

～ 産学官共同研究報告書 ～

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」
(温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)
配合・製造および施工指針 (案)

平成 19 年 3 月

(財)福井県建設技術公社

発刊にあたって

(財)福井県建設技術公社は、県および市町の建設技術の向上と良質な社会資本の整備に寄与することを目的として、平成6年4月に設立されて以来、研修業務、調査・設計マニュアルの作成、建設事業に関する受託業務などを行い、建設事業の円滑かつ効率的な執行を図るための発注者支援を行ってまいりました。

産学官共同研究支援事業は平成12年度より、大学と民間企業および県の機関(雪対策・建設技術研究所)が対等の立場で共通の課題に取り組み、技術研究開発を推進し、建設技術の高度化を図ることを目的として始まり、当公社はこの共同研究のコーディネートを行っております。

近年、公共工事を取り巻く状況は大きく変化し、工事発注者の責務と公共工事の品質確保(品確法)が明確化された中、塩害、アルカリ骨材反応等によるコンクリート構造物の劣化が問題視されております。

福井県は日本列島のほぼ中央に位置し、海山に囲まれ変化に富んだ自然景観を有し、四季豊かな県土となっております。福井県は「福井元気宣言」の中で確かな社会基盤の構築として“元気な県土”を一つのビジョンに上げており、また、「元気な県政」では“持続可能な循環型社会”や“資源循環型の社会経済システム”への転換を図るため、リサイクルの推進を行っております。

これを受け当公社では、福井県内にある北陸電力(株)敦賀火力発電所から産出される、フライアッシュ(産業副産物)を活用し、より質の高いコンクリート構造物の建設に向け、平成16年度から平成18年度までの3ヶ年にわたって研究に取り組み、ここに報告書(指針)作成の運びとなりました。今後、建設事業に関わる技術者の参考資料になれば幸いです。

最後に、この共同研究にご協力頂いた方々に対し、深く感謝申し上げます。

平成19年3月

(財)福井県建設技術公社
理事長職務代行 川上 秀吉

まえがき

社会基盤を構築する建設構造物においては、橋脚を始めとして部材断面の大きいコンクリート部材が多く、これらマスコンクリート構造物の建設にあたり、水和熱の発生を抑えることができる代表的なセメントとして高炉セメントがあり、多様な構造体で使用されてきた。しかし近年、高炉セメント B 種を使用したコンクリート部材で、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生事例が多数報告されるようになり、実際に高炉 B 種コンクリートの水和発熱量を測定すると、従来の評価とは逆転して普通セメントコンクリートの場合と同等あるいはより大きい結果が出ている。

一方で、生産量が年々増大しているフライアッシュは、コンクリート用混和材として、流動性の改善や水和熱低減、乾燥収縮の低減、長期強度の増大等が認められており、高炉セメント B 種と組み合わせることで、より低発熱で乾燥収縮が小さく、長期強度の大きいコンクリートを得られる可能性がある。また、それにより温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの抑制効果も期待できる。

本研究は、高炉 B 種コンクリートにフライアッシュを混和材として添加した「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の特性を把握する目的で行ったものであり、(財)福井県建設技術公社のコーディネートのもと、福井宇部生コンクリート(株)、福井大学、福井県雪対策・建設技術研究所などが共同で研究をすすめてきた。本研究では、室内実験や試験施工によって、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」のひび割れ抑制効果や耐久性を検証するとともに、使用にあたっての指針を策定した。本報告書はこの共同研究による成果をまとめたものである。

本研究の遂行にあたっては、産官学のそれぞれの能力の発揮および有機的結合がなされ非常に意義のある研究成果が得られた。今後、多数の実際工事への適用によって一層の信頼性確保ならびに広範囲への普及を図る必要があるが、本研究の成果が、コンクリート施工における安定性の向上につながれば幸いである。

平成 19 年 3 月

福井大学工学部建築建設工学科
講師 本間 礼人

産学官共同研究支援事業 研究開発グループ

(平成 16 年度)

石川 裕夏	福井宇部生コンクリート(株) 常務取締役 / ユーコン(株) 代表取締役社長
高橋 和男	福井宇部生コンクリート(株) 本社工場・芦原工場 工場長
植田 厚元	宇部三菱セメント(株) 北陸支店 技術担当課長代理
黒川 健治	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課副課長 (現 北陸電力(株) 福井支店大野電力部土木課)
多田 正人	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課
本間 礼人	福井大学工学部 建築建設工学科講師
街道 春仁	福井県雪対策・建設技術研究所次長 (現 福井県足羽川激特対策工事事務所長)
三田村 文寛	福井県雪対策・建設技術研究所主任研究員
鳥山 公裕	福井県土木管理課企画主査 (現 福井県福井土木事務所地域整備一課)
免 博彦	(株)福井県建設技術公社業務課長
伊藤 桂一	(財)福井県建設技術公社業務課主任 (現 福井県福井土木事務所道路保全課長)
藤田 博行	(財)福井県建設技術公社業務課主査

(平成 17 年度)

石川 裕夏	福井宇部生コンクリート(株) 常務取締役 / ユーコン(株) 代表取締役社長
高橋 和男	福井宇部生コンクリート(株) 本社工場・芦原工場 工場長
植田 厚元	宇部三菱セメント(株) 北陸支店 技術担当課長代理
坂居 哲夫	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課長
黒川 健治	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課副課長 (現 北陸電力(株) 福井支店大野電力部土木課)
多田 正人	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課
本間 礼人	福井大学工学部 建築建設工学科講師
三田村 文寛	福井県雪対策・建設技術研究所主任研究員
鳥山 公裕	福井県土木管理課企画主査 (現 福井県福井土木事務所地域整備一課)
免 博彦	(株)福井県建設技術公社業務課長
伊藤 桂一	(財)福井県建設技術公社業務課主任 (現 福井県福井土木事務所道路保全課長)
山木 忠嘉	(財)福井県建設技術公社業務課企画主査
藤田 博行	(財)福井県建設技術公社業務課主査

(平成18年度)

石川 裕夏	福井宇部生コンクリート(株) 常務取締役 / ユーコン(株) 代表取締役社長
高橋 和男	福井宇部生コンクリート(株) 本社工場・芦原工場 工場長
植田 厚元	宇部三菱セメント(株) 北陸支店 技術担当課長代理
勝矢 義隆	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課長
佐野 憲一	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課副課長
多田 正人	北陸電力(株) 敦賀火力発電所業務課
本間 礼人	福井大学工学部 建築建設工学科講師
三田村 文寛	福井県雪対策・建設技術研究所主任研究員
坂口 正雄	福井県土木管理課企画主査
免 博彦	(株)福井県建設技術公社業務課長
山木 忠嘉	(財)福井県建設技術公社業務課企画主査
藤田 博行	(財)福井県建設技術公社業務課主査

- 目次 -

第 編 「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」配合・製造および施工指針(案)

第 1 章 総則	
1.1 本指針の目的	- 1
1.2 適用が望まれるコンクリート構造物の種類	- 2
第 2 章 コンクリートの材料	
2.1 フライアッシュ	- 3
2.2 セメント	- 4
2.3 骨材	- 4
2.4 水	- 4
2.5 混和剤	- 5
第 3 章 コンクリートの配合	
3.1 置換率	- 6
3.2 水結合材比	- 6
3.3 単位水量	- 6
3.4 細骨材率	- 7
3.5 空気量	- 7
第 4 章 コンクリートの製造	
4.1 フライアッシュの貯蔵設備	- 8
4.2 フライアッシュの計量	- 8
4.3 練混ぜ	- 8
第 5 章 コンクリートの運搬、打込みおよび養生	
5.1 運搬および打込み	- 10
5.2 養生	- 10
第 6 章 品質管理	
6.1 工場の選定	- 11
6.2 品質についての指定	- 11
6.3 品質管理および検査	- 12

第 編 高炉セメントを使用したコンクリートの特性に及ぼすフライアッシュの影響に関する基礎研究

第 1 章 序論	
1.1 研究背景	- 1
1.2 研究のながれ	- 2
第 2 章 配合計画	
2.1 概要	- 4
2.2 材料	- 4
2.3 配合	- 7
2.4 練混ぜ	- 7
第 3 章 特殊混和剤の特性	
3.1 概要	- 9
3.2 特殊混和剤の特性	- 9
3.3 まとめ	- 11
第 4 章 フレッシュ性状および硬化性状	
4.1 概要	- 12
4.2 フレッシュコンクリート性状	- 12
4.3 圧縮強度	- 12
4.4 静弾性係数	- 15
4.5 まとめ	- 17
第 5 章 水和熱による温度上昇特性	
5.1 概要	- 18
5.2 簡易断熱温度上昇試験	- 18
5.3 試験結果および考察	- 19
5.4 まとめ	- 22
第 6 章 乾燥収縮特性	
6.1 概要	- 23
6.2 乾燥収縮試験（長さ変化試験）	- 23
6.3 試験結果および考察	- 24
6.4 まとめ	- 25
第 7 章 凍結融解作用に対する抵抗性	
7.1 概要	- 26
7.2 凍結融解試験	- 26
7.3 試験結果および考察	- 27
7.4 まとめ	- 30

第8章 中性化に対する抵抗性	
8.1 概要	- 31
8.2 中性化試験	- 31
8.3 試験結果および考察	- 32
8.4 まとめ	- 37
第9章 塩害に対する抵抗性	
9.1 概要	- 38
9.2 塩水浸漬試験	- 38
9.3 試験結果および考察	- 39
9.4 まとめ	- 40
第10章 アルカリ骨材反応に対する抵抗性	
10.1 概要	- 41
10.2 アルカリ骨材反応性試験	- 41
10.3 実験結果および考察	- 42
10.4 まとめ	- 44
第11章 模擬マスコンクリートの施工実験	
11.1 概要	- 45
11.2 施工実験の実施方法	- 45
11.3 実験結果および考察	- 46
11.4 まとめ	- 51
第12章 試験施工	
12.1 概要	- 53
12.2 試験施工の実施方法	- 53
12.3 寒中期の試験施工	- 56
12.4 暑中期の試験施工（その1）	- 59
12.5 暑中期の試験施工（その2）	- 63
12.6 標準期の試験施工	- 66
12.7 試験施工の検証および考察	- 69
12.8 まとめ	- 71
第13章 総括	
13.1 試験結果の総括表	- 72
13.2 まとめ	- 74

参考文献

～ 第 編 ～

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」
(温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)
配合・製造および施工指針 (案)

1. 総則

1.1 本指針の目的

本指針は、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の材料、配合、製造および施工についての標準を示すものである。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」とは、高炉 B 種コンクリートにフライアッシュ混和材を添加したコンクリートで、高炉 B 種コンクリートと比べて、4 週で同等の強度発現を可能にしつつ、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れを抑制できるものである。

ダム工事などのマスコンクリート構造物で用いられてきた三成分系セメント（普通ポルトランドセメント・高炉スラグ微粉末・フライアッシュからなるセメント）コンクリートも、同様のひび割れ抑制効果を有しているが、強度発現が高炉セメント B 種に比べて遅く、大規模工事における受注生産に限られた市場性に劣るものである。

本指針で示す「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、生コンクリート製造プラントにて、高炉 B 種コンクリートにフライアッシュ混和材を添加するものであり、工事の規模にかかわらず供給できるため、既存の三成分系セメントコンクリートと異なり市場形成の向上を図ることが可能である。

また、フライアッシュは各地の火力発電所から産出される産業副産物であり、これを有効活用することによって環境負荷を低減することができる。福井県ではグリーン購入法に基づきグリーン購入推進方針を打ち出しており、この施策にも寄与できるものである。

本指針は、この「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の使用材料、配合設計、製造、運搬および打込み、品質管理の標準を定めたものである。なお、本指針で示されていない事項は、「福井県土木工事共通仕様書」および「コンクリート標準示方書〔施工編〕」によるものとする。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の長所

高炉 B 種コンクリートよりも、水和熱の発生を低減することができ、温度ひび割れの発生を抑制できる。

高炉 B 種コンクリートよりも、乾燥収縮ひずみを低減することができ、乾燥収縮ひび割れの発生を抑制できる。

高炉 B 種コンクリートと同等の 4 週強度を発現することができる。

フライアッシュを有効利用することで、環境負荷を低減できるコンクリートである。

1.2 適用が望まれるコンクリート構造物の種類

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生が懸念されるマスコンクリート構造物などで用いることが望ましい。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、1.1で示したとおり、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れを抑制するなどの効果が期待できる。この特性をふまえ、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生が懸念されるマスコンクリート構造物などにこのコンクリートを適用することが望ましい。

なお、コンクリート標準示方書〔施工編〕では、マスコンクリート構造物のおおよその定義として、「広がりのあるスラブについては厚さ 80～100cm 以上、下端が拘束された壁では 50cm 以上」とされており、この定義に当てはまるコンクリート構造物には「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」を適用することが望ましい。例えば、部材厚の大きな擁壁工や橋梁下部工、砂防堰堤工などが挙げられる。

2. コンクリートの材料

2.1 フライアッシュ

フライアッシュの種類は、北陸電力株式会社 敦賀火力発電所から排出されるもので、JIS A 6201 で示される 種のフライアッシュ混和材を使用することとする。

JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」は、粉末度と強熱減量の組み合わせによって、種、種、種および種の品質が規定され、福井県ではこれらのうちフライアッシュ種が北陸電力敦賀火力発電所から排出されている。本研究では、この北陸電力敦賀火力発電所から排出されるフライアッシュ種を用いており、全てこのフライアッシュを用いて「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の効果や性状の検証を行ってきた。

したがって、使用されるフライアッシュは、北陸電力敦賀火力発電所から排出されるフライアッシュ種を使用することとする。

JIS A 6201 フライアッシュの品質

		種	種	種	種
二酸化けい素 (%)		45.0 以上			
湿分 (%)		1.0 以下			
強熱減量 (%)		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 (g/cm ³)		1.95 以上			
粉末度	45 μm ふるい残分 (網ふるい方法) (%)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (プレーン方法) (cm ² /g)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
フロー値比 (%)		105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

2.2 セメント

セメントは、JIS R 5211 に適合した「高炉セメント B 種」を用いる。

本研究では、元々用いられてきた高炉 B 種のコンクリートにフライアッシュ混和材を添加するという事で検証をすすめてきた。これは、1.1 で示したとおり、三成分系セメントコンクリートと同一のコンクリートを製造するという目的やリサイクル率を高めるといふ目的によるものである。

したがって、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」では、ベースとなるコンクリートのセメントの種類として、福井県内の土木工事等で広く使用されている高炉セメント B 種を用いることとする。

2.3 骨材

細骨材および粗骨材は、JIS A 5308 付属書 1 に適合するものを用いる。

通常のコンクリートで用いられている骨材を使用することとし、JIS A 5308 付属書 1 で規定されている骨材を用いる。

なお、本研究において、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、高炉セメントやフライアッシュセメントなどの混合セメントと同様に、アルカリ骨材反応に対する抑制効果も確認されている。

2.4 水

水は、JIS A 5308 付属書 3 に適合するものを用いる。

通常のコンクリートで用いられている練り水を使用することとし、JIS A 5308 付属書 3 で規定されている水を用いる。

2.5 混和剤

- (1) 混和剤として、JIS A 6204 に適合する AE 減水剤を用いる。
- (2) 「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」用の混和剤として、(1) で示した混和剤に加え、機能性有機リン酸エステルを主成分とする特殊 AE 剤を併用して使用する。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の問題点として、フライアッシュ中の未燃炭素の影響で空気連行性が低下するほか、硬化後のコンクリートに黒ずみによる色むらが発生することが確認されている。このため、通常のコンクリートで用いられている JIS A 6204 に適合した AE 減水剤のほかに、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」用の特殊混和剤、機能性有機リン酸エステルを主成分とした特殊 AE 剤を併用することとする。この特殊 AE 剤を併用することで、空気連行性の低下を抑えることができるほか、硬化後のコンクリート表面に発生する色むらを抑制できることが、本研究にて確認されている。

ただし、AE 減水剤と特殊 AE 剤の組み合わせ方によっては所定の性能を発揮しない可能性もありうることから、事前に試験などで性状を確認する必要がある。本研究においては、リグニンスルホン酸と特殊界面活性剤を主成分とする AE 減水剤(山宗化学株式会社：ヤマソー90SE)と特殊 AE 剤(花王株式会社：マイティーAE-01)の組み合わせが良好であることを確認済みである。

3. コンクリートの配合

3.1 フライアッシュの置換率

使用するフライアッシュの置換率は 20%を標準とする。なお、ここでいう置換率とは、フライアッシュの質量を結合材の質量で除した値を百分率で表したものをいう。

本研究では、フライアッシュの置換率を 20%として種々のデータを蓄積してきた。この結果、置換率 20%で「水和熱による温度上昇の低減」、「乾燥収縮の低減」を十分にもたらし、施工性も十分に確保できることが確認されている。また、「凍結融解作用に対する抵抗性」や「中性化に対する抵抗性」、「塩害に対する抵抗性」などのコンクリートの耐久性についても、フライアッシュの置換率を 20%として検証を行ってきた。

よって、本指針では、フライアッシュ混和材の置換率 20%を標準とした。

$$\text{置換率 (\%)} = \frac{\text{フライアッシュ混和材の質量}}{\text{高炉セメントの質量} + \text{フライアッシュ混和材の質量}} \times 100$$

3.2 水結合材比

水結合材比は、コンクリートの所要の強度や耐久性などを考慮して決めるものとする。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」も通常のコンクリートと同様に、コンクリートの圧縮強度は結合材水比と直線関係にあることから、コンクリートの圧縮強度と結合材水比との関係から水結合材比を定めることを原則とする。

また、福井県土木工事共通仕様書では、土木コンクリート構造物の耐久性を向上させる目的で、「水セメント比は、鉄筋コンクリートについては 55%以下、無筋コンクリートについては 60 %以下とするものとする。」とされており、当コンクリートの水結合材比についてもこれを満たすことを確認したうえで使用することとする。

3.3 単位水量

単位水量は、作業ができる範囲内でできるだけ少なくなるよう、試験によってこれを定めなければならない。

所用のスランプを得るのに必要な単位水量は、使用材料、配合などによって相違するの

で、実際の施工に用いる材料を用いて試験を行い、これを定める。この際、単位水量はできるだけ小さくなるように定めることとする。

3.4 細骨材率

細骨材率は、所要のワーカビリティが得られる範囲内で、単位水量が最小になるよう、試験によってこれを定めなければならない。

試験により細骨材率を定めることとする。細骨材率と単位水量は密接な関係があることから、単位水量ができるだけ小さくなるように、細骨材率を設定することとする。

3.5 空気量

コンクリート荷卸し時の空気量が 4.5% (許容値：4.5±1.5%) となるよう、試験によってこれを定めなければならない。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」も、通常のコンクリートと同様に、荷卸し時の空気量が 4.5% (許容値：4.5±1.5%) となるように配合設計を行う。

2.5 で示したとおり、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、通常のコンクリートに比べて空気連行性が低下するほか、運搬時の時間経過に伴う空気量の減少が大きいことから空気量の保持には十分留意する必要がある。

4. コンクリートの製造

4.1 フライアッシュの貯蔵設備

フライアッシュの貯蔵設備は、専用のものであることとし、貯蔵中に品質が変化したり、他の物質が混入しない構造のものでなければならない。

フライアッシュの貯蔵設備に要求される事項は、基本的にセメントに求められる要求事項と同じであり、湿気を防ぐことはもちろん、通気も避けることが必要である。また、他のセメントや混和材などが混入しないようにしなければならない。よって、フライアッシュの貯蔵には、専用の設備を使用することとする。

4.2 フライアッシュの計量

- (1) フライアッシュの計量設備は、専用のものであることとし、所定の計量誤差内で計量できるものでなければならない。
- (2) フライアッシュは、1 バッチ分ずつ質量で計量する。
- (3) フライアッシュの計量誤差は、1 回計量に対して 2%以下でなければならない。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」を製造するうえで、フライアッシュの計量を正確に行うことは、重要事項の一つである。フライアッシュは結合材の一部であり、コンクリートの品質に特に敏感に影響を与える材料であるため、計量誤差が大きい場合には、所定の品質のコンクリートが得られないばかりか、このコンクリートを用いた構造物の使用目的が達せられなくなる恐れもある。したがって、フライアッシュの計量には、専用の設備を用いることとする。また、計量誤差については、通常の混和材と同様に 2%とする。

4.3 練混ぜ

- (1) コンクリートは、均等質のコンクリートが得られるよう十分に練混ぜなければならない。
- (2) 材料をミキサに投入する順序、練混ぜ時間は、あらかじめ適切に定めておかなければならない。

フライアッシュを用いたコンクリートは、コンクリート中にフライアッシュが均等に分散するよう、十分にこれを練混ぜなければならない。また、材料をミキサに投入する順序、練混ぜ時間は、試験によって定めなければならない。

5. コンクリートの運搬、打込みおよび養生

5.1 運搬および打込み

コンクリートは、練混ぜたのち速やかに運搬し、直ちに打込み、十分に締め固めなければならず、練混ぜを開始してから 1.5 時間以内に荷卸しができるように運搬しなければならない。また、練混ぜてから打ち終わるまでの時間は、原則として、外気温が 25 を超える時点で 1.5 時間、25 以下の時で 2 時間を越えてはならない。

フライアッシュを用いたコンクリートの運搬および打込みは、通常のコンクリートと同様に行えばよい。ただし、通常のコンクリートに比べて、スランプロスや空気量の低下がやや大きいことから、運搬時間には十分留意する必要がある。

5.2 養生

- (1) コンクリートの養生にあたっては、養生期間中、日光の直射、風等による水分の逸散を防ぐことはもちろん、コンクリートの露出面を常に湿潤状態に保たなければならない。
- (2) 表面を荒らさないで作業ができる程度に硬化したら、コンクリートの露出面は養生用マット、布等を濡らしたものでこれを覆うか、または散水あるいは湛水を行い、湿潤状態を保たなければならない。
- (3) 湿潤養生は、高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等の期間、行わなければならない。

