

論文 暑中環境下での高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基本特性と施工品質評価

椎名 貴快*1・田中 徹*2・小池 晶子*3・中村 英佑*4

要旨：高炉スラグ微粉末 4000 を普通ポルトランドセメントの 70%置換で用いたコンクリート（水結合材比 50%）について、夏期を想定した高温条件下での基本特性を室内試験で確認した。試験の結果、安定したフレッシュ性状を確保するには適切な化学混和剤の選定が必須で、スラグに石膏を添加（SO₃換算で約 2%）した場合、ブリーディングが若干増加し、凝結がやや遅延したものの、初期材齢での強度発現性は高炉セメント B 種相当の配合と同程度であった。また暑中環境下でのポンプ圧送性（水平換算長 150m）は所要品質を確保でき、実施工の結果、硬化コンクリートの品質（表層透気係数、表面吸水速度）も評価は良好であった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高炉セメント C 種、暑中環境、石膏、三酸化硫黄、表層透気係数

1. はじめに

近年、環境負荷低減や資源有効利用の観点から、ポルトランドセメントの代替として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物を積極的に用いたコンクリートが注目されている。著者らは、ポルトランドセメントよりも CO₂ 排出原単位が少なく、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末に着目し、特に、国内での製造・供給能力の高い高炉スラグ微粉末 4000¹⁾を選定し、同材を JIS R 5211（高炉セメント）で規定されるスラグ置換率の上限以上（70%以上）で用いた高炉スラグ微粉末高含有コンクリートについて検討してきた²⁾⁵⁾。

一般的に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性は温度依存性が高いとされるが、特に、夏期施工時などの高温条件下におけるデータは十分ではない。そこで、スラグ置換率 70%（JIS 上限）の配合を対象に、室温 30℃の条件で試験を実施し、化学混和剤の種類の違いによるフレッシュ性状への影響や、高炉スラグ微粉末への石膏添加によるブリーディングや凝結、圧縮強度への影響等を確認した。さらに、暑中環境下でのポンプ圧送性試験による施工検証や、実施工でのコンクリート硬化体品質の評価も実施した。本稿では、これらの室内・屋外試験や実施工の概要および結果を示す。

2. 室内試験

2.1 使用材料およびコンクリート配合条件

表-1 に使用材料の種類と物理的性質を示す。結合材には、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した。高炉スラグ微粉末の品質は、粉末度や石膏添加の有無等により異なる。粉末度は、市販品で製造・供

給量の多い JIS A 6206 に準拠した高炉スラグ微粉末 4000（比表面積 3,500cm²/g 以上 5,000cm²/g 未満）とした。石膏（無水石膏）は、スラグの初期反応の促進や初期強度確保を目的に、過剰膨張しない範疇で添加するが、三酸化硫黄（以下 SO₃）換算で質量比 2.01%（JIS A 6206: 4.0% 以下）添加した製品を使用した。

表-2 にコンクリートの配合条件を示す。本試験では、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末 4000 を、JIS R 5211 に規定される高炉セメント C 種に相当する高炉スラグの分量（スラグ置換率）で 70%（質量比）とした。また既往の研究成果を参考に、水結合材比（W/B）は 50%、細骨材率（s/a）48%で、単位水量（W）は事前試験の結果から 163kg/m³ とした。目標フレッシュ性状はスランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%である。

表-1 使用材料の種類と物理的性質

使用材料	記号	物理的性質
水	W	上水道水
普通ポルトランドセメント	OPC	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,350cm ² /g, SO ₃ 量 2.02%
高炉スラグ微粉末 4000	石膏添加 BFS4C	密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4,460cm ² /g, SO ₃ 量 2.01%
細骨材	S	静岡県掛川産山砂 表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 2.02%, F.M2.66
粗骨材	G	東京都青梅産砕石 2005 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.83%, 実積率 58.5%

備考) 上記の材料は全て JIS 規格品

表-2 コンクリート配合条件

スラグ置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	B		S	G
				OPC	BFS4C		
70 (C種)	50	48	163	98	228	838	936

