

# 論文 スラグ中のせっこう種類が異なる低水結合材比の高炉セメントC種相当コンクリートにおける諸特性の比較

高木 雄介\*1・椎名 貴快\*2・田中 徹\*3・土師 康一\*4

**要旨:** 高炉スラグ微粉末をセメント質量の70%置換で用いた高炉セメントC種相当コンクリート(W/B=32, 40, 45%)において, 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室内実験で確認した。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。しかし, コンクリートの収縮特性(自己, 乾燥)は無水と同程度もしくは良好で, 表層品質(水分浸透深さ, 透気係数, 表面吸水深さ)は無水よりも優位な結果となった。せっこう中の結晶水の種類によってコンクリートの特性が異なる結果となった。

**キーワード:** 高炉スラグ微粉末, せっこう, 二水, 無水, 収縮, 表層品質

## 1. はじめに

近年, 地球温暖化対策として二酸化炭素(以下, CO<sub>2</sub>)排出量削減の取り組みが世界各国で進められている。日本は, エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量が年間11.1億トン(2017年度)と世界第5位で, 統計上, 産業部門はこの内の約25%を排出している。そこで建設分野では, 主要な建設資材のコンクリートに用いるポルトランドセメントのCO<sub>2</sub>排出原単位に着目し, 産業副産物(高炉スラグ微粉末, フライアッシュなど)をセメント代替として積極的に用いたコンクリートに最近注目が集まっている。

現在, 国内の土木官工事を中心に, 高炉スラグ微粉末を40~45%混合した高炉セメントB種が用いられている。また, 置換率が60%を超える高炉セメントC種相当の結合材についても, 関連する設計・施工指針類<sup>2)</sup>がここ数年で相次いで発行されているが, 汎用化にむけたデータの蓄積はまだ十分とは言えない。特に, スラグ中のせっこうによる影響については知見がまだ少ない。

そこで著者らは, 高炉スラグ微粉末を70%置換で用いた高炉セメントC種相当コンクリートにおいて, 高炉スラグ微粉末に添加するせっ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室内実験で確認し比較検討した。

## 2. 試験概要

### 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っこうは, 結晶水数の異なる二水せ

表-1 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 3.16g/cm <sup>3</sup>
BF	高炉スラグ微粉末	(表-2 参照)
S	混合砂(山砂+石灰砕砂)	表乾密度 2.62, 2.63g/cm <sup>3</sup>
G	石灰石碎石 2005	表乾密度 2.70, 2.71g/cm <sup>3</sup>
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

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 せっこう	無水 せっこう	せっこう なし
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.80 以上	2.88	2.89	2.90
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	3500 以上 5000 未満	4500	4310	4380
活性度 指数 (%)	材齢 7 日	55 以上	68	63
	材齢 28 日	75 以上	88	89
	材齢 91 日	95 以上	100	110
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

こう(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)および無水せっこう(CaSO<sub>4</sub>)の2種類とした。またせっこうの添加量は, 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, SO<sub>3</sub>)4.0%以下)およびNセメントにおける標準的なSO<sub>3</sub>含有

\*1 西松建設株式会社 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*2 西松建設株式会社 技術研究所 上席研究員 工修 (正会員)

\*3 戸田建設株式会社 技術開発センター 社会基盤再生ユニット マネージャー 工修 (正会員)

\*4 戸田建設株式会社 土木工事技術部 技術5課 課長 工修 (正会員)

表-3 コンクリート配合

せっこう	スラグ置換率 BF/(C+BF) (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	B		S	G	AE 減水剤 (B×%)	AE 剤 (B×0.002wt%)
					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

量 2.0%を参考に、本試験では SO<sub>3</sub> 量換算で 2.0%となるように調整した。さらに比較のため、せっ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），粗骨材には石灰石砕石を使用し，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（以下，PC）リグニンスルホン酸塩を主成分とする高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 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）は事前の室内試験や実機試験の結果を参考に，45%，40%，32%の 3 水準とした。

2.3 試験項目および方法

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。

表-4 試験方法

分類	試験項目	試験方法
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101
	スランブフロー	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

