

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360197  
 研究課題名 (和文) コンクリート構造物の予防保全のためのモニタリング技術の開発・研究  
 研究課題名 (英文) Research and development of monitoring technique for preventive maintenance  
 研究代表者  
 濱田 秀則 (Hamada Hidenori)  
 九州大学大学院 工学研究院 准教授  
 研究者番号：70344314

## 研究成果の概要：

本研究においては、鉄筋コンクリート構造物中の鋼材腐食を対象とし、腐食センサの開発を行うとともに、腐食モニタリング結果の LCC 評価システムへの融合を目的とした。また、コンクリート構造物の劣化環境の定量的評価方法を提案することも目的とした。

平成 19 年度～平成 20 年度にかけての 2 ヶ年において、以下に示す内容の研究を行い、研究成果を得た。

1) 鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食センサの開発に関する研究：通常、AC インピーダンス法により分極抵抗を計測する際に用いられている「接触センサ」を用いて、直流分極曲線を計測することを試みた。その結果、既存の接触センサを用いて分極曲線を計測することが可能であることがわかったため、直流分極曲線計測を現地構造物へ適用する可能性を把握することができた。さらには、分極曲線の結果を用いてコンクリート中鉄筋の不動態の状態を判定する既存の方法を検証した。

2) 腐食環境下への供試体の暴露試験：標準試験体による劣化促進試験を実施した。温度条件、乾湿繰返し条件を変化させた環境で促進試験を行い、劣化状況を試験した。試験期間が十分でなかったことから、十分なデータの取得までは至らず、試験は現在も継続している。一方、実環境に暴露している試験体の暴露期間 6 ヶ月および 1 年時の評価試験を実施した。この場合も、試験期間が十分でなかったために、十分なデータの取得までは至らず、暴露試験は現在も継続している。したがって、標準供試体の暴露による環境評価方法の原案の提案は今後の課題として残った。また、80 年間供用された後に撤去された実構造物に対して、電気化学的計測を行ない、計測方法の有効性の検証を行った。

3) データ整理・解析および最終報告書の作成、対外的な報告：これまでに得られた試験結果を、卒業論文 1 編、修士論文 1 編に取りまとめた。また、土木学会において 4 編の口頭発表を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	6,200,000	1,860,000	8,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

## 1. 研究開始当初の背景

近年、貴重な社会資本を構成するコンクリート構造物の劣化が顕在化しており、これらの構造物の適切かつ経済的な維持管理が極めて重要になってきている。コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす外来因子として、CO<sub>2</sub>とCl<sup>-</sup>が挙げられる。これらは、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋腐食に密接に関連しており、最終的には構造物の性能低下を招く因子となる。構造物に対して、より高い安全性を確保しかつ経済的な維持管理を施すためには、場合によっては構造物の管理手法も『事後保全』よりも『予防保全』の方がメリットが大きい場合もあり得る。

このような観点に立った場合、コンクリート構造物において、鋼材の腐食状況の把握や腐食因子の侵入速度の把握は、合理的な維持管理を行うためには極めて重要である。現在、コンクリート構造物の主な点検手法は「目視」である。しかし、「目視」点検はCO<sub>2</sub>やCl<sup>-</sup>といった腐食因子の浸透状況を確認することは出来ない。すなわち、『事後保全』の考え方に立脚している。これらを明確にする技術として、以下に示す2つの手法を挙げることができる。すなわち、1) 定式化による腐食因子の浸透状況の予測、2) 直接的な腐食因子の浸透状況の計測、である。

腐食因子の浸透予測は多くの研究者によって検討されており、すでに多くの成果が得られている。しかし、近年急速にコンクリートが多様化していること、さらに、コンクリート構造物が置かれている気象・環境条件も多様化していることから、個々の構造物に対して適用可能な、モニタリング技術、評価技術の重要性が高まってきている。コンクリート構造物の健全性評価の手法としては、コアを採取し、それらを分析するという手法が一般的であるが、全ての構造物からコア採取ができるわけではなく、また、コアの採取には時間とお金がかかるのも否定できない。

本研究の開始当初の背景を要約すると以上ようになる。

## 2. 研究の目的

上述の問題点を解決する手法として、本研究課題において、表面接触型の腐食モニタリングセンサ(以下、腐食センサ)を提案し、その開発研究を行う。表面接触型の腐食センサ

として、直線分極抵抗計測方式による鉄筋の腐食速度のモニタリングセンサの開発研究を行う。本センサは、コンクリートの表面から内部鉄筋に対して、直流電流を供給することにより、内部鉄筋の分極抵抗を計測するものである。

一方、当然のことではあるが、コンクリート構造物の耐久性は構造物が置かれる環境条件のほか、施工時におけるコンクリートの打ち込み、締固めといった施工状況にも大きく影響される。さらに、コンクリート構造物の耐久性を考慮する際、このような施工時の要因を定量化することは困難である。したがって、実構造物においては、誤差要因の影響を把握しながら、LCCを評価することが求められる。腐食センサを構造物に適用することは、LCC評価に腐食センサによる実測値をフィードバックさせることができるというメリットに繋がる。これにより、LCCを繰返し修正しながら算定することが可能となり、発生する誤差を最小限に抑えたLCCの算定を実現することができる。

