

論文

[1147] マスコンクリートの温度応力へのクリープの影響に関する研究

正会員 梅原秀哲 (名古屋工業大学社会開発工学科)

正会員○北川善己 (名古屋工業大学大学院)

正会員 吉田弥智 (名古屋工業大学)

1. まえがき

マスコンクリートの温度応力問題では、現在のところ、解析手法として有限要素法等を用いて温度応力を推定することが可能となっている。しかし、若材令時のコンクリートの応力-ひずみ関係に関しては、時間の経過に伴う弾性係数の増加およびクリープその他による応力緩和の影響の両者を考慮し、さらにこれが温度履歴や材令に大きく依存していることを的確に表す解析モデルの提案や研究例も十分とはいえない。

そこで本研究では、若材令時のコンクリートのクリープ特性の把握を目的として、若材令のコンクリートを対象としてクリープ試験を行い、粘弾性レオロジーモデルによるクリープ構成式の評価を行った。さらに温度応力の計測を行った鉄筋コンクリート橋脚基礎フーチングを対象として、クリープを考慮した温度応力解析(以下クリープ解析と略記)を行い、実測結果との比較検討を行った。

2. 実構造物における温度応力の計測

本研究において温度応力の計測を行った構造物は、図-1に示すような底面が15.5×14.5m、高さが3.5mの鉄筋コンクリート橋脚基礎フーチングである。実際の施工においては、フーチングを同一高さの2リフトに分割し、第1リフトのコンクリート打込み終了1日後に第2リフトのコンクリートを打込んだ。また温度応力の計測点は、図-1に示すようにそれぞれのリフト内に各3点ずつ、計6点設置した。各測点において、温度、応力、ひずみをそれぞれ測定し、さらにフーチング周辺部における外気温も測定した。なお、応力およびひずみの測定は、フーチングの長辺方向に行った。施工時期は4月下旬で、表-1に示す配合のコンクリートを約22℃で打ち込んだ。セメントは普通ポルトランドセメントを使用している。

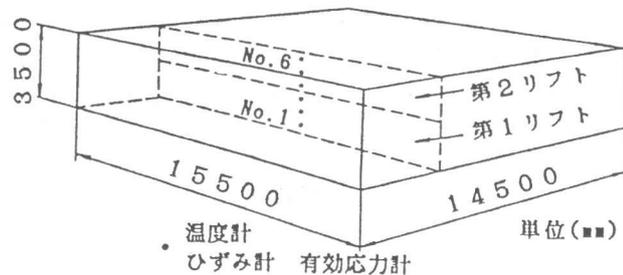


図-1 フーチングの概要

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
40	8.0	4.0	149	276	691	1204

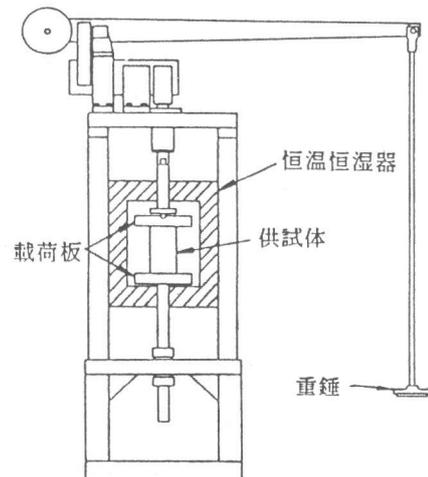


図-2 クリープ試験機

3. 若材令コンクリートのクリープ試験

3.1 試験概要

本研究で用いたクリープ試験機の概要を図-2に示す。

試験機はレバー比1:40のてこ式圧縮クリープ試験機であり、最大荷重は5000kgfである。またこの試験機は、温度および湿度が自由に設定可能な恒温恒湿器を備え、その内部に供試体を設置して試験を行うことが可能である。試験に使用した供試体はφ10×20cmの円柱供試体であり、フーチングと同じ材料、同じ配合のコンクリートを用いて作製し、内部に埋め込み型ひずみ計および熱電対を埋め込んだ。なお、供試体の乾燥収縮を防ぐため、供試体表面に厚さ0.05mmのアルミテープを貼り、恒温恒湿器内部の湿度を100%に設定して試験を行った。試験はコンクリートのクリープに影響を与える要因として、温度および荷重材令の影響に着目して行った。

