

報告 ポータブル蛍光 X 線分析装置によるコンクリート表面鉄分量の把握

丸山 真一^{*1}・長谷川 昌明^{*2}・久保 淳一郎^{*3}・関 雅樹^{*4}

要旨：東海道新幹線は供用開始以来 40 年以上が経過し，高架橋等に代表されるコンクリート構造物の維持管理の重要性は益々高まっている。将来にわたり，これらの構造物の健全性を維持するためには，RC 部材の内部鉄筋の腐食度を直接的に評価することが有効である。このため，可搬型の鉄分測定用高性能蛍光 X 線分析装置を開発し，鉄分の定量分析を可能とした。さらに，非破壊により内部鉄筋の腐食度を評価するために，コンクリート表面の鉄分量と内部鉄筋の腐食量の相関性に関する知見を得た。

キーワード：鉄筋腐食，蛍光 X 線分析装置，健全度評価，非破壊試験，鉄分量

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。

ここで，コンクリート構造物の耐力を評価するにおいては，内部の鉄筋の腐食状態を知ることは有用である。例えば，久保ら²⁾は鉄筋の腐食がコンクリートの疲労耐力に及ぼす影響について研究をしている。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¹⁾。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³⁾。一方，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である。そこで本研究では，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することを目的とする。

ここでは，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，可搬型のポータブル蛍光 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オンサイトで定量的に測定し，内部鉄筋の腐食度の推定を試みる。

2. 鉄分測定用ポータブル蛍光 X 線分析装置の開発

蛍光 X 線分析装置は，従来は実験室に据え置き，試料の元素成分を分析するために用いられてきた。近年では，土壌汚染物質（重金属類）をオンサイトで分析することを目的に，可搬型のポータブル蛍光 X 線分析装置が開発，市販されている。

同装置をコンクリートに適用するために，これまでに，コンクリート中の塩化物イオン量を高精度に測定できるよう可搬型の装置を改良したものがある^{4),5)}。本研究では，塩化物イオン量に加えて，コンクリート表面の鉄分量を精度よく検出できるよう，この可搬型蛍光 X 線分析装置を改良することとした（写真 - 1）。



写真 - 1 ポータブル蛍光 X 線分析装置

*1 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部 研究員 工修(正会員)

*2 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部 グループリーダー 工修(正会員)

*3 東海旅客鉄道（株） 新幹線鉄道事業本部東京新幹線構造物検査センター所長 Ph.D.(正会員)

*4 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部長 博（工）(正会員)

2.1 X線検出器の改良

鉄分量および塩分量の感度を向上させるために、可搬型検出器の受光面積を大きくし、検出する蛍光X線強度を増大させた。図-1に示すとおり、検出器の受光面積を2倍にすることで、軽量元素の感度を約2倍に向上させた。

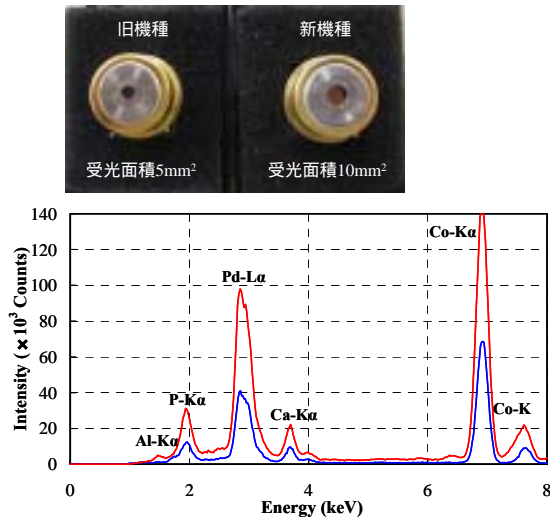


図-1 X線検出器の改良

2.2 1次フィルタの改良

X線管から照射された1次X線は、試料によって散乱され、コンプトン散乱や連続X線が生じ、S/N比(SignalとNoiseの比)が悪くなる為、低濃度の成分に対して精度の高い分析が行えない。鉄分量を測定する際、1次X線を直接試料に照射するとバックグラウンド成分が大きくなり、鉄のピークが著しく検出しづらくなる。このような場合、X線管と試料との間に適切な金属箔を挿入するとその吸収特性によって、連続X線成分を低減できるため、バックグラウンドが下がり、P/B比(ピーク強度とバックグラウンド強度の面積比)が向上する。そこで、図-2に示す1次フィルタにTi(チタン)を用いバックグラウンド成分を下げることで鉄の測定を高感度で可能にした。その結果、図-3の検出スペクトルのとおり、鉄分において明瞭なピークが得られるようになった。

