

論文 超音波トモグラフィによるASR劣化した供用中RC橋脚の内部劣化推定

森川 信*1， 藤原 勝也*2， 葛目 和宏*3， 山中 利明*4， 山本 利史*5

The use of ultrasonic tomography to evaluate the internal deterioration of ASR-affected reinforced concrete piers

Makoto MORIKAWA*1, Katsuya FUJIWARA*2, Kazuhiro KUZUME*3, Toshiaki YAMANAKA*4 and Toshifumi YAMAMOTO*5

要旨：ASR劣化したRC構造物の劣化度評価は，外観ひび割れや採取したコアの物理定数の確認によることが多い。しかし，ASR特有のひび割れにより深度の深いコアを採取することが困難であることや，供用中路線では複数のコアを採取することが出来ないため，内部の劣化状態をより正確に把握することが困難な場合が多い。本件では，ジャンクション整備のために拡幅を計画している供用中のRC橋脚において，今後，拡幅に伴い新たな作用が加わることから，外観およびコア採取による確認に加え，研究が確立されつつある超音波トモグラフィ法による内部診断を試みた。結果，外観ひび割れやコア調査からASRによる劣化が著しいと判断された橋脚は，トモグラフィ解析によるスペクトル重心も小さく，劣化は内部まで進行しているものと推察された。

キーワード：超音波トモグラフィ，供用中路線，ASR橋脚改築，内部劣化推定

1. はじめに

ASR劣化したRC構造物の劣化度評価は，ひび割れなどの外観劣化度や，採取したコアの圧縮強度，弾性係数などによって確認することが多い。しかし，ASR劣化した構造物からコアを採取することは，ASR特有のひび割れのためコアが折損してしまい，深度の深い部分のコアを採取することが困難であることが多い。また，供用中路線においては，複数のコアを採取することは出来ないため，内部の劣化状態をより正確に把握することが難しい。今回，既設部分を拡幅してジャンクションを整備する供用中のRC橋脚において，今後，拡幅によって新たな作用が加わることから橋脚の状態を詳細に把握する必要があった。そこで，外観およびコア採取による調査に加え，研究が確立されつつある超音波トモグラフィ法を用いて内部診断を試みた。本稿では，これらの調査結果について報告する。

脚において実施した。当該橋脚は，2～3車線の上部工を支える単柱形式のRC橋脚であり，梁幅は橋軸直角方向に約12.3m～16.5m，橋軸方向に約2.0m～2.6mである。竣工は1970年代前半であり，40年以上が経過している。なお，過年度の定期点検において，ASRによる劣化が確認されており，これまで，ひび割れ補修や表面保護による予防保全を施しているが，最新の表面保護が実施されてから18年程度経過している状況にある。今回，既設の表面保護はある程度のひび割れ幅まで追従するため，既設表面保護をウォータージェットにより撤去して詳細調査を行った(図-1)。



図-1 調査対象橋脚(表面保護撤去後)

2. 調査対象構造物の概要

調査は，ジャンクション改築の対象となる17橋

*1 阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部西船場ジャンクション建設事務所

*2 阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部西船場ジャンクション建設事務所 主任

*3 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

*4 清水建設(株)大阪支店土木部 西船場JCT作業所 所長

*5 清水建設(株)大阪支店土木部 西船場JCT作業所 副所長

3. 外観ひび割れ調査およびコア試験

(1) 外観ひび割れ調査

ひび割れ調査は、橋脚に接近して0.3mm以上のひび割れをすべて記録した。

調査対象とした橋脚は、施工時期はほぼ同時期であるが、当時の建設工区が2工区にわかれており、使用しているプラントが異なるためか、劣化状況が著しい区間と比較的軽度な区間に分かれた。調査結果の一例を図-2および図-3に示す。なお、最大ひび割れ幅、ひび割れ延長および密度等の結果一覧は後述の表-1に示す。

(2) コア採取による物理定数の確認

コアは、図-4に示す梁腰部において各3本、橋脚毎に採取した。出来る限り深い位置の採取を試みたが、内在するひび割れに苦勞し、直径約7cm、高さ約18cm~31cmの円柱体のコアから、かぶりを含めて、100mm~200mmの深度で供試体を採取した。

