

論文 歩道橋のトポロジー最適化設計と3Dプリンティング技術を用いた製作および構造性能実証

鈴木 三馨*1・山本 悠人*2・木ノ村 幸士*1・畑 明仁*1

要旨: 著者らはセメント系材料を用いた3Dプリンティング技術を開発し、これまでにトポロジー最適化手法を用いて全体の剛性を保ちながら軽量化した小型の無筋ベンチを、設計通りに実現できることを実証した。一方で、補強方法を3Dプリンティングに適用した実大規模のトポロジー最適化構造の実現と構造性能評価は今後の課題とされてきた。そこで、同最適化手法を用いて大型PC歩道橋を設計し、その製作および構造性能評価を行う大型実証プロジェクトを実施した。その結果、3Dプリンティング技術を用いて製作したPC歩道橋は有限要素法による予測解析結果と同等の挙動を示し、供用時の荷重に対し安全であることを確認した。

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

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(例えば1)~3)。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メリットの1つである4)。

著者らは、これまで材料押出方式の3Dプリンティングに適したセメント系材料の開発および同材料を用いた3Dプリンティング技術の開発を進めてきた。セメント系材料による3Dプリンティングでは難しいとされてきたトポロジー最適化手法で設計した複雑な形状についても、設定通りに製作実現できることを実証している5)。一方で、その対象は二人掛けの小型の無筋ベンチであった。これは、下縁に発生する引張応力に対しセメント系材料の引張強度のみで抵抗するため、死荷重や想定荷重の小さな製作物を対象とするのが限界だったことに起因する。つまりは、セメント系材料を用いて大型あるいは構造物スケールの最適化構造を実現するためには、3Dプリンティングに何らかの補強方法を適用する必要があることを意味している。

そこで、このような現状を打破するため、以下の大型実証プロジェクトを実施した。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歩道橋を設計し、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である。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。本プロジェクトの検討手順を図-1に示す。

本稿では、別稿6)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歩道橋の設計および製作時に必要となる材料諸元およびプレストレス力を設定した。続いて、トポロジー最適化手法を用いた橋桁の最適設計および製作実証を行った。最後に、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歩道橋の構造性能評価を行った。

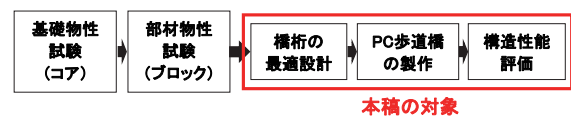


図-1 本プロジェクトの検討手順

2. 橋桁の最適設計

2.1 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は、設計者の過去の経験や従来の設計手法に囚われない新たな手法が求められており、その一つとして自由度の高い構造最適設計が可能であるトポロジー最適化が注目されている。構造最適化には図-2に示すように、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化が挙げられる。トポロジー最適化は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の方法で、寸法最適化や形状最適化と比較して構造の性能をより改善できる可能性を持っている。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、図-3に示すように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し、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。

*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博(工)

*2 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 修(工)

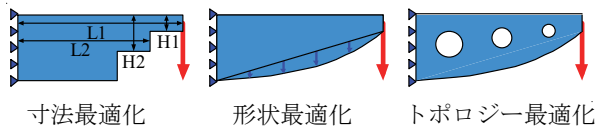


図-2 構造最適化手法

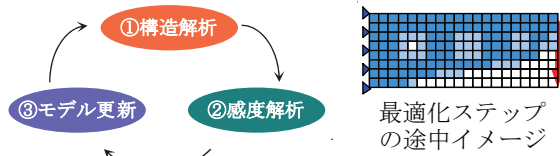


図-3 トポロジー最適化の手順

2.2 設計概要と使用材料

先述の通り、トポロジー最適化を設計に用いることで軽量かつ剛性の高い部材の設計が可能になる。一方で、先進的な研究を除き線形材料を対象とした最適化になる点や、中間密度の影響により工学的な解釈が困難になる点といった短所も存在する⁷⁾。そのため一般的には、トポロジー最適化により得られた形状をベースとして、工学的に妥当な形となるように、また意匠的観点や製造の観点から多少の人為的な形状変更のプロセスを経て形状を決定し、最終的に数値解析や実機試験によりその構造性能が検証される。著者らが実施した取り組みにおいても同様であり、トポロジー最適化の後に複数回の形状修正と有限要素法による検証を経て形状を決定している。