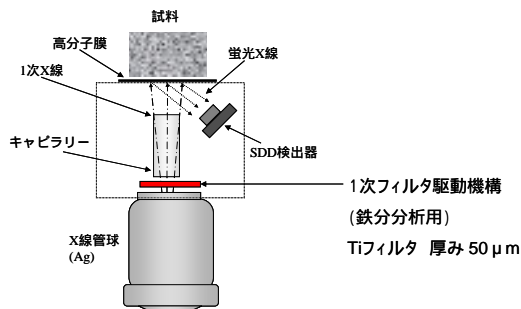


図-2 1次フィルタの改良

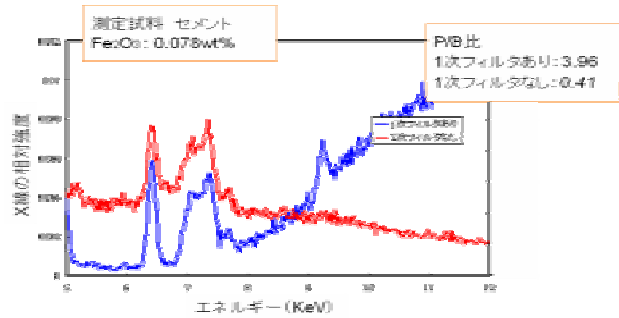


図-3 1次フィルタ改良の効果

3. 電食供試体を用いた検証

3.1 実験概要

今回使用したポータブル蛍光X線分析装置は、前章で開発したものである。本装置の有効性を確認するため、鉄筋の腐食レベルが異なる電食供試体を用いて検討を行った。供試体は、幅240mm×高さ360mm×長さ3000mmのRCはり部材である。使用した鉄筋は主鉄筋としてSD295-D25、帯鉄筋としてSR235-R13を用い、主鉄筋のかぶり厚さが38mmになるように埋設した(図-4)。内部鉄筋を早期に腐食させるため、はりを3%食塩水に浸漬したうえで、表-1の条件で電食させた(写真-2)。電食レベルをLevel 1, 2および3とし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。

測定については、Level 0を除く各供試体においては、電食の進行に伴い発生したひび割れ面上側に向け、この上で、ひび割れ箇所に沿って一定間隔で10測点程度選定し、蛍光X線分析装置を用いて成分分析を行った。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。

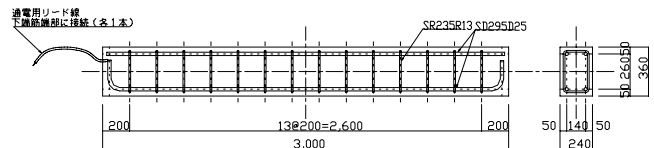


図-4 電食供試体の寸法および形状

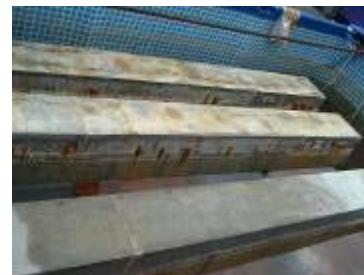


写真-2 電食状況

表 - 1 電食条件

電食レベル	損傷目標	積算電流量
Level 0		
Level 1	鉄筋腐食によるひび割れ発生の進展期状態	172 [hr・A]
Level 2	鉄筋腐食によるひび割れ発生後で、かぶりコンクリートの剥落を伴うまでの加速期状態	1299 [hr・A]
Level 3	鉄筋腐食によるひび割れが発生し、数箇所のかぶりコンクリートの剥落が発生する劣化期状態	3120 [hr・A]

で6%、Level 3で15%であった(図-7)。参考に、各供試体より取り出した鉄筋の腐食度合いを写真-4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。

