

せっこうの種類が高炉スラグ微粉末を多量に用いた低炭素型コンクリート「スラグリート®」の諸特性に与える影響

Influence of gypsum type on characteristics of low-carbon concrete “slagrete”

高木 雄介*

Yusuke Takagi

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

我彦 聡志*

Satoshi Wabiko

要 約

結合材に占めるポルトランドセメント量が極めて少ない低炭素型コンクリート「スラグリート®」の汎用化に供するデータを実験で取得した。スラグ置換率 70% で低水結合材比 (32, 40, 45%) の配合条件において、メーカー毎に異なるスラグ中のせっこうの種類 (二水, 無水) が、コンクリートの諸特性に与える影響を確認した。実験の結果、二水せっこうを用いた場合、無水に比べて、フレッシュ性状の経時変化がやや大きく、凝結もわずかに遅延し、長期強度の発現はやや鈍化する傾向がみられた。一方で、コンクリートの収縮特性は無水と同程度もしくは良好で、表層品質は無水よりも優位な結果となり、せっこう中の結晶水の種類でコンクリート特性が異なる見解を得た。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

近年、地球温暖化対策として、二酸化炭素 (以下、CO₂) の排出量削減に向けた取り組みが世界各国で進められている。日本では、2016 年に政府が「地球温暖化対策計画」¹⁾ を閣議決定し、2030 年度までに 26% (2013 年度比) の CO₂ をはじめとする温室効果ガスの削減が目標に掲げられている。しかし、2017 年度の調査報告²⁾ によると、日本におけるエネルギー起源の CO₂ 排出量は年間 11.1 億 t で、その排出量は世界で 5 番目に多いのが実態である。このため、産業界では今後一層の CO₂ 排出削減の推進が求められている。

建設分野においては、資材の製造や運搬、施工、建設重機の稼働など、事業の過程で多くの CO₂ を排出している。例えば、主要な建設資材の 1 つであるコンクリートは、製造によって年間 2,000 万 t 超 (日本の年間 CO₂ 排出量の約 2%) の CO₂ 量を排出し、その大半がポルトラ

ンドセメントに由来したものであるとの試算がある。そこで、当社は戸田建設 (株) と共同で、材料 1 t 当たりの CO₂ 排出量が普通ポルトランドセメントのおよそ 30 分の 1 と少ない産業副産物の高炉スラグ微粉末に着目し、同材をセメント代替の混和材として多量に使用した「スラグリート®」を実用化し、すでに一部工事で実績を有している。また最近では、スラグ置換率が 60% を超える高炉セメント C 種相当の結合材を用いたコンクリートに関して、土木学会や日本建築学会から設計・施工指針類³⁾⁴⁾ が相次いで発行され、建設工事に採用しやすい環境が整いつつある。しかしながら、汎用化にむけたデータの蓄積はまだ十分とは言えない。例えば、スラグ中のせっこうによるフレッシュコンクリートや硬化コンクリートへの影響については知見が少ない。

そこで著者らは、スラグ置換率 70% の高炉セメント C

表一 使用材料

記号	使用材料	物性値ほか
W	水	上水道水
C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³
BF	高炉スラグ微粉末	(表一 2 参照)
S	混合砂 (山砂 + 石灰砕砂)	表乾密度 2.62, 2.63 g/cm ³
G	石灰石砕石 2005	表乾密度 2.70, 2.71 g/cm ³
SP	高性能 AE 減水剤 標準形 (I 種)	ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩
AE	AE 剤	樹脂酸系界面活性剤

* 技術研究所土木技術グループ

表－2 高炉スラグ微粉末

項 目	高炉スラグ微粉末 4000			
	JIS A 6206 規格値	二水 せつこう	無水 せつこう	せつこう なし
密度 (g/cm ³)	2.80 以上	2.88	2.89	2.90
比表面積 (cm ² /g)	3500 以上 5000 未満	4500	4310	4380
活性度 指数 (%)	材齢 7 日	55 以上	68	72
	材齢 28 日	75 以上	88	94
	材齢 91 日	95 以上	100	108
フロー値比 (%)	95 以上	100	99	101
酸化マグネシウム (%)	10.0 以下	7.00	6.13	6.18
三酸化硫黄 (%)	4.0 以下	2.10	2.26	0.00
強熱減量 (%)	3.0 以下	0.70	0.21	0.29
塩化物イオン (%)	0.02 以下	0.003	0.005	0.004

