

## 断面補修を行ったRC橋の塩害環境下における鋼材腐食に関する考察

佐川, 康貴  
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

森川, 亮太  
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

濱田, 秀則  
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

<https://hdl.handle.net/2324/15630>

---

出版情報：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集．9，pp.97-102，2009-10-30.  
日本材料学会  
バージョン：  
権利関係：

## 断面補修を行った RC 橋の塩害環境下における鋼材腐食に関する考察

佐川 康貴<sup>\*1</sup>, 森川 亮太<sup>\*2</sup>, 濱田 秀則<sup>\*3</sup>

## A Study on Steel Corrosion of Repaired RC Bridge under Chloride Attack Environment

Yasutaka SAGAWA<sup>\*1</sup>, Ryota MORIKAWA<sup>\*2</sup>, and Hidenori HAMADA<sup>\*3</sup>

**要旨：** 本研究では、九州北部の日本海側に位置する RC 海上橋（供用期間約 75 年）が塩害に起因する劣化を受け、解体されるのに伴い、鉄筋の自然電位および分極抵抗を計測し、非破壊的に腐食状況を調査するとともに、はつり調査を行い実際の腐食状況と比較した。その結果、電気化学的手法の結果からは腐食の程度は小さいと推定されたが、はつり調査の結果では腐食が認められた。また、断面補修モルタルの全塩化物イオン濃度を測定した結果、桁側面よりも桁下面の方が表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見掛けの拡散係数が高くなった。

**キーワード：** 腐食、自然電位、分極抵抗、全塩化物イオン濃度、拡散係数

## 1. はじめに

わが国では、戦後の経済成長とともに社会基盤構造物の整備も着実に行われ、現在では膨大なストックが蓄積されている。構造物の維持管理を行うにあたり、従来の事後保全的な維持管理から予防保全的な維持管理への転換を図るため、アセットマネジメントの概念が導入され、その確立に向けて自治体等による点検、修繕計画の策定等が進められている。

構造物の供用中あるいは解体された構造物について、劣化や損傷の状況を調査し、活用することは、今後の計画的な維持管理を実施する上で重要である。さらに、調査の結果は、既存構造物の維持管理のみならず、今後整備される長寿命な新設構造物を設計・施工する上で、活用が期待される。また、性能照査型の設計法に移行する中で、実構造物のデータを用いて検証す

ることは重要である。

本研究では、解体桁を用いて電気化学的手法による非破壊試験および鉄筋のはつり調査を行い、塩害環境下において供用 75 年を経た実構造物の鋼材腐食について調査および考察を行った。

## 2. 調査構造物の概要

本研究で調査の対象とした S 橋は、九州北部の日本海側に位置する RC 海上橋であり、側面のうち一方は日本海に面し（以下、「外海側」）、他方は内海に面している（以下、「内海側」）。橋面下は通常は砂浜であるが、満潮時には海水が往来する。満潮面から桁下面までの高さは約 2.5～4.0m である。気象条件としては、架橋位置における記録が無く明確ではないが、年間を通して風が強く、特に冬期においては北西の季節風が卓越し、強い潮風や波しぶきを受ける状態に

\*1 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 助教

\*2 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 修士課程

\*3 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 准教授

ある。

本橋は 1932 年に架設され、1967 年には活荷重の増加に伴い、セメントモルタルを用いた桁断面の増厚および主鉄筋の追加による補修、補強が行われた。1974 年には PC 橋が併設され、PC 部が車道として、RC 部が歩道として供用されてきたものの、塩害による劣化が著しく、建設から約 75 年で解体された。

### 3. 試験体の諸元

図-1 に示す RC 部より、ウェブ幅 470mm、フランジ幅 1000mm、桁高 970mm、橋軸方向長さ約 1000mm となるよう、ワイヤーソーを用いて切断し、試験体を採取した。表面観察の結果、補修モルタルの表面には、曲げひび割れあるいは鋼材腐食によるものと推測されるひび割れが全体的に分布している状況が認められた。

調査を行った RC 桁試験体の断面の状況を図-2 に示す。図には標準的な寸法を示している。主鉄筋は、丸鋼φ25 の 2 段配筋（計 8 本）であった。ウェブは吹付けセメントモルタルによる断面補修（図中の斜線部）が行われており、その厚さは下面で約 200mm、側面で約 70~80mm であった。主鉄筋として用いられた丸鋼のうち上段鉄筋付近までコンクリートのはつりが行われていた。断面補修の際に主鉄筋の最下段に異形棒鋼 D29 が 4 本追加されていた。

