

T-3DP®で作製した外殻を埋設型枠として利用した RCはりのせん断耐力向上効果の検証

山本 悠人^{*1}・木ノ村 幸士^{*1}・村田 哲^{*1}

Keywords : 3D-printing, shear strength, permanent formwork, finite element method

3D プリンティング, せん断耐力, 埋設型枠, 有限要素法

1. はじめに

建設業に従事する技能者の高齢化と数年以内の大量離職を見据え、国土交通省は「i-Construction」を掲げて建設現場の生産性向上に取り組んでいる。その中でもコンクリート工は特に生産性向上が遅れており、トンネル工事は50年間で生産性が約10倍に上昇しているのに対し、コンクリート工は横ばいであると報告されている¹⁾。この現状を打破するためコンクリート生産性向上検討協議会¹⁾が立ち上がり、基準スランプの変更や機械式継手・定着工法のガイドライン策定といった基本的な取り組みから、プレキャスト（PCa）工法、部材の規格・標準化やValue for Moneyの概念を取り入れた評価方法、サプライチェーンマネジメントの効率化など先進的な取り組みまで幅広い施策が計画・実装されている。このような社会課題の解決策の一つとして建設用3Dプリンティング（3DP）技術が注目されている。セメント系材料を用いて自由形状を造形できるだけでなく、埋設型枠として利用することで型枠工（および状況に応じて足場工・支保工）を省くことができ、コンクリート工の生産性向上に寄与する。現状における3DPの利用は、外装材や構造性能を考慮しない型枠材としての利用が主であり、3DP外殻の力学的性能に期待する事例は僅かである²⁾。

力学的性能に期待して3DP外殻を設計するために、近年いくつかの実験報告が見受けられるようになった。大成建設においてもT-3DPを開発して以来、3DPで製作されたはりの曲げ耐力の実験的な耐力評価³⁾、正負交番載荷による3DP-RC複合柱の曲げ耐力・じん性の評価⁴⁾を実施している。はりの試験では弾性変形の範囲で

FEMによる設計と同等の挙動を示した結果が、柱の実験においてはRC柱と比較して3DP-RC複合柱が高いじん性を有する結果が報告されている。

本論文では今まで確認されていない3DP-RC複合部材において3DP外殻がせん断耐力の向上に与える影響とメカニズムの解明のために実施した3DP-RC複合はりの3点曲げ試験およびFEMによる再現解析を実施した内容をまとめた。2章にて試験概要及びはりの製作、3章にて試験結果とその考察、4章にてFEMによる再現解析の結果、5章にまとめと今後の展望を示す。

2. 試験概要

2.1 試験目的・評価項目

試験ケースを表-1に、試験体図面および使用材料等を図-1に示す。試験ケースは、①通常施工のRC試験体、②短纖維入りの3DP外殻を有するPF（Printing & Fiber）試験体、③短纖維による補強効果を比較するため短纖維を無添加とした3DP外殻を有するPN（Printing & normal mortar）試験体、④3DP製作との違いを比較するため、外殻を短纖維入りプリント材料で打ち込み製作したCF（Casting & Fiber）試験体の計4ケースとし、

表-1 試験ケース

Table 1 Parameters of specimens

	内部	外殻
試験体 RC	一体打設（普通コンクリート）	
試験体 PF		纖維有：3DP 積層 フロー：110~113mm
試験体 PN	普通コンクリート	纖維無：3DP 積層 フロー：106~114mm
試験体 CF		纖維有：打ち込み フロー：110~115mm

