

論文

超音波トモグラフィによるASR劣化したPC梁橋脚の内部性状の把握に関する検討

葛目 和宏*¹, 金海 鉦*², 松本 茂*³, 山本 貴士*⁴, 宮川 豊章*⁵

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

Kazuhiro KUZUME *¹, Shou KANAUMI *², Shigeru MATSUMOTO *³,
Takashi YAMAMOTO *⁴ and Toyoaki MIYAGAWA *⁵

要旨: コンクリート部材の内部性状を把握することは実効的な維持管理を計画・実施するための重要な要因となる。筆者らは、ASR劣化した供試体を用いてスペクトル重心を指標とした超音波トモグラフィ法によって、内部構造を推定できる可能性について知見を得ているが、スペクトル重心は、超音波透過距離によって減衰し、これまでは健全コンクリートで得たデータを基準に補正を行い評価していた。本研究では、ASR劣化したコンクリートの距離減衰特性に着眼した検討を行い、スペクトル重心の距離補正の精度向上を図り、さらに、この結果を用いて実橋PC梁橋脚の梁断面の内部性状を精細に評価した。

キーワード: アルカリ骨材反応, 超音波トモグラフィ, スペクトル重心, 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手法として、近年、超音波トモグラフィ解析を適用した研究がさかんに行われている^{1), 2)}。超音波トモグラフィ解析では、超音波伝搬速度を指標とした研究が多い中で、筆者らは、超音波受信波のスペクトル重心に着眼し、長期暴露させ力学特性の低下を伴うASR劣化を模擬した試験体に適用して非破壊的に内部構造を推定できる可能性について既に報告している^{3)~4)}。この報告でスペクトル重心は、超音波透過距離によって減衰することも把握しており、この結果を基に健全コンクリートで得られたデータを基準に距離補正を行い評価していた。しかし、ASR劣化したコンクリートに健全コンクリートで得られ

た距離減衰特性を適用することは合理的でないと考え、超音波トモグラフィ法の精度向上を目的にASR劣化したコンクリートでの距離減衰特性に着眼し距離補正を行うための検討を行い、さらに、この結果を用いて実橋PC梁橋脚の梁断面の内部性状を評価した。

2. スペクトル重心の距離減衰の再評価に関する検討

2.1 検討対象

反応性骨材を適用して製作したRC梁供試体(400×400×5000mm)へ載荷試験を実施した後、スペクトル重心の距離減衰に関する検討を行った。表-1~4にコンクリートの配合および使用材料、化学法による判定結果を示す。梁供試体

*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 取締役技術部長

*3 阪神高速技研(株) 技術部担当部長

*4 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授

*5 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授

表-1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)							AD No.70	NaCl (kg)	
					W	C	S			G				
							S1	S2	S3	G1	G2			G3
20	8	4.5	57	47.4	168	295	177	76	608	196	294	487	2.950	19.5

表-2 使用材料

材料種類	材料名
普通セメント	普通ポルトランドセメント
S1 川砂	兵庫県武庫川産下流産 砂(川砂)
S2 海砂	佐賀県唐津産 砂(海砂)
S3反応性細骨材	北海道産 砕砂
G1砕1505	箕面市止々呂美産 碎石
G2砕2015	箕面市止々呂美産 碎石
G3反応性粗骨材	北海道産 碎石

表-3 化学法による判定結果 (S3: 砕砂)

アルカリ濃度減少量(R _c) mmol/L	溶解シリカ量(S _c) mmol/L	判定
103	435	無害でない

表-4 化学法による判定結果 (G3: 砕石)

アルカリ濃度減少量(R _c) mmol/L	溶解シリカ量(S _c) mmol/L	判定
108	525	無害でない

JIS A 1145:2001 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)

は、図-1~2に示すようにスターラップ下縁の

曲げ加工部および主鉄筋の両端曲げ加工部の破断を模擬して作製しており、平成19年度に作製し、4年間自然暴露したのち荷重試験を行い、その後、5ブロックに切断し、さらに図-3~4に示す荷重による影響を受けていないと考えられる(外観上、曲げひび割れの発生が見られていない範囲)支間1/4L~支点部の範囲を100,200,300,500mmの長さで切断調整したものである。

なお、本梁供試体は、荷重試験終了後、切断前にL/4断面においてトモグラフィ解析を行うための超音波試験を行っている。

2.2 試験方法

供試体の断面は、一部スターラップを越えて内部までひび割れが発生していたが、超音波は、M-3-1ブロックを含めた5体について、図-5に示したようにひび割れが認められなかった断

