

最新の診断技術

日紫喜 剛啓^{*1}・林 大介^{*2}

PC 技術が適用されるようになってから半世紀以上が経過し、PC 構造物を適切に維持管理していくことが必要とされている。こうした状況を踏まえ、本報では、PC 構造物の診断技術の最新動向について概説した。

これまでに、PC 構造物における特徴的な変状として、塩害、アルカリ骨材反応および PC グラウトの充てん不良が確認されている。これらの3つの変状に関して、①塩害については、現場で迅速に塩化物イオン量を測定できる簡易型蛍光 X 線装置や近赤外分光法、電磁波レーダ法が実用化されつつあること、②アルカリ骨材反応については、磁気法による一方向からの測定のみで隅角部の鉄筋破断を診断できるようにする研究が進められていること、③ PC グラウトの充てん不良については、インパクトエコー法の画像処理（SIBIE 法）や電磁パルス法によって、未充てん部を検出できる可能性が見い出されていることなどを紹介した。

キーワード：非破壊検査、塩害、アルカリ骨材反応、PC グラウト充てん不良

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）技術は、1950 年代に実用化され、橋梁構造物を中心とした多くの構造物に適用されている。

PC 構造物は、ひび割れを制御するように設計され、また、高強度コンクリートが用いられることから、一般に、高い耐久性を有する傾向にある。その一方で、環境条件の変化や過大な外荷重に対して敏感に反応する特性もあり、なかには、PC 鋼材の腐食によって構造物が崩壊した事例も報告されている¹⁾。したがって、長期間にわたって所要の性能を保持していくためには、適切な維持管理を行っていくことが必要とされる。今後、PC 構造物の高齢化が進んでいくことを踏まえると、ますます、維持管理の重要性が高まっていくものと考えられる。

こうした状況を鑑み、本報では、PC 構造物の維持管理において重要な役割を果たす診断技術を取り上げ、最近の研究動向について概説する。

2. PC 構造物の診断と調査内容

土木コンクリート構造物の維持管理では、一般的に、日常点検、定期点検および詳細点検が行われている²⁾。

日常点検および定期点検においては、主として目視や打音による調査が行われる。ここで変状が確認された場合には、詳細点検として変状に応じた構造物の詳細データが取得される。

これらの点検で実施される主な調査項目および方法を表 - 1 に示す³⁾。ここで、同表には、次章で紹介する調査項目を網掛けで示してある。構造物の診断を適切に行うためには、こうした点検・調査を高い精度で行うことが重要であり、供用中の構造物を極力傷つけることなく、迅速に、データを取得できる技術が必要とされている。

3. PC 構造物の診断技術の現状

これまでに、PC 構造物における特徴的な変状として、塩害、アルカリ骨材反応および PC グラウトの充てん不良が発生している²⁾。これらのほかにも PC 構造物に生じる変状はあるが、本報では、これらの3つの代表的な変状に着眼して、診断技術に関する動向を紹介する。

3.1 塩害に関する診断技術

1 つめは、1970 年代に日本海沿岸部における PC 橋梁で発生した事例に代表される塩害である。PC 構造物には塩化物イオンが浸透しにくい低水セメント比のコンクリートが用いられることが多いが、こうした事例によって、沿岸域のような厳しい塩害環境においては早期に劣化が生じる可能性もあることが明らかとなった。

塩害については、まず、コンクリート中に浸透した塩化物イオン量を高い精度で把握することが重要である。一般的な方法は、コアを採取して深さ方向の塩化物イオン量を分析する方法であるが、最近では、現場で迅速に塩化物イオン量を測定する方法の研究開発が進められている。



