

論文 3D プリンティングで外殻を製作した 3DCP-RC 複合柱の FEM 解析による耐震性能評価

山本 悠人*1・木ノ村 幸士*2・大野 元寛*3・石田 哲也*4

要旨: 短繊維補強モルタルを用いた 3D プリンティングにより鉄筋外周に埋設型枠を自動化施工し、内部コンクリートを打込みして製作される柱部材 (3DCP-RC 複合柱) の正負交番載荷試験に対して、固定ひび割れモデルに基づく非線形有限要素法の再現性を評価した。短繊維の配向性を考慮した 3DCP 材料のモデル化により、3DCP 外殻が有する耐力およびじん性への向上効果を再現できることが確認された。一方で外殻のはく落による拘束効果の低下に伴う軸方向鉄筋の座屈および水平耐力低下の定量的な再現には至っておらず、3DCP 外殻の拘束効果の直接的なモデル化および 3DCP-コンクリート間の界面モデルの確立が課題となった。

キーワード: 3D プリンティング, 正負交番載荷試験, 非線形有限要素法

1. はじめに

建設業に従事する技能者の高齢化が進み、現場の省力化が重要な社会課題となっている。解決策の一つとしてセメント系材料の建設用 3D プリンティング (3D concrete printing, 以下 3DCP) 技術が注目されており、すでに非構造部材や小型建築では適用が進められている¹⁾。

筆者らは短繊維補強モルタルの 3D プリンティングで製作した 3DCP 外殻を有する RC 部材 (以下、3DCP-RC 複合構造) の開発を進めている。3DCP 外殻によって、はり部材のせん断耐力の向上効果²⁾、内部コンクリートへの拘束効果³⁾、柱部材のじん性の向上効果⁴⁾が得られることを実験的に確認してきた。一方で 3DCP 外殻のはく落や軸方向鉄筋の座屈・破断による耐力低下といった損傷レベル 3, 4⁵⁾の挙動を含めた部材の耐震性の評価に関しては検討がなされておらず、国内外においてもそのような実験事例は見られない。解析的な検討としては Sabra ら⁶⁾が非線形有限要素法 (FEM) により 3DCP-RC 複合部材の再現解析を試みているが、最大耐荷力までの検証となっており損傷レベル 3 以降の耐震性能を評価・検証しているものではない。そこで 3DCP-RC 部材の終局までの高精度な FEM 手法の確立と設計への導入を最終目標として、本研究では損傷レベル 4 までの正負交番載荷試験を対象に、既存のコンクリート構成則に基づく FEM による再現解析を行った。解析結果に基づき、3DCP-RC 複合柱の耐震性能の再現性評価およびモデル化の妥当性の検証を行った上で解析手法の改善点について考察する。

工を想定した RC 橋脚の 1/5 スケールとなる 600mm の正方形断面とし、加力高さは 2400mm とした。試験体の図面および配筋情報を図-1 に、材料情報を表-1,2 に示す。試験体は 2 体用意し、1 体は比較用に通常施工した RC 構造 (以下、NRC ケース)、他方は基部から高さ 1800mm まで 3DCP 外殻を有する 3DCP-RC 複合構造 (以下、3DRC ケース) とした。試験体の軸方向鉄筋比は 1.97%、横拘束鉄筋体積比は 0.59% である。短繊維補強モルタルを用いた 3DCP-RC 複合構造は高いせん断耐力を有することを確認している²⁾ため、横拘束鉄筋量を低く設定し

