

論文

超音波トモグラフィによる ASR 劣化したコンクリート 内部性状の把握に関する検討

葛目 和宏^{*1}， 真鍋 英規^{*2}， 小椋 紀彦^{*3}， 山本 貴士^{*4}， 宮川 豊章^{*5}

Experimental Study on Inspection for Internal Deterioration of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction Using Ultrasonic Tomography Method

Kazuhiro KUZUME^{*1}, Hideki MANABE^{*2}, Norihiko OGURA^{*3},
Takashi YAMAMOTO^{*4}, and Toyoaki MIYAGAWA^{*5}

要旨：コンクリートの力学特性の低下を伴う ASR 劣化では，構造物の安全性を確保する上で，構造物の劣化程度を的確に把握するとともに，その情報を活用し力学特性を適切かつ定量的に評価することが維持管理を行う上で重要となる．本研究では，長期暴露させた ASR 試験体を用いて顕在化した表層のひび割れより更に内部のコンクリート状況に関して，超音波トモグラフィ法を適用して可視化を試みた．その結果，距離減衰を考慮したスペクトル重心に着眼すれば，超音波トモグラフィの結果より，ASR 劣化したコンクリートの内部構造の強度が推定できる可能性を有していることが分かった．

キーワード：アルカリ骨材反応，内部劣化，超音波トモグラフィ，距離減衰

1. はじめに

コンクリートの内部品質を評価する非破壊試験技術として，超音波を用いた弾性波法が一般的によく知られている．既往の研究によれば，コンクリートを透過した超音波伝播速度と圧縮強度，弾性係数との間には，ある程度の相関を有していることが認められている¹⁾．近年では，コンクリート構造物を測定した超音波伝播速度を用いてトモグラフィ解析を行い，内部の欠陥位置を可視化，推定する研究が活発に行われている²⁾．

本研究は，長期暴露させた ASR 試験体を用いて力学特性の低下を伴う ASR 劣化を模擬し，これに超音波トモグラフィ法を適用して可視化を行い，得られた情報から力学特性を適切かつ定

量的に評価する新たな推定手法の構築を目指し検討を行ったものである．

2. 検討要因

2.1 長期暴露 ASR 試験体

ASR 試験体は，平成 17 年に打設，屋外にて 7 年間長期暴露されたポストテンション方式の PC 試験体を用いた．これまでのモニタリング計測の表面ひずみの結果では，8000～9000 μ 程度有しているのが確認されている．試験体の大きさは，中型試験体：535×560×4000mm，大型試験体：1200×1250×7500mm の 2 種類があり，各試験体とも，図-1 の波線で示した 3 箇所断面位置で超音波トモグラフィを実施した．また比較として，同時期に非反応性骨材で作製した

*1 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長
*2 (株)国際建設技術研究所 構造設計部 部長
*3 (株)国際建設技術研究所 技術部 課長
*4 京都大学大学院工学研究科 准教授
*5 京都大学大学院工学研究科 教授

