text{年}$

図4-2-30 水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響

(主鉄筋に着目した屋内試験)

この図を含めて、4-2-3-1の結果をまとめる。

1. ひび割れが存在する場合、水セメント比の相違はマクロセル腐食形成機構に影響を及ぼした。すなわち、暴露期間が短期では、何れの水セメント比においても、ひび割れと交差する部分の鉄筋においてのみ腐食が発生した。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が30%では、ひび割れと交差する鉄筋だけがマクロセルのアノード部およびミクロセル腐食発生箇所となった。また、水セメント比が50%あるいは70%の場合、ひび割れ近傍の鉄筋がアノードとなるマクロセルが形成し、腐食が進行した。さらに、水セメント比が70%の場合は、健全なかぶりコンクリート内部の鉄筋においても、ミクロセル腐食は発生した。
2. 上記2の理由について、以下のことが考えられた。ひび割れ近傍に生じる、鉄筋とコンクリートの剥離部（肌離れ）は、水セメント比が高いほど広くなった。したがって、水セメント比が高い場合、塩化物イオンはひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離部を容易に伝わり、健全なかぶりコンクリート内部に浸透した。その結果、ひび割れ近傍において、マクロセル腐食のアノード部が形成したと考えられた。

4-2-3-2 単一のスターラップに着目したモデル供試体を用いた屋内試験

水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-2-31に示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はミクロセル電流密度分布を表す。Type-C 供試体を用いた。なお、ひび割れ幅は0.3mmとし、水セメント比は、30%、50%、70%の3水準とした。

はじめに、マクロセル腐食形成機構について、実験結果を整理する。何れの実験ケースにおいても、下部水平鉄筋において、マクロセルのアノード電流が確認された。また、ミクロセル電流が大きくなった。これは、4-2-2-2にて検討した通りである。

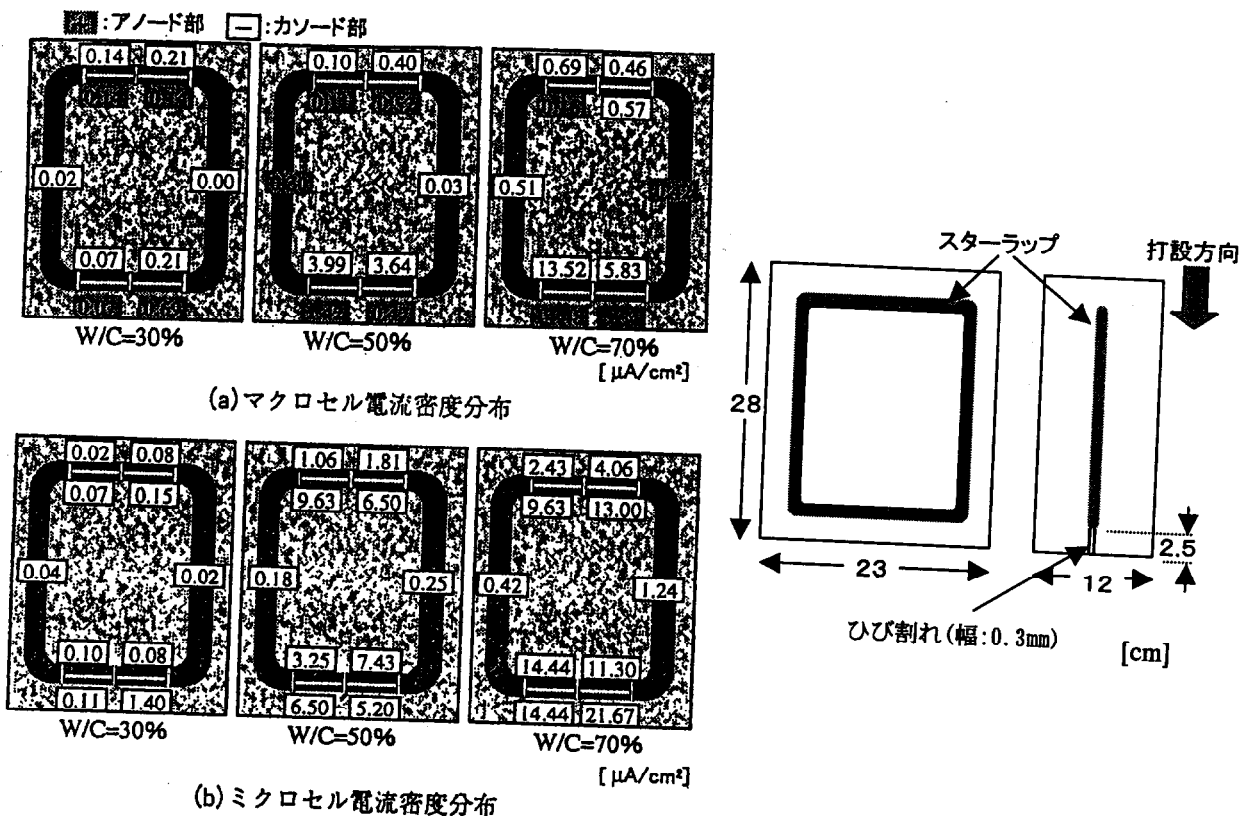


図 4-2-31 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一のスターラップに着目した屋内試験)

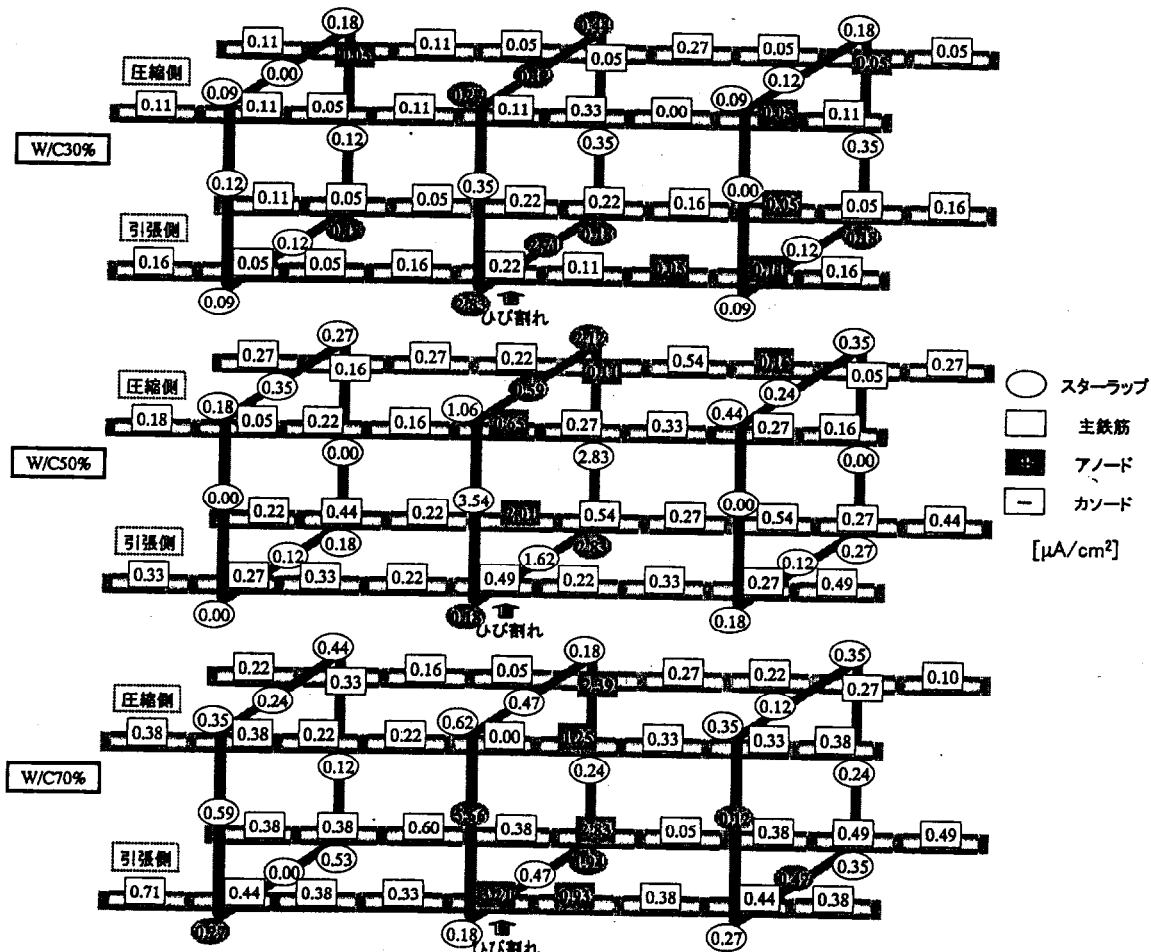
4-2-3-3 主鉄筋とスターラップをともに考慮したモデル供試体を用いた屋内試験

水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図 4-2-32 に示す。(a) はマクロセル電流密度分布を、(b) はミクロセル電流密度分布を表す。Type-D 供試体を用いた。水セメント比は、30%、50% および 70% の 3 水準とした。図 4-2-1 (d) および図 4-2-4 (a) に示す通り、ひび割れは中央のスターラップ近傍に存在する。

はじめに、腐食形成機構について、結果を整理する。水セメント比が 30% の場合、マクロセルのアノード電流密度は、中央のスターラップの下部鉄筋において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度は、中央のスターラップの上部水平鉄筋および下部鉄筋において大きくなった。水セメント比が 50% の場合、マクロセルのアノード電流密度は、中央のスターラップ下部鉄筋およびひび割れと交差する主鉄筋において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度は、中央のスターラップの上部水平鉄筋および下部鉄筋において大きくな

った。さらに、水セメント比が70%の場合、マクロセルのアノード電流密度は、中央のスターラップ下部鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度は、中央のスターラップ下部鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍においても大きくなった。

次に、腐食速度について、結果を整理する。表4-2-7に、水セメント比とマクロセル電流、ミクロセル電流の総和の関係を示す。ただし、マクロセル電流の総和とは、アノ



$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図4-2-32 (a) 水セメント比の相違がマクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

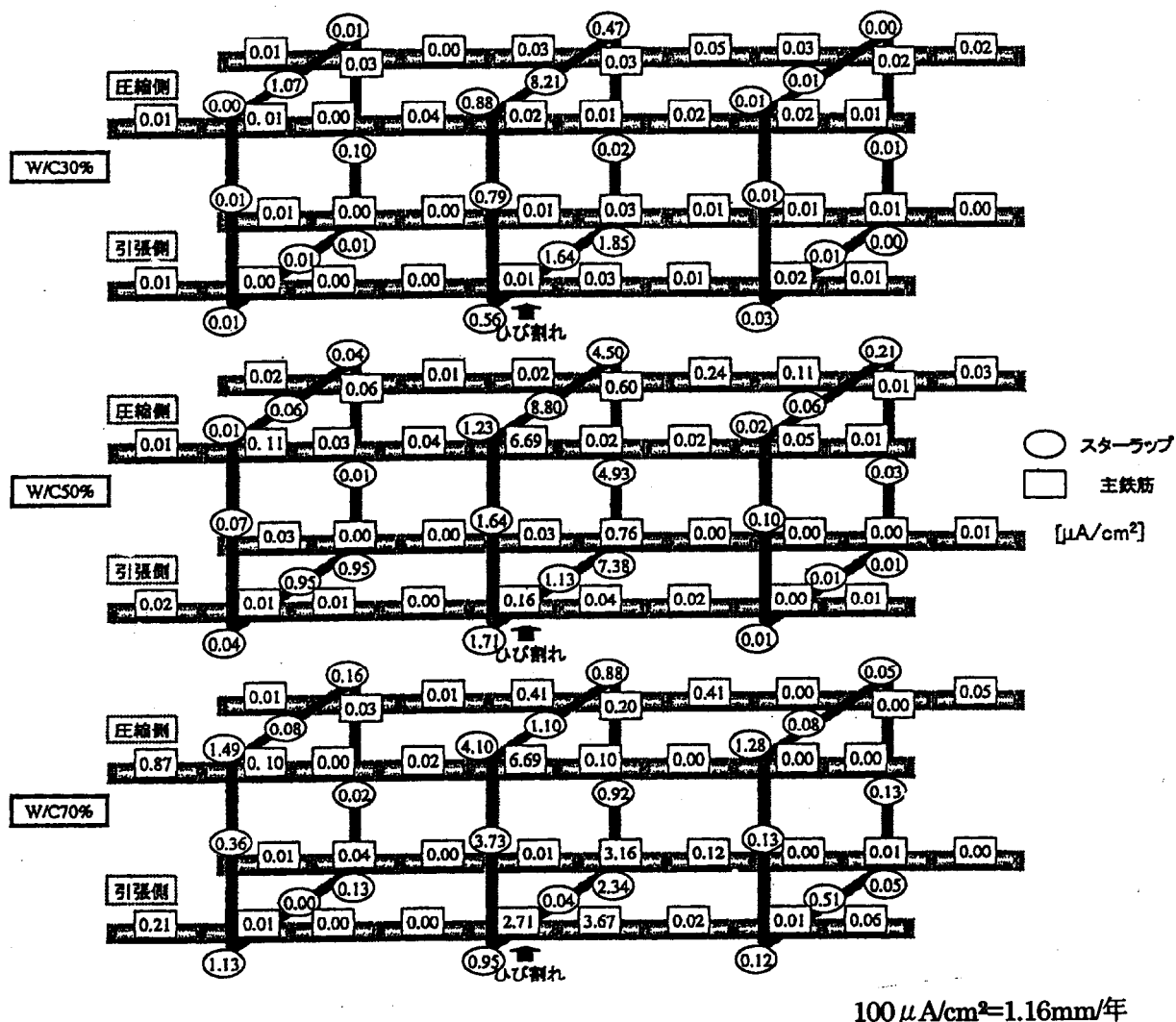


図4-2-32 (b) 水セメント比の相違がマイクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

ード電流が確認された要素毎のマクロセル電流密度に表面積をかけ、それを合計したものである。また、マイクロセル電流の総和とは、各鉄筋要素毎にマイクロセル電流密度と表面積をかけ、それを合計したものである。これによると、マクロセル電流、マイクロセル電流、腐食電流ともに、水セメント比が低いほど、減少することが認められた。

表4-2-7 水セメント比が腐食電流に及ぼす影響

(μA)

W/C (%)	30	50	70
マクロセル電流(A)	76.8	116.7	273.0
ミクロセル電流(B)	279	491.9	552.4
腐食電流(A+B)	355.8	608.6	825.4

図4-2-33に、主鉄筋は基よりスターラップも考慮した場合、水セメント比の相違がマクロセル腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響を整理する。

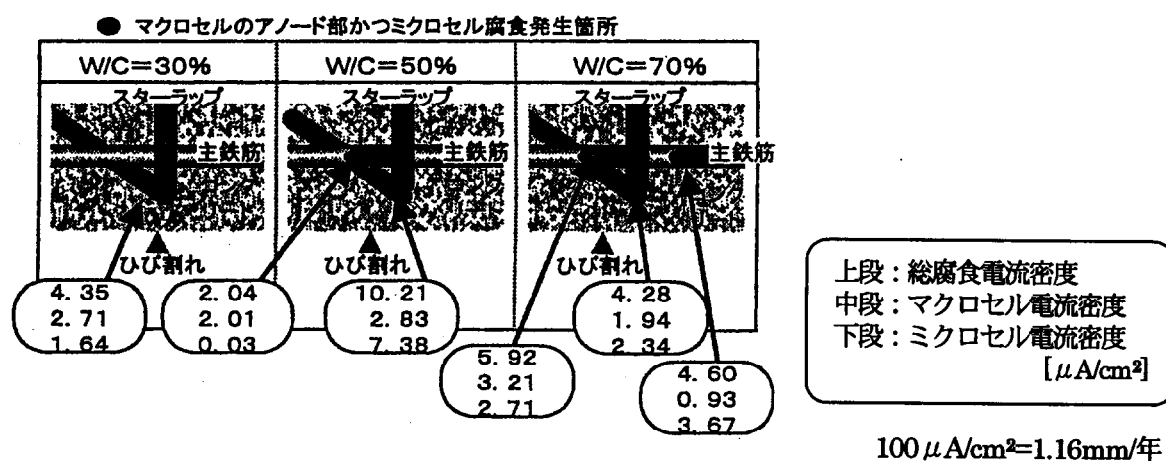


図4-2-33 水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響 (主鉄筋とスターラップをともに考慮した屋内試験)

水セメント比が30%では、ひび割れと接するスターラップ下部鉄筋において、マクロセルのアノード部、ミクロセル腐食の発生箇所となる。特に、マクロセル電流がミクロセル電流と比較して大きくなった。一方、水セメント比が70%では、ひび割れと接するスターラップ下部鉄筋、主鉄筋およびひび割れ近傍の主鉄筋において、マクロセルのアノード部となり、またミクロセル腐食も進行した。特に、スターラップ下部鉄筋やひび割れ近傍の主鉄筋では、ミクロセル電流が、マクロセル電流と比較して大きかった。以上のことから、水セメント比に関わらず、スターラップの下部鉄筋において、腐食は進行した。例えば、水セメント比が50%の時、スターラップの腐食速度は、主鉄筋の約5倍となった。すなわち、スターラップの腐食は、主鉄筋と比較して速かった。スターラップは、主鉄筋と比較して、外部環境に近い位置に存在する。したがって、酸素や塩化物イオンは容易に鉄筋に

浸透する。このため、スターラップの腐食速度が主鉄筋より速かったと考えられる。なお、全体としては、水セメント比と腐食速度の関係については、水セメント比が低いほど、腐食速度は減少することが確認された。ただし、スターラップの下部鉄筋に限れば、水セメント比が 30% の場合、水セメント比が 70% の場合と比較して、マクロセルの影響が大きく、腐食速度も増加した。

4-2-3-4 屋内試験の整理

単一の主鉄筋に着目した供試体では、水セメント比が 30% および 50% の時はひび割れ箇所が腐食した。一方、水セメント比が 70% では、ひび割れ箇所およびその近傍も、腐食した。単一のスターラップに着目した供試体では、ひび割れと接する下部水平鉄筋が腐食した。また、主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体では、水セメント比が 30% の時、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋が腐食した。水セメント比が 50% では、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋、および引張側主鉄筋が腐食した。水セメント比が 70% では、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋、引張側主鉄筋およびひび割れ近傍の主鉄筋も、腐食した。すなわち、何れの水セメント比においても、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋は腐食し、その腐食速度は速かった。このスターラップの下部水平鉄筋の腐食形態は、水セメント比の相違の影響を受けた。すなわち、低水セメント比ではマクロセル卓越型腐食が進行し、高水セメント比ではミクロセル卓越型腐食が進行した。これに伴い、水セメント比が 30% の場合に、水セメント比が 70% の場合と比較して腐食速度は促進した。

4-2-3-5 鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外試験

図 4-2-3-4 に、引張側鉄筋のマクロセル電流密度分布およびミクロセル電流密度分布を示す。Type-E 供試体を用いた。水セメント比は、屋内試験と同様に、30%、50% および 70% の 3 水準とした。

水セメント比が 30% の場合、マクロセルのアノード電流密度は、ひび割れ近傍のスターラップ下部において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度も、ひび割れ近傍のスターラップ下部において最大となった。水セメント比が 50% の場合、マクロセルのアノード電流密度は、ひび割れと交差するスターラップおよび主鉄筋において大きくなった。一方、ミクロセル電流密度も、ひび割れと交差するスターラップおよび主鉄筋において大きな

った。水セメント比が70%の場合、マクロセルのアノード電流密度は、ひび割れと交差する主鉄筋および一部ではその近傍においても大きくなった。一方、ミクロセル電流密度は、ひび割れと交差する主鉄筋およびスターラップで大きくなった。すなわち、何れの水セメント比においても、ひび割れと交差するスターラップにおいて腐食が進行した。例えば、水セメント比が50%の場合、スターラップの腐食速度は、最大で $7.18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($0.08\text{mm}/\text{年}$) であった。さらに、このスターラップ下部鉄筋においては、水セメント比の相違が腐食形態に影響を及ぼした。例えば、スターラップ下部鉄筋における、(マクロセルのアノード電流密度：ミクロセル電流密度) の関係は、水セメント比が30%の場合、(1.1：1.0) であったのに対し、水セメント比が70%の場合、(1：20) であった。また、ひび割れと交差する主鉄筋の腐食は、多くの場合、マクロセルが卓越した。例えば、水セメント比が70%の場合、腐食速度が最大となる主鉄筋において、マクロセル電流密度 ($6.42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) は、ミクロセル電流密度 ($0.11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) の約60倍となった。

以上のことから、水セメント比の相違が腐食形成機構に及ぼす影響は、屋外試験と屋内試験で、同様の傾向を示すことが確認できた。

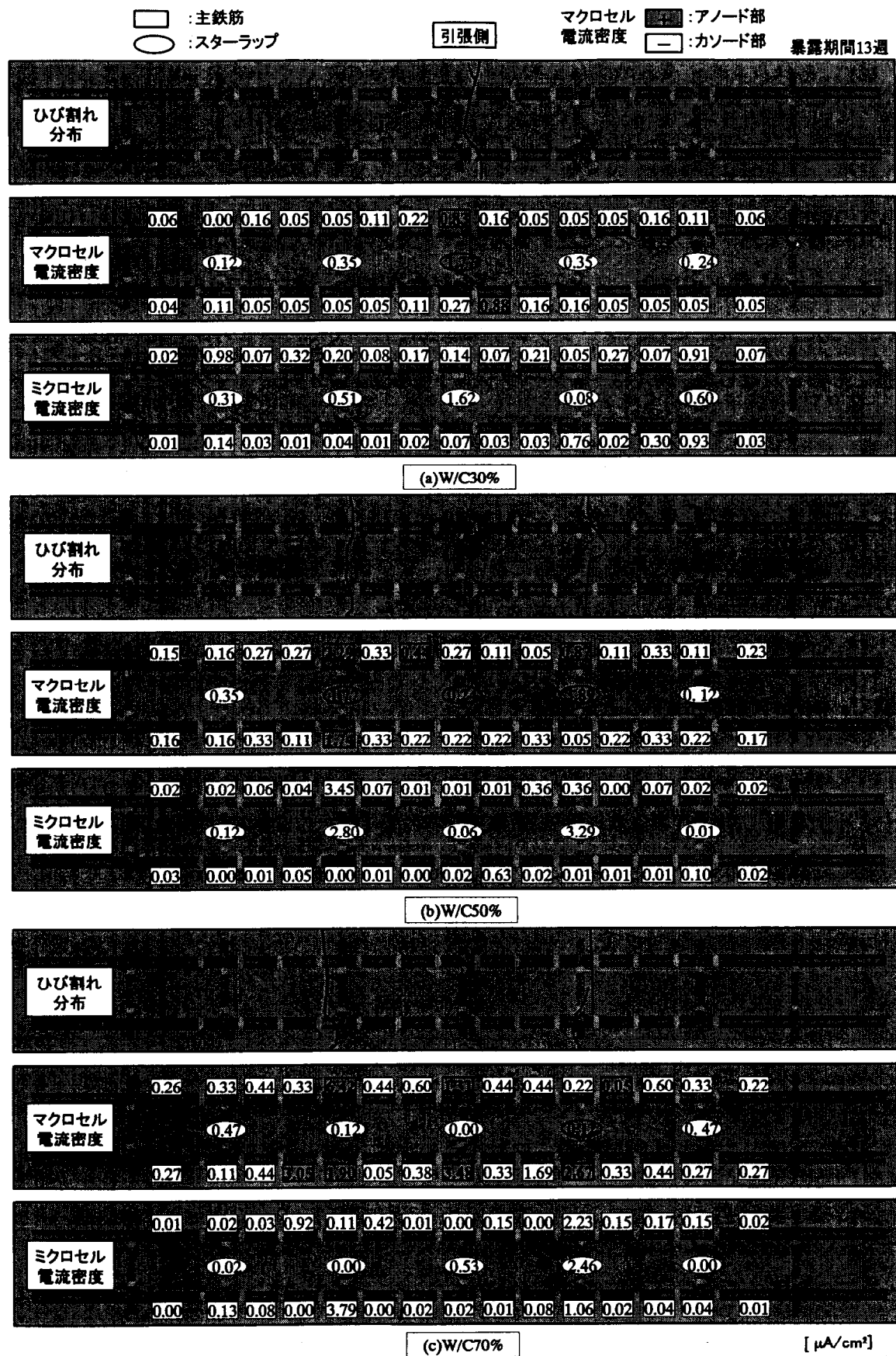


図4-2-34 水セメント比の相違がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響（鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外暴露試験）

4-3 断面修復部の打継目近傍に生じるマクロセル腐食

4-3-1 実験概要

4-3-1-1 使用材料

実験に使用した材料は4-2と同じである。主な性質を表4-3-1に示す。なお、エポキシ樹脂系補修材の物理的性質を表4-3-2に示す。また、エポキシ樹脂系補修材の作製に使用した、骨材および結合材の質量比は、3:1であった。

表4-3-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質 ^{注)}
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材(モルタル) (コンクリート)	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
	川砂	比重=2.62、F.M.=3.08、吸水率=1.73%
粗骨材	碎石	比重=2.64、F.M.=6.70、吸水率=0.68%
混和剤	減水剤・AE剤	リグニンスルホン酸系
	増粘剤	セルロース系
	高性能AE減水剤	ナフタレン系
鉄筋	丸鋼(φ9)	降伏強度=354N/mm ² 、Fe含有率=99.13%
	異形棒鋼(D10)	降伏強度=367N/mm ² 、Fe含有率=98.84%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材(陸砂)の物理的性質は表2-2-2に、細骨材(川砂)および粗骨材(碎石)の物理的性質は表3-2-2に、鉄筋(丸鋼)の化学成分は表2-2-3に、鉄筋(異形棒鋼)の化学成分は表3-2-3に示した通りである。

表4-3-2 エポキシ樹脂系補修材の物理的性質

比重	7日強度(MPa)			主成分
	圧縮	引張	曲げ	
2.00	36	15	19.6	ポリエステル

注) ポリマーセメントモルタルの物理的性質は表3-2-5に示す。

4-3-1-2 供試体概要

本研究では、3種類のモルタル供試体(Type-A、Type-B、Type-D)と2種類のコンクリート供試体(Type-C、Type-E)を使用した。

4-3-2の実験では、Type-AおよびType-C供試体により、塩化物イオン含有量と

腐食形成機構と腐食速度の関係およびモルタル、コンクリートあるいは補修材の材質と腐食形成機構と腐食速度の関係について検討した。さらに、Type-B 供試体を用い、酸素透過量を測定し、酸素透過量が腐食速度に及ぼす影響について検討した。

4-3-3の実験では、Type-D および Type-E 供試体により、打継目の物質透過性と腐食形成機構と腐食速度の関係およびモルタル、コンクリートあるいは補修材の材質と腐食形成機構と腐食速度の関係について検討を行った。

4-3-4の実験では、Type-A 供試体を用いて湿度や温度が腐食速度に与える影響を検討するとともに、Type-B 供試体により外部環境ごとに酸素透過量およびコンクリート抵抗を測定し、外部環境が腐食速度に与える影響について検討を加えた。

(1) Type-A 供試体 (モルタル)

Type-A 供試体を図4-3-1(a)に示す。補修材をモデル化した部材は、塩化物イオンを含まない健全なモルタルを用いた。一方、母材をモデル化した部材は、塩化物イオンを含有するモルタルを使用した。

使用した鉄筋は、図4-3-2(a)に示すように、長さ2.0 cmの鉄筋要素を6本繫いだ丸鋼を用いた。前処理は2-2と同様である。打設方法を次に示す。まず塩化物イオン含有量の少ない補修材側モルタルを打設した。24時間養生後に打継面をワイヤブラシで清掃し、塩化物イオン含有量の多い母材側モルタルを打設した。打設後24時間湿空養生した後脱型し、各外部環境中に暴露した。ただし、暴露中に打継目から酸素や水分が浸入することを防ぐため、脱型直後に全ての供試体の打継目を全周に渡ってエポキシ系樹脂により1cm幅でシールした。なお、4-3-4の実験において、相対湿度50%の空气中に暴露する供試体については、初期ひび割れを防ぐために脱型後1週間湿度80%室温20℃において初期養生を行い、その後暴露を開始した。

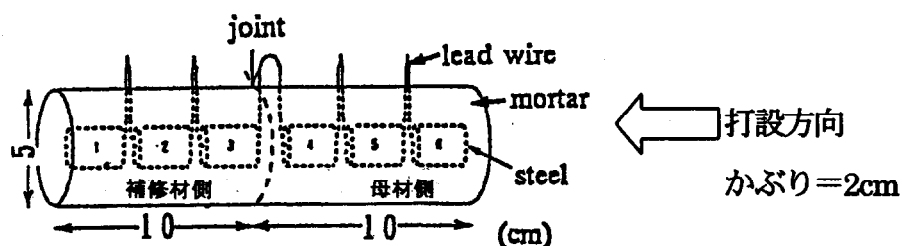
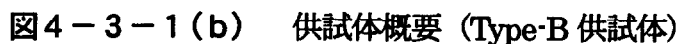


図4-3-1(a) 供試体概要 (Type-A 供試体)



Type-B 供試体を図4-3-1(b)に示す。供試体の中心部には鉄筋、供試体の側面および底面にはチタンメッシュを埋設した。鉄筋はType-A 供試体と同じく丸鋼を用い、両側端部にリード線をはんだ付けした。また、チタンメッシュは端部にリード線をはんだで接続し、接続部はエポキシ系樹脂により被覆した。供試体の作製方法を次に示す。中央に鉄筋、側面および底面にチタンメッシュが配置された型枠にモルタルを打設し、24時間湿空養生した後脱型した。打型直後に上面を残す5面をシリコンで塗装し、酸素の透過が1面のみから起こるようにして、Type-A 供試体と同様な環境に暴露した。



147

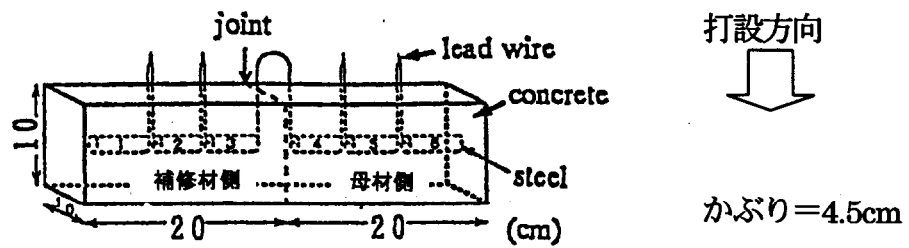


図4-3-1(c) 供試体概要 (Type-C 供試体)

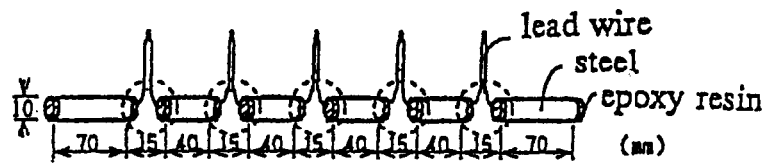


図4-3-2(b) 内部に埋設した分割鉄筋 (Type-C 供試体)

(4) Type-D 供試体 (モルタル)

Type-D 供試体を図4-3-1(d)に示す。使用した鉄筋は、7本に分割した丸鋼である。鉄筋の前処理および打設方法は、Type-A と同様である。ただし、要素番号4の鉄筋中央部で打継目が生じるように打設した。また、打継目の種類に相違を設けるため、表4-3-3に示す処理を打継面に施した。

表4-3-3 打継目の種類と打継面の処理方法

	タイプ	打継面の処理方法
モルタル	A	ワイヤブラシによりレイタンスを除去
	B	無処理 (レイタンスを除去せず)
	C	レイタンスを除去せず、厚さ0.5mmの濾紙を挟む
コンクリート	D	無処理
	E	厚さ0.5mmの濾紙を挟む

注) モルタルは鉛直方向に打継ぎを行ったため、レイタンス有り。
コンクリートは水平方向に打継ぎを行ったため、レイタンス無し。

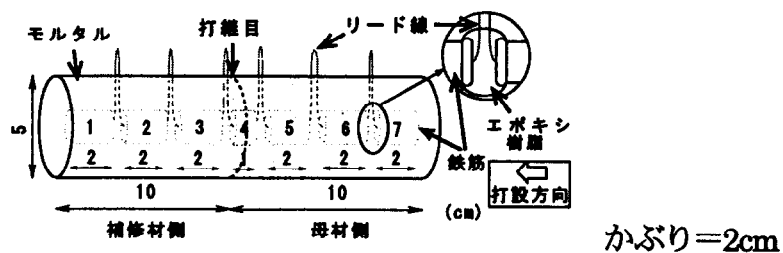


図4-3-1(d) 供試体概要 (Type-D 供試体)

(5) Type-E 供試体 (コンクリート)

Type-E 供試体を図4-3-1(e)に示す。使用した鉄筋は、異形棒鋼である。Type-E 供試体においても、打設手順は、Type-D 供試体と同様である。ただし、梁および床板の主鉄筋を模擬し、鉄筋は水平方向に配置し、コンクリートの打設方向は鉄筋と垂直とした。したがって、鉄筋の下面は、ブリーディングの影響を受けた貧配合のコンクリートと接した。なお、打継目の種類と打継面の処理方法は、表4-3-3に示す通りである。

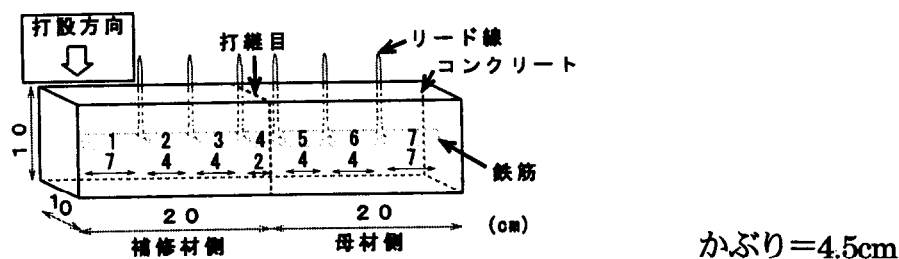


図4-3-1(e) 供試体概要 (Type-E 供試体)

4-3-1-3 打継目の種類と付着強度

打継目の種類と付着強度の関係を表4-3-4に示す。付着強度は、無筋のモルタル供試体を用い、材齢3カ月において、図4-3-3に示す曲げ試験により評価した。

表4-3-4 打継目の種類と付着強度

打継目の種類	A	B	C
A側モルタルのW/C	30		
B側モルタルのW/C	100		
付着強度比	1.00	0.76	0

付着強度比：打継目の種類がAの曲げ強度を1としたときの曲げ強度比

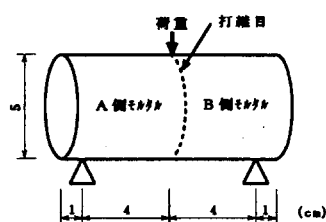


図4-3-3 打継目の付着強度測定試験方法

4-3-1-4 配合および基本性状

Type-A および Type-C 供試体の配合と外部環境を表4-3-5に、酸素透過量を測定した Type-B 供試体の配合と外部環境を表4-3-6に示す。Type-D および Type-E 供試体の配合を表4-3-7に示す。コンクリート供試体においては、実構造物において高い補修効果を要求される場合を考慮し、配合を設定した。したがって補修材には、モルタルによる実験で高い補修効果が得られた、水セメント比が30%のコンクリート、あるいは断面修復工法として今までに実績の多いポリマーセメントモルタルを使用した。また、母材側には、補修後若干の塩分が浸透した場合を模擬し、ポリマーセメントモルタルを用いた場合を除き、 0.5kg/m^3 の塩化物イオンを含有した。

表4-3-5 Type-A および Type-C 供試体の配合と外部環境

		補修材側		母材側		surroundings
		W/C(%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	W/C(%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	
Type-A	1	30	0.5	30	15.0	R. H. 80%
	2	30	0.5	50	15.0	R. H. 80%
	3	30	0.5	100	15.0	R. H. 80%
	4	50	0.5	30	15.0	R. H. 80%
	5	100	0.5	30	15.0	R. H. 80%
	6	100	0.5	30	15.0	R. H. 50%
	7	100	0.5	30	15.0	water
Type-C	8	epoxy	0	50	15.0	R. H. 80%
	9	polymer	0	50	15.0	R. H. 80%
	10	30	0.5	50	15.0	R. H. 80%
	11	100	0.5	50	15.0	R. H. 80%
	12	polymer	0	50	0.5	R. H. 80%
	13	polymer	0	50	2.0	R. H. 80%
	14	polymer	0	50	7.0	R. H. 80%

表4-3-6 Type-B 供試体の配合と外部環境

W/C(%)	30	50	100
surrounding			
water	—	○	—
R. H. 80%	○	○	○
R. H. 50%	—	○	—

表4-3-7 Type-D および Type-E 供試体の配合と外部環境

	補修材側		打継目の種類	母材側	
	W/C(%)	Cl(kg/m ³)		W/C(%)	Cl(kg/m ³)
Type-D	100	0.5	A	30	15.0
	100	0.5	B	30	15.0
	100	0.5	C	30	15.0
	30	0.5	B	30	15.0
Type-E	30	0.5	D	50	15.0
	30	0.5	E	50	15.0
	ポリマー	0.0	D	50	15.0
	ポリマー	0.0	E	50	15.0

4-3-1-5 測定項目

マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および酸素透過量を測定した。マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度の測定方法は2-2と同様である。また、酸素透過量の測定方法は2-2と同様である。なお、3-2-2-1に示した通り、腐食速度が0.034mm/年 ($2.93 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) 以下であれば、30年後における鉄筋耐力は健全時の70%以上を有する。一方、腐食速度が0.085 mm/年 ($7.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) 以上であれば、30年後における鉄筋耐力は健全時の35%以下となる⁴⁻²⁾。

(1) 打継目の電気抵抗の測定

モルタル供試体を用い、鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、図4-3-1(a)に示す要素番号3と5の鉄筋間の抵抗を、2-3-2-1(3)3)に示す方法により測定し、母材と補修材間を電気が流れる時の打継目の電気抵抗として相対的に評価した。

(2) コンクリート抵抗の測定

$\phi 5 \times 10\text{cm}$ のモルタル供試体および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ のコンクリート供試体を用い、各外部環境中におけるコンクリート抵抗を、交流インピーダンス法により測定した。

4-3-2 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

4-3-2-1 モルタル供試体を用いた検討

母材側モルタルの水セメント比の相違が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-3-4に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ とし、母材側モルタルの水セメント比を30%、50%、100%、塩化物イオン含有量は $15.0\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合の測定結果である。

実験の結果、マクロセル電流密度は、補修材側がカソード電流(正)、母材側がアノード電流(負)を示していた。そして、ミクロセル電流密度については、補修材側では全く見られず、母材側でのみ発生していることが認められた。しかしながら、これらの計測の範囲では、母材側モルタルの水セメント比がマクロセル腐食に及ぼす影響は明確には確認されない。

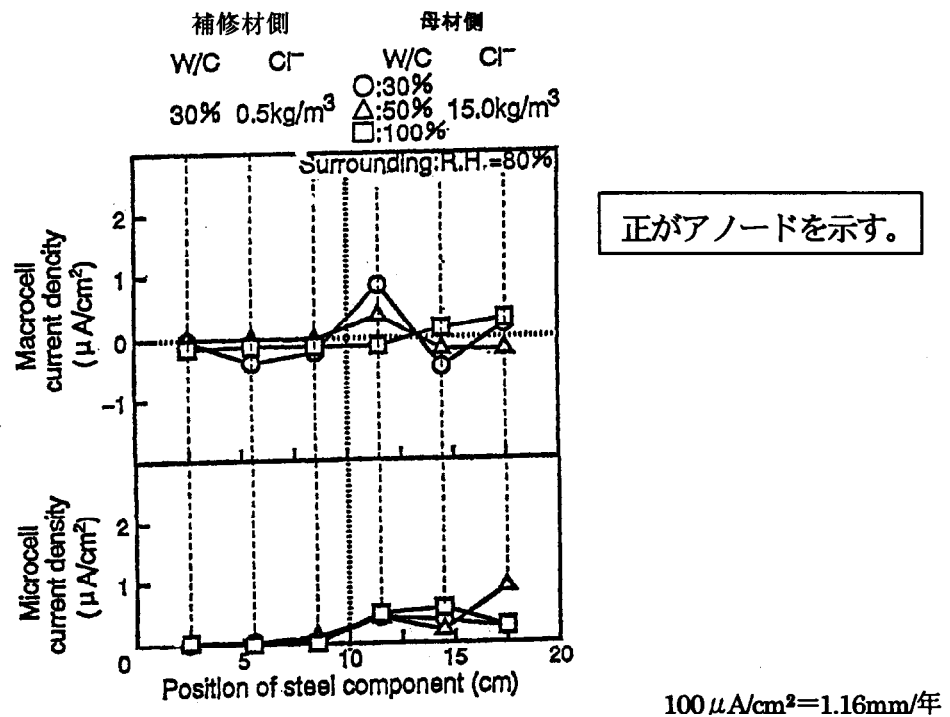


図4-3-4 母材側モルタルの水セメント比の相違が腐食速度に及ぼす影響

一方、塩化物イオン含有量の少ない補修材側モルタルの水セメント比が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に与える影響を図4-3-5に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比を30%、50%、100%、塩化物イオン含有量は0.5kg/m³とし、母材側モルタルの水セメント比を30%、塩化物イオン含有量は15.0kg/m³とした場合の測定結果である。

実験の結果、マクロセル電流密度に関して、補修材側は全てカソード電流であるが、母材側では打継目近傍を中心に大きなアノード電流が確認された。また、カソード側の水セメント比が高いほど、母材側に見られるマクロセルによるアノード電流密度は大きくなることも確認された。ミクロセル電流密度に関しては、全て母材側の鉄筋に見られ、その分布形状は、マクロセル電流密度と類似した傾向を示していた。

以上の検討の結果、カソード側となっている補修材側モルタルの水セメント比が腐食速度に影響を及ぼすことが明らかとなった。これを、補修材側モルタルの酸素透過性の面から検討を加えてみる。すなわち、補修材側モルタルの酸素透過量を Type-B 供試体により測定し、同様な条件下で Type-A 供試体において測定されたマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度のアノード側の値(正の値)を各々足し合わせ、両者を比較した。