圧縮強度、静弾性係数および、ひび割れ調査結果を含む結果一覧を表-1に示す。圧縮強度や静弾性係数は、外観ひび割れ調査で著しいひび割れが確認された橋脚において、比較的低い結果であった。圧縮強度の最小値はP6橋脚において、14.6N/mm²であり、設計基準強度(27N/mm²)の54%程度の強度しかない結果となった。静弾性係数の結果においても設計値と比較すると大きく下回る橋脚があった。また、採取したコアを観察すると、ほとんどのコアでゲルが確認され、ASRによる劣化が生じていることがうかがえた。

圧縮強度試験結果や静弾性係数が低い橋脚については、建設後40年以上経過し、ASRはかなり進行していることが予想される。一方で、圧縮強度が設計値以上あったP10およびP12~P17橋脚については、ASRが現在も進行中である可能性も考えられたため、残存膨張試験(JCI-DD2法)にて進行度合いを

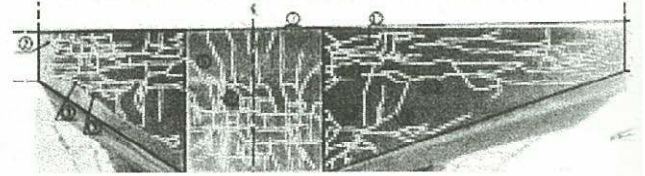


図-2 ひび割れが著しい区間の状況

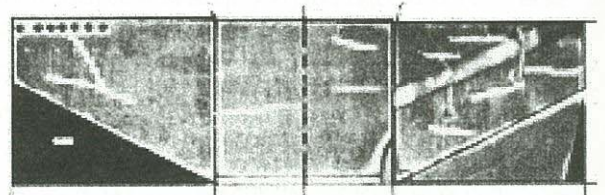


図-3 ひび割れが比較的軽度な区間の状況

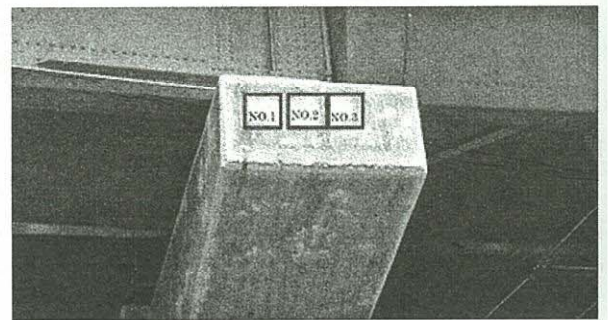


図-4 コア採取位置

表-1 調査結果一覧

コア採取箇所: 固定側プレート接合部コンクリート面

既設橋脚番号	施工年度	圧縮強度(N/mm ²) 設計値σ _{ck} =27(N/mm ²)				静弾性係数(kN/m ²) 設計値E=26.5(kN/m ²)				ゲル 有無	最大ひび割れ幅 ^{※1} (mm) (1)0.3mm以上 【劣化度判定は下記】	ひび割れ延長 ^{※2} (m)	ひび割れ密度 ^{※2} (m/m ²)	
		No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均					
P1	1970年~1972年	42.6	37.6	42.2	40.8	25.0	19.7	19.3	21.3	有	1.0	195.4	3.63	
		39.2	33.6	38.3	37.0	22.4	27.8	28.5	26.2	有				
P2		36.1	33.5	35.5	35.0	18.5	20.3	20.6	19.8	有	1.5	104.4	1.68	
		32.6	32.5	35.7	33.6	25.3	25.8	25.6	25.6	有				
P3		26.6	23.4	25.7	25.2	18.8	24.4	20.7	21.3	有	5.0	134.5	2.22	
P4		26.2	25.5	29.1	26.9	21.1	20.9	27.8	23.3	有	0.4	136.5	2.14	
P5		24.6	26.4	25.5	25.5	21.9	25.2	23.4	23.5	有	0.5	102.5	1.68	
P6		14.6	15.6	17.7	16.0	8.0	6.8	8.3	7.7	有	6.0	352.8	5.79	
P7		17.6	26.2	17.2	20.3	7.5	10.5	5.1	7.7	有	10.0	298.1	4.89	
P8		27.1	22.0	22.6	23.9	13.2	8.2	7.9	9.8	有	7.0	288.9	4.74	
P9		33.7	36.6	26.9	32.4	26.8	26.1	18.1	23.7	有	2.0	112.9	1.85	
