

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	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
Title(English)	
著者(和文)	大即信明
Author(English)	NOBUAKI OTSUKI
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第1635号, 授与年月日:1986年12月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第1635号, Conferred date:1986/12/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

目次

1. 序論	1
2. 海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論	6
2.1 塩素イオン存在下のコンクリート中の鉄筋の腐食理論	6
2.2 腐食機構の電気化学的解釈	6
3. 実験手法に関する検討	10
3.1 鉄筋観察および腐食量	10
3.2 電気化学的方法	10
3.3 塩素イオン含有量の測定	25
4. 内在および侵入塩素イオンの腐食におよぼす影響	29
4.1 不動態のグレードの経時変化におよぼす影響	29
4.2 腐食度の経時変化におよぼす影響	43
4.3 コンクリートの内部構造におよぼす影響	44
5. ひびわれの存在が腐食におよぼす影響	53
5.1 ひびわれのない供試体での実験	53
5.2 ひびわれのある供試体での実験	81
5.3 モデル供試体を用いたひびわれの存在の影響の検討	94
5.4 ひびわれの存在と塩素イオンの侵入に関する検討	113
5.5 考察および結論	114
6. 電気化学的方法の評価	116
6.1 不動態のグレード	116
6.2 自然電極電位	119
6.3 腐食電流密度	119
6.4 再不動態化電位	121
6.5 結論	124
7. 長期暴露実験供試体による鉄筋腐食の確認	125
7.1 ひびわれのない供試体を用いた10年試験	125
7.2 ひびわれのある供試体を用いた3年試験	141
8. 塩素イオンと実在構造物の腐食およびその対策	152
8.1 塩素イオン含有量と実在構造物の腐食	152
8.2 海洋環境におけるコンクリート中鉄筋の腐食対策	162

9. 結論	174
10. あとがき	177
参考文献	178

第 1 章

序論

(1) 目的

従来より、港湾構造物を含め、多くの海洋コンクリート構造物が建設され、過去の多くの場合は、何の問題もなく、その社会的役割を果たしてきた。しかしながら、近年になって、一部の海洋コンクリート構造物の劣化が著しく、コンクリート構造物の耐海水性の問題が徐々に顕在化してきている。特に、鉄筋コンクリートにおいて、鉄筋の腐食および膨張による鉄筋のかぶりコンクリートの剝離が重大な問題である。

一般の鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に対するひとつの解決策として、土木、建築両学会では、使用材料中の塩素イオン（塩分）含有量に対して、厳しい規制を設けている（(1),(2)）。しかしながら、海洋環境での鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食の要因としては、通常の陸上コンクリート部材での要因（コンクリートの品質、ひびわれの存在、かぶり、使用材料中塩素イオン等）のほかに環境としての海水より侵入する塩素イオンがあるのが大きな特徴である。即ち、使用材料より含まれるもののほかに、海洋環境としての海水よりコンクリート中へ侵入するものが当然考えられる。これらが、コンクリート中の鉄筋表面に到達するのは、前者が水和反応以前からであり、後者の大部分が、水和反応終了後と考えられる。そのため、両者のコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす影響は、異なることが予想される。なお、ひびわれの発生時期によっては後者は、極めて早期に鉄筋表面に到達することもあり得る。

本研究では、これら2種類の塩素イオン、を前者の使用材料中に既に含まれる塩素イオンを内在イオンと定義し、後者の環境よりコンクリート中に進入する塩素イオンを侵入イオンと定義した。本研究の目的は、これらの内在および侵入塩素イオンの海洋環境における鉄筋コンクリート中鉄筋の腐食におよぼす影響を他の腐食におよぼす要因であるコンクリートの品質（水セメント比、セメント等）、ひびわれの存在、かぶり等の影響を含めて検討することである。なお、内在塩素イオンとしては練り混ぜ水に海水等を用いることにより塩素イオンを混入した。

(2) 概要

前節で述べたように、本研究では、海洋環境での内在および侵入塩素イオンのコンクリート中鉄筋の腐食におよぼす影響を明らかにすることを主目的とする。

概略の構成は、室内実験によって一般的な傾向を把握し、長期暴露実験および実在構造物調査により一部の確認を行なった。

腐食の評価方法としては、コンクリートより取り出した鉄筋の観察、および、非破壊試験として電気化学的方法を用いた。

鉄筋観察は、材令1年、3年、10年といった定まった時点で行ない、その時点での塩素イオンの影響の評価を行なった。それ以外の時点での経時的な塩素イオンの影響については、種々の制約（供試体数、時間、費用）があり、特に供試体数を節約するために非破壊試験方法を用いることとした。非破壊試験方法としては、最も適切と考えられる電気化学的方法を用いた。なお、電気化学的方法の、コンクリート（モルタルを含む）中の鉄筋への実際的な有効性、理論的な適用性に関する既往の検討は十分とはいえないので、本研究で提案する方法を含めて、有効性、適用性を検討した。

次に、本研究と関連する既往の研究および本研究の位置づけについて述べる。

既往の塩素イオンがコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす影響に関する研究は、以下のごとく4つに分けることができる。

即ち、① 内在塩素イオン、即ちコンクリート使用材料（特に海砂）中に含まれる塩素イオンの影響に関する実験、② 鉄筋を埋め込んだコンクリート、モルタル供試体の海洋環境暴露実験、③ 内在塩素イオンを含んだコンクリートあるいはモルタル供試体の海洋環境暴露実験、および、④ 海洋環境の实在コンクリート構造物の調査である。

以下、各々について述べる。

a) コンクリート使用材料（特に海砂）中に含まれる塩素イオンの影響に関する実験
このテーマに関しては、膨大な研究がある。これらを、集大成した報告(3)によると、コンクリート中に材料中より含まれる塩素イオンが鉄筋の腐食におよぼす影響は次のようである。

① コンクリート中の液相は、通常水酸化カルシウムを主体とする水酸化物を溶解し、pH 12以上のアルカリ性を保持している。この高いアルカリ性環境の中では、鉄筋表面は完全に不動態化され、錆の発生はみられない。

② アルカリ溶液中に、Cl⁻イオンが含まれると、(OH)⁻イオンの不動態化作用を阻害し、ある（塩素イオン/水酸イオン比を上回ると不動態は破壊され、酸素および水の存在下で錆が発生する。石灰水飽和溶液中のNaCl濃度を变化させた実験によると、NaCl濃度0.045%が発錆の限度であると判断される。

③ 上記の限度以上に塩化物が混入しても、コンクリート中の鉄筋が腐食しない例もおい。これは、セメントペースト中の水和物が、塩化物と結合しているためとされる。この結合については、不明確な点が多く残されているが、フリーデル氏塩が生成することは確かめられている。

④ 常温における塩化物の固着は、普通の化学成分のポルトランドセメントの場合、Cl⁻イオンとしてセメントの0.4%程度という研究もあり、また0.9%程度という研究もある。

⑤ 海砂を用いると、セメントと結合するものがあったとしても、若干の塩化物は残留するので、PC鋼材の僅かな断面減少でも危険を伴うプレストレスコンクリートには塩化物を用いてはならず、また、海砂も用いてはならない。

⑥ 耐硫酸塩ポルトランドセメントは、C3Aが5%と低く、したがって、塩化物の固定能力が低く塩化物を含ませてはならない。又、アルミナセメントに塩化物が含まれると、凝結が著しく遅延されるので、塩化物を含ませてはならない。

⑦ 塩化物を含むコンクリートを高温養生すると、鉄筋に錆の発生がみられる。この発生過程については、種々の議論がある。しかし、高温養生の場合に塩化物の使用を禁止する点では異論はない。

⑧ 水セメント比を小さくし、単位水量を少なくし、硬練りのコンクリートを十分に締め固め、かぶりを大きくとることが、錆を防ぐ要諦である。

なお、これらの結論は、海洋環境を主な対象とはしておらず、また、ひびわれの影響についてもほとんど考慮していない。

b) 鉄筋を埋め込んだコンクリート、モルタル供試体の海洋環境暴露実験

イ) ひびわれのない場合

これに関しては、文献((4),(5))をはじめとして多くのものがある。これらに共通

して言えることは、以下のようである。

- ① 混合セメントがポルトランドセメントに比較して、pHは若干低い、水密性が良く塩分浸透が少なく、強度の伸びも良い。このため、防食性能も良い。
- ② 水セメント比とスランプが小さく、かぶり大きいものの防食性能が良い。
なお、ここでは使用材料に塩化物を含む場合については除いてある。

ロ) ひびわれのある場合

これに関しても、((6),(7))を、はじめとして多くのものがある。これらに共通して言えることは、以下のようである。

- ① 中性化は腐食の原因ではない。
- ② ひびわれ幅が0.2mm程度以下では、鉄筋の腐食が強度特性に与える影響は小さかった。
- ③ かぶりの影響は、大きい。

c) 使用材料に塩素イオンを含んだコンクリートあるいはモルタル供試体の海洋環境暴露実験

これについては、((8),(9),(10))等の研究がある。これらに共通する結論は、以下のようである。

即ち、練り混ぜ水、養生水の組み合わせに対する腐食量は、セメントの種類、W/Cに関係なく、(海水練り+海水養生) > (海水練り+淡水養生) > (淡水練り+海水養生) > (淡水練り+淡水養生)の順である。

また、文献(8)では、次のごとき結論をだしている。

即ち、海水暴露実験の材令5年における鉄筋の発錆量を高温高湿の条件下で行なった促進実験の結果と比較した結果、海水暴露実験結果を促進試験結果によって推定するのは困難である。

d) 海洋環境のコンクリート構造物の調査

これに関しては、文献(10)等の調査がある。これらに、共通の事項は次のようである。

- ① コンクリート中に蓄積される塩分量は、極めて多い。
- ② 所要の品質を有するコンクリートを入念に打ち込み、締め固めおよび養生を適切に実施し、適切なかぶりが確保されているときは、材令20年以上でも十分な耐久性を確保することが出来る。

e) 本研究の位置づけ

本研究は、(c)に分類されるものではあるが、既往の研究とは以下の点で異なっている。

即ち、① 使用材料からコンクリート中へ蓄積される塩分(塩素イオン)と外部環境より供給される塩素イオンの影響を分離したこと、② ①において、ひびわれの影響を考慮したこと、③ 室内短期実験結果を、屋外暴露長期実験と実在構造物の劣化状況調査で確認したこと、および、④ 独自の方法を含む電気化学的方法を適用範囲を明かにして、かつ用いたこと、が挙げられる。

また、本研究は海洋環境にコンクリート構造物を建設するものの立場より、塩素イオンの影響をみるものである。即ち、ある程度の塩素イオンの侵入は、長期を考えればやむを得ないという立場から、塩素イオンの影響を考えた。さらに、資源節約の見地から、塩素イオンによる害を他の因子で置き換えることが出来ないかということ考えた。こ

れは、既往の研究の多くが、外部よりの塩素イオンの浸透にそれほどの注意を払わず、また、塩素イオンの害ばかりを強調するものが多く、それらとは本研究は趣を異にする訳である。

これらが、本研究の位置づけである。

(3) 構成

本研究の構成は、以下の通りである(図1.1参照)。

2章において、海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論について述べた。腐食理論を説明するとともに、コンクリート中での腐食の特徴および塩素イオンの影響を述べた。

3章において、本研究において用いる実験方法を紹介した。電気化学的方法については、主として水溶液中で用いられているものを、用いることとした。本研究で提案する方法についても述べた。

4章において、海水養生あるいは標準養生したモルタル供試体を用いた室内実験および短期暴露実験によって内在および侵入イオンのモルタル中の鉄筋の腐食におよぼす影響を検討した。さらに、内在および侵入塩素イオンのコンクリートの内部構造におよぼす影響を検討した。

5章において、NaCl溶液(海水と同一塩素イオン濃度)中養生あるいは標準養生したコンクリート供試体を用いてひびわれの存在および内在および侵入塩素イオンが鉄筋の腐食におよぼす影響を検討した。

6章において、種々の電気化学的方法の有効性、適応性に関する評価を行なった。これは、水溶液中とコンクリート中では、電気化学理論成立のための条件が異なり、水溶液中では有効な方法も、コンクリート中で有効とは限らないからである。

7章において、内在および侵入塩素イオンさらにひびわれの存在のコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす影響を、長期暴露実験により確認した。加えて、セメントの種類の影響も検討した。

8章において、実在コンクリート構造物調査を実施し(1部文献調査)、内在および侵入塩素イオン、およびひびわれの存在のコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす影響を確認し、さらに、7章までの検討結果を加えて、海洋環境での鉄筋コンクリート中鉄筋の腐食対策について考察した。

9章において、結論をのべた。

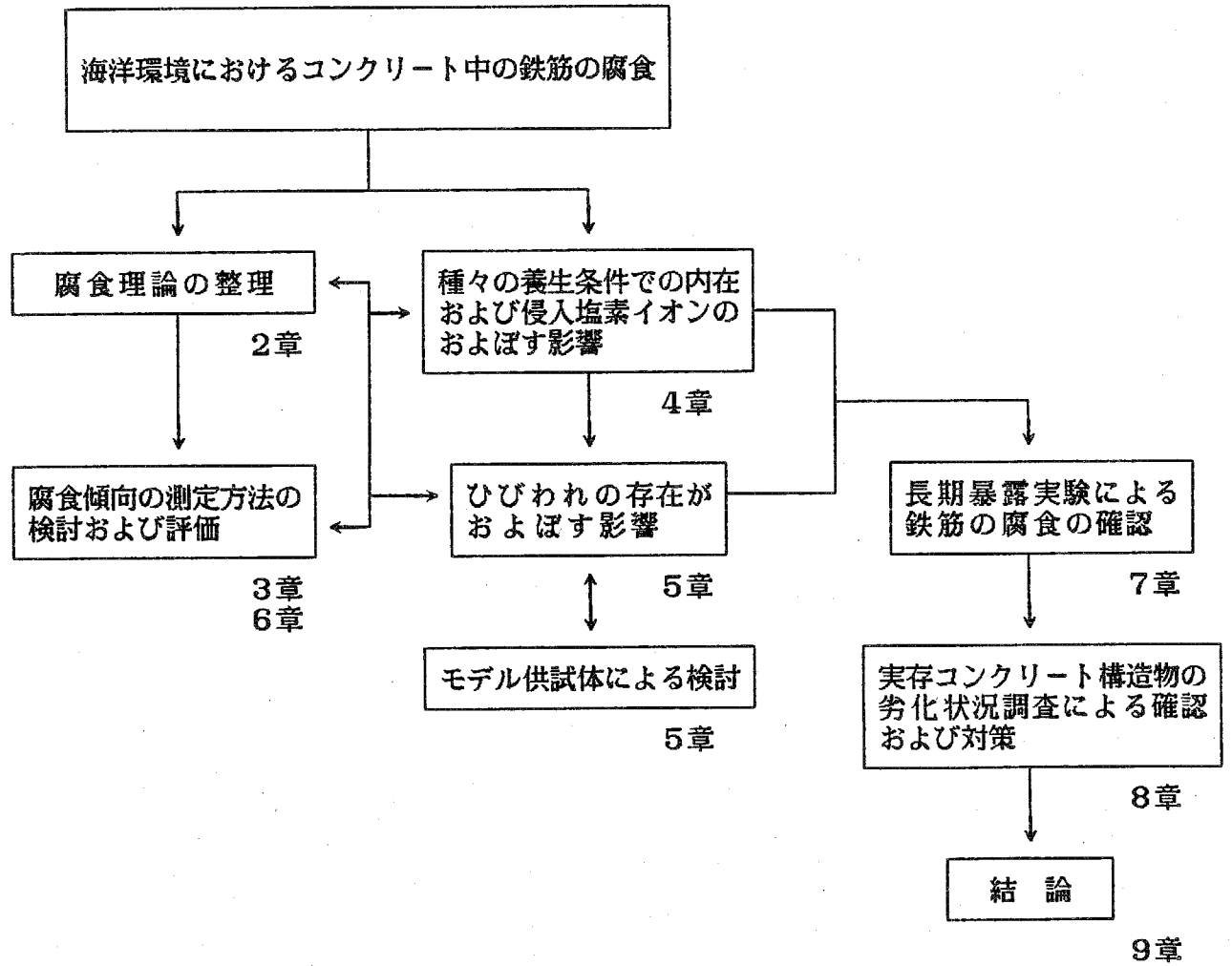


図1.1 本研究のフローチャート

第2章

海洋環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論

2.1 塩素イオン存在下のコンクリート中の鉄筋の腐食に関する定説

一般にコンクリート中の鉄筋の腐食については次のように言われている。

まず、塩素イオンの存在しない条件下では、コンクリート中の鉄筋は腐食しないと言われている。その理由として、コンクリート中のpHは12程度以上であり、この条件では、鉄筋表面には、不動態が形成され、これによって、腐食は、著しく制限されるということが言われている。

しかしながら、塩素イオンを含む溶液が鉄筋表面にあると、不動態が破壊され、腐食が進行する可能性がある。特に、コンクリートにひびわれ等の欠陥部があると、その部分の鉄筋がアノードとなり、また、酸素の供給も容易となるので、マイクロセル、マクロセルのいずれか、あるいは、両方が形成され、腐食は進行すると言われる((12),(13),(14),(15))。塩素イオン存在下でのこれらの一般論は、種々の研究論文の考察等に多く引用されるが、具体的な不動態およびマクロセルに関する研究は、十分とはいえない。

2.2 腐食機構の電気化学的解釈

一般的な腐食機構の解釈は次のようである。

鉄筋の腐食は、鉄筋を形成する金属鉄が、鉄イオンとなり、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $Fe(OH)_2$ 等のいわゆる錆を形成する反応をさす。この反応は、電子の移動と、化学反応を含む電気化学的反応である。

コンクリート中の鉄筋表面は、ミクロにみると不均一である。不均一である理由としては、ミルスケールの不均一性、鉄筋表面の凹凸等の鉄筋に関するものと、pH、酸素、ブリージング、および、乾湿の不均一性等のコンクリートに関するものがある。このため鉄筋表面は、ミクロ的に電位が不均一になり、アノード部とカソード部を生ずる。即ち、腐食電池(corrosion cell, galvanic cellともいう)を生ずる。

不動態を生じない場合に、コンクリート中の鉄筋に生ずる腐食電池の概要は、図2.1に示すとうりである(12)。金属鉄は、アノード部において鉄イオンとなり溶解する($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)。この時生じた電子は、カソード部へ移動し、水と酸素から水酸イオンを形成する($2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)。水酸イオンはカソード部からアノード部へ移動し、 Fe^{2+} イオンと反応し $Fe(OH)_2$ を形成する。 $Fe(OH)_2$ は酸素と反応し、容易に Fe_2O_3 あるいは Fe_3O_4 を形成する。これらは、いわゆる錆である。特に、鉄筋表面からやや離れた所に形成される Fe_2O_3 は、層状で空隙が多く、しかも鉄筋に付着しない錆層を形成する。

しかしながら、塩素イオンの影響を受けず、また、中性化もしていない健全なコンクリート中では、鉄イオンが、金属鉄に密着したままで酸化され、薄い酸化膜が、金属鉄表面を覆うようになる場合がある。この酸化膜の厚さは非常に薄く、30Å内外あるいはそれ以下と言われている(14)。これを概念的に示めたのが、図2.2(12)である。一般に、この酸化皮膜を不動態皮膜と、称し腐食速度は、著しく低下すると言われている。

不動態の有無は、PourbaixによるPourbaix Diagramを用いるのが分かりやすい。図。

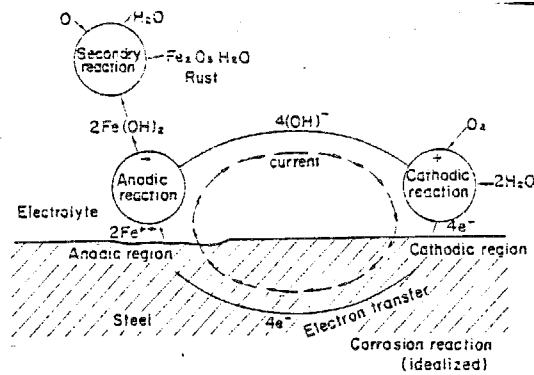


図 2.1 腐食反応の概略

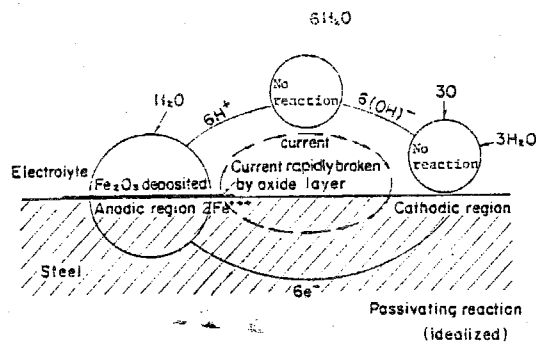


図 2.2 不動態の効果

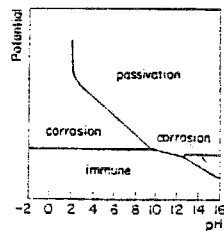


図 2.3 簡略化した Pourbaix 図

2. 3に簡略化したPourbaix Diagramを示す。この図中には、腐食領域(CORROSION)、不動態領域(PASSIVATION)、および、不活性領域(IMMUNE)の3つがある。

コンクリート中の鉄筋の場合、pHはおよそ12程度であるので、図より外部からの電流等がなければ、不動態があると考えられる。これによって、通常は、腐食は発生しない。

しかし、塩素イオンの存在するコンクリート中もしくは中性化したコンクリート中では、不動態は容易に破壊され、コンクリート中の鉄筋は腐食する可能性がある。海洋環境(海中部、感潮部)では、中性化はほとんどなく、塩素イオンの影響が卓越すると考えられる。この理由については、後述する。なお、塩素イオンによって不動態が破壊される機構については不明な点が多いが、その影響自体は明かにされており、ごく少量(0.03モル)の塩素イオンによって不動態は、脆いものになることが知られている(12)。

ある部分で不動態が存在しなくなると、不動態のある部分とない部分でアノード部とカソード部が生じ、腐食電池が形成される。アノード部とカソード部の距離の大小によって腐食電池および腐食機構が分類される。距離の比較的大きなものを(例えば、数cm以上)をマクロセル、小さなものを、マイクロセルということもできる。

(1) ミクロセル

これは、比較的均質な溶媒中にある金属表面に生じる。

一般に、鉄筋表面は、おおくの微小なアノード部とカソード部よりなり、鉄筋自身により短絡されて、腐食電池を形成している。マイクロセルにおいては、アノード部とカソード部の分布状態が、マクロ的にみて均一であり、腐食の状態もマクロ的にみて均一となるものである。

(2) マクロセル

マクロセルは、アノード部とカソード部の距離が比較的大きな場合に生ずる腐食電池である。この形成には、鉄筋表面あるいはコンクリート中にマクロな不均一性がある場合である。

不均一性の原因より大きく分類して、マクロセルには、濃淡電池および活性-不動態電池が考えられる。

a) 濃淡電池

コンクリート中において、pH、塩化物濃度、あるいは、酸素濃度が部分的に異なる場合がある。pHおよび酸素濃度の場合には、それらの値が低い部分が、塩化物濃度の場合には、その値の高いところが、アノードになりやすく、これによって腐食が促進される。

海洋環境のコンクリート中においては、塩化物あるいは酸素による濃淡電池が発生することが考えられる。

b) 活性-不動態電池(16)

ひびわれ等の影響によって、塩化物濃度あるいは酸素濃度の分布が、特に、不均一な場合には、ある部分の鉄筋には不動態があるが、他の部分にはない(活性化している)ことも考えられる。この場合、活性部分がアノードとも言われている。活性部分の

不動態部分に体する面積が小さいほどその部分の腐食進行速度は速い、と言われている。

以上述べたように、コンクリート中铁筋の腐食は、不動態の有無、および、pH、塩化物濃度、酸素濃度の分布に支配されると考えられる。海洋環境では、特に、塩化物濃度（塩素イオン濃度）およびそれに伴う不動態の有無が重要である。

上述したマイクロセルあるいはマクロセルの少なくとも1つが発生することによって、鉄筋の腐食が発生する。

第3章 実験方法に関する検討

3.1 鉄筋観察および腐食量

鉄筋の腐食に関する測定は、重要な測定項目ではあるが、簡便かつ確立された測定方法はないのが実状である。一般には、鉄筋の表面観察および腐食面積の測定が行なわれるが、本研究では、それらに加えて、錆の重量測定を行なった。

(1) 鉄筋の表面観察

鉄の表面は、通常、純粹の金属鉄が露出していることはなく、酸化鉄で覆われている。そのため、どういった酸化鉄を、錆（腐食している）と判定するかが問題となる。本研究では、薄いねずみ色で鉄筋表面全域あるいは部分的に密着した均一な薄い酸化鉄は無視し、黒、赤、赤茶、茶、黄等の色彩を有したものを対象とした。

観察の結果得られた鉄筋表面の錆の分布状況をA4用紙へスケッチした。

(2) 腐食面積の測定

(1)でスケッチした図より、プランメーターにて腐食面積を求めた。

(3) 錆重量の測定

カッターナイフを用い、錆を鉄筋表面よりこすり落とし、直示天秤にて重量を測定した。作業中は、錆にモルタル分等が混入しないように慎重に、また、すべての錆をこすり落とすよう努力したが、ある程度の誤差は、避けることができないようであった。

3.2 電気化学的方法

ここで述べる分野の電気化学的方法は、簡単に言って、鉄筋の電位および電流の測定、さらにこれらの測定結果の解釈によりコンクリート中の鉄筋の腐食状態を推察する方法である。

(1) 既往の方法

a) 電位および電流の個別の測定

一般には、ある一定の環境条件において、鉄筋の電位が貴であるほど腐食しにくく、電位が卑であるほど腐食しやすいと言われている。このため、コンクリート中の鉄筋の電位（自然電極電位と称することがおおい）あるいは電位分布を測定することによって、腐食あるいは腐食の傾向を判断することが可能であると言われている。一例として、B. Tremperらによるカリフォルニア州の橋梁被害調査(17)を初めとして、我が国においても、最近用いられており、ある程度の成果をあげている。なお、この方法の欠点については後述する。

なお、電流測定は、歴史的に最も重要な実験方法であり、異種金属間のガルバニ電池の電流の測定は、19世紀より、腐食の研究に用いられている。

コンクリート中の鋼材の腐食の研究においても、善(18)、宮川(13)等の研究にみられるように、マクロセル電流の測定が、行なわれている。

なお、本研究ではこれらの測定には、市販の電気量測定器（DIGITAL MULTIMETER、内

部抵抗10000Ω)を用いた。

b) 分極曲線(電位-電流曲線)

分極曲線とは、金属が、ある環境中にある場合に、電位あるいは電流を、外部電源を用いて、強制的に変化させることによって得る電位-電流曲線のことである。分極曲線は、金属の腐食特性を迅速に判定する方法として、腐食工学の分野で広く用いられており、その判定の信頼性は高いとされている。

分極曲線から得られる情報は、基本的には、試料がある電位において電気化学的な平衡状態を保つには、どれだけの外部電流が必要か、というものであるが、種々の仮定を設けることによって、次の解釈をすることができる。すなわち、

- ① ターフェル線があると仮定して、腐食電流(交換電流)を算定する。ターフェル線とは、過電圧が小さい時に、電圧と電流の対数とに線形関係があるとして求める線である。
- ② 不動態の程度を判定することができる。
- ③ 試料がマクロセルの1部を形成した際のアノード電流あるいはカソード電流の見積りができる。

の3つである。

次にこれらの方法を用いた鉄筋に関する検討例を述べる。

①に関しては、青戸の研究(4)等があり、一応の成果を挙げてはいるが、定性的な領域をでていない。

②に関しては、水溶液中の鉄筋に関する研究が多い。通常、飽和Ca(OH)₂水溶液を、コンクリートに代わるものと考えて検討している。この水溶液中では、鉄筋は、不動態を有していると言われている。後述する検討によれば、この水溶液中ではある電位の範囲内において1000-10000 nA/cm²程度の電流密度の不動態が存在するようである。しかし、不動態に関する分極曲線の系統だった研究はないようである。

③に関しては、異種金属が、腐食電池(ガルバニ電池)を形成したときの、腐食速度の推定等に利用できるようである。

これら3つの方法については、本研究でも用いており、詳細は後述する。なお、ここで述べた方法は、試料全体がマイクロセルであるときは問題ないが、試料にマクロセルがあるときには、その解釈には理論上からも問題がある。即ち、数種の異なったアノードおよびカソードが混在する場合には、測定される分極曲線は、複数の分極曲線の加算されたものとなり、解釈が困難となる。例えば、おおきな空隙あるいはひびわれ等がある場合には、分極曲線による情報の処理は困難となる。

なお、分極曲線の測定方法については、後述する。

c) 腐食電流の測定

腐食反応に律速条件のない場合、即ち、イオンの供給が不足している、あるいは、十分な不動態がある等の条件のない場合、過電圧(強制的に与えられた電位と自然電極電位との差)を η 、それに伴う外部電流を i 、腐食電流を i_0 とすれば、分極曲線は、

$$i = i_0 [\exp \{ (1 - \beta) \eta F / RT \} - \exp (-\beta \eta F / RT)] \quad \text{式(1)}$$

と表わすことができる(14)。ここで、 β : symmetry factor (1/2と近似することが多い)、 F : Faraday定数、 R : 気体定数、である。この式を、

η の大きな範囲で近似するか、あるいは、小さな範囲で近似するかのいずれかによって、

腐食電流 i_0 を求めることができる。前者の近似を Tafel 近似、後者の近似を分極抵抗法という。

(イ) Tafel 近似を用いた方法

式(1)において、 β を $1/2$ と仮定し、 η が十分大であるとすれば、 $\exp\{(1-\beta)\eta/RT\} \gg \exp(-\beta\eta F/RT)$ となり、 $i \approx i_0 \exp\{(1-\beta)\eta F/RT\}$ とすることができる。この近似の程度は、 $\eta = 100\text{mV}$ で約 98%、 120mV で約 99% となる。このとき、電流 i を対数で表わして図示すれば、図 3. 1 に示すように、 $\log i$ と η (図 3. 1 で η は電位の E_{corr} からの差である) は直線関係となり、その直線と $\eta = 0$ (電位が E_{corr} の時) との交点が電流 i_0 、即ち、腐食電流を表わす。また、 β が $1/2$ でない場合でも、式は難しくはなるが、ほぼ同じことがいえる。なお、著者は、この方法を用いる場合、 $\eta > 100\text{mV}$ でのデータをもちいた。

この方法は、理論的には問題ないが、実際には、直線部 (Tafel region) の判定および傾の決定が困難であること、あるいは、電位の掃引速度の影響が明確でないなどの問題点がある。さらに、不動態の影響、酸素の供給条件等によっては、理論上の仮定が崩れることもある。

(ロ) 分極抵抗法 (図 3. 2 参照)

Tafel 近似とは逆に、 η が十分小さいとすれば、 β が $1/2$ のとき、式(1)は、 $i \approx i_0 F \eta / RT$ と近似することができる。この場合、 $i_0 = (RT/F) \times (\Delta i / \Delta \eta)$ として i_0 が算定される。この時、 $\Delta \eta = 10\text{mV}$ では誤差は約 1%、 20mV で約 2.5% である。また、 β が $1/2$ でない場合には、 $\Delta i / \Delta \eta = \beta a \cdot \beta c / \{2.3 i_0 (\beta a + \beta c)\}$ なる近似が可能である。ここで、 βa 、 βc : アノードおよびカソード側の Tafel slope, $\Delta i / \Delta \eta$: 直線勾配、である。

コンクリート中の鉄筋では、 $\beta a = 0.12$ 、 $\beta c = 0.06$ として算定すれば、精度は 2 倍以内とされる(14)。

d) 再不動態化電位の測定

a) および前述した電気化学的方法は、均一な腐食 (一般腐食あるいは General corrosion ともいう) に対して特に有効とされる。しかしながら、孔食 (pitting) および応力腐食等の発見にはそれほど有効ではない。

コンクリート中鉄筋の腐食の 1 つの形態として、孔食も考えられる。この孔食の発見には、再不動態化電位の測定が有効であるといわれている(14)。アノード分極をおこない、不動態域を過ぎて、電流が急激に増加し始めて、約 $2\text{mA}/\text{cm}^2$ となった段階で、カソード方向に掃引するとある電位で電流が 0 となる。この電位を再不動態化電位という。

再不動態化電位と孔食電位、自然電極電位との関係は次のごとくである。ここで、孔食電位とは、厳密な定義ではないが、電位が僅かに貴に変化するだけで電流が急速に増加し始める電位である。即ち、①自然電極電位が孔食電位よりも貴であれば、新しい孔食が発生し成長する、②自然電極電位が孔食電位と再不動態化電位との間であれば、既成の孔食が成長する、③自然電極電位が、再不動態化電位よりも卑であれば、孔食は発生も成長もしない。

e) カソード分極曲線の測定

カソード分極曲線の測定は、アノード分極曲線と同様に、ASTMG 5-72 の動電

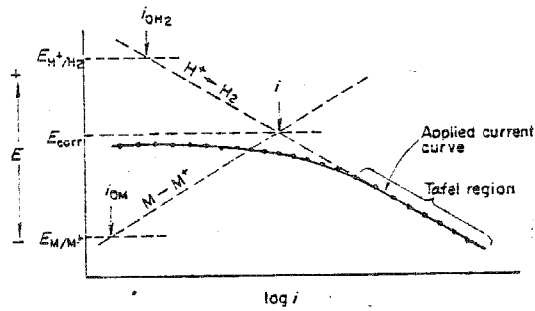


図3.1 Tafel線の適用例

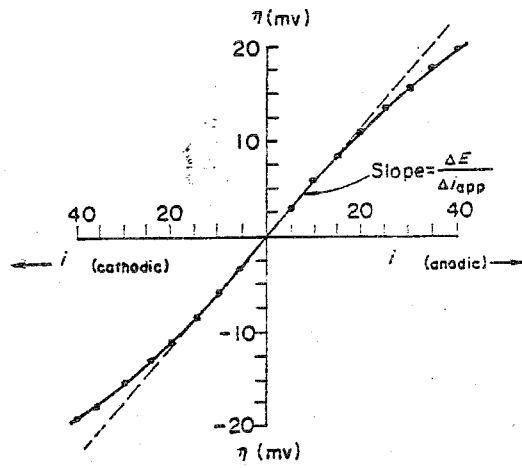


図3.2 分極抵抗法の適用例

位分極法に準じて行なった。なお、アノードの場合との相違は、電位の掃引方向が、自然電極電位から卑の方向とし、 -1.2V (vs. SCE) まで分極させた点である。なお、カソード分極曲線を測定する理由は、ひびわれの有無等による酸素の供給条件の相違がカソード分極曲線に影響を与えられ考えられるためである。その根拠は、以下のようである。

腐食が進行するには、カソード部に酸化剤が供給される必要がある。

酸化剤の量が多いほど、同一の電位でカソード分極曲線の電流密度は大きくなることが知られている。例えば、図 3. 3 (15) においては、アルゴンの飽和した酸素を含まない NaCl 溶液中に酸化剤として Fe^{3+} を種々の割合で混入してカソード分極曲線を測定した結果を示しているが、 Fe^{3+} の多いほど電流密度の多いことが理解される。

一般には、コンクリート中鉄筋の腐食反応に関係する酸化剤は、酸素と考えられるので、酸素の供給条件によってカソード分極曲線が変化することが予想される。

(2) 新たな電気化学の応用方法の提示

腐食は、電気化学的反応であり、腐食に関する情報を得るには、電気化学的方法を用いるのが良いと考えられる。しかしながら、コンクリート（モルタルも含む）中の鉄筋に対しては、前述した方法のみでは、不十分な点もあると考えられた。

本研究では、不動態に関するものとマクロセル電流の測定に関するものとの 2 つの方法を考案し、それらを用いた。本項では、それらの方法を提示する。

a) アノード分極曲線を用いた不動態の分類方法

前述したように、「通常のコンクリート中の鉄筋には、不動態がある。」と一般には言われているが、その具体的な検証例は少ない。ここでは、まず、良好な不動態を有していると言われるものが、アノード分極曲線を用いてどのように表わせるのか、また逆に、不動態が全くないと言われるものがどのように表わせるのかを検討する。これを判断の基準として、アノード分極曲線の測定結果を用いて、塩素イオン、養生（暴露）条件、W/C、材令、等が不動態におよぼす影響を検討する。

ここでは、不動態の分類方法を示す準備として、不動態の電気化学的解釈とアノード分極曲線の測定例および応用例について説明する。

① 不動態の電気化学的解釈

広義には、「不動態は、ある環境条件での化学反応性の消滅」と定義される(14)。さらに、狭義には、「金属あるいは合金が、熱力学的には、金属状態から錆の状態へと移行するに十分おおきな自由エネルギーの減少を伴う環境下にありながら、十分な腐食抵抗性がある場合に、不動態を有しているという(19)。」とされる。

この不動態の本質ならびに電気化学的性質に関しては次のような解釈がある(14)。即ち、「…このため、不動態膜の性質および不動態の具体的な性質は、いまだに未解決の問題として残っている。過去 10 年間に行なわれた電気化学の分野の研究により、不動態に関する知識が増加し、腐食の分野でおおきの重要な進歩がなされてきた。これらの研究は、不動態膜の性質に関する情報を得るのではなく、むしろ、不動態に関するメカニズムとは、完全に独立である。」

即ち、不動態の電気化学的な研究は、電気化学的な情報によって、不動態の電気化学的な性質を把握するものであって、不動態膜そのものの構造の解明には、全く関係ないものである。従って、不動態の定義を、電気化学的にする場合には、不動態膜自体の構

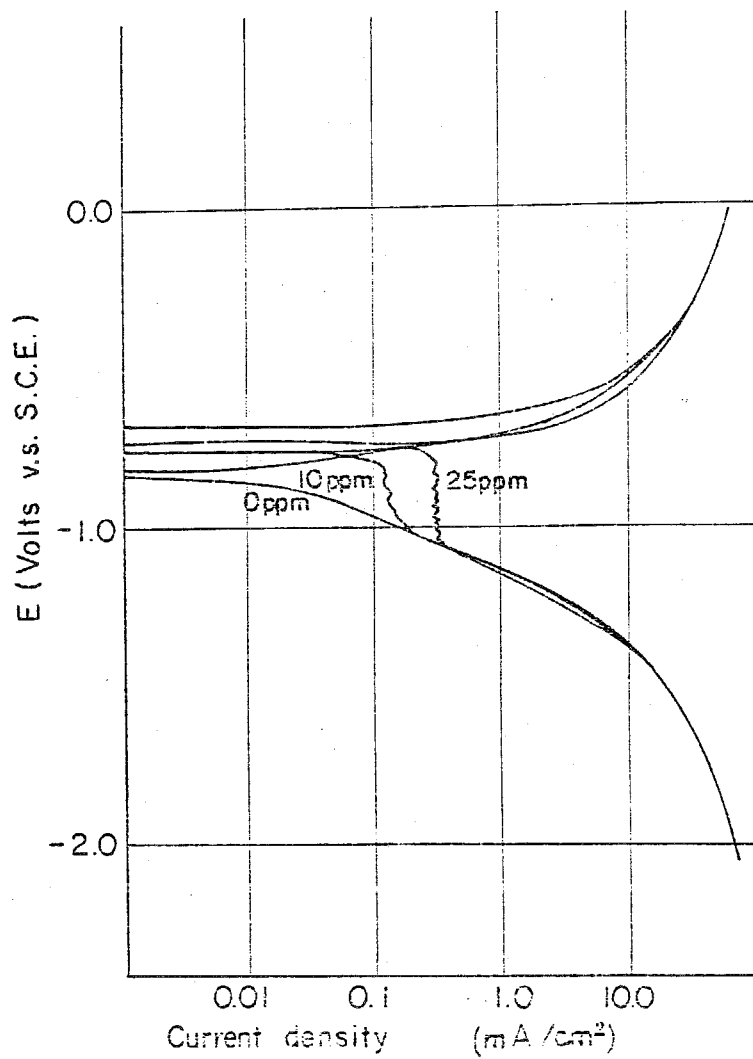


図 3.3 マイルドスチールのカソード分極曲線に及ぼす酸化剤 (Fe^{3+}) の影響 (3.5% NaCl 溶液中アルゴン飽和)

造については、全く言及しないのである。本研究においては、不動態皮膜自体の構造の検討は全く行なわれないが、上記の理由による。

さて、電気化学的に、不動態が存在するか否かは、アノード分極曲線によって判定するのが普通である。通常、不動態膜は、酸化膜 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等) と考えられている。この膜は、電子は通すが、イオンは通しにくいと言われている。これは、アノード分極曲線において、電流が制限されることを意味する。

これらのことより、アノード分極曲線は概念的に、活性 (active)、不動態 (passive)、活性-不動態 (active-passive) に分類される (図3.4参照)。おおまかにいって、図3.4に示す分極曲線に対応して、活性では腐食が進行しやすく、不動態では腐食が進行しにくく、また活性-不動態では微妙な条件の変化で腐食の進行の難易が変化する。

このように、アノード分極曲線より、不動態の電気化学的性質な定義あるいは腐食に対する性質を推察することが出来る。

② アノード分極曲線の測定および応用例

分極曲線の測定方法には、大きく分けて、電位を制御していく方法と、電流を制御していく方法とがある。また、電位あるいは電流を連続的に変えるのか断続的に変えるのか、さらに、電位あるいは電流を変化させる速度によっても異なった分極曲線となる可能性がある。

標準的なものとして、ASTMG 5-72 "Standard reference method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements" による測定法がある。

本研究に於いては、上記規定のPotentiodynamic method (動電位分極法) に準じて、測定を行なった。電位の掃引速度 (掃引速度とは分極曲線測定時の電位の変化する速度である) は、 1 mV/sec を標準とした。

ステンレススチールの研究に関しては、アノード分極曲線を用いた例は多い。図3.5、図3.6(14)に2種類のステンレススチール (304 L S. S. および 316 S. S.) の分極曲線の例を示す。いずれの図においても、良好な不動態を有しているとの判断がなされており、不動態域の電流密度は、 1000 nA/cm^2 程度である。なお、測定方法については (5) で述べる。

③ アノード分極曲線を用いたコンクリート中鉄筋の不動態判定方法

電気化学の分野におけるステンレススチール等のアノード分極曲線の測定は、主として水溶液中で行なわれており、この範囲で有効であることが認められている。しかし、コンクリート中の鉄筋について、この測定が有効か否かについて若干の問題点がある。ここでは、この問題点を検討するとともに、コンクリート中鉄筋の不動態判定方法を提示する。

イ) 問題点

コンクリートは、水溶液に比較して、大きな電気抵抗を有している。このため、この抵抗による電位降下 (iR ドロップ) のアノード分極曲線におよぼす影響を検討する必要がある。また、ステンレススチールでは、良好な不動態域 (不動態の影響が電流におよぶと考えられる電位の範囲) の電流密度は、約 1000 nA/cm^2 以下であろうと推察されるが、鉄筋については実測例もなくどの程度の値であるかを検討する必要がある。

ロ) iR ドロップ (電位降下) の影響について

試料 (鉄筋) と照合電極間の溶媒に抵抗 r があると、試料の電位 E は、 $\Delta E = i \cdot r$

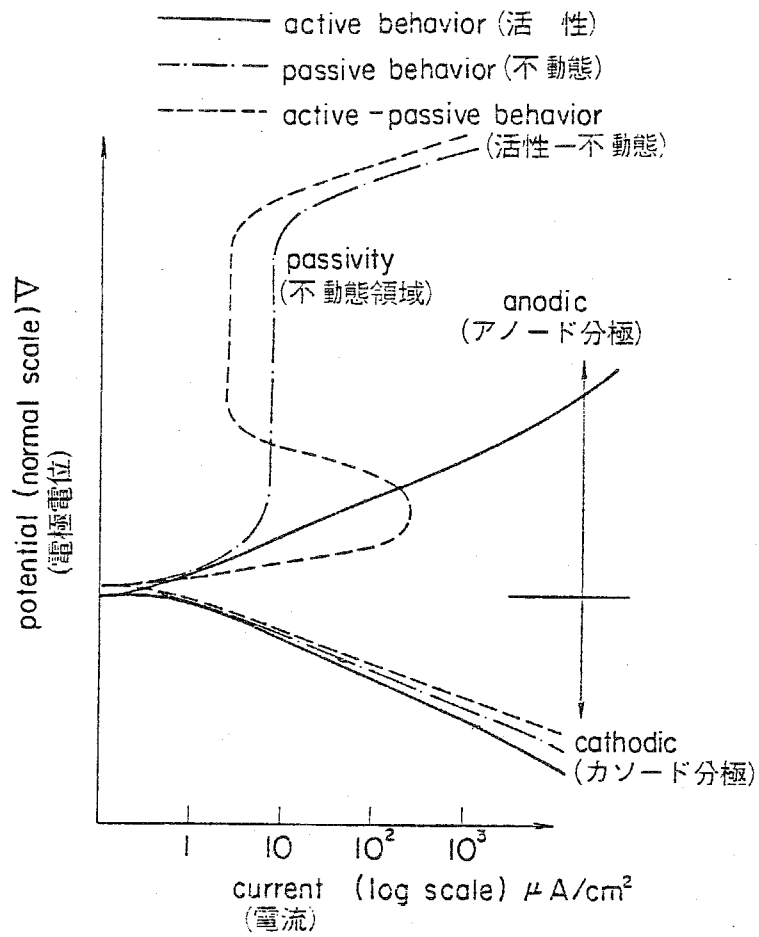


図 3.4 アノード分極曲線の分類

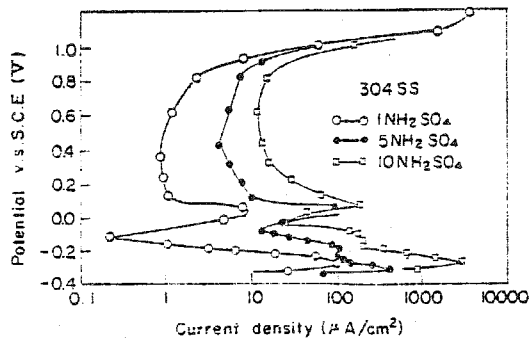


図 3.5 304L ステンレススチールの 1 規定
硫酸溶液中のアノード分極曲線

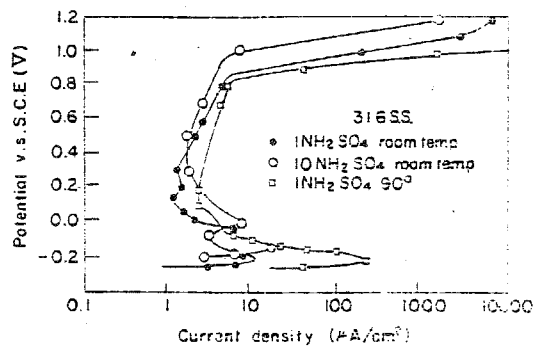


図3.6 316 ステンレススチールの1規定
硫酸溶液中のアノード分極曲線

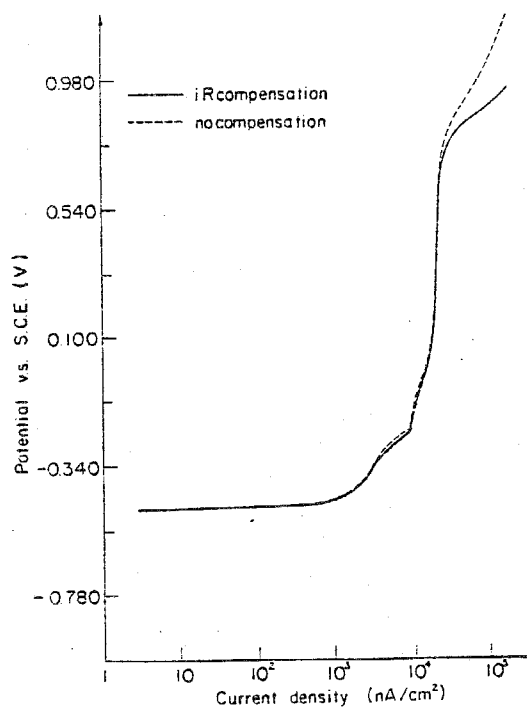


図3.7 抵抗による電位降下の影響

(i' : 鉄筋と照合電極間の電流) だけずれて測定される。コンクリートは、アルカリ、酸や塩類の水溶液に比較して電気抵抗が大きく、測定電流が多いときには水溶液では無視できる範囲であっても、 ΔE が問題となる。

ΔE は、 $\Delta E = i' r$ と表わせるが、この式において、鉄筋と対極間(図3.11参照)の電流 i (この i が測定すべき電流であって、通常、 $i \gg i'$)および測定機器の内部抵抗 R を用いると、

$$\Delta E = r^2 \cdot i / (r + R)$$

と表わすことができる。

本研究での、1部の試験では、マイクロコンピュータ内蔵の測定機器(Model 350, EG&G Princeton Research社製)を用いたが、この機器は、随意に iR ドロップを補正することが可能なので、 iR ドロップに対する考慮はほとんど無用であった。しかし、これ以外のものは、 iR ドロップの影響を考慮する必要がある。これらの供試体は、ほとんど $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体であり、多くの場合この中央部に鉄筋が埋め込んである。この場合、コンクリートの電気抵抗は、十分に給水しているという条件で、鉄筋として長さ10cmかつ径9または10mm(表面積約 30mm^2)の鉄筋を用いた場合、平均 80Ω 、最大で 150Ω 程度である。また、測定機器の内部抵抗は、 $10\text{k}\Omega$ である。さらに、後述するが、電流密度は $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 程度まで計れば十分である(この場合、鉄筋全体の電流は、 $30\text{cm}^2 \times 1\text{mA}/\text{cm}^2 = 30\text{mA}$)。この時、抵抗を 150Ω と仮定すれば、

$\Delta E = r^2 \cdot i / (r + R) = 150^2 \times 30\text{mA} / (150 + 10000) \approx 67\text{mV}$ となる。また、電流密度が、 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に対しては、約 6.7mV 程度となる。

図3.7に、測定機器の内部抵抗 r が約 50Ω の場合の、 iR ドロップの補正を行なったときと行っていないときとの分極曲線を示す(Model 350を使用)。この図によれば、電流密度 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ までは、定量的にもほとんど問題なく、 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ においても、定性的な判断には問題ないものと思われる。

ハ) 不動態域での電流密度

NaOH水溶液中での実験(15)によれば、不動態を有すると考えられる鉄筋に $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電流を流した後も、その鉄筋の電位は変化しないとしている。

しかしながら、鉄筋の不動態については、これ以上の情報はなく、不動態域の電流密度について以下の検討を行なった。

即ち、次の6種の溶液中の鉄筋のアノード分極曲線を測定し、不動態と電流密度(不動態保持電流密度という)との関係を検討した。

- (a) 飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液(通常、不動態があると考えられる)
- (b) セメント抽出液(通常、不動態があると考えられている。 $\text{pH} \approx 12$)
- (c) 0.1% NaCl溶液(通常、不動態はないと考えられている。)
- (d) 3.6% NaCl溶液(通常、不動態はないと考えられている。ほぼ、海水に等しい塩素含有量である。)
- (e) 1.8% NaCl混入セメント抽出液(通常、不動態はないと考えられている。)
- (f) 3.6% NaCl混入セメント抽出液(通常、不動態はないと考えられる。)

図3.8に、これらの分極曲線を示す(掃引速度 $1\text{mV}/\text{s}$ 、掃引速度とは分極曲線測定時の電位の変化する速度である)。

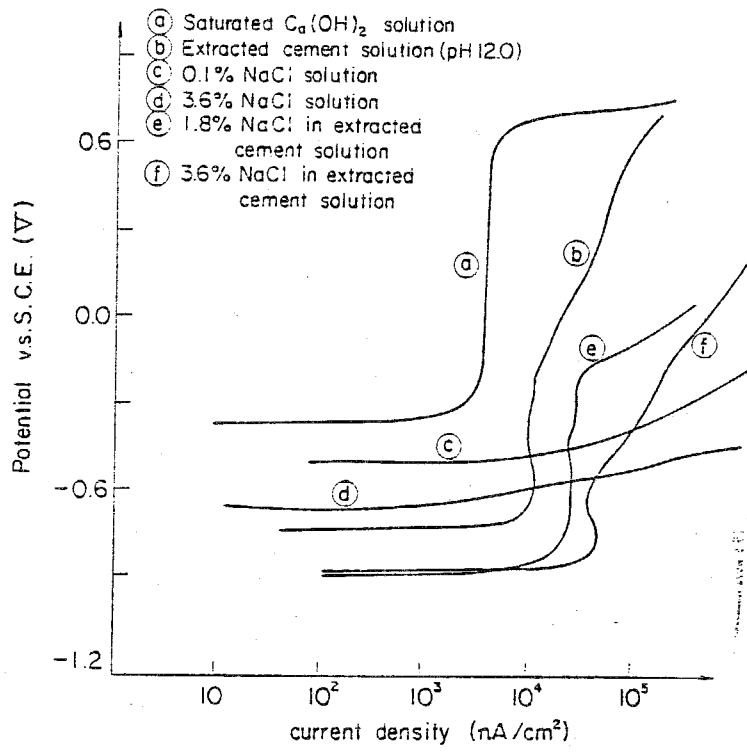


図3.8 各種の溶液中での分極曲線

おおまかに判断すると、 $10 \sim 100 \mu A / cm^2$ を境として、通常不動態のあると言われているものはこの電流密度以下であり、不動態のないといわれているものはこれ以上の電流密度であると言える。このように、不動態と電流密度が対応するようである。

不動態を、定性あるいは定量的に判定しようという試みは、以前よりなされてはいるが、十分なものはない。著者は、ひとつの試みとして、分極曲線の平均的な電流密度を考え、図3. 8等を参考として、以下に示す不動態のグレードを設定した(図3. 9)。

即ち、鉄筋の自然電極電位を E_n として、電位 E が、 $E_n + 0.2 V < E < +0.6 V$ (vs. S. C. E. (飽和甘こう電極)の範囲で、

グレード0: 電流密度が1度でも $100 \mu A / cm^2$ を超えるもの(全く不動態がないと判断した)

グレード1: 電流密度が、 $10 \sim 100 \mu A / cm^2$ にあるもの(不完全ではあるが、若干は不動態があると判断される)

グレード2: 電流密度が1度でも $10 \mu A / cm^2$ を越え、かつ、グレード1または3に含まれないもの

グレード3: 電流密度が、 $1 \sim 10 \mu A / cm^2$ にあるもの

グレード4: 電流密度が、1度でも $1 \mu A / cm^2$ を越え、かつ、グレード1, 2, および3に含まれないもの

グレード5: 電流密度が、 $1 \mu A / cm^2$ を越えないもの(非常に良好な不動態があると判断される)

ここで、電位の範囲として、 $E_n + 0.2 V < E < +0.6 V$ を考えたのは、 $E < E_n + 0.2 V$ ではカソード分極の影響が考えられ、また、 $+0.6 V < E$ では、水の分解による酸素の発生等の異なった反応の起こる可能性があるからである。

b) コンクリート中鉄筋におよぼすマクロセルの影響の測定

コンクリート中鉄筋のマクロセル発生の原因としては、前述したように、濃淡電池作用と活性-不動態電池作用がある。コンクリート中鉄筋の場合、異形鉄筋の模様、骨材の寸法より考えて、マクロセルのアノード部あるいはカソード部の最小単位は数cmを目安にすればよいように思われる。通常数cmと考えられているマクロセルの最小単位を、本研究では具体的に2.5cmとして研究を進めた。

さて、上記のいずれかの原因によって、比較的離れた距離(数cm以上と考えている)に大きなアノード部とカソード部が形成され、これらの間にマクロセル電流が流れる。このマクロセル電流が、ミクロセルの腐食電流に比較して大きい場合、マクロセルによる腐食が顕著になる。

ここでは、マクロセル電流の解釈および本研究での測定方法について述べる。

(イ) マクロセル電流の電気化学的解釈

コンクリート中の鉄筋には、通常なんらかの原因でアノード部及びカソード部が生じている。アノード部およびカソード部の電位を各々 E_a , E_c とし、各種のアノード分極曲線およびカソード分極曲線を図3. 10に概念的に示す。

この図で、アノード分極曲線A-1, A-2, A-3は各々、活性(不動態はない)、不完全ながらも不動態がある、良好な不動態がある、に相当するものとし、カソード分極曲線は主として溶存酸素量の影響によって酸素量の多い方から、C-1, C-2, C-3のごとくなるものと考えた。なお、カソード分極曲線の分類の根拠となる分極曲線の実測例は後に示す。

