

論文

[1031] 温度応力によるマスコンクリートの力学的挙動

正会員 ○ 今枝 靖典 (名古屋大学大学院)
 正会員 石川 雅美 (東急建設技術研究所)
 正会員 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. 序論

マスコンクリートの温度応力発生メカニズムの解明は、過去十年間、特に大きな進歩をみせてきた。しかし、これらの研究は実構造物において実測した応力、ひずみなどの実験的研究、あるいは、各種解析法を用いた解析的研究のどちらかであり、同一試験体の同一部の応力とひずみの両方を、実験値と比較して十分な一致をみた解析例は数少ない。まして温度変形に関する実測例はほとんどないのが現状である。過去の研究例は、一局部のひずみのみを実測して解析したか、あるいは応力のみを実測し解析したか、そのいずれかが大半を占めている。

応力、ひずみ、変位の三量を実測し二量は解析と合うが一量が解析と合わないというのであれば、まだ、十分に現象を理解したとはいえない難いであろう。しかし、温度応力の研究は未だその域を脱していないと考えられる。

そこで、本研究の目的とするところは、打継面の拘束条件を変化させた実構造物に近い大型試験体の実験を行って、応力、ひずみ、変位を独立に同一箇所において実測し、その三量を有限要素解析手法の結果と比較し、マスコンクリートの温度応力発生メカニズム、特に若材令に生じる打継面でのすべりやはく離の挙動について考察を行うところにある。

2. 壁体モデル実験

試験体は、参考文献(1)に詳細に述べてあるが、特徴的な点を再記すると以下のようである。

過去に行われた温度応力に関する大型壁体実験は、そのほとんどが拘束体コンクリートを直接地盤に打設している為、真の外部拘束作用が不明確となっていた。そこで、本実験では、拘束体コンクリートを、幅 95cm、高さ 1m、長さ 15m の鉄筋コンクリートブロックとし、その底部にテフロンシートによる特殊なすべり機構を設け、温度変形に対する地盤以下からの外部拘束の影響を受けない明確な拘束条件のもとで実験を実施している。被拘束体は、幅 30cm、高さ 1m、長さ 15m のコンクリートブロックである。モデル別の打継面の拘束条件は以下のようである。

- M1は、打継面をバキュームサンドブラストを用いて処理した。また、打継面上に鉛直方向にかかる圧力を測定するため、片端部、中央部、その中間の3箇所に圧力計を設置した。

- M2は、テフロンシートを打継面に布設し、水平拘束を極力減じた。また、打継面上に片端断面から中心断面にかけて11箇所圧力計を設置した。

- M3は、打継面及び被拘束体内に通常の壁式土木構造物と同様に配筋を施し、拘束体と被拘束体との相対変形を押さえている。これにより、外部拘束はかなり大きくなるものと思われる。

M1からM3までの試験体概略を図2.1に示す。

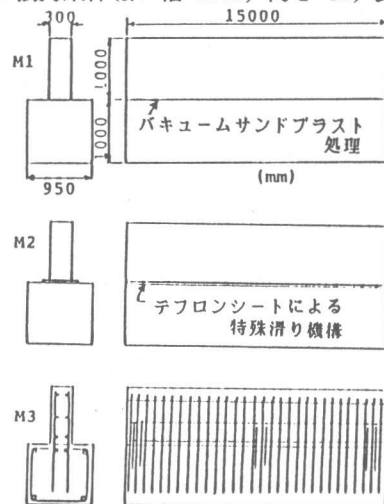


図2.1 試験体概略図

3. 温度応力解析手法

温度解析は、2次元よりも3次元温度問題として考える方が、より精度の高い解析が行えるといえよう。しかし、応力解析において3次元問題としてFEM解析することは、自由度が大きく、複雑かつ不経済な解析となる。そこで、3次元温度場のもとで、2次元のFEM応力解析手法を用いて3次元の応力を求める擬3次元応力解析手法を考案した。また、試験体は、拘束体底部のすべり、ならびに拘束体と被拘束体の打継面でのすべりやはく離、温度クラックの発生など複雑な不連続挙動を呈することが考えられる。そこで、これらの挙動を考慮し得るように、要素内の不連続境界面に仮想バネを組み入れるバネモデルを用いて応力解析を行い⁽²⁾、特に温度クラック発生後の剛性低下には負のヤング率を与える剛性低下モデルを用いて解析を行った。なお、以下に示す解析では、クリープの影響は、ヤング係数の低減として考慮されている。