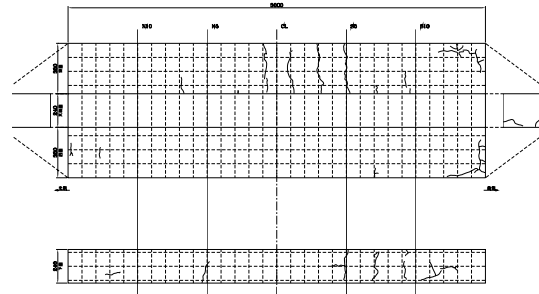


図 - 5 ひび割れ発生状況 (Level 2 供試体)

3.2 実験結果および考察

Level 1, 2 および 3 供試体は、電食の進行に伴い、コンクリート表面に複数のひび割れが生じた。一例として、Level 2 供試体のひび割れ発生状況を図-5に示す。また、各供試体の測定面(ひび割れ発生面)の状況を写真-3に示す。これによれば、積算電流量が多い供試体ほど、ひび割れから内部鉄筋の腐食によって生じた錆が多く発生していることが認められる。次に、計測によって得られた蛍光X線スペクトルの一例として、Level 2の結果を図-6に示す。これによれば、セメント硬化体の成分であるCaやSiのほか、ClやFeを検出していることが認められる。このうち、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を総合すると、鉄筋の腐食度が大きい供試体ほどFeのスペクトル強度が大きいことが分かった。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-1に示す検出器の受光範囲で検出されるスペクトル強度から鉄分量(重量パーセント濃度)への変換は、検量線法を用いた。検量線法とは、標準試料を用いて検量線を作成し、未知試料の含有量を測定する方法である。各供試体から析出した重量パーセント濃度を求めた結果、図-7のようになった。これによれば、積算電流量が多い供試体ほど、すなわち電食が促進した供試体ほど、コンクリート表面に鉄分が析出している傾向が認められる。