*1 西松建設（株） 技術研究所土木技術グループ 上席研究員 工修（正会員）

*2 戸田建設（株） 技術開発センター社会基盤ユニット 主管 工修（正会員）

*3 （株）フローリック 技術本部技術部 主査（正会員）

*4 （国研）土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 工修（正会員）

2.2 試験要因および試験結果

(1) 化学混和剤の選定

高炉スラグ微粉末 4000 (石膏添加 BFS4C) をスラグ置換率 70% (JIS R 5211 の上限量) で用いた配合について、室温 30℃の暑中条件下で、化学混和剤の種類 (性能区分) の違いがフレッシュ性状 (スランプ、空気量) の経時安定性に与える影響を室内試験で確認した。表-3 に、比較検討に用いた化学混和剤の種類と主成分を示す。化学混和剤は、AE 減水剤、AE 減水剤 (高機能型) および高性能 AE 減水剤の 3 種類で、高性能 AE 減水剤は高炉スラグ高含有用に開発された専用混和剤で、通常の高性能 AE 減水剤よりもワーカビリティの保持に優れている。それぞれ標準形と遅延形を用いた。なお、使用した全ての化学混和剤は JIS A 6204 に適合した製品である。

図-1 に 30℃環境での混和剤種類別のスランプおよび空気量の経時変化を示す。なお図中の経過時間とは、注水からの時間で、練上がり完了後 (0 分)、30 分後、60 分後の 3 回とし、各々静置した状態 (表面は乾燥防止用シートで被覆) で存置し、試験前に試料を切り返してから測定した。試験の結果、標準形の混和剤はどれも注水から 30 分までは性状確保できたが、60 分では経時ロスが大きい結果となった。一方、遅延形の場合、AE 減水剤 (高機能型) および高性能 AE 減水剤は、注水から 60 分経過後も安定した性状を確保でき、特に高性能 AE 減水剤の方が保持性能は高かった。そこで、以降の試験では、高性能 AE 減水剤 (遅延形) を使用した。

(2) スラグ中の SO₃ 量による影響

高炉スラグ微粉末 4000 への石膏添加により含有される SO₃ が、暑中環境下でのコンクリート特性に与える影響については十分なデータがない。そこで表-4 のように、室温 30℃一定の環境において、スラグ置換率を JIS R 5211 に規定される高炉セメント B 種および C 種に相当する 45%および 70%の 2 配合とした時、高炉スラグ微粉末 4000 への石膏添加の有無による SO₃ 含有量 (0.00%または 2.01%) の違いが、フレッシュコンクリートのブリーディングや凝結特性および圧縮強度に与える影響を室内試験で確認した。配合は、水結合材比(W/B)50%、単位水量(W)163kg/m³、細骨材率(s/a)48%および単位粗骨材かさ容積 0.606(m³/m³)は固定した。化学混和剤には高性能 AE 減水剤 (遅延形) を使用し、添加量は全てのケースで一定 (B×1.05%) とした。

図-2 に、30℃環境で、スラグ置換率 45%および 70%でのブリーディング率および凝結時間の測定結果をスラグ中の SO₃ 含有量別に示す。同図より、ブリーディング率は、スラグ中の SO₃ 含有量が 2.01%の方が若干増加し、特にスラグ置換率が高い 70%ではやや多い傾向であった。しかし、その量自体は多くはなく、ブリーディング終結

表-3 化学混和剤の種類と主成分

化学混和剤の種類		記号	主成分
AE 減水剤	標準形	WR(S)	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩
	遅延形	WR(L)	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩
AE 減水剤 (高機能型)	標準形	HWR(S)	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩, ポリカルボン酸系化合物
	遅延形	HWR(L)	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸系化合物
高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用)	標準形	SP(S)	ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩
	遅延形	SP(L)	リグニンスルホン酸塩

