

論文 マスコンクリートの温度応力解析方法に関する基礎的検討

川口 徹

要旨: マスコンクリートの温度応力を解析的に予測する際に、これまで多くの場合、時間区分増分荷重法が用いられてきている。しかし、この方法では弾性係数が時間的に変化したことによる釣り合い状態の変化の影響が考慮できない。この欠点を避けて、弾性係数・クリープ性状の時間依存性をできるだけ精確に考慮した時間区分全荷重法による解析アルゴリズムを明らかにした。基本的な解析例を用いて既往の方法による解析結果と比較検討した。

キーワード: マスコンクリート、温度応力、クリープ、有効弾性係数、応力解析

1. はじめに

コンクリート打込み後、セメントの水和熱によるコンクリート部材の温度上昇、温度降下過程で生じるマスコンクリートの温度応力を解析的にできるだけ精確に予測するためには、以下のことが重要である。①. 硬化の進行に伴うコンクリートの弾性係数の発現性状を適切にモデル化する。②. 同様に、コンクリートのクリープ性状について適切なモデル化を行う。③. これらのコンクリートの力学的性状をできるだけ精確に反映した解析アルゴリズムを構成する。

④. 解析対象とするマスコンクリート構造物、あるいは部材の形状、寸法、拘束条件など解析モデルを適切に設定する。

これらのことを考慮して、これまでに種々の解析方法が提案されてきている[1]。複雑な形状の構造物の解析にはほとんどの場合、有限要素法が使われてきている。

これまで基本となる解析アルゴリズムは、時間区分増分荷重法を用いたものが多い[2]～[4]。この方法は、時間区分内に新たに生じた温度変化分のみを荷重(初期ひずみ)として与え時間区分ごとに増分温度応力を求め、それ以前からの増分応力を足し合わせて解析対象時点での応力を評価するものである。この方法の欠点としては、時間的に弾性係数が変化したことによる応力再配分の影響が考慮できないことがあげられる。温度応力の簡略解析法としてよく用いられている有効弾性係数法は、ここでいう時間区分増分荷重法の1つである[5]。

ここでは、時間区分増分荷重法の欠点を避けた解析アルゴリズムとして時間区分全荷重法による解析手順を示し、基本的な解析例を用いて解析方法の違いによる影響を検討する。

2. 時間区分全荷重法による解析手順

コンクリート温度、弾性係数の時間変化を微小時間区分に分割して解析を進めるものとする。解析にあたり以下の仮定を採用する。温度荷重は、増分荷重として扱うのではなく、その時点で作用している全荷重を考えることを基本とする。同一時間区分内ではコンクリートの弾性係数は一定とする。時間区分の切り替え時点で弾性係数は、図-1に模式的に示すようにステップ関数状に変化するものとする。

時刻 t_i において、次の2つの式が同時に成り立つものとする。

$${}_1\sigma_i = E_i \cdot ({}_1\varepsilon_i - \varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{ci}) \quad (1)$$

$${}_0\sigma_{i+1} = E_{i+1} \cdot ({}_0\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{ci}) \quad (2)$$

ここに、

${}_1\sigma_i$: 時間区分 $(t_i - t_{i-1})$ の
終点でのコンクリートの応力

${}_0\sigma_{i+1}$: 時間区分 $(t_{i+1} - t_i)$ の
始点でのコンクリートの応力

E_i : 時間区分 $(t_i - t_{i-1})$ 間で
のコンクリートの弾性係数

E_{i+1} : 時間区分 $(t_{i+1} - t_i)$ 間で
のコンクリートの弾性係数

${}_1\varepsilon_i$: 時間区分 $(t_i - t_{i-1})$ の
終点でのコンクリートの実ひずみ

${}_0\varepsilon_{i+1}$: 時間区分 $(t_{i+1} - t_i)$ の
始点でのコンクリートの実ひずみ

ε_{Ti} : 時刻 t_i でのコンクリートの
温度ひずみ、つまり、

$$\varepsilon_{Ti} = \alpha \cdot (T_i - T_0) \quad (3)$$

α は、コンクリートの線膨張係数、

T_i は、時刻 t_i でのコンクリート温度、

T_0 は、コンクリートの初期温度

ε_{ci} : 基準とする時刻から時刻 t_i までに生じるコンクリートの全クリープひずみ

ε_{ci} の算定にあたっては、以下の仮定が成り立つものとする。つまり、一定持続応力 σ を載荷材令 t_0 で載荷して、材令 t まで経過した時のクリープひずみ ε_c は、次式で求められる。

