

論文 弾性波法による ASR 損傷コンクリート橋脚の内部探査

笹谷輝彦*¹・藤原規雄*²・杉谷真司*³・鳥居和之*⁴

要旨：ASR 損傷構造物の維持管理において構造物の劣化度を評価する必要があるが、通常のコア採取による詳細調査では構造物の内部の状況を評価できない場合が多い。本研究では、ASR 損傷橋脚の内部劣化及び鉄筋破断の影響を調べることを目的として、著しい劣化が発生した橋脚の梁部の調査に弾性波法を適用し、同一箇所で行った貫通コンクリートコアの結果と比較することにより、非破壊検査としての弾性波法の適用性について検討した。

キーワード：弾性波法、ASR、非破壊試験、コア採取、内部劣化、鉄筋破断

1. まえがき

通常、ASR による損傷を受けたコンクリート構造物に対する劣化度調査では、コア採取による室内試験や現地での局所的なはつり調査が実施されている¹⁾。しかし、供用中である橋梁の維持管理において、このような点検を実施することは安全管理上からも問題があり、構造物への影響を最小限に留めることができる、非破壊試験による調査・診断手法の確立が望まれている。一方、ASR 損傷構造物の補修・補強の可否を判定する場合や補強設計を実施する場合には、現状のコンクリートの品質や鉄筋破断の位置を正確に把握する必要があるが、コア採取やはつり点検は適用箇所に限りがあり、とくにコアは表面部の比較的健全な箇所から採取されているのが問題である。このため、コアによる損傷度の評価は、構造体全体の品質を必ずしも的確に捉えているとは言えず、その結果は構造体の内部亀裂の影響が含まれていないために、構造体の性状を過大に評価している可能性が高い。従来、ASR 損傷橋脚に弾性波法を適用した調査事例は少なく、既存機器の弾性波出力の増大や検出精度の改良が必要であるとともに、実橋脚の



写真-1 A橋橋脚(P2)の外観

表面状態や含水比の影響を考慮した評価基準の確立が求められる²⁾。

本研究では、ASR 損傷構造物の劣化状況を診断する非破壊試験法の開発を目的として、ASR 損傷が生じている実橋脚について弾性波法による調査を実施し、その有効性について検討した。

2. 調査概要

調査対象の橋脚（写真-1 参照）は、供用年数が20数年経過した単純桁を支持する2橋梁の内の3橋脚（T型）であり、劣化状況の詳細を表-1に示す。A橋とB橋の梁部は配筋量が多少異なるものの、梁幅や梁高などはほぼ同一のものである。両橋脚では、粗骨材に使用した両輝石安山岩砕石（反応性鉱物：クリストバライ

*1 株式会社国土開発センター 橋梁部グループリーダー 博(工) (正会員)

*2 株式会社国際建設技術研究所 課長

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境基盤工学専攻

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-1 目視観察及びはつり調査結果

		ひび割れ発生状況	鉄筋の腐食及び破断の状況	
A	橋脚	梁	水平方向に卓越したひび割れが発生。流出側端部上面にスケーリングの痕跡。	流出側端部の腐食顕著。せん断補強筋が上部の隅角部で破断。折り曲げ鉄筋が曲げ加工部で破断。
		柱	軸筋に沿った縦方向のひび割れが発生。	腐食軽微。破断無し。
		フーチング	亀甲状のひび割れが発生。	未確認。
	橋台	水平方向に卓越したひび割れが発生。前面及び側面に亀甲状のひび割れが発生。	腐食軽微。せん断補強筋および配力筋が隅角部で破断。	
B	橋脚	梁	水平方向に卓越したひび割れが発生。	腐食軽微。せん断補強筋および配力筋が隅角部で破断。
		柱	軸筋に沿った縦方向のひび割れが発生。	腐食軽微。破断無し。
		フーチング	未確認。	未確認。
		橋台	前面及び側面に亀甲状のひび割れが発生。	腐食軽微。破断無し。

