

論文 接合部の挙動に着目したマルチスケール解析による RC 造耐震壁試験体の挙動評価

佐藤 真俊*1・相澤 直之*2・佐々木 義志*3・櫻井 真人*4

要旨：近年、RC 造のインフラ構造物における老朽化が深刻化しており、供用中に発生した微細なひび割れや環境条件による構造性能の変化が躯体の弾性時の挙動に影響を与える可能性について指摘されている。本研究では接合要素を導入した RC 造耐震壁のマルチスケール解析を適用し、実験において接合部付近の曲率が大きくなり曲げ変位の発生が確認される現象の再現を試みた。解析の結果、耐震壁のフランジ基部における剥離や鉄筋の抜け出しを考慮することで曲げ変位が最大 20%程度増大することを確認した。

キーワード：耐震壁，マルチスケール解析，静的載荷解析，接合要素，鉄筋抜け出し

1. はじめに

RC 構造物に対する応力解析においては、設計時の剛性や強度を用いて部材復元力特性を設定することが通常であり、養生・曝露期間の影響は考慮されていない。しかしながら、コンクリートという材料の特性上、養生・曝露期間の影響により要素レベル・構造物レベルの剛性は時々刻々と変化する。

櫻井らは養生・曝露期間の異なる試験体に対し繰り返し載荷実験^{1),2),3)}(以降、実験と称する)を行うとともに、マルチスケール解析 (DuCOM-COM3 連成解析⁴⁾) による実験の再現を実施することで、養生・曝露期間の温度時刻歴が荷重-変位曲線の勾配に影響を与えていることを指摘した⁵⁾。ただし、実験では耐震壁基部と下スタブの接合部 (以降、接合部と称する) における剥離や鉄筋の抜け出しが確認されている一方、解析では環境条件・拘束条件による影響を確認するために接合部での完全固着を仮定している。そのため、実験と比較して試験体に発生する曲率が小さく、載荷時における曲げ挙動を過小評価していた。

本研究では耐震壁試験体モデルに接合要素^{6),7)}を導入し、載荷時における試験体の曲げ挙動の改善を試みる。また、接合部における剥離や鉄筋の変形がどの程度発生しているかの分析を行う。なお、本研究では接合要素を導入したマルチスケール解析が実現できる解析ソフトとして LINK3D を使用している。

2. 接合要素のモデル化と解析条件

2.1 耐震壁試験体および解析モデル概要

本研究では根本らによる研究⁵⁾で用いられた耐震壁解析モデルと同一のものを採用する。根本ら⁵⁾は実験^{1),2),3)}

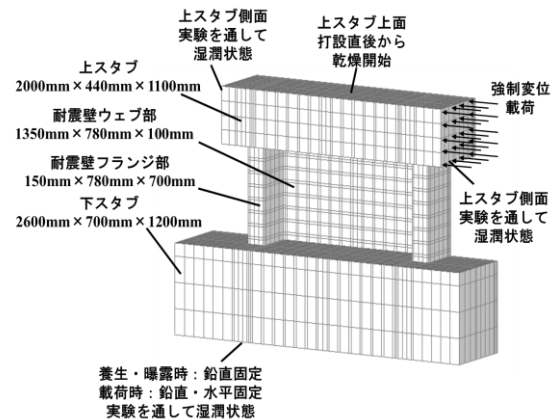


図-1 既往の研究⁵⁾で用いた解析モデル (1/2 モデル)

表-1 試験体名 (解析ケース) と環境条件一覧

試験体名	養生・曝露期間
WCD-A	1ヶ月 (養生 27日+曝露 6日)
WD3	7ヶ月 (養生 27日+曝露 180日)
WD4	11ヶ月 (養生 27日+曝露 283日)

で用いた試験体と同スケールの解析モデル (図-1) を三次元ソリッド要素にて作成し、表-1に示す3つの養生・曝露期間を解析ケースとし、それぞれの環境条件を付与した後に静的載荷解析を実施している。なお、図-1の解析モデルは形状および実験条件を考慮し、奥行方向の中心位置に対称境界を設置した 1/2 モデルとなっている。拘束条件は養生・曝露時と載荷時で変更しており、養生・曝露時は下スタブ底面の鉛直自由度を固定、載荷時は下スタブ底面の並進自由度を全て固定している。

