

挿入補強材の付着特性を考慮した 3DCP 積層体の の曲げ挙動予測モデルの開発

DEVELOPMENT OF A PREDICTION MODEL FOR BENDING BEHAVIOR OF 3DCP LAMINATES CONSIDERING ADHESION CHARACTERISTICS OF INSERTION REINFORCEMENT

小林 紀行
Noriyuki KOBAYASHI

A reinforcement method for 3D concrete printing (3DCP) involving the vertical insertion of reinforcement materials between layers has been proposed. However, weak adhesion between the reinforcement and mortar limits the improvement in bending performance, and the underlying mechanism remains primarily experimentally studied. To quantitatively assess the enhancement of strength and rigidity and to design optimal reinforcement configurations, a theoretical analysis was conducted to predict deformation and failure behavior. By modeling the relationship between pull-out load and slip displacement based on frictional adhesion strength from pull-out tests, bending behavior was analyzed using a fiber model.

Keywords : 3D concrete printer, Interlayer reinforcement, Adhesion characteristics, Bridging model, Fiber model
建設用コンクリート 3D プリンタ, 層間補強, 付着特性, 架橋モデル, ファイバーモデル

1. はじめに

近年、国内の建設業は少子高齢化に起因する就業者数の減少を背景に、建設現場における人材不足が深刻化しており、極めて厳しい状況に直面している。建設用コンクリート 3D プリンタ (以下、3DCP) は、型枠を必要としない施工が可能であり、生産性向上に寄与できるほか、造形の自由度向上や使用材料の減少などの利点がある¹⁾。

一方で、一層ずつ積層を繰り返す造形方式による積層体には、層間に不連続が生じ、力学的な弱点となる²⁾。従来の RC 工法と同じように事前に鉄筋を配筋し補強を行うことが難しいため、層間の弱点を補うための補強方法の開発が求められている。これまで補強方法として、層間にワイヤーを配置する方法³⁾やメッシュを敷く方法⁴⁾などが提案されているが、これらは補強材の配置に手作業が必要とし、3DCP の特長である造形の自由度を制限することに加え、省人化を生かしきれていない。また、国内における 3DCP の適用事例においては、ほとんどが埋設型枠としての利用にとどまっているのが現状である。これらの事例では、補強のため事前に内部に鉄筋を配置したり、繊維補強セメント系複合材料を充填したりする工程が必要であり、依然として現場作業が多いという課題がある。

そこで、自由な造形と省人化を両立した層間補強方法として、補強材を積層体の表面から垂直に挿入を行う「補強材挿入システム」を開発し、力学特性の向上について検討を行ってきた⁵⁾。この方法では、補強材の挿入機構を 3DCP のノズルに後付けで設置し、積層と挿入のサイクルを繰り返すことで積層プロセスと並行して積層体を自動で造形することができる。ピン形状の補強材 (以下、ピン補強材) を挿入した試験体について曲げ試験を実施した結果、補強材

を挿入した試験体は無補強の試験体と比較して靱性が大幅に向上することを確認した⁶⁾。しかし、補強材には表面が平滑なピン補強材を使用していたため、積層材料であるモルタルとの付着が弱く、曲げ応力の向上は限定的であった。また、補強材の挿入による曲げ性能の向上メカニズムについては実験的検討のみに留まっていた。補強材による強度や剛性の向上を定量的に評価し、最適な配置を設計するためには、変形や破壊挙動を予測する理論的検討を行う必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では補強材の付着特性に着目して、補強材を挿入した 3DCP 積層体の曲げ挙動を予測するモデルを開発することを目的とする。まず、補強材の付着力向上を目的に、ねじ形状の補強材 (以下、ねじ補強材) の検討とその挿入機構の開発を行う。次に、実構造部材への適用を想定し、補強材を千鳥状に挿入した 2 種類の積層体 (H 型梁試験体、および、矩形梁試験体) の作製を行い、曲げ試験を実施する。最後に、ピン補強材の引抜試験結果をもとに、付着すべりを考慮した補強材架橋モデルを開発し、H 型梁試験体を解析対象として曲げ変形解析を実施する。さらに、解析結果と実際の力学試験の結果を比較することで解析の妥当性を検討する。

2. 補強材の付着特性向上に関する実験的検討

ねじ補強材を積層体に対し垂直挿入可能な挿入機構を開発し、それを用いて積層体への挿入試験を実施した。補強材を挿入した積層体から試験体を切り出し、力学試験を実施することで、補強効果について検証を行った。

