

# 論文 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状に関する実験的研究

武田 篤史\*1・石関 嘉一\*1・坂上 肇\*2・荒木 昭俊\*3

**要旨:** 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。本研究では、本構造の基本的な構造特性の調査を目的として、2 種類の梁の単調曲げせん断載荷実験を行ってその破壊過程を観察するとともに、FEM 解析により通常の RC 部材との違いを考察した。その結果、本構造が構造物として成立するということが明らかとなるとともに、埋設型枠の考慮方法、吹付コンクリートの引張強度、および吹付コンクリートのひび割れ面せん断伝達の面で通常の RC 構造と異なることが明らかとなった。

**キーワード:** 吹付コンクリート, 3D プリンタ, 埋設型枠, 梁曲げせん断実験, FEM 解析

## 1. はじめに

近年、建設労働力の不足への対応や建設現場における働き方改革の一環として、建設現場における生産性向上が求められている。生産性向上を図る方策としては、ICT の活用を中心に進められているが<sup>1)</sup>、多様な施工方法を確立し、それぞれの現場における施工方法の選択肢を増やすことも、有効な手段であると考えられる。

また、生産性向上と同時に、観光先進国の実現へ向けて景観に配慮した社会資本整備も求められている<sup>1)</sup>。しかし、型枠を用いる通常の RC 構造物の構築では、コストや施工の制約から、意匠性に限界があった。

このような課題に対して、3D プリンタによるモルタル造埋設型枠と吹付コンクリートによって構造物を構築することが一つの解決策になると考えた。3D プリンタによるモルタル造埋設型枠により自由な意匠が実現でき、吹付コンクリートにより打ち込み方向の自由度を確保する。

3D プリンタによるモルタル造部材は、無人化または少人化による任意形状の RC 構造物製造への展開を見据え、いくつかの研究が進められている<sup>2)~5)</sup>。これらはいずれもチキソ性を高めたモルタルを積層して構築するものであるが、その構造性能に関する検討は材料レベルにとどまっており、部材レベルでの検討はなされていない。

吹付コンクリートは、トンネル覆工や補強・補修目的として一般的な工法であるが、吹付コンクリートのみにより構造部材を構築した例は見当たらない。したがって、吹付コンクリートにより構築した RC 部材の構造評価に関しても、解決すべき課題である。

そこで、本研究においては、3D プリンタによるモルタル造埋設型枠と吹付コンクリートによって構築した構造物の基本的な構造特性の調査を目的として、2 種類の梁

の単調曲げせん断載荷実験を行ってその破壊過程を観察するとともに、FEM 解析により通常の RC 部材との違いを考察した。2 種類の梁は、破壊性状がそれぞれ曲げ破壊型およびせん断破壊型とすることにより、曲げ破壊とせん断破壊のそれぞれに関して考察した。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

#### (1) 構造

試験体の構造諸元を図-1に示す。曲げ破壊型試験体

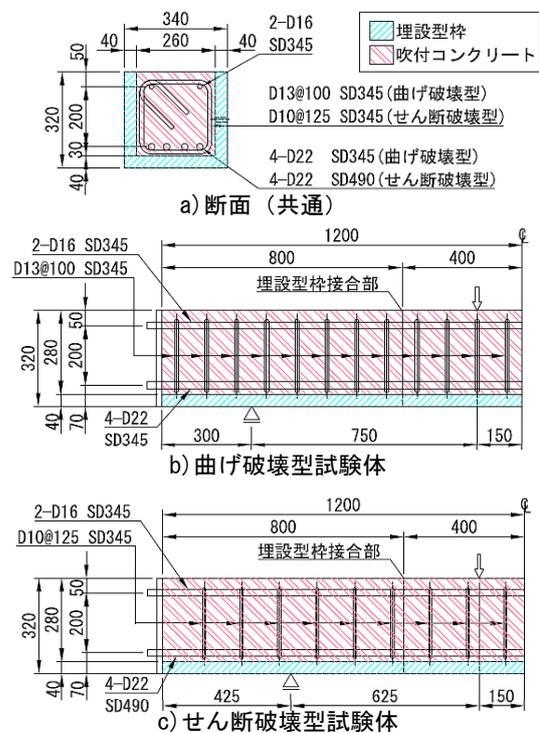


図-1 試験体構造諸元

\*1 (株)大林組 技術研究所 博 (工) (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所 修 (工)