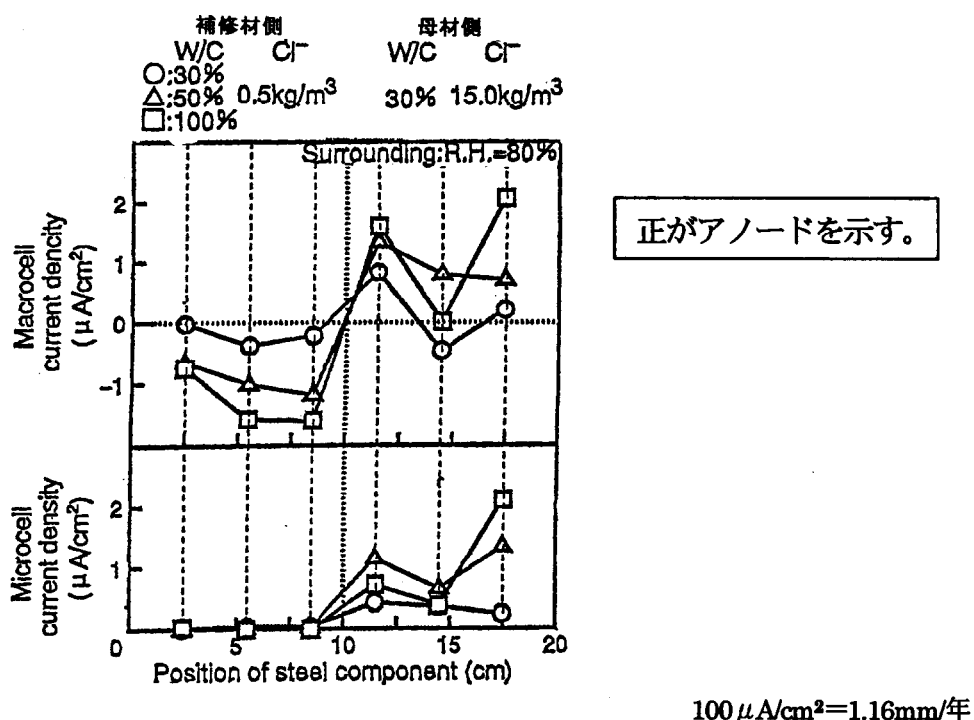


図4-3-5 補修材側モルタルの水セメント比の相違が腐食速度に及ぼす影響

測定結果を図4-3-6に示す。同図より、補修材側モルタルの水セメント比が増加すると酸素透過量は増加し、さらにアノード側の腐食電流密度の和も増加することが認められた。したがって、カソード側となる補修材側モルタルの酸素供給量がマクロセル腐食の形成とその後の進行に大きな影響を及ぼしていると推測される。

4-3-2-2 コンクリート供試体を用いた検討

図4-3-7に、補修材側にエポキシ樹脂系補修材、ポリマーセメントモルタルあるいはコンクリート、母材側に水セメント比が50%、塩化物イオン含有量が15.0kg/m³のコンクリートを使用した場合の、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度の測定結果を

示す。

マクロセル電流密度の分布はモルタル供試体の場合と若干異なる傾向が見られた。すなわち、マクロセルのアノード電流密度は母材側コンクリートの中でも打継目近傍の鉄筋要素において顕著に見られた。特に、一部の供試体においては塩化物イオン含有量の多い母材側の中だけで、アノード部とカソード部に分かれていることが確認された。ミクロセル電流密度に関しては、マクロセルによるアノード電流密度が増大した部分（母材側コンクリートの打継目近傍）で大きな値が測定された。

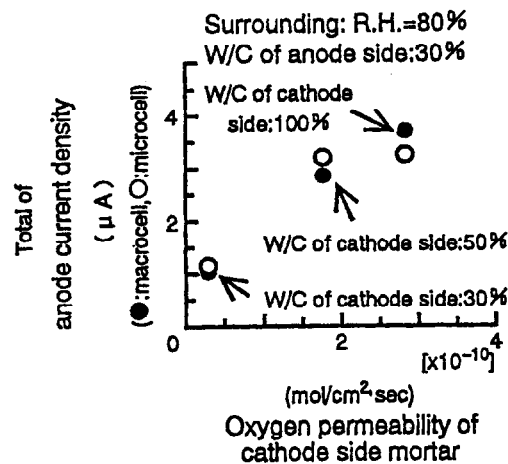


図4-3-6 酸素透過量と腐食速度の関係

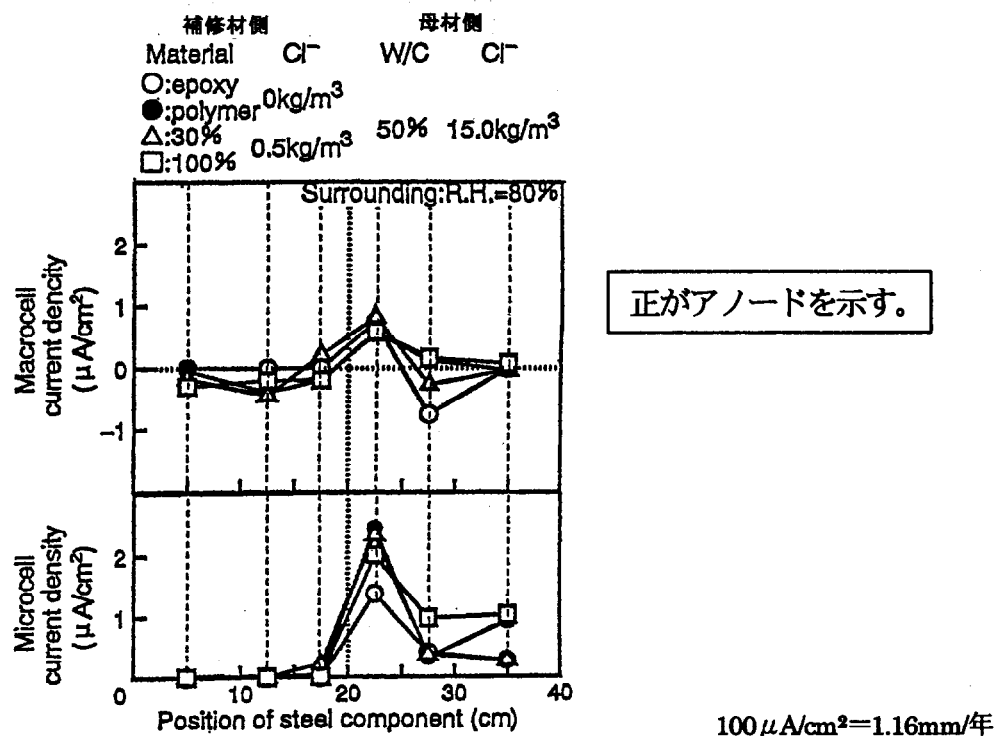


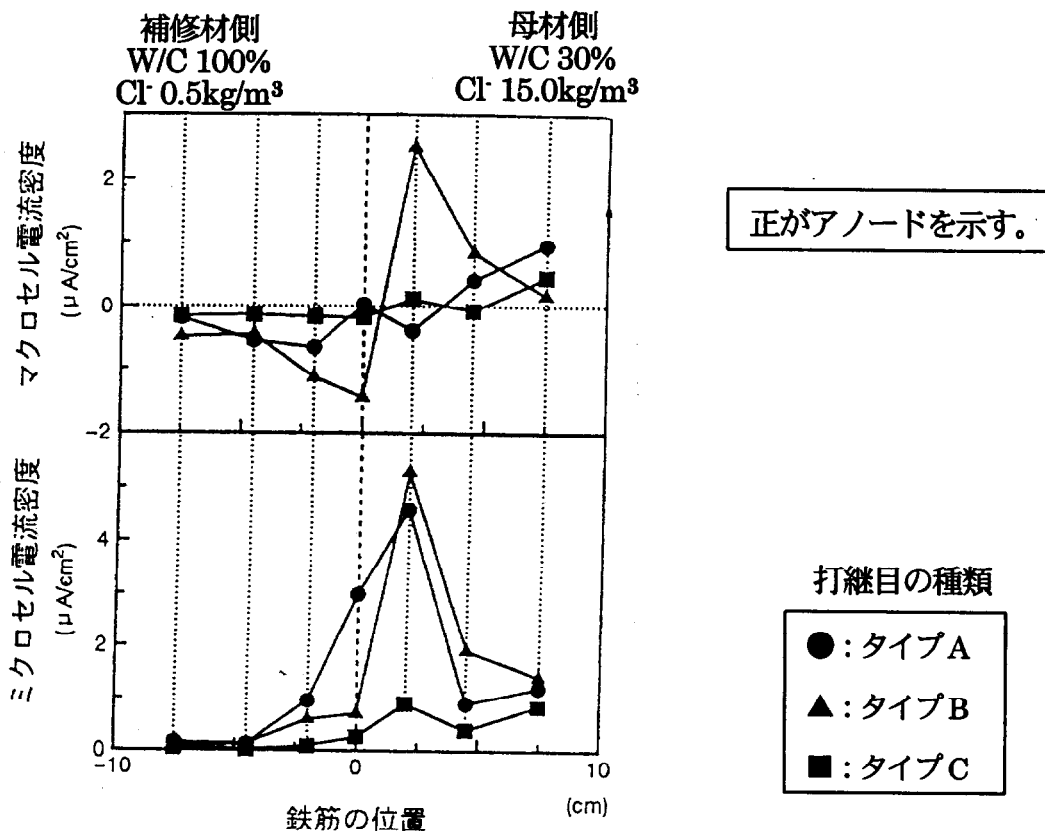
図4-3-7 補修材側コンクリートの材質の相違が腐食速度に及ぼす影響

4-3-3 打継目の種類が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

4-3-3-1 モルタル供試体を用いた検討

(1) 打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響

打継目の種類が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-3-8に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比が100%、塩化物イオン含有量は 0.5 kg/m^3 とし、母材側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は 15.0 kg/m^3 とした場合の測定結果である。また、打継目の種類は、表4-3-3のタイプA、タイプBおよびタイプCである。



$100\mu\text{A/cm}^2=1.16\text{mm/年}$

図4-3-8 打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響 (モルタル)

これによると、打継目の種類によらず、マクロセル電流密度に関しては、母材側の全ての鉄筋で負、補修材側の一部の鉄筋で正の値が認められる。したがって、母材側がカソード、補修材側がアノードであるマクロセルが形成していると考えられる。

また、打継目の種類に関して比較すると、マクロセル電流密度に関しては、母材内部の打継目近傍の鉄筋において、タイプBがタイプAあるいはタイプCと比較し、アノード電流が大きくなることが認められた。ミクロセル電流密度に関しては、打継目あるいは母材側打継目近傍で、最も大きいことが認められた。また、その値は、タイプAおよびタイプBでは、タイプCと比較し、大きくなることが確認できた。したがって、打継目がタイプBの場合、タイプAあるいはタイプCと比較し、腐食が促進することが明らかとなった。

このことに対し、打継目における酸素透過量および母材と補修材間を電気が流れるときの打継目における電気抵抗の面から検討を加えてみる。すなわち、測定されたマクロセル電流およびミクロセル電流のアノード側の値（図4-3-8中の正の電流密度とその鉄筋要素の表面積を掛けた値）を各々足し合わせ、打継目における酸素透過量および電気抵抗と比較した。

打継目における酸素透過量とマクロセル電流およびミクロセル電流の和の関係を、図4-3-9に示す。これによると、タイプAはタイプBと比較し、酸素透過量が減少し、腐食電流も減少することが認められた。また、打継目の電気抵抗とマクロセル電流の関係を、図4-3-10に示す。これによると、タイプCはタイプBと比較し、電気抵抗は増加し、腐食電流は減少することが認められた。

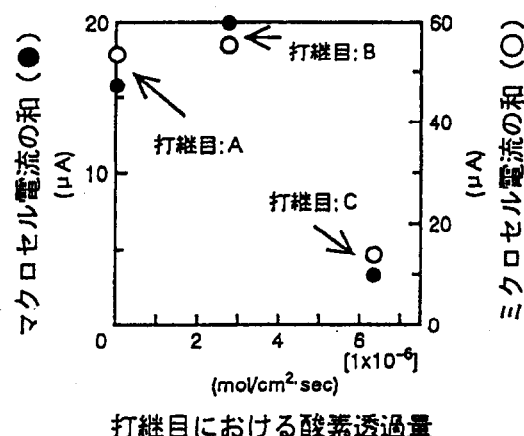


図4-3-9 打継目における酸素透過量と腐食電流の関係（モルタル）

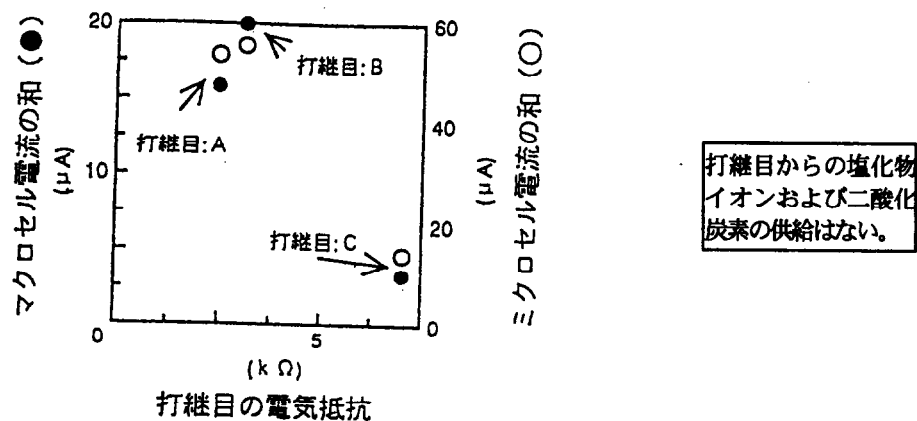


図4-3-10 打継目における電気抵抗と腐食速度の関係（モルタル）

図4-3-11に、打継目の連続性と鉄筋の腐食速度の関係をまとめる。打継目の連続性が優れると、打継目における酸素透過量が減少し律速条件となり、腐食は抑制されと考えられる(図4-3-11左)。また、打継目の連続性が劣ると、塩化物イオンの浸透が無く、かつ中性化の影響が小さいときは、打継目の電気抵抗が増加し、母材と補修材間に跨るマクロセルの形成が電氣的に困難となり、腐食は抑制されと考えられる(図4-3-11中央)。したがって、断面修復部に形成するマクロセルの腐食速度は、両者の影響を相互に受け、制御されると思われる(図4-3-11右)。なお、ここでの実験では、タイプBで最も大きな腐食速度を示したが、この値は打継目が電解質（海水等）で満たされる等の条件により変化することも考えられる。

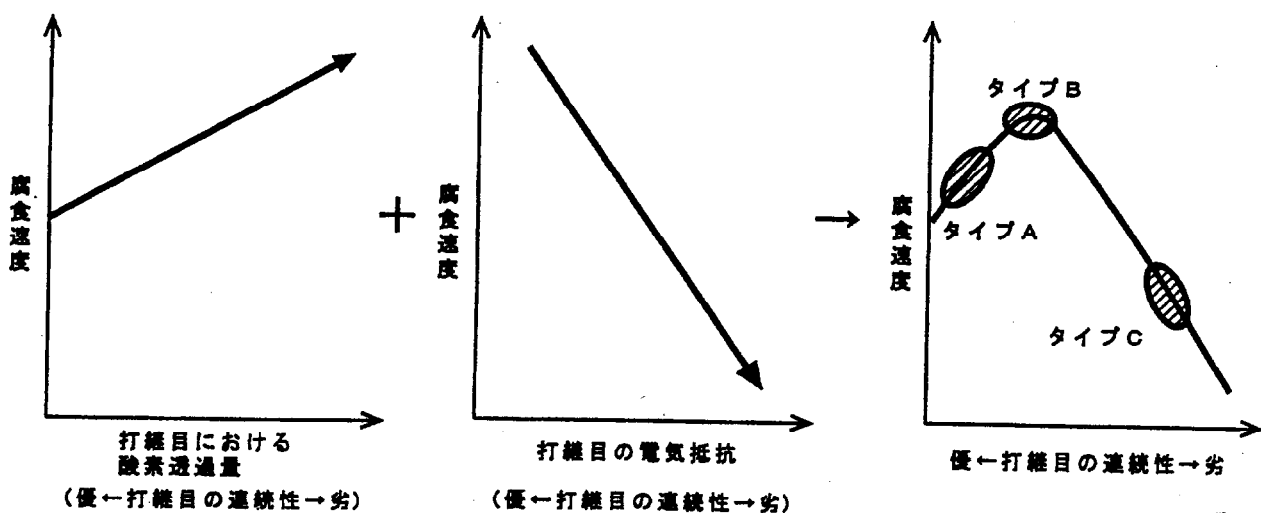
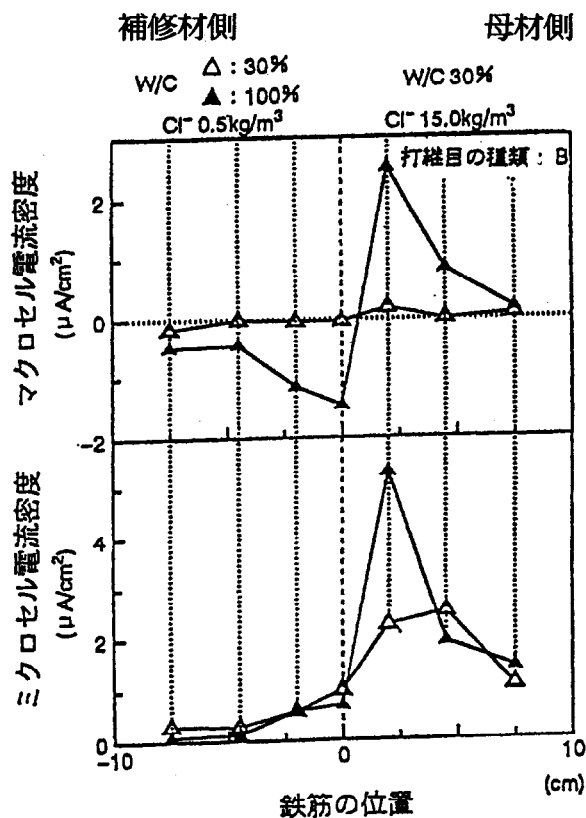


図4-3-11 打継目の連続性と腐食速度の関係

(2) 水セメント比の相違が腐食速度に及ぼす影響

補修材側モルタルの水セメント比の相違が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-3-12に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比が30%および100%、塩化物イオン含有量は 0.5kg/m^3 とし、母材側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は 15.0kg/m^3 である。また、打継目の種類は、上記実験において腐食速度が最大であった、タイプBである。

これによると、マクロセル電流密度に関しては、補修材側モルタルの水セメント比が30%の場合は、100%の場合と比較し、減少することが認められる。また、ミクロセル電流密度に関しても、補修材側モルタルの水セメント比が30%の場合は、100%の場合と比較し、母材側打継目近傍での値が、減少することが認められる。



$$100\mu\text{A/cm}^2=1.16\text{mm/年}$$

図4-3-12 補修材側モルタルの水セメント比の相違が腐食速度に及ぼす影響
(モルタル)

以上の検討の結果、打継目が同種の場合、マクロセルにおいてカソード部となる補修材側モルタルの水セメント比が低い時に、腐食速度は減少することが明らかとなった。これは、補修材側モルタルの水セメント比が低い時は、モルタル中の酸素透過量が減少し、かつ表4-3-8に示すように、比抵抗が増大するため、腐食が抑制されと考えられる。

表4-3-8 補修材側材料の抵抗

材料	抵抗(k Ω ・cm)
モルタル W/C30%	13.99
モルタル W/C100%	3.77
ポリマーセメントモルタル	31.90
コンクリート W/C30%	18.44
コンクリート W/C100%	16.03

(エポキシ樹脂系補修材の抵抗は測定不可能)

4-3-3-2 コンクリート供試体による検討

モルタル供試体を用いた実験的検討により、補修材の水セメント比が低い場合、酸素透過量が減少し、かつ比抵抗が増大するため、腐食は抑制されることが明らかとなった。したがって、コンクリート部材を用いた検討では、実構造物において高い補修効果が要求される場合を考慮し、補修材は酸素透過性が低く⁴⁻¹⁰⁾ かつ比抵抗が大きい水セメント比30%のコンクリートおよびポリマーセメントの場合に関して、検討を行った。

(1) 補修材に水セメント比が30%のコンクリートを用いた場合

打継目の種類が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図4-3-13に示す。同図は、補修材側コンクリートの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は0.5kg/m³とし、母材側コンクリートの水セメント比が50%、塩化物イオン含有量は15.0kg/m³とした場合の測定結果である。また、打継目の種類は、表4-3-3のタイプDおよびタイプEである。

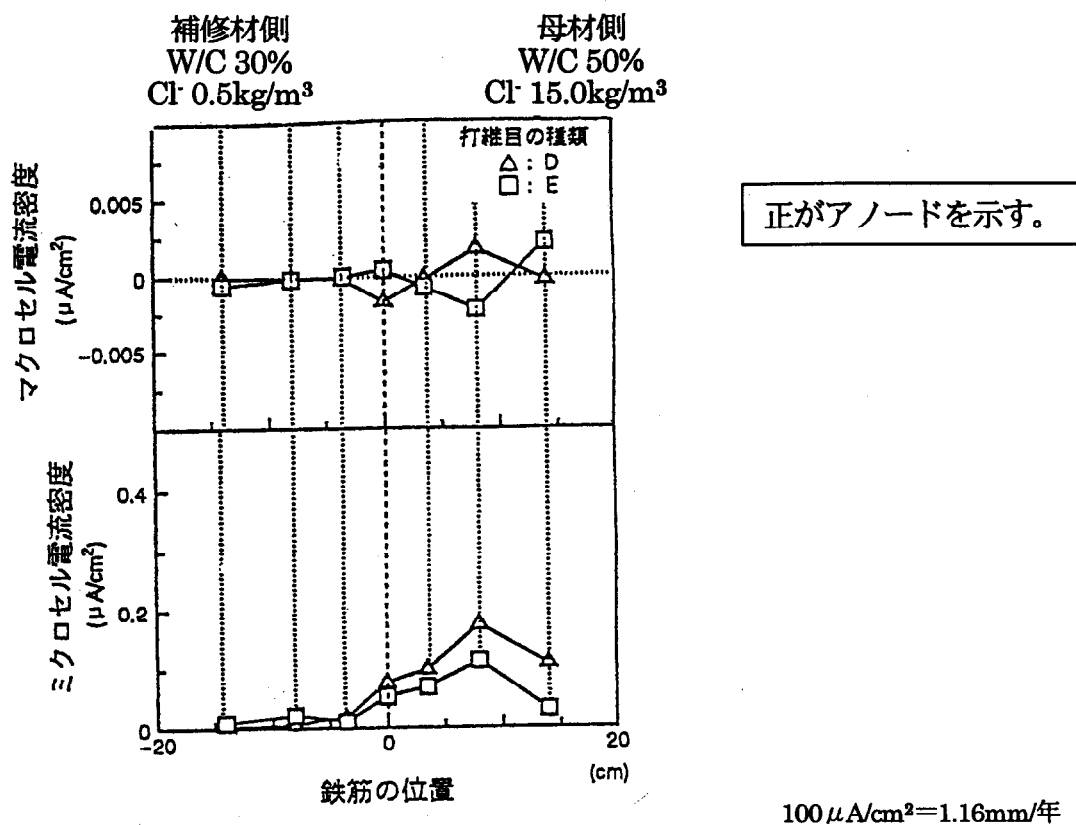


図4-3-13 打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響 (コンクリート)

これによると、マクロセル電流密度に関しては、タイプDでは、母材側でアノード電流が、打継目でカソード電流が認められた。一方、タイプEでは、母材側内部だけでアノード電流およびカソード電流が確認された。また、ミクロセル電流密度に関しては、打継目の種類に関わらず、母材内部および打継目にて大きい。そして、その値は、タイプDがタイプEと比較し、大きくなることが認められた。

以上の検討の結果、タイプDでは母材側がアノード、補修材側および打継目がカソードとなるマクロセルの形成が認められるが、タイプEでは明確なマクロセルの形成は認められなかった。そして、モルタル供試体による実験的検討と同様、無処理にて打継ぎを行ったタイプDでは、打継面に濾紙を挟んだタイプEと比較し、腐食速度は増加することが明らかとなった。これは、モルタルと同様、塩化物イオンの浸透が無く、かつ中性化の影響が小さいときは、打継目の連続性が劣ると、打継目における電気抵抗が増加し、母材と補修材内部の鉄筋間でのマクロセルの形成が困難になるためと考えられる。

(2) 補修材にポリマーセメントモルタルを使用した場合

図4-3-14は、補修材側を塩化物イオンを含有しないポリマーセメントモルタルと

し、母材側コンクリートの水セメント比を 50%、塩化物イオン含有量は 15.0kg/m^3 とした場合の測定結果である。

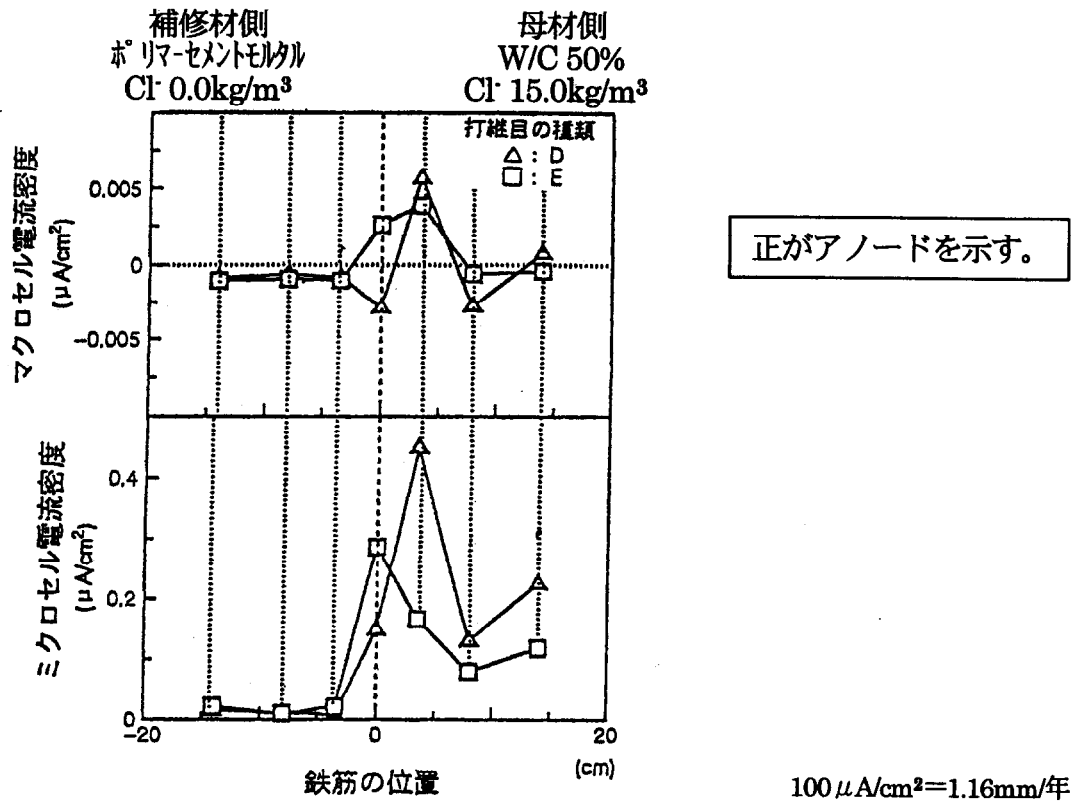


図4-3-14 打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響 (ポリマーセメントモルタル)

これによると、マクロセル電流密度に関しては、タイプDでは、母材側打継目近傍でアノード電流が、打継目あるいは一部の母材内部の鉄筋でカソード電流が認められた。一方、タイプEは、打継目および母材側打継目近傍でアノード電流が確認されるが、顕著なカソード電流は確認されなかった。また、ミクロセル電流密度に関しては、タイプDでは、母材側打継目近傍にて、一方タイプEでは、打継目にて大きくなることが認められた。また、その値は、打継目を除いて、タイプDがタイプEと比較し、大きいことが確認された。

さらに、供試体を割裂し、内部の鉄筋を取り出し、腐食状況を観察した。図4-3-15は、鉄筋の腐食状況の観察結果である。また、図4-3-16は腐食部面積を鉄筋表面積で除することにより算定した、腐食面積率である。これらによると、打継目の種類に関わらず、母材側打継目近傍で腐食が最も進行していることが確認できる。そして、その腐食程度は、タイプDがタイプEと比較し、進行していると考えられる。

以上の検討の結果、補修材にポリマーセメントモルタルを用いた場合にも、水セメント

比が30%のコンクリートを用いた場合と同様に、タイプDはタイプEと比較し、腐食速度が増加することが明らかとなった。

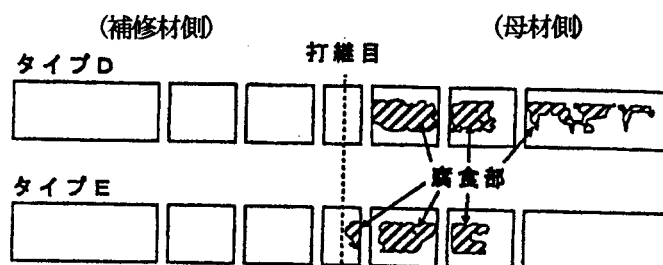


図4-3-15 鉄筋の腐食状況

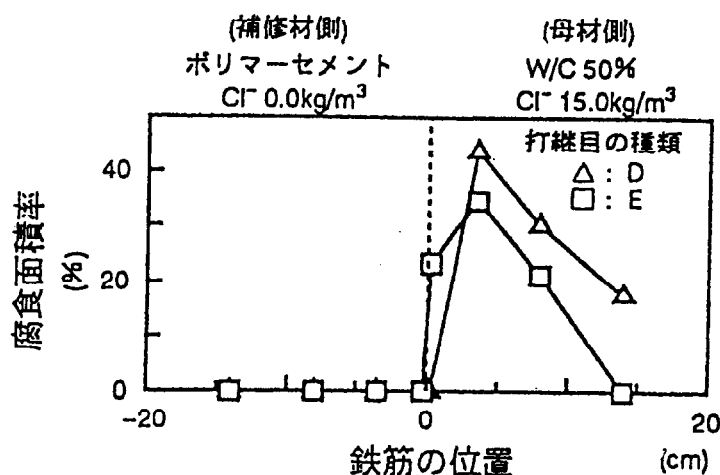


図4-3-16 打継目の種類と腐食面積率の関係

4-3-3-3 解析的検証

(1) モデルの構築

本研究では、実験的検討に用いた供試体を考慮し、図4-3-17に示す形状を対象とした。また、コンクリート中を流れる電流は、コンクリート内部の電位変化に比例し、抵抗に反比例するとして、式を展開した。ただし、①コンクリート中を流れる電流は鉄筋に対して平行でかぶり方向で変化しない、②電位は鉄筋の長手方向のみで変化し、かぶり方向では変化しない、③部材内部の物性は、打継目からの距離によらず一定、と仮定する。なお、これらの仮定には、コンクリート中の鉄筋腐食形成機構を表す際、不適当な要素も含まれる。例えば、鉄筋とコンクリート界面には空隙が存在する⁴⁻¹¹⁾。したがって、コンクリートのバルク部と比較して鉄筋界面では電流は流れやすいと考えられる。本研究では

第一次近似として前述の通り仮定したが、厳密には鉄筋とコンクリート界面の物質透過性、抵抗等の影響も含め、かぶり方向の電気特性変化を考慮する必要がある。

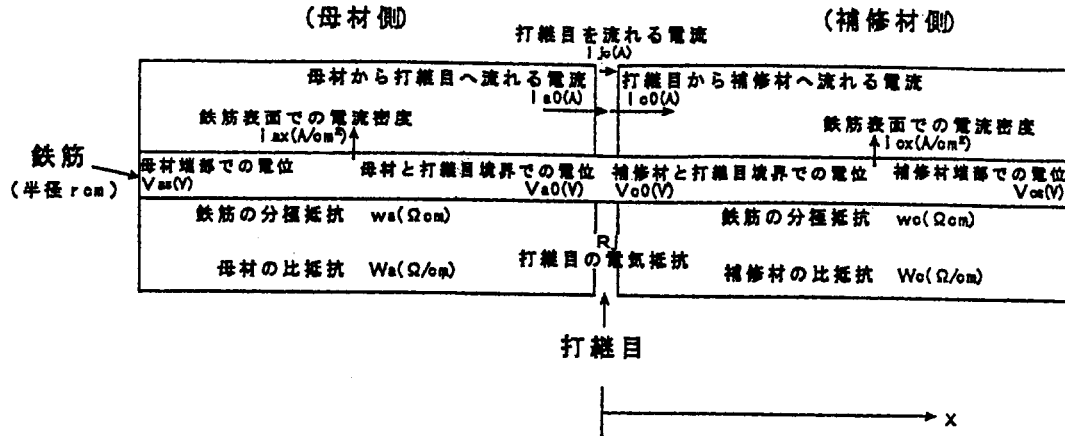


図4-3-17 モデルで対象とする供試体

文献⁴⁻¹²⁾を参考にし、打継目から距離 x 離れた任意の点での鉄筋のカソード・アノード電流密度、および補修材・母材中の鉄筋の電位を求める。

図4-3-17における任意の点 x において、軸方向のコンクリート内の電流 I は軸方向に流れる際、コンクリートの抵抗による電圧変化を生ずる。

$$dV_x = IWdx \quad \therefore \frac{dV_x}{dx} = IW \quad (4-3-1)$$

また、この部分で鉄筋に電流が流入または流出するため、 I は変化するが、この流出入する電流、すなわち dI/dx と鉄筋の分極抵抗 w により IR ドロップは $V_x - V_s$ である。したがって、次式が成り立つ。

$$V_x - V_s = w \frac{dI}{dx} \quad \therefore \frac{dV_x}{dx} = w \frac{d^2I}{dx^2} \quad (4-3-2)$$

式(4-3-1)および式(4-3-2)より、次式が導かれる。

$$IW = w \frac{d^2 I}{dx^2} \quad \therefore \frac{d^2 I}{dx^2} = \frac{W}{w} I \quad (4-3-3)$$

ここで、任意の x における式 (4-3-3) の解は、 $\alpha = \sqrt{\frac{W}{w}}$ とした時、次式で示される。

$$I_x = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} \quad (4-3-4)$$

補修材側における境界条件から、 $x=0$ のとき、 $I_c = I_{c0}$ 、 $x=L_c$ のとき $I_c = 0$ となる。
このことから、補修材側の任意の x における式 (4-3-4) は次式のとおりとなる。

$$I_x = I_{c0} \frac{\sinh \alpha_c (L_c - x)}{\sinh \alpha_c L_c} \quad (4-3-5)$$

したがって、補修材側の任意の x における鉄筋に流入する電流密度 i_c は、次式のとおりとなる。

$$i_{cx} = -\frac{1}{2\pi r} \frac{dI_c}{dx} = -\frac{\alpha_c I_{c0} \cosh \alpha_c (L_c - x)}{2\pi r \sinh \alpha_c L_c} \quad (4-3-6)$$

また、補修材側の任意の x における分極 $V_{co} - V_{cs}$ は次式のとおりとなる。

$$V_{cx} - V_{cs} = -2\pi r w_c i_c = -w_c \frac{\alpha_c I_{c0} \cosh \alpha_c (L_c - x)}{\sinh \alpha_c L_c} \quad (4-3-7)$$

よって、 $x=0$ においては、次式のとおりとなる。

$$V_{co} - V_{cs} = -w_c \frac{\alpha_c I_{c0} \cosh \alpha_c L_c}{\sinh \alpha_c L_c} \quad (4-3-8)$$

同様に、母材側は、以下ようになる。

$$i_{ax} = \frac{\alpha_a I_{a0} \cosh \alpha_a (L_a - x)}{2\pi \sinh \alpha_a L_a} \quad (4-3-9)$$

$$V_{a0} - V_{as} = w_a \frac{\alpha_a I_{a0} \cosh \alpha_a L_a}{\sinh \alpha_a L_a} \quad (4-3-10)$$

ここで、 L は鉄筋の長さ(補修材側で L_c 、母材側で L_a [cm])、 x は打継目から任意の点までの距離(補修材方向を正[cm])、 w は鉄筋の単位長さ当りの分極抵抗(補修材側で w_c 、母材側で w_a [Ωcm^2])、 r は鉄筋の半径[cm]、 W は長手方向のコンクリートの単位長さ当りの抵抗(補修材側で W_c 、母材側で W_a [Ωcm])を示す。

$$W = \frac{\rho}{S}$$

ただし、 ρ はコンクリートの比抵抗 [Ωcm]、 S はコンクリートの断面積 [cm^2]を示す。

I_{c0} は打継目から補修材へ流れる電流[A]、 I_{a0} は母材から打継目に流れる電流[A]、 i_x は任意の点で鉄筋から流出する電流密度(補修材側で i_{cx} 、母材側で i_{ax} [A/cm^2])、 V_{c0} は補修材と打継目境界での鉄筋の電位[V]、 V_{a0} は母材と打継目境界での鉄筋の電位[V]、 V_s は鉄筋端部における自然電位(補修材側で V_{cs} 、母材側で V_{as} [V])を示す。

さらに、打継目の種類について考慮する。4-3-3-1における実験的検討より、母材と補修材間を電気が流れるとき、打継目が電気的な抵抗となることが明らかとなった。したがって、打継目を貫く電流と打継目における電圧変化には、次式の関係が成り立つ。

$$V_{j1} = R_j I_{c0} \quad (4-3-11)$$

ここで、 V_{j1} は打継目を通過するために必要な電圧ロス、 R_j は打継目の電気抵抗を示す。

また、打継目近傍の母材側、補修材側および打継目における電流および電圧変化の関係を表すと、次式の様になる。

$$I_{a0} = I_{jc} + I_{c0} \quad (4-3-12)$$

$$V_{c0} - V_{a0} = V_{j1} \quad (4-3-13)$$

ここで、 I_{jc} は打継目で発生するカソード電流（打継目における酸素透過量に関連）を示す。

したがって、式(4-3-8)および式(4-3-10)～(4-3-13)より、次式が求まる。

$$I_{c0} = \frac{-(V_{cs} - V_{as}) - w_a \frac{\alpha_a I_{jc} \cosh \alpha_a L_a}{\sinh \alpha_a L_a}}{w_c \frac{\alpha_c \cosh \alpha_c L_c}{\sinh \alpha_c L_c} + w_a \frac{\alpha_a \cosh \alpha_a L_a}{\sinh \alpha_c L_c} + R_j} \quad (4-3-14)$$

したがって、式(4-3-14)を式(4-3-12)に代入し、 I_{a0} が求まる。さらに、式(4-3-6)および式(4-3-9)より、任意の点におけるカソード電流密度およびアノード電流密度が算定される。

(2) 検証結果

打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響を、図4-3-18および図4-3-19に示す。代入したパラメータは、材齢3カ月における実験値を参考にし、表4-3-9に示す値を用いた。打継目の種類の相違により、打継目における酸素透過量の影響を受ける I_{jc} 、および打継目の電気抵抗(R_j)が異なる。

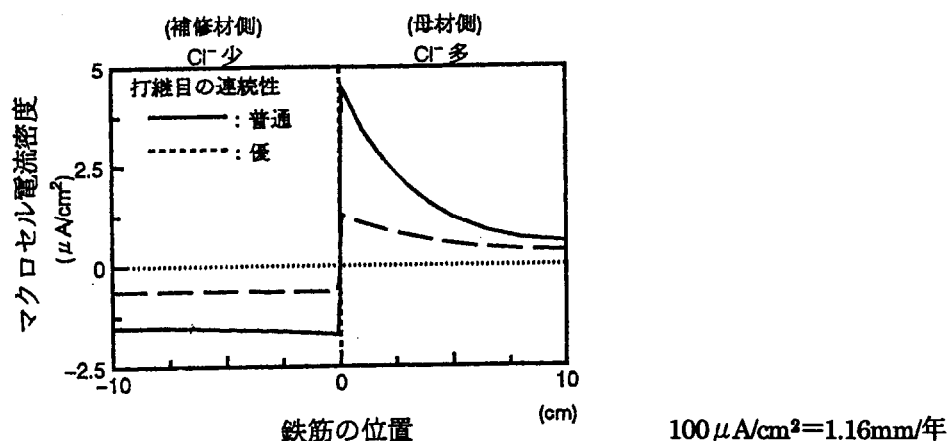


図4-3-18 打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響（解析結果-1）

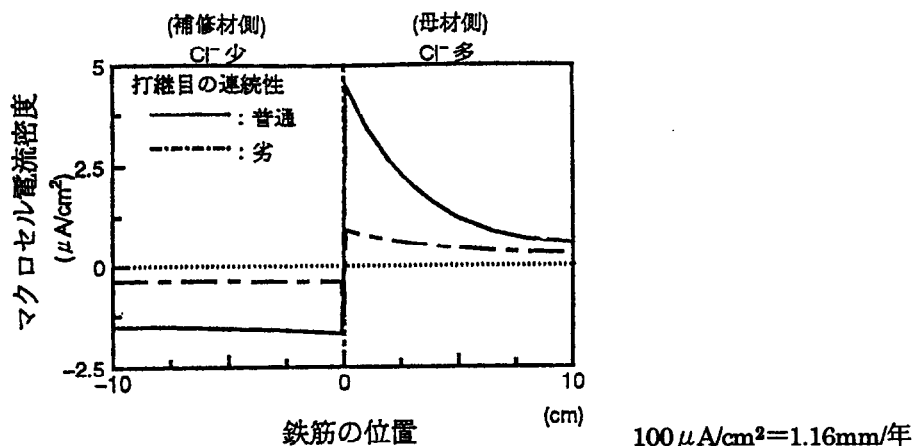


図4-3-19 打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響（解析結果-2）

表4-3-9 解析に用いた代入値

打継目の 連続性	V_{cs} (mV)	V_{as} (mV)	w_c ($k\Omega cm^2$)	w_a ($k\Omega cm^2$)	ρ_s ($k\Omega cm^2$)	ρ_a ($k\Omega cm^2$)	R_i ($k\Omega$)	I_c (μA)
優	-250	-600	500	20	3	5	3.0	0.5
普通	-250	-700	200	10	3	5	3.5	2.0
劣	-200	-450	500	25	3	5	7.5	4.0

図4-3-19および図4-3-20によると、打継目からの塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給がない時、打継目の連続性が優れるあるいは劣る場合は、普通の場合と比較し、マクロセル電流密度が減少することが確認できる。したがって、4-3-3-1(1)および4-3-3-2に示した実験結果を裏付ける結果が得られた。

4-3-4 外部環境の相違が及ぼす影響

これまでの検討の結果、マクロセル腐食の進行にはカソード側の材料の酸素透過量とコンクリート抵抗が大きく影響しているものと推測された。酸素透過量やコンクリート抵抗は、それぞれ外部環境の湿度にも大きく影響される。また、鉄筋の腐食速度は、温度の影響を受ける。したがって、ここでは、外部環境の湿度や温度が腐食速度に与える影響について検討を行った。

4-3-4-1 外部環境中の湿度の相違がマクロセル腐食に及ぼす影響

(1) 外部環境が定常的な場合

外部環境の湿度の相違が、Type-A 供試体で測定されたマクロセル電流密度のアノード電流密度（正の値）の和に及ぼす影響を図4-3-20に示す。実験の結果、アノード側のマクロセル電流密度の和は相対湿度80%の場合最大となり、水中および乾燥空気中では小さくなることが認められた。これは、相対湿度の影響を受けて、カソード側材料の酸素透過量や比抵抗が変化したことが主要因と考えられる。

