

コンクリート構造物の診断と非破壊検査[†]

大津 政康*

Diagnosis of Concrete Structures by Nondestructive Inspection

by

Masayasu OHTSU*

Key words : Diagnosis, Nondestructive inspection, Maintenance, Defects, Electro-chemical methods, Elastic-wave method, Electro-magnetic methods

1 緒 言

2001年初頭に(社)土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁾が発行されるなど、もはやコンクリート構造物はメンテナンスフリーではなく維持管理への配慮が重要な社会資本として認知された。この示方書では、構造物の性能の維持を旨とした管理計画を遂行するために、診断を目的とした点検が不可欠とされている。そのための検査法として非破壊検査法への関心が高まりつつある。このような背景により、(社)日本コンクリート工学協会(JCI)からは、同じく本年3月に「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書」²⁾が出版された。

本稿では、これらの動向と報告書の内容を参考に、コンクリート構造物の劣化診断のための点検を行う場合に有効な最新の非破壊検査法について解説する。

2 劣化診断のための測定項目と検査法

維持管理に関連して診断の対象とすべきコンクリートの劣化現象を示方書[維持管理編]を参考に列挙すれば、①中性化、②塩害、③凍害、④化学的侵食、⑤アルカリ骨材反応、⑥疲労劣化である。

これらに対して非破壊検査法によって点検可能な項目を選び出せば、以下のようにまとめられる。

(1) 中性化と塩害に関しては、中性化領域や塩化物侵入度などを非破壊的に調べることは困難であり、鉄筋腐食が主な検査対象となる。

(2) 凍害のスケーリングやひび割れの存在は目視で点検できるため、非破壊的には表面ひび割れ深さや内部ひび割れの検査が対象となる。

(3) 化学的侵食とアルカリ骨材反応は目視による表面の点検と成分分析が主であり、コア採取などによる物性評価が非破壊検査の対象となる。

(4) 疲労では表面ひび割れに加えて、内部に蓄積された微小ひび割れの評価が非破壊検査の対象となる。

(5) さらに、これらの他に安全性と第三者影響度に関する劣化診断も必要のため、はく離とか内部欠陥を検査する手法も対象となる。

以上のことより、コンクリート構造物の診断のために非破壊検査法が対象とするコンクリート構造物の劣化現象は、①鉄筋腐食、②表面ひび割れ、③内部微小ひび割れ、④表面はく離を含む内部欠陥の4種類であることが明らかとなる。

JCI研究委員会報告で扱われている検査法を、それらの測定項目に関して分類すれば、表Iのようになる。鉄筋腐食の非破壊検査のためには電気化学的手法が開発・研究されており、既にかなり実績がある。ひび割れや内部欠陥に対しては、弾性波法が有効である。さらに、内部欠陥のみを対象とすれば電磁波法が有効となる。これらの適用事例を中心に各手法の開発動向について以下に解説する。

3 鉄筋腐食の診断

鉄筋腐食評価のために、現在までに開発されている検査法には、表Iのように自然電位法、分極抵抗法、電気抵抗法がある。ただし、実際に現場計測等に最も広く用いられているのは自然電位法であり、他の方法は補足的に用いられているのが現状である。図1に示す自然電位を測定する方法は、ASTM C876³⁾として1977年に制定され、世界中で広く用いられている。図のように飽和硫酸銅電極を用いてコンクリート表面の電位を測定し、 -350mV 以下であれば直下の鉄筋は90%以上の確率で腐食していると判断される。ただし、実際の測定に当たっては、各種の要因により、基準値が当てにならないことが報告されている。

そこで、土木学会基準(JSCE-E601-2000)では、その変動をできる限り少なくするための測定手順が示されている。

自然電位法による鉄筋腐食評価の大きな問題点は、表面に設置する電極と鉄筋間のかぶりコンクリートの特性に測定値が影響されることである。これを改善するために、表面測定値の補正法⁴⁾、ドリル穿孔により鉄筋付近で測定する方法、センサを埋設する方法⁵⁾などが検討されている。

理論的には、電位場はポテンシャル場であることより、

[†] 原稿受理 平成13年10月22日 Received Oct. 22, 2001

* 正会員 熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪, Graduate School of Sci. & Tech. Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860-8555

