

論文 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの低温環境下でのフレッシュ性状と強度に関する実験的検討

大橋 英紀*1・土師 康一*2・田中 徹*3・椎名 貴快*4

要旨: 普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末 4000 で 70%置換した高炉スラグ微粉末高含有コンクリートについて、冬期施工を模擬した環境温度下で、凝結時間試験やブリーディング試験を主とする室内試験により各種特性を確認した。試験の結果、低温環境下で高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを施工する場合、特に凝結やブリーディングの特性を改善し強度発現を促す方策として、本試験の範囲内では、早強ポルトランドセメントの使用や、養生温度を常温（20℃）に近い値に保持する養生対策が有効であることがわかった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、高炉セメント C 種、低温環境、凝結、ブリーディング

1. はじめに

平成 28 年に閣議決定された「地球温暖化対策計画」¹⁾によると、我が国は 2030 年度までに 2013 年度比で 26.0%の温室効果ガスの削減を目標としている。こうした社会情勢の中、建設業界においても他産業と同様に二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの削減が求められている。その取組みの一環として、普通ポルトランドセメントの代替に、鉄鋼製造時の副産物である高炉スラグ微粉末や石炭火力発電の際に発生するフライアッシュ等を用いたコンクリートが注目されている。

筆者らは、高炉スラグ微粉末は CO₂ 排出原単位が少ないこと、潜在水硬性を有することに着目し、(国研) 土木研究所が主催した「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」(2011～2015)²⁾に参画し、セメント質量の 70%以上(最大 90%)を高炉スラグ微粉末 4000 (写真-1)で置き換えた高炉スラグ微粉末高含有コンクリート³⁾を実用化し、施工現場への展開を進めている。

一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、同程度の強度を有する普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して、①水和熱による温度上昇を抑制し、②アルカリシリカ反応が抑制され、③水密性および塩化物イオンの浸透抵抗性に優れ、④長期強度が大きいとされる⁴⁾⁵⁾。しかしながら、低温環境下では凝結の遅延やブリーディングの増加、初期の強度発現が小さいことが、施工時の課題となることが多い。

そこで、高炉スラグ微粉末 4000 でポルトランドセメントを 70%置換(高炉セメント C 種相当)した高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを用いて、冬期施工を模擬した 5℃の低温環境下で室内実験を実施し、凝結やブリー

ディングといったフレッシュ特性および圧縮強度発現への影響を確認した。さらに、20℃および 35℃環境下でも同様の試験を実施し、環境温度による比較も行った。



写真-1 高炉スラグ微粉末 4000

2. 室内試験

2.1 使用材料

表-1 から表-3 に使用材料を示す。本試験では、3 か所のレディミクストコンクリート工場 (A, B, C) で使用されている骨材を用いて各々試験を行った。

セメントは、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを使用した。高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に準拠した高炉スラグ微粉末 4000 とし、プラント A および B では無水せっこう、プラント C では二水せっこうをそれぞれ三酸化硫黄 (SO₃) 換算で質量比 2.0% (JIS A 6206 : 4.0%以下) 添加した製品を用いた。なお、せっこうを添加した理由は、スラグの初期反応の促進や初期強度の確保のためである。化学混和剤は、JIS A 6204 に適合した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した高性能 AE 減水剤を使用した。

*1 戸田建設 (株) 技術開発センター 社会基盤ユニット 社会インフラチーム 工修 (正会員)

*2 戸田建設 (株) 土木工事技術部 技術 5 課 課長 工修 (正会員)

*3 戸田建設 (株) 技術開発センター 社会基盤ユニット マネージャー 工修 (正会員)

*4 西松建設 (株) 技術研究所 上席研究員 工修 (正会員)

なお、5℃および 20℃環境下では標準型、35℃環境下では遅延型を使用した。練混ぜ水はすべて上水道水である。

2.2 試験方法および配合

本試験では低温環境の温度条件として、打込み時のコンクリート最低温度である 5℃⁹⁾を設定した。試験項目は表-4 に示すとおり、フレッシュ性状としてスランプ、空気量、コンクリート温度測定、凝結時間、ブリーディングの各試験を行った。なお、スランプ、空気量、コンクリート温度測定については、練上がり直後（0 分）と経時変化（注水完了からの経過時間 30, 60, 90 分）も測定した。また比較のため、20℃と 35℃環境下でも同様の試験を行い、高炉スラグ微粉末高含有コンクリートにおける環境温度による影響も検討した。圧縮強度の確認は水中養生および封緘養生の 2 種類で行い、試験は材齢 3, 7, 14, 28, 91 日とした。本試験では、フレッシュ性状はプラント B、C について、強度発現はプラント A について考察する。