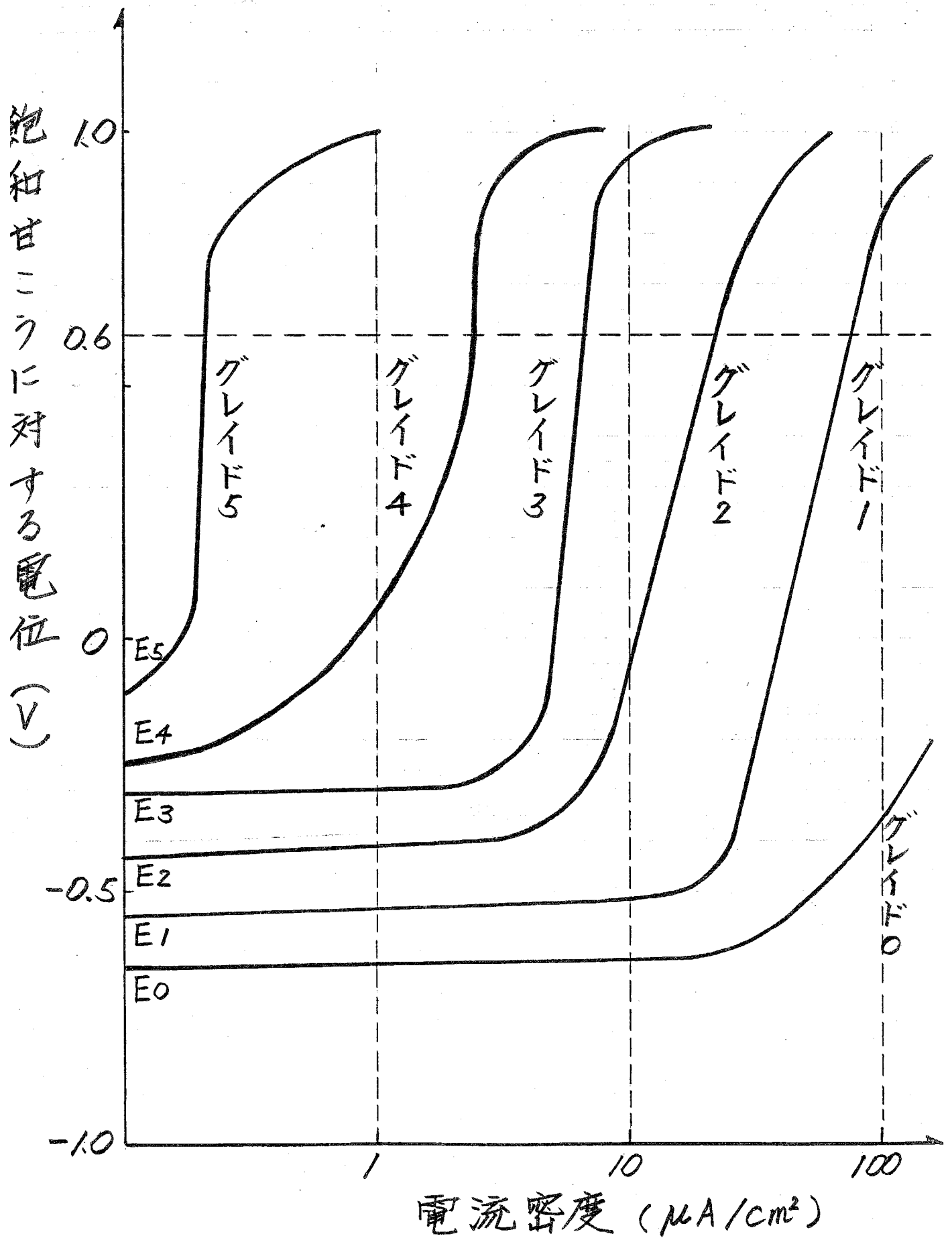


図3-9 不動態のグレード概念図

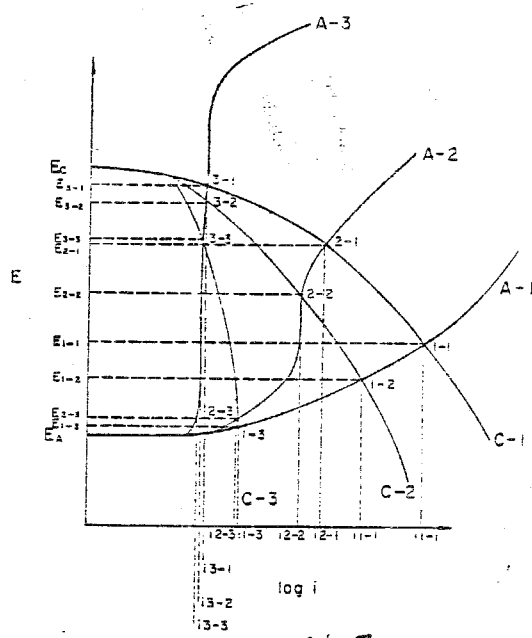


図 3.10 アノード分極曲線, カソード分極曲線および電位電流との関係

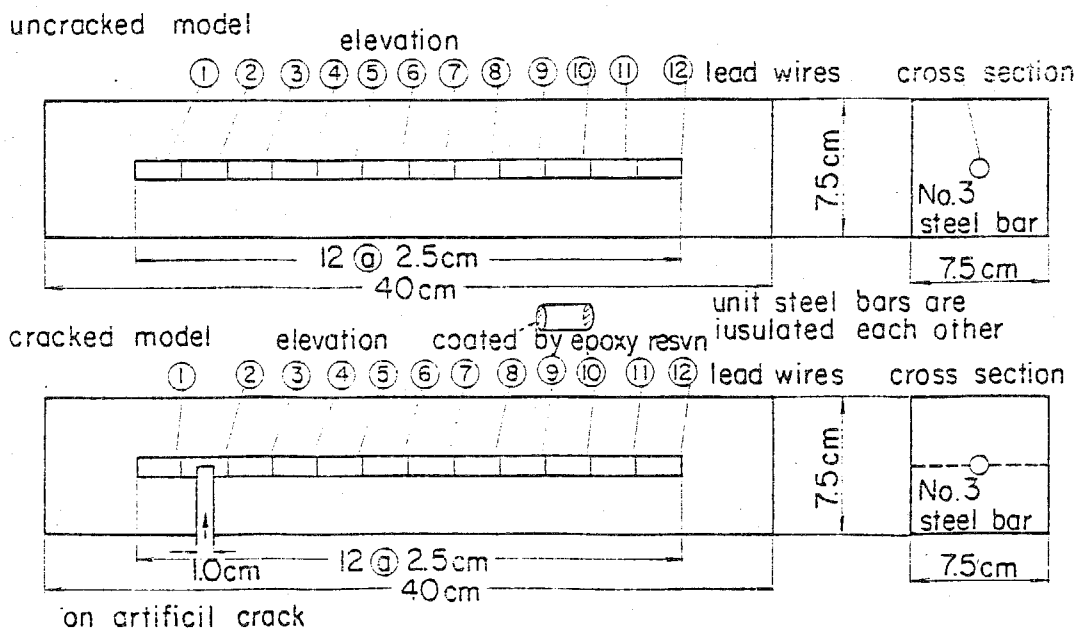


図 3.11 マクロセル電流測定用供試体の概要(はり型)

また、図で、 i_{1-1} , i_{1-2} , … , i_{3-3} は各々に対応するマクロセル電流を、 E_{1-1} , E_{1-2} , … , E_{3-3} は、各々に、対応する閉路電位を表わす。

この図を用いて、考察を行なう。不動態がない場合(A-1)、カソード分極曲線の少しの変化で、マクロセル電流は大きく変化する。また、マクロセル電流そのものの絶対値も大きい。不動態のある場合(A-3)、カソード分極曲線が変化しても、マクロセル電流は、ほとんど変化しないし、その絶対値も小さい。A-2は、その中間である。

また、この図から、アノード分極曲線が一定の場合は、閉路電位が卑であるほどマクロセル電流は小さく、逆に、カソード分極曲線が一定の場合には、閉路電位が卑であるほど、マクロセル電流は大となる。これにより、電位の貴卑とマクロセル電流との間には一義的な関係はないことがわかる。

現地調査等で、コンクリート中鉄筋の電位分布を測定し、「電位の最大値と最小値の差が大きい程腐食の大きい傾向にある。」という報告があるが(17)、図で、 E_a と E_c との差が大であることに対応し、特に不動態が無い場合にはその傾向が是認される。特に、調査をする場合は、腐食等が発生していることが通例であり、おおくの場合アノード部には不動態はなく、前記の傾向が認められるものと思われる。

このように、マクロセル電流と分極曲線とは、密接な関係にある。

なお、この図は、マクロセルについてのみでなく、ミクロセルの場合にも適用でき、ほぼ同様のことがいえる。

特に、一般には、電位と腐食電流あるいは電位と不動態の有無との間には一義的な関係はないということは重要である。また、電位のみから腐食の有無等を論ずることは、なんらかの条件、例えば、アノードあるいはカソード分極曲線が一定である等の条件がなければ、無理がある。

(ロ) マクロセル測定方法

前述したように、マクロセルの最小単位を2.5cmとして後述する供試体を用いマクロセル電流、不動態の有無、および腐食速度におよぼすひびわれ部の影響等を検討した。この検討には、長さ2.5cmの鉄筋の両端をエポキシ樹脂でコーティングしたものを要素鉄筋と称して、これを12本接続した長さ30cmの鉄筋を用いた。図3.11に示すように、この鉄筋をコンクリート中に埋め込んで、マクロセル測定用の供試体を作成した。

マクロセル電流は、この図に示す12の長さ2.5cmの要素鉄筋間に流れる電流を総て測定し、アノードあるいはカソード電流の総和をマクロセル電流と定義して測定した。

(3) 水溶液中とコンクリート中における鉄筋の腐食の相違と電気化学的方法の問題点

文献(3)中に於いて、飽和カルシウム溶液中等をコンクリート中と考え種々の結論を導いているが、以下に述べる欠点があり、モルタル及びコンクリート中の鉄筋を測定する場合とは異なる。

a) 水溶液中での問題点(腐食生成物)

水道水等の水溶液中の腐食生成物は多様である。文献(20)においては、「水溶液中では、腐食がやや停滞ぎみの場合は、腐食面の色調が黒あるいは茶色の単色に近いので

あるが、腐食が活発に進行している場合は、色の混在（黄、黒、赤茶、茶の混在）が認められた。」とされる。また、著者の観察でも、当初、黒の単色の錆でも、水溶液浸漬後1週間では色の混在が認められた。

コンクリート中（ひびわれのない場合）のものは、後述するように、ほとんどが黒（まれに茶）の単色であり、水溶液中とコンクリート中では、腐食生成物に若干の相違がある可能性もある。このため、水溶液中の鉄筋の電気化学的性質より、コンクリート中の鉄筋の電気化学的性質を直接知ることは難しい。

b) コンクリート中での問題点（均質性について）

電気化学的な方法は元来均質な水溶液中で適用される方法である。コンクリート中での場合、コンクリートの電気抵抗が大なることの影響は抵抗の補正を行ったり、電流密度の小さな場合は実用上無視できるなど解決可能となったが、コンクリートが不均質性であることの影響は、未知であり、検討が必要である。不均質であれば、大きなマクロセル電流が存在したり、測定する部分によってアノード分極曲線が異なったりする可能性がある。

しかしながら、幸いなことに、後述するひびわれを有しないモデル供試体（図3. 1 1 参照）を用いた試験において、2. 5 cm単位の要素鉄筋の分極曲線はそれほどバラつかず、又、それらの分極曲線と長さ30 cmの鉄筋の分極曲線もほとんど同一であった。この長さの範囲の鉄筋であれば、巨視的に均一と考えて電気化学的測定方法を用いてよいものと思われる。

しかしながら、後述するように、ひびわれが存在すると、電気化学的測定方法の有効性は非常に疑問となる。

(4) 本研究での分極曲線測定方法

分極曲線の測定方法の概要を、図3. 1 2に示す。照合電極としては、飽和甘こう電極を用い、対極としては、ステンレス鋼板を用いた。

測定は、電位を自然電極電位から+1. 0 Vまで掃引速度40 mV/min（4章、7章）あるいは60 mV/min（5章）で変化させ、その間の電位と電流の関係をX-Yレコーダーで記録した。なお、掃引速度が測定機器の都合上やむなく異なったが、その影響は、後述する実験より分極曲線の定性的な判断には少ないと考えた。

3. 3 塩素イオン含有量の測定

コンクリート中の塩素イオン量の測定は、困難な問題を含んでいる。問題点は大きく分けて3つある。即ち、試料の採取方法、塩素イオンの抽出方法、及び、定量方法の各々に関するものである。これらの問題点について述べ、さらに、本研究で用いた方法を示す。

a) 試料の採取方法

コンクリート中の塩素イオンには、水和物中にほぼ固定されたものあるいは液相中の可溶性のもの等があるが鉄筋の腐食の観点からは、鉄筋をとりまく液相中の塩素イオン濃度を知ることが望まれるが、現状では、直接に鉄筋周辺の液相中の試料を得ることは無理である。そのため、通常は、塩素イオンの状態は区別せずに塩素イオン量を測定し、それを代表値として取り扱っている。

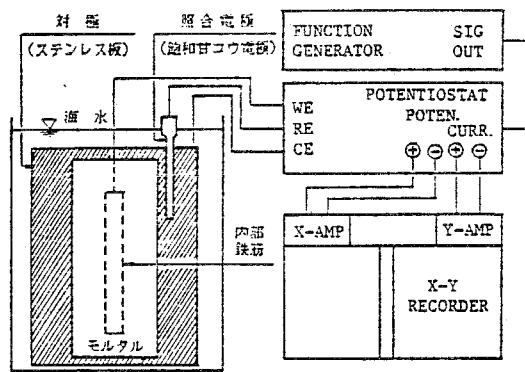


図 3.12 測定装置の概略

著者らが行なっている採取方法は、目的の箇所を中心に、半径およそ1 cm以内のコンクリートを小型たがね等を用いてハンマーで軽くたたきながら細かくして、粗骨材を取り除き（モルタル供試体の場合は省略）、モルタル分を取り出し、これをすりつぶすという方法である。

この方法の問題点は、粗骨材と細骨材との分離が困難なことである。そのため、目的とした部分のコンクリートをすべて粉状としてしまうことも考えたが、労力がかかること、粗骨材の分布によってモルタルと粗骨材の比率が不均一になること等の問題が依然として残るため、より簡便な上記の方法を採用した。

b) 塩素イオンの抽出方法

塩素イオンの抽出方法には大きく分けて2通りのものがある。1つは、試料中に含まれるすべての塩素イオン（全塩素イオンと称する）を抽出しようとするものであり、1つは、可溶性の塩素イオンを抽出しようとするものである。

全塩素イオンの抽出については、①試料を溶剤と共に白金るつぼで溶解した後に抽出するもの、②試料を硝酸溶液で溶解して抽出するもの、および、③試料を数分間煮沸して抽出するもの、の3通りがある。最も確実なのは、①であると思われるが、②、③共に全塩素イオンであるとしている(21)。

可溶性塩素イオンの抽出についても種々のものが考えられる。例えば、「試料1に対して5の割合の水を50℃に温めて加え、30分間攪はんした時に抽出される塩素イオン(21)」という考え方もある。著者が用いている方法は、「20℃で試料1gに100ccの水を加え、24時間後に抽出する塩素イオン」という考えであって、一応コンクリート中の鉄筋の腐食が常温で起こることを想定している。

以上でも分かるように、塩素イオン量は抽出条件を示さないと、意味がないと思われる。

c) 定量方法

定量方法には、大きく分けて、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法、クロム酸銀-吸光光度法、硝酸銀滴定法、および、直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いる方法の4種類がある。前3者については、歴史もあり確立された方法ではあるが、やや労力を必要とする。最後に記した方法は、簡便ではあるが、使用実績に乏しい。本研究ではこれらの方法を併用した。

これらの方法は、精度には差があるが、測定される数値自体には、あまり影響をおよぼさないとと思われる。表3.1に同一試料を用いて、硝酸銀滴定法以外の方法について比較したものを示す（後述する本研究でのデータをまとめたもの）。誤差の標準偏差が0.06-0.07であり、小数第1位までならば、同一視してよいと判断された。

以上、塩素イオン量測定上の問題点を述べた。

また、本研究での測定方法を取りまとめると次のようである。

試料は、モルタル分を取り出し、これをすり潰したものをを用いた。

抽出は、全塩素イオンについては、白金るつぼで溶解して抽出したものをを用い、可溶性塩素イオンは、20℃で24時間蒸留水中にて抽出したものとした。

定量方法は、全塩素イオンについては、クロム酸銀-吸光光度法を用い、可溶性塩素イオンについては、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法、クロム酸銀-吸光光度法、および、直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いる方法の3種を併用した。

表 3.1 3種の定量方法の相違に関する検討

(1) C. 塩素イオン選択性電極を用いた電位差適定法
 A. 直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いた方法

W/C (%)	コンクリートの種類		養生条件	A %	C %	A-C
	練り混ぜ	水				
45	水道水	海水	海中	0.28	0.21	0.07
55	海水		気中	0.10	0.13	-0.03
55	水道水	海水	海中	0.32	0.39	-0.07
55	海水	海水	海中	0.40	0.51	-0.11
55	海水	水道水	水中	0.05	0.09	-0.04
65	海水	海水	海中	0.39	0.46	0.07
65	水道水	海水	海中	0.26	0.37	-0.11
平均値				0.26	0.31	-0.05
				S. D.	0.06	
				Z	-0.84	

コンクリート材令1年
 抽出条件: 20°C 1日蒸留水中

(2) B. クロム酸銀一吸光光度法
 A. 直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いた方法

W/C (%)	コンクリートの種類		材令 (日)	A %	B %	A-B
	練り混ぜ	水				
40	水道水	海水	180	0.28	0.35	-0.07
	海水		180	0.21	0.30	-0.09
45	水道水	海水	180	0.43	0.44	-0.01
	海水		91	0.10	0.15	-0.05
	海水		180	0.57	0.49	-0.08
50	水道水	海水	91	0.02	0.04	-0.02
	水道水	海水	180	0.24	0.25	-0.01
	海水		91	0.10	0.15	-0.05
	海水		180	0.42	0.34	0.08
55	水道水	海水	91	0.06	0.11	-0.05
	水道水	海水	180	0.64	0.53	0.11
	海水		91	0.08	0.17	-0.09
	海水		180	0.74	0.64	0.10
60	水道水	海水	180	0.64	0.53	0.11
	海水		91	0.07	0.15	-0.08
	海水		180	0.76	0.66	0.10
65	海水		91	0.10	0.13	-0.03
	海水		180	1.55	0.55	0
平均値				0.33	0.33	0.0017
				S. D.	0.074	
				Z	0.023	

抽出条件: 20°C 1日蒸留水中
 養生条件: 28日標準養生後 海水中

第4章

内在および侵入塩素イオンの腐食におよぼす影響

本章では、内在および侵入塩素イオンが、モルタル中の鉄筋の不動態のグレイドおよび腐食の程度におよぼす影響を検討し、加えて、内在および侵入塩素イオンのコンクリートの内部構造におよぼす影響を検討した。

4.1 不動態のグレイドの経時変化におよぼす影響

(1) 概要

本節では、海水養生あるいは標準養生したモルタル供試体を用いた室内試験によって、内在および侵入塩素イオンのモルタル中铁筋の不動態のグレイドの経時変化におよぼす影響を検討し、併せて、腐食の程度とグレイドとの関係を検討した。検討方法としては、モルタル中铁筋の不動態のグレイドの測定、塩素イオン含有量および鉄筋の腐食度なる尺度を用いた（本章のみで用いるもので後述する）。さらに、鉄筋の腐食におよぼす w/c の影響、および、初期養生の影響についても検討した。不動態のグレイドを用いたのは、6章で述べるように、不動態のグレイドが鉄筋腐食のし易さを最もよく表わす電気化学的方法であると判断されたからである。

(2) 供試体の製作および養生（暴露）条件

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（三菱鉱業（社）製）を用いた。

細骨材は、山砂（千葉産）を用いた。

表4.1および表4.2にセメント試験成績表および細骨材の物理試験結果を示す。

練りませ水としては、水道水（横須賀市）のほかに自然海水（横須賀市久里浜湾）を用いたが、表4.3にその化学成分を示す。また、練り混ぜ水として、海水を希釈したもの、海水に塩素イオンを増量したものをを用いたが、海水の希釈には、蒸留水を用い、塩素イオンの増量には、試薬一級の塩化ナトリウムを用いた。

鉄筋は、JIS R3112に定めるSR24φ9mmの普通丸鋼を10%クエン酸アンモニウム溶液に48時間浸漬し、その後、水およびアルコールであらい、鉄筋表面の錆び等を除去し、端部に長さ1mのリード線をハンダづけし、その部分をエポキシ樹脂にてコーティングしたものをを用いた。

b) モルタルの種類および配合

モルタルは、 s/c を2とし、 w/c は、40、45、50、55、60、65%の6種類を用いた。また、練りませ水としては、水道水、海水、海水中の塩素イオン濃度を1/2に希釈したもの、1/4に希釈したもの、2倍に増量したもの、および、4倍に増量したものの、6種類を用いた。

表4.4に、モルタルの示方配合と練りませ時に混入される塩素イオン量を示す。なお、表中、記号Wは水道水練りを、記号1Sは海水練りを、記号1/4S、1/2S、2S、4Sは、それぞれ海水の1/4、1/2、2、4倍の塩素イオン濃度の練りませ

表 4.1 セメントの試験成績表

比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結				安定性	フロー値	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)			圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
		水 量 (%)	始 時	発 分	終 時			結 分	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.17	3180	27.6	2-26	3-29	良	252	22	49	71	135	233	416		

表 4.2 細骨材の物理試験結果

比 重	吸水量	単 位 容 積 量 (kgf/m ³)	空 隙 率 (%)	洗 試 験 (%)	有 機 不 純 物	ふるい (mm) を通過する百分率						粗 粒 率
						5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.63	1.33	1624	38.7	2.21	良	100	86	51	29	14	7	3.13

表 4.3 海水の化学成分

比 重 (20°C)	pH (20°C)	濁 度	化 学 成 分 (mg/l)						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃
1.022	7.55	1 以下	8925	343	362	1166	17411	2439	103

表 4.4 モルタルの配合

記号	W/C (%)	C (kgf/m ³)	W (kgf/m ³)	S (kgf/m ³)	塩分量 (%)
40-W	40	674.9	270.0	1439.8	0
40-1S	40	674.9	270.0	1439.8	0.20
40-2S	40	674.9	270.0	1439.8	0.41
40-4S	40	674.9	270.0	1439.8	0.82
45-W	45	652.9	293.8	1305.7	0
45-1/4S	45	652.9	293.8	1305.7	0.06
45-1/2S	45	652.9	293.8	1305.7	0.11
45-1S	45	652.9	293.8	1305.7	0.23
45-2S	45	652.9	293.8	1305.7	0.45
50-W	50	632.2	316.1	1264.5	0
50-1S	50	632.2	316.1	1264.5	0.07
55-W	55	612.9	337.1	1225.7	0
55-1/4S	55	612.9	337.1	1225.7	4.07
55-1/2S	55	612.9	337.1	1225.7	0.14
55-1S	55	612.9	337.1	1225.7	0.27
55-2S	55	612.9	337.1	1225.7	0.54
55-4S	55	612.9	337.1	1225.7	1.08
60-W	60	594.6	356.7	1189.3	0
60-1S	60	594.6	356.7	1189.3	0.29
65-1/4S	65	582.2	378.4	1164.3	0.08
65-1/2S	65	582.2	378.4	1164.3	0.16
65-1S	65	582.2	378.4	1164.3	0.31
65-2S	65	582.2	378.4	1164.3	0.62

表 4.5 配合および養生別供試体数

配合	養生条件				計
	養生条件				
	St	1K	7K	28K	
40-W	5	5	4	3	17
40-1S	5	5	4	3	17
40-2S	5	0	0	3	8
40-4S	5	0	0	3	8
45-W	5	5	4	3	17
45-1/4S	5	0	0	3	8
45-1/2S	5	0	0	3	8
45-1S	5	5	4	3	17
45-2S	5	0	0	3	8
50-W	5	5	4	3	17
50-1S	5	5	4	3	17
55-W	5	5	4	3	17
55-1/4S	5	5	4	3	17
55-1/2S	5	5	4	3	17
55-1S	5	5	4	3	17
55-2S	5	5	4	3	17
55-4S	5	5	4	3	71
60-W	5	5	4	3	17
60-1S	5	5	4	3	17
65-1/4S	5	0	0	3	8
65-1/2S	5	0	0	3	8
65-1S	5	5	4	3	17
65-2S	5	0	0	3	8

水を用いたことを示す。

c) 供試体の製作

供試体は、 $4 \times 4 \times 16$ cmの角柱モルタル供試体である。モルタルの練りまぜには、モルタルミキサ（容量20 l）を用いた。打設は2層に分けて行ない、鉄筋が断面中央に位置するようにした。このとき、鉄筋のかぶりは約1.5 cmである。締め固めには、 $\phi 10$ mmの鋼棒を用いた。打設後は、濡れむしろで1日湿潤養生し、その後脱型して、所定の環境で養生した。供試体の製作はすべて恒温恒湿室内（ 20°C 、80% R. H.）で行なった。

d) 養生（暴露）条件

養生条件は、以下に示す4条件とした。即ち、①水道水中標準養生（記号St）、②脱型後（材令1日）直ちに海水養生（記号1K）、③脱型後水道水中標準養生を行ない、材令7日より海水養生（記号7K）、および、④脱型後水道水中標準養生を行ない、材令28日より海水養生（記号28K）、の4種類である。

これらの養生はすべて恒温室内（ 20°C ）で行ない、海水養生に用いた海水は自然海水である。また、養生水は、15日程度の間隔で交換した。なお、配合、養生別の供試体数を、表4.5に示す。

(3) 測定項目

a) 鉄筋の電気化学的測定

モルタル中铁筋の電気化学的測定として、不動態のグレードを判定した。なお、ここでは、再測定の影響を無くすため、1供試体につき、唯1回の測定しか行なわず、再測定は行なわなかった。

b) モルタル中塩素イオン量の測定

モルタル中塩素イオン量を測定した。かぶり約1.5 cmの部分のモルタルを約1 g採取してそれをすりつぶしたものを、3.3で述べた可溶性塩素イオンの抽出方法で抽出した。

定量方法としては、材令180日までのものの1部分と材令1年のものすべてを、クロム酸塩-吸光光度法により測定し、また、材令180日までのものの大部分を簡便のため直読式の塩素イオンイオン活性度測定用電極を用いて測定した。

c) 鉄筋の腐食度の測定

この実験では、目視による腐食状況のみを観察し、その結果を腐食度という尺度を用いて表わした。

即ち、①腐食がまったく認められずに光沢のあるものを腐食度0、②腐食は認められないが光沢のなくなったもの、あるいは、光沢はあるが点錆び等が1部に発生しているものを腐食度1、③点錆びが広い範囲にあるものを腐食度2、④腐食が広い範囲にあるものを腐食度3、とした。

この判定基準によって、材令1年の鉄筋の腐食度を判定した。

(4) 実験結果

a) 不動態グレイドの判定

モルタル中鉄筋のアノード分極曲線を海中あるいは水道水中において、材令7日、28日、91日、180日、および、1年において測定した。これらの測定例を図4.1に示す。

これらの図をもとに、不動態のグレイドを判定し、その結果を表4.6に示す。概略の傾向として、養生S_t(水道水中標準養生)では、材例と共に、不動態のグレイドは1になっていき、S_t以外の海水養生では、グレイドは0となっていくようである。

この表より容易に分かることは、養生S_tでは、水セメント比、練りませ水の種類、に関係なく、材例1年では、すべてのモルタル中鉄筋がグレイド1となる。これに対して、海水養生のものはすべてグレイド1となった。

さらに、表4.6を基に、海水養生において、不動態のグレイドが最初に0となる材令(測定期間)を養生別に、表4.7に示す。これより、不動態のグレイドが0となるまでの期間は、水セメント比が小さいほど、練りませ水中の塩素イオン量が少ないほど、長くなることが分かる。また、水道水中に28日まで養生し、その後海水養生したもの(28K)のものの方が、1K、7Kに比較して不動態がより長く維持されることが分かる。

b) 塩素イオン含有量

所定の材令において測定した塩素イオン含有量を、表4.8および表4.9に示す。表4.8は、塩素イオン含有量を、モルタルに対する重量%で示したものであり、表4.9は絶乾状態の砂に対する重量%で示したものである。

これらの表より容易に分かることは、養生S_tでは、当初混入された塩素イオン量に対して、溶存塩素イオン量は材令と共に減少する傾向にあること、および、海水養生では、溶存塩素イオン量は増加することである。

表4.10に、養生S_tの、練りませ時に塩素イオンを含んだ供試体において、材令1年での溶存塩素イオン量の、当初含まれる塩素イオンに対する残存率を示した。概略40%弱であり、60%強は、20℃1年という条件でなんらかの形で固定されているものと考えられる。

表4.11に、海水養生した供試体の材令1年における溶存塩素イオン量を示す。これより、材令1年では、水道水練りと海水練り供試体のかぶり1.5cmにおける溶存塩素イオン量にはほとんど差のないことが分かる。また、それらの絶対量は、当初含まれる塩素イオン量に比較して大きい。

c) 鉄筋の腐食度

表4.12に、材令1年での、養生S_tおよび28Kのモルタル中鉄筋の腐食度を測定し、各々2本の平均値を示す。

(5) 考察

a) 水セメント比の影響

水セメント比の不動態のグレイドにおよぼす影響を、表4.10より整理して図4.

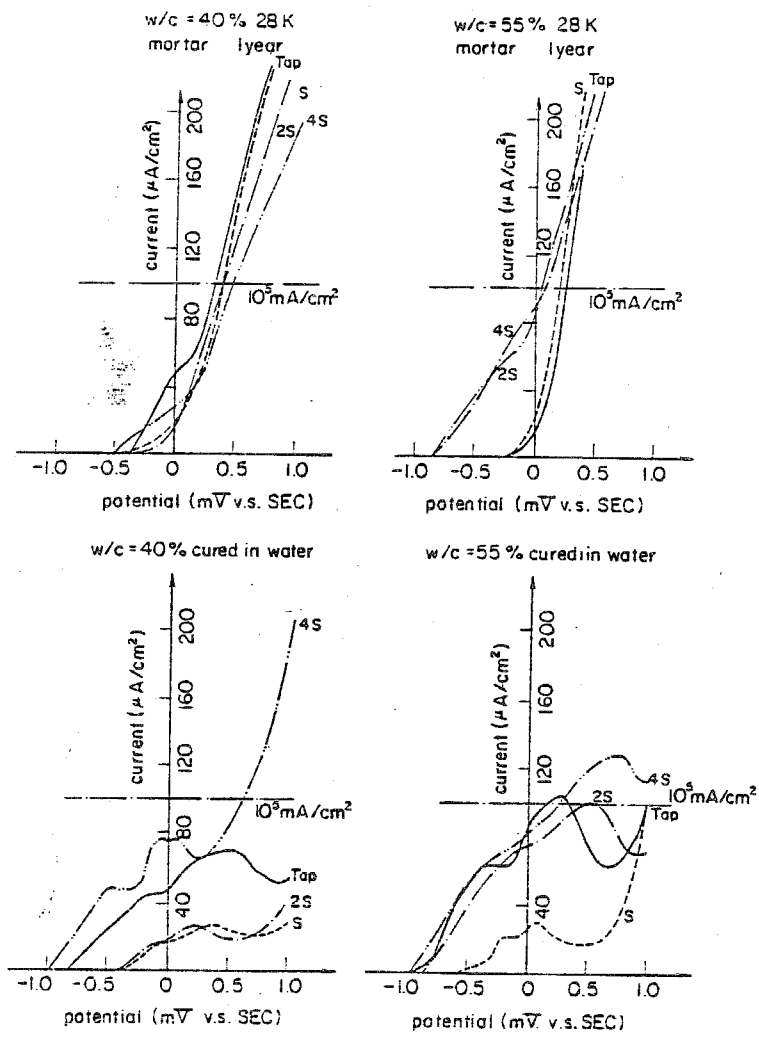


圖 4.1 分極曲線 ($w/c = 40$ and 55%)

表4.6 不動態のグレードに及ぼす各因子の影響

Curing Conditions Ages (days) Kinds of specimens	St					1 K					7 K				28K		
	7	28	91	180	1 y	7	28	91	180	1 y	28	91	180	1 y	91	180	1 y
	40 — W	1	2	1	1	1	1	1	1	0	0	1	2	1	0	2	1
40 — 1 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
40 — 2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	0
40 — 4 S	0	1	2	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
45 — W	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
45 — 1/4 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	0
45 — 1/2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	—
45 — 1 S	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
45 — 2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	0	0
55 — W	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
50 — 1 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	—
55 — W	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
55 — 1/4 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
55 — 1/2 S	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
55 — 1 S	0	1	1	1	1	0	1	1	—	0	1	0	0	0	0	0	0
55 — 2 S	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
55 — 4 S	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 — W	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
60 — 1 S	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 — 1/4 S	—	0	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—
65 — 1/2 S	0	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
65 — 1 S	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 — 2 S	0	0	0	0	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0

* 1y: 1year

表4.7 不動態のグレードと測定された期間

curing condition	mixing water	W/C					
		0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
28K	W	12	6	12	6	3	—
	1/4 S	—	6	—	6	—	3
	1/2 S	—	6	—	3	—	3
	1 S	12	6	6	3	3	3
	2 S	12	6	—	3	—	3
	4 S	3	—	—	3	—	—
7 K	W	12	6	6	3	3	—
	1/4 S	—	—	—	3	—	—
	1/2 S	—	—	—	3	—	—
	1 S	6	3	12	3	1	1
	2 S	—	—	—	6	—	—
	4 S	—	—	—	1	—	—
1 K	W	6	6	6	6	3	—
	1/4 S	—	—	—	6	—	—
	1/2 S	—	—	—	3	—	—
	1 S	6	6	6	—	3	1
	2 S	—	—	—	3	—	—
	4 S	—	—	—	6	—	—

(month)

表 4.8 塩素イオン含有量

The chloride ion contents (% V. S. mortar weight)

curing conditions ages (days)	St				1 K				7 K				28K					
	28	91	180	1year	28	91	180	1year	28	91	180	1year	91	180	1year			
40-W	—	—	—	—	(0.02)	(0.10)	(0.31)	0.56	(0.04)	(0.02)	—	0.44	—	—	(0.28)	0.35	0.62	
40-1 S <0.20>	(0.04)	—	(0.05)	0.05	(0.09)	(0.14)	(0.19)	0.62	(0.06)	(0.07)	(0.22)	0.75	—	—	(0.21)	0.30	0.62	
40-2 S <0.41>	(0.19)	(0.15)	(0.14)	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.21)	—	(0.64)	—	0.49	
40-4 S <0.82>	—	(0.39)	(0.32)	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.40)	—	(0.59)	—	0.68	
45-W	—	—	—	—	(0.05)	(0.09)	(0.31)	0.78	—	(0.07)	(0.47)	0.77	—	0.06	(0.43)	0.44	0.75	
45-1/4 S <0.06>	(0.02)	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.07)	—	(0.47)	—	0.55	
45-1/2 S <0.11>	—	(0.03)	(0.03)	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.03)	—	(0.17)	—	0.55	
45-1 S <0.23>	(0.04)	(0.05)	(0.04)	0.08	(0.11)	(0.13)	(0.55)	0.96	(0.09)	(0.10)	(0.51)	0.89	(0.10)	0.15	(0.57)	0.49	0.72	
45-2 S <0.45>	—	(0.12)	(0.04)	0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.18)	—	(0.37)	—	0.49	
50-W	—	—	—	—	(0.05)	(0.17)	(0.41)	0.89	(0.05)	(0.05)	(0.80)	0.88	(0.02)	0.04	(0.24)	0.25	0.70	
50-1 S <0.25>	(0.09)	(0.05)	—	0.06	(0.15)	(0.16)	(0.63)	0.72	(0.09)	—	(0.27)	0.70	(0.10)	0.15	(0.42)	0.34	0.49	
55-W	—	—	—	—	(0.10)	(0.14)	(0.56)	0.78	—	(0.72)	0.84	(0.06)	0.11	(0.64)	0.53	0.64	0.64	
55-1/4 S <0.07>	(0.03)	(0.02)	—	0.03	(0.13)	(0.15)	(0.70)	0.93	(0.06)	(0.08)	(0.81)	0.92	(0.07)	—	(0.49)	—	0.70	
55-1/2 S <0.14>	(0.05)	(0.02)	(0.02)	0.06	(0.14)	(0.21)	(0.48)	1.07	(0.10)	—	(0.62)	0.94	—	—	(0.62)	—	0.94	
55-1 S <0.27>	(0.05)	—	(0.04)	0.12	(0.13)	(0.26)	(0.55)	0.86	(0.12)	(0.19)	(0.78)	0.86	(0.08)	0.17	(0.74)	0.64	0.78	
55-2 S <0.54>	(0.14)	(0.13)	(0.13)	0.21	(0.26)	(0.40)	(0.62)	0.84	(0.20)	(0.32)	(0.57)	0.81	(0.19)	—	(0.54)	—	0.67	
55-4 S <1.08>	(0.36)	—	(0.26)	0.33	(0.57)	(0.65)	(0.65)	0.78	(0.37)	(0.51)	(0.67)	0.77	(0.53)	—	(0.65)	—	0.66	
60-W	—	—	—	—	(0.13)	—	(0.23)	0.92	(0.09)	(0.12)	(0.31)	0.92	—	—	(0.64)	0.53	0.82	
60-1 S <0.29>	(0.10)	(0.06)	(0.03)	0.07	—	(0.27)	(0.38)	0.73	—	(0.23)	(0.43)	0.80	(0.07)	0.15	(0.76)	0.66	0.72	
65-1/4 S <0.08>	(0.06)	(0.02)	(0.02)	0.02	—	(0.19)	—	—	—	(0.20)	—	—	—	—	(0.56)	—	0.67	
65-1/2 S <0.16>	(0.06)	(0.04)	(0.05)	0.04	(0.16)	—	—	—	(0.14)	—	—	—	—	—	(0.44)	—	—	
65-1 S <0.31>	(0.22)	—	—	0.12	—	(0.29)	—	1.01	—	—	—	—	0.83	(0.10)	0.13	(0.55)	0.55	0.79
65-2 S <0.62>	(0.49)	(0.20)	(0.16)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.31)	—	(0.27)	—	0.86	

< > : the chloride content when mixed
 () : using salt 9
 the others : using Cement Association's method

表 4.9 塩素イオン含有量

The chloride ion contents (% V. S. dry sand)

curing conditions ages (days)	St				1 K				7 K				28K				
	28	91	180	1year	28	91	180	1year	28	91	180	1year	91	180	1year		
40-W 0	—	—	—	—	(0.03)	(0.17)	(0.52)	0.96	(0.07)	(0.03)	—	0.76	—	—	(0.48)	0.60	1.06
40-1 S <0.34>	(0.07)	—	(0.08)	0.09	(0.07)	(0.24)	(0.32)	1.05	(0.10)	(0.12)	(0.37)	1.77	—	—	(0.36)	0.52	1.06
40-2 S <0.70>	(0.32)	(0.25)	(0.24)	0.19	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.35)	—	(1.10)	—	0.84
40-4 S <1.41>	—	(0.66)	(0.54)	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.67)	—	(1.02)	—	1.16
45-W 0	—	—	—	—	(0.09)	(0.16)	(0.54)	1.36	—	(0.12)	(0.82)	1.34	—	0.11	(0.75)	0.77	1.31
45-1/4 S <0.11>	(0.04)	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.12)	—	(0.82)	—	0.96
45-1/2 S <0.19>	—	(0.05)	(0.05)	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.05)	—	(0.30)	—	0.96
45-1 S <0.40>	(0.07)	(0.09)	(0.07)	0.14	(0.19)	(0.23)	(0.96)	1.67	(0.16)	(0.18)	(0.89)	1.55	(0.18)	0.26	(0.99)	0.85	1.25
45-2 S <0.78>	—	(0.21)	(0.21)	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.31)	—	(0.65)	—	0.85
50-W 0	—	—	—	—	(0.09)	(0.30)	(0.73)	1.53	(0.09)	(0.09)	(1.41)	1.56	(0.04)	0.07	(0.42)	0.44	1.24
50-1 S <0.43>	(0.16)	(0.09)	—	0.11	(0.27)	(0.28)	(1.12)	1.27	(0.16)	—	(0.48)	1.24	(0.18)	0.27	(0.74)	0.60	0.87
55-W 0	—	—	—	—	(0.18)	(0.25)	(1.00)	1.40	—	—	(1.29)	1.50	(0.11)	0.20	(1.15)	0.95	1.15
55-1/4 S <0.13>	(0.06)	(0.04)	—	0.06	(0.23)	(0.27)	(1.26)	1.67	(0.11)	(0.14)	(1.45)	1.65	(0.13)	—	(0.88)	—	1.26
55-1/2 S <0.25>	(0.09)	(0.04)	(0.04)	0.11	(0.25)	(0.38)	(0.86)	1.92	(0.18)	—	(1.11)	1.69	—	—	(1.11)	—	1.69
55-1 S <0.48>	(0.09)	—	(0.07)	0.22	(0.23)	(0.46)	(0.98)	1.54	(0.22)	(0.34)	(1.40)	1.54	(0.14)	0.30	(1.32)	1.14	1.40
55-2 S <0.97>	(0.25)	(0.23)	(0.23)	0.38	(0.46)	(0.72)	(1.11)	1.50	(0.36)	(0.58)	(1.62)	1.45	(0.34)	—	(0.97)	—	1.20
55-4 S <1.93>	(0.65)	—	(0.46)	0.59	(1.02)	(0.17)	(1.17)	1.40	(0.66)	(0.91)	(1.20)	1.38	(0.95)	—	(1.17)	—	1.18
60-W 0	—	—	—	—	(0.24)	—	(0.42)	1.67	(0.16)	(0.22)	(0.57)	1.67	—	—	(1.17)	0.96	1.49
60-1 S <0.53>	(0.18)	(0.11)	(0.06)	0.13	—	(0.49)	(0.69)	1.33	—	(0.42)	(0.78)	1.45	(0.13)	0.27	(1.38)	1.20	1.31
65-1/4 S <0.15>	(0.11)	(0.04)	(0.04)	0.04	—	(0.35)	—	—	—	(0.37)	—	—	—	—	(1.03)	—	1.24
65-1/2 S <0.29>	(0.11)	(0.08)	(0.09)	0.08	(0.29)	—	—	—	(0.26)	—	—	—	—	—	(0.31)	—	—
65-1 S <0.57>	(0.40)	—	—	0.22	—	(0.54)	—	1.86	—	—	—	1.53	(0.19)	0.24	(1.02)	1.02	1.45
65-2 S <1.14>	(0.90)	(0.37)	(0.29)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.57)	—	(0.50)	—	1.59

< > : the chloride content when mixed
 () : using salt 9
 the others : using Cement Association's method

表4.10 溶存塩素の材令1年における残存率
(標準養生)

Kinds of specimens	Residual (%)	Ave. and variance
40-S	25	
40-2 S	27	
40-4 S	34	
45-1/4 S	67	
45-1/2 S	55	
45-S	35	
45-2 S	36	
50-S	25	Ave.
55-1/4 S	42	36%
55-1/2 S	43	σ.
55-S	44	12%
55-2 S	39	
55-4 S	31	
60-S	24	
65-1/4 S	25	
65-1/2 S	25	
65-S	39	

表4.11 材令1年における海水養生
供試体の溶存塩素量
(% V.S. モルタル重量)

Curing Conditions Kinds of specimens	Curing Conditions				Average
	1 K	7 K	28K	Average	
40 - W	0.56	0.44	0.62	0.54	0.60
40 - 1 S	0.62	0.75	0.62	0.66	
45 - W	0.78	0.77	0.75	0.77	0.81
45 - 1 S	0.96	0.89	0.72	0.86	
50 - W	0.89	0.88	0.70	0.82	0.73
50 - 1 S	0.72	0.70	0.49	0.64	
55 - W	0.78	0.84	0.64	0.75	0.79
55 - 1 S	0.86	0.86	0.78	0.83	
60 - W	0.92	0.92	0.82	0.89	0.82
60 - 1 S	0.73	0.80	0.72	0.75	
Average	0.78	0.79	0.68	0.75	

Ave. W : 0.75, S : 0.75

表4.12 目視による腐食度
(材令1年, 2本平均)

配 合	養生条件	
	標準養生	海水養生 (28K)
40-W	0.5	1.5
40-1 S	0.5	1.0
40-4 S	0.5	1.5
40-4 S	1.0	1.5
45-W	0.5	1.5
45-1/4 S	0.5	1.5
45-1/2 S	1.0	1.0
45-1 S	1.0	1.5
45-2 S	0.5	1.5
50-W	0.5	1.0
50-1 S	0.5	1.0
55-W	0.5	1.5
55-1/4 S	0.0	1.5
55-1/2 S	0.0	2.0
55-1 S	0.5	2.5
55-2 S	0.5	1.5
55-4 S	1.5	1.5
60-W	0.5	2.0
60-1 S	0.0	2.0
65-W	0.5	1.5
65-1/4 S	0.0	1.0
65-1/2 S	0.5	—
65-1 S	0.5	1.0
65-2 S	0.5	1.5

2に示す。水セメント比の小さな程不動態のグレイドは高い値を示す傾向にある。

練り混ぜ水との関連で言えば、海水練りであっても水セメント比の小さなものは、水道水練りであっても水セメント比の大きなものより腐食しにくいと判断される。例えば、この図からは、水セメント比60%水道水練りの不動態のグレイドの平均値は約0.47であり、水セメント比45%、50%の海水練りでは、各々約0.53および0.70であった。

また、表4.11を、概念的に図化したものを図4.3に示す。これから、海水養生においては、不動態がなくなるまでの期間を長くしようとするれば、水セメント比あるいは塩素イオン含有量を小さくするかである。さらに、塩素イオン含有量の影響を水セメント比を小さくすることによって打ち消すことも可能であることを示す。

塩素イオン含有量におよぼす影響は、水セメント比40%のものがやや少ないことが認められた。

b) 練り混ぜ水中の塩素イオン量の影響

不動態のグレイドにおよぼす練り混ぜ水中の塩素イオン量の影響の経時変化を表4.13に示す。この塩素イオン量の影響は、標準養生で遅くとも180日で、海水養生のもので1年でなくなることが認められた。

また、1年間の不動態のグレイドの平均値におよぼす練り混ぜ水中に含まれる塩素イオン量の影響を図4.4、図4.5、図4.6に示す。図4.4は、標準養生(S t)におけるものを水セメント日毎に示したものである。塩素イオン量が多いほど不動態のグレイドは小さくなる傾向がある。特に、水セメント比65%のものでその傾向が顕著である。図4.5は海水養生(1 K, 7 K, 28 Kの平均)のものを水セメント日毎に示したものである。図4.6は、不動態のグレイドを養生条件毎に示したものである。塩素イオン量の多いほどグレイドは小さい傾向にあるが、塩素イオンの影響よりも、養生条件の影響の方が顕著である。

c) 養生条件の影響

図4.7に、不動態のグレイドの経時変化におよぼす養生条件の影響を示す。標準養生では、材令と共にやや増加あるいは変化しないと判断される。海水養生では、材令と共に急激に小さくなり、材令1年では、すべてのグレイドが0となることが認められる。

また、この図より、材令180日までは、水道水練りのものが海水練りのものより高いグレイドを示すことが認められる。

以上より、養生条件に拘らず、材令1年で、練り混ぜ水中の塩素イオンの影響は、不動態のグレイドに関する限りなくなる。

d) 不動態の有無と溶存塩素イオン量との関係

表4.10と表4.12を用いて、表4.14に不動態の有無と塩素イオン量との関係を示す。この表では、グレイド0を不動態がないとみなした。

当然ではあるが、溶存塩素イオン量の多い程不動態はなく、少ない程不動態はある傾向にある。さらに、本表より、80%以上の率で不動態があると判断される塩素イオン量は、0.15%以下である。また、0.2%以上では、不動態のある率は急激に低下し50%以下となる。

さらに、ここで不動態がないと判断される塩素イオン量で最低の値は0.05%であ

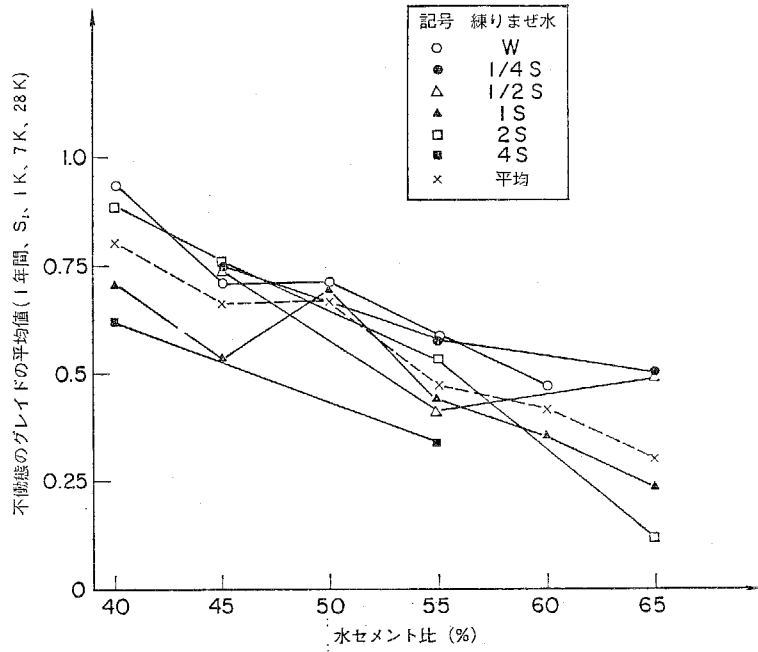


図4.2 不動態のグレードに及ぼす水セメント比の影響

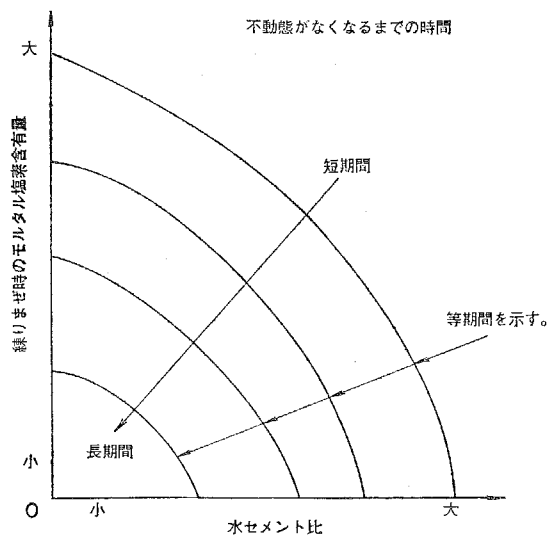


図4.3 不動態がなくなるまでの期間に及ぼす水セメント比と練り混ぜ時塩素量の影響

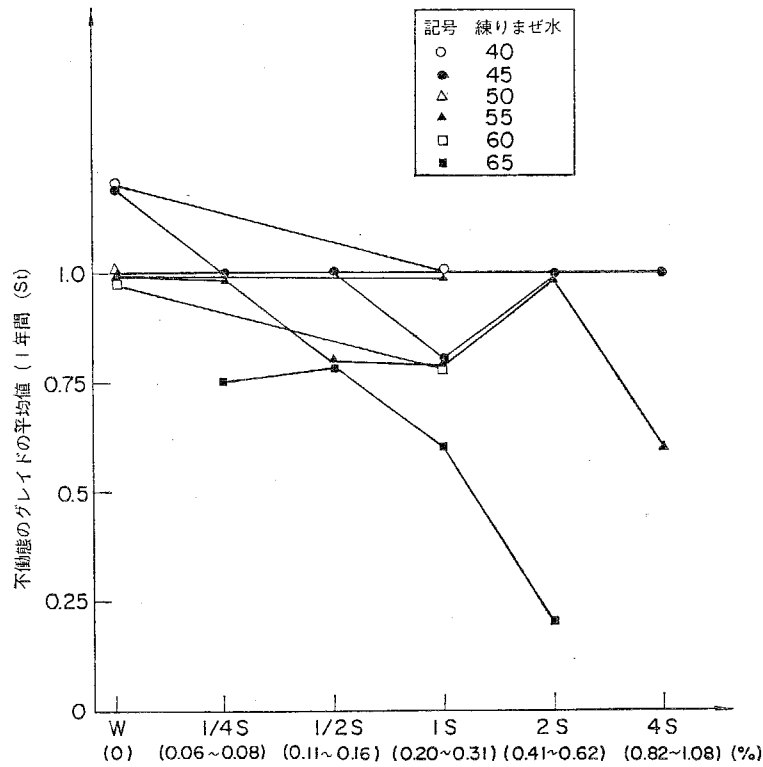


図 4.4 不動態のグライドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響 (St 標準養生)

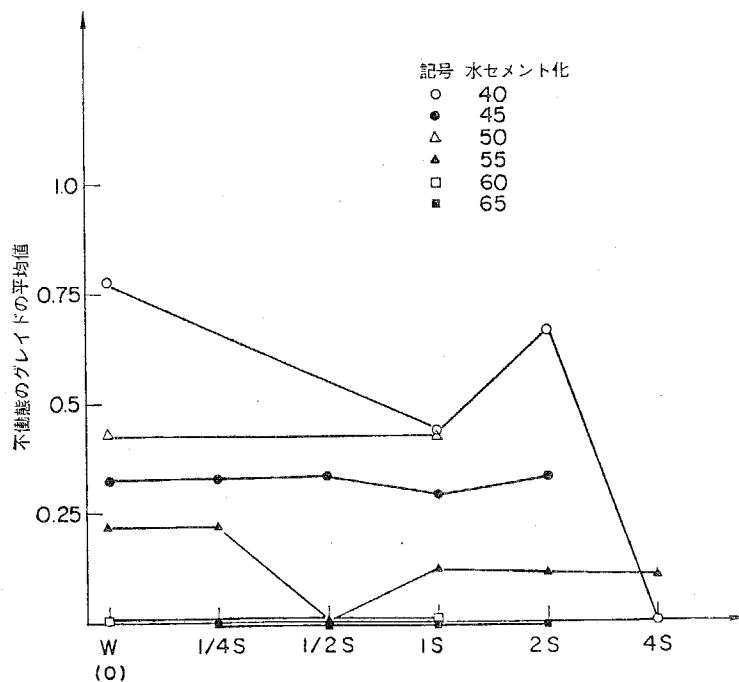


図 4.5 不動態のグライドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響
(不動態のグライドは 1K, 7K, 28K, かつ 91, 180, 365 日の平均)

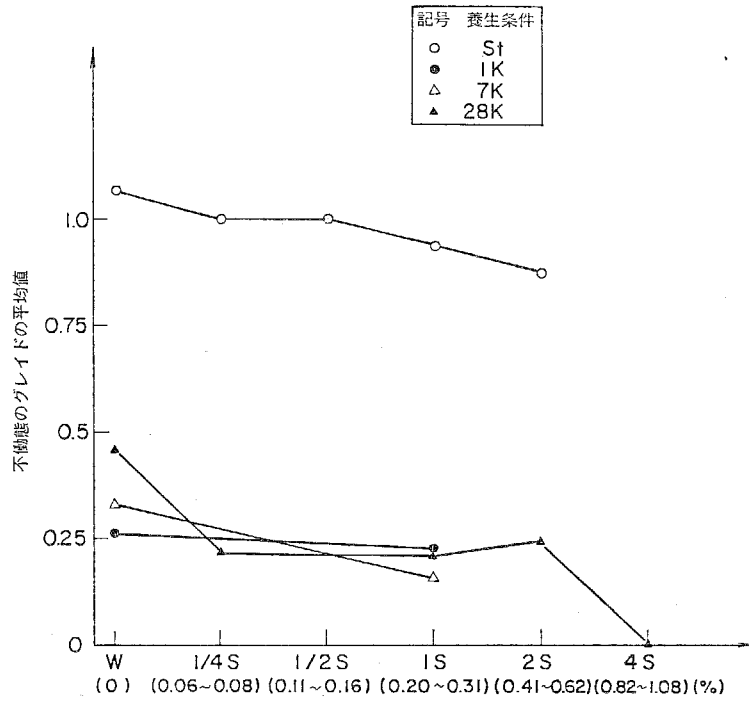


図4.6 不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響
(91日, 180日, 1年の平均値)