^{*1} Yoshihiro HISHIKI

(社)日本構造物診断技術協会
技術委員長（鹿島技術研究所）



^{*2} Daisuke HAYASHI

(社)日本構造物診断技術協会
技術委員（鹿島技術研究所
土木材料グループ）

○ 特集 / 解説 ○

表 - 1 PC 構造物の主な調査項目および方法 ³⁾

調査対象	調査技術
はく離・空洞	打音法, 赤外線法
ひび割れ・内部欠陥	内視鏡による目視法
内部欠陥	電磁波レーダ法, 打音法, 衝撃弾性波法, 超音波法, X線・γ線透過法, 赤外線法
部材厚	衝撃弾性波法, 超音波法, 打音法, 電磁波レーダ法
ひび割れ幅	目視法, 光学測定法
ひび割れ深さ	超音波法, コアサンプリング
変位・変形・疲労	光学測定法
圧縮強度	コアによる方法, 小径コアによる方法, 反発硬度法, 衝撃弾性波法, 超音波法
配合推定	セメント協会法, ICP法, グルコン酸ナトリウム法
鉄筋位置の把握	電磁誘導法, 電磁波レーダ法, X線・γ線透過法, はつりによる目視観察
鉄筋の腐食	鉄筋はつり出し法, 自然電位法, 分極抵抗法, コンクリート抵抗率法
塩化物イオン量	電位差滴定法, 硝酸銀滴定法, イオンクロマトグラフ法, EPMA法, 腐食センサ法
中性化深さ	採取コアによる方法, 小径コアによる方法, ドリル法, ドリル法 (簡易法), ガーゼ法, フルオレセイン法, 電磁波レーダ法
凍害	フェノールフタレイン法, はつり面で測定する方法, コンクリート供試体による方法, 採取コアによる方法, ドリル法, 小径コアによる方法
アルカリ骨材反応	反発硬度法, 細孔径分布調査
化学的腐食	SEM法, EPMA法
PCグラウトの充てん性	SEM法, EPMA法
	衝撃弾性波法, 削孔法 (内視鏡), X線透過法, インパクトエコー法, 超音波法

※網掛けは、本文で紹介する調査項目である。

たとえば、簡易型蛍光X線装置を用いてコンクリートの塩化物イオン量を測定する方法が検討されている⁴⁾。蛍光X線分析は、物質にX線を照射した際に発生する固有X線（蛍光X線）を検出・分光して元素分析を行うものであり、あらかじめ作成された検量線によって塩化物イオン量を推定する。実際の測定では、骨材とセメントを均等に採取することができる直径20～30mm程度のドリル削孔を行い、写真-1に示すようなポータブル型の蛍光X線装置を用いて塩化物イオン量を定量する。現場において数分で測定することができ、電位差滴定法との比較において、図-1に示すような妥当な測定結果が得られている⁵⁾。現在、実構造物への適用が進められており、さまざまな測定ノウハウが蓄積されつつある技術といえる。



写真 - 1 蛍光X線分析装置の一例 ⁵⁾

また、同様に、直径20～30mm程度に削孔した孔内にセンサを挿入し、図-2に示すように近赤外分光法によって塩化物イオン量を測定する方法が検討されている⁶⁾。近赤外分光法は、対象物に照射された近赤外領域（波長800～2500nm）の光の透過あるいは反射光の吸収に基づく分光法であり、コンクリート中のモルタル部分に近赤外光を照射して拡散反射された近赤外光の吸光度スペクトルから塩化物イオン量を推定する方法である。本技術についても、図-3に示すように、電位差滴定法による結果と高い相関が得られることが確認されている。

