

高炉スラグ微粉末を用いた早強性高流動コンクリートの耐久性に関する研究

(株)富士ピー・エス 技術本部 正会員○福田 昌明
 (株)富士ピー・エス 技術本部 正会員 徳光 卓
 福岡大学土木工学科 添田 政司
 福岡大学土木工学科 大和 竹史

1. はじめに

山陽新幹線のトンネル内壁剥落事故以来、コンクリート構造物の耐久性が社会問題化している。このような情勢のなか、プレストレストコンクリート分野においても、塩害耐久性向上を目的としてPC 橋梁への高炉スラグ微粉末の適用事例が報告されている¹⁾。

筆者らはこれまで、プレテンション工場製品の材料的・施工的な品質向上、省力化を目的として早強性高流動コンクリートを開発し、配合、流動性、水和熱特性などの諸性状についての研究を行ってきた²⁾。本高流動コンクリートは粉体系であり、水和熱を抑制しつつ早強性を発揮させるため、粉末度約 4000cm²/g の高炉スラグ微粉末 30%置換を標準としている。一般に、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、結合材にセメントのみを使用した場合に比べて遮塩性能に優れるものの、中性化抵抗性に劣り、特に、材令初期の養生の良否が品質に与える影響が大きいと言われていた³⁾。これらは比較的高い水セメント比における実験結果であり、プレストレストコンクリートのような比較的低水セメント比の場合や、蒸気養生を行う場合の性能については十分に明らかにされていない。また、一般に高強度コンクリートは実構造物と円柱供試体の強度の差が大きく、実構造物のコア強度は円柱供試体強度に比べて小さくなると言われている⁴⁾。

そこで本研究では、蒸気養生を行った模型桁供試体を作製して、構造体コンクリートの強度発現性の確認を行うとともに、早強型高流動コンクリートの高炉スラグ微粉末の粉末度と置換率の相違が、コンクリートフレッシュ性状、強度、中性化深さおよび塩分浸透性に及ぼす影響を明らかにしたものである。

2. 実験概要

実験は以下に示す2つのシリーズを設定した。

シリーズⅠ：模型桁供試体による構造体コンクリート強度の確認

シリーズⅡ：高炉スラグ微粉末の粉末度と置換率の相違が強度、中性化深さおよび塩分浸透性に及ぼす影響

2. 1 使用材料

表-1 に本実験の使用材料を示す。本実験に使用した材料は、結合材に早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用し、高炉スラグ微粉末の粉末度は約 4000cm²/g と約 6000cm²/g の二種類とした。細骨材に砕砂と石灰砕砂、粗骨材は砕石、混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。

表-1 使用材料

使用材料	記号	種類	物性および成分
セメント	HP	早強ポルトランドセメント	密度3.14g/cm ³
混和材	BS4	高炉スラグ微粉末	密度2.91g/cm ³ 粉末度4250cm ² /g
	BS6	高炉スラグ微粉末	密度2.91g/cm ³ 粉末度6120cm ² /g
細骨材	S1	砕砂	密度2.82kg/l実積率56.8%
	S2	石灰砕砂	密度2.65kg/l実積率57.5%
粗骨材	G	砕石	密度2.93kg/l実積率58.5%最大寸法20mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

2. 2 配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。コンクリートは粉体系の高流動コンクリートとした。高炉スラグ微粉末の粉末度を2種類、置換率を質量比内割で0%、30%、50%の3種類に変化させた。また、比較用として結合材に早強セメントのみを使用した W/C=50%のコンクリートについて試験を行った(表-2中のNC)。

表-2 コンクリートの配合

略号	BS粉末度 (cm ² /g)	BS置換率 (%)	W/(HP+BS) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	HP	BS	S1	S2	G	SP
BS00	-	0	35	56.6	175	500	0	519	479	818	5.00
BS43	4250	30	35	56.4	175	350	150	515	475	818	4.25
BS45	4250	50	35	56.3	175	250	250	519	479	818	4.00
BS63	6120	30	35	56.4	175	350	150	519	479	818	4.50
BS65	6120	50	35	56.3	175	250	250	519	479	818	4.75
NC	-	-	50	44	160	320	0	793	-	1084	5.76*