2.1 使用材料・補強材挿入機構

積層材料には、積層実績のあるプレミックスモルタルを水添加率14.75%で用いた。補強材には、ピン形状とねじ形状の異なる2種の補強材を用いた。ピン補強材は表面が平滑なものと表面をヤスリで円周方向に粗く加工したもの（以下、SPおよびRP）の2種を使用した。ねじ補強材は、積層モルタルとの付着向上を期待して採用した。ねじ補強材を挿入するための新たな方式として、図1に示すねじ挿入機構⁷⁾を開発した。

2.2 補強材挿入試験

開発したねじ挿入機構とピン挿入機構^{6), 8)}を用いて、簡易的に作製した積層体に対して挿入試験を実施した。挿入後の積層体は硬化後に引抜試験に用いる試験体と曲げ試験に用いる試験体に切り出した。

2.3 引抜試験

試験体は、挿入深さが25mmとなるように補強材を垂直挿入した積層体から60×60×40mmの角柱形状に切り出して作製した。試験は、試験体を固定用の金属板で挟んで固定し、補強材を鉛直方向に2.0mm/minで引抜き、荷重および変位を測定した。図2に、引抜試験の結果から算出した摩擦付着強度の比較を示す。摩擦付着強度は、ねじがSPの6倍となり、ねじのふしの凹凸による機械的かみ合いが、付着向上に有効であることが確認できた。

2.4 小型試験体の曲げ試験

40×40×160mmの角柱の試験体に対して、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」を参考に、3点曲げ試験を行った。曲げ試験の結果を図3に示す。図3より、ねじ補強材はSPに比べ、曲げ強度および靱性が向上することが確認された。一方で、ねじの頭部でせん断破壊を生じる試験体が生じた。これは、ねじの頭部の径が他のふしの径に比べて大きく、ねじの頭部の周囲に応力集中が発生したことが原因と考えられる。

3. 梁試験体による補強効果の検証

単一の補強材を用いた小型試験体で確認されている補強効果を、複数の補強材を配置した積層体に拡張し、その有効性を検証した。実際の構造部材を想定したH型断面および矩形断面を有する2種類の梁試験体（H型梁試験体および矩形梁試験体）を作製し、曲げ試験を実施することで、補強材の有無および補強材種類による補強効果を比較した。表1に実験のパラメータを示す。

3.1 H型梁試験体・矩形梁試験体の作製

図4に、H型梁試験体および矩形梁試験体を示す。H型梁試験体は、断面寸法は高さ200mm、幅300mm、ウェブ幅70mm、フランジ幅70mmで、積層高さは897mm（積層数69）とした。ピン補強材を挿入したH-SPと無補強のH-Nを各2体ずつ作製した。矩形梁試験体は、断面寸法が高さ150mm、幅150mmの正方形断面で、積層高さは504mm（積層数42）とし、SP、RP、ねじ補強材（S）を挿入した試験体および無補強の試験体を計6体作製した。補強材は積層中に千鳥状に配置し、補強材の断面積比を1%に統一することで、補強効果を比較した。作製後は気中養生とし、硬化後に試験体を整

表1 梁試験体の実験パラメータ

試験体の種類	シリーズ名	補強材の種類	補強材の本数[本]	材齢[日]	梁全長[mm]	試験スパン[mm]
H型梁試験体	H-SP-1	SP	480	28	897	750
	H-SP-2		480	91		
	H-N-1	無し	0	28		
	H-N-2		0	91		
矩形梁試験体	R-SP-1	SP	72	56	504	450
	R-RP-1	RP				
	R-S-1	S	81			
	R-S-2					
	R-N-1	無し	0			
	R-N-2					

