

# クリープ係数のばらつきを考慮した 不完全合成桁のクリープ解析

CREEP ANALYSIS OF INCOMPLETE COMPOSITE GIRDER  
CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF CREEP COEFFICIENT

高海克彦\*, 浜田純夫\*\*

Katsuhiko TAKAMI and Sumio HAMADA

\*工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

\*\*Ph.D 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

This paper describes the stochastic creep analysis of the steel-concrete incomplete composite girders. The procedure of the analysis is formulated by First-Order Second-Moment Method. The uncertainty behavior of the structure is caused by the variability of creep coefficient which consists of some uncertainty factors, for example the final creep strain and/or the creep rate. This method makes it possible in practical design to estimate the effects of the variability of creep coefficient.

Key Words: Creep Analysis, Uncertainty factors, Composite Girder

## 1. まえがき

鋼-コンクリート合成はり構造物の設計にあたり、クリープによるたわみや応力の変動を精度良く予測することが重要となっている。コンクリートを用いた構造物の設計に用いられるクリープ予測式には、わが国の道路橋示方書の式、ACIモデル式、CEBモデル式等がある。これらはいずれも多く研究成果に基づき、使用材料、配合、寸法、外部環境、材令等の要因を考慮して定められている。その他、予測式として線形性のみではなく非線形性をモデル化した式等も提示されている。これらの予測式はコンクリート断面の平均値のみを予測するので、確定論的モデルとよばれる。

しかるにこれらの式により完全にコンクリートのクリープ挙動を予測することは難しく、クリープの発生メカニズムや材料特性等の内部要因、および環境状態や外荷重等の外部要因の変動により、予測式に対するクリープ挙動は、ばらつきを有しているのが現状であり<sup>1)</sup>、40%ものばらつきがあるとの研究論文もある<sup>2)</sup>。

近年こうした問題に対し、クリープ予測式および構造解析法の両面から活発な研究がなされている。予測式と実験結果のばらつきに対し、Bazant, Madsen<sup>3)</sup>は予測モデルの不確定性を検討し、実測データから回帰分析しクリープ予測式の期待値と変動係数を求めている。また、

椿<sup>4)</sup>はクリープ式に含まれるパラメーター、即ちコンクリート配合、部材形状、寸法、温度・湿度等の環境条件に対して感度解析を行いその影響を検討している。また、各種確率論を用いた確率論的クリープ予測モデルの研究も行われている<sup>5)</sup>。

一方、構造材料の不確定性を考慮した構造解析手法には、不確定性を有する材料をパラメーターとするシミュレーション解析を行い統計処理する方法と、定式化において確率論手法を用いる方法がある。Floris<sup>6)</sup>らはRCはり構造のクリープ挙動に対する、気温と相対湿度の変動による影響をモンテカルロシミュレーションにより検討している。また、Bazant, Liu<sup>7)</sup>はLHS (Latin Hypercube Sampling) という計算効率を改善した手法を提案している。椿<sup>8)</sup>はコンクリート構造物を空間的確率場と仮定し、確率有限要素法を用いてRC部材のクリープ解析を行っている。ただしこの手法は確率場の自己相関関数を仮定する必要がある、その仮定方法については未だ明らかにされていない。

本研究は、先に著者らが不完全合成桁のクリープ解析において定式化した有限要素解析<sup>9)</sup>を発展させたものであり、コンクリートのクリープ係数のばらつきが合成桁の変位や応力に与える影響を、1次近似2次モーメント法を用いて評価し、その期待値と分散を求めようとする

ものである。こうすることにより、設計に用いるクリープ予測式のばらつきと構造物の挙動の変動との関係を明確にできるものと思われる。そこで本論文では、先ず解析に用いるクリープ係数のばらつきの与え方の仮定を述べた後、不完全合成桁の剛性方程式から偏微分法によって1次近似2次モーメント法の定式化を行った。次いでこの解析法を用いて、完全および不完全合成桁、またクリープ拘束度の異なる合成桁においてクリープ係数のばらつきがクリープ挙動へ与える影響について検討した。

## 2. クリープ係数のばらつき

現行の道路橋示方書ではコンクリートのクリープ解析において、作用応力が圧縮強度の60%程度以下の場合、クリープ係数法が採用されている。このクリープ係数は、遅れ弾性成分とフロー成分とから成り、その経時変化・最終値は主としてコンクリート部材の仮想厚と環境湿度条件によって規定されている<sup>10), 11)</sup>。しかもその部材の仮想厚にも湿度条件が含まれている。そこで、図-1のような合成桁のコンクリート床版を対象とし、材令7日で持続荷重が載荷されたとき、相対湿度が全期間に渡り40%, 70%および90%の場合のクリープ係数の経時変化を、示方書に従って示すと図-2のようになる。このコンクリート床