なお、ウェブ部の配筋は D10@100(ダブル)、フランジ部の配筋は主筋が 16-D10、補強筋が D10@100、上下スタブは主筋が 26-D22、補強筋が D19@100 であり、これをソリッド要素への鉄筋比を設定することで表現してい

*1 東北電力 (株) 発電カンパニー土木建築部 (原子力建築) 修(工) (正会員)

*2 東北電力 (株) 発電カンパニー土木建築部 課長

*3 (株) 構造計画研究所 防災・環境部環境推進室 修(工)

*4 秋田県立大学 システム科学技術部建築環境システム学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリート、鉄筋、接合要素の材料パラメータ

コンクリート		鉄筋		接合要素	
ヤング係数	33500N/mm ²	ヤング係数	176000N/mm ²	ヤング係数	33500N/mm ² (コンクリートと同一)
圧縮強度	47.5N/mm ²	降伏強度	345N/mm ²	せん断剛性	14111N/mm ²
引張強度	3.0N/mm ²	引張強度	483N/mm ²	鉄筋径	耐震壁ウェブ基部 : D10 耐震壁フランジ基部 : D16
ポアソン比	0.187	ポアソン比	0.3	鉄筋比	図-3 を参照
質量密度	2.27t/m ³	質量密度	7.85t/m ³	付着長	700mm

る。表-2 にコンクリート、鉄筋、接合要素の材料パラメータを示す。コンクリートは普通ポルトランドセメントであり、水セメント比は 55%、粗骨材の最大寸法は 10mm である。

コンクリートの構成則として Maekawa ら⁶⁾による弾塑性破壊モデル(図-2)を用いる。ここで、 ϵ_{peak} は圧縮強度に対するひずみ、 ϵ_{max} は過去に受けた圧縮ひずみの最大値、 ϵ'_p は塑性ひずみ、 K は弾性剛性残存率、 ϵ_t は引張強度に対するひずみ、 f'_{cd} は設計圧縮強度、 f'_c 、 f_t はそれぞれコンクリートの圧縮強度および引張強度である。本構成則では、コンクリートの引張軟化挙動が引張軟化係数 c を指数に持つ指数関数に従うと仮定しており、根本ら⁵⁾は c の値として鉄筋コンクリート部に 0.4、無筋コンクリート部に 2.0 を設定している。

圧縮側の挙動は過去に発生した最大ひずみをもとに弾性剛性残存率と塑性ひずみを算定し、これらの値に応じて剛性や応力が変化することを仮定したモデルである。

鉄筋に関しては破断ひずみを 0.18 とするバイリニア型の構成則を適用している。

2.2 接合要素のモデル化

本研究では、鉄筋を層状置換したコンクリート要素によるモデル化手法を用いた場合においてもこの接合部での剥離や鉄筋の抜け出しを評価するため、図-1 のモデルの接合部に接合要素を導入する。この要素の最大の特徴として、接合面における鉄筋の引張ひずみとすべりの関係が規定されており、鉄筋を線要素として個別にモデル化することなく鉄筋のすべり量や変形量を評価することが可能となる。

図-3 に接合部における鉄筋の引張ひずみ-すべり関係の模式図を示す。鉄筋の降伏からひずみ硬化が始まるまでを除き、ひずみの増加に伴いすべり量が単調に増加するモデルとなっている。なお、 ϵ_{sh} がひずみ硬化開始時のひずみ、 s_y は降伏ひずみ時のすべり量、 f_y 、 f_u はそれぞれ鉄筋の降伏強度および引張強度である。

図-4 に接合要素のモデル化と鉄筋比の設定状況を示す。図は接合要素の位置関係が分かるよう下スタブと耐震壁(ウェブ・フランジ)を表示させており、接合要素はこの下スタブと耐震壁の間に厚さ 0mm のソリッド要

