

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)
 正会員 円原 利夫 ((株)竹中土木)

1. はじめに

擁壁，タンク，水槽，隧道およびマッシブなコンクリート部材を有する建築物等では、主として施工中に鉛直方向のひびわれが認められることがある。このように比較的早期に発生するひびわれの原因は、セメントの水和熱による温度の上昇，降下に伴う熱伸縮ひずみが、既設のコンクリートや岩盤により拘束されることにあるものと考えられる。このようなひびわれの防止対策として、低発熱性のセメントを用いること、セメント量を減ずることやクーリングを行なうこと等が古くから提案されているが、これらの対策を定量的な意味で具体化する場、これらの対策の効果や限界を評価できる検討システムを確立する必要がある。このためには解明すべき問題も多いが、本研究は、マッシブな部材が外的に拘束された場合に生じる拘束応力計算方法、およびひびわれ発生の可能性の判定方法を提案するとともに、この計算方法と拘束モデルによる実験結果や実構造物での測定結果と比較することによつて、計算法の妥当性を検討したものである。

2. 温度応力算定方法

マッシブな部材に生じる温度の分布および経時変化は熱拡散方程式を適当な材料定数や境界条件のもとで解くことにより比較的精度よく求めることができる。実構造物での測定結果と、作成した差分方程式による熱解析プログラムによる計算結果とはよく一致することを確認しているが、得られた温度履歴から応力を求める場合にはヤング係数の変化、クリープ、拘束度等を考えた計算方法が必要となる。

A C I 207 委員会報告¹⁾では、打設ブロックが一様に収縮するのを底面において拘束した場合に生じる応力の分布は、ブロックの長さ(L)と高さ(H)の比 L/H によつて異なるが、生じる最大応力は L/H には関係なく次式で与えている。

$$\sigma t = \alpha \cdot \Delta T \cdot E_c / (1 + A_c E_c / A_s E_s) \dots\dots (1)$$

ここに α : コンクリートの線膨張係数、 ΔT : 温度降下量、 A_c, A_s : 打設ブロックおよび拘束体の断面積、 E_c, E_s : 打設ブロックおよび拘束体のヤング係数である。ただし拘束体が岩盤や大きな底盤のような場合には A_s の有効面積としては $2.5A_c$ としており、この場合は森の解析結果²⁾と一致している。すなわち、ひびわれ発生の可能性は(1)式で求まる最大拘束応力と引張強度とを対比して求めることができる。(1)式は拘束体の剛性 $A_s E_s$ を有するバネが、新しく打設したマッシブなコンクリートの熱変形 ($\alpha \cdot T_d(t)$) を拘束する図-1 のモデルの解と等価である。ただし、このモデルのコンクリートのヤング係数は時間的に変化することおよびクリープを考慮する必要がある。

このモデルに時刻 t において生じるひずみ $\epsilon(t)$ は、初期応力がない場合には次式で与えられる。

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

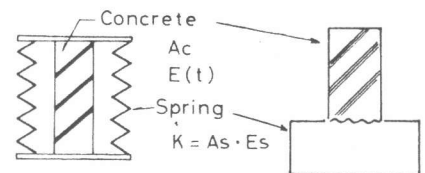


図-1 解析モデル

ここに E_0 は基準の28日材令におけるヤング係数であり、また $\varphi(t-\tau)$ は材令 τ で載荷したときの t におけるクリープ係数である、モデルの力のつりあいより次式が成立する。 $\sigma(t)A_c + \epsilon(t)A_s E_s = 0 \dots\dots (3)$

(2)、(3)式より次の積分方程式が得られ、これを数値解析法で解くことにより、温度変化 $T_c(t)$ に伴う拘束応力を解くことができる。

$$\int_0^t \frac{d\sigma(t)}{d\tau} \cdot \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha T_c(t) + \frac{A_c}{A_s E_s} \sigma(t) = 0 \dots\dots (4)$$

3)

