

報告 海洋環境下において 46 年間供用した鉄筋コンクリート水槽の劣化性状

野上 周嗣*1・福田 功*2・山路 徹*3・加藤 絵万*4

要旨: 本報告では、46 年間供用した鉄筋コンクリート水槽の劣化状況等の現況把握調査について報告する。調査の結果、(1)壁面の劣化の顕在化は鉄筋の重ね継手によるかぶり不足によること、(2)壁面のコンクリート内部は含水率が高い状態にあったため気中部であっても中性化が進行していないこと、(3)高い塩化物イオン濃度であってもかぶり厚および湿潤状況によって鉄筋腐食状況が異なること、(4) マクロセルの形成により一部で鉄筋腐食が促進され、その他の箇所では鉄筋腐食が抑制された可能性があること等から、鉄筋コンクリート水槽の劣化はかぶり厚および海水による湿潤状況が大きく影響を与えていると考えられる。

キーワード: 海洋環境, 鉄筋腐食, 塩化物イオン, 電気化学的測定, 劣化

1. はじめに

日本では 1960 年代中盤から 1970 年代前半に集中的に港湾施設等の社会インフラが整備されているが、これらの施設が今後、順次更新時期を迎える状態である。そのため、国を挙げて社会インフラの維持管理等に総合的かつ重点的に取り組みがなされている。

港湾施設は、他の社会インフラと比較して、一般的に厳しい自然環境下に置かれることから、材料の劣化、部材の損傷等の変状により、供用期間中に性能の低下が生じることが多い。また、港湾施設は日本の物流等を支える基幹施設であり長期間の性能および安全性確保は必要不可欠であるため、使用される材料の長期耐久性の評価および把握は、構造物の性能および安全性確保に重要な要素のひとつである。

当研究所では自然海水を使用した長期暴露試験施設を保有しており、コンクリートや鉄筋コンクリート、鋼材や各種防食材料および木質材料など様々な建設材料を多数暴露し、長期耐久性の評価および調査を実施している。本施設は、海水をシャワー状で噴霧し飛沫帯を再現した「海水シャワー暴露試験場」、自然海水をポンプで給排水し潮位の干満を模擬できる「海水循環水槽」(写真-1)、海洋からの飛来塩分による「海上大気暴露試験場」の 3 つの暴露場で構成され、環境区分として「飛沫帯」、「海水中」および「干満帯」、「海上大気中」の 4 環境を模擬した陸上の屋外暴露試験施設となっている。その中でも海水循環水槽は 1967 年に当時の運輸省港湾技術研究所が設置した鉄筋コンクリート製の施設であり、今日までの 46 年間継続して海洋環境を再現している世界でも数少ない施設である。

一般的に、港湾施設は波浪や船舶の離接岸、荷役機械等からの外力を受けているため、港湾施設の劣化・変状の原因は海水由来によるものと外力由来によるものの 2 種類に分類できるが、本施設は海水由来による材料の劣化・変状を把握するための施設である。

しかし、46 年間もの長期間にわたって暴露試験を行った結果、本施設も試験体と同様の暴露環境にさらされており、水槽壁面のひび割れや剥離、錆汁のしみ出しなど自然海水の影響と考えられる劣化が発生し、損傷が著しくなってきた。そのため、劣化状況等の現況把握の調査を実施し、劣化部の補修もしくは更新等の検討を行っている。

本報告では、46 年間供用した鉄筋コンクリート水槽(以下、RC 水槽)の劣化状況等の現況把握調査について報告する。



写真-1 海水循環水槽(RC 水槽)の外観

*1 (独)港湾空港技術研究所 ライフサイクルマネジメント支援センター研究官 修士(工学) (正会員)
 *2 (独)港湾空港技術研究所 ライフサイクルマネジメント支援センター長
 *3 (独)港湾空港技術研究所 構造研究領域長 博士(工学) (正会員)
 *4 (独)港湾空港技術研究所 構造研究チームリーダー 博士(工学) (正会員)