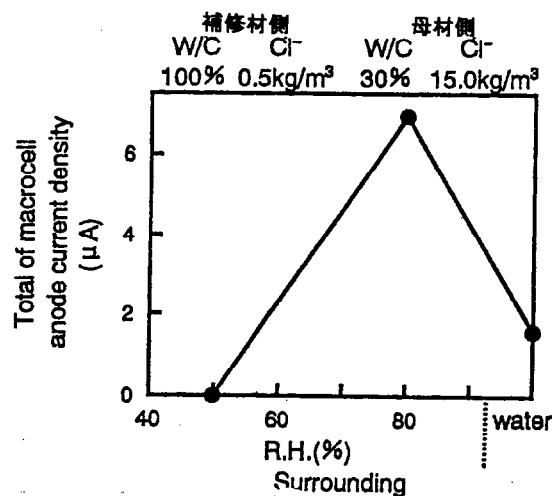


図4-3-20 外部環境の湿度が腐食速度に及ぼす影響

図4-3-21に、相対湿度と酸素透過量の関係を示す。図4-3-22に、相対湿度とモルタル抵抗の逆数との関係を示す。これらによると、酸素透過量は相対湿度が増加すると少なくなる傾向が認められる。一方、モルタル抵抗の逆数は相対湿度が上昇すると大きくなる。

したがって、外部環境中の相対湿度が低い場合、酸素透過量は多くなり、カソード反応を進行させる方向に働くが、モルタル抵抗の逆数が小さくなるために腐食速度は抑えられる。一方、相対湿度が高い場合や水中に暴露された場合では、酸素透過量が制限されるために腐食速度が遅くなることがわかった。

ここでの実験の範囲では、相対湿度が80%程度で最も大きな腐食速度を示したが、この値は材質やかぶり厚さ等の影響を受けて変化すると考えられる。

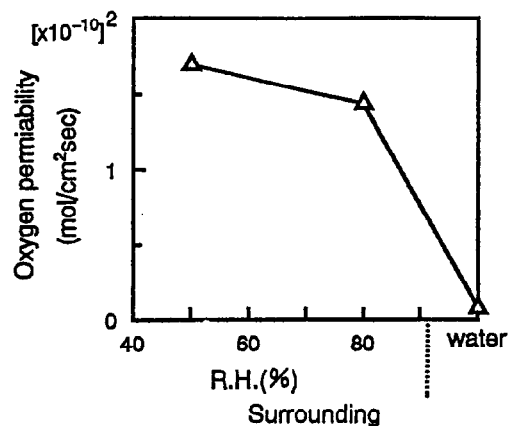


図4-3-21 湿度と酸素透過量の関係

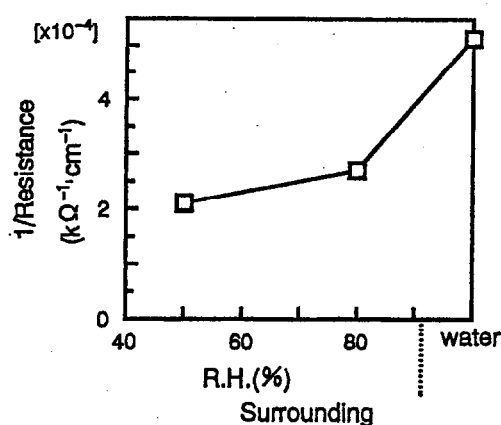


図4-3-22 湿度と抵抗の関係

(2) 外部環境が非定常な場合

塩水浸漬・湿潤気中繰返し環境下にて養生された場合、外部環境は非定常的に変化する。そして、干満帯部や飛沫帯に存在する港湾構造物の多くは、塩の干潮等非定常な外部環境に接する。したがって、ここでは、打継部周辺の外部環境の変化が時間により変化することが、打継目を貫く鉄筋のマクロセル腐食速度に及ぼす影響を検討する。

モルタル供試体(Type D)あるいはコンクリート供試体(Type E)を、6時間の塩水 (NaCl 濃度 3.1wt%) 浸漬と6時間の相対湿度 80%中での湿空養生を1サイクルとする、干満部を模倣した非定常環境下に暴露した。図4-3-23に、モルタル供試体の打継目を貫く鉄筋 (要素番号4の鉄筋) 表面での腐食電流密度の経時変化を示す。母材側モルタルの水セメント比は共に 30%であるが、補修材側モルタルの水セメント比は、供試体 I で 100%、

Ⅱでは 30%である。また、打継目の種類はタイプ B である。なお、図中では、材齢 2 カ月目の測定開始時を時間 0 とした。

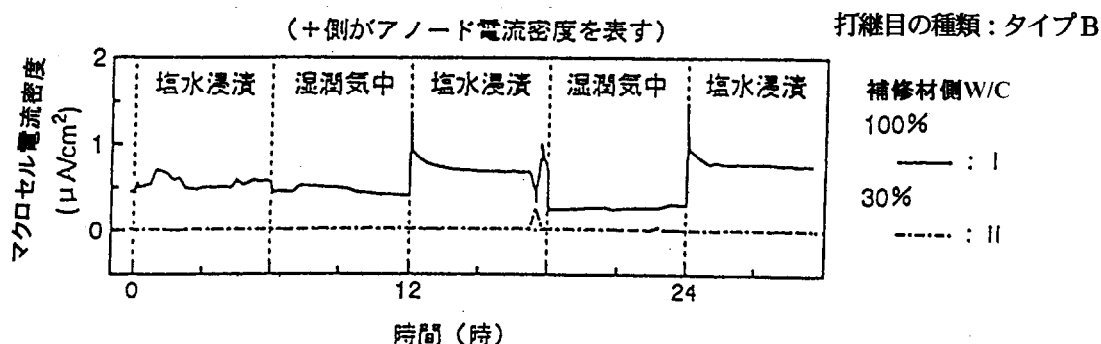


図 4-3-23 外部環境の変化に伴う打継目近傍鉄筋の腐食電流密度の経時変化 (モルタル)

これによると、供試体Ⅰでは、外部環境が変化した直後にマクロセル電流密度が大きく変化することが認められた。そして、塩水浸漬時にはアノード電流密度が増加し、湿空中では減少することがわかった。これは、塩化物イオンの浸透が増加する塩水浸漬時にはアノード反応が活発化し、一方塩化物イオンの浸透が無い湿空中ではアノード反応が抑制されるためと考えられる。また、補修材側モルタルの水セメント比が 30%である供試体Ⅱに関しては、外部環境の変化に伴う腐食電流密度の変化は認められず、その値も非常に小さかった。すなわち、打継目両側のモルタルの水セメント比が小さい場合、打継目に存在する鉄筋の腐食の進行は遅くなることが確認された。

図 4-3-24 に、コンクリート供試体の打継目を貫く鉄筋表面での電流密度の経時変化を示す。母材側コンクリートの水セメント比は 50%、補修材側コンクリートの水セメント比は 30%である。また、打継目の種類はタイプ D である。

これによると、モルタルと同様、外部環境が変化した直後に腐食電流密度が大きく変化することが認められた。そして、塩水浸漬直後にはアノード電流密度が、湿空に変化した直後にはカソード電流密度が生じていることが認められた。ただし、その値はモルタルと比較し非常に小さく、また環境の変化後しばらくすると定常状態に戻ることが認められた。これは、コンクリートの水セメント比が 30%と 50%であり、なおかつかぶり厚さも大きいいため、特に打継目に位置する鉄筋のみが外部環境の影響を大きく受け、その他のコンクリート内部の鉄筋では、表面からの腐食因子の浸透は少ないために、コンクリート内部の鉄筋ではカソードあるいはアノード反応が制限されるためと考えられる。

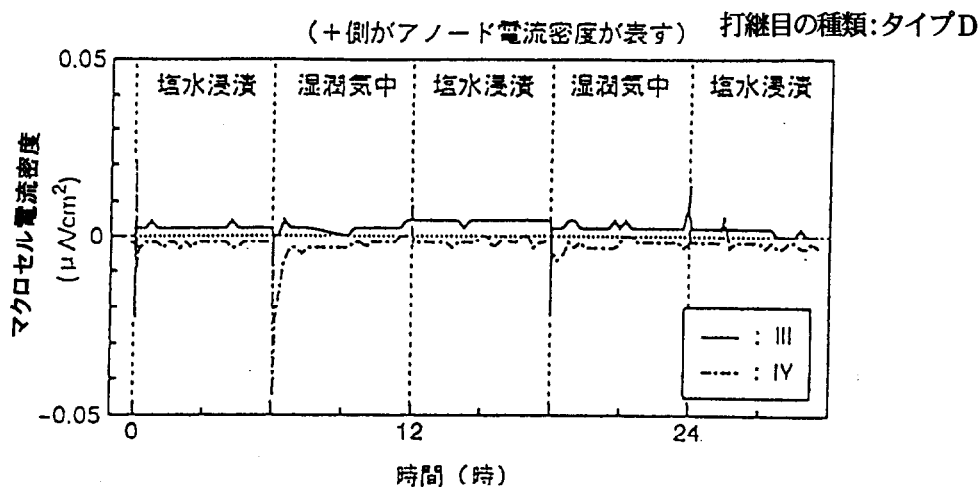


図4-3-24 外部環境の変化に伴う打継目近傍鉄筋の腐食電流密度の経時変化
(コンクリート)

以上の結果から、外部環境の変化に伴い、打継部の鉄筋の腐食速度は変化することが明らかとなった。特に、本研究で模擬した様な潮の干満の影響を受ける場合には、塩化物イオンが浸透する場合にアノード反応が活発化し、塩化物イオンが浸透しない場合には抑制されることが確認された。そして、打継目近傍のコンクリート部材の品質は、打継目を貫く鉄筋の腐食速度に影響を及ぼすことも認められた。

以上の結果および4-3-3の結果を踏まえると、打継目における酸素透過量および母材と補修材間の電気抵抗は、マクロセル腐食速度に影響を及ぼすことが明らかとなった。特に4-3-3の実験では、打継目の種類に相違を設け、打継目の物質通過性を変化させた。しかしながら、実構造物における打継目の物質通過性は、打継目の飽水状態によっても変化すると思われる。すなわち、同一打継目において、湿潤状態の時は、打継目における酸素透過量が減少する。一方、乾燥状態では、母材と補修材間の電気抵抗が増加する。本研究の検討を踏まえると、打継目の飽水状態とマクロセル腐食速度の関係は図4-3-25に示す通りと考えられる。したがって、乾燥から湿潤に変化するとき、および湿潤から乾燥に変化する際に、腐食速度が最大となる可能性がある。このため、乾湿が繰り返されることにより、腐食速度は最大となる点を往復することになる。以上のことから、実構造物において、乾湿繰り返し環境は、断面修復部における打継目近傍の鉄筋腐食を促進させることが示唆される。

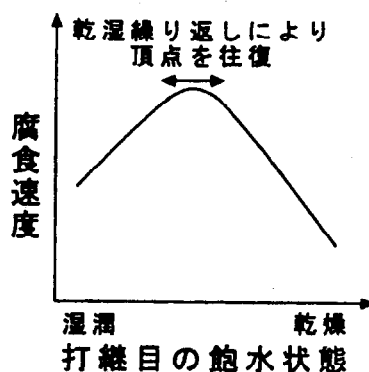


図4-3-25 打継目の飽水状態と腐食速度の関係

4-3-4-2 外部環境の温度の相違がマクロセル腐食に及ぼす影響

外部環境の温度の相違が、Type A 供試体の鉄筋のマクロセル電流密度のアノード電流密度の和に及ぼす影響を図4-3-26に示す。同図より、温度が上昇すると電流密度は増加し、温度が低下すると電流密度は減少することが認められた。一般に温度の上昇は化学反応速度を増加させ、80℃以下の自然環境下での腐食においても、温度の上昇とともに腐食速度は増加すると言われている⁴⁻¹³⁾。したがって、外部環境の温度の変化に伴いマクロセル電流密度が影響を受けたと考えられる。

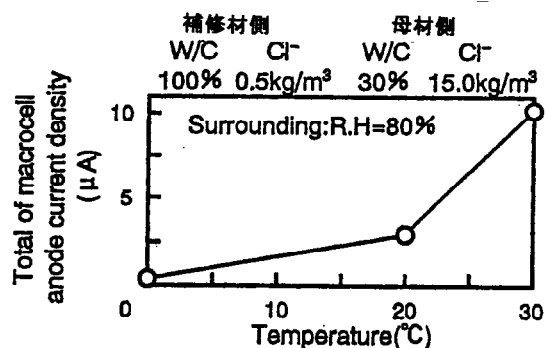


図4-3-26 外部環境の温度が腐食速度に及ぼす影響

4-4 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 塩分環境下にあるコンクリートの代表的な欠陥部である曲げひび割れ部および断面修復部の打継目近傍を対象とし、マクロセル腐食の形成機構を評価できた。
- ② 曲げひび割れ近傍では、主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は著しく速かった。例えば、水セメント比が50%の場合、スターラップ下部鉄筋の腐食速度は0.12mm/年となり、主鉄筋の腐食速度と比較して、5倍も速かった。
- ③ 曲げひび割れ部において、最も腐食速度が速いスターラップ下部鉄筋の腐食形態は、コンクリートの水セメント比の影響を受ける。すなわち、水セメント比が低い場合はマクロセル卓越型腐食が進行し、水セメント比が高い場合はミクロセル卓越型腐食が進行する。これに伴い、水セメント比が30%の場合が、水セメント比が70%の場合と比較して、約0.1mm/年程度腐食速度は速かった。
- ④ 曲げひび割れ近傍では、マクロセルが形成し、腐食速度は著しく増加した。すなわち、ひび割れがない場合は、上部スターラップにおいて、マクロセル電流密度:ミクロセル電流密度が1:5であったのが、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接する引張側主鉄筋において、70:1となった。さらに、ひび割れと交差する主鉄筋の腐食速度は0.02mm/年であり、ひび割れがない場合の3倍も速かった。
- ⑤ 屋内試験による②、③、④の結果は、屋外試験においても検証された。
- ⑥ 塩化物イオンを多量に含有した母材コンクリートを部分的にはつり取り、塩分を含まない健全なコンクリートあるいは補修材を打ち継ぐ「断面修復工法」により補修された打継部では、打継目を境とする母材と補修材間の塩化物イオン含有量の相違により、マクロセル腐食が進行することが確認された。また、断面修復部においては、母材側打継目近傍がマクロセルのアノードとなり、局所的に腐食速度は速くなる。
- ⑦ 打継目が同種の場合、補修材側コンクリートの水セメント比が低いほど、鉄筋の腐食速度は減少する。これは、コンクリート部材中および打継目における酸素透過量が減少し、またコンクリート抵抗が増大し、腐食速度が律速されるためと考えられる。
- ⑧ 外部環境中に酸素も水分も多量に含む場合、マクロセル腐食速度は最大となる。これは、外部環境中の湿度が上昇すると内部鉄筋への酸素透過量が減少し、逆に湿度が低下するとコンクリート抵抗が増加し、腐食速度は抑制されることが原因と考えられる。

- ⑨ 外部環境が周期的に塩水浸漬と湿潤空気を繰り返すことは、打継目近傍鉄筋のマクロセル形成機構に影響を及ぼす。特に、外部環境が変化した直後に、マクロセル腐食速度は急激に変化する。
- ⑩ 外部環境の温度が上昇すると腐食速度は増加し、温度が低下すると減少する。

- 1) 神山一:コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食, セメント技術年報, pp.491-493, 1972.
- 2) 宮川豊章, 武若耕司, 出村克宣, 梶田佳寛, 守分敦郎:コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 39-48, 1998.
- 3) 木内芳夫, 宮川豊章, 岡田清:コンクリートの電気抵抗および酸素浸透について, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp. 265-266, 1983.
- 4) 神田衛, 吉田八郎:コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No.357, pp.38-43, 1976.
- 5) 岡田清, 小柳洽, 宮川豊章:コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文報告集, 第281号, pp.75-87, 1979.
- 6) 蛭川友司, 見坊東光, 森芳徳, 伊藤洋:海水が浸透するひび割れ中の鉄筋腐食に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.466/V-19, pp.31-39, 1993.
- 7) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博:コンクリート中のマクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響, セメント・コンクリート, No.601, pp.41-48, 1997.
- 8) 大即信明, 横井聡之, 下沢浩:モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, 第360号/V-5, pp.111-118, 1985.
- 9) 梶田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治:コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, No.10, Vol.2, pp.493-498, 1988.
- 10) 小林一輔, 出頭圭三:各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol.24, No.12, pp.91-106, 1986.
- 11) Nobuaki OTSUKI, Makoto HISADA, Nathaniel B. DIOLA & Tarek Uddin MOHAMMED: Experimental Study on Interfacial Transition Zones in Reinforced Concrete; 土木学会論文集, No. 592, V-39, pp.155-167, 1998.
- 12) コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(II):コンクリート工学協会, pp.118-235, 1994.
- 13) 伊藤伍郎:腐食速度と防食技術, コロナ社, 1979.

第5章 既存鉄筋構造物の欠陥部に生じる

塩害によるマクロセル腐食

5-1 はじめに

5-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食

5-3 まとめ

5-1 はじめに

5-1-1 背景

第3章においては、モデル欠陥部を対象として、塩化物イオンの供給条件、酸素および水分の供給条件およびモルタルの水セメント比をパラメータとして、塩化物腐食の形態と速度を整理した。その結果、欠陥部が存在する場合、①水セメント比が低いとマクロセル卓越型腐食が進行する、②水セメント比が高いとミクロセル卓越型腐食が進行する、ことが明らかとなった。それに伴い、③低水セメント比においても、マクロセルが形成した場合には、水セメント比が高い場合と比較して腐食速度が促進されることが明らかとなった。さらに、第4章においては、具体的な欠陥部として曲げひび割れ部および断面修復部の打継目近傍を対象として、マクロセル腐食の形成機構を評価した。その結果、第3章における結果が検証され、さらに具体的な欠陥部に生じるマクロセル腐食の形成機構が明らかとなった。

ただし、第3章は、モデル欠陥部を有する供試体を用いた基礎的検討であった。また、第4章は供試体を用いた応用的検討であった。したがって、実構造物に対しても本研究で得られる結果を適用するためには、既存鉄筋コンクリート構造物を用いた実用的検討が必要である。

5-1-2 目的

以上の背景を受け、本章では塩害の影響を受け、30年間以上供用されている既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部を対象とし、マクロセル腐食の形成機構を評価する。本章の目的を以下に示す。

- ①2-3で開発した手法を、既存コンクリート構造物を対象とした調査に適用する。
- ②既存鉄筋コンクリート構造物の曲げひび割れ部に生じる腐食の形態と速度を評価する。
- ③第4章で得られた結果を、既存鉄筋コンクリート構造物の調査により検証する。

5-1-3 構成

本章では、30年間供用されている鉄筋コンクリート造栈橋上部工の曲げひび割れ部を対象とし、マクロセル形成状況を調査する。すなわち、2-3で提案した手法を用い、マクロセル腐食速度を算定する。その結果を第4章の検討結果と比較する。以上の結果から結論を導く。

5-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食

5-2-1 実験概要

5-2-1-1 部材概要

対象構造物は、東京湾に位置する栈橋上部工である。昭和 44 年に建築され、試験時までに 30 年が経過している。コンクリートの配合、スランプおよび設計基準強度を表 5-2-1 に示す。また、現場で採取された海水の主成分を表 5-2-2 に示す。欠陥の無い健全なかぶりコンクリート中に埋設された主鉄筋位置での可溶性塩化物イオン量はコンクリート質量に対して 1.0kg/m^3 であった。これは、発錆限界量($1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$)⁵⁻¹⁾ 以下であった。また、中性化深さは約 2mm であった。

表 5-2-1 コンクリートの配合および強度

単位水量	180kg/m ³
W/C	50%
slump	10~15cm
s/a	37%
粗骨材最大寸法	25mm
設計基準強度	43.7MPa

表 5-2-2 海水の主成分

(mol/l)					
陽イオン				陰イオン	
Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻
0.425	0.004	0.080	0.008	0.423	0.077

対象部材は図 5-2-1 に示す梁とした。H.W.L.から梁底面までの高さは、平均 130cm であった。主鉄筋はφ22mm の丸鋼であり、底面からのかぶりは 12cm、側面からのかぶりは 10cm であった。一方、スターラップはφ11mm の丸鋼であり、底面からのかぶりは 10cm、側面からのかぶりは 8cm であった。また、スターラップは 30cm 間隔で配筋されていた。測定は、表 5-2-3 に示す曲げひび割れを有する 4 つの異なる部材とした。梁-A は曲げひび割れが存在しない部材であった。一方、梁-B、梁-C および梁-D は曲

げひび割れを有する部材であった。梁-B に対しては、ひび割れ近傍のスターラップと主鉄筋のマクロセル腐食速度を比較するため、ひび割れ近傍のスターラップと主鉄筋について測定を行った。一方、梁-C および梁-D は、曲げひび割れ部の主鉄筋のマクロセル腐食速度分布を評価するため、主鉄筋について測定を行った。

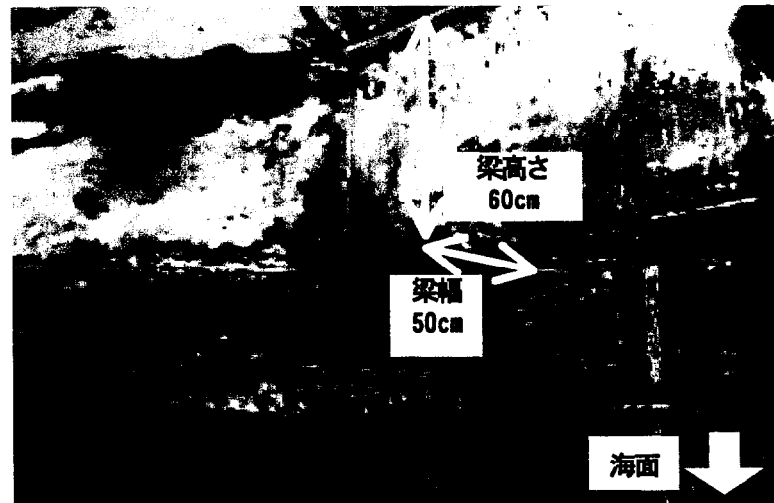


図 5-2-1 測定対象とした梁（同型）

表 5-2-3 測定対象とした梁

	ひび割れの有無	ひび割れ幅	測定対象
梁-A	無	—	主鉄筋およびスターラップ
梁-B	有	ひび割れ幅 1.6mm	
梁-C	有	ひび割れ幅 0.3mm	主鉄筋
梁-D	有	ひび割れ幅 0.6mm	

5-2-1-2 非破壊試験を用いた測定概要および電気モデルを用いた解析概要

15cm 間隔で鉄筋電位、分極抵抗を測定した。なお、測定には、電流拡散を防ぐためガード電流を発生させる二極プローブを有する、周波数応答解析装置を用いた⁵⁻²⁾。付加した交流の周波数は、60Hz～1Hz であった。また、測定対象とした梁から採取されたφ10×20cm のコアを用いて、コンクリート抵抗を測定した。測定は、表 5-2-4 に示す項

目について、平成11年9月10日～14日および平成12年2月4日に行った。

また、15×15×15cmのコンクリート部材を単位要素とし、解析を行った。

表5-2-4 測定項目と内容

測定項目	測定点	内容
(a)コンクリート抵抗	梁側面…2箇所 (2本)	・コアサンプル概要 φ10cm×20cm ・方法 交流インピーダンス法 ・負荷電圧 ±50mV ・周波数範囲 10~0.25Hz
(b)鉄筋電位	梁側面…4箇所 (鉄筋に沿って、 15cm ピッチ)	・使用参照電極 銅/硫酸銅電極
(c)鉄筋分極抵抗	同上	・方法 交流インピーダンス法 ・負荷電圧 ±50mV ・周波数 10, 1, 0.25, 0.0625, 0.015625Hz

5-2-2 実験結果

5-2-2-1 無ひび割れ部

図5-2-2に梁-Aにおける鉄筋電位(1段目)、分極抵抗(2段目)およびコンクリート抵抗(右下)の測定結果と、それらの値を用いて解析されたマクロセルアノード腐食速度(3段目)およびマイクロセル腐食速度(4段目)を示す。これによれば、腐食速度は遅いことが確認できた。また、かぶりコンクリートはつり後の内部鉄筋の腐食状況を図5-2-3に示す。これによれば、無ひび割れ部においては、顕著な腐食箇所は認められない。

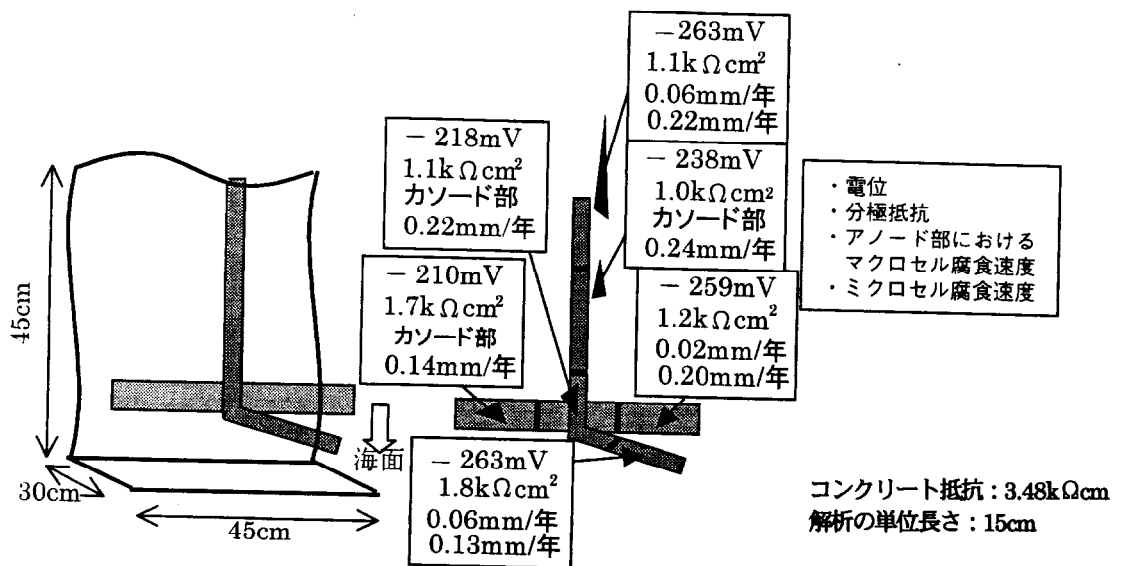


図5-2-2 梁Aにおいて非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析されたマクロセル腐食速度

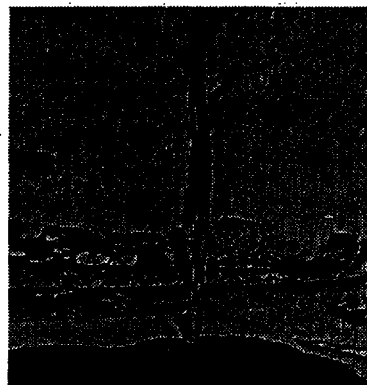


図5-2-3 梁A内部鉄筋の腐食状況

5-2-2-2 曲げひび割れ部

図5-2-4に梁-Bにおける鉄筋電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の測定結果と、それらの値を用いて解析されたマクロセル腐食速度を示す。これによれば、曲げひび割れ近傍においては、ひび割れと交差する主鉄筋とともに、スターラップにおいてもアノード電流が大きいことが確認できた。また、かぶりコンクリートはつり後の内部鉄筋の腐食状況を図5-2-5に示す。これによっても、曲げひび割れ近傍においては、スターラ

トップ下部鉄筋においても、腐食が顕著に進行していることが認められた。以上の結果は、4-2と同様である。すなわち、ひび割れが存在する場合、主鉄筋およびスターラップ下部水平鉄筋において、塩化物イオンが最も容易に浸透する。その結果、曲げひび割れ近傍においては、主鉄筋およびスターラップ下部水平鉄筋が、マクロセルのアノード部となると考えられる。

図5-2-6および図5-2-7に梁-Cおよび梁-Dにおける鉄筋電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の測定結果と、それらの値を用いて解析されたマクロセル腐食速度を示す。これらによれば、曲げひび割れ部においてアノード電流が大きいことが確認できた。また、かぶりコンクリートはつり後の内部鉄筋の腐食状況を図5-2-8および図5-2-9に示す。これらによれば、曲げひび割れおよびその近傍において、腐食が進行していることが認められる。これらの結果は、4-2と同様である。すなわち、曲げひび割れ近傍には、鉄筋とコンクリートの剥離部（肌離れ）が生じる⁵⁻³⁾。したがって、塩化物イオンは、ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離部を容易に伝わり、健全なかぶりコンクリート内部に浸透する。その結果、ひび割れおよびその近傍において、マクロセル腐食のアノード部が形成すると考えられる。

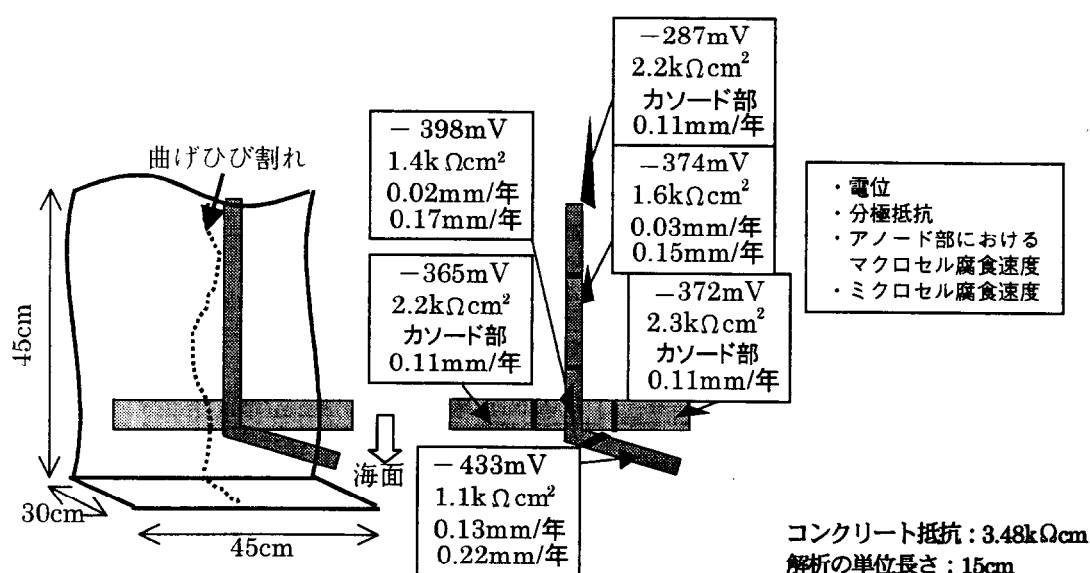


図5-2-4 梁Bにおいて非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析されたマクロセル腐食速度



スターラップ下面

図5-2-5 梁B内部のスターラップ下部鉄筋の腐食状況

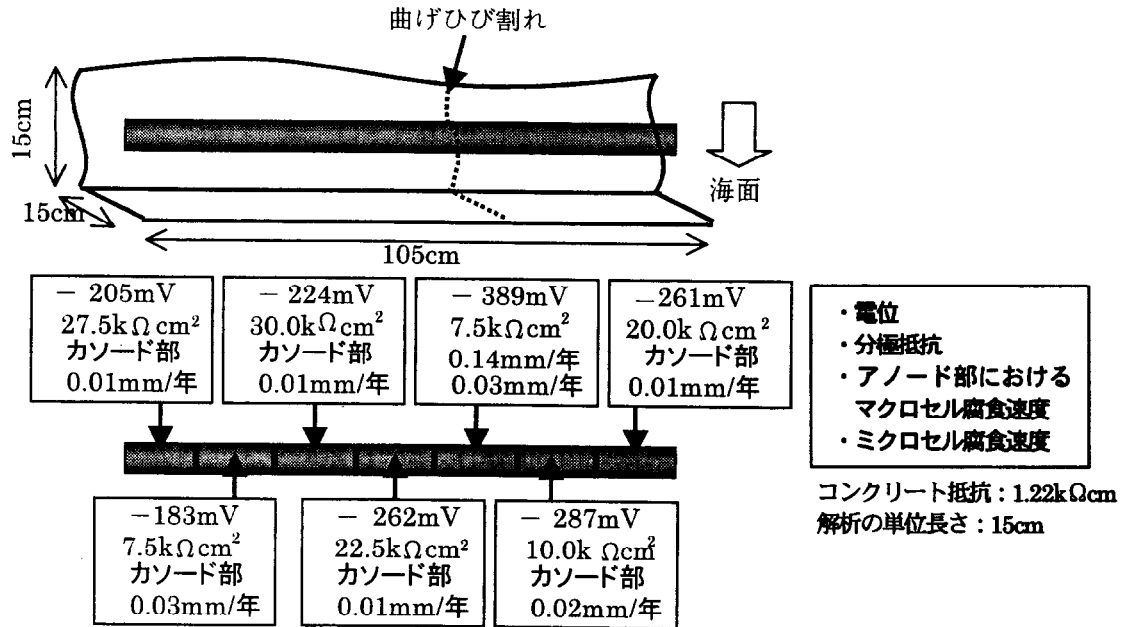


図5-2-6 梁Cにおいて非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析されたマクロセル腐食速度

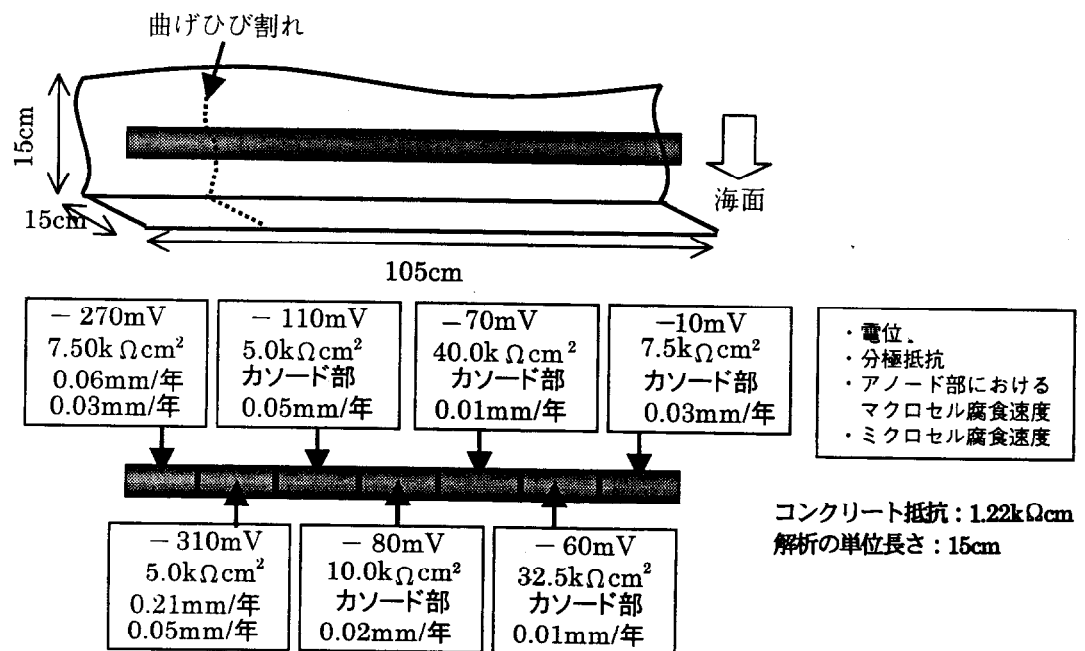


図5-2-7 梁Dにおいて非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析されたマクロセル腐食速度



図5-2-8 梁C内部鉄筋の腐食状況

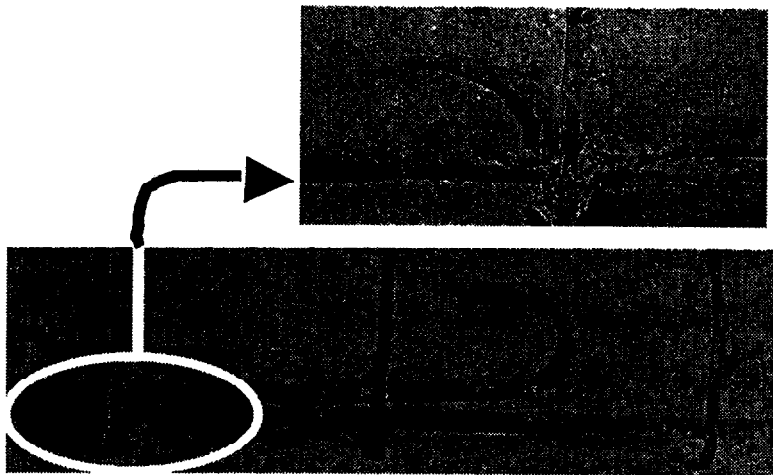


図5-2-9 梁D内部鉄筋の腐食状況

5-3 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 塩分環境下にある既存鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部を対象とし、腐食形態と腐食速度を評価できた。
- ② 第4章で得られた結果が検証された。詳細を、③および④に示す。
- ③ 曲げひび割れ近傍では、マクロセルが形成し、腐食速度は著しく増加する傾向が認められた。すなわち、ひび割れ近傍の主鉄筋がアノードとなり、ひび割れがないコンクリート内部の主鉄筋がカソードとなるマクロセルの形成が確認された。また、ひび割れ近傍の主鉄筋においては、マクロセル腐食速度:ミクロセル腐食速度が4:1で、その腐食速度は0.26mm/年であり、ひび割れがない部分の25倍も速い。なお、3-2-2-1(1)2)の判定基準によれば、寿命は約9年である。
- ④ 曲げひび割れ近傍では、スターラップの腐食速度が速い。例えば、スターラップ下部鉄筋の腐食速度は0.35mm/年である。なお、3-2-2-1(1)2)の判定基準によれば、寿命は約3年である。
- ⑤ 既存鉄筋コンクリート構造物の腐食速度調査に対する、2-3で開発した方法の適用可能性が検証された。すなわち、既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じている腐食の速度を、非破壊試験により現場で推定できることが確認できた。

- 1) 大即信明, 横井聡之, 下沢浩: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文報告集 No. 360/V-3, pp.111-118, 1985.
- 2) 田村博, 吉田正友: コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査方法, コンクリート工学年次講演会論文集 第6回, pp.205-208, 1984.
- 3) 神山一: コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食, セメント技術年報, pp.491-493, 1972.