ここでは Neville が収縮応力の計算で用いたのと同じ手法で、逐次計算により解くこととした。すなわち図-2に示すよう時間を区切り $E(Kj)=Ej$, $\varphi(Ti+\frac{1}{2},Kj)=\varphi ij$ のように略記すると、(4)式は次式となり、さらに、(5)式を書き換えると、(6)式の逐次計算しやすい型に表わすことができる。

$$\sum_{j=1}^i \left[\Delta \sigma_j \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi ij}{E_0} \right) \right] + \alpha T_c \cdot i + \frac{1}{2} + \frac{A_c}{A_s E_s} \sigma_{i+\frac{1}{2}} = 0 \quad \dots (5)$$

$$\left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi ij}{E_0} + \frac{A_c}{E_s A_s} \right) \sigma_{i+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi ij}{E_0} \right) \sigma_{i-\frac{1}{2}} - \alpha T_c \cdot i + \frac{1}{2} - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_j \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi ij}{E_0} \right) \quad \dots (6)$$

(5)式をコンピュータを用いて解けば、比較的簡単なプログラムで、拘束応力の進展を求めることができる。

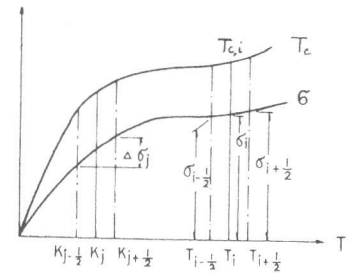


図-2 メッシュ分割

材料定数を定めるにあたっては、マッシブな部材中では水和熱による自己加熱のために、水和が促進されることを加味する必要がある。このためマチュリティの考えを取り入れ、ヤング係数については、(1)熱解析により求めた温度履歴から任意材令のマチュリティを求める。(2)これをもとに、圧縮強度の進展を求める。(3)ACI式のような圧縮強度とヤング係数の関係式からヤング係数を求めるの順に推定することとした。ひびわれに関連する引張強度も(2)の圧縮強度との関係で求めるものとする。クリープについては CEB-FIP⁴⁾の考えにもとずき、クリープをフローと遅延弾性の和とし、載荷時材令はマチュリティより求まる有効材令を用いること、フローの進行度は仮想厚が1.6mのものを用いること、若材令期は算定図から外挿して求めること等、マッシブな部材に近い値が得られるよう配慮した。

2 材料定数に関する実験

2.1 目的および方法：本実験は上述のような材料定数の算定法のうち特に比較的若材令を含む算定法を明確にするために行なったものである。コンクリートの配合は表-1に示すようにW/Cは50%とし、普通セメントコンクリート(NP)と中庸熱セメントコンクリート(MP)の2種とした。脱型が可能な材令8時間からのコンクリートの圧縮、割裂引張強度およびヤング係数の伸びを測定し

表-1 コンクリートの配合

| セメントの種類 | 最大寸法 (cm) | スラック (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------|-----------|-----------|---------|------------|----------|--------------------------|------|-----|----------|----|
| | | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 (AE) | |
| 普通 | 25 | 12 | 4.0 | 50.0 | 36.7 | 159 | 318 | 679 | 1169 | 96 |
| 中庸熱 | 25 | 12 | 4.0 | 50.0 | 36.7 | 159 | 318 | 679 | 1169 | 96 |

た。供試体は材令3日までは、温度20℃、湿度85%の恒温室内で養生し、以後は標準水中養生とした。

2.2 結果および考察：図-3にマチュリティと圧縮強度

進展率(28日強度に対する強度比率)の関係を示す。図中の実線は洪による強度発現推定式を示している。本実験では特にMPがやや早期強度の発現が大きい、ほぼ実測値と一致しており、セメント種別や水セメント比をパラメータとしている洪式は解析する上で便利であるので基本的に用いることにした。ただし洪式ではマチュリティが20以下で適用できないこともあることを考え、30以下では図中の破線に示した補正を行なうこととした。拘束応力の算定値に寄与するヤング係数の影響は非常に大きいので、各材令におけるヤング係数を正確に推定する必要がある。図-4に本実験で得られた結果を、ACI等に示されている算定式と対比して示す。これによるとACI式 ($E_c = 1.51 \times 10^4 \sqrt{f_c}$)は、実測値と比較して低く見積る傾向にあることが認められる。旧CEB-FIP式 ($E_c = 2.1 \times 10^4 \sqrt{f_c}$)は、実測値とよい対応を示しているが、強度が大きいと過大となる傾向にある。この点についてはさらに多くのデータで確認する必要があるが、ここでは次の回帰式を用いることとした。

$$E_c = -2.7 - 3.84 \log \sigma_c + 7.21 (\log \sigma_c)^2, (\times 10^3) \dots (7)$$