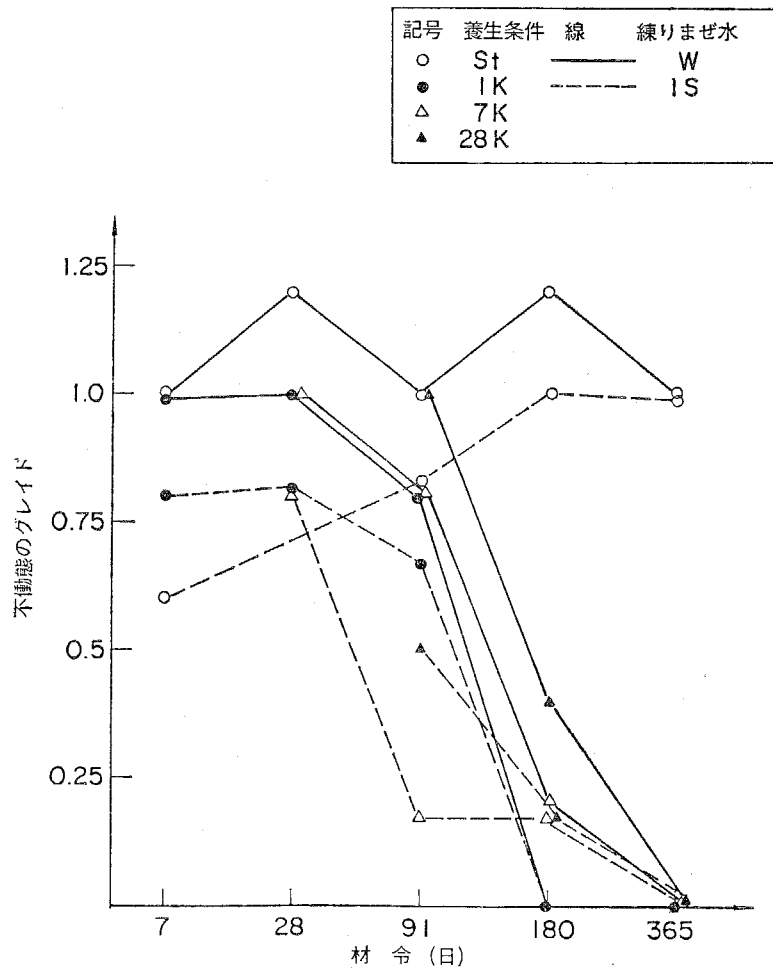


図4.7 不動態のグレイドの経年変化に及ぼす養生条件の影響
41

表 4.14 不動態の有無と塩素量

		塩素量 (V. S. モルタル%) の区間									合計
		≤0.075	0.075< ≤0.125 (0.10)	0.125< ≤0.175 (0.15)	0.175< ≤0.225 (0.20)	0.225< ≤0.275 (0.25)	0.275< ≤0.325 (0.30)	0.325< ≤0.375 (0.35)	0.375< ≤0.425 (0.40)	0.425<	
不動態があると判断される場合	塩分計による	44 (51.2%)	14 (16.3%)	15 (17.4%)	5 (5.8%)	3 (3.5%)	3 (3.5%)	0 (0%)	1 (1.2%)	1 (1.2%)	86
	セメ協による	11 (44.0%)	5 (20.0%)	2 (8.0%)	0 (0%)	1 (4.0%)	2 (8.0%)	2 (8.0%)	0 (0%)	2 (8.0%)	25
	合計 (%) A	55 (49.5%)	19 (17.1%)	17 (15.3%)	5 (4.5%)	4 (3.6%)	5 (4.5%)	2 (1.8%)	1 (0.9%)	3 (2.7%)	111
不動態がないと判断される場合	塩分計による	3 (4.8%)	4 (6.3%)	2 (3.2%)	6 (9.5%)	5 (7.9%)	5 (7.9%)	2 (3.2%)	4 (6.3%)	32 (50.8%)	63
	セメ協による	0 —	0 —	2 (3.6%)	0 —	0 —	0 —	1 (1.8%)	0 —	53 (94.6%)	56
	合計 (%) B	3 (2.5%)	4 (3.4%)	4 (3.4%)	6 (5.0%)	5 (4.2%)	5 (4.2%)	3 (2.5%)	4 (3.4%)	85 (71.4%)	119
不動態がある確率	A/A+B	0.95	0.83	0.82	0.47	0.46	0.52	0.42	0.21	0.04	

(注：不動態がないと判断されるもので最低の塩素量 0.05%)

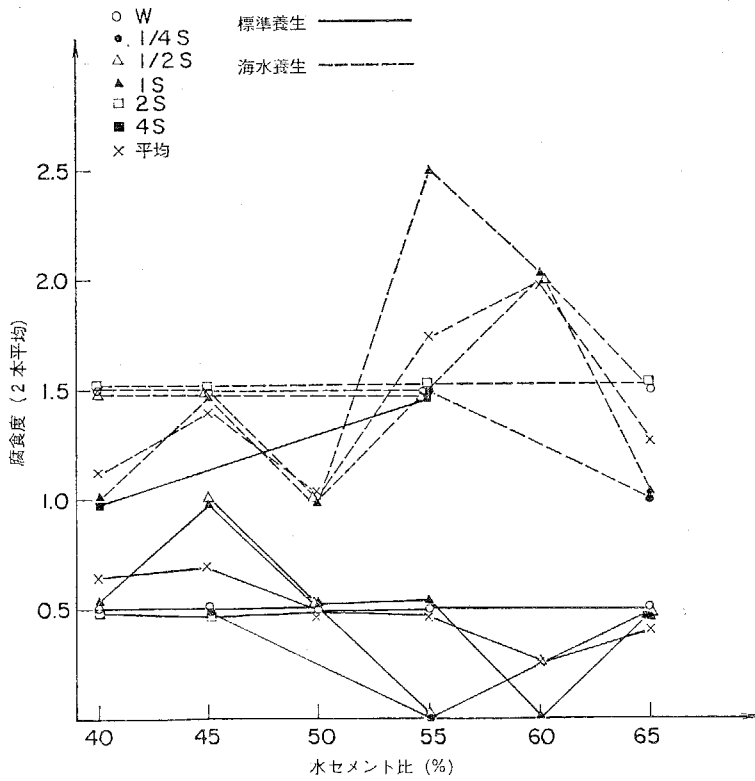


図 4.8 鉄筋の腐食度に及ぼす水セメント比, 練り混ぜ水および養生条件の影響

った。また、通常のコンクリート中のモルタル量を1500kgと仮定すると、0.15%、0.05%の塩素イオン量は各々コンクリート1m³中2.25kgおよび0.75kgに相当する。

e) 腐食度におよぼす影響

図4.8に鉄筋の腐食度におよぼす水セメント比、練り混ぜ水および養生条件の影響を示す。

図より、最も大きな影響をおよぼすのは養生条件と認められる。練り混ぜ水については、4Sが標準養生において大きな影響を示すが、その他の影響は小さい。水セメント比の影響も明かでない。

f) 結論

かぶり1.5cmのモルタル供試体を標準養生あるいは海水養生して、不動態のグレードの判定、溶存塩素イオン量の測定および腐食度の判定を行なった。本実験の範囲で次のことが言える。

イ) 水セメント比の小さな程、不動態のグレードは高い。また、練り混ぜ水に含まれる内在塩素イオンの影響を、水セメント比を小さくすることによって打ち消すことも可能である。しかし、材令1年では養生条件の影響が卓越し、水セメント比が不動態に与える影響はなくなる。

ロ) 練り混ぜ水に含まれる塩素イオン量が多いほど、不動態のグレードは小さい傾向にある。しかし、材令1年では、養生条件の影響が卓越し、練り混ぜ水中の塩素イオン量の影響はなくなる。

ハ) 養生条件の不動態のグレードにおよぼす影響は、材令と共に卓越してくる。材令1年では、標準養生したもののグレードはすべて1となり、海水養生したもののグレードはすべて0となった。不動態の有無を決定するのは養生条件と判断される。

ニ) モルタル中の溶存塩素イオン量が少ないほど、不動態の存在する率は高い。0.15%以下では、不動態は80%以上の率で存在する。

ホ) モルタルでは、材令1年において練り混ぜ時に含まれる塩素イオン量の40%弱しか溶存塩素イオンとして測定できなかった。

ヘ) モルタル中铁筋の不動態のグレードと鉄筋の腐食度にはかなりの相関関係が認められた。

ト) かぶりが小さい場合、練り混ぜ時に含まれる塩素イオン量にかかわらず、比較的短期間に養生条件によって不動態の有無が決定された。それゆえ、練り混ぜ水中の塩素イオン量のみを規制しても効果は少ない。

4.2 腐食度の経時変化におよぼす影響

(1) 概要

本節では、海中養生あるいは陸上養生(気中養生)したモルタル供試体を用いた暴露養生によって、内在および侵入塩素イオンのモルタル中の鉄筋の腐食の経時変化におよぼす影響を検討した。腐食の尺度としては、前節で述べた腐食度を用いた。

(2) 供試体の製作および暴露条件

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（宇部（社）製）を用いた。表4.15にセメント試験成績表を示す。

細骨材は、4.1と同じく山砂（千葉産）を用いた。練り混ぜ水としては4.1と同一の水道水および海水を用い、鉄筋も4.1と同一のものを用いた。

b) モルタルの種類および配合

モルタルは、 s/c を2とし、 w/c は、45、55、65%の3種類を用いた。また、練り混ぜ水としては、水道水、海水を用いた。

配合は表4.4の45-W、55-W、65-W、45-1S、55-1S、および65-1Sを用いた。

c) 供試体の製作

4.1と全く同一である。なお、供試体は、材令1日で脱型後すぐに暴露した。

d) 暴露条件

暴露条件は、陸上養生（気中養生）と海中養生とし、陸上部は神奈川県横須賀市の久里浜湾に面した港湾技術研究所の護岸より10m程度離れた海岸部とし、海中部は同じく港湾技術研究所の循環水槽内とした（7章に詳述する）。

(3) 測定項目

測定項目は、モルタル中の鉄筋の腐食度とし、材令28日、91日、180日および1年でモルタル供試体を割裂し、鉄筋の観察を行なった。

(4) 実験結果

材令28日、91日、180日および1年における腐食度の測定結果を表4.16に示す。さらに、練り混ぜ水別の平均値の経時変化を図4.9に示す。

(5) 考察

図4.9より、若材令において、練り混ぜ水の影響は顕著であるが、材令1年においてはその差が腐食度で表わす限りなくなることが認められた。すなわち、内在塩素イオンの影響によって鉄筋は若材令で錆やすくなるが、その後侵入塩素イオンによって材令1年で相対的な影響はなくなると考えられる。これは、4.1の不動態のグレードによる結果と同一の事を腐食の程度によっても確認したこととなる。

4.3 コンクリートの内部構造におよぼす影響

(1) 概要

a) 目的

コンクリートの内部構造におよぼす練り混ぜ水としての海水および外部から侵入してくる海水の影響を検討するのを目的とし、材令1年のコンクリート中のモルタルについ

表 4.15 セメント試験成績積表

セメントの物理的試験

セメントの種類	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝結		安定性	フロー値 (mm)	強 ぎ			
			始 発 (h-m)	結 終 (h-m)			圧縮強さ(kgf/cm ²)			
普通ポルトランドセメント	3.16	3080	2-49	3-54	良	245	3 日	7 日	28日	411

セメントの化学成分

セメントの種類	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
普通ポルトランドセメント	0.7	0.1	21.7	5.6	3.3	64.7	1.3	2.1

表4.16

鉄筋腐食度試験結果

	供試体名	陸上部				海中部			
		28	91	180	1年	28	91	180	1年
水道水練り	45-W	0	1	1	1	0	1	2	2
	55-W	0	1	1	1	0	1	2	2
	65-W	1	1	1	1	1	2	2	2
	平均	0.33	1.0	1.0	1.0	0.33	1.33	2.0	2.0
海水練り	45-1S	1	1	1	1	1	2	2	2
	55-1S	0	1	1	1	2	2	2	2
	65-1S	1	1	1	1	2	2	2	2
	平均	0.67	1.0	1.0	1.0	1.67	2.0	2.0	2.0

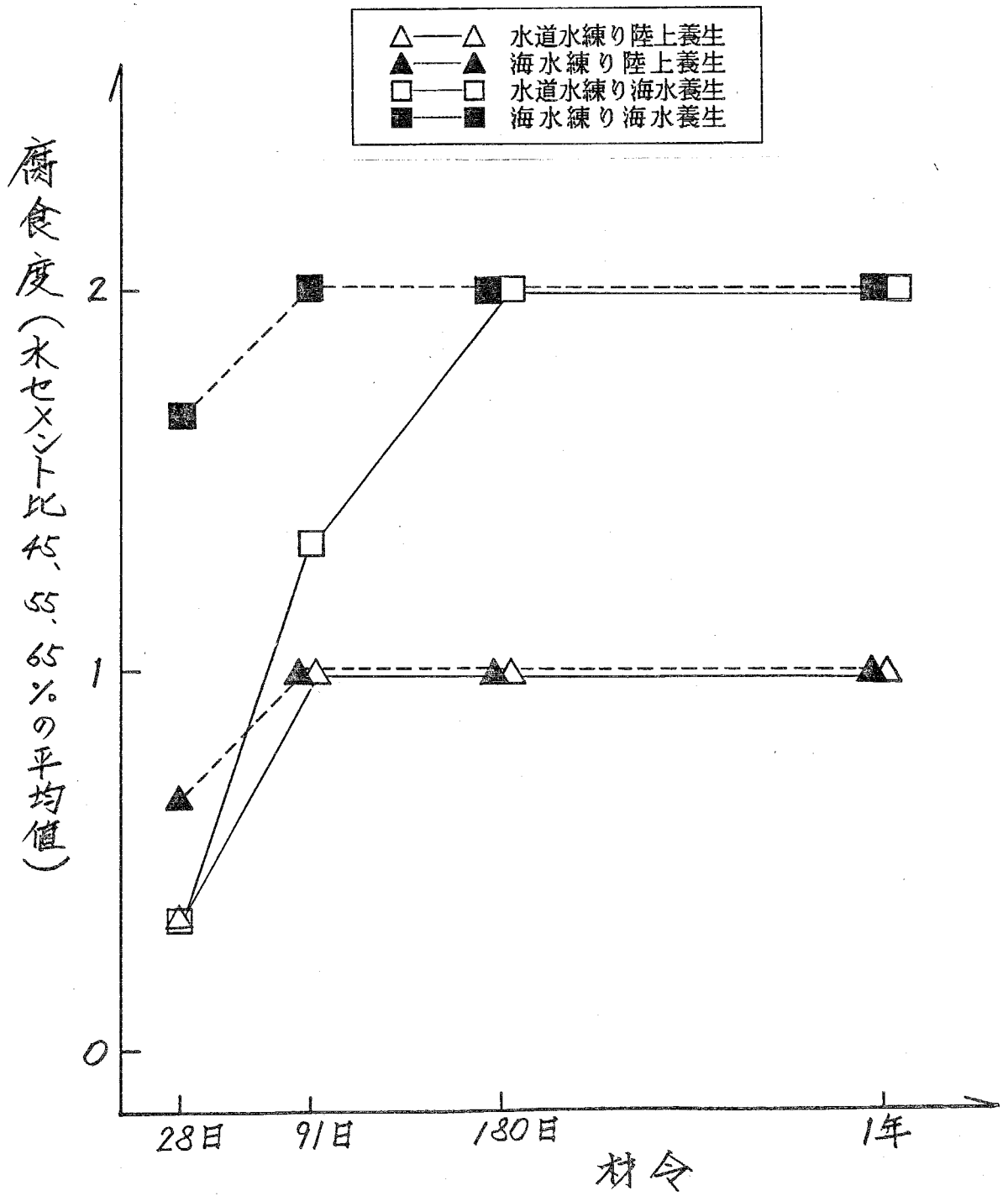


図4.9 モルタル中铁筋の腐食度経時変化

て、空隙率の測定、X線回析およびSEM観察を行なった。

b) 供試体の製作および暴露条件

イ) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いた。表4. 17および表4. 18に使用セメントの化学成分および物理的性質を示す。

粗骨材には、両神(千葉県)産砕石(最大寸法15mm)を、細骨材には、木更津産山砂を用いた。表4. 19に骨材の物理的性質を示す。

練りませ水としては、海水および水道水(横須賀市)を用いた。

混和剤として、ヴィンソルを用いた。

ロ) 配合

コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートとしての性質を表4. 20に示す。

ハ) 供試体の製作

練りませは、1001強制練りミキサを用いて行なった。練りませ時間は1分とし、締め固めは、突き棒によった。

供試体は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体とし、3種類(普通ポルトランドセメント水道水練り、普通ポルトランドセメント海水練り、B種高炉セメント海水練り)を各々2本合計6本試験した。

ニ) 養生(暴露)条件

供試体は、恒温室(20℃)に材令2日まで静置し脱型した。その後、材令28日まで水中標準養生を行なった。1種類2本の供試体のうち、各々1本ずつを材令1年まで水道水中標準養生および循環水槽中にて海水養生した。

ホ) 試料の採取

材令1年において、試料を円柱供試体の上下部5cmを除いたものの表面から1.5-2.5cmのモルタル部を試料とした。

c) 実験方法

イ) 空隙率

コンクリートの密実性を把握するために空隙率の測定を行なった。

コンクリートから採取した2.5-5gのモルタル塊を40時間真空乾燥したものを試とした。

測定は、ポロシメーター(Carlo Erba社製)を用いて行ない、注入圧力を1-2000 kgf/cm²として、細孔半径38-75000オングストローム間の細孔量および細孔量割合を測定した。

なお、注入圧力と水銀が圧入される細孔半径との関係は次式によった。

$$r = 75000 / P \quad (r: \text{細孔半径 (オングストローム)}, P: \text{加えられた絶対圧 (kgf/cm}^2))$$

ロ) X線回析

コンクリート中にいかなる化学成分があるかを、X線回析によって検討した。

コンクリートの表面より約20mmの距離にあるモルタルを試料とした。

X線回析装置の走査条件は次のようである。

対陰極: Cu, フィルター: Ni, モノクロメーター: グラファイト, 加速電圧および電流: 40 kVおよび100 mA, スリット系: 1°-0.15 mm~0.6°, 時

表 4.17 セメントの化学成分

セメントの種類	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
普通ポルトランドセメント	0.67	0.08	22.65	5.50	3.08	63.74	1.71	2.02
B種高炉セメント	1.26	0.20	25.47	9.06	2.42	54.09	3.96	2.82

表 4.18 セメントの物理的性質

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	強 さ					
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		曲げ強さ(kgf/cm ²)			圧縮強さ(kgf/cm ²)		
							3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.17	3240	27.4	2:00	3:22	良	32	48	74	128	212	431
B種高炉セメント	3.04	3820	29.5	4:05	5:54	良	30	41	75	112	183	431

表 4.19 骨材の物理的性質

骨材の種類	F. M.	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積量 (kgf/m ³)	実積率 (%)	安定性 (安損%)	洗い損失量 (%)	粘土塊 (%)	有機物 (不純物)
粗骨材	6.57	2.70	0.79	1520	56.5	7.9	1.0	0.8	—
細骨材	2.80	2.61	1.64	1770	68.9	6.2	1.0	0.4	良

表 4.20 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートとしての性質

記号	セメントの種類	W/C (%)	練り混ぜ水	s/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度
					セメント	水	細骨材	粗骨材	A E 剤			
NWH	普通ポルト	55	水道水	46	290	160	843	1026	0.0522	9.1*	4.9*	18 °C
NSH	"	55	海水	46	290	160	843	1026	0.0522	7.7*	4.7*	
BSH	B種高炉	55	"	46	290	160	840	1021	0.0870	7.5*	4.6*	

* 2バッチの平均値

定数：0.5 sec)

ハ) SEM観察

コンクリートの内部構造を明らかにするため、走査型電子顕微鏡を用いて、最大6000倍までの電子顕微鏡写真を撮影した。

(3) 実験結果

a) 空隙率

空隙率の測定結果を、表4.21に示す。各試料の38-75000オングストローム間の細孔量の順位は、NWH(普通ポルトランドセメント水道水練り標準養生) > NSH(普通ポルトランドセメント海水練り標準養生) > NWH海水養生 > NSH海水養生 > BSH(高炉B種海水練り標準養生) > BSH海水養生であった。

即ち、海水養生したコンクリートの細孔量は、標準養生したものより少ない。海水練りコンクリートの細孔量は、水道水練りのものより少ない。さらに、高炉セメントB種のもは、普通ポルトランドセメントのものより少ないことが認められた。

なお、38-78オングストロームの間では、この傾向は1部逆転している。

b) X線回析

X線回析結果を、表4.22に示す。

フリーデル氏塩は、NWH標準養生以外のものには全て存在が認められた。この塩の生成には、塩素を必要とするので、NWH標準養生のものに存在しないのは当然である。また、エトリンガイトは、海水練りおよび高炉セメントB種のものでやや多いことが認められる。

c) SEM観察

NWH海水養生、NSH標準養生およびNSH海水養生の材例1年のSEM観察を行った。

その結果、NWH海水養生とNSH標準養生には、フリーデル氏塩の結晶は観察されず、NSH海水養生のみに観察された。また、NSH標準養生の空隙にはエトリンガイトは観察されなかったが、NWH海水養生およびNSH海水養生の空隙には、エトリンガイトの針状結晶が多く観察された。

(4) 考察

a) コンクリート中には、内在塩素イオンおよび侵入塩素イオンの影響が強い程空隙率は小さな傾向にあるとおもわれた。また、B種高炉セメントの方が小さいと思われた。

b) X線回析によれば、塩素イオンの影響を受けるものは総てフリーデル氏塩を含むことが認められた。また、塩素イオン含有量の多いと思われるもの程フリーデル氏塩、エトリンガイトが多いことも認められた。また、B種高炉セメントの方が両者を多く含むことも認められた。

c) 以上の事より、フリーデル氏塩およびエトリンガイトの生成があると空隙率が少

表4.21 空隙率測定結果

細孔径 (Å)	細孔量 (mm ³ /g)					
	NWH		NSH		BSH	
	標準 養生	海水 養生	標準 養生	海水 養生	標準 養生	海水 養生
38	12.25	12.68	17.81	18.88	16.80	15.14
75	7.98	7.45	9.95	6.11	8.34	8.15
125	8.95	4.83	3.82	2.27	4.97	4.72
250	2.88	1.57	1.07	1.50	1.43	1.46
450	0.97	0.96	0.48	0.80	1.29	0.96
750	1.77	1.18	1.04	0.68	1.50	1.29
1250	2.70	1.99	2.08	1.68	2.53	2.57
2500	4.08	3.14	3.91	2.78	3.20	3.01
4500	5.25	5.82	3.68	5.11	2.85	3.01
7500	4.67	5.71	4.02	4.33	2.74	2.55
12500	3.85	4.77	3.56	4.78	2.85	2.78
25000	2.33	2.21	2.41	2.56	1.14	1.62
45000	0.70	1.28	0.34	0.89	0.57	0.23
75000						
合計	58.37	53.58	54.17	52.37	50.21	47.49

(試料は各1本)

表4.22 X線回折結果 (ピーク強度比)

配合	養生条件	検出鉱物名					
		フリーデル 氏塩 (0.0°)	エトリンガ イト (11.2°)	ポルトラン ダイト (18.3°)	方解石 (29.4°)	石英 (36.7°)	長石 (27.5°~ 28.0°)
NWH	標準 海水 養生	0	0.5	>19	7	5	8
		3.5	1	>19	4	8	15
NSH	標準 海水 養生	3	0.5	>19	4	5	9
		4.5	1	>19	7.5	3	8
BSH	標準 海水 養生	3	1.5	10	12	6	18
		3	2	11	6	4	6

なくなると判断された。

また、塩素イオンが存在すると空隙率が減少し、新たな塩素イオンの侵入を妨害するとも考えられ、海洋環境では、内在塩素イオン含有量に拘らず徐々に塩素イオン含有量が漸近してくることも考えられる。そのため、4.1で述べたように、モルタル中の塩素含有量が材令1年では差のない値となり、不動態のグレードも差が減少してくること、さらに4.2で述べたように腐食の程度の差も減少してくる事の1つの要因と考えられた。また、エトリンナイトによって強度への悪影響等がなければ、B種高炉セメントを用いた方が塩素イオンの侵入が少ないことが予想された。

第5章

ひびわれの存在が腐食におよぼす影響

本章においては、主として、NaCl溶液（海水と同一塩素イオン濃度）中養生あるいは標準養生したコンクリート供試体を用いて、ひびわれの存在および内在および侵入塩素イオンがコンクリート中鉄筋の腐食におよぼす影響を検討した。なお、本章の実験は、著者が米国留学中に実施したものである。

5.1 ひびわれのない供試体での実験

(1) 目的

ひびわれのないコンクリート円柱供試体を用い、外部環境からの侵入塩素イオンおよび使用材料（練りませ水）からの内在塩素イオンがコンクリート中鉄筋の腐食におよぼす概略の影響を標準養生および水道水練りのものを基準として比較することによって把握することが目的である。すなわち、海水練りかつ海水養生、海水練りかつ標準養生、水道水練りかつ海水養生、および、水道水練りかつ標準養生の4つの組み合わせについて実験を行ない比較を行なった。また、同時に各種の、電気化学的方法の有効性の検討も行なう。即ち、以下のものを目的とした。

まず、鉄筋の腐食と電気化学的性質に密接な相関性があるものとして、海水練りコンクリート中鉄筋の不動態の程度を初めとする電気化学的性質の経年変化が、図5.1に示すI, II, IIIのいずれのタイプに属するかを検討することである。Iに属するのであれば、海水練りコンクリートを鉄筋コンクリートに用いるのも、水道水練りコンクリートを用いるのも、大きな差はないものと判断されよう。しかし、IIIに属するのであれば、海水を練りませ水として用いると、水道水を用いた場合と比較して鉄筋の腐食が非常に進行する可能性があるかと判断されよう。

つぎに、海水養生が、鉄筋の不動態の程度を初めとする電気化学的性質および腐食（錆）にどの程度の影響をおよぼすかを検討することである。

さらに、各種の電気化学的方法の有効性についても検討する。

(2) 供試体の製作および養生（暴露）条件

a) 使用材料

セメントは、タイプIセメント（普通ポルトランドセメント）およびタイプIIIセメント（早強ポルトランドセメント）を用いた。なお、比重はいずれも3.15であった。

粗骨材は、オースチン（米国）近傍に産する *pea gravel* で、最大寸法 $3/8$ in.（約0.95cm）のものを用いた。なお、粗骨材は単位体積重量 1610 kgf/m^3 ，比重2.57，F.M. 5.99および吸水率1.08%のものであった。

細骨材も、オースチン近傍に産するものを用いた。これは単位体積重量 1595 kgf/m^3 ，比重2.58，F.M. 2.76，および吸水率1.02%のものであった。

練りませ水としては、蒸留水および人工海水（ASTMD 1145-75による）を用いた。

混和剤は、タイプIセメントには用いなかったが、タイプIIIセメントの場合には、AE剤およびCaCl₂をベースとした促進剤を1部に使用した。

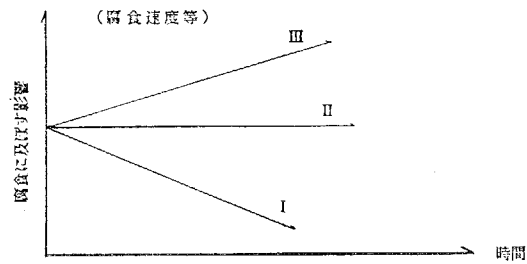


図 5.1 腐食に及ぼす影響の経時変化のタイプ

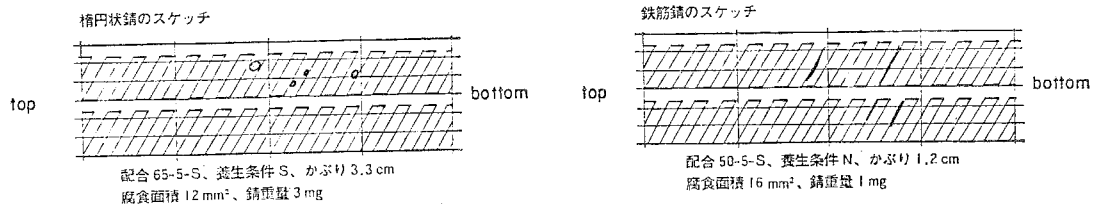


図 5.2 腐食状況スケッチ例

鉄筋として、グレイド60、ナンバー3 ($\phi 3/8$ in.)、長さ4 in. (約10 cm)の異形鉄筋を使用した。なお、コンクリートに埋め込む前に、サンドブラストし、光沢状態として使用した。また、片端にはリード線をハンダづけし、その後、両端部はエポキシ樹脂にてコーティングして使用した。

b) 配合

配合条件は、タイプIセメントの場合、粗骨材最大寸法 $3/8$ in. という条件下で、スランブの種類5 cm, 7 cm, 12 cmの3種を考え、w/cとして45%、50%、55%、65%の4種を考えた。

また、タイプIIIセメントを用いた場合、粗骨材最大寸法 $3/8$ in.、スランブ7 cm、w/c = 50%として配合を定めた。

示方配合および圧縮強度を表5.1に示す。

c) 供試体の形状および配筋

供試体は、 $\phi 3 \times 6$ in. (約 $\phi 7.5 \times 15.2$ cm)の寸法を有するものであって、鉄筋腐食試験用供試体と圧縮強度試験用供試体の2種を製作した。

埋め込み鉄筋は、1供試体につき1本とした。かぶりは、1.25 cmまたは3.3 cmとした。

d) 供試体の製作

コンクリートの練りまぜには、容量20 lのドラム回転式ミキサを用いた。コンクリートの打ち込みは、室温24°C、50% R. H.の室内で行なった。また、締め固めは、2層に分け、振動台を用いて行なった。鉄筋は、1層を締め固めた後、所定の位置に取りつけ、リード線を型枠上部に固定した棒に取りつけることによって上下方向に固定した。その後、2層目を打ち込み締め固めた。さらに、凝結終了後、上面を金ごて仕上げした。

e) 養生(暴露)条件

成形したコンクリート供試体は室内に静置し、濡れた布でおおい、1日で脱型後、恒温恒湿室(20°C、100% R. H.)にて材令28日まで養生する。その後、1部は3.6% NaCl溶液中にて養生し(N養生と称する)、1部は、室内で気中養生し(A養生と称する)、これら以外のものは、そのまま、標準養生を継続した。

(3) 測定項目

a) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、ASTM C 39-81 "Compression Strength of Cylindrical Concrete Specimens" に準じて行なった。供試体は、すべて片面仕上げ面を、硫黄キャッピングとした。タイプIセメントを用いたものでは、材令28日に、タイプIIIセメントを用いたものでは、材令7日に1配合について、各々2本試験を行なった。

b) 鉄筋の腐食量に関する測定

鉄筋の腐食量に関する測定としては、3章で述べた鉄筋の表面観察、腐食面積の測定

表 5.1 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	スランブ (cm)	W/C (%)	W (kgf/m ³)	C (kgf/m ³)	G (kgf/m ³)	S (kgf/m ³)	Sea Salt (kgf/m ³)	σ_{28} (kgf/cm ²)
45-5-T	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	0	455
45-5-S	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	6.84	435
45-7-T	I	7	45	220	488.9	748.2	819.5	0	448
45-7-S	I	7	45	220	488.9	748.2	819.5	7.92	450
45-12-T	I	12	45	240	533.3	748.2	730.8	0	444
54-12-S	I	12	45	240	533.3	748.2	730.8	8.64	447
50-5-T	I	5	50	190	380.0	748.2	986.6	0	393
50-5-S	I	5	50	190	380.0	748.2	986.6	6.84	390
55-5-T	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	0	337
55-5-S	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	6.84	334
65-5-T	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	0	254
65-5-S	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	6.84	232
65-12-T	I	12	65	240	369.7	748.2	874.4	0	231
65-12-S	I	12	65	240	369.7	748.2	874.4	8.64	251
H-T	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	402* AE剤
H-S	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	398* AE剤
H-H	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	420* Hydroset + AE剤

(スランブは目標値, *: 7日強度 圧縮強度は2本の平均値である。)

および錆重量の測定をおこなった。

(ハ)、(ニ)の測定項目とあわせて、配合、かぶり、養生(暴露)条件別に測定本数を表5.2に示した。

c) コンクリート中鉄筋の電気化学的測定

コンクリート中鉄筋の電気化学的測定としては、3章で述べたアノード分極曲線を用いた不動態のグレイド、腐食電流、再不動態化電位、および、自然電極電位を測定した。

d) 塩素イオン含有量の測定

材令1年のコンクリート供試体をはつり、かぶり約1.2cmの部分のモルタルを約1g採取し、これをすりつぶして試料とした。この試料を用いて、3.3で述べた本研究でいう可溶性塩素イオンを測定した。すなわち、約100mlかつ20℃の蒸留水中にて24時間で塩素イオンを抽出し、ろ紙にてこし、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により定量分析した。

(3) 実験結果

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

標準養生(気中)およびNaCl溶液中にて養生したコンクリート中鉄筋は、かつ裂して取り出した直後は、湿っていた。

錆の形状は、楕円状もしくは筋状のものが大部分で、互いに独立して存在しており、連続しているものはなかった。楕円状のものの発生箇所は、鉄筋の凹凸に関係ないと思われたが、筋状のものの発生箇所は、凹部の打ち込み方向に向かって上側の凸部との境界線に添って発生しているものが多かった(図5.2)。

錆の色は、黒が大部分でこげ茶が若干あった。これは、錆の大部分がマグネタイト(Fe_2O_3)であることを示しているものと思われる。

ロ) 腐食面積

表面観察の後、錆の状態を写生して、プランイメーターにて面積を測定した。結果を、表5.3に示す。この表では、同一配合、養生条件、および、かぶり別に腐食面積を平均し、さらに、鉄筋表面積を 30.3 cm^2 として腐食面積率を示した。

なお、精度は、整数位(mm^2)までと考えている。また、腐食の程度は非常に軽微であった。

ハ) 錆重量

腐食面積測定後、カッターナイフで鉄筋よりこすりとれる錆を取り、メトラー直示天秤(精度は 0.5 mg までと考えた)を用いて錆重量を測定した。表5.3に、腐食面積と共に、錆重量およびその平均値を示した。さらに、錆の厚さに関係すると考えられる量として、錆重量を腐食面積で除した量を示した。

b) 鉄筋の電気化学的測定

イ) アノード分極曲線を用いた不動態のグレイドの判定

材令1、2、4、6、12ヶ月におけるコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドを判定した。なお、測定は、同一配合、養生条件、およびかぶりについて1供試体(ただし、

表 5.2 測定項目および測定本数

配合号 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	製作 本数	測定本数					
				鉄筋の腐食に 関する測定 材令 1 年	不動態判定 材令 (月) 1, 2, 4, 6, 12	腐食電流 材令 (月) 1, 2, 4, 6, 12	Repassivation potential 材令 1 年	potential (月) 1, 2, 4, 6, 9, 12	塩素含有量 材令 1 年
45-5-T	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
45-5-S	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
45-7-T	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
35-7-S	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
45-12-T	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
45-12-S	N S	1.2	2	2	1	1	1	2*	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
50-5-T	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
50-5-T	N S	1.2	2	1	1	1	1	2	2
		1.2	2	1	1	1	1	2	2
55-5-T	N S A	1.2	6	2	2	2	2	5	2
		1.2	4	2	2	2	2	4	0
		3.3	2	1	1	1	1	2	0
		1.2	2	1	1	1	1	2	0
55-5-S	N S A	1.2	4	3	1	1	1	3	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	2
65-5-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
65-5-S	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
65-12-T	N S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
		1.2	2	1	1	1	1	2	0
65-12-S	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
H-T	N S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
		1.2	2	1	1	1	1	2	0
H-S	N S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
		1.2	2	1	1	1	1	2	0
H-H	N S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		1.2	2	2	1	1	1	2	0
Total			90	88	43	43	43	80	28

N : NaCl 溶液中
S : 標準養生

表 5.3 鉄筋の腐食面積および錆の重量

配 合 (記 号)	養生条件	かぶり (cm)	腐食面積 (mm ²)			腐食面積率 (%)	錆の重量 (mgf)			錆の厚さ (mgf/mm ²) B/A
			① (③)	② (④)	平均 A		① (③)	② (④)	平均 B	
45-5-T	N S	1.2	2.2	9.5	5.85	0.19	1	1	1	0.17
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		3.3	0	0	0	0	0	0	0	
45-5-S	N S	1.2	35*	59*	47	1.55	6	8	7	0.15
		1.2	6*	0	0	0.10	1	0	0.5	0.17
		3.3	16*	8	12	0.40	2	0.5	1.25	0.10
45-7-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
45-7-S	N S	1.2	0	3	1.5	0.05	0	0.05	0.25	0.17
		1.2	15	16	15.5	0.51	2	0.5	1.25	0.08
45-12-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
45-12-S	N S	1.2	8*	13*	10.5	0.35	2	1	1.5	0.14
		1.2	28	9	18.5	0.61	0.5	1	0.75	0.04
50-5-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
50-5-S	N S	1.2	16	4	10	0.30	1	1	1	0.10
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
55-5-T	N	1.2	12	6	7.33	0.24	2	1	1.33	0.18
		1.2	4	3	1.5	0.05	1	0.5	0.25	0.17
	S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	4*	0	2	0.07	0	0	0.25	0.13
A	3.3	3.5*	0	1.75	0.06	1	0	0.5	0.29	
	3.3	0	0	0	0	0	0	0		
55-5-S	N	1.2	4	7	5	0.17	0	2	1	0.2
		1.2	4	0	0	0	0	0	0	
	S	1.2	7*	1*	4	0.13	1	0	0.5	0.13
		3.3	9*	6*	7.5	0.25	0.5	1	0.75	0.10
A	1.2	0	0	0	0	0	1	0		
65-5-T	N	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		3.3	0	0	0	0	0	0	0	
65-5-S	N	1.2	1	31	16	0.53	0	5	2.5	0.16
		3.3	13*	12*	12.5	0.41	3	3	3	0.24
	S	1.2	0	13	6.5	0.21	0	0.5	0.25	0.04
65-12-T	N S	1.2	0	3	1.5	0.05	0	0	0	0
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
65-12-S	N S	1.2	12*	2.5*	18.5	0.61	1	3	2	0.11
		1.2	45	10	27.5	0.91	1	0.5	0.75	0.03
H-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
H-S	N S	1.2	10	30	20	0.66	0.5	5	2.75	0.14
		1.2	7	0	3.5	0.12	1	0	0.5	0.14
H-H	N S	1.2	25	0	12.5	0.41	1	0	0.5	0.04
		1.2	2	0	1	0.03	0.5	0	0.25	0.25
									平均	0.134
									S. D.	0.069

(* は pitting があると思われるもの)

55-5-T, 55-5-S, および、55-5-Nのかぶり1.2cmについては各々2本の同一供試体を各材令において測定した。測定結果を、表5.4に示す。

ロ) 腐食電流

アノード分極曲線より Tafel 近似を用いて、材令1, 2, 4, 6, 12ヶ月におけるコンクリート中鉄筋の腐食電流を算定した。測定結果を、表5.5に示す。

なお、表中、全腐食電流(単位 Faraday)は、電流密度に面積を乗じて電流を求め、さらに、それに期間を乗じて求めたものである。さらに、全腐食電流が、すべて Fe₃O₄ を生成するために用いられたとして Fe₃O₄ の量を算定した。

ハ) 再不動態化電位

再不動態化電位 (E_{rep} と略記する) を材令1年において測定した。その測定結果およびそれに対応する自然電極電位 (E_{corr} と略記する) との差を表5.6に示す。

ニ) 自然電極電位

自然電極電位を、材令1, 2, 4, 6, 9, 12ヶ月で測定し、その結果を表5.7に示す。

ク) 塩素イオン含有量

材令1年においてスランプ5cmのコンクリート供試体の塩素イオン含有量を測定し、その結果を表5.8に示す。

(4) 考察

ア) 養生条件のおよぼす影響

塩素イオンとして、水和反応の大部分が終了したあとの(材令28日以降を考えた)侵入塩素イオンの影響を考えた。即ち、材令28日以降の標準養生(恒温恒湿室内)と海水養生によるコンクリート中鉄筋の腐食の相違を考える。

イ) 鉄筋の腐食面積および錆の重量におよぼす影響

表5.9に、配合およびかぶりが同一という条件で、標準養生と海水養生したコンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量の相違を示す。なお、気中養生のものには腐食は認められなかった。

腐食の有無という観点からは、配合およびかぶりが同一であれば、標準養生で腐食の認められるものでは、必ず海水養生でも腐食が認められる。

腐食面積および錆重量においても、海水養生のものが標準養生のものを上回る傾向がある。

ロ) 不動態のグレードにおよぼす影響

表5.10に、養生条件が不動態のグレードにおよぼす影響を示した。ばらつきはあるものの、材令2ヶ月では、養生条件による差は僅かであるが、材令6ヶ月、12ヶ月となると標準養生の方が高いグレードとなる。

ハ) 腐食電流密度および全腐食電流におよぼす影響

表5.11に、養生条件が腐食電流密度および全電流密度におよぼす影響を示す。海水養生のものが標準養生のものに比較して大きな値を示す。特に、材令12ヶ月での腐食電流密度においてその傾向が明かである。

ニ) 再不動態化電位 (E_{rep}) および ($E_{rep} - E_{corr}$) におよぼす影響

表5.12に、養生条件が E_{rep} および ($E_{rep} - E_{corr}$) におよぼす影響

表 5.4 アトド分極曲線を用いた不動態判定

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令					平 均 (重み付き)
			1か月	2か月	4か月	6か月	12か月	
45-5-T	N S	1.2	3	3	1	1	1	1.5
		1.2	3	3	1	1	1	1.5
		3.3	2	3	1	1	1	1.38
45-5-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	0	0	1	1	1	0.75
		3.3	0	0	1	1	1	0.75
45-7-T	N S	1.2	1	1	1	1	2	1.25
		1.2	1	1	1	1	1	1
45-7-S	N S	1.2	0	0	1	1	1	0.75
		1.2	0	0	1	1	1	0.625
45-12-T	N S	1.2	1	1	3	1	1	1.455
		1.2	1	1	3	1	1	1.33
45-12-S	N S	1.2	0	0	0	0	1	0.25
		1.2	0	0	0	0	1	0.25
50-5-T	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	3	1	1	1	1.25
50-5-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	1	1	1	1	1
55-5-T	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	2	3	1	1	1	1.38
	3.3	3	3	1	2	3	2.33	
		1	1	1	1	1	1	
	A	1.2	1	3	3	5	5	3.92
65-12-T	N S	1.2	2	1	1	1	1	1.13
		1.2	2	3	3	3	3	2.88
65-12-S	N S	1.2	0	0	0	0	1	0.25
		1.2	0	0	0	0	1	0.25
H-T	N S	1.2	3	3	1	1	1	1.5
		1.2	3	2	1	2	1	1.71
H-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	1	1	1	1	1
H-H	N S	1.2	1	2	1	1	1	1.13
		1.2	1	1	2	1	1	1.17

表 5.5 腐食電流密度および1年間の全腐食電流

(電流密度単位 nA/cm²)

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令					全 腐 食 電 流 Faraday	錆を Fe ₃ O ₄ とし たときの 重量(mg)
			1 か年	2 か月	4 か月	6 か月	12か月		
45-5-T	N	1.2	183	187	1475	5400	2532	0.027	772
	S	1.2	150	130	194	—	—	—	—
		3.3	165	181	127	—	—	—	—
45-5-S	N	1.2	3320	690	1360	2400	8859	0.037	1060
	S	1.2	1910	1736	2400	2600	3360	0.025	726
		3.3	1268	1476	2823	3240	5680	0.032	939
45-7-T	N	1.2	3658	2823	1476	2412	2432	0.024	699
	S	1.2	2355	1597	2290	3228	3498	0.028	801
45-7-S	N	1.2	2187	3061	2603	2979	2990	0.028	802
	S	1.2	3061	3320	2603	2720	2977	0.028	816
45-12-T	N	1.2	1800	5856	—	484	1834	0.021	596
	S	1.2	1858	1780	375	1800	1871	0.015	449
45-12-S	N	1.2	5000	5856	2642	2658	2070	0.031	907
	S	1.2	2068	1593	1056	1780	1041	0.015	421
50-5-T	N	1.2	1071	2213	1476	2776	4112	0.025	739
	S	1.2	1993	659	2603	2412	2637	0.022	631
50-5-T	N	1.2	2440	2603	2305	2312	2336	0.023	671
	S	1.2	1726	3320	3061	3126	3200	0.029	345
55-5-T	N	1.2	907	2040	1667	5856	3643	0.034	994
	S	1.2	269	103	1157	1255	7073	0.024	687
		1.2	111	238	581	5400	1833	0.023	676
		1.2	2400	2040	1600	2440	3498	0.025	711
A	3.3	2041	2400	2040	2068	2745	0.022	643	
	1.2	114	90	63	248	350	0.002	58	
55-5-S	N	1.2	1067	514	343	1448	6412	0.023	663
	S	1.2	623	971	1255	1807	2564	0.016	468
		1.2	2400	2364	1929	2400	3793	0.026	755
		3.3	1379	3904	1736	3200	4112	0.030	862
A	1.2	2400	182	58	110	400	0.005	133	
65-5-T	N	1.2	2041	210	303	3320	5287	0.027	782
		3.3	114	194	1600	5856	4257	0.032	941
65-5-S	N	1.2	2400	771	713	2213	5287	0.025	729
	S	3.3	2734	1067	771	2213	6158	0.028	816
		1.2	1583	1549	2603	1667	2976	0.021	602
65-12-T	N	1.2	94	4592	4458	4281	4113	0.037	1072
	S	1.2	474	118	1067	207	336	0.004	115
65-12-S	N	1.2	3061	6350	5114	5240	5682	0.051	1471
	S	1.2	4063	4234	3949	4112	4834	0.042	1211
H-T	N	1.2	155	74	836	2603	1691	0.014	413
	S	1.2	204	437	1362	907	960	0.003	241
H-S	N	1.2	776	2822	3600	2823	3728	0.029	828
	S	1.2	1735	1475	2213	7238	1691	0.035	1021
H-H	N	1.2	2353	372	3320	2823	2976	0.025	731
	S	1.2	2894	3061	837	2823	3498	0.026	765

表 5.6 材令1年における再不動態化電位 (E_{rep})
および自然電極電位 (E_{corr})との差

配合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	E_{rep} (mV)	$E_{rep}-E_{corr}$ (mV)
45-5-T	N	1.2	-540	212
	S	1.2	211	449
		3.3	641	705
45-5-S	N	1.2	-435	189
	S	1.2	-280	604
		3.3	-294	624
45-7-T	N	1.2	-93	595
	S	1.2	-269	589
45-7-S	N	1.2	-418	306
	S	1.2	-258	600
45-12-T	N	1.2	515	703
	S	1.2	-116	706
45-12-S	N	1.2	-377	437
	S	1.2	-305	549
50-5-T	N	1.2	-381	561
	S	1.2	-180	544
50-5-S	N	1.2	-240	158
	S	1.2	-288	434
55-5-T	N	1.2	-475	413
	S	1.2	-376	122
		1.2	601	759
	A	3.3	-96	732
		1.2	-165	719
538	628			
55-5-S	N	1.2	-500	332
	S	1.2	-255	603
		3.3	-303	595
	A	3.3	-254	612
		1.2	470	500
65-5-T	N	1.2	-472	330
	S	3.3	-513	431
65-5-S	N	1.2	-469	193
	S	3.3	-532	234
		1.2	-234	654
65-12-T	N	1.2	-403	199
	S	1.2	651	793
65-12-S	N	1.2	-490	174
	S	1.2	-196	546
H-T	N	1.2	-512	442
	S	1.2	-93	361
H-S	N	1.2	-454	474
	S	1.2	-224	546
H-H	N	1.2	-501	461
	S	1.2	-64	706

E_{rep} V.S. SCE

表 5.7 自然電極電位の測定値 (mV V.S. SCE)

2本の平均値

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令 (月)						平均値 (重み付き)
			1	2	4	6	9	12	
45-5-T	N	1.2	-177	-244	-863	-1005	-812	-813	-710
	S	1.2	-167	-496	-347	-265	-323	-181	-290
		3.3	-153	-57	-106	-68	-65	-82	-85
45-5-S	N	1.2	-663	-752	-764	-875	-708	-769	-760
	S	1.2	-899	-889	-910	-875	-893	-901	-893
		3.3	-914	-904	-932	-773	-750	-879	-841
45-7-T	N	1.2	-710	-958	-543	-578	-660	-506	-648
	S	1.2	-867	-872	-894	-502	-362	-574	-652
45-7-S	N	1.2	-899	-998	-959	-936	-860	-824	-910
	S	1.2	-861	-905	-917	-868	-840	-859	-872
45-12-T	N	1.2	-840	-995	-607	-598	-594	-644	-684
	S	1.2	-845	-867	-611	-520	-831	-806	-733
45-12-S	N	1.2	-896	-1008	-991	-920	-902	-814	-922
	S	1.2	-901	-916	-1001	-868	-761	-854	-872
50-5-T	N	1.2	-901	-536	-416	-568	-838	-918	-692
	S	1.2	-873	-595	-875	-819	-803	-784	-799
50-5-S	N	1.2	-895	-969	-906	-841	-808	-750	-855
	S	1.2	-920	-916	-856	-891	-847	-722	-860
55-5-T	N	1.2*	-172	-1018	-801	-878	-908	-890	-803
	S	1.2	-307	-672	-974	-936	-899	-708	-790
		1.2	-167	-176	-560	-882	-67	-190	-368
		3.3	-843	-873	-782	-857	-776	-847	-823
55-5-S		1.2	-873	-879	-884	-871	-830	-862	-754
	A	1.2	-199	-118	-78	-47	-19	+46	-61
	N	1.2*	-915	-769	-805	-871	-869	-878	-874
	S	1.2	-940	-929	-919	-858	-843	-693	-863
65-5-T		1.2	-901	-884	-784	-757	-839	-799	-821
		3.3	-950	-912	-884	-923	-868	-858	-897
	A	1.2	-909	-95	-57	-10	+48	+22	-122
	N	1.2	-532	-639	-756	-1045	-684	-904	-737
65-5-S		3.3	-516	-327	-492	-607	-565	-717	-545
	N	1.2	-909	-335	-451	-570	-569	-738	-584
65-5-S	S	3.3	-895	-661	-556	-599	-765	-768	-699
		1.2	-909	-856	-897	-890	-880	-888	-887
65-12-T	N	1.2	-520	-852	-683	-968	-925	-761	-813
	S	1.2	-503	-542	-416	-326	-333	-142	-369
65-12-S	N	1.2	-911	-1046	-1029	-974	-974	-970	-964
	S	1.2	-929	-895	-715	-567	-567	-518	-688
H-T	N	1.2	-171	-84	-482	-643	-630	-742	-484
	S	1.2	-137	-636	-751	-658	-666	-706	-614
H-S	N	1.2	-916	-972	-977	-908	-782	-891	-895
	S	1.2	-914	-876	-900	-565	-842	-967	-810
H-H	N	1.2	-911	-724	-854	-730	-925	-939	-847
	S	1.2	-764	-855	-578	-867	-736	-740	-756

表5.8 材令1年までの塩素含有量
(モルタル重量比)

配合 (記号)	養生条件	塩素含有量 (%)
45-5-T	N	0.21
45-5-S	N	0.45
	S	0.11
50-5-T	N	0.23
50-5-S	N	0.26
	S	0.12
55-5-T	N	0.26
55-5-S	N	0.51
	S	0.17
65-5-T	N	0.38
65-5-S	N	0.46
	S	0.21

かぶり 1.2 cm 2本の平均値

表5.9 養生条件の鉄筋の腐食面積
および錆の重量に及ぼす影響

配合 (記号)	腐食面積 (mm ²)		錆の重量 (mgf)			
	養生条件		①-②		養生条件	
	N①	S②	N③	S④	③-④	
45-5-T	5.85	0	5.85	1	0	1
45-5-S	47	3	44	7	0.5	6.5
45-7-T	0	0	0	0	0	0
45-7-S	1.5	15.5	-14	0.25	1.25	-1
45-12-T	0	0	0	0	0	0
45-12-S	10.5	18.4	-8	1.5	0.75	0.75
50-5-T	10	0	0	0	0	0
50-5-S	10	0	10	1	0	1
55-5-T	1.33	0	7.33	1.33	0	1.33
	1.5	2	-0.5	0.25	0.25	0
55-5-S	5	0	5	1	0	1
65-5-S	16	6.5	0.5	2.5	0.25	2.25
65-12-T	1.5	0	1.5	0	0	0
65-12-S	18.5	27.5	-9	2	0.75	1.75
H-T	0	0	0	0	0	0
H-S	20	3.5	16.5	2.75	0.5	2.25
H-H	12.5	1	11.5	0.5	0.25	0.25
Total	平均	平均	平均	平均	平均	平均
	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t
錆のある ものにつ いて	平均	平均	平均	平均	平均	平均
	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t	S.D. _t

(かぶりはすべて1.2 cm)

表5.10 養生条件が不動態のグレードに及ぼす影響

配 合 (記 号)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦
	N ①	S ②		N ③	S ④		N ⑤	S ⑥		N ⑦	S ⑧	
45-5-T	3	3	0	1	1	0	1	1	0	1.5	1.5	0
45-5-S	1	0	-1	1	1	0	1	1	0	1	0.75	-0.25
45-7-T	1	1	0	1	1	0	2	1	-1	1.25	1	-0.25
45-7-S	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0.75	0.625	-0.125
45-12-T	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1.455	1.33	-0.125
45-12-S	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.25	0.25	0
50-5-T	1	3	2	1	1	0	1	1	0	1	1.25	0.25
50-5-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
55-5-T	1 3	3 1	2 -2	1 1	2 1	1 0	1 1	3 1	2 0	1 1.38	2.33 1	1.23 -0.38
55-5-S	1	1	-1	1	1	0	1	1	0	1.29	1	-0.29
65-5-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65-12-T	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1.13	2.88	1.75
65-12-S	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.25	0.25	0
H-T	3	2	-1	1	2	1	1	1	0	1.5	1.71	0.21
H-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
H-H	2	1	-1	1	1	0	1	1	0	1.13	1.17	0.04
平 均	1.29	1.29	0	0.88	1.12	0.235	1.06	1.235	0.176	1.05	1.18	0.127
S. D.	—	—	1.118	—	—	0.562	—	—	0.727	—	—	5.561
t	—	—	0	—	—	0.42	—	—	0.24	—	—	0.23

表5.11 養生条件が腐食電流密度および全腐食電流に及ぼす影響

(nA/cm²)

配 合 (記 号)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			全腐食電流 (F)		
	養生条件		①-②	養生条件		③-④	養生条件		⑤-⑥	養生条件		⑦-⑧
	N ①	S ②		N ③	S ④		N ⑤	S ⑥		N ⑦	S ⑧	
45-5-T	187	130	57	5400	—	—	2532	—	—	0.027	—	—
45-5-S	690	1736	-1046	2400	2600	-200	8859	3360	5499	0.037	0.025	0.012
45-7-T	2823	1597	1226	2412	3228	-816	2432	3498	-1066	0.024	0.028	-0.004
45-7-S	3061	3320	-259	2979	2720	259	2990	2977	13	0.028	0.028	0
45-12-T	5856	1780	4076	484	1800	-1316	1834	1871	-37	0.021	0.015	0.006
45-12-S	5856	1593	4263	2658	1780	878	2070	1041	1029	0.031	0.015	0.016
50-5-T	2213	659	1554	2776	2412	364	4112	2637	1475	0.025	0.022	0.003
50-5-S	2603	3320	-717	2312	3126	-814	2336	3200	-864	0.023	0.029	-0.006
55-5-T	2040 103	238 2040	1802 -1937	5856 1225	5400 2440	456 -1215	3643 7073	1833 3498	1810 3575	0.034 0.024	0.023 0.025	0.011 0.001
55-5-S	514	971	-457	1448	1807	-359	6412	2564	3848	0.023	0.016	0.007
65-5-S	771	1549	-778	2213	1667	546	5287	2976	2311	0.025	0.021	0.004
65-12-T	4592	118	4474	4281	207	4074	4113	336	3777	0.037	0.004	0.033
65-12-S	6350	4234	2116	5240	4112	1128	5682	4834	848	0.051	0.042	0.009
H-T	74	437	-363	2603	907	1696	1691	960	731	0.014	0.008	0.006
H-S	2822	1475	1347	2823	7238	-4415	3728	1691	2037	0.029	0.035	-0.006
H-H	372	3061	-2689	2823	2823	0	2976	3498	-522	0.025	0.026	-0.001
平 均	2407	1662	745	2937	2767	17	3986	2548	1529	0.028	0.023	0.0056
S. D.	2152	1226	2128	1470	1701	1759	2043	1177	1899	0.008	0.010	0.0098
t	—	—	0.35	—	—	0.01	—	—	0.81	—	—	0.57