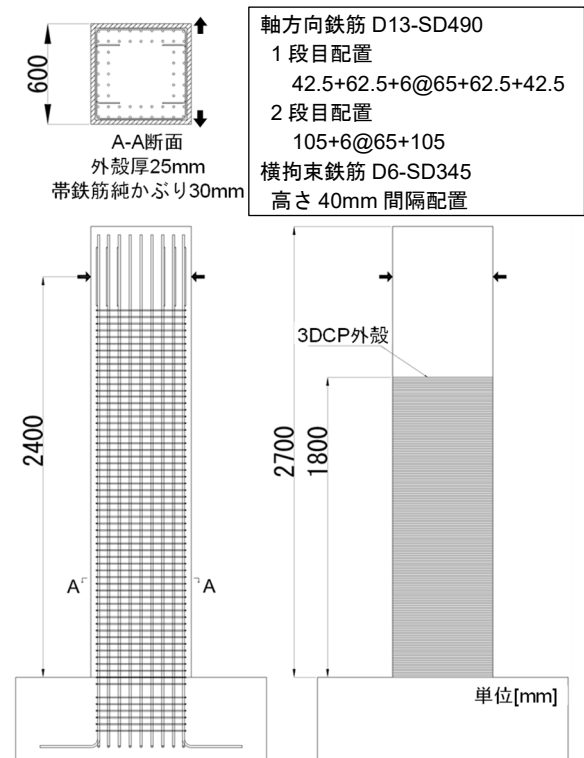


図-1 試験体概要

2. 実験概要

2.1 試験体設計・製作

試験体は支間長 30 メートル程度の鋼桁を支える下部

*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 修 (工) (正会員)
 *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 博 (工) (正会員)
 *3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 特任講師 博 (工) (正会員)
 *4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博 (工) (正会員)

た。3DCP 外殻は設計厚を 25mm とし、柱部の配筋が完了している状態で外殻を周り込むように 1 列でプリントした (図-2, 左)。プリントは約 100 分で 180 層の積層を完了した。その後加力部の型枠を設置後に内部コンクリートを打込みした。使用した材料の特性値を表-1,2 に示す。加力は土木研究所のガイドラインに基づき、応力 1.0N/mm^2 の軸力下で正負交番载荷試験を実施した (図-2, 右)。载荷は 1 サイクル目の耐力が最大耐力の 50% 程度まで減少する状況を目途に終了した。計測内容は荷重・変位の他に試験体の鉛直伸びおよびデジタル画像相関法による側面の変位・ひずみ分布を計測した。

2.2 試験結果

各試験ケースの水平荷重-変位関係と包絡線の比較を図-3 にそれぞれ示す。ここで水平荷重は全て軸力による偏心モーメントを水平荷重に換算し累加した荷重である。また降伏変位 δ_y は 27.0mm で両ケース共通とした。

NRC ケースでは $2\delta_y$ で最大耐力を示し、载荷が進むにつれ緩やかに荷重が低下、 $3\delta_y$ の载荷途中にかぶりコンクリートのはらみ出しを確認した。 $5\delta_y$ -1 サイクル目にて最大耐力の 40% となり、载荷を終了した。

3DRC ケースでは $2\delta_y$ を超えても緩やかに荷重が上昇し、 $4\delta_y$ で最大荷重を示した。その後は荷重低下が生じ、 $5\delta_y$ で 3DCP 外殻を含むかぶりのはく落、 $6\delta_y$ にて最大耐

力の 50% を下回ったため载荷を終了した。

最終的な破壊状況を図-4 に示す。最終的に高さ 300mm までのかぶりがはく落し、塑性ヒンジ長は 280mm であり、両ケース間で有意な差異は見られなかった。

2.3 3DCP 外殻が耐震性能に与える影響

3DRC ケースは NRC ケースに比べ最大耐力およびじん性の両方の点において高い耐震性能を有している結果となり、内部コンクリートを拘束するといった 3DCP 外殻に期待される効果を発揮したと考えられる。一方で 3DCP 外殻の拘束力は塑性ヒンジ長には影響は与えなかった。一般的に鉄筋コンクリートや炭素繊維シートで巻立て補強された部材の塑性ヒンジ長は短くなる⁷⁾。3DCP の積層により短繊維が周方向に配置されるため屈座・はらみ出しに伴う水平方向のひび割れには短繊維が効果的に配向されず、水平ひび割れは大きく開口するため、軸方向鉄筋の屈座に対して有意な拘束効果を発揮しなかったと考えられる。

表-1 コンクリートの材料強度・ヤング率

	コンクリート		3DCP 材料
	NRC ケース	3DRC ケース	
材齢	23 日	30 日	42 日
強度	35.3 N/mm^2	35.9 N/mm^2	57.0 N/mm^2
ヤング率	27.0 GPa	28.1 GPa	28.0 GPa

