

[85] マッシブなコンクリート部材のひびわれ予測に関する研究

正会員 吉 岡 保 彦 (竹中技術研究所)
 正会員 ○米 沢 敏 男 (竹中技術研究所)
 中 島 徹 (竹 中 土 木)

1 まえがき

マッシブなコンクリート部材にひびわれが発生する可能性の有無を予測し、ひびわれ防止対策の効果を定量的に把握するためには、部材に生じる水和熱による拘束応力を適確に解析する必要がある。マッシブなコンクリート部材の水和熱応力の解析においては、コンクリートの凝結が終了する時点あたりの極めて初期の材令から、ヤング率、クリープ、強度といった物性の経済的な変化を考慮した非線形の解析が要求される点に特徴がある。また、ひびわれ防止対策を検討するためには、種々の条件に対するシミュレーションが必要なため、実用性を損わない範囲で簡略化した解析モデルを設定することが望ましい。このような観点から筆者らは、第一回年次講演会において外的な拘束を受けるマッシブなコンクリート部材に生じる水和熱応力を解析するための一方法を提案し、小型の模型を用いた実験によりこの解析方法が妥当であることを報告している¹⁾。しかし、実構造物に生じるひびわれを外部拘束応力の解析結果のみから予測すると、やや危険側の判定を下していることが、いくつかの実構造物におけるひびわれの観測結果から確認され、内部拘束応力についても解析上考慮しておく必要があることが、わかった。そのため、本研究では、内外両方の拘束応力を同時に解析するための一方法を提案するとともに小型の模型を用いた実験により提案している解析法の妥当性を検討し、あわせてマッシブなコンクリート部材に生じる内部拘束応力の特性について考察を加えた。

2 内外の拘束を受けるマッシブなコンクリート部材の熱応力の解析法

2.1 解析モデルおよびマッシブなコンクリート部材のモデル化

ここで提案する解析モデルを図-1に示す。このモデルでは、いくつかの線材要素から構成されるコンクリート部とこれを外的に拘束するバネとが剛体によつて連結されており、要素間の温度履歴の差によつて生じる内部拘束応力とコンクリートの平均変形がバネに拘束されることによつて生じる外部拘束応力とを同時に解析できる。ここでは、図-2に示すようなマットコンクリート上に打設される厚肉の壁体を一例としてマッシブな実構造物とモデルとの対応関係を述べる。厚さに比べて高さかなり大きい壁では熱は主として壁の両側面より拡散するため壁体内の温度勾配は、厚さ方向が卓越している。そのため壁体内に生じる内部拘束応力は、近似的に図-2に模式的に示したような分布をしていると考えることができ、この応力を

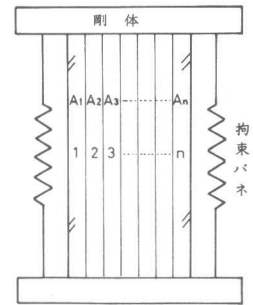


図-1 解析モデル

を解析するためには、壁体を図示したような鉛直方向の要素に分割して考えればよく、これらの要素が、モデルの各要素に対応することになる。またマットからの拘束による外部拘束応力は、壁体の端部を除いた一般部では、図-2に示すような分布になり、壁の底面で生じる最大応力は、マットと壁の剛性をモデルの拘束バネとコンクリートの剛性に置きかえた時、モデルのコンクリート部に生じる応力と等しい^{1), 2)}。

ひびわれの発生を予測する目的からは、この応力の最大値についてのみ考えておけばよく、このようなモデル化は妥当なものと考えられる。また、壁内の鉛直方向の温度勾配が無視できないような場合には、二次元的な要素分割を行つたり、