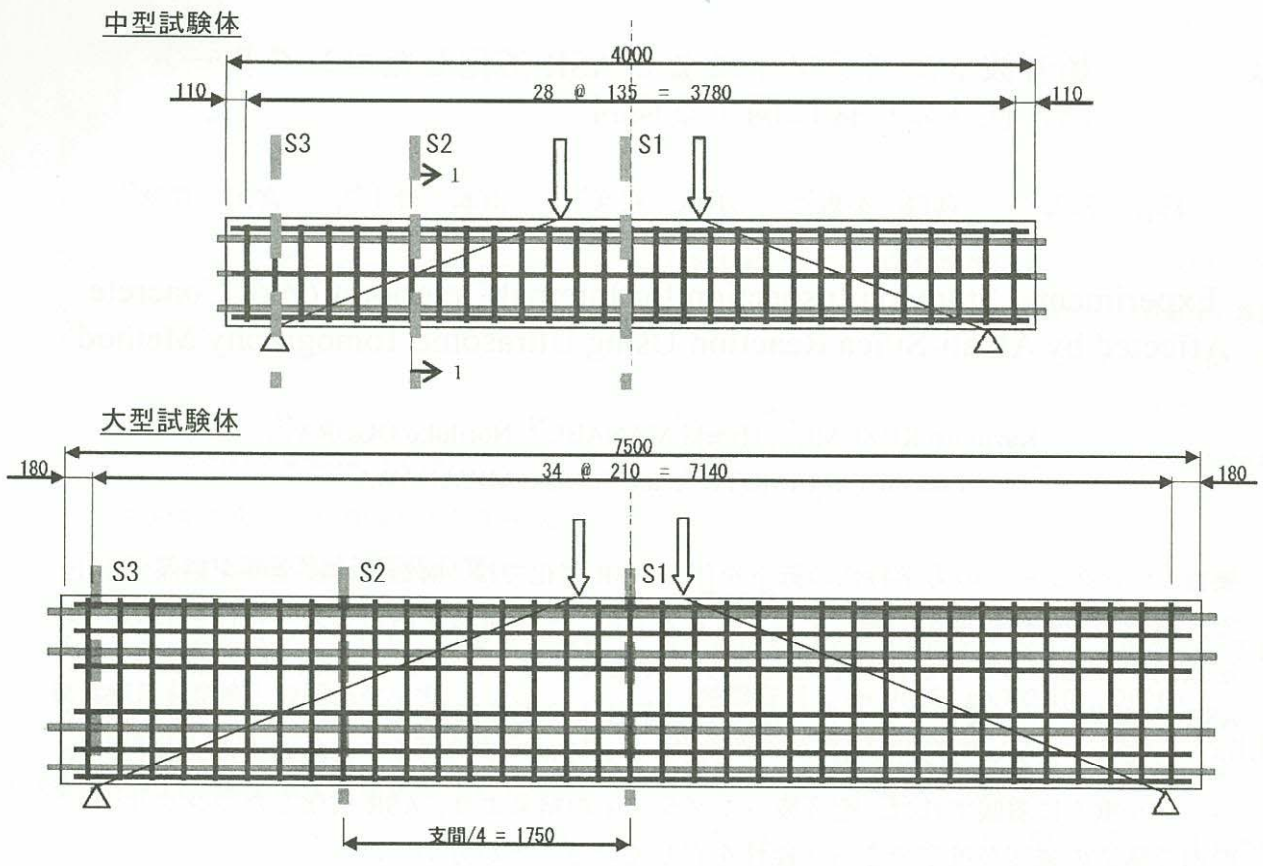
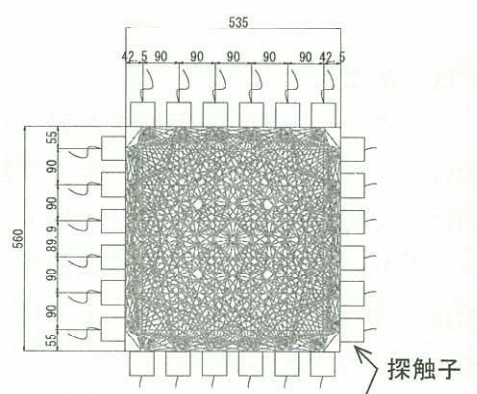


図-1 各種試験体の概要

中型健全試験体も利用して検討を行った。

各試験体の部材断面における超音波探触子の設置・測定間隔は、中型試験体で90mm(各面6箇所)、大型試験体では125mm(各面9箇所)を基本とし、発振側および受振側探触子の2個のみを使用して、図-2に示す探触子設置位置で順次探触子を動かしていき、超音波を対面方向(透過方向)、斜角方向および表面波のデータを取得した。なお、使用した試験体ではASR劣化の力学的特定を把握するために載荷試験を実施しており、超音波トモグラフィの測定は、載荷試験前後で実施した。

