

論文 70年以上経過した鉄筋コンクリート構造物の干満帯および海中部における耐久性

守分敦郎*¹・伊坂健二*²・福手勤*³・羽瀧貴士*⁴

要旨：本研究では、大正時代から岸壁として使用されてきた鉄筋コンクリート製ケーソンの耐久性について検討を行なった。このために、地上に引上げられたケーソンに対して、非破壊調査やコアのサンプリングを行なった後、内部鉄筋の腐食状態について確認を行なった。調査の結果、気中部、干満帯から海中部に至るまでのコンクリート中の鉄筋の腐食性状について確認した。さらに、コンクリート中に浸透した塩化物イオン量の分布より、岸壁形式の構造物における塩化物イオンの浸透過程について考察を加えた。

キーワード：塩害, 耐久性, 港湾構造物, 岸壁, 拡散, 丸鋼, 非破壊調査, 干満帯, 海中部

1. はじめに

これまで、鉄筋コンクリート構造物の塩害について、多くの研究や報告が行なわれてきた。筆者らも、明治時代に建設された港湾構造物の耐久性について報告してきた[1][2]。しかし、これまでの報告の多くは気中部のコンクリートに関するものであり、気中部、干満帯から海中部まで続く鉄筋コンクリート構造物の耐久性については、必ずしも十分な知見は得られていないようである。したがって、ここでは大正13年に建設された鉄筋コンクリート製ケーソンを対象に、気中部、干満帯から海中部にかけての鉄筋の腐食性状やコンクリート中に供給される塩化物イオン量を詳細に検討し、塩害に対する耐久性について検討を行なった。

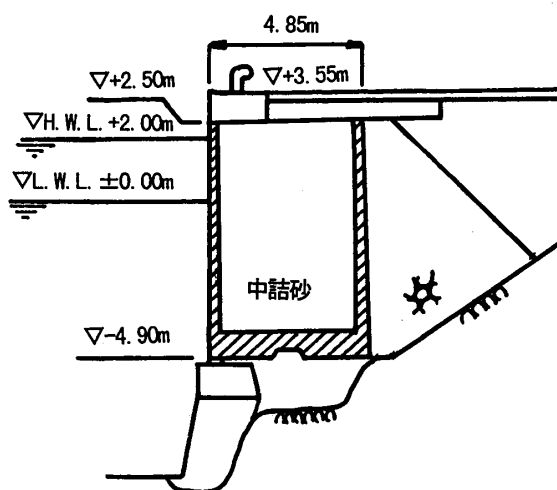


図-1 構造物の概要

2. 検討対象構造物と調査内容

検討対象とした構造物は、図-1に示す鉄筋コンクリート製のケーソンである。このケーソンは、関東大震災直後に建設されており、今回の調査までに約73年間海洋環境下にさらされてきた。調査は、表-1に示す項目を、構造物が陸上に引き上げられた直後に行った。ケーソン自体の天端は+2.5 mで

表-1 調査内容

調査項目	摘 要
外観目視調査	外観変状の調査
鉄筋健全度調査	鉄筋のはつり出し
非破壊調査	自然電位 交流インピーダンス測定
塩化物イオン量調査	JCI 規準案に示された方法
配合推定	セメント協会 F-18 に示された方法
コンクリートの力学試験	圧縮強度, 引張強度, ヤング係数
丸鋼成分分析	X線回折等による分析

- * 1 東亜建設工業(株) 技術研究所、工博（正会員）
- * 2 横浜市港湾局
- * 3 運輸省 港湾技術研究所 材料研究室 室長、工博（正会員）
- * 4 東亜建設工業(株) 横浜支店(正会員)

あるが、この構造物は掘り込まれた岸壁の奥の方に位置しているため、ケーソン前面の波浪条件は穏やかであり、満潮位より上の部分は外気の影響を受けているものと考えられる。したがって、調査結果は、満潮位より上の部分を「気中部」と考え、以下「干満帯」「海中上部」「海中下部」に分けて評価した。

