

報告 東海道新幹線の鉄筋コンクリート構造物の健全度評価および補修フローの研究

長谷川 昌明^{*1}・久保 淳一郎^{*2}・関 雅樹^{*3}・荒鹿 忠義^{*4}

要旨：東海道新幹線の土木構造物は供用を開始して既に40年以上が経過している。これまで、鉄筋コンクリート構造物については、予防保全として中性化対策のための表面保護工を実施しているが、将来にわたり健全性を維持するためには、現在の構造物の健全度を適切に評価し、その結果に基づく適切な補修・補強をしなければならない。本報告では、鉄筋の腐食度に着目した非破壊による健全度評価手法の提案を行うとともに、塩分や中性化により劣化が進んだ鉄筋コンクリートの新しい防錆工法の開発、耐力低下が進んだ高架橋の全断面修復にかわる耐力補強工法の開発、これらを組み入れた補修フローの考え方について詳述する。

キーワード：鉄筋腐食，蛍光X線分析装置，健全度評価，電気化学的防錆材注入，耐力補強，補修フロー

1. はじめに

東海道新幹線は、1964年10月の営業開始から既に40年以上が経過した。最近では、最高速度270km/hの高速運転、1日当たり最大350本を超える高密度運転となっている。将来にわたり引き続き東海道新幹線の安全かつ正確な運行を維持するためには、列車を支える構造物の適正な維持管理が重要である。

鉄道構造物の維持管理は、平成19年1月に国土交通省鉄道局から「鉄道構造物等維持管理標準」が制定されるとともに、本標準に解説を加えた実務の指針となる「鉄道構造物等維持管理標準・同解説」¹⁾が刊行され、これらに基づき維持管理を行っている。

本標準におけるフローでは、目視によるひび割れの状態やコンクリートの剥離・剥落の状態、鉄筋の露出状態などの定性的な評価から、場合によっては個別の検査も実施することで中性化や塩害、アルカリ骨材反応等の変状要因を究明し、個別の補修・補強対策を実施することとしている。しかし、この方法ではコンクリート構造物の耐力や性能（耐久性能、使用性能や安全性能）の低下度の評価となっていないという課題がある。

これに対して山陽新幹線では、耐力の判定に鉄筋径の測定等により推定した実耐力を設計耐力により除した値である公称安全率を指標とし、補修工法の選定に中性化の残り深さ、塩分含有量、鉄筋腐食度を指標として組み合わせた補修フロー²⁾（図-1）を用いているが、評価判定方法が細分化され過ぎているほか、この検査方法では実構造物を傷めることとなる。

本稿では、山陽新幹線の補修フローにおけるいくつかの課題について解決を図り、新たに東海道新幹線の補修

フローを策定するために研究開発した成果について述べる。

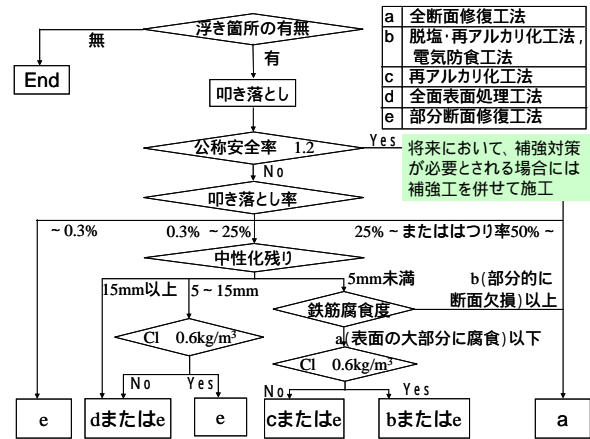


図-1 山陽新幹線における補修フロー

具体的には、公称安全率が低い構造物や鉄筋腐食が進んだ構造物に対する補修工法として、現在の全断面修復工法では耐力の回復は不明である上、スラブを対象としている。そこで、耐力上重要である梁も含めた新しい構造物の耐力補強工法について提案する。