表-5 に試験で用いたコンクリートの配合を示す。水結合材比（W/B）は、単位粗骨材かさ容積を固定して、プラント A では 50%と 45%、プラント B および C では 45%と 32%の各 2 水準とした。細骨材率（s/a）は表のとおり 42.0~48.5%の範囲で調整した。コンクリートの練混ぜは容量 55L の強制練り二軸ミキサを使用し、1 バッチ当たり 30L を練混ぜた。練混ぜ方法は、プラントによらず、W/B=50%および 45%の場合、セメント、骨材、高炉スラグ微粉末を 10 秒間空練りした後、混和剤および練り混ぜ水を加えて 90 秒間練り混ぜ、排出した。W/B=32%の場合は細骨材、高炉スラグ微粉末およびセメントを 10 秒間空練りし、混和剤および練混ぜ水を加えて 60 秒間練混ぜた。その後、粗骨材を加えて 90 秒間練混ぜた後、5 分間静置し、排出した。

本試験におけるフレッシュコンクリートの性状は、目標スランプを 21.0±2.0cm、目標空気量を 4.5±1.5%に統一した。

表-1 使用材料（プラント A）

材 料 名			記号	密度(g/cm ³)
結合材	ポルトランドセメント	普 通	OPC	3.16
		早 強	HPC	3.14
	高炉スラグ微粉末 4000	無水せっこう (2.0%添加)	BF	2.89
骨材	細骨材	陸 砂 (70%)	S1	2.58 (表乾)
		石灰砕砂 (30%)	S2	2.69 (表乾)
	粗骨材	砕石 2005	G	2.69 (表乾)

表-2 使用材料（プラント B）

材 料 名			記号	密度(g/cm ³)
結合材	ポルトランドセメント	普 通	OPC	3.16
		早 強	HPC	3.14
	高炉スラグ微粉末 4000	無水せっこう (2.0%添加)	BF	2.89
骨材	細骨材 (混合砂)	山 砂 (70%)	S	2.61 (表乾)
		石灰砕砂 (30%)		
	粗骨材	砕石 2005	G	2.70 (表乾)

表-3 使用材料（プラント C）

材 料 名			記号	密度(g/cm ³)
結合材	ポルトランドセメント	普 通	OPC	3.16
		早 強	HPC	3.14
	高炉スラグ微粉末 4000	二水せっこう (2.0%添加)	BF	2.87
骨材	細骨材 (混合砂)	山 砂 (60%)	S	2.62 (表乾)
		石灰砕砂 (40%)		
	粗骨材	砕石 2005 (70%)	G1	2.69 (表乾)
		砕石 2005 (30%)	G2	2.69 (表乾)

表-4 試験項目

分類	試験項目	試験方法	備 考		
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	21±2.0cm	経時変化 0, 30, 60 90 分	
	空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%		
	コンクリート温度測定	JIS A 1156			
	凝結時間	JIS A 1147			
	ブリーディング	JIS A 1123			
硬化体	圧縮強度	JIS A 1108	材齢 3, 7, 14, 28, 91 日		

表-5 コンクリート配合表

配合名	プラント	セメント種類		W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							混和剤添加率(B×%)		
		OPC	HPC			W	B		S		G		5℃	20℃	35℃
							C	BF	S1	S2	G1	G2			
AO-50%	A	○		50	48.0	163	98	228	591	264	955		1.00	—	—
AH-50%			○	50	48.0	163	98	228	591	264	955		1.00	—	—
AO-45%		○		45	47.0	163	109	254	569	254	955		1.00	—	—
BO-45%	B	○		45	48.5	170	113	264	836		915		1.10	1.10	1.15
BO-32%		○		32	43.0	175	164	383	671		915		1.10	1.00	1.00
BH-45%			○	45	48.5	170	113	264	836		915		1.15	—	—
BH-32%			○	32	43.0	175	164	383	671		915		1.10	—	—
CO-45%	C	○		45	47.5	170	113	264	821		650	278	1.10	1.00	1.05
CO-32%		○		32	42.0	175	164	383	658		650	278	1.00	0.90	0.90
CH-45%			○	45	47.5	170	113	264	821		650	278	1.15	—	—
CH-32%			○	32	42.0	175	164	383	658		650	278	1.00	—	—

