

論文

[1148] 打継面への塑性モデルを適用したマスコンクリートの温度応力解析

正会員○高辻 康 (名古屋大学大学院)

正会員 D.R.Lokuliyana (名古屋大学大学院)

正会員 田辺忠顕 (名古屋大学土木工学科)

1. はじめに

近年の構造物には高品質なコンクリートが要求されており、より精度よい計算方法・要因評価が必要となっている。この点はマスコンクリートの温度応力問題に関しても同様である。温度応力発生 of 構造的な原因は、新コンクリートが接する岩盤・既設コンクリートとの打継面付着性状と新コンクリート躯体の L/H (L : 新コンクリート躯体長、 H : 新コンクリート躯体高) に代表される形状効果であることはよく知られている。これら因子がどのようなメカニズムによって温度応力発生に寄与するかの詳細は未だ明らかではなく、従来の温度応力計算では応力・ひずみ・変位の良好な一致を得ることが非常に難しいようである。しかしながら、過去において行った研究結果から打継面の剛性評価を適切に行えばかなり推定精度が向上するという知見が得られており、本研究ではそれらの結果に基づき打継面要素に対して新たなモデル化を行った。即ち、打継面に対して特殊な塑性モデルを導入し有限要素解析に適用した結果、実測値との良好な一致を得ることが出来精度の高い温度応力解析が可能となった。

2. 本研究の背景

2.1 形状、付着性状の異なる大型壁体実験

石川ら¹⁾は、地盤からの拘束の影響を受けない条件のもとで付着性状・形状を変化させた5体の大型供試体実験を行っている。この実験は地盤と既設コンクリート間に特殊なすべり機構を設けており壁体コンクリート(被拘束体)の受ける外部拘束作用が明瞭である初めての実験例である。図-2.1に示す様に既設の拘束体コンクリート上に打設されている。実験モデルの形状・打継面付着性状について表2.1に示す。これらモデルに対し打設直後から材令15日に渡って応力・ひずみ・変位を測定している。

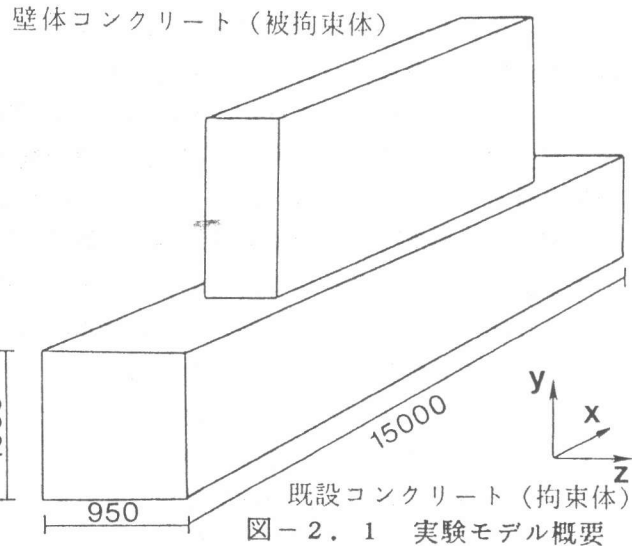


図-2.1 実験モデル概要

2.2 打継面の剛性変化を考慮した既往の解析結果

表-2.1に示すように、今枝ら²⁾はM1~M3、高辻ら³⁾はM4, M5モデルに対し3次元温度解析、擬3次元温度応力解析手法を用いて数値実験を行っている。その中で複雑な挙動を呈すると推測された打継面部分に図-2.2のバネモデルを挿入して、バネ剛性を与える形で温度応力解析を行っている。その検討での重要なポイントは従来の温度応力計算に加えた拘束面バネ

モデル中の鉛直方向剛性、水平方向剛性をいかに合理的に与えるかであり、また従来の温度応力計算をより向上させることであった。その研究ではバネ剛性を変化させて解析値の変動を検討し、また打継面の剛性の影響を検討している。実測値と良好に一致するようなバネ剛性は各モデル次のようであった。M1モデルには材令1日より端部からスパンの1/4部にかけて鉛直剛性を $0\text{kgf/cm}^2/\text{cm}$ とし、水平剛性を初期値の健全状態の20%とした。そしてはく離が進展するにつれて徐々に

