

港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討

大即信明*・長滝重義**・福手 勤***・中下兼次****

鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響を横浜港および川崎港の7地点の海面大気中、飛沫部、干満部、海中部において鉄筋を埋め込んだモルタル供試体の1年間の暴露試験を行うことにより検討した。

主な試験項目は、塩化物イオンの浸透性状および鉄筋腐食に関する項目であった。この結果、鉛直方向位置条件の影響を明確にしたのみならず、地点間の試験結果の相違について検討を加えた。特に、飛沫部の塩化物イオン浸透量の地点間の相違はその地点における波のエネルギーと関係づけられる可能性があることを示した。

Key Words : corrosion, chloride ion, marine environment, splash zone, wave energy

1. まえがき

我が国で、海洋環境におけるRCでの鋼材腐食が塩害の1つとして社会問題化して久しく、その間多くの研究がなされている。これらの研究には既存構造物の劣化度調査あるいは現地暴露実験が含まれており、その中で現場での気象、海象条件を含む環境条件の影響が大きいことが指摘されているが、環境条件の影響を総合的に検討したものはないと思われる。

また、土木学会の「耐久設計指針試案¹⁾」においては環境指数という環境条件の影響を定量化した指数を用いることになっており、この指数を合理的に定めるためにも環境条件の影響を早急に検討する必要がある。

本文は以上の観点にたち、海洋環境として港湾での環境を考え横浜および川崎港内というマクロ的にみると温度、降水量はほぼ一定と見られる海域において主として試験地点間海象条件の相違および鉛直方向位置条件(海中、干満、飛沫、大気中)を主な要因とする環境条件がRCでの鋼材腐食にどのような影響を与えるかに対するモルタル供試体を用いた基礎的な検討を報告するものである。

2. 実験内容

(1) 概要

横浜および川崎港内の種々の条件の異なる7地点の海中部、干満部、飛沫部、海上大気中に図-1に示す中心軸にφ9mm丸鋼を埋め込んだ水セメント比0.5、砂セメント比2.25、φ5×10cmのモルタル供試体(以下標準供試体と称する)を1年間暴露した。その間、モルタ

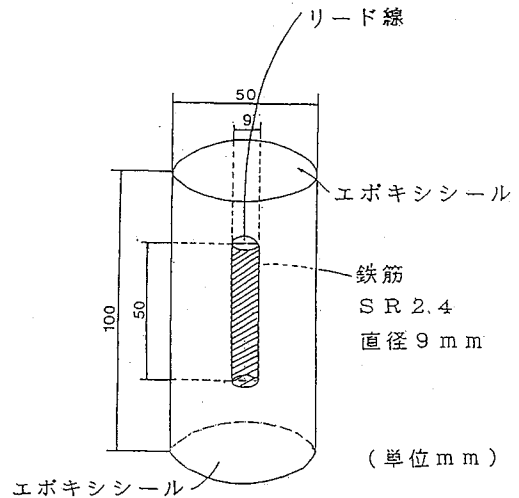


図-1 標準供試体の概略

ル中への塩化物イオン浸透性状、表面塩分付着量、および、丸鋼の電気化学的性質、腐食量等を測定した。これらの結果をもとに環境条件の及ぼす影響を検討した。

(2) 標準供試体の作製

セメントは、普通ポルトランドセメントで、その物理的性質および化学成分を表-1に示す。標準供試体に埋め込んだ鋼材はφ9mm SR 235のクエン酸アンモニウム溶液で処理した磨き鋼棒で、その化学的性質を表-2に示す。

配合は、水セメント比0.5、砂セメント比2.25とした。なお、このフロー値は210程度である。

次の手順で標準供試体を作製した。

①鋼材の前処理：鋼材を長さ5cmに切断し、端部にハンダでリード線を接続した。リード線を接続した鋼材を、24時間10%のクエン酸アンモニウム溶液に浸漬し錆を完全に除去し、アセトンで脱脂して、その後エポキシ樹

* 正会員 東京工業大学工学部助教授
(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 正会員 東京工業大学工学部教授

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所材料研究室長

**** 正会員 東京ガス(株)生産技術部

表一 セメントの物理的性質および化学的性質

強熱減量 (%)	0.80	
不溶残分 (%)	0.00	
比重	3.15	
化学成分	SiO ₂ (%)	21.40
	Al ₂ O ₃ (%)	5.20
	Fe ₂ O ₃ (%)	2.80
	CaO (%)	63.10
	MgO (%)	2.10
	SO ₃ (%)	2.10
	Na ₂ O (%)	0.19
	K ₂ O (%)	0.63

表二 鋼材の化学的性質

化学成分	C (%)	0.013
	Si (%)	0.012
	Mn (%)	0.049
	P (%)	0.0026
	S (%)	0.0021

脂で両端部をシールして使用した。

②モルタルの打設：図一に示すように、中央に鋼材を配置したφ5×10 cmのモルタル供試体を作製した。練混ぜ方法は、5リットル練りのモルタルミキサーに、細骨材、結合材を入れ1分間空練りし、その後水を入れ3分間練り混ぜるものとした。練り上がったモルタルを、型枠に2層につめて打設した。

