

論文 新タイプの低発熱形早強セメントコンクリートの諸性状

小田部裕一*¹・小林哲夫*²・鈴木康範*³

要旨：早強ポルトランドセメントは早期に強度発現を得ることができる反面、硬化に伴う発熱および自己収縮量が大きく、温度ひび割れ抵抗性が他のポルトランドセメントに比べて劣る。そのような早強ポルトランドセメントの短所を改善すべく低発熱形早強セメントを開発した。低発熱形早強セメントは化合物組成、粉末度を調整することにより、発熱および自己収縮量を低減させることを可能とし、ポリアルキルスルホン酸塩を主成分とする高性能 AE 減水剤と組み合わせることで強度的な問題も改善できることが判明した。

キーワード：低発熱形早強セメント、発熱、強度、自己収縮、温度ひび割れ

1. はじめに

近年、冬期における小規模なマスコンクリートには早強ポルトランドセメント（以下、早強セメントと称す）が使用されるようになった。特に、PC 桁のように早期に所要の強度が必要とされる場合には、その事例が多くなっている。しかしながら、早強セメントは早期に強度発現が得られるといった特性を持つ一方で、硬化に伴う発熱量、自己収縮量が大きく、温度ひび割れ抵抗性が他のポルトランドセメントと比べて劣るといった問題がある。

本研究では、早強セメントに関する上記のような問題点を改善するため、化合物組成、粉末度を調整した低発熱形早強セメントの開発を行うとともに、早期の強度発現を大きく低下させることのない低発熱形早強セメントコンクリートを使用混和剤との組み合わせにより検討した。また、低発熱形早強セメントコンクリートの物性を実験的に検討し、温度応力解析による温度ひび割れ抵抗性を検討した。更に箱形 PC 桁の壁部分を想定した実物規模試験体の作製による温度履歴、コア強度、応力ひずみの測定結果および蒸気養生後の強度特性についても報告

する。

2. 実験概要

2. 1 低発熱形早強セメントの開発

低発熱形早強セメントの開発段階では、発熱および自己収縮に最も影響を及ぼすと思われる化合物組成における C_2S 量および粉末度を変化させた数種の試製セメントを用い、断熱温度上昇や強度試験結果からその最適値を検討した。この開発段階では、強度特性の基準として材齢 7 日で早強セメントと同等もしくはそれ以上の強度を有することを目標にしているが、混和剤との相性による強度増進効果を得るために、使用混和剤の最適化についても検討した。

2. 2 実験項目

低発熱形早強セメントコンクリートの諸性状の確認では、場所打ち PC 桁に要求されるプレストレス直後の許容圧縮応力度¹⁾および所定の設計基準強度²⁾を加味し、材齢 7 日の圧縮強度が $50N/mm^2$ を満足する配合を対象とした。実験項目は表-1 に示す通りである。

2. 3 使用材料

低発熱形早強セメントの開発段階で用いた

* 1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

* 2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 工修 (正会員)

* 3 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 関東技術センター所長 工博 (正会員)

表-1 実験項目

検討内容	項目	水準
セメントの開発	圧縮強度	早強セメント 7種の試製セメント
	断熱温度上昇	
力学的特性	圧縮強度	早強セメントコンクリート 2種の低発熱形早強セメントコンクリート(使用混和剤を変化)
発熱特性	断熱温度上昇	
収縮特性	自己収縮 乾燥収縮	配合強度 50N/mm ² (材齢7日)を満足する配合
温度ひび割れ抵抗性	温度応力解析	
実規模パネルでの物性	温度履歴 構造体強度 応力	

試製セメントは化合物組成の C₂S 量を 13~25%, 粉末度を 4350~4800cm²/g の範囲で変化させた 7 種であり (表-2 参照), 何れも JIS 規格の早強セメントに合致している。

混和剤は, 基本的にポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤 (以下, SP-N と称す) を使用した。また, 低発熱形早強セメントとの相性による最適化を検討した結果, 強度増進が得られるものとしてポリアルキルスルホン酸塩系の高性能 AE 減水剤 (以下, SP-H と称す) を上記セメントと併用させた。骨材は細骨材に陸砂 (比重: 2.60, 吸水率: 1.90%, 粗粒率: 2.71), 粗骨材に碎石 (比重: 2.64, 吸水率: 0.79%, 粗粒率: 6.64) を使用した。