2. 検討対象構造物と調査内容

2.1 外観目視および鉄筋腐食状況

外観目視調査の結果、写真-1に見られるように、干満帯付近に船舶等の衝撃によると思われる「鉄筋の露出部分」が確認された。また、引き上げられたケーソンの表面には海成生物が付着しており、特に干満帯の下部に多かった。海成付着物を取り除いた後のコンクリート表面には、内部鉄筋の腐食に起因したと思われる劣化は確認されなかった。

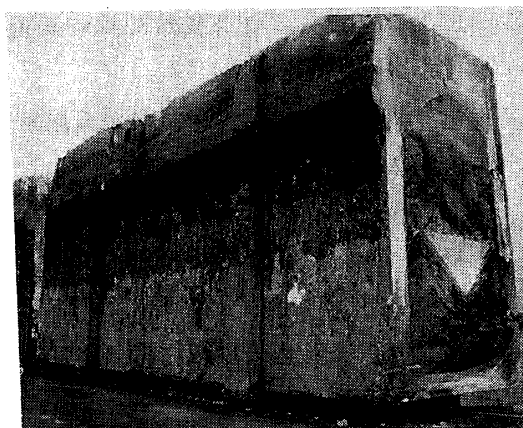


写真-1 約73年経過したケーソンの外観

鉄筋は、 $\phi 19\text{mm}$ の丸鋼が縦方向にはおよそ140mm間隔、水平方向にはおよそ230mm間隔で配置されていた。水平鉄筋のかぶりは50~60mm程度あり、縦筋方向鉄筋はその奥側に配置されていた。

鉄筋をはつりだして腐食状況を調べた結果では、気中部および干満帯の上部において、ブリーディングの影響と思われる孔食を伴う腐食が部分的に確認された。しかし、約70年という期間を考えると、鉄筋の腐食速度は大変遅いようである。また、海水中部の鉄筋表面は全て健全であり、腐食の跡などは見られなかった。

2.2 非破壊調査結果

Ag/AgClを参照電極とした、自然電位の測定結果を図-2に示す。さらに、周波数0.25Hzおよび200Hzを用いた交流インピーダンスによる分極抵抗およびコンクリート抵抗を、図-3および

