

論文 高炉スラグ及び再生粗骨材を用いたコンクリートに対する圧縮強度評価式の適用性に関する検討

藤本 就真*1・渡辺 健*2・鈴木 彩莉*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究では高炉スラグ、再生骨材を使用したコンクリート供試体に対して、衝撃弾性波法と超音波法のそれぞれから弾性波速度を算出し、日本非破壊検査協会にて提案されている圧縮強度評価式の適用が可能であるか検討した。また、普通骨材を使用したコンクリートの圧縮強度評価式を用いて、高炉スラグおよび再生骨材を使用したコンクリートの強度推定が可能であるか検討した。その結果、圧縮強度評価式による強度推定は、高炉スラグ、再生骨材を使用したコンクリートに対して適用可能であることが明らかとなった。また、高炉スラグに対して普通コンクリートの圧縮強度評価式を適用し強度推定精度について確認した。

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

1. はじめに

近年、天然骨材採取量の減少に伴い、産業副産物を起源とする骨材である銅スラグ、高炉スラグ、再生骨材等の有効利用が望まれている。しかし、以上のような骨材を使用したコンクリートに関するデータは少ないため、施工時の品質管理が重要である。そこで、早期に圧縮強度を推定できる圧縮強度評価式による強度推定を品質管理に適用できないかと考える。圧縮強度評価式は、コンクリートの圧縮強度と弾性波速度の関係を指数関数で表したものであり、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)として提案されている¹⁾。圧縮強度評価式は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が、スラグ骨材や再生骨材など、骨材特性の大きく異なる場合の検討が十分に行われているとは言い難い。さらに、精度の高い圧縮強度評価式の作成には長期間の測定が必要であり、手間、時間がかかる。そこで、本研究では圧縮

強度評価式の適用実績のない高炉スラグ、再生骨材を使用したコンクリート供試体に対し、2 パターンの衝撃弾性波法、超音波法で弾性波速度を測定し、圧縮強度との相関関係から圧縮強度評価式を求め、高炉スラグ、再生骨材を使用したコンクリートに対して圧縮強度評価式による強度推定が可能であるか検討を行った。また、材料毎に圧縮強度評価式を作成する手間、時間を省くことを目的とし、普通コンクリートの圧縮強度評価式を、高炉スラグ細骨材を細骨材に 30 %置換したコンクリートに対して適用することが可能であるか検討した。加えて、リバウンドハンマによる打撃で得られる反発度を用いて圧縮強度評価を行い、弾性波速度を用いた場合との比較、検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究でのコンクリート配合を表-1, 使用材料を表

表-1 コンクリート配合

コンクリートの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						AE (C×%)	SP (C×%)	SL (cm)	Air (%)
		W	C	S		G					
				S	BFS	G	RG				
N	45	157	349	789	-	964	-	0.006	1.6	8.0	4.3
	55	170	309	789	-	964	-	0.006	1.4	9.5	5.5
BFS	45	157	349	587	251	964	-	0.006	1.2	11.0	5.5
	55	170	309	587	251	964	-	0.006	1.0	10.5	3.8
RG	45	157	349	789	-	-	946	0.005	1.5	11.0	6.0
	55	170	309	789	-	-	946	0.005	1.1	11.0	5.5

*1 徳島大学 工学部 建設工学科 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博(工) 准教授(正会員)

*3 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)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博(正会員)

表-2 使用材料

使用材料	記号	物性等
普通ポルトランドセメント	OPC	表乾密度：3.16g/cm ³
普通砕砂	S	表乾密度：2.57g/cm ³ ，吸水率：2.43%，F.M.2.85，実積率：64.1%
福山産高炉スラグ細骨材	BFS	表乾密度：2.73g/cm ³ ，吸水率：0.89%，F.M.2.9，実積率：54.8%
普通砕石	G	表乾密度：2.57g/cm ³ ，吸水率：1.62%，F.M.6.66，実積率：55.9%
再生粗骨材	RG	表乾密度：2.52g/cm ³ ，吸水率：3.75%，F.M.6.59，実積率：57.6%
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
AE剤	AEA	高アルキルカルボン酸系

