

(5) 連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」のクリープ、乾燥収縮、 ひび割れに関する解析的研究

Analytical study on creep, shrinkage and cracking of continuous composite two I-girder bridge :
Chidorinosawagawa Bridge

西尾研二*, 山本晃久**, 大垣賀津雄*, 中村元***, 奥井義昭****

Kenji NISHIO, Akihisa YAMAMOTO, Kazuo OHGAKI, Hajime NAKAMURA and Yoshiaki OKUI

*工修 川崎重工業（株）技術総括本部 関東技術研究所（〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118）

**工修 川崎重工業（株）鉄構・機器事業部 橋梁・水門総括部（〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118）

***日本道路公団 北海道支社 建設部 構造技術課（〒004-8512 札幌市厚別区大谷地西 5-12-30）

****工博 埼玉大学 工学部建設工学科（〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 225）

This paper presents analytical study on time-dependent behavior of Chidorinosawagawa Bridge, which is a two I-girder continuous composite girder bridge. The segmental concrete casting and jack-up-down method are adopted in the construction to reduce tensile stress in the concrete slab near intermediate supports. The effects of cracking in the concrete slab and history of concrete casting in construction sequences are included in the analysis. Although the difference in concrete ages is neglected in conventional design practice, in this study the effects of different ages on the time-dependent behavior are taken into account. The loss of prestress in the concrete due to creep and shrinkage is evaluated.

Key Words: creep, shrinkage, tension stiffening

1. はじめに

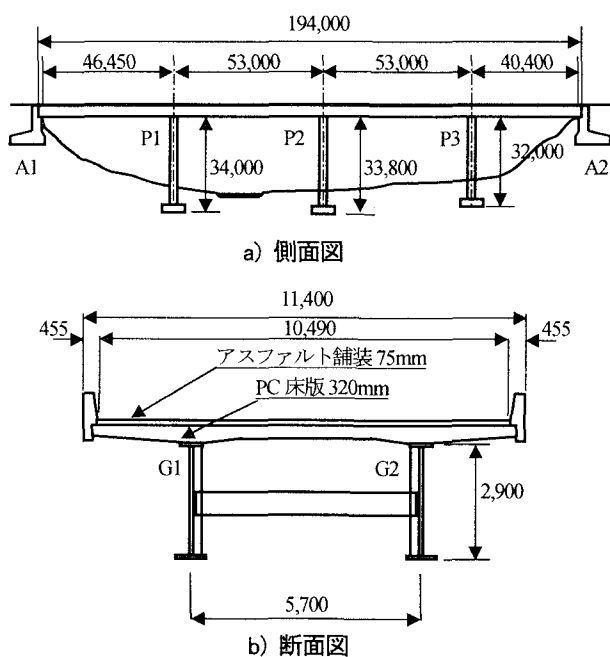
近年、経済性や施工性を追及した橋梁形式として、PC床版を有する2主桁橋の建設が関係各所で進められている。従来の道路橋はRC床版を多数の主桁で支えた構造となっており、部材数や溶接量など鋼桁の製作にかかる費用は大きい。経済性や施工性を考えた場合、主桁本数を減らすことは、維持管理を含めたトータルコストを下げる効果がある。多主桁から2主桁へと構造を変えることにより、床版支間は広がるため、我が国では床版にはRC床版ではなく、長支間に有利なPC床版が採用されている。

これまでに、ホロナイ川橋¹⁾、キウス第一橋²⁾などPC床版2主桁橋を採用した橋梁が建設されてきている。これらの床版構造は橋軸直角方向にPRC構造、橋軸方向にRC構造を持ち、連続非合成桁として設計されている。2主桁橋は従来の道路橋とは異なり、横構や対傾構の省略が行われている。このため、風荷重や地震荷重などの面外荷重に対して、床版は主要部材として扱われ、力の伝達に寄与しなければならない。それゆえ、鋼桁と床版の結合に関しては、頭付きスタッドを採用し、合成度を上げることになるが、非合成桁設計の観点から考えれば、

