

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性の改善に関する研究

ピーシー橋梁株 正会員 ○小林 崇
 ピーシー橋梁株 正会員 中村 定明
 ピーシー橋梁株 前田 拓郎

1. はじめに

近年、厳しい海洋環境下における塩害や寒冷地における凍結融解および凍結防止材の散布などによるコンクリートの劣化が問題となっている。これに対して高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、水密性・耐海水性・ASR抑制などに優れ、耐久性の向上を目的として使用されることが多い。また、省エネルギー、CO2発生量の低減やリサイクルの観点からも副産物である高炉スラグ微粉末の使用は有効である。

しかし、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは硬化初期における自己収縮量が大きく、プレキャストセグメント箱桁などの大型部材への適用においては、拘束効果の増大から製造時にひび割れなどの初期欠陥を誘発し、これによる耐久性の低下も予想される。

今回、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性改善、大型部材への適用を目的とした実験を行い、早強性膨張材の併用によりプレキャストセグメント箱桁に適用実績のある早強セメント単味コンクリートと同程度の性能および収縮特性を有する高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの配合を確認した。

2. 実験概要

2.1 性能目標および使用材料

本実験において、高炉スラグ微粉末の置換率は、コンクリートの高強度化および耐久性の向上からセメントの50% (質量比) とし、比表面積は早強ポルトランドセメントを使用した配合に対して50%置き換えても、若干の配合修正で同程度の強度を発現するとされる

表-1 使用材料

6000cm²/gとした^{1),2)}。

コンクリート性能の目標値を以下に示す。

1) フレッシュ性状

- ・スランプ：15±2.5cm、・空気量：4.5±1.5%

2) 硬化コンクリート性能

- ・PC導入強度：35N/mm² (材齢16時間)
- ・配合強度：50N/mm² (材齢28日)

使用材料を表-1に、示方配合を表-2にそれぞれ示す。

配合については、上記のコンクリート性能を有する高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの配合(②)を基

材料名	種類	産地・成分・物性	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14 g/cm ³ 比表面積 4550cm ² /g	HC
	高炉スラグ微粉末	密度 2.88g/cm ³ 比表面積 6060cm ² /g	BFS
混和材	早強性膨張材	石灰系、密度 3.20g/cm ³ 比表面積 4560cm ² /g	Ex
	川砂	静岡県大井川産 表乾密度 2.61g/cm ³ , FM2.78	S
粗骨材	川砂利	静岡県大井川産 表乾密度 2.64g/cm ³ , FM6.98	G
混和剤	高性能AE減水剤	ホリカルブ [®] ン酸エーテル系	SP
	AE助剤	変性ホリカルブ [®] ン酸化合物系	AE

表-2 コンクリートの示方配合

No.	配合種類	W/B (%)	BFS/B (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	C	BFS	S	G	Ex	SP	AE
①	HC単味	32.0	0	40.5	155	484	0	675	1034	0	0.85	0.020
②	HC+BFS		50	39.5	145	227	227	672	1073	0	0.60	0.015
③	HC+BFS+Ex.5					224	224			5	0.60	0.020
④	HC+BFS+Ex.10					222	222			10	0.50	0.015
⑤	HC+BFS+Ex.20					217	217			20	0.75	0.020

※ Bは総結合材量(C+BFS)を表す。

※ SP・AEについてはBに対する割合(B×%)にて示す。

準とした。膨張材は 5, 10, 20kg/m³ の 3 水準について結合材の一部と内割で置換し、目標とするフレッシュ性状を満足するよう混和剤の添加により調整を行った。

なお、表-2 の①に示す「HC 単味」配合は、プレキャストセグメント箱桁へ適用実績のある早強セメント単味によるコンクリートの配合であり、後述する本実験における収縮特性改善の目標とした配合である。

2.2 試験体の養生方法

試験体の養生は、早期強度の確保から蒸気養生を行うものとし、プレキャストセグメント箱桁製作時に使用した養生条件とした。図-1 に蒸気養生条件を示す。試験体は材齢 1 日 (16 時間) で脱型し、その後は温度 20°C、湿度 60%の恒温恒湿室内にて保管し、養生・計測を行うこととした。

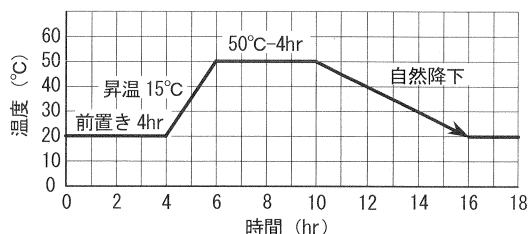


図-1 蒸気養生条件

2.3 測定項目および方法

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数測定試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、静弾性係数測定試験は JIS A 1149 にそれぞれ準拠し、同一供試体 (φ 10×20cm) により材齢 1 (16 時間), 2 (42 時間), 3, 7, 28 日について試験を行い、各配合の強度特性を把握するとともに膨張材の使用の有無、使用量による強度特性への影響について確認することとした。

