

[8] マスコンクリートの温度応力評価に及ぼす材料特性の
数値モデル化の影響

正会員 ○ 川 口 徹 (大林組技術研究所)
正会員 中 根 淳 (大林組技術研究所)

1. はじめに

温度ひびわれ予測方法として、FEMを利用した温度応力解析が盛んに行われるようになり、実測値との照合においても、一応の評価が可能になってきつつある。しかし、この種の数値解析のインプットデータとして問題となるコンクリート初期物性の数値モデル化の妥当性、およびそのモデルのちがいが応力解析値に及ぼす影響については十分な検討が行われているとは言い難い。

本報告は、既に発表したコンクリート材料の初期物性データに関する実験結果²⁾にもとづき、数値モデル化の検討を行い、応力解析値に与える影響について比較検討した結果について述べるものである。ここでは、特に弾性係数の発現性状、クリープ性状のモデル化のちがいによる影響について検討した。

2. 実験結果の要約²⁾

コンクリート初期物性に関する実験結果を要約すると次のようになる。

実験は、試験温度20℃、40℃の2段階で行い、圧縮強度、単位弾性歪の発現状況およびクリープ性状についてデータを収集した。クリープ試験は一軸圧縮応力状態で行った。載荷材令は、1、2、3、7、28日の5段階(試験温度40℃では載荷材令0.5日を加え6段階)で試験した。コンクリートは、フライアッシュB種セメントを用いた表-1に示す調合のものである。

表-1 コンクリートの調合

コンクリートの調合 (m ³)							まだ固まらないコンクリートの性質 計 4 週 時					
W/C	s/a	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	スタンプ	空気量	比重	コンクリート温度	弾性係数	弾性係数
(%)	(%)	(ℓ)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(g)	(Cm)	(%)	(Kg/m ³)	(℃)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)
55	43	16.4	298	780	1042	7.45	10	3.8	2302	20.9	308	3.12

実験の結果、次のことが明らかになった。

圧縮強度および単位弾性歪の発現性状は、有効材令でほぼ評価できる(図-1、2)。なお、有効材令の算定は次式によった。 $t_e = \int_0^t \theta_c dt / 2.0$ 、ここに t_e : 有効材令、 t : 材令、 θ_c : t 時のコンクリート温度である。圧縮強度、単位弾性歪と有効材令の関係について、試験値に対し最小二乗法を適用すると次のような関係式が得られた。

$$f_c = t_e / (.00301 t_e + .0141) \quad t > 0 \quad (1)$$

$$\ln(f_c) = \ln(10 t_e / 3) / \{ .147 \ln(10 t_e / 3) + .150 \} \quad t > .3 \quad (2)$$

$$\epsilon_c = \{ .337 \ln(t_e) + 1.13 \} / \{ .149 \ln(t_e) + .125 \} \quad t > 1 \quad (3)$$

ここに、 f_c : 圧縮強度、 ϵ_c : 単位弾性歪

なお、(1)式の双曲線型関数では、ごく初期の圧縮強度を過大評価しがちであることがわかった(図-1)。

クリープ性状については、次のようなことが明らかになった。①. 試験温度によらず載荷材令が小さいほどクリープ変形が大きく、除荷後の残留歪も大きい。②. 試験温度20℃の結果をCEB-FIPの方法による計算値³⁾と比較すると、載荷後ごく初期は試験値に比べ計算値の法が大きいとその後のクリープ変形の進行は試験値の方が大きく、載荷材令が小さいほどその差が大きくなっている。③. 一般に、コンクリートのクリープ性状は温度が高くなるほど大きくなると言われているが、今回の試験結果によると試験温度40℃のクリープ変形は試験温度20℃に比べ全般に小さくなった。これは、若材令では高温によるセメントの水和反応の促