中型試験体



大型試験体

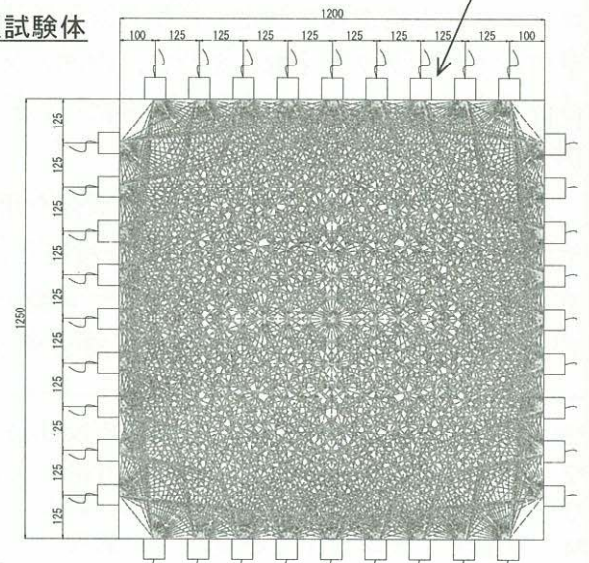


図-2 各試験体の超音波探触子設置位置図

表-1 試験体の検討数量

試験体	断面数	測点数		備考	
		透過, 斜角	表面		
中型	ASR	3	216点/断面	20点/断面	
	健全	1	216点/断面	20点/断面	S1のみ
大型	ASR	3	486点/断面	32点/断面	

2.2 超音波装置

表-2 に今回使用した超音波装置の仕様を示す。今回使用した超音波装置は、印加電圧 1200V、放電時間 0.5 μ sec である。探触子としては共振周波数 40kHz のものを使用した。波形収録には、A/D 変換分解能 14bit のデジタルオシロスコープを使用し、サンプリング周波数 10MS/s で波形を収録した。

表-2 超音波測定器の仕様

装置	K 社製
印可電圧	1200V
放電時間	0.5 μ sec
探触子共振周波数 (*実測値)	40kHz (42.0kHz)
探触子直径	60mm

※実際に探触子同士を合わせて行った実測値

2.3 トモグラフィ解析方法

トモグラフィ技術を応用した解析手法として、主に大きく 2 つの解析手法から構成される。1 つは順解析と呼ばれるものであり、発振点から受振点に至る弾性波の伝播経路を再現し、その到達時間を計算によって算出するものである。

もう 1 つは、逆解析と呼ぶもので、計算にて求められた伝播時間と測定された伝播時間との差(残差)を小さくするように、弾性波伝播速度を修正し、最適な速度を算出していく解析手法である。

今回の測定では、順解析として「逆投影法」、逆解析に「同時反復再構成法」を用いて検討を行った。各手法についての概要を下記に示す。

(1) 逆投影法

各波線がブロックを通過する長さで重みを付け、 j 番目のブロックの求める速度 V_j を下式により求める。

$$V_j = \frac{\sum (l_{ij} V_i)}{\sum l_{ij}} \quad (1)$$

ここに、 l_{ij} : i 番目の波線が j 番目のブロックを通過する長さ

(2) 同時反復再構成法

超音波測定結果の伝播速度と逆投影法で算出した各ブロックの伝播速度の誤差を補正するため、同時反復再構成法を使用した。同時反復再構成法は、残差や各ブロックを透過する波線の長さより、直接伝播時間の補正量を求める手法であり、各ブロックの伝播時間の補正量 ΔS は下式より求める。

$$\begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \dots \\ \Delta S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (l_{i1} OS_i) / \sum_{i=1}^m (l_{i1}) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m (l_{in} OS_i) / \sum_{i=1}^m (l_{in}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 OS_i : i 番目の波線の残差を全波線長で割ったもの、 m : ブロック内を通過する測点数

