

卒業論文概要

せん断補強筋比の異なる RC 梁における FEM のモデル化方法の考察

要素分割 せん断補強筋比 FEM 解析
 材料構成則 せん断破壊 損傷評価

1240155 宮原 稔弥*
 指導教員 鈴木 卓

1. はじめに

複雑な形状および荷重の作用する構造体の復元力特性およびひずみ分布などを評価するうえで非線形有限要素法（以下、FEM）は有効な手段である。コンクリート構造物の FEM 解析では、コンクリートの材料構成則による復元力特性の変化が指摘されている。文献 1)では、要素分割によって変化する復元力特性を抑制するコンクリート材料構成則が提案されており、その材料構成則を用いて要素分割が復元力特性に与える影響が検討されている。しかしながら、3次元モデルによる検討例は少なく検討の余地が残されている。

そこで本研究では、文献 2)に示された鉄筋コンクリート梁の静的荷重実験を対象とした 3次元 FEM 解析を実施した。本論では要素分割数の違いおよびせん断補強筋のモデル化方法が解析結果に及ぼす影響について検討した。

2. 対象試験体

検討対象は文献 2)に示される試験体 A2, B2, C2 の 3 体である。図 1 に試験体断面を、図 2 に試験体形状を、表 1 に試験体断面の詳細を、表 2 にコンクリートの材料特性を、表 3 に鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

当該試験体は実大の約 1/3 縮尺である。梁の幅とせいは 190×250mm である。また、梁中央部のせん断スパン比は 1.0 であり、せん断破壊型の試験体である。実験変数はせん断補強筋比である。

図 3 に荷重装置を示す。鉛直力は荷重フレーム上部に取り付けたオイルジャッキ (3,000kN) により作用させた。鉛直力荷重は試験体の加力点 A と支点 D を結ぶ基準線を考慮した支点 B と加力点 C の相対変位 δ を点 B-C 間の水平距離 ($2a=500\text{mm}$, a =せん断スパン長さである。) で除した変形角 R で制御させた。加圧プログラムは $R=0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ および $3.0 \times 10^{-2}\text{rad}$ の片側 1 サイクルである。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

図 4 に解析モデルを示す。解析は 3次元でモデル化した。試験体下部の 2 本の丸鋼は、当該位置節点の鉛直変位を拘束することで再現した。また、試験体上部の丸鋼は荷重版および試験体における当該位置節点の鉛直方向自由度を従属させることで再現した。コンクリートおよび荷重フレームは六

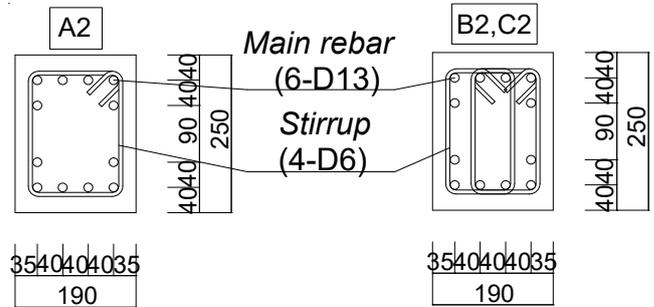


図 1 試験体断面

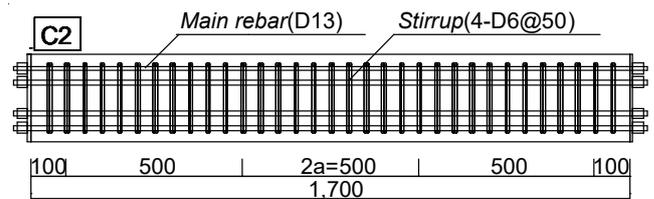
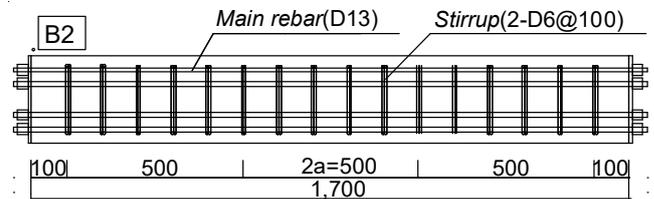
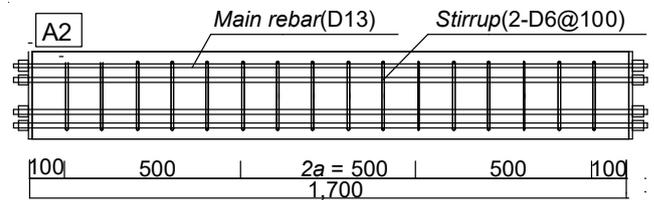


