

論文 縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について

岩野 聡史*1・森濱 和正*2・極檀 邦夫*3・境 友昭*4

要旨：コンクリート表面から入力した縦弾性波は、音響インピーダンスの異なる材料との境界面を反射面として多重反射することから、衝撃弾性波法では、これにより生成される振動数を測定し、厚さ測定、空洞探査を行う。しかし、過去の実験で反射面が材料と密着していると測定される振動数が変化することが確認され、地盤等に密着している実構造物での課題が示された。そこで、今回は背面を数種類の材料と密着させた供試体を用いて、実構造物への適用方法について検討する実験を行った。その結果、測定振動数、波形の減衰は背面材質により異なり、実構造物での測定にはこれらを考慮する必要があることが示された。

キーワード：衝撃弾性波法、非破壊検査、縦弾性波、振動数解析、音響インピーダンス

1. はじめに

衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の非破壊検査について研究をしている^{1) 2)}。コンクリート構造物の調査技術、診断技術に対する必要性が高まるなかで、衝撃弾性波法は測定が簡易であること、内部の鉄筋の影響を受けない測定が可能であること、適用できる厚さの範囲が約 2m と厚いことなど、他手法には無い特長を有する手法であると考えられる。衝撃弾性波法の主な測定項目に、振動数解析によるコンクリートの厚さ測定、内部の空洞探査がある。これはコンクリート表面から入力した縦弾性波が、コンクリートと音響インピーダンスの異なる材料との境界面を反射面として多重反射する性質を利用し、この多重反射により生成される振動数から測定するものである。

これらの測定が必要となる構造物は、主に背面が目視できない覆工コンクリートや床版などの構造物であり、背面は地盤等と密着している場合が考えられるが、コンクリートの背面が材料と密着している場合に測定される振動数は、背面が空洞の場合に測定される振動数とは変化することが確認されている。Sansalone らは³⁾、

コンクリートの背面がコンクリートよりも音響インピーダンスが小さい材料と密着している場合には、縦弾性波のコンクリート背面（材料との境界面）での反射による振動数の他に、材料の底面で反射する振動数が測定されるという変化を指摘している。これに対し、筆者ら行った過去の実験では⁴⁾、縦弾性波のコンクリート背面での反射による振動数そのものが変化する結果となった。

これらから、衝撃弾性波法による振動数解析を安易に実構造物に適用することには課題があると考えられる。そこで、今回の実験では、背面を砂、捨てコン等の異なる複数の材料と密着させた供試体を用いて、これらの背面状況の違いによって振動数解析結果等はどのような変化をするのかについて実験し、測定に及ぼす影響、実構造物への適用方法について検討した。

2. 供試体および実験内容

供試体の形状を図-1、測定位置を表-1に示す。各測定点の背面側は異なり、縦位置 1750mm（以下測定線 A と呼ぶ）の測定点は、砂利に囲まれた水、砂利、砂、捨てコン、捨てコン上の

*1 伊藤建設(株)技術研究所技術開発グループ 主任研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

*3 東海大学助教授 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*4 アプライドリサーチ(株)代表取締役 工博 (非会員)



