

(3) PRC連続橋モデルにおけるクリープの影響の数値解析的検討

宇都宮大学大学院 建設学専攻

○ 雪田 憲子

日本道路公団 東京建設局

正会員 和田 宣史

日本道路公団 東京建設局

布施 光啓

広島大学工学部 第四類(建設系)

正会員 佐藤 良一

1. 目的

最近、目地部の維持・補修の削減や乗り心地の向上を目指して、PCやPRC桁の連続化が図られている。橋梁上部工の連続化に伴って生じる問題の一つに、桁のクリープ・収縮および温度変化による変形に起因する橋脚の拘束応力がある。橋脚を弾性体として取り扱えば、桁の経時的変形による橋脚の発生応力は過大評価される。橋脚の拘束応力は変形拘束によるものであるため、橋脚コンクリートのクリープを考慮することにより、実際には応力は経時的に低減される。

そこで本研究は、橋梁上部工の連続化に関わる設計の合理化に資するために、上部PRC桁のプレストレス導入後のクリープ・収縮による変形がどの程度橋脚に応力を発生させるかを把握する目的で、プレストレス導入後に上部PRC桁が橋脚にヒンジ結合されるモデルを用い、数値解析的に検討した。

2. 解析モデル

実際のPRC連続橋は多径間で、橋脚とは相対変位を許しながら、橋脚に強制変位を与えるが、ここでは、PRC桁の経時的変形が橋脚にどの程度応力を発生させるかの把握を主目的とし、図-1のような、境界条件が明確で簡易なモデルを解析対象とした。PRC桁、橋脚およびフーチングの断面は340×200mm、300×300mm、900×300mmで、全断面に対する全鉄筋比は0.40%、0.56%、0.19%である。また、PRC桁の全断面に対する全PC鋼材比は0.39%である。表-1に実構造物と解析モデルの対応表を示す。杭基礎には曲げ剛性の大きいH型鋼を用いた。これは、橋脚基部の応力は杭頭の回転の影響を強く受けるので<sup>1)</sup>、この影響を小さくするためである。さらに、フーチングとH鋼はPC鋼棒で荷重を与えることにより一体とした。また、PRC桁と橋脚の間ではモーメントの伝達が行われなようにヒンジ結合とした。橋脚に伝わるPRC桁の経時的変形の影響を極力小さくすることが実務的に重要であるので、これを考慮に入れて、PRC桁のプレストレス導入後にある期間PRC桁を放置し、その後橋脚にPRC桁を架設し、結合するモデルとした。PRC桁のプレストレス導入は材齢3日と

