

論文 塩化物量を変化させた大型試験体に対する各種非破壊試験法の適用性検討

金光 俊徳*1・山下 恭敬*2・渡邊 晋也*3・福山 智子*4

要旨: 本研究では、内在塩化物量を変化させた大型鉄筋コンクリート試験体に対して、ひび割れ幅測定、自然電位法、塩化物量評価法(ドリル削孔法、蛍光 X 線法)、反発速度比測定法、および分極抵抗法(3 電極法、4 電極法)を適用し、コア試料採取および鉄筋腐食率により精度検証した。その結果、各塩化物量評価法は浅い位置で雨掛かりによりばらつきが大きくなること、反発速度比測定法は載荷試験結果より高い強度を推定すること、分極抵抗法は手法同士の指標の大小傾向は一致するが、腐食率とは整合しないことがわかった。このように、破壊可能かつ経年を有する大型試験体の活用により、各試験法の適用性と課題を明らかにできた。

キーワード: 非破壊試験、ひび割れ、塩化物量、反発速度比、分極抵抗法

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート構造物の現有性能を評価するにあたって、目視観察のみでは得られる情報が限られていることから、非破壊試験法を活用することが重要である。非破壊試験法のひとつの有用な使い方は、長大構造物に位置を変えながら適用し広範囲の定量情報を得ることによって、劣化している可能性が高い箇所や品質が低い箇所を絞り込み破壊試験の実施数を低減することである¹⁾。例えば、ある鉄筋が腐食している場合に、その腐食範囲や隣り合う鉄筋が腐食しているかどうかを非破壊で推定できれば有用である。

現在、様々な非破壊試験法が提案されているが、そのバックデータは条件を変化させた多数の小型試験体に対して適用した結果と推察される。しかし、実際の構造物では腐食が不均一に発生し、コンクリートの品質にばらつきがある。そのような状況下における非破壊試験法の適用性を検証することは実務応用にあたって重要と考えられる。しかし、実構造物への適用は、試験条件の調整が難しい上に、調査時間や破壊試験の実施箇所が限られることが多い。

そこで本研究では、練り混ぜる塩化物量を調整して作製し、経年により腐食進行させた大型試験体に対して複数の非破壊試験法を適用し、コア試料採取および鉄筋腐食率により精度検証することで、各手法の適用性を検討した。非破壊試験法は、内部鉄筋の腐食有無および表層品質を推定できる方法とし、JCI-TC234A 委員会「構造的な性能に主眼を置いた鋼材腐食性状の診断・推定手法研究委員会」の関係者が実施可能な方法を選定した。

2. 試験体概要

調査対象とした大型試験体は、寸法が幅 510 mm × 長さ 4000 mm × 高さ 200 mm で、作製時に 0~10 kg/m³ の塩化物を混入し、D13 の異形鉄筋を純かぶり 30 mm の位置に 100 mm 間隔で 4 本埋設したものである。本調査時点で、屋根等がない屋外に約 10 年間暴露されている。かぶり側である上面および下面の 2 面暴露とし、側面の 4 面はエポキシ樹脂によりシールした。図-1 に試験体の写真を示す。また表-1 にコンクリートの配調合を示す。

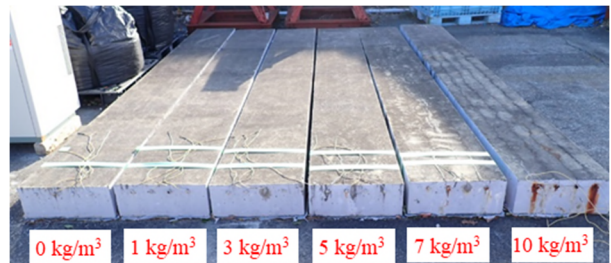


図-1 試験体の写真

表-1 試験体の配調合

	W/C [%]	[kg/m ³]						SL [cm]	Air [%]	F [N/mm ²]	
		W	C	S1 + S2	G	Ad	Cl ⁻ NaCl				
C-0	54.5	155	285	529 + 353	1000	2.85	0	0.00	7.0	3.5	35.3
C-1							1	1.65	10.0	3.1	34.4
C-3							3	4.95	9.0	3.1	31.4
C-5							5	8.24	10.0	3.5	30.8
C-7							7	11.5	6.5	3.5	31.1
C-10							10	16.5	6.5	4.5	28.0

