

論文 超音波を用いたコンクリートの力学的特性の推定に関する一考察

松土 雄紀^{*1}・小俣 貴洋^{*1}・満木 泰郎^{*2}・溝淵 利明^{*3}

要旨: コンクリート構造物に損傷を与えることなく力学的特性を推定することは、品質評価において重要である。これまでも各種非破壊試験などで数多く提案されているものの、測定値のばらつきが大きいことから、実際に適用するには難しい場合が散見される。本研究では、超音波伝播速度法をコンクリート構造物実際に適用するため、超音波伝播速度に影響を与える要因のうち、水セメント比、細骨材率、材齢、養生方法に着目し見直した基礎的実験を行った。また、室内試験における力学的特性の推定を行った。

キーワード: 非破壊試験, 超音波, 圧縮強度, 細骨材率

1. はじめに

高度成長期に大量に建設されたコンクリート構造物は、およそ 40~50 年の年月が経とうとしている。既存のコンクリート構造物を維持管理していくためには、定期的な品質検査を実施し、その結果に基づき劣化診断を行う必要がある。既設構造物の品質検査を実施する場合、コンクリート構造物からコアを採取して強度試験が行われる場合がある。しかし、コアの採取によって構造物に損傷を少なからず与えることや、コア採取後に補修が必要である点などの問題点がある。そこで、コンクリート構造物に損傷を与えることなく、繰返し検査が可能である非破壊試験が果たす役割が今後さらに大きくなると考えられる。今までも多くの非破壊試験が提案されているが、測定値のばらつきが多いことや測定精度がそれほど高くないこと、適用制限があること等の課題がある。

非破壊試験の中で、超音波伝播速度法はコンクリート中の超音波伝播速度とその圧縮強度との相関性がよいことから、力学的特性を推定する手法として古くから研究がなされており、いくつかの推定式が提案されている¹⁾。また、粗骨材の量やコンクリートの表面状態²⁾、骨材の分布³⁾、含水状態や混和剤⁴⁾、骨材の物性値⁵⁾などの要因が超音波伝播速度に与える影響についての研究が数多く行われている。

コンクリートは複雑な内部構造をもつ複合材料であるため、セメントの種類や単位骨材量、含水率、空隙率が異なると超音波伝播速度に影響を与えるとされている¹⁾。特に、骨材自体の超音波伝播速度はコンクリートの超音波伝播速度に大きく影響するため、骨材量や骨材の密度などの品質が異なると、水セメント比が同じであっても超音波伝播速度は大きく変化する⁶⁾。一般にコンクリート構造物を構成する各種部材におけるコンク

リートの品質の不均一性が構造耐力上、耐久性劣化の観点から問題視されている。高さ方向に骨材の分布が生じるような壁高の大きい部材では、下に粗骨材が沈降することで、高さにより骨材量が大きく異なり、超音波伝播速度に大きな影響を与えると考えられる。超音波伝播速度を用いてコンクリートの圧縮強度を正確に推定するためには、これらの影響要因を考慮した推定が必要であると考えられる。

本研究では、超音波伝播速度法を用いて、コンクリート構造物の強度推定や施工時に強度推定用の供試体を設置して、モニタリングを実施していくことを目指し、超音波伝播速度に影響を与える影響要因のうち、水セメント比、材齢、養生方法、細骨材率について室内実験を行い、力学的特性の推定を行った。

2. 検討の概要

2.1 検討ケース

検討ケースは使用セメントが普通ポルトランドセメントの 1 水準とし、水セメント比 3 水準、細骨材率 6 水準、養生方法は 2 種類、合計 36 ケースとした。要因と水準を表-1 に示す。

2.2 配合条件およびコンクリート配合

配合条件は、目標空気量 4.5%、目標スランプ 12cm とした。示方配合を表-2 に示す。本実験で使用した骨材は、粗骨材が硬質砂岩碎石（表乾密度 2.66 g/cm³、吸水

表-1 要因と水準

要因	水準
水セメント比(%)	40, 50, 60
細骨材率(%)	30, 40, 50, 60, 70, 100
養生方法	水中, 気中

*1 法政大学 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 工博 (正会員)

*3 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 博士(工学) (正会員)

