

# [5] マスコンクリートの熱変形挙動の実測と解析

正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)  
 正会員 西岡 哲 (東急建設技術研究所)  
 正会員 ○前田 強司 (東急建設技術研究所)  
 正会員 石川 雅美 (東急建設技術研究所)

## 1. まえがき

マスコンクリートの温度応力発生メカニズムの解明にあたっては、解析的な研究や実構造物における実測のみでなく、境界条件の明らかなマスコンクリート実験を行って、その挙動を検討する必要があることが以前から指摘<sup>2)</sup>されていたが、本格的な実験は行われていなかった。特にマスコンクリートブロック全体の変形を実測した実験、あるいは物理的に明確な外部拘束を使用したマスコンクリート実験例は公表されていない。

本報告は、上記の点に留意して行ったマスコンクリート温度応力実験の第一報である。高さ、幅、長さが各々1.0<sup>m</sup>、0.95<sup>m</sup>、15<sup>m</sup>の矩形はりの温度変形挙動を考察しているが、高感度の変位計を多数配置して、マスコンクリート全体変形を初めて測定したこと、はりの底面と地盤との間の摩擦を極力減じている点が特徴である。

## 2. 実験概要

試験体は、図1に示すように側面を厚さ5cmの発砲スチロールで覆い、試験体上下方向のみに温度勾配が生じるようにした。また本実験では外部拘束の影響を小さくするために、土間コンクリート上にセルフベリング材を施し、その上にテフロンシート2枚(0.2mmと0.3mm厚)および鉄板(0.5mm厚)を敷いた。これにより、本試験体の外部拘束はテフロンシート間の物理的な摩擦のみと考えられる。

変位計の設置位置を図2に、埋設計器(熱電対、ひずみ計、有効応力計および無応力ひずみ計)の位置を図3に示す。

計測は、コンクリート打設直後より材令1日までは30分、それ以降5日までは1時間、6日以降13日の終了まで2時間のインターバルで行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 コンクリートの諸物性

コンクリートの配合を表1に示す。

表1 コンクリートの配合

呼び強度 kg/cm <sup>2</sup>	スランプ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単体量kg/m <sup>3</sup>				混和剤 P oz. No.70
					C	W	S	G	
240	9	58.9	49.7	4±1	280	165	913	948	2.80

強度試験結果を図4、5に示す。なお引張強度は割裂強度試験により、弾性係数はコンプレッソメーターを用いて求めた。また同一配合、同品質コンクリートの断熱温度上昇曲線を図6に、近似式を次に示す。

$$T = 42.6 (1 - e^{-0.961 \cdot t}) \dots (1)$$

ここに、T: 断熱温度上昇(°C)

t: 材令(日)

