

## PRC逆L字型橋脚のひび割れ進展挙動と構造性能評価

名古屋大学大学院	○渡邊 理智
名古屋大学大学院 正会員 博(工)	中村 光
関西大学 正会員 博(工)	上田 尚史
中日本高速道路(株)	木曾 茂

Abstract : In this study, inverted-L-shaped PRC pier was analysed by using nonlinear finite element method, which includes moisture diffusion analysis and time-dependent behavior analysis, in order to evaluate the effect of shrinkage and creep on the structural performance. First, structural performance, including cracking behavior, of PRC pier under drying condition was simulated and the cracking behavior in the corner was investigated in detail. Then, time-dependent analysis considering effect of shrinkage and creep was simulated. It was shown that the shrinkage and creep influence not only cracking behavior but also load carrying capacity and postpeak behavior with crack propagation in the corner.

Key words : Shrinkage, Creep, Diffusion equation, Relative humidity, Postpeak behavior, Corner

## 1. はじめに

市街地では土地利用の制限から逆L字型橋脚がよく用いられる。逆L字型橋脚は上部工荷重によってラーメン構造と同様に隅角部対角線方向に引張応力が発生すると考えられるが、現在の設計では線材置換された静定構造物として扱い、隅角部の挙動は一般に考慮対象になっていない。また、逆L字型橋脚は柱部の引張鉄筋量が比較的大きくなる場合があり、その場合には鉄筋拘束による乾燥収縮ひび割れの発生が懸念される。このように逆L字型橋脚の隅角部では、柱、はり部とは異なる応力状態や収縮・クリープなどの時間依存挙動で複雑な応力状態となると思われるが、その影響は詳細に検討されていないと考えられる。

そこで本研究では、水分移動問題と時間依存挙動としての収縮・クリープを考慮可能な3次元非線形有限要素解析を用いて、既設のPRC逆L字型橋脚を対象に解析を行い、健全な状態での荷重によるひび割れ進展挙動について検討するとともに、時間依存挙動としての収縮、クリープが構造性能に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 解析手法

### 2.1 構造解析

本研究では、8節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形3次元有限要素解析を用いた<sup>1)</sup>。今回対象とした橋脚では、複数の荷重を考慮かつポストピーク領域の挙動を検討するために求解法として弧長法を用いた。コンクリートの材料モデルは、引張軟化領域では引張破壊エネルギーを考慮し、引張軟化曲線に1/4モデルを用いた。一方、圧縮領域では応力が圧縮強度に達するまではSeanzが提案した一軸の応力-ひずみ関係を用い、ひずみ軟化領域には、解のメッシュ寸法依存性を軽減させるために圧縮破壊エネルギーを導入した。鋼材のモデル化において、鉄筋は分散鉄筋要素としてモデル化を行い、鉄筋との付着が期待される領域にTension Stiffening Modelを仮定した。一方、PC鋼材は離散鉄筋要素としてモデル化を行い、コンクリート要素とは別に独立した鋼材要素をモデル化し、それぞれの要素間に付着特性を仮定したリンク要素を設けることで付着特性を直接モデル化した<sup>2) 3)</sup>。

## 2.2 水分移動解析

コンクリートの相対湿度は、乾燥収縮やクリープ特性を変化させ、ひび割れやたわみに影響を与えるため、その影響はできるだけ考慮することが望ましいと考えられる<sup>4)</sup>。そこで本研究ではコンクリートの相対湿度は相対含水率と等しいものと仮定し、式(1)に示す非定常の拡散方程式を解くことにより構造物中の相対含水率分布を求め、その影響を考慮することとした。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla R) \quad (1)$$

ここで、 $R$ は相対含水率、 $t$ は時間、 $D$ は水分伝導率、 $\nabla$ は微分演算子である。これは式(2)に示す境界条件のもとに解くことができる。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha(H - H_\infty) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $n$ は乾燥面の法線ベクトル、 $\alpha$ は水分伝達率、 $H$ 、 $H_\infty$ は乾燥面および外気の相対湿度である。また、水分伝導率 $D$ は、式(3)に示す式<sup>5)</sup>により相対含水率依存性を考慮した。

$$D/D_1 = 1/\{22(1 - R/100) + 1\}^{1.4} \quad (3)$$

ここで、 $D_1$ は初期水分伝導率である。

本研究では、式(1)、式(2)を差分法により時間に関して離散化し、陰解法により解を求めた。

## 2.3 時間依存挙動モデル

コンクリートの時間依存挙動として、クリープと収縮を考慮した。クリープの影響は、主応力方向の応力増分に対しStep by step法によりクリープひずみを算出し、初期ひずみ問題として考慮した。なお、クリープひずみの算定式は2007年版コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に示されている式(4)を用いた。

