

## プレキャストPC床版継手部における クリープ・乾燥収縮による鉄筋応力度算定評価

Stresses Evaluation of Reinforcement for Joint Part of Precast-PC-Slabs  
Caused by Creep and Shrinkage

橋 吉宏<sup>\*</sup>, 小笠原照夫<sup>\*\*</sup>, 白谷宏司<sup>\*\*\*</sup>, 大山 理<sup>\*\*\*\*</sup>, 栗田章光<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Yoshihiro TACHIBANA, Teruo OGASAWARA, Hiroshi SHIRATANI, Osamu OHYAMA, Akimitsu KURITA

<sup>\*</sup> 博士(工学) 川田工業(株), 橋梁事業部東京技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

<sup>\*\*</sup> 川田工業(株), 橋梁事業部東京技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

<sup>\*\*\*</sup> 博士(工学) 大成建設(株), 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

<sup>\*\*\*\*</sup> 博士(工学) 大阪工業大学講師, 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 博士(工学) 大阪工業大学教授, 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

It proposed the stresses evaluation method of the reinforcement for the joint part of Precast-PC-slabs caused by creep and drying shrinkage. The tensile stress of the reinforcement is caused in the joint part for shrink by creep and shrinkage in the PC structure part. First of all, the mechanics model of Precast-PC-slabs with joint parts is assumed for creep and shrinkage, and the stresses evaluation method of the reinforcement is induced. The induced this method is applied, the stress degree of reinforcement is calculated by the case study. It reports on the examination problem of details in an actual structure from these results.

*Key Words : Precast-PC-Slab, Joint, Stresses of Reinforcement, Creep, Shrinkage*

キーワード: プレキャストPC床版, 継手部, 鉄筋応力度, クリープ, 乾燥収縮

### 1. はじめに

構造面からのコスト縮減への対応として、少数主桁橋と高耐久性床版の組み合わせによる合理化橋梁が、最近定着しつつある。高耐久性床版として、PC床版、合成床版が一般に用いられているが、床版形式の選定においては、道路橋示方書に示される強度、耐久性等の要求性能を満足するとともに、施工条件、橋梁形式、構造上の特性、維持管理上の特性や経済性を考慮したうえで、最も合理的なものが選定される。

このうち、PC床版については場所打ちPC床版とプレキャストPC床版がある。プレキャストPC床版については長所として、①型枠支保工、配筋、コンクリート打設の現場作業が大幅に省力化でき床版工の現場工期短縮を図ることができる。②工場製品としてのプレキャスト床版は品質が安定している。③RC床版と比較して乾燥収縮を含めた耐ひび割れ性が向上する。などがあげられる。一方、短所として、①パネルの種類が多くなるとコスト高になる。②輸送費および据え付け費が、条件によってかなり割高になる場合がある。③継手構造の施工性と耐久性に検討を要する。などがあげられ、高耐久性床版とし

て性能を発揮するには、弱点になりやすい継手構造に対して十分な検討が不可欠である。

この継手構造として、ループ継手で接合する構造が第二東海自動車道の東海大府高架橋で採用されて以来、施工性に優れ耐久性のある継手構造として認知されるようになってきている<sup>1)</sup>。この東海大府高架橋は、橋軸直角方向はPC構造、橋軸方向はRC構造として設計されている。このように、一方向RC構造、一方向PC構造に統一されていれば、継手部の設計計算は単純である。ところが、中間支点付近の負曲げへの対処方法として、中間支点付近のみに橋軸方向にプレストレスを導入する構造が採用される例や、輸送の関係で幅員方向にプレキャストPC版を分割した場合、目地部にプレストレスを導入しない構造が採用される例もあり、一方向にPC構造とRC構造が混在する構造となる場合がある。

このような構造では、クリープ・乾燥収縮に起因する引張力が継手部に生じるにもかかわらず、設計上の対応について必ずしも十分な配慮がなされていないことが課題のひとつとしてあげられる。そこで本論文では、プレキャストPC床版をループ継手などRC構造として接合する構造を対象として、プレキャストPC床版のクリープと乾燥収