表-2 鉄筋の材料特性

	材質呼び名	降伏強度	弾性係数	引張強さ
軸方向鉄筋	SD490 D13	580 N/mm^2	1.92×10^5 N/mm^2	750 N/mm^2
横拘束鉄筋	SD345 D6	369 N/mm^2	1.83×10^5 N/mm^2	579 N/mm^2

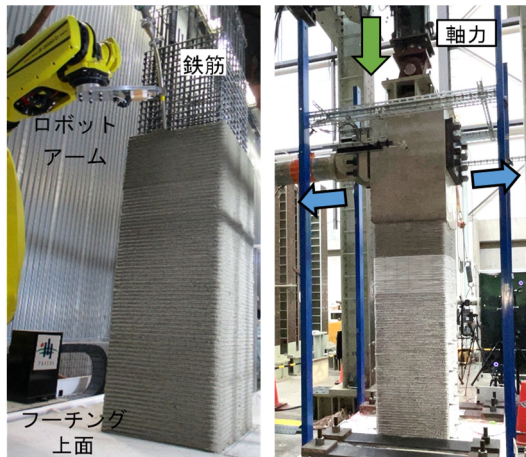


図-2 試験体製作・加力状況



図-4 破壊状況 (左: NRC ケース, 右: 3DRC ケース)

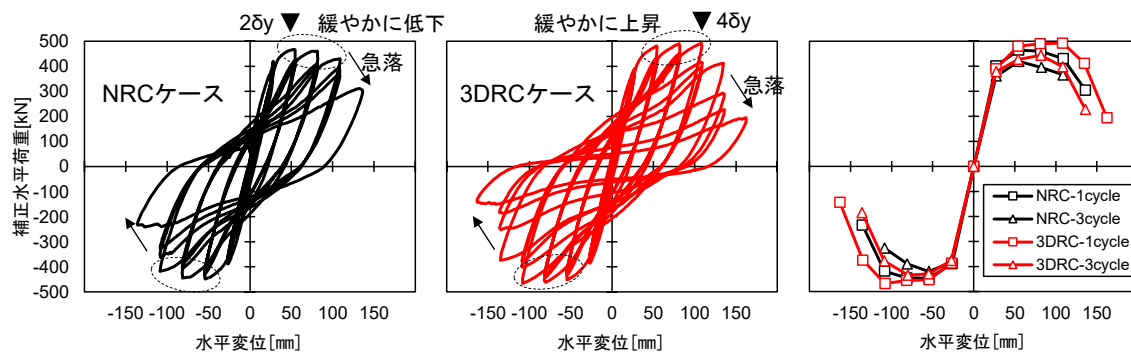


図-3 水平荷重-変位関係 (左: NRC ケース, 中: 3DRC ケース, 右: 包絡線比較)

3. 解析手法

3.1 解析手法および鉄筋コンクリートのモデル化

解析手法には、アクティブラック法に基づく非直交多方向固定ひび割れモデルを用いた三次元非線形有限要素法^{8,9)} (コード名: COM3, ver10.1) を用いた。

鉄筋コンクリート部は8節点6面体要素を用いて離散化した。圧縮側構成則は多軸応力状態を考慮した弾塑性破壊モデル¹⁰⁾、引張側構成則はブーニング手法¹¹⁾を用いて鉄筋の付着が影響する領域は鉄筋位置を中心としたテンションスティフニング効果を考慮するRC要素(引張軟化特性を表す係数⁵⁾ $C=0.4$)、その他の領域は引張破壊エネルギーと要素寸法に基づき軟化勾配が決定させるプレーンコンクリート要素(PL要素, $C>0.4$)に分割するモデル、せん断伝達はせん断変形に伴う軟化を考慮した接触密度関数に基づくモデル⁹⁾としている。ポアソン比は等価圧縮ひずみに応じて2直線で定義されるモデル⁹⁾とした。鉄筋の構成則にはRC要素としての平均応力-ひずみ関係を用いており、座屈に関しては骨格曲線を要素分割長・座屈長・鉄筋径に基づき低下勾配が定義されるDhakar & Mackawaモデル¹²⁾とし、履歴曲線にはMenegotto-Pintoモデルを基にエネルギー吸収を低減¹³⁾させたモデルを用いている。基礎部と柱部の間にはRCジョイント要素⁸⁾を導入し鉄筋の付着破壊に伴う伸び出しを考慮した。境界条件は基部を固定とし、加力は弾性鋼材でモデル化した加力版に強制変位を与え正負交番載荷試験を再現している。解析に用いたメッシュを図-5に示す。メッシュは各ケースで共通として、外殻部をPL要素または3DCP外殻要素(詳細は次節)としている。

