

コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発

—コンクリートの構成材料が弾性波速度に及ぼす影響—

Development of Nondestructive Inspection Method for Estimating Concrete Strength
—Influence of Component Materials in Concrete on Elastic Wave Velocity—

立見 栄司 EIJI TATSUMI

ものづくり大学 中田 善久 YOSHIHISA NAKATA

ものづくり大学 河谷 史郎 SHIRO KAWATANI

コンクリートの圧縮強度を衝撃弾性波の伝播速度を用いて推定する非破壊圧縮強度推定法において、弾性波速度と圧縮強度との適切な関係を確立することは、推定強度の精度や妥当性の観点から非常に重要である。コンクリートの弾性波速度や圧縮強度は、構成材料、調合、養生方法および含水率などに依存する。本報告ではこれらの影響要因を円柱供試体により検討し、適切な圧縮強度推定式の誘導と適用範囲について述べる。

キーワード：コンクリート、非破壊検査、衝撃弾性波、弾性波速度、圧縮強度

On a nondestructive inspection method for estimating compressive strength of concrete using velocity of impact-elastic wave, it is very important for improving the accuracy to establish appropriate relation between the elastic wave velocity and the strength. This paper describes the influence of component materials in concrete on the velocity and the strength, and proposes the estimating formula of the compressive strength.

Key Words: Concrete, Nondestructive Inspection, Impact-Elastic Wave, Elastic Wave Velocity, Compressive Strength

1. はじめに

筆者達はコンクリートの圧縮強度を従来の反発度法や超音波法^{1),2)}とは異なる衝撃弾性波の伝播速度から推定する手法、いわゆる「衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法」³⁾を開発した。この方法は、強度を測定する部位に振動検出器を当て、その近傍をハンマーで軽く叩くという極めて簡便な方法で圧縮強度が推定できることに特徴がある。

昨年度、現場展開を意図した試作機を作製し、主として場所打ちコンクリート杭の杭頭強度確認や施工段階における壁・スラブ・梁の強度推定など、施工時の強度管理に適用した結果、高い実用性を確認した⁴⁾。

一方、コンクリートの粗骨材の種類、粒径および量や含水率などが弾性係数や超音波速度（音速）に影響を及ぼすことは^{5),6)}既に明らかにされている。本手法は、コンクリート表面で弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との関係を用いて強度を推定しているため、それ

らの要因は推定結果に誤差として影響を与える可能性があると考えられる。そこで、本手法の適用範囲の設定および強度推定の精度向上の観点から、コンクリートの使用材料、調合、養生方法および含水率など、コンクリートの構成材料が弾性波速度と圧縮強度との相関関係に及ぼす影響について検討する必要があると考える。

本報告では、コンクリートの弾性波速度や圧縮強度に影響を及ぼす可能性がある要因・因子を洗い出し、それぞれに水準を設定し、円柱供試体により弾性波速度測定および圧縮強度試験を行い、弾性波速度と圧縮強度との相関関係を求め、その影響度合を検討するとともに圧縮強度推定式の設定に反映させる。

2. コンクリートの強度推定に及ぼす影響要因

(1) 影響要因と因子および水準

コンクリートの弾性波速度または圧縮強度に影響を及ぼす可能性がある要因および因子を表-1に示す。影響要

表-1 影響要因と因子

影響要因	影響因子	水準
使用材料	セメントの種類	普通ポルトランドセメント
		早強ポルトランドセメント
		高炉セメントB種
	粗骨材の最大寸法(mm)	20、25、40
	粗骨材の種類	硬質砂岩
		石灰石
	粗骨材の表面粗さ	砕石
細骨材の種類	川砂、山砂	
混和剤	AE減水剤、高性能AE減水剤	
調合	水セメント比(%)	30、40、50、60
	粗骨材のかさ容積(m ³ /m ³)	0、0.5、0.6、0.68
	スランブ(cm)	12±2.5、18±2.5
	空気量(%)	4.5±1.5、10%以上
供試体	養生方法	標準水中養生
		気中養生
		封緘養生
	材 齢(日)	7、14、28、56(、91)
	供試体形状(mm)	φ100×200、φ150×300
含水率	(相関関係の変化)	

因のうち使用材料に関する因子には、セメントの種類、粗骨材の最大寸法、粗骨材の種類、粗骨材の表面粗さ、細骨材の種類および混和剤がある。同様に調合には水セメント比、粗骨材のかさ容積、スランブおよび空気量がある。また、供試体には養生方法、材齢、供試体形状および含水率がある。これらの影響因子に対し、それぞれ表-1の3列目に実験で扱う水準を設定した。

なお、粗骨材の表面粗さの水準として砕石と砂利があるが、近年砂利は殆ど使用されていないので省略した。

(2) 影響因子と水準

前節に示す影響因子の中から、本報告では表-2に示すように、比較的重要な因子として考えられるセメントの種類、水セメント比、粗骨材の最大寸法、粗骨材の種類、粗骨材のかさ容積、スランブ、空気量、混和剤および形状に対して水準を考慮した円柱供試体を作製し、所定の養生方法および材齢に基づいた弾性波速度測定および圧縮強度試験を行い、弾性波速度と圧縮強度との関係を求めた。

表-2 弾性波速度と圧縮強度に対する影響因子と水準

要因・水準	セメント種類			水セメント比(%)				粗骨材								スランブ ¹⁾ (cm)		空気量(%)		混和剤		供試体形状(φ)		養生方法			材齢(日)									
	N	H	BB	30	40	50	60	20	25	40	硬質	石灰	軽量	0	0.50	0.60	0.68	12	18	4.5	10	AE	HAE	100	150	標準	気中	封緘	7	14	28	56	91			
セメント種類	●	●	●	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
水セメント比	●	-	-	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	*1	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
粗骨材最大寸法	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	*2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
粗骨材種類	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
粗骨材量	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
スランブ	●	-	-	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
空気量	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
混和剤	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
供試体形状	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
養生方法	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