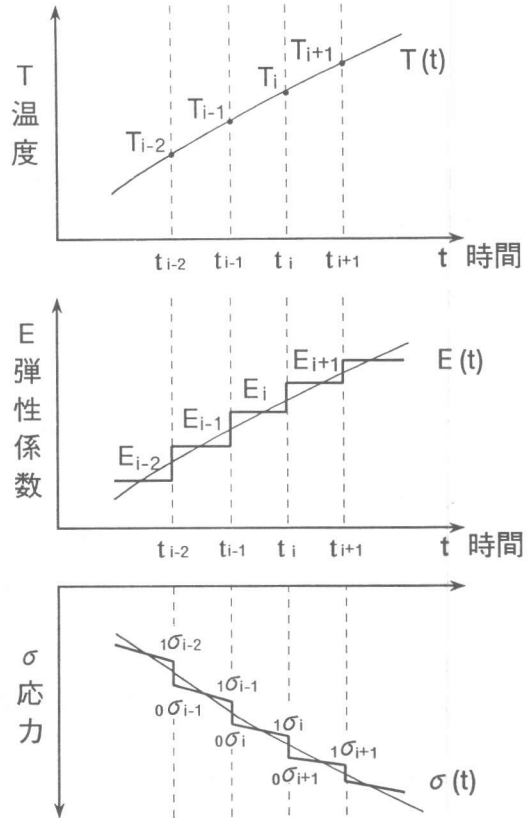
$$\varepsilon_c = \sigma \cdot U(t_0, t - t_0) \quad (4)$$

ここに、 $U(t_0, t - t_0)$ は単位応力あたりのクリープひずみ

また、若材令コンクリートのクリープひずみへの温度の影響は、載荷時材令にのみ有効材令で考慮するものとし[4]、載荷期間中の温度変化によるクリープひずみの変動は生じないものとする。このように仮定すると、式(4)は次のようになる。

$$\varepsilon_c = \sigma \cdot U({}_0t, t - t_0) \quad (5)$$

ここに、 ${}_0t$: 実載荷材令 t_0 に対し、温度履歴の影響を考慮した有効載荷材令
さらに、任意の変動応力状態下のクリープひずみの算定にあたっては、重ね合わせの法則が成



図一 時間区分全荷重法の概念図

り立つものとする。このように仮定すると、クリープひずみ ε_{ci} は、次式で求まる。

$$\varepsilon_{ci} = \sum_{j=1}^i ({}_0\sigma_{j-1} - \sigma_{j-1}) \cdot U({}_0t_{j-1}, t_i - t_{j-1}) + \sum_{j=1}^i ({}_1\sigma_j - \sigma_j) \cdot U({}_0t'_j, t_i - t'_j) \quad (6)$$

ここに、 $t'_j = t_{j-1} + (t_j - t_{j-1}) / 2$ 、 ${}_0t'_j$ は t'_j の有効材令である。また、同一時間区分内での応力変化 (${}_1\sigma_j - \sigma_j$) は、時間区分の中間点でステップ関数状に生じるものと見なした。

なお、以上の展開において、 ${}_1\sigma_i$ を算定するためには、式(1)、(3)、(6)を用いて、しかも、式(1)と式(6)の間で収れん計算が必要になる。 ${}_1\sigma_i$ を収れん計算によって求めた後は、式(2)により、 ${}_0\sigma_{i+1}$ を求め、次のステップに逐次計算を進めることになる。

以上が時間区分全荷重法による解析アルゴリズムである。

3. 若材令コンクリートの弾性係数、クリープ性状

具体的な解析を行うためには、入力データとして、若材令コンクリートの弾性係数、クリープ性状を適切にモデル化する必要がある。この種のデータとして汎用的に用いられている実験データは多くはない。ここでは、文献[4]のデータを用いて以後の解析検討を行うこととする。

まず、コンクリート打込み直後からの弾性係数の発現性状は、実験データから図-2に示す曲線化を行った。ここではコンクリート打込み直後の材令0.3日までは弾性係数はゼロと仮定した。

次に、クリープ性状については、以下のように仮定した。はじめに図-3に示す文献[4]の限られた載荷材令でのクリープ試験結果に対して、図中の曲線化を行った。次に、このデータと図-2の弾性係数の時間変化をもとに、任意の載荷材令に対し、単位応力あたりの(弾性+クリープ)ひずみの曲線化を行った。十分硬化したコンクリートの場合には、この曲線から載荷時の弾性ひずみを差し引いたものをクリープひずみとして問題はない。しかし、若材令コンクリートの場合には載