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

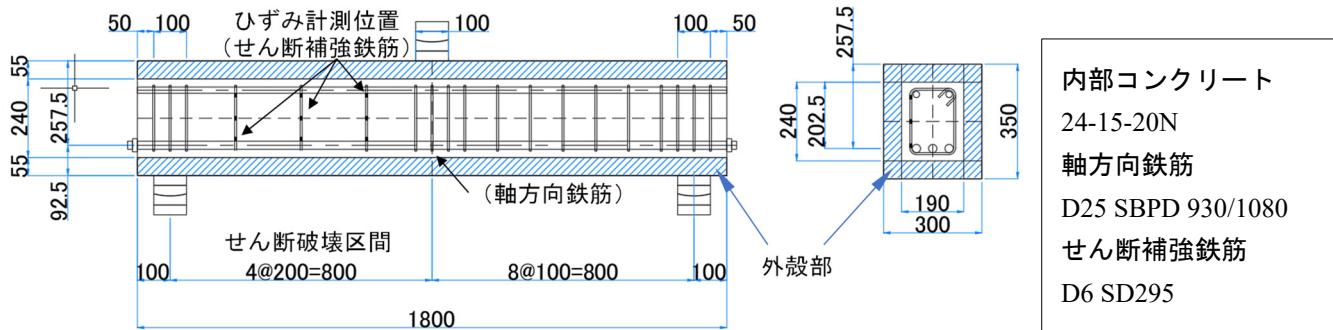


図-1 試験体図面・計測位置
Fig.1 Drawing of specimen, measurement

各ケース2体の合計8体にて加力を実施した。斜め引張破壊の耐力を評価するためせん断スパン(a/d)が3.11であるはりの3点曲げ試験とした。

試験体RCは木枠により外殻-内部を分けることなく普通コンクリートを一体として打設した。試験体CFは柱部材として先に内部コンクリートを打設したのちに鉛直打継シートにて目荒らし処理と同等の付着を確保し、外殻にPFと同様の短纖維補強モルタルを打込むことで製作した。試験体PFおよびPNは先に柱状に外殻をプリンティングにより製作し、その後、内部に鉄筋かご配置、内部コンクリート打設により製作した。また全ての試験体はせん断破壊区間を下側として柱部材として打設した。

短纖維補強モルタルによりプリンティングされた部材は従来の設計よりもせん断耐力が高く、定量的にせん断耐力を評価できない事例も見られる。また試験体PFはプリンティングによる纖維の配向性として、試験体のせん断変形を拘束するように配置されると想定され、せん断耐力はさらに向上するものと考えられる。そこで本研究では各試験体で確実にせん断破壊させるために、軸方向鉄筋にねじ節加工されたPC鋼棒(B種1号)を用いることとした。

計測は軸方向鉄筋中央の鉄筋ひずみ2箇所と、せん断破壊区間のせん断補強鉄筋3本に各3箇所の合計11箇所の鉄筋ひずみと、試験体中央および支点の鉛直変位を計測した。

2.2 プリンティング材料・積層

3DPに用いる短纖維補強モルタルは筆者らが開発を進めてきたものをベースとしており、水結合材比は31%である⁵⁾。試験体PF/CFでは、過去の実績や圧送負荷を考慮し、短纖維(ビニロン纖維:径0.2mm、長さ12mm)の添加量を2.0Vol.%と決定した。試験体PNの材料については、PF/CFと基本的に配合は同一とし、高性能減水剤と凝結遅延剤の添加量を調整することで

内部コンクリート

24-15-20N

軸方向鉄筋

D25 SBPD 930/1080

せん断補強鉄筋

D6 SD295

表-2 断面寸法

Table 2 Crosssection information

箇所(設計値)	PF-1	PF-2	PN-1	PN-2
長辺(350)	358	356	366	365
短辺(300)	305	308	317	311

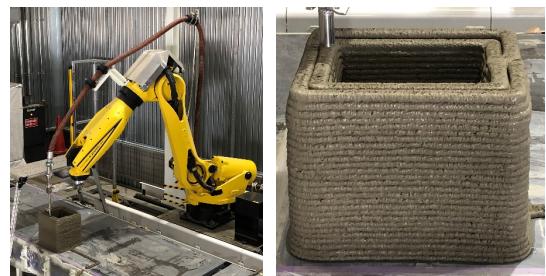


写真-1 プリンティング状況

Photo. 1 3D-printing

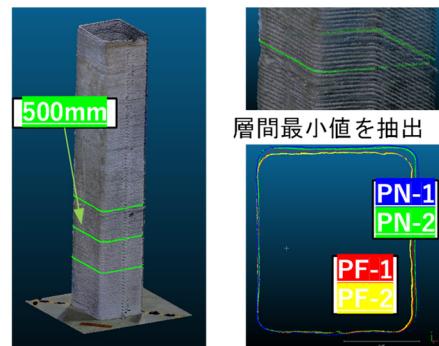


写真-2 3Dスキャニング

Photo. 2 3D-scanning

プリンティングに適したフレッシュ性状を満足する配合とした。各配合のモルタルフローを表-1に併せて示す。3DP外殻は、写真-1に示す通り、1断面を2列のパスにより形成し、180層(1層10mm、全1800mm)の連続積層により柱状に構築した。プリント速度は80~100mm/sec、1体の製作時間は75~95分であった。