表－4 試験方法

分類	試験項目	試験方法
フレッシュ 性状	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量 (圧力法)	JIS A 1128
	凝結試験	JIS A 1147
	断熱温度上昇特性	JCI-SQA3
硬化体 品質	圧縮強度	JIS A 1108
	自己収縮試験	JIS-SAS2-2
	長さ変化率試験	JIS A 1129
	水分浸透速度係数試験	JSCE-G 582
	表層透気試験	Torrent 法
	表面吸水試験	SWAT
	促進中性化試験	JIS A 1153

表－3 コンクリート配合

せつこう	スラグ置換率 BF/(C+BF) (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	B		S	G	SP (B×%)	AE (B×0.002 wt%)
					C	BF				
二水	70	45	48.4	170	113	264	837	915	0.90	2.00
		40	47.2	170	128	298	795	915	0.85	1.00
		32	43.1	175	164	383	674	915	0.85	1.50
無水	70	45	48.5	170	113	264	838	915	0.90	2.50
		40	47.2	170	128	298	796	915	0.85	1.00
		32	43.1	175	164	383	675	915	0.85	2.00
なし	70	45	48.5	170	113	264	839	915	0.90	1.75
		40	47.2	170	128	298	797	915	0.85	1.00
		32	43.1	175	164	383	676	915	0.90	1.50

種相当コンクリートにおいて、スラグに添加するせつこうの種類や添加有無が、コンクリートのフレッシュ性状や強度、硬化体品質に与える影響を実験で確認した。

§2. 実験概要

2-1 使用材料

表－1 および表－2 に使用材料および高炉スラグ微粉末の仕様を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（以下、Nセメント）、高炉スラグ微粉末は 4000 で、スラグに添加するせつこうは、結晶水数の異なる二水せつこう（CaSO₄・2H₂O）および無水せつこう（CaSO₄）の 2 種類とした。またせつこうの添加量は、JIS R 5211 における高炉セメント B 種の規定（三酸化硫黄（以下、SO₃）4.0%以下）および N セメントにおける標準的な SO₃ 含有量 2.0%を参考に、本試験では SO₃ 量換算で 2.0%となるように調整した。さらに比較のため、せつこう添加なしの高炉スラグ微粉末も加えた 3 種類とした。細骨材には混合砂（山砂、石灰石砕砂）、粗骨材には石灰石碎石を使用し、材料調達の都合上、骨材の表乾密度は 2 つの値を記載した。化学混和剤には、ポリカルボン酸系化合物リグニンスルホン酸塩を主成分とする高性能 AE 減水剤

（以下、SP）を使用した。なお、ポリカルボン酸系分散剤（以下、PD）は結合材中のせつこうにより供給される硫酸イオンの影響により流動性が低下する。これは、液相中の硫酸イオンによる PD の立体障害効果の低下が主要因であると報告されている⁵⁾。

2-2 コンクリート配合

表－3 に配合を示す。高炉スラグ微粉末の置換率は 70%で、水結合材比（以下、W/B）は事前の試験の結果を参考に、45%、40%、32%の 3 水準とした。

2-3 試験項目

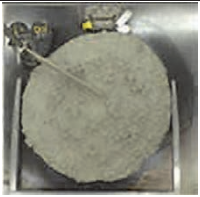
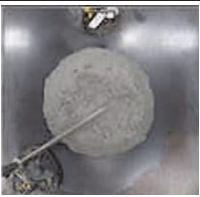
表－4 に試験項目および方法を示す。試験項目は、フレッシュ性状および硬化体品質について各々実施した。

