

論文 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質

齊藤 和秀*1・木之下 光男*2・伊原 俊樹*3・吉澤 千秋*4

要旨：高炉スラグ細骨材のコンクリート用骨材としての有効性，特にコンクリートの耐久性を向上させる効果を調べた。本研究では高炉スラグ細骨材を水セメント比 45 および 30% の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートに適用し，コンクリートの諸物性（フレッシュ性状，硬化物性）を天然細骨材を 100% 使用したコンクリートと比較した。その結果，高炉スラグ細骨材を 25～50% 置換したコンクリートは天然細骨材使用コンクリートと同等のフレッシュ性状を示すとともに，乾燥収縮を約 6～19%，自己収縮を約 8～12% 低減し，強度発現性，凍結融解抵抗性および中性化抵抗性についても優れた性質を示した。

キーワード：高炉スラグ細骨材，コンクリート，高性能 AE 減水剤，乾燥収縮，自己収縮，耐久性

1. はじめに

近年，良質な天然骨材の枯渇化や環境悪化への懸念から海砂を中心に天然砂の採取が規制されてきており，天然資源の保全や省エネルギーの観点からも高炉水砕スラグ細骨材（以下，スラグ細骨材）の使用が注目されてきている^{1),2),3)}。

スラグ細骨材のコンクリート用骨材への利用については古くから各方面で研究が行われており，スラグ細骨材の使用がコンクリートの諸物性に与える影響については既に多くの知見が得られており^{4),5),6),7),8)}，以下のごとくまとめられる^{9),10)}。

- (1) 単位水量が 2～10% 程度増加する
- (2) 空気を連行しやすい
- (3) ブリーディング量が多くなる
- (4) 固結防止剤を使用したスラグ細骨材の場合，凝結が遅延する
- (5) 圧縮強度は同一水セメント比でみると初期材齢では若干低い，長期材齢では同等以上となる
- (6) 乾燥収縮はやや小さくなる
- (7) 中性化速度は同等
- (8) 凍結融解抵抗性はやや低下する

しかしながら，これらの知見は，水セメント比が 50～70% 程度のブレンまたは AE 減水剤コンクリートを対象としてスラグ細骨材を添加した時にワーカビリティを一定とするために単位水量を増加させた配合で比較して得られたものが大多数を占める。

そこで本研究では，高性能 AE 減水剤を使用した水セメント比 45 および 30% のコンクリートにスラグ細骨材

を適用し，高性能 AE 減水剤添加量によりワーカビリティを調節し，天然細骨材を 100% 使用した場合と同じ配合でコンクリートの諸物性を比較し，スラグ細骨材のコンクリート用骨材としての有効性，特にコンクリートの耐久性を向上させる効果を調べた結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 高炉スラグ細骨材

スラグ細骨材は JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第 1 部：高炉スラグ骨材に適合し，製造所の異なる SG1～SG4 を使用した。表-1 にその物性値を示す。

表-1 高炉スラグ細骨材の物性値

スラグ細骨材	SG1	SG2	SG3	SG4
区分	BFS5	BFS5	BFS5	BFS5
表乾密度(g/cm ³)	2.73	2.81	2.73	2.77
吸水率(%)	0.45	0.73	0.60	0.75
粗粒率	2.56	3.54	2.26	2.26

2.2 その他の使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，ブレン値 3300cm²/g，記号 N）および高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³，ブレン値 3850cm²/g，記号 BB），細骨材は大井川水系産陸砂（表乾密度 2.58g/cm³，吸水率 2.31%，F.M.2.87，記号 S），粗骨材は岡崎産砕石（表乾密度 2.68g/cm³，吸水率 0.78%，実積率 60.0%，記号 G），混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（記号 HP）を使用した。

*1 竹本油脂(株)第三事業部 研究開発部 グループリーダー (正会員)

*2 竹本油脂(株)第三事業部 研究開発部 部長 工博 (正会員)

*3 竹本油脂(株)第三事業部 研究開発部 研究員 (正会員)

*4 JFE ミネラル(株)製鉄関連事業部 技術サービス部 部長 工博 (正会員)

