

水和発熱抑制剤を用いたコンクリート壁体の 温度応力の低減に関する研究

東 邦和¹・廣中哲也¹・梅原秀哲²

¹正会員 (株)奥村組 技術研究所 構造研究室 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

²正会員 Ph.D. 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科 (〒466-8555 名古屋市中昭和区御器所町)

マスコンクリートの温度応力対策として、水和発熱抑制剤の温度応力低減効果を定量的に論じることの必要性から一連の実験と解析を行った。はじめに壁面試験体を作成して抑制剤の添加量と発熱性状および強度発現性状の関係を明確にして、三次元 FEM 解析により温度低減効果と解析精度を検討した。次に実大の模擬試験体により、水和発熱抑制剤の温度応力低減効果を実験結果と解析の比較によって確認した。この結果から、壁厚の異なる壁体に解析を適用して低減効果の大きさを応力度低減率として評価できた。また、抑制コンクリートを部分打設した場合にも、全層に添加した場合と同様に評価できることを示した。

Key Words : heat controlling agent, massive concrete, thermal stress, crack

1. はじめに

コンクリート構造物を構築する際に、コンクリートの温度変化による体積変化が、下床版等の既打設コンクリートにより拘束を受け、後打ちのコンクリートに外部拘束ひび割れが発生することが知られている。ひび割れの発生を防止するために、セメント量を低減することや、低熱セメントを使用する等の対策が行われているが、その一つとして水和発熱抑制剤を用いる方法がある^{1)~4)}。この混和剤はコンクリートの発熱を緩やかにするものであり、マスコンクリートを対象に適用が検討されている^{5)~9)}。筆者らは水和発熱抑制剤による温度応力低減効果を得るためにいくつかの実施工適用を行ってきたが^{10)~12)}、温度応力抑制効果を定量的に予測するためのデータが不十分であり、一般的な構造物への適用はし難い状況である。本研究は、水和発熱抑制剤添加コンクリートの発熱性状および若材齢の強度発現性状を得て、温度応力低減効果の解析を行い、構造物に適用した場合の効果を評価することを目的として実施したものである。また、凝結を長時間延長し、可使時間を大幅に延長させることを目的としたものに超遅延剤があり、コンクリートの打ち継ぎ部の一体化の他、マスコンクリート打ち継ぎ部の拘束ひび割れの低減などを目的とした用途¹³⁾があるが水和発熱抑制剤と異なる作用のものである。

セメントの水和熱を抑制することを目的とした混和剤としては、本研究で使用した水和発熱抑制剤³⁾の他に、水和熱の抑制作用を有するグルコースポリマ

ーを主成分とする混和剤¹⁾、尿素の加水分解時における吸熱反応を用いたものがある^{2),14)}。また最近、新たに開発される動きがあり、その中では水和熱を抑制する有機物ソルビトール脂肪酸エステル¹⁵⁾を用いたものなどが報告されている。しかし、これらの報告では、構造物に適用した場合の温度応力低減効果を添加量と壁厚に対して定量的に取り扱ってはいない。本研究で用いた水和発熱抑制剤は、ポリヒドロキシカルボン酸エステルを主成分とし、コンクリートのアルカリ性と打設時のコンクリート温度および水和発熱による温度上昇に応じてエステルが徐々に分解して、水和抑制成分を放出する性質を有する。セメントの水和発熱速度を遅らせ、構造物からの自然放熱を利用して温度上昇を低下させることを特徴としていることから、壁体構造のような熱が外部に逃げやすい構造物の温度応力低減方法として有効である。水和発熱抑制剤の適用には、添加量に対する温度応力低減効果の確認が必要であり、解析により効果を見積もることができて初めて一般的に使用できるものとなると考えられる。

また、壁体全体に水和発熱抑制剤を添加する方法では、多量に添加すると遅延作用によりブリーディングが多くなることや、コストの増加も適用に際して問題となる。そこで全体の使用量を抑える利点からも、部分打設が考えられる^{7),10),11)}。提案方法はベースコンクリートの上に水和発熱抑制剤を添加したコンクリートを1層目として打設し、引き続きその上に抑制剤を添加しないコンクリートを所定高さまで打設する方法である。水和発熱抑制剤はコンクリートの温度上昇

表-1 配合

No. 種類	水セメント比 W/C %	s/a %	単位数 kg/m ³				水和発熱抑制剤 C×% 減水剤 C×%
			W	C	S	G	
1 通常	55	45	160	291	825	1045	— —
2 抑制-1	55	45	160	291	825	1045	0.8 —
3 抑制-2	55	45	160	291	825	1045	1.0 1.0
4 抑制-3	55	45	160	291	825	1045	1.3 1.0

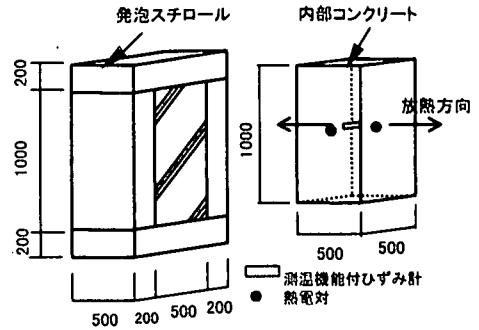


図-1 壁面試験体

に応じて遅延効果が発現されるものであり、部分打設の温度応力低減効果は打設されたそれぞれのコンクリートの発熱および放熱状態に影響されると同時に拘束状態にも影響されるため、コンクリートの温度および応力の挙動を明らかにする必要がある。そこで実験および解析の両面から、温度応力低減効果を検討する。

本研究では、はじめに①壁面試験体を用いて水和発熱抑制剤添加コンクリートの発熱性状と強度発現性状のパラメトリックなデータを得て、解析に用いるための発熱性状、強度発現性状をモデル化し温度解析精度を検討した。次に②実大のベースと壁面を模擬した試験体によって温度応力低減効果を確認し、三次元 FEM 温度応力解析により温度応力解析結果と実験結果を比較して温度応力抑制効果と解析の精度を確認した。さらに③抑制剤の添加量および壁厚をパラメータとした温度応力解析を行い壁厚の異なる場合の温度応力低減効果を算定して、その効果の大きさを定量的に評価した。また、部分打設による 2 層モデルを解析して全層に添加した場合と同様に温度応力低減効果が得られることを明らかにしたものである。

2. 壁面試験体実験

(1) 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント（比重 3.16）を使用し、細骨材は栃木県尻内町産、永野川水系陸砂（7 割）および葛生産、石灰石砕砂（3 割）の混合砂（比重 2.61、吸水率 1.3%、粗粒率 2.80）を使用した。粗骨材は筑波産硬質砂岩砕石（比重 2.70、吸水率 0.5%、粗粒率 6.70、最大粒径 20mm）を使用した。混和剤として水和発熱抑制剤はポリヒドロキシカルボン酸エステルを使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。ここでは水和発熱抑制剤を添加したコンクリートを抑制コンクリートといい、表中に添

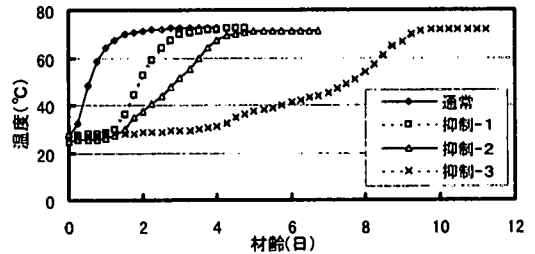


図-2 断熱温度上昇量

加量に応じて抑制-1, 2, 3 と示す。添加しないコンクリートを通常コンクリートといい通常と示す。コンクリートの配合は、水セメント比を一定とし、水和発熱抑制剤の添加量をセメント量に対して 0.8, 1.0, 1.3%に変化させた。この水和発熱抑制剤には、減水剤としての働きを付加していないことから、スランプの調整はナフタレン系高性能 AE 減水剤を添加して行った。また、空気量は AE 助剤（陰イオン界面活性剤）で調整した。目標スランプは 18cm、目標空気量は 4.5%とした。