表 I 測定項目と非破壊検査法

測定項目	非破壊検査の分類	試験方法	概要
鉄筋腐食	電気化学的手法	自然電位法	腐食程度の評価
		分極抵抗法	腐食速度の評価
		電気抵抗法	腐食環境の評価
表面ひび割れ	弾性波法	超音波法	伝播時間による深さ評価
微小ひび割れ	弾性波法	AE法	ひび割れ集積度及び発生位置の評価
		超音波法	ひび割れ増加による弾性波速度低下の評価
		共鳴振動法	弾性係数の変化を共振周波数より評価
内部欠陥	弾性波法	打音法	空隙の存在による音色の評価
		衝撃弾性波法	欠陥位置による反射波の共振特性の評価
	電磁波法	電磁波レーダ法	欠陥部からの反射波で位置決定
		赤外線法	温度画像による剥離、空隙部の評価
		放射線法	X線γ線の透過画像による評価

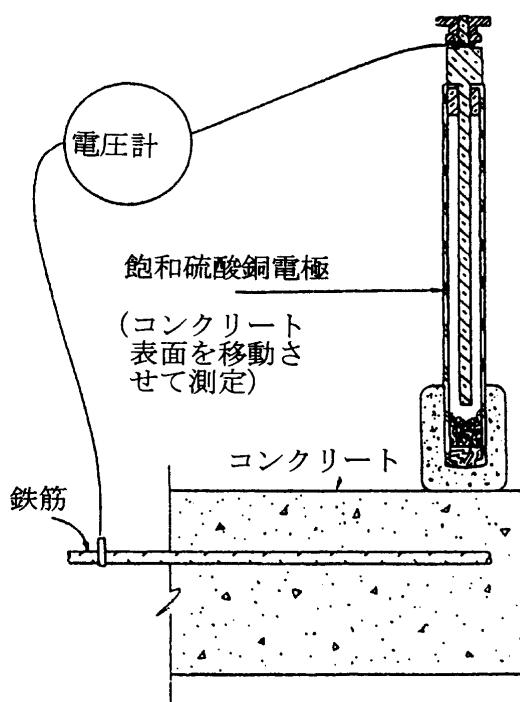


図1 自然電位法による電位測定

電位 $u(x)$ に関してラプラス方程式,

$$\nabla^2 u(x) = 0 \quad (1)$$

が成立する。したがって、鉄筋周辺の電位は表面電位を境界条件として解けば求められ^{6), 7)} かぶりコンクリートの影響が理論的に補正できる。ただし、ポテンシャル場としては3次元解析が不可欠であり、現場計測には不向きである。そこで、幾つかの簡略化が研究され^{8), 9)} 表面の電位から鉄筋周辺の電位を求める逆解析法が提案されている¹⁰⁾ 図2 上部には電食実験中の自然電位測定結果からある鉄筋上の電位を逆解析で求めた結果を示す。ASTMの基準 (-350mV) を適用すれば電食150時間後には、この鉄筋の右側で腐食していることが認められる。この電位分布に対して電流量解析を行えば、下図のようにカソード部(正)とアノード部(負)に分けられ、その結果は中段の実測結果と非常によく一致している。

式(1)を用いた逆解析手法の改良点は、境界要素法に基づいているため均質を仮定していることである。そのため内部空隙などが存在すれば、評価結果の信頼性は低くなる。そこで、逆解析に電気抵抗を考慮する手法が開発中である。図3の結果によれば、空隙部を有する場合にも、実測結果とよく一致した結果が得られている。

電気化学的手法は、理論も単純で現場計測に適した簡易な測定法である。これまでに測定値への信頼性に欠ける点が指摘されてきたが、それらに基づいて自然電位法の測定手順が確立されている。この結果、自然電位法に分極抵抗法を併用するだけで、かなりの精度で腐食範囲を特定できることが知られている。

4 表面ひび割れの診断

表面ひび割れの存在は目視により簡単に検出できるが、点検時に必要な情報は深さである。これに関しては超音波法と名付けられた弾性波を用いる手法が開発されている。なお、超音波とは正しくは可聴音域(20kHz以下)を超える周波数帯域の音波(空气中を伝わる縦波)のこ

