

高強度材料を使用したプレテンション方式 PCaPC 梁の有効プレストレス力の考察

小室 努^{*1}・森山 毅子彦^{*2}・竹崎 真一^{*3}・今井 和正^{*3}・是永 健好^{*3}

Keywords : creep, drying shrinkage, relaxation, effective prestressing force

クリープ, 乾燥収縮, リラクゼーション, 有効プレストレス力

1. はじめに

筆者らは大スパン空間を構築する鉄筋コンクリート技術として、当社独自のプレテンション方式プレキャストプレストレストコンクリート (PCaPC) 梁 T-POP[®] (Taisei Precast Optimized beam with Prestress) を開発した¹⁾。T-POP の特徴は、高強度コンクリートの利用と高強度鉄筋の緊張材としての使用により、鋼材量の削減、梁断面の縮小化、部材の軽量化が図れることである。また、コンクリート強度を早期に発現させることで、プレキャスト工場でのプレストレス力の導入時期を早めてプレキャスト部材の生産能力を向上させ、かつ現場での工期の短縮と品質の確保を実現した²⁾。

T-POP におけるプレテンション方式は、鋼材（緊張材）とコンクリートとの付着によってプレストレス力を導入（以下、プレストレス導入もしくは PS 導入）する合理的な施工法で、コンクリート硬化後早期のプレストレス導入が製造上経済的である。しかし、コンクリートの若齢時にプレストレス力を導入することや高強度鉄筋を緊張材にすることを考慮してプレストレス力の減退を見積もる必要があり、断面設計における有効プレストレス力の適切な設定が重要となる。有効プレストレス力は、施工手順を考慮したコンクリートの自己収縮・クリープ・乾燥収縮、鋼材のリラクゼーション等の影響を取り入れて算定するが、特にコンクリートのクリープ特性や鋼材のリラクゼーションが大きく影響を及ぼす。そこで本稿では、T-POP の製造手順およびコンクリート

や鉄筋の応力状態の推移を考慮して、有効プレストレス力の算定方法を考察する。

2. 製造手順とプレストレス力の推移

図-1 に T-POP の製造手順を、図-2 に緊張力とプレストレス力の推移を示す。

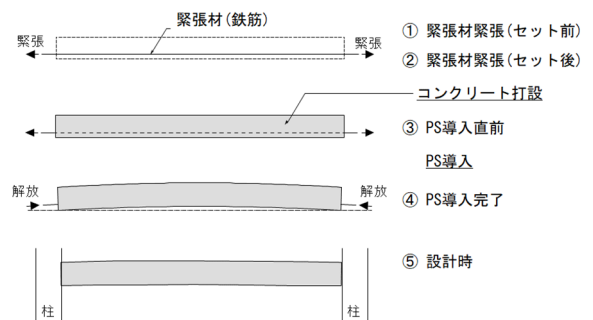


図-1 T-POP の製造手順

Fig.1 Production procedure of T-POP

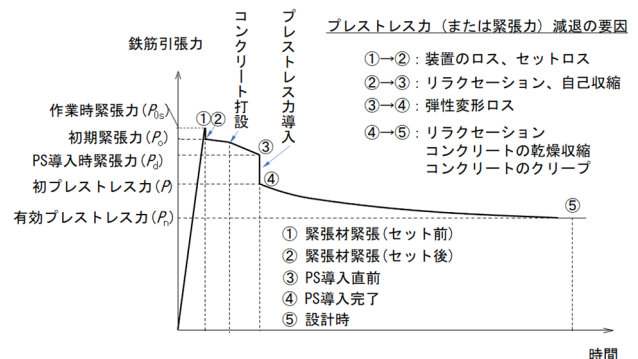


図-2 緊張力とプレストレス力の推移

Fig.2 Change of tension force and prestressing force

* 1 技術センター 技術企画部

* 2 建築本部 技術部

* 3 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

T-POP の製造手順の各ステップの緊張力とプレストレス力を以下に示す。

① 緊張材緊張（セット前）

装置にて緊張材の緊張力をセットする直前の荷重設定状況である作業時緊張力 P_{0s} を $0.9 P_y$ (P_y : 緊張材規格降伏点) 以下とする。

② 緊張材緊張（セット後）

緊張装置にて緊張力を一定に保持している状況で、①の時点から装置のロスとセットロス分（工場の実績値参考）を差し引いて緊張力を設定する。この緊張力を初期緊張力 P_0 と定義する。

この後、コンクリートを打設する。

③ プレストレス導入直前

②の時点から、鉄筋のリラクゼーションおよびコンクリート硬化時の自己収縮による緊張力のロスを見込む。この緊張力をプレストレス導入時緊張力 P_d と定義する。

④ プレストレス導入完了

緊張力を開放し、緊張材とコンクリートの付着力による端部の定着およびプレストレス導入が完了している状態。プレストレス力による部材の弾性変形を考慮して、プレストレス力を設定する。この時点のプレストレス力を初プレストレス力 P とする。

⑤ 設計時

建物供用開始後 50 年程度を想定して、コンクリートのクリープ・乾燥収縮と鋼材のリラクゼーションの影響を取り入れて、有効プレストレス力 P_n を算定する。

3. 緊張力・プレストレス力の設定

3.1 緊張力の設定

3.1.1 初期緊張力

T-POP の設計においては、初期緊張力として P_0 を $0.85 P_y$ （施工時許容引張力）以下の値で設定する。この場合、緊張装置のロス+セットロス（ $= \Delta P_0$ ）を見込んで、セット前の作業時緊張力 P_{0s} （前項の①時点）が $0.9 P_y$ 以下となるようにする。（式(1)）

$$P_{0s} = P_0 + \Delta P_0 \leq 0.9 P_y \quad (1)$$

ここで、 P_{0s} : セット前作業時緊張力

P_0 : 初期緊張力

ΔP_0 : 緊張装置のロス+セットロス

P_y : 緊張材の規格降伏点

3.1.2 プレストレス導入時緊張力

プレストレス導入時緊張力 P_d は、緊張材の緊張からプレストレス導入までに生じる緊張材のリラクゼーションによる減退量とコンクリートの自己収縮による減退量を考慮して、式(2)により算定する。

$$P_d = P_0 - \Delta P_{R0} - \Delta P_{Cs} \quad (2)$$

ここで、 P_d : プレストレス導入時緊張力

ΔP_{R0} : PS 導入直前までの緊張材のリラクゼーションによる減退力

ΔP_{Cs} : PS 導入直前までのコンクリート自己収縮に伴う減退力

$$\Delta P_{Cs} = \varepsilon_{sh0} \times E_s \times \sum A_s \quad (3)$$

ε_{sh0} : コンクリートの自己収縮ひずみ

E_s : 緊張材のヤング係数 (N/mm²)

