

クリンカーフリーコンクリートの 超硬練りコンクリートへの適用に関する研究

宇都宮大学 学生会員 ○竹井智哉 岩田正幸
宇都宮大学 正会員 藤原浩已 丸岡正知

1. はじめに

現在、地球温暖化の原因とされている二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの大気中の濃度が、産業革命以降において最高レベルに達している。セメントは製造時、主原料の石灰石を起源とする、あるいは製造工程で使用される化石燃料を起源とする二酸化炭素を排出しており、セメント1tを製造するにあたり0.8tもの二酸化炭素が排出される¹⁾。このため、日本のセメント産業から排出される二酸化炭素は、日本の総排出量の約4%を占めているとされている。筆者らはこのような状況を鑑み、クリンカーを使用しないで産業時副産物を主原料としたコンクリート（クリンカーフリーコンクリート：以下CFC）の研究を進めている。本報告では、CFCを即脱製品や転圧コンクリート舗装への適用性を検討することを目的に、超硬練りCFCを作製し、フレッシュ性状および強度性状などの基礎性状の把握を行った。

2 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。主材料として、フライアッシュ JIS II 種品(FA)および高炉スラグ微粉末(BS)を使用した。BSは、ブレン比表面積が4000、6000及び8000(cm²/g) (BS4000、BS6000、BS8000)のものをを用いた。また、セメントを使用しないため、水和反応による水酸化カルシウムが生成されず、FAのポズラン反応が不十分となると考えられる。このため、ポズラン反応活性化のためにアルカリ刺激材として石灰系膨張材(EX)を用いた。細骨材(S)として川砂、粗骨材(G)として5号、6号碎石を等量混合して用いた。混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤(SP)を用いた。SP添加量の上限値はSP/P=3.0%までとした。

2.2 配合

配合条件を表-2に、配合表を表-3にそれぞれ示す。単位粉体量(P)を500(kg/m³)、水粉体比(W/P、

表-1 使用材料

記号	材料	密度 (g/cm ³)
FA	フライアッシュ II 種	2.29
BS4000	高炉スラグ微粉末4000	2.90
BS6000	高炉スラグ微粉末6000	2.90
BS8000	高炉スラグ微粉末8000	2.90
EX	石灰系膨張材	3.16
C	普通ポルトランドセメント	3.15
S	鬼怒川産川砂	2.54
G	砂利(混合比 5号:6号=6:4)	2.66
W	水道水	1.00
SP	高性能減水剤	1.08

表-2 配合条件

VC 値 (秒)	修正 VC 値 (秒)	W / P (%)
20 ± 10	50 ± 10	20

表-3 配合表

No.	加熱時間 (h)	質量比 (%)					EX (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)				VC値 (s)
		FA	BS4000	BS6000	BS8000	C		P	W	S	G	
1	0	20	80	-	-	-	20	500	100	578	1306	20
2		30	70	-	-	-						25
3		40	60	-	-	-						30
4		0	100	-	-	-						30
5	2	20	80	-	-	-						20
6		30	70	-	-	-						25
7		40	60	-	-	-						30
8		100	0	-	-	-						-
9		20	-	80	-	-						25
10		20	-	-	80	-						25
11	3.5	20	80	-	-	-						20
12		30	70	-	-	-						25
13		40	60	-	-	-						30
14	2	-	-	-	-	100	-	500	100	578	1306	27

P=FA+BS+EX)を20%、FAとBSの混合割合を100:0、20:80、30:70、40:60、0:100とした。

2.3 供試体作成方法及び養生方法

供試体の作成は振動数が160~200Hzの振動タンバを用いて、打ち込み面より振動締固めを行った。供試体の締固め率を96%以上とし、型枠毎に練り上がったコンクリートを、締固め率96%相当量を計量し、全量を2層に分けて打ち込んだ。

養生方法は、成型直後の供試体をアルミテープで封じ、95℃の恒温槽内に静置し、加熱養生した。2時間もしくは3.5時間後に加熱を止め、槽内に静置したまま自然冷却し、24時間後、脱型して20℃の水中養生を行

キーワード クリンカーフリーコンクリート 超硬練りコンクリート 転圧コンクリート舗装

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部 TEL 028-689-6211

なった。また比較のため同時に作製した供試体について、加熱を行わず、20℃水中養生を行った。また、比較のため、普通ポルトランドセメント(C)を100%用いた場合についても検討を行った。