表-2 示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気 量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率(%)	単位量(kg/m ³)				単位量(g/m ³)	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
20	12	4.5	40	30	149	373	531	1282	1166	187
				40	164	410	681	1056	1281	16.4
				50	179	448	818	843	1400	13.44
				60	194	485	939	646	1516	9.7
				70	209	523	1045	463	1634	10.46
				100	245	613	1329	0	1916	0
			50	30	140	280	562	1346	875	8.4
				40	155	310	725	1116	969	9.3
				50	170	340	875	896	1063	6.8
				60	184	368	1011	697	1150	7.36
				70	199	398	1138	503	1244	3.98
				100	244	488	1434	0	1525	0
			60	30	137	228	578	1389	713	9.12
				40	152	253	746	1163	791	7.59
				50	167	278	903	928	869	8.34
				60	182	303	1047	721	947	6.06
				70	197	328	1182	521	1025	3.28
				100	234	390	1540	0	1219	0

率 0.50%), 細骨材が山砂 (表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.37%, 粗粒率 2.62) である。

2.3 試験方法

本試験では, JIS A 1108 に準ずる圧縮強度試験, JIS A 1149 に準ずるヤング係数試験および超音波測定を行った。供試体は, 圧縮強度試験用および超音波測定用の 2 種類とし, 1 水準につき 3 本とした。供試体寸法はφ 100×200mm を用いた。各試験の材齢は, 3, 7, 14, 28, 56, 91 日の 6 材齢とした。なお, 水中養生した供試体は, 養生水槽から取り出して 1 時間以内に測定を行った。

本試験では, 円柱供試体の上下端面の表面にグリースなどの接触媒質を塗布して超音波探触子を直接押し付け, 透過させることによって, 超音波伝播速度を測定した。測定装置の仕様を表-3に示す。

次に, 圧縮強度およびヤング係数を推定するために強度に影響を与えると思われる要因から説明変数を選定し, 重回帰分析を行い, 圧縮強度およびヤング係数の推定式を算定した。また, 算定した推定式を用い, 実測値との比較を行った。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験およびヤング係数試験

超音波伝播速度と圧縮強度の関係について養生方法

表-3 測定装置の仕様

時間測定	伝搬時間は4インライン数字表示方式
時間測定基準	10MHz 水晶発振によりタイミングパルス発振
最小読取時間 (精度)	±0.1 μ sec 発信
時間測定範囲	0.1~9,999 μ sec
伝搬能力	0~15m(対面法), 0~1.5m(表面法)
インプット感度	20KHz~500KHz(使用振動子の周波数) シグナルは 250 μ V インピーダンス-1M(400mV)
トランスミッター	励起パルス=1kV, 500V, 1.5 μ sec パルス反復周波数=毎秒 10 パルス
トランスジューサー	ジルコン酸チタン酸鉛セラミック(50kHz) 直系 50mm×42mm(ステンレス鋼製) 50kHz(標準トランスジューサー)以外も多数あり
周囲温度範囲	0°C~40°C

に対して超音波伝播速度は大きくばらついており、超音波伝播速度と圧縮強度にはほとんど相関関係はみられなかった。しかし、同一圧縮強度で比較した場合、超音波伝播速度は、水中養生に比べ気中養生のほうが小さくなる傾向がみられた。図-2から、超音波伝播速度と圧縮強度との関係は同一細骨材率でかつ養生方法が同じの場合、超音波伝播速度と圧縮強度に相関関係がみられることから、超音波伝播速度と圧縮強度との関係には養生方法や細骨材率の影響があると考えられる。図-3から、超音波伝播速度と圧縮強度との関係は同一細骨材率かつ水セメント比別の場合、超音波伝播速度と圧縮強度に相関関係がみられることから、水セメント比の影響もあると考えられる。

次に、超音波伝播速度とヤング係数との関係を養生方法別に整理した結果を図-4に示す。図-4から、一般的に言われるように、養生方法に関わらずヤング係数が増加するにともない、超音波伝播速度は増加する傾向があり、養生方法、水セメント比、細骨材率等に影響を受けることなく、超音波伝播速度とヤング係数は比較的高い相関関係にあることがわかる。