第6章 モデル欠陥部に生じる中性化によるマクロセル腐食

- 6-1 はじめに
- 6-2 実験的検討
- 6-3 まとめ

6-1 はじめに

6-1-1 背景

1-2「既往の研究の整理」に示した通り、これまでに、欠陥部の存在を無視したコンクリート部材に生じる、中性化による鉄筋腐食に関する研究は多数なされている。しかしながら、実在するコンクリート部材には、ひび割れや打継目等の欠陥が存在することが少なくない。したがって、これらの欠陥が存在する鉄筋コンクリートに生じる腐食についても、定量的な検討を行う必要がある。

6-1-2 目的

以上の背景を受け、本章の目的を以下に示す。

- ① 欠陥部に生じる中性化による腐食の形態（マクロセル腐食卓越型とミクロセル腐食卓越型）と速度を、二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとし、統一された条件でかつ網羅的に整理する。

6-1-3 構成

本章では、モデル欠陥部を有するモルタル供試体を用い、二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件およびモルタルの水セメント比が、腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を実験的に整理する。以上の結果を踏まえ、結論を導く。

6-2 実験的検討

6-2-1 実験概要

6-2-1-1 使用材料

実験に使用した材料は、3-2で用いた材料と同様である。主な性質を表6-2-1に示す。

表6-2-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
混和剤	増粘剤	セルロース系
	高性能 AE 減水剤	ナフタレン系
鉄筋	丸鋼(φ9mm)	降伏強度=354N/mm ² 、Fe含有率=99.21%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材(陸砂)の物理的性質は表2-2-2に、鉄筋(丸鋼)の化学成分は表2-2-3に示した通りである。

6-2-1-2 配合

6-2で使用したモルタルの配合は、2-2と同様である。

6-2-1-3 実験ケース

実験ケースを表6-2-2に示す。

表6-2-2 実験ケース

No	CO ₂ の供給位置	水分・酸素の供給条件	W/C(%)
6-2-1	欠陥	湿潤環境	30
6-2-2			50
6-2-3			70
6-2-4		乾湿繰返し環境	30
6-2-5			50
6-2-6			70
6-2-7		乾燥環境	30
6-2-8			50
6-2-9			70
6-2-10	欠陥と その近傍	湿潤環境	30
6-2-11			50
6-2-12			70
6-2-13		乾湿繰返し環境	30
6-2-14			50
6-2-15			70
6-2-16		乾燥環境	30
6-2-17			50
6-2-18			70
6-2-19	全体 浸透	湿潤環境	30
6-2-20			50
6-2-21			70
6-2-22		乾湿繰返し環境	30
6-2-23			50
6-2-24			70
6-2-25		乾燥環境	30
6-2-26			50
6-2-27			70

注)「湿潤」は水分が多く酸素が少ない環境、「乾湿繰返し」は水分および酸素がともに多い環境、「乾燥」は水分が少なく酸素が多い環境を意味する。

水セメント比は30%、50%、70%の3水準とした。二酸化炭素の鉄筋表面への供給位置を欠陥、欠陥と近傍、全体の3水準とした。水分・酸素の供給条件は、一般の外部環境を考慮し、水分が多く酸素が少ない湿潤環境、水分および酸素がともに多い乾湿繰返し環境、水分が少なく酸素が多い乾燥環境の3水準とした。湿潤環境は湿度90%室温20℃とし、乾燥環境は湿度50%室温20℃とした。また乾湿繰返し環境は、24時間の湿潤状態と、60時間の乾燥状態が繰り返される環境とした。そしてそれぞれを組み合わせた27水準について、各2本の供試体を作製した。

6-2-1-4 供試体概要

図6-2-1に供試体概要を示す。

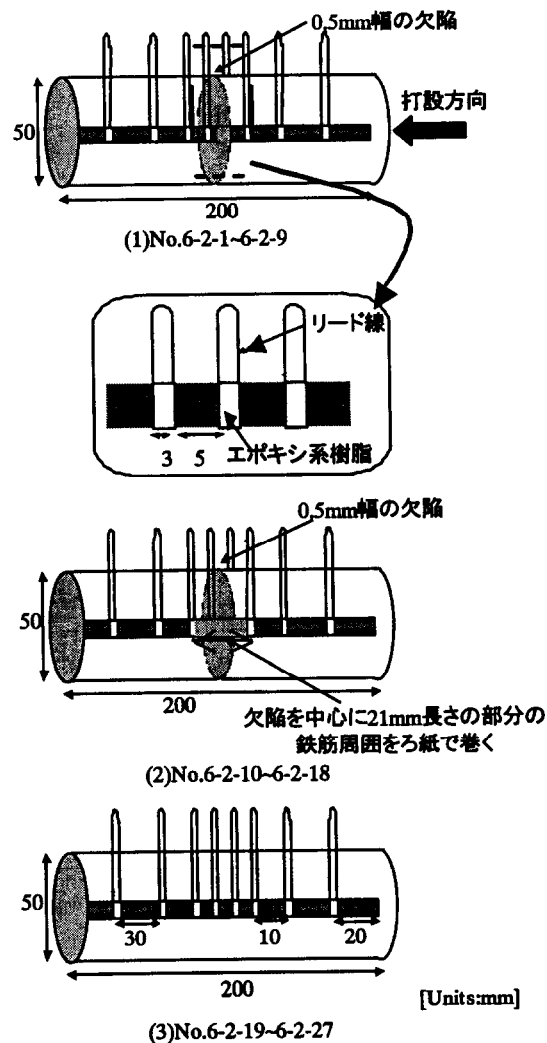


図6-2-1 供試体概要図

9つの要素に分割された鉄筋を用いた。なお欠陥に近い位置の腐食を詳細に検討するため9つの鉄筋要素のうち中央の鉄筋要素を特に細かく分割した。すなわち、欠陥とその近傍に5mmの鉄筋要素を3本配置し、その両端に10mm、その両端に30mm、最端部に20mmの鉄筋要素が連結するようにした。打設方法を次に示す。前処理した鉄筋を型枠中心に配置する。供試体の中央に欠陥部を生じさせるため、モルタルは2層に分けて打設した。初めに、直径50mm、高さ200mmの型枠の半分まで打設した。24時間経過後、表面のレイタンスを十分に除去し、さらに2層目を打設した。このとき No.6-2-1～No.6-2-9

供試体においては打継面に厚さが0.5 mm のろ紙を挟み、欠陥を有する供試体とした。また、No.6-2-10～No.6-2-18 供試体においては、打継面および欠陥部を中心に 21mm の範囲の鉄筋周囲にも、ろ紙を巻いた。養生方法を以下に示す。脱型後全ての供試体は湿潤環境中にて4週間の初期養生を行った。その後、中性化促進環境下に暴露した。その際、表 6-2-2 に示す各二酸化炭素の供給位置において、鉄筋近傍のモルタルが中性化したことを確認した後、表 6-2-2 に示す水分および酸素の供給を行うために、湿潤養生、乾湿繰り返し養生、乾燥養生を 56 日間行った。なお、測定は湿潤養生および乾湿繰り返し養生の供試体は湿潤環境中において行った。一方、乾燥養生の供試体は乾燥環境中において測定を行った。

6-2-1-5 測定項目

マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を測定した。また、腐食電流密度の測定が終了した供試体を割裂し、内部鉄筋の腐食状態を観察した。

6-2-2 実験結果および考察

6-2-2-1 腐食形態および腐食速度の判定方法

(1) 判定基準

腐食形態および腐食速度に関する評価は、2-2と同様である。

すなわち、腐食形態に関する評価では①腐食位置の判定②マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った。判定基準は①に関しては内部鉄筋の観察、および測定された総腐食電気量密度が相対的に大きい場所を限定し、アノード部と判定した。②に関しては、マクロセル電気量密度とミクロセル電気量密度の最大値を比較し、腐食形態を判定した。ここでは明らかに両者に差がみられる場合を卓越型として基準を設けた。すなわち、「 $\frac{2}{3}(0.67) \geq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をミクロセル卓越型腐食とした。一方、「 $\frac{3}{2}(1.50) \leq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をマクロセル卓越型腐食とした。また、「 $\frac{2}{3} < (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度}) < \frac{3}{2}$ 」の時をマクロセル・ミクロセル併存型腐食とした。

腐食速度に関する評価は、最大腐食電気量密度の値により判定した。本研究では宮川らの研究⁶⁻¹⁾を参考にし、鉄筋腐食減少量と鉄筋耐力の関係から 30 年後における鉄筋耐力

が、腐食速度の遅い方では健全時の 70%以上、一方速い方では健全時の 35%以下となる腐食減少率を求め、その総腐食電気量密度を逆算した。そして 56 日間の総腐食電気量密度の最大値が $20\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.034\text{mm}/\text{年}$ に相当) よりも小さい場合を腐食速度が遅い、 $50\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.085\text{mm}/\text{年}$ に相当) よりも大きい場合は腐食速度が速いと判定した。なお、部材の寿命を健全時の耐力の 70%に低下するまでの期間と定義した時、腐食速度の遅い場合の寿命は 30 年以上、速い場合の寿命は 15 年以内である。

(2) 実験結果の測定例

図 6-2-2(a)に No.6-2-3 供試体の腐食電気量密度分布を示す。二酸化炭素は欠陥のみに供給され、外部環境は湿潤、水セメント比は 70%である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥箇所において錆びていることが認められた。また、総腐食電気量密度は欠陥箇所ですべて大きくなり、(マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度) = 8.6 であることが認められた。以上のことから、欠陥箇所においてマクロセル卓越型腐食が発生していると判断できた。また、最大総腐食電気量密度は $24.26\text{C}/\text{cm}^2$ であり、腐食速度は速くもなく、遅くもないと判断できた。

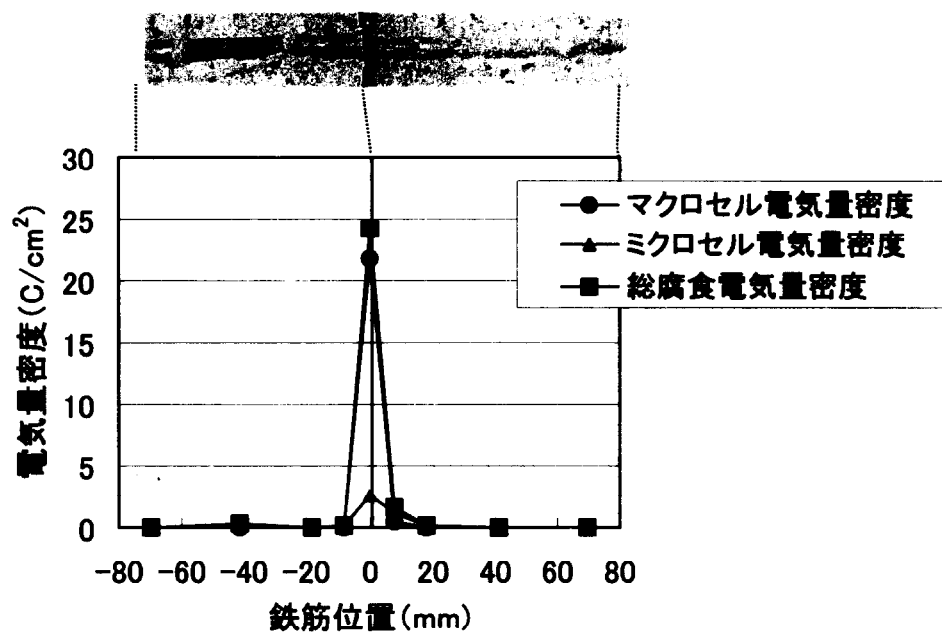
図 6-2-2(b)に No.6-2-11 供試体の腐食電気量密度分布を示す。二酸化炭素は欠陥と近傍に供給され、外部環境は湿潤、水セメント比は 50%である。鉄筋の観察結果によれば、欠陥箇所およびその近傍において錆びていることが認められた。また、総腐食電気量密度は欠陥箇所とその近傍で大きくなっていることが認められた。(マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度)は 3.7 であった。以上のことから、欠陥箇所とその近傍がアノードとなるマクロセル卓越型腐食が進行していると判断できた。また、最大総腐食電気量密度は $11.79\text{C}/\text{cm}^2$ であった。したがって、腐食速度は遅いと判断できた。

6-2-2-2 腐食形態および腐食速度の整理

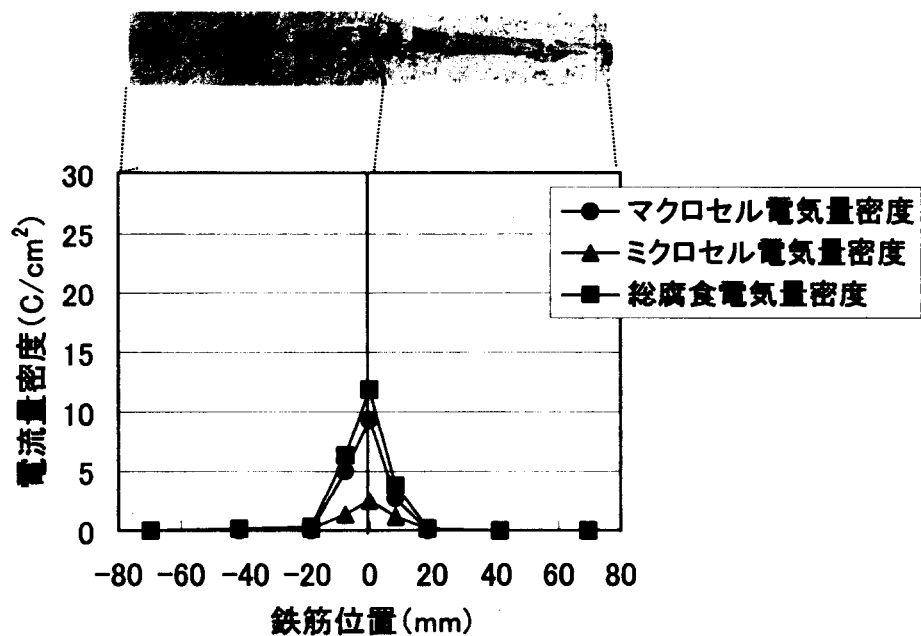
(1) 腐食形態

図 6-2-3 に中性化による最大マクロセルアノード電気量密度、図 6-2-4 に最大ミクロセル電気量密度を示す。腐食の形態をまとめる。上段・中段・下段はそれぞれ水セメント比が 30%・50%・70%の結果である。各段の横軸は、外部環境すなわち水分および酸素の供給条件を示す。縦軸は、二酸化炭素の供給条件を示す。これらの図を比較し、図 6-2-5 に中性化による腐食の形態をまとめる。格段の横軸と縦軸は図 6-2-3 と同様である。また、楕円内はアノード位置を示す。黒色部はミクロセル卓越型腐食、灰色部

はマクロセル・ミクロセル併存型腐食、白色部はマクロセル卓越型腐食を示す。



(a) No.6-2-3 供試体 (W/C=70%,欠陥, 湿潤)



(b) No.6-2-11 供試体 (W/C=50%,欠陥+近傍, 湿潤)

図6-2-2 欠陥部の腐食電流量密度分布

CO ₂ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	0.0
	欠陥 +近傍	8.7	1.2	3.8
	欠陥	0.1	1.0	0.2
W/C=30%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
CO ₂ の供給	全体	腐食なし	0.0	0.3
	欠陥 +近傍	2.1	9.3	9.3
	欠陥	5.7	6.8	1.4
W/C=50%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
CO ₂ の供給	全体	腐食なし	2.6	2.6
	欠陥 +近傍	4.6	2.4	9.7
	欠陥	21.2	14.5	21.7
W/C=70%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

単位: C/cm²
(56日間)

図6-2-3 欠陥部に生じる中性化腐食の最大マクロセル電気量密度の整理

CO ₂ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	0.1
	欠陥 +近傍	0.8	0.5	0.5
	欠陥	0.1	3.0	0.5
W/C=30%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

CO ₂ の供給	全体	腐食なし	0.6	0.5
	欠陥 +近傍	1.0	5.0	2.5
	欠陥	6.8	4.2	0.8
W/C=50%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

CO ₂ の供給	全体	腐食なし	0.2	1.6
	欠陥 +近傍	0.8	3.7	5.8
	欠陥	8.0	14.8	2.5
W/C=70%		乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				

単位: C/cm²
(56日間)

図6-2-4 欠陥部に生じる中性化腐食の最大マイクロセル電気量密度の整理

CO ₂ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	腐食なし
	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	腐食なし	欠陥部	腐食なし
	W/C=0.3	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
CO ₂ の供給	全体	腐食なし	腐食なし	腐食なし
	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部
	W/C=0.5	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
CO ₂ の供給	全体	腐食なし	一部	一部
	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍	欠陥部+近傍
	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部
	W/C=0.7	乾燥	乾湿繰返し	湿潤
H ₂ O, O ₂ の供給				
腐食形態				
ミクロセル卓越型				
併存型				
マクロセル卓越型				

図6-2-5 欠陥部近傍に生じる中性化腐食の形態の整理

これによると、二酸化炭素が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食することが認められる。ただし、水セメント比が30%、欠陥のみに二酸化炭素が浸透した場合には、外部環境が乾燥あるいは湿潤の時に腐食の発生が認められない。これは、欠陥に二酸化炭素が浸透した場合、その部分においては不動態皮膜の破壊が促進される。しかしながら、水セメント比が低いため、物質透過量は少なく、乾燥状態では水分の供給が、湿潤環境では酸素の供給が不足するため、腐食の進行は困難であったと考えられる。

また、二酸化炭素が全体に浸透した場合、水セメント比が70%の時には、アノード位置に関する定まった傾向は見られないことが認められる。これは、二酸化炭素が全体に浸透した場合には鉄筋全体の不動態が破壊される可能性はある。ただし、酸素と水分の供給条件によってアノード部の位置は変化するため、アノード部の定まった傾向は認められなかったと考えられる。なお、水セメント比が30%や50%の場合には、水分、酸素が十分に供給されないため腐食は進行しなかったといえる。

また、全体的にマクロセル腐食が卓越する傾向が認められる。これは、中性化したモルタルではセメントペーストが緻密化され、細孔量が減少する⁶⁻²⁾。このため中性化の進行に伴い、欠陥以外（欠陥の影響を受けないモルタル内部）では腐食要因である物質の浸透が困難になる。その結果、欠陥とそれ以外のモルタル部分において、内部鉄筋への酸素供給量の差が大きくなる。表6-2-3に、中性化の影響を受けた供試体と、塩化物の影響を受けた供試体の、欠陥とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比を示す。この値が大きいくほど、欠陥箇所の鉄筋への酸素供給量が、モルタル内部の鉄筋への酸素供給量と比較して、多量になることを意味する。また、欠陥以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量も示す。なお、酸素供給量の測定は4-2と同様であり、湿潤環境中において行った。表6-2-3によると、中性化の影響を受けた供試体では、塩化物の影響を受けた供試体と比較して、欠陥とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比が大きくなることが確認できる。すなわち、中性化の影響を受けた供試体では、塩化物の影響を受けた供試体と比較して、欠陥とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きくなるため、マクロセルが形成されやすくなると考えられる。

表6-2-3 欠陥箇所位置する鉄筋と健全なモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比

塩化物の影響	なし	あり				なし	
中性化の影響	なし	なし				あり	
W/C (%)	50	30	50	70	30	50	70
モルタル内部に位置する鉄筋の 単位面積あたりへの酸素供給量(mol/cm ² /sec)	4.6	5.9	3.3	2.6	65.6	23.6	6.0
欠陥箇所に位置する鉄筋の 単位面積あたりへの酸素供給量(mol/cm ² /sec)							
モルタル内部に位置する鉄筋の 単位面積あたりへの酸素供給量(mol/cm ² /sec)	3.35	3.24	3.40	7.60	0.09	0.30	0.50

(2) 腐食速度

図6-2-6に腐食速度の判定結果をまとめる。各段の横軸、縦軸は図6-2-3と同様である。また、楕円内の値は最大総腐食電気量密度を示す。

これによれば、全体的に水セメント比が低いほど腐食速度が遅いことが認められる。これは、水セメント比が低いほど、物質浸透量が減少するためと考えられる。

6-2-2-3 まとめ

6-2-2では、欠陥部に生じる中性化による腐食の形態と速度を整理した。得られた結論を以下にまとめる。

1. 腐食形態を整理した結果、水セメント比に関わらず、マクロセル卓越型の腐食が進行することが明らかとなった。
2. 腐食速度を整理した結果、水セメント比が低いほど腐食速度は遅くなることが明らかとなった。

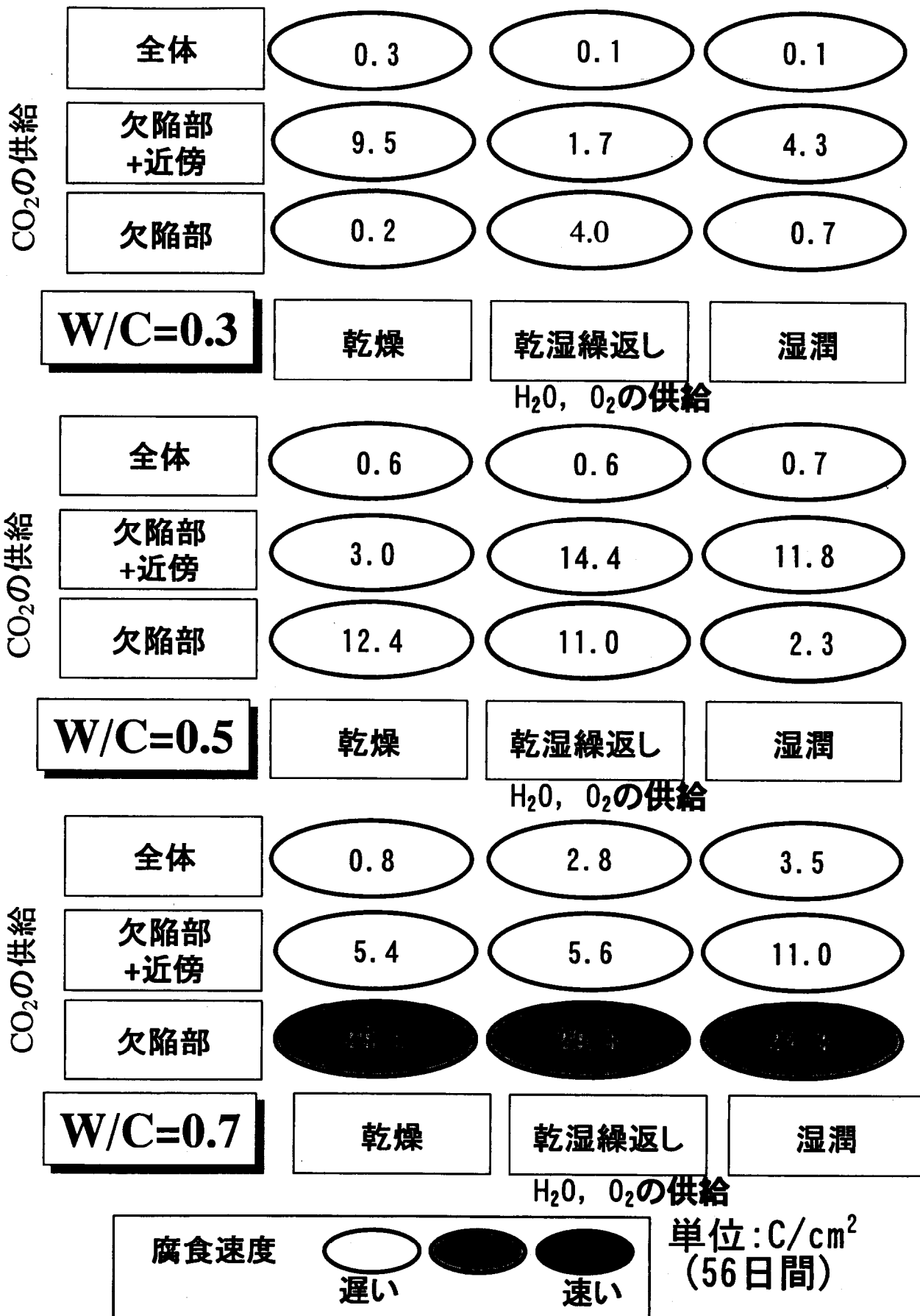


図6-2-6 欠陥部に生じる中性化腐食の速度の整理

6-3 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① モルタルの欠陥部に生じる中性化による鉄筋腐食の形態と速度について、二酸化炭素の供給条件、水分および酸素の供給条件、モルタルの水セメント比に相違を設け、全27ケースの腐食形態と腐食速度を、統一した条件のもと網羅的に整理することができた。
- ② 欠陥部に生じる中性化腐食では、水セメント比に関わらずマクロセル卓越型の腐食が進行する。また、水セメント比が高いほど、腐食速度は促進される。

- 1) 宮川豊章, 武若耕司, 出村克宣, 榊田佳寛, 守分敦郎: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 39-48, 1998.
- 2) 佐伯竜彦, 米山紘一, 長滝重義: 中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 69-78, 1992.

第7章 曲げひび割れ部および打継部に生じる中性化による

マクロセル腐食

- 7-1 はじめに
- 7-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食
- 7-3 コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食
- 7-4 まとめ

7-1 はじめに

7-1-1 背景

第6章においては、モデル欠陥部を対象として、二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件、モルタルの水セメント比をパラメータとして、中性化腐食の形態と速度を検討した。その結果、欠陥部が存在する場合、水セメント比に関わらずマクロセル卓越型腐食が進行することが明らかとなった。また、水セメント比が低いほど、腐食速度が抑制されることが明らかとなった。

第6章は、モデル欠陥部を有する供試体を用いた基礎的検討であった。したがって、実構造物に対しても本研究で得られる結果を適用するためには、具体的な欠陥部を有する応用的検討が必要である。

7-1-2 目的

以上の背景を受け、本章では中性化の影響を受けるコンクリートの代表的な欠陥部である曲げひび割れ部およびコールドジョイント部を対象とし、腐食形態および腐食速度を評価する。本章の目的を以下に示す。

- ① 曲げひび割れ部に生じる中性化腐食を対象とし、ひび割れの有無およびコンクリートの水セメント比の相違が、腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を評価する。
- ② コールドジョイント部に生じる中性化腐食を対象とし、コンクリートの水セメント比の相違が、腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を評価する。

7-1-3 構成

7-2では、曲げひび割れ部に生じる中性化によるマクロセル腐食を評価する。ここでは、単一の主鉄筋に着目した供試体および主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体を用いて検討する。7-2-2では、曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。7-2-3では、水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。7-3では、コールドジョイント部に生じる中性化によるマクロ

セル腐食を評価する。ここでは、水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響を検討する。以上の結果を踏まえ、第6章の結果と合わせ、結論を導く。

7-2 曲げひび割れ部に生じるマクロセル腐食

7-2-1 実験概要

7-2-1-1 使用材料

実験に使用した材料は、4-2で用いた材料と同様である。主な性質を表7-2-1に示す。

表7-2-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質 ^注
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
粗骨材	碎石	比重=2.64、F.M.=6.70、吸水率=0.68%
混和剤	減水剤・AE 剤	リグニンスルホン酸系
	高性能 AE 減水剤	ナフタレン系
鉄筋	丸鋼	降伏強度=354N/mm ² 、Fe 含有率=99.21%
	異形棒鋼	降伏強度=367N/mm ² 、Fe 含有率=98.84%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材(陸砂)の物理的性質は表2-2-2に、粗骨材(碎石)の物理的性質は表3-2-2に、鉄筋(丸鋼)の化学成分は表2-2-3に、鉄筋(異形棒鋼)の化学成分は表3-2-3に示した通りである。

7-2-1-2 配合

実験に使用したコンクリートは、4-2で用いた配合と同様である。

7-2-1-3 実験ケース

実験ケースは表7-2-2に示す通りである。

表 7-2-2 実験ケース

(a) 単一の主鉄筋を有する供試体

		W/C (%)		
		30	50	70
曲げひび 割れ	なし		○ △	
	あり	○	○ △	○

○：丸鋼 △：異形棒鋼

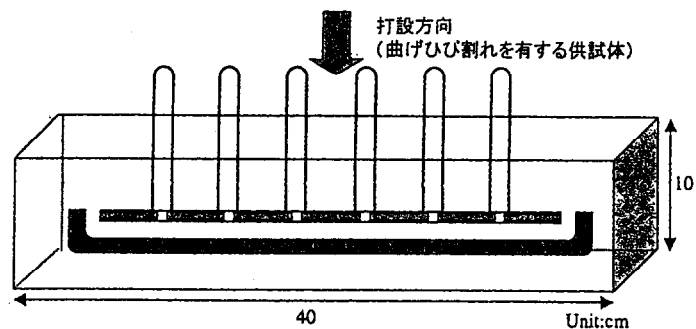
(b) 主鉄筋とスターラップを有する供試体

		W/C (%)		
		30	50	70
曲げひび 割れ	なし		○ △	
	あり	○	○ △	○

○：丸鋼 △：異形棒鋼

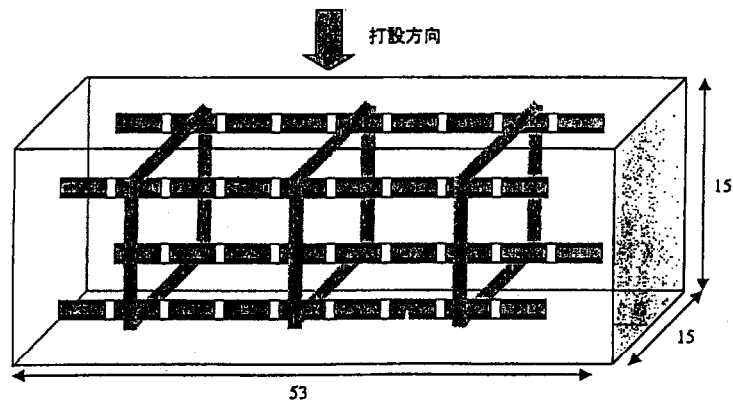
7-2-1-4 供試体概要

本節で使用した供試体を、図 7-2-1 に示す。



かぶり=4.5cm

図 7-2-1(a) 供試体概要図 (Type-A 供試体)



かぶり=2.5cm
[cm]

図 7-2-1(b) 供試体概要図 (Type-B 供試体)

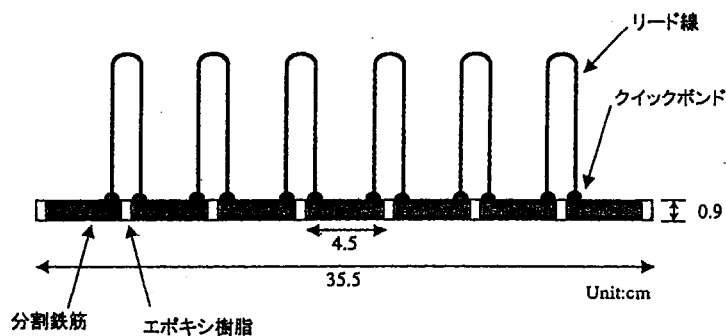


図 7-2-2(a) 分割鉄筋概要図 (Type-A 供試体)

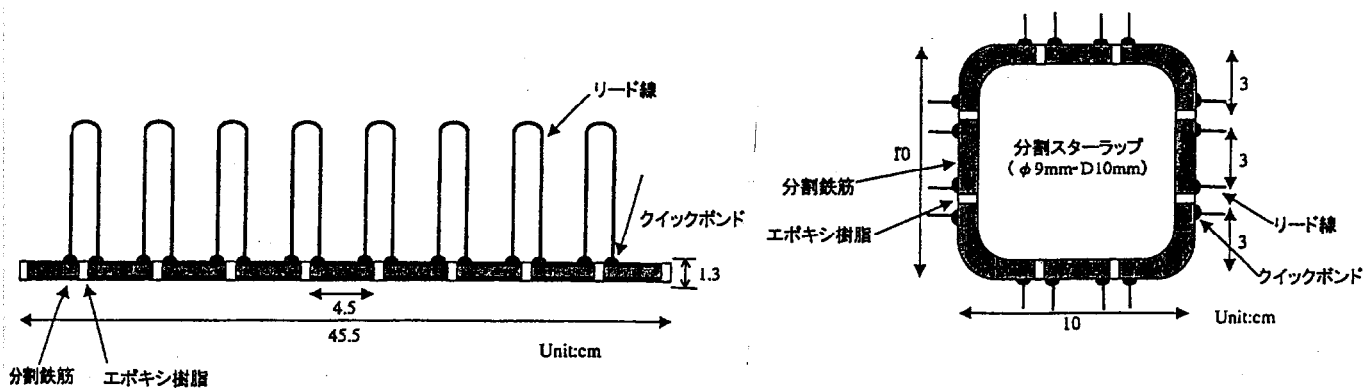


図 7-2-2(b) 分割鉄筋概要図 (Type-B 供試体)

(1) Type-A 供試体

図 7-2-2(a)に示す通り、7つの要素に分割した鉄筋を用いた。各分割鉄筋要素の長さは45mmである。前処理方法は、2-2と同様である。

曲げひび割れを有する供試体は、打設後、28日間水中養生(水温 20℃)を行った。その後、図 7-2-3に示す3点曲げ荷重を行い、供試体下面に曲げひび割れを生じさせた。

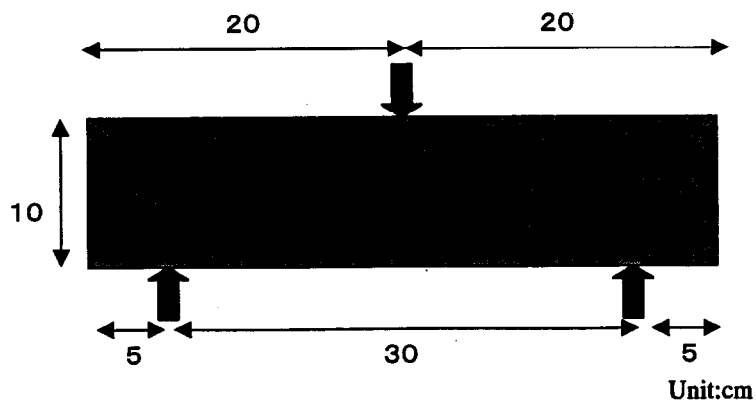


図 7-2-3 供試体荷重図

ひび割れ幅が 0.3mm に達した時点（鉄筋の引張応力は約 250MPa）で載荷を終了し、厚さ 0.1mm のステンレス板をひび割れ開口端部に挟み、残留ひび割れ幅が 0.3mm になるよう固定した。また、暴露面となるひび割れ開口面を除く 5 面をエポキシ系樹脂により被覆し、腐食要因物質が 1 面のみから浸透するようにした。その後、中性化促進試験室（二酸化炭素濃度 10%、温度 40℃、相対湿度 70%）内にて 91 日間暴露した。なお、暴露後、ひび割れ部において、鉄筋位置のコンクリートが中性化していることが確認された。

(2)Type-B 供試体

主鉄筋を 4 本、スターラップを 3 本配置した。また、図 7-2-2(b)に示す通り、主鉄筋は 7 つの要素に分割し、スターラップは 8 つの要素に分割した。鉄筋の前処理、および暴露条件は Type-A 供試体と同様である。鉄筋の組み立ては、主鉄筋とスターラップの接続部においては、2-2 の方法によりマクロセル電流を測定するため、リード線を介さず直接電流が流れることを防止した。このため、主鉄筋とスターラップ間にビニルテープを挟み、さらに導電性の低い釣り糸を用い接合した。その後、隣接するスターラップと主鉄筋にはんだ付けされたリード線を接続し、電気的には接続された状態とした。

打設後、28 日間水中養生（水温 20℃）を行った。その後、一部の供試体に対して、60kN の荷重にて（鉄筋の引張応力＝約 240MPa）、3 点曲げ載荷を行い、曲げひび割れを導入した。ひび割れ導入後、厚さ 0.1mm のステンレス板をひび割れ開口端部に挟み、残留ひび割れ幅が 0.3mm になるよう固定した。その後、中性化促進試験室（二酸化炭素濃度 10%、温度 40℃、相対湿度 70%）内にて 91 日間暴露した。なお、暴露後、ひび割れ部において、鉄筋位置のコンクリートが中性化していることは確認された。

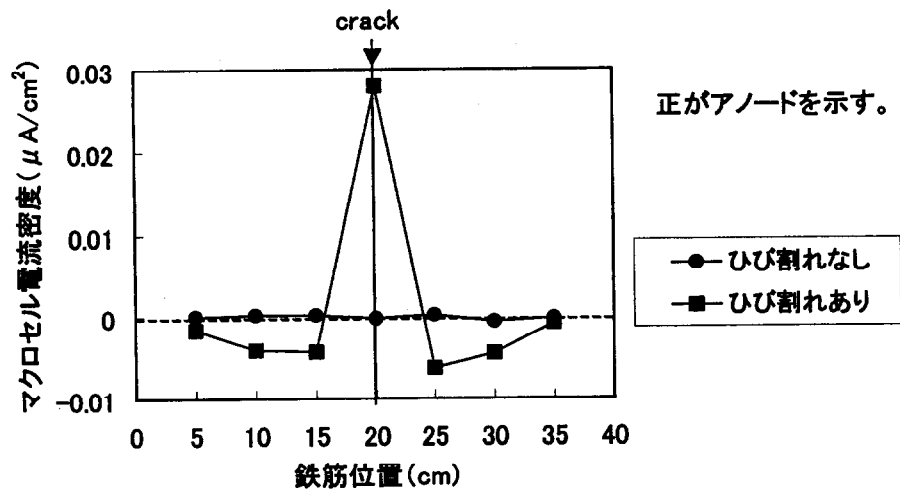
7-2-1-5 測定項目

マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を測定した。それぞれの測定方法は、2-2 と同様である。したがって、3-2-2-1 に示した通り、腐食速度が $2.9\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （鉄筋径 9mm の場合）あるいは $4.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （鉄筋径 13mm の場合）以下であれば、30 年後における鉄筋耐力は健全時の 70%以上を有する。一方、腐食速度が $7.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （鉄筋径 9mm の場合）あるいは $10.6\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （鉄筋径 13mm の場合）以上であれば、30 年後における鉄筋耐力は健全時の 35%以下となる⁷⁻¹⁾。なお、測定は、中性化促進試験室ではなく、湿潤環境中において行った。

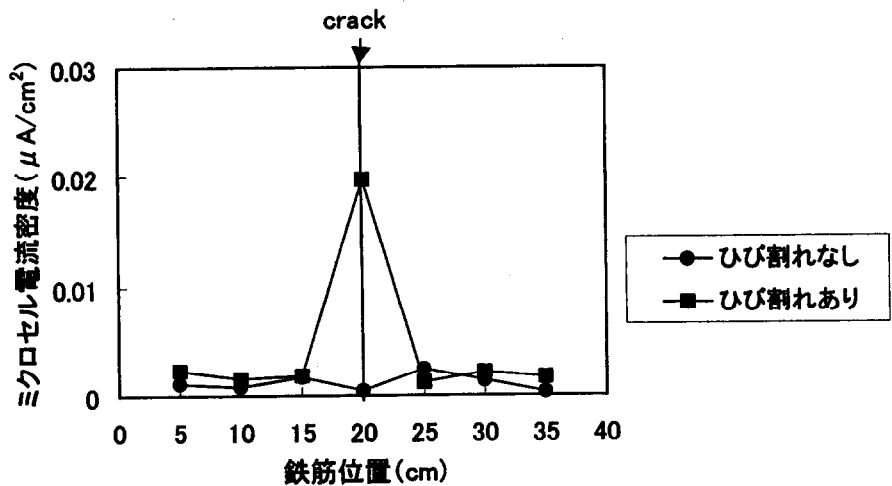
7-2-2 曲げひび割れの有無が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

7-2-2-1 単一の主鉄筋に着目した供試体を用いた検討

曲げひび割れの有無が、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図7-2-4に示す。コンクリートの水セメント比は50%である。



(a) マクロセル電流密度



(b) ミクロセル電流密度

W/C=50%

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$

図7-2-4 曲げひび割れの有無がマクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響 (単一の主鉄筋に着目した検討)

はじめにひび割れがない場合について整理する。マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度はいずれも小さい。最大腐食電流密度は $0.001 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。次に、ひび割れを有する場合について整理する。マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度はいずれも曲げひび割れ箇所において大きくなる。ひび割れ箇所における最大腐食電流密度は $0.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。すなわち、ひび割れがない場合と比較すると、ひび割れ箇所における鉄筋においては、約 50 倍も腐食速度が促進されることが確認できる。

単一の主鉄筋を有するコンクリート供試体を用いた、ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響に関する検討を図 7-2-5 にまとめる。これによると、曲げひび割れの存在が腐食に及ぼす影響は大きいことが認められる。すなわち、曲げひび割れが存在する場合、その箇所がアノードとなりマクロセル腐食が進行する。ここで、ひび割れがある場合、主鉄筋において腐食が発生する理由を考察する。ひび割れ部には腐食要因物質が容易に浸透する。その結果、主鉄筋においてマクロセルのアノードおよびミクロセル腐食の発生場所になったと考えられる。

以上より、次のことが明らかとなった。ひび割れがない場合と比べてひび割れが存在する場合はマクロセルが形成され、腐食速度が約 50 倍速くなる。また、ひび割れ部の鉄筋が腐食することを確認できた。

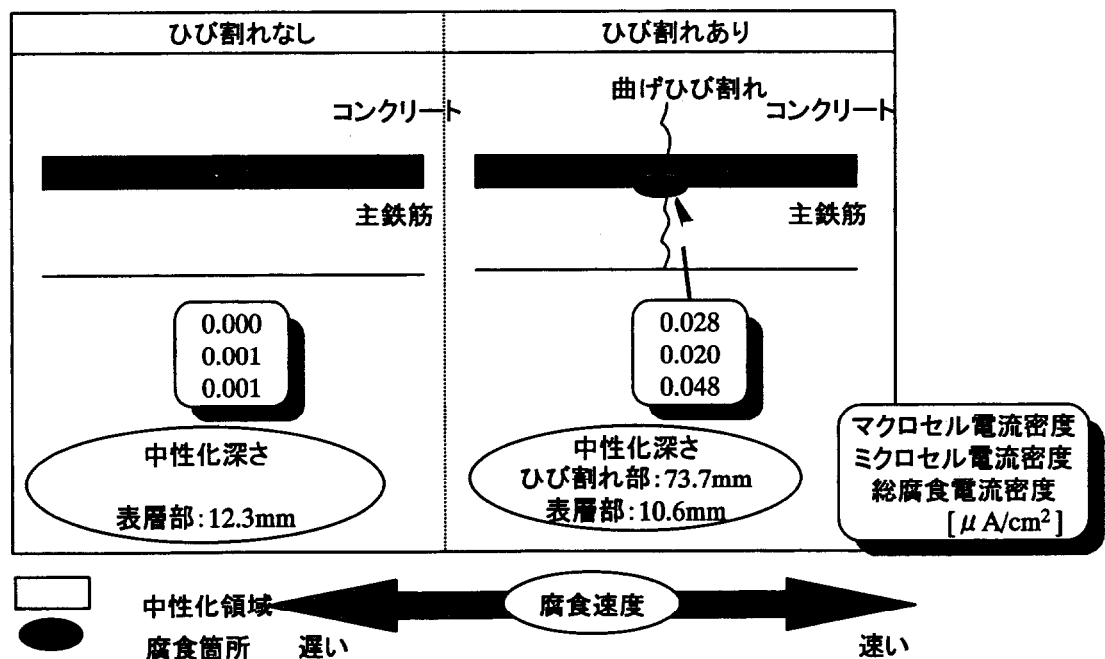


図 7-2-5 ひび割れの有無がマクロセル腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(単一の主鉄筋に着目した検討)

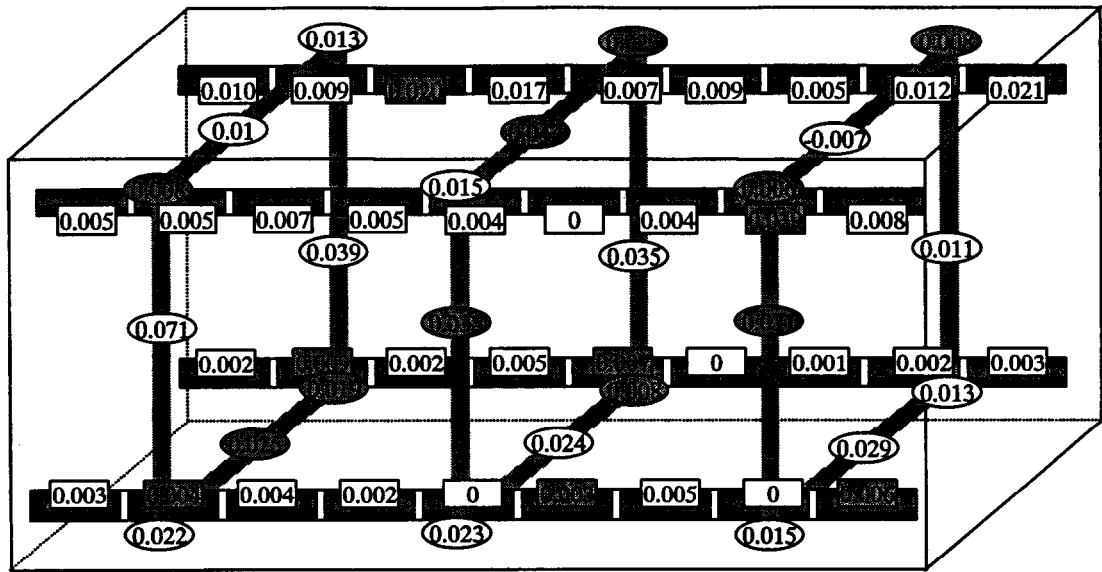
7-2-2-2 主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体を用いた検討

ひび割れの有無が、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度に及ぼす影響を図7-2-6～図7-2-8に示す。残留ひび割れ幅は0.3mm、コンクリートの水セメント比は50%である。3点曲げ試験によりひび割れが発生した面から見た値であり、長方形の中の数値は主鉄筋要素の電流密度値、楕円内の数値はスターラップ鉄筋要素の電流密度値を示す。■がアノード部、□がカソード部を示す。また、図7-2-6はマクロセル電流密度を、図7-2-7はミクロセル電流密度を、図7-2-8は総腐食電流密度を示す。何れもひび割れがない場合およびひび割れを有する場合の測定結果である。

はじめに、ひび割れが無い場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、スターラップの上部および下部水平鉄筋において大きくなる。ミクロセル電流密度は、スターラップの上部および下部水平鉄筋において大きくなる。最大総腐食電流密度は $0.068 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。次に、ひび割れがある場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、ひび割れ部のスターラップ下部鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋において大きくなる。ミクロセル電流密度は、ひび割れと交差するスターラップの下部鉄筋および引張側主鉄筋において大きくなる。ひび割れと交差する引張側主鉄筋において、最大総腐食電流密度は $2.979 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。すなわち、ひび割れがない場合と比較すると、ひび割れ箇所の鉄筋においては、約15倍も腐食速度が促進していることが確認できる。

主鉄筋とスターラップをともに考慮したコンクリート供試体を用いた、曲げひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響に関する検討についてまとめる。図7-2-9によると、ひび割れがない場合スターラップの上部水平鉄筋がアノードになることが認められる。また、マクロセル電流密度と比較してミクロセル電流密度が大きく、ミクロセル腐食が進行していると考えられる。さらに、最大総腐食電流密度は $0.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ で腐食速度は遅い。一方、ひび割れが存在する場合、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋および引張側主鉄筋がアノードとなることが認められる。また、総腐食速度が最大になる引張側主鉄筋においてマクロセル電流密度がミクロセル電流密度と比較して大きく、マクロセル腐食が進行していると考えられる。なおその総腐食速度 $2.979 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、ひび割れがない供試体と比較して約44倍速くなる。