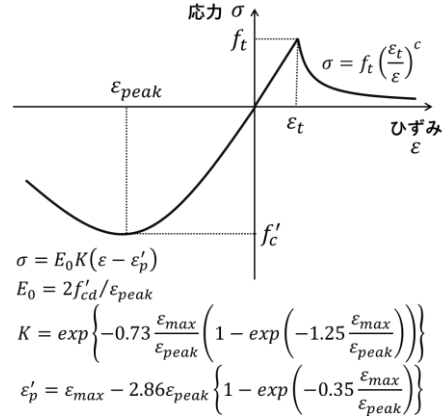


図-2 解析に用いたコンクリートの構成則⁶⁾

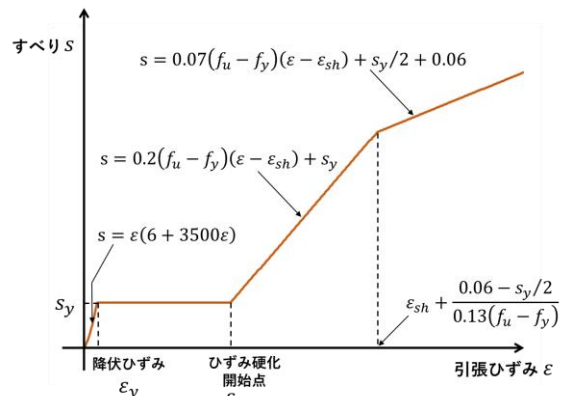


図-3 接合部における鉄筋の引張ひずみ-すべり関係^{6),7)}

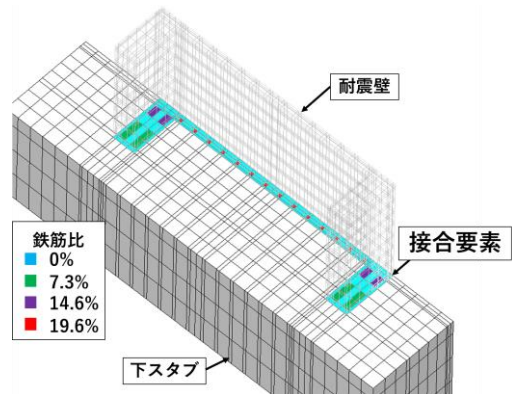


図-4 接合要素のモデル化と鉄筋比の設定

素として導入する。また、鉄筋比は壁面の配筋状況に基づき、鉄筋と接合要素の断面積の比を図-4 の通りに設定している。

接合要素のせん断剛性はコンクリートのヤング係数とポアソン比から算定される値となっており、純粋な圧

縮とせん断に対してはコンクリートと同様の挙動を示す。ただし、引張により剥離が生じた場合、せん断力は伝達されない。鉄筋比が0でない接合要素では、鉄筋比と付着長をもとに接合部における鉄筋のひずみが算出され、そのひずみに応じて図-3の関係に基づき鉄筋のすべり量が評価される⁴⁾。

2.3 解析条件

本研究では根本ら⁵⁾による解析条件と同一の条件の下で、接合要素を導入した解析モデルを用いたマルチスケール解析を実施する。すなわち、解析ケースごとに異なる養生・曝露期間を設定した後、上スタブへの静的载荷を実施する。養生・曝露期間における試験体の拘束条件・環境境界条件は図-1に示す通りである。耐震壁および上スタブの側面に与える湿度条件については、養生中(~27日)は90%で一定とし、27日以降は実験における観測値を付与することで脱型を模擬する。温度条件については養生・曝露期間中の実測値を各環境境界面へと入力する。なお、上記で与える温度および湿度は実験時の状況に近づけるため、すべて実測値の時刻歴である。

静的载荷フェーズにおいては、上スタブへの最大载荷変位が10mmとなるプッシュオーバー解析を実施する。解析は温度・湿度の観測値の計測間隔6時間を1ステップとしているが、打設直後は短期間で反応が進行するため、打設から3日までは14分を、3~27日は2.4時間を1ステップとして計算するよう補間している。一連の解析において接合要素自体はマルチスケール解析の影響を受けないが、隣接するコンクリート要素に収縮等が生じると接合要素にも変形が生じることとなる。

3. マルチスケール解析による再現解析結果の分析

3.1 曲率分布

実験では両フランジの高さ方向に変位計を複数点設置

し、各点の鉛直変位を計測している。曲率の算定にあたっては微小変形を仮定しており、両フランジの鉛直変位の差(弧に相当)を試験体の幅で除すことで各区間の回転角を算定している。そして、回転角を各区間長で除した値を本研究における曲率と定義している。実験・解析における区間分けを図-5に示す。解析モデルの作成にあたっては、実験における変位計の設置位置で必ずしも要素を分割しているわけではないため、区間の取り方に若干の差が生じている。