縮により目地部に生じる鉄筋応力度算定式を提案して、ケーススタディにより構造検討を行った結果を報告するものである。

## 2. クリープ・乾燥収縮の影響

PC 構造と RC 構造が混在する床版構造では、PC 構造部でクリープおよび乾燥収縮により床版が収縮するため、RC 構造部には引張力が生じ鉄筋には引張応力が生じる。図-1 にその概念を示す。

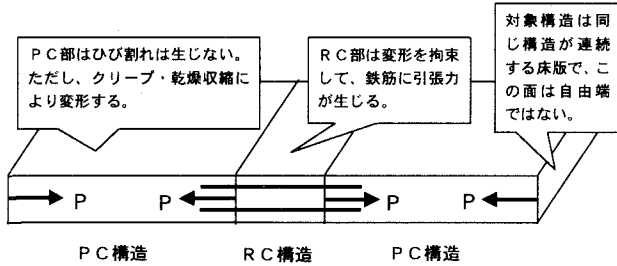


図-1 PC 構造と RC 構造が混在する床版構造

## 3. 継手部の鉄筋応力度算出方法

PC 構造部ではクリープおよび乾燥収縮により床版が収縮するため、RC 構造部には引張力が生じ鉄筋には引張応力が生じる。まず、プレキャスト PC 床版と間詰め部の力学モデルを仮定して、鉄筋応力度算定式を誘導する。なお、ここでは RC 構造の設計の仮定として、引張を受ける断面ではコンクリートを無視して鉄筋で引張力を受け持つとして鉄筋応力度を算出する。

### 3.1 乾燥収縮による鉄筋応力度の算出

図-2 は、プレキャスト PC 版と RC 構造の間詰め部の乾燥収縮に対する力学モデルである。間詰め部の鉄筋についてはループ継手でもよいが、図-2 では簡単のためにこのような表現としている。プレキャスト PC 床版内はひび割れが生じないと仮定して、プレキャスト PC 版の乾燥収縮によるひずみが間詰め部の RC 構造により外部拘束を受けるとした力学モデルであり、PC 版の収縮を算定するにあたり鉄筋の内部拘束の影響も考慮するものとした。なお、ここでは道路橋示方書に準じ、乾燥収縮によるクリープを考慮することとした。

まず、乾燥収縮による任意時刻  $t$  でのコンクリートならびに鉄筋の負担する軸力をそれぞれ  $\Delta N_{c,t}^S$  および  $\Delta N_{r,t}^S$  とすると、式(1)のとおり表される。

$$\Delta N_{r,t}^S = \frac{E_s A_r}{1 + n' p} \varepsilon_{s,t} = \Delta N_{c,t}^S \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_{s,t}$  : 乾燥収縮度

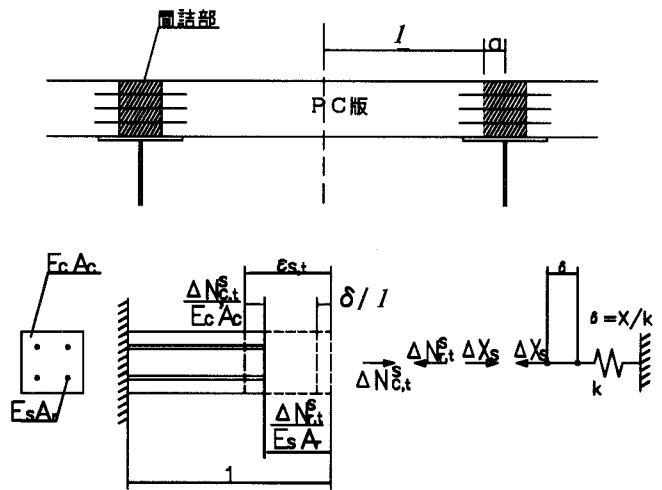


図-2 乾燥収縮に対するプレキャスト版と間詰め部の力学モデル

$E_s$  : 鋼材のヤング係数

$A_r$  : 鉄筋の断面積 (PC 鋼材を含む)

