

研究委員会 構造的に主眼を置いた鋼材腐食性状の診断・推定手法に関する研究委員会

大下 英吉*1・大野 健太郎*2・福山 智子*3・鈴木 修一*4・上原子 晶久*5・山田 雄太*6

要旨：鋼材腐食が生じた鉄筋コンクリート（RC）構造物の構造的評価では、鋼材の腐食性状（有効断面積や腐食量）およびコンクリート表面の腐食ひび割れ性状などを入力値とするが、入力値の情報取得には様々な制約があるため性能評価（出力値）が実際と乖離する可能性が生じる。そこで、構造的に及ぼす影響の大きい箇所を予め数値解析にて示し、当該領域での情報獲得手段としての非破壊試験方法の活用を体系的に示し、さらに取得された離散データを連続化する方法について検討した。さらに、プレストレストコンクリート（PC）構造での構造的評価も検討し、RC、PCを含めて共通実験を通して体系的に取り纏めた。

キーワード：構造的評価、鋼材腐食、非破壊試験、空間分布推定、数値構造解析、プレストレストコンクリート

1. はじめに

鋼材腐食が生じた鉄筋コンクリート（RC）構造物の構造的評価（構造計算）においては、実測により直接あるいは間接的に得た鋼材の腐食性状（有効断面積や腐食量）およびコンクリート表面における腐食ひび割れ性状などの空間分布情報が入力値として必要になる。しかし、鋼材の腐食性状をコンクリート表面から非破壊かつ高精度で評価可能な確立された手法は現在のところ存在せず、鋼材腐食の程度に応じて適切な調査手法を選択する必要がある。また、選定された調査箇所の鋼材腐食性状を得られたとしても離散的な情報にとどまり、それらを連続した空間分布情報に展開する手法もない。そのため、構造計算の入力値としては、腐食量の平均値や最大値を鋼材全域に付与する場合などが見られ、実際の構造的評価から乖離した出力値（性能評価）となる可能性が考えられる。

このような背景のもと、本研究委員会では、現行の定期点検要領との接続を意識しつつ、既存 RC 構造物における腐食した鋼材の腐食量を時間的・空間的に推定可能とする手法の確立を目的とした。

委員会の構成を表-1に示す。本委員会は、5つのWGから構成される。まず、「RC数値解析WG」では、RC上部工における鋼材腐食が構造的に及ぼす影響について、鋼材腐食位置、荷重作用位置に着目し、桁単体の場合と複数主桁の場合に分けて検討した。これらの検討結果を受け、「鋼材腐食量の診断手法検討WG」にて、鋼材腐食に関する各種試験方法を体系的にまとめるとともに、内

在塩分量を変えた共通試験体を用いた実験を通じて、各調査手法の測定結果と鉄筋腐食量の関係、および内在塩分量との関係について整理した。また、「鋼材腐食量の空間分布評価検討WG」において、共通試験で得られた鋼材腐食量の離散データに対し確率統計の手法を適用して空間的な分布に変換する推定方法について検討した。

さらに、RCだけでなくプレストレストコンクリート（PC）構造物も検討の対象とし、「PC数値解析WG」では、PC構造物に対する構造的評価を実施した。特に鋼

表-1 委員会構成

委員長	大下 英吉	(中央大学)
幹事	大野健太郎	(東京都立大学)
	福山 智子	(立命館大学)
	鈴木 修一	(パシフィックコンサルタンツ)
	上原子晶久	(弘前大学)
	山田雄太	(日本大学)
委員	秋山 充良	(早稲田大学)
	大久保 孝	(川田建設)
	大竹 雄	(東北大学)
	金田 尚志	(日鉄テクノロジー)
	金光 俊徳	(電力中央研究所)
	近藤 拓也	(高知工業高等専門学校)
	佐藤 文彦	(中日本ハイウェイエンジニアリング東京)
	武田 健太	(名古屋工業大学)
	千々和伸浩	(東京科学大学)
	福島 邦治	(日本ピーエス)
	藤原 規雄	(国際建設技術研究所)
	松崎 裕	(東京科学大学)
	松沢 晃一	(明治大学)
	村上 祐貴	(長岡工業高等専門学校)
	山下 恭敬	(高速道路総合技術研究所)

*1 中央大学 理工学部都市環境学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 東京都立大学 都市環境学部都市基盤環境学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科教授 博士（工学）（正会員）