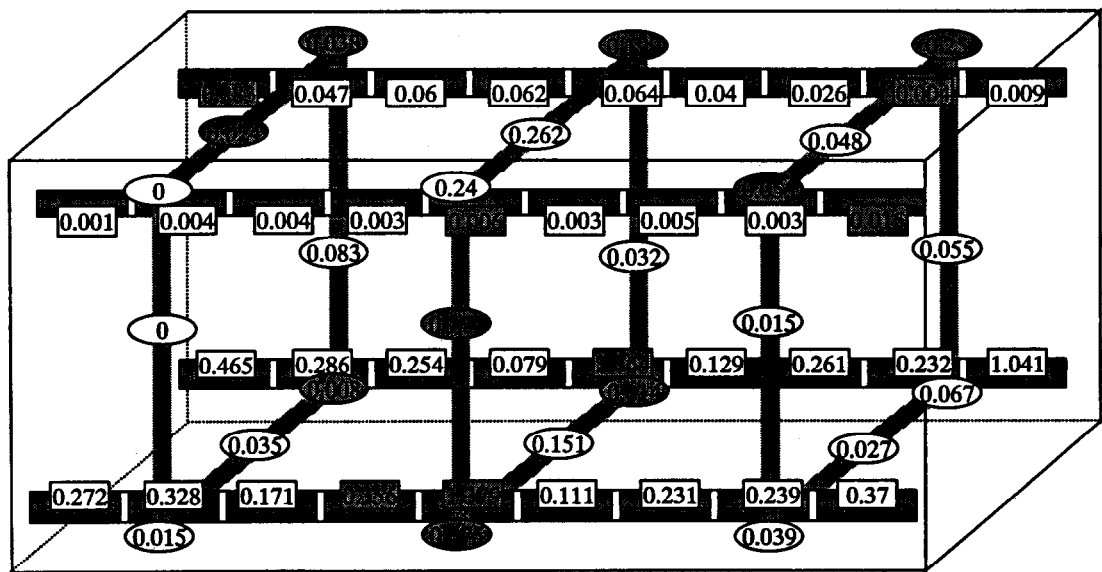
W/C=50%, ひび割れ無し



(a) ひび割れ無し

Unit: $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

W/C=50%, ひび割れ有り



(b) ひび割れ有り

↑
crack

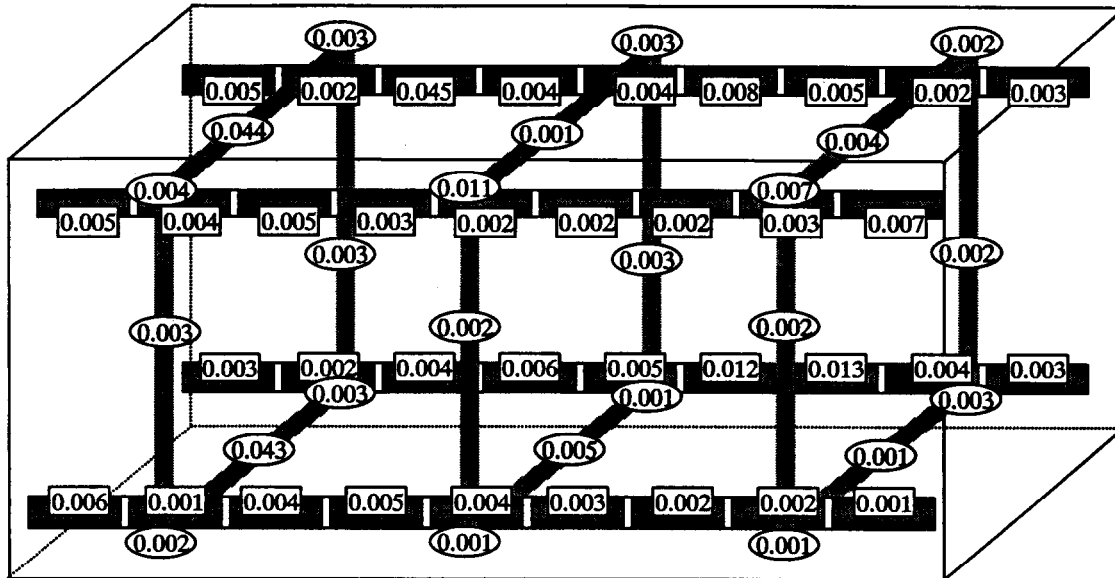
Unit: $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

● anode
○ cathode

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$

図7-2-6 ひび割れの有無がマクロセル電流密度に及ぼす影響

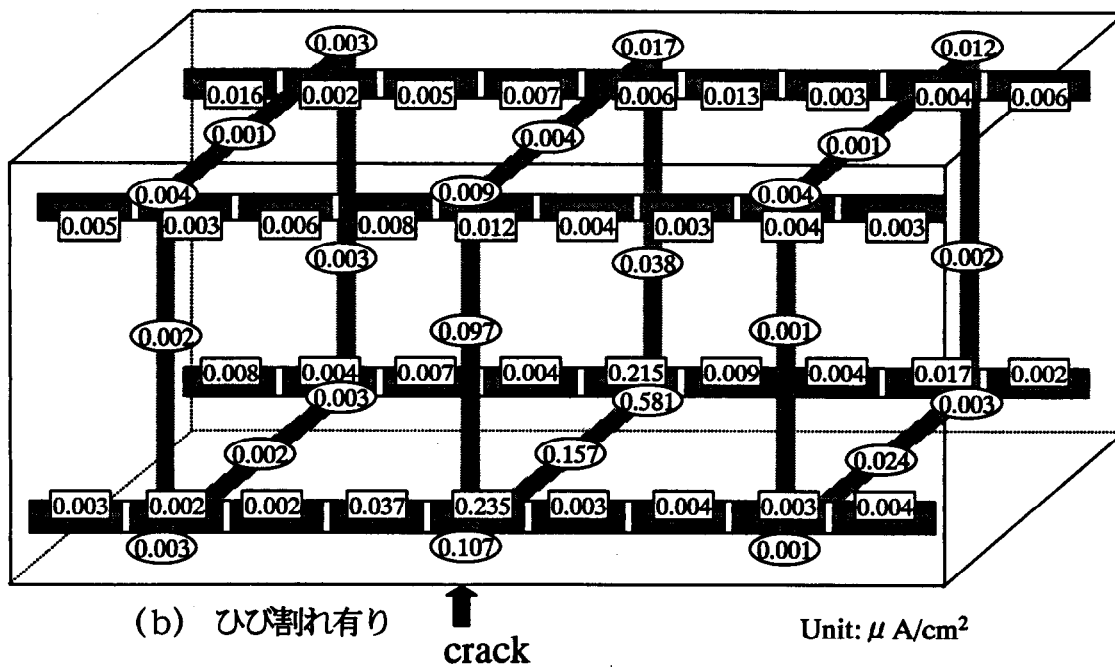
W/C=5.0%, ひび割れ無し



(a) ひび割れ無し

Unit: $\mu A/cm^2$

W/C=50%, ひび割れ有り



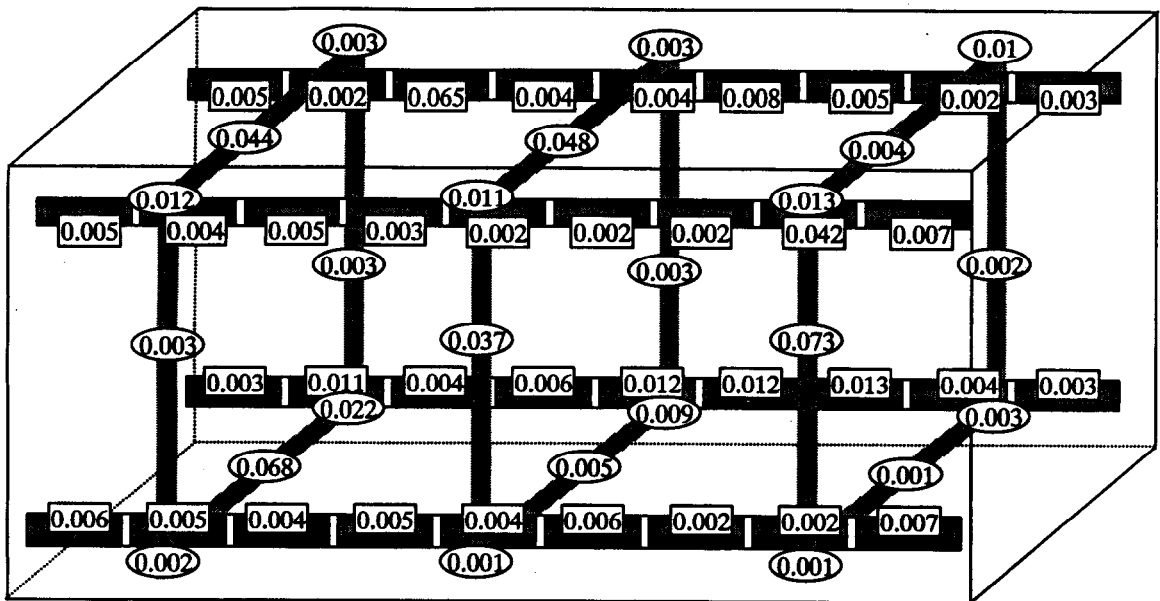
(b) ひび割れ有り

Unit: $\mu A/cm^2$

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図7-2-7 ひび割れの有無がマイクロセル電流密度に及ぼす影響

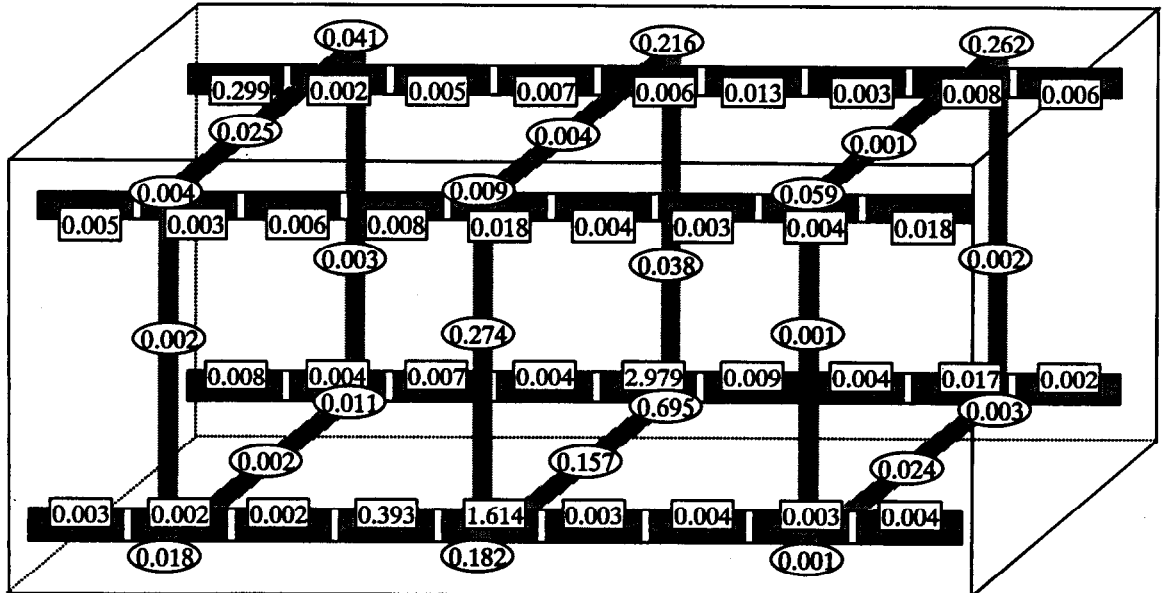
W/C=50%, ひび割れ無し



(a) ひび割れ無し

Unit: $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

W/C=50%, ひび割れ有り



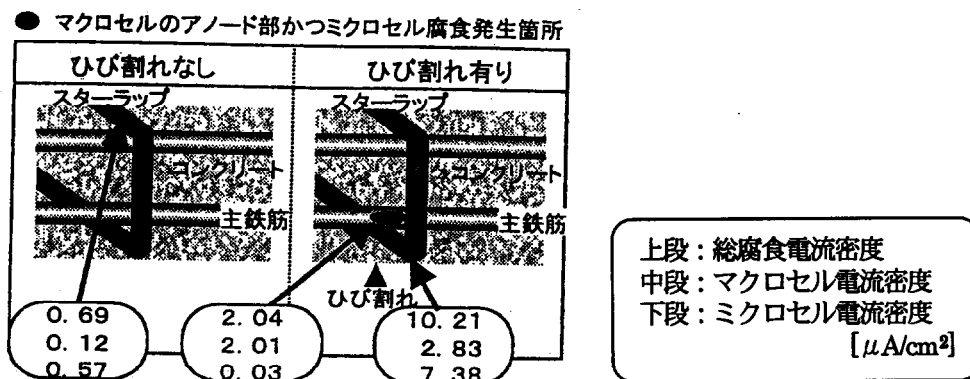
(b) ひび割れ有り

crack

Unit: $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$

図 7-2-8 ひび割れの有無が総腐食電流密度に及ぼす影響



$$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1.16 \text{mm}/\text{年}$$

図 7-2-9 ひび割れの有無がマクロセル形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)

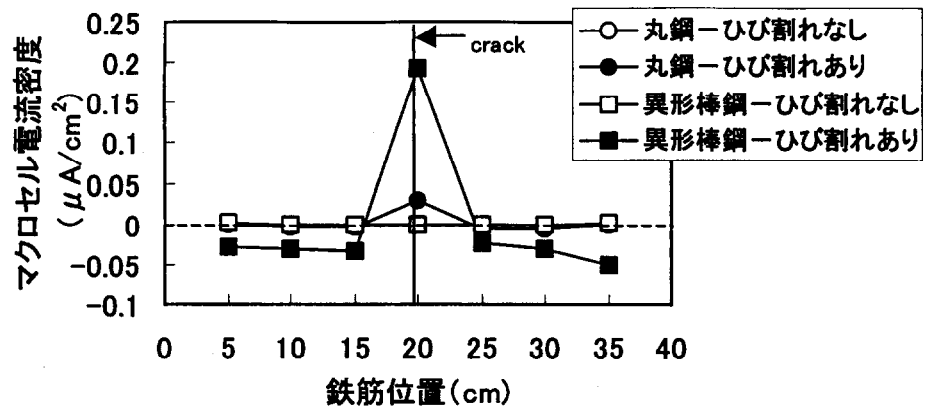
ここで、ひび割れがない場合スターラップ上部水平鉄筋において腐食が発生した理由について考察する。硬化コンクリートは打設方向に沿って、上部は下部と比較して貧配合になる⁷⁻²⁾。したがって、上部水平鉄筋は下部水平鉄筋と比較して貧配合のコンクリートと接することになる。貧配合となったコンクリートと接する鉄筋では、一般に腐食は進行する。したがって、上部水平鉄筋においてマクロセルのアノードあるいはマイクロセル腐食の発生箇所になったと考えられる。次に、ひび割れがある場合、スターラップ下部水平鉄筋および引張側主鉄筋において腐食が発生する理由を考察する。ひび割れ部には腐食要因物質が容易に浸透する。したがって、かぶりが少ないスターラップのみならず、主鉄筋にも到達することになる。その結果、スターラップ下部水平鉄筋および引張側主鉄筋において、マクロセルのアノードおよびマイクロセル腐食の発生場所になったと考えられる。

7-2-2-3 鉄筋形状の相違が及ぼす影響

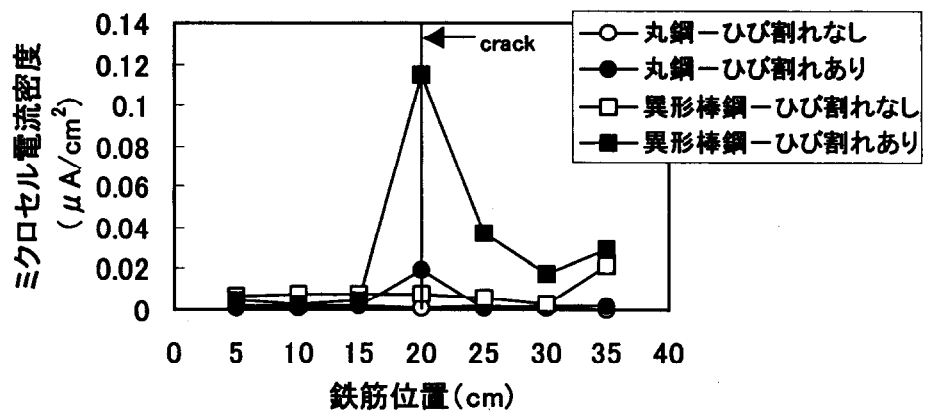
以上の検討は丸鋼を用いて行った。しかしながら、日本において鉄筋コンクリート構造物に使用される鋼材の多くは異形棒鋼である。このため、異形棒鋼を用いた場合における腐食形成機構および腐食速度が、丸鋼を用いた場合と同様か否かを整理する必要がある。

(1) 単一の主鉄筋を有するコンクリート供試体による検討

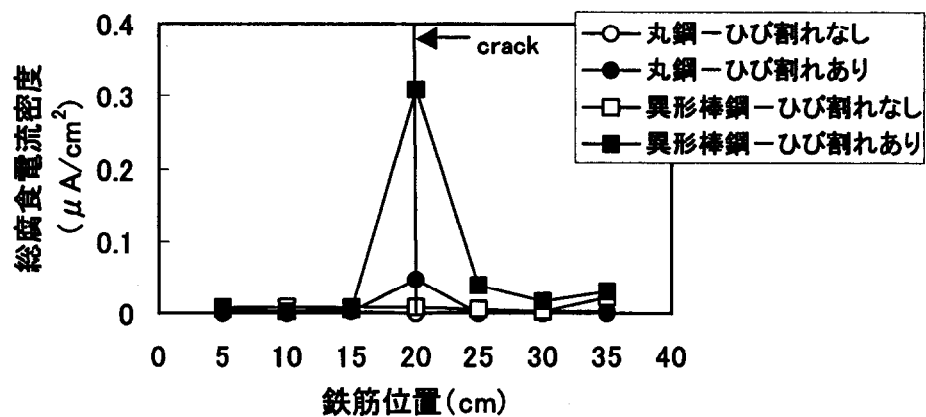
鉄筋形状の相違が、マクロセル電流密度、マイクロセル電流密度および総腐食電流密度に及ぼす影響を図 7-2-10 に示す。コンクリートの水セメント比は 50% である。



(a) マクロセル電流密度分布



(b) ミクロセル電流密度分布



(c) 総腐食電流密度分布

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図7-2-10 鉄筋形状の相違が腐食電流密度に及ぼす影響
(単一の主鉄筋に着目した検討)

はじめに丸鋼の場合について実験結果を整理する。ひび割れがない場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度はいずれも小さい。腐食電流密度は $0.003 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。曲げひび割れを有する場合、マクロセル電流密度は、ひび割れ箇所においてアノード電流が確認できる。ミクロセル電流密度も、ひび割れ箇所において大きな値を示している。この時、最大総腐食電流密度は $0.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。次に異形棒鋼の場合について実験結果を整理する。ひび割れがない場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度はいずれも小さい。腐食電流密度は $0.008 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。曲げひび割れを有する場合、マクロセル電流密度は、ひび割れ箇所においてアノード電流が確認できる。ミクロセル電流密度も、ひび割れ箇所において大きくなる。最大総腐食電流密度は $0.309 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。

単一の主鉄筋を有するコンクリート供試体に関する検討についてまとめる。図 7-2-11 によると、丸鋼および異形棒鋼を用いた場合、いずれにおいても、ひび割れがある場合、その箇所がアノードとなり、マクロセル卓越型腐食が進行することがわかる。すなわち、鉄筋形状が腐食形態に及ぼす影響は小さい。ただし、ひび割れ部におけるマクロセル電流密度、ミクロセル電流密度は、異形棒鋼を用いた場合が丸鋼を用いた場合より大きくなった。すなわち、ひび割れを有する場合、異形棒鋼を用いた時が腐食速度は速くなるといえる。ここで、異形棒鋼を用いた場合に腐食速度が速くなる理由を考察する。異形棒鋼を用いた場合には、形状からブリーディングの影響を受けやすい⁷⁻³⁾。このため、ひび割れ部と剥離部分に十分な腐食要因物質が供給されるために腐食速度が速くなると考えられる。さらに、鉄筋加工時において異形棒鋼は凹凸をつけるために丸鋼よりも多くの力がかかる。鉄分子結晶が乱れていると考えられる。これによっても、腐食しやすいと考えられる。

以上より、次のことが明らかとなった。鉄筋形状は、腐食形態には影響を及ぼさない。ただし、異形棒鋼を用いた場合、丸鋼を用いた場合より約 6 倍も腐食速度が速くなる。

(2) 主鉄筋とスターラップをともに有するコンクリート供試体による検討

曲げひび割れを有する供試体における、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度を図 7-2-12～図 7-2-14 に示す。水セメント比は 50% である。図 7-2-12 はマクロセル電流密度を示す。3 点曲げ試験により発生したひび割れ面から見た図であり、長方形が主鉄筋要素、楕円内がスターラップ鉄筋要素の値である。■ がアノード部、□ がカソード部を示している。同様に図 7-2-13 はミクロセル電流密

度を、図7-2-14は総腐食電流密度を示す。

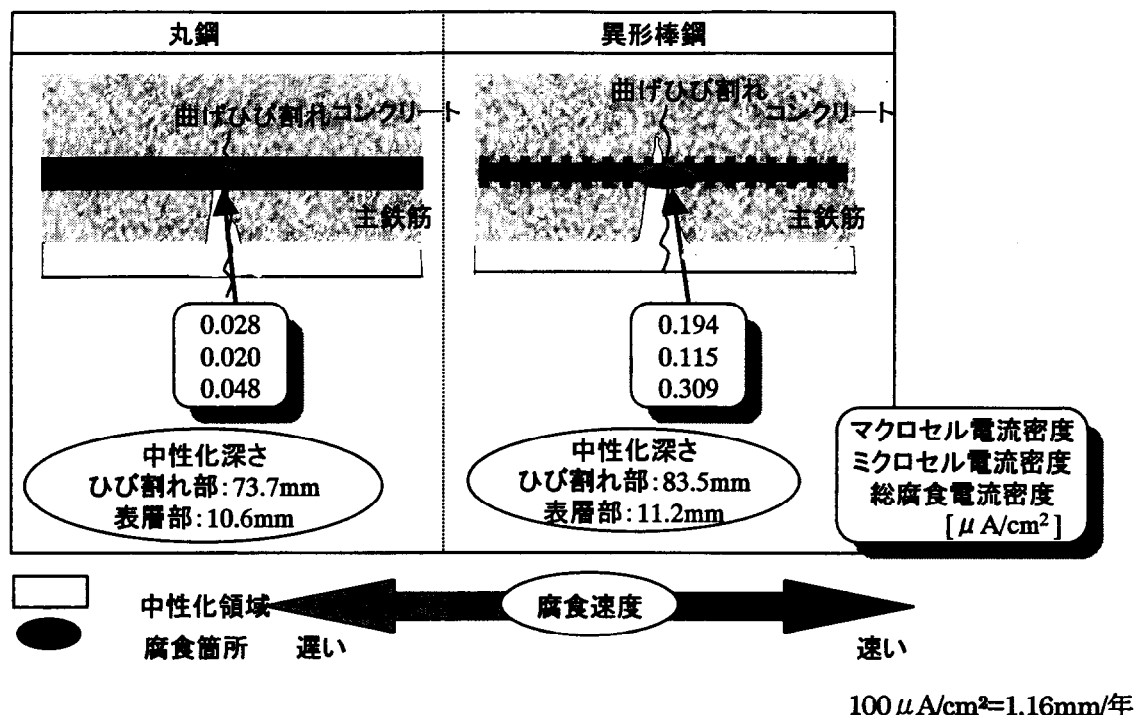
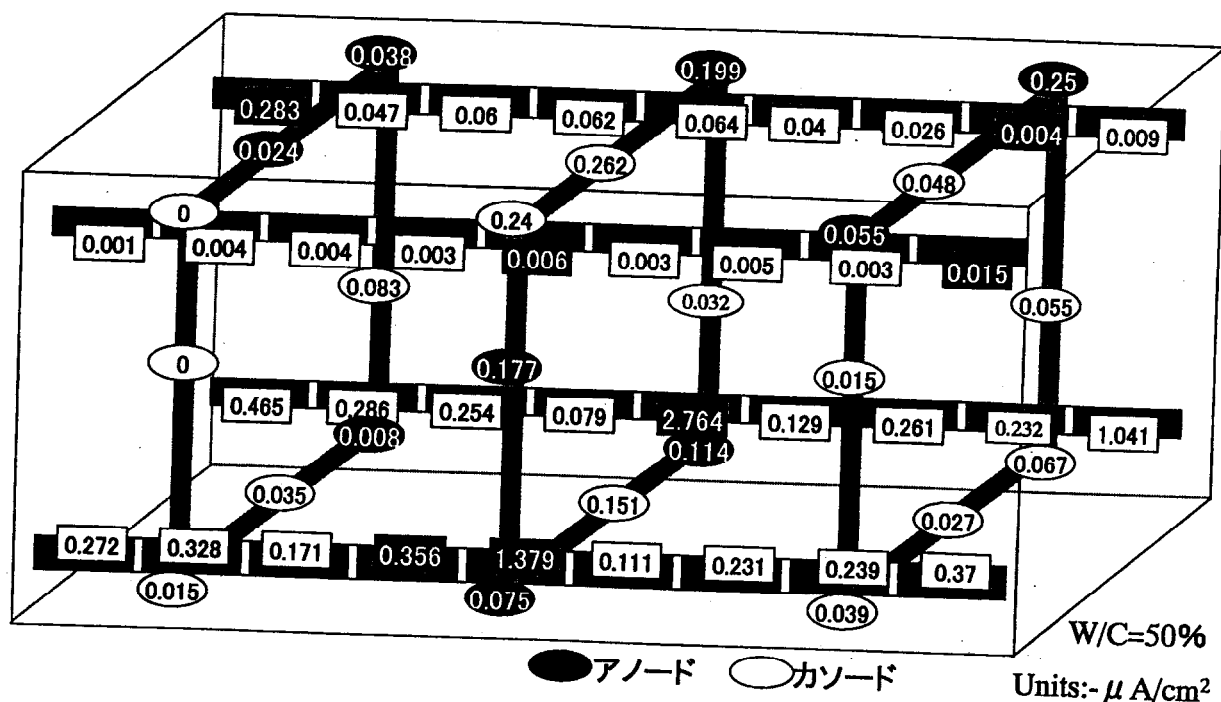


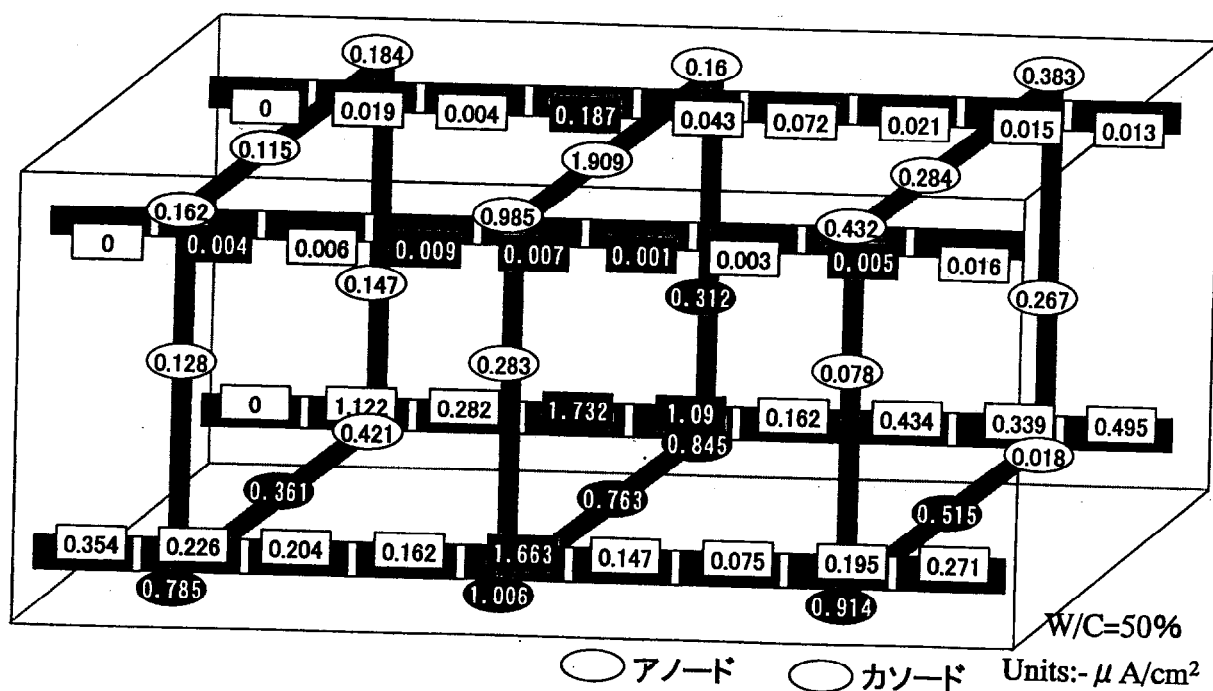
図7-2-11 鉄筋形状の相違がマクロセル腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(単一の主鉄筋に着目した検討)

はじめに、丸鋼の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、ひび割れ部のスターラップ下部水平鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋において大きくなる。ミクロセル電流密度も同様に、ひび割れ部のスターラップ下部水平鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋において大きくなる。ひび割れと交差する引張側主鉄筋において総腐食電流密度の最大値は、 $2.979 \mu A/cm^2$ である。次に、異形棒鋼の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、スターラップ下部水平鉄筋、ひび割れと交差する主鉄筋およびその近傍において大きくなる。ミクロセル電流密度も同様に、スターラップ下部水平鉄筋、ひび割れと交差する主鉄筋およびその近傍において大きくなる。ひび割れと交差する引張側主鉄筋において総腐食電流密度の最大値は、 $2.478 \mu A/cm^2$ である。

主鉄筋とスターラップをともに有するコンクリート供試体による検討についてまとめる。図7-2-15によると、丸鋼および異形棒鋼を用いた場合いずれにおいても、ひび割れ箇所におけるスターラップ下部水平鉄筋および引張側主鉄筋がアノードとなり、マクロセル卓越型腐食が進行することが認められる。したがって、鉄筋形状は腐食形態に影響を及ぼさないことが明らかとなった。また、腐食速度は、概ね異形棒鋼を用いた場合が丸鋼を



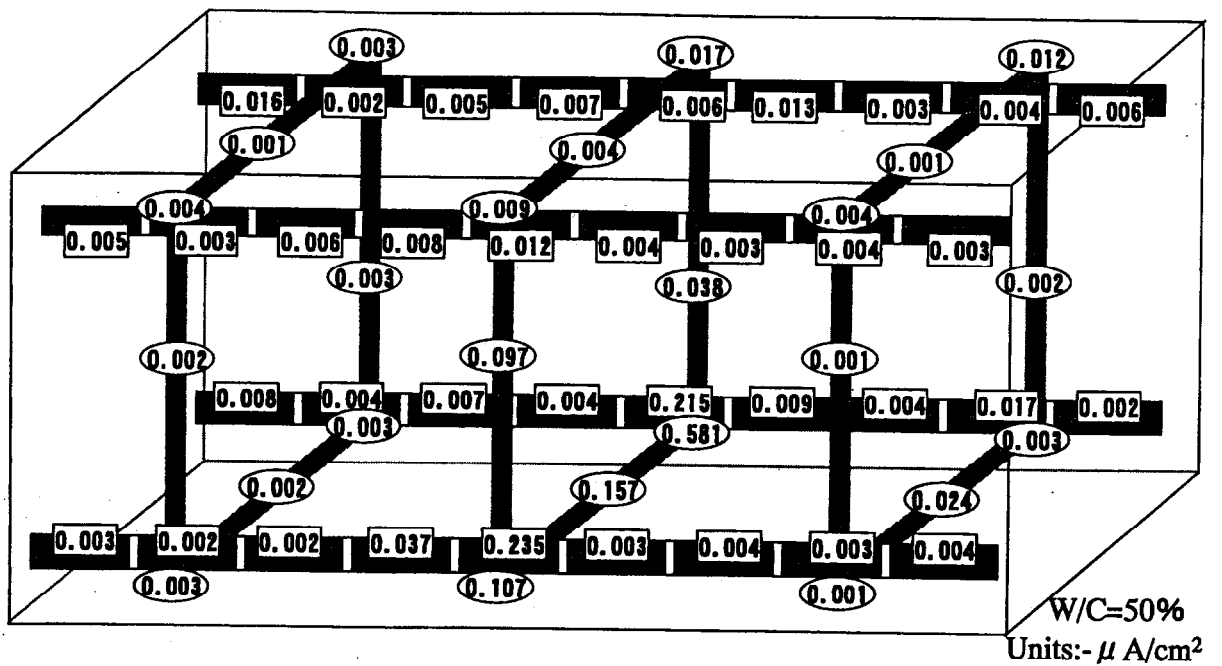
(a) 丸鋼



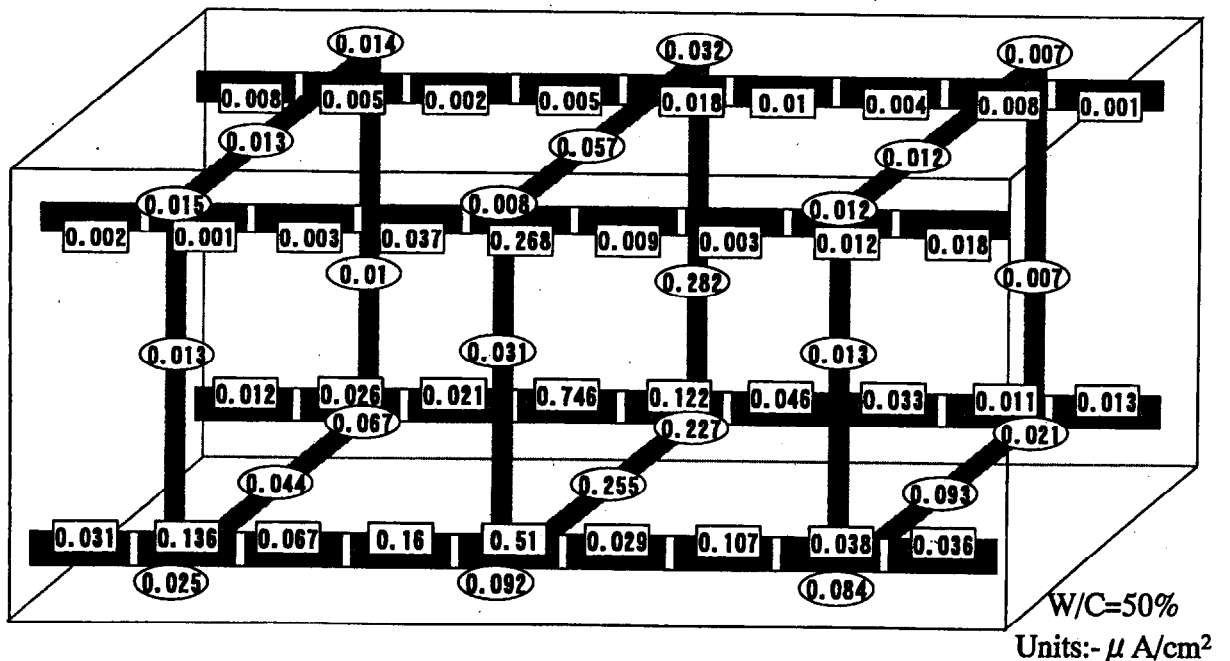
(b) 異形棒鋼

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図 7-2-12 鉄筋形状の相違がマクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)



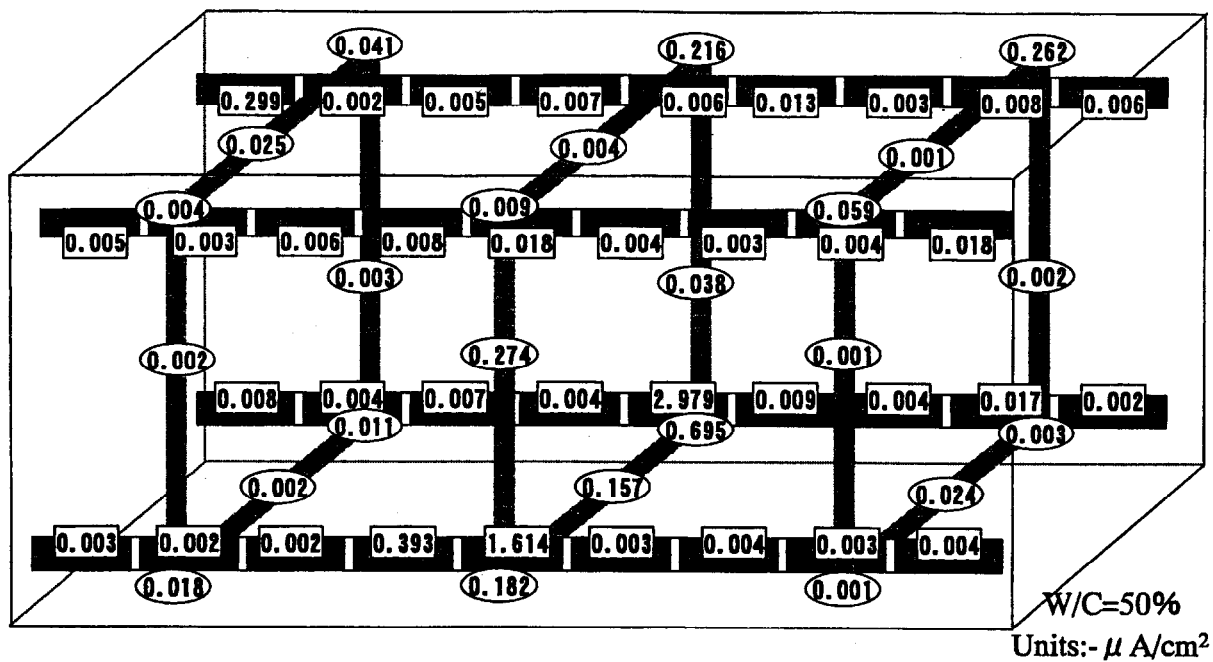
(a) 丸鋼



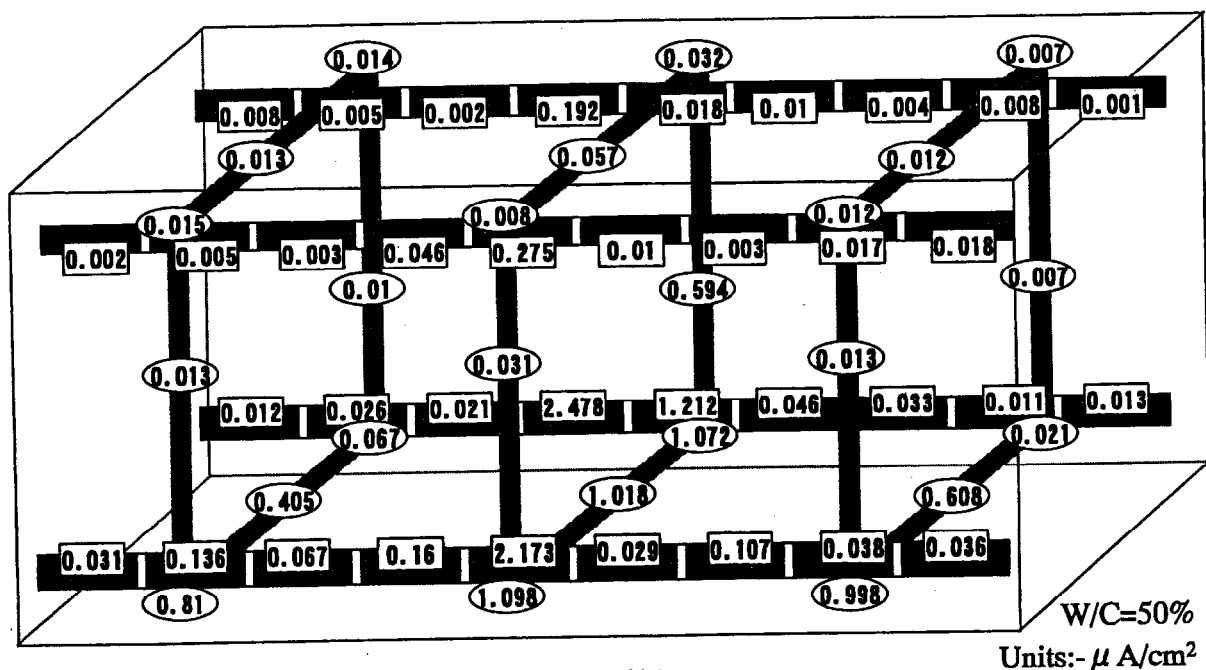
(b) 異形棒鋼

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図 7-2-13 鉄筋形状の相違がミクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)



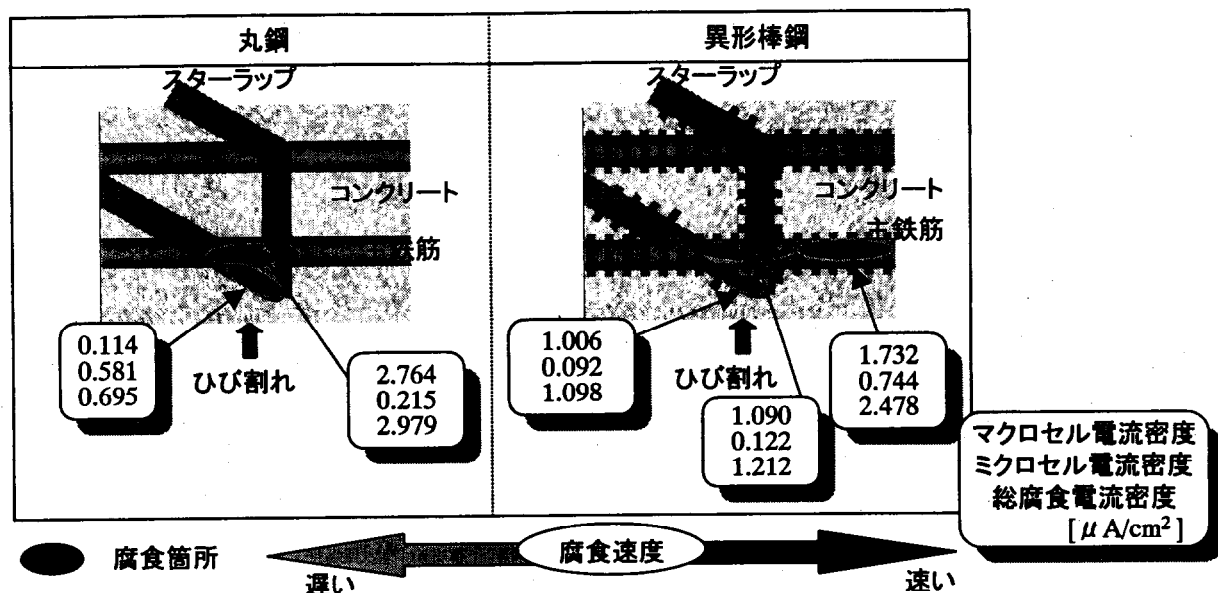
(a)丸鋼



(b)異形棒鋼

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図 7-2-14 鉄筋形状の相違が総腐食電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)



100 $\mu A/cm^2 = 1.16mm/年$

図 7-2-15 鉄筋形状の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)