表 5.12 養生条件が再不動態化電位および再不動態化電位と自然電極電位に及ぼす影響

(mV)

配 合 (記 号)	E _{rep}			E _{rep} -E _{corr}			配 合 (記 号)	E _{rep}			E _{rep} -E _{corr}		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③		養生条件		②-①	養生条件		④-③
	N①	S②		N③	S④			N①	S②		N②	S④	
45- 5-T	-540	211	751	212	449	237	55- 5-S	-500	-255	245	332	603	271
45- 5-S	-435	-280	155	189	604	415	65- 5-S	-469	-243	226	193	654	461
45- 7-T	-93	-269	-176	595	589	-6	65-12-N	-403	651	1054	199	793	594
45- 7-S	-418	-258	160	306	600	294	65-12-S	-490	-196	294	174	546	372
45-12-S	-377	-305	72	437	549	112	H-T	-512	-93	419	442	361	81
50- 5-T	-381	-180	201	561	544	-17	H-S	-454	-224	230	474	546	72
50- 5-S	-240	-288	-48	158	434	276	H-H	-501	-64	437	461	706	245
55- 5-T	-475	601	1076	413	759	346	平 均	-416.5	-80.5	336.0	329.3	591.8	262.6
	-376	-96	280	122	732	610	S. D.	113.2	304.0	351.2	154.9	118.9	206.8
							t	-	-	0.96	-	-	1.27

表 5.13 養生条件が自然電極電位(E_{corr})に及ぼす影響

(mV)

配 合 (記号)	材令2か月			材令6か月			材令9か月			材令12か月			平 均 値		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦	養生条件		⑩-⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
45- 5-T	-244	-496	-252	-1005	-265	740	-812	-323	489	-813	-181	632	-710	-299	411
45- 5-S	-752	-889	-137	-875	-875	0	-708	-893	-185	-769	-901	-132	-760	-893	-133
45- 7-T	-958	-872	86	-578	-592	-14	-660	-362	298	-506	-574	-68	-648	-652	-4
45- 7-S	-998	-905	93	-936	-868	68	-860	-840	20	-824	-859	-35	-910	-872	38
45-12-T	-995	-867	128	-598	-520	78	-594	-831	-237	-644	-806	-162	-684	-733	-49
45-12-S	-1008	-916	92	-920	-868	52	-902	-761	141	-814	-854	-40	-922	-872	50
50- 5-T	-536	-595	-59	-568	-819	-251	-838	-803	35	-918	-784	134	-692	-799	-107
50- 5-S	-969	-916	53	-841	-891	-50	-808	-847	-39	-750	-722	28	-855	-860	-5
55- 5-T	-1018	-176	842	-878	-882	-4	-908	-97	811	-890	-190	700	-803	-368	435
	-672	-873	-201	-936	-857	79	-899	-776	123	-708	-847	-139	-793	-823	-30
55- 5-S	-769	-929	-160	-971	-858	113	-869	-843	26	-878	-693	185	-874	-863	11
65- 5-S	-335	-856	-521	-570	-890	-320	-569	-880	-311	-738	-888	-150	-584	-887	-303
65-12-T	-852	-542	310	-968	-326	642	-925	-333	-592	-761	-142	619	-813	-369	444
65-12-S	-1046	-895	151	-974	-567	407	-970	-518	452	-818	-742	76	-964	-688	276
H-T	-84	-636	-552	-643	-658	-15	-630	-666	-36	-742	-706	36	-484	-614	-130
H-S	-972	-876	96	-908	-565	343	-782	-842	-60	-891	-867	24	-895	-810	85
H-H	-724	-855	-131	-730	-867	-137	-925	-736	189	-939	-740	199	-847	-756	91
平 均	-761	-770	-9.5	-818	-716	101.8	-803	-666	135.8	-788	-676	112.2	-779	-715	63.5
S. D.	298	209	318.6	163	208	283.5	126	248	305.5	108	255	279.7	130	195	212.7
t	-	-	-0.03	-	-	0.36	-	-	0.44	-	-	0.40	-	-	0.30

を示す。2-3の例外を除き、 E_{rep} 、($E_{rep} - E_{corr}$)共に標準養生のものが大きな値を示す。特に、孔食の起こり易さの尺度(小さいほど起こり易い)となる($E_{rep} - E_{corr}$)は明確に海水養生が小さな値を示す。

ホ) 自然電極電位におよぼす影響

表5.13に、養生条件が自然電極電位におよぼす影響を示す。材令2ヶ月では、養生条件による相違は明確ではないが、材令6, 9, 12ヶ月では、標準養生のものが大きな値を示す傾向にある。

ハ) 塩素イオン含有量におよぼす影響

表5.14に、養生条件が塩素イオン含有量におよぼす影響を示す。当然のことではあるが、海水養生のものが標準養生したものに比較して含有量が多い。海水養生したものは水道水練りであってもコンクリート中の材令1年の塩素イオン含有量は、海水練りコンクリートが練り混ぜ時に含む含有量にほぼ等しい。また、海水練りコンクリートで標準養生したものは材令1年で、練り混ぜた塩素イオンの6割を抽出することが出来た。

ト) まとめ

コンクリート中铁筋の腐食の有無については、明かに海水養生したものが腐食を生じやすく、腐食面積、錆重量についても、海水養生したものがやや多いことが認められる。

ロ)、ハ)、ホ)より、材令2ヶ月では、海水養生と標準養生の差は顕著ではないが、材令が長くなると、養生条件の差が明かとなる傾向がある。また、($E_{rep} - E_{corr}$)の養生条件による差も材令12ヶ月で明かとなる。この理由は、コンクリート中への海水の侵入と思われる。

b) 練り混ぜ水のおよぼす影響

塩素イオンとして、水和反応の始まる以前より存在する塩素イオンを考える。即ち、海水練りの影響を水道水練りとの比較で考える。

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量におよぼす影響

表5.15に、練り混ぜ水が鉄筋の腐食面積および錆重量におよぼす影響を示す。

腐食の有無という観点からは、水道水練りで腐食の生じている場合、それに対応する海水練りには必ず腐食が生じており、海水練りの方が明かに腐食を生じやすい。腐食面積および錆重量に関しては、海水練りの方が大きな傾向があるが、有意な差ではない。

ロ) 不動態のグレードにおよぼす影響

表5.16に、練り混ぜ水が不動態のグレードにおよぼす影響を示す。水道水練りの方が高い値を示す傾向がある。また、養生条件の影響とは異なり、練り混ぜ水の影響は材令と共に小さくなるようである。

また、この表より、海水練りでは、不動態のグレードの平均値は材令と共に、2ヶ月(0.75)、6ヶ月(1.0)、12ヶ月(1.2)と大きくなる傾向があるのに対して、水道水練りのものはやや小さくなる傾向がある。

ハ) 腐食電流密度および全電流密度におよぼす影響

表5.17に練り混ぜ水が、腐食電流密度および全腐食電流におよぼす影響を示す。海水練りのものが水道水練りのものを上回る傾向を示す。特に、材令2ヶ月の標準養生のもので明かである。しかし、材令6ヶ月では、練り混ぜ水の影響はほとんど認められず、また、材令12ヶ月ではまた練り混ぜ水の影響が表われるなど説明し難い点もある。後でも検討するが、腐食電流密度をコンクリート中铁筋の腐食の評価に適用するに問題があるように思われる。

表 5.14 養生条件が塩素含有量に及ぼす影響

配合 (記号)	塩素含有量 (%)					配合 (記号)	塩素含有量 (%)				
	養生条件		①-②	練り混ぜ時③	②/③		養生条件		①-②	練り混ぜ時③	②/③
	N ①	S ②					N ①	S ③			
45-5-T	0.21	(0)	0.21	0	—	55-5-S	0.51	0.17	0.34	0.268	0.634
45-5-S	0.45	0.11	0.34	0.265	0.415	65-5-T	0.38	(0)	0.38	0	—
50-5-T	0.23	(0)	0.23	0	—	65-5-S	0.46	0.21	0.25	0.269	0.781
50-5-S	0.26	0.12	0.14	0.266	0.451	平均	0.345	0.076	0.269	—	0.570
55-5-T	0.26	(0)	0.26	0	—	S. D.	—	—	0.080	—	—
						t	—	—	3.36	—	—

注：()内は理論値

表 5.15 練り混ぜ水の相違が鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

配号 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	腐食面積 (mm ²)			錆の重量 (mgf)		
			練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ水		④-③
			T ①	S ②		T ③	S ④	
45-5	N	1.2	5.85	47	41.15	1	7	6
45-7	N	1.2	0	1.5	1.5	0	0.25	0.25
45-12	N	1.2	0	10.5	10.5	0	1.5	1.5
50-5	N	1.2	0	10	10	0	1	1
55-5	N	1.2	7.33	5	-2.33	1.33	1	-0.33
65-5	N	1.2	0	16	16	0	2.5	2.5
		3.3	0	12.5	12.5	0	3	3
65-12	N	1.2	1.5	18.5	17	0	2	2
H	N	1.2	0	20	20	0	2.75	2.75
小計	平均 S. D. t	平均	1.63	15.67	14.04	0.26	2.23	2.07
		S. D.	—	—	12.45	—	—	1.85
		t	—	—	1.13	—	—	1.12
45-5	S	1.2	0	3	3	0	0.5	0.5
		3.3	0	12	12	0	1.25	1.25
45-7	S	1.2	0	15.5	15.5	0	1.25	1.25
45-12	S	1.2	0	18.5	18.5	0	1	1
50-5	S	1.2	0	0	0	0	0	0
55-5	S	1.2	0	0	0	0	0	0
		3.3	2	4	2	0.25	0.5	0.25
65-12	S	1.2	0	27.5	27.5	0	0.75	0.75
H	S	1.2	0	3.5	3.5	0	0.5	0.5
小計	平均 S. D. t	平均	0.375	9.11	8.775	0.075	0.65	0.575
		S. D.	—	—	9.225	—	—	0.472
		t	—	—	0.96	—	—	1.22
55-51	A	1.2	0	3.5	3.5	0	0.5	0.5
総計	平均 S. D. t	平均	0.922	11.8	10.93	0.154	1.4	1.246
		S. D.	—	—	10.73	—	—	1.464
		t	—	—	1.02	—	—	0.85

表5.16 練り混ぜ水が不動態のグレイドに及ぼす影響

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			平均		
			練り混ぜ水		①-②	練り混ぜ水		③-④	練り混ぜ水		⑤-⑥	練り混ぜ水		⑦-⑧
			T①	S②		T③	S④		T⑤	S⑥		T⑦	S⑧	
45-5	N	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.5	1	0.5
45-7	N	1.2	1	0	1	1	1	0	2	1	1	1.25	0.75	0.5
45-12	N	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.455	0.25	1.205
50-5	N	1.2	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
55-5	N	1.2	1	2	-1	1	1	0	1	1	0	1	1.29	-0.29
65-5	N	1.2	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1.29	1	0.29
		3.3	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1.38	0.88	0.5
65-12	N	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.13	0.25	0.88
H	N	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.5	1	0.5
小計		平均	1.67	0.78	0.89	1	0.78	0.22	1.11	1	0.11	1.28	0.82	0.45
		S.D. t	0.87	0.67	0.93	0	0.44	0.44	0.33	0	0.33	0.20	0.36	0.44
								0.50			0.33			1.02
45-5	S	1.2	3	0	3	1	1	0	1	1	0	1.5	0.75	0.75
		3.3	3	0	3	1	1	0	1	1	0	1.38	0.75	0.63
45-7	S	1.1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0.625	0.375
45-12	S	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.33	0.25	1.08
50-5	S	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.25	1	0.25
55-5	S	1.2	3	1	2	2	1	1	3	1	2	2.33	1	1.33
		t	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
		3.3	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65-12	S	1.2	3	0	3	3	0	3	3	1	2	2.88	0.25	2.63
H	S	1.2	2	1	1	2	1	1	1	1	0	1.71	1	5.71
小計		平均	2.10	0.50	1.60	1.40	0.80	0.60	1.40	1	0.40	1.54	0.76	0.78
		S.D. t	0.99	0.53	1.10	0.70	0.42	0.97	0.84	0	0.84	0.62	0.30	0.73
				1.37			0.62			0.48			1.00	
55-5	A	1.2	3	3	0	5	5	0	5	5	0	3.92	3.92	0
総計		平均	1.95	0.75	1.20	1.40	1.0	0.40	1.45	1.20	0.25	1.54	0.95	0.59
		S.D. t	0.94	0.79	1.11	4.99	1.03	0.75	1.05	0.89	0.64	0.73	0.77	0.64
				1.08			0.53			0.39			0.92	

表 5.17 練り混ぜ水が腐食電流密度および全腐食電流に
及ぼす影響

(nA/cm²)

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			全腐食電流 (F)		
			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水		
			T①	S②	②-①	T③	S④	④-③	T⑤	S⑥	⑥-⑤	T⑦	S⑧	⑧-⑦
45-5	N	1.2	187	690	503	5400	2400	-3000	2532	8856	6324	0.027	0.037	0.010
45-7	N	1.2	2823	3061	238	2412	2979	567	2432	2990	558	0.024	0.028	0.004
45-12	N	1.2	5856	5856	0	484	2658	2174	1834	2070	236	0.021	0.031	0.010
50-5	N	1.2	2213	2603	390	2776	2312	-464	4112	2336	-1776	0.025	0.023	-0.002
55-5	N	1.2	2040	514	-1526	5856	1448	-4408	3643	6412	2769	0.034	0.023	-0.011
65-5	N	1.2	210	771	561	3320	2213	-1107	5287	5287	0	0.027	0.025	-0.002
		3.3	194	1067	873	5856	2213	-3643	4257	6158	1901	0.032	0.028	-0.004
65-12	N	1.2	4592	6350	1758	4281	5240	959	4113	5682	1569	0.037	0.051	0.014
H	N	1.2	74	2822	2748	2603	2823	220	1691	3728	2037	0.014	0.029	0.015
小計		平均	2021	2637	616.1	3665	2698	-967	3322	4835	1513	0.027	0.031	0.0038
		S. D. t	2115	2197	1178	1827	1051	2258	1244	2232	2258	0.007	0.008	0.0090
			-	-	0.52	-	-	-0.43	-	-	0.67	-	-	0.42
45-5	S	1.2	130	1736	1606	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		3.3	181	1476	1295	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45-7	S	1.2	1597	3320	1723	3228	2720	-508	3498	2977	-521	0.028	0.028	0
45-12	S	1.2	1780	1593	-187	1800	1780	-20	1871	1041	-830	0.015	0.015	0
50-5	S	1.2	659	3320	2661	2412	3126	714	2637	3200	563	0.022	0.029	0.007
55-5	S	1.2	238	971	733	5400	1807	-3593	1833	2564	731	0.023	0.016	-0.007
		3.3	2040	2364	324	2440	2400	-40	3498	3793	295	0.025	0.026	0.001
			2400	3904	1504	2068	3200	1132	2745	4112	1367	0.022	0.030	0.008
65-12	S	1.2	118	4234	4116	207	4112	3905	336	4834	4498	0.004	0.042	0.038
H	S	1.2	437	1475	1038	907	7238	6331	960	1691	731	0.008	0.035	0.027
小計		平均	958	2439	1481	2308	3298	990	2172	3027	852	0.018	0.028	0.009
		S. D. t	895	1162	1217	1564	1769	2987	1141	1254	1634	0.009	0.009	0.015
			-	-	1.22	-	-	0.33	-	-	0.52	-	-	0.60
55-5	A	1.2	90	182	92	248	110	-138	350	400	50	0.002	0.005	0.003
総計		平均	1393	2415	1023	2872	2821	-51	3097	3785	1139	0.022	0.028	0.006
		S. D. t	1624	1720	1233	1862	1534	2650	2148	2126	1919	0.010	0.010	0.012
			-	-	0.83	-	-	-0.02	-	-	0.59	-	-	0.50

二) 再不動態化電位 (E_{rep}) および ($E_{rep} - E_{corr}$) におよぼす影響

表5. 18に、練り混ぜ水が E_{rep} および($E_{rep} - E_{corr}$)におよぼす影響を示す。($E_{rep} - E_{corr}$)について練り混ぜ水の影響がより明かである。水道水練りのものが大きく、孔食となりにくいと判断される。

ホ) 自然電極電位におよぼす影響

表5. 19に、練り混ぜ水が自然電極電位におよぼす影響を示す。水道水練りのものは、海水養生では卑の方向へ、標準養生では貴の方向へ向かう傾向にある。海水練りのものは、海水養生ではほとんど変化せず、また、標準養生では貴の方向へ向かう傾向にある。いずれも気中養生では貴の方向である。

水道水練りの方がより貴な値を示すが、その差は、標準養生では材令でありあまり変化せず約300mV、海水養生では材令2ヶ月で約200mV、材令12ヶ月で約150mVと標準養生に比較して差は小さくなる。

ハ) 塩素イオン含有量におよぼす影響

表5. 20に、練り混ぜ水が塩素イオン含有量におよぼす影響を示す。当然ながら、海水練りのものが水道水練りのものを上回る。しかし、その差は練り混ぜ時に比較して少なくなっており、養生条件に関係なく6割弱となっている。

c) 練り混ぜ水および養生条件が鉄筋の腐食傾向におよぼす影響

前述のごとく、海水練りおよび海水養生が、それぞれ水道水練りおよび標準養生に比較して腐食が多いことは明かである。また、表5. 15より練り混ぜ水および養生条件の影響を個別に抜き出すと表5. 21のごとくである。即ち、材令1年では、海水練り海水養生、海水練り標準養生、水道水練り海水養生、水道水練り標準養生の順で腐食が多い。

次に、不動態のグレードおよび自然電極電位に対する海水練りの影響の経時変化を考える。表5. 15より、練り混ぜ水による不動態のグレードの経時変化におよぼす影響を抽出すると表5. 22のごとくである。これより、練り混ぜ水の影響は徐々に小さくなることが認められる。特に、海水養生でその傾向が顕著である。この理由として標準養生では、練り混ぜ時の塩素イオンの1部が固定かされることが考えられる。これに対して、海水養生では、この影響に加えて、外部からの塩素イオンの侵入がある。いずれの影響も練り混ぜ時に含まれる塩素イオンの影響を打ち消す方向に働くと考えられる。

また、表5. 23に、不動態のグレードの経時変化におよぼす養生条件の影響を示すが、徐々に影響が大きくなることが認められる。即ち平均的には、材令1ヶ月で、練り混ぜ水による不動態のグレードの差は1.2、養生条件による差は0であったものが、材令1年では各々0.25および0.18となっている。

次に、自然電極電位の経時変化を考える。表5. 24に練り混ぜ水が電位の経時変化におよぼす影響を示す。これより、練り混ぜ水の影響は、特に海水養生において顕著に低下していることが認められる。また、表5. 25に、養生条件が電位の経時変化におよぼす影響を示す。これより、養生条件の影響は、特に水道水練りのもので顕著に増加していることが認められる。

以上述べた事項を図5. 3および図5. 4に示す。

ここまでの結論として、海水養生では、海水練りと水道水練りコンクリート中の鉄筋の腐食に関する多くの特性は養生期間が長くなるとそれらの差は小さくなると言えよう。

さらに、($E_{rep} - E_{corr}$)について言えば、材令1年では、練り混ぜ水によ

表 5.18 練り混ぜ水が再不動化電位および再不動化電位と自然電極電位の差に及ぼす影響

(mV)

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	E _{rep}			E _{rep} -E _{corr}		
			練り混ぜ水		①-②	練り混ぜ水		③-④
			T ①	S ②		T ③	S ④	
45-5	N	1.2	-540	-435	-105	212	189	23
45-7	N	1.2	-93	-418	325	595	306	289
50-5	N	1.2	-381	-240	-141	561	158	403
55-5	N	1.2	-475	-500	25	413	332	81
65-5	N	1.2	-472	-469	-3	330	193	137
		3.3	-513	-532	19	431	234	197
65-12	N	1.2	-403	-490	87	199	174	25
H	N	1.2	-512	-454	-58	442	474	-32
小計		平均	-424	-442	18.6	398	258	140
		S. D.	144	89	144.3	145	108	149
		t	—	—	0.13	—	—	0.94
45-7	S	1.2	-269	-258	-11	589	600	-11
45-12	S	1.2	-116	-305	189	706	549	157
50-5	S	1.2	-180	-288	108	544	434	110
55-5	S	1.2	601	-255	856	759	603	156
		3.3	-96	-303	207	732	595	137
			-165	-254	89	719	612	107
65-12	S	1.2	651	-196	847	793	546	247
H	S	1.2	-93	-224	131	361	546	-185
小計		平均	42	-260	302	650	561	90
		S. D.	365	38	346	144	58	142
		t	—	—	0.87	—	—	0.72
55-5	A	1.2	538	470	68	628	500	128
総計		平均	-148	-303	155	530	414	122
		S. D.	391	228	286	187	173	137
		t	—	—	0.54	—	—	0.89

表 5.19 練り混ぜ水が自然電極電位 (E_{corr}) に及ぼす影響

(mV)

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	材令2か月			材令6か月			材令9か月			材令12か月			平均値		
			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水		
			T①	S②	①- ②	T③	S④	③- ④	T⑤	S⑥	⑤- ⑥	T⑦	S⑧	⑦- ⑧	T⑨	S⑩	⑨- ⑩
45-5	N	1.2	-244	-752	508	-1005	-875	-130	-812	-708	-104	-813	-769	-44	-710	-760	50
45-7	N	1.2	-958	-998	40	-578	-936	358	-660	-860	200	-506	-824	318	-648	-910	262
45-12	N	1.2	-995	-1008	13	-598	-920	322	-594	-902	308	-644	-814	170	-684	-922	238
50-5	N	1.2	-536	-969	433	-568	-841	273	-838	-808	-30	-918	-750	-168	-692	-855	163
55-5	N	1.2	-1018	-769	-249	-878	-971	93	-908	-869	-39	-890	-878	-12	-803	-874	71
65-5	N	1.2	-639	-335	-304	-1045	-570	-475	-684	-569	-115	-904	-738	-166	-737	-584	-153
		3.3	-327	-661	334	-607	-599	-8	-565	-765	200	-717	-768	51	-545	-699	154
65-12	N	1.2	-852	-1046	194	-968	-974	6	-925	-970	45	-761	-818	57	-813	-964	151
H	N	1.2	-84	-972	888	-643	-908	265	-630	-782	152	-742	-891	149	-484	-895	411
小計		平均	-628	-834	206	-766	-844	78	-735	-804	69	-766	-806	39	-680	-829	150
		S.D.	352	232	380	204	153	268	137	118	152	135	54	159	109	124	157
		t	-	-	0.54	-	-	0.29	-	-	0.45	-	-	0.25	-	-	0.96
45-5	S	1.2	-496	-889	393	-265	-875	610	-323	-893	570	-181	-901	720	-299	-893	594
		3.3	-57	-904	847	-68	-773	705	-65	-750	685	-82	-879	797	-85	-841	756
45-7	S	1.2	-872	-905	33	-592	-868	276	-362	-840	478	-574	-859	285	-652	-872	220
45-12	S	1.2	-867	-916	49	-520	-868	348	-831	-761	-70	-806	-854	48	-733	-872	139
50-5	S	1.2	-595	-916	321	-819	-891	72	-803	-847	44	-784	-722	-62	-799	-860	61
55-5	S	1.2	-176	-929	753	-882	-858	-24	-97	-843	746	-190	-693	503	-368	-863	495
		3.3	-873	-884	11	-857	-757	-100	-776	-839	63	-847	-799	-48	-823	-821	-2
			-879	-912	33	-871	-923	52	-830	-868	38	-862	-858	-4	-754	-897	143
65-12	S	1.2	-542	-895	353	-326	-567	241	-333	-518	185	-142	-742	600	-369	688	319
H	S	1.2	-636	-876	240	-658	-565	-93	-666	-842	176	-706	-867	161	-614	-810	196
小計		平均	-599	-903	303	-586	-795	209	-509	-800	292	-517	-817	300	-550	-842	292
		S.D.	296	16	300	288	131	282	306	108	299	329	73	330	252	61	247
		t	-	-	1.01	-	-	0.74	-	-	0.98	-	-	0.91	-	-	1.18
55-5	A	1.2	-118	-95	-23	-47	-10	-37	-19	+48	-67	+46	+22	+24	-61	-122	61
総計		平均	-588	-832	243	-640	-777	138	-586	-759	173	-601	-770	169	-584	-800	216
		S.D.	325	232	331	290	226	272	288	218	260	312	196	284	233	184	214
		t	-	-	0.73	-	-	0.51	-	0.77	0.67	-	-	0.60	-	-	1.01

表5.20 練り混ぜ水が塩素含有量に及ぼす影響

配合 (記号)	養生 条件	塩素含有量(%)				差の 残存率 (②-①) /③
		練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ時の 差 ③	
		T①	S②			
44-5	N	0.21	0.45	0.23	0.265	0.87
50-5	N	0.23	0.26	0.03	0.266	0.11
55-5	N	0.26	0.51	0.25	0.268	0.93
65-5	N	0.38	0.46	0.08	0.269	0.30
平均(小計)		0.27	0.42	0.15	0.267	0.56
45-5	S	(0)	0.11	0.11	0.265	0.42
50-5	S	(0)	0.12	0.12	0.266	0.45
55-5	S	(0)	0.17	0.17	0.268	0.63
65-5	S	(0)	0.21	0.21	0.269	0.78
平均(小計)		(0)	0.15	0.15	0.267	0.57
総計		平均 S. D. t		0.15 0.078 1.92		0.56 0.29 1.93

注：(0)は使用材料中に塩素の含まれないことを示す。

表5.21 腐食に及ぼす練り混ぜ水および養生条件の影響

腐食面積の平均値

(mm²)

練り混ぜ水 養生条件	T 水道水	S 海水
N	1.63③	15.67①
S	0.375④	9.15②

錆の重量の平均値

練り混ぜ水 養生条件	T 水道水	S 海水
N	0.26 ③	2.33①
S	0.075④	0.55②

腐食発生の割合

練り混ぜ水 養生条件	T 水道水	S 海水
N	37(7/19)③	95(18/19)①
S	10(2/20)④	68(15/22)②

注：()内は本数 ○内は順位

表 5.22 不動態のグレイドの経時変化に及ぼす練り混ぜ水の影響

養生条件	練り混ぜ水	材 令				
		1か月	2か月	4か月	6か月	12か月
N	T ①	1.77	1.67	1.375	1.0	1.11
	S ②	0.56	0.78	0.875	0.78	1.0
	①-②	1.22 (1.09)	0.89 (0.96)	0.5 (1.20)	0.22 (0.50)	0.11 (0.33)
S	T ③	1.80	2.0	1.40	1.40	1.40
	S ④	0.50	0.50	0.80	0.80	1.0
	③-④	1.30 (1.06)	1.60 (1.37)	0.60 (1.26)	0.60 (0.62)	0.40 (0.48)
Total	T ⑤	1.79	1.95	1.38	1.40	1.45
	S ⑥	0.53	0.75	0.83	1.0	1.20
	⑤-⑥	1.26 (1.05)	1.20 (1.08)	0.55 (0.51)	0.40 (0.53)	0.25 (0.39)

以下は、1か月での値からの減少量

N	①-②	0	0.33	0.72	1.0	1.11
S	③-④	0	-0.30	0.70	0.70	0.0
Total	⑤-⑥	0	0.06	0.71	0.86	1.01

1か月での値との比率

N	①-②	1.0	0.73	0.41	0.10	0.09
S	③-④	1.0	1.23	0.46	0.46	0.31
Total	⑤-⑥	1.0	0.95	0.44	0.32	0.20

() 内は t 値

表 5.23 不動態のグレイドの経時変化に及ぼす養生条件の影響

練り混ぜ水	養生条件	材 令				
		1か月	2か月	4か月	6か月	12か月
T	N ①	1.75	1.75	1.25	1.0	1.125
	S ②	1.88	2.13	1.50	1.50	1.50
	②-①	0.125 (0.15)	0.375 (0.25)	0.25 (0.35)	0.50 (0.66)	0.375 (0.35)
S	N ③	0.625	0.75	0.875	0.85	1.0
	S ④	0.50	0.5	0.75	0.75	1.0
	④-③	-0.125 (0.35)	-0.25 (0.54)	-0.125 (0.35)	0 (-)	0 (-)
Total	N ⑤	1.19	1.25	1.06	0.875	1.06
	S ⑥	1.19	1.31	1.125	1.125	1.25
	⑥-⑤	0 (6)	0.06 (0.05)	0.06 (0.03)	0.25 (0.43)	0.19 (0.25)

以下は、1か月での差を0と仮定した場合

T	②-①	0	0.25	0.125	0.375	0.25
S	④-③	0	-	0	0.125	0.125

表 5.24 自然電極電位 (E_{corr}) の経時変化に及ぼす練り混ぜ水の影響

(mV)

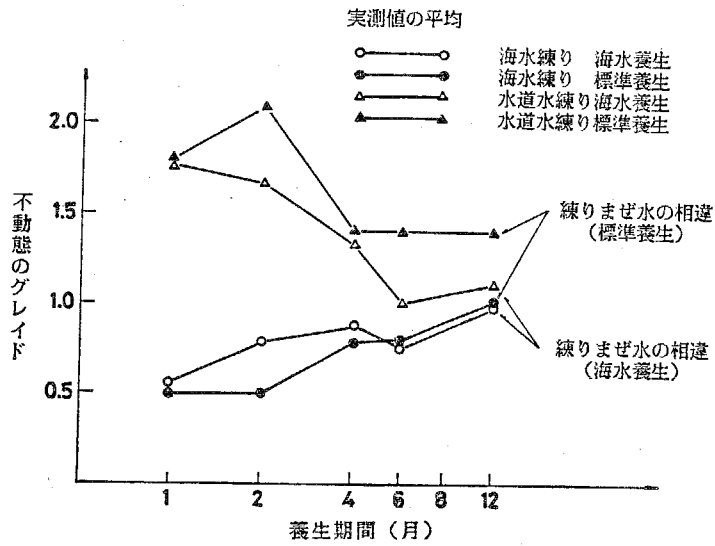
養生条件	練り混ぜ水	材 令					
		1 か月	2 か月	4 か月	6 か月	9 か月	12 か月
N	T ①	-504	-628	-627	-766	-735	-766
	S ②	-878	-834	-826	-844	-804	-806
	① - ②	374 (1.41)	206 (0.54)	199 (0.69)	78 (0.29)	69 (0.45)	39 (0.25)
S	T ③	-543	-599	-623	-586	-509	-517
	S ④	-913	-903	-882	-795	-800	-817
	③ - ④	370 (1.04)	303 (1.01)	259 (0.92)	209 (1.74)	292 (0.98)	300 (0.91)
Total	T ⑤	-524	-613	-625	-671	-616	-635
	S ⑥	-896	-870	-856	-818	-802	-812
	⑤ - ⑥	372 (1.21)	257 (0.77)	231 (0.82)	147 (0.53)	186 (0.72)	177 (0.61)
以下は、1 か月での値との比率							
N	① - ②	1.0	0.55	0.53	0.21	0.18	0.10
S	③ - ④	1.0	0.82	0.70	0.56	0.79	0.81
Total	⑤ - ⑥	1.0	0.69	0.62	0.40	0.50	0.48
1 か月での値を 0 とした場合							
N	① - ②	0	-168	-175	-296	-305	-335
S	③ - ④	0	-67	-111	-161	-78	-70
Total	⑤ - ⑥	0	-115	-141	-225	-186	-195

表 5.25 自然電極電位 (E_{corr}) の経時変化に及ぼす養生条件の影響

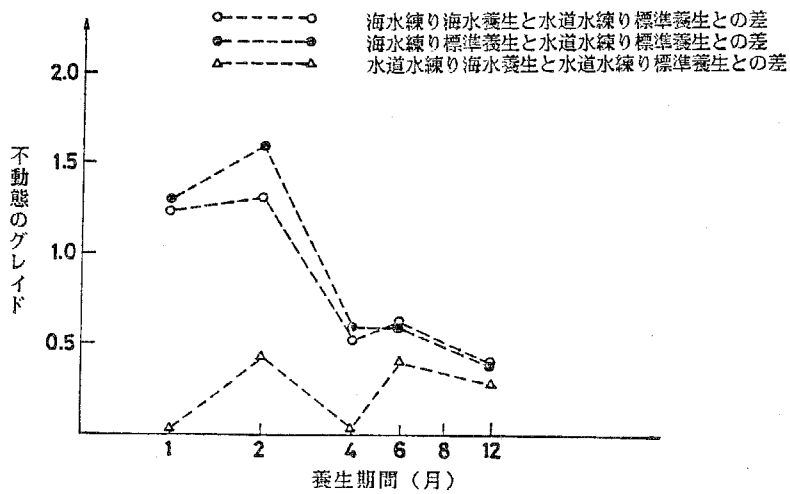
(mV)

練り混ぜ水	養生条件	材 令					
		1 か月	2 か月	4 か月	6 か月	9 か月	12 か月
T	N ①	-475	-670	-671	-772	-783	-748
	S ②	-551	-632	-654	-615	-524	-529
	② - ①	-76 (0.39)	38 (0.09)	17 (0.05)	157 (0.45)	259 (0.73)	219 (0.59)
S	N ③	-876	-856	-860	-875	-809	-811
	S ④	-908	-899	-889	-798	-803	-816
	④ - ③	-32 (0.38)	-43 (0.19)	-29 (0.13)	77 (0.34)	-6 (0.02)	-5 (0.05)
Total	N ⑤	-675	-762	-766	-824	-796	-780
	S ⑥	-729	-766	-772	-707	-664	-673
	⑥ - ⑤	-54 (0.37)	-2.6 (0)	-6.3 (0.01)	117 (0.41)	132 (0.42)	107 (0.37)
以下は、1 か月での差を 0 とした場合							
T	② - ①	0	114	93	233	335	295
S	④ - ③	0	-9	3	109	38	27
Total	⑥ - ⑤	0	51	48	171	186	161

注：() 内は t 値



(a)



(b)

図5.3 練り混ぜ水および養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響

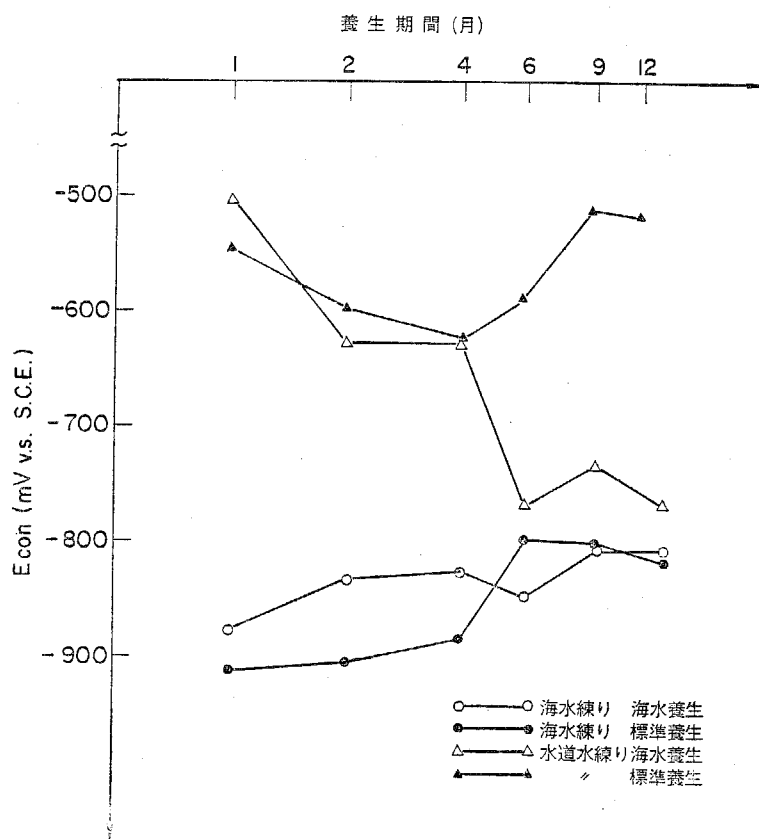


図 5.4 練り混ぜ水および養生条件が自然電極電位に及ぼす影響

る差が平均約120mVであるのに対して、養生条件による差は平均約260mVである。これは、孔食に関すると思われる($E_{rep} - E_{corr}$)については、養生条件の影響が練り混ぜ水の影響を上回ることを示す。

d) 結論

海水養生(3.6%NaCl溶液中)および標準養生(恒温恒湿室内)したコンクリート中鉄筋の腐食につき次のような結論を得た。

イ) 海水練りと水道水練りコンクリート中鉄筋の種々の腐食に関する特性(以後腐食傾向と称する)の差は、材令1ヶ月ではかなり大きい、材令と共に減少していく傾向にある。この傾向は、特に、海水養生において顕著である。この理由として、コンクリート中での可溶性塩素イオンの固定と海水からの塩素イオンの侵入という2つの要因が考えられる。

ロ) 海水養生と標準養生の差は、水道水練りコンクリート中鉄筋の腐食傾向に影響をおよぼす。しかし、材令1年では、練り混ぜ水の影響より小さい。

ハ) 材令1年での腐食量は、海水練りかつ海水養生のコンクリート中鉄筋のものが最も多く、次いで、海水練りかつ標準養生、水道水練りかつ海水養生、水道水練りかつ標準養生の順であった。

ニ) 材令1年で標準養生コンクリート中に残存する可溶性塩素イオン量は、練り混ぜ時の塩素イオン量の6割り弱であった。

5.2 ひびわれのある供試体での実験

(1) 目的

ひびわれを有するコンクリート角柱供試体を用いて、外部環境よりの侵入塩素イオンおよび練り混ぜ水として混入する内在塩素イオンが、コンクリート中鉄筋の腐食におよぼす影響を検討し、ひびわれのない場合との比較検討を行ない、ひびわれの存在の影響を検討する。

さらに、ひびわれのある場合における、各種の電気化学的方法の有効性についても検討する。

(2) 供試体の製作および養生(暴露)条件

a) 使用材料

使用材料は、シリーズ1と同一である。なお、鉄筋の長さのみが30cmと異なったものを用いている。

b) 配合

配合および圧縮強度を表5.26に示す。これらは、シリーズ1で用いたものの1部である。

c) 供試体の形状および配筋

供試体は、 $3 \times 3 \times 16$ in. (約 $7.5 \times 7.5 \times 40$ cm)の寸法を有する。埋め込み鉄筋は、1供試体につき1本とし、かぶり厚は、1.25cmとした。

表 5.26 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	スランブ (cm)	W/C (%)	W (kgf/m ³)	C (kgf/m ³)	G (kgf/m ³)	S (kgf/m ³)	Sea Salt (kgf/m ³)	σ_{28} (kgf/cm ²)	備考
45-T	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	0	455	
45-S	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	6.84	435	
55-T	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	0	337	
55-S	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	6.84	334	
65-T	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	0	254	
65-S	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	6.84	232	
H-T	III	7	50	196.5	391.9	1038.8	603.8	0	* 402	A. E. 剤
H-S	III	7	50	196.5	391.9	1038.8	603.9	7.07	* 398	A. E. 剤
H-H	III	7	50	196.5	391.9	1038.8	603.9	0	* 420	A. E. 剤 + Hydroset

注：スランブは目標値 * 7日強度 圧縮強度は2本の平均値

表 5.27 測定項目および測定本数

配合 (記号)	養生条件	製作本数	測定本数		
			鉄筋の腐食に関する測定	不動態の判定	Potential (自然電極電位)
45-T	N	2	2	1	2
45-S	N	2	2	1	2
55-T	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
55-S	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
65-T	N	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
65-S	N	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
H-T	M	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
H-S	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
H-H	M	2	2	1	2
	S	2	2	1	2

d) 供試体の製作

コンクリートの練りませおよび打ち込みは、シリーズ1と同様に行なった。

締め固めは、振動台を用いて行なった。埋め込み鉄筋は、1層を締め固めた後、所定の位置に固定した。その後、2層目を打ち込み、凝結終了後、上面を金ごて仕上げした。

e) 養生条件

成形したコンクリート供試体は、材令1日で脱型し、材令28日まで恒温恒湿室（20℃、100%R.H.）にて養生した。

28日間の標準養生後、供試体を3つのグループに分け、以下の3種の養生を適用した。すなわち、S養生：恒温恒湿室内において11ヶ月標準養生（全期間1年）、N養生：3.6%NaCl溶液中に11ヶ月浸漬（全期間1年）、X養生：N養生の後3ヶ月間気中養生（全期間1年3ヶ月）、の3つである。

(3) 測定項目

a) 鉄筋の腐食に関する測定

鉄筋の腐食に関する測定としては、表面観察、腐食面積の測定、および錆重量の測定を行なった。

b) 鉄筋の電気化学的測定

鉄筋の電気化学的測定としては、不動態のグレードの判定および自然電極電位の測定を行なった。

上記の測定項目について、配合、養生条件別に整理した測定本数を、表5.27に示す。

(4) コンクリート供試体へのひびわれ導入

材令28日において、コンクリート供試体に1点載荷により曲げモーメントをあたえ曲げひびわれを導入した。

鉄筋応力度として2000kgf/cm²を目標としたが、コンクリートの曲げ強度が高く、所定のひびわれ幅のひびわれが発生するまで載荷したところ鉄筋応力度は約3000kgf/cm²になった。表5.28に、1週間後に測定した残留ひびわれ幅の測定結果を示す。

(5) 実験結果

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

割裂直後では、S養生およびN養生のコンクリート中の鉄筋は湿っており、特に、ひびわれ近傍のものは完全に濡れていた。また、X養生のものの鉄筋は乾いてはいたが、赤茶色の錆がコンクリート表面に滲んでいた。

S養生、X養生のコンクリート中铁筋の錆は、黒いものが大部分で、形状は、楕円状もしくは筋状であった。いずれの形状のものも、凹部に発生しているものが多く、その

表 5.28 供試体の残留ひびわれ幅および
載荷時鉄筋応力度

配合 (記号)	養生 条件	番号	ひびわれ幅 (mm)				鉄筋応力度 (kgf/cm ²)
			①	②	③	total	
45-T	N	1	0.20	—	—	0.20	2397
		2	0.15	—	—	0.15	3120
45-S	N	1	0.15	—	—	0.15	2952
		2	0.15	—	—	0.15	3055
55-T	N	1	0.10	—	—	0.10	2680
		2	0.30	—	—	0.30	2961
		3	0.20	—	—	0.20	3196
		4	0.25	0.06	—	0.31	3290
	S	1	0.04	0.08	0.10	0.22	3055
		2	0.08	—	—	0.08	2961
55-S	N	1	0.20	0.08	—	0.28	3290
		2	0.08	—	—	0.08	2679
		3	0.10	—	—	0.10	2585
		4	0.10	—	—	0.10	3149
	S	1	0.08	—	—	0.08	2632
		2	0.10	—	—	0.10	3385
65-T	N	1	0.08	0.20	—	0.28	2867
		2	0.15	—	—	0.15	2538
65-S	N	1	0.08	—	—	0.08	2914
		2	0.08	—	—	0.08	2491
H-T	N	1	0.10	—	—	0.10	2632
		2	0.05	—	—	0.05	2914
	S	1	0.05	—	—	0.05	2914
		2	0.05	0.05	—	0.10	3769
H-S	H	1	0.10	—	—	0.10	2820
		2	0.05	0.05	—	0.10	3290
	S	1	0.05	—	—	0.05	3290
		2	0.05	—	—	0.05	3290
H-H	N	1	0.09	—	—	0.05	3010
		2	0.05	—	—	0.05	3525
	S	1	0.05	—	—	0.05	3243
		2	0.05	—	—	0.05	3290

傾向は筋状のもので顕著であった。X養生のコンクリート中鉄筋の錆は赤茶色のものが大部分で形状は無定形であった。この場合、凹凸部の境界面に錆が著しかった。錆の色より判断すると、酸素供給量の多いと思われるX養生の方に Fe_2O_3 が多く、酸素供給量の少ないと思われるS養生およびX養生に Fe_3O_4 が多いものと思われた。

ロ) 腐食面積

表面観察後、錆をスケッチしてプランメーターによって面積を測定した。測定結果を表5.29に示す。この表では、配合および養生条件別に腐食面積を平均し、さらに、腐食面積を 90.9 cm^2 として腐食面積率を示した。

ハ) 錆重量

腐食面積測定後、カッターナイフでこすり取れる錆を取り、直示天秤で錆重量を測定した。測定結果を、表5.29に合わせて示す。

b) 鉄筋の電気化学的測定

イ) 不動態のグレイドの判定

1、2、4、6、12ヶ月(X養生では15ヶ月も含む)のコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドを判定し、結果を表5.30に示す。

ロ) 自然電極電位

1、2、4、6、12ヶ月(X養生では15ヶ月も含む)において自然電極電位を測定し、その結果を表5.31に示す。

(6) 考察

a) 養生条件のおよぼす影響

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量におよぼす影響

同一配合で、S養生とN養生、N養生とX養生におけるコンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量の相違を整理して表5.32に示す。N養生とS養生を比較すると、N養生においてやや腐食の多い傾向が認められるが明確ではない。ひびわれのない場合と比較するとひびわれがあると養生条件の相違の影響は小さくなる。

N養生とX養生での相違は明確であって、X養生のコンクリート中の鉄筋の腐食は著しく多い。ひびわれのない場合では、乾湿の繰り返しを受ける感潮部のものが材令10年においても腐食が軽微であるのと対照的である。また、予備的にX養生としたひびわれのない供試体中の鉄筋は腐食が認められなかった。

ロ) 不動態のグレイドにおよぼす影響

表5.33および図5.5に、養生条件が、不動態のグレイドに与える影響を示す。材令2ヶ月では、標準養生の方がやや高い値を示すが、材令4ヶ月以降は、NaCl溶液中の方がやや高い値を示す。

ハ) 自然電極電位におよぼす影響

表5.34に、養生条件が、自然電極電位におよぼす影響を示す。NaCl溶液中に方が貴な値を示す傾向にある。

b) 練り混ぜ水のおよぼす影響

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量におよぼす影響

表5.35に、ひびわれのある供試体において、練り混ぜ水が鉄筋の腐食面積および

表5.29 鉄筋の腐食面積および錆の重量
(ひびわれのある供試体)

配合 (記号)	養生条件	腐食面積 (mm ²)				食積率 (%)	錆の重量 (mg)				錆の厚さ (mg/mm ²) B/A
		平均		平均			平均		平均		
		① (③)	② (④)	① (③)	② (④)		① (③)	② (④)	① (③)	② (④)	
45-T	N	150	10	80	0.88	23	0	11.5	0.14		
45-S	N	27	28	27.0	0.30	5	5	5	0.18		
55-T	N	134	196	10	1.2	12	13	8.33	0.08		
	S	0	0	0	0	0	0	0	—		
55-S	N	10	93	49	0.54	0	10	5	0.10		
	S	67	89	78	0.86	3	5	4	0.05		
65-T	N	26	40	33	0.36	3	11	7	0.21		
65-S	N	11	9	10	0.11	2	8	5	0.50		
H-T	N	0	3	1.5	0.02	0	1	0.5	0.33		
	S	0	0	0	0	0	0	0	—		
H-S	N	10	37	23.5	0.26	1.5	3	2.25	0.10		
	S	21	66	43.5	0.48	1	1	1	0.02		
H-H	N	0	12	6	0.07	0	5	2.5	0.42		
	S	39	19	29	0.32	4	1	2.5	0.13		
55-T	X	2600	1035	1818	20.0	40	23	31.5	0.02		
55-S	X	250	76	163	1.79	14	3	8.5	0.05		
65-T	X	2070	243	1157	12.7	42	14	28	0.02		
65-S	X	757	287	522	5.74	26	11	18.5	0.04		

注: X養生の錆はすべて赤茶

表5.30 ひびわれのある供試体における
アノード分極曲線を用いた不動態判定

配合 (記号)	養生 条件	測定材令 (月)						平均値 (重み 付き)
		1		2		3		
		1	2	1	2	1	2	
45-T	N	3	2	1	1	1	1.38	
45-S	N	1	2	2	2	2	1.88	
55-T	N	0	2	1	1	1	1	
	S	2	2	1	1	1	1.25	
55-S	N	1	1	1	1	1	1	
	S	1	1	1	2	1	1.33	
65-T	1	1	1	1	1	1	1	
65-S	N	1	1	1	1	1	1	
H-T	N	3	3	3	3	2	2.75	
	S	2	3	1	1	1	1.38	
H-S	N	2	2	2	3	3	2.58	
	S	2	3	1	1	1	1.54	
H-H	N	1	1	2	3	2	2.08	
	S	1	1	1	1	1	1	
							15か月	
55-T	X	1	3	3	1	1	5.58	
55-S	X	0	1	2	2	1	1.38	
65-T	X	1	1	1	2	1	1.33	
65-S	X	1	1	3	3	1	2	

表 5.31 ひびわれ供試体の自然電極電位の測定値

配 合 (記 号)	養生条件	測 定 材 令 (月)						平均値 (重み付き)	
		1	2	4	6	9	12		
45-T	N	-344	-396	-437	-592	-558	-535	-495	
45-S	N	-328	-377	-377	-441	-369	-320	-375	
55-T	N S	-401	-589	-461	-664	-534	-399	-522	
		-254	-232	-646	-634	-182	-92	-358	
55-S	N S	-722	-503	-479	-562	-619	-544	-573	
		-859	-712	-849	-861	-781	-653	-794	
65-T	N	-385	-336	-521	-593	-612	-600	-529	
65-S	N	-273	-421	-438	-459	-441	-464	-424	
H-T	N S	-57	-69	-143	-310	-323	-344	-228	
		-109	-362	-711	-841	-822	-675	-642	
H-S	N S	-208	-211	-307	-329	-331	-346	-298	
		-458	-562	-858	-563	-867	-773	-701	
H-H	N S	-342	-285	-293	-345	-436	-565	-379	
		-498	-805	-814	-818	-819	-758	-734	
									15ヵ月
55-T	X	-355	-248	-280	-394	-633	-704	-450	-332
55-S	X	-181	-294	-262	-254	-391	-426	-307	-236
65-T	X	-300	-425	-295	-408	-361	-475	-374	-340
65-S	X	-181	-333	-305	-525	-596	-462	-431	-226

表 5.32 養生条件の鉄筋の腐食面積および
錆の重量に及ぼす影響

(1) N養生とS養生

配 合 (記号)	腐食面積(mm ²)			錆の重量(mgf)		
	養生条件		①—②	養生条件		③—④
	N①	S②		N③	S④	
55-T	110	0	110	8.33	0	8.33
55-S	49	78	- 29	5	4	1
H-T	1.5	0	1.5	0.5	0	0.5
H-S	23.5	43.5	-20.0	2.25	1	1.25
H-H	6	20	- 23	2.5	2.5	0
Total	平 均		7.9	平 均		2.22
	S. D.		58.2	S. D.		3.45
	t		0.14	t		0.64

(2) X養生とN養生

配 合	X①	N②	①—②	X③	N④	③—④
55-T	1818	110	1708	31.5	8.33	23.17
55-S	163	49	114	8.5	5	3.5
65-T	1157	33	1124	28.0	7	21.0
65-S	522	10	512	18.5	5	13.5
Total	平 均		865	平 均		15.3
	S. D.		699	S. D.		8.98
	t		1.24	t		1.69

表 5.33 ひびわれのある供試体における養生条件が
不動態のグレードに及ぼす影響 (N養生とS養生)

配 合 (記号)	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
	養生条件		②—①	養生条件		④—③	養生条件		⑥—⑤	養生条件		⑧—⑦	養生条件		⑩—⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
55-T	2	2	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1.25	0.25
55-S	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	1	0	1	1.33	0.33
H-T	3	3	0	3	1	- 2	3	1	- 2	2	1	- 1	2.75	1.38	-1.37
H-S	2	3	1	2	1	- 1	3	1	- 2	3	1	- 2	2.58	1.54	-1.04
H-H	1	1	0	2	1	- 1	3	1	- 2	2	1	- 1	2.08	1	-1.08
平 均	1.8	2.0	0.2	1.8	1	- 0.8	2.2	1.2	- 1	1.8	1	- 0.8	1.88	1.3	-0.58
S. D.	0.84	1	0.45	0.84	0	0.84	1.10	0.45	1.41	0.84	0	0.84	0.84	0.20	0.81
t	—	—	0.45	—	—	-0.96	—	—	-0.71	—	—	-0.96	—	—	-0.72

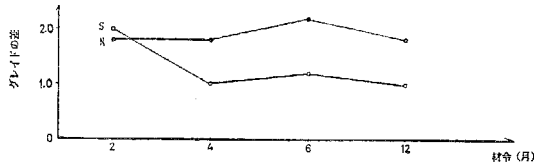


図 5.5 ひびわれのない供試体における養生条件が不動態のグレードに及ぼす影響

表 5.34 ひびわれのある供試体における養生条件が自然電極電位に及ぼす影響

配 合 (記号)	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦	養生条件		⑩-⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
55-T	-589	-232	357	-461	-646	-185	-664	-634	30	-399	-92	307	-522	-358	164
55-S	-503	-712	-209	-479	-849	-370	-562	-861	-299	-544	-653	-109	-573	-794	-221
H-T	-69	-362	-293	-143	-711	-568	-310	-841	-531	-344	-675	-331	-228	-642	-414
H-S	-211	-562	-351	-307	-858	-551	-328	-563	-235	-346	-773	-427	-298	-701	-403
H-H	-285	-805	-520	-293	-814	-521	-345	-818	-473	-565	-758	-193	-379	-734	-355
平均	-331	-535	-203	-337	-776	-439	-442	-743	-302	-440	-590	-151	-400	-646	-246
S. D.	213	238	333	138	93	162	161	135	222	107	283	284	146	170	242
t	-	-	-0.61	-	-	-2.71	-	-	-1.36	-	-	-0.53	-	-	-1.02

表 5.35 ひびわれのある供試体における練り混ぜ水の相違が鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

(T:水道水, S:海水)

配 号 (記号)	養 生 条 件	腐食面積(mm ²)			錆の重量(mgf)		
		練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ水		④-③
		T①	S②		T③	S④	
45	N	80.0	27.0	-53.0	11.5	5.0	-6.5
55	"	110.0	49.0	-61.0	8.33	5.0	-3.33
65	"	33.0	10.0	-23.0	7.0	5.0	-2.0
H	"	1.5	23.5	+22.0	0.5	2.25	+1.75
小計(平均)		56.1	27.4	-28.7	6.83	4.31	-2.52
55	S	0	78.0	78.0	0	4.0	4.0
H	"	0	43.5	43.5	0	1.0	1.0
小計(平均)		0	60.8	60.8	0	2.5	2.5
55	X	1818	163	-1655	31.5	8.5	-23
65	"	1157	522	-635	28.0	18.5	-9.5
55	X	1818	163	-1655	31.5	8.5	-23
65	"	1157	522	-635	28.0	18.5	-9.5
小計(平均)		1488	343	-1145	29.8	13.5	-16.3

鉛重量におよぼす影響を示す。標準養生（S養生）では、練り混ぜ水の影響は明かで、海水練りのものは腐食しているのに対し、水道水練りものは腐食していない傾向がある。ひびわれのない場合とあわせると、水道水練りかつ標準養生のものは合計24本で、そのうちひびわれのある場合に2本のみ腐食しているだけで、ほとんど腐食しないものと判断される。

しかし、N養生（NaCl溶液中）あるいはX養生（NaCl溶液中養生の後気中養生）では、全く異なる傾向を示す。即ち、表5.35（ひびわれのある場合）によれば、水道水練りものの腐食が比較的多いことが認められる。この理由の1つとしては、水道水練りの場合には、ひびわれ部とその他の部分との電気化学的性質が、海水練りの場合よりも、より異なりマクロセル電流がより大きいことが考えられる。いずれの理由にせよ、ひびわれがありかつ塩素イオンが大量に侵入する場合には、海水練りコンクリートの防食性能が水道水練りものに比較して劣るという事実はない。腐食状況より判断すると、ひびわれの存在によって、腐食の程度は、概略、（海水練りかつ海水養生）≒（海水練りかつ標準養生）≒（水道水練りかつ海水養生）>（水道水練りかつ標準養生）であると認められた。