*: AE 減水剤を使用

2. 3 供試体の作製および養生方法

シリーズ I : 図-1 に示す模型桁供試体と円柱供試体 (φ100×200mm) を製作した。模型桁供試体は桁長 2,000mm, 桁高 1,000mm の中空桁で、支間 24m のプレテンションホロー桁模したものである。コア採取のためにスターラップの間隔は実際の桁よりも広めとした。模型桁供試体の養生はコン

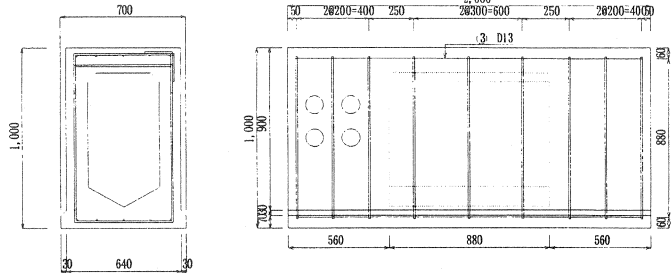


図-1 模型桁供試体

クリートの内部温度を測定しながら、蒸気養生と散水を併用して温度をコントロールし、内部温度を最高 50℃以下に抑えた。写真-1 は養生管理装置の外観である。脱型後は屋外に暴露した。円柱供試体の養生は材令 1 日まで模型桁供試体と同一の温度条件で養生したのち試験材令まで恒温水槽にて養生した。

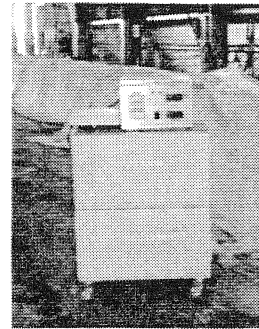


写真-1 養生管理装置

シリーズ II : 強度試験には円柱供試体 (φ100×200mm) を使用し、中性化促進試験および塩分浸透試験には角柱供試体 (100×100×400mm) を製作した。供試体の養生は材令 1 日まではシリーズ I で得られた模型桁供試体の内部温度履歴をプログラム蒸気養生槽で再現した蒸気養生を行い、試験材令まで恒温水槽にて養生した。

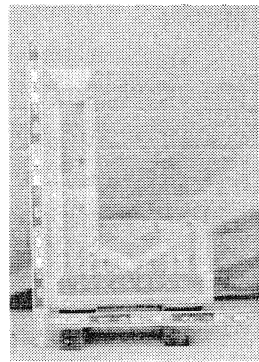


写真-2 実物大充填試験装置

2. 4 フレッシュ性状試験

フレッシュコンクリートの流動性はスランプフロー試験により、間隙通過性は V 型ロート流下試験により確認した。また、自己充填性はホロー桁断面を模した実物大充填試験装置により確認した。写真-2 に実物大充填試験装置を示す。各試験の目標値は表-3 に示すとおりである。

2. 5 圧縮強度試験

シリーズ I はコアと円柱供試体の材令 28 日, 91 日で、シリーズ II は円柱供試体の材令 1, 7, 28, 91 日で圧縮強度試験を行った。

2. 6 中性化促進試験

中性化促進試験はコンクリート角柱供試体を CO₂ 濃度 10%, 温度 40℃, 湿度 40% の中性化促進槽の中に置き、中性化を促進させた。促進期間は 140 日間とした。中性化深さの測定は供試体を 30 mm 間隔に割裂し、フェノールフタレイン法に準じて割裂面にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を噴霧して測定した。測定の間隔は初期測定を 4 週間目に行い、以後 2 週間おきに測定した。

表-3 フレッシュ性状の目標値

試験項目	目標値
ホロー桁断面充填装置試験	充填されたコンクリートが装置の排出側最上段の鋼材を上回ること
スランプフロー試験	650±50mm
V型ロート流下時間	9~20秒

2. 7 塩分浸透性試験

塩分浸透性はコンクリート角柱供試体を用い、塩水噴霧器により NaCl 3% 溶液に浸漬期間 3 日乾燥期間 4 日を 1 サイクルとして、24 サイクル・168 日間、促進試験により調査した。