2.3 実験計画および試験方法

2.3.1 実験 1 モルタル試験

コンクリート試験に使用するスラグ細骨材を選定する目的で各種スラグ細骨材を使用したモルタルの流動性と乾燥収縮を試験した。天然細骨材 S を基準として、スラグ細骨材は容積で 50%置換して使用した。モルタルの配合は、水セメント比 45%、S/N=2.5(容積比)とし、高性能 AE 減水剤の添加量は C×0.75%の一定とした。なお、空気量の影響をなくするため消泡剤を使用して NON-AE とした。モルタルの練混ぜは JIS R 5201 に準拠して行い、フロー値の測定は JIS R 5201 に規定されているフローコーンを用いた 0 打フローとした。乾燥収縮の試験体は 4×4×16cm のサイズとし、測定は JIS A 1129-3 に準拠し、供試体成形後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで標準水中養生した後の長さを基長として温度 20℃、湿度 60%RH の室内に保管し乾燥期間 26 週まで測定した。

2.3.2 実験 2 コンクリート試験

スラグ細骨材 SG1 を使用してコンクリートの諸物性（フレッシュ性状および硬化物性）を天然細骨材 S を使用したコンクリートと比較した。また高炉水砕スラグを微粉末の形で添加した場合と比較するため水セメント比 45%では高炉セメント B 種を使用したコンクリートについても試験した。実験の因子と水準を表-2 に示す。

SG1 は S に容積置換して使用することとし、細骨材の混合粒度分布を求めた。図-1 に示すとおり、S と SG1 の粒度分布が異なるため、混合粒度分布は F.M.が 2.56～2.87 の範囲で変化したが、いずれの混合比率においても JIS A 5308 の粒度分布の範囲に収まることを予め確認した。

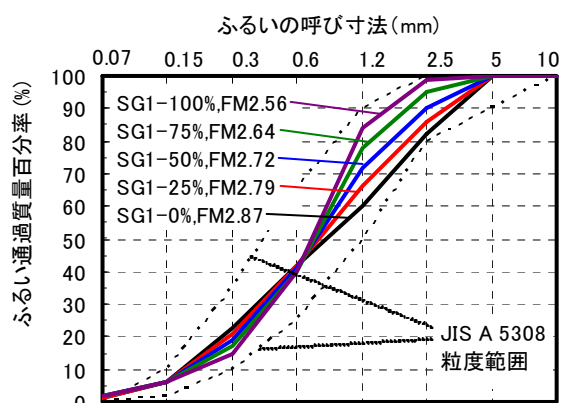


図-1 細骨材の混合粒度分布

表-2 実験の因子と水準

因子	水準
セメント	N, BB
水セメント比(%)	45,30
スラグ細骨材置換率(%)	0,25,50,75,100

(1) コンクリートの配合

高性能 AE 減水剤を使用し、設計基準強度が 36N/mm² 程度の普通強度のコンクリートを想定した水セメント比 (以下、W/C)45%のスランブ 8cm と、設計基準強度が 60N/mm² 程度の高強度コンクリートを想定した W/C=30%、スランブ 23cm の 2 種類の配合を設定した。コンクリートの配合を表-3 に示す。スラグ細骨材を置換する場合も単位水量と単位粗骨材かさ容積は一定とした。目標スランブおよび目標空気量は W/C=45%ではそれぞれ 8±1cm, 4.5±1%, W/C=30%では 23±1cm, 3.0±1%とした。

表-3 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	SG1 (%)	単位量(kg/m ³)							
				W	C	S	SG1	G			
45N0	N	45.0	0	150	333	784	0	1061			
45N25			25			588	207				
45N50			50			392	415				
45N75			75			196	622				
30N0			0			160	533		802	0	884
30N25	25	601	213								
30N50	50	402	426								
30N100	100	0	849								
45B0	BB	45.0	0	150	333			771	0	1061	
45B25			25			578	203				
45B50			50			387	405				
30B0			0			160	533	787	0		884