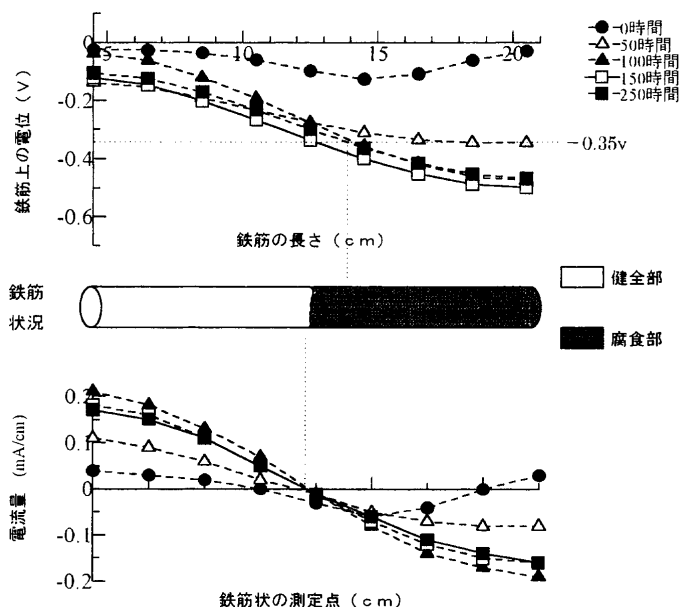
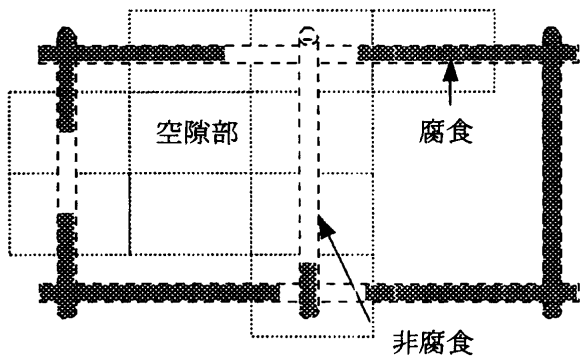
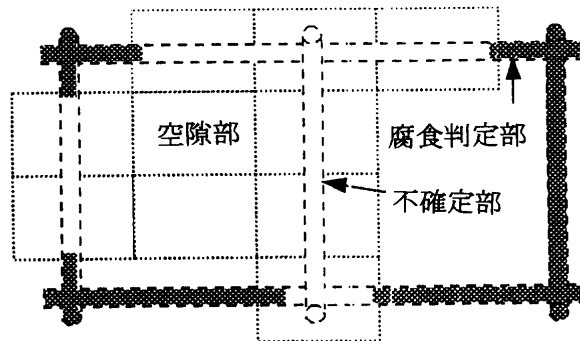


図2 鉄筋上の電位分布と電流量解析結果



(a) 目視判定結果



(b) 逆解析結果

図3 自然電位法の改良による腐食推定結果

とであるが、慣例的にそのような周波数帯の弾性波も超音波と呼ばれている。なお、音波は気体（空気）中を伝ばするが、弾性波は固体（コンクリート）中を伝ばする。その結果、縦波、横波、表面波等が含まれかなり複雑な反射・回折等を示すが、音波と同様に簡易に測定に用いられてきた理由は、最速の縦波のみを測定対象としてきたためである。

さらに、指向性を良くし立ち上がり時間の読み取り誤差を小さくするには、周波数を高くする必要があり、超音波領域の弾性波を用いるのが一般的である。ただし、金属材料と異なりコンクリートの不均質性に起因する減衰の大きさから、指向性と時間読み取り精度の向上はあまり期待できない。

ひび割れ深さを評価する一般的な手法は、図4に示すように発振子によって生じた弾性波が、ひび割れ底部で回折し受振子に到達するまでの時間を測定するものであ

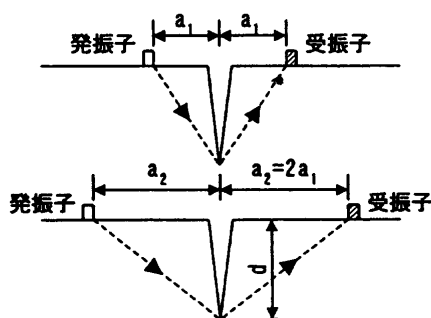


図4 BS法によるひび割れ深さ評価

る。これには幾つかの方法が提案されているが、表面波の影響を除き、直達の縦波を確実に測定するためには、図に示すBS法^{11), 12)}が最も理論的である。

この場合には、振動子間距離より、ひび割れ深さ d は、

$$d = a_1 \sqrt{(4t_i^2 - t_2^2) / (t_2^2 - t_1^2)} \quad (2)$$

により決定できる。ここで、振動子間隔 $2a_1$ と $2a_2 = 4a_1$ に対する縦波波動の到達時間が、それぞれ t_1 , t_2 である。

超音波法の原理は、伝ば距離 = 波動の伝ば時間 \times 縦波の伝ば速度であるが、式(2)の場合には、2ヶ所での測定のため縦波速度の決定が不要となり、実用性に優れている。ただし、縦波初動の特定には多くの不確定要因があり、特に測定装置の側に、S/N比などの雑音対策、初動到達時刻の特定方法、閾値方式の場合の設定値などにより、測定値の伝ば時間はかなり変化するので注意が必要である。