2.4 試験項目

本研究では、以下の項目について試験を行った。

- ・VC試験：JSCE-F507-1995
- ・曲げ強度試験：JIS A 1106

VC試験の目標値はVC値：20±10秒、修正VC値：50±10秒とし、目標を達成するために必要な高性能減水剤(SP)添加率をフレッシュ性状の評価指標とした。

曲げ強度試験は、脱型後、水中養生を行う前の材齢6h、12h、24hと、水中養生を行った材齢3日、28日に行った。材齢6h、12h、24hでの強度の検討は、転圧コンクリート舗装へ適用する際、材齢初期で交通解放可能となる配合の検討を目的として行った。材齢3日、28日での強度の検討は、即脱製品への適用性、高温での加熱養生が長期強度へ与える影響の検討を目的として行った。

3 試験結果及び考察

3.1 高性能減水剤(SP)添加率

図-1にBS4000混合割合とSP添加量の関係を、図-2にBSのブレン値とSP添加量の関係をそれぞれ示す。

BSの混合割合の増加に伴い、目標のVC値及び修正VC値を得るために必要なSP添加率は減少した。これは、BSは均一なガラス質であり、粉砕時の破面が滑らかな表面をしており、粒子面がすべり面を形成して潤滑作用を与えたこと、またBSは水の拘束が少ないことが要因であると考えられる。

BSのブレン値が4000、6000(cm²/g)ではSPの添加率に変化は見られなかったが、8000(cm²/g)では増加した。これは、ペースト中に占める微粒分の割合が多く、細骨材との粒度の連続性が悪くなり、ペーストが骨材間を通過して一体に挙動せず、流動性が低下したためと考えられる²⁾。

なお、粉体構成をFA=100%とした配合No.8では、SPを上限と設定したSP/P=3.0%まで添加したが、目標のVC値を満足することができなかった。これは、FAはBSに比べ水の拘束が多く、流動に必要な余剰水が減少したためと考えられる³⁾。

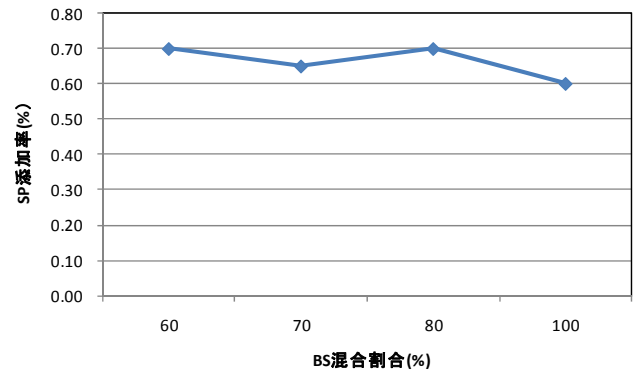


図-1 SP添加量とBS4000の混合割合の関係

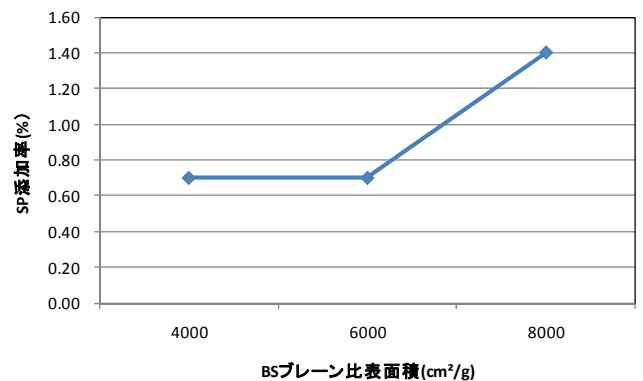


図-2 SP添加量とBSのブレン比表面積の関係

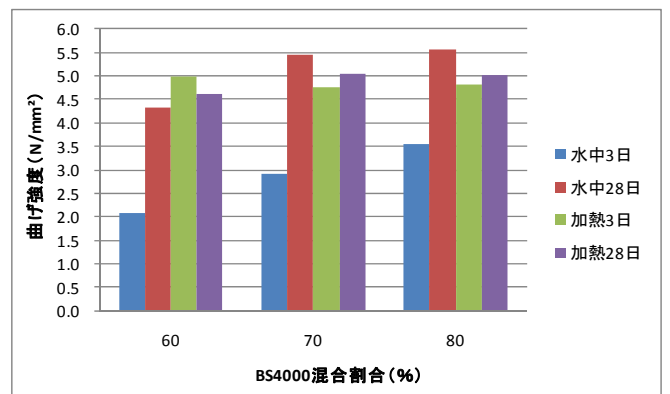


図-3 曲げ強度



写真-1 供試体中のアルカリの残存状況
(左：水中養生，右：加熱養生)

