

論文 一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果に関する実験的検討

溝淵利明*¹・横関康祐*¹・信田佳延*¹

要旨：マッシブなコンクリート構造物の場合、セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じるひび割れの可能性を事前に把握し、その対策を講じることは重要な課題である。そこで、実構造物での温度応力によるひび割れ発生メカニズムを評価するために、温度履歴及び軸拘束条件を任意に変化させ、コンクリートのひび割れ抵抗性を定量的に評価することが可能な試験装置を作製した。本論文では、この試験装置を用いて膨張材の効果について壁状構造物を対象に実験を行った。その結果、本装置を用いることで膨張材の効果を実験的に評価する可能性のあることを確認した。

キーワード：温度応力、ひび割れ、膨張材、一軸拘束、シミュレーション

1. はじめに

ダムや長大橋梁基礎をはじめとするマスコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れを抑制することは重要な課題である。温度ひび割れ発生の可能性については、近年の解析精度の向上やパソコンレベルでも大容量計算が可能となったこと、さらにCP法などの比較的簡便な解析手法やひび割れ発生を確率評価する方法が提案され、定量的な評価を事前に行うことが可能となってきている。マスコンクリート構造物の内部温度変化に関しては、これまでに多数の実構造物の計測データがあること及び解析に用いる断熱温度上昇式、比熱・熱伝導率等の熱定数が室内試験で得ることが可能であり、事前に使用する材料・配合での評価が可能であることから、比較的高い精度で予測が可能である。一方、セメントの水和熱に起因する温度応力は、実構造物での計測データが多くないことや若材齢時の弾性係数、引張強度及びクリープ係数等の力学的特性が明確になっていないことから、事前に精度良く評価することが難しく、特にひび割れ発生応力、ひび割れ発生後のひび割れ幅や本数等を事前に定量的に評価することが非常に難しいのが現状である。

そこで、温度ひび割れ発生メカニズムの解明を目的に、外部拘束応力、特に軸拘束力が卓越する構造物を対象とした温度応力をシミュレートするための試験装置を作製した^{1), 2)}。基本的な機能は参考文献1)に基づいたが、ひび割れ発生を計測範囲内で発生させるように、供試体中央部付近に約10%程度断面欠損部を設けた。また、若材齢時のひずみ及び応力挙動を極力正確に把握するため、アクチュエータ及び変位計の感度を高くするなどの改良を行った。一軸拘束試験装置（以後、温度応力シミュレーション装置と称する）は、セメントの水和熱によるコンクリートの発熱過程を忠実に再現するとともに、無拘束供試体によって生じるひずみを基に、完全拘束状態から無拘束状態まで自由に拘束状態を変化させることができ、コンクリートの打込み時からひび割れが生じるまでの応力及びひずみ履歴を測定することが可能な装置である。また、鉄筋を埋込んだ場合には、ひび割れ発生後のひび割れ幅の推移を評価することが可能である。さらに、一定温度でのひずみ及び応力制御が可能であることから、クリープや自己収縮の測定も可能である。