### 4. 調査項目

本研究では、携帯型腐食診断器を用い、照合電極に飽和銀/塩化銀電極を用いて、自然電位と分極抵抗を測定した。なお、測定前日には桁に散水し、湿布で覆った。測定中も随時散水し、コンクリートを湿潤にした状態で測定を行った。測定は、内海側の異形棒鋼（以下「内海異形」）、外海側の異形棒鋼（以下「外海異形」）、および丸鋼 2 本（以下「外海中段丸鋼」、「外海上段丸鋼」）の計 4 本を対象として行った。測点は、それぞれ橋軸方向に 100mm 程度の間隔で微細ひび割れを避けて設定した。

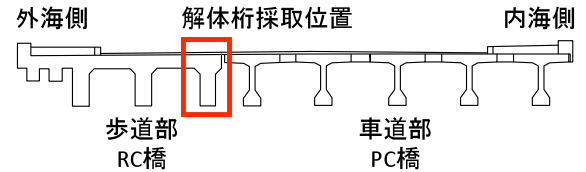


図-1 解体桁採取位置

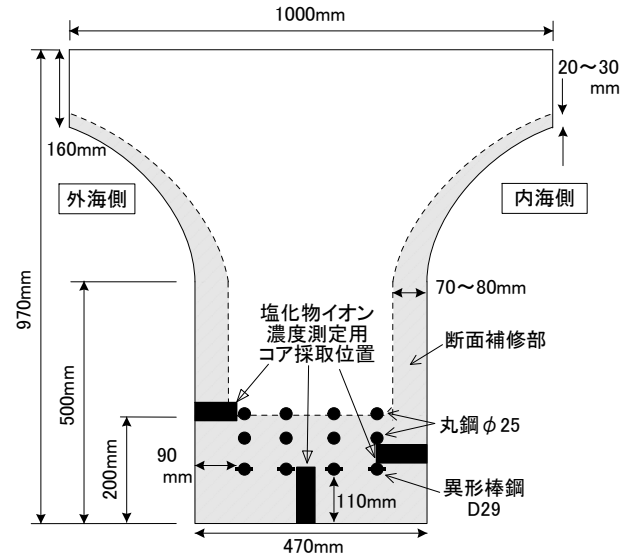


図-2 試験体断面状況

自然電位および分極抵抗の測定後、ブレーカーにより桁表面のモルタルをはつり取り、外海異形、外海中段丸鋼、および外海上段丸鋼の計 3 本の鉄筋を採取した。また、丸鋼についてはノギスを用いて直径の測定を行った。また、桁側面および桁下面からコアを採取し、モルタルの全塩化物イオン濃度を、JIS A 1154「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」に従い測定した。

### 5. 調査結果および考察

#### 5.1 電気化学的性質

図-3 に飽和硫酸銅電極(CSE)の電位に換算した自然電位の測定結果を示す。図中の破線は、ASTM C 876 による判定基準（表-1）のうち、しきい値である-200mV および-350mV を示している。ASTM の判定基準によると、丸鋼は全て「90%以上の確率で腐食無し」と判定された。異形棒鋼は全て「不確定」であるものの、全体的には丸鋼よりも卑（-）となった。

