

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 鈴木 成
宇都宮大学 正会員 藤原浩己 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 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ レベルのもの(BS4000)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)として鬼怒川産川砂、粗骨材(G)として笠間産碎石を用いた。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、SP 添加量の上限值を $\text{SP/P}=3.0\%$ までとした。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。

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

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
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	笠間産碎石	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

配合No.	質量比 (%)			EX (kg/m^3)	単位量(kg/m^3)				VC値(s)
	FA	BS4000	C		P	W	S	G	
1	20	80	0	20	500	100	578	1306	20
2	30	70	0						25
3	40	60	0						30
4	0	100	0						30
5	0	0	100	0					27

表-4 締固め率

配合No.	質量比 (%)			締固め率 (%)
	FA	BS	C	
1	20	80	0	98
2	30	70	0	98
3	40	60	0	97
4	0	100	0	98
5	0	0	100	98

2.2 配合条件

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 $500(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、水粉体比(W/P, $\text{P}=\text{FA}+\text{BS}+\text{EX}$)を 20%、FA と BS の混合割合を 20:80, 30:70, 40:60, 0:100 とした。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。

2.3 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 の振動タンパを用いて、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。各配合の養生方法は、No.1,2,3 については加熱養生及び水中養生を、No.4,5 については加熱養生のみ行った。

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
- ・ 乾燥収縮試験：JIS A1129
- ・ ラベリング試験：舗装調査 試験法便覧 B002

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、10×10×40cm の角柱供試体を用いて試験を行った。加熱養生を行った供試体については、成型後、材齢 6h, 12h, 24h, 3 日, 28 日に行った。また水中養生を行った供試体については 3 日, 28 日に行った。

乾燥収縮試験は、10×10×40cm の角柱供試体を用いて試験を行った。脱型後、供試体を水中養生し材齢 7 日に達した時点で水中から引き上げ、第一回目の測定を行い基長とした。また加熱養生を行った供試体については、養生後、材齢 24 時間に達した時点で、第一回目の測定を行い基長とした。供試体は室温 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室に静置し、乾燥開始から 1, 7, 14 日でそれぞれ測定を行った。

ラベリング試験は、90 分間往復運動する (1 分間に 66 往復) 40×15×5cm の平板供試体の表面を、チェーンの付いた車輪の回転により剥離摩耗する試験である。各断面の平均摩耗深さからすり減り量(断面積)を算出する。本実験では同一配合の 2 枚の供試体のすり減り

量を平均し、それを耐摩耗性の評価指標とした。試験には FA:BS=20:80 の配合を用い、水中養生または加熱養生を行い、材齢 28 日に試験を行った。また比較のため、セメント 100%のコンクリートについても検討を行った。

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 添加率は減少傾向を示した。これは、BS は均一なガラス質であり、粉碎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。

3.2 曲げ強度試験結果

BS の混合割合と曲げ強度の関係を、図-2 に示した。また図-3 に 2 時間 95℃加熱養生時の、材齢 6, 12, 24 時間における BS の混合割合と曲げ強度の関係を示した。なお、図中には比較用のセメント 100%としたコンクリートの曲げ強度も示した。また超硬練りコンクリートは締固め率によって、曲げ強度に影響が出ることから締固め率の確認を行った。表-4 に各配合における締固め率を示す。本研究の曲げ強度の目標値を JIS A 1132 及び JIS A 1106 より材齢 28 日において曲げ強度 4.5N/mm²とした。また一般的に交通解放が可能となる強度は 3.5N/mm²以上とされていることから材齢 24 時間以内で曲げ強度 3.5N/mm²とした。

図-2、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、3 日および 28 日ともに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、強度は増加する。一方、CFC 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いため、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、BS の混合割合の増加に伴い、材齢 6, 12, 24 時間の初期材齢での強度

発現性は高くなっている。しかし材齢3, 28日においては強度の明確な増加は認められなかった。これは、BSの混合割合の増加に伴い、初期材齢において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。また3日以降の材齢においては、95℃の高温で養生を行ったため、ポズラン反応が急激に進み、コンクリート中にFAのポズラン反応が十分に進行するだけの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がなくなったため、強度の増加が認められなかったと考えられる。

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、水和反応に必要な $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が失われたため、フェノールフタレイン噴霧による変色部分が減少したと思われる。

3.3 乾燥収縮試験結果

図-4に乾燥収縮試験結果を示す。図-4より、CFCは加熱養生を行うことで長さ変化を抑制できる傾向を示した。これは、加熱養生を行ったことで水和反応が促進され、乾燥収縮の測定開始前に組織が緻密化し、その後の収縮が抑制されたと考えられる。

また、水中養生を行ったものは、同配合条件のセメントコンクリートと比較して、長さ変化率は大きくなる傾向を示した。これは、既往の研究よりフライアッシュを20%混合したCFCはセメントコンクリートと比べ、初期強度が低く、静弾性係数が小さくなる⁵⁾ことから変形抵抗性に劣るためであると考えられる。

3.4 ラベリング試験結果

図-5にラベリング試験結果を示す。また、既往の研究⁶⁾よりストレートアスファルト混合物のすり減り量は締め固め度が96%程度の場合、 2.2cm^2 となることが知られている。

図-5より、養生条件の違いによるすり減り量の変化は確認することはできなかった。これは曲げ強度試験結果より、材齢28日では養生条件に関わらず、ほぼ同程度の強度を有しているため、すり減り量に変化は認