図-3 に、今回用いた超音波トモグラフィ解析のフローを示す。

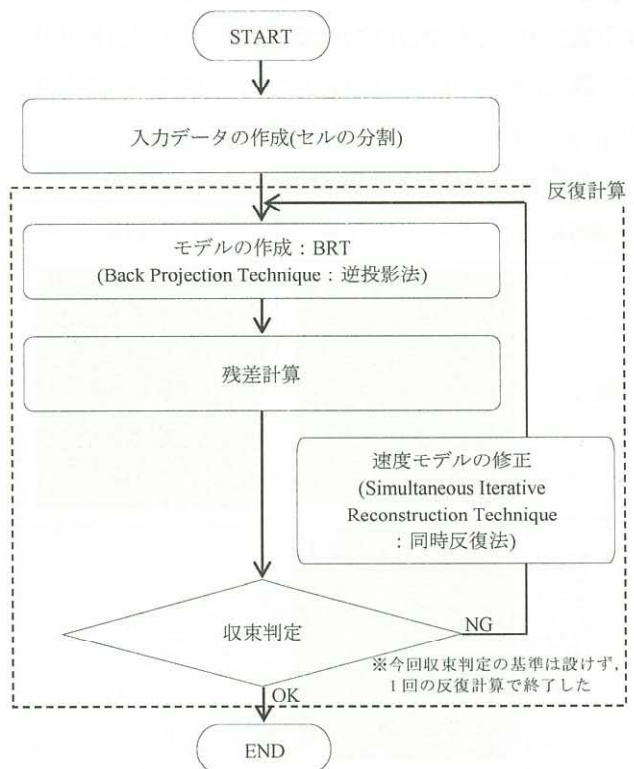


図-3 超音波トモグラフィ解析フロー

3. 検討結果

3.1 伝播速度による評価

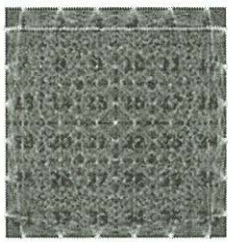



中型試験体における「健全試験体」と「ASR試験体」の伝播速度を評価パラメータとしたト

モグラフィ解析結果を、表-3 に示す。解析条件として先ず試験体の断面を、図-2 で示したように水平方向 6 分割，鉛直方向 6 分割にブロック分割した。また，伝播速度による速度差を 4200m/sec を最大値，3500m/sec を最小値として 25 水準で分類，色分けを行った。

健全試験体の解析結果では，概ね 4500～4600m/s 程度，ASR 試験体の解析結果では 3400～3600m/s 程度で，健全試験体と比較して伝播速度の低下が明確に認められた。しかし，ASR の劣化現象は，特に環境条件の影響を受けるコンクリート表層側で最も大きく，徐々に内部側へ劣化が進展していくメカニズムが通常である。

すなわち，ASR 試験体の劣化がまだ進展途中であるとするならば，ASR 試験体の断面内での伝播速度分布は，表層部の方が内部に比べ伝播速度の低下が顕著に現れるはずである。しかし当該試験体を対象とした解析結果では，ASR 試験体において伝播速度が顕著に低下した傾向は認められたものの，断面内では一様な伝播速度分布を示した。

表-3 伝播速度のトモグラフィ結果

試験体	ブロック分割	TG 結果
健全		
ASR		

※中型試験体の S1 断面の結果

4.200 1.500
(m/sec)

これらトモグラフィ解析の結果を検証するため，中型試験体をワイヤーソーで切断し，そこから鉛直方向および軸方向からコアを採取し，物性試験を実施した。コア採取位置を図-4 に，

採取コアの圧縮強度および静弾性係数試験の結果を表-4 に示す。

軸方向および鉛直方向の圧縮強度を比較すると，健全試験体の場合では軸方向の方が鉛直方向のコアに比べ 3% 程度，ASR 試験体では 24% 程度強度が高くなる傾向を示した。静弾性係数試験においても同様に，鉛直方向のコアより軸方向で採取したコアの方が高くなる傾向にあった。このことから，健全試験体は表層側および内部側ともコンクリートの状態は同程度であるのに対し，ASR 試験体の場合では，内部側よりも表層側の方が，よりコンクリートの劣化が顕著に進展することが確認できた。