$\sum A_s$: 緊張材の断面積の合計 (mm²)

初期緊張から PS 導入直前までの初期緊張力 P_0 に対するリラクゼーション係数を 2% とし、 $\Delta P_{R0} = 0.02 \times P_0$ とする（詳細を 4.1 節に示す）。また、コンクリートの自己収縮ひずみ ε_{cs} は材料試験の結果に基づくが、実績から $-200 \sim -300 \mu$ 程度見込むこととする。

3.2 初プレストレス力の設定

プレストレス力は、プレストレス導入による軸縮みおよび偏心曲げによる弾性変形により、導入直前の緊張材に与えた緊張力（プレストレス導入時緊張力 $= P_d$ ）より減退する。弾性変形によるプレストレス力の減退を算出し、設計時のコンクリート断面のプレストレス力を評価する。設計に用いるコンクリートの弾性変形による減退後のプレストレス力（初プレストレス力 P ）は、文献3)に記載（(5・31)式）の式(4)を準用して算出する。

$$P = \frac{P_d}{1 + np \left(1 + \frac{e^2}{I_{pc}/A_{pc}} \right)} \quad (4)$$

ここで、 P_d : 緊張材のプレストレス導入時緊張力

n : ヤング係数比 ($= E_s/E_c$)

E_s : 緊張材のヤング係数 (N/mm²)

- E_c : コンクリートのヤング係数 (導入時
コンクリート強度を用いて算定)
(N/mm²)
- p : 緊張材の鉄筋比 (= $\sum A_s/A_c$)
- A_s : 緊張材の断面積 (mm²)
- A_c : PCa コンクリート部の断面積
(mm²)
- e : PCa コンクリート断面図心からプレ
ストレス合力位置までの偏心距離
(mm)
- I_{pc} : PCa 部断面 2 次モーメント (緊張材
除く) (mm⁴)
- A_{pc} : PCa 部断面積 (緊張材除く) (mm²)

する) の有効プレストレス力 P_t を式(6)で表している。式(6)では、緊張材のリラクセーションによるプレストレス力の減退はプレストレス導入の瞬間に全量が起こるものと仮定している。つまり、式(7)に示すように初プレストレス力 P からリラクセーションによるプレストレス減退力収束値 ΔP_R をあらかじめ差し引いた見かけのプレストレス力 P' を用い、そこから下線部で示す乾燥収縮およびクリープによる減退力 ΔP_t を差し引くこととしている。

$$P_t = P' - \gamma \left\{ P' + \frac{1-\gamma}{\gamma} \left(D_p \frac{\varepsilon_{s0}}{\varphi_0} + \frac{K_p}{e} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{s0}}{\varphi_0 \cdot h} \right) \right\} (\varphi_t - \varphi_{t1}) \quad (6)$$

3.3 有効プレストレス力の設定

設計に用いる有効プレストレス力 P_n は、初プレストレス力 P に対して、プレストレス力有効率 η を乗じて計算する。式(5)に η の算定式を示す。

$$\eta = \frac{P - (\Delta P_R + \Delta P_t)}{P} \quad (5)$$

- ここで、 P : 初プレストレス力
- ΔP_R : 緊張材のリラクセーションによる減退力
- ΔP_t : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる減退力

ΔP_R の算定には、使用する緊張材のコンクリート中の長期 (50 年相当) リラクセーション係数の算定が必要であり、 ΔP_t の算定には、部材寸法に応じた使用するコンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみの算定が必要である。次章においては、緊張材のリラクセーションによるプレストレス力の減退とコンクリートの乾燥収縮およびクリープによるプレストレス力の減退について、過去の実験結果や規準に示される既往の検討から得られる評価および算定法を示す。

4. 有効プレストレス力の算定

PC 規準⁴⁾ 付 10 には、緊張材のリラクセーションとコンクリートのクリープおよび乾燥収縮とを同時に考えたときのプレストレス減退が示されている。ここでは、任意時間 t 週 (コンクリート打設時を 0 と

$$P' = P - \Delta P_R \quad (7)$$

- ここで、 P_t : 任意時間 t (コンクリート打設時を 0 とする) における有効プレストレス力
 - P' : 初プレストレス力 P からリラクセーションによるプレストレス減退力収束値 ΔP_R を差し引いた見かけのプレストレス力
 - P : 初プレストレス力
 - ε_{s0} : 材齢 0 からの乾燥収縮ひずみ収束値 (圧縮ひずみと同方向の縮みを正)
 - φ_0 : 材齢 0 からのクリープ係数収束値
 - φ_t : 任意時間 t におけるクリープ係数
 - φ_{t1} : 時間 t_1 におけるクリープ係数
- その他の記号は PC 規準⁴⁾ 付 10 による。

式(6)の任意時間 t を建物供用開始後 50 年程度とした P_t の値が式(5)右辺の分子の値となる。

次の 4.1 節においては緊張材のリラクセーションによる減退力 ΔP_R の算定について、4.2 節においてはコンクリートの乾燥収縮およびクリープによる減退力 ΔP_t の算定について考察する。

4.1 緊張材のリラクセーションによる減退

図-3 に緊張力の推移とリラクセーションによる緊張材の減退力 (ΔP_{R0} : PS 導入直前までの減退力, ΔP_R : PS 導入後の減退力) の関係を示す。図中の赤線はリラクセーション以外の要因による減退力の推移を示す。