(2) 試験方法

練混ぜは、強制パン型ミキサ(容量 55L)を用いて、W/C=45%では全材料投入後 90 秒練り混ぜ後排出した。W/C=30%では全材料投入後 120 秒練り混ぜた後ミキサー内に 3 分静置後 60 秒練り混ぜ排出した。なお、試験温度は 20℃、練り量は 40L とした。

スランブは JIS A 1101、空気量は JIS A 1128、凝結時間は JIS A 1147、ブリーディング量は JIS A 1123 に準拠して測定した。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し、標準養生は材齢 7,28,91 日,26 週および 1 年とした。簡易断熱養生は材齢 28 および 91 日とし、厚さ 200mm の発泡スチロール製(熱伝導率 0.04W/mK 程度)の断熱箱(750×1200×600mm)で材齢 7 日まで養生し、以降 20℃で封かん養生した。静弾性係数は JIS A 1149 に準拠した。乾燥収縮は JIS A 1129-3 に準拠し、脱型後材齢 7 日まで標準水中養生後を基長とし温度 20℃,60%RH の室内で乾燥期間 26 週まで測定した。自己収縮は JCI 自己収縮委員会の試験方法に準拠し、ひずみの測定は埋込型ひずみゲージを使用し、凝結始発時のひずみ値を基長とし、材齢 91 日まで測定した。凍結融解試験は JIS A 1148、促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。

3. 実験結果

3.1 実験 1 モルタルによる流動性と乾燥収縮

モルタルのフロー値を図-2 に示す。いずれのスラグ細骨材を混合した場合も天然細骨材 S100%の方が大きいフローとなった。スラグ細骨材の種類の違いでは、モルタルの流動性が骨材の粒形と粒度分布の影響を受けるため、粗粒率の小さいもの程フローが小さくなる傾向が見られた。また、粗粒率の大きいSG2は粒度調整のため特殊に粗く製造されたものであるため、モルタルが荒々しくやや分離気味となった。乾燥収縮試験結果を図-3 および表-4 に示す。SG1~SG4を50%混合することにより乾燥収縮ひずみは約16~21%低減した。スラグ細骨材の種類の違いによる乾燥収縮低減効果の違いはわずかであった。以上の結果をまとめると、流動性の面ではSG2とSG1はほぼ同等であり、フレッシュモルタルの状態ではSG1が優れていたため、収縮低減効果の面ではSG2の方が若干優れていたがコンクリート試験にはSG1を使用することにした。

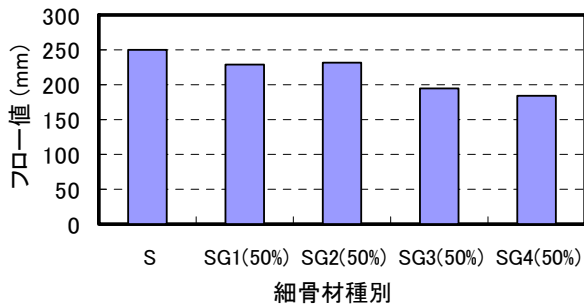


図-2 モルタルフロー値

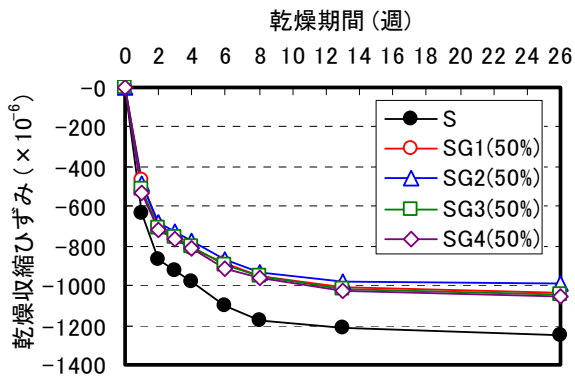


図-3 乾燥収縮試験結果

表-4 乾燥収縮試験結果まとめ

細骨材種別	乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$, 26 週)	収縮低減率 (%)
S	-1249	-
SG1(50%)	-1034	17.2
SG2(50%)	-990	20.7
SG3(50%)	-1046	16.3
SG4(50%)	-1055	15.5

