

若材令での遅れ弾性成分を考慮した コンクリート斜張橋のクリープ解析

A CREEP ANALYSIS OF CABLE-STAYED CONCRETE BRIDGES CONSIDERED WITH THE EFFECTS
OF THE DELAYED ELASTIC CREEP IN EARLY AGES

富田耕司* 廣河和男**

By Koji TOMITA and Kazuo HIROKAWA

The evaluations of the effects of creep and shrinkage in prestressed concrete structures are always important problems. Especially, in case of creep analysis for long span concrete bridges such as cable-stayed and arch bridge erected by step-by-step method, it is necessary to evaluate the effects of creep at each stage of erection of the girder accurately, because the changes of stress due to creep phenomena during the erection of the girder are accumulated and not a little influence on the final stress state of the bridge. This paper reports a more accurate analytical method of creep by taking account of the delayed elastic strain of creep at early ages of concrete. To aim at general purpose of this method, analytical method by using stiffness matrix is also developed. The numerical examples are presented in comparison with other analytical results.

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の大型化に伴って、構造形式が複雑化・多様化しており、施工方法も多種多様な工法が考案されている¹⁾。このような状況下、設計上で常に問題となるクリープ及び乾燥収縮の影響評価はさらに重要な問題となってきた。特にPC斜張橋やアーチ橋など、段階架設工法を多用する橋梁形式では架設時のクリープによる断面力の変化が、完成構造系の応力状態に思わぬ影響を及ぼす場合がある。つまり、初期の架設段階で発生したクリープによって変化する断面力は、完成構造系に至るまで、その変化量が累積・拡大され影響を増幅することが考えられる。また、クリープひずみの進行予測の考え方も1つのひずみから成る考え方から、2つのひずみから成る考え方に進歩してきた。すなわち、クリープひずみには塑性ひずみ(フローひずみ)のみならず遅れ弾性ひずみ(回復するクリープひずみ)も含まれていることが1960年頃から一般的に認められるようになった²⁾。この遅れ弾性ひずみは数多くの実験から持続荷重載荷後90日程度で比較的早期に概ね終了することが知られている³⁾。一方、コンクリート構造物のクリープに関する解析的研究は既に多数報告されている^{4)・5)・6)}。代表的な考え方として、いわゆるDischingerの解法とTrost-Bazantの解法がある^{7)・7)・8)}。前者は、一定応力度に対応するひずみの変動に着目し、その変動によって新たに発生する応力度を評価する考え方であり、後者は、一定に保たれたひずみに付随する応力度

* 工修 日本構研情報(株)

** 日本電子計算(株)

システム開発グループ

技術営業部

(〒541 大阪市中央区備後町1-5-2)

(〒550 大阪市西区江戸堀1-9-1)

の変動に着目して、リラクセーション係数を用いて応力度の変化を評価する考え方である。Dischingerのクリープ公式が成立した頃は、まだ、クリープひずみの中に回復する弾性的なひずみ成分があるということは知られていなかったこともあって遅れ弾性ひずみが評価できない。その後、遅れ弾性ひずみの最終値を評価できるように改良した改良Dischinger法(Improved Dischinger method)をRüschらは提案した³⁾。しかし、この解法では、若材令のコンクリート部材を有する架設構造系における進行途中の遅れ弾性ひずみを正確に評価することが難しい。そこで、著者らは改良Dischinger法の考え方を独自の形で展開し拡張して若材令での遅れ弾性ひずみを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係式を導いた^{9), 10)}。本文は、若材令での遅れ弾性ひずみを考慮して、架設段階を追った解析に適用できるコンクリートの応力-ひずみ関係式とそれを適用した変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析について報告するものである。

2. 基本式

2. 1 クリープひずみの進行予測式

クリープひずみは弾性ひずみに比例して生じ、クリープ係数 ϕ を用いて次式のように表されると DavisとGlanvilleは提案している^{4), 11)}。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e \cdot \phi \quad (1)$$

ここで、 ε_c はコンクリートのクリープひずみ、 ε_e は持続荷重によるコンクリートの弾性ひずみであり、 ϕ はクリープ係数である。

コンクリートのクリープひずみには残留するひずみばかりでなく、もとに戻るひずみが含まれていることが早くから確認されており、最近では、流動変形学的概念からなる'クリープ'と言う定義が曖昧になってきている²⁾。このような背景で式(1)に用いるクリープ係数の算出式は各国の設計基準に様々な形で定義されている。ACI 209-82や我国のプレストレスト・コンクリート設計施工規準(建築学会)などでは、流動変形学的概念に基づき、クリープ係数算出式は、フロー(流動)成分のみで定義されている。それに対し、DIN 4227、や我国の道路橋示方書(日本道路協会)、コンクリート標準示方書(土木学会)などでは、コンクリートのクリープひずみは遅れ弾性ひずみ(回復するクリープひずみ)とフローひずみ(回復しないクリープひずみ)との2つの成分によって構成されているとする考え方で定義されている¹²⁾。また、CEB-FIPでは、MODEL CODE 1978は後者の考え方であったが、MODEL CODE 1990は前者の考え方に替わっている。

本研究では、この遅れ弾性ひずみによる変形挙動を精度よく評価するという目的から道路橋示方書で採用している2つの成分からなるクリープひずみ予測式を用いることとする。

$$\phi(t, t_1) = \phi_{e0} \cdot \beta_e(t - t_1) + \phi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(t_1)\} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_{e0} : 遅れ弾性ひずみに対する基本のクリープ係数で、一般に0.4の値が用いられている。

ϕ_{f0} : フローひずみに対する基本のクリープ係数で構造物の環境条件に応じて規定されている。

$\beta_e(t - t_1)$: 載荷後の有効材令の経過日数に関する関数である。

$\beta_f(t)$: コンクリートの有効材令 t および部材の仮想厚さに関する関数である。

t_1, t : 載荷時およびクリープ係数の値を算出する時点でのコンクリートの有効材令。

便宜上、式(2)の右辺第1項の遅れ弾性成分(回復するクリープ成分)と右辺第2項のフロー成分(回復しないクリープ成分)との2つに分離して式(3)のように表すこととする。

$$\phi(t, t_1) = \phi_e(t - t_1) + \phi_f(t, t_1) \quad (3)$$

2. 2 クリープ解析法

(1) 一般式

力学的な材料特性が線形である場合には、種々の応力成分によるク

リープ変形量を重ね合わせることができる⁷⁾。図-1のように、ある変化するコンクリート応力度 $\sigma(\tau)$ を仮

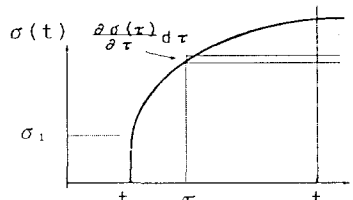


図-1 経時変化する応力度

定して、コンクリートの材令 t_1 で当初応力度 σ_1 が載荷された場合の着目材令 t でのコンクリートひずみは次式で表すことができる。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 + \phi(t, t_1)) + \int_{t_1}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{E} \cdot (1 + \phi(t, \tau)) d\tau + \epsilon_s(t) \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon(t)$: 経時変化するコンクリートひずみ、 E : コンクリートのヤング係数、
 $\phi(t, t_1)$: クリープ係数、 $\epsilon_s(t)$: 乾燥収縮ひずみ、
 τ : 任意のコンクリートの材令 ($t_1 \leq \tau \leq t$)。