-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント (OPC) を使用した。高炉スラグ細骨材 (BFS) は BFS5 を使用し、細骨材に 30%置換した。再生粗骨材 (RG) は杭基礎を破碎・分級した低度処理のものである。

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%、55% の 2 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。供試体は円柱供試体 (φ100×200mm) を用いた。

2.2 各試験の測定方法

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法は、サンプリング周期の違いが圧縮強度評価式に与える影響を確認するため、サンプリング周期 2μs、10μs の 2 通りに設定しそれぞれ (A)、(B) と表記する。衝撃弾性波法による測定方法を図-1(a) に示す。供試体端面に加速度計を押し付けその近傍を直径 10mm の鋼球で打撃し、打撃端面と底面で多重反射した弾性波を測定する多重反射法を用いた。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⁾。

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

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

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。(A)、(B) とともに周波数解析方法は FFT 解析とした。(A) ではサンプリング

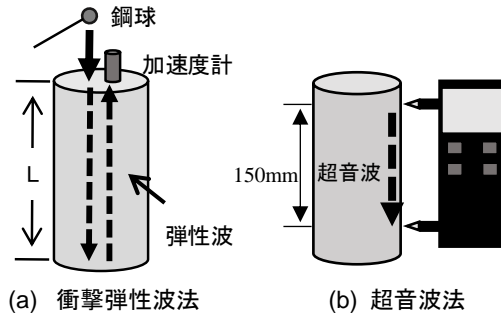


図-1 測定方法

時間 2μ 秒、解析点数を 4096 点に設定したため、周波数分解能は 122Hz である。(B) ではサンプリング時間 10μ 秒、解析点数を 4096 点に設定したため、周波数分解能は 24Hz である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。供試体の側面に測定器を当て、供試体表面の端子間 150mm 間を伝播する超音波を測定する表面法にて測定を行った。測定は波の伝搬速度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。

$$V_p = 150/t \quad (4)$$

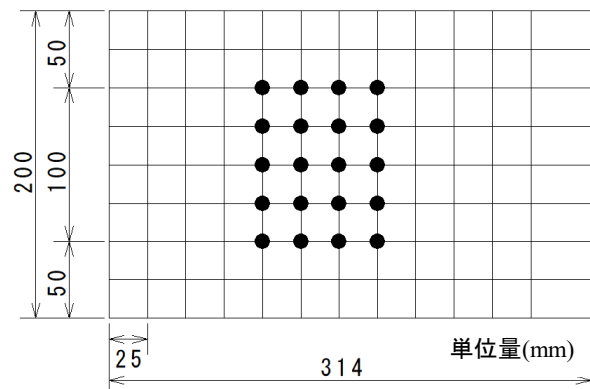


図-2 ハンマ打撃法の測定点

(3) ハンマ打撃法

ハンマ打撃法にはリバウンドハンマを用いて測定を行う。円柱供試体の側面図とハンマの打撃点を図-2に示す。一軸圧縮強度試験機を用いて荷重 20kN を载荷した状態で供試体側面を 20 点ずつ打撃した。

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)で表すことができる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使用材料の α 、 β 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、今回は $\pm 15\%$ を目標誤差率に設定し、範囲内に収まっているかを確認した。また、今回は普通コンクリートの圧縮強度評価式を BFS、RG を使用したコンクリートに対して適用可能か検討するため、誤差率について同様に確認した。

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

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

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

また、ハンマ打撃法から得られた反発度 R は、日本材料学会で提案されている式(8)に代入することで圧縮強度を推定し、圧縮強度評価式と同様に誤差率について評価を行った⁵⁾。ハンマ打撃法による圧縮強度推定に用いられる式に関する研究はすでに多く行われており、今回は日本材料学会で提案されている式を用い、弾性波速度から作成される圧縮強度評価式との比較を行った。

$$F_c = -18.0 + 1.27 \times R \quad (8)$$

3. 実験結果

3.1 材料毎の圧縮強度の関係

材齢 28 日の材料毎の圧縮強度の関係を図-3に示す。今回使用した BFS、RG は、圧縮強度が N と同程度であった。

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)で求めた弾性波速度と圧縮強度の関係をそれぞれ図-4(a)、(b)に示す。ここでは、W/C45%と 55%の 2 水準の結果を合わせて示している。弾性波速度と圧縮強度を指数近似したところ、各手法に