図-6にWCD-A, WD3, WD4それぞれに対する曲率分布を示す。曲率分布は接合要素をモデル化した結果に加え接合要素をモデル化しない結果と実験結果の3通りについて描画しており、実験結果・解析結果とも曲げ変位が0.65mmとなる時の値を示している。本研究における曲げ変位は、曲率の算定過程で得られる各区間の回転角と载荷点から各区間中央までの距離の積について全区間の総和を取った値と定義しており、上記の曲げ変位0.65mmは接合要素なしのモデルにおいて最大荷重値が発生するときの変位である。

これらの図より、いずれのケースにおいても接合要素

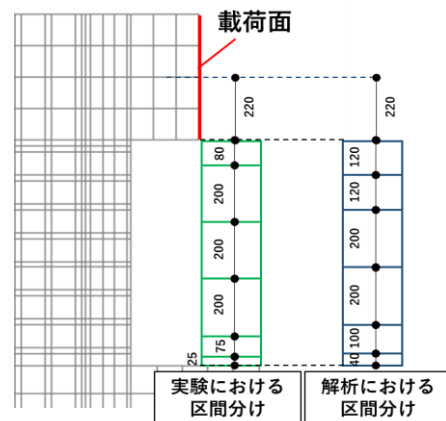


図-5 曲率算定のための区間分け

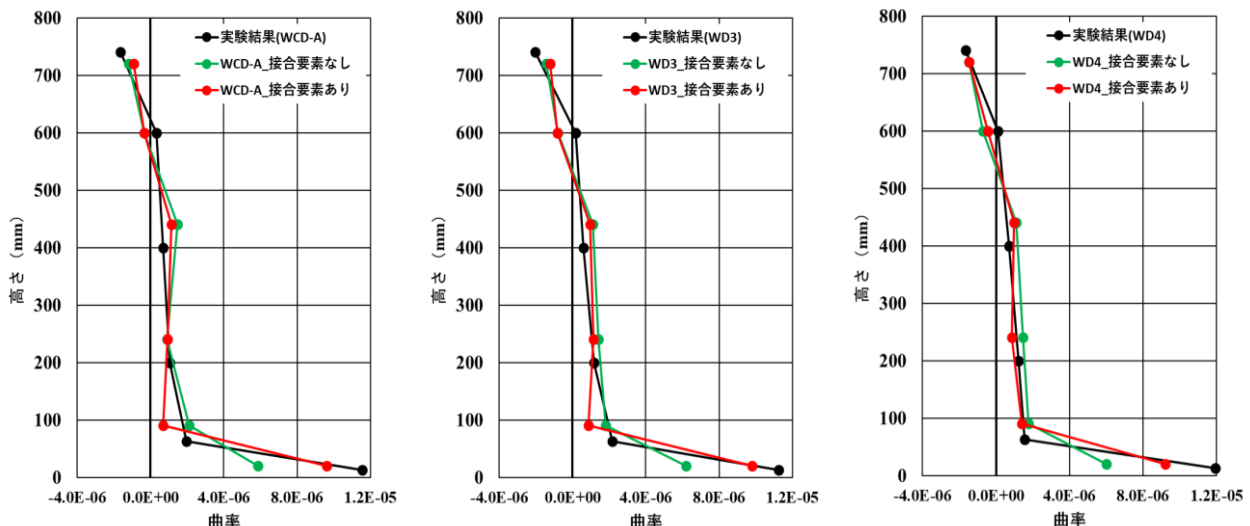


図-6 実験と解析における曲率分布の比較 (左: WCD-A, 中: WD3, 右: WD4)

の導入により試験体基部における曲率が増大し、実験結果に近づいていることが確認できる。一方、基部以外の箇所においては実験・解析双方の曲率が整合し、かつその値も小さい。

3.2 荷重-変位曲線

実験においても曲げ変形が発生していることが図-6より確認できるが、主たる破壊はせん断によって引き起こされる。図-7は実験時におけるWCD-Aの終局状態であり、耐震壁の中央にすべり面が発生するせん断破壊モードを呈する。なお、破壊性状は実験を行った3ケースで同一であり、代表してWCD-Aの結果を示している。本節では接合要素をモデル化することによる曲げ挙動への影響と破壊性状に与える影響について考察を行う。