③前養生：打設後、20℃の室内で24時間湿空養生（相対湿度95%以上の雰囲気）を行った後に、脱型し、その後6日間水中で養生した。

④シール：前養生終了後、供試体の両端部を、エポキシ樹脂でシールした。

(3) 測定時期

暴露開始後、1.3.6.12カ月において測定を行った。

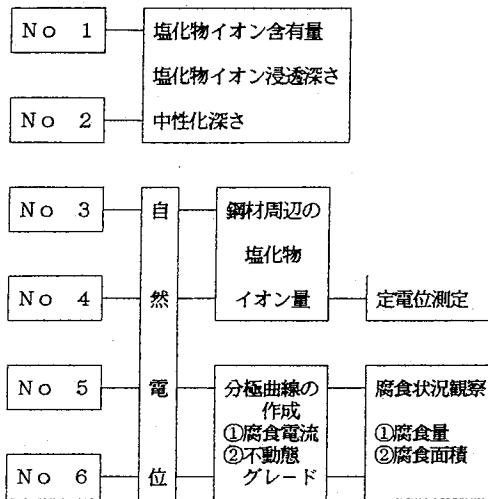
(4) 測定項目

測定時期ごとに、供試体を6本採取し、図二に示す様な実験を行った。

a) 供試体中の可溶性塩化物イオン含有量

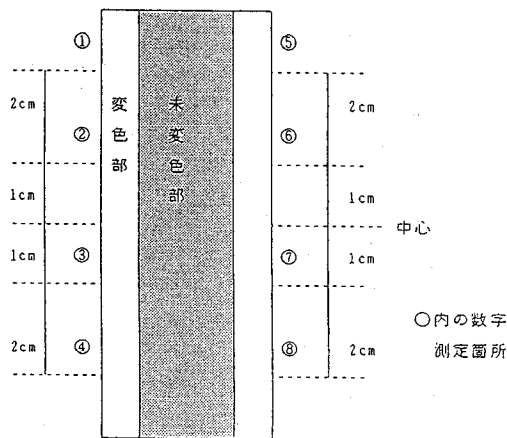
φ5×10 cmモルタル供試体全体を金槌で粗く砕きアセトンに浸漬した。アセトン蒸発後、試料を105℃の乾燥炉にて24時間乾燥させ、その後メノウ鉢にて150 μm以下程度に粉碎した。これを10g採取し、100gの蒸留水（約20℃）に24時間浸漬したものを濾過し試

供試体番号



図二 供試体1組の測定項目

変色境界



図三 塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さの測定箇所

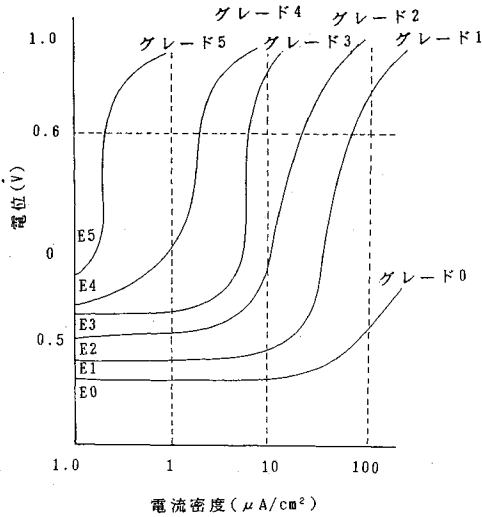
料溶液とした。試料溶液中の塩化物イオン量の測定を、塩分計（ソルメイト100型）を使用して行い、この値を用いて供試体中の可溶性塩化物イオン含有量を求めた。

b) 鋼材周辺の可溶性塩化物イオン量

供試体を軸方向に割裂し、内部の鋼材を直ちに採取し、24時間デシケータで乾燥させ、その重量差を付着水分量とした。その後鋼材を蒸留水で洗浄し、洗浄水中の塩化物イオン量を測定することにより、鋼材周辺の可溶性塩化物イオン量を算定した。

c) 塩化物イオン浸透深さ

供試体を軸方向に割裂し、供試体の割裂面に0.1Nの硝酸銀水溶液を噴霧し、白色に変色した部分を測定し浸透深さとした。測定箇所は、図三に示す様に8箇所



グレード0：電流密度が一度でも $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えるもの
(全く不動態がないもの)
 グレード1：電流密度が $10\sim 100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの
(不完全であるが若干は、不動態が存在する)
 グレード2：電流密度が一度でも $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつグレード1 またグレード3 に含まれないもの
 グレード3：電流密度が $1\sim 10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの
 グレード4：電流密度が一度でも $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつグレード1, 2, 3 にふくまれないもの
 グレード5：電流密度が $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えないもの
(非常に良好な不動態が存在する)
 電位 E が $E_n + 0.2\text{V} < E < 0.64\text{V}$ の範囲において
(V_s 飽和塩化銀電極)
 ここで E_n ：自然電位

図-4 不動態のグレードの概念図および分類

を測定し、その平均値を浸透深さとした。なお 0.1N の硝酸銀水溶液を噴霧することによって示された変色境界に対応する塩化物イオン量は、セメント重量当り $0.15\text{wt}\%$ の可溶性塩化物イオン量に対応する²⁾。

d) 供試体中の鋼材の電気化学的性質の測定

試体中の鋼材の自然電位、分極曲線(腐食電流、不動態グレード)、の電気化学的性質を測定した。測定にあたっては、ポテンショスタット、関数発生器等によって構成される全自動分極装置を使用した。また、参照電極として飽和塩化銀電極を用いた。

- ①自然電位：各材令ごとに、4本の供試体の自然電位を測定し、その平均値を自然電位の測定値として用いた。
- ②分極曲線の作成(腐食電流、不動態グレードの算出)：所定の材令において測定し、腐食電流、不動態グレード³⁾を求めた。分極は、 $-1000\sim 1000\text{mV}$ まで行い、掃引速度は $1\text{mV}/\text{s}$ を標準とした。

