

論文 複数の再生細骨材を用いたコンクリートの性能に関する実験的考察

田中 宏和^{*1}・李 柱国^{*2}・流田 靖博^{*3}

要旨：再生骨材のコンクリートへの利用を促進することを目的として、本研究では、高炉スラグ細骨材、フェロニッケルスラグ細骨材およびごみ焼却灰溶融スラグ細骨材を用いて、海砂の一部をそれぞれの再生細骨材で単独に置換したコンクリートおよび2種類で置換したコンクリートのスランブ、空気量、力学性能、中性化速度、乾燥収縮率および凍結融解抵抗性などの性能を測定・比較し、ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材に高炉スラグ細骨材やフェロニッケルスラグ細骨材を併用してコンクリートに用いる可能性を明らかにした。

キーワード：コンクリート、力学性能、耐久性、高炉スラグ細骨材、フェロニッケルスラグ細骨材、ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材

1. はじめに

近年、コンクリートの環境負荷を低減するため、コンクリートに廃棄物や副産物を利用することを目的とした研究^{1, 2, 3, 4)}が以前より活発になっており、既に数種類の再生材がJIS規格化された。高炉スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグおよび廃コンクリート塊などを原料としながらも、品質が良好、かつ安定である骨材を製造する技術は急速に進んでおり、一般のコンクリート構造物にも、これらの再生材を使用したコンクリートの適用が可能になりつつある。

しかし、現状を見ると、再生材の利用が拡大しているとは言えず、いくつかの原因があると考えられる。一つ目は、再生材を利用したコンクリートの性能が懸念されていること。例えば、廃棄物の最終処分場枯渇の観点からみれば、ごみ焼却灰溶融スラグ骨材の利用を推進しなければならないが、ごみ焼却灰溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの性能は天然骨材を使用した場合に比べて若干低下することや未解明とされる性能があるため、施工事例は未だに少ない。2005年度におけるごみ焼却灰溶融スラグ排出量63万tの内、8.5万t程度がコンクリート用骨材として利用されている⁵⁾。二つ目は、再生材を製造する地域に限られているため、材料の輸送コストが上昇すること。例えば、全国に高炉スラグ骨材を副産する製鉄所は16工場⁶⁾、フェロニッケルスラグ骨材を出荷する精錬所は6工場しかないため²⁾、輸送費および輸送による環境負荷が天然骨材より増加する恐れがある。三つ目は、コンクリートの耐久性などを確保するために、再生骨材を単独に用いる場合の使用量に目安や限度が設けられており、一度に大量の再生材を利用するのが困難であること。例えば、高炉スラグ細骨材は20～60%⁷⁾、フェロニッケルスラグ細骨材は50%以下⁷⁾、ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材は20%以下である⁸⁾。一度に大量の再生材を利用するために、再生材の単独利用ではなく、複

数での利用が考えられる。例えば、各自治体で容易、かつ安価に入手できるごみ焼却灰溶融スラグ骨材を近隣の生コン工場に搬送して、他の種類の再生骨材と併用すれば、再生材の利用量は大幅に増加し、輸送コストを削減できると考えられる。しかしながら、コンクリートに再生細骨材を単独で利用する研究は多く報告されているが、複数での利用を検討した研究はあまりない。

したがって、本研究では、ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材（以下、WSと称する）と高炉スラグ細骨材（以下、BSと称する）またはフェロニッケルスラグ細骨材（以下、FSと称する）を併用するコンクリートの性能を実験的に考察し、複数の再生細骨材を設計基準強度 F_c が18N/mm²であるコンクリートに利用する可能性を検討する。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの調合

コンクリートの調合およびフレッシュ時の性状を表-1に示す。設計基準強度 F_c は18N/mm²であり、水セメント比を53%、細骨材率を42%とした^{9, 10)}。また、結合材として、B種高炉セメント（密度: 3.04g/cm³）、細骨材として、海砂（佐賀県唐津産）、高炉スラグ細骨材（岡山県倉敷産）、フェロニッケルスラグ細骨材（京都府宮津産）およびごみ焼却灰溶融スラグ細骨材（山口県宇部産）を単独または複数で使用した。用いた骨材の性質を表-2に示す。

