

論文

[1160] 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

正会員 ○高辻 康 (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 田辺忠頭 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

マスコンクリートの温度応力発生に影響を及ぼす支配的要因の1つに外部拘束力の作用があげられる。その外部拘束力は、打継面での付着性状や L/H (L = 被拘束体面の長さ、 H = 被拘束体の高さ) 等によって影響される事がよく知られている。

今枝ら¹⁾は、拘束体と非拘束体間の打継面の拘束条件を変化させた実構造物に近い大型供試体実験を行った。そして応力、ひずみ、変位を独立に同一箇所において実測し、最も精度良いとされるFEM解析を用いてこれら変形挙動に関して、かなりの精度での一致を見ている。

しかし、 L/H が比較的小さい場合には同様のバネモデルを新旧コンクリートの打継面に適用しても解析の評価として必要な応力・ひずみ・変位の3量の十分な一致の得られない例が新たに見いだされた。これは、温度応力の発生メカニズムに依然として不明な点のあることを示しており本研究ではこの点の解明を主として行った。検討の結果は、打継面での拘束状態の時間的変化が、やはり応力の大小、分布状態に大きく影響していることを示しており、このような温度応力発生メカニズムの新たな側面について述べることにした。

2. 温度応力解析方法

ダムのように B (幅) が非常に大きい大型コンクリート構造物を解析する場合には、幅方向に垂直な向きに断面を取る2次元な温度解析、応力解析方法が用いられる。しかし、大型コンクリート構造物でも B/H , B/L が小さい場合には幅方向の温度勾配が生じる。打継面のようにく離、すべり等の複雑な挙動を呈することが予測できる所ではこの温度勾配が特に重要なファクターとなる。したがって幅方向に温度勾配が生じている構造物に対して2次元解析を適用することは精度上不都合であり実構造物への適用として危険であろう。つまり、このような構造物に対しては3次元温度解析を適用する方がより妥当と考えられる。

一方、同じ B/H , B/L の構造物であっても応力は、長手方向に卓越して生じる事が知られており2次元解析で十分な場合が多い。そこで今回の解析においては、温度を3次元領域で求め3次元温度場で2次元応力を求める擬3次元温度応力解析手法を用いることにした。また、打継面付近における複雑な挙動を表すために簡易的にバネモデル(図2. 1)を組み込み、その挙動を明白に示すことが出来るように配慮した。

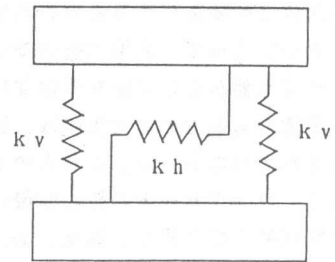


図2, 1 バネモデル

3. 壁体モデル実験

過去数多くのコンクリートの温度応力に関する大型壁体実験が行われてきたが、それらはほとんどが、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。つまり外部拘束作用が壁体コンクリートと拘束体、地盤と拘束体の双方の境界面上に働く為、被拘束体の温度変化に作用する真の外部拘束が不明瞭とされてきた。このため本実験では、拘束体の底部にすべり機構を設け、地盤と供試体をほぼ完全に切り離すことにし、温度変形に対する地盤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た。

試験体は、被拘束体コンクリートを $L/H = 5.0$ ($L = 5.0$ m, $H = 1.0$ m) である M4 試験体と、 $L/H = 2.5$ ($L = 5.0$ m, $H = 2.0$ m) である M5 試験体とした。(図3. 1) ここで、M4, M5としたのは、今枝らの実験供試体¹⁾が、M1, M2, M3 で(後述)、それに続くシリーズ供試体であるためである。拘束体と被拘束体との間の打継面はバキュームサンドブラスト処理をした後モルタルを塗布した。 L/H は、温度応力に最も大きな影響を与えるといわれている要因の1つであって、大型の壁体モデルでこのような地盤からの影響を受けない境界条件の確認のもとでの実大実験は、過去には実施されていなかった。これらの供試体に対して、コンクリートの打設直後から温度が定常状態となるまで、温度、応力、ひずみ、変位、打継面に生じるすべりを試験体の各箇所測定した。特に、応力、ひずみ、変位の三量を各々独立にほぼ同一箇所で測定し試験体の微細な温度変形を経時的に把握した。測定結果の中で被拘束体中央断面長手方向の応力・ひずみと全体的な変位をM4 供試体については(図3. 2~4)、M5 供試体については(図3. 5~7)に示す。

