

論文 RC 造直方体試験体の引張後の圧縮破壊性状把握とその FEM 解析

廣鹿 詩^{*1}・浅井 竜也^{*2}・権 淳日^{*3}・長江 拓也^{*4}

要旨：補強筋拘束を有する RC 造直方体試験体を対象に、事前引張量をパラメータとした圧縮破壊試験を実施した。その結果、事前引張載荷時のかぶりコンクリートの損傷によると考えられる圧縮耐力の低下、ならびに、引張載荷時に生じたひび割れ近傍において圧縮載荷時に主筋ひずみが集中し、そこが先行的に降伏することによる圧縮耐力時ひずみの増大が確認された。ポストピーク挙動は、補強筋拘束の影響により、事前引張量によらず概ね一致した。同実験の FEM 解析では、ひび割れ近傍における主筋ひずみの集中、ならびに、圧縮載荷時ポストピークにおけるひずみの局所化、の二点の再現性に特に課題があることを示した。

キーワード：圧縮破壊、繰返し載荷、拘束効果、光ファイバーひずみゲージ、有限要素解析

1. はじめに

RC 造曲げ破壊型耐震壁では脚部圧縮領域の破壊が耐力劣化の起点となり得るが、その劣化は、事前の逆方向載荷時に作用する引張力がその後の圧縮時に塑性化を進展させることで、顕著に生じることが指摘されている¹⁾。しかし、その影響について事前の引張量と圧縮破壊性状の関係を定量的に把握した研究事例^{例えば 2)}は限られてる。また、圧縮領域の破壊性状の詳細な再現解析に関する知見^{例えば 3)}は蓄積されてきているが、引張後の圧縮載荷時の圧縮破壊現象に着目した事例は少ない。

構造物の全体解析の実務利用の観点では計算負荷の低減が重要となるため、カーブドシェルモデルを用いた三次元有限要素 (FEM) 解析に関し、耐震壁の正負交番載荷試験における損傷過程や耐力劣化性状を良好に再現することが確認されている¹⁾。同研究は降伏領域が厚さ方向に偏心することで壁全体が面外に座屈する現象の再現に着目しており、柱型を有したり、柱型が無くても十分な厚さを有する耐震壁で一般的に見られるような圧縮破壊を起点とする劣化現象の再現性は検討されていない。

そこで、著者らは、壁脚部の圧縮破壊領域を対象に、事前の引張量をパラメータとした圧縮破壊試験を実施した⁴⁾。本稿では、その破壊性状について光ファイバーゲージを用いた詳細なひずみ計測結果に基づき報告すると

ともに、将来的に実大骨組みの FEM 解析によるモデル化手法を構築することを目指し、ソリッドモデルとカーブドシェルモデルによる FEM 解析の再現性を検証する。

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

試験体は、図-1(a)に示す同じ諸元の試験体3体(T0, T1, T2)と、比較のために作成した同寸法で無筋の試験体1体の計4体である。諸元は、既往の実験¹⁾において本稿で対象とする終局挙動の見られた耐震壁を参考に、圧縮破壊領域を含む高さを切り出し、約30%のスケールとして決定した。

2.2 載荷計画

引張載荷は、図-1(a)中に示すとおり、4本の主筋両端を引張載荷用のプレートに溶接し、そのプレートにナットで固定したPC鋼棒をアムスラーにより両引きすることで行った(図-1(b)上)。その後の圧縮試験は、4本の主筋をコンクリートからの出の長さが40mm程度に切断し、そこに有孔の圧縮用プレート(厚さ51mm)を被せ(図-1(a)右)、鉄筋とプレートとの隙間に無収縮モルタルを充填し、同プレートで載荷することで行った(図-1(b)下)。パラメータとした引張量は、壁部材において

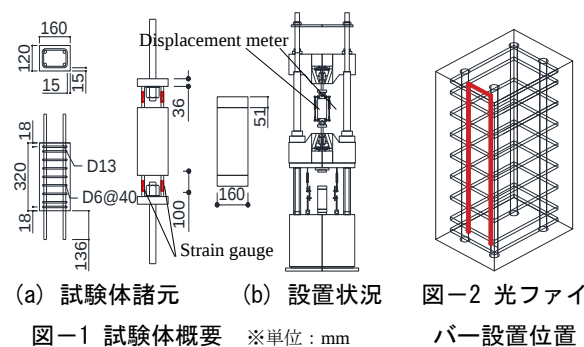


表-1 鉄筋の材料特性 ※単位: MPa

種類	降伏強度	引張強さ	ヤング係数
D13 (SD295)	353.4	493.3	2.02×10^5
D6 (SD295)	331.2	515.7	2.02×10^5

