

Nondestructive Evaluation of Concrete Structures Damaged  
by Alkali-Silica ReactionKazuhiro KUZUME<sup>\*1</sup>, Sho KANAUMI<sup>\*2</sup>, Norio FUJIWARA<sup>\*3</sup> and Masashi MORI<sup>\*4</sup>

**要旨**：アルカリ骨材反応（以下、ASR）によって著しく劣化した構造物では、折り曲げ鉄筋の曲げ加工部で破断が生じることがある。このような鉄筋破断を放置すると、コンクリートの拘束効果を低下させ、劣化が内部まで進行しやすくなり、最終的には構造物の耐荷性能を低下させることも予想される。我々がASR構造物の調査手法として研究開発を進めている周波数スペクトルの変化に着目した超音波法と、鉄筋破断の検出に適用する電磁誘導法を取り上げ、供試体を用いた試験結果および評価方法を検討した結果を報告する。

**キーワード**：ASR, 鉄筋破断, 超音波法, 周波数スペクトル, 電磁誘導法

## 1. はじめに

ASRが生じた構造物には、コンクリート表面にひび割れが発生するため、外観の観察によってある程度は劣化の状況を把握することができる。しかしながら、かぶり部と鉄筋で拘束された内部とでは劣化状況が異なる場合も多く、また、耐荷性能への影響が懸念される鉄筋破断は外観から発見することが困難である。

我々は、現在、ASR構造物についての非破壊調査手法として、周波数スペクトルの変化に着目して断面内部の劣化状況を評価する超音波法と、電磁誘導法を利用した鉄筋破断検出機の研究開発を進めている。以下に、これらについての現在までの検討結果を示す。

## 2. スペクトル重心を指標とした超音波法

## 2.1 スペクトル重心とASR劣化の関連性

これまで、超音波法によるASR構造物の劣化度調査では、伝播速度を指標とするのが一般的であったが、劣化がある程度顕著になった構造

物においては、劣化状況と伝播速度の傾向が一致しない場合もあった。我々が、ASR劣化が顕著になった実構造物で検討を重ねたところ、このような場合は、透過波形の周波数スペクトルの重み付け平均値であるスペクトル重心の方が指標として有効であるとの結論を得た<sup>1)2)</sup>。

一般に、コンクリートを透過させた超音波は、周波数の高い波ほどよく減衰するが<sup>4)</sup>、ASRで劣化したコンクリートにおいては、断面内に発生した微細なひび割れ等の影響によって、この傾向がより強くなる。このため微細なひび割れが多数発生しているものほど、すなわちASRによる劣化がより進行しているものほど、スペクトル重心は低い値に移行する（図-1参照）。

図-2は、ASR劣化したRC橋脚から採取したコアの圧縮強度とスペクトル重心の関係を表わした図である。ばらつきはあるものの、ASR劣化により強度が低下（各橋脚とも設計基準強度は $24\text{N/mm}^2$ ）しているコアほどスペクトル重心も低い値となる傾向を示している。

\*1 ㈱国際建設技術研究所 代表取締役社長

\*2 ㈱国際建設技術研究所 技術部 部長

\*3 ㈱国際建設技術研究所 技術部 次長

\*4 非破壊検査㈱ 安全工学研究所 主任研究員

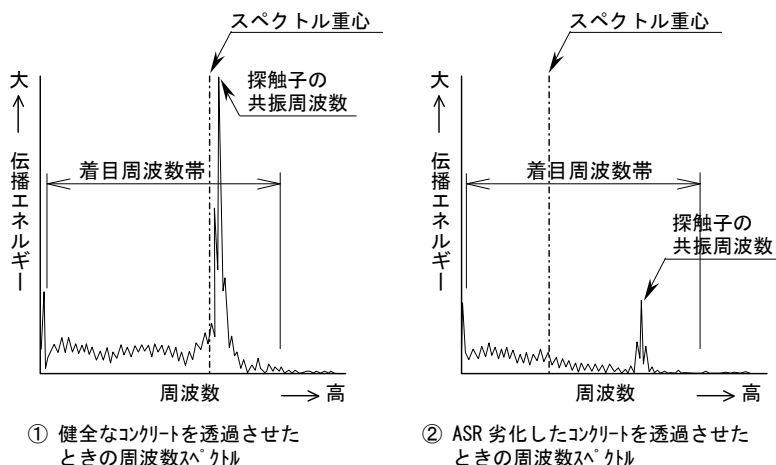


図-1 スペクトル重心の傾向

今回は、劣化度指標としてのスペクトル重心と ASR 劣化の関連を検証するために、反応性骨材を用いて作製した ASR 試験体を使用して、膨張量とスペクトル重心の関係を検討した。