測定方法は 4 週間おきに供試体を 30mm 間隔に割裂し、UNI7928 (Concrete-Determination of the Ion Chloride Penetration) に準じて、割裂面に 2% 硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 コンクリートのフレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。いずれの高流動コンクリートも土木学会高流動コンクリート施工指針のランク 1 を満足していることが確認された。また、ホロー桁断面を模した実物大充填試験装置により自己充填性を満足していることを確認した。

3. 2 シリーズ I : 構造体コンクリート強度

図-2 にコアと円柱供試体の圧縮強度の関係を示す。材令 28 日における BS43 配合のコア強度は 67.5N/mm²、円柱供試体の強度は 67.1N/mm² で差は 0.4N/mm²、材令 91 日における BS43 配合のコア強度は 73.0N/mm²、円柱供試体の強度は 75.1N/mm² で差は 1.9N/mm² であった。本供試体の条件では、一般に言われるようなコアと円柱供試体の強度差はみられなかったことから、品質管理に用いる構造物の強度は、円柱供試体強度を用いて良いと考えられる。

3. 3 シリーズ II : 強度、中性化深さおよび塩分浸透深さ

3. 3. 1 圧縮強度の経時変化

図-3 にコンクリート強度の経時変化を示す。材令 1 日における圧縮強度は、BS00 配合で 52.0N/mm²、BS43 配合で 42.3N/mm²、BS45 配合で 29.0N/mm²、BS63 配合で 38.0N/mm²、BS65 配合で 29.0N/mm² で目標強度 35N/mm² を満足しているものは BS00 配合と BS43 配合と BS63 配合であった。このことから、材令初期の強度発現におよぼす影響は高炉スラグ微粉末の粉末度よりも置換率のほうが大きいと考えられる。

材令 91 日における各配合の圧縮強度は BS00 配合で 83.5N/mm²、BS43 配合で 79.8N/mm²、BS45 配合で 80.0N/mm²、BS63 配合で 81.0N/mm²、BS65 配合で 88.5N/mm² であった。高炉スラグを混和した配合の圧縮強度は、長期にわたって増進している。

3. 3. 2 中性化促進試験

表-4 フレッシュ性状

種類	スランブフロー (cm)	Vロート流下時間 (sec)	空気量 (%)
BS00	63×64	14.31	1.6
BS43	60×60	13.38	2.1
BS45	63×61	11.81	1.4
BS63	60×62	11.47	1.8
BS65	60×62	11.47	1.3

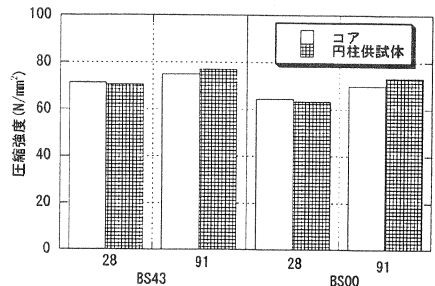


図-2 コアと円柱供試体の強度の関係

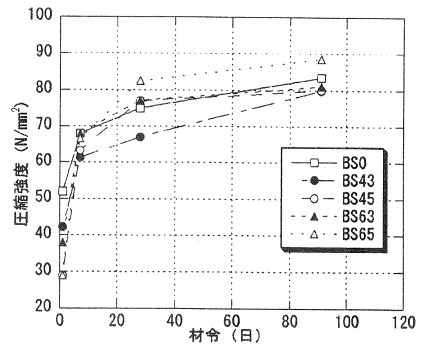


図-3 圧縮強度の経時変化

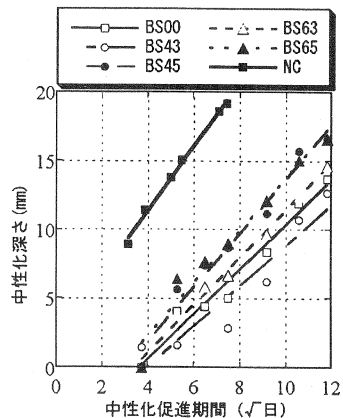


図-4 中性化促進試験結果

図-4に各配合の中性化深さと中性化促進期間の関係を示す。中性化促進期間 $\sqrt{12}$ 日における中性化深さは、BS00配合で約13mm、BS43配合とBS63配合では約14mm、BS45配合とBS65配合では約17mmとなり、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど、中性化深さは大きくなることが確認された。一方、高炉スラグ微粉末の粉末度の相違では、BS45とBS65、BS43とBS63では明瞭な差は見られなかった。W/C=50%のNC配合と比較すると、いずれの配合も中性化深さは小さい。