次に、鉄筋の腐食はコンクリートの中性化のみでなく、塩分との複合劣化により生じることから、中性化が進んだ場合や塩分を含むコンクリートに対する表面保護工は効果がないことが懸念され、著者らは研究を進めている。そこで、このような場合においては、一般的な補修工法である脱塩・再アルカリ化工法にかわる経済的で効果の持続性が期待できる新しい電気化学的鉄筋防錆材注入工法を開発し、選択補修工法にするとともに表面保

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 工修 (正会員)
 *2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 Ph.D. (正会員)
 *3 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 博(工) (正会員)
 *4 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部

護工の選択肢を排除した。

さらに、補修工法の選定の際の指標である鉄筋腐食率の調査手法について、鉄筋を採取することなく現地で簡易に鉄筋の腐食量を推定できるポータブル型蛍光X線分析装置の導入を提案し、その有効性を検証した。

2. 補修フローの提案

2.1 東海道新幹線 R C 構造物維持管理の現状

東海道新幹線の土木構造物では、東京から新大阪までの 515.8km のうちコンクリート構造物が 148km あり、大半の 118km が高架橋である。東海道新幹線では建設当時設計・施工の能率化を考慮してできるだけ単純化し、かつこれを標準化しよう努められた。この標準設計という考え方により、対策工法についても標準化することが可能であるというメリットがある。

東海道新幹線における維持管理フローは、標準²⁾に準拠した図 - 2 に示される。主に目視により全般検査を行い、ひび割れの状態、コンクリートの剥離・剥落の状態、表面の汚れや錆汁等から定性的に健全度評価を行う。この結果、A 判定とされたものについては機器類を用いた詳細な個別検査を実施して、変状要因を究明した後、補修を実施する。

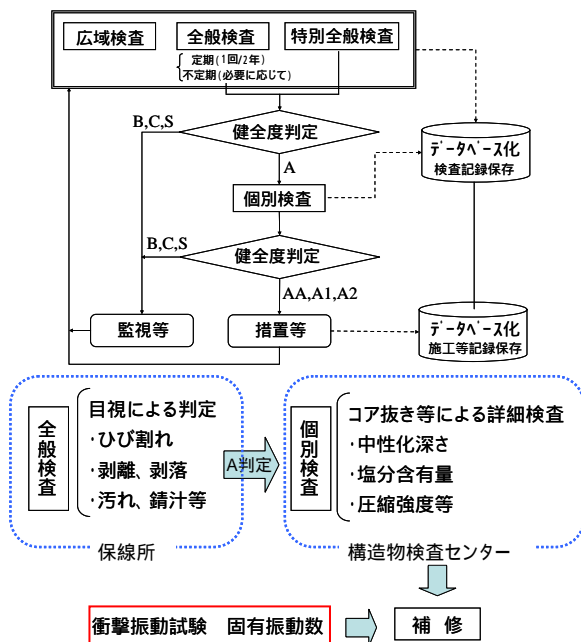


図 - 2 東海道新幹線における維持管理フロー

コンクリート構造物のうち橋脚や高架橋の柱については、固有振動数に着目した定量的な健全度評価^{3),4),5)}を実施している。しかし、スラブや梁については、これまで中性化による鉄筋の腐食のみに着目して対策を実施してきた。したがって、これらの劣化による耐力低下に対する対策工法は未だ確立されていない。

また、東海道新幹線のコンクリート構造物については、

これまでの現地調査の結果から、塩害やアルカリ骨材反応はほとんど見られず、経年によるコンクリートの中性化進行に起因する鉄筋の腐食のみが劣化の課題であるとされた⁶⁾。このため、東海道新幹線ではコンクリートの中性化の進行を抑制する目的により、「予防保全」として表面保護工を 2000 年から実施している。表面保護工の施工のために、固有な維持管理仕様書である「東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準⁷⁾」を制定している。

