

[165] 温度ひびわれ発生危険度の簡易評価システムについて

正会員 大崎幸雄 (間組 土木本部)
 正会員 〇庄野 昭 (間組 土木本部)
 正会員 杉山 律 (間組 土木本部)
 正会員 河田秋澄 (間組 技術研究所)

1. まえがき

大型構造物の増大やコンクリートへのより高度な機能の要請等に伴い、多くの構造物で温度ひびわれへの対応が要求されるようになってきた。

温度応力問題については、古くから数多くの研究が行われており、温度ひびわれの予測方法にも種々の方法が提案されている。近年では、有限要素法も多く用いられるようになり、解析手法についてはほぼ確立したともいえる。しかしながら、有限要素法を主体とした解析方法を数多くの構造物に適用していくのは、時間的制約、経済性の問題、対応技術者数の制約等から現実的でない場合も多い。簡易手法についてもいくつかの提案がみられる。塚山は、温度ひびわれ発生条件式として、部材断面厚さと拘束度からひびわれ発生限界となる断面中心部の最大温度上昇を誘導している¹⁾。この方法は、ひびわれ発生の有無の目安を容易に算出できる利点はあるが、種々の施工条件を計算に反映し得ない。吉岡らは、単純拘束モデルによる解析結果を有限要素法による解析結果と対比することにより、この方法の妥当性を報告している²⁾。

筆者らも、温度ひびわれ防止システムの開発の一環として、温度ひびわれ発生危険度の簡易評価システムを検討した。検討のポイントは、計算の簡素化・短時間化と計算精度という一般には相矛盾する点をどう処理するかであり、施工条件やひびわれの有無が明確である150の実構造物データによって検証を行いながら検討を進めた。

本文では、その検討事例ならびに開発された簡易評価システムを紹介するとともに、残された2, 3の問題点についても述べた。

2. 簡易評価システムの概念

このシステムは、熱伝導計算、温度応力および引張強度の算定、ひびわれ発生危険度の算定の3段階の計算によって、温度ひびわれが解析対象部材に発生する確率を推定するものである。温度応力問題が抽出されると、パーソナルコンピュータによってこれらが連続計算され、図1～図3の3枚の図で出力される。図3は、ひびわれ発生の危険性を評価する指標として設けたCRITICAL FACTOR (C. F.) の経時変化を示したものである。このC. F. とひびわれ発生の

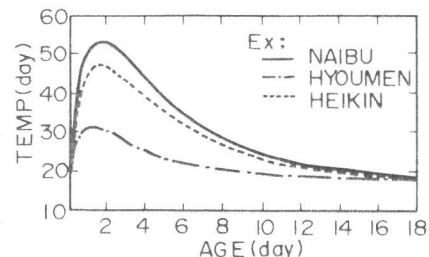


図1 温度履歴曲線

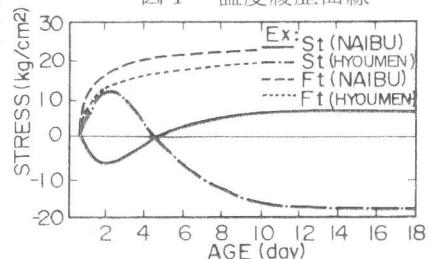


図2 温度応力(St)・引張強度(Ft)履歴曲線

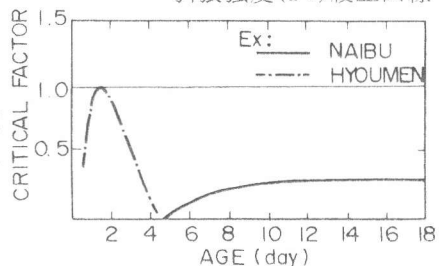


図3 CRITICAL FACTOR 履歴曲線

表1 計算パターンの一覧

計算モデル	壁型			マット型					
計算パターン	K-①	K-②	K-③	M-①	M-②	M-③	M-④	M-⑤	M-⑥
パターン図									
計算条件	仮想厚は壁厚や型枠の種類によって変化させ、脱型時には、仮想厚を除き、部材表面温度を降下させる。			仮想厚は養生条件やマット厚によって変化させる。層打ちの場合で下層リフトとの打設間隔が短い場合は、下層リフトの温度履歴計算を考慮して検討層の計算を行う。					

