

論文 マスコンクリートの外部拘束応力に関する検討

姜錫和*¹ · 金相哲*²

要旨:本研究ではマスコンクリートの外部拘束度の特性を検討するために、打設ブロックの長さとかさとの比(L/H)、下部拘束体の弾性係数(E_r)などマスコンクリート構造物で、特に外部拘束に影響を及ぼす因子を対象でパラメータスタディを行い各因子が温度応力に及ぼす影響および各因子間の相互影響に對して検討した。

検討結果、外部拘束により發生する應力は断面の高さ方向ではほぼ直線分布を表わしており、L/Hや拘束体の弾性係数の大きさによっても異なり打設したコンクリートの強度發現による弾性係数の増加により材齡別にもその影響が各各異なることが分った。

キーワード: マスコンクリート、水和熱、温度應力、温度ひびわれ、拘束度

1. はじめに

コンクリートは硬化過程において、水和反應により水和熱が發生するが、マスコンクリートのように大きさが大きい場合には外部への熱放出が遅れて内部温度が大きく上昇し、それによる体積變化が内部的または外部的に拘束を受けると構造物内には温度應力が發生する。その時、發生する温度應力(σ)は式(1)のように断面内の不均一な温度差により發生する應力(σ_i) (通常、内部拘束應力と呼ぶ)と体積の膨脹、または收縮が外部の拘束により發生する應力(σ_e)の和で示めされる。

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_e \quad (1)$$

マスコンクリートにおいて、温度應力は根本的に構造物内部の温度變化により發生することであるため、温度變化量と應力との相関性を明らかにするために、その間、實驗的または解析的に多くの研究が試られてきた。

その結果、スラブ構造物のように比較的内部拘束が強い構造物の場合においては、内部温度がピークに到達する時期と温度ひびわれが發生する時期に相互に相関性があり、温度變化量と應力變化量の間にはFig.1のような關係が成立することが知られている¹⁾。

しかし、外部拘束が強い場合には構造物内部の應力状態が内部の温度状態よりもむしろ打設ブロックの大きさや拘束体と被拘束体との間の附着状態の影響をもっと受けるために²⁾、内部温度分布を正確に測定しても温度應力の分布を豫測することは大變難しいである。したがって、外部拘束が強いマスコンクリートと關連した既往の研究は、主に測定した温度變化量を用いて温度應力を豫測する研究に集中されている。

その中で代表的な方法がACI207委員會法で現在にも外部拘束應力を計算するの一方普遍的に使用する方法である。

しかし、その方法では温度上昇時の體積膨脹を拘束して生じる外部拘束應力を全く無視しているため、提示された値に對してはいろいろの疑問點をもっていることが知られている³⁾。

したがって、本研究ではこのような觀點でマスコンクリートの外部拘束度の特性を明らかにするため、外部拘束應力に影響を及ぼす因子を選定し各因子を人為的に變えた16個の解析モデルに對してパラメータスタディを行い各解析結果から外部拘束度の鉛直方向の分布と徑時變化など各因子の變化に従う外部拘束度の特性を検討し、その結果をACI207法で提示している方

*1 東洋中央研究所 建設材料研究室室長 工博 (正會員)

*2 韓瑞大學校助教授 土木工學科 Ph.D (正會員)

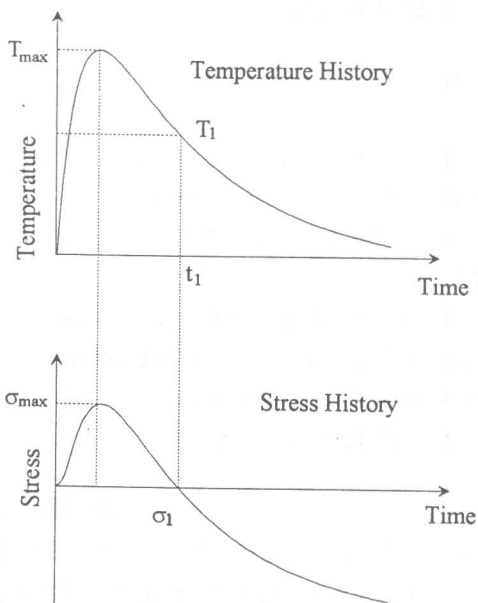


Fig.1 Schematic diagram of relationship between temperature and thermal stress history