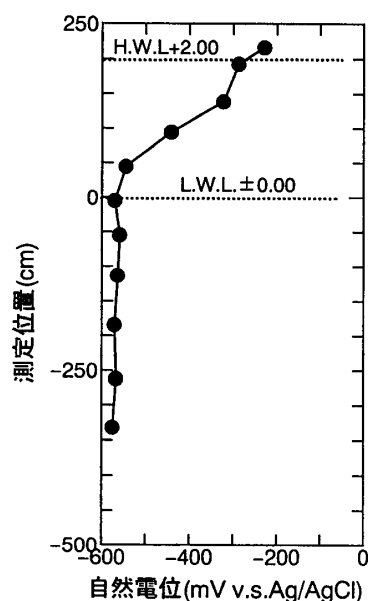


図-2 自然電位測定結果

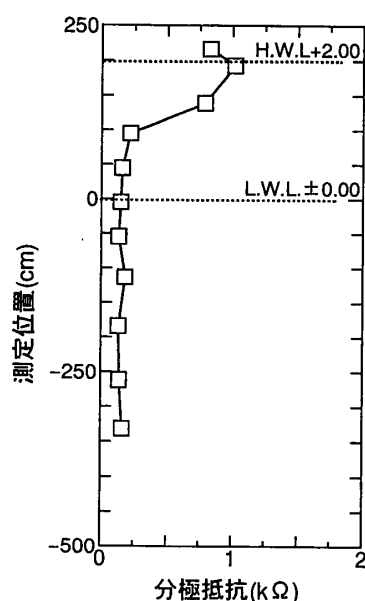


図-3 分極抵抗測定結果

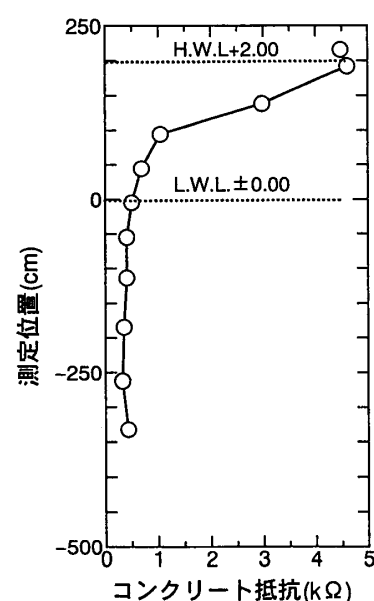


図-4 コンクリート抵抗測定結果

図-4に示す。

自然電位は、満潮位より上の部分は-200mV程度を示しているが、干満帯から海中部にかけて電位が卑に移行しており、干潮位以下では-500mV程度の値を示している。分極抵抗およびコンクリート抵抗の値は、気中部で大きい、干満帯以下では小さくなっている。

これらの非破壊試験結果から、干満帯の下部から海中部において、自然電位が「卑」で分極抵抗が小さいことより、不動態皮膜が破壊されて鉄筋腐食が進行しているものと推測される。しかし、はつり出して調べた鉄筋には腐食が見られていない。この原因として、干満帯以下の鉄筋においては、たとえ不動態皮膜が破壊されても、酸素供給量が少ないために腐食の進行が大変遅くなっているものと推測される。

2.3 塩化物イオン量調査結果

(1) 調査結果

コンクリート中の全塩化物イオン量の測定結果を図-5～図-8に示す。また、これらの測定結果の平均値を各測定位置と関連させて図-9に示す。

コンクリート中に浸透した塩化物イオン量は、気中部や干満帯に比較して海中部が大きいことが分かる。また、海中上部と海中下部では、作用する水圧が異なっているが、塩化物イオン浸透に大きな違いは見られなかった。

本構造物では、かぶりが約50mmの鉄筋位置の塩化物イオン量は、気中部、干満帯で0.2%程度、海中部で0.6～0.7%程度となっている。この値は、栈橋などの調査結果で指摘されている[3]塩化物イオンの発錆限界値を大幅に上回っており、鉄筋の腐食は塩化物イオン量だけでなく酸素供給量などの環境条件が、塩害に大きな影響を及ぼすこ