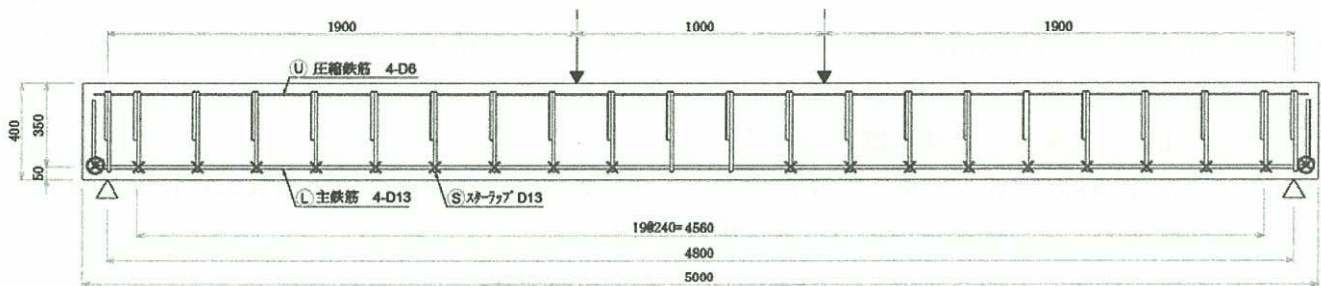


図-1 供試体の配筋図

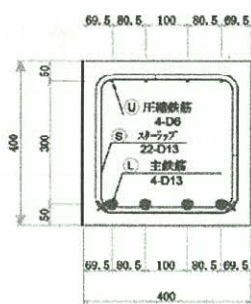


図-2 供試体の配筋断面図

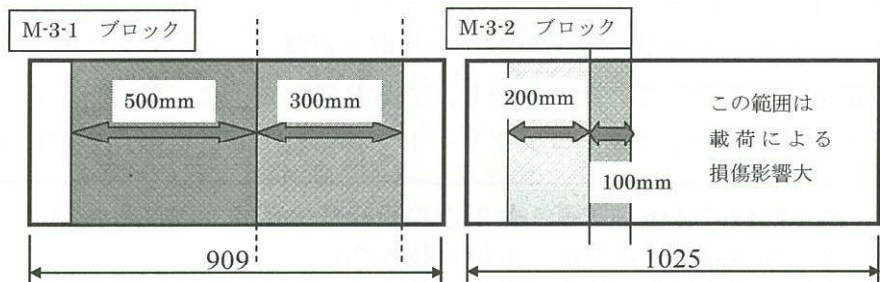


図-3 供試体切断構成図



図-4 梁供試体の外観状況（载荷試験後）

面高さの中央位置の水平方向4等分点において梁軸方向に透過させた。

今回使用した超音波装置の仕様を表-5に示す。

表-5 超音波装置の仕様

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 試験結果

今回対象とした5供試体のうち、代表例として、100~500mmの4体における超音波受信波

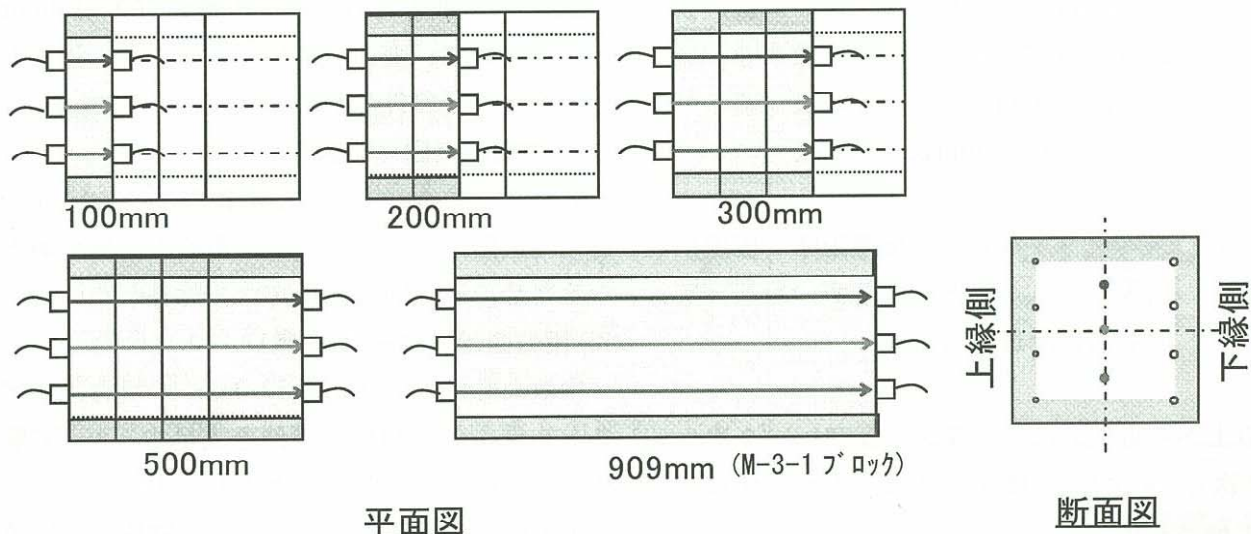


図-5 超音波の透過要領図

のパワースペクトル図を図-6に示す。

超音波探触子の共振周波数付近に相当する40kHz付近のスペクトル強度は、伝搬距離が増加するに従って減少する傾向が見られ、同周波数の500mm伝搬時のスペクトル強度は100mm伝搬時のそれに比べて約1/20程度まで減少していた。

図-7は、各供試体における超音波透過試験で得られたスペクトル重心と伝搬距離との関係を示したものである。スペクトル重心は、図-8に示した概念を基に、式(1)を用いて算出した。

$$\text{スペクトル重心 (kHz)} = \frac{\sum E_i \cdot F_i}{\sum E_i} \quad (1)$$

ここに、 E_i : 成分の大きさ、 F_i : 周波数

スペクトル重心と伝搬距離との関係は、伝搬距離が500mm程度までは、ほぼ線形関係が見られるものの、伝搬距離が増加するに従って、スペクトル重心の低下の割合は鈍くなる傾向が認められた。