超音波法でひび割れ深さを決定する際に、鉄筋コンクリート構造の場合には鉄筋の存在が大きな問題となる。鉄筋の配筋方向と直角に振動子を配置する場合には問題にならないが、鉄筋の直上で鉄筋方向に振動子を配置すれば、鉄筋がひび割れよりも浅い位置に存在する場合には、そこで反射波が発生する。その結果、図5に示されるように、鉄筋に近い位置では鉄筋位置を評価することになる。²⁾ 図中の解析値グラフの曲線部は発振子から鉄筋までの距離を示している。これより明らかなように、鉄筋コンクリートで表面ひび割れ深さを評価する際には、後述の電磁波レーダ法などを併用し、予め鉄筋位置を確認しておく必要がある。

5 微小ひび割れの診断

微小ひび割れの検査で対象となるのは、ひび割れの集積程度、ひび割れの発生位置、微小ひび割れの集積に伴う弾性係数の変化等である。弾性係数 E と縦波速度 V の間には、

$$V = \sqrt{[E(1-\nu)] / [\rho(1+\nu)(1-2\nu)]} \quad (3)$$

が成立する。ここで、 ρ , ν はコンクリートの密度とポアソン比である。1次元波動の理論あるいは棒部材の縦波伝ばモデルなどで、上式のポアソン比を0と置いた式が示されることがあるが、これは理論的には誤りで近似に他ならない。コンクリートは3次元物体であるので、式

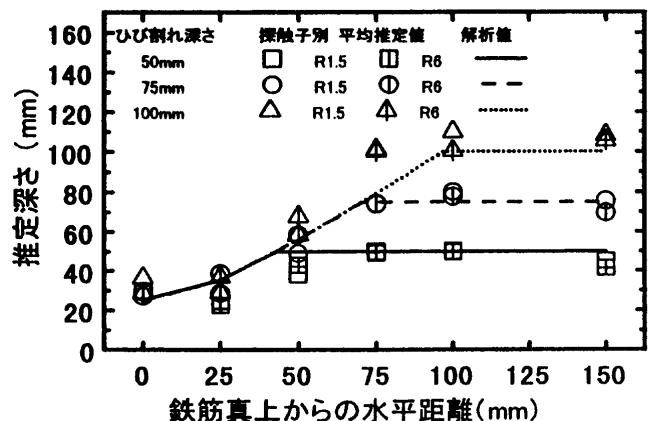


図5 鉄筋からの距離とひび割れ深さ推定値の比較

(3)で提示される以外の縦波を計測することは現実にはあり得ない。

アコースティック・エミッション (AE) 法は、微小ひび割れ発生に伴って生じる弾性波を検出する計測法である。したがって、多チャンネルの装置を用いれば、地震探査と同様に内部の微小ひび割れ発生位置を決定することができる。この手法は、最近ではさらに定量的な計測法として開発が進み、¹³⁾図6のようにひび割れ位置のみならず、種類(矢印は引張ひび割れ、×印はせん断ひび割れ)の分類、運動方向(矢印の方向は引張ひび割れの開口方向、×印はひび割れ面の法線方向とせん断の運動方向)まで解析できるようになっている。¹⁴⁾

ひび割れの累積度の評価はX線CT法のような直接的に内部を見る手法を除けば、容易にできるものではない。そこで、AE法をコア供試体の一軸圧縮試験試験に適用し、集積度を評価する手法が検討中である。¹⁵⁾それは、一軸圧縮試験時にAE頻度 N を計数し、その発生拳動を応力レベル($V = \sigma/\sigma_c : \%$, σ_c は圧縮強度)の関数としてレートプロセス解析によって、

$$N = C \cdot V^a \cdot \exp(bV) \quad (4)$$

と近似するものである。この場合に係数 a が、微小ひび割れの集積度を表すことが認められている。図7は0.1 mm以上の細孔容積の全体に占める容積率との比較を行った結果であり、¹⁶⁾明らかに微小ひび割れの集積度と a 値に強い正の相関のあることがわかる。

これより損傷力学を適用し、健全無垢な場合の弾性係数 E^* を式(4)に基づいて推定し、¹⁷⁾実際に採取されたコア供試体の結果と比較した例を図8に示す。この結果より、建設時の資料を必要とせずに橋台Aのコンクリートは健全($E_0/E^* > 1$)であるが、橋脚B、Cのコンクリートは $E_0/E^* < 1$ でわずかに劣化していると評価できる。これは、別に実施した疲労荷重履歴に関する解析結果ともよく一致しており、既設コンクリートの劣化評価に有効な手法となると期待できる。