2.2 実験の方法と測定項目

コンクリートを練り混ぜた直後に、スランブと空気量を測定し、圧縮強度、中性化抵抗性、乾燥収縮および凍結融解の試験体をそれぞれ製作した。所定の期間、試験体を水中で養生した後、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮率、中性化深さおよび相対動弾性係数の測定を行った。

以下にそれぞれの試験方法を述べる。

(1) フレッシュ時の性状

*1 山口大学大学院理工学研究科 感性デザイン工学専攻 (正会員)

*2 山口大学大学院理工学研究科 情報デザイン工学系専攻 准教授 博士（工学） (正会員)

*3 (財) 建材試験センター 西日本試験所 (正会員)

表－1 試験に用いたコンクリートの調合およびフレッシュ時の性状

シリーズ	調合		単位量(kg/m ³)							フレッシュ時の性状		
	W/C (%)	S/a (%)	W	C*	S	BS(置換率, %)	FS(置換率, %)	WS(置換率, %)	G	Sp/C (%)	Sl (cm)	Air (%)
N	53	42	165	311	763	0	0	0	1058	0.54	21.7	5.0
B5	53	42	162	305	379	379(50)	0	0	1051	0.44	20.1	5.0
W2	53	42	162	305	607	0	0	152(20)	1052	0.60	19.6	6.0
B3-W2	53	42	161	305	378	227(30)	0	151(20)	1048	0.54	19.7	5.6
B4-W2	53	42	157	295	294	294(40)	0	147(20)	1020	0.75	21.3	9.0
B5-W2	53	42	157	297	222	370(50)	0	148(20)	1026	0.75	20.5	7.0
B2-W3	53	42	158	298	370	148(20)	0	222(30)	1027	0.75	19.6	7.8
F3	53	42	163	307	540	0	231(30)	0	1069	0.60	22.5	5.0
F3-W2	53	42	163	307	387	0	232(30)	155(20)	1073	0.60	20.5	5.0
F3-W3	53	42	162	305	309	0	231(30)	231(30)	1070	0.60	20.5	5.8
F3-W4	53	42	162	307	233	0	233(30)	331(40)	1077	0.60	20.1	5.2

注) W/C: 水セメント比, S/a: 細骨材率, W: 水, C*: 高炉セメント, S: 海砂, BS: 高炉スラグ細骨材, FS: フェロニッケルスラグ細骨材, WS: ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材, G: 砕石, Sp: AE 減水剤, Sl: スランブ, Air: 空気量

表－2 実験に用いた骨材の性質

	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)	微粒分量 (%)	実績率 (%)	ふるいの通過率(%)										粗粒率
	絶乾	表乾				40mm	25mm	20mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
海砂	2.55	2.59	1.65	0.8	65.1					100	96	78	53	21	2	2.50
BS	2.72	2.73	0.27	4.4	58.5					100	100	96	59	25	13	2.08
WS	2.69	2.70	0.34	2.8	55.5					100	96	68	35	16	8	2.84
FS	3.12	3.13	0.33	-	58.0					100	100	96	72	43	22	1.67
砕石	2.71	2.72	0.41	0.4	58.5		100	95	45	3						6.57

スランブおよび空気量の測定は、それぞれ JIS A 1101, JIS A 1128 によって行った。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度の測定は、JIS A 1108:2006 によった。直径 10cm × 高さ 20cm の試験体を 20℃ 水中で 28 日間養生した。静弾性係数の測定は JIS A 1149:2001 によった。なお、静弾性係数の測定にはコンプレッソメーターを用いた。

(3) 乾燥収縮率および質量減少率

乾燥収縮率の測定は、JIS A 1129-1:2001 に準拠した。長さをコンパレータ方法によって、測定した上、材齢 1 週の長さを基準とした場合の変化率を算出した。この測定は 26 週まで行った。

(4) 中性化深さ

中性化深さの促進方法は、JIS A 1153:2003 に準拠した。試験体を 4 週まで水中養生した後、温度が 20℃、相対湿度が 60% の環境で材齢 8 週まで養生した。次に、試験体を炭酸ガス濃度が 5%、温度が 20℃、相対湿度が 60% の中性化試験槽に移入して、4 週と 8 週に促進中性化実験を行い、フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して、中性化深さを測定した。