*4 パシフィックコンサルタンツ（株） 交通基盤事業本部 博士（工学）（正会員）

*5 弘前大学 理工学部地球環境防災学科准教授 博士（工学）（正会員）

*6 日本大学 理工学部土木工学科助教 博士（工学）（正会員）

材破断が PCT 桁上部工に及ぼす影響について、鋼材破断位置、鋼材破断本数、載荷位置の観点から検討した。これに加えて「PC 鋼材健全性調査 WG」においては、PC 構造物特有の劣化変状について各種規準類を整理するとともに、PC グラウト充填状況調査、PC 鋼材破断調査、残存プレストレス量調査の各種共通実験を実施し、実用技術に加え研究過程の技術を取り込みながら、調査手法の体系的な整理を行った。

本稿では、本委員会活動成果の概要を報告する。

2. RC 数値解析 WG

2.1 活動概要

本 WG では、鉄筋コンクリート (RC) 上部工における鉄筋腐食が構造性能に及ぼす影響を、佐々木らの実験¹⁾を参照しつつ解析的に評価した。具体的には、鋼材腐食の位置が構造耐力にどう影響するかを明らかにすることを目的とし、実験データを有限要素解析で再現することを試みた。

2.2 実験概要

実験では、RC・T 桁を 3 本接続し、上部に床版を設けた橋梁上部工のスケールモデルを作成している。鉄筋腐食位置は、中央に配置した B0B および BBB 試験体と、腐食位置を重複しないよう配置した SBS 供試体の 3 種類である (図-1)。実測腐食量は桁単体で最大 19.8%、最小 9.8%、平均 13.9%であった。載荷方法は 4 点曲げ試験で、単純支持形式である。

2.3 解析方法

解析は有限要素解析ソフト ATENA (バージョン 5.9.1) を用い、単体桁と上部工の 2 種類に分けて実施した。両者の要素分割図を図-2 に示す。単体桁の解析では、健全桁と劣化桁について比較・検討した。鋼材腐食は主鉄筋の断面積減少でモデル化し、中央と右側に腐食区間を配置した。スターラップは、主鉄筋の腐食区間で断面積を適宜減少させた。付着応力とすべりの関係は、鋼材腐食量に応じて付着応力を低減させた。上部工解析も同様の条件で実施した。

2.4 解析結果

単体桁における鋼材腐食を中央に配置した荷重-変位関係を図-3 に示す。主鉄筋の腐食を中央に配置した場合には、腐食量に応じて曲げ耐荷性状が低下していた。一方、主鉄筋の腐食を右側に配置した場合には、腐食量が大きくなるしたがって、耐荷力やじん性が低下する傾向になった。

上部工の解析結果を図-4 に示す。この場合、実験と解析の比較を行うと、両者とも傾向は一致していることを確認した。この結果を踏まえると、劣化部位の隣接に健全部位が無いと、耐荷力が大きく損なわれる可能性が