(2) 既往の解法^{5)・6)}

いわゆるDischingerの解法は、同一のコンクリートに関しては載荷材令が異なっても任意の材令におけるクリープひずみの進行速度は同じとするWhitneyの法則 ($\phi(t, t_1) = \phi(t) - \phi(t_1)$) を適用し、また、乾燥収縮の進行速度も $\phi(t)$ と相似とする仮定を設けて、式(4)を変形して下記に示す微分方程式の形にしたものである^{2)・3)}。

$$\frac{d\epsilon(\phi)}{d\phi} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma(\phi)}{d\phi} + \frac{\sigma(t_1)}{E} + \frac{d\epsilon_s(\phi)}{d\phi} \quad (5)$$

この微分方程式を直接取り扱うのは困難であり、一般には、近似的に変化する応力の進行度をクリープの進行度と線形の関係にあると仮定して、式(5)の微分方程式を展開した次式が用いられている。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 + \phi(t, t_1)) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{E} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_1) \right\} + \epsilon_s(t) \quad (6)$$

上述のように、式(6)では、クリープひずみを構成する遅れ弾性ひずみは考慮されていない。Nilsenらはフローひずみに対して著しく速く進行が完了する遅れ弾性ひずみを瞬時に発生すると仮定した上でこれを考慮し得る解として次式に示す微分方程式を提案している³⁾。

$$\frac{d\epsilon(\phi_f)}{d\phi_f} = \frac{1 + \phi_0}{E} \cdot \frac{d\sigma(\phi_f)}{d\phi_f} + \frac{\sigma(t_1)}{E} + \frac{d\epsilon_s(\phi_f)}{d\phi_f} \quad (7)$$

ここで、Rüschらは $\phi_0 = 0.4$ と報告しており、式(6)と同様の考え方でクリープ及び乾燥収縮によって変化するコンクリート応力の進行度をフローひずみの進行度と線形の関係にあると考えると式(7)は次式のように展開でき、一般に、改良Dischinger法 (I. D 法) と呼ばれているものである^{2)・3)・7)}。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 + \phi(t, t_1)) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{E} \cdot \left\{ 1 + 0.4 + \frac{1}{2} \phi_f(t, t_1) \right\} + \epsilon_s(t) \quad (8)$$

また、我国では、回復クリープひずみを考慮した星埜らの実用式がある (式(9))¹³⁾。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 + \phi(t, t_1)) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{E} \cdot \left\{ 1 + \phi_d + \frac{1}{2} \phi(t, t_1) \right\} + \epsilon_s(t) \quad (9)$$

ここで、 ϕ_d : 回復クリープ係数

この解法は、載荷荷重や変化応力度に関する全ての遅れ弾性ひずみが瞬時に発生すると考えた I. D 法に対して、変化応力度 (減少応力度) に関する遅れ弾性ひずみ (回復クリープひずみ) のみを瞬時に発生すると考えているので、仮定による誤差は改善されている。しかし、架設時のワーゲン荷重などの除荷荷重に関する遅れ弾性ひずみの評価ができていないという弱点があり、また持続荷重に関する載荷材令の評価ができないことから構造系の変化を伴う架設段階を追ったクリープ解析には適用できない。

遅れ弾性成分を考えたもうひとつの代表的な解法として Trost-Bazant 法がある。この解法は、一定ひずみにおけるコンクリートの応力変動に着目した解法であり、次式のリラクセーション係数 (材令係数)

$\rho(t, t_1)$ を導入して式(4)を次式のように展開している^{3), 14)}。

$$\left. \begin{aligned} \rho(t, t_1) &= \int_{t_1}^t \frac{\frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \cdot \phi(t, t_1) d\tau}{\{\sigma(t) - \sigma_1\} \cdot \phi(t, t_1)} < 1 \\ \epsilon(t) &= \frac{\sigma_1}{E} \cdot \{1 + \phi(t, t_1)\} + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{E} \cdot \{1 + \rho(t, t_1) \cdot \phi(t, t_1)\} + \epsilon_s(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3. 若材令での遅れ弾性成分を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係式

3. 1 提案式

(1) 解析上の仮定

式(4)を若材令のコンクリート構造物に適用できる実用式とするために、次の2つの仮定を設けた^{3), 15)}。

i) 仮定1: クリープによって連続的に発生するコンクリートの微小変化応力度 $(\frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau)$ に関するクリープ進行度は、比較的短時間で現われる遅れ弾性成分を着目時間間隔(材令 $t_1 \sim t$ 区間)について瞬時に発生すると考える。すなわち、式(3)から当初応力に関するクリープ係数は、

$$\phi(t, \tau) = \phi_v(t - \tau) + \phi_f(t, \tau) \quad (11)$$

微小変化応力度に関するクリープ係数は

$$\phi(t, \tau) = \phi_v(t - t_1) + \phi_f(t, \tau) \quad (12)$$

ここで、便宜上 $\phi_v' = \phi_v(t - t_1)$ とおいて

$$\phi(t, \tau) = \phi_v' + \phi_f(t, \tau)$$

あるいは、

$$\phi(t, \tau) = \phi_v' + \phi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(\tau)\} \quad (13)$$

ただし、 τ は $t_1 < \tau < t$ である。

ii) 仮定2: クリープによって変化するコンクリート応力の進行度はクリープのフローひずみの進行と相似であると仮定する。すなわち、コンクリート材令 t_1 から材令 t の区間で発生する進行度は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\tau) &= \sigma(t_1) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{\phi_f(t, t_1)} \cdot \phi_f(\tau, t_1) \\ \sigma(\tau) &= \sigma(t_1) + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{\beta_f(t) - \beta_f(t_1)} \cdot \{\beta_f(\tau) - \beta_f(t_1)\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

また、式(2)から

ここでも、 τ は $t_1 < \tau < t$ である。

(2) 連続的に変化する応力下でのコンクリートの応力-ひずみ関係式

仮定2を適用することにより、連続して変化する応力度の変化速度は、式(14)を $\beta_f(\tau)$ で微分することで、次式のように表すことができる。

$$d\sigma(\tau) = \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{\beta_f(t) - \beta_f(t_1)} d\beta_f(\tau) \quad (15)$$

上式の材令 τ で発生した微小変化応力度 $(d\sigma(\tau))$ による着目材令 t でのひずみ変化は微小項であるので一定応力度下のコンクリートひずみとみなすと、次式で表される。

$$d_\tau \epsilon(t) = \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{\beta_f(t) - \beta_f(t_1)} \cdot \frac{1}{E} \cdot \{1 + \phi(t, \tau)\} d\beta_f(\tau) \quad (16)$$

微小変化応力度に関する仮定1のクリープ進行予測式(式(13))を適用すると次式のようになる。

$$d_\tau \epsilon(t) = \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{\beta_f(t) - \beta_f(t_1)} \cdot \frac{1}{E} \cdot \{1 + \phi_v' + \phi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(\tau)\}\} d\beta_f(\tau) \quad (17)$$

つまり、式(4)の右辺第2項は式(17)を $\beta_f(\tau)$ で積分することによって展開できる。
すなわち、

$$\Delta \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t) - \sigma(t_1)}{E} \cdot \left(1 + \phi_v' + \frac{1}{2} \cdot \phi_{f0} \cdot \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_1) \} \right) \quad (18)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon(t)$ は材令 t_1 から材令 t の間に発生する変化応力度によるひずみ変化量であるから、式(4)のコンクリートの応力-ひずみ関係式は次式ようになる。