表-6 フレッシュ性状結果 (5℃, 練上がり直後)

プラント	配合名	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(℃)
			21±2.0	4.5±1.5	—
B	BO-45%	OPC	21.0	3.7	9
	BO-32%		22.0	3.5	10
	BH-45%	HPC	22.0	4.8	9
	BH-32%		19.0	4.5	11
C	CO-45%	OPC	22.0	4.1	8
	CO-32%		22.5	4.6	8
	CH-45%	HPC	23.0	4.5	7
	CH-32%		22.5	4.9	8

3. 試験結果および考察

3.1 セメント種類による比較

5℃の低温環境下で、セメント種類として普通ポルトランドセメント (OPC) および早強ポルトランドセメント (HPC) を使用した場合のフレッシュ性状を確認した。W/B は 45%と 32%とし、プラント B およびプラント C の材料を用いて全 8 配合の試験を行った。表-6 に各ケースでの練上がり直後 (0 分) のフレッシュコンクリート試験の結果を示す。すべてのケースでスランプおよび空気量とも所定の目標値を満足した。なお、環境温度に対してコンクリート温度がやや高いが、これは実際のレディーミクストコンクリート工場から冬期に出荷されるコンクリートの練上がり温度が 9℃前後に設定されていることを考慮したためである。

図-1 および図-2 に、プラント B および C でのスランプと空気量の経時変化量を示す。試験の結果、すべてのケースにおいて、注水完了から 90 分までのフレッシュ性状は所定の目標値を満足する結果であった。ただし、プラント B はプラント C に比べて、注水完了から 30 分以降でのスランプが全体的にやや大きく変化している。特に、セメント種類が早強ポルトランドセメントの場合、普通ポルトランドセメントでの変化量を上回る傾向が見られた。プラント B および C の配合は概ね等しく、使用材料のうち、セメントや水、化学混和剤は同一製品を使用している。化学混和剤の使用量はプラントや配合によらずほぼ同量であり、混和剤によるフレッシュ性状への影響は小さいと考えられる。このため、プラント B でスランプがやや大きな経時変化を生じた理由として、高炉スラグ微粉末の品質、特にせっこうの化学組成の違い(無水せっこう、二水せっこう)による影響が考えられるが明確ではない。一方で、空気量の経時変化については、プラント B および C ともに大きな変化は確認されず、比較的安定していた。

図-3 に凝結試験結果を示す。凝結の始発・終結時間は、プラント B および C ともに、早強ポルトランドセメントを用いた方が普通ポルトランドセメントよりも早く、

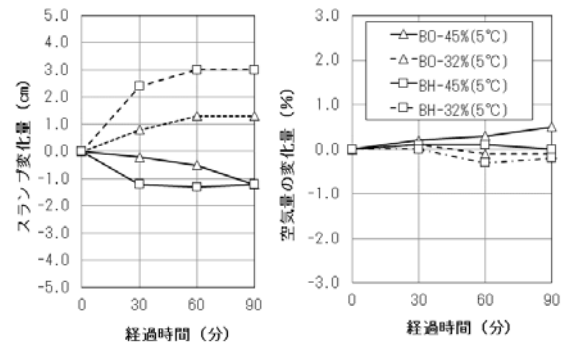


図-1 フレッシュ性状の経時変化 (プラント B, 5℃)

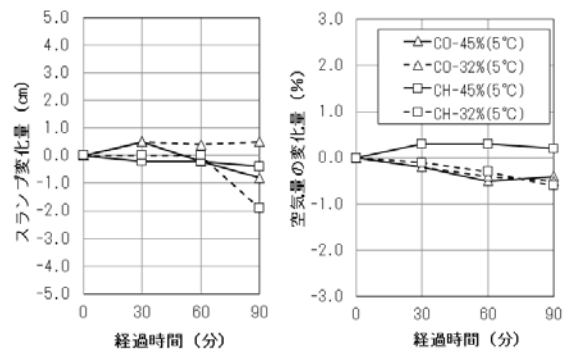


図-2 フレッシュ性状の経時変化 (プラント C, 5℃)

