

報告 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの実構造物への適用

児玉 浩一^{*1}・石川 哲也^{*2}・菅原 竜也^{*3}・廣島 明男^{*4}

要旨：ひび割れ制御を目的として、断熱温度上昇特性および自己収縮特性を改善した低発熱・収縮抑制型高炉セメントを実際の構造物で採用し、コア供試体を用いた物性試験や温度応力計測を行い、実構造物レベルにおける各種性状を確認した。その結果、この高炉セメントを使用すると通常の高炉セメントB種を使用するよりも、温度ピークが下がり、ひび割れ制御効果が有効であることが明らかとなった。

キーワード：高炉セメント，断熱温度上昇，自己収縮，低発熱，温度応力解析

1. はじめに

マスコンクリートは、セメント水和熱によるコンクリートの温度変化や自己収縮に伴う体積変化によりひび割れが発生し、構造物の諸性能を低下させる可能性がある。これらのひび割れを制御するためには、低発熱形セメントを用いて水和熱を小さくすることや自己収縮の少ないセメントを用いることが効果的である。

ひび割れ抑制のために開発された「低発熱・収縮抑制型高炉セメント」（以下、低発熱型高炉セメントと略す）は、JIS R 5211（高炉セメント）の適合範囲内で比表面積を小さくして反応性を抑制し、せっこう量を増やして収縮量を制御したものである。このため、通常の高炉セメントよりも温度上昇量が小さく、自己収縮量が少ない材料特性を有している。

本報告は、本セメントを実構造物レベルに適用した際の力学的特性や温度特性を把握する目的で、コア供試体による物性試験や温度応力計測を行い、それらの評価を行ったものである。

2. 構造概要および配合・使用材料

2.1 適用構造物の概要

低発熱型高炉セメントを適用した実構造物は、

容量12,000klのプロピレン地上式PCタンクのうち底板部（直径27m，厚さ1m，設計基準強度30N/mm²）であり、構造概略を図-1に示す。

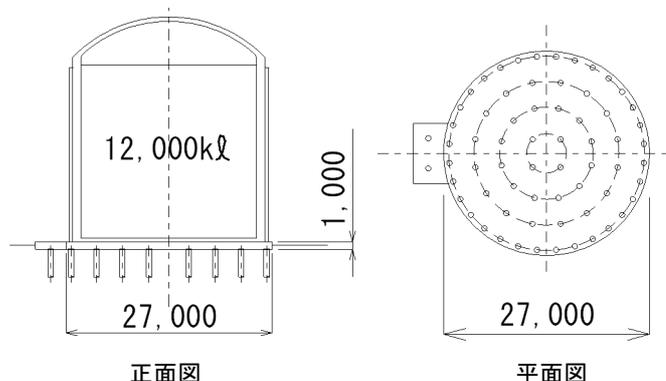


図-1 構造概略

2.2 示方配合および使用材料

示方配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。このうち使用したセメントの仕様を表-3に示す。本セメントは、断熱温度上昇量および自己収縮を小さくする目的で、高炉スラグの比表面積を3300cm²/g程度とし、SO₃量を4%程度に引き上げられたものである。なお、高炉スラグの置換率は40%である。

2.3 試験項目および計測項目

コンクリートの物性を把握するため、表-4に示す試験を実施した。特に、実施工環境によ

*1 清水建設（株） 土木事業本部 技術第一部 工修（正会員）

*2 新日本石油化学（株） 技術部

*3 清水建設（株） 土木横浜支店 土木部

*4（株）デイ・シイ セメント事業本部（正会員）

表-1 示方配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	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	混和剤 A
20	12	55.0	4.5	46.4	159	289	845	1012	2.89

表-2 使用材料一覧

種類	仕様	
セメント	低発熱・収縮抑制型 高炉セメントB種	密度 3.04g/cm ³
混和剤	A E減水剤 リグニンスルホン酸化合物 遅延型	
細骨材	千葉県君津産砂	表乾密度 2.57g/cm ³
	北海道上磯郡産砕砂	表乾密度 2.68g/cm ³
	配合容積比 (千葉県産砂：北海道産砕砂)	8：2
粗骨材	北海道上磯郡産	表乾密度 2.69g/cm ³
		Gmax 20mm