$p$  : 鉄筋比 (PC 鋼材を含む)

$n' = n(1 + \varphi_{s,t}/2)$

$n$  : ヤング係数比

$\varphi_{s,t}$  : 乾燥収縮に対するクリープ係数

つぎに、間詰め部の鉄筋に作用する軸力  $\Delta X_s$  は、式(2)に示す変位の適合条件より、式(3)のとおり求められる。

$$\frac{\Delta N_{r,t}^S}{E_s A_r} \ell - \frac{\Delta X_s}{k} = \frac{\Delta X_s}{(1 + np) E_c A_c} \ell \quad (2)$$

$$\Delta X_s = \frac{\varepsilon_{s,t} \ell}{(1 + n' p) \left\{ \frac{1}{k} + \frac{\ell}{(1 + np) E_c A_c} \right\}} \quad (3)$$

ここに、

$\ell$  : プレストレスが導入されている PC 版の長さの 1/2

$E_c' = (1/(1 + \varphi_{s,t}/2)) E_c$

$E_c$  : コンクリートのヤング係数

$A_c$  : コンクリートの断面積

$k$  : 間詰め部のバネ係数

ここで、間詰め部のバネ係数  $k$  の評価(図-3 参照)として以下の 2 通りの評価ができる。

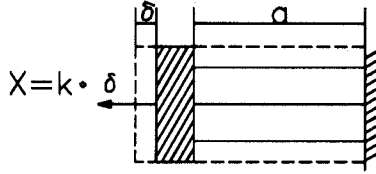
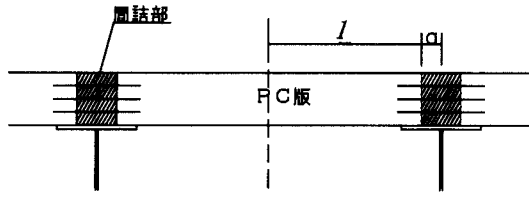


図3 間詰部のバネ

- ① 危険側の評価(鉄筋応力度を最小限に見積もる)の場合  
間詰コンクリート内の鉄筋剛性でバネを評価する。

$$k = \frac{E_s A_s}{a} \quad (3)$$

ここで、

- $a$  : 間詰部長さの1/2
- $E_s$  : 鋼材のヤング係数比
- $A_s$  : 間詰部の鉄筋断面積

- ② 安全側の評価(鉄筋応力度を最大限に見積もる)の場合  
間詰コンクリート内のコンクリート剛性でバネを評価する。

$$k = \frac{E_c A_c}{a} \quad (4)$$

ここで、

- $E_c$  : コンクリートのヤング係数比
- $A_c$  : コンクリートの断面積

間詰部の乾燥収縮により変化する鉄筋応力度  $\Delta\sigma_s$  は、式(5)より求められる。

$$\Delta\sigma_s = \frac{\Delta X_s}{A_s} \quad (5)$$

ここで、

- $\Delta\sigma_s$  : 乾燥収縮による間詰部の鉄筋応力度
- $A_s$  : 間詰部の鉄筋断面積

実構造ではテンションスティフニングが期待できるので、バネ係数は式(3)よりも大きく、式(3)と式(4)の間の値となる。したがって、鉄筋応力度についてもこの2つのバネ係数による計算値の間の値となるものと考えられる。

### 3.2 クリープによる鉄筋応力度の算出

図4に示すような前出の図2と同様な力学モデルを用いて、クリープにより間詰部に作用する力を求めることができる。クリープと乾燥収縮の取り扱いの大きな相違点は、持続荷重が作用しているか否かである。