(5) 相対動弾性係数および質量減少率

凍結融解試験は、JIS A 1148:2001 の A 法に準拠した。

30 サイクルごとに、試験体を凍結融解試験機から取り出し、ブラシでその表面を軽くこすり、水で洗浄した後、表面の水分を拭きとり、速やかに試験体のたわみ振動の一次共鳴振動数および質量を測定した。なお、試験は最大 300 サイクルまで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ時の性能

スランブの測定結果および AE 減水剤の使用量を図－1 に示す。スランブが 21±2cm になるために、AE 減水剤の添加量を調整した。AE 減水剤の添加量が多いほどスランブが大きいことを考慮すると、図－1(a) より、WS の置換率を 20% とし、BS の利用量は 40% 以下であれば、BS の増加に伴い、スランブは増加したが、BS の利用量は 40% 以上になると、スランブは低下した。また、図－1(b) を見ると、WS と BS の総利用量が一定であれば、WS の割合が大きいほど、スランブは小さい傾向が見られた。なお、図－1(c) によれば、WS と FS を併用する場合におけるスランブは、FS を単独で使用する場合より小さいが、WS を単独で使用する場合より大きく、FS の利用量が一定であれば、スランブは WS の増加に伴って減少することが認められた。

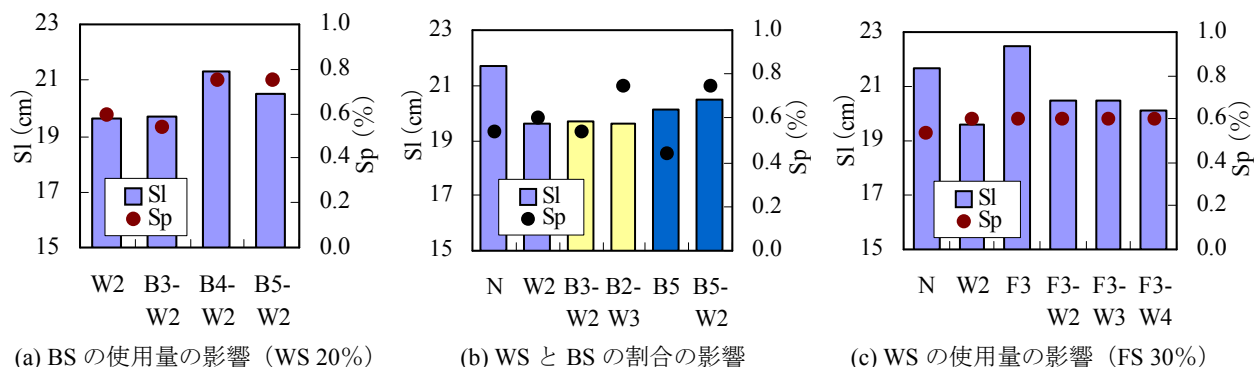


図-1 複数の再生材の使用がスランプに及ぼす影響

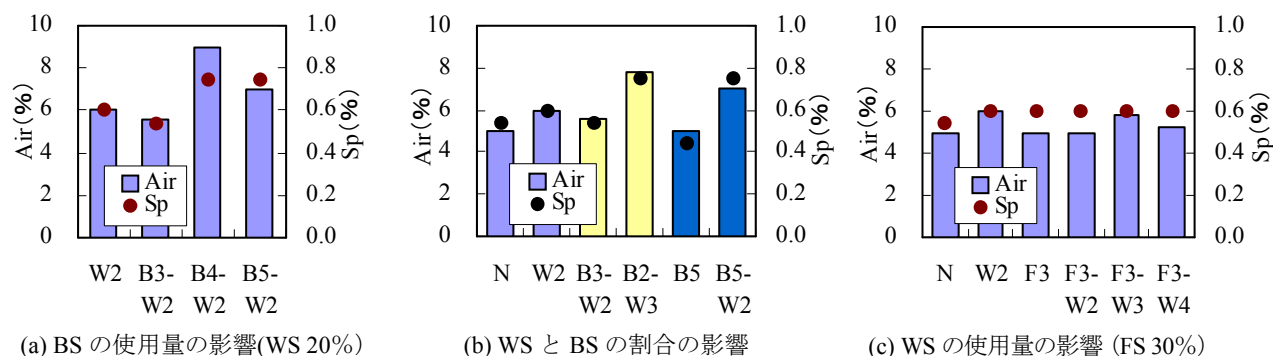


図-2 複数の再生材の使用が空気量に及ぼす影響

次に、空気量の実験結果を図-2 に示す。図-2(a)と図-2(b)より、BS と WS を併用する場合に、総置換率が50%以下、かつ WS の置換率が20%以下であれば、空気量は、凍結融解抵抗性を確保するための適正な範囲を超えなかった。一方、図-2(c)に示すように、30%の FS を使用した場合において、WS の使用量が40%まで増加しても、空気量は若干増加したが、適正な範囲にあった。

