

論文

[1111] PC 橋の鋼材腐食評価法について

正会員 大城 武 (琉球大学建設工学科)
 野里耕正 (沖縄総合事務局開発建設部)
 風間 洋 (沖縄建設弘済会)
 正会員〇後藤信弘 (新日本製鐵鉄鋼研究所)

1. はじめに

近年、塩害による鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が顕在化し、社会問題となっている。特に、沖縄県は海に囲まれ台風の常襲地であるため、多くのコンクリート構造物が海水滴および飛塩粒子などの影響を受けている。また、コンクリートの細骨材として海砂を使用しているが、過去には十分な除塩なしで使用したため、海砂に付着した塩分の影響が大きく現れている。さらに、鋼材の腐食を促進させている要因には高温多湿の環境条件も挙げられる。

このような塩害環境により著しい損傷を受けた構造物は補修・補強が必要となるが、損傷が外観的に認められず、かつ供用中である構造物の場合は、精度の高い非破壊検査手法を用いて現在および将来の劣化状況を把握し、補修時期およびその方法を予測する必要がある。

本研究は、塩害による構造物の劣化過程を解明し、外観的に損傷が現時点で認められないPC橋の塩害を予測するための評価基準を明確にすること、また、補修時期および補修工法等を設定する際の基礎資料を得ることを目的としている [1]。ここでは、電気化学的調査 (鋼材の自然電位測定、分極抵抗測定およびコンクリート抵抗測定) と含有塩分量測定を、促進試験供試体および実橋梁に対して行い、鋼材の発錆状況の評価を行っている。

2. 試験概要

2.1 促進試験

促進試験は、自然環境下で比較的長い期間を要するコンクリート中の鉄筋の腐食状況および塩分量の変化過程を、人工的に短期間で作り出すものである。本研究では、この促進試験結果を基礎データとし実橋梁の劣化過程の評価を行っている。

供試体のコンクリートの塩分量 (C l⁻ 量) は 0.6 kg/m³ と、1.5 kg/m³ の 2 種類で、それぞれを A 供試体および B 供試体とする。水セメント比は 40%、供試体寸法は 15 cm X 15 cm X 60 cm であり、鉄筋 (SD30-φ13) を 35 mm のかぶり で 2 本埋め込んでいる。

促進条件は、1 サイクルとして温度 55℃ の塩水 (3% NaCl) を 48 時間噴霧、同温で 24 時間乾燥している。所定のサイクル毎に自然電位 (E_{corr})、分極抵抗 (R_p) およびコンクリート抵抗 (R_s) 等の電気化学的特性値を交流インピーダンス法にて測定している。コンクリート抵抗は交流周波数 400 Hz を用いたときのインピーダンスとし、分極抵抗には交流周波数 0.25 Hz と 400 Hz 時のインピーダンスの差を用いている。これらの周波数の値はフィールドでの測定時間の効率と工学的判断から決定している。コンクリート抵抗および分極抵抗の測定値は、鉄筋径・かぶり・コンクリート抵抗・使用交流周波数などによる測定電流の分布を FEM 解析で求め、単位面積当りの抵抗値に換算している [2]。また、解体する供試体から、コアを採取し可溶性塩分量の測定を行い [3]、さらに発錆面積は内部の鉄筋を取

り出し、発錆部分をマイラー紙にトレースし、その面積をプランメータで測定して、全面積に対する面積率を算出している。

2.2 実橋梁試験

現在、沖縄県内で供用中のPC橋の中で異なる塩害環境を考慮し、外観的に塩害劣化の無い2橋（第二北前橋、佐手橋）と塩害を受けた補修対象の1橋（平南橋）を対象としている。第二北前橋は1980年架設され、海岸から150mに位置し、海水飛沫を直接受けることはない。従って外観的な損傷は全く観察されない状況である。一方、佐手橋は1983年に架設された橋で、海岸からの距離は70mである。塩害環境はやや厳しく、飛塩粒子の影響は大きい。また、平南橋は1981年の架設で、海岸に近接して厳しい塩害環境と考えられる。この橋梁では、施工時にかぶりの確保が不十分であった部位で鉄筋が腐食し、クラックおよびコンクリートの剝離が発生し、局部的には損傷が大きく補修対象の橋梁となっている。