備考) 上記の化学混和剤は全て JIS A 6204 に適合

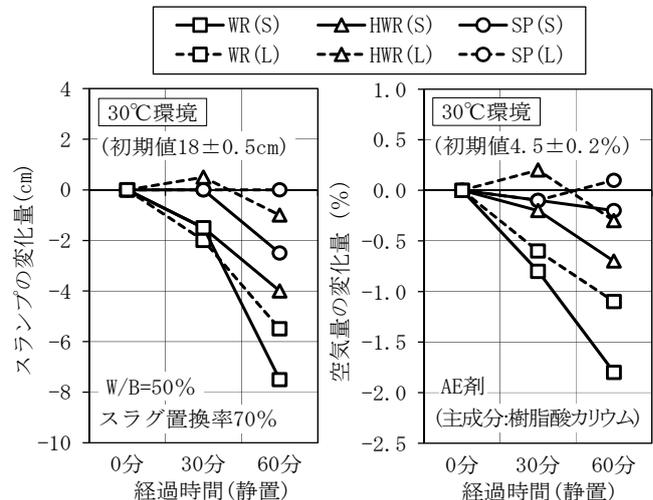


図-1 混和剤種類別スランプおよび空気量の経時変化

表-4 試験配合ケース

結合材(B)の質量構成比(%)		スラグ中の SO ₃ 含有量 (%)	W/B (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)
BFS4	OPC					
BFS4	OPC	0.00 または 2.01(石膏添加)	50	163	48	0.606
45(B 種)	55					
70(C 種)	30					

備考) 試験時の環境温度 30℃一定, BFS4(石膏添加なし)

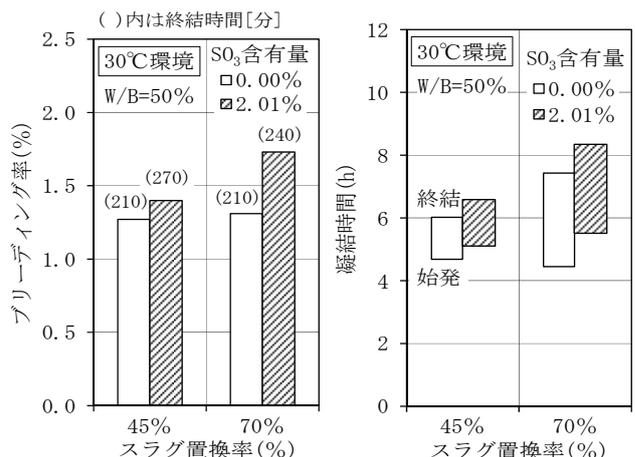


図-2 SO₃ 含有量別ブリーディング率および凝結時間

時間もスラグ置換率 70%で 240 分となり、例えば、打込み後の表面仕上げや養生等の作業を大きく阻害するような量と時間ではなかった。凝結時間は、30℃環境でスラグ置換率が 70%の場合、凝結の始発時間はスラグ置換率 45%と大きな差は認められなかった。終結時間は、スラ

グ置換率 45%よりも 1.5 時間ほど遅延する結果となり、特にスラグ中の SO₃ 含有量が 2.01%では凝結遅延がやや大きい傾向がみられた。

図-3 に、30℃環境でのスラグ置換率と圧縮強度の関係をスラグ中の SO₃ 含有量別に示す。スラグ置換率は 0%、45%および 70%で、試験材齢は 1, 3, 7 および 28 日の 4 材齢である。養生は全て封緘養生とした。同図より、スラグ中の SO₃ 含有量が 0.00%の時、同一水結合材比で、スラグ置換率の増加に伴って圧縮強度は小さくなる傾向を示した。一方、スラグ中の SO₃ 含有量が 2.01%の時、スラグ置換率 45%では SO₃ 含有量が 0.00%の時と圧縮強度は概ね同程度で、SO₃ 含有量の違いによる圧縮強度の大きな差は認められなかった。しかし、スラグ置換率 70%では、スラグ中の SO₃ 含有量 0.00%よりも圧縮強度は大きく、特に材齢 1~7 日ではスラグ置換率 45%の高炉セメント B 種相当と同程度の強度発現性を得られた。ただし、材齢 7 日から 28 日に至る強度の増進はやや鈍化しており、スラグ中の SO₃ による強度発現への効果は材齢初期に限定された。