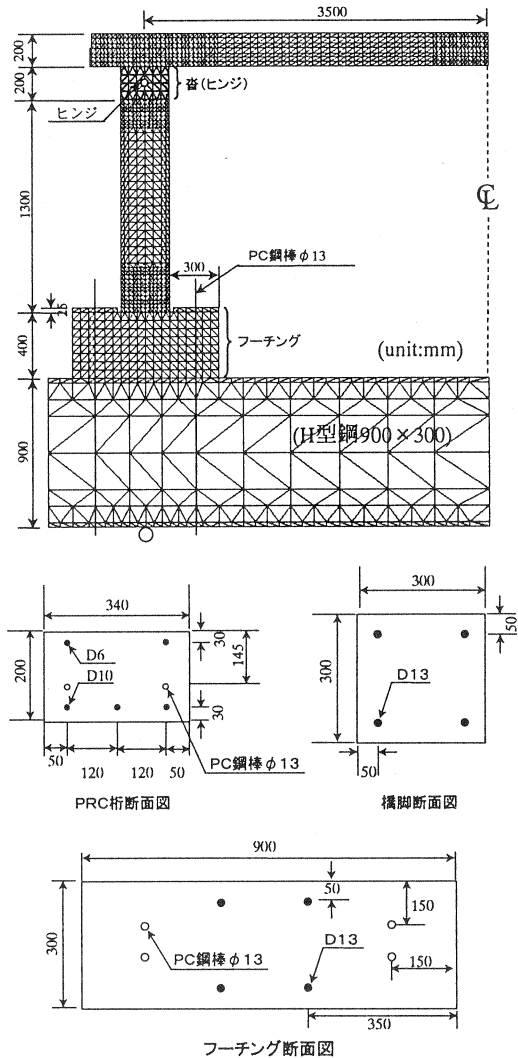


図-1 解析対象の概要

した。解析では、P R C桁を橋脚に架設する結合材齢を材齢 5日、100日、200日の3パターンとし、それぞれについて橋脚のクリープを考慮した場合と橋脚を弾性体と仮定した場合の計6ケースについて行った。PC鋼材の初期緊張力はいずれも同一で、プレストレス導入直後におけるスパン中央下縁のコンクリート応力は約 3.8N/mm<sup>2</sup>であった。

### 3. 材料モデル

本解析に用いたコンクリートの物性値は、P R C桁用、橋脚用それぞれのコンクリートの圧縮強度およびヤング係数測定用のテストピースと、クリープ、収縮ひずみ計測用の供試体を作製し、これらより得られた実験値に基づいている。P R C桁、橋脚用それぞれのコンクリートの打込み時期には 12 日の差があるが、解析ではこれを材齢の相違を取り込んだ物性値により考慮した。

解析に用いた標準養生材齢 28 日の圧縮強度、ヤング係数はそれぞれ、桁用コンクリートで 39.5N/mm<sup>2</sup>、34.8kN/mm<sup>2</sup>、橋脚用コンクリートで 27.0N/mm<sup>2</sup>、24.6kN/mm<sup>2</sup>である。図-2 に P R C桁用、橋脚用それぞれのコンクリートのヤング係数の経時変化を示す。コンクリートの各載荷時材齢のクリープ係数は、実験値と CEB-FIP Model Code 1990<sup>2)</sup> (MC90)に基づいて定めた。図-3、4 に P R C桁用、橋脚用それぞれのコンクリートの実験値と MC90 による値を示す。収縮も実験値に基づいて定め、結合後の増分収縮量を解析に取り入れた。収縮ひずみの経時変化を図-5 に示す。

### 4. 解析方法

解析方法は、2 次元有限要素法を用い、各タイムインターバルで発生する体積変化あるいはプレストレスによる応力を、所定の材齢において重ねることにより求めた。図-6 にフローチャートを示す。収縮ひずみ、温度ひずみは、各ステップ間の増分収縮ひずみ、増分温度ひずみを等価な節点力に置き換えることにより取り入れた。また、プレストレスは、プレストレス導入時に P C鋼材の初期ひずみを与えることにより考慮した。プレストレス、自重についても増分収縮ひずみ、増分温度ひずみと同様に等価節点力に置き換えている。

着目材齢  $t_{i+1/2}$  でのコンクリート応力、鉄筋応力は、以下のようにして求めた。なお、P C鋼棒については、プレストレス導入時に初期ひずみを与える以外は、基本的に鉄筋と同様の考え方である。

$$\{\Delta\sigma_c(t_{i+1/2}, t_j)\} = [D_c] \times \quad (1)$$

$$\{\{\Delta\varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j)\} - \{\Delta\varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\} - \{\Delta\varepsilon_{sh}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\}\}$$

$$\{\Delta\sigma_s(t_{i+1/2}, t_j)\} = [D_s] \times \quad (2)$$

$$\{\{\Delta\varepsilon_s(t_{i+1/2}, t_j)\} - \{\Delta\varepsilon_{ST}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\}\}$$