コンクリートの物性値に関して弾性係数の変化は縦波

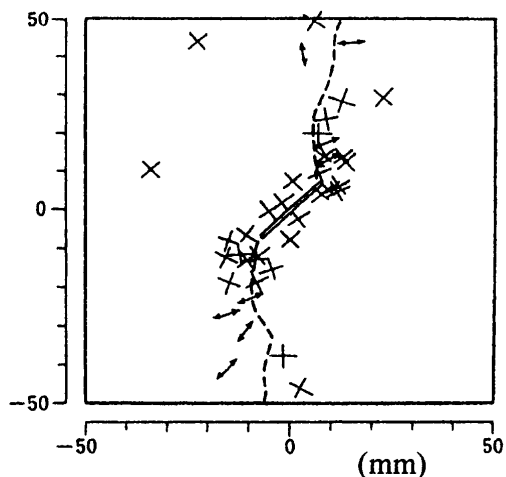


図6 コンクリート板(10cm×10cm)でのモーメントテンソル解析結果

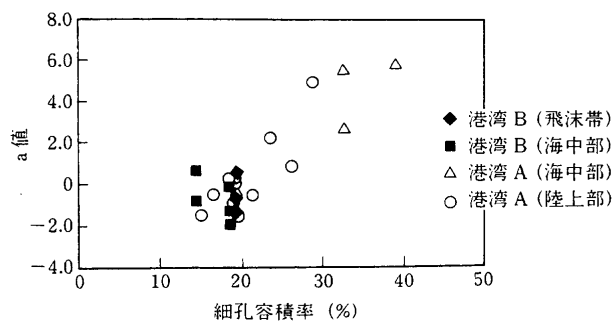
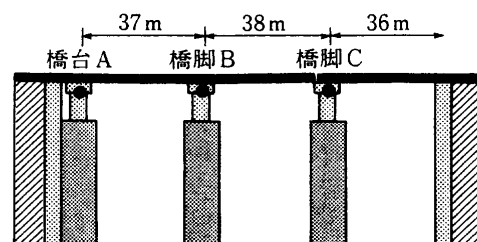
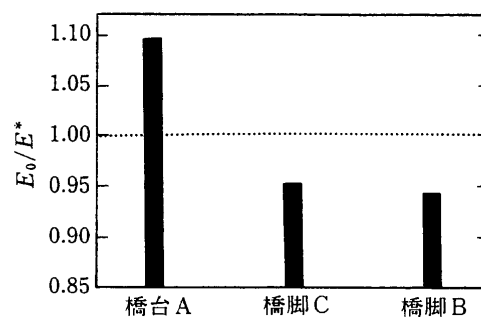


図7 レートプロセス解析による a 値と細孔容積率の関係



(a) 橋りょうコア採取位置



(b) 相対弾性係数の推定値

図8 コア試験より推定された相対弾性係数比

速度の変化として、式(3)より簡単に測定することができる。したがって、定期検査の折に超音波法による速度測定を実施すれば、微小ひび割れの蓄積による弾性係数の低下が評価できる。速度変化の比較からは、式(3)から知れるように二乗することで、相対的な弾性係数の変化が求められる。さらに、ポアソン比を与えれば(一般に0.2として十分である)、弾性係数の評価も可能である。

なお、弾性係数の相対的な変化は、JIS規格に定められているように、相対動弾性係数の変化として凍結融解試験で採用されている。これは、コンクリート部材の共振現象が、波長 λ と部材長 L の関係として、

$$\lambda/L = \text{整数 } n \quad (5)$$

なる条件を満足する場合として共振周波数 f を求める手法である。波長と周波数の関係からは、

$$\lambda = v/f \quad (6)$$

であるので、共振周波数 f と部材長 L から速度を決定することが可能である。一般に凍結融解試験では、その速度変化の二乗によって相対動弾性係数の変化としている。

ところで、弾性理論では物性値としての弾性係数に動

弾性と静弾性の違いは本来ありえない。さらに、共鳴振動法に示されている縦振動の共振周波数から弾性係数を決定する式は、式(3)で述べたようにポアソン比を含まない点で、理論的には誤りがある。この影響で動弾性係数は1割程度大きく評価される。

6 内部欠陥の診断

内部欠陥の検出には波動現象が適用される。表Iに示されているように、それには弾性波法と電磁波法が用いられる。いずれによっても反射波か透過波の検出によって内部の状況を推定し欠陥の存在を同定する。

