

論文

[1190] クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究

野村幸広^{*1}・上原匠^{*2}・梅原秀哲^{*3}

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を考慮し、さらにこれら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。

著者らは、これまでに圧縮クリープ試験結果を基にクリープを考慮した温度応力解析を行い、圧縮応力が作用する範囲内では実測結果を精度よく推定できるが、圧縮クリープ試験結果を引張応力側に適用した場合、実測値を過大評価する傾向にあることを明らかにしている[1]。

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、若材令時のコンクリート圧縮クリープ試験に加え、引張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を構築した。さらに、温度応力の計測を行った鉄筋コンクリートボックスカルバートを対象として、クリープを考慮した温度応力解析を行い、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

図-1に示す鉄筋コンクリートボックスカルバートを対象に温度応力の計測を行った。本構造物は図に示すように、下床版部、下壁部、上壁部およびスラブの3リフトに分けて施工された。打込み時間間隔は1ヶ月である。表-1に壁部の配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、打込み温度は19℃である。温度応力の計測点はひびわれの生じやすい下壁部で、2点である。

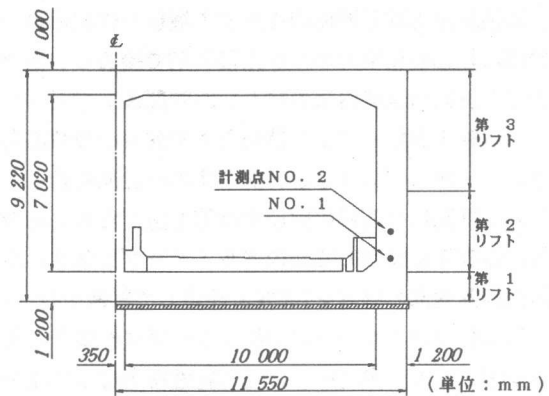


図-1 対象構造物概要図

3. 若材令コンクリートのクリープ試験

3.1 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は文献[1]と同じ装置を用いた。そして、ボックスカルバートと同じ材料、同じ配合のコンクリートを作製し、試験を行った。図-2に

表-1 配合表

| スラブ (cm) | W/C (%) | Air (%) | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | 湿和剤 (g/m ³) |
|-------------|------------|------------|----------------------------|-----|-----|------|----------------------------|
| | | | W | C | S | G | |
| 8 | 56 | 4.0 | 157 | 281 | 835 | 1010 | 880 |

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)
 *3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph.D. (正会員)

文献[1]の結果とともに今回の試験結果を示す。試験条件は供試体温度40℃、湿度 100%、載荷材令は材令1日である。コンクリートのクリープに特に影響を与えると思われる単位セメント量および水セメント比がほぼ同じであるため、両者は極めてよく一致している。

3.2 引張クリープ試験

(1) 試験概要

引張クリープ試験は、図-3に示す自動水平調節機能を備えたレバー比1:50の重錘でこ式クリープ試験機で行った。供試体の載荷は鋼板および供試体断面一様接着方式を採用し、供試体の温度および湿度は恒温恒湿器で操作した。なお、最大載荷荷重は8000kgf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、ボックスカルバートと同じ材料、同じ配合のコンクリートを作製し、内部に埋め込み型ひずみ計および熱電対を埋め込んだ。

供試体は打込み後24時間で脱型し、温度20℃、湿度100%で圧縮クリープ試験を行い、試験終了後直ちに供試体と同じ断面積を有する鋼板を供試体の両端部に超速硬化型エポキシ系接着剤で接着し、室温20℃の恒温恒湿機内に静置し、24時間後、引張クリープ試験を開始した。各試験とも載荷時の載荷応力比は25~30%であり、5日間ひずみの計測を行った。なお、供試体の乾燥収縮ひずみ等を防ぐため、常時供試体表面に厚さ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。

若材令コンクリートの引張クリープに影響を与える要因として、温度応力の応力特性を考慮して圧縮応力履歴の大きさおよびその履歴期間、さらに温度の影響に着目して試験を行った。