●:実施、○:重複項目、*1:水セメント比が30%の場合のみ、*2:粗骨材の最大寸法が40mmの場合のみ

硬質:硬質砂岩、石灰:石灰岩、軽量:人口軽量骨材、AE:AE減水剤、HAE:高性能AE減水剤

表-3 コンクリート供試体の主材料

主材料	種類・性質
セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³ 、比表面積3,280cm ² /g)
	早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm ³ 、比表面積4,490cm ² /g)
	高炉セメントB種(密度3.04g/cm ³ 、比表面積3,800cm ² /g)
細骨材	茨城県真壁郡関城町関城肥土地先産洗砂(密度2.58g/cm ³ 、吸水率2.82%、粗粒率2.60、実積率67.0%)
粗骨材(硬質砂岩)	埼玉県秩父産硬質砂岩の砕石(密度2.71g/cm ³ 、吸水率0.55%、粗粒率6.56、実積率58.8%)
粗骨材(石灰岩)	高知県産石灰石の砕石(表乾密度2.69g/cm ³ 、吸水率0.37%、粗粒率6.73、実積率61.3%)
粗骨材(軽量骨材)	人工軽量骨材:日本メサライト工業株式会社(表乾密度1.65g/cm ³ 、吸水率28.0%、粗粒率6.35、実積率60.0%)
混和剤	AE減水剤:リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体(ポゾリスNo.70)
	高性能AE減水剤:ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体(レオビルドSP8S(B))
	空気量調整剤:アルキルアルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤(ポゾリスNo.303A)

3. 実験概要

(1) コンクリート供試体

実験に用いたコンクリート供試体は、φ100×200mmの円柱供試体であり、形状の比較にはφ150×300mmの供試体を使用した。

コンクリートの主材料の種類および性質を表-3に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを基準とし、比較として早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた。細骨材は茨城県真壁郡関城町産の川砂を用い、粗骨材は埼玉県秩父産の硬質砂岩の砕石を基準とし、粗骨材の種類の比較対象として高知県産の石灰石の砕石および日本メサライト社の人工軽量骨材を使用した。

混和剤には、減水剤として水セメント比が40%以上の場合、ポゾリスNo.70のAE減水剤を、水セメント比が30%の場合、レオビルドSP8S(B)の高性能AE減水剤を使用し、空気量調整剤としてポゾリスNo.303Aを使用した。

表-4, 5, 6にコンクリートの調合と実測スランブおよび空気量を示す。表-4は、セメントの種類、水セメント比および粗骨材のかさ容積を変えた調合であり、粗骨材は硬質砂岩の砕石で、最大寸法は20mm、目標スランブは12cmである。

表-4 コンクリートの調合と実測スランプ、空気量

セメントの種類	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)		実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
				W	C	S	G	No.70	303A		
普通ポルトランドセメント	0.60	60	48.9	174	290	870	954	0.87	0.0087	10.4	6.0
		50	47.4	175	350	818	954	1.05	0.0088	13.0	5.3
		40	45.1	175	438	747	954	1.31	0.0088	12.0	4.6
		30	41.9	170	567	654	954	*4.53	0.0096	14.0	4.2
	0.68	41.1	170	340	718	1082	1.02	0.0102	13.5	4.6	
	0.50	55.6	180	360	948	795	1.08	0.0072	9.6	5.3	
早強セメント 高炉B種	0.6	0.0	100	287	575	1318	0	1.72	-	24.0	4.2
		47.3	175	350	816	954	1.05	0.0105	12.8	4.6	
			47.0	175	350	807	954	1.05	0.0088	14.2	4.9

*はSP8S(B)を示す

表-5 コンクリートの調合と実測スランプ、空気量

セメントの種類	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)		実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
				W	C	S	G	No.70	303A		
普通ポルトランドセメント	0.60	60	47.6	185	308	826	954	1.23	0.0108	20.3	5.4
		50	46.3	183	366	784	954	1.28	0.0128	20.2	5.3
		40	43.5	185	463	700	954	1.84	0.0162	19.4	6.0
		30	41.9	170	567	654	954	*5.67	0.0096	20.5	3.9

*はSP8S(B)を示す

表-6 コンクリートの調合と実測スランプ、空気量

影響因子	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)		実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
				W	C	S	G	No.70	303A		
空気量	12	50	45.6	155	310	760	954	0.93	0.0341	14.0	>10
混和剤			48.3	168	336	847	954	*2.35	0.0084	8.0	6.4
石灰石	18	50	45.0	175	350	778	989	1.40	0.0123	19.7	5.5
軽量骨材			45.0	178	356	759	594	1.42	0.0134	19.5	#6.1
25mm			44.9	175	350	775	1001	1.40	0.0114	19.7	6.0
40mm			43.6	172	344	758	1032	1.38	0.0103	17.1	4.5

*はSP8S(B)を示す #は容積法による空気量

他方、表-5 は目標スランプが 18cm の場合で、普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材のかさ容積は 0.6m³/m³ として水セメント比を 30, 40, 50 および 60% とした調査である。さらに、表-6 は、空気量、混和剤、粗骨材の種類および粗骨材の最大寸法による影響を比較するための調査である。共通の水準として、セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材のかさ容積は 0.6m³/m³、水セメント比は 50% である。

