

# 委員会報告 「コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法 研究委員会報告」

大津政康\*<sup>1</sup>, 鎌田敏郎\*<sup>2</sup>, 山田和夫\*<sup>3</sup>, 永山 勝\*<sup>4</sup>

【委員構成】 委員長 大津政康 熊本大学大学院自然科学研究科

(弾性波法 Task-Force Group) 幹事 鎌田敏郎 岐阜大学工学部

内田昌勝 太平洋セメント(株)中央研究所 辻 伸幸 太平洋セメント(株)中央研究所  
伊東良浩 千葉工業大学工学部 宇野洋志城 佐藤工業(株)中央技術研究所  
吉田克弥 佐藤工業(株)中央技術研究所 松山公年 日本工営(株)中央研究所  
岩波光保 国土交通省港湾技術研究所 湯山茂徳 日本フィジカルアコースティクス(株)  
吉荒俊克 非破壊検査(株)技術本部安全工学研究所

(電磁波法 Task-Force Group) 幹事 山田和夫 愛知工業大学工学部

込山貴仁(株)コンステック・エンジニアリング本部 吉沢 勝 (財)首都高速道路技術センター  
瀬古繁喜 (株)竹中工務店技術研究所 柳内睦人 日本大学生産工学部  
菅野 匡 日本道路公団試験研究所 吉村明彦 コマツエンジニアリング(株)

(電気化学的手法 Task-Force Group) 幹事 永山 勝 (財)日本建築総合試験所

岩波光保 国土交通省港湾技術研究所 葛目和宏 (株)国際建設技術研究所  
鹿毛忠継 国土交通省建築研究所 渡辺博志 国土交通省土木研究所  
横田 優 (株)四国総合研究所

(通信委員) 尼崎省二 立命館大学理工学部 重石光弘 熊本大学工学部

## 1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理の重要性が指摘されて久しいが、そのためには診断としての点検・調査は不可欠である。ところが、コンクリートはメンテナンスフリー(maintenance free)とこれまで一般に考えられてきており、「診断」という用語自身が馴染みの無いものと言える。医学分野を参考にすれば、人体における不具合の原因を明らかにすることが診断行為である。したがって、コンクリート構造物に劣化性状が見られた場合に、点検・調査により劣化の程度を評価し原因を究明することが診断と定義できる。コンクリート構造物の維持管理に

関して最近刊行された土木学会コンクリート標準示「維持管理編」<sup>1)</sup>では、第1部で試験および調査の方法として点検の手法が述べられ、調査・点検の詳細と手順については第2部で劣化機構に対応した取り組みが述べられている。そこでの詳細点検に際して有効な試験法とされ、実用化と併せて開発研究が活発に進められているのが非破壊検査法(NDE)である。

欠陥評価を目的としたNDEの重要性は以前から認識されている。本協会では名古屋大学の小阪・谷川教授を委員長として「コンクリート非破壊試験法研究委員会」が1989年に発足し、シンポジウムと講習会の開催ならびに非破壊試

\*<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科 教授 工博 (正会員)

\*<sup>2</sup> 岐阜大学工学部土木工学科 助教授 博(工) (正会員)

\*<sup>3</sup> 愛知工業大学工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

\*<sup>4</sup> (財)日本建築総合試験所材料試験室 室長 博(工) (正会員)

験法に関する幾つかの基準案の作成をされて<sup>2)</sup>、1992年に活動を終えている。その後、阪神・淡路大震災の復旧工事あるいは復興工事の中で、コンクリートのNDEは健全性診断に必須の技術として確立が急務と認識されるようになっていく。さらに、近年のトンネル、高架橋での崩落事故等によって、研究開発の重要性が認識され、実用化への早急な取り組みが指摘されている。このような動向の中で本研究委員会は新たに発足し、各分野で進められてきた研究を調査・集約し、現状においてコンクリート構造物の診断に適用可能な非破壊検査試験法をとりまとめた。その成果については委員会報告書を3月に作成し講習会を実施済みである。