法で計算した外部拘束応力と比較した。

2. L/Hと拘束体の弾性係数の変化に従う外部拘束応力の變化

2.1 検討方法

本検討では、L/Hと拘束体の弾性係数の変化に従う外部拘束応力の變化を検討するためにL/Hと下部拘束体の弾性係数(E_r)を解析變數でパラメータスタディを行った。解析範圍は内部拘束が強い場合から外部拘束が強い場合までのすべての場合を含ませるため、Table 1のようにL/Hを4水準(本論文では L_1 , 2, 3, 4シリーズと呼ぶ)、また E_r は軟岩から硬岩までを想定して500kg/cm²から300,000kg/cm²までの4水準(本論文では E_1 , 2, 3, 4シリーズと呼ぶ)で變化させた16個の解析モデルに対して検討を行った。なお、便宜上打設高をすべて1.0mで固定して解析を行った。

本解析のためには獨自に開發した有限要素法による水和熱および温度應力解析プログラムを使

Table 1 Model Case

Parameter	$E_r(\text{kgf/cm}^2)$				
	500	10,000	50,000	300,000	
L/H	2	L_1E_1	L_1E_2	L_1E_3	L_1E_4
	4	L_2E_1	L_2E_2	L_2E_3	L_2E_4
	6	L_3E_1	L_3E_2	L_3E_3	L_3E_4
	10	L_4E_1	L_4E_2	L_4E_3	L_4E_4

用した。そのプログラムにおいて、コンクリートの硬化過程に従うヤング係数の變化は積算温度概念を導入し岡田の積算温度式⁴⁾を使い計算し、クリープの影響は一般に使っているクリープ係数を使わずに、各段階でのクリープひずみ増分を計算する方法を使用し、クリープモデルはCEB-FIP1990モデルを採用した。

解析は3時間間隔で30日間行い温度變化および温度應力變化を検討し、單位セメント量と打設温度はすべて解析モデルに対して同一に400 kgf/m³、20℃で假定し解析を行った。

2.2 内部拘束應力

本研究では全體の温度應力から内部拘束應力のみ引いて任意の材齡での外部拘束應力の分布を評價した。その際、内部拘束應力は解析時外部拘束体の弾性係数をほぼ0に近く入力(実際には 1.0kg/cm²入力)し計算した應力値を内部拘束のみによる應力と考え使用した。

2.3 外部拘束應力の徑時變化

各解析モデルに対する計算値から内部拘束應力による値を引いて時間経過による變化を圖で示すとFig.2のようになる。便宜上、拘束体の弾性係数が一番小さい E_1 シリーズの場合は外部拘束應力値が非常に小さい値を表わすために省略した。

1) 外部拘束が小さい場合

通常、外部拘束が小さい場合は、内部拘束應力が温度ひびわれ發生の可能性を支配する。Fig.2において、L/Hが小さい状態で拘束体の弾性係数が大きくなる L_1 シリーズの應力變化をみると、中央部と底面部の應力の大きさは多少變化はあるものの、應力のパターンにはあまり變化が

