クリンカーフリーコンクリートの 転圧コンクリート舗装(RCCP)への適用に関する研究

藤原浩已^{*1} 丸岡正知^{*1} 鯉渕清^{*2} 竹井智哉^{*1}

^{*1} 宇都宮大学 大学院工学研究科(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

^{*2} 株式会社デイ・シイ 開発企画室(〒210-0854 神奈川県川崎市川崎区浅野 1-1)

要旨：本研究では、セメントを使用しないクリンカーフリーコンクリートを RCCP に適用するためにフレッシュ性状試験及び強度試験を行った。クリンカーフリーコンクリートの水粉体比は 20 %、単位粉体量は 500kg/m³ であり、フライアッシュ及び高炉スラグ微粉末の混合割合、モルタル粗骨材容積比、養生時間を変えて実験を行った。その結果、次の様なことが明らかとなった。材齢 12 時間で曲げ強度 3.5N/mm²、材齢 28 日で曲げ強度 4.5N/mm² 以上を発現した。高炉スラグ微粉末の混合割合の増加に伴い、曲げ及び圧縮強度は増加した。また本コンクリートには強度発現に対し適切な養生温度及び養生時間が存在すると考えられる。

キーワード：クリンカーフリーコンクリート、RCCP、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末

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、産業革命以前から現在までで最高レベルに達している。また、人間活動に伴う化石燃料の消費、セメント生産、森林破壊や土地利用の変化などの人間の活動により、大気中の二酸化炭素濃度は増加している。そのため、社会的に二酸化炭素の排出削減が求められており、温室効果ガス抑制技術の改善、発展が求められている。

セメントは製造時、主原料の石灰石を起源とした二酸化炭素や石灰石加熱時に使用される化石燃料から二酸化炭素が発生しており、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。

近年、石油の価格は上昇しており、それを原材料とするアスファルトの価格も引き上げられている。また石油は枯渇するとも言われており、石油が枯渇した時の対策としてアスファルトよりも安価で、施工性も同等であるアスファルト舗装に代わる舗装技術の開発を行う必要性が高くなっている。コンクリート舗装はアスファルト舗装と比べ、交通解放が可能となる強度に達するまでの養生時間が長くなる。そのため、今日の交通環境に対応した早期解放可能なコンクリート舗装の開発が必要であると思われる。そこで、本研究では製造時に多量の CO₂ を排出するセメントを使用しない、クリンカーフリーコンクリートの RCCP への適用について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を Table 1 に示す。主材料として、フライアッシュ JIS II 種規格品(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 4,000、6,000 及び 8,000(cm²/g) (BS4000、BS6000、BS8000)のものを用いた。また、セメントを使用しないため、水酸化カルシウムが生成されず、FA のボゾラン反応が不十分となると考えられる。このため、ボゾ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。

2.2 配合条件

配合条件を Table 2 に示す。また、配合表を Table 3 に示す。水粉体比(W/P、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、モルタル粗骨材空隙比(Km)を 1.4 及び 1.6 とした。

2.3 供試体作成方法及び養生方法

供試体は各養生条件で 3 本とし、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、供試体をアルミテープで封じ、95℃の恒温槽にて加熱養生した。2 もしくは 3.5 時間後に加

Table 1 Materials

Materials	Symbol	Type of material	Density (g/cm ³)	F.M.	Specific surface area (cm ² /g)
Powder	FA	Fly Ash JIS II	2.29	-	4,130
	BS4000	Ground granulated blast-furnace Slag	2.90	-	4,410
	BS6000		2.90	-	6,290
	BS8000		2.90	-	8,240
	EX	Lime-based expanding agent	3.16	-	3,450
Water	W	Tap water	1.00	-	-
Fine aggregate	S	River sand	2.54	2.77	-
Coarse aggregate	G	Crushed stone	2.66	6.67	-
Admixture	SP	High-range water-reducing admixture	1.08	-	-

Table 2 Mixing proportion

VC value (sec)	Correction VC value (sec)	W/B (%)	Km
20 ± 10	50 ± 10	20	1.4, 1.6

Table 3 Mixing proportion

No.	heating (h)	Km	Percentage of weight (%)				HEX (kg/m ³)	Unit content (kg/m ³)				VC value (s)
			FA	BS4000	BS6000	BS8000		B	W	S	G	
1	0	1.4	20	80	-	-	20	500	100	578	1,308	20
2			30	70	-	-						25
3			40	60	-	-						30
4		1.6	20	80	-	-				762	1,115	22
5			30	70	-	-						30
6			40	60	-	-						25
7	2	1.4	0	100	-	-				578	1,308	30
8			20	80	-	-						20
9			30	70	-	-						25
10			40	60	-	-						30
11			100	0	-	-						-
12			20	-	80	-						25
13			20	-	-	80						26
14		1.6	20	80	-	-				762	1,115	22
15			30	70	-	-						30
16			40	60	-	-						25
17			20	80	-	-						20
18	3.5	1.4	30	70	-	-				578	1,308	25
19			40	60	-	-						30