表-1 実構造物と解析モデルの対応表

実構造物	解析モデル
杭基礎	H型鋼 (900×300mm)
沓	ヒンジ

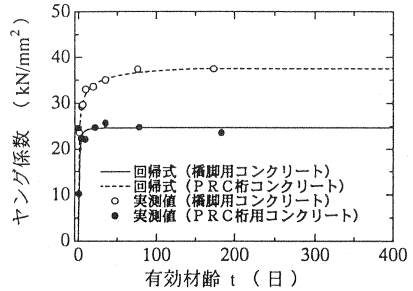


図-2 ヤング係数の経時変化

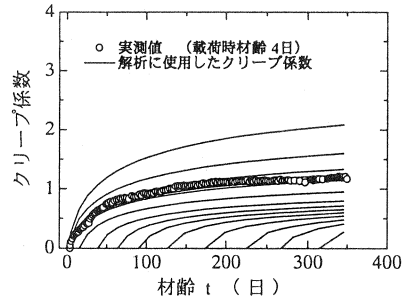


図-3 P R C桁用コンクリートのクリープ係数

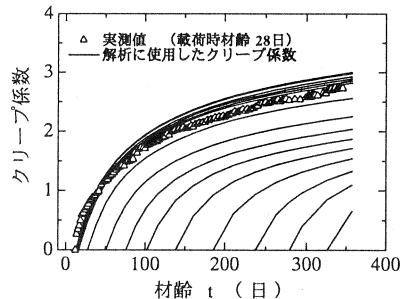


図-4 橋脚用コンクリートのクリープ係数

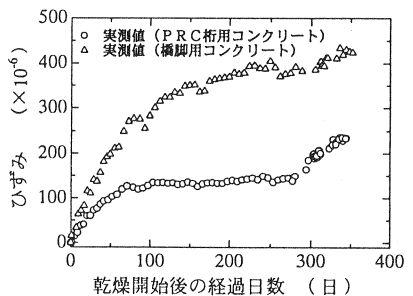


図-5 収縮ひずみの経時変化

ここに、 $\{\Delta\sigma_c(t_{i+1/2}, t_j)\}$ : コンクリートの増分応力  
 $\{\Delta\varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j)\}$ : コンクリートの増分実ひずみ  
 $\{(\Delta\varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}))\}$ : コンクリートの増分温度ひずみ  
 $\{\Delta\varepsilon_{sh}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\}$ : コンクリートの増分収縮ひずみ  
 $\{\Delta\sigma_s(t_{i+1/2}, t_j)\}$ : 鉄筋の増分応力  
 $\{\Delta\varepsilon_s(t_{i+1/2}, t_j)\}$ : 鉄筋の増分実ひずみ  
 $\{(\Delta\varepsilon_{ST}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}))\}$ : 鉄筋の増分温度ひずみ  
 $[D_c]$ : コンクリートの剛性マトリックス

$$[D_c] = \frac{Ee(t_{i+1/2}, t_j)}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\nu$ : コンクリートのポアソン比、

$Ee(t_{i+1/2}, t_j)$ : ステップ  $t_j$  で荷重された時の、ステップ  $t_{i+1/2}$  における有効ヤング係数

また、有効ヤング係数は次のとおりである;

$$Ee(t_{i+1/2}, t_j) = \frac{Ec(t_j)}{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_j) \times Ec(t_j) / Ec_{c,28}} \quad (4)$$

$Ec(t_j)$ : ステップ  $t_j$  で荷重された時のヤング係数

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$ : ステップ  $t_j$  で荷重された時の、ステップ  $t_{i+1/2}$  におけるクリープ係数