表-2 コンクリートの材料特性 ※単位: MPa

圧縮強度	割裂強度	ヤング係数
33.5	2.8	2.60×10^4

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境工学専攻(学生会員)

*2 東京大学生産技術研究所 准教授・博士(工学)(正会員)

*3 大阪工業大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)(正会員)

*4 名古屋大学減災連携研究センター 准教授・博士(工学)(正会員)

①主筋降伏が生じる以前、②変形角 1/100 程度、③変形角 1/50 程度、をそれぞれ想定し、引張ひずみが①0 μ (試験体 T0 : 事前の引張を行わない場合)、②10,000 μ (試験体 T1)、③20,000 μ (試験体 T2)、の計三種類とした。無筋コンクリートも①と同様に事前の引張荷重は行わない。

2.3 計測計画

引張荷重時には、図-1(a)中に示すひずみゲージにより試験体を貫通する各鉄筋両端のひずみを、図-1(b)上に示す鉛直変位計により試験体全体の総伸び量を、それぞれ計測した。圧縮荷重時には、図-1(b)下に示すアムスラー間に設けた鉛直変位計により試験体の総縮み量を計測した。ただし、圧縮荷重時の変位計計測値には載荷プレートおよびアムスラー載荷治具の変位を含んだため、それに関しては、同変位を含まない計測を行った載荷試験の結果との比較に基づき取り除いた。

また、両荷重時には、試験体内部の詳細な主筋ひずみ分布を把握するため、図-2 に赤色で示すとおり、ポリイミドコーティングされた光ファイバーゲージを、研磨した主筋のリブ部にアクリル系接着材で貼付した。計測時のゲージ長は 2 mm である。

3 実験結果

3.1 応力度-ひずみ関係

作用荷重を試験体断面積で除することで応力度を、鉛直

変位計計測値を試験体高さで除すことでひずみをそれぞれ求め、両者の関係を図-3 に示す。同図より、事前引張荷重を行った T1、T2 は、それを行っていない T0 と比べて最大圧縮荷重が約 6%~10%低下し、その時のひずみは約 85%~93%増大した。これは、かぶり剥落後のポストピークの曲線が三試験体で同様であることを踏まえると、引張荷重によってかぶりコンクリートの圧縮力負担分が低下したためであると推察される。

3.2 高さ方向のひずみ・応力度分布

図-4、5 に光ファイバーにより計測された T0、T1 の主筋ひずみ分布を、図-8 にそれに基づき以下のように計算した主筋応力度分布をそれぞれ示す。すなわち、主筋の構成則として材料試験結果を用いた完全弾塑性モデルを仮定し、計測ステップ間に生じたひずみ増減にヤング係数を乗じて足し合わせることで応力度を算出した。各図のプロットに対応する計測ステップは図-3 に示す

