

高炉スラグ微粉末を高含有した 低炭素型コンクリート『スラグリート®』の開発

基礎性状試験結果について

DEVELOPMENT OF LOW - CARBON CONCRETE THAT HIGH CONTENT OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG (SLAGRETE)

For basic properties test results

新谷 岳*¹, 土師 康一*², 田中 徹*³
Gaku SHINTANI, Kouichi HAZE and Tooru TANAKA

As part of the efforts to build a low - carbon society, we have developed a Slagrete which replaced the majority of the Portland cement with admixture (ground granulated blast furnace slag). The use of admixtures, while contributing to reducing carbon dioxide emissions at the time of material production, has a significant impact on the quality of the fresh concrete and hardened concrete. Therefore, in the application of this for Slagrete, it is important to perform the basic properties.

Among the basic properties, this paper reports 4 items which are, (1) contractile properties, (2) freeze - thaw resistance, (3) compressive strength, to report (4) the temperature characteristics.

Keywords : Low carbon concrete, Ground Granulated Blast furnace slag, The basic property
低炭素型コンクリート, 高炉スラグ, 基礎性状

1. はじめに

低炭素社会の構築に向けた取組みの一環として、コンクリートに使用するセメントの一部分あるいは大部分を高炉スラグ微粉末などの混和材で置き換えた低炭素型コンクリートの利用が注目されている。その中で当社は、西松建設(株)及び(国研)土木研究所と共同で、セメント質量の 70~90%を高炉スラグ微粉末に置換した低炭素型コンクリート『スラグリート®』を開発している¹⁾。この『スラグリート®』の高炉スラグ微粉末置換率は、高炉セメントの JIS 規格(JIS R 5211)の C 種(置換率上限値 70%)以上に相当する。

このように、セメントの代替品として混和材を大量に使用することは、セメントの製造時に発生する二酸化炭素排出量の削減に寄与することができる。しかしこのような高い置換率のコンクリートにおいては、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの基礎性状が明確にされておらず、『スラグリート®』の適用にあたっては、基礎性状を適切に把握しておく必要がある。

そこで本稿では、『スラグリート®』基礎性状試験の結果について報告を行う。

2. スラグリートの概要

今回開発した『スラグリート®』は、セメントに対す高炉スラグ微粉末(以降、BFS)の置換率が、質量比で 70%~90%のコンクリートである。使用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

ンドセメントを標準とし、BFS は粉末度 4000cm²/g で、無水せつこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添したものを使用している。表 - 1 に『スラグリート®』の使用材料を示し、その標準配合例を示す。

表 - 1 使用材料及び配合例

材料	記号	仕様
水	W	上水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3,320cm ² /g
	HPC	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³ ,比表面積:4,490cm ² /g
混合材	BFS	高炉スラグ微粉末4000 密度:2.89g/cm ³ ,比表面積:4,440cm ² /g
細骨材	S	掛川産酸砂 表乾密度:2.58g/cm ³ ,吸水率:2.01%
粗骨材	G	空間産砕石 表乾密度:2.67g/cm ³ ,吸水率:0.43%
混和剤	Ad	AE減水剤(高機能タイプ) (標準形1種)
		リグニンスルホン酸塩,オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	SP	高性能AE減水剤(標準形1種) ポリカルボン酸系化合物,リグニンスルホン酸塩

配合例	水結合材比		高炉スラグ微粉末への置換率	細骨材率	単位量 (kg/m ³)				
	W/B	BFS/B			結合材B		細骨材	粗骨材	
	(%)	(%)	セメント	高炉スラグ微粉末	S	G			
①	35	90	50.0	水 W	165	47	424	835	835
②	50	70	45.9	水 W	163	98	228	811	982

※配合例①: スランプフロー42.5cm±7.5cm, 空気量4.5cm³±1.5% (中流動コンクリート相当)
高性能AE減水剤(高炉スラグ高含有用)
※配合例②: スランプ12.0cm±2.5cm, 空気量4.5cm³±1.5%
AE減水剤(高機能タイプ)

一般に使用されている高炉セメント B 種(JIS R 5211)は、基礎的な性状が明らかにされており²⁾、普通ポルトランドセメントに対して収縮特性・凍結融解特性・初期圧縮強度は不利になること、その一方で温度特性は有利になることが知られている。しかし、今回開発した『スラグリート®』は BFS への置換

*1 戸田建設(株)土木工事技術部 修士(工学)
*2 戸田建設(株)土木工事技術部 修士(工学)
*3 戸田建設(株)技術開発センター 修士(工学)

Civil Works Engineering Department, TODA CORPORATION, M.Eng.
Civil Works Engineering Department, TODA CORPORATION, M.Eng.
Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

率(以降, BFS 置換率)がこのような高炉セメント B 種より大きく, その基礎性状が不明であった. そのため今回『スラグリート®』について基礎性状試験を行い, 特に施工に大きく影響することが考えられる, (1)収縮特性, (2)凍結融解抵抗性, (3)圧縮強度, (4)温度特性の 4 項目について報告を行う.

3. 各種性能確認試験

3.1 試験概要

今回, BFS 置換率が基礎性状に及ぼす影響を把握することを目的に各種試験を実施したので, 以下にその試験内容および結果を示す.