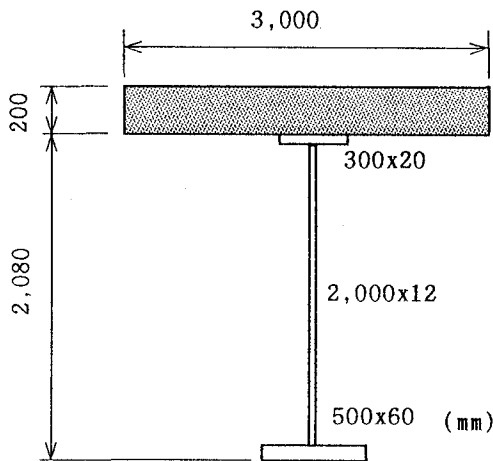


図-1 計算対象桁

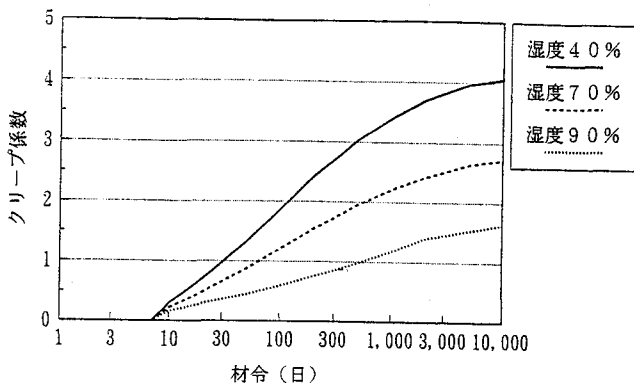


図-2 湿度によるクリープ係数の進展

版の仮想部材厚は相対湿度40%, 70%, 90%の場合それぞれ20, 30, 100cmとなる。わが国の屋外環境の相対湿度の平均値はほぼ70%であるが、湿度条件によりクリープの進行およびその係数の最終値にほぼ2倍の差異が生じている。文献4)の各種クリープ係数の感度解析においても、クリープ係数に対する各種影響要因の内、外部環境湿度が大きなファクターであることが示されている。

さて、合成桁ではコンクリートクリープが鋼桁により拘束されるため、クリープの進行と共に応力は変動する。この応力下で回復クリープを考慮した式(1)のクリープ係数<sup>12)</sup>にも、湿度の変動をはじめとする各種影響要因によりばらつきが発生する。

$$\begin{aligned} \phi_a(t_2, t, t_1) &= \{\phi_a(t, t_1) + \phi_f(t) - \phi_f(t_1)\} \\ &\quad - \frac{1}{\phi_{a\infty}} \phi_a(t, t_1) \phi_a(t_2, t) \\ &= \phi(t, t_1) - \frac{1}{\phi_{a\infty}} \phi_a(t, t_1) \phi_a(t_2, t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $\phi_a(t, t_1)$  は遅れ弾性クリープ成分、 $\phi_f(t)$  がフロークリープ成分であり、式(1)の第2項が回復クリープを表す。また $t_1$  は載荷材令、 $t_2$  は着目材令である。なお、本クリープ係数の詳細については文献9)に述べたとおりである。

いま、式(1)の遅れ弾性クリープとフロークリープを式(2)の指数関数で仮定する。

$$\begin{aligned} \phi_a(t, t_1) &= \phi_{a\infty} \{1 - \exp(-k_a(t - t_1))\} \\ \phi_f(t) &= \phi_{f\infty} \{1 - \exp(-k_f t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\phi_{a\infty}, \phi_{f\infty}, k_a, k_f$  は、それぞれ遅れ弾性クリープ係数とフロークリープ係数の最終値、遅れ弾性クリープの速度係数、およびフロークリープの速度係数である。これら4つの係数をクリープ構成係数とよび、いずれも正規確率分布に従う確率量として扱う。クリープ係数のばらつきはこれらの確率量に起因し、各確率量の変動がクリープ係数のばらつきを与えるとする。ただし、これらの係数には相関は無いものと仮定する。以後これらを $x_1, x_2, x_3, x_4$  で表し、各平均値を $\bar{x}_i$  とする。

## 3. 1次近似2次モーメント法<sup>13)</sup>

線形構造系の材料の不確定性を考慮するために適用される1次近似2次モーメント法を用いて、クリープ係数のばらつきによる鋼-コンクリート合成桁の挙動の期待値および分散を評価する。解法の定式化にあたり、剛性方程式から直接テーラー展開を行ったり、摂動法による定式化も可能であるが、本研究では偏微分法を用いる。