圧縮強度別での超音波伝播速度と細骨材率の関係のうち気中養生したものを図-5、水中養生したものを図-6にそれぞれ示す。図-5および図-6から、養生方法にかかわらず、細骨材率が大きくなると超音波伝播速度は小さくなる傾向にあった。これは、セメントペーストに比べ骨材は超音波伝播速度が大きい傾向があることから³⁾、細骨材率が大きくなるとペースト量が増加することによって超音波伝播速度が小さくなるものと思われる。また、同一圧縮強度であっても細骨材率の影響により、超音波伝播速度の値が大きく異なる結果となった。

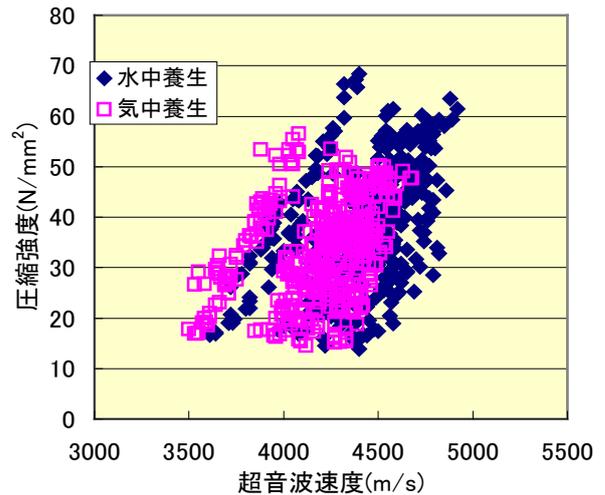


図-1 超音波伝播速度と圧縮強度の関係(養生方法別)

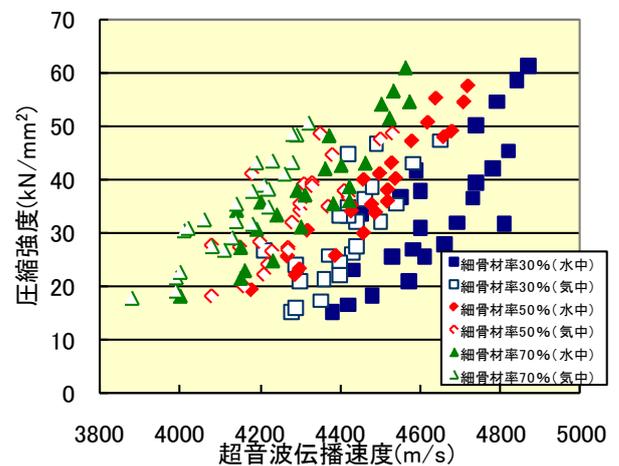


図-2 超音波伝播速度と圧縮強度の関係(細骨材率別)

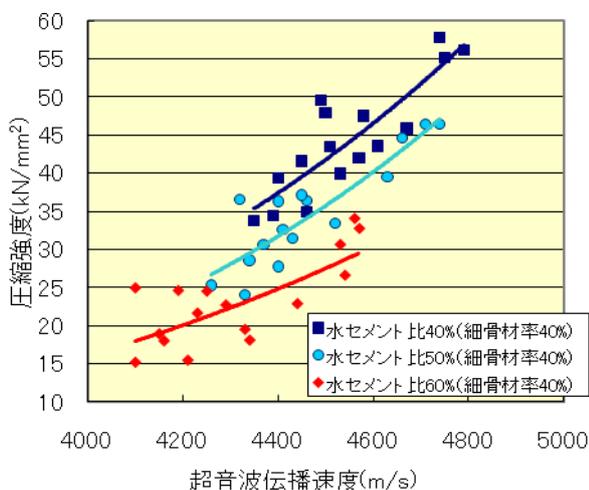


図-3 超音波伝播速度と圧縮強度の関係(水セメント比別)

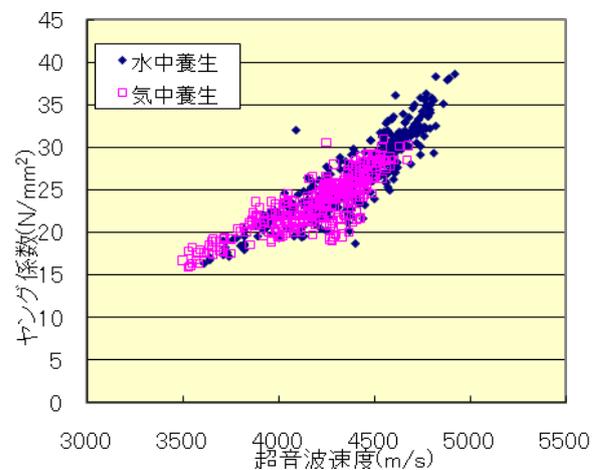


図-4 超音波伝播速度とヤング係数の関係(養生方法別)