2.4 スペクトル重心と伝搬距離との関係を示す近似式の検討

スペクトル重心の距離補正を行うために必要となる近似式を検討した。近似式は、以下のa)およびb)の事項を基本として検討した。

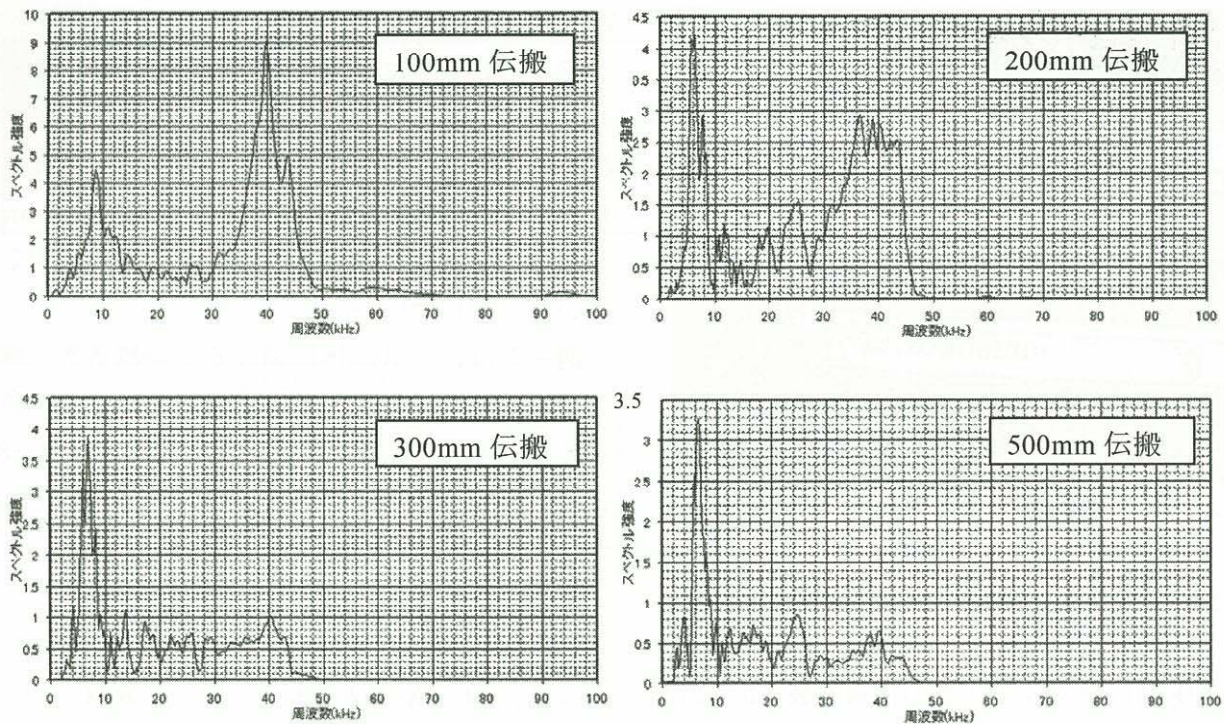


図-6 超音波受信波のパワースペクトル図

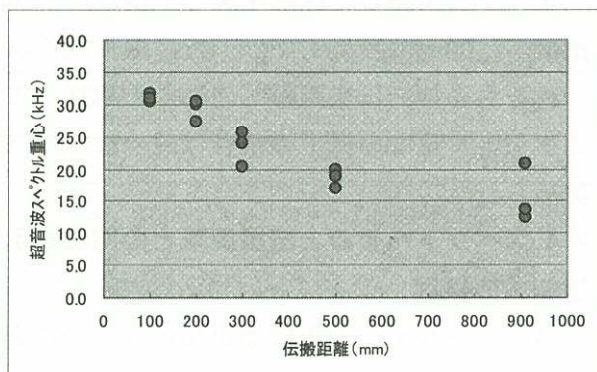


図-7 スペクトル重心と伝搬距離との関係

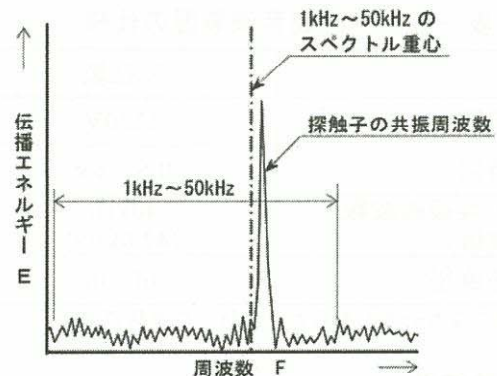


図-8 スペクトル重心の概念

- a) 今回適用した超音波探触子の共振周波数は、約 40kHz であったことから、伝搬距離が 0mm に近づくに従ってスペクトル重心も 40kHz に近づく。
- b) スペクトル重心は、伝搬距離が極度に増大しても、0 とはならず、ある一定の数値に漸近する。

以上から近似式は、曲線式と仮定し、「2次」、「3次」、「4次」、「指数」、「対数」の5種類について検討した。

以下に検討結果を示す。

(1) 2次、4次曲線

2次、4次曲線では、伝搬距離が 700~800mm 程度において、変曲点が出現するため、適用曲線の選定から除外した。

(2) 3次曲線 (図-9 参照)

3次曲線については、伝搬距離が 1300mm を越えた段階から、スペクトル重心が、負の値となるため、適用曲線の選定から除外した。