3.2 力学性能

各シリーズのコンクリートの28日圧縮強度を図-3 に示す。基準コンクリート N の圧縮強度は40.6 MPaであった。図-3(a)に示すように、20%の WS を使用すると、BS の使用量の増加に伴い、圧縮強度は低下した。詳しくみると、圧縮強度は、W2 が33.9 MPa、B3-W2 が33.3 MPa、B4-W2 が31.5 MPa、B5-W2 が29.6 MPaであり、シリーズ N に比べて、低下率がそれぞれ17%、18%、22%、27%であった。また、図-3(b)より、再生細骨材の総置換率

を50%とし、WS の割合が20%であれば、圧縮強度は、BS を50%で単独に使用した場合とほぼ同じであったが、WS の割合が30%になると、圧縮強度が低下した。なお、図-3(c)に示すように、50%の BS を使用した場合に、さらに20%の WS を使用すると、圧縮強度は大幅に低下した。これらの結果によって、BS と WS をそれぞれ30%と20%の割合で併用しうることがわかった。

図-3(d)によれば、20%の WS を単独に使用したシリーズ W2 より、30%の海砂を FS でさらに置換したシリーズ F3-W2 は圧縮強度が大きかった。一方、図-3(e)に示すように、FS と WS を併用した場合に、総置換率および WS の使用量が増加しても、圧縮強度は低下する傾向が殆ど見られなかった。シリーズ N に比べ、圧縮強度の低下率は僅か6~8%であった。WS が単独に使用される場合における強度低減は、FS の併用によって小さくなることが認められた。一方、図-3 に示すように、再生

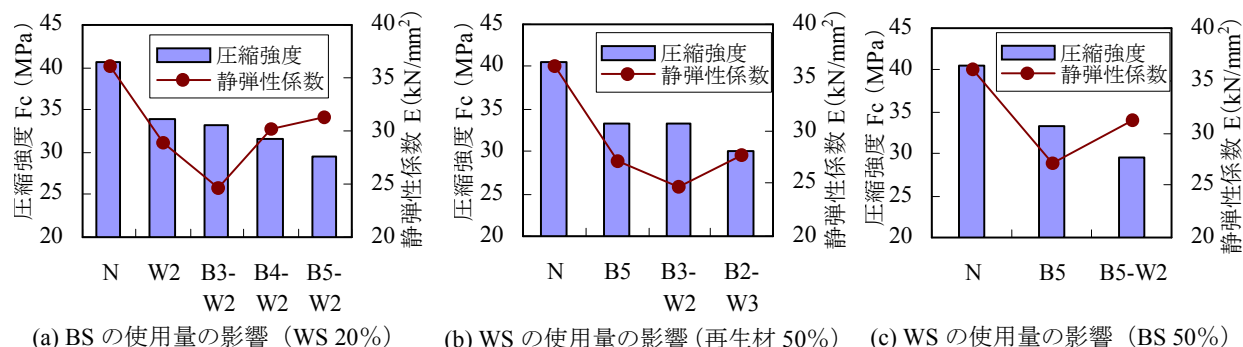
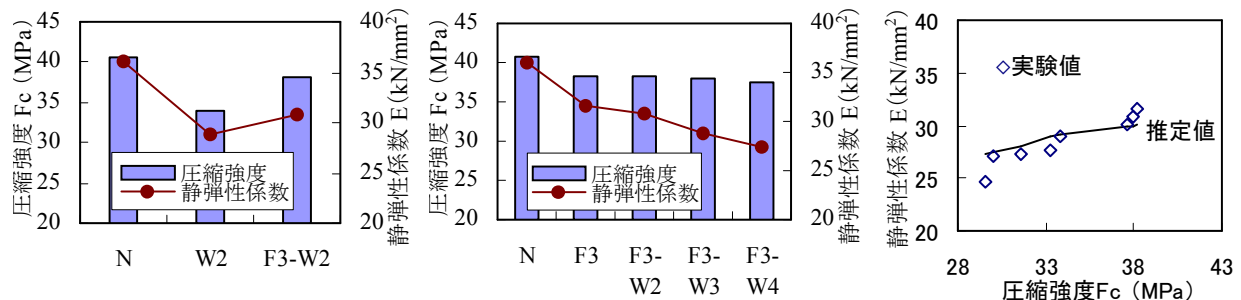