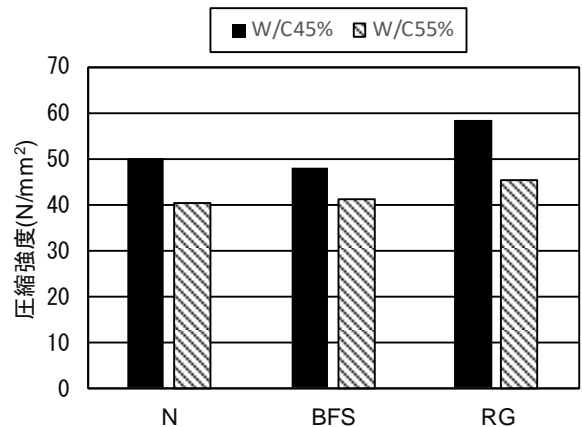
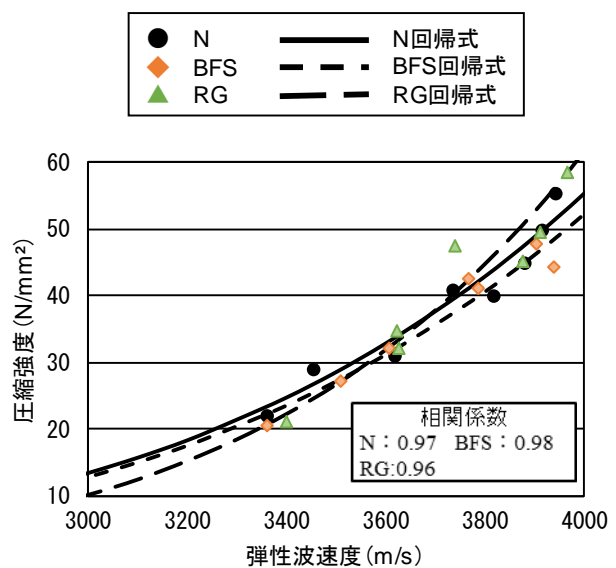
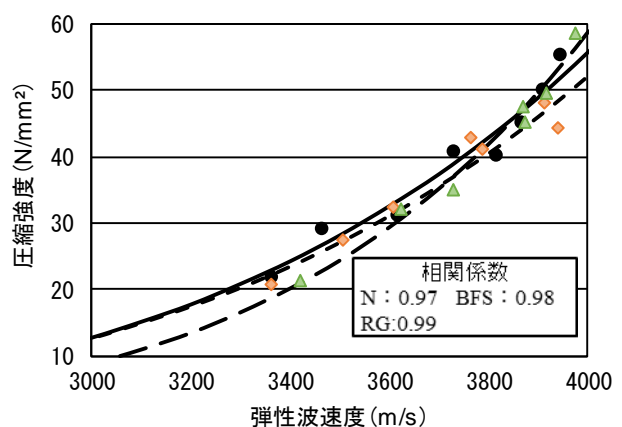


図-3 材齢 28 日の圧縮強度の結果



(a) 衝撃弾性波法(A)による関係式の結果



(b) 衝撃弾性波法(B)による関係式の結果

図-4 衝撃弾性波法による関係式の結果

おける相関係数は全ての配合において 0.96 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 節に示す方法で使用材料ごとに算出した。使用材料が変化しても圧縮強度評価式は成り立つが、その関係式は使用材料により異なることが確認できた。べき乗係数である α の値は RG のみ日本非破壊検査協会ですべての 4~6²⁾の範囲を超えて大きな値となった。また周波数分解能の観点から結果を比較すると、24Hz と高い分解能で解析を行った(A)に比べ 122Hz と低い分解能で解析を行った(B)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)では 0.97~0.99 となっているのに対して、(B)では 0.96~0.98 と僅かに低くなった。周波数分解能が 122Hz の場合、解析後のピークが一つずれると基本周波数も 122Hz だけ変化する。その分、算出される弾性波速度も $\Delta V_p = 2 \times 122 \times 0.2 = 48.8 \text{m/s}$ 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。