写真-1 測定状況



写真-2 水部状況

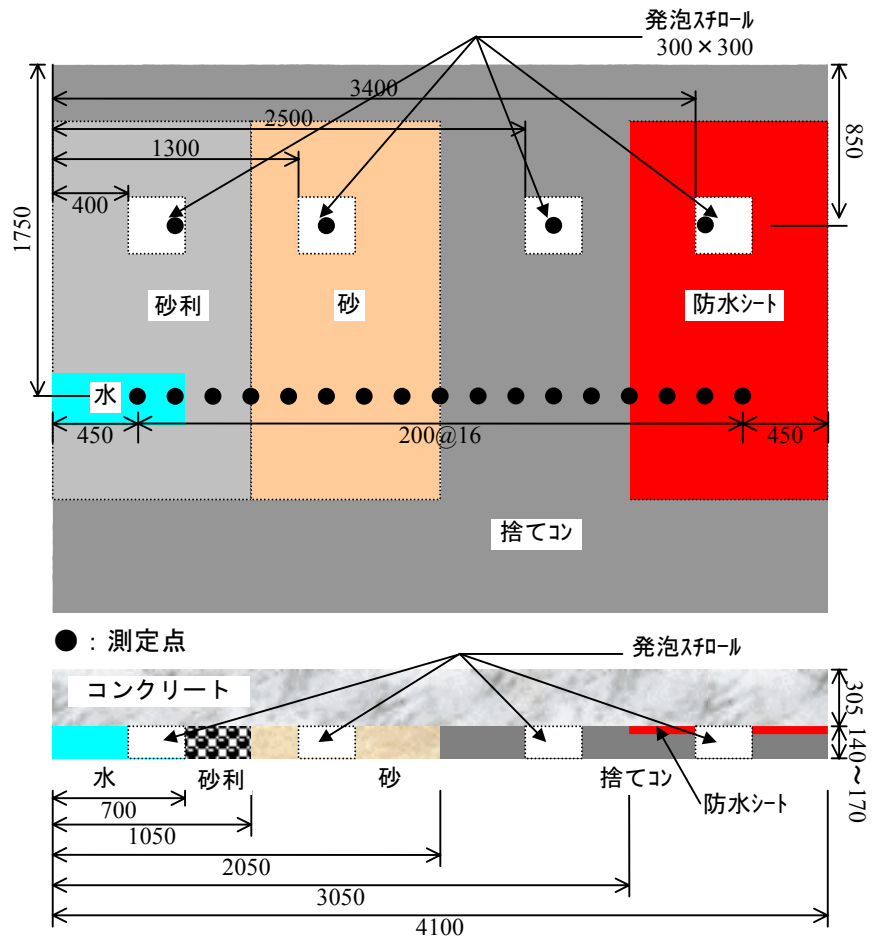


図-1 供試体および背面状況
(単位: mm, 上図: 平面図, 下図: 正面図)

防水シート, これらが密着した状況である。また, これらの各材料はアスファルト上に設置したシート上に密着している。縦位置 850mm (以下測定線 B と呼ぶ) の測定点は, トンネル覆工コンクリートの背面空洞を想定した測定点で, 断面積 300×300mm の発泡スチロールを各材料内に埋設して, 各材料内をコンクリートから分離させた状況である。コンクリートおよび捨てコンの配合表は表-2 に示す。

測定状況を写真-1 に示す。測定はコンクリート表面に加速度計 (PCB 社製, 352C66 型) を手で押し付け, その近傍を直径 20mm の鋼球で打撃する。加速度計が検知した振動をサンプリングクロック 10 μ 秒, データ数 800 個で記録し, この測定波形に対し, MEM (最大エントロピー法) による振動数解析を行い, 測定波形および振動数解析結果が各背面状況によってどのように変化するかについて比較した。また, 砂利に囲まれた水は, 写真-2 に示す通り, 水を

表-1 測定位置および背面状況

測定縦位置(mm)			
1750 (測定線A)		850 (測定線B)	
横位置 (mm)	背面状況	横位置 (mm)	背面状況
450	水	—	—
650		650	発泡スチロール
850	砂利	—	—
1050		—	—
1250	砂	—	—
1450		1450	発泡スチロール
1650		—	—
1850		—	—
2050	捨てコン	—	—
2250		—	—
2450		—	—
2650		2650	発泡スチロール
2850	防水シート	—	—
3050		—	—
3250		—	—
3450		3450	発泡スチロール
3650	—	—	—

表-2 コンクリートの配合表

部位	セメント	呼び強度	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
底版	BB	30	20	8	50	4.5	42.2	161	322	773	1058	3.41
捨てコン	N	18	20	8	70	4.5	47	161	230	885	1031	2.44