硬化後、試験体PFおよびPNの外殻の出来形を3Dスキャニングで測定した。せん断破壊区間中央となる底面から500mm高さでの断面寸法を表-2に、形状の外観および測定結果の比較を写真-2に示す。断面寸法については、プリント層間(断面積が小さくなる箇所)を抽

出している。試験体 PF は各辺 3%以下の誤差で積層されているが、PN は 6%近い誤差が生じている辺も確認される。ケース間でプリントパスは同じであるが、短纖維の有無で自重に対する横方向の抵抗性が異なり、積層に伴う圧密で試験体 PN の水平変形量が大きくなつたと考える。なお、試験体 RC および CF の断面寸法（外寸）は、表-2 に示す試験体 PF の測定結果を踏まえて 357mm×305mm に変更し、3DP により製作した試験体と同等の断面積となるように打込み製作を行つた。試験体 CF の外殻幅は設計通り 55mm である。

3. 試験結果

3.1 材料試験結果

鉄筋の引張試験結果、内部コンクリートおよび短纖維補強モルタルの強度試験結果をそれぞれ表-3、表-4 に示す。内部コンおよび CF の強度試験体についてはモールド製作し、PF および PN については、別途プリントにより製作した 500×500×200mm のブロックからかぶり 50mm 以上を確保して $\phi 100\text{mm}$ でコア抜き採取した試験体を用いた結果である。脱型およびコア抜きは製作翌日に実施し、その後曲げ試験に用いるはり試験体と同じ環境で現場気中養生を継続した。強度試験の材齢は、はりの曲げ試験の実施工材齢と同一であり、いずれも材齢 28 日以降である。なお、PF および PN の割裂引張強度試験は、積層方向と平行に加力する縦目載荷（プリント層間が円柱の縦中心にある条件）で行った。

3.2 3 点曲げ試験

試験の載荷状況を写真-3 に、各試験体の荷重-変位関係を図-2 に、主要イベント時の耐力を表-5 に、目視によるひび割れと最終破壊状況を図-3 にそれぞれ示す。なお図-3 は各試験体の最大耐力が低いものの結果である。ひび割れは加力中に目視により観察し、主要イベント発生時にも加力は継続した。すべての試験体において「曲げひび割れの発生」⇒「斜めひび割れの発生」⇒「せん断補強鉄筋の降伏」⇒「斜めひび割れの貫通により耐力低下」が生じた。なおそれまでに軸方向鉄筋の降伏は確認されなかつた。各試験ケースは 2 体の試験体で載荷をしており、同一ケース間で差は 5%以内とばらつきが小さい耐力を示している。試験体 RC のみ 16%の耐力差が生じているが、これは斜めひび割れが圧縮領域の下を通るように進展し、貫通が遅れたためである。



写真-3 試験状況

Photo 3 Loading situation

表-3 鉄筋の材料強度[N/mm²]

Table 3 Material testing result of rebars

	降伏点強度	ヤング率	引張強さ
軸方向鉄筋	1010	2.05×10^4	-
せん断補強 鉄筋	357	1.80×10^4	574

表-4 コンクリート強度

Table 4 Concrete strength

	圧縮強度	ヤング率	割裂引張
内部コン	35.1	2.80×10^4	2.54
PF	62.7	2.20×10^4	3.33
PN	57.0	2.38×10^4	2.18
CF	59.4	2.43×10^4	5.72

表-5 ひび割れ発生荷重、耐力一覧 [kN]

Table 5 Cracking load, Maximum load

	曲げ ひび割れ	せん断 ひび割れ	最大 荷重	外殻+内部 の負担耐力
RC	77 / 84	205 / 214	254 / 305	102
PF	116 / 70	440 / 470	565 / 562	256
PN	77 / 63	244 / 228	331 / 339	140
CF	60 / 85	393 / 440	543 / 518	234