C: 普通ポルトランドセメント, S1: 川砂, S2: 山砂, G: 川砂利, Ad: 減水剤, NaCl: 塩化ナトリウム試薬 1 級, F: 28 日強度

*1 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 高速道路総合技術研究所 橋梁研究室 博士 (工学) (正会員)

*3 LiT (株) 博士 (工学) (正会員)

*4 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)

3. 測定概要

測定日の温湿度環境を図-2 に示す。この環境下で以下の測定を行った。各測定位置を端部から何 mm と表現しているが、これは図-1 で見えている 510 mm × 200 mm の面を 0 mm とした時の試験体長軸方向の距離である。また、内部鉄筋は図-1 の方向で左から、左端、左、右、右端という名称とした。

3.1 ひび割れ幅

既往研究には、腐食ひび割れ幅から腐食量を推定するための考え方²⁾がある。推定に必要なデータは、コンクリートの圧縮強度、かぶり、配筋、および鉄筋径である。対象試験体においてこれらは既知であるため、本調査でひび割れ幅と腐食量に相関があるかどうか検証できる。ひび割れ幅は、試験体端部から 50 mm ごとにクラックスケールを用いて測定した。

3.2 自然電位法

試験体端部から 100 mm ごとに内部鉄筋の自然電位を測定した。デジタルマルチメーターの+極と内部鉄筋をケーブルで導通して、-極に鉛照合電極(PRE)を接続し、水を含ませたスポンジを介して鉄筋直上のコンクリート表面に PRE を接触させることで測定した。PRE から飽和硫酸銅照合電極(CSE)には、温度によって多少変化するが、PRE の測定値から 800mV を差し引けば換算できる³⁾。

3.3 中性化深さ

JIS A 1152 に準拠して、塩化物量 10 kg/m³ の試験体(以降 C-10 試験体と称する)に対して 3 箇所コア試料を採取し、その側面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで評価した。採取位置は、端部から 900, 1700, 2500 mm の位置である。

3.4 塩化物量

(1) ドリル法

NDIS3433「硬化コンクリート中の塩化物量の簡易試験方法」に準拠して C-10 試験体に対して、φ25 mm のドリルビットを用いて 1 測点あたり測定深さ 60 mm まで削孔した。試料採取は深さ 20mm ごとに行った。4 測点実施し、位置は試験体端部から 800, 1600, 2400, 3200 mm であり、順に試験位置①～④と称した。各測点では、鉄筋 4 本の間点である 3 点から削孔して、それぞれの削孔穴から採取した試料(合計 50 g 以上)を表面からの深度ごとに混合した。その試料に対して炭酸塩を用いた全塩分測定を行った。

(2) 蛍光 X 線法

ポータブル型蛍光 X 線分析装置を用いて、試験体表面の塩化物量を測定した⁴⁾。位置は試験体端部からおおむね 1000 mm とした。C-10 試験体に対しては、表面だけでなく、表面から 3 mm および 7 mm の深さまでサンダーで削った後も測定した。

3.5 コンクリートの表面強度評価

試験体表面に対して反発速度比測定法を適用して反発速度比 Q を測定し、これまでに提案されている換算式を用いて圧縮強度を算出することによって表面強度を推定した⁵⁾⁶⁾。従来の反発度 R を測定するリバウンドハンマーでは適用方向によって補正する必要があるが、反発速度比測定法は補正の必要がないことが利点である。

3.6 分極抵抗法

分極抵抗の測定には、鉄筋にリード線を導通する従来型の 3 電極法と、コンクリート表面のみから完全非破壊で測定できる 4 電極法の 2 つの方式を用いた。3 電極法の測定時の様子を図-3 に、4 電極法を図-4 に示す。

