

論文 境界面特性への塑性モデルの適用ならびに層打ちコンクリート構造物の温度応力解析

石川靖晃*1・菊川浩治*2・石川雅美*3・田辺忠顕*4

要旨:本稿ではまず時間依存性を考慮に入れた塑性モデルの構築を行い、境界面に適用した。そして大型試験体による層打ちコンクリート構造物の温度応力実測結果をもとに温度応力解析を行った。結論として、提案したモデルは、構造物内の応力、ひずみの実測値を十分捉えるだけでなく、層打ちコンクリートの剥離の進展をも解析的に捉えられることが確認された。

キーワード:塑性モデル, 温度応力, 境界面特性, 剥離

1. はじめに

マスコンクリート構造物の温度応力等の初期応力問題の精度良い解明がなされるために、若材齢時コンクリートの力学的や材料的特性をさらに合理的な手法による数理モデルによって表現する必要がある。その中でも特に必要な解明点は岩盤と新コンクリートとの水平境界あるいはコンクリートブロック相互の水平境界の適切な力学モデルである。これに関しては、過去に今枝[1]および高辻[2]らの研究がある。しかし、今枝らの研究では解析パラメータの決定方法に関して著しく客観性を欠き、また高辻らの研究では境界面に対し、せん断方向のすべりを解析的に表すことが不可能であった。その理由の一つとして両者による研究は境界面特性の時間依存性が考慮されていなかったためと考えられる。本稿ではコンクリートの水平境界面自身に対して材齢依存を考慮に入れた塑性モデルの構築を行った。そして提案された塑性モデルを層打ちコンクリートの境界面特性へ適用した。更に有限要素法による温度応力解析を行い、既存の温度応力実験の実測結果[3]と比較する事により提案されたモデルの適用性について検討した。

2. 材齢依存を考慮に入れた塑性モデルおよび境界面への適用

2.1. 材齢依存を考慮に入れた塑性モデル

著者らは若材齢時のコンクリートのひずみは弾性、塑性、粘弾性および粘塑性成分の4成分で表現されると主張してきた[4][5]。以下のモデルに関する議論は著者の主張に従い進めることにする。作用するひずみが応力に依存する成分のみで構成されると仮定する場合、全ひずみ増分は、筆者の主張によれば次式で表現される。

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^p\} + d\{\varepsilon^{ve}\} + d\{\varepsilon^{vp}\} \quad (1)$$

ここで、上付き添え字 $'e'$, $'p'$, $'ve'$ および $'vp'$ はそれぞれ弾性、塑性、粘弾性および粘塑性成分を表している。

また、応力および弾性ひずみ成分の関係は次式に従う。

$$d\{\sigma\} = [D^e]d\{\varepsilon^e\} \quad (2)$$

ここで、 $[D^e]$ は弾性接線剛性マトリックスであり、材齢によって変化する。

*1 名城大学助手 理工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 名城大学教授 理工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 東急建設（株）土木設計部、工博（正会員）

*4 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

式(1)により、 $d\{\varepsilon^e\}$ は計算されるが、そのためには塑性、粘塑性および粘弾性成分が陽に計算される必要がある。粘弾性成分に関しては、筆者らが以前提案した方法[4]で粘弾性変形を増分化し、計算することは可能である。さらには筆者らは以前粘塑性変形成分に関する定式化を行い、報告を行っている[5]。それによれば、粘塑性変形は以下の式で与えられることを述べている。

$$d\{\varepsilon^{vp}\} = \gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial \{\sigma\}} dt \quad (3)$$

ここで ϕ は粘塑性ポテンシャルであり、 γ は粘性係数である。

また、塑性変形の有無の判定は降伏関数 F で行った。降伏関数 F は一般的には応力および塑性仕事の関数であるとされているが、若材齢時においては粘着力や内部摩擦角は時間およびひずみ速度依存の値となる。これらの物性値は多くの降伏関数の中に含まれるため、降伏関数もまた、時間依存の関数であることがいえる。塑性変形が関連流れ則に従う場合には生じる塑性変形は次式で示される。

$$d\{\varepsilon^p\} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (4)$$

また、応力が降伏曲面上に存在する条件は次式で表される。

$$\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T d\{\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial W^p}^T dW^p + \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial \{\dot{\varepsilon}\}}^T d\{\dot{\varepsilon}\} = 0 \quad (5)$$