供試体の脱型は 24 時間後に行い、所定の養生を施し、材齢 7, 14, 28, 56 および 91 日に弾性波速度測定と圧縮強度試験を行った。

(2) 円柱供試体の弾性波速度測定法

円柱供試体の弾性波速度を求める方法として、2 点間の弾性波の伝播時間差より求める方法は形状的な制約があるので、比較的簡便で安定した測定結果が得られる衝撃弾性波法⁷⁾を用いた。写真-1 に示すように、供試体端面をハンマーで打撃して発生させた軸（縦）方向の衝撃弾性波形を取り込み、スペクトル解析により縦波の重複反射成分の 1 次振動数 f_1 を抽出し、式(1)を用いて弾性波速度を算出した。この振動数 f_1 は共鳴振動法 (JIS A1127) による縦振動数に一致する成分であり、棒状体を伝播する縦波の振動数であると考えられる。したがって、コンクリートの縦波速度（棒状体を伝播する弾性波速度） V_p は、供試体の長さ L として、式(1)で表される。

$$V_p = 2L \cdot f_1 \quad (1)$$

図-1 は円柱供試体より測定した衝撃弾性波形のフーリ

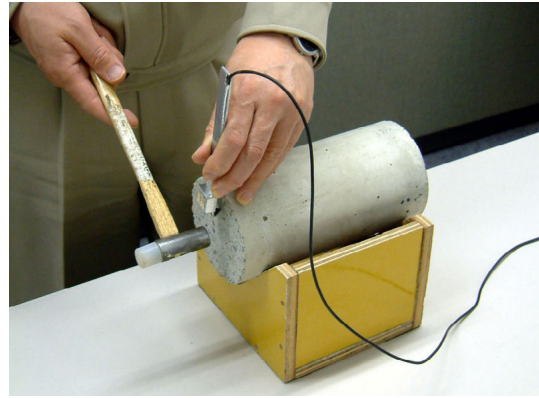


写真-1 円柱供試体の弾性波速度測定状況

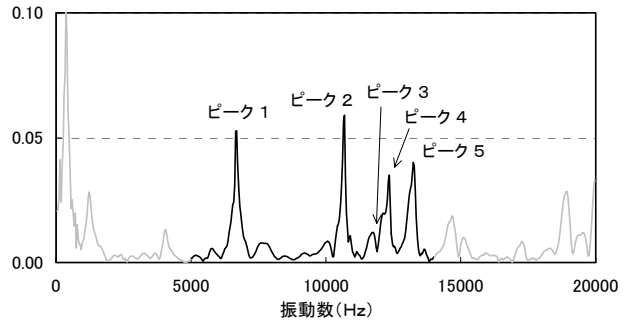


図-1 衝撃弾性波形のフーリエスペクトルと卓越振動数

エスペクトルの一例であり、5000~14000Hz の振動数成分に注目して表示したものである。解析の諸元は、サンプリング周波数が 150kHz、データ数が 4096 個による FFT 解析である。

注目した振動数の範囲には 5 つの顕著なピークがある。共鳴振動法による共鳴振動数との一致性から、ピーク 1 はたわみ振動数、ピーク 2 は縦振動数に相当する。なお、この振動数比は円柱供試体で約 1.61 である。ピーク 3 は、共鳴振動法では明確な共鳴点を示さないが、この振動数を式(1)の f_1 として計算した速度値は超音波法による音速とほぼ一致することから、半無限体を伝播する縦波速度（弾性波速度）の成分であると思われる。また、ピーク 4 は供試体端面の中心から外れた円周付近を打撃した時に顕著に生ずる成分で、共鳴振動法においても同様な位置を加振した時に対応した共鳴振動数を示すことから、たわみ振動と縦振動の連成振動モードであるものと思われる。なお、ピーク 5 はピーク 1 の 2 倍の振動数であることから、たわみ振動の 2 次成分であると考えられる。

したがって、コンクリートの弾性波速度として、ピーク 2 およびピーク 3 から算出される棒状体および半無限体を伝播する縦波速度を測定した。測定速度値は、3 体の円柱供試体の平均値とし、各供試体の速度値は供試体端面の 3 ヶ所をハンマーで打撃して得られた 3 個の速度値の平均値とした。

4. 影響因子の検討

本章で行う影響因子の検討においては、棒状体または半無限体のどちらの弾性波速度で論じても結果は変りないので、棒状体を伝播する縦波速度を弾性波速度として圧縮強度との関係を比較検討した。

(1) 水セメント比の影響

水セメント比を30%, 40%, 50%および60%と変化させた場合の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-2, 図-3に示す。図-2は目標スランプが12cm, 図-3は18cmとしたものである。使用材料の普通ポルトランドセメントおよび粗骨材のかさ容積 $0.6\text{m}^3/\text{m}^3$ は共通とした。なお、材齢は基本的には7, 14, 28, 56および91日としたが、目標スランプが12cmの水セメント比が30%の場合のみ、初期強度領域の傾向を掴むために、材齢1, 2, 3および5日を追加した。

全ての水セメント比において、材齢と共に強度の発現と弾性波速度の増加が見られ、その相関性には共通の傾向が認められた。しかしながら、水セメント比が30%と40, 50, 60%の間には明瞭な相違点もあった。両スランプ共に、水セメント比が40~60%の場合は、弾性波速度と圧縮強度との関係に連続性が認められた。これに対し、水セメント比が30%の弾性波速度と圧縮強度との関係は、40~60%の関係を強度軸の上方に平行移動させたように、同一速度に対して高い圧縮強度を示す傾向となっていた。

図-4, 5は、材齢が28日および91日のセメント水比と弾性波速度との関係およびセメント水比と圧縮強度との関係を示したものである。セメント水比に対する弾性波速度と圧縮強度の増加傾向を比較すると、セメント水比が2.5以下、水セメント比で40%以上の場合、それぞれの増加傾向がリンクしているのに対し、30%の場合は強度の増加率に比較して弾性波速度の増加率が鈍る傾向が認められた。その結果、水セメント比が30%の場合、他に比べて同一速度に対して高い圧縮強度を示すものと思われる。この傾向は低水セメント比のコンクリート特性であると考えられ、それ故に水セメント比が40%以上と30%とで、弾性波速度と圧縮強度との関係が異なったものと思われる。

(2) スランプの影響

図-6は、前節の水セメント比を変えた弾性波速度と圧縮強度との関係を統合し、その関係を目標スランプ別に比較したものである。この結果、両者の相関関係は非常によく合致しており、弾性波速度と圧縮強度との関係にスランプによる影響は極めて少ないと思われる。

