

B-45

3Dプリンターで外枠を構築した鉄筋コンクリート梁の力学挙動の解析 Analyses on Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Beams with 3D Printed Encasement

○二宮明南¹, 長沼一洋², 田嶋和樹², 白井和貴³

Haruna Ninomiya¹, Kazuhiro Naganuma², Kazuki Tajima², Kazutaka Shirai³

Abstract: Nonlinear finite element analyses are performed for reinforced concrete beams with mortar encasement prefabricated by a 3D printer. The analyses simulated experimental behaviors relatively well for both flexural and shear dominant specimens. Analysis results indicate that the compressive strength of the encasement has an effect on the flexural strength of the beam.

1. はじめに

鉄筋コンクリート工事の施工の省力化に 3D プリンターの活用が期待されている。その一例としてコンクリートの型枠に代わり、3D プリンターで製作したモルタルの外枠を構造体の一部として利用することが検討されている。本研究では外枠をモルタルで製作した鉄筋コンクリート梁の実験を対象に、有限要素法による非線形解析を行い、曲げモーメントとせん断力を受ける梁の力学挙動を考察した。

2. 解析モデル

解析対象は 3D プリンターで製作したモルタルの外枠を有する鉄筋コンクリート梁¹⁾である。Fig.1 に試験体の形状と配筋を示す。中央の 2 点に集中荷重を受ける単純梁である。試験体は Table 1 に示す M-3 と S-3 の 2 体で、主に鉄筋の径と降伏強度が異なっている。M-3 は曲げ型、S-3 はせん断型である。

試験体の要素分割を Fig.2 に示す。2次元でモデル化し、モルタル部とコンクリート部は平面応力要素により、それぞれを別々にモデル化して要素を重ね合わせた。実験では 3D プリンターで製作した外枠と内部コンクリートの間には目立った離間は確認されていないため、解析でも両者の動きは同一とした。鉄筋は線材要素でモデル化し、コンクリートとの付着すべりは考慮していない。コンクリートの引張強度は圧縮強度から 3.56 N/mm² と仮定した²⁾。モルタルの引張強度は 3D プリンティングによる層と層の間の早期の剥離を考慮し、0.5 N/mm² と低く設定した³⁾。

3. 解析手法

コンクリートとモルタルは直交異方性モデル⁴⁾により、引張側はひび割れ発生まで線形弾性、圧縮応力～ひずみ曲線は修正 Ahmad 式⁵⁾で表現した。鉄筋は bilinear 型の応力～ひずみ関係とし、降伏後の剛性率は 1/100 とした。解析は載荷点に変位増分を与え、最大荷重を得るため、荷重が低下するまで計算を実施した。

4. 解析結果

Fig.3 に荷重～中央部たわみ関係を示す。解析はモルタル部をコンクリートと同一の材料特性とした場合の結果 (Analysis-2) も併せて示す。実験と比較すると、

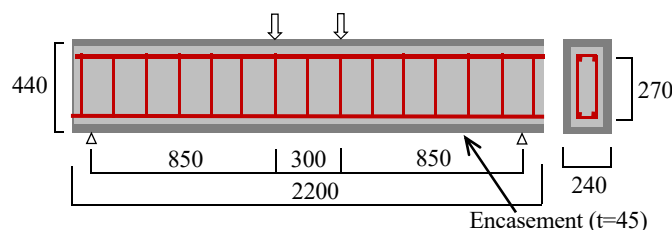


Fig.1 Configuration of specimens

Table 1 Material properties of specimens

試験体	コンクリート強度	モルタル強度	主筋	あばら筋
M-3	51.1 N/mm ²	30.2 N/mm ²	D19	D13
S-3	51.1 N/mm ²	28.0 N/mm ²	D25	D6

a D19 : $\sigma_y=383$ N/mm² D13 : $\sigma_y=372$ N/mm²
D25 : $\sigma_y=1000$ N/mm² D6 : $\sigma_y=429$ N/mm²