ここで W^p は塑性仕事である。式(5)は時間 t およびひずみ速度 $\{\dot{\varepsilon}\}$ に対する方向微分を含めた F に関する全微分形で表現されるが、一般的な塑性解析では時間に関する項は含まれない。しかし、降伏曲面が時間依存性をもつ場合には必ず考慮されなければならないであろう。式(2)および(4)を式(5)に代入すると、次式が得られる。

$$\lambda = \frac{\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T [D^e] (d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon^{ve}\} - d\{\varepsilon^{vp}\}) + \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial \{\dot{\varepsilon}\}}^T d\{\dot{\varepsilon}\}}{\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T [D^e] \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} + h} \quad (6)$$

ここで h は硬化パラメータであり、次式で表される。

$$h = - \frac{\partial F}{\partial \varepsilon^p}^T \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (7)$$

ところが、古典塑性理論によれば、 λ は応力と塑性仕事の関数となるため、式(6)の右辺の時間依存項の総和は恒等的に0とならなければならない。即ち、

$$- \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T [D^e] (d\{\varepsilon^{ve}\} + d\{\varepsilon^{vp}\}) + \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial \{\dot{\varepsilon}\}}^T d\{\dot{\varepsilon}\} = 0 \quad (8)$$

式(8)の意味するところは、降伏直後の時間停止した状態での降伏曲面上には、応力は決して存在せず、降伏後の時間とひずみ速度に応じて変化していく降伏曲面上に存在し、仮に、降伏直後の曲面に応力を存在させようとした場合にその状態に移行させるために作用させた変形量が粘弾性成分および粘塑性成分である。式(3)を式(8)に代入すると

$$\gamma = \frac{\frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial \{\dot{u}\}}^T d\{\dot{u}\} - \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T [D^e] d\{\varepsilon^{ve}\}}{\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}^T [D^e] \phi \frac{\partial \phi}{\partial \{\sigma\}} dt} \quad (9)$$

従って、時間依存型の降伏関数の存在を認めるならば、式(3)における粘性係数 γ は独立した値ではなく、応力および塑性仕事さらには降伏関数や粘塑性ポテンシャル関数、弾性剛性マトリクスおよび粘弾性変形に依存する値となることが分かる。換言すれば、粘弾性ひずみに関するパラメータお

よび降伏関数が一意的に与えられた場合、粘塑性ひずみ成分は一意的に定まる。数値解析では、全体の変形は弾性、粘弾性および塑性成分の和であるとした従来の塑性理論を用いた変形計算、いわゆる通常の弾塑性解析を行えばよい。その理由は、降伏曲面が時間やひずみ速度に依存しうがしまいが、リターンマッピングにより応力を降伏曲面上に載せるためである。数値解析で計算される塑性変形は以上の定式化における粘塑性および塑性変形の和として計算される。しかし、変形の性質を知る上で時間に依存しない塑性変形と時間依存性の粘性による変形に区別することが必要となる場合、以上の定式化により塑性成分は時間とは独立した挙動であると解釈され、塑性成分の区別が可能となるのである。

2.2. 塑性モデルの境界面への適用

本稿で扱う境界面とは、既設コンクリートもしくは地盤と打設コンクリートとの境界面である。コンクリートに内部応力が発生した場合、境界面を剥離させ得るほどの応力が境界面に作用する。この場合、既設コンクリートもしくは地盤側に生じる変位と打設コンクリート側に生じる変位は決して同じではなく、ある程度の変位差が生じる。従って境界面を変位の適合性を持たず、また要素厚が0である Joint 要素として捉えることが適当であると思われる。2次元的に境界面を扱うと仮定した場合、境界面に作用する応力は境界面に対して水平なせん断応力 σ_t および境界面に対して垂直な鉛直応力 σ_n の2成分と考えることが出来る。また、作用する応力に伴い、境界面のせん断変位 u_t および鉛直変位 u_n が生じる。

2.1節で構築された塑性モデルにおいて $\{\epsilon\}$ を $\{u\} = (u_t, u_n)^T$ 、さらに応力およびひずみの構成関係を

$$d\{\sigma\} = [K^e]d\{u\}, [K^e] = \begin{bmatrix} k_t & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

と置き換えることにより、提案した塑性モデルを境界面に適用した。但し k_t および k_n は境界面における水平および鉛直方向の弾性剛性で材齢により変化する。

降伏関数として、本稿では次式で与えられる双曲線型の降伏関数を用いた[6]。

$$F = \sigma_t^2 - (c^* - \sigma_n \tan \phi^*)^2 + (c^* - \chi^* \tan \phi^*)^2 \quad (11)$$