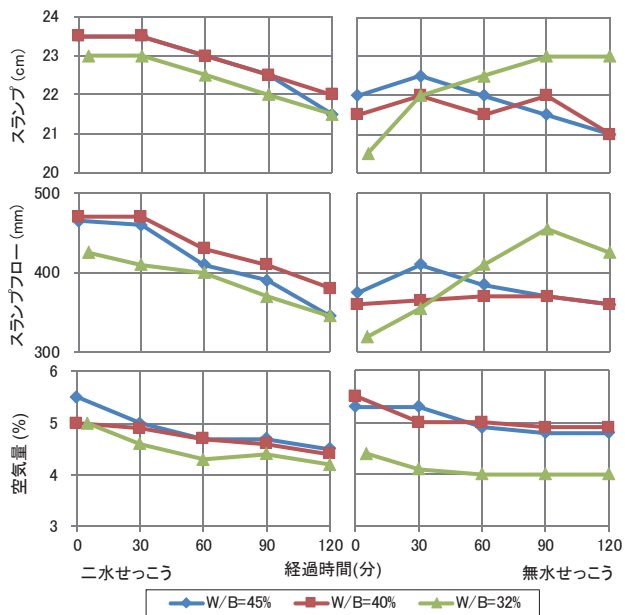
§3. 実験結果

3-1 フレッシュ性状

図－1 に二水および無水のせつこうをスラグに添加したコンクリートにおけるフレッシュ性状（スランプ、スランプフロー、空気量）の経時変化（練上がり～120 分）の比較、表－5 にスランプフローの広がり状況を示す。ス

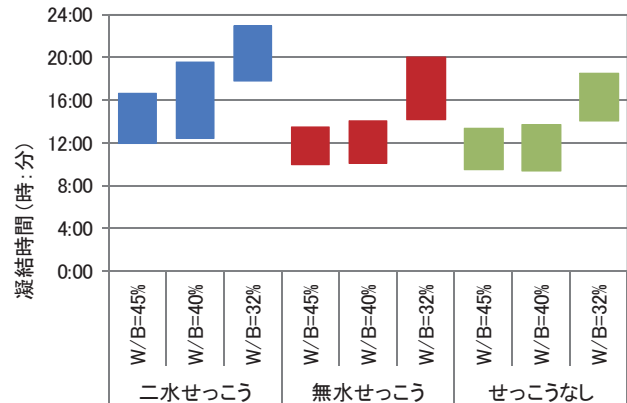
表ー5 スランプフローの広がり状況

せっこう種類		二水		無水	
W/B		45%	32%	45%	32%
経過時間	練上がり				
	60 分				
	120 分				



図ー1 フレッシュ性状経時変化 (左: 二水, 右: 無水)

ランプおよびスランプフローは、二水せっこうを添加した場合、経過時間 30 分まではほとんどロスはないものの、それ以降は右肩下がり、経時ロスがやや大きくなる傾向となった。一方、無水せっこうを添加した場合はややバラツキが見られ、特に W/B が 32% では表ー5 から分かるように経過時間によってスランプフローが後延びする結果となった。今回、全ての W/B 配合で練上がりから 120 分後までスランプ・スランプフローは所要の品質を満足したが、二水せっこうと無水せっこうを添加した場合で、経時変化が異なる挙動となった。既往の文献⁵⁾によると、二水せっこうを添加した場合、無水せっこうと比較して、PD 吸着量が多い傾向が報告されている。今回の試験でも、二水せっこうを用いた時、スランプおよ



図ー2 凝結 (始発・終結)

びスランプフローが時間の経過とともに無水に比べてやや大きく低下しており、二水せっこうによる PD 吸着の影響が推測された。次に空気量については、二水および無水ともに大きな差はなく、両配合とも経過時間 120 分で概ね 0.5% の低下に留まった。

以上より、本実験の範囲内では、二水および無水のせっこうをそれぞれスラグに添加して用いた時のフレッシュ性状の低下量は軽微であり、注水から 120 分までの施工に必要な性能は十分に保持できていると考えられるが、両者の性質には明確な差が生じており、使用の際に考慮する必要がある。

3-2 凝結特性

図ー2 にせっこう別の凝結試験結果を示す。凝結の始発・終結時間は、W/B が 32% の時、40% や 45% よりもやや遅れる傾向が全ての配合で確認されたものの、無水せっこうを用いた時の凝結特性はせっこうなしと同程度であった。一方、二水せっこうを用いた場合には、始発・終結時間が無水せっこうに比べて全体的に 2 時間以上遅

延する結果となった。一般的に、せっこうは凝結や硬化過程で重要な役割を担っている C_3A との反応でエトリンガイトを生成し、その生成量はせっこうの種類で若干異なるとされる。既報⁵⁾によると、エトリンガイトの生成そのものが凝結を遅らせる働きがあるとされ、二水せっこうはエトリンガイトの生成量が無水せっこうに比べると若干ではあるが多いとされている。