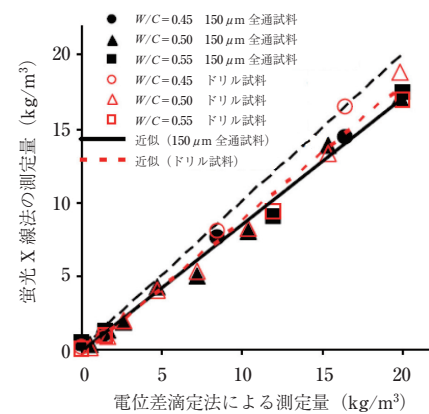


図 - 1 蛍光X線法と電位差滴定法の比較 ⁵⁾

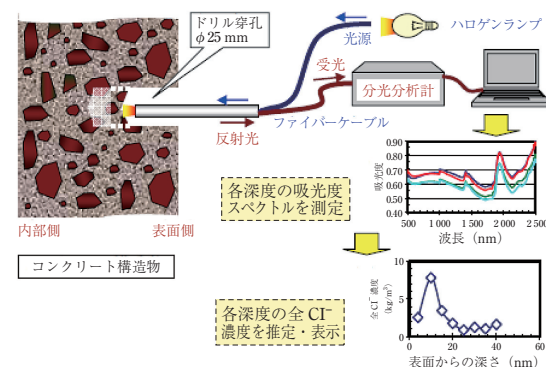


図 - 2 近赤外分光法の測定概念 ⁶⁾

以上の2つの方法は、構造物の任意の点の塩化物イオン量を測定する方法であるが、コンクリートの塩化物イオン量を面状に測定しようとする研究開発も進められている。これは、鉄筋探査で用いられる電磁波レーダ法を応用する技術であり、鉄筋からの電磁波反射波形の振幅量がコンクリート中の塩化物イオン量によって変化することを利用して、表面から鉄筋位置までの平均の塩化物イオン量を推定

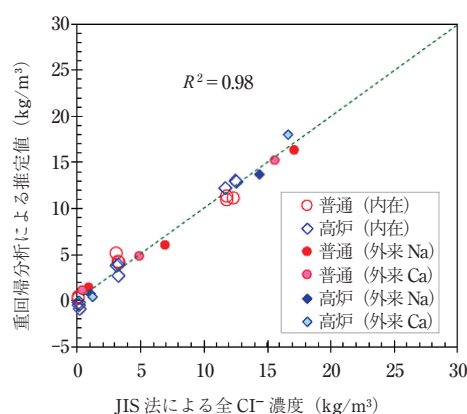


図 - 3 近赤外分光法と電位差滴定法の比較⁶⁾

するものである⁷⁾。本技術を実際の栈橋に適用した結果、図 - 4 に示すような濃度分布が得られている。現在、図 - 5 に示すように、コンクリート表面部に交流電流を印加して周波数を変化させた際の電圧差（実効値）から表面塩化物イオン量を推定するインピーダンス法との組合せにより、鉄筋位置における塩化物イオン量を推定する方法が検討されている⁸⁾。

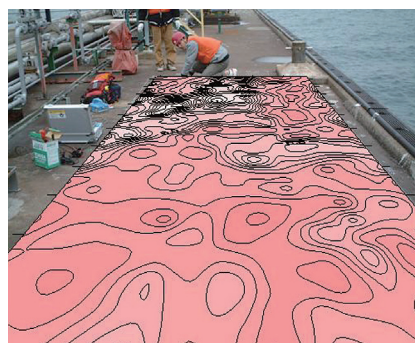


図 - 4 塩化物イオン濃度分布の一例（文献 7）の著者からの提供）

以上に示した手法は塩化物イオン量を推定する方法であるが、鉄筋腐食が開始している可能性がある構造物においては、その腐食状態を把握するための調査が必要となる。鉄筋腐食については、鉄筋をはつり出して目視で観察する方法が採用されることが多いが、非（微）破壊検査の一種である自然電位法および分極抵抗法が適用されることもある。最近では、これらの電気化学的手法の妥当性について検証が進められ、データが蓄積されつつある。たとえば、自然電位法における判定の閾値が、環境やコンクリートの条件に異存する可能性があることや、図 - 6 に示すように、分極抵抗法による腐食減量が、干満帯のような環境では大きく推定される可能性があることなどが報告されている⁹⁾。