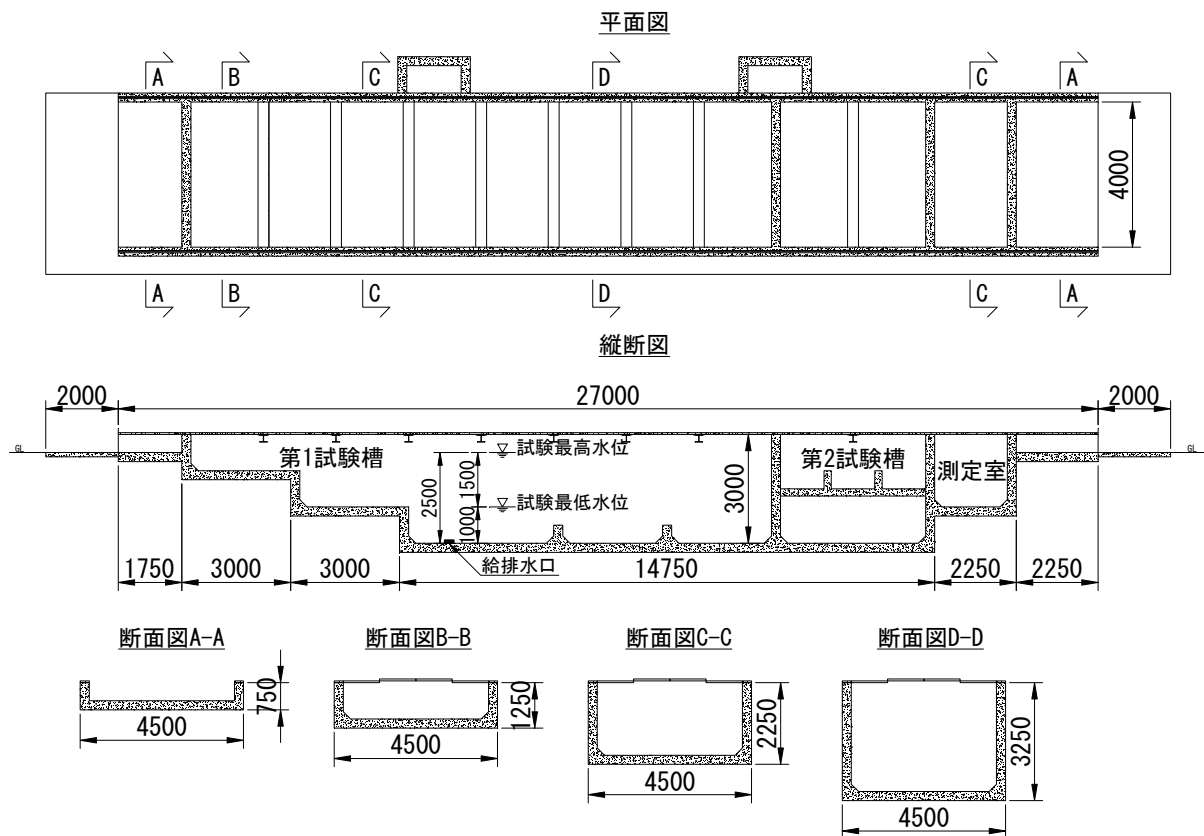


図-1 RC水槽形状図・配筋図

2. 調査概要

2.1 RC水槽の仕様

RC水槽の形状図を図-1に示す。なお、使用された鉄筋は主にD13およびD10、設計かぶり厚は50mmとなっている。ただし、コンクリートの強度や配合、および使用された鉄筋の力学特性等に関する詳細は不明である。また、RC水槽では自然海水による干満を1日2回再現している。

2.2 調査項目

RC水槽で実施した調査の主な項目を表-1に示す。調査項目の選定にあたっては、主に港湾RC構造物に対して実施される調査項目を参考にした。

表-1 調査項目

| 調査項目 | 基準 |
|----------|-----------------|
| 目視調査 | — |
| 鉄筋腐食調査 | はつりによる |
| 配合推定 | セメント協会法 |
| 圧縮強度試験 | JIS A 1107 |
| 中性化深さ | JIS A 1152 |
| 自然電位測定 | JSCE-E 601-2007 |
| 分極抵抗測定 | — |
| 塩化物イオン濃度 | JIS A 1154 |