(2) 試験体

断熱温度上昇試験と 50cm 厚の壁体を模擬した壁面試験体によって、温度上昇の抑制効果を測定した。壁面試験体を図-1 に示す。壁厚 50cm の壁面試験体は、壁面側にのみ熱が逃げるように残りの 4 面を発泡スチロールで断熱した。本実験では抑制剤の添加量をパラメータとし、定量的な断熱温度上昇特性と強度特性値を得ることを目的とした。

(3) 発熱特性

a) 断熱温度上昇特性と壁面試験体温度

断熱温度上昇試験は、空気循環式断熱温度上昇試験装置によって打設温度 20°C における温度上昇量を測定した。なお、試料の量は 50ℓである。

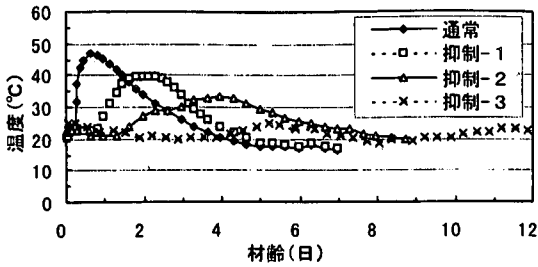


図-3 壁面試験体温度測定結果

断熱温度上昇量を図-2 に示す。通常コンクリートと比較して水和発熱抑制剤の添加量の増加に伴って温度上昇曲線が緩やかになり、発熱速度を低減する効果が認められる。抑制剤の添加により温度上昇勾配が緩やかになるのは、凝結遅延剤と異なりコンクリートの発熱に伴って抑制剤の効果が発現されるためである。特に添加量 1.3%の抑制-3 ではその傾向が顕著であり、材齢 4 日まで温度上昇の開始が遅れ、その後の上昇速度も小さい。ただし、温度上昇速度が小さくなくても単位セメント量が同じであれば、断熱温度上昇量の最大値は同じであることがわかる。

壁面試験体温度測定結果を図-3 に示す。水和発熱抑制剤を添加した試験体は壁面から放熱することによって温度上昇量が低下し、通常コンクリートに比べて、抑制-1 ではピーク温度で 7°C の低下、抑制-2 は 13°C、抑制-3 は 22°C の低下を示した。温度ピークの材齢では通常コンクリートにおける 0.6 日が、抑制-1 は 2 日、抑制-2 は 4 日、抑制-3 では 6 日に遅れている。これから抑制コンクリートを壁厚 50cm の壁体に打設した場合には、明らかなピーク温度の低下と発熱の遅れを示すことがわかった。

打設温度を 30°C、20°C、10°C に変えた場合の水和発熱抑制剤の添加量と断熱温度上昇曲線を図-4 に示す¹²⁾。打設温度が高くなるにつれて曲線の起ちあがり早く勾配も大きい。水和発熱抑制剤を添加したコンクリートも同様な傾向であり、添加量の増大と共に温度上昇勾配が緩やかになる。この結果により、水和発熱抑制剤は打設温度 10°C から 30°C の範囲では温度上昇勾配を緩やかにする効果があることがわかる。

b) 解析のためのモデル化

次に解析のための断熱温度上昇曲線の検討を行う。本解析では、近似式として発熱量を時間の関数で表わした断熱温度上昇曲線を用いる。本解析の適用範囲は、本実験の結果から部材断面としてマスコンクリートとして扱える壁体幅 50cm 以上のものとし、外気温 20°C のものを取り扱う。既往の断熱温度上昇曲線式¹⁶⁾の中から、水和発熱抑制剤添加コンクリートの

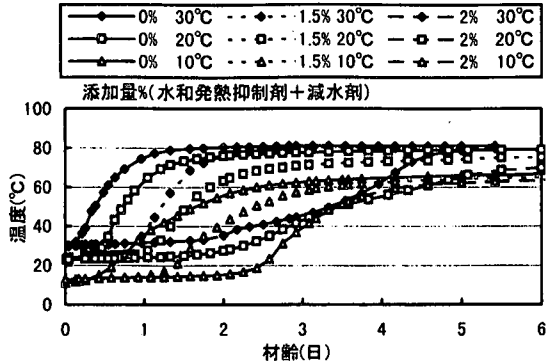


図-4 打設温度の違いによる断熱温度上昇曲線

表-2 断熱温度上昇式の係数值 近似式(1)

種類	Q_{∞} (°C)	γ	β	D(日)
通常	46.1	2.24	1.0	0.2
抑制-1	45.7	1.50	1.0	1.3
抑制-2	46.6	0.80	1.0	1.5
抑制-3	46.0	0.37	1.0	4.0

断熱温度上昇に対応すると思われるものを式(1)に示す。また初期材齢から終局に至るまでの断熱温度上昇傾向をより良く表現できる式として式(2)を用いる¹⁷⁾。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-D)^{\beta}}) \quad (1)$$

$$Q(t) = \frac{1}{1 + a \cdot e^{-b(t)}} Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-D)^{\beta}}) \quad (2)$$

ここに、

$Q_{(t)}$: 時間 t(日)の断熱温度上昇量 (°C)

$Q_{(\infty)}$: 終局断熱温度上昇量(°C)

γ : 温度上昇速度に関する定数

β : 時間のべき乗項

D : 遅延効果に関する係数 (日)

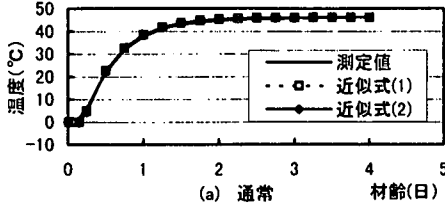
a : 発熱開始から発熱加速期に至るまでの時間に関する係数

b : 発熱加速期の温度上昇速度に関する係数

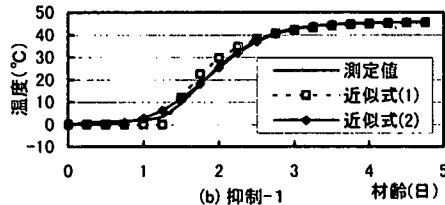
上昇温度を断熱温度上昇式(1)で評価したときの係数を表-2 に、式(2)で評価したときの係数を表-3 に示す。断熱温度上昇測定値と式(1)で近似した曲線を図-5 に示す。断熱温度上昇曲線は、通常の場合には近似曲線(1)(2)と大きな違いはなく、測定値を精度よく表わすことができる。抑制-1 では、断熱温度上昇曲線は抑制効果によって曲線の立ちあがり材齢が遅れると共に、初期の勾配が小さくなる。抑制-2 では、測定

表-3 断熱温度上昇式の係数值 近似式(2)

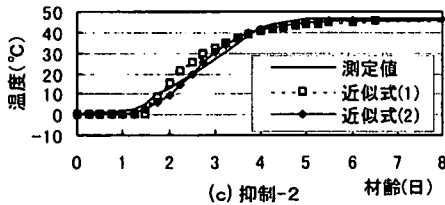
種類	Q_{∞} (°C)	γ	β	D(日)	a	b
通常	46.1	2.24	1.0	0.2	20	20
抑制-1	45.7	1.5	1.0	0.5	90	2.5
抑制-2	46.6	0.8	1.0	0.8	110	2.0
抑制-3	46.0	0.6	1.0	1.2	150	0.75



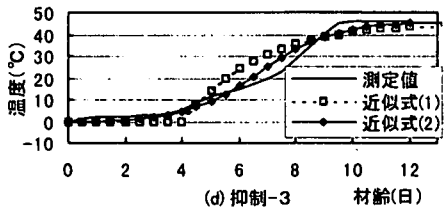
(a) 通常



(b) 抑制-1



(c) 抑制-2



(d) 抑制-3

図-5 断熱温度曲線と近似曲線

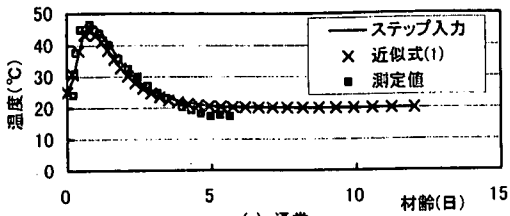
値の曲線は勾配が直線に近くなり、さらに抑制-3 では下向きに凸な曲線となる。添加量の少ない抑制-1 では、近似式(1)(2)と測定値の違いは比較的小さいが、明確な温度低減効果を得ることのできる抑制-2、3 では、近似式(1)の発熱期間の曲線との乖離が大きくなる。従来、水和発熱抑制剤の温度応力解析例では、近似曲線(1)で検討されていたが、この結果から、近似曲線(1)では水和発熱抑制剤を添加したコンクリートの断熱温度上昇を表現できないと考えられた。また、近似式(1)よりも、抑制-2、3の断熱温度上昇曲線に近いと考えられる近似式(2)によれば、水和発熱抑制剤