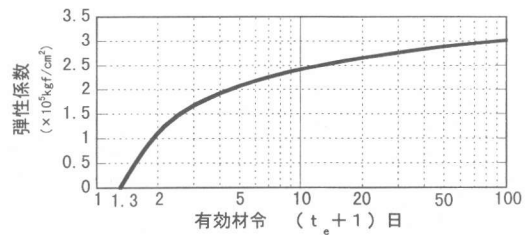


図-2 弾性係数の発現性状[4]

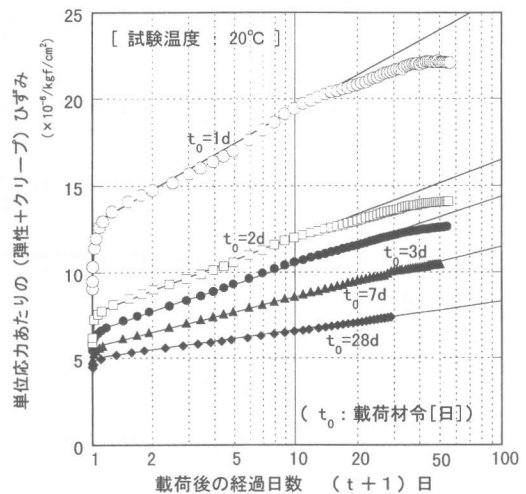


図-3 クリープ試験の結果[4]

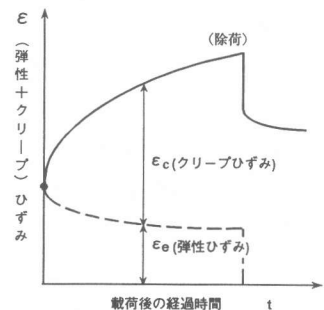


図-4 クリープひずみの定義

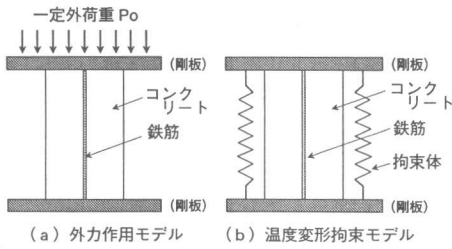


図-5 一軸モデルの概念図

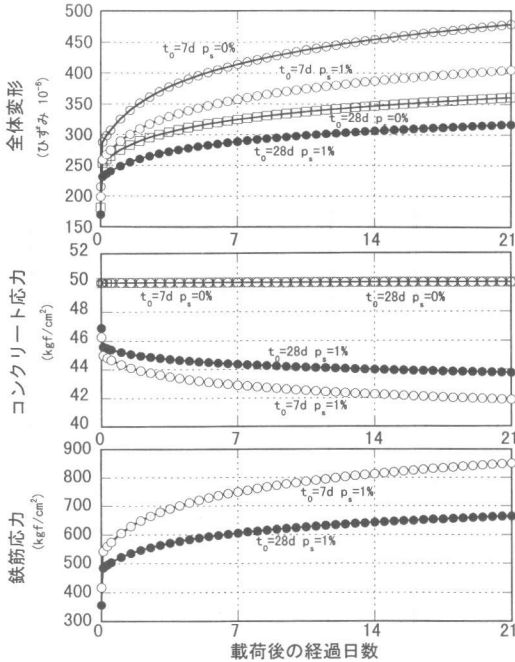


図-6 一定外力荷重の解析結果

荷期間中の弾性係数の変化が無視できないため、図-4に示すように、載荷期間中の任意の時点の弾性ひずみを弾性係数の逆数として求め、そのひずみ量を差し引いた残りをクリープひずみとした。一方、時間区分増分荷重法を適用する場合には、慣用的な方法と同じように載荷時弾性ひずみを差し引いてクリープひずみとした。なお、各時間区分での弾性係数は、全荷重法、増分荷重法にかかわらず、同じ値を用いた。このほか、解析に必要なデータとして、コンクリートの線膨張係数は材令によらず一定で、 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ と仮定した。