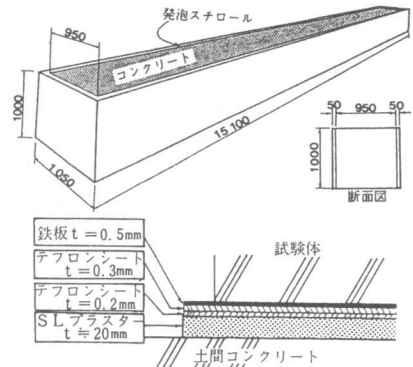


図1 試験体の保温および底面処理

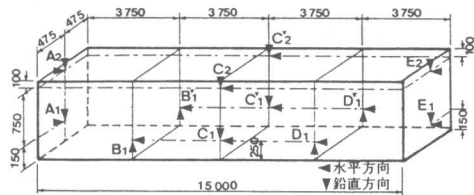


図2 変位計設置位置

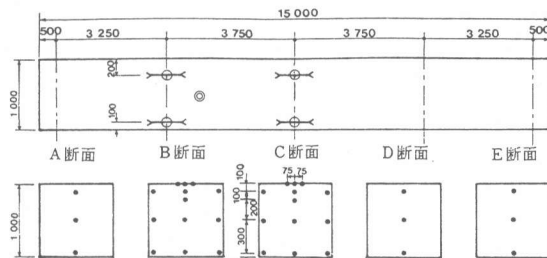


図3 計器埋設位置

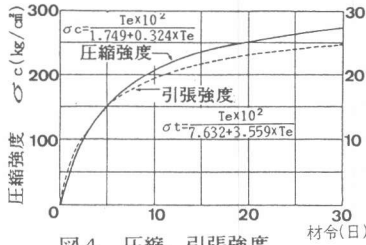


図4 圧縮、引張強度

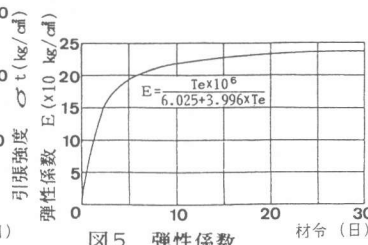


図5 弾性係数

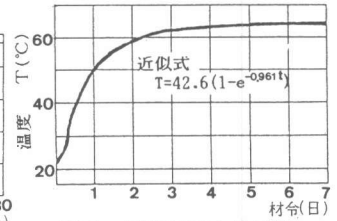


図6 断熱温度上昇曲線

コンクリートの線膨張係数は、無応力管内のひずみと温度の関係より求めた。線膨張係数 $\alpha$ は、打設後2.5時間から5時間までは $\alpha_1 = 19.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となり、通常値の2倍程度となった。また、温度上昇過程( $\alpha_2 = 9.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )より温度降下過程( $\alpha_3 = 10.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )の方が大きな値を示した。

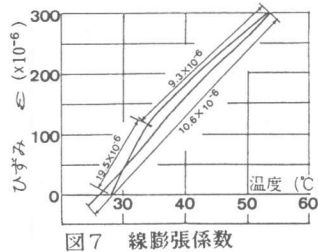


図7 線膨張係数

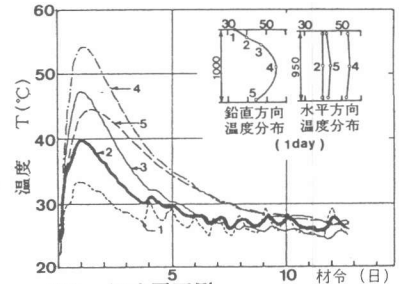


図8 温度履歴例

### 3.2 温度

図8に温度履歴の例を示す。打設温度は約26°C、最高温度に達するのは材令1日で約55°C(中央部)であった。鉛直方向温度分布は、中央部が最も高く、続いて下部、上部といった温度勾配を形成し、表面と中心部の最大温度差は材令1日で22°Cであった。断面内水平方向温度分布の最大温度差は材令1日で2.7°Cであり、ほぼ均一な温度分布が得られた。断面内水平方向温度分布が均一であることから、本試験体の解析は平面応力場の温度応力問題として取り扱うことが可能であると判断した。

### 3.3 ひずみと応力

図9~11にひずみと応力の経時変化例を示す。初期値の設定は、コンクリート打設終了後 ひずみ計は4時間後(線膨張係数の変化点)・応力計は1時間後とした。

変形成分のひずみは、材令1日(最高温度時)まで膨張しその後収縮側へ移る。断面平均温度と変形成分ひずみ(上部と下部の平均値)の関係より見掛の線膨張係数 $\alpha'$ を計算すると、

温度上昇過程 $\alpha'_2 = 9.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$   
 温度降下過程 $\alpha'_3 = 10.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$   
 となった。これと無応力管内のひずみより求めた線膨張係数 $\alpha$ と比較すると、その差は $0.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とほとんどなかった。このことより、試験体軸方向拘束はほとんど作用しなかったものと判断される。