ここでは、温度応力シミュレーション装置を用いてこれまで定量評価が難しかった膨張材の

*¹ 鹿島技術研究所第二研究部第2研究室（正会員）

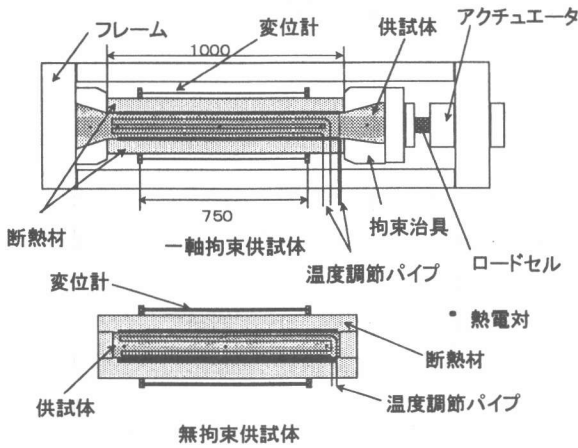


図-1 温度応力シミュレーション装置の概要

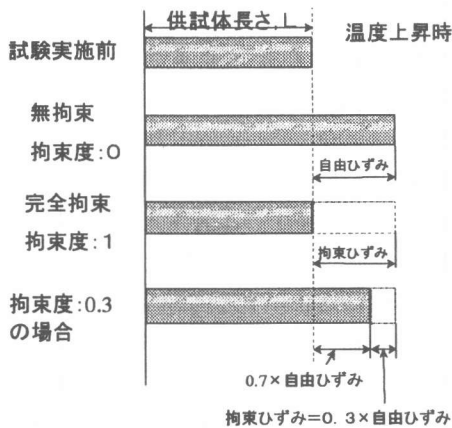


図-2 拘束度とひずみとの関係

ひび割れ抑制効果について実験を行い、膨張材の抑制効果を定量的に評価することの可能性について報告するものである。

2. 温度シミュレーション装置の概要

本装置は、マスコンクリート構造物の部材中央部付近を対象とし、打設開始からセメントの水和熱による温度上昇及び温度降下を自在にコントロールできるように、供試体周囲を断熱材で覆い、パイプを埋設して温度調節を行えるようになっている。また、供試体からの水分の逸散がないように供試体周囲をシートで覆って実験を行っている。温度制御及びひずみ制御は、コンクリートが発熱を開始する凝結始発時間か

ら行うこととした

供試体の寸法は図-1に示すように150×150×1500mmで、試験対象となるのは拘束治具で把持されている部分を除く長さ1000mmの部分である。応力に対しては、図-1に示すように供試体両側に拘束治具を設け、一方に取り付けたアクチュエータによって軸拘束度を自由変形(軸拘束度;0)から完全拘束状態(軸拘束度;1)まで任意に設定できるようになっている。軸拘束度の設定は、図-2に示すように拘束供試体と同寸法で無拘束状態の

供試体の温度変化に対するひずみ変化量の割合とした。例えば、軸拘束度0.3とは、自由ひずみの70%を与えることとなり、残りの30%が拘束ひずみとなる。

3. 膨張材の効果に関する検討

温度応力シミュレーション装置を用いた若材齢時の温度応力挙動を把握するための第一歩として、膨張材の効果について検討を行った。膨張材を混和したコンクリートは、その膨張効果を定量的に評価することが難しいのが現状である³⁾。そこで、本検討は膨張材を用いて施工する壁状構造物を仮定して、膨張材の混和の有無によるひび割れ抵抗性について実験を行った。

3.1 検討の概要

本検討では、図-3に示すような地盤上に底版(長さ20m×幅20m×厚さ0.8m)及び

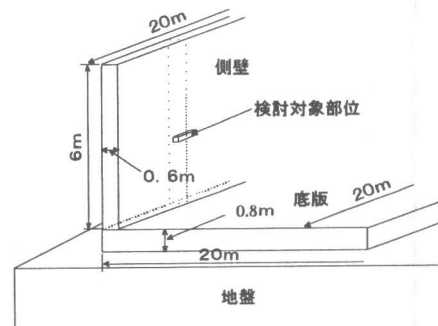


図-3 検討対象部位の概要

表-1 コンクリートの配合

ケース No.	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤
			水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	
1	53.7	48.0	145	270	—	925	1021	C×1.45%
2	53.7	48.0	145	240	30	926	1022	C×1.45%

高さ6m、壁厚0.6m、長さ20mの壁を施工した場合の壁中央部での温度履歴を事前に算定し、その結果を用いて温度応力シミュレーション装置で膨張材の有無について完全拘束状態(拘束度;1.0)での応力履歴、ひび割れ発生時期及びひび割れ発生応力を求めた。

本検討で用いたコンクリート配合は、表-1に示すようにスランプ12cm、設計基準強度24N/mm²、単位セメント量270kg/m³で高炉B種セメントを用いた場合とした。また、膨張材混和量はセメントの内割りで30kg/m³とした。コンクリートの使用材料を表-2に示す。