3.2 3DCP 外殻のモデル化

前章3DRCケースで用いた3DCP材料は、PVA短繊維(径0.2mm, 長さ12mm)を1.0Vol.%添加したモルタル材料であり、ランダム配向条件での一軸引張試験ではひずみ軟化、切欠き曲げ試験(JCI-S-002-2003)ではたわみ硬化を示す材料であることを確認している。切欠き曲げ試験では積層に伴う異方性を検討しており、図-6に示す通りブロックを積層し(図中①)、2方向で試験体を切り出して(同②③)、切欠き曲げ試験を実施した。また比較用として通常型枠に打込んだ供試体(図中④)も用意した。柱部材として曲げひび割れに寄与する方向ではたわみ軟化を示し、圧縮破壊や座屈に伴う縦ひび割れに寄与する方向ではたわみ硬化を示し高い破壊エネルギーを示すことを確認した。この破壊エネルギーを元に3DCP要素の各方向の引張側構成則における軟化勾配を決定した。要素代表長さ $L_e=100\text{mm}$ での各要素の引張軟化曲線を図-7に示す。外殻の周方向は高い破壊エネルギーを考慮しRC要素と同等の軟化勾配、他方向はPL要素と同様の傾向を示す。

圧縮側の骨格曲線については、モルタルであることから同強度のコンクリートよりもヤング率が低く、コンクリートで用いた構成則に対して圧縮強度のピーク時ひずみを 4000μ とすることでヤング率の低減を考慮した。なお先述の圧縮側構成則は本来、粗骨材周辺に発生するマイクロラックに伴い圧縮応力のピーク前から剛性が徐々に低下するコンクリートをモデル化したものであり、本モデル化ではモルタルの直線的な骨格曲線を再現しておらず、またピーク後の軟化勾配を低く表現していることに注意が必要である。

せん断伝達に関しては粗骨材がないためせん断ひび割れ面が平滑化することを簡易的にモデル化するために接触密度関数に0.2~0.5程度の低減係数を乗じる手法が提案^{14,15)}されている。3DCP材料に対して1面せん断試験を実施した実績はないため、本解析ではモルタル材料であり材料の圧縮強度が近いPVA-ECCモデル¹⁵⁾を参考に低減係数を0.25とした。

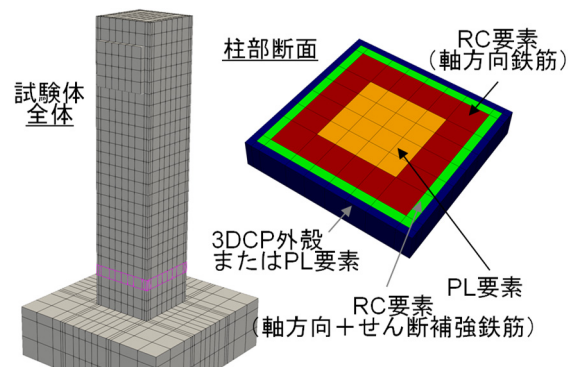


図-5 解析モデル (左: 全体, 右: 柱部断面)