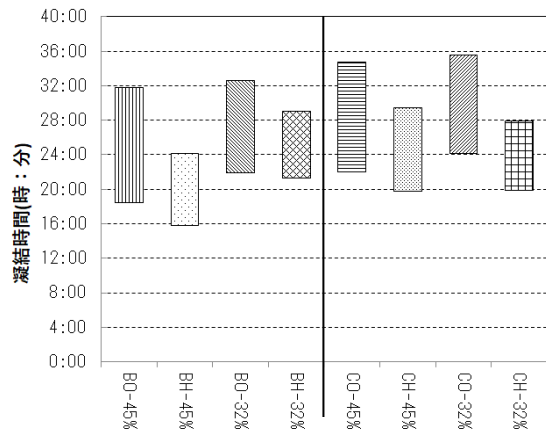


図-3 凝結試験結果 (5℃)

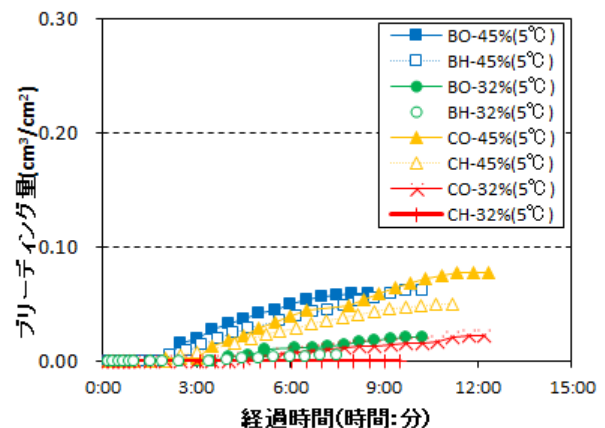


図-4 ブリーディング試験結果 (5℃)

始発で約 2～4 時間、終結で約 3.5～7 時間短くなった。
W/B によらず化学混和剤の添加量は同等であり、フレッシュ性状への影響は小さいと考えられる。低温環境下で高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを施工する場合、セメントの種類は凝結特性に大きく影響し、凝結時間の短縮には早強ポルトランドセメントの使用が有効であった。図-4 にブリーディング試験の結果を示す。早強ポルトランドセメントを使用した場合、普通ポルトランド

セメントと比較してブリーディング量が減少する傾向となった。また W/B が大きいほど、ブリーディング量が増加し、ブリーディングの始発時間は 2 時間ほど早くなった。一般にブリーディングは使用材料や配合条件等によって異なり、土木分野では特に規定はないが、建築分野では JASS5⁷⁾の水密コンクリートで $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下との規定がある。今回はすべての配合で同規定を満足する結果となった。

表-7 フレッシュ性状結果 (5, 20, 35℃)

プラント	配合名	環境温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
			21±2.0	4.5±1.5	—
B	BO-45%	5	21.0	3.7	9
	BO-32%		22.0	3.5	10
	BO-45%	20	22.5	4.7	23
	BO-32%		21.0	4.5	22
	BO-45%	35	22.5	4.7	32
	BO-32%		22.5	4.9	32
C	CO-45%	5	22.0	4.1	8
	CO-32%		22.5	4.6	8
	CO-45%	20	22.5	5.5	22
	CO-32%		22.5	5.5	22
	CO-45%	35	22.0	4.8	31
	CO-32%		22.5	5.6	32