3.2 収縮特性試験

(1) 配合及び使用材料

今回の収縮特性試験に用いた配合は, 水結合材比を 35% (早強ポルトランドセメント使用) および 50% (普通ポルトランドセメント使用) の二水準とした. 混和剤は, 水結合材比 35% 配合においては高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系化合物リグニンスルホン酸塩) を用い, 水結合材比 50% 配合においては AE 減水剤 (高機能タイプ) (リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物) を用いた. また水結合材比ごとに, BFS 置換率を, ①50% (高炉セメント B 種相当), ②70% (高炉セメント C 種上限相当), ③90% (高炉セメント C 種上限超) の 3 水準とした. 表 - 2 に試験配合を示す.

表 - 2 試験配合

配合 ケース	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	S/a (%)	単位数 (kg/m ³)						混和剤	
				W	B			S	G	Ad (B×%)	SP (B×%)
					OPC	HPC	BFS				
①		50		165	-	236	236	842	842	-	1.30
②	35	70	50.0	165	-	141	330	839	839	-	1.25
③		90		165	-	47	424	835	835	-	1.20
④		50		163	163	-	163	813	984	1.20	-
⑤	50	70	45.9	163	98	-	228	811	982	1.10	-
⑥		90		163	33	-	293	809	979	1.00	-

(2) 試験方法

・自己収縮試験

『(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法』³⁾を参考に, 図 - 1 に示すように, 測温機能付き埋設型ひずみ計を中央部に配置した角柱試験体 (10×10×40cm) を使用して試験を実施した. 試験体は, コンクリート打設後, 24 時間で脱型を行い, その後, 封緘状態にて恒温恒湿室内 (温度: 20°C, 湿度: 60%RH) で測定した.

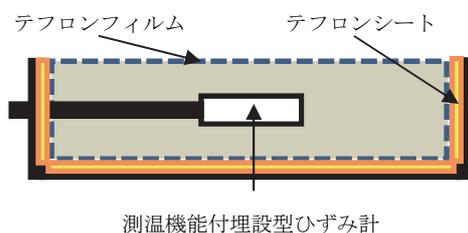


図 - 1 自己収縮試験体概要図

・長さ変化試験

BFS 置換率がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の確認を目的として, JIS A 1129『モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法』に準拠した長さ変化試験を実施した. 試験は, 打設後, 24 時間で脱型を行い, 材齢 7 日まで水中養生を実施後, 初期値の計測を行い, 恒温恒湿室内で 26 週まで測定した.

(3) 試験結果および考察

・自己収縮試験

BFS 置換率を 50%, 70%, 90%とした場合の自己収縮試験結果を, 水結合材比ごとに図 - 2, 図 - 3 に示す. 試験の結果, 水結合材比に関わらず, 今回の試験の範囲では, BFS 置換率が高い配合の方が, 収縮量が小さい結果となった. また, BFS 置換率ごとに比較すると, 置換率 50%と 70%の配合は概ね同程度であるが, JIS 上限値を超える置換率 90%の配合では, 収縮量が小さくなる傾向が認められた. これは, BFS に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリングaitにより, 材齢初期(凝結始発後)に適度な膨張作用が加わることで, 自己収縮ひずみの発生が緩和されたためと考える. また水結合材比が 35%の配合と 50%の配合を比較すると, 総じて 35%の配合の方が大きな値となった. 最後に水結合材比 50%の配合では自己収縮が無視できる程度に小さい値となっている. これは粉体量やセメントの比表面積の違いが影響していると考えられる.

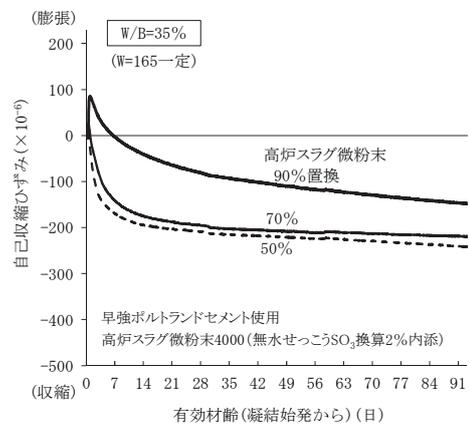


図 - 2 自己収縮試験結果 (W/B=35%)

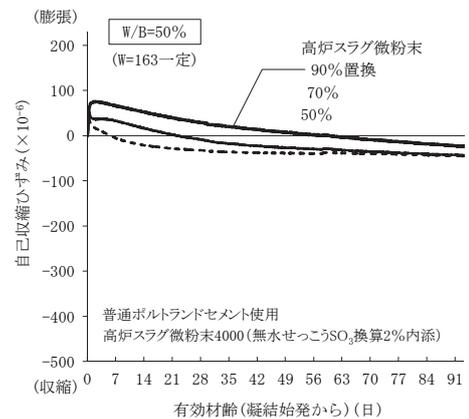


図 - 3 自己収縮試験結果 (W/B=50%)

・長さ変化試験

BFS 置換率による長さ変化率の違いを水結合材比ごとに、図 - 4、図 - 5 に示す。図より、水結合材比が 35% の配合では、BFS 置換率によらず長さ変化率が同程度であるが、水結合材比が 50% の配合では、BFS 置換率が高いほど、長さ変化率が小さくなり、JIS 上限値を超える置換率 90% 配合では、長さ変化率が特に小さい結果となっていることがわかる。これは、BFS の配合量に相応して、コンクリート中の組織が緻密となり、収縮が抑制された結果であると考えられる。