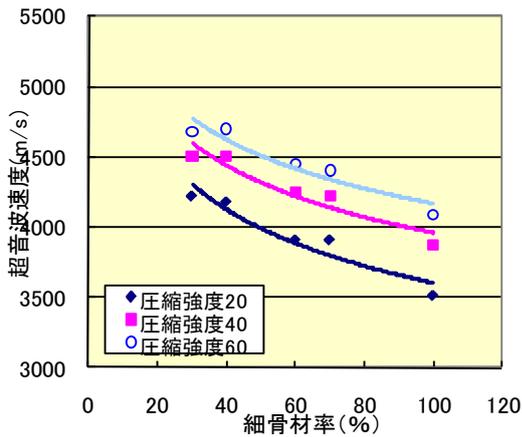


図-5 圧縮強度別の速度と細骨材率の関係（気中）

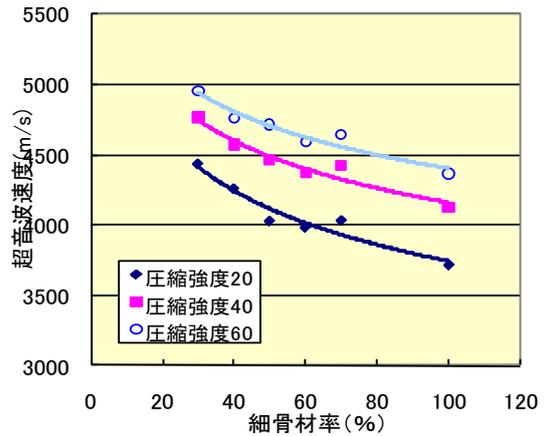


図-6 圧縮強度別の速度と細骨材率の関係（水中）

以上の点から、これまでの研究から言われているように超音波伝播速度と圧縮強度の関係については、養生方法や水セメント比、細骨材率の影響があると考えられる。また、超音波伝播速度とヤング係数の関係は細骨材率による影響があまり見られなかった。

3.2 超音波伝播速度の経時変化

超音波測定で得られた材齢と超音波伝播速度との関係について、各水セメント比における超音波伝播速度の測定値を材齢ごとに平均したもののうち、気中養生した場合を図-7に示し、水中養生した場合を図-8に示す。図-7から、気中養生した場合、超音波伝播速度は材齢14日までは増加傾向があるものの、材齢14日以降は減少傾向を示した。また、既往の研究から強度増進がほとんどない場合、超音波伝播速度は低下傾向を示すといわれており²⁾、本試験結果も同様の傾向を示した。また、細骨材率が速度に影響を与えており、細骨材率によってそれぞれ超音波伝播速度の値が大きく異なる結果となった。一方、図-8から水中養生で行った場合、気中養生とは異なり、水中養生では材齢14日以降も増加する結果となった。既往の研究において、長期材齢になると、コンクリート強度の増大に比べ、超音波伝播速度の変化は緩やかになるといわれており⁶⁾、本研究でも同様の傾向を示した。以上の結果から、水中養生と気中養生では、材齢に伴う超音波伝播速度変化の傾向が大きく異なる結果となった。また、細骨材率によって、同一材齢においても超音波伝播速度の値が異なる結果となった。これらのことより、力学的特性の推定は養生方法や細骨材率を考慮して推定する必要があると思われる。