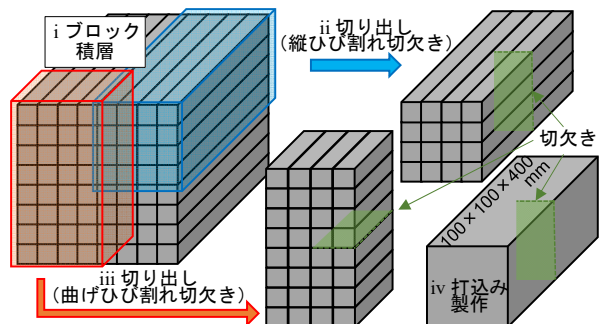


図-6 切り欠き曲げ試験における異方性確認

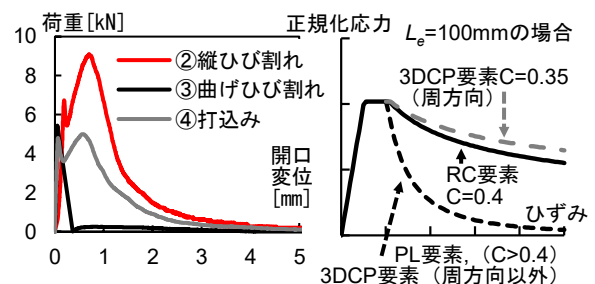


図-7 引張軟化構成則 (左: 切欠き曲げ試験結果, 右: モデル化例)

4. 解析結果

4.1 荷重変位関係

得られた解析結果として水平荷重変位関係、鉛直伸び水平変位関係を図-8,9に示す。本モデル化および解析プログラムにより、各ケースにおいて降伏点から最大耐力点まで耐力及び鉛直伸び変位を精度良く再現している解析結果が得られた。

NRC ケースでは実験時に $4\delta_y$ においてコンクリートの圧縮破壊が進行して水平荷重が低下し、繰り返し載荷時に座屈が顕著となり、さらなる荷重低下が生じており、解析においても同タイミングで荷重低下が再現されている。伸び変位に着目すると、 $3\delta_y$ まで一様に伸び変位が増加し、 $4\delta_y$ -1 サイクルでその増加率が停滞、2 サイクル目以降に座屈が進展して縮み始める挙動を良好に再現した。

3DRC ケースにおいても広範囲で座屈が始まり、損傷レベル3に相当する水平荷重が著しく低下する前 ($5\delta_y$ -1 サイクル) までは正負側の両方で耐力およびじん性を精度よく再現している。これより 3DCP-RC 複合柱のモデル化として、コンクリートを対象とした構成則をベースとしてヤング率・せん断剛性を低減し、引張構成則の異方性を考慮したのみの簡易的なモデル化により耐力およびじん性を損傷レベル3までは良好に再現できることが確認できた。その後の $5\delta_y$ -2 サイクル目以降、実験では大きく荷重低下している一方で、解析では低下の傾向は

定性的に捉えられているが、定量的な再現性は低い。伸び出しにおいても同様に、荷重低下が生じた $4\delta_y$ から伸び変位も減少に転じており、NRC と比較して低い再現性となっている。

また両ケースの結果として、履歴吸収エネルギーを過大に再現している。これは同様の解析手法を用いた3次元解析を実施している既往研究¹⁶⁾でも同様の傾向がみられる。本試験体は基礎部と柱部を2段階で打込みしたため、再現性をより高めるためには打ち継ぎを考慮し基部からの伸び出しが大きくなったと考えられる。また軸方向鉄筋の配置間隔が 65mm と高密度であり、RC ジョイントで考慮している 5ϕ の付着破壊区間よりも付着破壊が進行し、より伸び出した可能性も考えられる。履歴吸収エネルギーの再現性を高めるためには、これらを考慮したRC ジョイント要素への修正が必要である。

4.2 ひずみに基づく外殻が有する座屈抑止効果の分析

座屈が生じる前後である $3\sim 6\delta_y$ の柱中央断面での最大主ひずみ・最小主ひずみ分布を図-10に示す。比較として実験におけるデジタル画像相関法(以下DIC)により得られた表面の最大主ひずみ分布を併せて示す。

NRCにおいては $3\delta_y$ 時に 5000μ を超える残留した圧縮ひずみ(図中①)が残っており、前サイクルでかぶりコンクリートが圧縮破壊している。実験時においても同様の事象を確認しており、図中②に示す通り $3\delta_y$ 時には縦