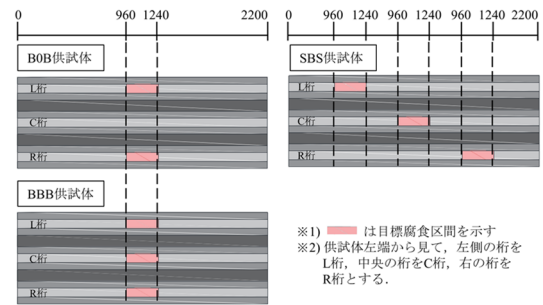


図-1 実験における腐食区間の配置

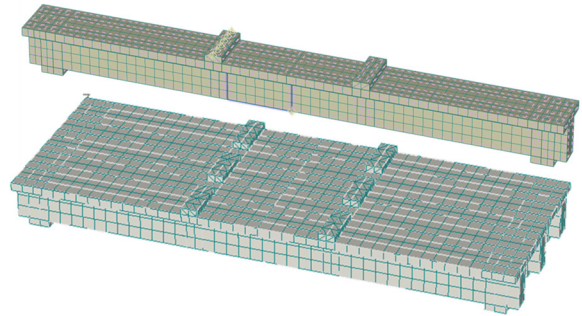


図-2 要素分割図

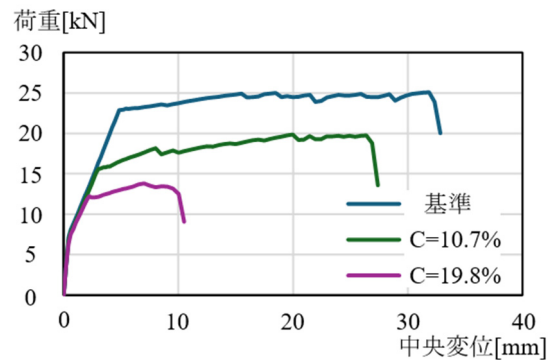


図-3 単体桁の荷重-中央変位関係

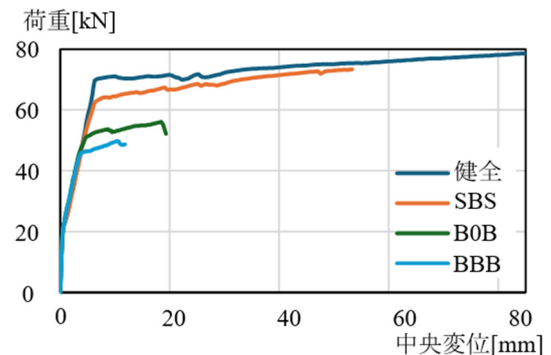


図-4 上部工の荷重-中央変位関係

あることが明らかになった。

2.5 解析結果を踏まえた点検手法への提言

まず、単体桁の解析では、最大曲げモーメントが作用する位置に鋼材腐食部位が存在すると、耐荷性状が大きく低下することが明らかになった。このことから、構造物の点検においては、荷重の作用位置と大きさを意識する必要があるといえる。

一方、上部工の解析では、部材内部の劣化部位と隣接

桁の健全部位の有無で耐荷性状が大きくことなることを示した。関連して劣化部位の隣接において、外観が健全でも内部で鋼材腐食の劣化が起こっている場合には、構造物の状態としては安全性が低下している状態になる。従って、劣化部位が近接している健全部においては、非破壊試験方法などを駆使して、外観の健全性を確実に保証する必要があるといえる。

3. 鋼材腐食量の診断手法検討 WG

3.1 目的

1章で述べたように、鋼材腐食を生じた RC 構造物の構造性能評価においては、鋼材の腐食性状の空間分布情報が入力値として必要になる。腐食情報を取得して空間分布に拡張するためには複数点の測定が必要になる。

また、実際の調査において、同じ RC 部材内であっても、雨がかりなどの環境条件によって腐食が進行している鋼材とそうでない鋼材が混在する場合も見られることがある。よって、非破壊試験方法を用いて複数箇所を調査し腐食リスクの高い部位を特定できれば効率的な維持管理が可能となる。

しかし、鋼材の腐食性状をコンクリート表面から非破壊かつ高精度で評価可能な確立された手法は現在のところ存在せず、鋼材腐食の程度に応じて適切な調査手法を選択する必要がある。

本 WG では、鋼材腐食量の非破壊試験方法について、調査時の選定フローを提案し、現存する各種非破壊試験法を共通試験体に適用した結果を報告することで、試験方法の適用範囲について考察する。

3.2 鋼材腐食調査手法の分類と選定の考え方、測定マニュアルの作成

非破壊検査協会・鉄筋コンクリート部門、鉄筋腐食診断手法研究委員会（2014年9月～2018年8月：大下委員長）、鉄筋腐食診断に係る技術ガイドライン作成研究委員会（2018年9月～2022年8月：大下委員長）の研究成果²⁾を参照し、表-2に示すような鋼材腐食推定に関連する調査手法を分類した。

実務上、直接的な腐食量測定が困難であるため、これらの技術を組み合わせた総合的な評価が必要となる。各測定技術の原理や適用方法について詳細な説明を行い、調査の流れを体系的に整理し、選定の考え方を提案した。

3.3 非破壊試験方法の適用性検証に関する共通実験

既存の RC 構造物の耐久性評価には非破壊試験技術の活用が不可欠である。特に、大規模な構造物に対しては、非破壊試験方法により広範囲で定量的な情報を取得することで劣化の進行している可能性の高い箇所を特定し、破壊試験の実施数を削減することが可能となる。

本 WG では、腐食を進行させた大型試験体（図-5）を

用いて複数の非破壊試験方法を適用し、鋼材が置かれている環境としてのコンクリートの品質や鋼材の腐食状態の推定と実測した鋼材腐食率との比較、各種手法間のデータの整合性確認により適用性検証を行った。