表-4 解析熱特性値一覧

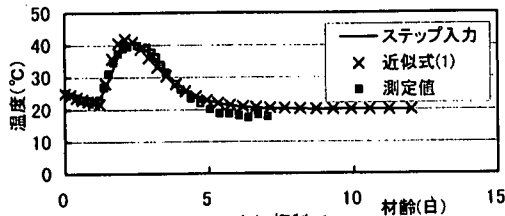
モデル	壁厚 cm	高さ m	長さ m
壁面試験体	50	1.0	0.5
打設温度 25°C	外気温 20°C		
比熱 (kJ/kg°C)	1.281		
熱伝導率 (W/m°C)	2.57		
密度 (kg/m³)	2300		
熱膨張係数 (/°C)	1.0×10^{-6}		
熱伝達率 (W/m²°C)	11.7		
断熱温度上昇曲線	近似式(1)およびステップ入力		

の発熱性状をより近似的に表わすことができる。水和発熱抑制剤の効果を一般的に表わすためには近似式(2)を用いることも考えられる。しかし、ここでは水和発熱抑制剤の発熱性状をより正確に示すことが必要であると考えられた。従って、材齢初期の緩やかな発熱と後半の発熱勾配の特徴を表すために、測定値の曲線から計算ステップごとの時間区分における温度変化量に対応する単位体積当たりの熱量を入力として計算する方法を用いて解析を行い、近似式(1)(2)と比較した。

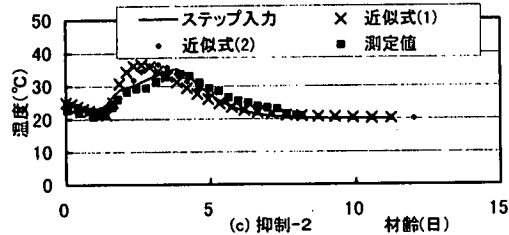
三次元 FEM による壁面試験体の温度変化の解析に用いた熱特性値を表-4 に示す。ステップ入力と近似式(1)(2)による FEM 温度解析結果と測定値の比較を図-6 に示す。通常と抑制-1 ではステップ入力と近似式(1)に大きな違いはなく、測定値を比較的よく表している。近似式(2)は線が重なることから省略している。抑制-2、3 では、ステップ入力と近似式(1)では、温度履歴は大きく異なってくる。近似式(1)では、断熱温度上昇曲線の勾配が小さくなる現象を十分に表せないことから、初期の試験体温度の上昇が大きく計算される。近似式(2)では初期の温度上昇測定値の曲線に近づいているが、まだ十分ではない。これに比較して、ステップ入力による解析結果では勾配が緩やかでピーク温度も低く、実際の温度履歴を正確に表現できるといえる。特に抑制-3 の場合には、断熱温度上昇曲線(図-5d)は発熱初期から緩やかな温度上昇勾配を持ち、発熱期間の途中で勾配が小さくなり下に凸な曲線となるが、これに対応して試験体温度測定値(図-6d)にも発熱期間中にピーク温度が低下する状況がみられた。ステップ入力による解析では測定値と同様の温度変化を



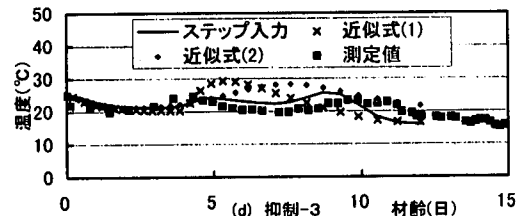
(a) 通常



(b) 抑制-1



(c) 抑制-2



(d) 抑制-3

図-6 FEM 温度解析結果と測定値の比較

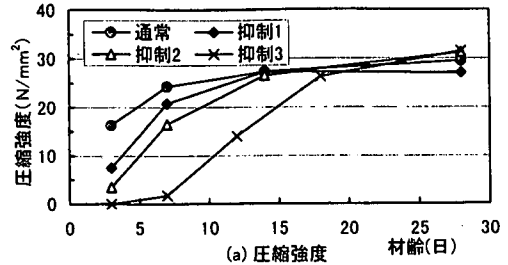
示している。

これらの結果から、水和発熱抑制剤の効果を表わすためには近似式(1)よりも近似式(2)の方が発熱特性を適切に表現でき、今後検討を進めることによって解析に適用できる可能性が考えられる。しかし、ここではステップ入力による方法によって、より高い精度で表わせることが確かめられた。

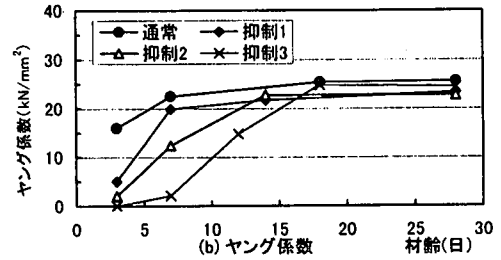
(4) 硬化コンクリートの特性

a) 強度特性

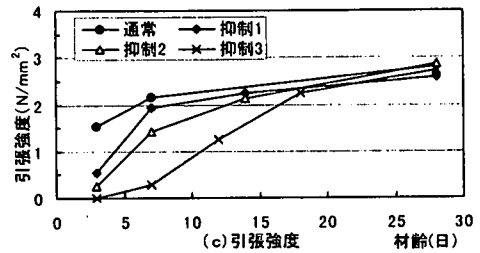
模擬試験体の温度応力解析のために実施した強度特性試験におけるコンクリートの養生条件は 20°C、封緘養生である。通常コンクリートおよび抑制-1、2、



(a) 圧縮強度



(b) ヤング係数



(c) 引張強度

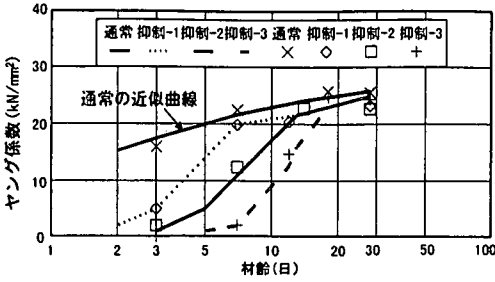
図-7 強度特性測定結果

3 コンクリートの圧縮強度、ヤング係数と、割裂試験から得た引張強度の試験結果を図-7に示す。

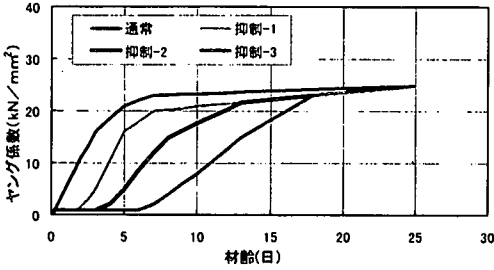
水和発熱抑制剤添加コンクリートは、添加量に応じて初期材齢での強度発現が、通常コンクリートと比べて遅くなり、抑制3の圧縮強度は材齢7日で通常の強度の約10%、12日では約55%と小さい。しかし、材齢18日では通常と同程度の強度となり、それ以降は通常を上回る強度となっている。同様に抑制-1、2においても抑制剤の添加によって強度発現が遅れるが、材齢14日以降では通常と同等の強度発現を得ている。抑制3のヤング係数の発現も、材齢7日で通常の約10%、12日では約60%である。引張強度も同様に材齢7日で通常の約10%、12日では約55%である。いずれも圧縮強度の発現に応じた傾向を示している。この結果は筆者らの文献(12)に示した異なる配合試験の結果でも大きな違いはなく、水和発熱抑制剤添加コンクリートの強度特性を示すものである。これにより、