圧縮強度と引張強度の関係について検討した結果、若材令

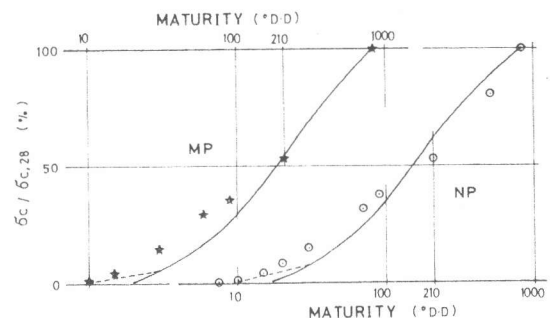


図-3 マチュリティと強度発現率の関係

期までヤング係数の場合と同じように連続性が認められるが、ACI 207 委員会提案式 ($\sigma_t = 1.78\sqrt{\sigma_c}$) は初期強度を過大に評価することがわかり、ここでは *bi-linear* な直線式で表わすこととした。

3 一軸拘束モデル実験

3.1 目的および方法：先述の計算方法の妥当性を確認するため、乾燥収縮拘束実験と同様の手法を取入れた比較的小型の拘束モデルで応力変化を測定し、計算値との比較を行なった。

拘束試験装置は図-5に示すように、コンクリートの中心部 (20×20cm) を発泡スチロール製断熱材で囲むことにより、水と熱の逸散を減少させ、マッシブな部材に近い温度履歴を与え、この変形を鋼材で拘束するものである。鋼材にはひずみゲージを貼布し、コンクリートの応力はひずみの測定値から力のつり合いにより求めた。鋼材とコンクリートのすべりを防止するために、端部での接触面積を大きくするとともに、すべり止め筋を溶接した鉄板とコンクリート部をボルトで緊着させた。拘束鋼材の断面積を3種に変化させた。(コンクリートのヤング係数を材令28日で定めた場合、拘束度 R は 0.16, 0.38, および 0.71 となる)、また使用するコンクリートは2で用いたものと同配合とし、打込み温度は 15℃ および 30℃ を目標とした。

3.2 試験結果および考察：図-6に埋設した熱電対によって測定した被拘束部分のコンクリートの温度履歴を示す。このように断熱材のみで、マッシブなコンクリート部材に近い温度履歴を与えることができる。この図より最高温度はMPの方が低く、応力低減上有利であることがわかる。

図-7, 8に、NP-18.5 および MP-30.0 の拘束応力実測値 (破線) および、図-6の温度を用いて先述の方法で求めた拘束応力の計算値 (実線) を示す。実測値についてみると、初期に圧縮応力が作用するが、温度降下とともに大きな引張応力が作用するようになり材令7日程度で平衡に達している。この時の応力は拘束度が大きいほど、打込み温度が高いほど、またMPよりもNPの方が大きく