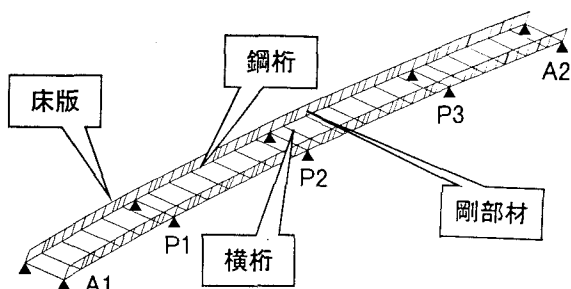
矛盾が生じてくる。このような状況の中で、本研究の対象橋梁である日本道路公団 北海道横断自動車道・千鳥の沢川橋は連続合成2主桁橋として実施設計を行った³⁾。

千鳥の沢川橋の床版には、移動型枠による分割施工（ピアノ鍵盤工法）を採用しており、後死荷重、クリープ、乾燥収縮および温度差を含めた荷重状態で、床版のひび割れが発生しないことを条件として設計している。そのため、床版の施工段階中に逐次ジャッキアップダウンを行い、中間支点部床版にプレストレスを導入している。一方、活荷重載荷時に対しては、ひび割れの発生を許すが、ひび割れ幅を許容値以内に抑えるように鉄筋量を増やしている。また橋軸方向におけるクリープ係数、乾燥収縮度の取扱いについては、道路橋示方書⁴⁾（以下、道示と呼ぶ）IIの考え方に従っているが、分割施工終了後から全てのコンクリート床版の材令が同一であるとしてクリープ、乾燥収縮を考慮している。しかしながら、実際には各打設ブロックごとにコンクリート材令が異なり、逐次合成されていく床版のクリープ、乾燥収縮の影響は考慮されていない。

このような状況を踏まえて、本研究では千鳥の沢川橋を対象として、施工開始時からクリープ、乾燥収縮を考慮した解析を行い、それらによる応力変動について考察



図－1 千鳥の沢川橋



図－2 解析モデル

を行った。

さらに、中間支点部床版のひび割れ解析を行うため、RC 部材の引張硬化を考慮したモデル化について基礎的検討を行った。

2. 対象橋梁のモデル化

2.1 千鳥の沢川橋の概要

本研究の対象橋梁である千鳥の沢川橋は、日本道路公団・北海道横断自動車道の追分 I.C.～夕張 I.C.間に位置しており、平均支間長 48.5m の PC 床版を有する 4 径間連続合成 2 主桁橋である。本橋の鋼桁は桁高 2.9m (外法一定) であり、床版支間 5.7m、床版厚 320mm の場所打ち横締めプレストレストコンクリート床版を採用している。図－1 に千鳥の沢川橋の側面図および断面図を示す。

2.2 解析モデル

本解析モデルは図－2 に示すように、平面曲率を考慮した立体モデルであり、床版および鋼桁をそれぞれの図心位置において、はり要素でモデル化している。床版－鋼桁間の結合には、剛部材を用いている。このようなモ

表－1 合成作用の取扱い

項目	合成作用の取扱い		適用
正曲げ	版のコンクリートを桁の断面に算入		
負曲げ	引張応力を受ける版において、コンクリート断面を有効とする設計を行う場合	版のコンクリートを桁の断面に算入	
	引張応力を受ける版において、コンクリート断面を無視する設計を行う場合	版のコンクリート中の橋軸方向鉄筋を桁の断面に算入	

デル化を行うことによって、床版だけにクリープ、乾燥収縮を考慮することができる。

床版のモデル化については、表－1 に示す道示Ⅱの合成作用の取扱いを考慮している。同表に示す通り、負曲げ部での床版の取扱い方は 2 通りあるが、実施設計では後死荷重、クリープ、乾燥収縮および温度差を含めた荷重状態で、床版のひび割れが発生しないことを条件として設計している。このため、床版は負曲げ部において有効に働くと考え、床版の剛性評価では有効幅を考慮している。

