

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	材齢約30年の7つのドルフィンの鉄筋コンクリート調査に基づく腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する考察
Title(English)	Discussion on Chloride Threshold Value for the Initiation of Steel Corrosion Based on the Investigation of RC of Seven Existing Dolphins at the Age of around 30 Years
著者(和文)	網野貴彦, 大即信明, 斎藤豪, 羽瀨貴士
Authors(English)	Takahiko Amino, Nobuaki Otsuki, Tsuyoshi Saito, Takashi Habuchi
出典(和文)	材料, Vol. 59, No. 4, pp. 303-308
Citation(English)	Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 59, No. 4, pp. 303-308
発行日 / Pub. date	2010, 4
公式URL	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/result-char/ja/?item1=4&amp;word1=%E6%9D%90%E9%BD%A2%E7%B4%8430%E5%B9%B4%E3%81%AE7%E3%81%A4%E3%81%AE%E3%83%89%E3%83%AB%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%89%84%E7%AD%8B%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%88%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E3%81%AB%E5%9F%BA%E3%81%A5%E3%81%8F%E8%85%90%E9%A3%9F%E7%99%BA%E7%94%9F%E9%99%90%E7%95%8C%E5%A1%A9%E5%8C%96%E7%89%A9%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3%E6%BF%83%E5%BA%A6%E3%81%AB%E9%96%A2%E3%81%99%E3%82%8B%E8%80%83%E5%AF%9F">https://www.jstage.jst.go.jp/result-char/ja/?item1=4&amp;word1=%E6%9D%90%E9%BD%A2%E7%B4%8430%E5%B9%B4%E3%81%AE7%E3%81%A4%E3%81%AE%E3%83%89%E3%83%AB%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%89%84%E7%AD%8B%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%88%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E3%81%AB%E5%9F%BA%E3%81%A5%E3%81%8F%E8%85%90%E9%A3%9F%E7%99%BA%E7%94%9F%E9%99%90%E7%95%8C%E5%A1%A9%E5%8C%96%E7%89%A9%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3%E6%BF%83%E5%BA%A6%E3%81%AB%E9%96%A2%E3%81%99%E3%82%8B%E8%80%83%E5%AF%9F</a>
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

論文

# 材齢約 30 年の 7 つのドルフィンの鉄筋コンクリート調査に基づく 腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する考察

網野 貴彦\* 大 即 信 明\*\*

齋 藤 豪\*\* 羽 淵 貴 士\*\*\*

Discussion on Chloride Threshold Value for the Initiation of Steel Corrosion based on  
the Investigation of RC of Seven Existing Dolphins at the Age of around 30 years

By

Takahiko AMINO\*, Nobuaki OTSUKI\*\*, Tsuyoshi SAITO\*\* and Takashi HABUCHI\*\*\*

This paper aims to discuss the chloride threshold value for the initiation of steel corrosion and the influence of chloride content at the rebar on corrosion progress in marine RC structures. The site investigation of reinforced concrete of seven existing dolphins was conducted in order to examine the influence of cover thickness and chloride content at the rebar on chloride induced corrosion. These dolphins were constructed in Tokyo bay and have been in service for around 30 years. In addition, the laboratory test was carried out by using reinforced concrete specimens with various chloride content and cover thickness in order to prove the results obtained from the site investigation. As the results, the chloride threshold value for the initiation of steel corrosion has been ranged within 2.0 and 2.4 kg/m<sup>3</sup>. Moreover the speed of corrosion progress of rebars has been increased rapidly when chloride content at the rebar exceeded around 4.0kg/m<sup>3</sup>. Also, no serious corrosion of rebars with cover thickness over 70mm has been confirmed in around 30 years old concrete of dolphins.

**Key words:** Chloride attack, Dolphins, Chloride threshold value, Corrosion rate, Cover thickness

## 1 緒 言

厳しい海洋環境下に曝される港湾 RC 構造物の塩害対策の必要性は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度（鉄筋腐食が開始されるとき限界濃度）に達するまでの期間（予測）と、構造物に期待される供用期間との比較結果を判断材料として検討されることが多い。

しかし、実構造物における塩害劣化の進行は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度のみならず、かぶり、鉄筋径、コンクリートの配合（水セメント比やセメント種類）、温度や湿度などに影響され<sup>1), 2)</sup>、さらに打ち込まれたコンクリートの品質、かぶりなどの施工誤差、塩化物イオンや酸素の供給量など環境要因の不確実性も加わるため、必ずしも予測が容易でないとされている<sup>3)</sup>。特に腐食発生限界塩化物イオン濃度は 1.2 ~ 2.4kg/m<sup>3</sup> の範囲に存在するとされているが、様々な環境に置かれる構造物ごとでその値が異なることも指摘されている<sup>4)</sup>。