図-3 複数の再生材の使用が力学性能に及ぼす影響



(d) FS の使用量の影響 (WS 20%)

(e) WS の使用量の影響 (FS 30%)

図-3 複数の再生材の使用が力学性能に及ぼす影響

図-4 静弾性係数の実験値と推定値の比較

細骨材を利用したコンクリートの静弾性係数は、天然細骨材を使用したものより小さかった。BS と WS を併用する場合には、ばらつきが大きく、一定の傾向が見られなかったが、FS と WS を併用する場合には、FS の使用量の増加または WS の使用量の減少に伴って、静弾性係数は増加することが認められた。また、図-4 に示すように、WS と BS や FS を併用しても、コンクリートの静弾性係数は、式(1)と式(2)に示す推定式¹⁾による推定値に近いといえる。つまり、再生材を併用する場合でも、現行の静弾性係数推定式によって推定することが可能である。

$$E = 21.0 \times (\gamma/2.3)^{1.5} \times (F_c/20)^{1/2} \quad (1)$$

($15 \leq F_c \leq 36$ MPa の場合)

$$E = 335 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/24)^2 \times (F_c/60)^{1/3} \quad (2)$$

($F_c > 36$ MPa の場合)

3.3 耐久性能

(1) 乾燥収縮抵抗性

長さの変化率を図-5 と図-6 に示す。再生細骨材を使用しないシリーズ N に比べ、BS と WS を併用したコ

ンクリートの長さ変化率は小さく、総置換率が大きいはほど小さかった。一方、FS と WS を併用した場合には、長さの変化率は、基準シリーズ N より大きく、総置換率が大きいほど大きい傾向が見られた。また、図-5(b), (d) より、BS や FS を併用すれば、WS の利用量の増加に伴い、長さの変化率は大きくなることが分かった。なお、図-5(c) より、長さの変化率は、WS の単独使用より、FS を併用する場合に大きくなることが認められた。

しかし、図-6 に示すように、基準コンクリート、再生細骨材を単独に使用したコンクリート、および再生細骨材を複数で使用したコンクリートの間に、17 週までの長さの変化率に顕著な差は見られなかった。筆者らは、引き続き 26 週までの長さの変化率を測定し、別途に結果を報告させていただきたい。なお、これらの結果によって、WS と BS や FS とを併用する場合の乾燥収縮は、それぞれの単独使用の場合に比べ、あまり差異がなく、 800×10^{-6} の長さ変化率以下に確保できることが認められた。

