

論文

[1147] マスコンクリートの外部拘束メカニズムに及ぼすL/Hの影響

正会員○石川雅美(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)

西岡 哲(東急建設技術研究所)

正会員 田辺忠顕 (名古屋大学工学部)

1.はじめに

マスコンクリートの熱変形挙動は、その外部拘束機構を考える上で極めて重要である。しかしながら、これまでのマスコンクリートの温度応力に関する研究の多くは、コンクリート硬化時の応力あるいは、ひずみに重点がおかれ、硬化時の変形に着目した研究は著者らの研究[1][2][3]を除いてはほとんど見あたらない。マスコンクリートが硬化時に示す熱変形は、そこに作用する外部拘束の作用を極めてよく反映すると考えられるため、これを実験的に観察することは重要な意味を持つ。そこで著者らは、実験室内で、長さLと高さHの比の異なる3体のマスコンクリート試験体を打設し、この試験体の硬化時の熱変形を厳密に測定することを試みた。そして、拘束を受けるコンクリートの外部拘束作用の大きさと熱変形パターンとの関係について検討した。

2. マスコンクリートの温度応力実験

(1) マスコンクリート温度応力試験体

マスコンクリートの温度応力実験は、拘束体と被拘束体から成る実構造物大の大型マスコンクリート試験体を用いて行った。試験体の種類は、図1に示すように、高さ1m、幅0.95m、長さ15mの拘束体と、被拘束体のL/Hが異なる3体である。実験は、試験体各部の温度、応力、ひずみ、および変位などを、被拘束体コンクリート打設直後から4週間程度、30分から2時間の間隔で測定した。以下、これら3体の試験体をM1(L=15,H=1,L/H=15), M4(L=5,H=1,L/H=5), M5(L=5,H=2,L/H=2.5), と呼ぶことにする。

M1, M4, M5の試験体の被拘束体は、同じ拘束体の上に時期をずらして作製したものである。拘束体となる部分のコンクリートは、1985年7月2日に打設した。その55日後、この拘束体の上面にM1の被拘束体部分のコンクリートを打設し、実験を行った。M1の実験終了後、被拘束体部分を撤去し、'86年9月2日にM4の被拘束体を作製した。M4の実験終了後、同様にして'86年9月22日にM5の実験を行った。これら3体の試験体の打継面の処理は、すべて同様に行って

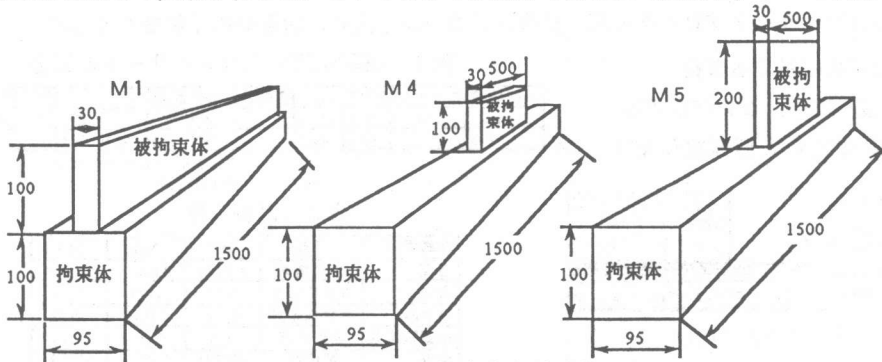


図1 マスコンクリート温度応力試験体

いる。すなわち、打継面となる拘束体上面をサンドブラスト処理し、それぞれの被拘束体コンクリートを打継ぐ前に、この面を十分な湿潤状態におき、セメントペーストを塗布した。これは、通常の無筋コンクリート構造で、最も入念に打継ぎを行った場合を想定したものである。

(2) 実験の特徴

本実験の特徴は、応力、ひずみ、および変位の各量をそれぞれ独立に、そして、応力とひずみについては同一の箇所測定していることである。特に変位については、1/2000mmの分解能を持つ高感度型の変位計を、M1については66台、M4、M5では69台使用して、温度上昇から降下に至るまでの試験体全体の変形を実測した。さらに本実験を行うにあたっては、いくつかの工夫がなされている。すなわち、被拘束体が、拘束体から受ける外部拘束の影響と、その下の地盤などから受ける外部拘束の影響とを区別するため、拘束体の底面に図2に示すような特殊なすべり機構を設けたこと、また、外気温の変動の影響を少なくし、被拘束体の温度上昇量を大きくするため、拘束体の側面に厚さ5cm、被拘束体の側面に厚さ10cmの断熱材（発泡スチロール）を貼付けたこと、などである。実験計測中は、被拘束体の上面の乾燥を防ぐため、この部分と同じ温度で湛水養生を行った。また、実験は、プレハブの室内で行っているため、外気温などの環境条件の変動は小さく、比較的安定したデータが得られている。