温度応力シミュレーション装置に用いた温度履歴は、使用する配合について事前に断熱温度上昇試験を行い、その結果を用いて温度解析して求めた壁中央部のものである。ただし、その他の熱特性は土木学会コンクリート標準示方書に準拠した。温度解析に用いた各定数を表-3に示す。

3.2 実験結果及び考察

実験結果を図-4~7に示す。

図-4から、無拘束供試体及び拘束供試体の温度履歴は、入力した温度履歴データに追従し、両者にはほとんど差異はなかった。

無拘束供試体の温度変化とひずみ変化量との関係を図-5に示す。

図-5から、各ケースの温度降下時の線膨張係数を算定した結果、膨張材を混和しないケ

表-2 使用材料

項目	摘要
セメント	高炉B種セメント、比重;3.01
膨張材	主成分;カルシウムサルホアルミニイト、比重;2.71
細骨材	砕砂:陸砂=60:40、表乾比重;2.67 吸水率;1.13、粗粒率;2.74
粗骨材	石灰石碎石、粗骨材最大寸法;25mm 表乾比重;2.72、吸水率;0.42%
AE減水剤	主成分;高変性ポリオールとセルロースエーテルの複合体

表-3 温度解析条件

項目	入力データ	
	コンクリート	地盤
初期温度(°C)	20	15
断熱温度上昇式(°C)	Q _∞	42.0
	γ	1.00
熱伝導率(W/m°C)	2.70	3.45
比熱(kJ/kg°C)	1.15	0.80
密度(kg/m ³)	2360	2600
外気温	20°C一定	

断熱温度上昇式; $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t})$

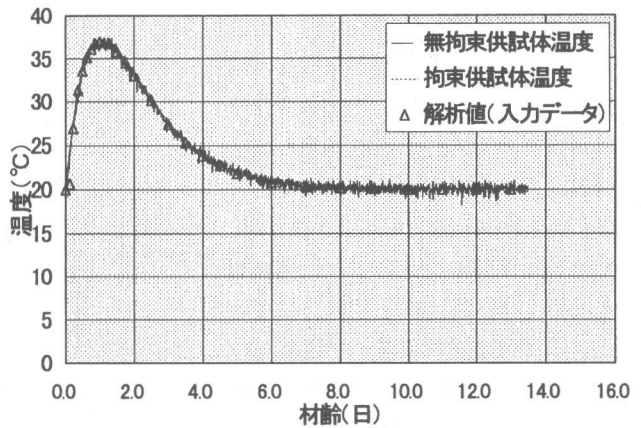


図-4 温度履歴

ス1で 8.23×10^{-6} 、膨張材を混和したケース2で 8.04×10^{-6} であり、膨張材の有無に関係なくほぼ同じ結果であった。

次に、各ケースの応力履歴を図-6に示す。図-6から、膨張材を混和しないケース1では、材齢4.7日において引張応力 1.75 N/mm^2 でひび割れが発生する結果となった。一方、膨張材

を混和したケース2では、打設後14日までの実験期間中ひび割れは生じなかった。ケース1でひび割れが生じた時点でのケース2の引張応力は 1.93 N/mm^2 であり、約10%大きいことがわかる。本実験ではこれまでいわれているように、初期膨張によってケミカルプレストレスが導入され、引張応力が軽減される効果はみられず⁴⁾、圧縮応力が増大するものの引張域に達する材齢が膨張材を混和しない場合とほぼ同様であり、かつ引張応力の増進も混和しない場合に比べて早くなる傾向にあった。これは、膨張材の混和が初期のケミカルプレストレスの導入による効果よりも、コンクリートの引張性能が改善されたものと考えられる。