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{cc} / \sigma'_{cp} &= [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}] \cdot \varepsilon'_{cr} \\ \varepsilon'_{cr} &= \varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc} \\ \varepsilon'_{bc} &= 15(C + W)^{2.0} (W/C)^{2.4} (\ln t_0)^{-0.67} \\ \varepsilon'_{dc} &= 4500(C + W)^{1.4} (W/C)^{4.2} (\ln(V/S)/10)^{-2.2} (1 - RH/100)^{0.36} t_s^{-0.30} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon'_{cc} / \sigma'_{cp}$ は単位応力あたりのクリープひずみ、 $\varepsilon'_{cr}$ は単位応力当りのクリープひずみの最終値、 $\varepsilon'_{bc}$ は単位応力当りの基本クリープひずみの最終値、 $\varepsilon'_{dc}$ は単位応力当りの乾燥クリープひずみの最終値、 $C$ は単位水量、 $W$ は単位水量、 $V$ は体積、 $S$ は表面積、 $RH$ は相対湿度である。また、 $t_0$ 、 $t'$ 、 $t$ は乾燥開始時、載荷時、載荷中のコンクリートの有効材齢である。なお、 $RH$ は水分移動解析により算出した相対湿度を用いた。

一方、収縮の影響は2007年版コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に示されている式(5)により収縮ひずみを算出し、初期ひずみ問題として考慮した。

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{cs}(t, t_0) &= [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \\ \varepsilon'_{sh} &= -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ はコンクリートの材齢 $t_0$ から $t$ までの収縮ひずみ、 $\varepsilon'_{sh}$ は収縮ひずみの最終値、 $t_0$ 、 $t$ は乾燥開始時、乾燥中のコンクリートの有効材齢である。なお、クリープと同様に $RH$ は水分移動解析により算出した相対湿度を用いた。

### 3. 解析概要

本研究では、現在供用中の逆L字型PRC橋脚を対象に解析を行った。図-1に対象橋脚の寸法を示す。また、図-2に配筋図を示す。柱部の主筋はD51で2段に配筋されている。はり部にはPC鋼材として1S28.6のPC鋼より線が29本配置されている。導入プレストレス力は1本あたり650kNである。また、構造物内部には中間帯鉄筋が配筋されているが、隅角部背面側には中間帯鉄筋が配筋されていない部分が存在している。

図-3に解析モデルを示す。コンクリート要素は1辺約30cmの直方体でモデル化し、構造物表面の要素は外気による構造物表層での相対湿度変化を精度よく評価するために深さ方向にさらに3分割した。鉄筋は2.1で述べたように分散鉄筋で、PC鋼材は離散鉄筋によりモデル化した。PC鋼材はモデル化を簡易に行うため、曲率は考慮せずに直線的にモデル化した。なお、PC鋼材の位置については、背面部のPC鋼材定着部の位置を基準として配置し、PC定着部は図-3の青色で示す領域である。領域解析に用いたコンクリートおよび鉄筋、PC鋼材の材料特性値を表-1に示す。境界条件は、橋脚下端部を完全拘束とした。解析では、設計荷重における荷重比 (G2/G3=1.0) を保ったまま図-3のG2, G3に荷重を加えていった。設計荷重は死荷重が5110kN、衝撃無し活荷重が2090kNの合計7200kN (G2とG3の和) である。

水分移動解析ならびに時間依存挙動解析は、構造物内部の初期相対湿度を90%とし、構造物表面を乾燥面として外気の相対湿度を70%として0日目から乾燥を開始し、10日目にプレストレスの導入、365日目に載荷を行った。水分移動解析に用いたパラメータは、構造物内部の相対湿度分布の違いが顕著に出るように、初期水分伝導率  $D_1$  を500 mm<sup>2</sup>/day、水分伝導率  $\alpha$  を3.8 mm/day とした。これは、普通コンクリートと比較すると初期水分伝導率は大きく、水分伝導率は小さくなっている。そのため、本解析は実際の時間スケールとは必ずしも対応していないことに注意が必要である。

### 4. 解析対象の構造性能評価

収縮・クリープを考慮せずに荷重載荷を行い、対象とした逆L字型橋脚の基本的な構造性能の評価を行った。図-4に荷重-変位関係を示す。変位ははり先端部の変位を、荷重はG2とG3の和を