(3) 実験に用いたコンクリートおよび計測の内容

拘束体、および被拘束体には、同じ配合のコンクリートを用いた。このコンクリート配合は、表1に示すように、単位セメント量280kg/m³、水セメント比58.9%、呼び強度240kg/cm²の通常の土木構造物に用いられる一般的な配合である。それぞれの被拘束体に用いたコンクリートと同一バッチの円柱供試体（φ10x20）を20℃の水中で養生しておき、それらの圧縮強度、および弾性係数を求めた。その結果を図3、4に示す。各試験体の計測項目を表2に示す。また、図5に各試験体にセットした有効応力計およびひずみ計の位置および、変位の測定位置を示す。この図に示してあるように、計測を行った断面は各試験体の形状に応じて、便宜上A～Eで表す。

拘束体および被拘束体の両端の変位計と被拘束体最上部の変位計は、図6に示すように、セットされている。それ以外の変位計については、鉛直、水平を一組として、表側と裏側にそれぞれ一組ずつセットしてある。鉛直方向の変位計の値については、不動ばりの温度変形量を算出し、この分の補正を行った。しかし、水平方向に対しては、不動ばりの温度変形の影響が無視し得るほど小さいため、補正は行わなかった。また、不動ばりの信頼性を高めるため図7に示すように、床コンクリートの下1mまで掘り下げコンクリートブロックで固定した。そして、床コンクリートとコンクリートブロックの間に発泡スチロールを入れ、お互いの干渉をなくした。

3. 実験結果に対する考察

(1) 温度、応力、およびひずみ

実構造物大の大型試験体M1、M

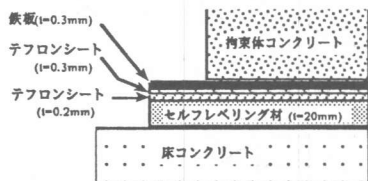


図2 拘束体底面のすべり機構

表1 実験に用いたコンクリートの配合

| 呼び強度 | スランプ | W/C | S/a | 空気量 | 単位量(kg/m ³) | | | | 混和剤(kg/m ³) |
|--------------------|------|------|------|-----|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|
| kg/cm ² | cm | (%) | (%) | (%) | C* | W | S | G | Poz. No.8** |
| 240 | 9+1 | 58.9 | 49.7 | 4 | 280 | 165 | 913 | 948 | 2.8 |

*普通ポルトランドセメント
**4倍溶液

表2 計測項目

| 計測項目 | 計器 | M1 | M4 | M5 |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| 温度 | CC熱電対 | 45(41) | 44(43) | 37(31) |
| 応力 | 有効応力計 | 6(4) | 3(4) | 3(4) |
| ひずみ | 埋設型歪計 | 9(4) | 13(4) | 9(4) |
| 線膨張係数 | 無応力管 | 1(1) | 1(1) | 1(1) |
| 変位 | 変位計 | 42(24) | 30(39) | 30(39) |

*数字は被拘束体の計測点数
カッコ内は拘束体の計測点数

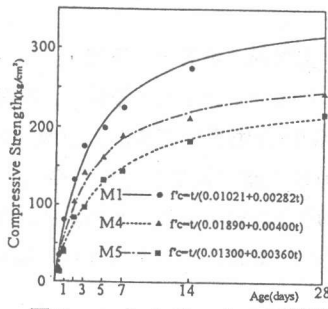


図3 コンクリートの圧縮強度

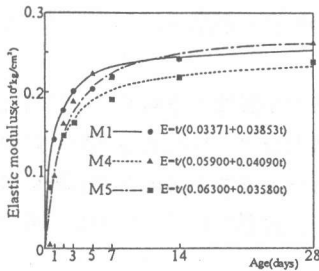


図4 コンクリートの弾性係数

4, M5の被拘束体硬化時に観察された温度, 応力, およびひずみについて考察する。温度計測は各試験体とも, A~Eのそれぞれの断面に熱電対を埋設し, 3次元的に行った。特に中央断面(C断面)については, 熱電対を, M1で3点, M4, M5で2点埋設し, 重点的に温度を計測した。図8①~③に, この断面で観察された各試験体の被拘束体の温度履歴を示す。