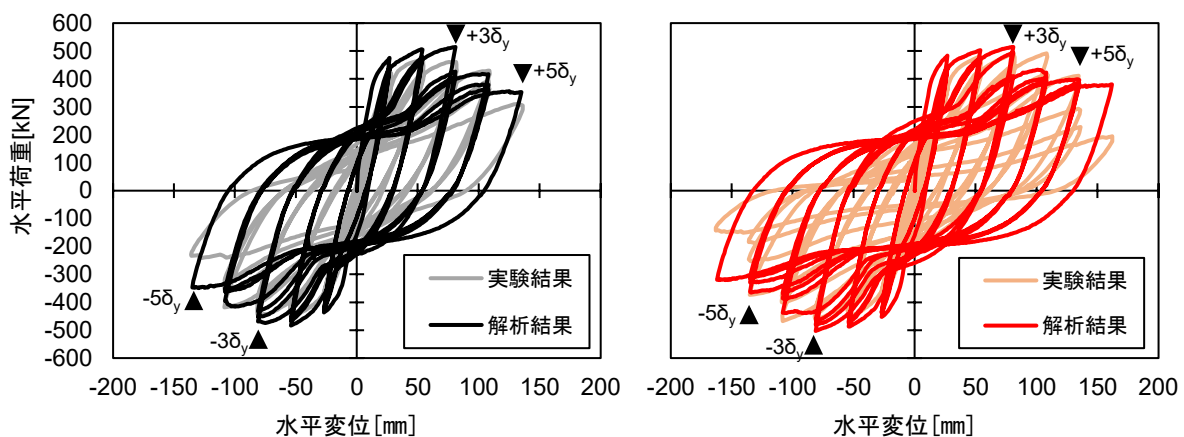


図-8 解析結果：水平荷重-変位関係（左：NRC ケース、右：3DRC ケース）

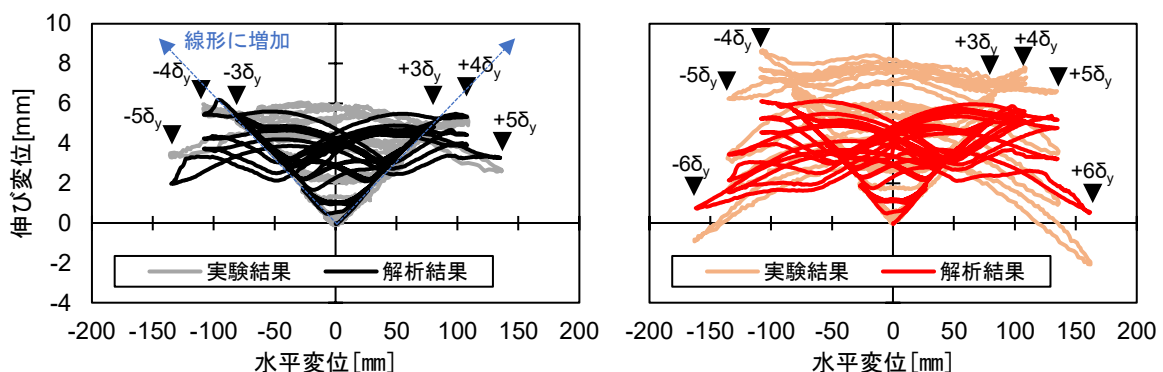


図-9 解析結果：鉛直伸び変位-水平変位関係（左：NRC ケース、右：3DRC ケース）

ひび割れが生じている。また解析では $4\delta_y$ では座屈が生じ、RC 要素においても 5000μ を超える圧縮ひずみが生じて伸び変位が低下している。実験においても同様のタイミングで座屈が生じ、伸び変位が低下している。

3DRC ケースにおいては、解析上 $3\delta_y$ で圧縮ひずみはほとんど残留しておらず (図中③)、RC 要素に座屈が生じ荷重低下が確認されているが、一方で実験上は座屈に伴うはらみ出しは確認されず、荷重低下も生じていない。 $4\delta_y$ において実験では外見上の座屈・損傷は生じていないが、解析においては RC 要素に圧縮ひずみが残留するまで座屈が進行しており (図中④)、荷重低下も 1 サイクル

分早く生じている。実際の座屈ははらみ出しを伴い、3DCP 外殻はその変形を押しえつめることで高いじん性を有する。一方で本研究の解析では座屈は圧縮応力の低減でモデル化され、軸方向鉄筋のはらみ出し変形を直接表現するものではない。そのため 3DCP 要素の解析上の拘束効果は圧縮変形に伴うポアソン効果による変形を抑える効果のみである。このことが理由で座屈のタイミングが正確に再現できていないものと考えられる。また $5\delta_y$ 以降は実験において外殻とかぶりコンクリートがはく落し (図中⑤)、軸方向鉄筋が破断した。解析上はそれらのはく落を考慮していない。また座屈後の低サイクル疲労