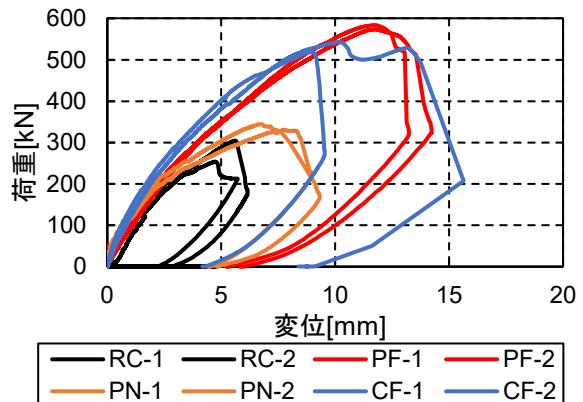


図-2 荷重-変位関係

Fig.2 Load-displacement relationships

試験体 RC のせん断ひび割れ貫通時のせん断力は、二羽ら⁶が提案している式(1)に基づくコンクリートが受け持つせん断耐力 101kN (載荷重 202kN) とほぼ同様の値を示している。

$$V_c = 0.20 f'_c^{1/3} (100 p_w)^{1/3} d^{-1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) \times b d \quad (1)$$

ここで f'_c : コンクリート強度, d : 有効高さ, p_w : 引張鉄筋比, a/d : せん断スパン比, b : はりの幅である。

斜めひび割れの進展は、載荷板と支点をつなぐ直線であった。

試験体 PF は、せん断ひび割れの貫通時の荷重が試験体 RC と比べて 200kN 以上高く、曲げひび割れおよび斜めひび割れの本数も多く、分散して発生していることを確認した。試験体 PN は曲げひび割れの本数が少なく試験体 RC と同等であるのに対し、斜めひび割れは分散して発生していることが確認された。なお試験体 PF, PN 共にせん断破壊時まで外殻のはく離・はく落は生じなかつた。

試験体 CF は試験体 PF と挙動が似ており、せん断ひび割れ貫通時の荷重が大きく、曲げひび割れ・斜めひび割れが分散して発生していることを確認した。

3.3 繊維補強およびプリンティングの耐力への影響

3DP 外殻と内部コンクリートが負担するせん断耐力は、最大せん断耐力からせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 25kN を除いた表-5（右列）の通りになる。

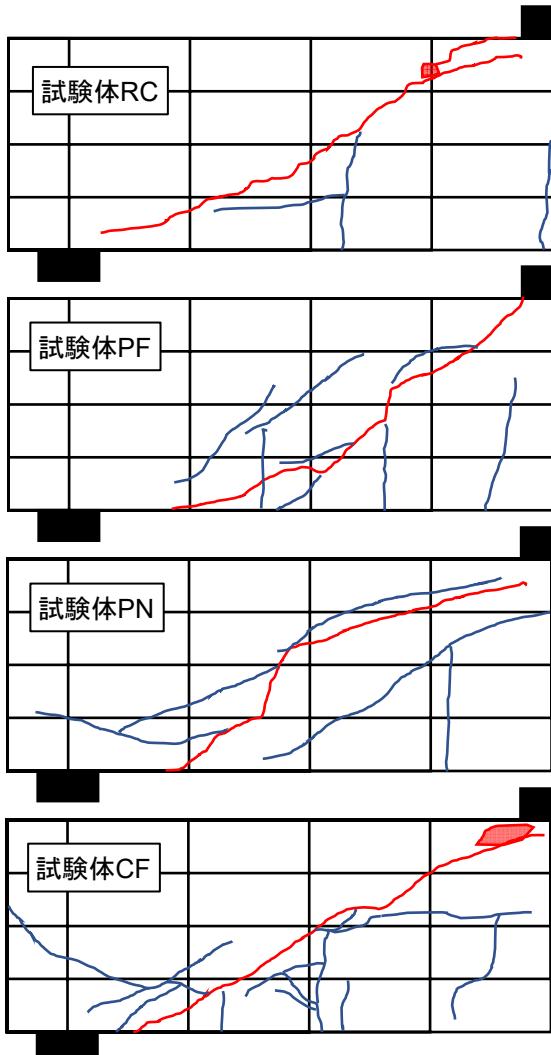


図-3 ひび割れ状況（赤線：最終開口ひび割れ）

Fig.3 Cracking distribution

短纖維を用いた試験体 PF, CF と試験体 PN を比較すると、少なくとも 1.67 倍以上の耐力向上を示している。試験体 PF および CF では曲げひび割れの本数が、短纖維を用いない試験体 RC, PN と比較して多く発生しており、今回の短纖維によりプリンティング施工の有無を問わず、ひび割れ分散の効果が得られていることが確認される。

