

## 8章 研究成果のまとめ

### 8.1 各検討の結果

本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

- ・ **2章**では、供用中のPC道路橋の定期点検調書で報告されている変状の中で、H16橋梁定期点検要領（案）に示されているPC上部構造のひび割れパターン（①～⑳）に分類できないひび割れがあったことから、ひび割れパターンを①～⑳、[21]～[40]のひび割れパターンに分類した。また、持続荷重の影響が疑われるひび割れパターンを推定したうえで、それらのパターンのひび割れが発生している橋梁および異常なたわみ、遊間の異常が発生している橋梁を97橋抽出し、その中の5橋について現地調査を実施した。その結果、平成24年道路橋示方書のクリープ係数や乾燥収縮度を用いて設計を行っている場合でも、コンクリートのひずみが拘束される場合や鉄筋の配置の条件によっては、設計計算を上回る引張応力や変位が生じる可能性があることが推察された。
- ・ **3章**では、PC橋のクリープひずみのばらつきに影響を及ぼす要因に関して、「環境」「配合」「構造」「設計」「施工」の項目に分けて、過去の文献などを整理した。その結果、クリープひずみのばらつきには、断面内に配置された鉄筋が影響することがわかった。
- ・ **4章**では、クリープ係数の予測式に関する技術基準等の現状と課題に関して、各国基準に規定されているクリープ予測式の比較を行い、課題の整理を行った。その結果、各基準で計算に用いるパラメータ（水セメント比・圧縮強度など）や予測式の式形が異なり、材齢20,000日でクリープ係数に1.37～3.30のばらつきがあることがわかった。
- ・ **5章**では、PC橋のクリープ係数をパラメータとした感度解析を実施した。その結果、自重クリープとプレストレスクリープによる不静定力は相殺関係にあるため、死荷重合計の断面力に対する影響は大きくないものの、有効プレストレスは、クリープ係数が大きいほど小さくなるため、全体的には、クリープ係数が大きいほうが安全側の評価となる傾向であることが確認された。鉛直変位・水平変位は、クリープ係数に比例して変位が変化するため、クリープ係数が大きい方が変位に関しても安全側の評価となることがわかった。このため、有ヒンジラーメン橋などで生じている部材ごとの環境条件の差などによって生じる長期的なたわみのずれに対する課題は残るものの、道路橋示方書のクリープ予測式は、各国の基準と比べ安全側のクリープ係数を与えていることがわかった。
- ・ **6章**では、クリープの進行実態や配置鉄筋量が及ぼす影響度合いに関して、クリープ載荷試験を実施した。その結果、コンクリートに生じるひずみは、軸方向鉄筋量が多いほど小さくなる傾向があり、配置鉄筋量が多い場合、鉄筋拘束力の影響を考慮した設計を行わないと、実構造物に想定以上の引張応力度が発生する懸念がある

ことがわかった。また、鉄筋拘束の影響を控除したクリープ係数は、軸方向鉄筋量の違いに関わらずほぼ同じで、欧米基準のクリープ係数に近いことがわかった。

- ・ **7章**では、**6章**で得られた実測のクリープ係数および鉄筋配置の影響を考慮した感度解析を実施した。応力変動の程度は配置鉄筋量によって異なるが、鉄筋拘束力の影響により上部工全体に引張方向の軸力が作用するため、コンクリートの圧縮応力度は上縁・下縁とも小さくなることから、配置鉄筋量によっては鉄筋拘束の影響が断面諸元に影響を与えるような引張応力度を生じさせる可能性があることがわかった。また、鉄筋を断面諸元に反映すると、曲げ応力度も変化するため、鉄筋換算断面を用いることで、より高い精度の解析が可能になることも確認できた。このため、鉄筋拘束力の影響や断面諸元に対する配置鉄筋の影響を適切に評価した設計を行うことが必要であることがわかった。

