

報告 各種低発熱型セメントを使用したコンクリートの耐久性について

齋藤 敏樹*1・毛馬内 学*2・加藤 政治*3

要旨: 低発熱型の低熱ポルトランドセメント, 中庸熱ポルトランドセメント, フライアッシュセメント(置換率 30%)および中庸熱フライアッシュセメント(置換率 30%)を使用したコンクリートの基礎的な耐久性能の比較を行った。その結果, 同一設計基準強度における凍結融解および乾燥収縮に対する抵抗性は単位水量および水セメント比が小さいフライアッシュセメントが最も優れているが, 断熱温度特性は低熱ポルトランドセメントが最も上昇速度が遅くかつ最終温度が低いことが明らかになった。

キーワード: 低発熱型セメント, フライアッシュ, 強度, 凍結融解, 乾燥収縮, 自己収縮, 断熱温度上昇

1. はじめに

大型コンクリート構造物においては, 水和発熱に伴う温度ひび割れ対策が重要な課題となる。一般的には, 低発熱型セメントの低熱ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを使用することが多い。しかし, 低熱ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの入手が容易でないことが多い。他方, 環境問題および循環型社会構築のために資源の有効利用, 産業副産物の有効利用などの観点からフライアッシュおよび高炉スラグなどが多く利用されている。特にフライアッシュをセメント置換したコンクリートは水和発熱量を減少させることが知られており, マスコンクリートにおいてはフライアッシュが多く利用されている。低発熱型セメントを使用したコンクリートの耐久性についての研究は多くされている¹⁾が, 設計基準強度を配合条件に設定して比較検討したものは少ない²⁾。

本研究では, 低発熱型セメントの低熱ポルトランドセメント, 中庸熱ポルトランドセメント, フライアッシュセメントおよび中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリート(それぞれ L, M, FC および MFC という)について, 2 水準の設計基準強度により各種耐久性能の基礎的な比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験水準

実験に使用した材料を表-1 に示す。使用したセメントは, 低熱ポルトランドセメント, 中庸熱ポルトランドセメント, 普通ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%置換したセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%置換したセメントの 4 水準とした。フライアッシュは JIS II 種灰を使用した。細骨材は陸砂 1 と陸砂 2 を質量比で 70%, 30%の割合で混合し

て使用した。粗骨材は最大寸法 20mm の碎石を使用した。

表-1 使用材料

種類	諸元
セメント	低熱 低熱ポルトランドセメント 密度: 3.22g/cm ³ , 比表面積: 3,600cm ² /g
	中庸熱 中庸熱ポルトランドセメント 密度: 3.21g/cm ³ , 比表面積: 3,260cm ² /g
	フライアッシュC 普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3,360cm ² /g +フライアッシュ(置換率30%)
	中庸熱F 中庸熱ポルトランドセメント +フライアッシュ(置換率30%)
フライアッシュ	JIS II 種灰 密度: 2.31g/cm ³ , 二酸化けい素: 66.2%, 湿分: 0.18% 強熱減量: 1.3%, 45μmふるい残分: 2% 比表面積: 3,950cm ² /g, M, B吸着量: 0.31mg/g フロー値比: 111%, 活性度指数: 100(91日)
細骨材	陸砂 1 (70%) 表乾密度: 2.66g/cm ³ , 吸水率: 0.96%, 微粒分量: 0.2% 単位容積質量: 1.740kg/L, 実積率: 66.0% 安定性: 0.7%, 粗粒率: 2.32, ASR化学法: 無害
	陸砂 2 (30%) 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 1.42%, 微粒分量: 0.7% 単位容積質量: 1.879kg/L, 実積率: 70.8% 安定性: 0.8%, 粗粒率: 2.57, ASR化学法: 無害
粗骨材	碎石、最大寸法20mm 表乾密度: 2.68g/cm ³ , 吸水率: 1.65%, 微粒分量: 1.2% 単位容積質量: 1.517kg/L, 実積率: 57.5% 安定性: 1.5%, 粗粒率: 6.90, ASR化学法: 無害
混和剤	AE減水剤 主成分: 変性リグニンスルホン酸化合物
	高性能AE減水剤 主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE剤 主成分: アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	消泡剤 主成分: ポリアルキレングリコール誘導体
練混ぜ水	上水道水

