

3D プリンティング技術を用いた PC 構造体の製作と経過観察

大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○鈴木 三馨 木ノ村 幸士
山本 悠人 畑 明仁

1. はじめに

著者らは、トポロジー最適化手法を用いて、3 次元的に断面が変化するアンボンド工法を用いた大型 PC 構造体を設計し、構成する断面部材を 3D プリンティングにより製作・接合した後、プレストレスを導入して PC 構造体の成立を実証するプロジェクトを実施した。

前報¹⁾に続き、本稿では、別稿²⁾にて報告した、コア供試体を対象とする基礎物性試験およびブロック供試体を対象とする部材物性試験の結果から、PC 構造体の製作時に必要となるプレストレス力の設定と、PC 構造体の製作実証によるプレストレス力のモニタリングの結果を報告する。

2. PC 構造体の製作

(1) プレストレス力の導入

トポロジー最適化を用いて設計した PC 構造体（図-1）の製作にあたり、導入プレストレス力を設定した。導入するプレストレス力は、部材中央断面（図-1 中 1-1 断面）にて検討を行い、コンクリート標準示方書³⁾に準拠して、式（1）～式（3）を用いて求めた。

$$P = P_e - \Delta\sigma_{pr} \cdot A_c \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma \sigma_{pt} \quad (2)$$

$$P_e = P_t - \frac{n_p \rho_p \cdot \phi'_{365} \cdot P_t + E_p \cdot A_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \rho_p (1 + \chi \phi'_{365})} \quad (3)$$

ここに、 P ：設計断面におけるプレストレス力（100kN）、 $\Delta\sigma_{pr}$ ：PC 鋼棒のリラクセーションによる緊張材引張応力度の減少量、 γ ：PC 鋼棒の見掛けのリラクセーション率（0.0215）、 σ_{pt} ：導入直後の PC 鋼棒の引張応力度、 P_e ：クリープ・収縮の影響を考慮した PC 鋼棒のプレストレス力、 P_t ：導入直後の PC 鋼棒の引張力、 n_p ：PC 鋼棒のコンクリートに対するヤング係数比、 ρ_p ：緊張材の断面積比、 ϕ'_{365} ：コンクリートの修正クリープ係数（ $\phi'_{365} = \phi_{365} / \sigma_{cr} \cdot P_t / A_c$ ）、 ϕ_{365} ：コンクリートのクリープ係数 4.53（クリープ係数はひずみ履歴から求め、

56 日までの試験結果から近似した 365 日相当の値（図-2 参照）、 σ_{cr} ：クリープ試験時の応力度（10N/mm²：材齢 7 日時加圧ケース）、 χ ：エージング係数（0.8）、 ε'_{cs} ：コンクリートの収縮ひずみ（ 50×10^{-6} 図-3 参照）、 E_p ：PC 鋼棒のヤング係数（201kN/mm²）、 E_c ：コンクリートのヤング係数（20kN/mm²）、 A_p ：PC 鋼棒の断面積（681mm²）、 A_c ：コンクリート全断面の断面積（137,500mm²）

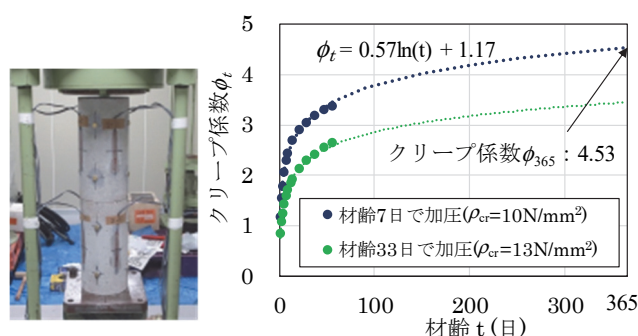
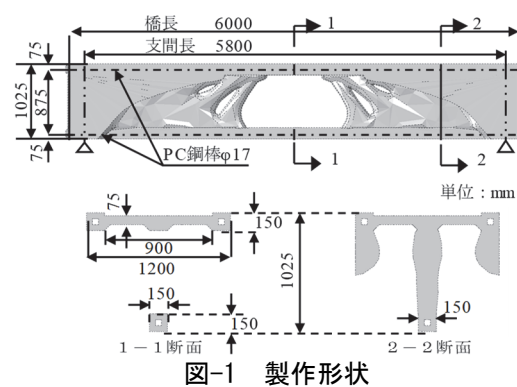