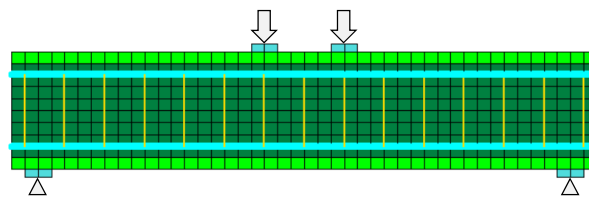


Fig.2 Finite element idealization

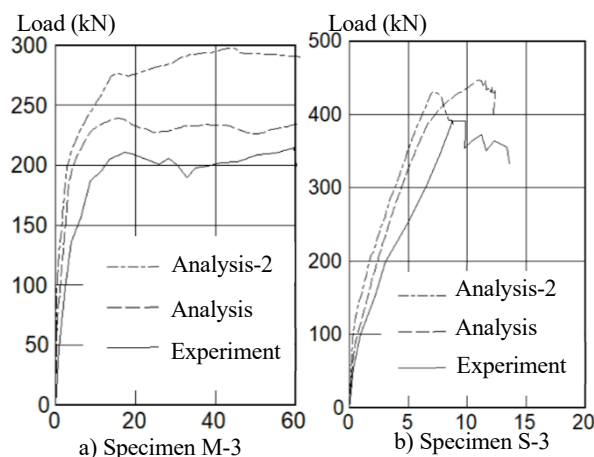


Fig.3 Load - deflection relationships

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・教員・建築 3 : 北海道大学・教員・建築

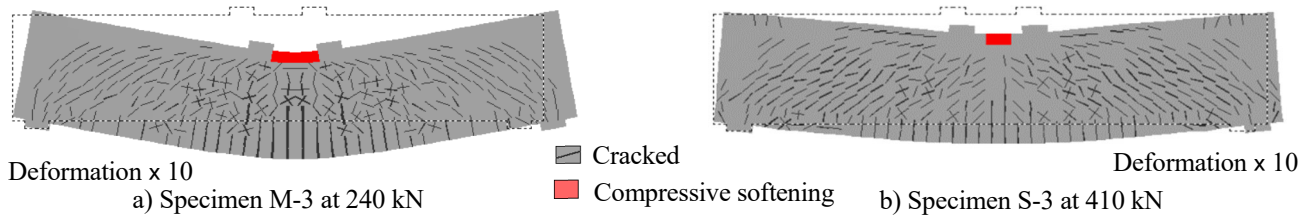


Fig.4 Crack propagation and deformation modes

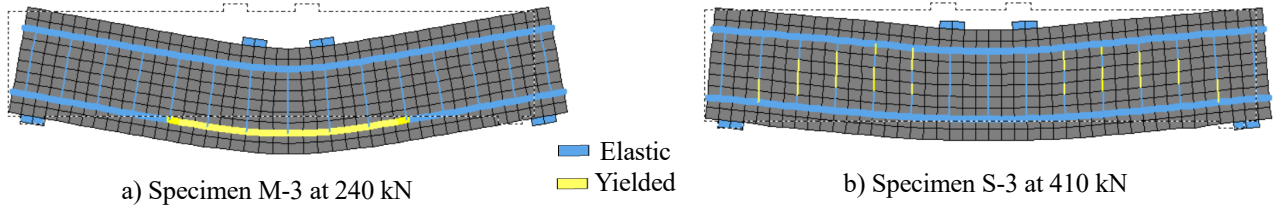


Fig.5 Yielding of reinforcements

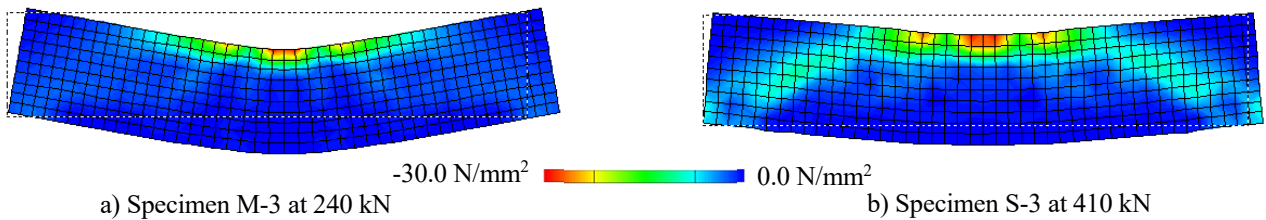


Fig.6 Minimum principal stress distributions

両試験体とも解析の方が剛性と最大荷重が高く、その原因として、モルタル部のひび割れ後のせん断伝達特性をコンクリートと同等としたことが考えられる。最大荷重到達後は実験と同様に曲げ型の M-3 は変形が進み、せん断型の S-3 は急激に荷重が低下しており、破壊モードの違いが再現できている。

解析でモルタル部をコンクリートと同一の材料特性とした場合は両試験体とも剛性がやや高くなり、曲げ型の M-3 では最大荷重の増大が顕著である。一方、せん断型の S-3 では最大荷重は若干低下している。曲げ型ではかぶり部分のモルタルの圧縮力の分担が最大荷重に寄与しているものと推察できる。

Fig.4 に解析の最大荷重近傍におけるひび割れと変形モードを示す。M-3 は中央下部で曲げひび割れが進展しており、荷重点間のコンクリートは圧縮強度到達後の軟化域に入っている。S-3 は荷重点と支持点の間にせん断ひび割れが広範囲に生じている。

Fig.5 に鉄筋の降伏状況を示す。M-3 は引張側の主筋が降伏し、S-3 は荷重点と支持点の間であばら筋が降伏しており、破壊モードの違いが明確に現れている。S-3 でモルタル部の特性をコンクリートと同一にしても最大荷重にあまり差が見られなかった原因は、あばら筋の降伏により耐力が決定しているためと考えられる。

Fig.6 にコンクリートの最小主応力分布を示す。M-3 では梁の上面側で曲げによる圧縮応力のレベルが高くなっているが、S-3 では荷重点から支持点に向かって

圧縮ストラットが形成されていることが分かる。

5. まとめ

3D プリンターで外枠を製作した鉄筋コンクリート梁の実験を対象に解析を行い、以下のことが分かった。

- 1) 主筋の引張降伏が先行する曲げ型では外枠のモルタルの圧縮強度が最大荷重に与える影響が大きい。
 - 2) あばら筋の降伏が先行するせん断型では外枠のモルタルの圧縮強度は最大荷重にほとんど影響しない。
- 今後、3D プリンティングによる層間の引張強度の評価や 3 次元モデルによる構造性能の検討などを進める予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K18173 (研究代表者: 白井和貴) の支援を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 監物希美, 他: 3D プリンティングで外枠を構築した梁の曲げ・せん断荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.2053-2058, 2024
- 2) 野口貴文, 他: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11-16, 1995.6
- 3) 長谷川周平, 他: 3D プリンティングで積層されるモルタルの層間付着強度に関する一考察, 日本建築学会大会梗概集, 材料施工, pp.143-145, 2021.9
- 4) Darwin, D., et al.: Nonlinear Biaxial Stress - Strain Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM2, pp.229-241, April, 1977.
- 5) 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