図-8は接合要素の導入により試験体の曲げ挙動がどのように変化したかを評価するため、試験体の曲げ変位を横軸に取ったWCD-A, WD3, WD4それぞれに対する荷重-曲げ変位曲線である。なお、縦軸の荷重値は荷重によって発生した基部の支点反力の合計値である。

最大耐力に至るまでの曲線の勾配に着目すると、いずれのケースにおいても接合要素をモデル化しない場合は概ね0.3mmまでは実験における荷重-曲げ変位曲線を包絡する結果となっている。一方、0.3mm以降においては曲げ変位の増加とともに乖離が徐々に大きくなっている。一方、接合要素をモデル化することで、0.3mm付近から最大耐力に至る過程において接合要素をモデル化しない場合に比べ曲げ変位が増大し、実験における荷重-曲げ変位曲線の勾配に近づくことが確認できる。接合要素のモ

デル化により、曲げ変位の最大値は接合要素をモデル化しない場合と比較してWD3では10%、WCD-AとWD4では20%程度増加する。図-6の曲率分布より接合要素の有無による違いは耐震壁基部の曲率の大小のみであることから、接合要素の導入により剥離の発生と鉄筋の抜け出しを考慮したことが、解析における曲げ変位の精度向上に寄与したと考えることができる。

図-9に載荷変位(最大10mm)を横軸に取った、WCD-A, WD3, WD4それぞれの荷重-変位曲線を示す。本試験体における曲げ変位は全体変位に比べると小さく、これらの荷重-変位曲線における極端な変化はない。最大耐力が発生する際の載荷変位も接合要素導入前とほぼ同じ4.2mmとなっている。ただし、荷重-曲げ変位曲線において最大耐力付近の変位が接合要素なしの場合に比べ増大したことに対応して、わずかではあるが図-8においても変位の増大が確認できる。

なお、材齢が経過した試験体において最大耐力が実験と解析で乖離する傾向が図-9から確認される。解析で



図-7 試験体 WCD-A の破壊状態

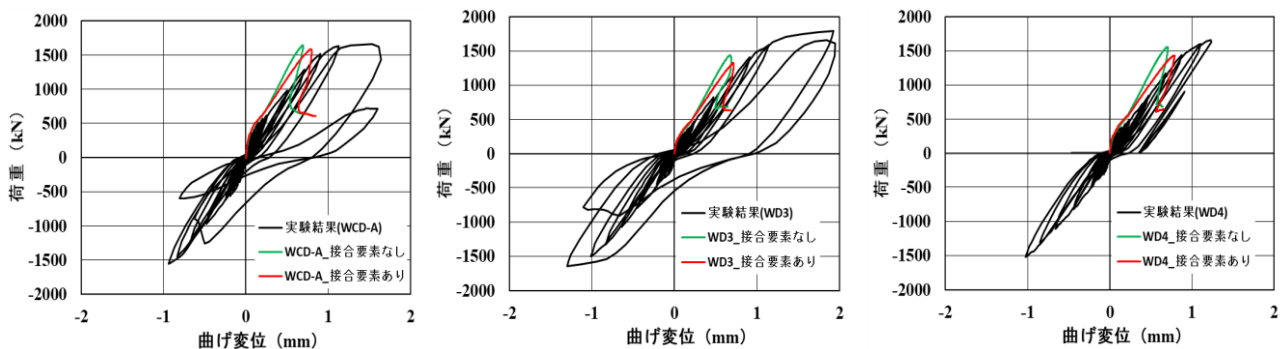


図-8 荷重-曲げ変位曲線の比較 (左: WCD-A, 中央: WD3, 右: WD4)