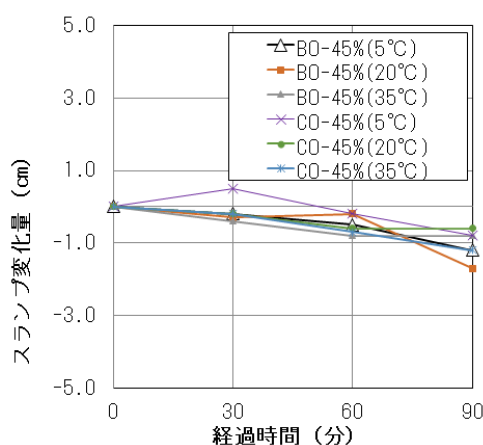


図-5 スランプ試験結果

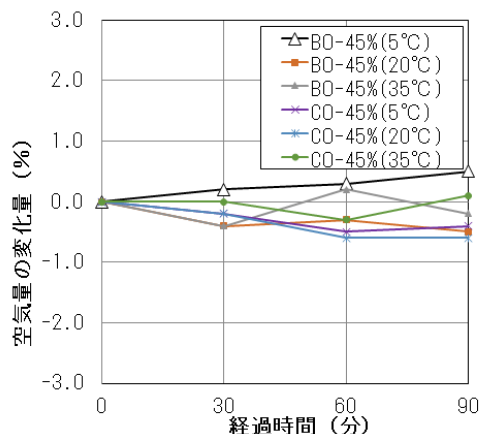


図-6 空気量試験結果

3.2 環境温度による比較

環境温度を 5℃, 20℃, 35℃とした時のフレッシュ性状とその経時変化を確認した。セメントは普通ポルトランドセメント (OPC), W/B は 45%と 32%で、プラント B および C の材料を用いて全 12 配合の試験を行った。

表-7 に各ケースでの練上がり直後 (0 分) のフレッシュ性状試験の結果を示す。練上がり直後のフレッシュ性状は、すべてのケースで所定の目標値を満足した。また、図-5 および図-6 にスランプと空気量の経時変化量を示す。試験の結果、環境温度 5℃, 20℃および 35℃のすべて温度条件で、注水完了から 90 分までのフレッシュ性状は、所定の目標値を満足する結果を得られた。

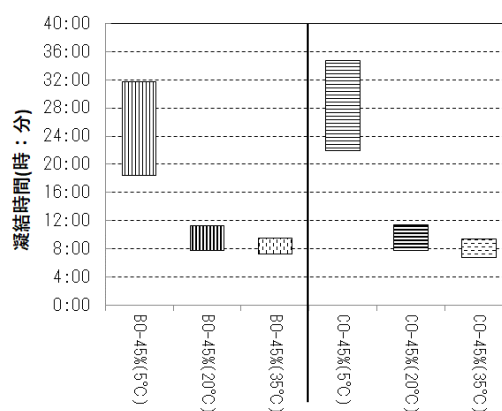


図-7 凝結試験結果 (W/B=45%)

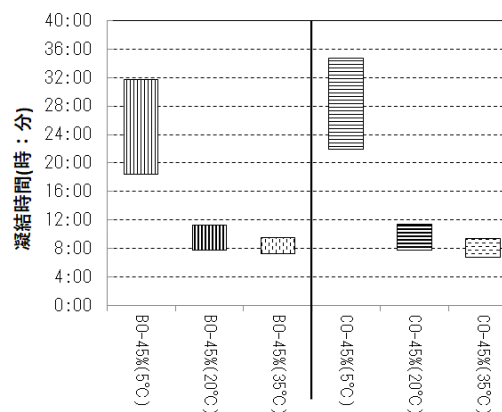


図-8 凝結試験結果 (W/B=32%)

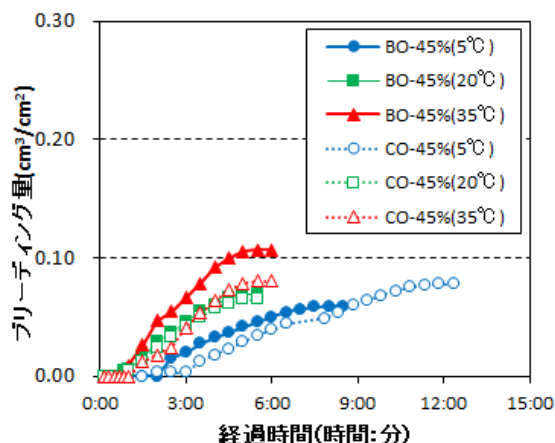


図-9 ブリーディング試験結果 (W/B=45%)

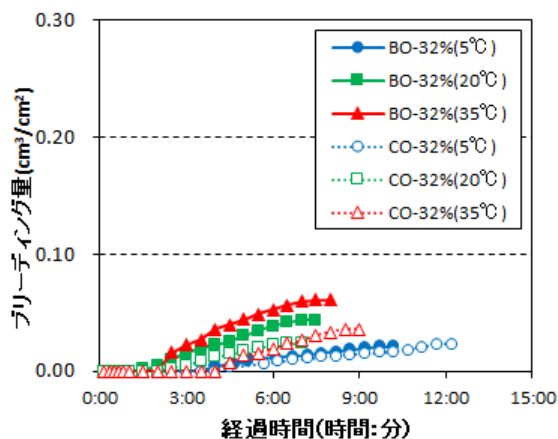


図-10 ブリーディング試験結果 (W/B=32%)