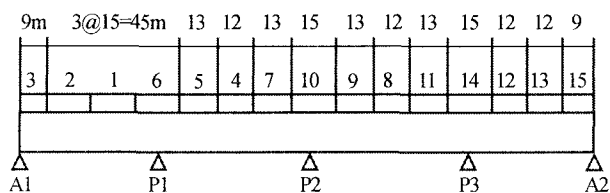
解析には、床版の分割施工により逐次合成されていく状況を忠実に再現でき、かつ、クリープ、乾燥収縮の影響を考慮できる汎用プログラム (DIANA[®]) を用いた。

2.3 解析モデルの妥当性検証

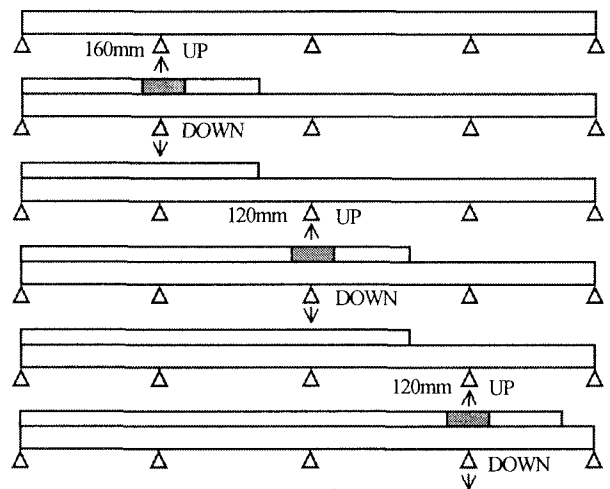
千鳥の沢川橋では、移動型枠による分割施工を適用している。中間支点部床版のひび割れを回避するため、床版打設は図－3 に示すように、支間部を先行させるピアノ鍵盤工法とし、ジャッキアップダウン工法を併用している。ジャッキアップ量は後死荷重、クリープ、乾燥収縮および温度差を含めた荷重状態で、床版のひび割れが発生しないことを条件として決定している⁹⁾。なお、ジャッキアップ量は図中に示す通りである。

図－2 に示す解析モデルの妥当性を確認するため、まず、クリープ、乾燥収縮を考慮しない状態で実施設計との比較を行った。実施設計は平面格子を解析モデルとした格子解析によるものであり、本解析は図－2 に示す解析モデルを用いている。また両者は図－3 に示す床版の打設順序を考慮している。

分割施工終了後の床版上縁応力について、実施設計と比較したものを図－4 に示す。図中の横軸は橋軸方向の距離を表している。同図から、モデル化の違いによる差異は多少あるものの両者はほぼ一致しており、本解析モ



a) 床版打設順序



b) ジャッキアップダウン工法

図-3 床版の施工方法

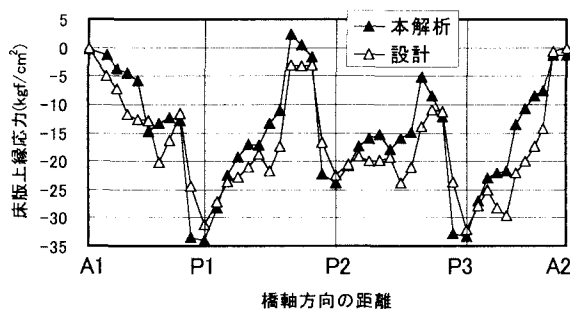


図-4 分割施工終了後の床版上縁応力

デルが妥当なものであるといえる。

3. クリープ、乾燥収縮解析

3.1 クリープ、乾燥収縮のモデル化

クリープ、乾燥収縮を正確に予測することは、鋼・コンクリート複合構造物の長期的な挙動を把握する上で重要である。今日までに、CEB-FIP90 式、ACI209 式、阪田式など多数の予測式が提案され、設計に適用されている^{7), 8)}。本研究では道示Ⅰで採用されている CEB-FIP78 式（以下、78 式と呼ぶ）を用いた。