(3) 指数曲線 (図-10 参照)

指数曲線は、伝搬距離が 0mm の場合、スペクトル重心が 40kHz の条件を満足するが、試験結果との適合性が他の曲線よりも劣り、さらに伝搬距離が長くなるに従って、試験値と回帰値との乖離も増大する傾向にあった。

(4) 対数曲線 (図-11 参照)

対数曲線は、スペクトル重心が 40kHz の条件を満足しないが、指数近似曲線に比べて、試験結果との整合性に優れており、伝搬距離がある程度長くなっても、試験値と回帰値との乖離の程度も小さい傾向が認められた。

以上から、検討した 5 種類の近似曲線のうち、対数近似曲線が最も適用性が高いと考え、式(2)で示した対数近似曲線を適用してスペクトル重心の距離補正を行うこととした。

$$Y = -7.6069 \text{ Log } X + 67.125 \quad (2)$$

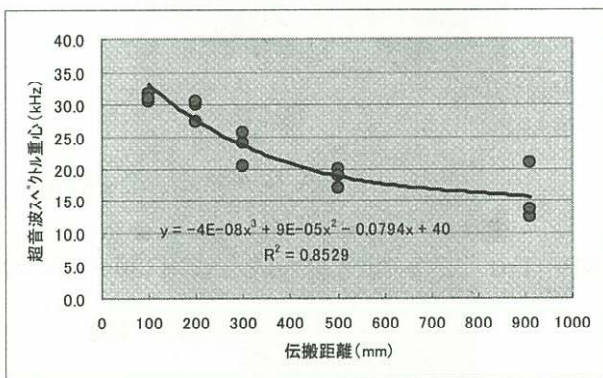


図-9 3次曲線近似図

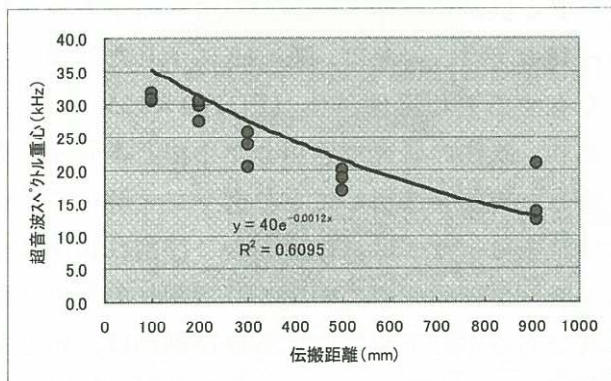


図-10 指数曲線近似図

2.5 トモグラフィ解析によるスペクトル重心の距離減衰に関する検討

ASR劣化したコンクリートのトモグラフィ解析に適用するためのスペクトル重心の距離減衰特性の評価について、これまでに適用していた健全コンクリートでの距離減衰特性との比較・照合も含めて検討した。