本研究においては、腐食センサの開発を行うとともに、腐食モニタリング結果のLCC評価システムへの融合を目的として、以下の点を明らかにする。すなわち、1) 溶液浸漬実験とコンクリート中における発錆限界濃度の整合性、2) 異なる特性のコンクリートにおけるセンサの適用性、および、3) LCCによる将来予測と腐食センサの予測修正の融合による構造物の維持管理シナリオの最適化、である。

現在、建設分野への公共投資額は縮小傾向にあるのは否定できないが、一方で安全で豊かな暮らしを支えるための社会基盤施設の構築が求められており、構造物のLCCの低減や維持管理費用の分散化についての取り組みが本格化しつつある。構造物のLCC最小とするためには、『事後保全』による対応だけでは難しく、『予防保全を前提とした維持管理手法の最適化』の方法論および適用技術を確立する必要がある。以上の状況を考慮し、本研究は予防保全を実現するために要求される要素技術としての腐食センサを開発することを目標としている。また、現場のニーズに対応できるよう、安価な、かつ容易なモニタリング技術、という2点に重点をおいた研究方針で腐食センサの開発を行う。また、腐食センサによるモニタリングとLCC評価を複合させたシステム構築により最適な維

持管理手法の提案を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、平成19年度と20年度の2カ年にわたり実施した。初年度の平成19年度においては、以下の研究を実施した。すなわち、鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食センサの開発に関する研究として、1) 接触センサ部の改良ならびに接触方法の改良、2) 計測電流の分布状況と得られる計測値の定量的把握、3) 鉄筋の腐食減量と分極抵抗の関係の構築ならびに腐食速度推定精度の向上、である。また、腐食環境下への供試体の暴露試験として、1) 標準試験体の作成および暴露の開始、を行った。

平成19年度の実績を踏まえ、2年目の平成20年度においては以下の示す内容の研究を行った。

1) 鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食センサの開発に関する研究：通常、ACインピーダンス法により分極抵抗を計測する際に用いられている「接触センサ」を用いて、直流の分極曲線を計測することを試みた。その結果、既存の接触センサを用いて分極曲線を計測することが可能であることがわかったので、直流分極曲線計測を現地構造物へ適用する可能性を把握することができた。さらには、分極曲線の結果を用いてコンクリート中鉄筋の不動態の状態を判定する既存の方法を検証した。

2) 腐食環境下への供試体の暴露試験：標準試験体による劣化促進試験を実施した。温度条件、乾湿繰返し条件を変化させた環境で促進試験を行い、劣化状況を試験した。試験期間が十分でなかったことから、十分なデータの取得までは至らず、試験は現在も継続している。一方、実環境に暴露している試験体の暴露期間6ヶ月および1年時の評価試験を実施した。この場合も、試験期間が十分でなかったために、十分なデータの取得までは至らず、暴露試験は現在も継続している。したがって、標準供試体の暴露による環境評価方法の原案の提案は今後の課題として残った。また、80年間供用された後に撤去された実構造物に対して、電気化学的計測を行ない、計測方法の有効性の検証を行った。

3) データ整理・解析および最終報告書の作成、対外的な報告：これまでに得られた試験結果を、卒業論文1編、修士論文1編に取りまとめた。また、土木学会において4編の口頭発表を行った。

### 4. 研究成果

上記、3.に示す研究を行った結果、以下に示す3分類の研究成果を得た。

1) 電気化学的計測における電位の掃引速度が分極曲線の形状に及ぼす影響についての研究成果

鉄筋の不動態被膜の状態を把握する方法の1つとして、分極曲線の測定がある。しかし、従来の分極曲線の測定では、測定対象物を水に浸漬し測定を行う必要があった。さらに、分極曲線の測定には40分程度必要とするため、現状では現場での測定には適していなかった。これらの問題を解決できれば、不動態被膜の状態を把握する非常に有効な手段になる。本研究では、分極曲線の測定を実構造物に適用するために、電位の掃引速度が曲線形状に及ぼす影響を実験的に把握した。結果を極めて簡潔に以下に列挙する。

(1) 2重対極センサ、すなわち接触型センサを用いた場合(B法)の分極曲線は、従来の方法(A法)により求めた分極曲線とほぼ同様となった。(図-1)

(2) 掃引速度100, 200mV/min.で測定を行った場合、掃引速度50mV/min.に対して、電流密度の計測値がそれぞれ10%, 40%程度増加した。これらの関係より、掃引速度50mV/min.時の値を規準として、測定値を換算できる。