因果関係は実構造物データに基づいて求められており、C.F.を計算することによって、その部材のひびわれ発生確率を求めることができる。

計算手順は図4に示すとおり、壁型、マット型の2種類のモデルで計算される。それぞれのモデルは表1に示すような計算パターンに分類されている。表1からわかるように、計算はすべて一次元で行われる。これは計算機の容量、計算時間の短縮などから決定された。

3. 熱伝導計算に関する検討

熱伝導計算にはSchmidt法を採用した。Schmidt法では節点間隔を細かくすると、計算時間間隔が短縮し、所要期間までの計算ステップ数が増大する。計算時間を短縮するためには計算ステップ数の削減が望まれるが、これは部材内部での放熱作用が遅れ、コンクリート温度の過大評価につながる。そこで、図5に示すような分割数（または節点間隔）と温度上昇の関係を把握し、実測値との検証を行って、最大節点間隔（10cm）を設定した。

熱拡散率、断熱温度上昇式や、施工条件などの入力値の設定には以下のような方法を採用した。図6は熱拡散率がコンクリートの最大温度に及ぼす影響を解析したものであるが、その影響は比較的少ないことがわかる。そこで、本システムでは標準値（0.07 m²/day）を設定した。

断熱温度上昇式は、用いる試験装置や試験方法等によ

って異った試験値が得られ既往の研究成果からこれを精度よく求めることは難しいようであるが、本システムでは系統的な研究成果がまとめられている塚山式を採用した。これを用いた場合の熱伝導解析値は、実構造物温度に対して低い値を与えることがよく経験されるが、この問題に対しては、終局温度上昇量Kおよび反応速度 α を変化させて実測値との対応を検証し、Kを割増しすることによって実用的精度が得られることが判明した。（図7参照）

施工条件によって部材の放熱条件は多岐にわたるが、ここでは表1に示したように計算パターンを分類し、それぞれのパターン毎に部材厚さ、型わくの種類、養生方法によって計算条件を区分した。なお、計算条件の区分とは、境界条件として設けられた仮想厚の区分を意味する。型わくの脱型時や養生の撤去時にはコンクリートの表面温度は短時間で急激に降下し、その後徐々に外気温に近づく傾向が認められる。そこでこのような場合には、