3. 調査結果

3.1 目視調査および鉄筋腐食調査

代表的な位置での目視調査結果を写真-2, 3および図-2に示す。また、同位置においてコンクリートのはつり取りによる鉄筋腐食調査を行っている。

亀裂や浮き、欠損、錆汁の滲み出しなどの劣化は、一部の干満部壁面に集中して発生していた。

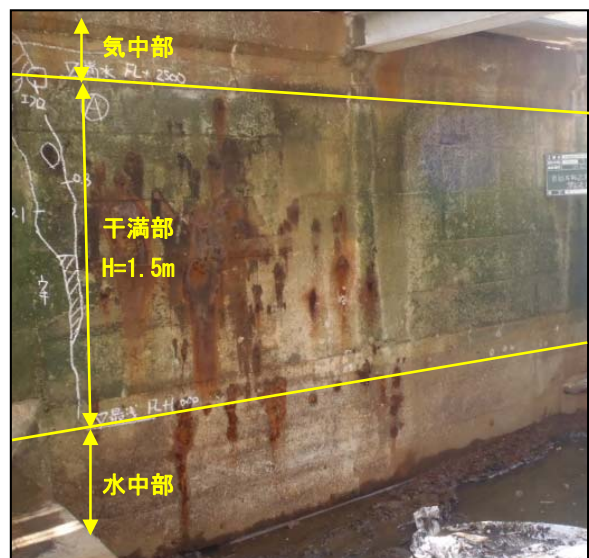


写真-2 RC水槽内の劣化状況

コンクリートのはつり取りによる鉄筋腐食調査結果を図-3および写真-4~6に示す。壁面に錆汁の滲み出しがある等の劣化が生じていた箇所のかぶり厚は30mm~40mm程度しかなく、鉄筋は著しい腐食により消失している状態であった。劣化が生じていない箇所のかぶり厚さは50mm~90mm程度であり、劣化が生じていた箇所と比較すると平均20mm程度厚い結果であった。

今回の劣化の顕在化は、鉄筋の重ね継手の有無の影響が大きく、継手の存在によって、結果として、かぶり不足となっている箇所では劣化の発生が著しく、かぶりが十分だった箇所では番線も腐食せず健全であった。



写真-3 劣化部分の状況 (写真-2 と同一位置)

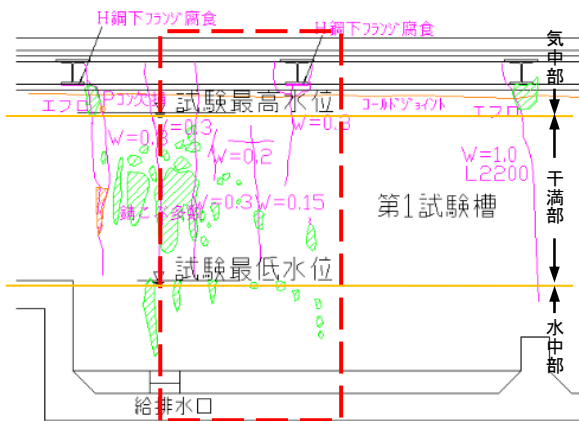


図-2 劣化状況図 (写真-2, 3 と同一位置)