既往の研究では、図-12に示す健全コンクリート供試体から得たスペクトル重心と伝搬距離

との関係を直線近似して得られた近似式を基に測定されたスペクトル重心について、その時の伝搬距離を近似式に代入して求められたスペクトル重心と伝搬距離 0mm に対応する約 30kHz との絶対差を加算する補正を行っている。しかし、この補正方法では、伝搬距離が 0mm の場合でも探触子の共振周波数には整合せず、逆に伝搬距離が極端に増大した場合にはスペクトル重心が負の値となるなどの不都合が生じる。

本研究では、実務上の伝搬距離を勘案し、スペクトル重心の距離減衰による補正は、伝搬距離 100mm 位置を基準に伝搬距離がこれより長い場合は、近似式に伝搬距離に相当するスペクトル重心の絶対差を加え、これよりも短い場合は、同様に絶対差を減じて処理した。先ず、今回、スペクトル重心の距離減衰を検討するために適用した ASR劣化した RC 梁供試体を対象に評価した。なお、トモグラフィ解析は、既往の研究と同手法³⁾を適用して実施した。

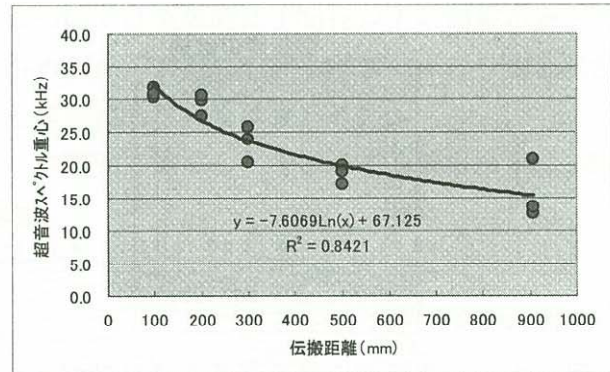


図-11 対数曲線近似図

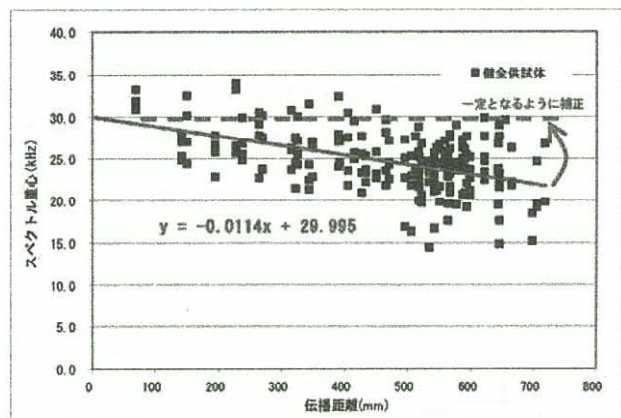


図-12 スペクトル重心と伝搬距離との直線近似回帰 (既往研究)

3. ASR劣化したRC供試体による評価

図-13に供試体の切断面の状況，図-14に探触子配置図を示す．図-15～16は，トモグラフィ解析結果を示したものである．トモグラフィ解析は，既往および本研究での手法における結果が同一周波数範囲で表示できるように両解析で得られた周波数域を包括する範囲の最大、最小値を25水準で色分けして表示し、個々の解析ケースについてはその範囲を併記した．(以下の評価ケースも同様)

既往の手法を適用した結果と本研究で提案した手法を適用した結果に著しい差異は認められないが，後者では，前者に比べて断面内部の健全領域が広く評価されている．また，両解析結果ともに供試体側面の下縁付近から延びるスターラップの曲げ加工部破断に伴うひび割れを捉えていると考えられる．供試体の断面寸法が400×400mmと比較的小規模であったことから両解析結果に大きな差が生じなかったのではないかと考えられる．