熱を止め、槽内に静置したまま除冷し、24 時間後、脱型し 20 °C 水中養生をおこなった。養生温度が高い程反応速度が早くなると考え、水が蒸発しない 95 °C で養生を行った。また比較のため同時に作成した供試体について、材齢 1 日で脱型し、20 °C 水中養生を行った。

2.4 試験項目

本実験では、以下の項目について実験を行った。

- ・ VC 試験：JSCE-F507-1995
- ・ 曲げ強度試験：JIS A 1106
- ・ 圧縮強度試験：JIS A 1108

目標値は VC 値：20 ± 10 秒、修正 VC 値：50 ± 10 秒とした²⁾。曲げ強度試験は、材齢 6h、12h、24h、3 日、28 日に行った。また圧縮強度試験は、材齢 3 日、28 日に行った。

目標曲げ強度を材齢 3 日で 3.5N/mm² とした。また材齢 28 日で 4.5N/mm² とした。

2.5 試験結果及び考察

(1) 高性能減水剤 (SP) 添加率

Fig.1 に Km 及び BS の混合割合と混和剤添加量の関係を、Fig.2 に BS のブレン値と混和剤添加量の関係を示した。粉体構成を FA = 100 % とした配合、No.11 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⁾。また BS の混合割合の増加に伴い、目標の 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、及び BS は水の拘束が少ないことが要因であると考えられる。また Km が 1.6 の場合、1.4 の場合と比べ、目標の VC 値を得るのに必要な SP 添加率は増加した。これは Km の増加に伴い、モルタル中の細骨材量が増加し、

Fig. 1 Relationship between additional ratio of SP and mixed ratio of ground granulated blast-furnace slag

Fig. 2 Relationship between additional ratio of SP and blain specific surface area of BS

Fig. 3 Relationship between Flexural strength and mixed ratio of ground granulated blast-furnace slag (wet curing)

Fig. 4 Relationship between Flexural strength and mixed ratio of ground granulated blast-furnace slag (2h heat curing)

ペースト細骨材容積比が減少し、流動性が低下したため、これを補うために、SP 添加量が増加したと考えられる。また、BS のブレン値が 4,000、6,000(cm²/g) では SP の添加率に変化は見られなかったが、8,000(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⁴⁾。

(2) 曲げ強度試験結果

a) 粉体構成及び Km の検討

曲げ強度試験結果について、Fig. 3 に水中養生を行った場合の曲げ強度、Fig. 4 に 2 時間、95 °C 加熱養生を行った場合の曲げ強度を示した。また、Photo. 1 に材齢 28 日の水中養生及び 2 時間 95 °C 加熱養生を行った供試体の破壊断面に、Ca(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。

Fig. 3 より水中養生の場合、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 のポゾラン反応により長期

Photo. 1 The remain situation of Ca(OH)₂ (left : wet curing, right : 2h heat curing)

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 のポゾラン反応性に比べ、BS の潜在水硬性が強度特性に及ぼす影響が大きいと、材齢 28 日程度の短期間においては FA の混合割合の増加に伴い、強度は低下したと考えられる。Km=1.6 の配合において、BS の混合割合が 60 %である No. 6 は他の配合と比べ、締固め率が高いと、高い強度を示したと考えられる。No. 4、No. 5、No. 6 の締固め率はそれぞれ、96、96、98 %であった。No. 6 が高い強度を示したため、Km=1.6 28 日の強度は減少する傾向があるように見ら

れると考えられる

Fig.4 より、2 時間 95 ℃加熱養生を行ったものは、材齢の増加に伴う強度の増進は見られなかった。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 のポゾラン反応が十分に進行するだけの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がなくなったためと考えられる。Photo.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。また、Km の増加に伴い、曲げ強度は低下する。これは Km の増加に伴い、ペースト細骨材容積比が減少し、締固め性状が悪化したためと考えられる。

b) 強度発現性の検討

曲げ強度試験結果を Fig.5、Fig.6、Fig.7、Fig.8 に示す。Fig.5 に 2 時間 95 ℃加熱養生時の、BS の混合割合と曲げ強度の関係、Fig.6 に 3.5 時間 95 ℃加熱養生時の BS の混合割合と曲げ強度の関係、Fig.7 に各配合の加熱養生時間と強度の関係を示した。また Fig.8 に BS のブレン値と曲げ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 Fig.9 に示す。Fig.5 より BS の混合割合の増加に伴い、短期間での強度発現性は高くなっている。