腐食電流は、アノード分極曲線をターフェル近似(自然電位より -100mV から -200mV 程度で直線近似した)により求めた。

また不動態グレードはアノード分極曲線により図-4に示す条件で分類した。

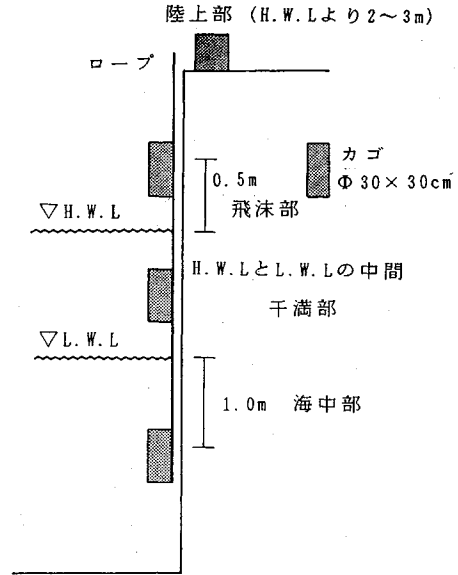


図-5 鉛直方向位置条件の概要

これらの測定は、各材令ごとに、2本行いその平均値を用いた。

e) 腐食量、腐食面積率の測定

測定方法は、まず供試体を割裂し鋼材を採取する。採取した鋼材の腐食状況を方眼紙にスケッチし、腐食面積率を求めた。その後鋼材をデシケーターの中で24時間乾燥させ重量を測定し、10%のクエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬し、浸漬後再び乾燥させて重量を測定した。この重量差によって腐食量を求めた。

3. 暴露条件の整理

暴露条件の整理を鉛直的な位置の条件と平面的な地域の条件とに分けて述べる。

(1) 鉛直方向位置条件の選定(図-5)

鉛直方向位置条件は次のようにした。

- 海中部：L. W. L. より 1m 下
- 干満部：L. W. L. と H. W. L. の中間
- 飛沫部：H. W. L. の 0.5m 上

(2) 暴露地点の選定

標準供試体の暴露地点は、下記に示すように選定した暴露地点を図-6、図-7に示す。

川崎方面

- ①千鳥町第三工事課前 A 地点：千鳥運河の内部に位置しており、防波堤に囲まれている。波は静かである。供試体は杭に設置しており、かえり波を受ける状態である。(水深 5m)
- ②千鳥町検潮所 B 地点：千鳥町埠頭の先端に位置し、幅 500m の京浜運河に面している。供試体は、検潮所の渡り棧橋に設置しており、構造物によるかえり波を受

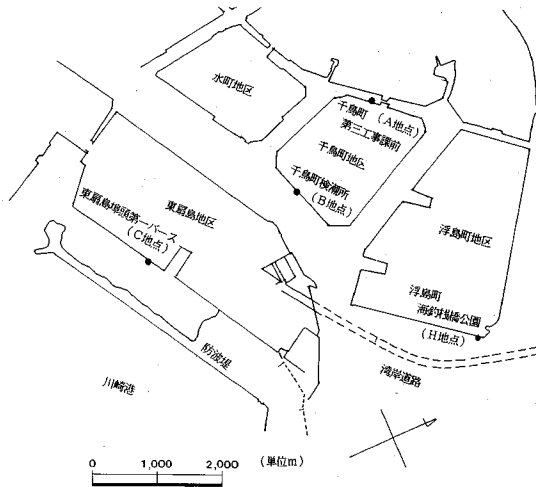


図-6 川崎方面暴露地点

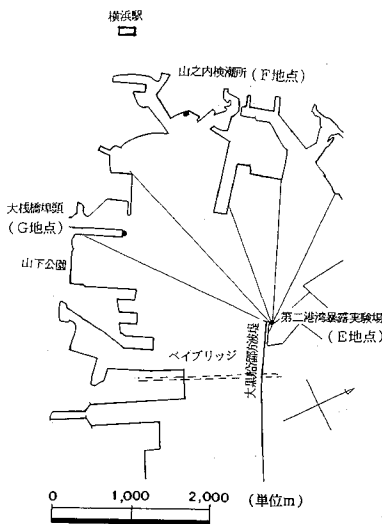


図-7 横浜方面暴露地点

けない。(水深 10 m)

- ③浮島町海釣棧橋公園 H 地点：多摩川の流出部付近
- ④東扇島埠頭ケーソン打継場 C 地点：東扇島防波堤の内部に位置しており扇島第一航路にあたる地区である。供試体設置箇所は、岸壁によるかえり波を受ける。(水深 15 m)

横浜方面

- ⑤大黒埠頭船溜内実験場 E 地点：船溜内防波堤に囲まれている。既設の洋上構造物である。供試体設置箇所は、かえり波を受けない。(水深 10 m)
- ⑥山之内検潮所 F 地点：供試体設置箇所は、岸壁とポンツーンにより囲まれた場所であり、かえり波を受ける。(水深 7.5 m)
- ⑦大棧橋埠頭 G 地点：大棧橋埠頭の隙先端に位置し、東北水堤に囲まれているが、外洋からの波を直接受ける

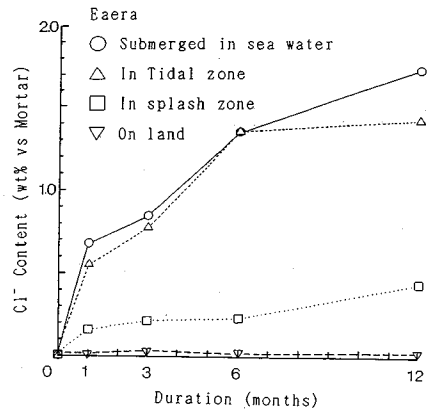


図-8 供試体中の可溶性塩化物イオン含有量の経時変化 (第2港湾暴露実験場)