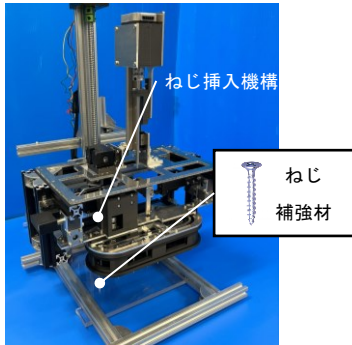


図1 ねじ挿入機構⁷⁾

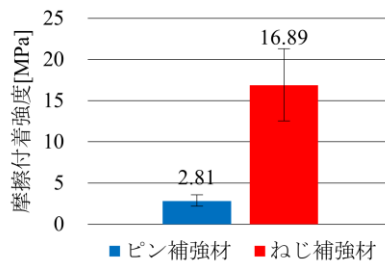


図2 引抜試験結果

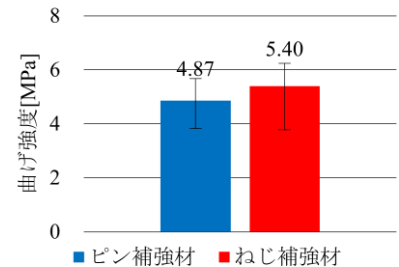


図3 曲げ試験結果

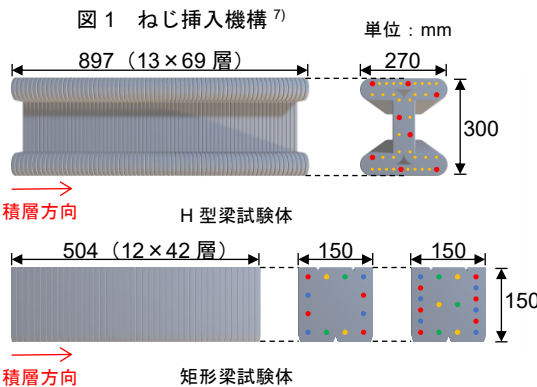


図4 H型梁試験体・矩形梁試験体

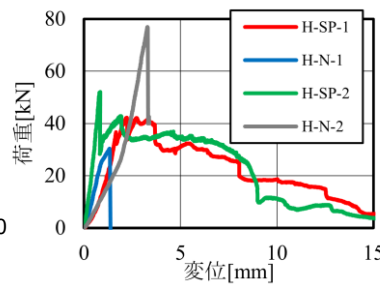


図5 H型梁曲げ試験結果

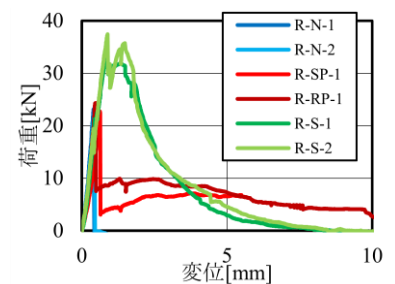


図6 矩形梁曲げ試験結果

形した。

3.2 H型梁試験体・矩形梁試験体の曲げ試験

作製したH型梁試験体および矩形梁試験体に対し4点曲げ試験を実施し、補強効果を評価した。試験はアムスラー万能試験機（最大荷重 1000 kN）を用い、支点間距離はH型梁試験体が750 mm、矩形梁試験体が450 mmで行った。載荷速度は0.3 mm/minとし、中央および各応力部にLVDTおよびひずみゲージを配置し、たわみおよびひずみを測定した。図5、図6に曲げ試験の結果を示す。H型梁試験体では、SPを挿入した試験体が無補強の試験体に比べて曲げ強度が約75%向上した。無補強の試験体は脆性的に破壊するのにに対し、SPを挿入した試験体は靱性的な破壊挙動を示し、ひび割れの拡大が抑制された。補強材を千鳥状に配置し、各層をずらすことで補強材同士の干渉を最小限に抑えつつ、応力を広範囲にわたって均一分散させることが可能となったと考えられる。矩形梁試験体では、ピン補強材の表面性状の違いおよびねじ補強材の効果を比較した。ピン補強材同士では、表面を粗くすることで靱性の向上を確認した。ねじ補強材とピン補強材との比較では、ねじの方が高い補強効果が確認された。補強効果をさらに向上させるためには、ねじ形状の最適化や適切な配置計画の検討が重要であると考えられる。

4. 付着すべり考慮したファイバーモデルによる曲げ解析

補強材を挿入した3DCP積層体の曲げ挙動を予測するためには、補強材が引張力を負担する際の付着特性を正確に評価する必要がある。図7に、ピン補強材の拔出挙動の模式図を示す。曲げ荷重に対しては、引張側の補強材には積層モルタルとの付着を介して引張力が作用し、補強材と積層モルタルの界面で付着すべりが生じる⁹⁾。この付着すべり挙動について引抜試験を実施することで、補強材の拔出挙動から補強材架橋モデルを構築した。H型梁試験体を対象として、SPの架橋モデルを用いたファイバーモデル¹⁰⁾による断面解析を実施することで、曲げ性能の評価を行った。