表-3 セメント試験成績一覧

品質	種類	高炉セメントB種	
		JIS R 5211 規格値	試験成績
密度 (g/cm ³)		—	3.04
比表面積 (cm ² /g)		3000 以上	3360
凝結	水量 %	—	25.9
	始発 h-min	60min 以上	3-30
	終結 h-min	10h 以下	5-05
安定性	パット法	良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	3 日	10.0 以上	17.3
	7 日	17.5 以上	26.2
	28 日	42.5 以上	46.9
	91 日	—	63.4
化学成分 (%)	酸化マグネシウム	6.0 以下	3.58
	三酸化硫黄	4.0 以下	3.70
	強熱減量	3.0 以下	0.33
	全アルカリ	—	0.51
	塩化物イオン	—	0.009
スラグ混入量 (%)			40

る各種物性の把握を目的に、材齢 28 日においてコア供試体を採取し、各種試験を同時に実施した。

打ち込まれたコンクリートの温度変化および発生ひずみや応力を計測するため、図-2 に示す箇所に計測器を設置した。計測ポイントは、図-2 に示すように、底版中央部を測点 1、半径の中間点を測点 2 とし、底版表面からの深さ 500mm の位置で、熱電対による温度、ひずみゲージによるひずみ、無応力計による自由ひずみ、および有効応力計による応力の計測を実施した。また、表面より 250mm の位置と 850mm の位置に熱電対を設置し、温度の計測を行った。

3. 物性試験および計測結果

3.1 物性試験結果

(1) 標準養生供試体による試験結果

図-3、4 に、標準養生における圧縮強度、引張強度、ヤング係数の各試験結果を示す。

以上の結果から圧縮強度(f^c)と引張強度(f)との関係式を求めると、

表-4 試験項目と計測項目

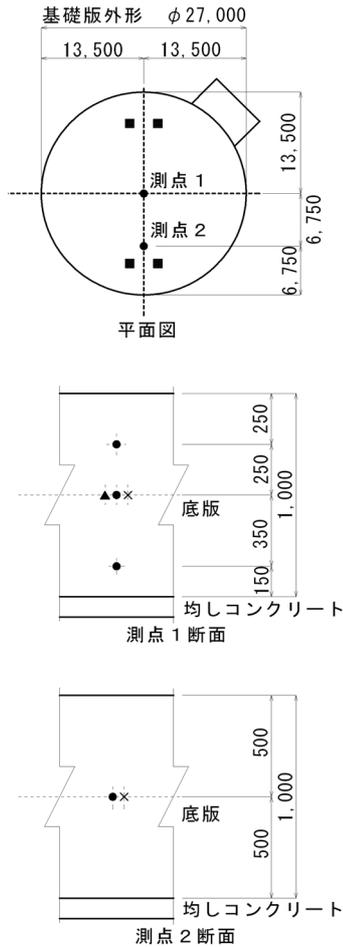
試験項目	圧縮強度試験 (JIS A 1108)	標準養生 コア供試体
	引張強度試験 (JIS A 1113)	標準養生 コア供試体
	静弾性係数試験 (JIS A 1149)	標準養生 コア供試体
	断熱温度上昇試験 (JCI-SQA3)	
計測項目	温度測定	熱電対
	ひずみ測定	ひずみゲージ
	自由ひずみ測定	無応力計
	コンクリート応力の計測	有効応力計

$$f(t) = 0.139 f^c(t)^{0.8533} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

となる。同じく圧縮強度(f^c)とヤング係数(E)との関係式は、

$$E(t) = 4191 f^c(t)^{0.5584} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

となる。



● 熱電対
 × 有効応力計・ひずみ計
 ▲ 無応力容器+ひずみ計
 ■ 強度試験用コア抜き位置

図-2 計測ポイント

引張強度は、土木学会（以下 JSCE と略す）の式に比べると、若材齢時で小さく、10 日以降は材齢が進むに連れ実測値の方が大きくなる。ヤング係数は若材齢時でほぼ同じであるが、7 日以降は実測値の方が大きくなる。

(2) コア供試体による試験結果

材齢 28 日において実構造物から採取したコア供試体の圧縮強度、引張強度、ヤング係数の各試験結果を表-5 に示す。

同表には、標準養生での試験結果を合わせて示したとおり、実構造物のコア供試体の物性値は標準養生より約 10% 小さくなっているが、これは既往の研究¹⁾においても報告されているようにコア採取時の影響であることを考慮すれば、ほぼ同程度の強度発現であると評価できる。