使用材料は3Dプリンティング技術のために著者らが開発してきたセメント系材料であり、表-1にこれまでの材料試験により得られた代表的な諸元を示す。引張強度は荷重方向と積層方向が一致する向きを縦目、直交する方向を横目と定義した。積層工法であることから、引張強度に明確な異方性があることが確認される。また、セメント系材料の特徴でもある、圧縮強度に比べ引張強度が低いことから、製作する橋桁はプレストレスを導入し、供用時に部材に引張応力が発生しないPC歩道橋(橋桁)とする。

2.3 形状設計

最適設計の対象とする橋桁の概要を図-4に示す。橋長6.0m×幅1.2m×高さ1.0mとし、上フランジ端部に2本、下フランジ中央に1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、下フランジのPC鋼棒周辺150mm×150mm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/m²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。プレストレスについては上フランジに25kN×2箇所、下フラ

ンジに50kN×1箇所としている。

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(体積×密度)を最適化前の25%とした状態において想定荷重に対する曲げ剛性が一番高くなるように設定した。材料は線形材料のみが適用可能であり、諸元は表-1に示すヤング率、ポアソン比および密度を用いた。

トポロジー最適化結果を図-5に示す。密度法では各要素内の充填の様相は正規化された密度(0(完全空洞状態)~1(完全充填状態))で表現する。可視化する密度を変更した図を併せて示している。中央には中空空間が

表-1 材料諸元

ヤング率	ポアソン比	密度
20 kN/mm ²	0.21	2.2 kN/m ³
圧縮強度	引張強度(左:横目, 右:縦目)	
30 N/mm ²	3.0 N/mm ²	2.2 N/mm ²

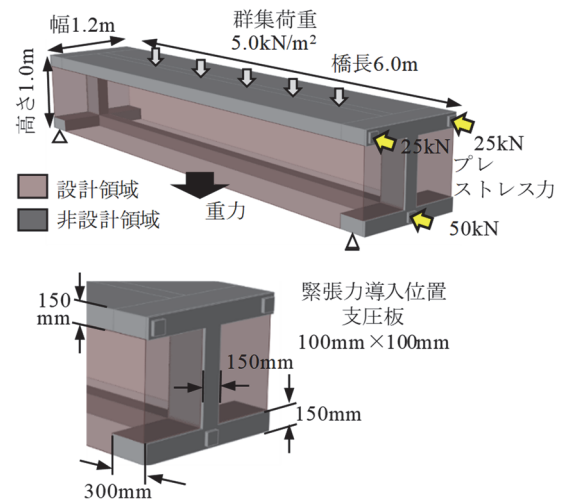


図-4 最適化対象形状



a) 表示密度 0.5 以上を表示



b) 表示密度の 0.3 以上を表示



c) 表示密度の 0.1 以上を表示

図-5 トポロジー最適化結果

あり、大きい応力が発生しないと想定される箇所には部材が存在しないことが工学的に判断できる。各条件においてもアーチ橋のような形を示しており、路面に作用する群集荷重に対して圧縮力を利用してアーチ状に耐荷機構を形成する構造であることがわかる。表示密度を高く設定した a) では、他のケースに比べ中空が大きく、また中央には斜材が1本のみとなっている。一方で表示密度を低くした b), c) では、最適化形状に大きな差はなく、表示密度の差に対する形状が安定している。そこで最適解が安定している形状で軽量のケースである b) を最適化の基本形状とした。

b) の形状は、中央の斜材は直径 20mm 程度であり現在開発している 3D プリンティングシステムのノズル径が 25mm であることを考慮すると、同システムで製作するには小さい部材となる。そこで施工性と安全性に配慮して対象の斜材の径を 20mm から 75mm に変更した。また、意匠的な観点から、下フランジ中央に存在する部材を除去し、下フランジはアーチ区間を除き、PC 鋼棒周辺の 150mm×150mm の棒部材、つまり最適設計前の非設計領域のみとなるように変更した。また路面整備を考慮し、上フランジ厚を変更した。このような人為的な形状変更を加えて得られた結果を図-6 に示す。この形状を製作する PC 歩道橋の形状と決定し、次章以降で製作と性能照査について述べる。

3. PC 歩道橋の製作

3.1 プレストレス力の設定

導入するプレストレス力は、部材中央断面（図-6 の 1-1 断面）にて検討を行い、コンクリート標準示方書⁸⁾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 鋼棒のプレストレス力、 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、 $\phi'_{365} = \phi_{365} / \sigma_{cr} \cdot P_t / A_c$ 、 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-7 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)、 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)

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⁹⁾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 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 27.5kN×2 箇所、下フランジに 55kN×1 箇所とした。