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_1}{E} \cdot \{ 1 + \phi(t, t_1) \} + \frac{\sigma(t) - \sigma_1}{E} \cdot \left(1 + \phi_v' + \frac{1}{2} \cdot \phi_{f0} \cdot \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_1) \} \right) + \varepsilon_s(t) \quad (19)$$

ここで、 $\phi_v' = \phi_v(t - t_1)$

つまり、式(19)は変化応力度に関する材令 $t_1 \sim t$ 区間で生じる遅れ弾性ひずみを材令 t_1 で瞬時に発生すると考えた場合の応力-ひずみ関係を表すものである。

(3) 架設段階を追ったクリープ解析の実用式^{10)・15)}

図-2に示すようにステージ1で自重(q)が作用し(時刻 $t_1 \sim t_2$)、時刻 t_2 で構造系が変化して(ステージ2)斜材張力を導入する系を例にして時刻 t_3 における応力状態とその応力によるクリープひずみについて考えてみる。コンクリートの応力-ひずみ関係の基本式(式(19))は応力が連続的に変化する場合にのみ適用できる。架設段階を追った解析を行う際には、ステージ毎に構造系が変化し、複数の荷重が異なった載荷材令に作用するので、コンクリート応力は不連続に変化し、上述の基本式(式(19))は適用できない。そこで、これらの影響は別途評価することとし、応力度が連続的に変化する区間毎に応力-ひずみ関係の基本式(式(19))を適用して、重ね合わせの原理を適用することで、各架設段階のクリープの影響評価を行うことにする。

ステージ1： まず、時刻 t_1 で自重(q)を載荷した直後から時刻 t_2 の直前すなわち、構造系が変化して斜材張力が作用する直前までの区間に着目するとクリープによるコンクリートひずみは式(19)の外力による弾性ひずみを無視すると次式で得られる。

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\sigma_{0.1}}{E} \{ \phi_v(t_2 - t_1) + \phi_f(t_2, t_1) \} + \frac{\Delta \sigma_1}{E} \left\{ 1 + \phi_v' + \frac{1}{2} \phi_f(t_2, t_1) \right\} \quad (20)$$

ここで $\phi_v' = \phi_v(t_2 - t_1)$ 、 $\sigma_{0.1}$ は自重(q)による応力度、 $\Delta \sigma_1$ は時刻 t_2 で構造系が変化して斜材張力が作用する直前までの間に $\sigma_{0.1}$ が作用することで発生したコンクリートの変化応力度である。

ステージ2： 次に斜材が架設された構造系において斜材張力を導入した直後(t_2)から時刻 t_3 までの区間に着目し、その区間で生じるクリープひずみを考えてみる。時刻 t_2 で初めて載荷される斜材張力(T)については、前述のステージ1の場合と同様に式(19)を適用して次式が得られる。

$$\Delta \varepsilon_{2(B, b)} = \frac{\sigma_{0.2}}{E} \{ \phi_v(t_3 - t_2) + \phi_f(t_3, t_2) \} + \frac{\Delta \sigma_2}{E} \left\{ 1 + \phi_v' + \frac{1}{2} \phi_f(t_3, t_2) \right\} \quad (21)$$

ここで $\phi_v' = \phi_v(t_3 - t_2)$ 、 $\sigma_{0.2}$ は斜材張力(T)による応力度、 $\Delta \sigma_2$ は時刻 t_2 から時刻 t_3 まで

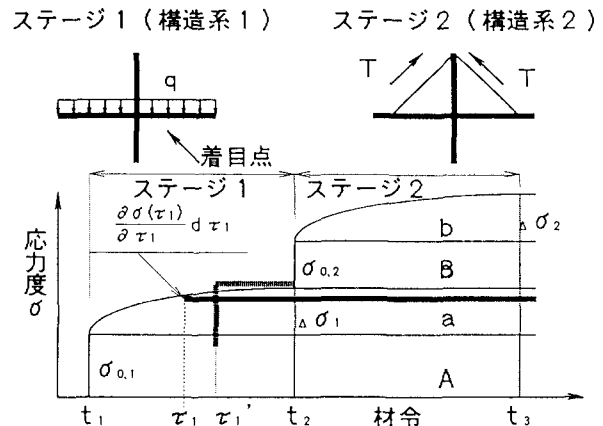


図-2 架設段階を追ったコンクリートの応力状態

の間に $\sigma_{0.1}$ が作用することで発生したコンクリートの変化応力度である。

次に、時刻 t_1 で載荷して時刻 t_2 まで既にクリープが進行している荷重（自重）に関するクリープひずみについて考えてみる。図-3に示すように時刻 t_1 で持続荷重が作用した場合の時刻 $t_2 \sim t_3$ の間で進行するクリープひずみはクリープひずみ進行曲線において時刻 $t_1 \sim t_3$ までのクリープひずみから時刻 $t_1 \sim t_2$ までのクリープひずみを差し引いたものであり、次式で得られる。

$$\Delta \varepsilon_{2(A)} = \varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_2) \quad (22)$$

上式を自重に関するひずみ進行に適用して、フロー成分について、Whitneyの仮定を用いて整理すれば次式のように表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_{2(A)} = \frac{\sigma_{0.1}}{E} \{ (\phi_v(t_3 - t_1) - \phi_v(t_2 - t_1)) + \phi_f(t_3, t_2) \} \quad (23)$$

次にステージ1で発生した変化応力（ $\Delta \sigma_1$ ）によるクリープひずみについて考えてみる。図-2に示すように、ステージ1で発生した変化応力は材令 t_1 から t_2 区間において連続的に発生し、載荷されることになり、材令 t_2 から材令 t_3 区間の解析を行う際に、載荷時刻を特定できない。そこで微小時間 $d\tau_1$ に発生する微小変化応力については、式(16)と同様に一定応力度下でのクリープひずみ進行予測式を適用できると考える。

すなわち、ステージ2でのクリープひずみは、式(23)の関係を用いて次式のように表される。

$$d\varepsilon_{2(a)} = \frac{\partial \sigma(\tau_1)}{\partial \tau_1} \cdot \frac{1}{E} \{ (\phi_v(t_3 - \tau_1) - \phi_v(t_2 - \tau_1)) + \phi_f(t_3, t_2) \} d\tau_1 \quad (24)$$

ステージ1で発生した変化応力によるステージ2でのクリープひずみ量は上記の微小変化応力度によるものの累積として評価でき、次式で表される。

$$\Delta \varepsilon_{2(a)} = \int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon_{2(a)} \quad (25)$$

しかし、式(25)を構造物の解析に直接適用するのは、煩雑な数値積分を行う必要がある。そこで、時間関数（積分変数）である遅れ弾性成分の項を時間に無関係な定数項として評価するために下記の手法を設定する。

すなわち、次ステージ以降（ $t_{i+1} \sim t_{i+2}$ ）での遅れ弾性成分を評価する際に、材令 t_1 から t_{i+1} の区間において連続的に発生した変化応力度は材令 τ_1' （ $t_1 < \tau_1' < t_{i+1}$ ）で瞬時に載荷されると考える。