一般に、コンクリートの強度増進および耐久性の確保のためには、コンクリートを湿潤状態に保ち、できるだけ長く養生期間を確保するのがよい。フライアッシュを用いたコンクリートでは、初期養生が特に重要であり、湿潤状態を保つ期間は普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも長くする必要がある。よって、高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等の期間、湿潤養生を行うこととする。

養生期間の標準

日平均気温	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメント B 種 コンクリート	普通セメント コンクリート
10 超	7 日以上	7 日以上	5 日以上
10 以下	9 日以上	9 日以上	

6. 品質管理

6.1 工場の選定

- (1) 工場は、JIS マーク表示認証工場で、かつ福井県から「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」のリサイクル認定を受けている工場の中から選定しなければならない。
- (2) 工場の選定に関しては、フライアッシュを含めた材料の貯蔵設備、計量設備、計量値記録装置等の設置状況、現場までの運搬時間、荷卸し時間、コンクリートの製造能力、運搬車数、品質管理状態などを考慮しなければならない。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、水和熱による温度上昇の低減や乾燥収縮の低減などの効果が発揮されることを期待し、セメント量の 20% をフライアッシュで置換して使用される。このため、材料の貯蔵および計量、コンクリートの配合および練混ぜが適当でないと、所用の品質を有するコンクリートを安定して供給することが難しくなる。このため、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」を発注する際には、コンクリートを製造するための必要な諸設備が整備されていると同時に、品質管理が十分におこなわれている工場を選定することが重要となる。

よって、この工場選定の基準として、JIS マーク表示認証工場であるほか、福井県から「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」のリサイクル認定を受けている工場を選定することとする。また、コンクリート主任技士およびコンクリート診断士が常駐している工場を選定することが望ましい。

6.2 品質についての指定

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」を発注する際には、購入者は、次のとおり、呼び強度のほか、スランプ、粗骨材の最大寸法などを指定しなければならない。

- (a) 呼び強度
- (b) スランプ
- (c) 粗骨材の最大寸法
- (d) 呼び強度を保証する材齢
- (e) その他 必要な事項

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」も、通常のコンクリートと同様に、呼び強度、スランプ、粗骨材の最大寸法などを指定して発注を行うこととする。その他、

必要な事項については、そのつど指定を行うこととする。

6.3 品質管理および検査

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の品質管理および検査は、「福井県土木工事共通仕様書」および「コンクリート標準示方書〔施工編〕」によるものとする。

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」も、これに要求される性能項目やそれらの試験方法は、基本的に通常のコンクリートと同じである。このため、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の品質管理および検査も、原則として「福井県土木工事共通仕様書」および「コンクリート標準示方書〔施工編〕」によるものとする。

～ 第 編 ～

高炉セメントを使用したコンクリートの特性に及ぼす
フライアッシュの影響に関する基礎的研究

第1章 序論

1.1 研究背景

部材断面の大きいマスコンクリート構造物の建設にあたっては、セメントの水和熱による温度ひび割れを防止する各種の対策が施されている。その対策として 低発熱系のセメントの使用、 コンクリート内部と表面の温度勾配を均一にするため、型枠に断熱性のあるものを使用して養生を行う、 コンクリートの温度を下げる等が行われる。

の低発熱型のセメントのひとつとして、高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置換した高炉セメントがある。スラグの潜在水硬性やワーカビリティの改善等の特徴をもつ高炉セメントは、高強度コンクリート、高流動コンクリート、海洋コンクリートなど様々な分野で応用され、また研究されてきた。一般に高炉スラグの混入量を増加させれば、断熱温度上昇は小さくなるとされ、現在まで公共土木工事などの多くのマスコンクリート構造物で高炉セメントは使用されてきている。本県においても公共工事については原則として高炉 B 種コンクリートを使用することが求められている。

しかし近年、呼び強度発現までの材齢短縮（4 週強度増大）の要求に応えるため、セメント品質の改変が行われた結果、高炉 B 種コンクリートの水和発熱量は普通セメントを使用した場合と同等またはむしろ増大する事になってしまった。このことから現状の高炉 B 種コンクリートでは、従来期待されてきたような低発熱性を得ることは難しくなり、またそれによる温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生も普通セメントより多いなど、問題が生じることとなった。本県においても高炉 B 種コンクリートを使用した一部の公共工事において温度ひび割れ発生や乾燥収縮ひび割れの事例が多数報告されている。このうち一件は、厳寒期の施工にもかかわらず、配合設計段階における温度補正による単位セメント量の増加のために温度ひび割れが生じていた。低発熱・マスコンクリート向け、と言われてきた高炉 B 種コンクリートにおいても、温度特性の検討無しには安全な施工ができない状況になってきていると言っても良いであろう。

一方で、産業副産物の中には、ポゾラン反応を引き起こすフライアッシュや水和ゲルを生じるシリカフェームが存在している。これまでの研究によりフライアッシュをセメントに混入すると流動性の改善や水和熱低減、長期強度の増大等が認められ、コンクリート用混和材として有効である事が分かっている。国外からの輸入品でかつ非常に高価であるシリカフェームと比べ、国産のフライアッシュの生産量は、火力発電が原子力発電と共に日本の電力供給の柱とされているため、年々増え続けている。

地球温暖化防止や廃棄物削減、リサイクルが叫ばれる現代において、これからも増えつづけるこれらの副産物の有効利用を促進していく必要があり、フライアッシュの混和材としての有効利用はその有力な一選択肢とみなされている。

1.2 研究のながれ

前述の通り、高炉セメント B 種だけでは水和熱による温度上昇の抑制や乾燥収縮を低減することは難しいが、フライアッシュの場合は、水和熱による温度上昇や乾燥収縮を小さくできることが報告されている。ならば、フライアッシュと高炉スラグを併用すれば、水和熱による温度上昇や乾燥収縮の小さい、マスコンクリートに適したコンクリートになるのではないだろうか。また、それにより温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの抑制も期待できる。

この高炉スラグ微粉末とフライアッシュ、普通ポルトランドセメントを組み合わせた三成分系セメントのマスコンクリート構造物への適用研究といった報告は存在する。しかし高炉 B 種コンクリートにフライアッシュを混和材として添加したコンクリート、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、フライアッシュのポゾラン反応と高炉スラグ粉末の潜在水硬性による長期強度の伸び、クリンカーの絶対量が少ないことによる水和熱の低減や乾燥収縮の低減等、様々な効果が期待できるが、現時点までにそのような報告はされていない。

本研究では、高炉 B 種コンクリートにフライアッシュを添加した「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」の材料特性を明らかにすることを目的とし、平成 16 年度から平成 18 年度にかけて実験研究を行ってきた。これにより、「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」は、高炉 B 種コンクリートに比べて、水和熱による温度上昇を低減できるほか、乾燥収縮を低減できることが確認され、その結果、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れを抑制できることが実証された。

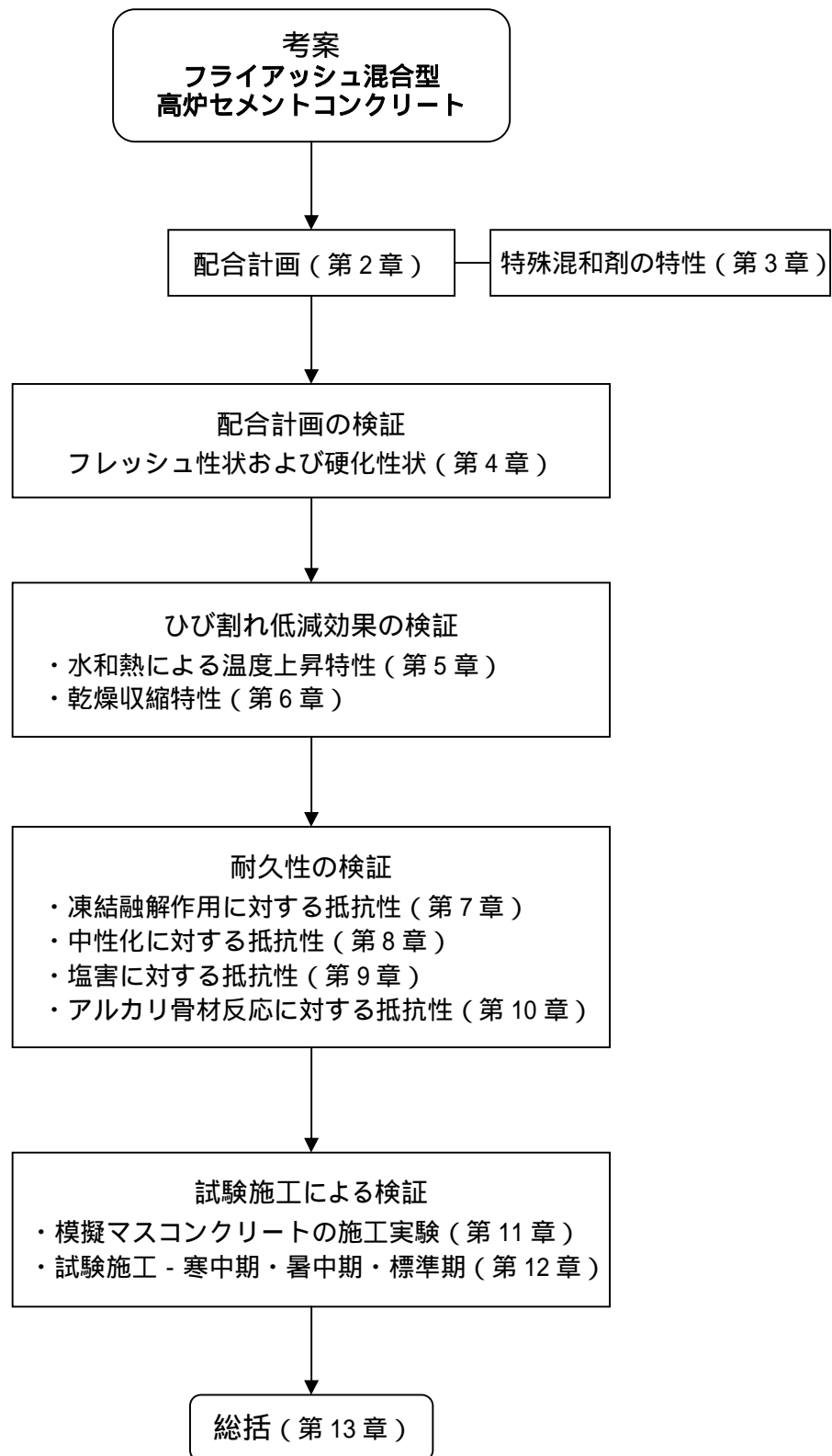


図 1-1 本研究のフロー

第2章 配合計画

2.1 概要

本章では、本研究に用いるコンクリートの配合計画（使用材料、配合、練混ぜ）について述べる。本研究において詳細に検討を行うフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート（高炉 B 種コンクリートにフライアッシュ混和材を添加したコンクリート）および従来から使用されている高炉 B 種コンクリート（以下、高炉セメントコンクリートと称す）の配合計画を以下のとおり示す。

2.2 材料

2.2.1 使用材料

本研究で用いるコンクリートに使用した材料を表 2-1 に示す。

表 2-1 使用材料

材料	種類	生産者・産地	品質特性
セメント	高炉セメント B 種	宇部三菱セメント株式会社	密度 3.04 g/cm ³
混和材	フライアッシュ (JIS 種)	北陸電力株式会社 敦賀火力発電所	密度 2.21 g/cm ³ 比表面積 4280 cm ² /g
細骨材	陸砂 粗砂	九頭竜川中流域産	表乾密度 2.58 g/cm ³ 絶乾密度 2.53 g/cm ³ 吸水率 1.82 % 粗粒率 2.95
	陸砂 細砂	あわら市内産	表乾密度 2.54 g/cm ³ 絶乾密度 2.48 g/cm ³ 吸水率 2.26 % 粗粒率 1.71
粗骨材	陸砂利 (最大寸法 25mm)	九頭竜川中流域産	表乾密度 2.65 g/cm ³ 絶乾密度 2.61 g/cm ³ 吸水率 1.87 % 実績率 60.3 %
混和剤	AE 減水剤 (標準型 種)	山宗化学株式会社	品名 ヤマソー-90SE 主成分 リグニンスルホン酸と 特殊界面活性剤 減水率 15%
	特殊 AE 剤 (AE 剤 種)	花王株式会社	品名 マイティ- AE-01 主成分 機能性有機リン酸エステル 減水率 7%

(1) セメント

高炉セメントは、高炉スラグの混合量により A 種、B 種、C 種に分類されるが、本研究では、現在、土木工事などで最も多く使われている高炉セメント B 種を使用した。

(2) 混和材

フライアッシュは、北陸電力株式会社敦賀火力発電所で製造された JIS 種品のフライアッシュ混和材を使用した。

(3) 細骨材

細骨材は、福井市近郊で手に入れやすい九頭竜川中流域産の粗砂とあわら市内産の細砂を 65% : 35% の割合で混合して使用した。図 2-1 に混合砂の粒度曲線を示す。

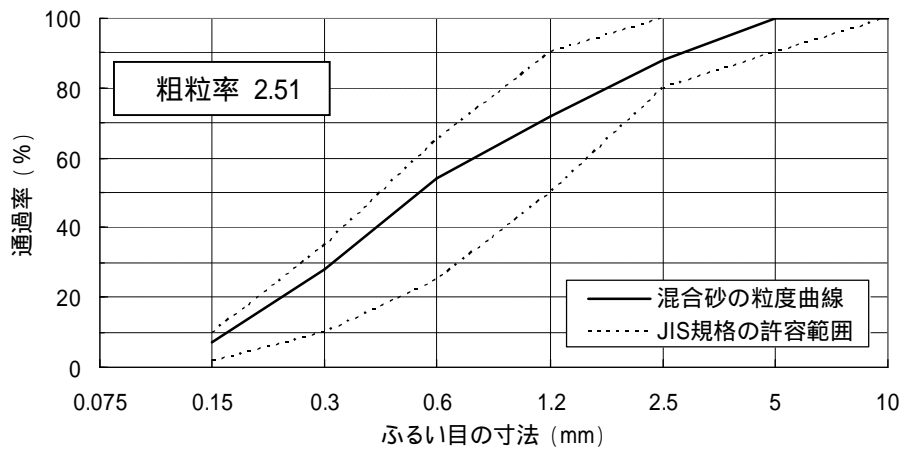


図 2-1 混合砂の粒度曲線

(4) 粗骨材

粗骨材も福井市近郊で手に入れやすい九頭竜川中流域産の砂利を使用した。図 2-2 に粗骨材の粒度曲線を示す。

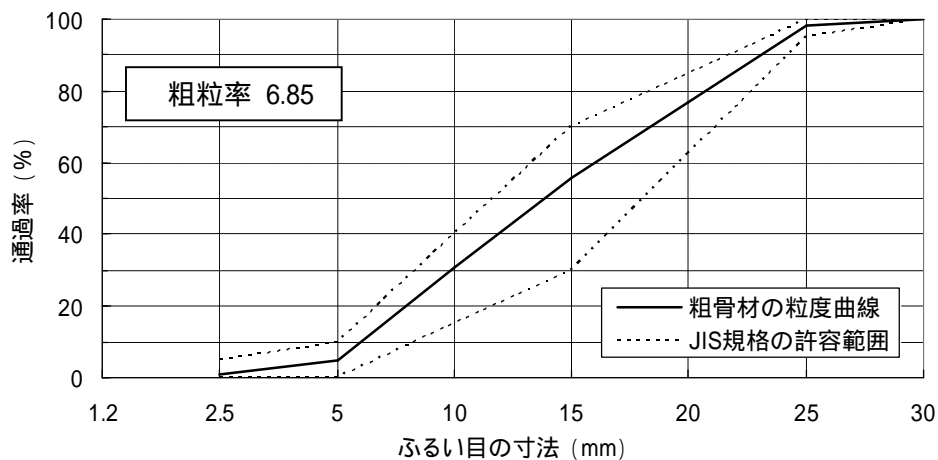


図 2-2 粗骨材の粒度曲線

(5) 混和剤

今回使用した混和剤は、一般汎用品の AE 減水剤と本研究用に開発された特殊 AE 剤である。特殊 AE 剤は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに用いるもので、空気連行性および空気量保持性能を高め、フライアッシュによる色むらを防止する効果がある。この特殊 AE 剤の性能については、第 3 章で詳細に述べる。

2.2.2 本研究で使用するリサイクル材料の特性

(1) 高炉セメント

高炉セメントとは、銑鉄を製造する際に副産物として発生する“高炉スラグ”を、クリンカー・石膏と共に混合したセメントである。近年、省資源、省エネルギー、地球温暖化防止の観点から、高炉セメントの使用比率が増加しており、現在では国内セメント販売高の 25% を占めている。

高炉セメントは化学抵抗性や海水抵抗性、塩害に対する抵抗性に優れており、海岸構造物や下水道関連構造物に適するとされる。また、アルカリ骨材反応に対しての抑制効果があることも確認されており、高い耐久性を有する。

しかしながら、第 1 章に述べたとおり、近年の高炉セメントは温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れが発生する可能性が他のセメントに比べて高いことが確認されている。

(2) フライアッシュ

フライアッシュは、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼する際に溶融された灰分が冷却されて球状になったものを電気集塵機等で集めた微粉炭燃焼灰である。

火力発電に伴うフライアッシュの発生量は 97 年度に約 500 万トンで、その約半数がセメント原料、セメント混和材、地盤改良材等で利用されているが、その後の火力発電所の新設や増設に伴い現在約 1000 万トンのフライアッシュの発生があるとされている。しかし、粘土代替えとしてセメント原料に使う場合、石灰石などと混合して 1400 以上で焼成するため、1t のセメントを製造するのに 500kg 以上の CO₂ を大気に放出している。地球環境破壊が問題になっている中、資源の有効利用と廃棄物削減の観点から、コンクリート分野においてフライアッシュの大量利用の可能性が期待されている。

フライアッシュはそれ自体には水硬性はないが、これに含まれる可溶性のケイ酸等がセメントの水和の際に生成される水酸化カルシウムと常温で徐々に化合して、不溶性の安定なケイ酸カルシウム等を作るポゾラン反応をもたらす。フライアッシュのポゾラン反応は、ガラス相の化学反応、比表面積等に支配され、反応は長期間継続して進行する。フライアッシュの周辺部がポゾラン反応生成物で充たされるに従い、フライアッシュとセメントペースト硬化体とが強固に結合され、長期にわたって強度が増進し、水密性、耐久性が向上される。また、フライアッシュは粒子の大部分が滑らかなガラス球状であるため、コンクリートのワーカビリティの改善も期待できる。

2.3 配合

本研究では、福井宇部生コンクリート株式会社によって作成された基本データをもとに、以下の配合を用いた。表 2-2 にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート（高炉 B 種コンクリートにフライアッシュ混和材を添加したコンクリート）の配合を、表 2-3 に従来から使用されている高炉セメントコンクリート（高炉 B 種コンクリート）の配合を示す。なお、呼び強度は管理材齢 28 日によるものとし、目標スランプ値 8cm、目標空気量 4.5% とした。

表 2-2 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの配合表

略称	配合の種類	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						
				C	F	W	S	G	AD1	AD2
BBFa-18	18-8-25BB + フライアッシュ	53	43.0	221	55	146	786	1073	3.008	0.285
BBFa-24	24-8-25BB + フライアッシュ	44	40.4	270	67	148	715	1086	3.673	0.348
BBFa-24 (特殊AE剤なし)	24-8-25BB + フライアッシュ (特殊 AE 剤なし)	44	40.4	270	67	148	715	1086	3.673	
BBFa-30	30-8-25BB + フライアッシュ	37	37.2	327	82	151	630	1097	4.458	0.423

表 2-3 高炉セメントコンクリートの配合表

略称	配合の種類	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						
				C	F	W	S	G	AD1	AD2
BB-24	24-8-25BB (従来配合)	52	44.4	291		151	807	1044	3.172	

ここに、

W/C : 水セメント比、W/B : 水結合材比、s/a : 細骨材率、

C : 単位セメント量、F : 単位フライアッシュ量、W : 単位水量、S : 単位細骨材量、

G : 単位粗骨材量、AD1 : AE 減水剤 単位使用量、AD2 : 特殊 AE 剤 単位使用量

2.4 練混ぜ

練混ぜは、強制攪拌型コンクリートミキサ（マルイ社製）を使用して、図 2-3 の手順に従って行うこととした。

コンクリートの練混ぜ開始前に、よく混ぜ、均一な含水状態にした骨材の表面水率を計測し、補正計算した配合表を作成したうえで各材料の計量を行う。

次に、ミキサが練り混ぜ中にコンクリートの水を吸収しないように“汚し”を行う。そのため、ミキサに汚しコンクリート分の材料を投入し練り混ぜ、手作業にてミキサにむらなくコンクリートを付着させる。

ここから図 2-3 の手順に従って作業を行う。初めに、セメントと細骨材を投入し 2 分間練り混ぜ、その後フライアッシュを入れ、また 2 分間練り混ぜる。次に、混和剤を混ぜた水を投入して 2 分間練り混ぜる。最後に粗骨材を投入し 2 分間練り混ぜる。なお、粗骨材投入後は、1 分間経過後にミキサを止め、パドルや底の混ざりきっていない部分をモルタルスプーンで混ぜ、さらに 1 分間練り混ぜるようにした。

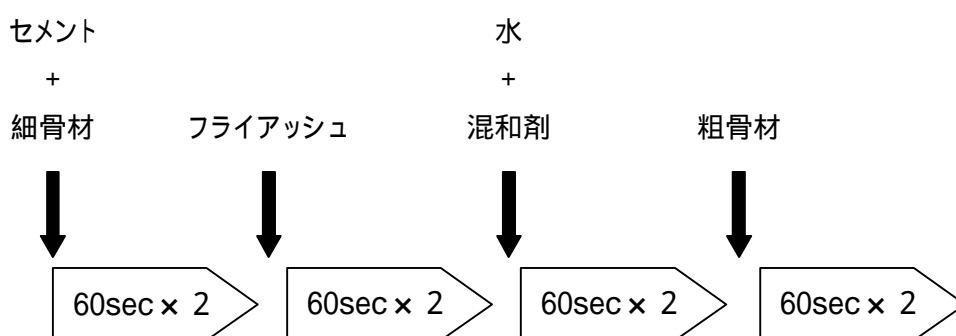


図 2-3 練り混ぜ順序



写真 2-1 強制攪拌型コンクリートミキサ (マルイ社製)