表-5 配合

No.	種類	水セメント比 W/C %	s/a %	単位量 kg/m ³				水和発熱 抑制剤 C×% 減水剤 C×%
				W	C	S	G	
1	通常	54.0	45.3	157	291	835	1043	— —
2	抑制-3	52.5	48.0	153	291	889	997	1.3 1.0



(a) ヤング係数の対数表示



(b) 解析用ヤング係数

図-8 解析に用いるヤング係数

水和発熱抑制剤を添加したコンクリートは、圧縮強度の発現が遅れると共に、ヤング係数、引張強度の発現も同様に遅れることがわかった。なお、ヤング係数、引張強度も材齢 28 日では、通常コンクリートと同等の値を得ており、硬化コンクリートの最終強度に影響はない。

b) 解析のためのモデル化

解析に用いるヤング係数を図-8 に示す。図-8(a)には対数表示でヤング係数実測値および近似した曲線を示す。この中で通常コンクリートの近似曲線は実験結果で得た材齢 91 日における圧縮強度から次式(3)(4)により求めた有効ヤング係数¹⁸⁾の曲線であり、補正係数 $\phi(t) = 1.0$ とした場合である。

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} f_c'(91) \quad (3)$$

$$Ee(t) = \Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c'(t)} \quad (4)$$

ここに

$f_c'(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度の推定値 (N/mm²)

$f_c'(91)$: 材齢 91 日の通常コンクリートの圧縮強度 33.8(N/mm²)

定数 a : 4.5, b : 0.95 (普通ポルトランドセメント)

$Ee(t)$: 材齢 t 日における有効ヤング係数 (N/mm²)

$\Phi(t)$: 温度上昇時におけるクリープが大きいことによるヤング係数の補正係数

通常コンクリートのヤング係数発現は式(3)(4)によって表すことができるが、水和発熱抑制剤を添加した場合には近似式(3)(4)で表すことはできないため、ここでは実測値を基にしてヤング係数の発現を表すこととした。解析用ヤング係数を図-8(b)に示す。若材齢時のクリープを考慮して、このヤング係数の立ち上がりからの材齢ごとに補正係数 ϕ をかけて有効ヤング係数とした。通常の場合は材齢 3 日まで $\phi(t) = 0.73$ 、材齢 5 日以降 $\phi(t) = 1.0$ とし、その間の材齢は直線補間した。抑制は、ヤング係数曲線から上記材齢の通常と同等のヤング係数の値を得る材齢とし、上記の材齢を抑制-1 は材齢 5 日まで $\phi(t) = 0.73$ 、材齢 7 日以降 $\phi(t) = 1.0$ 、抑制-2 は材齢 8 日まで $\phi(t) = 0.73$ 、材齢 13 日以降 $\phi(t) = 1.0$ 、抑制-3 は材齢 12 日まで $\phi(t) = 0.73$ 、材齢 18 日以降 $\phi(t) = 1.0$ とした。ここでは、抑制剤添加量の違いによる応力抑制効果の検討を目的としていることから、有効ヤング係数をヤング係数の発現に応じて上記のように設定したものである。FEM 解析においては有効ヤング係数も計算ステップごとに対応する値をデータとして入力する方法を用いた。

3. 模擬試験体実験

(1) 使用材料および配合

使用材料は壁面試験体と同じである。配合を表-5 に示す。No.1 は通常、No.2 は抑制-3 の配合である。

(2) 試験体

模擬試験体を図-9 に示す。試験体は長さ 6.0m であり、幅 1.6m のベースコンクリートの上に厚さ 50cm の壁を打ち継いだものである。D10 の鉄筋を縦筋 30cm ピッチ、横筋 20cm のピッチで配筋している。全高 2.1m、壁高さ 1.4m である。

試験体は 2 体作成した。1 体は通常コンクリートを全高打設したものである (通常試験体)。もう 1 体は、抑制コンクリートを壁部高さの 1/2 まで打設し、そしてさらにその上に通常コンクリートを壁部全高ま

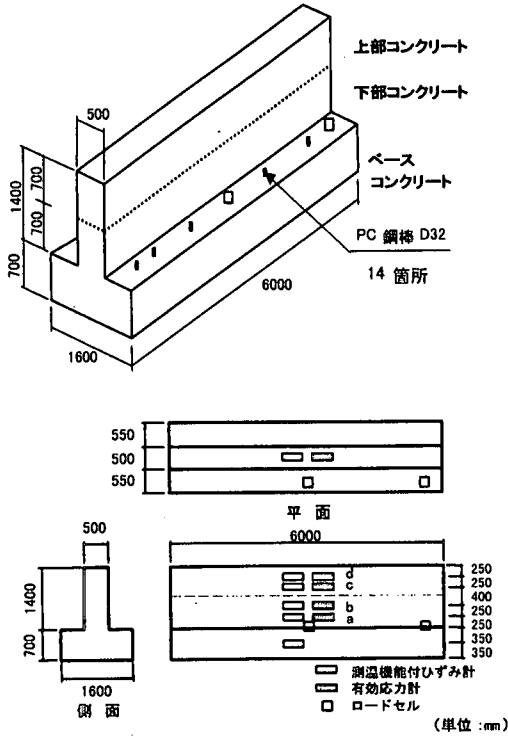


図-9 模擬試験体

で打設したものである（抑制試験体）。両試験体ともベースコンクリートは、打設後 2 ヶ月経過して十分に硬化した段階で、反力床に PC 鋼棒で固定した。

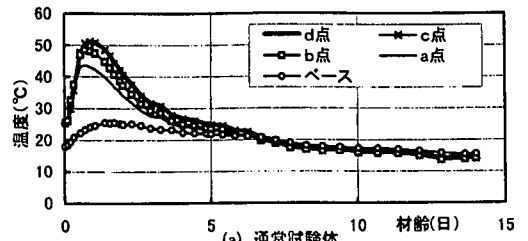
壁部のコンクリートは、通常試験体、抑制試験体ともに連続して全高を打ち上げている。外気温の平均は 20℃、コンクリート打設温度 25℃である。両試験体ともに、壁面天端部には 20cm 厚の発泡スチロールを置き断熱しているが、鉛直面は型枠面のままで放熱させた。型枠は壁打設後 7 日で脱型した。

抑制試験体は壁部のコンクリートを打ち継いでいるので、壁部の高さ 1/2 より上を上部コンクリート、下を下部コンクリートと呼ぶ。また、図-9 に示すひずみ計及び有効応力計の測点位置 a, b, c, d は、抑制試験体の場合には、a, b 点は下部抑制コンクリート中に、c, d 点は上部通常コンクリート中にある。

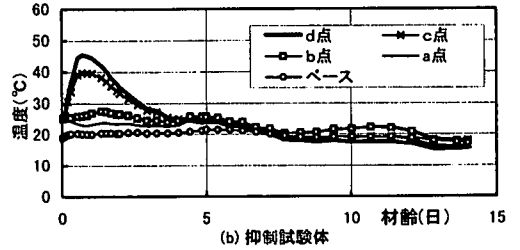
(3) 実験結果および考察

a) 温度測定結果

模擬試験体温度の測定結果を図-10 に示す。通常試験体は壁部全高が抑制剤を添加しないコンクリートであり、一般的な壁体構造物で観測される温度上昇および下降の状況を示した。ピーク温度は d 点の 51.1℃で材齢 0.9 日に生じており、b, c, d 点の温度の差は小さい。a 点のピーク温度が 43.7℃と下がって