3.4 塩化物イオン濃度が電磁波レーダ法による鋼材の画像化に及ぼす影響に関する共通実験

近年、電磁波レーダ法による鋼材腐食推定に関する研究が進んでいる。RC 構造物において、塩化物量の増加が電磁波の減衰を引き起こし、鋼材からの反射波振幅値が低下することが報告されている。この特性を利用した塩化物含有量の違いによる電磁波特性の変化と鉄筋の腐食リスクについて検討した。

3.3 節で実施した屋外暴露試験体を用いた調査では、実際に塩化物量の多い試験体では鉄筋像が不鮮明になる現象が確認された（図-6）。しかし、これは鉄筋腐食やひび割れの影響を含んでいると考えられたため、新たにひび割れのない試験体を作製し、室内実験により電磁波減衰に影響する要因に関して調査を行った。

表-2 鋼材腐食調査に関連する非破壊試験方法

対象	手法
コンクリートの品質や状態の評価	塩化物イオン量測定（ドリル法と蛍光 X 線法） ・サンプリングと分析手法
	自然電位法：環境条件の推定
	コンクリートの表面強度 中性化深さ
鋼材の形状情報	電磁波レーダ法：鉄筋径やかぶり厚の推定
	電磁誘導法：鉄筋径やかぶり厚の推定
コンクリート内部鋼材の腐食評価	分極抵抗法（交流インピーダンス法二周波数法を含む）：腐食の進行度（積算腐食量）の評価
	腐食ひび割れ幅からの腐食量の間接推定
	実際のはつり出し ・腐食量の実測と非破壊推定結果の比較

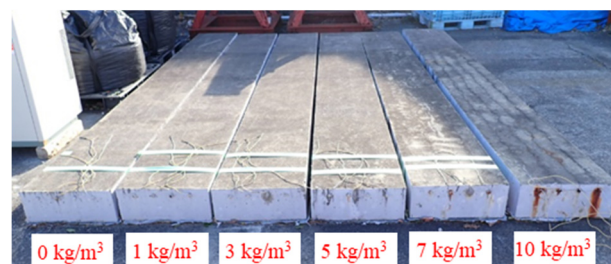


図-5 屋外暴露試験体

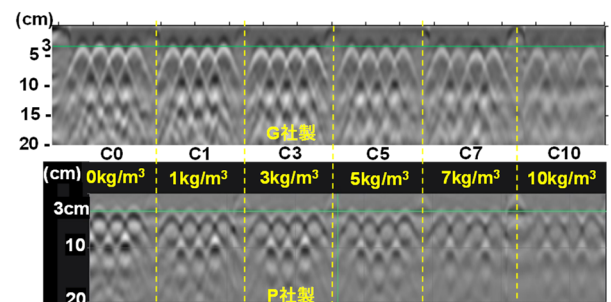


図-6 屋外暴露試験体の電磁波レーダ画像

4. 鋼材腐食量の空間分布評価検討 WG

4.1 目的

鋼材腐食した構造物の構造性能を精度良く評価するには、鋼材の腐食性状およびコンクリート表面における腐食ひび割れ性状などの空間分布としての情報が求められる。鋼材腐食量はコンクリート表面から計測出来ないため、鉄筋をコンクリートから取り出して計測を行う必要がある。構造物を損傷させることになるため、計測できる数量は限定される。そこで、構造計算の入力値として、計測した鋼材腐食量の平均値や、最大腐食量を構造物全体の腐食量として採用される場合が多い。計測により得られた鋼材腐食量を信頼性の高い空間的情報に展開できると、鋼材腐食した構造物の構造性能評価の精度向上に繋がる。鋼材腐食量の空間的特性およびその不確定性を把握し、構造性能評価の精度向上に役立てるための検討を行うことにした。しかし、鋼材腐食量の直接的な計測は、構造物を損傷させるため、空間的情報に展開できるだけの情報を得ることが困難と考えられる。そこで、コンクリート表面の腐食ひび割れ幅から鋼材腐食量の空間分布を推定する方法についても検討した。