3.1 擬3次元温度応力解析手法

2次元平面応力要素を更に厚さ方向に分割するサブ要素を考える。図3.1に示したサブ要素群①, ②, ③の各節点に $\Delta T_{i1} - \Delta T_{i4}$ までの温度増分が得られたとする。これを平面応力問題化するため、各サブ要素ともy方向の4辺の中点を結ぶ断面A, B, Cを想定する。断面を構成する4節点の温度増分は、分割した辺の両節点の温度増分の平均とし、この断面温度分布がサブ要素厚さ方向に均一分布すると仮定することにより、各サブ要素の断面ごとの温度増分 Δt により生じる温度応力増分 $\{\sigma_\theta\}$ が次式で求められる。

$$\{\sigma_\theta\} = [D] \{\alpha \Delta t\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、[D]；コンクリートのx-z平面での応力-ひずみマトリックス

次に(3.1)式で求めた各サブ要素の $\{\sigma_\theta\}$ を次式で等価節点力 $\{F_\theta\}$ に変換する。

$$\{F_\theta\} = [B]^T \{\sigma_\theta\} dV = [B]^T [D] \{\alpha \Delta t\} dV \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、[B]；コンクリートのx-z平面での変位-ひずみマトリックス

また、平面保持の法則に従い、サブ要素群①, ②, ③すべてのy-z断面内の同一z座標では同一のひずみとなる。そこで、(3.2)式より求めた断面A, B, Cの等価節点力を総和し、要素群全体に共通の応力成分 $\{\sigma_T\}$ が、ひずみ $\{\varepsilon\}$ および変位 $\{u\}$ とから以下のように求められる。

$$\Sigma \{F_\theta\} = \{F_{\theta 0}\} + \{F_{\theta 0}\} + \{F_{\theta 0}\} = [K] \{u\} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\{\sigma_T\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] [B] \{u\} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、[K]；コンクリートの剛性マトリックス

以上、温度増分により生じる各要素の全応力 $\{\sigma_\sigma\}$ は、(3.1), (3.4)式より次式で求められる。

$$\{\sigma_\sigma\} = \{\sigma_T\} - \{\sigma_\theta\} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

3.2 不連続要素のバネモデル化

図3.2に示す幅 Δd 、すべり Δw に進展した不連続要素を想定する。不連続界面の水平、鉛直方向にそれぞれバネ定数が k_h 、 k_v なる仮想バネを挿入すると要素に働く応力 σ_y' 、 τ'_{xy} とバネの伸縮量 Δd 、 Δw との間には次式の関係が成り立つ。

$$\sigma_y' = k_v \cdot \Delta d, \quad \tau'_{xy} = k_h \cdot \Delta w \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで、 Δd 、 Δw をひずみ量に換算し、要素に働く応力 σ_x' 、 σ_y' 、 τ_{xy}' と、それにより生じるひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} には、要素の高さを h として次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E + 1/h/k_v & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu)/E + 1/h/k_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \tau_{xy}' \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

このように、不連続面での変位量 Δd 、 Δw をひずみ量に換算するバネモデルにより、迅速かつ簡潔に計算を行うことができる。なお、変位関数に関しては、4接点のアイソパラメトリック

表示を用いており、剛性マトリックスを導く際に使用した数値積分点は、それぞれの方向に(2×2)である。

3.3 鉄筋コンクリートの温度クラックによる剛性低下モデル

無筋コンクリートは、引張クラックの発生とともに、その剛性をほとんど失うが、鉄筋コンクリートの場合、ひびわれ発生後もなお、構造部材として十分機能し得る剛性が残存する。そこでM3の温度クラックに対して、クラックの生じていない健全状態Ⅰ、コンクリート引張力の寄与がなくなり、鉄筋だけで剛性を保っている状態Ⅲ、そしてこれらの中間領域におけるクラックによるコンクリートの剛性低下が生じている状態Ⅱの3領域に分けて応力-ひずみ関係をモデル化して解析した(図3.3)。なお図中、 E_{cI} は健全状態でのコンクリートの弾性係数、 E_{cII} は剛性低下時のコンクリートの弾性係数、 E_s を鉄筋の弾性係数、 p_x を鉄筋比とする。