$Ec_{c,28}$ : 標準養生材齢 28 日におけるヤング係数

$[D_s]$ : 鉄筋の剛性マトリックス

このように、各ステップの増分応力はクリープの進行による応力の緩和を受けながらステップ  $t_{i+1/2}$  において加算される。

結合後の PRC 桁のクリープ変形は、結合直前の応力による結合後の進行クリープひずみ  $\varepsilon_{cr}$  を求め、これを収縮量と同様に与えることにより、取り入れた。図-7 に示すように、結合材齢を  $t_m$  で、任意の着目材齢  $t_{i+1/2}$  における進行クリープひずみ  $\varepsilon_{cr}$  は、結合前の体積変化およびプレストレスによる応力に対し、結合直後から着目時点までのクリープ係数の増分に結合直前の弾性ひずみをかけて、次式で求められる。

$$\varepsilon_{cr} = \sum_{j=1}^m \frac{\sigma(t_{m-1/2}, t_j)}{Ec_{c,28}} \times \{ \phi(t_{i+1/2}, t_j) - \phi(t_{m+1/2}, t_j) \} \quad (5)$$

$\sigma(t_{m-1/2}, t_j)$ : 結合する直前の材齢  $t_{m-1/2}$  における各荷重時ごとの応力

$\phi(t_{m+1/2}, t_j)$ : ステップ  $t_j$  で荷重された時の、結合直後  $t_{m+1/2}$  におけるクリープ係数

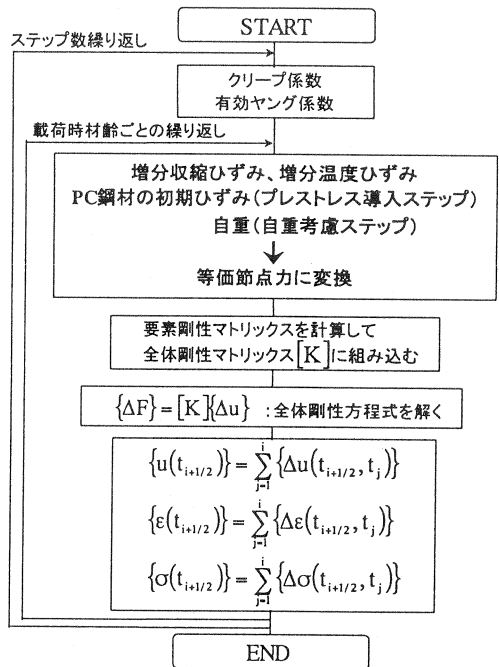


図-6 フローチャート

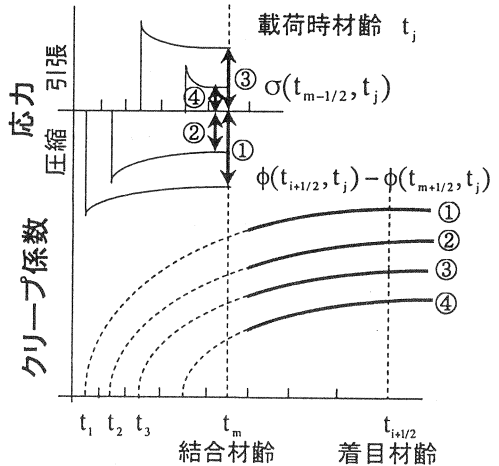


図-7 進行クリープひずみ

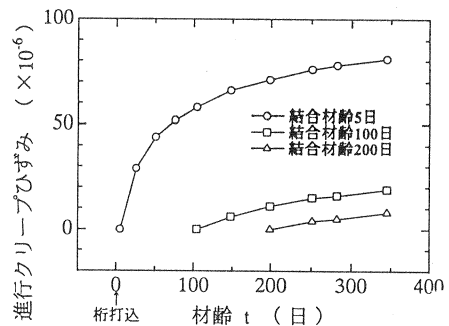


図-8 PRC 桁下縁の進行クリープひずみ

図-8に各結合材齢における進行クリープひずみを示す。

### 5. 解析結果

図-9に、各結合時を原点としたときの橋脚基部外側でのコンクリート応力の経時変化を示す。結合材齢5日の場合、結合材齢が早いために桁のクリープ・収縮による経時的変形によって橋脚基部外側に生じるコンクリート応力はもっとも大きく、材齢345日において橋脚のクリープを考慮した場合が  $1.07\text{N/mm}^2$ 、橋脚を弾性体と仮定した場合は  $1.68\text{N/mm}^2$  となった。また、材齢300日から345日かけてコンクリート応力が增大している理由は、解析に用いたP R C桁の収縮ひずみが増大しているためである。次に、結合材齢が100日の場合は、材齢345日における橋脚基部外側のコンクリート応力は、結合材齢5日の場合の約1/2程度で、橋脚のクリープを考慮した場合が  $0.55\text{N/mm}^2$ 、橋脚を弾性体と仮定した場合は  $0.77\text{N/mm}^2$  であった。