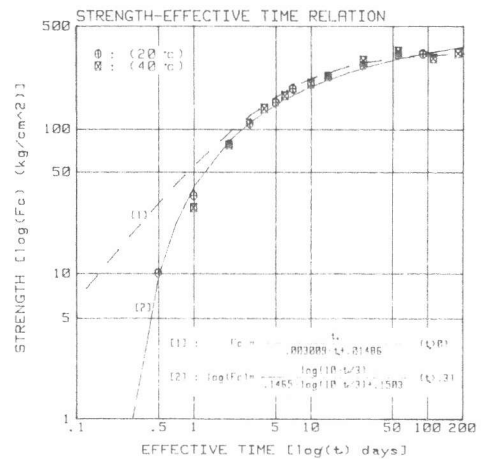


図-1 圧縮強度と有効材令の関係

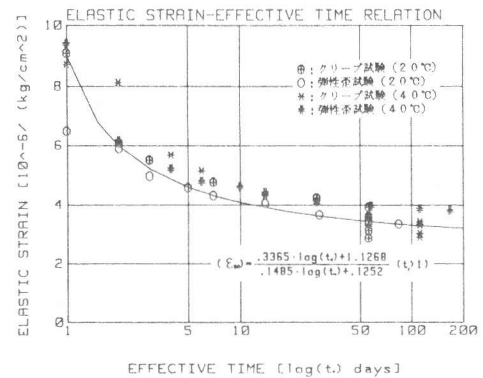


図-2 単位弾性歪と有効材令の関係

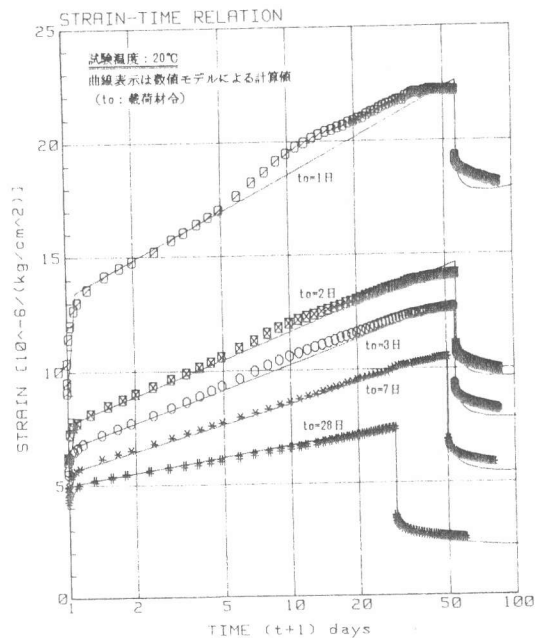


図-3 クリープ変形の実験値と計算値の比較
(試験温度：20℃)

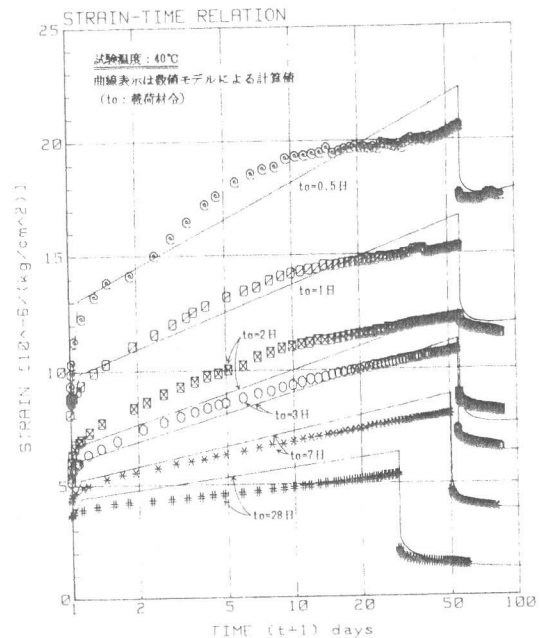


図-4 クリープ変形の実験値と計算値の比較
(試験温度：40℃)