実施設計では、道示Ⅱ9.2 の考え方に従い、橋軸方向におけるクリープ係数、最終乾燥収縮度はそれぞれ $\phi=2$ 、 $\epsilon=150\mu$ （膨張材の使用により 200μ から 150μ に低減）を用いている。このとき、分割施工終了後からクリープ、乾燥収縮のみを考慮している。しかしながら、実際には各打設ブロックごとにコンクリート材令が異なり、逐次合成されていく床版のクリープ、乾燥収縮の影響は考慮

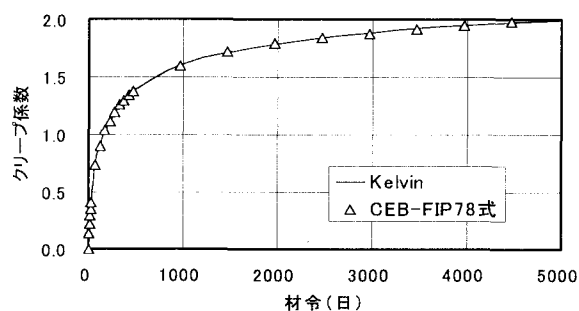


図-5 クリープ係数

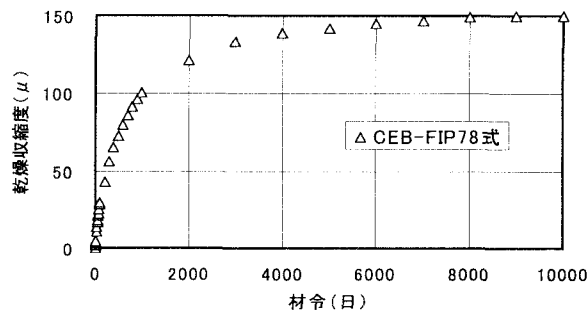


図-6 乾燥収縮度

表-2 解析の分類

項目	解析 A	解析 B	解析 C
分割施工	○	○	×
分割施工中のクリープ、乾燥収縮	○	×	×
分割施工後のクリープ、乾燥収縮	○	○	○

注) ○：考慮，×：非考慮

されていない。したがって、床版ブロックごとの材令の差異を考慮した上で、時間の経過とともに変化していくクリープ、乾燥収縮の影響を考慮した解析を行うこととした。

本解析では、クリープの時間依存挙動を Kelvin モデルで近似し、時間域での逐次積分により経時挙動を求めている。図-5は 78 式を 6 個の直列に接続した Kelvin モデルで近似したものであり、クリープ挙動を精度よく表現していることがわかる。図-6は本解析で用いた乾燥収縮度の経時変化を示しており、この関係を直接、解析に組込んでいる。なお、Kelvin モデルを用いてクリープ挙動をモデル化する場合、78 式に示されているような遅れ弾性およびフロー成分の影響は考慮できない。しかし、通常的设计で用いられている換算ヤング係数法でも、この影響は無視されているため、本解析においても無視した。また 78 式は圧縮応力下でのクリープ予測式であるが、以下の計算例では、引張応力下でも圧縮下と同様に扱っている。

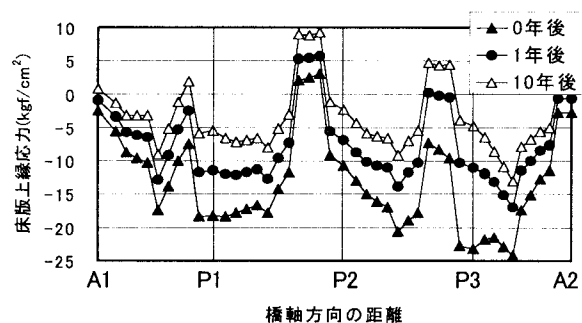


図-7 後死荷重載荷後の経時変化(解析 A)