1) 温度について: M1は, 打設温度33.8℃, 0.63日後にピーク温度60.4℃に達し, 材令12日ではほぼ定常温度となった。被拘束体の中央断面と端部との温度差の最大は, 2.0℃, 壁厚方向の最大温度差も2.0℃であった。M4, M5では, 打設温度はそれぞれ, 25.9℃, 31.6℃, ピーク温度は51.6℃, 65.4℃であった。ピーク温度に達する材令は, M4が0.88日, M5が1.52日であった。被拘束体長手方向の温度差は, M4が1.5℃, M5が2.6℃, また壁厚方向では, M4, M5それぞれ, 1.8℃, と1.4℃であった。これら試験体の被拘束体部分は, 断熱材の効果により, 壁厚方向に対して一定とみなしうるほぼ2次元的な温度分布になっていると言える。このような温度に対して, 観察された応力, およびひずみについて考察を行う。図8④~⑨は, M1, M4, M5の各試験体の被拘束体中央断面

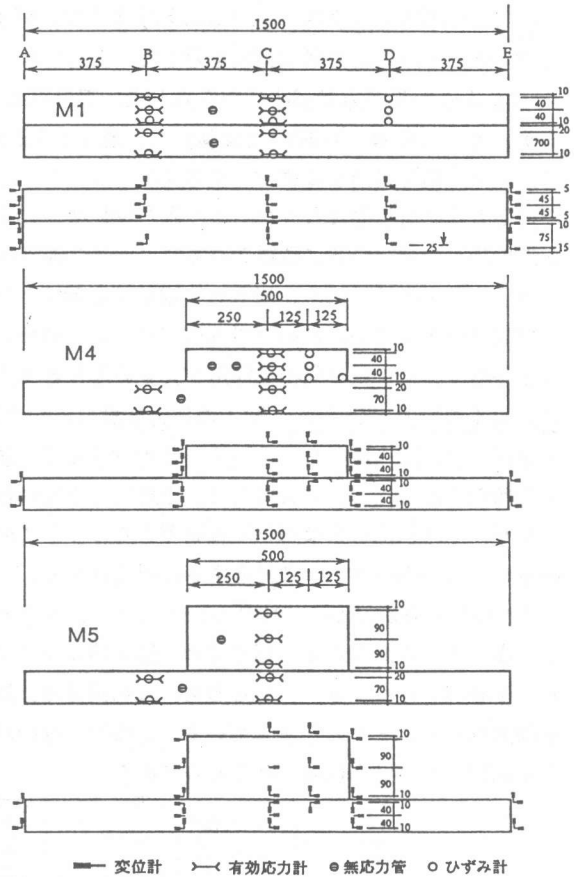


図5 各試験体の計測器の位置

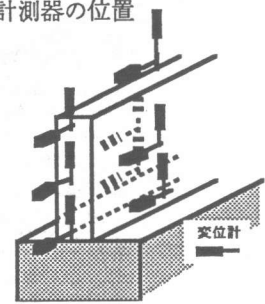


図6 端部の変位計の設置状況

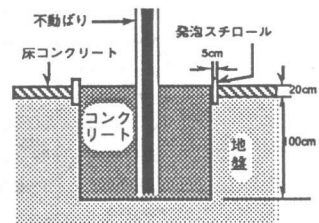


図7 不動ばりの固定方法

で観察された応力とひずみである。

2) M1の応力とひずみ: 図8④に示すように, M1の応力は, 上層部, 中層部, 下層部とも, 打設直後から圧縮応力増加傾向を示した. 上層部は, 他の部分よりはやく引張側へ推移し, 材令2.0日頃から引張応力は減少傾向を示した. 下層部と中層部は材令0.8日頃まで圧縮応力が増加するが, それ以降は, 圧縮応力は減少し, 材令1.5日から引張応力は急激に増加した. 材令3.0日に, 中央断面を貫通するクラックの発生によって, 各部に急激な応力解放が生じ, それ以降, 各部の応力は平衡状態となった. この応力履歴は, 著者らの研究[1][2]でも論じているように, 比較的外部拘束の強い場合に観察されるパターンと推測される.