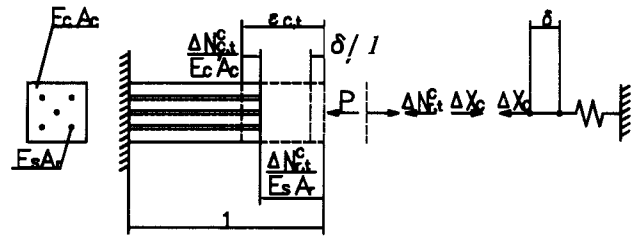
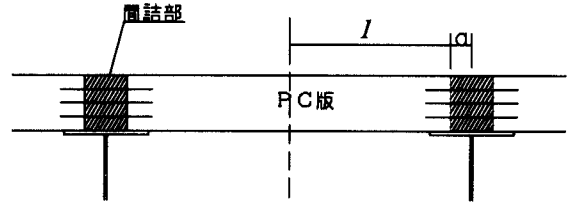


図4 クリープに対するプレキャスト版と間詰部の力学モデル

まず、クリープによる任意時刻  $t$  でのコンクリートならびに鉄筋の負担する軸力をそれぞれ  $\Delta N_{c,t}^C$  および  $\Delta N_{s,t}^C$  とすると、式(6)のとおり表される。

$$\Delta N_{s,t}^C = \frac{npP}{1+n'p} \varphi_{c,t} = \Delta N_{c,t}^C \quad (6)$$

ここに、

- $P$  : 導入軸力 (間詰部施工時)
- $p$  : 鉄筋比 (PC 鋼材を含む)
- $n' = n(1 + \varphi_{st}/2)$
- $n$  : ヤング係数比
- $\varphi_{c,t}$  : クリープ係数

つぎに、乾燥収縮同様、間詰部の鉄筋に作用する軸力  $\Delta X_c$  は、変位の適合条件より、式(7)のとおり求められる。

$$\Delta X_c = \frac{P\ell\varphi_{c,t}}{(1+n'p)E_c A_c \left\{ \frac{1}{k} + \frac{\ell}{(1+np)E_c' A_c} \right\}} \quad (7)$$

ここに、

- $\ell$  : プレストレスが導入されている PC 版の長さの1/2
- $E_c' = (1/(1 + \varphi_{c,t}/2))E_c$
- $E_c$  : コンクリートのヤング係数
- $A_c$  : コンクリートの断面積
- $k$  : 間詰部のバネ係数

ここで、 $k$ の評価として、乾燥収縮の場合と同様以下の2通りの評価ができる。

- ① 危険側の評価(鉄筋応力度を最小限に見積もる)の場合  
 間詰コンクリート内の鉄筋剛性でバネを評価する。

$$k = \frac{E_s A_s}{a} \quad (8)$$

ここで、

- $a$  : 間詰部長さの1/2
- $E_s$  : 鋼材のヤング係数比
- $A_s$  : 間詰部の鉄筋断面積

- ② 安全側の評価(鉄筋応力度を最大限に見積もる)の場合  
 間詰コンクリート内のコンクリート剛性でバネを評価する。

$$k = \frac{E_c A_c}{a} \quad (9)$$

ここで、

- $E_c$  : コンクリートのヤング係数比
- $A_c$  : コンクリートの断面積

クリープにより変化する鉄筋応力度 $\Delta\sigma_c$ は、式(10)より求められる。

$$\Delta\sigma_c = \frac{\Delta X_c}{A_s} \quad (10)$$

ここで、

- $\Delta\sigma_c$  : クリープによる間詰部の鉄筋応力度
- $A_s$  : 間詰部の鉄筋断面積

## 4. 検討例

### 4.1 検討対象とした床版

ここでは、簡単な計算例として、図-5に示す橋梁のように、幅員方向に分割して縦目地を入れた床版構造<sup>2)</sup>を対象として検討を行う。床版構造として、橋軸直角方向はPC構造、橋軸方向はRC構造として設計されている。縦目地に対して文献3)では、幅員方向に分割したプレキャストPC床版の分割目地は耐久性の観点からプレストレスを与えることを原則としており、実橋の縦目地として図-6の構造が用いられるが、ここでは、仮にこの部分にプレストレスを与えなかった場合の図-7の構造に対して、継手部の鉄筋応力度を算定してみることにする。