3.2 試験結果および考察

温度の影響に関する試験は供試体温度を20、40、80℃の3種類とし、材令1日で圧縮応力として10kgf/cm²を載荷した後、5日間にわたってひずみの計測を行った。載荷応力比は約25~30%である。図-3~5に各温度における試験結果を示す。各グラフにおける横軸は荷重載荷後の経過時間、縦軸は単位載荷応力当たりのクリープひずみであるクリープ・コンプライアンスJ(t)である。J(t)は次式で表される。

$$J(t) = \frac{\text{クリープひずみ}}{\text{載荷応力}} \quad (1)$$

このクリープ・コンプライアンスを用いたのは、クリープ破壊を起こさない程度の応力の範囲内では、クリープひずみは載荷応力の大きさに比例するというDavis-Glanvilleの法則が成り立つものと仮定すると、クリープ・コンプライアンスJ(t)を用いてあらゆる応力に対するクリープひずみを記述することが可能となるからである。

これらの図からわかるように、載荷時間5日における40℃の場合のクリープ・コンプライアンスは20℃の場合に比べ約1.3倍、80℃の場合は20℃の場合の約1.8倍であり、供試体温度が高くなるほどクリープひずみが励起されることが明らかとなった。

また載荷材令の影響に関する試験は、供試体温度を40℃とし、材令3日で圧縮応力として10kgf/cm²を載荷した。図-6に試験結果を示す。図から明らかなように、載荷材令3日の試験結果

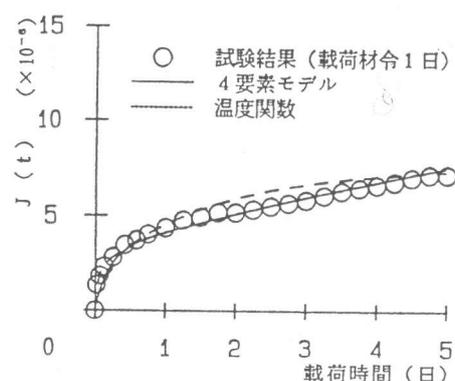


図-3 クリープ試験結果 (20℃)

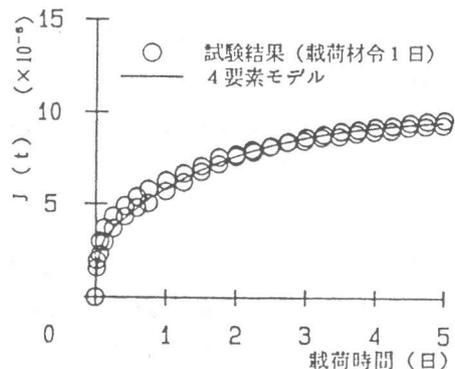


図-4 クリープ試験結果 (40℃)

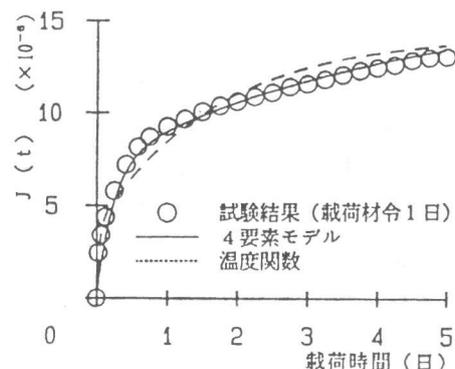


図-5 クリープ試験結果 (80℃)

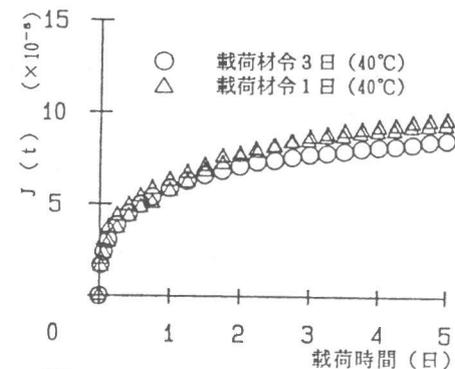


図-6 クリープ試験結果
(載荷材令の影響)

は、載荷時間が1日までは載荷材令1日の場合と大きな差異はなく、その後は載荷材令1日に比べ少し下回っており、載荷材令が遅くなると終局クリープひずみは減少するものと思われる。

3.3 クリープ構成式

コンクリートのクリープ特性に関する研究はこれまで数多くなされているが、若材令時のクリープ特性に関しては研究例が少ない。そこで今回の試験結果に対して粘弾性レオロジーモデルを適用し、若材令コンクリートのクリープ構成式について検討を行った。