図-7 および図-8 に凝結試験の結果を示す。プラント B および C とともに W/B が 45% と 32% で凝結時間に差はあるものの、おおよその共通した傾向として 5℃ 環境下では凝結の始発が 18 時間以降に、終結が 31 時間以降で極めて遅くなった。一方で、20℃ 以上の環境温度では凝結始発が 7 時間程度、終結が 12 時間程度であった。この結果、低温環境下で普通ポルトランドセメントを用いた場合、凝結の始発時間が打込み完了後から半日以上を要するため、施工時の仕上げ作業時間に大きな影響を及ぼす可能性が認められた。

図-9、図-10 にブリーディング試験の結果を示す。ブリーディング量は、W/B=45% で 0.11~0.06cm³/cm² 程度、W/B=32% で 0.06~0.02cm³/cm² 程度で、W/B が大きいほどブリーディング量は多く、また温度が低いほどブリーディングの終結までに時間を要する結果となった。このような傾向は一般の普通コンクリートと同様であるが、特に 5℃ 環境下では、高炉スラグ微粉末の置換率が 70% と高いため、凝結硬化反応が 20℃ や 35℃ に比して大きく遅延したことも大きく影響していると考えられる。また、35℃ の場合、ブリーディング量がやや多くなる傾向が見られたが、これは遅延型の混和剤を用いたことによる凝結遅延の影響であると推察される。

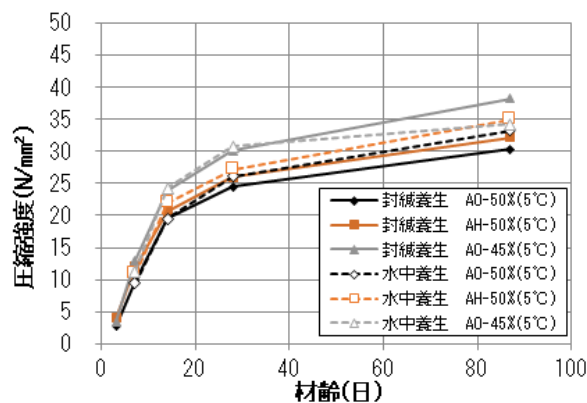


図-11 材齢と圧縮強度の関係 (5℃)

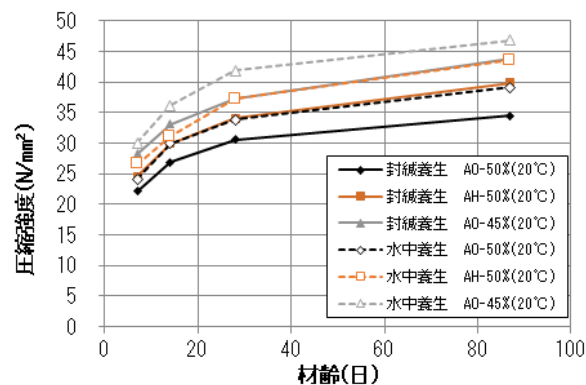


図-12 材齢と圧縮強度の関係 (20℃)

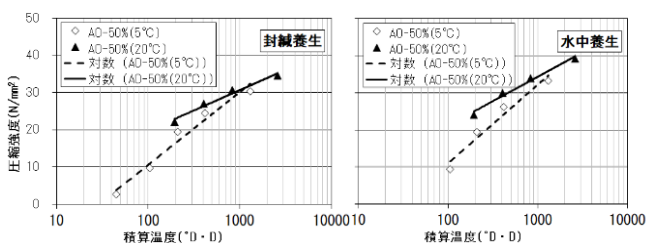


図-13 積算温度と圧縮強度の関係 (OPC, W/B=50%)

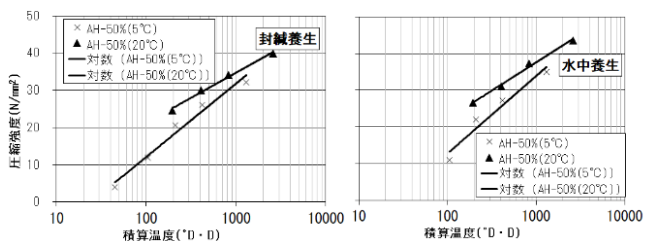


図-14 積算温度と圧縮強度の関係 (HPC, W/B=50%)