表-2 ASRにより劣化したコンクリート橋脚の調査項目

	測定項目	測定方法
現地計測	ひび割れ状況	目視点検及びデジタルカメラ撮影によりひび割れ展開図を作成。
	鉄筋腐食及び破断状況	ひび割れ発生個所ではつり検査を実施。
コアによる 屋内試験	圧縮強度及び静弾性係数	貫通コアの内部より切りだした試験体(φ55mm)にて圧縮強度、静弾性係数及び超音波パルス速度を測定。
	塩化物イオン含有量	コア(φ55mm)を表面から10mmごとに切出し、JCI-SC5に従い電位差滴定法により塩化物イオン含有量(2Nの硝酸溶解)を測定。
	ASRゲルの生成状況及び組成分析	骨材周囲のASRゲルの化学組成をSEM-EDXAにて測定及び酢酸ウラニル蛍光法によりASRゲルの生成状況の観察。
	残存膨張性	コア(φ55mm)を50°Cの飽和NaCl溶液に浸漬し、膨張量の経時変化を測定。

ト、火山ガラス)によりASRが発生しており、凍結防止剤が流下する梁端部では凍結融解との複合的な劣化作用によりコンクリートのスケーリングや脆弱化が観察された³⁾。現地調査としては、目視観察(ひび割れ、スケーリング)、はつり調査(鉄筋腐食、鉄筋破断)、コアの詳細調査(圧縮強度、弾性係数、超音波パルス速度(市販品(Pundit)、振動子周波数:50kHz)、残存膨張量(50°C飽和NaCl溶液浸漬法)及び弾性波法(特注品、振動子周波数:40kHz、振動子印加電圧:1.2kV)による内部劣化調査を実施した。調査項目の概要を表-2に示す。弾性波の測定は、厚さ2.5mの梁部側面に対する透過法または鉄筋破断が発生した梁隅角部の斜方向透過法とし、受振波観察方式とした。この際、弾性波の伝播速度を測定するとともに、弾性波の伝播波形を解析して得られた周波数スペクトルについて、重み付けをした周波数の平均値(以下、周波数中央値とする)を算出し、ASRによる内部劣化の評価指標とした。今回の測定では、構造物の微振動や高周波ノイズの影響を避けるために、1kHzから50kHzの間の周波数成分(分析幅:50Hz)を対象とした。周波数中央値の演

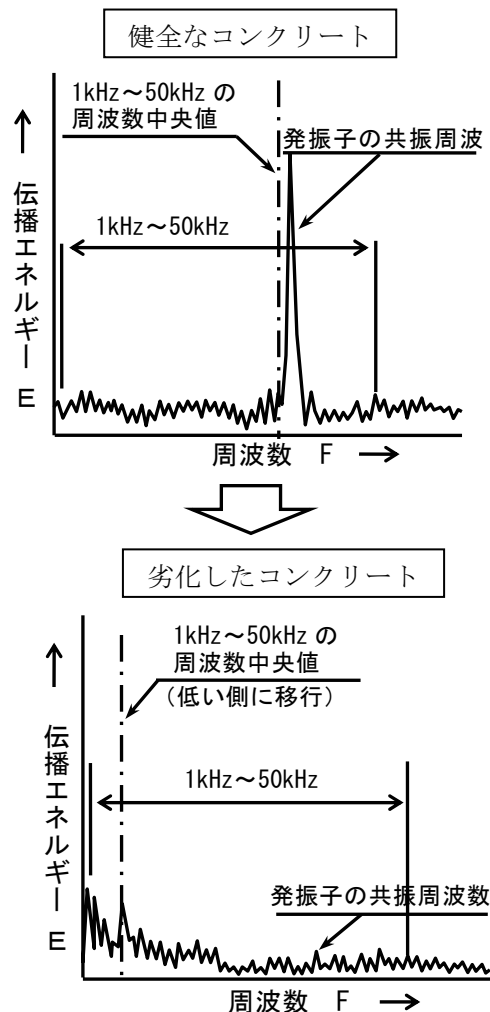


図-1 コンクリートの劣化に伴う周波数スペクトルの変化

算方法を式(1)に示す。

$$\text{周波数中央値} = \frac{\sum (F_i \times E_i)}{\sum E_i} \dots (1)$$

(ここに、 F_i :周波数、 E_i :伝播エネルギー)