なお、表5.36に練り混ぜ水および養生条件別の鉛厚さを示した。養生条件による差が明かに認められ、練り混ぜ水による差は認められない。

ロ) 不動態のグレイドにおよぼす影響

表5.37および図5.6に、練り混ぜ水が不動態のグレイドにおよぼす影響を示した。材令2ヶ月では水道水練りの方が明かに高い値を示す。材令4ヶ月、6ヶ月となると、海水練りの方がむしろ高くなり、材令12ヶ月では、ほとんど差はないと判断される。

ハ) 自然電極電位におよぼす影響

表5.38および図5.7に練り混ぜ水が自然電極電位におよぼす影響を示す。S養生では、明かに水道水練りの方が高い値を示すが、N養生では練り混ぜ水による差は小さいことが認められる。

シ) ひびわれ幅におよぼす影響

表5.39、図5.8および図5.9に鉄筋の腐食面積におよぼす最大ひびわれ幅およびひびわれ幅の合計値の影響を示す。S養生かつ海水練りおよびN養生かつ水道水練りではひびわれ幅の大きいほど腐食面積の大きいことが認められたが、N養生かつ海水練りでは明確ではなかった。

ド) ひびわれのない場合との比較

ひびわれの有無による、練り混ぜ水および養生条件の腐食におよぼす影響を表5.40に示す。

ひびわれの有無に関係なく共通している点は、水道水練りかつ標準養生のものがほとんど腐食していないことである。

ひびわれの有無によって、大きく異なる点は、水道水練りかつ海水養生（NaCl溶液中）の場合で、ひびわれのない場合は、腐食面積、鉛重量其他の組み合わせに比較して少ない方であるのに対し、ひびわれのある場合では、比較的多い方である。

ひびわれのない場合でも、海水養生では、水道水練りと海水練りの腐食傾向は徐々にちかづく傾向にあったが、ひびわれのある場合では、腐食面積、鉛重量に関しても海水

表 5.36 錆の厚さの比較(練り混ぜ水, 養生条件別の平均値の比較)

養生条件 \ 練り混ぜ水	水道水 (T)	海水 (S)
N	0.19	0.26
S	—	0.06
X	0.02	0.05

(mgf/mm²)

表 5.37 ひびわれのある供試体における練り混ぜ水が不動態のグレードに及ぼす影響

配合 (記号)	養生条件	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平均		
		練り混ぜ水		①-②	練り混ぜ水		③-④	練り混ぜ水		⑤-⑥	練り混ぜ水		⑦-⑧	練り混ぜ水		⑨-⑩
		T①	S②		T③	S④		T⑤	S⑥		T⑦	S⑧		T⑨	S⑩	
45	N	2	2	0	1	2	-1	1	2	-1	1	2	-1	1.38	1.88	-0.5
55	"	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65	"	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
H	"	3	2	1	3	2	1	3	3	0	2	3	-1	2.75	2.58	0.17
小計(平均)		2	1.5	0.5	1.5	1.5	0	1.5	1.75	-0.25	1.25	1.75	-0.5	1.53	1.62	-0.08
55	S	2	1	1	1	1	0	1	2	-1	1	1	0	1.25	1.33	-0.08
H	"	3	3	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1.38	1.54	-0.16
小計(平均)		2.5	2	0.5	1	1	0	1	1.5	-0.5	1	1	0	1.32	1.44	-0.12
55	X	3	1	2	3	2	1	1	2	-1	1	1	0	1.58	1.38	0.20
65	"	1	1	0	1	3	-2	2	3	-1	1	1	0	1.33	2	-0.67
小計(平均)		2	1	1	2	2.5	-0.5	1.5	2.5	-1	1	1	0	1.46	1.69	-0.24

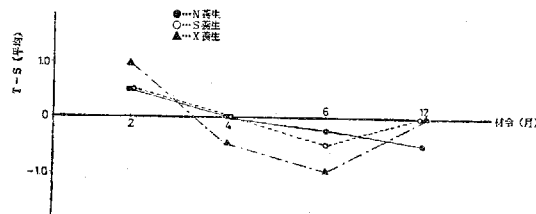


図 5.6 ひびわれのある供試体における養生条件が不動態のグレードに及ぼす影響

表 5.38 練り混ぜ水が自然電極電位 (E_{corr}) に及ぼす影響

(mV)

配合 (記号)	養生 条件	材令2か月			材令6か月			材令9か月			材令12か月			平均値		
		練り混ぜ 水		①-②	練り混ぜ 水		③-④	練り混ぜ水		⑤-⑥	練り混ぜ水		⑦-⑧	練り混ぜ水		⑨-⑩
		T①	S②		T③	S④		T⑤	S⑥		T⑦	S⑧		T⑨	S⑩	
45	N	-396	-377	19	-592	-441	-151	-558	-369	-189	-535	-320	-215	-495	-375	-120
55	N	-589	-503	86	-664	-562	-102	-534	-619	85	-366	-544	145	-522	-573	51
	X(N)	-248	-294	46	-394	-254	-140	-633	-391	-242	-704	-426	-278	-450	-307	-143
65	N	-336	-421	85	-593	-459	-134	-612	-441	-171	-600	-464	-136	-529	-424	-105
	X(N)	-425	-333	92	-408	-525	117	-361	-596	235	-475	-431	44	-340	-226	-114
H	N	-69	-211	142	-310	-329	19	-323	-331	8	-344	-346	2	-228	-298	70
小計	平均	-344	-357	13	-494	-428	65	-504	-458	46	-510	-422	88	-427	-367	60
	S. D.	176	102	95	141	117	109	131	121	186	132	81	154	120	122	94
	t	-	-	0.14	-	-	-0.60	-	-	-0.25	-	-	-0.57	-	-	-0.63
55	S	-232	-712	480	-634	-861	227	-182	-781	599	-92	-653	561	-358	-794	436
H	S	-362	-562	200	-	-	-	-822	-867	45	-675	-773	98	-642	-701	59
小計(平均)		-297	-637	340	-634	-861	227	-502	-824	322	-384	-713	330	-500	-748	248

表 5.39 ひびわれ幅の腐食面積に及ぼす影響

(mm²)

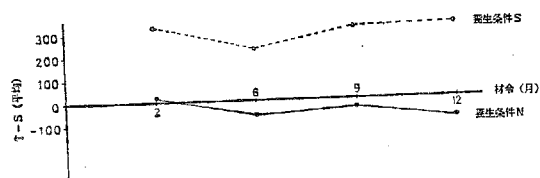


図 5.7 練り混ぜ水が自然電極電位に及ぼす影響

最大ひび われ幅 (mm)	養生条件および練り混ぜ水					
	S 養生			N 養生		
	水道水	海水	平均	水道水	海水	平均
0.05	0	43	22	3	37	20
0.08	0	67	39	-	38	(38)
0.10	0	89	45	67	27	47
0.15	-	-	-	25	28	27
0.20	-	-	-	59	10	35
0.30	-	-	-	196	-	(196)

ひびわれ 幅の合計 (mm)	養生条件および練り混ぜ水					
	S 養生			N 養生		
	水道水	海水	平均	水道水	海水	平均
0.05	0	43	22	3	-	(3)
0.08	0	67	39	-	38	(38)
0.10	0	89	45	67	30	49
0.15	-	-	-	25	28	27
0.2-0.25	0	-	(0)	150	-	(150)
0.25以上	-	-	-	111	10	61

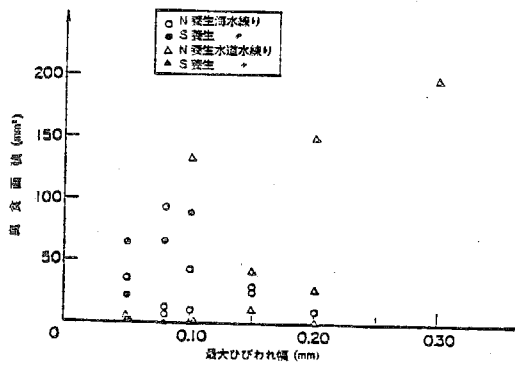


図 5.8 最大ひびわれ幅と腐食面積との関係

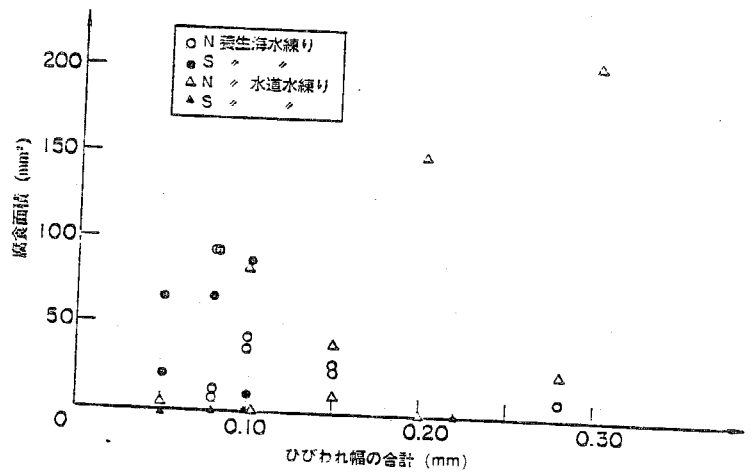


図 5.9 ひびわれ幅の合計値と腐食面積との関係

表 5.40 ひびわれの有無による腐食に及ぼす練り混ぜ水および養生条件の影響

(1) 腐食面積率の平均値 (%)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	0.62②	0.05③	0.30③	0.52①
S	0.0④	0.01④	0.67①	0.30②

(2) 錆の単位面積あたり重量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	75.1④	8.6③	47.4②	76.9①
S	0④	2.5④	27.5③	18.2②

(3) 腐食発生の割合 (%)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	78③	37③	89②	95①
S	0④	10④	100①	68②

注：○内はひびわれの有無別の順位

練りが不利とは言えないようである。この理由として、短期間の内に鉄筋表面に海水が侵入することが挙げられる。

なお、標準養生では、ひびわれのある場合の方が、水道水練りと海水練りとの差はより明確であった。

不動態のグレイドにおよぼす影響を図5.10に示す。この図より判断すれば、ひびわれのある場合、練り混ぜ水よりも養生条件の影響が卓越して来るのは、材令4ヶ月以降と判断される。また、ひびわれのない場合、海水養生の影響が卓越して来るのは12ヶ月以降と考えられる。これによっても、ひびわれのある場合の方が、練り混ぜ水の影響が少ないことが分かる。

e) 結論

標準養生（恒温恒湿室内、材令12ヶ月まで）、海水養生（3.6%NaCl溶液中、材令12ヶ月）および海水養生後気中養生（材令15ヶ月まで）をしたひびわれのあるコンクリート中铁筋の腐食につき、次の結論を得た。

イ) 海水練りが腐食量におよぼす影響は、標準養生では、海水練りの腐食量の方が、水道水練りのものに比較して多いが、海水養生あるいは海水養生後気中養生では、むしろ海水練りの腐食量が少ない。

ロ) 腐食量に関し、ひびわれのない場合との大きな相違は、水道水練りかつ海水養生の腐食量がひびわれのある場合では大きいことである。

ハ) 海水養生後気中養生のものの腐食量は著しく大きい。

ニ) ひびわれ幅の大きな程腐食量は大きい傾向がある。

ホ) 不動態のグレイドより判断すると、海水練りの影響は、材令4ヶ月以降は、表面には現われない。この期間は、ひびわれにない場合より短い。

5.3 モデル供試体を用いたひびわれの影響の検討

(1) 目的

本節の目的は、5.1および5.2で明かとなったひびわれの存在の腐食に関する影響について、主として電気化学的試験を行ない、ひびわれの存在による腐食機構の変化を明らかにすることである。さらに、各種の電気化学的方法の、ひびわれのあるコンクリート中铁筋への有効性の検討も行なった。塩素イオンの影響の検討が含まれるのは当然である。

電気化学的方法としては、3章で述べた鉄筋を12の要素に分割したモデル鉄筋をコンクリート中に埋め込んだ供試体を用い、要素鉄筋各々のアノードおよびカソード分極曲線の測定および要素鉄筋相互の電流を測定することによって、マイクロセル電流およびマクロセル電流の算定、不動態のグレイドの判定および自然電極電位におよぼすカソード分極曲線の影響の検討等を行なった。さらに、乾湿がマクロセル電流におよぼす影響も検討した。

(2) 供試体の製作および養生条件

a) 使用材料

使用材料は、5.1のものと同一である。ただし、タイプIIIセメントは、用いなかっ

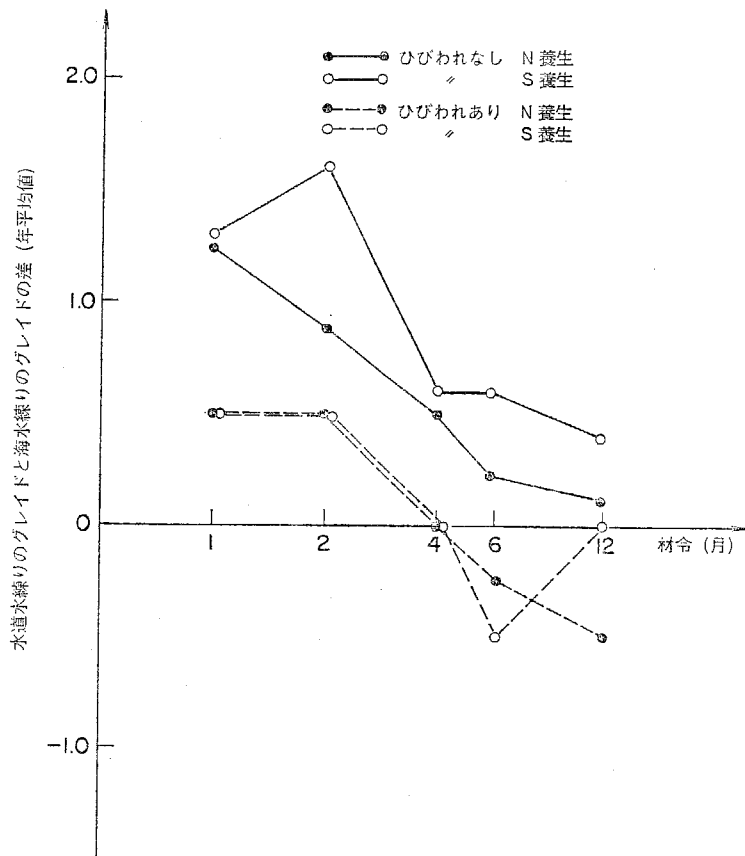


図 5.10 ひびわれの有無による纏り混ぜ水が不動態のグレードに及ぼす影響の相違

た。

b) 配合

配合を、表5.41に示す。この配合も、5.1の配合の1部と同一である。

c) 供試体の形状および配筋

供試体は、S、VおよびVC型の3種を用いた。

S型は、 $\phi 6 \times 6$ in. (約 15×15 cm)の寸法の円柱供試体であり、V型およびVC型は、 $7.5 \times 7.5 \times 40$ cmの角柱供試体である。

S型の埋め込み鉄筋の本数は、1供試体につき2本(長さ10 cm)とし、かぶりは各々1.25 cmおよび7 cmとした。

V型およびVC型の鉄筋としては、3章で述べた図3.10に示すような鉄筋を用いて、各供試体にそれを埋め込んだ。かぶりは約3.3 cmとした。

d) 供試体の製作

供試体の製作は、5.1と同様に行なった。

e) 養生条件

成形したコンクリート供試体は、室内に静置し、濡れた布でおおい、1日で脱型後、恒温恒湿室(20℃、100% R. H.)において2ヶ月間養生した。その後、1部は水道水中養生し、残りは3.6% NaCl溶液中で養生した。

(3) 測定項目

a) 鉄筋の腐食に関する測定

鉄筋の腐食に関しては、主として表面観察を行なった。

b) 電気化学的測定

鉄筋の電気化学的測定として、自然電極電位、分極曲線、腐食電流、および、マクロセル電流を測定した。

なお、供試体の種類の一覧を表5.42に示す。

(4) 実験結果

a) 鉄筋の腐食に関する測定

S型供試体を材令3ヶ月で鉄筋軸にそってかつ裂し、鉄筋を露出させた状態で、その後、水中養生とした。材令6ヶ月(鉄筋露出後6ヶ月)において、鉄筋の表面観察を行なった。比較的面積の大きな赤茶色の厚い錆が露出面の1部に観察された。それらの腐食面積および錆重量を、表5.43に示す。

V型およびVC型供試体は、材令9ヶ月で鉄筋を露出させ観察を行なった。V型供試体の錆は非常に軽微であり、茶または黒色のものであった。VC型供試体の錆は、ひびわれ部全体を覆っており、他の部分では、錆は、全く観察されなかった。

表 5.41 コンクリートの配合

記号	スラブ (cm)	W/C (%)	W (kgf/m ³)	C (kgf/m ³)	G (kgf/m ³)	S (kgf/m ³)	Sea Salt (kgf/m ³)	σ_{28} (kgf/cm ²)	供試体の記号
45-5-T	5	45	190	422.7	748.2	952.7	0	455	V-45-T, VC-45-T
45-5-S	5	45	190	422.7	748.2	952.7	6.84	435	V-45-S, VC-45-S
65-12-T	12	65	240	369.7	748.2	874.4	0	231	V-65-T, VC-65-T
65-12-S	12	65	240	369.7	748.2	874.4	8.14	251	V-65-S, VC-65-S
45-7-T	7	45	220	488.9	748.2	819.5	0	448	S型
45-12-T	12	45	240	533.3	748.7	720.8	0	444	V-45-I-T

表 5.42 供試体の種類

供試体の 名称	配 合 (記号)	供した試験および本数
S型	45-7-T	ひびわれ前後の電気化学的 変化 2本
V-45-T	45-5-T	Open 供試体1本, Closed 供試体2本, Dry and Wet 供試体2本
V-65-T	65-12-T	同上
V-65-S	65-12-S	同上
V-45-12-T	45-12-T	同上
V-45-S	45-5-S	Open 供試体1本, Closed 供試体1本
VC-45-T	45-5-T	Open 供試体1本
VC-45-S	45-5-S	Closed 供試体4本 (水道水中2本, NaCl 溶 液中2本)
VC-65-T	65-12-T	Dry and Wet 供試体2本
VC-65-S	65-12-S	

表 5.43 S型供試体鉄筋の腐食面積および錆の重量

供 試 体	腐食面積 (mm ²)	錆の重量 (mgf)	錆の厚さ (mgf/mm ²)
Sa-1 (かぶり 1.25 cm)	35	40	1.14
Sb-1 (かぶり 1.25 cm)	32	18	0.56
Sa-7 (かぶり 7 cm)	125	79	0.63
Sb-7 (かぶり 7 cm)	2	1	0.5
* 45-7-T	0	0	—

* 同一配合のコンクリートを用いたひびわれのないもの

b) 自然電極電位

イ) ひびわれ発生前後の自然電極電位の変化

S型供試体(SaおよびSb)を材令3ヶ月でかつ裂し、鉄筋を露出させて、その前後での自然電極電位の変化を測定した。結果を、表5.44に示す。これより、Sa-1cm、Sa-7cmおよびSb-7cmは、ひびわれの発生によって、電位は貴となり、Sb-7cmのみ逆に卑となった。いずれも、材令1年では、-330-530mVとなった。

これを、ひびわれのない供試体(45-7-T)のものと比較すると、ひびわれのある供試体の方が概して貴であり、かつ、前述したように赤茶色の錆を有している。このことは、ひびわれのある場合には、一体としての自然電極電位を比較することは問題があることを示す。

ロ) モデル供試体の自然電極電位

V型(ひびわれのないモデル供試体)とVC型(ひびわれのあるモデル供試体)の自然電極電位を表5.45に示す。明かにひびわれのあるVC型の電位が貴であることが認められた。

ハ) モデル供試体の各要素鉄筋の自然電極電位

表5.46および表5.47に、V型およびVC型の各要素鉄筋の自然電極電位を示す。ここで、オープン供試体とは、図5.11に示すように、各要素鉄筋を常時電氣的に独立にしておくものであり、クローズド供試体と波、各要素鉄筋を常時電氣的に接続しているものである。

V型では、オープン供試体の要素鉄筋の自然電極電位の平均値はバラツキはあるものの、クローズド供試体のもとのほぼ同一である。このことは、V型では電氣的に接合しなくても、各要素鉄筋の電気化学的性質は変化しないことを示唆すると思われる。また、2.5cmでの測定と30cmでのものとで相違がないとも言えよう。

VC型では、オープンとクローズド供試体の各要素鉄筋の電位とは明かに相違する。このことは、要素鉄筋が電氣的に接続された場合、異種の要素(ここでは、ひびわれ部)が存在すると、接続されない場合とは事なり、なんらかの電気化学的変化が起こることを意味している。即ち、ひびわれ部がある場合、全体は部分の平均では表わせないのである。

c) アノード分極曲線および不動態のグレイド

イ) ひびわれ発生前後のアノード分極曲線

図5.12に、材令2ヶ月でのひびわれのない供試体のアノード分極曲線と、ひびわれ(かつ裂)後2週間でのアノード分極曲線を示す。不動態のグレイドは、Sb-7(ひびわれ前)がグレイド3、ひびわれ後がグレイド2である他は、すべてグレイド1と判定でき、ひびわれ前後で大きな差はない。しかし、ひびわれ発生前後では錆の状況が異なりグレイドが差がないこととは傾向が異なる。

ロ) ひびわれのないモデル供試体のアノード分極曲線および不動態のグレイド

材令6ヶ月で、ひびわれのないクローズドモデル供試体において、全体としてのアノード分極曲線と各要素のアノード分極曲線を水道水中で測定し、それらを比較した。

配合65-12-Tおよび45-5-Sについての測定結果を図5.13および図5.14に示す。いずれの図においても全体と各要素鉄筋の分極曲線には大差ない。したがって、不動態のグレイドも同一である。このことは、要素鉄筋相互の電気化学的性質が

表 5.44 ひびわれ前後での自然電極電位の変化 (in tap water)

材令 鉄筋	1か月 nocrack	2か月 nocrack	cracking	+5分	+10分	+20分	+1時間	+2時間	+6時間	+1日	+1週間	+2週間	1年	
Sa-1(かぶり 1.25 cm)	-483	-875		-472	-501	-522	-553	-540	-456	-461	-534	-640	-474	
Sb-1(")	-909	-908		-523	-540	-549	-613	-627	-645	-641	-552	-633	-514	
Sa-7(かぶり 7 cm)	-916	-898		-510	-460	-441	-378	-338	-471	-605	-834	-637	-522	
Sb-7(")	-130	-130		-149	-84	-123	-176	-179	-171	-548	-519	-516	-336	
平均	-610	-703		-414	-396	-409	-430	-421	-436	-564	-535	-606	-462	
S. D.	378	382		178	211	196	197	202	196	78	14	60	86	
平均 (S. D.)	-656 (356)			-467 (156)										
*45-7-T (2本平均)	-867	-872												-574

* 同一配合のコンクリートを用いたひびわれのない供試体

表 5.45 自然電極電位の測定 (2本の平均値)

供試体	材令				平均
	20日	2か月	3か月	6か月	
V-45-T	-877	-857	-821	-777	-833
V-45-S	-939	-907	-892	-962	-925
V-65-T	-873	-165	-368	-351	-439
V-65-S	-844	-832	-720	-562	-740
VC-45-T	-158	-368	-391	-249	-292
VC-45-S	-274	-172	-139	-190	-194
VC-65-T	-161	-151	-150	-173	-159
VC-65-S	-689	-673	-588	-313	-362

表 5.46 V型供試体の各要素鉄筋の自然電極電位

配合	材令	Open 供試体		Closed 供試体 ②	①-②
		平均①	S. D.		
45-T	7日	-554	207	-397	-157
	28日	-809	160	-877	68
	2か月	-815	152	-857	42
65-T	7日	-509	241	-487	-22
	14日	-597	277	-546	-51
	28日	-665	285	-873	208
	2か月	-140	54	-165	25
45-S	7日	-940	7	-919	-21
	28日	-953	12	-939	-14
	2か月	-901	9	-907	6
				平均	8
				S. D.	93

表 5.47 VC型供試体の各要素鉄筋の自然電極電位

(mV)

配合	材令	Open 供試体			Closed 供試体
		ひびわれ部	その他の部分 平均	S. D.	
45-T	7日	-522	-599	246	-248
	28日	-509	-704	216	-158
	2か月	-571	-974	18	-368
	3か月	-501	-895	77	-391
45-S	28日	-296	-876	134	-274
65-T	28日	-114	-810	161	-161
	2か月	-510	-788	194	-151
	3か月	-392	-784	160	-150

供試体	材令				平均
	28日	2ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	
V-45-T	-877	-857	-821	-777	-833
V-45-S	-939	-907	-892	-952	-925
V-65-T	-873	-165	-368	-351	-439
V-65-S	-844	-832	-720	-562	-740
VC-45-T	-158	-368	-391	-249	-292
VC-45-S	-274	-172	-139	-190	-194
VC-65-T	-161	-151	-150	-173	-159
VC-65-S	-689	-673	-588	-313	-362

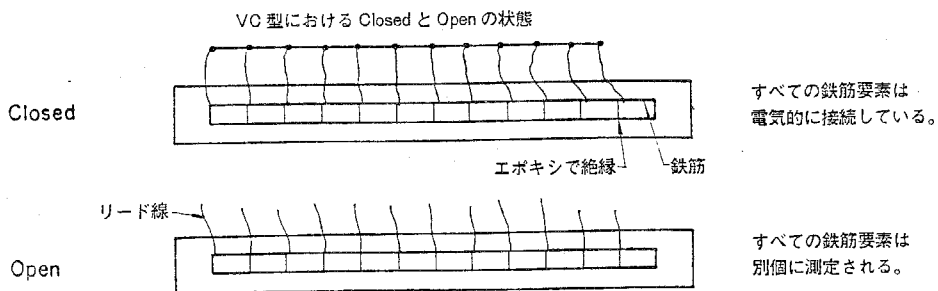


図 5.11 閉路供試体と開路供試体

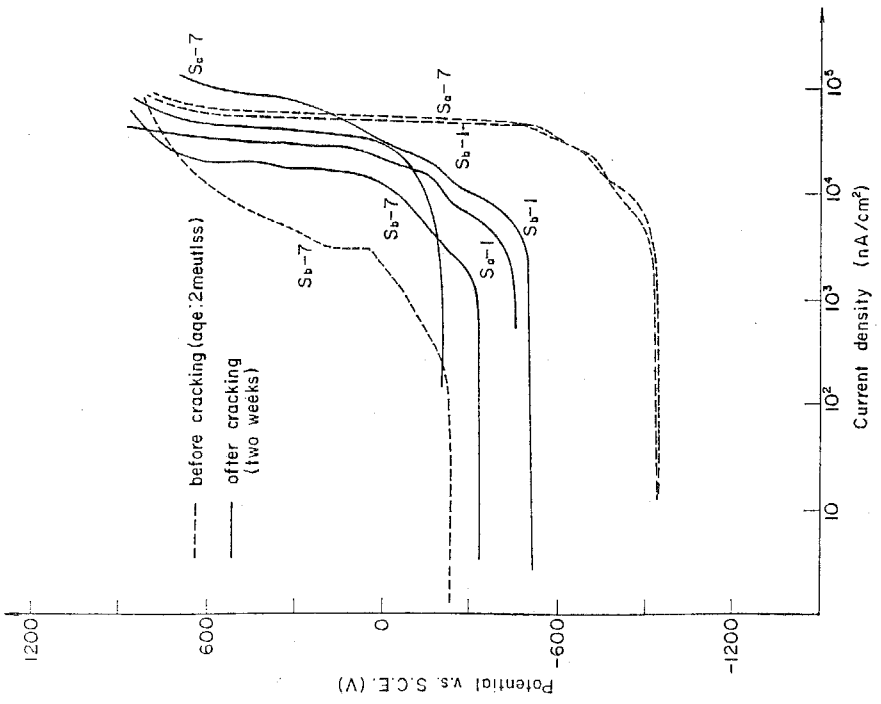
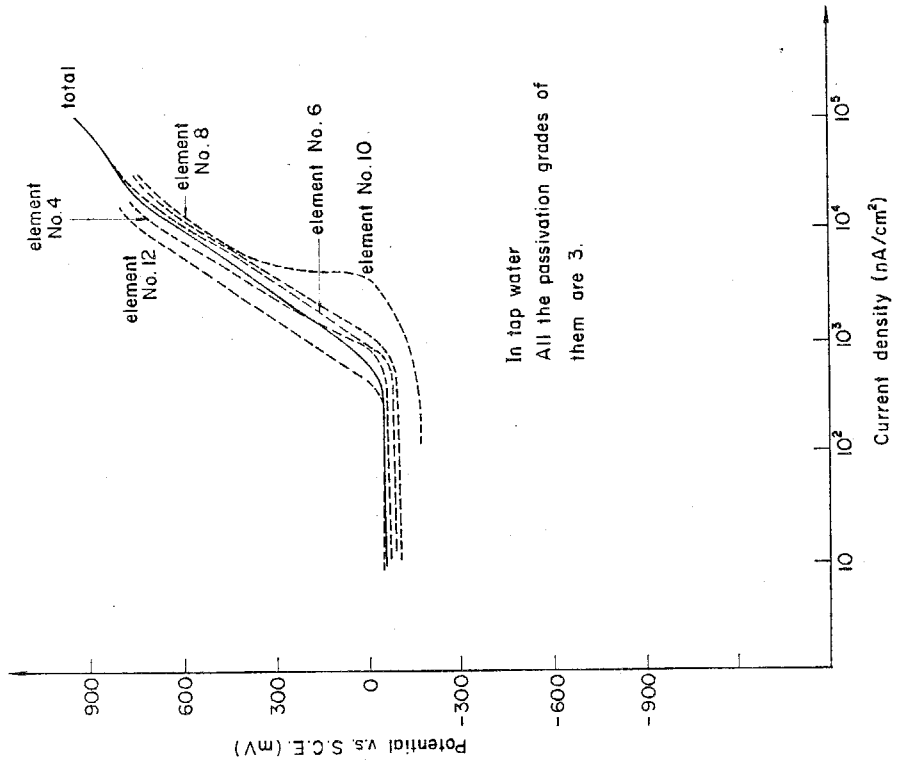


図5.13 ひびわれのな、供試体(配合65-12-T)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

図5.12 ひびわれ前後のアノード分極曲線の変化

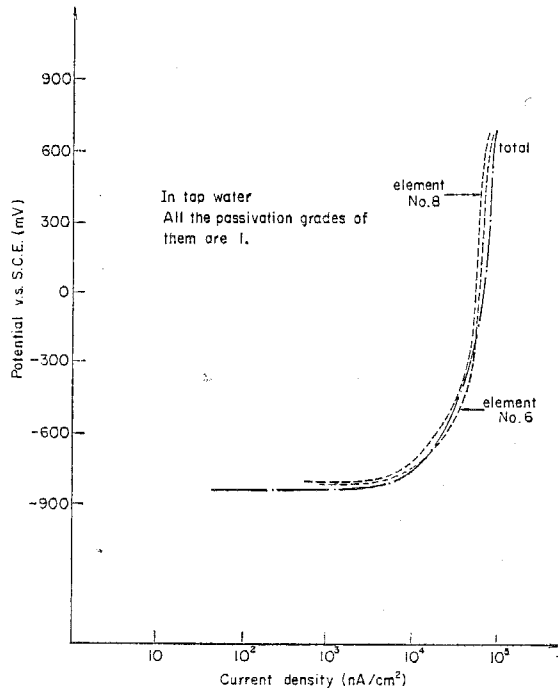


図 5.14 ひびわれのない供試体(配合 45-5-S)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

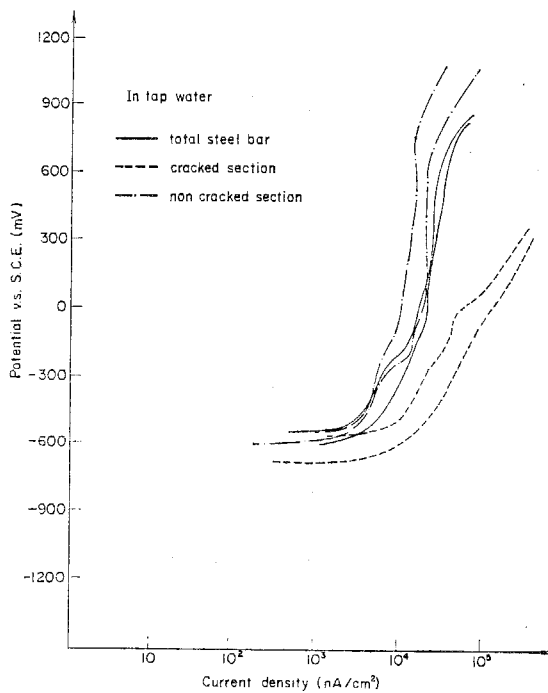


図 5.15 ひびわれのある供試体(配合 65-5-T)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

同一であることを示すとともに、2.5 cmでの測定と30 cmでの測定に差のないことも示している。

ハ) ひびわれのあるモデル供試体のアノード分極曲線および不動態のグレイド

① 水道水中での測定

材令6ヶ月において、ひびわれのあるクローズド供試体の全体としてのアノード分極曲線を測定し、その1ヶ月後に各要素鉄筋（ひびわれ部を含む）のアノード分極曲線を測定した。その測定結果を、図5.15、図5.16、および、図5.17に示す。

これらの図より、ひびわれ部鉄筋の電流密度は大きく、不動態のグレイドは0と判定された。また、ひびわれ部には、明らかに赤茶色の錆が観察された。全体としてのアノード分極曲線とひびわれ部を含まない要素鉄筋のアノード分極曲線を比較すると、僅かに全体としてのものの電流密度が大きい、大部分のものの不動態のグレイドは共に1と判定される。この理由として、ひびわれ部の面積は、要素鉄筋の1/12であり、ひびわれ部の影響は全体のアノード分極曲線にはそれほど及ばないと考えられる。

② NaCl (3.6%) 溶液中での測定

①と同様の測定をNaCl溶液中においても行なった。測定結果の一例を図5.18および図5.19に示す。

これらの結果より、①と同様にひびわれ部のものの電流密度が大きく、この値は、水道水中のものより大きい。また、全体およびひびわれ部の不動態のグレイドはすべて0であった。

①、②より、全体としてのアノード分極曲線は、ひびわれ部の影響を若干受ける。特に、ひびわれ部のものの電流密度が大きいほど、ひびわれ部の影響は大きいものと思われる。しかし、全体としてのアノード分極曲線より、ひびわれ部のものを類推することは、無理があるようである。

③ 不動態のグレイド

表5.48に、モデル供試体に関する不動態のグレイドを示す。

ニ) カソード分極曲線の測定

ひびわれのあるモデル供試体を用いて、材令6ヶ月において、ひびわれ部とひびわれのない部分の要素鉄筋のカソード分極曲線を測定して比較した。測定結果の1部を図5.20に示す。

これらより、ひびわれ部のカソード分極曲線の方がより大きな電流密度を示す。カソード部での反応を、酸素の還元反応とすれば、この原因は、ひびわれ部の方が、酸素供給が容易なためと考えられる。

ホ) 腐食電流

モデル供試体の材令6ヶ月におけるアノード分極曲線より、Tafelの仮定を用いて腐食電流を求めた。測定結果を、表5.49に示す。

ひびわれのない供試体では、要素鉄筋全体をまとめて測定した場合と、個別に測定した場合の電流密度は小さいという傾向が認められた。

また、ひびわれのある供試体では、ひびわれ部の電流密度が最も高く、次いで全体として測定したものであり、ひびわれのない部分のものが最小であった。

ヘ) マクロセル電流の測定

材令6ヶ月におけるマクロセル電流の測定例を表5.50に示す。この測定では、番号の大きな要素鉄筋から番号の小さな要素鉄筋に流れ込む電流を測定し、上三角行列を作製し、残りの下三角行列は対応する上三角行列の符号を逆として作製した。なお、こ

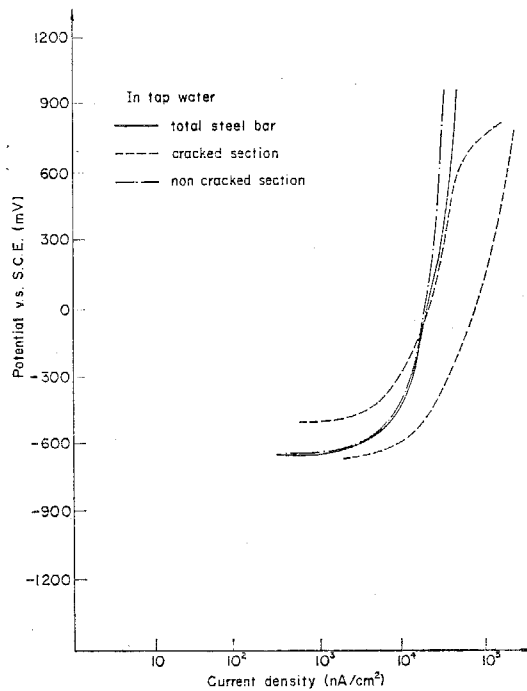


図 5.16 ひびわれのある供試体(配合45-5-S)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

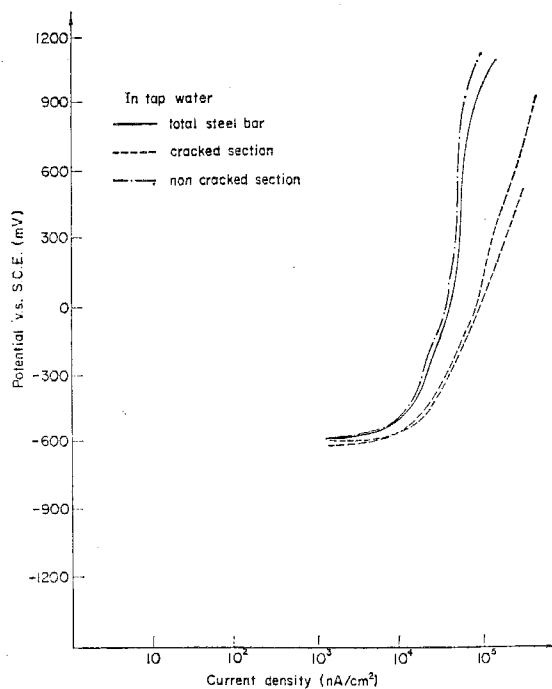


図 5.17 ひびわれのある供試体(配合65-12-S)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

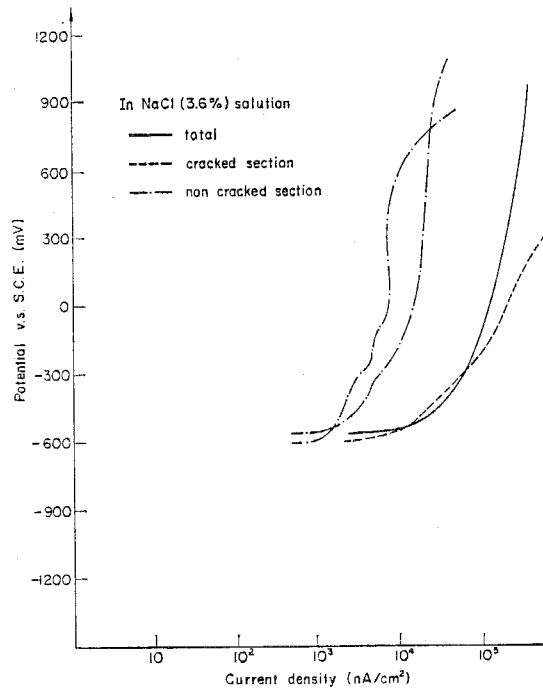


図 5.18 ひびわれのある供試体(配合45-5-T)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

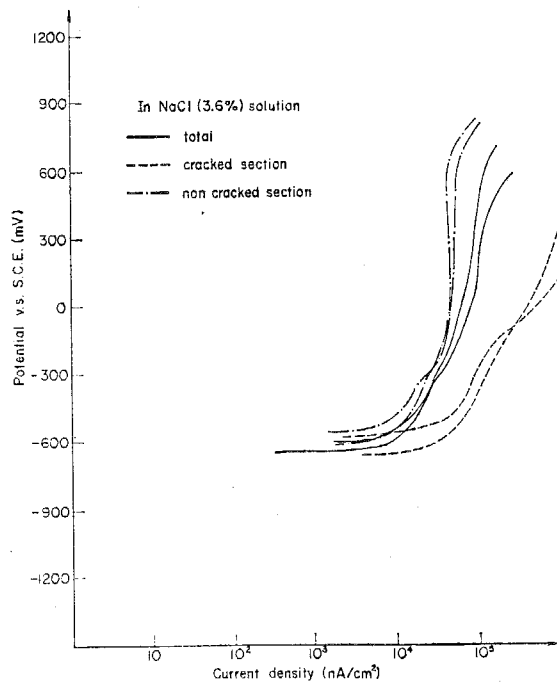


図 5.19 ひびわれのある供試体(配合65-12-S)の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

表 5.48 モデル供試体の不動態のグレイド

種 類	養 生 (測定) 条 件	配 合 (記号)	全 体 と して のグレイド	各要素ごとのグレイド								
				ひびわれ 部	ひびわれのない部分 (要素番号)							
					1	3	5	7	9	11	平均	
ひびわれの ない供試体	水道水 中	45-5-T	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1
		45-5-S	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1
		65-12-7	3*	—	3	3	3	3	3	3	3	3
		45-12-T	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1
ひびわれの ある供試体	水道水 中	45-5-T	2	1	2	2	3	—	—	—	—	2.3
		45-5-S	1	0	1	1	1	—	—	—	—	1
		65-12-T	1*	0	1	1	2	—	—	—	—	1.3
		65-12-S	1*	0	1	1	1	—	—	—	—	1
	Na Cl 溶液中	45-5-T	0.5*	0	1	2	1	—	—	—	—	1
		45-5-S	1	0	1	0	1	—	—	—	—	0.7
		65-12-T	1	0	1	2	1	—	—	—	—	1.3
		65-12-S	0.5*	0	1	1	1	—	—	—	—	1

* のみ2本平均

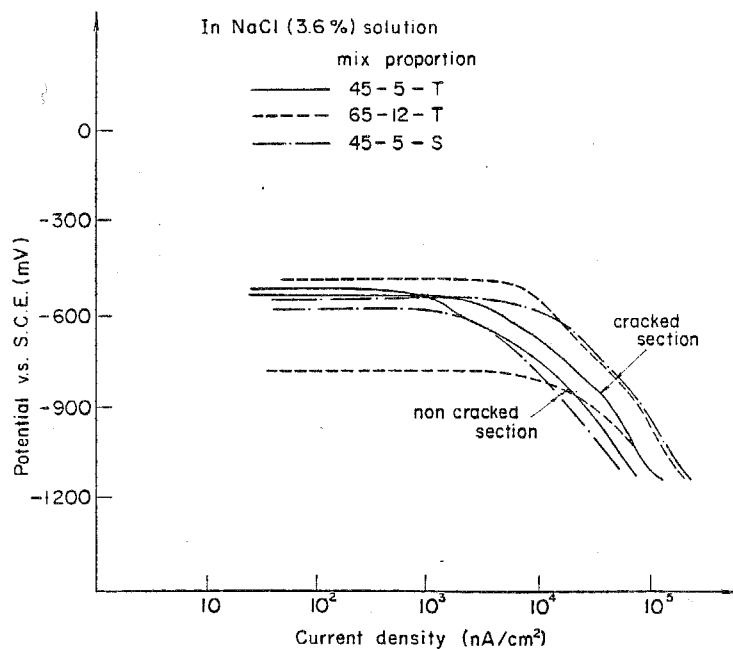


図 5.20 ひびわれ部のカソード分極に及ぼす影響

表 5.49 モデル供試体の腐食電流密度

種類	養生 (測定) 条件	配合 (記号)	全体として の電流密度 (nA/cm ²)	各要素ごとの電流密度 (nA/cm ²)							
				ひびわれ 部	ひびわれのない部分 (要素番号)						平均
					1	3	5	7	9	11	
ひびわれの ない 供試体	水道水 中	45-5-T	2243	—	3634	2082	2637	1997	2976	2760	2683
		45-5-S	3227	—	3360	3036	4833	3498	4458	3658	3807
		65-12-T	483*	—	851	785	323	754	616	411	707
		65-11-S	2712	—	—	—	2976	—	—	—	2976
		45-12-T	1267*	—	990	2532	1438	2532	2154	1960	1929
ひびわれの ある 供試体	水道水 中	45-5-T	385	641	350	350	754	—	—	—	485
		45-5-S	1274	2920*	960	785	817	—	—	—	854
		65-12-T	1657*	3558*	1760	1909	1833	—	—	—	1834
		65-12-S	1829*	3827*	2745	2335	2637	—	—	—	2572
	NaCl 溶液中	45-5-T	4458*	6677	785	1129	754	—	—	—	889
		45-5-S	2745	3510*	2532	1987	2336	—	—	—	2285
		65-12-T	2976	3524*	1760	1909	2069	—	—	—	1912
		65-12-S	4442*	8723*	2976	5680	2336	—	—	—	3664

表 5.50 マクロセル電流の測定例

(1) ひびわれのないモデル供試体 (配合 65-12-T) mix potential. -248

(μA)

カソード側*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計	
アノード側*														
1		-0.5	5.3	-1.0	-2.2	-2.7	0	-2.2	-0.7	2.7	0.1	-1.0	-2.2	
2		0.5		10.0	-0.5	-2.5	-0.5	-2.8	-1.6	-0.5	0	1.1	0	3.2
3		-5.3	-10.0		0	-7.0	-7.0	-5.0	-1.0	-2.0	2.0	0	0	-35.3
4		1.0	0.5	0		0	-2.0	-3.0	-2.0	-1.0	3.0	1.0	0	-2.5
5		2.2	2.5	7.0	0		-2.2	-5.0	-0.2	-0.5	5.0	3.0	-0.5	11.3
6		2.7	0.5	7.0	2.0	2.2		-3.0	2.0	0	6.0	0	1.0	20.4
7		0	2.8	5.0	3.0	5.0	3.0		4.0	2.0	0	0	2.0	26.8
8		2.2	1.6	1.0	2.0	0.2	-2.0	-4.0		0	5.0	3.0	0	9.0
9		0.7	0.5	2.0	1.0	0.5	0	-2.0	0		4.0	2.0	0	8.7
10		-2.7	0	-2.0	-3.0	-5.0	-6.0	0	-5.0	-4.0		0	-2.0	-29.7
11		-0.1	-1.1	0	-1.0	-3.0	0	0	-3.0	-2.0	0		-2.0	-12.2
12		1.0	0	0	0	0.5	-1.0	-2.0	0	0	2.0	2.0		2.5
マクロセル電流 (アノード電流の合計)													81.9	

* : 要素鉄筋の No.

(2) ひびわれのあるモデル供試体 (配合 65-12-S, NaCl 溶液中) mix potential. -576

(μA)

カソード側*	1	②	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計	
アノード側*														
1		0.9	0.5	5.0	0.2	0.3	0	0	0.1	0.1	2.6	0.9	10.6	
②		-0.9		-0.4	4.0	-0.2	-0.6	2.9	-0.2	-0.3	-0.5	1.6	0.6	② 6.0
3		-0.5	0.4		5.0	0.2	0	2.0	0	0	0.2	2.4	0.8	10.5
4		-5.0	-4.0	-5.0		-5.0	-5.0	-1.0	-5.0	-5.0	-5.0	-2.0	-4.0	-46.0
5		-0.2	0.2	-0.2	5.0		-0.3	3.4	-0.3	-0.2	0.1	0.1	0.7	8.3
6		-0.3	0.6	0	5.0	0.3		3.0	0	0	0.2	3.0	1.1	12.9
7		0	-2.9	-2.0	1.0	-3.4	-3.0		-4.0	-4.0	-3.5	-0.8	-1.8	-24.4
8		0	0.2	0	5.0	0.3	0	4.0		0	0.1	2.7	1.0	13.3
9		-0.1	0.3	0	5.0	0.2	0	4.0	0		0.2	2.9	1.2	13.7
10		-0.1	0.5	-0.2	5.0	-0.1	-0.2	3.5	-0.1	-0.2		3.0	1.0	12.1
11		-2.6	-1.6	-2.4	2.0	-0.1	-3.0	0.8	-2.7	-2.9	-3.0		-1.0	-16.5
12		-0.9	-0.6	-0.8	4.0	-0.7	-1.1	1.8	-1.0	-1.2	-1.0	1.0		-0.5
マクロセル電流 (アノード電流の合計)													87.4	

② : ひびわれ部アノード電流

* : 要素鉄筋の No.