\*3 デンカ (株)セメント・特混研究部 修 (工) (正会員)

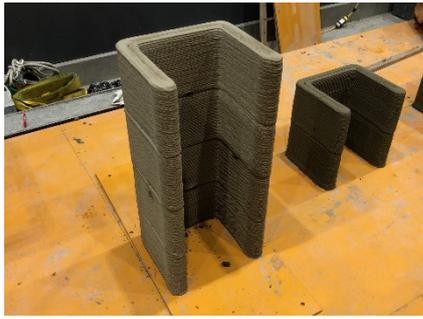


図-2 3Dプリンタによる埋設型枠

表-1 吹付コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				急結剤 (C×%)
		W	C	S	G	
50	60	200	400	1054	716	8

C: 普通ポルトランドセメント

S: 新潟県糸魚川産姫川水系砂

G: 新潟県糸魚川産6号砕石

急結剤: 酸性液体急結剤, デンカ社ナトミックLSA

とせん断破壊型は、同様の断面とし、軸方向鉄筋の強度およびせん断補強筋量を変えた。なお、せん断破壊型試験体は破壊するせん断スパンを特定するため、左右でせん断補強筋量を変えたが、図-1には試験区間の諸元のみを示した。

#### (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4)の方法を基本とし、より大きなロボットアームを用いて作製した。

作製時は、図-2のように断面が水平になるようにして、部材軸方向に高さ800mmとなるまで積層した。1層の厚さは、5mmであり、200mmごとにインターバルを空けて作製した(以降、打重ね部と称す)。各試験体には、800mmまで積層した埋設型枠をそれぞれ3体使用した。

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、有機繊維をあらかじめ混合したプレミックス材料を用いた。水プレミックス材料比はW/P=16.4%とし、凝結遅延材により硬化速度を調整した。有機繊維は少量であり、引張特性への影響はほとんどないレベルである。練り混ぜには汎用のパン型ミキサーを、吐出ノズルまでの圧送には小型のモルタルポンプを用いた。

#### (3) 吹付コンクリート

埋設型枠に鉄筋を固定したのち、開口側を下側に、すなわち図-1に対して天地反転した向きで設置し、上向きに吹付を行った。各試験体それぞれ3体の埋設型枠は、端部の平滑処理などは行わずに、単に隣り合わせて配置したのみである。

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吹付機を介して圧縮空気です排出口まで送り、急結剤と混合して吹き付けた。圧送には2.0イ

表-2 鉄筋引張試験結果

試験体	部位	径	規格	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
曲げ破壊型	軸方向鉄筋(引張)	D22	SD345	379	590	190
	軸方向鉄筋(圧縮)	D16	SD345	373	591	197
	せん断補強筋※	D13	SD345	393	564	-
せん断破壊型	軸方向鉄筋(引張)	D22	SD490	531	700	197
	軸方向鉄筋(圧縮)	D16	SD345	373	591	197
	せん断補強筋	D10	SD345	337	560	193

※曲げ破壊型試験体のせん断補強筋はミルシート値

表-3 セメント系材料圧縮試験結果

試験体	部位	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
共通	埋設型枠	68.6	23.9
曲げ破壊型	吹付コンクリート	45.0	23.9
せん断破壊型		41.8	21.6

ンチ管を用い、吐出量は1~2m<sup>3</sup>/hrとした。

吹付コンクリート材料の配合は、表-1に示す配合とした。

#### (4) 材料特性

鉄筋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圧縮強度試験結果を表-3に示す。3Dプリンタ用モルタルは、吐出口より排出されたモルタルを試料とし、φ50mm×h100mmのモールドによりテストピースを作製した。吹付コンクリートは、JSCE-F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方(案)」に準拠し、パネル型枠に吹き付けて作製したパネルより、φ50mm×h100mmのコアを採取して試験に供した。モルタル及びコンクリートの試験日は、梁載荷試験の載荷日と同日とした。

#### 2.2 載荷方法

単純梁の2点載荷とし、支点および載荷点は図-1b)、c)に示すとおり、試験体によって変えた。それぞれのせん断スパン比は、曲げ破壊型試験体でa/d=3.0、せん断破壊型試験体でa/d=2.5とした。等曲げスパンはいずれも300mmとした。