### 4.2 検討対象とした継手構造

文献4)では、道路橋示方書に従ったPC床版の設計例として、東海大府高架橋など3主桁橋の幅員床版(床版支間 6.0m)の設計例を示している。道路橋示方書ではPC床版はフルプレストレスが要求され、

また、文献3)においても縦目地部についてはフルプレストレスが要求されている。ここでは、文献2)および文献4)を参考に、検討対象とする床版支間、床版厚およびPC鋼材の配置およびプレストレス導入量を表-1のとおりとした。

表-1 床版の概要 (橋軸直角方向)

床版支間	6,000mm		
1枚のPC床版幅	13,600mm		
床版厚	一般部	270mm	ハンチ部 370mm
間詰部長	310mm		
PC鋼材	1S21.8	PC鋼材間隔	200mm
導入軸力	360kN/本		

なお、橋軸直角方向の鉄筋として、図-6に示すように分割目地にプレストレスを与えている実橋ではD13を3段で125mm間隔に配置しているが、本検討ではこの部分がRC構造となることから、鉄筋量をパラメータとして鉄筋間隔を一定として鉄筋径をD13、D19、D25と変化させて、クリープ・乾燥収縮による鉄筋応力度を算出した。

### 4.3 クリープおよび乾燥収縮の設定

プレキャスト床のクリープ係数、乾燥収縮度、表-2に示す2つのケースを考え、鉄筋応力度の計算を行ってみた。ここで、ヤング係数比 $n$ は7.0とした。

表-2 計算に用いたクリープ係数および乾燥収縮度

	ケース1	ケース2
クリープ係数： $\varphi_{c,t}$	1.7	1.0
乾燥収縮度： $\varepsilon_{s,t}$	160 $\mu$	100 $\mu$
乾燥収縮に対する	3.4	2.0
クリープ係数： $\varphi_{s,t}$	(2.0 $\varphi_{c,t}$ )	(2.0 $\varphi_{c,t}$ )

ケース1は、プレキャスト床版を工場製作後90日間の養生期間を経た後に架設するものとして、道路橋示方書にしたがった値である。ここで乾燥収縮に対するクリープ係数は、クリープ係数の倍と仮定した。ケース2は、実橋における計測例で道路橋示方書の値よりも小さいことが報告されていることから参考とした値<sup>9)</sup>である。

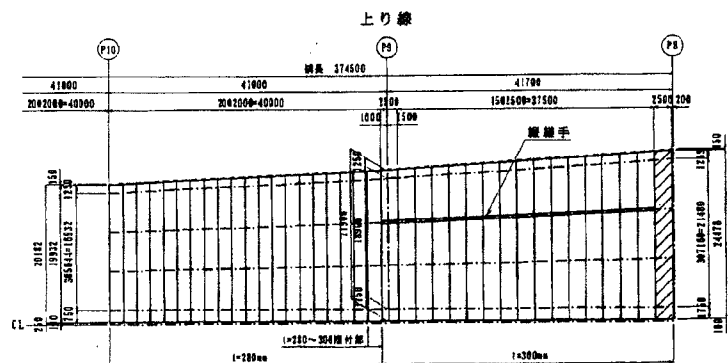


図-5 幅員方向に分割された床版の例<sup>2)</sup>

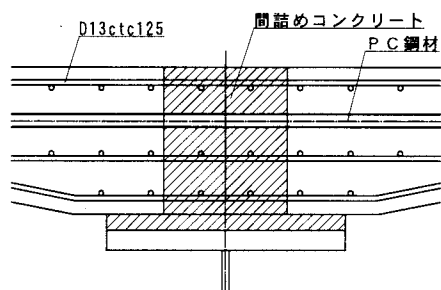


図-6 実橋における継手構造概要<sup>2)</sup>

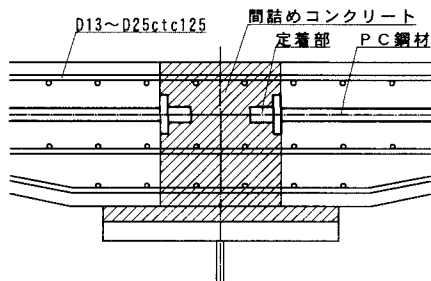


図-7 検討対象とした継手構造

#### 4.4 間詰部鉄筋応力度の算定結果および考察

表-3~6に、ケース1およびケース2の間詰部鉄筋応力度算定結果を、間詰部の剛性を鉄筋剛性で評価した場合(危険側評価)とコンクリート剛性で評価した場合(安全側評価)について示す。