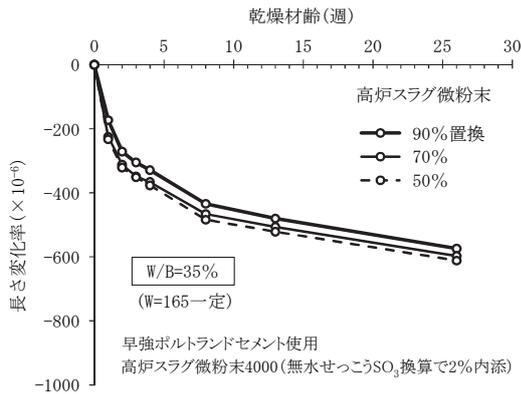


図 - 4 長さ変化試験結果 (W/B=35%)

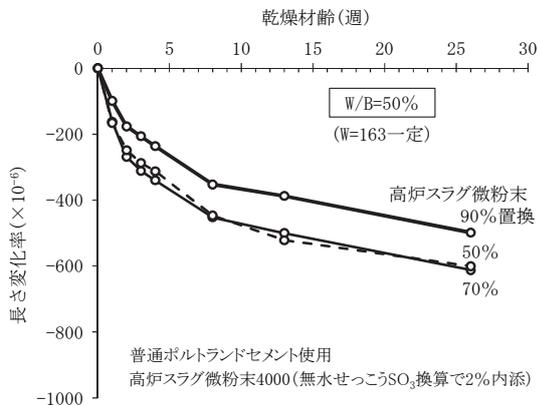


図 - 5 長さ変化試験結果 (W/B=50%)

(4) 収縮特性のまとめ

今回検討により以下のことが確認された。

- ・内添する無水せっこうに起因するエトリンガイトの作用により、水結合材比に関わらず、BFS 置換率が高い配合で自己収縮量が小さい結果となった。
- ・長さ変化試験の結果、W/B=50%、BFS 置換率が 90% の配合で長さ変化率が小さく、乾燥収縮に対する抵抗性が高いことが確認された。

上記結果より、BFS を高含有したコンクリートを、十分に養生することによって、高炉セメント B 種を用いたコンクリートよりも、高い収縮ひずみ抑制効果が得られることが明らかとなった。

3.2 凍結融解抵抗性

(1) 配合および使用材料

表 - 3 凍結融解抵抗性試験に用いたコンクリートの配合ケースを示す。試験配合は 3.1 項と同様に水結合材比を 35%(早強ポルトランドセメント・高性能 AE 減水剤)および 50%(普通ポルトランドセメント・AE 減水剤(高性能タイプ))の二水準とした。また水結合材比ごとに、BFS 置換率を、①30%(高炉セメント B 種下限値)、②50%(高炉セメント B 種相当)、③70%(高炉セメント C 種上限相当)、④90%(高炉セメント C 種上限超)の 4 水準とした。

表 - 3 試験配合

配合ケース	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤		
				W	B		S	G	Ad (B×%)	SP (B×%)	
					OPC	HPC					BFS
①	35	30	50.0	165	-	330	141	846	846	-	1.35
②		50		165	-	236	236	842	842	-	1.30
③		70		165	-	141	330	839	839	-	1.25
④		90		165	-	47	424	835	835	-	1.20
⑤	50	30	45.9	163	228	-	98	815	987	1.30	-
⑥		50		163	163	-	163	813	984	1.20	-
⑦		70		163	98	-	228	811	982	1.10	-
⑧		90		163	33	-	293	809	979	1.00	-

(2) 試験結果および考察

・化学混和剤の使用量

図 - 6 に 20℃環境で空気量 4.5% の時、同程度のワーカビリティや流動性を得るために必要な化学混和剤の使用量と BFS 置換率の関係を示す。同図より、W/B の違いによらず、置換率が大いほど、化学混和剤 [主剤] の必要量は減少し、一方で、空気量調整剤(AE 剤)の必要量は増加することがわかる。これは、BFS の使用による単位水量の低減効果による影響と推定される。

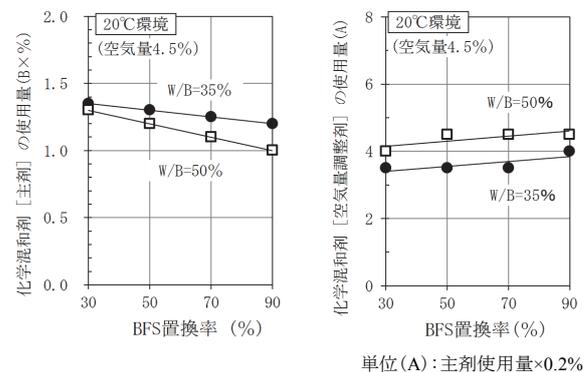


図 - 6 化学混和剤量と BFS 置換率の関係

・凝結特性

図 - 7 に凝結時間(始発から終結に至るまでの時間)と BFS 置換率の関係を示す。同図より、W/B が 35% および 50% ともに、置換率が 70% 以上になると凝結時間が遅延する傾向を示すことがわかる。これは、置換率 70% 以上の配合においては結合材に占めるポルトランドセメントの量が極めて少なくなったこと