一般に、健全なコンクリートの場合、図-1に示すように、周波数成分は発信周波数(40kHz)が卓越するが、ASRにより劣化が進行したコンクリートでは、コンクリートの微細ひび割れの発生や骨材周囲のASRゲル生成の影響で卓越周波数が発信周波数よりも低い側に移行し、ピークが明瞭でなくなるのが特徴である²⁾。弾性波調査の終了後、橋脚よりφ55mmの貫通コアを採取して、構造体の内部劣化の状況を観察するとともに、構造体内部の圧縮強度及び静弾性係数の変化を調べた。また、現地調査での弾性波の結果と比較するために、各種長さに切り出したコアの弾性波速度(発信周波数:40kHz)と超音波パルス速度(発信周波数:50kHz)を測定した。なお、両橋梁は曲線区間に設置されているため路面には片勾配が付けられており、冬季には凍結防止剤を含む路面排水が伸縮継手部より橋脚梁部の勾配の低い方(以後、流出側とする)に集中して流下している。この影響で、橋脚枕梁端部の流出側はASR損傷が顕著であり、コアは路面排水の影響が顕著な部位(梁先端部)と比較的健全な部位(梁付け根部)から数本ずつ採取した。

3. 調査結果および考察

3.1 ASR 損傷橋脚への弾性波法の適用性

橋脚梁部の劣化状況及び弾性波の測定位置を図-2に示す。超音波パルス速度測定装置(市販品(Pundit))は超音波がまったく透過せず、測定結果が得られなかった。それに対して、出力を改良した弾性波速度測定装置(特注品)は2.5mの部材厚での測定が十分に可能であった。しかし、橋脚の梁端部の測定では、側面横方向だけでなく上下方向でも弾性波がまったく透過しない箇所があり、図-3に示すように、それらの箇所ではかぶりコンクリートの浮きや鉄筋破断による構造体の内部への割れの発生が確認さ