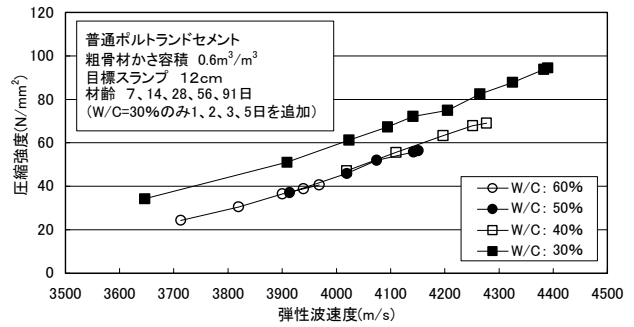


図-2 水セメント比の影響 (目標スランプ 12cm)

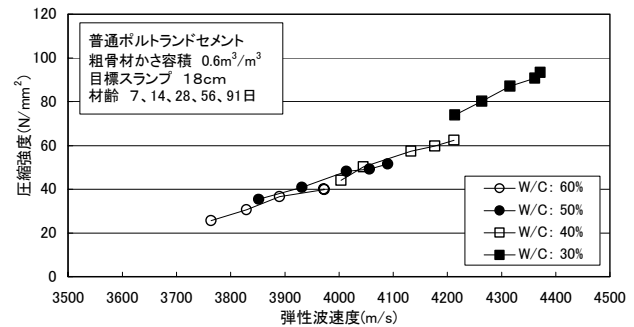


図-3 水セメント比の影響 (目標スランプ 18cm)