載荷履歴は、いずれの試験体も単調一方載荷とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 曲げ破壊型試験体

##### (1) 荷重-変位関係と破壊過程

荷重-変位関係を図-3に示す。図中には、FEM解析による解析値も示す。解析値は、普通コンクリートに対して用いられる構成側を用い、2.1(4)に示す材料特性の試験値を用いて計算した。ただし、埋設型枠材料と吹付コンクリート材料のヤング係数が概ね同様であることから、埋設型枠部分についても、吹付コンクリートと同様の材料特性を適用した。なお、解析方法の詳細については、4章に詳述する。

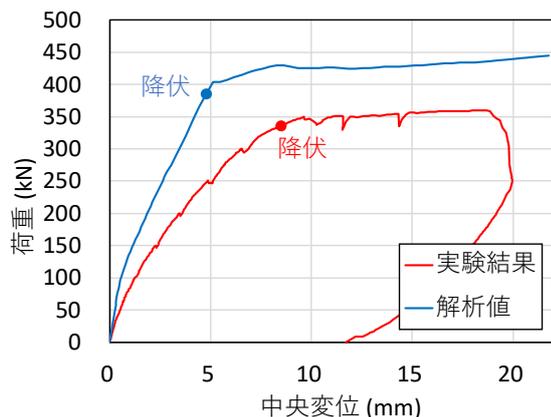


図-3 荷重-変位関係  
(曲げ破壊型試験体)

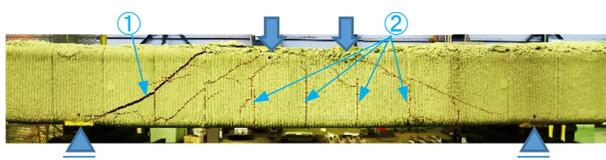


図-4 ひび割れ状況 (載荷終了時)  
(曲げ破壊型試験体)

載荷初期より、解析値より小さな剛性を示しており、明確なひび割れ発生点は見られなかった。これは、3体の埋設型枠間で引張を伝達することができないことが主要因と考えられる。また、初期に観察されたひび割れも、打重ね部で見られており、埋設型枠の引張負担は小さいことがわかる。

軸方向鉄筋が降伏ひずみに達したのは、中央変位 8.49mm、荷重 336kN であった。計算値と比較すると、荷重は小さく変位は大きいことから、普通コンクリートと同様に評価することが困難であることがわかる。

降伏後は、変位 18.7mm・荷重 359.8kN までわずかな耐力上昇を伴って変形が進んだが、斜めひび割れが大きく開いてせん断破壊した。なお、コンクリート標準示方書<sup>(9)</sup>に基づいて計算したせん断耐力は 642kN であるため、普通コンクリートであればせん断破壊しないことが想定される。

## (2) ひび割れ性状

載荷終了時のひび割れ状況写真を図-4に示す。ひび割れは赤線にてなぞっている。載荷点付近から支点到掛けて直線状に見られるひび割れ(図-4①)がせん断破壊の原因となるせん断ひび割れである。埋設型枠の打重ね部や接合部は、ひび割れが生じている(図-4②)。

全般に、通常のRCに比してひび割れ本数が少ないことがわかる。これは、外部の埋設型枠部分と内部の吹付コンクリート部分の間でせん断滑りが生じたために、外部の埋設型枠部分のみでひび割れ本数が少なかったものと考えたと説明がつく。埋設型枠部分は積層痕による縞模様が生じており、縞模様の凹部の存在が、埋設型枠と