(3) 環境温度、養生方法が強度発現性に与える影響

混和材を多量に用いたコンクリートの強度発現は、打込み後の温度履歴の影響を受けやすいと言われている。そこで、スラグ置換率 70%、W/B50%のコンクリートについて、環境温度（練混ぜ時からの温度）5, 10, 20 および 30℃の 4 水準として、材齢 3, 7, 14, 28 および 91 日の 5 材齢で圧縮強度を求め、環境温度が高炉スラグ微粉末 (BFS4C) を高含有したコンクリートの強度発現性に与える影響を試験で確認した。図-4 に環境温度と圧縮強度の関係を示す。養生方法は水中と封緘の 2 種類で、水中養生での脱型材齢は 1 日（5℃の時のみ 2 日）とし、養生中の水温は環境温度と同一温度に調整した。同図より、共通して環境温度が高いほど各材齢での圧縮強度は概ね線形的に増加する傾向がみられた。また水中養生と封緘養生を比較した場合、低温領域（5~10℃）では、強度発現性は概ね同程度であったが、長期強度（材齢 28 日以降）は水中の方がやや大きな値であった。一方、常温から高温領域（20~30℃）では、高炉スラグ微粉末の反応が活性化することで、材齢 3 日の初期強度は封緘の方が大きかったが、以降の強度増進は水中の方が顕著で、長期強度は水中の方が 10%以上大きな値となった。以上より、打込み後の温度や水分供給の条件は強度発現性と密接に関係しており、特に夏期のような高温環境下では、積極的な水分の供給が長期強度の発現に有効であると考えられる。

次に、環境温度と強度発現との間に高い相関性が認められたため、有効材齢を用いた強度発現の推定精度を検証した。有効材齢と圧縮強度の関係式（圧縮強度発現式）は日本コンクリート工学会（以下 JCI）の式⁶⁾を用いた。

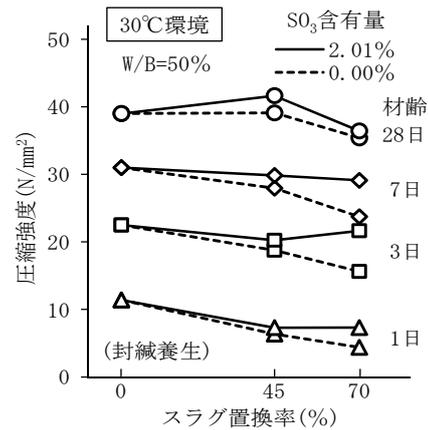


図-3 スラグ置換率と圧縮強度の関係 (SO₃ 含有量別)

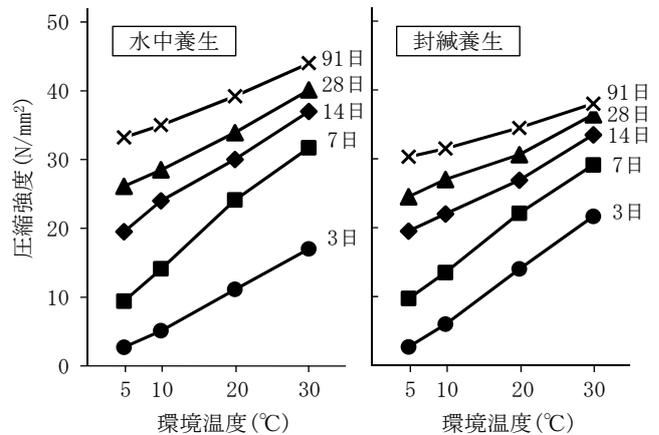


図-4 環境温度と圧縮強度の関係（水中・封緘養生）

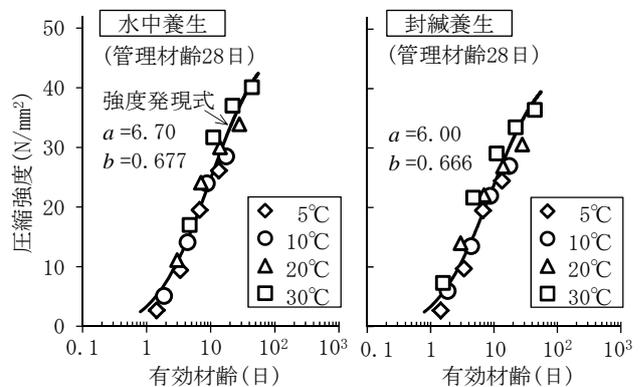


図-5 有効材齢と圧縮強度の関係（水中・封緘養生）

図-5 に有効材齢（凝結始発を起点）と圧縮強度の関係を養生別（水中、封緘）に整理して示す。なお、図中には回帰分析で求めた強度発現曲線と同定係数 a , b （セメント種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す）の値を併記した。同図より、高炉スラグ微粉末 70%置換のコンクリートでも、普通コンクリートと同様に有効材齢で 28 日までの強度発現を比較的精度良く推定できた。