3.2 曲げ強度試験結果

(1)粉体構成の検討

材齢 3 日，28 日での強度の検討を行った。BS4000 を用いた条件における BS 混合割合と曲げ強度の関係を図 - 3 に示した。図 - 3 より水中養生を行ったものは，BS の混合割合の増加に伴い，いずれの材齢でも曲げ強度は増加した。これは，BS の混合割合の増加に伴い，潜在水硬性による強度発現が顕著となったためと考えられる。

一般に FA を含むコンクリートは，FA のポズラン反応により長期にわたり，強度は増進する。一方，クリンカーフリーコンクリートは FA のポズラン反応性に比べ，BS の潜在水硬性が初期の強度特性に及ぼす影響が大きく，FA の混合割合の増加に伴い，材齢 28 日程度の短期間における強度発現性は低下したと考えられる。

加熱養生を行ったものは材齢の増加に伴う強度の明確な増加は認められなかった。これは 95℃の高温で養生を行ったため，反応が急激に進み，コンクリート中に FA のポズラン反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が多量に消費されたためと考えられる。

写真 - 1 に材齢 28 日の水中養生及び 2 時間 95℃加熱養生を行った供試体の破壊断面に， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の残像状態確認のために，フェノールフタレイン液を噴霧したものを示す。色の濃くなっている部分がフェノールフタレイン液の噴霧による変色部分である。

写真 - 1 より，2 時間 95℃加熱養生を行ったものは，急激な反応の進行によりアルカリ源が消費されたため，フェノールフタレイン噴霧による変色部分が減少したもののと思われる。

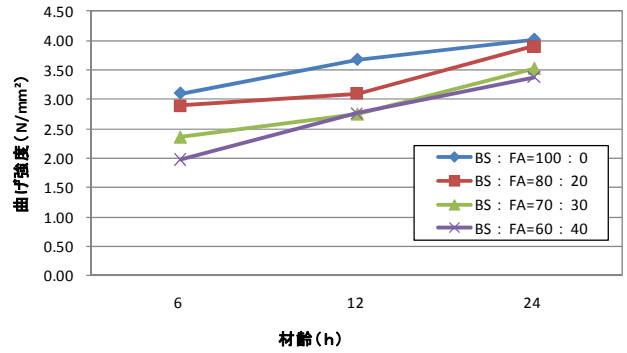


図-5 曲げ強度 BS:FA の混合比の関係
(2 時間加熱養生)

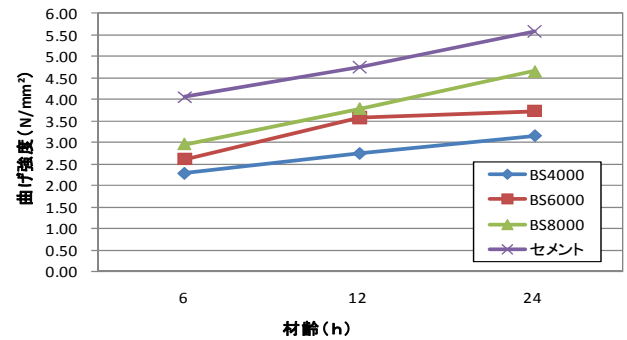


図-6 曲げ強度と BS プレーン比表面積の関係

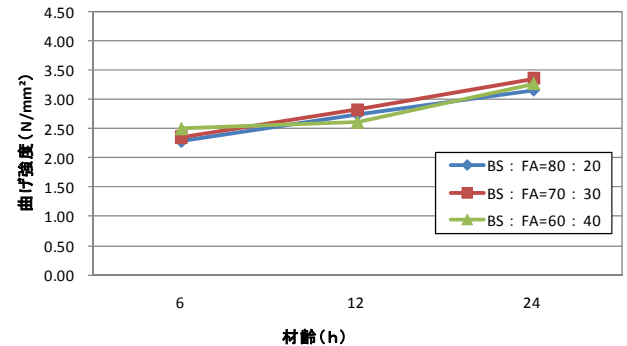


図-7 曲げ強度と BS:FA の混合比の関係
(3.5 時間加熱養生)

