

論文 圧縮強度の非破壊的推定における速度測定手法および評価式の検討

鈴木 彩莉^{*1}・渡辺 健^{*2}・岩野 聡史^{*3}・小椋 紀彦^{*4}

要旨：現在、衝撃弾性波法による圧縮強度推定手法が提案されているが、弾性波速度と圧縮強度の関係は配合、使用材料、測定条件によって変化する。本研究では W/C と材齢を変化させた供試体に対して、衝撃弾性波法と超音波法から弾性波速度を算出し、W/C 毎に圧縮強度の推定を行った。また、衝撃弾性波法による材齢毎での強度推定の精度を検討した。その結果、衝撃弾性波法では周波数分解能と強度評価式のべき乗係数が推定精度に関係していること、超音波法での強度評価式は衝撃弾性波法と同じように指数関数で近似できるがその係数が変化すること、指数関数での近似曲線は材齢毎での推定には適さないことが確認できた。

キーワード：衝撃弾性波法、超音波法、圧縮強度、弾性波速度、強度評価式、周波数分解能

1. はじめに

コンクリート構造物において圧縮強度は最も重要な力学的特性の一つである。圧縮強度を測定する手段として主にコアの採取が用いられている。コアの採取により構造物全体の圧縮強度を把握するためには複数のコアが必要であるが、構造物損傷を与えることや労力の観点より、現実的ではない。そこで、コンクリート構造物に非破壊試験の一つである衝撃弾性波法を適用し、測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法についての研究が行われている。弾性波速度と圧縮強度には相関関係があるとされており、それらの関係は指数関数で表されることが示されている¹⁾。また、日本非破壊検査協会では圧縮強度評価式の作成方法が NDIS2426-2 衝撃弾性波法の附属所 D (参考) として提案されており²⁾、弾性波速度と圧縮強度の関係はコンクリートの配合や使用材料によって変化することが確認されている³⁾。そこで、本研究では同一の使用材料で W/C と材齢を変化させた供試体に対し複数の機材で測定を行い、同じ W/C のコンクリートにおける材齢の進行に伴う弾性波速度と圧縮強度の相関関係を利用した圧縮強度評価式（以下、W/C 毎の圧縮強度評価式という）を求め、測定条件が推定精度に与える影響について検討を行った。また、同じ材齢のコンクリートにおける W/C の違いによる弾性波速度と圧縮

強度の相関関係を利用した圧縮強度評価式（以下、材齢毎の圧縮強度評価式という）および超音波法による W/C 毎の圧縮強度評価式は指数関数による近似が適用可能か検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの配合を表-1 に示す。W/C と材齢の違いによる圧縮強度評価式の変化と圧縮強度の推定精度を確認するため、W/C は 45%、50%、55%、60% の 4 水準に設定し、それぞれ 3 日、7 日、28 日、56 日間水中養生を行った。本実験での目標スランブは 10±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5% に設定し、各配合でその目標範囲内のスランブと空気量を得ることが出来た。また、骨材量が弾性波速度に与える影響を除去するため、骨材量は全ての配合で一定とした。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は徳島県産の骨材を使用した。供試体は円柱供試体（φ100×200mm）を用い、養生終了後、表乾状態で測定を行った。

2.2 弾性波速度の測定方法

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法は 3 通りの方法を適用した。ここではその 3 手法を (A)、(B)、(C) と表記する。衝撃弾性波法に

表-1 配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SL(cm)	Air(%)
		W	C	S	G	AEA	SP		
45	45	157	349	790	965	0.007	4.2	10.0	5.2
50		164	327			0.008	3.3	12.5	5.0
55		170	308			0.009	3.1	7.5	4.5
60		175	292			0.010	2.6	10.0	3.0

^{*1} 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

^{*2} 徳島大学大学院 理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 (正会員)

^{*3} リック (株) 技術研究所課長 (正会員)

^{*4} (株) CORE 技術研究所 技術部課長 (正会員)