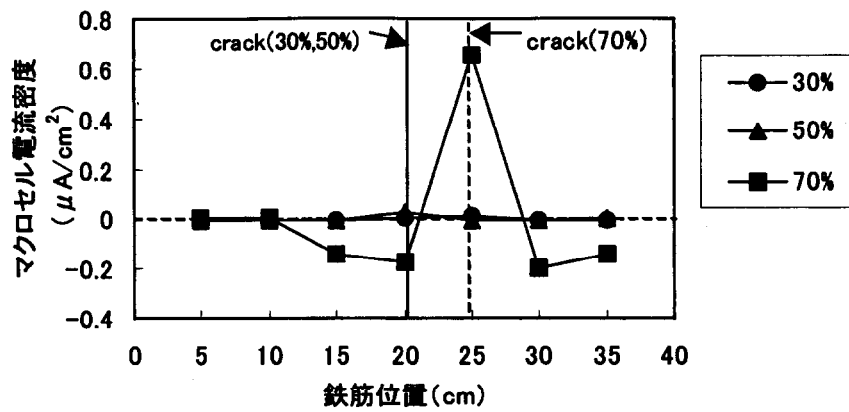
用いた場合と比較して速いことが認められる。ただし、一部最大総腐食電流密度は丸鋼鉄筋の方が大きくなっている場合もあるが、ひび割れ部と接する下部水平鉄筋における腐食電流を比較してみれば明らかに丸鋼に比べて異形鉄筋の場合の方が大きい。

以上より、主鉄筋とスターラップをともに有するコンクリート供試体についても、単一の主鉄筋のみに着目した供試体の結果を検証できた。

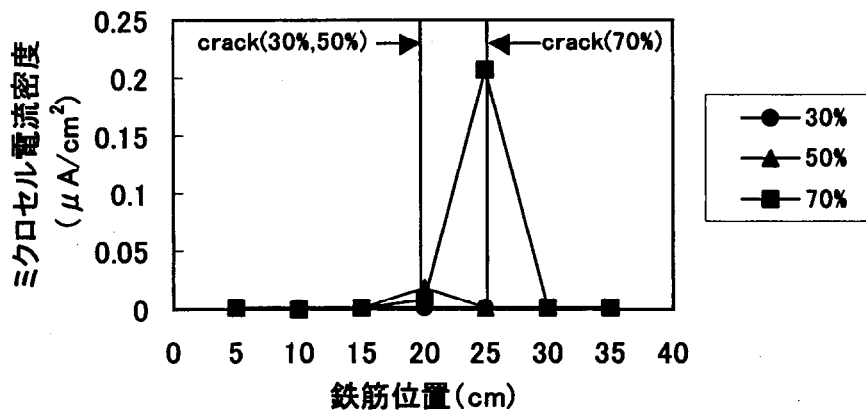
7-2-3 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

7-2-3-1 単一の主鉄筋に着目した供試体を用いた検討

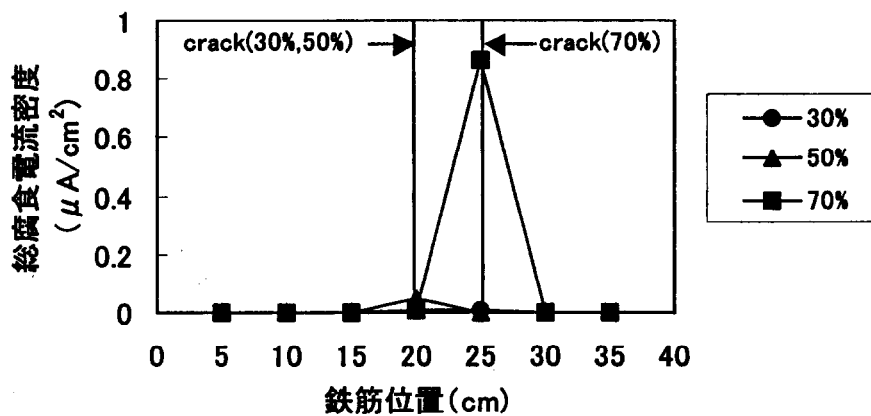
曲げひび割れを有する供試体を用い、水セメント比の相違がマクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度に及ぼす影響を図 7-2-16 に示す。水セメント比は 30%、50%、70% である。



(a) マクロセル電流密度



(b) ミクロセル電流密度



(c) 総腐食電流密度

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

図 7-2-16 水セメント比の相違が腐食電流密度に及ぼす影響

(単一の主鉄筋に着目した検討)

はじめに水セメント比が30%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度はいずれも小さい。ひび割れ部におけるマクロセル電流密度は $0.006 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、ミクロセル電流密度は $0.003 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、総腐食電流密度は $0.009 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。次に、水セメント比が50%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度はひび割れ部において大きくなる。ミクロセル電流密度も同様にひび割れ部において大きくなる。ひび割れ部におけるマクロセル電流密度は $0.028 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、ミクロセル電流密度は $0.020 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、総腐食電流密度は $0.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。さらに、水セメント比が70%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度はひび割れ部において大きくなる。ミクロセル電流密度も同様にひび割れ部において大きくなる。ひび割れ部におけるマクロセル電流密度は $0.656 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、ミクロセル電流密度は $0.207 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、総腐食電流密度は $0.863 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。

単一の主鉄筋を有するコンクリート供試体を用いた、水セメント比の相違がマクロセル腐食に及ぼす影響に関する検討についてまとめる。図7-2-17によると、腐食要因物質の侵入箇所となるひび割れ箇所がアノードになり、マクロセル腐食が進行することが認められる。また、いずれの水セメント比においてもマクロセル卓越型の腐食が進行することが確認される。さらに、腐食速度は水セメント比が高くなるに伴い速くなることが確認できる。

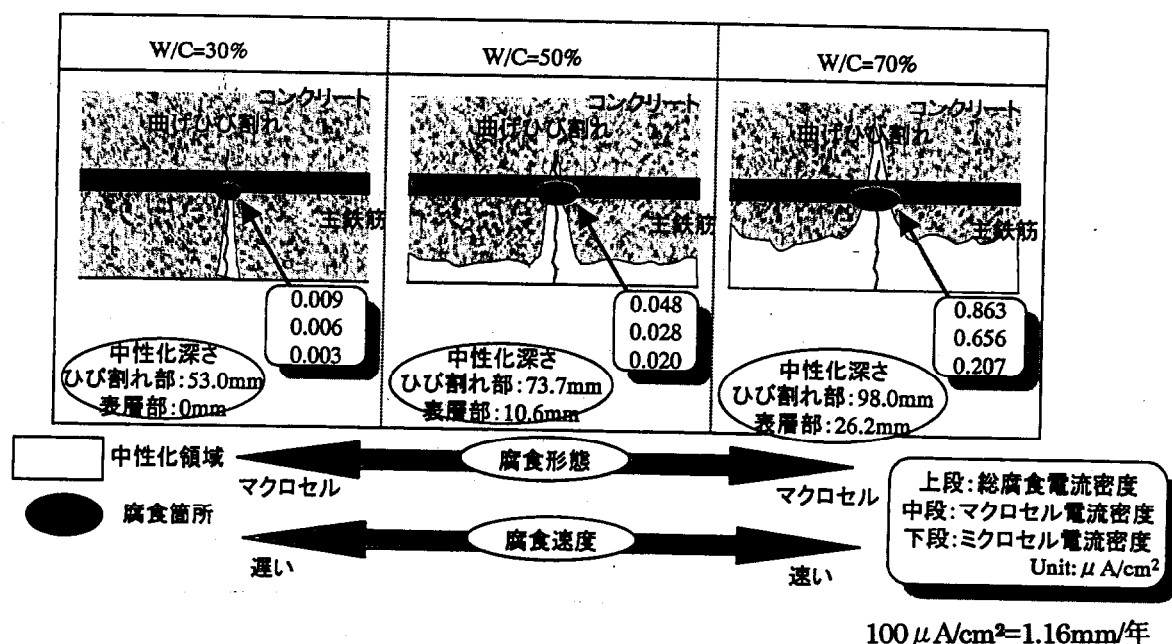


図7-2-17 水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響 (単一の主鉄筋に着目した検討)

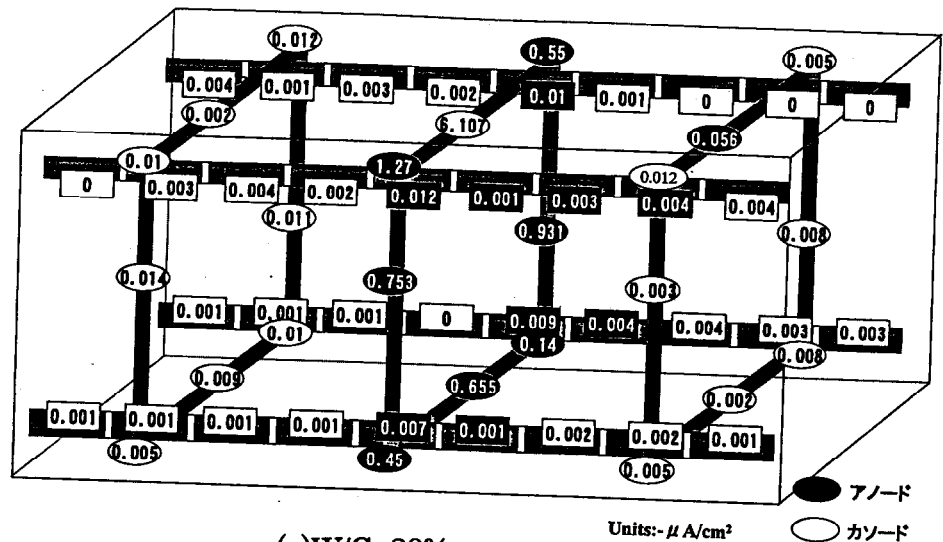
以上より、次のことを検証できた。いずれの水セメント比においても、マクロセル卓越型の腐食が進行する。また、腐食速度は、水セメント比が低いほど遅くなる。

7-2-3-2 主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体を用いた検討

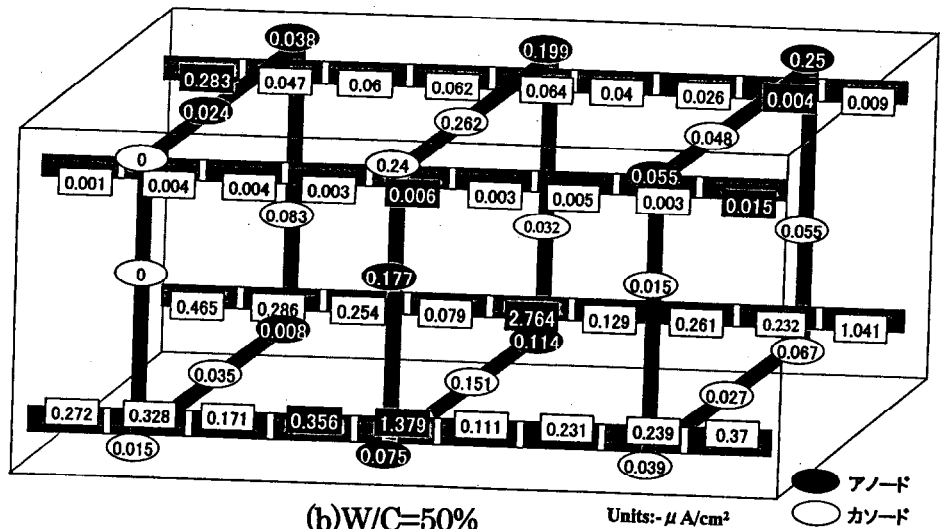
水セメント比の相違が、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度に及ぼす影響を図7-2-18～図7-2-20に示す。水セメント比は30%、50%、70%である。図7-2-18はマクロセル電流密度を示す。3点曲げ試験によりひび割れが発生した面から見た値であり、長方形の中の数値が主鉄筋要素の電流値を、楕円内の数値がスターラップ鉄筋要素の腐食電流値を示す。■がアノード部、□がカソード部を示している。同様に、図7-2-19はミクロセル電流密度を、図7-2-20は総腐食電流密度を示す。

はじめに、水セメント比が30%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、ひび割れと接するスターラップ上部水平鉄筋および下部水平鉄筋において大きくなる。一方、ミクロセル電流密度は、ひび割れと接するスターラップ上部水平鉄筋および下部水平鉄筋において大きくなる。次に、水セメント比が50%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、ひび割れと接する引張側主鉄筋において大きくなる。一方、ミクロセル電流密度は、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋において大きくなる。さらに、水セメント比が70%の場合について実験結果を整理する。マクロセル電流密度は、ひび割れと接するスターラップ下部水平鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍の主鉄筋において大きくなる。一方、ミクロセル電流密度は、ひび割れと接するスターラップ下部水平鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍の主鉄筋において大きくなる。

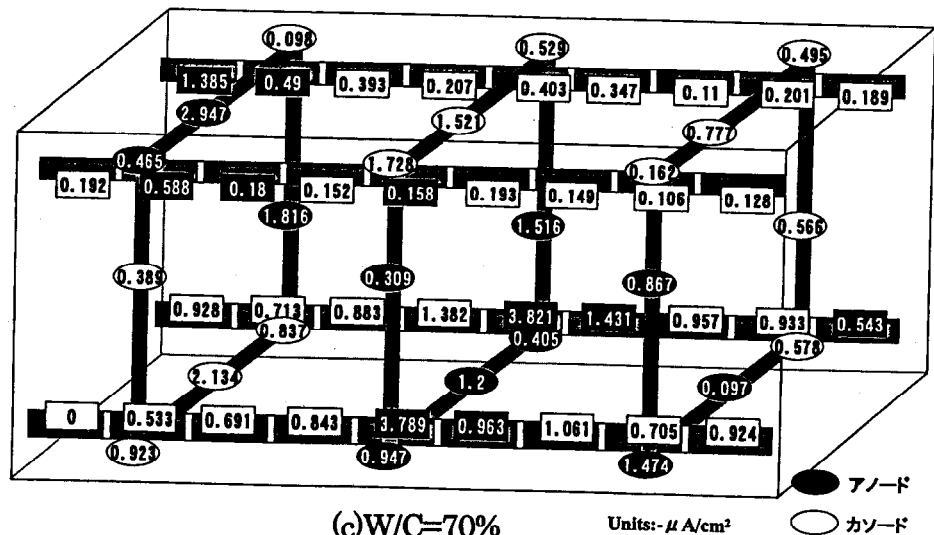
主鉄筋とスターラップをともに有するコンクリート供試体を用いた、水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響に関する検討についてまとめる。図7-2-15によると、水セメント比が30%の時、ひび割れと接するスターラップ下部水平鉄筋において、マクロセル腐食のアノード部、ミクロセル腐食の発生場所となることが認められる。また、マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を比較すると前者が大きく、マクロセル卓越型の腐食が進行していることが確認できる。また、水セメント比が50%ではひび割れと接するスターラップ下部水平鉄筋、引張側主鉄筋においてマクロセル腐食のアノード部、ミクロセル腐食の発生場所となることが認められる。マクロセル電流密度とミク



(a) W/C=30%



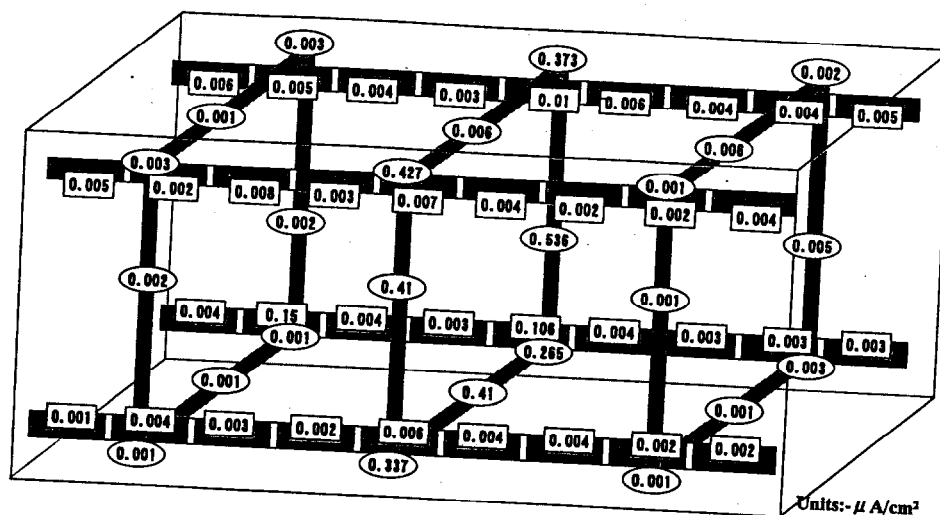
(b) W/C=50%



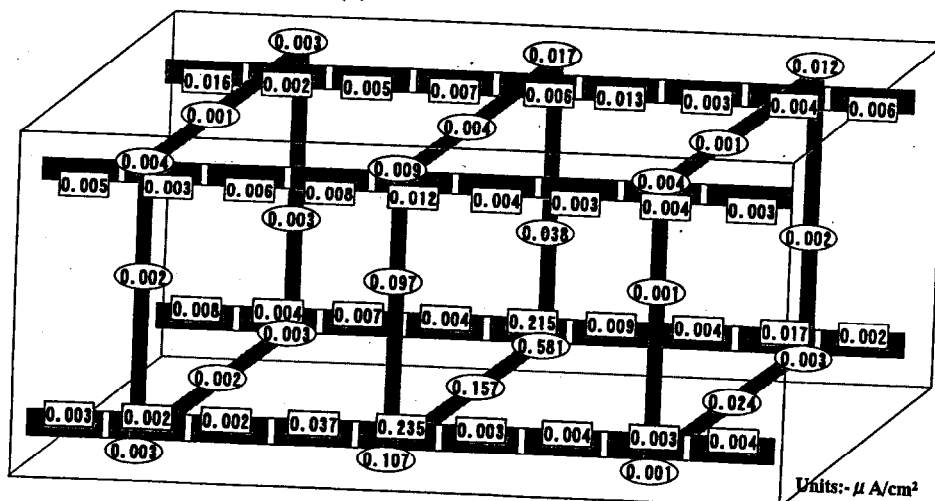
(c) W/C=70%

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

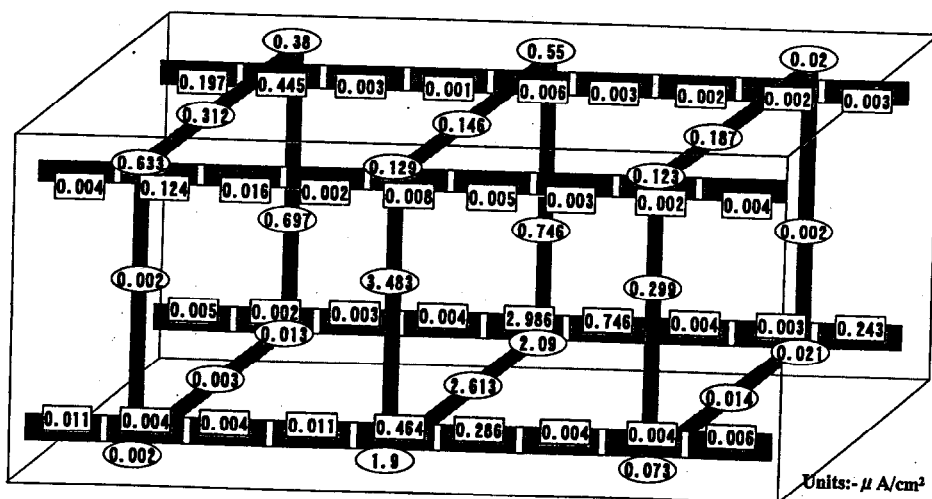
図 7-2-18 水セメント比の相違がマクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)



(a)W/C=30%



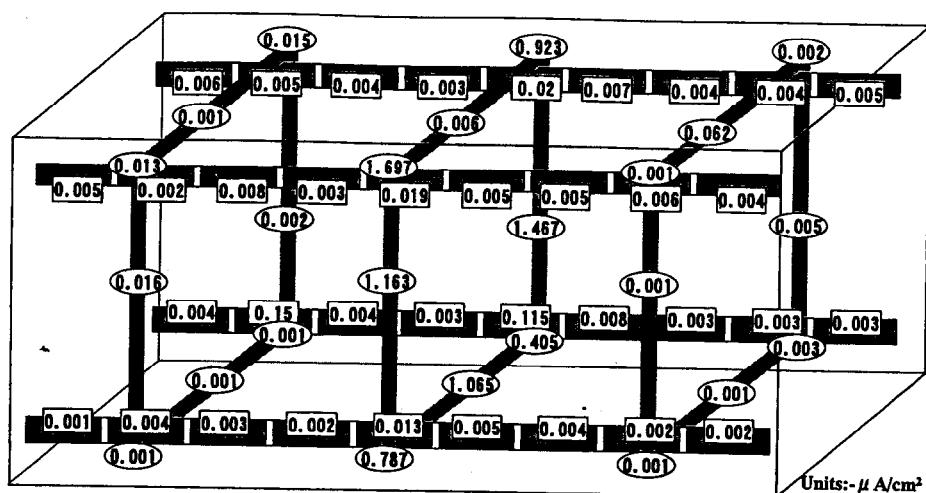
(b)W/C=50%



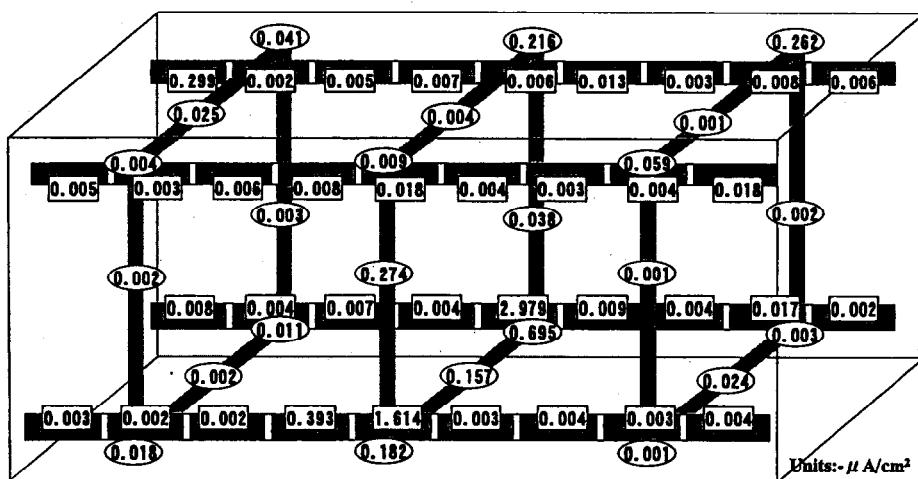
(c)W/C=70%

$100 \mu A/cm^2 = 1.16 mm/年$

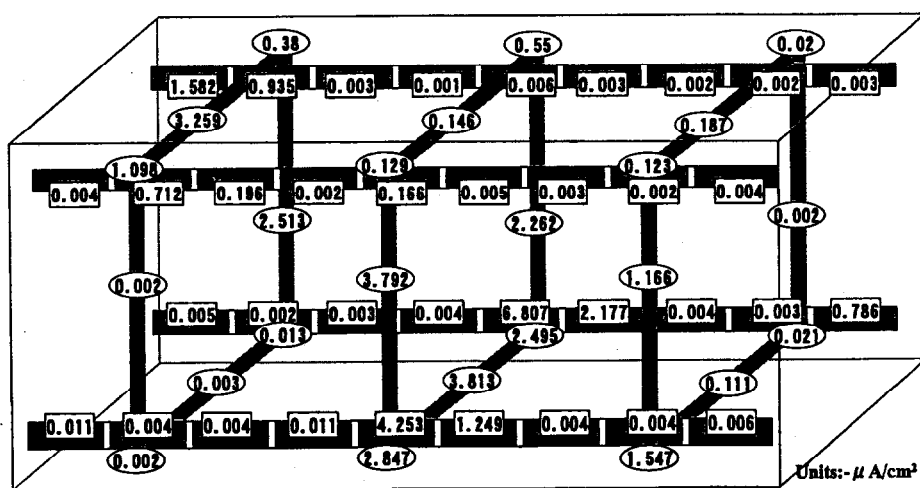
図7-2-19 水セメント比の相違がマイクロセル電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)



(a)W/C=30%



(b)W/C=50%



(c)W/C=70%

$100 \mu A/cm^2 = 1.16mm/年$

図7-2-20 水セメント比の相違が総腐食電流密度に及ぼす影響
(主鉄筋とスターラップをともに考慮した検討)

ロセル電流密度を比較すると前者が大きく、マクロセル卓越型の腐食が進行していることが確認できる。一方、水セメント比が70%では、ひび割れと接するスターラップ下部水平鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍においてマクロセル腐食のアノード部、ミクロセル腐食の発生場所となることが認められる。マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を比較すると前者が大きく、マクロセル卓越型の腐食が進行していることが確認できる。さらに、腐食速度は、水セメント比が低くなるに伴い遅くなることが認められる。ここで、水セメント比が高くなるに伴い腐食位置が拡大する理由を考察する。水セメント比が高くなるに伴い、曲げひび割れ近傍の剥離（肌離れ）が増大し、またコンクリート内部の物質透過量も増大する。したがって、水セメント比が高いほど、ひび割れから離れたコンクリート内部へも腐食要因物質が供給されるため、腐食位置は拡大したと考えられる。また、水セメント比が高いほど、ひび割れから離れたコンクリート内部へ、二酸化炭素の供給とともに、酸素の供給も可能とする。すなわち、カソード面積が増加する。ここで、1-2-2-1に示した通り、マクロセルにおいてカソード面積が増加すると、腐食速度が促進される。したがって、水セメント比が高い場合には、カソード面積が増加することによっても、腐食速度が増加したと考えられる。

以上より、次のことを確認できた。水セメント比に関わらず、腐食要因物質の侵入箇所位置する鉄筋が腐食する。その時、水セメント比が高くなるに伴い、コンクリート内部への腐食要因物質の供給量が増加する。そのため、アノード位置は、スターラップから主鉄筋、そしてその近傍に広がる。また、いずれの水セメント比においても、マクロセル卓越型の腐食が進行する。腐食速度は、水セメント比が低いほど遅い。

7-3 コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食

7-3-1 実験概要

7-3-1-1 使用材料

実験に使用した材料は、7-2で用いた材料と同様である。主な性質を表7-3-1に示す。

表7-3-1 使用材料の主な性質

	規格	主な性質 ^{注)}
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ 、比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	比重=2.60、F.M.=2.59、吸水率=2.20%
粗骨材	碎石	比重=2.64、F.M.=6.70、吸水率=0.68%
混和剤	減水剤・AE剤	リグニンスルホン酸系
	高性能AE減水剤	ナフタレン系
鉄筋	異形棒鋼	降伏強度=367N/mm ² 、Fe含有率=98.84%

注) 普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分は表2-2-1に、細骨材（陸砂）の物理的性質は表2-2-2に、粗骨材（碎石）の物理的性質は表3-2-2に、鉄筋（異形棒鋼）の化学成分は表3-2-3に示した通りである。

7-3-1-2 配合

実験に使用したコンクリートの配合および基礎性状を表7-3-2に示す。

表7-3-2 コンクリートの配合および基礎性状

W/C (%)	s/a	W (Kg/m ³)	C (Kg/m ³)	S (Kg/m ³)	G (Kg/m ³)	減水剤 (g/m ³)	AE剤 (g/m ³)	高性能AE減水剤 (g/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
30	39.8	165	550	621	958	-	-	6600	6.4	1.7
55	43.1	173	315	771	1037	0.3	3.2	-	9	2.2
80	48.0	206	258	826	912		13	-	70-59	2.5

7-3-1-3 実験ケース

実験ケースは表7-3-3に示す通りである。

表 7-3-3 実験ケース

	W/C(%)		
	30	50	70%
コールドジョイント	○	○	○

○：実験を行ったケースを示す

7-3-1-4 供試体概要

本節で使用した供試体を図 7-3-1 に示す。

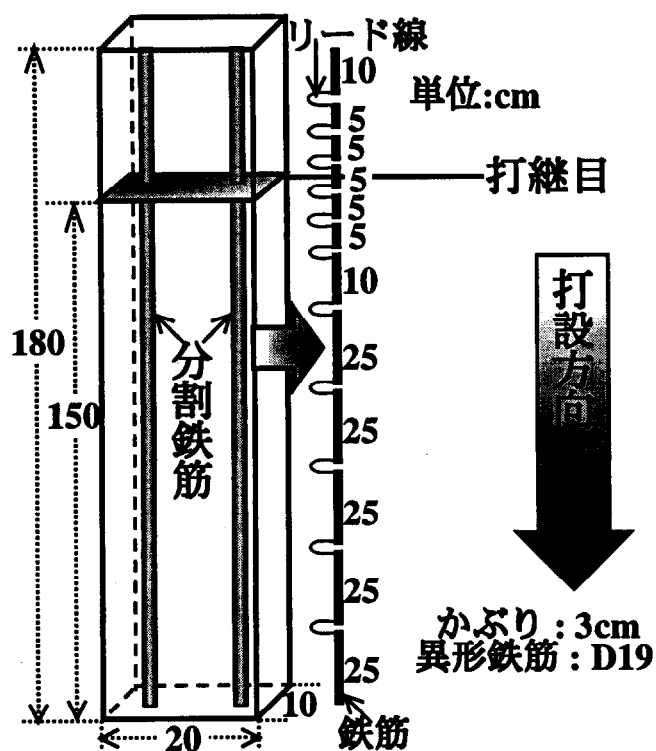


図 7-3-1 供試体概要図

12 の要素に分割した鉄筋を用いた。各分割鉄筋要素の長さは 5cm、10cm、25cm である。前処理方法は、2-2 と同様である。打設方法を次に示す。はじめに、打継ぎ高さ（底面から 150cm）まで打設した。18 時間後、継足しの打設を行った。ここで、18 時間とは、母材部分の打設終了時刻を夕刻 16 時とし、継足しの打設開始を翌日の朝 10 時と仮定したことによる。また、打継ぎに際しては、母材上部のレイタンスをワイヤブラシで十分除去し

た。継足し終了から24時間後脱型し、上面および下面をエポキシ系樹脂により被覆し、腐食要因物質が浸透することを防いだ。中性化は、二酸化炭素濃度10%、温度40℃、相対湿度70%の環境に2ヶ月間暴露することにより進行させた。

7-3-1-5 測定項目

マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および酸素透過量を測定した。腐食電流密度の測定方法は、2-2と同様である。また、酸素透過量の測定方法は、4-2と同様である。なお、測定は中性化促進環境下ではなく、湿潤環境下において行った。

7-3-2 水セメント比の相違が腐食形態および腐食速度に及ぼす影響

図7-3-2～図7-3-4に、水セメント比の相違がマクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度に及ぼす影響を示す。腐食位置は何れの水セメント比においてもコールドジョイント近傍である。これは、コールドジョイントにおいて、コンクリートと比較して、物質透過性が高いためと考えられる。また、水セメント比が高いほど、総腐食電流密度は大きくなることが認められる。これは、表7-3-4に示す通り、水セメント比が高いほど、物質透過性が高いためと考えられる。さらに、図7-3-2と図7-3-3を比較すると、コールドジョイント部においてマクロセル電流密度がミクロセル電流密度と比較して大きい。したがって、マクロセル卓越型の腐食が進行していると考えられる。

表7-3-4 酸素透過量

W/C (%)	酸素透過量($10^{-11} \times \text{mol/cm}^2/\text{sec}$)
30	1.89
55	3.02
80	3.53

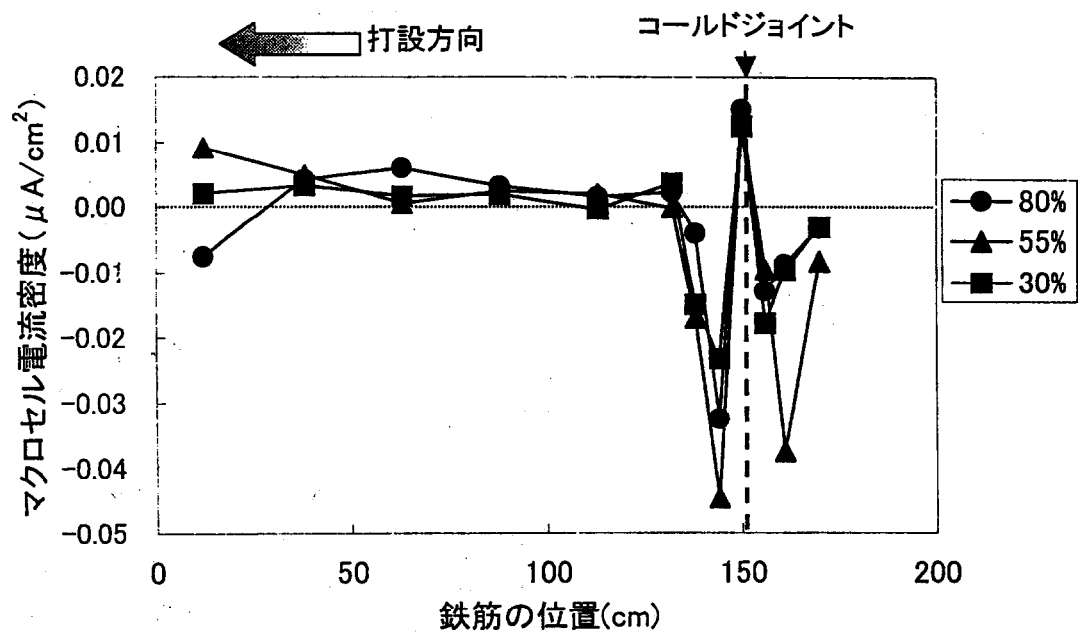


図 7-3-2 水セメント比の相違がマクロセル電流密度に及ぼす影響

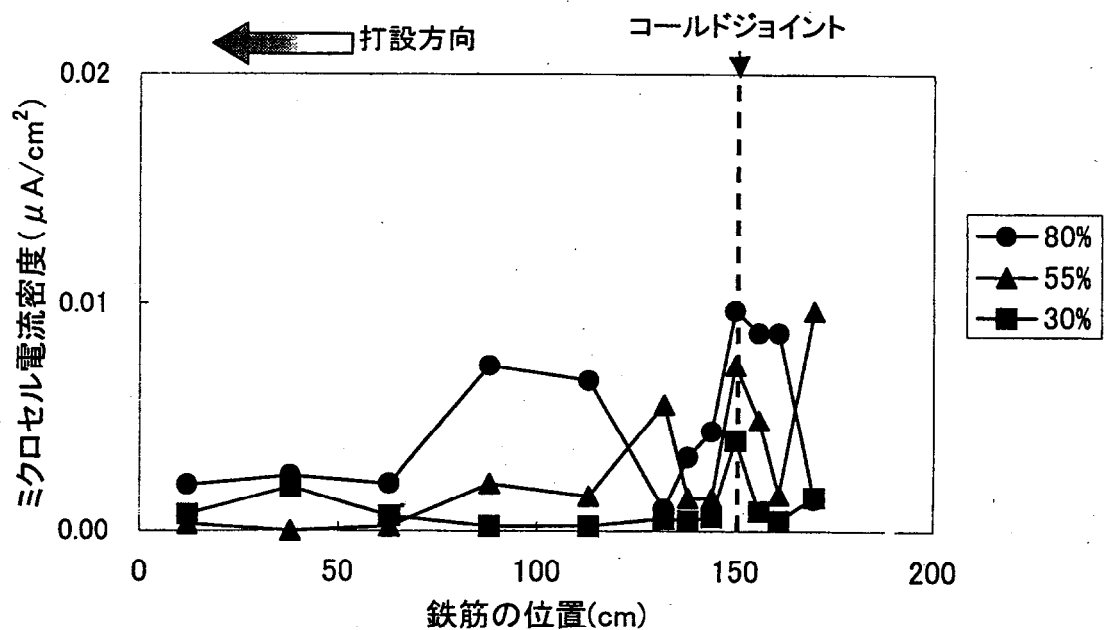


図 7-3-3 水セメント比の相違がミクロセル電流密度に及ぼす影響

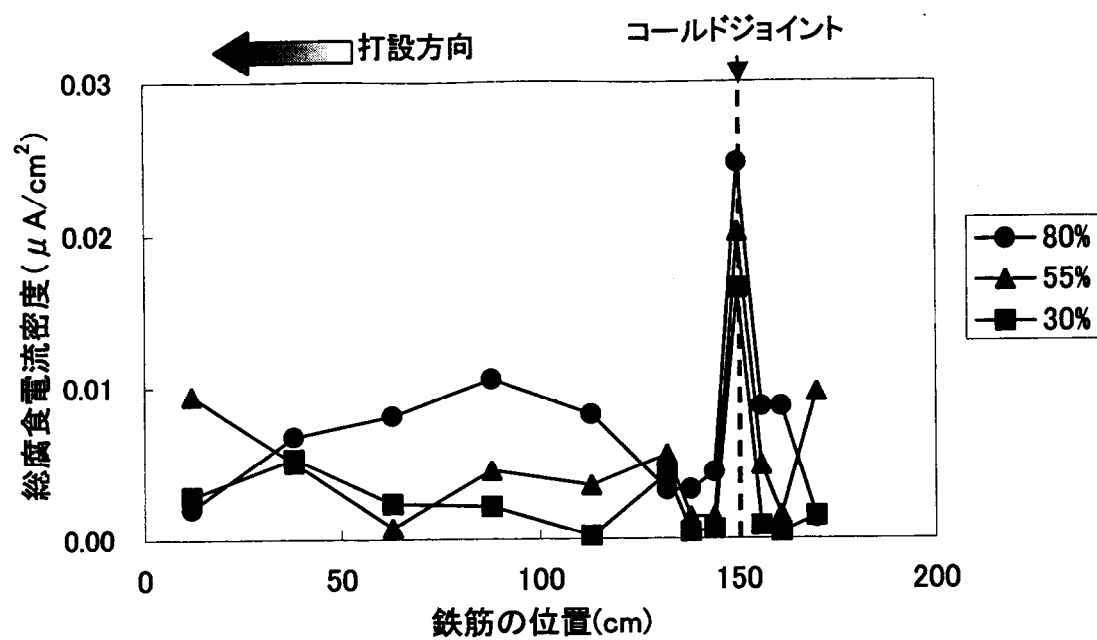


図7-3-4 水セメント比の相違が総腐食電流密度に及ぼす影響

7-4 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 中性化の影響を受けるコンクリートの代表的な欠陥部である曲げひび割れ部およびコールドジョイント部を対象とし、腐食形態および腐食速度を評価できた。
- ② 第6章の結果が検証された。すなわち、いずれの水セメント比においても、マクロセル卓越型の腐食が進行する。また、腐食速度は、水セメント比が低いほど遅くなる。
- ③ 曲げひび割れ近傍では、主鉄筋のみならず、スターラップの腐食速度も速い。例えば、水セメント比が30%の時スターラップ下部水平鉄筋の腐食速度は0.012mm/年となり、主鉄筋と比較すると約10倍速くなる。なお、3-2-2-1(1)2)の判定基準によれば、寿命は約160年である。
- ④ 曲げひび割れ近傍ではマクロセルが形成されることにより腐食速度が増加する傾向が認められた。例えば、ひび割れがない場合と比較して約45倍速くなる。
- ⑤ コールドジョイントおよびその近傍がマクロセルのアノード部となり、またミクロセル腐食も活性され、腐食速度も速い。
- ⑥ 鉄筋形状の相違は腐食形態に影響を及ぼさないが、腐食速度に影響を及ぼす。すなわち、丸鋼および異形棒鋼ともに、曲げひび割れ近傍の鉄筋においてマクロセルのアノード部が形成される。ただし、その腐食速度は異形棒鋼が丸鋼と比較して速く、約10倍になる。

- 1) 宮川豊章, 武若耕司, 出村克宣, 榊田佳寛, 守分敦郎: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 39-48, 1998.
- 2) 神田衛, 吉田八郎: コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No.357, pp.38-43, 1976.
- 3) Nathaniel B. Diola : Formation and Modification of Interfacial Transition Zones in Concrete, 東京工業大学学位論文, 1999

第8章 既存構造物の欠陥部に生じる

中性化によるマクロセル腐食

8-1 はじめに

8-2 コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食

8-3 まとめ

8-2 コールドジョイント部に生じるマクロセル腐食

8-2-1 実験概要

8-2-1-1 部材概要

対象部材は、東京工業大学緑が丘3号館（東京都目黒区）屋上壁面部である。これは5階建ての鉄筋コンクリート建物で、竣工後約35年が経過している。コンクリートの配合、スランプおよび設計基準強度を表8-2-1に示す。また、鉄筋の径は15mmである。目視調査の結果、対象部材には打継処理の悪い箇所（以降コールドジョイント部と称す。）が存在する。特に、測定対象とした部分の近傍には、図8-2-1に示すような鉄筋腐食の発生、コンクリートの剥落部分が見られた。また、同壁面部において図8-2-2に示すような腐食の進行が確認できない打継目も見られた。コールドジョイント部における腐食は、外部環境を考慮すると中性化により生じたと判断できる。

表8-2-1 コンクリートの配合および強度

単位水量	173kg/m ³
W/C	60%
slump	18cm
s/a	41%
粗骨材最大寸法	25mm
設計基準強度	18MPa

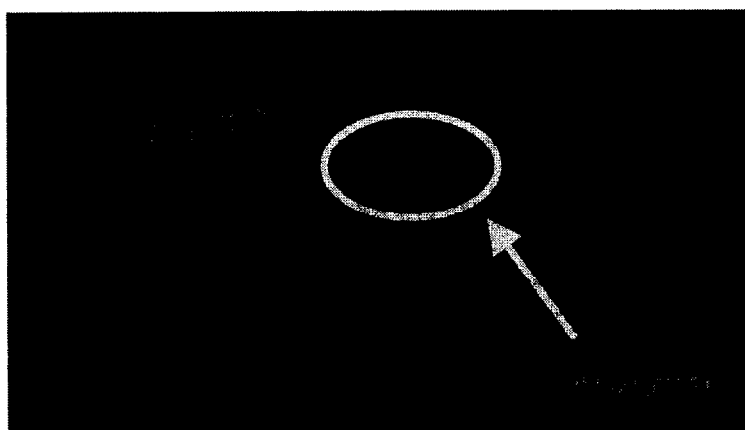


図8-2-1 コールドジョイント部における鉄筋の腐食状況

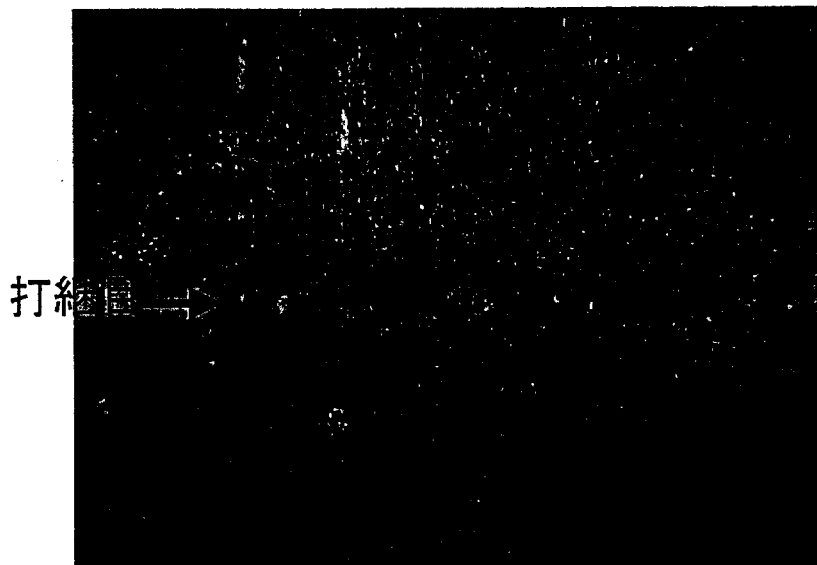


図 8 - 2 - 2 打継ぎ処理が良い部分

8 - 2 - 1 - 2 測定概要および解析概要

測定方法および解析方法は 5 - 2 と同様である。ただし、測定間隔は、打継目近傍においては 25cm、それ以外の箇所においては 50cm 間隔とした。また、測定は、平成 12 年 10 月 10 日の午前中に行った。当日の天候は晴れていたが、前日は雨が降っており、コンクリートは表乾状態に近い状態であったと考えられる。