通常施工の試験体 RC とプリンティング外殻を有する試験体 PF・PN を比較すると、初期剛性や曲げひび割れ発生荷重に関しては各試験間で有意な差が確認されなかつた。一方で外殻+内部コンクリートが受け持つせん断耐力は PN で約 1.4 倍、PF で 2.6 倍にもなつており、本配合でのプリンティング外殻により高いせん断補強効果を確認することができる。

試験体 PF と CF を比較すると、試験体 PF が試験体 CF よりも耐力が高く、せん断耐力の負担分としては試験体 PF が約 10% 上昇している。同一材料においてプリンティング施工が打込みよりもせん断補強性能が高い結果となった。要因としては、短纖維の配向性と曲げひび割れによる斜めひび割れ貫通の阻害があげられる。纖維の配向性が、外殻プリンティングにおいて短纖維が周方向に配置されるため、せん断変形に沿って多くの纖維が配置されることで補強用纖維により受け持たれるせん断耐力が有意に向上したと考える。

斜めひび割れの貫通の阻害については、3DP 外殻を用いた PF, PN 共に確認されたものである。プリンティングの影響で外殻には異方性があり、プリント層間の割裂引張強度はやや低下することが表-4 や既往研究⁵⁾により確認されている。そのため試験体 PF では試験体 CF に比較して曲げひび割れが進展しやすくなっている。試験体 RC, CF では曲げひび割れから進展した斜めひび割れがつながり 1 本の斜めひび割れとして貫通したが、試験 PF, PN ではそれぞれが貫通せずに平行した 2 本の斜めひび割れとして発生し、他方が支点-載荷点を

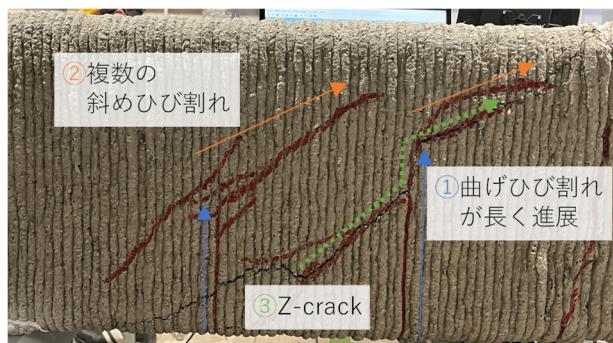


図-4 試験体 PF でのひび割れ進展

Fig.4 Cracking propagation (casePF)

貫通するように開口して耐力低下を生じている。これは界面が相対的に弱部となり曲げひび割れが誘発され、プリンティング界面の曲げひび割れが高さ方向に長く進展したためと考える。このプリンティング外殻の異方性により斜めひび割れが阻害されたためと考えている。図-4に示す通り、試験体PFでは最終的に開口した斜めひび割れが曲げひび割れに阻害され、Z形状のクラックとなっている。Pimanmasら⁷⁾は先行ひび割れにより斜めひび割れが阻害された場合にせん断耐力が向上することを検証している。試験体PFにおいても同様の影響により耐力が向上したと考えている。これは今回のせん断スパン比で発生した事象であり、せん断スパン比が大きくなるとより効果が顕著になり、小さくなると影響が小さくなると想定している。そのためこの効果を設計上用いるためには様々な諸元における実験または解析的検討が必要となる。

4. FEMによる再現解析

4.1 数値モデル

3次元FEM解析によって、3DP外殻をモデル化することにより外殻のせん断耐力の向上を評価できるかを検討した。ソフトウェアは汎用有限要素法ソフトウェアである diana (ver10.8) を用いた。解析はコンクリートおよび3DP外殻を4節点6面体3ソリッド要素、鉄筋を埋込トラス要素としてモデル化した。メッシュ図を図-5に示す。対象は試験体RCおよび試験体PFとし、コンクリート要素および3DP要素は Maekawa-Fukuura モデル⁸⁾、鉄筋は軸方向鉄筋を弾性体、せん断補強鉄筋を VonMises 型の完全弾塑性モデルとし、降伏強度は材料試験により得られた値とした。コンクリートは鉄筋の配置によりプレーンコンクリート要素(PL要素)とRC要素に分け、TensionSoftening は破壊エネルギー

により定義したが、鉄筋が配置されている要素では、鉄筋の配置方向を TensionStiffening (Cpowerを0.4)とした。要素の代表長さは 50mm としている。また 3DP 要素は Maekawa-Fukuura モデルにおいて強度を材料特性値とし、せん断伝達のモデルとして接触密度関数を 0.5 倍に低減したモデル⁹⁾、引張挙動として繊維の効果を考慮したひずみ硬化型のモデル化とした。