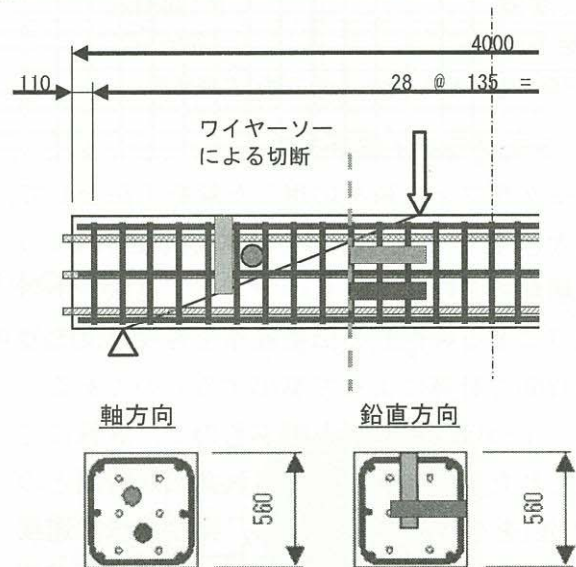


図-4 コア採取位置図

表-4 中型試験体の物性試験結果

試験体	コア採取方向	圧縮強度 (N/mm ²)	平均	静弾性係数 (kN/mm ²)	平均
健全	軸方向	43.8～69.3	68.6	38.5～39.2	38.9
	鉛直方向	55.1～72.9	66.7	35.5～38.4	36.5
ASR	軸方向	37.5～46.1	42.7	19.4～20.7	20.1
	鉛直方向	25.7～42.2	32.6	6.87～10.1	8.67

※コアの採取本数は，各方向とも n=3
※コアは，φ100×200mm で採取

従来の伝播速度をパラメータとした評価方法では，ASR 劣化した試験体をトモグラフィ法により可視化しても，力学的特性を適切に再現するまでに至らなかった。

3.2 評価指標の改良

トモグラフィ解析の精度を上げるため、以下に示す2パターンの改良を加え検討を行った。

(1) 指標となる評価パラメータの検討

既往のトモグラフィ解析では、伝播速度を評価パラメータとすることが一般的である。しかし、図-5に示す中型試験体のS1断面の伝播速度と各測点の関係を示した分布状況を見ても明らかのように、伝播速度は健全試験体およびASR試験体とも、各試験体での速度差はほとんど生じていない。そのため、伝播速度をパラメータとした解析結果では、伝播速度分布が一様に表現されたと考えられる。

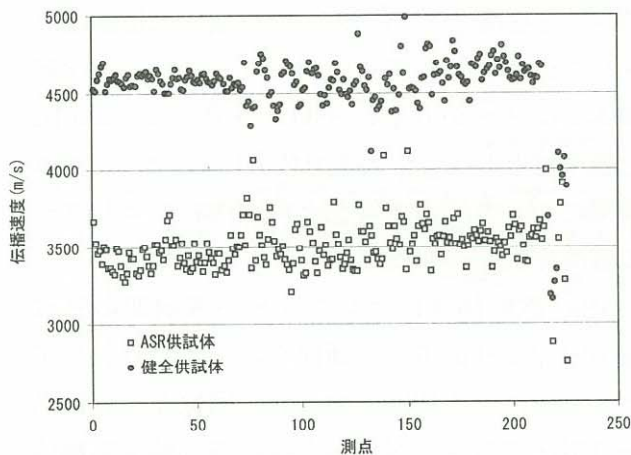


図-5 伝播速度の分布状況

そこで伝播波形を周波数分析し、スペクトル重心を評価パラメータとした検討を試みた。

本評価パラメータは、弾性波エネルギーに着眼した分析手法であり、超音波法では、透過した弾性波の高周波成分の減衰を定量的に示したものと云える。ここで示すスペクトル重心とは、伝播波形を解析して得られた周波数スペクトルの重み付けをした平均値である。既往の研究によれば、スペクトル重心や最大振幅など、弾性波エネルギーに着眼した評価パラメータの方が、ASR劣化構造物では伝播速度よりも伝播媒体の影響を感度良く捉えられることが報告されている³⁾。今回の評価では、試験体の微振動や高周波ノイズの影響を避けるため、下記に示すように1kHzから50kHzの間の周波数成分(スライス幅 50Hz)に重み付けをした平均値をスペクトル

