

[2005] 大型供試体によるマスコンクリート実験とその解析

正 会員 ○今枝靖典（名古屋大学大学院）

正 会員 畑中重光（名古屋大学工学部）

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に関する研究は、過去十年間特に大きな進歩をみせ、温度応力発生メカニズムの実態が、明らかにされつつある。各種の解析法、また供試体実験も多大な数にのぼっている。

しかし、得られた知見の精度はどうかとなると、やはりまだ幾つもの問題が残されていると言えよう。有限要素解析（境界要素法なども含めて）は現在考えられる最も精度のよい解析方法と言え、その解析例も数多いが、それによって行われた解析で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研究例はまだ公表されてないと言えよう。

まして温度変形に関する研究例は、実験値も殆どなかったのが現状である。

過去の研究例は、ひずみのみ、しかも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のである。

もし応力とひずみの両方を実測し、いずれか一方のみを解析値と一致させたら、他方の値は解析値と合わない、更に応力、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言うのであれば、我々は十分に現象を理解したとはいえないであろう。しかし、温度応力研究の現状は未だその域を脱していないと考えられるのである。

そこで本研究の目的とするところは、応力、ひずみ、変位をそれぞれ独立に実測し、その三量を従来から使用してきた有限要素モデルで、どの程度までシミュレートできるかを試み、そのモデルの正当性を確かめるところにある。

2. 実験概要

実験概要は、すでに報告したが¹⁾簡単に再記すると以下のようである。

試験体は、図-1に示すように全側面を断熱材で覆った高さ 1m、幅 0.95m、長さ 15m の拘束体の上に、同じく断熱材を全側面に覆った高さ 1m、幅 0.30m、長さ 15m の被拘束体を拘束体打設後約 50日おいて打設し、温度、ひずみ、応力、変位などを温度が定常状態となるまで測定した。拘束体と土間コンクリート間の底部処理は、レベリング材、テフロンシート 2枚、及び鉄板を敷くことにより外部拘束の影響をほとんどなくしており、打継部では、バキュームサンドブラスト処理を施した。

変位は、高感度変位計 ($2 \times 10^{-3}/\text{mm}$ の分解能) を端断面中心線上に 5箇所、1/4 断面の両側面に 4箇所ずつ、中心断面の両側面に 5箇所設置し各箇所とも水平、鉛直変位を測定した。

応力とひずみの計測については 1/4 断面、中心断面の中心線上の図-2に示す位置にそれぞれ計器を設置した。(以下、被拘束体上層部、中層部、下層部、拘束体上層部、下層部の測定結果を A, B, C, D, E とする。) 試験体は、コンクリート打設後から膨張するにあたり、打継部ですべりが生じ、その後収縮過程においては両端から中心方向に向かい全長の 1/4 程度のはく離が材令 2 日目までに生じた。更に、中心断面付近に被拘束体を完全に貫通した温度クラックが材令 3 日頃発生した。(図-3 参照)