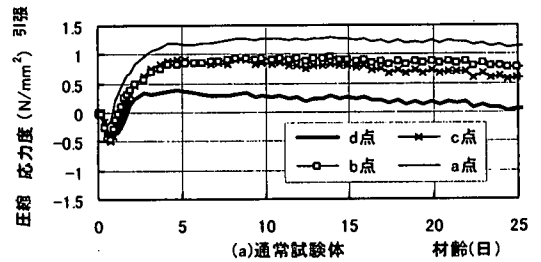


(a) 通常試験体

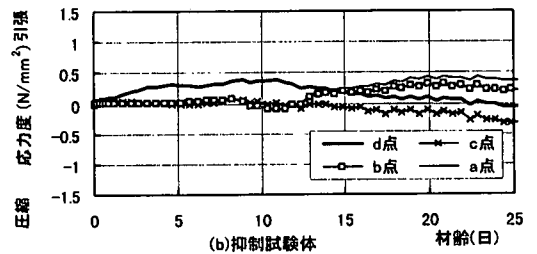


(b) 抑制試験体

図-10 模擬試験体温度測定結果



(a) 通常試験体



(b) 抑制試験体

図-11 有効応力計による応力の測定結果

るのは、ベースコンクリートへの伝熱によるものであり、ベースコンクリートの温度は、25.5℃まで上昇している。

一方、抑制試験体の上部 d, c 点のピーク温度は、それぞれ 45.5℃、39.7℃と通常試験体に比べて低くなっている。これは抑制剤の効果により下部のコンクリートの温度が低いため、上部コンクリートの熱が下部に伝わったことによる低下である。下部コンクリートのピーク温度は b 点で 27.4℃、a 点で

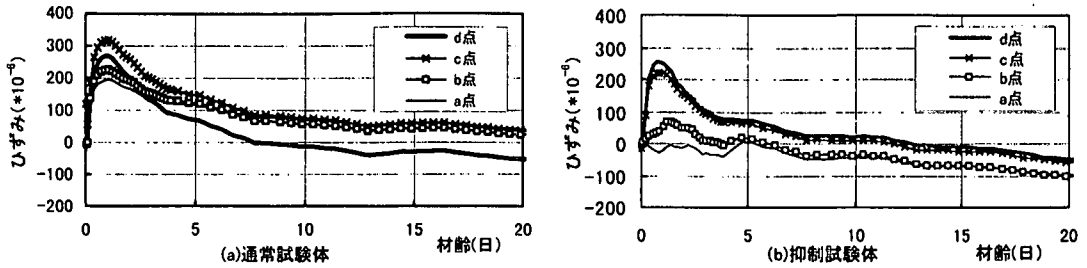


図-12 コンクリートひずみの測定結果

23.8℃と明らかに低く、抑制試験体は通常試験体に比較して温度が低下していることがわかる。

b) 応力測定結果

有効応力計による応力の測定結果を図-11に示す。通常試験体は初期に圧縮応力が発生しており、d点では -0.45N/mm^2 である。その後全体が引張側に転じ、a点で最大 1.3N/mm^2 の応力が発生している。引張応力の大きさは、壁体上部d点から下部a点に順次大きくなっており、壁体下部のベースコンクリートからの拘束の大きい部分に、大きな引張応力が発生している。

抑制試験体は、初期にはa, b, c点にはほとんど応力が発生していない。d点には材齢10日で引張応力 0.38N/mm^2 が生じているが、その後引張応力が減少するように推移する。また、材齢10日以降にa, b点の応力は引張側に推移している。初期にd点に発生する引張応力は、壁体上部の温度が比較的高いことから、ピーク温度以降の温度低下により発生したと考えられる。しかし初期には下部抑制コンクリートは剛性が小さくベースコンクリートによる拘束が働かず、通常試験体と比較して全体に発生する応力は小さい。また、材齢10日以降にa, b点に発生した引張応力は、下部コンクリートの温度低下により発生したものである。ただし、下部コンクリートは、温度の上昇量および下降量が小さいことから、発生応力も小さい。この実験において抑制試験体に発生した引張応力は最大 0.43N/mm^2 であり、抑制コンクリートを下部に打設することにより、抑制試験体に発生する応力は通常試験体と比較して約1/3に低下する。

c) ひずみ測定結果

コンクリートひずみ計による実ひずみの測定結果を図-12に示す。通常試験体はa, b, c, d点とも、 $200\sim 300 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみを示し、ベースコンクリートによる拘束を受ける壁体構造物の一般的なひずみの挙動を示した。抑制試験体では壁の上部コンクリートc, d点は通常試験体と同様に温度上昇量に応じた大きな膨張ひずみを示すが、下部のa, b点は、下部コンクリートの発熱が小さいことから、通常試験体

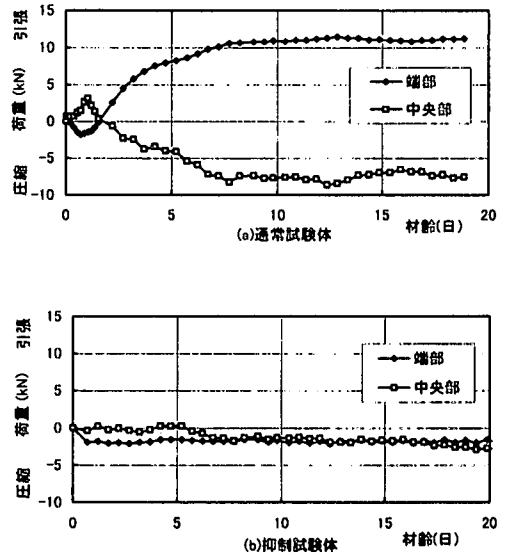


図-13 PC鋼棒応力の測定結果

と比べて小さい膨張ひずみしか発生していないことを示している。またa, b点のひずみの違いは、b点では上部コンクリートの影響を受けて若干の伸びひずみを示すが、下方のa点では上部コンクリートからの影響によるひずみは小さい。

d) PC鋼棒応力測定結果

模擬試験体は、ベースコンクリートの拘束によって壁体に発生する応力を大きくするために、ベースコンクリートを反力床にPC鋼棒で固定している。

PC鋼棒に発生する応力の変化をロードセルにより測定した。応力の測定結果を図-13に示す。通常試験体のベースコンクリートの端部を固定しているPC鋼棒では最大引張応力 11.5kN 、ベースコンクリートの中央部を固定しているPC鋼棒では最大圧縮応力 -8.6kN である。壁体コンクリートの温度変化により、

表-6 解析モデルと物性値一覧

No.	壁厚 cm	高さ m	長さ m
モデル-1	50	2.1	6.0
モデル-2	100	4.2	12.0
モデル-3	200	8.4	24.0
打設温度 25°C		外気温 20°C	
比熱 (kJ/kg°C)		1.281	
熱伝導率 (W/m°C)		2.57	
密度 (kg/m ³)		2300	
熱膨張係数 (/°C)		1.0×10 ⁻⁵	
熱伝達率 (W/m ² °C)		11.7	
ベースコンクリートの弾性係数(N/mm ²)		3×10 ⁴	
壁体コンクリートの断熱温度上昇量		図-2 をグラフ 入力	
壁体コンクリートの弾性係数(N/mm ²)		有効ヤング係数をグラフ 入力	

ベースコンクリートは初期に上に凸、その後下に凸な挙動を示し、それに伴って端部と中央部の PC 鋼棒に応力が発生したことを示している。抑制試験体も中央部の PC 鋼棒が初期に引張から圧縮に移行する挙動がわずかに見られるが、発生応力の大きさは通常試験体と比較して圧縮側で-2.9 kN と著しく小さくなっており、抑制試験体では発生応力が低減されている。

4. 三次元 FEM による温度応力低減効果の検討

(1) 解析目的

壁モデルを対象として水和発熱抑制剤の温度応力低減効果を比較するため、三次元 FEM を用いて増分法による解析を行った。はじめに模擬試験体の実験結果と解析結果を比較した。次に壁厚とコンクリートの種類をパラメータとして解析を行い、以下に示す2方法について温度応力低減効果を検討した。

- ①水和発熱抑制剤を壁部の全コンクリートに使用する方法
- ②水和発熱抑制剤を添加した抑制コンクリートの上に通常コンクリートを層状に連続打設する部分打設方法

(2) 解析に用いた物性値

物性値一覧を表-6 に示す。解析における断熱温度上昇量は、壁面試験体に使用した各コンクリートの断熱温度上昇量の測定値 (図-2) から求めた計算ステップごとの熱量を与えた。ヤング係数は、強度試験結果から得た図-8 (b) に示すモデルを用いた有効ヤング係数を与えた。また、熱膨張係数の模擬試験体による実測値の平均値は通常で 10.0×10⁻⁶/°C、抑制-3 で 10.4×10⁻⁶/°Cであるが、解析には 10.0×10⁻⁶/°Cを用いた。

