

論文 衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度推定方法の検討

岩野 聡史^{*1}・森濱 和正^{*2}・極檀 邦夫^{*3}・境 友昭^{*4}

要旨： 衝撃弾性波法によるコンクリートの圧縮強度の推定では、コンクリート構造物で弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度の関係式を換算式として、圧縮強度を算出する。筆者らは、推定精度の向上には測定構造物ごとに弾性波速度と圧縮強度の関係を調査し、換算式を設定する必要があると提案してきた。そこで、新設構造物である3構造物11部材を測定対象として、提案する方法により圧縮強度を推定する実験を行った。さらに、推定精度の検証や、より簡易な換算式の設定方法の検討を行い、衝撃弾性波法による新設構造物における圧縮強度の推定手順を提案した。

キーワード： 新設構造物, 強度管理, 衝撃弾性波法, 弾性波速度, 圧縮強度

1. はじめに

筆者らは、新設コンクリート構造物の強度管理方法として適用されることを目的として衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度の推定方法について検討している¹⁾。本法は、コンクリート構造物で弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度の関係式を換算式として、圧縮強度を算出する方法である。この方法から、推定精度には換算式が大きく影響するが、弾性波速度と圧縮強度の関係はコンクリートの配合等により変化することから、筆者らは、推定精度の向上には測定構造物ごとに換算式を設定する必要があると提案している。新設構造物では、コンクリート打設時に管理用の円柱供試体を製作することから、換算式の設定方法にこの円柱供試体を利用することが有効であると考えられる。そこで、今回は新設構造物である3構造物11部材を測定対象として、打設時に製作した円柱供試体により弾性波速度と圧縮強度の関係を調査し、その結果から換算式を設定して、実構造物での弾性波速度の測定結果から圧縮強度を推定する実験を行った。さらに、推定精度の検証や、より簡易な換算式の設定方法の検討を行い、

衝撃弾性波法による新設構造物における圧縮強度の推定手順について検討したので報告する。

2. 実験概要

2.1 実験内容

実験を行った構造物の一覧を表-1に示す。全て新設構造物であり、3構造物11部材である。コンクリートの種類は5種類である。

これらの構造物に対し、2.2節に示す手順により、衝撃弾性波法により圧縮強度を推定し、測定点の近傍で小径コア(φ25mm)を採取して行った圧縮試験結果との比較を行ない、推定精度の検証や、推定手順について検討した。

2.2 衝撃弾性波法による圧縮強度推定手順

(1) 弾性波速度と圧縮強度の関係調査

各構造物各部材の打設時に製作した円柱供試



写真-1 円柱供試体での弾性波速測定状況

*1 リック(株)技術研究所技術開発グループ 所長代理 (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 iTECS 技術協会 理事長 工修 (正会員)

*4 アプライドリサーチ(株) 代表取締役 工博

体（写真-1）に対し、弾性波速度、圧縮強度を測定し、両者の関係式を得た。

(2) 実構造物での弾性波速度測定、圧縮強度の推定

実構造物で弾性波速度を測定し、(1)により得られた、弾性波速度と圧縮強度の関係式から、実構造物の圧縮強度を推定した。

3. 実験結果

3.1 弾性波速度と圧縮強度の関係

打設時に製作した円柱供試体により、弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係を調査した。調査方法は、材齢変化により弾性波速度と圧縮強度を変化させ、両者の関係式を得る方法である。測定した材齢は7日程度、28日程度の2回で、弾性波速度を測定したその後に圧縮試験を行った。養生方法は封緘養生、水中養生の2種類である。弾性波速度の測定方法は、鋼球打撃により発生する縦弾性波が長手方向へ多重反射することにより生成される周波数を求め、円柱供試体の長さから計算した。

全部材での調査結果を図-1に、構造物A P36での調査結果を図-2に、構造物Bでの調査結果を図-3に示す。図-1より、弾性波速度と圧縮強度には正の相関関係が確認されるが、11部材の5種類の配合での結果が混在したものであり、相関係数は0.77程度である。また、配合によっては両者の関係が大きく異なることが明確な結果である。