著者が前に提示した、床版と鋼桁をはり要素に、ずれ止めをばね要素にモデル化した不完全合成桁のクリープ解析の剛性方程式は次のように表される<sup>9)</sup>。

$$[K]\{u\} = \{G_f\} \quad (3)$$

ここに、 $[K] = [K_f] + [K_s] + [K_{cs}]$  で、 $[K_f]$ 、 $[K_s]$ 、 $[K_{cs}]$  は、それぞれコンクリート床版、鋼桁、ずれ止めの剛性マトリクス、 $\{u\}$  はクリープ節点変位ベクトル、 $\{G_f\}$  はクリープ荷重ベクトルである。このうち、 $[K_f]$ 、 $\{u\}$ 、 $\{G_f\}$  が、確率量であるクリープ構成係数の関数となる。コンクリート床版のクリープ剛性マトリクスは通常のはり要素の定式化から、また途中載荷の無い場合のクリープ荷重ベクトルはそれぞれ次のように表される<sup>9)</sup>。

$$[K_f] = E_f \int_0^l [B_c]^T [B_c] dz \quad (4)$$

$$\{G_f\} = \phi(t_2, t_1) [K_f] \{u_e\} \quad (5)$$

ここに、 $l$  は要素長、 $[B_c]$  はコンクリートはりのひずみマトリクス、 $\{u_e\}$  は弾性節点変位ベクトルである。また、 $E_f$  は次式の換算ヤング係数である。

$$E_f = \frac{E_c}{1 + \rho(t_2, t_1) \phi(t_2, t_1)} \quad (6)$$

ただし、 $E_c$  はコンクリートのヤング係数（一定値）、 $\rho(t_2, t_1)$  は次式である。

$$\rho(t_2, t_1) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\phi_{\infty} \{\phi(t_2, t_1)\}^2} \int_{t_1}^{t_2} \phi(t_2, t) \cdot \frac{d}{dt} \phi_{\infty}(t_2, t) \phi_{\infty}(t, t_1) dt$$

1次近似2次モーメント法によるとクリープ変位の期待値は、式(3)において確率変数の平均値を用いてそのまま計算できる。

一方、式(3)を $x_i$  で偏微分すると次式が得られる。

$$[K] \frac{\partial \{u\}}{\partial x_i} = - \frac{\partial [K_f]}{\partial x_i} \{u\} + \frac{\partial \{G_f\}}{\partial x_i} \quad (i=1 \sim 4) \quad (7)$$

これが1次の変位変動率決定方程式である。上式右辺の二つの偏微分は、式(4)、(5)から明らかにように換算ヤング係数の偏微分に帰着し、計算の簡易化が図れる。また $\{u\}$  はクリープ変位の期待値であり、式(3)から算定される。

変位の分散は式(7)を用いて次式で表される。

$$Var[\{u\}] = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \left( \frac{\partial \{u\}}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left( \frac{\partial \{u\}}{\partial x_j} \right)_{x_j} \cdot cov[x_i, x_j] \quad (8)$$

ここに、 $cov[x_i, x_j]$  は確率変数 $x_i$  と $x_j$  の共分散を表す。ただし、本研究では確率変数に相関は無いと仮定した故、確率変数の共分散は分散のみとなる。

偏微分法によれば式(3)、(7)の連立一次方程式の解法において左辺の剛性マトリクスの処理（例えば消去、L

U分解）は一度行えば良い。

変位と同様にコンクリートのクリープに伴うコンクリートと鋼桁の応力の期待値は、変位の期待値および確率変数の平均値 $\bar{x}_i$  ( $i=1 \sim 4$ ) を用いて次式で表される。コンクリート応力の期待値

$$\sigma_c(t_2, t_1) = E_f [B_c] \{u\} - \frac{E_f}{E_c} \sigma(t_1) \phi(t_2, t_1) \quad (9)$$

鋼桁応力の期待値

$$\sigma_s(t_2, t_1) = E_s [B_s] \{u\} \quad (10)$$

ここに、 $\sigma(t_1)$  は材令 $t_1$ で作用する応力を、また $E_s$ 、 $[B_s]$ は鋼桁のヤング係数およびひずみマトリクスである。

また、それぞれの応力の分散は次式で表される。

$$Var[\sigma_c(t_2, t_1)] = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \left( \frac{\partial \sigma_c}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left( \frac{\partial \sigma_c}{\partial x_j} \right)_{x_j} \cdot cov[x_i, x_j] \quad (11)$$

$$Var[\sigma_s(t_2, t_1)] = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \left( \frac{\partial \sigma_s}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left( \frac{\partial \sigma_s}{\partial x_j} \right)_{x_j} \cdot cov[x_i, x_j] \quad (12)$$