しかし、ひび割れ部を中心に中性化が鉄筋に一部到達しているコンクリート構造物が稀に見られ、また、ごく一部の橋梁において施工時の混和剤由来や沿岸部の飛来塩分による内在塩分の多いコンクリート構造物の存在が確認されている。このような場合には表面保護工による内部鉄筋の腐食抑制効果が期待できないため、別の補修工法に依存する必要があると考えられる。

2.2. 提案する補修フロー

東海道新幹線では、中性化によるコンクリートの劣化を防止するため、ひび割れの多い橋梁から順に表面保護工を実施してきた。しかし、中性化の進行度は橋梁によりばらつきがあるとともに、将来にわたり全ての橋梁が表面保護工により耐力の低下を防止できるとは限らない。したがって、東海道新幹線コンクリート橋梁 148km の全数について、将来にわたり健全性を維持するための健全度判定および補修工法選定フローにより対策を実施することが望まれる。

そこで、山陽新幹線の補修フローをもとに、課題を解決することで改良した補修フローの案を図 - 3 に示す。

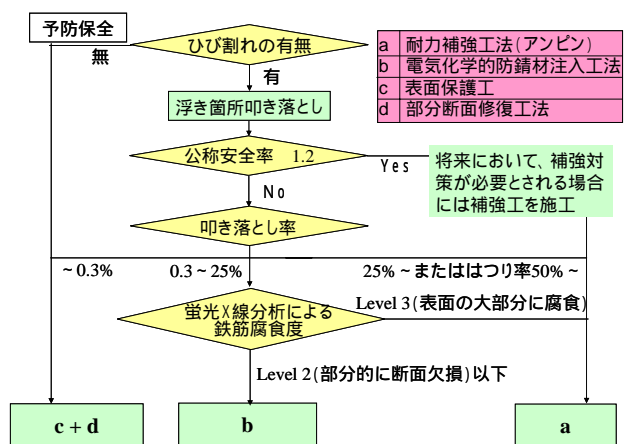


図 - 3 コンクリート構造物の補修工法選定フロー案

本フローにおける判定の内容は下記を指標としている。最初の全般検査による目視では、構造物表面のひび割れ、浮き箇所の有無を判定する。これにより、ひび割れ、浮きのない健全な構造物についてはこれまでどおり中性化を防止するための予防保全として、表面保護工を

施工するものとする。耐力の判定は、鉄筋腐食が進んでいると推定される箇所の鉄筋抜き取りまたはかぶりコンクリートはつり後のノギスによる鉄筋径の測定等により推定した実耐力を、設計耐力により除した値である公称安全率を指標とする²⁾。変状程度のカテゴリとして、叩き落とし率またははつり率、および鉄筋腐食度を指標とする。叩き落とし率とは、部材面積に対して、当該点検においてハンマー等により叩き落とした面積の割合を言う。はつり率とは、叩き落とした周囲を、鉄筋の腐食状況が点錆程度になるまで、電動ピック等ではつり取った面積の部材断面に対する割合を言う。鉄筋腐食度はポータブル型蛍光X線分析装置による鉄筋表面の錆の状態の評価レベルである。

採用する補修工法については、これまでの中性化防止対策としての表面保護工のほか、電気化学的防錆材注入工法^{8),9)}、構造物の部材または全体を補強する耐力補強工法を導入している。