両者の相関関係は、弾性波速度 V_p は弾性係数 E と密度 ρ とポアソン比 ν により式(1)の関係にあること、コンクリートの圧縮強度 f_c と動弾性係数 E_D は式(2)の関係にあること²⁾、この両式により成立する関係である。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$E_D = A \cdot f_c^B \quad (2)$$

ここに A, B は係数コンクリートの配合等によって決定される係数である。従って、配合が異なるコンクリート間においては、密度、ポアソ

表-1 実験を実施した構造物

構造物	測定対象部材			コンクリート種類
	橋脚	P35	フーチング	
A	橋脚	P35	フーチング	27-8-20BB
			橋脚上部	30-8-20N
			橋脚下部	30-8-20N
	橋脚	P36	フーチング	27-8-20BB
			橋脚上部	30-8-20N
			橋脚下部	30-8-20N
橋脚	P37	フーチング	27-8-20BB	
		橋脚上部	30-8-20N	
		橋脚下部	30-8-20N	
B	PCホロースラブ	上部	36-8-20H	
C	橋脚	フーチング	24-8-20BB	

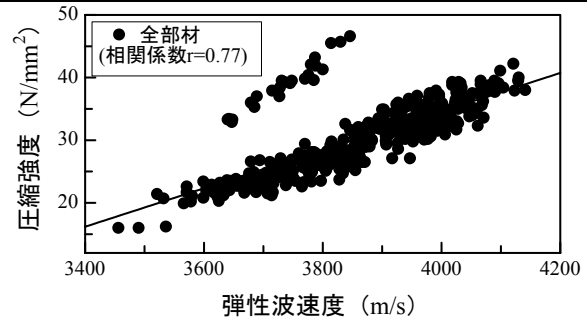


図-1 弾性波速度と圧縮強度の関係（全部材）

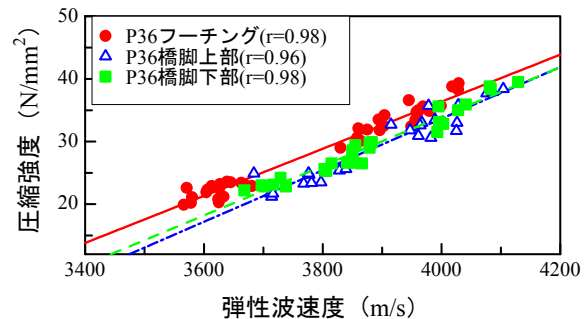


図-2 弾性波速度と圧縮強度の関係（構造物A P36）

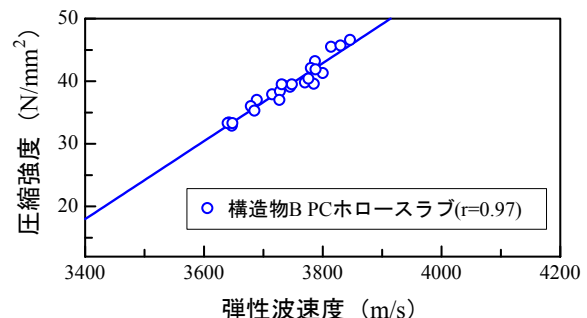


図-3 弾性波速度と圧縮強度の関係（構造物B）

ン比、式(2)での係数が異なり、弾性波速度と圧縮強度の一つの関係式を得ることは困難となる。

一方、部材毎に両者の関係を示した図-2、3では両者は強い相関関係が確認された。ここでは、封緘養生、水中養生が混在した結果である

表-2 弾性波速度と圧縮強度の関係式

構造物	測定対象部材		コンクリート種類	係数a	係数b	相関係数	
A	橋脚	P35	フーチング	27-8-20BB	3.51×10^{-2}	-105.8	0.96
			橋脚上部	30-8-20N	3.92×10^{-2}	-123.0	0.96
			橋脚下部	30-8-20N	3.64×10^{-2}	-111.8	0.95
	橋脚	P36	フーチング	27-8-20BB	3.76×10^{-2}	-114.0	0.98
			橋脚上部	30-8-20N	4.11×10^{-2}	-130.9	0.96
			橋脚下部	30-8-20N	3.95×10^{-2}	-124.0	0.98
	橋脚	P37	フーチング	27-8-20BB	3.63×10^{-2}	-110.4	0.97
			橋脚上部	30-8-20N	3.80×10^{-2}	-115.8	0.96
			橋脚下部	30-8-20N	3.87×10^{-2}	-117.8	0.96
B	PCホロースラブ	上部	36-8-20H	6.22×10^{-2}	-193.6	0.97	
C	橋脚	フーチング	24-8-20BB	3.55×10^{-2}	-109.2	0.94	