## 2. 対象とした試験方法

コンクリート構造物の欠陥・劣化部などを非破壊的に検査する目的では、主に弾性波と電磁波が用いられている。診断では鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食も重要な点検項目であり、それには電気化学的手法が開発されている。そこで、これらの3つの方法について、Part I 弾性波法、Part II 電磁波法、Part III 電気化学的手法の順にコンクリート構造物を対象として試験法の確立、構造物診断への適用例などについて、現在までの知見を整理した。さらに今後の適用分野を提案することも目標に調査結果をまとめた。その内容の要約を以下に述べる。

## 3. 弾性波法

Part I 弾性波法 (Elastic-Wave Methods) では、超音波法 (Ultrasonic Methods) について試験方法を解説した後に、研究の現状および規格基準化の動向をまとめた。AE法 (Acoustic Emission Methods) も試験方法と装置を解説した後に、研究の現状と今後の展望を述べた。

弾性波法では、特に欧米を中心に適用例が報告されている手法にインパクトエコー法がある。これを含めて同種の手法は衝撃弾性波法 (Impact Elastic-Wave Methods) にまとめた。さら

に、類似の手法ではあるが、近年、実務に多用されている手法として、打音法 (Impact Acoustics Methods) についても解説した。

これらの解説にまとめた4つの試験法の適用性比較を行えば、表-1 のようになる。超音波法は元々コンクリート中の縦波 (P波) の伝播時間を測る方法である。それゆえ、速度から弾性係数の評価、ひび割れ深さなどの位置決定が可能である。AE法はひび割れ発生・進展に伴って生じた弾性波を検出するため、発生波動に関する直接的な情報を得ることができる。衝撃弾性波法と打音法はコンクリート内部の欠陥の存在を検出するのに有効である。ただし、前者では反射波の検出を対象とするのに対し、後者では欠陥上のコンクリート部の板振動を検出することを主目的としている。

次に、精度と簡便性についてまとめれば、図-1 のようになる。図中の横軸に取った検査効率 (実際には使用する装置自身の簡便性と深く関係している) は、超音波法とかAE法では、弾性波動を検出・記録する専用の測定装置が必要である。そのため定量的な測定結果は得られるが、その使用性あるいは測定の容易さの点で開発の余地がある。装置に関しては、測定精度と定量性についても同様なことと言える。打音法は可聴音から判断するという簡便さのゆえに、定量性に乏しい。この精度向上には検出・記録装置が必要となり、報告ではそれを中心に解説した。

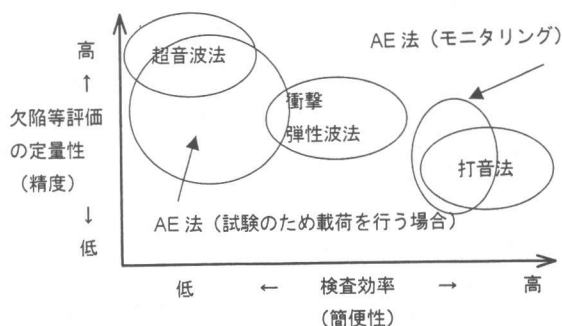


図-1 弾性波法における各手法の比較

表-1 弾性波法における各手法の適用性

適用対象		超音波法	AE法	衝撃弾性波法	打音法
品質評価	強度	△	×	×	×
	弾性係数	○	×	△	△
ひび割れ主に、表面に開口部を持つひび割れ	深さの定量評価	○	×	×	×
	進展評価	×	○*	×	×
	種類の識別	×	○*	×	×
内部欠陥(空隙)(剥離)	表面から浅い箇所(20cm程度まで)の欠陥の有無	○	×	○	○
	表面から深い箇所(20cm以上)の欠陥の有無	△	×	○	○
	欠陥位置の定量化	○	×	○	△
	欠陥規模の定量化	○	×	○	○
損傷程度の評価		○	×	○	○
損傷進行の評価		○	○*	○	○
履歴荷重の推定		×	○*	×	×