(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 節に示す方法で使用材料毎に算出した。相関係数は 0.92~0.96 となり、各材料で弾性波速度と圧縮強度の間に相関がみられたが、衝撃弾性波法を用いた場合よりも相関係数が小さくなった。超音波法では、コンクリート供試体の表面を伝播する波の伝搬時間を測定するため、供試体の表面状況に大きく依存する。そのため、供試体内部を伝播する弾性波を測定する衝撃弾性波法に比べ、外的要因を受けやすい表面波を測定する超音波法での相関係数が小さくなったと考えられる。これらのことから、今回の測定方法を適用し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るが、衝撃弾性波法を用いた場合よりも相関係数は小さくなること、関係式は使用材料により変化することが確認できた。さらに、 α 、 β の値は衝撃弾性波法で測定した際の値と大きく異なっていることが確認できた。これは、超音波法により伝搬する超音波の速度が衝撃弾性波法での弾性波の伝搬速度よりも速いことが原因であると考えられる。衝撃弾性波法での弾性波速度おおよそ 3000m/s~4000m/s であるのに対し、超音波法での超音波伝搬 3500m/s~4500m/s であった。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 反発度と圧縮強度の関係式

リバウンドハンマを用いたハンマ打撃法により得られた反発度と圧縮強度の関係を図-6 に示す。反発度によるコンクリートの圧縮強度推定は、簡易であることから

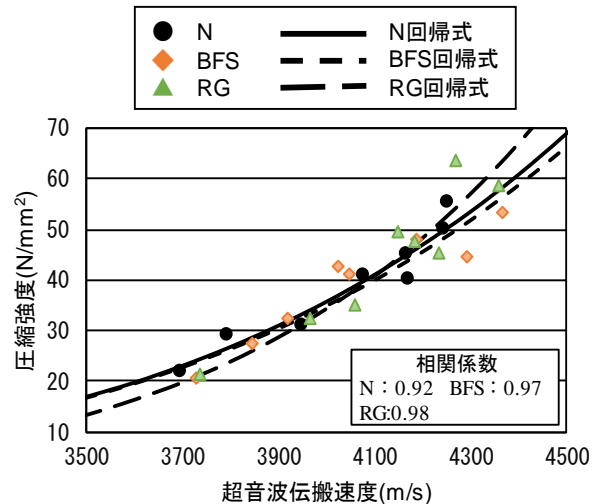


図-5 超音波法による関係式の結果

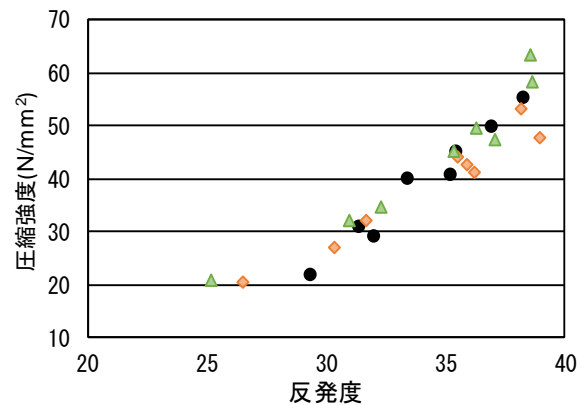


図-6 ハンマ打撃法による関係式の結果

実構造物に対して使用されているが、打撃する試験者の力加減や角度、コンクリートの表面状態に影響されることから、圧縮強度推定精度は衝撃弾性波法を適用した際の値よりも小さくなることが確認されている⁵⁾。今回の結果から、圧縮強度と反発度の間には相関があることが確認できた

3.4 圧縮強度の推定精度

各手法で算出した圧縮強度評価式の、 α 、 β の値を表-3 に示す。

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法(A)、(B)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±15%の範囲内に収まっているかを評価した。圧縮強度評価式はコンクリートの種類毎に作成したものを適用した。推定精度の結果と誤差率の最大値および平均値を図-7(a)、(b)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。周波数分解能の高い衝撃弾性波法(B)の誤差率が周波数分解能の低い(A)の誤差率よりも低くなることが確認できた。