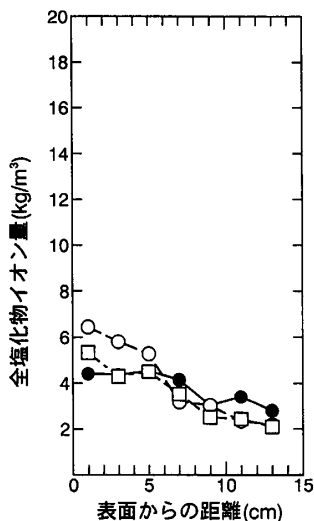


図-5 気中部の塩化物量

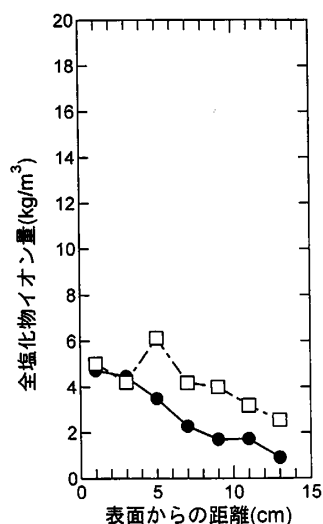


図-6 干満帯の塩化物量

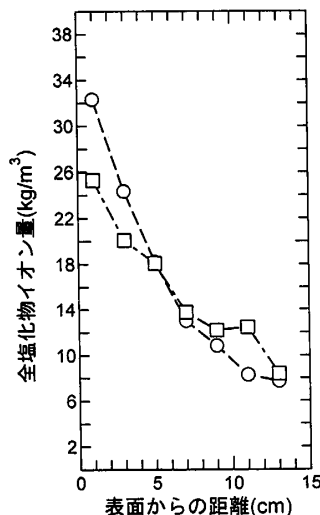


図-7 海中上部の塩化物量

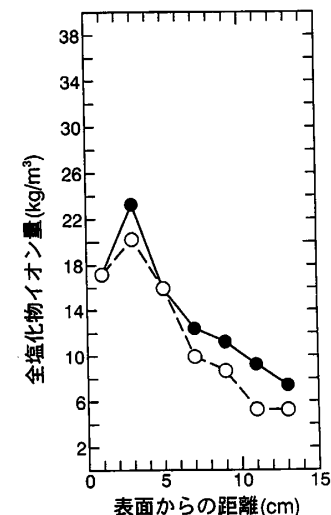


図-8 海中下部の塩化物量

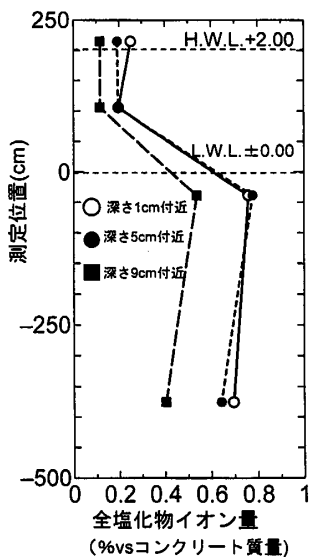


図-9 測定位置と塩化物量

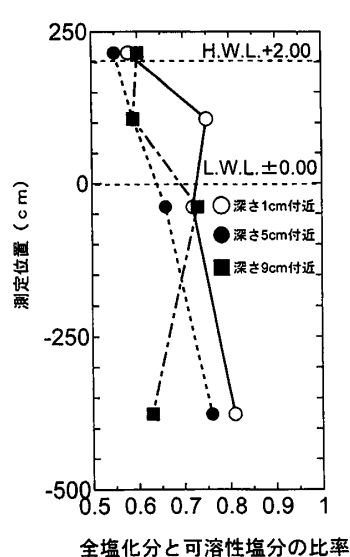


図-10 全塩分量と可溶性塩分量の比率

とが分かる。

全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の比率は、図-10に見られるように、気中部や干満帯に比較して海中部の可溶性塩化物イオン量が多く、海中上部より海中下部の方が若干大きい。これは、コンクリート中の空隙に海水が浸透したことの影響と考えられる。

(2) 塩化物イオンの浸透現象に関する検討

コンクリート中に浸透する塩化物イオン量を、経過年数と関連させて検討するために、先の調査結果を次式で示される Fick の拡散方程式で近似して、「表面塩化物イオン量」と「見かけの拡散係数」を算出した。

$$C(t, x) = C_0 \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \times \sqrt{D \times t}} \right) \right]$$

ここに、

x : 表面から鉄筋までの深さ (cm)

C : x cm の深さの塩化物イオン量 (%)

t : 建設からの期間 (sec)

C_0 : 表面塩化物イオン量 (%)

D : 見かけの拡散係数 (cm^2/sec)

このとき、表面塩化物イオン量は構造物の環境条件に大きく影響されるため、

「Case1: 建設時点から一定 ($C_0 = \text{一定}$)」

「Case2: 初期に増加してある程度経過すると一定 ($C_0(t) = C_0 \times (1 - e^{-\gamma t})$) ただし $\gamma = \text{定数}$, $t = \text{材齢 (年)}$)」あるいは