ここで、 c^*, ϕ^* および χ^* は、塑性仕事による損傷によって変動する境界面での粘着力、内部摩擦角および一軸引張強度である。勿論これらの物性値は材齢に依存するし、変位速度についても依存するかもしれない。

本稿ではGoodman[7]の研究を基に境界面における力の釣り合い式の有限要素による離散化を行った。それにより境界面の材齢依存特性を考慮にいたれた変形解析が可能となる。

3. L/H が異なる大型試験体による温度応力実験

石川らは、図-1に示すような3体の L/H が異なる試験体に対して温度応力実験を行っている[3]。

これら3体の試験体は拘束体部と被拘束体部によって構成され拘束体上部に被拘束体部のコンクリートを打ち継いだ際の被拘束体の硬化時の挙動を対象としている。試験体のコンクリートの配合は3体とも同一である。また、試験体側面部には断熱材が張られている。試験体の L/H は図-1に示す試験体M1で15、M4で5、M5で2.5である。

実験はプレハブの室内で行われ、外気温などの環境条件の変動がかなり小さく、計測されたデータの信頼性は非常に高いことが行われた実験の特徴の一つである。

試験体M1, M4およびM5における応力, ひずみの実測結果を図-2, また試験体M1の変形の実測結果を図-3に示す。

実測結果では, 試験体M1においては, 応力は材齢初期の温度上昇段階においては全断面で圧縮となり, 温度の下降に従い全断面で引張となっている。ひずみは殆ど発生せず高々 30μ 程度である。変形については, 材齢1日を経過したあたりから被拘束体端部より剥離が進展し剥離の最大値は鉛直方向では約 0.6mm , 水平方向では約 1.0mm である。また, 材齢3日あたりで被拘束体中心断面部に貫通クラックが生じている。

試験体M4は躯体長 L がM1に比べ $1/3$ であるため, 応力およびひずみの発生傾向がM1に比べかなり異なっている。温度上昇段階では応力は中央部および下部では圧縮, 上部では引張となり, 温度の下降と共に応力は中央部および下部では引張, 上部では圧縮となっている。ひずみは全断面を通して大きく発生しており, 一番大きく発生している上部では最大約 170μ となっている。被拘束体端部の剥離は材齢3日辺りから発生しており, 材齢10日では全境界面で剥離した結果となっている。

試験体M5については L/H がM4に比べさらに半分の値となっており, 応力およびひずみは定性的にはM4と同様の傾向を示しているが, 絶対的に大きな値となっている。変形に関しては, M4に比べ殆ど剥離は生じておらず, 端部でわずかに生じた程度である。

4. 温度応力実験に対する塑性モデルによる解析的検討

4.1 解析における仮定および用いたパラメータ

前述の実験結果に対して, 提案された境界面モデルを用いて2次元FEM温度応力解析を行った。本稿では境界面特性へのモデルの適用について主として論じるため, 境界面以外の拘束体および被拘束体コンクリートは有効弾性係数による等価弾性体であると仮定し, 貫通ひび割れが生じた時点で解析を止めた。

温度応力解析を行う場合, 入力として与える温度履歴を適切に算定した後, コンクリートの有効弾性係数や線膨張係数等の物性値を適切に与える必要がある。本稿では温度応力解析を行う際, コンクリートの有効弾性係数や線膨張係数は実測値から得られた値を用いた。また, 別に温度解析を行い, 温度の実測値とマッチさせた温度の解析値を温度応力解析用入力データとして用いた。

コンクリートそのものの物性値は実測などで評価できる一方で, 境界面特性を示す物性値に関しては, 殆どの場合において実験的に評価することはできないため, 現在まで数例の研究しか行われていないことが現状である。従って本稿では, 境界面に関する物性値に関しては, 幾つかを除いては全て推定された値を用いた。