さらに、両側面の異形棒鋼を比較した結果、

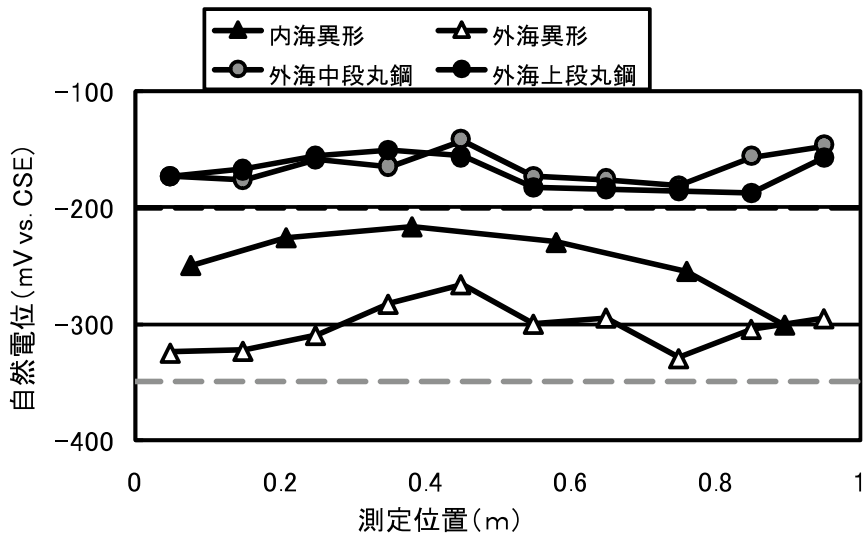


図-3 自然電位測定結果

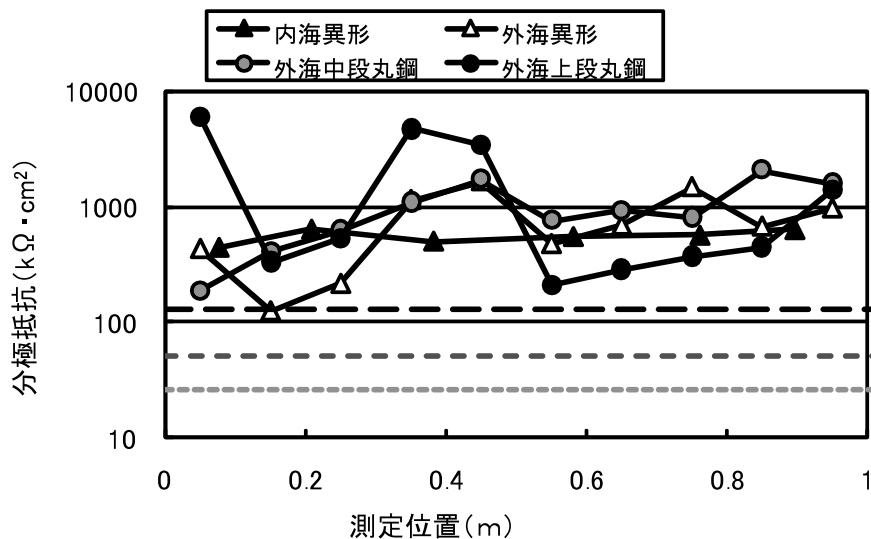


図-4 分極抵抗測定結果

表-1 ASTMによる腐食判定基準

自然電位 E (mV vs CSE)	腐食の可能性
$-350\text{mV} > E$	90%以上の確率で 腐食あり
$-200 > E > -350$	不確定
$E > -200$	90%以上の確率で 腐食なし

表-2 CEBによる腐食速度判定基準

分極抵抗 ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	腐食速度の判定
130 より大	不動態状態 (腐食なし) または極めて遅い腐食速度
52 以上 130 以下	低～中程度の腐食速度
26 以上 52 以下	中～高程度の腐食速度
26 未満	激しい, 高い腐食速度

外海側の方が自然電位は卑（-）となり、内海側より外海側の方が腐食の進行が速いと考えられた。また、外海側の丸鋼と異形棒鋼を比較すると異形棒鋼の方が自然電位は卑となり、異形

棒鋼の方が丸鋼より自然電位が卑となった。

図-4 に分極抵抗の測定結果を示す。図中の破

線は、CEBによる判定基準に示されるしきい値を示している。CEBの判定基準によると、ほぼ全ての箇所で  $130\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  より高い値を示し、「不動態状態（腐食無し）または極めて遅い腐食速度」と判定された。

以上より、自然電位および分極抵抗の測定の結果からは、丸鋼は腐食していない可能性が高いこと、異形棒鋼は腐食している可能性があるものの腐食速度は遅いことが推察された。

## 5.2 鉄筋の腐食状況

写真-1は、はつり出した鉄筋の腐食状況を示したものである。自然電位および分極抵抗の測定結果より、腐食はあまり進行していないと考えられたが、実際には腐食が生じており、特に丸鋼の腐食の程度が高いことが明らかとなった。

土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]に示される腐食のグレードと鋼材の状態<sup>1)</sup>によると、異形棒鋼は「部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。」、また、丸鋼は「断面欠損が生じている。」に相当し、特に丸鋼において実際の腐食状況と非破壊試験の判定が異なる結果となった。

このような結果となった原因として、断面補修時には丸鋼は腐食していたものの、断面補修により再び不動態被膜が形成され、自然電位が貴（+）になったことが推察される。

また、外海中段丸鋼の直径をノギスで計測した結果を図-5に示す。測定は、クエン酸水素二アンモニウム水溶液に浸漬して腐食生成物を取り除いた後に行い、コンクリート中に設置時の