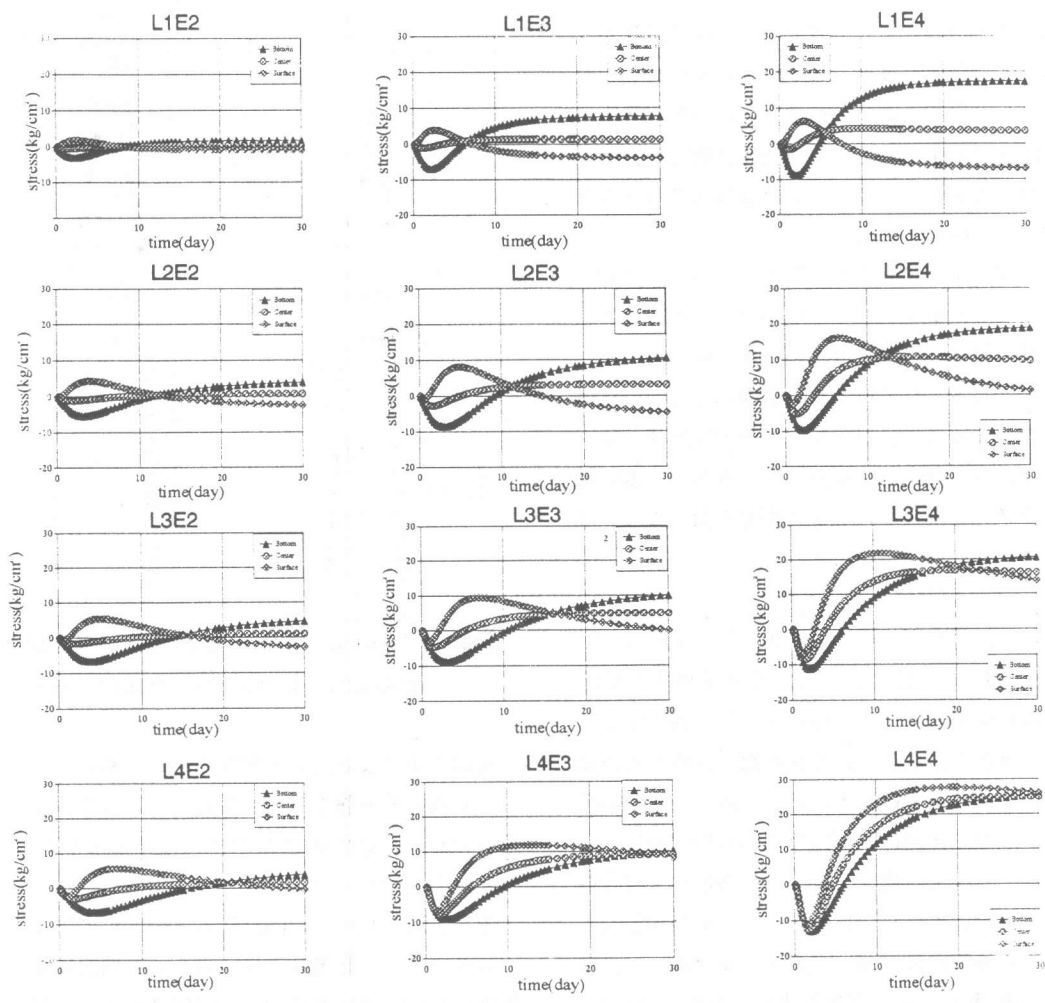


Fig.2 Variation of external restraint stress of elapsed time

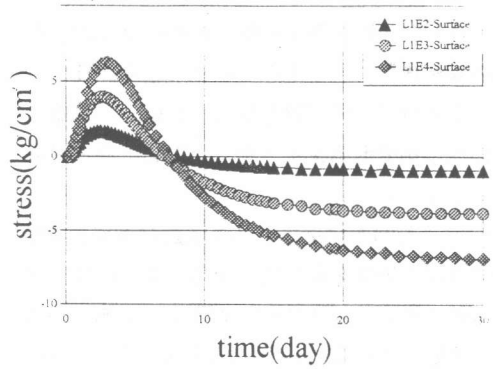


Fig. 3 Thermal stress in surface for L1 series

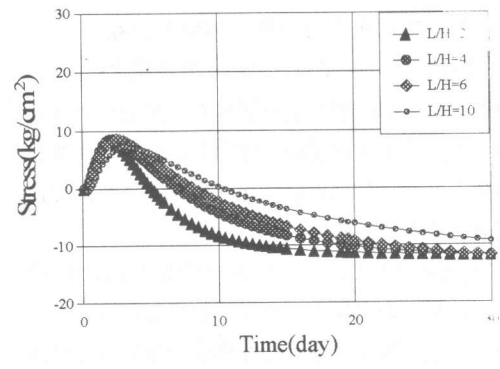


Fig. 4 Thermal stress in surface in E2 series

みられない。しかし、表面部の引張応力は拘束体の弾性係数が大きくなるに従いその大きさが増加し、内部拘束応力が温度ひびわれの発生可能性を支配する場合にも外部拘束応力が温度ひびわれの発生に大きく影響を及ぼしていることが分った(Fig.3参照)。

一方、拘束体の弾性係数が小さい状態でL/Hが増加するE₂シリーズの場合をみると、全體的な応力変化はL₁シリーズの場合と同じようなパターンを表わしているが、表面部の場合L/Hが大きくなるほど、引張応力が最大に到達する時点が少し遅くなる傾向になるものの、表面部のひびわれ発生にはあまり影響を及ぼしていることが分った(Fig.4参照)。

2) 外部拘束が大きい場合