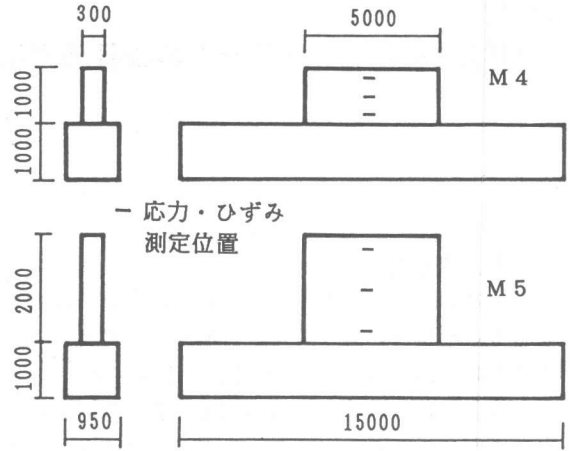


図3, 1 供試体

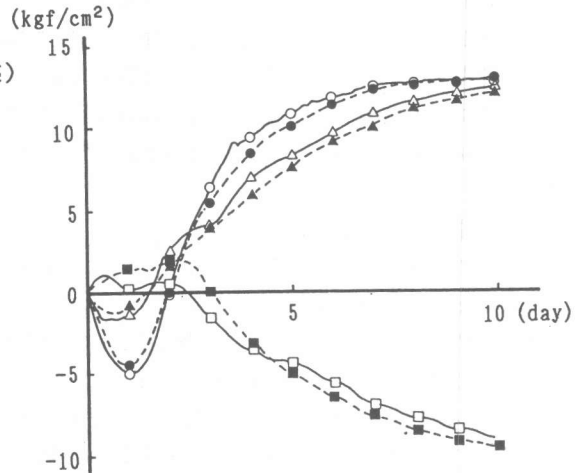


図3, 2 M4 応力

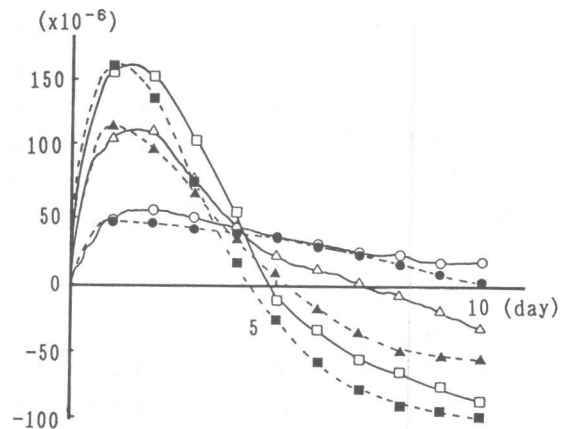


図3, 3 M4 ひずみ

	実測結果	解析結果
上層部	—□—	---■---
中層部	—○—	---●---
下層部	—△—	---▲---

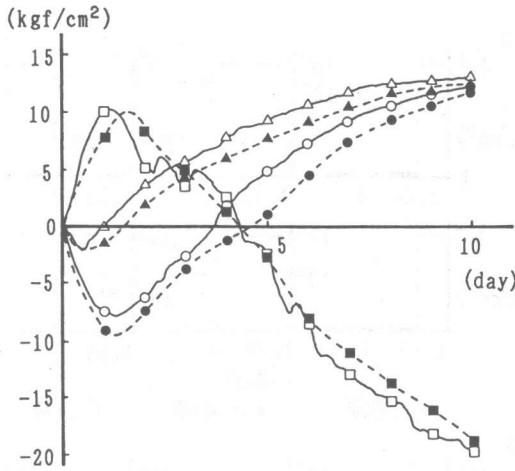


図3, 5 M5 応力

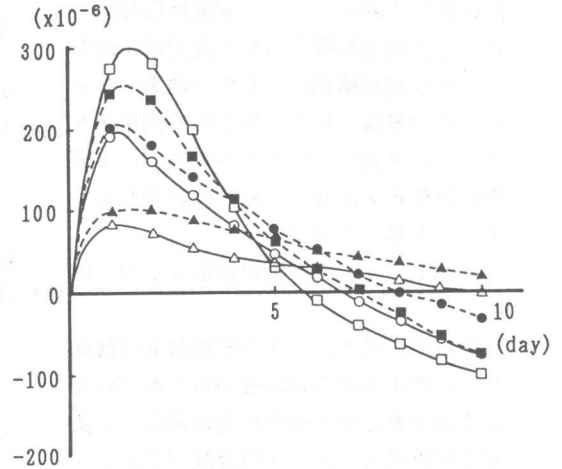


図3, 6 M5 ひずみ

4. 温度応力発生メカニズムに関する考察

4. 1 拘束体と被拘束体境界面におけるバネ剛性の算定

4. 1. 1 新たなバネ剛性算定に至った背景

今枝らは、M1～M3の供試体（拘束体はM4、M5と同じ、被拘束体の $L/H = 15$ ）において応力・ひずみ・変位の3量の解析値、実測値との良好な一致を報告している。もちろん、この場合にも適切なバネ定数を拘束体と被拘束体との境界面に仮定する必要がある。M2の場合は拘束体、被拘束体間にテフロンシートを敷いて拘束の無い状況、M3の場合は鉛直方向に配筋し拘束が強固で拘束体と非拘束体との境界では、相対的すべりは生じない条件にあった。