

報 告

[1065] 低発熱型高強度コンクリートの諸性質

溝淵利明*1・岩井稔*1・高木淳*2・武内等*3

1. はじめに

近年, 諸外国では設計基準強度 800kgf/cm^2 レベルの場所打ち高強度コンクリートを用いた施工が行われている。わが国でも超高層RCビルや長大斜張橋のタワー, 大容量地下式貯槽側壁等を適用の対象として, 高強度コンクリートに関する技術開発が積極的に行われている。また, 最近では, 比較的マシブなコンクリート構造物への高強度コンクリートの適用が検討されている。その場合, 単位セメント量の増加によって硬化時におけるセメントの水和反応に伴う温度上昇量が大きくなることや, 粘性の増加に伴いコンクリート製造時での練りまぜ効率の低下, ポンプ圧送時における管内の圧力損失の増加等, 高強度コンクリートを用いる上で解決すべき技術的課題がある。このような技術的課題に対して筆者らは, これまでに高炉スラグ微粉末を大量添加した低熱スラグセメント及び高性能AE減水剤を用いた設計基準強度 600kgf/cm^2 の高強度コンクリートを対象に各種検討を行ってきた[1]。

本報文では, 設計基準強度 600kgf/cm^2 の低発熱型高強度コンクリートの大容量地下式貯槽側壁への適用を目指して, 低熱スラグセメント及びフライアッシュ10%混入マスコン型高炉B種セメントを用いたコンクリートの諸性質について実験的検討を行ったものである。

2. 実験の概要

2.1 コンクリートの要求品質

(1) スランプフロー

これまでの検討結果[1][2]から, 流動性, ポンプ圧送性等の施工性から判断して, 練上り時のスランプフローの目標値を $55 \pm 5\text{ cm}$ とした。また, スランプフローの保持時間は運搬時間等を考慮して90分以上とした。

(2) 凝結時間

地下式貯槽側壁の施工時に, 型枠に生じる最大側圧を設計値である 4 t/m^2 以下に抑えるため, 凝結始発時間の目標値を10時間以内とした。これは, 打設速度が比較的遅く, 凝結時間が比較的長い水中不分離性コンクリートでの側圧は, 凝結始発時間の6割程度まで型枠に生じる側圧がほぼ液圧状態にあるという報告[3]を参考にした。

(3) 圧縮強度

設計基準強度 600kgf/cm^2 に対して, 配合強度は材料のばらつき等を考慮して 720kgf/cm^2 (材令91日) とした。本検討でのコンクリートの目標品質を表-1に示す。

表-1 コンクリートの目標品質

項 目	配合条件	測定方法
スランプフロー	$55 \pm 5\text{ cm}$	水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)
空 気 量	$4 \pm 1\%$	JIS A 1128
凝結始発時間	10時間以内	JIS A 6204
設計基準強度	600kgf/cm^2	——
目 標 強 度	720kgf/cm^2	JIS A 1108
粗骨材最大寸法	20mm	——

*1 鹿島技術研究所第二研究部 研究員, 工修(正会員)

*2 東京瓦斯(株)生産技術部工場建設グループ

*3 鹿島(株)建設総事業本部 東京支店

表-2 セメントの試験成績

セメントの種類	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結			安定性	曲げ強さ (kgf/cm^2)			圧縮強さ (kgf/cm^2)			酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	水和熱 (cal/g)	
			水量 (%)	始発 (時分)	終結 (時分)		3日	7日	28日	3日	7日	28日				7日	28日
LSC	2.96	5770	34.2	3-55	5-55	良	42	53	83	126	240	386	5.7	2.5	0.1	48.4	53.5
FMKC-10	2.89	3980	29.0	4-10	5-30	良	20	32	60	77	146	345	—	—	—	51.0	63.3

2.2 使用材料

(1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメントに粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を約80%混入した低熱スラグセメント（以後LSC と称する）及びフライアッシュ10%混入マスコン型高炉B種セメント（以後FMKC-10 と称する）を用いた。セメントの試験成績を表-2に示す。

(2) 骨材

骨材は、細骨材及び粗骨材とも施工を予定している付近の生コン工場で使用しているものを用いた。骨材の試験成績を表-3に示す。

表-3 骨材の試験成績

項 目	粗 骨 材	細 骨 材
骨材の種類	砕 石 (石灰岩)	山 砂
産 地	八戸産	君津産
粗骨材最大寸法	20mm	—
表乾比重	2.64	2.59
吸 水 率	0.37%	2.05%
単位容積重量	$1580\text{kg}/\text{m}^3$	$1720\text{kg}/\text{m}^3$
実 積 率	62.3%	—
粗 粒 率	6.75	2.47