第3章 特殊混和剤の特性

3.1 概要

フライアッシュ混和材を用いたコンクリートは、以下の問題が生じることが既往の文献等によって確認されている。

フライアッシュ混和材がコンクリート性状に与える影響

- ・ フライアッシュ中の未燃カーボン分に AE 剤が吸着される影響で、空気連行性および空気量保持性能が低下する。その結果、凍結融解作用に対する抵抗性が低下する。
- ・ フライアッシュ中のカーボン分の影響で、硬化後のコンクリート表面に黒ずみが析出し、色むらが発生する。

このため、フライアッシュ混和材をコンクリートに添加する場合には、適正な空気量を確保し、黒ずみなどによる色むらの発生を防止することが重要となる。特に、本研究で検討を行うフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、フライアッシュ混和材の置換率が 20%と一般に流通しているフライアッシュセメント B 種（フライアッシュの置換率およそ 15%）と比べても置換率が高い。このため、空気連行性および空気量保持性能の確保、色むらの抑制がより重要となった。

そこで、本研究ではフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに、特殊 AE 剤を使用することとしている。この特殊 AE 剤は、空気連行性および空気量保持性能を高め、フライアッシュの黒ずみによる色むらの発生を抑制する目的で使用されるものである。以下に、この特殊 AE 剤の特性を述べる。

3.2 特殊混和剤の特性

3.2.1 特殊混和剤の特長

本研究では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの空気連行性および空気量保持性の確保や色むらの発生を抑制を目的として、機能性有機リン酸エステルを主成分とする特殊 AE 剤を用いることとした。

この特殊 AE 剤は、未燃カーボン分に容易には吸着されない特殊な成分を有し、空気連行性および空気量保持性能を向上させた特殊型である。また、特殊 AE 剤によって連行される気泡界面にカーボン分が吸着するため、コンクリート内にカーボンが均一に分散されるようになって、色むらの発生を防止し、コンクリート表面の美観を良好に保つ効果が得られる。

3.2.2 空気連行性および空気量保持性能の検証

特殊 AE 剤の空気連行性および空気量保持性能を検証する目的で、特殊 AE 剤を使用したフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと特殊 AE 剤を使用しないフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの比較試験を行った。

この比較試験では、第 2 章に示した BBFa-24 と BBFa-24 (特殊 AE 剤なし) の配合を用いて、練混ぜ直後の空気量および 30 分後の空気量の経時変化を確認した。以下に、その結果を示す。

表 3-1 空気連行性および空気量保持性能の試験結果

配合	練混ぜ直後			練混ぜ 30 分後		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
BBFa-24	9.0	5.2	21.0	7.5	4.4	21.0
BBFa-24 (特殊 AE 剤なし)	8.5	3.5	20.0	6.0	2.2	21.0

この結果から、特殊 AE 剤を用いたコンクリートは練混ぜ直後の規定の空気量を確保できたほか、練混ぜ 30 分後においても空気量ロスを小さく抑えることができ規定の空気量を確保することができた。この特殊 AE 剤を用いることで、空気連行性および空気量保持性能を向上できることが確認された。

3.2.3 色むら抑制効果の検証

色むら抑制効果の検証を行う目的で、セメントをフライアッシュ混和材で 20% 置換した 1 : 2 モルタルのペーストをピーカー内に作成し、特殊 AE 剤を使用したペーストと特殊 AE 剤を使用しないペーストとで、色むら抑制効果の比較検証を行った。以下に比較写真を示す。



特殊 AE 剤使用



特殊 AE 剤使用なし

写真 3-1 色むら抑制効果の比較写真

この結果、特殊 AE 剤を使用していないペーストでは、表面部に黒っぽい斑模様が生じた。また一方の特殊 AE 剤を使用したペーストでは、特殊 AE 剤の分散効果によって、カーボン分が均一に分散し、色むらなどが生じないことが確かめられ、特殊 AE 剤を用いることで、フライアッシュによる色むらの発生を抑制できることが確認された。

3.3 まとめ

- (1) 機能性有機リン酸エステルを主成分とする特殊 AE 剤を使用することで、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの適正な空気量（空気連行性能および空気量保持性能）を確保することができた。逆に、特殊 AE 剤を用いなければ、十分な空気連行性能および空気量保持性能を確保することができなかった。
- (2) 特殊 AE 剤を使用することで、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに生じやすい黒ずみによる色むらの発生を抑制できることが確認された。

第4章 フレッシュ性状と硬化性状

4.1 概要

本章ではフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状について述べる。ここで言及するのは、スランプ試験、単位体積重量、空気量試験、圧縮強度試験ならびに静弾性係数試験である。

4.2 フレッシュコンクリート性状

4.2.1 試験方法

コンクリートのフレッシュ性状を調べるために行なった試験は、以下の通りである。

- ・ スランプ試験 (JIS A 1101)
- ・ 空気量の測定 (JIS A 1118)
- ・ フレッシュコンクリート性状の目視確認

4.2.2 試験結果および考察

第2章で示した配合でのフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリートのスランプ試験結果ならびに空気量試験結果を表4-1に示す。これらの結果から、適当な水セメント比や単位水量の設定、第3章で述べた特殊AE剤を用いる等の適切な配合設計を行えば、スランプおよび空気量をJISの規格内に管理でき、必要なワーカビリティ、材料分離抵抗性も得られることが確認された。

表4-1 スランプ試験・空気量試験の結果およびフレッシュコンクリート性状の目視確認

略称	配合の種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	性状確認
BBFa-18	18-8-25BB + フライアッシュ	10.5	6.0	良好
BBFa-24	24-8-25BB + フライアッシュ	8.5	4.9	良好
BBFa-30	30-8-25BB + フライアッシュ	9.0	3.9	良好
BB-24	24-8-25BB (従来配合)	8.0	4.3	良好

4.3 圧縮強度試験

4.3.1 試験方法

圧縮強度試験は、アムスラー型圧縮試験機を用いて、材齢7日(1週)、28日(4週)、56日(8週)に行った。この試験は、「JIS A 1108：コンクリートの圧縮強度試験方法」

に準ずるものとし、以下の方法で行った。

(1) 供試体のセット

供試体の上下端面および上下の加圧板の圧縮面を清掃したうえで、供試体を供試体直径の1%以内の誤差で、その中心軸が加圧板の中心と一致するようにセットする。

(2) 圧縮荷重の負荷

供試体に衝撃を与えないように一様な速度で荷重を加える。荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ になるようにする。供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字3桁まで読み取り、圧縮強度を算出する。



写真 4-1 アムスラー型 圧縮強度試験機

4.3.2 試験結果および考察

普通セメントコンクリートにフライアッシュを混入するとポゾラン反応によって長期強度が増進するが、結合材量が減るために初期強度が小さくなる事がわかっている。本節では高炉セメントにフライアッシュを混入した場合、強度発現にどのような影響を及ぼすか、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較をしながら検証する。

(1) 強度発現の比較検証

第2章で示した BBFa-24 と BB-24 の配合を用いて、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの強度発現の比較検証を行った。以下に、その結果を示す。

表 4-2 圧縮強度試験の結果

コンクリートの種類		圧縮強度 (N/mm ²)		
		7日材齢	28日材齢	56日材齢
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	18.5	35.7	41.4
BB-24	高炉セメントコンクリート	19.1	34.5	43.2

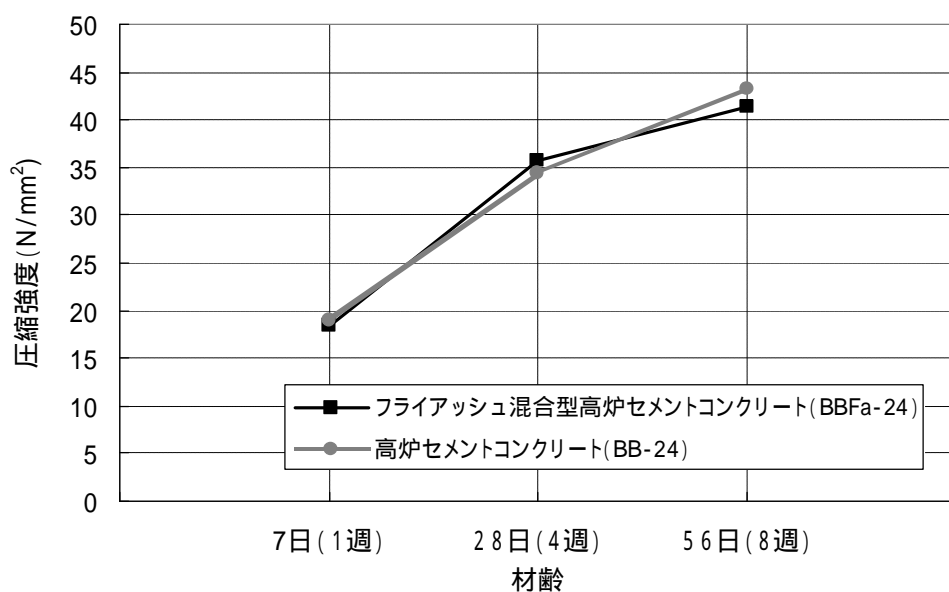


図 4-1 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの強度発現の比較

この結果から、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで、よく似た強度の発現性が確認された。両者で若干の強度差が見られるが、圧縮強度の標準偏差を考慮すると、7日、28日、56日材齢の強度発現に有意差はないと判断される。

(2) 結合材量が異なるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの強度発現

結合材量が異なる呼び強度 18、24、30 のフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いて強度発現の検証を行った。以下に、その結果を示す。

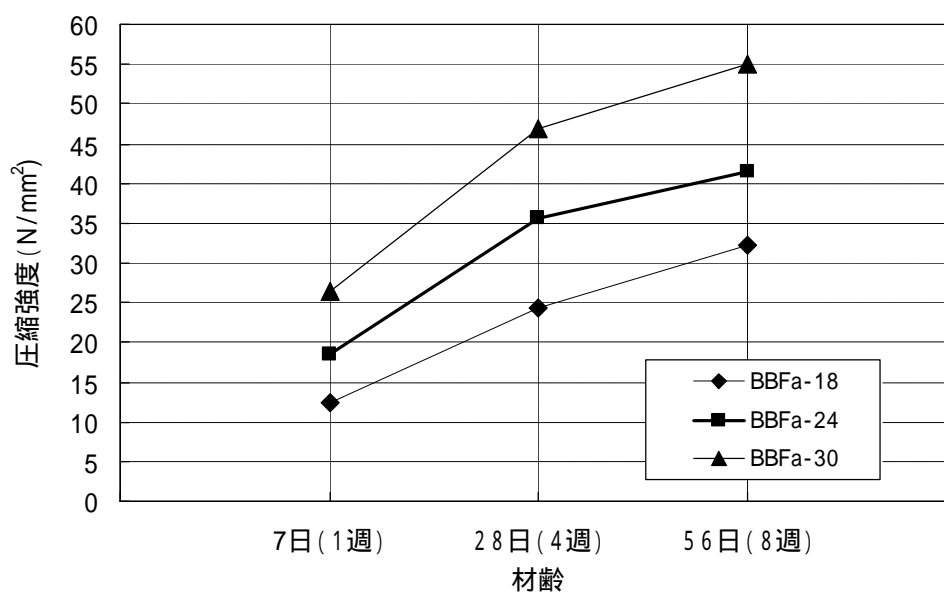


図 4-2 結合材量が異なるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの強度発現

この結果から、結合材量の増加に比例して強度が増加していることが確認された。このことは、呼び強度に関わらず、フライアッシュ混和材の置換率を一定（置換率 20%）とした配合計画が適切であることを示している。

4.4 静弾性係数試験

4.4.1 試験方法

4.2 で述べた圧縮強度試験の材齢 4 週時の試験と同時に、静弾性係数試験を行った。この試験は、「JIS A 1149：コンクリートの静弾性係数試験方法」に準ずるものとし、以下の概要で行った。

(1) 供試体のセットおよび圧縮荷重の負荷
供試体のセットおよび圧縮荷重の負荷は、4.3 に示した圧縮強度試験の試験方法に準じて行う。



写真 4-2 静弾性係数試験

(2) ひずみの測定

供試体の縦ひずみは、最大荷重の 1/2 程度まで測定し、その測定間隔は等間隔として少なくとも 10 点以上を記録する。この記録から、供試体ごとに応力 - ひずみ曲線を作成する。

(3) 計算

静弾性係数は、次式によって算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c ：各供試体の静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 ：最大荷重の 1/3 に相当する応力 (N/mm²)

S_2 ：供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} の時の応力 (N/mm²)

ε_1 ：応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 ： 50×10^{-6}

4.4.2 試験結果および考察

静弾性係数試験の結果を図 4-3、4-4、4-5 に示す。コンクリートの静弾性係数の数値は、4.4.1 に示したとおり、圧縮強度の 1/3 の応力の点と 50×10^{-6} とを結んだ直線の勾配で表される割線弾性係数として算出した。

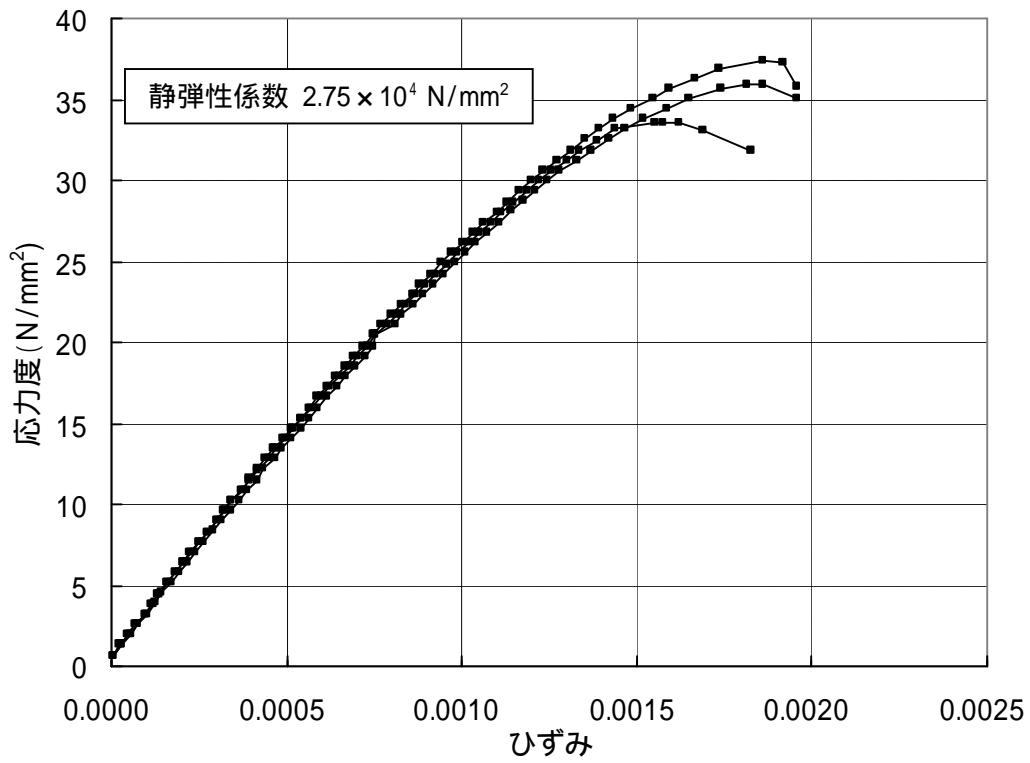


図 4-3 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの応力 - ひずみ曲線 (材齢4週)

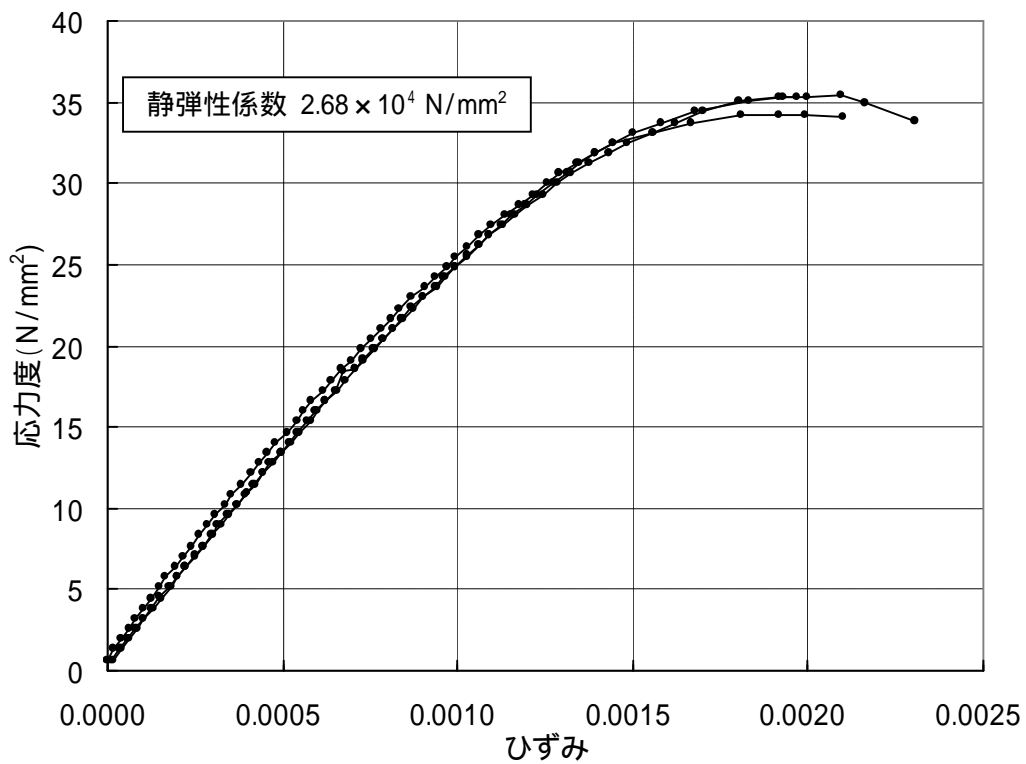


図 4-4 高炉セメントコンクリートの応力 - ひずみ曲線 (材齢4週)

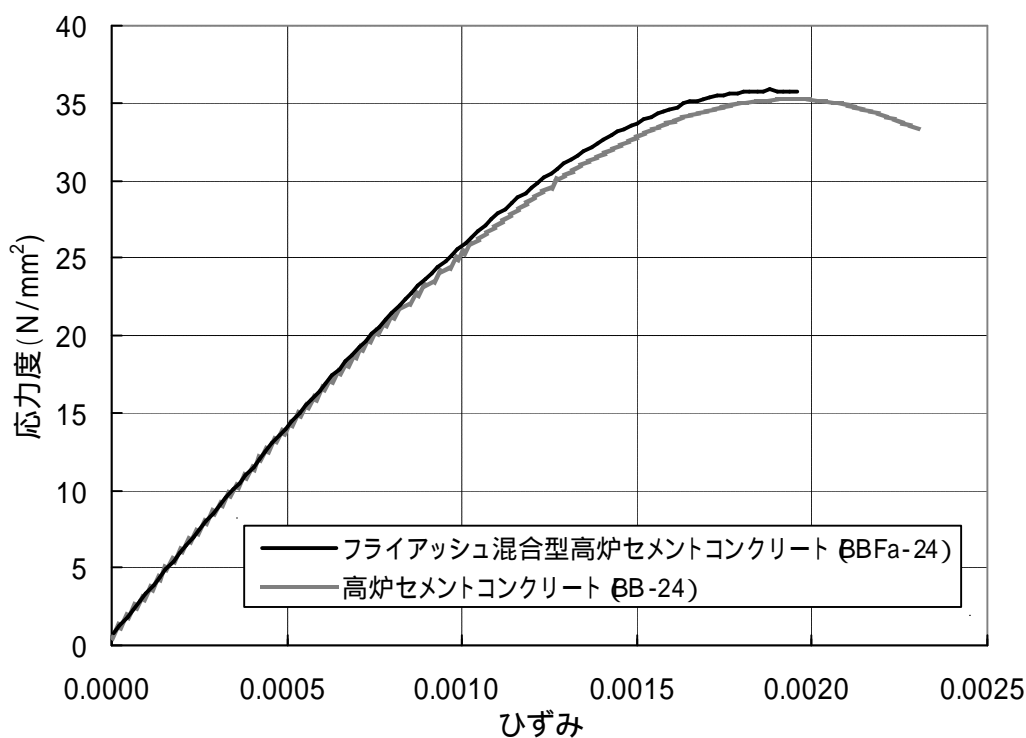


図4-5 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの応力 - ひずみ曲線の比較
(材齢4週)

これらの結果より、静弾性係数はフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとでほぼ同じであることがわかる。よって、フライアッシュ混和材の添加（置換率 20%）が静弾性係数に与える影響は少なく、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの静弾性係数は同等と考えられる。

4.5 まとめ

- (1) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートのフレッシュ性状に関して、適当な水結合材比や単位水量の設定、第3章で述べた特殊 AE 剤を用いる等の適切な配合設計を行えば、スランプおよび空気量を JIS の規格内に管理でき、必要なワーカビリティ、材料分離抵抗性も得られることが確認された。
- (2) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで、よく似た強度の発現性が確認された。両者で若干の強度差は見られるが、圧縮強度の標準偏差を考慮すると、7日、28日、56日材齢の強度発現に有意差はないと判断される。
- (3) 静弾性係数は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで同等であることが確認された。