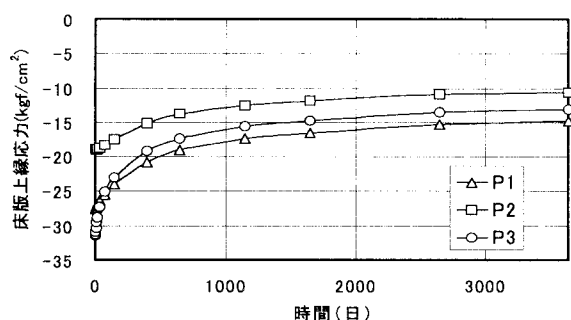


図-8 各支点のプレストレス経時変化(解析 A)

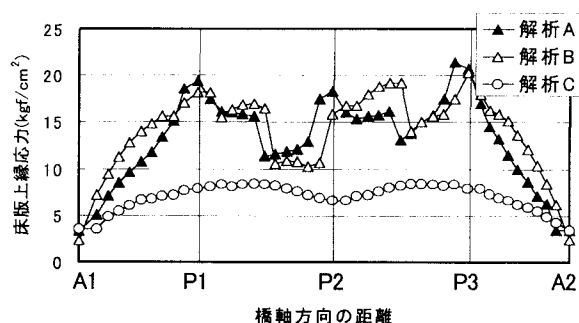


図-9 クリープ、乾燥収縮による応力の比較

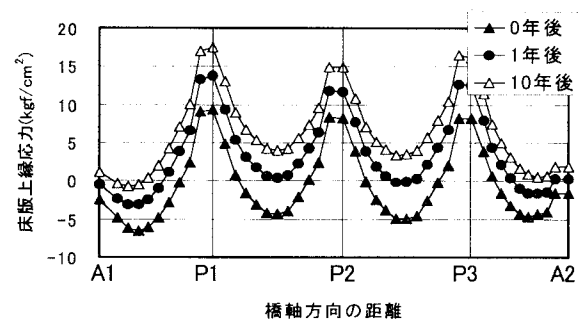


図-10 後死荷重載荷時の経時変化(解析 C)

3. 2 解析結果および考察

(1) 解析の分類

本研究では、表-2に示すように3つのランクの解析を行った。表中の○印は項目を考慮していることを表す。解析 A は分割施工を考慮し、分割施工中、施工後のクリープ、乾燥収縮も考慮している。解析 B は分割施工を考慮しているが、分割施工中のクリープ、乾燥収縮を考慮せず、施工後についてのみ考慮している。実施設計は解析 B を採用しているが、クリープ、乾燥収縮の影響を換算ヤング率で評価している点が時間積分の本解析法と異なる。解析 C は分割施工を考慮せず、一括施工後にクリープ、乾燥収縮を考慮している。

(2) 完成後の変動(解析 A)

分割施工終了後に後死荷重を載荷し、その後のクリープ、乾燥収縮による床版上縁応力の経時変化を図-7に示す。ここでは、施工開始時からクリープ、乾燥収縮を考慮している。同図より、時間の経過とともに応力分布が上方ヘシフトしていき、クリープ、乾燥収縮により各中間支点から少し A1 側のブロックで引張応力が生じていることがわかる。

(3) プレストレスの損失(解析 A)

各中間支点 P1, P2, P3 において、床版上縁における橋軸方向応力の経時変化を図-8に示す。図中の横軸は分割施工終了後からの経過時間を表している。同図から、時刻 0 ではジャッキアップダウンのプレストレスによって圧縮応力が生じ、時間の経過とともにプレストレスが減少していき、10 年後には、ほぼ一定値に収束していることがわかる。各支点における導入時から 10 年間のプレストレスの損失は、それぞれ 47%, 44%, 58%である。