(3) 混和剤

LSC には、ポリカルボン酸エーテル系の複合物に架橋ポリマーを混入した高性能AE減水剤（N社製）を使用し、FMKC-10 には、高縮合芳香族スルホン酸化合物である高性能減水剤を使用した。また、補助AE剤には高アルキルカルボン酸系のものを用いた。

2.3 コンクリートの配合及び練りませ

LSC 及びFMKC-10 を用いたコンクリートの配合を表-4に示す。配合は、それぞれのセメントについて試験練りを行い、練上り温度20℃で表-1に示す配合条件を満足するように単位水量及び混和剤添加率を選定した。

練りませは、2軸強制攪拌式ミキサ（容量100ℓ、T社製）を用い、全材料投入後120秒練りませた。そして、コンクリート排出後5分間静置させてから練返しを行い、試験を実施した。

表-4 コンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤	AE助剤
LSC	30.0	39.6	160	533	636	1003	6.93	1.60
FMKC-10	30.0	39.6	130	433	717	1081	14.72	0.13

2.4 実験内容

(1) 練上り温度の違いがフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響

高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等の混和材及び高性能減水剤を多量添加したコンクリートの場合、寒中時での凝結時間の遅延や暑中時でのフローダウン等練上り温度及び養生温度に影響を受け易いことから、LSC 及びFMKC-10 についてそれぞれ同じ配合を用いて、練上り温度を10、20、30℃と変化させた場合のスランプフローの経時変化及び凝結時間について実験を行った。

(2) コンクリートの力学的特性及び熱的特性

LSC 及びFMKC-10 を用いたコンクリートの力学的特性（圧縮強度、引張強度、弾性係数）に関する試験及び断熱温度上昇試験を実施した。圧縮強度などの力学的特性については、材令28, 91日以外に若材令時（材令1, 3, 5, 7日）についても試験を実施した。また、養生は供試体脱型後 20 ± 2 ℃の水中養生を行った。

断熱温度上昇試験は、M社製の空冷式断熱温度上昇試験装置を用いて行った（コンクリートの容積は約50ℓ）。試験期間は10日間とした。

(3) クリープ及び乾燥収縮

LSC 及びFMKC-10 を用いたコンクリートについて乾燥収縮試験（JIS A 1129）を実施した。試験は $10 \times 10 \times 40$ cmの供試体を用い、測定はコンパレータ法で行った。

クリープ試験はLSCのみ実施し、載荷材令7, 14, 28日の3ケースについて行った。供試体は 15×30 cmを用い、供試体からの水の逸散を防ぐためにエポキシ樹脂で供試体周囲にコーティングを施した。ひずみの測定は、供試体内部にコンクリートひずみ計を埋込んで行った。また、荷重は載荷時の圧縮強度の35%とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 練上り温度の違いがフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響

練上り温度を $10 \sim 30$ ℃に変化させた場合のLSC 及びFMKC-10 を用いたコンクリートのスランブフローの経時変化を図-1に示す。LSCの場合、練上り直後のスランブフローは、温度による影響をほとんど受けないが、 30 ℃と高温の場合にフローダウンが大きく、90分後には約20cmフローが低下する結果となった。また、 10 ℃と 20 ℃を比較すると、90分までのフローの保持は 20 ℃の方が良くなっていた。これは、水和が促進される高温時では、今回使用した混和剤のスランブ保持能力が十分でなく、スランブフローを保持するのに適した温度があるためと思われる。一方、FMKC-10の場合、練上り直後のスランブフローは温度が高くなるほど大きくなり、練上り温度 30 ℃の条件ではLSCとは逆にほとんどフローダウンが見られなかった。セメントの種類と温度に合わせて高性能AE減水剤の流動保持効果をいかに制御するかが依然大きな課題である。

次に、凝結試験結果を図-2, 3に示す。図-2から、FMKC-10はLSCに比べ練上り温度 $10 \sim 30$ ℃の範囲において、1～3時間程度凝結始発時間が遅く、低温時において凝結始発時間10時間以内の条件を満足できない結果となった。また、図-3に示すように、練上り温度が異なっても同一配合であれば凝結始発までの積算温度（コンクリート標準示方書の方法、 -10 ℃を基点）はほぼ一定になっている。このことは、実構造物での温度測定結果から、凝結始発時間がある程度推定できることを示すものである。