山陽新幹線の補修フローと異なる本フローの特徴は、公称安全率が低い構造物や鉄筋腐食が進んだ構造物に対する補修工法として、現在の全断面修復工法にかわり構造物の耐力を補強する新しい工法を採用していることである。また、これまで一般的に採用されてきた脱塩・再アルカリ化工法にかえて、経済的で効果の持続性がある、新しく開発した電気化学的鉄筋防錆材注入工法を取り入れていることである。本工法は中性化が深く進行し鉄筋の腐食が進んでいる場合にも適用可能であり、しかも工法のメカニズムの面から塩分を多量に含む場合にも効果を発揮すると期待され、補修工法選定のフローにおいて中性化深さや塩分量のようなコア採取またはドリル粉採取といった破壊調査を省略している。さらに、鉄筋腐食率の調査手法について、鉄筋を採取することなく現地で簡易に鉄筋の腐食量を推定できるポータブル型蛍光X線分析装置を導入することである。

次章以降においては、本フローの特徴である耐力補強工法、電気化学的防錆材注入工法の考え方、ポータブル蛍光X線分析装置による鉄筋腐食度評価の適用の可能性について紹介する。

3. 耐力補強工法の提案

鉄筋腐食が進行し、公称安全率が低下した構造物や叩き落とし率の大きい構造物、鉄筋腐食率の大きい構造物に対しては、山陽新幹線のフローにおいては全断面修復工法を採用することとなっている。しかし、全断面修復工法はその耐力回復に対する効果が不明である。また、耐震も含め将来的に耐力を補強する必要があることを考慮すると、これまで柱や橋脚については補強方法が存在するが、梁やスラブについては補強方法が確立してい

ない。そこで、本フローにおいて公称安全率、叩き落とし率、鉄筋腐食率を評価基準とした補強工法を提案した。

先に述べたとおり、東海道新幹線における構造物は標準設計がなされており、対策工法についても標準化が可能である。対策工法のパースを図-4に示す。基礎の増打ち杭、フーチング拡大後、既設縦梁を受けるフレームを構築するものである。

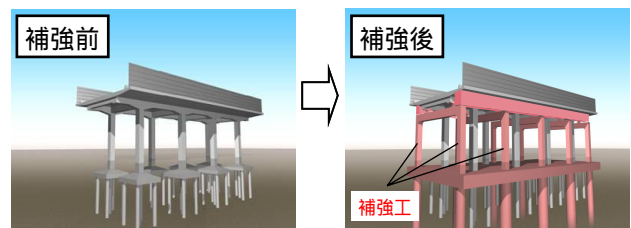


図-4 耐力補強工法概念図

本補強工は、既設縦梁の剛性が低下した場合に、補強工により列車活荷重を分担し、既設縦梁の断面力および変形量が小さくなるよう設計した。具体的には、構造解析上、既設縦梁の剛性EIのうちヤング率の低減により剛性低下を表現し、既設縦梁の剛性が新設時の70%に低下した場合でも、本対策を実施することにより変形量は新設時の80%程度に収まるとともに、長期的に既設梁の剛性がさらに50%にまで低下しても、変形量は新設時と同等となり、梁部材としての耐力を確保している。したがって、本補強工により、長期的な耐力確保を確実に行う観点から、山陽新幹線と同等の閾値とする。また、鉄筋の腐食程度として全面に浮き錆が生じているLevel 3(鉄筋腐食度の非破壊検査にて後述する)を閾値として考えている。

本工法の効果について、実物大の高架橋において劣化を模擬して梁を損傷させ、その後写真-1に示す梁補強工法の試験施工を行った。補強の前後にて、梁に荷重を載荷したときの変位量から梁の剛性を評価したところ、梁を劣化させる前の健全な状態よりも変位量が小さくなり、所要の補強効果があることを確認している。