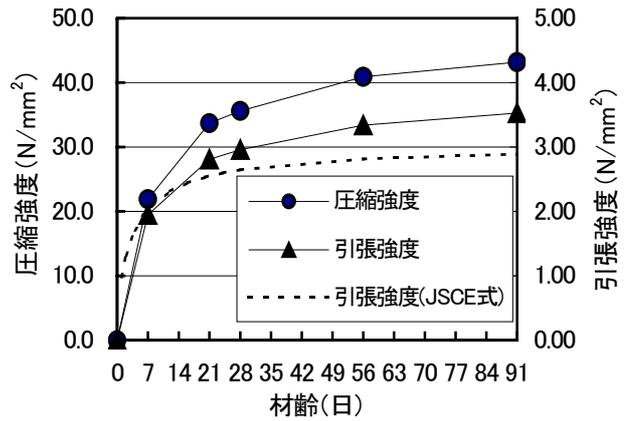


図-3 圧縮強度・引張強度試験結果

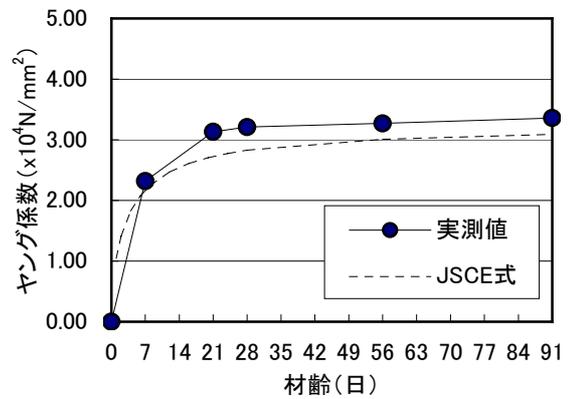


図-4 ヤング係数試験結果

表-5 コア供試体と標準養生供試体との比較

項目	実構造物のコア供試体	標準養生の試験供試体
圧縮強度 (N/mm ²)	33.3	35.6
引張強度 (N/mm ²)	2.65	2.96
ヤング係数 (x10 ⁴ N/mm ²)	2.95	3.21

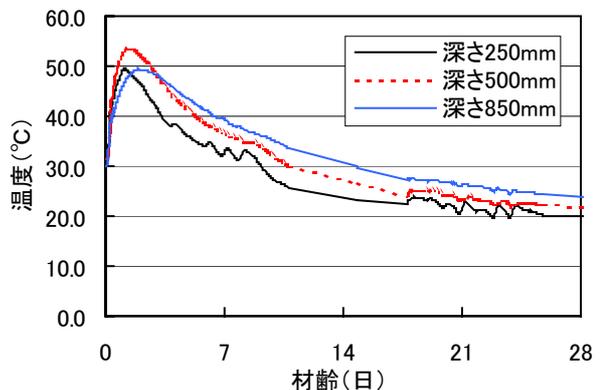


図-5 温度計測結果（測点1）

3.2 計測結果

(1) 温度計測結果

図-5に、底板中央部の測点1（計測位置は高さ方向に3点）での温度計測結果（コンクリート温度経時変化）を示す。部材中心部の温度は、最大で54℃まで上昇していた。

(2) ひずみ計測結果

図-6に、測点1と測点2における、ひずみ計測結果（材齢とひずみの関係）を示す。

なお、以降の記述では（+）が引張である。

(3) 発生応力の計測結果

図-7に、測点1と測点2での温度応力計測結果（材齢と温度応力の関係）を示す。発生応力は最大で1.1N/mm²であり、ひび割れ指数

$(f(t)/\sigma_t(t))$ の最小値は2.19であった。

なお、ひび割れ調査はコンクリート打設後37日間行ったが、コンクリート底板にはひび割れは確認できなかった。

3.3 自由ひずみ計測による線膨張係数の算定

無応力容器内に設置したひずみ計により求められた自由ひずみと温度の計測結果から線膨張係数を求めた。図-8に計測結果を示す。なお、自由ひずみの実測値には自己収縮および乾燥収縮ひずみが含まれているため、ここで得られた線膨張係数はこれらを含む見かけのものである。線膨張係数は、平均約 7×10^{-6} (1/℃)であった。