今回製作した ASR 試験体は、15×15×53cm の角柱で、無筋（表-1 および写真-1 参照）、反応性骨材の割合を多少変えて、3 種類×3 体＝計 9 体作製した。この試験体を約 5 ヶ月間、促進養生室（温度 40℃、相対湿度 95%以上）で養生しながら、定期的に超音波測定と膨張率の測定を行った。

表-1 ASR 試験体の反応性骨材量

試験体	粗骨材		細骨材	
	反応性	非反応	反応性	非反応
シリーズ I	50 %	50 %	50 %	50 %
シリーズ II	50 %	50 %	60 %	40 %
シリーズ III	50 %	50 %	40 %	60 %

各シリーズ 3 体、計 9 体製作

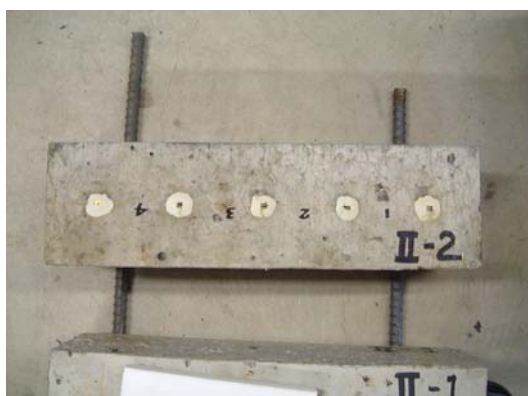


写真-1 試験体外観（□15×15×53cm）

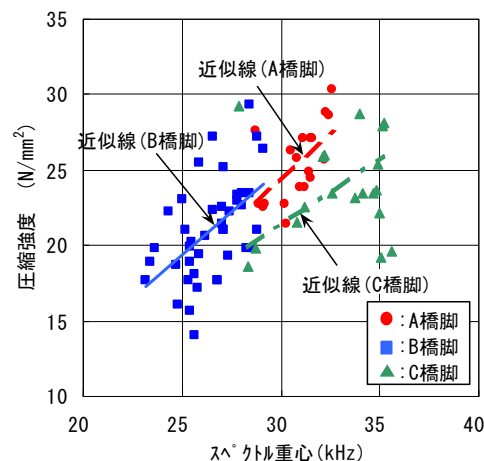


図-2 ASR 構造物のコア強度とスペクトル重心

超音波の測定は、共振周波数 40kHz の探触子を使用し、試験体の長寸方向（530mm）に透過させた伝播波形を測定した。膨張率は、試験体表面に取り付けた標点間距離の変化量を測定して求めた（図-3 参照）。

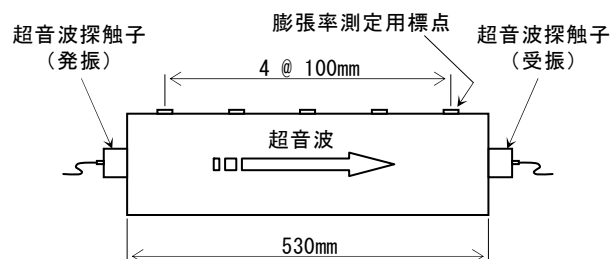


図-3 試験体測定要領

膨張率とスペクトル重心および伝播速度の関係を図-4 および図-5 に示す。なお、最もよく膨張したシリーズ III の試験体は、最終測定時（材齢約 5 ヶ月）において膨張率が 1% 近くに達していた。

スペクトル重心は、図-4 に示すように膨張率の増大にともなって低下していく傾向にあり、当初 23～28kHz 程度であったものが、膨張率 0.8% を超えた時点では 12～17kHz 程度まで低下している。これに対して伝播速度は、図-5 に示すように膨張率が 0.2% を超えるあたりまでは急速に低下するが、その後は膨張率が増えても大きな変化がなかった。