4.2 検討内容

地盤の分野では、実務においてクリギングまたはガウス過程回帰（GPR : Gaussian Process Regression）と呼ばれる推定手法を用いて空間分布推定が行われている。クリギングは、南アフリカの鉱山学者 D.G.Krige と統計学者 H.S.Sichel が鉱物資源埋蔵量の算出法を改善する目的で考案した手法を、G.Matheron が確率論の枠組みの下で確立させた手法である³⁾。一方、ガウス過程回帰はベイズの定理に基礎を置く統計的機械学習として確立された⁴⁾。両者とも、線形結合により予測を行うという基本原理は同じである。しかし、前者は2,3次元空間を対象としているのに対し、後者は多次元空間を対象としていること、また、発展の相違から表現方法に違いがある。本WGでは、後者のガウス過程回帰を用いて、鋼材腐食量の空間分布推定および空間的特性について検討した。

検討では、電食により腐食させた供試体の残存耐力実験の際に計測された鋼材腐食量および3.3節で計測した暴露試験供試体の鋼材腐食量を対象として鋼材腐食量の空間分布推定および空間的特性を分析した。鋼材腐食量の計測データに対して、ガウス過程回帰を用いた空間分布推定は、計測データとの誤差も小さく、十分、適用可能であることが確認された。推定結果を用いた空間分布特性の分析では、電食により腐食させた腐食鉄筋より暴露試験の腐食鉄筋の方が、鋼材腐食量の空間的相関の範囲が広い傾向が見られた。しかし、暴露試験の空間的相関でもその範囲は1m程度であり、影響範囲は限定的であることが確認された。腐食ひび割れ幅から鋼材腐食量

の空間分布推定の検討では、ガウス過程回帰による推定と論文による最新の推定手法について調査した。ガウス過程回帰を用いて腐食ひび割れ幅から鋼材腐食量の空間分布を推定した場合、両者の相関性の高い供試体では、腐食ひび割れ幅から鋼材腐食量の分布傾向を定量的に推定できるものの、局所的な変動までの推定は困難であった。最新の研究では、画像解析技術とFEM解析を組み合わせ、機械学習のアルゴリズムを利用した高度な空間分布推定技術も提案されており、それらの知見の収集を図った^{5),6)}。

4.3 本WGのまとめ

地盤工学等において活用されている空間分布推定手法を用いて鋼材腐食量の空間分布推定および空間的特性の検討を行った。その結果、鋼材腐食量の空間分布推定にも適用可能であること、鋼材腐食量の空間相関の範囲は限定的であることが確認できた。また、腐食ひび割れ幅より鋼材腐食量の空間分布推定は、分布傾向は推定できるものの、細部までの推定は困難だった。また、最新の研究について調べて知見の収集を図った。

5. PC 数値解析 WG

5.1 PCT 桁橋を対象とした数値解析の意義および目的

PC 構造物の健全度評価に際しては、耐荷性能に大きな影響を及ぼす PC 鋼材自体の劣化情報と構造物内部における劣化位置の情報を取得し、点検重点箇所を選定に繋げる必要がある。劣化の状態は構造物の供用環境や使用材料に応じて多岐にわたることから、実現象や実験結果に基づきこれらが耐荷性能に及ぼす統一的な影響を把握することは困難である。このような観点から本WGでは、数値解析により PC 鋼材の劣化が構造物の耐荷性能に及ぼす影響を把握することとし、劣化した PC 鋼材を有する PCT 桁橋を対象として三次元有限要素解析を実施した。解析の実施に際しては、44年間供用された実在する単純 PCT 合成桁^{7), 8)}を参考にして対象を選定した。はじめに、劣化した PC 鋼材を有する単一の桁を対象とした解析を実施することにより PC 鋼材の劣化が耐荷性能に及ぼす大局的な影響を把握した後、このような部材を有する多主桁橋を対象として構造系に及ぼす影響を把握するための解析を実施することにより点検重点箇所の同定に資する情報を整理した。

5.2 PC 鋼材の劣化が単一の PCT 桁の耐荷性能に及ぼす影響

(1) 支間中央部における PC 鋼材の劣化による影響

作用曲げモーメントの影響が顕在化する支間中央部における PC 鋼材が腐食により破断したケースを想定し、破断箇所からプレストレス量が緩和するようにモデル化した解析を実施した。解析の結果から、鋼材の破断が耐