そこで本稿では、材齢が約 30 年の 7 つのドルフィンの鉄筋コンクリートに対して劣化調査を実施し、かぶりや鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食に及ぼす影響について分析した。また、実構造物における調査結果の検証を目的として、塩化物イオン濃度、かぶりを変えた複数体の鉄筋コンクリート試験体を用いた室内試

験を実施し、実構造物調査と室内試験の結果を照合して、港湾 RC 構造物における腐食発生限界塩化物イオン濃度および鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を考察した。

## 2 実構造物における劣化調査

### 2-1 調査ドルフィンの概要

調査対象の構造物は、材齢が約 30 年である Table 1 に示す 7 つのドルフィンの鉄筋コンクリートである。いずれも東京湾内の同じ地点に建設され、陸岸から数十 m ~ 数百 m 離れた位置に立地するものである。また、当時の施工記録によれば、7 つのドルフィンのコンクリートには普通ポルトランドセメントが使用されており、水セメント比 50% の同条件で施工されていた。

ここで、ドルフィンのコンクリートに関する構造または塩害劣化の特徴的な点について概説する。

ドルフィンとは、陸岸から離れた海上に立地する荷役棧橋に、船舶が接岸または係留するための施設であり、船舶を係留する網取ドルフィン、船舶を接舷させる接岸ドルフィンに大別される。ドルフィンの構造的な点として、鉄筋コンクリートが鋼管杭等で支持された状態で海上に建設されること、その平面積は棧橋の上部工に比べて小さいこと、船舶の接岸のために飛沫帯や干満帯の海水面付近の標高にコンクリートが設置されることなどが

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

\* 非 会 員 東亜建設工業(株) (東京工業大学) 〒230-0035 横浜市鶴見区安善町, Toa Corporation, Tsurumi-ku, Yokohama, 230-0035

\*\* 正 会 員 東京工業大学 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Dept. of Sci. & Eng., Tokyo Insti. of Tech., Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

\*\*\* 非 会 員 東亜建設工業(株) 〒230-0035 横浜市鶴見区安善町, Toa Corporation, Tsurumi-ku, Yokohama, 230-0035

Table 1 Outline of Investigated Dolphins

Name	Const- ruction year	Elapsed years at the time of Investigation	Distance from H.W.L to the Investigated Points(m)		Diameter of Rebar		Employed Materials & Mix Proportion of Concrete of Dolphins														
			Bottom	Side	Bottom	Side															
					Outer Inner	Outer Inner															
A	1971	33	0.0	+0.50 ~ +2.50	D25 D22	D22 D19	Water-Cement Ratio was 50%. Ordinary Portland Cement was used. Unit Weight ( kg/m <sup>3</sup> ) <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Water W</th> <th>Cement C</th> <th>Fine Agg. S</th> <th>Coarse Agg. G</th> <th>Admixture Ad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>170</td> <td>340</td> <td>835</td> <td>998</td> <td>0.03% × C</td> </tr> </tbody> </table> Air Entraining Agent (Noninonic Polyoxyethylene and Specialized Anion Activator)					Water W	Cement C	Fine Agg. S	Coarse Agg. G	Admixture Ad	170	340	835	998	0.03% × C
Water W	Cement C	Fine Agg. S	Coarse Agg. G	Admixture Ad																	
170	340	835	998	0.03% × C																	
B	1971	33	0.0	+0.50 ~ +2.50	D25 D22	D22 D19															
C	1971	35	0.5	Not investigated	D25 D22	-															
D	1972	36	0.0	0.3	D22 D22	D22 D19															
E	1972	36	3.0	Not investigated	D19 D19	-															
F	1972	36	3.0	Not investigated	D19 D19	-															
G	1982	26	1.0	1.4	D25 D25	D25 D16															

Steel grade of all rebars is SD295 according to JIS G 3112.