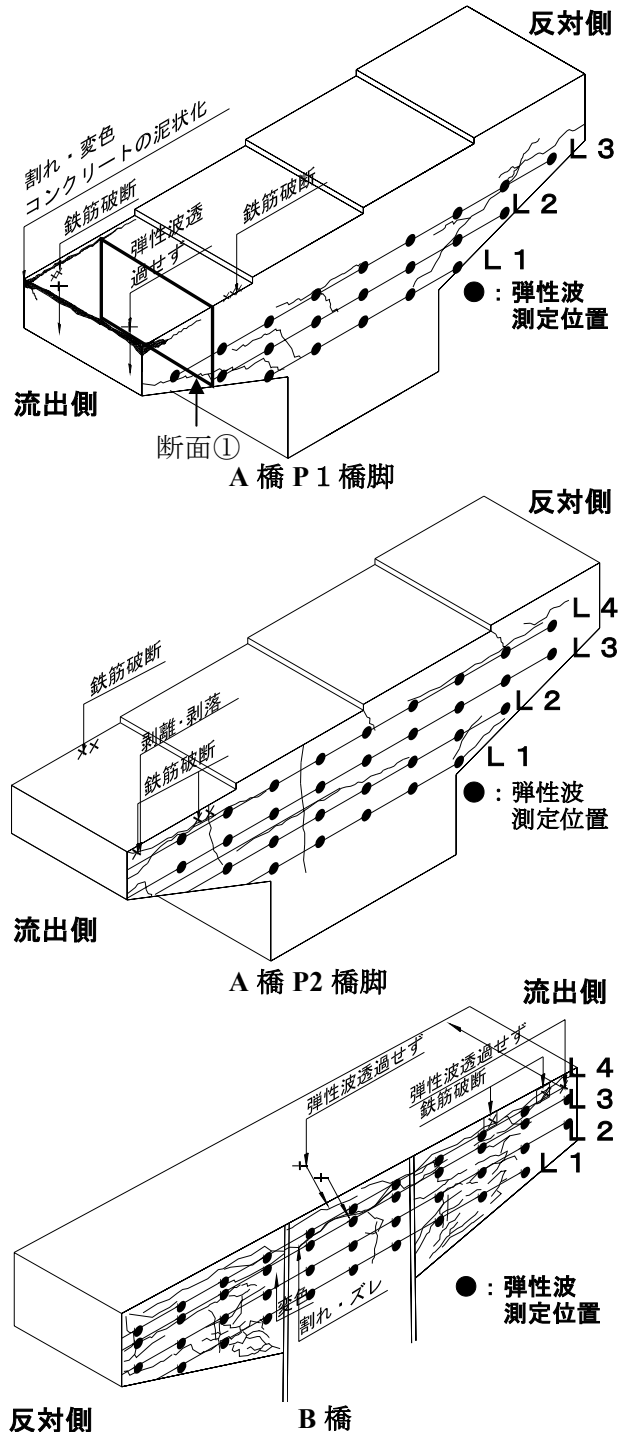


図-2 A橋及びB橋の劣化状況及び透過法適用位置

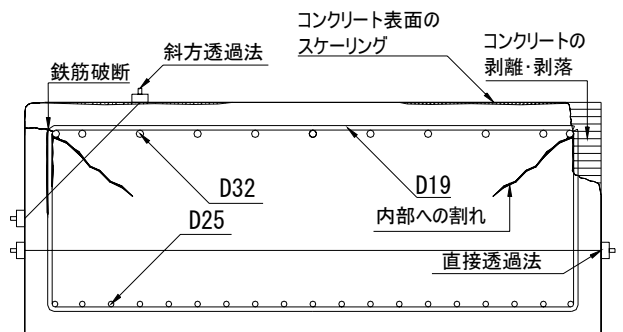


図-3 A橋梁端部における劣化状況図(断面①)

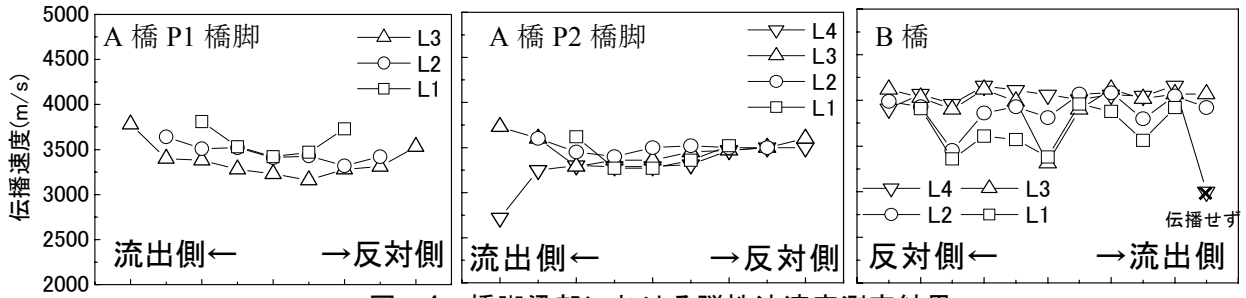


図-4 橋脚梁部における弾性波速度測定結果

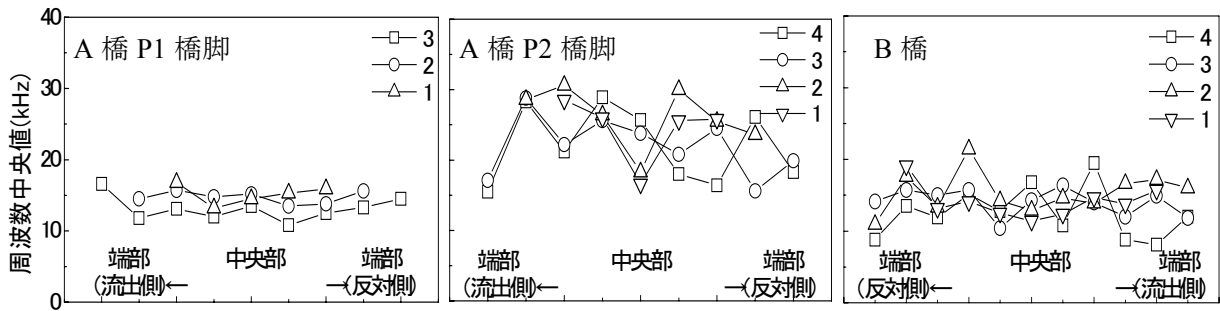


図-5 橋脚梁部における周波数中央値測定結果

れた。一方、鉄筋破断の有無の推定を目的に実施した梁隅角部の斜方向透過法では、鉄筋破断により発生した割れを透過する場合には伝播波形の顕著な減少がみられ、鉄筋破断の有無や割れの発生領域の推定に弾性波法が適用できる可能性が示された。しかし、梁端部では路面排水からの泥分や ASR ゲルで割れが目詰まりしている箇所もあり、その際の識別が今後の課題として残された。