により、セメントの水和反応で発生する刺激剤成分が減少し、その結果、凝結の遅延が顕著に現れたものとする。

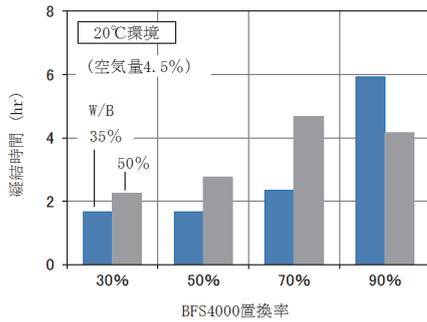


図 - 7 凝結時間と BFS 置換率の関係

・ブリーディング率

ブリーディングは、BFS 置換率が大きいほど BFS の反応が遅くなるため多くなった。しかし、ブリーディング率は 1.0~2.5%程度であり、普通コンクリート(W/C35%にて 0.5%程度)に対して微増程度であった。

・圧縮強度

図 - 8 に各配合の材齢 7 日、28 日での圧縮強度試験の結果を示す。図より BFS 置換率の増加とともに圧縮強度は小さくなり、特に置換率 90%で 28 日強度の伸びが鈍化していることがわかる。これは、BFS の混和によりクリンカー量が減少したことで、クリンカーの水和反応で生成される水酸化カルシウムが減少し、それによってさらに BFS の反応も低下したためと考えられる。ただし、強度は全ての配合で 20N/mm²以上となっている。

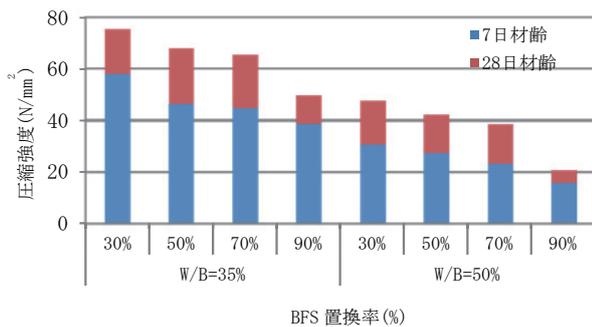


図 - 8 圧縮強度

・気泡間隔係数

図 - 9 にリニアトラバース法で測定した気泡間隔係数と BFS 置換率の関係を示す。ここでは空気量を 4.5%とし、コンクリートの湿潤養生期間は 7 日である。同図より、W/B= 50%の場合、気泡間隔係数の値は全ての置換率で 250μ以下であり、耐凍害性を確保する上で問題のない範囲であることがわかる。一方、W/B=35%の場合、BFS 置換率が大きいほど気泡間隔係数の値は緩やかに増加し、特に 90%置換では急激に大きくなっている。以上より、W/B が小さく、BFS

置換率が大きい場合、空気量を標準値である 4.5%としても、気泡間隔係数の値は大きく、耐凍害性の確保が難しい可能性があることが明らかとなった。

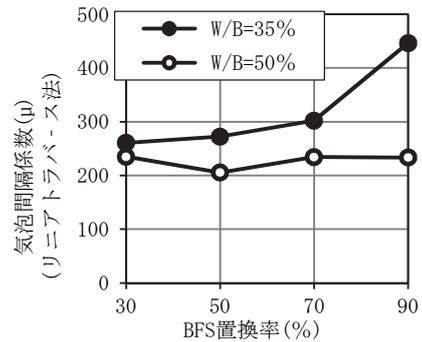


図 - 9 気泡間隔係数

・耐久性指数(湿潤養生期間の影響)

図 - 9 の結果を踏まえ、気泡間隔係数が大きく、耐凍害性が劣ると推定された W/B=35%、BFS 置換率 90%配合に対して、コンクリートの湿潤養生期間を 3 日、7 日、10 日、14 日、28 日とした時の 300 サイクル凍結融解試験を実施した。耐久性指数の結果を図 - 10 に示す。同図より、BFS 置換率が 90%でも、湿潤養生期間が長いほど耐久性指数が向上することがわかる。しかし、300 サイクルで所要性能(相対動弾性係数 60%以上)を満足したのは湿潤養生期間 28 日のみであった。

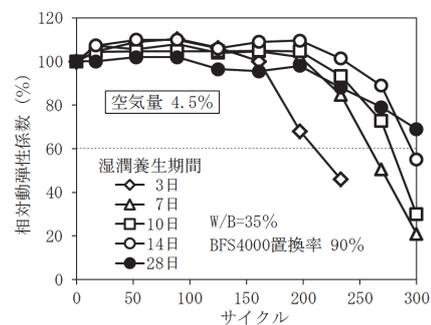


図 - 10 耐久性指数(湿潤養生期間の影響)

・耐久性指数(空気量の増量)

図 - 11 に、W/B=35%、BFS 置換率 90%の配合で、湿潤養生期間 28 日として、空気量を 4.5%から 5.5%に増加した時の耐久性指数を比較して示す。同図より、空気量を増やすことで耐久性指数が大幅に改善することがわかる。また気泡間隔係数も 250μ以下で、こちらも同様に改善効果がみられた。

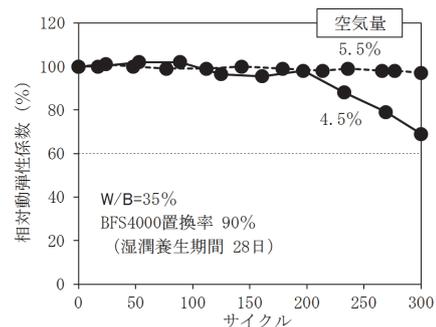


図 - 11 凍結融解試験による耐久性指数(空気量の増量効果)