2.4 コンクリートの配合

低発熱形早強セメントの開発段階では W/C を 40%一定とし, スランプ 10cm, 空気量 4.5% を目標としたコンクリートを用いた。力学的特性の検討段階では, 上記スランプおよび空気量を目標とし, W/C を 35, 40, 45% の 3 水準に変化させたコンクリートを用いた。

3. 実験結果

3.1 低発熱形早強セメントの開発

試製セメントを用いたコンクリートの強度試験結果 (材齢 7 日) および断熱温度上昇試験結果を 図-1 に示す。試製セメントの材齢 7 日の圧縮強度は, C₂S 量 14% (粉末度

表-2 試製セメントの化合物組成

No	粉末度 (cm ² /g)	化合物組成 (%)				SO ₃ (%)
		C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	C ₄ AF	
1	4800	62	12	9	8	3.5
2	4740	61	14	9	8	3.5
3	4660	59	16	8	8	3.4
4	4580	57	18	8	9	3.4
5	4500	55	21	8	9	3.3
6	4420	53	23	7	9	3.3
7	4340	51	25	7	9	3.2

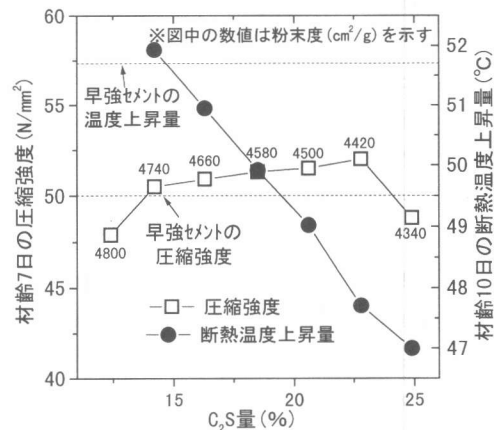


図-1 圧縮強度と断熱温度上昇

4750cm²/g) 程度より早強セメントの強度を上回り, 23% (粉末度 4400cm²/g) でピークに達する。ただし, 25% (粉末度 4350cm²/g) では急激に減少し, 早強セメントの強度を下回る結果となった。断熱温度上昇量は, C₂S 量の増加に伴い小さくなり, 強度および断熱温度上昇の双方を加味すると C₂S 量 23%, 粉末度 4400cm²/g が適当と思われる。このメカニ

表-3 セメントの化学成分

セメント種類	粉末度 (cm ² /g)	化学成分 (%)						化合物組成 (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
早強	4800	20.2	4.9	2.6	63.7	1.4	3.4	60	12	9	8
低発熱形早強	4400	21.5	4.6	2.9	63.2	1.3	3.2	50	24	7	9

ズムに関しては細孔構造に着目し検討すべきと思われるが、水和生成物の析出空間が反応の遅い C₂S 量を増したことにより増加し、早強セメントと比較した場合に 1, 3 日といった初期材齢以降の強度増加が得られたものと考えている。

3. 2 低発熱形早強セメントコンクリートの基礎性状

ここで、使用するセメントは低発熱形早強セメントの開発で実施した予備試験の結果を基に試製したものである。このセメントおよび比較対象とした早強セメントの化学成分等は表-3 に示す通りである。

(1) 圧縮強度

早強セメントと SP-N (以下、HCC と称す)、低発熱形早強セメントと SP-N および SP-H (以下、LHCC1 および LHCC2 と称す) といった 3 つの組み合わせにより W/C=35, 40, 45% の 3 水準で実施した圧縮強度試験結果を図-2 に示す。LHCC1 は材齢 7 日から HCC の圧縮強度を上回り、LHCC2 では材齢 3 日で HCC を上回る結果となった。SP-H 使用による強度増進効果は、セメント粒子の高分散化がセメントと水の接触機会を増加させ、水和反応が促進されたものと思われる。また、早強セメントと SP-H の組み合わせで圧縮強度を確認したところ、大きな強度増進は認められなかった。したがって、HCC, LHCC1, LHCC2 の材齢 7 日で 50N/mm² を満足する配合を算定し (表-4 参照)、断熱温度上昇および収縮特性等の基礎性状を確認した。

(2) 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験結果を図-3 に示す。試

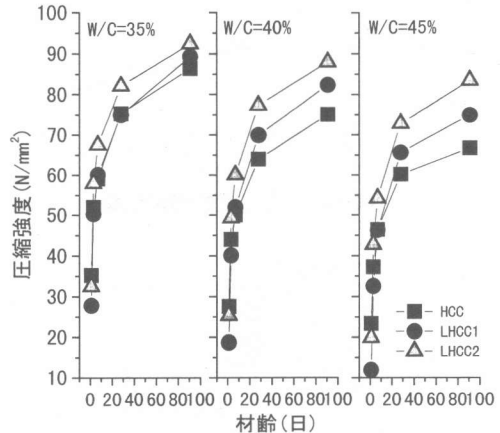


図-2 圧縮強度試験結果

表-4 所定の強度を満足するコンクリート配合

コンクリート種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad.
HCC	41.1	158	384	747	1017	3.84
LHCC1	41.5	158	381	750	1019	3.81
LHCC2	49.4	158	320	800	1019	1.92