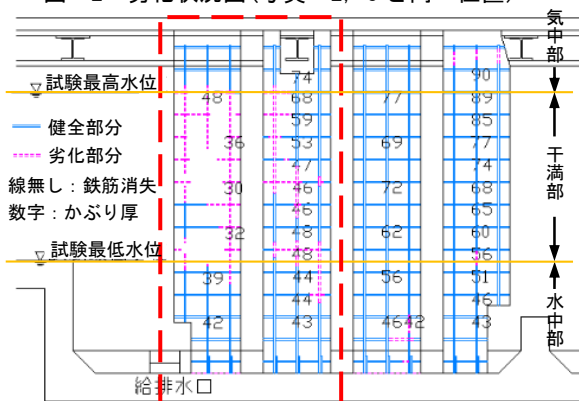


図-3 鉄筋腐食状況図

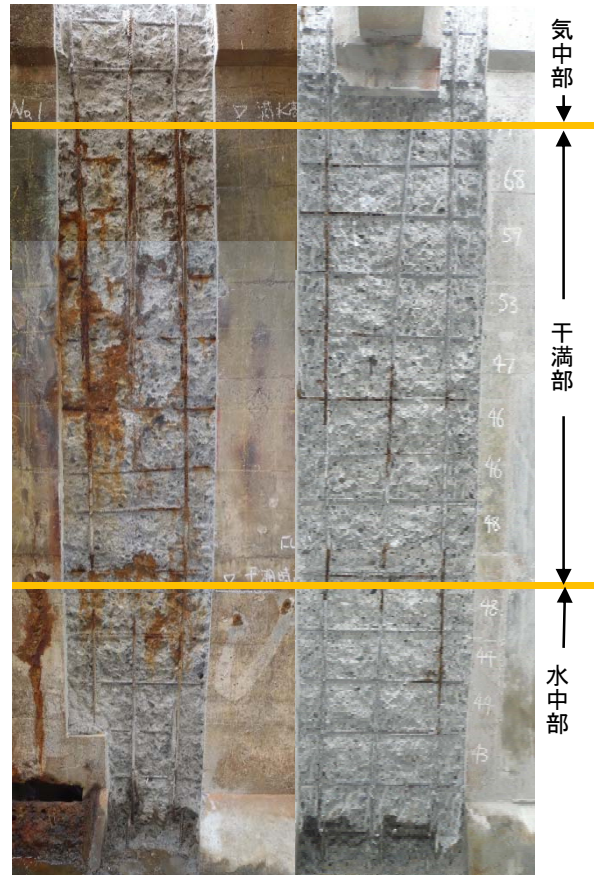


写真-4 鉄筋腐食状況 (図-2, 3 赤点線囲み部分)



写真-5 劣化部の鉄筋腐食状況 (重ね継手部分)



写真-6 劣化部の鉄筋腐食状況

3.2 配合推定

使用されたコンクリートの配合が不明であるため、セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18 『硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告』による配合推定試験から単位セメント量および単位水量を算定した。配合推定の結果および配合推定から算定した水セメント比を表-2に示す。

表-2 配合推定結果および水セメント比

| 部位 | 配合推定結果 | | 水セメント比 | |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|------------|
| | セメント量 (kg/m ³) | 骨材量 (kg/m ³) | 差引法 (%) | 強熱法 (%) |
| 気中部 | 281 | 1938 | 55.2 | 59.8 |
| 干満部 (上部) | 313 | 1844 | 57.6 | 58.5 |
| 干満部 (下部) | 307 | 1863 | 55.2 | 56.6 |
| 水中部 | 297 | 1851 | 68.9 | 61.5 |

3.3 圧縮強度

RC 水槽壁面部の気中部、干満部、水中部から直径φ100mmのコア抜きを行い、JIS A 1107に基づくコンクリートコアの圧縮強度試験を行った。結果を表-3に示す。いずれの部位も平均値が40N/mm²を越える結果となり、強度は十分保有していることが判明した。

表-3 コンクリートコアの圧縮強度試験結果

| 部位 | No. | 圧縮強度 (N/mm ²) | 平均圧縮強度 (N/mm ²) |
|-----|-----|------------------------------|--------------------------------|
| 気中部 | 1 | 41.7 | 41.6 |
| | 2 | 40.4 | |
| | 3 | 42.6 | |
| 干満部 | 1 | 42.6 | 49.4 |
| | 2 | 54.2 | |
| | 3 | 52.4 | |
| | 4 | 55.5 | |
| | 5 | 50.3 | |
| | 6 | 41.2 | |
| 水中部 | 1 | 41.4 | 45.1 |
| | 2 | 36.9 | |
| | 3 | 56.9 | |