進により圧縮強度、弾性係数の発現が早いから、高温だからといって必ずしもクリープ変形が大きくなるものとは理解される。

3. クリープ性状の数値モデル化

コンクリートのクリープ性状の試験値に対する数値モデル化にあたっては、荷重材令、温度の影響を考慮して次のような一般式を適用することとした。

なお、クリープ性状への温度の影響は、2. で述べた試験結果から荷重時材令に有効材令の考え方を適用することとし、温度が高くなることによるクリープ変形の割増しは行わないこととした。

$$\epsilon_c = \left\{ \frac{A}{\ln(\tau_0+1)} + B \right\} \cdot \ln(\tau+1) + \left\{ \frac{C}{\ln(\tau_0+1)} + D \right\} \quad \tau > .1 \quad (4)$$

$$\epsilon_c = \kappa \cdot \tau \quad 0 < \tau < .1$$

ここに、

$$\kappa = \left[\left\{ \frac{A}{\ln(\tau_0+1)} + B \right\} \ln(1.1) + \left\{ \frac{C}{\ln(\tau_0+1)} + D \right\} \right] / (.1)$$

ϵ_c : 単位クリープ歪

τ : 荷重後の日数

τ_0 : 有効荷重材令 (日)

なお、A、B、C、Dは、実験定数である。これらの定数は以下のように求めた。

試験温度20℃の荷重中の測定値に対して各荷重材令ごとに曲線の最適化を行い、各荷重材令区間ごとに個別に係数値を設定し線形補間法を適用した。

この数値モデルの実測値との照合状況を除荷後の性状も含めて試験時温度ごとにそれぞれ図-3、4に示した。

これらの図から今回の数値モデルは、試験温度20℃のみな

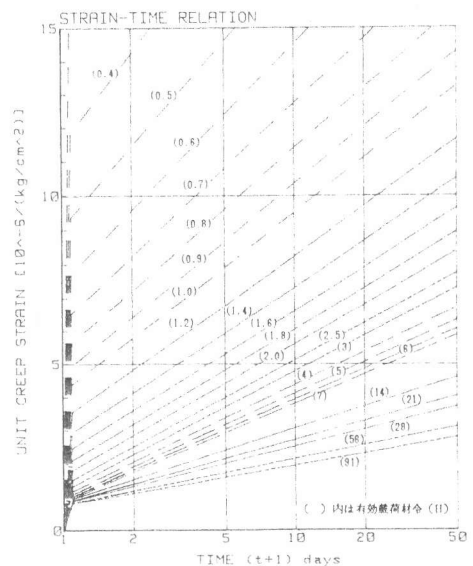


図-5 数値モデルによる
単位クリープ曲線

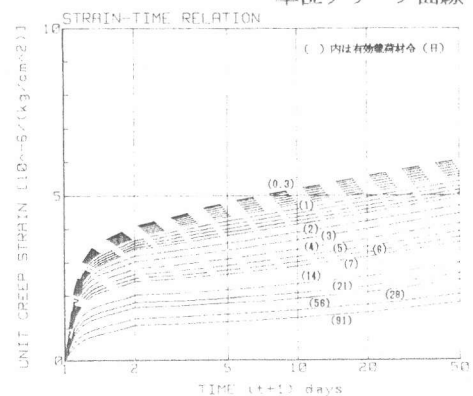


図-6 CEB-FIPによる
単位クリープ曲線

らず、試験温度 40℃ のクリープ性状についても実測値をよく表わしていることがわかる。

このようにして求めた数値モデルで算定した載荷材令の変化による単位クリープ歪を図-5に示す。図-6には比較のため CEB-FIP による単位クリープ歪の計算値を同一スケールで示した。なお、CEB-FIP で数値の与えられていない $0 < t_0 \leq 3$ の間は線形補間して計算した。CEB-FIP の計算値は載荷後ごく初期を除いてクリープ変形は全般に小さく、かつ、載荷材令の影響も小さいことがわかる。

4. 解析的検討

以上に述べた実験結果およびその数値モデル、さらに既往の研究結果を用いて、マスコンクリートの応力解析上のインプットデータとしての弾性係数の発現性状およびクリープ性状の数値モデル化のちがいが応力解析値に及ぼす影響について検討する。

解析上の評価を容易にするため、ここで使用する解析モデルは次のような単純化を行った。つまり、実験に使ったものと同じコンクリートで作った壁厚 1.5m の半無限壁体の中心部温度履歴を断面内で一様に受ける一軸拘束モデル（材令 28 日における拘束度は約 0.60）を仮定した。温度履歴は、このコンクリートについて行った断熱温度上昇試験の結果にもとづいて一次元差分法を適用して計算によって求めた。応力解析には、時間増分法による重ね合せ法を適用した。