解析には、拘束体底部のテフロン処理による拘束体と地盤との間のすべり、および打継面でのすべりやはく離に対しては、これらの挙動を拘束体、被拘束体最下列の要素群内の不連続量とみなし、バネモデル化による不連続要素として解析を行った。これにより、すべりによる付着の弱さや外部拘束の軽減、はく離による応力解放、剛性低下を表現している。また、本解析手法と3次元FEM応力解析を用いた結果は、ほとんど一致したものが得られた。更にコンクリートの弾性係数 E は、静弾性係数測定結果より材令を t (日)として次式で近似した。

$$E = t \times 10^6 / (3.371 + 3.853 \times t) \quad (3.8)$$

ただし、材令6時間ぐらいまではクリープ等を考慮して、 $E = 10,000 \text{ kg/cm}^2$ とした。

4. 解析結果および考察

著者らの研究⁽³⁾によれば、これら3体の試験体の変形は以下のように特徴付けることが可能であった。即ち、まず、被拘束体の拘束が極めて小さいと考えられる場合(M2)、温度上昇過程で被拘束体は下に凸となり、温度下降過程で上に凸となる(図4.1)。次に、水平、鉛直両拘束が強い場合(M3)、温度上昇過程で試験体全体は上に凸となり、温度下降過程では下に凸と、M2と全く逆になる(図4.2)。拘束の程度が、両者の中間にある場合(M1)、温度上昇過程で試験体全体は上に凸となり、温度下降過程では被拘束体のみが下に凸となることである(図4.3)。FEMによる解析が、この変形挙動を追うことができるかどうかの一つのPointである。

次に、打継面で圧力を計測したが、計測された圧力は、一様ではなく、長手方向にいくつかの山や谷がみられる(図4.4(a))。もし、これが解析的にも存在するとすれば、新コンクリートに作

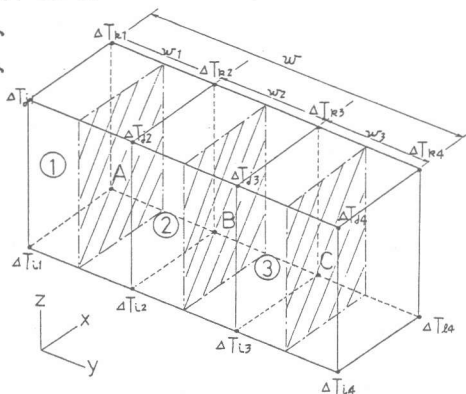


図3.1 サブ要素群

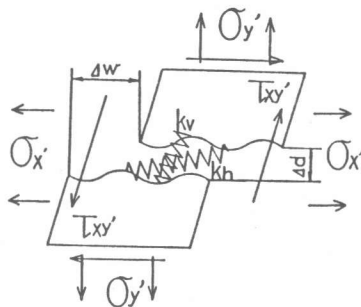


図3.2 不連続要素

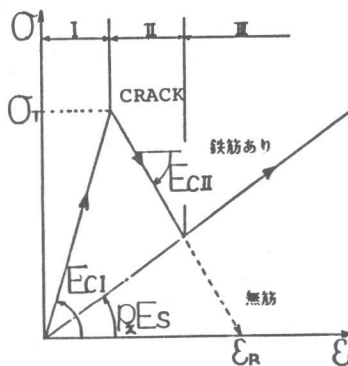


図3.3 剛性低下モデル

用する拘束曲げモーメントが(+)になったり、(-)になったり長手方向に増加、減少を繰り返すことになる。この圧力の傾向を解析が追うことができるかどうか、もう一つの Point である。