の場合、全電流の合計値は必ず0となり、アノード部要素鉄筋へ流入する電流の合計値（+記号）と、カソード部要素鉄筋から流出する電流の合計値（-記号）の絶対値は等しくなる。この電流の合計値をマクロセル電流と定義した。

表5.51のこれらの測定結果を示す。ひびわれのある供試体のマクロセル電流がやや大きい傾向がある。また、ひびわれ部が必ずしもアノード部とならないことは注目に値する。

さらに、V型およびVC型供試体において、V型では任意の鉄筋要素、VC型ではひびわれ部の要素鉄筋を対象として、他の要素より流入する電流と乾湿の条件との関係を測定した。測定結果を、表5.52および表5.53に示す。なお、乾湿のサイクルは、潮汐作用を考慮して6時間とした。

(5) 考察

a) マクロセル電流とマイクロセル電流について

材令6ヶ月におけるマクロセル電流とマイクロセル電流との関係を表5.54に示す。ここでは、真のマイクロセル電流と実験値より算定した腐食電流とに比例関係があると仮定して、その補正係数を α とした。

全体としてのマクロセル電流とマイクロセル電流との比について考える。水道水中でのV型とVC型を比較すると、明かにVC型の比の方が大きく、ひびわれ部があるとマクロセルの影響が大きくなると言えよう。また、VC型において、水道水中とNaCl溶液中とを比較すると、NaCl溶液中ではマクロセルの影響が小さくなっている。この理由として、NaCl溶液中では、元々ひびわれ部を含む各部のマイクロセルが活発であることが考えられる。

ひびわれ部の項目を見ると、水道水中ではNaCl溶液中に比較して、マクロセル電流の影響が大きいことが分かる。これも、NaCl溶液中では、マイクロセルが活発なためと考えられる。また、全マクロセル電流におよぼすひびわれ部の影響も水道水中の方が大きい。

さらに、水道水中では、海水練りコンクリートではひびわれ部がアノードに、水道水練りではカソードとなる傾向がある。したがって、水道水中では海水練りコンクリート中の鉄筋が腐食しやすいことの原因となる。しかし、NaCl溶液中では明かでない。

即ち、ひびわれの存在によってマクロセルの影響は大きくなる。特に、水道水中でその影響は大きい。また、ひびわれ部は必ずしもアノードでない。

b) VC型供試体での練り混ぜ水および養生（測定）条件のおよぼす影響

表5.55に、VC型供試体の不動態のグレイドにおよぼす練り混ぜ水および養生（測定）条件の影響を示す。練り混ぜ水の影響は、水道水養生では水道水練りのグレイドが若干大きい、NaCl溶液中での差はないと判断される。養生条件では、水道水養生のグレイドがやや大きいようである。

また、ひびわれ部の不動態のグレイドは、他の部分のものより小さい。

表5.56に、VC型供試体のマクロセル電流におよぼす練り混ぜ水および養生（測定）条件の影響を示す。練り混ぜ水の影響は、水道水中で顕著である。ひびわれ部については水道水練りではカソードとなり、海水練りではアノードとなる。

乾燥の影響

表5.51 検査6ヶ月におけるマクロセル電流

種類	養生条件 (測定)	配合 (記号)	ひびわれ部に流入するアノード電流 (μA)	全体としてのマクロセル電流 (μA)	ひびわれ部がアノードである割合
ひびわれのない供試体	水道水中	45-5-T	—	73.2	—
		45-5-S	—	97.0	—
		65-12-T	—	71.3	—
		65-12-S	—	14.8	—
		45-12-T	—	24.5	—
ひびわれのある供試体	水道水中	45-5-T	-57.6	93.2	0/2
		45-5-S	27.4	140.8	2/2
		65-12-T	-187.8	598.8	0/2
		65-12-S	19.1	142.7	2/2
		45-5-T	25.6	95.6	2/2
NaCl 溶液中	45-5-S	1.2	32.3	2/2	
	65-12-T	-0.2	341.6	1/2	
	65-12-S	6.1	74.5	2/2	

測定条件	配合			合
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	
および期間	45-5-T	45-5-S	65-12-T	65-12-S
①NaCl 溶液中	-0.2	0.2	0.1	-0.1
drying 5 min	0.1	0.6	0	-0.1
10min	0.2	0.2	0.1	0
10min	0.3	0.6	0.1	-0.1
20min	0.2	0	0	0.1
30min	0.2	0.8	-0.2	0
1 hour	-0.4	0.2	0.1	-0.2
2 hrs	-0.6	0.2	0.2	-0.3
3 hrs	0	0.6	0.2	-0.3
4 hrs	0.9	0.2	0.2	-0.2
5 hrs	-0.3	0.1	-0.1	0
6 hrs	0	0.3	0	-0.3
wetting 5 min	-0.1	0.8	-0.4	-0.3
10min	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
15min	0.4	0.4	-0.3	-0.3
20min	1.0	0.2	-0.3	-0.1
30min	-0.3	0.3	-0.2	-0.2
1 hour	0.6	0	-0.1	-0.3
2 hrs	-0.3	0.1	-0.4	-0.4
3 hrs	0.4	0.3	0.2	-0.1
4 hrs	-0.3	0.5	0.1	-0.2
5 hrs	-0.1	0.3	-0.2	-0.1
6 hrs	-0.1	0.3	-0.1	-0.2

12時間 (1 cycle) での全電流

電流の種類	配合			合
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	
Anode 電流	0.008	0.011	0.004	0
Cathode 電流	-0.008	0	-0.004	-0.009
①の状態での電流	-0.009	0.009	0.004	-0.004

マクロセル電流に及ぼす
乾燥の影響(材料6か月)

(μA)

測定条件	配 合		
	45-5-T	45-5-S	65-12-T 65-12-S
および時間	5.0	2.6	- 10 6.7
① NaCl 溶液中			
drying 5 min	1.0	-0.7	-1.0 -6.3
10min	0.2	-1.0	-0.5 -5.4
15min	-0.3	-1.2	-0.4 -4.7
20min	-0.7	-2.7	-0.5 -4.5
30min	-0.7	-2.1	-0.8 -4.1
1 hour	-0.8	-1.6	-1.1 -5.3
2 hrs	-1.9	-7.4	-3.1 -9.3
3 hrs	-3.0	-3.9	-0.9 -8.4
4 hrs	-1.4	-5.8	-1.3 -10.9
5 hrs	-0.7	-8.6	-1.2 -9.8
6 hrs	-0.7	-7.5	-0.8 -9.0
wetting 5 min	8.0	-3.2	0.2 -8.0
10min	0.7	6.2	9.9 2.4
15min	8.9	6.8	12.7 8.8
20min	9.1	8.3	34.1 8.7
30min	8.8	9.4	38.9 8.2
1 hour	7.2	13.3	10.7 7.0
2 hrs	12.5	5.1	13.7 7.1
3 hrs	8.8	5.1	8.7 3.8
4 hrs	8.4	7.5	3.3 7.0
5 hrs	8.0	9.2	1.8 5.6
6 hrs	8.0	11.9	0.7 3.7

12時間 (1 cycle) ひびわれ部に流れ込む電流

電流の種類	配 合		
	45-5-T	45-5-S	65-12-T 65-12-S
Anode 電流	0.197	9.185	0.208 0.142
Cathode 電流	-0.031	-0.120	-0.035 -0.189
①の状態での電流	0.216	0.112	-0.432 0.289

(単位: coulomb) 注: 2本の平均値

表 5.54 マクロセル電流とマイクロセル電流

(μA)

種 類	養 生 (測定) 条 件	配 合 (記号)	ひびわれ部		全 体 と し て			ひびわれ部の 割 合	
			マ ク ロ セ ル 電 流 ①	ミ ク ロ セ ル 電 流 ②	マ ク ロ セ ル 電 流 ③	ミ ク ロ セ ル 電 流 ④	マ ク ロ セ ル 電 流 ①/③	ミ ク ロ セ ル 電 流 ②/④	
V 型 (ひびわれなし)	水道水 中	45-5-T	—	—	73.2	203.9α	0.36	—	—
		45-5-S	—	—	97.0	293.3α	0.33	—	—
		65-12-T	—	—	71.3	43.9α	1.62	—	—
		65-12-S	—	—	14.8	246.5α	0.06	—	—
		45-12-T	—	—	24.5	115.2α	0.21	—	—
V C 型 (ひびわれあり)	水道水 中 NaCl 溶液 中	45-5-T	57.6	5.0α	93.2	35.0α	2.66	-0.62	0.14
		45-5-S	27.4	22.8α	140.8	115.8α	1.22	0.19	0.20
		65-12-T	187.8	27.8α	598.8	150.6α	3.98	-0.31	0.18
		65-12-S	19.1	29.9α	142.7	166.3α	0.86	0.13	0.18
		45-5-T	25.6	52.1α	95.6	405.2α	0.24	0.27	0.13
		45-5-S	1.2	27.4α	32.3	249.5α	0.13	0.04	0.11
		65-12-T	—	27.5α	341.6	270.5α	1.26	-0.00	0.10
		65-12-S	6.1	68.0α	74.5	403.8α	0.18	0.08	0.17

注: α は補正係数

表 5.55 VC型供試体の不動態のグレイド(アノード分極曲線より)に及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響

	練り混ぜ水	配合(記号)	養生(測定)条件		平均
			水道水中	NaCl溶液中	
全体として	水道水	45-5-T	2	0.5	1.125
		65-12-T	1	1	
		平均	1.5	0.75	
	海水	45-5-S	1	1	0.875
		65-12-S	1	0.5	
		平均	1	0.75	
平均		1.25	0.75	1	
ひびわれ部	水道水	45-5-T	1	0	0.25
		65-12-T	0	0	
		平均	0.5	0	
	海水	45-5-S	0	0	0
		65-12-S	0	0	
		平均	0	0	
平均		0.25	0	0.125	

表 5.56 VC型供試体のマクロセル電流に及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響

(μA)

	練り混ぜ水	配合(記号)	養生(測定)条件		平均
			水道水中	NaCl溶液中	
全体として	水道水	45-5-T	93.2	95.6	282.3
		65-12-T	598.8	341.4	
		平均	346.0	218.5	
	海水	45-5-S	140.8	32.3	97.6
		65-12-S	142.7	74.5	
		平均	141.8	53.4	
平均		243.9	136.0	190.0	
ひびわれ部	水道水	45-5-T	-57.6	25.6	-55.0
		65-12-T	-187.8	-0.2	
		平均	-122.7	12.7	
	海水	45-5-S	27.4	1.2	13.5
		65-12-S	19.1	6.1	
		平均	23.3	3.7	
平均		-49.7	8.2	-20.8	

c) ひびわれ部のマクロセル電流におよぼす乾湿の影響

ひびわれのある供試体（V C型）とない供試体（V型）との大きな違いは、ひびわれのない場合は、乾湿は電流の方向に大きな影響を与えないが、ひびわれがある場合には、乾湿によって電流の方向が変化する。即ち、ひびわれがある場合には、乾燥過程でひびわれ部はカソードに、湿潤過程でアノードとなる傾向がある。

このことより、乾湿の繰り返しにより、ひびわれ部がアノードとなり腐食が促進され、また、逆に他の部分がアノードとなり腐食が促進される可能性がある。しかし、本実験は供試体が小さいためか、マクロセルの顕著な影響は認められなかった。

d) ひびわれのある供試体に関する電気化学的方法

ひびわれの存在によってカソード分極曲線が大きく変化するので、自然電極電位の有効性が著しく減少した。アノード分極曲線による不動態のグレイドの有効性も減少するが、NaCl溶液中で若干有効であった。

(6) 結論

a) ひびわれの存在によってマクロセルの影響が大きくなる傾向にある。

b) 水道水養生では、海水練りコンクリート中鉄筋のひびわれ部はアノードとなり、水道水練りコンクリートのひびわれ部はカソードとなり、これにより、5.2の標準養生で海水練りと水道水練りコンクリート中鉄筋の腐食が大きく違う理由の一部が説明される。

c) ひびわれ部には不動態は存在しにくい。

d) ひびわれの存在によって、カソード分極曲線が変化するため、自然電極電位の有効性は減少する。

5.4 ひびわれの存在と塩素イオンの侵入に関する検討

(1) 目的

ひびわれの発生によって、海洋環境下（海中部、感潮部）では、海水は速やかにひびわれ箇所およびそれに連続する鉄筋とコンクリートとのはく離部に侵入すると考えられる。この海水の侵入は、練りませ水中の塩素イオン量に関係せず、したがって、ひびわれのある場合では、ひびわれのない場合に比較して、内在塩素イオン量による鉄筋の腐食の違いは少ないものと考えられる。

本節では、ひびわれ部にどの程度の塩素イオンが侵入するかについて簡単な試験を行った。

(2) 方法

フランレジンコンクリートを用いた供試体を2体製作した。フランレジンコンクリートを用いた理由は、塩素イオンのひびわれ部以外からの侵入を避けるためである。鉄筋およびその配筋は、シリーズ5と同一である。また、ひびわれ導入時の鉄筋応力度は、約3500 kg/cm²とした。残留ひびわれ幅は、1つの供試体では0.15mmのものが1つ、他の1本では、0.10mmと0.15mmの2つのひびわれが発生していた。

ひびわれ導入は、材令1ヶ月で行ない、その後、材令1年までNaCl溶液中に浸漬した。

(3) 結果

材令1年において、供試体を鉄筋軸方向に半割りし、半割り部の鉄筋跡およびその近傍に、0.014モルAgNO₃溶液を点滴した。この溶液によって、塩素の存在する部分は白濁する。このスケッチを図5.21に示す。いずれの供試体においても鉄筋跡の80%以上が白濁していた。この部分の塩素イオン濃度については、0.014モルAgNO₃溶液で感知出来るものであるという以上には言えないが、このことより、ひびわれによって海水中にあるコンクリート中鉄筋表面の多くの部分に塩素イオンの付着している可能性の高いことが認められた。

5.5 考察

本章での実験結果等より、ひびわれの存在の鉄筋腐食におよぼす影響を考察すると以下のものである。

(1) 内在塩素イオンの影響は、ひびわれの存在によって短期間に減少する。

これは、5.1および5.2での内在塩素イオン（練り混ぜ水の相違）による不動態のグレイドの差の存在期間を比較すると、ひびわれのない場合では12ヶ月であったものが、ひびわれが存在すると4ヶ月となったことを根拠としている。

この理由として、5.3で示したように、ひびわれ部は内在塩素イオンの有無に拘らず、不動態のグレイドが0となる傾向があることおよび海水養生中では5.4で示したようにひびわれの存在により、塩素イオンが鉄筋表面に侵入することが大きな理由と考えられる。

(2) 海水養生かつひびわれの存在する場合に、内在塩素イオンによって鉄筋腐食量は多くはならなかった。むしろ、内在塩素イオンのないもの（水道水練り）の腐食量が多い傾向にあったが、この事実は、5.3の水道水練りのもののひびわれ部がアノードとなり、海水練りのもののひびわれ部がカソードとなったことから水道水練りのもののひびわれ部が腐食しやすくなったことが一因と考えられる。また、腐食状況から総合的に判断すると、腐食は、ひびわれのない場合、（海水練りかつ海水養生）>（海水練りかつ標準養生（水道水中））>（水道水練りかつ標準養生）>（水道水練りかつ標準養生）であるのに対して、ひびわれが存在すると、（海水練りかつ海水養生）≒（海水練りかつ標準養生（水道水中））≒（水道水練りかつ標準養生）>（水道水練りかつ標準養生）のような順序と判断された。

(3) ひびわれの存在によって、海水養生後気中養生したものの鉄筋の腐食が著しく多い。また、7章の結果によると、標準養生3ヶ月の後3年間気中養生したものでは腐食はなく、海水養生によって不動態がなくなりその後気中で酸素の供給が十分な場合腐食が顕著になることを示していると思われる。

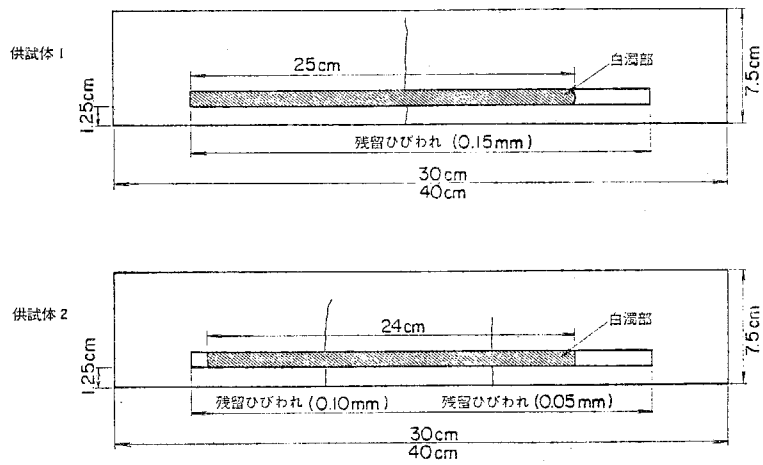


図 5.21 フランレジンインクリート中へのひびわれ部からの塩素浸入

第6章 電気化学的方法の評価

本研究で用いた種々の電気化学的方法の評価を4章および5章の実験結果より検討した。

6.1 不動態のグレイド

(1) 4章1節の実験結果に基づく考察

4.1の実験結果を整理し、不動態のグレイドと腐食度との関係を図6.1に示す。ここでは、不動態のグレイドとして、各々のモルタル中鉄筋の91日、180日、および1年のグレイドの平均値を用いた。

これより、養生条件別では、不動態のグレイド別にサンプル数が大幅に異なることもあってか傾向の把握は困難であるが、全体としてみると、腐食のように非常にばらつく現象としては、高い相関が認められる。

(2) 5章1節の実験結果に基づいた考察

5.1では、各種の電気化学的方法の有効性を、コンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量と比較検討した。

表6.1に不動態のグレイドの1年間の平均値(重み付平均)と腐食発生割合との関係を示す。明確な境界は存在しないが、概略1.0を境界値として腐食発生領域と非腐食発生領域に分けることが可能と思われる。1.0を境界値とすると、1.0以下の腐食発生割合は1年で8割強となる。

図6.2および図6.3に各々不動態のグレイドの平均値と腐食面積および錆重量との関係を示す。定性的には、不動態のグレイドが小さいほど腐食面積率および錆重量共に増加することが認められ、また、境界値1.0として概略分類出来ることが分かる。

このデータから、不動態のグレイドは、腐食の定性的な尺度として十分用いることが出来ると判断される。

(3) 5章3節の実験結果に基づいた考察

5.3では、モデル供試体を用いてひびわれの電気化学的方法の有効性におよぼす影響を検討した。

不動態のグレイドの判定には、アノード分極曲線を用いるが、アノード分極曲線は自然電極電位とは異なり、任意の電位において個々の要素の電流を加算したものが全体のアノード分極曲線のベースとなる。この意味でひびわれ部の影響は、全体のアノード分極曲線に反映される。

しかし、問題はひびわれ部の影響によって他の部分のアノード分極曲線が変化する可能性があることとひびわれ部の面積が不明なことである。

前者の問題について、ひびわれ部の他の部分の不動態のグレイドにおよぼす影響を表6.2にまとめた。配合45-5-T、65-12-Sでは、ひびわれ部によって不動態のグレイドは高くなり、65-12-Tの水道水中のみでひびわれ部によってグレイドは低くなることが認められた。また、前述したように、クロードとオープン供試体の自然電極電位には明かに差がある。いずれにせよ、ひびわれ部のその他の部分のアノ-

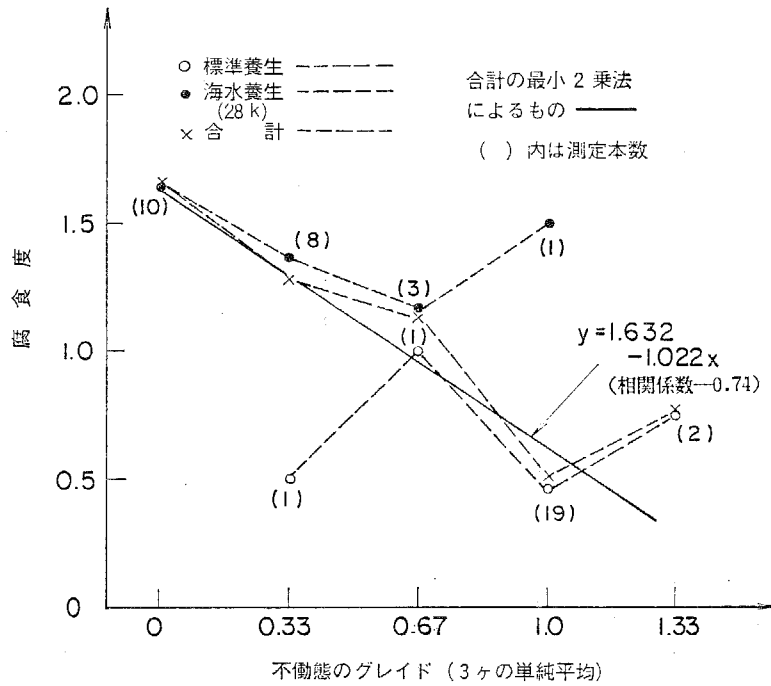


図 6.1 不動態のグレイドと腐食度の関係

1 不動態のグレイドと腐食発生の割合

状態のイロ	0.5以下	0.5 < ≤ 1.0	1.0 < ≤ 1.5	1.5 < ≤ 2.0	2.0 <
発生割合	100% (8/8)	66% (27/41)	35% (11/31)	0% (0/2)	0% (0/4)
状態のイロ	0.5未満	0.5 ≤ < 1.0	1.0 ≤ < 1.5	1.5 ≤ < 2.0	2.0以上
発生割合	100% (8/8)	80% (8/10)	50% (28/56)	25% (2/8)	0% (0/4)

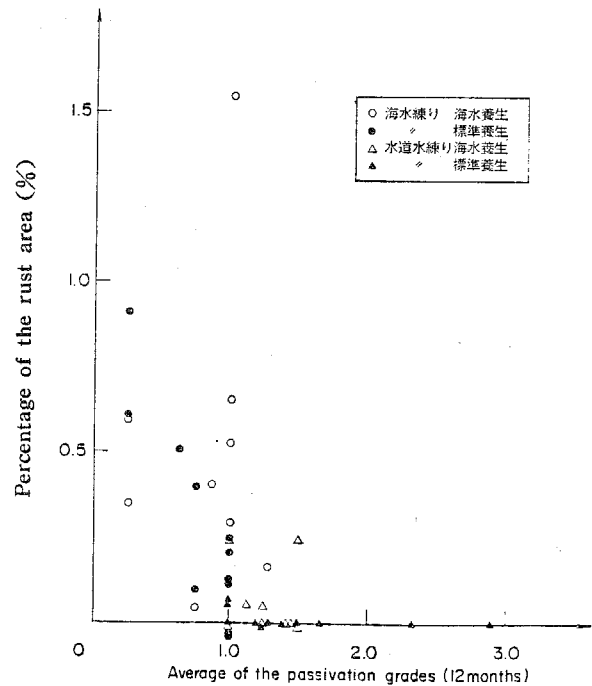


図 6.2 不動態のグレイドと腐食面積率との関係 (腐食面積率は 2本の平均値)

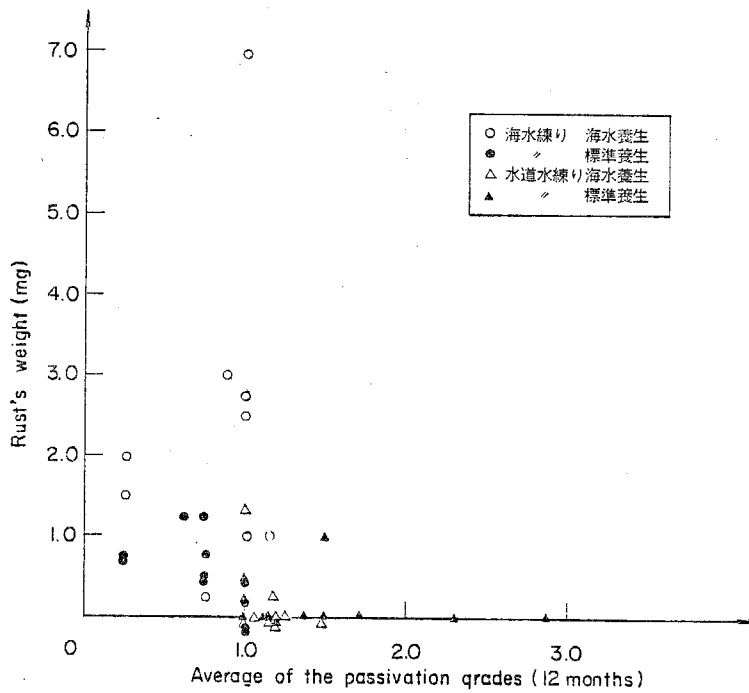


図 6.3 不動態のグレードと錆重量との関係 (錆重量は
 5本の平均値)

表 6.2 ひびわれ部のひびわれのない部分の
 不動態のグレードにおよぼす影響 (クロスド供試体)

配 合 (記号)	VC 型供試体の ひびわれのない 部分の不動態の グレード		V型供試 体のグレ イド (水道水 中)	表 5.4より (材令 6 か月)	
	水道水中	NaCl 溶液中		水道水中	NaCl 溶液中
45-5-S	1	0.7	1	1	1
65-12-T	1.3	1.3	3	3	1
65-12-S	1	1	—	0	0

ド分極曲線に与える影響は大きい。このため、ひびわれのない供試体とひびわれのある供試体のアノード分極曲線を直接比較して腐食の傾向（腐食の有無など）を判定することには無理がある。

後者の問題は、面積比が分からなければ、全体のアノード分極曲線からひびわれ部あるいはその他の部分のアノード分極曲線を分離することが出来ないことになる。

以上のことより、ひびわれのある供試体とない供試体のアノード分極曲線の直接比較には無理がある。しかし、同一供試体の経時変化、あるいは同程度のひびわれを有する供試体の相対的な比較であれば、ある程度判断は可能と思われる。

6. 2 自然電極電位

(1) 5章1節の実験結果に基づいた考察

前述したように、同一の自然電極電位を有する鉄筋であっても、アノードの特性（アノード分極曲線および面積）とカソードの特性（カソード分極曲線および面積）の組み合わせは、無数にあるので、鉄筋の腐食の判定に適応するには理論的な問題がある。

しかしながら、図6.4に示すように、 -550mV (vs. SCE) より貴な電位では、腐食は発生しておらず、定性的な判断には役立つと思われる。

(2) 5章3節の実験結果に基づいた考察

5.3の実験結果より、ひびわれの発生によって、大部分の供試体の自然電極電位は貴に、また、当所非常に貴であったものはひびわれ発生後は卑へと移行した。

このように、ひびわれによって腐食が発生しやすくなるにも拘らず電位が必ずしも卑とならないのは以下の理由による。

即ち、自然電極電位が腐食のしやすさと関係するためには、カソード分極曲線がほぼ一定であるという条件が必要と考えられるが、ひびわれによってこの条件が無くなるため電位は必ずしも卑とはならないと言えよう。

例えば、図6.5によってS a, S bでの電位の変化を説明すると次のようである。

ひびわれ発生前のカソード分極曲線をIのごとく想定し、さらに、ひびわれ発生前の不動態のあるアノード分極曲線をA、不動態のないアノード分極曲線をBと想定する。電位はアノードとカソード分極曲線の交点として求められ、この場合、不動態の有無によってXあるいはYとして求められる。S a, S b供試体ではS b-7がXにそのほかYに相当したと考えられる。さて、ひびわれ発生後は、カソード分極曲線の電流密度は増大しIIのように想定される。またひびわれ発生後は不動態は存在しないことが多く、アノード分極曲線はCのごとく想定される。したがって、ひびわれ発生後の電位はZのごとくすることが想定される。これによって、ひびわれによってS b-7のみが貴に他のものが卑となったことが定性的に説明される。

上記のごとくにカソード分極曲線が変化する場合には、自然電極電位は腐食の判定には適用しにくい。

6. 3 腐食電流密度

(1) 5章1節の実験結果に基づいた考察

均一な水溶液中で理想的な試験を行ない、全ての反応生成物を測定できれば、全腐食

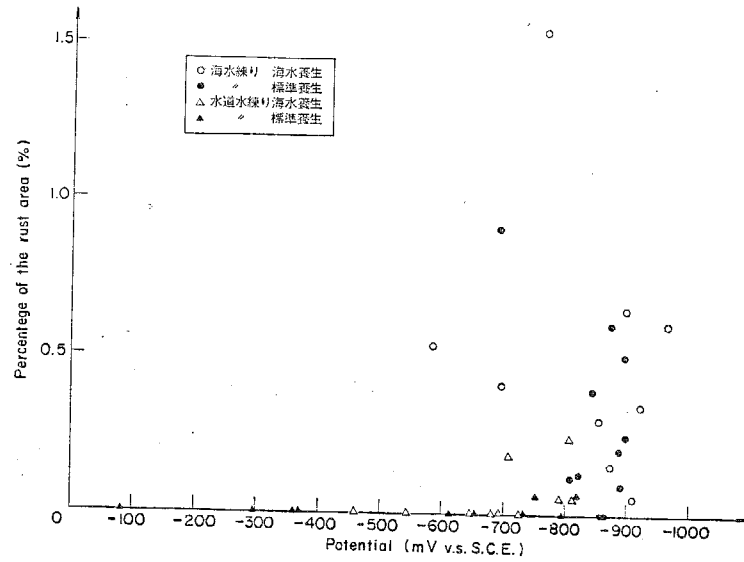


図6.4 自然電極電位の平均値と腐食面積率との関係(腐食面積率は2本の平均値)

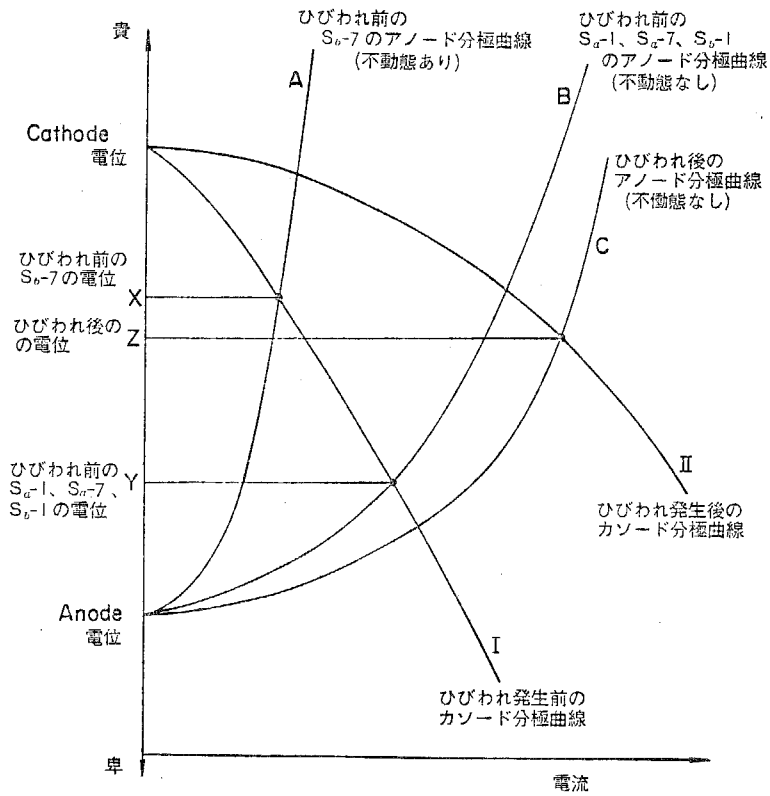


図6.5 ひびわれ前後の自然電極電位変化の概念図

電流 C (この場合、1年間の腐食電流の合計: coulomb) と反応生成物の当量 X との間には、 $C = X \times F$ (F : Faraday, 96500 coulomb) の関係が成り立つはずである。即ち、比例関係が期待される。

しかしながら、図 6. 6 に示す全腐食電流と錆重量の関係からは、比例関係の存在は認められない。

この理由としては、Tafel の仮定の適応性の問題、および、反応生成物はいわゆる錆のみではない、という2つのことが考えられる。これらについての議論は後述するが、いずれにしても、腐食電流は、腐食量の判定の尺度として用いにくいことが分かる。

(2) 腐食電流密度と不動態のグレイドに関する考察

一般に水溶液中での試験では、腐食電流と反応生成物とは、Faraday 数と規定数がよく一致すると言われている。しかしながら、本実験では、図 6. 6 に示すようにそれらは一致しない。また、表 4. 1、表 4. 3 の Faraday 数より算定した錆重量と実測値とでは、1000 倍近くの相違がある。この原因として著者は、① Tafel 線を用いた算定法、および、② 錆と反応生成物との関係、に問題があると考えた。

①については、特に、掃引速度と Tafel 線の傾の変化との関係が問題と考えた。しかし、図 6. 7 に示す本実験結果より、掃引速度を 0.5 mV/s から 8 mV/s まで変化させても、腐食電流密度の測定値の差は大きく見積っても 10 倍であって、1000 倍近い差から考えると主因とは考えにくい。

そこで主因は②ではないかかと推察された。表 6. 3 に、表 4. 1 および表 4. 3 よりまとめた、全腐食電流から求めた錆の厚さ(全鉄筋表面積に一樣に錆が分布すると仮定した)と実測した錆重量を腐食面積で除したものを錆厚さと称して示す。なお、全電流から錆の厚さを算出する際の反応生成物を Fe_2O_3 と仮定した。

この表より、錆重量の測定精度および掃引速度の影響を考えると、錆の厚さはよく一致していると考えられる。さらに飛躍して考えると、錆の発生していない表面にもほぼ同一厚さ(規定数に換算して)の反応生成物がある可能性があり、この生成物は不動態の生成となんらかの関係があるとも考えた。また、この表では不動態のグレイドも併せて示したが、全く錆のないものはグレイド 1 以上に対応するものが多く、この意味するところは、グレイド 1 以上では、腐食電流のほとんどは不動態の生成に用いられ、しかも、皮膜の厚さは薄いということが推察される。

6. 4 再不動態化電位

再不動態化電位は、単独で用いられることもあるが、むしろ再不動態化電位と自然電極電位の差として用いられることが多い。

図 6. 8 に、再不動態電位 (E_{rep}) と自然電極電位 (E_{corr}) との差と腐食面積率との関係を示す。全体としては、両者に明確な相関関係は認められない。しかしながら、 400 mV 程度を境界として、それ以下は海水養生のもの、それ以上は標準養生のものと明確に別れており、($E_{rep} - E_{corr}$) は養生条件と密接な関係があることが認められた。

材令 1 年では、養生条件の差は、腐食面積にそれほど影響を与えず、したがって、($E_{rep} - E_{corr}$) は、腐食面積と関連づけられなかったものと考えられる。

なお、通常 ($E_{rep} - E_{corr}$) は、孔食の発生と関連づけられる数値であるが、直接的な関連は認められなかった。

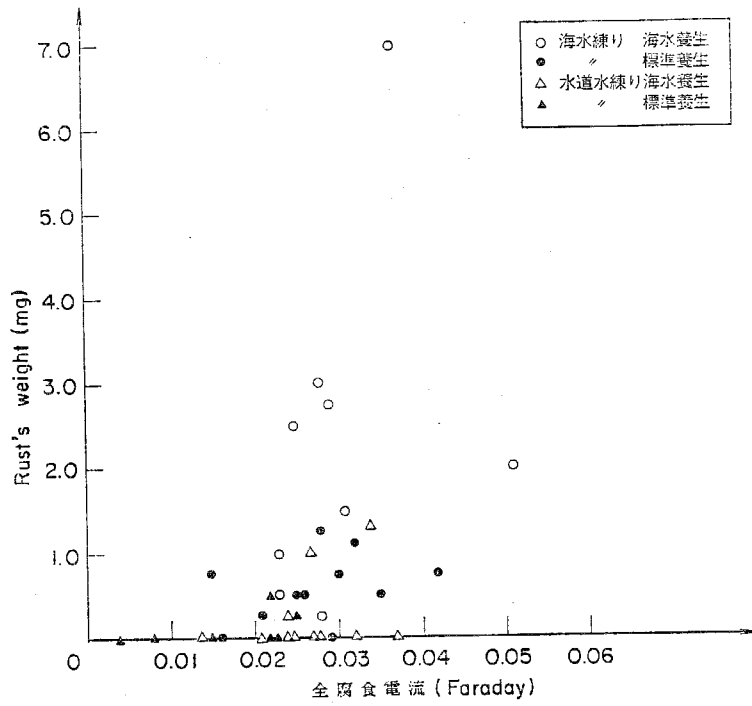


図 6.6 全腐食電流と錆重量との関係 (錆重量は 2本の平均値)

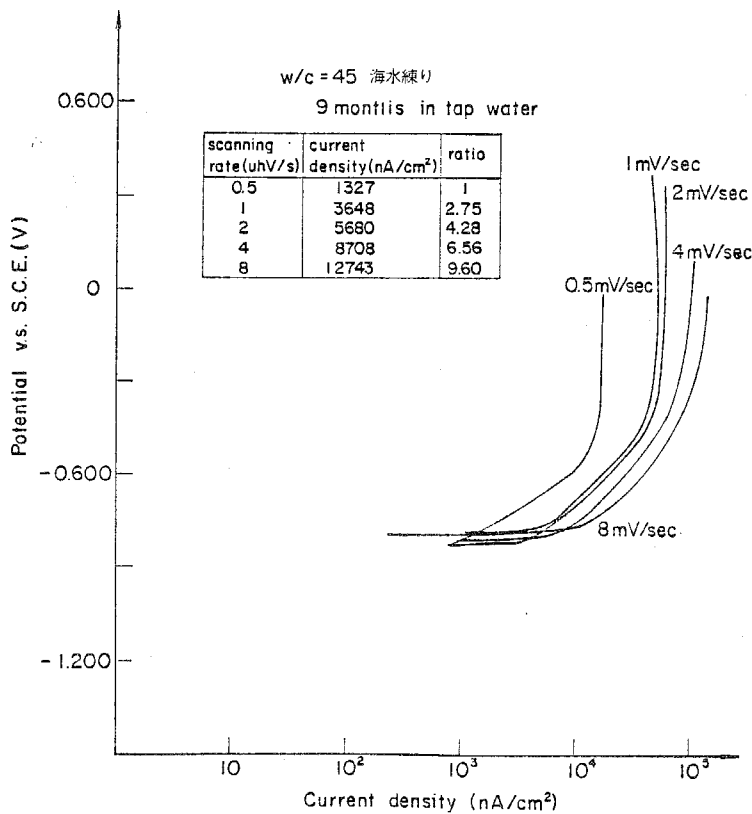


図 6.7 掃引速度の分極曲線に及ぼす影響

表 6.3 全腐食電流および
実測値から求めた 錆の厚さ

配号 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	錆の厚さ (mgf/mm ²)		不動態の グレイド
			全腐食 電流より	実測値 より	
45-5-T	N	1.2	0.25	0.17	1.5
45-5-S	S	1.2	0.35	0.15	1
		1.2	0.24	0.17	0.75
		3.3	0.31	0.10	0.75
45-7-T	N	1.2	0.23	—	1.25
	S	1.2	0.26	—	1
45-7-S	N	1.2	0.26	0.17	0.75
	S	1.2	0.27	0.08	0.625
45-2-T	N	1.2	0.20	—	1.455
	S	1.2	0.15	—	1.33
45-12-S	N	1.2	0.30	0.14	0.25
	S	1.2	0.14	0.04	0.25
50-5-T	N	1.2	0.24	—	7
	S	1.2	0.21	—	1.25
50-5-S	N	1.2	0.22	0.01	1
	S	1.2	0.28	—	1
55-5-T	S	1.2	0.33	0.18	1
		1.2	0.23	0.17	1.38
		1.2	0.22	—	2.33
		1.2	0.23	0.13	1
		3.3	0.21	0.20	1
55-5-S	S	1.2	0.22	0.20	1.29
		1.2	0.15	—	1
		1.2	0.25	0.13	1
		3.3	0.28	0.10	1
65-5-T	N	1.2	0.26	—	1.29
		1.2	0.31	—	1.38
65-5-S	S	1.2	0.24	0.16	1
		3.3	0.27	0.24	0.88
		1.2	0.20	0.04	1
65-12-T	N	1.2	0.35	—	1.13
	S	1.2	0.04	—	2.88
65-12-S	N	1.2	0.47	0.11	0.25
	S	1.2	0.40	0.03	0.25
H-T	N	1.2	0.14	—	1.5
	S	1.2	0.08	—	1.71
H-S	N	1.2	0.27	0.14	1
	S	1.2	0.34	0.14	1
H-H	N	1.2	0.24	0.04	1.13
	S	1.2	0.25	0.25	1.17

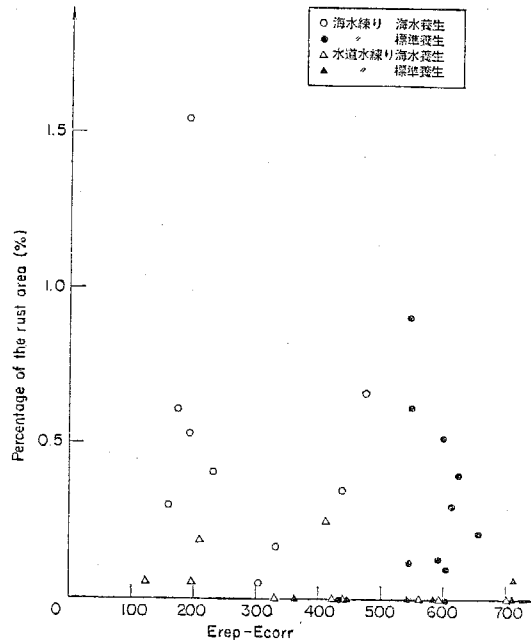


図 6.8 再不動態化電位と自然電極電位
の差と腐食面積率の関係
(腐食面積率は2本の平均値)

6. 4 結論

一般に、電気化学理論の多くは、均一溶液中、1つのアノード、1つのカソードがあるという条件の下に理論を展開しており、電気化学的方法もその理論にもとずいているわけである。しかしながら、コンクリートは不均一な多相材料であり、また、鉄筋表面は不均一である。そのため、電気化学の理論上の仮定の厳密な成立は疑問である。

この疑問を解決すべく、種々の電気化学的方法を実験的に検討した結果、不動態のグレード次いで自然電極電位が有効であることが認められた。また、コンクリート中よりもモルタル中の鉄筋に関しての方が有効であるとの印象を受けた。さらに、ひびわれがある場合には、自然電極電位は有効でなく、不動態のグレードも相対比較に有効であるのみである。また、再不動態化電位と自然電極電位の差によって養生条件の判定の可能性もある。

第7章

長期暴露実験供試体による鉄筋腐食の確認

本章においては、4章および5章での内在および侵入塩素イオンさらにひびわれの存在の鉄筋腐食におよぼす影響の室内実験による検討結果を、長期暴露実験により確認した。加えて、セメントの種類の影響も検討した。

7.1 ひびわれのない供試体を用いた10年試験

(1) 概要

ここでは、暴露条件として感潮部を用い、材令は10年という長期材令とした。これによって、前述したコンクリートおよびモルタルの1年試験の結果を長期材令試験結果と比較することによって検証することが出来た。即ち、養生（暴露）条件および練りませ時に含まれる塩素イオンの影響を長期にわたって確認した。さらに、セメントの種類の影響についても検討した。なお、電気化学的方法としては、自然電極電位の測定および不動態のグレイドの判定を行なった。

(2) 供試体の製作および暴露条件

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（記号N0およびN2）、早強ポルトランドセメント（記号H0およびH2）、中庸熟ポルトランドセメント（記号M0）、B種高炉セメント（記号B0およびB2）、および、アルミナセメント（記号AL）を用いた。N2、B2のセメントは、それぞれN0、B0（昭和45年当時の市販セメント）に化学石膏をS03重量で2%増量したものである。表7.1-表7.3に使用したセメントの化学成分および物理試験結果を示す。

ここで、S03量を変化させて検討したのは、昭和44年にJIS R5210~5213改正され、セメント中のS03量が2%増加してよいことになったためである。このため、S03の変化がコンクリートの長期の耐海水性にどのような影響を与えるかを検討することが必要となった。しかしながら、本研究ではこの点については、特には言及しないこととした。

粗骨材および細骨材は、神奈川県相模川産のもので、その物理試験結果を表7.4に示す。

コンクリートの練りませ水として、水道水と海水を用いた。海水の成分を、表7.5に示す。

減水剤としては、ボゾリスNo.5Lを用い、空気量の調節には、AE剤ボゾリスNo.303を使用した。

鉄筋は、JISRG3112に定めるφ9mmの丸鋼を用い、コンクリート中の埋め込み長さを18cmとした。埋め込み鉄筋は、10%クエン酸アンモニウム溶液によって黒皮を除去して、光沢状態として使用した。

b) 供試体の製作

コンクリートの配合条件は、粗骨材の最大寸法25mm、単位セメント量290kgf

表 7.1 セメントの化学分析結果

セメントの種類	記号	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	S (%)	f. cao (%)
普通ポルトランドセメント	NO	0.8	0.3	21.7	5.5	3.1	64.7	1.3	2.0	0.30	0.57	—	0.9
普通ポルトランドセメント	N2	1.7	0.3	20.7	5.2	2.9	63.3	1.2	3.9	0.27	0.56	—	0.9
早強ポルトランドセメント	HO	1.1	0.5	20.6	5.2	2.7	65.3	2.2	2.5	0.37	0.54	—	0.9
中庸熱ポルトランドセメント	MO	0.8	0.2	23.5	4.5	3.8	65.4	1.2	1.7	0.28	0.48	—	0.5
B種高炉セメント	BO	0.4	0.7	25.7	9.7	2.1	54.1	3.2	2.4	0.46	0.51	0.4	0.3
B種高炉セメント	B2	1.3	0.6	24.4	9.3	2.0	53.2	3.0	4.3	0.44	0.48	0.4	0.4

表 7.2 セメントの物理試験結果

セメントの種類	記号	比重	粉末度		凝結		安定性	フロー値 (mm)	強さ								
			比表面積 (cm ² /g)	標準網ふるい 80μ残分 (%)	水量 (%)	発時			終時	曲げ強さ (kgf/cm ²)				圧縮強さ (kgf/cm ²)			
										1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	NO	3.14	3180	1.6	27.5	2:28	3:28	良	250	—	32.9	46.1	69.0	—	131	226	422
普通ポルトランドセメント	N2	3.12	3570	1.6	27.8	2:50	3:50	良	249	—	39.0	47.3	72.6	—	159	231	380
早強ポルトランドセメント	HO	3.13	4290	0.7	29.0	2:23	3:26	良	259	30.8	47.7	62.2	115	226	338	447	
中庸熱ポルトランドセメント	MO	3.19	3260	2.0	25.5	3:02	4:27	良	255	—	25.3	36.0	62.2	—	90	146	317
B種高炉セメント	BO	3.04	3850	1.4	28.8	3:34	5:10	良	255	—	28.1	34.9	62.0	—	97	152	346
B種高炉セメント	B2	3.00	4100	1.3	29.0	3:54	5:52	良	253	—	26.8	37.8	63.8	—	9	152	325

表 7.3 アルミナセメントの化学分析および物理試験結果

化学成分 (%)			比重	粉末度		曲げ強さ (1日) (kgf/cm ²)	圧縮強さ (1日) (kgf/cm ²)
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO		比表面積 (cm ² /g)	標準網ふるい 88μ残分 (%)		
60.6	2.5	32.5	2.98	42.30	0.2	67.2	468

表 7.4 使用骨材の物理試験結果

種別	比重	吸水量 (%)	粗粒率
細骨材	2.61	2.52	2.98
粗骨材	2.65	1.05	6.85

表 7.5 海水の化学成分

試料採取日	比重 (20°C)	pH (20°C)	化 学 成 分 (mg/l)						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃
1970年2月3日	1.024	8.03	10125	387	376	1180	17136	2412	65

表 7.6 コンクリートの配合

セメントの種類	記号	練り混ぜ水	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						塩素含有量 vs モルタル (%)
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (1)	A E 剤 (c. c.)	
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	25	6.6	3.4	52.7	37.0	153	290	740	1261	2.9	—	—
		海水	25	5.6	3.2	53.4	36.0	155	290	718	1277	2.9	—	0.227
早強ポルトランドセメント	HO	水道水	25	3.7	3.9	53.1	37.0	154	290	748	1258	2.9	—	—
		海水	25	5.7	3.1	55.2	36.0	160	290	711	1263	2.9	—	0.235
中庸熟ポルトランドセメント	MO	水道水	25	6.5	4.8	52.4	37.0	152	290	742	1264	2.9	—	—
		海水	25	4.6	4.0	53.1	36.0	154	290	720	1280	2.9	—	0.226
B種高炉セメント	BO	水道水	25	3.5	3.0	52.4	37.0	152	290	738	1258	2.9	—	—
		海水	25	4.0	3.8	53.1	36.0	154	290	716	1274	2.9	—	0.226
アルミナセメント	AL	水道水	25	6.3	3.1	52.1	37.0	151	290	737	1256	2.9	20	—
		海水	25	5.1	3.5	52.8	36.0	153	290	716	1272	2.9	—	0.225

注) スランブ, 空気量は測定値

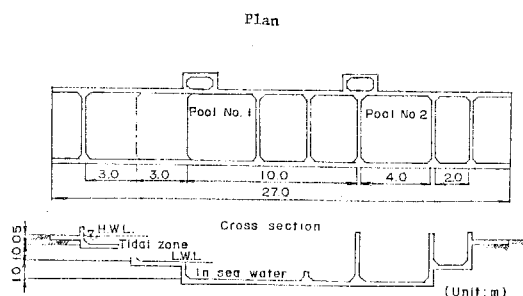


図 7.1 海水循環水槽概略図

／m³、スランプ5 cm、空気量4%を目標とした。配合結果を表7. 6に示す。

供試体は、 $\phi 15 \times 30$ cmの円柱供試体であり、圧縮強度試験供試体、鉄筋腐食試験供試体、および、自然電極電位測定供試体の3種類のものを製作した。

鉄筋腐食試験供試体は、埋め込まれた鉄筋の腐食の観察に用いると共に、供試体の上下両端を、カッターにより切断して、コンクリートの中酸化試験に用いた。鉄筋腐食試験供試体に埋め込む鉄筋の本数は、1供試体につき3本とし、かぶりをそれぞれ2、4、7 cmと変化させた。

また、埋め込み鉄筋の電気化学的測定に用いる自然電極電位測定供試体は、鉄筋腐食試験供試体と同様のものとして、各鉄筋の上端に $\phi 1$ mmの穴をあけ、それをリード線に接続したものである。

コンクリートの練りませには容量200 lの強制練りミキサを用いた。コンクリートの打設は、20℃の恒温室内で行なった。型枠に、コンクリートを2層に分けて詰め、各層を棒状振動機で締め固めた。鉄筋腐食試験供試体および自然電極電位測定供試体では、コンクリートを上面まで打ち込んだ後に、鉄筋の固定金具を取り外して、表面より4-5 cmの部分を振動機により再び締め固めて、コンクリートの表面を金ごて仕上げした。

c) 供試体の養生および暴露

成形したコンクリート供試体は、恒温室内に静置して、翌日脱型して、標準養生水槽(21℃)にて材令7日まで養生(早強ポルトランドセメントの場合材令3日まで)を行なった後、海水循環水槽の最も腐食環境の厳しいと考えられた感潮部に設置した。

海水循環水槽は、図7. 1に示す構造を有し、1日2回ポンプで海水を吸排水し、1.5 mの潮位差で自然の潮汐作用に似た状態を模倣するものである。この水槽の海水は、久里浜湾(神奈川県)に面した護岸に隣接した井戸から採取している。海水の化学成分は、表7. 5に示すものとほぼ同一である。また、海水の温度は、夏期で約24℃、冬期で約8℃である。

(3) 測定項目

a) 圧縮強度

圧縮強度試験は、JISA1108により行なった。試験は、初期材令、1年、5年、および10年、の各材令にて行なった。

b) コンクリート中の塩素イオン含有量

鉄筋腐食試験供試体を用いて、かぶりがそれぞれ2、4、7 cmの鉄筋近傍のコンクリートを5-10 g採取し、さらに、3. 3に述べた全塩素イオンに対する抽出を行ない、その後、クロム酸銀-吸光光度法によって塩素イオンを定量した。塩素イオン含有量については、材令10年で試験を行なった。

c) コンクリート中の鉄筋の腐食状況

材令10年で、鉄筋腐食試験供試体をつ裂して、鉄筋を取り出して表面の腐食状況を観察した。鉄筋に接したコンクリートについては、供試体かつ裂後ただちにフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹きつけて、中性化の有無を確かめた。

取り出した鉄筋について、肉眼で観察できる腐食した部分をトレースしてプランメーターによって腐食面積を測定した。

d) コンクリート中铁筋の電気化学的性質

イ) 自然電極電位

本節の試験においては、照合電極として海水塩化銀電極を用いた。なお、測定時には、供試体は、海水に浸っている状態とした。

ロ) 不動態のグレイド

材令10年において、鉄筋腐食試験供試体を用いて分極曲線を測定し、不動態のグレイドを判定した。この場合、コンクリート供試体の下層部分(約5cm)のコンクリートをかっ裂ではぎ取り鉄筋の端部を露出させ、ハンダ付けによりリード線を接続した。接続部およびコンクリートのかっ裂面は、エポキシ樹脂でコーティングした。また、照合電極および対極としてそれぞれ飽和甘こう電極およびステンレス鋼を用いた。

本節の実験では、電位の掃引速度を40mV/min(0.67mV/sec)とした。

e) コンクリートの中性化

鉄筋腐食用試験供試体を図7.2に示すように上面より5cmおよび25cmでかっ裂により切断し、さらに、上面から5cmまでの部分を半割りとしてフェノールフタレイン溶液を吹きつけ、着色状態をトレースした。試験は、材令1年、5年、10年で行ない、最大中性化深さを測定した。また、平均中性化深さもプランメーターにより中性化部分の面積を測定して、それを周辺長で除することによって求めた。

(4) 実験結果

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

材令10年において、かぶりごとに、水道水練りのものについては、普通ポルトランドセメントのもの4本、早強ポルトランドセメントおよびアルミナセメントのものを各々2本、中庸熱セメントおよびB種高炉セメントのものを各々3本、また、海水練りのものについては、普通ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントのものを各々6本、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよびアルミナセメントのもの各々3本、を表面観察し、さらに、鉄筋腐食面積を測定した。

各種のポルトランドセメントを用いたものにおいては、水道水練りの場合、27本の中で4本が腐食しており、海水練りの場合では、36本の中で12本が腐食していた。B種高炉セメントを用いたものでは、水道水練りの場合、9本の中で1本が腐食しており、海水練りの場合、18本の中で2本が腐食していた。さらに、アルミナセメントを用いたものでは、水道水練りの場合、6本の中で2本が、海水練りの場合では、9本すべてが腐食していた。

鉄筋の腐食の程度は、いずれの場合においても軽微であり、かぶりのコンクリートを剝落させたものや、コンクリート表面に錆を溶出させたものは皆無であった。錆としては、Fe₃O₄が主成分と思われる黒いものが多く、Fe₂O₃が主成分と思われる赤い錆も若干観察された。赤い錆は、アルミナセメントを用いたものに多く見られ、また、

表7.7 鉄筋の腐食面積率

(%)

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり		
		2 cm	4 cm	7 cm
		個別平均	個別平均	個別平均
普通ポルトランドセメント (NO+N2)	水道水	5.3 0.8 1.6 0.0	1.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0 0.0
	海水	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.3 0.0 0.0	0.0 0.0 0.1 0.5
早強ポルトランドセメント (HO)	水道水	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
	海水	2.0 4.5 4.3	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
中庸熱ポルトランドセメント (MO)	水道水	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
	海水	0.0 1.3 0.8	0.0 0.0	0.5 0.8 0.0
B種高炉セメント (BO+B2)	水道水	0.3 0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
	海水	0.0 0.0 0.2 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.2 0.0 0.0
アルミナセメント (AL)	水道水	0.0 0.2	0.0 0.1	0.0 0.0
	海水	2.3 1.3 2.1	1.7 0.5 2.0	1.5 1.3 1.4

(材令10年)

図7.2 鉄筋腐食試験用供試体およびその切断面

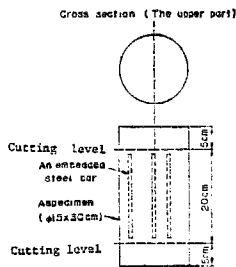


表7.8 自然電極電位の経年変化

(mV)

経過年数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	全平均
NO 水道水	-429	-435	-325	-360	-482	-613	-624	-	-731	-844	-544
NO 海水	-469	-484	-546	-482	-514	-643	-597	-	-708	-817	-584
N2 水道水	-390	-296	-302	-338	-348	-483	-530	-	-720	-777	-465
N2 海水	-650	-852	-694	-549	-583	-624	-561	-	-764	-810	-676
HO 水道水	-912	-729	-628	-421	-491	-733	-586	-	-843	-831	-686
HO 海水	-979	-900	-800	-629	-623	-600	-624	-	-603	-717	-719
MO 水道水	-659	-723	-625	-484	-497	-623	-624	-	-727	-799	-640
MO 海水	-791	-903	-815	-656	-588	-654	-599	-	-713	-752	-719
BO 水道水	-915	-922	-688	-645	-608	-605	-538	-	-506	-499	-659
BO 海水	-792	-739	-638	-419	-550	-448	-486	-	-448	-517	-560
B2 水道水	-814	-700	-617	-577	-618	-583	-486	-	-447	-518	-596
B2 海水	-670	-790	-724	-514	-467	-475	-439	-	-463	-476	-558
AL 水道水	-72	-96	-174	-133	-130	-122	-147	-	-447	-281	-184
AL 海水	-84	-60	-87	-134	-205	-235	-211	-	-286	-294	-177

注) おのおのの値は、供試体3本かぶり2, 4, 7cm, 測定月2, 4, 7, 10月の36個の測定値の平均である。

130

かぶりの小さなものにおいても観察された。鉄筋上端部（打ち込み方向に向かって）付近の錆は、その他の部分のものに比較して、面積も大きく厚かった。なお、鉄筋が腐食している場合においても、その周辺のコンクリートに中性化は認められなかった。

なお、アルミナセメントを用いた海水練りコンクリート中铁筋のすべてが腐食していたことの理由として、アルミナセメントの硬化が材令1日でも脱型出来ないほど遅かったことが考えられる。

また、鉄筋上端部付近の腐食が大きい理由としては、ブリージング水の影響あるいは鉄筋固定金具の取り外し後に打ち足したコンクリートが十分に締め固められず若干ボラスになったことなどが考えられる。ただし、鉄筋の取り出し時に観察した限りでは、異常は全くなかった。

アルミナセメントを用いたものを除外して、鉄筋の腐食は、かぶり2、4、7cmの鉄筋でそれぞれ30本の中で10本、3本、6本が腐食していた。

ロ) 腐食面積率

鉄筋の腐食面積率の測定結果を、表7.7に示す。なお、腐食面積率は、鉄筋表面積を50.0cm²として算定した。腐食面積は、セメント種、練りませ水、およびかぶりが同一であっても供試体によってバラツキがあった。

b) コンクリート中铁筋の電気化学的測定

イ) 自然電極電位

コンクリート中铁筋の自然電極電位は、セメントの種類と練りませ水の組み合わせごとに3本ずつの供試体（合計42コンクリート供試体、126鉄筋）について暴露開始時より測定した。自然電極電位の経年変化を、表7.8および図7.3に示す。これらの値は、セメントの種類別に3供試体のかぶり2、4、7cmについて各年ごとに1月、4月、7月、および、10月の4回測定し、計36個の測定値を平均したものである。なお、材令5年ごろまでの測定月による変動はかなり大きかった。

自然電極電位の経年変化は、各種のポルトランドセメント、B種高炉セメント、および、アルミナセメントの3グループによって明らかに傾向が異なった。各種のポルトランドセメントを用いたものでは、電位が徐々に、卑に移行する傾向を示し、材令10年では、-710--850mVとなった。B種高炉セメントを用いたものでは、電位は徐々に貴に移行する傾向を示し、材令10年では、-470--520mVとなった。アルミナセメントを用いたものでは、電位は徐々に卑に移行する傾向を示すが、電位は前2者より貴であって、材令10年では-240--270mVとなった。

ロ) 不動態のグレイドの判定

材令10年でコンクリート中铁筋のアノード分極曲線を測定し、不動態のグレイドの判定を行なった。結果を、表7.9に示す。これより、練りませ水またはかぶりの影響よりもセメントの種類による影響が卓越していることが認められる。即ち、B種高炉セメントを用いたコンクリート中铁筋の不動態のグレイドの方が明らかに、普通もしくは早強ポルトランドセメントのものより良い値を示す。

c) 圧縮強度および中性化

イ) 圧縮強度の経年変化

コンクリートの圧縮強度試験に用いた供試体数は、原則として、セメントの種類と練りませ水の組み合わせごとに3本であり、材令28日、1年、5年、10年において行

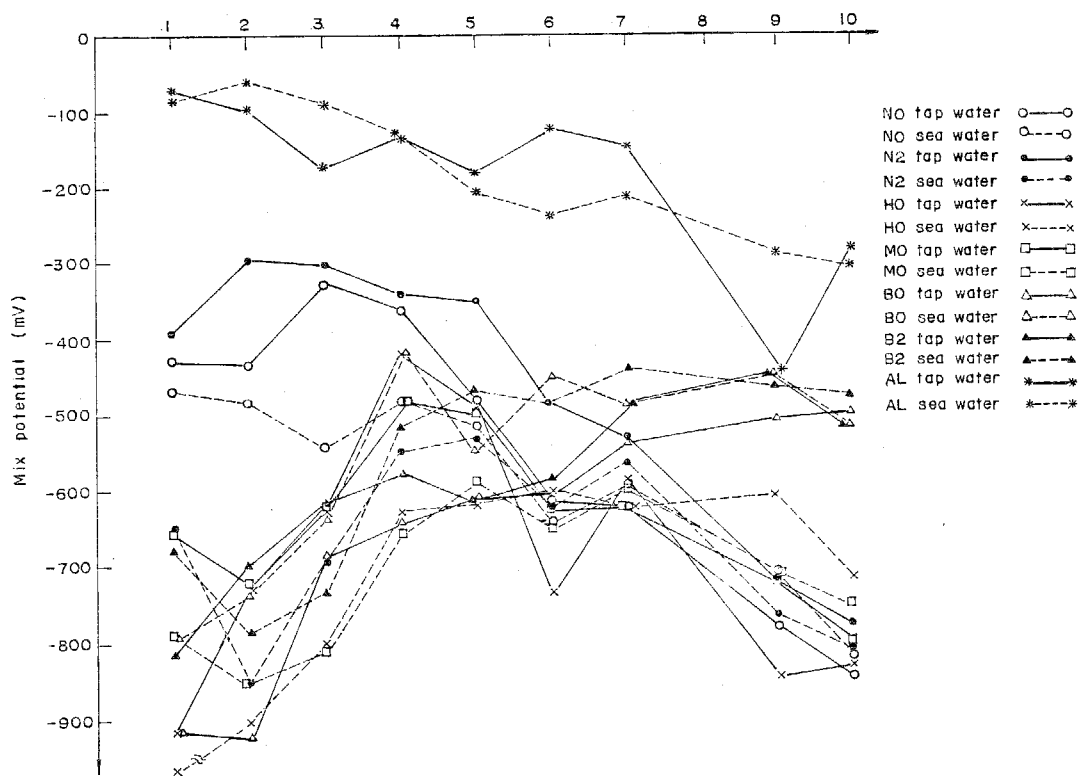


図 7.3 自然電極電位の経年変化

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)	不動態のブレイク平均値	不動態のブレイク平均値
普通ポルトランドセメント (N2)	水道水	2	0 1	0.5
		4	0 1	0.5
		7	0 1	0.5
早強ポルトランドセメント (HO)	水道水	2	1 1 1	1
		4	2 2 2	2
		7	2 2 3	2.5
	海水	2	1 0	0.5
		4	2 2 2	2
		7	2 2 2	2
B種高炉セメント (B2)	水道水	2	3 3 3	3
		4	4 4 3	3.5
		7	4 4 4	4
	海水	2	3 3 3	3
		4	4 4 4	3.5
		7	4 4 3	3.5
アルミナセメント (AL)	水道水	2	4 4 4	4
		4	4 4 4	4
		7	4 4 4	4

表 7.10 コンクリートの圧縮強度の経年変化 (kgf/cm²)