第5章 水和熱による温度上昇特性

5.1 概要

セメントの水和熱による温度上昇およびその後の温度降下は、打設後のコンクリートに膨張・収縮挙動をもたらす。この際、コンクリートに引張応力が作用し、この引張応力が引張強度を上回る場合、コンクリートにひび割れが発生する。このひび割れを温度ひび割れといい、この温度ひび割れを抑制することが施工現場での課題となっている。

温度ひび割れの発生を抑制するためには、セメントの水和熱による温度上昇を低く抑えることが有効とされ、本研究では、フライアッシュ混和材を高炉セメントコンクリートに添加し、セメントの水和熱による温度上昇を抑制する方法を考案した。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度ひび割れ抑制効果を確認する目的で、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの水和熱による温度上昇特性の比較検証を行った。

5.2 簡易断熱温度上昇試験

5.2.1 試験方法

セメントの水和熱による温度上昇特性を把握する試験として、断熱温度上昇試験や簡易断熱上昇試験などがある。今回の試験では、試験方法が簡便かつ効率的な簡易断熱温度上昇試験を用いることとした。この試験の概要は以下のとおりである。

(1) 供試体および試験体の作成

試験に用いる供試体は、ペール缶(290mm×330mm)を用いることとし、この缶にコンクリートを充填する。コンクリートを充填し終えたら蓋をして、あらかじめ発砲スチロールで作成した簡易断熱上昇試験の装置にペール缶ごと納め、これを簡易断熱温度上昇試験の試験体とする。

(2) 試験体の保存

作成された試験体は、室内温度 20℃ の試験室に設置する。

(3) 測定

温度の測定は、試験体断面の中心線上部、中部、下部の3点で行い、ポータブルデータロガーで温度変化を連続的に記録する。

(4) 温度変化の測定期間

本研究における温度変化の測定は、打設直後から材齢 15 日まで連続的に行う。

5.2.2 試験ケース

簡易断熱温度上昇試験は、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第2章で示したBBFa-24とBB-24の配合を用いた。この試験に用いたコンクリートは、第4章のフレッシュ性状および硬化性状を検証した際のコンクリートで、フレッシュ性状は、第4章に示した以下のとおりであった。

表 5-1 簡易断熱上昇試験 試験ケース

コンクリートの種類		スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	8.5	4.9	20.0
BB-24	高炉セメントコンクリート	8.0	4.3	20.0

5.3 試験結果および考察

5.3.1 水和熱による温度上昇特性の比較検証

フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度ひび割れ低減効果を確認する目的で、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの水和熱による温度変化を比較検証した。

表 5-2 および図 5-1 に、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの温度変化の結果を示す。なお、ここで示すコンクリート温度は、測点3点（試験体断面の中心線上部、中部、下部）の温度を平均したものである。

表 5-2 最高温度と最高温度到達材齢の結果

コンクリートの種類		初期温度 ()	最高温度 ()	最高温度 到達材齢 (日)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	21.0	33.2	1.08
BB-24	高炉セメントコンクリート	21.4	35.7	0.98

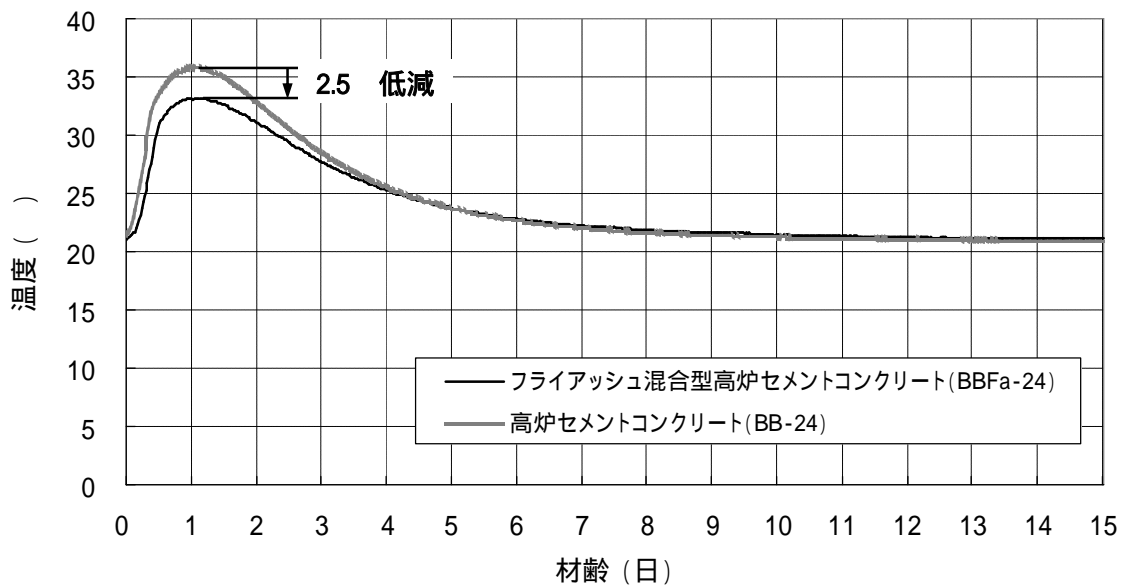


図 5-1 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの温度変化

この結果から、BB-24 が材齢 1 日弱で最高温度 35.7 に達し、BBFa-24 が材齢 1 日強で最高温度 33.2 に達した。フライアッシュ混和材を添加することで、最高温度が 2.5 低減されていることがわかる。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べてセメントの水和熱による温度上昇を低く制御できることが確認された。また、温度上昇勾配も高炉セメントコンクリートの方が大きくなった。

水和熱による温度上昇が大きければ大きいほど、温度上昇勾配が大きければ大きいほど、温度ひび割れの発生確率が高くなることから、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、温度ひび割れの発生確率を低減できるといえる。

5.3.2 呼び強度を変えたフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度上昇特性

5.3.1 では、同じ呼び強度 (BBFa-24 および BB-24) のフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの比較検証を行った。ここでは、呼び強度を変えた場合の温度上昇特性を把握する目的で、呼び強度 18 (BBFa-18) および呼び強度 30 (BBFa-30) のフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度上昇特性の検証を行った。

表 5-3 および図 5-2 に、呼び強度 18 (BBFa-18)、呼び強度 24 (BBFa-24) および呼び強度 30 (BBFa-30) のフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと呼び強度 24 (BB-24) の高炉セメントコンクリートの温度変化の結果を示す。

表 5-3 最高温度と最高温度到達材齢の結果

コンクリートの種類		初期温度 ()	最高温度 ()	最高温度 到達材齢 (日)
BBFa-18	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (呼び強度 18)	16.2	28.1	1.25
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (呼び強度 24)	21.0	33.2	1.08
BBFa-30	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (呼び強度 30)	20.1	32.6	1.00
BB-24	高炉セメントコンクリート	21.4	35.7	0.98

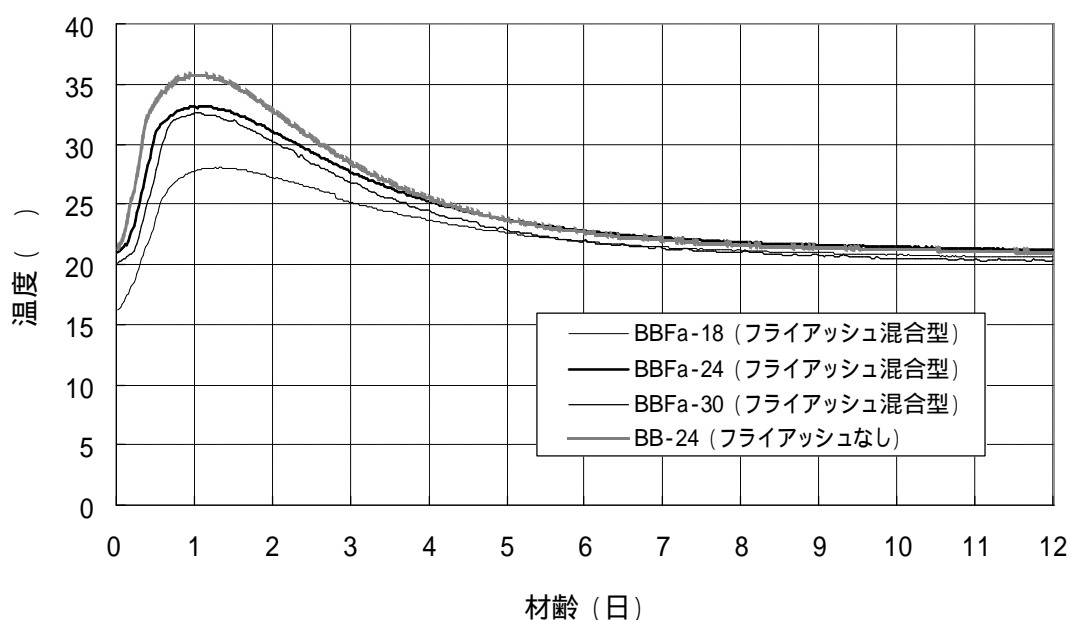


図 5-2 呼び強度を変えたフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度変化

この結果から、打設後のコンクリートの最高温度は BBFa-18 < BBFa-30 < BBFa-24 < BB-24 となった。今回の試験では、温度計測時の初期温度に差が生じていることから、コンクリートの最高温度は、BBFa-30 < BBFa-24 となっているが、最高温度と初期温度の差や既往の文献などから総合的に判断して、呼び強度が高くなればなるほど、すなわち結合材量に比例するかたちで、セメントの水和熱によるコンクリートの最高温度は高くなると推測される。いずれにせよ、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの呼び強度 18、24、30 の全てにおいて、呼び強度 24 の高炉セメントコンクリートの最高温度を下回る結果となり、あらためてフライアッシュを添加することによって、水和熱による温度上昇を低減できることが確認された。

5.4 まとめ

- (1) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて水和熱による温度上昇を低く制御でき、温度上昇勾配も小さくできる。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、温度ひび割れの発生確率を低減できる。
- (2) 呼び強度が高くなればなるほど、すなわち結合材量に比例するかたちで、水和熱によるコンクリートの最高温度は高くなると推測される。

第6章 乾燥収縮特性

6.1 概要

コンクリートは、打設後に乾燥することで収縮の挙動を示す。この際、コンクリートが何らかの拘束を受け、部材に発生する引張応力が引張強度を上回る場合、コンクリートにひび割れが発生する。このひび割れを乾燥収縮ひび割れといい、前章の温度ひび割れと同様に、乾燥収縮ひび割れを抑制することが施工現場での課題となっている。

乾燥収縮ひび割れを抑制するためには、乾燥収縮量をいかに低減するかが重要であり、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートによる乾燥収縮ひび割れの低減効果が期待された。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの乾燥収縮ひび割れの低減効果を確認する目的で、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの乾燥収縮特性の比較検証を行った。

6.2 乾燥収縮試験（長さ変化試験）

6.2.1 試験方法

今回の乾燥収縮試験は、「JIS A 1129-1：モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 - 第1部：コンパレータ法」に準じて行った。この試験の概要は以下のとおりである。

（1）供試体の作成

試験に用いる供試体の大きさは、断面が一辺100mmの正方形、長さが400mmとし、1回の試験で3本の供試体を用いる。

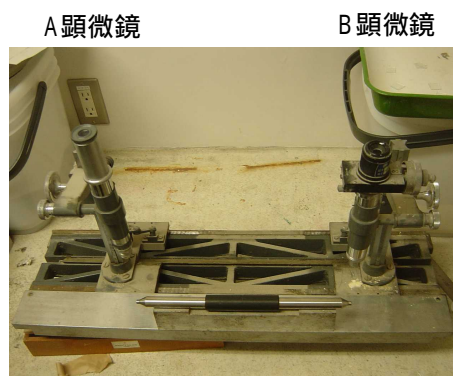


写真 6-1 コンパレータ

（2）標線乳色ガラスの取付

標線乳色ガラスは、測定用の標線を刻線するもので、供試体の脱型後、供試体の側面の中心線上でそれぞれの乳色ガラスの中心間の距離がほぼ基長（基長：あらかじめ設定した標線間の距離）となるように取り付ける。

（3）乾燥収縮ひずみの測定期間

標線乳色ガラスの取り付け後、ただちに第1回目の測定を行い、1回目の測定後、供試体を20℃の水中で養生し、材齢が7日になったときに第2回目の測定を行い、この時点を目録とする。第2回目の測定後、（4）に示す条件で保存し、本研究では材齢1週から材齢13週まで、1週ごとにひずみの測定を行う。

(4) 供試体の保存

保存期間中、供試体の周辺温度を 20 、湿度を 65% に保つ。

(5) 計算

長さ変化率は、次式によって算出する。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \times 100$$

ここに、 L : 長さ変化率 (%)

L_0 : 基長

X_{01} : 基準とした時点での測定値 1

X_{02} : 基準とした時点での測定値 2

X_{i1} : 所定材齢時の測定値 1

X_{i2} : 所定材齢時の測定値 2

長さの単位は、
同一とする。

6.2.2 試験ケース

乾燥収縮の試験も、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第 2 章で示した BBFa-24 と BB-24 の配合を用いた。乾燥収縮試験に用いたコンクリートも、第 4 章に示したフレッシュ性状および硬化性状を検証した際のコンクリートで、このフレッシュ性状は、以下のとおりであった。

表 6-1 乾燥収縮試験 試験ケース

コンクリートの種類		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	8.5	4.9	20.0
BB-24	高炉セメントコンクリート	8.0	4.3	20.0

6.3 試験結果および考察

フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの乾燥収縮ひび割れ低減効果を確認する目的で、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を比較検証した。

表 6-2 および図 6-1 に、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの材齢 13 週後までの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。

表 6-2 乾燥収縮試験の結果 (材齢 13 週)

コンクリートの種類		乾燥収縮ひずみ
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	753×10^{-6}
BB-24	高炉セメントコンクリート	1357×10^{-6}

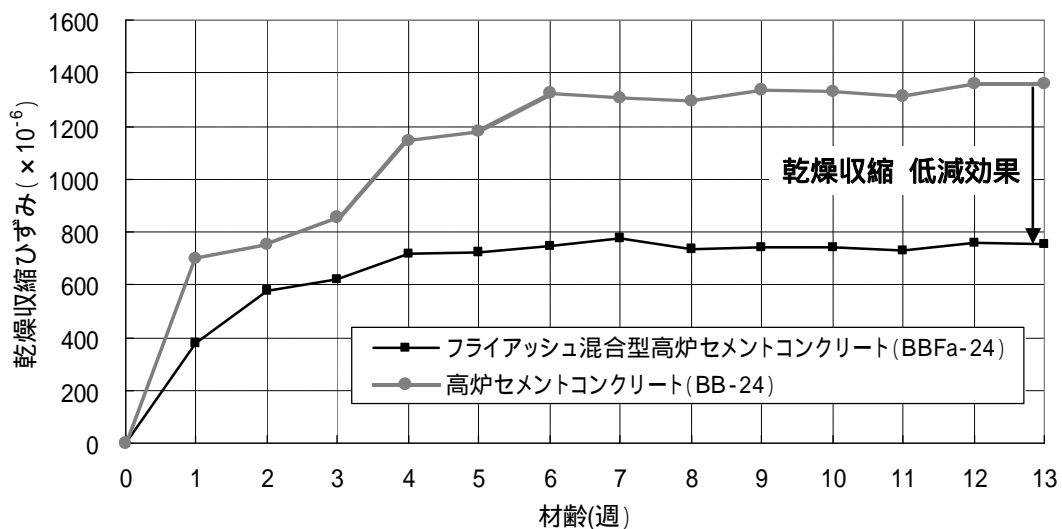


図 6-1 乾燥収縮ひずみの経時変化

この結果から、材齢 13 週の BBFa-24 の乾燥収縮ひずみは、BB-24 の乾燥収縮ひずみの約 1/2 になり、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べてセメントの乾燥収縮を大幅に低減することができる。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、乾燥収縮ひび割れの発生確率を大きく低減できるといえる。

6.4 まとめ

乾燥収縮試験の結果、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、乾燥収縮量を大幅に低減できることが確認された。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、乾燥収縮ひび割れの発生確率を低減できる。

第7章 凍結融解作用に対する抵抗性

7.1 概要

凍結融解作用は、コンクリート中の水分が凍結し、それが気温の上昇や日射を受けて融解するという現象である。コンクリート中の水が凍結する時の体積膨張とその逆の融解の繰り返しによってコンクリートの組織に圧縮と引張の繰り返し応力が発生し、それが次第に微細なひび割れを生じさせ、ついにはコンクリートの破壊に至る劣化をもたらす。このため、コンクリートの耐久性を検討するうえで、凍結融解に対する抵抗性を把握することは、無筋コンクリート構造物および有筋コンクリート構造物のいずれにおいても非常に重要である。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性について述べる。本研究では、高炉セメントコンクリートとの比較検証を通じて、凍結融解に対する抵抗性の評価を行うこととした。

7.2 凍結融解試験

7.2.1 試験方法

今回の凍結融解試験は、「JIS A 1148：コンクリートの凍結融解試験法（A法）」に準じて行った。この試験の概要は以下のとおりである。

（1）供試体

試験に用いる供試体の大きさは、断面が一辺 100mm の正方形、長さが 400mm とし、1 回の試験で 3 本の供試体を用いる。供試体の作成後、20 の水槽中において、28 日間養生を行う。

（2）供試体容器

凍結融解作用を負荷する際に用いる供試体容器は、凍結融解中常に約 3 mm 厚の水で供試体の全面が覆われるようなものとし、原則として内面に突起部を有するゴム製のものとする。

（3）凍結融解サイクル

28 日間の 20 水中養生後、凍結融解作用を負荷する。凍結融解の 1 サイクルは、供試体の中心部温度が 5 から -18 に下がり、また -18 から 5 まで上がるものとし、1 サイクルには 3 時間以上、4 時間以内の時間を要するものとする。また、凍結融解試験の終了は、300 サイクルとし、それまでに相対動弾性係数が 60% 以下になったものは、そのサイクルで終了とする。

(4) 計算

- ・ 相対動弾性係数

相対動弾性係数は、次式によって算出する。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100$$

ここに、 P_n ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数 (%)

f_n ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

f_0 ：凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

- ・ 質量減少率

質量減少率は、次式によって算出する。

$$W_n = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100$$

ここに、 W_n ：凍結融解 n サイクル後の質量減少率 (%)

w_n ：凍結融解 n サイクル後の供試体の質量 (g)

w_0 ：凍結融解 0 サイクルにおける供試体の質量 (g)

7.2.2 試験ケース

凍結融解の試験も、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第 2 章で示した BBFa-24 と BB-24 の配合を用いた。また、凍結融解試験に用いたコンクリートも、第 4 章に示したフレッシュ性状および硬化性状を検証した際のコンクリートで、このフレッシュ性状は、以下のとおりであった。

表 7-1 凍結融解試験 試験ケース

コンクリートの種類		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	8.5	4.9	20.0
BB-24	高炉セメントコンクリート	8.0	4.3	20.0

7.3 試験結果および考察

7.3.1 相対動弾性係数の比較検証

凍結融解試験における各サイクルの相対動弾性係数および相対動弾性係数の経時変化を以下に示す。

表 7-2 相対動弾性係数の結果

コンクリートの種類		相対動弾性係数 (%)		
		92 サイクル	185 サイクル	300 サイクル
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	92	87	81
BB-24	高炉セメントコンクリート	90	85	72

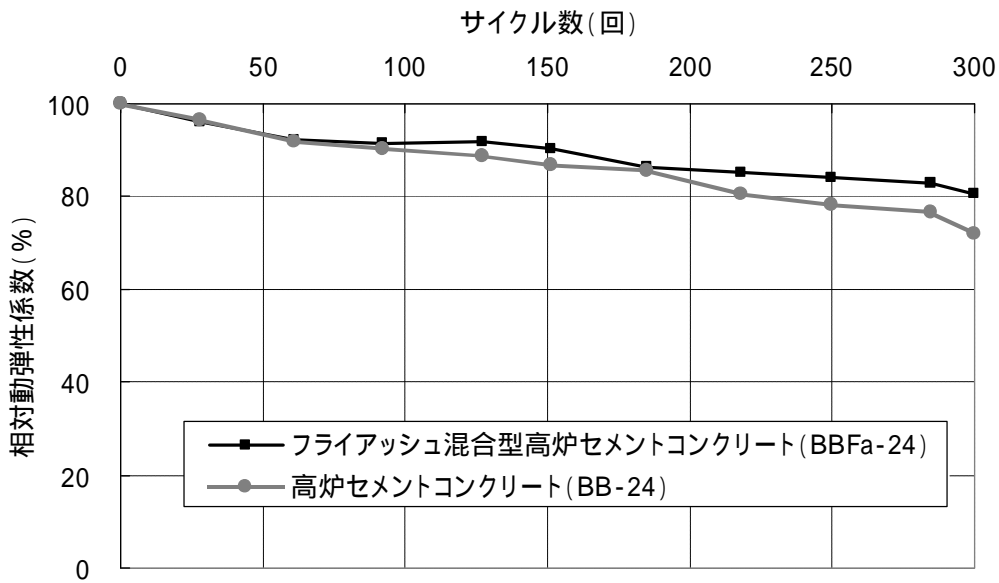


図 7-1 相対動弾性係数の経時変化

凍結融解 300 サイクル後の相対動弾性係数の平均は、BBFa-24 で 81%、BB-24 で 72% となり、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が相対動弾性係数は大きくなることが確認された。このことから、凍結融解作用に対する抵抗性に大きな影響を与える空気量を適切に管理すれば、フライアッシュの添加が相対動弾性係数に与える悪い影響はなく、むしろ同一呼び強度で水結合材比が小さくなるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて相対動弾性係数が大きくなるという結果が得られた。

7.3.2 質量減少率の比較検証

凍結融解試験における各サイクルの質量減少率および質量減少率の経時変化を以下に示す。

表 7-3 質量減少率の結果

コンクリートの種類		質量減少率 (%)		
		92 サイクル	185 サイクル	300 サイクル
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	0.8	2.2	4.0
BB-24	高炉セメントコンクリート	0.8	1.5	2.1