による測定方法を図-1(a), 各手法の測定・解析条件を表-2 に示す。供試体端面に加速度計を押し付けその近傍を鋼球で打撃し, 打撃端面と底面で多重反射した弾性波を測定した。(A), (B), (C)で用いた鋼球の直径はそれぞれ 10mm, 4.7mm, 10mm である。周波数解析方法はフーリエ解析を用いた。フーリエ解析ではパワースペクトルでの各周波数の振幅値は, 式(1)により求めた係数 a_f , b_f を式(2)に代入することにより算出できる³⁾。

$$\begin{cases} a_f = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi f) t dt \\ b_f = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi f) t dt \end{cases} \quad (1)$$

$$P_f = \sqrt{a_f^2 + b_f^2} \quad (2)$$

ここで, f : 周波数, P_f : 周波数 f の振幅値, $x(t)$: 時刻 t での測定振動の振幅値, T : 測定振動の測定時間長(測定振動のサンプリング時間と解析点数の積)である。フーリエ解析を高速で実行する方法として高速フーリエ変換(FFT 解析)がある。FFT 解析では, パワースペクトルで振幅値を求める際の周波数分解能は測定振動の測定時間長の逆数から自動的に設定される。(B), (C)の周波数解析方法は FFT 解析とした。(B)ではサンプリング時間 1 μ 秒, 解析点数を 32768 点に設定したため, 周波数分解能は 30Hz である。(C)ではサンプリング時間 2 μ 秒, 解析点数を 2048 点に設定したため, 周波数分解能は 244Hz である。一方, (A)は FFT 解析ではなく, 任意の周波数の振幅値を式(1)および式(2)により算出する方法を用いた。周波数分解能は 10Hz に設定した。以上のように各手法で得られた周波数応答から基本周波数 f_0 を求め, 式(3)に代入することで弾性波速度 V_p を算出した。

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (3)$$

(2) 超音波法

超音波法による測定方法を図-1(b)に示す。供試体端面から超音波を送信し, もう一方の端面で受信する透過法にて測定を行った。測定は波の伝搬時間 t が表示される超音波測定機器を用い, 式(4)より弾性波速度を算出した。送信電圧は 1000V, サンプリング時間は 0.1 μ 秒である。

$$V_p = L/t \quad (4)$$

2.3 圧縮強度評価式と評価方法

非破壊試験により測定されたコンクリートの弾性波速度 V_p は弾性係数 E , 密度 ρ , ポアソン比 ν より式(5)で表される。また, コンクリートの単位重量がほぼ同じ場合, 圧縮強度 f_c と動弾性係数 E_D には式(6)の関係が成り立つ。弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c には相関関係があり, その関係は式(5)と式(6)から, 式(7)で表すことが出来る⁴⁾。

α , β は実験によって求まる定数である。式(7)を圧縮強度評価式とする。本研究では, 実験で測定した圧縮強度と弾性波速度に最小二乗法を適用させて各 W/C の α , β

表-2 衝撃弾性波法の測定・解析条件

測定・解析条件	(A)	(B)	(C)
サンプリング時間(μ 秒)	10	1	2
解析点数(個)	800	32768	2048
周波数分解能(Hz)	10	30	244