ル重心として求めた。

$$\text{スペクトル重心(kHz)} = \frac{\sum E_i \cdot F_i}{\sum E_i} \quad (3)$$

ここに、 E_i : 成分の大きさ、 F_i : 周波数

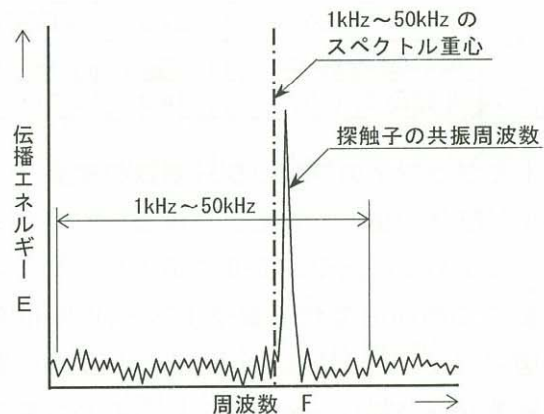


図-6 スペクトル重心の概要図

測定では共振周波数が40kHzの探触子を使用しており、健全なコンクリート構造物の場合、伝播波形の周波数成分はこの付近が卓越することになるが、劣化が進行すると卓越する周波数が低い側に移行するとともに、ピークが明確ではなくなる傾向を示す。

同じ中型試験体S1断面での、スペクトル重心と各測点の関係を示す、図-7、表-5に示す。

伝播速度に比べ、各測点でスペクトル重心が大きく変動している傾向を示しており、またその変動は、健全試験体よりASR試験体の方がより顕著に現れている。

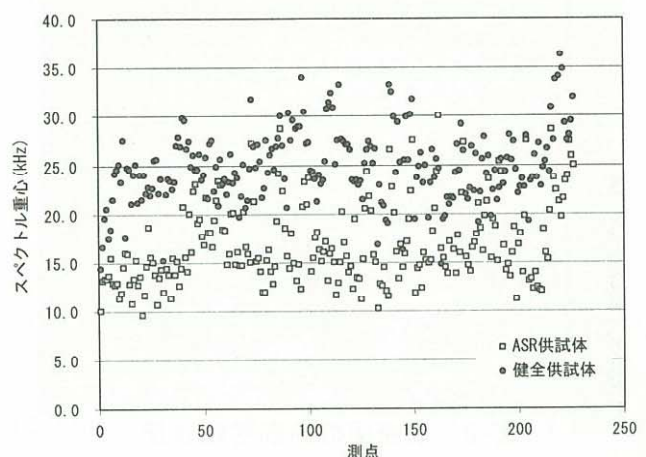


図-7 スペクトル重心の分布状況

表-5 評価パラメータの結果一覧

評価パラメータ	項目	健全試験体	ASR試験体
伝播速度	平均値 (m/sec)	4554	3482
	標準偏差 (m/sec)	245	229
	変動係数 (%)	5.4	6.6
スペクトル重心	平均値 (kHz)	24.9	16.9
	標準偏差 (kHz)	3.7	4.2
	変動係数 (%)	14.9	24.9

(2) トモグラフィのブロック分割数の変更

中型試験体の場合、90mm を探触子の測定間隔として定めていたが、図-8 に示すワイヤーソーによる切断面の変状を観察すると(切断位置は、図-4 を参照)、表層から 30mm 程度の位置まで顕著なひび割れが発生しているのが目視で確認できた。表-4 に示した物性試験の結果においても、ASR 試験体の場合では、内部側よりも表層側の方が、よりコンクリートの劣化が顕著に進展することが認められており、目視の結果と一致する。そこで、ASR による内部劣化深さを測定結果の 30mm と仮定すると、現状のブロック分割数は 1 辺の長さが 90mm であり、内部劣化深さの 3 倍の長さを有していることから、1 つのブロック内で変状の影響が平均化されている可能性が考えられた。そのため、これまでの分割数 6×6 分割から、一辺が 30mm 程度となる 18×18 分割まで細分化し、表層部の劣化状況の再現を試みた。イメージ図を、表-6 に示す。