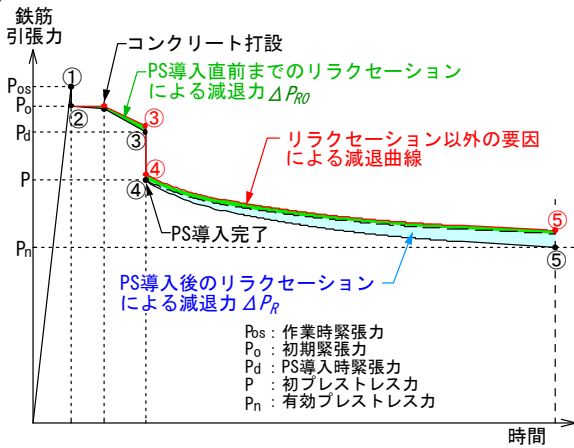


図-3 緊張力の推移とリラクゼーション

Fig.3 Change of tension force and relaxation

リラクゼーションによる緊張材の減退力 (ΔP_{R0} および ΔP_R) は、PS 導入直前までのリラクゼーション係数 Ψ_{sh0} および PS 導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数 Ψ_{ps} を用いて、式(8)および式(9)で表現される。なお、式(9)での $(1 - \gamma)$ はコンクリート硬化後の緊張材とコンクリート間の力の釣り合いから得られる係数 (PC 規準⁴⁾ 付10 参照) である。

$$\Delta P_{R0} = \Psi_{sh0} \cdot P_0 \quad (8)$$

$$\Delta P_R = \Psi_{ps} \cdot P \cdot (1 - \gamma) \quad (9)$$

ここで、 ΔP_{R0} : PS 導入直前までの減退力
 ΔP_R : PS 導入後の長期にわたる減退力
 Ψ_{sh0} : PS 導入直前までのリラクゼーション係数
 Ψ_{ps} : PS 導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数

式(10)に示すように Ψ_{sh0} および Ψ_{ps} の和を、緊張材緊張からの設計時まで (図-3 での②~⑤) の全体のリラクゼーション係数 Ψ として捉える。

$$\Psi = \Psi_{sh0} + \Psi_{ps} \quad (10)$$

一方、PC 規準⁴⁾では、(全体の) リラクゼーション係数 Ψ をリラクゼーション以外の減退量から、式(11)で示している。そこで、 Ψ_{sh0} および Ψ_0 をリラクゼーション試験結果から定めた後、式(11)を用いて全体のリラクゼーション係数 Ψ を安全側に求め、PS 導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数 Ψ_{ps} を式(10)から $\Psi - \Psi_{sh0}$ として定める。

$$\Psi = \Psi_0 (1 - 2 \cdot \Delta\sigma_{pcs} / \sigma_{pi}) \quad (11)$$

ここで、 Ψ_0 : 長期的な純リラクゼーション係数
 $\Delta\sigma_{pcs}$: コンクリートの乾燥収縮・クリープ等による引張応力の減退量 (N/mm²)
 σ_{pi} : 緊張作業直後の引張応力 (N/mm²)

4.1.1 PS 導入直前までのリラクゼーション係数

Ψ_{sh0}

式(9)に示す Ψ のうち、PS 導入直前まで (③までの期間) のリラクゼーション係数 Ψ_{sh0} に関しては、高強度コンクリートの自己収縮によって引張ひずみが少し減退するものの、ひずみ一定持続下のリラクゼーション試験に近い状態と考えられる。T-POP では、初期緊張からコンクリート打設と蒸気養生を経て1~2日でPS導入を行っており、図-4に示す文献5)のリラクゼーション試験結果から Ψ_{sh0} を2.0% (2日:48時間以内) とする。

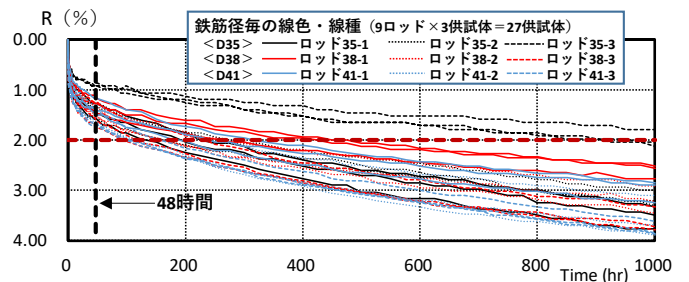


図-4 1000時間リラクゼーション試験結果⁵⁾

Fig.4 Relaxation test results of 1000 hours⁵⁾

4.1.2 長期的な純リラクゼーション係数 Ψ_0

文献5)の試験データは過緊張を前提にした結果であるため、同文献では別途24時間リラクゼーション試験によって過緊張の有無の影響を把握し、品質保証値として1000時間の純リラクゼーション値を6.0% (過緊張なしの上限値) と推定している。因みに、この値は図-4で示した試験結果における1000時間の最大値 (3.90%) の1.5倍超である。

長期的なリラクゼーション係数 Ψ_0 は、30年を超えるリラクゼーション試験が必要となるが、高強度鉄筋を対象とした試験データは現存しないため、PC 規準⁴⁾ (2002年度版) の解説に示される「1000時間 (純リラクゼーション値) の2倍を長期間のリラク

セッションとしてよいとしている」の記述を参考として、長期的なリラクゼーション係数 Ψ_0 を、前述した 1000 時間の純リラクゼーションの推定値 6.0% の2倍となる 12.0% とする。

4.1.3 緊張材応力の減退要因と減退量 $\Delta\sigma_{pcs}$

ここでは、全体のリラクゼーション係数 Ψ を決定するための緊張材の応力が減退する要因について述べる。式(11)に示される $\Delta\sigma_{pcs}$ は、リラクゼーション以外の要因による減退量の総和である。初期緊張時(図-3の②)から長期的に応力が減退する要因は、T-POPでは以下の3つが挙げられる。

- 1) 緊張作業後のコンクリート打設から蒸気養生を経て PS 導入直前までにおける高強度コンクリートの自己収縮：③まで
- 2) PS 導入による弾性縮み(弾性ロス)：③～④
- 3) PS 導入後のコンクリートの乾燥収縮・クリープ：④～⑤

これら3つの要因による減退量の総和 $\Delta\sigma_{pcs}$ は式(12)となる。

$$\Delta\sigma_{pcs} = \Delta\sigma_{sh0} + \Delta\sigma_e + \Delta\sigma_{ps} \quad (12)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{sh0}$: 高強度コンクリートの初期自己収縮による減退量

$\Delta\sigma_e$: PS 導入時の弾性ロスによる減退量

$\Delta\sigma_{ps}$: PS 導入後におけるコンクリートの乾燥収縮・クリープによる減退量

上記各要因の影響によって、緊張材の減退量($\Delta\sigma_{pcs}$)が増えると式(11)から Ψ は小さくなり、逆に減退量が減ると Ψ は大きくなる。すなわち、リラクゼーション係数 Ψ とリラクゼーション以外の要因による減退量は負の相関関係にあり、T-POPの部材諸元毎に両者の関係を導出するのは煩雑である。そこで、 Ψ の算定にあたって、各要因の応力減退量の最小値相当を用いることによって、リラクゼーション係数 Ψ が大きく評価される安全側の設計値とする。さらに、図-3の模式図には PS 導入後の梁自重を含めた長期荷重の影響を示していないが、緊張力による曲げ応力と逆方向に働く長期荷重も厳密には考慮すべきである。そこで、ここでは計算を簡便にするために、PS 導入後の減退の要因($\Delta\sigma_{ps}$)、すなわちコンクリートの乾燥収縮とクリープの影響は無視($\Delta\sigma_{ps} = 0$)し、長期荷重の影響と相殺されているものとする。