4. 解析的検討による評価

低発熱型セメントのひび割れ制御効果について解析的評価を行う目的で、物性試験結果や計測結果を用いた同定解析を行った。

4.1 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは、図-9に示すような、底板を対象とした2次元FEM軸対象モデルとした。

(2) 解析定数

表-6に解析に用いた定数を示す。定数は3.1~3.3の実測値を使用することを基本とした。

なお、自己収縮ひずみについては、同一のセメントを用いた既往の研究²⁾結果からを用いた。

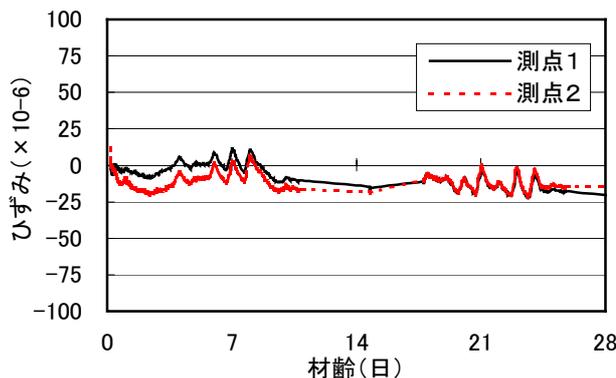


図-6 ひずみ計測結果

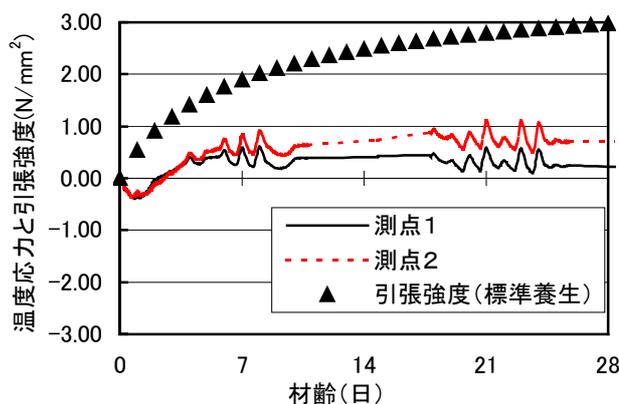


図-7 温度応力計測結果

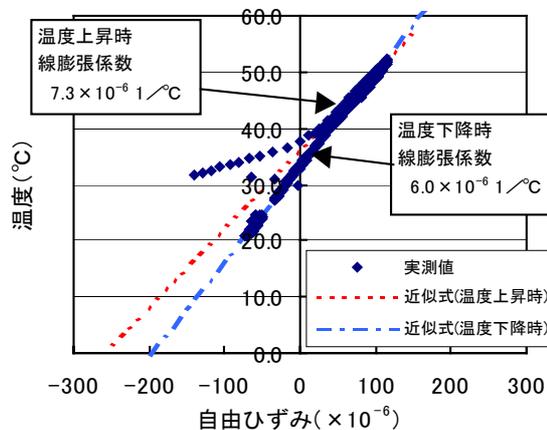


図-8 温度と自由ひずみの関係

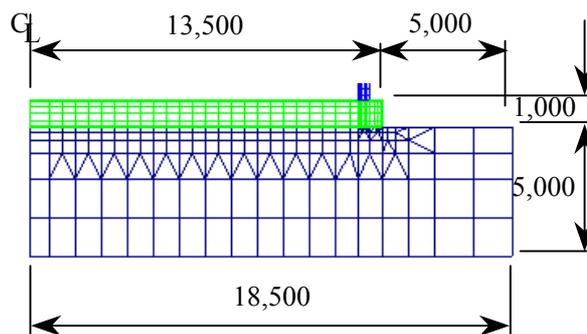


図-9 解析モデル

表一六 実構造物解析用物性値

項目	単位	物性値		
		低発熱・収縮抑制型 高炉セメントB種	通常の高炉セメントB種	低熱ポルトランドセメント
熱伝導率	W/m°C	2.7		
密度	kg/m ³	2400		
比熱	kJ/kg°C	1.15		
断熱温度 上昇量	°C	$T=38.9\{1-\exp(-0.724)t\}$ 打込温度 30°Cで求めた値 (メーカー資料より)	$T=44.5\{1-\exp(-1.364)t\}$ 打込温度 30°Cで求めた値 (JSCE 式)	$T=38.2\{1-\exp(-0.465)t\}$ 打込温度 30°Cで求めた値 (メーカー資料より)
圧縮強度	N/mm ²	f^c (実測値)	f^c (実測値)	f^c (メーカー資料より)
ヤング係数	N/mm ²	$E_t = \phi(t) \times 4191 \times f^c{}^{0.5584}$ (実測値)	$E_t = \phi(t) \times 4700 \times f^c{}^{0.5}$ (JSCE 式)	$E_t = \phi(t) \times 4700 \times f^c{}^{0.5}$ (JSCE 式)
ヤング係数の 補正係数		JSCE 有効ヤング係数法： 材齢 3 日まで : $\phi = 0.73$ 材齢 5 日から : $\phi = 1.0$ 材齢 3 日～5 日まで：直線補完		