ケース1のクリープ係数と乾燥収縮度では、実構造において表-3と表4の間の値であり、ケース2については表-5と表6の間の値となる。クリープ係数と乾燥収縮度の差が及ぼす影響について、表-3と表-5あるいは表-4と表-6を比較すると、クリープ係数の差に比べて乾燥収縮度の差が鉄筋応力度に顕著に影響していない。これは、乾燥収縮に対するクリープ係数の設定に関係しており、この係数を小さく設定すると応力緩和も小さくなるため、乾燥収縮度の低減に対してはクリープの場合と傾向が異なるためである。

クリープと乾燥収縮による鉄筋応力度の合計値をみると、表-3および表4に示す道路橋示方書に準じたケース1では、D13を用いた場合は、クリープと乾燥収縮だけでSD345の降伏応力度である345N/mm<sup>2</sup>を超え、また、D25を用いても鉄筋の許容応力度140N/mm<sup>2</sup>を超える計算結果であった。一方、表-5および表-6に示す道路橋示方書よりも小さいクリープ係数と乾燥収縮度で計算したケース2については、D13を用いた場合はDINの降伏に対する制限値である限界降伏応力度276N/mm<sup>2</sup>を超え、鉄筋の許容応力度140N/mm<sup>2</sup>以下に収まるのはD25の場合だけであった。ただし、許容応力度に対する余裕は小さく、後死荷重や活荷重による鉄筋応力度を重ねると許容応力度を越えるのは明らかである。したがって、本検討例におけるD25を配置しても鉄筋量が不足する結果となった。

表-3 ケース1の鉄筋応力度算定結果(危険側評価)

k 鉄筋剛性評価	D13	D19	D25
鉄筋比(鉄筋のみ)	1.10%	1.85%	2.51%
鉄筋比(PC鋼材含む)	1.52%	2.28%	2.93%
乾燥収縮 $\Delta\sigma_s$ N/mm <sup>2</sup>	132	76	55
クリープ $\Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	232	141	109
合計 $\Delta\sigma_s + \Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	364	218	159

表-4 ケース1の鉄筋応力度算定結果(安全側評価)

k 鉄筋剛性評価	D13	D19	D25
鉄筋比(鉄筋のみ)	1.10%	1.85%	2.51%
鉄筋比(PC鋼材含む)	1.52%	2.28%	2.93%
乾燥収縮 $\Delta\sigma_s$ N/mm <sup>2</sup>	147	82	58
クリープ $\Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	273	156	112
合計 $\Delta\sigma_s + \Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	420	273	170

表-5 ケース2の鉄筋応力度算定結果(危険側評価)

k 鉄筋剛性評価	D13	D19	D25
鉄筋比(鉄筋のみ)	1.10%	1.85%	2.51%
鉄筋比(PC鋼材含む)	1.52%	2.28%	2.93%
乾燥収縮 $\Delta\sigma_s$ N/mm <sup>2</sup>	112	67	46
クリープ $\Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	168	105	79
合計 $\Delta\sigma_s + \Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	280	172	128

表-6 ケース2の鉄筋応力度算定結果(安全側評価)

k 鉄筋剛性評価	D13	D19	D25
鉄筋比(鉄筋のみ)	1.10%	1.85%	2.51%
鉄筋比(PC鋼材含む)	1.52%	2.28%	2.93%
乾燥収縮 $\Delta\sigma_s$ N/mm <sup>2</sup>	130	74	53
クリープ $\Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	204	118	86
合計 $\Delta\sigma_s + \Delta\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	334	192	138