(3) 凍結融解抵抗性のまとめ

気泡間隔係数の結果から、20℃環境においては、BFS 置換率が大きいほど凝結が遅延し、ブリーディングは微増している。そのため、この間に凍結融解抵抗性に寄与する微細な空気が抜けた可能性があり、特に W/B が小さい時に顕著であった。W/B が小さく、BFS 置換率が大きい場合、湿潤養生期間を十分にとり、空気量を 5.5%に増やす対策が凍結融解抵抗性の確保に有効であった。

3.3 強度および中性化・塩化物イオン浸透抵抗性

(1) 配合および使用材料

表 - 4 に試験配合を示す。配合は水結合材比を 35% (早強ポルトランドセメント・高性能 AE 減水剤) とし、BFS への置換率を、90% (高炉セメント C 種上限超) とした。なお、試験体の作製および養生はすべて 20℃ 環境で実施した。

表 - 4 試験配合

配合 ケース	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤		
				W	B			S	G	Ad (B×%)	SP (B×%)
					OPC	HPC	BFS				
①	35	90	50	165	-	47	424	811	838	-	1.00

(2) 実験結果

・圧縮強度と静弾性係数の関係

図 - 12 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。また同図中には比較参考データとして、表 - 5 のとおり、BFS 置換率が高炉セメント JIS 規格 (JIS R 5211) の B 種相当の分量 (50%)、C 種相当の分量 (70%)、規格外の分量 (90%) の 3 水準全 7 配合の結果も併記した。同図より、BFS 置換率やセメント種類の違いによらず圧縮強度と静弾性係数との関係は、土木学会式と一致することが確認できた。

表 - 5 比較参考配合の仕様

	BFS 置換率	セメント 種類	W/B (%)
①	B 種相当の分量 (50%)	OPC	50
②	C 種相当の分量 (70%)	OPC	35, 40, 50, 60
③	JIS 規格外の分量 (90%)	HPC	30, 45

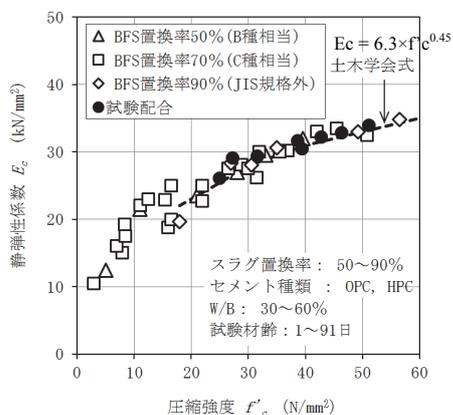


図 - 12 圧縮強度と静弾性係数

・圧縮強度

図 - 13 に 20℃環境下における湿潤養生期間を 3 日、7 日、10 日、14 日、28 日の 5 水準とした場合の材齢 28 日および 91 日における圧縮強度試験結果を示す。なお所定の湿潤養生期間が終了した後はすべて 20℃ 空气中に存置した。図中の圧縮強度の値は湿潤養生期間 28 日での値を 1.0 とした時の比率で表した。同図より、28 日強度は湿潤養生期間 3 日では 28 日間養生した場合と比較して 10%程度低いものの、7 日以上実施すれば概ね等しい結果であることがわかる。一方、91 日強度は湿潤養生期間 7 日でも 28 日養生強度に比べて 10%程度低く、10~14 日養生しても 6~7%低い結果であった。以上より、強度発現は湿潤養生期間が長いほど有利に作用することがわかる。ただし実際の工事を想定した場合、強度管理材齢を 28 日とすると、湿潤養生期間は 7 日以上で十分に所要強度を確保できると考える。

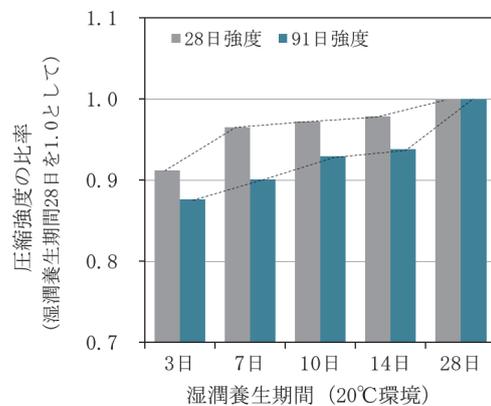


図 - 13 圧縮強度 (湿潤養生期間別)

・中性化抵抗性

図 - 14 に促進中性化試験 (JIS A 1153) および内陸暴露実験 (茨城県つくば市内、暴露 24 ヶ月) から得られた中性化速度係数の結果を湿潤養生期間別に示す。ただし中性化速度係数の値は湿潤養生期間 28 日での値を 1.0 とした時の比率で表した。同図より、湿潤養生を 7 日以上実施した場合は、中性化抵抗性が 28 日間養生した結果と概ね同程度になることが示された。

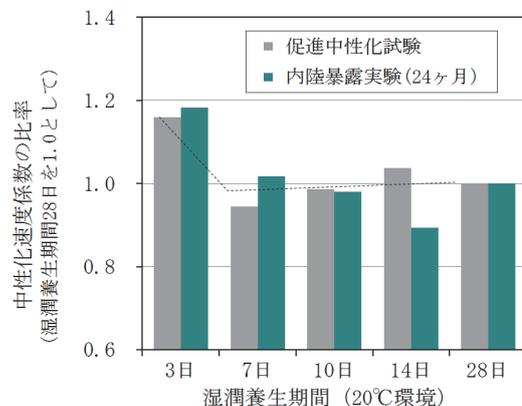


図 - 14 中性化速度係数の比較 (湿潤養生期間別)