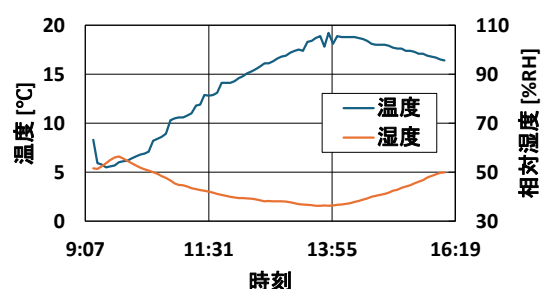


図-2 測定日の温湿度



図-3 3電極法の測定の様子



図-4 4電極法の測定時の様子

(1) 3 電極法

分極抵抗の測定にはポータブル型測定器と対極と照合電極が一体となったプローブセットを使用した。見かけの分極抵抗とコンクリートの電気抵抗を測定し、電流分布状況を数値シミュレーションによって求めて被測定面積を設定している⁷⁾。その結果を用いて、単位面積あたりの分極抵抗(Ωcm^2)を算出した。

(2) 4 電極法

この手法は、4 個の端子をコンクリート表面に内部鉄筋の直上かつ平行に一列に配置して、外側の 2 端子に対して電圧をかけて広帯域の周波数の電流を印加し、内側 2 端子の電位差を測定することによってインピーダンスを取得し、分析することによって腐食指標を算出する手法である。

腐食指標から単位面積当たりの分極抵抗(Ωcm^2)への換算方法はすでに提案しており⁸⁾、現場等への適用性も検証している⁹⁾。測定条件としては、電位振幅 $\Delta V=1.0\text{ V}$ 、周波数が $80\text{mHz}\sim 500\text{ kHz}$ 、外側 2 端子間隔が 120 mm 、内側 2 端子間隔が 80 mm である。コンクリート表面のみからの印加では鉄筋-コンクリート界面にかかる電位差が小さくなるため、3 電極法より高い電位振幅を設定し

ている。

3.7 鉄筋の腐食状況確認

内部鉄筋の腐食状況を実際にはつり出して観察したことに加え、実際の腐食重量減少を測定することによって検証した。腐食生成物除去後の鉄筋重量(g)と健全時の鉄筋の重量(g)との比から、腐食率(%)を算出した。

4. コンクリートの品質や状態の評価

4.1 ひび割れ幅と自然電位の関係

C-10 試験体表面のひび割れ状況を図-5 に示す。図中の赤丸はコア試料を採取した箇所である。

続いて、ひび割れ A およびひび割れ B のひび割れ幅と自然電位の測定結果を図-6 に示す。この結果に基づき、ひび割れ幅と自然電位の大小関係が把握しやすい箇所にて、湿式によるコア抜きを実施した。採取直後にはコア表面の水分を拭き取った。

コア抜き箇所の腐食状況を図-7 に示す。ひび割れ幅が大きいほど腐食量が大きいと仮定した場合、B1 や B3 と比較して A1 の腐食量が大きいと予想されるが、A1 の腐食量が大きいように見受けられない。また、電位が低いほど腐食進行すると仮定すると、B1 より B3 の方が腐

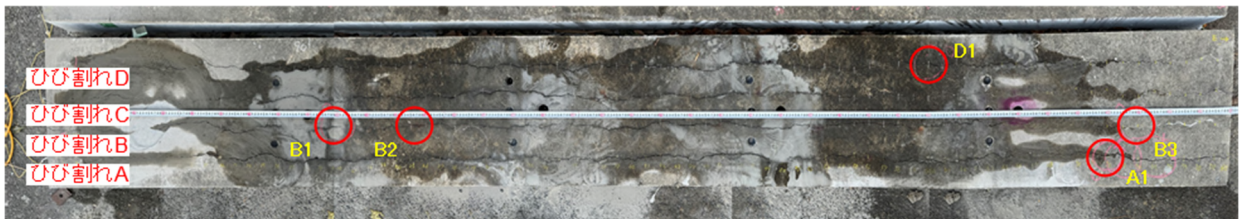


図-5 ひび割れ状況 (C-10)