が、これらの養生方法の違いには影響されず、同一部材のコンクリートであれば、弾性波速度と圧縮強度には一つの関係式が得られることが確認された。また、図-2 では同一配合の橋脚上部と下部での結果を示しているが、両部材での回帰直線はほぼ一致した結果であった。これからも関係式は、コンクリートの配合によって決定されることが確認される。

全部材のコンクリートで得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式の係数、相関係数を表-2に示す。なお、式(1)、式(2)では両者の関係式は指数曲線となるが、今回の実験ではサンプル数の問題から式(3)に示す直線回帰とした。

$$f_c = a \cdot V_p - b \quad (a, b: \text{係数}) \quad (3)$$

3.2 実構造物での弾性波速度の測定による圧縮強度の推定結果

3 構造物 11 部材において、構造物で直接弾性波速度を測定し、3.1 節で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式を換算式として、圧縮強度を推定した。弾性波速度の測定状況図を図-4に示す。加速度センサーをコンクリート表面に2点設置し、一直線上の点をφ10mmの鋼球で打撃し、縦弾性波の表面を伝搬する成分の到達時間差を計測して、弾性波速度を測定した。なお、各測定点について、2 受信点間の距離 L は200mm から 100mm 間隔で 1000mm までとし、各距離で得られた弾性波速度を平均化したものを、その測定点での弾性波速度とした。

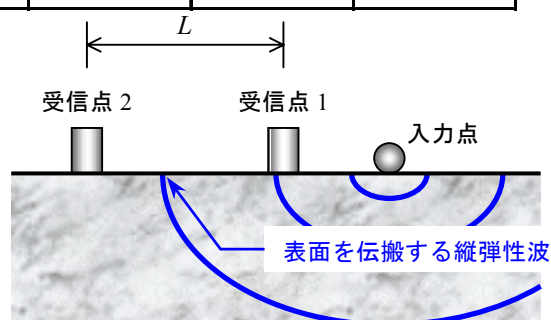


図-4 弾性波速度測定方法



写真-2 測定物全景（構造物 A, P37）

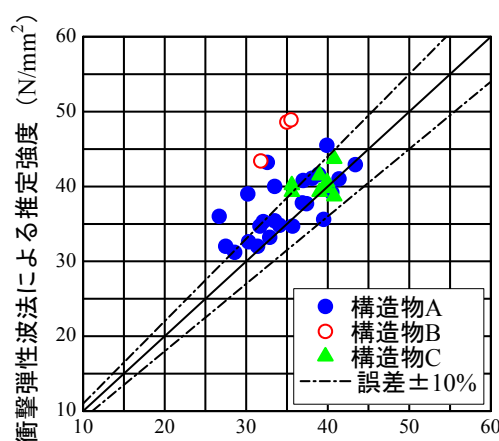


図-5 実構造物での強度推定結果

各部材で得られた弾性波速度と圧縮強度推定結果と測定点近傍で採取したφ25mmの小径コアによる圧縮試験結果との比較を表-3、図-5に示す。なお、小径コアによる圧縮試験は材齢28日で実施したのに対し、衝撃弾性波法による測定材齢は28日とは限らない。そこで、式(4)による材齢変化による予測式³⁾を用いて、各材齢 t で推定された強度 $f_c(t)$ から、28日強度 f_{c28} を計算して比較した。

$$f_{c28} = \left(\frac{a+bt}{t \times d} \right) \times f'_c(t) \quad (4)$$

ここに、 a, b, d はセメントの種類によって変化する係数である。

比較結果より、両者の誤差は概ね10%の範囲内であった。誤差が20%以上となった部材を見ると、構造物A P35 フーチング、P36 フーチングでは、小径コアによる圧縮試験結果は、同一部材内に他測定点に比べ強度が小さくなる点が存在するのに対し、衝撃弾性波法による推定結果では、同一部材内での強度差が生じなかったことによる。衝撃弾性波法は2点のセンサーを1000mmまで離間して弾性波速度を測定することから、この範囲での平均的な強度が算出されることによる。