(2) 試験結果および考察

圧縮応力履歴の大きさに関する試験は、圧縮応力の大きさを0、15、25kgf/cm²の3種類とし、温度20℃で材令1日で載荷し、材令2日で除荷後、材令3日で引張応力を作用させた。図-4に試験結果を示す。グラフにおける横軸は引張荷重載荷後の載荷材令、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である。クリープ破壊を起こさない程度の応力の範囲では、クリープ

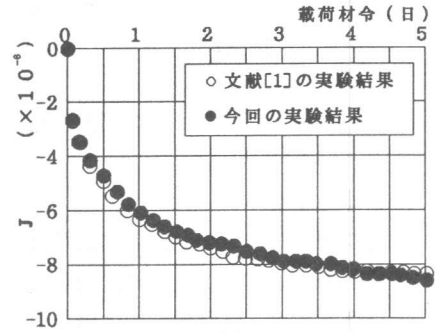


図-2 圧縮クリープ試験結果

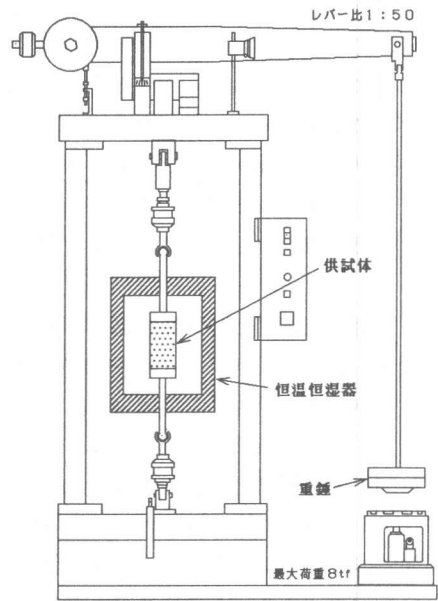


図-3 引張クリープ試験機

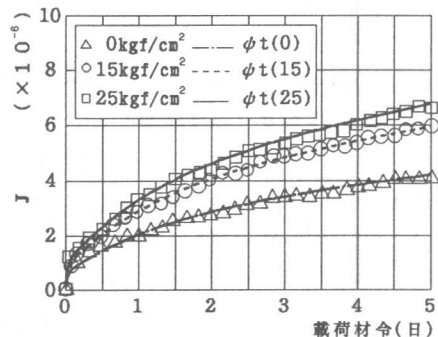


図-4 圧縮履歴の大きさの影響

ひずみは荷重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ことから、クリープコンプライアンスを用いる。図より、圧縮応力履歴が大きくなるほど、引張クリープひずみが励起されることが明らかになった。

次に、履歴期間に関する試験は、圧縮荷重期間を1、2、3日の3種類とし、温度20℃で、圧縮応力15kgf/cm²を荷重し、1日の除荷期間を経た後引張応力を作用させた。図-5に示す試験結果より、引張応力荷重後1.5日までは3ケースとも同様の傾向を示すが、それ以降は、履歴期間が長いほど引張クリープひずみは減少する傾向が得られた。したがって、履歴期間が長くなると、終局クリープひずみは減少する傾向にあると考えられる。

さらに温度の影響に関する試験は、温度を20、30、40℃、圧縮荷重期間を1日とし、材令2日で除荷後、材令3日で引張応力を作用させた。図-6に示す試験結果より、供試体温度が20℃のクリープコンプライアンスと比べて30℃の場合は約1.1倍、40℃の場合は約1.3倍となり、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になった。

3.3 クリープ構成式

著者らは既に、粘弾性レオロジーモデルを適用して、若材令コンクリートの圧縮クリープ構成式を構築している[1]。以下にその構成式を示す。

$$J_c = \xi_c(\tau) \cdot \phi_c(T) \cdot \{2.696(1 - e^{-24.7\tau}) + 7.199(1 - e^{-0.575\tau})\} \times 10^{-6} \quad (1)$$