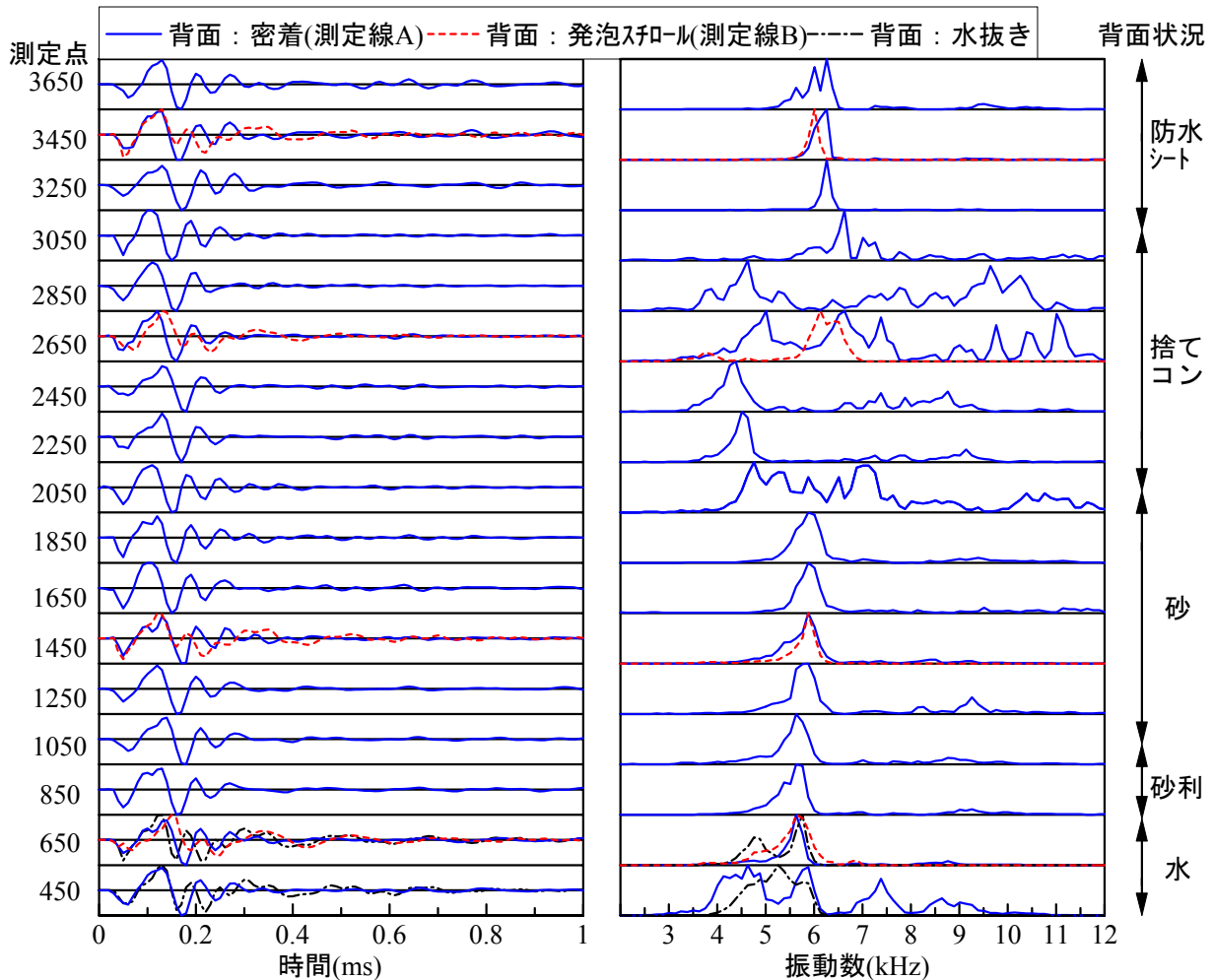


図-2 各測定点での測定波形（左図）および振動数スペクトル（右図）

抜くことが可能であることから、背面を空洞とした状況でも測定した。

3. 測定結果および考察

3.1 振動数解析結果の比較

各測定点で得られた測定波形および振動数スペクトルを図-2に示す。また、図-3に各測定点での振動数スペクトルにおいて、振幅が最大となる振動数 f_0 を、表-3に、 f_0 とコンクリートで別途測定した縦弾性波速度4000m/sから式(1)により求めた測定厚さ D を示す。

$$D = 4000 / (2f_0) \quad (1)$$

各結果を比較すると次の傾向が確認された。

- (1)背面側が各材料に密着した測定線 A の各測定結果を比較すると、背面側の材料によって振動数スペクトル、振幅が最大となる振動数は変化した。表-3に示した測定厚さとコンクリートの実際の厚さ305mm、背面材料を含めた実際の厚さ445~475mmとを比較すると、防水シートではコンクリートの厚さ付近、捨てコンでは背面材料を含めた厚さ付近が測定される。しかし、それ以外の材料では、両者の中間の厚さが測定された。また、捨てコン上では他測定点とは異なり複数の振動数成分が卓越する結果となった。
- (2)測定線 A と 300×300mm の発泡スチロール上