4. 一軸モデルでの検討

ここでは単純な一軸モデルを用いて、時間区分全荷重法による解析の妥当性を検討する。な

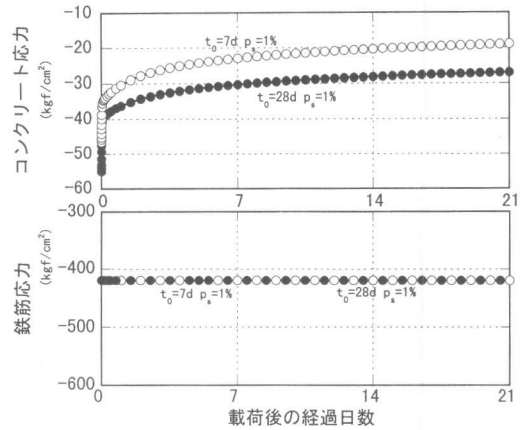


図-7 一定温度荷重の解析結果

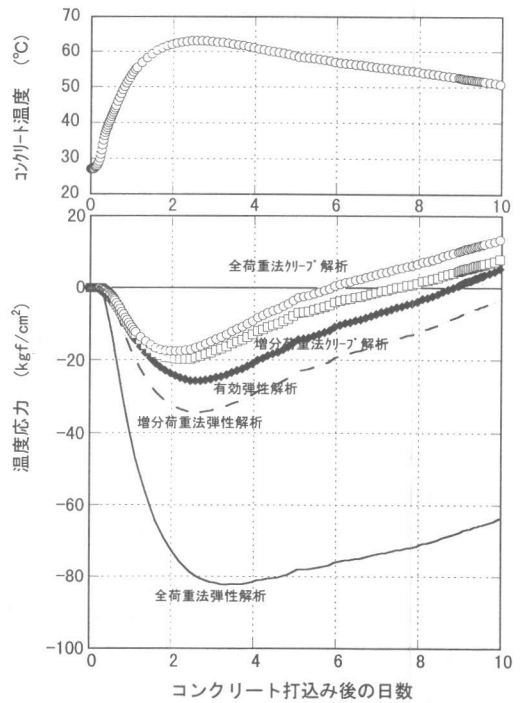


図-8 可変温度荷重の解析結果

お、解析にあたり鉄筋は完全弾性体で、弾性係数は $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ と仮定した。

4. 1 一定外力荷重を受ける場合

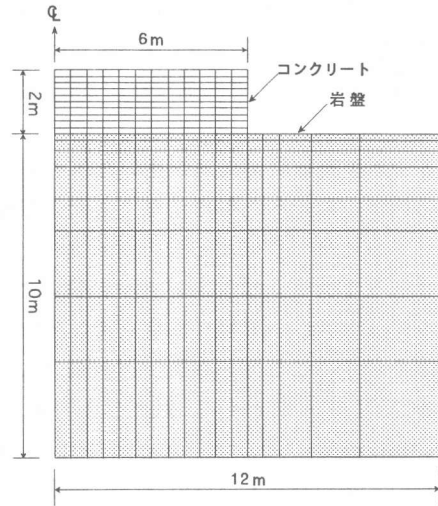
図一5.(a)に示す一軸モデル(鉄筋比 $p_s = 0, 1\%$) に一定外力荷重 ($P_0 = 50 \text{kgf/cm}^2$) が荷重材令7、28日からそれぞれ21日間作用した時の解析結果を図一6に示す。図からわかるように、荷重材令が若いほど、鉄筋がないものほど変形が大きい。鉄筋がないとコンクリートの応力は荷重期間中一定であるのに対し、鉄筋があると変形が進むに従い、コンクリートの負担応力が減り、鉄筋の負担応力が増えていることがわかる。

4. 2 一定温度荷重を受ける場合

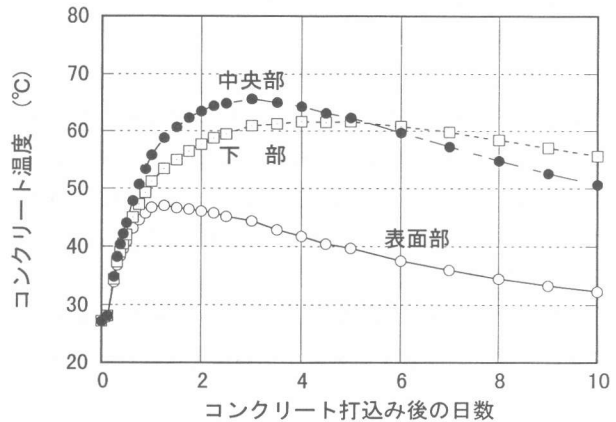
図一5.(b)に示す一軸モデル ($p_s = 1\%$) に一定温度荷重 ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) をステップ関数状に、荷重材令7、28日から21日間作用させ、その温度変形を完全拘束した場合の解析結果を図一7に示す。荷重材令が若いほど、コンクリートの弾性係数が小さいのでコンクリートに発生する応力が小さく、荷重期間中の応力の変化が大きいこと、さらには、荷重材令、荷重期間に関わらず、鉄筋の負担応力は一定のままであることがわかる。