以上から、本試験において、二水せっこうを用いた時に凝結時間が遅延した原因として、せっこうによるエトリンガイトの生成量の影響が推定される。

3-3 断熱温度上昇特性

図-3 に打込み温度 20°C での断熱温度上昇試験結果を示す。二水せっこうを用いた方は、無水よりも発熱量がやや低く、 W/B が大きいほどその傾向は顕著であった。次に、試験から得られた終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の結果を、土木学会のスラグ設計・施工指針³⁾ に示された高炉セメント C 種での標準値 ($300 \leq C \leq 500 \text{ kg/m}^3$ の時) と比較して表-6 に示す。土木学会式から算出した計算値は、試験結果よりも 10% ほど安全側に評価されているが、概ね妥当な予測値であり、土木学会式で高炉スラグ高置換配合の発熱量を適切に予測できると考える。

3-4 圧縮強度

図-4 に 20°C 水中養生での材齢 7 日、14 日、28 日、56 日、91 日における圧縮強度の試験結果を示す。高炉スラグ微粉末を用いているため、長期的な強度の伸びはどれも大きかった。ただし、二水せっこうの方が、無水よりも材齢 28 日以降の強度発現がやや鈍化する傾向となった。この理由として、二水せっこう自体が保有する結晶水により、スラグの表面に水和膜が早期に形成された影響でスラグ芯部までの反応が緩やかとなり、それに伴って長期強度の発現が鈍化したのではないかと考えた。

図-5 に土木学会のスラグ設計・施工指針³⁾ に示された高炉セメント C 種での圧縮強度式から求めた計算結果と試験結果を比較して示す。土木学会式の計算値は無水せっこうを用いた配合との整合が良く、二水せっこうを用いた場合にはやや危険側の予測結果になった。

3-5 自己収縮

図-6 に各配合での自己収縮試験の結果を示す。せっこうを添加した場合、材齢初期に明確な膨張挙動が見られ、二水せっこうを用いた配合では最大 130μ 、無水せっこうでは 80μ 程度であった。この膨張ひずみの差は、せっこう種類の違いによるエトリンガイト生成量の差が影響したものと推察される。なお、初期膨張ひずみは W/B が小さい配合ほど大きく、さらにその後の収縮ひずみも W/B が小さい配合ほど大きくなる傾向があった。有効材齢 195 日目での自己収縮ひずみの大きさは、せっこうなし (約 $200 \sim 270 \mu$) > 無水せっこう (約 $130 \sim 220$)

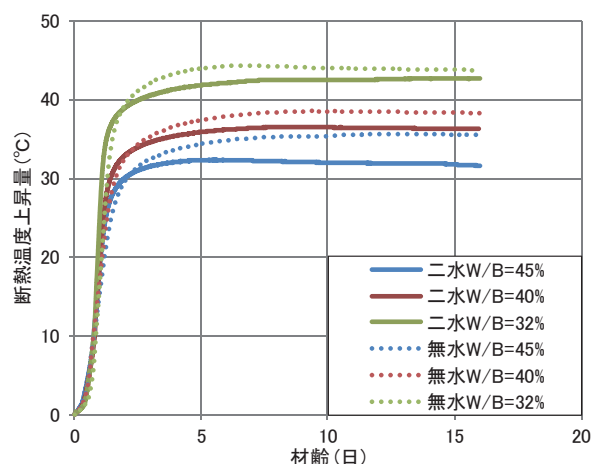


図-3 断熱温度上昇試験結果

表-6 終局断熱温度上昇量の比較

W/B (%)	B (kg/m ³)	終局断熱温度上昇量 (°C)		土木学会標準値 ²⁾
		二水	無水	
45	377	32.3	35.6	39.4
40	426	36.4	38.5	41.9
32	547	42.7	44.3	(適用外)

備考) 打込み温度 20°C

土木学会高炉セメント C 種の標準値

$$Q_{\infty} = a + b \times T_a, \quad a = 21.6 + 0.0586 \times C, \quad b = -0.0696 - 0.00038 \times C$$

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$), T_a : 打込み温度 ($^{\circ}\text{C}$)

C : 単位セメント量 (kg/m^3) ($300 \leq C \leq 500 \text{ kg/m}^3$)