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

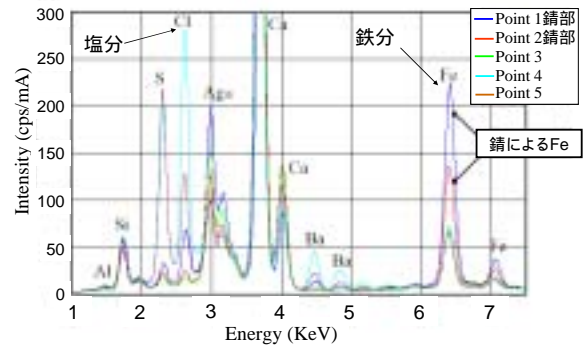


図 - 6 測定スペクトルの例

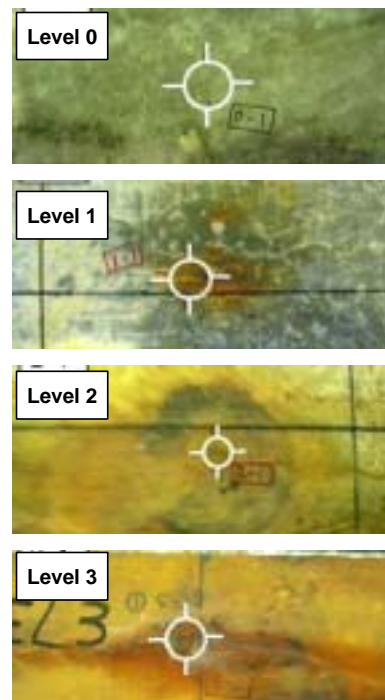


写真 - 3 各供試体の測定面の状況

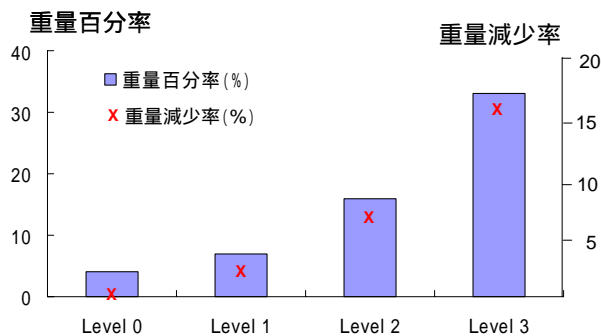


図 - 7 コンクリート表面の鉄分の重量百分率と内部鉄筋の重量減少率

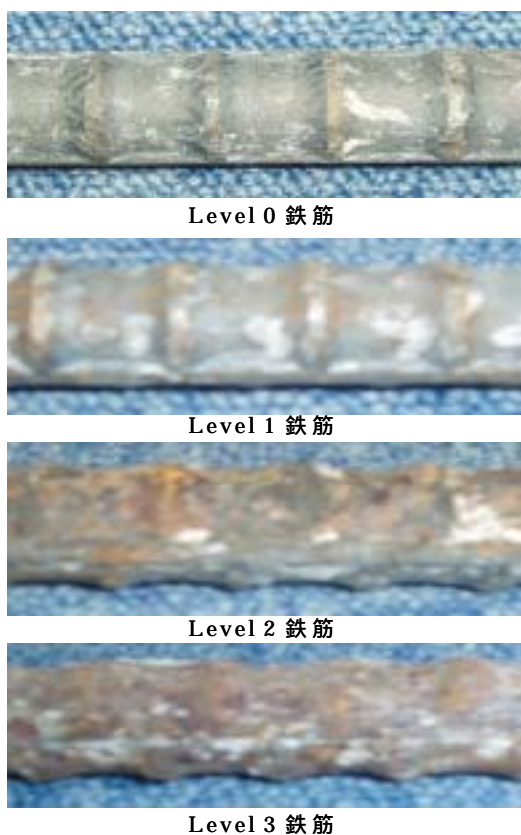


写真 - 4 各レベル供試体の鉄筋腐食状況

4. 促進腐食供試体を用いた検討

4.1 実験概要

前章の電食供試体を用いた検討により、コンクリート表面に析出した鉄分量は、内部鉄筋の腐食量と相関性が大きいことが示唆された。ただし、試験体の種類や試験条件が少ない。また、電食させた供試体であることから、ひび割れを通して鉄分が溶出し、その量は電食量に比例して容易に検出できたことが考えられる。しかしながら、析出する鉄分量は、コンクリートの水セメント比、かぶり厚さ、ひび割れ幅等に応じて変化する可能性がある。そこで、これらをパラメータとし

た促進腐食供試体を用いた検討を行った。

普通ポルトランドセメントを使用した供試体に対し、電食させることなく、塩水噴霧によって内部鉄筋の腐食を促進させた。供試体寸法は、幅 100mm × 高さ 100mm × 長さ 400mm の RC 供試体である。使用した鉄筋は SD295-D6 であり、曲げ加工した後、供試体長手方向に設置した（図 - 8）。この後、各供試体所定のかぶり厚さを設けて打設した。これらの供試体を標準水中養生した後、曲げひび割れが所定幅となるよう 3 点曲げ載荷試験を行った。供試体一覧を表 - 2 に示す。また、打設面から見た供試体の概観を写真 - 5 に示す。

表 - 2 促進腐食供試体一覧

No.	W/C (%)	かぶり厚さ(mm)	目標ひび割れ幅(mm)	製作本数
1	60	10	0.1	3
2			0.2	3
3		20	0.1	3
4			0.2	3
5		30	0.1	3
6			0.2	3
7	70	10	0.1	3
8			0.2	3
9		20	0.1	3
10			0.2	3
11		30	0.1	3
12			0.2	3

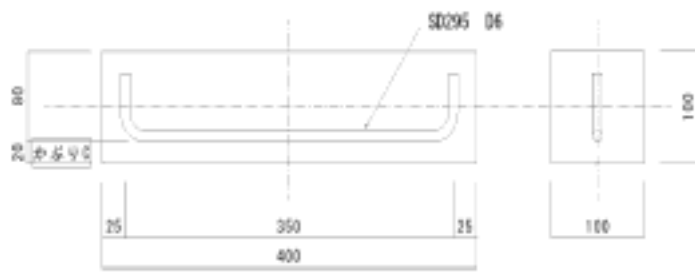
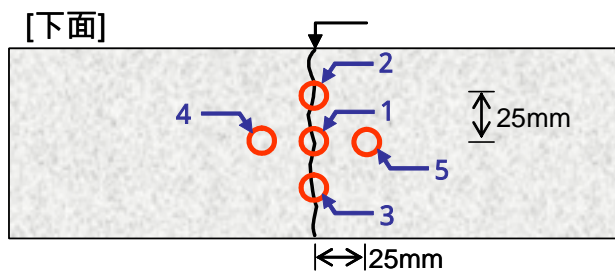