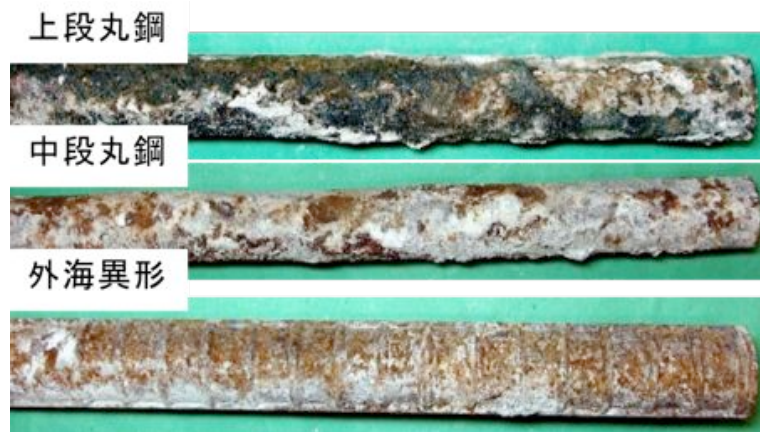


写真-2 鉄筋の腐食状況

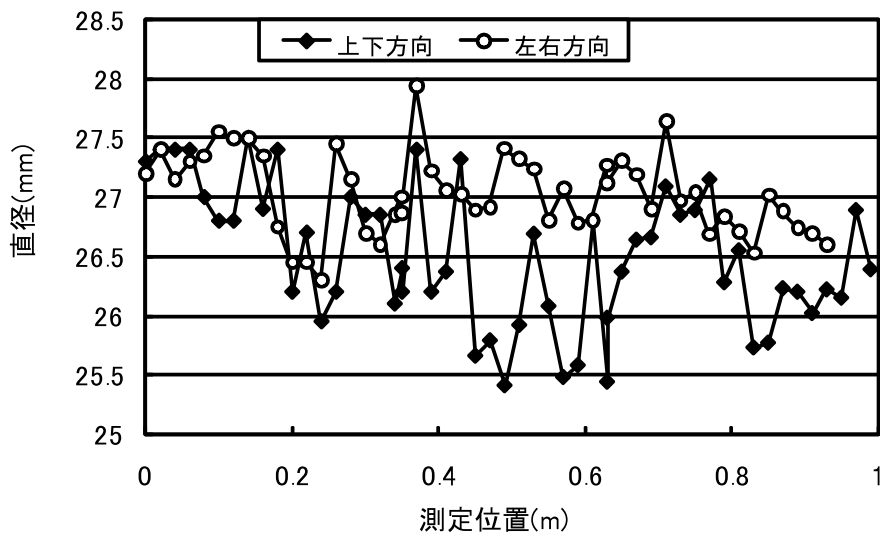


図-5 丸鋼の直径計測結果（外海中段丸鋼）

水平方向および鉛直方向の直径を測定した。

図より、水平方向より鉛直方向の直径が小さくなっており、外海上段丸鋼においても同様の傾向が見られた。建設当時の丸鋼の製造精度は不明ではあるが、鉄筋の左右方向よりも上下方向の断面減少の方が大きいと考えられる。これは、ブリーディング等により鉄筋下面に空隙が形成されやすく、腐食が生じやすいという既往の知見<sup>2)</sup>と一致する。

### 5.3 断面補修モルタルの塩化物イオン濃度

RC 桁の内海側、外海側および下面について断面補修モルタルの全塩化物イオン濃度を求めた結果を図-6 に示す。図中では、測定結果をプロットするとともに Fick の拡散方程式の解にフィッティングした近似式も併せて示している。

図より、桁下面の塩化物イオン濃度が最も高く、内海側および外海側の桁側面における塩化物イオン濃度はほぼ等しくなった。このような結果が得られた原因として、桁の曲げひび割れによる影響と本橋の立地条件による影響が考えられる。本橋は、干潮時には橋の下は砂浜であるが、満潮時には海水面となり、下面からの塩化物イオンの侵入の程度が側面よりも大きかったものと考えられる。

また、初期塩化物イオン量を考慮せず、表面塩化物イオン濃度および塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数を算出した結果を、表-3 に示す。なお、算出にあたり、供用年数は、補修が行われてから解体されるまでの 40 年として計算を行った。表より、表面塩化物イオン濃度および見掛けの拡散係数ともに、下面が最も大きくなる結果となった。

土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕は式(1)で表される水セメント比 W/C と拡散係数  $D_p$  との関係式（普通ポルトランドセメントを使用する場合）が示されている。

