

銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度評価推定に関する研究

徳島大学大学院 学生会員 ○鈴木彩莉 徳島大学大学院 正会員 渡辺健
 徳島大学大学院 フェロー会員 橋本親典 徳島大学大学院 学生会員 西山航平

1. はじめに

日本非破壊検査協会では圧縮強度を把握する手法として、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推定する研究が行われている¹⁾。圧縮強度と弾性波速度には相関関係があり、その関係は指数関数で表すことが出来る。しかし、コンクリートの配合や使用材料などによって関係式は変化すると考えられており、配合毎に圧縮強度の推定を行うことが求められている。近年では、骨材資源確保のために、銅スラグなどを骨材の代替材として用いるなど、材料の多様化が進んでいる。そこで、本研究では銅スラグ細骨材コンクリートに対して衝撃弾性波法による測定を行い、同じ配合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、圧縮強度評価式という）を作成し、圧縮強度の推定精度を評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの配合を表-1、使用材料を表-2に示す。銅スラグ細骨材の置換率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、置換率は0%、30%、60%の3水準に設定した。W/Cは55%で一定とし、粗骨材量が弾性波速度に与える影響を除去するため、粗骨材量も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、3日、7日、28日、56日間水中養生を行った。

2.2 圧縮強度の評価方法

衝撃弾性波法による測定方法を図-1に示す。供試体端面に加速度計を設置し、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した。得られた時間波形に対して、周波数分解能244HzでFFT解析を行い、周波数スペクトルを算出した。この時の卓越周波数を基本周波数 f_0 とし、式(1)に代入することで弾性波速度 V_p を算出した。

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (1)$$

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(2)で表される。また、圧縮強度 F_c と弾性係数 E_D には式(3)の関係がある。そのことから、弾性波速度 V_p と圧縮強度 F_c の関係は、式(4)で表すことが出来る。式(4)を圧縮強度評価式とする。最小二乗法を適用させて求めた α 、 β から推定圧縮強度を算出し、実際の圧縮強度との誤差率を評価した。

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

$$E_D = A \cdot f_c^B \quad (3)$$

$$F_c = \left\{ \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{A(1-\nu)} \right\}^{1/B} \cdot V_p^{2/B} = \beta \times V_p^\alpha \quad (4)$$

表-1 配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
			W	C	CUS	S	G	AEA	SP
N					-	790			6.2
CUS30	55	45	170	308	325	553	965	0.012	5.5
CUS60					651	316			4.6

表-2 使用材料

材料名:記号	物性など
普通ポルトランドセメント:C	密度:3.16g/cm³ 比表面積:3410cm²/g
阿波市産砕砂:S	表乾密度:2.57g/cm³ 吸水率:1.77%
板野町産砕石1505:G1	表乾密度:2.57g/cm³ 吸水率:1.60%
板野町産砕石2010:G2	表乾密度:2.57g/cm³ 吸水率:1.62%
小名浜産銅スラグ:CUS2.5	表面密度:3.53g/cm³ 吸水率:0.10%

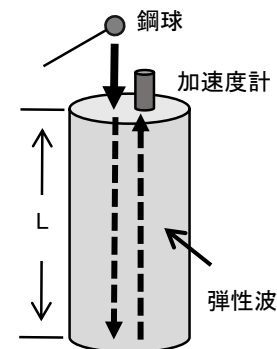


図-1 衝撃弾性波法の測定方法

3. 実験結果

3.1 静弾性係数と圧縮強度の関係

各配合の静弾性係数と圧縮強度の関係を図-2(a)に示す。
材齢7日以降の静弾性係数は、

N 配合と比較して CUS30 配合で 4~10%, CUS60 配合で 10~15% 増加しており、同じ圧縮強度でも銅スラグを混和することで静弾性係数は増加する傾向が確認できた。銅スラグはガラス質で徳島県産の骨材より硬いため、コンクリート自体が変形しにくくなり静弾性係数が増加したと考えられる。