(2) 中性化抵抗性

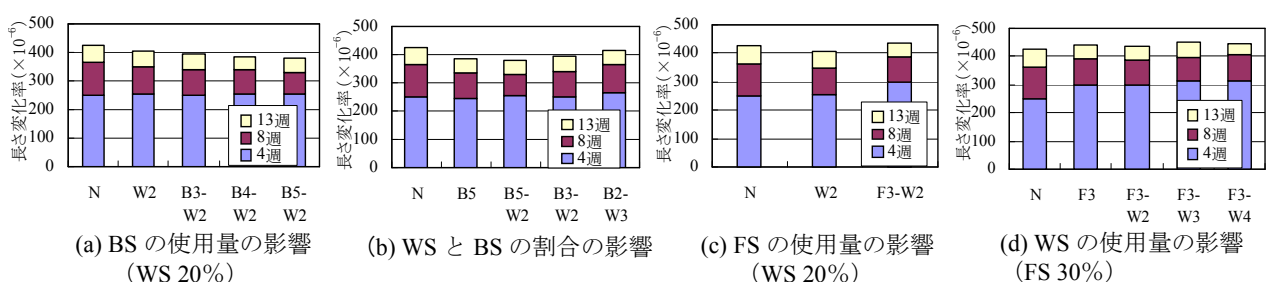
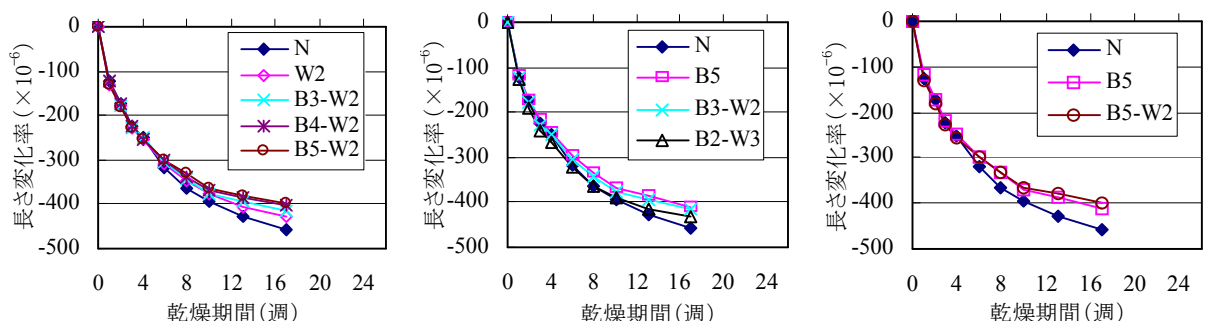


図-5 複数の再生材の使用が長さ変化率に及ぼす影響

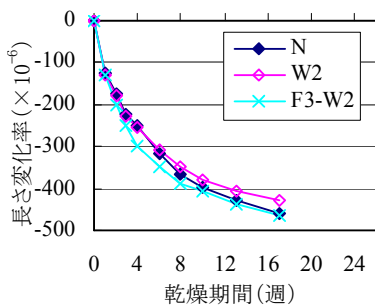


(a) BS の使用量の影響 (WS 20%)

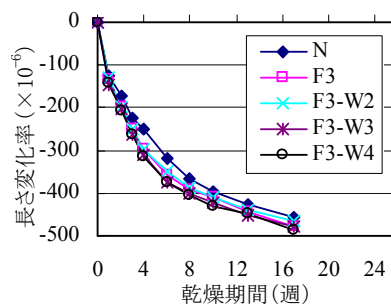
(b) WS の使用量の影響 (再生材 50%)

(c) WS の使用量の影響 (BS 50%)

図-6 複数の再生材の使用が長さ変化率に及ぼす影響(17 週までの結果)



(d) FS の使用量の影響 (WS 20%)



(e) WS の使用量の影響 (FS 30%)

図-6 複数の再生材の使用が長さ変化率に及ぼす影響(17 週までの結果)

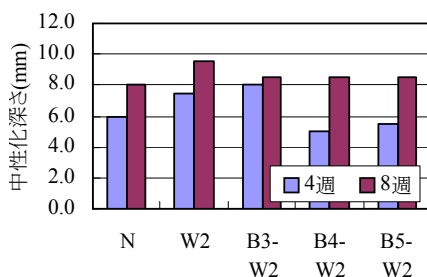
中性化促進試験の結果を図-7 に示す。4 週の中性化深さは小さく、相対的に大きな実験誤差が生じたため、ばらつきが大きく、実験結果に一定の傾向が見られなかった。しかし、再生細骨材の単独での使用と複数での使用にも拘わらず、再生細骨材を使用したコンクリートの 8 週間の中性化深さは、基準シリーズ N より大きかった。

また、図-7(a), (b), (c)によれば、再生細骨材の総使用量に拘わらず、BS と WS を併用する場合の 8 週間の中性化深さは、BS または WS を単独に使用する場合より

