

論文 P 波初動検出を改良した弾性波トモグラフィによる ASR 劣化したコンクリート構造物の評価

土橋 和也*1・塩谷 智基*2・河野 広隆*3・茅野 茂*4

要旨：アルカリシリカ反応により劣化したコンクリート橋脚梁に弾性波トモグラフィを適用し、コンクリート内部の損傷程度を評価した。対象の橋脚梁は損傷程度の異なる 2 つの橋脚梁である。本研究では、AIC による到達時刻の正確さを判断できる指標として明瞭度を導入した。受信 AE 波形の明瞭度を考慮した弾性波トモグラフィより得られた対象のコンクリート表面近傍における弾性波速度分布と目視点検より得られた表面のひび割れ状況は整合していた。また、上記速度のヒストグラムに基づいて対象の構造物の損傷程度をより適切に評価できる可能性が示唆された。

キーワード：弾性波トモグラフィ、明瞭度、ASR、速度ヒストグラム、AIC

1. はじめに

近年、我が国では土木構造物の供用年数の増加に対応するための維持管理体制の構築が喫緊の課題となっている。また、高度経済成長期に集中的にコンクリート構造物が整備されたため、供用年数が 50 年を超えるものが同時期に急増し、コンクリート構造物の劣化が深刻な問題となっている。これらのコンクリート構造物の劣化要因の一つにアルカリシリカ反応（以下 ASR）が挙げられる。ASR により劣化したコンクリート構造物は力学特性の低下を伴うため、適切な補修や維持管理が必要であり、また、ASR による劣化が顕在化したコンクリート構造物は全国各地で報告されている。従来の点検では主に外観調査および詳細調査が実施されるが、外観調査は、構造物内部の劣化程度を考慮できないため、構造物全体の劣化度を正確に評価していない可能性が考えられる。一方の詳細調査は、コア採取を行うため、構造物にいくらかの損傷を与えてしまうという問題点がある。さらに、詳細調査の結果がコアの採取位置に依存するだけでなく、コアは比較的ひび割れ等が少ない箇所のみ採取可能という問題もある。以上から、内部の劣化状況を正確に把握し、その結果から、構造物全体の劣化度や性能を評価できる非破壊検査手法の確立が求められている。このような非破壊検査手法が確立できれば、維持管理作業の効率化へ繋がると考えられる。

ここで、ASR に限らずコンクリート構造物の損傷評価において弾性波速度の変化に着目した検討が行われてきたり。また、三次元弾性波トモグラフィにより ASR 劣化した実構造物を対象とした研究も行われている²⁾。しかし、構造物が大きくなるにしたがい、P 波の伝播距離が

長くなることで距離減衰およびノイズの影響により P 波の到達時刻を正確に読み取れていない可能性があり、その結果、正確なトモグラフィ解析が実施できない場合がある。そこで、本研究では ASR により劣化したコンクリート橋脚梁を対象とし、弾性波トモグラフィ解析を実施する上で、AIC⁴⁾ (Akaike Information Criterion, 赤池情報量規準) による P 波初動抽出時に弾性波到達時刻の精度を示す明瞭度を導入した。また従来の弾性波トモグラフィおよび明瞭度を適用した弾性波トモグラフィの解析結果を比較し、構造物の劣化程度を評価することを試みた。

2. 弾性波速度トモグラフィ

2.1 全体概要

本研究では非破壊検査技術の一つである弾性波速度トモグラフィを用いた³⁾。弾性波速度トモグラフィは図-1 に示すような手順によって解析が実施される。本解析は主に入力データとなる観測走時の抽出、波線追跡法による到達時刻の計算に分類される。以下に解析フローの詳細を示す。

2.2 入力データの作成

(1) P 波初動の検出

上述のとおり弾性波速度トモグラフィ法では図-1 に示すように、解析手順の最初の段階で観測走時を正確に抽出することが必要である。つまり、各センサの弾性波の到達時刻を精度良く読み取ることがその後の結果に大きく影響を与える。本研究では、AICPicker⁵⁾を用いて弾性波の到達時刻測走時)を抽出した。以下に AICPicker の算出式を示す。N 個のサンプル数で記録された波形の振幅値を $X_i(i=1, 2, \dots, N)$ とし、任意の点 $i=k$ での AIC(k)

*1 京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (学生会員)

*2 京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻特定教授 工博 (正会員)