これらの橋梁の桁側面について、自然電位（ E_{corr} ）、分極抵抗（ R_p ）およびコンクリート抵抗（ R_s ）を測定している。また、測定位置でコンクリートのコアを採取し、含有塩分量（全塩分）の測定も実施している[3]。

3. 試験結果および考察

3.1 促進試験

現在、A、B供試体ともに16本の試験を完了している。電気化学的特性値（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）の測定は、各供試体に埋設された2本の鉄筋について、各々2カ所で行っている。A、B供試体の測定結果の内、代表的な例を図1、2に示す。測定結果はA、B各供試体共にそれぞれ同様の傾向を示し、特に大きな差異は見られない。測定結果の共通的な傾向を以下に記述する。

(1) 自然電位 (mV vs Ag/AgCl)

20サイクルまでは、 $-100 \sim -200$ mVの範囲で比較的貴な値を示しているが、B供試体は初期塩分量に対応して僅かに卑な傾向を示す。20サイクルを超えた時点で著しく卑に移行し、40サイクルでは $-300 \sim -400$ mVに達している。40~60サイクル間でさらに卑に移行し、それ以降のサイクルでは -400 mV~ -500 mVの範囲で分布している。

(2) 分極抵抗 ($K\Omega \cdot cm^2$)

分極抵抗の変化はサイクル数の増加に伴い大きく3つの領域（健全域、遷移域、活性域）に分類できる。40サイクルまでを健全域と分類する。ここでは、大きな分極抵抗を現しているが、測定値に大きな変動幅が生じている。特に大きな値を除外するとほぼ $10 \sim 15 K\Omega \cdot cm^2$ の範囲に分散している。40~60サイクル間の遷移域は分極抵抗が著しく減少する区間で、

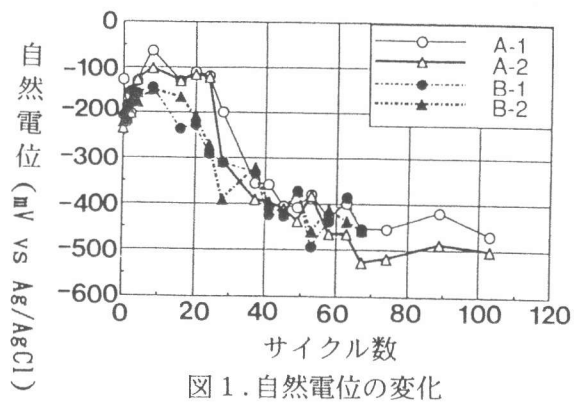


図1. 自然電位の変化

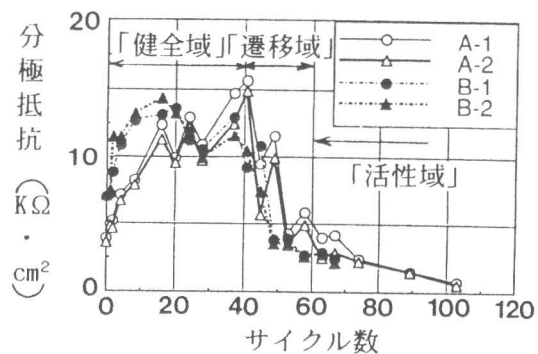


図2. 分極抵抗の変化

60サイクル以上の活性域の領域では低い値となっている。この区間では分極抵抗が1.0～5.0KΩ・cm²に分布し、サイクル数の増加に伴って徐々に低下する傾向を示している。

(3) コンクリート抵抗 (KΩ・cm²)

分極抵抗と同様に、40サイクルまでは10～20KΩ・cm²の範囲に分布し、40サイクル以降から減少の傾向を示し、70サイクルでは10KΩ・cm²のレベルに達している。測定が十分な湿潤状態で行われているため、測定結果は後述の実橋梁に比べ小さな値となっている。