表-7 解析ケース一覧

ケース	解析モデル	計算条件
1	モデル-1 壁厚 50cm	通常コンクリート単独使用
	1 層モデル	抑制-1 単独使用
		抑制-2 単独使用
2	モデル-1 壁厚 50cm	通常コンクリート単独使用
	2 層モデル	抑制-1 (1 層目) + 通常 (2 層目)
		抑制-2 (1 層目) + 通常 (2 層目)
抑制-3 (1 層目) + 通常 (2 層目)		
3	モデル-2 壁厚 100cm	通常コンクリート単独使用
	1 層モデル	抑制-1 単独使用
		抑制-2 単独使用
抑制-3 単独使用		
4	モデル-2 壁厚 100cm	通常コンクリート単独使用
	2 層モデル	抑制-1 (1 層目) + 通常 (2 層目)
		抑制-2 (1 層目) + 通常 (2 層目)
抑制-3 (1 層目) + 通常 (2 層目)		
5	モデル-3 壁厚 200cm	通常コンクリート単独使用
	1 層モデル	抑制-1 単独使用
		抑制-2 単独使用
抑制-3 単独使用		
6	モデル-3 壁厚 200cm	通常コンクリート単独使用
	2 層モデル	抑制-1 (1 層目) + 通常 (2 層目)
		抑制-2 (1 層目) + 通常 (2 層目)
抑制-3 (1 層目) + 通常 (2 層目)		

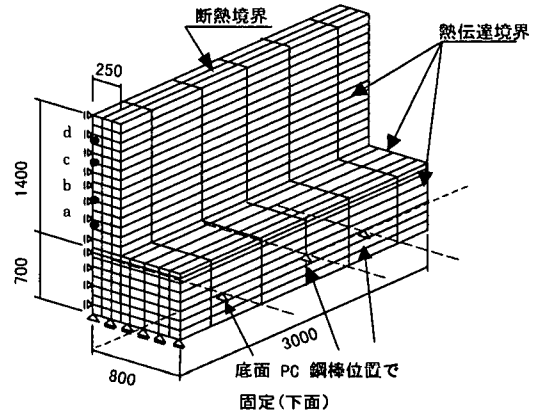


図-14 解析モデル 1 (1/4 断面モデル)

(3) 解析モデルと解析ケース

解析ケースの一覧を表-7 に示す。50cm (モデル 1)、100cm (モデル-2)、200cm (モデル-3) と 3 種類の壁厚とし、高さおよび長さは模擬試験体と相似形で大きさを変えたモデルを用いた。1 層モデルは、壁部全高を 1 種類のコンクリートで打設するモデルであり、2 層モデルは壁高の 1/2 を抑制コンクリートで打設し、引き続き 1/2 を通常コンクリートで打設する部分打設のモデルである。また、反力床への固定を模擬して PC 鋼棒位置でベースコンクリートの下部に固定

条件を入れた。解析モデル-1 (壁厚 50cm) の形状を
 図-14 に示す。モデルは対称性を考慮した 1/4 モデル
 である。

(4) 解析結果

a) 模擬試験体の解析結果

模擬試験体により得た実験結果との比較によって、
 解析モデルを用いて温度と応力の挙動をシミュレーシ
 ョンできることを確認する。通常および抑制試験体の
 温度変化の解析値と測定値を図-15 に示す。

通常試験体では、d 点のピーク温度は解析で
 47.9℃ (材齢 0.9 日)、測定では 51.1℃ (材齢 0.9
 日)、b 点では解析で 47.0℃、測定で 48.5℃であり、
 a 点では解析で 45.2℃、測定では 43.7℃である。測
 定値に比べて、解析値の各点の温度差は小さいが、全
 般的に解析結果は測定結果をよく表わしている。

抑制試験体では、d 点のピーク温度は解析で
 46.4℃(材齢 0.9 日)、測定で 45.5℃(材齢 0.8 日)で
 ある。b 点は解析で 29.4℃(材齢 1.4 日)であり、測定
 では 27.4℃ (材齢 1.4 日)である。b 点の第 2 のピー
 ク温度 (材齢 10 日前後) は解析においても現れてい
 る。解析結果の第 2 のピーク温度が測定値より高い
 理由は、材齢 7 日以降に生じた外気温の低下を解析
 では考慮していないことによる。また壁下部の a 点
 のピーク温度は解析で 26.5℃ (材齢 1.4 日)、測定で
 は 23.8℃ (材齢 1.4 日)である。ベースコンクリート
 への熱伝導が解析では小さく、ピーク温度が少し高く
 計算される傾向にあるが、全般的には十分にシミュレ
 ーションできているといえよう。

応力の解析値と測定値の比較を図-16 に示す。通常
 試験体の発生応力は、a 点の解析値で圧縮最大値
 -0.21 N/mm^2 、引張最大値 1.3 N/mm^2 であり、測定値
 の圧縮最大値 -0.21 N/mm^2 、引張最大値 1.3 N/mm^2 と
 等しい。d 点では解析値の引張最大値 1.1 N/mm^2 に
 比べて、測定値は 0.37 N/mm^2 と小さくなっている。

応力の解析値も、温度と同様に壁体上下間の差が測
 定値に比べて小さい傾向にある。d 点は引張り応力の
 増加から一定値に変化しており、目視観測ではみられ
 なかったが、測点近傍にクラックが生じて応力緩和し
 たことが考えられる。

抑制試験体では d 点に引張最大値が生じ、解析値
 は 0.69 N/mm^2 であり、測定値では 0.38 N/mm^2 である。
 また、a、b、c 点は、材齢 10 日前後に上部コン
 クリートの収縮と下部コンクリートの発熱のため圧縮
 側へ推移する。その値は解析で -0.19 N/mm^2 であり、
 測定では -0.10 N/mm^2 である。その後、引張側に推
 移し、引張応力の最大値は解析で 0.39 N/mm^2 、測
 定では 0.25 N/mm^2 である。引張応力の発生は下部コ
 ンクリートの温度低下による。解析値の応力は全般に

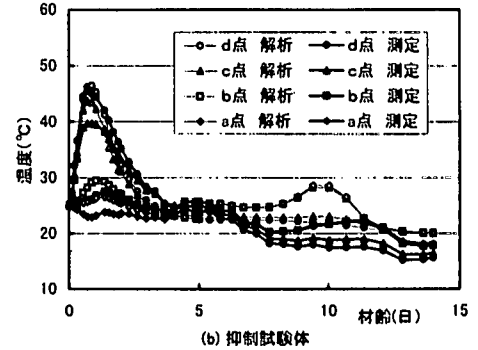
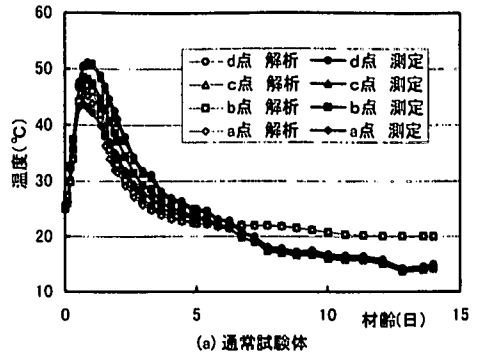


図-15 温度解析値と測定値の比較

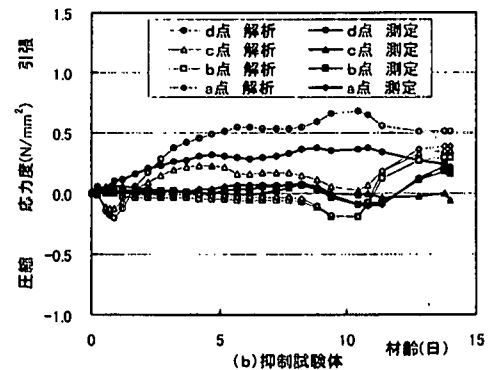
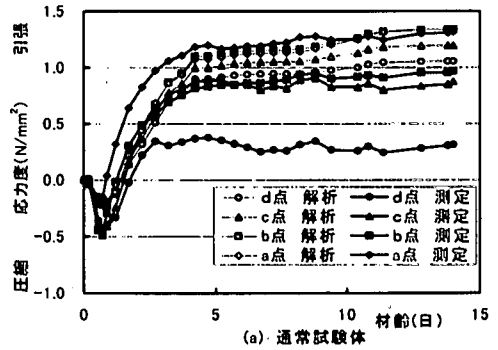