3.2 実験 2 コンクリート試験結果

3.2.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5 および図-4 に示す。

(1) 混和剤添加量

目標スランブを得るための HP の添加量はスラグ細骨材置換率が 50%まではほぼ同等であったが 50%を超えると増加した。45N75 では $C \times 0.85$ 以上添加してもスランブが増加せずやや分離傾向が認められたため、目標スランブは得られなかったが供試体を採取した。30N100 では約 1.2 倍の添加量を必要とし、目標スランブを得ることができたが、やや荒々しいコンクリートとなった。

(2) ブリーディング

W/C=45%では置換率 50%までは天然細骨材とほぼ同等であったが、置換率 75%では約 3 倍に増加した。W/C=30%ではブリーディングは認められなかった。

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	HP 添加量 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	凝結(h)		ブリーディング量 (cm^3/cm^2)
					始発	終結	
45N0	0.75	8.0	4.2	21.0	4.5	6.6	0.039
45N25	0.75	8.5	4.5	21.0	4.6	6.8	0.029
45N50	0.75	7.5	4.4	21.0	4.8	6.9	0.022
45N75	0.85	2.5	4.7	22.0	6.7	9.1	0.147
45B0	0.60	8.0	4.6	20.0	5.0	7.8	0.029
45B25	0.60	8.0	5.0	20.0	5.2	7.7	0.022
45B50	0.60	8.0	4.8	20.0	4.8	7.5	0.029
30N0	1.10	23.0	3.1	23.0	3.9	6.0	0
30N25	1.05	22.0	2.8	23.0	3.7	5.8	0
30N50	1.00	23.0	3.2	23.0	3.6	5.7	0
30N100	1.30	22.0	3.1	23.0	4.8	7.3	0
30B0	0.85	22.5	3.0	22.0	4.8	6.5	0

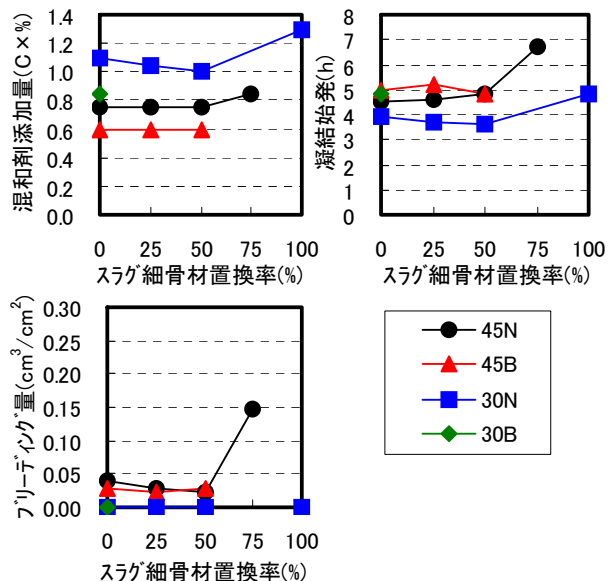


図-4 フレッシュコンクリートの試験結果

(3) 凝結時間

W/C=45%では置換率の増加に伴い凝結時間は遅延する傾向があり、置換率50%までは約20分程度遅延した。この遅延は固結防止剤の添加によるものであり程度はわずかであった^{3),12)}。しかし、置換率が75%になると高性能AE減水剤の添加量が増加したため約120分程度遅延した。W/C=30%では置換率50%まで凝結遅延は認められなかったが、100%では高性能AE減水剤の添加量が増加したため約80分程度遅延した。

3.2.2 乾燥収縮および自己収縮

乾燥収縮および自己収縮試験結果を図-5、収縮試験結果のまとめを表-6、スラグ細骨材置換率と乾燥収縮ひずみ、乾燥収縮低減率、質量減少率および自己収縮ひずみ、自己収縮および質量減少率の関係を図-6に示す。