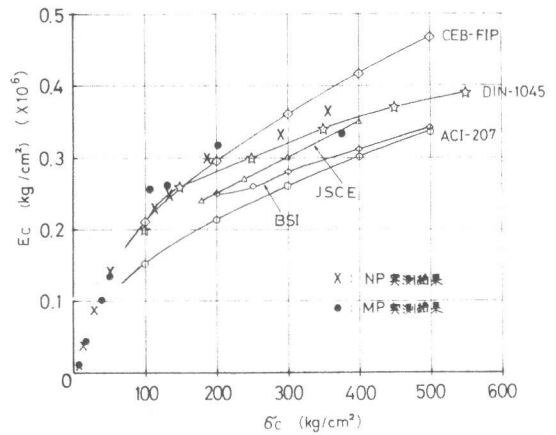


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

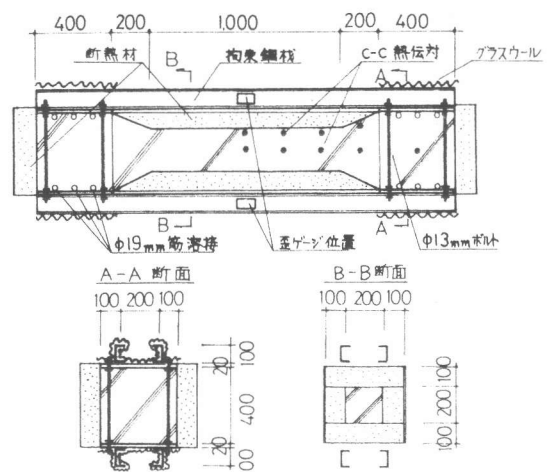


図-5 拘束実験装置

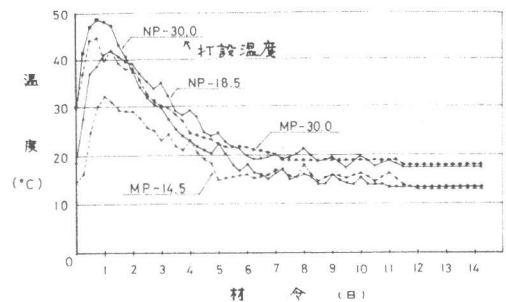


図-6 温度履歴測定結果

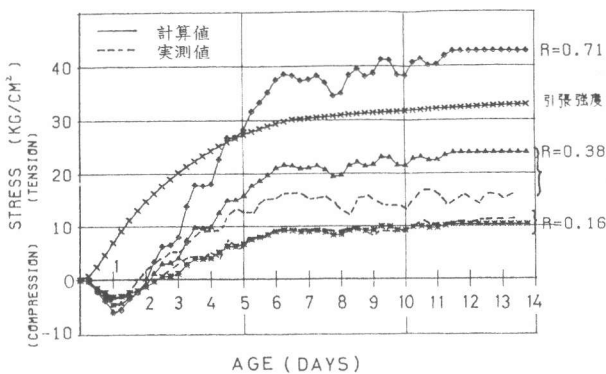


図-7 応力履歴の計算値と実測値の比較 (NP-18.5)

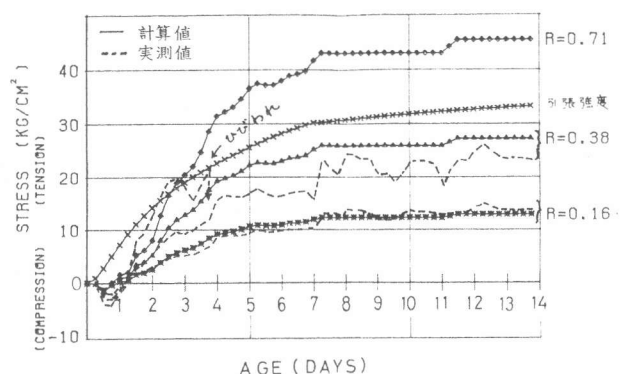


図-8 応力履歴の計算値と実測値の比較 (MP-30.0)

なることが認められる。拘束度が0.71と大きいものは、材令4日でひずみが解放されており、ひびわれが生じたことを示している

計算値と実測値とを比較すると、応力の進展特性も一致し、よい対応を示していることがわかる。図-9は各試験体の任意材令における拘束応力と実測値の関係を示したものである。これによると応力の推定精度は、セメント種別、打設温度および材令による差異はみられず、全体を平均すると実測応力は計算応力の約90%であった。しかし拘束度0.38のものは、0.16に比べて明らかに推定精度が低いことがみられる。またひびわれの発生時期は計算では約3日となり実測値と若干ずれがみられたり、計算ではひびわれが入ることになるが、実際にはみられなかつた例(NP-30.0でR=0.38の場合)もある。これらのこと