また、Fig.5、Fig.6 より、加熱養生時間の増加に伴い、材齢 12h、24h の曲げ強度は、全ての配合において低下した。また、Fig.7 より材齢 6h の曲げ強度は BS:FA=80:20 は強度が低下し、BS:FA=70:30 は強度に変化が見られず、BS:FA=60:40 は強度は増大した。一般に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、今回の研究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、強度が低下したと考えられる。また、BS を使用したコンクリートは、高温での養生時間が長くなると内部の気孔が増大するため、強度低下を起こしたと考えられる⁵⁾。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.19 の強度は増加したと考えられる⁶⁾。また、Fig.8 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を緻密化した結果と考えられる。

(3) 圧縮強度試験結果

粉体構成及び Km と圧縮強度の関係を Fig.10 及び Fig.11 に示す。Fig.10 に水中養生を行った場合の圧縮強度、Fig.11 に 2 時間、95 ℃加熱養生を行った場合の圧縮強度を示した。

Fig.10 より、水中養生を行った場合、BS の混合割合の増加に伴い、材齢 3 日の圧縮強度は増加した。しかし、材齢 28 日の圧縮強度は、BS の混合割合の増減による明確な変化は認められなかった。Fig.11 より、2

Fig. 5 Flexural strength (2h heat curing)

Fig. 6 Flexural strength (3.5h heat curing)

Fig. 7 Flexural strength

Fig. 8 Flexural strength

Fig. 9 Temperature in the concrete

Fig. 10 Compressive strength (wet curing)

Fig. 11 Compressive strength (2h heat curing)

時間、95℃加熱養生を行ったものは材齢による強度の増進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のボゾラン反応が十分に進行するだけの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がなくなったためと考えられる。Kmで比較すると、Km=1.6、BSの混合割合が60%であるNo.6以外はKmの増加に伴い、圧縮強度は低下した。これは曲げ強度と同様に、Kmの増加に伴い、ペースト細骨材容積比が減

少し、締固め性状が悪化したためと考えられる。No.4、No.5、No.6の締固め率はそれぞれ、96、96、98%であり、No.6は他の配合と比べ、締固め率が高かったため、高い強度を示したと考えられる。

3. まとめ

クリンカーフリーコンクリートのRCCPへの適用に関する検討を行い、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添加量は減少する。
- (2) 高炉スラグ微粉末の粉末度が4,000、6,000(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、8,000(cm^2/g)になると目標VC値を得るのに必要なSP添加量は増加する。
- (3) 高炉スラグ微粉末の混合割合の増加に伴い、強度は増加する。
- (4) 高炉スラグ微粉末の粉末度の増加に伴い、強度は増加する。
- (5) コンクリート内部の温度が高くなると、材齢が12時間以降の強度は低下する。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する。

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) 戸川一夫、中本順次：転圧質配合コンクリートに対する高炉スラグ微粉末の利用、コンクリート工学年次論文集、Vol.13、No.1、pp.39-44（1991）
- 3) 吉野公ほか：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) 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、pp.397-402（1998）
- 5) 宮入英彦ほか：高炉系セメントの高温高压養生における強度発現性、セメントコンクリート、Vol.28、pp.355-359（1974）
- 6) 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、Vol.29、pp.285-290（2007）

STUDY ON APPLICATION OF CLINKER FREE CONCRETE TO ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT

Hiromi FUJIWARA^{*1}, Masanori MARUOKA^{*1}, Kiyoshi KOIBUCHI^{*2} and Tomoya TAKEI^{*1}

^{*1} UTSUNOMIYA UNIVERSITY, Graduate school of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering (7-1-2, Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585, Japan)

^{*2} DC CO., LTD (1-1, Asano, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0854, Japan)

ABSTRACT : In this study, we perform a flesh property examination and a strength examination for application of Clinker Free Concrete (CFC) which doesn't include any cement, to roller compacted concrete pavement (RCCP). CFC's water-powder ratio is 20 % (W/P=20 %) and powder content is 500 (kg/m³). 5 types of mixed ratio of ground granulated blast-furnace slag and fly ash, and two types of mortar-coarse aggregate volume ratio were used for CFC. Two types of curing time were changed at this study. As a result of this study, the flexural strength of clinker free concrete of 12 hours age showed over 3.5 N/mm². And that of 28-days age showed over 4.5N/mm². The flexural strength increased with the increase of BS's mixed ratio. There is the best Curing temperature of clinker free concrete.

KEY WORDS : Clinker free concrete, RCCP, Fly ash, Ground graduate blast furnace slag