Table 2 Items of Site Investigation

Contents	Items	Methods
Surveys by Chipping Concrete	Area Reduction Ratio of Rebar, Cover Thickness	Measurement by Slide Gauge
Chloride Content in Concrete at the Rebar	Total Chloride Content in Concrete	Sampling Cores ( 50mm ) JCI-SC4 <sup>5)</sup>
Corrosion Rate of Rebar	Polarization Resistance	AC Impedance by Double-Counter Electrode Sensor
Moisture in Concrete	Moisture	Sampling Cores ( 100mm ) JCI-DD5 <sup>7)</sup>

挙げられる。また、ほとんどの場合で、ドルフィンのコンクリート底面は平坦であり、護岸等の隣接構造物も存在しない(つまり、隣接構造物の存在による波の反射の影響がない)ため、コンクリートに供給される塩化物イオン量は平面的な位置によって大きく異なるケースは少なく、その供給量は海水面とコンクリートの距離に影響されていることが多い。さらに、干満帯付近にコンクリートが位置するため、設計かぶりが大きめに設定されることが多く(70~100mm)、腐食に必要な酸素の供給量も少ないことから、塩害劣化の進行は比較的緩やかと考えられている。なお、塩害の他に、波力や漂流物の衝突による損傷が多いのも特徴として挙げられる。

2.2 調査項目

調査は各々のドルフィンのコンクリート底面および側面にて行った。なお、構造物ごとで調査箇所数は異なるが、7 構造物の調査箇所数の合計は 43 箇所であり、各箇所では外側および内側鉄筋の 2 本に対し、Table 2 に示す項目を調査した。以下に、各項目の測定方法を示す。

2.2.1 鉄筋の断面減少率 鉄筋の断面減少率は、内側鉄筋の裏側までコンクリートをはつた後、鉄筋のふしでない部分、いわゆる「谷」をノギスにて測定し、「谷」における最小の直径と、それに直角方向の直径の平均値を実測径として、式(1)により算出した。

$$A_{red} = (A_0 - A) / A_0 \times 100 \tag{1}$$

ここに、 $A_{red}$  : 鉄筋の断面減少率(%)、 $A$  : 実測径から計算した鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $A_0$  : 基準鉄筋径から計算した鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>)を表す。なお、基準鉄筋径は、

Table 3 Criterion for judging the Degree of Corrosion according to CEB<sup>6)</sup>

Measured Corrosion Rate (μA/cm <sup>2</sup> )	Judgments for Corrosion Rate	Polarization Resistance (k · cm <sup>2</sup> )
Less than 0.1 - 0.2	Passivation (No Corrosion)	More than 130 - 260
0.2 - 0.5	Corrosion Rate with Low or Moderate Speed	52 - 130
0.5 - 1.0	Corrosion Rate with Moderate or High Speed	26 - 52
More than 1.0	Corrosion Rate with High Speed	Less than 26

目視にて錆が全く確認されず健全であった鉄筋の実測径の平均値を用いた。

2.2.2 鉄筋のかぶり 鉄筋のかぶりはノギスにより、コンクリート表面から鉄筋のふしに相当する距離を測定した。

2.2.3 塩化物イオン量 塩化物イオン量は、コア(50mm × L150mm)を採取し、表面から 2cm ごとにスライスして、スライスした各試料中に含まれる全塩化物イオン量を JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法(硝酸銀滴定法)」<sup>5)</sup> に準じて測定した。

2.2.4 鉄筋の腐食速度 鉄筋の腐食速度は、二重対極センサーを用いた交流インピーダンス法による鉄筋の分極抵抗から、式(2)により算出した。なお、Table 3 に、交流インピーダンス法により測定された分極抵抗および腐食速度ごとの鉄筋の腐食状態に関する CEB に基づく判定基準<sup>6)</sup>を示す。

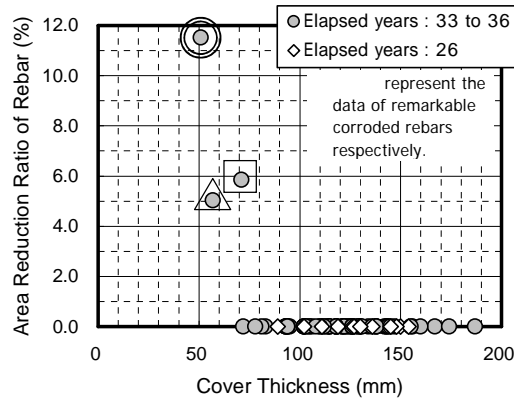


Fig.1 Relation between Cover Thickness and Area Reduction Ratio of Rebar

$$I_{corr} = 0.026(V) / R_p \quad (2)$$

ここに、 $I_{corr}$ ：腐食速度 ( $\mu A/cm^2$ )、 $R_p$ ：分極抵抗 ( $k\Omega \cdot cm^2$ ) を表す。

**2・2・5 コンクリートの飽水率** コンクリート中の飽水率は、100mm×L100mmのコアを採取し、JCI-DD5「酸素の拡散係数試験方法(案)」<sup>7)</sup>に準拠して測定した。なお、飽水率は式(3)により求めた。

$$H = (W - W_d) / (W_s - W_d) \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $H$ ：飽水率(%)、 $W$ ：コア採取時の試料の重量(kg)、 $W_d$ ：105℃で一定重量まで炉乾燥させた後の試料の絶乾重量(kg)、 $W_s$ ：48時間吸水させた後の試料の飽和重量(kg)を表す。