(1) 乾燥収縮

スラグ細骨材置換率の増加に伴い乾燥収縮ひずみと質量減少率は低減し、置換率25~50%までの範囲では、いずれの配合においてもスラグ細骨材を混合することにより、コンクリートの乾燥収縮ひずみは約 $100\sim130\times 10^{-6}$ 程度、収縮低減率で約6~19%低減し、質量減少率は約12~20%程度低減した。コンクリートのワーカビリティは低下したが50%以上置換することで45N75では

27.1%、30N100では32.3%の低減効果が得られた。スラグ細骨材の収縮低減メカニズムについては、(1)スラグ細骨材表面の組織が潜在水硬性による水和反応により緻密化した^{4),5)}、(2)スラグ細骨材の吸水率が小さいためもともとコンクリート中の水分が少なく乾燥水分量(質量減少率)が小さい、等が考えられるが十分な解明には至っておらず今後詳細な検討が必要である。スラグ細骨材無添加の45N0,45B0,30N0,30B0の26週における乾燥収縮ひずみはそれぞれ、-658,-662,-617および-616 $\times 10^{-6}$ であり、セメントの違いによる乾燥収縮の差はわずかであった。高炉水砕スラグが微粉末として混合されている45B0と30B0の乾燥収縮は、それぞれ45N0と30N0とほぼ同等であり、高炉水砕スラグ微粉末に乾燥収縮低減効果は認められなかった。

表-6 収縮試験結果まとめ

記号	乾燥収縮 (乾燥期間 26 週)			自己収縮 (材齢 91 日)	
	乾燥収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	収縮 低減率 (%)	質量 減少率 (%)	自己収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	収縮 低減率 (%)
45N0	-658	-	2.27	-	-
45N25	-598	9.1	2.17	-	-
45N50	-531	19.3	1.83	-	-
45N75	-480	27.1	1.58	-	-
45B0	-662	-	2.47	-	-
45B25	-621	6.2	2.39	-	-
45B50	-555	16.2	2.17	-	-
30N0	-617	-	1.13	-428	-
30N25	-572	7.3	1.07	-392	8.4
30N50	-512	17.0	0.91	-378	11.7
30N100	-418	32.3	0.72	-	-
30B0	-616	-	1.17	-	-