・塩化物イオン浸透抵抗性

新潟県の海岸線付近に21ヶ月間暴露した試験体の塩化物イオン浸透深さを硝酸銀溶液噴霧試験の発色深さから求め、湿潤養生期間28日での値を1.0とした時の比率で湿潤養生期間別に図-15に示す。同図より、湿潤養生を7日以上実施した場合、塩化物イオン浸透抵抗性(塩化物イオン浸透深さ)は概ね同程度となることがわかる。なお、ここで示した結果は暴露実験から求めたため、中性化の進行に伴う塩化物イオン量の内部濃縮効果による影響も含まれており、塩害と中性化が複合的に作用した条件下での値である。

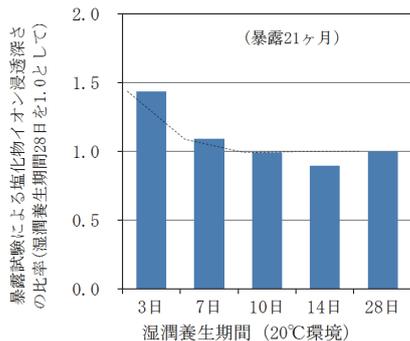


図-15 暴露試験による塩化物イオン浸透深さの比較 (湿潤養生期間別)

(3) 圧縮強度特性のまとめ

BFSを用いたコンクリートの標準的な湿潤養生期間は、表-6の様にB種配合では7日以上(日平均15℃以上)、C種相当では8日以上の規定がある²⁾。実験の結果、湿潤養生期間28日での強度や耐久性(中性化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性)との比較により、BFS置換率が90%の配合における湿潤養生期間(20℃環境)は、7日以上が望ましい結果が得られた。

表-6 BFSを用いたコンクリートの標準的な湿潤養生期間の規定

日平均気温	混合セメントB種	日平均気温	30~40%置換	50%置換	55~70%置換
15℃以上	7日	17℃	6日以上	7日以上	8日以上
10℃以上	9日	10℃	9日以上	10日以上	11日以上
5℃以上	12日	5℃	12日以上	13日以上	14日以上

3.4 温度特性

(1) 配合及び使用材料

表-7に温度特性の検討に用いた試験配合を示す。配合は水結合材比を35%(早強ポルトランドセメント・高性能AE減水剤・BFS置換率90%)および50%(普通ポルトランドセメント・AE減水剤(高機能タイプ)・BFS置換率70%)の二配合とした。

表-7 試験配合

配合ケース	W/B (%)	BFS置換率 (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤		
				W	B			S	G	Ad (B×%)	SP (B×%)
					OPC	HPC	BFS				
①	35	90	50.0	165	-	47	424	811	838	-	1.20
②	50	70	45.9	163	98	-	228	801	978	1.10	-

(2) 室内試験概要及び試験結果

・熱膨張係数

中心部に埋込み型ひずみ計を埋設した供試体(φ100×200mm)を使用し、温度変化に伴う体積変化特性を把握することを目的として熱膨張試験を実施した。養生方法は、打設後20℃環境下で材齢3日まで湿潤養生した後、脱型し材齢28日まで同環境下での封緘養生とした。その後、供試体に温度履歴(20~60℃, 4サイクル, 温度変化:2.0℃/hr)を与えてひずみを測定した。

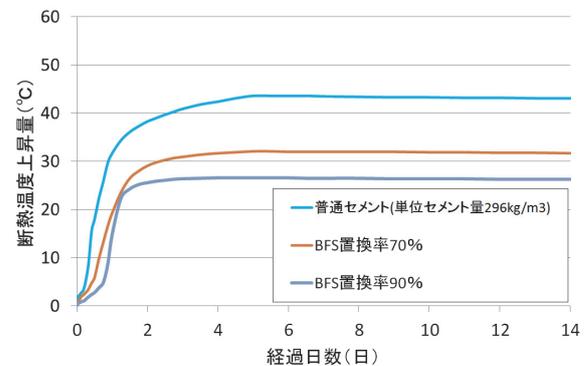
試験結果を表-8に示す。試験の結果から得られた熱膨張係数は12.8×10⁻⁶/℃と『コンクリート標準示方書(設計編)』⁵⁾に示す高炉セメントB種の熱膨張係数(12×10⁻⁶/℃)より7%程度大きくなる結果となった。

表-8 熱膨張係数測定結果

サイクル	熱膨張係数(×10 ⁻⁶ /℃)		
	上昇時	下降時	平均
2回目	12.1	12.7	12.8
3回目	12.8	12.9	
4回目	13.0	13.1	

・断熱温度上昇特性

セメント水和熱による断熱温度上昇特性を把握することを目的として、断熱温度上昇試験(JCI-SQA3)⁶⁾を実施した。図-16に試験結果を示す。図より今回検討した試験配合の断熱温度上昇量は、普通セメント(単位セメント量296kg/m³)の終局断熱温度上昇量Q_∞の51~60%程度となった。