表-2 実験ケース

実験ケース	セメント種類	設計基準強度 (91日) (N/mm ²)	スランブまたはスランブフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)
L40	低熱	40	15±2.5	5.0±1.0	55以下
L60		60	15±2.5	5.0±1.0	55以下
M40	中庸熱	40	15±2.5	5.0±1.0	55以下
FC40	フライアッシュC	40	15±2.5	5.0±1.0	55以下
FC60		60	55±7.5	4.0±1.5	55以下
MFC40	中庸熱F	40	15±2.5	5.0±1.0	55以下
MFC60		60	55±7.5	4.0±1.5	55以下

*1 北電総合設計 (株) 技術研究所土木試験室室長 (正会員)

*2 北海道電力 (株) 総合研究所火力・土木技術グループ

*3 北海道電力 (株) 火力部石炭灰リサイクル推進室

表-3 配合表

実験ケース	セメント種類	水セメント比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)										フレッシュ性状				
					水 W	セメント			細骨材		粗骨材 G1	混和剤				スランブまたはスランブフロー (cm)	50cmフロー到達時間 (sec)	空気量 (%)	温度 (°C)
						混合 C+F	セメント C	フライアッシュ F	S1	S2		AE減水剤 Ad	高性能AE減水剤 SP	AE剤 AE	消泡剤 DF				
L40	低熱	55.0	—	47.0	154	280	280	—	621	269	1,007	2.80	—	5.60	—	15.5	—	4.7	18.3
L60		39.5	—	44.0	156	395	395	—	550	238	1,008	3.95	—	13.82	—	16.0	—	4.6	18.5
M40	中庸熱	52.0	—	46.0	157	302	302	—	599	259	1,012	3.02	—	7.55	—	14.5	—	5.0	19.2
FC40	フライアッシュC	39.5	30	44.0	146	370	259	111	552	239	1,012	3.70	—	37.00	—	15.0	—	5.4	19.3
FC60		29.5		41.0	144	488	342	146	492	213	1,019	—	6.34	24.40	9.76	59.0	7.9	4.4	19.9
MFC40	中庸熱F	40.5	30	44.0	146	360	252	108	556	241	1,018	3.60	—	36.00	—	14.5	—	4.1	19.6
MFC60		30.0		41.0	144	480	336	144	495	215	1,026	—	5.76	19.20	9.60	60.7	7.9	5.0	19.7

混和剤は AE 減水剤，高性能 AE 減水剤，AE 剤(空気量調整)および消泡剤とした。

実験ケースを表-2 に示す。コンクリートの設計基準強度を材齢91日において40および60N/mm²の2水準とし、水セメント比は55%以下とした。フレッシュ性状の目標値は、設計基準強度40N/mm²の場合スランブ15±2.5cm、空気量5.0±1.0%とし、60N/mm²の場合スランブフロー55±7.5cm、空気量4.0±1.5%とした。

コンクリートの配合表を表-3 に示す。予備実験の結果、L60 のケースは水セメント比が40%程度で設計基準強度を満足する配合となったため、スランブ15±2.5cm、空気量5.0±1.0%の配合条件とした。高性能 AE 減水剤を使用した FC60 および MFC60 のケースは、スランブフローだけではなく50cm フロー到達時間を測定し、10±5 秒になるように高性能 AE 減水剤量および単位水量を調整した。

2.2 実験項目および方法

(1) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは55L強制練り二軸ミキサを使用し、粗骨材、細骨材およびセメントを投入して30秒練り混ぜた後、水および混和剤を投入し2分練り混ぜ排出し、練板にて手練りを行いフレッシュ性状を測定し供試体を作製した。