それで今枝らは、M2に関しては鉛直、水平バネ定数を 10 kg/cm/cm^2 と全ての材令において非常に小さく設定し、M3では鉛直、水平バネ定数を $\infty \text{ kg/cm/cm}^2$ に設定した。M1の場合（M4、M5と同じ打継条件）には、バネ剛性を以下のように設定した。

(I) 基本的には、時間による変化はない。

(II) はく離の生じる条件に達した場合に鉛直剛性を 0 kg/cm/cm^2 とする。

(III) はく離発生と共に水平剛性が徐々に低下する。

この様にバネを設定することによりM2、M3のみならずM1についても実験値と解析値がよく一致したことを今枝らは述べている。しかし、この同じバネモデルをM4、M5に適用したとこ

実測結果—網掛け
解析結果—破線
試験体原型—実線

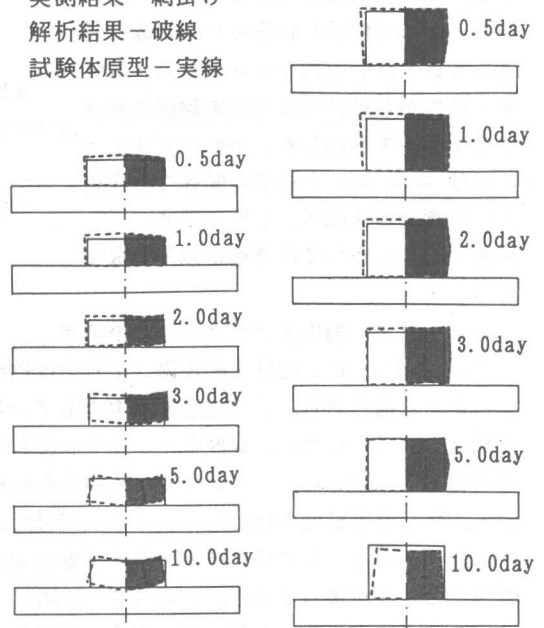


図3, 4 M4 変位

図3, 7 M5 変位

ろ、応力、ひずみの2量は一致するが変位は著しく異なったり、変位は良好に一致するが応力が異なるなど実測値に対して、解析値が極端に合わない結果となった。この事は、M1～M3 応力発生メカニズムとは異なったメカニズムが、本研究が対象とするM4, M5に発生していることを示している。

