

T-3DP®で作製した埋設型枠が有する 柱の耐震性能の向上に関する検証

大型構造実験および非線形有限要素法 COM3 に基づく性能検証

山本 悠人*¹・木ノ村 幸士*¹・村田 哲*¹・田中 俊成*¹・畑 明仁*¹

Keywords : 3D-printing, seismic performance, permanent formwork, finite element method

3D プリンティング, 耐震性能, 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が進み数年以内の大量離職が想定され、建設現場の省力化が喫緊の課題となっている。大成建設ではコンクリート工の生産性向上・省力化を目指して 2018 年から建設用 3D プリンティング技術「T-3DP®」を開発・拡充している¹⁾。

T-3DP では不陸地形にもプリント可能な高い自立安定性・積層性を有する配合²⁾、CO₂ 排出量収支マイナスを実現した環境配慮コンクリート「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」をベースとした環境配慮型の積層モルタル材料³⁾、力学性能の向上が期待できる PVA 繊維補強された高強度積層モルタル材料⁴⁾など複数のプリント材料を整備している。また積層方式もガントリー式⁵⁾およびロボットアームによる移動式⁶⁾のシステムを整備しており、積層する部材や目的に合わせて最適な配合・積層方式を選択できる。

本研究では T-3DP にて製作される部材の適用範囲を広げることが目的に、ロボットアームを用いる鉄筋回避工法によって積層される 3DP 埋設型枠を利用することで生産性高く製作された柱部材の耐震性能を検証する。PVA 繊維補強された高強度モルタルを適用することで、T-3DP で製作した埋設型枠を有する柱（以下、3DP 柱）は従来の一般的な鉄筋コンクリート構造（以下、RC 構造）の柱よりも高い耐震性能を有していると期待できる。本稿では 2 章にてプリンティング製造方法を含めた柱の正負交番載荷試験概要、3 章で実験結果と埋設型枠が耐震性能に与える影響の考察、4 章で非線形有限要素法による再現解析結果を示す。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

試験体は支間 50m 程度の鋼桁道路橋の下部工を想定した断面 3m×3m の単柱式 RC 橋脚を縮尺 1/5 に縮小した断面を有する試験体（断面 600mm×600mm）とした。試験体は比較用として通常施工した RC 試験体（RCcase）、添加量 1.0Vol.%の短繊維補強モルタルを材料とした 3DP 埋設型枠を有する 3DP 柱試験体（3DPcase）の 2 ケースとした。これら試験体の変数は 3DCP 外殻の有無のみであり、柱部の鉄筋、フーチングや加力スタブは同一配筋・同一形状である。試験ケースと使用したコンクリート、3DP 用の短繊維補強モルタル、の強度試験結果を表-1 に示す。軸方向鉄筋は D13（SD490）を 2 段配筋で 56 本配置し、軸方向鉄筋比は 1.97%である。帯鉄筋は D6（SD345）を高さ間隔 40mm で配置し、横拘束鉄筋比は 0.59%である。これは本研究で用いる 3DP 材料にて製作した 3DP はりでは高いせん断耐力を有する結果⁴⁾が確認されており、適用にあたってせん断補強鉄筋を削減できる可能性があるため、低い鉄筋量に設定したものである。

表-1 試験ケースおよび使用材料強度
Table 1 Specimen parameters and material properties

	RCcase	3DPcase
構造仕様	通常 RC	3DP 柱
断面形状	600mm×600mm (外周の 3DP 枠を含む)	
コンクリート 強度, 材齢	35.3 N/mm ² 材齢 23 日	35.9 N/mm ² 材齢 30 日
3DP モルタル 強度, 材齢	-	57.0 N/mm ² 材齢 42 日

* 1 技術センター 社会技術研究部 先端構造研究室

2.2 試験体製作

試験体の図面を図-1 に示す。試験体は「フーチングおよび柱部の配筋」⇒「フーチング側枠設置・打込み」⇒「鉄筋回避工法による 3DCP 外殻構築」⇒「加力スタブ配筋・型枠設置」⇒「内部コンクリートの打込み（高さ 2700mm）」の順に製作した。

図-2 にロボットアームを使用した鉄筋回避工法によるプリント状況およびプリントパスを示す。幅 25mm のノズルを用いて 1 列で外殻を構築した。外殻のプリントはロボットアーム手前面（図-2 内右上の積層開始点）から開始し、対面で切り返して反対側より再度周り込むように一筆書きで構築している。そのため対面ではプリンティングの突き合わせ箇所が生じる（図-2 内 C 面）。この突き合わせ部では短繊維の架橋効果が期待できないことから、拘束効果が弱くなる可能性があり、この影響をなるべく小さくするために突き合わせ箇所を千鳥配置で 150mm 離れるようなプリントパスを設定した。1 層の高さは 10mm、1 層当たりプリント時間は約 30 秒、基部から高さ 1800mm までのプリントに要した時間は約 100 分であった。