3.2 製作方法および出来形管理

PC 歩道橋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 プリンタ装置により製作し、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-8)。製作したパーツの一例を図-9 a) に、製作したブロックの一例を図-9 b) 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。各ブロックは橋軸方

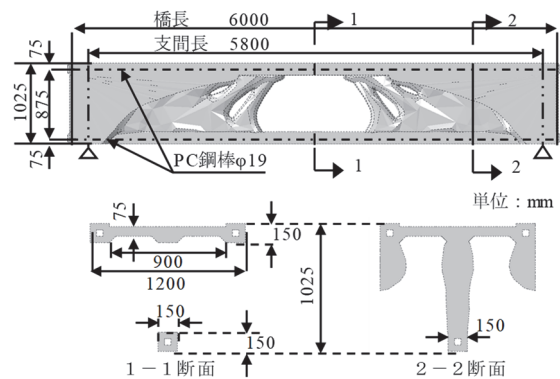


図-6 製作形状

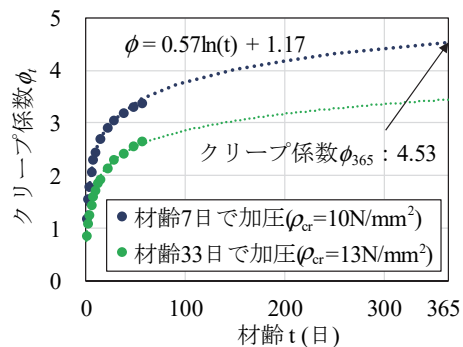


図-7 クリープ係数の経時変化

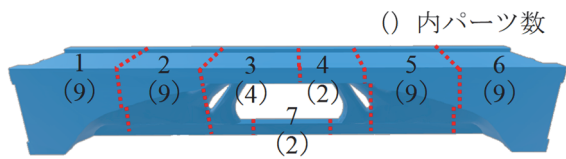
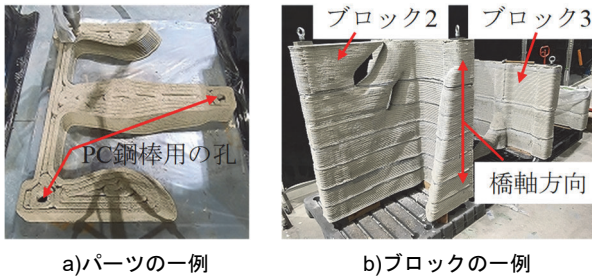
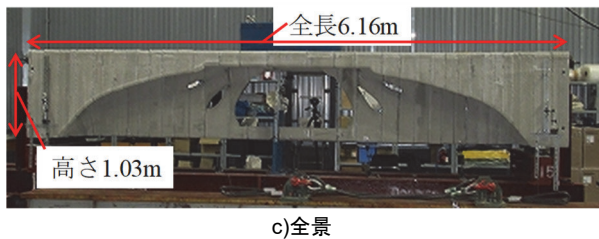


図-8 3D 歩道橋のブロック割



a) パーツの一例

b) ブロックの一例



c) 全景

図-9 製作した PC 構造体

向が垂直の状態 (図-9 b)) から回転する必要があるため、事前に有限要素法にてブロック回転時に各ブロックに生じる発生応力を確認して、引張応力が発生する箇所には、回転時のみ鋼製アングルにより外部補強する対策を行った。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、ヤング率が大きいプレキャストセグメント用エポキシ樹脂系接着剤 (JSCE-H101 適合品) 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 26.2kN×2 箇所、下フランジに 54.4kN×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⁶⁾により、乾燥収縮ひずみは材齢 7 日ま

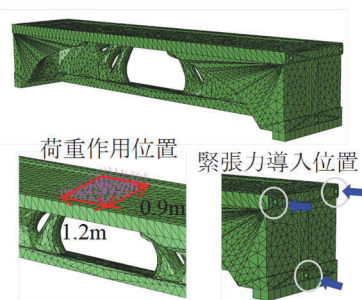


図-11 メッシュ図と加力位置

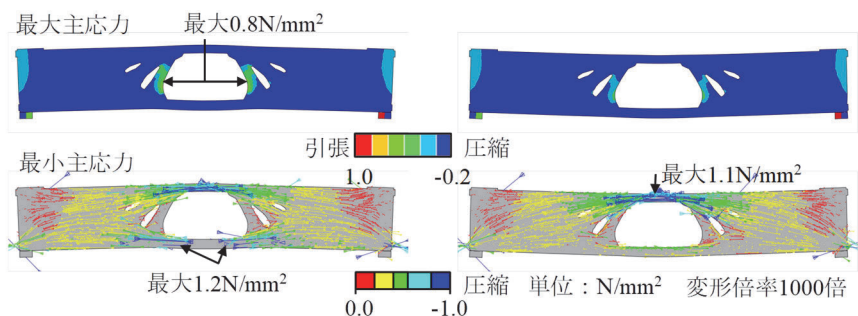


図-12 応力分布 (左: 死荷重時, 右: 供用 (10kN 作用) 時)