橋脚梁部の弾性波速度の測定結果を図-4に示す。A 橋の橋脚 (P1,P2) の弾性波速度は 3200~3700m/s であり、平均値は 3500m/s 程度であった。これらの値は、一般的に健全なコンクリート構造体の目安である 4000m/s を下回っており、橋脚梁部全体でコンクリートの ASR 劣化が生じているのを捉えていた⁴⁾。とくに、顕著な劣化が観察された梁端部 (P2 流出側) の上側では 2700m/s まで大きく低下していた。なお、路面排水によるコンクリートの脆弱化が発生したのは、梁端部から最初の支承まで、上面から 20~30cm の深さの領域であり、この箇所の測定では弾性波が大きく低下しているか、または測定が不能であった。一方、B 橋の橋脚では、梁端部 (流出側) を除くと、梁上部でも伝播速度

が 4000m/s を越えており、全体的に A 橋よりも ASR 劣化の程度が小さいと判断された。しかし、B 橋の梁下側では弾性波速度が大きくばらついている箇所もあり、局部的に大きな ASR 劣化が進行している可能性が示唆された。

橋脚梁部の弾性波周波数中央値の測定結果を図-5に示す。弾性波のスペクトル分布は、共振周波数である 40kHz と比較して、周波数中央値が低周波領域 (10~30kHz) に移行していた。A 橋橋脚(P1,P2)の弾性波速度には明確な差異が認められなかったが、弾性波の周波数中央値は P2 橋脚よりも P1 橋脚が小さくなっていた。この結果は、目視観察及びコアによる詳細試験の結果とも整合性があり、弾性波の周波数中央値は弾性波速度よりも内部劣化の程度をより反映していると考えられた。一方、B 橋橋脚の弾性波の周波数中央値は A 橋 P1 橋脚とほぼ同程度の値になった。弾性波速度及び弾性波の周波数中央値は ASR による内部劣化の程度を推定する指標として有効であると考えられた。しかし、降雨などによる表面及び内部の含水状態の変化及び柱と梁の接合部のように複雑に配筋された箇所での測定値の評価など、今後の課題としてさらに検討を進める必要があった。

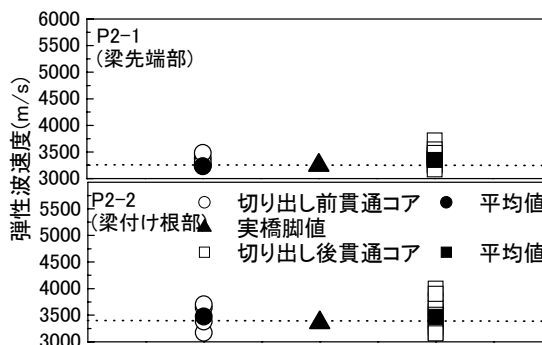
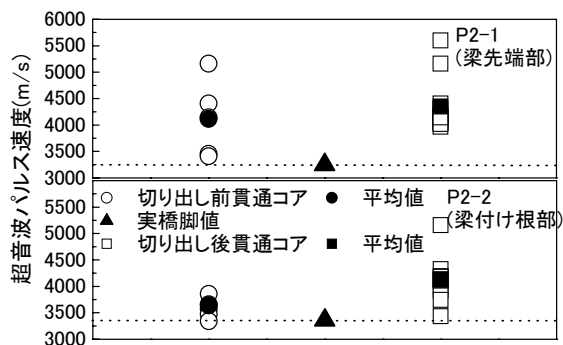