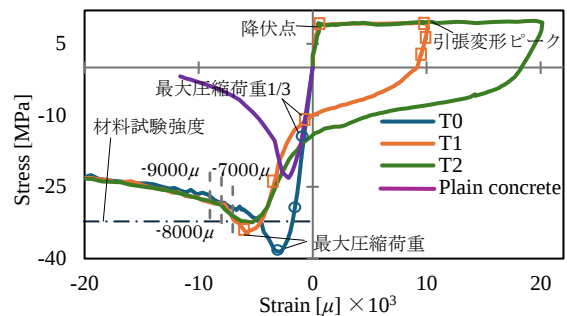


図-3 平均応力度 - 平均ひずみ関係

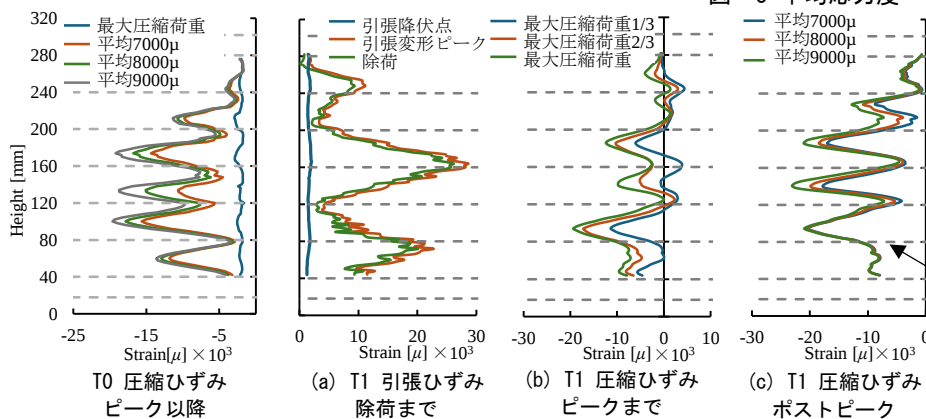


図-4 T0 主筋ひずみ分布

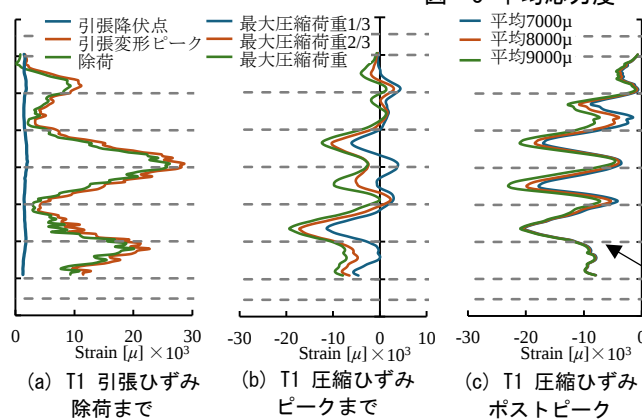


図-5 T1 主筋ひずみ分布

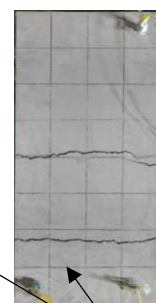


図-6 T1 引張時写真

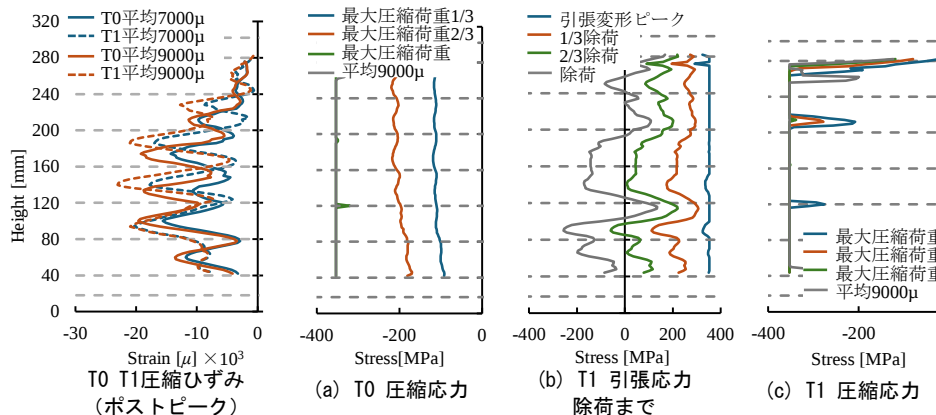


図-7 T0 T1 主筋ひずみ分布比較

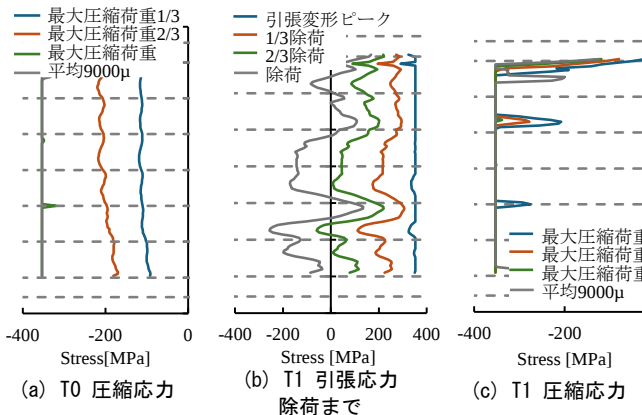


図-8 主筋応力度分布



図-9 T1 圧縮時写真

とおりである。図-6, 9 は T1 の引張載荷時・圧縮載荷時それぞれの変形ピーク時の写真である。

ひずみ分布は、事前の引張載荷を受けていない T0 は、最大圧縮荷重まではほぼ均一となっているが、それ以降は補強筋間において増大している（図-4）。一方、事前の引張載荷を受けた T1 では、引張時（図-5(a)）はひび割れ箇所に対応してひずみが増大し、最大圧縮荷重まで（図-5(b)）はひび割れ位置の圧縮ひずみが特に顕著に増大するものの、それ以降（図-5(c)）は T0 と同様に補強筋間においてひずみが増大した。圧縮時における二試験体のひずみ分布の違いを明確に示すべく、図-7 にポストピークの両ひずみ分布をそれぞれ比較している。

応力度分布に関しては、図-8(a) より、T0 は高さ方向に概ね均一に増大し、圧縮平均 9000 μ 時には全計測区間で降伏に達している。一方、T1 は、引張除荷時（図-8(b)）におけるひび割れ箇所近傍の圧縮応力が比較的大きく、圧縮載荷時（図-8(c)）には早期（最大圧縮荷重 1/3）において既に大半の領域が降伏応力に達している。すなわち、引張載荷時においてひび割れが発生した領域付近ではコンクリートの圧縮応力負担が比較的小さく、そのため同位置の主筋の降伏が先行した。これが最大圧縮荷重時のひずみが増大した要因と考えられる。