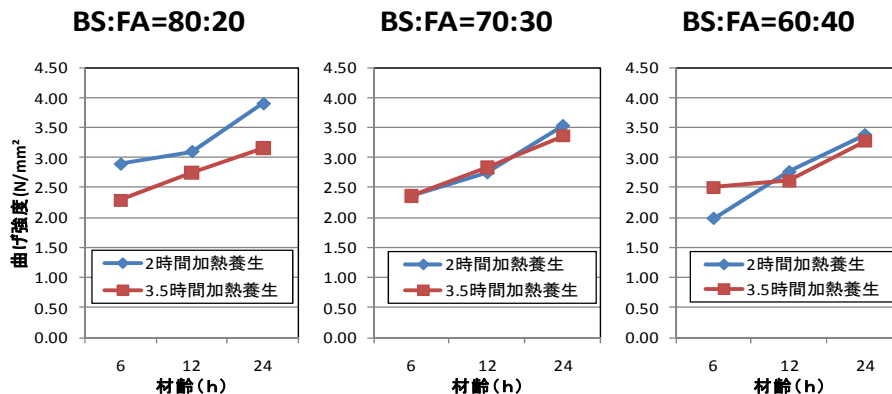


図-8 曲げ強度

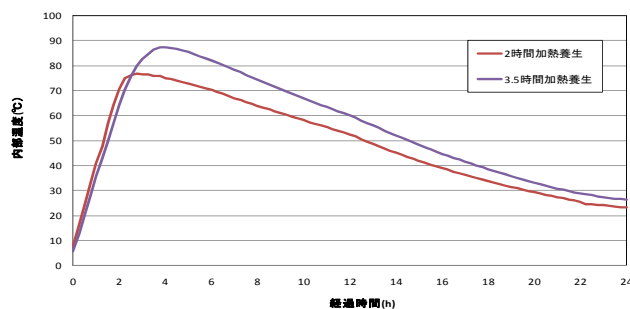


図-9 コンクリートの内部温度

(2)BS のブレン比表面積及び加熱時間の検討

材齢 6h, 12h, 24h において、短時間における、加熱養生による強度発現性を検討した。図-5 に 2 時間 95℃ 加熱養生時の BS4000 の混合割合と曲げ強度の関係、図-6 に同じ養生条件における BS の粉末度と曲げ強度の関係をそれぞれ示す。なお、図中には比較用のセメントを 100% 使用したコンクリートの曲げ強度も示した。また、図-7 に 3.5 時間 95℃ 加熱養生時の BS4000 の混合割合と曲げ強度の関係、図-8 に、各混合割合における加熱養生時間と強度の関係を示した。また、加熱時間ごとのコンクリート内部の温度変化を図-9 に示す。

図-5 より、BS の混合割合の増加に伴い、初期材齢での強度発現性は高くなっている。また、図-6 より BS の粉末度の増大に伴い、曲げ強度は増加した。

これは、高粉末度のものほど比表面積が大きく、反応性が高くなり、コンクリートの内部組織の緻密化に大きく寄与するためと考えられる。また、図-5 及び図-7 より、加熱養生時間が増加すると、材齢 12h, 24h の曲げ強度は、全配合で低下した。また、図-8 より材齢 6h の曲げ強度は BS:FA=80:20 では低下し、BS:FA=70:30 では変化が見られず、BS:FA=60:40 では増大した。一般にある一定温度までは養生温度が高くなると、強度発現性は良好となるとされる。しかし、既往の研究では養生温度を 90℃ 以上の高温とした例はないため、今回の実験結果とは大きく異なるものと考えられる。

これは、コンクリート内部の温度が高くなり、急激に反応が進んだため、水和生成物が粗大になり、内部組織が疎となったため、強度が低下したためと考えられる。また、高温養生を行った場合、FA の混合割合が大きい程、初期強度は増加するため、材齢 6h での No.13 の強度は増加したと考えられる⁴⁾。

5.まとめ

クリンカーフリーコンクリートの超硬練りコンクリートへの適用性を検討し、以下の知見を得た。

- (1)高炉スラグ微粉末の混合割合の増加に伴い、目標の VC 値を得るのに必要な SP 添加量は減少した。
- (2)高炉スラグ微粉末の粉末度が 4000, 6000(cm^2/g)では目標 VC 値を得るのに必要な SP 添加量に変化はないが、8000(cm^2/g)になると目標 VC 値を得るのに必要な SP 添加量は増加した。
- (3)高炉スラグ微粉末の混合割合の増加及び粉末度の増加に伴い、強度は増加した。
- (4)コンクリート内部の温度が上昇すると、材齢が 12 時間以降の強度は低下した。しかし、材齢が 6 時間の場合、高炉スラグ微粉末の混合割合の高いものは強度が低下し、フライアッシュの混合割合の大きいものは強度が増加した。

参考文献：

- 1) 社団法人セメント協会：セメント産業における環境対策(2007)
- 2) 瀬戸謙一郎、古澤靖彦、信田佳延：併用系自己充填コンクリートにおける石灰微粉末の粉末度が及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.20、No.2、pp397-402(1998)
- 3) 吉野公、井上正一、黒田保、村山真一：フライアッシュの性質が混和剤の添加量に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27、No.1、pp.175-180(2005)
- 4) 渡辺新一、菅田紀之：フライアッシュ混入コンクリートの強度および収縮に及ぼす養生温度の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol29、No.1、pp285-290(2007)