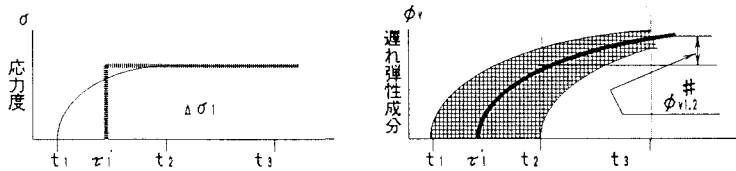


図-4(a)ステージ1で発生した変化応力度 図-4(b)ステージ1で発生した微小変化応力度に関する遅れ弾性成分進行度

図-4(b)の編目部分に示すように、材令 $t_1 \sim$ 材令 t_2 区間で連続的に発生する微小変化応力度に関するクリープ係数の遅れ弾性成分は無数に存在する。そこで、上記の手法を適用してステージ1（材令 $t_1 \sim$ 材令 t_2 区間）で発生した変化応力度は材令 τ_1' で瞬時に載荷されたと考えると（図-4(a)の太い点線）これによる時刻 t_3 でのクリープひずみは次式のように表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_{2(a)} = \frac{\Delta \sigma_1}{E} \{ \phi_{v,2}^* + \phi_f(t_3, t_2) \} \quad (26)$$

ここで、 $\phi_{v,2}^* = \phi_v(t_3 - \tau_1') - \phi_v(t_2 - \tau_1')$

ステージ2でのクリープひずみは重ね合わせの原理を適用して式(21)、(23)および(26)より式(27)として表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_{2(A)} + \Delta \varepsilon_{2(a)} + \Delta \varepsilon_{2(B, b)}$$

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{\sigma_{0,1}}{E} \{ \phi_{v,1,2} + \phi_{f,2} \} + \frac{\sigma_{0,2}}{E} \{ \phi_{v,2,2} + \phi_{f,2} \} + \frac{\Delta \sigma_1}{E} \{ \phi_{v,1,2}^* + \phi_{f,2} \} + \frac{\Delta \sigma_2}{E} \left\{ 1 + \phi_{v,2,2} + \frac{1}{2} \phi_{f,2} \right\} \quad (27)$$

ここで、 $\phi_{v,1,2} = \phi_v(t_3 - t_1) - \phi_v(t_2 - t_1)$ 、 $\phi_{v,2,2} = \phi_v(t_3 - t_2)$ 、 $\phi_{f,2} = \phi_f(t_3, t_2)$

時刻 $t_n \sim t_{n+1}$ の間の任意ステージ n において発生するクリープひずみは式(27)を拡張して下記のように表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_n^c = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{0,i}}{E} \{ \phi_{v,i,n} + \phi_{f,n} \} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta \sigma_i}{E} \{ \phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n} \} + \frac{\Delta \sigma_n}{E} \left\{ 1 + \phi_{v,n,n} + \frac{1}{2} \phi_{f,n} \right\} \quad (28)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_n^c$: ステージ n でクリープによって発生したコンクリートひずみ
 $\sigma_{0,i}$: ステージ i で載荷されたコンクリートの弾性応力
 $\Delta \sigma_i$: ステージ i で、クリープによって発生するコンクリートの变化応力
 $\Delta \sigma_n$: ステージ n で、クリープによって発生するコンクリートの变化応力
 $\phi_{v,i,n}$: ステージ n におけるステージ i での載荷荷重に関する遅れ弾性成分の変化量
 $\phi_{v,i,n} = \phi_v(t_{n+1} - t_i) - \phi_v(t_n - t_i)$
 $\phi_{f,n}$: ステージ n におけるフロー成分の変化量
 $\phi_{f,n} = \phi_f(t_{n+1}, t_n)$
 $\phi_{v,i,n}^*$: ステージ n におけるステージ i で発生した変化応力に関する遅れ弾性成分の変化量
 $\phi_{v,i,n}^* = \phi_v(t_{n+1} - \tau_i') - \phi_v(t_n - \tau_i')$
 τ_i' : 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ の間に連続的に発生する変化応力度の載荷材令 ($t_i < \tau_i < t_{i+1}$)
 E : コンクリートのヤング係数

また、乾燥収縮のひずみ分布を断面内一定と仮定した場合の乾燥収縮ひずみによるコンクリートの応力-ひずみ関係式は式(28)と同様の考え方で取り扱って次式で表すことができる。ここで、第1項は乾燥収縮ひずみであり、第2項は、第3項は「乾燥収縮ひずみの進行に伴って発生するコンクリートの变化応力」によるクリープひずみの進行をあらわす。

$$\Delta \varepsilon_n^s = \varepsilon_{s,n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta \sigma_{s,i}}{E} \{ \phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n} \} + \frac{\Delta \sigma_{s,n}}{E} \left\{ 1 + \phi_{v,n,n} + \frac{1}{2} \phi_{f,n} \right\} \quad (29)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_n^s$: ステージ n で乾燥収縮によって発生したコンクリートひずみ
 $\varepsilon_{s,n} = \varepsilon_s(t_n, t_{n-1})$: ステージ n における乾燥収縮度の変化量
 $\Delta \sigma_{s,i}$: ステージ i で、乾燥収縮によって発生するコンクリートの变化応力
 $\Delta \sigma_{s,n}$: ステージ n で、乾燥収縮によって発生するコンクリートの变化応力

式(28)、式(29)を用いることによって若材令コンクリートでの遅れ弾性成分を考慮し、且つ、架設段階を追ったクリープ及び乾燥収縮解析が可能になる。次に、式(28)、式(29)を用いたクリープ及び乾燥収縮による影響評価を行う構造解析手法について述べる。

3. 2 汎用構造解析への適用

ここでは、剛性マトリックスを用いた変位法による構造解析への適用について述べる。この際、コンクリートのクリープ及び乾燥収縮によるひずみ変化を鉄筋およびPC鋼材が拘束する作用も同時に考慮する^{13)・16)}。クリープ及び乾燥収縮によってコンクリート断面図心に生じるひずみおよ

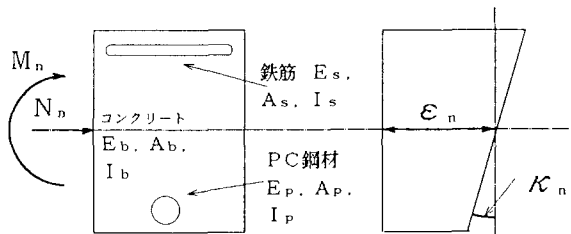


図-5 コンクリート部材の断面力と変形

び曲率変化をそれぞれ ϵ_n, κ_n とし、また断面に作用している軸力および曲げモーメントを N_n, M_n とすると、ステージ n での鋼材拘束を考慮した断面力とひずみのつり合い式は式(28)、式(29)より次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} N_n \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \\ D_2 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_n \\ \kappa_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

ここで、 N_n, M_n : ステージ n における断面力

ϵ_n, κ_n : ステージ n におけるひずみおよび曲率

$D_1 = \psi_n \cdot E_b \cdot A_b + E_s \cdot A_s + E_p \cdot A_p$

$D_2 = E_s \cdot Q_s + E_p \cdot Q_p$

$D_3 = \psi_n \cdot E_b \cdot I_b + E_s \cdot I_s + E_p \cdot I_p$

$\psi_n = 1 / (1 + \phi_{v,n} + 1/2 \cdot \phi_{f,n})$

$\phi_{v,n}$: ステージ n におけるステージ n で発生した遅れ弾性成分の変化量

$\phi_{f,n}$: ステージ n におけるフロー成分の変化量

E_b : コンクリートのヤング係数

E_s : 鉄筋のヤング係数

E_p : P C 鋼材のヤング係数

A_b : コンクリートの断面積

A_s : 鉄筋の断面積

A_p : P C 鋼材の断面積

Q_s : 鉄筋の断面一次モーメント

Q_p : P C 鋼材の断面一次モーメント

I_b : コンクリートの断面二次モーメント

I_s : 鉄筋の断面二次モーメント

I_p : P C 鋼材の断面二次モーメント

式(30)の荷重項は次式で表される。

クリープ解析の場合：

$$F_1 = \sum_{i=1}^n N_{c,i} \cdot (\phi_{v,i,n} + \phi_{f,n}) + \sum_{i=1}^{n-1} N_{i,i} \cdot (\phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n})$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^n M_{c,i} \cdot (\phi_{v,i,n} + \phi_{f,n}) + \sum_{i=1}^{n-1} M_{i,i} \cdot (\phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n})$$