以上、事前の引張載荷が圧縮破壊性状に与えた影響を定量的に把握した。

4. 非線形 FEM 解析

4.1 FEM 解析モデル概要

上記実験の再現解析概要を本章に記す。本稿の目的は FEM 解析の再現性の検証のため、一般的なモデル条件として設定した結果をそのまま実験結果と比較する。

(1) 構成モデル

本研究では、三次元 FEM 解析プログラム DIANA ver10.8 を用いて解析を行った。ここでは、ソリッド要素を用いた解析と、より計算負荷の小さいカーブドシェル要素を用いた解析を、試験体 T0, T1, 無筋試験体に対して行った（T2 は、圧縮載荷時のファイバーストレイン計測結果が得られていないこと、応力度 - ひずみ関係が T1 と同様となったことを踏まえ、本稿では対象としない）。モデルの概要図を図-13 に示す。

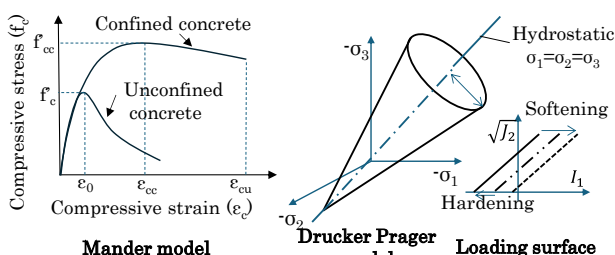


図-10 コンクリート要素構成則

コンクリートは、アイソパラメトリック八節点六面体ソリッド要素もしくはアイソパラメトリック八節点四辺形カーブドシェル要素によりモデル化した。後者は、要素の法線方向の応力度が強制的に 0 になり、また、要素の厚み方向に積分点を有し、面内のひずみ分布は面外方向に線形となるように仮定されるモデルである。

鉄筋は、埋め込み鉄筋要素で作成した。鉄筋要素とコンクリート要素の間には、CEB-FIP⁵⁾で提案された付着滑りモデルを設定した。またシェルモデルでは横補強筋の拘束効果を自然に再現できないため、(2)に後述するように、拘束領域のコンクリートは、拘束効果を経験的に見込んだ強度および軟化曲線を定義した。メッシュサイズは、荷重変形関係にそれによる有意な差が概ね見られなくなった 16 mm とした。

(2) 材料モデル

図-10 にコンクリート要素、図-11 に鉄筋要素、図-12 に鉄筋とコンクリート間の付着に使用した材料構成則の概要図を示す。コンクリート要素は、ソリッドモデルでは Drucker Prager 型構成則および同破壊基準を用い、パラメータは無筋試験体によって得られる曲線を用いて文献⁹⁾で提案された手順により定めた。同モデルは、補強筋による側圧を受けた際の三軸応力下におけるコンクリートの挙動を再現できることが知られている。引張挙動は Hordik による軟化曲線を使用し、その際、引張強度および引張破壊エネルギーは CEB-FIP⁵⁾による提案式を用いて算出した。ひび割れモデルについては、分散ひび割れモデルを使用した。シェルモデルでは、圧縮側は Mander らが提案した定式化⁷⁾に従って定義し、要素内で一様なコンクリート材料を仮定し、図-13 のように区分するかぶりコンクリートとコアコンクリートの平均的な応力度 - ひずみ曲線を用いた。引張およびひび割れモデルについては、ソリッドモデルと同様のものを使用した。