2.3 加力・計測

正負交番荷重試験の実施状況を写真-1 に示す。荷重は土木研究所のガイドラインを参考に計算上の初降伏荷重の約 1/4 倍および 2/4 倍である±100kN、200kN の予備荷重を実施し、その後降伏変位の整数倍を各 3 サイクル与える繰返し荷重とした。加力が進行し、水平荷重が低下を開始し降伏荷重を下回り、1 サイクル目が最大水平耐力の 40~60%まで低下することを目安に終了することとした。

荷重装置に内蔵しているロードセルにより軸力および水平荷重を計測した。水平変位は各側面の荷重点高さで接触型の変位計により計測し、2 点の平均値を水平変位とした。鉄筋のひずみは図-1 に示す通り、軸方向鉄筋は 6 本を高さ 100mm 間隔で 9 段（高さ-200~600mm）、横拘束鉄筋は平面 6 か所を基部から 15 段目（高さ 600mm）まで計測対象とした。

側面は片方（写真-1 内の側面 1）でデジタル画像相関法⁶⁾（Digital Image Correlation method, 以下 DIC）によってフーチング上面から高さ 1200mm の範囲で変位・ひずみ分布を計測した。DIC は構造実験においてひび割れやかぶりコンクリートのはく落、軸方向鉄筋の座屈等の破壊進展を明瞭かつ簡易に計測することができる方法であり、目視でひび割れを確認することが難しい 3DP のひび割れ計測に効果的な計測手法である。

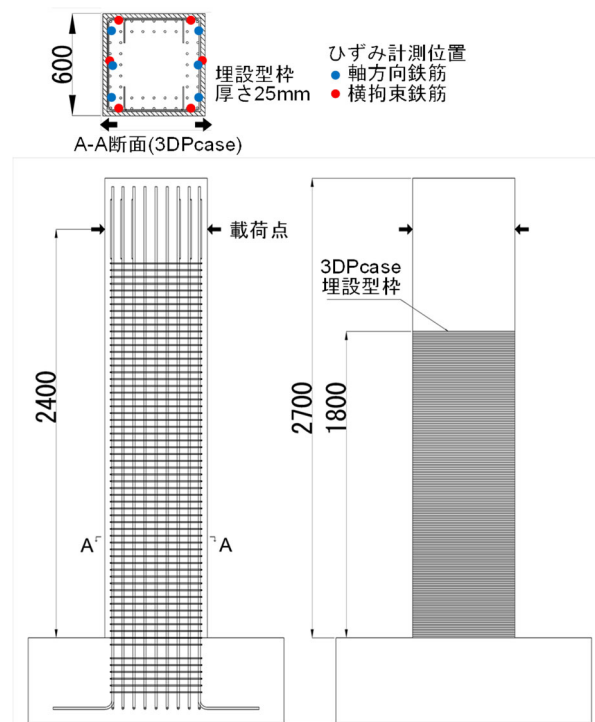


図-1 試験体概要図

Fig. 1 Specimen outline and drawing

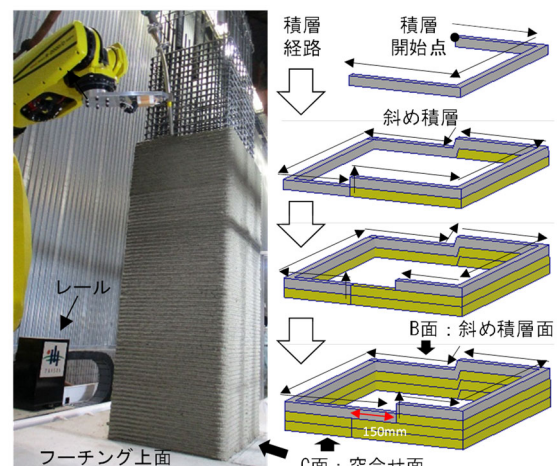


図-2 積層状況とプリントパス

Fig. 2 3D-printing path

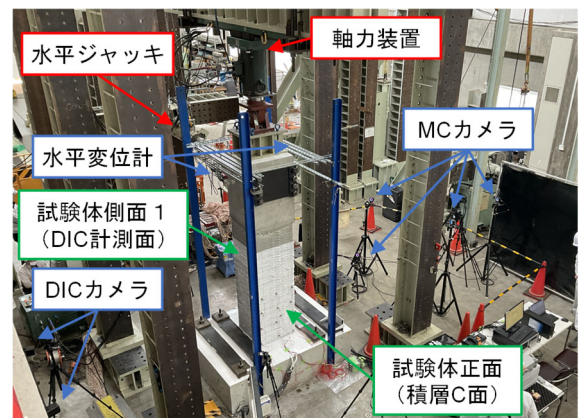


写真-1 加力・計測状況

Photo.1 Loading and measurement setup

3. 試験結果

3.1 荷重変位関係と損傷進展

両ケースの水平荷重-水平変位関係と荷重包絡線の比較を図-3 に、主要な損傷の進行状況を表-2 に DIC により得られた各 1 サイクル目の最大主ひずみ分布を図-4 に示す。降伏変位は両ケースで 27.0mm であった。