表2. 1 実験モデルのまとめ

	拘束体			被拘束体					打継面処理
	B _a (cm)	H _a (cm)	L _a (cm)	B (cm)	H (cm)	L (cm)	L/H	配筋	
M1	30	100	1500	30	100	1500	15	×	バキュームサンド ブラスト処理
M2				30	100	1500	15	×	テフロンシートによる すべり機構
M3				30	100	1500	15	○	打継面鉛直方向に両 コンクリートブロックを 一体化させる鉄筋を配置
M4				30	100	500	5	×	M1の打継面処理に 加えてモルタルを 打設直前に薄く塗布
M5				30	200	500	2.5	×	M4と同様の打継面処理

水平剛性を低下させてゆくモデルを与えた。M2モデルにはバネ定数には 10kgf/cm/cm^2 と極めて小さい値を用いた。M3モデルには鉄筋による外部拘束を考慮して鉛直バネ剛性、水平バネ剛性とも無限に大きいとした。また、M4・M5モデルには、打継面性状がM1モデルと同様であるため今枝らの用いた方法を同様に適用した。しかしながら実測値との良好な一致は得られずここにM1モデルとは異なるメカニズムの発生が示唆された。そこで、バネ剛性を時間的・部分的に変化させ数百例にのぼる試計算の結果から実測値に最も適合するモデルを選択した。具体的には、温度上昇期には中央部で弱く端部で強い剛性、温度下降期には中央部で強く端部で弱い剛性を与えると的確に実測変形挙動を示したのである。即ち、圧縮圧力の大きな部位と有限要素法のバネ剛性の大きな部位は一致し、打継面の圧力変動が打継面の剛性に大きく影響していることが判明したのである。そして新コンクリート躯体の全体的な変形挙動は打継面のこの種の時間的剛性変化に大きく影響を受けることが明かとなった。

これら2つの研究によって5つの供試体に対する一応の解析的評価が出来たが、後者の研究では実測結果に合わせる形の打継面剛性を数値として与えており、その一般的表現は得られていなかった。しかし、それらの剛性を一般的に表現し、その適用性を検証しないと他の構造物に対する汎用性に欠けることは明らかである。そこで、本研究では打継面の圧力状況に応じて打継面剛性が一般的に得られるような数学モデルを構築する試みを行った。

3. 修正Drucker-Pragerモデルの構築

3. 1 考案した打継面モデル

打継面の挙動を基本的には塑性モデルにより表現し、塑性モデルとしてのMohr-Coulomb則の代

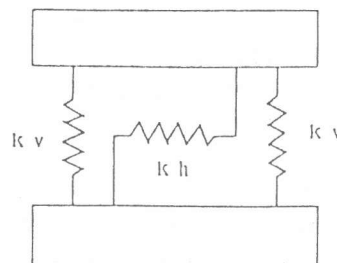


図-2. 2 バネモデル

わりにDrucker-Pragerモデルを使用することを考えた。しかし、その際に一般的にしようされているDrucker-Pragerモデルに次の修正を加える。即ち、従来の降伏条件 $f(\alpha, k)$ は平面応力場において

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (3.1)$$

ここで応力の不変量は $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2$ $J_2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}{3}$

α, k : 材料定数

これで表される塑性条件は2次元場で楕円であるが、次の2点を考慮して修正を加える。

- ・打継面に対して水平方向である σ_x 方向の物性は従来と同じである。
- ・打継面に対して垂直な方向である σ_y 方向の物性は σ_x 方向の物性と比べて非常に弱い。

ゆえにDrucker-Prager則を σ_y 方向に修正した異方性を有するコンクリートとして降伏条件を σ_y 方向の一軸圧縮強度は σ_x 方向の値に対して $1/\kappa_c$ とし、一軸引張強度は σ_x 方向の値に対して $1/\kappa_t$ とした。よって σ_y 方向の一軸圧縮強度、一軸引張強度はそれぞれ $f'_{cy} = f'_c / \kappa_c$ 、 $f'_{ty} = f'_t / \kappa_t$ となる。 $\tau_{xy} = 0$ 状態における $\sigma_x - \sigma_y$ 平面上で、この修正したモデルの降伏条件は図-3.1のようになる。これは、従来のDrucker-Prager則を σ_y 方向にのみ弱くした形となっている。つまり降伏関数として次式が得られる。