(4) 塩分量分析試験

4、8、12、16、29、33、41、50サイクル終了時にコアを採取し、可溶性塩分量の増加過程を調べた。代表的な例として、6つのサイクル時の塩分量分析結果を図3に示す。

A供試体の表層(0～10mm)の塩分量は、外部からの浸透により4サイクル終了時点で0.34%に達し、早期に表面濃度が増加することがわかる。サイクル数の増加に伴い表層部の濃度は増加し、また、内部へ拡散が進行している。鉄筋周辺部(30～40mm)では33サイクル時に0.1%に達し、その後、塩分量は増加し、50サイクル時には0.12%になっている。

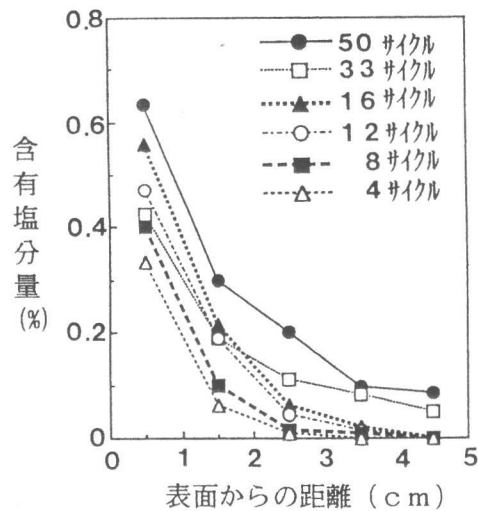


図3.含有塩分量の分布 (A供試体)

B供試体は、初期混入塩分量1.5kg/m³ (Cl⁻量)を含有している。この値はコンクリート重量に換算して0.1% (全塩分量)に等価となる。本試験で検出された可溶性塩分量は0.05%であり、全塩分量の50%が複塩として固定化している。この初期混入塩分量をベースに外部からの浸透塩分量が加算された分布形状となっている。

A、B供試体ともに29サイクル以降には鉄筋周辺で0.1%に達する塩分環境下であり、鉄筋の発錆限界に達している[4]。この塩分量に起因して自然電位および分極抵抗に変化をもたらしたと考えられる。

(5) 鉄筋の発錆面積率

A、B供試体の各々1体を29、33、41、50サイクル終了時に解体し、発錆面積の全面積に対する発錆面積率を求めた。

A供試体では、29サイクル時に微細な点錆が観察されるが、錆面積の測定は不可能である。33サイクルで4測定点中1カ所に12.4%が観察され、局所的な錆が現れている。41サイクル時に4測定点中3カ所で12.6、2.3、1.6%が現れ錆の拡大が認められている。

B供試体はA供試体よりも早期に錆が生じ、29サイクルで4測定点中2カ所に14.7%、18.4%が現れている。33サイクル時には1測定点で3.9%が確認され、41サイクル時には4測定点に0.8%、16.9%、20.4%、21.2%と広範囲に錆が認められる。

発錆面積率と分極抵抗との関係を図4に示す。

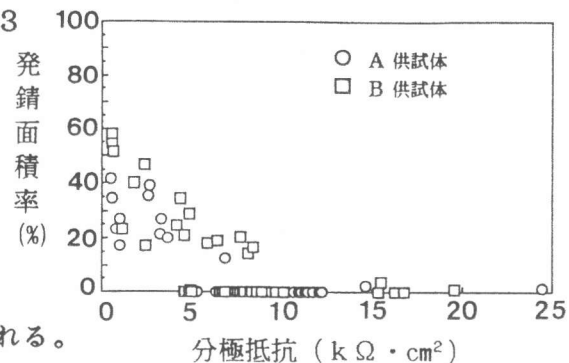


図4.分極抵抗と発錆面積率の関係

測定データが少なく相関式の誘導は難しいが、既報の結果 [5]と同様の範囲に分布している。この図において活性域、遷移域、健全域は、それぞれ腐食大、腐食中から小、腐食微小あるいは腐食無しに対応していると考えられる。