	普通	70%置換	90%置換
Q _∞ (℃)	43.1	31.7	26.3

図-16 断熱温度上昇特性

(3) 試験打設概要および計測結果

実施工時における『スラグリート[®]』の温度上昇特性の把握を目的として、実施工設備を用いた試験打設を実施した。試験配合は水結合材比を35%(早強ポルトランドセメント・高性能AE減水剤・BFS置換率90%)である。供試体は写真-1に示すように、一辺が1.0mの立方体状で、打設時の温度性状を確認するために深さ0.5mの位置の供試体中心部、ならびに端部に熱電対を配置した。また、比較のため、材齢28日における圧縮強度が同等となる普通コンクリート

(27 - 12 - 20N)を同時打設し、温度計測結果の比較を行った。図 - 17 に試験打設時における封緘養生供試体(φ100×200mm)の圧縮強度試験結果を示す。図より今回配合については、普通コンクリートと概ね同等の初期強度発現となっていることがわかる。

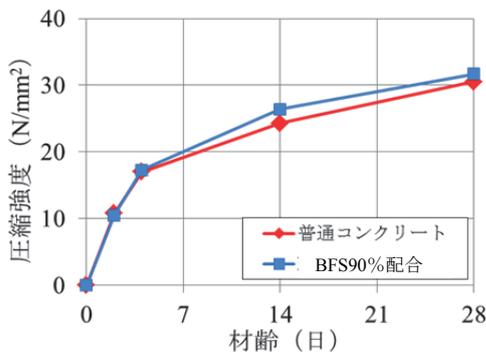
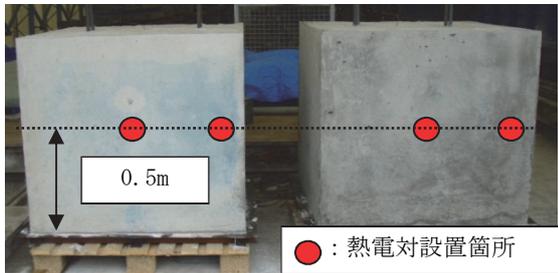


図 - 17 強度試験結果(封緘養生)

図 - 18 に試験打設時におけるコンクリート供試体の温度計測結果を示す。図に示すように供試体中心部のピーク温度は普通コンクリートに比べ約 10℃低く、また、温度ピークの材齢が 5 時間遅延することが分かった。

図 - 19 に供試体中心部における温度計測結果と、試験物性を用いた温度解析結果を示す。図に示すように実測値がピーク温度で 0.6℃高く、ピーク材齢が 2.9 時間早いものの、解析結果と実測値には相関関係が見られ、実打設時の温度上昇特性を再現できると考える。

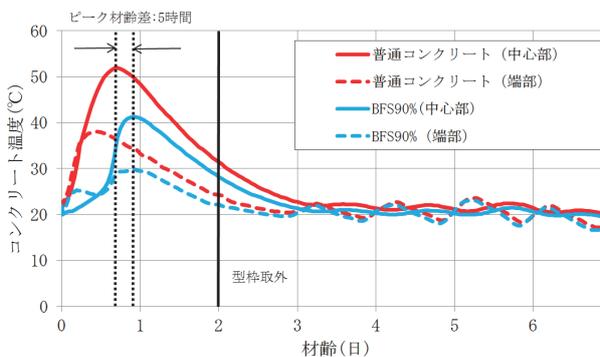


図 - 18 温度計測結果

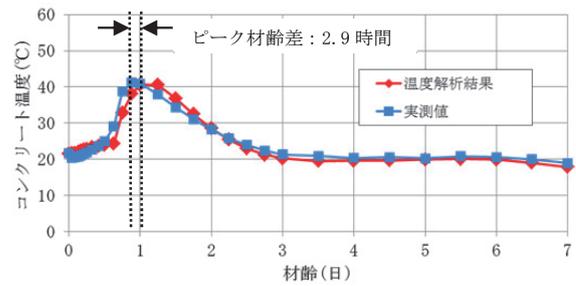


図 - 19 温度解析結果と実測値(中心部)

(4) 温度応力解析

上述の温度特性を用いて、温度応力解析⁷⁾を行った。解析は、普通コンクリートを用いたケースと、『スラグリート[®]』(水結合材比 50%・普通ポルトランドセメント・BFS 置換率 70%)を用いたケースで行い、最小ひび割れ指数のコンター図にて比較を行った。解析モデルを図 - 20 及び図 - 21 に示す。