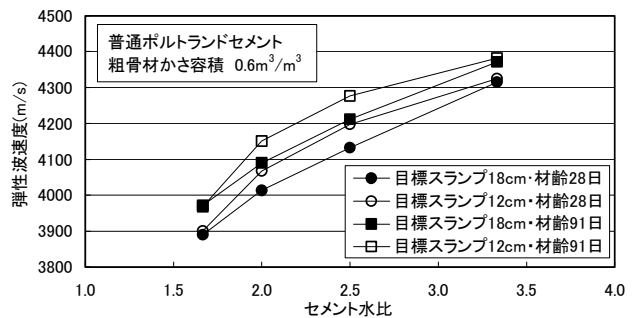


図-4 セメント水比と弾性波速度の関係

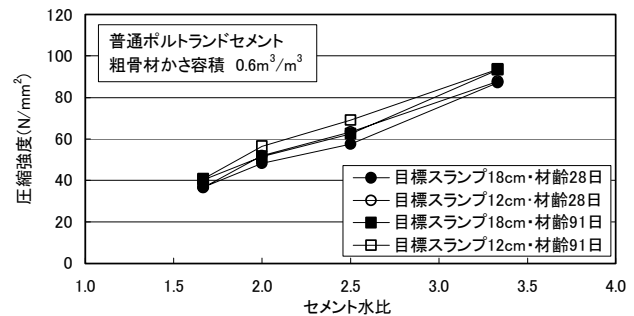


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

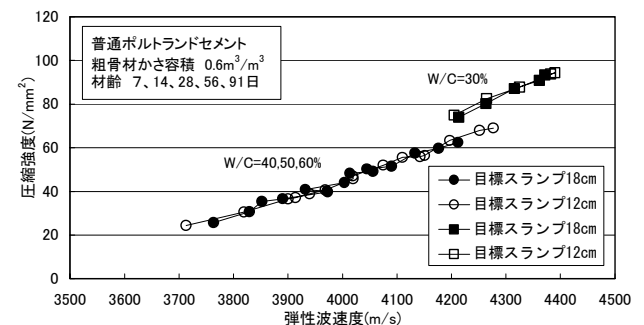


図-6 スランプの影響

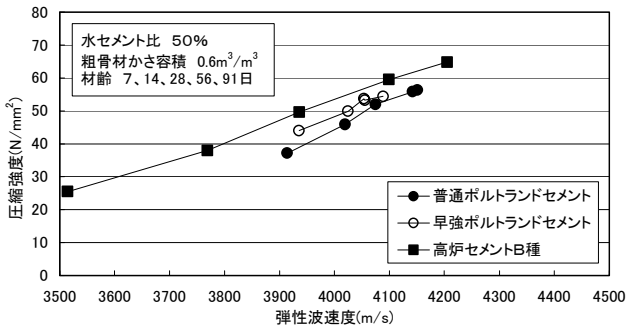


図-7 セメントの種類の影響

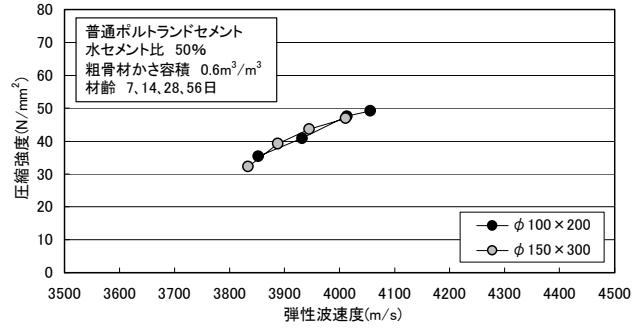


図-9 供試体形状の影響

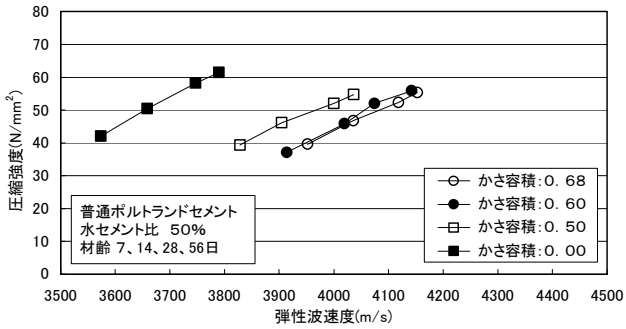


図-8 粗骨材のかさ容積の影響

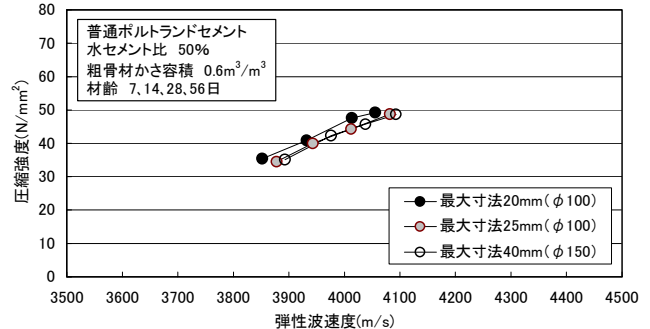


図-10 粗骨材の最大寸法の影響

(3) セメントの種類の影響

セメントの種類として、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-7に示す。セメントの種類により若干の異なる関係が認められた。普通ポルトランドセメントに比較して早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種ともに同一弾性波速度に対して圧縮強度が高い傾向を示した。早強ポルトランドセメントが比較的近い関係にあるのに対し、高炉セメントB種はやや離れた関係にあった。しかしながら、高炉セメントB種は高材齢になるに従い、普通ポルトランドセメントの関係に接近する傾向が見られた。このようなセメントの種類による弾性波速度と圧縮強度との関係の相違は、それぞれの強度発現と弾性波速度の成長特性に起因していると思われる。

(4) 粗骨材のかさ容積の影響

粗骨材のかさ容積を0、0.5、0.6および0.68m³/m³と変化させた場合の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-8に示す。普通ポルトランドセメント、水セメント比50%および目標スランプ12cmは共通とした。

かさ容積が0.6と0.68m³/m³では、ほぼ一致した関係が認められたが、0および0.5m³/m³では、それらと明らかに異なる関係を示していた。この結果から、粗骨材の量の増加とともに弾性波速度も増大するが、0.6m³/m³付近からその割合が飽和するものと思われる。一般的にコン

クリートのかさ容積は0.6~0.7m³/m³の範囲にあるので、この影響は殆ど受けないものと思われる。

なお、かさ容積が0のモルタルと0.6m³/m³のコンクリートとを比較すると、モルタルはコンクリートより弾性波速度で1割程度低い反面、圧縮強度で1割程度高い値を示していた。

(5) 供試体形状の影響

普通ポルトランドセメント、水セメント比50%、粗骨材の最大寸法20mmおよびかさ容積0.6m³/m³の同一コンクリートをφ100×200およびφ150×300の供試体形状で比較した弾性波速度と圧縮強度との関係を図-9に示す。

両者の弾性波速度と圧縮強度との関係はほぼ一致していた。弾性波速度はコンクリートそのものの特性であり、基本的には供試体の形状で変わるものではないが、圧縮強度とともに、供試体の径が小さい方(φ100)が高くなる傾向が認められ、その結果、相関関係が一致したものと考えられる。したがって、供試体形状による影響は殆ど受けないと思われる。

(6) 粗骨材の最大寸法の影響

粗骨材の最大寸法が20、25および40mmの弾性波速度と圧縮強度との関係を図-10に示す。普通ポルトランドセメント、水セメント比50%、かさ容積0.6m³/m³および目標スランプ18cmは共通である。供試体形状は、粗骨材の最大寸法が20mmと25mmの場合はφ100×200であり、最

大寸法が40mmの場合はφ150×300である。供試体形状は異なるが、前節で述べたように、供試体形状の相違は無視できると思われる。

粗骨材の最大寸法を変えた3種類の弾性波速度と圧縮強度との関係には優位な相違が認められなかったので、粗骨材のかさ容積が同じ場合は、最大寸法の影響は少ないものと思われる。

(7) 粗骨材の種類の影響

粗骨材の種類を硬質砂岩、石灰石および人工軽量骨材とした場合の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-11に比較する。普通ポルトランドセメント、水セメント比50%、粗骨材のかさ容積0.6m³/m³、最大寸法20mmおよび目標スランプ18cmなどの調合条件は共通である。

まず、硬質砂岩と石灰石の弾性波速度と圧縮強度との関係を比較すると、両者の相関性に若干の差はあるが、概ね一致していた。石灰石は、硬質砂岩に比べて圧縮強度は僅かに低いが、逆に弾性波速度は速い傾向が認められ、相関関係において同一弾性波速度に対して圧縮強度が若干低い値を示す結果となった。

他方、人工軽量骨材は多孔質の骨材特性を反映し、硬質砂岩に比較して圧縮強度、弾性波速度ともに低く、特に弾性波速度の低下が顕著であったために、弾性波速度と圧縮強度との関係が大きく異なったものと思われる。

(8) 空気量および混和剤の影響

空気量および混和剤を変えた弾性波速度と圧縮強度との関係を図-12に示す。粗骨材のかさ容積が0.6m³/m³、普通ポルトランドセメントによる水セメント比50%などの共通調合に対し、目標空気量4.5%と空気量10%以上の過空気量の比較および高性能AE減水剤とAE減水剤の比較を行った。

過空気量および高性能AE減水剤ともに同一圧縮強度に対して弾性波速度が低くなる傾向が認められた。過空気量の場合は、圧縮強度、弾性波速度共に低下する正の相関性を示すため、弾性波速度と圧縮強度との関係に与える影響は軽減されたものと思われる。高性能AE減水剤の場合は、セメント量が若干少ないためか、弾性波速度と圧縮強度ともに低下したが、弾性波速度の低下量に比べて圧縮強度の低下量が少なかったために、AE減水剤の相関とは一致せず、多少の相違が現れたものと考えられる。この傾向は前節(1)の水セメント比の影響で述べた水セメント比が30%の場合と同様の傾向である。