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

図-1 に二水および無水のせっ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（スランブ，スランブフロー，空気量）の経時変化（練上がり～120分）を比較して示す。スランブおよびスランブフローは，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%では後延びする結果となったものの，すべての W/B 配合で 120 分後も経時ロスが小さい結果となった。既往の文献<sup>4)</sup>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 PC 吸着量が多い傾向があり，また，結合材中のせっこうにより供給される硫酸イオン濃度の上昇により流動性が低下すると報告されている。今回の試験でも，二水せっこうを用いた時，スランブおよびスランブフローが時間の経過とともに無水に比べて低下し

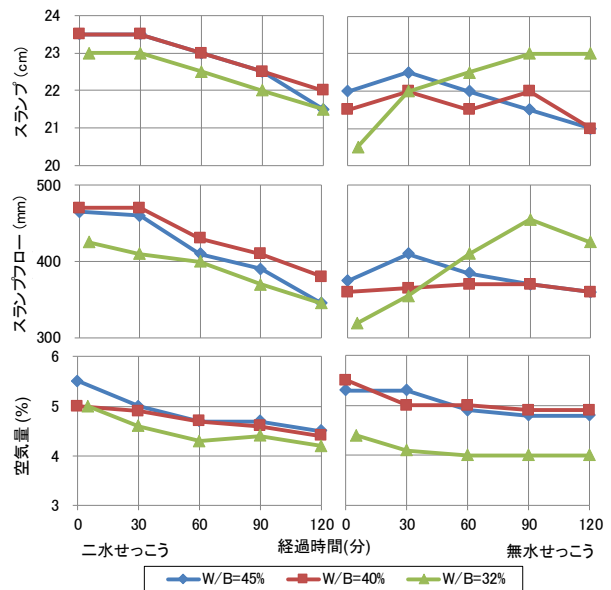


図-1 フレッシュ性状経時変化（二水，無水）

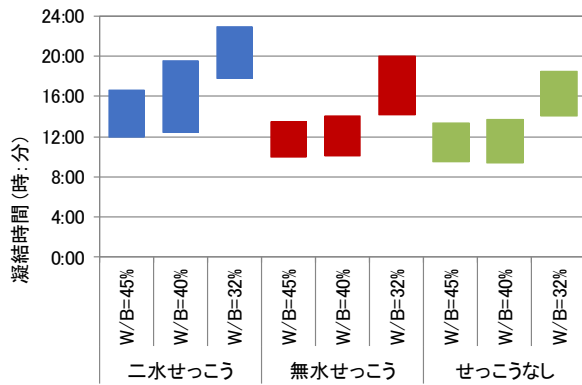


図-2 凝結 (始発・終結)

ており、二水せっこうによる PC 吸着の影響が推測された。一方で、無水せっこうを用いた場合に、スランプ及びフローが時間経過で増加している現象がみられる。これは、半水せっこうを添加した場合の経時変化に酷似しており、硫酸イオン濃度が何らかの影響により低下し、PC によるセメント分散効果が、練り上がり直後よりも高くなっているものだと考えられる。特に W/B の小さい 32% の配合で顕著にその影響がみられたが、本試験では詳細な解析を行っておらず、さらなる検討が必要であると考え。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 0.5% 程度の低下に留まった。

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、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。しかし、二水せっこうを用いた場合には、無水せっこうを添加した場合よりも性状の低下が大きく、注意する必要がある。

### 3.2 凝結特性

図-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% では 40% や 45% よりもやや遅れる傾向がどの配合でも確認されたものの、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<sub>3</sub>A 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<sup>4)</sup>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。

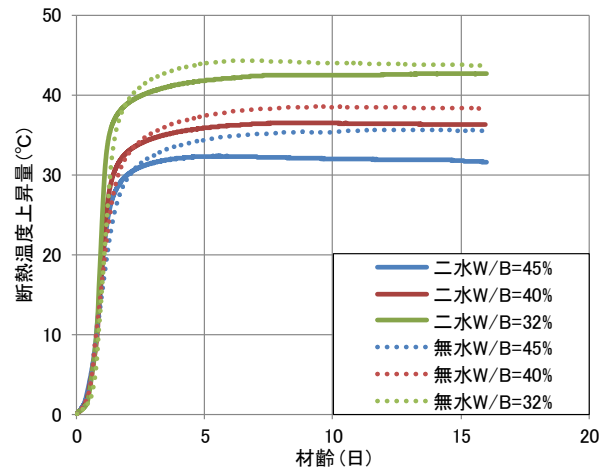


図-3 断熱温度上昇試験結果

表-5 終局断熱温度上昇量の比較

W/B (%)	B (kg/m <sup>3</sup> )	終局断熱温度上昇量(°C)		
		せっこう		土木学会標準値 <sup>2)</sup>
		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