3.2 実橋梁試験

(1) 電気化学的特性値

塩害環境の異なるPC橋について、電気化学的特性値（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）の測定結果を図5～7に示す。図中の縦軸の数字1、2、3はウェブ、4はハンチ、5は下フランジ側面の測定位置を示している。横軸は橋軸方向のスターラップの位置を示している。

最も塩害環境の穏やかな第二北前橋について、自然電位は110～2mV（CSE換算、-10～-122mV）と貴な値を示している。分極抵抗は、ウェブで13～17KΩ・cm²、ハンチで6～10KΩ・cm²、下フランジで11～17KΩ・cm²と高い値を示している。コンクリート抵抗も、ウェブで55～99KΩ・cm²、ハンチで39～60KΩ・cm²、下フランジで110～124KΩ・cm²と高い値を示している。これらの特性値から、現時点で塩害は受けておらず、健全な状態であると推定される。この橋梁の含有塩分量は図8に示すように小さい値であり、塩害を受けにくい環境条件下にある。また、コンクリートをはつり目視観察したところ発錆は全く認められなかった。

海岸より70m離れた佐手橋については、外観的には塩害の損傷劣化は無いが、季節風の影響を受け易く、飛塩粒子を多く受ける位置にある。自然電位は、+80～0mV（CSE換算、-40～-120mV）と上記の第二北前橋と同様に貴な値を示している。分極抵抗は、ウェブで4.5～8KΩ・cm²、ハンチで5～9KΩ・cm²、下フランジで5～7KΩ・cm²と小さくなる傾向を示している。コンクリート抵抗は、ウェブで40～60KΩ・cm²、ハンチで40～60KΩ・cm²、下フランジで40～80KΩ・cm²の範囲の値を示している。鉄筋の腐食状況を確認するために目視観察を行ったところ健全な状態であった。

平南橋は最も海岸に隣接しているが、桁高が高く直接海水飛沫は受けることはない。しかし、飛塩粒子の影響は著しく大きい。かぶりの薄い部位でコンクリートの剝離およびひびわれの発生があり、補修対象の橋梁となっている。自然電位は、-70～-195mV（CSE換算、-190～-315mV）と卑な値を示している。分極抵抗は、ウェブで0.7～4.5KΩ・cm²、下フランジで1.9～3.8KΩ・cm²に分布しており、前述の他の2橋に比較して著しく小さ

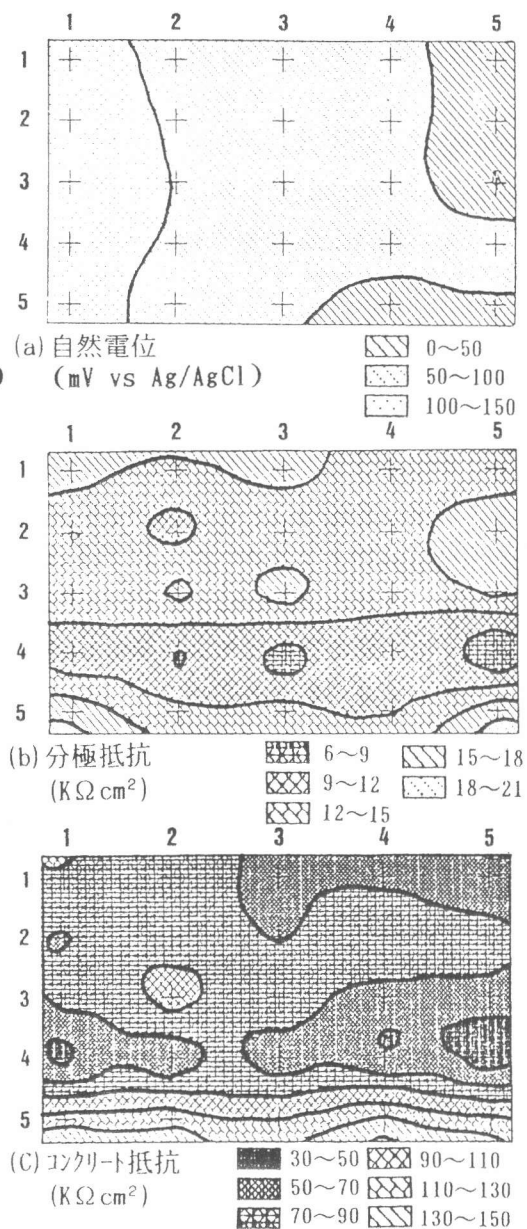
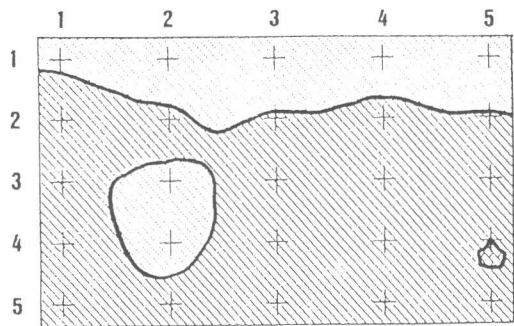
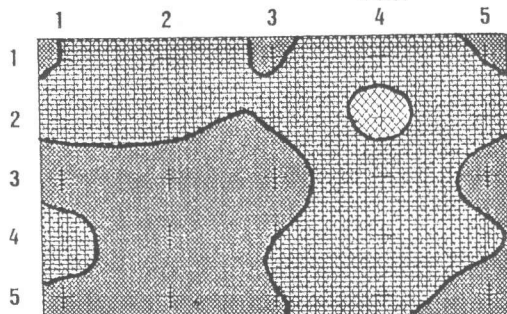