(4) クリープ、乾燥収縮の比較(解析 A, B, C)

図-9は解析 A から得られるクリープ、乾燥収縮による応力と、実施設計(解析 B)で計算したものとを比較したものである。ここで、実施設計の値は、道示 II に示されている仮想ヤング係数比を用いた計算値である。なお、同図には、ジャッキアップダウンによるプレストレス導入を行わない一括施工後のクリープ、乾燥収縮による応力(解析 C)を参考として示す。同図より、解析 A は実施設計とほぼ同様な傾向を示していることがわかる。また分割施工(解析 A)と一括施工(解析 C)とを比較すると、常に分割施工による応力の方が大きい。

(5) 完成後の変動(解析 C)

一括施工後に後死荷重を載荷し、その後の床版上縁応力の経時変化を図-10に示す。応力変動の推移状況については、図-7の解析結果と同様に上方ヘシフトしていく様子がわかる。また図-7と図-10とを比較すると、施工による差異が顕著に認められる。

4. ひび割れ解析

4. 1 引張硬化

鉄筋コンクリートのひび割れは、構造物に要求される水密性や鉄筋の腐食に伴う耐久性などに大きな影響を与える。そのため、使用限界状態の検討では、ひび割れ幅やひび割れ進展などを把握することが重要な問題となってくる。

図-11に単軸引張を受ける鉄筋コンクリートの荷重-変位関係を示す。同図は、鉄筋コンクリートがコンクリートの引張強度を超えると、その剛性はひび割れが生じて

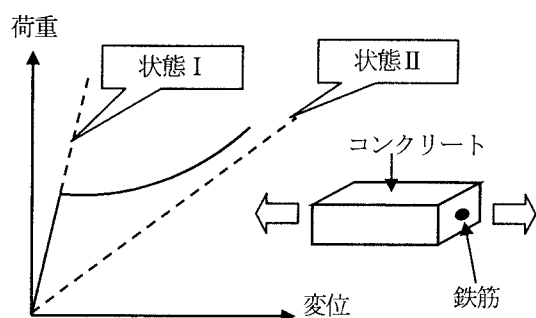


図-11 単軸引張を受けるRC部材

表-3 鉄筋コンクリートの物性値

コンクリートのヤング係数	$E_c(\text{N/mm}^2)$	29400
鉄筋のヤング係数	$E_s(\text{N/mm}^2)$	205800
鉄筋比	p	0.019
コンクリートの引張強度	$\sigma_c(\text{N/mm}^2)$	2.7
鉄筋の降伏強度	$\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	345

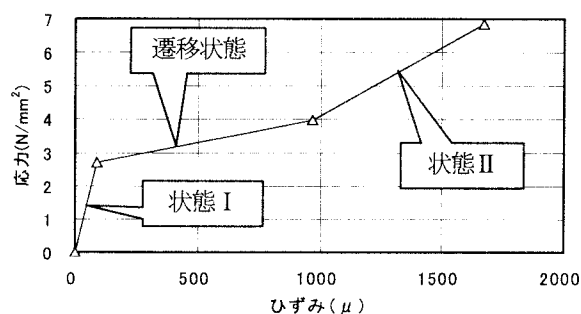


図-12 平均応力-ひずみ関係

いない状態 I から徐々に低下し、鉄筋のみの断面剛性である状態 II に漸近していくことを示している。これはコンクリートと鉄筋との付着すべりから生じる引張硬化によるものである^{9), 10)}。ここでは、中間支点部床版のひび割れ解析を行うため、RC 床版の引張硬化を考慮したモデル化について基礎的検討を行うこととした。本解析では、鉄筋コンクリートを 1 つの材料として考えている。