土木学会コンクリート標準示方書-耐久性照査型-〔施工編〕では次式の中性化速度式が示されている。

$$y = R(-3.57 + 9.0W/B)\sqrt{t}$$

ここで、 y は中性化深さ (mm)、 R は環境の影響を表す係数、 W/B は有効水結合材比、 t は中性化期間 (年)である。この式で $y=15\text{mm}$ 、 $R=1.6$ (乾燥しやすい環境)、 $W/B=0.36$ (高炉スラグ微粉末の置換率30%として計算)とおき、中性化の所要年数 t を逆算すると、深さ15mmまで中性化するのに約900年かかる計算になる。これらのことから、本実験で用いたW/C=34%、高炉スラグ微粉末の置換率30、50%の範囲内では、通常環境下での中性化抵抗性は十分と考えられる。

3.3.3 塩分浸透試験

図-5に塩水噴霧試験による塩分浸透深さの測定結果を示す。塩分浸透期間168日でのBS43、BS45、BS63、BS65の塩分浸透深さは約7~9mmであり、BS00の中性化深さ約14mmに比べて、65~50%程度小さい値となった。一般に、高炉スラグの粉末度が細かいほど、遮塩性能に優れるとされるが、本実験結果では、BS65配合は塩分浸透の初期には塩分浸透深さが小さくなるものの、塩分浸透期間が経過するにつれて、BS43配合、BS45配合、BS63配合との差は小さくなり、塩分浸透期間168日では他の配合との差は僅かであった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 圧縮強度用円柱供試体と模型桁供試体から採取したコアの強度はほぼ等しい。
- ② 材令初期における強度発現への影響は高炉スラグ微粉末の粉末度よりも置換率のほうが大きい。
- ③ W/C=34%、高炉スラグ微粉末の置換率30%、50%では通常環境下における中性化抵抗性は十分に有している。高炉スラグ微粉末の粉末度による中性化抵抗性への影響は確認されなかった。
- ④ 結合材を30~50%高炉スラグに置換することで、塩分浸透深さが早強単味のコンクリートより1/2程度であった。
- ⑤ 初期の塩分浸透期間では同一水セメント比、同一置換率の条件下で粉末度が大きいほうが塩分浸透深さは小さい。しかし、塩分浸透期間半年では高炉スラグの粉末度と置換率による影響は少なくなった。

参考文献

- 1) 後藤 剣也, 江崎 守, 吉富 泰一, 松下 博通; 高炉スラグ微粉末を用いたPC橋の設計・施工, 第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp739~742, 2000.10
- 2) 左東 有次, 添田 政司, 大和 竹史, 徳光 卓; 早強性高流動コンクリートの発熱特性, 第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp653~658, 1996.10
- 3) 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, 1996.3
- 4) 日本建築学会; 高強度コンクリートの技術の現状, pp161~171, 1991
- 5) 土木学会; コンクリート標準示方書-耐久性照査型-〔施工編〕, 2000.1

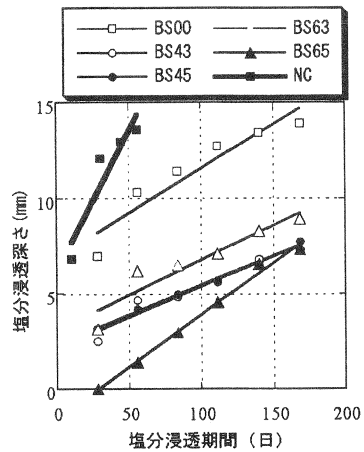


図-5 塩分浸透試験結果