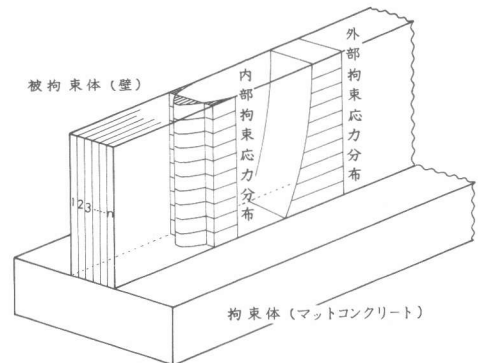


図-2 厚肉壁体の応力分布とモデル化

岩盤上に打設されるマッドコンクリートのような場合には水平方向の要素に分割するなど、実構造物を実用性を損わない範囲で近似した要素分割を行うことにより、これらの構造物に生じる内外の拘束応力をここで提案するモデルを用いて解析することができる。

2.2 モデルの応力解析法

マッシブなコンクリート部材の熱応力を解析するためには、コンクリートの物性の経時的な変化を考慮したクリープ解析を行う必要があり、そのためここでは、物性とクリープの連続的な変化の過程をステップバイステップで近似した増分法による解析を行っている。以下には、 i 番目のステップにおける各要素とバネの応力増分の算定法を示す。モデルのコンクリート要素の数を n 個とする。 k 番目の要素の i ステップにおける熱膨張収縮による自由歪の増分を $\Delta \varepsilon_{k,i}$ 、 $1 \sim (i-1)$ ステップの応力増分によるクリープ歪の増分を $\Delta \varepsilon_{c,k,i}$ 、ヤング率を $E_{k,i}$ 、実歪の増分を $\Delta \varepsilon_i$ とすると、応力増分 $\Delta \sigma_{k,i}$ は、(1)式で表わせる。クリープ歪の増分 $\Delta \varepsilon_{c,k,i}$ は、2.3で述べるクリープ係数を用いて重ね合せ法で算定すると(2)式で表わせる。(2)式中、 $\varphi_{k,i,j}$ は、 j ステップで載荷した後 i ステップまでのクリープ係数である。拘束バネの自由歪の増分を $\Delta \varepsilon_{s,i}$ 、ヤング率を E_s とすれば、バネの応力増分は、(3)式で表わせる。(1)(3)式より、つり合い条件式(4)が求まり、(4)式から実歪の増分(5)式が算定される。

$$\Delta \sigma_{k,i} = E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{c,k,i}) \} \quad (1) \quad \Delta \varepsilon_{c,k,i} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_{k,j} (\varphi_{k,i,j} - \varphi_{k,i-1,j}) / E_{c28} \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_{s,i} = E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{c,k,i}) \} + A_s E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta \varepsilon_i = \left[\sum_{k=1}^n \{ A_k E_{k,i} (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{c,k,i}) \} + A_s E_s \Delta \varepsilon_{s,i} \right] / \left\{ \sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} + A_s E_s \right\} \quad (5)$$

(5)式の $\Delta \varepsilon_i$ を(1)(3)式に代入すると要素とバネの応力増分が求まる。ただし、(2)式によるクリープ歪の増分には、 i ステップの応力増分 $\Delta \sigma_{k,i}$ によるクリープ歪の増分を含んでいないため、ここで求まる解は近似解であり、正解は、 $\Delta \sigma_{k,i}$ によるクリープ歪増分(6)式、(6)式による $\Delta \varepsilon'_{c,k}$ を考慮した応力増分(7)式、つり合い条件式(8)式、以上の三式から求まる(9)式の k を $1 \sim n$ まで変化させて求まる n 個の式による $\Delta \sigma_{1,i} \sim \Delta \sigma_{n,i}$ に関する連立方程式を満足する解でなければならない。

$$\Delta \varepsilon'_{c,k} = \Delta \sigma_{k,i} \varphi_{k,i,i} / E_{c28} \quad (6)$$

$$\Delta \sigma_{k,i} = E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{c,k,i} + \Delta \varepsilon'_{c,k}) \} \quad (7) \quad \sum_{k=1}^n A_k \Delta \sigma_{k,i} + A_s E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) = 0 \quad (8)$$

$$A_1 \Delta \sigma_{1,i} + A_2 \Delta \sigma_{2,i} + \dots + (A_s E_s / E_{k,i} + A_s E_s \varphi_{k,i,j} / E_{c28} + A_k) \Delta \sigma_{k,i} + \dots - A_n \Delta \sigma_{n,i} = A_s E_s (\Delta \varepsilon_{s,i} - \Delta \varepsilon_{k,i} - \Delta \varepsilon_{c,k,i}) \quad (9)$$