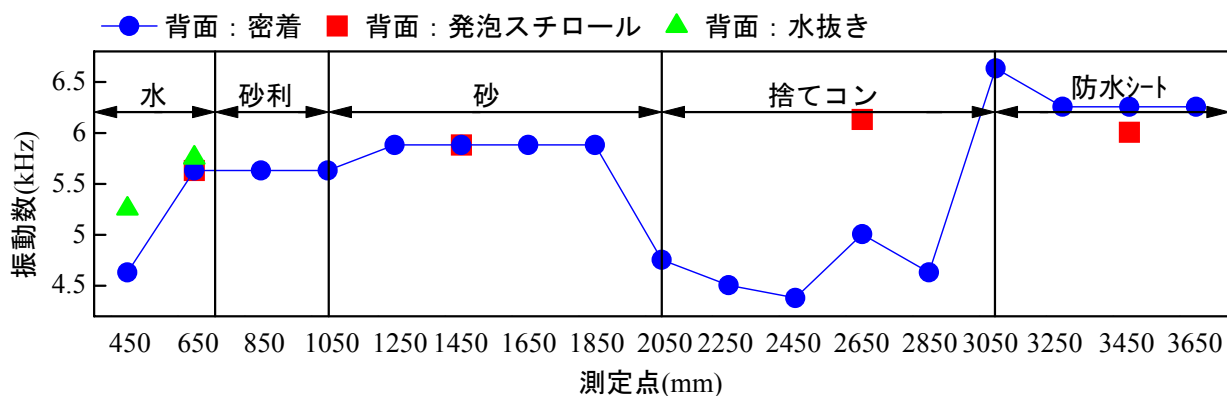


図-3 各測定点で振幅が最大となる振動数

表-3 各測定点で振幅が最大となる振動数および測定厚さ

測定点 (mm)	測定線A						測定線B		
	背面状況	振動数 (kHz)	厚さ (mm)	背面状況	振動数 (kHz)	厚さ (mm)	背面状況	振動数 (kHz)	厚さ (mm)
450	水	4.63	432	水抜き (空洞)	5.26	380	発泡スチロール	—	—
650		5.63	355		5.76	347		5.63	355
850	砂利	5.63	355	発泡スチロール	—	—		—	—
1050		5.63	355		—	—			
1250	砂	5.88	340		—	—			
1450		5.88	340		5.88	340			
1650		5.88	340		—	—			
1850		5.88	340		—	—			
2050	捨てコン	4.76	421		—	—			
2250		4.51	444		—	—			
2450		4.38	457		—	—			
2650		5.01	400		6.13	326			
2850	防水シート	4.63	432		—	—			
3050		6.63	302		—	—			
3250		6.26	320		—	—			
3450		6.26	320		6.01	333			
3650	6.26	320	—		—				

である測定線Bの同位置での結果を比較すると、捨てコン内に埋設された測定点 2650mmでは両者に違いが見られ、測定線Bでの測定厚さはコンクリートの厚さ程度となるが、それ以外の測定点では、測定線AとBに明確な違いは見られない。

- (3)測定線Aの砂利、砂利に囲まれた水と比較すると、何れも5.6kHz付近の振動数が卓越し、背面材料の影響により測定される振動数の変化は見られるが、砂利と水による材料の違いは見られない。また、水を抜き空洞とした場合でも、砂利と明確な違いは見られない。以上(1)~(3)の傾向を総括すると、コンクリートの背面側が各材料に密着している場合に測定