(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-7(c)に示す。平均誤差率は 14.1, 最大誤差率は 17.2 となり、目標誤差率の範囲には入っていないが、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) ハンマ打撃法

リバウンドハンマを用いたハンマ打撃法で測定した反発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-7(d)に示す。平均誤差率が 44.2, 最大誤差率が 48.1 となり、目標値の範囲を大きく超えた。強度換算式は日本材料学会が提案する式(8)以外にも多くの研究者から発表されているが、各式による結果には大きな差があり、コンクリート表面の反発度を強度に換算することが困難であることを示している。したがって、精度を上げるためには、同一の構造物から切り取ったコンクリートコアの圧縮強度を用いて補正することが望ましいとされている。今回の研究では、換算式の補正を行わなかったため誤差率が大きく出ていると考えられる。また、反発度と圧縮強度の間には相関がみられたため、換算式の適切な補正を行えば圧縮強度の推定は可能であると思われる。

3.5 普通コンクリートの圧縮強度評価式による BFS コンクリートの強度推定

3.1 節で示すように、N と BFS の圧縮強度が同程度であったため、N の圧縮強度評価式による BFS の強度推定が可能か検討した。また、一般的に RG を使用したコンクリートの品質は、RG の品質に大きく影響を受けることが確認されており⁹⁾、N と同様の圧縮強度評価式の適用は難しいと考え、検討項目から除外した。衝撃弾性波法(B)から算出した N (普通コンクリート) の W/C 毎の圧縮強度評価式を用いて、BFS の圧縮強度を W/C 毎に推定した結果を図-8(a), (b)に示す。W/C45%での最大誤差率が 19.1 となり、目標誤差率の範囲を上回る結果となったが、全体が誤差率 20%以内に収まった。このことから、N の圧縮強度評価式は BFS を使用したコンクリートに対して汎用可能である可能性が示された。

4. まとめ

使用材料の異なる供試体に対して、衝撃弾性波法、超音波法、ハンマ打撃法を用いて弾性波速度、反発度を測定し、圧縮強度評価式とその推定精度を評価した。また、衝撃弾性波法から算出した N (普通コンクリート) の圧縮強度評価式を用いて、BFS, RG の圧縮強度を推定した結果、以下のことが明らかとなった。

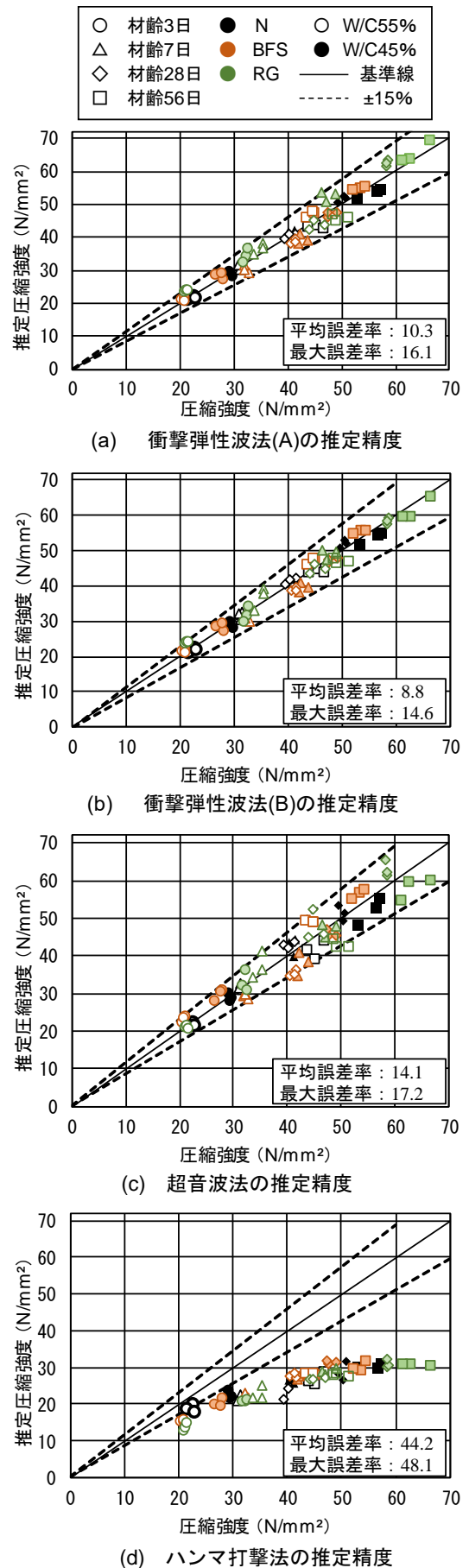
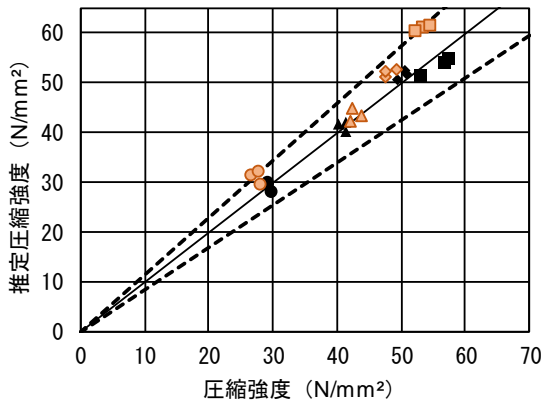
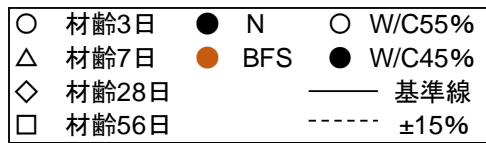