引張強度	N/mm ²	$f^t = 0.139 \times f^c{}^{0.8533}$ (実測値)	$f^t = 0.44 \times f^c{}^{0.5}$ (JSCE 式)	$f^t = 0.44 \times f^c{}^{0.5}$ (JSCE 式)
ポアソン比		0.2		
線膨張係数	1/°C	実測値 : 7×10^{-6}	JSCE 参考値 : 10×10^{-6}	JSCE 参考値 : 10×10^{-6}
自己収縮 ひずみ		既往の研究 ²⁾	JCI 実験式	JCI 実験式
外気温	°C	日平均		
打込温度	°C	31.8		
地盤の ヤング係数	N/mm ²	30		

4.2 解析結果

(1) 温度解析結果

結果の一例として図一10 に測点 1 における深さ方向 500mm の温度解析結果と実測値を示す。解析結果は実測値をほぼ再現している。なお、他の測点についても再現性は良好であった。

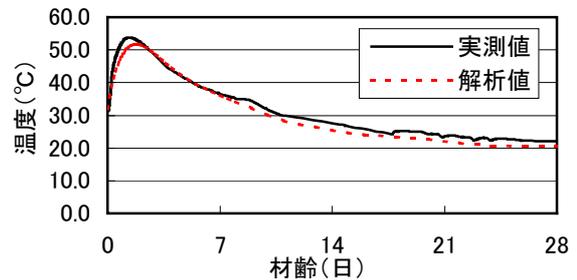
(2) ひずみ解析結果

図一11 に測点 1 のひずみ解析結果と計測結果を示す。解析結果は実測値とほぼ同じであり、他の測点についても同様であった。

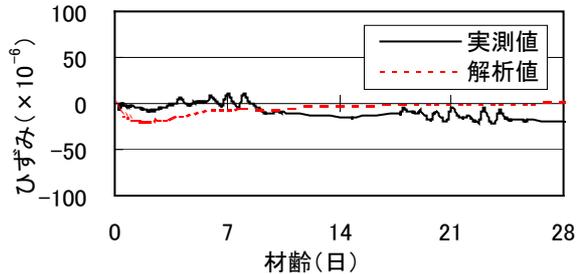
(3) 温度応力解析結果

図一12 に底版中心部の温度応力解析結果、計測結果および引張強度を示す。

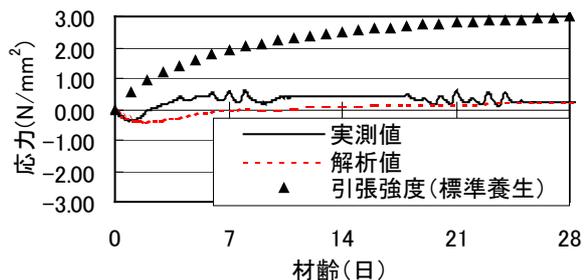
解析の結果、圧縮応力と引張応力の各最大はほぼ同定できた。なお、発生応力が圧縮減少時から引張増加時に転じる時点での応力変化の再現性がやや低いことから、この原因を検討するため、若材齢時の物性についてさらに詳細な検討が必要なものと考えられる。



図一10 温度解析結果と実測値(測点 1 中心部)



図一11 ひずみ解析結果と実測値(測点 1 中心部)



図一12 温度解析結果と実測値(測点 1 中心部)

4.3 低発熱型セメントのひび割れ制御効果に対する評価

(1) 表面付近の温度応力解析結果

前節で構築した解析モデルを用いて、底版表面部のひび割れ発生の可能性について評価を行った。図-13 に温度応力解析結果を示すが、底版表面部のひび割れ指数は 1.00 を上回っており、実構造物でも実際にひび割れが確認されていないことから、低発熱型セメントを用いることによりひび割れ制御がなされていたと判断できる。