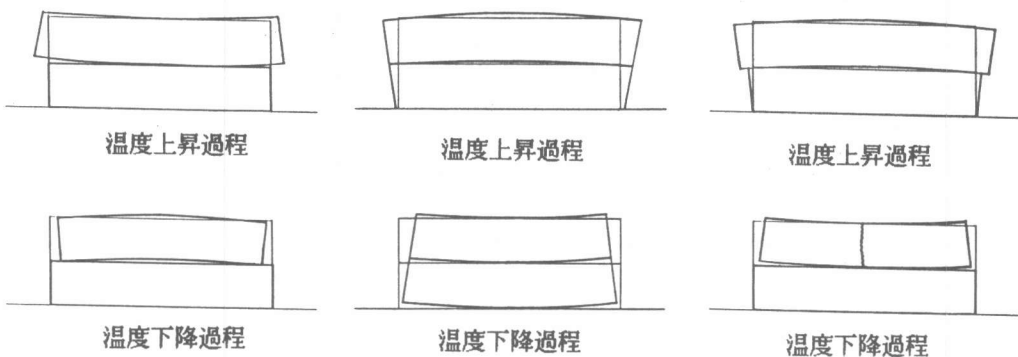


図4.1 拘束の弱い試験体変形 図4.2 拘束の強い試験体変形 図4.3 中程度拘束の試験体変形

ここで、応力、ひずみ、変形の結果⁽¹⁾を図4.5に示す。

M2は打継面では、せん断剛性が無視できるくらい軽減されており、水平バネ定数を 10 kg/cm^3 と極めて小さい値として解析すると、応力、ひずみ、変位とも実測とかなり一致した。この時の変形挙動は、はく離に対する水平バネ定数を 0 kg/cm^3 として解析した結果と同一である⁽³⁾。

次にM3は、鉄筋による拘束を、鉛直、水平バネ定数とも 極めて大きな値として解析したところ、被拘束体、拘束体ともに一体化した変形挙動を行い、材令 3 日から 4 日にかけて、中層部より上層部へ伝播する温度クラックが発生する解析結果を得た。鉛直上方へのめくり上がりは、実測結果ほどには顕著ではないが、試験体が下に凸の曲げ変形を示し、実測と同様に両端部 1/8 程度で生じている結果を得た。

M1については、鉛直方向の引張応力の発生とともに、鉛直バネ定数を 0 kg/cm^3 と鉛直剛性を解放し、せん断剛性を初期値の約 20 %に低減させ、はく離が進展するにつれて徐々にせん断剛性を低下させていき、一定のはく離進展がみられた後もせん断剛性がある程度保たれるようにしたところ、実測によく合う結果が得られた。これは、はく離が生じて、その不連続界面での骨材の噛み合いなどせん断剛性がある程度保たれる事実を示していると思われる。

これらの解析結果は、事実上、マスコンクリートの打継面のせん断剛性、鉛直剛性の同定となった。上記のように、最も実験値を追従できるせん断剛性を打継面のはく離間隔 Δw と材令でモデル化すると図4.6のようである。

次に、M2における打継面での圧力分布の解析を図4.4(b)に示す。端部から中央に向かって圧縮圧力、引張圧力、圧縮圧力……と二転三転している。この傾向は、実測にも見られた現象であり、この打継面における長手方向の圧力分布の不均一さは計器の誤差によるものではなく、実現象のように考えられる。先にも述べたように、これは、拘束モーメントが、長手方向に変化すること、それも符号の反転まであり得ることを示唆するもので、にわかには断定できないが、今後の詳細な検討が要求される。

なお、以上述べてきたパラメータ以外の値は、次のように設定した。

- ・地盤の弾性係数は、 $10,000 \text{ kg/cm}^2$ 、拘束体底部処理による試験体と地盤のすべりに対しては、鉛直バネ定数をその要素の鉛直応力が圧縮の時、 $\infty \text{ kg/cm}^3$ 、引張の時、 0 kg/cm^3 、水平バネ定数は、 100 kg/cm^3