P10		51.1	52.5	53.6	52.4	36.5	39.6	39.8	38.6	無	0.5	103.3	1.61	
P11		1970年~1973年	37.7	30.6	32.3	33.5	10.6	12.9	20.3	14.6	有	1.0	217.0	3.24
P12			39.7	39.1	50.2	43.0	33.0	33.7	36.5	34.4	無	0.4	72.2	1.25
P13			33.7	32.5	43.7	36.6	30.0	31.2	37.8	33.0	有	0.3	33.9	0.54
P14			37.7	54.6	48.4	46.9	33.2	40.5	37.1	36.9	無	0.5	45.2	0.81
P15			38.4	43.9	41.5	41.3	31.4	36.2	33.1	33.6	無	0.5	91.7	1.64
P16	39.6		35.8	40.9	38.8	30.8	36.5	32.7	33.3	無	0.3	43.0	0.77	
P17	36.4		42.1	45.0	41.2	31.0	33.4	34.8	33.1	無	0.5	81.4	1.16	

確認した。結果は、いずれの橋脚においても残存膨張率は0.03%以下であり、以降の反応はほとんどないものと考えられた。

調査の結果、建設から40年超経過しており、残存膨張率の値も低いことから、外観ひび割れが少ない橋脚は、比較的健全な状態であると判断できる。一方、ひび割れ幅、ひび割れ延長および密度、圧縮強度、静弾性係数の結果より、P3、P6～8の4橋脚については、ASRの進行が著しく進んでいると考えられた。そこで、上記4橋脚の隅角部での鉄筋破断について追加調査したが、破断は確認されなかった。

4. 超音波トモグラフィ法による内部診断

4-1 超音波トモグラフィ法の採用

表面保護撤去後のひび割れ調査やコア採取による圧縮強度試験等については、表面やそのほとんどが鉄筋かぶり付近での調査結果である。従来、鉄筋の健全度が確保されていれば、ASRによる劣化が多少進行していても、ケミカルプレストレスの効果などもあり、構造物の安全性が著しく低下するような危険な状態に至ることはない。しかし、今回、1車線幅に伴う上部工荷重の増加など将来にわたって新たな作用が加わることになるため、より詳細に構造体内部の状態を把握することを考えた。対象橋脚は、供用中であるため、複数のコアを貫通させてまで内部の調査は行えないと判断し、近年研究が行われている^{例えば1)}、超音波トモグラフィを用いたコンクリート内部調査を行うこととした。超音波トモグラフィ解析を適用した研究は様々行われているが、ASR劣化構造物では、超音波の伝搬速度よりもスペクトル重心を指標とした手法のほうが伝搬媒体の影響を感度よく捉えることができることから²⁾、本手法による超音波トモグラフィ法により実施した。

4-2 調査および解析方法

調査は、外観ひび割れ調査および圧縮強度や静弾性係数が小さい結果となったP3およびP6～8、また、比較対象のため、健全と判断されたP15についても実施した。測点個所および測点数を表-2に示す。また、超音波探触子の配置および解析ブロック割図を図-5、6に示す。現地の梁の形状により、測定は超音波探触子を上面および両側側面に配置した3面で行った。なお、探触子としては、共振周波数40kHzのものを使用した。

解析方法は、トモグラフィ技術を応用した手法として順解析と逆解析の2つの解析手法から構成されるが、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」を用いた³⁾。