(2) 強度試験

圧縮強度はJIS A 1108 に準拠し、材齢7, 10, 28 および91日で測定を行った。引張強度はJIS A 1113 に、静弾性係数はJIS A 1149 に準拠し、材齢91日で測定を行った。供試体は直径100mm、高さ200mmの円柱供試体とし、供試体作製後1日で脱型し所定材齢まで水中養生(20±2°C)した。

(3) 凍結融解試験

凍結融解試験はJIS A 1148 のA法に準拠し、材齢91日から行い、300サイクルまで30サイクル毎測定した。供試体は作製後1日で脱型し所定材齢まで水中養生(20±2°C)した。

(4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験はJIS A 1129-1 に準拠した。供試体は作製後1日で脱型し材齢7日まで水中養生(20±2°C)した。材齢7日を基準として温度20±2°C、相対湿度60±5%の恒温恒湿室にて供試体を保存し、保存期間7, 28, 56, 91, 182 および273日で収縮量を測定した。

(5) 自己収縮試験

自己収縮試験は低弾性埋込み型シリコンコーティングゲージ(弾性係数0.98N/mm²)を用いて、コンクリートの自由収縮ひずみを測定した³⁾。供試体は直径125mm、高さ250mmの円柱供試体とし、封緘養生(20±2°C)にて作製直後から縦方向のひずみを測定した。

(6) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は空気循環式断熱温度上昇試験装置を使用して供試体温度が一定になるまで行った。供試体は直径335mm、高さ280mmの円柱供試体とした。

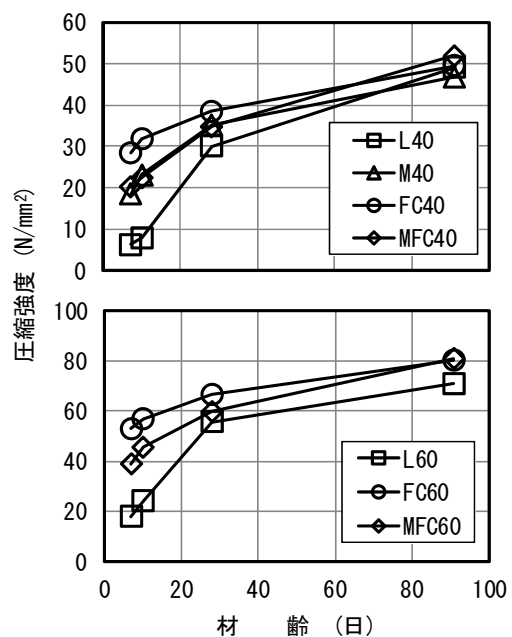


図-1 材齢と圧縮強度の関係

3. 実験結果および考察

3.1 強度試験

材齢と圧縮強度の関係を図-1に、圧縮強度と引張強度の関係を図-2に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3に示す。

図-1より、セメントの種類により強度発現が異なることが分かる。材齢28日までの圧縮強度は、Lが最も小さく、次いでMとMFCが同程度、FCが最も強度が高い結果となり、一般に知られているセメントの鉱物組成の違いにより強度発現が異なることが確認された。

図-2より、引張強度は圧縮強度との相関性が認められ、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会)に記載されている圧縮強度と引張強度の関係と同様であった。他方、セメントの種類による圧縮強度と引張強度の関係の違いは認められなかった。

図-3より、静弾性係数は圧縮強度との相関性が認められ、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会)に記載されている圧縮強度と静弾性係数の関係と同様であった。他方、セメントの種類による圧縮強度と静弾性係数の関係の違いは認められなかった。

3.2 凍結融解試験

サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-4に、水セメント比と相対動弾性係数の関係を図-5に示す。