4.2 応力-ひずみ関係のモデル化

引張硬化を考慮した応力-ひずみ関係を考える。まず、ひび割れ発生前において、図-11 に示す鉄筋コンクリート断面に引張力 T が作用したとき、次式が得られる。

$$T = A \sigma = A_s E_s \varepsilon + A_c E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma = [np + (1-p)] E_c \varepsilon = E \varepsilon \quad (2)$$

$$E = [np + (1-p)] E_c \quad (3)$$

ここに、 A : 全断面積

A_s : 鉄筋の断面積

A_c : コンクリートの断面積

E_s : 鉄筋のヤング係数

E_c : コンクリートのヤング係数

σ : 平均応力

ε : 平均ひずみ

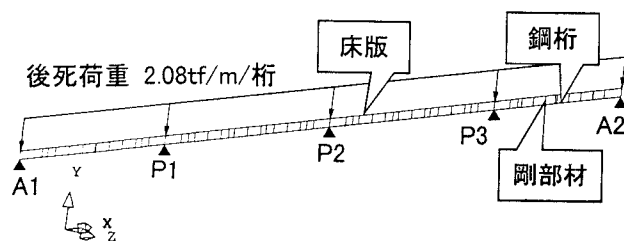


図-13 解析モデル

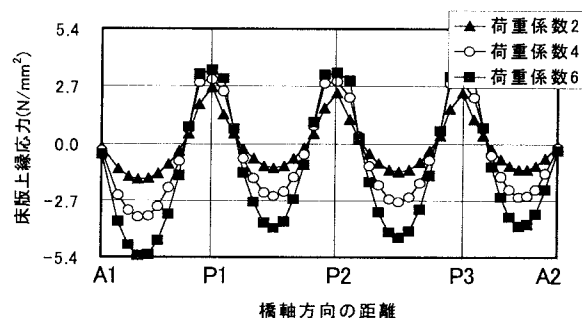


図-14 後死荷重載荷時の床版上縁応力

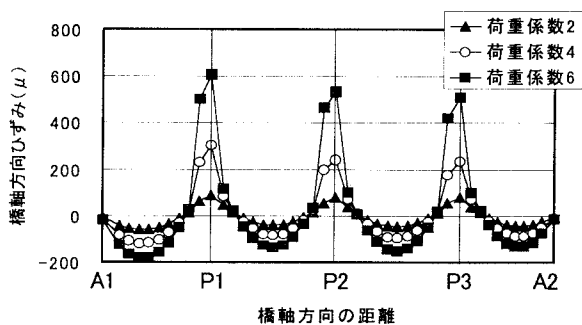


図-15 橋軸方向ひずみの分布図

n : ヤング係数比

p : 鉄筋比

ここで、ひび割れ発生前の状態 I における RC 床版 ($n=7$, $p=1.5\%$) を想定すると、 $E/E_c=1.09$ となる。よって、ひび割れ前の段階では、鉄筋コンクリートのヤング係数は、コンクリートのヤング係数にほぼ等しいといえる。

つぎに、完全にひび割れが進展し、鉄筋のみが力を受け持つ状態 II を考える。このとき $\sigma_c=0$ より、

$$T = A \sigma = A_s E_s \varepsilon \quad (4)$$

$$\sigma = p E_s \varepsilon = E_\sigma \varepsilon \quad (5)$$

$$E_\sigma = p E_s \quad (6)$$

ここに、 E_σ はひび割れ後の見かけ上ヤング係数を表す。

以上のことを考慮し、表-3 に示す鉄筋コンクリートの物性値を用いれば、図-12 に示す応力-ひずみ関係が得られる。このとき、遷移状態における見かけの弾性率は、既往の研究成果¹¹⁾を参考に弾性挙動時の直線勾配の 1/20 としている。