包絡線の比較では、降伏変位まで挙動が等しく、最大耐力から荷重低下までは 3DPcase が RCcase を包含するような結果となっており、最大耐力は RCcase (+464kN) と比較して 3DPcase (+492kN) では有意な向上がみられた。また降伏荷重を保持する変形性能も概ね 18 δ_y の向上がみられた。最終的な塑性ヒンジ長やかぶりコンクリートのはく落、範囲に大きな差異は見られなかった。

3.1.1 RCcase

通常施工した RC 柱は正負共に 28 δ_y -1 サイクル目で最大荷重 (+464kN, -446kN) を示した。その後は荷重の進行とともに荷重が緩やかに低下し、38 δ_y の荷重途中にかぶりコンクリートのはらみ出しを確認し、48 δ_y -2 サイクル目に水平耐力が降伏荷重を下回った。58 δ_y -1 サイクル目負側にて最大水平耐力の 40%を下回ったため終了とした。ひび割れは 65kN で柱基部に曲げひび割れが発生し、最大主ひずみ分布から 18 δ_y 時には曲げひび割れが斜めに進展している様子が確認される。最大耐力を示した 28 δ_y では圧縮縁の一部に縦方向のひび割れ (図-4 内、1-A) を確認しており、このタイミングで圧縮縁の一部コンクリートが圧縮破壊している。またこれ以降、基部を除いて斜めひび割れ幅の拡大は確認されていない。38 δ_y ではこの縦方向のひび割れが圧縮縁の広範

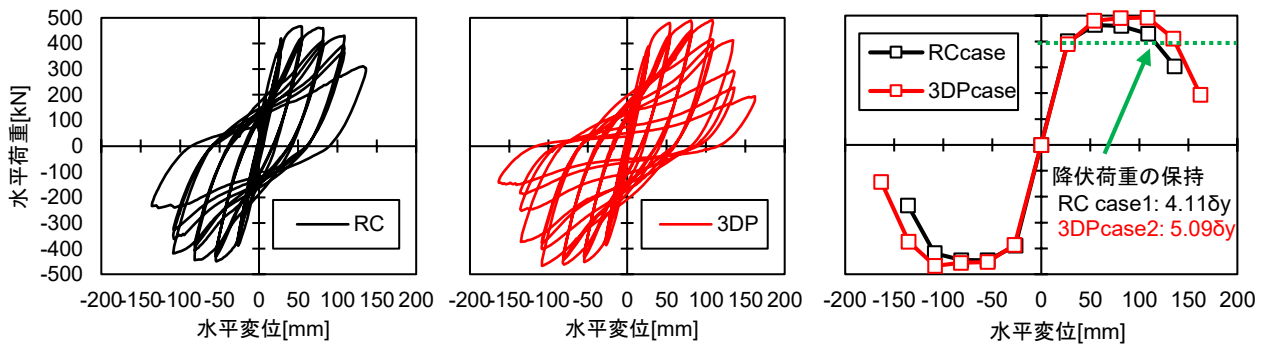


図-3 荷重変位関係および荷重包絡線の比較 (左: RCcase, 中: 3DPcase, 右: 包絡線比較)