*3 京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 阪神高速道路株式会社 技術部

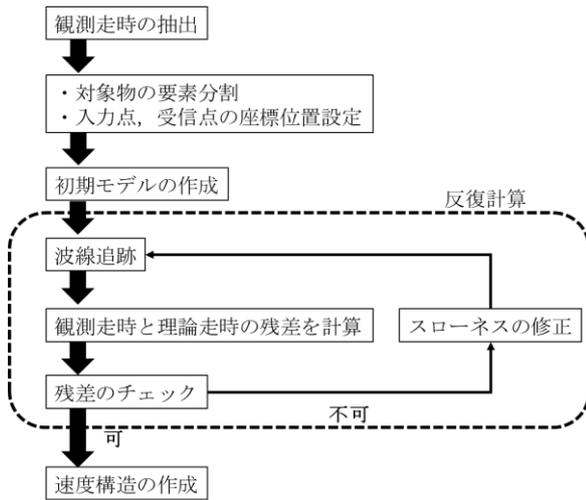


図-1 弾性波速度トモグラフィの解析手順

を式 (1)により求める。

$$AIC(k) = k * \log\{var(X[1,k])\} + (N-k-1) * \log\{var(X[k+1,N])\} \quad (1)$$

ここで、 $var(X[1,k])$ は波形振幅値 X_1 から X_k の分散であり、 $var(X[k+1,N])$ は波形振幅値 X_{k+1} から X_N の分散を示す。得られた AIC が最小値を示す点での時間が有意な到達時刻る。

(2) 明瞭度

本研究では弾性波データの到達時刻に AICPicker を適用したが、S/N 比が低下するとその抽出精度も低下することが知られている。しかし、どの程度低下するかは明確ではない。そのため、AIC による到達時刻の正確さを判断できる指標として P 波到達時での AIC(k) の 2 階微分値で表される明瞭度 DD を導入した⁹⁾。その明瞭度は次式で表される。

$$DD = \frac{\left\{ \begin{array}{l} AIC(k_{min} - \delta k) \\ + AIC(k_{min} + \delta k) \\ - 2AIC(k_{min}) \end{array} \right\}}{(\delta k)^2} \quad (2)$$

$\delta k = 100$

明瞭度の値が 0.05 以上のデータは十分な精度の到達時刻出できることが確認されているため⁷⁾、本研究でも明瞭度を導入した弾性波トモグラフィについては明瞭度の値が 0.05 以上のデータのみを用いて解析を行った。

2.3 解析概要

弾性波速度トモグラフィにより得られる速度構造は以下の手順により得られる。

まず、ある発信点から受信点までの弾性波伝播時間 T_{obs} (以下、観測走時) は、式 (3) で求められる。

$$T_{obs} = T_o - T_s \quad (3)$$

ここで、 T_o は受信時刻、 T_s は発信時刻である。

次に、対象とした構造物を節点により構成される要素に分割し、発信点と受信点の位置情報を節点に与える。一方、分割された要素に初期値として伝播速度の逆数であるスローネス s を与え、初期モデルを作成する。この要素分割モデルで得られる初動走時の理論値 T_{cal} (以下、理論走時) は、各要素に与えられたスローネスと、波線追跡法により求められた各要素を横切る波線長を用いて式 (4) により求められ、観測走時に対する理論走時の走時残差 ΔT は式 (5) により求められる。

$$T_{cal} = \sum_j s_j \cdot l_j \quad (4)$$

$$\Delta T = T_{obs} - T_{cal} \quad (5)$$

ここで、 s_j は要素 j に初期値として与えたスローネス、 l_j は要素 j を横切る波線長である。

そして、得られた走時残差が許容値の範囲内かどうかをチェックする。残差が大きい場合には、各要素のスローネスを補正する。このときのスローネス補正量を SIRT 法により求める。SIRT 法は走時残差と各要素を横切る波線長により、各要素のスローネス補正量を求める手法である。各要素のスローネス補正量 Δs_j と補正スローネス s'_j は式 (6) と式 (7) により求められる。

$$\begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \vdots \\ \Delta s_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i * l_{i1}}{L_i}}{\sum_i l_{i1}} \\ \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i * l_{i2}}{L_i}}{\sum_i l_{i2}} \\ \vdots \\ \frac{\sum_i \frac{\Delta T_i * l_{ij}}{L_i}}{\sum_i l_{ij}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$s'_j = s_j + \Delta s_j \quad (7)$$