乾燥収縮解析の場合：

$$F_1 = \psi_n \cdot E_b \cdot A_b \cdot \epsilon_{s,n} + \sum_{i=1}^{n-1} N_{s,i,i} \cdot (\phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n})$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n-1} M_{s,i,i} \cdot (\phi_{v,i,n}^* + \phi_{f,n})$$

ここで、 $N_{c,i}$: ステージ i で載荷されたコンクリートの軸力

$M_{c,i}$: ステージ i で載荷されたコンクリートの曲げモーメント

$N_{i,i}$: ステージ i において、クリープによって発生したコンクリートの変化軸力

$M_{i,i}$: ステージ i において、クリープによって発生したコンクリートの変化曲げモーメント

$\phi_{v,i,n}$: ステージ n におけるステージ i での載荷荷重に関する遅れ弾性成分の変化量

$\phi_{f,n}$: ステージ n におけるフロー成分の変化量

$\phi_{v,i,n}^*$: ステージ n におけるステージ i で発生した変化応力に関する遅れ弾性成分の変化量

$\epsilon_{s,n}$: ステージ n における乾燥収縮ひずみの変化量

$N_{s,i,i}$: ステージ i において、乾燥収縮によって発生したコンクリートの変化軸力

$M_{s,i,i}$: ステージ i において、乾燥収縮によって発生したコンクリートの変化曲げモーメント

式(30)より、単一部材における変位法の基本式は、部材内でのクリープおよび乾燥収縮により生ずる断面力の分布を直線と仮定すると次式の形で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ M_i \\ X_j \\ Y_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} D_1 & 0 & -D_2 & -D_1 & 0 & D_2 \\ 0 & B_1 & B_2 & 0 & -B_1 & B_2 \\ -D_2 & B_2 & B_3 & D_2 & -B_2 & B_4 \\ -D_1 & 0 & D_2 & D_1 & 0 & -D_2 \\ 0 & -B_1 & -B_2 & 0 & B_1 & -B_2 \\ D_2 & B_2 & B_4 & -D_2 & -B_2 & B_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta N_i \\ \Delta S_i \\ \Delta M_i \\ \Delta N_j \\ \Delta S_j \\ \Delta M_j \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\text{ここで } B_1 = \frac{12}{L^2} \left(D_3 - \frac{D_2^2}{D_1} \right), \quad B_2 = \frac{6}{L^2} \left(D_3 - \frac{D_2^2}{D_1} \right), \quad B_3 = 4 \cdot D_3 - \frac{3 \cdot D_2^2}{D_1}, \quad B_4 = 2 \cdot D_3 - \frac{3 \cdot D_2^2}{D_1},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta N_i \\ \Delta S_i \\ \Delta M_i \\ \Delta N_j \\ \Delta S_j \\ \Delta M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{1,i} \cdot (1 - r_n/2) \\ -F_{2,i} \cdot r_m/2 \\ -F_{2,i} \\ F_{1,j} \cdot (1 - r_n/2) \\ F_{2,j} \cdot r_m/2 \\ F_{2,j} \cdot (1 - r_m) \end{bmatrix}, \quad r_n = 1 - \frac{F_{1,j}}{F_{1,i}}, \quad r_m = 1 - \frac{F_{2,j}}{F_{2,i}},$$

L : 部材長

式(31)を簡単に表すと。

$$F = D \cdot V + P \quad (32)$$

次に鋼材の拘束作用がない場合について考えてみる。式(32)の D は剛性マトリックスであり、鉄筋および PC 鋼材による拘束作用がない場合には、 $D_1 = \phi E A$ 、 $D_2 = 0$ 、 $D_3 = \phi E I$ であるので、この場合の剛性マトリックス D は次式のように表される。

$$D = \frac{\phi}{L} \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 & -EA & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^2}EI & \frac{6}{L}EI & 0 & -\frac{12}{L^2}EI & \frac{6}{L}EI \\ 0 & \frac{6}{L}EI & 4EI & 0 & -\frac{6}{L}EI & 2EI \\ -EA & 0 & 0 & EA & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^2}EI & \frac{6}{L}EI & 0 & \frac{12}{L^2}EI & -\frac{6}{L}EI \\ 0 & \frac{6}{L}EI & 2EI & 0 & -\frac{6}{L}EI & 4EI \end{bmatrix} \quad (33)$$

式(30)、式(31)で示したように断面内に配置された鋼材を考慮して力のつり合い式をたてると、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による鋼材応力度の変化量も同時に計算することができる。

4. 計算例、および考察

図-6に示すような段階施工による片持ちばりについて計算を行ってみる。

i) 計算例 1 : たわみ性状の検討

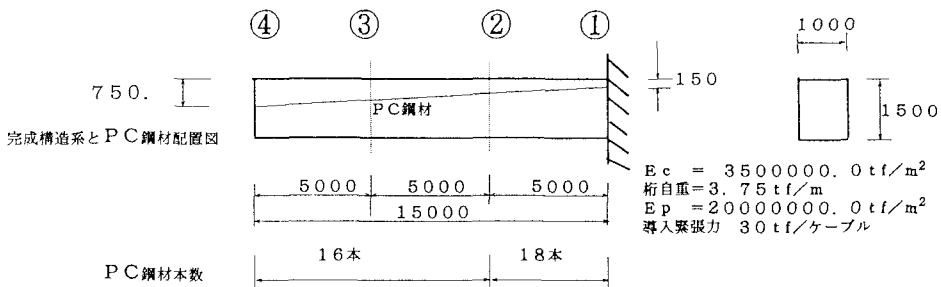


図-6 片持ちばりの構造図、断面寸法、荷重強度および PC 鋼材本数

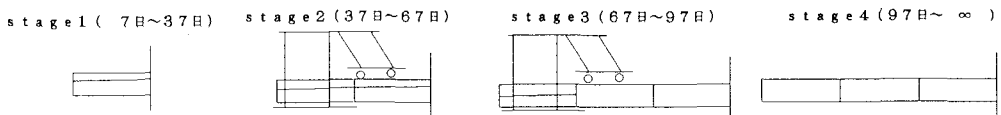


図-7 架設工程

図-7に示す架設行程の片持ちばりを考える。ステージ 1 (7日～37日)では、支保工架設で①-②部材のコンクリート打設を行う。その後①-②部材にプレストレスを60 tf (導入本数2本) 導入する。次にステージ 2 (37日～67日)では、①-②部材の先端②にワーゲン (WG = 35 tf) を架設し、②-③部材のコンクリート打設を行う。その後①-②部材と②-③部材にプレストレスを480 tf (導入本数16本) 導入する。続いてステージ 3 (67日～97日)では、格点②に載荷されていたワーゲンを②-③部材の先端③に移動させ、③-④部材のコンクリート打設を行う。その後、③-④部材にプレストレスを480 tf (導入本数16本) 導入する。最後にステージ 4 (97日～∞)では、格点③に載荷されていたワーゲンを撤去す