M1のひずみは, M4, M5と比較して各部でそれほど差がなく, また, 膨張側のひずみも最大で 30×10^{-6} と小さい. このひずみのパターンも外部拘束が大きい場合に観察されるもので, このことから, M1は外部拘束作用が大きい場合と判断できる.

3) M4の応力とひずみ: M4の応力履歴は, 材令2.0日程度まで中層部と下層部が圧縮側に, 上層部は逆に引張側となっている. この材令以降上層部は圧縮側となり, 圧縮応力は徐々に増加する傾向を示した. これに対して, 上層部と下層部は, 材令5日程度まで引張応力が急激に増加したが, それ以降応力はほぼ平衡状態となった. この応力履歴は, 比較的外部拘束の弱い場合にみられる応力のパターンに対応すると判断される.

M4のひずみ履歴からまず明らかなことは, M1と比較して, 各部で生じているひずみ量が大きくなっている点である. M4では, 膨張時においても, 収縮時においても, 上層部が最も大きく, 下層部が最も小さい. すなわち, 被拘束体の上層部ほど大きく変形し, 逆に下層部では変形が拘束されていることを示している. このひずみのパターンは, 応力と同様, 外部拘束の弱い場合に観察される場合に見られるものである.

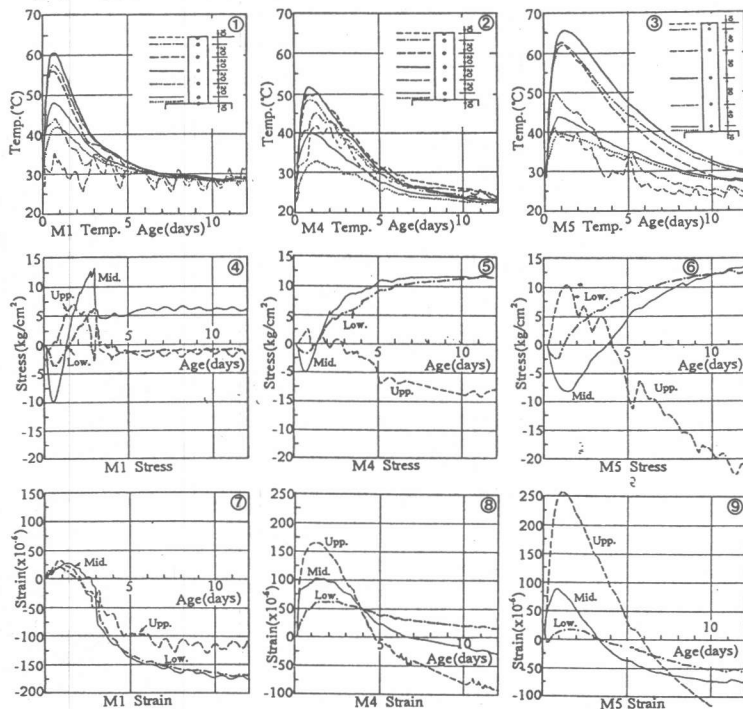


図8 温度、ひずみ、及び応力の履歴

4) M5の応力とひずみ: M5の応力履歴は, M4とほぼ同様である. すなわち, 中層部と下層部は圧縮から引張りへ, 上層部は引張から圧縮と推移した. しかし, 応力の値はM4に比べかなり大きく, 上層部の最大引張応力は材令1.2日で10.2kg/cm², 中層部の圧縮応力の最大は, 材令1.2日で, 7.2kg/cm²であった. また, M5のひずみについても, その傾向はM4とほぼ同様であり, M5の外部拘束の作用も比較的弱いようである.

この応力およびひずみの観察結果から, これら3つの試験体のうち, M1は外部拘束の作用が強いようであり, M4, M5は比較的弱いようである. なおこれらの試験体のうち, クラックが発生したのはM1だけであった. また, M1とM4は, 被拘束体と拘束体との間の打継面に試験体長手方向の両端から試験体長の1/4程度まで剥離が生じていることを目視により確認した.