ここでは連立方程式を直接解くかわりに、くり返し解法で応力増分の正解を算定している。このくり返し解法では、(1)~(5)式を用いて求まる解を第一近似解とし、この近似解を用いて算定した(6)式によるクリープ歪増分を(2)式に加え再度(1)~(5)式を用いて応力増分を求める。この操作を解が十分な精度で収束するまでくり返している。

2.3 クリープ係数の算定法

クリープ係数としては、以下に示すCEB-FIPの指針³⁾(1978年)を基本的に使用している。

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_0 \varphi(t, t_0) / E_{c28} \quad (10) \quad \varphi(t, t_0) = \beta_a + 0.4 \beta_a (t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad (11)$$

$$\beta_a = 0.6 (1 - f_c(t_0) / f_{c\infty}) (1 + 0.48 \log t) \quad (12)$$

(12)式の急速初期変形は、指針の表現を Rüschi のデータ等を用いて修正したものである。遅延弾性、塑性流動の進行度の関数は、指針に与えられている曲線を折れ線近似したものを使用している。変動応力の影響は(2)式のような重ね合せ法で評価しており、変動温度の影響は、(13)式による温度関数を用いて、重ね合せ法と同様な手法で、温度履歴を考慮した算定を行っている。

$$\alpha = 0.40 + 0.03 T \quad (13)$$

2.4 強度およびヤング率の算定法

第一回年次講演会で既に報告しているように、(1)温度履歴から積算温度を求める、(2)積算温度から圧縮強度を求める、(3)圧縮強度からヤング率と引張強度を算定するという方法を用いている。

2.5 ひびわれ発生の判定基準

応力の解析結果からひびわれ発生の可能性を判定するためには、厳密には、応力の限界値、歪の限界値、およびこれらの確率分布を考慮した破壊基準が必要とされるが、このような破壊基準を定めるのは、現状では困難で

あり、部材内の引張応力の最大値が引張強度を上回る時にひびわれが発生するものとしている。

3 小型模型を用いた実験による検討

3.1 実験概要

内部拘束応力を精度よく測定することは現状ではかなり困難であるが、本研究では、次の二つの方法で内部拘束応力を実験的に求めてみた。方法 (A) : コンクリート部材に内部拘束応力と外部拘束応力とを同時に発生させる。外部拘束応力は、第一回年次講演会で報告しているように拘束材である鋼材のひずみから測定することができる。ひびわれが発生した時、部材内の引張応力の最大値が近似的にその材令での引張強度に等しいと考えれば、引張強度と外部拘束応力との差から内部拘束応力の最大値を求めることができる。方法 (B) : 有効応力計を埋設し内部拘束応力を直接測定する。有効応力計としては東横エルメル (株) 製 GK-200 を使用する。

3.2 実験方法

コンクリートには日本社製の中庸熟セメントを用いた。骨材は大井川産の川砂、川砂利を使用した。配合は、表-1に示すものを用いた。方法 (A) による試験体拘束装置および断熱方法を図-3に示した。試験体は中央部で厚さ10cm高さ45cm、端部で30×45cmの亜鈴状のものを使用した。拘束鋼材としては二種類のH型钢を使用した。これらの鋼材による拘束度Rを標準養生材令28日のコンクリートのヤング率 $E_{c,28}$ を用いて $R=1/(1+A_c E_{c,28}/A_s E_s)$ で定義すると、0.45, 0.69である。また拘束鋼材の中央部には12点のワイヤストレインゲージを貼布し、鋼材の歪変化からコンクリートの外部拘束応力を求めた。方法 (B) による試験体は、図-3に示す方法 (A) の試験体から端部のふくらみと鋼材を取り除いたものであり、他の諸元は、図-3と等しい。試験体の両側面は厚さ10cmの断熱材で覆っており熱の厚さ方向への拡散を防いだ。また試験体の高さ中央部の両側面には、図-3に示すように温床線を配置してあり、これに図-4に示す制御装置を用いて通電し、中央部で最大、上下面で最小となるような放物線状のマスコンクリート相当の温度履歴を与えた。この装置では、ドラム式のプログラム設定器で試験体中央部に与える温度履歴を設定しておき、試験体中央部に埋設した測温抵抗体による測定値と設定温度との差を電圧変換し、温床線に通電している。また試験体中の温度分布は、C-C熱電対により測定した。試験体には、次に示すようなA、B二種の温度履歴を与えた。温度履歴A: 最高温度60℃、室内温度と平衡する材令10日、温度履歴B: 最高温度70℃、室内温度と