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (1)$$

この式(1)を用い、表-3 で得られた拡散係数が

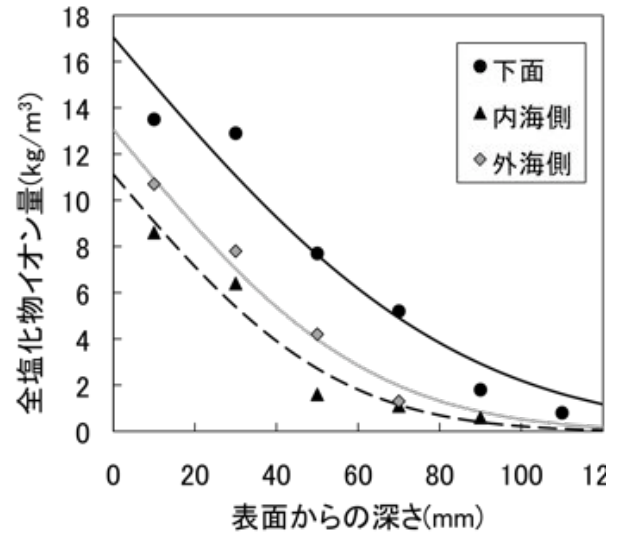


図-6 モルタルの全塩化物イオン濃度

表-3 表面塩化物イオン濃度および塩化物イオン拡散係数算定結果

部位	表面塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	塩化物イオン拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year)
下面	17.1	0.542
内海側	11.1	0.231
外海側	13.1	0.297

ら W/C を逆算すると、W/C=30~35%となる。コンクリートとモルタルとでは同一の W/C であっても拡散係数が異なると考えられるが、10<sup>-1</sup>cm<sup>2</sup>/year オーダーが得られた結果より、補修モルタルの塩分浸透抵抗性は非常に高いものであったと考えられる。実際、モルタルの圧縮強度および静弾性係数をコアの圧縮強度試験から求めた結果、それぞれ、115N/mm<sup>2</sup>、37.5kN/mm<sup>2</sup>となったことから、使用されたモルタルが緻密であったことが分かる。

しかしながら、前節までで示したように、内部の鋼材には腐食が認められ、モルタル表面には一部、腐食によると考えられるひび割れが認められた。これは、曲げひび割れからの塩化物イオンの侵入や、繰返し荷重によりコンクリートと補修モルタルとの界面の付着力が低下したこと等が原因として考えられる。

## 6. 結論

本研究では、海上橋として供用され、建設後約 35 年で断面補修が行われたにもかかわらず供用約 75 年で塩害による劣化のため解体された RC 橋について、鉄筋の自然電位および分極抵抗の測定、鉄筋のはつり調査、断面補修モルタルの塩化物イオン濃度について調査、考察を行った。本研究の範囲内で得られた結論を、以下に示す。

- (1) 自然電位を測定した結果、丸鋼よりも異形棒鋼の方が全体的に低く、丸鋼は「90%以上の確率で腐食なし」、異形棒鋼は「不確定」と判定された。また、異形棒鋼では内海側よりも外海側の方が低い結果が得られた。
- (2) 分極抵抗を測定した結果、ほぼ全ての鉄筋で「不動態状態もしくは極めて遅い腐食速度」と判定され、不動態の状態は良好であるか、腐食していてもその速度は遅いものと推察された。
- (3) 丸鋼は非破壊試験では「腐食なし」と判定されたが、はつり調査の結果、実際には腐食が認められ、非破壊試験による評価と異なった。これは、断面補修前には腐食していたものの断面補修により再び不動態が形成された等の理由により自然電位が高い状態に移ったことが原因として考えられる。

よって、電気化学的な手法を用いる場合には経時的な計測が必要である。

- (4) 丸鋼の直径を計測した結果、コンクリート内部での設置時における左右方向よりも上下方向の方が断面減少が大きい傾向が認められた。
- (5) 桁側面および桁下面において表面の塩化物イオン濃度は  $10\text{kg/m}^3$  以上の高い値を示し、満潮時には海水面が桁下に近くなるため、桁下の塩化物イオン濃度が最も高くなった。補修モルタルの塩化物イオン拡散係数は  $0.3\sim 0.6\text{cm}^2/\text{year}$  であり、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートで水セメント比  $W/C=30\sim 35\%$  に相当し、使用されたモルタルの塩分浸透抵抗性は高いことが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p.109，2007.3
- 2) Tarek Uddin Mohammed, 濱田秀則：コンクリート中の鉄筋の腐食について一長期暴露試験より得られたこと一，コンクリート工学，Vol.46, No.4, pp.23-26, 2008.4
- 3) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p.55，2007.3