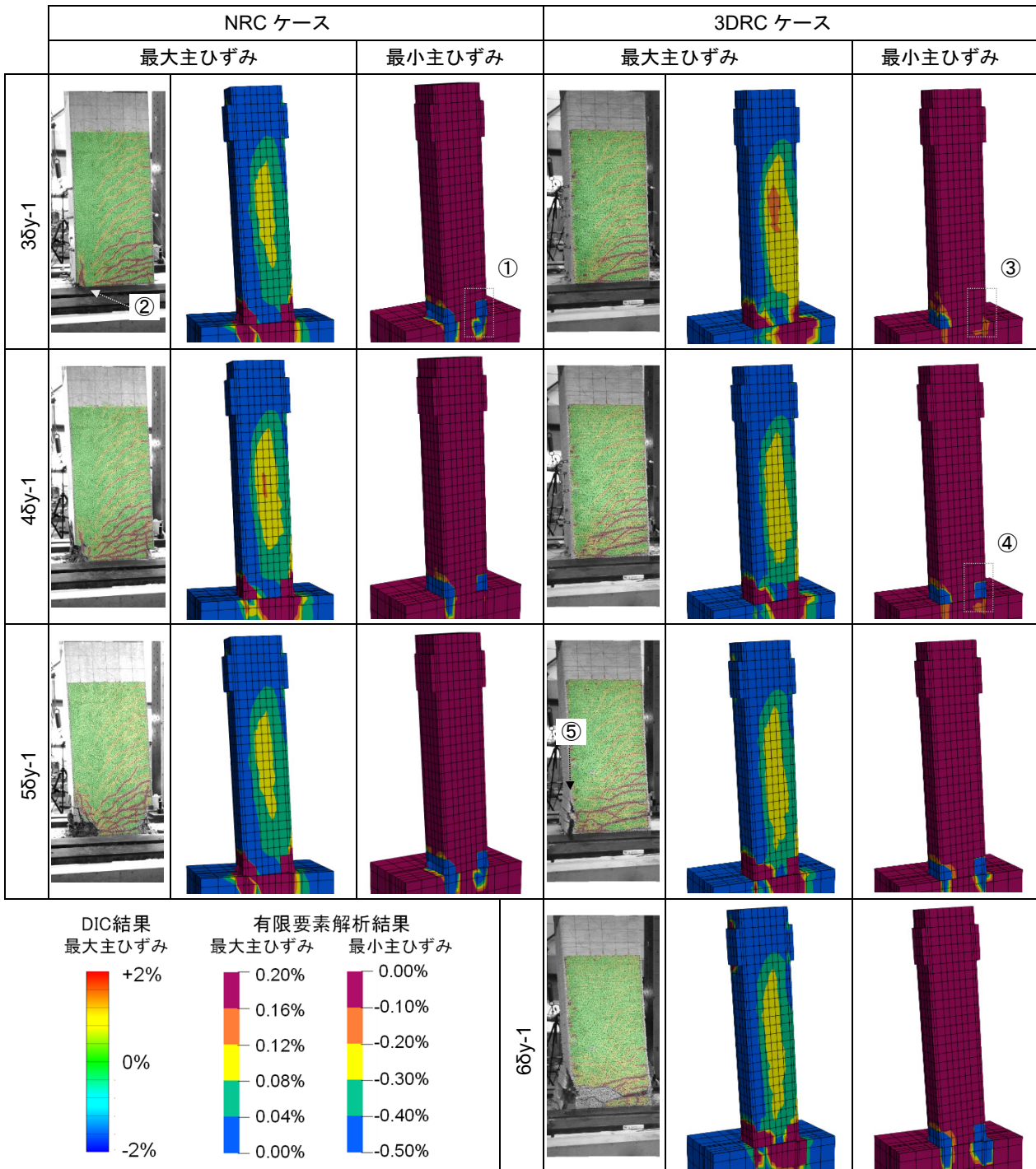


図-10 解析結果 (各列左: DIC-最大主ひずみ, 中: 解析-最大主ひずみ, 右: 解析-最小主ひずみ分布)