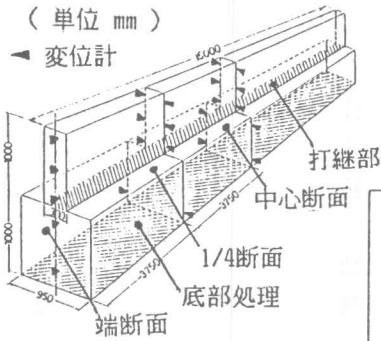


図-1 試験体概図と
変位計設置位置



図-2 1/4断面、中心断面での
応力、ひずみ計設置位置

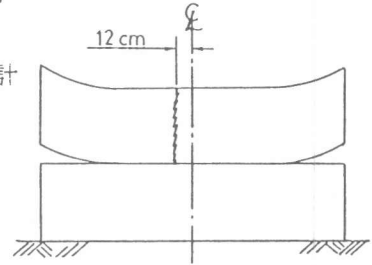


図-3 試験体のクラック、
はく離状況

3. 解析方法

本解析手法も既に発表している¹⁾ので簡単に記す。本手法は、四角形アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法である。図-4に示すように任意の要素内にすべり Δw 、幅 Δd なるクラックが生じた際にクラック界面の水平、鉛直方向に二つのバネを挿入するモデル化(以下クラック要素と言う。)を行っている。このため新たに要素分割を行ったり、接点を設けたりする必要がなく、温度解析との接続がスムーズになっている。接合要素などを用いると、温度別の新たな自由度が必要となり、温度をそこでも与えなければならないためかなり複雑となる。また、クラック要素のバネ定数 k_v 、 k_h を実験との比較から同定する際、迅速かつ簡潔に計算が行える。解析には、図-5に示した要素分割をした。地盤の拘束を極力小さくした底部処理による試験体と地盤とのすべり、及び打継部での拘束体と被拘束体とのすべりやはく離(図中波線で表示)を含む要素群にも、これらの不連続量をクラックと想定したバネモデルを適用している。

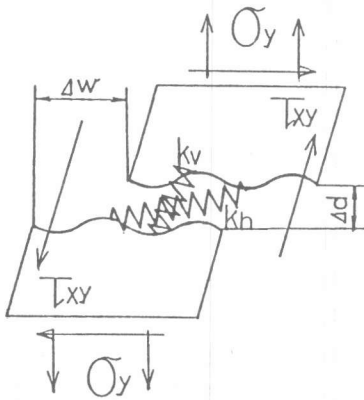
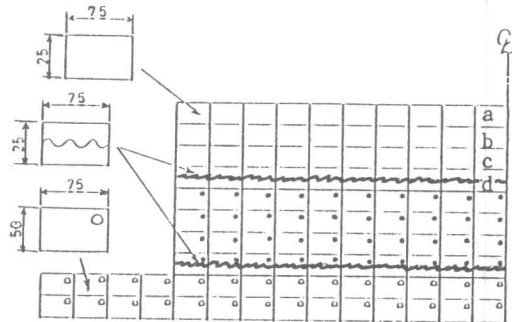


図-4 クラック要素での
バネモデル



メッシュ右肩 無印 被拘束体要素
●印 拘束体要素
○印 地盤要素

図-5 要素分割

4. 測定結果と解析結果との比較

今回の実験は、打継面のすべり、はく離、及び中心断面付近にクラックが生じ、不連続変位の適切な処理が必要な解析しづらいものとなっている。これらを先に述べたバネモデル化するとともに、そのバネ定数を同定しつつ、かつコンクリートの線膨張係数、弾性係数をも時間とともに変化させ、更に地盤の弾性係数も、500, 1000, 5000, 10000, 30000 kgf/cm² と変化させてその影響を調べた。

4. 1 変形(変位)

高精度変位計で測定した経時的な変位を図-6に材令0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7日毎に示した。図中の実線と破線は、両端断面の変形を中心断面を境にして同一方向で示している。又、各材令に対応する解析解も・印でプロットしてある。

図より明らかに材令1日あたりまで試験体全体が上に凸の曲げ変形を生じ、打継部端部で0.05mm程度のすべりを生じていることが認められた。更に被拘束体の急冷とともに、材令1.5日頃から被拘束体は下に凸の曲げ変形に転じ、今度は端部ではく離を生じているのが認められた。被拘束体の水平方向変位は材令3日頃から元の位置よりさらに収縮しているのが認められた。これは被拘束体での温度ピーク(最高で60℃)時の材令18時間から定常状態(27℃)へと落ち着くまでの温度差約30℃に試験体長さ15mと線膨張係数 $10 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ を乗じた単純収縮量4mm強と実測で得られたその間での水平方向の収縮量3.1mmには開きがみられることから、はく離での拘束効果が、多少なりとも存在するものと考えられる。これは、後の解析結果からも確かめられている。

逆に温度ピークをむかえるまでの膨張過程においては、収縮量に比べると、わずか1/2.3の1.40mmの水平方向の膨張量が生じているのみである。これは、拘束効果が被拘束体と拘束体との弾性係数比によって影響されるためであって、当然のことといえよう。

次に材令1日までに生じる打継面のすべりに対して考察を行う。鉛直方向のバネ定数は ∞ kgf/cm²/cm、水平方向のバネ定数は10, 100, 1000, 1000 kgf/cm²/cmと変えて、まず、打継部水平方向の剛性が、全体変形に与える影響を考察した。100 kgf/cm²/cm以下では被拘束体の水平変位が1mmをこえてしまい、材令数日経過しても元の位置にまで戻らないが、逆に ∞ kgf/cm²/cmの場合、水平変位