荷力の低下に及ぼす影響やひび割れの発生状況に及ぼす影響、耐久性に対する副次作用についても整理した。

(2) サグ部における PC 鋼材の劣化による影響

PC 鋼材の劣化が耐荷性能に及ぼす大局的な影響を把握する観点から、グラウトの未充填等による劣化が生じる可能性が高いサグ部の始端で PC 鋼材が破断した極端なケースを主に想定し、その位置を解析変数とした解析を実施した。解析の結果から、破断本数が同一であっても破断箇所が断面方向に重複するケースでは曲げ理論が耐力を過大に評価し得ることや、その原因などについて整理した。

(3) 付着消失区間等を考慮した場合の影響

PC 鋼材破断後の残存曲げ耐力は最大作用曲げモーメント箇所の断面での残存鋼材量により概ね予測できるのに対し、せん断耐力については、プレストレスがせん断耐力に複雑な影響を及ぼす可能性があることから、サグ部の定着端部にて PC 鋼材の破断が生じたケースを対象として破断位置からの付着回復区間や荷重位置を解析変数とした解析を実施した。解析の結果から、破壊形態や耐荷性能に及ぼす影響について整理した。

5.3 劣化した桁を有する PCT 桁橋の耐荷性能

前節までに記した劣化した PC 鋼材を有する単一の桁を含む PCT 桁橋を対象として解析を実施した。劣化した桁の位置と桁内部での PC 鋼材の破断箇所を解析変数とし、支間中央部の PC 鋼材が破断した桁を有する場合や支間 1/4 点の PC 鋼材が破断した桁を有する場合において、PC 鋼材の破断箇所や劣化した桁の位置が構造全体系の耐荷性能に及ぼす影響についてとりまとめた。

6. PC 鋼材健全性調査 WG

6.1 PC 鋼材の健全性評価に資する調査

(1) PC 構造物と PC 鋼材の健全性評価の現状と課題

PC 構造物特有の劣化現象として PC 鋼材とグラウトに関するものおよび定着部の損傷が挙げられ、PC 構造物の健全度評価においては、耐久性の側面としてのコンクリートの状態と、耐荷性の側面としてのプレストレス状態の適切な把握が重要である。そのためには、コンクリートの健全性と PC 鋼材の健全性に着目する必要がある。特に、PC 構造物において PC 鋼材は極めて重要な要素であり、PC 構造物の健全度評価は PC 鋼材の劣化状況を基に行われることとなる。しかしながら、PC 鋼材の変状は、それがコンクリート内部で進行し、その進行が外観の変状と直接結びつかない場合もあるため、劣化予測が困難な場合も多い。したがって、PC 鋼材がコンクリート内部に配置されている PC 構造物は、PC 鋼材の状態を直接確認することが困難であることに加え、シーズ、グラウトなどの構成要素が RC 構造より多く、かつ鋼材にプレ

ストレスが導入されているため、PC 鋼材の健全性評価の難易度が高いことが課題となっている。

(2) PC 鋼材の健全性調査の意義・目的

PC 構造物において、留意すべき事項は、耐荷性能への影響であり、すなわちプレストレス力の保持が成されているかを確認することが最重要である。PC 鋼材の破断という事態が生じた場合には、著しい耐荷性能の低下が起きる。しかしながら現状では、既設 PC 構造物に導入されている残存プレストレス量を直接、定量的かつ精度良く評価することは難しく、さらに PC 鋼材の腐食状況を非破壊的に調査できる方法は確立されていない。よって、PC 鋼材の健全性を評価する上で、鋼材破断の有無や PC グラウトの充填状況調査を実施する必要がある。ポストテンション PC 構造物特有の PC グラウトの充填状況や PC 鋼材の腐食や破断を調査する目的は、これらの変状の有無の確認および変状の把握をすることである。

(3) PC 鋼材の健全性調査手法

PC 構造物や部材の耐荷性能や耐久性を評価するためには、プレストレスの量や PC 鋼材の健全性を正確に把握する必要がある。それぞれの調査目的に応じて各種調査手法が存在するが、それらは微破壊調査と非破壊調査に大別される。微破壊調査では、破壊を伴うため適用箇所の制限と繰返し測定が不可能な点が課題として挙げられる。また、非破壊調査では、プレストレス量の把握では超音波法に関する研究が実施されているが、実用段階には至っていない。PC 鋼材の破断有無は、漏洩磁束法を適用できる範囲では破断有無および位置を特定できる可能性が高いとされる。また、PC グラウトの充填度調査は適用可能な範囲が限られていることと、判定精度の確保のため削孔法などとの併用が多い。一方、PC 鋼材の腐食の可能性を非破壊的に調査できる手法は現段階では存在しない。