外部拘束が強い場合は解析モデル中にはL₃E₄やL₄E₃、そしてL₄E₄など、L/Hと拘束体の弾性係数が両方とも大きい場合がこれに該当する。この場合をみると、外部拘束応力は内部拘束応力に比べて非常に大きいため、構造物全體的な応力状態が全体的に外部拘束応力の影響を受けひびわれの発生時期や位置などが外部拘束応力の支配を受けている。したがって、壁體構造物のように外部拘束が強い構造物の場合はコンクリートの1回打設高と下部拘束体の拘束状態が温度ひびわれの制御に重要な變數になることが分った。

2.4 外部拘束応力の鉛直方向の分布

本研究では時間経過に従う外部拘束応力の鉛直方向分布の變化を検討した。解析モデルの中で外部拘束の影響が一番大きいE₄シリーズを対象として、材齡経過に従う鉛直方向の外部拘束応力分布はFig.5のようである。

Fig.5をみると、外部拘束の影響は鉛直方向で高さ別に拘束程度が異なり打設したコンクリートの強度發現に従う弾性係数の増加および体積變化により材齡別にもその影響が各各異なりL/Hと拘束体の弾性係数の大きさによっても各各異なることで表われた。

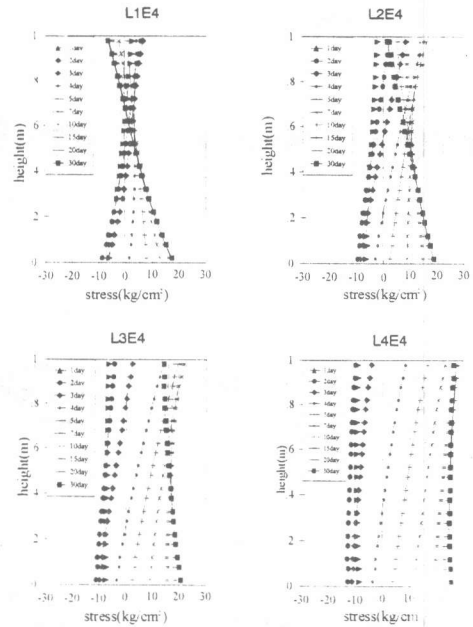


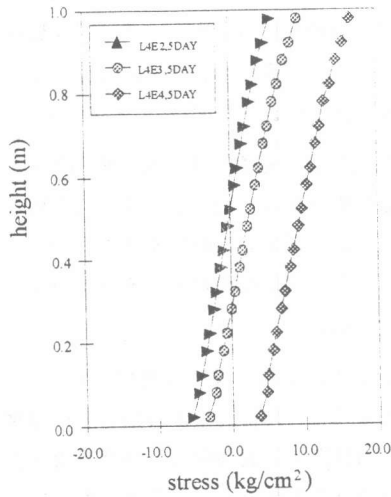
Fig.5 Vertical distribution of external restraint stress for elapsed time