図-16 応力解析値と測定値の比較

測定値と比べて圧縮引張ともに大きい傾向にあるが、解析により試験体の応力挙動の特徴を表わしている。

以上の結果から、本解析手法により水和発熱抑制剤を用いたコンクリート構造物の添加量の違いによる温度応力の挙動を比較できると考えられる。

b) 1層モデルによる解析結果

壁部全高を1種類のコンクリートで打設する1層モデルによる温度と応力を検討した。解析ケース3(壁厚100cm)の壁中心の高さ方向4箇所(下方からa, b, c, d)のピーク温度と発生する最大引張応力の解析結果による比較を図-17に示す。通常コンクリートでは60℃のピーク温度が抑制コンクリートでは添加量に応じて低下し、抑制-3では42℃になっている。応力のピークは通常では3.2N/mm²であるが、抑制-3では1.1N/mm²に低減している。また、応力の分布は、通常では、壁部の最終的な収縮変形時におけるベースコンクリートの拘束から下部のa, b点の引張応力が大きい。抑制-2, 3では、全体の温度変化が小さく収縮による曲げ変形が小さいことから、上下の応力の違いが小さくなっていることがわかる。これにより壁厚100cmの場合に抑制コンクリートの使用によるピーク温度上昇の低下量と応力の低減量が得られた。

同様に壁厚を変化させたモデル-1, 2, 3の解析から得た応力度低減率を図-18に示す。応力度低減率は各位置における通常コンクリートの応力を1.0として各抑制コンクリートにおける発生応力を示したもので小さいほど低減効果は高い。高さ方向のa, b, c, d点はいずれも同一壁厚に対する応力度低減率に大きな違いはない。各抑制コンクリートの効果は壁厚に対してほぼ線形である。抑制効果の小さい抑制-1では壁厚200cmの場合に応力度低減率が0.9から1.0となり、低減効果の得られないことがわかる。水和発熱抑制剤の応力低減効果には、若材齢のクリープが大きいことも挙げられるが、壁厚の違いによる低減効果の違いには、熱が壁の外に逃げることによる応力発生の高減効果が大きいと考えられ、壁厚が薄いほど低減効果は大きい結果となった。

水和発熱抑制剤を添加したコンクリートを打設することにより温度応力の低減効果を得るためには、壁厚によって添加量を変える必要がある。この解析により壁厚と抑制剤添加量による応力低減効果を定量的に評価することができる。

c) 2層モデルによる解析結果

2層モデルは、抑制コンクリートの上にかけて通常コンクリートを打設するモデルである。抑制コンクリートモデルにおいては解析点a, bは下部抑制コンクリート内に、解析点c, dは上部通常コンクリート内に位置する。ケース4(壁厚100cm)の解析結果を

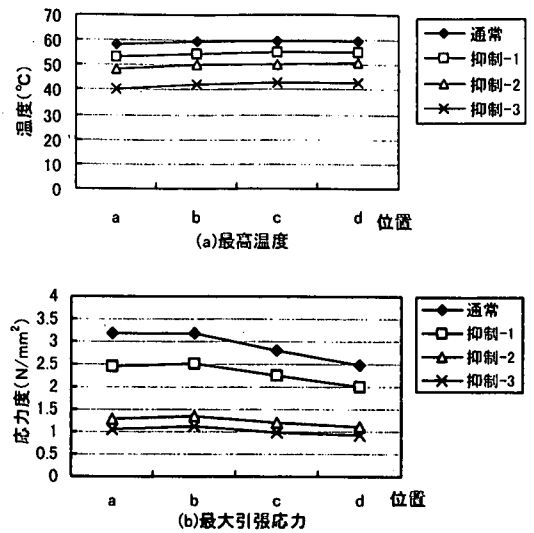


図-17 1層モデル解析結果(ケース3 壁厚100cm)

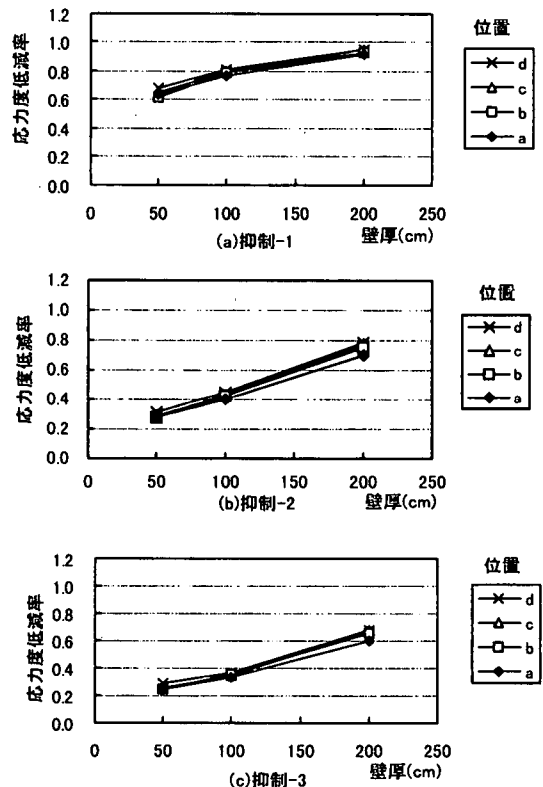


図-18 1層モデル応力度低減率

図-19 に示す。最高温度は通常コンクリートで 60℃ であるが、下部抑制コンクリートでは、添加率に応じて低下し、抑制-3 の点 a, b では 40℃ となり、約 20℃ の温度低下がみられた。発生応力は、抑制-1, 2, 3 に示すように添加率に応じて低下する。応力低減の大きさは前項の 1 層モデルと大きな違いはないが、抑制-2 は壁の上部 c, d 点、抑制-3 では d 点の応力の低減が 1 層モデルと比べて少し小さい。水和発熱抑制剤は、図-4 の打設温度を変えた断熱温度曲線に示すように、打設温度が変わっても添加量に応じた水和発熱抑制効果が得られる。

壁厚を変化させたモデル-1, 2, 3 の解析から得た応力度低減率を図-20 に示す。低減率は、1 層モデルの場合と同様に各点における通常の応力を 1.0 として示しており、小さいほど低減効果は高い。抑制効果の小さい抑制-1 で壁厚 200cm の場合は 1 層モデルと同様に応力低減効果は得られない。低減率は 1 層モデルと同じく、壁厚に対してほぼ線形になっているが、抑制-2, 3 の場合に壁の上部 c, d 点の低減効果が 1 層モデルと比べて小さくなる相違が見られる。c, d 点の応力度低減率が小さくなる理由は、上部の通常コンクリートが温度低下しつつあるときに、下部抑制コンクリートの発熱膨張による引張力が上部コンクリートに働くことによる。抑制コンクリートの温度上昇の時期が遅くなる抑制-2, 3 の場合には、この影響から壁体上部 c, d 点で応力度低減率の数値が大きくなり、抑制効果が小さくなる。しかし壁体上部は壁体下部と比べて大きな応力の発生しない部分であり、図-19(b) に示す壁厚 100cm の場合でも d 点は a 点よりわずかに大きい程度の応力の発生である。このように部分打設の場合には、傾向としては 1 層打設と同じであるが、添加量により応力の発生が異なってくるので、応力の解析により抑制効果を検討する必要がある。

以上のことから下部に抑制コンクリート、上部に通常コンクリートを連続して打ち上げた場合にも、壁部全高に抑制コンクリートを打設した場合と同様に応力低減効果が得られることがわかった。壁の厚さによって適当な効果を得るための抑制剤の添加量があり、解析により応力度低減率を求め、通常コンクリートの発生応力と比較することができる。