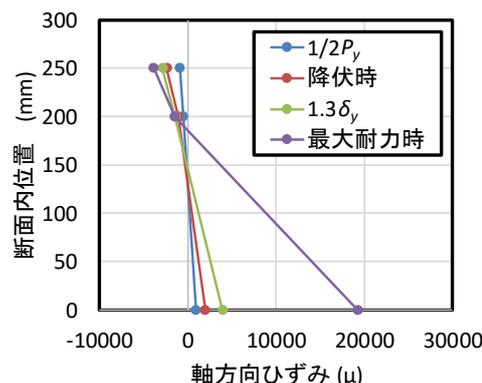


図-5 断面内軸ひずみ分布

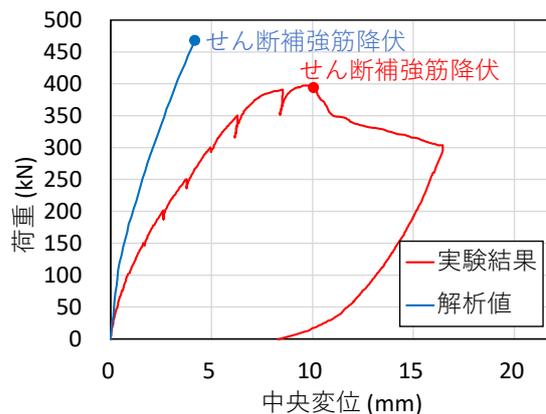


図-6 荷重-変位関係  
(せん断破壊型試験体)

吹付コンクリートの密着性を妨げたと推測される。

## (3) 平面保持の仮定

図-5に等曲げスパン中央における断面内ひずみ分布を示す。図中、断面内位置は引張鉄筋位置を0とした。ひずみは、吹付コンクリート圧縮縁、圧縮鉄筋、引張鉄筋それぞれに貼付したひずみゲージにより計測した。プロットしたのは、荷重が軸方向鉄筋降伏時の1/2に達した時(1/2Py)、軸方向鉄筋降伏時、変位が軸方向鉄筋降伏時の1.3倍に達した時(1.3δy)、および最大耐力時の4点とした。

図より、変位が軸方向鉄筋降伏時の1.3倍に達した時までにはひずみが概ね直線形状であり、曲げ挙動に関しては、平面保持の仮定を用いることが可能であると推察される。

## 3.2 せん断破壊型試験体

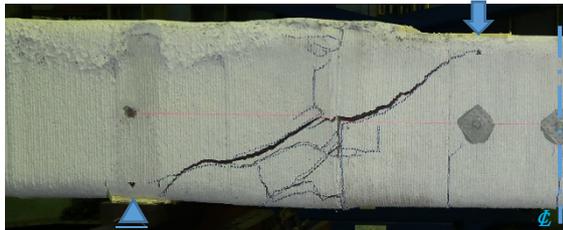
### (1) 荷重-変位関係と破壊過程

荷重-変位関係を図-6に示す。図中には、FEM解析による解析値も示す。解析値は、曲げ破壊型試験体に対するものと同様の条件で計算した。解析方法の詳細については、4章に詳述する。

曲げ試験体と同様に、載荷初期より解析値より小さな剛性を示しており、埋設型枠の引張負担が小さいとの仮



a) 正面



b) 裏面

図一七 ひび割れ状況（載荷終了時）  
（せん断破壊型試験体）

定は、本試験体においても整合する。

荷重 397.4kN, 変位 9.72mm で最大耐力に達したのち、せん断補強筋の降伏を伴って荷重が急落した。最大耐力は、解析によるせん断補強筋降伏時荷重 468kN に比して小さく、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に基づいて計算したせん断耐力 399 kN とは同等であった。

### (2) ひび割れ性状

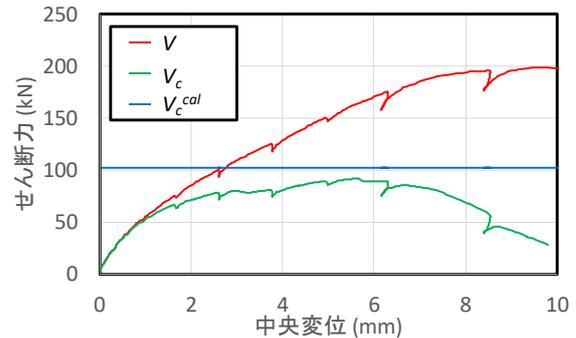
載荷終了時のひび割れ状況写真を図一七に示す。a) 正面においてはひび割れを赤線にてなぞっている。