Fig. 3 Load – displacement relationships and compare of envelope

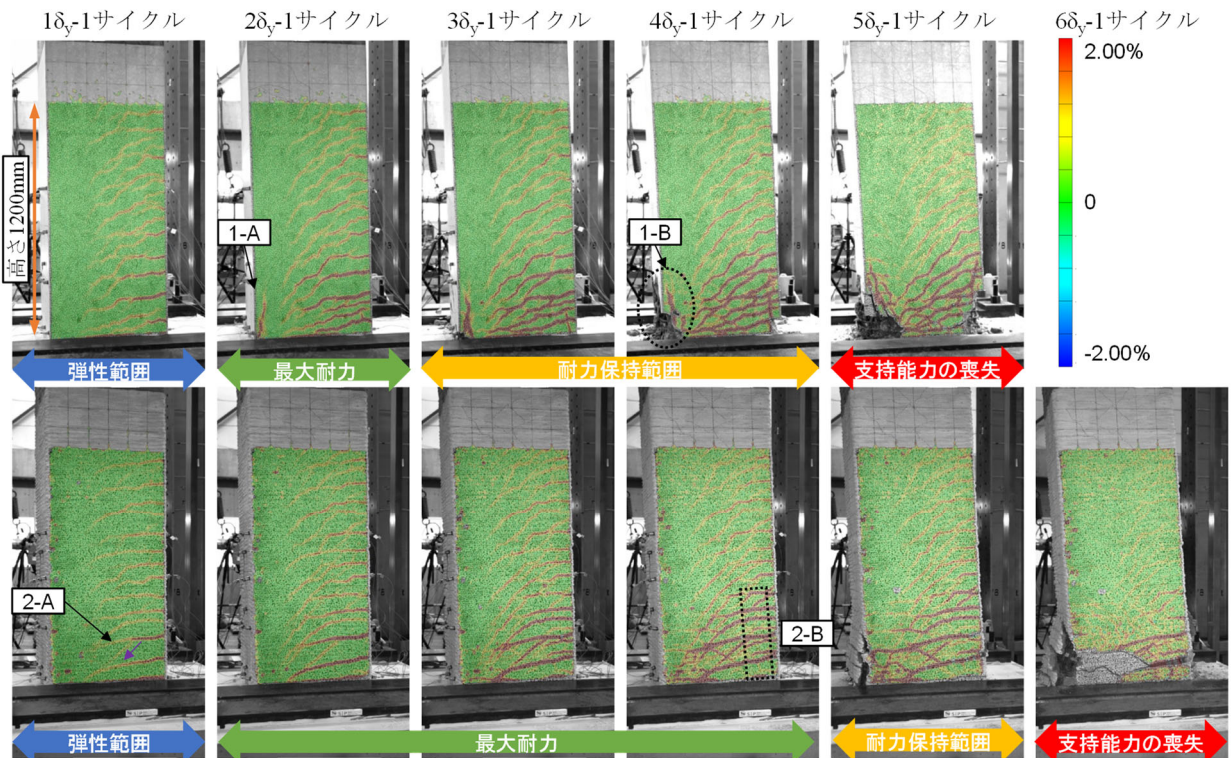


図-4 DIC 計測による最大主ひずみ分布 (上段: RCcase, 下段: 3DPcase)

Fig. 4 Maximum principal strain distribution

囲に発生・進展した。4 δ y では軸方向鉄筋の座屈に伴いかぶりコンクリートがはく落し（図-4 内、1-B）、2 サイクル目の載荷途中に軸方向鉄筋の破断を確認した。5 δ y でははく落・座屈がさらに進行した。

3.1.2 3DPcase

短繊維を 1.0Vol.% 添加した case2 は正負共に 4 δ y-1 サイクル目で最大荷重（+492kN, -467kN）を示した。その後は載荷の進行とともに荷重が低下し、5 δ y の繰返し載荷にて降伏荷重を下回り、5 δ y-2 サイクル目に最大水平耐力の 40% を下回ったため、6 δ y-1 サイクル目に加力を終了した。

ひび割れは 120kN で柱基部に曲げひび割れが発生した。1 δ y 時には斜めひび割れの発生が確認されたが、case1 のように曲げひび割れから斜め方向に進展するものではなく、曲げひび割れの途中から斜め方向に分岐するような進展（図-4 内、2-A）となっていることが確認され、これはせん断破壊する 3DCP-RC はりの試験⁴⁾と同様の事象である。斜めひび割れ幅は発生以降、基部を除いて拡大している様子は確認されていない。2 δ y, 3 δ y では基部のひび割れ幅の拡大を除いて外見上、損傷は進展していない。4 δ y では 1 サイクル目に圧縮縁にて縦ひび割れが発生し、2 サイクル目の正負で共に軸方向鉄筋の座屈と圧縮側全体のはらみ出しを確認した（写真-2）。5 δ y では 2 サイクル目に軸方向鉄筋の破断を確認し、同時に水平荷重が急激に減少した。

3.2 履歴吸収エネルギー

両ケースの履歴吸収エネルギーを図-5 に示す。1 サイクル目の履歴吸収エネルギーは両ケースで塑性率 3 まで線形に増加している。3DPcase では以降 4 δ y でも同等の増加を示したが、RCcase は 4 δ y-1 サイクル目時点で増加勾配が低下し、相対的に低いエネルギー吸収量となっている。その後 5 δ y-1 サイクル目からエネルギー吸収量が僅かに減少に転じている。3DPcase においても 5 δ y-1 サイクル目からエネルギー吸収量が減少しているが、吸収量は RCcase と比較して大きい値である。