これらの結果から、ASR 劣化がある程度顕著になったものについては、伝播速度よりもスペ

クトル重心の方が劣化との相関性が高く，劣化度合いの有効な指標であること検証できた。

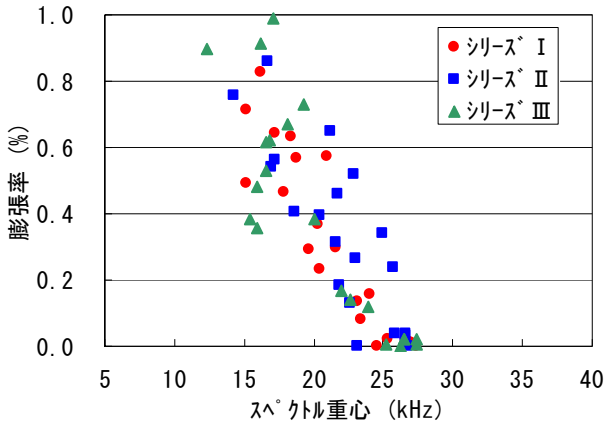


図-4 膨張率とスペクトル重心

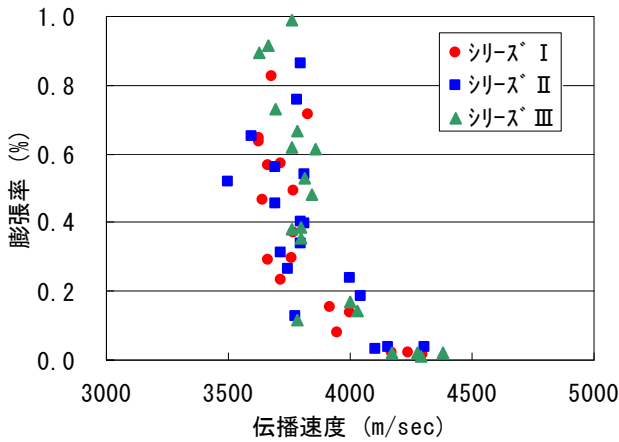


図-5 膨張率と伝播速度

## 2.2 スペクトル重心による評価の問題点

### (1) 伝播距離の影響

コンクリートを透過させた超音波は，高い周波数の波ほどよく減衰するが，この傾向は ASR 劣化が顕著になるほど強まる．図-6 および図-7 は，ASR 劣化の顕著な箇所と軽微な箇所から採取した長寸のコアを，少しずつ切断しながら測定したスペクトル重心を示したものである．

ともに，伝播距離が長くなるに従ってスペクトル重心は低下していく傾向にあるが，その割合は劣化の顕著な箇所から採取したコアの方が大きい．

この検討から，伝播距離をある程度長くすれば劣化度の評価が容易になることがわかったが，反面，同じ状態のコンクリートであっても伝播

距離によってスペクトル重心が変化するので，厚みの異なる部材の測定結果を比較する場合などには注意が必要である．

今後，様々な劣化度や伝播距離でスペクトル重心を測定し，データベース化を進めていけば，伝播距離の影響を定量的に評価できるようになるとと思われる．

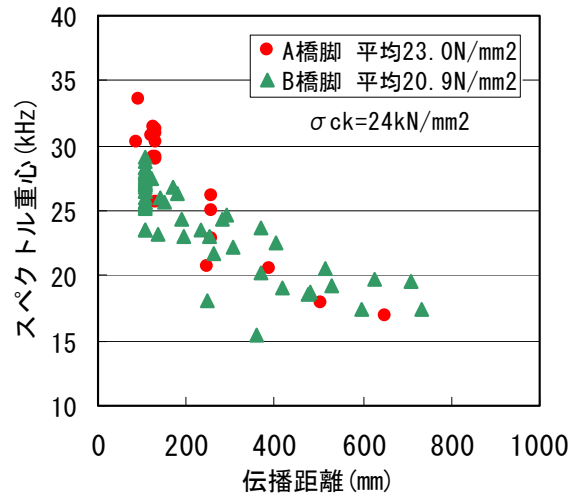


図-6 スペクトル重心と伝播距離(劣化顕著)

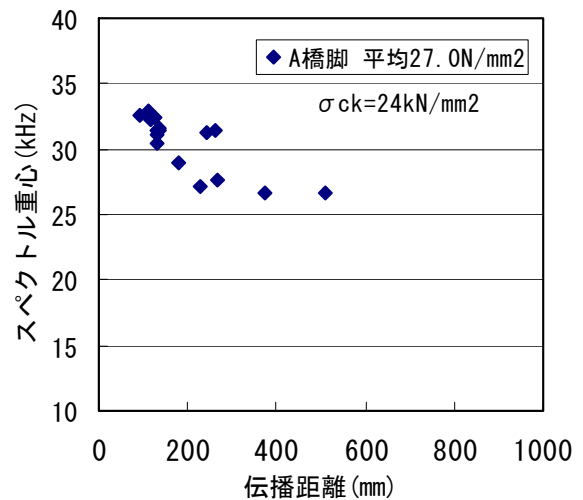


図-7 スペクトル重心と伝播距離(劣化軽微)