地域である。かえり波を受ける。(水深 10 m)

その他

- ⑧運輸省港湾技術研究所循環水槽内 J 地点：既設実験場、人為的自然環境
- ⑨新日鉄君津製作所 構内棧橋 K 地点：供試体設置箇所は風雨のほか、かえり波を受ける。(水深 4 m)

4. 鉛直方向位置条件の影響

本章では、暴露地点の環境評価をするにあたり、まず鉛直方向位置条件の相違が供試体の諸性質にどの様に影響するのか検討した。なお試験期間は 1989 年 11 月 14 日～翌 90 年 11 月 14 日までの 1 年間とし、特に第二港湾暴露実験場 (E 地点) の結果を用いて、鉛直方向位置条件の比較を行った。

(1) 塩化物イオン浸透性

a) 供試体中の可溶性塩化物イオン含有量

図-8 は、供試体中の可溶性塩化物イオン量の経時変化を示したものである。なお塩化物イオン量はモルタル重量当りに換算している。

海中、干満、飛沫、陸上部の順で含有量が多くなっている。しかし海中部と干満部の差はほとんど無く、この傾向は他の地点でも同様である。

b) 可溶性塩化物イオンの浸透深さ

図-9 は、塩化物イオンの浸透深さの経時変化を示したものである。海中部、干満部は、3 カ月目で浸透深さが鋼材位置に到達し、分極曲線からは、不動態の破壊が認められた。飛沫部は、前二者と比較して浸透速度は遅いものの、12 カ月目で塩化物イオンが鋼材位置に到達し、鋼材には明確な腐食が発生していた。

陸上部では、極めて遅い浸透速度であり、腐食にいたっておらず、分極曲線から良好な不動態があることが確認された。

c) 鋼材周囲の可溶性塩化物イオン量

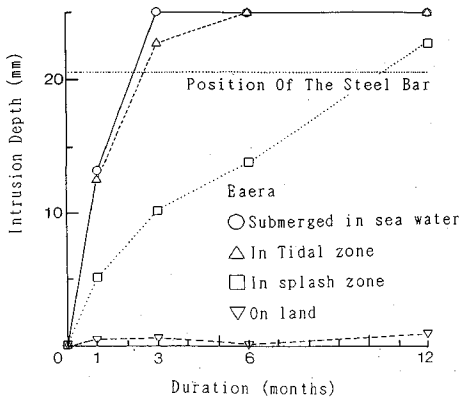


図-9 塩化物イオン浸透深さの経時変化 (第2港湾暴露実験場)

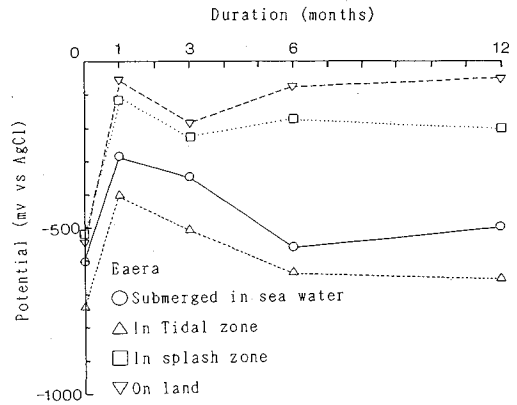


図-11 自然電位の経時変化

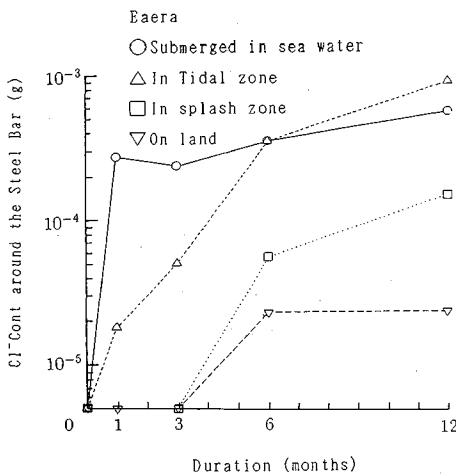


図-10 鋼材周囲可溶性塩化物イオン量の経時変化 (第2港湾暴露実験場)

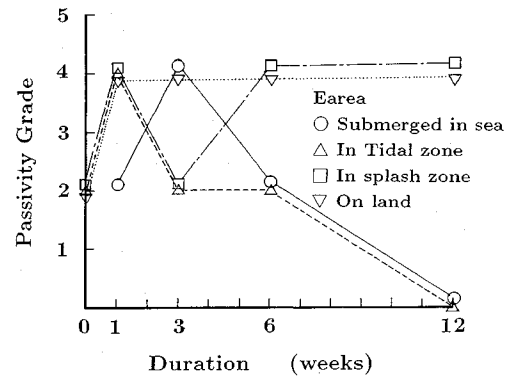


図-12 不動態グレードの経時変化

図-10は、鋼材周囲の可溶性塩化物イオン量の経時変化を示したものである。この図からわかるように塩化物イオン量が 10^{-4} gに到達したものは、(可溶性塩化物イオン濃度に換算すると約10000ppmとなる)分極曲線において早くも腐食傾向が見られた。また飛沫部においても12カ月で 10^{-4} gに到達し、分極曲線より腐食傾向が見られた。なお、著者ら³⁾の研究では鋼材周囲の可溶性塩化物イオン濃度が10000ppmを越えると腐食傾向を示すとされている。

(2) 電気化学的性質および腐食量

a) 自然電位

図-11に自然電位の経時変化を示す。この図からわかるように、自然電位は、材令1カ月より陸上部を除き卑になる傾向が見られる。材令12カ月において、海中、干満部では-600mV程度、飛沫部では-200mV、陸上部では-80mV程度である。