4. 3 可変温度荷重を受ける場合

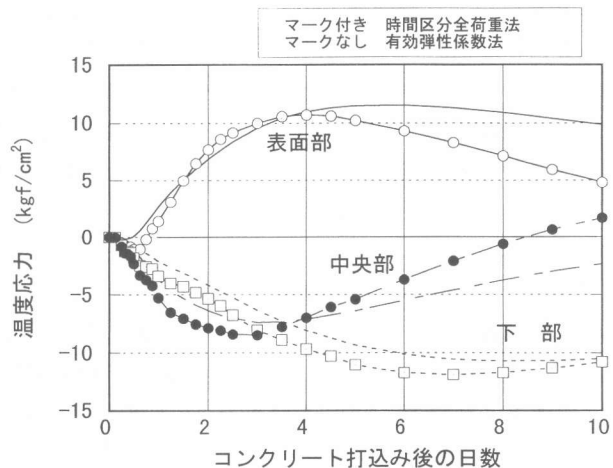
前節と同様に図一5.(b)に示す一軸モデル ($p_s = 0\%$ 、完全拘束) に図一8に示す可変温度荷重を作用させた。この温度履歴は、文献[4]と同じ調合のコンクリートをスラブ状マスコンクリートに打設して実測したものの一部である[6]。応力解析の結果を図一8に示す。ここでは、クリープの影響の有無や既存の解析方法との比較も合わせて検討した。なお、有効弾性係数法を適用する場合の弾性係数の低減係数は、文献[5]に準じた。図一8から、今回提案したクリープを考慮した時間区分全荷重法による解析結果が、



図一9 有限要素法の解析モデル



図一10 温度分布解析結果



図一11 温度応力解析結果

温度上昇時に蓄積される圧縮応力が最も小さく、温度降下に伴う引張応力への反転が早く生じている。なお、クリープの影響を無視した同じ弾性解析でも、時間区分増分荷重法と時間区分全荷重法とでは解析結果が大きく異なることに注意する必要がある。

5. 2次元有限要素法を用いた解析例

これまでに述べた解析法を2次元有限要素法に適用し、岩盤上に打設されたスラブ状マスコンクリートに生じる温度応力の解析を行った。厚さ2m、幅・奥行きは12mのスラブ状マスコンクリートである。コンクリートの調合は、文献[4]、[6]の検討に用いたものと同じで、フライアッシュセメントB種、単位セメント量は 324kg/m^3 とした。図-9に解析モデルの寸法、要素分割を示す。ここでの解析では鉄筋は入れていない。温度分布解析の結果を図-10に示す。これを入力データとして温度応力を解析した結果を図-11に示す。岩盤の弾性係数は、 $12,000\text{kgf/cm}^2$ とした。図-11中には、時間区分全荷重法と有効弾性係数法による解析結果を比較して示した。スラブ中央部の温度降下に伴う応力の変化を比較すると、有効弾性係数法による解析結果は、時間区分全荷重法による解析結果よりその変化が緩やかであり、温度ひびわれ予測の観点からは必ずしも安全ではないことがわかる。

6. まとめ

既往の温度応力解析方法である時間区分増分荷重法の欠点を避けて、弾性係数・クリープ性状の時間依存性をできるだけ精確に考慮した時間区分全荷重法の解析アルゴリズムを示し、基本的な解析例を用いて既往の方法による解析結果との比較検討を行った。最近のコンクリートの高強度化、高流動化に伴って顕在化しつつある自己収縮ひずみが温度応力に与える影響の予測にも本解析方法が適用できるものとする。

なお、温度応力解析の簡便法として有効弾性係数法がよく用いられているが、その解析結果の評価については十分注意する必要があるのではないかと考える。

参考文献

- [1] 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、コンクリート工学、Vol.21, No.8～Vol.22, No.1、1983～1984
- [2] 吉岡保彦ほか：単純拘束モデルによるマスコンクリートに生じる熱応力解析と実験、J C I 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.91～96、1982.8
- [3] 山崎敏敏ほか：スラブ状マスコンクリートの上表面引張応力度分布に与える広さ／厚さ比と基盤剛性の影響、J C I 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.57～60、1982.8
- [4] 川口徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価に及ぼす材料特性の数値モデル化の影響、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.29～32、1985
- [5] 土木学会：コンクリート標準示方書、施工編、pp.173～193、1996.3
- [6] 川口徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価方法に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.1, pp.1087～1092、1992