#### 4. 計算結果と検討

##### 4. 1 解析精度の検討

本解析法の妥当性及び精度の確認のため、別途実施したモンテカルロシミュレーションの結果と比較する。対象桁は、前掲の図-1の断面を有する支間長40mの単純完全合成桁である<sup>9)</sup>。コンクリートと鋼のヤング係数は、それぞれ $E_c = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とする。持続荷重は、55.25kgf/cmの等分布満載荷重である。確率変数として扱うクリープ構成係数の平均値は、図-2の湿度70%のクリープ係数進展グラフから最小二乗法により次のように同定し、その結果を図-3に示す。

$$\phi_{\infty} = 0.4, k_{\infty} = 0.025$$

$$\phi_{fn} = 2.3, k_f = 0.0045$$

これらを構成係数の基準値とし、個々のばらつきは変動係数で与えることにする。

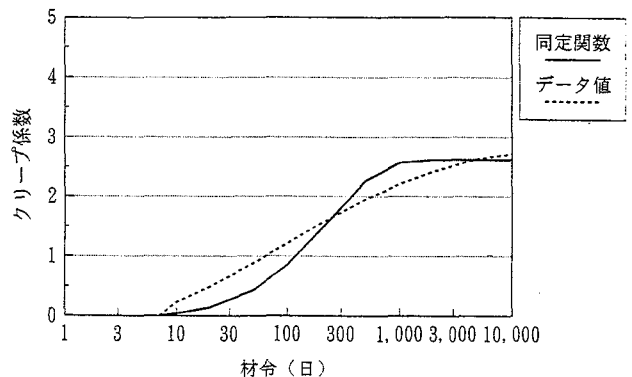


図-3 クリープ係数の同定結果

材令  $t_1=7$  日で持続荷重を載荷し、4つの確率量の変動係数を10～40%としたときの、材令1000日における支間中央のクリープたわみの分散を図-4、コンクリート床版上縁および鋼桁下縁のクリープ応力の分散をそれぞれ図-5、図-6に、モンテカルロシミュレーションの結果と併せて示す。モンテカルロシミュレーションのサンプル数は1000個である。変動係数が大きくなると、たわみ分散と床版上縁応力分散はモンテカルロ法に比して若干小さく、鋼桁下縁応力は大きくなっているが、総じて両者はほぼ一致している。細かくみると、合成桁たわみと鋼桁下縁応力については変動係数が40%、床版上縁については30%の確率量の変動まではよく一致し、本解析法のクリープ挙動のばらつきの評価法としての妥当性が示された

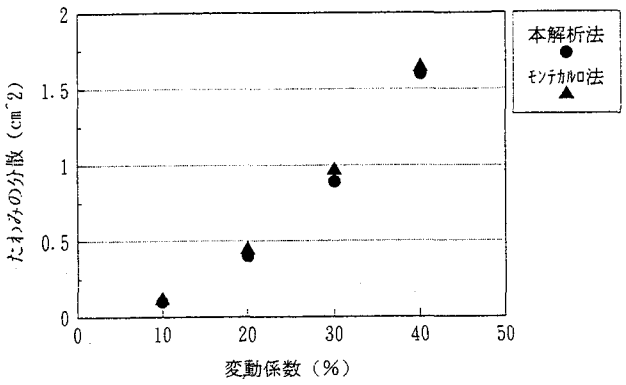


図-4 クリープたわみの解析精度

と思われる。また、モンテカルロ法は式(3)の剛性方程式を1000回解くのに対し、本解析法は式(3)、(7)をそれぞれ1回づつ解けばよいことから、本法の計算効率が高くて高いことが分かる。

#### 4. 2 クリープ挙動のばらつきの経時変化

各構成係数のばらつきをそれぞれ30%とし、支間中央のたわみと応力について、クリープ挙動の期待値( $\mu$ )と挙動の標準偏差( $\sigma$ )だけ変動した値の経時変化を図-7、図-8、図-9に示す。図-7はクリープたわみ、図-8、図-9はそれぞれ床版と鋼桁の上下縁クリープ応力である。因みに、弾性(初期)値は図中に記したとおりである。この桁では、たわみ、応力の期待値は、材令1000日まで増加するがそれ以降は一定値のままであり変化しない。