### (2) 測定システムの機械差

超音波の周波数スペクトルは，超音波発生装置や探触子の特性などによって決定される．このため，これらの特性が全く異なるシステムで測定したデータを比較することは困難である．

現在，我々が使用している測定システムは，

断面の大きな部材でも有効なデータが測定できるように特注で製作したものである。スペクトル重心を評価指標として標準化するためには、測定システムの必要性能や特性を定める必要がある。

今後は、研究結果を基に必要性能を整理し、できるだけ一般に流通する機材で構成した測定システムを検討していきたい。

### 3. 電磁誘導法による鉄筋破断探査

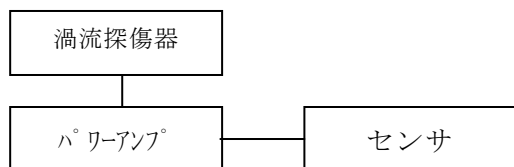
#### 3.1 測定装置の改良

我々が開発を進めている鉄筋破断探査機は、電磁誘導法の原理を用いたもので、実構造物においても鉄筋破断の検出に成功している<sup>2) 3)</sup>。しかしながら、従来の装置では測定者が測定波形を定性的に評価して破断の有無を判定しており、測定者の技量や熟練度によっては判定結果にばらつきが生じることもあった。

このような背景から、測定波形を定量的評価して鉄筋破断の有無を判定できる改良装置を開発した。

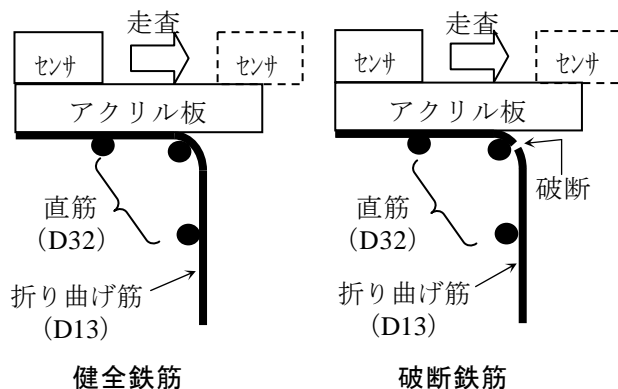
##### (1) 従来装置の概要

従来の鉄筋破断探査機は、**図-8**に示すように渦流探傷器とパワーアンプおよびセンサから構成されており、渦流探傷器は単一周波数仕様である。また、センサは励磁コイルと検出コイルを各1個使用している。

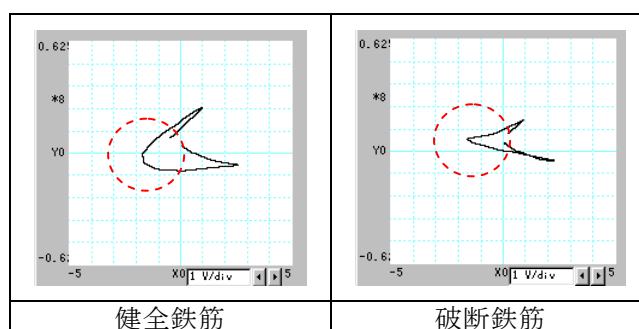


**図-8 従来装置の構成**

この装置を用いて、破断および健全な折り曲げ鉄筋の試験体 (**図-9** 参照) を走査すると、**図-10**に示すような測定波形が得られる (この波形はベクトル表示されており、以降測定波形は全てこの表示とする)。



**図-9 折り曲げ鉄筋の健全および破断試験体**



**図-10 従来装置による測定波形**

同図の破線円内に着目すると、健全な鉄筋の波形には丸みがあるが、破断鉄筋では鋭角的となっており、この波形形状の違いから破断の有無を識別することができる。しかしながら、実構造物で測定した波形は、鉄筋間隔やかぶりの不揃い、躯体表面の不陸、型枠セパレータや組立筋などの影響によって、これらの特徴が不明瞭になることも多く、この手法に熟練した技術者でなければ測定や波形の分析が困難な場合もあった。

##### (2) 改良装置の改良点

従来装置の大きな問題点は、測定者が測定波形を観察して鉄筋破断の有無を判定していたところにある。このため、測定者の主観的判断や熟練度の影響を受けることがあるため、改良装置では波形を定量的に評価することに主眼を置いて以下の点を改良した。