ひび割れは、せん断破壊時に大きく開いたもの以外はほとんど見られなかった。せん断破壊時に大きく開いたひび割れは、a) 正面においては、Sectional pre-crack を有する梁のせん断破壊時に見られるような Z-shape crack<sup>7)</sup> が埋設型枠の継ぎ目で発生したように見えるが、b) 裏面においては、載荷点から支点に向けてほぼ直線状に発生している。そこで、埋設型枠に対して打音検査を行うと、吹付コンクリートから剥離していることが明らかになった。したがって、Z-shape crack が発生しているのは埋設型枠のみであり、吹付コンクリートでは通常のせん断ひび割れが生じているものと推測される。

また、埋設型枠に発生しているひび割れ本数は非常に少ないが、それは曲げ破壊型試験体と同様の現象であり、外部の埋設型枠部分と内部の吹付コンクリート部分の間でせん断滑りが生じたためであると推測される。

### (3) せん断補強筋以外が分担するせん断力

せん断補強筋以外が分担するせん断力 ( $V_c$ ) と変位の関係を、図一八に示す。 $V_c$  は全せん断力( $V$ )から、せん断補強筋が分担するせん断力( $V_s$ )を減ずることにより算定した。 $V_s$  は、各せん断補強筋において3 か所計測したひび割れのうちの最大値にせん断補強筋断面積およびヤング



図一八 せん断補強筋以外が分担するせん断力

係数を乗じたものを各せん断補強筋の負担せん断力とし、載荷点から支点までの全てのせん断補強筋(5 本)の負担せん断力を総和することで計算した。図中には、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に基づいて計算したせん断補強筋を用いない梁のせん断耐力( $V_c^{cal}$ )も示している。

$V_c$  の最大値は 91.9kN であり、 $V_c^{cal}$  の 9 割程度が発揮されている。 $V_c$  が  $V_c^{cal}$  に達しない理由としては、(2)に示す通り最大耐力時に埋設型枠は剥離しているにもかかわらず、 $V_c^{cal}$  の算定においては埋設型枠を含む断面で計算していることが理由の一つに挙げられる。

$V_c$  値は、梁のせん断破壊時より前にピークを迎え、梁のせん断破壊時までは維持されず、結果的にせん断破壊時の  $V_c$  は計算値の 3 割以下まで低下している。一般に、 $V_c$  の抵抗機構としては 1)骨材のかみ合わせ、2)軸方向鉄筋のダウエル作用、圧縮コンクリートの抵抗が上げられるが、吹付コンクリートには 6 号砕石(最大粒径 5~13mm) が用いられ、さらに粗骨材量も少ないことから、普通コンクリートに比して、1)の骨材のかみ合わせ作用が劣っていたものと推測される。

## 4. 解析による検討

3 章に示した実験結果は、普通コンクリートを対象とした解析値と併せて示したが、実験結果と解析値は整合しなかった。そこで、実験で得られた考察を反映して再度解析を行うことにより、本構造と普通コンクリートの違いを考察する。

### 4.1 解析方法

解析は 2 次元 FEM 解析による。解析コードは、有限要素法 (FEM) によるコンクリート系構造を対象とした構造解析/熱伝導解析プログラム「FINAL」<sup>8)</sup>を用いた。コンクリートは平面応力要素、軸方向鉄筋は梁要素とし、せん断補強筋はコンクリート要素中の埋め込み鉄筋としてモデル化した。平面要素と梁要素は完全付着を仮定し、接点共有とした。曲げ破壊型試験体の解析モデルを図一九に示すが、せん断破壊型試験体のモデルも概ね同様である。

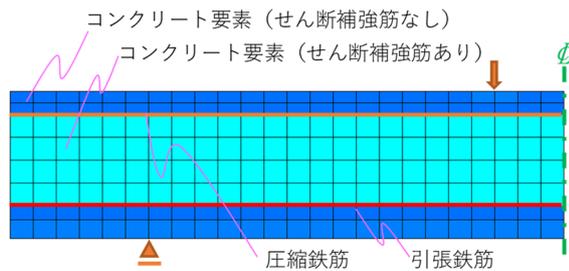


図-9 解析モデル図  
(曲げ破壊型試験体)

材料強度や弾性係数は 2.1(4)に示す材料試験値を用いた。ただし、埋設型枠材料と吹付コンクリート材料のヤング係数が概ね同様であることから、埋設型枠部分についても、吹付コンクリートと同様の材料特性を適用した。

コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は、修正 Ahmad モデル<sup>9)</sup>とし、友澤らの方法<sup>10)</sup>で圧縮強度時ひずみを算定した。引張領域は、ひび割れまでを弾性とし、ひび割れ強度以降は出雲らのモデル<sup>11)</sup> ( $C=0.4$ ) によりテンションステイフニングを考慮した。コンクリートの引張強度は友澤らの方法<sup>10)</sup>で算定した。ひび割れ面のせん断伝達は、Al-Mahaidi モデル<sup>12)</sup>とした。

鉄筋の応力-ひずみ特性は、完全弾塑性型のバイリニアモデルとした。

#### 4.2 実験結果の反映

前述の通り、4.1 節に示したモデルでは実験結果と解析値が整合しない。そこで、本節に示す3点に関して、変更を加えた。

##### (1)埋設型枠の扱い

いずれの試験体においても、埋設型枠に現れるひび割れ本数は少なく、埋設型枠と吹付コンクリート間ではせん断滑りが発生していることが推測された。そこで、埋設型枠の寄与は少ないものと考え、埋設型枠を考慮しないこととした。なお、曲げ破壊型試験体においては、主に引張側コンクリートとなるため、その影響はほとんどなかった。

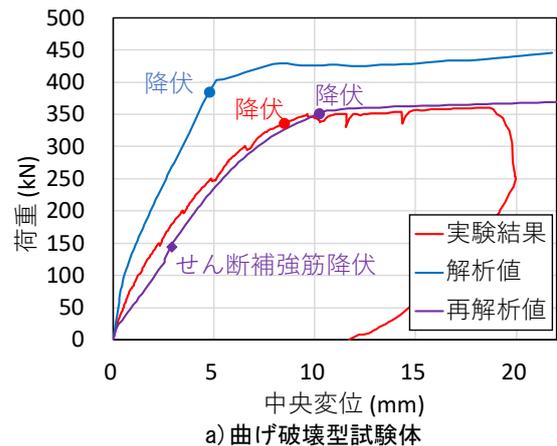
##### (2)ひび割れ面のせん断伝達

曲げ破壊型試験体は、曲げ降伏には至ったものの、最終的にせん断破壊した。これは、普通コンクリートに対するせん断耐力式<sup>6)</sup>と整合しないことから、普通コンクリートに対するせん断耐力機構とは異なることを示唆している。さらに、せん断破壊型試験体においては、 $V_c$ の推移より骨材のかみ合わせに関して普通コンクリートより劣っていることが想定された。

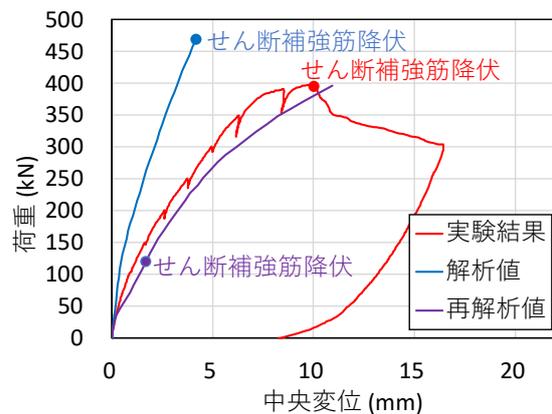
そこで、ひび割れ面におけるせん断伝達が発生しないモデルに修正した。

##### (3)吹付コンクリートの引張強度

曲げ破壊型試験体においては、平面保持の仮定が成立



a) 曲げ破壊型試験体



b) せん断破壊型試験体

図-10 再解析結果

しているにもかかわらず降伏までの剛性が大幅に小さかった。このことから、せん断変形が大きく生じたことが推測される。せん断変形のうちひび割れ前の弾性変形は非常に小さいことから、せん断変形が大きくなるためには、せん断ひび割れが普通コンクリートに比して生じやすい必要がある。そこで、吹付コンクリートの引張強度を、普通コンクリートに対する  $3.23\text{N/mm}^2$  から  $0.500\text{N/mm}^2$  に低減した。なお、 $0.500\text{N/mm}^2$  という値には格別の根拠はなく、実験結果と解析値が整合するようにチューニングしたものである。