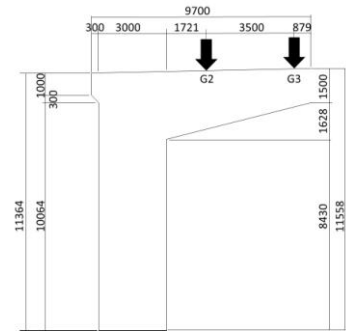
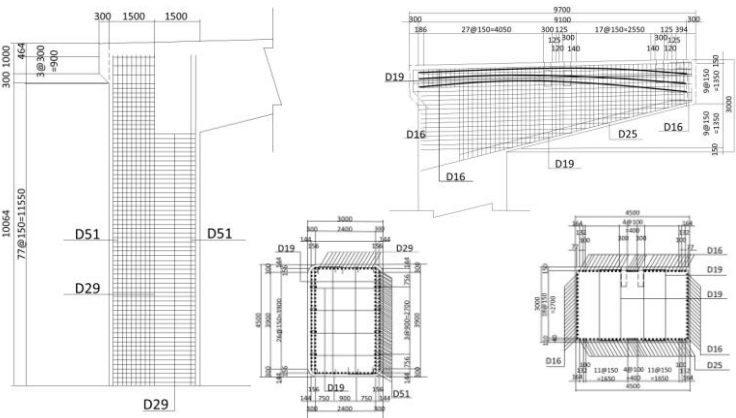


図-1 対象橋脚の寸法図



(a) 柱部配筋図

(b) はり部配筋図

図-2 対象橋脚の配筋図

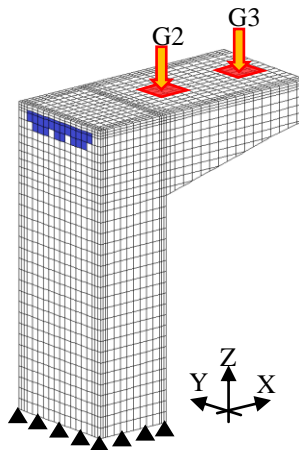


図-3 解析モデル

表-1 材料特性値

(i) コンクリートの材料特性値

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	30.0
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.2
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	28.0

(ii) 鉄筋の材料特性値

降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	345.0
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	200.0

(iii) PC鋼材の材料特性値

降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1515.0
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	200.0

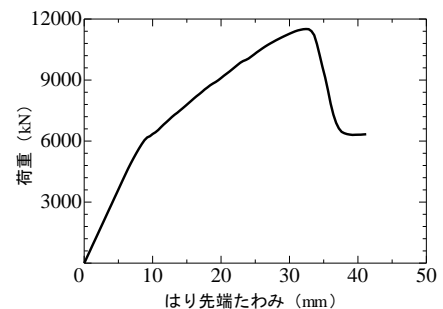


図-4 荷重-変位関係

取っている。なお、プレストレスにより初期たわみが発生するが、荷重開始時の変位を0としている。剛性低下荷重は6046kNであり、最大荷重は11509kNであった。対象橋脚の設計荷重7200kNであるため、十分な安全余裕度を有している。また、最大荷重後は荷重が比較的急に低下する挙動がみられた。図-5に複数のたわみ量における奥行中央断面のひび割れ図を示す。ひび割れ図の色は、図中の凡例に示すひび割れ幅に対応している。たわみ量15mmでは、橋脚背面部に曲げひび割れが発生している。特に柱上部隅角部下部断面に曲げひび割れ進展が生じた。また、ひび割れ幅は表面部では小さく、内部では大きくなっている。これは表面部では鉄筋の影響で曲げひび割れが分散しやすく、個々のひび割れ幅は小さくなるが、内部では複数のひび割れが連結してひび割れ幅が大きくなるものと思われる。たわみ量25mmでは、隅角部の分散鉄筋領域の内側で鉛直に進展するひび割れが発生している。最大荷重となるたわみ量32mmでは、隅角部において鉛直ひび割れが大きく進展していく。そして最大荷重以降は、隅角部において斜めひび割れが大きく進展している。