(9) 養生方法の影響

養生方法を標準水中養生、封緘養生および気中養生と

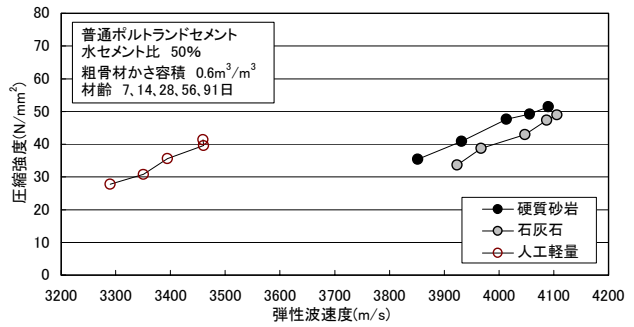


図-11 粗骨材の種類の影響

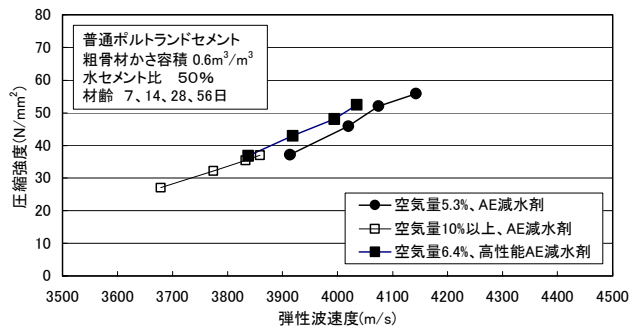


図-12 空気量および混和剤の影響

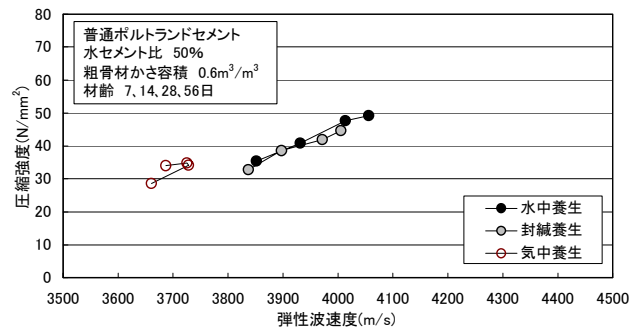


図-13 養生方法の影響

した供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-13に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、水セメント比は50%、粗骨材かさ容積は0.6m³/m³である。

標準水中養生と封緘養生の結果は非常によく一致していた。これは、封緘養生の方が水中養生よりも弾性波速度、圧縮強度ともに低いが、正の相関関係であるために弾性波速度と圧縮強度との関係が一致したと考えられる。

一方、気中養生の場合は、乾燥により、水中養生に比べて弾性波速度と圧縮強度ともに低下し、弾性波速度の方が圧縮強度よりも大きく低下したために、弾性波速度と圧縮強度との関係が異なると考えられる。

(10) 実験結果のまとめ

本章では比較的重要な影響因子として考えられるセメントの種類、水セメント比、粗骨材の最大寸法、粗骨材の種類、粗骨材の量、スランプ、空気量、混和剤、養生方法、材齢および供試体形状が弾性波速度と圧縮強度と

表-7 影響因子と検討結果

影響要因	影響因子	検討結果
使用材料	セメントの種類	・普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントは概ね一致する ・高炉セメントB種は普通PCとは異なる
	粗骨材の最大寸法	・ほとんど影響を受けない
	粗骨材の種類	・硬質砂岩と石灰石は概ね一致する ・人工軽量骨材とは異なる
	混和剤	・AE減水剤と高性能AE減水剤では多少の相違がある
調合	水セメント比	・W/C=40%以上では相関性がほぼ一致するが、それ以下で異なる
	粗骨材のかさ容積	・0.6と0.68m ³ /m ³ はほぼ一致する ・モルタルとコンクリートでは異なる
	スランブ	・ほとんど影響を受けない
	空気量	・10%以上の場合、多少の影響を受ける
供試体	養生方法	・標準水中と封緘養生とはほぼ一致する ・気中養生とは異なる
	材 齢(日)	・材齢は相関性に影響を与えない
	供試体形状	・供試体形状の影響は少ない

の関係に及ぼす影響を検討した。検討結果の要点をまとめて表-7に示す。この結果、上記の要因は、セメントの種類を除き、粗骨材の量や種類などが一般的な調合のコンクリートの範囲(圧縮強度が20~70N/mm²)であれば、比較的影響は少なく、類似した相関性を示した。

しかしながら、高炉セメントB種や人工軽量骨材を用いたコンクリート、低水セメント比の超高強度コンクリートおよびモルタルなどに適用する場合には、予め試験を行い、使用条件に適合した弾性波速度と圧縮強度との関係を求める必要がある。

また、標準水中養生と気中養生の相関性に相違があるように、型枠の脱型時期による乾燥(含水率)の影響を受けるので、その様な状況下のコンクリートに本章の実験結果を直接適用できるとは限らない。したがって、含水率の影響など残された課題、影響要因についてはさらに検討する予定である。

5. 圧縮強度推定式の設定

(1) 圧縮強度推定式

圧縮強度推定式の誘導方法については文献3)で既に述べたが、ここに整理して再述する。即ち、前章に示した水セメント比を変えた弾性波速度と圧縮強度との関係を用いて圧縮強度を推定するための実験式(圧縮強度推定式)を誘導する手法を以下に示す。

まず、半無限体を伝播する弾性波速度をV、動弾性係数をE、密度をρ、ポアソン比をνとすると、弾性波動論から動弾性係数は弾性波速度、密度、ポアソン比に依存する式(2)で表される。

$$E = \rho V^2(1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu) \quad (2)$$