基部の損傷状況の進展と履歴吸収エネルギーの変化を評価すると、エネルギー吸収量が低下に転じた時点で、すべてのケースで既に基部のはらみ出し・かぶりコンクリートのはく落が生じている。図-4 で示した通り 3DP 埋設型枠を有する 3DPcase は RCcase に比べて目視上の損傷は概ね塑性率 1 だけ遅く進展する。同様にエネルギー吸収量の低下も遅く進展しており、損傷の進展状況との対応は同等である。これより 3DP 柱も通常 RC 柱と同様に履歴吸収エネルギーの安定度と損傷状況を対応できることが確認された。

表-2 主要な損傷イベント

Table 2 Timing of main destruction	case1	case2
最大耐力[kN]	464	492
かぶりコンクリートのはく離	3 δ y-1c	4 δ y-2c
降伏荷重までの低下	4 δ y-2c	5 δ y-2c
軸方向鉄筋の破断	4 δ y-2c	5 δ y-2c

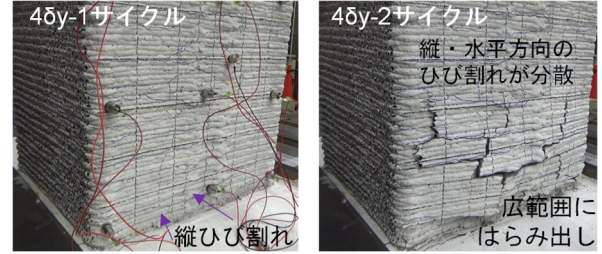


写真-2 3DPcase, 4 δ y での基部損傷

Photo.2 Damage of 3DP-column base at 4 δ y-cycle loading

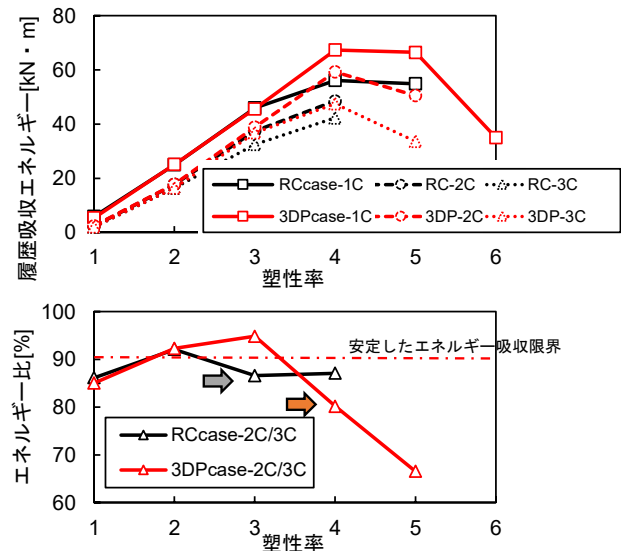


図-5 履歴吸収エネルギーとその比率

Fig. 5 Energy absorption and energy ratio on each ductility

3.3 3DP 埋設型枠が耐力・じん性に与える影響

今回の 3DPcase の結果を道路橋示方書⁷⁾に規定される限界状態と照らし合わせると、限界状態 1 は降伏までの弾性範囲で RCcase と同等、限界状態 2 および 3 は図-5 に示す履歴吸収エネルギー比と図-3 の降伏荷重の保持から 1 δ y のじん性向上と判断できる。

3DPcase が高い耐力・じん性を有しているが、これは 3DP 材料がコンクリートと比べ材料強度が高いこと、既往研究⁸⁾で確認されているコアコンクリートへの拘束効果と共に、軸方向鉄筋の座屈を抑える効果が働いたと考えられる。一方で 3DP の拘束力は塑性ヒンジ長には影響は与えなかった。これらコアコンクリートに与える拘束効果、鉄筋の座屈を抑制する効果に関しては、更なる部材実験や非線形有限要素法（以下、非線形 FEM と記す）などを活用して検討を進める。

4. FEM による再現解析

4.1 解析手法

4.1.1 RC 部のモデル化

解析手法には、アクティブク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^{9,10)}（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¹¹⁾、引張側構成則はゾーニング手法¹²⁾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イニング効果を考慮する RC 要素（引張軟化特性を表す係数 $C=0.4$ ）、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¹⁰⁾としている。用いた構成則を図-6 に示す。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 Dhakal & Maekawa モデル¹³⁾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¹⁴⁾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⁹⁾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载荷試験を再現している。解析に用いたメッシュを図-7 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（詳細は次項）としている。

4.1.2 3DP 部のモデル化

前章で示した通り、本研究で用いた 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-8 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。外殻の周方向は高い破壊エネルギーを考慮し