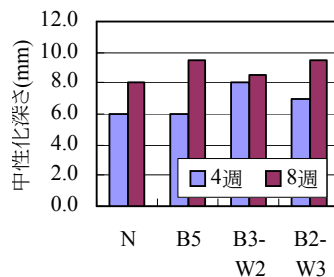
(3) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験によって得られた相対弾性係数を図-8 に示す。図-8(a), (b), (c)より、300 サイクルの時点で、BS と WS を併用する場合の相対動弾性係数は、基準シリーズ、20%WS の単独使用および 50%BS の単独使用の場合より若干小さかったが、すべて 95%以上であった。図-8(a)より、WS の使用量を 20%一定とする場合に、ばらつきがあったが、BS の使用量の増加に伴い、相対動弾

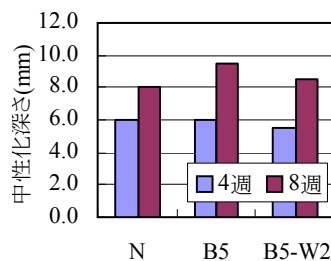
性係数が低下した。また、図-8(b)より、BS と WS の総置換率が 50%と一定する場合、WS の割合の増加に伴い、相対動弾性係数は減少することが認められた。なお、図-8(c)よれば、50%の BS を単独で利用した試験体に比べれば、20%の BS を併用したものの相対動弾性係数は低下したが、依然、高い凍結融解抵抗性



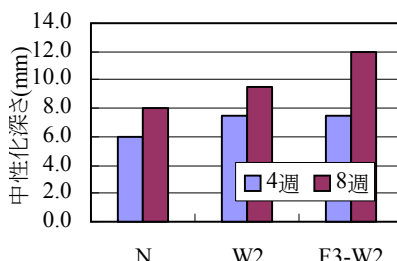
(a) BS の使用量の影響 (WS 20%)



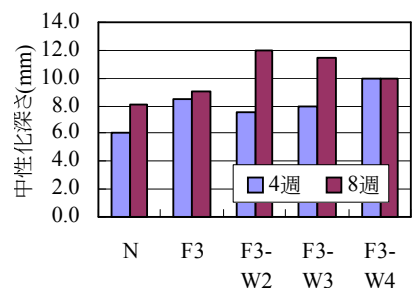
(b) WS の使用量の影響(再生材 50%)



(c) WS の使用量の影響 (BS 50%)

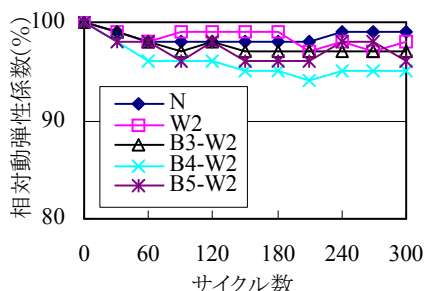


(d) FS の使用量の影響 (WS 20%)

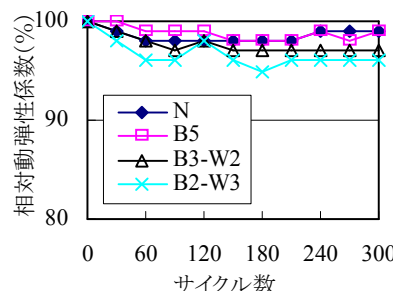


(e) WS の使用量の影響 (FS 30%)

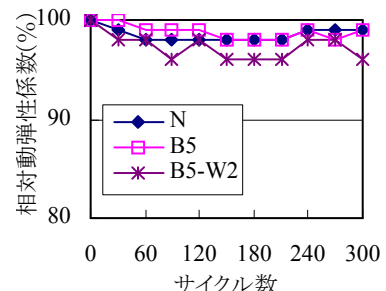
図-7 複数の再生材の使用が中性化深さに及ぼす影響(17 週までの結果)



(a) BS の使用量の影響 (WS 20%)



(b) WS の使用量の影響 (再生材 50%)



(c) WS の使用量の影響 (BS 50%)

図-8 複数の再生材の使用が耐久性に及ぼす影響

を有することがわかった。紙面の都合で各コンクリートの質量変化率の実験結果を示さないが、質量変化率は、WS を単独で利用した場合に比べ、BS と WS を併用した場合には、大きくなった。筆者らは、FS と WS を併用した試験体の相対動弾性係数を測定中であり、別途に結果を報告させていただく。

4. 結論

本研究では、高炉溶融スラグ細骨材(BS)やフェロニッケルスラグ細骨材(FS)とごみ焼却灰溶融スラグ細骨材(WS)を併用したコンクリートの性能を考察した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