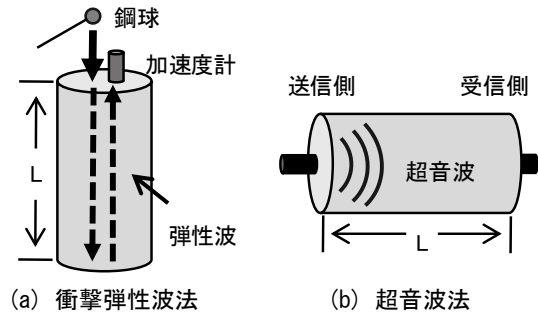


図-1 測定方法

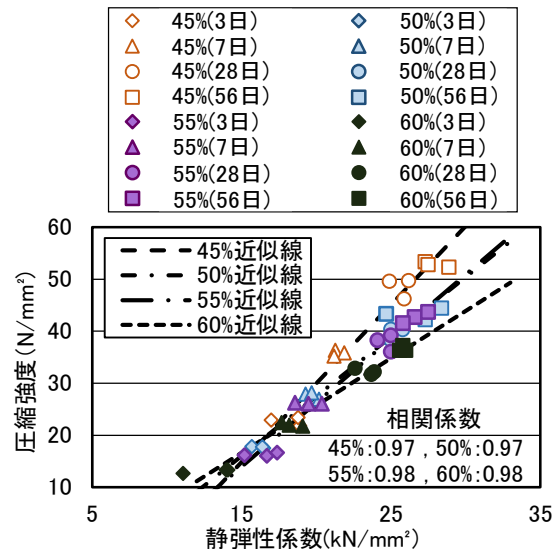


図-2 静弾性係数と圧縮強度の関係

を求めた。推定圧縮強度は α , β と測定した弾性波速度 V_p を式(7)に代入して算出した。推定圧縮強度と圧縮強度の誤差を圧縮強度で割った値を誤差率とし, $\pm 15\%$ の範囲内に収まっているかを確認した。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

$$E_D = A \cdot f_c^B \quad (6)$$

$$f_c = \left\{ \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{A(1-\nu)} \right\}^{1/B} \cdot V_p^{2/B} = \beta \times V_p^\alpha \quad (7)$$

3. 実験結果

3.1 静弾性係数と圧縮強度の関係

各供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2 に示

表-3 定数 α , β の結果

	W/C45(%)		W/C50(%)		W/C55(%)		W/C60(%)	
	α	β	α	β	α	β	α	β
(A)	5.792	0.08×10^{-18}	5.773	0.08×10^{-18}	5.667	0.19×10^{-18}	5.670	0.17×10^{-18}
(B)	5.695	0.17×10^{-18}	5.887	0.03×10^{-18}	5.650	0.22×10^{-18}	5.754	0.09×10^{-18}
(C)	5.479	1.00×10^{-18}	5.416	1.50×10^{-18}	5.629	0.25×10^{-18}	5.519	0.59×10^{-18}

す。静弾性係数はコンプレッソメーターを用いて測定を行った。静弾性係数と動弾性係数には十分な相関が認められており⁵⁾、動弾性係数と弾性波速度は式(5)のような関係が成り立つ。従って、静弾性係数と弾性波速度にも相関があると考えられる。本実験での圧縮強度と静弾性係数の相関係数は全ての配合において 0.97 以上となり、十分な相関関係にあることが分かった。

3.2 弾性波速度と圧縮強度の関係式

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法(A), (B), (C)で求めた弾性波速度と圧縮強度の関係をそれぞれ図-3 (a), (b), (c)に示す。衝撃弾性波法(B)については材齢 7 日の実験は行っていないため、材齢 3 日, 28 日, 56 日の結果のみ示している。弾性波速度と圧縮強度を指数近似したところ、各手法における相関係数は全ての配合において 0.97 以上となり、既往の研究の通り、弾性波速度と圧縮強度の間に相関関係があることが確認できた。このときの回帰曲線が圧縮強度評価式であり、2.3 に示す方法で各 W/C ごとに算出した。圧縮強度評価式の定数 α , β の値を表-3 に示す。W/C が変化しても圧縮強度評価式は成り立つが、その関係式は W/C ごとに異なり、 α , β の値からもそのことが確認できた。各 W/C で α , β に規則性は見られなかったが、べき乗係数である α の値は 5.7 ± 0.3 となり、日本非破壊検査協会で示している $4 \sim 6$ ²⁾の範囲内に収まる結果となった。また周波数分解能の観点から結果を比較すると、10Hz, 30Hz と高い分解能で解析を行った(A)と(B)は弾性波速度の値が同配合, 同材齢で同等の結果が得られた。それに対して、244Hz と低い分解能で解析を行った(C)では同配合, 同材齢において弾性波速度の値にばらつきが見られた。このことは相関係数の結果からも確認できた。(A)と(B)では全ての配合において 0.99 となっているのに対して、(C)では 0.97~0.99 と僅かに低くなった。周波数分解能が 244Hz の場合、解析後のピークが一つずれると基本周波数も 244Hz だけ変化する。その分、算出される弾性波速度も $\Delta V_p \approx 2 \times 244 \times 0.2 = 97.6 \text{ m/s}$ 変化することになり、大幅なずれが生じてしまう。そのため周波数分解能が弾性波速度の値に影響を与えた分、回帰曲線(圧縮強度評価式)も異なる結果を示したと考えられる。なお、本実験で用いた鋼球すべては共振周波数よ