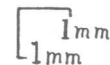
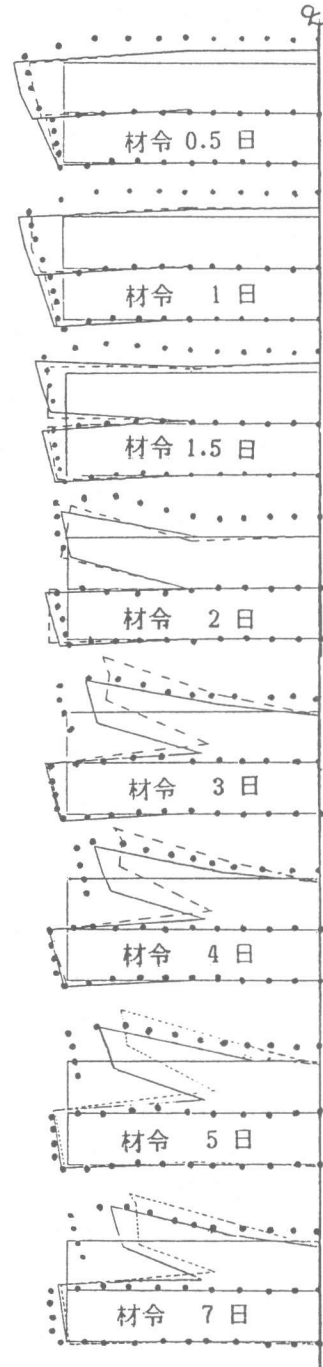


図-6 変形結果

が被拘束体、拘束体とも実測値の 50%~80% 程度しか生じない事が判明した。解析の結果によるとすべりに対しては鉛直バネ定数は ∞ kgf/cm²/cm、水平バネ定数は 10^3 のオーダーで実測と一致する。これらは、石川ら²⁾の実験結果、また Bazant, Gambarovaら³⁾によって、提案されている硬化コンクリートのクラック面のせん断剛性に比較しても妥当な値と考えられる。更に、材令 1日頃から生じた打継面でははく離に対しては、材令 1日~2日にかけて徐々に鉛直バネ定数を 0 kgf/cm²/cm へと端断面から 1/4 断面にかけて解放していき、その時の水平バネ定数を、0, 100, 1000, ∞ kgf/cm²/cm とし、その変形に与える影響を考察した。

0 kgf/cm²/cm の場合、被拘束体は、端断面の水平変位は、実測と一致するものの鉛直方向には、下方に変形し続け、上に凸の変形が経時的に著しくなるのが認められた。(図-7)

また、 ∞ kgf/cm²/cm 断面での鉛直変位は実測と一致もしくは、それ以上(実測の 150%)になるものの、水平変位は被拘束体上部が同下部よりも収縮する解析となった。(図-8)

このため、はく離に対しては、鉛直バネ定数は常に 0 kgf/cm²/cm と解放し、水平バネ定数をはく離発生まもない要素には 1000 kgf/cm²/cm、徐々に 500, 100 kgf/cm²/cm へと低減させていくと実測とよく一致した。即ち、不連続変位面が生じてもその界面には、ある程度のせん断剛性が保たれるのが実状のようである。