4.1 弾性係数発現性状のモデル化の影響

まず始めに弾性係数発現性状の数値モデル化のちがいが応力解析値に与える影響について検討する。

ここでは次の 3 種類の方法の比較を行った。

①. 圧縮強度と有効材令の関係式に (1) 式を用い、さらに弾性係数と圧縮強度の関係式として一般的な式 $E_c = a \sqrt{f_c}$ (a は、定数) を用いて弾性係数を求める。

②. 圧縮強度と有効材令の関係式に (2) 式を用い、①. と同様の関係式から弾性係数を求める。

③. 単位弾性歪と有効材令の関係式である (3) 式から、その逆数として弾性係数を求める。

なお、ここでは比較を容易にするため、3 者の弾性係数が材令 28 日で等しくなるように①、②の定数 a を設定した。この 3 者の弾性係数の発現状況のちがいを図-7に示す。ごく初期材令時を除いて大きな差はない。

このような数値モデルのちがいによる応力解析の結果を図-8に示す。なお、この解析は、クリープの影響を考慮していない弾性解析である。

この図から次のことがわかる。

①. の圧縮強度と有効材令の関係式に双曲線型関数を用いた場合には、ごく初期の弾性係数を過大評価しているため、温度上昇域での圧縮応力が過大になり、逆に温度降下にもなう引張応力が過少評価される傾向がある。外部拘束が卓越する場合の温度応力の評価にあたっては、①. のモデル化では危険側の評価になるおそれがあることがわかる。

一方、②.、③. ではモデル化のちがいにかかわらず応力解析値はほとんど差がない。③. のように弾性係数の発現性状を直接インプットデータとして用いることが最善であるが、それが困難な

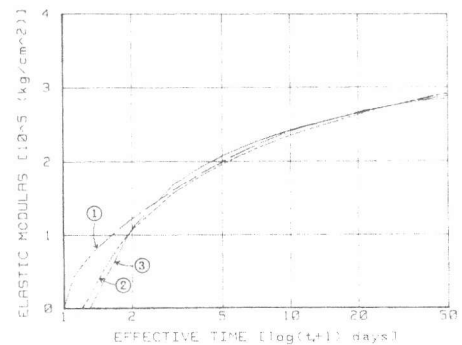


図-7 弾性係数の発現状況の比較

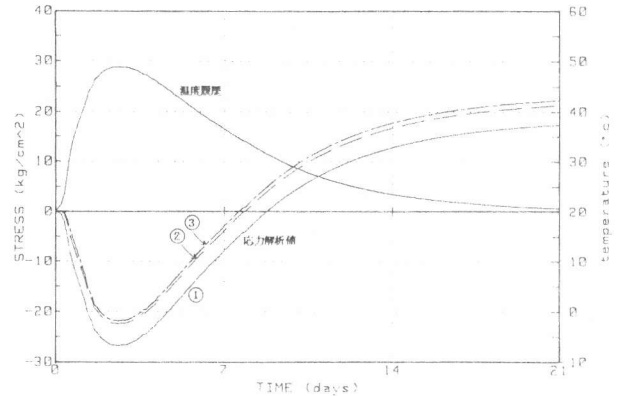


図-8 応力解析結果 (弾性係数モデル化の影響)

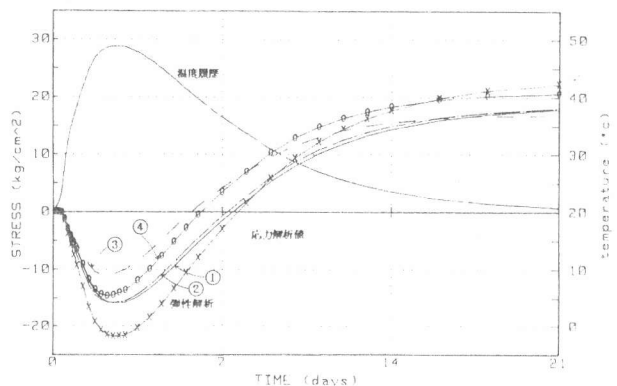


図-9 応力解析結果 (クリープ性状モデル化の影響)