8 - 2 - 2 実験結果

図 8 - 2 - 3 および図 8 - 2 - 4 に鉄筋電位 (1 段目)、分極抵抗 (2 段目) およびコンクリート抵抗 (右下) の測定結果と、それらの値を用いて指定されたマクロセルアノード腐食速度 (3 段目) およびミクロセル腐食速度 (4 段目) を示す。これらによれば、コールドジョイント部において腐食速度は最大になることを確認できた。一方、打継処理の良い箇所においては健全部と比較しても腐食速度は小さくなることを確認できた。つまり、打継処理が良い場合、打継部は腐食要因物資の侵入箇所とならないため、鉄筋腐食に対する欠陥にはならないといえる。また、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を比較した結果、前者が大きい。したがって、マクロセル卓越型の腐食が進行する傾向にあることを確認できた。

以上より、実構造物においてもコールドジョイント部近傍がアノードとなるマクロセル

が形成し、腐食速度が速くなることを確認できた。

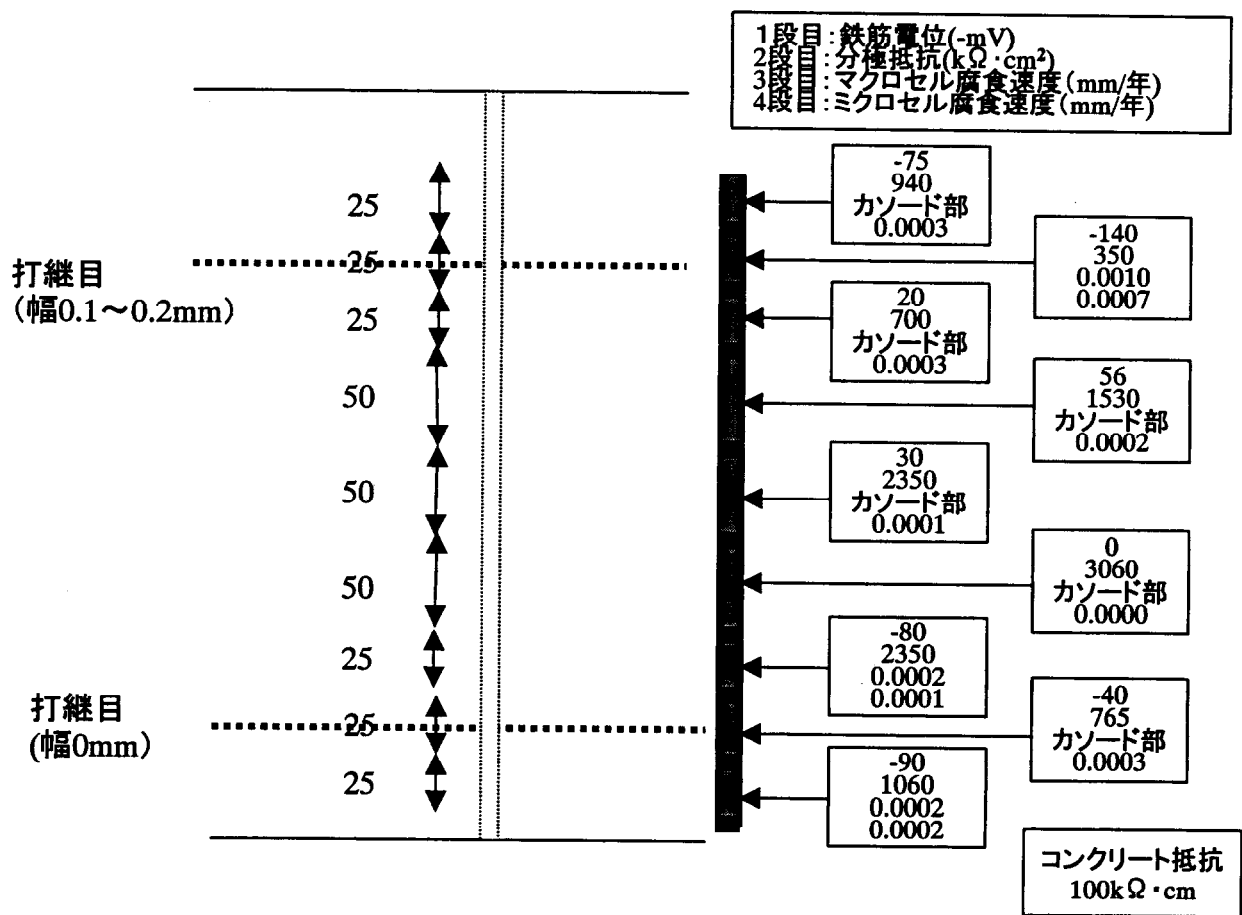


図8-2-3 既存鉄筋コンクリート構造物において非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析された腐食速度 (その1)

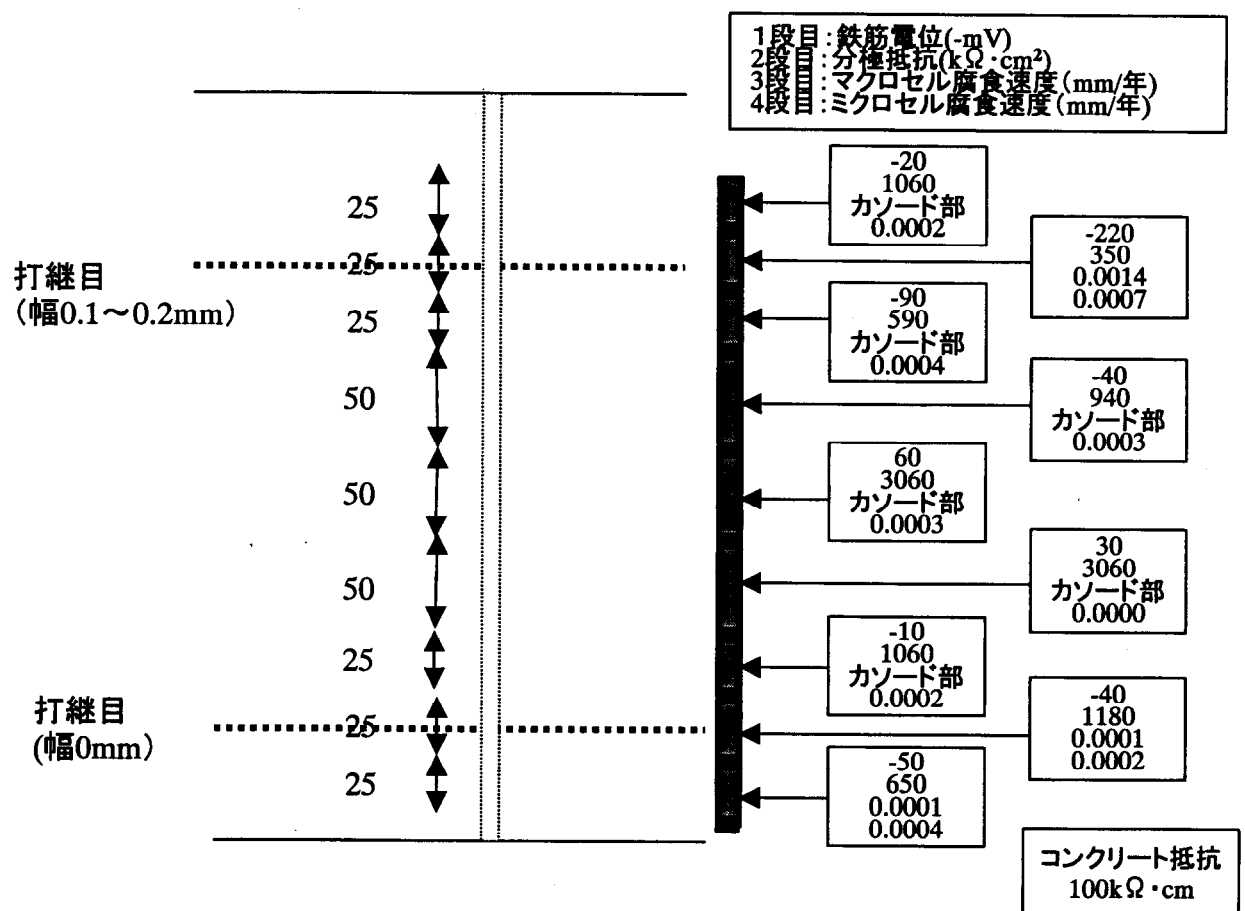


図8-2-4 既存鉄筋コンクリート構造物において非破壊試験により測定された値とモデルを用いて解析された腐食速度 (その1)

8-3 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 中性化の影響を受ける既存鉄筋コンクリートのコールドジョイント部を対象とし、マクロセル腐食の形成機構を評価できた。
- ② 第7章で得られた結果が検証された。詳細を、③に示す。
- ③ コールドジョイント部では、マクロセル腐食が進行する。すなわち、コールドジョイント近傍の鉄筋がアノードとなり、かぶりコンクリート内部の鉄筋がカソードとなるマクロセルの形成が確認された。また、コールドジョイント近傍の鉄筋の腐食速度は、コールドジョイントがない部分の約20倍も速い。

第9章 欠陥部に生じる腐食の形態と速度

9-1 はじめに

9-2 塩害による腐食と中性化による腐食の比較

9-3 マクロセル腐食に影響を及ぼす要因の整理

9-4 まとめ

9-1 はじめに

9-1-1 背景

第3章から第5章において、塩害による腐食の形態と速度を整理した。第3章では、モデル欠陥部を対象とした基礎的な研究を行った。第4章では、塩分環境下における代表的な欠陥部である曲げひび割れ部および断面修復部に生じる打継ぎ目近傍を対象とし、応用的な検討を行った。第5章では、既存鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ部を対象とした、実用的検討を行った。一方、第6章から第8章において、中性化による腐食の形態と速度を整理した。塩害による腐食に対する検討と同様に、基礎的検討、応用的検討、実用的検討を行った。特に、第7章では、中性化の影響を受ける環境下における代表的な欠陥部である曲げひび割れおよびコールドジョイント部を対象とし、検討を行った。

既存鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食は、主に塩害および中性化により生じる。したがって、第3章から第8章で得られた全ての結果に基づき鉄筋コンクリート部材の腐食を整理できれば、鉄筋コンクリートのマクロセル腐食に関する形成機構と腐食速度を広く深く把握できるものと考えられる。

9-1-2 目的

以上の背景を受け、本章の目的を以下に示す。

- ① 塩害による腐食と中性化による腐食の形態に関する共通点と相違点を整理する。また、両者の腐食速度を比較する。
- ② マクロセルが形成されるケースを抽出し、マクロセル形成パターンを分類する。
- ③ ②で得られた結果を基に、実構造物中においてマクロセル腐食が発生すると予想される部位を列挙する。

9-1-3 構成

9-2では、塩害による腐食と中性化による腐食を比較する。ここでは、塩害による腐食と中性化による腐食の形態に関する共通点と相違点を整理する。また、塩害による腐食

と中性化による腐食の速度を比較する。9-3では、マクロセル腐食速度に影響を及ぼす要因の整理を行う。ここでは、マクロセルが形成されるパターンを抽出し、欠陥部の存在、塩化物イオンおよび二酸化炭素の供給条件、水分の供給条件、酸素の供給条件をパラメータとして、アノードとカソードの形成パターンを分類する。また、各マクロセル形成パターンに対して、マクロセル腐食速度に影響を及ぼす要因を整理する。以上の結果を基に、実存する具体的な鉄筋コンクリート部材を対象とし、マクロセル腐食の顕著な進行が危ぶまれる部位を列挙する。

9-2 塩害による腐食と中性化による腐食の比較

9-2-1 腐食形態の比較

本研究では、腐食形態に関する評価として、①腐食位置の判定②マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った。腐食位置の判定を行った結果、塩害による腐食および中性化による腐食の何れにおいても、腐食要因物質が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食することが明らかとなった。一方、マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った結果、塩害による腐食および中性化による腐食では相違がみられた。すなわち、塩害による腐食では、低水セメント比のときマクロセル腐食が卓越し、高水セメント比のときミクロセル腐食が卓越する傾向がみられた。一方、中性化による腐食では、水セメント比に関わらずマクロセル腐食が卓越する傾向がみられた。

ここで、塩害による腐食と中性化による腐食において、腐食セルに関して相違がみられた原因を考察する。これは、6-2で述べた通り、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りによると考えられる。すなわち、両者への物質供給量の偏りが大きい場合にマクロセルが形成されやすく、一方偏りが小さい場合にミクロセルが形成されやすいと考えられる。具体的に検討すると、塩害による腐食では、低水セメント比の場合に欠陥以外のモルタル内部の鉄筋への物質供給量が減少する。一方、高水セメント比の場合には、欠陥以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量が増加する。したがって、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りは、水セメント比が低いほど大きく、水セメント比が高いほど小さい。その結果、低水セメント比のときにはマクロセル腐食が卓越し、高水セメント比のときにはミクロセル腐食が卓越したと考えられる。また、表9-2-1に示す通り中性化によりモルタルの細孔量は減少する。このため、表9-2-2に示した通りモルタル内部の鉄筋への物質供給量は減少する。したがって、欠陥部とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りは増加する。その結果、中性化による腐食では、マクロセル腐食が卓越したと考えられる。

表9-2-1 塩害および中性化の影響を受けたモルタルの細孔
(W/C=50%、3-2-1・6-2と同環境に56日間暴露したφ5×10cm 供試体)

塩化物の影響	なし	あり	なし
中性化の影響	なし	なし	あり
総細孔量 ($\times 10^2$ cc/g)	9.25	9.38	3.25

表9-2-2 欠陥箇所に位置する鉄筋と健全なモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比

(3-2-1・6-2に示した供試体)

塩化物の影響	なし	あり				なし		
中性化の影響	なし	なし				あり		
W/C (%)	50	30	50	70	30	50	70	
欠陥部に位置する鉄筋単位面積あたりへの 酸素供給量(10^{-11} mol/cm ² /sec)	4.6	5.9	3.3	2.6	65.6	23.6	6.0	
モルタル内部に位置する鉄筋単位面積あたりへの酸素供給量(10^{-11} mol/cm ² /sec)	3.35	3.24	3.40	7.60	0.09	0.30	0.50	

9-2-2 腐食速度の比較

図3-2-7および図6-2-6をもとに、塩害および中性化による腐食の速度を比較する。その結果、塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度と比較して、速いことが認められる。

ここで、pH および塩化物イオン供給の有無が鉄筋の分極特性に及ぼす影響を検討した。はじめに、実験概要を説明する。モルタル供試体に埋設された鉄筋と同種の鉄筋を、長さ1cmの要素に切断した。端部にリード線をはんだ付けし、接合部をエポキシ系樹脂で被覆した。この鉄筋要素を、pHが12.4、10.5および8.5に調整されたCa(OH)₂水溶液に、28日間浸漬した。同時に、各pHのCa(OH)₂水溶液に対して、3.1wt%濃度になる様に調整しNaClを添加した溶液も作製し、鉄筋要素を浸漬した。なお、温度は20℃とした。浸漬が終了した後、鉄筋要素のアノード分極曲線および分極抵抗を測定した。図9-2-1にアノード分極曲線を、表9-2-3に分極抵抗を示す。これらによれば、pHが減少するほど、また塩化物イオンを含む場合、腐食が促進される傾向にあることが認められる。ここで、pHが12.4で塩化物イオンを含む場合と、pHが10.5あるいは8.5で塩化物イオンを含ま

ない場合を比較する。図9-2-1によれば、前者は後者と比較して、アノード電流密度は高いことが認められる。また、表9-2-3によれば、前者は後者と比較して、分極抵抗が小さいことが認められる。以上のことから、①pHが12.4で塩化物イオンを含む場合は、pHが10.5あるいは8.5で塩化物イオンを含まない場合と比較して、腐食速度が促進される傾向にあることが確認された。次に、塩害および中性化の影響を受けたコンクリート中に位置する鉄筋の環境を考える。②pHが12.4で塩化物イオンを含む場合とは、塩害の影響を受けたコンクリート中に位置する鉄筋の環境に対応する。一方、③pHが10.5あるいは8.5で塩化物イオンを含まない場合とは、中性化の影響を受けたコンクリート中に位置する鉄筋の環境に対応する。以上のことから①②③を踏まえると、塩害の影響を受けたコンクリート中に位置する鉄筋が、中性化の影響を受けたコンクリート中に位置する鉄筋と比較して、腐食が促進される環境にあると考えられる。このために、塩害による腐食の速度が、中性化による腐食の速度と比較して、速かったと思われる。

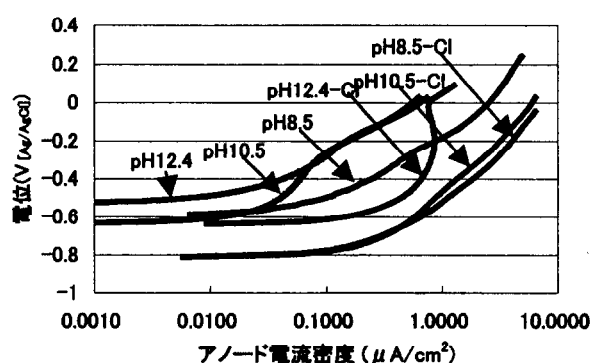


図9-2-1 塩化物イオンの有無と pH の相違がアノード分極曲線に及ぼす影響

表9-2-3 塩化物イオンの有無と pH の相違が分極抵抗に及ぼす影響
($k\Omega \cdot cm^2$)

pH	12.4	10.5	8.5
Cl ⁻ あり	1.55	1.35	1.09
Cl ⁻ なし	3.38	2.48	2.25

また、表9-2-1に示した通り中性化の影響を受けたモルタルでは細孔量が減少する。その結果、中性化の影響を受けたモルタルでは、表9-2-2に示した通り鉄筋への酸素供給量は減少する。したがって、中性化の影響を受けたモルタル中に位置する鉄筋では力

ソード反応が律速され、腐食速度が抑制される。また、中性化の影響を受けたモルタルでは、表9-2-4に示した通り、モルタル抵抗が増加する。したがって、中性化の影響を受けたモルタル中に位置する鉄筋では、広範囲にわたるマクロセルの形成が電氣的に困難になり腐食速度が抑制される。例えば、図9-2-2に示すように、同一の塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、酸素・水分の供給条件、水セメント比の場合、中性化の影響を受けたモルタル中铁筋におけるカソード部は、塩害の影響を受けたモルタル中铁筋のカソード部と比較して、欠陥近傍に限られていることが確認される。これらのことも、中性化による腐食の速度が、塩害による腐食の速度と比較して遅い理由に挙げられる。

表9-2-4 塩害および中性化の影響を受けたモルタルの抵抗
(W/C=50%、3-2-1・6-2と同環境に56日間暴露したφ5×10cm 供試体)

塩化物の影響	なし	あり	なし
中性化の影響	なし	なし	あり
モルタル抵抗 ($k\Omega \cdot cm$)	7.0	3.69	40.0

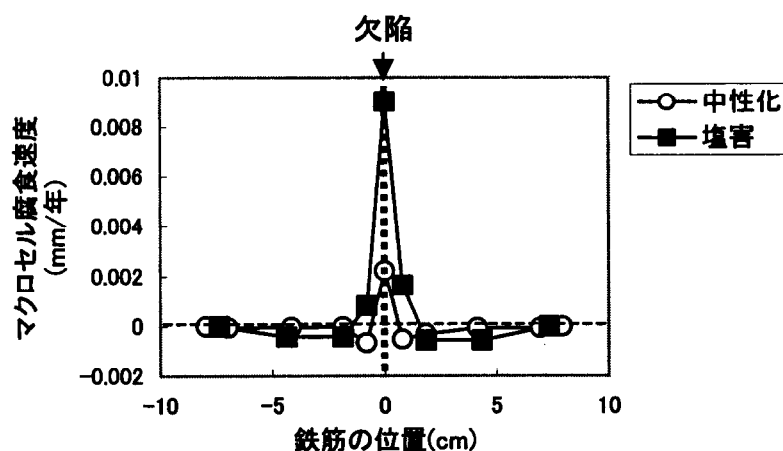


図9-2-2 塩害と中性化の影響を受けたマクロセル腐食速度分布の比較
(塩化物イオン・二酸化炭素の供給条件：欠陥，
酸素・水の供給条件：乾湿繰返し，水セメント比：30%)

以上の実験的考察を踏まえ、塩害による腐食の速度が中性化による腐食速度と比較して速いことを、3-3に示したモデルを用い、解析的に検証する。ここでは解析対象とするケースは表9-2-4に示す2通りとする。すなわち、No.9-2-1は塩害による腐食を模擬

し、モルタル内部への酸素供給量が多く、モルタル抵抗が低いケースとする。一方、No.9-2-2は中性化による腐食を模擬し、モルタル内部への酸素供給量が少なく、モルタル抵抗が高いケースとする。なお、塩化物イオンおよび二酸化炭素の供給は欠陥部のみ、酸素および水分の供給は多い乾湿繰り返し環境とする。

表 9 - 2 - 4 解析ケース

No	欠陥の影響	Cl・CO ₂ の影響	異種材料の打継ぎ	Cl・CO ₂ の供給条件	モルタル内部鉄筋への酸素供給量	モルタル抵抗
9-2-1	あり	Cl	なし	欠陥部のみ	多	低
9-2-2		CO ₂			少	高

解析は、図 9 - 2 - 3 に示す部材を対象とする。部材寸法は、 $\phi 5\text{cm} \times 20\text{cm}$ とし、供試体中央には $\phi 0.9\text{cm}$ の丸鋼が埋設される。

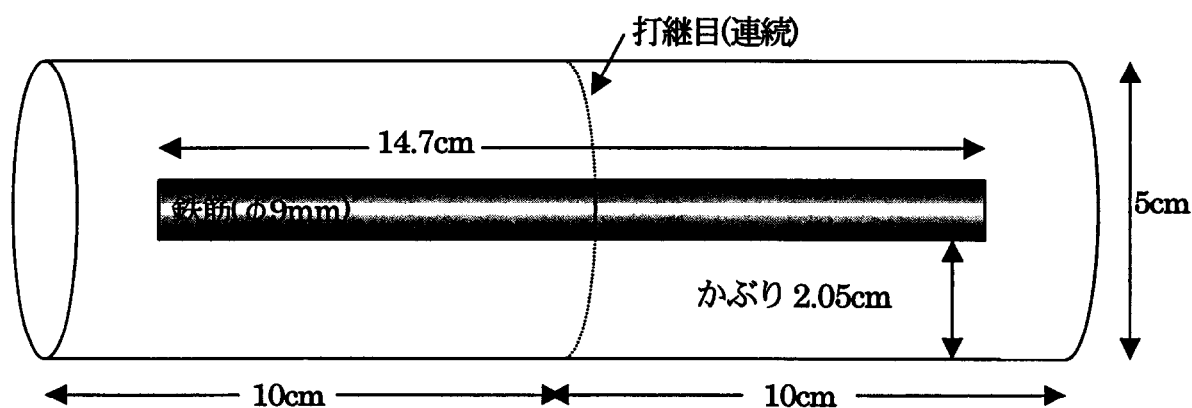


図 9 - 2 - 3 解析に用いた部材概要

鉄筋の分極抵抗は、塩化物イオンが供給される欠陥部とそれ以外を区別し、実験値を参考にして代入する。また、酸素透過量およびモルタル抵抗は、3 - 3 - 2 - 2 を参考にし決定する。モデルへの代入値を表 9 - 2 - 5 に示す。

表 9-2-5 モデルへの代入値

No.		分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)	酸素供給量 ($mol/cm^2 \cdot sec$)	モルタル抵抗 ($k\Omega \cdot cm$)
9-2-1	欠陥部以外	100	5.0×10^{-12}	20
	欠陥部	10	1.0×10^{-11}	—
9-2-2	欠陥部以外	100	0.5×10^{-12}	40
	欠陥部	10	1.0×10^{-11}	—

表 9-2-6 に、欠陥部鉄筋要素におけるマクロセル腐食速度、ミクロセル腐食速度およびそれらを合計した全腐食速度を示す。これによれば、塩害による腐食の場合が、中性化による腐食の場合と比較して、欠陥部の鉄筋要素における腐食速度は速いことが認められる。

表 9-2-6 欠陥部における腐食速度

No.	Cl ⁻ ・CO ₂ の影響	マクロセル腐食速度 (mm/年)	ミクロセル腐食速度 (mm/年)	全腐食速度 (mm/年)
9-2-1	Cl ⁻	0.334	6.611	6.945
9-2-2	CO ₂	0.335	0.659	0.994

9-2-3 まとめ

本節では、塩害および中性化に伴う腐食の形態と速度の比較を行った。得られた結論を以下にまとめる。

1. 塩害および中性化による腐食の形態を比較した結果、次のことが明らかとなった。共通点としては、腐食要因物質が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食すること、が挙げられる。一方、相違点としては、塩害による腐食では水セメント比の相違により腐食形態が異なり、中性化による腐食では水セメント比の相違にかかわらず、マクロセル卓越型の腐食が進行することが挙げられる。
2. 上記 1 の結果を踏まえ腐食セル形成機構に関して、次のことが明らかとなった。欠陥箇所と欠陥の影響を受けない健全なモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きい場合、マクロセル卓越型の腐食が進行する。一方、両者への腐食要因物質の偏りが小さい場合、ミクロセル卓越型の腐食が進行する。
3. 塩害および中性化による腐食の速度を比較した結果、塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度より速いことが明らかとなった。

9-3 マクロセル腐食に影響を及ぼす要因の整理

本研究では、塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、酸素・水分の供給条件、コンクリートの水セメント比に相違を設け検討を加えてきた。表9-3-1において、その結果得られた腐食形態および腐食速度に影響を及ぼす要因を列挙し、その傾向を整理する。

表9-3-1 腐食形態と腐食速度に影響を及ぼす要因の整理

因子		腐食形態	腐食速度		検討した章
欠陥	有	マクロセルが形成する。	速い。		3,4,5,6,7,8,9
	無	ミクロセルが形成する。	遅い。		3,4,5,6,7,8,9
Cl ⁻	多	マクロセルのアノード部となる。	速い。		3,4,5
	少	マクロセルのカソード部となる。	遅い。		3,4,5
CO ₂	多	マクロセルのアノード部となる。	速い。		6,7,8
	少	マクロセルのカソード部となる。	遅い。		6,7,8
酸素	多	マクロセルのカソード部となる。	アノード部で速い。		3,6
	少	マクロセルのアノード部となる。	アノード部で遅い。		3,6
水	多	マクロセルのカソード部となる。	アノード部で速い。		3,6
	少	マクロセルのアノード部となる。	アノード部で遅い。		3,6
中性化	低 W/C	欠陥が存在する場合には、欠陥とコンクリートの内部間の鉄筋への物質供給量の偏りが大きくなり、マクロセルが形成する。	塩害より遅い。	遅い。	6,7,9
	高 W/C		塩害より遅い。	速い。	6,7,8,9
塩害	低 W/C	欠陥が存在する場合においても、欠陥とコンクリート内部間の鉄筋への物質供給量の偏りは小さく、ミクロセルが形成する。	中性化より速い。	欠陥部では、局所的に速い場合がある。	3,4,9
	高 W/C			速い。	3,4,9

以上の表から、腐食形態と腐食速度に関して、下記に示す傾向が見られた。

1. 塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給箇所がアノードとなる。
2. 酸素および水分が少ない環境中では、カソード反応が律速されるため、腐食速度は遅い。
3. 物質供給量の偏りが小さい場合、アノードとカソードは同一箇所に生じ、ミクロセル

が形成される。一方、物質供給量の偏りが大きい場合、アノードとカソードは異なる場所に生じ、マクロセルが形成される。

この結果を踏まえ、塩害および中性化によるコンクリート中铁筋の腐食形態と腐食速度を、欠陥の影響を考慮し、塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、酸素・水分の供給条件をパラメータとし整理する。塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件は、図9-3-1に示す欠陥部、コンクリート中の一部、全体、欠陥部とコンクリート中の一部の4水準に区分する。酸素の供給条件も、欠陥部、コンクリート中の一部、全体、欠陥部とコンクリート中の一部の4水準に区分する。水の供給条件は、湿潤（多い場合）と乾燥（少ない場合）の2水準に区分する。全50ケースの検討結果を表9-3-2に記す。

鹽 腐食物質の供給

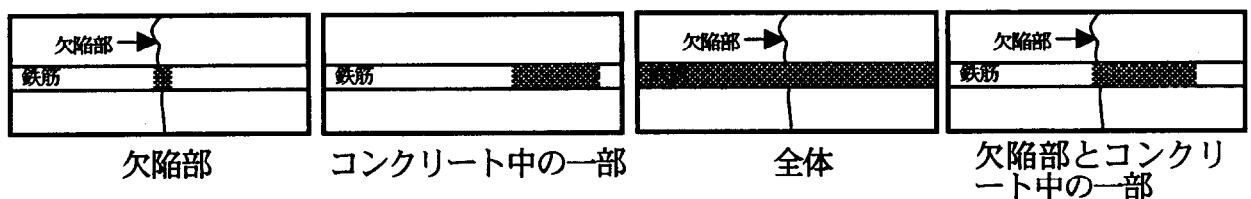


図9-3-1 各種物質の供給位置

表9-3-2 塩化物イオンあるいは二酸化炭素の浸透によるマクロセル形成パターン
(全50ケース)

No	Cl ⁻ /CO ₂ 供給	水の供給	O ₂ の供給	アノード	カソード	状況	腐食形態	腐食部位
1	欠陥部	湿潤	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部のみでマクロセル形成。	マクロセル	欠陥部
2			一部	欠陥部	一部	欠陥部(アノード)の一部(カソード)のマクロセル。	マクロセル	欠陥部
3			全体	欠陥部	全体	欠陥部(アノード)全体(カソード)のマクロセル。	マクロセル	欠陥部
4			欠陥部と一部	欠陥部	欠陥部と一部	欠陥部でマクロセル形成、欠陥部(アノード)の一部(カソード)のマクロセル。	マクロセル	欠陥部
5			欠陥部と全体	欠陥部	欠陥部と全体	欠陥部でマクロセル形成、欠陥部(アノード)全体(カソード)のマクロセル。	マクロセル	欠陥部
6		乾燥	欠陥部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
7			一部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
8			全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
9			欠陥部と一部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
10			欠陥部と全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—

11	一部	湿潤	欠陥部	一部	欠陥部	一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マクロ	一部
12			一部	一部	一部	一部でマクロ。	マクロ	一部
13			全体	一部	全体	一部でマクロ。一部(7左記以外)のマクロ。	マロ +ミロ	一部
14			欠陥部と一部	一部	欠陥部と一部	一部でマクロ。一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ	一部
15			欠陥部と全体	一部	欠陥部と全体	欠陥部と一部でマクロ。一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	一部
16		乾燥	欠陥部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
17			一部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
18			全体	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
19			欠陥部と一部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
20			欠陥部と全体	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
21	全体	湿潤	欠陥部	全体	欠陥部	欠陥部でマクロ。欠陥部を除く全体(7欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	全体
22			一部	全体	一部	一部でマクロ。一部を除く部分(7一部外)のマクロ。	マロ +ミロ	全体
23			全体	全体	全体	全体でマクロ。	マロ	全体
24			欠陥部と一部	全体	欠陥部と一部	欠陥部と一部でマクロ。上記以外(7欠陥部と一部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	全体
25			欠陥部と全体	全体	欠陥部と全体	欠陥部と全体でマクロ。	マロ	全体
26		乾燥	欠陥部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
27			一部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
28			全体	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
29			欠陥部と一部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
30			欠陥部と全体	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
31	欠陥部と一部	湿潤	欠陥部	欠陥部と一部	欠陥部	欠陥部でマクロ。一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	欠陥部と一部
32			一部	欠陥部と一部	一部	一部でマクロ。一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	欠陥部と一部
33			全体	欠陥部と一部	全体	欠陥部と一部でマクロ。一部(欠陥部外)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	欠陥部と一部
34			欠陥部と一部	欠陥部と一部	欠陥部と一部	欠陥部と一部でマクロ。	マロ	欠陥部と一部
35			欠陥部と全体	欠陥部と一部	欠陥部と全体	欠陥部と一部でマクロ。一部(欠陥部と一部を除く部分(7)のマクロ。欠陥部の酸素透過量は多い。7/10が広い。	マロ +ミロ	欠陥部と一部
36		乾燥	欠陥部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—
37			一部	—	—	水がないため、カド反応が進行しない。	—	—

38.			全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
39.			欠陥部と一部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
40.			欠陥部と全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
41.	欠陥部と全体	湿潤	欠陥部	欠陥部と全体	欠陥部	欠陥部で加硫。欠陥部を除く全体は、欠陥部(1)の加硫。欠陥部の酸素透過量が多い。	マカ +ミカ	欠陥部と全体
42.			一部	欠陥部と全体	一部	一部で加硫。欠陥部と一部を除く全体は、一部(1)の加硫。	マカ +ミカ	欠陥部と全体
43.			全体	欠陥部と全体	全体	欠陥部を含む全体で加硫。欠陥部の酸素透過量が多い。	マカ +ミカ	欠陥部と全体
44.			欠陥部と一部	欠陥部と全体	一部	欠陥部と一部で加硫。左記を除く部分の欠陥部と一部(1)の加硫。	マカ +ミカ	欠陥部と全体
45.			欠陥部と全体	欠陥部と全体	全体	欠陥部を含む全体で加硫。欠陥部の酸素透過量が多い。	マカ +ミカ	欠陥部と全体
46.		乾燥	欠陥部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
47.			—	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
48.			全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
49.			欠陥部と一部	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—
50.			欠陥部と全体	—	—	水がないため、カソード反応が進行しない。	—	—

表9-3-2のうち、条件が重なるケースあるいは腐食速度が遅いケースを除くと、表9-3-3に示す通りとなる。

表9-3-3 塩害および中性化によるマクロセル形成パターン

No	ClCO ₂ 供給	水の供給	O ₂ の供給	アノード	カソード	状況	腐食形態	マカセルパターン	腐食部位
1	欠陥部	湿潤	欠陥部	欠陥部	欠陥部	欠陥部のみでマカセル形成。	シロセル	—	欠陥部
2			一部	欠陥部	一部	欠陥部(1)一部(1)のマカセル。	マカセル	Type A	欠陥部
3			全体	欠陥部	全体	欠陥部(1)全体(1)のマカセル。	マカセル	Type A	欠陥部
4	一部	湿潤	欠陥部	一部	欠陥部	一部(1)欠陥部(1)のマカセル。欠陥部の酸素透過量が多い。アノードが広い。	マカセル	Type B	一部
5			一部	一部	一部	一部でマカセル。	シロセル	—	一部
6			全体	一部	全体	一部でマカセル。一部(1)左記以外(1)のマカセル。	マカ +ミカ	Type C	一部
7	全体	湿潤	欠陥部	全体	欠陥部	欠陥部でマカセル。欠陥部を除く全体(1)欠陥部(1)のマカセル。欠陥部の酸素透過量が多い。アノードが広い。	マカ +ミカ	Type B	全体
8			一部	全体	一部	一部でマカセル。一部を除く部分(1)一部(1)のマカセル。	マカ +ミカ	Type C	全体
9			全体	全体	全体	全体でマカセル。	シロセル	—	全体

これらのうち、マクロセルが形成されるケースについて、各種物質供給条件とアノードとカソードの位置関係を整理すると、図9-3-2に示す3パターンに分類される。

■ アノード □ カソード

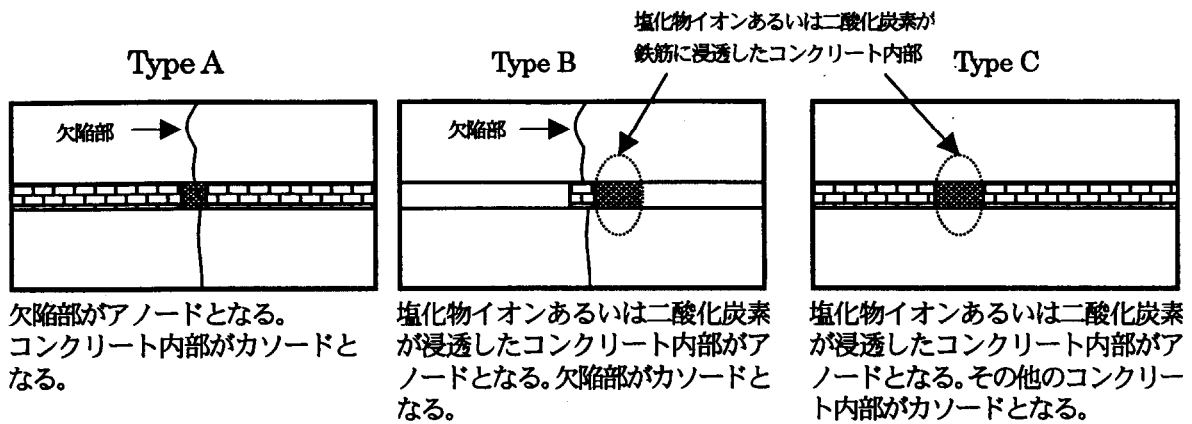


図 9-3-2 マクロセル形成パターン

図 9-3-2 を踏まえ、実在する鉄筋コンクリート部材を対象とし、塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件を考慮し、マクロセル腐食が進行すると考えられる部位を列挙する。

表 9-3-4 に塩分環境下における鉄筋コンクリートのマクロセル腐食発生個所を、表 9-3-5 に中性化環境下における鉄筋コンクリートのマクロセル腐食発生個所を示す。

表 9-3-4 塩分環境下における鉄筋コンクリートのマクロセル腐食発生箇所の分類

No	欠陥 の影響	塩化 物の 影響	箇所		アノード部	カソード部	要因	マクロ 形成 パターン
A	なし	なし	打設方向に 対する位置	鉛直方向に 埋設された 鉄筋の位置	打設方向に対 して上部	打設方向に対 して下部	ブリーディングによりコンク リート上部は下部より貧配合 となる。	
B				鉄筋の上面 と下面	打設方向に対 して下面	打設方向に対 して上面	ブリーディングにより鉄筋下 面には空隙が生じる。	
C		あり	干満部		海面下	海面上	塩化物濃度は、海面下で高く、 海面上で低い。また、酸素濃度 は、海面下で低く、海面上で高 い。	Type C
D			海底トンネル		外側（塩化物が 浸透した海側）	内側（塩化物が 未浸透の内側）	塩化物濃度は、海側で高く、内 側で低い。また、酸素濃度は、 海側で低く、内側で高い。	Type C
E			一部に融雪剤が散布される 部材		散布される部 分	散布されない 部分	塩化物濃度は、融雪剤が散布さ れる部分で高く、散布されない 部分で低い。	Type C
F	あり	あり	断面修復部に生じる打継目		母材	補修材	塩化物濃度は、母材で高く、補 修材で低い。	Type C
G						打継目	打継目以外	打継目では塩化物イオンが多 量に浸透する。
H			曲げひび割れ		ひび割れ	ひび割れ以外	ひび割れ個所では塩化物イオ ンが多量に浸透する。	Type A
I						ひび割れ近傍	ひび割れ	ひび割れ個所では酸素が多量 に浸透する。
J			施工不良により鉄筋端部が 突出した部分		突出部	コンクリート 内部	突出した部分では外部環境の 影響を直接受ける。	Type A 長期では Type B
K			乾燥収縮ひび割れ		ひび割れ	ひび割れ以外	ひび割れ個所では塩化物イオ ンが多量に浸透する。	Type A 長期では Type B

注) マクロセル形成パターンは図 9-3-2 を参照。

表9-3-5 中性化環境下における鉄筋コンクリートのマクロセル腐食発生箇所の分類

No	欠陥 の影響	二酸化 炭素の 影響	箇所		アノード部	カソード部	要因	マクロセル 形成 パターン
A	なし	なし	打設方向に 対する位置	鉛直方向に 埋設された 鉄筋の位置	打設方向に 対して上部	打設方向に 対して下部	ブリーディングによりコンク リート上部は下部より貧配合 となる。	
B				鉄筋の上面 と下面	打設方向に 対して下面	打設方向に 対して上面	ブリーディングにより鉄筋下 面には空隙が生じる。	
C	あり	あり	コールドジョイント		打継目	打継目以外	打継目では二酸化炭素が多量 に浸透する。	Type A
D			曲げひび割れ		ひび割れ	ひび割れ以外	ひび割れ個所では二酸化炭素 が多量に浸透する。	Type A
E					ひび割れ近傍	ひび割れ	ひび割れ個所では酸素が多量 に浸透する。	Type B
F			施工不良により鉄筋端部が 突出した部分		突出部	コンクリート 内部	突出した部分では外部環境の 影響を直接受ける。	Type A 長期では Type B
G			乾燥収縮ひび割れ		ひび割れ	ひび割れ以外	ひび割れ個所では二酸化炭素 が多量に浸透する。	Type A 長期では Type B

注) マクロセル形成パターンは図9-3-2を参照。

9-4 まとめ

本章で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 塩害および中性化による腐食の形態を比較した結果、次のことが明らかとなった。共通点としては、腐食要因物質が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食すること、が挙げられる。一方、相違点としては、塩害による腐食では水セメント比の相違により腐食形態が異なり、中性化による腐食では水セメント比の相違にかかわらず、マクロセル卓越型の腐食が進行することが挙げられる。
- ② 上記 1 の結果を踏まえ腐食セル形成機構に関して、次のことが明らかとなった。欠陥箇所と欠陥の影響を受けない健全なモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きい場合、マクロセル卓越型の腐食が進行する。一方、両者への腐食要因物質の偏りが小さい場合、ミクロセル卓越型の腐食が進行する。
- ③ 塩害および中性化による腐食の速度を比較した結果、塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度より速いことが明らかとなった。
- ④ 塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、水分の供給条件、酸素の供給条件をパラメータとし、マクロセルが形成されるケースを抽出した。その結果、アノード部とカソード部の組み合わせにより、マクロセル形成パターンを 3 つに分類することができた。
- ⑤ マクロセル腐食速度は、カソード部の鉄筋に供給される酸素量に依存することが確認された。
- ⑥ 実構造物において、塩害および中性化によりマクロセル腐食が発生すると予想される部位を列挙できた。

第 10 章 結論

- 10-1 各章で得られた結果の整理
- 10-2 全体の結論

10-1 各章で得られた結果の整理

第2章では、マクロセル腐食速度の測定手法を開発した。第3章から第8章では、鉄筋コンクリートの欠陥部に生じるマクロセル腐食の形成機構と腐食速度を評価した。この内、第3章から第5章では塩害によるマクロセル腐食を対象とし、第6章から第8章では中性化によるマクロセル腐食を対象とした。また、塩害および中性化による腐食の何れの検討においても、モデル欠陥部を対象とした基礎的検討、具体的な欠陥部を対象とした応用的検討、既存鉄筋コンクリート構造物を対象とした実用的検討を行った。以上の結果をもとに、第9章では、マクロセルが形成されるメカニズムを考察した。