4.2 解析結果

解析結果の荷重-変位関係を図-6に示す。試験体RC、PFを対象としたとき、良好に荷重-変位関係と最大耐力を再現した。本結果から、既存の材料モデルにおいて適切な強度、破壊エネルギーといった入力値を導入することで3DP-RC複合構造の耐力をFEMにより再現できることが確認された。

解析における最大荷重時の最大主ひずみ分布と最小主応力分布を図-7に示す。試験体RCではせん断破壊区間において斜めひび割れが発生し、上面載荷版付近のコンクリートの圧縮破壊により強度低下しており、これが試験における斜めひび割れの貫通と対応している。試験体PFでは試験体RCと比較してせん断破壊区間でのひび割れが広がっており、3DP外殻の引張挙動が適切に作用していると考える。また最小主応力分布では、試験体PFにおいて載荷版から支点までアーチ状に応力が発生している。斜めひび割れが広範囲に発生し、かつ外殻の引張硬化挙動により内部コンクリートが拘束され、軸方向鉄筋を弦とした3DP外殻+内部コンクリートのアーチ効果による耐荷機構が成立し、部材のせん断耐力が向上していることが確認される。

一方で本手法では試験後PFと試験体CFの違いを再現することが難しい。前章で示したZクラックの再現のためには、3DP外殻の異方性を詳細にモデル化する必要があると考える。層間の引張軟化挙動とプリント

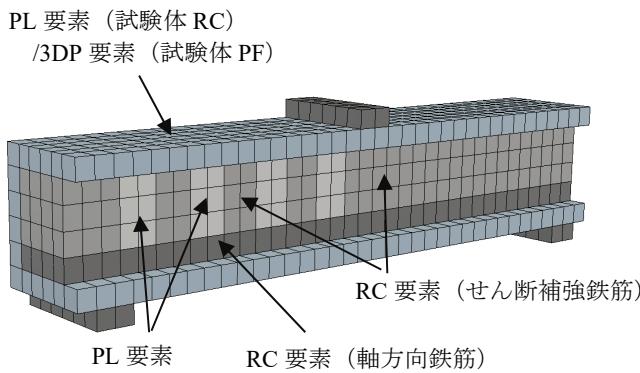


図-5 FE モデル
Fig.5 FE Model

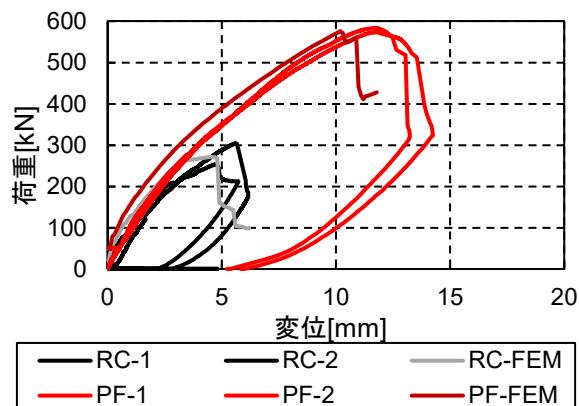
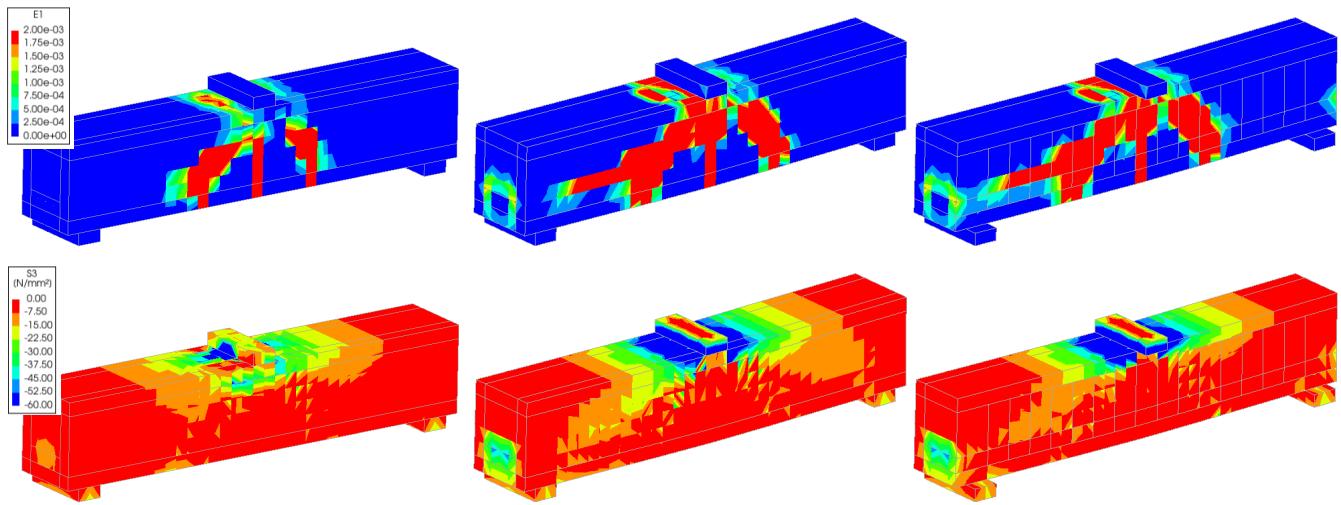