ここに、荷重材令 $\xi_c(\tau)$ ： $\xi_c(\tau) = -0.3071 \log \tau + 1.0$

温度関数 $\phi_c(T)$ ： $\phi_c(T) = 0.0112T + 0.552$

τ ：荷重材令(日)、 T ：温度(℃)、 t ：材令(日)

今回も同様に、粘弾性レオロジーモデルを用いて若材令コンクリートの引張クリープ構成式を構築した。基本的レオロジーモデルとしてMaxwellモデルとVoigtモデルがあり、これらを複数個結合し、一般化したモデルを構築することはしばしば行われる。モデルが複雑になれば、より複雑なクリープ現象を表現し得ると考えられるが、クリープ構成式中のパラメーターが多くなり実用的でない。また、一般的に用いられるのは5要素程度までのものが多い。したがって、今回は、圧縮応力15kgf/cm²、温度20℃、圧縮履歴1日で行われたクリープ試験結果に対して、5要素までの様々なモデルについての検討を行った。その結果、以下に示すVoigt要素2個と粘性ダッシュポットを直列結合した5要素モデルが図-4～図-6に示すように、実験結果と精度良く一致する

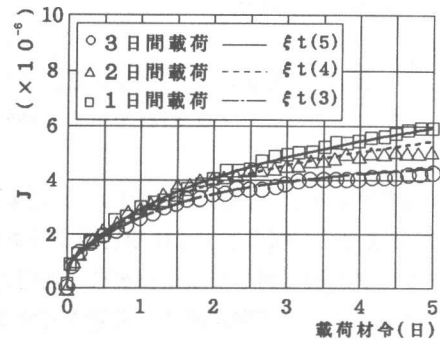


図-5 圧縮履歴期間の影響

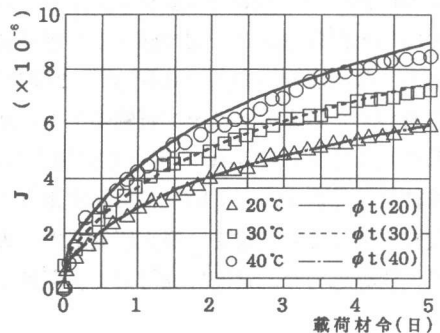


図-6 温度の影響

ことが明らかとなった。

$$J_t = \phi_t(\sigma_{max}) \cdot \phi_t(T) \cdot \xi_t(\tau) \cdot \{2.874(1 - e^{-0.801t}) + 0.813(1 - e^{-45.38t}) + 0.4468t\} \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここで、 $\phi_t(\sigma_{max})$ 、 $\phi_t(T)$ 、 $\xi_t(\tau)$ は圧縮応力15kgf/cm²、温度20℃、圧縮履歴1日で行われたクリープ試験に対して、それぞれ圧縮応力履歴の大きさ、温度、圧縮履歴期間の影響を表す変数である。まず、圧縮応力履歴の大きさについては、クリープ試験では荷重応力を一定にしているが、実際は作用する圧縮応力は時間的に変化している。しかし、温度20℃・湿度100%一定で図-1に示す測点No.2の応力(最大圧縮応力15.1kgf/cm²)と同様な荷重応力を与えたときのクリープ試験結果と、圧縮応力履歴の大きさを15kgf/cm²一定とした場合の式(3)の計算結果を比較すると、図-7に示すように両者は極めて良い一致を示した。この結果から、応力履歴の大きさの影響を、最大圧縮応力で表すことにした。試験結果を基に、最小二乗法を用いて最大圧縮応力 σ_{max} (kgf/cm²)の1次関数として次式が得られた。

$$\phi_t(\sigma_{max}) = 0.017\sigma_{max} + 0.701 \quad (3)$$

また、温度の影響や圧縮履歴期間の影響も、それぞれ温度T(℃)、圧縮履歴期間 τ (日)の1次関数として表すこととした。温度係数 $\phi_t(T)$ は図-6に示す試験結果を、また圧縮履歴期間係数 $\xi_t(\tau)$ は図-5に示す結果を、それぞれ最小二乗法を用いて求めた式を以下に示す。

$$\phi_t(T) = 0.0257T + 0.487 \quad (4)$$

$$\xi_t(\tau) = -1.107 \log \tau + 1.538 \quad (5)$$

4. 温度応力解析

4.1 温度解析

温度解析は、図-8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[2]。コンクリートの断熱温度上昇量Q(t)(℃)は、断熱温度上昇試験を基に、次式で表される