図10-1-1において、第2章から第9章において得られた結果の関連を整理する。第2章では、マクロセル腐食速度の測定方法を開発した。ここでは、①分割鉄筋を埋設した供試体を用いる測定方法、および②供試体のみならず既存鉄筋コンクリート構造物中のマクロセル腐食速度を測定する方法を開発した。①の方法は、第3章、第4章、第6章、第7章の実験に使用した。一方、②の方法は、第5章および第8章の既存鉄筋コンクリート構造物に対する腐食速度調査に使用した。第3章では、モデル欠陥部に生じる塩害による腐食の形態と速度を統一した条件でかつ網羅的に整理した。その結果、③水セメント比が低い場合にマクロセル卓越型腐食が進行し、水セメント比が高い場合にミクロセル卓越型腐食が進行すること、④マクロセルの形成に伴い、水セメント比が低い時に水セメント比が高い時と比較して、腐食速度が速い場合があること、が明らかとなった。また、⑤塩化物イオン含有量が異なる部材間では、塩化物イオン含有量が多い部材内部の鉄筋がアノード、少ない部材内部の鉄筋がカソードとなるマクロセルが形成され、塩化物イオン含有量が多い部材内部の打継目近傍に存在する鉄筋において腐食が増進することが明らかとなった。第4章では、塩分環境下のコンクリート部材の代表的な欠陥部である曲げひび割れ部および断面修復部の打継目近傍に生じる塩害によるマクロセル腐食を評価した。その結果、曲げひび割れ近傍では、⑥マクロセルが形成し、腐食が著しく増進すること、⑦主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は速いこと、⑧スターラップの腐食形態は低水セメント比でマクロセル卓越型、高水セメント比でミクロセル卓越型になり、低水セメント比の場合に高水セメント比の場合と比較して腐食が増進すること、が認められた。また、断面修復部の打継目近傍では、⑨塩化物イオンを多量に含有する母材内部の打継目近傍がアノード部となるマクロセルが形成し、腐食速度は速いこと、⑩酸素および水分がともに

多い環境において、腐食は最も増進すること、が認められた。すなわち、⑥、⑧、⑨および⑩の結果は、第3章の結果(③、④および⑤)により説明することができた。第5章では、実際に30年間供用されている鉄筋コンクリート造橋上部工を対象とし、曲げひび割れ部に生じる塩害によるマクロセル腐食を評価した。その結果、⑪曲げひび割れ近傍では、マクロセルが形成し、腐食が増進すること、⑫主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は速いこと、が確認された。すなわち、これらの結果は、第4章の結果(⑥および⑦)により説明することができた。第6章では、モデル欠陥部に生じる中性化による腐食の形態と速度を統一した条件でかつ網羅的に整理した。その結果、⑬水セメント比の相違に関わらず、マクロセル卓越型腐食が進行すること、⑭水セメント比が低いほど、腐食速度は遅いこと、が明らかとなった。第7章では、中性化の影響を受けるコンクリートの代表的な欠陥部である曲げひび割れ部およびコールドジョイント部に生じるマクロセル腐食を評価した。その結果、曲げひび割れ近傍では、⑮マクロセルが形成し、腐食が著しく増進すること、⑯主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は速いこと、⑰マクロセル卓越型腐食が進行し、水セメント比が低いほど腐食速度は遅いこと、が認められた。また、コールドジョイント近傍では、⑱コールドジョイント近傍がアノード部となるマクロセルが形成し、腐食速度は速いこと、が認められた。すなわち、⑮、⑰および⑱の結果は、第6章の結果(⑬および⑭)により説明することができた。第8章では、実際に35年間供用されている鉄筋コンクリート造建物を対象とし、コールドジョイント部に生じる中性化によるマクロセル腐食を評価した。その結果、⑲コールドジョイント近傍ではマクロセル卓越型腐食が進行すること、が確認された。すなわち、この結果は、第7章の結果(⑱)により説明することができた。第3章から第8章までの結果をもとに、第9章では、マクロセルが形成されるメカニズムを考察した。その結果、⑳塩害による腐食は中性化による腐食と比較して、腐食速度が速いこと、㉑マクロセル形成パターンは3つに分類できること、が判明した。

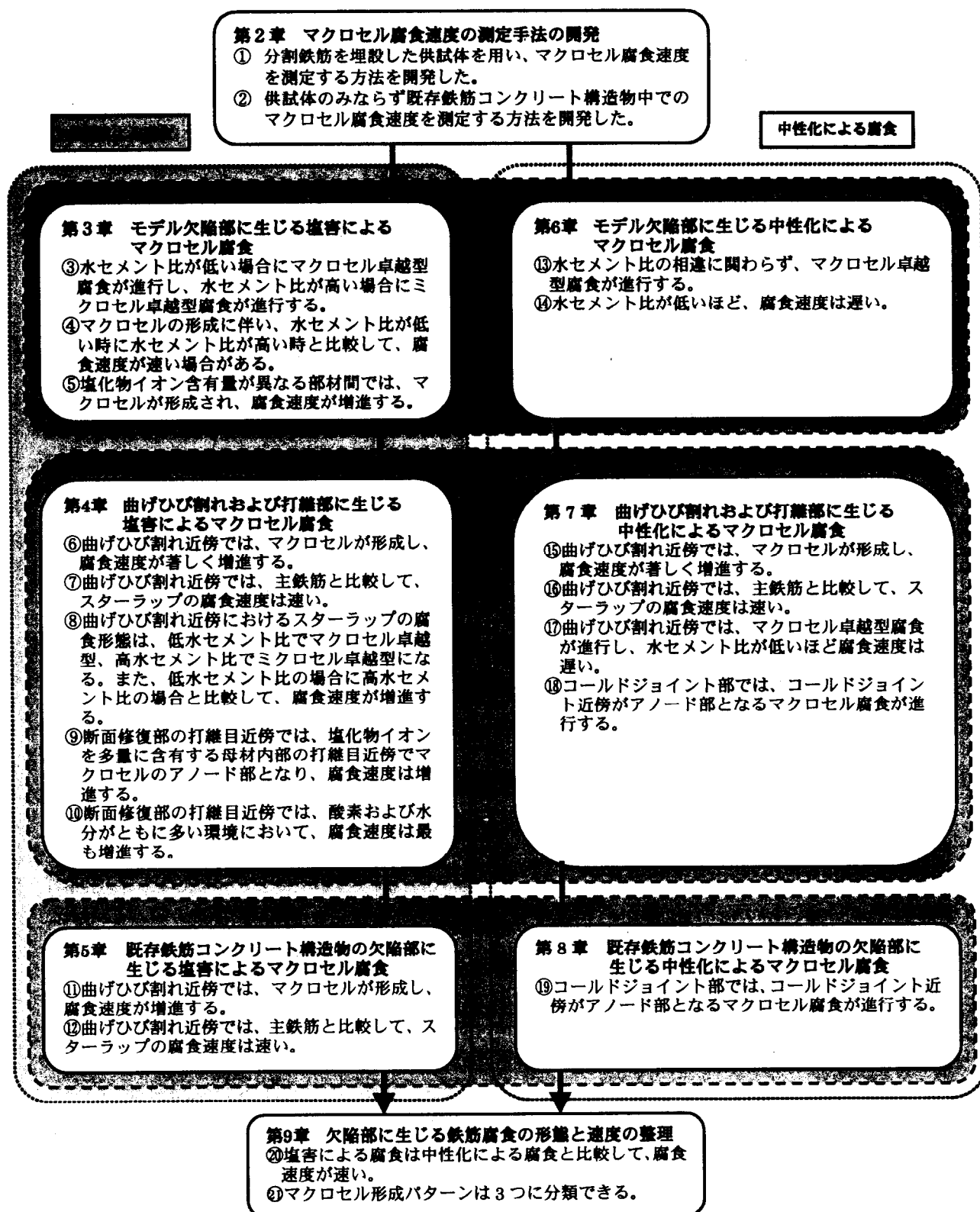


図10-1-1 本章で得られた結果の関連

10-2 全体の結論

次に示す3つの目的を達成するため、基礎的検討、応用的検討、実用的検討を行った。

A. 鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化による腐食について、形態（マクロセル腐食・ミクロセル腐食）と速度を、統一した基準でかつ網羅的に整理する。その結果を基に、マクロセル形成機構およびその速度に影響を及ぼす主な要因を整理する。

B. マクロセルが形成されかつ腐食速度が速いと予想される具体的な欠陥部（曲げひび割れ部、打継部）の腐食形成機構と腐食速度を、上記Aの結果に基づき評価する。

C. 既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じている腐食の速度を、非破壊試験により現場で定量的に推定する手法を提案する。この手法を用いて、30～40年間供用された既存鉄筋コンクリート構造物中の腐食速度を評価し、上記Bの結果を検証する。

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

・目的Aに対する結論（基礎的検討により得られた結論）：

- (1) コンクリートの欠陥部に生じる腐食に関して、塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、水分および酸素の供給条件、水セメント比をパラメータとし、全54ケースの腐食形態と腐食速度を、統一した条件のもと網羅的に整理・比較できた。塩害および中性化による腐食の具体的な結果を下記(2)(3)(4)に示す。
- (2) 塩害の影響を受けるコンクリートにおいて、欠陥部が内部鉄筋の腐食に及ぼす影響を評価できた。その結果、欠陥が存在する場合、水セメント比が高いほどミクロセルを形成する傾向にあり、水セメント比が低いほどマクロセルを形成する傾向にあることが明らかとなった。これに伴い、欠陥が存在する場合、水セメント比が低い場合には欠陥箇所における局所的な腐食が生じ、水セメント比が高い場合よりも腐食は促進されることもあることが確認された。以上のことから、欠陥が存在する場合、コンクリートの水セメント比が低いことは、塩害による鉄筋腐食の抑制効果に優れているとは必ずしも言えないことが判明した。
- (3) 中性化の影響を受けるコンクリートにおいて、欠陥部が内部鉄筋の腐食に及ぼす影響を評価できた。その結果、欠陥が存在する場合、水セメント比に関わらずマクロセルが形成されることが明らかとなった。また、欠陥が存在する場合、水セメント比が高いほど腐食は促進されることが確認された。以上のことから、欠陥が存在する場合、中性化によるコンクリートの鉄筋腐食に対する耐久性は、水セメント比が低いほど優

れることが判明した。

- (4) 塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度と比較して速いことが確認できた。
- (5) 塩化物イオン含有量が異なるコンクリートが打ち継がれている部材では、塩化物イオン含有量が多い部材内部の鉄筋がアノード、少ない部材内部の鉄筋がカソードとなるマクロセルが形成されることが明らかとなった。一方、全体に塩化物イオンが多く含有されている部材内部の鉄筋ではミクロセル腐食が進行した。したがって、一部にのみ塩化物イオンが多量に含まれる部材中の鉄筋では、全体に塩化物イオンが多量に含まれる部材中の鉄筋と比較して、腐食は増進することが判明した。
- (6) マクロセルの形成パターンは、欠陥部の存在、塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給条件、酸素および水分の供給条件により3つに分類できた(図10-2-1)。また、マクロセル腐食速度は、カソード部の鉄筋に供給される酸素量に依存することが認められた。

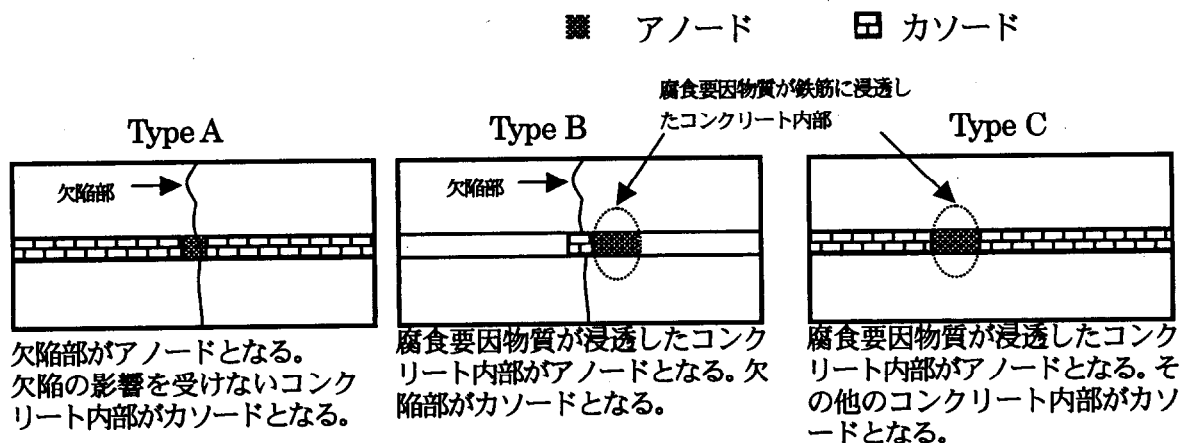


図10-2-1 マクロセル形成パターン

・ 目的Bに対する結論 (応用的検討により得られた結論) :

- (7) 上記(2)(3)(4)(5)(6)の結果は、曲げひび割れ、断面修復部の打継目近傍あるいはコールドジョイントを有する供試体を用いた検討によって、同様の傾向を示すことが確認された。具体的な結果を下記(8)(9)(10)(11)に示す。
- (8) 塩害および中性化の影響を受けた鉄筋コンクリートの曲げひび割れ近傍では、マクロセル腐食が進行し、その腐食速度は著しく増加することが認められた。例えば塩害の影響を受ける鉄筋コンクリート部材において、ひび割れがない場合は上部スターラッ

プにおいて「マクロセル腐食速度：ミクロセル腐食速度＝1：5」であった。一方、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接する引張側主鉄筋において「70：1」となった。さらに、ひび割れと交差する主鉄筋の腐食速度は 0.02mm/年であり、ひび割れがない場合の 3 倍も速かった。

- (9) 塩害および中性化の影響を受けた鉄筋コンクリートの曲げひび割れ近傍では、主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は著しく速かった。例えば、水セメント比が 50% の場合、スターラップ下部鉄筋の腐食速度は 0.12mm/年となり、主鉄筋の腐食速度と比較して、5 倍も速かった。
- (10) 塩害の影響を受ける鉄筋コンクリートの断面修復部では、母材(塩化物イオン含有量が多い側)と補修材(塩化物イオン含有量が少ない側)の間においてマクロセルが形成され、母材内部打継目近傍の鉄筋において腐食速度が増進することが認められた。この傾向は、断面修復用補修材として富配合のコンクリートを用いた場合にも同様であった。例えば、断面修復用補修材としてこれまでに実績の多い「ポリマーセメントモルタル」を補修材として用いた場合、母材側打継目近傍の鉄筋の腐食速度は 0.04mm/年であった。
- (11) 中性化の影響を受ける鉄筋コンクリートのコールドジョイント近傍では、マクロセル腐食が進行することが認められた。例えば、水セメント比が 55% のコンクリートにおいて、コールドジョイントと接する鉄筋において、「マクロセル腐食速度：ミクロセル腐食速度＝18：1」となった。

・ 目的Cに対する結論（実用的検討により得られた結論）：

- (12) 既存鉄筋コンクリート構造物の欠陥部に生じるマクロセル腐食速度を、非破壊試験により現場で推定する方法を提案できた。
- (13) 30～40 年間供用された既存鉄筋コンクリート構造物中の腐食速度を評価し、上記 (8) (9) (11) の結果を検証した。

・ 上記結論を得るための手段として得た結論：

- (14) 内部鉄筋を分割した供試体を用いることにより、実構造物では測定不可能なマクロセル腐食電流およびミクロセル腐食電流を区別して、定量的に評価できた。

謝辞

本研究の遂行およびとりまとめを行う機会を与えて頂き、ご多忙にも関わらず終始高いご見地で御指導ご鞭撻を頂きました、東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻（開発システム工学科）教授大即信明先生に心より感謝の意を表します。本論文の審査をして頂き、御助言を頂きました、材料工学専攻（金属工学科）教授水流徹先生、土木工学専攻（土木工学科）教授市川篤司先生、同教授二羽淳一郎先生、同客員助教授松川圭輔先生に深く感謝いたします。

また、東京工業大学名誉教授長滝重義先生には、本学在職中に数々のご助言を頂きました。元東京工業大学助手鎌田敏郎先生、同久田真先生におかれましても、本学在職中に公私にわたり数々のご助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、実験、考察、論文作成においては、守分敦郎博士（1993年～1996年、博士後期課程在籍）、柴田常德氏（1994年～1997年、学部・修士課程在籍）、Tarek Uddin Md. 博士（1994年～1997年、博士後期課程在籍）、鈴木裕隆氏（1996年～1998年、修士課程在籍）、坂巻直紀氏（1996年、学部在籍）、木村勇人氏（1997年～2000年、学部・修士課程在籍）、小長井彰祐氏（1999年～現在、学部・修士課程在籍）にご尽力を頂きました。深く感謝いたします。

最後に、同時期に東京工業大学土木系コンクリート研究室に在籍し、共に生活してきた、鈴木真紀子さんを始めとする秘書の皆様ならびに院生・学生の皆様には、常に励まされ応援していただきました。ありがとうございました。

平成13年3月16日

宮里 心一

```
1: ' ----- データ -----
2: ' NP, NE, , NB
3: DATA 12, 11, 6
4: ' I, J, Rij
5: data 1, 2, 3470
6: data 2, 4, 1.12
7: data 3, 4, 590
8: data 4, 6, 0.69
9: data 5, 6, 490
10: data 6, 8, 1.03
11: data 7, 8, 7.8
12: data 8, 10, 0.68
13: data 9, 10, 8.1
14: data 10, 12, 0.75
15: data 11, 12, 8.2
16: ' IB, B
17: data 1, -413
18: data 3, -368
19: data 5, -348
20: data 7, -508
21: data 9, -498
22: DATA 11, -462
23: ' 抵抗回路網の計算
24: READ NP, NE, NB
25: ' 配列の宣言
26: DIM A(NP, NP), U(NP), B(NP)
27: ' データの読み込み
28: FOR L = 1 TO NE
29:   READ I, J, Rij
30:   A(I, J) = 1 / Rij
31:   A(J, I) = 1 / Rij
32: NEXT L
33: ' 対角成分の計算
34: FOR I = 1 TO NP
35:   S = 0
36:   FOR J = 1 TO NP
37:     S = S + A(I, J)
38:   NEXT J
39:   A(I, I) = -S
40: NEXT I
41: ' 境界条件の読み込み
42: FOR L = 1 TO NB
43:   READ IB, BVAL
44:   FOR J = 1 TO NP
45:     A(IB, J) = 0
46:   NEXT J
47:   A(IB, IB) = 1
48:   B(IB) = BVAL
49: NEXT L
50: ' 方程式 [A]{x}={u}を解く
51: N = NP
52: ' -----連立一次方程式を解く-----
53:
54: FOR K = 1 TO N - 1
```

```

55:  AMAX = ABS(A(K, K)): IMAX = K
56:  FOR I = K + 1 TO N
57:    AIK = ABS(A(I, K))
58:    IF AIK > AMAX THEN AMAX = AIK: IMAX = I
59:  NEXT I
60:  IF IMAX = K THEN
61:    P = A(K, K)
62:  ELSE
63:    FOR J = K TO N
64:      SWAP A(K, J), A(IMAX, J)
65:    NEXT J
66:    SWAP B(K), B(IMAX)
67:    P = A(K, K)
68:  END IF
69:  FOR J = K + 1 TO N
70:    A(K, J) = A(K, J) / P
71:  NEXT J
72:  B(K) = B(K) / P
73:  FOR I = K + 1 TO N
74:    Q = A(I, K)
75:    FOR J = K + 1 TO N
76:      A(I, J) = A(I, J) - Q * A(K, J)
77:    NEXT J
78:    B(I) = B(I) - Q * B(K)
79:  NEXT I
80: NEXT K
81: U(N) = B(N) / A(N, N)
82: FOR K = N - 1 TO 1 STEP -1
83:   S = 0
84:   FOR J = K + 1 TO N
85:     S = A(K, J) * U(J) + S
86:   NEXT J
87:   U(K) = B(K) - S
88: NEXT K
89: ' 出力
90: PRINT "点番号      電位"
91: FOR I = 1 TO NP - 1 STEP 2
92: PRINT USING "###      "; (I + 1) / 2;
93: PRINT USING "#### mV"; U(I)
94: NEXT I
95: ' 電流計算
96: PRINT "端点の番号      電流 "
97: RESTORE
98: READ NP, NE, NB
99: FOR L = 1 TO NE
100:  READ I, J, Rij
101:  Iij = (U(I) - U(J)) / Rij
102:  GG = L / 2
103:  IF GG - INT(GG) = 0 THEN
104:    PRINT USING "###      "; I / 2; J / 2;
105:    PRINT USING "#####.##### μA"; Iij
106:  END IF
107: next L
108: stop

```

F-BASIC97
3-3example.BAS

Page 3
13:27:39 2000/10/16

109:END
110:
111:

```

1:window (0,0)-(15, 10)
2:
3:rem****腐食速度予測プログラム****
4:
5:' ****各種定数の定義****
6:
7:' IMICRO(X) = 要素Xの要素内セル腐食電流( $\mu$ A)
8:' IMACRO(X) = 要素Xの要素間セル腐食電流( $\mu$ A)
9:' IIMACRO(X,Y) = 要素XとY間の要素間セル腐食電流( $\mu$ A) (X=cathode, Y=anode)
10:' ICATHO(X) = 要素Xの全カソード電流( $\mu$ A)
11:' S = 単位鉄筋表面積( $\text{cm}^2$ )
12:' JJ = 健全なコンクリート中の酸素移動フラックス( $\text{mol}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )
13:' (鉄筋表面への単位時間当たりの酸素到達量)
14:' JJJ = ひび割れ部の酸素移動フラックス( $\text{mol}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )
15:' F = ファラデー定数
16:' RXU(X) = 鉄筋から暴露面方向へX離れた要素のコンクリート抵抗( $\text{k}\Omega$ )
17:' RU(X) = 鉄筋から暴露面方向へX離れた要素を電気が流れた場合の任意の2要素間
   の全抵抗( $\text{k}\Omega$ )
18:' RP(N) = 要素Nにおける分極抵抗( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
19:' R(X,Y) = 要素XとY間の全抵抗( $\text{k}\Omega$ )
20:' GM(X) = 鉄筋から暴露面方向へX離れた要素の含水率(%)
21:' N = 要素数(鉄筋軸方向)
22:' L = 要素数(鉄筋軸と垂直方向)
23:
24:' ****分割要素の指定****
25:EN = 0.05
26:' 鉄筋軸方向の要素の長さ(cm)
27:EL = 0.05
28:' 鉄筋軸と鉛直方向の要素の長さ(cm)
29:N = 294
30:' 鉄筋軸方向: 0.05cm要素@14.7cm
31:L = 51
32:' 鉄筋軸と垂直方向: 0.05cm要素@5cm $\phi$  (ただし、鉄筋径1cm $\phi$ を除く。)
33:S = EN*1*3.14
34:MA = 147
35:' 欠陥部の中心
36:ND = 5
37:' 分割鉄筋要素数
38:
39:' ****配列の指定****
40:dim RP(N), IMICRO(N), IMACRO(N), IIMACRO(N,N), ICATHO(N)
41:dim R(N,N), JJ(N), GM(M), RXU(L), RU(L), RCM(L)
42:dim UIMICRO(ND+1), UIMACRO(ND+1), RRR(ND)
43:
44:' ****定数****
45:F = 96500
46:
47:WC = 50
48:' 水セメント比(%)
49:
50:PW = 1.818 * 10-2
51:' 水の液抵抗( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ )
52:
53:WW = 4 * 10-3

```

```
54: '水膜の厚さ(cm)
55:
56: '****測定された分極抵抗( $k\Omega \cdot cm^2$ )の設定****
57: for I = 1 to 123
58:   RP(I) = 800/S
59: next I
60: for I = 124 to 139
61:   RP(I) = 500/S
62: next I
63: for I = 140 to MA - 1
64:   RP(I) = 2/S
65: next I
66: for I = MA to MA + 1
67:   RP(I) = 2/S
68: next I
69: for I = MA + 2 to 155
70:   RP(I) = 2/S
71: next I
72: for I = 156 to 171
73:   RP(I) = 230/S
74: next I
75: for I = 172 to N
76:   RP(I) = 6800/S
77: next I
78:
79: '****酸素透過量****
80:   JC=7.41*10(-13)
81:   JA1=2.23*10(-11)
82:   JA2=1.79*10(-12)
83:   JA3=8.93*10(-13)
84:
85: '*****コンクリート抵抗*****
86:   for I = 1 to L
87:     RCM(L+1-I) = 20
88:   next I
89:   for I = 1 to L
90:     RXU(I)=RCM(I)*EN/((I*EL+0.475)*2*3.14*EL)
91:   next I
92:   for I = 1 to N-1
93:     for II = I+1 to N
94:       for III = 1 to L
95:         RXUU = PW * EL / (0.9 * 3.14 * WW)
96:         for V=1 to III
97:           RXUU = RXU(V) + RXUU
98:         next V
99:         RU(III)=RXUU+RXU(III)*(II-I)
100:       next III
101:       RUU=0
102:       for III = 1 to L
103:         RUU=1/RU(III)+RUU
104:       next III
105:       R(I, II)=1/RUU
106:       R(II, I)=R(I, II)
107:     next II
```

```

108: next I
109:
110: ****全カソード電流の算定****
111: for I = 1 to N
112:     ICATHO(I)=JC*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
113: next I
114: for I = MA to MA + 1
115:     ICATHO(I)=JA1*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
116: next I
117:     ICATHO(MA-1)=JA2*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
118:     ICATHO(MA+2)=JA2*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
119:     ICATHO(MA-2)=JA3*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
120:     ICATHO(MA+3)=JA3*S*F*4/10^(-6)      ' 電流の単位は(μA)
121:
122: ****要素内セル電流と要素間セル電流の分配****
123: for I = 1 to N
124:     for II = 1 to N
125:         IIMACRO(I, II) = 0
126:     next II
127: next I
128: for I = 1 to N
129:     RMACRO = 0
130:     if I < MA - 1 then
131:         for II = 1 to MA+1
132:             if I = II then
133:                 RMACRO = 2/RP(I)+RMACRO
134:             else
135:                 RMACRO = 1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II))+RMACRO
136:             endif
137:         next II
138:         for II = 1 to MA+1
139:             if I = II then
140:                 IMICRO(I) = ICATHO(I)*(2/RP(I))/RMACRO
141:             else
142:                 IIMACRO(I, II) = ICATHO(I)*(1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II)))/RMACRO
143:             endif
144:         next II
145:     else if I > MA + 1 then
146:         for II = MA to N
147:             if I = II then
148:                 RMACRO = 2/RP(I)+RMACRO
149:             else
150:                 RMACRO = 1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II))+RMACRO
151:             endif
152:         next II
153:         for II = MA to N
154:             if I = II then
155:                 IMICRO(I) = ICATHO(I)*(2/RP(I))/RMACRO
156:             else
157:                 IIMACRO(I, II) = ICATHO(I)*(1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II)))/RMACRO
158:             endif
159:         next II
160:     else
161:         for II = 1 to N

```

```

162:         if I = II then
163:             RMACRO = 2/RP(I)+RMACRO
164:         else
165:             RMACRO = 1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II))+RMACRO
166:         endif
167:     next II
168:     for II = 1 to N
169:         if I = II then
170:             IMICRO(I) = ICATHO(I)*(2/RP(I))/RMACRO
171:         else
172:             IIMACRO(I, II) = ICATHO(I)*(1/(R(I, II)+RP(I)+RP(II)))/RMACRO
173:         endif
174:     next II
175: endif
176: next I
177: for I = 1 to N
178:     IMACRO(I) = 0
179:     for II = 1 to N
180:         IMACRO(I) = IIMACRO(II, I) + IMACRO(I)
181:     next II
182: next I
183: for I = 1 to N-1
184:     line (I*EN, IMICRO(I)/S)-((I+1)*EN, IMICRO(I+1)/S), pset, 15
185:     line (I*EN, IMACRO(I)/S)-((I+1)*EN, IMACRO(I+1)/S), pset, 13
186:     '電流密度の単位は(μA/cm2)
187: next I
188: for I = 1 to 280 step 20
189:     for II = I to I + 19
190:         print II, IMICRO(II)/S, IMACRO(II)/S
191:     next II
192: stop
193: next I
194: for I = 281 to N
195:     print I, IMICRO(I)/S, IMACRO(I)/S
196: next I
197: stop
198:
199: print ' '
200:
201: '****分割鉄筋要素毎の電流密度算定****
202: for I = 1 to ND+1
203:     UIMICRO(I) = 0
204:     UIMACRO(I) = 0
205: next I
206: CCC = 0
207: for I = 1 to 123
208:     AAA = 0
209:     BBB = 0
210:     for II = 1 to 123
211:         if II = I then
212:             AAA = AAA
213:         else
214:             AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
215:         endif

```

```

216: next II
217: for II = 124 to N
218:   BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
219: next II
220: UIMICRO(1) = IMICRO(1) + UIMICRO(1) + AAA
221: UIMACRO(1) = IMACRO(1) - AAA + UIMACRO(1) - BBB
222: next I
223: RRR(1) = RP(1) / S
224: for I = 2 to 123
225:   RRR(1) = RRR(1) * RP(I) / S / (RRR(1) + RP(I) / S)
226: next I
227: CCC = UIMACRO(1) + CCC
228: UIMICRO(1) = UIMICRO(1)/(123*S)
229: UIMACRO(1) = UIMACRO(1)/(123*S)
230: RRR(1) = 0.0209 / (RRR(1)*(123*S)) * 1000
231: for I = 124 to 139
232:   AAA = 0
233:   BBB = 0
234:   for II = 124 to 139
235:     if II = I then
236:       AAA = AAA
237:     else
238:       AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
239:     endif
240:   next II
241:   for II = 1 to 123
242:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
243:   next II
244:   for II = 140 to N
245:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
246:   next II
247: UIMICRO(2) = IMICRO(1) + UIMICRO(2) + AAA
248: UIMACRO(2) = IMACRO(1) - AAA + UIMACRO(2) - BBB
249: next I
250: RRR(2) = RP(124) / S
251: for I = 125 to 139
252:   RRR(2) = RRR(2) * RP(I) / S / (RRR(2) + RP(I) / S)
253: next I
254: CCC = UIMACRO(2) + CCC
255: UIMICRO(2) = UIMICRO(2)/(16*S)
256: UIMACRO(2) = UIMACRO(2)/(16*S)
257: RRR(2) = 0.0209 / (RRR(2) * 16 * S) * 1000
258: for I = 140 to 155
259:   AAA = 0
260:   BBB = 0
261:   for II = 140 to 155
262:     if II = I then
263:       AAA = AAA
264:     else
265:       AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
266:     endif
267:   next II
268:   for II = 1 to 139
269:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB

```

```
270: next II
271: for II = 156 to N
272:   BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
273: next II
274: UIMICRO(3) = IMICRO(I) + UIMICRO(3) + AAA
275: UIMACRO(3) = IMACRO(I) - AAA + UIMACRO(3) - BBB
276: next I
277: RRR(3) = RP(140) / S
278: for I = 141 to 155
279:   RRR(3) = RRR(3) * RP(I) / S / (RRR(3) + RP(I) / S)
280: next I
281: CCC = UIMACRO(3) + CCC
282: UIMICRO(3) = UIMICRO(3) / (16 * S)
283: UIMACRO(3) = UIMACRO(3) / (16 * S)
284: RRR(3) = 0.0209 / (RRR(3) * 16 * S) * 1000
285: for I = 156 to 171
286:   AAA = 0
287:   BBB = 0
288:   for II = 156 to 171
289:     if II = I then
290:       AAA = AAA
291:     else
292:       AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
293:     endif
294:   next II
295:   for II = 1 to 155
296:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
297:   next II
298:   for II = 172 to N
299:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
300:   next II
301: UIMICRO(4) = IMICRO(I) + UIMICRO(4) + AAA
302: UIMACRO(4) = IMACRO(I) - AAA + UIMACRO(4) - BBB
303: next I
304: RRR(4) = RP(156) / S
305: for I = 157 to 171
306:   RRR(4) = RRR(4) * RP(I) / S / (RRR(4) + RP(I) / S)
307: next I
308: CCC = UIMACRO(4) + CCC
309: UIMICRO(4) = UIMICRO(4) / (16 * S)
310: UIMACRO(4) = UIMACRO(4) / (16 * S)
311: RRR(4) = 0.0209 / (RRR(4) * 16 * S) * 1000
312: for I = 172 to N
313:   AAA = 0
314:   BBB = 0
315:   for II = 172 to N
316:     if II = I then
317:       AAA = AAA
318:     else
319:       AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
320:     endif
321:   next II
322:   for II = 1 to 171
323:     BBB = IIMACRO(I, II) + BBB
```

```
324: next II
325: UIMICRO(5) = IMICRO(I) + UIMICRO(5) + AAA
326: UIMACRO(5) = IMACRO(I) - AAA + UIMACRO(5) - BBB
327: next I
328: RRR(5) = RP(172) / S
329: for I = 173 to N
330:   RRR(5) = RRR(5) * RP(I) / S / (RRR(5) + RP(I) / S)
331: next I
332: CCC = UIMACRO(5) + CCC
333: UIMICRO(5) = UIMICRO(5) / (123 * S)
334: UIMACRO(5) = UIMACRO(5) / (123 * S)
335: RRR(5) = 0.0209 / (RRR(5) * 123 * S) * 1000
336: print CCC
337: for I = 1 to ND
338:   print I, UIMICRO(I), UIMACRO(I), RRR(I)
339: next I
340: stop
341: for I = MA to MA+1
342:   AAA=0
343:   for II = MA to MA+1
344:     if II = I then
345:       AAA = AAA
346:     else
347:       AAA = IIMACRO(II, I) + AAA
348:     endif
349:   next II
350: UIMICRO(6) = IMICRO(I) + UIMICRO(6) + AAA
351: UIMACRO(6) = IMACRO(I) - AAA + UIMACRO(6)
352: next I
353: UIMICRO(6) = UIMICRO(6) / (2 * S)
354: UIMACRO(6) = UIMACRO(6) / (2 * S)
355:   print UIMICRO(6), UIMACRO(6)
356: stop
357: end
358:
```

```

1:'00 Kawasaki Yakou-tyou
2:'block-C area-1
3:'Macrocell corosion current
4:'7(NX)+7(NB) = 14
5:'----- データ -----
6:NP = 14
7:NB = 7
8:NX = 7
9:NP1 = NP + 1
10:NX1 = NX - 1
11:dim LNX(NX + 1)
12:KK = 0.0209
13:'----- データの読み込み -----
14:' 配列の宣言
15:dim AAA(NP, NP+1), U(NP), B(NP), P(NB), PR(NP), E(NP), CHECK(NP), MACD(NP),
    MICD(NP)
16:
17:for I = 1 to NP
18:  CHECK(I) = 0
19:NEXT I
20:
21:' "単位長さ(cm)" ; UNIT
22:UNIT = 15
23:' "鉄筋の直径(cm)" ; DFEM
24:DFEM = 2.2
25:' "コンクリート抵抗(k Ohm cm)" ; RR
26:RR = 1.216
27:' "鉄筋表面積(cm2)"
28:AFEM = DFEM * 3.14 * UNIT
29:' "分極抵抗(k Ohm)" ; PR
30:' "鉄筋電位(mV)" ; E
31:PR(1) = 27.5 / AFEM
32:E(1) = -205
33:CHECK(1) = 1
34:PR(3) = 7.5 / AFEM
35:E(3) = -183
36:CHECK(3) = 1
37:PR(5) = 30 / AFEM
38:E(5) = -224
39:CHECK(5) = 1
40:PR(7) = 22.5 / AFEM
41:E(7) = -262
42:CHECK(7) = 1
43:PR(9) = 7.5 / AFEM
44:E(9) = -389
45:CHECK(9) = 1
46:PR(11) = 10 / AFEM
47:E(11) = -287
48:CHECK(11) = 1
49:PR(13) = 20 / AFEM
50:E(13) = -261
51:CHECK(13) = 1
52:
53:

```

```

54: '-----各接点間の抵抗-----
55: RRR = RR / (UNIT * UNIT * 3.14) * UNIT
56:
57: '-----各接点間の抵抗の逆数-----
58: FOR I = 1 TO NP
59:   FOR J = 1 TO NP
60:     AAA(I, J) = 0
61:   NEXT J
62:   U(I) = 0
63:   B(I) = 0
64: NEXT I
65: AA = 1 / RRR
66: for I = 2 to NP - 2 step 2
67:   AAA(I, I + 2) = AA
68:   AAA(I + 2, I) = AA
69: next I
70: for I = 1 to NP - 1 step 2
71:   AAA(I, I + 1) = 1 / PR(I)
72:   AAA(I + 1, I) = 1 / PR(I)
73: next I
74:
75: '-----対角成分の計算-----
76: FOR I = 1 TO NP
77:   S = 0
78:   IF CHECK(I) = 0 THEN
79:     FOR J = 1 TO NP
80:       S = S + AAA(I, J)
81:     NEXT J
82:     AAA(I, I) = -S
83:   ELSE
84:     FOR J = 1 TO NP
85:       AAA(I, J) = 0
86:     NEXT J
87:     AAA(I, I) = 1
88:   END IF
89: NEXT I
90:
91: '----- 方程式 [AAA] {x} = {u} を解く -----
92: N = NP
93: FOR K = 1 TO N - 1
94:   AMAX = ABS(AAA(K, K)): IMAX = K
95:   FOR I = K + 1 TO N
96:     AIK = ABS(AAA(I, K))
97:     IF AIK > AMAX THEN AMAX = AIK: IMAX = I
98:   NEXT I
99:   IF IMAX = K THEN
100:     P = AAA(K, K)
101:   ELSE
102:     FOR J = K TO N
103:       SWAP AAA(K, J), AAA(IMAX, J)
104:     NEXT J
105:     SWAP E(K), E(IMAX)
106:     P = AAA(K, K)
107:   END IF

```

```

108:      FOR J = K + 1 TO N
109:          AAA(K, J) = AAA(K, J) / P
110:      NEXT J
111:      E(K) = E(K) / P
112:      FOR I = K + 1 TO N
113:          Q = AAA(I, K)
114:          FOR J = K + 1 TO N
115:              AAA(I, J) = AAA(I, J) - Q * AAA(K, J)
116:          NEXT J
117:          E(I) = E(I) - Q * E(K)
118:      NEXT I
119: next K
120: print AAA(N, N)
121: stop
122: U(N) = E(N) / AAA(N, N)
123: FOR K = N - 1 TO 1 STEP -1
124:     S = 0
125:     FOR J = K + 1 TO N
126:         S = AAA(K, J) * U(J) + S
127:     NEXT J
128:     U(K) = E(K) - S
129: next K
130:
131: ' -----出力-----
132: FOR I = 1 TO NP
133:     E(I) = U(I)
134: NEXT I
135: for I = 1 to NP-1 step 2
136:     PRINT "V(U)="; I, E(I)
137: NEXT I
138: print "マクロセル電流密度(μA/cm2)"
139: for I = 1 to NP -1 step 2
140:     MACD(I) = (-E(I) + E(I+1)) / PR(I) / AFEM
141:     print using "#####.##### (μA/cm2)"; MACD(I)
142: next I
143: print "ミクロセル電流密度(μA/cm2)"
144: for I = 1 to NP -1 step 2
145:     MICD(I) = KK * 1000 / PR(I) / AFEM
146:     print using "#####.##### (μA/cm2)"; MICD(I)
147: next I
148: stop
149: end

```

本論文に関連する学術論文・国際会議

第2章に関連する学術論文・国際会議

- 1) 宮里心一, 長瀧重義, 大即信明, 柴田常德: 自然電位法と交流インピーダンス法を用いた鉄筋のマクロセル腐食電流の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19 No.1, pp.817-822, 1997.6.
- 2) 宮里心一, 大即信明, 佐伯竜彦: 分極曲線を用いた断面修復部のマクロセル腐食速度予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20 No.2, pp.865-870, 1998.7.
- 3) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル腐食速度の測定方法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, 投稿中, 2001.7.
- 4) S. Nagataki, N. Otsuki, A. Moriwake and S. Miyazato: Influence of Macro-cell on Embedded Bars in Repaired Concrete Members, Concrete under Severe Conditions, pp.605-614, Sapporo, Japan, 1995.8.

第3章に関連する学術論文・国際会議

- 5) 大即信明, 久田真, 木村勇人, 宮里心一: 欠陥部がモルタル中鉄筋の塩化物によるマクロセル腐食の形態に及ぼす影響, セメント協会論文集(セメント・コンクリート論文集), No.52, pp.698-703, 1999.2.
…上記5)に対して「平成10年 セメント協会論文賞」受賞
- 6) S. Miyazato, N. Otsuki and H. Kimura: Experimental Study on the Corrosion Mechanism of Steel Reinforcement near Mortar Joint, 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1502-1507, Kochi, Japan, 1999.8.

第4章に関連する学術論文・国際会議

- 7) Nobuaki Otsuki, Shin-ichi Miyazato, Nathaniel B. Diola and Hirotaka Suzuki: Influence of Bending Crack and Water-Cement Ratio on Chloride -Induced Corrosion of Main Reinforcing Bars and Stirrups, Technical Papers of American Concrete Institute (ACI Materials Journal), Vol.97, No.4, pp.453-462, 2000.8.
- 8) 大即信明, 宮里心一, 鈴木裕隆, 木村勇人: 曲げひび割れ近傍に生じる主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.161-177, 1999.8.
- 9) 大即信明, 宮里心一, 柴田常德, 久田真, Tarek Uddin Md., 長瀧重義: 鉄筋

コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.63-74, 1998.11.

- 10) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 鎌田敏郎, 宮里心一: 断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.31-42, 1997.11.

- 11) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.109-119, 1996.8.

…上記 8)~11)に対して「平成 11 年 土木学会吉田研究奨励賞」受賞

- 12) S. Nagataki, N. Otsuki, A. Moriwake and S. Miyazato : Influence of Permeation of Oxygen and Chloride Ion through Joints on Macro-cell Corrosion , 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete (SP-170), pp.1333-1356, Sydney, Australia, 1997.8.

- 13) S. Nagataki, N. Otsuki, A. Moriwake, S. Miyazato and T. Shibata : Macro-cell Corrosion on Embedded Bars in Concrete Members with Joints, 7th Durability of Building Materials and Components, pp.411-420, Stockholm, Sweden, 1996.5.

第 5 章に関連する学術論文・国際会議

- 14) 宮里心一, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, Vol.12 No. 2, 掲載決定, 2001.5.

- 15) S. Miyazato, N. Otsuki, A. Konagai and T. Nishida : The estimation of macrocell corrosion rate of rebar in built infrastructure using non-destructive tests, 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 投稿中, Singapore, 2000.12.

第 6 章に関連する学術論文・国際会議

- 16) 大即信明, 宮里心一, 木村勇人: コンクリートの欠陥部に生じる中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 材料学会論文集 (材料), 投稿中

第 9 章に関連する学術論文・国際会議

- 17) 宮里心一, 大即信明, 木村勇人, 水流徹: モルタルの欠陥部に生じる塩害および中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 土木学会論文集, (投稿中)

- 18) S. Miyazato, N. Otsuki and H. Kimura : Steel corrosion induced by chloride ions and carbonation in mortar with bending cracks and joints , Second international conference on engineering materials, 掲載決定, San Jose, CA, USA, 2001.8.