4. 1. 2 実挙動に対応するバネ剛性

そこで、M4, M5の試験体を打継面で、どのような応力伝達が行われているか検討するために時間経過に関して、温度上昇段階（Ⅰ）、下降段階（Ⅱ）、定常段階（Ⅲ）の3段階に状態を分類し、この各期間において鉛直バネ、水平バネ定数の組合せを各種に変え応力の発生の仕方、変形（変位）状況とバネ定数の関係を考察した。百数十ケースに及ぶ試計算の結果から最終的に最も実験値に適合するモデルを選択した。そのモデルのバネ定数 k_v 、 k_h と材令の関係を被拘束体の位置別に（図4. 1）に示す。この抽出モデルについての考察は以下の様である。

4. 1. 3 抽出モデルについての考察

M4に関しては、温度上昇段階（Ⅰ）では端部で拘束が強く中央部で付着が極端に弱い損傷モデルがよく適合する。この場合には中央部でのみ鉛直、水平バネ剛性が他よりも低い。温度下降段階（Ⅱ）においては、温度低下に伴う収縮により下に凸の曲げ変形を呈する。即ち、鉛直バネは端部で 0 kg/cm/cm^2 、1/4部から中央部の範囲では、大きなバネ剛性を有するモデルが適合する。特にその範囲内において、1/4部付近に無限大のバネ剛性を与え、中央部に向かって徐々に剛性を小さくして行くモデルが実挙動を適確に表現する。また、水平剛性は鉛直剛性と線形関係におく値が適当である。この（Ⅱ）段階のモデルの変形は、両端から1/4の位置に支点を有する静定張出梁の中央部に集中荷重を載荷した状態によく似ている。定常段階（Ⅲ）ではⅡ段階に加えて、水平剛性を1/4部から端部に向かって更に、低くするモデルがよく適合する。これは1/4部付近で、（Ⅱ）において生じていた打継面がせん断力により、多少すべりやすくなる事を仮定することに相当する。

M5に関しては、（Ⅰ）において端部ではM4同様拘束の強いモデルがよく適合する。ただ中央部はM4程には解放されていない結果となる。これは、HがM4の倍であることによる自重効果によるものと推測できる。（Ⅱ）では、M4と鉛直、水平方向とも同じ剛性を与えたところ応力等が実測と一致する。（Ⅲ）では水平剛性に関してM4に対して大きな値を与えたところ実測

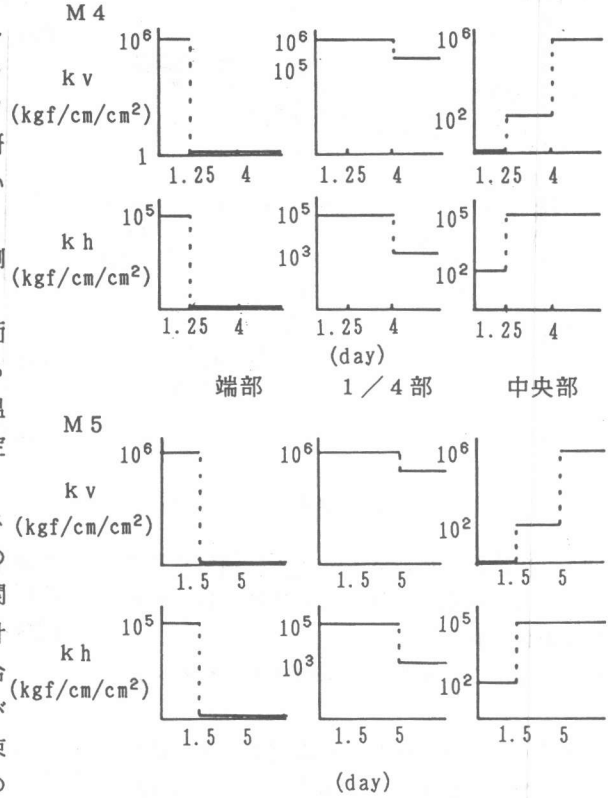


図4. 1 バネ定数と材令の関係

との一致が得られる。これも自重効果が水平剛性を高めることに関係すると推察できる。これらのバネ剛性を適用した解析結果がM4については(図3. 2~4)、M5については(図3. 5~7)である。