特に海中、干満部では、塩化物イオンが鋼材周囲に到

達した3カ月以降、自然電位が卑になりASTM標準のランクⅢ(90%以上腐食している)に属する電位を示したが、腐食はほとんど発生していなかった。しかし飛沫部では、塩化物イオンが鋼材周囲に到達したと考えられる6~12カ月に、電位が卑になり、その電位が海中部よりも貴であるにもかかわらず、明確な腐食が発生し、その量も前二者よりも多かった。一般的には自然電位が卑であるほど鋼材は腐食しやすいといわれているが、本実験では、電位が卑である海中、干満部よりも、貴である飛沫部の方が腐食量が多く、電位が-500mV以下でも、全く腐食していないものが数多く見られた。このような傾向は他の暴露地点でも見られ、自然電位測定法による腐食状況の判定には、環境条件を十分考慮する必要があると思われる。

b) 腐食電流および不動態グレード

図-12に不動態グレードの経時変化を示す。この図が示すように海中、干満部では、グレードが経時的に減少し、12カ月目では0になり完全に不動態が消失したと考えられる。また陸上部は常にグレード4を保ち、良好な不動態があることが確認された。しかし飛沫部ではグレード4にもかかわらず腐食が発生し、海中、干満部

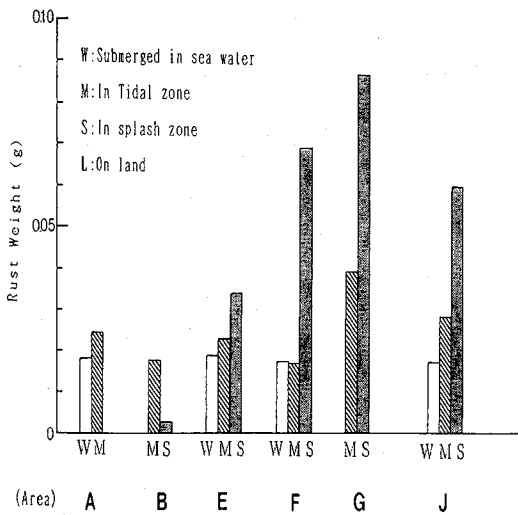


図-13 暴露地点別の1年間の腐食量

ではグレード0にもかかわらず腐食は全く軽微なものであった。海中、干満部のように塩化物イオンの供給が豊富なところでは、容易に不動態が消失するが、腐食に必要な酸素がないため腐食がほとんど発生していなかったと考えられる。これは“不動態の消失=工学上意味のある腐食の発生”とは言えないことを示したものである。このように不動態グレードは、不動態の状態を推定する方法としては、非常に有用な方法であると思われるが、腐食の判定においては自然電位と同様にその環境条件により有効性が異なるものと考えられる。

c) 腐食量

図-13にA, B, C, D, E, F, G, J地点における、1年間の腐食量を示したものである。

この図が示すように、ほとんどの暴露地点 (B地点を除いて) においても、飛沫部 (S: Splash Zone) が海中 (W: Sea Water), 干満部 (M: Tidal Zone) よりも腐食量が多いことが示されている。

これまでの検討において塩化物浸透性状においては、飛沫部は、海中、干満部よりも小さく、自然電位等の電気化学的性質でも同様の傾向が見られた。海中、干満部では、3カ月程度で塩化物イオンが鋼材周囲が到達し、分極曲線で腐食傾向を示すものが現れ、12カ月目では不動態グレードが0になり完全に不動態が消失したが、腐食は全く軽微であった。また飛沫部は、6~12カ月で塩化物イオンが鋼材位置に到達し、分極曲線で腐食傾向を示すものが現れ、不動態グレードは0でないものの、明確な腐食が生じた。

塩化物イオンの浸透性状と電気化学的性質が相反する原因としては、酸素の影響が考えられる。すなわち腐食反応に酸素の存在は不可欠であり、また一般的にコンクリート中の鋼材腐食は酸素拡散が律速条件である。海中、

干満部のように酸素の供給が少ない環境では、塩化物イオンの浸透により、早期に不動態が破壊され腐食傾向を示すが、酸素が少ないため、実際の腐食速度は遅いと考えられる。しかし飛沫部のように、塩化物イオンの浸透が遅いため鋼材位置に到達するまでは酸素の供給により良好な不動態が形成されるが、到達後には、酸素が多く存在するため腐食反応が活発になるものと考えられる。

(3) まとめ

塩化物浸透性状、電気化学的性質の検討によって、鉛直方向暴露位置の特性が確認された。すなわち、

①海中中部では塩化物イオンの浸入により早期に不動態が消失するものの、腐食に不可欠である酸素の供給が少ないため実際の腐食速度は遅い。

②干満部では海中中部と同様に塩化物イオンの浸入により早期に不動態が消失する。海中中部より外気に接する機会はあるものの、あまり酸素は供給されず腐食速度も海中中部と同程度である。

③飛沫部では海中、干満部よりも塩化物イオンの浸透速度が遅いため、鋼材位置に到達するまでは、良好な不動態が形成される。しかし到達後不動態が破壊され、著しい腐食が発生する。このため最も早期劣化が発生しやすい。