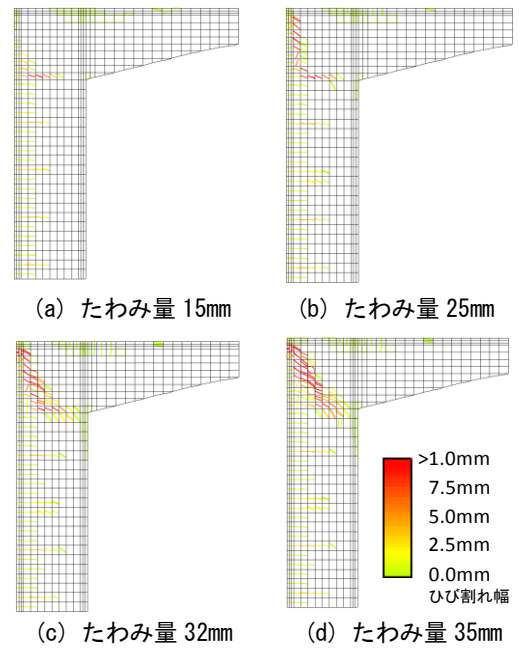


図-5 奥行中央断面のひび割れ図

道路橋示方書<sup>7)</sup>では、ラーメン構造に対して隅角部対角線方向に発生する引張応力度の考慮がなされている。解析で用いた引張強度の入力値は2.22N/mm<sup>2</sup>であり、計算式により算出した隅角部対角線の引張応力度が引張強度に達する荷重は7265kNである。解析結果では、たわみ量25mmにおいて隅角部における鉛直ひび割れが発生しており、このときの荷重10362kNから算出した隅角部対角線の引張応力度は3.16N/mm<sup>2</sup>である。したがって、今回の逆L字型橋脚においては隅角部対角線方向に発生する引張応力に起因する斜めひび割れが発生したものと考えられる。

5. 時間依存挙動が構造物の挙動に及ぼす影響

5.1 荷重前からの乾燥が及ぼす影響

本節では、施工から荷重までの収縮・クリープが対象構造物の構造性能に及ぼす影響の検討を行った。また、収縮量による影響を検討するために、2.3の式(5)により算出される収縮ひずみを1.5倍、2倍に変化させた解析を行った。365日目の乾燥面における収縮ひずみは、基本ケースが約350μであった。図-6に荷重を行う365日目における鉛直方向の初期応力に関するひずみ分布図を示す。ひずみは全ひずみではなく、クリープ、収縮などの初期ひずみ問題に対する拘束によって生じる応力とプレストレスにより生じる応力を算定するために必要となるひずみのみとしている。プレストレスの影響により定着部の下部に最も大きな鉛直引張応力が発生している。また、収縮量による違いを見てみると、収縮量の増加に伴い鉛直引張応力が増大していることが確認できる。図-7にそれぞれの荷重-変位

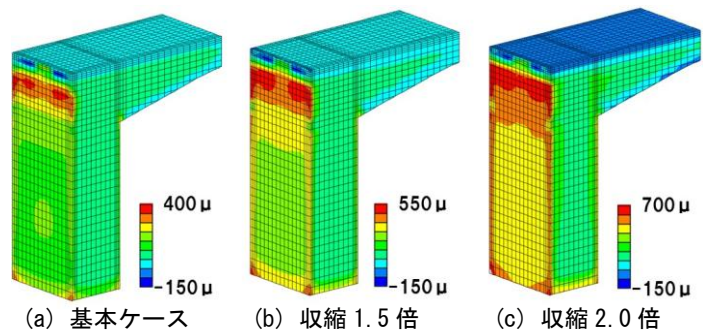


図-6 初期ひずみ分布

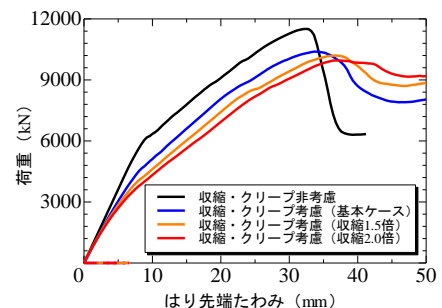


図-7 荷重-変位関係

関係と収縮・クリープを考慮しない場合の荷重-変位関係の比較を示す。なお、収縮・クリープ考慮の場合の荷重-変位関係は、荷重までの時間依存挙動による変位が生じているため、荷重開始時の変位を0としている。収縮、クリープ非考慮の場合と収縮・クリープ考慮の場合を比較すると、収縮・クリープを考慮することにより、表面ひび割れの発生による初期剛性の低下、曲げひび割れ発生荷重の低下、最大荷重の低下が見られた。最大荷重は、収縮・クリープ非考慮の場合の11509kNに対して、収縮量基本ケースが10392kN(90.3%)、収縮量1.5倍のケースが10197kN(88.6%)、収縮量2倍のケースが9958kN(86.5%)であった。