る。

遅れ弾性ひずみによる回復クリープの影響が顕著に現れる格点③のクリープによるたわみに着目して、次の4通りの解析方法での計算結果について検討する。

- 解法① 本解法（主桁内鋼材によるクリープ変形の拘束を考慮した場合）
- 解法② 本解法（主桁内鋼材によるクリープ変形の拘束を無視した場合）
- 解法③ I. D法（Improved Dischinger method）
- 解法④ Dischinger法

クリープ係数は図-8(a),(b),(c)の進行曲線に示すものを用いる。ここで、I. D法については遅れ弾性成分が瞬時に発生すると考えてその値を $\phi_v=0.4$ とし、フロー成分の値は図-8(b)に示すものを用いる。

Dischinger法については図-8(c)に示すコンクリート材令7日に初期载荷した場合の遅れ弾性成分（ $\phi_{v,1}$ ）とフロー成分（ ϕ_f ）をたし合わせたクリープ係数を用いる。数値計算については、本解法に基づいて、作成されたクリープ解析システム（CSS/CREEP）*を用いて計算した。その計算手順は図-9に示すようにまず弾性解析により着目ステージの断面力を求め、次にこの結果と着目ステージ以前のクリープ解析で得られたクリープ2次断面力によるクリープ解析を行う。この時、着目ステージ内で载荷された断面力はすべてそのステージの着目開始直後に作用すると仮定する。これらの計算を架設ステージ数繰り返す。ワーゲンの移動、撤去は、逆载荷による構造解析を行った。以上のような条件で実施した計算結果を表-1に示す。表-1の結果から次のことがいえる。

- (1) 本解法において鋼材を考慮した場合の主桁プレストレスによるクリープたわみは鋼材を無視した場合より小さい値となっている。これは、鋼材拘束を考慮することによりプレストレスの減少量を評価しているためプレストレスによるそりが減少しているからと考えられ、妥当な傾向であると判断される。
- (2) 自重によるクリープたわみについてDischinger法と本解法（鋼材を考慮した場合、無視した場合）を比べてみると本解法での結果が大きいたわみ値を与えている。これは、中間載

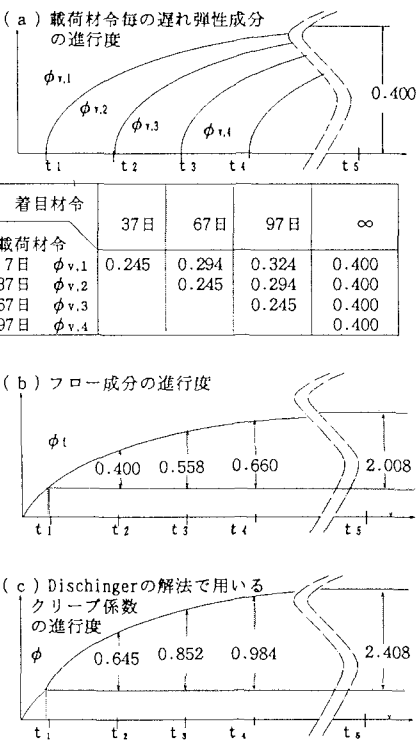


図-8 クリープ係数

表-1 格点3の $t = \infty$ でのたわみ値(mm)

	自重	プレストレス	ワーゲン	合計	比率
弾性ひずみ	12.797	-11.632	0.0	1.165	1.00
クリープたわみ	解法①	24.282	-22.189	1.565	3.658
	解法②	26.650	-26.340	1.880	2.190
	解法③	26.650	-26.340	1.880	2.190
	解法④	23.232	-24.054	2.449	1.627

注) 負符号は上方向変位を示す。

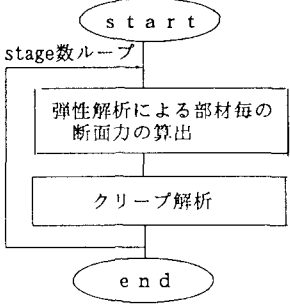


図-9 計算手順

*: CSS/CREEPはP.C.斜張橋設計施工支援システム開発会で開発されたP.C.斜張橋のクリープ解析プログラムである。

荷された荷重によるクリープひずみの取扱い方の違いにあると考えられる。すなわち、ステージ2で架設された②-③部材の自重による①-②部材のクリープひずみを考えてみると、図-10(b)、(c)に示すように本解法では時刻 t_2 で载荷された荷重について新たに遅れ弾性ひずみを考慮するが、Dischingerの解法ではこれを無視している。つまり、Dischingerの解法では、ステージ2で载荷された荷重に関する①-②部材のクリープ係数を、12.2%過小評価している結果である。

(3) ワーゲン荷重などの除荷される荷重についてはDischingerの解法による結果が本解法によるものより大きいたわみ値を与えている。これは、たとえば、ステージ2でワーゲンが载荷されステージ4で撤去される①-②部材について考えてみると図-11(c)、(d)に示すように、荷重の除荷(ワーゲン撤去)による遅れ弾性ひずみの取り扱い方の違いによるものと考えられ、ワーゲン撤去以降のクリープひずみの進行について次のことがいえる。

- ・ Dischingerの解法で用いるクリープひずみの進行はフローひずみの性質により除荷以降では零となる。
- ・ 本解法では、ワーゲンを撤去する直前までに発生した遅れ弾性ひずみが、時間 ∞ において完全に回復する。

なお、除荷される荷重について本解法では除荷される時点で逆载荷荷重を载荷して重ね合わせることで除荷荷重を評価している。このことから除荷荷重のクリープについては、Dischingerの解法は本解法より除荷される荷重に対するクリープひずみを過大評価しているといえる。

(4) 本解法(鋼材無視した場合)とI. D法では、最終たわみが同一の値を示した。これは図-8に示すように本解法、I. D法ともクリープ係数の遅れ弾性成分最終値($\phi_{e,\infty}$)が0.4であり、また、図-11(c)、(d)に示す除荷荷重(ワーゲン荷重)に関する遅れ弾性ひずみについても、I. D法では除荷直後に遅れ弾性成分が全て回復した結果であり、本解法でも $t = \infty$ でのクリープひずみは、フローひずみのみの値となり、理論的に同一な変位となる。

(5) 本解法において個々の荷重についてみると鋼材の拘束作用を考慮した結果は無視したものより絶対値が小さいたわみを与えている。これは、鋼材がコンクリートのクリープひずみを拘束する影響が評価されているためであると考えられ妥当な傾向である。また、図-12に示すように格点③に着目して除荷される荷重