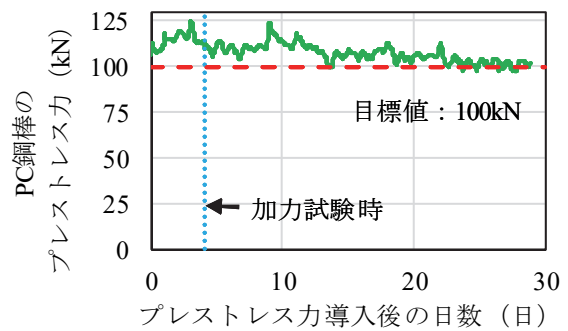


図-10 プレストレス力の経時変化

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。

製作した PC 歩道橋 (図-9 c)) 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おり、自重に対し積層可能な高さにより決定したのではない。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。

3.3 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-10 に示す。4 章に示す曲げ荷重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。

4. 構造性能評価

4.1 有限要素法による性能照査

製作した橋桁の構造性能の照査のため、有限要素法により、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、供用時の荷重に対しては弾性

的な挙動を示す状態であることが予想されたため、材料モデルは表-1の材料諸元から、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、パーツ間の接着剤、PC鋼棒はモデル化せず、端部にプレート形状をモデル化し、プレストレス力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力をモデル化した。複雑な形状であることから離散化時の曲面の再現性を高めるため、要素は4面体1次要素とし要素代表長さを50mmと細かい要素を用いた。作成したモデルは節点数が15,896、要素数が64,138となった。メッシュ図および緊張力相当の圧力導入位置を図-11に示す。

緊張力と自重のみが作用する死荷重時、および期間限定の供用時に対して、中央付近に人が12人程度集まる状態を供用時の最大の想定とし、中央1.2mに10kNの荷重が載荷されている状態を解析の対象とした。分布荷重として与えた10kNの載荷位置を図-11に併せて示す。

各載荷条件における解析結果として最大主応力および最小主応力分布を図-12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/mm²程度の引張応力が発生していることが確認される。緊張力により桁が反り上がり、中空部が縦に変形する際に斜材に引張力が生じることが原因だと考えられる。しかしながら、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、また供用時想定に緩和されることから使用性に問題はないと判断した。圧縮応力は中空部の下フランジで最大約1.2N/mm²を示した。この値は圧縮強度よりも小さく、また下フランジ部を対象としたオイラーの座屈荷重設計値以下の値である。

供用時荷重作用時は、前述の通り中空部斜材の引張応力が低減された。また圧縮応力は中央上フランジにて最大約1.1N/mm²の値を示した。最小主応力分布からアーチ状に耐荷機構が成立していることが確認される。死荷重時と供用時荷重作用時を比較した中央鉛直変位は、中央上フランジにて0.169mmとなり、立体横断施設技術基準⁹⁾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。

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

4.2 加力試験による検証

製作したPC歩道橋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。載荷は図-13に示す1枚約1.9kNの鋼板を中央に載荷することで加力を行い、最大で鋼板5枚、9.45kNの鋼板を載荷した。なお載荷試験時には路面の整備が未実装であったため、路面荷重を考慮し、死荷重として合計5.88kNの分布荷重をすべての載荷ケースにおいて別

途付加している。加力条件を表-2にまとめる。変形は橋桁中央の上フランジと下フランジ、また中央から900mm、2000mm離れた箇所の下フランジおよび支点直上において鉛直方向の変位計測を実施した。なお変位計測は路面荷重相当の分布荷重を与えた時点をも0mmとしている。