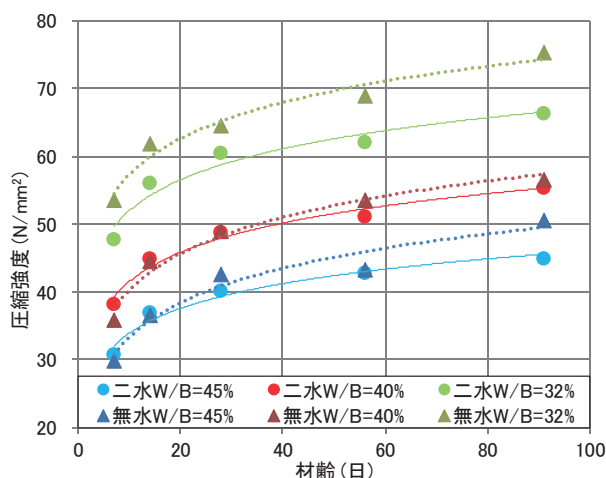


図-4 圧縮強度 (せっこう種類, W/B 別)

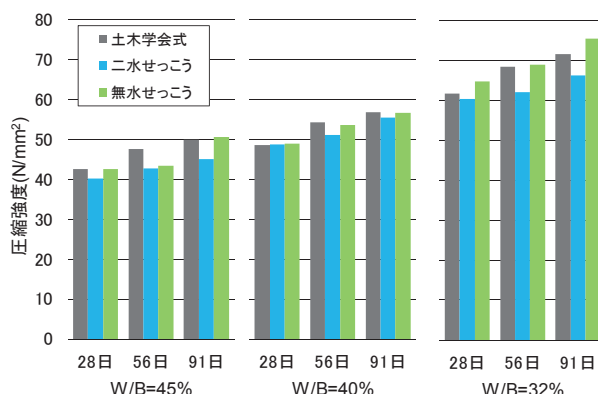


図-5 土木学会式との圧縮強度の比較

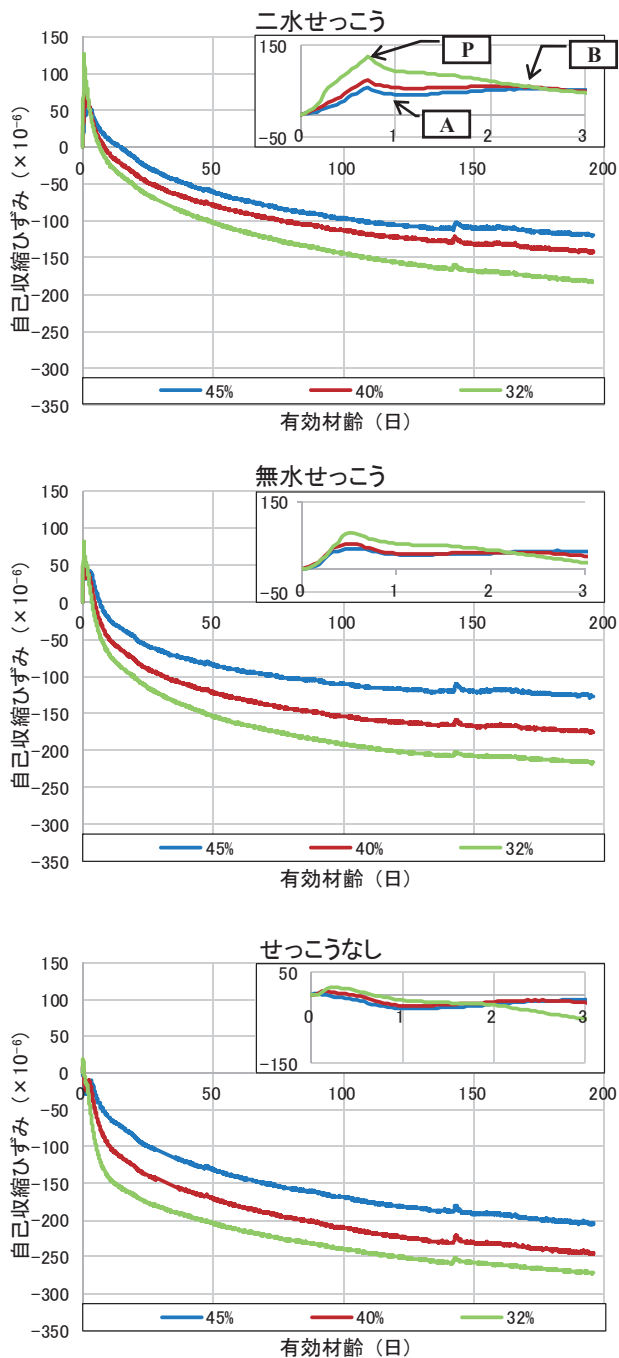


図-6 自己収縮試験結果(せっこう種類別)