図 2 試験体形状

表 1 試験体断面の詳細

	A2	B2	C2
断面 $b \times D$ (mm)	190×250	190×250	190×250
せん断スパン比	1	1	1
上端筋, 下端筋	6-D13 USD685	6-D13 USD685	6-D13 USD685
せん断補強筋	2-D6@100	4-D6@100	4-D6@50
せん断補強筋比 ρ_w (%)	0.33	0.67	1.33

面要素でモデル化し、鉄筋はすべて埋込み鉄筋として定義した。解析変数は要素分割数である。梁せいの250mmを6から10分割の4種類で要素の辺の長さを設定した。

コンクリートと鉄筋の材料特性は表2および表3の値を使用した。コンクリートの引張強度 σ_{cr} はコンクリート強度 σ_B を用いて文献3)に記載されている式(1)より算出した。

$$\sigma_{cr} = 0.23\sigma_B^{2/3} \quad (1)$$

本解析では実験と同様のせん断スパン比を再現するため、試験体の支点位置および荷重位置のそれぞれ2点を実験と同じ位置に定義した。また、実験と同様の加力条件となるように試験体上部におけるフレームの荷重点に強制変位を与えた。なお、解析には市販の非線形解析ソフトウェア「FINAL」を使用した。

3.2 材料構成則

図5にコンクリートおよび鉄筋の材料構成則を示す。コンクリートのテンションステイフニング特性は出雲らのモデル⁴⁾を用い、係数を $c=0.8$ とした。コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は上昇域においては、修正 Ahmad モデル⁵⁾を用いた。下降域においては中村・桧貝モデル⁶⁾を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性は Al-Mahaidi モデル⁶⁾を用いた。鉄筋の履歴特性は直線型の Bilinear モデルを用いた。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 せん断力-変形角

図6に実験および解析結果のせん断力-変形角関係を示す。解析結果では、各サイクルごとのピーク時の値のみを示す。

解析では、せん断補強筋比に拘らず要素分割数の減少に伴う最大耐力の増加が確認された。また、10分割の解析結果をみると、せん断補強筋比の増加に伴い解析の各サイクルピーク時のせん断力は実験のものとは比べて高くなる傾向が認められた。

図7に10分割モデルにおける試験体B2およびC2において高いせん断力が確認された $0.25 \times 10^{-2} \text{rad}$ 時の中子筋位置の最大主ひずみ分布を示す。試験体A2では中子筋が無

表2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時のひずみ(μ)
30.1	26.9	1,940

表3 鉄筋の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D13 (USD685)	790	198	942
D6 (SD295)	372	197	555