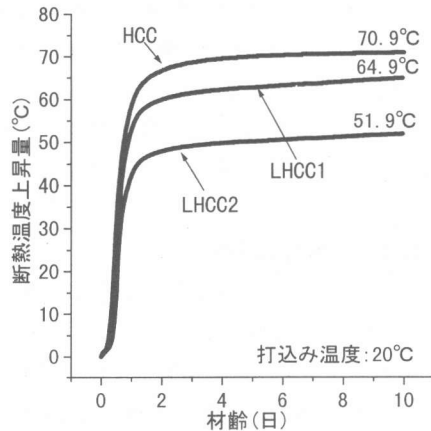


図-3 断熱温度上昇試験結果

験開始から 10 日後の断熱温度上昇量を各コンクリート間で比較すると、LHCC1 は HCC の約 90%、LHCC2 では約 70%にまで低減される。

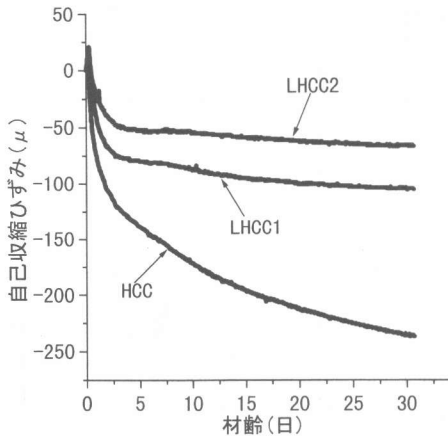


図-4 自己収縮測定結果

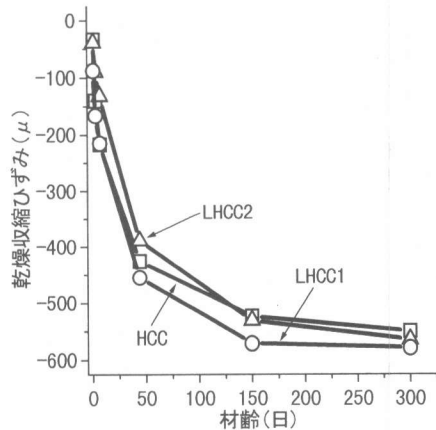


図-5 乾燥収縮測定結果

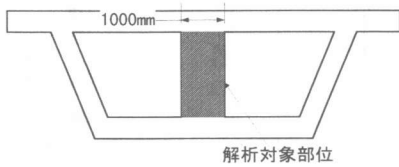


図-6 解析対象構造物

(3) 自己収縮および乾燥収縮

自己収縮および乾燥収縮の測定結果を図-4および図-5に示す。LHCC1, LHCC2の自己収縮量はHCCに比べて大きく低減される。これは、セメント自体の粉末度、化合物組成の影響、もしくはLHCC2に関しては単位ペースト量の低減が大きく影響しているものと考えられる。また、乾燥収縮に関しては、何れのコンクリートともほぼ同等の値に収束している。

(4) 温度ひび割れ抵抗性

(1)~(3)で得られた結果を基に温度応力解析を実施し、温度ひび割れ抵抗性について検討した。解析対象モデルは2室箱形PC桁の中央に位置する壁部分とし(図-6参照)、解析方法は3次元FEM解析である。解析結果より得られた部材中心部の温度履歴、最小温度ひび割れ指数を図-7に示す。温度履歴は断熱温度上昇に依存する部分が大きいため、HCCに対するLHCC1, LHCC2の温度低減効果は断熱温度上昇試験結果に類似している。それに