4. 2 拘束体境界面におけるバネ剛性からみた局部応力集中について

M4, M5の実験結果に対して解析上打継面付近の剛性変化を適切に与えることによって解析値を実測値に一致させることが出来た。しかしこのバネ剛性の値は打継面の位置、材令によってかなり異なり何故このようなバネ値が得られるのか、その理由が明確にされる必要がある。これは先に述べた打継面上に発生する鉛直方向の圧力分布と密接な関係があるはずである。(図3. 5)に示したようにM4では被拘束体の端部にはく離が生じておりそのはく離の始点は、強い圧縮状態となっているはずである。つまり、はく離挙動を支える支点が存在する必要がある。また、はく離が生じているところは引張状態にあるわけで、打継面には端部より引張領域~圧縮領域への変化が存在し、1/4部から中央部にかけてバネ剛性は徐々に弱まっている事から、弱い領域に変化するらしい事が推察される。即ち、M4供試体の場合には局部的なバネ剛性の変化が必要で、打継面に沿って拘束体と被拘束体の間に集中的な力のやり取りをする箇所の存在することが示唆されるのである。

そこで、弾性変形理論に基づく次のようなモデルを考え、各場合における打継面圧力分布解析を試みた。

(I) 弾性係数 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした被拘束体を考える。この時、重力は無視する。被拘束体が自由な熱変形を生じたとして Compensation Plane 法から両端部が鉛直方向に一定の曲率で上昇するような下に凸の変形が与えられたとする。この場合に拘束体の存在によってこの変形が拘束されたときの圧力変化を計算する。まず、この状態から鉛直変位が打継面上で0になるように打継面に等価な節点力 F_1 を与える。(図4. 2) この時に被拘束体に生じる応力を σ_1 とする。

(II) 今度は、拘束体と被拘束体とを合体させた全体積(拘束体+被拘束体)に(I)で得た等価節点力 F_1 に対して $F_2 = -F_1$ である節点力を与え、そのときの境界面の応力を σ_2 とする。(図4. 3)

(III) この σ_1 は、温度低下時の状況を弾性変形によって表した打継面上の応力である。また、 σ_2 は F_1 を境界面上に与えた事によって生じる逆向きの節点力による打継面上に発生する応力である。ここで $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ とすると σ は打継面が無敵大のバネ剛性を有する状態と仮定した全体モデルにおける温度低下による境界面圧力を表すことになる。

以上の過程を被拘束体と拘束体の長さの比

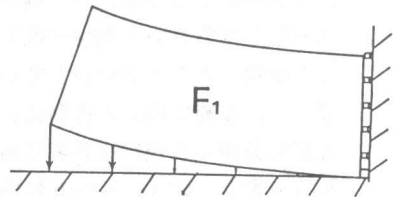


図4. 2 F1の载荷する状況

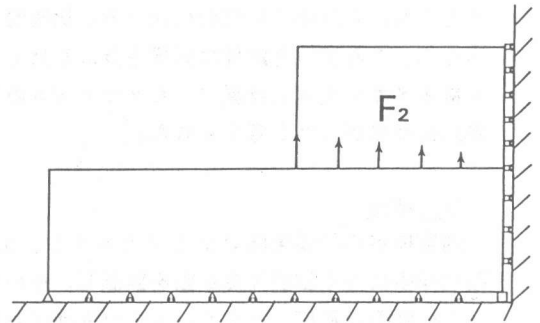


図4. 3 反力F2の载荷する状況

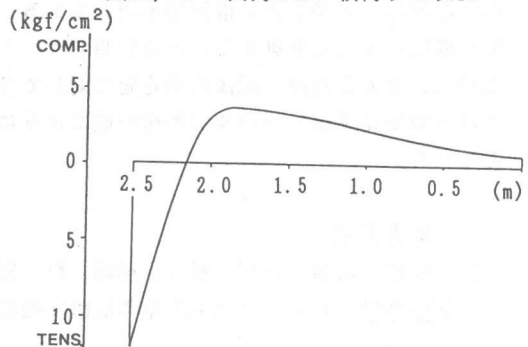


図4. 4 圧力分布 (L = 5 m)