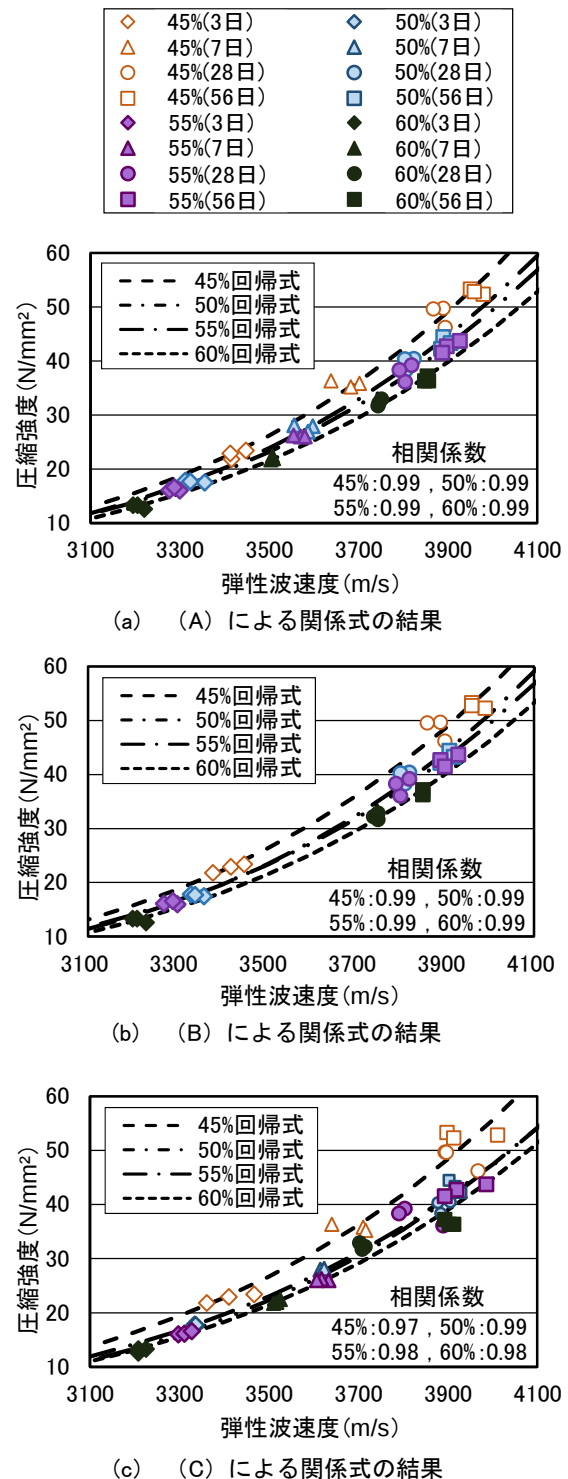


図-3 衝撃弾性波法による関係式の結果

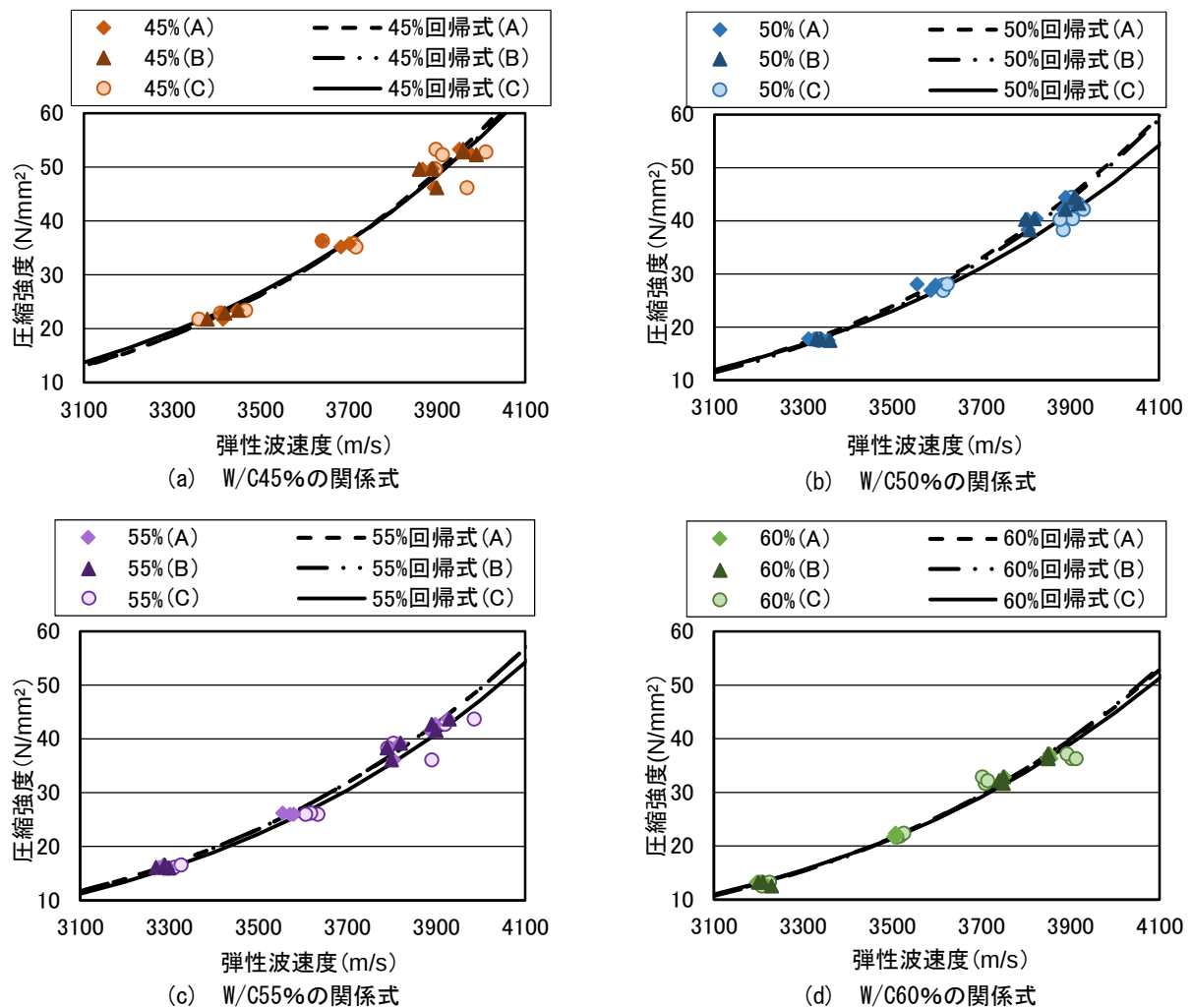


図-4 3手法の衝撃弾性波法による関係式の比較

り大きい周波数で入力が可能であったため、鋼球の大きさによる影響は無視できる。周波数分解能の違いが圧縮強度評価式にどの程度違いを与えるのか比較を行うため、W/C 毎に測定値と回帰曲線を重ねたグラフを図-4 に示す。(A)と(B)の回帰曲線はほぼ一致したが、(C)は(A)、(B)の回帰曲線とは少しずれた結果となった。

(2) 超音波法

超音波法で求めた弾性波速度と圧縮強度の関係を図-5 に、 α 、 β の値を表-4 に示す。圧縮強度評価式は衝撃弾性波法の場合と同様に、2.3 に示す方法で各 W/C 毎に算出した。相関係数は全ての配合において 0.98 以上となり、高い相関性が確認できた。超音波法を用いた場合でも圧縮強度評価式は適用可能であり、その関係式は W/C 毎に変化していることが確認できた。べき乗係数 α