3.2 圧縮強度評価式と推定精度

弾性波速度と圧縮強度の関係を図-2(b)に示す。CUS 配合における両者の関係も N 配合と同様に相関関係が成り立つことが確認できた。理論上では、式(2)のように弾性係数が大きくなると弾性波速度も大きくなるとされているが、本実験で算出した弾性波速度に大きな違いは確認出来なかった。これは密度の違いが影響していると考えられる。N 配合と比較すると、CUS30 配合では 3% 程度、CUS60 配合では 7% 程度、密度の増加が確認できた。式(2)を参考に弾性波速度の増加率を算出すると、1.5% 程度となった。銅スラグを混和することで静弾性係数と共に密度も増加したため弾性波速度に違いが表れなかったといえる。また、2.2 に記載した方法で算出した各配合の圧縮強度評価式を表-3 に示す。日本非破壊検査協会を示している、 α の範囲は 4~6¹⁾ であり、CUS 配合においても α の値はその範囲内に収まる結果となった。この評価式から推定した圧縮強度の誤差率を図-2(c)に示す。また、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(5)で表される。

$$\text{変動率} = \{(f_0 \pm D_t)/f_0\}^\alpha \quad (5)$$

$D_t = 244\text{Hz}$, $f_0 \doteq 10,000\text{Hz}$, $\alpha \doteq 5.8$ 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、0.86~1.15 となった。今回実験した周波数分解能を満たせば、銅スラグを使用した場合でも $\pm 15\%$ 以下の精度で推定可能である。このことから、新設構造物に適用する場合、圧縮強度評価式を配合毎に作成することで、より高い精度での推定が可能であると考えられる。

4. まとめ

銅スラグ細骨材コンクリートに対して指数関数による近似を行った結果、普通コンクリートと同様に圧縮強度評価式を作成することが出来た。

参考文献

- 1) NDIS 2426-2 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

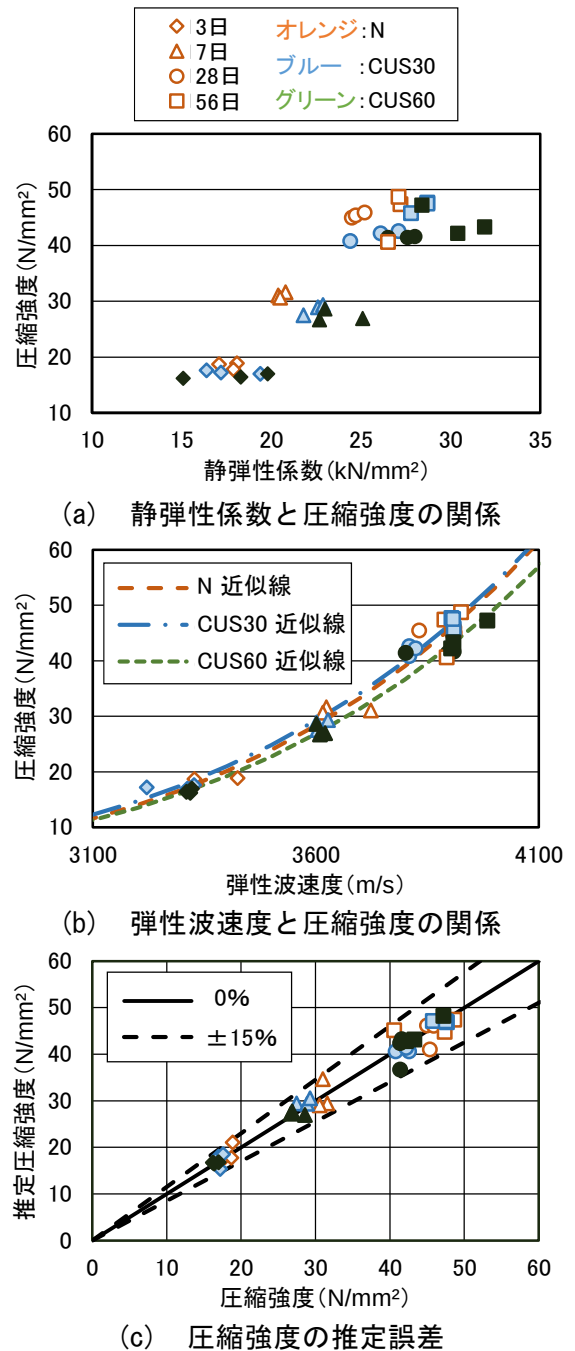


図-2 実験結果

表-3 圧縮強度評価式の算出結果

配合名	$F_c = \beta \times V_p^\alpha$
N	$F_c = 1.863 \times 10^{-20} \times V_p^{5.956}$
CUS30	$F_c = 6.841 \times 10^{-20} \times V_p^{5.801}$
CUS60	$F_c = 6.809 \times 10^{-20} \times V_p^{5.791}$