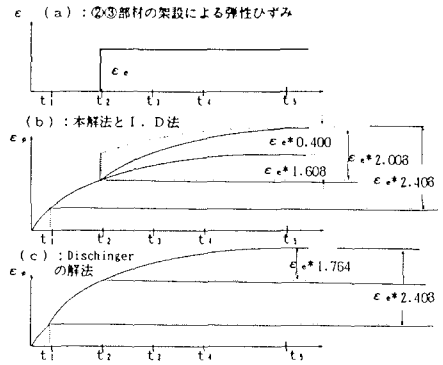


図-10 ステージ2で载荷された①-②部材のクリープひずみ

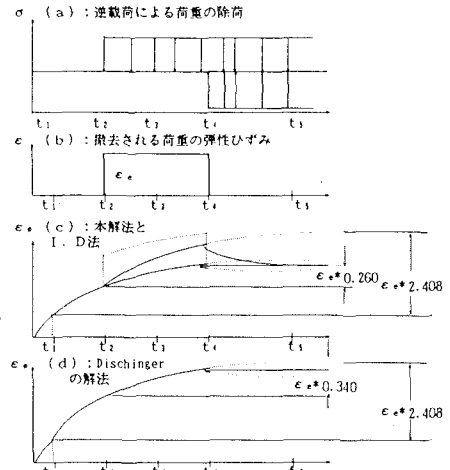


図-11 撤去される荷重によるクリープひずみ

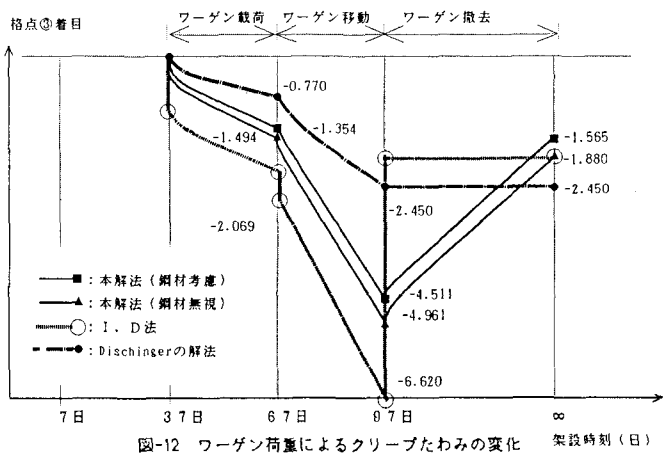


図-12 ワーゲン荷重によるクリープたわみの変化

(ワーゲン荷重) によるたわみ値の時系列変化をみるとワーゲン荷重が撤去される前には、I・D法の結果が他の解法に比べて最大の値を示している。これは、I・D法では載荷荷重に対する遅れ弾性成分が全て瞬時に発生すると評価しているからである。その他の解法による結果は、本解法による鋼材無視、鋼材考慮、Dischingerの解法の順に大きなたわみ値が得られている。ワーゲン荷重撤去後から最終時刻($t=\infty$)ではDischingerの解法でのたわみ値が最大となり、つづいて本解法の鋼材無視、考慮の順となる。この結果は、まさに遅れ弾性ひずみの回復による影響を評価できていると言え、また、上記の(1)～(4)の考察とも合致するものである。

ii) 計算例2：架設段階を追ったクリープ解析

表-2 載荷材令毎の遅れ弾性成分の進行度

着目材令	21日	35日	49日	49日以降	∞
載荷材令					
7日 $\phi_{v,1}$	0.203	0.240	0.268	0.268	0.400
21日 $\phi_{v,2}$		0.203	0.240	0.240	0.400
35日 $\phi_{v,3}$			0.203	0.203	0.400
49日 $\phi_{v,4}$					0.400
49日+ $\phi_{v,4}$					0.400

表-3 フロー成分の進行度

着目材令	21日	35日	49日	49日以降	∞
ϕ_r	0.257	0.386	0.473	0.473	2.000

表-4 Dischingerの解法で用いるクリープ係数の進行度

着目材令	21日	35日	49日	49日以降	∞
ϕ	0.459	0.625	0.741	0.741	0.400

クリープによる部材断面力の変化について検討するために、図-13に示すモデルを考える。解析条件は斜張橋の架設を想定して図-14に示す架設工程を考えたモデルで計算を行う。クリープ係数は表-2～4に示すものを用いる。ここで、I・D法については遅れ弾性成分が瞬時に発生すると考えてその値を $\phi_r=0.4$ とする。以上の条件で実施した $t=\infty$ での計算結果を表-5に示す。この結果から次のことがいえる。

(1) $t=\infty$ での合計値についてみると、各解法の結果に大きな差はない。しかし、各荷重毎の結果では、その差は合計値より大きくなっている。これは、主桁内プレストレス及び斜材調整張力を自重とキャンセルする方向に作用させているためその差を互いに相殺しているからであると考えられる。つまり、クリープによる断面力の変化が小さくなるように設計した場合には、各解法の最終値での差は小さくなる。例えば、表-6に示す本計算例の斜材調整力を10%、主桁内プレストレスを30%それぞれ大きくした結果では各解法の最終値での差はさらに縮小し、本解法とI・D法では結果がほとんど一致している。また、表-5の結果から、クリープによる変化断面力は、本解法の結果に比べて、I・D法では若干大きめの値であり、Dischinger法では小さめの傾向である。本解法の結果はその中間の値を示している。

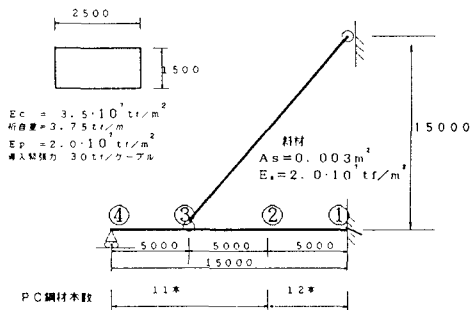


図-13 斜張橋の計算モデル

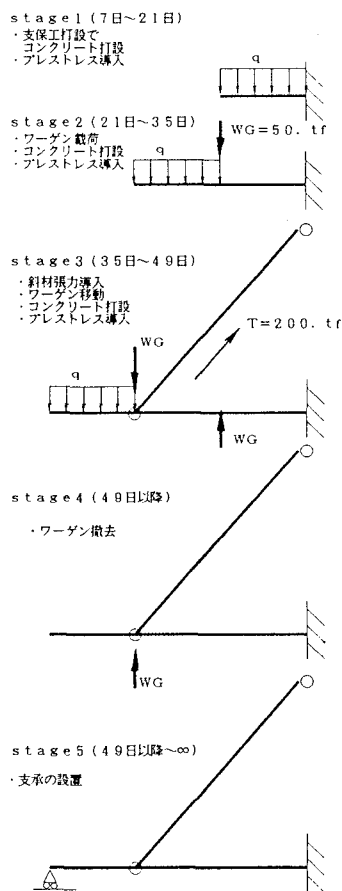


図-14 斜張橋の架設工程

(2) 除荷荷重(本計算例ではワーゲン荷重)の結果は、各解法でその傾向が異なっている。これは、格

点④に支点を設置する直前にワーゲン荷重を撤去しているためI. D法ではワーゲン荷重撤去に関する遅れ弾性成分の全てがこの時点(格点④)に支点がない構造系)で瞬時に作用し、斜材に圧縮の軸力が生じている。これに対して、本解法では、その後の時間経過に伴って遅れ弾性成分が回復するので完成構造系にその多くが作用し、格点④の支点反力と斜材の軸力に影響が分散されている。

ちなみに、格点④の支点設置を90日遅らせた結果では本解法とI. D法ではほぼ一致する(表-7参照)。これは、本解法が除荷荷重の影響を回復クリープとして考慮していることによる差異であるといえる。

(3) 表-8に架設工程を90日間隔に延ばした結果を示すが、本解法とI. D法とではほぼ同じ値を示している。これは遅れ弾性成分の影響が両解法でおおむね一致していることによるものである。さらに、表-5と表-8の各断面力についての値の差をみると、本解法の差が最も大きい。つまり、本解法による結果は架設工程の違いを最も鋭敏に結果に反映しているものと考えられる。

表-5 クリープ解析結果(14日間隔の架設工程)