6.2 PC 鋼材の健全性評価に資する共通実験

(1) 共通実験の目的

PC 鋼材健全性評価に資する非破壊試験方法の現状把握と整理を目的に、ポストテンション PC 供試体を使用し、PC 鋼材の破断有無、PC グラウトの充填度、プレストレス量の把握について、実用段階の測定方法に加え研究段階にある手法も含めた共通実験を実施した。これらの共通実験を通して、各調査手法が有する測定原理、適用条件を整理するとともに、それぞれの手法の課題をとりまとめた。

(2) 調査手法一覧

共通実験に使用した調査手法の一覧を表-3 に、実験に使用した供試体概要を表-4 に示す。

(3) 共通実験結果の概要

共通実験を通してそれぞれの手法の現状を把握した。

表-3 共通実験での調査手法一覧

調査内容	調査手法	
PCグラウトの充填状況	超音波法	広帯域超音波法 (WUT)
		超音波の縦波多重反射法
		イメージスキャナ法
	衝撃弾性波法	iTECS法
		振幅差分法
	PRA-TICA (多重反射法と透過法の併用法)	
	電磁パルス法	
PC鋼材破断調査	漏洩磁束法	
プレストレス導入度	超音波法	

表-4 共通実験に使用した供試体概要

調査内容	供試体概要
PCグラウトの充填状況	PCT桁供試体 PC鋼より線 シース径φ65mm かぶり約130~140mm
	鉛直鋼棒供試体 PC鋼棒 シース径38mm かぶり約200, 275mm
PC鋼材破断調査	PC鋼より線/PC鋼棒 シース内径: 70, 45, 40mm かぶり: 100, 105, 110mm
プレストレス導入度	版状2500×1500×200mm PC鋼棒4本による緊張力制御

PC グラウトの充填状況調査では、各手法の適用可能範囲が明示されるとともに、適用上の留意点が整理された。PC 鋼材破断調査では、かぶりの大きさによる影響およびかぶり内に存在する鉄筋の影響について結果が整理された。プレストレス量の調査では、PC 鋼材の破断を模擬した場合など、複数の条件下における応力度評価を実施した。

7. まとめ

RC および PC 構造物を対象に鋼材腐食が構造性能に及ぼす影響について数値解析を通して検討し、構造的に影響の大きい箇所を選定、選定された箇所における各種非破壊試験方法の適用性、さらには、取得された離散デ

ータを連続データに変換する推定手法について検討した。また、RC では、内在塩分量を変えた試験体による共通実験、PC では鋼材破断、グラウト充填度、残存プレストレス量をそれぞれパラメータとした試験体による共通実験をそれぞれ実施した。これらの検討を通して、構造性能に主眼を置いた鋼材の腐食性状把握、診断手法について体系的に整理した。

参考文献

- 1) 佐々木靖也ほか：RC 上部工に生じる鉄筋腐食分布がその荷重-変位関係に及ぼす影響に関する基礎的研究，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会概要集，V-765，2024.9
- 2) 大下英吉，村上祐貴，金田尚志，高鍋雅則：鉄筋腐食診断委員会における取り組み，非破壊検査，Vol.72，No.3，pp.102-108，2023.3
- 3) 間瀬 茂：地球統計学とクリギング法 R と geoR によるデータ解析，オーム社，2010
- 4) 持橋 大地，大羽 成征：ガウス過程回帰と機械学習，講談社，2019
- 5) Srivaranun, S., Akiyama, M., Yamada, T., Frangopol, D.M. and Xin, J.: A novel combined experimental-machine learning approach to estimate the probabilistic capacity of RC beams with spatially correlated rebar corrosion in transverse and longitudinal directions, Engineering Structures, Vol. 279, 115588, 2023.
- 6) Jia, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Xu, Z.: Bayesian inference of the spatial distribution of steel corrosion in reinforced concrete structures using corrosion-induced crack width, Structural Safety, Vol. 111, 102518, 2024.
- 7) 増井隆，秋元泰輔，蒲和也：44 年供用した PC 桁の載荷試験報告(その 1)，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，No.23, pp.235-238, 2014.10.
- 8) 蒲和也，増井隆，秋元泰輔：44 年供用した PC 桁の載荷試験報告(その 2)，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，No.23, pp.239-242, 2014.10.