図-6 および図-7 に、環境温度 10, 20 および 30℃で封緘養生した時の圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数との関係を示す。図中には、JCI⁶⁾、土木学会⁷⁾および日本建築学会⁸⁾の指針や示方書に示された関係式から

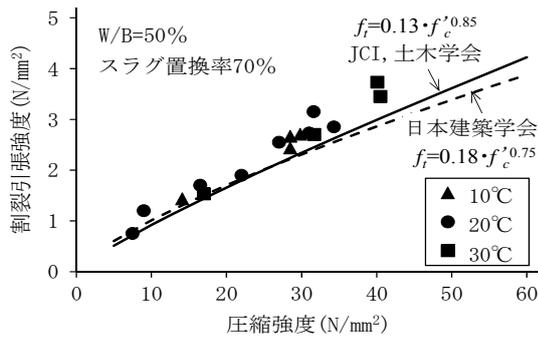


図-6 圧縮強度と割裂引張強度の関係

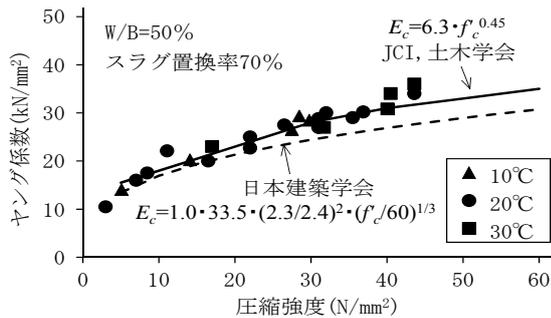


図-7 圧縮強度とヤング率の関係

算出した特性値も併記した。同図より、割裂引張強度は JCI や土木学会、日本建築学会の式から算出した特性値と概ね一致しており、高炉セメント C 種相当の結合材を用いたコンクリートでも一般的な関係式で評価できた。なお、圧縮強度が高いほど割裂引張強度が関係式よりもやや大きくなるが、この理由は明確ではなく、今後検討していきたい。ヤング係数は、JCI や土木学会の式から算出される特性値とほぼ一致していたが、日本建築学会の式 ($k_2=1.0$ として) よりもやや大きな傾向を示した。

3. 施工性試験

3.1 概要

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの暑中環境下におけるポンプ圧送性能を屋外試験で確認した。表-5 および表-6 に試験概要およびコンクリート配合と使用材料を示す。試験は 2016 年 8 月、気温 28~29°C の夏期条件下で実施した。コンクリートは、呼び強度 27N/mm²、スランプ 18cm、空気量 4.5%で、スラグ置換率 70%の高炉セメント C 種相当の配合コンクリートである。レディーミクストコンクリート工場にて材料一括投入にて製造し、運搬時間 29 分で試験場所に到着した。

ポンプ圧送性試験は、ピストン式コンクリートポンプ車を使用し、配管径 5B で水平換算距離 150m を最大吐出圧力 7.0MPa、圧送速度 25m³/h で圧送した (写真-1)。

3.2 試験結果

(1) フレッシュ性状およびポンプ圧送性

表-7 および写真-2 にフレッシュ性状の経時変化およびポンプ圧送前後でのスランプ状態を示す。測定は、

表-5 ポンプ圧送性試験の概要

試験時期	2016 年 8 月 (最高気温 30.8°C)
気温	28~29°C (試験時)
運搬時間	29 分 (工場~試験場所)
コンクリート	呼び強度 27N/mm ² 、スランプ 18cm、空気量 4.5%
圧送方法	ピストン式コンクリートポンプ車 (最大吐出圧力 7.0MPa、圧送速度 25m ³ /h)
配管条件	水平換算距離 150m (配管径 5B、直管 88m、90°ベント管 6 本、テーパ管 2 本、フレキシブルホース 1 本)