(1) スランブ

WS の置換率が 20%であり、かつ BS の利用量は 40%以下であれば、BS の増加に伴い、スランブは増加した。WS と BS の総利用量が一定であれば、WS の割合が大きいほど、スランブは小さい。WS と FS を併用する場合のスランブは、FS を単独に使用する場合より小さいが、WS を単独に使用する場合より大きい。

(2) 空気量

BS と WS を併用する場合に、総置換率が 50%以下、かつ WS の置換率が 30%以下であれば、空気量は、3~6%と確保できる。30%の FS を使用した場合において、WS の使用量の増加に伴い、空気量は若干増加するが、6%以下である。

(2) 力学性能

20%の WS を使用すると、BS の使用量の増加に伴い、圧縮強度は低下する。BS と WS の総置換率が 50%であり、かつ WS の割合が 20%以下であれば、コンクリートの圧縮強度は、BS を 50%で単独に使用した場合とほぼ同じであるが、WS の割合が 20%を超えると、圧縮強度が低下する。また、FS と WS を併用した場合に、総置換率および WS の使用量が増加しても、圧縮強度はあまり低下しない。

(3) 乾燥収縮

天然骨材を用いたコンクリートに比べ、BS と WS を併用したコンクリートの乾燥収縮率は小さく、総置換率が大きいほど小さいが、FS と WS を併用したコンクリートの乾燥収縮率は大きく、総置換率が大きいほど大きい。また、乾燥収縮率は、WS の単独使用より、FS と WS を併用する場合の方が大きい。

(4) 中性化抵抗性

BS と WS を併用する場合の 8 週間の中性化深さは、BS または WS を単独に使用する場合より小さい。FS と WS を併用する場合の 8 週間の中性化深さは、FS または WS の単独使用の場合より大きい。WS は BS を単独に使用した時の中性化速度を低減する効果がある。

(5) 凍結融解抵抗性

BS と WS を併用する場合の耐久性指数は、BS を単独で利用する場合より若干小さいが、95%以上である。WS の使用量を 20%と一定にする場合、BS の使用量を増加するほど、耐久性指数は小さくなった。また、BS と WS の総置換率が 50%と一定にすれば、WS の割合が大きいほど、耐久性指数は小さい。

本研究は、一定の水セメント比を有し、高炉セメントと再生細骨材を用いたコンクリートの性能を考察したものである。今後、セメントの種類と設計基準強度を変えて、複数の再生細骨材を利用したコンクリートの性能を考察する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、(財) 建材試験センター西日本試験所の井上英雄副所長、杉原大祐氏をはじめとする方々より、多大なご助言、ご協力をいただきました。また、萩森興産(株)、カヤ興産(株)および宇部市環境保全センターに、再生細骨材をいただきました。また、試験体の製作に際して山口大学大学院理工学研究科の松尾栄治助教、李慶濤君、張文博君、山口大学工学部の山中慎祐君よりご協力をいただきました。ここに付記し、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀部玄ほか：フェロニッケルスラグ細骨材、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp.1081-1082, 1998.9
- 2) 斎藤丈士ほか：都市ごみ溶融スラグを骨材に用いたコンクリートの性状に関する実験研究、日本建築学会技術報告集、第 15 号, pp.395, 2002.6
- 3) 戸田勝哉ほか：溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.1, pp.1367-1372, 2003
- 4) 谷山教幸ほか：ごみ溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの調合に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp.355-356, 2004.7
- 5) <http://www.hazama.co.jp/pressrelease/2008/080702.html>
- 6) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(平成 20 年度実績)、pp.4, 2009.9
- 7) 四国地区骨材資源対策技術委員会：スラグ細骨材を用いたコンクリートを施工する上でのポイント、<http://www.skr.mlit.go.jp/yongi/gyoumu/gijutsu/image/kotuzai02.pdf>, 2003
- 8) (財)岐阜県建設研究センター：溶融スラグの土木資材への利用に関するガイドライン(案)、pp.18-28, 2003
- 9) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリートの施工指針・同解説、pp.40-55, 1984
- 10) 日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説、pp.32-52, 2001
- 11) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説、pp.159-160, 1999