④陸上部では飛沫部よりもさらに塩化物イオンの浸透速度が遅いため、鋼材位置に到達するまでは、相当時間を要する。その間非常に良好な不動態が形成される。

5. 暴露地点の影響

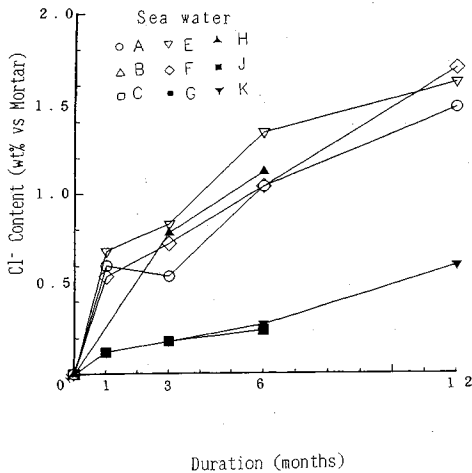
本節では、暴露地点の比較を行い、その地点の環境を評価する。

(1) 塩化物イオン浸透性状

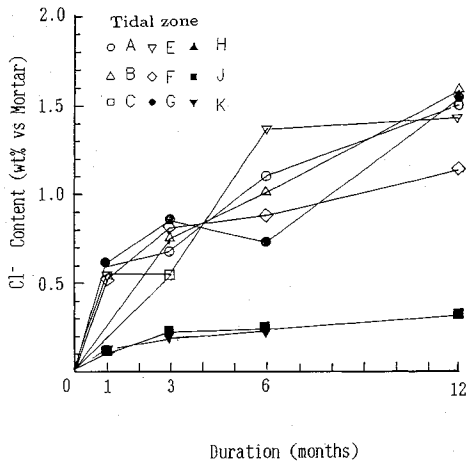
a) 供試体中の可溶性塩化物イオン量

図-14及び図-15は、海中及び干満部の結果を示す。これらの図が示すように、川崎、横浜両港の地点 (A, B, C, HおよびE, F, G地点) では、含有量に明確な地点差は認められなかった。原因としては川崎、横浜港のように比較的狭い地点では、海水の塩化物イオン濃度(18000 ppm)、潮流、潮の干満等にほとんど差がないため、地点差が生じなかったと考えられる。また多摩川の流出部であり、塩水くさび等淡水と混じり合いを検討するために暴露した浮島町釣棧橋公園 (H地点) でも、その影響は認められなかった。

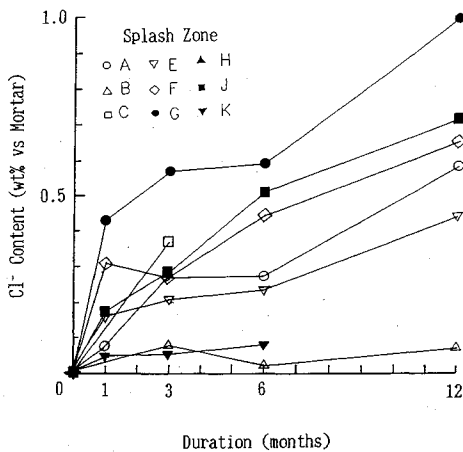
しかし港湾技術研究所循環水槽内 (J地点) では、他の地点と明確な差が認められた。ここでの含有量は材令6カ月目で、他の地点の約1/4程度であった。J地点の海水中の塩化物イオン濃度は他の地点とほとんど同じであり、成分の影響は無視できる。J地点と他の地点との相違点は、試験水槽内であり潮流等作用を受けない環境



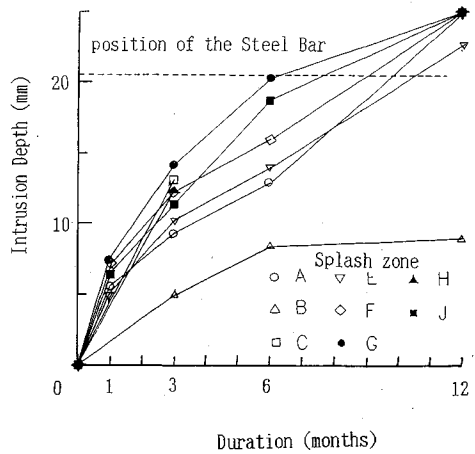
図—14 供試体の可溶性塩化物イオン含有量の経時変化 (海中部)



図—15 供試体の可溶性塩化物イオン含有量の経時変化 (干満部)



図—16 供試体の可溶性塩化物イオン含有量の経時変化 (飛沫部)



図—17 塩化物イオンの浸透深さの経時変化 (飛沫部)

下にあることで、室内の塩水浸漬試験の結果 (K 地点)と同程度であった。これは潮流の影響が塩化物の浸透に影響を与える可能性があることを示唆したものである。この1つの原因として、潮流がないとモルタル供試体周囲の塩化物イオン濃度が減少するが、潮流があると塩化物イオン濃度が常に一定であることが考えられる。

次に、図—16に飛沫部の結果を示す。この図からわかるように、飛沫部では明確な地点差が認められた。

特に大栈橋埠頭 (G 地点)が多く、ついで港湾技術研究所循環水槽内 (J 地点)、山之内検潮所 (F 地点)となっている。また唯一の洋上構造物であり風域が大きく、横浜港航路に面し、前面通過交通量が最も多いと思われる第二港湾暴露実験場 (E 地点)は、防波堤に囲まれ、かつかえり波の影響を受けないように供試体を暴露したため、あまり塩化物イオンが浸透していない。この傾向は、千鳥町検潮所 (B 地点)にも認められた。また海中、干満部の含有量が少なかった。J地点は、人工的な飛沫部で1日に数回スプレーにより確実に塩化物イオンが供給されるため、含有量が多くなっている。このように塩化物浸透性状において地点差は、飛沫部で認められ、その原因は、風域 (吹送距離)、防波堤等の有無による構造物の立地条件 (供試体の暴露場所) およびかえり波の影響が考えられる。なお陸上部でも地点差が認められたが、含有量自体が少ないため、その評価には至らなかった。

b) 塩化物イオン浸透深さ

図—17は飛沫部の結果を示したものであるが、含有量と同様に地点差が見られ、含有量の最も多かったG地点が一番早く鋼材到達したと考えられ、ついでJ地点、F地点となっており、この順位は、含有量とよく対応する。