による鉄筋の破断を考慮していないため $6\delta_y$ の耐力を過大評価した。界面要素等, 3DCP 外殻のはく落に伴う拘束効果の低下を考慮できるモデル化とすることで, 水平荷重の急落を再現できるものと考えられる。

5. まとめ

損傷レベル 4 までの 3DCP-RC 複合柱の耐震性能を評価した実験を対象とした非線形有限要素解析により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 3DCP 材料である短繊維補強モルタルのモデル化として, コンクリートを対象とした既存の構成則をベースとし, ヤング率・せん断剛性を低減し, 3D プリンティングの積層経路による短繊維の配向性に起因する引張構成則の異方性を考慮することで 3DCP-RC 複合柱の損傷レベル 3 までの耐力およびじん性を精度よく再現できる。

(2) 基礎と柱部を結ぶ RC ジョイント要素, 軸方向鉄筋の破断・座屈に対する 3DCP 外殻の拘束効果, 外殻のはく落に伴う拘束効果の解放をより精緻にモデル化することで, 座屈のタイミングから終局時の耐力低下までをより精度高く再現できる可能性がある。

今後は解析モデルの改良と共に, FEM に基づき性能照査される際の照査指標⁹⁾に関する検討を進める。正規化累加ひずみエネルギー W_n や偏差ひずみの第 2 不変量 $\sqrt{J'_2}$ および軸力保持機能の喪失に対する損傷指標¹⁰⁾である $W_{n,core}$ 等の 3DCP-RC 部材への適用性を検証し, FEM による設計手法の確立を目指す。

謝辞

本研究で対象とした実験は内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人: 土木研究所) によって実施されました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省: 令和 6 年版国土交通白書, 2024
- 2) 山本悠人ほか: 3D プリンティング外殻による RC はりのせん断耐力向上効果の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 24 巻, pp.351-356, 2024.10
- 3) 山本悠人, 木ノ村幸士, 村田哲, 張文博: セメント系 3D プリンティング外殻による拘束がコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響の評価, 第 27 回橋梁等の耐震設計シンポジウム, No.27, pp.343-348, 2024.7
- 4) 木ノ村幸士, 張文博, 川端康平, 河村圭亮: 3D プリ

ンティングで外殻を構築したデモ橋脚の交番載荷試験による性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 1528-1533, 2022.7

- 5) (公社) 土木学会: [2022 年制定]コンクリート標準示方書設計編, 2023.3
- 6) Tarek Sabra ほか: Analytical investigation on the structural performance of RC column with 3D-printed concrete permanent formwork, fib symposium2024, pp.769-778, 2024.11
- 7) 玉越隆史, 白戸真大, 星隈順一, 塚淳一: 「既設橋の耐震補強設計に関する技術資料」, 国土技術政策総合研究所資料 第 700 号/土木研究所資料第 4244 号, 2012.11
- 8) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 9) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 10) Maekawa, K. and Okamura, H.: The deformational behavior and constitutive equation of concrete using the elastoplastic fracture model, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. 37, No. 2, pp. 253-328, 1983.
- 11) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 564/V-35, pp. 297-316, 1997.
- 12) Dhakal, R. P. and Maekawa, K.: Post-peak cyclic response analysis and energy dissipation capacity of RC columns, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, Vol. 676/V-51, pp. 117-133, 2001.
- 13) 土屋智史, 津野和宏, 前川宏一: 常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合載荷した RC 柱の非線形三次元有限要素立体解析, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 131-143, 2001.8.
- 14) 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, No.697/V-54, pp.65-84, 2002.2
- 15) Benny Suryanto, Kohei Nagai, Koichi Maekawa: Modeling and Analysis of Shear-critical ECC Members with Anisotropic Stress and Strain Fields, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 2, pp.239-258, 2010.7
- 16) 牧剛史, 土屋智史, 斉藤成彦, 渡邊忠朋: コンクリートの損傷指標を用いた RC 部材の三次元耐荷機構の数値解析的評価, 土木学会論文集 E2, Vol.78, pp.121-137, 2022.1