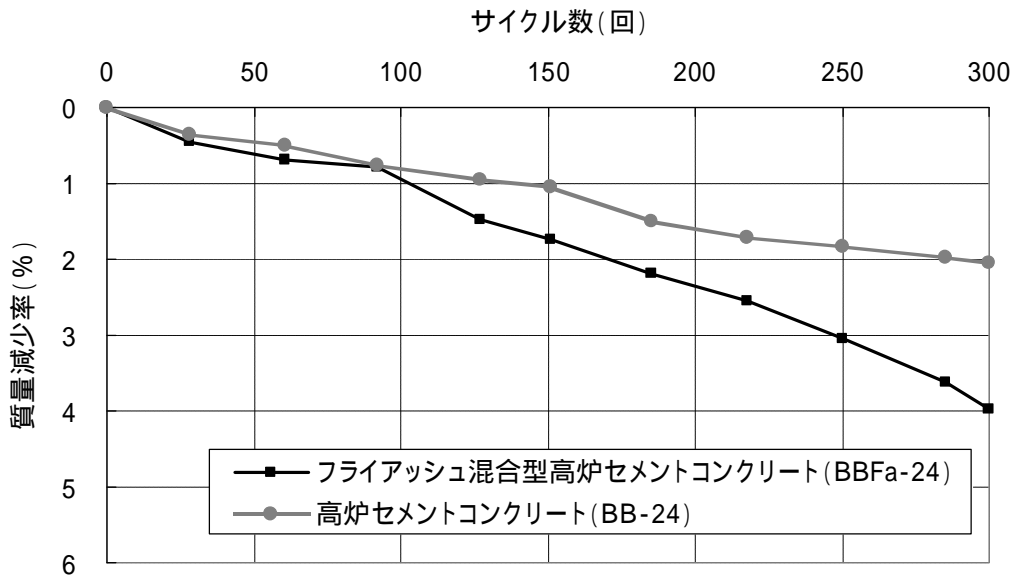


図 7-2 質量変化率の経時変化

質量減少率は BBFa-24 で 4.0%、BB-24 で 2.1% になった。また、BB-24 では緩やかな勾配で質量変化率が大きくなっているが、BBFa-24 ではあるサイクル数で急激に質量変化率が大きくなる傾向を示した。

質量減少率は、BBFa-24 が BB-24 より大きくなったが、これは供試体表面のコンクリートが凍結融解によって剥がれ落ちてしまったからである。フライアッシュは水和反応による乾燥開始が遅く、前述の動弾性係数試験の結果から内部微細構造はフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方がより緻密であると考えられるため、凍結融解による破壊が外周部に集中する傾向にあると考えられる。耐久性の上で、表面剥離の傾向が強いというデータは問題が生じるように思われがちであるが、一般に凍結融解抵抗性で重視されるのは相対動弾性係数の方である。また、この試験の基準となった繰り返しサイクル 300 回という基準は北海道地方よりも厳しい想定(札幌地域では厳寒期の平均気温がマイナス 8.4 で、ASTM ないし JIS 条件の凍結融解に至る回数は年間およそ 2 回)で行われるものであるため、福井県内での使用には寒冷地であっても問題はないと思われる。

7.4 まとめ

- (1) 相対動弾性係数は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて高くなった。
- (2) 質量減少率は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて大きくなった。しかしながら、この試験の基準や質量減少率の値から判断して、福井県内での使用には寒冷地であっても問題はないと判断される。

第 8 章 中性化に対する抵抗性

8.1 概要

コンクリートの表面に存在する水酸化カルシウムは、空気中に存在する二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを生成し、pH の低下をもたらす。空気中の二酸化炭素は、次々と多量に供給されるため、炭酸カルシウムを生じる領域は次第にコンクリートの内部に進行していく。これをコンクリートの中性化とよび、この中性化領域が鉄筋にまで至ると鉄筋の腐食をもたらす。このため、コンクリートの耐久性、なかでも有筋コンクリート構造物の耐久性を検討するうえで、中性化に対する抵抗性を把握することは非常に重要である。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中性化に対する抵抗性について述べる。本研究では、高炉セメントコンクリートとの比較検証を通じて、中性化に対する抵抗性の評価を行うこととした。

8.2 中性化試験

8.2.1 試験方法

今回の中性化試験は、「JIS A 1153：コンクリートの促進中性化試験」に準じて行った。この試験の概要は以下のとおりである。

(1) 供試体

試験に用いる供試体の大きさは、断面が一辺 100mm の正方形、長さが 400mm とし、1 回の試験で 3 本の供試体を用いる。供試体は脱型後、材齢 4 週まで 20 の湿潤状態で養生を行う。(本研究では、水槽中において 28 日間養生を行うこととした。)材齢 4 週後、温度 20 、相対湿度 60% の恒温恒湿室に材齢 8 週まで静置する。

(2) 中性化の促進方法

中性化の促進条件は、温度 20 、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5 % とする。

(3) 中性化深さの測定方法

測定面は、所定の促進期間に達した時点で供試体の長さ方向と直角に供試体を端部から約 60mm の位置で割裂または切断した面とし、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧して赤紫色に呈色しない部分を中性化深さとして測定する。なお、この測定は、打設面、下面、両側面の 4 断面で行う。

(4) 中性化深さの測定期間

本研究における中性化深さの測定は、材齢 4 週、8 週、13 週で行う。

8.2.2 試験ケース

中性化試験も、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第2章で示した BBFa-24 と BB-24 の配合を用いた。また、中性化試験に用いたコンクリートのフレッシュ性状を以下に示す。

表 8-1 促進中性化試験 試験ケース

コンクリートの種類		スランプ (cm)	空気量 (%)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	9.5	4.7
BB-24	高炉セメントコンクリート	9.5	2.5

8.3 試験結果および考察

8.3.1 中性化進行速度の比較検証

以下に促進中性化試験の結果を示す。中性化深さは、打設面、下面、両側面の平均値を算出した。

表 8-2 促進中性化試験の結果

コンクリートの種類		中性化深さ (mm)		
		4 週	8 週	13 週
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	6.3	12.1	15.8
BB-24	高炉セメントコンクリート	4.6	7.8	11.3

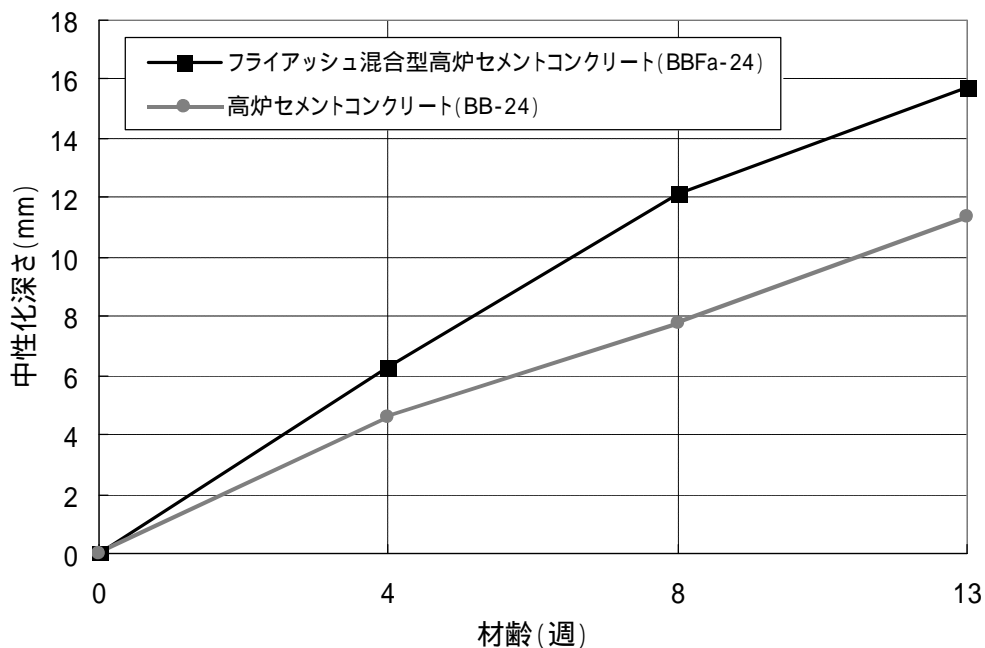


図 8-1 促進中性化試験における中性化深さの経時変化

この結果から、BBFa-24の方がBB-24に比べて中性化の進行が早いことが確認され、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは高炉セメントコンクリートに比べて、中性化の進行が早いといえる。

8.3.2 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (BBFa-24) の鉄筋かぶりの設計

8.3.1 で示した比較検証の結果から、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートより中性化しやすいという結果となった。

ここでは、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (BBFa-24) を自然環境下におかれた実構造物に適用した際にどの程度の速度で中性化が進むかの算出を行うほか、コンクリート標準示方書〔施工編〕を参照にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (BBFa-24) を用いる場合の鉄筋かぶりの設計を行った。

(1) 自然環境下での中性化速度係数の算出および中性化の将来予測

促進中性化試験環境下での中性化速度係数の算出

一般に、中性化深さ C は経過時間の平方根 t に比例することがわかっており、以下の式で表される。

$$C = A\sqrt{t}$$

ここに、 C : 中性化深さ、 A : 中性化速度係数、 t : 経過時間

図 8-2 に促進中性化試験の結果を用いて算出した、促進中性化試験環境下におけるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中性化進行予測曲線を示す。この中性化進行予測曲線の算定については、材齢 8 週および 13 週の中性化深さのデータを用いて安全側に算出した。

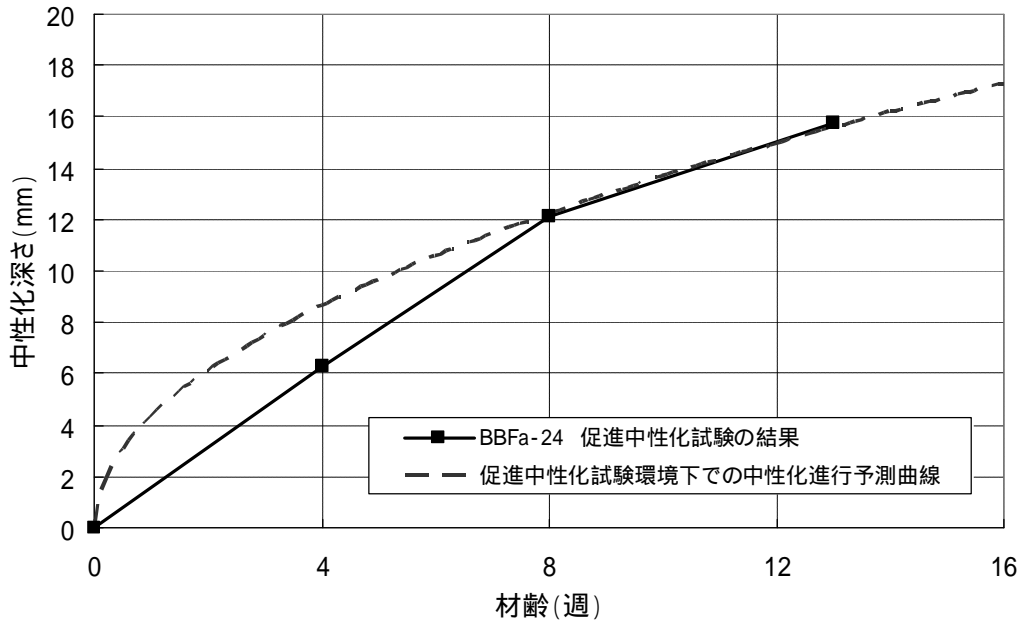


図 8-2 促進中性化試験環境下でのフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中性化進行予測曲線 (BBFa-24)

この結果から、促進中性化試験環境下における中性化進行予測曲線は、以下のよう
に表される。

$$C = 31.25 \times \sqrt{t} \quad (C : \text{mm}, t : \text{年})$$

自然環境下での中性化速度係数の算出と中性化の将来予測

「日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解析」では、促進中性化試験で得られた結果を基準に、任意の二酸化炭素濃度環境下における中性化速度係数の算出式を以下のように示している。

$$A = \sqrt{\frac{CO_2}{5}} \times A'$$

ここに、 A : 任意の二酸化炭素濃度環境下での中性化速度係数

CO₂ : 任意の二酸化炭素濃度 (%)

A' : 促進中性化試験から得られた中性化速度係数

上記の式を用いることにより、自然環境下（任意の二酸化炭素濃度環境下での算定が可能）での中性化の進行に関する評価を行うことができる。一般に、自然環境下での二酸化炭素濃度は、およそ 0.03% とされ、自然環境下での中性化速度係数および中性化進行予測曲線は以下のとおりになる。

$$A = \sqrt{\frac{CO_2}{5}} \times A' = \sqrt{\frac{0.03}{5}} \times 31.25 = 2.421 \quad \text{自然環境下での中性化速度係数 (mm/年)}$$

$$C = 2.421 \times \sqrt{t} \quad (C : \text{mm}, t : \text{年})$$

ここで得られた中性化速度係数を用いて、自然環境下でフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを使用したコンクリートの中性化進行予測グラフを以下に示す。この結果、自然環境下では材齢 50 年で 17.1mm、材齢 100 年で 24.2mm の中性化の進行が生じると予想される。

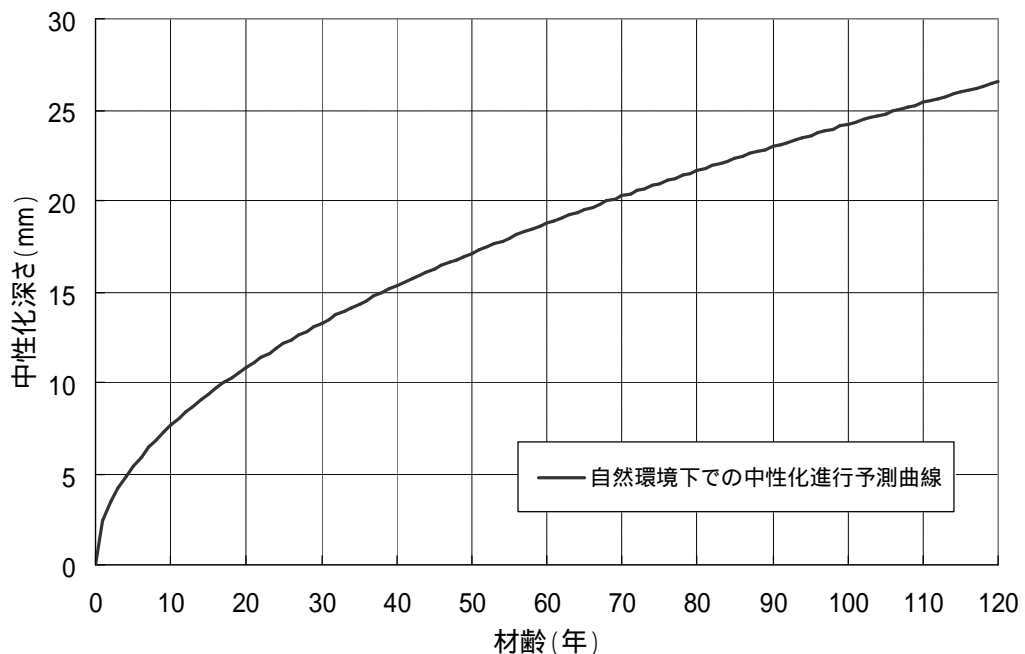


図 8-3 自然環境下でのフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中性化進行予測曲線 (BBFa-24)

(2) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (BBFa-24) の鉄筋かぶりの設計

中性化に対する鉄筋かぶりの照査方法

コンクリート標準示方書〔施工編〕では、中性化に関する鉄筋かぶりの照査方法として、以下のように示している。

中性化に関する鉄筋かぶりの照査は、「中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行ってよい。」

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0$$

ここに、 i : 構造物係数

y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ $y_{lim} = C - C_K$

C : かぶりの期待値、一般に、設計かぶり (mm)

C_K : 中性化残り (mm)

y_d : 中性化深さの設計値 $y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$

d : 中性化速度係数の設計値 (mm/年) $d = K \cdot e \cdot C$

K : 中性化速度係数の特性値

e : 環境作用の程度を表す係数

cb : 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数

c : コンクリートの材料係数

鉄筋かぶりの設計

で示した照査方法を用いてフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの鉄筋かぶりの設計を行う。鉄筋かぶりの算定は、で示した照査法から C (かぶりの期待値) を逆算するかたちで算定することとした。

表 8-3 に鉄筋かぶりの算定を行うにあたっての諸条件、表 8-4 に算定の結果を示す。

表 8-3 鉄筋かぶりを設計するうえでの諸条件

設定項目	設定値	備考
i 構造物係数	1.0	
C_K 中性化残り (mm)	10	
K 中性化速度係数の特性値	2.421	8.2.2 (1) より
e 環境作用の程度を表す係数	1.6	乾燥しやすい環境 南向きの面
cb 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数	1.15	
c コンクリートの材料係数	1.0	
d 中性化速度係数の設計値	3.874	$= K \cdot e \cdot C$

表 8-4 鉄筋かぶりの算定結果

耐用年数	鉄筋かぶりの設計値	備考
50 年	41.5mm	$y_d = 4.454\sqrt{t}$ (y_d : mm、 t : 年)
75 年	48.6mm	
100 年	54.5mm	

この結果から、耐用年数を 100 年とした構造物で、鉄筋かぶりを 54.5mm 以上に設計すれば、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの使用に支障がないことがわかる。

実際の設計などで用いられる「社団法人全日本建設技術協会：土木構造物設計ガイドライン」などでは、主鉄筋中心からコンクリート表面までのかぶりは 10cm を標準としており、このことから、通常の鉄筋かぶりを設けた構造物において、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いても、実用上は問題ないと判断される。

8.4 まとめ

- (1) 中性化の進行は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて早い。
- (2) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの自然環境化での中性化進行速度、必要となる鉄筋かぶりを算定した結果、鉄筋かぶり厚の設計および施工管理を確実に行えば、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いても、実用上は問題が無いと考えられる。

第9章 塩害に対する抵抗性

9.1 概要

塩害とは、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れやはく離を引き起こしたり、鋼材の断面減少などを引き起こすことにより、構造物の諸性能が低下する現象である。塩化物イオンは海水や凍結防止剤などのように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合とがある。このうち、コンクリート製造時に材料から供給される塩化物イオンについては、1986年の塩化物総量規制が徹底されて以降、問題になることはほとんどなく、第12章に示すとおり、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに内在する塩化物量も塩化物総量規制値(0.30kg/m³)を大きく下回る。これに対して、外部環境から供給される塩分は潮風等によってコンクリート中に供給され続け、特に福井県をはじめとする北陸地方などでは日本海からの潮風の影響を受けやすいことから、外来塩分によってもたらされる塩害に対して抵抗性を確保することが重要である。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの塩害に対する抵抗性について述べる。本研究では、高炉セメントコンクリートとの比較検証を通じて、塩害に対する抵抗性の評価を行うこととした。

9.2 塩水浸漬試験

9.2.1 試験方法

塩害に対しての抵抗性を検証する試験は、現段階で規格化されておらず、各研究機関で独自に試験方法を定めている状況にある。よって、本研究では以下の方法で試験をすすめた。

(1) 供試体

試験に用いる供試体の大きさは、断面が一辺100mmの正方形、長さが400mmとし、1回の試験で3本の供試体を用いる。供試体の作成後、20℃の水槽中において、28日間養生を行う。

(2) 塩水浸漬方法

塩分3%濃度の塩水を2日浸漬、2日乾燥を1サイクルとして塩水の浸漬を繰り返す。

(3) 塩分浸透深さの測定方法

塩素イオンの浸透深さの測定は、供試体の長さ方向と直角に供試体の切断を行い、吸光度法によって測定を行う。

(4) 塩分浸透深さの測定期間

本研究において、塩分浸透深さの測定は、材齢4週および13週で行う。

9.2.2 試験ケース

塩水浸漬試験は、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第2章で示したBBFa-24とBB-24の配合を用いた。試験に用いたコンクリートのフレッシュ性状は、促進中性化試験に用いたコンクリートと同じで、以下のフレッシュ性状を示した。

表 9-1 塩水浸漬試験 試験ケース

コンクリートの種類		スランプ (cm)	空気量 (%)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	9.5	4.7
BB-24	高炉セメントコンクリート	9.5	2.5

9.3 実験結果および考察

以下に塩水浸漬試験の結果を示す。

表 9-2 塩水浸漬試験の結果

コンクリートの種類		塩分浸透深さ (mm)	
		4週	13週
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	7.5	11.8
BB-24	高炉セメントコンクリート	7.6	11.9

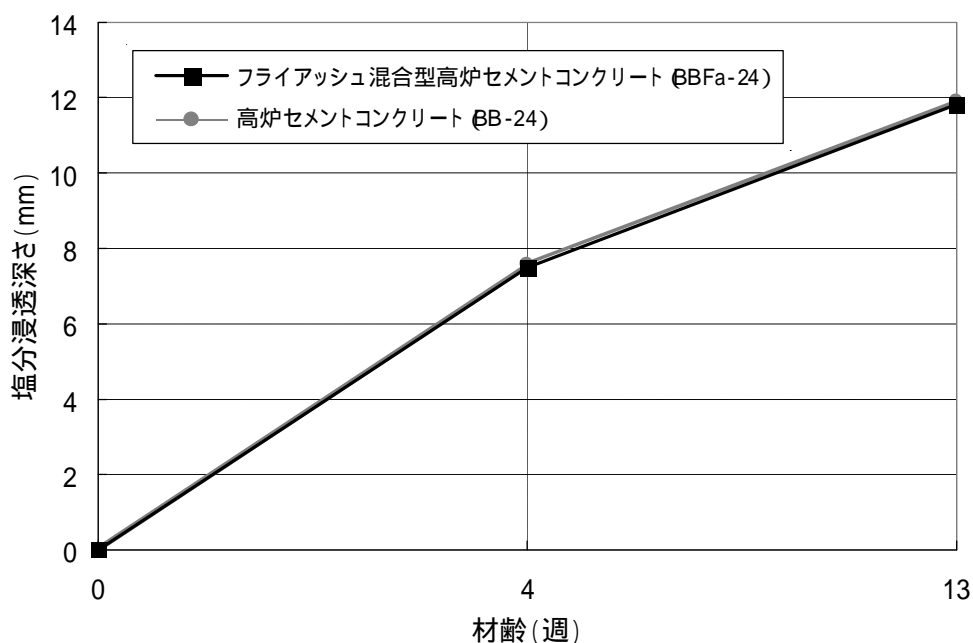


図 9-1 塩分浸透深さの経時変化

これらの結果から、塩分の浸透程度は BBFa-24 と BB-24 でほぼ同等であることが確認された。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの塩害に対する抵抗性はほぼ同等であるといえる。

