

3D プリンタおよび吹付ロボットで製造した RC 構造の載荷実験

(株) 大林組 正会員 ○北村勇斗
(株) 大林組 正会員 石関嘉一
(株) 大林組 正会員 沼崎孝義

(株) 大林組 正会員 武田篤史
(株) 大林組 非会員 坂上 肇
デンカ (株) 正会員 荒木昭俊

1. はじめに

生産性向上および多彩な意匠の実現を目的として、3D プリンタで製造したモルタル造埋設型枠を用いた吹付コンクリートによる RC 構造を考案した。既発表では人力で上向きに吹付けたときの構造性能を確認し、構造物としての成立性を確認したり。本稿では、ロボットで水平方向に吹付けた RC 構造の載荷実験について示す。

2. 実験方法

2.1 試験体構造 試験体の配筋は、曲げ破壊型試験体とせん断破壊型の 2 種類とし、埋設型枠～吹付コンクリート間の処理方法、載荷方向および載荷方向をパラメーターとした。図-1 に試験体の諸元を、表-1 に実験パラメーターを示す。

2.2 3D プリンタによるモルタル造埋設型枠 埋設型枠は、文献 2)の方法により、断面が層となる方向に積層して作製した。モルタル材料には、ポルトランドセメント、細骨材、硬化促進剤、チキソ性調整剤、有機繊維を混合したプレミックス材料を用いた。

2.3 吹付コンクリート 埋設型枠に鉄筋を固定したのち、部材軸が鉛直になるように配置して水平方向からロボットによるコンクリート吹付を行った。吹付方法は乾式とし、生コンクリートプラントで空練りしたコンクリートを用いた。施工は、ロボットアーム先端に吹付ノズルを装着し、事前のティーチングにより吹付範囲を指定した。吹付状況を図-2 に示す。

2.4 材料特性 鉄筋等鋼材の引張試験結果を表-2 に、3D プリンタ用モルタルおよび吹付コンクリートの強度試験結果を表-3 に示す。

2.5 載荷方法 図-1 に示すように、単純梁の 1 点載荷とした。載荷履歴は、いずれの試験体も一方向単調載荷とした。

3. 計算値

3.1 曲げ試験体 ファイバーモデルにより吹付けコンクリートおよび埋設型枠のモルタルが一体化されていると仮定して計算した。材料定数は材料試験結果を基本としたが、吹付コンクリートの引張強度は既往の研究 3) に示される異方性を考慮し表-2 より低い 2.0N/mm² とし、埋設型枠モルタルの引張強度は成型時の層間の強度が期待できないことから 0 とした。コンクリート・モルタルの圧縮構成則は、圧縮強度までを修正 Ahmad モデル、圧縮強度後は軟化しないフラットモデルとした。鉄筋は完全弾塑性型とした。

3.2 せん断試験体 吹付けコンクリートおよび埋設型枠モルタル

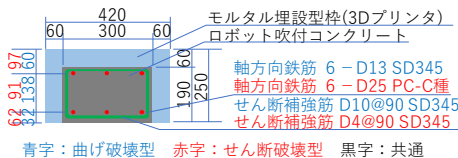


図-1 試験体構造諸元

表-1 試験体パラメーター

試験体 No.	破壊モード	載荷方向※1	吹付～型枠界面	a/d※2	配筋
1	曲げ	A	無処理	2.29	軸方向鉄筋: 6-D13 SD345 せん断補強筋: 2-D10@90 SD345
2			プライマー		
3			アンカーボルト※2		
4		B		2.63	
5	せん断	A	無処理	2.65	軸方向鉄筋: 6-D25 異形PC-C種 せん断補強筋: 2-D4@90
6		B		3.28	

※1 載荷方向A: 吹付引張, 載荷方向B: 吹付圧縮
※2 a: せん断スパン, d: 埋設型枠を含む有効高さ
※3 4-M10@90, ボルト頭をコアコンクリートに定着



図-2 吹付状況

表-2 鋼材引張試験結果

試験体 No.		径	規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
1~4	軸方向鉄筋	D13	SD345	360*	543	197
	せん断補強筋	D10		362	592	193
3	アンカーボルト	M10	8.8	840*	1079	201
5,6	軸方向鉄筋	D25	SBPD 1080/1230	—※1	—※1	204
	せん断補強筋	D4	SD345	401	556	194

*0.2%オフセット強度
※1 ヤング係数の計測のみ実施

表-3 セメント系材料圧縮試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張割裂強度 (N/mm ²)
3Dプリンタ埋設型枠	65.3	20.6	4.8
吹付コンクリート	63.7	26.4	—

キーワード 吹付コンクリート, 3D プリンタ, 埋設型枠, 吹付ロボット, 梁曲げせん断実験
連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株) 大林組技術研究所 TEL042-495-1013