3.2 アルカリ骨材反応に関する診断技術

2 つめは、塩害と、ほぼ同時期に、近畿、中国、北陸などの地域を中心に顕在化したアルカリ骨材反応である。アルカリ骨材反応については、その後も、2000 年代に入っ

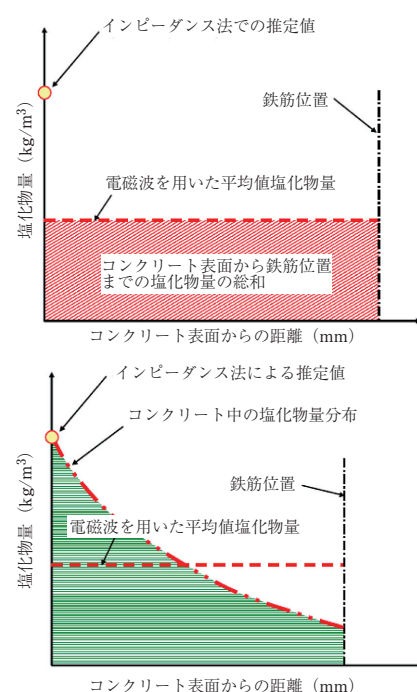


図 - 5 鉄筋位置の塩化物イオン量の推定方法⁸⁾

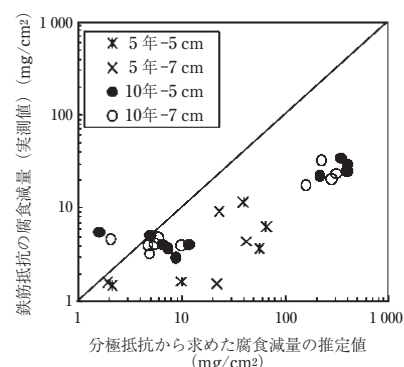


図 - 6 分極抵抗法による腐食減量の推定値と実測値⁹⁾

てから、その膨張圧によって鉄筋の曲げ加工部および圧接部に破断が生じてしまう事例が確認されている¹⁰⁾。これまでのところ、PC 構造物における鉄筋破断は、ほとんど生じていないものと考えられるが、鉄筋破断の有無を判定する非破壊検査技術の必要性は高いものと考えられる。

鉄筋破断の判定方法の一つとして、鉄筋が強磁性体であることを利用し、鉄筋を着磁させて磁束密度を測定する磁気法がある。磁気法で隅角部を診断する場合、上面・側面の二方向からのアクセスが前提となるが、構造物によっては、一方向からのアクセスしかできない場合もある。このため、現在、一方向からの測定方法を確認し、その適用性を拡大しようとする研究が進められており、測定面に対して平行方向に着磁・測定することによって、鉄筋破断を診断できる可能性が見い出されている¹¹⁾。

3.3 PC グラウトの充てん不良に関する診断技術

3 つめは、1980 年代後半から 90 年にかけて顕在化してきた PC グラウトの充てん不良である。PC グラウトに未

充てん箇所が存在すると、PC 鋼材が腐食して破断することがあり、構造物の安全性を著しく阻害するおそれがある。実際に、海外では、橋梁の PC 鋼材が腐食によって破断し、落橋に至った事例も報告されている¹⁾。

PC グラウトの充てん不良を調査する方法については、有効な方法が確立されていないのが現状であるが、最近のいくつかの研究において、充てん不良を検出できる可能性が見い出されている。

これまでの PC グラウト充てん不良の調査では、インパクトエコー法が適用されることがあった。これは、図 - 7 に示すように、弾性的な衝撃力により入力された弾性波を変位型センサで検出記録し、高速フーリエ変換処理によって周波数スペクトルを求める方法である¹²⁾。この方法では、鉄筋の影響などにより周波数スペクトル上に多くのピークが存在してしまうために、充てん不良の同定が困難である場合が多かった。これを改善するために、インパクトエコー法で得られる周波数スペクトルを用い、弾性波の反射の影響を画像化して欠陥部を評価する SIBIE 法 (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) の適用性が検討されている¹²⁾。その結果によれば、SIBIE 法によって、鉄筋位置に関わらずグラウトの未充てん部を評価することができることが示されている。