図-4より、凍結融解300サイクルにおける相対動弾性係数は最も小さいL40でも88%以上であり、優れた耐凍害性を有していることが認められた。他方、セメント

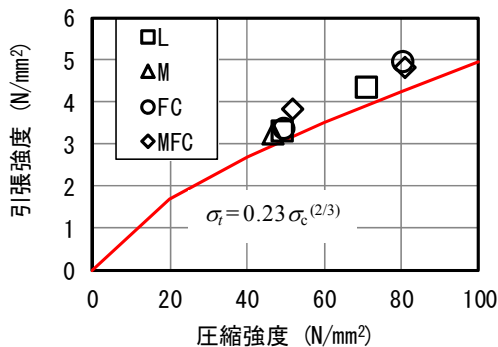


図-2 圧縮強度と引張強度の関係

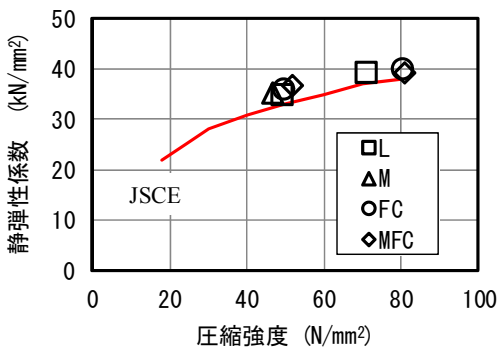


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

の種類による相対動弾性係数の違いは、Lが最も相対動弾性係数が小さく、次いでM、MFCおよびFCの順に大きくなり、フライアッシュを使用しているケースの耐凍害性が高いことが分かる。

図-5より、凍結融解300サイクルにおける相対動弾性係数は、水セメント比が大きいほど相対動弾性係数が小さいことが分かる。本実験においては、気泡間隔係数を測定していないため水セメント比と気泡間隔係数の関係が不明確であるが、同一設計基準強度においてFCおよびMFCの耐凍害性がLおよびMより高いのは、水セメント比が小さかったことが要因の一つであると考えられる。

3.3 乾燥収縮試験

保存期間と長さ変化率の関係を図-6に、水セメント比と長さ変化率の関係を図-7に、単位水量と長さ変化率の関係を図-8に示す。なお、図-6には鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説(日本建築学会)に記載されているコンクリートの特級および高級の乾燥収縮ひずみを示した。

図-6より、長さ変化率は保存期間の経過にしたがい大

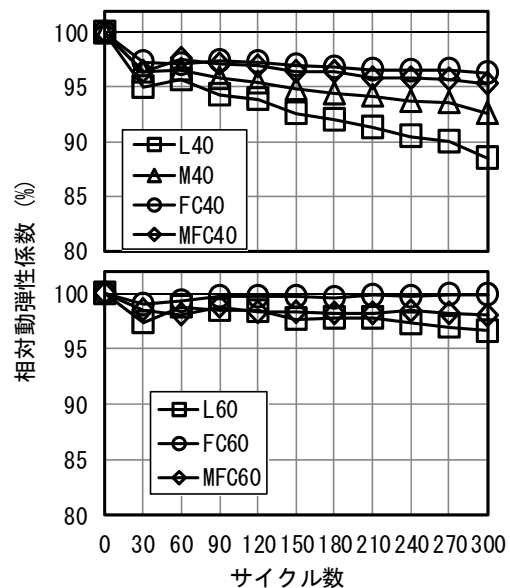


図-4 サイクル数と相対動弾性係数の関係

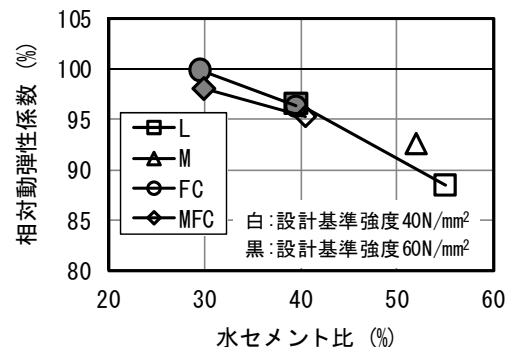


図-5 水セメント比と相対動弾性係数の関係

きくなり、保存期間 273 日では $530\sim 730\times 10^{-6}$ の収縮量となった。他方、セメントの種類による長さ変化率の違いは、L が最も大きく保存期間 273 日で長さ変化率が 650×10^{-6} 以上となりコンクリートの級は標準になるが、保存期間がさらに経過すると 800×10^{-6} 以上になる可能性が考えられる。次いで長さ変化率が高いのは M となり、FC と MFC は同程度で最も長さ変化率が小さい結果であり、フライアッシュを使用しているケースが長さ変化率が小さい結果であった。なお、M、FC および MFC は保