が一体化されているとした場合(V₁), および吹付コンクリートのみで抵抗する場合(V₂)の2通りを想定して, 二羽式⁴⁾により算定した。

4. 実験結果

4.1 曲げ破壊型試験体 荷重—変位関係を図-3, 4に示す。いずれの試験体も, 曲げ挙動を示した。降伏以降まで吹付けコンクリートおよび埋設型枠のモルタルが一体化されて挙動しており, おおむねファイバーモデルの計算値と同様となった。過年度の実験¹⁾において, 吹付けコンクリートと埋設型枠のモルタルが分離して挙動したため, 埋設型枠～吹付コンクリート間の処理をパラメーターとしてNo.1～No.3の試験体を設定したが, その差はほとんどなかった。過年度の実験より本実験のほうが界面での滑りせん断応力が大きいにも関わらず一体性を保てたのは, 吹付方向の差(過年度=上向き, 本実験=水平)やロボット施工とした点の影響が出たものと考えられる。なお, アンカーボルトによって一体性を高めた試験体のみ剛性および耐力が若干低いのは, 過密なアンカーボルトが吹付コンクリートの充填性に影響したためと考えられる。

4.2 せん断破壊型試験体 荷重—変位関係を図-5, 6に示す。いずれもせん断破壊によって耐力が低下した。ただし, No.5試験体は, 変位7mm程度でせん断破壊したものの, 太い軸方向鉄筋のダウエル作用によって荷重が再度上昇した。計算値と比較すると, いずれの試験体も, 埋設型枠のモルタルが一体化されているとした場合(V₁)よりも吹付コンクリートのみで抵抗している場合(V₂)の方が整合した。破壊形態においても, 埋設型枠と吹付コンクリートの剥離は観察されており, 実質的に吹付コンクリートのみが抵抗したものと考えられる。曲げ破壊型試験体においては埋設型枠と吹付コンクリートの一体化が図れたのに対して, せん断破壊型試験体で剥離したのは, 1)界面のせん断応力レベルが高い。2)せん断試験体は軸方向鉄筋が太く, 吹付コンクリートの充填性に影響した。という2つの理由が考えられる。

5. まとめ

3Dプリンタで製造したモルタル造埋設型枠に対して, ロボットによりコンクリート吹付を行ったRC試験体の載荷実験を行い, 以下の知見を得た。1)曲げ破壊型試験体は, 埋設型枠を含めてファイバーモデルによりシミュレートすることができた。2)せん断破壊型試験体については, 吹付コンクリートのみに対する計算値と同等のせん断耐力となった。3)ロボット施工とすることで, 充填性が向上する可能性がある。

参考文献 1)武田篤史他：3Dプリンタによるモルタル造埋設型枠を用いた吹付コンクリート構造の基本性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42-2, pp.1261-1266, 2020。 2)平田隆祥他：モルタル積層による3Dプリンター(AM法)を用いた建設部材の製造について, 第73回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-286, pp.571-572, 2018。 3)井上寛美他：覆工としての吹付けコンクリートの強度特性と耐久性に関する研究, 土木学会論文集, 第391号/VI-8, pp.46-55, 1988。 4)二羽淳一郎他：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, No.372/V-5, pp.165-175, 1986。

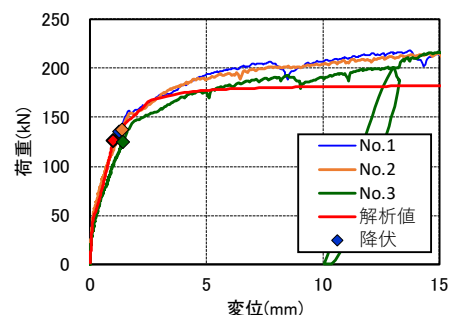


図-3 荷重—変位関係 (No. 1～3)

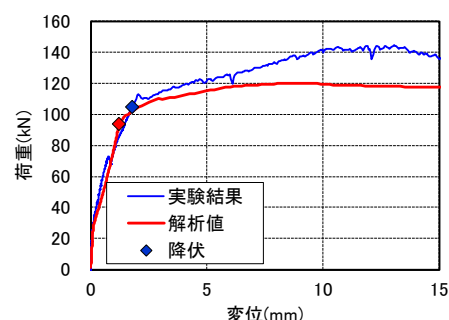


図-4 荷重—変位関係 (No. 4)

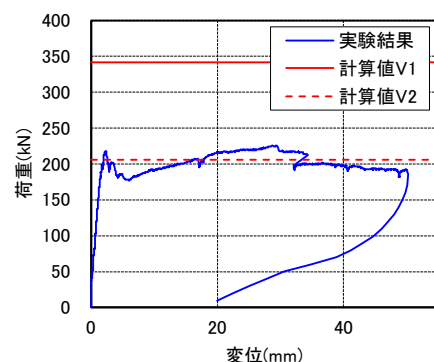


図-5 荷重—変位関係 (No. 5)

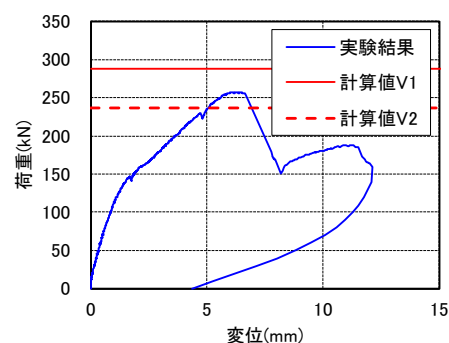


図-6 荷重—変位関係 (No. 6)