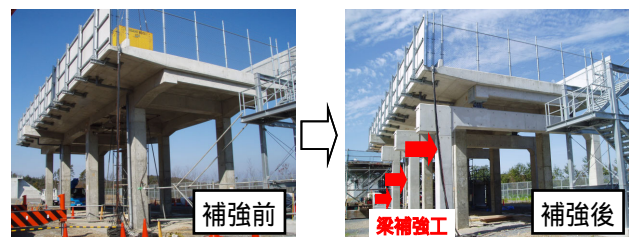


写真-1 耐力補強工法の試験施工

4. 電気化学的鉄筋防錆材注入工法

東海道新幹線では、平成12年からコンクリート橋り

よう（高架橋）の経年劣化に対する対策として、ひび割れの発生箇所を中心に表面保護工を実施している。すでに構造の一部が劣化した場合においては、表面保護工以外の方法で鉄筋の腐食を抑制する対策をとることが一般的である。例えば、著しく中性化が進んでしまったコンクリートに対して、コンクリートを削らずに中の鉄筋の腐食を防ぐ方法として、再アルカリ化工法がある。しかし、この工法はコストがかかる上、その効果の持続性が明確になっておらず¹⁰⁾、東海道新幹線では採用していない。

また、中性化が進んだ場合や塩分を含むコンクリートに対する表面保護工は効果がないことが懸念される。このような場合においても、補修工法選定フローは可能な限りシンプルでしかも構造物を傷めるような破壊的な調査項目をできるだけ最小限とすることが望ましいと考えられる。

そこで、まったく新しい発想による鉄筋の防食工法「電気化学的鉄筋防錆材注入工法」を開発した^{8),9)}。今回開発した工法は、鉄筋の腐食防止のため、コンクリートを削ることなく、直接防錆材を鉄筋に付着させることが可能である。この工法は、図-5に示すように、防錆材の入った水溶液を浸したメッシュをコンクリートの外側に貼り付け、メッシュ（陽極）と内部の鉄筋（陰極）を電気的に導通させて、中性化したコンクリートに電気を流すことによって、正のイオンに電離する防錆材を鉄筋の方向へ電気泳動させて鉄筋付近に定着させる。

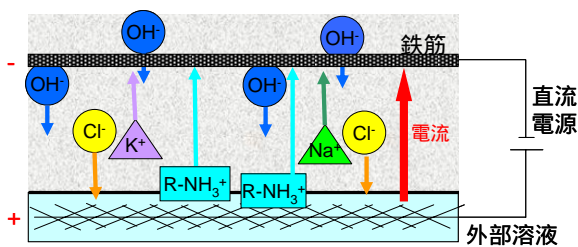


図-5 電気化学的工法の概念図

これによって非常に効率的に防錆材を鉄筋付近まで送り込むことが可能となり、鉄筋に到達した防錆材は、鉄筋に付着することで防錆効果を発揮する^{8),9)}。また、この工法では、脱塩・再アルカリ化工法と同様に、中性化していた鉄筋付近のコンクリートをアルカリ性に回復するとともに、鉄筋腐食を誘発する原因となる塩分を電気力によってコンクリートの外の水溶液に流し出すことが可能である。従来の脱塩や再アルカリ化工法と比較しても、短時間、経済的に施工できる可能性があるとともに、最も重要な鉄筋腐食を防ぐ防錆材の注入を可能とした大変有効な工法であると言える。したがって、この工法は中性化が鉄筋まで到達している場合には既

に有効であると確認されており^{8),9)}、また、塩分を多量に含むため表面保護工が適用できない場合に大いに適用できる可能性があると期待される。しかもこの特徴によって、本工法を採用する大きなメリットは、補修工法選定のフローにおいて中性化深さや塩分量のような破壊調査を省略できる可能性があるところにある。

本工法は既に実物大のコンクリート構造物にて写真-2に示す試験施工を実施した結果、脱塩・再アルカリ化工法に比較して経済的に施工できるとともに、長期間効果が持続することを確認した。現在、塩分を多量に含む試験体における本工法の有効性を検証中であり、本工法を選択する具体的な閾値の検討を今後進めていく。