μ) > 二水せっこう (約 120~180 μ) の順で、二水せっこうが最も小さい値であった。

自己収縮ひずみの挙動をみると、特に W/B が大きい配合ほど、初期膨張のピーク点 (図中 P 点) 以外に、初期段階 (有効材齢 0~3 日目) において 2 度の屈曲点が明確に現れた (図中 A 点, B 点)。これらの挙動は、エトリングイトの生成による膨張や、エトリングイトがモノサルフェートへの転化や再結晶化等によって溶解したことなどが原因と推定される⁶⁾ が明確ではない。

3-6 乾燥収縮

図-7 に長さ変化率と質量減少率の関係を示す。高炉スラグ微粉末を高置換で用いたコンクリートにおいて

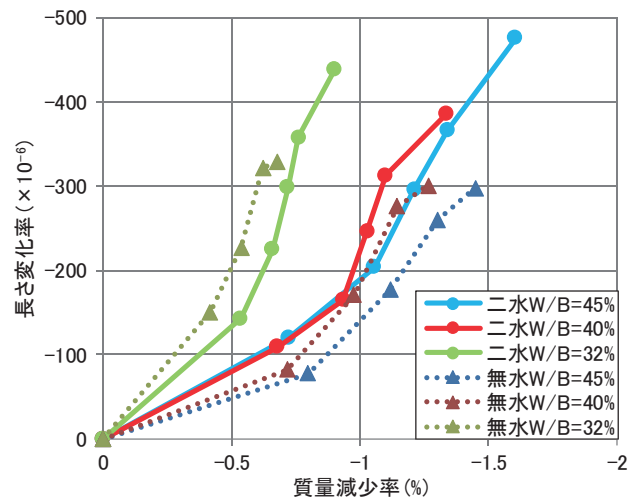


図-7 長さ変化率と質量減少率の関係

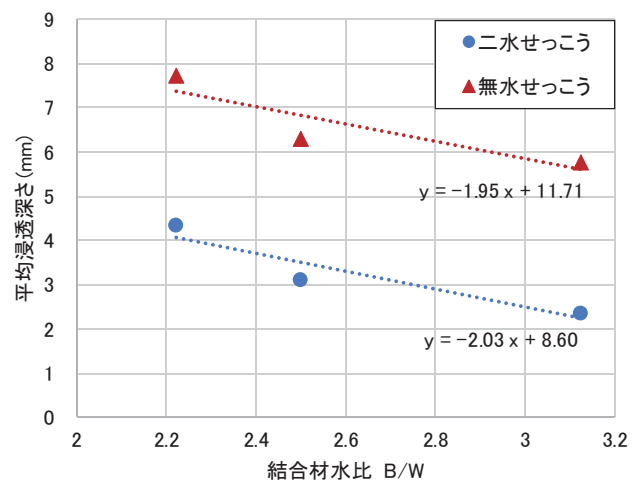


図-8 B/W と水分浸透深さの関係 (せっこう種類)

も、普通コンクリートにおける知見と同様に、W/B が小さい配合ほど質量減少率は小さくなる傾向が確認できる。また長さ変化率の値は、せっこうの種類による明確な差は見られず、概ね同じ挙動であった。

3-7 表層品質試験

(1) 水分浸透深さ

短期の水掛かりによってコンクリート表面から浸透する水分の浸透深さと B/W の関係を図-8 に示す。試験は材齢 98 日目に実施した。なお、各配合で浸漬開始から 5 時間後、24 時間後、48 時間後に水分の浸透深さを測定したところ、浸漬時間による差がみられなかった。このため、浸透速度係数を算出せず、浸透深さのみでの評価を行うため、本稿では各時間の測定値より、平均値を算出して図示した。平均水分浸透深さの値は、せっこうの種類に係わらず、B/W の増加とともに線形近似的に小さくなった。これは B/W が大きいほど結合材が多く、硬化コンクリート中の空隙構造が密になっているためである。また二水と無水を比較すると、二水せっこうの方が水分浸透抵抗性に優れており、表層付近がより緻密になっていることがわかった。