- ① 渦流探傷器の仕様を単一周波数から多重周波数に変更し、データ収集を1チャンネルから3チャンネルとした。また、センサの検出

コイルも 1 個から 2 個として、1 回の走査で複数の情報が得られるようにした。

② 測定波形を多角的に解析（多重周波数による解析，検出コイル大，小による解析，生波形による解析）する機能を付加し，それによる定量的評価から鉄筋破断の有無の判定結果が表示されるようにした。

③ 従来装置では別々であった渦流探傷器とパワーアンプを一体化し，可搬性および操作性の向上を図った。

(3) 改良装置の波形解析

改良装置では，測定波形を定量的に評価するために 3 つの方法で解析処理を行い，その結果を総合的に判断して鉄筋破断の有無を判定できるようにした。

以下に，各解析処理の方法を示す。

① 多重周波数による測定および解析

測定波形には，破断の信号以外の不要な信号（直筋や折り曲げ鉄筋の連続部の信号）も含まれており，これを消去できれば破断の有無の判定は容易になる。改良装置では，異なる周波数で測定した波形を解析し，不要信号を消去する処理を行っている。

この解析のイメージは図-11 に示すとおりで，試験周波数 F1 で測定した波形を位相および振幅調整し，それを試験周波数 F2 で測定した波形で減算処理（以後，MIXING と呼ぶ）して不要信号を消去する。これにより，破断がある場合は破断信号の波形のみが抽出されるが，破断のない場合は波形が消滅する。

図-12 は，図-9 に示した試験体の測定波形の解析例である。異なる周波数で測定した F1 波形と F2 波形を MIXING したものが M1 波形であるが，理論上は消去されるはずの健全鉄筋についても波形が残っている。しかしながら健全鉄筋の M1 波形は，破断信号を含んでいる破断鉄筋の波形と比較するとかなり小さいので，識別することが可能である。

なお，波形の振幅はかぶりの厚さ（測定対象までの距離）によっても変化するので，こ

の影響を排除するために F1 波形との振幅比で M1 波形を評価している（図-12 において，AM/A1 および BM/B1）。

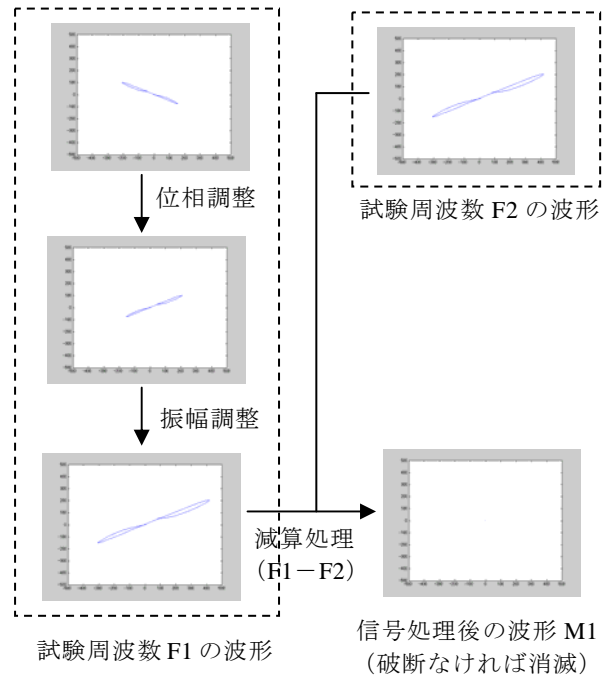


図-11 MIXING のイメージ図

健全鉄筋の波形	破断鉄筋の波形
F1 波形	F1 波形
F2 波形	F2 波形
M1 波形	M1 波形

図-12 多重周波数の信号処理例

② 大・小の検出コイルによる測定および解析  
 従来装置では1個であったセンサの検出コイルを、改良装置では大、小2個の検出コイルとした。これによって複数の信号を測定し、それらを MIXING することで不要信号（直筋や折り曲げ鉄筋の連続部等）の消去を行っている。

図-13 および図-14 は、大、小のコイルで試験体を測定した波形である（明瞭な波形を示すために調査対象鉄筋も直筋としている）。検出コイル大で測定した波形は、試験体 A（破断なしモデル）が振幅 8.96V、試験体 B（破断のみを再現したモデル）は振幅 1.16V であった。これに対して、検出コイル小の測定波形は、試験体 A が振幅 4.10V と検出コイル大の半分程度の大きさであるのに対し、試験体 B の振幅は逆に 1.47V と検出コイル大の波形よりも大きかった。このような特性を利用して、検出コイル大、小の MIXING を行えば、破断信号の波形を明瞭化できると考えられる。