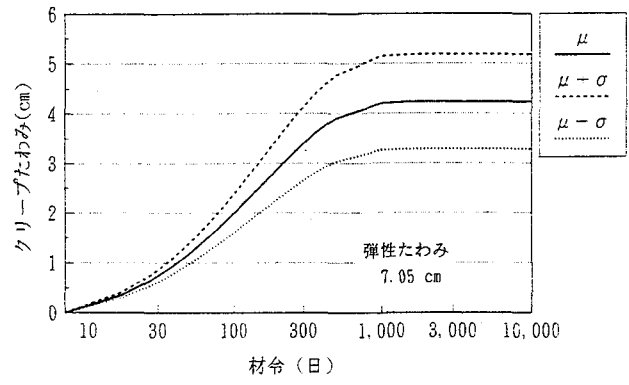


図-7 クリープたわみの経時変化

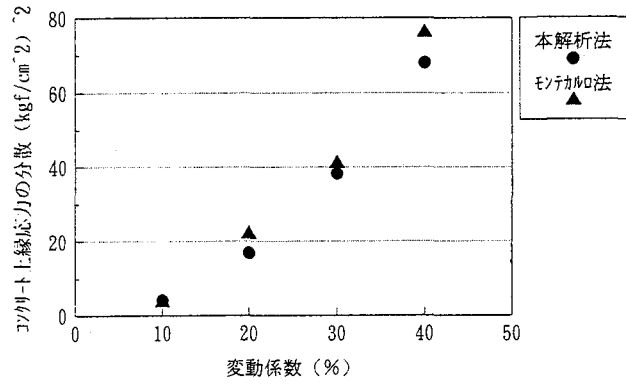


図-5 コンクリート応力の解析精度

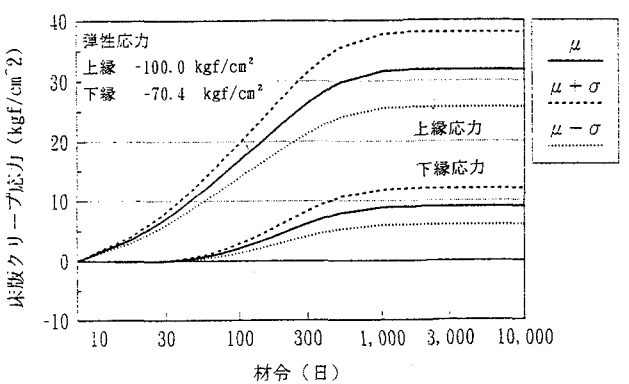


図-8 床版クリープ応力の経時変化

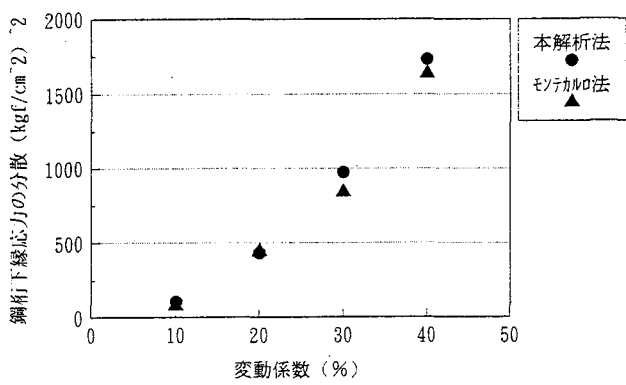


図-6 鋼桁応力の解析精度

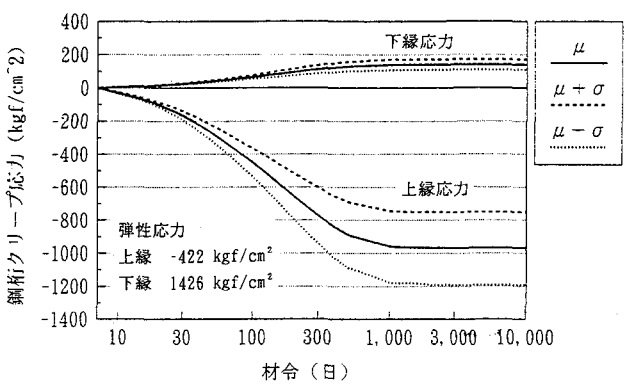


図-9 鋼桁クリープ応力の経時変化

また各種標準偏差も同様の傾向を有している。これは図-3に示すように用いた同定クリープ関数が、材令1000日ではほぼ最終値に収束するためである。床版上下縁では、弾性応力は圧縮であるが、クリープにより引張応力が生じるため圧縮応力が減少する、いわゆる応力緩和状態となっている。床版クリープ応力の変動係数は、材令1000日で上下縁それぞれ19%と33%で、ばらつきそのものは下縁側が大きくなっている。一方、鋼桁では上縁のクリープ応力が著しく大きく、且つ弾性応力と同符号で重なり合うことになる。鋼桁のクリープ応力の変動係数は上下縁とも22%である。

4. 3 構成係数の影響とたわみ感度

図-10に4つの構成係数が、基準値の場合と、個々に基準値から40%増加したときの支間中央のクリープたわみの経時変化を示す。図より他の係数に比べ、フロークリープの最終値の増加が大きなたわみ増加と成っているのが分かる。ただし各係数の影響度は全期間に渡って一定ではなく、材令の経過中に変動している。図-11には式(7)で求めたたわみの1次変動率（感度）を示す。感度は遅れ弾性クリープの最終値（ $\phi_{fs}$ ）とフロークリープの最終値（ $\phi_{fs}$ ）については基準値から単位量だけ変動したときの、また遅れ弾性クリープの速度係数（ $k_d$ ）については1/100、フロークリープの速度係数（ $k_f$ ）については1/1000の変動に対するたわみ感度を示している。遅れ弾性クリープの最終値に対するたわみ感度は、材令初