発生応力と拘束ひずみとの関係は、図-7に示すように膨張材を混和した場合には、材齢1日までの温度上昇期間(A区間)に 580×10^{-6} の圧縮ひずみを生じる結果となった。既往の文献³⁾によれば、無拘束膨張率は膨張材量 30 kg/m^3 で 700×10^{-6} 程度といわれており、本実験で得られた値とほぼ一致する結果となった。また、圧縮時の拘束ひずみは膨張材を混和しない場合が約 60×10^{-6} であり、膨張材の混和によって混和しない場合に比べて約10倍の圧縮ひずみが生じる結果となった。

図-7に示す温度降下期間(B区間)では、各ケースの曲線の傾きは膨張材の有無に関係なくほとんど同じであった。膨張材が混和していないケースでは、ひび割れ発生時の拘束ひずみが 28×10^{-6} であり、引張応力領域でのひずみ変化量が約 90×10^{-6} であった。膨張材を混和した場合には、引張応力領域でのひずみ変化量が約130

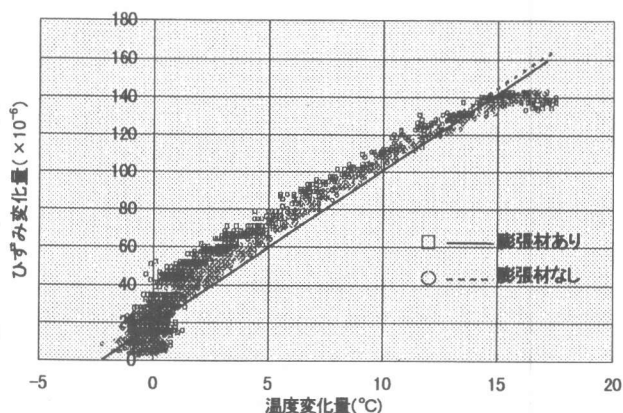


図-5 温度変化量とひずみとの関係

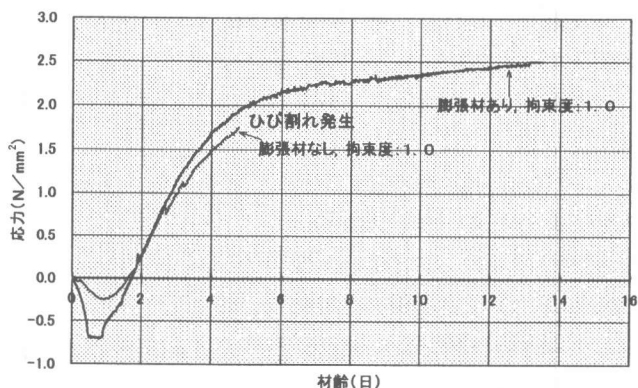


図-6 応力履歴

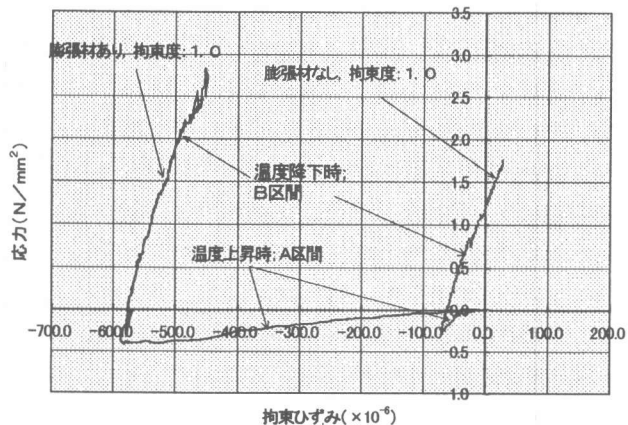


図-7 拘束ひずみと発生応力との関係

$\times 10^{-6}$ であった。上記の引張応力領域でのひずみ変化量をコンクリートの引張限界ひずみとして考えた場合、膨張材を混和することで混和しない場合に比べて引張限界ひずみが1.4倍以上増加することとなる。これは、これまでいわけ