場合には②. のように圧縮強度の発現性状をより適切に評価することが望ましいと考える。②. のようなモデル化でも応力解析は、それほど大きな問題はないと考える。

4.2 クリープ性状の数値モデル化の影響

次に、クリープ性状の数値モデル化の影響が応力解析値に与える影響について検討する。ここでは次の4種類の方法的比較を行なった。

- ①. 最も簡便な有効弾性係数 $\{E_{ce} = E_c / (1 + \phi) = (2/3) E_c\}$ ⁴⁾ によるモデル化。
- ②. CEB-FIPによる計算値。ただし、温度の影響は有効載荷材令で考慮する。
- ③. 3. で述べた数値モデル。ただし、温度の影響は割増し係数 $(\phi = 0.03T + 0.40)$ ⁵⁾ で考慮する。
- ④. 3. の数値モデル。ただし、温度の影響は有効載荷材令で考慮する。

なお、②~④の解析でのクリープの影響の取扱いは、初期歪による重ね合せ法を適用した。又、弾性係数の発現性状は、4.1.③. の方法で仮定した。

応力解析の結果を図-9に示す。なお、比較のために弾性解析の結果も合わせて示した。

この図から次のことがわかる。クリープ変形の効果を考慮することにより、弾性解析に比べ、温度上昇域で生じる圧縮応力に対しては、応力低減効果が認められる。①.、②.、④. の数値モデルのちがいによる差はほとんどない。

一方、温度降下に伴う引張応力の発現に関しては、数値モデル化の差が生じている。④. の数値モデルのように実験によるクリープ性状をより実情に近くモデル化した場合、温度上昇域で蓄積される残留クリープ変形の影響で弾性解析に比べ、次のような特徴がある。つまり、圧縮応力から引張応力に反転する時期が早くなり、部分的には引張応力そのものが大きくなっている領域が生じている。このことから、クリープ効果を考慮すると弾性解析に比べ、常に応力低減効果が期待できるものではないことが明らかになった。なお、外部拘束が卓越する場合の引張応力を評価する場合、④. に比べ①.、②.、③. の数値モデルでは危険側になるので注意を要することがわかる。

また、今回の解析結果では①. と②. とでほとんど差が認められない。これは図-6に示したようにCEB-FIPによるクリープ変形は、載荷後ごく初期での変形が大きく、その後の変形の進行が小さいこと、および載荷材令の変化による影響が小さいことによるものであると考えられる。

5. まとめ

今回の検討により、次のことが明らかになった。

- (1). 圧縮強度と有効材令の関係式に双曲線型関数を用いて弾性係数の発現を仮定すると、ごく初期材令での圧縮強度、弾性係数を過大に評価しがちなため、温度降下域での引張応力を過小評価する危険性がある。
- (2). 圧縮強度と有効材令の関係式に対数型関数を用いて弾性係数を求めたものと、単位弾性歪と有効材令の関係式から逆数としてそれを求めた場合とでは、応力解析結果にほとんど差がない。
- (3). 若材令のコンクリートのクリープ性状を載荷材令、温度の影響も考慮して対数型関数で数値モデル化ができ、実験結果との照合状況もよかった。
- (4). 今回提案した数値モデルによるクリープを考慮した応力解析結果によると、マスコンクリートの温度変化によって生ずる温度応力は、弾性解析に比べ、常に応力低減効果が期待できるものではないことがわかった。

なお、今回の温度応力評価は、単純な一軸拘束モデルによって解析的に検討したものである。今後は、モデル実験あるいは、現場計測等を通じて実際の応力計測値との比較検討を行い予測精度の向上に努めたい。

(参考文献)

- (1). たとえば、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、JCI-C2 (1982)、JCI-C7(1984)
- (2). 川口：マスコンクリートの若材令クリープ性状、日本建築学会大会梗概集、1984
- (3). CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 3rd Ed., 1978
- (4). 入矢、他：マッシュなRC構造物の温度ひびわれ抑制に関する研究(その2)、土木学会大会概要集(V)、1983
- (5). 吉岡、他：マッシュなコンクリート部材のひびわれ予測に関する研究、コンクリート工学年次講演会論文集、1980