外部拘束による応力の鉛直方向の分布をみると、ほぼ直線形態を表わしており、このような応力分布の直線性はL/Hが大きくなるほど明確になることが分った。

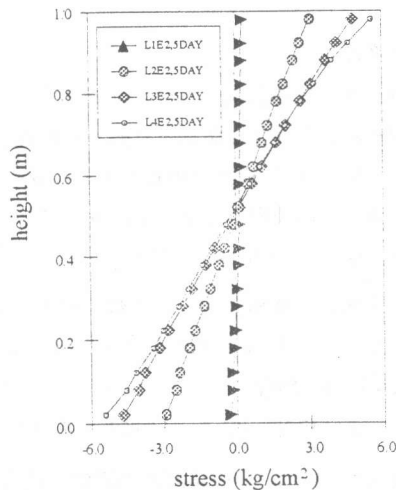
また、L₁シリーズやE₂シリーズのように比較的外部拘束の影響が小さい場合は初期温度上昇時には底面部は壓縮力、表面部は引張力で作用し、温度下降時にはその反対に作用して軸變形拘束より曲げ變形拘束が卓越した形態になった。しかし、L₄シリーズやE₄シリーズのようにL/Hや拘束体の弾性係数が大きい場合は拘束体の弾性係数が大きくなるほど、またL/Hが大きくなるほど、曲げ變形拘束が卓越した形態から徐々に軸變形拘束が卓越した形態に変わっていくことが分った。

一方、L/Hと拘束体の弾性係数が外部拘束応力に及ぼす影響を概略的に把握するために、同一材齡に対してL/Hが一定な場合(a)と拘束体の弾性係数が一定な場合(b)を対象に鉛直方向の分布を検討した(Fig.6参照)

その結果、L/Hが一定な状態で拘束体の弾性係数が大きくなる場合は鉛直方向応力分布を表わ



(a) L/H : constant



(b) E_r : constant

Fig. 6 Effect of E_r and L/H on external restraint

す直線の傾きはほぼ同一の状態に水平に移動する形態になり、拘束体の弾性係数が一定の状態ではL/Hが増加すると直線の傾きが変ることになる。したがって、拘束体の弾性係数は主に軸変形の拘束に、またL/Hは曲げ変形の拘束に影響を及ぼしていることが分った。

3. ACI 207委員会法に対する検討

ACI法では式(1)で ΔT_t を最高温度から計算

する材齢まで降下された温度量で考えているが、それはある特定な位置での温度降下量ではなく部材内の平均温度の降下量を意味する。したがって、本解析モデルを対象としてACI法で假定している部材内の平均温度降下量 ΔT_m を計算するために、木村の式⁵⁾を使用した。

先に、外部拘束が弱い場合であるL₁E₂に対して比較をすると、Fig.7のようになる。

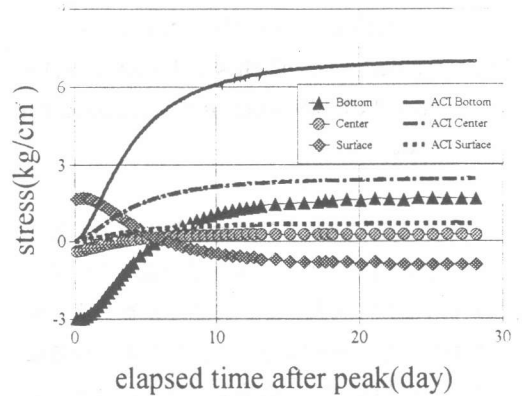


Fig.7 Comparison of this calculated value and ACI 207 committee method for L₁E₂

Fig.7をみると、本解析結果は内部温度が最高温度に到達する2.5日材齢になると、すでに構造物の膨脹拘束による影響が現われ表面部は圧縮応力を、また底面部は引張応力を表わし曲げ拘束の影響で徐々に応力が変化する様相を表わした。しかし、ACI法では温度降下時点から外部拘束応力を評価しているため、初期値は0を表わし温度下降とともに部材全断面にかけて引張応力を表わす応力様相を示した。また、計算値の大きさを比較すると、ACI法による計算値が本解析結果より非常に大きいことになり、ACI法は外部拘束が弱い場合に對しては過大評価していることが分った。