粘弾性レオロジーモデルは、弾性ばねと粘性ダッシュポットの組み合わせによって表現される。基本的レオロジーモデルとして Maxwellモデルと Voigtモデルがあるが、これらのモデルだけでは実際の材料における複雑なクリープ現象を表現することができないため、これら2つのモデルを複数個結合し、一般化モデルに拡張することがしばしば行われる。クリープ現象は応力に対するひずみの応答であり、それを記述するには Maxwell要素と複数個の Voigt要素を直列結合した一般化 Voigtモデルが適しているが、温度応力のクリープ解析ではクリープひずみのみが必要である。弾性ひずみ成分を除いた一般化 Voigtモデルに対して、単位ステップ応力 $\sigma(t) = 1$ が作用したときのひずみの応答は次式で表される。

$$\varepsilon(t) = \frac{t}{\eta} + \sum_i C_i (1 - e^{-t/T_i}) \quad (2)$$

ここに、 t : 時間 (日) η : 緩和粘性係数
 C_i : コンプライアンス T_i : 遅延時間

(2)式において i を大きくすれば、より複雑なクリープ現象を表現し得ると考えられるが、モデルが複雑になればクリープ構成式中のパラメータ数が多くなり、実用面に適さない。一般的に用いられるのは $i = 2$ 程度までのものが多いため、今回の温度の影響に関するクリープ試験結果に対し、 $i = 2$ までの種々のモデルについて検討を行った。その結果、図-7に示す Voigt要素を2個直列結合した4要素モデルが、図-3～5に示すように、試験結果と最もよい一致を示すことが明らかとなった。なお、供試体温度が40°Cの場合のクリープ・コンプライアンスは次式で表される。

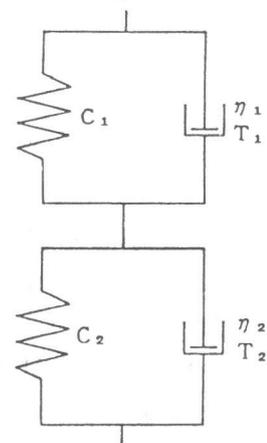


図-7 4要素モデル

$$J(t) = \{ 2.696 (1 - e^{-24.7t}) + 7.199 (1 - e^{-0.575t}) \} \times 10^{-6} \quad (3)$$

ところでコンクリートのクリープでは、温度によってクリープひずみが励起されること、および載荷材令が進むにつれてクリープひずみが減少することの両者を考慮する必要があり、クリープ構成式をできるだけ簡易にしなければならない。そこで、まず温度の影響は、(3)式のクリープ曲線を基準とし、温度 T (°C) の一次関数である温度関数 $\phi(T)$ を (3)式に乗じることによって表すこととした。 $\phi(T)$ は図-8に示すように、温度の影響に関するクリープ試験結果より

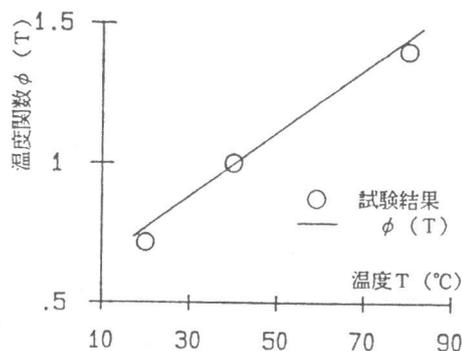


図-8 温度関数

最小二乗法を用いて求め、次式が得られた。

$$\phi(T) = 0.0112T + 0.552 \quad (4)$$

(4)式を(3)式に乗じて求めたクリープ曲線をクリープ試験結果と比較した結果、図-3と図-5に示すように、ほとんど試験結果と一致することが明らかとなった。

また荷材令の影響は、荷材令28日のクリープ式を基準とした荷材令係数 $\xi(\tau)$ を用いることが一般的であるが、今回の試験の荷材令が1日と3日の2種類であること、および若材令コンクリートのクリープはきわめて大きいので、荷材令1日のクリープ曲線を基準とした方がより実際に近い挙動を表し得ると考えた。しかし、今回の試験結果のみでは荷材令係数を求めることができないため、CEB-FIP Model Codeを参考にし、荷材令1日の荷材令係数を28日のその1.8倍と仮定し、荷材令 τ (日)の常用対数の一次関数である次式を求めた[1]。また求めた荷材令係数を図-9に示す。