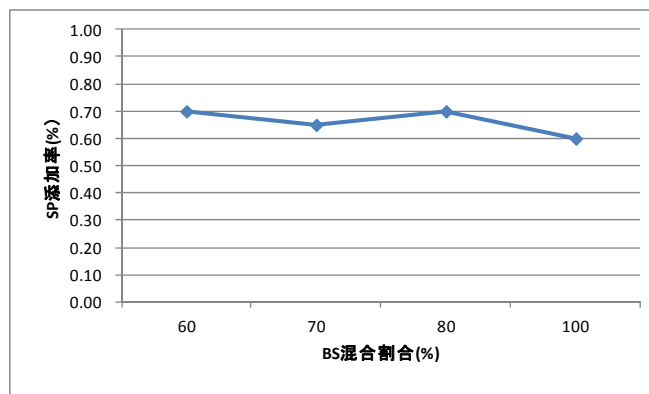


図-1 SP添加量とBS4000の混合割合の関係

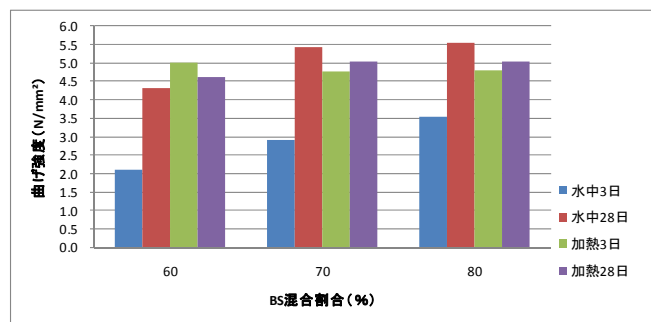


図-2 高炉スラグの混合割合と曲げ強度の関係

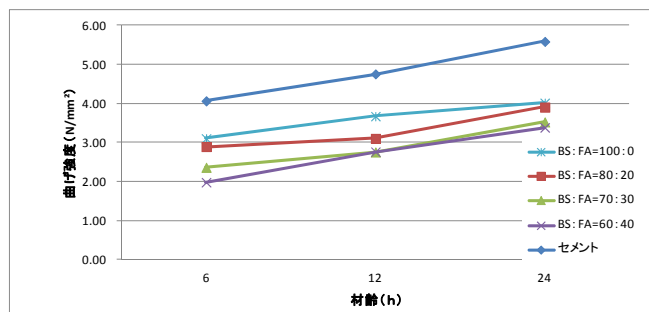


図-3 曲げ強度 BS:FAの混合比の関係
(2時間加熱養生)



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)

められなかったと考えられる。

また、セメントコンクリートと比較するとすり減り量は大きくなるが、締め固め度が96%程度のストレートアスファルト混合物のすり減り量と比べ、小さくなることが認められた。本研究の範囲内では、ストレートアスファルトと比べ、耐摩耗性は高いと判断できる。

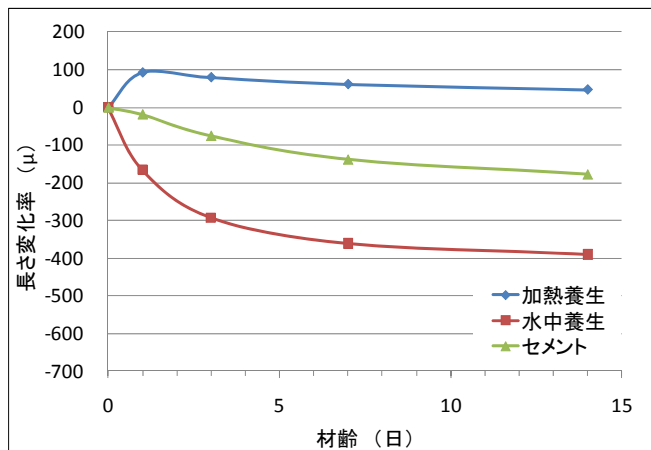


図-4 乾燥収縮試験結果

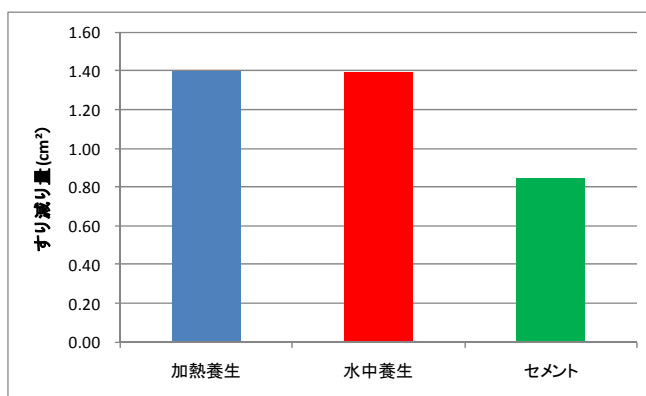


図-5 ラベリング試験結果

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混合割合の増加に伴い、強度は増加した。
- (3)加熱養生することでクリンカーフリーコンクリートの乾燥収縮は抑制される。
- (4)養生条件の違いによるすり減り量の変化は生じない。また本研究の範囲内では、締め固め度96%程度のストレートアスファルトと比べ、耐摩耗性は高いといえる。

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)
- 5) 岩田正幸：環境負荷低減コンクリートへ及ぼす各種アルカリ刺激材とポゾラン物質の影響に関する研究、宇都宮大学工学部卒業論文（2012）
- 6) 久保和幸：舗装路面の性能評価法の高度化に関する研究