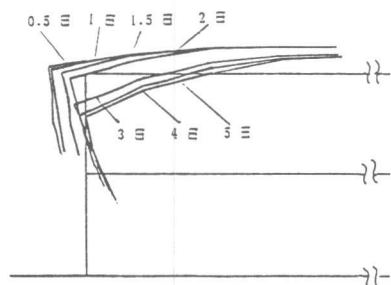


図-7 はく離に対する水平バネ定数が 0 kgf/cm²/cm の被拘束体変形

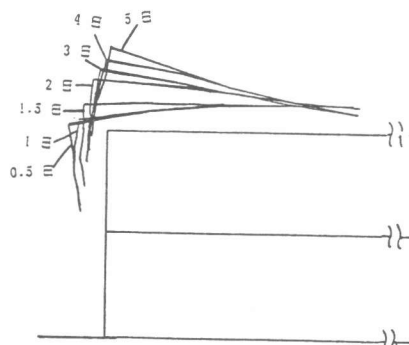


図-8 はく離に対する水平バネ定数が ∞ kgf/cm²/cm の被拘束体変形

4.2 ひずみ

打設直後を初期値とした中心断面での材令 15 時間までのひずみ測定結果を図-9.1に示す。(図-9.2は同じひずみ測定結果を材令 3日のスケールに拡大した) 実測されたひずみがコンクリートの真のひずみかそれとも計器の誤差であるかは議論のあるところである。ひずみ計の構造を変えた他の供試体における実測ひずみは、初期の温度状態拘束状態がほぼ類似であるにもかかわらず、比較するとかなり小さな値を示している。今、打設後 3時間を仮に初期設定とすると、コンクリートのひずみは中心断面で図-10 のようになり、コンクリートの真のひずみを図-9.2に近いと考えるか図-10 に近いと考えるかとは大きな差異を生じるのである。解析では、打継部においてのすべりが大きくひずみに影響することから、水平バネ定数を幾パターン(0, 10, 100, 1000, 10000, ∞ kgf/cm²/cm)にかえて計算したが、図-9に見られるような大きなひずみはついに得られなかった。しかし、打設後 3時間とはいえ、試験体の温度上昇は最高で 10℃にも達しているため、この間の温度増分によるひずみを無視することは

できないものと思われる。このことを考慮するため、図-9.1の材令0~3時間に材令3~数時間に示すひずみ曲線の近似線を3時間でのひずみ値から引きおろし、打設直後での切片を初期値とする仮定のもとでひずみ曲線を再び求めたのが図-11である。この図には解析結果も記してあり、実測結果と解析結果とが、かなり一致している。従って、図-11にみえるような初期材令でのひずみの急増をコンクリートの真のひずみを表しているといえよう。

—— 被拘束体 上層部 A
 —— 被拘束体 中層部 B
 - - - 被拘束体 下層部 C

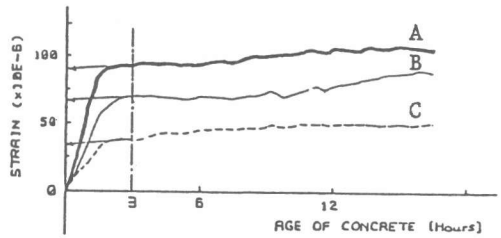


図-9.1 材令15時間までの中心断面ひずみ (初期値は打設直後)

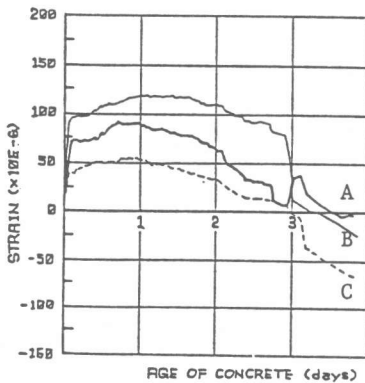


図-9.2 材令3日までの中心断面ひずみ (初期値は打設直後)

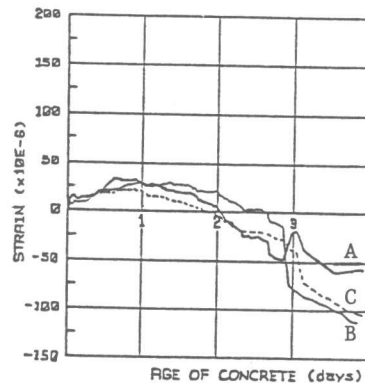
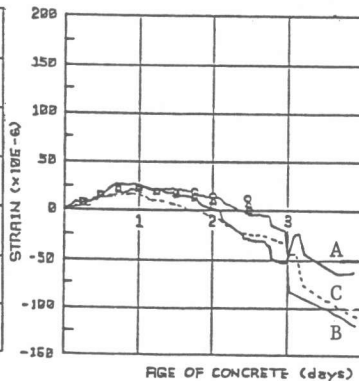
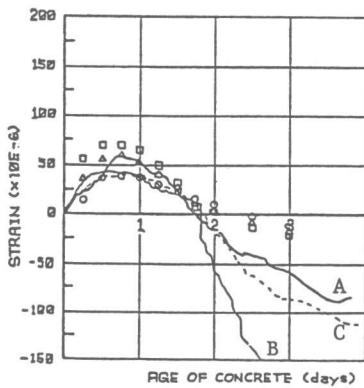