(1) 高強度コンクリートの自己収縮による減退量

本構法に関する既往の実験等⁶⁾から、高強度コンクリートの打設から蒸気養生を経て PS 導入直前までのコンクリートの自己収縮量(ϵ_{sh0})は-200~-300 μ である。この実績の最小値相当(-200 μ)を採用して緊張応力の減退量($\Delta\sigma_{sh0}$)を算出すると、41.0N/mm²となる。

(2) PS 導入時の弾性ロスによる減退量

PS 導入時の弾性ロスによる減退量($\Delta\sigma_e$)を算出するためには、PCaPC 梁の断面および配筋等の構造諸元を決定する必要がある。そこで4.1.4項にて検討を示す。

4.1.4 弾性ロスによる減退量 $\Delta\sigma_e$ の試算

過去の実績では、梁幅は 270~300 mm、断面せいは設計条件により 570~1150 mm (スラブ厚除く)、PCaPC 梁の断面平均プレストレス(σ_{ave})は初期緊張応力(σ_{pi})に対して算出すると、おおよそ 10~20 N/mm²の範囲となっている。緊張材は鉄筋径 D35~D41 を使用し、強度種別は過去の実績では規格降伏点 $R\sigma_y$ が 685 N/mm² 級と同 590 N/mm² 級がある。そこで、ここでは 590 N/mm² 級の鉄筋を使用すると仮定して σ_{ave} が実績における下限値相当の 10 N/mm² となる図-5に示す2つの断面を対象とした。

図に示す断面は設計条件によって異なるが、断面1は 15 m 程度までのスパン、断面2は 20 m 級のスパンを想定している。なお、 $\Delta\sigma_e$ の計算にあたっては、式(3)を基に σ_{pi} ($0.85R\sigma_y$) から前項で算出した $\Delta\sigma_{sh0}$ を差し引いた PS 導入時緊張力とし、PS 導入時のコンクリート圧縮強度を 60 N/mm² と仮定し、複数の緊張材はそれらを合力位置に集約して求めた。 $\Delta\sigma_e$ の計算結果は、断面1で 86.6 N/mm²、断面2で 101.7 N/mm² となる。

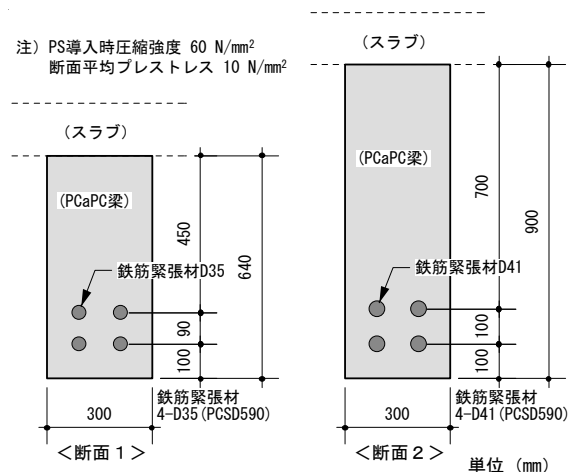


図-5 検討断面

Fig.5 Cross section to be calculated

表-1 設計用リラクゼーション係数の検討結果

Table 1 Calculation results of relaxation factor for design

断面例	計算条件		各要因による応力減退量			減退量 総計	$\frac{\Delta\sigma_{pcs}}{\sigma_{pi}}$	リラクゼーション精算値			設計用 Ψ_{ps} (%)
	Ψ_0 (%)	σ_{pi} (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{sh0}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_e$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{ps}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_{pcs}$ (N/mm ²)		Ψ (%)	Ψ_{sh0} (%)	Ψ_{ps} (%)	
断面 1	12.0	501.5	41.0	86.6	—	127.6	0.254	5.90	2.0	3.90	4.0
断面 2	12.0	501.5	41.0	101.7	—	142.7	0.285	5.17	2.0	3.17	

4.1.5 PS 導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数 Ψ_{ps}

高強度コンクリートの初期の自己収縮と PS 導入時の弾性ロスによる減退量 $\Delta\sigma_{pcs}$ を下限値相当で求めるとともに、PS 導入後のコンクリートの乾燥収縮・クリープの影響は無視して算出した設計用リラクゼーション係数 (Ψ , Ψ_{ps}) の検討結果を表-1 に示す。表に見られるように、設計用リラクゼーション係数 Ψ は、断面 1 で 5.90%、断面 2 で 5.17% となる。PS 導入直前までの Ψ_{sh0} を 2.0% と仮定すると、PS 導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数 Ψ_{ps} はそれぞれ 3.90%、3.17% となる。これらの結果から設計における同リラクゼーション係数 Ψ_{ps} を 4.0% とする。

4.2 乾燥収縮・クリープによる減退

PC 規準⁴⁾において、一般のプレテンション方式 PC 部材のクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力の減退量の算出では、促進養生によって PS 導入時強度が材齢 $t_1=1$ 週程度の強度に相当することを想定し、それ以降におけるクリープ係数収束値 $\varphi_n = \varphi_0 - \varphi_{t_1} = 2.5$ 、乾燥収縮ひずみ収束値 $\varepsilon_{sn} = 300\mu$ が使用されている。しかしながら、本構法のように鉄筋緊張材によりプレストレスを与える場合、一般的な PC 鋼材に比べて緊張時の緊張材ひずみが小さいことから、コンクリートの乾燥収縮ひずみやクリープの影響によるプレストレス力減退量が大きくなる。本構法に使用する Fc60~120 の高強度コンクリートの場合、クリープ係数および乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べて一般に小さく、また、若齢時にプレストレスが導入される本構法でも蒸気養生を行うことによってクリープ係数を抑制できることが分かっている⁶⁾。これらを考慮し、本構法ではコンクリートの蒸気養生を行うことを原則とし、コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみ収束値は、試験・実績に基づき適切に設定する。