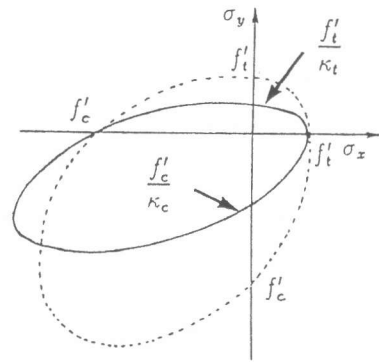


図-3.1 $\tau_{xy}=0$ 状態での修正Drucker-Prager則

$$f = \alpha(\sigma_x + \kappa\sigma_y) + \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + (\kappa\sigma_y)^2 + \sigma_x(\kappa\sigma_y)}{3} + \tau_{xy}^2} - k \quad (3.2)$$

最終的にこのモデルの特徴は次のとおりである。

- ①低下係数 κ_c, κ_t を用いることで従来のMohr-Coulomb則とDrucker-Prager則との一致を考慮した降伏条件と同様の計算が可能である。
- ②この降伏曲線(2次元)は、convex(全ての曲面で凸)を満たしている。
- ③図に示した通り降伏曲線上の多くの部分で法線の向きが鉛直方向を向く。従って関連する流れ則を用いると主に鉛直方向の塑性ひずみが発生する。

次にこの降伏条件を用いた場合の具体的な計算方法について述べる。この降伏条件は応力のみ関数 $f = f(\sigma_{ij})$ として扱う。また塑性ひずみ増分として関連する流れ則を用いる。最終的に弾塑性マトリクスは次式となる。

$$d\sigma_{ij} = \left[D_{ijlt}^e - \frac{D_{ijop}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{op}} D_{mnkl}^e}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{tu}}} \right] d\epsilon_{kl} \quad (3.3)$$

このようにして求めた打継面モデルが、与えられたパラメータ κ_t によってどのような挙動を示すか感度解析を行うと鉛直応力-鉛直ひずみ関係は図-3.2の様になる。

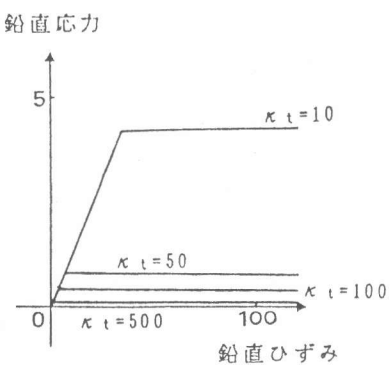


図-3.2 感度解析結果

4. 実測結果と解析結果の比較検討

以上に示した打継面要素モデルを図-4.1に示す要素分割図に挿入して応力解析を行った。

< M 1 >

材令1日までが温度上昇段階でありその段階での打継面の状態は、1/4部付近のみ降伏しその他の打継面では降伏に至らない結果となった(図-4.2)。またその後の温度下降段階においては、打継面で生じた鉛直応力状態として端部から1mあたりの部分では引張となり弱い剛性となった。その他の部分での降伏に至らず強い剛性を保ったままであった。応力・ひずみ結果を図-4.3, 4.4に示す。

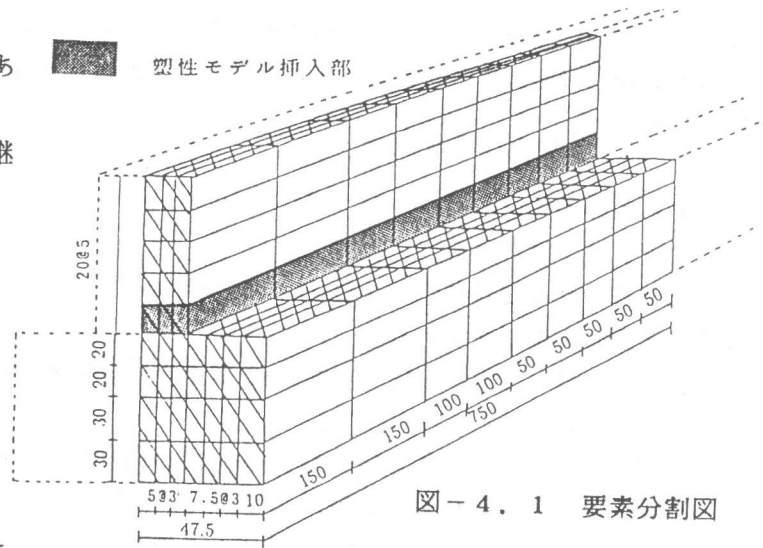


図-4.1 要素分割図

< M 2 >

この供試体は先に述べたように被拘束体と拘束体の間にテフロンシートを設けているため水平方向の影響が小さいモデルである。実測結果はそのテフロンシートの影響によって被拘束体は水平方向に