4.3 解析結果および考察

解析モデルは図-13 に示すような平面モデルとし、モデル化は図-2 と同様である。荷重については、舗装、壁高欄、地覆の後死荷重のみを考慮し、後死荷重を漸増

させることによって、RC床版にひび割れを発生させる。

図-14 に後死荷重を漸増させたときの床版上縁応力を示す。図中の荷重係数は後死荷重に対する倍数を表す。同図より、荷重係数の増加に伴って、支間部では弾性的な応答が見られる。一方、中間支点部では引張強度を超えると、応力上昇は見られず、ある一定の範囲においてひび割れが生じていることがわかる。

図-15 は、図-14 に対応する床版上面の橋軸方向ひずみの分布図である。同図より、荷重係数 4, 6 に対する中間支点部の橋軸方向ひずみは急激な上昇を示しており、ひび割れ発生により剛性が低下していることがうかがえる。また、中間支点部のひずみ量から、ひび割れ発生後の応力-ひずみ状態は、図-12 に示す遷移状態にあることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、千鳥の沢川橋を対象に施工開始時からクリープ、乾燥収縮を考慮した解析を行った。また RC 床版の引張硬化を考慮したひび割れ解析として、後死荷重を漸増させたときの応力-ひずみ状態を調べた。以下に、本研究によって得られた知見を示す。

- ① 汎用プログラム(DIANA)を適用することによって、分割施工により逐次合成されていく状況を忠実に再現でき、かつ、クリープ、乾燥収縮を考慮した解析を行うことができる。
- ② ジャッキアップダウン工法により橋軸方向に導入したプレストレスは、各支点において5割前後の損失が生じる。
- ③ クリープ、乾燥収縮の影響については、床版打設ブロックごとの材令の差まで設計に考慮する必要はなく、道示Ⅱに示されている仮想ヤング係数比に基づく計算法で妥当な解を与えることができる。
- ④ ひび割れ解析では、鉄筋コンクリートを1つの材料として考え、引張硬化を考慮した応力-ひずみ関係を適用することにより、ひび割れを考慮した連続合成桁の挙動検討および解析ができる。

今後、活荷重載荷時に生じるひび割れの範囲を把握するため、クリープ、乾燥収縮の影響と同時にひび割れを考慮した解析を適用していくことが課題であると考えら

れる。

謝辞：最後に、本研究を進めるにあたりご指導頂きました長岡技術科学大学 長井正嗣教授に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋昭一、志村勉、橋吉宏、小西哲司：PC 床版 2 主桁「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討、橋梁と基礎、Vol.30, No.2, pp23～30, 1996.2
- 2) 高橋昭一、川尻克利、宮内博英、林芳文、塚島朗：PC 床版 2 主桁橋「キウス第一橋」の設計、土木学会第 52 回年次学術講演会、I-A307, pp612～613, 1997.9
- 3) 田村陽司、川尻克利、大垣賀津雄、作川孝一：PC 床版連続合成 2 主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計、橋梁と基礎、Vol.32, No.9, pp18～22, 1998.9
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ, 1996.12
- 5) DIANA Nonlinear Analysis User's Manual, Release6.1
- 6) 大垣賀津雄、山本晃久、作川孝一、久保拓也、田村陽司、川尻克利：連続合成 2 主桁橋の中間支点部ジャッキアップダウンに関する一考察、土木学会第 53 回年次学術講演会、I-A13, pp26～27, 1998.10
- 7) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測、コンクリート工学、Vol.31, No.2, pp5～14, 1993.2
- 8) 土木学会：コンクリートの力学特性に関する調査報告書、コンクリートライブラリー69, 1991.7
- 9) 劉玉撃、彦坂熙：異形鉄筋の準微視的付着作用を考慮した鉄筋コンクリートの引張硬化のシミュレーション、構造工学論文集、Vol.44A, pp37～46, 1998.3
- 10) V. Cervenka and J. Margoldova : Tension stiffening effect in smeared crack model, ASCE EMD Specialty Conference, pp57～60, 1995.5
- 11) C. Ouyang, E. Wollrab, S.M. Kulkarni and S.P. Shah : Prediction of cracking response of reinforced concrete tensile members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.1, pp70～78, 1997.1