3.3 超音波伝播速度法による力学的特性の推定

本研究では、超音波伝播速度と力学的特性の関係について、材齢、超音波伝播速度のみの影響を考慮した回帰分析および、超音波伝播速度に影響を与える要因を考慮

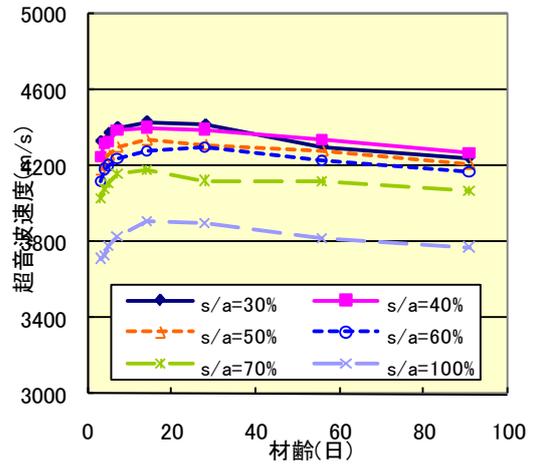


図-7 材齢と超音波伝播速度の関係（気中）

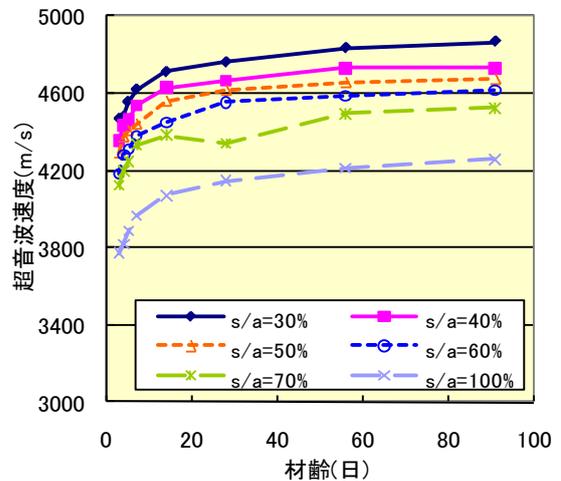


図-8 材齢と超音波伝播速度の関係（水中）

した重回帰分析を行った。重回帰分析の説明変数は、超音波伝播速度、材齢、セメント水比、細骨材率、単位容積質量とした。合計3ケースの重回帰分析を行い、圧縮強度およびヤング係数の推定式の算定を行った。それぞれの重相関係数を表-4に示す。表-4から、圧縮強度およびヤング係数における重回帰分析では、全データでの圧縮強度推定における相関係数が0.95、ヤング係数推定の相関係数が0.93となっており単回帰分析に比べ高い相関関係にあった。これは、超音波伝播速度だけでなく、材齢、セメント水比、細骨材率、単位容積質量を考慮したことにより力学的特性の推定精度が向上したものと考えられる。圧縮強度、ヤング係数に対する重回帰式を以下に示す。また、全データによる重回帰分析による推定値と実験値との関係を図-9および図-10に示す。

以下の式に適用した場合、重回帰分析による推定値と実験値は高い相関関係が得られた。

$$F_c = 35.7V + 0.098t + 22.3C/W + 16.6s/a - 53.3w - 47.9 \quad (1)$$

$$E_c = 13.6V + 0.0252t + 6.46C/W + 1.58s/a + 1.59w - 67.1 \quad (2)$$

ここで、 F_c ：推定圧縮強度(N/mm²)、 E_c ：推定ヤング係数(kN/mm²)、 V ：超音波伝播速度(m/s)、 t ：材齢(日)、 C/W ：セメント水比、 s/a ：細骨材率(%)、 w ：単位容積質量(kg/m³)である。

3.4 推定値と実測値の比較

式(1)を検証するために、式(1)で用いた既知の値であるコンクリートのうち、水セメント比50%、細骨材率40%のもので、単位容積質量を一定と考え材齢3日の値を代入し、変数を超音波伝播速度と材齢とした推定式を以下に示す。

$$F_c = 35.7V + 0.0984t - 131 \quad (3)$$

ここで、 F_c ：推定圧縮強度(N/mm²)、 V ：超音波伝播速度(m/s)、 t ：材齢(日)である。

推定は、新たに作製した水セメント比50%のコンクリートを用い、実測値と推定値の比較を行った。推定値と実測値を比較した結果を図-11に示す。図-11から、推定式は実測値と比較的よく近似していることがわかる。