(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

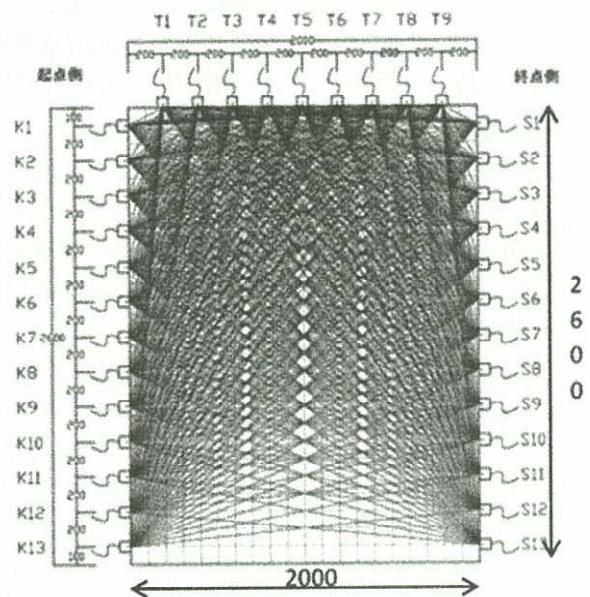
超音波測定結果の伝播速度と逆投影法で算出した各ブロックの伝播速度の誤差を補正するため、同時反復再構成法を使用した。同時反復再構成法は、残差や各ブロックを通過する波線の長さより、直接伝播時間の補正量を求める手法であり、各ブロックの伝播時間の補正量 ΔS は下式より求める。

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

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

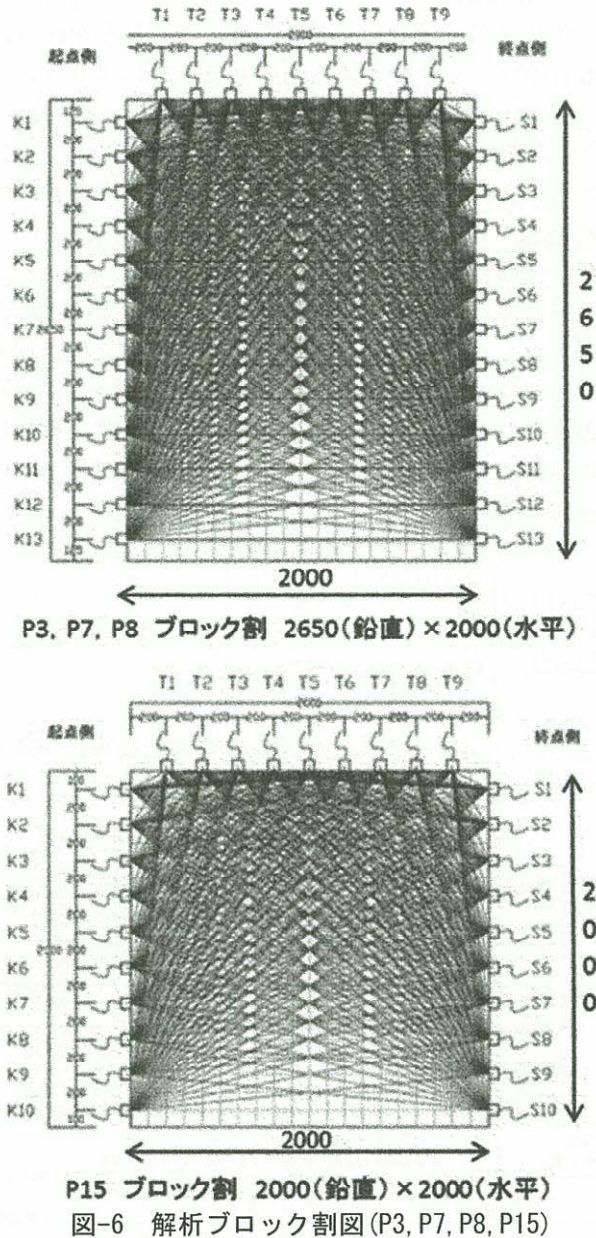
表-2 測点個所および測点数

橋脚No.	測点数	梁断面(mm)
P3	403	□2650*2000
P6	403	□2600*2000
P7	403	□2650*2000
P8	403	□2650*2000
P15	280	□2000*2000