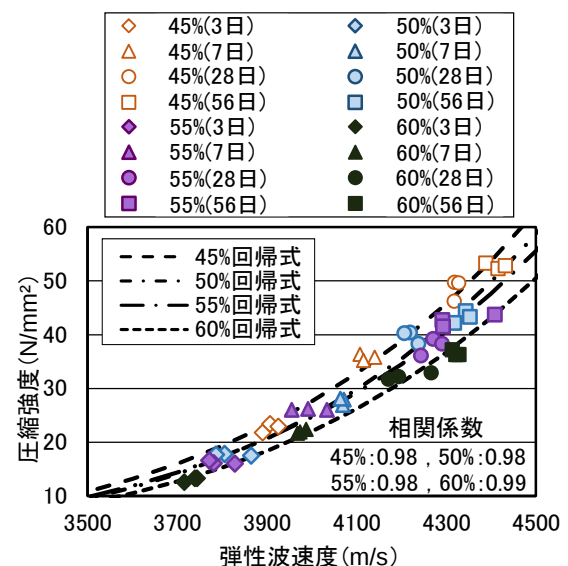


図-5 超音波法による関係式の結果

表-4 定数 α 、 β の結果

	W/C45(%)		W/C50(%)		W/C55(%)		W/C60(%)	
	α	β	α	β	α	β	α	β
超音波法	6.995	1.80×10^{-24}	7.258	0.18×10^{-24}	6.885	3.90×10^{-24}	7.057	0.84×10^{-24}

の値は 7.0 ± 0.3 となり衝撃弾性波法を用いて求めた場合と異なることが示された。 β の値においても衝撃弾性波法を用いて求めた場合と異なる結果となった。同じ W/C でも、衝撃弾性波法と超音波法を用いた場合では圧縮強度評価式も大きく変わる。衝撃弾性波法は多重反射、超音波法は1回のみの透過で測定を行ったため、弾性波の伝搬が異なったことが主要因と考えられる。そのため、実際の構造物に圧縮強度評価式を適用させる場合、各手法で圧縮強度評価式を作成する必要がある。

3.3 圧縮強度の推定精度

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法(A),(B),(C)で算出した弾性波速度から圧縮強度の推定を行い、推定した圧縮強度と実際の圧縮強度の誤差率が $\pm 15\%$ の範囲内に収まっているかを評価した。推定精度の結果と誤差率の最大値および平均値を図-6(a),(b),(c)に示す。最大誤差率は全配合の中で最も大きくなった誤差率の値であり、平均誤差率は全配合の誤差率の平均をとった値である。圧縮強度評価式を W/C 毎に作成したことにより、各 W/C で誤差率は $\pm 15\%$ に収まった。周波数分解能と比較すると、(A),(B)と比べて周波数分解能の低い(C)の推定誤差率が大きくなっており、同配合、同材齢での推定誤差のばらつきも大きくなることが確認できた。推定誤差のばらつきを、推定圧縮強度の変動率を表すことで評価した。この変動率は、解析後のピークのずれによって生じる変動率であり、周波数分解能 D_t 、基本周波数 f_0 、定数 α によって式(8)で表される。

$$\text{変動率} = \{(f_0 \pm D_t)/f_0\}^\alpha \quad (8)$$

例として周波数分解能が最も低い(C)で考えると、 $D_t = 244\text{Hz}$ 、 $f_0 \approx 10,000\text{Hz}$ 、 $\alpha \approx 5.5$ であるため、解析後のピークが一つずれて基本周波数が変化した場合の変動率は、 $0.87 \sim 1.14$ となり、 $\pm 15\%$ の範囲内に収まることが確認できる。そのため、(C)の条件においても $\pm 15\%$ 程度の推定精度が得られたと考えられる。また、これらから圧縮強度の推定精度には周波数分解能とべき乗係数である α が関係しているということが示された。