○：良，○\*：載荷条件下にて可，△：可，×：不可

#### 4. 電磁波法

Part II 電磁波法 (Electromagnetic Wave Method) では、赤外線サーモグラフィ法 (Infrared Thermography) について試験方法の原理に続いて研究の現状について調査し、

- (1) 壁仕上げ材の剥離検査
- (2) コンクリートの内部評価
- (3) 鋼・コンクリート間の剥離評価
- (4) コンクリートの充填性評価
- (5) 吹付けコンクリートの施工管理
- (6) コンクリートのひび割れ評価
- (7) 鋼板巻立て工事の検査手法
- (8) 炭素繊維シートの欠陥探査
- (9) 舗装体の損傷診断

などへの適用性を解説した後に、多くの適用事

例と基準化の動向をとりまとめた。次に電磁波レーダ法 (Ground Penetrating Radar) について試験方法と研究の現状を述べた後に、適用事例として鉄筋探査・PC橋梁探査・トンネル覆工コンクリート調査などの成果を解説した。さらに、今後の展望として機器改良・開発の方向性と規準の動向をまとめた。

鉄筋位置の同定手法として実績のある電磁誘導法 (Electromagnetic Testing) も電磁波法の中で取り上げ、試験方法の原理、研究の現状、適用事例、今後の展望をまとめた。

最も新しい手法としてX線・γ線・中性子線法 (Nuclear Methods) がある。これは、放射線という特殊な電磁波を用いるため、基礎知識と計測方法を述べた後に、研究の現状としてX線CT

法、密度計測、水分量計測についてまとめた。

適用事例としては、関係法令について解説した後、以下のような事例を今後の展望とともに紹介した。

- (1) 筋位置推定
- (2) PCグラウトの充填度評価
- (3) RCCP コンクリート舗装への適用
- (4) コンクリート充填性（空隙）評価

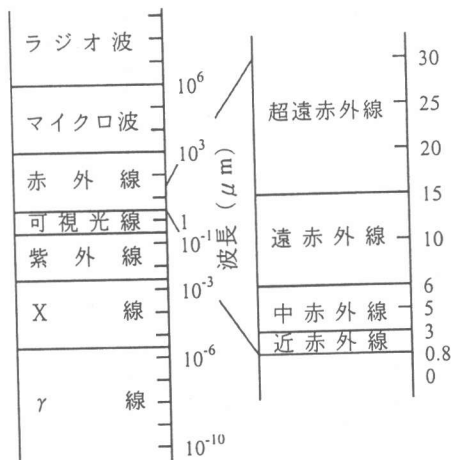


図-2 電磁波の波長による分類

電磁波とは、光に代表される空气中を伝播する横波の総称である。その波長による分類を図-2に示す。コンクリートの非破壊試験に適用される電磁波で可視光線よりも波長の長いものが、マイクロ波を用いた電磁波レーダ法と、温度を伝える赤外線を用いたサーモグラフィ法である。一方、可視光線よりもはるかに波長の短いのが、放射線（X線、γ線、中性子線）である。X線とγ線は、主に透過波を用いた透視画像を撮影するのに用いられ、中性子線は水素による減速効果を利用した水分量の検出に使用される。波動現象は検出しないが、鉄筋などの存在に伴う磁場の変化を検出するのが電磁誘導法である。

以上の試験方法について検査対象とその有効性をまとめた結果を表-2に示す。赤外線サーモグラフィ法は表面温度分布を計測するため、内部欠陥の検出および鉄筋位置の判定は浅い部位に限られる。一般に市販されている機器では数 cm

程度までの深さに限られており、かぶり厚さの評価は容易でないことが多い。電磁波レーダ法では、もう少し深くまで検査可能であるが、それでも数 10 cm 程度が限界で 1 m を超える深さまで適用可能とは考えられていない。

表-2 電磁波法における各手法の検査対象と適用性

試験方法	検査対象	
	内部欠陥 (空洞・剥離)	鉄筋位置
赤外線サーモグラフィ法	○	△
電磁波レーダ法	○	○
電磁誘導法	×	○
X線・γ線・中性子線法	○	◎