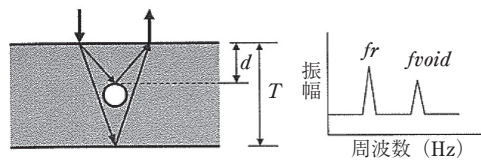


図 - 7 インパクトエコー法の概念¹²⁾

インパクトエコー法のほかにも、コンクリート表面に振動センサを設置し、非接触でシースに電磁力を与えた場合に受信される弾性波からグラウト充てん状態を評価する電磁パルス法が検討されている¹³⁾。その結果によれば、コンクリート表面で出力した波形の最大振幅値に着目することにより、図 - 8 に示すように、グラウト未充てん区間および充てん率の違いをおおむね把握することができることが示されている。

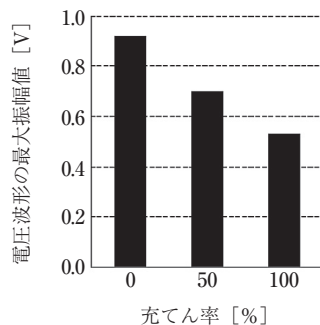


図 - 8 電磁パルス法による測定結果¹³⁾

4. おわりに

本報では、PC 構造物の最近の診断技術として、塩害、アルカリ骨材反応および PC グラウトの充てん不良に関する調査技術を概説した。これらの技術は、実用段階にあるものから、研究段階にあるものまでさまざまであるが、今後、これまでに社会資本としてストックされた多くの PC 構造物の維持管理に役立てられる技術となることを期待したい。

また、(社)日本構造物診断技術協会においても、これらの技術動向についてアンテナを巡らせ、情報を発信していくとともに、診断技術の進展に寄与できるような研究活動をしていく所存である。

参考文献

- 1) R.J.WOODWARD, F.W.WILLIAMS : Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan, STRUCTURAL ENGINEERING GROUP Proc. Instn Civ. Engrs., Part 1, 1988, 84, Aug., 635-669
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会：コンクリート構造診断技術, 2010.5
- 3) (社)日本構造物診断技術協会：構造物の調査と補修補強に関する技術シート (協会内部資料), 2010.7
- 4) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1095-2000, 2007
- 5) 土井仁, 熱田真一：簡易型蛍光 X 線を用いた硬化コンクリートの含有塩分量試験, (社)日本構造物診断技術協会 第 22 回構造物の診断と補修に関する技術・研究発表会論文集, pp.1-4, 2010.10
- 6) 山本晃臣, 上田隆雄, 郡政人, 七澤章：塩分浸透形態が近赤外分光法の吸光度スペクトルに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1667-1672, 2010
- 7) 中込甲斐, 溝渕利明, 新開一生, 坂田昇, 須田久美子, 林大介：電磁波を用いた塩分量推定における実構造物への適用に関する一考察 : 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部門, pp.1181-1182, 2005.9
- 8) 田中峻, 松土雄紀, 小俣貴洋, 溝渕利明：非破壊による鉄筋コンクリート中の塩分量推定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1993-1998, 2009.9
- 9) 審良善和, 岩波光保, 山路徹, 石中正人：干満体に暴露した各種セメントを用いたコンクリート中鉄筋の自然電位および分極抵抗と鉄筋腐食の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1661-1666, 2010.9
- 10) (社)土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書 - 鉄筋破断と新たな対応 -, コンクリートライブラリー 124, 2005.8
- 11) 寺澤広基, 廣瀬誠, 服部篤史, 河野広隆, 宮川豊章：片面からの磁気法を用いた鉄筋破断非破壊診断手法, (社)日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.10, pp.135-140, 2010.10
- 12) 山田雅彦, 田竈慶一, 大津政康：プレストレストコンクリート構造物の SIBIE 解析における鉄筋の影響の評価, (社)日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.10, pp.113-118, 2010.10
- 13) 宗像晃太郎, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 角田蛸：PC グラウト充填状況の違いが電磁パルス法で測定される最大振幅値に与える影響に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1685-1690, 2010

【2011 年 1 月 26 日受付】