(2) 超音波法

超音波法で算出した弾性波速度から推定した圧縮強度についても同様の評価を行った。その結果を図-6(d)に示す。全配合が $\pm 15\%$ の範囲内に収まる結果となり、指数近似による圧縮強度評価式の作成および圧縮強度推定が可能であることが示された。

3.4 各材齢での評価

圧縮強度評価式を材齢毎で作成した場合、精度良く推定できるか検討するため、最も低い周波数分解能で解析を行った衝撃弾性波法(C)の結果を用いて検討を行った。算出した弾性波速度と圧縮強度を材齢毎に指数近似し、

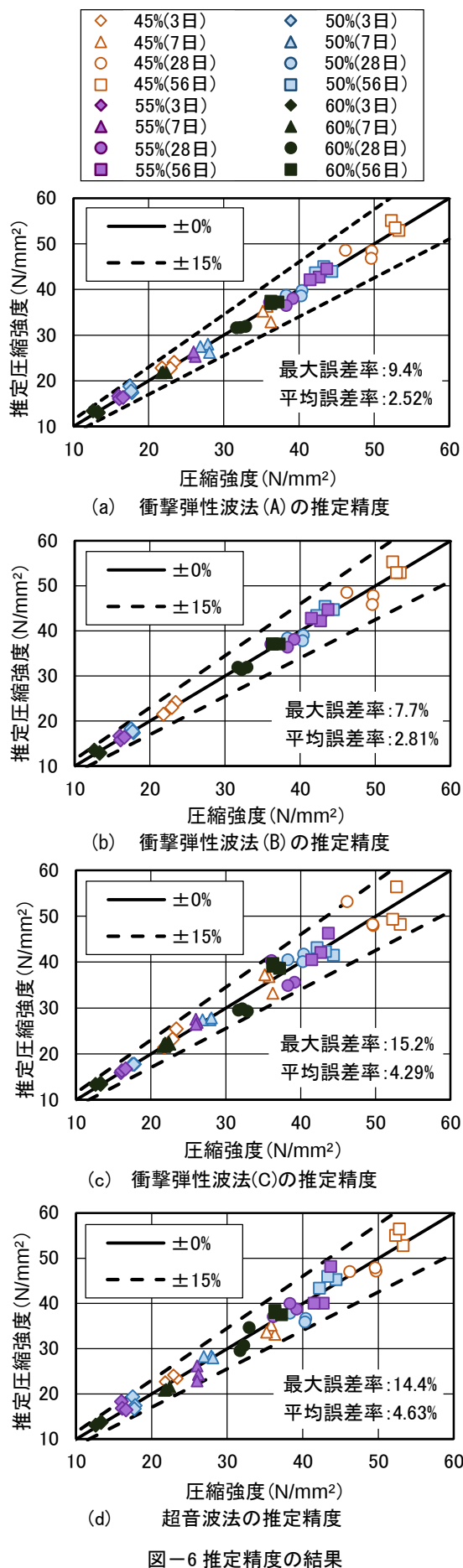


図-6 推定精度の結果

表-5 定数 α , β の結果

	材齢3(日)		材齢7(日)		材齢28(日)		材齢56(日)	
	α	β	α	β	α	β	α	β
(C)	8.55	1.4×10^{-29}	9.016	0.023×10^{-29}	5.325	3.2×10^{-18}	5.547	0.51×10^{-18}