存期間 273 日で長さ変化率が $500\sim 650\times 10^{-6}$ 以内であり、コンクリートの級は高級になるが、さらに変化する可能性が考えられるため実験を継続する予定である。

図-7 および図-8 より、長さ変化率は水セメント比が大きいほど大きくなり、単位水量が多いほど大きくなる傾向が認められた。したがって、フライアッシュを使用しているケースの長さ変化率が小さい結果となったのは、L および M より単位水量が少なく水セメント比が小さかったことが要因の一つであると考えられる。

3.4 自己収縮試験

打込み直後からのひずみの経時変化を図-9 に、材齢 1 日を基点としたひずみの経時変化を図-10 に示す。

図-9 より、打込み直後から 0.25 日程度（6 時間程度）

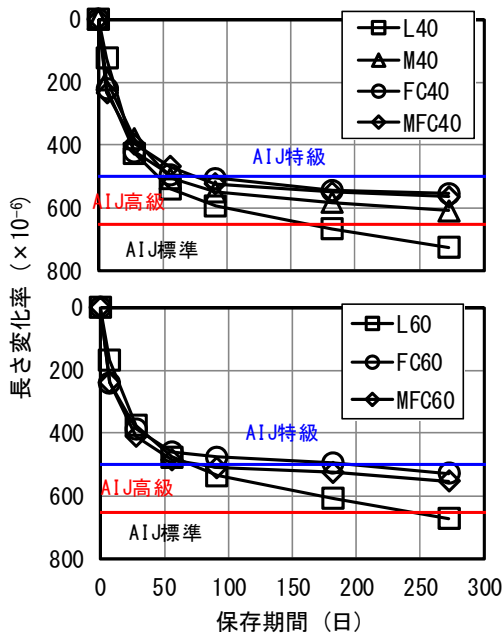


図-6 保存期間と長さ変化率の関係

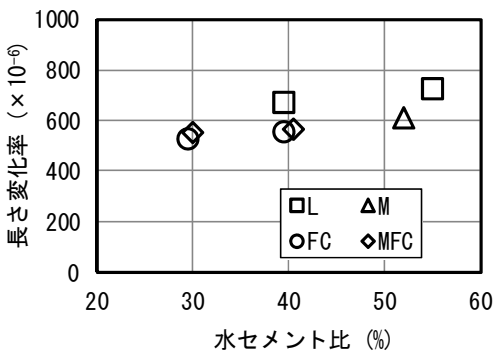


図-7 水セメント比と長さ変化率の関係

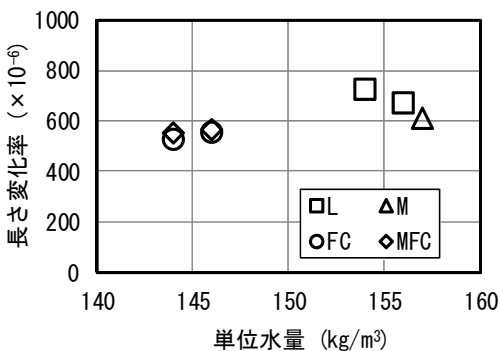


図-8 単位水量と長さ変化率の関係

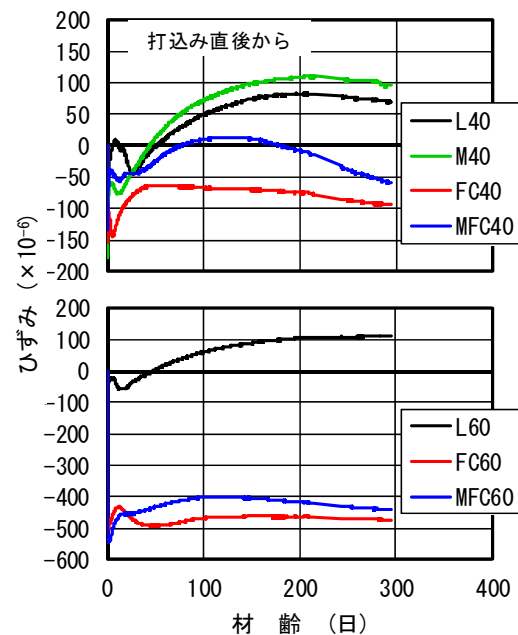
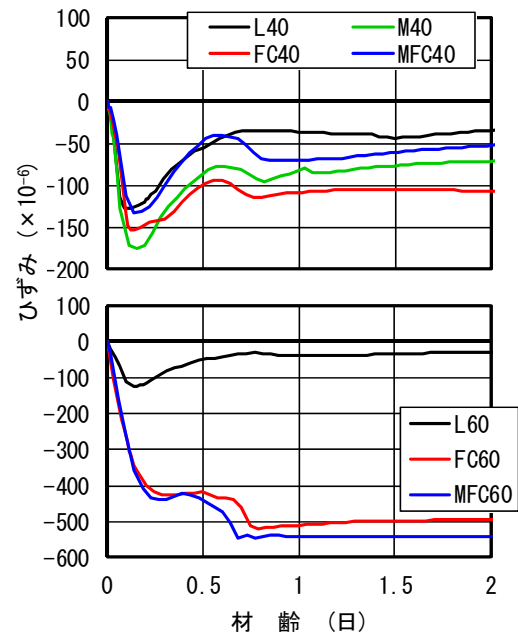


図-9 ひずみの経時変化

までコンクリートは収縮し、その後材齢1日程度で一旦ひずみが一定になることが分かる。FC60とMFC60のケースは他のケースより材齢1日までのひずみは大きいですが、この2ケースは水セメント比が30%以下で高性能AE減水剤を使用したケースのため、他のケースとひずみの変化が異なるものと考えられる。

図-10より、材齢1日を基点としたひずみは、実験ケースにより異なるものの、材齢100~200日まで膨張した後、収縮する傾向が認められる。セメントの種類によるひずみの違いは、Mが最も膨張し、次いでL、MFCの順にひずみは小さくなり、FCが最も小さいひずみとなった。

材齢273日におけるひずみと単位セメント量の関係を図-11に示す。

図-11より、材齢273日のひずみは、セメントの種類によりひずみ量は異なるものの単位セメント量の増加にしたがい小さくなる傾向(収縮が大きくなる)であり、FCとMFCが最も小さく、ついでL、Mの順に大きくなった。材齢273日ではひずみ量がまだ一定になっていない