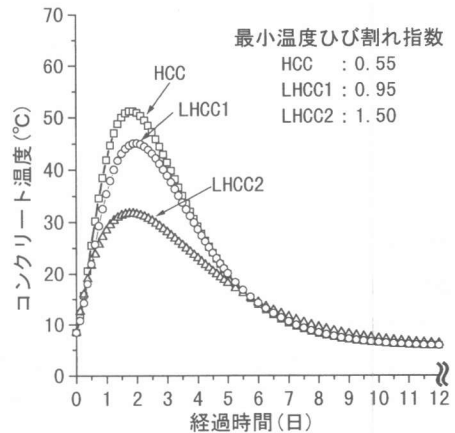


図-7 温度応力解析結果

加えて、LHCC1およびLHCC2は自己収縮量が低減されるため、最小温度ひび割れ指数が大きくなり、温度ひび割れ抵抗性が向上している。

(5) 実物規模試験体による性状確認

図-6に示したような壁構造物を想定し、壁の幅を0.5m, 1.0mと変えた2種類の実物規模試験体を用いた温度履歴、コア強度、応力ひずみの測定を実施した。それぞれの結果は図-8~10に示す通りである。図-8より、温度の実測値と解析結果(図-7)はそれぞれの打設温度が異なるため、必ずしも一致するものでないが、温度低減効果は確認できる。また、高温履歴を受けた構造体強度は初期材

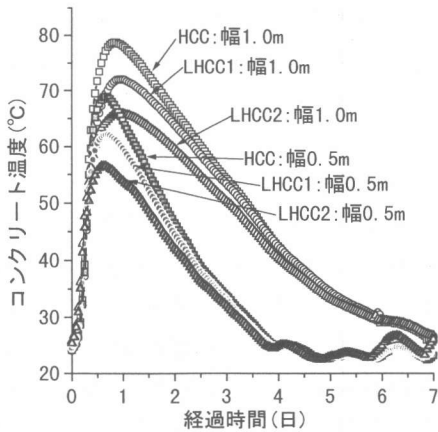


図-8 実規模試験体の温度履歴

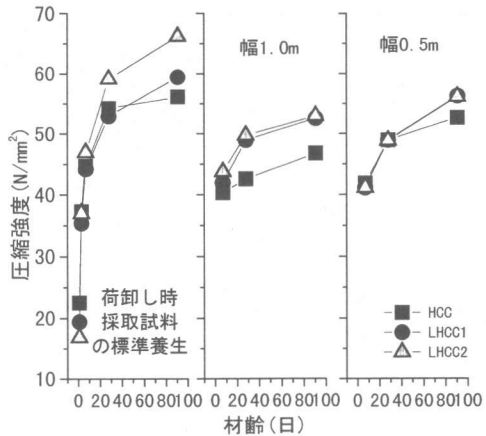


図-9 実規模試験体のコア強度

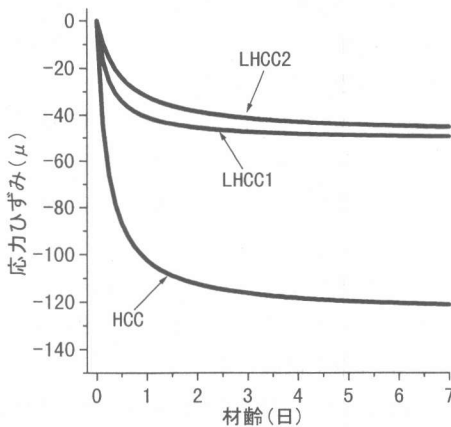


図-10 実規模試験体の応力ひずみ

齢での強度発現は大きいものの、長期的な強度発現は阻害される²⁾。よって、HCCより低発熱化されたLHCC1、LHCC2は、標準養生での長期強度発現性が良好である特性と相俟って構造体強度も良好な発現性を示している。更に試験体に発生する応力ひずみは、HCCに比べてLHCC1、LHCC2の両者とも大きく低減されている。これは、ひずみ計の設置箇所が試験体中心部にあることから、自己収縮低減効果の影響が大きいと考えられる。

次に、この試験体の温度履歴から発熱特性を同定するために逆解析を行った。解析モデルは厚さ・高さ方向に温度勾配が無いことを勘案し、幅方向の1次元とした。境界条件に

表-5 発熱特性の同定値

コンクリート種類	壁幅 [m]	$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^{\delta})\}$		
		Q_{∞}	γ	δ
HCC	1.0	55.1	0.00571	2.368
	0.5	49.1	0.00958	2.233
HCCの断熱		69.6	0.00615	1.800
LHCC1	1.0	51.7	0.00629	2.207
	0.5	46.1	0.01079	2.123
LHCC1の断熱		62.6	0.00131	2.316
LHCC2	1.0	43.7	0.04483	1.464
	0.5	39.0	0.02942	1.711
LHCC2の断熱		50.1	0.00111	2.374