ここで、 L は i 番目の波線経路の全長、 ΔT_i は i 番目の波線の走時残差、 l_{ij} は波線 i が要素 j を横切る波線長である。

得られた補正スローネスを用いて再び波線追跡を実施する。このような繰り返し計算によって、弾性波による測定の結果である多数かつ多方向の観測走時に整合する各要素のスローネス、つまりは各要素の弾性波速度が求められる。最終的に、対象領域を弾性波速度構造で表すことで弾性波速度トモグラフィの結果が得られる。

3. 調査概要

3.1 構造物の概要

対象とした構造物は ASR が進行した 2 橋脚梁であり、供用年数は 43 年である。計測は橋脚の一部を切り出したブロックを対象とした。外観目視の結果よりひび割れの少ない橋脚梁 (以下、橋脚梁 A) とひび割れの多い橋脚梁 (以下、橋脚梁 B) に区分される。ここで、各橋脚の外観を図-2 に示す。また、この橋脚梁の切断ブロッ

クを切出す際に使用した吊るし孔 150mm が各橋脚ブロックにそれぞれ2つつ存在する。

3.2 事前調査

各橋脚梁の棲部よりコア試料をそれぞれ3体ずつ採取し、それらの圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。それらの結果および各橋脚梁の表面のひび割れ密度の結果を表-1に示す。ここで、ひび割れ密度の値は橋脚梁全体での値である。各橋脚梁の圧縮強度および静弾性係数はどれも設計値を下回っている。特に、橋脚梁Bの静弾性係数については設計値を大きく下回っている。



図-2 各橋脚梁の外観

表-1 圧縮強度, 静弾性係数およびひび割れ密度の結果

	圧縮強度(N/mm ²) 設計値 $\sigma_{ck}=27(N/mm^2)$				静弾性係数(kN/m ²) 設計値 $E=26.5(kN/m^2)$				ひび割れ密度 (m/m ²)
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均	
橋脚梁 A	26.6	23.4	25.7	25.2	18.8	24.4	20.7	21.3	2.22
橋脚梁 B	17.6	26.2	17.2	20.3	7.5	10.5	5.1	7.7	4.89