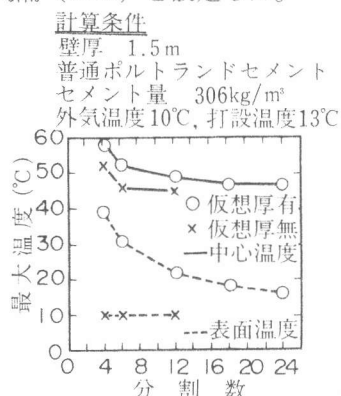


図5 計算分割数と最大温度の関係

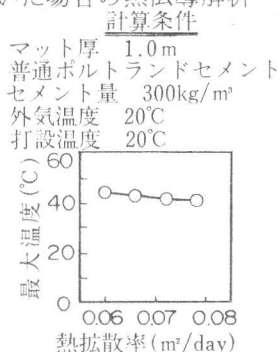


図6 熱拡散率と最大温度

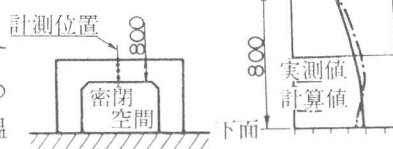


図9 K③モデルによる仮想厚検証例

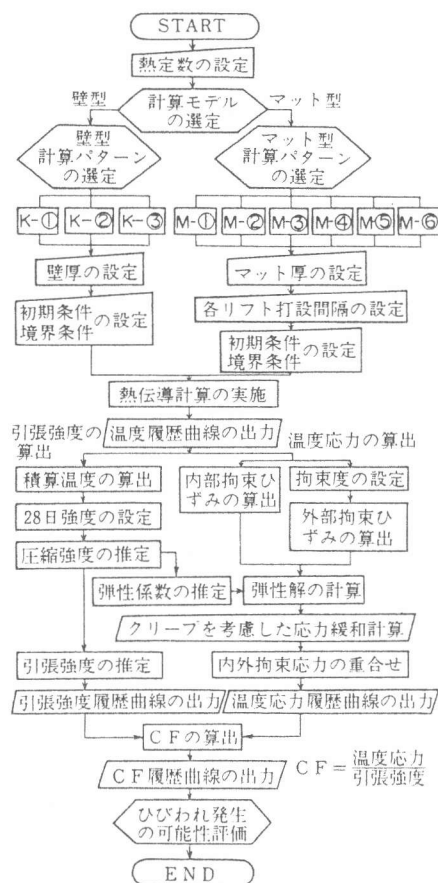


図4 計算手順

計算条件 壁厚1.2m、節点間隔0.75m
普通ポルトランドセメント
セメント量306kg/m³
外気温6.5℃、打設温度10℃

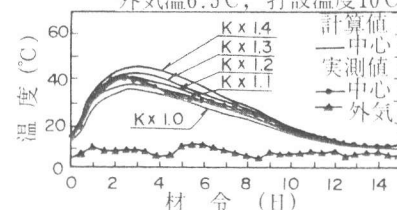


図7 K値の割増し係数検証例

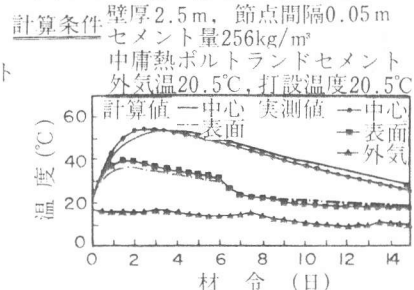


図8 脱型に伴うコンクリート温度変化

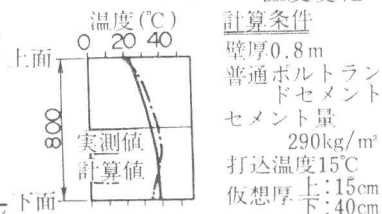


図9 K③モデルによる仮想厚検証例

仮想厚を減少させることによって処理することとした。図8は、K-①モデルによる脱型の影響の検証例であるが、実際との適合性は比較的良好である。また、図9は、K-③モデルで、側壁とスラブが同時打設された場合の仮想厚を検証したものであるが、壁面が密閉空間に接している場合にはかなり大きい仮想厚を設ける必要がある。

4. 温度応力計算方法と拘束度の検討

温度応力は、内部拘束応力および外部拘束応力に区分して算出し、両者の和として求めることとした。

前者については、部材内部の温度分布形を関数化して、これによる内部応力の解析値を求める方法がよく用いられるが、ここでは、熱伝導計算によって求められている部材断面内の平均温度と計算節点温度の差に線膨張係数、弾性係数、クリープに伴う応力低減係数を乗じ、ポアソン比を考慮して求めることとした。このことは、非線形温度分布の平均勾配によって生じる部材全体の曲率を完全に拘束することになる。

後者については、部材断面内の平均温度の変化に伴う自由変形が、軸方向の拘束度Rによって単純拘束されるとして算出することとした。

弾性係数は圧縮強度 (σ_c) との関係式 ($a \times \sigma_c^b$) で示し、圧縮強度は筆者らの実験値等から、その発現率をセメントの種類毎に表2のように与えた。クリープによる応力緩和は、実験値から、弾性係数の低減率として材令tの関数形 ($a \times t^b$) で示した。

拘束度については、数値シミュレーションによって検討した。数値シミュレーションには有限要素法を用い、内部拘束応力は、コンクリート要素底面にローラ支持条件を設定して算出した。外部拘束応力は、底面連続拘束の条件で計算された応力から内部拘束応力成分を差し引いて求めた。この外部応力成分を、部材平均温度が断面に一樣に作用したときの自由変形を完全に拘束する応力で除することによって拘束度を求めることができる。解析結果を図10～図12に、解析に用いた物性値を表3に示す。これらの図によると、コンクリートの剛性に比べ拘束体の剛性が小さくなるにつれて拘束度が小さくなるのがわかる。特に、L/Hの大きい場合には顕著である。また、L/Hが5程度以上になると、相対高さが大きくなっても拘束度の減少はあまり期待できないようである。