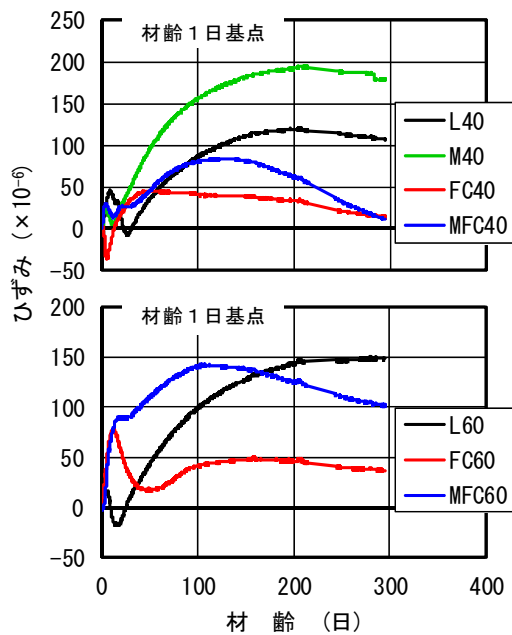


図-10 材齢1日を基点としたひずみの経時変化

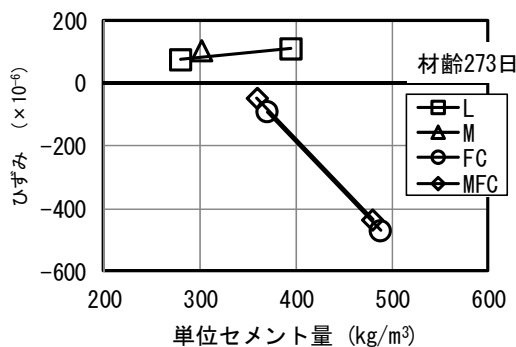


図-11 材齢273日のひずみと単位セメント量の関係

ため、実験を継続する予定である。また、本実験ではセメントの鉱物分析およびC-S-H分析の測定をしていないため不明確な点が多く、また骨材中に膨張性鉱物があることも否定できないため、今後の検討課題である。

3.5 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇量の経時変化を図-12に示す。図-12より、断熱温度上昇量はセメントの種類により異なり、FCの温度上昇および最終温度が最も早くかつ高い。次いでMFC、Lの順に遅くかつ低くなる事が分かる。なお、M40のケースは実施していない。

測定結果からコンクリートの熱物性値を式(1)⁴⁾により求めた。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_0)^s}) \quad (1)$$

ここに、 t : 材齢(日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量(°C)

r : 断熱温度上昇速度に関する係数

t_0 : 発熱開始材齢(日)