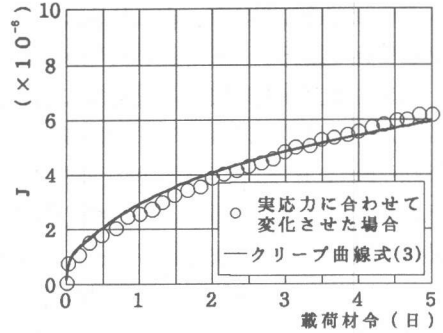


図-7 実応力に合わせたクリープ試験

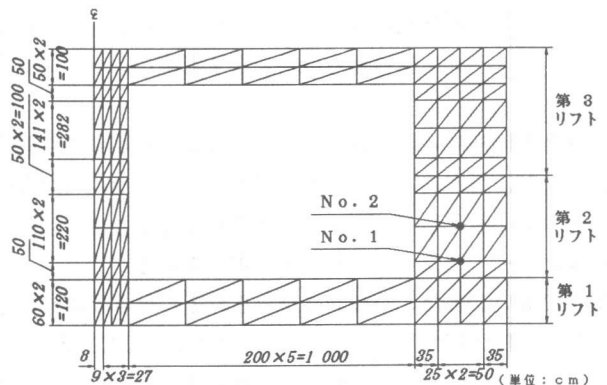


図-8 要素分割図

近似式が得られた。

$$Q(t) = 46.06(1 - e^{-0.958t}) \quad (6)$$

ここに、 t ：材令(日)

一例として測点No. 1の温度の解析結果と実測結果を図-9に示す。図から明らかなように、最大温度が2~3℃解析値の方が実測値より大きいが、両者は精度良く一致している。なお、他の測定点においても同様であり、この温度解析結果は応力解析に際して、十分な精度を有するものと考えられる。

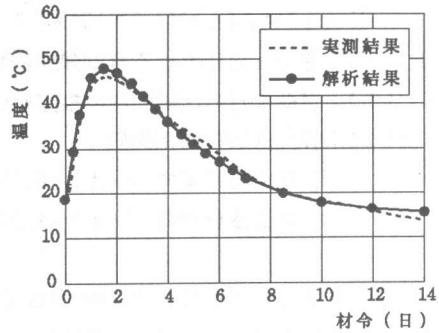


図-9 温度解析結果(測点No. 1)

4.2 応力解析

壁状構造物の温度応力解析には、通常コンペンセーションプレーン法(以下、CP法と略記)が用いられる。CP法においてコンクリートのクリープ特性を考慮するには、一般に弾性係数がクリープによって低減されるとみなして弾性係数に低減係数を乗じた有効弾性係数を用いる。そこで、以下の方法で構築したクリープ構成式から有効弾性係数を求めることとした。

ある時間 t における弾性係数 $E_0(t)$ は、応力 $\sigma(t)$ とひずみ $\varepsilon(t)$ で $E_0(t) = \sigma(t) / \varepsilon(t)$ と表され、ある時間 t におけるクリープひずみ $\varepsilon_c(t)$ を考慮した有効弾性係数 $E_e(t)$ は次式のように表される。

$$E_e(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t) + \varepsilon_c(t)} = \frac{E_0(t)}{1 + J \cdot E_0(t)} \quad (7)$$

ここに、 $J = \varepsilon_c(t) / \sigma(t)$

今回の解析では、各要素ごとに $\sigma(t)$ が異なるため、各要素ごとに弾性係数を与えた。式(7)の J に圧縮応力側では J_c 、引張応力側では J_t を代入し有効弾性係数を求めた。なお、 J_c に関しては文献[1]の結果から導かれたものであるが、図-2に示したように、今回の実験の対象としたコンクリートの圧縮クリープ特性とほとんど一致しているので、 J_c をそのまま用いることにした。

