

PC 構造体のトポロジー最適化設計と構造性能実証

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

1. はじめに

近年、3D プリンティングによるセメント系材料の施工方法の開発が世界各地で進められている^{例えぱり}。3D プリンティングによる製作では、製作する部材の形状の自由度を高め、トポロジー最適化手法等による最適設計と融合することで、軽量化や剛性の付加、また材料の削減等を期待できることが利点の1つである²⁾。

筆者らは、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、構成する多種多様な断面部材を 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 構造体として成立することを実証するプロジェクトを実施した。本プロジェクトは、積層構造に起因する硬化体特性の取得や、積層構造体の設計、施工ノウハウの蓄積、構造性能評価の基礎検討を目的としている。

本稿では、トポロジー最適化手法を用いた PC 構造体の最適設計を行い、有限要素法による性能照査および想定荷重を負荷した加力試験の結果を比較し、製作実証した PC 構造体の構造性能評価を行った。

2. PC 構造体の最適設計

(1) トポロジー最適化

3D プリンティング技術を応用したコンクリート施工法の特徴を最大限に引き出すために、構造の形状に加えて穴の数の増減などの形態の変更を可能とする最も自由度の高い構造最適化であるトポロジー最適化を用いた。トポロジー最適化は端的に言うと、質量、変位などの制約条件の下、有限要素法による構造解析、その結果を受けての感度解析、モデルの変更を繰り返す、不要な材料（要素）を削り最適な形状を見出していく手法である。

(2) 設計概要と使用材料

設計に用いた 3D プリンティング用の使用材料の諸元は、別稿³⁾に基づき、ヤング率 20kN/mm^2 、ポアソン

比 0.21、密度 2.2kN/m^3 、圧縮強度 30N/mm^2 、引張強度 2.2N/mm^2 （縦目：載荷方向と積層方向が一致する向き）、 3.0N/mm^2 （横目：縦目と直交する向き）とした。また、圧縮強度に比べ引張強度が低いことから、製作する PC 構造体はプレストレスを導入し、供用時に部材に引張強度以上の引張応力が発生しないこととした。

(3) 形状設計

最適設計の対象とする PC 構造体の概要を図-1 に示す。橋長 6.0m × 幅 1.2m × 高さ 1.0m とし、上下フランジ端部に 3 本の PC 鋼棒を配置する形状とした。路面となる厚さ 150mm の上フランジおよび下フランジの PC 鋼棒周辺 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ の領域、および端部 300mm の領域はトポロジー最適化の対象外となる非設計領域と設定した。想定荷重としては上面に活荷重として床板を設計する際に用いられる 5.0kN/m^2 の群集荷重、死荷重として自重とプレストレスを設定した。プレストレス力については上下フランジに計 100kN とした。

トポロジー最適化の実行は、密度法に基づく汎用プログラムである Inspire ver2019.2 を用いた。最適化の条件としては設計領域の質量が 25% に低減した状態において想定荷重に対する剛性が一番高くなるように設定した。製作する PC 構造体の形状は、トポロジー最適化結果から人為的な形状変更を加えて得られた結果（図-2）とした。

3. 有限要素法による性能照査

有限要素法により、製作した PC 構造体の構造性能

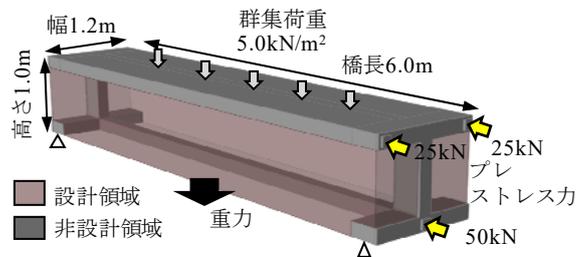


図-1 最適化対象形状と荷重条件

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、構造性能

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

の照査として供用時を想定した再現解析を実施した。解析は ABAQUS2016 にて実施し、ヤング率とポアソン比、および密度のみを考慮した線形モデルを使用した。またプレストレスに相当する大きさの圧力を導入することでプレストレスをモデル化した。