(2) 透気係数, 表面吸水速度

図一9 に表層透気試験 (Torrent 法) および表面吸水試験 (SWAT) による透気係数 kT および表面吸水速度 P_{600} の測定結果を示す。なお試験体は, 材齢 28 日まで水中養生した後, 以降は 20℃ 気中に存置し, 測定は材齢 98 日目に行った。また測定時におけるコンクリート表面での含水率は 4% 前後で同等であった。測定の結果, 透気係数および表面吸水速度は, W/B が小さいほど小さくなり, 良好な値となった。また, せっこう種類の違いによる測定結果 ($W/B=32\%$ の時) を比較すると, 両方とも高い品質を得られているが, 特に二水せっこうの方が硬化コンクリート表層付近の緻密性が高い結果となった。

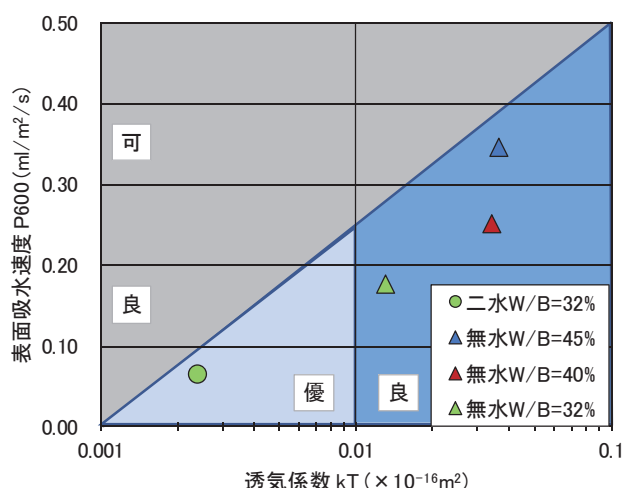
表層付近の性質の差をみるため, 表一7 に二水および無水せっこうで作製した $\phi 100 \text{ mm} \times H200 \text{ mm}$ の円柱供試体の割裂断面の写真を例に示す。どちらの配合も材齢 28 日まで水中養生した後, 以降は 20℃ 気中に存置し, 割裂は材齢 98 日目に行った供試体である。写真を比較すると無水配合 $W/B=32\%$ では表層 10 mm 辺りの深さまで白く変色しているのに対し, 二水ではほとんど変色は見られない。また, W/B が大きくなることによりこの領域は広がる。本試験では, これらの反応に対し細かな解析は行っていないが, せっこうによる表層の違いが目視で確認された。透気試験・吸水試験の結果を鑑みるに, 変色している領域での品質は, そうでない領域よりも品質が低下している可能性がある。

3-8 中性化抵抗性

図一10 に促進中性化試験の結果を示す。測定材齢 1 週目の段階では, 二水せっこうと無水せっこうで中性化深さは概ね同程度であった。しかし測定材齢 4 週目以降, 無水の方が中性化深さは小さくなった。つまり, 中性化抵抗性は硬化体表層付近ではそれほど変わらなかったが, 表面から 5 mm, 10 mm と深くなるにつれて硬化体内部は無水の方が空隙構造は緻密で, 中性化が進行しにくかったと考える。せっこうの種類による中性化抵抗性の差は軽微であったが, 同一のものとして一概には評価することができない可能性があり, せっこう種類による中性化抵抗性への影響に注意が必要と考える。なお, 高炉スラグ微粉末を多量に用いたコンクリートは, 元来アルカリ量が少ないことに加え, 炭酸化生成物や空隙構造の相違, それに伴う拡散現象の相違などの影響も考えられる。このため, 今後より詳細な検討も必要である。