表-3 実構造物での強度推定結果

構造物	測定部材	弾性波速度 (m/s)	推定圧縮強度 (N/mm ²)		③圧縮試験結果 (N/mm ²)	誤差 (②/③)	
			①測定時	②28日予測			
A	P35	フーチング	4043	36.0	36.0	26.7	1.35
			3962	33.2	33.2	32.9	1.01
			4026	35.4	35.4	33.5	1.06
			4008	34.8	34.8	34.1	1.02
			3929	32.0	32.0	27.5	1.16
		4005	34.7	34.7	35.7	0.97	
		橋脚上部	4005	34.0	42.9	43.4	0.99
			3966	32.5	41.0	41.4	0.99
		橋脚下部	4049	35.7	37.8	36.9	1.02
	3969		32.8	34.7	31.7	1.09	
	P36	フーチング	4027	37.4	39.0	30.2	1.29
			4034	37.6	39.2	40.5	0.97
			4094	39.9	41.6	38.9	1.07
		橋脚上部	3953	31.7	45.5	39.9	1.14
			3914	30.1	43.2	32.6	1.33
		橋脚下部	4039	35.5	40.0	33.5	1.19
	P37	フーチング	3934	31.4	35.3	32.1	1.10
			3904	31.2	31.2	28.6	1.09
			4025	35.6	35.6	39.5	0.90
		橋脚上部	4082	37.7	37.7	37.4	1.01
			3928	33.6	41.1	38.1	1.08
3920			33.3	40.8	37.0	1.10	
橋脚下部		3853	31.3	32.6	30.3	1.08	
		3839	30.8	32.0	31.4	1.02	
		PCホロースラブ	3688	35.9	43.4	31.8	1.13
3757	40.2		48.6	35.0	1.15		
3761	40.5		48.9	35.5	1.14		
C	橋脚	北面	4035	34.0	40.6	39.9	1.02
			4015	33.3	39.8	39.9	1.00
		東面	4026	33.7	40.2	35.6	1.13
			4003	32.9	39.3	35.6	1.10
		西面	4057	34.8	41.5	39.0	1.07
			4004	32.9	39.3	39.0	1.01
		南面	3989	32.4	38.7	40.8	0.95
			4108	36.6	43.7	40.8	1.07

4. 簡易な換算式設定方法の検討

4.1 検討目的, 方法

3章に示した推定結果では、一定の成果が確認されたが、円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査方法には改善点があると考えられる。3.1節の調査方法(通常法と呼ぶ)では、材齢毎に弾性波速度と圧縮強度の両者を測定する必要があり、さらに、調査回数を3回とすれば、1回に用いる円柱供試体の本数が3体であることから、9体の円柱供試体が必要となるように、多くの円柱供試体を必要とする。

そこで、圧縮試験を材齢28日の1回のみとし、3体の円柱供試体のみで両者の関係を調査する

方法(簡易法と呼ぶ)を検討した。以下にその手順を示す。

1)円柱供試体を3体製作する。2)養生期間中である材齢7日、14日、21日に弾性波速度を測定する(写真-3)。3)材齢28日に弾性波速度測定と圧縮試験を行う。4)3)での圧縮試験結果 f_{c28} から材齢7日、14日、21日での圧縮強度 $f_c(t)$ を式(4)により予測する。5)2)~4)から得られた弾性波速度と圧縮強度の関係を調査する。

以上の簡易法を、今回実験した3構造物11部材の材齢28日で圧縮試験を行う円柱供試体で、封緘養生と水中養生で実施し、3.1節(通常法)で得られた結果と比較した。

4.2 検討結果

表-4 に簡易法で得られた弾性波速度と圧縮強度の相関係数，簡易法で得られた関係式と通常法で得られた関係式との寄与率を示す。表-4 より，簡易法の養生方法は封緘養生と水中養生の2種類あるが，相関係数，寄与率とも簡易法（水中養生）の方が高い結果となった。図-6 に弾性波速度と圧縮強度の関係について，構造物 A P37 橋脚下部での各方法での比較を示す。通常法は養生方法の違いには影響されず，一つの関係式が得られる。一方，簡易法では養生方法によって関係が異なり，簡易法（水中養生）は通常法と近い関係を示すが，簡易法（封緘養生）では通常法と比較すると同一強度で測定される弾性波速度が遅くなった。