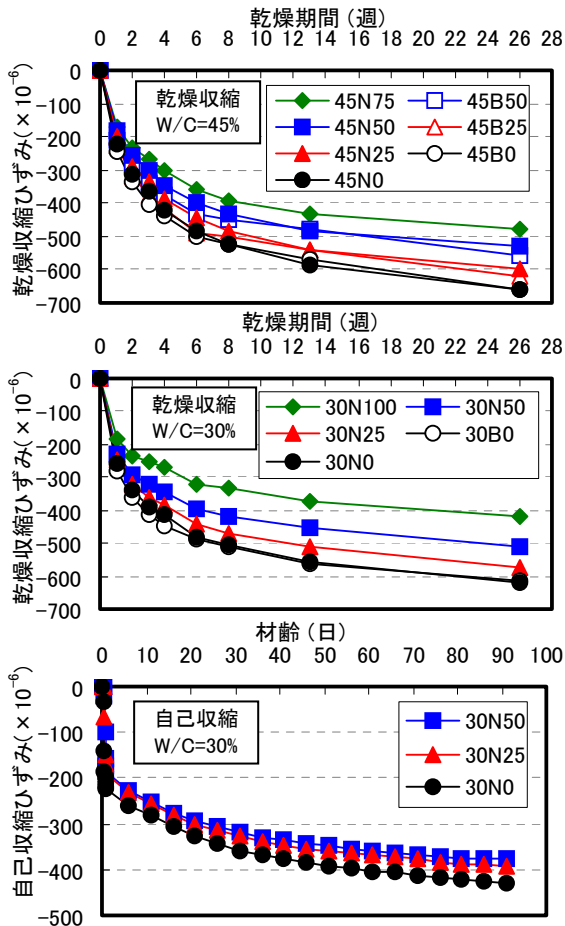


図-5 乾燥収縮および自己収縮試験結果

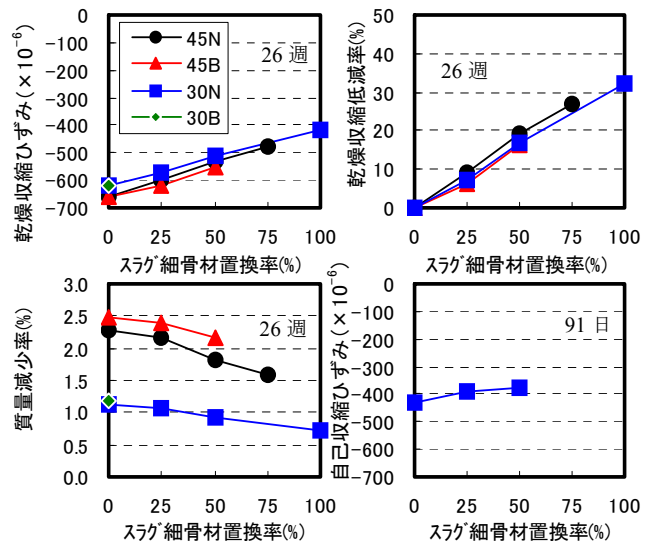


図-6 スラグ細骨材置換率と乾燥収縮ひずみ、乾燥収縮低減率、質量減少率および自己収縮ひずみの関係

(2) 自己収縮

基準である30N0の自己収縮ひずみは材齢91日において -428×10^{-6} と比較的小さい値であったが、スラグ細骨材置換率の増加に伴い自己収縮ひずみは更に低減し、置換率50%で11.7%の低減効果が得られた。スラグ細骨材による自己収縮低減のメカニズムは乾燥収縮低減と同様に潜在水硬性が関係しているものと考えられる。

3.2.3 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験結果を表-7および図-7に示す。

W/C=45%ではいずれのセメントにおいてもスラグ細骨材置換率50%以下では初期の強度発現性は天然細骨材と同等かやや低い値であったが、スラグ細骨材は潜在水硬性を有しており⁵⁾、長期に渡って強度増進するため長期強度は天然細骨材よりも高い値が得られた。また、置換率が50%を超えると初期に強度が低下する傾向があるが長期では天然細骨材と同等以上となった。W/C=30%についてもスラグ細骨材置換率の増加に伴い初期強度は同等かわずかに低下したが長期における強度増進は材齢1年の時点ではほとんど認められなかった。本研究では材齢2年までの強度を確認する予定である。

材齢28日における静弾性係数試験結果を図-8に示す。いずれもNew RC式に近い値であり、既往の研究⁹⁾に見られるとおり圧縮強度との相関が高いが、スラグ細骨材を置換したコンクリートの静弾性係数はわずかに大きい傾向にある。

簡易断熱養生の温度履歴を図-9に示す。スラグ細骨材置換率の増加に伴いピーク到達時間が若干遅くなったが、これは凝結遅延の影響である。置換率の違いによる最高温度の差はわずかであり、スラグ細骨材の使用が発熱温度に与える影響は小さいことがわかる。

表-7 圧縮強度試験結果

記号	圧縮強度 (N/mm ²)					簡易断熱養生	
	標準養生					28日	91日
	7日	28日	91日	26週	1年		
45N0	44.6	57.0	59.1	59.7	63.2	-	-
45N25	43.5	56.9	61.7	62.9	67.8	-	-
45N50	43.2	56.9	63.8	64.3	68.5	-	-
45N75	37.5	54.4	61.8	63.1	66.9	-	-
45B0	30.7	51.7	65.0	66.0	67.2	-	-
45B25	31.3	51.9	64.5	67.4	69.6	-	-
45B50	30.8	51.8	65.4	68.0	71.5	-	-
30N0	77.9	93.8	99.9	105	108	84.0	85.6
30N25	76.8	93.6	100	104	106	79.5	86.2
30N50	76.1	91.6	99.2	101	103	81.7	86.4
30N100	73.7	90.8	98.2	104	106	77.6	80.7
30B0	63.7	83.8	96.1	102	103	84.5	89.4