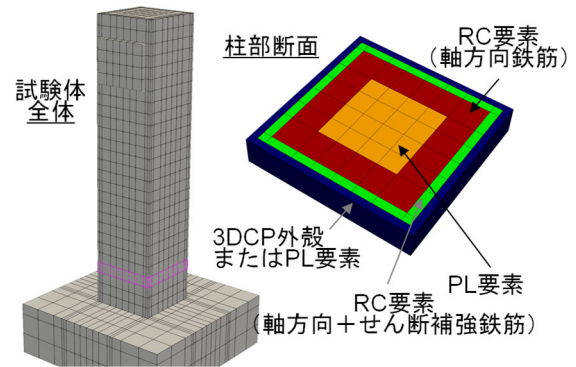


図-7 FE モデルと断面要素分割
Fig. 7 Finite element model and meshing

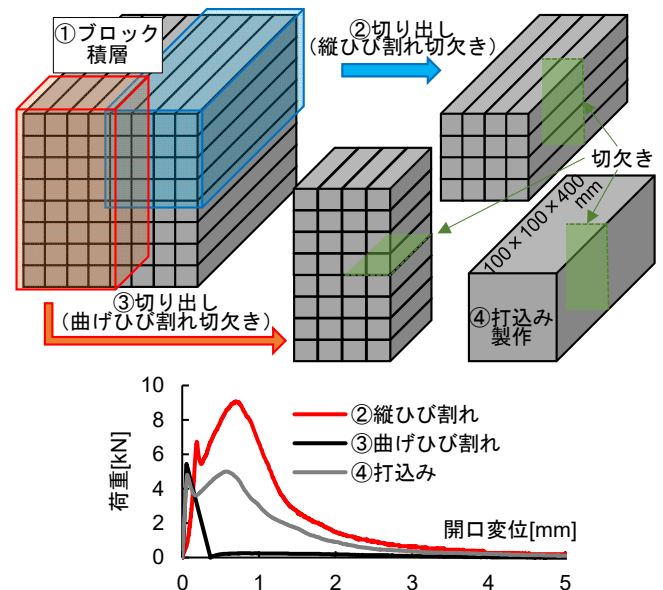


図-8 3DP による異方性を確認する切欠き曲げ試験
Fig. 8 Notch bend tests for 3DP orientation

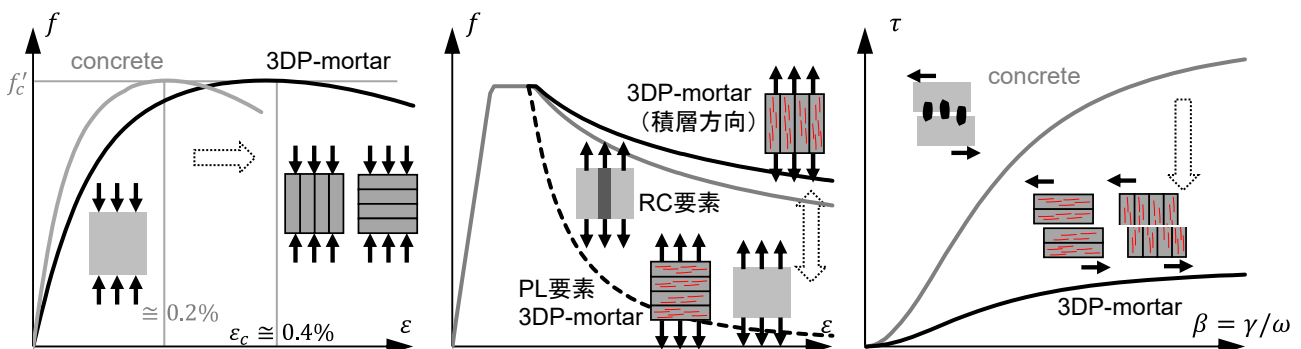


図-6 コンクリート・3DP モルタル構成則（左：圧縮，中：引張，右：せん断伝達）

Fig. 6 Constitutive models of concrete and 3DP mortar

RC 要素と同様の軟化勾配, 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 とすることで剛性の低減を考慮した。

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 $0.2\sim0.5$ 程度の低減係数を乗じる手法が提案^{15,16)}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に近い PVA-ECC モデル¹⁶⁾を参考に低減係数を 0.25 とした。以上の 3DP の構成則を図-6 に併せて示す。

4.2 解析結果

4.2.1 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-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。

RCcase 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。

3DPcase 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 3DP 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, RCcase 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¹⁷⁾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 段階で打込みため, 再現性をより高めるためには打ち継ぎを考慮