図 - 8 コンクリート供試体の形状及び寸法



写真 - 5 促進腐食供試体

これらの供試体に対し、3点曲げ載荷試験により、目標ひび割れ幅になるように鉄筋直交方向にひび割れを導入した。この際、クラックスケールを用いて実測ひび割れ幅を計測している。曲げひび割れ導入後、鉄筋腐食を促すために促進中性化試験装置を用いて、二酸化炭素濃度5%の環境で4週間中性化促進を行った。さらに、腐食を促進させるために、ひび割れ部に対し6ヶ月間継続的に5%食塩水を噴霧した。次に、導入したひび割れに沿って、図-9に示すようにひび割れを中心に5測点設定し、蛍光X線分析装置を用いてコンクリート表面部の鉄分量を計測した。計測は、塩害腐食を促進させてから、1ヶ月後および6ヶ月後に実施した。この際、得られたスペクトル強度に対し、予め求められている検量線を用いて重量パーセント濃度を算出した。



1:中央、2:25mm上、3:25mm下、
4:25mm左、5:25mm右

図 - 9 コンクリート供試体の計測位置

4.2 実験結果および考察

(1)水セメント比の相違が鉄分量に及ぼす影響

ともに、かぶり厚さ 30mm、ひび割れ幅が 0.2mm、塩分の混入のない No.6 (W/C=60%) および No.12 (W/C=70%) 供試体におけるコンクリート表面の鉄分

量を図-10に示す。これによれば、いずれの計測点も No.12 供試体の方が、鉄分量の析出が多いことが認められる。これらの供試体は、ひび割れ幅が同等であるため、塩化物イオンの浸透により、不動態被膜は同程度破壊されていると考えられる。従って、水セメント比が大きく、セメント硬化体の空隙が大きい No.12 供試体の方が酸素の供給が多いため、No.6 供試体よりも内部鉄筋の腐食度が大きく、コンクリート表面に鉄分が多く析出したと推察される。

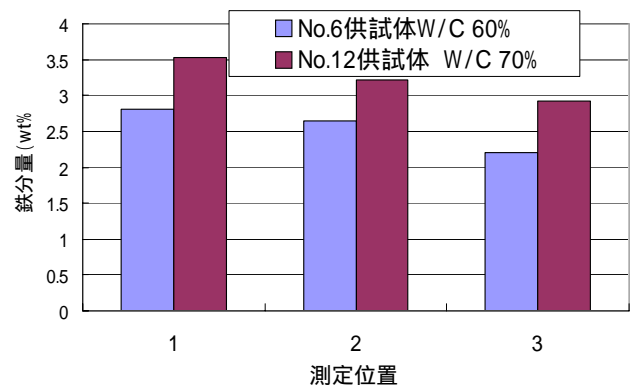


図 - 10 水セメント比の相違が鉄分量に及ぼす影響

(2) ひび割れ幅が鉄分量に及ぼす影響

塩害腐食を促進させてから1ヶ月後の全供試体の計測結果を図-11に示す。これによれば、全供試体のうち、鉄分量が著しく析出しているのは、実測ひび割れ幅が大きい No.2 供試体および No.14 供試体であることが認められた。従って、ひび割れ幅が大きいほど、酸素の供給が多く、内部鉄筋の腐食が促進した結果、多量の鉄分量が析出したものと推察される。このことから、今後も継続して塩害腐食を促進させ、定期的に計測を行う。