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

$Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量(°C),  $T_a$ : 打込み温度(°C)

C: 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>) (300 ≤ C ≤ 500 kg/m<sup>3</sup>)

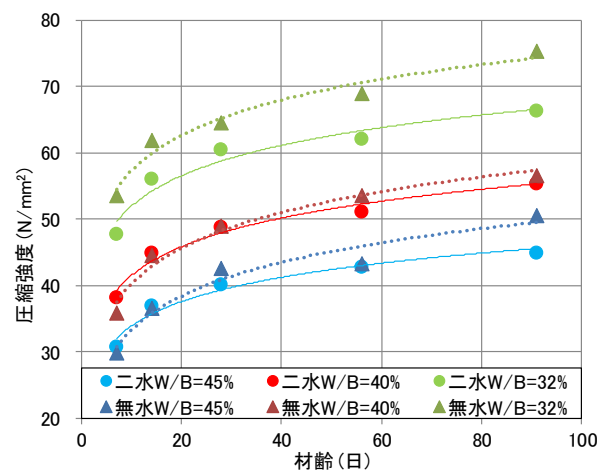


図-4 圧縮強度 (せっこう種類, W/B 別)

### 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  $Q_{\infty}$  の結果を、土木学会のスラグ設計・施工指針<sup>2)</sup>に示された高炉セメント C 種での標準値 (300 ≤ C ≤ 500 kg/m<sup>3</sup> の時) と比較して表-5 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

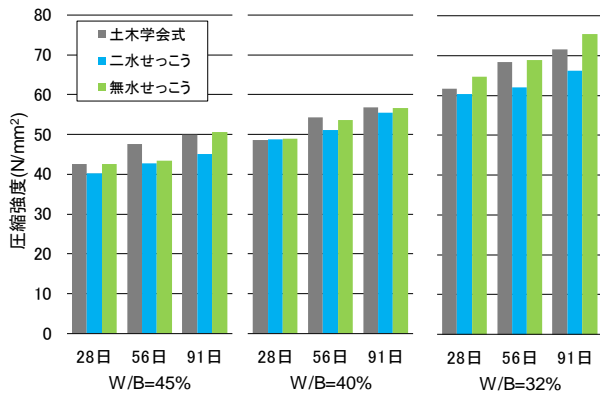


図-5 土木学会式との圧縮強度の比較

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たと考える。

### 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、材齢28日以降の長期的な強度の伸びはどれも大きかった。また、無水せっこうが二水よりも強度の発現が高い結果となった理由として、無水せっこうが時間をかけて水と反応し、安定せっこうになる過程で発熱・硬化するためだと考えられる。図-3の断熱温度上昇からも二水よりも無水の方が数度高い温度になっているのはこれらの反応の影響が表れているものと推測される。

図-5に土木学会のスラグ設計・施工指針<sup>2)</sup>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良く一致したが、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130 $\mu$ 、無水せっこうでは80 $\mu$ 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考えられる。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55日目での自己収縮ひずみの大きさは、せっこうなし(約140~210 $\mu$ ) > 無水せっこう(約90~160 $\mu$ ) > 二水せっこう(約60~110 $\mu$ )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