図-14は、前章の実験で得られた、普通ポルトランドセ

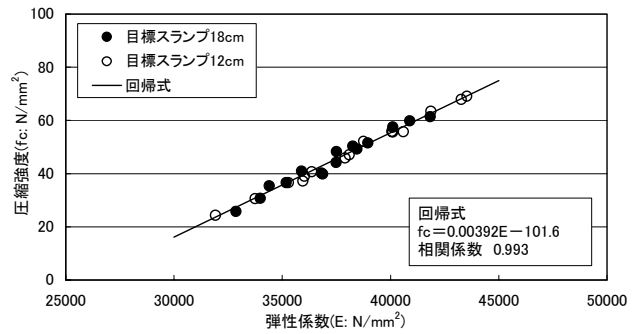


図-14 動弾性係数と圧縮強度との関係および回帰式

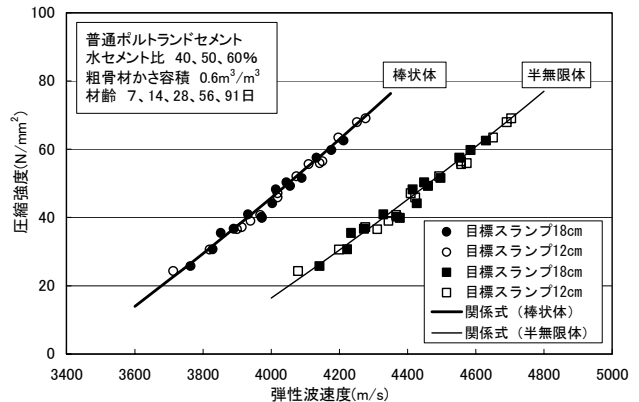


図-15 弾性波速度と圧縮強度の実験的關係式

メントで粗骨材のかさ容積が0.6m³/m³、水セメント比が40、50および60%の動弾性係数と圧縮強度との関係を目標スランブが12cmと18cmとを区別して示したものである。この結果、コンクリートの動弾性係数と圧縮強度との間には、20N/mm²以上の範囲において、ほぼ直線的な依存関係が認められた。そこで、式(3)のように、圧縮強度f_cを動弾性係数に関する1次式で仮定する。

$$f_c = a E + b \quad (3)$$

ここに、a、bは、動弾性係数と圧縮強度の実験的關係式の係数であり、実験により定まるものとする。式(3)に式(2)を代入することにより、圧縮強度は弾性波速度、密度およびポアソン比を用いて式(4)で表される。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \quad (4)$$

ここに、 $c = (1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu)$ である。

他方、棒状体を伝播する弾性波速度をV_pとすれば、動弾性係数は式(5)で表され、同様に式(3)を適用することにより圧縮強度は式(6)で表される。

$$E = \rho V_p^2 \quad (5)$$

$$f_c = a \cdot \rho V_p^2 + b \quad (6)$$

ここでは、式(4)を半無限体の弾性波速度による圧縮強度推定式、式(6)を棒状体の弾性波速度による圧縮強度推定式と呼ぶこととする。

(2) 圧縮強度推定式の設定

図-15は、普通ポルトランドセメントで粗骨材のかさ容

表-8 共鳴振動法および衝撃弾性波形のスペクトルによるポアソン比の比較

解析法	供試体	寸法(mm)			断面積 (cm ²)	質量 kg	振動数(Hz)			Gd N/mm ²	Ed N/mm ²	ポアソン比	
		長さ	縦	横			たわみ振動	ねじり振動	縦振動			供試体	平均値
共鳴振動法	W/C=40%	395.0	101.3	102.5	10383	9.786	2361	3113	5387	17104	43214	0.263	0.256
							2382	3139	5469	17382	44517	0.281	
	W/C=50%	399.0	102.1	103.6	10578	9.935	2316	3042	5268	16448	41601	0.265	
							2335	3093	5302	16989	42102	0.239	
	W/C=60%	399.0	101.7	102.1	10384	9.613	2238	2966	5131	15391	38900	0.264	
							2253	2998	5160	15700	39280	0.251	
衝撃弾性波法	W/C=40%	395.0	101.3	102.5	10383	9.786	2332	3101	5347	16968	42570	0.254	0.252
							2368	3125	5396	17228	43328	0.258	
	W/C=50%	399.0	102.1	103.6	10578	9.935	2295	3027	5225	16289	40919	0.256	
							2319	3064	5273	16805	41649	0.239	
	W/C=60%	399.0	101.7	102.1	10384	9.613	2222	2966	5090	15521	38469	0.239	
							2246	2991	5151	15496	39149	0.263	

各供試体の上段は材齢28日、下段は材齢49日。網掛けの値は平均より除外

積が 0.6m³/m³、水セメント比が 40, 50 および 60%, 材齢が 7, 14, 28, 56 および 91 日の弾性波速度と圧縮強度との関係を目録スランプが 12cm と 18cm とを比較したものである。図中の記号で丸印は棒状体の弾性波速度、四角は半無限体の弾性波速度と圧縮強度との関係である。

ここで、コンクリートの密度として便宜的に 2.3g/cm³ とし、棒状体の弾性波速度と圧縮強度との関係を式(6)で近似させることにより、棒状体の弾性波速度による圧縮強度推定式は、係数 a = 1/220, b = -121.5N/mm² が得られ、図-15 の太い実線のように描かれる。

さらに、式(2)および式(5)から棒状体の弾性波速度に対する半無限体の弾性波速度の割合(速度比) γ は式(7)で算出される。

$$\gamma = V/V_p = \sqrt{\{(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)\}} = \sqrt{1/c} \quad (7)$$

$$c = 1/\gamma^2 \quad (8)$$

図-15 にプロットした弾性波速度の棒状体に対する半無限体の割合の平均値は 1.101 であり、式(8)より c=0.825 が得られ、上記 a, b とともに式(4)に代入して圧縮強度を計算すると、同図の細い実線が描かれる。この近似曲線は半無限体の弾性波速度と圧縮強度との関係(四角の記号)をよく捉えている。なお、式(7)から算出された動的なポアソン比は 0.255 であり、既往の研究⁸⁾ とほぼ一致している。