また、収縮の影響が大きいものほど、最大荷重後の荷重低下は少なく、荷重低下がゆるやかになった。その原因は明確ではないが、今回対象とした橋脚の最大荷重後の挙動は、隅角部の斜めひび割れと密接な関係があると考えられ、収縮が小さいほど荷重が大きくなるため、ひび割れ進展時に解放されるエネルギーが大きくなり、斜めひび割れの進展が急激に進んだことが1つの原因と推測される。

図-8に図-5のひび割れ図のものと同じ変位における、収縮・クリープ非考慮の場合と収縮・クリープ考慮の基本ケースの奥行中央断面のせん断ひずみ分布図を示す。ひずみ分布図でひずみが大きくなっている位置がひび割れ位置と対応している。両者のせん断ひずみ分布の進展には大きな違いは見られなかった。せん断ひずみ分布から、隅角部においては隅角部下断面の曲げひび割れよりも隅角部の鉛直ひび割れの方がせん断ひずみが大きく、最大荷重以前から鉛直ひび割れの進展挙動が支配的であることがわかる。また、収縮ひずみ量が異なる場合でも、最大荷重時はPC定着部付近の表面ひび割れが進展し、内部のひび割れと連結する時点となっていることがわかる。したがって、収縮を考慮した場合は表面ひび割れの進展がしやすい状態にあるため、最大荷重が低下したものと考えられる。収縮は明らかに構造性能に影響を及ぼし、その影響を適切に評価することが望ましい結果となった。

5.2 一定荷重下での時間依存挙動

実際の橋脚は上部工による荷重がかかった状態で供用される。そこで本節では、一定荷重を載荷した後の対象構造物の時間依存挙動の検討を行った。解析は、365日目に一定荷重を載荷し、荷重を保持した状態で2000日目まで解析を行った。なお、一定荷重の載荷を行うために本解析は荷重制御法により解析を行った。また、載荷荷重レベルによる影響を検討するために、設計荷重7200kNを載荷した場合に加えて設計荷重よりも大きい9000kNを載荷した場合の解析を行った。