拘束度に関する研究報告としてはACI207委員会報告がよく知られているが、今回の解析結果はこの報告に比べて相対的に拘束度が大きくなっている。この原因については明確ではないが、今回の解析上の問題の1つとして、弾性係数の発現過程を考慮していない点があげられる。また、打継目のずれを含めた実験データも十分ではなく、実験データによる検証も今後の課題である。

表2 圧縮強度の発現曲線例

セメント 種 別	D・D	強度発現 曲 線	a	b	c
早強	≤30	$y = ax^2 + bx + c$	0.0244	-0.0284	0.0097
	>30		-0.0046	0.1620	0.2863
普通	≤30	$y = ax + b$	0.0119	-0.0278	0.0203
	>30		0.1124	-0.3465	—
中・高熱	≤30	$y = ax^2 + bx + c$	0.0104	-0.0272	0.0200
	>30		0.0062	0.0136	0.0765

注1) yは28日強度(20℃養生)に対する強度比

2) $x = 2.398 \times \ln(D \cdot D / 3.5) - 1$

3) D・Dは積算温度(℃×H)

表3 解析に用いた物性値

温度分布	$T(s) = -75S^2 + 50S + 25$ ただし、 $S = h/H$, $0 \leq S \leq 1$
コンクリート	$E_c = 1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 又は $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0.16$ $\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
岩 盤	$E_g = 5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0.32$ $\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

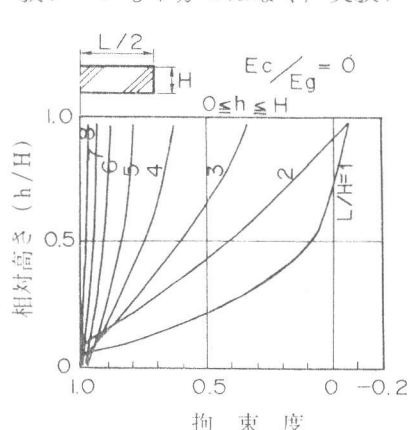


図10 拘束度解析結果(1)

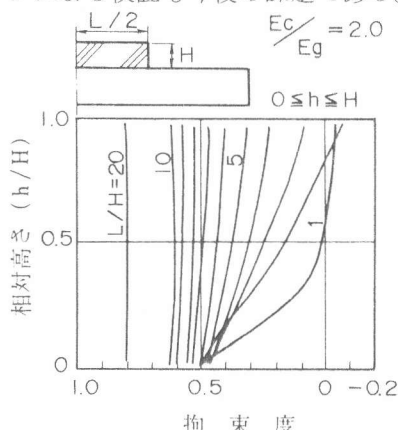


図11 拘束度解析結果(2)

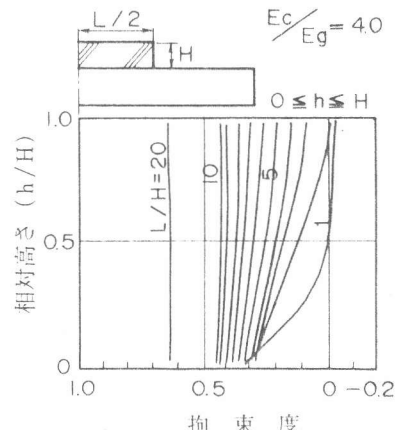


図12 拘束度解析結果(3)

5. 有限要素法との比較例

図13および図14は本システムによる解析とFEM解析の比較例を示したものである。解析対象は、26 m × 26 m × 厚さ 5 m (2.5 m × 2 リフト施工) のマットコンクリートで、FEM解析モデルを図15に示す。使用したコンクリートの熱力学特性値は同一とした。図13および図14によると両解析結果には大きな差はみられない。