### 2・3 調査結果

**2・3・1 断面減少率とかぶり** Fig.1に、鉄筋の断面減少率とかぶりの関係を示す。なお、図中では、調査時点における経過年数が構造物ごとに異なっていたため、経過年数33～36年のグループと26年のグループに区別した。これによれば、かぶり70mmを超える鉄筋では、約30年経過していても、断面減少を伴う鉄筋腐食は生じていなかったことがわかる。

一方、かぶりが70mmより小さかった3箇所において断面減少率の大きい鉄筋が確認されたが、これらはFig.2に示すように、杭周辺に設置されたつばプレートに干渉し、かぶりが確保できていなかった鉄筋である(Fig.1において○で囲ったものがそれに該当し、Fig.3～Fig.5においても、これら3点に相当するものを明示した)。なお、杭周辺部以外の箇所では、このような断面減少を伴う腐食は確認されなかった。

また、設計図によれば、設計かぶりは外側鉄筋で100mmであったが、Fig.1に示した実測のかぶりは50～190mmの範囲に幅広く分布していた。これは、かぶりの異なる外側鉄筋と内側鉄筋の結果を同じグラフに示したこと、実際の鉄筋は設計かぶりに対して全体的に大きめに配置されていたことによるものと思われる。

**2・3・2 全塩化物イオン濃度とかぶり** Fig.3に、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度とかぶりの関係を示す。これによると、鉄筋位置の塩化物イオン濃度はかぶりが小さくなるほど大きくなっていった。また、経過年数33～36

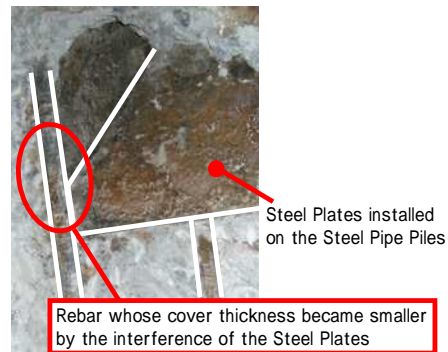


Fig.2 Corrosion State of Rebar around the Steel Pipe Piles

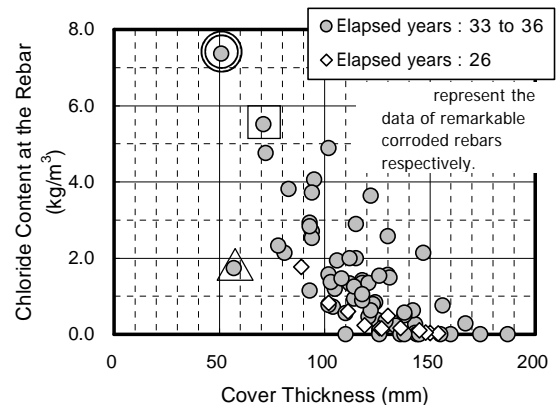


Fig.3 Relation between Cover Thickness and Chloride Content at the Rebar

年のものは26年のものに比べて、同じかぶりであっても全塩化物イオン濃度が大きくなっており、経過年数の増加につれて塩化物イオンが内部深くまで浸透している様子が伺えた。

**2・3・3 断面減少率と全塩化物イオン濃度** Fig.4に、鉄筋の断面減少率と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係を示す。これによると、全塩化物イオン濃度が $2.0kg/m^3$ 付近の1点(図中○)のみ鉄筋の断面減少率が大きかったが、その他の大多数は $2.0kg/m^3$ 以上であっても鉄筋の断面減少は生じていなかった。また、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度が $5.0kg/m^3$ 以上に達した鉄筋において、断面減少を伴う著しい腐食が進行している状況が確認された。

**2・3・4 腐食速度と全塩化物イオン濃度** Fig.5に、鉄筋の腐食速度と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係を示す。この結果によると、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が約 $2.0kg/m^3$ 以下の場合、鉄筋の腐食速度は、Table3に示す「不動状態」に相当する範囲に分布し、非常に小さい値であった。

一方、約 $2.0kg/m^3$ 以上の場合には、全塩化物イオン濃度の増加とともに腐食速度も増加し、ばらつきも大きくなる傾向が見られた。また、そのときの腐食速度は「不動状態」と「低～中程度の腐食速度」が混在した範囲に分布していた。