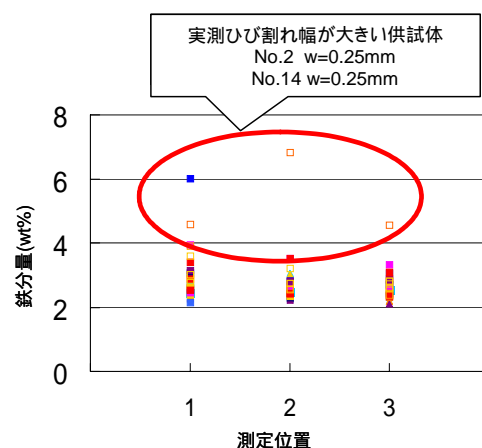


図 - 11 全供試体の計測結果

(3) かぶり厚さが鉄分量に及ぼす影響

ともに、W/C が 70%，実測ひび割れ幅が 0.2mm，塩分の混入のない No.8（かぶり厚さ=10mm）および No.12（かぶり厚さ=30mm）供試体におけるコンクリート表面の鉄分量を図 - 12 の左に示す。同様にとともに、W/C が 60%，実測ひび割れ幅が 0.3mm，塩分の混入のない No.2（かぶり厚さ=10mm）および No.4（かぶり厚さ=20mm）供試体におけるコンクリート表面の鉄分量を図 - 12 の右に示す。鉄分量の計測は，塩害腐食を促進させてから 1 ヶ月後に実施した。これらによると，かぶり厚さはコンクリート表面に析出する鉄分量に関係しないと考えられる。ただし，腐食促進してから 1 ヶ月後の計測だったため，有意な差が認められなかった可能性がある。従って，今後も継続して塩害腐食を促進させ，定期的に計測を行う。

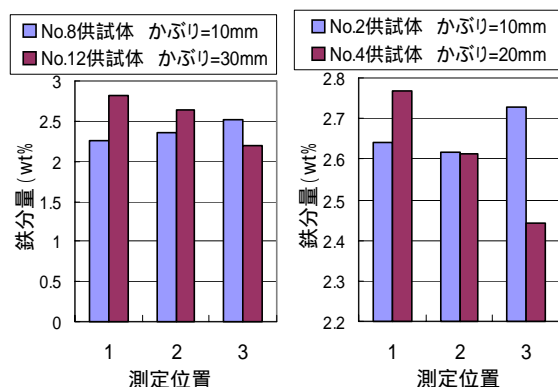


図 - 12 かぶり厚さが鉄分量に及ぼす影響

5. まとめ

本稿では，東海道新幹線のコンクリート構造物の維持管理のために，コンクリート中鉄筋の腐食量を非破壊検査で把握することを目的として，鉄分測定用ポータブル蛍光 X 線分析装置の開発，および同装置の適用妥当性を検討した。電食供試体を用いた結果から，今回鉄分検出用に改良したポータブル蛍光 X 線分析装置の有用性を確認するとともに，測定された鉄分量と内部鉄筋の腐食量とは相関があるこ

とが認められた。また，腐食促進供試体を用いた結果から，水セメント比およびひび割れ幅は鉄分量の析出に影響を及ぼし，他方，かぶり厚さが及ぼす影響は大きくないことが認められた。これについては，今後も継続して腐食を促進させ，鉄分量の計測を行っていく。

今後の課題としては，本装置で計測可能なコンクリート表面の鉄分量から内部鉄筋腐食度を評価する閾値を提案することとする。これについては，腐食促進供試体からコンクリートを破碎して鉄筋を採取し，直接的に鉄筋の腐食減量を求めることにより，鉄筋の腐食度とコンクリート表面の鉄分量の相関を検証する必要があると考えている。今後，このような試験を積み重ねることにより，鉄筋の腐食度を把握することが可能になると考える。また，本手法は将来的には，新幹線営業線のコンクリート構造物への適用を想定しているため，現場での試験実績を積み重ねる必要があると考えている。

なお，ポータブル蛍光 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中嶋様，永井様にご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

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) 久保淳一郎ほか：腐食した鉄筋の疲労特性，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.5-113，2008.9
- 3) コンクリート診断技術 08，社団法人日本コンクリート工学協会，2008
- 4) 金田尚志ほか：ポータブル蛍光 X 線分析装置を用いたコンクリートの分析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1
- 5) 金田尚志ほか：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 集 1 号，pp.1095-1100，2007