干満部および海中部にも地点差が若干認められたが、飛沫部ほど明瞭ではなかった。

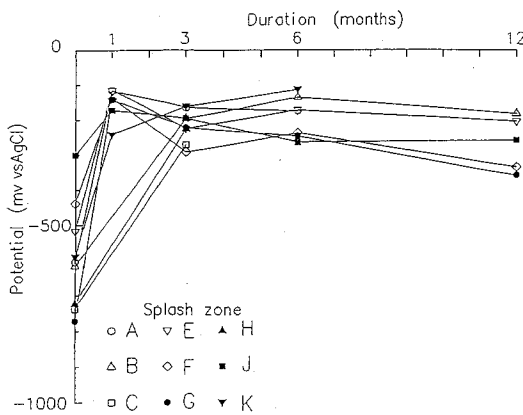


図-18 自然電位の経時変化

c) 鋼材周囲の可溶性塩化物イオン量

これについては、明確な地点差が認められなかった。

(2) 電気化学的性質

a) 自然電位

図-18は、飛沫部の結果を示したものであり、塩化物イオン含有量の多いG、F及びJ地点は、他の地点と比較して、自然電位は卑であり、わずかであるが地点差が認められた

b) 腐食量

4.(2)の図-13に全暴露地点の腐食量を示す。

海中、干満部では地点差は認められなかったものの、飛沫部では、明確な地点差が認められた。特にG地点は、他の地点と比較して腐食量が多い。

G地点は、塩化物浸透性状、電気化学的性質および酸素の透過性とも卓越しているため、腐食量が多いと考えられる。またJ、F、E地点も、G地点ほどではないものの、腐食が発生し、腐食上厳しいという地点の特性が明確に現れた。

(3) 環境評価に影響を及ぼす因子の検討

前述したように、飛沫部において地点差が生じたが、この原因を明らかにすることは、暴露地点の環境評価を行う上で極めて重要である。ここでは重回帰分析を行い、どのような環境条件が飛沫部での塩化物の蓄積及び鋼材腐食に影響を及ぼすのかを検討し、暴露地点の環境評価を行った。

3. および4. で飛沫部においては、海中部あるいは干満部よりも、地点差が明確に認められたことから、飛沫部の試験結果を用いて、環境評価を試みた。

さらに、対象とした試験結果として塩化物イオン量を選択した。この大きな理由は最もデータが多く、かつ、データの信頼性も高いと判断したためである。

また、これが塩害での主要因であるために選択したことは勿論である。

まず、地点差を生じさせる環境条件を説明変数として

選定する。説明変数となりうる環境条件として、気象条件、および海象条件を考えた。

このうち、気象条件については川崎港と横浜港においては大差なく説明変数から除外した。海象条件については、波の影響が最も大きいと判断し、波に影響を与える風域、そこでの前面通過交通量およびかえり波の有無を説明変数の候補と考え順次検討した。

①風域について

波の発生、発達についての支配要因として風速(U)と吹送距離(F)が考えられる。これらによって有義波高 $H_{1/3}$ は、理論的に次式で表される⁴⁾

(本来は、深海波の式であるが、吹送距離が小さく波高が水深に対して小さいので近似的に問題ないと仮定した)。

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.3 \times \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + 0.008(gF/U^2)^{1/2}]^2} \right\}$$

この式で、風速については横浜、川崎の範囲では条件に差がないと考え、かつ比較的強風時(風速10 m/s程度以上)の波が塩化物イオンの浸透性状に影響を与えるものと考えた。

また、吹送距離はおおむね数100 mである。これらの条件から $(gF/U^2)^{1/2}$ はおおよそ3~10程度であるため $1 + 0.008(gF/U)$ となる。これより、近似的に $gH_{1/3}/U^2 \approx 0.0048(gF/U^2)^{1/2}$ となり、さらに $H_{1/3} = 0.0048(F/g)^{1/2} \cdot U$ と簡略化される。すなわち、 $H_{1/3}$ は \sqrt{F} に、関係することがわかる。逆にFは $H_{1/3}^2$ と関連し、このことはFと波のエネルギーとに関連のあることがわかる。本論文では、供試体中への塩化物イオンの浸透は、波が直接あるいは飛沫として供試体へ当たるときに、そのエネルギーによって水分もとともに供試体中に入っていくという仮定を検討する。

なお、防波堤がある場合は、該当地点から防波堤までの距離をその方位での吹送距離と考えた。吹送距離は表-3に示すように前16方位の平均値を代表値として用いることとした。

②かえり波の影響

かえり波によって供試体への波の影響は大きくかわることは目視によっても明らかなので、かえり波の有無を説明変数 X_2 として用いることとした。

③前面通過交通量

構造物周辺を通過するフェリー、タンカー等による航跡波の影響も考えられたが、評価が困難であるため説明変数として用いなかった。

(4) 重回帰分析

前節までの検討より、重回帰分析での目的変数Yをモルタル供試体中の可溶性塩化物イオン含有量、説明変数 X_1 を合計の吹送距離(m)の平均値(F_1)、さらに説明変数 X_2 をかえり波の有無(「有」を1、「無」を0と

表-3 各暴露地区の吹送距離 (Km)