s : 断熱温度上昇速度に関する係数

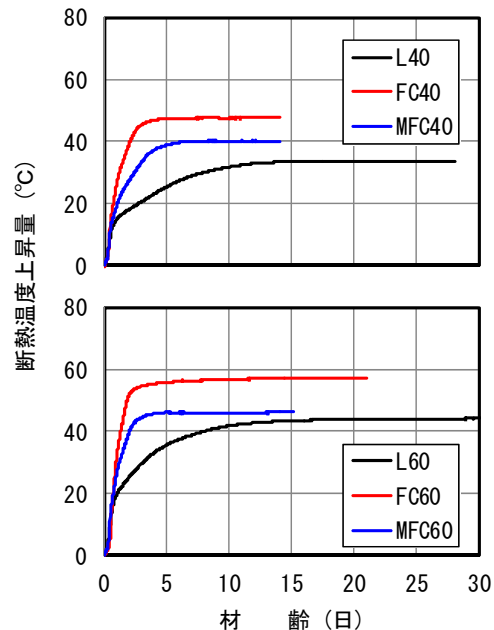


図-12 断熱温度上昇量の経時変化

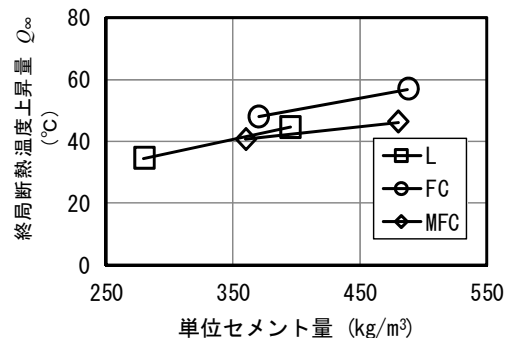


図-13 単位セメント量と終局断熱温度上昇量の関係

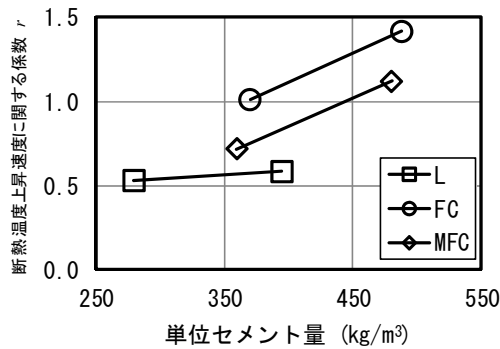


図-14 単位セメント量と断熱温度上昇速度に関する係数の関係

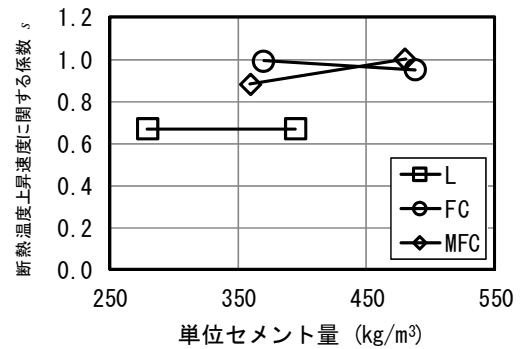


図-15 単位セメント量と断熱温度上昇速度に関する係数 s との関係

式(1)により求めた終局断熱温度上昇量と単位セメント量の関係を図-13に、断熱温度上昇速度に関する係数 r と単位セメント量の関係を図-14に、断熱温度上昇速度に関する係数 s と単位セメント量の関係を図-15に示す。

図-13より、終局断熱温度上昇量は単位セメント量の増加にしたがい高くなること分かる。セメントの種類による違いは、同一単位セメント量で比較すると、FCが最も高く、MFCとLは同程度の終局断熱温度上昇量であった。

図-14より、断熱温度上昇速度に関する係数 r は単位セメント量の増加にしたがい大きくなること分かる。セメントの種類による違いは、同一単位セメント量で比較すると、FCが最も大きく、次いでMFC、Lの順に小さくなった。

図-15より、断熱温度上昇速度に関する係数 s は単位セメント量との相関性は認められなかった。セメントの種類による違いは、Lが最も小さく0.7程度、MFCは0.9～1.0程度、FCは0.95～1.0程度となった。

低発熱型セメントを使用したコンクリートの熱物性値を求めた結果、FCが最も温度上昇が早くかつ最終温度が高くなり、次いでMFC、Lの順に遅くかつ低くなること分かった。

4. まとめ

同一設計基準強度の配合条件における低発熱型セメントを使用したコンクリートについて強度試験および耐久性試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 圧縮強度は、材齢28日まではFCが最も高く、次いでM、MFC、Lの順に低くなるが、初期材齢からの強度増進はLが最も大きく、次いでMFC、M、FCの順となった。他方、圧縮強度と引張強度および静弾性係数との関係は、セメントの種類による相違は認められなかった。