「Case3: $\sqrt{\text{年数}}$ に比例する ($C_0 = S \times \sqrt{t}$) ただし $S = \text{定数}$, $t = \text{材齢 (年)}$)」などの考え方が示されている。本構造物の場合経過年数が長いため、Case1 と Case2 ではほぼ同様な結果となるため、ここでは Case1 と Case3 を比較した。

構造物の位置と表面塩化物イオン量の間係を図-11に、見かけの拡散係数を図-12に示す。

C_0 が一定と考えた場合では、気中部から干満帯にかけて、表面塩化物イオン量は 0.26~0.38% 程度となり、海中部の 0.89~1.1% 程度に比較して小さい値を示している。また、見かけの拡散係数については、とくに干満帯において大きな

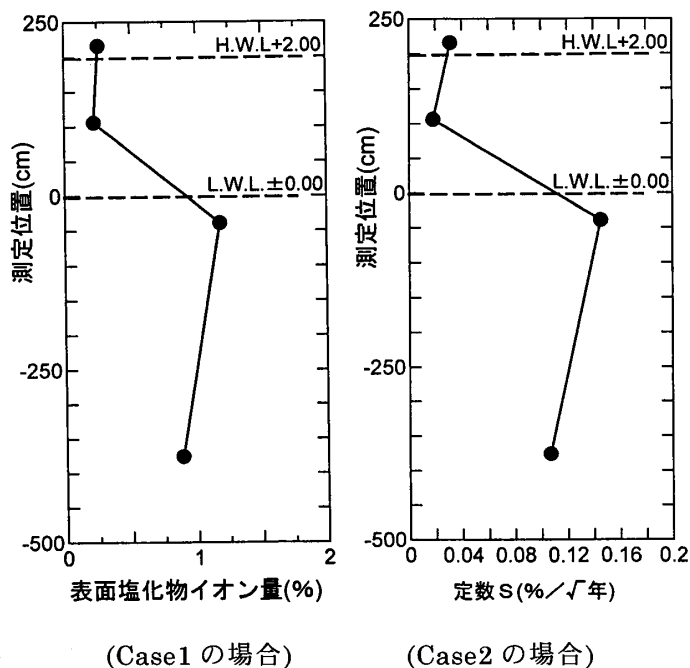


図-11 測定位置と表面塩化物イオン量の分布

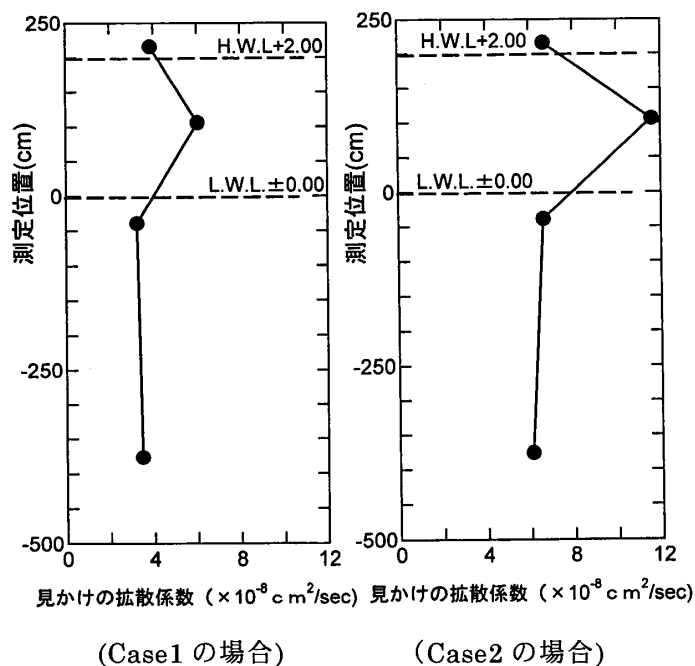


図-12 測定位置と見かけの拡散係数の分布

値が見られ、乾湿繰り返しが塩化物イオンの拡散速度を大きくしているものと推測される。

C_0 が $\sqrt{\text{年数}}$ に比例すると考えた場合でも、各数値の分布は C_0 が一定と考えた場合と同様な傾向を示しているが、見かけの拡散係数は若干大きくなる。