4.2.1 使用するクリープ係数および乾燥収縮ひずみ

ここで、設計基準強度 Fc100 N/mm² のコンクリート供試体 ($\phi 100 \times 200$ mm) のクリープおよび乾燥収縮の計測結果の一例を図-6 に示す。この計測結果によれば、導入後のクリープ係数収束値 φ_n は 1.0 程度、乾燥収縮ひずみ収束値 ε_{sn} は 350 μ 程度と見込まれる。

なお、クリープ係数は、部材寸法が大きいほど小さくなることが知られており、この寸法による影響係数 φ_{RH} が、式(13)のように文献 7) に示されている。

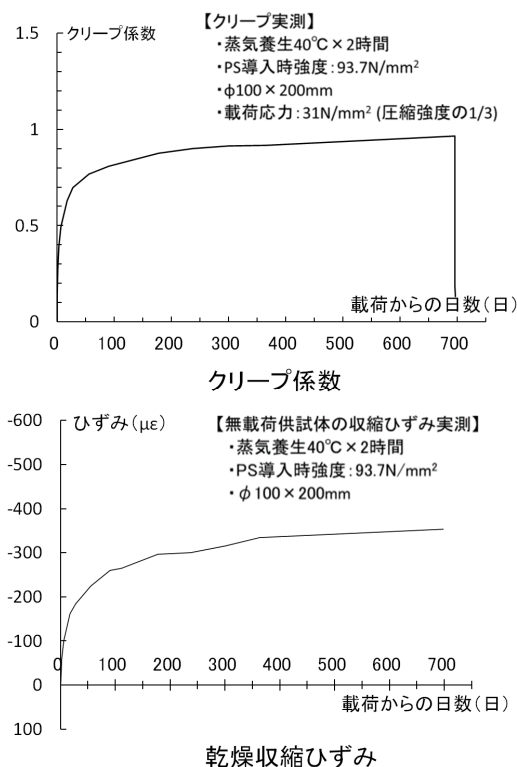


図-6 クリープ係数および乾燥収縮ひずみの試験結果⁶⁾
Fig.6 Test results of creep coefficient and drying shrinkage strain⁶⁾

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \quad (13)$$

- ここで、 RH : 相対湿度 (%)
 RH_0 : 100%
 h : 部材の仮想厚さ (= $2A_c/u$) (mm)
 h_0 : 100 mm
 A_c : 部材の断面積 (mm²)
 u : 部材断面の周長 (mm)

この影響係数 ϕ_{RH} を梁の断面寸法に応じて算出し、供試体 ($\phi 100 \times 200$ mm) の影響係数 2.096 に対する比 (以下、低減係数) をクリープ係数試験結果に乘じ、実断面におけるクリープ係数とすることとした (図-7 参照)。

上記で示した乾燥収縮ひずみ収束値 ϵ_{sn} およびクリープ係数収束値 ϕ_n を用い、式(6)および式(7)に示すクリープによる減退力 ΔP_t を算定することとする。

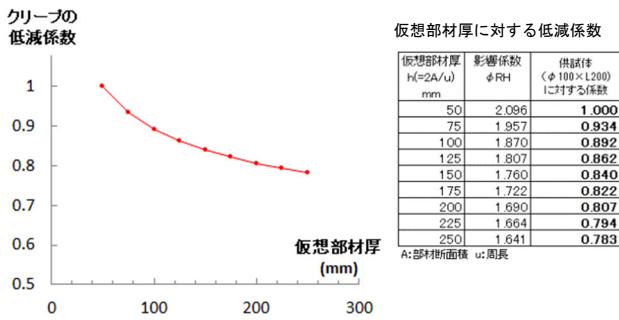


図-7 クリープ係数の低減係数⁷⁾
 Fig.7 Reduction in creep coefficient⁷⁾

5. 設計用プレストレス力有効率

5.1 設計用プレストレス力有効率の算定

PC 規準⁴⁾ではプレテンション方式のプレストレス力有効率は $\eta = 0.8$ と設定されている。本構法では、緊張材に高強度鉄筋を使用し、若材齢でプレストレス導入を実施することから、プレストレス力有効率 η が小さくなる傾向があると想定される。そこで、プレストレス力有効率 η を、式(5)、式(6)および式(7)を用いて求めることを前章で示し、4.1 節および 4.2 節でそれぞれ、緊張材のリラクセーションによる減退力 ΔP_R および乾燥収縮およびクリープによる減退力 ΔP_t の具体的算定法を示した。本章では、過去の複数の実施設計をもとに、プレストレス力有効率 η を前章に従い算定し、プレストレス力有効率 η を一定の値として扱う「設計用プレストレス力有効率 η 」を定めることを検討する。

5.2 既設計部材での検証

表-2 に過去の実施設計の 9 種類の部材断面および構造緒元を示す。緊張材は SD685 および SD590、コンクリートの設計基準強度は $F_c 70 \sim 100$ 、PS 導入時コンクリート強度は $60.0 \sim 93.7 \text{ N/mm}^2$ である。これらの設計断面に対して、前章で示す手順によりプレストレス力有効率 η を算定し、その結果を表-2 に示す。同表には、式(14)に示す導入時下端圧縮応力 σ_c を合わせて示し、図-8 にはプレストレス力有効率 η と導入時下端圧縮応力 σ_c の関係を示す。

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e}{Z_c} \quad (14)$$

- ここで、 σ_c : 導入時下端圧縮応力
 P : 初プレストレス力
 A_c : PCa 部材断面積
 Z_c : PCa 部材下端用断面二次モーメント
 e : PCa 部材断面重心軸に対するプレストレス力偏心距離

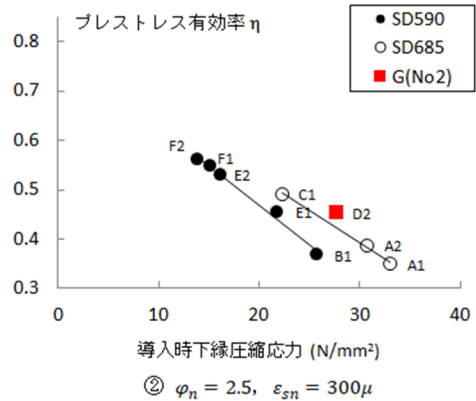
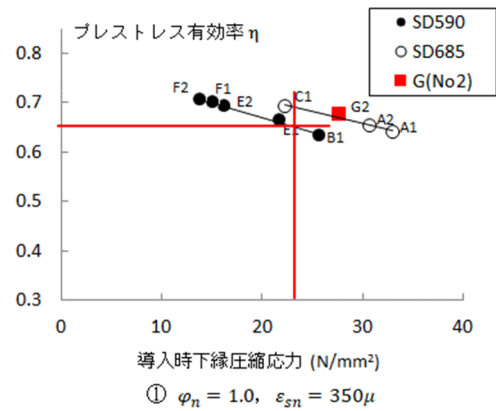