なお、鉄筋の断面減少率の大きかった3本の鉄筋の腐食速度が小さく計測されているが(図中○で示したもの)、これは著しい腐食により鉄筋周辺にひび割れ等

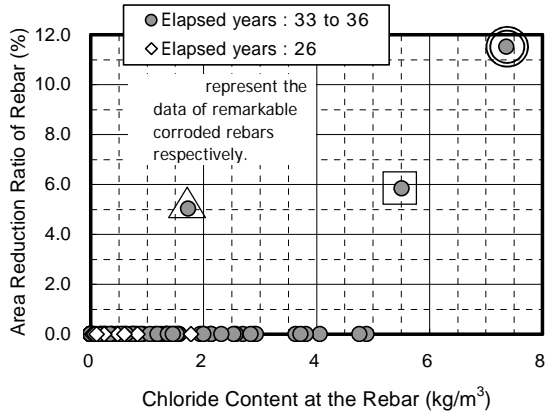


Fig.4 Relation between Chloride Content at the Rebar and Area Reduction Ratio of Rebar

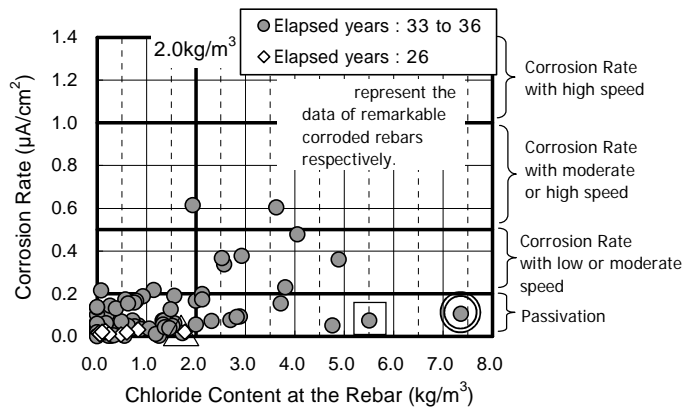


Fig.5 Relation between Chloride Content at the Rebar and Corrosion Rate

が発生していた影響で、分極抵抗が正しく測定できなかったためである。

**2.3.5 コンクリートの飽水率** コンクリート中の飽水率は、酸素の移動し易さやそれに伴う腐食速度に関する定性的な評価に利用されることが多い。例えば、解析的に検討された事例によると、飽水率が80%以上となると腐食開始からひび割れ発生までの時間が長くなり、腐食速度が小さくなるとされている<sup>8)</sup>。

今回の調査ドルフィンにおける鉄筋位置付近のコンクリート中の飽水率は、構造物ごとにばらつきが見られたものの概ね75~90%の範囲にあったことから、激しい腐食が進行する環境ではなかったものと考えられる。このことは、Fig.4に示したように、鉄筋位置における全塩化物イオン濃度が2.0~5.0kg/m<sup>3</sup>に至った場合でも、著しい断面減少が見られていない鉄筋が多数存在した事実を裏付けているものと考えられる。

**3 室内試験**

**3.1 試験概要**

本章では、2章の実構造物調査による腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度に関する知見の検証を目的として実施した室内試験の結果を説明する。

**3.1.1 試験体概要** 室内試験では、Fig.6に示すように、長さ10cmの異形鉄筋を所定のかぶり位置に3本ずつ配置したコンクリート試験体を用いた。また、コンクリート配合をTable 4に示すが、Table 5に示す所定量の塩化物イオンがコンクリート中に混入されるように、塩

化ナトリウムを十分に溶解させた練混ぜ水を用いて、コンクリートを製造した。

**3.1.2 検討ケース** 本検討では、かぶりの違いによる影響も確認するため、Table 5に示すように、水セメント比55%、鉄筋径D16の条件を固定し、かぶり(d=2, 5, 7cm)を変化させた。また、試験体は全て温度20℃、相対湿度80%の環境に曝露した。なお、10×20cmのコンクリート供試体を同環境下で曝露し、飽水率を測定したところ、飽水率は70%であった。

**3.1.3 計測項目** 計測項目は、試験体製作から1年後に取り出した鉄筋の腐食面積率、腐食減量である。なお、鉄筋の腐食面積率および腐食減量は「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」<sup>9)</sup>に準じて測定した。また、本稿では、測定された鉄筋の腐食減量から式(4)に示す腐食度を算出して考察を加えた。

$$I = \frac{W_0 - W}{A \times t} \tag{4}$$

ここに、I：鉄筋の腐食度 (mg/cm<sup>2</sup>/年)、W<sub>0</sub>：試験前の鉄筋の質量 (mg)、W：腐食生成物除去後の鉄筋の質量 (mg)、A：鉄筋の表面積 (cm<sup>2</sup>)、t：コンクリート打込