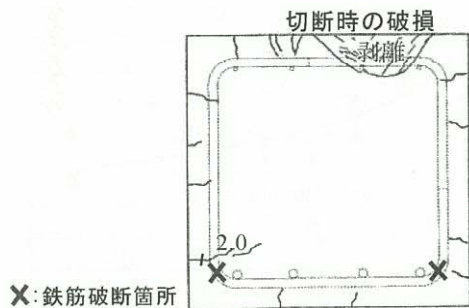


図-13 切断面の状況写真およびスケッチ

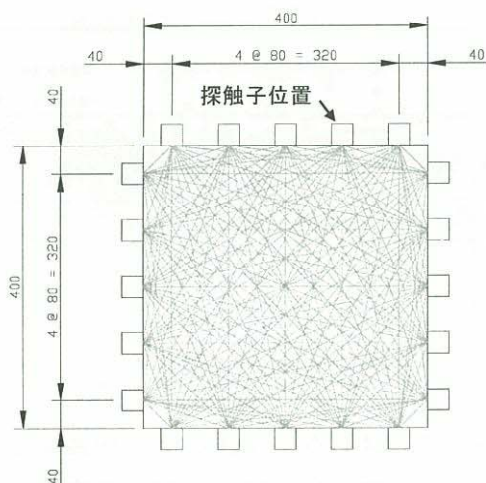


図-14 探触子配置図

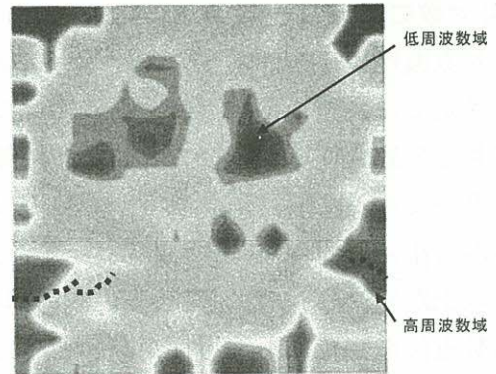


図-15 既往の手法を適用 (29~35kHz)

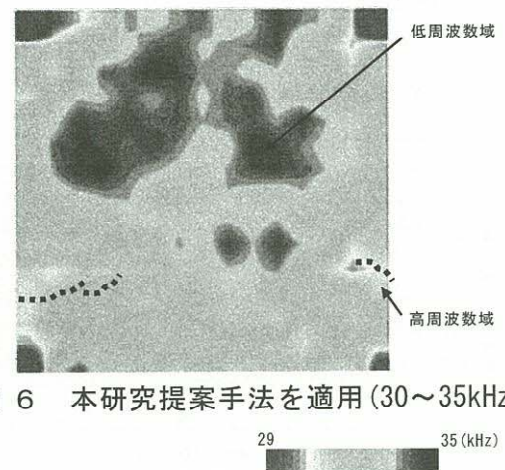


図-16 本研究提案手法を適用 (30~35kHz)

4. ASR劣化したPC供試体による評価

PC供試体のトモグラフィ解析結果を図-17～18に示す．対象は，図-19に示した外観変状を有するPC梁供試体（□1200×1250mm）であり，既往の研究で適用した手法と本研究で提案した手法を適用してトモグラフィ解析の比較検証を行った．供試体表面のひび割れ状況は，上面および両側面におけるひび割れの発現は顕著であるが，下面におけるひび割れは，殆どが0.2mm未満であった．トモグラフィ解析結果は，両手法ともにスペクトル重心が断面内部側で高く，表面側が低い傾向を示しており，概ね切断面の観察結果とも整合していた．

また，両手法による解析結果は，スペクトル重心の絶対値の違いはあるものの，ともに上・下，両側面での劣化度の差異について定性的ではあるが整合している傾向が見られる．

しかし，既往の研究を適用した解析結果は，スペクトル重心が低く表示される領域がかぶりを越えて比較的的内部まで劣化が進行している傾

向を示しているのに対して、本研究の手法を適用した解析結果では既往の手法に比べてスペクトル重心が低く表示される領域が表面から比較的浅い範囲に分布する傾向が見られた。

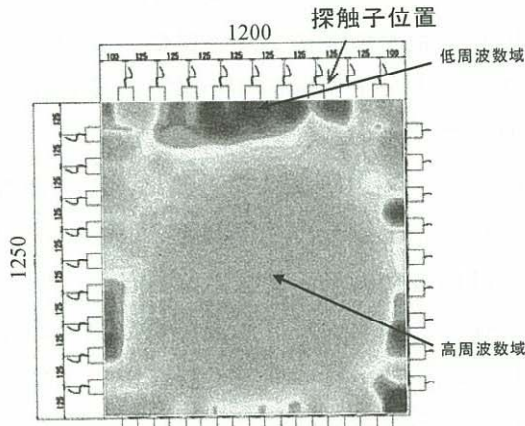


図-17 既往の手法を適用(23~29kHz)