4.1 架橋モデルの構築

RC工法の解析では通常、鉄筋とコンクリートの結合が完全であ

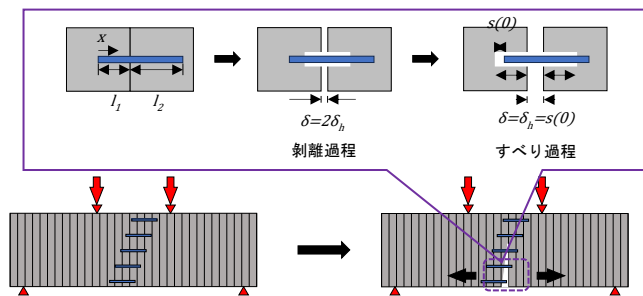


図7 ピン補強材の拔出挙動

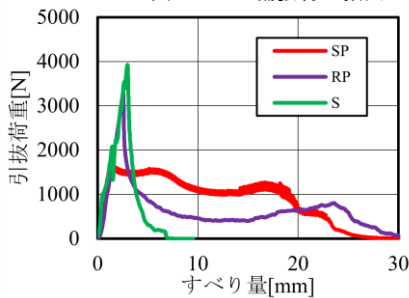


図8 引抜荷重とすべり量の関係

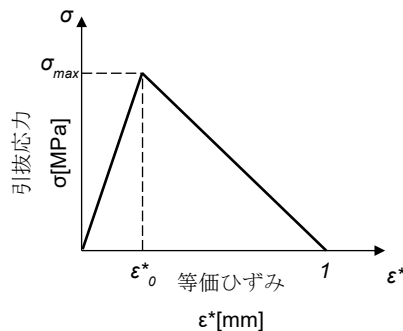


図9 ピン補強材の架橋モデル

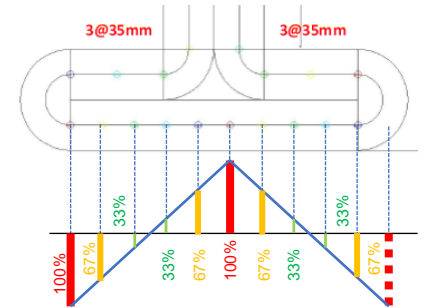


図10 H型梁試験体の引張側の断面図

る、すなわち、コンクリートと鉄筋のひずみが等しいと仮定している¹⁰⁾。しかしながら、本研究で用いた補強材は付着長さが100 mm以下と非常に短いため、補強材が降伏に至る前にひび割れ面から完全に引抜かれる。そのため、付着すべりの影響が大きく、補強材と積層モルタルでは異なるひずみが発生する。そこで、付着すべりを考慮した補強材の応力-ひずみ関係を構築することを試みた。まず、引抜試験を実施し、付着応力とすべり量の関係を明らかにした。図8に、引抜試験の結果を示す。ピン補強材は、SPは引抜荷重が平均で1653 N、RPは平均で3329 Nまでほぼ直線的に増加した後、埋込み長さの30 mmまで緩やかに荷重が低下する挙動が見られた。

次に、補強材と積層モルタルの間の付着特性を引抜試験の結果をもとにモデル化を行った。補強材の引張側の構成則に補強材の付着すべりの影響を考慮するため、補強材の変形によるひずみと付着すべりによるひずみを合わせた等価ひずみ ϵ^* を(1)式により求めた¹¹⁾。

$$\epsilon^* = \frac{Slip}{l_1} + \frac{P}{E \cdot A_p} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (1)$$

ここで、第1項の ϵ_1 は付着すべりによるひずみ、第2項の ϵ_2 は弾性変形の伸びによるひずみを表す。

この等価ひずみ ϵ^* を用いて、補強材が負担する引張応力と等価ひずみの関係について、線形的に荷重が増加し引抜荷重が最大となった後、補強材の拔出に伴って徐々に荷重が減少していくという挙動を簡易に表現するため、(2)式のバイリニアモデルを採用した。図9にピン補強材の架橋モデルの模式図を示す。

$$\sigma(\epsilon^*) = \begin{cases} \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_0^*} \cdot \epsilon^*, & \epsilon^* \leq \epsilon_0^* \\ \sigma_{max} - \frac{\sigma_{max}}{1 - \epsilon_0^*} \cdot (\epsilon^* - \epsilon_0^*), & \epsilon_0^* < \epsilon^* \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 σ_{max} : 最大引抜応力[MPa]、 ϵ_0^* : σ_{max} 時の等価ひずみ[-]