材令1日 ——— 材令3日 - - - - -
 材令2日 - - - - - 材令5日 - - - - -

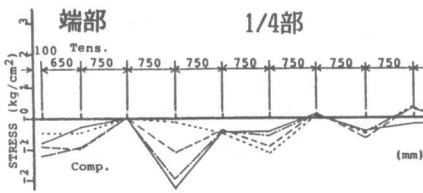


図4.4(a) M2の圧力計実測結果

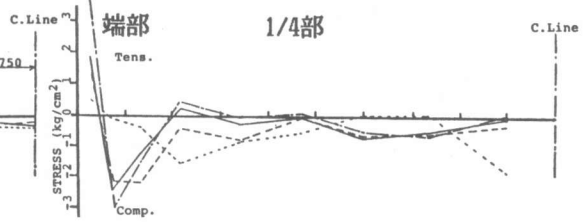


図4.4(b) M2の打継面の圧力解析結果

実測結果
 被拘束体上層部 ——— 井
 被拘束体中層部 ——— ○
 被拘束体下層部 ——— □

解析結果
 ———
 ———
 - - - - -

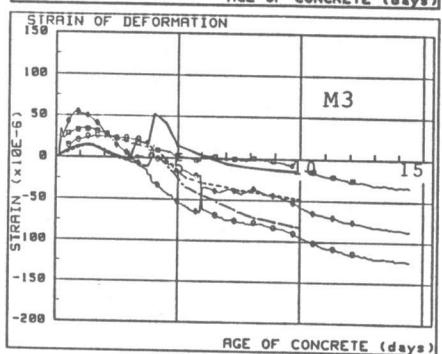
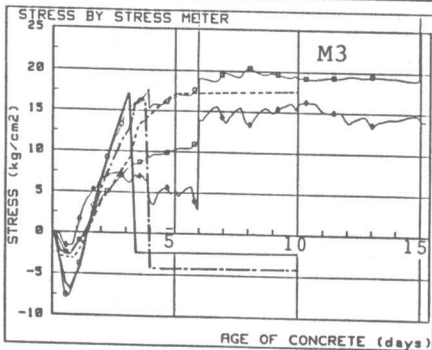
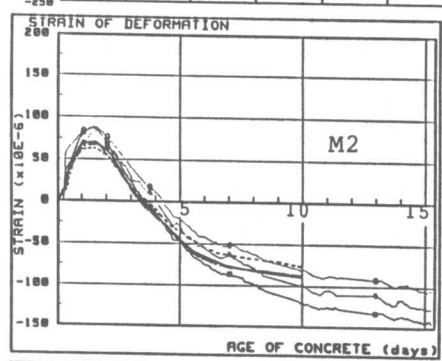
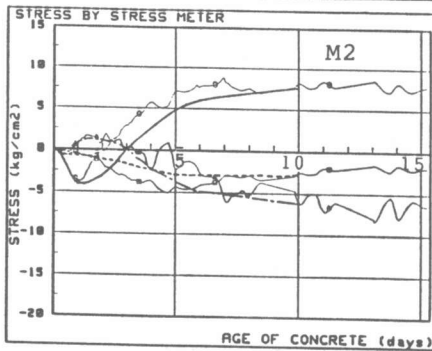
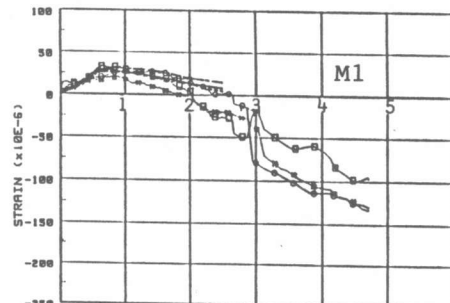
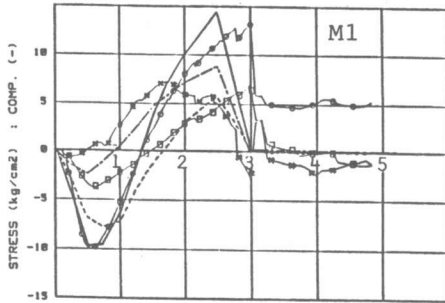
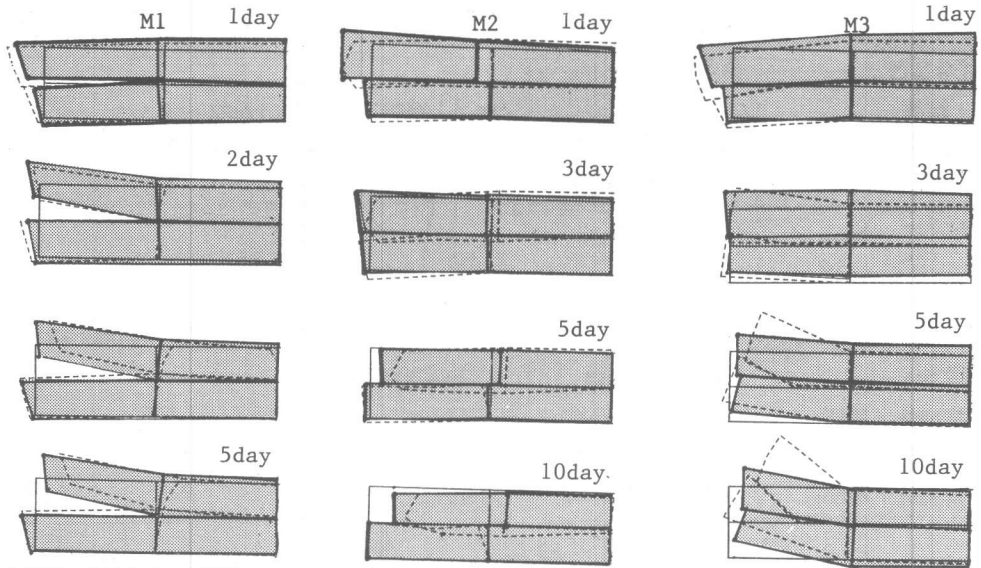