(2) 変形の実測結果

図9に試験体各部にセットした変位計から求めた試験体の変形図を示した. ここで, 水平方向の変形については, 打設直後の位置より膨脹側をプラス, 収縮側をマイナスとした. また, 鉛直方向では, 上方への変位をプラス, 下方への変位をマイナスとした.

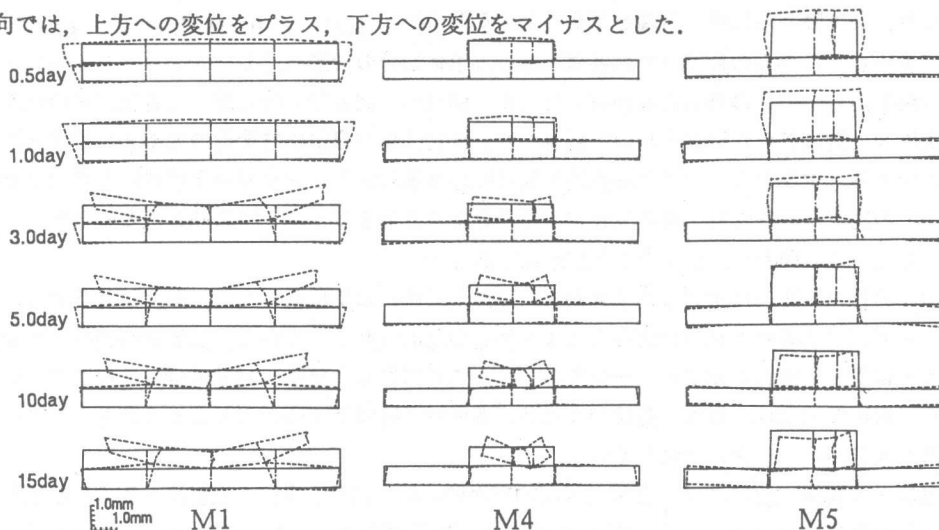


図9 試験体の変形図

1) M1: 温度ピーク時においては, 被拘束体の中央部が上方に変位し, 両端部がこれに比べて下側になる, いわゆる上に凸なる変形が認められた. 温度降下時には, 被拘束体の変形は温度ピーク時とは逆に水平方向に収縮しながら両端が上方へと変位する, 下に凸の形になった.

2) M4: M4の熱変形のパターンも, M1とほぼ同様であった. すなわち, 材令0.5日~1日の温度上昇時には, 上に凸の形になり, 温度降下時には, 両端部がそり上がる下に凸の形になった. M4の被拘束体の温度ピーク時の両端部の平均変位量は, 水平方向で, M1のおよそ1/8程度となっており, M1の試験体長15mに対して, M4の試験体長5mという比率を考える

表3 変位計測結果

| | | M1 | | M4 | | M5 | |
|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| 打設温度 | | 33.8℃ | | 25.9℃ | | 31.6℃ | |
| ピーク温度 | | 60.4℃ | | 51.6℃ | | 65.4℃ | |
| 温度ピーク 材令 | | 0.63 day | | 0.81 day | | 1.37 day | |
| 変位量(mm) | | A側 | E側 | A側 | E側 | A側 | E側 |
| 水平 | (下) | 0.476 | 0.384 | 0.063 | 0.077 | 0.106 | 0.795 |
| | (中) | 0.688 | 0.567 | 0.106 | 0.103 | 0.323 | 0.264 |
| | (上) | 0.797 | 0.602 | 0.052 | 0.036 | 0.133 | 0.106 |
| | 水平平均 | 0.667 | 0.537 | 0.086 | 0.084 | 0.242 | 0.338 |
| 鉛直 | (下) | -0.314 | -0.063 | 0.052 | 0.036 | -0.020 | -0.041 |
| | (中) | -0.080 | 0.017 | 0.086 | 0.125 | 0.181 | 0.182 |
| | (上) | 0.020 | 0.071 | 0.169 | 0.173 | 0.463 | 0.516 |
| | 鉛直(平均) | -0.107 | 0.012 | 0.096 | 0.117 | 0.197 | 0.204 |
| 材令 | (下) | -1.038 | -1.212 | -0.374 | -0.115 | -0.136 | -0.090 |
| | (中) | -0.940 | -1.310 | -0.509 | -0.344 | -0.248 | -0.171 |
| | (上) | -0.809 | -1.218 | -0.656 | -0.455 | -0.326 | -0.267 |
| | 水平平均 | -0.933 | -1.272 | -0.511 | -0.320 | -0.241 | -0.174 |
| 15日 | (下) | 0.704 | 1.023 | 0.449 | 0.369 | 0.024 | 0.060 |
| | (中) | 0.617 | 0.986 | 0.165 | 0.325 | -0.085 | -0.160 |
| | (上) | 0.583 | 0.716 | 0.411 | 0.402 | -0.222 | -0.042 |
| | 鉛直(平均) | 0.627 | 0.939 | 0.271 | 0.349 | -0.091 | -0.092 |