Pick の拡散則を用いると、気中部および干満帯における鉄筋位置の塩化物イオン量を計算することが可能であり、その例を図-13に示す。これは、かぶり 5cm の鉄筋位置の塩化物イオン量を推定したものである。計算には、73 年経過した時点のデータ（塩化物イオン量分布）を用いているため、それぞれの曲線は 73 年付近で一致しているが、「 $C_0 = S \times \sqrt{t}$ 」の方では、経過年数が短い場合の塩化物イオン量が小さく、70 年以降においても長期に渡って増加することを示している。しかし、港湾構造物のように建設当初から多量の塩化物イオンが供給される環境にある場合、比較的短い期間でコンクリート中の塩化物イオンが増大し、数年である程度安定する傾向にあることが指摘されている[4]。したがって、港湾構造物でしかも建設後の経過年数が長い場合には、表面塩化物イオン量の経年変化は「Case1」あるいは「Case2」とした方が良いものと考えられる。

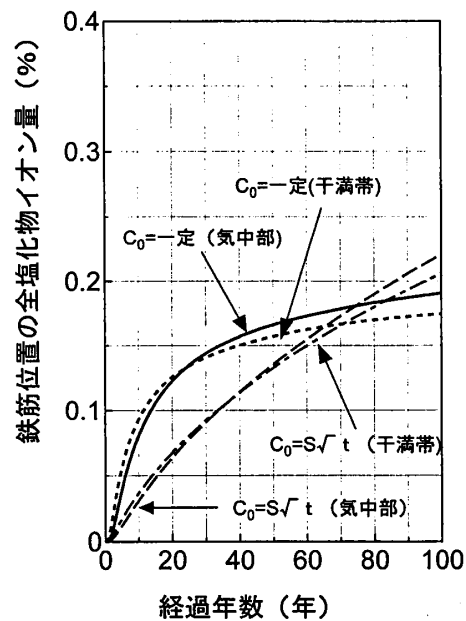


図-13 鉄筋位置の塩化物イオンの履歴

2.4 コンクリートの力学試験および配合推定試験結果

海水がコンクリートの力学特性に及ぼす影響を検討するために、圧縮強度、引張強度およびヤング係数を、構造物の表面部分から採取したφ 10cm 長さ 20cm のコアにより確認した。試験結果を図-14～図-16に示す。これらの図から明らかなように、本構造物においては干満帯において圧縮強度や引張強度の低下が見られた。