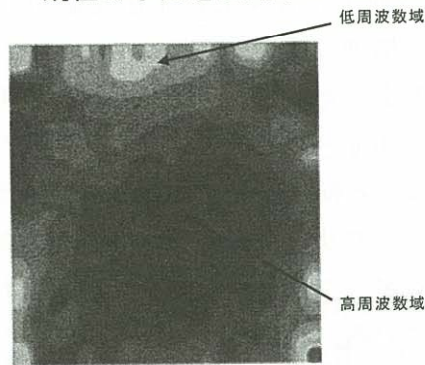


図-18 本研究提案手法を適用(29~33kHz)

5. 実橋PC梁橋脚梁部材の評価

実橋におけるPC梁橋脚の梁部材において超音波試験を行った結果を基にトモグラフィ解析を行った。梁の断面は $\square 2500 \times 1500 \sim 3566 \text{mm}$ であり、試験は、梁先端から2.3m位置において天端から1mの範囲で行った。現地の条件により測定は、超音波探触子を上面および両側面に配置した場合の3面で行った。なお、梁部材は、過年度において、炭素繊維シートによる巻き立て補修が行われており、コンクリート表面の状態は直接視認することはできない状態であった。超音波試験はこの炭素繊維シート表面上から行った。図-20は、補修前に実施したひび割れ状況調査結果とともに既往の手法を適用したトモグラフィ解析結果と本研究手法を適用した解析結果を示したものである。既往の手法による結果は、最大周波数が40kHzを越えていたため、ここでは、本研究による解析結果の最大周波数を上限として表示した。上面および側面の周波数は、ほぼ35kHz以下で表示され、内部については全体的に37kHz以上の領域が殆どを占めたが、表面における補修前のひび割れ状況とは定性的な一致は見られた。