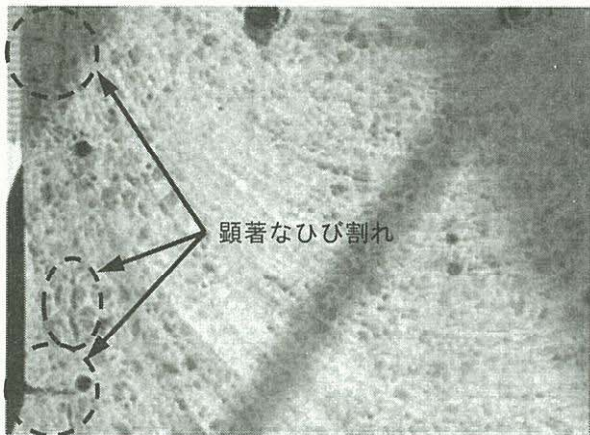


図-8 切断面の内部劣化状況

3.3 スペクトル重心による評価

中型試験体におけるスペクトル重心を評価パラメータとしたトモグラフィ解析結果を、表-7

表-6 ブロック分割数の変更

改良前 分割数(6×6)						改良後 分割数(18×18)					
1	2	3	4	5	6						
7	8	9	10	11	12						
13	14	15	16	17	18						
19	20	21	22	23	24						
25	26	27	28	29	30						
31	32	33	34	35	36						

※中型試験体の場合

に示す。なお、スペクトル重心を指標とした場合、逆投影法でモデルを作成する際に伝播速度におけるスローネスと同様に距離情報を有した特性値を必要とするため、周波数に伝播距離を乗じて逆数とした値を使用した。また、健全試験体ではスペクトル重心 35kHz を最大値、20kHz を最小値として 25 水準で色分けした。ASR 試験体については、表層側と内部側とのコントラストの濃淡を明確にするためレンジは可変した。

ASR 試験体ではコンクリート表層側の周波数が内部より低下した傾向を示しており、ワイヤーソーによる切断面の変状と同様な劣化機構を可視化することができた。一方、健全試験体では、コンクリート内部の中心位置付近で、一部周波数が低下するのが認められた。

表-7 スペクトル重心のトモグラフィ結果

評価パラメータ	健全試験体	ASR 試験体
スペクトル重心		

※中型試験体の S1 断面の結果

3.4 距離減衰の影響を考慮した評価

評価パラメータ、および解析のブロック分割数を改良・修正したことによって、従来の伝播速度を基にしたトモグラフィ解析より、実試験体の劣化状態と似かよった解析結果が得られた。しかしながら、表-4 の圧縮強度および静弾性係

数試験の測定結果を反映すると、健全試験体では表層側と内部側のコンクリートの強度は同程度であり、表-7で示した健全試験体のコンクリート内部の中心位置付近で、一部周波数が低下した傾向を示したトモグラフィ解析結果とは整合しない。

高田、塩谷らの研究⁴⁾によれば、伝播速度や振幅などの弾性波パラメータは、伝播距離による影響が考慮されておらず、直接的に劣化の指標に結び付けることが困難であるとしている。つまり、弾性波パラメータを劣化と結び付けるには、伝播距離による補正(距離減衰を考慮)が必要であることを示唆している。中型健全試験体の伝播距離とスペクトル重心の関係を、図-9に示す。

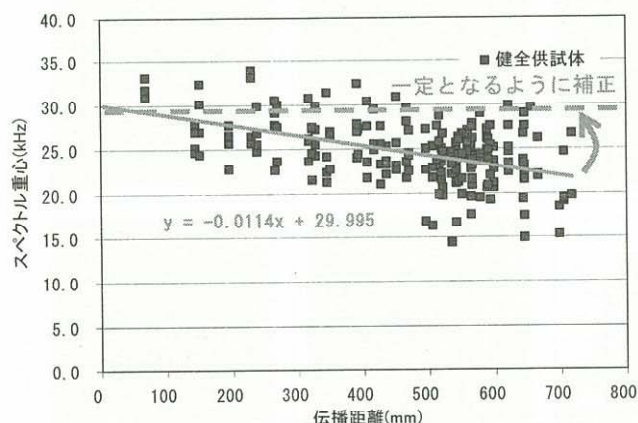


図-9 スペクトル重心と伝播距離の関係

スペクトル重心は、当該試験体では伝播距離に応じて線形に低下する傾向を示している。そこで、健全試験体のコンクリートの表層側と内部側が一様なコンクリート状態と仮定し、算出した線形回帰式が図中の波線部で示す一定値になるよう伝播距離による補正を行った。