セメントの種類	記号	練り混ぜ水	圧縮強度 (kgf/cm ²)					海水練り水道水練り			σ _{10年} σ _{28日}
			28日	1年	5年	10年	28日	5年	10年		
普通ポルトランドセメント	NO	水道水 海水	366(35.9) 409(40.1)	— 405(39.7)	509(49.9) 518(50.8)	321(31.5) 335(32.8)	1.12	1.02	1.04	0.88 0.82	
			N2	388(38.0)	366(35.9)	524(51.4) 521(51.1)	307(30.1)	—	1.00	—	— 0.79
早強ポルトランドセメント	HO	水道水 海水	*425(41.7) *390(38.2)	— 411(40.3)	560(54.9) 555(54.4)	—	0.92	0.99	— 0.98		
			MO	328(32.1) 356(34.9)	— 558(54.7)	478(46.8) 477(46.7)	344(33.4) 379(37.1)	1.09	1.00	1.10 1.06	
B種高炉セメント	BO	水道水 海水	380(37.2) 395(38.7)	— 532(52.1)	563(55.2) 551(54.0)	429(42.0) 423(41.5)	1.04	0.98	0.99	1.03 1.07	
			B2	363(35.6) 366(35.9)	— 420(41.2)	523(51.3) 513(50.3)	— 389(38.1)	1.01	0.98	— 1.06	
アルミナセメント	AL	水道水 海水	**428(41.9) ***258(25.3)	— 568(55.7)	672(65.9) 603(59.1)	—	—	0.90	—		
			平均	1.04	0.98	1.04	0.98	1.04	0.98	0.98	

注) おのおの値は3本である。また*は7日, **は1日, ***は4日の強度である。()内は N/mm²

100

なった。試験結果を、表7. 10に示す。

各種ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの圧縮強度はいずれの場合も、水道水練りのものと同等であった。

コンクリートの圧縮強度は、材令5年のものが最も大きく、材令10年では強度の低下が明確に認められた。材令5年から10年にかけての強度の減少割合は、普通および早強ポルトランドセメントの場合3-4割、中庸熟ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの場合二割強であった。また、材令10年の圧縮強度は、材令28日のものに比較して、普通ポルトランドセメントの場合0.79から0.88とやや小さく、B種高炉セメントおよび中庸熟ポルトランドセメントの場合、1.03から1.07とやや大きかった。早強ポルトランドセメントの場合は、材令7日の強度とほぼ同一であった。

ロ) 中性化の経年変化

中性化を、材令1年、5年、10年で測定した。

材令1年では、いずれの供試体も、表面のみが中性化している程度であり、コンクリート内部への中性化の進行は認められなかった。

材令5年および10年における中性化の試験結果を、表7. 11に示す。中性化の区域が狭く、平均中性化深さを測定することが困難であったので、最大中性化深さのみを測定した。最大中性化深さは、供試体上部の隅角部や粗骨材の粗粒分が表面近くに存在するような箇所に生じていた。

d) 塩素イオン含有量

材令10年におけるコンクリート供試体中のかぶり別の塩素イオン含有量を表7. 12に示す。これより、10年間感潮部に暴露されたコンクリート中の塩素イオン含有量は、練りませ水として海水を用いたコンクリートの練りませ時の塩素イオン量と比較しても著しく多い。

(5) 考察

a) 練り混ぜ水の影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響

腐食の有無および腐食面積率におよぼす練り混ぜ水の影響を、表7. 13および表7. 14に示す。

腐食発生の割合は明かに海水練りの方が多し。また、腐食面積率については、1部のものを除いて、海水練りのもののほうが多い傾向にある。

ロ) 自然電極電位の経年変化におよぼす影響

海水練りコンクリート中铁筋と水道水練りコンクリート中铁筋の自然電極電位の差の経年変化を表7. 15および図7. 4に示す。概略の傾向は、材令5年程度までは、海水練りのものが卑であり、特に、材令2-3年においてこの傾向が著しいが、材令6年以降は、海水練りのものがやや貴となっている。自然電極電位が鉄筋の腐食と関係するとすれば、感潮部という条件下では、材令2-3年までは海水練りのものが水道水練りのものに比較して腐食しやすいが、材令5年以降はその差がなくなり、あるいは逆転する傾向すらあることを示す。

ハ) 不動態のグレードにおよぼす影響

表 7.11 コンクリートの中酸化

セメントの種類	記号	最大中性化深さ (mm)											
		練り混ぜ水				縦断面							
		横断面		縦断面		横断面		縦断面					
		上面	下面	上面	下面	上面	下面	上面	下面				
5年		10年		5年		10年		5年		10年			
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	0	4	0	2	0(4)	0(6)	0	0	0(2)	0(7)	
		海水	0	4	0	2	0(3)	0(2)	0	0	0(3)	0(5)	
	N2	水道水	3	0	2	0	0(3)	0(1)	0	0	0(1)	0(1)	
		海水	1	0	0	4	0(5)	0(3)	1	2	0(3)	0(4)	
	早強ポルトランドセメント	HO	水道水	0	0	0	0	0(0)	0(2)	0	0	0(0)	0(0)
			海水	0	0	0	2	0(0)	1(2)	0	3	0(0)	0(5)
中庸熱ポルトランドセメント	MO	水道水	0	2	0	0	0(2)	0(6)	1	3	0(3)	1(8)	
		海水	0	0	0	9	0(3)	0(4)	1	2	0(3)	0(8)	
	B種高炉セメント	BO	水道水	1	7	2	6	0(5)	3(8)	3	4	0(4)	0(5)
			海水	2	2	3	4	0(5)	4(6)	2	6	0(4)	4(5)
アルミナセメント	AL	水道水	2	2	2	0	0(3)	0(3)	2	3	0(3)	0(3)	
		海水	2	6	2	5	0(4)	4(6)	2	4	0(6)	3(5)	

() 内の数字は供試体隅角部

表 7.12 コンクリート中の塩素含有量 (全塩素) (% V.S. モルタル重量)

セメントの種類	かぶり (cm)	水道水練り	海水練り	海水練りに当りける塩素量②	塩素含有率①-③
普通ポルトランドセメント (NO)	2	1.73	1.65	0.23	1.32
	4	1.55	1.70		1.37
	7	1.33	1.30		1.07
早強ポルトランドセメント (HO)	2	1.63	2.70	0.24	2.46
	4	1.40	1.75		1.51
	7	1.00	1.50		1.25
B種高炉セメント (BO)	2	1.08	1.50	0.23	1.27
	4	0.80	0.98		0.75
	7	0.40	0.98		0.75
アルミナセメント (AL)	2	0.36		0.23	
	4	0.16			
	7	0.08			

表 7.13 腐食の有無に及ぼす練り混ぜ水の影響 (%)

セメントの種類	練り混ぜ水		平均
	水道水	海水	
普通ポルトランドセメント	33.3 (4/12)	27.8 (5/18)	30.1
早強ポルトランドセメント	0 (0/6)	33.3 (3/9)	16.7
中庸熱ポルトランドセメント	0 (0/9)	44.4 (4/9)	22.2
B種高炉セメント	11.1 (1/9)	11.1 (2/18)	11.1
アルミナセメント	33.3 (2/6)	100 (9/9)	66.7
平均 (アルミナを除く)	11.1	29.2	

注: 腐食発生率 (%) (✓) は (腐食している本数/全体の本数) の意味

表 7.14 腐食面積率に及ぼす練り混ぜ水の影響 (%)

セメントの種類	練り混ぜ水	
	水道水	海水
普通ポルトランドセメント	0.73	0.07
早強ポルトランドセメント	0	1.20
中庸熱ポルトランドセメント	0	0.43
B種高炉セメント	0.03	0.02
アルミナセメント	0.05	1.57
平均 (アルミナを除く)	0.19	0.43

注：腐食面積率の平均値 (%)

表 7.15 練り混ぜ水による自然電極電位の相違の経年変化
(海水練りの自然電極電位 - 水道水練りの自然電極電位)

(mV)

セメントの種類	経過年数										平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
NO	-40	-49	-221	-122	-32	-30	27	—	73	27	-41
N2	-260	-556	-392	-211	-235	-141	-31	—	-44	-33	-211
HO	-67	-171	-172	-208	-132	133	-38	—	240	114	-33
MO	-132	-180	-190	-172	-91	-31	25	—	14	47	-79
BO	123	183	50	226	58	157	55	—	58	-18	99
B2	144	-90	-107	63	151	108	47	—	-16	42	38
AL	-8	36	87	-1	-25	-113	-64	—	161	-13	7
平均	-34	-118	-135	-61	-44	12	3	—	69	24	-31

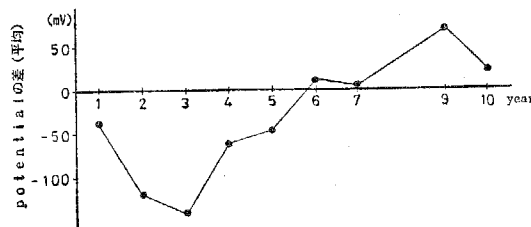


図 7.4 練り混ぜ水による自然電極電位の相違の経年変化

練り混ぜ水が材令10年のコンクリート中铁筋の不動態のグレイドにおよぼす影響を表7.16に示す。平均的には、海水練りと水道水練りとの差はないが、セメント種別に見ると、普通ポルトランドセメントでは海水練りが、また、早強ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントのものでは、水道水練りのものが、不動態のグレイドが高い。この不動態のグレイドより判断すると、普通ポルトランドセメント中の鉄筋は、特に水道水練りのものにおいて腐食が進行していると思われ、早強ポルトランドセメントのものは、ほとんどのものが腐食は進行していないと思われる。さらに、B種高炉セメントのものは、全く進行していないと判断される。

ニ) コンクリートの圧縮強度および中性化におよぼす影響

海水練りコンクリートと水道水練りコンクリートの圧縮強度の比(海水練り/水道水練り)を見ると、それらは、アルミナセメントを除いて0.95から1.10にあり、材令5年および10年ではそれらの平均は各々0.98および1.10となる。これより、海水練りコンクリートの圧縮強度はアルミナセメントを除いて、水道水練りコンクリートに劣らない。

表7.17に、材令5年、10年のコンクリートの中性化(コンクリートの横断面)におよぼす練り混ぜ水の影響を示す。海水練りコンクリートの最大中性化深さの方が大きいことがわかる。

ホ) 塩素イオン含有量におよぼす影響

海水練りコンクリートの塩素イオン含有量が多い。

バ) セメント種別の影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響

表7.13、7.14より判断すると、水道水練りコンクリートの場合、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの防食性能が優れており、普通ポルトランドセメントおよびアルミナセメントの防食性能はやや劣ることが認められる。また、海水練りの場合、B種高炉セメントの防食性能が優れている。

特に、本試験結果より、B種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの防食性能が、普通ポルトランドセメントを用いた水道水練りコンクリートのものを上回ることは注目に値する。

ロ) 自然電極電位におよぼす影響

前述したように、自然電極電位におよぼす影響は、各種のポルトランドセメント、B種高炉セメントおよびアルミナセメントを用いたもので傾向が異なった。

即ち、各種のポルトランドセメントを用いたものは、材令5年まではばらつくが、それ以降は卑に向かい、材令10年では $-710\text{mV} \sim -850\text{mV}$ となった。B種高炉セメントを用いたものは、当初は卑であるが、徐々に貴に向かい、材令10年では $-470 \sim -520\text{mV}$ となる。アルミナセメントを用いたものは、当初相当貴であるが徐々に卑に向かい材令10年では $-240 \sim -270\text{mV}$ となる。

自然電極電位で判断すれば、各種のポルトランドセメントおよびアルミナセメントを用いたコンクリート中铁筋は徐々に腐食しやすく、逆に、B種高炉セメントを用いたコンクリート中のものは徐々に腐食しにくくなる傾向にある。

なお、この傾向は、練り混ぜ水の影響を受けない。

ハ) 不動態のグレイドにおよぼす影響

表7.16より、材令10年では、不動態のグレイドは、B種高炉セメントを用いた

表7.16 練り混ぜ水が材令10年の
不動態のクレイドに及ぼす影響

セメントの 種類	かぶり (cm)	練り混ぜ水			
		水道水		海水	
		かぶり別	平均	かぶり別	平均
普通ポルト ランド セメント	2	0 1	0.5	1 1	1.0
	4	0 1		1 1	
	7	0 1		1 1	
早強ポルト ランド セメント	2	2 2	2.17	1 0	1.5
	4	2 2		2 2	
	7	2 3		2 2	
B種高炉 セメント	2	3 3	3.5	3 3	3.33
	4	4 3		3 4	
	7	4 4		4 3	
平均		2.06		1.94	

表7.17 コンクリートの中性化に及ぼす
練り混ぜ水の影響

(mm)

セメントの 種類	材令	横断面の最大中性化 平均値(上下面を含む)	
		水道水練り	海水練り
NO	5年	0	0.17
	10年	2.5	2.83
HO	5年	0	0
MO	5年	0.33	0.5
	10年	2.17	3.5
BO	5年	2.0	5.17
	10年	2.33	4.17

ものが最も高く、次いで、早強ポルトランドセメントを用いたものであり、最も低いのが普通ポルトランドセメントを用いたものである。特に注目すべき点は、B種高炉セメント海水練りの不動態のグレイドは3以上であり、材令10年での腐食の進行は全くなないと判断され、かつ、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントの水道水練りのものより高い値であるということである。

また、普通ポルトランドセメントを用いたものでは、水道水練りのグレイドが海水練りのものより低い傾向があり、この傾向は、腐食の有無および腐食面積率の傾向とも一致する。

ニ) コンクリートの圧縮強度および中性化におよぼす影響

セメント種別の材令10年と材令28日の圧縮強度の比を見ると、B種高炉セメントと中庸熟ポルトランドセメントのものが1.05程度であり、普通ポルトランドセメントのものが0.80-0.90であり、普通ポルトランドセメントがやや劣るようである。この理由の1つとして、B種高炉セメントと中庸熟ポルトランドセメントの初期強度発現は、普通ポルトランドセメントに比較して遅いことが挙げられる。

表7.17より、最大中性化深さについては、材令10年では、水道水練りのものについてはセメント種別の影響はほとんどないが、海水練りのものでは、B種高炉セメントを用いたものが最も大きく、普通ポルトランドセメントを用いたものが最も小さい。

ホ) 塩素イオン含有量におよぼす影響

普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の含有量が多く、次いで、B種高炉セメントを用いたものであり、アルミナセメントを用いたものが最も少ないことが認められた。

c) かぶりの影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響

表7.18および表7.19に、かぶりの鉄筋の腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響を示す。水道水練りと海水練りとで傾向が異なった。水道水練りでは、かぶりの影響は明瞭であり、かぶりのおおいいほど腐食の発生および腐食面積率は減少する。特に、かぶり7cmでは腐食はなかった。これに対して、海水練りでは、かぶり2cmのもの腐食が最も顕著ではあるが、かぶり4cmのものより7cmのもの腐食が多く、必ずしも、かぶりの影響は明瞭ではない。これは、練り混ぜ水としての海水のおよぼす悪影響はかぶりに無関係の為と考えられる。

ロ) 自然電極電位におよぼす影響

自然電極電位をかぶり別に整理したものを表7.20に示す。材令10年におけるものはかぶりの大きなもの程貴である傾向を示す。しかし、10年間の平均値では、かぶりによる差は明かでない。

ハ) 不動態のグレイドにおよぼす影響

早強ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いたものでは、かぶりの大きい方がやや高いグレイドを示す。しかし、普通ポルトランドセメントを用いたものでは差が認められなかった。

ニ) 塩素イオン含有量におよぼす影響

当然のことではあるが、かぶりの小さい程含有量は多い。

d) 結論

表 7.18 鉄筋の腐食の有無に及ぼすかぶりの影響

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)		
		2	4	7
普通ポルトランドセメント	水道水	3/4	1/4	0/4
	海水	0/6	2/6	3/6
早強ポルトランドセメント	水道水	0/2	0/2	0/2
	海水	3/3	0/3	0/3
中庸熱ポルトランドセメント	水道水	0/3	0/3	0/3
	海水	3/4	0/4	2/4
B種高炉セメント	水道水	1/3	0/3	0/3
	海水	1/6	0/6	1/6
合計	水道水	4/12 (33.3%)	1/12 (8.3%)	0/12 (0%)
	海水	7/19 (36.8%)	2/19 (10.5%)	6/10 (31.6%)
	平均	35.1%	9.4%	15.8%

表 7.19 鉄筋の腐食面積率に及ぼすかぶりの影響 (平均値)

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)		
		2	4	7
普通ポルトランドセメント	水道水	1.93	0.25	0.0
	海水	0.0	0.07	0.15
早強ポルトランドセメント	水道水	0.0	0.0	0.0
	海水	3.60	0.0	0.0
中庸熱ポルトランドセメント	水道水	0.0	0.0	0.0
	海水	0.87	0.0	0.43
B種高炉セメント	水道水	0.1	0.0	0.0
	海水	0.03	0.0	0.03
合計	水道水	0.51	0.06	0.0
	海水	1.13	0.02	0.15
	平均	0.82	0.04	0.08

(%)

表 7.20 かぶり別の自然電極電位

(mV)

セメントの種類	かぶり					
	2 cm		4 cm		7 cm	
	全平均	材令10年	全平均	材令10年	全平均	材令10年
普通ポルトランドセメント	-569	-851	-559	-633	-565	-649
B種高炉セメント	-571	-463	-591	-462	-587	-330
アルミナセメント	-211	-359	-193	-232	-133	-195

表 7.21 腐食面積率(材令10年)に及ぼす各種要因の影響

練り混ぜ水	腐食面積率	セメント種	腐食面積率	かぶり	腐食面積率
水道水	0.19%	普通ポルト	0.40%	2 cm	0.82%
海水	0.43%	早強ポルト	0.60%	4 cm	0.04%
		中庸熱ポルト	0.22%	7 cm	0.08%
		B種高炉	0.03%		

イ) 材令10年での腐食のし易さにおよぼす要因

材令10年での腐食のし易さにおよぼす要因を不動態のグレードおよび自然電極電位より判断すると、練り混ぜ水とかぶりの影響は、セメント種別の影響に比較して少ない。この場合、B種高炉セメントを用いたものが良好な防食性能を示し、その海水練りのものの防食性能は、普通ポルトランドセメントの水道水練りのものより良好である。

ロ) 材令10年での腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響

表7.21に各々練り混ぜ水、セメント種、およびかぶりの腐食の有無および腐食面積率におよぼす影響を示す。腐食面積率に関しては、セメントおよびかぶりの影響が大きいと思われる。特に、B種高炉セメントを用いたものおよび水道水練りかぶり7cmのものは、腐食は非常に少ない。なお、全体として腐食は軽微である。

ハ) 圧縮強度の経年変化におよぼす要因

セメント種別の影響はあるが、練り混ぜ水による相違は少ない。

ニ) 塩素イオン含有量におよぼす要因

海水練りおよびかぶりの小さなものの塩素イオン含有量が多いことは当然であるが、B種高炉セメントを用いたものが他のセメントを用いたものに比較して少ない。

ホ) まとめ

コンクリート中鉄筋の腐食におよぼす練り混ぜ水、セメント、かぶりの影響はそれぞれ大きい。また、それらの材令10年での腐食のし易さにおよぼす影響については、セメントの影響が顕著である。以上の事が、かぶり7cmの範囲かつ感潮部で確認された。

7.2 ひびわれのある供試体を用いた3年試験

(1) 概要

ここでは、海洋環境として主として感潮部を考え、海中部、陸上部（海岸より5m離れた位置にある）および室内（気中）を対象として、ひびわれのある鉄筋コンクリートの3年暴露実験を行なった。この結果を、7.1のひびわれのない場合と比較することによって、鉄筋腐食におよぼすひびわれの存在の影響を確認した。

(2) 供試体の製作および暴露条件

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを用いた。表7.22および表7.23に使用したセメントの化学成分および物理試験成績表を示す。

粗骨材は富士川産のものを用い、細骨材は千葉両神産のものを用いた。骨材の物理試験結果を表7.24に示す。

コンクリートの練り混ぜ水として、水道水と海水を用いた。

鉄筋は、SD35D13長さ50cmのものを用いた。鉄筋は、埋め込み時特別の処理はしなかったが、錆のない状態で用いた。

b) 供試体の製作

コンクリートの配合条件は、粗骨材の最大寸法25mm、スランプ12cmを目標とし、水セメント比を45、55、65%と変化させた。配合結果を、表7.25に示す。

供試体は、10×10×60cmおよび15×15×60cmのものを、前者をかぶり2

表 7.22 ス セメントの化学成分表

セメントの種類	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
普通ポルトランドセメント	0.7	0.1	21.7	5.6	3.3	64.7	1.3	2.1

表7.23 セメントの物理的試験表

セメントの種類	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝結		安定性	強さ		
			始 (h-m)	終結 (h-m)		圧縮強さ(kgf/cm^2)		
普通ポルトランド セメント	3.16	3080	2-49	3-54	良	3日	7日	28日
						146	247	411

表 7.24 骨材物理的性質

骨材の種類	F.M.	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積 重 量 (kgf/m ³)	実積率 (%)	洗 損 失 量 (%)
粗 骨 材	6.81	2.63	0.90	1660	63.2	0.6
細 骨 材	2.85	2.61	1.40	1760	68.4	1.0

表 7.25 コンクリートの配合

セメントの種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空 気 量 の 範 圍 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)			
						C	W	S	G
普通ポルトランドセメント	25	12±2	1.5±1	45	39.7	361	162	689	1168
"	25	12±2	1.5±1	55	41.0	295	162	771	1139
"	25	12±2	1.5±1	65	41.2	250	162	790	1158

および4 cm用に、また、後者をかぶり7 cm用として製作した。

埋め込み鉄筋の電位を測定するため、鉄筋の両端にリード線をハンダ付けしエポキシ樹脂でコーティングした。

コンクリートの練りまぜには容量100 lの強制練りミキサを用いた。コンクリートの打設は、20℃の恒温室内で行なった。型枠に、コンクリートを2層に分けて詰め、各層を棒状振動機で締め固めた。1層を打ち込んだ後に鉄筋を所定の位置に固定し、2層目を打ち締め固め、その後、コンクリートの表面を金ごて仕上げした。なお、供試体の総数は55本であった。供試体の概要を図7.5に示す。

c) 供試体の養生および暴露

成形したコンクリート供試体は、恒温室内に静置して、翌日脱型して、標準養生水槽(21℃)にて材令28日まで養生を行なった後、100 tアムスラー試験機にて曲げモーメントを加え、曲げひびわれを導入し、海水循環水槽の所定の位置に設置した。なお、室内養生のもの3本については、材令3ヶ月まで標準養生水槽にて養生し、その後室内気中にて養生した。

海水循環水槽は、前節で述べたように、図7.1に示す構造を有し、1日2回ポンプで海水を吸排水し、1.5 mの潮位差で自然の潮汐作用に似た状態を模倣するものである。ここでは、32本を感潮部に、8本を海中部に、さらに、12本を水槽の横手であり海岸から約5 m離れた位置にある陸上部に暴露した。

曲げひびわれは、鉄筋応力度が1000、2000あるいは3000 kg/cm²となるようなモーメントを与えた。表7.26に供試体の種類、鉄筋の応力レベル、養生条件および導入されたひびわれ幅を示す。ひびわれの形状の1例を図7.6に示す。供試体の種類の記号について述べると、1番目のBは角柱供試体であることを示し、2番目の数字は被り(cm)を示し、3番目のSあるいはWはそれぞれコンクリートが海水練りあるいは水道水練りであることを示し、最後の45、55、65は水セメント比を示す。

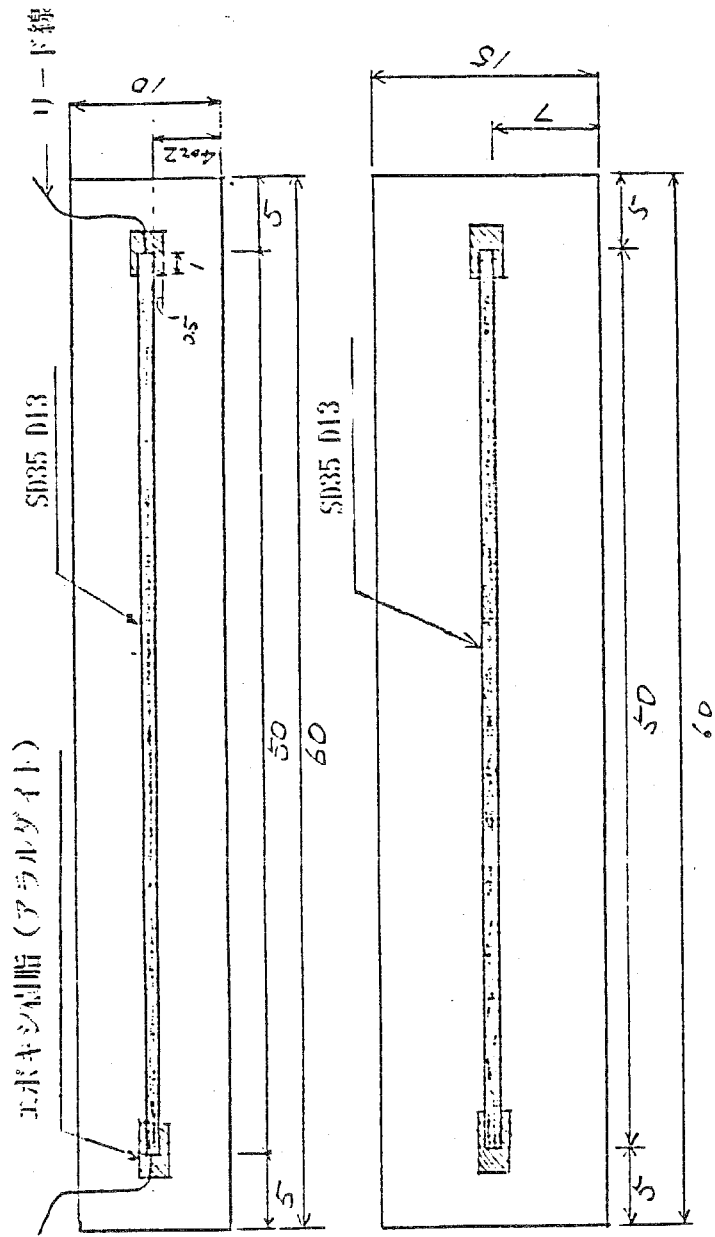
(3) 材令3年における腐食状況

鉄筋の腐食は軽微で、コンクリート表面に錆が滲んだものや縦ひびわれが生じたものは皆無であった。また、錆は黒いものが大部分で稀に赤系統のものがあつた。形状は、ほとんどが点錆であつた。錆を図7.7に示すようにB4用紙に写し、プランメーターにて面積を測定し、鉄筋表面積を200 cm²として算定し表7.27に示した。

(4) 内在塩素イオンが腐食におよぼす影響

表7.27より、感潮部では海水練りと水道水練りコンクリート中の鉄筋腐食量にほとんど差がないことが認められた。また、海中部でも同様の傾向と思われた。これに対して陸上部では、供試体数が少ないが、海水練りコンクリート中铁筋の腐食量が多いことが認められた。

この結果は5章のひびわれの存在の影響を確認するものである。即ち、侵入塩素イオンが多い場合には、ひびわれの存在によって、内在塩素イオンによる腐食量の相違はなくなるということが認められた(ひびわれがないと腐食量に差がある)。



15×15×60cm
(高さ0.2cm, 4cm)

15×15×60cm
(高さ0.7cm)

(単位: cm)

図 7.5 供試体の概要

供試体名 B7S55-1-2000

15×15×60cm

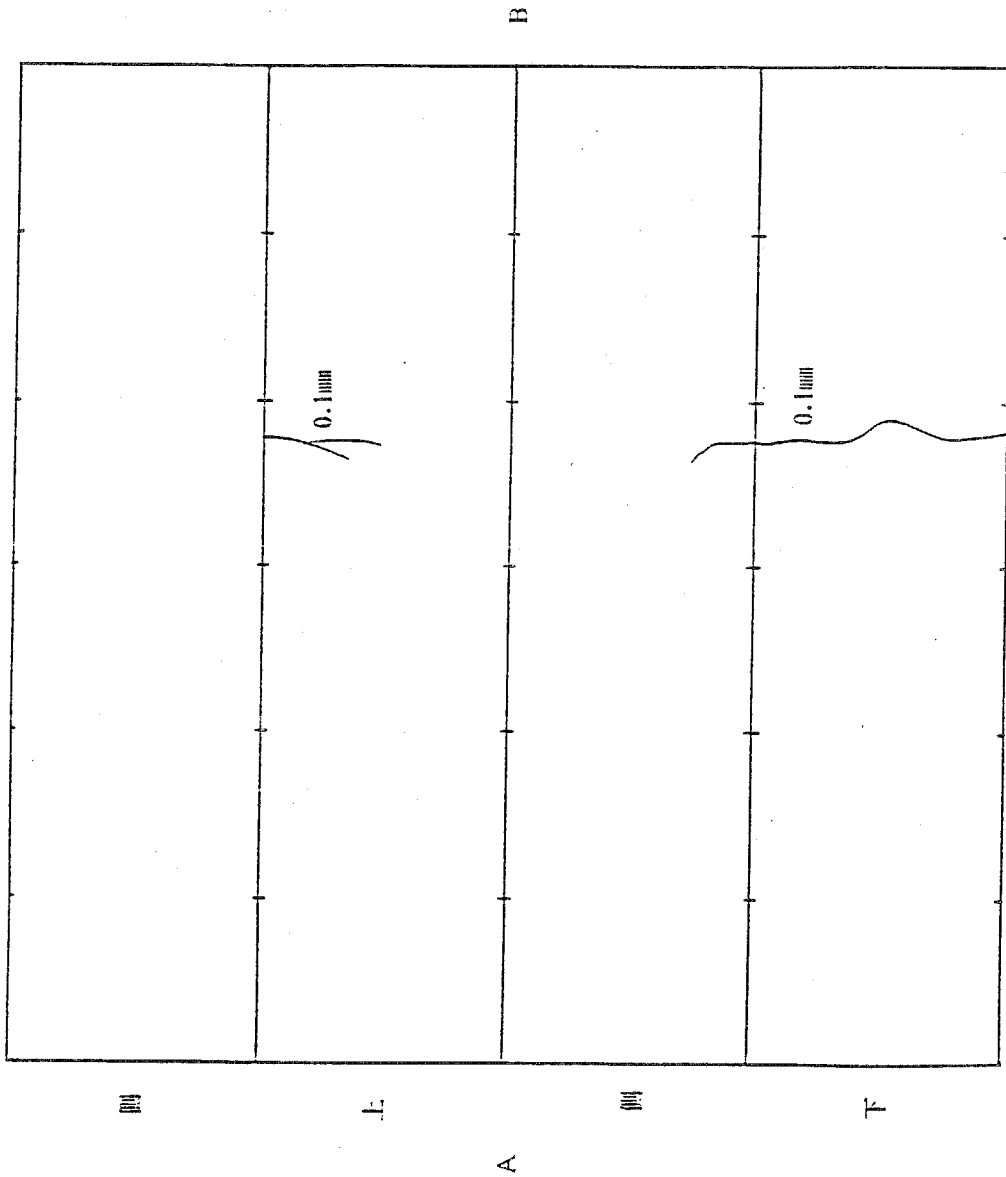


図 7.6 破断状況の1例

表7.26 供試体の種類

供試体名	応力レベル	養生条件	ひびわれ幅		
			①	②	total
B4S55	1000	感潮部	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.05	—	0.05
B4W55	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B2S55	2000	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.05	—	0.05
B2S65	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B2W65	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4S45	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.10	0.10	0.20
B4S55	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4S65	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B4W55	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4W65	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.10	0.10	0.20
B7S55	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.05	—	0.05
B7S65	〃	〃	0.30	—	0.30
	〃	〃	0.10	—	0.10
B7W55	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B7W65	〃	〃	0.10	—	0.10
B4S55	3000	〃	0.20	—	0.20
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4W55	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.05	—	0.05
B4S55	2000	海中部	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B4S65	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4W55	〃	〃	0.10	—	0.10
	〃	〃	0.02	—	0.02
B4W65	〃	〃	0.02	—	0.02
	〃	〃	0.06	—	0.06
B4S55	1000	陸上部	0.05	—	0.05
B4W55	〃	〃	0.05	—	0.05
B2S55	2000	〃	0.02	—	0.02
	〃	〃	0.05	—	0.05
B2S65	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.05	—	0.05
B2W55	〃	〃	0.02	—	0.02
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4S55	〃	〃	0.05	—	0.05
B4S65	〃	〃	0.05	—	0.05
	〃	〃	0.10	—	0.10
B4W55	3000	〃	0.10	—	0.10
B4S55	2000	室内気中	0.02	—	0.02
B4S65	〃	〃	0.04	—	0.04
B4W55	〃	〃	0.06	—	0.06

圧力レベル 2000, かぶり 7cm, W/C=55%, 海水練り

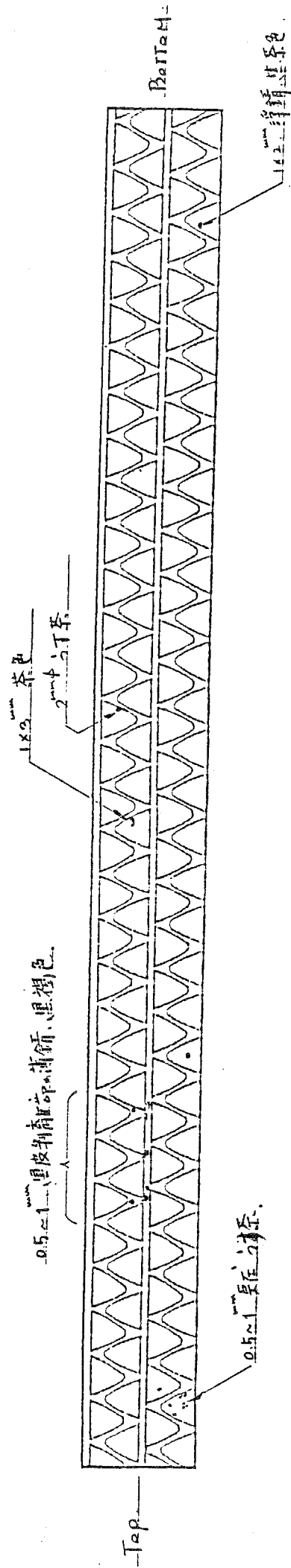


図7.7 腐食状況の一例

表 7.27

ひびわれのあり様試験結果

腐食面積率 (%)

感潮部					
応力レベル	かぶり (cm)	W/C (%)	水道水練り ①	海水練り ②	②-①
1000	4	55	0.136	0.067	-0.069
2000	2	65	0.144	0.134	-0.010
〃	4	55	0.300	0.138	-0.162
〃	4	65	0.146	0.011	-0.135
〃	7	55	0.037	0.050	0.013
〃	7	65	0.030	0.068	0.038
3000	4	55	0.008	0.225	0.217
				平均	-0.015
海中部					
2000	4	55	0.206	0.079	-0.127
〃	4	65	0.003	0.035	0.032
陸上部					
1000	4	55	0	0.055	0.055
2000	2	55	0.015	0.108	0.093
〃	4	55	—	0.080	0.080
室内気中 (3か月水中標準養生)					
2000	4	55	0	0	0

第8章 塩素イオンと実在構造物の腐食 およびその対策

8.1 塩素イオン含有量および腐食

(1) 塩素イオン含有量の実態

a) 実存無筋コンクリート構造物中の塩素イオン量

建設後15-44年経過したコンクリート岸壁および護岸の全塩素含有量を表8.1(27)に示す。これらの構造物は、感潮部よりやや上方の飛沫部にあり、比較的少ない塩素含有量である。また、浸漬後およそ15年経過した海中部の根固めブロックの対角線方向の全塩素含有量(この試料の抽出条件のみ5分間煮沸)を図8.1に示す。隅角部より10、20、30cmの位置の全塩素含有量は、各々1.66、0.76、0.35%と比較的多くの塩素を含んでいるが、40-80cmの位置では0.1%以下となる。さらに、建設後各々15年および20年経過した感潮部に近い飛沫部にある栈橋床板の全塩素イオン含有量を表8.2に示す。

なお、海水を練り混ぜ水として用いた場合の全塩素イオン含有量はおおよそ0.25%、海砂中の塩分規制値として塩分0.1%(NaCl換算)とした場合の全塩素イオン含有量はおおよそ0.04%である。これらの数値と比較すると海中のコンクリート中では、かぶり30cmでさえ0.25%を上回り、また、飛まつ部でも0.25%を上回るものがあり、大部分が0.04%を上回っていた。

b) かぶり、練り混ぜ水、セメントの種類、骨材の種類、打継目の存在による塩分含有量の相違

海洋環境にそれぞれ10年および5年暴露したコンクリート供試体中の塩素イオン含有量を表8.3(7章より)および表8.4に示す(24)。表8.3には塩素イオン含有量およびこれにおよぼすかぶり、セメントの種類、練り混ぜ水(海水、水道水)の影響を示す。表8.4には、塩素イオン含有量およびこれにおよぼす暴露条件、かぶり、骨材、打継目の影響を示す。これらの表より、海中部および感潮部に長期間暴露したコンクリート中の塩素イオン含有量は、0.25%や0.04%という数値に比較して著しく多い。普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントをもちいたコンクリートの塩素イオン含有量は、B種高炉セメントを用いたものに比較して大きい。また、かぶりが大きいほど塩素イオン含有量は大きい。さらに、サンゴ質の低品質の沖縄産骨材を用いたコンクリート中の塩素イオン含有量は通常の骨材を用いたものに比較して大きいなどの点が認められた。

(2) 内在塩素イオンの少ない鉄筋コンクリート栈橋の劣化状況調査(文献(11)より引用)

調査および試験を実施したH栈橋は、昭和29年から昭和31年にかけて建設された北九州にある栈橋で調査時は建設後ほぼ20年であった。

a) 栈橋構造の概略

表8.1 岸壁および護岸の
全塩素イオン含有量 (%)

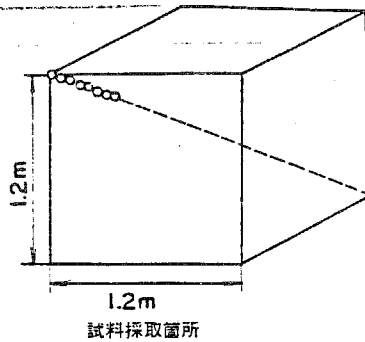
構造物	試験時までの経過年数	かぶり (cm)		
		0~4	8~12	16~20
七尾港岸壁	18年	0.24	0.22	0.23
		0.32	0.32	0.38
		0.29	0.37	0.34
		0.29	0.32	0.21
		0.29	0.31	0.29
滝港護岸	44年	0.26	0.12	0.04
		0.20	0.12	0.05
		0.23	0.14	0.05
		0.23	0.10	0.02
		0.13	0.10	0.05
		0.21	0.12	0.04
津港護岸	15年	0.13	0.08	0.06
		0.08	0.07	0.06
		0.08	0.07	0.06
		0.10	0.07	0.06
宇治山田護岸	15年	0.10	0.06	0.03
		0.07	0.06	0.06
		0.08	0.09	0.07
		0.08	0.09	0.07
		0.08	0.07	0.07

表8.2 栈橋のスラブ等における
全塩素イオン含有量および
見かけの拡散係数

	データの種類	かぶり (cm)	塩素含有量 (%)	経過年数	計算値	
					Co (%)	D *
飛沫部	① スラブコンクリート C=315kg/m ³ W/C=36%	2.5	0.08	20年	0.10	0.39
		7.5	0.05			
		12.5	0.035			
		17.5	0.03			
飛沫部	② スラブコンクリート C=480kg/m ³ W/C=43%	2.5	0.63	20年	0.56	0.13
		7.5	0.21			
		12.5	0.10			
		17.5	0.02			
飛沫部	③ スラブコンクリート (はり部) W/C=60%	2.5	0.29	15年	0.28	0.26
		2.5	0.16			
		7.5	0.10			
		7.5	0.06			
		15.0	0.02			
		15.0	0.05			
海中部	文献(24) モルタル W/C=40%	0.5	0.35	0.5年	0.94	0.11
		1.25	0.15			
		1.75	0.01			
		0.5	0.50	1.0年		
		1.25	0.30			
		2.0	0.15			
		2.75	0.01	2.0年		
		0.25	1.00			
		0.90	0.52			
		1.5	0.38			
2.25	0.25					
3.1	0.08					
文献(23) ベースト W/C = 40.0%						0.694

* (10⁻⁷ cm² / sec)

深さ (cm)	塩素含有量
10	1.66
20	0.76
30	0.35
40	0.09
50	0.06
60	0.07
70	0.08
80	0.08



試料採取箇所

図 8.1 根固めブロック中の塩素イオン含有量
 (コンクリートの概略仕様: 普通ポルトランドセメント,
 $G_{max} = 40mm$, 単位セメント量: $400kg/m^3$, $W/C = 50\%$)

表 8.3 円柱供試体 ($\phi 15 \times 30cm$) 中の
 塩素イオン含有量 (‰)
 (検査10年)

セメントの種類	かぶり	全 塩 素 (%)		水溶性塩素 (%)	
		水道水練り	海水練り	水道水練り	海水練り
普通ポルトランドセメント	2	1.73	1.65	1.63	1.40
	4	1.55	1.70	1.48	1.25
	7	1.33	1.30	1.15	1.60
早強ポルトランドセメント	2	1.63	2.70	1.60	2.13
	4	1.00	1.75	0.90	1.55
	7	1.40	1.50	1.40	1.43
B 種 高 炉 セ メ ン ト	2	1.08	1.50	0.90	1.33
	4	0.80	0.98	0.64	0.85
	7	0.40	0.98	0.33	0.87
アルミナセメント	2	0.36	/	0.34	/
	4	0.16		0.14	
	7	0.08		0.04	

注) モルタルに対する重量百分率である。

表 8.4 円柱供試体 ($\phi 15 \times 30cm$) 中の
 塩素イオン含有量 (溶存塩素イオン) (‰)
 (検査5年)

	かぶり (cm)	感潮部	海中部	陸上部	備 考
河 川 産 骨 材 (普通ポルト) $W/C = 42\%$	2	0.48	0.69	0.08	骨材最大寸法 25mm 打設後28日で暴露
	4	0.34	0.38	0.05	
	7	0.15	0.25	0.05	
沖 縄 産 骨 材 1 本部砕石普通ポルト $W/C = 44\%$	2	0.56	0.83	0.10	骨材最大寸法 40mm 打設後28日で暴露
	4	0.55	0.70	0.07	
	7	0.33	0.50	0.07	
沖 縄 産 骨 材 2 宮古砕石普通ポルト $W/C = 45\%$	2	0.40	0.49	0.17	骨材最大寸法 25mm 打設後28日で暴露
	4	0.44	0.48	0.10	
	7	0.40	0.41	0.10	
打 継 目 供 試 体 河川産骨材早強ポルト $W/C = 50\%$	2	—	0.88	—	骨材最大寸法 25mm 打設後50日で暴露
	4	—	0.50	—	
	7	—	0.38	—	

棧橋型式は、図8.2に示すように鉄筋コンクリートケーソンの前面に並列して打ち込んだ鉄筋コンクリートぐいと上部工により構成されており、上部工は複げた構造である。すなわち、上部工の上側はけたと床版により構成されており、上部工の下側はくい間およびくい頭とケーソンを連結した下げたの構造である。下げたの斜げたと直げたは、横方向の外力（船舶接岸力）を負担する目的で設けられたものであり、軸力に対して設計されている。棧橋は、これらの部材により構成されているが、鉄筋コンクリートぐいおよび下げたの斜げたと直げたは、いずれもプレキャスト部材であり、その他の部材（上げたおよび床版、下げたの前面げた、くい上部の立ち上がり部）は、現場打ちコンクリートにより施工された。

b) 環境条件

構造物の建設された地点の環境条件として、気象条件と海象条件を考えた。

風向は四季を通じ北の風が最も多く、北北西の風がこれに次ぎ、風速は一般に北の風が強く、強風は冬期に多く発生する。気象条件としては、温暖な地域に属すると考えられ、凍結融解作用の影響は無視することができて構造物に対して苛酷な環境でないと思われる。また、付近にはコンクリートに対して有害なガスを発生する工場等もなく、この面での影響もないと思われる。

次に海象条件として、港内の潮流は最大 0.52 m/sec 、最小 0.16 m/sec で概して小さく、干満差は 2.23 m である。荒天時には、棧橋上面は若干波しぶきをかぶる。本棧橋は、海象条件としても、苛酷な条件下に位置するものではない。

c) 施工方法

本棧橋建設当時の関係者から施工時の状況を聴取しこれらをまとめると、施工方法は以下のものであったと思われる。

現場打ちコンクリートの使用材料は、鉄筋はSS41（ $\phi 9$ 、 $\phi 13$ 、 $\phi 22$ ）、セメントは普通ホルトランドセメントである。用いた骨材は、粗骨材は碎石であり、細骨材は砂丘砂である。コンクリートの配合比は1:2:4（容積配合）であって、単位セメント量は $270\text{--}300\text{ kgf}$ 程度とし、スランプは $12\text{--}15\text{ cm}$ の範囲である。コンクリートの設計基準強度は、圧縮強度でほぼ 200 kgf/cm^2 である。鉄筋のかぶりは、床版では 5 cm 、けたでは 7 cm とした。

鉄筋コンクリートぐいは工場製品であって、コンクリートのスランプは $2\text{--}3\text{ cm}$ 、鉄筋のかぶりは 4.5 cm 、細骨材に海砂を使用している可能性があり、製造方法は遠心力締め固めである。上部工の下げたの斜げたと直げたは、棧橋付近に型枠を設置してコンクリート打ちを行なって製作されたものであり、製作後所定の場所に運搬、設置された。なお、この場合、用いた粗骨材は川砂利である。

棧橋の施工は、鉄筋コンクリートぐいの打ち込み、下げたの前面げたの現場打ちコンクリートによる施工、上げたおよび床版の現場打ちコンクリートによる施工の順序で行なわれた。

現場打ちコンクリートでは、練り混ぜには14切および21切のミキサを使用し、ダンプトラックおよび一輪車により打ち込み場所まで運搬した。木製の型枠を用い、粗骨材をスパーサーとして鉄筋を組み立て、コンクリート打ちと並行して突き棒による突き固めおよび長靴をはいた作業員が踏み固めることによりコンクリートを締め固めた。表面仕上げには、板材、木こて、ほうき等を用いた。なお、上部工の前面げたなどの感潮

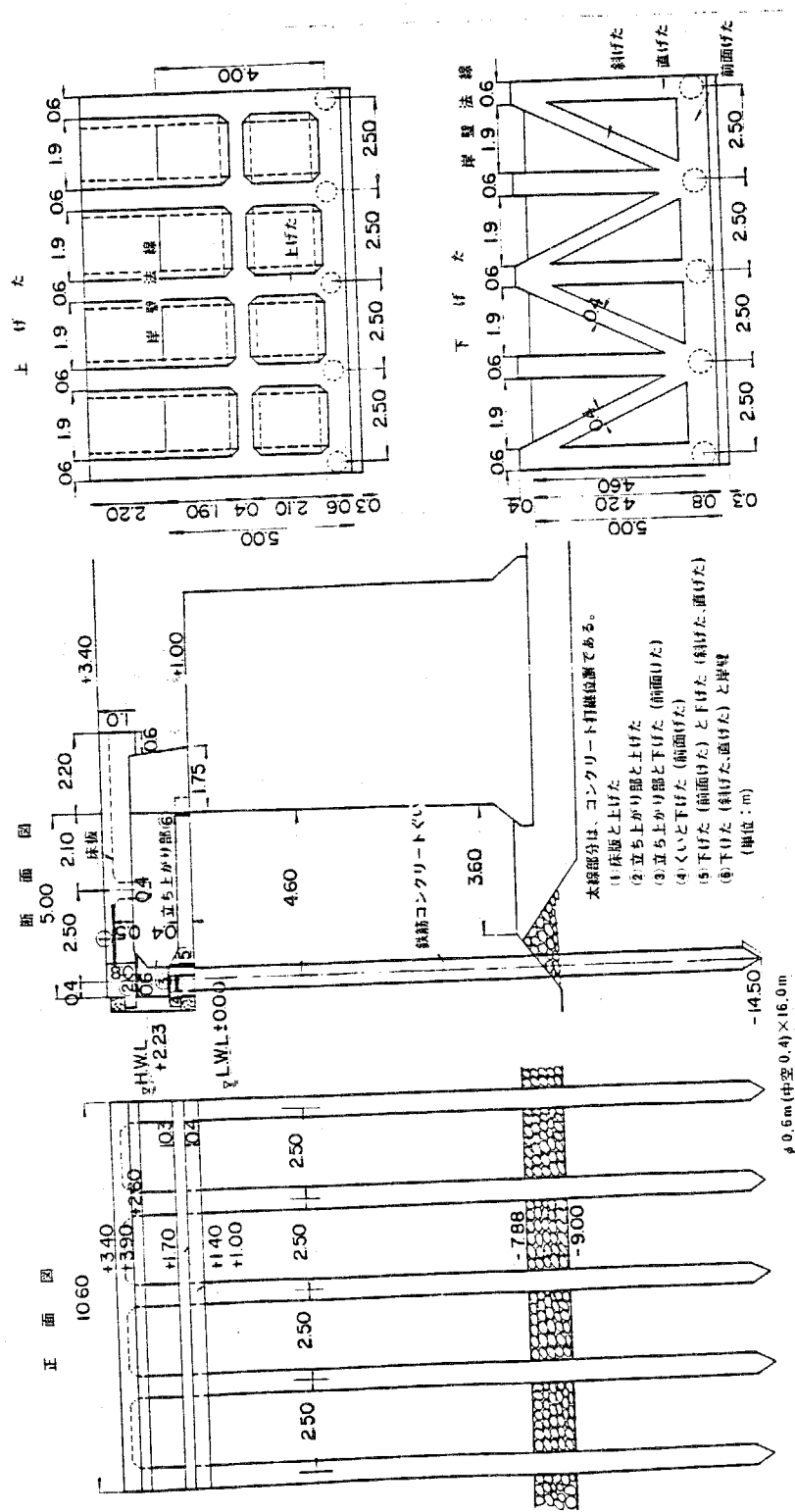


図 8.2 横棧橋の構造図

部に位置する部材では、干潮時に鉄筋を配置して、翌日の干潮時にコンクリートの打ち込みおよび締め固めを実施した。したがって、この部分の鉄筋は打ち込み以前に海水の浸漬を受けたことになる。

コンクリート打ち込み中の降雨はなかったが、感潮部に位置する部材では、コンクリート打ち込み後数時間で海水に接したことになる。

d) 現場打ちコンクリートの劣化状況と鉄筋の腐食

現場打ちコンクリートにより施工した部材としては、前述したように上げた、床版、下げた、鉄筋コンクリートぐい上部の立ち上がり部がある。現地で実施した観察結果によると、床版と上げたの劣化が顕著であった。床版の劣化状況の観察結果の1例を写真8.1にも示すが、この場合には、鉄筋とコンクリートが完全に剝離して、かぶりのコンクリートが損失していた。写真8.2は、引張鉄筋が腐食により膨張して、鉄筋位置に添って下げた軸方向に過大なひびわれが発生した1例を示すものである。鉄筋の腐食は、一般に各部材の隅角部に配筋されたものにおいて顕著であり、これらのうちで海側に位置したものに特に顕著であった。

前面げた（下げた）、床版および上げたにおけるコンクリート表面からの距離と塩素イオン含有量との関係をそれぞれ図8.3、図8.4および図8.5に示す。

床版中の塩素イオン含有量は、上層のコンクリート部分（上面から0-5cm）において0.13-0.3%程度の範囲にあり、上面から深くなるに従い減少する傾向にある。しかし、床版下層のコンクリート部分の含有量は、上層に比較して著しく多く、最大で0.7%程度の値を示した。床版下層のコンクリートは、下方の海水によって絶えず高い湿度に暴露されており、波浪の強い時には直接に波浪にさらされることも考えられる。このような原因により、床版下層のコンクリートが高い含有量を示したものと考えられる。さらに床版によっても相違し、E2、E3、E4の順に塩素イオン含有量は小さな値を示しており、減少する順序は、コンクリートの圧縮強度と相反する傾向を示している。

上げた表層部分のコンクリート中の塩素イオン含有量は、ほぼ0.4-0.8%の範囲にあり、ほぼ7cm付近では0.2-0.5%程度である。

前面げた（下げた）中の塩素イオン含有量は、床版や上げたに比較すると大きな値を示している。表層の部分では1.0%を越えるものもあり、かぶり7cmでも0.4-0.7%である。この理由として前面げた（下げた）が感潮部に位置することが挙げられる。

以上述べたように、現場打ちコンクリート中の塩素イオン含有量は、コンクリートの品質、部材表面からの位置、海水との接触条件などの要因によって相違すると考えられる。

また、本調査では腐食した鉄筋の引張耐力減少率と塩素イオン含有量との関係を求め、その結果を図8.6に示すが、かなりの関係があるようである。

e) プレキャストコンクリート部材の劣化状況

本栈橋に使用したプレキャスト部材には、下げたと鉄筋コンクリートぐいがある。下げたについては、貝殻等を除去して表面観察を行なったが、コンクリート表面はきれいであり、ひびわれのないしはコンクリートの欠損は認められなかった。鉄筋コンクリートぐいは、引き抜き後に観察を行なったが、円周方向に引き抜き後に発生したと思われるひびわれが観察されたのみで、ぐいそのものには下げたとどうようにコンクリートの欠

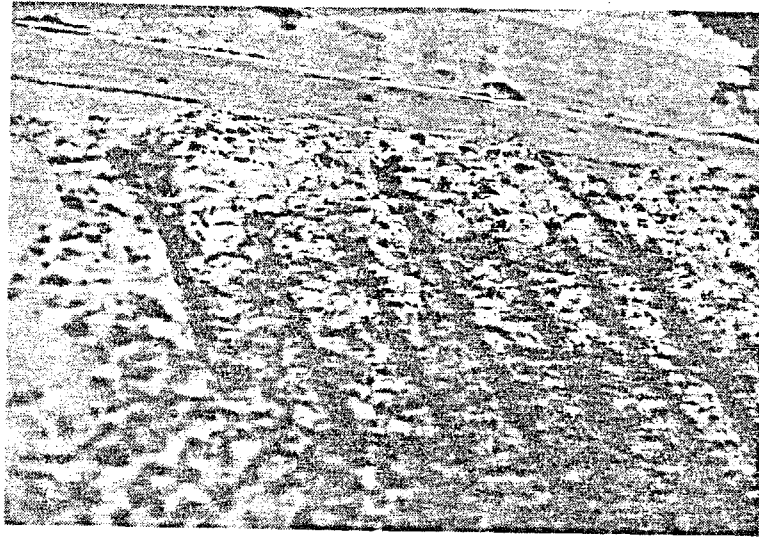


写真 8.1 床版下のコンクリート
はく落状況

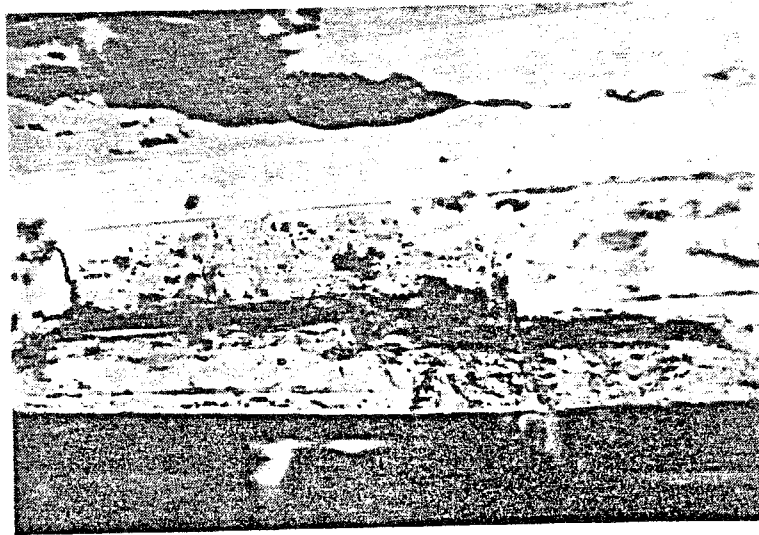
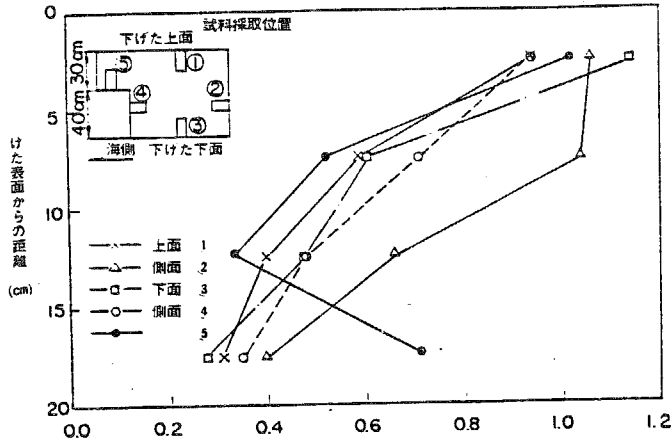
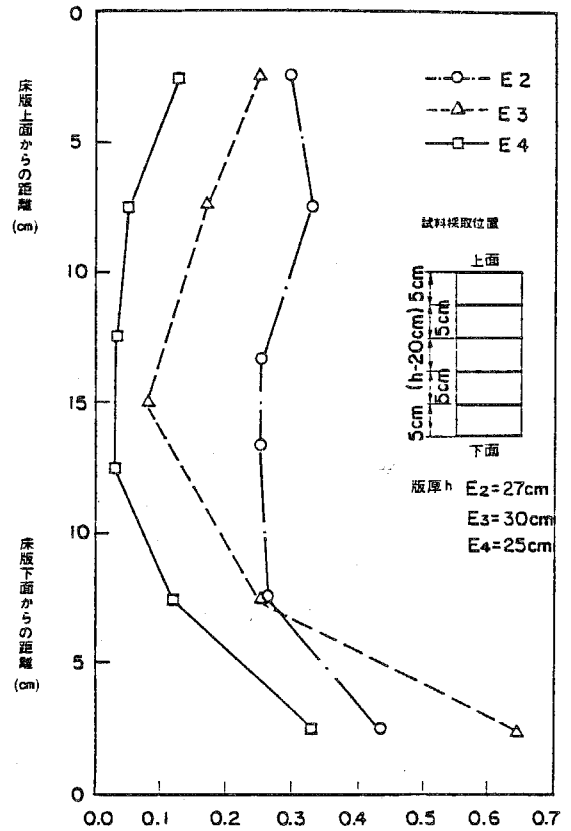