3.4 中性化深さ

RC 水槽壁面部の気中部、干満部、水中部から直径φ

100mmのコアを採取し、JIS A 1152に基づく中性化深さの測定を実施した。結果を表-4および写真-7に示す。

その結果、気中部は他の環境と比較すると中性化が進行していたが、水槽内のコンクリート内部は含水率が高い状態であったため、著しい中性化の進行は見られなかったと考えられる。干満部は1日2回干満が繰り返されているがコンクリート中の湿潤が保たれた状態であったため、他の環境と比較して中性化が進行しなかったことが考えられる。水中部は、常時海水に浸水していることでセメント水和物中のカルシウム分が溶出し pH が低下したと考えられる。なお、水セメント比45~53%の試験体を5~30年間、干満もしくは海中で暴露した結果、中性化深さと劣化深さ(ピッカース硬さの低下範囲)は概ね一致するという報告¹⁾があるため、本コンクリートの劣化も表層付近までの可能性がある。

表-4 中性化深さ試験結果

| 部位 | 中性化深さ |
|---------|-------|
| 気中部 | 7.0mm |
| 干満部(上部) | 3.0mm |
| 干満部(下部) | 2.0mm |
| 水中部 | 5.0mm |



写真-7 中性化深さ試験結果(気中部)

3.5 塩化物イオン濃度

RC 水槽壁面部の気中部、干満部、水中部から直径φ100mm長さ200mmのコア抜きを各3本ずつ行い、JIS A 1154に基づく硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度の測定(電位差滴定法)を行った。なお、測定は表面から10mm毎とし、60mmの深さまで行った。結果を図-4に示す。

設計での鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度は水中部で最も高く、気中部では2.0kg/m³程度であった。また、干満部(下部)では他の環境と比較すると、鉄筋位置周辺におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度にばらつきがみられた。また、水中部の塩化物イオン濃度分布は、表面付近からコンクリート奥行き方向