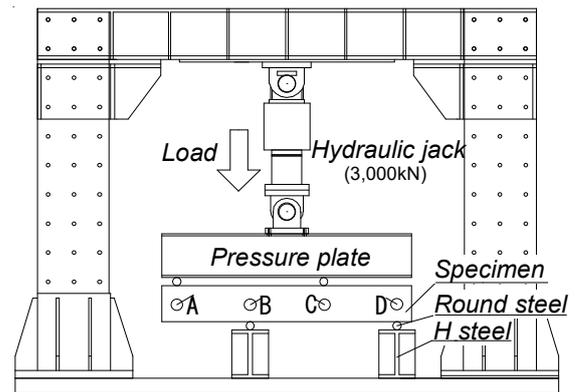


図3 荷重計画荷装置

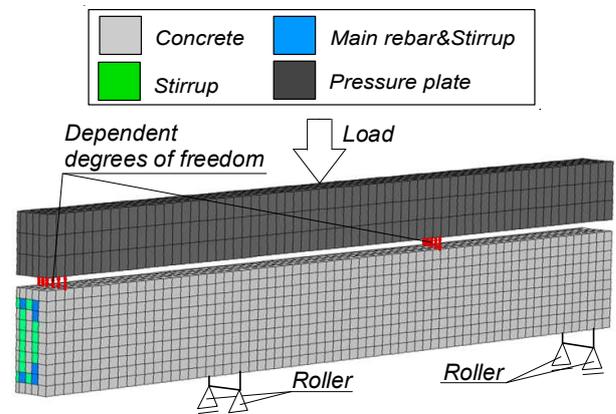


図4 解析モデル

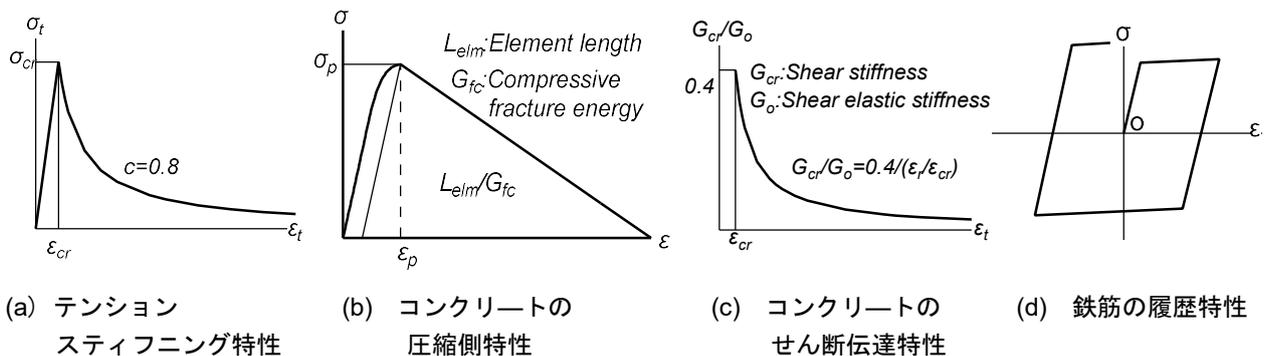


図5 コンクリートおよび鉄筋の材料構成則

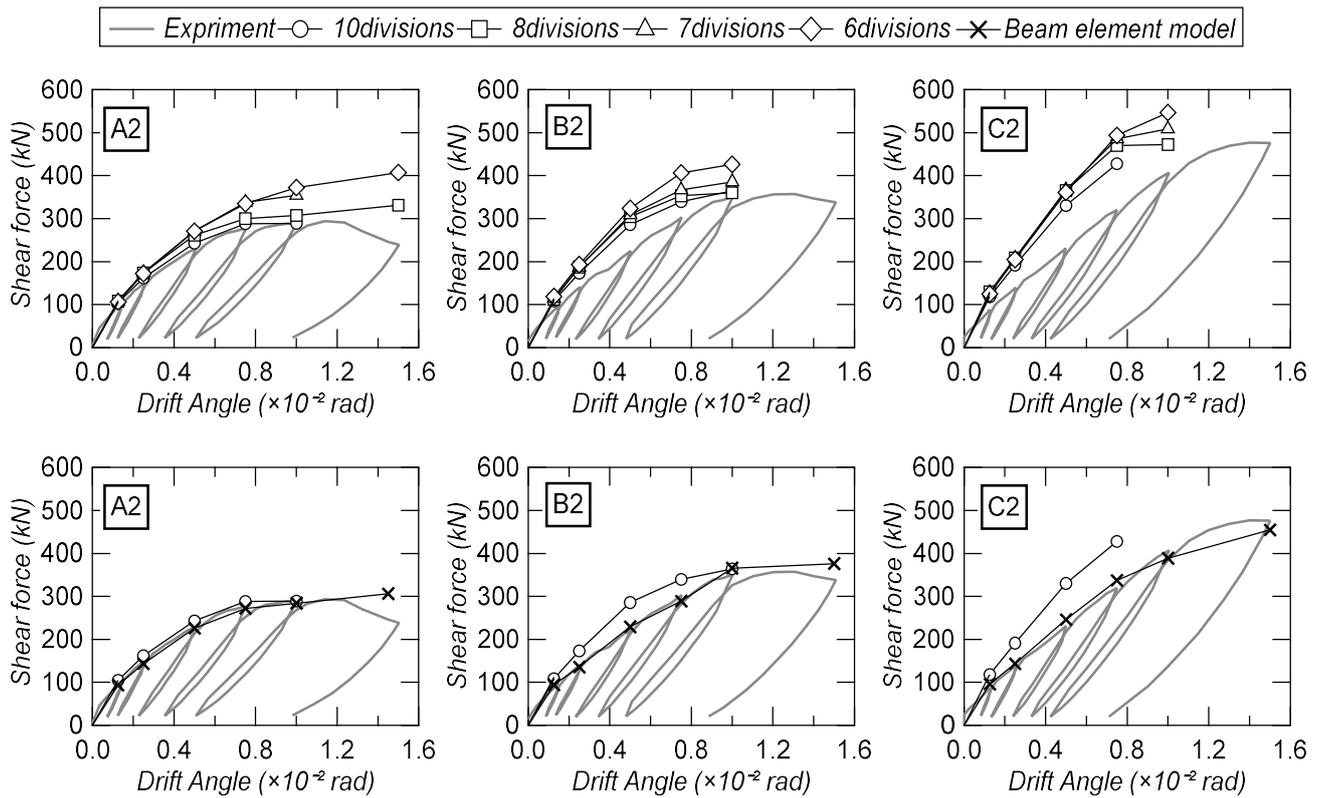


図6 実験結果および解析結果のせん断力-変形角関係

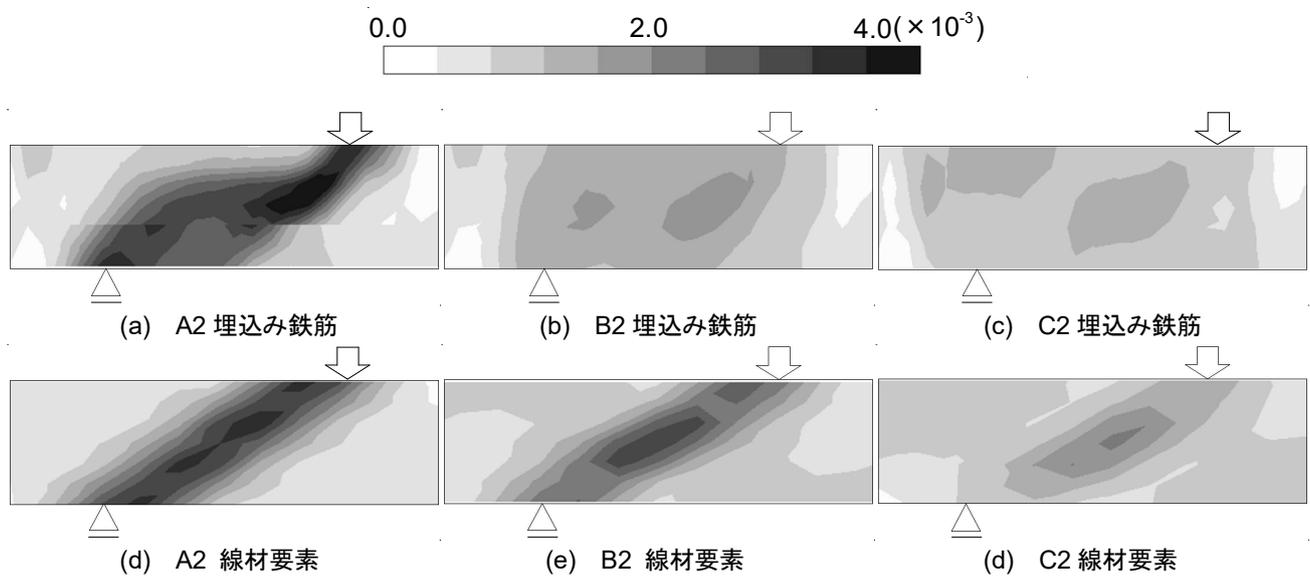


図7 $0.25 \times 10^{-2} \text{rad}$ 時の中子筋位置の最大主ひずみ

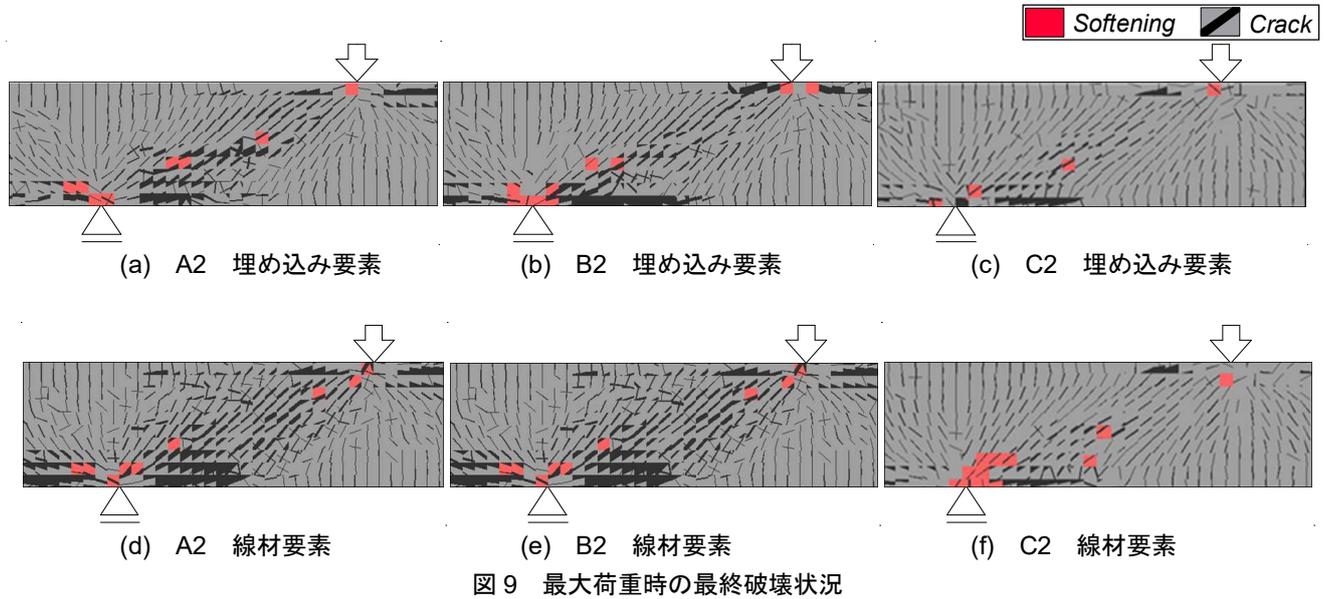
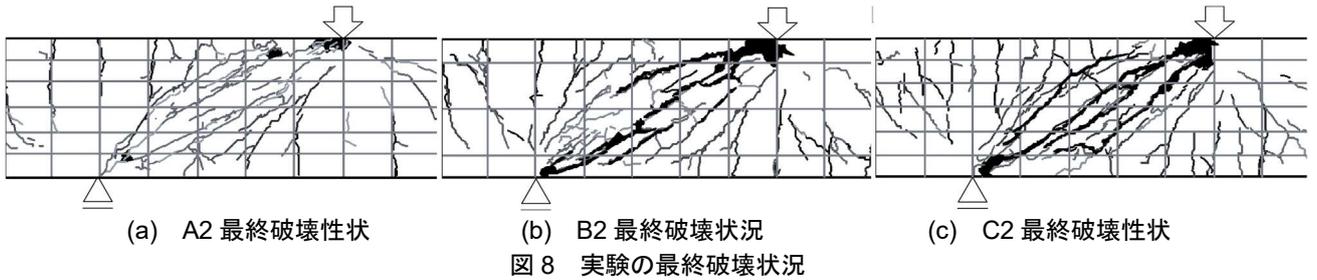
いため無筋要素で、試験体 B2 および C2 では埋込み鉄筋でそれぞれ定義されている。

試験体 B2 および C2 は試験体 A2 に比べて全体的に低いひずみの発生が確認された。当該変形角における各試験体の実験のせん断力および損傷状況に大きな差は認められない。そこで、ひずみ分布の範囲を無筋要素として定義できる線材要素の 10 分割モデルを別途作成した。図 6 下段に示すせん断力-変形角関係では、 $0.25 \times 10^{-2} \text{rad}$ 以降の解析結果におい