(2) 通常の高炉セメントとの比較

低発熱型高炉セメントと通常の高炉セメント、低熱ポルトランドセメントとの比較解析を行った。その結果を図-14, 15 に示す。

本構造物のケースにおいて、低発熱型高炉セメントは、低熱ポルトランドセメントほどではないものの、通常の高炉セメントよりもコンクリート中の最高温度を押さえることができ、8℃程度の改善効果を得られる結果となった。さらに、表面に発生する温度応力も低減させることも可能であり、通常の高炉セメント B 種に比べひび割れ制御に有効であることがわかった。

5. まとめ

低発熱・収縮抑制型高炉セメントのひび割れ制御の効果について、実構造物における計測および数値解析を通じて評価を行った。

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 低発熱型高炉セメントは、通常の高炉セメント B 種と比較して、コンクリートの発熱や温度応力も抑えることができる。
- (2) 低発熱型高炉セメントは、標準養生供試体により得られる物性値を用いることによって、解析によるひび割れ発生の評価が可能である。

謝辞

施工や計測に際し、石川島プラントエンジニアリング(株)にご協力を頂きました。

ここに記して感謝の意を表します。

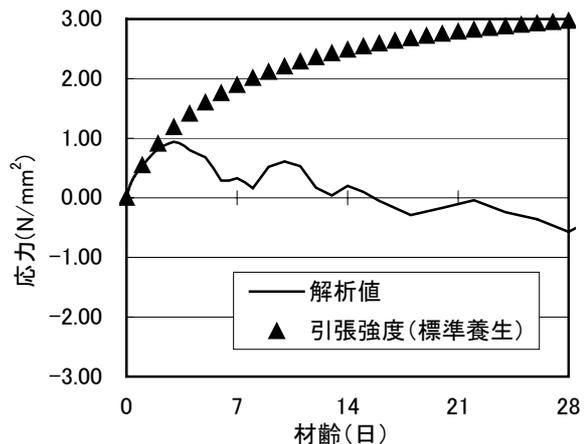


図-13 温度応力解析結果 (測点 1 表面)

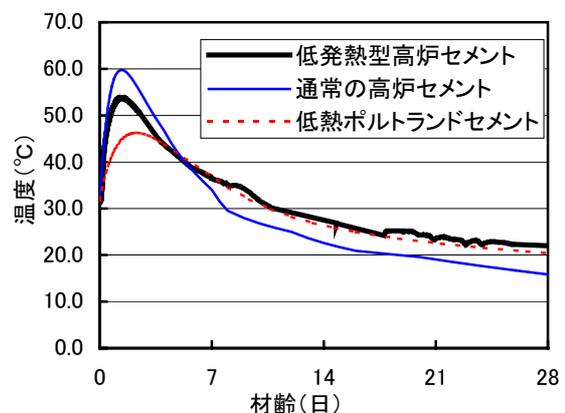


図-14 温度解析結果比較 (測点 1 中心部)

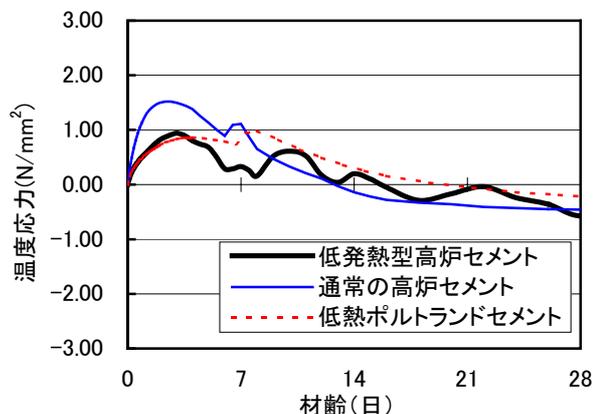


図-15 温度応力解析結果比較 (測点 1 表面)

参考文献

- 1) 太田実: コア強度と標準供試体強度との関係についての既往の資料, 土木学会コンクリートライブラリー第 38 号, pp.75-83, 1974.9
- 2) 大澤友宏, 宮澤伸吾, 廣島明男, 鯉淵清: 高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する実験的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 第 V 部門, pp.589-590, 2004.9