図4.5(a) 応力結果

図4.5(b) ひずみ結果



実測変形結果は、破線
 解析変形結果は、網掛けで表示
 (なお、試験体原型は、実線)

図4.5(c) 変形結果 (1/2試験体)

5. 結論

大型のマスコンクリート試験体を3体作製し、変位、ひずみ、応力の多点測定を行い、実挙動を観測するとともに、これに対応させて擬3次元のFEM解析を行い、両者の比較・検討から、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムを検討した。その結果、マスコンクリートの実挙動は、打継面のすべり、およびはく離挙動に大きく影響されていることが判明した。打継面のせん断剛性、鉛直剛性が多少変化しただけで、すべり、はく離、打継面の鉛直反力、それらの方向が変化し、それはまた、材令によっても影響されるのである。今回行ったFEM解析から、これらの微妙な挙動は、打継面に適切なせん断剛性モデル、鉛直剛性モデルを用いることによって、表し得ると考えられた。そのモデルの一つを同定結果に基づいて提案した。しかし、今後更に打継面の力学的挙動のモデル化を適切に行う研究が必要であろう。これは、新旧コンクリートの打面の処理方法、岩盤とコンクリートの打継面の処理方法などによって、変化すると考えられ、必ずしも容易ではなかろうが、大体的方向は見出せたと感じている。クリープの影響については陽には論じていないが、ここでは有効ヤング係数として考慮されており、以上の結論はクリープも含めた上で、このような結論が導きうると考えられる。

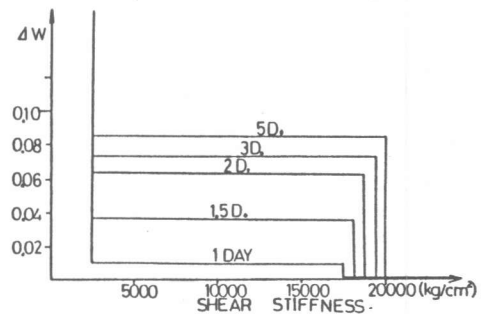


図4.6 はく離に対するせん断剛性

打継面のせん断剛性、鉛直剛性が多少変化しただけで、すべり、はく離、打継面の鉛直反力、それらの方向が変化し、それはまた、材令によっても影響されるのである。今回行ったFEM解析から、これらの微妙な挙動は、打継面に適切なせん断剛性モデル、鉛直剛性モデルを用いることによって、表し得ると考えられた。そのモデルの一つを同定結果に基づいて提案した。しかし、今後更に打継面の力学的挙動のモデル化を適切に行う研究が必要であろう。これは、新旧コンクリートの打面の処理方法、岩盤とコンクリートの打継面の処理方法などによって、変化すると考えられ、必ずしも容易ではなかろうが、大体的方向は見出せたと感じている。クリープの影響については陽には論じていないが、ここでは有効ヤング係数として考慮されており、以上の結論はクリープも含めた上で、このような結論が導きうると考えられる。

参考文献

- 1) 石川雅美、前田 剛、西岡 哲、田辺忠頭：大型試験体によるコンクリートの温度応力実験
 コンクリート工学年次論文報告集 1988.6
- 2) 今枝靖典、西岡 哲、田辺忠頭：クラック面を有するコンクリート構造体の温度応力および温度変形、土木学会第41回年次学術講演会
- 3) 今枝靖典、畑中重光、田辺忠頭：大型供試体によるマスコンクリート実験とその解析、コンクリート工学年次論文報告集 1987.6