9.4 まとめ

塩害に対する抵抗性は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで、ほぼ同等であるといえる。

第 10 章 アルカリ骨材反応に対する抵抗性

10.1 概要

アルカリ骨材反応とは、コンクリート中のアルカリ成分と反応性鉱物を含有する骨材が反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させる現象である。アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩反応があり、我が国では、主にアルカリシリカ反応の劣化現象が報告されている（以下、このアルカリシリカ反応をアルカリ骨材反応と称す）。このアルカリ骨材反応を抑制するため、コンクリート標準示方書や JIS 規格等では、次のいずれかの対策を講じなければならないと定めており、一定以上の高炉スラグ分量（高炉スラグの分量で 40%以上）を有する高炉 B 種コンクリートは、アルカリ骨材反応を抑制する効果が認められている（下記 の抑制対策に相当）。

アルカリ骨材反応(アルカリシリカ反応)の抑制対策
コンクリート中のアルカリ総量を抑制する。
抑制効果のある混合セメント（高炉セメントなど）等を使用する。
安全と認められる骨材を使用する。

本章では、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートのアルカリ骨材反応に対する抵抗性について述べる。本研究では、既にアルカリ骨材反応に対する抑制効果が認められている高炉セメントコンクリートとの比較検証を通じて、アルカリ骨材反応に対する抵抗性の評価を行った。

10.2 アルカリ骨材反応性試験

10.2.1 試験方法

今回の試験は、「JIS A 1146：骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）」に準じて行うこととし、「無害でない」と判定された骨材を用いて、フライアッシュ混合型コンクリートおよび高炉セメントコンクリートをベースとしたモルタルのアルカリ骨材反応による膨張量（長さ変化）の比較検証を行った。この試験の概要は、以下のとおりである。

（１）供試体

試験に用いる供試体の大きさは、断面が一辺 40mm の正方形、長さが 160mm とし、1 回の試験で 3 本の供試体を用いる。

（２）骨材

本試験では、「無害でない」と判定された粗骨材を用い、あらかじめ洗浄した後、絶乾状態として粉碎して細骨材とし、粒度調整を行ったうえで表乾状態とする。

(3) モルタルの配合

モルタルの配合は、高炉セメントコンクリートをベースとした配合で、セメント 1、水 + NaOH 水溶液 0.5、表乾状態の細骨材 2.25、またフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートをベースとした配合で、セメント 0.8、フライアッシュ混和材 0.2、水 + NaOH 水溶液 0.5、表乾状態の細骨材 2.25 の質量混合比とする。NaOH 水溶液の量は、結合材(セメント + フライアッシュ)の全アルカリが $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で 1.2% となるように計算して定める。

(4) 供試体の貯蔵

供試体は、密閉した容器に温度 40℃、相対湿度 95% 以上で貯蔵する。

(5) 長さ変化の測定方法

本研究における長さ変化の測定は、第 6 章で示した「JIS A 1129-1: モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 - 第 1 部: コンパレータ法」に準じて行い、膨張率を算出する。

(6) 長さ変化(膨張率)の測定期間

本研究における長さ変化の測定は、脱型時、材齢 2 週、4 週、8 週で行う。

10.2.2 試験ケース

アルカリ骨材反応に対する抵抗性の評価試験は、「無害でない」と判定された骨材を用いて、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの配合をベースとしたモルタルと高炉セメントコンクリートの配合をベースとしたモルタルとで比較検証を行うこととした。また、試験体のアルカリ量は結合材(セメント + フライアッシュ)の全アルカリが $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で 1.2% となるように調整した。表 10-1 に、試験に用いたモルタルの配合を示す。

表 10-1 アルカリ骨材反応性試験(モルタルバー法) 試験ケース

モルタルの種類	配合 (g)			
	セメント	フライアッシュ	水 + NaOH	細骨材
フライアッシュ混合型高炉セメントモルタル	480	120	300	1350
高炉セメントモルタル	600		300	1350

10.3 実験結果および考察

以下にアルカリ骨材反応性試験の結果を示す。

表 10-2 アルカリ骨材反応性試験(モルタルバー法) 試験結果

モルタルの種類	膨張率 (%)		
	2 週	4 週	8 週
フライアッシュ混合型高炉セメントモルタル	- 0.040	- 0.078	- 0.046
高炉セメントモルタル	0.045	0.009	0.029

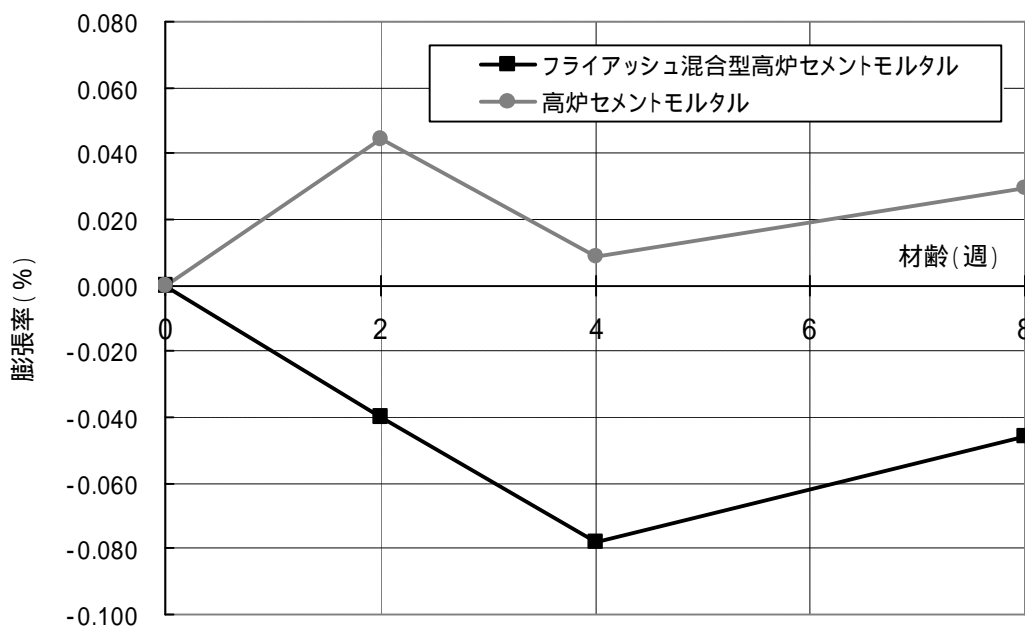


図 10-1 モルタルバー法による膨張率の経時変化

この結果から、膨張および収縮を繰り返す経時変化となり、収縮をもたらさない試験条件下において収縮が見られるという本来発生しないはずの事象が生じた。試験室内の湿度条件が一定でなかったなどの不備が考えられ、試験精度そのものが疑わしいといえる。

しかしながら、同じ環境条件下での定性的な傾向として膨張量は高炉セメントコンクリート（高炉セメントモルタル）の方が大きくなる傾向が確認され、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは高炉セメントコンクリートと同等以上にアルカリ骨材反応を抑制する効果があると推測される。また、高炉スラグの分量 40%（質量%）以上の高炉セメントおよびフライアッシュの分量 15%（質量%）以上のフライアッシュセメントを用いたコンクリートでは、アルカリ骨材反応を抑制する効果が既に確認されており、この高炉セメントとフライアッシュの両者を組み合わせたフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートにおいても、アルカリ骨材反応を抑制する特性をもつと推測される。

今後あらためて、試験方法を検討し直して再試験を行い、信頼性の高いデータを取得す

る予定である。

10.4 まとめ

アルカリ骨材反応性試験において、膨張量は高炉セメントコンクリートの方が大きくなる傾向が確認された。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは高炉セメントコンクリートと同等以上にアルカリ骨材反応を抑制する効果があると推測される。

しかしながら、今回の試験は試験精度そのものが疑わしく、再試験が必要である。

第 11 章 模擬マスコンクリートの施工実験

11.1 概要

本章では、室内試験の実験スケールから実際の施工スケールに近づけて、水和熱による温度上昇特性およびひずみ変化を検証する目的で、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリートの模擬マスコンクリート試験体を暑中期に打設した。また、今回の試験では、生コンクリート工場にてコンクリートの製造および運搬を行い、打設現場でのフレッシュ性状の確認もあわせて行った。

11.2 施工実験の実施方法

11.2.1 試験方法

今回の施工実験は、以下の手順で行うこととした。

(1) マスコンクリート試験体

福井大学の構内に、1000mm×1000mm×1000mm のキュービック形状の木製型枠を 2 箇所設置。それぞれ、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリート用とする。

(2) コンクリートの製造および運搬

福井宇部生コンクリート株式会社 芦原工場において、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリートの製造および運搬を行う。また、打設現場にてフレッシュ性状の試験（スランプ試験、空気量試験、コンクリート温度の測定）を行ったうえで打設を行う。



写真 11-1 コンクリートの打設状況

(3) 温度測定およびひずみ測定

温度測定およびひずみの測定は、コンクリートの打設直後から温度およびひずみが安定するまで連続して行う。温度測定点およびひずみ測定点は、以下のとおりである。なお、この試験では脱型によるノイズの発生などを懸念して、実験期間中、型枠は存置することとした。

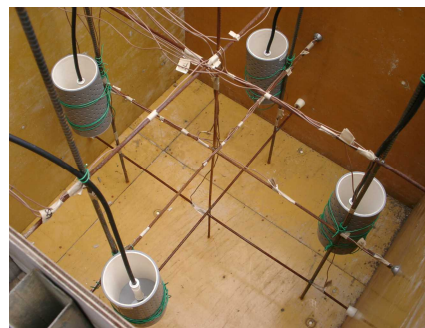


写真 11-2 温度およびひずみ測定器

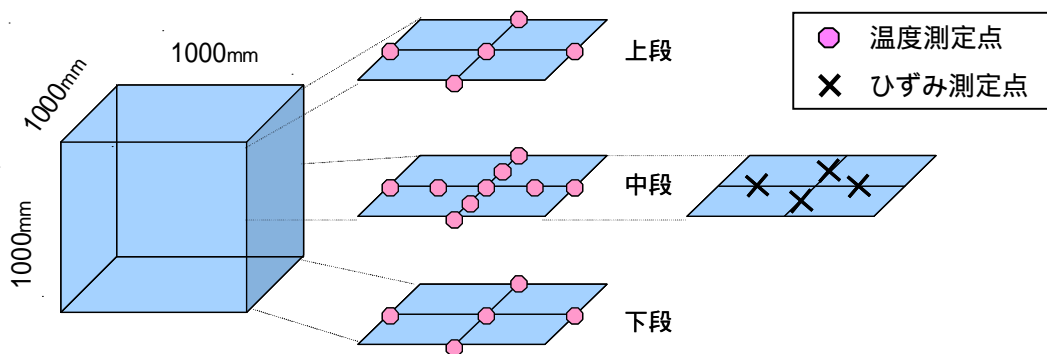


図 11-1 温度およびひずみ測定位置

11.2.2 試験ケース

この模擬マスコンクリートの施工実験も、呼び強度が同じであるフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで比較検証を行うこととし、第2章で示した BBFa-24 と BB-24 の配合を用いた。生コンクリートの製造は、福井宇部生コンクリート株式会社 芦原工場において製造し、福井大学までトラックアジテータで運搬を行った。

11.3 試験結果および考察

11.3.1 打設現場でのコンクリートのフレッシュ性状

以下に、打設したコンクリートのフレッシュ性状等を示す。

表 11-1 コンクリート性状試験の結果

種別	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート	
配合 (略称)	24-8-25BB+フライアッシュ (BBFa-24)	24-8-25BB (BB-24)	
打設日時	平成 17 年 8 月 20 日 13 時 15 分	平成 17 年 8 月 20 日 14 時 00 分	
混練りから荷卸しまでの 経過時間 (分)	35 分	35 分	
コンクリート温度 ()	33.0	33.0	
スランプ (cm)	9.5	7.5	
空気量 (%)	4.4	4.1	
圧縮強度 試験	7 日材齢 (N/mm ²)	18.6	20.2
	28 日材齢 (N/mm ²)	33.2	32.7

フレッシュ性状試験の結果、暑中期の製造および運搬を伴っても、生コン工場において適切な配合設計および品質管理を行えば、打設現場（荷卸し場所）において、JIS の規格を十分に満たすことが確認された。また、圧縮強度についても呼び強度を十分に上回り、問題ないことが確認された。

11.3.2 水和熱による温度上昇特性の比較検証

表 11-2、表 11-3 に中心部および東面 - 中段の水和熱による最高温度および最高温度に到達する材齢を示す。また、表 11-4 に中心部と東面の最大温度差およびこの温度差が最も大きくなった時の材齢を示す。

図 11-2、図 11-3 に中心部および東面 - 中段の温度変化のグラフを示す。また、図 11-4 にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中心部と東面 - 中段の温度変化のグラフ、さらに図 11-5 に高炉セメントコンクリートの中心部と東面 - 中段の温度変化のグラフを示す。

表 11-2 中心部における最高温度と最高温度到達材齢

コンクリートの種類		最高温度 ()	最高温度 到達材齢 (日)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	55.2	1.25
BB-24	高炉セメントコンクリート	59.7	1.19

表 11-3 東面-中段における最高温度と最高温度到達材齢

コンクリートの種類		最高温度 ()	最高温度 到達材齢 (日)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	46.3	1.31
BB-24	高炉セメントコンクリート	47.3	1.44

表 11-4 中心部と東面-中段と最高温度差および最高温度差が生じる材齢

コンクリートの種類		最高温度差 ()	最高温度差が 生じる材齢 (日)
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	11.1	1.25
BB-24	高炉セメントコンクリート	14.4	1.25

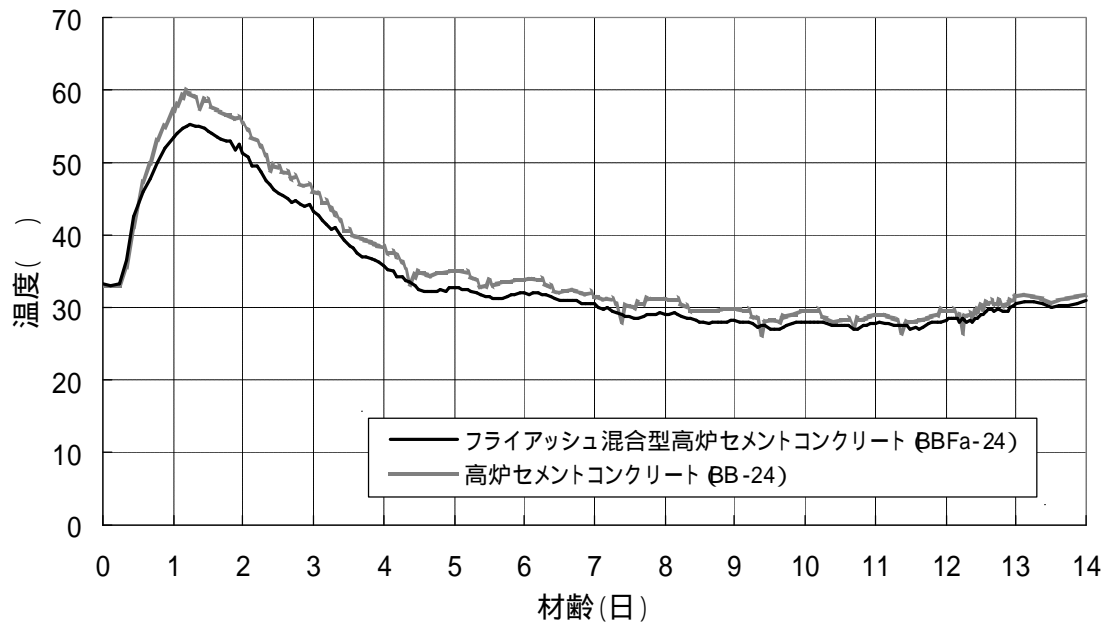


図 11-2 中心部における温度変化

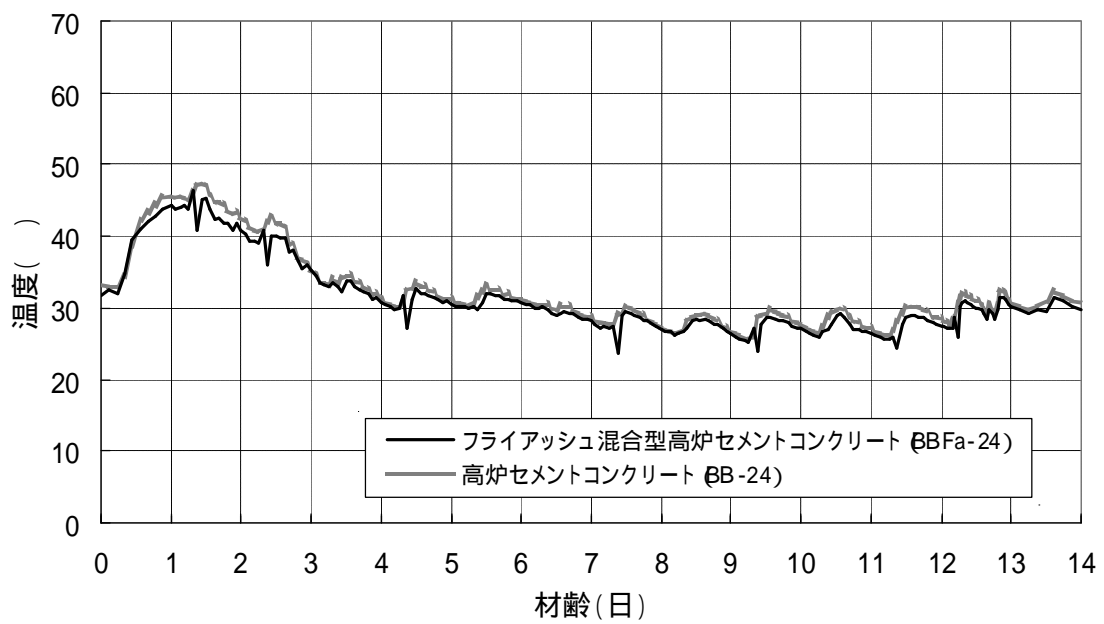


図 11-3 東面 - 中段における温度変化

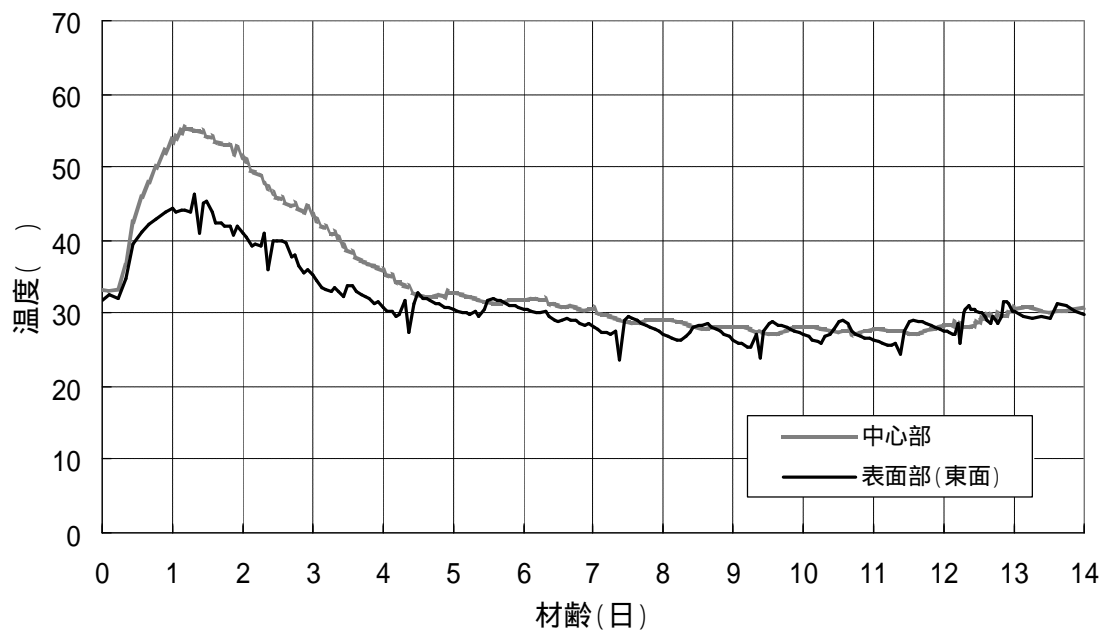


図 11-4 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの中心部と表面部(東面 - 中段)の温度変化