図-10 材令3日までの中心断面ひずみ (初期値は打設後3時間)



解析値

□ 被拘束体 (上層部)
 △ 被拘束体 (中層部)
 ○ 被拘束体 (下層部)

図-11.1 1/4断面でのひずみ 図-11.2 中心断面でのひずみ

4.3 応力

中心断面での応力の実測と解析結果を図-12に示す。材令3日あたりで両者とも応力解析がみられるが、これは先に述べたように中心断面付近に被拘束体を貫通した温度クラック発生によるものである。実測B (被拘束体中層部) の応力はそれにもかかわらず 5kgf/cm^2 を指しているが、これは残留応力と思われる。またクラック発生時に実測Bが最も大きいことから

(12kgf/cm²) クラックは被拘束体中層部から発生したと考えられる。解析においても材令3日での引張許容応力を被拘束体で 15kgf/cm² としたところ、図-5のb要素の鉛直方向にクラックが発生し、その後他の a,c,d 要素にも応力解放力により伝播し鉛直方向に進展した。従って d 要素は、水平、鉛直方向に二本のクラックが入ったモデルとなっている。

クラック界面でのバネ定数は、水平、鉛直ともに 10kgf/cm²/cm とほとんど解放したため、材令材令3日以降の被拘束体の解析値(図-12の○, △, □印)はそれぞれ 0 kg/cm² を示している。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。

線膨張係数は材令6時間までを、 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ それ以後 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

地盤の弾性係数は1000kgf/cm²。 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 ∞ kgf/cm²/cm 水平バネ定数 50 kgf/cm²/cm を用いた。

5. まとめ

本研究で対象とした試験体は、打継面にはく離やすべり、更に中心断面での温度クラックが生じ、これらの各種不連続変位を有する複雑挙動を持った試験体となった。しかし、マスコンクリート構造物の実体は、実はこの試験体に代表されるように特性の異なった各種の不連続性を有する構造物であることが示されたわけで、その解析は、これらの不連続量を適切に表現しうるものでなくてはならないことが判明した。又、本解析手法の結果によるとクラック要素でのバネ定数、コンクリートの線膨張係数、地盤も含めた弾性係数を適切に定めることにより応力、ひずみはもとより、変位までも定量的にある程度まで表しうるができると思われた。

勿論、実測ひずみの信憑性、水平打継面のせん断、鉛直剛性など、更に今後の検討を要する問題が残されている。

本研究の解析を行った試験体の他に、類似の試験体の実験は既に終了しており、これらに対する解析を行って問題点の解明をはかっていくつもりである。

参考文献

- 1) 今枝、西岡、田辺 「クラック面を有するコンクリート構造物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 昭和61年11月
- 2) 石川、西岡、前田 「 Compensation-Line 法とその応用」 第8回コンクリート工学年次講演会論文集 昭和61年 6月
- 3) Bazant, Z. P., and Gambarova, P., "Rough Cracks in Reinforced Concrete," Journal of the Structural Division, ASCE, No.ST4, Proc. Paper 15330, Apr., 1980.

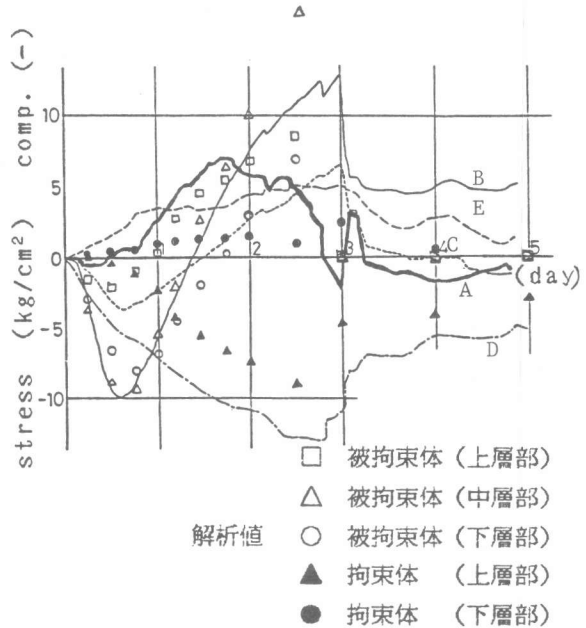


図-12 中心断面での応力