表-2 配合推定試験結果

W/C (%)	単位容積質量 (kg/m ³)			
	水	セメント	骨材	合計
52	166.6	320.9	1984.3	2471.8

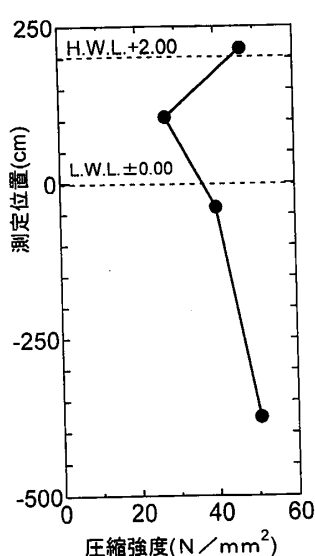


図-14 圧縮強度測定結果

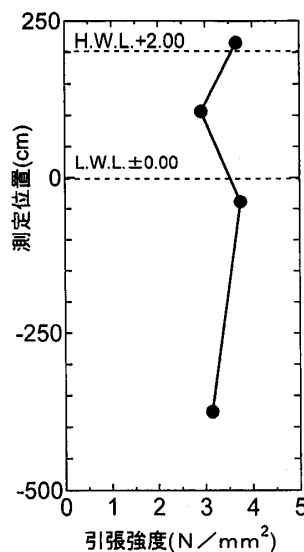


図-15 引張強度測定結果

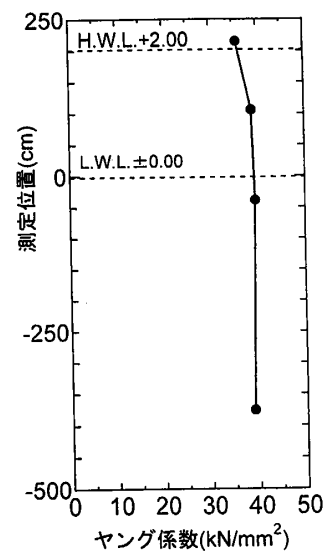


図-16 ヤング係数測定結果

さらに、コンクリートの配合推定試験の結果を表-2に示す。当時使用された骨材やセメントの成分が不明なため、精度の高い配合推定は難しいが、W/Cが52%程度と推定されることより、当時使用されたコンクリートの配合は、現在使用されているコンクリートの配合と大きく異ならないことがわかる。

2.5 鉄筋の成分分析結果

鉄筋の組成分析結果を、現在の異形鉄筋のミルシートに示された値と比較して表-3に示す。1試料の分析ではあるが、丸鋼の成分のうち現在の鉄筋と最も大きな違いが見られたのは「P」であった。現在のJIS G3112では、「PおよびSは0.04%以下」の規定があるが、大正時代の丸鋼では「P」の値がこの規定を上回っている。一般に、鋼材の腐食抑制効果の高い成分として、「P」「Cu」が挙げられており、大正時代の丸鋼は比較的耐腐食性に優れていたと推測される。

表-3 鉄筋の化学成分 (w t %)

	C	S i	M n	P	S	C u
採取した丸鋼	0.12	0.12	0.58	0.072	0.022	0.16
異形鉄筋(SD295B)	0.21	0.17	0.72	0.031	0.028	—

3. 結論

大正時代の鉄筋コンクリート構造物の調査を通じて、以下の結論が得られた。

1. 厳しい海洋環境に70年以上さらされてきた鉄筋コンクリート製ケーソンの塩害に対する耐久性を検討した結果、鉄筋腐食は満潮位より上の部分のみに見られ、干満帯および海中部では鉄筋腐食は見られなかった。
2. 非破壊調査の結果では、干満帯から海中部にかけて、自然電位は「卑」を示し、分極抵抗やコンクリート抵抗は小さくなることが確認された。しかし、この部分での鉄筋腐食が見られないことより、鉄筋は塩化物イオンによって不動態皮膜が破壊されているにもかかわらず、酸素が十分供給されないために、腐食速度が大変遅かったものと推測される。
3. 塩化物イオンの拡散則を用いて塩害に対する耐久性を評価する場合、港湾構造物における表面塩化物イオン量の経年変化は、建設当初に急速に増加するがその後の変化は少ないものと推測された。
4. コンクリートの力学特性としては、干満帯において圧縮強度、引張強度の低下が確認された。
5. 大正時代の丸鋼の成分分析の結果、リンの含有量が多いことが確認された。

謝辞:本研究の実施にあたり、横浜市港湾局 細川隆司氏、松坂英一氏には大変お世話になった。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] 市川公一・浅野泰史・守分敦郎・飯田薫:80年経過したコンクリート製港湾構造物の耐久性について, 第12回コンクリート工学年次講演会論文集 12-1, pp. 639-644, 1990
- [2] 風間亨・上杉忠男・飯田薫・守分敦郎:明治時代に建設されたコンクリート製港湾構造物の耐久性について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 466-467, 1990
- [3] 守分敦郎・長滝重義・大即信明・三浦成夫:既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 111-122, 1995. 8
- [4] 竹田宣典・迫田恵三・十河茂幸:海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定, 第13回コンクリート工学年次講演会論文集 13-1, pp. 595-600, 1991