図-6 A橋 P2 橋脚における切り出し前後における弾性波及び超音波パルス速度測定結果

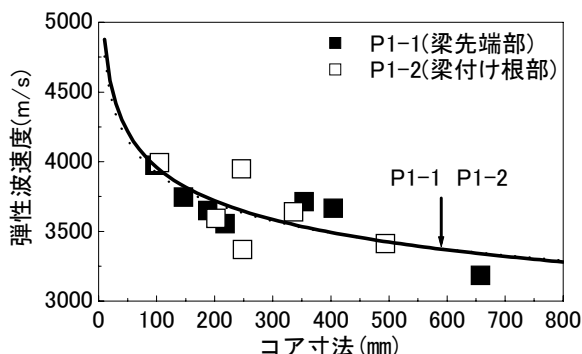
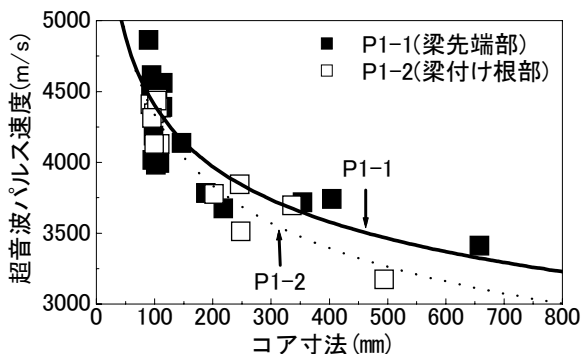


図-7 A橋 P1 橋脚における弾性波及び超音波パルス速度とコア寸法の関係

3.2 貫通コアへの弾性波法の適用性

橋脚梁部より採取したコンクリートコアについて実施した弾性波速度の測定結果を図-6に示す。貫通コンクリートコアの中で比較的長い箇所を選んで弾性波速度を測定した結果、測定値のばらつきが大きくなったが、実橋脚における弾性波速度と同じ測定位置から採取した比較的長いコアの弾性波速度の平均値はほぼ同じになった。一方、強度試験を実施するために長さを10cmに整形したコアでは、ひび割れや断面欠損の影響が現われなくなるので、コアの弾性波速度は実橋脚の測定結果と比較して20~30%程度大きくなった。

コアの寸法と弾性波速度、超音波パルス速度との関係を図-7に示す。コア試験体の超音波パルス速度はコア寸法に関係なく同一試験体の弾性波速度よりも多少大きくなる傾向にあった。また、コア寸法と弾性波速度及び超音波パルス速度の間には相関関係が認められたことから、これらの関係が整理できれば、コアの弾性波速度（または超音波パルス速度）から比較的大きな部材の測定値が推定できるものと考えられる。

3.3 コンクリートコアの圧縮強度、静弾性係数及び超音波パルス速度の変動

橋脚梁部（A橋(P1)、流下側）より採取したコアの深さ方向での圧縮強度、静弾性係数及び超音波パルス速度の分布状況を図-8に示す。一般に、ASR 損傷橋脚から採取したコンクリートコアの圧縮強度が設計基準強度（24N/mm²）を下回することは稀であるが、橋脚の内部にて設計基準強度を大きく下回るものがあり、構造体内部での強度低下の確認は弾性波による橋脚の測定結果とも一致した。また、コアの静弾性係数の値は設計基準強度から推定される値25kN/mm²の半分以下となり、変動もかなり大きなものとなった。コアの超音波パルス速度の値は4000~5000m/sの範囲にあり、3500m/s以下をASR判定の目安とする基準とは合致しなかった⁵⁾。

橋脚梁部より採取したコンクリートコアについて実施した圧縮強度と静弾性係数、超音波パルス速度との関係を図-9及び図-10に示す。既往の研究⁶⁾より、ASR 損傷を受けたコンクリートでは、圧縮強度よりも静弾性係数が大きく低下することが知られており、今回の試験でもコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度と