[注] ◎：優、○：良、△：可、×：不可

電磁誘導法は磁場を測定するため、鉄筋以外の情報を得ることはできない。X法とγ線法は、透視写真を撮る試験法として、医療に代表される多くの実績がある。ただし、現在に至っても放射線としての危険性は改良されていない。コンクリート構造物に適用するためには、医療で人体に用いるのよりはるかに高いエネルギーの放射線を用いる必要があり、測定に際して被爆の危険性は高まる。そのため適用事例は現状では多くはなく、使用に当たっての多くの規制が定められている。

## 5. 電気化学的手法

Part III 電気化学的手法 (Electro-Chemical Methods) では、鉄筋腐食の判定のための手法についてのみとりまとめた。そのため電気化学反応に基づく測定原理を述べ、測定方法としては自然電位法、分極抵抗法と電気抵抗法について解説することにした。この他の手法についても研究開発は進められているが、研究の現状から実務に使用可能な試験法に限定した。ただし、分極抵抗法と電気抵抗法に関しては、現在も種々の測定手法と機器が開発中であることを考

慮して、現状で利用されている代表的な測定法について調査結果を報告した。

このような理由から報告書では、Part I 弾性波法、Part II 電磁波法とは異なる構成として、まず鉄筋腐食の評価のための測定に用いる機器・装置、測定結果の整理方法、測定結果の評価方法を記述した。そして、今回の調査で得られた

多くの測定事例を結果の評価とともに示すことにした。その内容については、表-3に要約を示す。ここでは、測定結果の概要のみが紹介されている。実際の調査結果の詳細については報告書を参照されたい。この表から既に多くの鉄筋コンクリート構造物において、腐食評価のための検査が行われていることがわかるであろう。

表-3 鉄筋腐食に関する測定事例の要約

事例記号	適用した方法	概要および特徴
A	自然電位法 分極抵抗法	開水路側壁調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 24年経過した構造物であり、塩化物や中性化など腐食発生要因はほとんどない事例</li> <li>・ 実際の鉄筋腐食は全般に軽微な状態であり、自然電位や分極抵抗による評価は一致した</li> <li>・ 測定位置の鉄筋が重ね継ぎ位置であり、見かけの分極抵抗が小さくなった。単位面積当たりの分極抵抗 (<math>\Omega\text{cm}^2</math>) を求める際、配筋状況を正確に調べることが重要である</li> </ul>
B	自然電位法 分極抵抗法	地下道側壁調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 36年経過した構造物であり、潮位の干満により塩化物浸透を受け腐食が進行した事例</li> <li>・ 実際の鉄筋腐食は孔食を伴う著しい状態であり、自然電位や分極抵抗による評価は概ね一致した</li> <li>・ コンクリート中の塩化物量と分極抵抗に基づく腐食速度から、腐食発生時期を考察した</li> </ul>
C	自然電位法	駅ホームコンクリート橋台の調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 27年経過したコンクリート橋台であり、融雪剤による塩害の事例</li> <li>・ 実際の鉄筋腐食は、流水経路付近で重度の腐食が生じており、かぶりコンクリートの品質や性状に関わる電位変動分を補正した結果、自然電位による評価は概ね一致した</li> <li>・ かぶりコンクリートの性状を定量的に把握することで推定精度の向上が図れた</li> </ul>
D	自然電位法 分極抵抗法	栈橋床版・梁の調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 約30年以上経過した栈橋上部工の床版・梁であり、極めて厳しい塩害環境下にある事例</li> <li>・ 実際の鉄筋状態は、腐食していないものから断面欠損に至るような腐食まで様々な段階のものが認められた。腐食状況と自然電位は良く対応していた</li> <li>・ 分極抵抗による腐食推定を行う場合、鉄筋相互の導通や分極範囲の特定が必須であることが示された</li> </ul>
E	自然電位法 分極抵抗法 電気抵抗法	栈橋床版の調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 約30年以上経過した栈橋上部工の床版であり、極めて厳しい塩害環境下にある事例</li> <li>・ 腐食状態は点錆から表面錆までの段階であり、自然電位とは良く対応していた</li> <li>・ 分極抵抗測定時には分極範囲を特定することが、定量的な鉄筋腐食推定には必要であることが示された</li> </ul>
F	自然電位法	既に補修した栈橋の調査事例
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 断面修復補修を行って数年が経過した栈橋上部工であり、補修後に再劣化している事例</li> <li>・ 断面修復箇所でも再劣化が生じている箇所と生じていない箇所が自然電位の測定値から推定できた</li> <li>・ 補修対策を施した構造物のその後の劣化進展をモニタリングする上で自然電位測定が有効であった。</li> </ul>