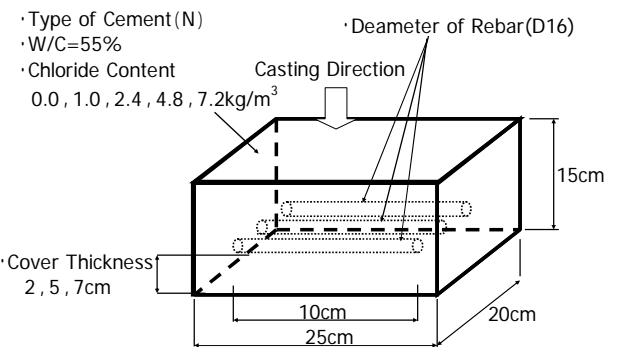


Fig.6 Outline of Concrete Specimens

Type of Cement	W/C (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	Ad
N	55	164	294	792	1061	2.94

N: Ordinary Portland Cement, Specific Gravity 3.16g/cm<sup>3</sup>

A<sub>d</sub>: Water Reducer with Air-Entraining

Table 5 Examination Cases

Case Name	W/C (%)	Diameter of Bar	Cover Thickness (cm)	Exposure Environment	Chloride Content in Concrete (kg/m <sup>3</sup> )	Number of Concrete Specimens	Number of Rebar
N-1	55	D16	2	20 80%RH Constant	5 types of 0, 1, 2, 4, 4.8, 7.2 for each case	5	15
N-2			5			5	15
N-3			7			5	15

N-1 ~ 3 : 5 types of chloride content × 1 specimen for each case



(a) Chloride Content : 4.8kg/m<sup>3</sup>



(b) Chloride Content : 7.2kg/m<sup>3</sup>

Fig.7 Corrosion States of Rebar (Case:N-2)

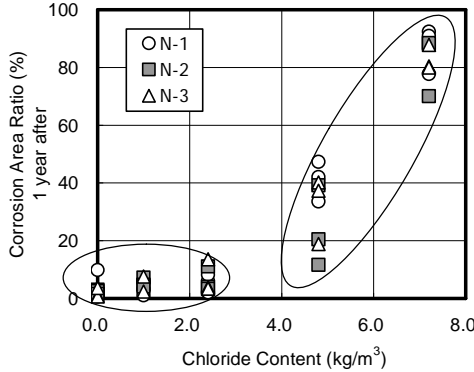


Fig.8 Relation between Corrosion Area Ratio and Chloride Content in Concrete

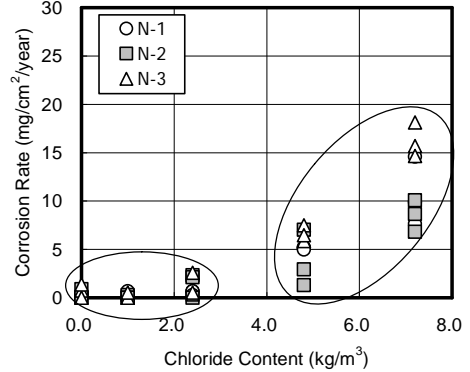


Fig.9 Relation between Corrosion Rate and Chloride Content in Concrete

み後からの試験年数を表す。

3.2 試験結果

Fig.7 に、N-2 における全塩化物イオン濃度 4.8kg/m<sup>3</sup> および 7.2kg/m<sup>3</sup> の試験終了後の鉄筋の腐食状況を示す。なお、Fig.7 に示す写真上側は、Fig.6 に示す打込み面と一致させている。これによれば、全塩化物イオン濃度が 4.8kg/m<sup>3</sup> の場合、打込み方向に対し鉄筋下側のみ腐食が見られたが、7.2kg/m<sup>3</sup> の場合では鉄筋全周に腐食が見られた。浮島らは、ブリーディングにより生成される水平鉄筋周りの境界層の厚さが鉄筋腐食に影響することを示唆している<sup>10)</sup>。これを勘案すると、今回の結果には、塩化物イオン濃度とブリーディングによる複合的な影響が含まれているものと考えられる。

Fig.8 に、鉄筋の腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係を示す。これによると、全塩化物イオン濃度 2.4kg/m<sup>3</sup> 以下と 4.8kg/m<sup>3</sup> 以上のグループで傾向が異なっていることがわかる。