表-6 コンクリート配合と使用材料

スラグ置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	B		S	G	SP
				OPC	BFS4C			
70	50	48	163	98	228	855	955	2.93

W(地下水)、OPC(普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm³)、BFS4C(高炉スラグ微粉末 4000(石膏添加)、密度 2.89g/cm³)、S[7:3 混合](陸砂:表乾密度 2.58g/cm³、吸水率 2.45%、F.M2.50、石灰砕砂 2005:表乾密度 2.69g/cm³、吸水率 1.60%、F.M3.08)、G(砕石 2005: 表乾密度 2.69g/cm³、吸水率 0.55%、実積率 61.7%)、SP(高性能 AE 減水剤 遅延形 1 種)



写真-1 ポンプ圧送性試験 (水平換算距離 150m)

表-7 フレッシュ性状の経時変化

項目	注水からの時間 (分)	フレッシュ性状		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
工場出荷時	13	21.0	3.8	27
現場荷卸し時	52	20.0	3.7	29
圧送後	74	19.0	3.5	31

備考) 気温 28~29°C、運搬時間 29 分



写真-2 ポンプ圧送前後でのスランプ状態

工場出荷時、現場荷卸し時および 150m 圧送後の計 3 回実施した。試験の結果、暑中環境下での 150m 圧送前後におけるスランプの低下は 1cm、空気量の増減は 0.2%減に収まり、所要の品質 (スランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%) を満足する結果であった。また圧送中の管内閉塞や材料分離 (圧送前後に採取した試料中の単位粗骨材容積の変化や性状目視評価による) 等の不具合も発生しなかった。スラグ置換率 70%のコンクリートは、暑中環境でも、一般的に使用されているピストン式コンクリー

トポンプ車を用いて圧送でき、圧送後もコンクリート品質を確保できることを確認した。

(2) 圧縮強度

150m ポンプ圧送後に供試体を採取し、コンクリートの圧縮強度を確認した。供試体の養生方法は、標準養生(20℃水中)、現場水中養生(現場の日陰に設置した水槽内に存置)、現場封緘養生(ビニール袋で密封して現場の日陰に存置)の3種類で、試験材齢は7日および28日とした。また模擬柱部材(寸法 W1.0m×D1.0m×H1.0m、無筋、上下断熱材設置、現場存置)をポンプ施工で作製し、材齢7日で脱型後、現場気中に存置し、材齢28日に高さ方向にコア採取して圧縮強度を確認した。コアは直径φ100mmで、内(模擬柱部材の中心寄り)と外(側面寄り)の2箇所各々1本採取し、上下100mmを切断・廃棄し、残りを4等分してコア1本当たり4本の試料を計8本採取した。図-8に圧縮強度試験の結果を示す。7日強度は現場水中養生が26.4N/mm²で他養生より1割程大きい値であったが、28日強度は標準養生と同一の35N/mm²となった。現場封緘養生は、7日と28日ともに現場水中養生よりも1割程低い値であった。模擬柱部材のコア供試体強度は、内と外ともに高さ方向で優位な差はなく、各々の平均は31.1N/mm²と30.3N/mm²でやや内が大きい。コア供試体の内と外の平均は30.7N/mm²で、現場封緘養生より若干小さい値であったが概ね同等で、呼び強度27N/mm²を上回る結果を得られた。

4. 構造物への夏期施工

4.1 概要

共同溝(プレキャストボックスカルバート)トレンチ部の側壁と頂版部に、スラグ置換率70%のコンクリートを約5.0m³施工した(写真-3)。コンクリート配合は、前記のポンプ圧送性試験の配合(表-6)と同一である。施工場所は茨城県つくば市内、施工時期は8月末(最高気温32.2℃)で施工時気温29~30℃の夏期条件であった。なお、施工場所付近は狭隘でポンプ車を設置できなかったためバケット打ちを採用し、締め作業には細径の内部振動機と木槌を使用した。