を(1:3)に保ち、同じ曲率(中央断面から2.5 m離れた部位で0.5 mmの鉛直変位)の変位を与え、被拘束体の長さLを①L = 5.0 m, ②L = 15.0 m, ③L = 45.0 mと変化させ、圧力分布解析を行った。(図4. 4~6)

この結果、境界面の圧力分布はL/Hの値には関係なく端部から中央部に向かって強い引張領域、次に強い圧縮領域そして弱い領域と変化することが明らかとなった。そして、底面の長さLが大きくなるとLの影響によって変曲点の数が増加して圧力値は小さいながらも分布状況としては、引張領域、圧縮領域が交互に発生することが判明した。これらの結果を図4. 1の結果と対比すると、圧縮圧力の大きいところと、バネ剛性の大きな部位は一致しておりバネ剛性の低いところは、軸力が少ないところと一致している。従って、4. 1. 3節に示した変動は、打継面における圧力分布から決定されるであろう事が言えそうである。図4. 4~6に示されるように、M1サイズでもM4サイズでも圧縮領域は存在する。しかし、この場合、圧縮応力、引張応力ともにLが小さい場合に比べると比較的小さく、これがバネ剛性に影響を及ぼしM1~M3メカニズムとは異なったメカニズムの発生につながったと考えられた。

5. 結論

地盤拘束の影響を除いたL/H = 2.5, 5.0のマスコンクリート大型供試体実験を行った。水和熱発生に伴う試験体実挙動を観測し、その変形挙動に対応する有限要素解析を試みた。

この結果、新旧コンクリートの打継面における鉛直・水平剛性の時間的変化を考慮に入れない限り温度応力の精度よい推定の不可能であることが示された。さらに水平剛性は、鉛直方向の圧力の程度によって変動することも判明した。このような要因を考慮にいれた有限要素解析を行った結果、実大の実験供試体の測定値に対してほぼ一致して解析値を得ることが出来た。しかし、これらの知見を設計レベルで使用可能なように簡易化するにはまだ今後の検討を必要とすると考えている。

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変形挙動、コンクリート工学年次論文報告集、1988. 6

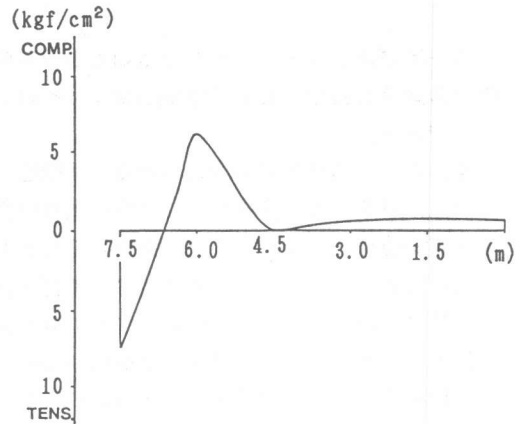


図4, 5 圧力分布 (L = 15 m)

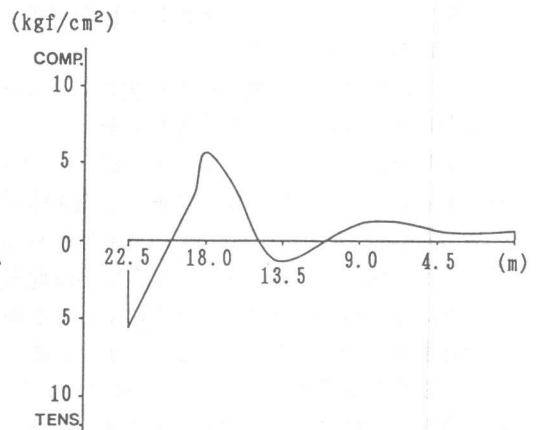


図4, 6 圧力分布 (L = 45 m)