結合材齢200日の場合は、材齢345日における橋脚基部外側のコンクリート応力は、結合材齢100日の場合よりも若干小さく、橋脚のクリープを考慮した場合が  $0.43\text{N/mm}^2$ 、橋脚を弾性体と仮定した場合は  $0.61\text{N/mm}^2$  となった。結合材齢が100日の場合と200日の場合で、橋脚基部外側のコンクリート応力に大きな差が見られなかった理由としては、材齢100日以降のP R C桁のクリープ・収縮の進行割合が小さいことがあげられる。

図-10に材齢345日における橋脚基部外側のコンクリート応力と結合材齢の関係を示す。橋脚のクリープを考慮した場合の橋脚基部外側のコンクリート応力は、橋脚を弾性体と仮定した場合と比較すると結合材齢が早いほど低減が大きい。各結合材齢の、橋脚を弾性と仮定した場合に対する橋脚のクリープを考慮した場合のコンクリート応力の低減率は、結合材齢が5日、100日、200日でそれぞれ、36%、29%、29%であった。

### 6. まとめ

- 1) P R C桁結合後の橋脚基部外側のコンクリート応力に対する橋脚のクリープ影響を数値解析的に評価することができた。
- 2) 桁のクリープ・収縮によって生じる橋脚基部外側のコンクリート応力は結合材齢の影響が大きい。本解析では、橋脚のクリープを考慮した場合、橋脚を弾性体と仮定した場合ともにコンクリート応力は、材齢345日において結合材齢100日場合は結合材齢5日の約1/2であった。
- 3) 本解析において、橋脚のクリープを考慮したことによる橋脚基部外側のコンクリート応力の低減率は、材齢345日において、結合材齢が5日、100日、200日でそれぞれ、36%、29%、29%であった。

今後は、橋梁上部工の連続化に関わる設計において橋脚のクリープを考慮するためには、橋脚基部の応力の定量的な評価が重要であり、P R C桁のクリープ・収縮による経時的変形によって、実際に橋脚基部に生じる応力について実験と解析の両面から検討してゆく予定である。

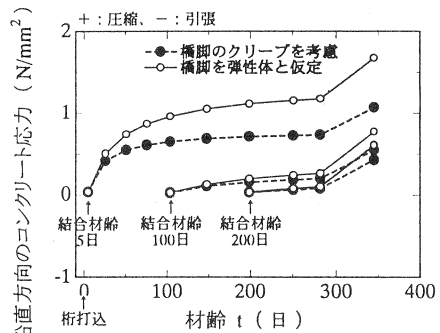


図-9 橋脚基部外側のコンクリート応力の経時変化

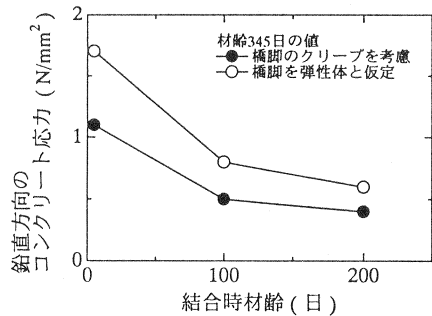


図-10 橋脚基部外側のコンクリート応力と結合材齢の関係

参考文献 1) 雪田憲子ほか：P R C桁とR C橋脚からなるラーメンのクリープ解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No3、pp.913-918、1999 2) CEB-FIP Model Code 1990