図10は(2)式のクリープ係数を $\phi = 0.6$ として求めたものである。このクリープ係数 $\phi$ は、図11に示す

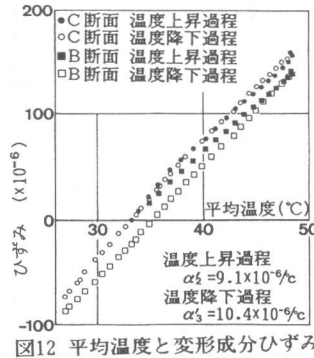


図12 平均温度と変形成分ひずみ

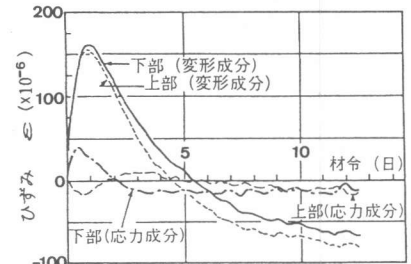


図9 ひずみ履歴例

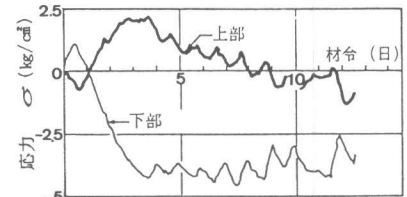


図10 ひずみから求めた応力例

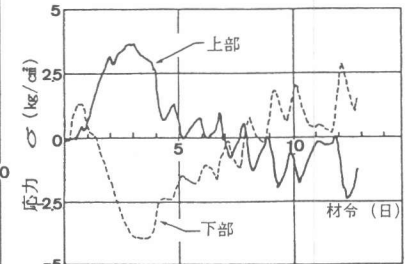


図11 応力履歴例(有効応力計)

$$\sigma(t_n) = \sum_{i=1}^n E(t_i) \times \psi \times \epsilon_i \quad \text{--- (2)}$$

ここに  $\sigma(t_n)$ :  $t_n$ 日の有効応力(kg/cm²)  
 $E(t_i)$ :  $t_i$ 日の弾性係数(kg/cm²)  
 $\epsilon_i$ : 応力に対応するひずみ増分  
 $\psi$ : クリープ係数

有効応力計の値と比較して決定した。ひずみ計から求めた応力は有効応力計の値と同様の傾向を示すことから、ひずみ計を用いてもある程度応力を推定し得ることが示された。

図11の応力履歴は、初期において上部・下部ともに引張応力を示し、材令0.7日頃から上部はさらに引張側へ、下部は圧縮応力増加へ反転した。この傾向は、初期温度上昇過程においては外部拘束の影響が小さく内部拘束が卓越したことに起因し、材令0.7日頃から外部拘束（特に曲げ成分）の影響が現れたものと考えられる。ここで得られた応力履歴は、著者が報告した「外部拘束の影響が少ない場合に得られる応力パターン<sup>1)</sup>」と同様な傾向を示した。

### 3.4 変形挙動

図13, 14にコンクリート打設終了後1時間を初期値とした水平方向と鉛直方向の変形履歴を示す。また図15に各材令における変形図を示した。A断面における最大変形は、上部と下部の平均値で水平方向に1.03mm（材令20時間）膨張し、0.27mm（材令30時間）浮き上がりとなった。このことは、解析に基づく熱変形として「コンクリートは水平方向にmm単位で動くばかりでなく上下方向にも大きく変形し、その最大値は水平方向最大変形の50%にも達する<sup>2)</sup>」との報告を裏付けている。水平方向と鉛直方向の最大変形材令が異なっているのは水平方向変形が断面平均温度に依存し、鉛直方向変形が温度勾配に依存するためと考えられる。