4.2 ファイバーモデルによるH型梁試験体の曲げ変形解析

ファイバーモデルでは、梁の断面を多数の細かいファイバー要素に分割し、各要素に対応する材料特性を割り当てることで非線形解析を行った。本研究では以下の流れに沿って解析を行った。まず、積層モルタルと補強材の材料特性を設定した。モルタルおよび補強材の降伏強度および塑性挙動などの材料特性を反映させるため、各材料に対して構成則を設定した。ここで、補強材の引張側の架橋則に(2)式の架橋モデルを用いることで付着すべりを反映させた。次に、解析対象となるH型梁試験体の断面諸元について、梁断面の形状寸法、補強材の圧縮縁からの距離 y_i および総断面積 A_{st} を定義した。図4で示す積層体について、特定の積層界面に着目すると、埋込み長さは補強材の両端から界面までの距離 l となる。そのうち短い方を l_1

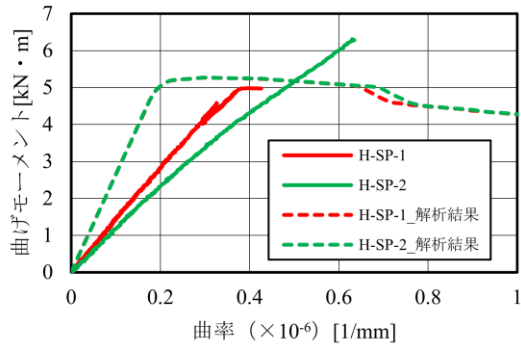


図 11 曲げモーメントと曲率の関係

と定義すると、補強材の挿入位置により l_1 は異なる値をとり、最大で 30 mm となる。補強材が実際に負担する引張力は l_1 に依存するため、 l_1 のばらつきを平均化して一様に扱うため、基準値として 30 mm を設定して、補正係数 ψ を導入した。 ψ は、各補強材の l_1 と 30 mm の割合の平均値として表現され、(3)式により求められる。図 10 には H 型梁試験体の引張側の断面図を示しており、 ψ を適用することで断面の性能を統一的に評価した。

$$\psi = N \cdot \sum_{k=1}^N \frac{l_{1,k}}{30} = 10 \cdot \frac{30 \times 2 + 20 \times 4 + 10 \times 4}{30} = 60\% \quad (3)$$

ここで、 N : 圧縮縁からの距離 y_i に位置する補強材の本数[本]、 $l_{1,k}$: k 番目に位置する補強材の l_1 [mm]、 A'_{st} : 有効断面積[mm²]、 A_{st} : 圧縮縁からの距離 y_i に位置する補強材の総断面積[mm²]

H 型梁試験体では、断面を 3 つの矩形に近似して分割し、さらに各矩形を断面高さ方向に 200 要素に分割し、補強材の圧縮縁からの距離 y_i と有効断面積 A'_{st} を入力した。次に、材料特性から許容される最大・最小の軸力を決定し、最大曲率と最小曲率を 500 回の反復計算により求めた。設定した曲率範囲内で各段階における曲率と曲げモーメントを計算した。なお、解析プログラムには、Fantilli ら¹²⁾の Excel マクロを用いた。

図 11 に、H 型梁試験体の解析により得られた曲げモーメントと曲率の関係と実験結果との比較を示す。最大曲げモーメントは実験値の平均が 5.59 kN·m、解析値は 5.27 kN·m と精度良く求めることが可能であった。しかしながら、解析値は実験値よりも剛性を過大評価するという結果になった。これは、本解析では積層モルタルの引張強度を均一に 1 MPa と仮定して計算を行ったが、実際の積層体では、層間の付着強度が場所により少しずつ異なっており、局所的な欠陥などを考慮できていないことが原因だと考えられる。

続いて、解析結果の曲げモーメントと曲率の関係をトリリニアに近似し簡素化することで、H 型梁試験体の荷重と変位の関係を求めた。図 12 に、実験結果との比較を示す。最大荷重を比較すると、実験値の平均は 47.1 kN、解析値は 42.1 kN となり、誤差は 10.6% と比較的精度よく一致した。また、補強材の引抜けに伴う、靱性挙動も解析によって最大荷重をある程度予測可能であることが示された。