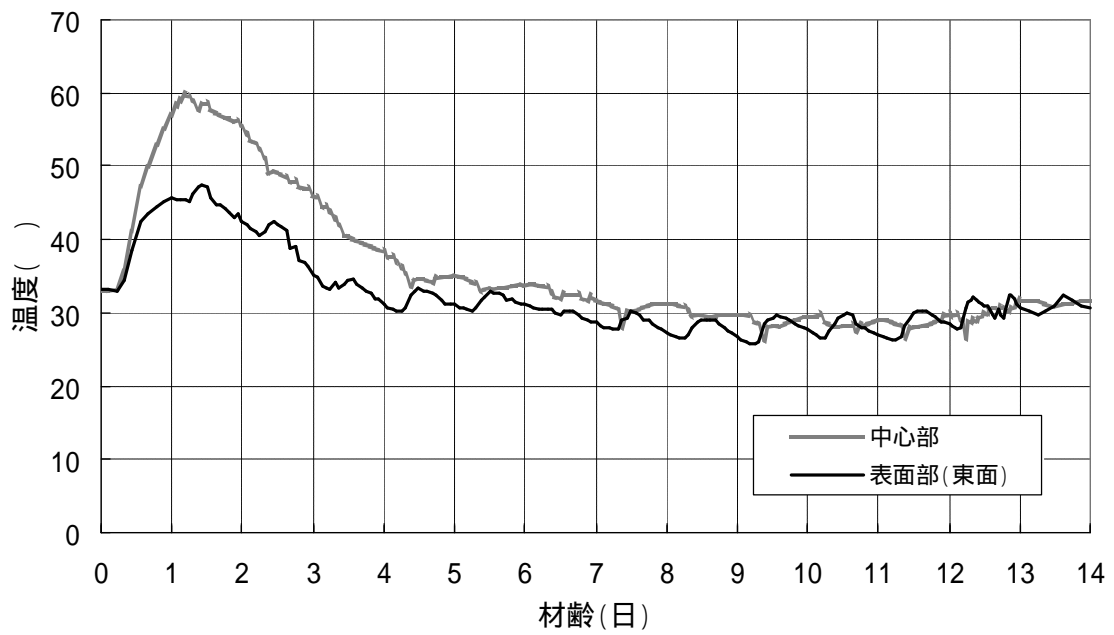


図 11-5 高炉セメントコンクリートの中心部と表面部(東面 - 中段)の温度変化

これらの結果から、全体的に高炉セメントコンクリートよりもフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が水和熱による温度上昇が小さいという予想通りの結果が得られた。第 5 章で述べた簡易断熱温度上昇試験で用いられた 20 リットル缶と比較すると、20 リットル缶ではフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの最高温度の差が 2.5 であったの対して、今回行ったマスコンクリート試験体では、中心部において約 5 も温度差が生じた。そのため、大きなコンクリートになればなるほど大きな効果が期待できると予想される。

また、中心部と表面部の温度差についても、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートよりも高炉セメントコンクリートの方が大きく、このことが温度ひび割れを誘発させる原因になっていると思われる。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いれば、中心部と表面部の温度差を小さくでき、温度ひび割れの発生を低減できると考えられる。

これらの結果から、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートによる温度ひび割れの抑制効果は明らかといえる。

11.3.3 ひずみ変化の比較検証

表 11-5 にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリートの東面の初期膨張値を示す。また、図 11-6 に、東面における初期膨張の最大値を 0 とした相対ひずみの経時変化を示す。

表 11-5 東面の初期膨張値

コンクリートの種類		初期膨張ひずみ
BBFa-24	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート	38.3×10^{-6}
BB-24	高炉セメントコンクリート	67.5×10^{-6}

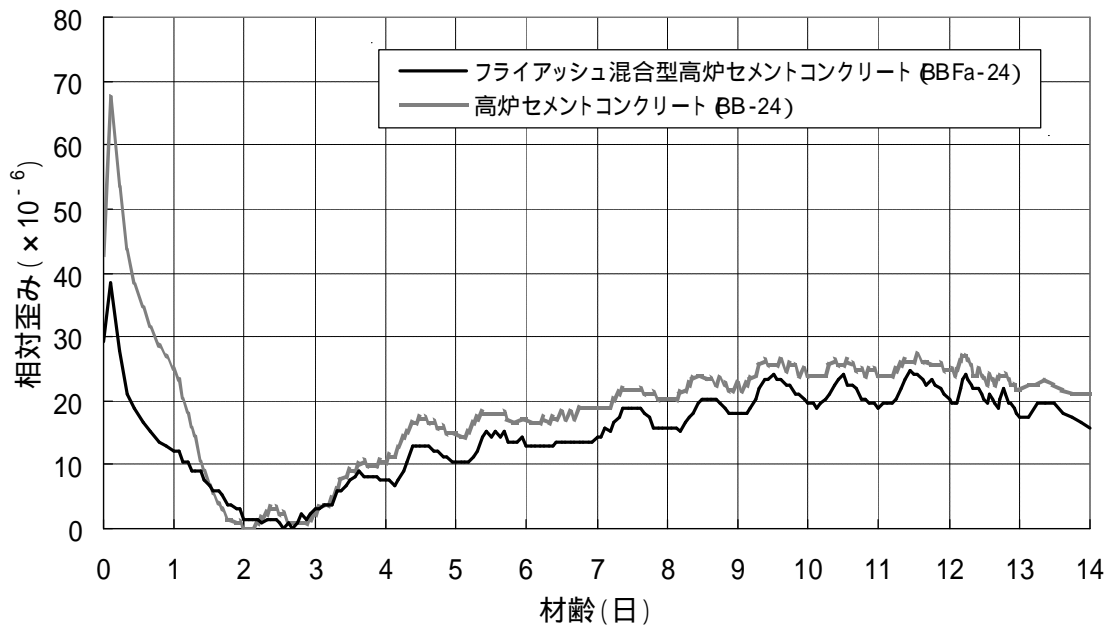


図 11-6 東面におけるひずみの経時変化（初期膨張の最大値を0）

この結果から、初期膨張値に大きな違いがみられ、高炉セメントコンクリートの方がフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに比べて、大きな初期膨張値を示した。このことは、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、初期膨張を小さく抑えることができ、温度ひび割れの発生の可能性を小さくできることを示している。

11.4 まとめ

- (1) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートについて、暑中期の製造および運搬を伴っても、生コン工場で適切な配合設計および品質管理を行えば、打設現場(荷卸し場所)での JIS の規格を十分に満たすことが確認された。
- (2) 全体的に高炉セメントコンクリートよりもフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が水和熱による温度上昇が小さいという予想通りの結果が得られた。
- (3) 中心部と表面部の温度差についても、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートよりも高炉セメントコンクリートの方が大きく、温度ひび割れを誘発させる原因になっていると思われる。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いれば、中心部と表面部の温度差を小さくでき、温度ひび割れの発生を低減できると考えられる。

- (4) 初期膨張値に大きな違いがみられ、高炉セメントコンクリートの方がフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートに比べて、大きな初期膨張値を示した。このことは、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、初期膨張を小さく抑えることができ、温度ひび割れの発生の可能性を小さくできることを示している。

第 12 章 試験施工

12.1 概要

福井大学での室内試験および模擬マスコンクリートの施工実験では評価ができない施工性やコンクリート硬化後の外観を検証することを目的として試験施工を実施した。平成 16 年度は寒中期、平成 17 年度は暑中期、平成 18 年度には標準期において試験施工を実施した。本研究では、高炉セメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートとの比較検証を通じて施工性や外観性状の評価を行うこととした。

12.2 試験施工の実施方法

12.2.1 目的

試験施工の目的は以下のとおりで、主にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの施工性の確認を行った。

- ・ 施工現場でのフレッシュコンクリート性状の検証
- ・ コンクリートの施工性の検証
- ・ 硬化後のコンクリートの外観調査

12.2.2 試験施工の実施時期

コンクリートの性状は、一般に外気温の影響を大きく受け、施工性も季節ごとに大きく異なる。このため、今回の試験施工は、標準期（秋期）、暑中期（夏期）、寒中期（冬期）の 3 期間にわたって実施し、年間を通じて、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの適用が可能であるかの検証を行った。

表 12-1 試験施工の種別

種別	実施時期	工事場所	工種
寒中期	平成 16 年度 冬期	福井県勝山市内	道路擁壁工事 (重力式擁壁工)
暑中期	平成 17 年度 夏期	福井県勝山市内	
		福井県坂井市内	
標準期	平成 18 年度 秋期	福井県勝山市内	

12.2.3 試験施工で用いた配合

今回の試験施工で使用した標準配合は以下のとおりで、配合に使用した材料は第 2 章で示した使用材料と同一である。

表 12-2 試験施工の配合表

配合の種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			C	F	W	S	G	AD1	AD2
18-8-40BB + フライアッシュ	53	38.7	207	52	137	722	1181	2.823	0.267
18-8-40BB	60	41.2	234		140	781	1150	2.551	
18-8-40N	63	40.6	232		146	768	1158	2.440	

ここに、

W/C : 水セメント比、W/B : 水結合材比、s/a : 細骨材率、

C : 単位セメント量、F : 単位フライアッシュ量、W : 単位水量、S : 単位細骨材量

G : 単位粗骨材量、AD1 : AE 減水剤 単位使用量、AD2 : 特殊 AE 剤 単位使用量

12.2.4 試験施工の調査事項

(1) フレッシュコンクリートの性状の検証

フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの施工現場でのフレッシュ性状を確認する目的で、以下の試験を実施する。

- ・ 外気温およびコンクリート温度
- ・ スランプ試験 (JIS A 1101)
- ・ 空気量試験 (JIS A 1128)
- ・ 塩化物含有量試験
- ・ コンクリートの圧縮強度試験 (3日、7日、28日、56日、91日材齢)

(2) 施工性の検証

ポンプ圧送性の検証

ポンプ圧送が可能であるためのコンクリートの条件として、コンクリート自体に以下の品質が要求される。

-) 管壁でのコンクリートが滑動するための流動性
-) 管内のコンクリートが形状変化できる変形性
-) 圧力の時間的、位置的変動に耐える分離抵抗性

以上をふまえ、今回の試験施工では、ポンプ圧送性を検証する目的で以下の調査を行うこととした。

- ・ ポンプ筒先におけるコンクリートの性状確認
 圧送後のポンプの筒先から吐出されるコンクリートについて、材料分離の有無、粘性などのコンクリート性状の確認を行う。
- ・ コンクリートポンプ圧力
 一般に、コンクリート圧送時におけるポンプ圧力を測定することによって、コンクリートのポンパビリティを評価することができる。このため、設定吐出量を一定にした条件で各コンクリートを圧送し、コンクリートポンプ車の圧力を測定してフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートの比較検討を行う。

コンクリートの打設、仕上げ状況の検証

コンクリートの打設状況の評価する目的で、以下の項目について観察を行う。また、コンクリート表面の仕上げを行う場合、コンクリートのブリーディング量や粘性が仕上げやすさに影響を与えることから、打設後の天端におけるブリーディングの発生状況、コテ仕上げの施工性についての調査を行う。

- ・ 生コン車のシュートにおけるコンクリートの流動状況
- ・ コンクリートの打設時間
- ・ ブリーディングの発生状況
- ・ コテ仕上げの施工性

(3) 硬化後のコンクリートの外観調査

試験施工に使用した各コンクリートの硬化後の外観を評価する目的で、以下の外観調査を行う。調査時期は、型枠脱型時およびコンクリート打設を行ってから1ヵ月後および3ヵ月後に行うこととした。

- ・ ひび割れの発生状況
 コンクリート表面におけるひび割れ発生状況を観察する。
- ・ 色むらの発生状況
 コンクリート表面の色調などを観察し、色むらが生じていないかを確認する。

12.3 寒中期の試験施工

12.3.1 工事概要

表 12-3 工事概要

工種	道路擁壁工事
工事場所	福井県勝山市内
構造物の種類	重力式擁壁（無筋コンクリート）
基本配合	18 - 8 - 40
打設方法	ポンプ打設（ピストン式ポンプ）

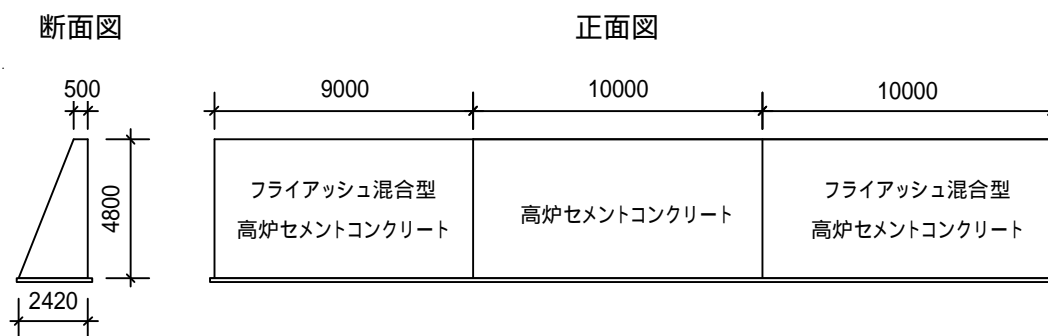


図 12-1 工事図面



写真 12-1 施工状況

12.3.2 試験施工の結果

(1) コンクリートの性状試験

表 12-4 コンクリート性状試験の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート			高炉セメントコンクリート		
配合		18-8-40BB + フライアッシュ			18-8-40BB		
試験日		平成 17 年 1 月 13 日	平成 17 年 2 月 8 日	平成 17 年 2 月 22 日	平成 17 年 1 月 25 日	平成 17 年 2 月 12 日	平成 17 年 2 月 28 日
混練りから荷卸しまでの 経過時間 (分)		50	40	55	45	45	40
外気温 ()		6.0	5.0	3.0	6.0	4.0	4.0
コンクリート温度 ()		7.0	7.0	6.0	7.0	7.0	6.0
スランプ 試験	工場 スランプ (cm)	12.0	12.0	12.5	12.0	11.0	10.0
	現場 スランプ (cm)	9.0	8.5	9.5	9.0	8.5	8.0
	スランプロス (cm)	3.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0
空気量 試験	工場 空気量 (%)	4.8	4.8	4.5	4.7	5.0	4.0
	現場 空気量 (%)	4.3	4.6	4.7	4.5	4.7	3.9
	空気量ロス (%)	0.5	0.2	0.2 増	0.2	0.3	0.1
塩化物 含有量試験	塩化物含有量 (kg/m ³)	0.0182	0.0171	0.0125			0.0298
圧縮強度 試験	3 日材齢 (N/mm ²)	5.26	5.01	3.86	5.10	4.92	6.38
	7 日材齢 (N/mm ²)	9.40	11.2	10.0	11.8	9.81	13.5
	28 日材齢 (N/mm ²)	23.9	25.4	24.3	25.3	24.1	29.8
	56 日材齢 (N/mm ²)	31.7	31.6	30.6	33.5	31.2	38.0
	91 日材齢 (N/mm ²)	35.4	33.7	37.9	37.4	34.1	39.6

(2) 施工性状

表 12-5 施工性状の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート			高炉セメントコンクリート		
試験日		平成 17 年 1 月 13 日	平成 17 年 2 月 8 日	平成 17 年 2 月 22 日	平成 17 年 1 月 25 日	平成 17 年 2 月 12 日	平成 17 年 2 月 28 日
荷卸し性状		良好	良好	良好			良好
ポンプ 性状	筒先性状		良好	良好			良好
	油ポンプ回転数 (rpm)		1300	1200			1200
	圧力最大値 (kg/cm ²)		140	120			120
	定常圧力 (kg/cm ²)		100 ~ 120	80 ~ 100			80 ~ 100
	圧送状況		やや負荷大	普通			普通
打設時間 (min./m ³)		9.7	4.3	9.3			8.6
ブリーディングの発生状況		普通	普通	普通			普通
コテ仕上げの状況				良好			良好

(3) 外観性状

表 12-6 外観性状の結果まとめ

種別	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
ひび割れ	なし	なし
色むら	打設箇所の一部で、赤っぽい箇所および黒っぽい箇所が見受けられた。ただ、これは、メタル型枠の錆びなどが付着したもので、コンクリート材料から析出したものではないと考えられる。この色むらも、6ヶ月経過以降は目立たなくなった。	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと同様に、打設箇所の一部で、赤っぽい箇所および黒っぽい箇所が見受けられた。これも、メタル型枠の錆びなどが付着したものと考えられる。こちら、6ヶ月経過以降は目立たなくなった。
その他	多少のアバタが見られた。	多少のアバタが見られた。

12.4 暑中期の試験施工（その1）

12.4.1 工事概要

表 12-7 工事概要

工種	道路擁壁工事
工事場所	福井県坂井市内
構造物の種類	重力式擁壁（無筋コンクリート）
基本配合	18 - 8 - 40
打設方法	ポンプ打設（ピストン式ポンプ）

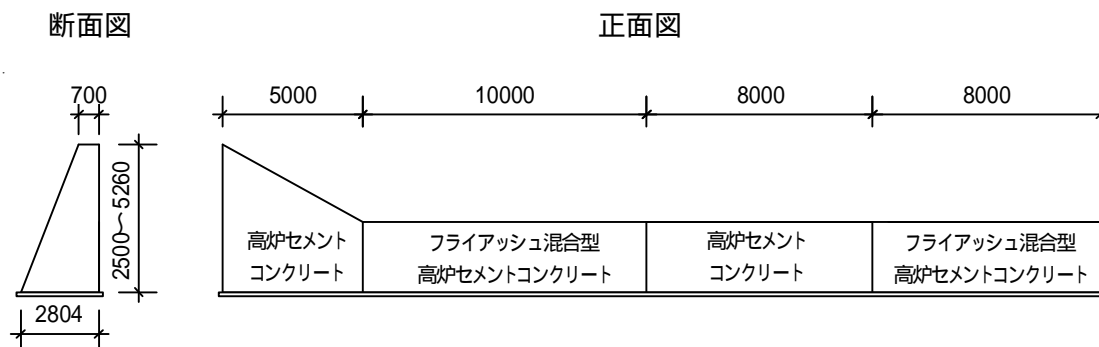


図 12-2 工事図面



写真 12-2 施工状況

12.4.2 試験施工の結果

(1) コンクリートの性状試験

表 12-8 コンクリート性状試験の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
配合		18-8-40BB + フライアッシュ	18-8-40BB
試験日		平成 17 年 7 月 25 日	平成 17 年 7 月 29 日
混練りから荷卸しまでの 経過時間 (分)		45	45
外気温 ()		30.0	30.0
コンクリート温度 ()		31.0	30.0
スランプ 試験	工場 スランプ (cm)	12.0	12.5
	現場 スランプ (cm)	9.0	9.0
	スランプロス (cm)	3.0	3.5
空気量 試験	工場 空気量 (%)	4.8	4.6
	現場 空気量 (%)	4.0	4.3
	空気量ロス (%)	0.8	0.3
塩化物 含有量試験	塩化物含有量 (kg/m ³)	0.020	0.022
圧縮強度 試験	3 日材齢 (N/mm ²)	6.46	7.50
	7 日材齢 (N/mm ²)	10.8	12.7
	28 日材齢 (N/mm ²)	22.4	24.8
	56 日材齢 (N/mm ²)	31.5	29.1
	91 日材齢 (N/mm ²)	37.2	35.2

(2) 施工性状

表 12-9 施工性状の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
試験日		平成 17 年 7 月 25 日	平成 17 年 7 月 29 日
荷卸し性状		良好	良好
ポンプ 性状	筒先性状	良好	良好
	油ポンプ回転数 (rpm)	1100	1100
	圧力最大値 (kg/cm ²)	80	80
	定常圧力 (kg/cm ²)	60	80
	圧送状況	普通	普通
打設時間 (min./m ³)		3.0	3.0
ブリーディングの発生状況		少ない	少々あり
コテ仕上げの状況		良好	良好

(3) 外観性状

表 12-10 外観性状の結果まとめ

種別	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
ひび割れ	セパレータ廻りに水平方向のひび割れが発生。これは、締固め不足などの施工方法が原因の「沈下ひび割れ」とみられる。	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと同様の「沈下ひび割れ」が発生。また、スパン長 8000mm の打設箇所、下部から鉛直方向に伸びるひび割れが発生。これは、コンクリートの打設から5ヶ月以降に発生したひび割れで、「乾燥収縮ひび割れ」と考えられる。 (表 12-11, 写真 12-3)
色むら	なし	なし
その他	なし	なし

表 12-11 ひび割れの標準調査表 および ひび割れ発生図

分類		状況	推定されるひび割れの原因
ひび割れの パターン	発生時期	数 10 日以上	
	規則性	あり	
	形態	表層 もしくは 貫通	
ひび割れの メカニズム	変形要因	収縮性	
	関係する範囲	材料 および 部材	
配合による分類			
打込み時の気象条件		高温	

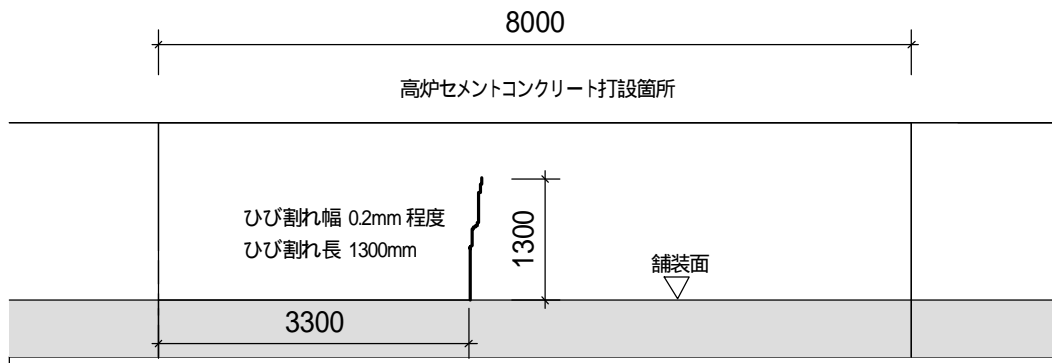


写真 12-3 高炉セメントコンクリート打設箇所に発生した乾燥収縮ひび割れ

12.5 暑中期の試験施工（その2）

12.5.1 工事概要

表 12-12 工事概要

工種	道路擁壁工事
工事場所	福井県勝山市内
構造物の種類	重力式擁壁（無筋コンクリート）
基本配合	18 - 8 - 40
打設方法	ポンプ打設（ピストン式ポンプ）