以上のように、式(4)および式(6)の係数 a, b, c を決定することにより、半無限体および棒状体の弾性波速度に対する圧縮強度推定式が設定される。

(3) ポアソン比の検証

本節では、前節で得られた動的なポアソン比 0.255 の良否を共鳴振動法および3章の(2)節で述べた衝撃弾性波による方法を用いて検証する。使用した供試体は水セメント比が 40, 50 および 60%の角柱供試体である。

供試体寸法、質量、測定振動数および計算結果を共鳴振動法と衝撃弾性波法で比較して表-8 に示す。この結果、

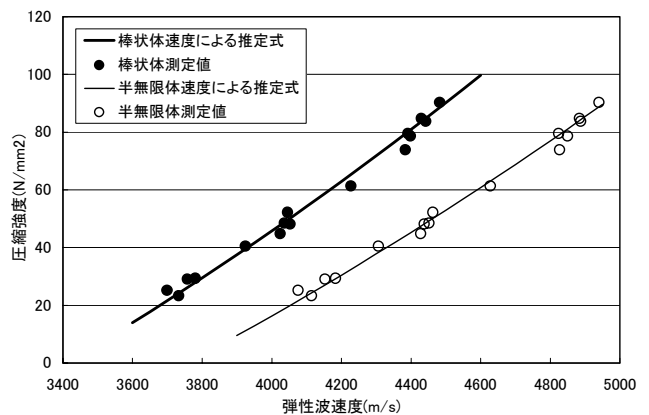


図-16 圧縮強度推定式の適合性

各供試体のポアソン比は 0.25 前後であり、共鳴振動法および衝撃弾性波法から求めた平均値はそれぞれ 0.256 および 0.252 となり、共鳴振動法が僅かに高い値を示しているが、ほぼ一致しているものと評価できる。したがって、前節の方法によるポアソン比は妥当なものと考えられる。

(4) 圧縮強度推定式の適合性の検証

本節では、前節(1)で設定した圧縮強度推定式を他のコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係に適用し、その適合性について検証する。

図-16 は、他の目的の試験体を作製するために、生コンプラントより調達したコンクリートを用いた円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係に前節で設定した圧縮強度推定式を重ねたものである。セメントは普通ポルトランドセメントである。主材料の種類、性質および割合等については省略する。養生方法は、標準水中養生または試験体付近での封緘(非脱型)養生の後、試験時に脱型したものである。なお、材齢は 7 日、28 日、56 日または 91 日である。

図-16 の黒丸は棒状体、白丸は半無限体の弾性波速度と圧縮強度との関係であり、太い実線で示す棒状体および

細い実線で示す半無限体の圧縮強度推定式ともに非常によく対応しており、前節で設定した圧縮強度推定式が適合していると評価できる。したがって、弾性波速度と圧縮強度との関係は、生コンプラントなどから出荷される一般的なコンクリートであれば、調合などには余り左右されず、圧縮強度推定式が適用できると思われる。

6. おわりに

衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法において、適用範囲の設定および強度推定の精度向上の観点から、コンクリートの使用材料、調合および養生方法など、コンクリートの構成材料が弾性波速度と圧縮強度との相関関係に及ぼす影響について円柱供試体を用いて検討した。その結果を基に圧縮強度推定式を設定し、この圧縮強度推定式を一般のコンクリートを用いて検証した。これらの検討を通して貴重な知見が得られた。

- (1) コンクリートの構成材料が弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響は、粗骨材の量や種類などが一般的な調合のコンクリートの範囲（圧縮強度が 20～70N/mm²）であれば、比較的少ないことを把握した。
- (2) 高炉セメントB種や人工軽量骨材を用いたコンクリート、低水セメント比の超高強度コンクリートおよびモルタルなどに適用する場合には、予め試験を行い、使用条件に適合した弾性波速度と圧縮強度との関係を求める必要があることも明らかになった。
- (3) 実験から得られた弾性波速度と圧縮強度との関係を用いて設定した圧縮強度推定式は、生コンプラントから調達したコンクリートで作製した円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係に一致し、その適合性が検証された。このことは、結論(1)を裏付けたものと考えられる。さらに、圧縮強度推定式の設定過程で算出されたポアソン比は既往の研究とも良く対応した。
- (4) 標準水中養生と気中養生の相関性に相違があるように、弾性波速度は型枠の脱型時期による乾燥状態（含水率）の影響を受けるので、その様な状況下のコンクリートに5章で設定した圧縮強度推定式を直接適用できるとは限らない。含水率の影響を考慮した圧縮強度推定式が必要である。
- (5) 圧縮強度推定式の設定において、円柱供試体の棒状体に対する半無限体の弾性波速度比を用いて式(7)から妥当な動ポアソン比が算出された。

今後は、含水率の影響など残された課題、影響要因についてさらに検討するとともに、推定精度向上のため、データの蓄積、測定法の改良などを行う予定である。

参考文献

- 1) 十代田知三, 野崎喜嗣, 小林幸一: 実大モデルによる超音波法, 反発度法および複合法の検討—非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法, 日本建築学会構造系論文報告集 No. 428, pp. 1-9, 1991. 10
- 2) 森濱和正, 吉荒俊克, 太田資郎: 非破壊試験による圧縮強度の推定, 非破壊検査, 50(7), pp. 440-445, 2001. 7
- 3) 立見栄司, 辻定和, 蓮尾孝一: 衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 985-986, 2002. 8
- 4) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発—試作機による杭頭強度確認への適用, 三井建設技術研究報告 Vol. 27, 2002
- 5) ヴォラプッタポーニ コンキット, 十代田知三: 条件の異なるコンクリートの音速と動弾性係数との関係—非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その2)—, 日本建築学会構造系論文集, No. 527, pp. 15-19, 2000. 1
- 6) 山下英俊, 堺孝司, 熊谷守晃, 喜多達夫: 超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23 No. 1, pp. 583-588, 2001
- 7) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino: Impact-Echo Method, Concrete International, Vol. 10, No. 4, pp. 38-46, 1988. 4
- 8) 尼崎省二: コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1491-1496, 2002