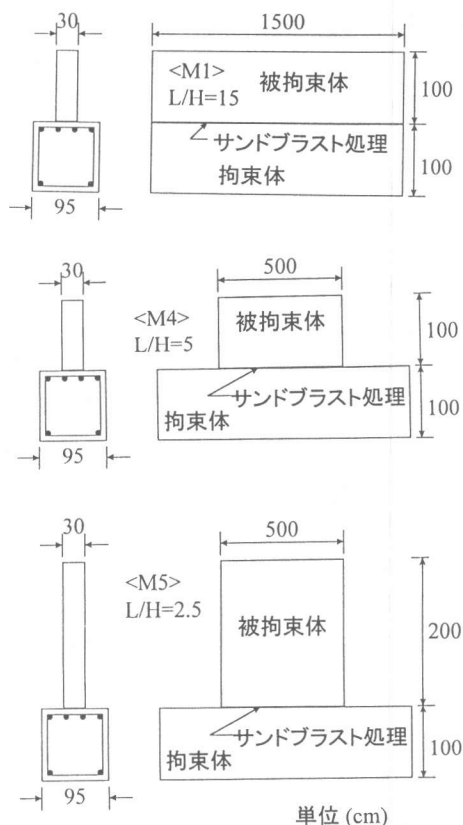


図-1 試験体概要

まず、境界面の鉛直方向の弾性剛性 k_n であるが、今枝らの評価[1]を基に、全ての試験体に対して材齢によらず $100\text{kgf/cm}^2/\text{cm}$ とした。

次に境界面におけるせん断方向の弾性剛性 k_t および粘着力 c^* であるが、全ての試験体に対して材齢 t (日)に対して単調増加する形で以下のように推定した。

$$k_t = \begin{cases} 100(\text{kgf/cm}^2/\text{cm}) & t \leq 0.5 \\ 100 + 1000(t - 0.5) & 0.5 < t \leq 3 \\ 2600 & 3 < t \end{cases}, c^* = \begin{cases} 10(\text{kgf/cm}^2) & t \leq 3 \\ 10 + 5(t - 3) & 3 < t \end{cases}$$

続いて境界面における内部摩擦角 ϕ^* は試験体、材齢によらず $\phi^* = 30^\circ$ と推定した。その理由は文献[5]で、若材齢時のコンクリートの内部摩擦角は材齢によらず殆ど変動しないと報告されているからである。コンクリートの物性をそのまま境界面特性に適用することには検討の余地はあるが、簡単のため本稿ではコンクリートの内部摩擦角をそのまま境界面に適用した。境界面特性としての一軸引張強度 χ^* については、全ての試験体において 0.7kgf/cm^2 と推定した。また、全ての解析では簡単のため粘着力および内部摩擦角の損傷による変化はないものとした。簡単のため、粘弾性成分は無いと仮定した。推定された境界面特性に関する物性値の値は3章で述べられた実験結果の被拘束体と拘束体との境界面に対して有効であって、一般的な打設コンクリートと既設コンクリートとの境界面特性を表現する場合についての一般化は今後の検討課題である。

4.2 応力、ひずみおよび変位実測結果に対する解析的検討

試験体M1, M4およびM5の応力およびひずみの実測結果に対する提案されたモデルを用いた解析結果を図-2さらに試験体M1の変形の解析結果を図-3に重ねて示す。

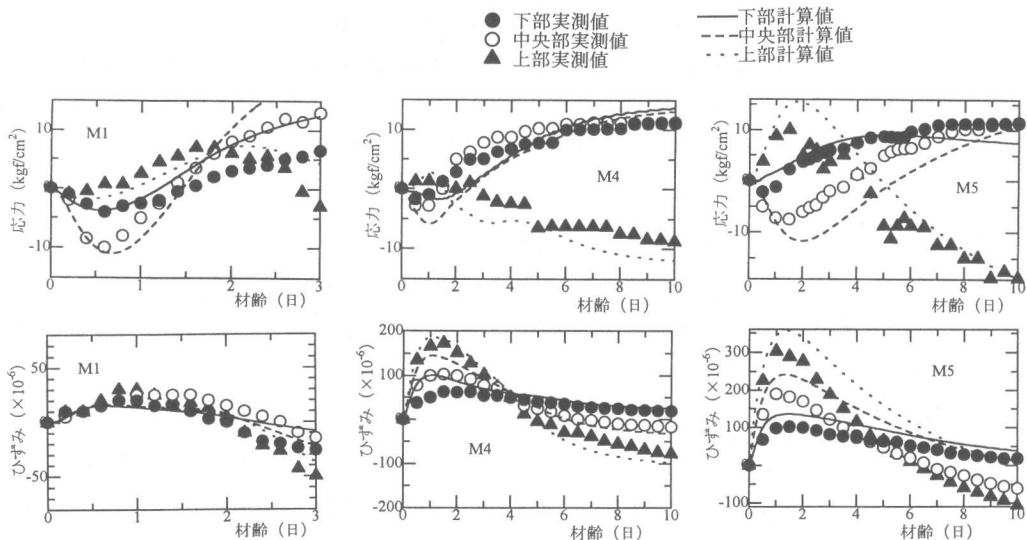


図-2 応力およびひずみの実測および解析結果

応力、ひずみおよび変形の実測結果と解析結果を比較検討してみると、M1については、解析値は材齢1日以降に生じる剥離の進展を良く表現しており、剥離に伴うひずみの圧縮側への発生および断面上部における応力の圧縮側への移行についても良く表現していると思われる。解析的には材齢1.6日に境界面端部要素が先ず降伏することによって剥離し、材齢の進行と共に応力の再分配が行われると共に被拘束体端部より1/4部まで剥離が進展している。このような剥離の進展は従来の研究では解析的に捉えることが出来なかった現象であり、逆に言えばこのような現象を解析的に捉