ているように膨張材の混和がひび割れ抵抗性を向上させる効果があることを示すものである。

4. 膨張材効果の評価方法

温度応力シミュレーション装置による膨張材の実験結果から、膨張材の混和によって発生応力が増大するとともにひび割れ抵抗性も向上する結果となった。したがって、この現象を温度応力解析に適用するためには、見掛けの弾性係数を大きくするとともに、引張強度も大きくする必要がありますと思われる。そこで、実験結果を基に事後解析を行い、膨張材を用いた場合の見掛けの引張強度及び弾性係数の算定を行った。

4.1 解析方法

検討では、図-8に示すように温度解析で用いた壁状構造物の2次元モデルを適用し、応力解析方法としてCP法を用いて行った。拘束係数は、完全拘束状態であることを考慮して軸拘束係数 1.0、曲げ拘束係数 1.0 とした。力学的特性は、実験時に併せて行った圧縮強度、引張強度及び弾性係数試験結果を基にした回帰式を用い、線膨張係数は温度応力シミュレーション装置での試験結果を用いた。また、本解析ではクリープなどの応力緩和を考慮しなかった。

解析方法は、図-6に示す応力履歴に合うように弾性係数の回帰式に係数 α_1 、 α_2 を乗ずることとした。引張強度の評価については、膨張材を混和していないケースの場合、ひび割れ発生時期でひび割れ指数が 1.0 になるように回帰式の係数 β_1 を求め、膨張材を混和したケースについては解析対象期間での最小ひび割れ指数が 1.0 以上になるように係数 β_2 を求めた。

各強度試験から求めた回帰式を以下に示すとともに、図-9に圧縮強度と積算温度との関係、図-10に圧縮強度と引張強度及び弾性係数との関係を示す。ただし、力学的特性は膨張材の有無による差異がなかったことから、両者の試験結果を合せた式とした。

圧縮強度; $f_c = 23.33 \log(M) - 29.28 (N/mm^2)$
 M ; 積算温度 (日・°C)

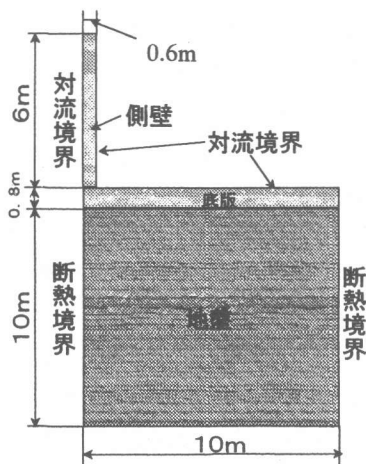


図-8 温度応力解析モデル

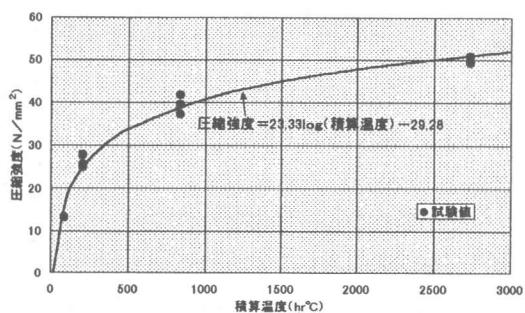


図-9 積算温度と圧縮強度との関係

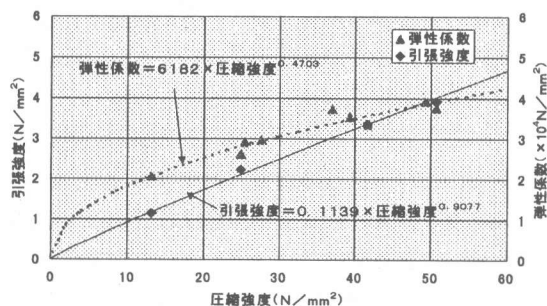


図-10 圧縮強度と引張強度・弾性係数との関係

表-4 見掛けの弾性係数及び引張強度を推定するための係数

ケース No.	膨張材の有無	係数	温度上昇時	温度降下時
1	なし	弾性係数 α_1	1.5	0.75
		引張強度 β_1	0.94	
2	あり	弾性係数 α_2	3.5 (2.3)	1.0 (1.3)
		引張強度 β_2	1.15 (1.2)	