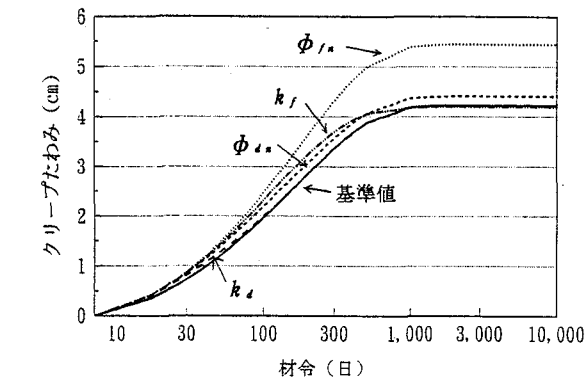


図-10 構成係数別クリープたわみ

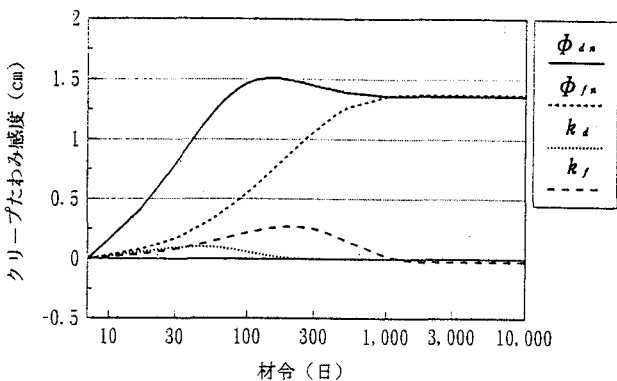


図-11 たわみ感度

期に大きくなり、100日前後でピーク値を迎えた後、漸減収束している。一方、フロークリープの最終値に対するたわみ感度は、材令と共に漸増し、材令1000日で遅れ弾性クリープの最終値に対するたわみ感度の最終値とほぼ等しくなっている。ただし、両者の基準値が相当異なっているため、材令初期の感度の差異がそのままたわみのばらつきに現れてこないと考えられる。

遅れ弾性クリープの速度係数のたわみ感度は、材令300日で0となり、これ以降はたわみに対して全く影響を及ぼさないことを示している。またフロークリープの速度係数に対するたわみ感度は、材令1000日で正值から僅かに負値となっているが、これ以降の材令では速度増加により基準値の場合に比せたわみは小さいことを意味している。

4. 4 床版と鋼桁の合成程度の影響

本解析法では床版と鋼桁を結合するばね剛性を変えることにより、完全合成桁と不完全合成桁の解析が可能である。表-1には、フロークリープの最終値のみを30%変動させたときの完全合成桁（ $k_z=\infty$ ）と、不完全合成桁2ケースについて弾性値と材令10000日におけるクリープ挙動の期待値と標準偏差を示した。不完全合成桁になるとクリープによるたわみ、鋼桁上下縁応力の期待値および標準偏差値は完全合成に比べ小さくなっている。一方、スラブではクリープ応力の標準偏差値は上下縁とも鋼桁と同様に減少しているが、期待値そのものは上縁では僅かながら増加、下縁ではばね剛性がかなり低いと反対符号となっている。これは、鋼桁のコンクリートクリープに対する拘束力、およびコンクリートの鋼桁に対するその反力の大きさが減少するためと考えられる。