鉄筋要素は、Von Mises 塑性モデルの移動硬化則を用いて、実験の材料試験による値からひずみ硬化域まで含めたマルチリニア型の直線でモデル化した。

(3) 拘束条件・載荷条件

引張載荷および圧縮載荷は、鋼材プレートを変位制御することで行った。鋼材プレートは弾性材でモデル化し、上部プレートの上面および下部プレートの底面の並進方

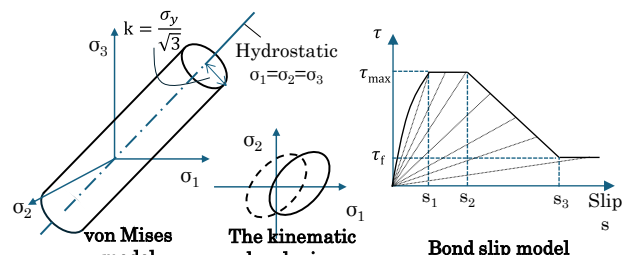


図-11 鉄筋要素構成則

図-12 付着滑りモデル

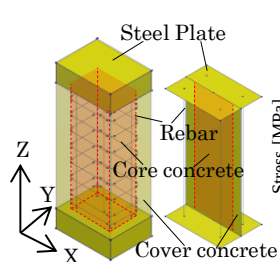


図-13 FEM 解析モデル

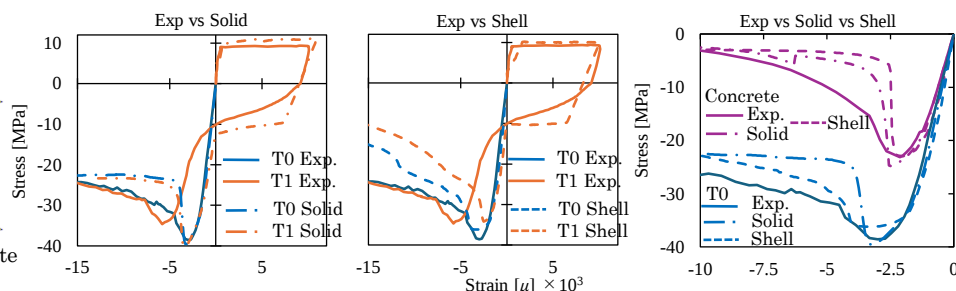


図-14 平均応力度 - 平均ひずみ関係

向は拘束した。T1 試験体における引張载荷から圧縮载荷を一連の解析で再現するため、鋼材プレートとコンクリート要素間には、引張载荷時に剛性ゼロ、圧縮载荷時に十分剛となる要素を設定した。鋼材プレートと主筋端部は常に同変位となるように設定した。

4.2 解析結果

以上の条件のもと、図-14 にソリッドモデルおよびシェルモデルの解析結果を実験値と合わせて示す。同図は応力度 - ひずみ関係を示しており、解析における応力度は、プレートにかかる反力を全断面で除した平均応力度、ひずみはコンクリート要素の上下端の相対変位をその区間距離で除した平均ひずみとした。

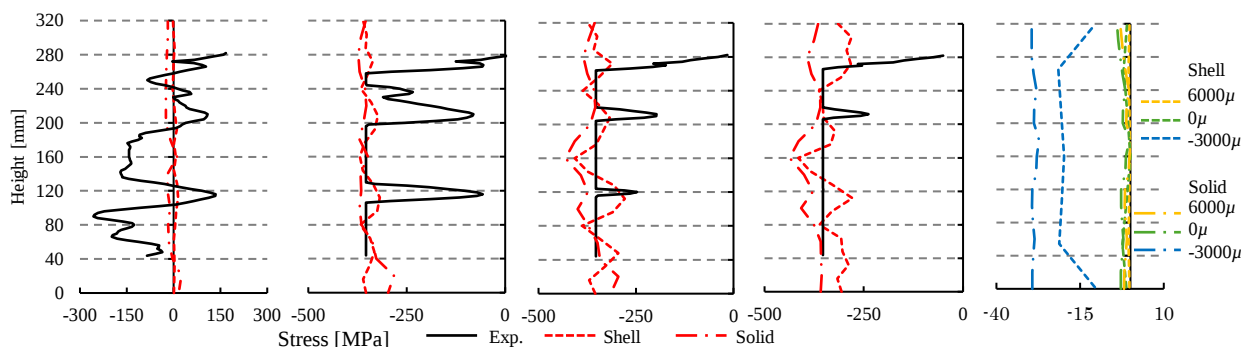
T0 においては、両モデルで圧縮耐力をおおむね良好に再現したものの、負勾配域について両モデルとも実験を過小評価した。これは無筋試験体でも同様であり、この要因としては、4.4 節に示すように、実験に比べてひずみの局所化が早期に生じたことが考えられる。

T1 においては、まず引張力除荷後、圧縮载荷開始から最大圧縮荷重までを見ると、実験では徐々に剛性が上昇し、ひび割れが閉鎖する平均 -3000μ 程度で剛性が急激に上昇するのに対し、両解析モデルでは圧縮载荷直後から試験体全断面積に対し4本の主筋のみが圧縮力を負担する状態の見かけの剛性 5500 kN/mm^2 程度で推移した後、それらが一斉に降伏して勾配が急減し、その後平均ひずみの正負が反転した（コンクリートひずみが圧縮に転じた）時点で剛性が急激に増大した。これに伴い、実験で

みられた圧縮耐力時のひずみ増大についても再現されていない。これらの差異は主に、ひび割れ近傍における主筋ひずみの集中、および、T0 試験体でも先述した圧縮载荷時ポストピークにおけるひずみの局所化の再現性によるものと考えられるため、これらに焦点をあて、実験と解析で差異が生じたメカニズムをそれぞれ以降に詳細に検討する。なお、かぶりコンクリートの剥落によると考えられる最大耐力の低下も解析では再現できておらず、これは鉄筋-コンクリート間の付着性状の再現性によるものと考えられるが、この詳細な分析は今後の課題とする。