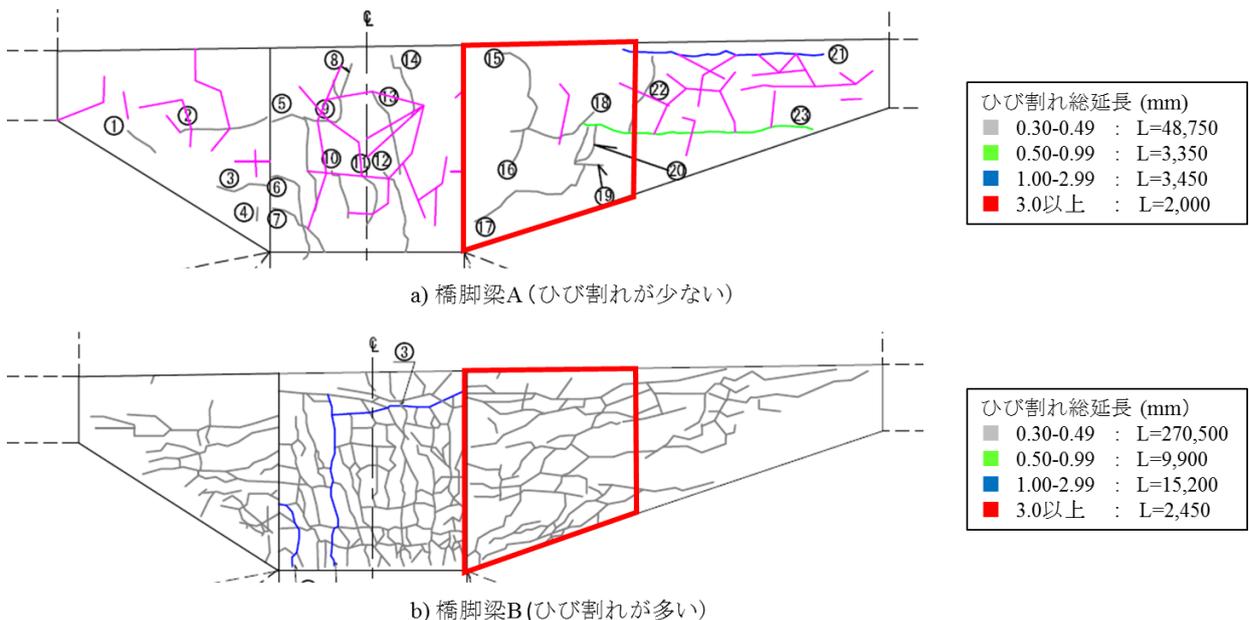


図-3 ひび割れ図

ここで、ASR が進行すると圧縮強度に比べ静弾性係数は大きく低下するため、橋脚梁 A に対して橋脚梁 B の方が ASR による劣化が進行していると考えられる。また、ひび割れ密度においても橋脚梁 B では橋脚梁 A の 2 倍以上の値を示しており、このことから橋脚梁 A と橋脚梁 B とでは損傷程度に大きな差があると推定できる。

図-3 に各橋脚梁のひび割れ図を示す。ここで、ひび割れ図において赤線で囲まれた部分は切り出しブロック(本研究での計測対象領域)の位置である。また、ひび割れ図の色の違いは凡例に示すようにひび割れ幅の違いを表している。図のひび割れ総延長は橋脚梁全体での値であるが、明らかに橋脚梁 B の方が多くのひび割れが発生していることが確認できる。また、計測対象領域においても同様に橋脚梁 A に比べ橋脚梁 B の方がひび割れの発生が顕著であることが確認できる。

3.3 計測概要

計測には加速度計測システムおよび圧電型トランスデューサを使用した。また、コンクリート表面に鋼製の台座をエポキシ樹脂により設置し、その上にセンサを取り付けた。各橋脚梁のセンサ配置を図-4に示す。使用したセンサの数は25個である。ここで、橋脚梁 B にお

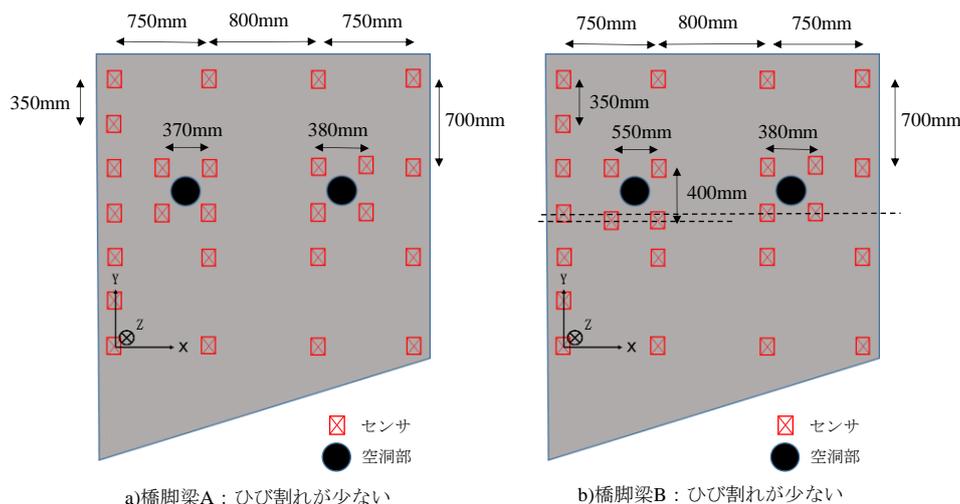


図-4 センサ配置

いてひび割れが発生しており損傷が著しいと想定された左部にセンサを密に配置し、さらに波線が通りやすくなるように切り出す際に空けられた空洞部の周りにもセンサを密に配置した。使用した打撃ハンマはφ11mmの鋼球である。センサの配置した面の裏側から各センサの真裏の既知点、すなわちセンサ数と同じ25か所から打撃し弾性波を励起した。また、相対する打撃面とセンサ設置面は、互いに入れ替えることで対象に打撃とセンサによる弾性波の受信を行った。サンプリングレートは200kHzとした。ここで、各橋脚梁の解析条件をそれぞれ表-2、表-3に示す。到達時刻としたAICPickerにより決定した。解析対象のモデルは、橋脚梁Aは12(X軸方向)×8(Y軸方向)×4(Z軸方向)であり、橋脚梁Bは10(X軸方向)×10(Y軸方向)×4(Z軸方向)である。ここで、橋脚梁Aと橋脚梁Bで要素数が異なるのは各橋脚梁において空洞部の位置に若干の差異があったためである。また、空洞部のメッシュ部分は解析上の都合で0m/sとできないため空気の色度である340(m/s)で固定した。