一般的に打音法では、打撃によって、はく離部あるいは空隙上部のコンクリート層が板振動を生じるのを判読する。これは、可聴音の変化やマイクロフォンで検出した音響の振幅変化として検出できる。図9はトンネル覆工部の巻き厚不足の箇所を打撃による振動振幅の大きな箇所として同定した結果²⁾である。このように可聴音を聞き分けると、振幅値の変化を調査するのが打音法での一般的な分析である。

衝撃弾性波法は、欧米では一般に Impact Echo 法として知られており、専用の打撃入力装置と変位型センサを用いた検出装置が市販されている。¹⁸⁾その原理は、式(5)、(6)を参考に、共振周波数が、

$$f = v/nD \quad (7)$$

なる関係から生じることを原理としている。ここで、 D は式(5)にあった代表長さ L を欠陥深さ D に置き換えたものである。したがって、打撃によって発生した弾性波を検出し、主に反射波が含まれていると考えられる波動部分の周波数スペクトルを求め、ピーク周波数 f を同定すれば、式(7)から欠陥の深さ D を求めることが可能となる。標準的な Impact Echo 法では、式(7)で $n=2$ と置いた場合(打撃面から欠陥深さまでの距離が1波長となる)を設定している。

しかし、実際にこの方法を適用する場合には、既に問題点が指摘されている。¹⁹⁾その一つは、式(7)の共振周波数がスペクトルピークとして検出されるには、当然のことであるが打撃入力成分と検出装置の検出周波数帯域のいずれもが、それを含んでいることが前提となることである。例えば、打音法で用いられるハンマー入

力の上限周波数は5kHz程度と低い。それゆえ板振動を検出するなら問題はないが、内部欠陥を式(7)により同定しようとすれば、約50cm以上の深さにある欠陥に対するピーク周波数を検出するしかできない。現実には、そのような深部にある欠陥からの反射波は減衰が大きく、反射波の検出は容易でない。また、これまでの調査によれば市販の装置の応答周波数上限も10kHz程度であり、20cm程度以上の深さの欠陥でないと、理論的には同定は困難と考えられる。

そこで、打撃に鋼球落下とか開発したアルミ弾の発射装置を用い、波動検出には加速度計を用いたシステムを開発中である。現状の Impact Echo 法の最も本質的な問題点は、スペクトル図の数あるピークから式(7)に対応するピーク周波数のみを抽出することの困難さである。そこで、検出断面を対象として反射源の存在によるピーク周波数が発生したと仮定し、画像処理により反射源の存在を図化する手法(SIBIE: Stack Imaging of Spectral Amplitudes Based on Impact Echo)を開発した。²⁰⁾それをPCグラウトの充填度の評価に用いた例を図10に示す。反射の強さが濃い部分として示されており、グラウトの充填部では断面中央部に反射源は見られないのに対し、グラウト未充填部では明確な反射源の影が見られる。このように衝撃弾性波法は画像処理を導入することにより内部欠陥を明示できる手法が開発中である。

電磁波法のレーダ法は、RADIO Detecting And Rangingの略称で、ラジオ波(マイクロ波)と呼ばれる空気中で数kmから数mの波長の電磁波をコンクリート中に掃射し、反射波の伝ば時間から反射源画像を得る方法である。鉄筋コンクリート中では比誘電率とGHz程度の周波数帯のアンテナを用いるため数mから数10cmの波長として伝ばし、鉄筋と内部欠陥が同じく反射源として図11のように画像処理される。²¹⁾図の中央部の暗部が欠陥で左側の表面付近の暗部が鉄筋の影である。ただし、鉄筋のような埋設物や空隙等の内部欠陥のいずれでも現状の装置では数10cmまでの深部までしか分析できない。また、開口幅の小さなひび割れは同定困難とされている。

赤外線サーモグラフィ法は、赤外線カメラを用いてコンクリート表層部の温度分布を得るもので、最近ではカメラも簡易なものが多く市販されている。はく離部や内部欠陥の測定には、均一な温度場の設定が不可欠で、表面の汚れや水分の影響を除くことが必要となる。現在までに打音法などの併用による確認手法の整備が進められており、かなり明確に内部空洞の存在を同定できるようになっている。橋梁高欄部でのコンクリートの浮き(潜在的なはく離部)の撮影結果の例を図12に示す。²⁾このように適切な環境で写真撮影がなされれば、欠陥部の存在を明示できることが特徴である。それゆえに使用例が増加しつつあるが、温度変化の測定に過ぎないため、表層部(数10cmまで)より深い位置の内部欠陥には不向きである。