平衡に達する材令14日。なお最高温度時の材令はいずれも2日であり試験は、10℃の恒温室で行った。

表-1 コンクリートの配合

M. S. (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
25	12	4.0	50	36.7	159	318	679	1169

3.3 試験結果および考察

温度履歴Bを与えたときの温度の履歴と分布の測定値を図-5に示す。中央部の温度は、設定温度に近いものが得られており、温度の分布も放物線に近いものが得られた。材令2日における中央部と上下面との温度差は、3.3℃となっており、この温度差は、実構造物でもかなりマシな部材に相当する。

図-6は、方法 (A)、温度履歴 (A) による測定結果を示しており、鋼材の歪から測定したコンクリートの外部拘束応力を破線で示した。また図中には、積算温度を考慮して求めた部材中央部の引張強度の発現状況を同時に示した。

この試験体では材令6.8日に鋼材の応力が解放されており、目視によると、高さ方向に貫通するクラックが観察された。方法 (A) によつて内部拘束応力の最大値を求めると、この場合14 kg/cm²となる。表-2に方法 (A) で推定した拘束応力

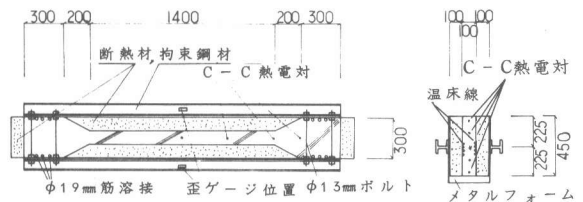


図-3 試験装置 (方法A)

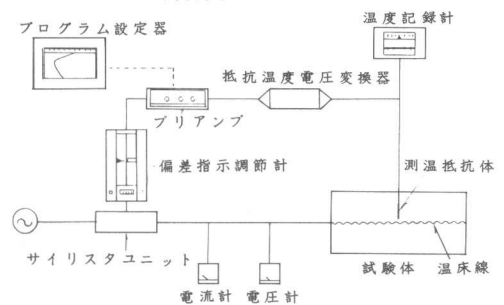


図-4 温度制御装置

とびわれ発生時の材令をまとめて示した。とびわれ発生時の材令は拘束度の大きなものが早い。しかし温度履歴(A)と(B)を比べると最高温度、温度差ともに小さいAの方が早くとびわれが発生している。これはAの方が温度降下速度が早いことに起因しているものと考えられる。表-2に示す結果では、とびわれ発生時の内部拘束応力の最大値は、10~15 kg/cm²程度と考えられ、外部拘束応力に比べて必ずしも無視できない値である。図-7に温度履歴(A)を与えて方法(B)により測定した内部拘束応力を示した。これによると上下の表面部では温度上昇時には引張応力が生じるが温度降下にもなつて圧縮側へ転じている。中央部では逆に圧縮応力から引張応力へ転じている。これは表面部で引張、中央部で圧縮応力が常に作用するとされてきた従来の概念とは異なる。この原因は、温度上昇時には表面部で引張、中央部で圧縮応力が生じるものの、この材令ではヤング率も小さく、クリープも大きいため、応力としては比較的小さいが、温度降下時には相対的に中央部の温度降下量が大きく、ヤング率も大きいため、ある材令からは、表面部では圧縮、中央部では引張応力になることによるものと考えられる。なお、方法(B)の試験体では、A,Bいずれの温度履歴を与えた場合でもとびわれの発生は観察されなかつた。先に述べた表-2のとびわれ発生時の材令の項には本研究で提案した解析方法により求めたとびわれ発生時の材令を観測値とともに示した。解析により求めたとびわれ発生時の材令は観測値と良く一致している。また図-6, 7には、解析により求めた応力の履歴を測定値とともに示した。内部拘束応力の測定は現状ではかなり難しく測定精度にはある程度限界があるが、応力の測定結果と解析結果とは比較的良好に対応しており先に述べた内部拘束応力の分布に関する特性は解析的にも裏づけられる。これらの点から本研究で提案している解析法はマスコンクリートのとびわれ予測に十分適用できるものと考えられる。