4.2 試験結果

(1) フレッシュ性状および圧縮強度

表-8に現場荷卸し時のフレッシュ性状試験結果および圧縮強度試験結果を示す。運搬時間は29分で、大型トラックアジテータ2台(1台目:3m³積、2台目:2m³積)に分けて出荷した。試験の結果、荷卸し時のフレッシュ性状は2台とも所定の基準内に収まった。圧縮強度は材齢2日で14.0N/mm²となり、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁰⁾に示された型枠および支保の取外しに必要な圧縮強度(壁5.0N/mm²以上、スラブ14.0N/mm²

以上)に達したため、同日に型枠・支保工を解体した。28日強度は36N/mm²で、ポンプ圧送性試験の時と同等であり、呼び強度27N/mm²を十分に満足した。

(2) 硬化コンクリートの表層品質評価

型枠脱型後の仕上りは表面気泡も少なく良好で、厚さ250mmの側壁および頂版ともに充填性に問題はなかった。表-9および図-9に施工完了から約2か月後(材齢69日)に実施した表層透気試験(TORRENT)の測定結果、表-10に表面吸水試験(SWAT)の測定結果を示す。測定箇所は側壁2面(A、B)とし、各面の上下2箇所(700mm離)で測定した。測定面は、コンクリート中の含

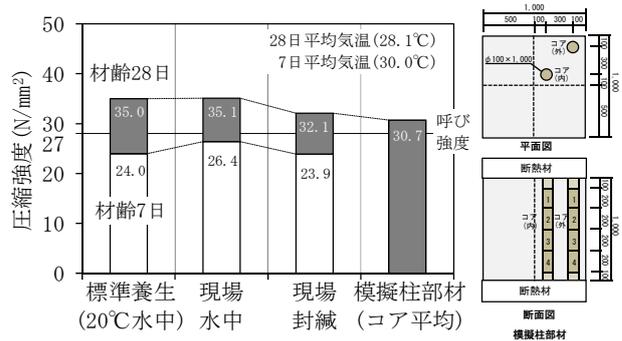


図-8 圧縮強度試験結果

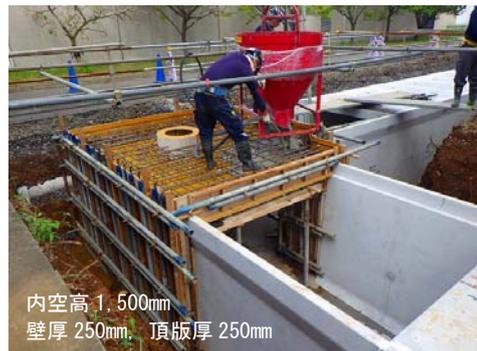


写真-3 共同溝トレンチ部側壁・頂版への打込み状況

表-8 フレッシュ性状試験結果と圧縮強度試験結果

運搬	フレッシュ性状(荷卸し時)			圧縮強度(N/mm ²)		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	2日 (脱型)	7日	28日 (管理)
	18±2.5	4.5±1.5	35以下	5以上 14以上	—	27以上
1台目	19.5	3.8	29.0	14.0	26.2	36.0
2台目	19.5	3.8	29.0	—	—	—

備考) 圧縮強度用供試体の養生は、材齢2日が現場封緘養生、材齢7日および28日は標準養生(20℃水中)

表-9 表層透気試験の測定結果

測定箇所	含水率 (%)	電気抵抗率 ρ (kΩ・cm)	表層透気係数 kT(×10 ⁻¹⁶ m ²)		グレード判定		
			平均	個別			
側壁	A面	上	4.8	68.1	0.035	good	
			4.8	63.5	0.066	0.051	good
	B面	上	4.6	58.0	0.026	average	good
			4.9	63.1	0.070	0.048	good
スイス基準	5.5以下	(10~20以上)	グレード判定へ		5段階		

備考) 測定は材齢69日目に実施

グレード評価は電気抵抗率による含水補正後の結果

スイス基準とはスイス竣工検査試行基準(SIA 262/1:2013-Annex)