図-15 は、破断なしモデルと破断ありモデルで測定した検出コイル大、小の波形を MIXING したものである。これに表されるように、破断なしモデルでは波形が消滅するが、破断ありのモデルは破断信号の波形が残るので、破断の有無を判定することができる。

③ 原波形の軌跡の解析

破断がある場合の原波形の軌跡は、健全な場合の波形の軌跡と比べて鋭角になる（図-10の破線円内）。改良装置では、測定波形の軌跡の角度を、これまでの調査・研究結果から設定した閾値と照査して破断の有無を判定できるようにした。

3.2 模擬モデルでの検証

橋脚梁部のスターラップの破断を再現した模擬モデルを用いて、改良装置の解析アルゴリズムの妥当性を検証した。

模擬モデルは、写真-1 に示すように、曲げ加工部で切断した折り曲げ鉄筋（破断鉄筋）と連続した折り曲げ鉄筋（健全鉄筋）を1本ずつ配

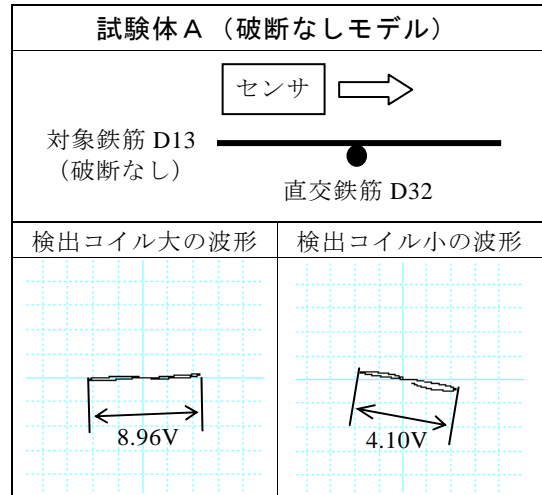


図-13 破断なしの波形

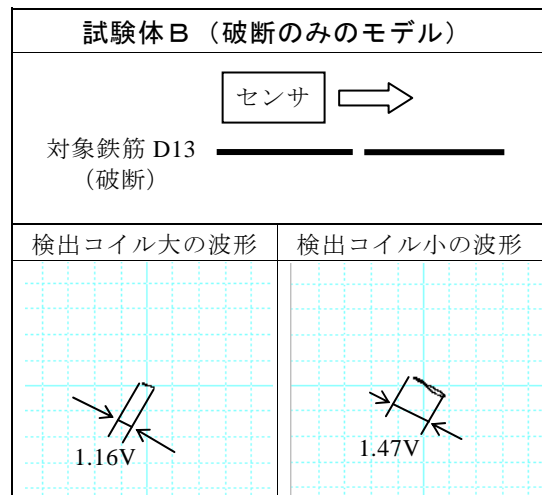


図-14 破断のみの波形

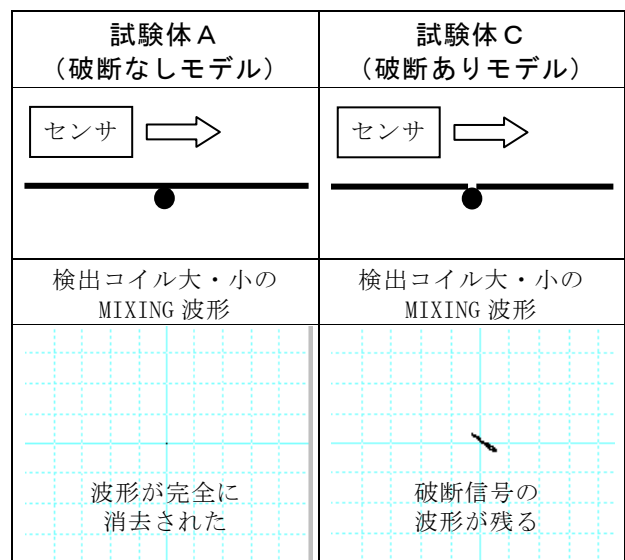


図-15 検出コイル大・小の MIXING 波形

している。これらの鉄筋には、実橋脚のスターラップに多いD13を使用しており、亚克力板で再現したかぶり（純かぶり）は、上面、側面ともに60mmとしている。また、主鉄筋を再現するために、折り曲げ鉄筋に直交するD32の直筋を3本配している。