写真-2 コンクリート構造物への試験施工

5. 非破壊による鉄筋腐食度評価

鉄筋の腐食度を調査する場合、コンクリートをはつり鉄筋を目視・採取するか、もしくは自然電位・分極抵抗の測定が用いられる。これらは鉄筋の腐食量を可能な限り正確に知ることが可能であるが、コンクリートを一部壊す、あるいは手間がかかるといった課題がある。筆者らは、腐食ひび割れが発生する前に鉄筋の腐食を検知する電磁パルスを活用した非破壊検査手法を研究しており、これについては別稿にて報告する。筆者らは、実際のコンクリート構造物の健全度を把握するにおいては、鉄筋の腐食量を必ずしも正確に知る必要はなく、腐食レベルの差が判断できれば十分と考えており、現地で非破壊にて簡易に鉄筋の腐食度を判定できる手法を開発している。鉄筋の腐食が進行することによりコンクリート表面にひび割れが発生し、錆汁が生じることに着目し、ポータブル型蛍光X線分析装置にてコンクリート表面のひび割れ部の鉄分を含む元素成分を定量的に測定し、内部鉄筋の腐食度の推定を試みるものである。実際のコンクリート中では主筋のほかスターラップ等の補強筋があり、主筋の腐食量とコンクリート表面の鉄分量を関連付けることが最終的な目標であるが、本稿ではまず装置の有用性および鉄筋の腐食との相関が得られるか、実験的に検討を行なった。

測定機器は、写真-3に示す土壤汚染の環境計測に実績のあるポータブル型蛍光X線分析装置を用いた。本装置は現場で簡易に成分分析ができるとともに、コンクリ

ート中の塩化物といった微量の軽元素の検出感度を高めた機器^{11),12)}である。

本装置の有効性を確認するため、鉄筋の腐食度をかえた4つの供試体(幅240mm×高さ360mm×長さ3000mmのRCはり部材、かぶり：主鉄筋38mm)で測定を実施した。内部鉄筋を早期に腐食させるため、はりを積算電流量6.14A・日(以後「Level 1」と呼ぶ)、61.40A・day(「Level 2」)および170.54A・day(「Level 3」)の3種類によって電食させた。比較のため電食させない試験体(打設してから2ヶ月程度自然環境に暴露)を「Level 0」とした。測定は、写真-3に示すように、Level 0を除く各供試体において鉄筋を腐食させひび割れが生じた下面を上に向けて、ひび割れ箇所を任意に10測点程度蛍光X線分析装置により成分の分析を行った。Level 0の供試体では表面から任意に3点選定し、同様に分析を行った。各供試体の測定面の状況を写真-4に示す。電食の電流を大きくし、鉄筋の腐食が大きい供試体ほどひび割れからの錆が多く発生しているように見える。



写真-3 ポータブル型蛍光X線分析装置(左)及び本装置による測定状況(右)

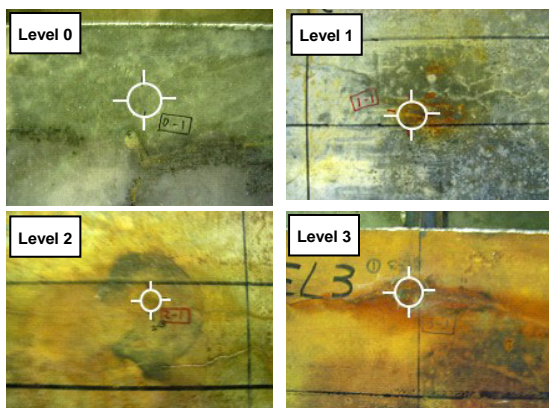


写真-4 各供試体の測定面の状況

また、蛍光X線分析装置により得られたスペクトルの一例を図-6に示す。コンクリートの成分であるCaやSiのほか、ClやFeを検出していることがわかる。Clは外部溶液(3%食塩水)からの電食による侵入であると考えられる。各供試体の測定結果から、鉄筋の腐食が大きい試験体ほどFeのスペクトル強度が大きいことがわか