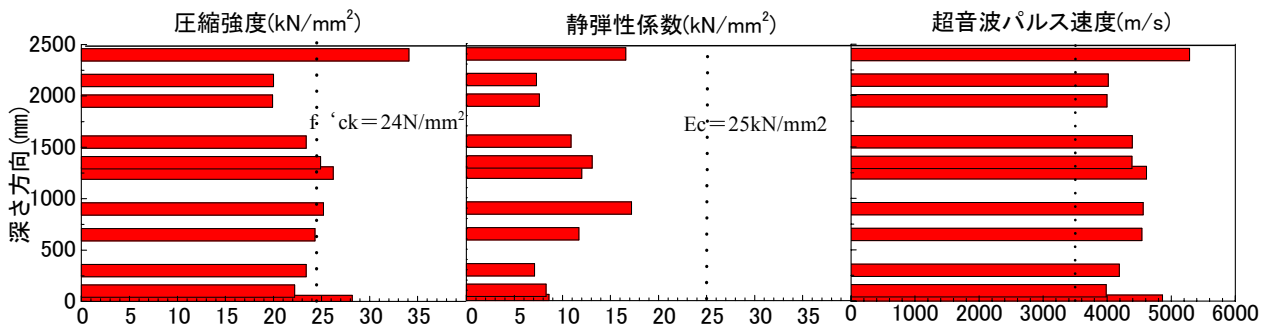


図-8 深さ方向で見た圧縮強度、静弾性係数、超音波パルス速度分布 (A橋 P1 橋脚)

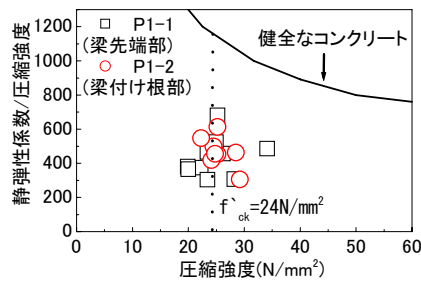


図-9 圧縮強度と静弾性係数との関係 (A橋)

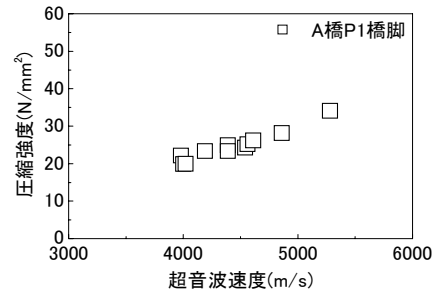


図-10 圧縮強度と超音波パルス速度の関係

の関係の分布状況より採取コア毎の ASR 損傷度を判定することができた。また、コアの圧縮強度と超音波パルス速度との間には比較的良好な相関性が認められ、超音波パルス速度によるコアの圧縮強度の推定も可能と考えられた。

4. 結論

ASR 損傷橋脚の梁部を対象として、弾性波法による非破壊検査及びコアによる損傷度の調査を実施して、実橋脚への弾性波法の適用性を検討した。

本研究により得られた主要な結果をとりまとめると、次のようである。

(1) 橋脚梁端部では弾性波が透過しない箇所があり、それらの箇所ではかぶりコンクリートの浮きや鉄筋破断による構造体の内部への割れの発生が確認された。

(2) 橋脚梁部では弾性波速度及び弾性波の周波数中央値が低下しており、これらを ASR 劣化の程度を示す指標とすることができた。

(3) 橋脚より採取したコアの弾性波速度及び弾性波の周波数中央値は試験体の寸法が長いものほど低い値を示した。

(4) 橋脚より採取したコアの圧縮強度と超音波パルス速度との間には良好な関係があり、非

破壊試験により圧縮強度が推定できる可能性が確認された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご協力を賜りました、(株)ピー・エス三菱奥田由法氏並びに(株)国際建設技術研究所葛目和宏氏に感謝の意を表します。

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」, pp.142-156, 2001
- 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検査, 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, 2002.6
- 3) 鳥居和之, 笹谷輝彦, 久保善司, 杉谷真司：凍結防止剤の影響を受けた橋梁の ASR 損傷度の調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24-2, pp.579-584, 2002
- 4) Kojima, T., Hayashi, H., Kawamura, M., Kuzume, K.: Maintenance of Highway Structures Affected by alkali-aggregate Reaction, Proc. of 11th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp.1159-1166, 2000.
- 5) (財) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発, 1989
- 6) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460, pp.151-154, 1993