本研究で提案した手法による解析結果は35

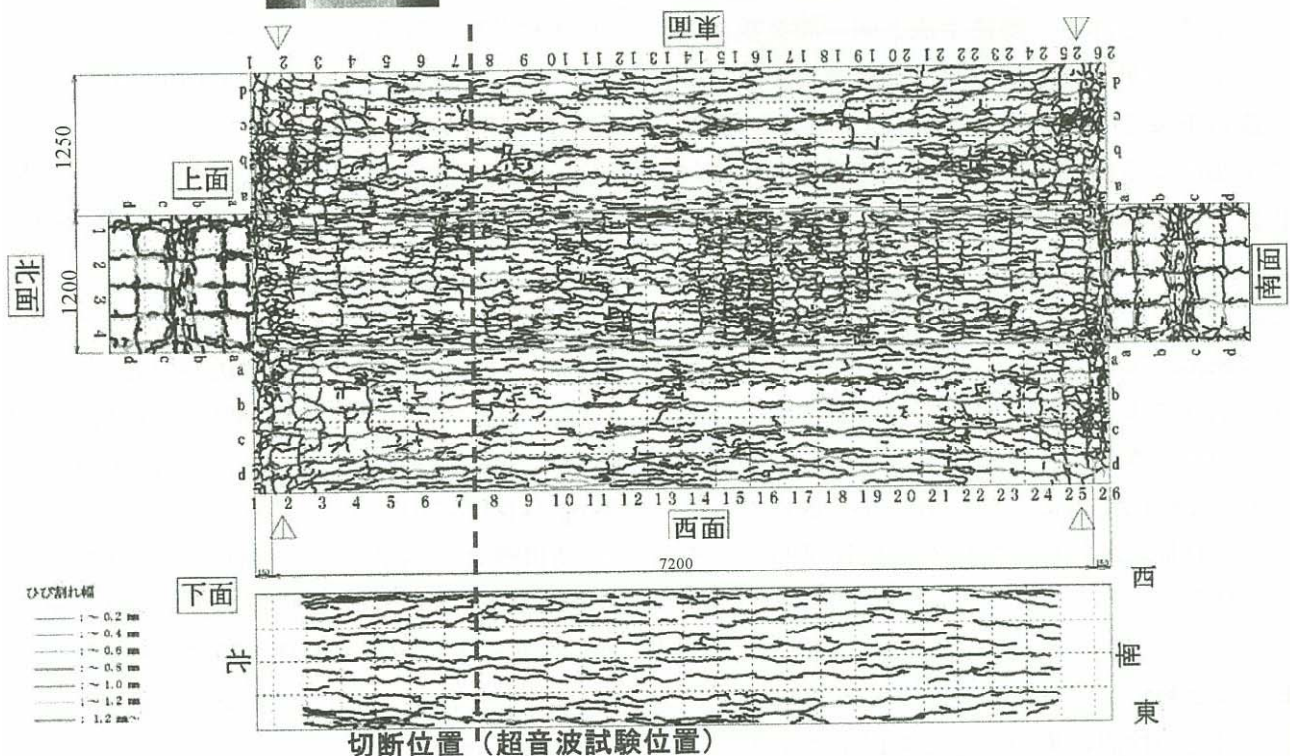


図-19 PC供試体外観状況図

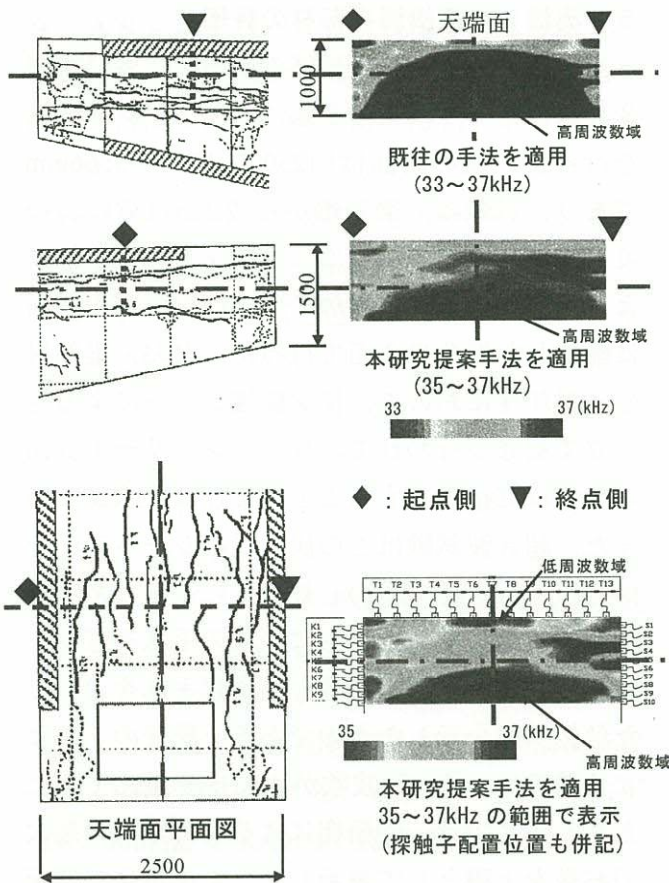


図-20 トモグラフィ解析結果

～37kHz の 2kHz の範囲にあり、供試体による結果に比べて比較的狭小な範囲に集中していた。これは、実橋条件での特性や3面透過による影響等が考えられる。既往手法と同一周波数帯での表示では明確ではないが、解析結果に基づく周波数帯域で表示(図-20右下)すれば、既往の手法による解析結果と同様に補修前ひび割れ状況との整合性は高いと考えられ、特に断面内部の周波数の変化については、既往手法に比べて詳細に捉えていると考えられる。供試体による試験結果では、何れも表面から発生しているひび割れによる変状を捉えていたと考えられることから、本ケースにおいても表層の低周波数域は、定性的ではあるが、樹脂注入されているひび割れ補修跡を捉えていた可能性が高いと考えられる。

6. まとめ

本研究の検討結果のまとめを以下に示す。

- (1) ASR劣化したコンクリートへのトモグラフィ解析を適用するためのスペクトル重心の距離補正について、健全コンクリートを適用した補正法では合理的でないと考え、ASR劣化した梁供試体から切り出した試験体を適用して距離減衰に関する試験・検討を行い、スペクトル重心と伝搬距離との関係を対数近似して評価することを提案した。
- (2) 提案した対数近似曲線を基に、ASR劣化したRCおよびPC梁供試体の断面内部の品質を評価した結果、健全コンクリートを適用した補正法に比べて、表面のひび割れの発現性状や、ひび割れの内部進展状況を精度良く評価できると考えられた。
- (3) 本研究で提案した手法を適用して実橋PC梁橋脚の梁部材についてトモグラフィ解析を実施した。解析の結果、スペクトル重心が低い部位と補修前のひび割れ位置が定性的に一致する傾向が見られた。注入樹脂が介在したコンクリート断面を評価した結果と考えられるが、これらの検証は今後の検討課題と考えている。

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体品質の推定,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：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,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13巻,pp.181-188,2013.11
- 4) 高田雄大,塩谷智他：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