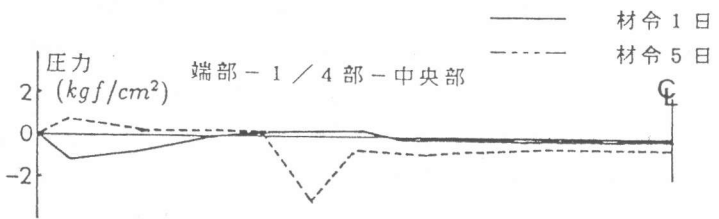


図-4.2 M1打継面圧力分布

自由な変形を呈している。またひずみは上・中・下の各層でほぼ同じ値になっていることから、M1、M4、M5のような温度上昇段階での上に凸の変形、温度下降段階での下に凸の変形がほとんど生じていないといえる。これに対し本塑性モデルが適用可能かどうか様々な低下係数の組合せを考え数値解析を行った。しかしながら、その結果は有効であるとは言えず、応力・ひずみ・変位の3量においてそれぞれ実測値との間に大きな差異が認められた。よってM2モデルに対しては、本塑性モデルを適用せず今枝らのパネモデルを利用してせん断剛性を強制的に小さくする方法で計算を行えば十分であると思われる。

< M 3 >

このモデルは先に述べたように打継面で鉛直方向に配筋されており鉛直方向に強い剛性を保っている。実測値について検討するとM1モデルの実測値とよく似ている。本解析での塑性モデル適用に際しては、弾塑性マトリクスに単純に鉄筋の剛性を加えたモデルを利用した。解析結果は

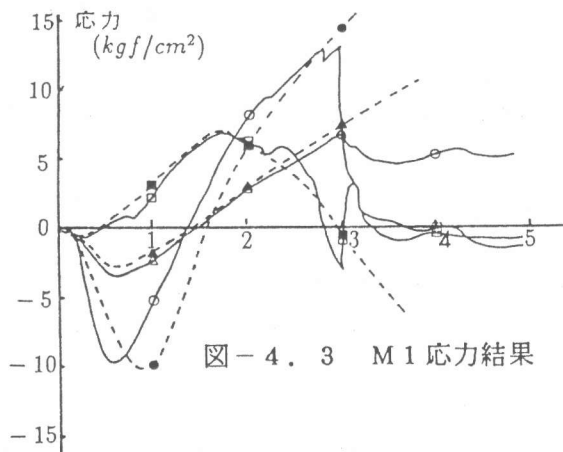


図-4.3 M1応力結果

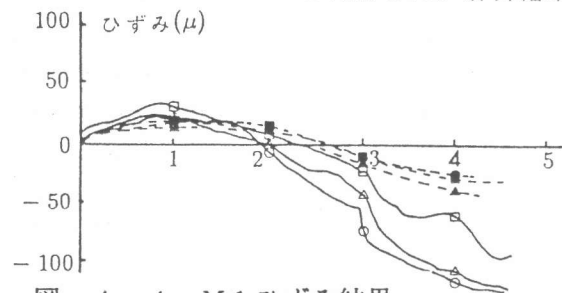


図-4.4 M1ひずみ結果

	実測結果	解析結果
被拘束体上層部	—□—	---■---
被拘束体中層部	—○—	---●---
被拘束体下層部	—△—	---▲---

M1モデルの応力・ひずみ・変位のそれぞれと同じであり、M1の場合と同様降伏する打継面部分が少なく、ほとんどの打継面が高い剛性を保ったままでの解析が行われる。よって本モデルでも解析上かなりの精度の結果は得ているが、配筋して剛性が高くなることが物理的にも合致するから鉄筋に相当する剛性を加えた解析がより合理的と言えよう。