4. 弾性波速度トモグラフィ解析結果

4.1 表面ひび割れと弾性波速度の整合性

図-5に対象とした2つの橋脚梁の三次元弾性波速度トモグラフィにより得られた表面側の速度分布および各橋脚梁の表面ひび割れ図を示す。ここで、示す速度分布のコンター図については、高速度は寒色系で表され健全であると推定され、低速度は暖色系で表され劣化していると推定される。

まず、従来の弾性波速度トモグラフィ(P波初動検出:AICのみ)により得られた速度分布と表面ひび割れ図を比較する。橋脚梁Aについて、中央部および右下部にひび割れが発生した箇所において弾性波速度が低下していることが確認できる。一方、橋脚梁Bにおいては、全体

表-2 橋脚梁Aの解析条件

項目	値
到達時刻	計測データに基づきAIC法により決定
解析対象領域	2300×2100×2000mm
要素分割数	12×8×4要素
全要素数	384要素
要素内初期速度	4000(m/s)
度	(空洞部の要素は340(m/s)で固定)

表-3 橋脚梁Bの解析条件

項目	値
到達時刻	計測データに基づきAIC法により決定
解析対象領域	2300×2100×2000mm
要素分割数	10×10×4要素
全要素数	400要素
要素内初期速度	4000(m/s)
度	(空洞部の要素は340(m/s)で固定)

にひび割れが発生しているが速度分布においても全体が低速度を示している。従来の弾性波速度トモグラフィにより得られた速度分布とひび割れ状況は整合しているように見えるが、各橋脚梁の速度分布から推定できる損傷程度には差が見られない。また、表面のひび割れ密度を正しく反映しているとも言えない。

次に、P波初動検出においてAICpickerならびに明瞭度を適用した弾性波速度トモグラフィにより得られた速度分布と表面ひび割れを比較する。橋脚梁Aについて、中央部および右下にひび割れが発生している箇所において速度は低下している。一方、ひび割れが発生していない部分では基本的に高速度を示している。全体にひび割れが発生している橋脚梁Bにおいては、全体的に低速度を示しており、また、局所的に非常に速度が遅い部分が見受けられる結果となった。これらより、従来の弾性波

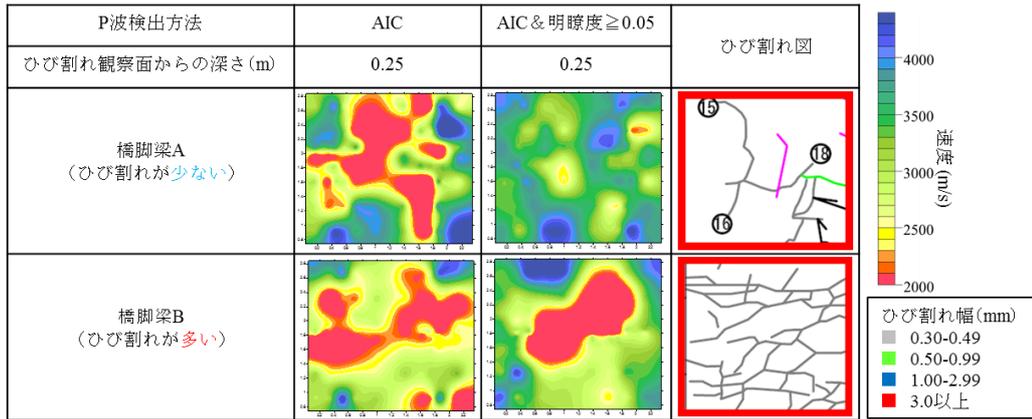
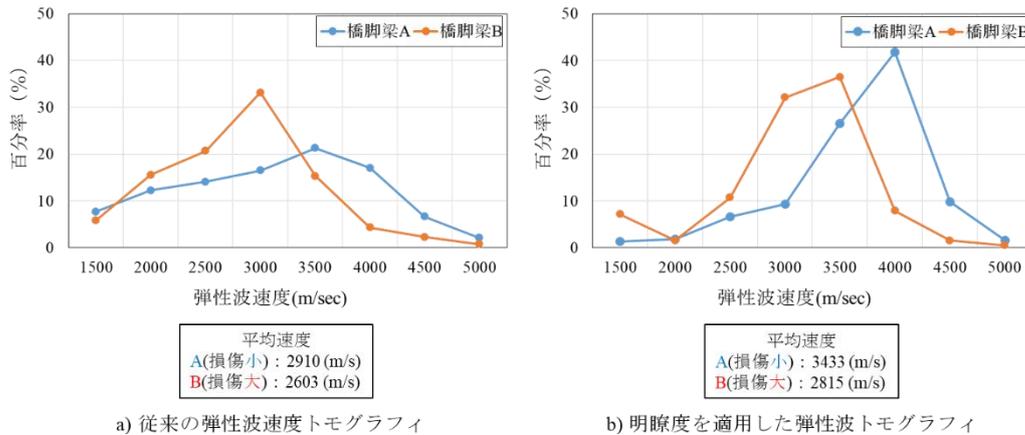