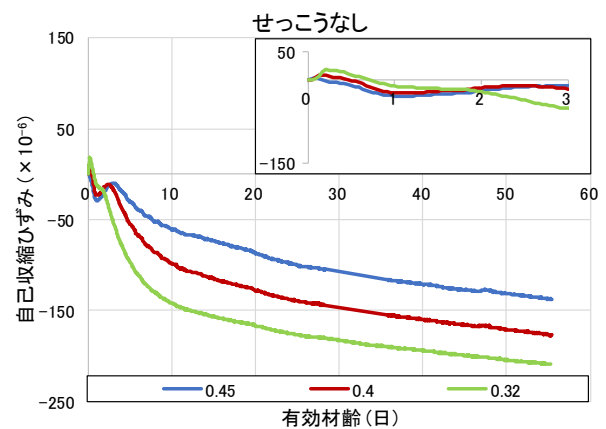
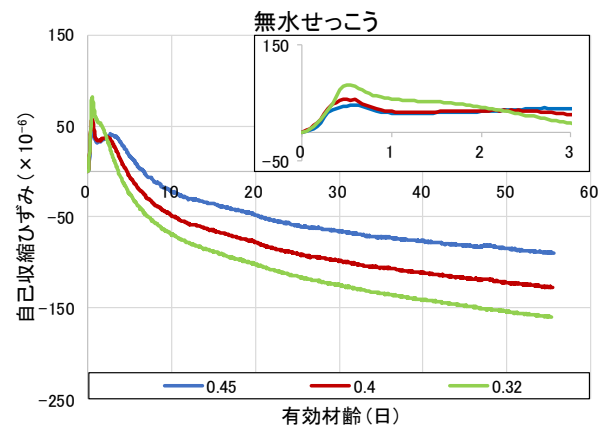
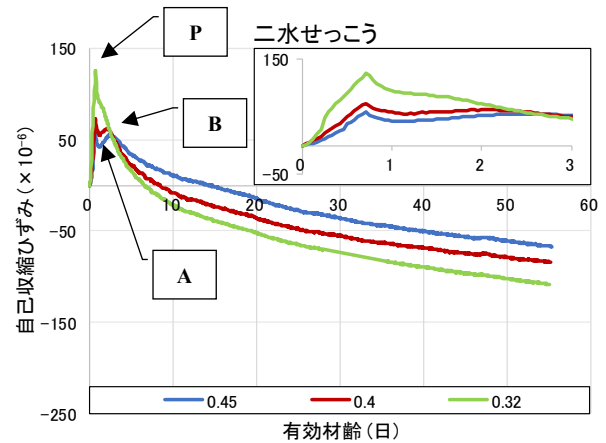


図-6 自己収縮試験結果(せっこう種類別)

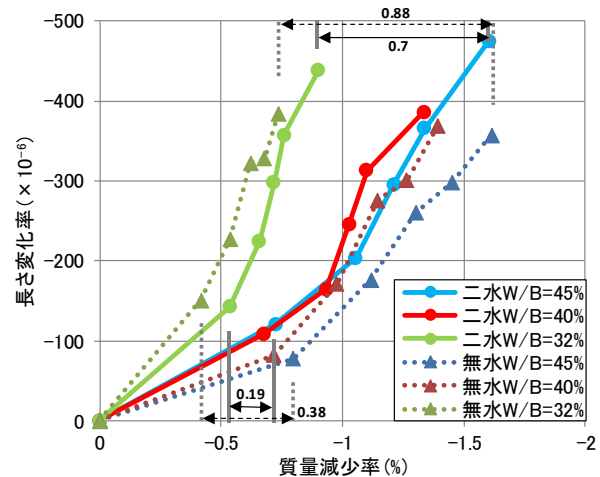


図-7 長さ変化率と質量減少率の関係

ガイトの生成による膨張や、エトリンガ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<sup>9)</sup>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、無水せっこうを用いた場合、二水よりも W/B による質量減少率が大きくなっていることが分かる。一方で、長さ変化率の値は、無水せっこうを用いた場合、二水よりも小さくなる傾向がみられた。

### 3.7 コンクリート表層品質試験

#### (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7日間の水中養生後、20℃気中に存置し、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、表層付近が水分浸透抵抗性に優れていることを確認した。

#### (2) 透気係数、表面吸水速度

図-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 P600 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表層透気係数が小さいことを確認した。

表層付近の性質の差として、写真-1 に二水および無水せっこうで作製したΦ100×H200mmの円柱供試体割裂時の写真を例に示す。どちらの配合も上記の通り、材齢28日まで水中養生した後、以降は20℃気中に存置し、割

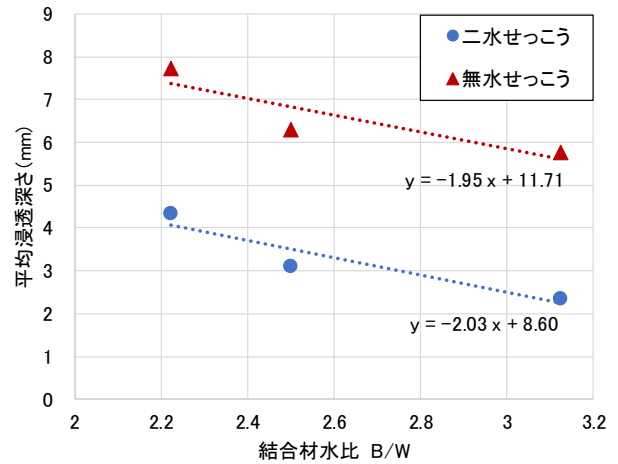


図-8 B/W と水分浸透深さの関係 (せっこう種類別)