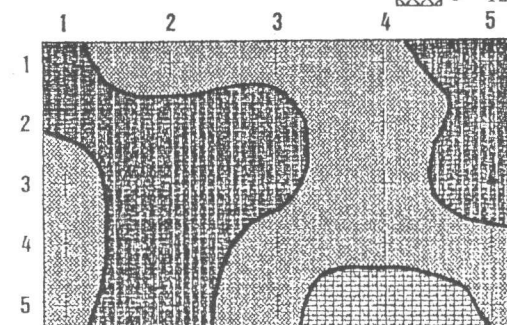
図5. 実橋梁測定結果（第2北前橋）



(a) 自然電位
(mV vs Ag/AgCl)

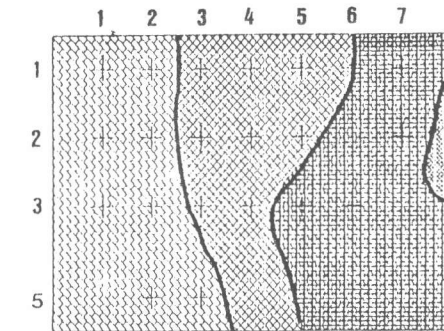


(b) 分極抵抗
(KΩ cm²)

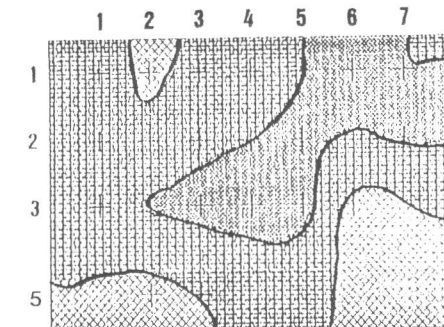


(c) コンクリート抵抗
(KΩ cm²)

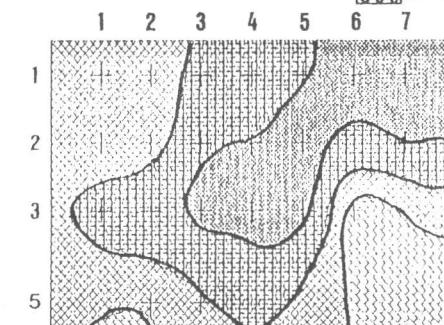
図6. 実橋梁測定結果 (佐手橋)



(a) 自然電位
(mV vs Ag/AgCl)



(b) 分極抵抗
(KΩ cm²)



(c) コンクリート抵抗
(KΩ cm²)

図7. 実橋梁測定結果 (平南橋)