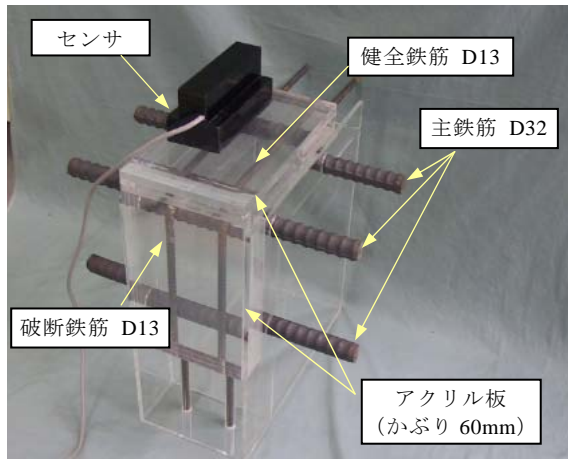


写真-1 模擬モデル

模擬モデルの測定波形の解析結果は、図-16に示すとおりである。改良装置では、各解析による判定結果を容易に識別できるように、判定画面を○×表示にしているが、健全鉄筋は全て○（健全）、破断鉄筋は全て×（破断）と判定されており、本装置の解析アルゴリズムの妥当性を確認することができた。

### 3.3 コンクリート供試体での検証

より実構造物に近い条件で改良装置の有効性を検証するために、別途実施される載荷試験用に製作されたPC梁モデル供試体（以下、コンクリート供試体と称する）で測定を行った。

この供試体の外形寸法 600×600×4000mm で、D13のスターラップがかぶり（純かぶり）32mm、間隔 170mm で配されている。これらの一部では、下縁側の隅角部を切断して鉄筋破断が再現されており、今回の改良装置による測定はここを対象に行った(写真-2 参照)。

コンクリート供試体での測定結果は、図-17に示すとおりで、測定波形を解析結果は、健全鉄筋が全て○（健全）、破断鉄筋は全て×（破断）と判定されており、コンクリート供試体においても改良装置の有効性が確認された。

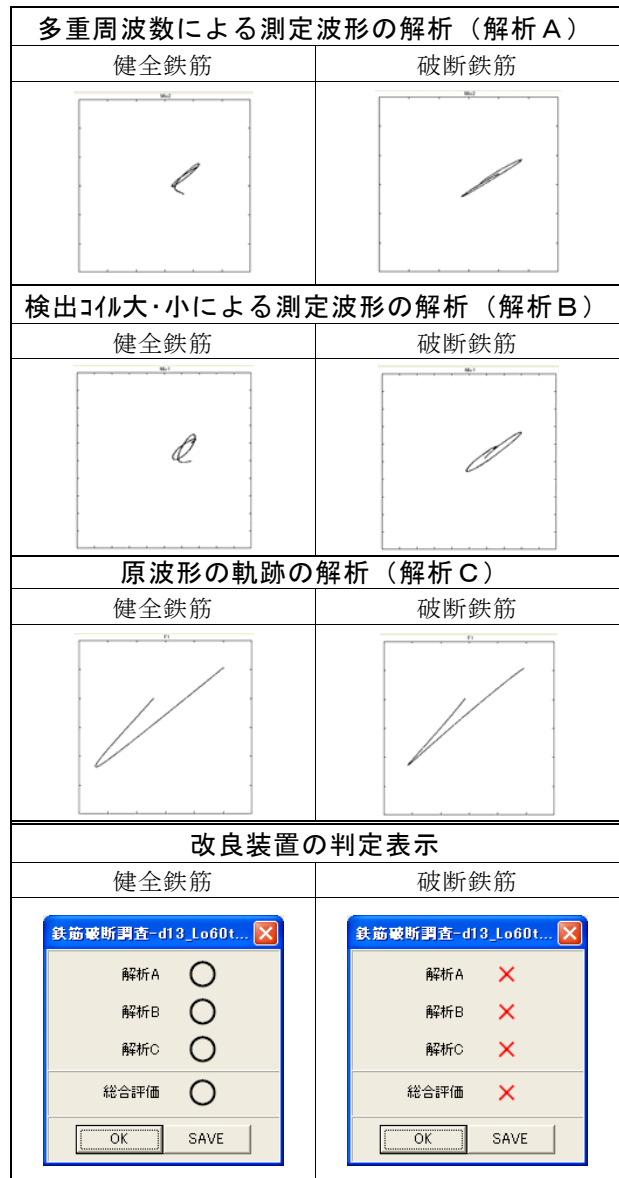


図-16 模擬モデルの測定結果



写真-2 コンクリート供試体での測定状況

なお、コンクリート供試体の解析波形は、健全鉄筋と破断鉄筋の差が模擬モデルよりも顕著であったが、これはかぶりの影響と考えられる。今後はかぶりの大小が波形に及ぼす影響を定量的に評価できるように検討していく予定である。