吹付コンクリートの引張強度に関して、井上<sup>13)</sup>は実験結果より、「一般のコンクリートに比較して低い」としている。その原因としては、「材料は間欠的に送られ、ホース内を流れる材料は不連続となる。こうした状態で吹付けられると事実上材料別に分離した薄層の積み重ね(ラミネーション)になる。これがコンクリート内部に構造的な異方性を生じさせ引張強度に影響していると思われる」と示している。したがって、引張強度を低減することは定性的には既往の研究と合致している。ただし、本検討においては異方性までモデル化できておらず、今後の課題である。

### 4.3 解析結果

前節の変更を加えた解析結果を図-10に示す。

曲げ破壊型試験体については、剛性、耐力、降伏点とも概ね実験値と整合している。ただし、変位 2.90mm でせん断補強筋が降伏している。実験においてせん断補強筋のひずみは計測していなかったものの、変位 2.90mm においてせん断ひび割れの顕著な進展が観察されなかったことから、せん断補強筋降伏に関しては実験結果と整合していないと推測される。

せん断破壊型試験体は剛性や耐力は実験値と整合しているものの、せん断補強筋降伏点が整合しない。

すなわち、いずれの試験体も 4.2 節に示す修正を行うことで、荷重-変位関係は概ねシミュレートできることがわかる。ただし、せん断補強筋の降伏点において実験結果との不整合が生じている。この原因としては、埋設型枠の寄与が挙げられる。荷重が小さい間は、埋設型枠と吹付コンクリートの間における付着滑りは小さく、埋設型枠がせん断耐力を受け持つと考えることは合理的である。

### 5. 結論

3D プリンタによるモルタル造埋設型枠と吹付コンクリートによって構築した構造物の基本的な構造特性の調査を目的として、2 種類の梁の単調曲げせん断載荷実験を行ってその破壊過程を観察するとともに、解析によって通常の RC 部材との違いを考察した。本論文の結論を以下に示す。

- 1) 吹付コンクリートは、曲げモーメントに対して平面保持の仮定が適用可能である。
- 2) 本構造のせん断耐力は、普通コンクリートと同様の方法で評価することはできない。
- 3) 本構造の解析に当たっては、1)埋設型枠を考慮しない、2)ひび割れ面のせん断伝達を考慮しない、3)吹付コンクリートの引張強度を低減する、ということを行うことで、概ねシミュレート可能である。ただし、せん断補強筋降伏のタイミングは実験と解析で整合しなかった。これは、荷重が小さい間の埋設型枠の寄与が原因と考えられる。

実験を通して、本構造が構造物として成立するということが明らかとなるとともに、構造設計を行うための課題も明らかとなった。今後は、各材料・各材料間の強度特性を明らかにして、構造設計法を構築していく予定である。

### 参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 令和元年版，2019.7
- 2) 木ノ村幸士，村田哲，橋本貴之，坂本淳，丸屋剛：

付加積層技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発 ～開発概要～，第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，V-283，pp.565-566，2018.8

- 3) 村田哲，木ノ村幸士，橋本貴之，坂本淳，丸屋剛：付加積層技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発 ～基礎検討～，第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，V-284，pp.567-568，2018.8
- 4) 平田隆祥，坂上肇，金子智弥，石関嘉一，荒木昭俊：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.571-572，2018.8
- 5) 小倉大季，Venkatesh Nerella，Viktor Mechtcherine：3D プリンティングで作製した繊維補強セメント複材料のひずみ硬化挙動，第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，V-287，pp.573-574，2018.8
- 6) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 設計編，丸善出版，2017.12
- 7) Li Fu，Hikaru NAKAMURA，Yoshihito YAMAMOTO and Taito MIURA：Influence of sectional pre-crack on shear strength of RC beams，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，pp.547-552，2017.6
- 8) 米澤健次，長沼一洋：3 次元非線形 FEM 解析による RC 構造物の地震時挙動シミュレーション，大林組技術研究所報 No.71，2007
- 9) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170，1995.8
- 10) 友澤史紀，野口貴文，小野山貫造：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集 A（材料・施工），pp.497-498，1990.10
- 11) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25，No.9，pp.107-120，1987.9
- 12) Al-Mahaidi,R.S.H.：Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep.of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 13) 井上寛美，金成勝博，石口真実，宮田尚彦：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.46-55，1988.3