5. まとめ

本研究は水和発熱抑制剤の温度応力低減効果を、実験的に明らかにし、解析によって効果を応力度低減率

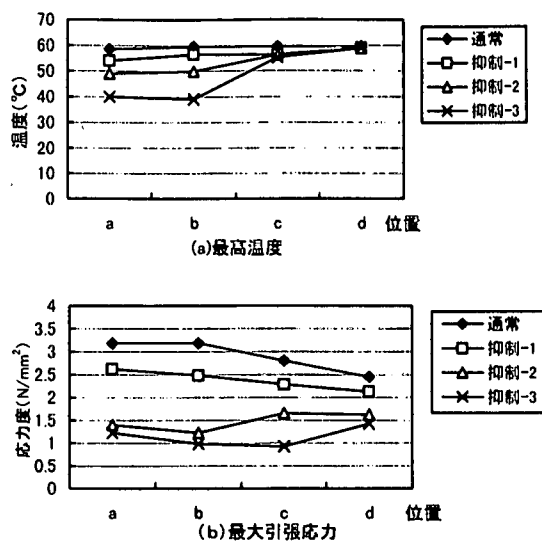


図-19 2層モデル解析結果 (ケース4 壁厚100cm)

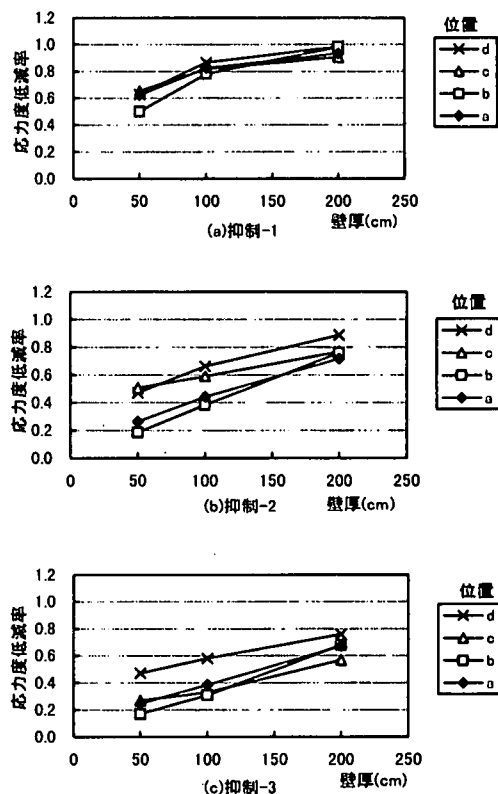


図-20 2層モデル応力度低減率

として評価できるようにすることを目的とした。本研究で得た結論を以下に示す。

- (1)水和発熱抑制剤を添加したコンクリートの温度解析は、従来の断熱温度上昇近似式(1)では不十分である。近似式(2)により精度を改善することができるが、断熱温度上昇曲線のステップ入力により FEM 解析で温度変化特性を表すことができる。
- (2)模擬実験における通常および抑制のいずれの試験体についても実験結果を十分な精度で解析できたことにより、本解析手法により水和発熱抑制剤を用いたコンクリート構造物の温度応力の挙動を解析できることが確かめられた。
- (3)模擬試験体による測定結果と三次元 FEM 解析結果により、抑制剤の添加により壁体に発生する温度応力を約 1/3 に低減できることが確認できた。
- (4)水和発熱抑制剤の添加量と壁厚に対する応力度低減率の関係を解析により明らかにした。これにより 50cm から 200cm の壁厚について通常コンクリートの発生応力 1.0 に対して最大 0.3 の応力度に低減できる結果が得られた。
- (5)抑制コンクリートの部分打設の場合も、壁部全高に抑制剤を添加した場合と同様に効果が得られ、解析評価することができる。これにより、部分打設による応力度低減効果を添加量ごとに算定し、検討することができた。

水和発熱抑制剤を添加したコンクリートの挙動は、添加量によって温度履歴や強度発現が大きく異なってくるとともに、構造物の放熱や拘束条件によっても変化する。壁体の高さや部分打設の場合の抑制剤添加コンクリート層厚を変化させた場合など、検討を行うことが必要である。本研究により、壁体モデルの挙動を解析できたことで、水和発熱抑制剤の有効な適用が図られるものと考えられる。

謝辞：本研究にご示唆と貴重なご助言を頂いた JR 東日本、住友大阪セメントの関係者の方々ならびに岡山大学阪田憲次教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1)安藤哲也，五味秀明，宇田川秀行，玉木俊之：水和熱抑制剤型膨脹材のマッシュなコンクリートへの適用，第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.3，pp.1-4，1981。
- 2)阪田憲次，巢元利博，宮崎勝敏：尿素混入コンクリートのひび割れ抑制効果に関する研究，セメント技術年報，

No.42，pp.407-410，1988。

- 3)稲田和夫，小堀規行，井ノ川 尚，内田清彦：マスコンクリートにおける水和発熱抑制剤の効果，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.198-203，1990。
- 4)土木学会コンクリート技術シリーズ No.8「マスコンクリート技術の現状と動向」温度ひび割れ抑制混和材料「水和発熱抑制剤」pp.19-20，1994。
- 5)阿部保彦，柿崎正義，岡村純二，市村達明：マッシュなフライアッシュ混入コンクリートにおける水和熱制御混和剤の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.83-88，1991。
- 6)武本健示，時川 忠，阿部 力，井ノ川 尚：水和発熱抑制剤を用いたコンクリートの基礎性状，セメント・コンクリート論文集，No.47，pp.212 - 217，1993。
- 7)岩田道敏，斎藤啓一，三輪 渡：高減水型水和熱抑制剤の部分使用による箱型ラーメンの温度ひび割れ対策，土木学会第 48 回年次学術講演会 V，pp.698 - 699，1993。
- 8)岩田道敏，斎藤啓一，庄司公男，井ノ川 尚：箱型ラーメンの温度ひび割れに対する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.1161 - 1166，1993。
- 9)稲田和夫，小堀規行，井ノ川 尚，内田清彦：マスコンクリートにおける水和発熱抑制剤の効果，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.198 - 203，1990。
- 10)東 邦和，上西 隆，起橋孝徳，白石祐彰：水和発熱抑制剤の部分使用によるマスコンクリートの温度応力抑制効果，土木学会第 49 回年次学術講演会 V，pp.414-415,1994。
- 11)東 邦和，上西 隆，起橋孝徳，廣中哲也：水和発熱抑制剤の部分使用による温度応力抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.381-386，1995。
- 12)Azuma, K., Hironaka, T., and Umehara, H. : Study on the effect of thermal stress reduction using heat controlling agent in massive concrete, *Proc. of Int. Conf. on Engineering Materials*, pp.789-798, 1997.
- 13)竹下治之：凝結遅延性コンクリートを用いた外部拘束応力の抑制に関する研究，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.85-92，1986。
- 14)綾野克紀，マリノガ-ジ ュマ シヤハソ，亀高誠治，阪田憲次：高流動コンクリートの水和熱低減に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.87-92，1995。
- 15)田中敏嗣，上野雅之，下山善秀：水和熱を抑制する有機物を用いたコンクリートの特性，セメント・コンクリート論文集，No. 52，pp.218-223，1998。
- 16)平賀友晃，倉林清：コンクリートの断熱温度上昇特性

に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、pp.1-6, 1982.8.

17)河野政典, 榎田佳寛, 上西 隆, 起橋孝徳: シリカフェュームを使用した 100N/mm² 級高強度コンクリートの

発熱・強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1015-1020, 1998.

18)コンクリート標準示方書 [平成 8 年度制定] 施工編.

(1999. 12. 24 受付)

STUDY ON THE THERMAL STRESS REDUCTION METHOD USING HEAT CONTROLLING AGENT IN MASSIVE CONCRETE WALL

Kunikazu AZUMA, Tetsuya HIRONAKA and Hidetaka UMEHARA

The experiments and analyses were conducted in order to estimate the effects of heat controlling agent on the thermal stress reduction in massive concrete structures. The relation between the heat generation and the strength to the amount of agent was investigated. Both the effects on heat reduction and accuracy of computation were analyzed. On the state of stress suppression, it was proved that the results of comparison between mock up experiments and thermal stress analyses were in good agreement. The rate of reduction was estimated on the analytical application to wall structures with different thickness. It was also found that the effect of stress reduction was obtained in the application of layered casting method.