P6 ブロック割 2600(鉛直)×2000(水平)
図-5 解析ブロック割図(P6)

が 40kHz の探触子を使用しており、健全な構造物の



4-3 測定波形および周波数分布結果

調査結果のうち、外観ひび割れおよび圧縮強度等の結果から、最もASRによる劣化の進行がみられたP6橋脚と、健全と判断したP15橋脚の代表的な部位での水平透過波形図、および周波数分布図を図-7および図-8に示す。

健全と判断したP15橋脚の伝搬速度は、一般的に良好とされるオーダーの4100~4400m/secであったが、ASRによる劣化の進行がみられたP6橋脚は、P15橋脚と比べて伝搬速度の低下が見られた。また、伝搬波形を周波数分析し、スペクトル重心を評価パラメーターとしたとき、P6橋脚はP15橋脚と比べて低い結果となった。ここで示すスペクトル重心とは、伝搬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。測定では、共振周波数

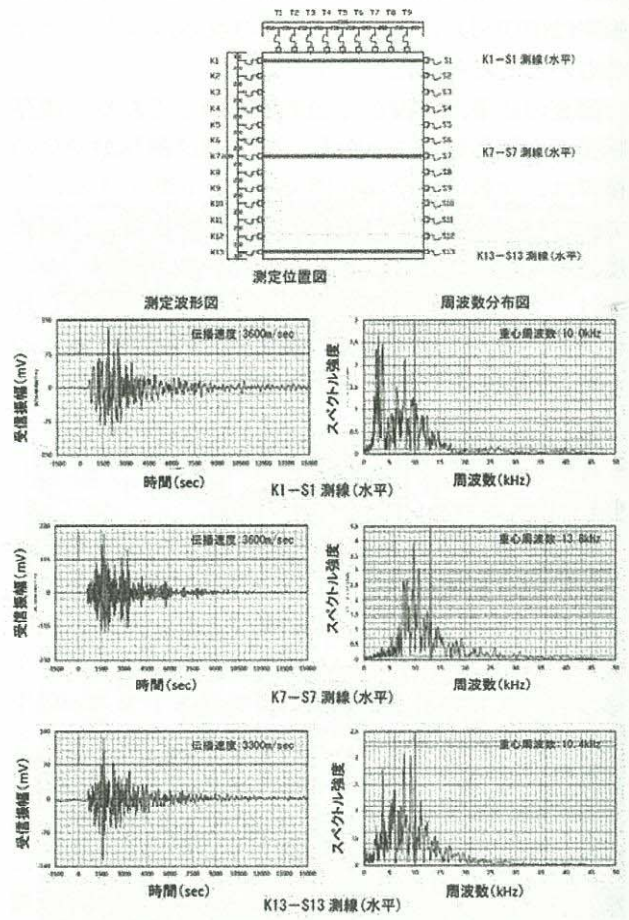


図-7 測定波形・周波数分図 (P6)