距離減衰補正後の中型、大型試験体のトモグラフィ解析結果(載荷試験前、載荷試験後)を、表-8に示す。

トモグラフィ解析は、35kHzを最大値、20kHzを最小値として25水準で色分けした。

距離減衰による補正の結果、ASR試験体では距離減衰補正前と比較して、表層側の周波数が内部と比べて低い傾向は変わらないものの、局所的な周波数の差は生じることなく、周波数の

高低差が明瞭に現れている。

また、載荷試験前後を比較すると、載荷試験後の方が、全体的に周波数が低下した傾向を示した。

3.5 距離減衰補正後のスペクトル重心と強度との関係

距離減衰を補正した中型試験体のスペクトル重心と表-4の各試験体の圧縮強度試験結果を基に、スペクトル重心と強度との関係を整理した。結果を図-10に示す。

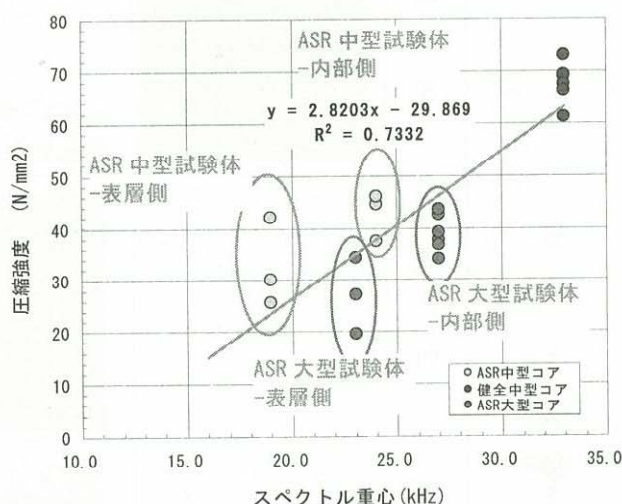


図-10 距離減衰後のスペクトル重心と圧縮強度との関係

この図からスペクトル重心と強度との関係は、非常に良好な相関が得られている。

妥当性の検証は今後必要ではあるが、距離減衰を考慮した周波数の重心を得ることができれば、超音波トモグラフィの結果より、ある程度コンクリート内部の強度が推定できる可能性を有していることが分かった。

4. まとめ

(1) ASR劣化した試験体に対しトモグラフィ解析で可視化を行ったが、従来の伝播速度をパラメータとした評価方法では、力学的特性を適切に再現するまでに至らなかった。

(2) 距離減衰を考慮したスペクトル重心を適用すれば、超音波トモグラフィの結果より、ASR劣化したコンクリートの内部構造の強度推定できる可能性を有していることが分かった。

表-8 距離減衰の影響を考慮したトモグラフィ結果

試験体		健全試験体 S1 断面	ASR 試験体 S1 断面	ASR 試験体 S2 断面	ASR 試験体 S3 断面
中型 試験体	載荷前				
	載荷後				
大型 試験体	載荷前	/			
	載荷後				

※載荷試験は、図-1 で示す 2 点集中載荷で実施。中型および大型試験体とも曲げ破壊した。
 ※終局時においては、試験体全体にわたってひび割れが発生し、特に載荷点と中央付近
 下端部のひび割れが著しい。

35.0 20.0 (dB)

謝辞

本研究は、国土交通省「平成 23 年度建設技術研究開発助成制度」で採択された「ASR 劣化構造物の力学性能推定技術の確立（研究代表者：宮川豊章）」における研究成果の一部を紹介したものであり、関係各位ならびに京都大学の塩谷智基准教授には多大なるご指導、ご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

1) 木村芳幹：超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造物品質の推定, GBRC 33(日本建築総合試験所), pp.13-21,2008

- 2) 松本貴士, 塩谷智基他：弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性診断, 土木学会関東支部新潟会研究発表会, 2004
- 3) 葛目和宏他：ASR 劣化構造物の非破壊的な評価方法について, 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 5 巻, pp.151-158, 2005.10
- 4) 高田雄大, 塩谷智基他：弾性波の周波数応答特性による不均質材料の損傷評価に関する研究, 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 12 巻, pp.363-368, 2012.11