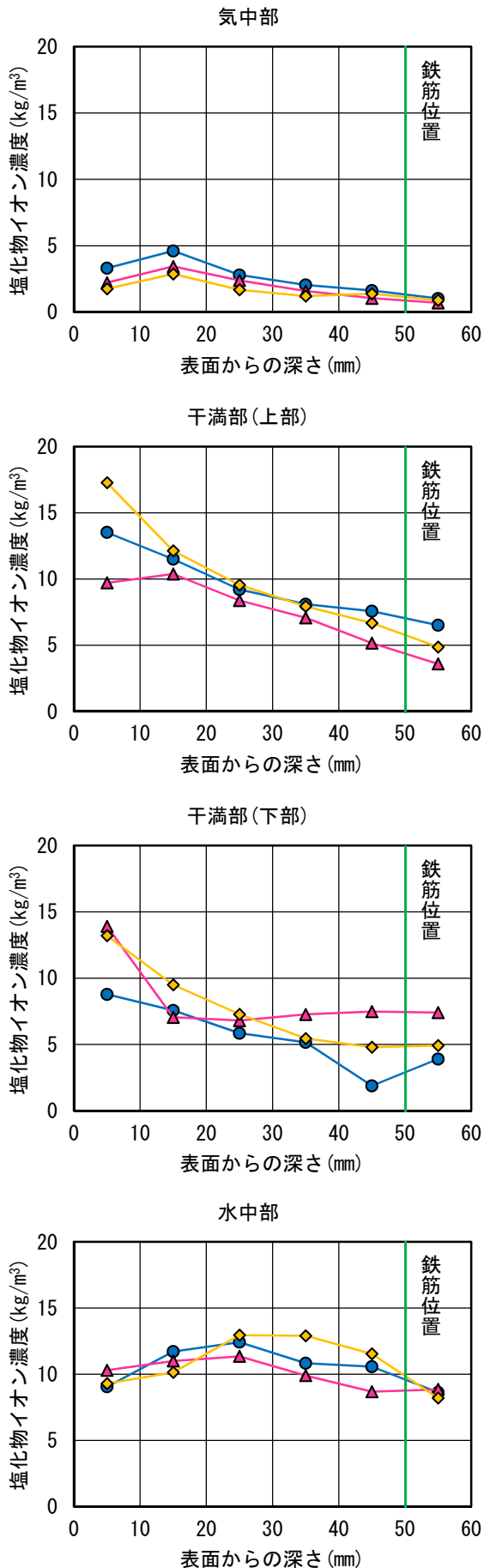


図-4 塩化物イオン濃度測定結果

までほぼ一定な分布を示していた。これより水中部ではコンクリート中の塩化物イオン濃度がほぼ飽和状態となっていることが推察される。

3.6 自然電位・分極抵抗

RC水槽壁面部において、JSCE-E 601-2007に基づく自然電位測定を実施した。鉄筋腐食調査と同一箇所での結果を図-5,劣化部と健全部における自然電位の分布を図-6に示す。なお、測定時点でのコンクリート水分計により計測した表面含水率は6.3%~7.4%であった。また、自然電位による鉄筋腐食性評価は、ASTM C 876によって実施している。

確認された自然電位は-400~-700mv程度であり、ASTM C 876を用いて評価すると全ての測点で「90%以上の確率で腐食あり」となる。図-5の左側は他の箇所よりも自然電位が卑の傾向となっているが、目視調査においても劣化が顕著な部分であったため、双方の結果は一致する。また、図-6は水中部へ向かうほど卑の傾向となっているが、海水によってコンクリート内部は含水率が高い状態となっていたこと、および高い塩化物イオン濃度であったためと考えられる。また、鉄筋腐食が健全な箇所の直近に存在していたため、健全な箇所でも卑の傾向となった可能性も考えられる。

自然電位測定と同一箇所において、分極抵抗測定を実施した。その際の測定位置を図-7、測定結果を図-8に示す。なお、測定方法はACインピーダンス法でおこなっており、腐食速度の評価はCEB²⁾から提案されている判定基準を用いた。また、測定時点でのコンクリート水分計により計測した表面含水率は6.1%~7.3%であった。

測定の結果、劣化が顕著であったNo.1~13においてほとんどの結果において腐食の進行が認められる結果を示した。特に最高水位から800mmより深い位置においてCEBの判定基準で評価すると「中から高程度の腐食速度」もしくは「激しい、高い腐食速度」となり、目視調査で鉄筋の腐食が確認された位置と概ね一致した。またその他の位置では「低から中程度の腐食速度」となっており、この結果についても概ね一致していると言える。

No.14~26においては全てにおいて「不動態状態(腐食なし)」となり、この結果についても目視調査で「健全な状態」と確認された位置と概ね一致した。

3.1で確認したとおり、鉄筋腐食は一部の干満部壁面に集中して発生し、他の環境では見られなかった。干満部と水中部で鉄筋腐食の発生に相違が生じた要因は、重ね継手の存在によるかぶり厚の差に加えて、コンクリート中の湿潤状態による酸素の供給の差が考えられる。また、マクロセルの形成により一部で鉄筋腐食が促進され、その他の箇所では鉄筋腐食が抑制された可能性が考えられる。