4 あとがき

本研究では、内外の拘束を受けるマスコンクリート部材の熱応力を解析するための一方法を提案し、解析法の妥当性を実験的に確認した。またマスコンクリートに生じる内部拘束応力は、温度上昇時には表面部で引張、中央部で圧縮であるが、材令の経過とともに表面部では圧縮、中央部では引張に転ずることを実験と解析の両方で指摘した。これは従来の概念とは異なるものである。本研究で提案する解析法を用いて、かなり広範囲のマスコンクリート構造物のとびわれを予測できるものと考えられるが、ごく初期材令のコンクリートの物性、クリープ特性、とびわれ発生条件等詳細には今後検討する余地のある問題が残されているものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 吉岡, 米沢, 丹原「マッシブなコンクリート部材に生じる拘束応力ととびわれに関する研究」第1回コンクリート工学年次講演会 1979
- 2) ACI 207 Committee, Journal of ACI, July 1973
- 3) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 3rd Ed, 1978
- 4) Rüsck 他, 「コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮」百鳥訳 鹿島出版会 1977

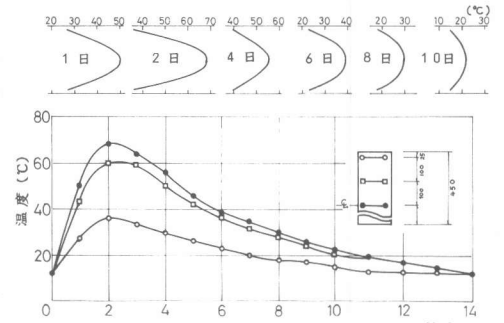


図-5 温度履歴と温度分布(温度履歴B)材令(日)

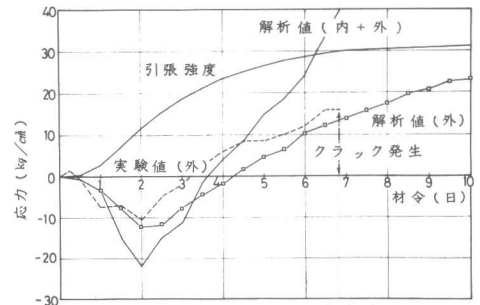


図-6 応力測定結果と解析値(方法A, 温度履歴A)

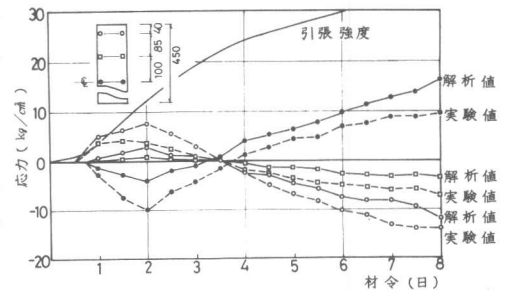


図-7 応力測定結果と解析値(方法B, 温度履歴A)

表-2 とびわれ発生時の材令と拘束応力

温度履歴	拘束度	とびわれ発生材令(日)		とびわれ発生時応力(kg/cm ²)	
		実験	計算	内部拘束応力	外部拘束応力
A	0	発生せず	発生せず	—	—
	0.45	6.8	6.3	14.0	16.0
	0.69	5.6	5.8	9.5	17.5
B	0	発生せず	発生せず	—	—
	0.45	8.0	8.8	17.5	14.5
	0.69	6.1	7.2	8.0	23.5