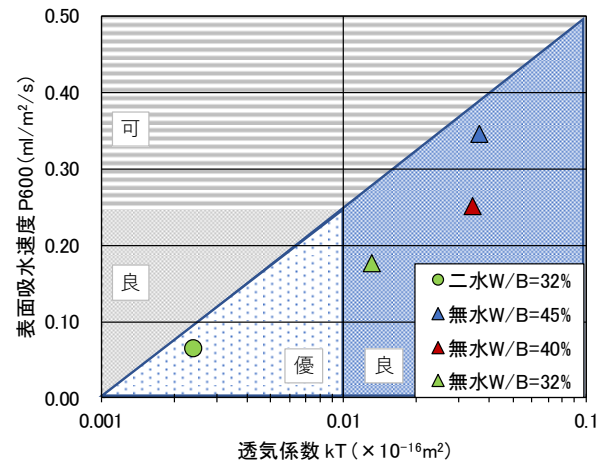


図-9 透気係数と表面吸水速度の関係

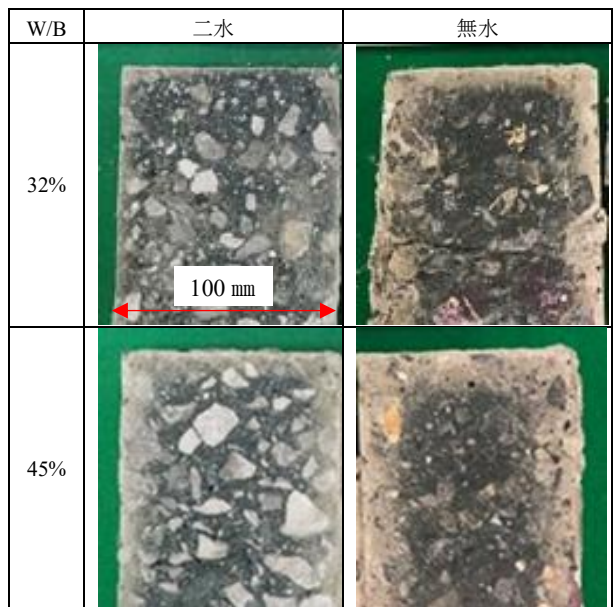


写真-1 割裂断面写真

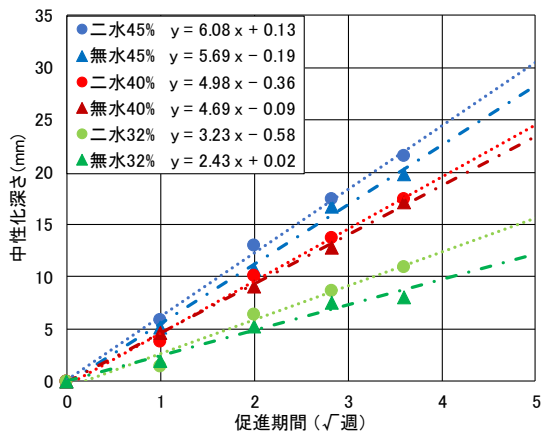


図-10 促進中性化試験結果

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 10mm 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表層品質が低下している可能性がある。

### 3.8 中性化抵抗性

図-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、無水せっこうと二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。3.7 より、透気係数は二水の方が低く、優れていたが、無水配合でも十分な透気係数は得られており、中性化抵抗性は無水の方が優れている傾向がみられた。せっこう以外の配合条件や環境が同じことを考慮すると、圧縮強度の差による影響と考えられる。せっこう種類による差は軽微である可能性はあるが、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、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% 置換で用いた高炉セメント C 種相当コンクリートに関して、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得られた知見を以下に示す。

- (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 55 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若干の差が確認され、同一のものとして扱えない可能性が見られた。
- (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、若干ではあるが無水せっこうの方が優れている結果であった。

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：2017 年度温室効果ガス排出量
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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