図-5 表面弾性波速度分布とひび割れ図



a) 従来の弾性波速度トモグラフィ

b) 明瞭度を適用した弾性波トモグラフィ

図-6 弾性波速度ヒストグラム

速度トモグラフィに比べ、明瞭度を適用した弾性波速度トモグラフィにより得られるコンクリート表面近傍の速度分布が、ひび割れ密度正確に反映しており、ASRによる構造物の損傷程度を正しく評価できていると考えられる。

4.2 弾性波速度ヒストグラム

図-6 に a) 従来の弾性波速度トモグラフィにより得られた弾性波速度ヒストグラムおよび各橋脚梁の平均速度 b) 明瞭度を適用した弾性波速度トモグラフィの弾性波速度ヒストグラムおよび各橋脚梁の平均速度を示す。従来の弾性波速度トモグラフィではどちらの橋脚梁においても低速度が大半を占めており ASR が進行していると推察できる。しかし、平均速度に着目すると、その値に大きな差は見られない。ここで、前述した通り橋脚梁 A, B は静弾性係数の値の違いおよびひび割れ密度から、その損傷程度は大きく異なると思われるが、上記の結果からそのことは読み取れず、構造物の損傷程度を正しく評価できているとは言えない。次に、明瞭度を取り入れた弾性波速度トモグラフィにおける各橋脚梁の速度分布を見てみると、その値に大きな違いが見られる。すなわち、橋脚梁 A に着目してみると、約半数の解析用において弾性波速度が健全部を示す 4000 (m/s) 付近の値を示

しており、この構造物は損傷部と劣化部が混在していると推察できる。また、橋脚梁 B においては弾性波速度の大半が 3500 (m/s) 以下を示し、橋脚梁 A に比べ損傷が進行していると評価できる。さらに平均速度を見てみると、明瞭度を適用することで従来の弾性波速度トモグラフィの結果に比べ、各橋脚梁の平均速度においてその値の差が大きくなっていることが確認でき、このことから静弾性係数の値を考慮した各橋脚梁の損傷程度を正確に評価していると考えられる。以上から、明瞭度を適用することで弾性波トモグラフィにより ASR による損傷の違いを正しく評価できるようになった可能性が示唆される。

4.3 構造物の内部評価

図-7 に橋脚梁 A, B の各鉛直断面における速度分布および表-4 に各断面の平均速度を示す。ここで各断面のトモグラフィ図にそれぞれ 2 か所ずつある黒丸は空洞部の位置を表している。まず橋脚梁の A について、表面のひび割れと低速度 (3000 (m/s) 程度) の部分が整合していたため正面からの深さが 0.75m, 1.25m の内部においても同様の速度領域が広がっており表面と同程度の劣化が生じていると推察できる。また、このことは各断面の平均速度がどれも 3400 (m/s) 程度であることから読み取れる。また、ひび割れ観察面の裏面 (深さ 1.75m) の上

部において非常に速度の遅い (2000 (m/s)程度) 箇所があり, 内部の速度構造を見るとこの部分ではひび割れが内部まで延伸していると推察できる. 一方, 橋脚梁 B においては表面も内部も 3000 (m/s)程度の速度が多く分布しているが, 両面に非常に速度の遅い (2000 (m/s)程度) 箇所が局所的に見られ, この部分では特に ASR による劣化が進行していると考えられる. また各鉛直断面の平均速度においても表面付近と内部において速度差が見られ, このことから表面付近での ASR による劣化が顕著であると推察できる.