(2) 自己膨張収縮量測定試験

自己膨張収縮量の測定は、「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法 (案)」(JCI 自己収縮研究委員会報告) に準じ、10×10×40cm の角柱供試体の膨張収縮ひずみ (乾燥収縮+自己膨張収縮ひずみ) および内部温度を埋込型ひずみ計により 7 日間計測した。

計測に際しては、型枠底面および側面にテフロンシートを、両端部内側には発泡スチロールを配置し、内側にポリエステルフィルムを入れコンクリートの型枠への接触を防ぎ、自由変形が可能な無拘束条件とした。図-2 に試験概略図を示す。

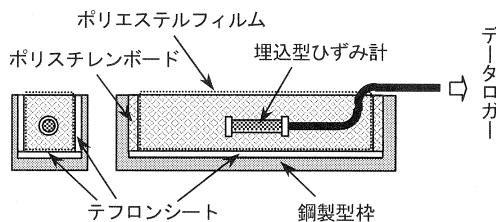


図-2 自己収縮及び自己膨張測定試験概略図

2.4 収縮特性改善の目標値の設定

2.3(2) に示した自己膨張収縮量測定試験方法について、使用した埋込型ひずみ計の見かけの弾性係数は 40N/mm² であり、コンクリートの弾性係数がこれを達した時点がひずみ計測の基準点となる。常温養生を基本とする本試験方法において、この基準点はコンクリートの凝結始発時間やこれと同様の有効材齢とされているが、蒸気養生下ではコンクリートの性状が急激に変化することから、温度上昇過程における凝結始発時間の把握が困難である。また、コンクリートの熱線膨張係数は、一般に 10×10⁻⁶/°C と仮定されるが、硬化過程におけるコンクリートの熱膨張量は凝結始発付近で最大となり、強度の増進に伴い減少し終結後はほぼ一定となる。硬化過程における熱線膨張係数の測定方法は確立されておらず、今回のような蒸気養生条件下では熱膨張ひずみの補正は困難である³⁾。

これより本実験においては、ひずみ測定 of 基準点は蒸気養生における昇温直前 (練上り後 4 時間) とし、熱線膨張係数による補正は行わず、材齢 1 日 (16 時間) におけるひずみ量が早強セメント単味によるコンクリートと同程度になる配合の確認を本実験の目標値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

図-3 に圧縮強度の発現特性を、図-4 に静弾性係数の発現特性をそれぞれ示す。

膨張材の使用は、無拘束条件下においてコンクリート組織を弛緩し強度を低下させるが、拘束条件下では組織を維持、緻密化させるとされている⁴⁾。本実験において、圧縮強度および静弾性係数測定試験は、鋼製型枠で成型した無拘束条件に近い供試体で行ったが、膨張材の使用の有無・添加量に寄らず高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの各材齢時における圧縮強度および静弾性係数は同程度を示しており、圧縮試験時の破壊形態・性状に差異は見られなかった。これより、本実験においては、使用した早強性膨張材は 20kg/m³ 程度の添加量ではコンクリート組織に影響なく、全配合が目標とする硬化コンクリート性能を満たしていることを確認した。

3.2 自己収縮及び自己膨張特性

各配合のコンクリートの練上り 4 時間後から材齢 7 日までの自己膨張収縮量の経時変化を図-5 に示す。

本図において配合の種類に寄らず、ほぼ全ての配合のひずみ量が膨張側にあるのは、前述したように熱線膨張係数による温度補正を行っていないため、養生初期における膨張ひずみが残存している為であり、本図はコンクリートの膨張収縮ひずみの絶対量を表すものではなく、各配合間の膨張収縮特性を相対的に比較するものである。

表-3 に自己膨張収縮量の最大値 (材齢 8.2 時間) および材齢 1, 7, 28 日における計測値を示す。

図-5 および表-3 より、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリート配合(②)は、早強セメント単味によるコンクリート配合(①)に比べ材齢 1 日で 150 μ 、材齢 7 日で 190 μ 程度膨張量が小さい (すなわち、収縮量が多い) 結果となった。これより本実験の目的は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに材齢 1 日で 150 μ の膨張ひずみを付加する膨張材の使用量の推定となり、膨張材を 5kg/m³ 使用することで目標とする収縮特性の改善が可能であることを確認した。

本実験において、膨張材の使用量と自己膨張収縮特性について、膨張材の使用量によらず蒸気養生下における膨張材の反応速度はほぼ一定であり、全ての配合において最高温度 50 $^{\circ}$ C を約 2 時間保持した材齢 8.2 時間で膨張量は最大となり、この時点よりコンクリートは収縮を開始した。最大膨張後の収縮量がほぼ同程度であることから、コンクリートが硬化過程において与えら