() は膨張材を混和しない場合を 1.0 とした場合

引張強度； $f_t = 0.1139 f_c^{0.9077} (N/mm^2)$

弾性係数； $E_c = 6182 f_c^{0.4703} (N/mm^2)$

4.2 解析結果

実験結果と解析結果を比較した結果を表-4及び図-11に示す。

表-4及び図-11から、膨張材を混和した場合弾性係数の回帰式に対する係数 α_2 が、温度上昇時に3.5、温度降下時で1.0であり、引張強度に対する係数 β_2 が1.15となった。膨張材を混和しない場合には、弾性係数に対する係数 α_1 が温度上昇時1.5、温度降下時0.75、引張強度に対する係数 β_1 が0.94であった。膨張材を混和しない場合の各係数を1.0とした場合の膨張材混和の係数 α'_2 は、温度上昇時で2.3、温度降下時で1.3、 β'_2 が1.2であった。

以上の結果から、膨張材のひび割れ抑制効果については見掛けの弾性係数及び引張強度を求めることで定量的に評価できる可能性があると考えられる。ただし、上記の評価は本検討で設定した配合条件、環境条件及び構造物の形状でのものであり、一般的に前項で選定した値を用いることは難しいと思われる。したがって、今後はセメントの種類や量等の材料・配合の違い、拘束度の違い、施工条件及び強度レベルや構造形式などの設計条件の違いによる影響について、さらに定量評価を行っていく必要があると思われる。

5. まとめ

マスコンクリート構造物での温度応力によるひび割れ発生メカニズムを評価するために、温度履歴及び軸拘束条件を任意に変化させることが可能な試験装置を作製した。本検討では、コンクリートのひび割れ抵抗性に対する定量的評価研究の一環として、膨張材の効果について実験及び定量的な評価を行うための解析を行った。

その結果、膨張材の効果については見掛けの

弾性係数及び引張強度を設定することで定量的に評価することの可能性があることを確認した。また、本検討では発生応力の評価において見掛けの弾性係数を設定したが、膨張材の特性を考慮した場合の線膨張係数に対する係数の設定と考えることも可能である。この点については今後の課題としてさらに検討を行っていくつもりである。

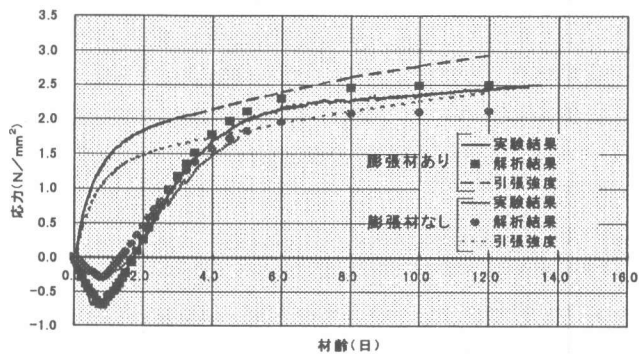


図-11 温度応力解析結果と実験結果との比較

参考文献

- 1) Sander Lokhorst・Klass van Breugel: Experimental and Numerical Analysis of Stress Development in Hardening Concrete, Progress in Concrete Research, Delft University of Technology, faculty of Civil Engineering, Vol.4,1995
- 2) 金津努・青柳征夫・中野毅弘: 硬化コンクリートの温度ひびわれ判定試験方法 ひびわれ判定装置の開発と地中線シールドトンネル二次覆工コンクリートへの適用, 電力中央研究所土木技術研究所研究報告, No.382049, 1983
- 3) 土木学会: 膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー75, 1993
- 4) 辻幸和・玉木俊之・五味秀明: 膨張材を用いたマスコンクリートの温度応力とケミカルプレストレス, セメント技術年報 No.36, pp159~162, 1982