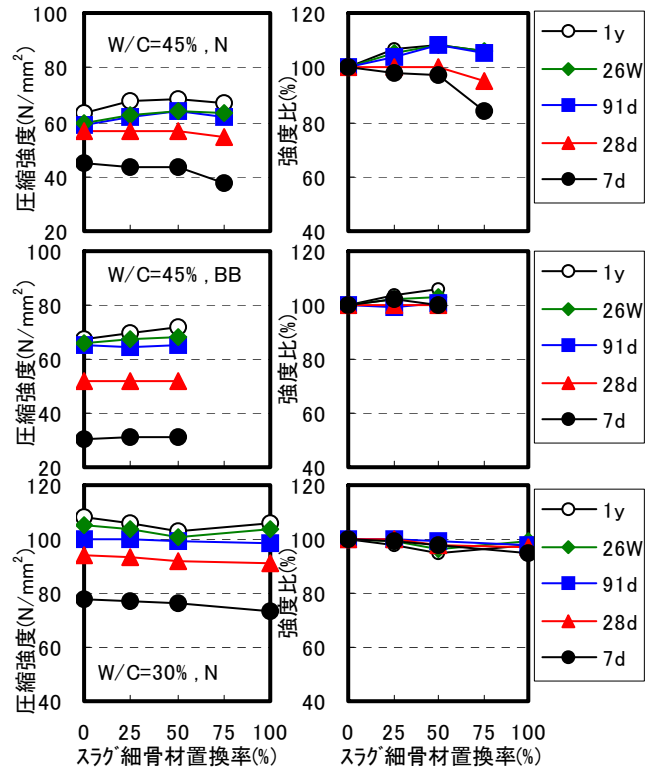


図-7 スラグ細骨材置換率と強度および強度比の関係

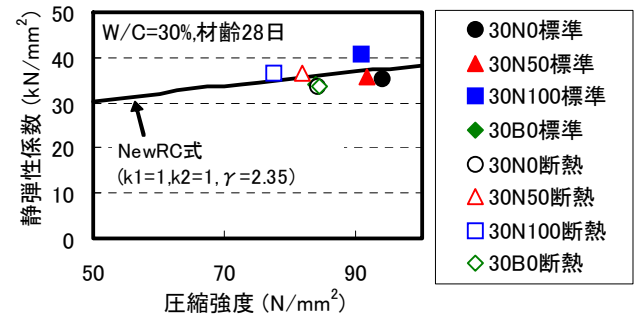


図-8 静弾性係数試験結果

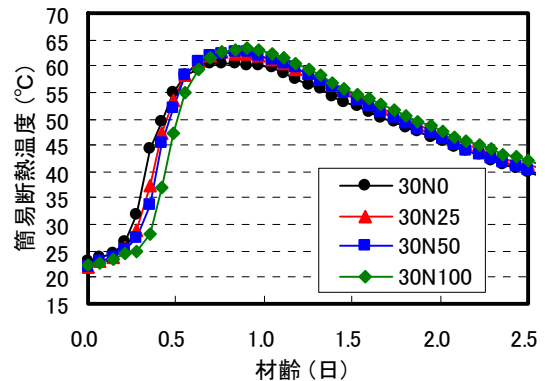


図-9 簡易断熱養生の温度履歴

3.2.4 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果を表-8に示す。いずれの配合においても、耐久性指数が90以上であり十分な凍結融解抵抗性を示したが、スラグ細骨材置換率の増加に伴い耐久性指数がわずかに低下した。これは空気量が同一の場合で

もスラグ細骨材を使用すると比較的大きな気泡が多く含まれ、凍結融解抵抗性を向上させるのに有効な 100 μ m 以下の気泡の数が減少したため¹²⁾と考えられる。

表-8 凍結融解試験結果

記号	凍結融解(300 サイクル) 耐久性指数
45N0	99
45N25	92
45N50	96
45B0	100
45B25	99
45B50	96
30N0	97
30N25	98
30N50	95

3.2.5 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図-10 に示す。いずれの配合においても、促進期間 26 週における中性化深さが 15mm 以下であり十分な中性化抵抗性を示した。また、スラグ細骨材置換率の増加に伴い中性化深さがわずかに小さくなる傾向があり既往の研究結果⁷⁾と一致した。これは高炉スラグ細骨材が潜在水硬性を有しておりセメントと化学反応して密実になったためと考えられる。