5. 結論

本研究では, ASR による劣化程度が異なる 2 つの橋脚梁を対象として, 従来の弾性波速度トモグラフィ解析および明瞭度を適用した弾性波速度トモグラフィ解析の比較検討を行った. 以下に本研究より得られた知見を示す.

- (1) 従来の弾性波速度トモグラフィでは, ASR による損傷を相対的に評価することはできたが, その程度を定性的に評価することは困難であった.
- (2) 明瞭度を適用した弾性波速度トモグラフィから得られたコンクリート表面近傍での速度分布はひび割れ密度を正しく反映し, 目視により得られたひび割れ状況に整合していた.
- (3) 明瞭度と適用した弾性波速度トモグラフィによって ASR による損傷の程度を正しく評価できる可能性が示唆された.

謝辞

本研究を実施するにあたり, 京都大学大学院の西田孝弘特定准教授, 麻植久史特定准教授, 橋本勝文特定講師, 服部篤史准教, 松本理佐助教, 平野裕一技術職員には多大なご協力を頂きました. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- 1) P. Rivard and F. Saint-Pierre : Assessing Alkali-silica Reaction Damage to Concrete with Non-destructive Methods: From the lab to the field, Construction and Building Materials, Vol.23, pp.902-909, 2009
- 2) 西田孝弘, 塩谷智基, 麻植久史, 古野昌吾 : ASR により劣化したコンクリート橋脚の三次元弾性波トモグラフィによる内部損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2067-2072, 2016
- 3) Y. Kobayashi, T. Shiotani, D. G. Aggelis, H. Shiojiri :Three-Dimensional Seismic Tomography for Existing Concrete Structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol.2,

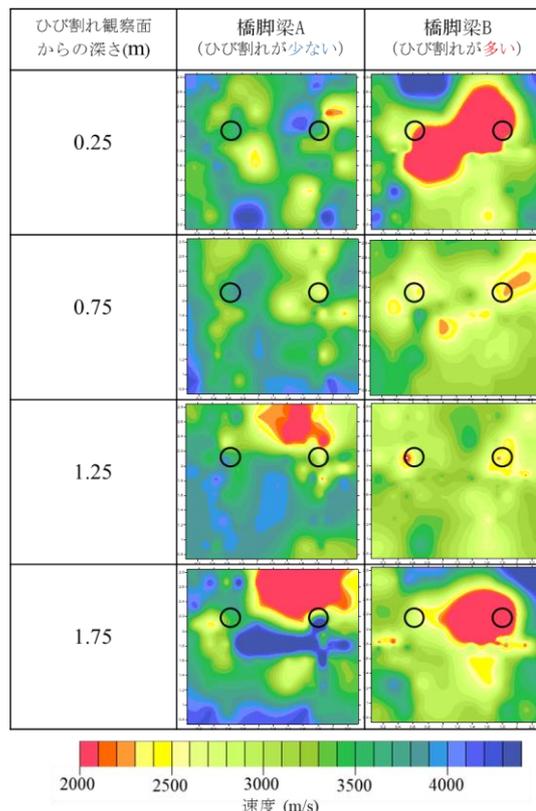


図-7 各断面の弾性波速度分布

表-4 各水平断面の平均速度

正面からの 深さ(m)	平均速度 (m/s)	
	橋脚梁 A (ひび割れが少ない)	橋脚梁 B (ひび割れが多い)
0.25	3501	2588
0.75	3401	2947
1.25	3407	2989
1.75	3422	2741

pp.595-600, 2007

- 4) Akaike :Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes, Annals of the Institute of Statistical Mathematics Vol.26, No.1, pp.363-387, 1974
- 5) 大野健太郎, 下園晋一郎, 沢田陽祐, 大津政康 : AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol. 57, No. 11, pp. 531-536, 2008.
- 6) 前田直樹 : 地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価, 地震第 2 輯, 第 38 巻, pp.365-379,1985
- 7) 麻植久史, 塩谷智基, 橋本勝文, 茅野様 :実 RC 床版を対象とした加速度計による AE 計測システム開発, 第 21 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.25-28, 2017