った。また、鉄筋に含まれるその他の元素、例えばAlやZnについては、もともとの量が微量であることもあり、コンクリート表面での有意な差は見られなかった。

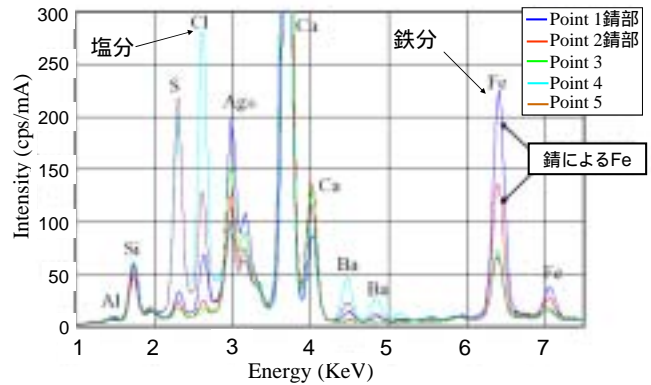


図-6 測定スペクトルの例

測定により得られたスペクトルから、各元素の重量百分率を計算し、鉄分について示したものが図-7である。

図より、鉄筋腐食の進んだ試験体ほどひび割れを通してコンクリート表面に鉄分が漏出している傾向が、この装置により捉えられている。また、本装置によりコンクリート表面の鉄錆を定量化できることがわかった。

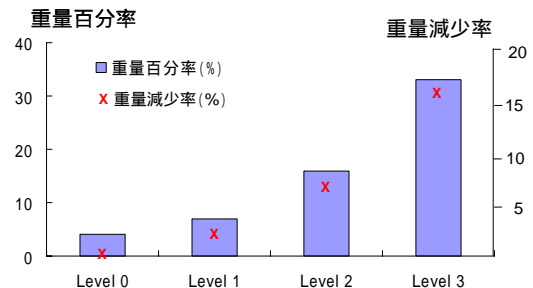


図-7 表面の鉄分重量百分率と内部鉄筋の重量減少率

また、試験終了後に試験体を解体し、鉄筋の重量減少率を測定した結果、Level 0で0%、Level 1で2%、Level 2で6%、Level 3で15%であった(図-7)。参考に、各試験体より取り出した鉄筋の腐食度合いを写真-5に示す。このことから、鉄筋の腐食による重量減少とひび割れから生じる錆汁の鉄分量とは相関があると言える。本試験においては、試験体の種類や試験条件が少ないことから、鉄分量と鉄筋腐食量との定量的関係式の提案には至らないが、今後試験を積み重ねることで、現場に持ち込んだポータブル型蛍光X線分析装置による鉄分の測定量から内部鉄筋の腐食量を推定できる可能性がある。その結果、鉄筋の残存耐力から構造物が現在保有する耐力や性能を知ることができると考えている。

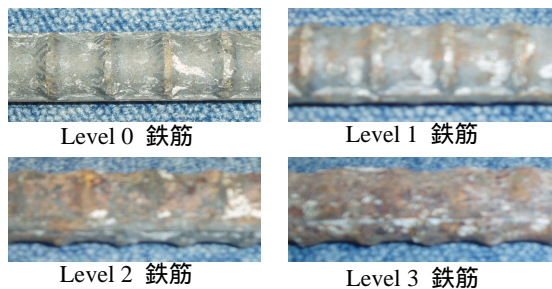


写真 - 5 各レベル試験体中の鉄筋の腐食状況

この手法を確立するためには、鉄筋の腐食度に加え、今後は鉄筋径やかぶり厚、コンクリート強度などをパラメータとした数多くの試験を実施する必要がある。また、鉄筋の腐食がごく微量の場合を含めより詳細な鉄筋腐食量を推定するために、鉄筋の腐食と相関がある鉄分以外の成分についても今後研究を行う。さらに、本装置はポータブルで現場での測定が可能であることが特徴であるが、現場のコンクリート構造物はそれぞれ環境条件が異なるため、環境条件による違いがコンクリート表面の元素成分に及ぼす影響を、現場での測定実績を積み重ねて解明する必要がある。これらの研究の成果から、補修工法を選定するフローに取り入れるために閾値を設定するとともに、現場において標準的に測定可能なマニュアル作りを目標として引き続き研究を行う。