## 8.2 持続荷重の影響評価の精度向上のための提案

本共同研究の成果より、断面剛性に対する鉄筋の評価、クリープ・乾燥収縮によるコンクリートのひずみを鉄筋が拘束することによる影響等が、PC橋の実挙動の評価に対して重要な要素であることが判明した。

これらの持続荷重の影響評価について、さらに厳密化することはPC橋に発生するひび割れなどの変状を防止するための有効な手段になると考えられる。また、今後の新技術、新工法を用いた構造についても合理的な設計が可能となるものと考えられる。このため、本研究ではPC橋の設計において、持続荷重の影響評価の精度向上のため、以下の①②のとおり、配置鉄筋の影響を考慮することを提案する。

### ①【鉄筋拘束力について】

従来、プレストレストコンクリート構造においては、PC鋼材量に対する鉄筋量の割合が少なく、部材応力レベルにおける鉄筋拘束力の影響が小さいとされていたため、一般に鉄筋拘束の影響は考慮されてきていなかった。しかしながら、近年、耐震設計やひび割れを許容する設計手法の導入、そして高強度コンクリートを用いた部材の薄肉化に伴い、従来よりも鉄筋量が増加する傾向にある。そのため、鉄筋拘束がプレストレストコンクリート部材のクリープ挙動に及ぼす影響に着目した長期暴露試験結果等をもとに、1)軸方向鉄筋量の違いによりクリープ変形に明確な差異が生じること、2)配置鉄筋量によっては鉄筋拘束の影響が断面諸元に影響を与えるような引張応力度を生じさせる可能性があることが確認されたことから、プレストレストコンクリート構造においても鉄筋拘束の影響を考慮するのがよい。

### コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるPC鋼材応力度の減少量

有効プレストレス力 ( $P_e$ ) は、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮と、PC鋼材の見かけのリラクセーションとによるプレストレスの減少量を、プレストレス直後のプレストレス力より減ずることによって求める。鉄筋拘束の影響を考慮したコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるPC鋼材引張応力度の減少量の算出式は、「PRC橋の設計」<sup>1)</sup>や「2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編]」<sup>2)</sup>が参考となる。以下に、「PRC橋の設計」<sup>1)</sup>による、鉄筋をPC鋼材に換算して、全鋼材の図心位置を求め、その位置における持続荷重によるコンクリートの応力度を用いて減少量を算出する方法を示す。

$$\Delta\sigma_{p\varphi} = (n \cdot \varphi \cdot \sigma_{cp} + E_p \cdot \varepsilon_s) / \{1 + \alpha (1 + \varphi/2)\}$$

$$\text{ただし } \alpha = n \cdot A_{p+s} \cdot (1/A + e_{p+s}^2/I)$$

ここに

$\Delta\sigma_{p\varphi}$  : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるPC鋼材応力度の減少量(N/mm<sup>2</sup>)

$\varphi$  : コンクリートのクリープ係数

$\varepsilon_s$  : コンクリートの乾燥収縮度

$n$  : ヤング係数比 ( $n = E_p/E_c$ )

$E_p$  : PC鋼材のヤング係数

- $E_s$  : 鉄筋のヤング係数  
 $E_c$  : コンクリートのヤング係数  
 $A_{p+s}$  : PC鋼材および鉄筋の換算断面積  
 $A_{p+s} = A_p + (E_p/E_s) \cdot A_s$   
 $A_p$  : PC鋼材の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $A_s$  : 鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $A$  : コンクリート部材断面の総断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{cp}$  : 鋼材図心位置における持続荷重によるコンクリートの応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $e_{p+s}$  : 鋼材図心と断面図心との偏心量 (mm)  
 $I$  : コンクリート部材断面の図心に関する断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