- (2) 凍結融解に対する抵抗性は、同一設計基準強度で比

較するとFCが最も高く、次いでMFC、M、Lの順に低くなった。しかし同一水セメント比で比較すると同程度の耐久性であり、設計基準強度より水セメント比の影響が大きいと考えられた。

- (3) 乾燥収縮量は、FCが最も小さく、次いでMFC、M、Lの順に大きくなった。FCおよびMFCはMおよびLより単位水量が少ないことが乾燥収縮量が小さくなった要因と考えられた。
- (4) 自己収縮量は、FCが最も大きく、次いでMFC、M、Lの順となった。しかし材齢273日ではひずみが一定になっていないため実験を継続する予定である。また、膨張傾向が生じたケースがあり、骨材中の膨張性鉱物の確認など検討予定である。
- (5) 断熱温度上昇試験の結果は、FCが最も温度上昇および最終温度が早くかつ高くなり、次いでMFC、Lの順に遅くかつ低くなった。断熱温度上昇に関する係数 r は単位セメント量との相関性が認められたが、係数 s はセメントの種類により変化することが確認された。

参考文献

- 1) たとえば、山路徹、濱田秀則、福手勤、船寄隆：高炉スラグとフライアッシュを混合したコンクリートの材料特性および耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.1, pp.145-150, 2000
- 2) たとえば、神崎隆男、廣島明男、依田彰彦、横室隆：各種低発熱型セメントを用いたコンクリートの長期耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp.63-68, 2004
- 3) 堀田智明、名和豊春：セメント系材料の自己収縮に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.542, pp.9-15, 2001.4
- 4) (公社)日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.47-50, 2008.11