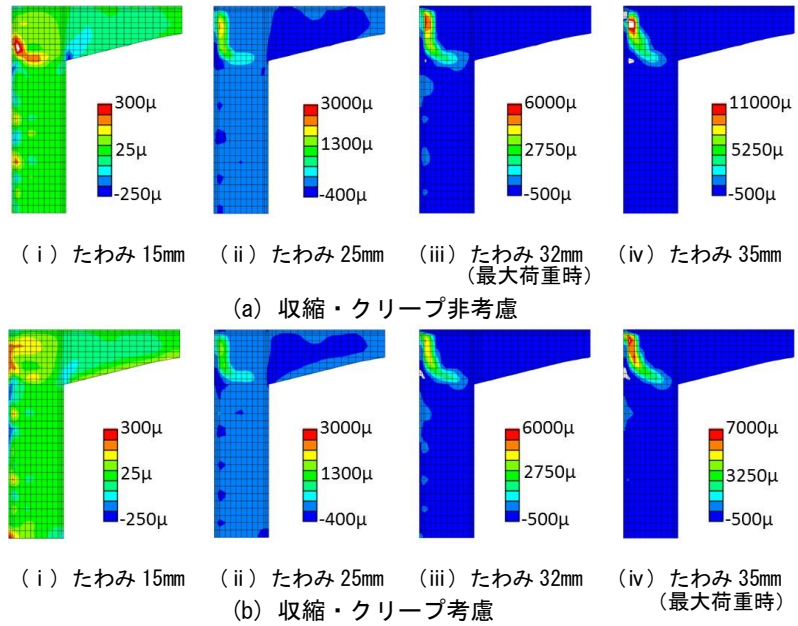


図-8 奥行中央断面のせん断ひずみ分布の進展

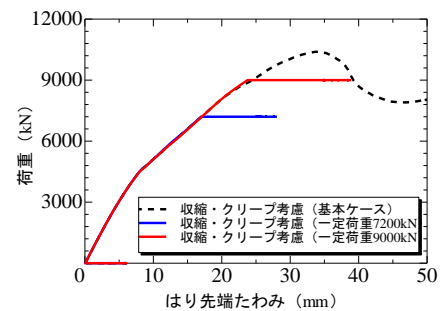


図-9 荷重-変位関係

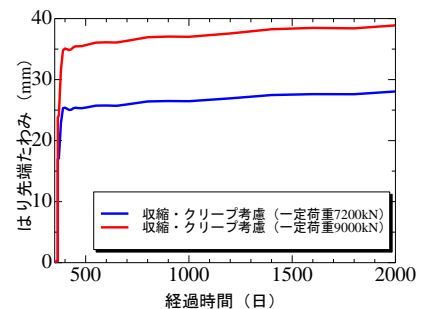


図-10 はり先端たわみの経時変化

図-9に荷重-変位関係を示す。

また、図-10に荷重後のはり先端たわみの経時変化を示す。荷重後、クリープによってたわみが増加していることがわかる。図-11に荷重直後と2000日目における構造物表面および奥行中央断面のせん断ひずみ分布図の比較を示す。荷重後の時間依存挙動の進展によって構造物表面と構造物内部のどちらにおいても隅角部のせん断ひずみが増加している。荷重レベルによる違いを比較すると、荷重レベルの高い9000kNの一定荷重荷重の場合の方が、荷重直後から2000日目までのせん断ひずみの増加量が多いことが確認できる。また、9000kNの一定荷重を荷重した場合の構造物表面と構造物内部の比較を行うと、構造物表面よりも構造物内部の方が非常に大きく隅角部のせん断ひずみが増加している。したがって、時間依存挙動の進行によって、構造物表面からでは確認できない構造物内部での損傷が発生する可能性が示された。

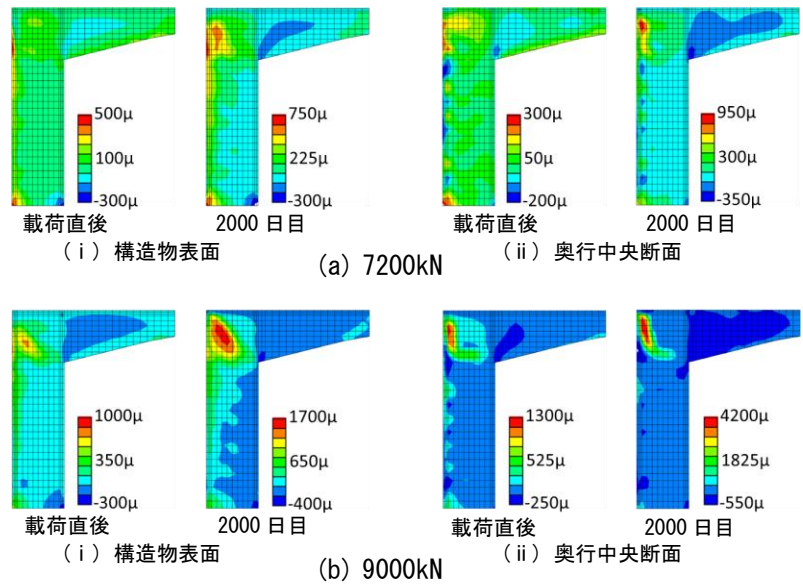


図-11 せん断ひずみ分布図の経時変化

## 6. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 逆L字型橋脚は、設計時において隅角部の挙動を一般には考慮しないが、構造解析によって終局時に隅角部で斜めひび割れが発生、進展して最大荷重となる挙動を確認した。
- (2) 施工から供用までの収縮・クリープの影響によって、構造物表面に引張初期応力が発生することで、曲げひび割れ発生荷重および耐力が低下する可能性を解析的に示した。また、相対湿度分布を考慮した収縮・クリープの影響を適切に評価することが重要である結果が示された。
- (3) 上部工荷重後の時間依存挙動の進行によって、構造物に損傷が生じる可能性を解析的に示した。その際、構造物内部において構造物表面からでは確認できない損傷が生じている可能性を示唆する結果を得た。

## 参考文献

- 1) 田辺忠顕：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.
- 2) 菅満宜，中村光，檜貝勇，斉藤成彦：RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，pp. 295-300，2001.
- 3) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係，土木学会論文集，Vol. 378，V-6，pp. 165-174，1987.
- 4) 玉野慶吾，中村光，上田尚史，国枝稔：PRCはり部材の時間依存挙動に関する解析的検討，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol. 19，pp. 491-496，2010.
- 5) 秋田宏，藤原忠司，小西俊之，尾坂芳夫：コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 12，No. 1，pp. 161-166，1990.
- 6) 土木学会：2007年度制定コンクリート標準示方書設計編，2007.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IIIコンクリート橋編)・同解説，2012.