<M4>

まず温度上昇段階の結果であるが材令6時間において打継面圧力が大きくなり始める。材令18時間での圧力分布状況は図-4.5に示す様になった。すなわち、端部では圧縮状態となり1/4部から中央部にかけては引張状態となった。この段階で全打継面要素が降伏し、鉛直方向でかなりの剛性低下を生じさせた。次に温度下降段階であるが、まず打継面圧力は上昇段階で端部が圧縮、中央部で引張という分布であったが、逆に端部でははく離を生じさせるような1~2kgf/cm²の引張となった。また、1/4部から中央部にかけては圧縮状態となった。特に端部から50cm~75cm付近では5kgf/cm²程度の圧縮となった。1/4部付近では降伏しない状態の圧縮状態となり、この部分が構造物自体あるいははく離を支える状態をとると思われる。これらM4モデルの応力・ひずみ結果を図-4.6, 4.7に示す。

<M5>

まず温度上昇段階であるが、打継面付近については材令18時間頃から降伏し始めた。この時の打継面の圧力状況は図-4.8に示す様である。ここでもM4モデルと同様に端部では圧縮、1/4部から中央部にかけて引張となった。次に温度下降段階の解析結果を示す。打継面端部では引張応力が生じ1/4部では圧縮圧力となった。特に中央部では非常に小さい値となった。またひずみにおいては若干の差異があるもののひずみの直線性は保っており全体像を捉えるには十分な値であると思う。変位については実測で認められた端部での小さなはく離を解析的に示しており、これで応力・ひずみ・変位の3量の解析的な一致が得られたものと言える。これらM5モデルの応力・ひずみ結果を図-4.9, 4.10に示す。

これらの計算では低下係数として $\kappa_c=30$ 、 $\kappa_t=220$ を用いた。このように塑性モデルを用いて計算した結果、応力・ひずみについて高い精度で実測値との一致を得ることができた。しかし、変位に関して特に温度上昇段階の膨張時に水平方向の変位が解析上大きめに出ることが解った。こ

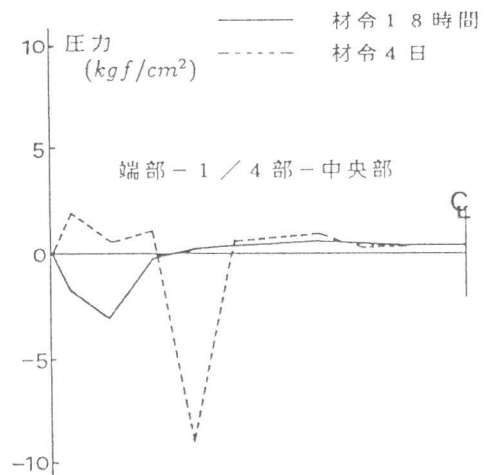


図-4.5 M4打継面圧力分布

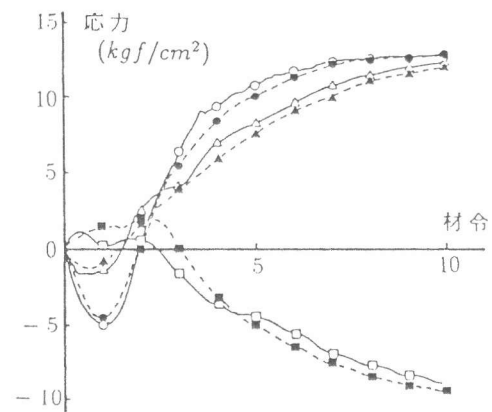


図-4.6 M4応力結果

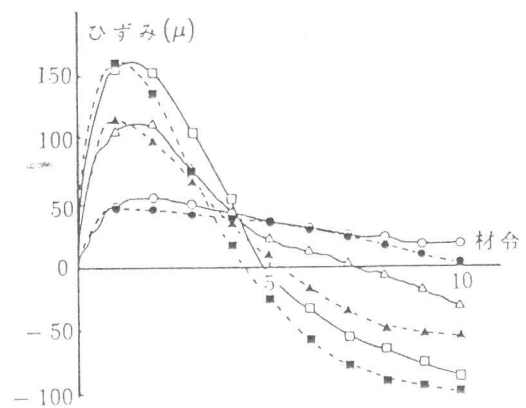
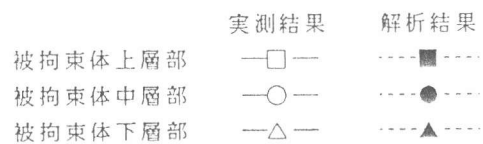