と、ピーク温度の違いを考慮してもかなり小さい。

3) M5: M5の被拘束体の熱変形は、他の2つと比較して、下に凸、あるいは上に凸といった曲げ変形は、あまり卓越していないようである。それでもどちらかと言えば、図10から判断して、M1、M4と同様に、温度上昇時には上に凸、温度降下時には、下に凸といった形になっているようである。各試験体で観察された変位置の詳細を表3に示した。

4. 熱変形性状に関する考察

実験の結果、観察された変形は、いずれの試験体についても、図9に示すように、温度上昇時には、上に凸の形となり、温度降下時には、両端部がそり上がる下に凸

の形であった。これらの観察された各試験体被拘束体部分の変形に対して、コンペーンションライン法を用いて、その理論的な検討を行った。図11は、図8①～③に示した各試験体の被拘束体中央断面で観察された温度を用いて計算した、被拘束体の自由な熱変形の曲率 ϕ の履歴を示したものである。すなわち、全く外部拘束を受けない状態にあるコンクリートの曲げ変形の曲率である。この図で ϕ の符号は、被拘束体が上に凸となる変形をプラス、下に凸となる変形ををマイナスとした。この図から、以下のことが考察できる。

1) M1の自由な変形はその ϕ の傾きから、温度上昇時には下に凸となり、温度が降下するのにしたがって、打設当初の状態に戻ろうとする挙動が認められる。しかし、実際に観察された変形はこれとは逆の、図10に示すパターンであった。これに対し、M4、M5では、その曲率 ϕ の傾きから、自由な変形は、温度上昇時が上に凸、温度降下時が下に凸の形となっており、これは実測された変形のパターンと一致している。

2) 著者らは既報[1][2]の中で、比較的外部拘束が強い場合には、自由な熱変形と実際に観察される変形の形状が異なること、また反対に外部拘束の作用が比較的小さい場合には、自由な熱変形と、観察される変形とが一致するという事を述べた。このことから判断すると、M1では、外部拘束作用が強いようであり、逆に試験体長の短いM4、M5では、外部拘束の作用が比較的弱いと考えられる。

5. まとめ

これまで述べたように、各試験体の自由な熱変形の形状と実験的から観察された変形形状とが異なっていることが明らかになった。しかし、これら試験体の拘束体と被拘束体の打継面は、すべて同様に処理しており、この部分の付着の状態はどの試験体においてもほぼ同様であると考えられる。従って、変形挙動から推測される外部拘束作用の違いは、被拘束体の長さ、もしくは被拘束体のL/Hに起因するものと考えられる。しかしながら、これについては、FEMなどを用いたより詳細な検討を行ない確認する必要があるものと思われる。

参考文献

[1]石川雅美 前田強司 西岡哲 田辺忠顕：マスコンクリートの熱変形および熱応力に関する実験的研究：土木学会論文集，第408号/V-11，pp121~pp130, 1989.8.

[2]田辺忠顕 原口晃 石川雅美：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外部拘束効果：マスコンクリートの温度応力に関するコロキウム講演論文集，pp83~pp90, 1982.8.

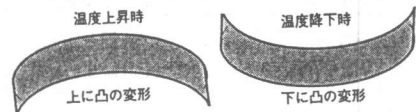


図10 熱変形のパターン

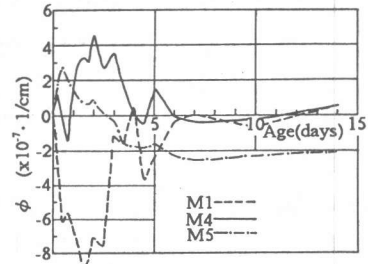


図11 自由な熱変形を表す ϕ の傾き