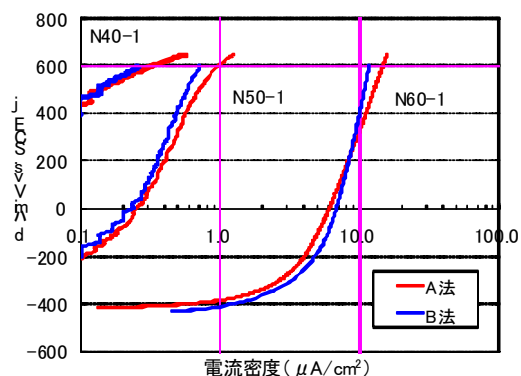


図-1

2) 鉄筋-コンクリート界面及び試験環境が鉄筋腐食に及ぼす影響についての研究成果

コンクリート構造物の劣化の原因の一つである鉄筋の腐食は、コンクリートの含水状況、酸素の供給状況など、多くの要因に影響を受ける。種々の要因のうち、コンクリートの材料分離によって発生する鉄筋下面の空隙が鉄筋腐食に及ぼす影響について既に報告されていたものの、十分な研究はなされていなかった。本研究では電気化学的手法による鉄筋腐食の診断を行い、また鉄筋下面に生じる空隙が、鉄筋の腐食に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に

簡潔にまとめる。

(1) 打設面に近い鉄筋ほど、下面に発生する空隙が大きくなる傾向を示した。また、水セメント比が大きく、打設面に近いものほど、ピッカース硬さ、ピッカース硬さ比は低い値を示した。このことから、打設面に近いほど鉄筋下面はブリーディングの影響を受けやすく、そのため空隙が大きくなったものと推測される。

(2) 鉄筋周辺の塩化物イオン濃度が低い場合でも、腐食は発生する可能性があり、このことから、鉄筋下面の空隙面積にごとに、腐食発生限界塩化物イオン濃度を整理する必要がある。

(3) 鉄筋下面の空隙が大きい場合、塩分の有無に関わらず腐食が進行する。また、初期に分極抵抗が大きく低い値を示す場合、鉄筋とコンクリートの界面に空隙の存在が考えられる。(写真-2)



写真-1

3) 塩害環境下において長期供用された RC 桁の鋼材腐食・塩分量調査結果に関する研究成果

本研究で調査を実施した橋梁は、九州北部の日本海側に位置する RC 製海上橋であり、側面のうち一方は日本海に面し（外海側）、他方は内海に面している（内海側）。本橋は昭和 7 年に架設され、昭和 42 年には活荷重の増加に伴い、桁の断面増厚（セメントモルタル）および主鉄筋の追加による補修・補強が行われた。さらに、昭和 49 年には、PC 橋が併設され、PC 部が車道として、RC 部が歩道として用いられてきたものの、劣化が著しく、供用約 80 年で解体された。本研究では、この橋梁の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はつり調査を行うことにより、供用 80 年を経た実構造物の鋼材腐食について調査した。本研究で得られた知見を以下に簡潔にまとめる。

(1) 丸鋼において、非破壊試験では腐食なしと判定されたが、実際には腐食が認められた。この腐食は、断面補修を実施する以前に発生していたと推察される。

(2) 丸鋼において、鉄筋の直径を計測した

結果、左右方向よりも上下方向の断面減少が大きい傾向が認められた。(図-2)

(3) 桁の下面と外海側において表面の塩化物イオン濃度が高くなり、特に外海側では鉄筋周辺の塩化物イオン濃度も高くなった。

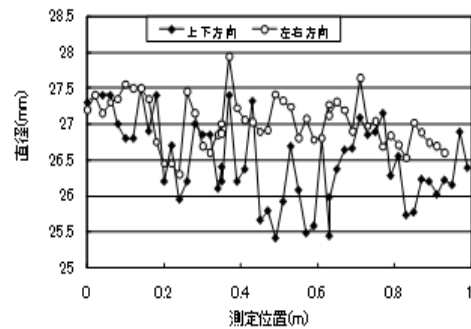


図-2

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① 高橋勝也・濱田秀則・佐川康貴：モルタルに埋設された鉄筋の腐食要因に関する一考察、土木学会平成 20 年度全国大会、平成 20 年 9 月 12 日、東北大学川内北キャンパス
- ② 池之平勉・森川亮太・濱田秀則・佐川康貴：塩害環境下において長期供用された RC 桁の鋼材腐食・塩分量調査結果、平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会、平成 21 年 3 月 7 日、九州大学伊都キャンパス
- ③ 森川亮太・濱田秀則・佐川康貴・高橋勝也：電気化学的計測における電位の掃引速度が分極曲線の形状に及ぼす影響、平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会、平成 21 年 3 月 7 日、九州大学伊都キャンパス
- ④ 高橋勝也・濱田秀則・佐川康貴・森川亮太・池之平勉：モルタルに埋設された鉄筋の下面の空隙が腐食に及ぼす影響、平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会、平成 21 年 3 月 7 日、九州大学伊都キャンパス

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱田 秀則 (HAMADA HIDENORI)  
九州大学大学院・工学研究院・准教授  
研究者番号：70344314

(2) 研究分担者

佐川 康貴 (SAGAWA YASUTAKA)  
九州大学大学院・工学研究院・助教  
研究者番号：10325508

(3) 連携研究者

松下 博通 (MATSUSHITA HIROMICHI)  
九州大学大学院・工学研究院・名誉教授  
研究者番号：10038036