

竹中技術研究所 ○正会員 吉岡 保孝
同 上 正会員 米沢 敏男
(株) 竹中土木 丹原 利夫

1. まえがき：擁壁、水槽、ボックスカルバートや比較的厚肉の壁部を有する建築物等のコンクリート構造物ではしばしば鉛直方向のひびわれが発生しているのが認められることがある。このようなひびわれの原因は、主として熱伸縮あるいは乾燥収縮にあるものと考えられている。すなわち新しく打設されたコンクリートと既設のコンクリートや岩盤とでは、セメントの水和熱による熱伸縮量、場合によっては乾燥収縮量や外気温による熱伸縮量が異なり拘束応力を生じるためにひびわれが発生する。このひびわれの発生条件に関しては古くから研究されてはいるが、温度上昇時の圧縮応力を無視し、大まかな換算ヤング係数を用いる等の仮定の下に応力の概算が行なわれていることが多い。本報告はマスコンクリートのひびわれ問題説明の一環として、拘束下のマスコンクリートの応力（ひずみ）のクリープ、ヤング係数を考慮した一算定方法及び計算例を示し、考察を加えたものである。

2. マスコンクリートの熱応力計算方法：図-1に示るように、コンクリートと弾性バネからなるモデルを考える。コンクリートがマシブである場合、一般に図-2に示した $T_c(t)$ のような温度履歴を示すが、バネによって拘束されるために、コンクリートに $\sigma(t)$ なる応力が生じることになる。温度上昇は打設直后から生じるために応力算定には、ヤング係数の時間的変化、クリープを考慮に入れる必要がある。時刻 t におけるひずみ $\epsilon(t)$ は初期応力がなく、圧縮・引張のクリープ特性が同じで、重ね合せが成立するものとするとき次式となる。

$$\epsilon(t) = \int_0^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha T_c(t) \quad \dots (1) \quad \left(\alpha: \text{熱膨張係数}, E_0: \text{基準ヤング係数}, \varphi: \text{クリープ係数} \right)$$

モデルの力のつり合いより、 $\sigma(t)A_c + \epsilon(t)A_sE_s = 0$ となるから、両式より次の積分方程式が得られる。

$$\int_0^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha T_c(t) = - \frac{A_c}{A_s E_s} \sigma(t) \quad \dots (2)$$

ここでは Neville が完全拘束下の収縮応力の計算を行なったのと同様の方法で数値解析を行なう。 $E(K_j) = E_j$, $\varphi(T_{i+1/2}, K_j) = \varphi_{ij}$ のように略記し、図-2のように応力、ひずみを与えると(2)式は、(3)式のように変形でき、初期から応力の逐次計算を行なうことができる。

$$\left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi_{ij}}{E_0} + \frac{A_c}{A_s E_s} \right) \cdot \sigma_{i+1/2} = \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi_{ij}}{E_0} \right) \sigma_{i-1/2} - \alpha T_{c,i+1/2} - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_j \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi_{ij}}{E_0} \right) \quad \dots (3)$$

3. 材料定数の取り扱い：まずクリープであるが、このような若材令でのクリープに関する研究は非常に少ない。FIP-CEB国際指針では材令一日からのクリープを与えており、Nevilleはこれに対する近似式を与えている。ここでも、この式($\varphi(T, K) = \varphi_R \cdot 0.132 \ln[(T-K)+1] \cdot 10.28/(5+0K)$)を基本的に行うことにした。さらにマスコンクリートの熱応力の計算には、硬化が熱によって促進されることも加味する必要がある。このため(1)与えられた温度履歴から積算温度 M_j を求め、クリープ式の載荷時材令に関する係数中の K の代りに $M_j/30$ を用い、硬化促進の影響を考慮した。(2)同様に積算温度から圧縮強度 σ_c を求め、この σ_c から ACI の推定式 ($E_c = 1.51 \times 10^4 \sqrt{\sigma_c}$) によりヤング係数を求めた。強度の発現率は図-3に示すように、 $M_j > 30$ では洪博士の提案式を用い、30以下では図のように仮定した。図中に当所での実験値を記入したが設定式とよく一致している。

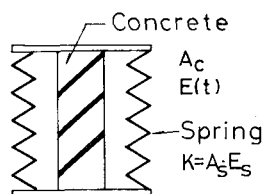


図-1 単純拘束モデル

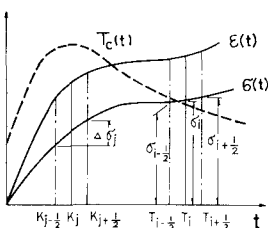


図-2 時間分割

またヤング係数と圧縮強度の関係式も実験値とよい対応を示した。さらに(3)温度が高くなるとクリープも大きくなることを考慮し、当所での実験から若干高めであるが、ある温度 T_c では 20°C の $9N_{20}$ の $T/20$ 倍と仮定した。

4. 計算例と若干の考察：上記の方法を用いて、28日強度が 360 kg/cm^2 $w/c=50\%$ のコンクリート (M_j と E_j の関係が定まる)について、温度履歴および拘束係数 $[R=1/(1+A_c E_c/A_s E_s)]$ を種々に変化させて拘束応力の計算を行なった。図-4は計算に用いた温度履歴を示したもので、打ち込み温度、最終安定温度は 20°C とし、実験結果や差分式による計算を参考にして5種類の履歴曲線を選んだ。クリープ係数はマスコンクリートでは小さいと思われるが、ここでは3.0と仮定した。

図-5, 6は計算結果の一例を示したものである。いずれの場合にも初期にかなり大きな圧縮応力が作用し、最高温度に達した後は徐々に減少する。また最終温度が打設温度を下回ることがなくても、(1)式を用いるとやはり初期の圧縮応力より大きい引張応力が作用することがわかる。図-5によると温度降下速度が緩やかであるほど当然最大拘束引張応力の発生時期が遅くなり、またその値もわずかであるが減少しており、強度の伸びを考えるとひびわれの危険性も減少することがわかる。図-6によると発生する引張応力は、温度上昇値が10, 20, 30と大きくなるに従って増すが、必ずしも正比例はしていないことがわかる。図-7は温度変化とひび開きの関係の計算例を示したものである。拘束度が高いと初期にはひび開きがほとんど現れないが、次第に伸びを示し、最高温度に達した後ほぼ直線的に減少してゆくことになる。図-8は2ヶ所の実構造物でカルソンひび開き計を用いたひび開きの測定結果を図-7に対応して示したものである。ここでは打設後5~6時間をひび開きの起発としている。ひびわれ発生が少し前までは計算結果と類似のひび開き変化を示していることがわかる。以上に述べた外的な拘束による応力の外、マスコンクリートでは表面と中央部の温度差による応力が付加される。この応力は、(1)式のひび開きが表面と中央で等しく、応力比は2:1であるとするときと近似的に求めることができる。図-9に、温度差の履歴が図-4, No.3と対応する場合の計算結果を示すが、従来言われているように表面部にのみ引張応力が作用するのではなく、中心部でも後期に引張応力が作用することを示している。

5. おわりに：以上にマスコンクリートのひびわれ問題の解明の一助として、拘束下のマスコンクリートに生じる計算方法と計算例を示したが、いくつかの興味ある結果が得られた。しかしクリープ係数を文献から仮定した単純モデルでの計算であり、実構造物に適用するには計算結果を実験的に確認しておく必要がある。この上での本計算方法を基に、さらにマスコンクリートのひびわれ問題について検討を進める予定である。

図-7 温度変化とひび開きの関係 図-8 構造物のひび開き測定結果 図-9 不均一温度分布による応力