簡易法（封緘養生）で測定される弾性波速度が遅くなる原因は，測定方法の問題が考えられる。ここでは写真-3 に示すとおり，容器から脱型せずに，梱包したままの状態弾性波速度を測定したが，コンクリート背面に材料が密着している状態では，周波数解析結果に影響が生じる⁴⁾。周波数解析結果の例を図-7 に示すと，縦弾性波の多重反射による周波数は 9kHz 付近であるが，他の方法では1周波数成分のみで卓越したのに対し，簡易法（封緘養生）では2成分で卓越し，さらに，周波数が低く変化した。これから，正確な周波数が測定されずに，測定上の弾性波速度が遅くなったものと考えられる。

以上から，脱型せずに，梱包したままの円柱供試体を用いて測定した弾性波速度は信頼性が低く，さらに，実際の弾性波速度よりも遅く測定されることから，ここで得られた関係式を用いれば，実構造物で正確な弾性波速度を測定した場合には強度を過大に評価することとなり，適用には課題がある。精度向上には容器から脱型する等の改善が必要と考えられる。一方，簡易法（水中養生）の結果では，通常法との差は微小であることから，弾性波速度と圧縮強度の関係式を得る方法として，水中養生中の円柱供試体による簡易法が適用できるものと期待される。



写真-3 養生中の円柱供試体状況
(上：封緘養生中，下：水中養生中)

表-4 弾性波速度と圧縮強度の関係調査方法の比較

構造物	測定部材	簡易法 (封緘養生)		簡易法 (水中養生)		
		相関係数	通常法との寄与率	相関係数	通常法との寄与率	
A	P35	フーチング	0.85	0.87	0.93	0.98
		橋脚上部	0.93	0.77	—	—
		橋脚下部	0.74	0.74	0.82	0.93
	P36	フーチング	0.82	0.83	0.98	0.99
		橋脚上部	0.90	0.84	0.90	0.98
		橋脚下部	0.92	0.93	0.97	0.98
P37	フーチング	0.87	0.96	—	—	
	橋脚上部	0.97	0.94	0.98	0.94	
	橋脚下部	0.92	0.84	0.99	0.84	
B	PCホロースラブ	0.84	0.53	0.94	0.93	
C	橋脚	0.95	0.96	0.99	0.92	
平均値		0.88	0.84	0.95	0.94	