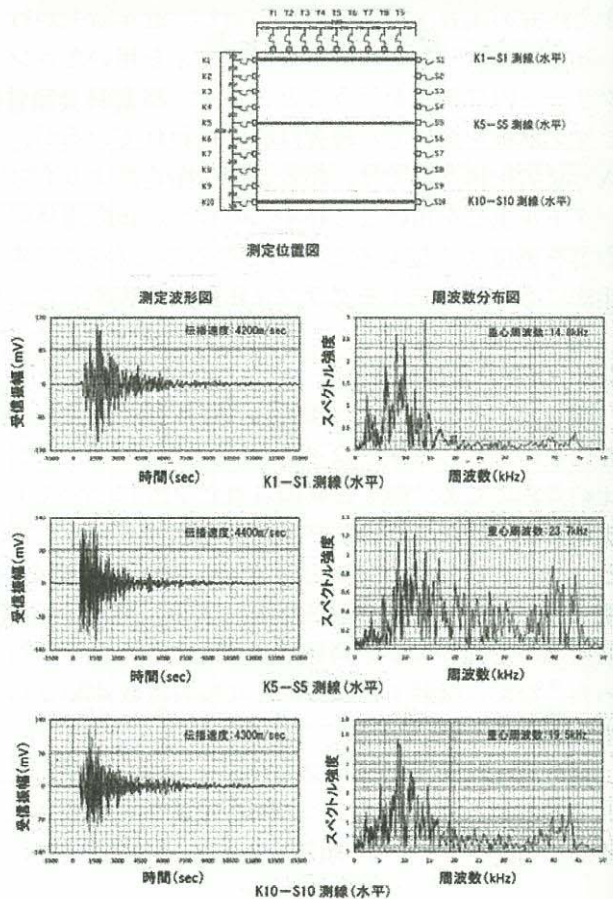


図-8 測定波形・周波数分図 (P15)

場合、伝搬波形の周波数成分はこの付近が卓越することになるが、劣化が進行すると共振周波数帯域の周波数成分が減衰し、低周波帯域の成分が卓越する為、見掛け上、スペクトル重心は低下の傾向を示す。P6 橋脚は、共振周波数帯域でのスペクトル強度が非常に低く、劣化の進行がうかがえる。一方、健全と判断された P15 橋脚においても、梁上面などの水分供給が多いと思われる表面付近では中段部や下面側に比べてスペクトル重心が低く、劣化していることがうかがえる。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が知られており^{1,2)}、P6 や P15 の上・中・下面のように各橋脚で透過距離が同一な場合においては劣化度の相対比較は可能となるが、透過距離が異なるような各橋脚間での劣化度を比較する場合には距離減衰特性に着眼した補正の検討が必要である。