### 鉄筋拘束によって生じる断面力

鉄筋拘束によって生じる断面力は、部材断面に対し図 8.2.1 に示すような拘束力として作用するものと考え、以下の式により算出できる。

$$N_s = -A_s \cdot \Delta\sigma_{ps}$$

ただし、  $\Delta\sigma_{ps} = E_s/E_p \cdot \Delta\sigma_{p\phi}$

$$M_s = N_s \cdot e_s$$

ここに

- $N_s$  : 鉄筋拘束により断面に生じる軸力 (引張応力) (N)  
 $M_s$  : 鉄筋拘束により断面に生じる曲げモーメント (N・mm)  
 $\Delta\sigma_{ps}$  : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による鉄筋応力度の増加量 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $e_s$  : 鉄筋図心の偏心量 (mm)

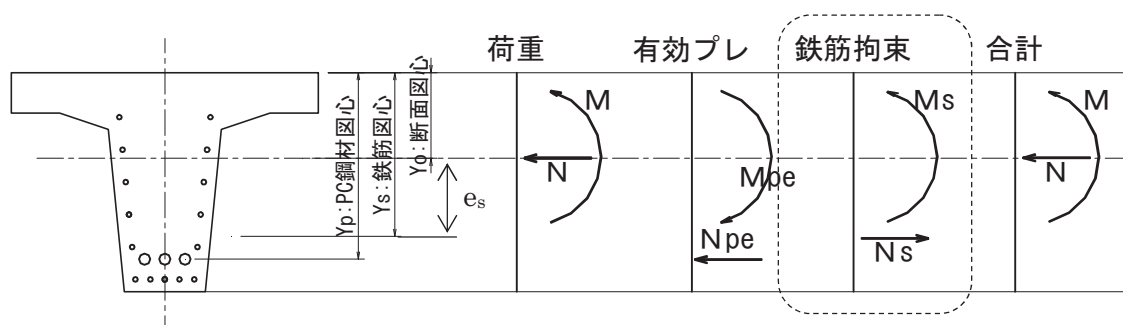


図 8.2.1 鉄筋拘束力によって生じる断面力

## ②【鉄筋換算断面について】

鉄筋拘束力の項でも示したように、近年、プレストレストコンクリート構造においても鉄筋が多く配置されてきている。そのため鉄筋拘束力の影響と同様に、主桁の応力度を算出する際には、鉄筋が部材の弾性変形を妨げることが無視できないことから、鉄筋換算断面を用いた断面定数を用いるのがよい。配置された鉄筋量を考慮した鉄筋換算断面を用いることによって、1)主桁断面積、2)主桁断面定数、3)PC鋼材偏心量等に影響が生じるが、実際の構造物により近い鉄筋換算断面を設計計算に用いることで、実橋の応力状態をより適確に解析することが可能となる。換算断面の比較を図8.2.2に示す。

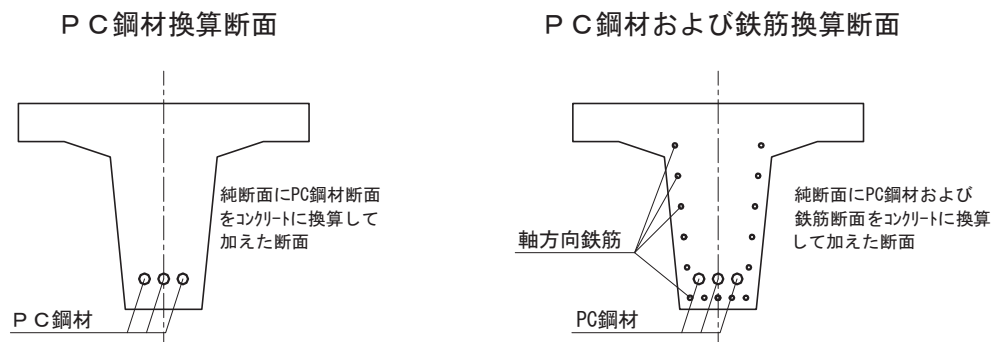


図 8.2.2 換算断面の比較

### 8.3 まとめ

本研究では、H16 橋梁定期点検要領（案）に基づき専門技術者により取得された均質な点検データを元に、持続荷重によるコンクリートのクリープの影響や収縮の影響などの時間依存性挙動に伴う変状に着目し、その要因の抽出を行った。その結果、PC橋の時間依存性挙動に対しては、コンクリートのひずみをコンクリート断面内に配置された鉄筋が拘束することによって生じる応力や変形の影響が大きいことを確認した。