図-2 クリープ試験の状況と試験結果

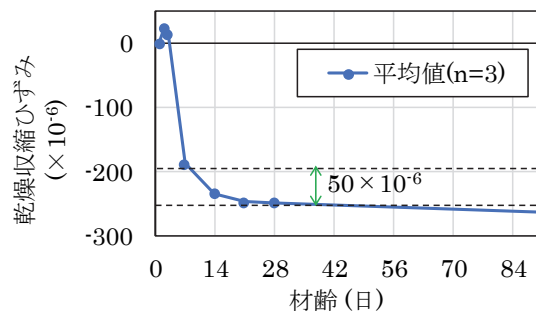


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

キーワード 3D プリンティング、トポロジー最適化、軽量化、プレストレス、クリープ

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 TEL 045-814-7228

クリープ変形の予測精度を向上させる目的で、PC 緊張引張応力導入直後の PC 緊張応力と材齢 7 日加圧ケースのクリープ試験時の応力の比を掛けた修正クリープ係数を用い、また、乾燥収縮ひずみは事前検討²⁾にて別途計測した材齢 7 日以降からのひずみを用い 50×10^{-6} (図-3 参照) とすることで、導入直後のプレストレス力の合計は 110kN となった。そこで、目標のプレストレス力は上フランジに $27.5\text{kN} \times 2$ 箇所、下フランジに $55\text{kN} \times 1$ 箇所とした。

(2) 製作方法および出来形管理

PC 構造体のプリンティング部は 44 パーツで構成される。各パーツを 3D プリント装置により製作し、パーツ同士を接着接合して 7 個のブロック (2~9 パーツ/ブロック) とし、さらに各ブロックを接着接合して製作した (図-4)。製作した PC 構造体を図-5 に示す。各パーツはパーツ間の接合時にねじれ等が生じないように上面にキャッピング材 (セメント系材料) を塗布し鋼板を用いてプレスすることで、水平かつ平滑にした。パーツ間、ブロック間の接合面は、製作したパーツより圧縮強度、ヤング係数が大きいエポキシ樹脂系接着剤で接着することで接合面を弱部にしないようにした。

全ブロック接合後、3 箇所に配置した PC 鋼棒 (直径 17 mm) に油圧ジャッキを取り付け緊張して上フランジに $26.2\text{kN} \times 2$ 箇所、下フランジに $54.4\text{kN} \times 1$ 箇所の合計 106.8kN のプレストレス力を導入した。プレストレス力導入時の各パーツの材齢は 7 日以上である。これは事前の乾燥収縮試験²⁾により、乾燥収縮ひずみは材齢 7 日までで 200×10^{-6} 程度となり、その後の乾燥収縮ひずみが小さいためである (図-3)。

製作した PC 構造体 (図-5) の橋長は 6.0m での設計のところ、接着する工程で 6.16m となり 2.6% 長くなった。各製作パーツの積み上げ高さは、プリンティング材のフレッシュ性状を保持可能な限界時間が制約となっている。つまり、製作パーツの断面が大きくなるほど製作に時間を要するため、パーツ高さを小さくせざるを得ない。その結果、分割パーツ数が多くなり、パーツ間の接着剤の厚みが誤差の主要因となっている。

(3) プレストレス力のモニタリング

PC 鋼棒のプレストレス力の経時変化を図-6 に示す。前報¹⁾に示す加力試験はプレストレス力導入 4 日後に実施した。プレストレス力導入後 28 日時点では、導入直後の PC 鋼棒の引張力と PC 鋼棒のひずみから推

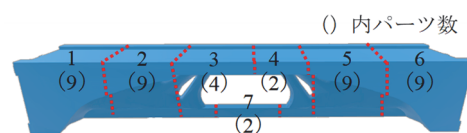


図-4 PC 構造体のブロック割

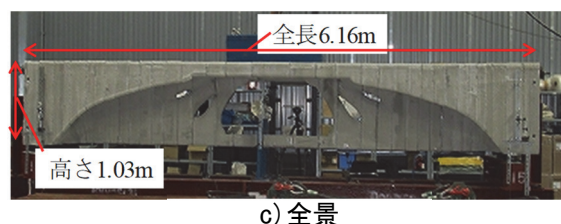


図-5 製作した PC 構造体

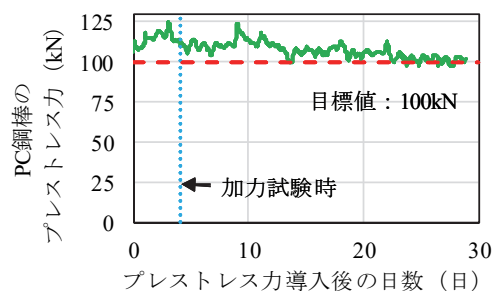


図-6 プレストレス力の経時変化

定した PC 引張力は 102kN であり、想定 of 100kN に漸近している。PC 鋼棒のプレストレス力の経時変化にぶれが生じるのは、気温の影響が考えられる。

3. まとめ

3D プリンティング技術を用いた実大規模の PC 構造体の製作実証と経過観察により、橋長は接着する工程で 2.6% 長くなり、プレストレス力は導入後 28 日時点で想定 of プレストレス力が導入されていることが確認できた。

参考文献

- 1) 木ノ村幸士, 鈴木三馨, 山本悠人, 畑明仁: PC 構造体のトポロジー最適化設計と構造性能実証, 第 75 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2020. (投稿中)
- 2) 村田哲, 張文博, 木ノ村幸士, 畑明仁: 3D プリンティングで製作した積層体の硬化物性と収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, 2020. (投稿中)
- 3) 土木学会: 2017 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.403-411, 2018.3.