4.3 ひび割れ部における主筋ひずみの集中挙動

T1 の圧縮载荷時の応力度分布を図-15 に示す。実験において、除荷時（図-15(a)）から圧縮平均 2000μ （図-15(d)）まで、ひび割れ位置近傍での応力の増分が顕著であった。ひび割れ間で主筋の応力の進展が緩やかであったことから、コンクリートが圧縮応力を負担していると推察される。それに対し両解析で、除荷時には主筋の応力度が高さ方向一様に0となり、引張平均 6000μ （図-15(b)）、圧縮平均 2000μ 時点までそのまま概ね一様に主筋の応力が増大し、シェルモデル、ソリッドモデルともに、図-15(e)に示すコンクリートのみの断面内平均応力度分布は平均 0μ までほとんど応力を負担していない。上記は、主筋からコンクリートへの応力伝達の違いによるものと考えられる。文献9)では、引張载荷の除荷時に、ひび割れ間では主筋近傍のコンクリートの引張塑性変形により主筋の縮みが拘束され、ひび割れ位置でのひずみ



(a) 主筋：除荷時 (b) 主筋：平均 6000μ (c) 主筋：平均 0μ (d) 主筋：平均 -2000μ (e) コンクリート断面平均
図-15 T1 の鉄筋 (a)～(d) およびコンクリート (e) の応力度分布

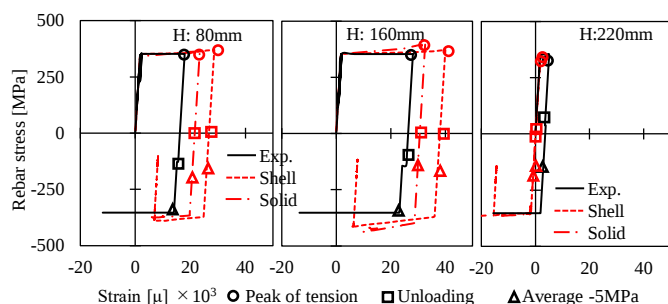


図-16 各高さの鉄筋応力度 - ひずみ関係

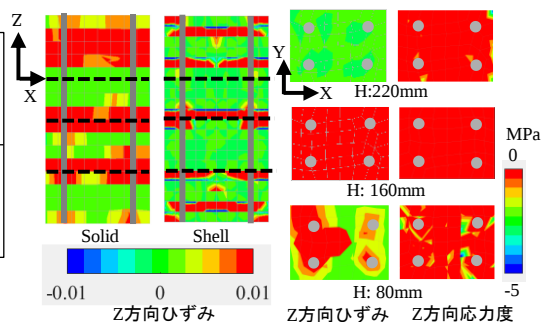


図-17 除荷時コンクリートひずみ応力度分布

の進展が相対的に早いこと、また、ひび割れ間ではコンクリートが圧縮応力を負担していることが示されている。本稿の実験においても図-8(b)のように、同現象に整合する応力・ひずみ分布が得られている。それに比べ解析では、図-16に各高さにおける主筋の応力度-ひずみ関係を比較するとおり、ひび割れの発生した高さ 80 mm および 160 mm で圧縮ひずみの進展が緩やかであり、一方でひび割れ間に対応する高さ 220 mm で同ひずみの進展が早い。さらに、引張力除荷時について、主筋を含む鉛直断面の Z 方向ひずみ分布を図-17(左)に、ソリッドモデルについては加えて水平方向断面の Z 方向ひずみおよび Z 方向応力度分布を図-17(右)に、それぞれ示す。同図より、付着モデルの存在により離散的なひび割れは再現され、ひび割れ位置において引張ひずみが比較的大きい傾向は得られているものの、実験や文献 9) で見られた、ひび割れ間のコンクリートが圧縮力を負担する現象は再現できていない。これは、付着応力-すべり関係に原点回帰型の除荷時モデルを用いたため、コンクリートが主筋の縮みを拘束することで鉄筋からコンクリートに圧縮応力が伝達される先述の現象を再現できなかったことが主な要因と考えられる。そのため、付着滑りモデルにおいて、文献 9) で指摘されるように、除荷時剛性が原点回帰型よりも高くなる実状を反映することで、本現象を再現し得ると推察する。