写真 8.2 下げたの鉄筋位置における
ひびわれ発生状況



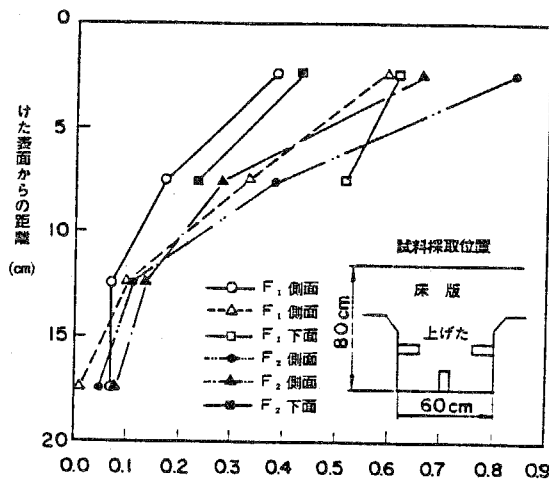
塩分量 (NaCl換算重量%)
VS コンクリート

図 8.3 前面けた (下げた) 中の
塩分量



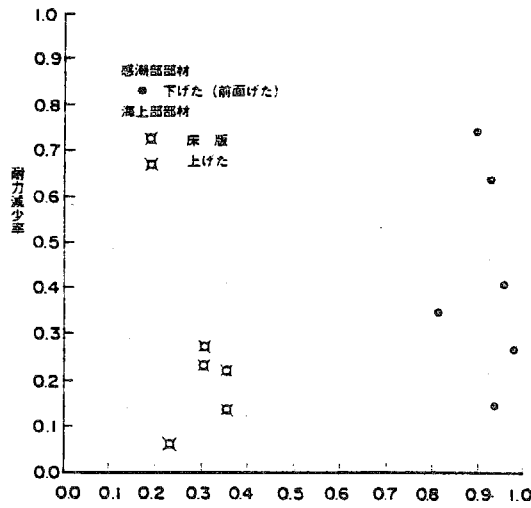
塩分量 (NaCl換算重量%)
VS コンクリート

図 8.4 床版中の塩分量

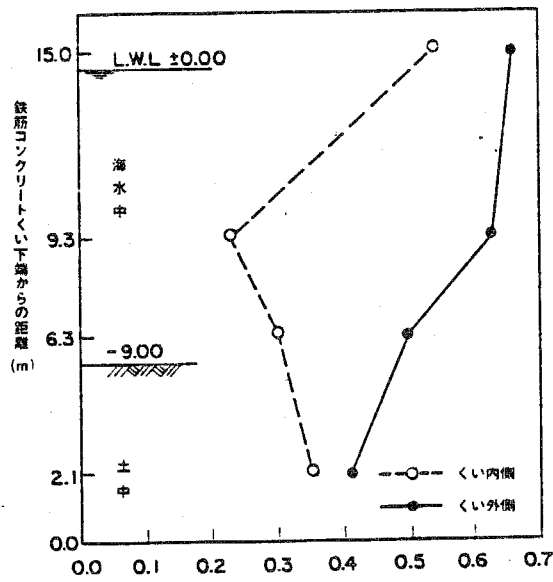


塩分量 (NaCl換算重量%)
VS コンクリート

図 8.5 上げた中の塩分量



塩分量 (NaCl換算重量%)
VSコンクリート
図 8.6 腐食した鉄筋の引張耐力と
コンクリート中の塩分量



塩分量 (NaCl換算重量%)
VSコンクリート
図 8.7 鉄筋コンクリートくい中の
塩分量

損等は認められなかった。また、鉄筋の腐食もほとんど進行していないものと考えられた。

図8.7に、打ち込まれたくい先端からの距離と塩分量(NaCl換算)を示す(かぶり厚は約2.5cmである)。深さ方向で検討すると、土中では小さい値となっており、くい上端付近ではほぼ最大値を示している。これは、上端付近では、波浪作用などにより塩分の浸透作用が大きかったものと考えられる。これらの値は、現場打ちコンクリートで施工した感潮部にある下げた(前面げた)の値と比較すると、若干小さな値であった。

一部の鉄筋に腐食が認められたが、その腐食状況は鉄筋表面に限定されていた。また、鉄筋の腐食によりかぶりコンクリートの剝離などは生じていなかった。

(3) 内在塩素イオンの多いコンクリート構造物の劣化状況調査

調査および試験を実施した岸壁は、東北日本海側の、昭和33年から40年にかけて建設されたS港井筒式岸壁(-9m)である。調査した床版は、調査当時竣工より15年経過していた。

a) 岸壁構造の概略(図8.8に示す)

下部構造は、既設の-3m物揚げ場と、それに平行に5.1m離して5.8m間隔で設置される井筒式ケーソンである。上部工として、井筒と井筒との間および井筒と護岸との間には床版を架設した。この床版はすべてプレキャスト板であり、現場近くの作業ヤードで製作した。劣化状況を調査したのは主として床版である。

b) 環境条件

風向風速をみると、夏場は穏やかであるが、冬場になると、NW~WNWの日が多くなり、月平均風速で6-8m/sec、日最大風速25m/secと強風の日が続くようになる。

気温は、冬場は零下となる日が多く、12月-3月までは、毎日のようにコンクリートは、凍結融解作用を受けているものと思われる。

海象条件については、岸壁の位置が、防波堤より約1km入った所にあり、外部施設のような厳しい条件ではないが、気象条件や冬期波浪などを考え合わせるとかなり苛酷な自然条件下にある岸壁と考えられる。

c) 施工方法

井筒は一辺7.8mの正方形で(内側寸法6.0mの正方形)で、高さ13.15mのものを13基設置し、井筒と井筒および井筒と-3m既設物揚げ場の間に床版を架設した。井筒は高さ5mまでをケーソンヤードで製作したものをスリップウェイより進水させてフローターを抱かせて曳航した。据付後は、井筒内部の土砂を掘削し井筒を沈下させ-1.2mに定着を計った。井筒の打ち足しは、一層の高さをそれぞれ2.8m、2.8m、2.0m、0.55mと4層に区分して施工し、型枠については、陸上で組み立てたものを起重機線であつて井筒上にのせることとした。

d) コンクリートの施工

コンクリートの使用材料については、鉄筋はSS41(ϕ 13mm、 ϕ 22mm)、セメントは普通ホルランドセメントである。砂、砂利共一部であるが、現地採取の海砂、

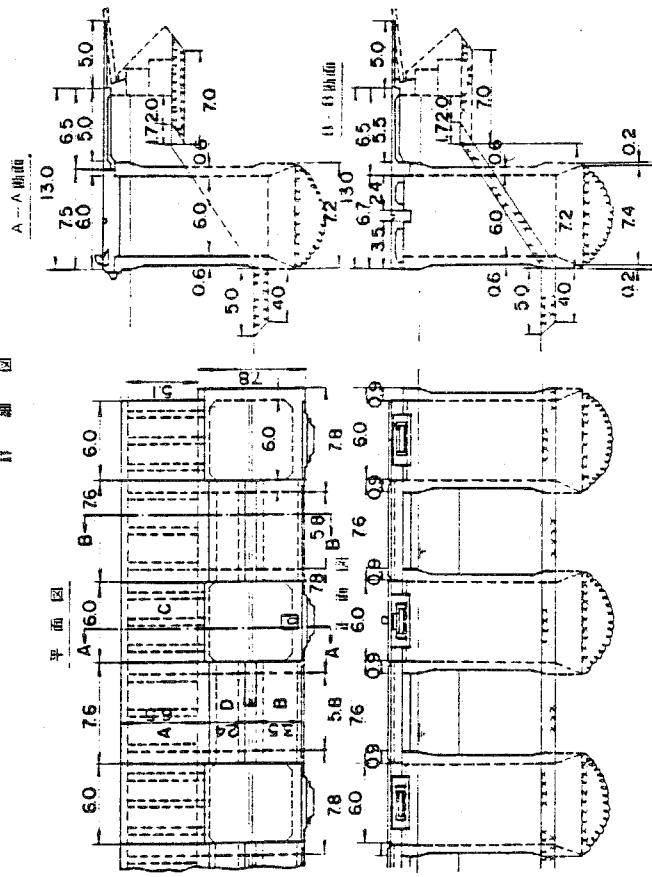
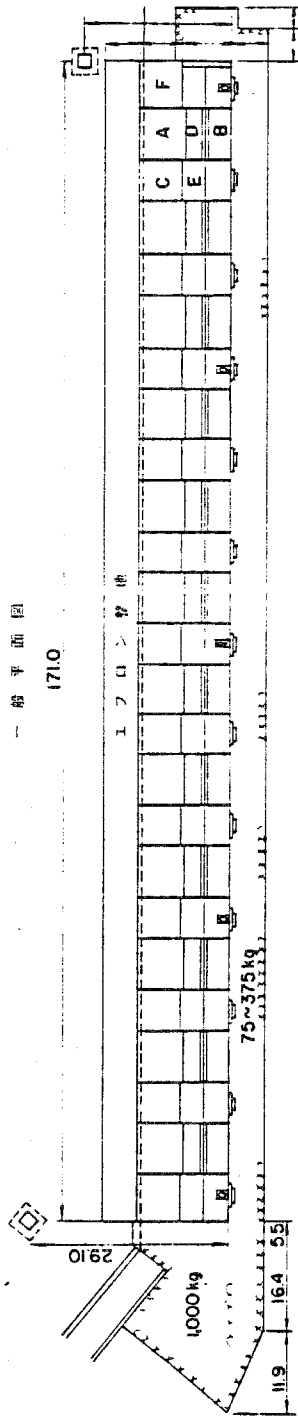


図8.8 S港 - 9.0m 岸壁 - 一般平面図

海砂利を用いた。コンクリートの配合は1:2:4（容積配合）であったと思われ、セメント315kg、砂597kg、砂利1466kgであると思われ、水セメント比は53%、最大粗骨材寸法は40mmであった。コンクリートの設計基準強度は180kg/cm²、鉄筋のかぶりは5cm程度であった。

練り混ぜ水については、現場に水道水が完備していなかったため、ミキサー小屋の脇に深さ1.5mの井戸を掘りポンプアップして用いていたが、物揚げ場に接近していることからかなりの塩素イオンを含んでいることが考えられる。また、水量不足から直接海水を使用せざるを得なかったことも考えられる。このためコンクリートはほぼ海水練りであったと考えられる。

コンクリートの練り混ぜには、10切および16切のミキサを使用しト口により打設場所まで運搬した。締め固めは打ち込みと並行して棒状バイブレーターおよび突き棒で行なった。配筋の密な場所あるいは隅角部については、突き棒のみで十分突き固めた。表面仕上げは、板材、木ごて、ほうき等を用いて行なった。

養生は、散水養生とし、夏場の暑い日には、ムシロを被せて養生し、冬場はテントにより保温した。極度に寒い日には、角材を渡し側面にニクロム線を沿わせて電気熱により保温した。

現場の品質管理については、空気量の測定、スランブの測定および床版に1個程度の割合で圧縮試験用コアを採取し品質の異常なバラツキの有無を調べた。

e) 劣化状況

床版については、上側にも種々のひびわれが認められたが床版下面の劣化が顕著であった。床版梁部には図8.9および写真8.3に示すように鉄筋に添って大きなひびわれが入っているものが散見された。また、写真8.4に示すように床版下部の剝離も認められた。

また、上部の井筒は、環境条件については床版と類似な条件下にあるが、ひびわれ、浮き錆等は全く観察されなかった。

f) 塩素イオン含有量




梁部中の塩素イオン含有量の測定例を図8.10に示す。上層部では、平均0.23%という値を示し、中間層では平均0.06%、下層部では平均0.40%という値を示した。下層の値は、練り混ぜ水として海水を使用した場合の値約0.25%を上回るが、他の部分ではやや小さい値である。また、(2)で述べた内在塩素イオンのない場合と比較してもやや小さい値である。

(4) 構造形式が塩素イオン含有量および劣化状況におよぼす影響

東京湾においてほぼ昭和40年に施工された棧橋の塩素イオン含有量および外観観察を行なった。この調査は建設後約20年の時点で行なった。

T棧橋は、図8.11に示すように計画水深-10mの鋼管直杭式の横棧橋であって、上部工は現場打ち鉄筋コンクリートで施工されたものである。鉄筋コンクリートの使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、設計基準強度210kgf/cm²、スランブ15cm、粗骨材最大寸法25mm、水セメント比50%であった。また、鉄筋径は13、16、19、22、25mmを用い、最小かぶりは7.0cmとした。

目視調査では、床版コンクリートの剝離、鉄筋露出および腐食、さらに遊離石灰が目

- 凡 例
-  ひびわれ
 -  豆 板
 -  はく離

(単位:cm)

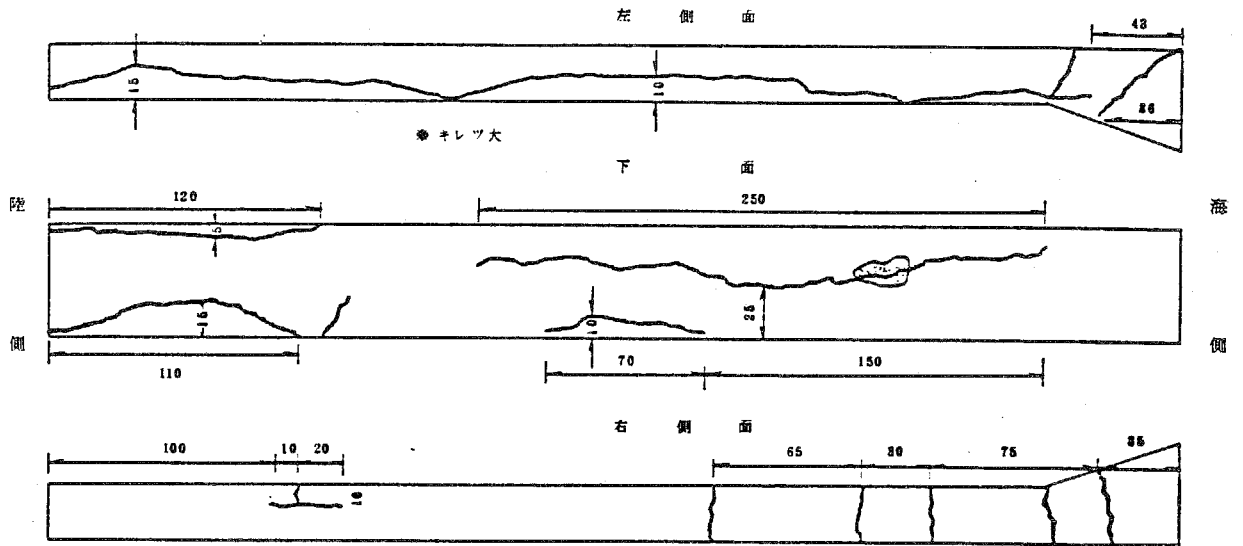


図 8.9 床版梁部ひびわれ状況の一例



写真 8.3 床版梁部のコンクリートの剥離

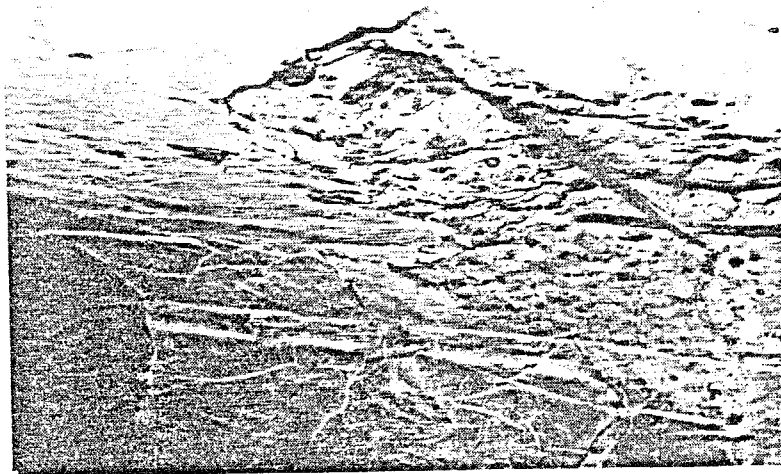
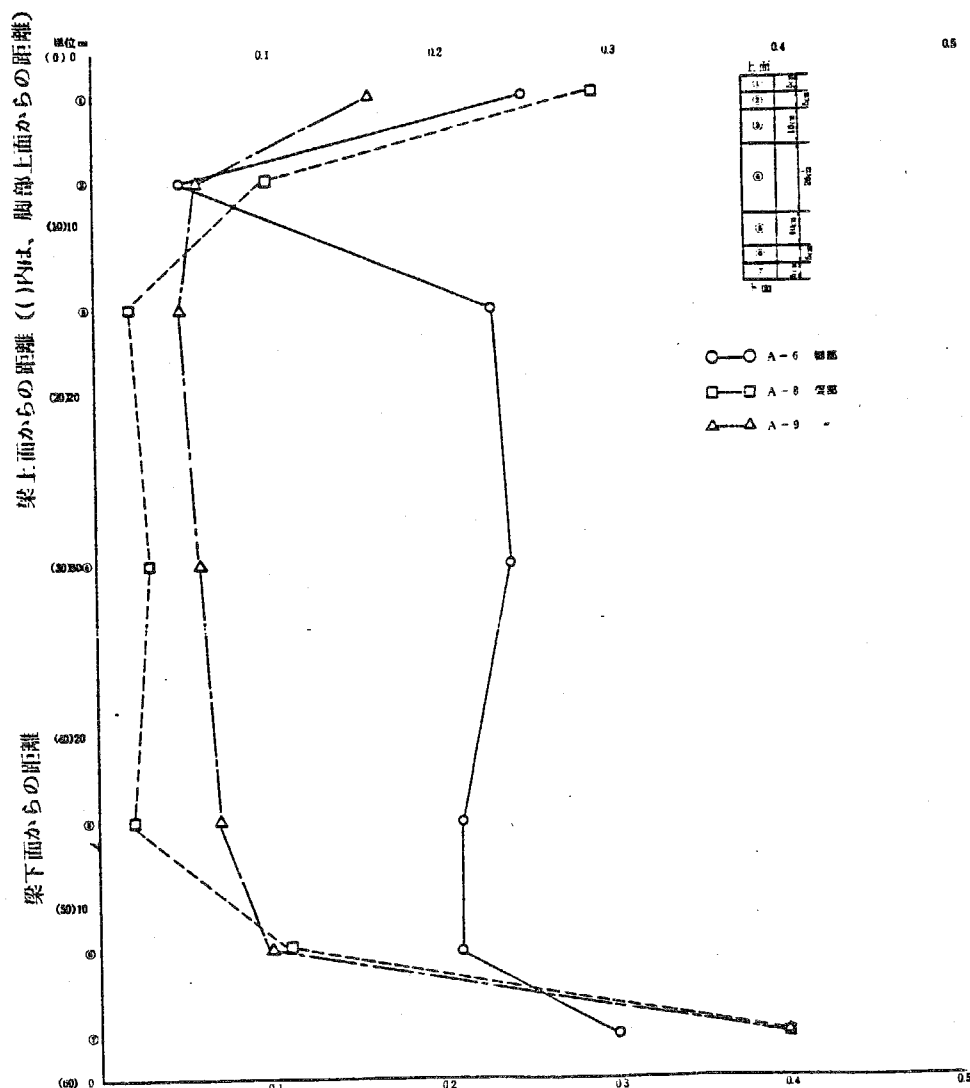


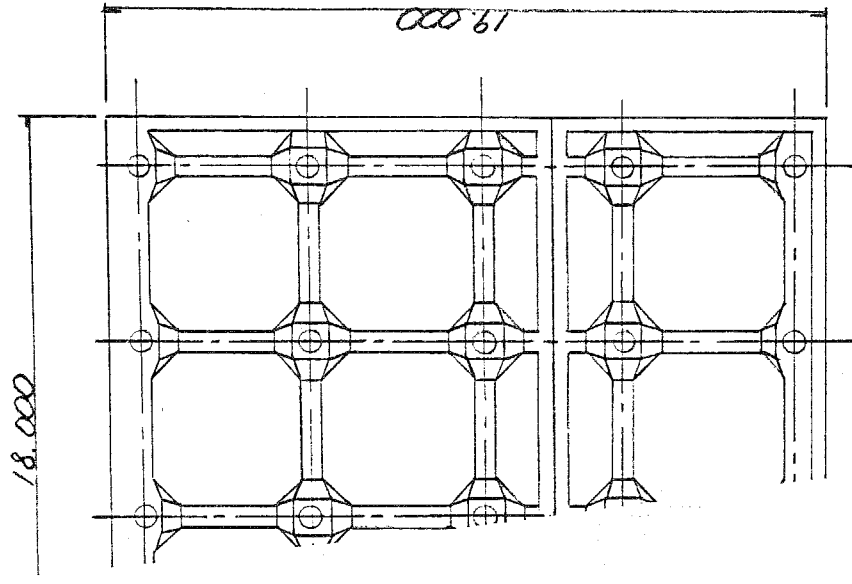
写真 8.4 床版下部のコンクリートの剥離



塩分量 (NaCl 換算重量% vs コンクリート)

図 8.10 床版梁部中の塩分量

平面图



断面图

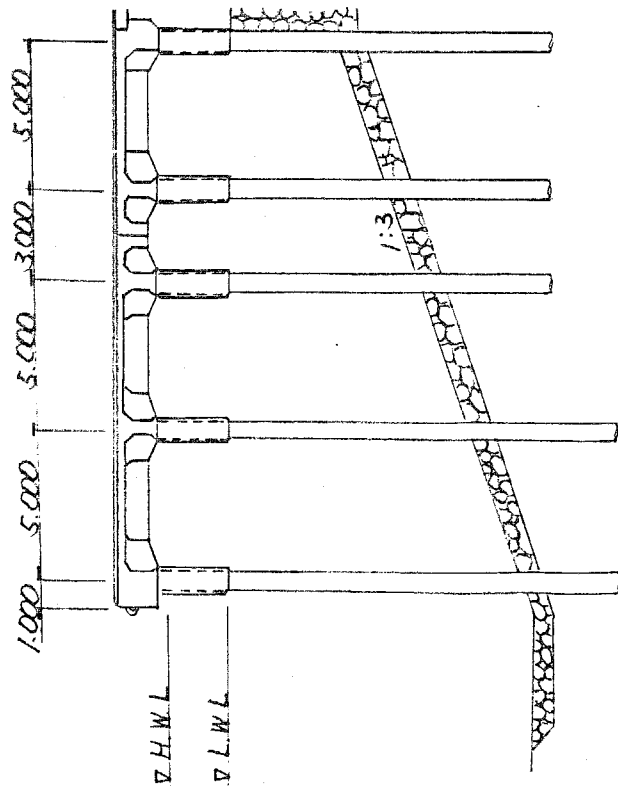


图 8.11 T 栈着概要图

立った。また、梁のひびわれは梁の底面および側面全体に確認され、梁の軸方向全長にわたっているものも多く観察された。

代表的な梁、床版における塩素イオン含有量を図8.12に示す。練り混ぜ水として海水を使用した場合の塩素イオン含有量は、NaCl換算でコンクリートに対する重量比でやはり約0.25%程度であるので、かぶり7cm程度までは、この値を上回ることが認められた。

N栈橋は、図8.13に示すような計画水深-10mの鋼管直杭式の突堤式の栈橋であって、現場打ち鉄筋コンクリートで施工されたものである。施工時の記録がなくコンクリートについての情報もないが、コンクリートの割裂面の色、当時の慣例から考えて、普通ポルトランドセメントを用いたと考えられる。また、配合推定(セメント協会の方法)によれば、水セメント比は50%程度であったと考えられる。また、鉄筋の最小かぶりは5cm(鉄筋探査計による)と考えられる。

目視調査では、梁、床版ともひびわれが数箇所見られる程度であり、豆板、剝離、錆汁、鉄筋露出などは観察されなかった。

代表的な梁、床版における塩素イオン含有量を図8.14に示す。この図で海側とは便宜上船舶接岸側とした。この図より本栈橋コンクリート中の塩素イオン含有量は0.15%以下であった。

なお、両栈橋の気象条件はほぼ同一であり、風域の長さはN栈橋の方が長く波高は、N栈橋の方が大きいと考えられる。しかしながら、栈橋上部工については、T栈橋では背後の壁によって波が跳ね返されて飛まつが容易に発生すると考えられるのに対し、N栈橋では背後に壁はなく波は通り抜けになるため飛まつが発生は少ないと考えられる。

以上の調査結果より以下の事が言えよう。建設後の年数、気象条件、施工方法、コンクリートの品質等が似た栈橋において、構造形式のみが異なる栈橋の目視調査を行なった結果、飛まつが出来やすい構造の方が塩素イオン含有量も多く、劣化も著しいことが判明した。

(5) まとめ

以上の結果をまとめると以下の様である。

海洋環境にある実在コンクリート構造物中の塩素イオン含有量は、おおくの場合、練り混ぜ水として海水を用いたフレッシュコンクリート中の内在塩素イオン含有量を上回る。

(2)および(3)の調査結果を比較すると、内在塩素イオン含有量が劣化状況および塩素イオン含有量におよぼす影響は比較的少ない。

8.2 コンクリート港湾構造物の腐食対策

前節で述べた事項を中心に本研究で得られた知見によりコンクリート港湾構造物の腐食対策をまとめた。

(1) 構造形式に対する対策

前節で述べた調査、港湾技術研究所での港湾構造物目視調査および各港湾建設局の情報によれば、コンクリート港湾構造物の腐食による劣化事例は栈橋がほとんどである。しかも、腐食による劣化は、梁または床版が大部分を占め、柱および壁部材の事例は稀である。このため、係留施設としては出来るだけ栈橋を用いず、たとえば、壁部材が主

塩分量 (NaCl換算重量%)
vs コンクリート

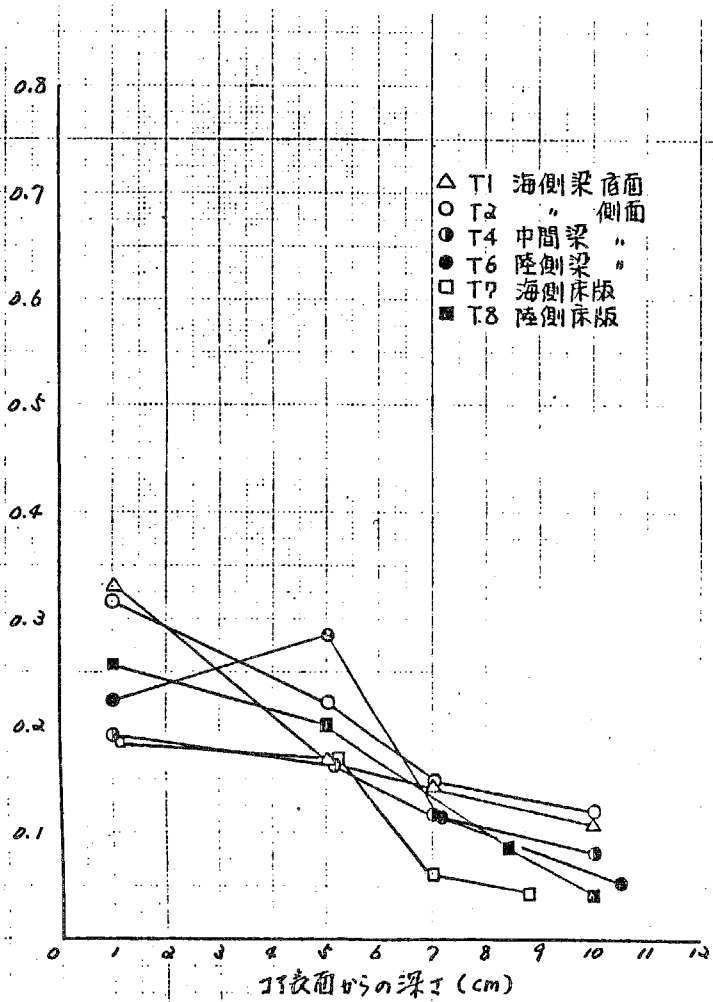
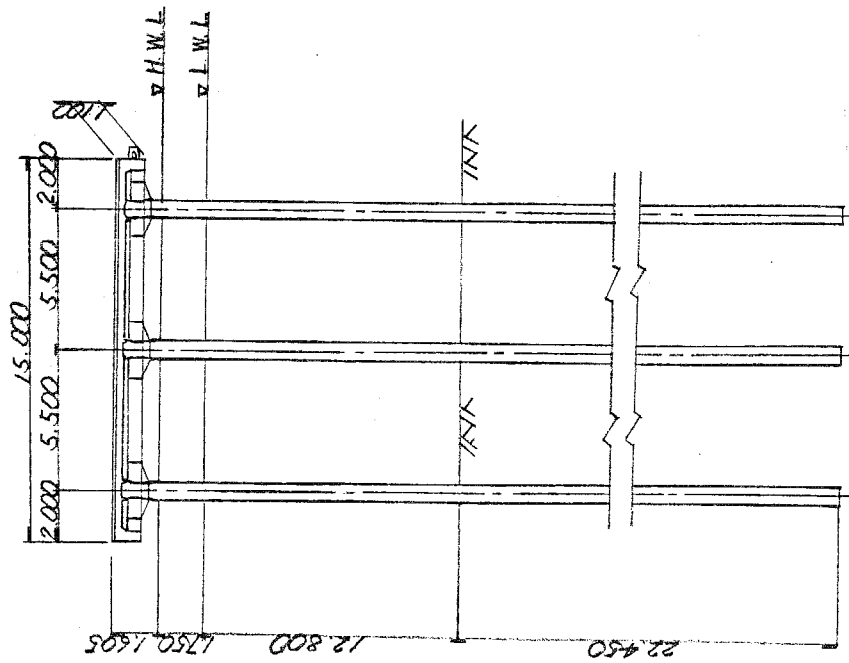


図8.12 T架橋上部工
コンクリート中の塩分量

正面图



平面图

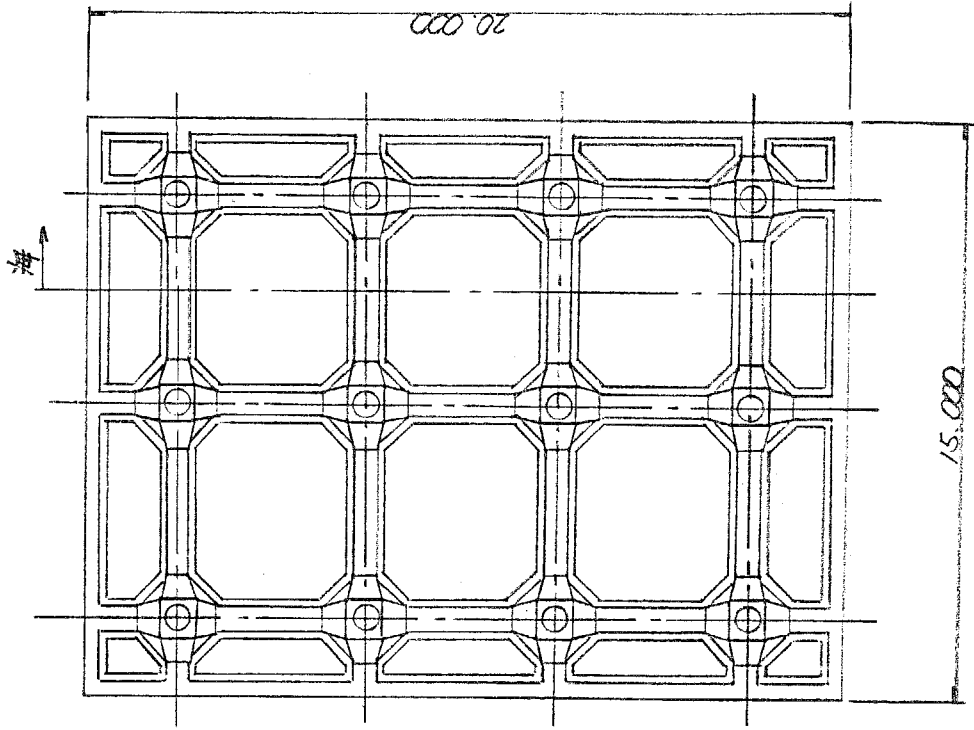


图 8.13 N 栈桥概要图

塩分量 (NaCl換算重量%)
VS コンクリート

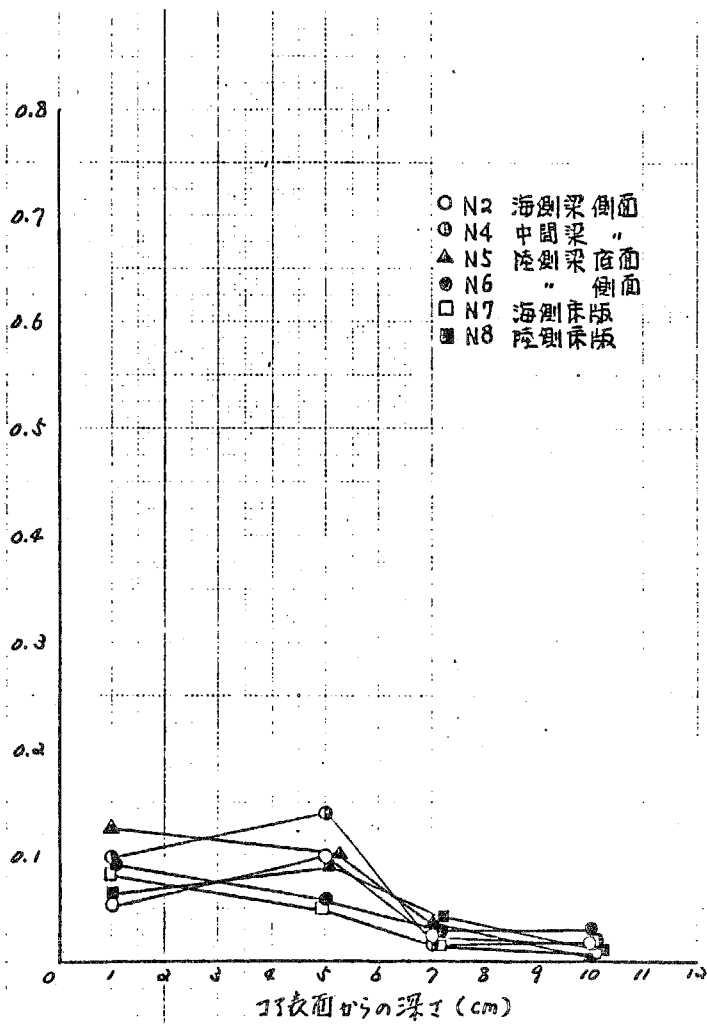


図 8.14 N 栈橋 上部工
コンクリート中の塩分量

であるケーソン式あるいはL型ブロック式の岸壁を用いるという対策が考えられる。

また、前節の(3)の事例等によれば、波しぶきが起りやすく、しかも波しぶきが直接鉄筋コンクリート部材にあたる構造に塩素イオンが蓄積されやすくかつ鉄筋の腐食も進行しやすい。このため、波しぶきが直接鉄筋コンクリート部材にあたるような構造は避けるのが望ましい。

(2) ひびわれ対策

ひびわれの存在が鉄筋の腐食に重大な影響をおよぼすのは、5章で述べたように、海中養生後気中養生した場合であり、海洋環境のうちでは飛沫帯に相当すると考えられる。また、その他の海中部、感潮部での鉄筋の腐食は、5および7章の結果より、ひびわれの存在は、鉄筋腐食の主因ではないように思われる。そのため、飛沫部や類似の環境では特にひびわれ対策(制御あるいはひびわれを存在させない)が必要となる。ひとつには、(1)と関連するが、常時はほとんどひびわれが存在しないと考えられる柱や壁部材を用いるということと、ひとつには、プレストレスによってひびわれを制御することが考えられる。プレストレスコンクリートとする場合に注意すべきことは、ひびわれの発生を制御しても、塩素イオンの侵入はプレストレスコンクリートであるからといって防ぐことは出来ないで、鋼材あるいはシースには不動態は期待出来ないで、かぶりコンクリートより水分および酸素が供給されれば腐食は進行するので、それらの制御は、海中部や飛沫部の鉄筋コンクリート部材と同様のコンクリートの品質、かぶりを確保する必要がある。すなわち、プレストレスがあるという、かぶりやコンクリートの品質を下げることは好ましくないと判断される。

(3) セメントの種類

7章の結果より、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントをもちいたコンクリートの中で、最も防食性能が良好であるのが高炉セメントを用いたもの、最も劣るものが普通ポルトランドセメントを用いたものと判断された。また、海水練りであっても高炉セメントを用いたものの鉄筋の腐食の方が水道水練りであっても普通ポルトランドセメントを用いたものの鉄筋の腐食よりも少ないという事実も確認された。このため、港湾構造物の場合、積極的に高炉セメントの活用を計ることが望まれる。

(4) 内在塩素イオンについて

ここでは、なんらかの理由で使用材料として塩素イオンを含む材料を使用せざるを得ない時の対策について述べる。

4および5章で述べたように、内在塩素イオンの悪影響は材令と共に減少し、ひびわれの存在する場合は約4ヶ月、感潮部でひびわれのない場合で5年程度で不動態に関してほとんどなくなり空隙率についても内在塩素イオンの存在する方が小さいので水分や酸素の供給についても防食上不利ではないので、長期材令を考えれば、内在塩素イオンの腐食に対する影響は無視されると判断される。また、前節の(1)と(2)においても実在構造物においては、内在塩素イオンの鉄筋の腐食に対する影響は調査において不明であるのに対し、梁であるのか壁であるのか、現場打ちであるのかプレキャストであるのかが明らかに鉄筋腐食の要因であった。また、長期材令では、普通ポルトランドセメントの水道水練りコンクリートよりも高炉セメントの海水練りのものの方が明らかに

良好な防食性能を示した。このため、長期の腐食量のみが問題となる場合では、内在塩素イオンがあるからといって、なんの対策もいらない可能性もあるし、同一の海洋環境で、普通ポルトランドセメントの水道水練りコンクリートの十分な実績があるのであれば、高炉セメントを用いるという対策もあろう。

逆に材令28日の範囲では、4章より、明らかに海水練りのものの不動態のグレードは低く、水セメント比、初期養生条件では制御出来ないと判断された。このため、初期の防食性能が重要な場合、あるいは、初期に苛酷な腐食環境にさらされる場合には、内在塩素イオンの使用は不可能と考えられる。このような事例としては、蒸気養生あるいはオートクレーブ養生を行なう場合が考えられる。

材令28日程度までに過度に苛酷な環境条件にさらされず、また、長期のみでなく材令1-2年の間にも内在塩素イオンの悪影響を抑えたい場合には、恐らくこの程度の判断が工学的な判断と思われるが、次の様に考えることも出来る。即ち、材令1年までの不動態のグレードを、対応する水道水練りコンクリート中の鉄筋のものに比較して、同程度以上にするという考え方である。この考え方で、4章の結果を基に、材令28日まで標準養生でそれ以後海水養生という条件で、水セメント比と1年の不動態のグレードの平均値との関係を整理すると図8.15のごとくとなる。この図より、内在塩素イオンとして使用水として海水を用いた場合、水セメント比を5-10%減少させれば、1年の平均的な不動態のグレードはほぼ同一となると判断される。よって、内在塩素イオン量として使用水として海水を用いる場合（コンクリート1立方mについて約2.5-3.5kg）で、水セメント比を5-10%減少させればよいと思われる。なお、4章では、かぶりが1.5cmという条件で実験を行なっているのに対し実際の構造物では5cm以上のかぶりを用いており、若干の相違が考えられるが、水セメント比を5%程度減少させると強度、水密性等のコンクリートの品質が大幅に高くなることが期待され、この値で鉄筋の腐食におよぼす内在塩素イオンの悪影響を十分補うことが出来ると思われる。この条件に加えて、普通ポルトランドセメントに代えて高炉セメントを用いるとさらに良好な防食性能が期待される。以上をまとめると次のようである。

- ① 長期の鉄筋腐食のみが問題であれば、内在塩素イオンに関してはなんらの対策も必要でないと思われるが、普通ポルトランドセメントに代えてB種高炉セメントを用いる方が良い。
- ② 初期に腐食に関して苛酷な条件がある場合には、内在塩素イオンの存在は避けるべきである。
- ③ 通常の条件下では、内在塩素イオンがある場合、水セメント比を5%程度減少させて用いればよく、さらに普通ポルトランドセメントに代えてB種高炉セメントを用いるのが望ましい。

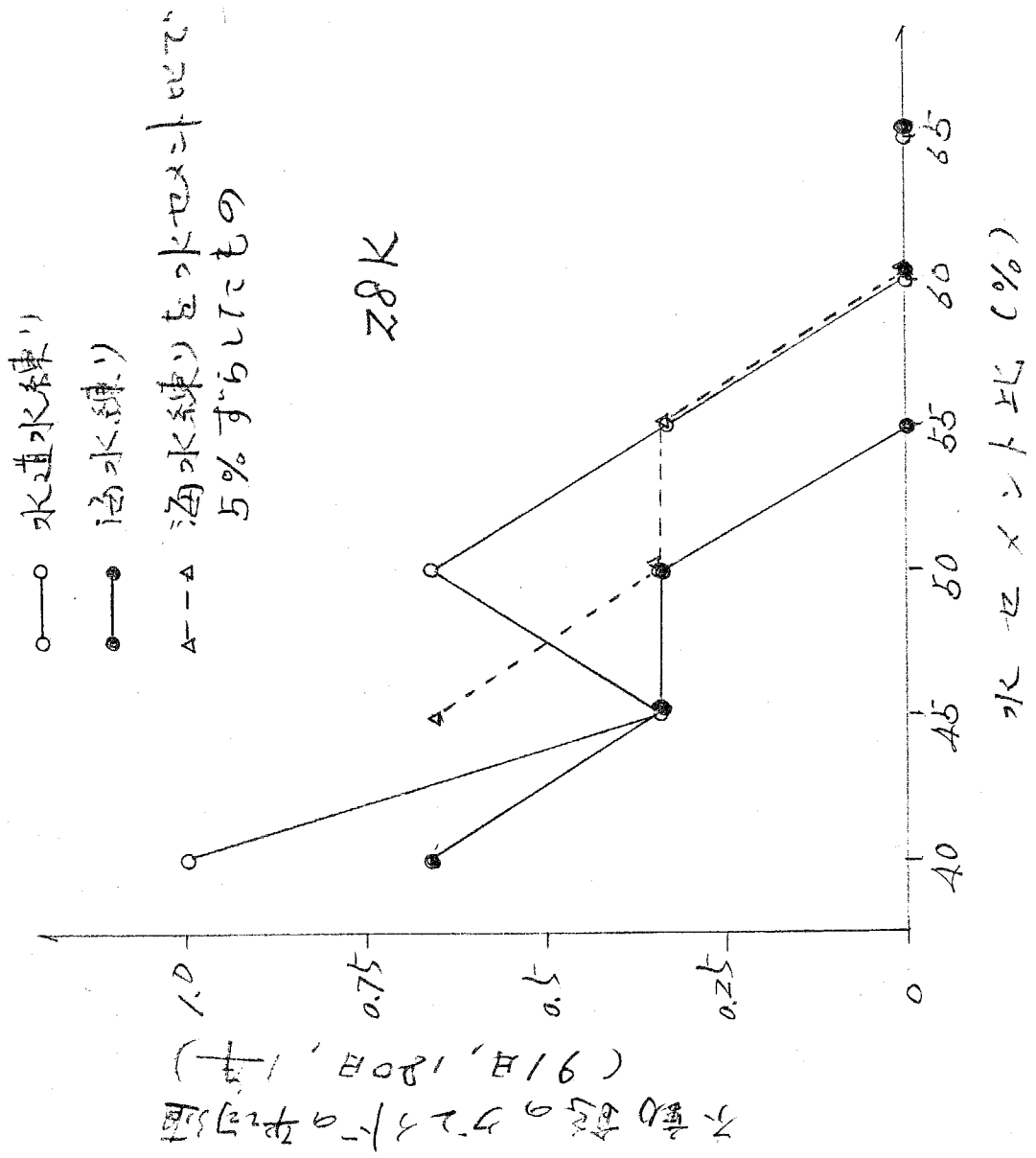


図 8.15 不動態のグレイドの平均値と水セメント比との関係

第9章 結論

以上より、本研究の結論をまとめると次の通りである。

(1) 内在塩素イオンのコンクリート中の鉄筋の腐食におよぼす相対的な影響は、材令と共に減少する。この場合、ひびわれの存在により、減少の度合いは速くなる。

この結論は、4. 1の実験結果において海水養生、標準養生（水道水養生）を問わず材令1年で不動態のグレイドの差がなくなったこと、7章の長期暴露実験においては5年程度で自然電極電位の差がなくなったことにより、内在塩素イオンの相対的な影響が減少することが確認された。また、5章の実験結果において、ひびわれの存在によって不動態のグレイドの差が減少することにより確認された。5章の材令12ヶ月の結果をまとめると表9. 1の(1)のようである。

なお、内在塩素イオンの影響は、4. 1の不動態のグレイドおよび4. 2の腐食度の測定で示したように材令28日、91日では明らかである。

(2) 内在塩素イオンおよび侵入塩素イオンの鉄筋の腐食におよぼす影響を、腐食面積および腐食の有無によって判断すると、ひびわれの存在しない場合では、5章の実験結果より、従来言われているように、（海水練りかつ海水養生）>（海水練りかつ標準養生）>（水道水練りかつ海水養生）>（水道水練りかつ標準養生）の順序で腐食が多いことが確認された。また、7章の長期暴露実験においてもほぼこの傾向が確認されたが、その差は5章の室内実験ほど明らかではなかった。

ひびわれが存在すると、5章の結果より、材令1年では（海水練りかつ海水養生）≒（海水練りかつ標準養生）≒（水道水練りかつ海水養生）>（水道水練りかつ標準養生）となり、特に海水養生での内在塩素イオンの影響が認められなくなった。5章の結果をまとめると表9. 1の(2)のようである。7章の長期暴露実験結果および8章の实在構造物調査においても、海洋環境においては内在塩素イオンの影響は認められなかった。

(3) 本研究で検討した各種要因の長期の腐食傾向におよぼす影響度を概略まとめると表9. 2に示すようである。特に、セメントの種類別の鉄筋の腐食におよぼす影響は、内在塩素イオンの影響より大きい。これは、7章の長期暴露実験により確認された。特に、B種高炉セメントかつ海水練りのコンクリート中の鉄筋の腐食が小さなことが認められた。

(4) 海洋環境の鉄筋コンクリート構造物になんらかの理由で海水練りに相当する内在塩素イオンが含まれる場合の対策として次のことが考えられる。十分な初期養生（常温）を行ない、水セメント比を内在塩素イオンの含まれない場合よりも5%低くし、かつ、B種高炉セメントを用いることが望まれる。

(5) 海洋環境に耐久性に富むコンクリート構造物を建設する場合、梁部材の使用を出来るだけ避け、壁構造を多く用いるのがよく、さらに、波しぶきの発生しにくい構造が望まれる。

表 9.1 練り混ぜ水の影響
(海水練りの悪影響の有無)

(1) 腐食の傾向 (材令12ヶ月)

	ひびわれなし	ひびわれあり
標準養生	有	ほとんどなし
海水養生	ほとんどなし	むしろ逆転

(2) 腐食量 (材令12ヶ月)

	ひびわれなし	ひびわれあり
標準養生	有(中)	有(大)
海水養生	有(中)	ほとんどなし

表 9.2 各種要因の長期の腐食
におよぼす影響

より大きな影響度を及ぼす要因	養生(環境)条件, ひびわれの有無, セメント種
影響を及ぼす要因	使用材料(練り混ぜ水)中の塩素, 水セメント比 初期養生期間 かぶり(7cmまで)

(6) 電気化学的方法で最も有効であるのは、本研究で提案した不動態のグレイドの判定であり、次いで自然電極電位の測定である。なお、いずれもひびわれの存在によりその有効性は大幅に低下する。

第 10 章 あとがき

(1) 本研究の問題点

本研究での主な問題点は、コンクリート中の鉄筋に対する電気化学的方法の信頼性である。

電気化学理論は、均一な溶媒、溶質を前提としていることが多く、不均一な場合には種々の制約がある。コンクリートは元来不均一な材料であるため、どの程度電気化学的方法が、コンクリート中の鉄筋に対して有効であるかが疑問であった。そのため、各実験シリーズにおいて、腐食面積等と著者の提案する不動態のグレード等の電気化学的方法とのキャリブレーションを行なった。しかしながら、十分なものとは言い難いのである。

(2) 謝辞

本研究の実施にあたっては非常に多くの方のご示唆および御協力をいただいた。

長期の暴露試験および実在構造物調査は、1970年より継続しているものである。研究の発端は、赤塚雄三元港湾技術研究所材料施工研究室長のご示唆によるものであり、試験および調査の1部は関博および森好夫元材料施工研究室長に負う所が多く、元材料施工研究室研究員の浅岡邦一氏、田淵民雄氏、佐々木克彦氏、小野寺幸夫氏、丸山浩氏、故九嶋茂雄氏、藤沢孝夫氏、堀井義一氏、下沢治氏、および、現研究員の原茂稚光氏に試験の一部を担当していただいた。さらに、実在構造物調査では、運輸省第1、2および4港湾建設局の御協力をいただいた。

また、短期材令試験の一部はテキサス大学 (Austin, Texas, U.S.A.) で行なったが、Dr. Z. Elirizer, Dr. D. W. Fowler, Mrs. H. Wheat, Mr. D. Whitney および Mr. D. Malkemus のご指導およびご協力をいただいた。

さらに、港湾技術研究所構造部土田肇部長、横井聡之材料施工研究室長、善一章前主任研究官、セメント協会の方々および東京工業大学長滝重義教授等に種々のご示唆とご協力をいただいた。ここに、謹んで感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書解説（昭和49年度版）、1974、p. 105.
- 2) 建築学会：建築工事標準仕様書・同解説、JASS5 鉄筋コンクリート工事、1979、p. 121
- 3) 海砂に関する調査研究委員会：海砂に関する調査研究報告書、日本コンクリート会議、1974.3、199p.
- 4) 青戸 章：鉄筋コンクリートの耐海水性に関する研究、鉄道技術研究報告、No. 1156、1980、11月、250p.
- 5) C. Dehghanian & C. E. Locke: Electrochemical behavior of steel in concrete as a result of chloride diffusion into concrete-Part 2, Corrosion, NACE, Vol. 38, No. 9, Sep. 1982, pp. 494-499
- 6) 関 博、丸山 博：長期間海水作用を受けたコンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食について、港湾技術研究所報告、第12巻、第3号、1973.9、pp. 203~225
- 7) E. Atimtay & P. M. Ferguson: Early chloride corrosion of reinforced concrete - A test report, ACI . Vol. 70, No. 70-55, 1973, Sept, pp. 606-611
- 8) (社)セメント協会：海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究-材令5年中間報告(その2)-コンクリート専門委員会報告F-35、June、1982、79p.
- 9) R. Shalom, M. Raphael : Influence of sea water on corrosion of reinforcement, aci, vol. 55, No. 55-76, 1959, June, pp. 1251-1268
- 10) 川村満紀、山田祐定、小泉徹：海砂使用モルタル中の鉄筋の発錆に関する実験的研究、セメント年報、No. 29、1975、5月、p. 238
- 11) 関 博、堀井義一：建設後20年を経過した鉄筋コンクリートさん橋の劣化状況調査、港湾技術研究所資料No. 255、pp. 53、May、1977
- 12) A. W. Beeby : Concrete in the Oceans -Cracking and Corrosion-, Technical Report No. 1, CIRIA/ UEG, C&CA, 1978, 77p.
- 13) K. Okada and T. Miyagawa: Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete, A. C. I. SP-65-14, 1980, pp. 237~254
- 14) M. G. Montana and N. D. Green : Corrosion Engineering, McGRAW-Hill Book Co., 1978, p. 319-337
- 15) H. A. Berman: Sodium Chloride, Corrosion of reinforcing Steel, and the pH of Calcium Hydroxide Solution, A. C. I., Vol. 71, 1975, pp. 150~157
- 16) V. K. Gouda and H. M. Mourad: Galvanic Cells Encountered in the Corrosion of Steel Reinforcement, I, II, III, & IV, Corrosion Science, Vol. 14, No. 11~12, 1974, pp. 68~90 and Vol. 15, No. 5, 1975, pp. 307~336
- 17) B. Tremper, J. L. Beaton and R. F. Stratful : Causes and Repair of Deterioration to a California Bridge due to Corrosion of Reinforcing Steel in a Marine Environment, Part II, Highway Research Board Bulletin 182, 1958, pp. 18~41
- 18) 善一章：港湾における鋼材防食法の研究（第一報）-セメント硬化体による防食

報一、港研報告、第5 卷9号、1966、141p.

- 19) H.H.Uhlig : Corrosion and Corrosion Control , John Wiley & Sons Inc. , 1971. p.61
- 20) 榎野紀元：鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究、建築研究報告、No.90、1980、244p.
- 21) セメント協会コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告、No.F-18、1967、71p.
- 22) 片脇清士：コンクリート中に含まれる塩化物の定量方法に関する一試案、海洋コンクリート構造物の防食指針（案）資料、JCI-R1、1973、pp.99～106
- 23) 近藤連一、佐竹実、牛山宏隆：セメント硬化体中のイオン拡散、セメント年報28、1974、pp.58～61
- 24) O.E.Gjølrv and Ø.Vennesland : Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.9 , No.2, 1979, pp.229～238
- 25) 森好夫、野木孝次：コンクリートの耐海水性に関する研究—材令10年試験結果報告—、セメントコンクリート、No.417、1981
- 26) 大即 信明：港湾環境におけるコンクリートの耐久性について、昭和56年度港湾技術研究所講演会、1981、pp.125～166
- 27) 関 博、小野寺幸夫、丸山浩：長期間海岸環境中に暴露された無筋コンクリート構造物の劣化状況調査、港湾技研資料、No.142、June 1972、p.33
- 28) 運輸省内部資料
- 29) V.K.Gouda : Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel, British Corrosion Journal Vol.5 , 1970, pp.198～203
- 30) J.M.Gaidis, A.M.Rosenberg and I.Saleh : Improved Test Methods for Determining Corrosion Inhibition by Calcium Nitrite in Concrete , A.S.T.M., S.T.P.713 , 1980, pp.64～74
- 31) J.O.Bookris and A.K.N.Reddy : Modern Electrochemistry 2 , Plenum Publishing Co.,1977, p.883
- 32) R.L.Martin: Application of Electrochemical Polarization to Corrosion, Petrolite Instruments Co. , 1978, 66p.