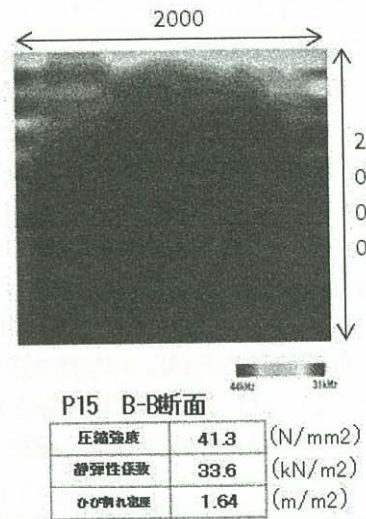


図-10 健全と判断した橋脚のトモグラフィ結果

4-4 超音波トモグラフィ測定結果

調査した各橋脚について、スペクトル重心を評価パラメータとしたトモグラフィ結果を図-9 および図-10 に示す。調査断面位置 (B-B) を図-11 に示す。

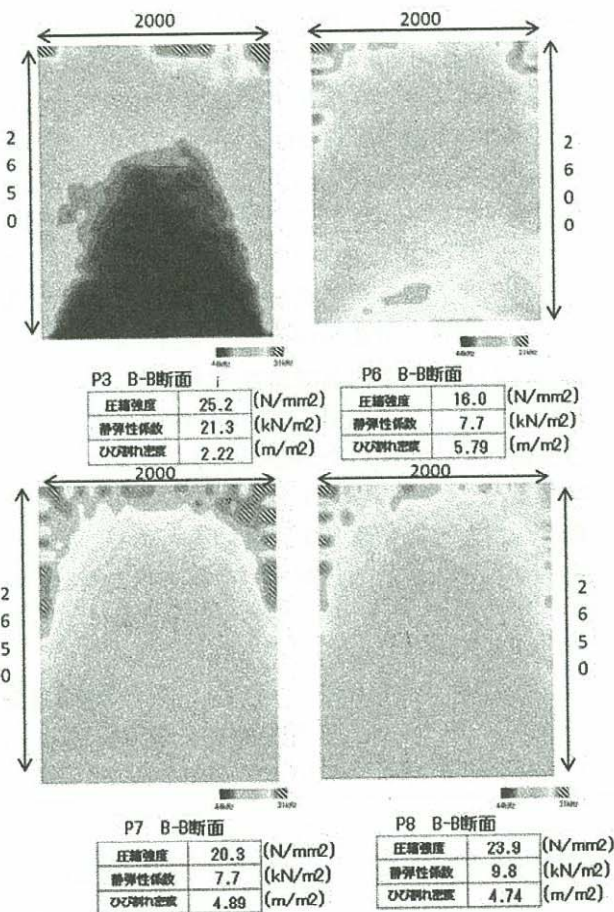


図-9 ASR劣化が著しいと判断された橋脚のトモグラフィ結果

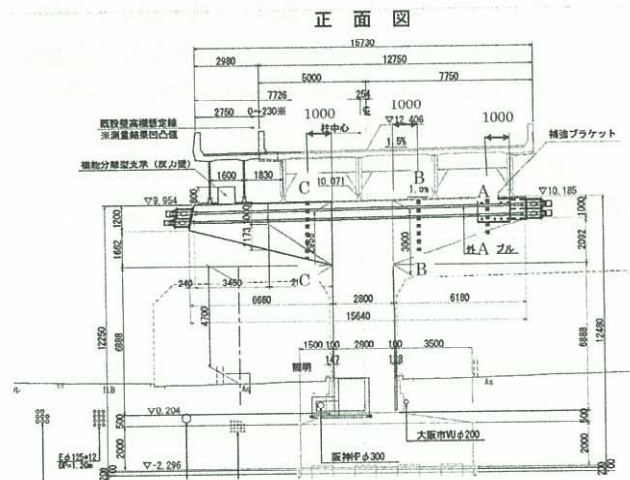


図-11 調査断面 (B-B)

ASR劣化した橋脚では、健全と判断した橋脚と比べて表層および内部にかけてスペクトル重心が小さく、劣化している傾向がうかがえた。また、外観ひび割れや圧縮強度、静弾性係数の結果において、劣化はしているが、著しい静弾性係数等の低下がみられなかった P3 橋脚は、それらの低下が著しい P6 ~8 橋脚と比べて一部良好な傾向を示した。

5. まとめ

(1)建設後、40数年を経過した供用中のRC構造物において、予防保全で設置している表面保護を撤去し、詳細に外観ひび割れ調査、コア採取による圧縮強度試験等にて確認を行った結果、ASRによる劣化が著しく進んでいる橋脚が判明した。

(2)ASR劣化の著しい橋脚において、今後、ジャンクン改築によって新たな作用が加わるようになるため、内部の状態をより詳細に把握すべく、超音

波トモグラフィ法を用いて調査を行った。その結果、表面のひび割れや圧縮強度、静弾性係数による劣化の度合いに応じた内部劣化の状況を可視化することができた。

(3)外観ひび割れおよびコア調査からASRによる劣化が著しいと判断された橋脚は、トモグラフィ解析によるスペクトル重心も非常に小さく、劣化は内部まで進行しているものと推察された。

(4)本調査では、梁の形状から超音波探触子を3面（梁上面、両側面）に配置して内部の調査を行っていることから、一部、良好な傾向がみられた個所もあり、4面とした場合とのさらなる精度の検証は必要であると考えている。

(5)本調査では、スペクトル重心と伝搬距離減衰の補正や、補正後の圧縮強度との関係について検証が必要であると考えている。ASRによる劣化が著しく進行していると判断される橋脚においては、今後、ジャンクション改築に伴う耐力が懸念されるため、一部、再構築を含めた検討を行っている。この場合、撤去時に、内部の強度確認と劣化状態の観察を行い、今回調査した超音波トモグラフィの解析結果と、実構造物との相関関係について検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 葛目和宏, 金海鉦, 松本茂, 山本貴士, 宮川豊章:
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, 第14回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集, pp.315-322, 2014.10
- 2) 葛目和宏, 真鍋英規, 小椋紀彦, 山本貴士, 宮川豊章: 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, 第13回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集, pp.181-188, 2013.11
- 3) 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, GBRC33(日本建築総合研究所), pp.13-21, 2008.4.