3.2 コンクリートの力学的特性及び熱的特性

LSC 及びFMKC-10 を用いたコンクリートの圧

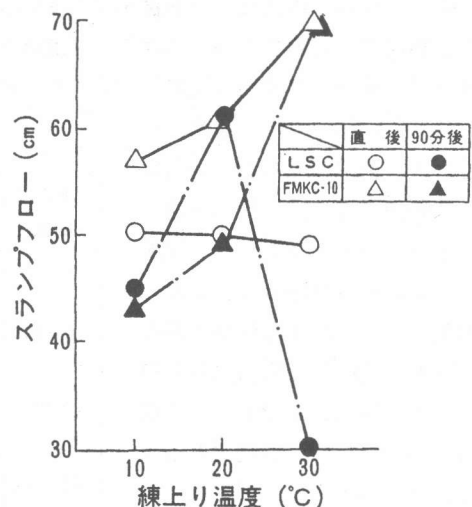


図-1 練上り温度とスランブフローとの関係

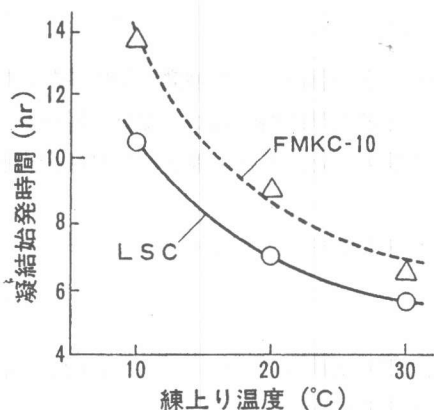


図-2 練上り温度と凝結始発時間との関係

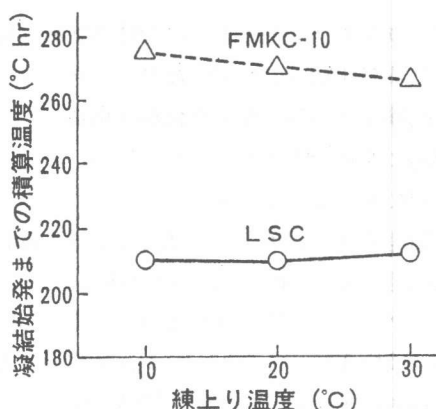


図-3 練上り温度と積算温度との関係

縮強度、引張強度及び弾性係数の試験結果を表-5及び図-4～6に示す。

図-4から、LSC及びFMKC-10とも材令91日において、ほぼ所定の強度を満足する結果となった。LSCは、若材令時での強度発現がFMKC-10よりも大きく、このことは、若材令の強度が積算温度に比例すると考えた場合、LSCの方がFMKC-10に比べて、寒中時での型枠の脱型が早く行える利点を有していると思われる。

引張強度は、図-5に示すようにLSCは若材令での強度発現が大きく、FMKC-10は長期材令での強度増進が大きい傾向を示した。また、静弾性係数に関しては、図-6に示すようにLSC及びFMKC-10ともほぼ同様な発現を示した。

LSC及びFMKC-10の練上り温度20°Cでの断熱温度上昇試験結果を図-7に示す。また、比較のために同じ強度レベルでの普通ポルトランドセメントを用いたケース（水セメント比30%，単位セメント量500kg/m³）[1]についても併記した。

図-7から、単位セメント量が最も多いLSCの断熱温度上昇量Kが最も小さく、普通ポルトランドセメントの場合と比較して約20°C低減した。一方、FMKC-10の場合、単位セメント量が最も少ないものの、断熱温度上昇量Kは普通ポルトランドセメントとそれ程変わらない結果であった。また、単位セメント量1kg当りの温度上昇量で比較した場合、LSCが最も小さく0.068°Cであり、FMKC-10が0.117°C、普通ポルトランドセメントが0.114°Cで、両者はほぼ同等であった。また、温度上昇速度に関する定数 α で