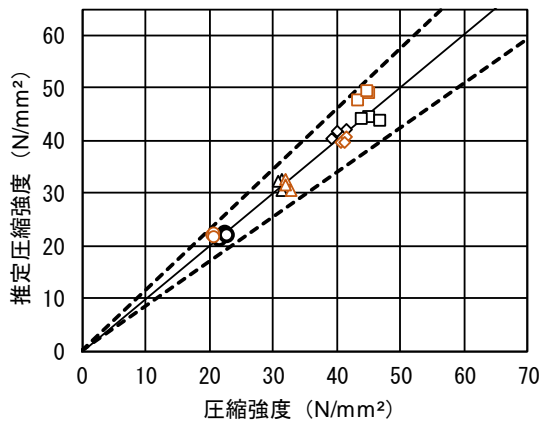
図-7 各手法での推定精度の結果

表-3 定数 α , β の結果

	W/C (%)	N		BFS		RG	
		45	55	45	55	45	55
衝撃弾性波法	α	4.677	4.965	5.1	4.041	4.637	4.913
	β	8.20×10^{-16}	6.84×10^{-17}	1.76×10^{-17}	7.48×10^{-14}	1.04×10^{-15}	1.02×10^{-16}
超音波法	α	5.103	5.494	5.706	1.716	5.163	5.507
	β	3.67×10^{-18}	1.13×10^{-19}	1.44×10^{-20}	4.8×10^{-6}	2.08×10^{-18}	1.02×10^{-19}



(a) W/C45%の汎用結果



(b) W/C55%の汎用結果

図-8 汎用した場合の推定精度の結果

- (1) 各使用材料において圧縮強度評価式を作成した場合、使用材料によって圧縮強度評価式は変化した。また、RGのべき乗係数 α は4~6の範囲外となったが、圧縮強度推定ではN, BFS, RGすべてで±15%以内の精度を持つことが示された。
- (2) 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。
- (3) ハンマ打撃法による圧縮強度推定を行う際は、日本材料学会が提案する式を基準として適切な補正を行う必要があることが確認された。
- (4) 衝撃弾性波法から算出したN(普通コンクリート)の圧縮強度評価式を用いて、BFSの圧縮強度を推定した場合、圧縮強度と弾性波速度の関係は同程度となり、Nの圧縮強度評価式を適用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日野幹雄:スペクトル解析(新装版), 朝倉書店, pp.10-18, 2010.5
- 3) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 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
- 4) 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
- 5) コンクリート標準示方書[基準編], 硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(JSCA-G504-1999), pp439, 1999
- 6) 菊池雅史, 道正泰弘, 安永亮, 江原恭二:再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.474, 11-20, 1995