一方、Fig.9 に、鉄筋の腐食度と全塩化物イオン濃度の関係を示すが、これにおいても Fig.8 の結果と同様の傾向が見られていた。このことから、室内試験によって、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度が 2.4 ~ 4.8kg/m<sup>3</sup> の範囲に存在する可能性が見取れる。

なお、本検討では、かぶりの大小により、鉄筋の腐食面積率や腐食度が影響される傾向は確認されなかった。

4 港湾 RC 構造物における腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する考察

本章では、実構造物調査と室内試験の結果を照合して、腐食発生限界塩化物イオン濃度および鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食速度に及ぼす影響を考察する。

まず、Fig.10 に、実構造物調査に基づく鉄筋の腐食速度と、室内試験による腐食度から推定した腐食速度を、横軸を鉄筋位置の全塩化物イオン濃度として同一グラフ上にプロットした結果を示す。なお、図中では、ドルフィンのコンクリート配合 (単位セメント量 340kg/m<sup>3</sup>)

と、室内試験の配合 (単位セメント量 294kg/m<sup>3</sup>) が異なるため、セメント質量あたりの全塩化物イオン濃度として横軸を表記した。また、室内試験による腐食速度は、式(4)にて得られた腐食度を用いて式(5)により推定した。

$$I_{corr} = 2F \times \frac{I}{[Fe]} \times \frac{10^3}{60 \times 60 \times 24 \times 365} \quad (5)$$

ここに、 $I_{corr}$ : 腐食速度 (  $\mu A/cm^2$  ),  $F$ : ファラデー定数 ( =96500C/mol ),  $I$ : 式(4)から算出される腐食度 ( mg/cm<sup>2</sup>/年 ),  $[Fe]$ : 鉄イオンの原子量 ( =55.85g/mol ) を表す。

この比較によれば、両者とも、セメント質量に対してほぼ 0.6 ~ 0.8% の全塩化物イオン濃度 ( 調査ドルフィンのコンクリートでは 2.0 ~ 2.7kg/m<sup>3</sup> , 室内試験体のコンクリートでは 1.8 ~ 2.4kg/m<sup>3</sup> に相当 ) を上回ったときに腐食速度が増加する傾向が見られる。これを勘案すると、ドルフィンのコンクリートにおける腐食発生限界塩化物イオン濃度は 2.0kg/m<sup>3</sup> 程度と考えられ、この値は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>11)</sup>における推奨値と一致していた。また、Table 3 に示した CEB による腐食速度の判定基準<sup>6)</sup>を準用すると、「低 ~ 中程度の腐食速度」から「中 ~ 高程度の腐食速度」に移行するのは、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.0 ~ 1.6% の範囲 ( 調査ドルフィンでは 3.4 ~ 5.4kg/m<sup>3</sup> , 室内試験体では 2.9 ~ 4.8kg/m<sup>3</sup> に相当 ) であり、これらの平均として考えると、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度が概ね 4.0kg/m<sup>3</sup> に達したときに、腐食速度が速い速度に移行するものと考えられた。

次に、Fig.11 に、実構造物調査に基づく鉄筋の断面減少率と、式(5)により計算した室内試験体の腐食速度を用いて 36 年後の鉄筋の断面減少率を推定した結果を、同一グラフ上にプロットした。これによれば、両者とも、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度が 1.5% ( 調査ドルフィンでは 5.0kg/m<sup>3</sup> , 室内試験体では 4.4kg/m<sup>3</sup> ) 未満ではほとんどの鉄筋で断面減少は見られていない。一方、1.5% ( セメント質量に対する ) を上回ると断面減少率が急増し、その傾向は両者でほぼ一致していた。

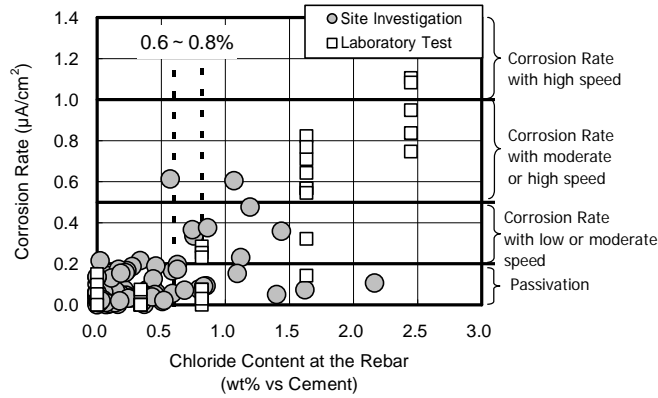


Fig.10 Comparison between Corrosion Rate obtained from Site Investigation and that from Laboratory Test