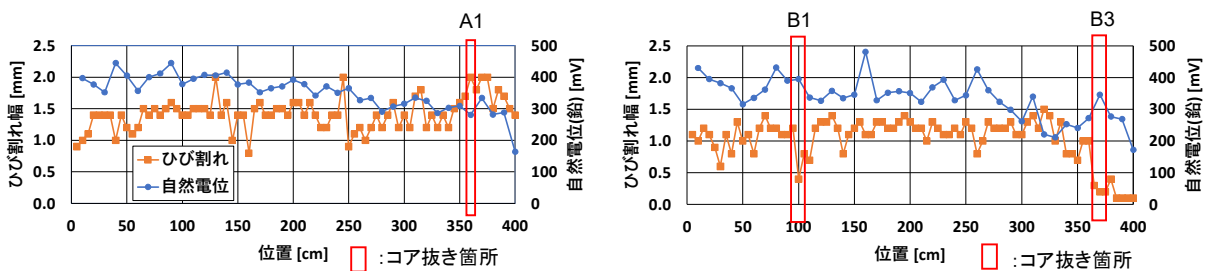
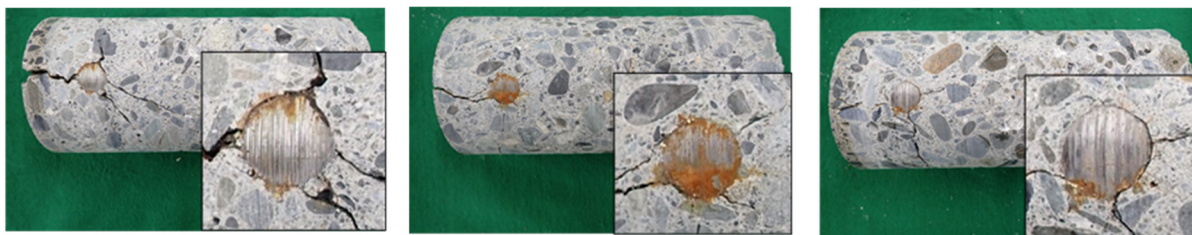


図-6 C-10 試験体のひび割れ状況 (左: ひび割れ A, 右: ひび割れ B)



A1: ひび割れ幅:大, 電位:小

B1: ひび割れ幅:小, 電位:大

B3: ひび割れ幅:小, 電位:小

図-7 コア抜き箇所の腐食状況

食進行していると予想されるが、B1の方が腐食進行しているように見受けられる。

したがって本試験体に関しては、ひび割れ幅と自然電位には相関がなく、またひび割れ幅と腐食量には相関がないことがわかった。ただし、ある特定箇所のデータから得られた結果であることに注意が必要である。

4.2 中性化深さ

中性化深さはいずれの試料でも0 mmであった。このことから、屋根のない屋外に上向きに暴露したコンクリートは極めて中性化しにくいことがわかった。

4.3 塩化物量の評価

C-10 試験体に対するドリル削孔による塩化物量の評価結果を図-8に示す。表面からの深さが0-20 mmでは推定塩化物量に大きなばらつきを有するが、20-40 mmおよび40-60 mmではばらつきが小さい。これは表面付近では雨掛かりにより塩化物量の変化があり、同一試験体内でもその変化程度が異なるためと考えられる。一方で、深いほど雨掛かりの影響が小さくなると推察される。

続いて、蛍光 X 線法による評価結果を表-2に示す。表面での推定塩化物量はさび汁部以外では小さい値となっており5 kg/m³以上の練り混ぜ量でも小さい。一方、削り部における推定塩化物量は、表面より比較的大きな値が推定されており、こちらの方が真値に近いと推察された。

4.4 反発速度比測定法の測定と検証

反発速度比測定法による測定から得られた圧縮強度推定結果を図-9に示す。測線①は試験体側面から左端鉄筋との間、測線②は左端鉄筋の直上、測線③は左端鉄筋と左鉄筋との間である。各測線では、10箇所打撃した。結果を見ると10 kg/m³の測線②の推定強度が他と比較して非常に小さいことがわかる。鉄筋直上では腐食にともなうひび割れがあるため、反発速度比が小さくなったと考えられる。