※ t は経過時間 [hr] を示す

における熱伝達率は、HCCの温度履歴より熱伝達率および発熱特性を未知数として解析を行った結果、試験体の幅に関係なく $5.7 \text{ W/m}^2\text{C}$ に収束したことから、この値を既知数として全ケースについて解析を行った。同定された発熱特性に関する係数は表-5に示す通りである。表中には断熱温度上昇試験結果より最小二乗法で求めた近似式の係数も合わせて記したが、この Q_{∞} (終局断熱温度上昇量) と比較して同定された値は小さく、幅が小さくなる毎に減少していく傾向にある。この原因として、逆解析プログラム内で温度降下に合わせた発熱速度の解を求めるには、一般的とされている熱伝達率を既知とした場合、発熱速度を過小に見積もる傾向にある。すなわち、試験体の寸法が小さく温度降下が急になるほど発熱速度を過小に見積もり、最終積分量と

表-6 蒸気養生におけるコンクリート配合

コンクリート種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad.
HCC'	35	158	451	693	1017	4.51
LHCC2'		158	451	693	1019	2.71

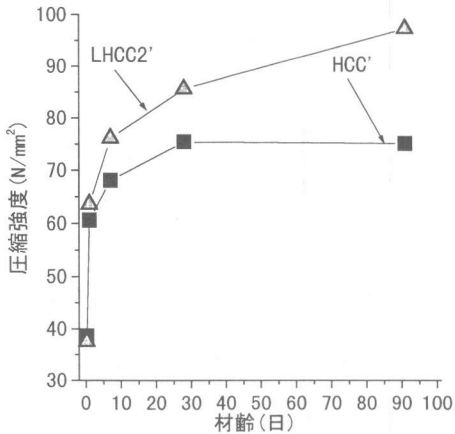


図-11 蒸気養生後の強度試験結果

なる Q_{90} が小さくなってしまふ。よつて、適切な発熱特性を同定するには試験体寸法もしくは部材寸法に依存する点を考慮する必要がある。

(6) 蒸気養生後の強度特性

早強セメントは、早期に高い強度が得られる特性を生かしてコンクリート製品メーカーにおける蒸気養生製品に用いられることが多い。

そこで、低発熱形早強セメントの上記分野への適用性を検討するために、蒸気養生後の強度特性を実験的に求めた。セメントおよび混和剤の組み合わせによるコンクリートの種類は HCC', LHCC2' の 2 種類とした。PC 桁を対象としたコンクリートの配合は、表-6 に示す通りである。蒸気養生条件は、20°C で前養生 3hr, 昇温 15°C/hr, 65°C で 3hr 保持とした。

圧縮強度試験結果を図-11に示す。脱型直後の圧縮強度を比較すると、HCC' と LHCC2' はほぼ同等となっているが、その後 LHCC2' の強度発現は良好であり、24 時間以降 HCC' との差が徐々に大きくなつてゐる。よつて、LHCC2' のように使用混和剤を最適化したコン

クリートに関しては強度発現性も良好となり、早期に所定強度を必要とする蒸気養生製品へも適用可能と考えられる。

4. まとめ

- 1) 材齢 7 日の圧縮強度および断熱温度上昇量に着目した場合、化合物組成や粉末度を調整することによつて、早強セメントと比較して発熱を抑えかつ同等の強度を有する低発熱形早強セメントの製造が可能となる。
- 2) 低発熱形早強セメントを用いたコンクリートは早強セメントの場合と比べて、材齢 7 日以降で同等以上の強度を有し、使用混和剤の最適化を図ることによつて、更に高い強度発現性が得られる。
- 3) 強度レベルを同等とした低発熱形早強コンクリートは早強セメントコンクリートに比べて、最大 30% の発熱温度低減効果が得られる。
- 4) 低発熱形早強セメントコンクリートは早強セメントコンクリートに比べて自己収縮量が 50% 以上低減可能となる。
- 5) 発熱および自己収縮の低減が可能な低発熱形早強セメントコンクリートは、従来の早強セメントコンクリートに比べて温度ひび割れ抵抗性が向上する。
- 6) 低発熱形早強セメントコンクリートは、長期的な構造体強度の発現性が良好となる。
- 7) 使用混和剤の最適化を謀つた低発熱形早強セメントコンクリートは蒸気養生を行った場合、早強セメントコンクリート以上の強度発現を有する。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 日本道路協会, 1996
- 2) 堀口浩司, 長曾我部徹, 大塚昭男, 鈴木康範: 各種セメントを用いたコンクリートの高温養生強度, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.766~771, 1993