文献2)に示した実際の構造では、図-6に示すようにプレストレスを与えて一方にPC構造としているので、このような鉄筋応力は生じない。しかし、本検討で仮に想定した図-7に示す構造では、プレキャスト版のクリープおよび乾燥収縮が間詰部の鉄筋応力度に及ぼす影響が大きく、現実問題として耐荷性を確保するための必要鉄筋量が配置できないほどに大きくなった。したがって、PC構造とRC構造が混在する構造を対象とした本検討結果は、床版の耐荷性および耐久性を確保するうえで、この構造ではクリープおよび乾燥収縮に依存する割合が大きく、その扱いが非常に重要であることを示唆する結果であると言える。

## 5. まとめ

少数主桁橋に代表される合理化構造は、床版構造を半永久的な構造部材と捉えて、鋼主構造の単純化を図るものである。したがって、床版構造については、耐荷性に対する安全性が検証されたうえで、耐久性の確保が要求される。

本研究において、PC 構造と RC 構造が混在する床版に対して、設計計算におけるプレキャスト PC 床版のクリープと乾燥収縮により目地部に生じる鉄筋応力度算定式を提案して、ケーススタディにより構造検討を行った結果を、以下にまとめることができる。

- (1) 乾燥収縮およびクリープに対するプレキャスト版と間詰部の力学モデルを構築し、間詰部の鉄筋応力度の算定式を導いた結果を示した。
- (2) 提案式においては、間詰部のバネ剛性の評価により鉄筋応力度が変化する。間詰コンクリート内のバネ剛性を鉄筋剛性で評価すれば鉄筋応力度を最小限に評価し、コンクリート剛性で評価すれば最大限に評価することになり、実構造においてはこの間の値をとるものとした。
- (3) 検討例として、幅員方向に分割して縦目地を入れた床版構造で、目地部にプレストレスを導入しない PC 構造と RC 構造が混在した床版に対して、乾燥収縮とクリープにより生じる鉄筋応力度を計算した。その結果、設計計算上無視できない大きな引張力が鉄筋に作用することがわかり、十分な鉄筋量を配置する必要があることが示された。
- (4) PC 構造と RC 構造が混在した床版では、クリープおよび乾燥収縮に依存する度合いが大きく、その扱いが非常に重要であることが示唆された。

本研究では理論解による鉄筋応力度算定式を提案したが、実構造では鋼桁の影響も考慮しなければならない場合がある。1章でも述べたが、中間支点付近の負曲げへの対処方法として、中間支点付近のみに橋軸方向にプレストレスを導入する構造についても、同様に、PC 鋼材定着部の鉄筋には引張力が発生する。この場合は、PC 床版のクリープと乾燥収縮による変形は鋼桁によっても拘束されるため、式(5)、式(10)よりも鉄筋応力度は小さくなるが、間詰部の鉄筋応力度の負担が軽減された分、PC 床版のプレストレスが減少することや鋼桁に応力が移行するなど、さらに複雑な挙動を示す。PC 構造と RC 構造が混在する床版構造では、クリープと乾燥収縮の扱いが重要であり、これらの鋼桁を含めた扱いについては今後の課題である。

### 【参考文献】

- 1) 橋 吉宏・街道 浩・小西哲司；鋼道路橋に適用される PC 床版の現状と課題について、土木学会第一回道路橋床版シンポジウム講演論文集，1998.11.

- 2) 鹿島孝之・江田徹・野上泰典・山本晃久・済藤英明・武野優・水口和之・藤田真実；広幅員プレキャスト PC 床版縦継ぎ手構造に関する実験・解析検討，土木学会第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2000.10.
- 3) (財)高速道路技術センター；第二東名・名神鋼少数主桁橋の設計・施工指針（案），2000.3.
- 4) 玉越隆史・川畑篤敬；鋼道路橋床版の設計と留意点ー道路橋示方書改訂についてー，土木学会第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003.6.
- 5) 前田研一・志村 勉・橋 吉宏・越後 滋；プレキャスト床版合成桁斜張橋の設計と施工，土木学会論文集，No.552/VI - 28，1995.9.