ても実験値と比べて概ね対応する傾向が認められた。また、図 7 下段のひずみ分布をみると、線材要素モデルは埋め込み要素モデルと比べて、試験体 A2 ではひずみが小さく、その他の試験体ではひずみが大きくなった。

4.2 損傷状況

図 8 に実験の最終破壊状況を、図 9 に 10 分割における埋め込み要素および線材要素モデルの最大耐力時の最終破壊状況を示す。解析結果では、ひび割れ幅を 5 倍に拡大表示し



ており、コンクリートの軟化要素を赤色で示している。

実験では、梁中央部にひび割れの拡幅が確認されている。解析においても全解析モデルで梁中央部にひび割れの拡幅が認められた。また、梁中央部においてコンクリート要素の圧縮ひずみの軟化が確認された。さらに解析では、最大耐力後に全解析モデルで梁中央部の軟化域の広がり確認された。以上のことから、図9に示す全解析モデルの損傷状態は概ね再現できていると判断される。

5. まとめ

本研究では、RC梁の3次元FEM解析を行い、要素分割数およびせん断補強筋のモデル化が解析結果に及ぼす影響を検討した。本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 梁せいを10分割としてせん断補強筋を埋め込み要素としたモデルは、中子筋の無い試験体の復元力特性を概ね再現するものの、中子筋のある試験体の復元力特性を上回った。
- 2) 梁せいを10分割とした解析モデルの損傷状況は実験の損傷状況を概ね再現できた。
- 3) せん断補強筋を線材要素としたモデルは埋め込み要素としたモデルと比べて中子筋位置のひずみが高くなり実験の復元力特性を概ね再現できた。

参考文献

- 1) H. Nakamura, T. Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete ,Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.10
- 2) 中島真吾 : RC梁のせん断ひび割れ幅によるせん断耐力評価に関する研究, 卒業論文, 2023.3
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書設計編, 2017
- 4) 出雲淳一ほか : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板 要素の解析モデル, コンクリート工学論文集, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 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
- 6) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dept. of Structural Engineering, Cornell Univ. Jan. 1979