される振動数は、背面側が空洞の場合に測定される振動数と比較して変化すると言える。しかし、縦弾性波のコンクリート背面での反射による振動数の他に背面材料の底面で反射する振動数が測定されるようになるという変化だけではなく、砂・砂利等ではコンクリートと背面材料の中間の厚さが測定されたことから、コンクリート背面での反射による振動数そのものが、背面が空洞の場合と比較して低くなるという変化も生じていると考えられる。

また、音響インピーダンスが空洞に最も近い防水シートでは変化が無く、音響インピーダンスがコンクリートに最も近い捨てコンとその他の材料では変化の状況が異なることから、コン

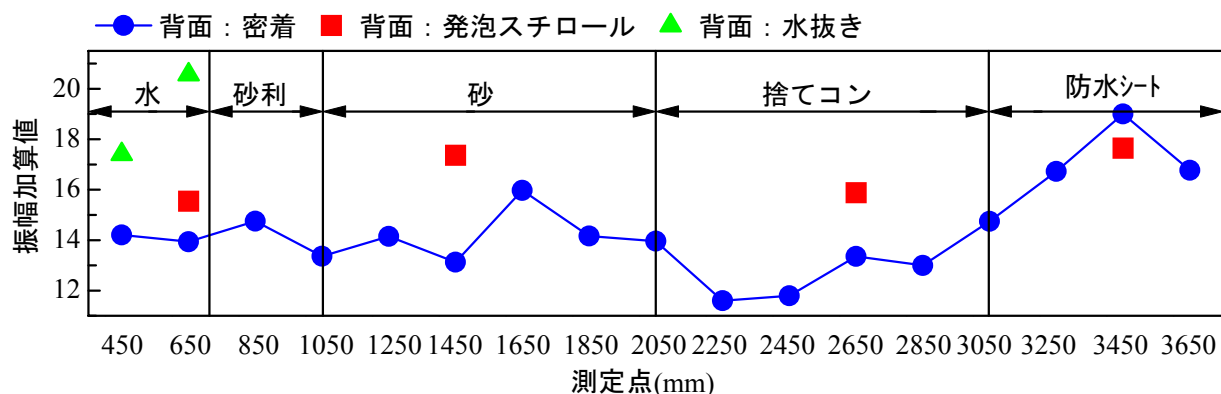


図-4 各測定点での振幅加算値

クリートと背面に密着している材料との音響インピーダンスの比率によって、振動数解析結果に生じる変化の状況は異なるものと考えられる。しかし、断面積 $300 \times 300 \text{mm}$ の発泡スチロール、断面積 $300 \times 700 \text{mm}$ の水部では明確な変化が見られなかったことから、局所的な背面状況の変化には対応されず、測定点の背面付近である程度以上の断面積を持つ背面状況に対応して変化すると考えられる。また、2 材料の境界点となる測定点では、他の測定結果と比較すると、1050 mm では砂利、2050mm では捨てコン、3050mm では防水シートでの測定結果と同様となり、一方の背面材料に対応した結果であった。しかし、どちらかの材料の影響を受けるかについての規則性は確認されなかった。

コンクリートと材料の境界面で反射する縦弾性波の振動数低下の原因については、周知の通り、縦弾性波がコンクリート中を伝搬し、反射する場合は、コンクリートと反射面の材料との音響インピーダンスの比率によって反射波が引張波となるか圧縮波となるかが決定される。測定点に引張波が到達するか、圧縮波が到達するかによって、測定波形の位相は異なり、つまり、背面材料の音響インピーダンスは測定波形の周期性を決定する大きな要因であると考えられる。これから、背面に材料が密着すれば、空洞の場合と音響インピーダンスが異なるので、測定波形の周期性に何らかの影響を及ぼすと推測されるが、今回の実験では原因を特定するには至っていない。