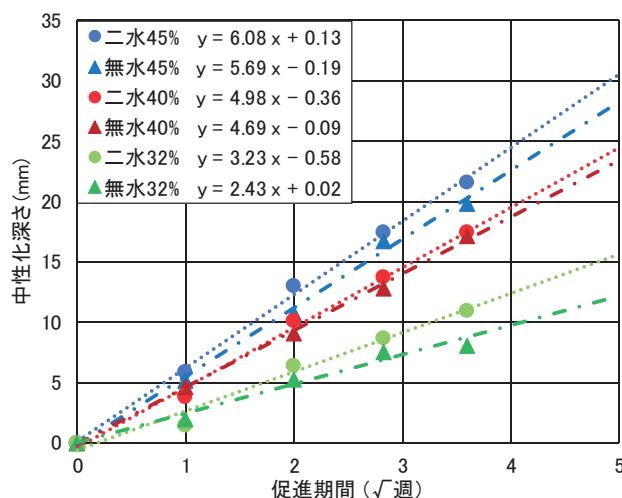
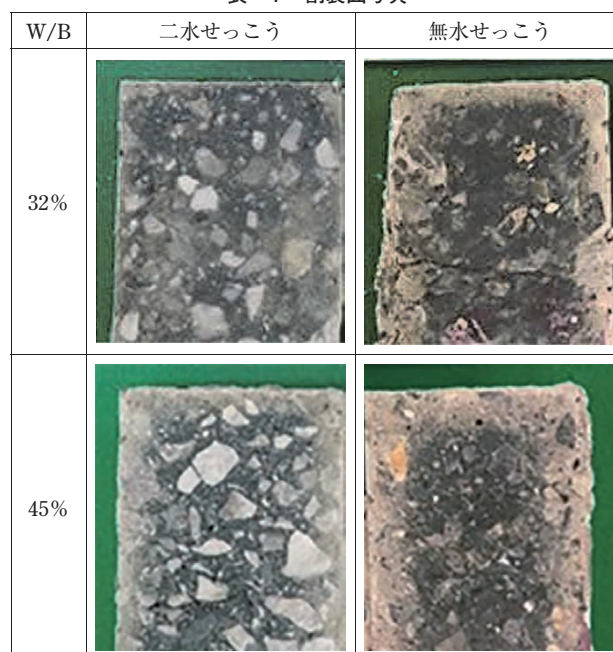
§4. まとめ

本稿では, Nセメントに高炉スラグ微粉末 4000 を 70% 置換で用いた低水結合材比の低炭素型コンクリート「スラグリート®」に関して, スラグに加えるせっこうの種類や添加有無がコンクリートの諸特性に与える影響を室内試験で確認した。本試験の範囲内において, 二水せ



図一9 透気係数と表面吸水速度の関係

表一7 割裂面写真



図一10 促進中性化試験結果

っこうと無水せっこうを配合した場合で異なる特性がみられ, 高炉スラグ微粉末を多量に用いた低水結合材比の

配合では、せっこう種類に留意する必要があると考える。

- (1) コンクリートのフレッシュ性状は、スラグ中のせっこう種類によらず、全ての配合で経過時間 120 分まで性能を保持できた。ただし、二水せっこうは 30 分以降、やや経時ロスがあり、無水は性状にバラツキがあったものの、経時ロスは小さかった。
- (2) 凝結特性は、二水せっこうを用いた場合、無水せっこうやせっこうなしの配合に比べてやや遅延した。
- (3) 断熱温度上昇試験による終局断熱温度上昇量は、二水せっこうの方が無水よりもやや低く、W/B が大きいほどその傾向は大きかった。
- (4) 圧縮強度は、せっこう種類によらず、材齢 28 日以降の長期的な強度の伸びが大きかった。ただし、二水せっこうの方が、長期強度の発現がやや鈍化した。
- (5) 土木学会のスラグ設計・施工指針による強度推定式は、無水せっこうを用いた配合との整合が良かった。
- (6) 自己収縮ひずみ（有効材齢 195 日）は、せっこうなし＞無水＞二水の順で、二水せっこうを用いた場合が最も小さい値であった。
- (7) 長さ変化率は、せっこうの種類による明確な差は見られず、概ね同じ挙動であった。
- (8) 水分浸透速度係数や透気係数、表面吸水速度などの硬化コンクリート表層品質項目は、二水せっこうを用いた方がより良好な結果であった。
- (9) 中性化抵抗性は、硬化体表層付近ではせっこう種類

の違いで優位な差はなかったが、表層以深の硬化体内部では無水の方が高いと推定された。

- (10) 二水せっこうと無水せっこうでは、本試験結果のように両者の性能にやや差があり、その特性に応じた施工が必要であると考ええる。

謝辞. 本試験の実施にあたり、(株)フローリック様には貴重なご助言と多大なご協力を頂いた。ここに記して心より謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画，2016.5
- 2) 環境省：2017 年度温室効果ガス排出量
- 3) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，コンクリートライブラリー 151，2018.9
- 4) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説，2017.9
- 5) 加藤弘義：粉体系高流動コンクリートの高品質化のための材料設計，京都大学学位論文，2002
- 6) 高橋俊之，中田英喜，吉田孝三郎，後藤誠史：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，コンクリート工学論文集，第 7 巻，1996