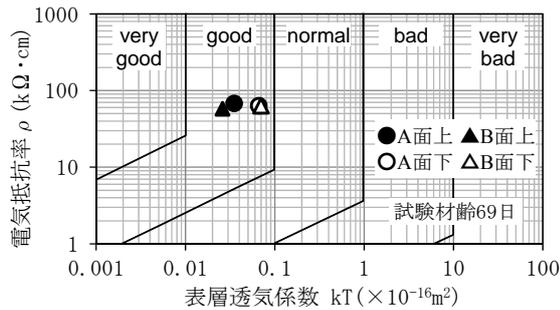


図-9 表層透気係数と電気抵抗率の関係

表-10 表面吸水試験の測定結果

測定箇所		含水率 (%)	表面吸水速度 P600(ml/m ² /s)		グレード判定
側壁	A面	上	4.8	0.241	平均 良
		下	4.8	0.131	
	B面	上	4.6	0.184	平均 良
		下	4.9	0.184	

グレード評価: 0.250 以下(良), 0.250~0.500(一般), 0.500 以上(劣)

水率が 4.6~4.9% (測定器:ASTM F2659-10 準拠), 電気抵抗率 58~68kΩcm (測定器:Wenner 四電極法), 表面温度 10℃以上で, スイスの竣工検査試行基準¹¹⁾で定める表層透気試験面の試験実施条件を満足した。

表層透気係数 kT は, A 面で平均 0.051×10⁻¹⁶m², B 面で平均 0.048×10⁻¹⁶m² となり, 概ね等しい値であった。壁上方の値が下方よりも半分程度で, 高さ方向で差がみられたが, 経験上, 測定値が小さい場合のばらつきの範疇であると考え。本測定結果は, Torrent らが提案する品質グレード評価(5段階)¹²⁾で「good」の評価となり, 表層コンクリートは物質移動抵抗性に優れ, 品質の良いコンクリートであった。

表面吸水速度 p600 は, A 面で平均 0.186ml/m²/s, B 面で平均 0.184ml/m²/s で, ほぼ等しい値であった。なお同値のグレード評価は, 一般的に 3 段階 (0.250 以下:良, 0.250~0.500:一般, 0.500 以上:劣) に区分されており, 本測定結果のグレードは「良」の評価であった。

5. まとめ

本研究では, 高炉スラグ微粉末 4000 を普通ポルトランドセメントの 70%置換で用いたコンクリートについて, 夏期想定 30℃環境における基本特性の確認および暑中条件下でのポンプ圧送試験や実施工による硬化体品質の評価を実施した。本検討で得られた結果を以下に示す。

- (1) 化学混和剤は遅延形で, 特にポリカルボン酸系化合物とリグニンスルホン酸塩を主成分とした高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用) を用いることで, フレッシュ性状の経時安定性を確保できた。
- (2) 高炉スラグ微粉末 4000 への石膏添加 (無水石膏を SO₃ 換算で質量比約 2%添加) により, プリーディングが若干増加し, 凝結がやや遅延したものの, 高炉

セメント B 種相当 (スラグ置換率 45%) と同程度の強度発現性を得られた。

- (3) 打込み後, 積極的に水分を供給する養生を実施することで, コンクリートの強度発現性が高くなる。
- (4) 暑中条件下でも, ピストン式コンクリートポンプによる圧送性 (水平換算距離 150m) は良好であった。
- (5) 表層透気試験や表面吸水試験の結果, 高い品質を有していることが確認された。

なお, 本研究は国立研究開発法人土木研究所が主催した共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」(2011~2015 年) の成果の一部とその展開である。

謝辞: 本研究を行う上で, (株)デイ・シイ殿には貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用 (2015 年版)
- 2) 椎名貴快ほか: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの強度と耐久性に着目した湿潤養生期間, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-487, pp.973-974, 2015.9
- 3) 土師康一ほか: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの温度特性に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-486, pp.971-972, 2015.9
- 4) 椎名貴快ほか: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解抵抗性に与える湿潤養生期間と空気量の影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-123, pp.245-246, 2016.9
- 5) 新谷岳ほか: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの収縮特性に関する検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-124, pp.247-248, 2016.9
- 6) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- 7) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013
- 8) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, 2008
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015
- 10) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2013
- 11) Recommendations for Quality Control of Concrete with Air-Permeability Measurements, SIA 262/1:2013-Annex
- 12) R. J. Torrent and G. Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", Proceedings of International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE), pp.985-992, 1995