図-8 プレストレス力有効率と下端圧縮応力の関係
 Fig.8 Relationship between prestressing force efficiency and bottom compression stress

表-2 既設計部材でのプレストレス力有効率の算出結果

Table 2 Verification results of prestressing force efficiency in previously designed members

建物名		A		B	C	E		F		G	
梁タイプ		Type1	Type2	Type1	Type1	Type1	Type2	Type1	Type2	NO2	
PCa梁 構造諸元	断面 配筋図										
	b × D'	300 × 770 (950)	300 × 570 (750)	300 × 600 (750)	290 × 865 (1000)	300 × 1100 (1400)	300 × 1150 (1400)	300 × 650	300 × 750	300 × 900 (1050)	
	L'	14,800 (18,690)	14,800 (18,690)	11,100 (16,000)	16,500 (22,800)	14,400	8,000	10,400 (11,000)	10,400 (11,000)	18,000	
	緊張鉄筋	6本-D41	4本-D41	4本-D41	4本-D38	6本-D38	4本-D38	2本-D41	2本-D41	6本-D38	
	鉄筋強度	SD685	SD685	SD590	SD685	SD590	SD590	SD590	SD590	SD685	
	F _c	70	70	70	80	100	100	80	80	100	
	PS時 σ _B	60	60	60	60	80	80	70	70	93.7	
鉄筋緊張時	P0/Py	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	
導入時緊張力	Pd/Py	0.773	0.773	0.764	0.773	0.764	0.764	0.764	0.764	0.773	
初プレストレスカ	P/Py	0.574	0.591	0.585	0.626	0.613	0.644	0.656	0.661	0.584	
PS導入後 下縁圧縮応力	σ _c (N/mm ²)	33.0	30.7	25.7	22.3	21.8	16.2	15.1	13.9	27.6	
プレストレス 有効率	η = Pt/P	①	0.641	0.655	0.632	0.694	0.664	0.693	0.700	0.705	0.677
		②	0.350	0.387	0.368	0.492	0.455	0.530	0.548	0.562	0.454

①:T-POP(φ_n=1.0, ε_{sn}=350μ) ②:PC規準(φ_n=2.5, ε_{sn}=300μ)

(いずれのケースも、クリープ係数には梁断面寸法に応じた低減係数(図-7参照)を乗じて有効率を求めた。)

プレストレス力有効率ηの算定においては、鉄筋緊張材のリラクゼーション係数を6% (PS導入直前までのリラクゼーション係数Ψ_{sh0}を2%, PS導入後のコンクリート部材中でのリラクゼーション係数Ψ_{ps}を4%)とし、コンクリートの自己収縮ひずみε_{sh0}は-200μとした。クリープ係数収束値および乾燥収縮収束値には、4.2.1項に示したφ_n = 1.0, ε_{sn} = 350μを用いた(表-2および図-8の上図)。また、一般のプレテンション部材の値としてPC規準⁴⁾に示されているφ_n = 2.5, ε_{sn} = 300μを用いた場合についても、比較として求めた(表-2および図-8の下図)。なお、いずれのケースにおいても、クリープ係数には式(13)および図-7に示す寸法効果による低減係数を乗じ、自重による応力変化は考慮していない。

PC規準⁴⁾の値(φ_n = 2.5, ε_{sn} = 300μ)を用いた場合の有効率ηは、4.2.1項に示したφ_n = 1.0, ε_{sn} = 350μを用いた場合の算定結果に比べてかなり小さい結果となった。これからも、本構法においてプレストレスの効果の有効に利用するためには、クリープ

係数の小さいコンクリートを使用することが重要であることがわかる。また、プレストレス力有効率ηの算定結果は、導入後の下端圧縮応力σ_cが大きいほど小さくなる傾向が見られ、φ_n = 1.0, ε_{sn} = 350μの値を用いて緊張材にSD590を用いた場合は、導入時の下端圧縮応力σ_cが23 N/mm²以下であれば設計用プレストレス力有効率をη = 0.65としてよいと考えられる。ただし、本検討では、自重や積載荷重による梁下端側の引張力の回復や後打ちコンクリート部の剛性の寄与は考慮しない安全側の判断となっており、条件の検討により本値を大きくできる可能性もある。

6. 長期載荷試験による検証

6.1 載荷試験概要

前章では、過去の実施設計の9種類の部材断面对象として、プレストレス力有効率ηを算定した。本章では、プレストレス有効率の経時変化について実験的に把握、検証することをひとつの目的として、

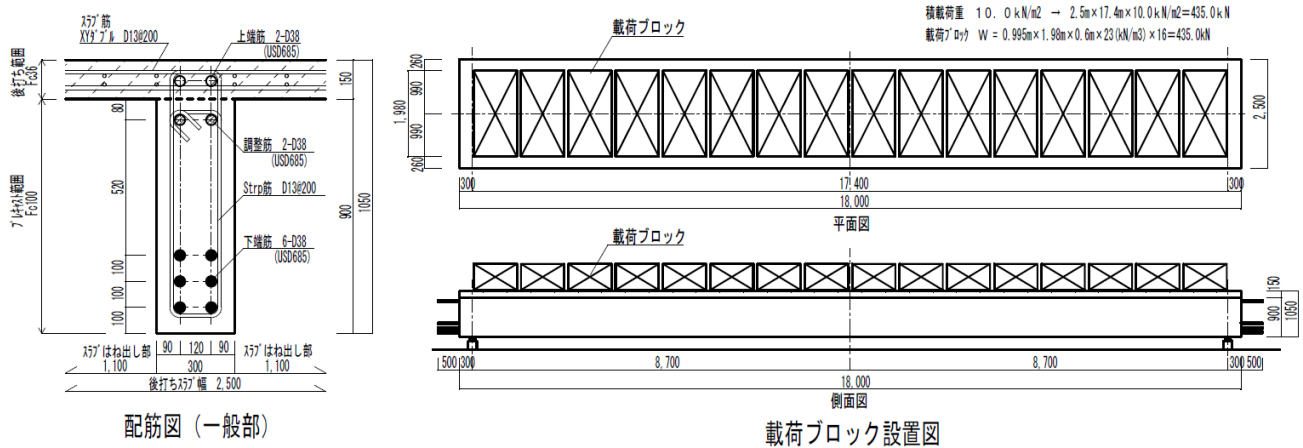


図-9 長期載荷試験概要⁶⁾

Fig.9 Overview of long-term loading tests⁶⁾

本構法を模擬した実大梁試験体を製作し、長期載荷実験を行った(図-9 参照)。試験体は梁幅 300 mm、梁せい 1,050 mm (PCa 部 900 mm+後打設スラブ部 150 mm)、長さ 18,000 mm の PCaPC 小梁で、下端主筋には緊張材兼用として SD685 の高強度鉄筋を使用している。鉄筋(緊張材)緊張、コンクリート打設、プレストレス導入、後打ちスラブ部コンクリート打設、長期荷重載荷の手順で約 1 年の長期載荷実験を実施した。