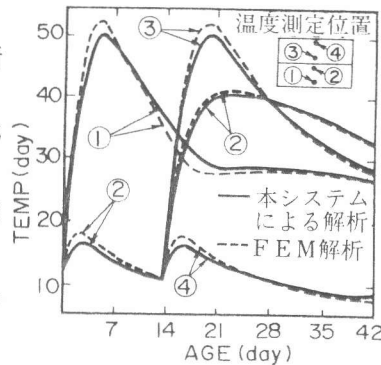


図13 熱伝導計算結果

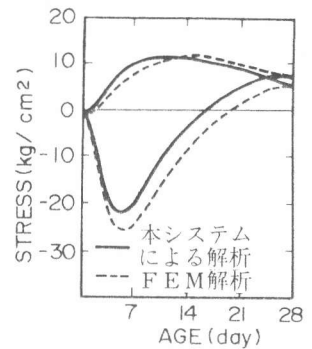


図14 温度応力計算結果

6. ひびわれ発生危険度の評価

ひびわれ発生危険度を評価するための指標としてC.F.を設け、これを(温度応力/引張強度)と定義した。なお、引張強度は、表2に示した圧縮強度の関数($a \times \sigma_c^b$)として表示し、時間・温度依存性を考慮した。したがって、C.F. > 1であれば、理論的にはひびわれが発生することになるが、温度応力の算定、引張強度の推定等の計算条件と実構造物の施工条件には差があるため、計算されたC.F.には誤差が生じる。そこで、実構造物におけるひびわれの有無とC.F.の関係を明らかにすることによって、C.F.からひびわれ発生危険度を評価することとした。解析の対象とした部材は、前述した150ケースである。解析結果は図16のようであり、C.F.がある値上になるとひびわれ発生確率は急激に増大することがわかる。また、C.F.が1.3を越えたとほとんどの部材でひびわれが発生し、0.7を下廻ると、その確率は非常に小さくなるようである。解析に用いたデータ数は必ずしも十分とはいえないが、このような方法を用いることにより、ある程度の精度でひびわれ発生危険度を評価できそうである。

7. まとめ

以上、多くの構造物へ容易に利用できることを目的に開発した“温度ひびわれ発生危険度の簡易評価システム”について述べた。このシステムは、近年急速に普及してきたパーソナルコンピュータを用い、単純モデルで計算を行うものであるが、多くの実構造物によるデータとの検証を行うことにより、ある程度の精度でひびわれ発生危険度を評価し得ることが判明した。

しかし、細部については問題も残されており、今後さらにデータを蓄積して精度の向上につなげていきたい。また、今回のシステムでは、ひびわれの程度については言及していない。この点も今後の課題である。

拘束度の評価、打継部の挙動など十分な説明がなされていないものも少なくなく、あるいは新素材によるひびわれ防止効果等も合わせて幅広い研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 塚山隆一：マッシュな鉄筋コンクリート構造物の温度ひびわれ，セメントコンクリート，No.370，1977.12
- 2) 吉岡保彦：マスコンクリートのひびわれ予測システムの開発とその適用例，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム，1984.3
- 3) 小野 定：マスコンクリートの外部拘束による温度ひびわれ制御について，セメント技術年報XXXIV，1980
- 4) 中内博司・吉川弘道・庄野 昭：マスコンクリートの温度応力解析，間組研究年報，1980
- 5) 平賀友晃：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム，1984.3
- 6) 庄野 昭・斉藤喜代子：若材令コンクリートの強度性状に関する研究，間組研究年報，1982
- 7) 大崎幸雄・吉川弘道・河田秋澄：コンクリート構造物の粘弾性解析，間組研究年報，1981

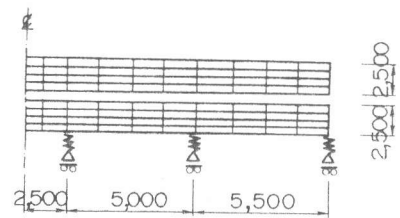


図15 FEM解析モデル

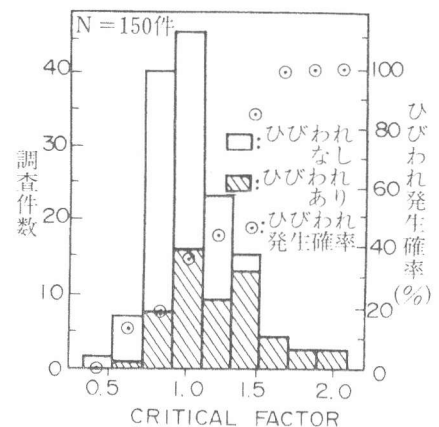


図16 C.F.とひびわれ発生確率