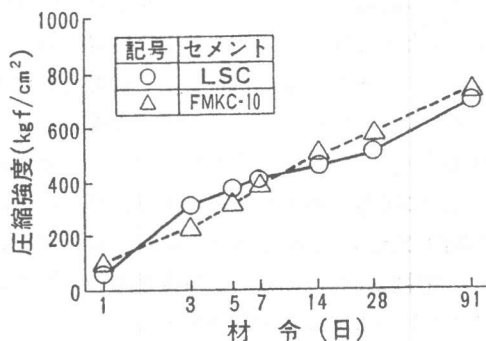


図-4 圧縮強度試験結果

表-5 コンクリートの力学特性試験結果

セメントの種類	試験項目	試験材令							
		1日	3日	5日	7日	14日	28日	91日	
LSC	圧縮強度試験 (kgf/cm²)	61	310	365	404	460	506	697	
	引張強度試験 (kgf/cm²)	14	29	36	36	38	40	45	
	静弾性係数試験 ($\times 10^5$ kgf/cm²)	1.25	2.70	2.94	3.30	3.63	3.73	4.51	
FMKC-10	圧縮強度試験 (kgf/cm²)	74	222	320	392	481	571	731	
	引張強度試験 (kgf/cm²)	7	19	25	33	39	40	49	
	静弾性係数試験 ($\times 10^5$ kgf/cm²)	0.82	2.62	3.12	3.20	3.42	3.72	4.57	

比較した場合、FMKC-10 が最も小さく0.62であり、LSC が1.41でFMKC-10 の2倍以上の速度であり、普通ポルトランドセメントの1.08に比べても1.3 倍程度速い結果となった。

3.3 クリープ及び乾燥収縮

(1). クリープ特性

LSC を用いたクリープ試験結果を図-8に示す。

図-8から、載荷後 600日でのクリープ係数は、載荷材令7日の場合で約1.1、載荷材令14日の場合で約1.0、材令28日で載荷した場合で約0.95であり、載荷材令が遅いほどクリープ係数は小さくなる傾向にあった。また、本試験で得られたクリープ係数とコンクリート標準示方書・設計編に示されているクリープ係数と比較した場合、各載荷材令とも示方書の値の1/2 以下であった。

(2). 乾燥収縮特性

LSC 及びFMKC-10 を用いた乾燥収縮試験の材令6ヶ月までの結果を図-9に示す。

図-9から、材令6ヶ月までの乾燥収縮量はLSC が 230μ 、FMKC-10が 310μ であった。高強度コンクリートの乾燥収縮量に関する既往の文献[4] [5]では、普通ポルトランドセメントを用いた同様な配合条件での材令6ヶ月での乾燥収縮量は $700\sim 800\mu$ であり、LSC で1/3程度、FMKC-10 で1/2 となり、LSC及びFMKC-10を用いた低発熱型高強度コンクリートの方が普通セメントを用いたものより乾燥収縮量が大きく低減されることがわかった。

4. まとめ

低熱スラグセメント及びフライアッシュ10%混入マスコン型高炉B種セメントを用いた設計基準強度 600kgf/cm^2 の低発熱型高強度コンクリートについて、コンクリートの諸特性の検討を行った。本実験で明らかとなった点を以下に示す。

- (1) LSC の凝結始発時間は、練上り温度にかかわらずFMKC-10 に比べて約2時間早い傾向を示した。LSC 及びFMKC-10 とともに凝結始発までの積算温度は、練上り温度にかかわらずほぼ一定であったことから、実構造物においても温度測定結果を活用することにより、その部位での凝結始発時間をある程度推定することが可能と思われる。