表-4 各水準における重相関係数

分析方法	養生方法	圧縮強度	ヤング係数
重回帰	両方	0.95	0.93
	気中	0.97	0.96
	水中	0.98	0.97

4. おわりに

本研究では、超音波伝播速度に影響を与える要因のう

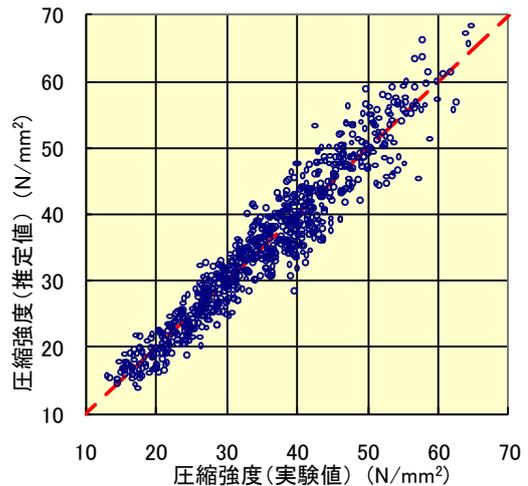


図-9 圧縮強度の推定値と実測値との関係

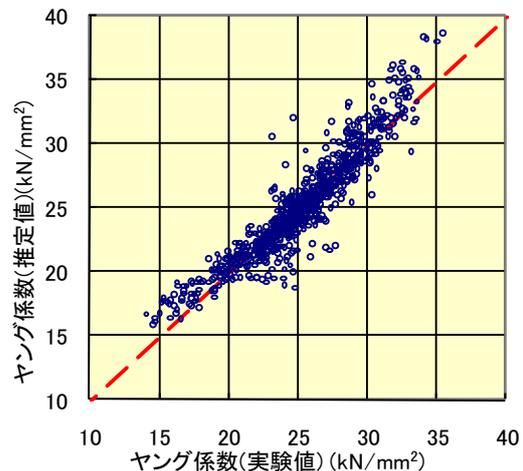


図-10 ヤング係数の推定値と実測値との関係

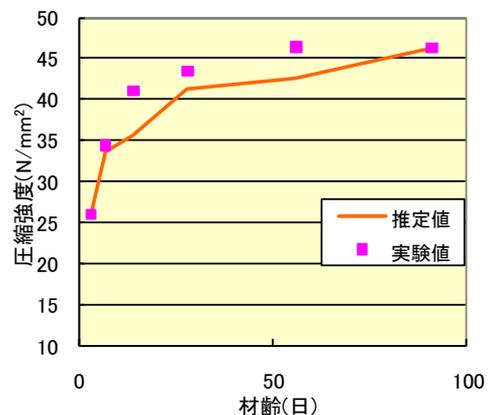


図-11 推定値と実測値との比較

ち、水セメント比、細骨材率、材齢、養生方法に着目し、実験を行った。

超音波伝播速度を用いた強度推定を行うための基礎的その結果、ヤング係数は、養生方法にわずかに影響を受けるが、水セメント比および細骨材率の要因の影響をほとんど受けず、一般的にいわれるように、超音波伝播速度と比較的高い相関関係にあると考えられる。超音波伝播速度は、同一材齢であっても細骨材率によって影響を受けることや、同一配合であっても養生方法によって影響を受ける結果となった。圧縮強度は、養生方法、水セメント比に影響を受ける。また、同一圧縮強度であっても細骨材率の影響により、超音波伝播速が異なることが明らかになった。室内試験における強度推定は、同一水セメント比の場合、比較的高い精度の推定が可能となった。

今後は、超音波伝播速度法による強度推定を確立するために、本検討で扱わなかった骨材の種類、単位セメント量、コンクリート表面の状況などの各種条件を考慮した基礎的実験を行う必要がある。また、実構造物における力学的特性の推定を行うため、実物大実験を行い高さ方向の骨材分布の推定を行う必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート強度推定ための非破壊試験方法マニュアル，pp.28-75，1983
- 2) 勝畑恭一，十代田知三：コンクリート中の超音波伝播速度に影響する因子-粗骨材の量および表面粗さ-，建築学会大会学術講演概要集，pp253-254，1993.9
- 3) 勝畑恭一，十代田知三，西澤英樹：コンクリート中の超音波伝播速度に影響する因子-骨材の有無および分布-，日本建築学会大会学術講演概要集，pp843-844，1994.9
- 4) 坂詰和子，十代田知三：コンクリート中の超音波伝播速度に影響する因子-試験時含水状態および混和材-，日本建築学会大会学術講演概要集，pp687-688，1996.9
- 5) 山下英俊，堺孝司，熊谷守晃，喜多達夫：セメント硬化体の超音波伝播速度に及ぼす骨材および細孔構造の影響 コンクリート工学年次論文集，Vol21，No.2，1999
- 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，Vol23，No.1，2001