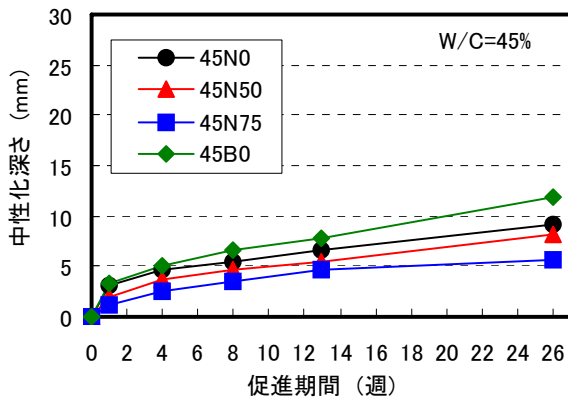


図-10 促進中性化試験結果

4. まとめ

高炉スラグ細骨材を高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートに適用し、諸性質を天然細骨材を使用したコンクリートと比較し、本研究の範囲で以下の知見を得た。

- (1) スラグ細骨材置換率 50%までは天然細骨材と同一配合としても高性能 AE 減水剤を使用することにより良好なワーカビリティが得られる。
- (2) 置換率 50%程度まで使用してもコンクリートのフレッシュ性状(ワーカビリティ、凝結時間、ブリーデ

ィング)は天然細骨材と同等である。

- (3) 高炉スラグ細骨材を 25~50%置換したコンクリートは、天然細骨材に比較して、乾燥収縮を約 6~19%、自己収縮を約 8~12%低減できる。
- (4) W/C=45%では高炉スラグ細骨材を混合すると初期強度は天然細骨材と同等かやや低くなるが長期では天然細骨材よりも高い強度が得られる。W/C=30%でも初期強度は同等かわずかに低下したが長期における強度増進はほとんど認められなかった。
- (5) 高炉スラグ細骨材を 25~50%置換したコンクリートは十分な凍結融解抵抗性を有する。
- (6) 高炉スラグ細骨材を混合することにより中性化速度はわずかに小さくなる。
- (7) 高性能 AE 減水剤を使用して同一配合で天然細骨材と比較した場合でも高炉スラグ細骨材の収縮低減効果や中性化抵抗性の向上が確認できた。今後はそのメカニズムの解明について詳しく検討していく予定である。

参考文献

- 1) 山中量一：高炉スラグ細骨材，コンクリート工学，Vol.46, No.5, pp.90-94, 2008.5
- 2) 吉澤千秋：高炉スラグ細骨材の現状と課題，コンクリートテクノ，Vol.24, No.12, pp.29-34, 2005.12
- 3) 高橋智雄，木之下光男，光藤浩之，吉澤千秋：高炉スラグ細骨材用固結防止剤の開発，コンクリート工学，Vol.40, No.11, pp.19-25, 2002.11
- 4) 長滝重義，高田誠，河野広隆：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの体積変化，セメント技術年報，No.31, pp.148-151, 1977
- 5) 長滝重義，米山紘一，高田誠：高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1, pp.193-196, 1979
- 6) 植田紳治：高炉水砕砂を使用したコンクリートの諸性状に関する実験研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1, pp.197-200, 1979
- 7) 依田彰彦：高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について，セメント技術年報，No.34, pp.133-136, 1980
- 8) 國府勝郎，下山善秀：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの20年試験結果，セメント・コンクリート，No.714, pp.27-32, 2006.8
- 9) 岸谷孝一，友沢史紀，沼田晋一：コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1, pp.213-216, 1979
- 10) 土木学会，高炉スラグ骨材コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー76, 1993
- 11) 光藤浩之，吉澤千秋，高橋智雄，木之下光男：高炉スラグ細骨材の固結防止技術，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26, No.1, pp.87-92, 2004
- 12) 小林正凡，田中弘：高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.2, pp.41-44, 1980