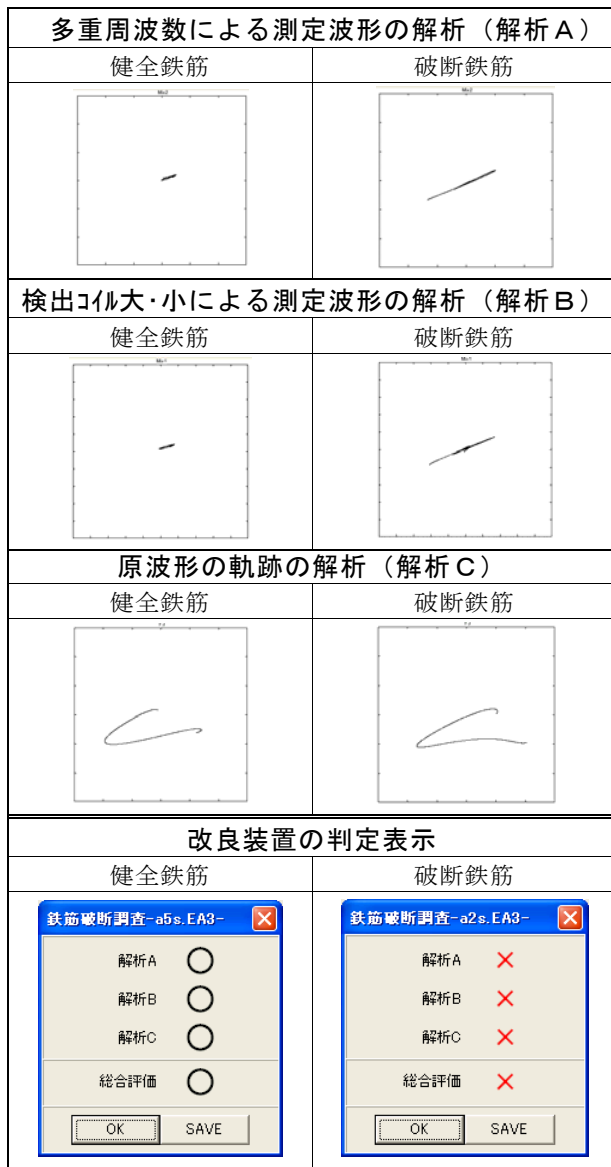


図-17 コンクリート供試体の測定結果

#### 4. まとめ

本研究成果のまとめを箇条書きにして示す。

- (1) ASR 劣化した構造物から採取したコアにおいては、スペクトル重心と圧縮強度に相関が見られた。
- (2) ASR 試験体による実験では、スペクトル重心は膨張率 1% 近くになっても膨張率と比例関係にあったのに対し、伝播速度は膨張率

0.2% 以上になるとほとんど変化がなくなった。

- (3) これらの結果から、ASR 劣化が顕著になった構造物では、伝播速度よりもスペクトル重心の方が評価指標として優れていると考えられる。
- (4) スペクトル重心は伝播距離によって変化するので、厚みの異なる部材の測定結果を比較する場合などは注意が必要である。
- (5) 測定波形を定量的に解析できるように改良した鉄筋破断探査機を開発した。この改良装置には、①多重周波数で測定した波形の解析、②複数の検出コイルによる測定した波形の解析、③原波形の軌跡の解析、の3つの解析機能を付加した。
- (6) これによって、これまで測定者の判断に委ねられていた鉄筋破断の判定が、多角的な波形解析に基づき機械的に行えるようになった。

#### 参考文献

- 1) 笹谷輝彦, 藤原規雄, 杉谷真司, 鳥居和之: 弾性波法による ASR 損傷コンクリート橋脚の内部探査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 629~634, 2003.7
- 2) 葛目和宏, 森雅司, 松本茂: アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊試験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第2巻, pp.171-178, 2002.10
- 3) 葛目和宏, 藤原規雄, 吉荒俊克, 森雅司: ASR劣化調査に用いる非破壊検査手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第4巻, pp. 67-74, 2004.10
- 4) 稲葉智明, 葛西亮平, 小島正, 廣瀬壮一, 羽矢洋: コンクリート供試体における超音波減衰係数, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第4巻, pp. 289-292, 2004.10