4.4 圧縮荷重時ポストピークのひずみ局所化挙動

圧縮荷重時のポストピーク挙動を比較するため、図-18(a), (b)に T0 の圧縮 8000 μ 時のひずみ分布および応力度分布を示す。ソリッドモデルでは、試験体中央付近にひずみ・応力が增大した点においては実験と同様の傾向であったが、より高いひずみ・応力が狭い範囲で集中した。一方、シェルモデルでは、端部で顕著にひずみ・応力が增大した。このひずみ局所化の差異が生じたメカニズムを分析するため、局所化挙動が進行し始める最大圧縮荷重時以降を対象に、試験体の応力・変形状態を分析する。分析対象は無筋試験体と T0 とし、T1 は T0 とポストピーク挙動が概ね一致したため本稿では省略する。

図-19 および図-21 に、無筋試験体および T0 につい

て、最大圧縮荷重時の、平面的な重心位置を通る鉛直断面の Z 方向応力度分布と変形図をそれぞれ示す。さらに無筋試験体については、図-20 に、最大圧縮荷重後の急激な耐力低下後の Z 方向応力およびひずみを、鉛直断面ならびに中央高さの水平断面について示す。図-19 より、ソリッドモデルでは、両試験体において圧縮応力束が中央に形成され、中央高さ付近が横方向に膨張する一般的な圧縮破壊性状を示している。ただし、図-20 に示すとおり、最大荷重直後には中央の圧縮応力束の応力負担が急減し、そのひずみの進展とともに耐力が低下した。この耐力の急減に関する実験との差異に関しては、適切な材料構成則の設定による改善の余地があるものの、それには今後のさらなる検討を要する。一方、シェルモデルでは、図-21 より、圧縮応力束や中央高さ付近での横膨張は見られず、試験体上下端に応力が集中した。

さらにシェルモデルで上下端に応力が集中した要因を詳細に分析するべく、図-22 に、同モデルで局所化が生じた高さ 270 mm (上端近傍) の水平方向断面を対象に、Y 方向と Z 方向の応力度分布の結果をソリッドモデルとシェルモデルで比較する。なお、シェルモデルの結果は、面外方向の積分点三点それぞれの面での値を線形補完したものである。同図より、両試験体共通で、ソリッドモデルでは Y 方向に最大 2 MPa 程度の圧縮応力度が生じており、この端部鋼材プレートによる側圧により Z