		格点④のM (tf・m)		斜材の軸力 (t)		格点④の反力 (tf)	
		M	比	N	比	R	比
自重	弾性解	-1935.4	-	20.9	-	0.0	-
	Dischinger法	-543.9	0.76	28.1	0.90	88.8	-
	I. D法	-822.1	1.15	33.2	1.07	67.4	-
	本解法	-712.0	1.0	31.1	1.00	75.9	-
主桁内 アライスト と 斜材 調整張力	弾性解	1655.0	-	172.9	-	0.0	-
	Dischinger法	420.0	0.75	165.0	1.02	-77.9	-
	I. D法	656.3	1.17	158.0	0.98	-58.3	-
	本解法	558.8	1.00	161.2	1.00	-66.5	-
合計	弾性解	-280.4	-	193.8	-	0.0	-
	Dischinger法	-123.9	0.81	193.1	1.00	10.9	-
	I. D法	-165.8	1.08	191.2	0.99	9.1	-
	本解法	-153.2	1.00	192.3	1.00	9.4	-
ワー ゲン 荷重	弾性解	-21.1	-	-2.5	-	0.0	-
	Dischinger法	-3.9	0.11	-1.6	1.60	0.6	-
	I. D法	-8.7	0.24	-2.7	2.70	0.9	-
	本解法	-36.6	1.00	-1.0	1.00	-1.9	-

表-6 クリープ解析結果(主桁内アライスト30%、斜材調整張力10% up)

		格点④のM (tf・m)		斜材の軸力 (t)		格点④の反力 (tf)	
		M	比	N	比	R	比
合計	弾性解	-71.7	-	211.1	-	0.0	-
	Dischinger法	-78.9	0.89	209.4	1.01	0.5	-
	I. D法	-88.4	1.00	206.9	0.99	1.3	-
	本解法	-88.7	1.00	208.2	1.00	0.5	-

表-7 クリープ解析結果(格点④の支点設置を90日後とした場合)

		格点④のM (tf・m)		斜材の軸力 (t)		格点④の反力 (tf)	
		M	比	N	比	R	比
ワー ゲン 荷重	弾性解	-21.1	-	-2.5	-	0.0	-
	Dischinger法	-5.0	0.49	-1.5	1.71	0.5	-
	I. D法	-10.2	1.00	-2.7	1.28	0.8	-
	本解法	-10.2	1.00	-2.1	1.00	0.5	-

表-8 クリープ解析結果(90日間隔の架設工程)

		格点④のM (tf・m)		斜材の軸力 (t)		格点④の反力 (tf)	
		M	比	N	比	R	比
自重	弾性解	-1935.4	-	20.9	-	0.0	-
	Dischinger法	-961.1	0.86	31.5	0.86	59.1	-
	I. D法	-1138.3	1.02	36.5	0.99	44.5	-
	本解法	-1115.6	1.00	36.7	1.00	45.9	-
主桁内 アライスト と 斜材 調整張力	弾性解	1655.0	-	172.9	-	0.0	-
	Dischinger法	791.1	0.87	162.4	1.04	-51.7	-
	I. D法	933.6	1.02	155.2	1.00	-38.4	-
	本解法	913.3	1.00	155.7	1.00	-39.9	-
合計	弾性解	-280.4	-	193.8	-	0.0	-
	Dischinger法	-170.0	0.84	193.9	1.01	7.4	-
	I. D法	-204.7	1.01	191.7	1.00	6.1	-
	本解法	-202.3	1.00	192.4	1.00	6.0	-

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 道路橋示方書のクリープ係数算出式と I. D 法の考え方に基いて、若材令での遅れ弾性成分を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の実用式(式(19))を提示した。

(2) その実用式を拡張して架設段階を忠実に考慮できるクリープ解析の実用解法を提案した(式(27))。同様に、乾燥収縮解析法も示した(式(29))。

(3) 変位法による構造解析に本解法を適用して汎用的なクリープ及び乾燥収縮の影響解析手法を示した。その際、鋼材によるクリープひずみの拘束も考慮できる形で提案した。

(4) 段階施工法による張り出しばりを対象にして数値計算を実施し、従来の解法(Dischinger法, 改良 Dischinger法)との結果の比較及び考察を行って、施工途中に荷重の載荷や移動、除荷があるコンクリート構造物に関して、架設構造系のクリープによる変位や 2 次断面力に与える遅れ弾性成分の影響を明確にした。

なお、コンクリートの変化応力進行度に関する仮定 2 は、当初応力度の 2 割程度以下の変化応力度が発生する場合に適用できるものであり、変化応力度が大きい場合には誤差が生じることが考えられ、数値解析を行う際に時刻分割数を多くするなどの注意が必要である。

謝辞：本研究を通じて多くの技術的助言や激励を下された P C 斜張橋設計施工支援システム開発会の技術者諸兄に深く御礼を申し上げます。また、本論文の作成にあたって大阪工業大学の栗田章光講師より多大なるご指導を戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井 学： P C 斜張橋の最近の進歩、コンクリート工学年次論文報告集、10-1 1988, PP. 87~94.
- 2) ルッシュ、ユングビルト著、百島祐信 訳：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮(その作用と計算方法)、第 2 版 鹿島出版会、昭和 52 年 4 月。
- 3) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J. : Creep of Plain and Structuyal Concrete, Construction Press, 1983 年。
- 4) 渡辺誠一、六車ひろし：コンクリートのクリープに関する一考察、日本建築学会論文報告集、第 402 号・1989 年 8 月, PP. 71~78.
- 5) 中井 博、栗田 章光：鋼・コンクリート合成構造のクリープ乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察、構造工学論文集, Vol. 36A, 1990 年 3 月, PP. 1275~1284.
- 6) 長大コンクリート橋設計施工支援システム研究会：P C 斜張橋設計施工支援システムに関する調査研究報告書、日本電子計算(株)、平成元年 5 月。
- 7) F. レオンハルト著、横道英雄監訳：レオンハルトのコンクリート講座 5 プレストレスコンクリート、鹿島出版会、昭和 58。
- 8) 栗田 章光、中井 博：回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集, Vol. 37A, 1991 年 3 月, PP. 1407~1418.
- 9) 富田 耕司、廣河 和男：若材令での遅れ弾性成分を考慮したクリープ解析法の一提案：平成 4 年度土木学会関西支部年次学術講演集、平成 4 年 5 月, V-6-1.
- 10) 富田 耕司、廣河 和男：架設段階を追ったクリープ解析法の一提案：第 47 回年次学術講演会概要集：V-7 9、平成 4 年 9 月, PP. 188~189.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ、コンクリート橋編、丸善、平成 2 年。
- 12) コンクリート斜張橋研究委員会：コンクリート斜張橋の設計上の諸問題に関する検討、(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部、昭和 6 2 年 8 月。
- 13) 星埜正明、佐伯彰一：コンクリート斜張橋のクリープ解析、土木学会論文集、第 295 号・1980 年 3 月, PP. 103~113.
- 14) Schade, D. : Alterungsbeiwerte fur das Kriechen von Beton nach den Spannbetonrichtlinien, Beton-und Stahlbetonbau 72 H5 1977, PP. 113~117.
- 15) 富田 耕司、廣河 和男：若材令での遅れ弾性成分を考慮したクリープの影響評価解析法：J I P 情報処理学会：第 1 2 回 J I P S 論文集、JIPS-91-11、1991 年 11 月, PP. 278~289.
- 16) 小宮正 久、酒井 一、前田 晴人：任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案、プレストレスコンクリート、Vol. 29, NO. 2, Mar. 1987, PP. 8~17.

(1992 年 9 月 21 日受付)