方位	A地区	B地区	C地区	E地区	F地区	G地区
S	-	0.63	0.63	0.80	0.1	0.35
SSE	-	0.55	0.63	0.80	0.2	1.80
SE	-	0.70	0.63	0.73	0.25	3.40
ESE	-	1.50	0.80	1.88	0.3	1.13
E	-	1.53	1.50	2.70	0.25	-
ENE	-	-	-	11.20	0.25	-
NE	-	-	-	3.45	0.3	-
NNE	-	-	-	1.20	0.75	-
N	-	-	-	1.80	0.65	-
NNW	-	-	-	1.83	1.96	-
NW	-	-	-	-	2.00	-
WNW	-	-	-	-	1.70	-
W	-	-	-	-	0.1	-
WSW	-	-	-	-	0.05	-
SW	0.83	1.90	2.18	-	0.05	-
SSW	-	0.88	0.88	-	0.05	-
合計	0.83	7.69	7.25	26.39	8.96	6.68
平均 (m)	52	480	453	560	418	1649

表-4 各暴露地区の平均吹送距離および飛沫部供試体の可溶性塩化物イオン含有量

地区名	A	B	C	E	F	G
可溶性塩化物イオン含有量 (wt%)	0.584	0.073	0.740	0.443	0.653	0.999
吹送距離の平均値 F (m)	52	480	453	560	418	1649
√F	7.2	2.19	21.3	23.7	20.4	40.6
かえり波の有無	有(1)	無(0)	有(1)	無(0)	有(1)	有(1)
Z: かえり波有るとき2F、かえり波無るときFとしたもの	104	480	906	560	836	3298

Z: 換算平均吹送距離と称する。

する)とした。

表-4 に目的変数および説明変数の値を示す。

これを用いて重回帰計算を行った。この結果、決定係数は0.8670となった。この場合、自由度が4という点

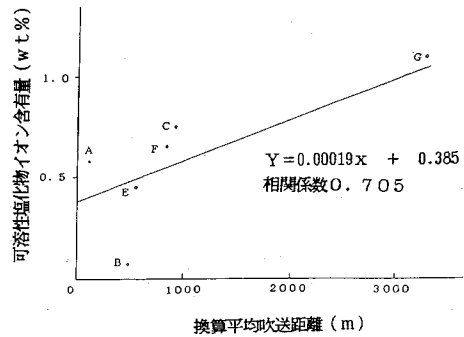


図-19 換算平均吹送距離と可溶性塩化物イオンとの関係

がやや問題ではあるが、可溶性塩化物イオン含有量を吹送距離とかえり波の有無で推定できることがわかった。このことは波のエネルギーが可溶性塩化物イオン含有量に影響するという仮定の裏付けとなる。

さらに、重複波理論においてはかえり波があると波のエネルギーは2倍になることが知られている。このことから説明変数として、かえり波のない場合は吹送距離をそのまま、また、かえり波のある場合には、2×吹送距離を換算平均吹送距離と称して、これをエネルギーに比例する変数と考えて最小2乗法を用いて計算した。この結果を図-19に示す。B地点の様にやや説明しにくいものもあり、相関係数も0.704とやや低いが、この種のものとしてはよい相関があると判断した。

この結果より、可溶性塩化物イオン含有量に及ぼす環境条件の影響は波エネルギーという指標によって評価できるという仮説をたてることができる。

6. 結 論

前章までに小型の標準供試体の暴露試験結果を用いて、塩害に及ぼす港湾での環境条件の影響を検討した。この結果、以下の事項を明らかにした。

(1) 海中部、干満部、飛沫部、陸上部の相違については、従来言われている飛沫部における塩害が最も厳しいことを確認し、その理由についても確認した。

(2) 地点差については、海中部、干満部、陸上部に比べて飛沫部において、地点における塩害の程度が相違することを確認した。

(3) 飛沫部における可溶性塩化物イオン含有量に及ぼす種々の因子を検討した結果、飛沫部の塩化物イオン浸透量の地点間の相違はその地点における波のエネルギーと関係づけられる可能性があることを示せた。

(4) 自然電位測定法および不動態グレードによる腐食状況の判定は、環境条件によりその有効性が異なる。これは、酸素供給に関する情報が含まれていないためである。

謝 辞 本研究の暴露試験に協力していただいた運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所および京浜港工事事務所の関係者の方々に感謝致します。さらに、本研究の1部は文部省科学研究費補助金(No. 01850108)により実施されたことを付記し、感謝致します。

参 考 文 献

1) 土木学会：耐久設計指針（試案），コンクリートライブラリー第65号，pp.5～6，1989.

- 2) 大即信明・中下兼次：硬化したコンクリート中における塩素イオンの測定に関する研究，セメント技術年報43，1989.
- 3) N. Otsuki, S. Nagataki and K. Nakashita : Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method Measuring Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, ACI Materials Journal, Vol.89, No.6, pp.587～592, 1992.
- 4) 佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾—わかり易い土木講座，17，p.110，彰国社，1972年3月.

(1992.11.11 受付)

BASIC STUDY OF THE INFLUENCE ON MARINE ENVIRONMENT ON THE CHLORIDE ATTACK AGAINST REINFORCED CONCRETE

Nobuaki OTSUKI, Shigeyoshi NAGATAKI, Tsutomu FUKUTE and Kenji NAKASITA

In this paper, a basic study of the influence of marine environments on the chloride attack against reinforced concrete is presented. For this purpose, specimens had been exposed at 7 points in Yokohama and Kawasaki port combined, and at every points, they were placed at splash, tidal and submerged zone. The specimens were tested after scheduled periods up to 1 year.

The tests were mainly aimed at investigation penetration of chloride ion and corrosion of embedded steel bars.

The test's results clarify the difference of chloride penetration between points as well as the influence of vertical positions (splash, tidal and submerged). Especially, the authors can make an assumption that the amounts of chloride penetration at tidal zone are closely related to the energy of waves.