最終水平変形は、最終安定温度が打設終了時とほぼ同じ温度であったが、打設終了時よりもかなり収縮側となった。この一因として線膨張係数が温度上昇過程より温度降下過程の方が大きいことも考えられる。試験体端部（AとE断面）の水平変形合計値と断面平均温度の関係を図16に示す。図中に線膨張係数と温度変化量の関係より、試験体軸方向拘束が全くない場合の水平変形量も示した。図16より、実測水平変形は、軸方向拘束が全くない場合の変形量と比較すると、温度上昇過程で大きな差が生じており、温度降下過程ではほぼ一致している。このことは、コンクリートの初期硬化過程では試験体の弾性係数が小さいために軸方向拘束作用が大きく表われたことや、打設時間が2.5時間程度かかり、軸方向と鉛直方向の温度分布がばらついたことなどの原因と思われる。

最終鉛直変形は、若干ではあるが試験体中央部がそり上がった形となった。この原因として、打設終了時にすでに若干の温度勾配が生じていたことによるものと考えられる。また鉛直変形は試験体端部が顕著であり、それ以外の部分ではわずかな変形しか観察されなかった。

### 4. FEM温度応力解析

解析は平面応力場の温度応力問題として取り扱い、図17に示すモデルで2次元弾性温度応力解析（解析コード：Total-RC）を行った。解析は試験体に実測温度から推定した温度分布と弾性係数を与え、試験体と土間コンクリート間を接合要素でモデル化し、実測値と一致するように接合要素の剛性を様々に変化させた。線膨張係数は $10.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 一定とし、試験体自重は考慮していない。次に代表的な3ケースの解析例を示す。

ケース1は、 $E = 1.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、 $G = 1.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ で曲げ拘束と軸拘束がほとんどない場合である。このケースの変形挙動は、温度上昇に伴って端部が浮き上がり、温度降下により初期の位置に戻る。しかし、浮き上が