図-4.7 M4ひずみ結果



の点に関しては、打設直後のクリープによる影響や水平方向のすべりの影響と考えられ、本解析で特に考慮していないことが原因と思われる。

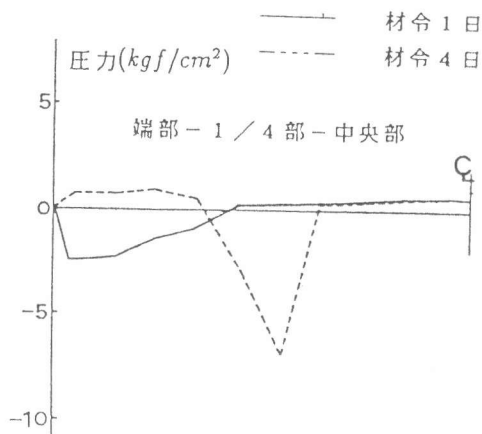


図-4.8 M5 打継面圧力分布

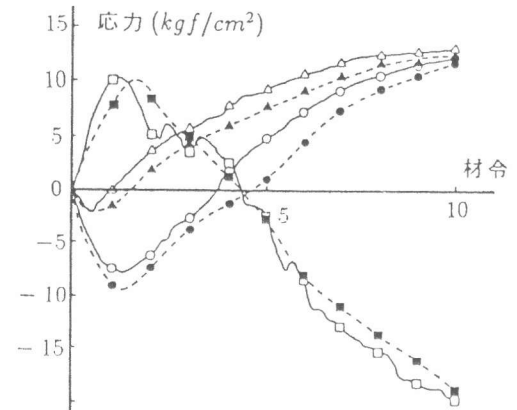


図-4.9 M5 応力結果

	実測結果	解析結果
被拘束体上層部	□	■
被拘束体中層部	○	●
被拘束体下層部	△	▲

5. まとめ

以上のように $L/H=2.5, 5, 15$ の5つのモデルに対し適用したところM2モデルを除くと応力・ひずみに対しては非常に高い精度での解析結果を得ることができた。また変位についても鉛直方向については、十分な結果を得ることができ、水平方向についても打継面上の大きなすべりやクリープの影響を除けば全体像を捉えるに十分なだけの結果を得ることができた。即ち本モデルは打継面処理の状態や形状の異なるケースにも適用可能と言えよう。また打継面が鉄筋によって補強されていても本モデルに鉄筋剛性を加えれば適用可能であった。

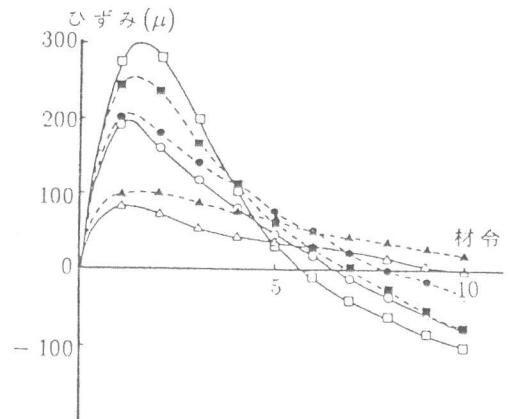


図-4.10 M5 ひずみ結果

今後の温度応力問題は、構造解析的なものから最大の関心事である温度ひびわれの発生及び温度ひびわれ幅制御といったテーマに移って行くものと思われるが、本研究はこの温度ひびわれ問題も含めた温度応力問題に対してその要因分析の有効な一検討となるとと思われる。

謝辞：本論文作成にあたり多くの実験データを提供して下さった東急建設技術研究所の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 今枝靖典：温度応力によるマスコンクリートの変形挙動、名古屋大学修士論文、1988年3月
- 2) 高辻 康、石川雅美、田辺忠顕：マスコンクリートの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、第12巻第1号、pp.925-930、1990年6月
- 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) Chen, W. F: Plasticity in Reinforced Concrete, 1975