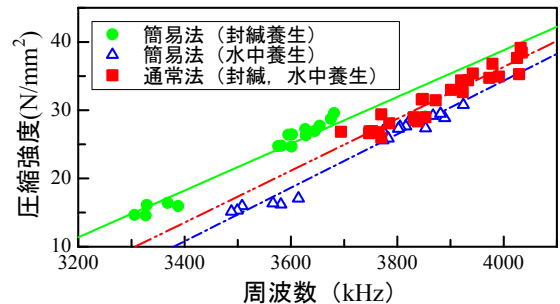


図-6 各方法によるでの弾性波速度と圧縮強度の関係（構造物A P37橋脚下部）

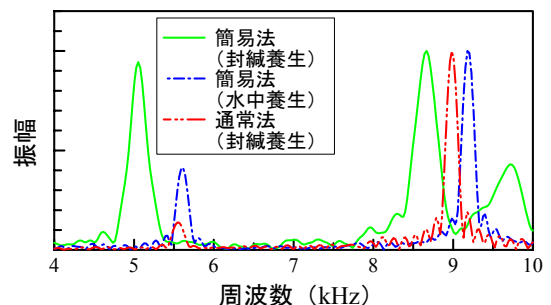


図-7 各円柱供試体での周波数解析結果（構造物A：P36）

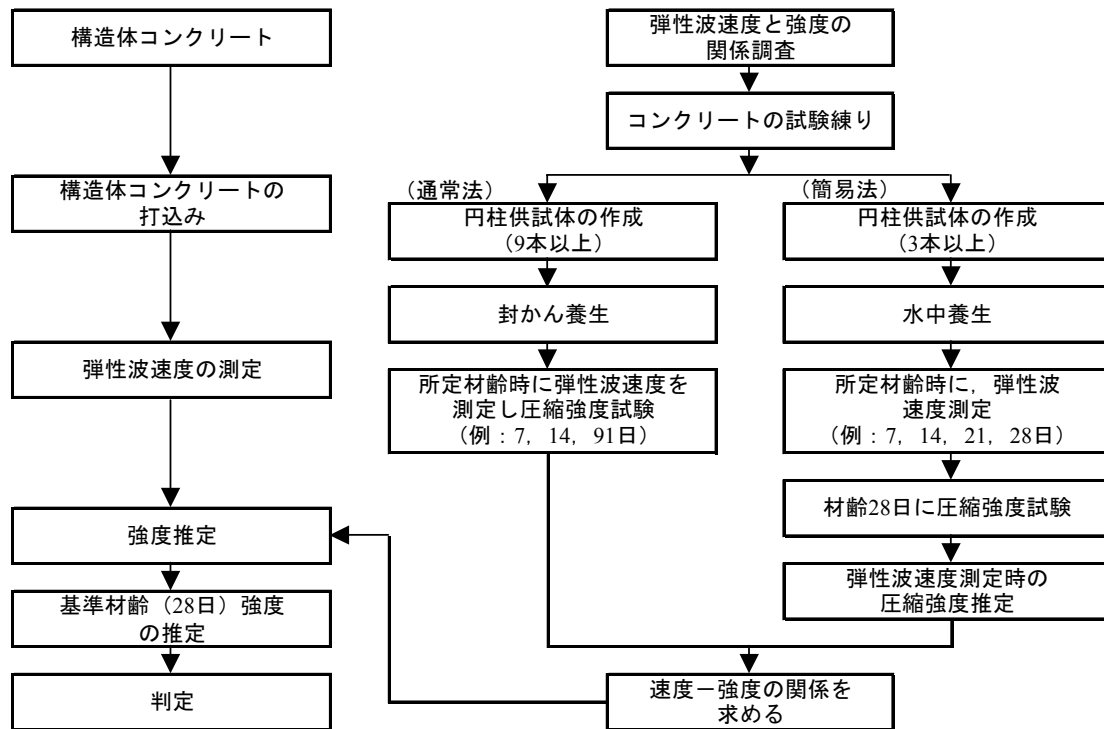


図-8 提案される衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度推定手順

5. 衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度推定手順の提案

3章、4章の実験成果から提案される、衝撃弾性波法による圧縮強度推定手順を図-8に示す。弾性波速度から圧縮強度への換算式は配合毎に設定する必要があるが、実構造物で測定した弾性波速度からこの換算式により圧縮強度を推定する。また、換算式は簡易法(水中養生)により、通常法と同等の式が得られるものと期待される。

6. まとめ

新設コンクリート構造物の強度管理方法への適用を目的とし、衝撃弾性波法による圧縮強度の推定精度の検証や、簡易な換算式の設定方法の検討を行った。その結果、1)弾性波速度と圧縮強度の関係はコンクリートの配合により異なることから、弾性波速度から圧縮強度への換算式は配合毎に設定する必要がある。2) 1)により設定した換算式を用いて、実構造物で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定すると、小径コアによる結果との誤差は概ね±10%以内となった。3)弾性波速度と圧縮強度の換算式の設定方法として、簡易法を検討した。その結果、水中

養生中の円柱供試体による簡易法により、通常法と同等の換算式が得られることが確認された。

以上の実験成果から衝撃弾性波法による新設コンクリート構造物での圧縮強度推定手順を提案したが、今後は、この手順を検証して改善する予定である。

最後に、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) 岩野聡史, 森濱和正, 境友昭, 極檀邦夫: 衝撃弾性波法による新設供試体でのコンクリートの圧縮強度の推定, 土木学会第60回年次学術講演概要集第V部, pp.49-50, 2005.9
- 2) 河野清, 田澤栄一, 門司唱: 新しいコンクリート工学, 朝倉書店, 1987.5
- 3) (社)土木学会, 2002年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp.52, 2002.3
- 4) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1887-1892, 2004.6