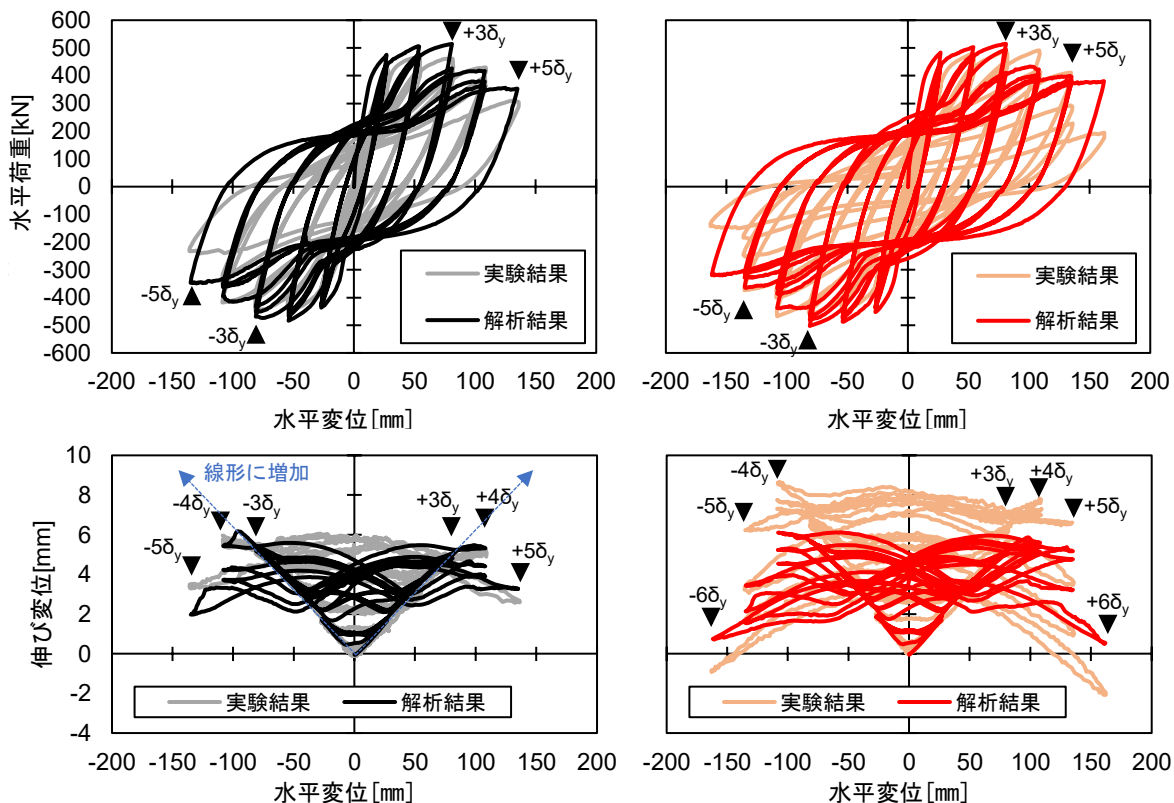


図-9 解析結果: 荷重-変位関係および鉛直伸び変位-水平変位関係 (左: RCcase, 右: 3DPcase)

Fig. 9 FEM result load-displacement relationships and elongation-displacement relationships

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。

4.2.2 ひずみに基づく 3DP の座屈抑止効果の検証

座屈が生じる前後である 3~6δy 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。

RC においては 3δy 時に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 3δy 時には縦ひび割れが生じている。また解析では 4δy 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。