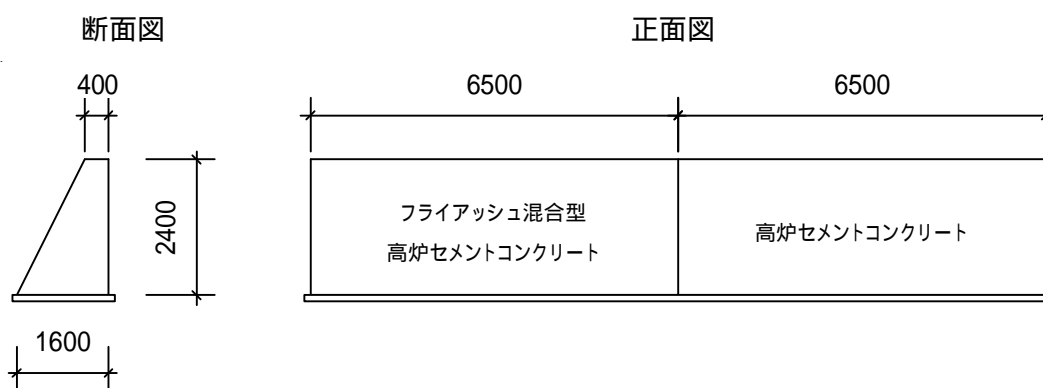


図 12-3 工事図面



写真 12-4 施工状況

12.5.2 試験施工の結果

(1) コンクリートの性状試験

表 12-13 コンクリート性状試験の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
配合		18-8-40BB + フライアッシュ	18-8-40BB
試験日		平成 17 年 7 月 27 日	
混練りから荷卸しまでの 経過時間 (分)		60	50
外気温 ()		27.0	27.0
コンクリート温度 ()		31.0	31.0
スランプ 試験	工場 スランプ (cm)	10.0	10.0
	現場 スランプ (cm)	7.5	8.0
	スランプロス (cm)	2.5	2.0
空気量 試験	工場 空気量 (%)	4.3	5.0
	現場 空気量 (%)	5.3	4.4
	空気量ロス (%)	1.0 増	0.6
塩化物 含有量試験	塩化物含有量 (kg/m ³)	0.021	0.023
圧縮強度 試験	3 日材齢 (N/mm ²)	7.42	9.87
	7 日材齢 (N/mm ²)	12.2	14.0
	28 日材齢 (N/mm ²)	23.5	25.4
	56 日材齢 (N/mm ²)	30.2	30.1
	91 日材齢 (N/mm ²)	34.7	33.6

(2) 施工性状

表 12-14 施工性状の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
試験日		平成 17 年 7 月 27 日	
荷卸し性状		良好	良好
ポンプ 性状	筒先性状	良好	良好
	油ポンプ回転数 (rpm)	1200	1200
	圧力最大値 (kg/cm ²)	100	90
	定常圧力 (kg/cm ²)	80	70
	圧送状況	普通	普通
打設時間 (min./m ³)		3.0	3.0
ブリーディングの発生状況		普通	普通
コテ仕上げの状況		良好	良好

(3) 外観性状

表 12-15 外観性状の結果まとめ

種別	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート
ひび割れ	なし	なし
色むら	なし	なし
その他	なし	なし

12.6 標準期の試験施工

12.6.1 工事概要

表 12-16 工事概要

工種	道路擁壁工事
工事場所	福井県勝山市内
構造物の種類	重力式擁壁（無筋コンクリート）
基本配合	1 8 - 8 - 4 0
打設方法	ポンプ打設（ピストン式ポンプ）

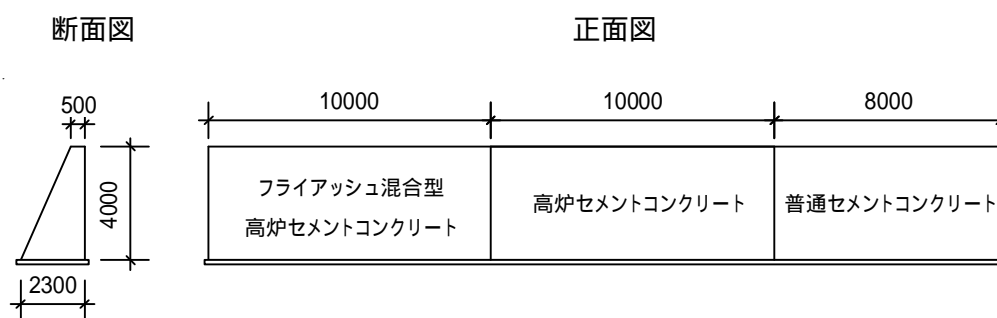


図 12-8 工事図面

12.6.2 試験施工の結果

(1) コンクリートの性状試験

表 12-17 コンクリート性状試験の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート		高炉セメントコンクリート		普通セメントコンクリート	
配合		18-8-40BB + フライアッシュ		18-8-40BB		18-8-40N	
試験日		平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日	平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日	平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日
混練りから荷卸しまでの 経過時間 (分)		45	40	45	40	40	45
外気温 ()		15.0	9.0	15.0	10.0	17.0	10.0
コンクリート温度 ()		18.0	14.0	19.0	16.0	20.0	16.0
スランプ 試験	工場 スランプ (cm)		9.5		10.0		8.0
	現場 スランプ (cm)	9.5	9.0	8.0	8.5	7.5	7.0
	スランプロス (cm)		0.5		1.5		1.0
空気量 試験	工場 空気量 (%)		4.0		6.0		4.0
	現場 空気量 (%)	4.0	4.0	4.5	4.3	4.0	3.8
	空気量ロス (%)		0		1.7		0.2
塩化物 含有量試験	塩化物含有量 (kg/m ³)	0.010	0.010	0.024		0.030	
圧縮強度 試験	3 日材齢 (N/mm ²)	5.02		7.25		9.43	
	7 日材齢 (N/mm ²)	11.2	11.9	13.0	13.4	14.6	16.4
	28 日材齢 (N/mm ²)	21.0	23.4	23.9	23.9	22.0	24.3
	56 日材齢 (N/mm ²)	27.3		28.2		24.5	
	91 日材齢 (N/mm ²)	32.1		32.8		25.0	

(2) 施工性状

表 12-18 施工性状の結果まとめ

種別		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート		高炉セメントコンクリート		普通セメントコンクリート	
		平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日	平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日	平成 18 年 10 月 25 日	平成 18 年 11 月 9 日
荷卸し性状			良好		良好		良好
ポンプ 性状	筒先性状		良好		良好		良好
	油ポンプ回転数 (rpm)		1100		1100		1100
	圧力最大値 (kg/cm ²)		100		90		90
	定常圧力 (kg/cm ²)		80 ~ 90		70 ~ 80		70 ~ 80
	圧送状況		普通		普通		普通
打設時間 (min./m ³)			5.0		5.0		4.5
ブリーディングの発生状況			普通		普通		普通
コテ仕上げの状況			普通		普通		普通

(3) 外観性状

表 12-19 外観性状の結果まとめ

種別	フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート		高炉セメントコンクリート	普通セメントコンクリート
ひび割れ	なし		なし	なし
色むら	なし		なし	なし
その他	なし		なし	なし

12.7 施工性の比較検証および考察

12.7.1 コンクリート性状

(1) スランプ試験

気温の高い暑中期を中心に、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートのスランプロス、高炉セメントコンクリートと比較してやや大きい。しかしながら、現場でのスランプ試験では、全て JIS の規格内に収まっており、季節配合の調整等の配合設計を適切に行えば、品質管理上の問題はないといえる。

(2) 空気量試験

経時変化による空気量ロスは、特殊 AE 剤を用いた成果がみられ、全ての期間を通じて小さかった。現場での空気量試験も全て JIS の規格内に収まっている。特殊 AE 剤を適切に使用することで、空気量の管理も問題なく行えることが確認された。

(3) 塩化物含有量試験

塩化物含有量については、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートに比べてやや低くなった。JIS の基準値を大きく下回り、塩化物の含有に関する問題は全くないと考えられる。

(4) コンクリートの圧縮強度試験

フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートに比べ、3 日および 7 日材齢までの強度発現はやや下回る。しかしながら、材齢 28 日以降については、両者ほぼ同等で、当然のことながら管理材齢である 28 日材齢で、所定の呼び強度を上回る結果が得られた。

12.7.2 施工性状

(1) 荷卸し性状

荷卸し性状は、いずれのコンクリートもほぼ同等で、良好であった。フレッシュコンクリートの色については、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートが高炉セメントコンクリートや普通セメントコンクリートに比べてやや黒っぽかった。

(2) 打設時間（打設スピード）

打設時間については、いずれのコンクリートともほぼ同等であった。

(3) ブリーディングの発生状況

フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリート、普通セメントコンクリートとで、ブリーディングの発生状況は見た目ではほとんど変わらなかった。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートでは、特殊 AE 剤の分散効果がブリーディングの発生状況に良い影響を及ぼしていると考えられる。

(4) コテ仕上げの施工性

コテ仕上げの施工性は、いずれのコンクリートもほぼ同等で、良好であった。コテ仕上げを行っている施工者に聞き取り調査を行ったが、「言われなければ、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで区別がつかない。」との回答を得た。

12.7.3 ポンプ圧送性能

(1) 圧送負荷

ポンプ圧送圧力は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートに比べてやや大きくなった。ただし、圧送に支障をきたすような負荷ではなく、圧送性能は問題ないと判断する。

(2) ポンプ筒先性状

筒先性状の状態は、いずれのコンクリートも良好であった。

12.7.4 外観調査

脱型直後、打設1ヵ月後、打設3ヵ月後をめぐりに外観調査をおこなった。

(1) ひび割れの発生状況

暑中期に打設を行った施工現場で鉛直方向のひび割れおよび水平方向のひび割れが見つかった。

鉛直方向のひび割れが発生したのは、高炉セメントコンクリートを打設したスパンで、コンクリートの打設から約5ヶ月経過以降に、重力式擁壁の下部から上方に鉛直に伸びるひび割れが1本、スパン中央付近に発生した。ひび割れ発生時期やひび割れの形態から判断して、「乾燥収縮ひび割れ」と考えられる。

また、水平方向のひび割れは、高炉セメントコンクリートおよびフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを打設した両方のスパンで、セパレータ廻りに発生した。これは、締固め不足などの施工方法が原因の「沈下ひび割れ」とみられ、コンクリート材料が原因のひび割れである可能性は低い。

その他の現場では、ひび割れの発生は特に見当たらなかった。

(2) 色むらの発生状況

色むらの発生は、特に見られなかった。一部の現場で、黒っぽくなった部分や赤っぽい部分がフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート、高炉セメントコンクリートの両方で見られた。ただ、これはメタル型枠の錆びの付着によるもので、コンクリートそのものによる色むらではないと判断される。フライアッシュを混合したコンクリートによく見られる黒ずみによる色むらも全く見受けられなかった。特殊AE剤による色むら

抑制効果（分散効果）がよく出ていると考えられる。

また、打設直後および脱型直後は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの表面が高炉セメントコンクリートに比べて黒っぽい印象を受けたが、打設後 1 ヶ月を経過までに、黒っぽい色はなくなり、外観上の区別はつかなくなった。

12.8 まとめ

- (1) 寒中期、暑中期、試験施工の結果、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリート、普通セメントコンクリートとでコンクリートのフレッシュ性状、荷卸し・施工性状、ポンプ圧送性能などで大きな差はなかった。
- (2) 外観調査の結果、暑中期における高炉セメントコンクリートの打設箇所で、乾燥収縮ひび割れが発生した。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの打設箇所では、一部施工上の問題と思われる沈下ひび割れが発生したが、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生は見受けられず、実施工でひび割れの発生具合に差が生じた。実際の施工においても、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートによる温度ひび割れおよび乾燥収縮ひび割れの抑制効果が確認された。

第 13 章 総括

13.1 試験結果の総括表

本研究での試験結果および評価等を以下の表にまとめる。

表 13-1 室内試験の結果 総括表

試験		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート	評価
フレッシュ 性状 BB-24 BBFa-18 BBFa-24 BBFa-30	スランプ	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	適切な配合計画を行えば、JIS 規格内に容易に収めることができる。フライアッシュを添加しても、高炉セメントコンクリートと同等のフレッシュ性状をもつコンクリートを製造することが可能である。
	空気量	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	
	性状 (目視確認)	良好	良好	
硬化性状 BB-24 BBFa-24	圧縮強度	7日 18.5 N/mm ² 28日 35.7 N/mm ² 56日 41.4 N/mm ²	7日 19.1 N/mm ² 28日 34.5 N/mm ² 56日 43.2 N/mm ²	同等の強度発現
	静弾性係数 (材齢 28 日)	2.75 × 10 ⁴ N/mm ²	2.68 × 10 ⁴ N/mm ²	同等のヤング係数
水和熱特性 BB-24 BBFa-24	簡易断熱 温度上昇試験	最高温度 33.2 (材齢 1.08 日)	最高温度 35.7 (材齢 0.98 日)	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、水和熱による温度上昇を低減できる。
乾燥収縮特性 BB-24 BBFa-24	乾燥収縮試験 (材齢 13 週)	乾燥収縮ひずみ 753 × 10 ⁻⁶	乾燥収縮ひずみ 1357 × 10 ⁻⁶	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、乾燥収縮ひずみを低減できる。
凍結融解 抵抗性 BB-24 BBFa-24	凍結融解試験 (300 サイクル)	相対動弾性係 81% 質量減少率 4.0%	相対動弾性係 72% 質量減少率 2.1%	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が、300 サイクル後の相対動弾性係数は大きい。
中性化抵抗性 BB-24 BBFa-24	促進中性化試験 (材齢 13 週)	中性化深さ 15.8 mm	中性化深さ 11.3 mm	フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が中性化の進行が早い。但し、かぶりを適切に確保すれば問題なし。
塩害抵抗性 BB-24 BBFa-24	塩分浸漬試験 (材齢 13 週)	塩分浸透深さ 11.8 mm	塩分浸透深さ 11.9 mm	同等の塩害抵抗性
アルカリ骨材反応 抵抗性 BB 珪ケル BBFa 珪ケル	アルカリ骨材 反応性試験 モルタルバー法 (材齢 8 週)	膨張率 - 0.046 %	膨張率 0.029 %	アルカリ骨材反応に対する抵抗性に関して、同等以上の抵抗性を有すると推測。

表 13-2 施工試験の結果 総括表

試 験		フライアッシュ混合型 高炉セメントコンクリート	高炉セメントコンクリート	評 価	
模擬マスコン 施工実験 BB-24 BBFa-24	コンクリート性状	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	運搬を伴っても、JIS の規格内に収めるこ とができた。	
	マスコン 内部温度	中心部	最高温度 55.2 (材齢 1.25 日)	最高温度 59.7 (材齢 1.19 日)	フライアッシュ混合 型高炉セメントコン クリートは、水和熱 による温度上昇を低 減できる。また、中 心部と表面部の温度 差も小さくできる。 さらに、初期の膨張 ひずみも小さくする ことができ、温度ひ び割れの抑制効果が 確認された。
		東面	最高温度 46.3 (材齢 1.31 日)	最高温度 47.3 (材齢 1.44 日)	
	温度差	中心部 - 東面 温度差 11.1	中心部 - 東面 温度差 14.4		
初期膨張ひずみ	38.3×10^{-6}	67.5×10^{-6}			
寒中期 試験施工 18-8-40	コンクリート性状	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	寒中期に運搬を伴っ ても、JIS 規格内に収 めることができた。	
	施工性状	概ね良好 圧送負荷やや大	良好	圧送負荷がやや大き かったものの、施工 性は、ほぼ同等。	
	外観性状	多少のアバタ	多少のアバタ	ほぼ同等	
暑中期 試験施工 18-8-40	コンクリート性状	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	暑中期に運搬を伴っ ても、JIS の規格内に 収めることができた。	
	施工性状	良好	良好	ほぼ同等	
	外観性状	・沈下ひび割れ (施工が要因)	・乾燥収縮ひび割れ ・沈下ひび割れ (施工が要因)	高炉セメントコンクリ ートの打設箇所に乾燥 収縮ひび割れが発生。	
標準期 試験施工 18-8-40	コンクリート性状	全てのケースで JIS 規格に適合	全てのケースで JIS 規格に適合	標準期に運搬を伴っ ても、JIS の規格内に 収めることができた。	
	施工性状	良好	良好	ほぼ同等	
	外観性状	良好	良好	同等	

13.2 まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートのフレッシュ性状に関して、水結合材比や単位水量の設定、機能性有機リン酸エステルを主成分とする特殊 AE 剤を用いる等の適切な配合設計を行えば、スランプおよび空気量を JIS の規格内に管理できる。また、必要なワーカビリティ、材料分離抵抗性も得られることが確認された。
- (2) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリートとで、強度発現や静弾性係数などの硬化性状はほぼ同等である。
- (3) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べてセメントの水和熱による温度上昇を低く制御でき、温度ひび割れの発生確率を低減できる。
- (4) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートに比べて、乾燥収縮量を大幅に低減することができ、乾燥収縮ひび割れの発生確率を低減できる。
- (5) 凍結融解作用の抵抗性を評価するうえで最も重要な評価指標である相対動弾性係数の変動は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて高く、高炉セメントコンクリートと同等以上の耐凍害性を有する。一方、質量減少率は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて大きくなった。しかしながら、この試験の基準や質量減少率の値から判断して、福井県内での使用には寒冷地であっても問題はないと判断される。
- (6) 中性化の進行は、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて早い。しかしながら、自然環境下での中性化進行速度、必要となる鉄筋かぶりを算定した結果、鉄筋かぶり厚の設計および施工管理を確実にすれば、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートを用いても、実用上は問題が無いと考えられる。
- (7) フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは、高炉セメントコンクリートの塩害に対する抵抗性とほぼ同等であるといえる。
- (8) アルカリ骨材反応性試験において、膨張量は高炉セメントコンクリートの方が大きくなる傾向が確認された。よって、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート

トは高炉セメントコンクリートと同等以上にアルカリ骨材反応を抑制する効果があると推測される。しかしながら、今回の試験は試験精度そのものが疑わしく、再試験が必要である。

- (9) 模擬マスコンクリートの施工実験の結果、全体的にフライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートに比べて、水和熱による温度上昇が小さいという結果が得られた。中心部と表面部の温度差についても、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートよりも小さいことが確認された。さらに、初期膨張値に大きな違いがみられ、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの方が高炉セメントコンクリートよりも小さいことが確認された。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートは温度ひび割れの発生を抑制できることが模擬マスコンクリートの施工実験からも検証された。
- (10) 寒中期、暑中期、標準期に行った試験施工の結果、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートと高炉セメントコンクリート、普通セメントコンクリートとでコンクリートのフレッシュ性状、施工性状、ポンプ圧送性能などで大きな差はなかった。
- (11) 試験施工での外観調査の結果、暑中期における高炉セメントコンクリートの打設箇所、乾燥収縮ひび割れが発生した。フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの打設箇所では、一部施工上の問題と思われる沈下ひび割れが発生したが温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生は見受けられず、ひび割れの発生状況に差が生じた。実際の施工においても、フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートによる温度ひび割れおよび乾燥収縮ひび割れの抑制効果が確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書〔施工編〕
- 2) 土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕
- 3) 福井県土木部：福井県土木工事共通仕様書，平成16年4月
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2003
- 5) 日本規格協会：JISハンドブック 生コンクリート，2004～2006
- 6) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料，2005
- 7) 宇部三菱セメント株式会社：UMEテキスト
- 8) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）
- 9) 十河 茂幸ほか：コンクリートのひび割れがわかる本，セメントジャーナル社
- 10) 配合基礎資料（福井宇部生コンクリート株式会社・ユーコン株式会社）
- 11) 山路 徹ほか：「高炉スラグとフライアッシュを混合した低発熱系セメントを用いたコンクリートの材料特性及び耐久性」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22 No.1，2000，pp.145-15
- 12) 山田 順治ほか：わかりやすいセメントとコンクリートの知識，鹿島出版会
- 13) 石栗 忠彦ほか：「ピーライト系低発熱セメントを用いた超高層建築物の地下部マスコンクリートひび割れ対策」，社団法人日本建築学会 学術講演梗概集，1995年度大会（北海道），pp.951-952
- 14) 苔米地 司ほか：「高炉スラグ微粉末がモルタル強度及びコンクリートの断熱温度上昇に及ぼす影響」，社団法人日本建築学会 学術講演梗概集，1993年度大会（関東），pp.751-752
- 15) 福手 勤ほか：「水和熱による温度履歴がマスコンクリートの力学特性および耐久性に及ぼす影響」，土木学会論文集，No.641，-46，2000.2，pp.117-132
- 16) 社団法人日本建築学会：建築材料実験用教材，1999.1

- 17) 長瀧 重義ほか：コンクリート便覧 第二版，社団法人コンクリート工学協会，1996
- 18) 植木 康知ほか：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用，高炉スラグ協会
- 19) 須藤 由美子ほか：「フライアッシュコンクリートの気泡特性」，社団法人日本建築学会 学術講演梗概集 1998 年度大会（九州），pp.635-636
- 20) 森山 容州ほか：コンクリート技術の展開，社団法人セメント協会，1987
- 21) 湯浅 昇ほか：「表層コンクリートの品質（凍結融解作用によるスケーリングとの関係）」 社団法人日本建築学会 学術講演梗概集 1998 年度大会（九州），pp.387-388
- 22) 三森 敏司ほか：「フライアッシュを用いたコンクリートの凝結と強度発現」 社団法人日本建築学会 学術講演梗概集 1997 年度大会（関東），pp.49-50
- 23) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解析
- 24) 社団法人全日本建設技術協会：土木構造物設計ガイドライン
- 25) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針，2003

「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」
(温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)
配合・製造および施工指針(案)

平成 19 年 3 月発行

編集	研究開発グループ
発行	〒910-0005 福井市大手 2-9-10 (電気ビル1F) (財)福井県建設技術公社
連絡先	〒910-0142 福井市上森田 5-1105-1 福井宇部生コンクリート株式会社 電話 0776-56-1234
印刷	〒918-8231 福井市問屋町 1 丁目 7 番地 創文堂印刷株式会社