6.2 計算に使用したクリープ係数・乾燥収縮ひずみの経時変化の評価

時間 t におけるクリープ係数は、一般的なコンクリートの場合として PC 規準⁴⁾には式(15)が示されている。また、文献 7) (以下、MC90)にも評価式が示されているが、同式は蒸気養生を施す本構法の条件で実施したクリープ試験の結果に対して、長期間載荷後のクリープ係数を過大評価することが報告されている⁶⁾。本稿では、クリープ係数計測結果と整合するようなクリープ係数の計算式を以下のように設定する。

PC 規準⁴⁾記載の式(15)は、式(16)に実験等で得られた係数を代入して得られている³⁾。

$$\varphi_t = \frac{0.75 t}{1.5 + 0.25 t} \quad (15)$$

$$\varphi_t = \frac{c \times d_1 \times t}{a + b \times t} \quad (16)$$

ここで、 a, b : 実験により求められる係数
 c : 部材寸法の影響を表す係数

d_1 : 大気湿度の影響を表す係数
 t : 経過時間

c, d_1 は材料に影響されない変数であると考え、 $c \times d_1$ は PC 規準⁴⁾に準じて 0.75 を用い、変数 a, b を設定する。設定にあたっては、載荷材齢 $t_1 = 1$ 週としたクリープ係数収束値の計測結果 ($\varphi_n = 1.0$) にもとづいて、式(17-1)~式(17-3)のように求める。

$$\varphi_n = \varphi_0 - \varphi_{t_1} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{0.75 \times t}{a + b \cdot t} \right) - \frac{0.75}{a + b} \quad (17-1)$$

$$= \frac{0.75}{b} - \frac{0.75}{a + b} = 1.0 \quad (17-2)$$

$$\text{これを整理すると、} a = \frac{b^2}{0.75 - b} \quad (17-3)$$

式(17-3)の解として、 $a = 1.0, b = 0.5$ と設定した場合の $\varphi_t - \varphi_{t_1}$ の計算結果を図-10 に赤破線で示す。初期段階から収束段階に至るまで実験結果と比較的整合性が良いことから、これらの係数を用いた式(18)を時間 t におけるクリープ係数の評価式として用いることとした。

$$\varphi_t = \frac{0.75 t}{1.0 + 0.5 t} \quad (18)$$

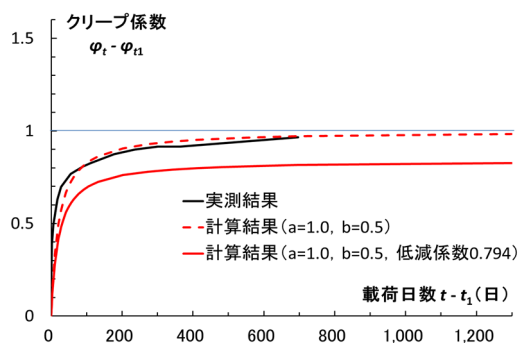


図-10 クリープ係数実測値と計算値の比較⁶⁾
Fig.10 Comparison between the measured and calculated values of the creep coefficient⁶⁾

また、時間 $t = t_1$ (載荷材齢 $t_1 = 1$ 週) 以降のクリープ係数 $\varphi_t - \varphi_{t1}$ は式(19)のように表される。式(18)より式(6)における φ_0 は 1.5 となる。

$$\varphi_t - \varphi_{t1} = \frac{0.75t}{1.0 + 0.5t} - 0.5 = \frac{0.5t - 0.5}{1.0 + 0.5t} \quad (19)$$

図-10 中には、部材断面寸法に応じて低減したクリープ係数の計算結果を併せて赤実線で示す。寸法効果の影響は、本試験体の PCa 部分の断面寸法から式(13)および図-7の方法で算出される低減係数 0.794 を式(19)に乗じることで求めた。

次に、乾燥収縮ひずみの時間変化について示す。乾燥収縮ひずみの進行がクリープの進行に比例するものと仮定すれば³⁾、 $t = t_1$ 以降に生じる乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_s(t - t_1)$ は式(20)となる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(t - t_1) &= \frac{\varepsilon_{s0}}{\varphi_0} (\varphi_t - \varphi_{t1}) \\ &= \frac{\varepsilon_{sn}}{\varphi_n} (\varphi_t - \varphi_{t1}) \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 φ_n : t_1 以降のクリープ係数収束値 (= 1.0)

ε_{sn} : t_1 以降の乾燥収縮ひずみ収束値 (= 350μ)

乾燥収縮ひずみの経時変化実測結果と式(19)による計算結果の比較を図-11に示す。乾燥収縮ひずみの収束値 ε_{sn} を実測結果に基づいて定義すれば、その経時変化をおおよそ評価できている。