なお、調査ドルフィン中の飽水率は75～90%、室内試験体は約70%であり、室内試験のほうが若干腐食は進行しやすい<sup>8)</sup>と考えられたが、今回の結果では、上記のとおり、この程度の飽水率の違いは、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度などにさほど影響していなかったようである。

このことから、比較的コンクリート中の飽水率が高いと考えられる港湾RC構造物においては、鉄筋位置の塩化物イオン濃度を2.0～4.0kg/m<sup>3</sup>以下に抑制する早期対策(表面保護工や電気化学的補修工法など)の実施により、著しい塩害劣化の進行を避けられる可能性があるものと考えられた。

## 5 結 言

本検討において得られた知見を以下に示す。

(1) 材齢約30年の7つのドルフィンにおける実構造物調査の結果によれば、腐食発生限界塩化物イオン濃度は2.0kg/m<sup>3</sup>以上に存在すること、また鉄筋位置の塩化物イオン濃度が5.0kg/m<sup>3</sup>を上回った鉄筋において、断面減少を伴う著しい腐食が生じていることがわかった。

(2) 塩化物イオン濃度とかぶりを変えた鉄筋コンクリート試験体による室内試験によっても、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は2.4～4.8kg/m<sup>3</sup>の範囲に存在することが確認された。

(3) 実構造物調査と室内試験の結果を照合した結果、ドルフィン中の鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は2.0～2.4kg/m<sup>3</sup>の範囲に存在し、さらに鉄筋位置の塩化物イオン濃度が概ね4.0kg/m<sup>3</sup>より大きくなると、鉄筋の腐食速度は速い速度に移行することがわかった。

(4) 材齢約30年経過した7つのドルフィンにおける実構造物調査の結果から、70mmを上回るかぶりが確保された鉄筋では、断面減少を伴う著しい腐食が生じていないことがわかった。

## 参 考 文 献

1) S.Morinaga, “Study on Service Life Prediction of

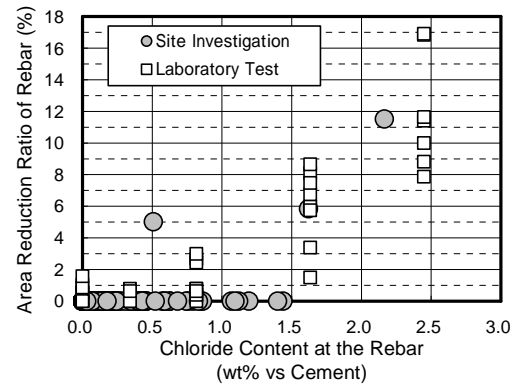


Fig.11 Comparison between Area Reduction Ratio of Rebar obtained from Site Investigation and Laboratory Test

Reinforced Concrete Buildings based on Corrosion Rate of Reinforcement”, PhD Thesis submitted to the University of Tokyo (1986).

- 2) T.Nishida, N.Otsuki and M.A.Baccay, “Examination on Temperature Dependency for Deterioration due to Steel Corrosion of Reinforced Concrete Based on Arrhenius Law”, Proceedings of the Materials and Environment 2006, Japan Society of Corrosion Engineering, pp.363-366 (2006).
- 3) Japan Society of Civil Engineers, “Standard Specifications for Concrete Structures - 2007, “Maintenance””, pp.110-116 (2008).
- 4) N.Otsuki, N.Kashino, K.Katawaki, A.Kobayashi, T.Miyagawa, K.Kishitani and N.Nishizawa, “Series of Durability of Concrete Structures, Chloride Attack ( )”, pp.31-34 (1986), Gihoudo Shuppan Co., Ltd..
- 5) Japan Concrete Institute, “Collection of JCI Standard (1997-2002)”, pp.106-114 (2004).
- 6) Japan Concrete Institute, “Technique for diagnosis of Concrete '09, Standard Edition”, pp.164-167 (2009)
- 7) Japan Concrete Institute, “Collection of JCI Standard (1997-2002)”, pp.186-193 (2004).
- 8) H.Seki and H.Yamamoto, “Consideration on Analysis of Corrosion Rate of Reinforcement in Concrete”, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.9, No.1, pp.381-386 (1987).
- 9) Japan Concrete Institute, “Collection of JCI Standard (1997-2002)”, pp.91-92 (2004).
- 10) F.Ukishima, N.Otsuki, T.Nishida and Y.Song, “Influence of Chloride Ion and ITZ around Horizontal Steel Bars on Corrosions of Steel Bars in Concrete”, Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS, Vol.6, pp.299-304 (2006).
- 11) Japan Port & Harbour Association, “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan”, p.489 (2007).