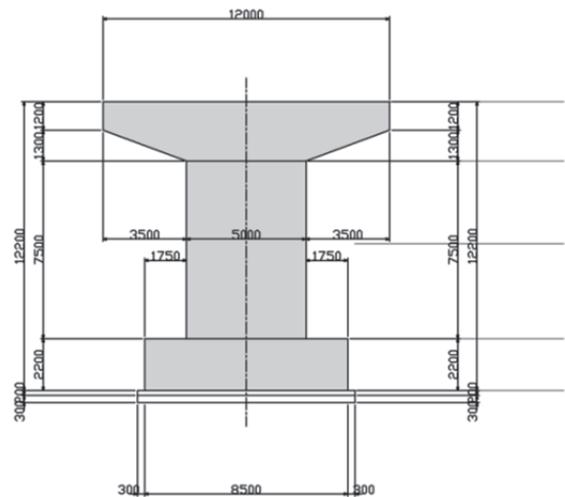


図 - 20 解析構造図

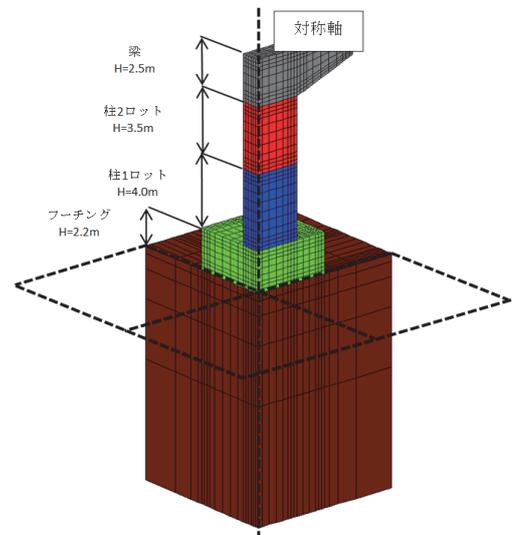


図 - 21 解析モデル

解析に用いた配合を表 - 9、物性値を表 - 10 に示す。なお今回の解析では、材料特性による差を明確にするため、解析期間中の外気温およびコンクリート初期温度を 20℃一定とした。

表 - 9 解析使用配合

普通コンクリート (27-12-20N)

置換率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (高性能AE減水剤 (結合材×%))
			水	結合材		細骨材	粗骨材	
				セメント	高炉スラグ			
-	55.0	45.0	163	296	-	804	1018	1.30

スラグリート (高炉スラグ微粉末70%置換)

置換率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (高性能AE減水剤 (結合材×%))
			水	結合材		細骨材	粗骨材	
				セメント	高炉スラグ			
70	50.0	45.9	163	98	228	801	978	1.10

表 - 10 使用物性値

	熱膨張係数	断熱温度上昇特性
	(×10 ⁻⁶ /℃)	Q _∞ (℃)
普通コンクリート	10.0	43.1
スラグリート	12.8	31.7

打設リフト割は、フーチング、柱1回目、柱2回目、梁の計4リフトとし、上記の条件の基に解析を行った。図 - 22 に最小ひび割れ指数カウンター図を、表 - 11 に着目点の最小ひび割れ指数一覧を示す。

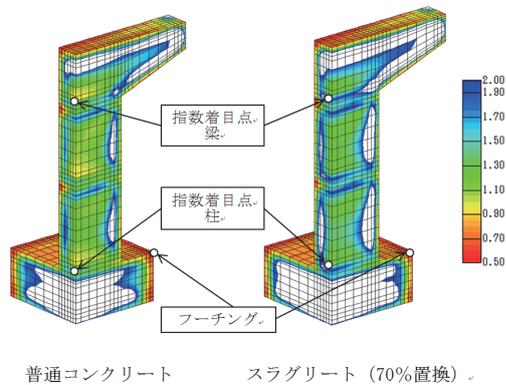


図 - 22 最小ひび割れ指数カウンター図

表 - 11 最小ひび割れ指数一覧

配合種別	着目部位	最小ひび割れ指数	材齢 (日)
普通コンクリート	フーチング	0.56	1.8
	柱	1.36	43.3
	梁	1.31	37.3
『スラグリート*』	フーチング	0.54	1.8
	柱	1.77	42.0
	梁	1.73	37.3

解析結果より、得られた知見を以下に示す。

- ・今回の解析において、『スラグリート®』を用いたケースは、普通コンクリートを用いたケースより、柱・梁部のひび割れ指数が 30%程度向上している。
- ・フーチング部のひび割れ指数は同程度である。
- ・最小ひび割れ指数の発生箇所を見ると、フーチング部のひび割れは内部拘束に起因しており、柱・梁部のひび割れは外部拘束に起因している。

(5) 温度特性のまとめ

温度応力解析の結果より、実打設において『スラグリート®』を使用する際には、内部拘束ひび割れを抑制するために、打設後には適切な養生を行い、ひび割れ用心鉄筋を配置する等、対策を行う必要があると言える。

4. おわりに

本稿では、『スラグリート®』を実施工に使用する際、特に懸念される、(1)収縮特性、(2)凍結融解抵抗性、(3)圧縮強度、(4)温度特性の4項目について、基礎性状を明らかにした。その結果、BFS置換率70%配合においては、高炉セメントB種と同等以上の基礎性状を確認することが出来た。しかしBFS置換率90%配合においては、収縮に対して高い抵抗性を有する反面、W/Bが低い配合の場合には凍結融解抵抗性が低下することから、空気量を5.5%に増やしたり、養生対策を行う必要があることが確認できた。

以上より、今回開発した『スラグリート®』は、BFS置換率がJIS規格を超過していることから、基礎性状が不明であったが、特に施工時に懸念される基礎性状を明らかにし、その実用性を確認することが出来た。

参考文献

- 1) 土木研究所・戸田建設・西松建設，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(V)，2016.1
- 2) 土木学会，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針(コンクリートライブラリー86)，1996.6
- 3) コンクリート工学協会，超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，1994.5
- 4) 椎名貴快 他，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 - 974，2015.9.2
- 5) 土木学会，2012年制定コンクリート標準示方書(設計編)，2013.3
- 6) 日本コンクリート工学会，JCI 規準集(1977-2002)，2004.4
- 7) 土師康一 他，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 - 972，2015.9.3