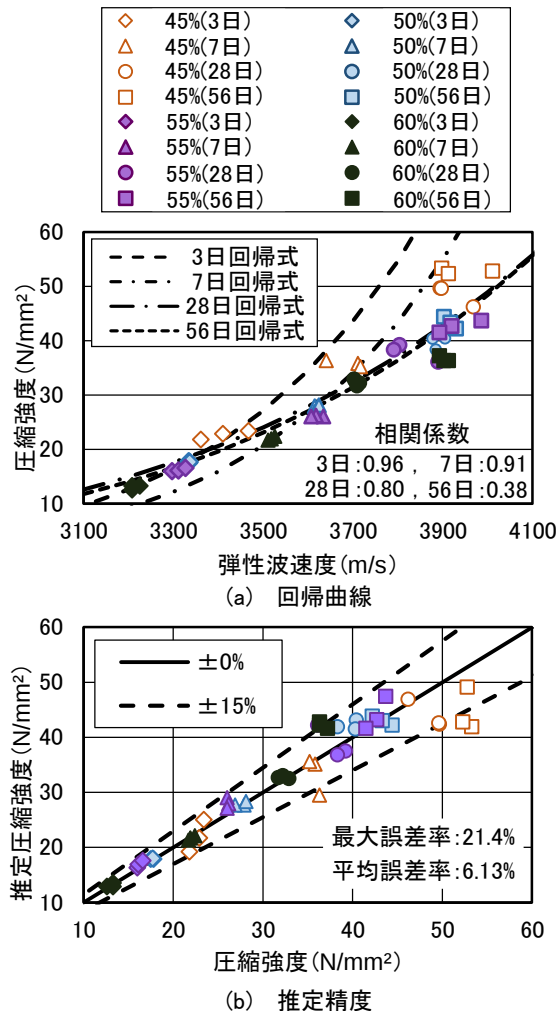


図-7 材齢毎の回帰曲線と推定精度

回帰式を求めた。回帰曲線を図-7(a)に、推定精度を図-7(b)に示す。また、表-5に α , β の値を示す。材齢28日、56日の回帰曲線の傾きが材齢3日、7日より小さくなっており、 α の値も同様の傾向にあることが確認できた。推定圧縮強度の誤差率は材齢が大きくなるほど $\pm 15\%$ を外れていく傾向が確認できた。初期材齢においては、W/Cの違いによって生じる弾性波速度の増加と圧縮強度の増加は指数近似できるが、材齢28日以降は指数近似では回帰曲線を表せないということが示された。従って、材齢毎の推定には別の関数形を用いるなど、工夫が必要であると思われる。

4. まとめ

W/Cの異なる供試体に対して、衝撃弾性波法と超音波

法を用いて弾性波速度を測定し、圧縮強度評価式とその推定精度を評価した。また、衝撃弾性波法(C)で材齢毎に評価し、圧縮強度評価式が適用可能か確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 各 W/C において圧縮強度評価式を作成した場合、W/C によって圧縮強度評価式は変化した。また、全てのべき乗係数 α は4~6の範囲内となり、圧縮強度推定も $\pm 15\%$ 以内の精度を持つことが示された。
- 2) 圧縮強度の推定精度は、べき乗係数 α と周波数分解能が大きく関係しており、特に周波数分解能が高いほど推定精度は向上した。
- 3) 各材齢で圧縮強度評価式を適用したところ、精度良い推定が難しく、指数近似によって回帰曲線を求める方法は適さないことが示された。
- 4) 超音波法を用いた場合、圧縮強度評価式は衝撃弾性波法と同様の傾向を示し、指数関数での近似曲線は適用可能であることが示された。また、 α と β は衝撃弾性波法で求めた値と異なる結果となった。

謝辞

本研究は、日本非破壊検査協会 衝撃弾性波法研究委員会で得られた成果の一部を取りまとめたものである。また、3章の実験では、徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学 西山航平氏に協力頂いた。ここに記して謝辞を表す。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 渡辺健: 衝撃弾性波法による既設コンクリート構造物の圧縮強度評価方法の検討, 非破壊検査, Vol.65, No.9, pp461-467, 2016
- 2) NDIS2426-2 付属書 D: 新設コンクリート構造物におけるコンクリート圧縮強度評価方法, pp.20, 2014
- 3) 日野幹雄: スペクトル解析 (新装版), 朝倉書店, pp.10-18, 2010.5
- 4) 岩野聡史, 森濱和正, 極壇邦夫, 境友昭: 弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp1638, 2003
- 5) 尼崎省二: コンクリートの弾性定数と弾性波速度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp1638, 2007