いことは注目される。コンクリート抵抗は、ウェブで16~35KΩ・cm²、下フランジで34~45KΩ・cm²で、これらの値も他の橋梁に比して小さい。この原因としては、コンクリート中の含有塩分量が大きく、また結露による湿潤状態の環境要因が考えられる。測定点の鉄筋の目視観察を行ったところ、スターラップは全面錆の状態であった。このことは、分極抵抗が2.5KΩ・cm²以下になった場合には、発錆面積が大きいことを示している。

分極抵抗に関し、実橋梁および促進試験の結果を比較して考察する。促進試験結果に対応して各橋梁の発錆程度を推測すると、第二北前橋の6~17KΩ・cm²は健全状態を示しているが、佐手橋の4.5~9KΩ・cm²は健全な状態から活性域に移行する段階である。平南橋の0.7~4.5KΩ・cm²は促進試験の最終段階のサイクルに現れる活性域を示している。実橋梁の観察結果より、この領域の分極抵抗は、鉄筋表面の広範囲な発錆状況を示すものと考えられる。

(2) 含有塩分量

塩分量分析結果を図8に示した。ここでは、全塩分量 (NaCl%) の分析結果を示している。塩害環境の厳しくない第二北前橋および佐手橋については、表層部で0.15%を示しているが、20~40mmにおいては外部からの浸透塩分量は検出されていない。一方、平南橋については、著しい浸透塩分量が検出され、鉄筋位置の30~40mmにおいては0.1%に達しており、この量は鉄筋の発錆限界と考えられる[4]。この高濃度の塩分量が前述の発錆原因と考えられる。

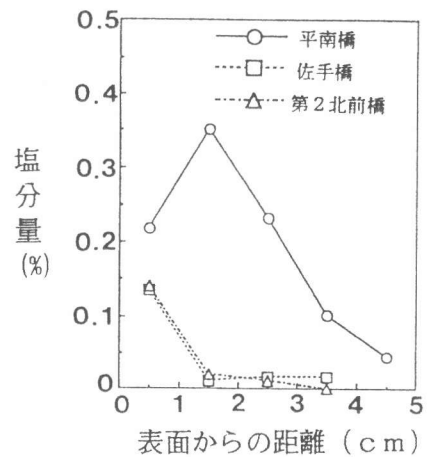


図8. 塩分量の分布 (実橋梁)

4. まとめ

本研究では、塩害によるPC橋の劣化過程を解明するため、電気化学的試験と含有塩分量分析試験を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 塩害による劣化過程は、促進試験における分極抵抗の測定結果から大きく「健全域」「遷移域」「活性域」の3領域に区分できる。この領域はA供試体 (Cl⁻量0.6 kg/m³) およびB供試体 (Cl⁻量1.5 kg/m³) のいずれに対してもほぼ同じサイクルで分類できる。
- (2) 塩分量分析試験結果において、鉄筋周辺部の含有塩分量が発錆限界量に達するサイクル数は、電気化学的特性値の劣化過程の「遷移域」と一致する。このことは、電気化学的特性値が塩害による劣化過程を定量的に把握していることを示している。
- (3) 塩害環境の異なる実橋梁の電気化学的特性値の測定結果から、劣化状況の評価が可能となっている。測定結果の劣化評価は、目視による鉄筋腐食観察結果と対応している。更に、促進試験の発錆面積率と分極抵抗の相関性から、電気化学的特性値による劣化状況の定量的評価の可能性が示唆されている。

参考文献

- 1) 大城 武、野瀬耕正、風間 洋、三田俊一郎：コンクリート橋の塩害対策に関する調査・研究、コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム、コンクリート工学協会、pp115-120、1991
- 2) 後藤信弘、松岡和巳、伊藤 毅：交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング、コンクリート工学年次論文報告集、pp527-532、1990.6
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)、1987
- 4) 宮川豊章：Early Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete、京都大学博士論文、1985
- 5) T.Oshiro, S.Tanikawa, N.Goto: A Study on Durability of Structures Exposed to Marine Environment, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, ACI SP-128, pp433-447, 1991.12