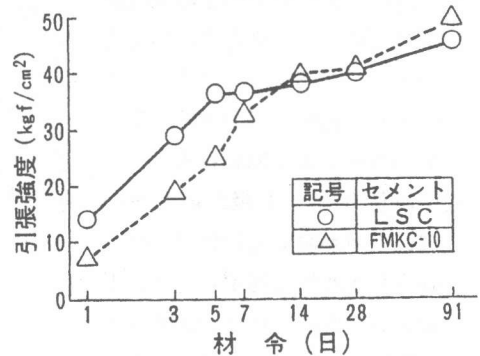


図-5 引張強度試験結果

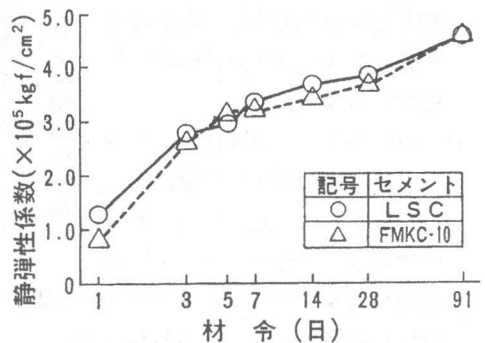


図-6 静弾性係数試験結果

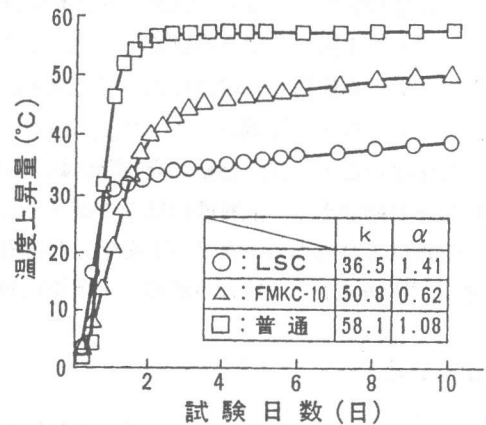


図-7 断熱温度上昇試験結果

(2) LSC は若材令での圧縮強度発現がFMKC-10 よりも大きいことから、LSCがFMKC-10 に比べて寒中時での型枠の早期脱型に対して利点があると思われる。

(3) 単位セメント量が最も多いLSCの断熱温度上昇量は、同じ強度レベルの普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して約20℃の低減が可能となった。単位セメント当りの温度上昇量で比較した場合、LSCが最も小さく、FMKC-10の約1/2程度であった。

(4) LSCのクリープ係数は、示方書・設計編に示された値に比べ、1/2以下であった。また、乾燥収縮量は、普通セメントを用い

た同じ強度レベルのコンクリートに関する既往の文献値に比べてLSCで1/3程度、FMKC-10で1/2程度であることがわかった。

設計基準強度 600kgf/cm²のコンクリートを対象として、低発熱性と凝結が遅れないことを目指して、2種類のセメント（低熱スラグセメント及びフライアッシュ10%混入マスコン型高炉B種セメント）を用いて配合検討を行った。その結果、両セメントを用いた場合とも普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べて、低発熱性は認められるが、低熱スラグセメント使用の方がフライアッシュ10%混入マスコン型高炉B種セメント使用に比べて、①、断熱温度上昇量Kが約14℃小さいこと、②、凝結始発時間が約2時間早いこと、③、若材令での圧縮強度の発現が大きいことが確認され、品質的にはやや優ることがわかった。

今後はこれらのコンクリートを用いた実規模レベルでの打設実験を行い、コンクリートの側圧、ポンプ圧送性や品質管理方法等、実用化に向けて検討を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 万木正弘、溝淵利明、武内等；低発熱型高炉セメントを用いた高強度コンクリートの施工性に関する研究、鹿島技術研究所年報 第39号、pp.7～16、1991.10
- [2] 溝淵利明、万木正弘、峯岸孝二；低熱スラグセメントを用いた高強度コンクリートの施工性に関する検討、土木学会第46回年次学術講演会V、pp.604～604、1991.9
- [3] 土木学会；水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー67、pp.170～192、1991.5
- [4] 福士勲；高強度コンクリートの強度特性及び耐久性に関する実験的研究、住宅都市整備公団 住宅都市試験研究所 調査研究期報 No.90、pp.293～301、1989
- [5] 長瀧重義、米倉亜州夫；高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープの特性、コンクリート工学、Vol.20、No.4、pp.75～87、1982.4

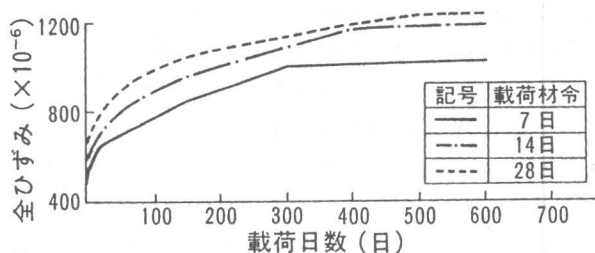


図-8 クリープ試験結果

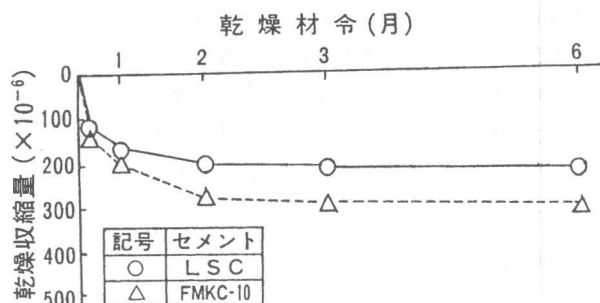


図-9 乾燥収縮試験結果