検証として、C-10試験体から3体のコア試料を採取し、圧縮荷重による強度試験を実施した。直径の平均値が63.2 mm、高さの平均値が125.5 mm、圧縮強度の平均値が28.6 N/mm²であった。反発速度比測定法により強度推定した結果と荷重試験結果との比較を表-3に示す。

結果、反発速度比測定法は高めに強度を推定することが明らかとなった。これは表層のペースト成分が洗われ骨材の露出が多いことが原因のひとつと考えられるが、それを考慮しても非常に高い値が推定されている。既設コンクリートに本手法を適用する際には十分注意することに加え、今後既設構造物への適用と検証を蓄積することにより推定式の再構築も検討すべきと考える。

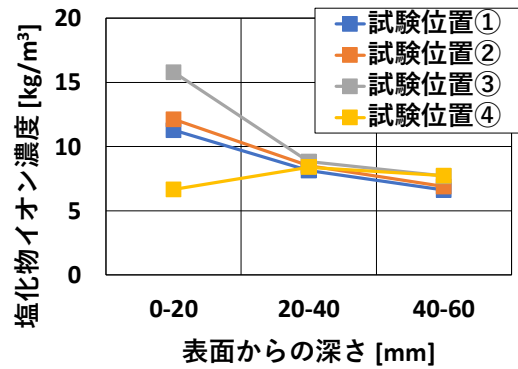


図-8 ドリル削孔法による塩化物量(C-10)

表-2 蛍光 X 線による塩化物量

測定面	CL-Kα 強度 (cps)	塩化物量換算 (kg/m ³)
0 kg/m ³ 表面	42.01	1.62
1 kg/m ³ 表面	32.66	1.15
3 kg/m ³ 表面	102.06	4.64
5 kg/m ³ 表面	43.01	1.67
7 kg/m ³ 表面	57.11	2.38
10 kg/m ³ 表面	72.98	3.18
10 kg/m ³ 表面(錆汁部)	1928.62	96.52
10 kg/m ³ 3 mm 削り部	270.53	13.11
10 kg/m ³ 3 mm 削り部(錆汁部)	210.69	10.10
10 kg/m ³ 7 mm 削り部	340.78	16.65
10 kg/m ³ 7 mm 削り部(錆汁部)	334.96	16.35