$$\xi(\tau) = -0.307 \log \tau + 1.0 \quad (5)$$

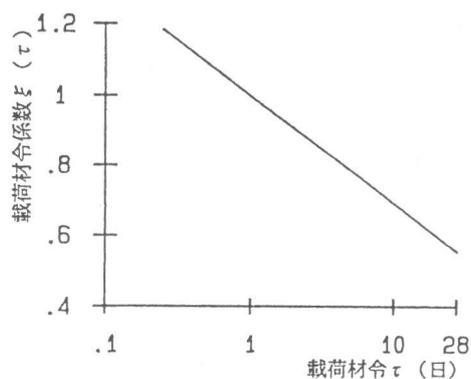


図-9 荷材令係数

4. 温度応力解析

4.1 解析手法

温度応力のクリープ解析は、二次元有限要素法を用いた初期ひずみ法を適用し、クリープひずみ増分は状態方程式法により求めた[2]。状態方程式法は、ある時刻におけるクリープひずみ速度がその瞬間における状態量(応力や時間)に依存すると考え、塑性変形問題におけるひずみ増分理論と同様に、クリープひずみ速度が偏差応力に比例すると仮定する。したがって、クリープひずみ速度は次式で表される。

$$\dot{\epsilon}_{1j}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^c}{\bar{\sigma}} \sigma_{1j}' \quad (6)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_{1j}^c$: クリープひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}^c$: 相当クリープひずみ速度
 σ_{1j}' : 偏差応力 $\bar{\sigma}$: 相当応力

本研究では相当クリープひずみ速度として、大崎らが提案した次式を用いた[3]。

$$\dot{\bar{\epsilon}}^c = \xi(\tau) \phi(T) \dot{j}(t) \bar{\sigma} \quad (7)$$

4.2 解析結果

温度解析は、図-10に示すモデルに二次元有限要素法を適用して解析を行った。なお、コンクリートの断熱温度上昇量以外の熱特性値はすべて、土木学会コンクリート標準示方書(以下示方書と略記)に示された値を用いた[4]。コンクリートの断熱温度上昇量は、断熱温度上昇試験を

行い、次式で表される断熱温度上昇量 $Q(t)$ ($^{\circ}\text{C}$) の算定式が得られた。

$$Q(t) = 44(1 - e^{-0.80t}) \quad (8)$$

ここに、 t : 材令 (日)

一例として測点No. 4の温度の解析結果と実測結果を図-11に示す。図からわかるように両者はよく一致している。また他の測点においても同様のことが言え、この温度解析結果は応力解析に際して、十分な精度を有しているものと考えられる。

また応力解析では、コンクリートの弾性係数として、フーチングと同じ材料、同じ配合で作製したコンクリート供試体に、フーチング内部と同一の温度履歴を与えて測定した弾性係数を、積算温度の常用対数の一次式で表した評価式を用いて各要素ごとに求めた。求めた評価式は次式で表される。

$$E_c(M) = \begin{cases} 2.451 \log_{10} M - 5.28 & (200 < M \leq 1000) \\ 0.941 \log_{10} M - 0.78 & (1000 < M \leq 23000) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 E_c : コンクリートの弾性係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)
 M : 積算温度 ($^{\circ}\text{Chr}$)

なお引張弾性係数は、今回実験を行っていないので、圧縮弾性係数と等しいと仮定した。

応力解析は、クリープ解析とクリープを考慮しない弾性解析および示方書に示された有効弾性係数を用いた弾性解析の3種類で、図-10に示すモデルに二次元有限要素法を適用して解析を行った。示方書に示された有効弾性係数は、圧縮強度の関数として次式で表される。

$$E_o(t) = \begin{cases} 1.1 \times 10^4 \sqrt{f_c'(t)} & (\text{材令3日まで}) \\ 1.5 \times 10^4 \sqrt{f_c'(t)} & (\text{材令3日以降}) \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 $E_o(t)$: 材令 t 日のコンクリートの有効弾性係数 (kgf/cm^2)
 $f_c'(t)$: 材令 t 日のコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)

なおクリープ解析において、引張クリープ特性は今回の試験が圧縮のみであることから、圧縮クリープ特性と等しいと仮定して解析を行った。

一例として、図-12, 13にそれぞれ測点No. 1とNo. 4の応力の解析結果と実測結果を示す。図より、クリープ解析結果がクリープを考慮しない解析結果よりも約30%小さくなっている。他の測点においても同様の傾向が見られ、クリープ解析結果はクリープを考慮しない解析結果よりも約