4. 5 鋼桁拘束度によるクリープ挙動

合成桁ではコンクリートのクリープひずみを鋼桁が拘束することになる。そこで拘束度のクリープ挙動への影

表-1 合成度のクリープ挙動への影響

| ばね剛性 $k_z$<br>$\times 10^3$<br>(kgf/cm/cm) |          |      | たわみ<br>(cm)    | 支間中央断面 応力 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |                 |                 |                  |
|--------------------------------------------|----------|------|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                                            |          |      |                | スラブ上縁                            | スラブ下縁           | 鋼桁上縁            | 鋼桁下縁             |
| $\infty$<br>(完全合成)                         | 弾性値      |      | 7.05<br>(1.00) | -100.0<br>(1.00)                 | -70.4<br>(1.00) | -42.2<br>(1.00) | 142.6<br>(1.00)  |
|                                            | クリ<br>ープ | 期待値  | 4.23<br>(1.00) | 31.8<br>(1.00)                   | 9.0<br>(1.00)   | -96.8<br>(1.00) | 14.0<br>(1.00)   |
|                                            |          | 標準偏差 | 1.26<br>(1.00) | 8.25<br>(1.00)                   | 4.01<br>(1.00)  | 2.90<br>(1.00)  | 4.2<br>(1.00)    |
|                                            |          | 弾性値  |                | 8.78<br>(1.24)                   | -95.7<br>(0.96) | -59.5<br>(0.84) | -78.0<br>(1.85)  |
| 1.25<br>(不完全合成)                            | クリ<br>ープ | 期待値  | 3.50<br>(0.83) | 32.2<br>(1.01)                   | 1.8<br>(0.20)   | -81.3<br>(0.84) | 11.9<br>(0.85)   |
|                                            |          | 標準偏差 | 1.05<br>(0.83) | 7.92<br>(0.96)                   | 2.44<br>(0.61)  | 2.46<br>(0.85)  | 3.6<br>(0.86)    |
|                                            |          | 弾性値  |                | 10.20<br>(1.45)                  | -91.8<br>(0.92) | -49.8<br>(0.71) | -109.7<br>(2.60) |
| 0.625<br>(不完全合成)                           | クリ<br>ープ | 期待値  | 2.94<br>(0.70) | 32.8<br>(1.03)                   | -4.3<br>(-0.48) | -68.5<br>(0.71) | 10.2<br>(0.73)   |
|                                            |          | 標準偏差 | 0.89<br>(0.71) | 7.68<br>(0.93)                   | 1.08<br>(0.27)  | 2.09<br>(0.72)  | 3.1<br>(0.73)    |

( ) 内は完全合成の場合との比

表-2 合成桁鋼断面諸元

|      | As (cm <sup>2</sup> ) | Is x10 <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> ) |
|------|-----------------------|----------------------------------------|
| モデルA | 6 0 0 (1.0)           | 3. 7 5 (1.0)                           |
| モデルB | 6 6 0 (1.1)           | 5. 9 9 (1.68)                          |
| モデルC | 7 2 0 (1.2)           | 9. 2 1 (2.58)                          |

( ) 内はモデルAに対する比

響を調べるため、3種類の桁断面に関してクリープ計算を行った。図-1の断面桁をモデルA、モデルAの床版および鋼桁の両フランジ寸法、ならびにウェブ厚はそのままウェブ高さを $h=250\text{cm}$ 、 $h=300\text{cm}$ とした桁を、それぞれモデルB、モデルCとする。各モデルの鋼桁の断面積と断面2次モーメントは表-2のとおりであり、モデルA、

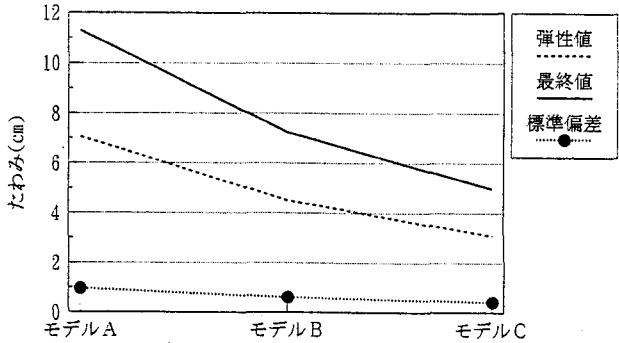


図-12 拘束度の影響 (たわみ)

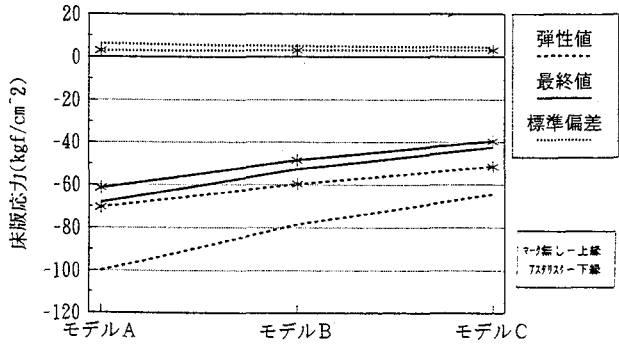


図-13 拘束度の影響 (床版応力)

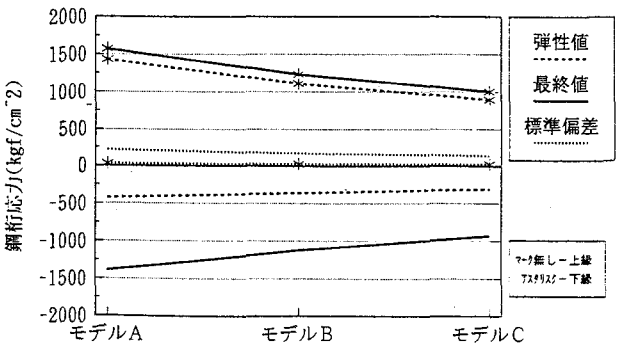


図-14 拘束度の影響 (鋼桁応力)