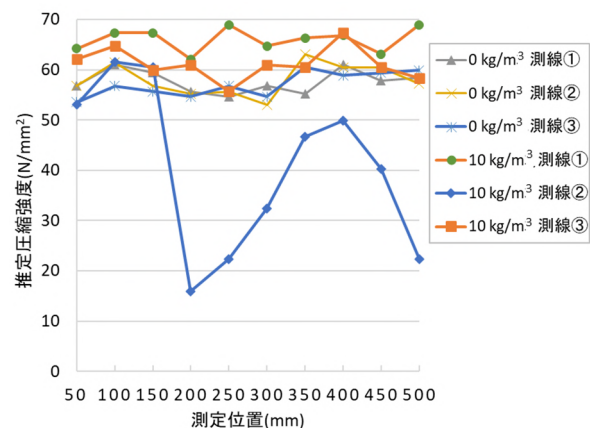


図-9 反発速度比測定法による強度推定結果

表-3 反発速度比測定法による推定強度と実際の強度との比較

測線	推定強度 N/mm ²	圧縮強度(荷重) N/mm ²
①: 端部-鉄筋間	65.9	28.6
②: 鉄筋直上	40.5	
③: 鉄筋間	61.1	

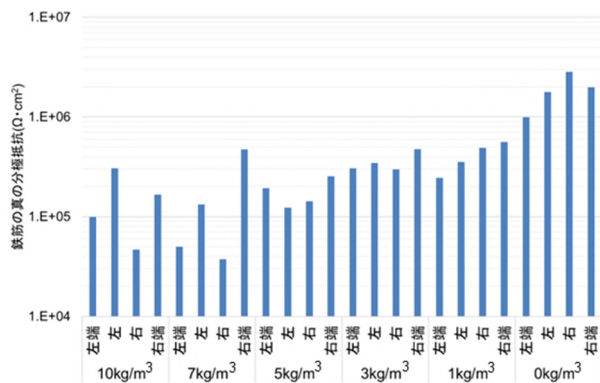


図-10 3電極法による分極抵抗

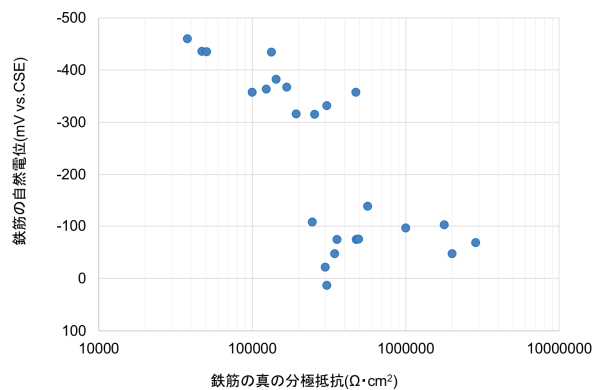


図-11 自然電位と分極抵抗の関係

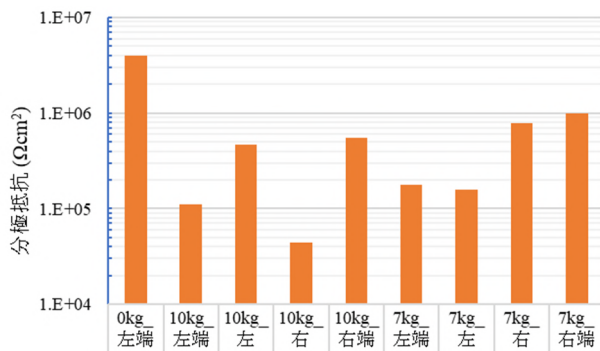


図-12 4電極法による分極抵抗

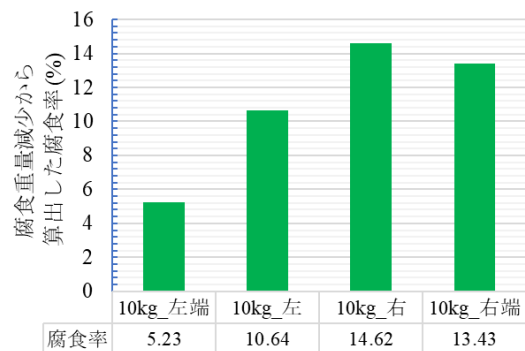


図-13 C-10の腐食率算出結果

5. コンクリート内部鉄筋の腐食評価

5.1 3電極法による評価結果

3電極法により推定した単位面積当たりの分極抵抗を図-10に示す。塩化物量が増加するほど分極抵抗が低下しており、腐食発生の可能性や腐食速度が大きいことを示唆している。また、塩化物量7kg/m³と10kg/m³の試験体に着目すると、鉄筋によって分極抵抗の値が異なっている。例えば、10kg/m³の右端と左の鉄筋に対して、右と左端の鉄筋の分極抵抗が低い値となっている。これは、同一試験体内でも腐食進行程度が異なる可能性を示している。

自然電位と分極抵抗を比較した結果を図-11に示す。分極抵抗が低下するほど自然電位が低下する傾向にあり、両手法ともに腐食発生の判定に使用できる可能性が高いことを示している。

5.2 4電極法による評価結果

4電極法による単位面積当たりの分極抵抗評価結果を図-12に示す。特にC-10試験体に関しては、右端と左の鉄筋と比較して、右と左端の鉄筋の分極抵抗が低い値であった。これは3電極法と同様の傾向である。CEB基準¹⁰⁾では、分極抵抗130(kΩcm²)より大きい場合に健全と判定するが、10kg_左端、10kg_右以外の鉄筋は健全領域に入ることから、現在では腐食がほとんど進行していない可能性がある。