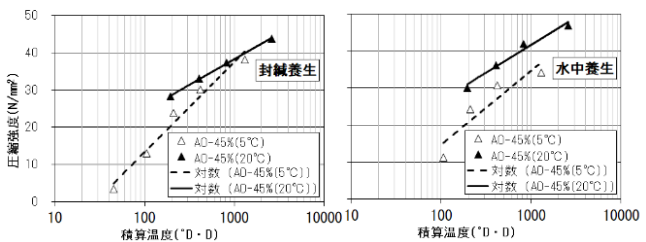


図-15 積算温度と圧縮強度の関係 (OPC, W/B=45%)

3.3 圧縮強度試験結果

高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの圧縮強度発現に対する環境温度（5℃、20℃）や養生方法（封緘養生、水中養生）の違いによる影響について確認した。セメントは普通ポルトランドセメント（OPC）と早強ポルトランドセメント（HPC）を使用し、W/B は 50%と 45%で、プラント A の材料を用いた。

図-11 および図-12 に材齢と圧縮強度の関係を示す。5℃の時に同一配合で水中養生と封緘養生を比較した場合、材齢 7 日までの強度に優位な差は見られないが、28 日以降の長期強度は（45%配合を除いて）水中養生の方が増加する傾向が認められた。また 20℃の場合、封緘養生と比較して、水中養生の方が強度発現は大きくなり、全体として、環境温度が高いほど各材齢での強度は大きい傾向であった。

図-13、図-14 および図-15 に、水中養生と封緘養生を行った場合の圧縮強度と積算温度との関係を示す。環境温度に関わらず、いずれの場合も一般の普通コンクリートと同様に圧縮強度は概ね直線的に増加する傾向となった。また、養生方法にかかわらず、20℃の方が 5℃よりも圧縮強度は増加する傾向となった。

以上より、打込み後の温度や水分供給の条件が、強度の発現に大きく影響しており、特に低温条件での施工においては、養生温度をできるだけ高くすることが長期強度の発現に有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントの 70%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換した高炉スラグ微粉末高含有コンクリートについて、5℃の低温環境下での施工を模擬した室内試験を行い、その性状について確認した。

本試験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 早強ポルトランドセメントを用いた場合、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて、凝結の始発および終結時間が短くなり、凝結特性に改善が見られた。
- (2) 普通ポルトランドセメントを用いた場合、凝結特性は環境温度に大きく左右され、特に 5℃では始発および終結時間ともに 20℃や 35℃に比べて大きく遅延した。

- (3) 早強ポルトランドセメントを用いた場合、ブリーディング量が普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて減少した。なお W/B が大きいほど、ブリーディング量は増大し、ブリーディングの発生開始時間も早くなった。
- (4) ブリーディングの発生開始時間は、環境温度 5℃の場合、20℃や 35℃に比べて遅くなる傾向がみられた。これは凝結試験の結果とも一致した。
- (5) 圧縮強度は、一般の普通コンクリートと同様に、養生温度が高いほど上昇し、積算温度との関係で整理することができた。
- (6) 5℃環境下での強度発現は、初期材齢よりも長期材齢の方が水分供給による養生の効果が現れた。

以上の結果より、低温環境下で高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを施工する場合、本試験の範囲内において、早強ポルトランドセメントを使用した方が凝結やブリーディングの性状を改善し、施工に有利であると考えられる。また初期の養生温度をできるだけ常温（20℃）に近づけることで、コンクリート打込み面の仕上げに至る時間を大幅に短くできるため、低温環境下での施工においては養生方法に配慮が必要である。

本研究は、(国研) 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）での成果を発展させたものである。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画：2016.5
- 2) (国研) 土木研究所・戸田建設(株)・西松建設(株)：共同研究報告書471号、475号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書、2016.1
- 3) 椎名貴快，田中 徹，小池晶子，中村英佑：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，pp.157～162，2017
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー86「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」，1996.6
- 5) 伊代田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，コンクリート工学，52巻，4号，2014
- 6) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 7) 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」，2015.7