これらの結果から、補強材の引抜試験の結果をもとに、積層モルタルとの付着性状を評価することで、補強材を挿入した 3DCP 積層体の曲げ変形挙動が予測可能であることが示された。さらに、引抜試験結果に基づく架橋モデルの妥当性が裏付けられる結果となり、今後の補強材の挿入本数や配置計画の検討に寄与することが示され

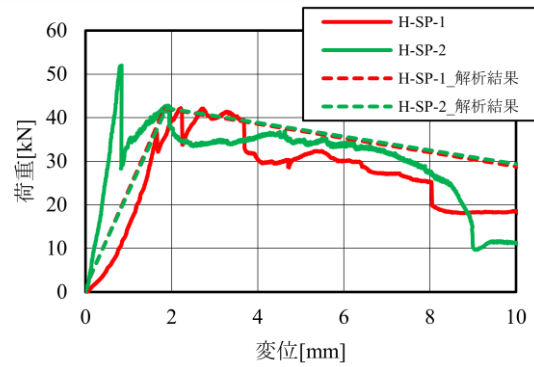


図 12 荷重と変位の関係

た。本研究の解析では、ピン補強材のみを対象としたが、ねじ補強材についても機械的なかみ合いを考慮した構成則を作成することで、モデルの適用範囲を拡大可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、補強材を挿入した 3DCP 積層体について、補強材の付着特性をもとに曲げ挙動を予測するモデルの開発を試みた。以下に得られた知見を示す。

- 1) ねじ補強材を挿入可能な機構を開発し、3DCP に設置した。ねじ補強材は機械的なかみ合いによりピン補強材よりも高い付着力を有しており、積層体の曲げ性能を大きく向上することができた。
- 2) ピン補強材の引抜試験をもとに付着すべりを考慮した補強材架橋モデルを構築した。H 型梁試験体を対象に、ファイバーモデルによる解析に適用することで、曲げ強度および変形性能を概ね予測可能であることが示された。

参考文献

- 1) 石田哲也, 木ノ村幸士: 3D プリンティング技術がもたらす建設産業へのインパクト, Vol. 59, p. 173-180, 2021
- 2) T. Wangler, N. Roussel, F. P. Bos, T. A. M. Salet, and R. J. Flatt: Digital Concrete: A Review, Elsevier Ltd, Vol. 123, pp. 1-17, 2019
- 3) Bos F.P., Ahmed Z.Y., Jutinov E.R. Salet. T.A.M.: Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete, *Materials*, 10(11): 1314, 2017
- 4) Marchment T., Sanjayan J.: Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing, *Automation in Construction*, 109, 102992, 2020
- 5) T. Nishiwaki, Y. Miyata, S. Furue, S. Fukatsu, and H. Kajita: REINFORCING THE INTERLAYERS OF 3D-PRINTED MORTAR USING METAL FIBER INSERTION, *ACI Material Journal*, Vol. 118, pp. 331-340, 2021
- 6) 浅川智哉ら: 建設用コンクリート 3D プリンタに適用可能な自動補強材挿入機構の開発及び評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 45, pp. 1642-1647, 2023
- 7) 江川諒ら: 建設用 3D コンクリートプリンタにおける高い補強効果と挿入力を持つねじ形状補強材挿入機構の開発, 第 22 回建設ロボットシンポジウム, O3-3, 2024
- 8) 江川諒ら: 補強材自動挿入機能を持った 3DCP による人が利用可能な曲面を持つ家具の造形, 第 21 回建設ロボットシンポジウム, P1-6, 2023
- 9) Victor C Li: Reinforced Concrete Fiber Beam Element with Bond-Slip, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 6, 2000
- 10) 楠原文雄ら: 境界条件を考慮した合成スラブに関する研究 その 3: 付着すべりを考慮したファイバーモデルによる長期たわみ解析, *日本建築学会大会学術講演集 (関東)*, pp. 205-206, 2000
- 11) Monti. M., Spacone, E.: Reinforced concrete fiber beam element with bond-slip, Vol. 126, No. 6, pp. 654-661, 2000
- 12) Fantilli, A. P. et.al: The deflection of reinforced concrete beams containing recycled steel fibers, *Structural Concrete*, pp. 2089-2104, 2021