B、Cと剛性が大きくなると、クリープ拘束度も増加する。載荷および支持条件はすべて4.1と同じとし、フロークリープの最終値のみを30%変動させたときの材令10000日におけるクリープたわみを図-12に、床版と鋼桁のクリープ応力を図-13、図-14にそれぞれモデル毎に示す。図中の最終値とは弾性値とクリープ挙動の期待値の和を表す。言い換えると最終値と弾性値の差がクリープ期待値であるが、桁の拘束度が大きくなるとクリープ期待値は小さくなっている。これは、4.4のずれ止め剛性が小さくなり拘束度が低下する場合とまったく同じである。クリープたわみの標準偏差は拘束度の増加と共に若干小さくなるが、応力の標準偏差はスケールのにはほとんど変化はない。

## 5. 結論

不完全合成桁の確定系クリープ有限要素解析法を發展させ、1次近似2次モーメント法を用いてクリープ係数のばらつきを確率的に考慮した、クリープ解析法を提示し、各種パラメトリックスタディによりクリープ挙動のばらつきを検討した。本研究では、クリープ予測式の元となるクリープ係数を、4つの構成係数から成るとし、各々について合成桁のクリープ挙動に対する影響評価を可能としている。本研究によって得られた成果をまとめると次のようになる。

- ①合成桁のクリープ解析にクリープ係数のばらつきを考慮するため、合成桁の剛性方程式の偏微分から1次近似2次モーメントの定式化を行い、解析精度を調べた結果、構成係数のばらつきの変動係数が30%までは、モンテカルロシミュレーションの結果とほぼ一致することを確認した。
- ②クリープ挙動のばらつきは材令と共に増加するが、期待値が一定値に収束するとばらつきの変動も生じない。
- ③4つの構成係数の内フロークリープの最終値が、クリープ挙動に大きな影響を及ぼすが、各構成係数の影響度は、材令経過中で異なることを確認した。
- ④ずれ止め剛性の増加、また鋼桁剛性の増大等、コンクリートのクリープの拘束度が大きくなると合成桁クリープ挙動の期待値は減少し、クリープ係数のばらつきの影響は相対的に小さくなることを示した。

今回の検討例では、クリープ構成係数のばらつきを既定の変動係数として与えたが、実験によるクリープデータベースの蓄積により、実際の湿度、温度、配合等のばらつきと構成係数の変動との関係を明確にし、予測式の精度の向上を図るべきであることは言うまでもない。コンクリート材料のヤング係数や強度などよりはるかに大きいばらつきを含むクリープを対象として構造解析をする場合、クリープ予測式の吟味の上、こうした確率的解析法により応答のばらつきの大きさも合わせて示すことが必要ではないと思われる。

# 参考文献

- 1) 阪田憲次：時間依存性材料特性－クリープ・乾燥収縮－，コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，コンクリートライブラリー69，pp.79～95，1991
- 2) 阪田憲次，綾野克紀：コンクリートの非線形クリープ予測式の提案，土木学会論文集No.451/V-17，pp.179～188p，1992
- 3) Madsen, H.O. and Bazant, Z. P.: Uncertainty Analysis of Creep and Shrinkage Effects in Concrete Structures, ACI JOURNAL/March-April, pp.116-127, 1983
- 4) 椿 龍哉：コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測式に関する感度解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，pp.217～222，1989
- 5) 椿 龍哉：コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測法の現状，土木学会論文集No.414/V-12，pp.23～31，1990
- 6) Floris, c., Marelli, R. and Regondi, L.: Creep Effects in Concrete Structures: A Study of Stochastic Behavior, ACI MATERIAL JOURNAL/May-June ,pp.248-256, 1991
- 7) Bazant, Z. P. and Liu, K. L.: Random Creep and Shrinkage in Structures: Sampling, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.5, pp.1113-1134, 1985
- 8) 椿 龍哉：統計的ばらつきを考慮したコンクリート構造のクリープ解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.8，pp.537～540，1986
- 9) 高海克彦，浜田純夫：不完全合成桁のクリープ解析法，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1269～1278，1993
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，pp.37～41，1990
- 11) 日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧，pp.45～50，1985
- 12) 渡辺誠一，六車 熙：コンクリートのクリープひずみに関する一考察（遅れ弾性および回復クリープのP C 静定部材のクリープ解析に及ぼす影響），日本建築学会構造系論文報告集，第402号，pp.71～78，1989
- 13) 中桐 滋，久保俊明：確率有限要素法入門，1985

(1994年9月14日受付)