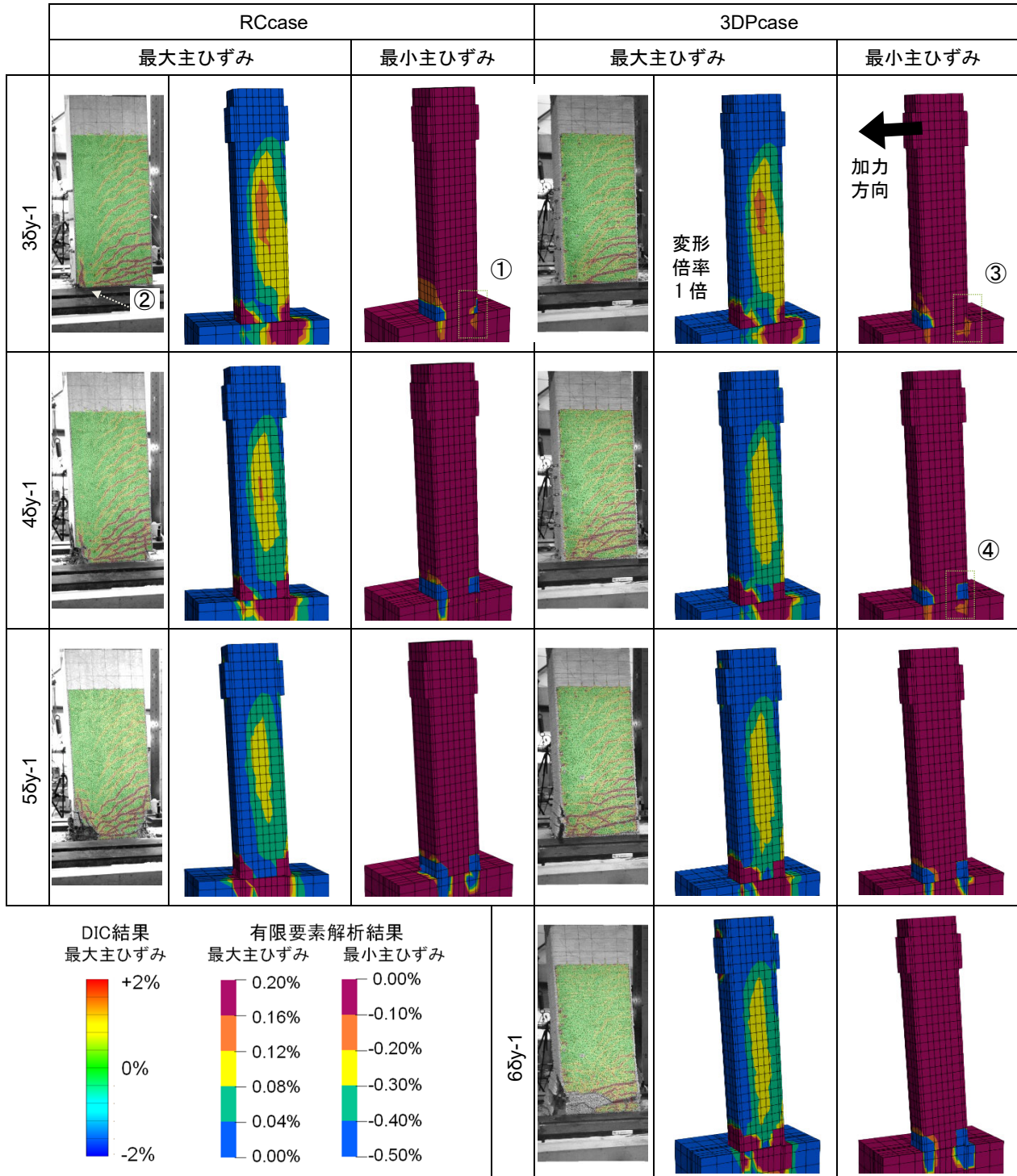


図-10 解析結果：（左：DIC 最大主ひずみ分布，中：FEM 最大主ひずみ分布，右：FEM 最大主ひずみ分布）

Fig. 10 FEM result maximum and minimum principal strain distribution

参考文献

3DPcase 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。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、3DP はその変形を押さえつけ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なく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。

5. まとめ

ロボットアームにより可能となる鉄筋回避工法により製作した 3DP 埋設型枠を有する柱の正負交番載荷試験およびその再現解析により得られた知見をまとめる。

- ✓ 短繊維 1.0Vol.%以上を添加するモルタルを用いて 3D プリント製作した 3DP 柱は、従来工法で施工した通常 RC 柱と比較して高い水平耐力と変形性能を有することを確認した。
- ✓ 3DP 柱の損傷と履歴吸収エネルギーの関係は従来の RC 構造と同様の傾向であり、実験に基づき適切に限界状態を判断することができる。
- ✓ 3DP 材料である短繊維補強モルタルのモデル化として、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 3DP 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。

T-3DP の更なる展開・実用に向け、様々な構造形式に対して、実験および数値解析に基づき適切な性能評価を実施し、建設現場の生産性向上に貢献していく。

謝辞

本論文内の実験は内閣府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）にて実施した内容である。実験の評価および解析において東京大学石田哲也教授、大野元寛特任講師に多大なご助言をいただいた。ここに謝意を表す。

- 1) 村田哲, 木ノ村幸士, 小尾博俊, 山本悠人: 3D プリンタ技術を活用した新たなコンクリート施工法の開発と展望, 大成建設技術センター報, 第 51 号, 23, 2018.
- 2) 田中俊成, 臼井達哉, 古賀快尚, 宮本真吾, 木ノ村幸士: 不陸な地盤面上での 3D プリンティング技術の開発と検証, 大成建設技術センター報, 第 56 号, 16, 2023.
- 3) 木ノ村幸士, 村田哲, 田中俊成ら: 環境配慮 3D プリンティング配合を用いた多孔質柱の製作と実適用, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V-462, 2024.9
- 4) 山本悠人, 木ノ村幸士, 村田哲: 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, 大成建設技術センター報, 第 57 号, 30, 2024.
- 5) 木ノ村幸士: 建設 3D プリンティング技術の高度化と適用拡大, 電力土木, No.433, pp67-69, 2024.
- 6) 山本悠人, 村田裕志, 河村圭亮, 氏家大介: 部材損傷評価における画像解析システムの適用, 大成建設技術センター報, 第 52 号, 28, 2019.
- 7) 日本道路協会: 平成 29 年制定道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 牧剛史, 土屋智史, 齊藤成彦, 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