図-6 解析結果：荷重-変位関係
Fig.6 FEM result : load-displacement relationships



(1) 試験体 RC

(2) 試験体 PF (全体表示)

(3) 試験体 PF (手前外殻非表示)

図-7 解析結果（上：最大主ひずみ分布，下：最小主応力分布）

Fig.7 FEM result (Max principal strain distribution, Min principal stress distribution)

イング方向の引張硬化挙動、および各方向の接触密度関数の低減をより適切に考慮すると同時に、プリンティング層間を界面要素によりモデル化することも検討しており、ひび割れ性状の再現の高度化を今後進めていきたい。

5. まとめ

3DP により製作された外殻を有する 3DP-RC 複合はりの 3 点曲げ試験により、3DP 外殻がせん断耐力に与える影響を評価した。以下に本研究で確認された内容をまとめる。

- (1) 今回の配合で作製された 3DP 外殻を有するはりは、プリンティング材料の纖維の有無に依らず同断面の RC はりと比較して高いせん断耐力を有している。
- (2) プリンティング材料に短纖維を添加することでせん断耐力は飛躍的に向上し、部材レベルでは通常の RC 部材と比較して 2 倍以上の耐力となる。
- (3) プリンティング施工の影響としては、材料試験レベルで異方性が確認されているが、はり部材として剛性・ひび割れ発生強度に与える影響は小さく、今回のせん断スパン比では斜めひび割れを阻害することでせん断耐力の向上に貢献する。
- (4) 短纖維モルタルを用いた 3DP 外殻を有するはり部材は、外殻の受け持つせん断耐力が纖維の配向性・ひび割れ分散の影響で飛躍的に上昇することが確認された一方で、これらの要因をどのように設計に反映するかが課題として生じた。

今後は埋設型枠として利用したシェル部の耐久性の検討を進めるとともに、実現場への早期適用を目指して研究開発を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省：コンクリート生産性向上検討協議会 <https://www.mlit.go.jp/tec/i-con-concrete.html>.
- 2) 土木学会：3D プリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会（364 委員会）成果報告書、コンクリート技術シリーズ 133, 2023.
- 3) 鈴木三馨、山本悠人、木ノ村幸士、畠明仁：PC 構造体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評価、大成建設技術センター報、第 53 号-24, 2020.
- 4) 木ノ村幸士、張文博、川端康平、河村圭亮：3D プリンティングによるデモ橋脚の外殻構築と交番載荷試験による性能評価、大成建設技術センター報、第 55 号-28, 2022.
- 5) 張文博、村田哲、木ノ村幸士、畠明仁：3D プリンティングで製作した積層体の強度特性と収縮性状に関する実験的検討、大成建設技術センター報、第 53 号-23, 2020.
- 6) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、Vol. 352, V-5, pp. 167-176, 1986.
- 7) Amon PIMANMAS, Koichi MAEKAWA: Influence of Pre-Crack on RC Behavior in shear, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.669/V-50, 277-291, 2001.
- 8) K.MAEKAWA, H.OKAMURA, A.PIMANMAS: Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete, CRC press, London, 2003.
- 9) 土屋智史、三島徹也、前川宏一：高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価、土木学会論文集、Vol. 697, V-54, pp. 65-84, 2002.