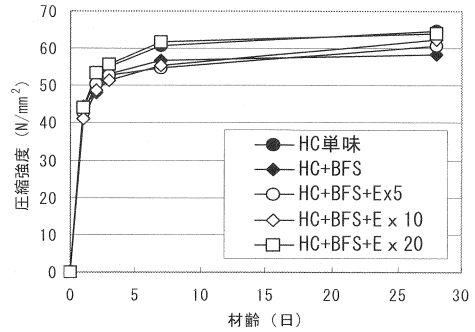


図-3 圧縮強度発現特性

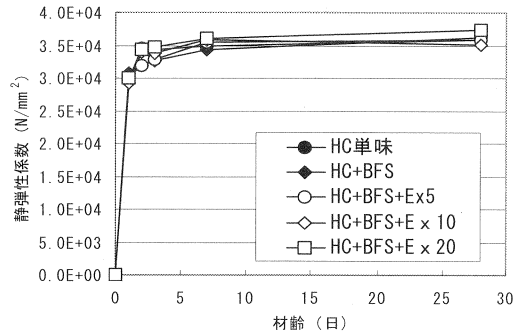


図-4 静弾性係数発現特性

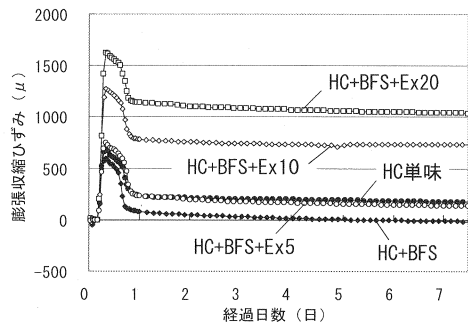


図-5 自己膨張収縮量の経時変化

表-3 自己膨張収縮ひずみの計測値および相対量

No.	配合種類	最大	1d	7d	28d
①	HC 単味	696 (+99)	235 (+156)	181 (+192)	33 (+144)
②	HC+BFS	597	79	-11	-111
③	HC+BFS+Ex. 5	751 (+154)	235 (+156)	141 (+152)	62 (+173)
④	HC+BFS+Ex. 10	1276 (+680)	782 (+703)	737 (+747)	652 (+763)
⑤	HC+BFS+Ex. 20	1628 (+1031)	1139 (+1044)	1044 (+1055)	965 (+1076)

※ ()はHC+BFS との相対量を表す。

れた膨張材による膨張ひずみは硬化後においても内部応力として保持されることを確認し、膨張材の使用が高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性の改善に有効であることが確認された。

4. まとめ

水密性・耐海水性に優れる高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、耐久性の向上に有効である。しかし、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは初期における自己収縮量が大きく、プレキャストセグメント箱桁など大型部材への適用は、拘束効果の増大による初期欠陥の誘発、耐久性の低下が懸念される。

今回、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性を改善し、大型部材への適用を目的とした本実験において、早強性膨張材の使用により大断面セグメントへの使用実績のある早強セメント単味によるコンクリートと同程度の収縮特性への改善が可能であることを確認した。

本実験により得られた知見を以下に述べる。

- (1) 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性は、早強性膨張材を $5\text{kg}/\text{m}^3$ 使用することにより早強セメント単味によるコンクリート程度に改善することが可能であり、 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の添加量ではコンクリート組織に影響を及ぼさないことを確認した。
- (2) 硬化過程において付加される膨張材による膨張ひずみは、硬化後も内部応力として保持され、膨張材の使用の有無および使用量によらず最大膨張後の収縮傾向は同様であることを確認した。
- (3) 本実験において、膨張材の有無や使用量によらず、コンクリートの膨張量は材齢 8.2 時間を最大として、これ以降収縮挙動となり脱型後の遅れ膨張などは確認されなかった。

5. 今後の検討課題

今回、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの大型部材への適用を目的とする実験の第一段階として、早強性膨張材の使用により大断面セグメントへの使用実績のある早強セメント単味によるコンクリートと同程度の収縮特性を有する高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの配合を確認した。

今後、断熱温度上昇量の測定などの実験を行い、これらの実験により得られるコンクリートの諸物性、収縮特性を用いた解析などにより大型部材への適用性について検討を行う。

また、コンクリートの収縮特性は、使用骨材などにより異なることや膨張材の膨張特性がコンクリートの硬化過程における熱履歴に影響を受けると思われ、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートおよび収縮特性の改善を目的とした膨張材の使用に際しては、使用材料や養生条件の検討および条件にあわせた自己膨張収縮量の測定、使用量の検討が必要であると思われ、本論文がこれの参考となれば幸いである。

本実験は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの大型部材への適用を目的としたが、これに限らず T 桁橋・中空床版橋・PC 床版など小型プレキャスト部材の耐久性の向上および副産物の積極的な利用を目的として、高炉スラグ微粉末および膨張材の使用の検討を行う予定である。

謝辞

本実験にあたり、太平洋マテリアル(株)、新日鐵高炉セメント(株)、(株)ポゾリス物産より材料をご提供戴きました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー86、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針、1996.6
- 2) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久プレストレストコンクリート構造物の開発、1998.3
- 3) 原田克巳、松下博通、後藤貴弘、三小田典史：高炉セメント使用コンクリートの高温下におけるひずみ特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.2, 2001
- 4) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、2002.9