なお、外部拘束が強い場合であるL₄E₄に対して計算結果を比較すると、Fig.8のようになる。

Fig.8をみると、本解析結果は初期はコンクリートの膨脹を拘束する方向で外部拘束が作用す

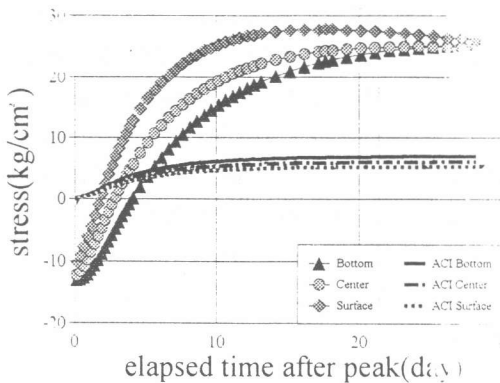


Fig.8 Comparison of this calculated value and ACI 207 committee method for L4E4

るためにすでに全断面にかけて圧縮応力状態を表わし最高温度に到達する材齢を過ると収縮を拘束する方向で外部拘束が作用し徐々に引張応力を表わす応力形態を示した。しかし、収縮に対する拘束作用のみを考慮しているACI法による計算値は本解析結果より非常に小さくなっており、ACI法は外部拘束が強い場合に對しては過小評価していることが分った。

したがって、外部拘束の大きさに関係なく曲げ變形の拘束は無視し軸變形の拘束のみを考慮してACI207法は再検討の餘地があると考えられる。

4. 結論

本研究では、マスコンクリートの外部拘束度の特性を明らかにするために、外部拘束應力に影響を及ぼす因子を選定しパラメータスタディを行い各解析結果から外部拘束度の鉛直方向の分布と経時變化などの各因子の變化に従う外部拘束度の特性を検討し、その結果をACI207委員会で提示している方法で計算した外部拘束應力と比較した。

検討を通じて得られた結論をまとめると、以下ようになる。

- 1) L/Hが小さい状態では拘束体の弾性係数が増加すると表面部の引張應力が増加し温度

ひびわれの發生可能性が大きくなるが、拘束体の弾性係数が小さい状態ではL/Hが増加しても表面部のひびわれ發生にはあまり影響を及ぼしていないことが分った。

- 2) 外部拘束の影響により曲げ變形拘束と軸變形拘束の割合が變化し、外部拘束度が増加するほど應力を支配する拘束成分は曲げ變形拘束から軸變形拘束に變っていくことが分った。
- 3) ACI委員会法を使って外部拘束應力を計算する場合、外部拘束が弱い場合には實際の應力状態を過大評価し、外部拘束が強い場合には過小評価するおそれがあることが分った。

参考文献

- 1) 森永繁・桑原隆司：マスコンクリートの水和熱によるきれつ防止を目的とした施工法、コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム発表報告集、日本コンクリート工學協會、pp. 113-118、1977. 3
- 2) 石川雅美・前田強司・西岡哲・田邊忠顯：マスコンクリートの外部拘束メカニズムに及ぼすL/Hの影響、コンクリート工學年次論文報告集、Vol.9, No.1, pp. 851-856, 1990. 6
- 3) マスコンクリートの温度應力研究委員會報告書：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度應力計算方法の提案、pp.47-93, 1985. 11
- 4) 岡田清・小林和夫・宮川豊章・村本吉弘：マスコンクリートの基本的特性に関する考察、セメント技術年譜、Vol.34, pp.230-234, 1980
- 5) 木村克彦・小野定：マスコンクリート構造物の温度ひびわれ發生の評価方法に関する研究、土木學會論文集、No.378/V-6, pp.61-70, 1987.2