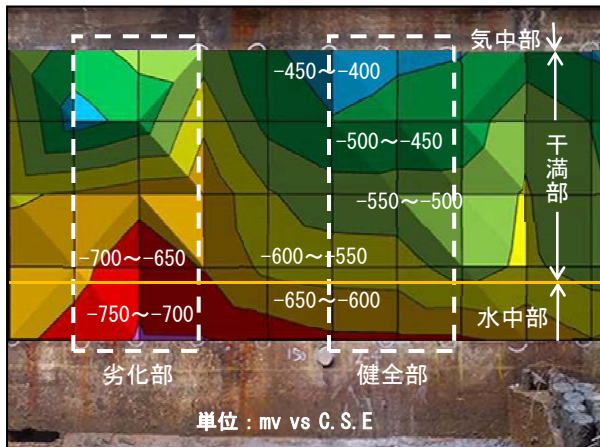


図-5 自然電位測定結果

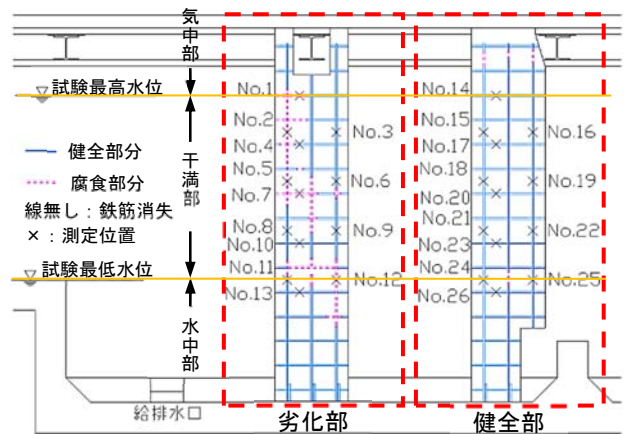


図-7 分極抵抗測定箇所

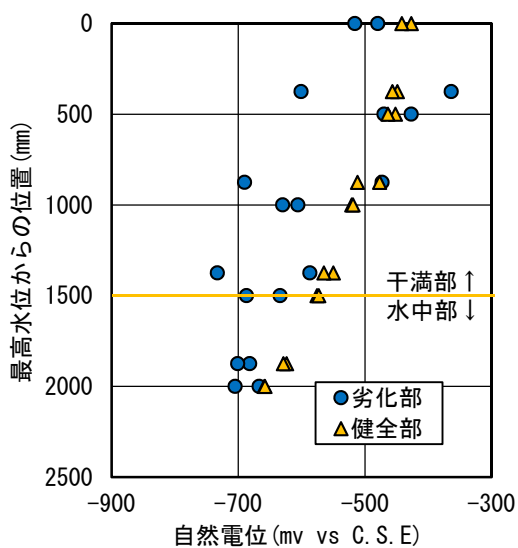


図-6 劣化部と健全部の自然電位測定結果

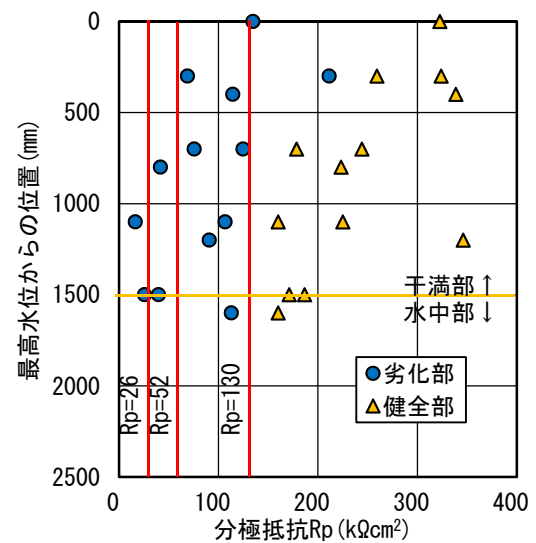


図-8 分極抵抗測定結果

4. まとめ

46年間波浪等の外力を受けず供用したRC水槽の劣化状況等の現況について調査した。

調査結果から、以下の事が考えられた。

- (1) 壁面の劣化の顕在化は、鉄筋の重ね継手の存在によってかぶり不足となり、鉄筋腐食の発生が著しくなったためと考えられる。
- (2) 干満部と水中部で鉄筋腐食の発生に相違が生じた要因は、重ね継手の存在によるかぶり厚の差に加えて、コンクリート中の湿潤状態による酸素の供給の差が考えられる。また、マクロセルの形成により一部で鉄筋腐食が促進され、その他の箇所では鉄筋腐食が抑制された可能性が考えられる。

以上のことから、RC水槽の劣化はかぶり厚およびコンクリート中の湿潤状態に大きく影響を受けていると考えられる。

今回の結果は、46年間供用した鉄筋コンクリート水槽の劣化状況等の現況を報告したものであり、これまでの類似調査等で判明している結果に大きく影響を与えるものではない。しかし、長期供用した実構造物から得られた本研究の各種データは、海洋環境下におけるRC構造物の長期耐久性に関する貴重な資料を提供するものであると考えている。

参考文献

- 1) 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 山田一夫: 海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.21-37, 2010
- 2) 土木学会: コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書, pp.184, 2009.10