弾性係数 E_0 として、ボックスカルバートと同じ材料、同じ配合で作製したコンクリート供試体の弾性係数を、積算温度の常用対数の一次式で表した評価式を用いた。以下にその評価式を示す。

$$E_0(M) = \begin{cases} 3.096 \log M - 7.503 & (250 < M \leq 1000) \\ 0.751 \log M - 0.468 & (1000 \leq M < 22000) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 E_0 ：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、圧縮弾性係数に等しいと仮定した。応力解析は、示方書に示された有効弾性係数 E_e を用いた場合、式(7)に示す有効弾性係数 E_e を用いた場合、さらに弾性係数 E_0 に示方書で用いられている補正係数 $\phi(t)$ を乗じた有効弾性係数 E_e を用いた場合の計3ケースについて検討した。ところで、示方書に示された有効弾性係数 E_e は圧縮強度の

関数として次式で表わされる。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f_c'(t)} \quad (9)$$

- $E_e(t)$: 材令 t 日における有効弾性係数(kgf/cm²)
- $f_c'(t)$: 材令 t 日の圧縮強度の推定値(kgf/cm²)
- $\phi(t)$: 弾性係数の補正係数
 - 〔 材令3日まで $\phi(t) = 0.73$
 - 〔 材令5日以降 $\phi(t) = 1.00$

一例として図-10に測点 No.1における応力の解析値と実測値を示す。有効弾性係数 E_e と有効弾性係数 E_c の解析値を比較すると、同じ補正係数 $\phi(t)$ を用いても、有効弾性係数 E_e を用いた解析値の方が、有効弾性係数 E_c を用いた場合より、圧縮側、

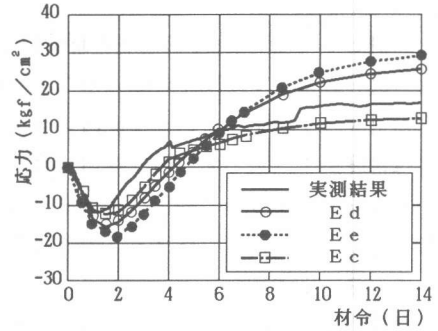


図-10 応力解析結果 (測点 No. 1)

引張側ともに約10%小さくなるのがわかる。次に有効弾性係数 E_e と有効弾性係数 E_c を比較すると、有効弾性係数 E_e を用いた解析値は、有効弾性係数 E_c を用いた場合より圧縮側で約10~20%、引張側で約50%小さい。また、有効弾性係数 E_e を用いた値は、引張側でやや小さめの値を示すものの他の解析値と比較しても実測値に最も近い値を示すことが明らかとなった。以上のことから、コンクリートの応力解析において若材令時のコンクリートの圧縮および引張の両クリープを考慮する必要性が明確となり、本研究で構築したクリープモデルを用いることにより、精度よく温度応力が推定できることが明らかとなった。

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引張クリープ試験により、圧縮応力履歴の大きさが大きくなるほどクリープひずみが励起するが、圧縮応力履歴の期間が長くなるほどクリープの終局ひずみは減少する傾向にあることまた、温度が20℃の場合のクリープコンプライアンスと比べて30℃の場合は約1.1倍、40℃の場合は約1.3倍となることが明らかとなった。
2. 若材令コンクリートの引張クリープ構成式として、Voigt要素2個とダッシュポット1個を直列結合した5要素モデルが試験結果と最も良く一致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に、圧縮および引張の両クリープ構成式を組み込んだ有効弾性係数 E_e を用いて温度応力解析を行った結果、圧縮側、引張側ともに実測値と良く一致し、本研究で構築したクリープモデルを用いることにより、精度よく温度応力が推定できる見通しが得られた。

参考文献

- 1) 梅原秀哲・北川善己・吉田弥智：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1、pp. 845-850、1991. 6
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）、1991. 10