中央上フランジにおける荷重-変位関係を図-14に示す。また4.1節にて述べた有限要素モデルを用いた等し

表-2 加力条件

ケース	載荷枚数	載荷荷重	備考
-	-	5.88 kN	路面荷重
A	1	1.88 kN	
B	3	5.69 kN	
C	5	9.45 kN	3回繰返し



図-13 載荷試験状況

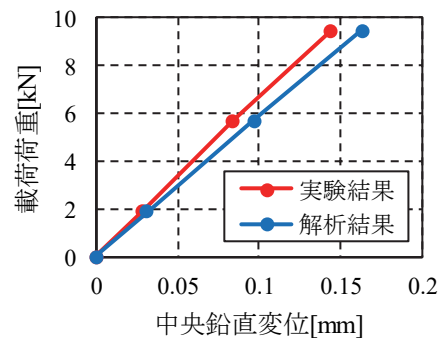


図-14 荷重-変位関係

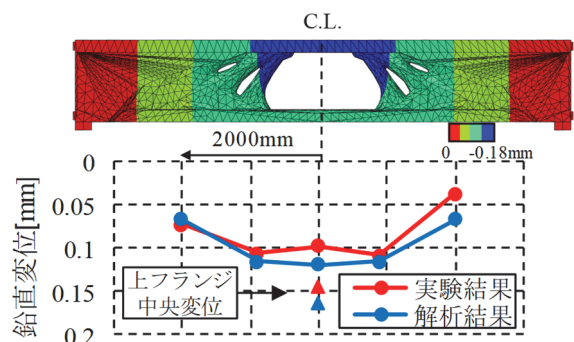


図-15 鉛直変位分布

い載荷荷重時における変位結果を併せて示す。なお3章で述べた通り、実際の橋長は設計値よりも伸びているため、支間長を実験と解析とで一致させ、結果を比較している。荷重値に応じてほぼ線形の変位応答を示し、最大積載時においても橋桁に変状はなく、弾性体としての挙動を示している。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。

実験および解析の最大積載時の変位分布を図-15に示す。解析も実験と同様に、緊張力により反り上がった状態を0とし、その状態からの各節点の相対変形を載荷時の変位として出力している。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。

以上から、著者らが開発してきた3Dプリンティング技術を用いて製作した実大規模のPC歩道橋は、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。

4.3 今後の展望

本PC歩道橋は、長期曝露によりPC歩道橋の健全性の評価をした後に、載荷試験により耐力が低下するまでの挙動を確認する試験を予定している。この試験では本PC歩道橋の耐力と破壊モードを確認するとともに、今後実行予定である材料非線形モデルを用いた数値解析との比較・検証を実施する。

5. まとめ

本論文では、3Dプリンティング技術を用いた実大規模のPC歩道橋の設計と製作についてまとめた。この過程において得られた知見および今後の展開を以下にまとめる。

- (1) トポロジー最適化を用いて橋長6.0mの設計を実施した。施工性を考慮して人為的な形状変更を加え、3Dプリンティング技術を用いて製作が可能なPC歩道橋の設計を達成した。
- (2) 導入するプレストレス力は、セメント系プリンティング材の要素試験で得られたクリープ係数、乾燥収縮ひずみを用いて設定し、PC歩道橋の実測値からリラクゼーションによるプレストレス力の減少量はプレストレス力導入後28日現在、ほとんどないことが確認できた。
- (3) 製作したPC歩道橋の橋長は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。これは、分割パーツ数が多くなったことによるパー

ツ間の接着剤の厚みに起因している。

- (4) 有限要素法により、対象としたPC歩道橋の構造性能を評価した。供用時に想定される荷重における照査では、部材に大きな応力が発生することなく健全であることが確認できた。
- (5) 実験による性能評価として、製作したPC歩道橋の中央に約10kNの荷重を実施した。結果として、部材には変状が発生せず、弾性体としての挙動を示した。また有限要素法による予測値とほぼ同等の挙動を示し、3Dプリンティング技術を用いた部材は想定通りの挙動を示すことを確認できた。
- (6) 今後は供用前後の構造性能の変化の調査、および供用後は耐力試験により最大耐力の確認を実施する予定である。

謝辞

本稿の執筆にあたり、太平洋セメント株式会社より材料を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T. T. Le et al.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, Vol.45, Issue 8, pp.1221-1232, 2012.
- 2) T. Wangler et al.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges, *RILEM Technical Letters*, pp.67-75, (2016)1.
- 3) R.A. Buswell et al.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 112, pp.37-49, 2018.
- 4) 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.
- 5) 木ノ村幸士，村田哲，小尾博俊，山本悠人，畑明仁：建設用3Dプリンティング技術の開発と今後の展望，土木学会建設技術研究委員会，土木建設技術発表会2019概要集，pp.69-75.
- 6) 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）.
- 7) 山崎慎太郎：トポロジー最適化の概要と新展開，システム／制御／計測，Vol.61，No.1，pp.29-34，2017.
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979.1.