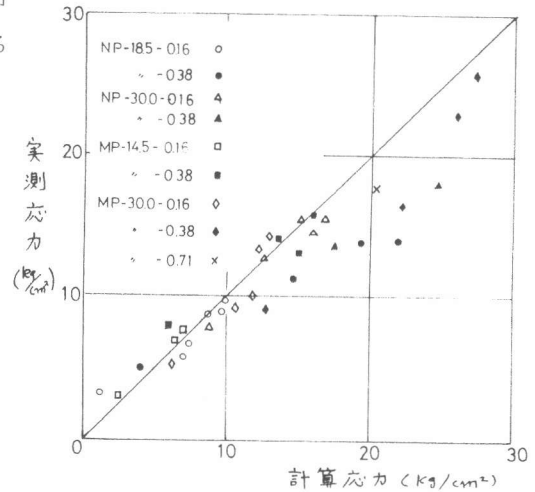


図-9 拘束応力の比較

から、計算におけるクリープの取り扱いや引張強度の仮定になお検討すべき問題は残されてはいるが、ひびわれ発生判定に若干の幅をもたせれば、現状でも十分に実用に供しうるものと考えられる。

4. 実構造物でのひびわれ観測結果との対応

表-2 実構造物での観測結果と計算結果の比較

表-2には、厚肉の壁体を有する実構造物でのひびわれ観測結果と、拘束応力および引張強度の関係から予想される計算結果とを対比して示したものである。これによると全般的にはよい対応を示しているが、ひびわれの発生時期は実際に観測されたものの方がやや早い傾向があることや、計算上では発生しないが、拘束応力が引張強度に近い場合には発生していることがあること等から、計算結果はやや危険側の判定を下しているものと思われる。この原因は計算上の仮定の他に、本計算方法では部材内の不均一温度分布による内部拘束応力を含めず、外部拘束応力のみについて計算を行なっていることが考えられる。

| 構造物 | 概要 | 観測結果 | 計算による予測結果 |
|--------|----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 厚肉外壁 | 基礎版上に1.2m厚の壁を打設 | 材令8日にひびわれ発生(ひずみ計による) | 材令10日にひびわれ発生 |
| 水路仕切壁 | 基礎版上に底面幅1.4m、高さ1mの台型ハンチを打設 | 材令4日にひびわれ発生 | 材令4日では引張強度が計算応力より6%大きくひびわれは生じない |
| | 同上にパイプクーリングを実施 | ひびわれ認められず | ひびわれ発生せず約10%の余裕あり |
| | 底面幅2.2m、高さ1.5mのハンチを打設 | 材令5日にひびわれ発生 | 材令8日にひびわれ発生 |
| 箱型隧道中壁 | 底版上に80cm厚の壁を打設、冬期 | ひびわれ認められず | ひびわれ発生せず約5%の余裕 |
| | 同上、秋期施工 | 脱型時(材令8日)にひびわれ確認 | ひびわれ発生せず、しかし2%の余裕しかない |

5. あとがき

本研究により、マシブな部材に生じるひびわれ発生を防止するための対策の効果や限界を定量的に評価することに対し、一段階を経たものと考えている。しかし、より正確に評価するには内部拘束応力等さらに検討すべき点があり、現在実験を継続中である。またこの種のひびわれは経済的な理由で大規模な対策がとりにくいため⁶⁾に避けられない場合も多く、ACIやBSのようにひびわれ幅を鉄筋や目地により有害でない範囲に制御する方法についても研究を進める必要があり、今後のより広い研究が期待される。

参考文献

- 1) ACI 207 Committee, Jour of ACI, July, 1973
- 2) 森忠次, 土木学会論文報告集, 昭和38年7月
- 3) A. M. Neville, "Creep of Concrete", 1970
- 4) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 3rd Ed, 1978
- 5) 洪, 長島, "寒中コンクリート", 技術書院, 1968
- 6) BS5337, "Code of practice for the structural use of concrete for retaining aqueous liquids", 1976