3.2 測定波形の減衰の比較

各背面材料で測定される波形の減衰の程度を比較した。方法は式(2)のように、測定波形の振幅 $y(t)$ の絶対値を加算し、これを最大振幅 y_{max} で正規化した関数を用いて評価する。ここでは、この関数による値を振幅加算値 Y という。

$$Y = \sum_{t=0}^{2ms} |y(t)/y_{max}| \quad (2)$$

各背面材料で Y を比較した結果を図-4 に示す。図-4 より、音響インピーダンスがコンクリートに最も近い捨てコンでは Y の値は小さくなり、音響インピーダンスが空洞に近い防水シート、発泡スチロール、水を抜いた場合では Y の値は大きくなった。つまり、音響インピーダンスがコンクリートに近くなるほど Y の値が小さくなる傾向が確認された。また、断面積の小さい発泡スチロール、水を抜いた場合でも背面側の材料に対応した結果となり、振動数解析結果とは異なり、局所的な背面状況の変化にも良く対応した結果であると言える。

音響インピーダンスがコンクリートに近くなるほど Y の値が小さくなるの原因について考える。コンクリートと背面材料との境界面で反射する縦弾性波の振幅は式(3)で示される反射係数 R によって決定される。つまり、背面材料の音響インピーダンスがコンクリートに近くなるほど、反射波の振幅は小さくなることとなる。

$$R = (Z_C - Z_M) / (Z_C + Z_M) \quad (3)$$

(Z_C : コンクリートの音響インピーダンス
 Z_M : 背面材料の音響インピーダンス)

測定波形は多重反射する縦弾性波の各反射波が合成されたものである。これから、背面材料の音響インピーダンスがコンクリートに近く、反射波の振幅が小さくなる背面材料ほど、時間経過後の測定波形の振幅が小さくなる。Yは測定波形の時間減衰に対応する値であるので、音響インピーダンスがコンクリートに近くなるほどYの値が小さくなったものと考えられる。

また、図-2より、背面が捨てコンに密着している場合での振動数スペクトルは複数の振動数が卓越したが、捨てコンでは反射波の振幅が特に小さくなっている。これから、捨てコンではコンクリートと背面材料との境界面での多重反射による振動数成分の振幅が小さくなったため、他の振動数成分の振幅が相対的に大きくなり、複数の振動数が卓越したものと考えられる。

4. まとめ

背面を異なる材料と密着させた供試体を用いて、縦弾性波の反射面の材質によって測定結果がどのように変化するかについて実験した。その結果を以下に示す。

- (1)コンクリート背面が材料に密着している場合に測定される振動数は、背面に密着している材料の音響インピーダンスによって変化する。変化状況は背面に密着している材料の音響インピーダンスによって異なり、縦弾性波のコンクリート背面での反射による振動数と背面材料の底面で反射する振動数の両者が測定されるという変化だけではなく、コンクリート背面での反射による振動数そのものが、低くなる変化も生じていると考えられる。しかし、断面積の小さい背面材料には対応されず、ある程度以上の断面積を持つ背面材料に対応して変化する。
- (2)コンクリート背面に密着している材料によって、コンクリート背面で反射する縦弾性波の振幅は異なる。これから、背面材料の音響インピーダンスがコンクリートに近くなるほど、測定波形の時間減衰は大きくなる。また、

この変化は断面積の小さい背面状況の変化にも良く対応する。

- (3)背面側が地盤等に密着したコンクリート構造物で衝撃弾性波法による振動数解析を適用する場合には、コンクリート背面での反射による振動数が低く変化することから、安易に厚さ測定はできないと言える。また、コンクリート背面での多重反射による振動数成分の振幅が小さくなることにより、他の振動数成分が卓越する場合が考えられるので、この振動数成分の卓越が内部の空洞によるものであるなどの判断は、安易にできないと言える。

しかし、振動数解析結果と測定波形の減衰の両者から判断すれば、材料に密着したコンクリート背面からの反射した縦弾性波なのか、空洞から反射した縦弾性波なのかの推定や、背面材料の音響インピーダンスの推定も含めた測定に可能性があると考えられる。

なお、本研究は独立行政法人土木研究所との共同研究で行ったものであり、論文は研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書、国土交通省土木研究所 共同研究報告書 第268号, pp.168-172, 2001.3
- 2) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭, 森濱和正: 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001.6
- 3) Sansalone, M. and Streett, W.B., Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, pp.143-150, 1997
- 4) 岩野聡史 他: 衝撃弾性波法によるコンクリート厚さ測定における背面地盤の影響について, 第30回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 第V部門, No.33, 2002.3