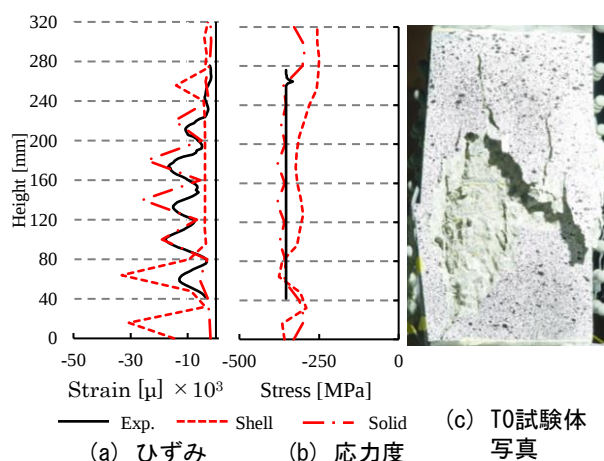


図-18 T0 試験体圧縮 8000 μ 時の損傷状況

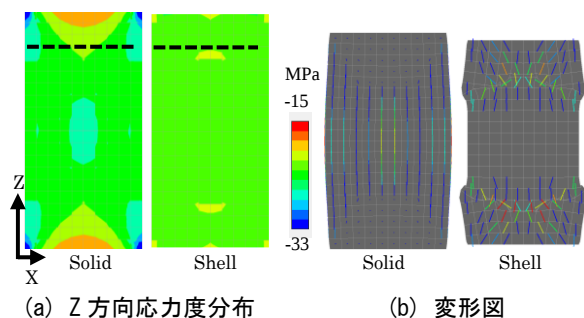


図-19 無筋試験体の最大圧縮荷重時応力・変形状態

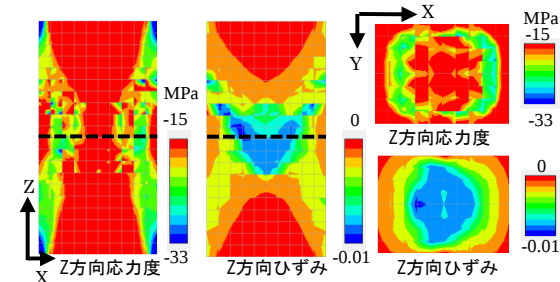


図-20 ソリッドモデルにおける無筋試験体の最大圧縮荷重後のZ方向ひずみ・応力度分布

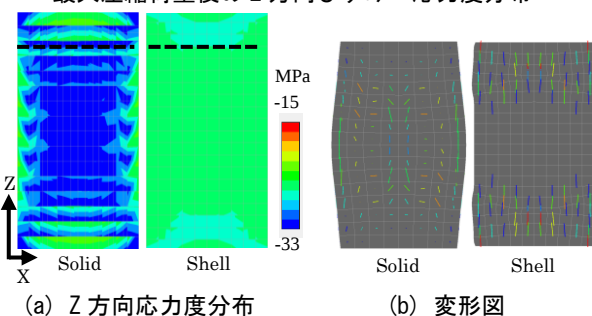


図-21 試験体 T0 の最大圧縮荷重時応力・変形状態

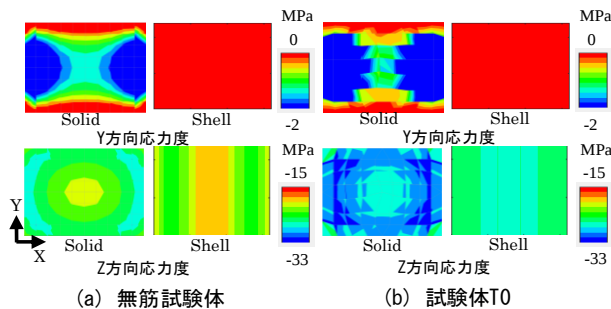


図-22 Y方向・Z方向の応力度分布

方向応力が増大し圧縮束を形成した。一方、シェルモデルでは、モデルの特性上、同様の側圧の影響はX方向のみに生じ、Y方向では生じずに（Y方向応力度は常に0 MPa）上下端で早期に破壊が生じた。これが、シェルモデルにおいて、実験と整合する破壊性状が再現できない要因と考えられる。

5. まとめ

補強筋拘束を有するRC造直方体試験体を対象に、事前引張量をパラメータとした圧縮破壊試験を実施した。さらに、FEM解析によるその再現性について、一般的な

パラメータを用いたソリッドモデルとシェルモデルを対象に確認した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 事前引張荷重時のかぶりコンクリートの損傷によると考えられる圧縮耐力の低下、ならびに、引張荷重時に生じたひび割れ近傍において圧縮荷重時に主筋ひずみが集中し、そこが先行的に降伏することによる圧縮耐力時ひずみの増大が確認された。ポストピーク挙動は、補強筋拘束の影響により、事前引張量によらず概ね一致した。
- (2) FEM解析では、引張除荷時にひび割れ近傍において主筋のひずみが集中する現象を再現できておらず、それに伴いその後の圧縮荷重時に同箇所が先行して降伏し圧縮耐力時ひずみが増大する現象を再現できなかった。これは、付着滑りの除荷時モデルに因ると考えられる。
- (3) ポストピークでは、圧縮荷重時に一般的に見られる中央高さ付近の横膨張とそれに伴う圧縮束の形成が、ソリッドモデルでは見られたものの実験よりも顕著な局所化により耐力が急激に低下した。シェルモデルでは、モデルの特性上、面外方向の応力を考慮できないため、上記破壊性状を再現できず上下端において破壊が先行した。
- (4) 以上、FEM解析は実験結果の凡その傾向は捉えたものの、ポストピークや付着滑りのモデルを改善することで、より精緻な挙動再現が可能になると考えられる。

謝辞

本研究の一部は令和5年度セコム科学技術振興財団一般研究助成「DXによる建築設計の変革を見据えた包括的耐震性能評価手法の構築(研究代表者：浅井竜也)」の下に実施しました。

参考文献

- 1) Farhad Dashti: Evolution of Out-of-plane Deformation and Subsequent Instability in Rectangular RC Walls under In-plane Cyclic Loading: Experimental Observation, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 47, Issue 15, Dec. 2018
- 2) Tarquini, D., et al.: Uniaxial Cyclic Tests on Reinforced Concrete Members with Lap Splices, Earthquake Spectra, Vol.35, No.2, pp.1023-1043, May 2019.
- 3) 伊藤誠ほか：中心軸圧縮を受けるコンファインドコンクリートの内部性状に関する解析的研究，応用力学論文集，Vol.10，pp.391-402，2007.8
- 4) 廣鹿詩ほか：RC造耐震壁脚部の曲げ圧縮破壊性状に及ぼす事前引張力の影響 - 圧縮破壊領域を取り出した静的載荷実験に基づく検討 -，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.393-394，2024.7
- 5) fib Model Code 2010, Vol.1, Final Draft, fib bulletin 66, 2012
- 6) 田辺忠顕ほか：コンクリート材料統一弾塑性モデル，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.21-29，1994.8
- 7) Mander J. B. et al.: Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, Volume114, Issue8, pp.1804-1826, 1988
- 8) 壹岐直之ほか：除荷時における異形鉄筋の局所付着特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.817-822，2002