えられることが本稿で提案されたモデルの大きな特徴でもある。解析で生じた剥離した変位量は実測値と比較しても良い一致を与えており、更に応力、ひずみに関しても実測値と良く一致しており、本解析の妥当性が認められる。

M4については、解析的には材齢4日から境界面端部要素が先ず降伏することによって剥離し、材齢6日ぐらいまでの間に端部から1/4部まで剥離が進展した。応力およびひずみに関しては解析値は実測値と良く一致している。

M5については、解析的には材齢3日から境界面端部要素が剥離し、材齢10日まで端部からおよそ1/3付近まで剥離が進展する。応力およびひずみに関しても解析値は良く実測値を表現していると思われる。

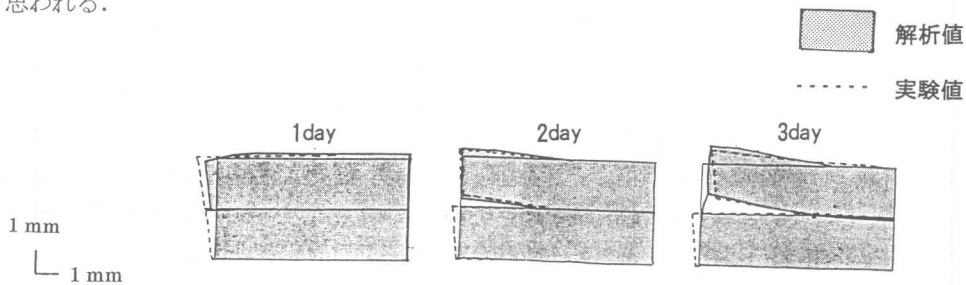


図-3 試験体M1における変形の実測および解析結果

全体的に石川らが行った温度応力実験における L/H が異なる試験体に対して提案されたモデルによる解析値は良く実測値を捉えたといえよう。1節で述べたが、解析に用いた境界面特性に関する物性値は全て推定値であるとはいえ、これらの物性値は L/H の違いに関わらず全て同じである。ゆえに、本稿で提案されたモデルによる解析手法は L/H の違いに対して統一的に層打ちコンクリート構造物の剥離現象を解析的に表現出来ると思われる。境界面の粘着力や鉛直剛性の値を境界面性状に応じて変化させ、さらに、境界面に拘束鉄筋を配置した場合、これらの値を鉄筋量に応じて大きくとれば、任意の境界面性状に対しても提案されたモデルは適用可能であると思われる。

5. 結論

本研究の示す範囲で以下に示すことが得られた。

- ・提案されたモデルは境界面の剥離現象を解析的に捉えることが可能である。
- ・異なる L/H をもつ試験体に対しても、提案されたモデルは実測による応力およびひずみを統一的に捉えることが可能である。

参考文献

- [1] 今枝靖典・石川雅美・西岡 哲・田辺忠顕:温度応力によるマスコンクリートの力学的挙動, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988年
- [2] 高辻 康・石川雅美・田辺忠顕:マスコンクリート温度応力発生メカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, 1990年
- [3] 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, pp.121~130, 1989年8月.
- [4] 石川靖晃・菊川浩治・田辺忠顕:遷移材齢時におけるコンクリートの時間依存挙動のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, 18-1, pp.681-686, 1996年
- [5] 石川靖晃・大下英吉・阿部博俊・田辺忠顕:時間依存挙動に対する若材齢コンクリートのモデル化, 土木学会論文集, 第520号/V-28, pp.123-133, 1995年8月
- [6] Wu Z., Farahat, A. M. and T. Tanabe: Modeling of Concrete Discontinuities with Dilatancy and Surface Degradation, Proceedings of JSCE, No.472/V-20, pp.119-130, Aug., 1993
- [7] R. E. Goodman: A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Journal of the SoilMechanics and Foundation Division, Proceedings of ASCE, May, 1968