緊張力と自重のみが作用する死荷重時、および中央付近に人が12人程度集まる状態を短期の供用時の最大の想定とし、路面中央部（橋軸方向：1.2m、橋軸直角方向：0.9m）に10kNの荷重を作用させた。

各載荷条件における解析結果として最大主応力分布を図-3に示す。なお各応力分布は中央断面の分布を示している。死荷重時における最大主応力分布を確認すると、中央の斜材基部に 0.8N/mm^2 程度の引張応力が発生していることが確認される。しかし、この応力値は材料試験より得られた引張強度よりも小さい値であること、また供用時想定 of 載荷時には緩和されることから使用性に問題はないと判断した。

死荷重時と供用時荷重作用時を比較した相対鉛直変位は、中央上フランジにて 0.169mm となり、立体横断施設技術基準⁴⁾に示される支間長（5800mm）の $1/600$ 以下（活荷重時）とする規定を十分に満足している。

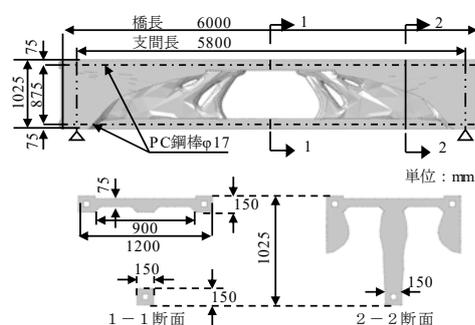


図-2 製作形状

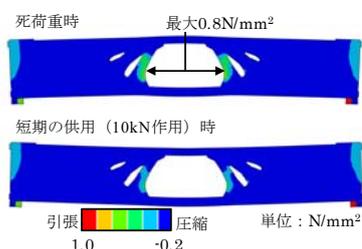


図-3 最大主応力分布

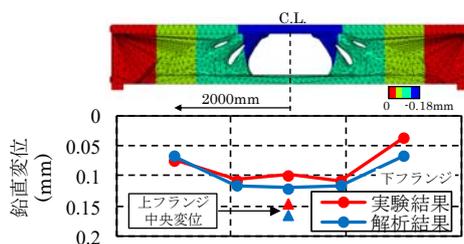


図-4 鉛直変位分布

以上から、各ケースの解析により対象の PC 構造体の使用性に問題はないと判断した。

4. 加力試験による検証

製作した PC 構造体に対して載荷試験を実施することで、実部材の性能評価と FEM による予測解析の検証を行った。短期の供用時を想定し、載荷荷重は最大で 9.45kN とした。鉛直方向の変位計測は、中央の上下フランジ、また中央から 900mm 、 2000mm 離れた個所の下フランジおよび支点直上において実施した。なお変位計測は路面荷重相当 (5.88kN) の分布荷重を与えた時点を 0mm としている。

実験および解析の最大積載時の変位分布を図-4に示す。下フランジの変形は、中央 2000mm の区間においてはほぼ一様の変位であることが解析結果から確認され、中央では上フランジの変形がより大きい値を示していることがわかる。この傾向は実験においても確認され、各計測点でほぼ同様の値を示した。また、ほぼ線形の荷重-変位応答を示し、最大積載時においても PC 構造体に変状はなかった。上フランジの最大変位は支間中央で 0.144mm となり、有限要素法による結果 0.163mm とほぼ一致している。

以上から、著者らが開発した 3D プリンティング技術を用いて製作した実大規模の PC 構造体は、解析による想定通りの構造性能を有していることが確認された。

5. まとめ

トポロジー最適化を用いて最適設計を行い、人為的な変更を加えて製作する PC 構造体の最終形状を決定した。有限要素法による予測解析および実製作した PC 構造体の加力試験による実測値を比較した結果、本 PC 構造体は想定通りの挙動を示すことが確認できた。

謝辞

本研究の実施にあたり、太平洋セメント（株）より材料を提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) T. Wangler et al.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges, RILEM Technical Letters, pp.67-75, (2016)1.
- 2) 日経 BP：特集“設計・施工を刷新する建設 3D プリンター”，日経コンストラクション 2019 年 7 月 8 日号，pp.28-47.
- 3) 村田哲ら：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)
- 4) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979.1.