最後に放射線法は、人体のX線撮影と同様な手法であるが、当然のことながら人体検査用のX線ビームより、

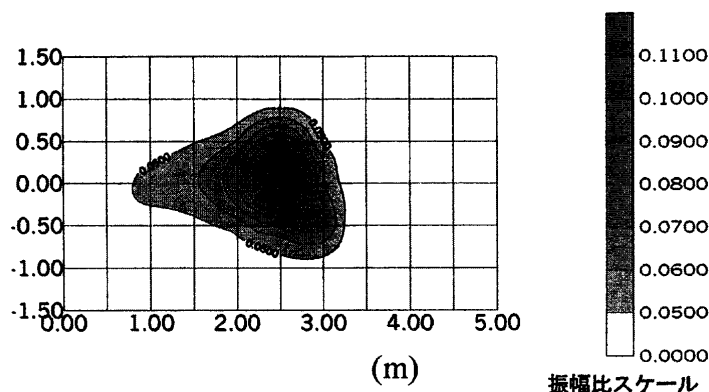


図9 打音法によるトンネル孔壁部巻き厚不足箇所の同定

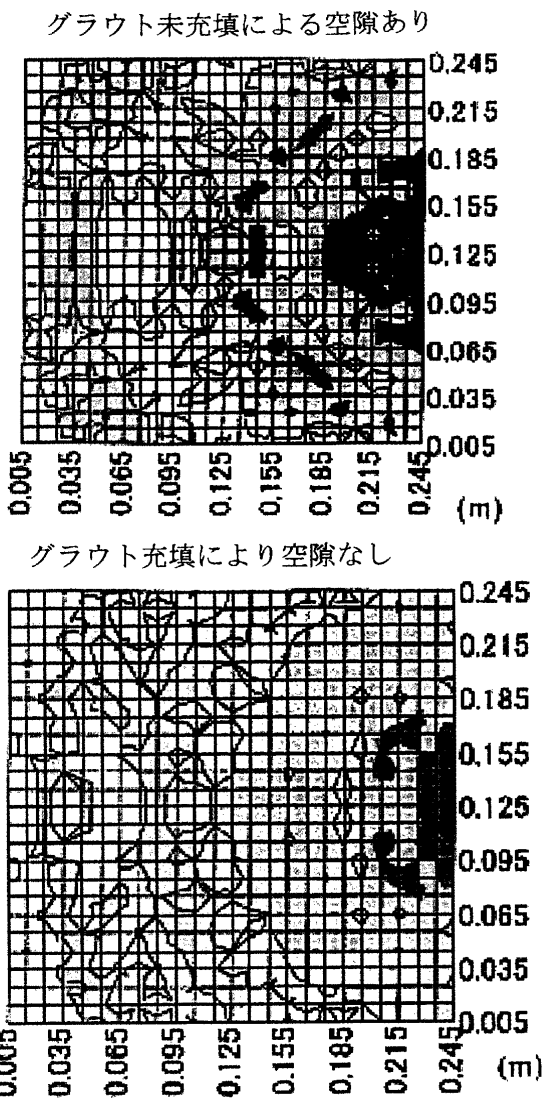


図10 SIBIEによるグラウト充てん度評価

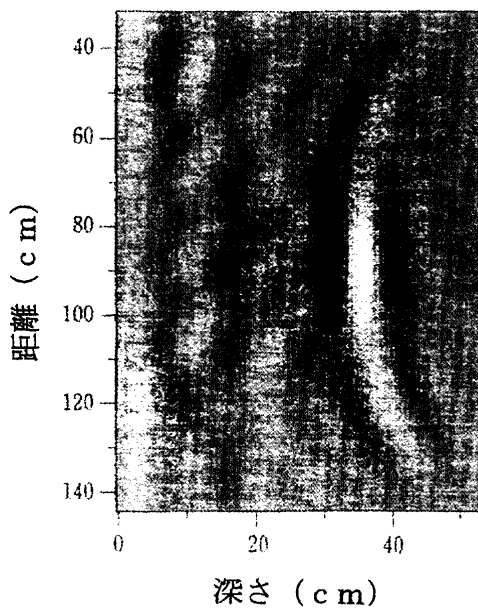


図11 鉄筋より深部に空隙のある部材のレーダ探査結果

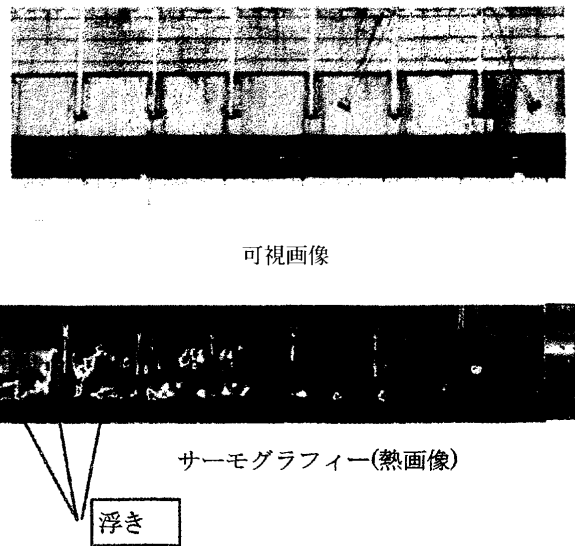


図12 橋梁高欄部の調査結果

はるかにパワーの大きなものが必要となり安全性には十分に配慮する必要がある。もちろん資格を持つ専門技術者以外には使用できない。さらに、人体のX線写真と同様であるが、影の存在を解釈する必要が残されており、現状では適用性が開発中の技術と考えられる。

7 結 語

コンクリート構造物はメンテナンスフリーではなく維持管理への配慮が必要な社会資本として認識されるようになっている。そこで、維持管理計画を遂行するための検査法として非破壊検査法への関心が高まりつつある。維持管理に関連して診断の対象とすべき劣化現象に対して非破壊検査法の適用可能な欠陥として鉄筋腐食、表面ひび割れ、内部微小ひび割れ、表面はく離を含む内部欠陥を取り上げた。

そして、鉄筋腐食のための電気化学的手法、ひび割れと内部欠陥に有効な弾性波法、内部欠陥のみを対象とする電磁波法などについて解説した。その内容としては最新の研究動向を踏まえ、鉄筋腐食判定のための自然電位法の改良、表面ひび割れ深さ決定のための超音波法の留意点、微小ひび割れの集積度と発生位置を同定するためのAE法の適用例、ひび割れの増加に伴う弾性係数の低下を検出するための超音波法と共鳴振動法の理論と実際などをまとめた。内部欠陥の同定に関しては、電磁波法の現状と開発動向について論じた。

非破壊検査法は、測定原理を含めて研究が進み、それに伴って市販の装置も多く見られるようになっている。しかし、使用に当たっては原理に立ち戻って結果を解釈する必要性が指摘されており、今後の需要の増加に答えられるべく、さらなる成果の蓄積と研究開発が要望されている。

参 考 文 献

- 1) 土木学会, コンクリート標準示方書 [維持管理編] (2001).
- 2) 日本コンクリート工学協会, 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会報告書 (2001).

- 3) ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (1991).
- 4) 佐々木孝彦, 飯島 亮, 立松英彦, コンクリート工学年次論文報告集, **18**, No.1, 801 (1996).
- 5) 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸, コンクリート工学年次論文報告集, **14**, No.1, 763 (1992).