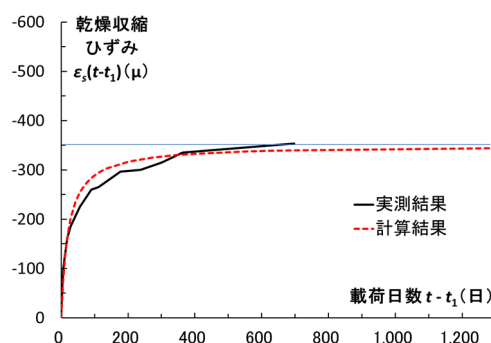


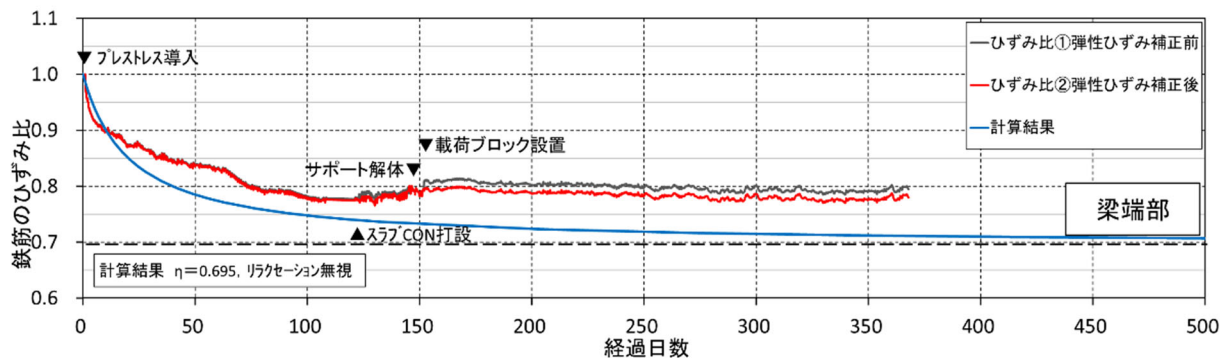
図-11 乾燥収縮ひずみ実測値と計算値の比較⁶⁾
Fig.11 Comparison between the measured and calculated values of drying shrinkage strain⁶⁾

6.3 計測結果と計算結果の比較

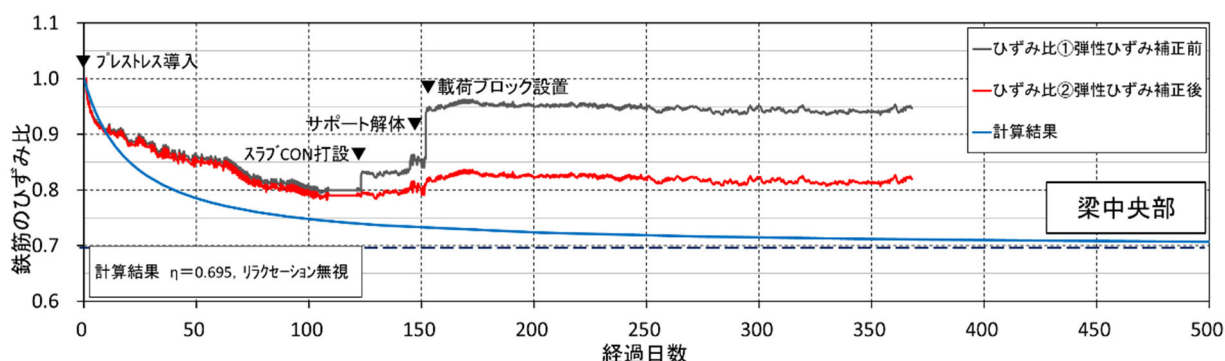
実大実験における鉄筋緊張材のひずみ計測結果と、式(19)、(20)を用いて計算した結果を図-12に比較して示す。いずれも、PS導入直後のひずみを1としてその比率(ひずみ比①)を黒実線で示している。なお、式(4)に示すようにプレストレス力有効率 η の算定には緊張材のリラクセーションによる減退 ΔP_R を考慮するが、鉄筋緊張材のひずみ実測結果には ΔP_R の影響は含まれない。そこで、ここでは式(5)において $\Delta P_R = 0$ として、コンクリートの乾燥収縮・クリープによる減退 ΔP_t を対象にプレストレス力有効率 η の計算を行った。

自重や積載荷重によって生じる弾性ひずみを補正したひずみ比②は、梁端部および梁中央部ともに、およそ100日以降で0.8を若干下回っているが、130日経過後のスラブコンクリート荷重や載荷ブロックの設置によりひずみの変動は見られるものの、長期にわたって著しい低下は見られない。

また、実測結果(ひずみ比②)は、梁端部および中央ともに計算結果(青線)より若干大きな値で推移しており、計測期間中は、最終計算値($\eta = 0.695$, 図中破線)を上回っていた。また、300日経過以降の実測結果はほぼ一定となっている。このように、長期的な有効率 η の推移と計算結果の比較から、本稿で示した計算手法は安全側であると考えられる。



(a) 梁端部の鉄筋のひずみ比の推移



(b) 梁中央部の鉄筋のひずみ比の推移

図-12 実大実験による鉄筋緊張材のひずみ比長期計測結果と計算値の比較⁶⁾
 Fig.12 Comparison between long-term measured strain ratios of steel reinforcement obtained from full-scale experiments and calculated values⁶⁾

7. まとめ

高強度鉄筋のリラクゼーション特性と超高強度コンクリートのクリープ・収縮の特性を考慮した、高強度材料を使用したプレテンション方式 PCaPC 梁の有効プレストレス力推定方法を提示し、プレストレス力有効率の計算値と実測値の比較を行った。本構法の範囲内において、プレストレス導入時の弾性変形による減退後の初プレストレス力を用い、リラクゼーション係数、自己収縮ひずみ、クリープ係数などを適切に評価することで本構法のプレストレス力有効率をおおよそ評価できると考えている。

なお、本稿 5.2 節においては、一定の条件下で安全側の判断として設計用プレストレス力有効率 $\eta = 0.65$ と示したが、より詳細な検討により、本値より大きな値を採用できる可能性もある。

参考文献

- 1) 竹崎 真一, 是永 健好, 小室 努, 河本 慎一郎, 甲斐 隆夫: 高強度異形鉄筋を用いたプレテンション方式 PCaPC 梁の構造性能, 大成建設技術センター報, 第 39 号, 30, 2006.
- 2) 竹崎 真一, 馬場 重彰, 是永 健好, 小室 努, 河本 慎一郎, 飯島 真人, 甲斐 隆夫: 高強度鉄筋を利用した PCaPC 梁の開発と適用, 大成建設技術センター報, 第 42 号, 15, 2009.
- 3) 六車 熙: プレストレストコンクリート, コロナ社, 1963.
- 4) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 2002.および 2022.
- 5) 後藤隆臣ほか: 緊張材に使用される太径高強度ねじ筋鉄筋のリラクゼーション試験 (その 1~その 2), 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 IV, pp.597-600, 2023.8
- 6) 例えば, 渡邊祐一ほか: 大容量の高強度鉄筋を緊張材とするプレテンション PCaPC 梁の構造性能 (その 1~その 5), 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 IV, pp.823-832, 2016.7
- 7) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), Thomas Telford, pp.52-65, 1997.