6. おわりに

本稿では、東海道新幹線における新しい補修フローを提案した。

鉄筋の腐食が進行し、公称安全率が低下した構造物を含む劣化が進んだ場合の補修工法として、これまでの全断面修復工法にかわり耐力を補強する工法を提案した。中性化が進んでいる構造物や塩分を多量に含む構造物において一般的に採用されている脱塩・再アルカリ化工法にかわり、経済的で長期的な鉄筋腐食抑制効果が見込める電気化学的鉄筋防錆材注入工法を開発し、これを選択肢として取り入れた。引き続き本工法の研究を進め、具体的な本工法の採用基準を定めるものとする。鉄筋の腐食度の評価手法として、鉄筋の採取や分極抵抗値の測定などの手法と比較して、非破壊でかつ簡易に測定、評価する方法として、ポータブル型蛍光X線分析装置の有効性を検証した。本装置により、定量的にコンクリート表面の鉄分量を測定することが可能であり、内部の鉄筋腐食量との相関から、鉄筋の腐食度を推定できる可能性を示した。今後は、パラメータと試験条件を増やし、鉄分量と鉄筋腐食量との関係式を見出すとともに、現場での環境条件を考慮した標準的な測定方法および評価方法について研究を進める。

本フローは一般的なコンクリート構造物の維持管理においても適用が可能であり、汎用性のあるものとなるよう引き続き研究を進めることとしたい。

謝辞

蛍光X線分析装置によるコンクリート表面の成分分析につきましては、試験の実施およびデータ整理にあたり、アワーズテック株式会社に中嶋様、永井様にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(コンクリート構造物), 財団法人鉄道技術研究所編, 丸善株式会社, 2007.1
- 2) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会, 2000.7
- 3) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価法の研究, RTRI REPORT, Vol.4, No.9, 1990.9
- 4) 関雅樹・西村昭彦・佐野弘幸・中野聡: RC ラーメン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関する研究, 土木学会論文集 No.731/ -63, pp.51-64, 2003.4
- 5) 関雅樹・水谷健太・西村昭彦・中野聡: 兵庫県南部地震によるラーメン高架橋の振動特性に関する考察, 土木学会論文集 No550, V-33, pp.145-153, 1996.1
- 6) 田中宏昌: 東海道新幹線ラーメン高架橋の現状評価と維持管理システムに関する研究, 筑波大学博士論文, 2001.4
- 7) 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準, 社団法人日本鉄道施設協会, 1999.8
- 8) 久保淳一郎・澤田祥平: 中性化した鉄筋コンクリートへの鉄筋防錆材の電気化学的注入工法, コンクリート工学協会誌, Vol. 45, No. 12, pp.23-28, 2007.12
- 9) Kubo J., Sawada S., Page C. L., Page M. M., Electrochemical inhibitor injection for control of reinforcement corrosion in carbonated concrete, Materials and Corrosion, Vol. 59, pp.107-114, 2008
- 10) Cigna R., Andrade C., Nurnberger U., Polder R., Weydert R., Seitz E. (Eds.), in COST Action 521, Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, Final report, European Communities EUR 20599, Luxembourg, pp.115-148, 2003
- 11) 金田尚志・石川幸宏・魚本健人: ポータブル型蛍光X線分析装置を用いたコンクリートの分析, コンクリート工学協会論文集 28 巻 1 号, pp.1793-1798, 2006
- 12) 金田尚志・魚本健人: 塩化物測定用ポータブル型蛍光X線分析装置の開発, コンクリート工学協会論文集 29 巻 1 号, pp.1095-1100, 2007