- 6) 乙丸正彦, 大津政康, 村上祐治, 山下英俊, コンクリート工学年次論文報告集, **12**, No.1, 539 (1990).
- 7) 小無理恵, 矢島哲司, 魚本健人, 星野富夫, 土木学会論文集, No.550/V-33, 13 (1996).
- 8) 山村浩紀, 大津政康, コンクリート工学年次論文報告集, **15**, No.1, 643 (1993).
- 9) 山本利史, 重石光弘, 大津政康, 一田謙治, コンクリート工学年次論文報告集, **19**, No.1, 1303 (1997).
- 10) M. Ohtsu and T. Yamamoto, Construction & Building Materials, **11**, 398 (1997).
- 11) Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulse in Concrete, BS 1881, Part 203 (1986).
- 12) Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete, BS 4408, Part 5 (1974).
- 13) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本亨久, 非破壊検査, **42**, No.10, 570 (1993).
- 14) 重石光弘, 大津政康, 材料, **45**, 1055 (1996).
- 15) 飯田剛史, 渡辺弘史, 友田祐一, 大津政康, コンクリート工学年次論文報告集, **22**, No.1, 271 (2000).
- 16) A. Ishibashi, K. Matsuyama, S. Ohta and M. Ohtsu, Proc. 6th Int. Sym. on AE from Composite Materials, ASTM, 145 (1998).
- 17) 大津政康, コンクリート工学, **38**, No.7, 10 (2000).
- 18) M. J. Sansalone and W. B. Streett, Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N. Y. (1997).
- 19) T. Watanabe, M. Tokai and M. Ohtsu, Proc. 9th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, London (2001).
- 20) 渡辺 健, 渡海雅信, 小坂浩二, 大津政康, コンクリート工学年次論文集, **22**, No.1, 391 (2000).
- 21) 朴 錫均, 魚本健人, 土木学会論文集, No.538/V-31, 95 (1996).