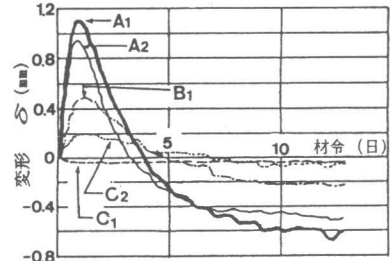


図13 水平方向変形履歴例

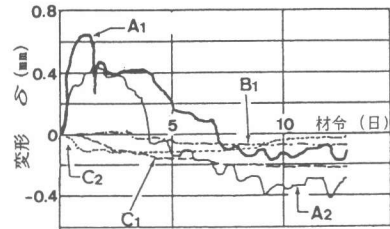


図14 鉛直方向変形履歴例

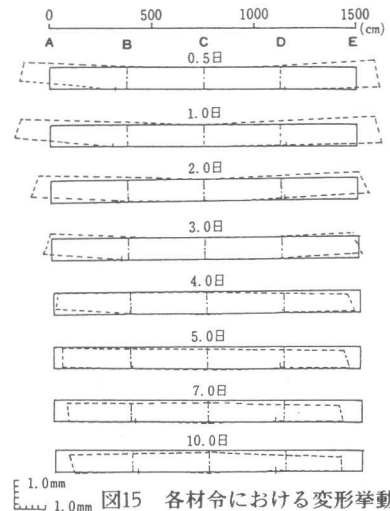


図15 各材令における変形挙動

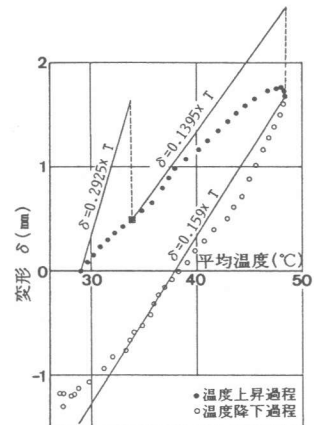


図16 水平変形と温度の関係

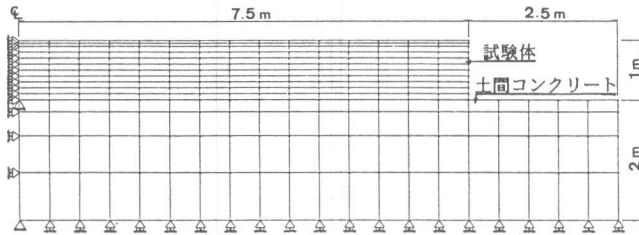


図17 2次元弾性FEM温度応力解析モデル

り量が水平変形量より大きくなり実測結果と異なった。応力は図18に示すように実測結果とやや類似しているようである。

ケース2は、 $E=1.0\text{kg/cm}^2$ 、 $G=1.0\text{kg/cm}^2$ で曲げ拘束と軸拘束が働く場合である。このケースの全体変形は実測結果と異なり、端部が下がり $1/4\ell$ 点が浮き上がる挙動を示した。この原因は軸拘束が作用したためと考えられる。応力は図19に示すように、外部拘束の影響が卓越する場合の応力パターンに類似している。

ケース3は、 $E=1.0\text{kg/cm}^2$ 、 $G=1.0 \times 10^{-4}\text{kg/cm}^2$ で曲げ拘束は働くが軸拘束はほとんどない場合である。このケースの変形挙動は、図21、22に示すように実測結果とほぼ同様な挙動を示した。応力も図20に示すように実測結果とよく一致している。

このように、たとえ同一の温度分布とその履歴が与えられた場合でも、接合要素の剛性すなわち外部拘束効果のとり方により、応力パターンや変形パターンが大きく影響を受けることがわかった。

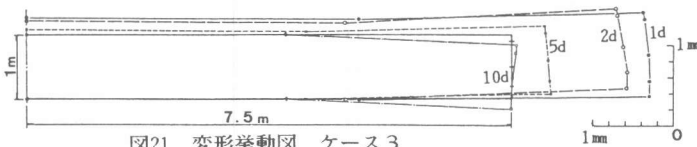


図21 変形挙動図 ケース3

## 5. まとめ

本実験は、外部拘束の影響が少ない場合を想定して実施したものである。その結果、これまで解析に基づき推測されていただけであったコンクリートの熱変形挙動をある程度の精度で実際に確認できた。また、ここで実測された温度を基に、実測された変形と一致するように外部拘束効果を変化させて解析した結果、軸拘束と曲げ拘束を変えて与えた場合によく一致した。また変形挙動が一致すれば、応力も実測応力とよく一致することがわかった。

謝辞：本研究を進めるに当たり御助力いただいた名古屋工業大学梅原秀哲助教授に心から御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 田辺、原口、石川；マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの拘束効果，マスコンクリート温度応力発生メカニズムに関するコロキウム 1982年 10月 J.C.I.
- 2) 日本コンクリート工学協会；マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括 1984. 2

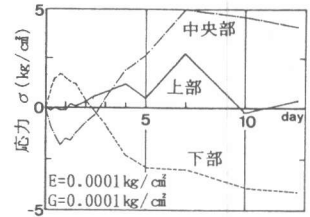


図18 中央断面応力 ケース1

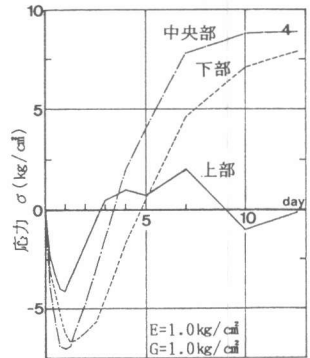


図19 中央断面応力 ケース2

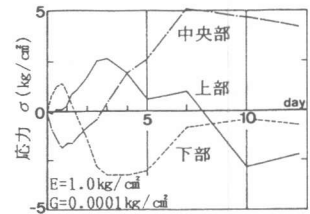


図20 中央断面応力 ケース3

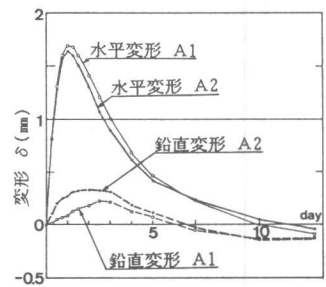


図22 端部変形履歴 ケース3