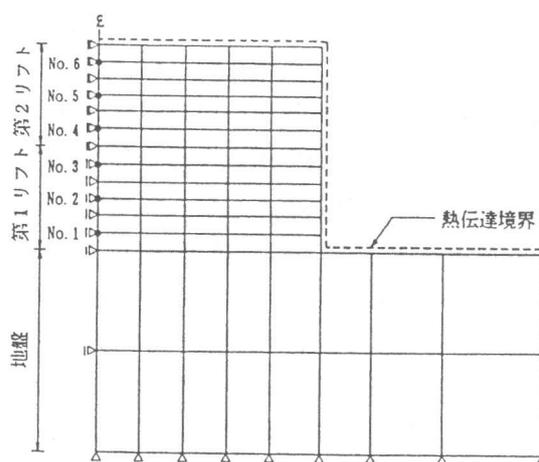


図-10 要素分割図

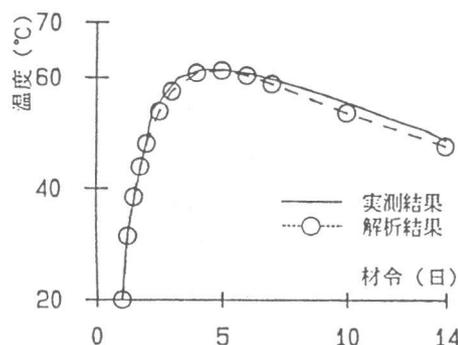


図-11 温度解析結果 (測点No. 4)

20~50%小さくなり、クリープによる応力緩和の影響が非常に大きいことが明らかとなった。また示方書に示された有効弾性係数を用いた解析結果は、クリープ解析結果と比べ、他の測点を含めた全体的な傾向として約30~50%応力が小さくなっており、実測値よりも小さな値となっている。したがって、実測を行った構造物では、示方書に示された有効弾性係数を用いて応力解析を行うと、実際に発生する応力を過小評価する危険性があることが明らかとなった。また実測結果とクリープ解析結果を比較すると、測点No.1では、解析結果はコンクリート打込み直後から引張応力が増大する傾向をよく表しているが、材令8日までは実測結果よりもかなり大きな値となっている。測点No.4では、材令2日から9日頃までは解析結果が実測結果を少し上回っているが、両者はその傾向がよく一致している。他の測点を含めた全体的な傾向として、圧縮応力の範囲内では実測結果と解析結果はよく一致しているが、引張応力は実測結果を過大評価する傾向が認められる。

一般的にコンクリートの圧縮クリープ特性と引張クリープ特性は異なると言われており、今回の解析では両者の違いを考慮していないため、このような結果になったものと考えられる。したがって解析においても、圧縮と引張の違いを考慮する必要があると思われ、今後の研究課題としてさらに検討すべきである。

5. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 若材令コンクリートのクリープ特性に与える温度の影響に関して試験結果より、載荷材令5日における供試体温度が40℃の場合のクリープ・コンプライアンスは、20℃の場合に比べ約1.3倍、80℃では20℃の場合の約1.8倍となることが明らかとなった。
- 2) 載荷材令1日の若材令コンクリートのクリープ構成式として、Voigt要素を2個直列結合した4要素モデルが試験結果と最もよく適合することが明らかとなった。
- 3) 温度応力の計測を行った構造物を対象として、積算温度によって評価した弾性係数を用い、4要素モデルを基にして提案したクリープ構成式を用いて温度応力解析を行った結果、クリープを考慮しない弾性解析に比べ、応力が約20~50%軽減され、圧縮応力が作用する範囲内で実測結果を精度よく推定できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structure, 1978
- 2) 宮 建三・矢川元基: 原子炉構造工学、東大出版会、1976.10
- 3) 大崎幸雄・吉川弘道・河田秋澄: マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討、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論文集、1982.8
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(施工編)、1986.10

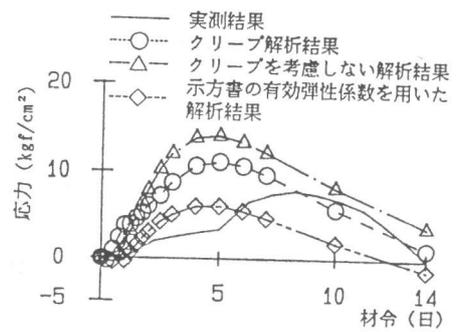


図-12 応力解析結果(測点No.1)

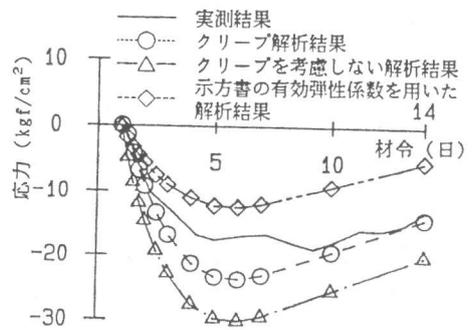


図-13 応力解析結果(測点No.4)