5.3 手法同士の比較と実際の腐食傾向との比較

5.1節と5.2節で示した図-10と図-12を比較すると分極抵抗法(3電極法と4電極法)では、C-10試験体に関して分極抵抗の大小傾向が一致することがわかった。ただし、C-7試験体に関しては大小傾向が一致していない鉄筋もある。このように、必ず一致するというわけではないため、今後も解釈方法等の検討が必要である。また、実際の腐食状況との比較として、図-13にC-10の実際の鉄筋の重量減少から算出した分極抵抗測定箇所近傍の腐食率を示す。10kg_左端の鉄筋に着目すると、分極抵抗は低い一方で腐食率が低い、すなわち腐食速度が大きいのがこれまで蓄積した腐食量としては小さいという結果であった。このように、分極抵抗と腐食率を単純に比較しても傾向として一致しないことがわかった。これは、一回の測定で腐食量を推定することには限界があることを示しており、逆に言えばモニタリングによって腐食速度の経時変化を測定することが重要であるということがわかった。

6. まとめ

本研究では、塩化物量を変化させた大型試験体に対して、各種非破壊試験法を適用した。第1章に記載した通り、破壊可能かつ経年を有する大型試験体を活用することにより、各試験法の適用性と課題を明らかにすること

ができた。得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験体全長に渡ってひび割れ幅と自然電位を測定、比較した結果、両者に相関は見られなかった。
- (2) 塩化物量の簡易評価法であるドリル削孔法や蛍光 X 線法で評価したところ、表面付近の塩化物量のばらつきは大きかったが、深いほど練混ぜた塩化物量に近いことがわかった。
- (3) 反発速度比による強度推定結果とコア試料の圧縮強度を比較した結果、反発速度比は高めに強度推定することが明らかとなった。これは表層のペースト成分が洗われ骨材の露出が多いためと考えられ、既設コンクリートに適用する際の課題である。
- (4) 分極抵抗法(3 電極法と 4 電極法)と実際の腐食状況を比較した結果、両手法による分極抵抗の大小傾向がおおむね一致した。その一方で、分極抵抗の大小傾向と腐食率には相関が見られなかった。これは、一回の分極抵抗測定で腐食量を推定することには限界があることを示している。

謝辞

本調査は、JCI-TC234A 委員会「構造性能に主眼を置いた鋼材腐食性状の診断・推定手法研究委員会」の活動の一環として行われたものである。関係各位に謝意を示す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会，第 3 編，9 章，pp.271-312, 2024.
- 2) 西内達雄：コンクリート表面のひび割れ幅に基づく鉄

筋腐食量の推定手法，電力中央研究所報告，N08024, 2009.

- 3) 篠田吉央，望月紀保：鉄筋自然電位の測定温度に伴う照合電極間の電位換算について，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-224, pp.447-448, 2011.
- 4) 金田尚志：ハンドヘルド蛍光 X 線分析装置によるコンクリートコア側面を用いた塩化物量の測定，土木学会年次学術講演会，Vol.65, V-190, pp.379-380, 2010.
- 5) 湯浅昇：リバウンドハンマーによる強度推定に関する話題提供—各種リバウンドハンマーの相互比較，リバウンドハンマーの反発度と圧縮強度との関係を求める方法の提案—，コンクリート工学，Vol.48, No.12, pp.23-30, 2010.
- 6) 道路構造物ジャーナル NET：<https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/11171/?spage=4>
(閲覧日：2025 年 1 月 9 日)
- 7) 金田尚志，松岡和巳：BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1715-1720, 2011.
- 8) 金光俊徳，左藤眞市，高谷哲，山本貴士：完全非破壊による分極抵抗法の端子配置および測定結果の解釈方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.45, No.1, pp.694-699, 2023.
- 9) 金光俊徳，染谷望，渡邊晋也，左藤眞市：種々の現場測定から見出された非破壊分極抵抗法の注意点と課題，コンクリート工学年次論文集，Vol.46, No.1, pp.787-792, 2024.
- 10) CEB: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin 243, 1998.