なお、本研究では時間依存性挙動に着目した影響評価手法に関して取りまとめているが、供用開始後2年以内に実施される定期点検（初回点検）までの間に生じるPC橋の変状（図8.3.1の①）に対する影響評価と対策に関しては、国総研資料第910号プレストレストコンクリート橋における初期変状の影響評価と対策に関する共同研究報告書（その1）<sup>3)</sup>及び国総研資料第1046号プレストレストコンクリート橋における初期変状の影響評価と対策に関する共同研究報告書（その2）<sup>4)</sup>に取りまとめている。今後、より高品質なPC橋を構築していくためには、これら双方の成果を取り入れた設計がなされていくことが必要である。

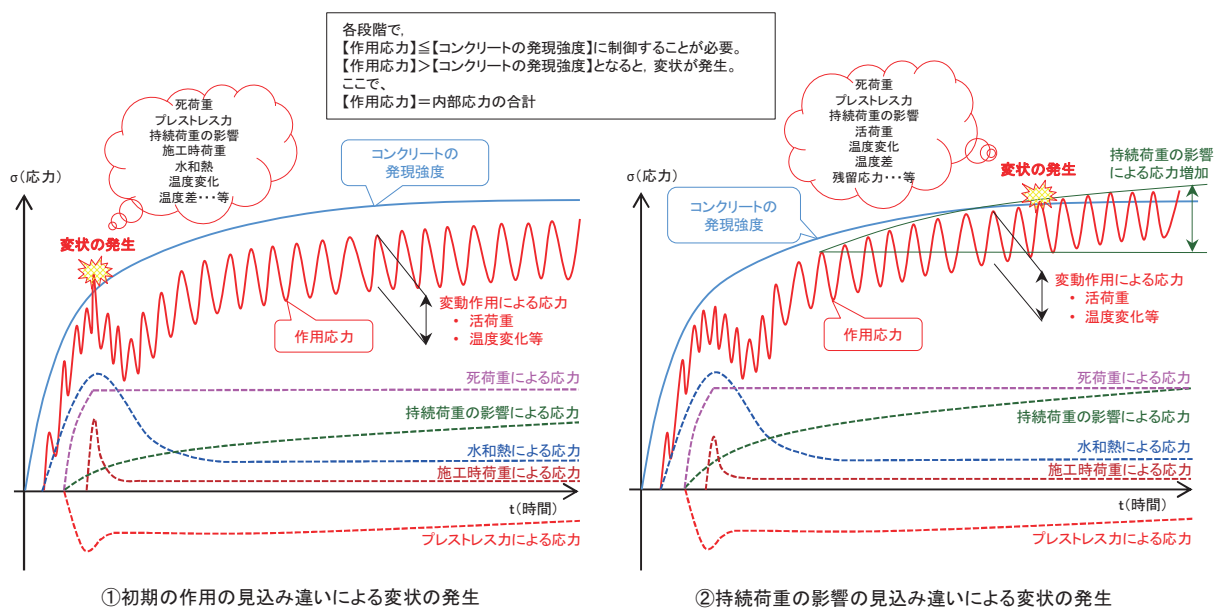


図 8.3.1 PC橋の作用応力とコンクリートの発現強度の関係（概念図）

#### 【8章 参考文献】

- 1) 西澤紀昭・新井英雄・北国秀一・酒井英昭：P R C橋の設計，技報堂出版，1993年
- 2) 公益社団法人 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2012年
- 3) 国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書 第910号，土木研究所 共同研究報告書 第468号，プレストレストコンクリート橋における初期変状の影響評価と対策に関する共同研究報告書（その1），2016.3
- 4) 国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書 第1048号，土木研究所 共同研究報告書 第498号，プレストレストコンクリート橋における初期変状の影響評価と対策に関する共同研究報告書（その2），2018.7