表-3 鉄筋腐食に関する測定事例（続き）

G	自然電位法	<p>栈橋の梁の調査事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・約30年以上経過した栈橋上部工の梁であり、極めて厳しい塩害環境下にある事例</li> <li>・ひび割れの存在や長い経過年数にもかかわらず、測定結果からは腐食していないことが推定された。実際の鉄筋状態も腐食は全く認められず、健全な状態であった</li> <li>・塩害環境下にあるコンクリート構造物でも内部鉄筋が腐食していない場合もあり、腐食していないことを実証する上で電気化学的手法は有効であった</li> </ul>
		<p>鋼橋のRC床版調査事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・約25年経過した鋼橋のRC床版であり、2年前に床版の上面増厚工事が実施された事例</li> <li>・床版下面には、微細なひび割れやエフロッセンスが見られるが、鉄筋は概ね健全な状態であった</li> <li>・自然電位による評価は概ね一致した</li> </ul>
I	自然電位法	<p>寒冷地にある構造物の柱の調査事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・寒冷地の海洋環境下にあり、約20年経過したRC構造物の事例</li> <li>・腐食した鉄筋が多数露出している状態であり、損傷部分周辺にも腐食傾向が見られた</li> <li>・自然電位と腐食グレードは、ASTM基準と概ね一致していた</li> </ul>
		<p>コンクリート橋脚の調査事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・海岸線より200m以内に位置し、約30年経過したRCラーメン橋脚の調査事例</li> <li>・腐食の著しい箇所が、必ずしも電位の谷とはなっておらず、自然電位の分布から、腐食の著しい箇所を特定できない場合もある。</li> <li>・橋脚の各々では自然電位の数値範囲がことなり、概ねASTM基準と整合していた</li> </ul>
K	自然電位法 分極抵抗法	<p>防錆剤（亜硝酸リチウム）の防錆効果確認実験適用事例</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験体内の鉄筋近傍に埋設する小型センサを使用した実験事例</li> <li>・試験体の腐食傾向あるいは防食傾向は、自然電位よりも分極抵抗の方が敏感であった</li> <li>・腐食傾向の経時変化を連続的に把握できるメリットはあるものの、それらのデータを電気化学的に評価することは、まだ十分でない</li> </ul>

## 6. まとめ

構造物の劣化事例の増加から維持管理に関連した点検例を見つけることは、現状ではそう困難なことではない。研究委員会では、それらを広く調査し、点検のためのNDEの研究動向とともに試験法の解説を試みた。今後への展望を考えれば、実際にNDEが有効に用いられ、有用な成果を挙げられた事例とノウハウの蓄積が重要であろう。海外、特にアメリカでは、そのような点を考慮しコスト面を評価した事例が、最近多く報告されている<sup>3)</sup>。海外のNDEの実施例では、Cost PerformanceあるいはSaving(経費節約)を含めた報告が一般的である。本協会での

「コンクリート診断士」制度の充実により、そのような実施例の増加とNDEの有用性の発展を祈念したい。

## 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会、2001
- 2) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1992
- 3) Kesner, K., Poston, R. W., Salmassian, K. and Fulton, G. R. : Repair of Marina del Rey Seawall," Concrete International, ACI, No. 12, pp.43-50, Dec. 1999