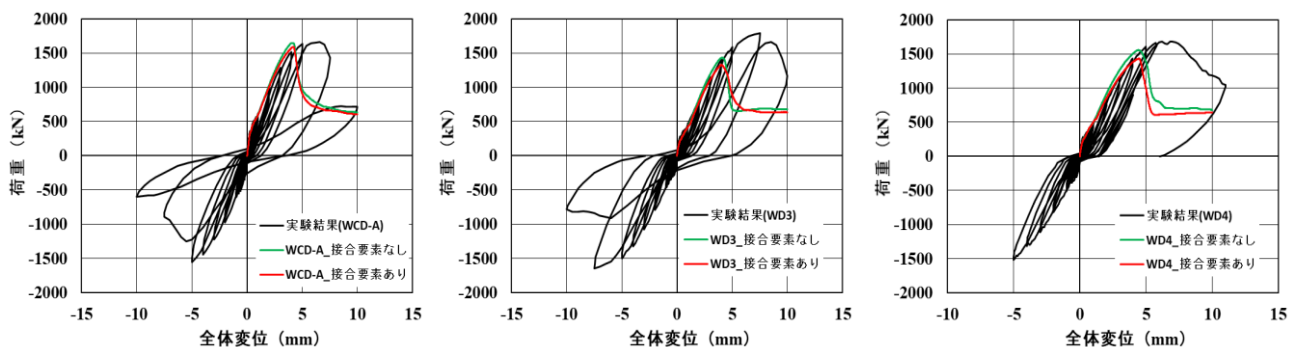


図-9 荷重-全体変位曲線の比較 (左: WCD-A, 中央: WD3, 右: WD4)

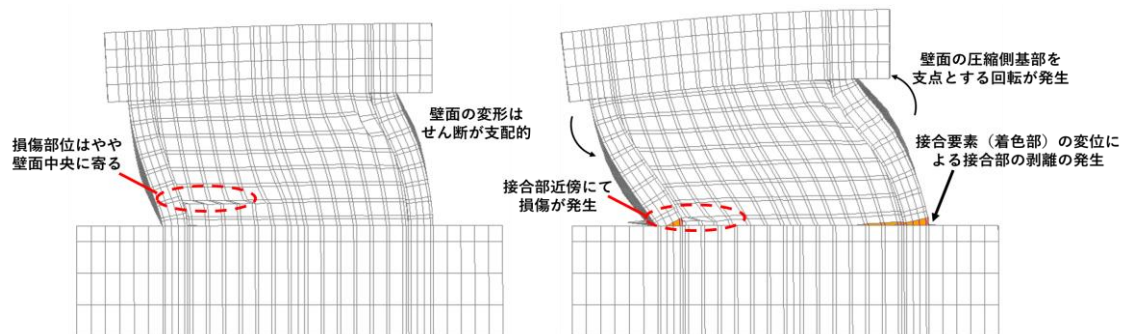


図-10 WCD-Aにおける载荷変位 4.6mm 時点での変形図 (左: 接合要素なし, 右: 接合要素あり, 倍率: 1000 倍)

は分散ひび割れモデルを用いており、養生・曝露期間に発生したクラックの影響を要素単位で平均化して扱っている。また、クラック面における接触やかみ合わせについても接触密度関数⁴⁾の考えに基づき、伝達されるせん断力はクラック幅とせん断変形量の関数で表現できるとしている。この仮定ではクラック幅が大きい場合に伝達されるせん断力は低下し、せん断変形量が大きくなった場合にはコンクリートの塑性化により伝達せん断力が頭打ちになるとしている。そのため、クラック発生による要素レベルでのせん断力の伝達能力の低下が試験体の最大耐力に影響を及ぼした可能性がある。一方、実験では材料のばらつきの影響により、クラック幅と伝達されるせん断力の関係は一意には定まらない。すなわち、養生・曝露期間中に発生したクラック面におけるかみ合わせ作用が解析におけるクラック幅とせん断力の関係よりも強く表れたことで、最大耐力の著しい低下が発生せず、解析結果との間に差が生じた一因と考えられる。

また、図-8、図-9より、接合要素をモデル化した結果、接合要素なしの場合に比べ最大耐力が WCD-A では 3%程度、WD3、WD4 では 8%程度低下していることが確認される。図-10 に最大耐力を超過した直後となる変位 4.6mm 時点での WCD-A の変形図を示す。接合要素のないモデルでは全体的にせん断変形が卓越するため、接合要素を導入したモデルに比べ変形の集中は緩やかであり、接合部からやや離れた位置においてせん断による損傷が発生している。一方、接合要素を導入したモデルでは接合部で剥離が発生するため、せん断力を伝達する接合面の面積が減少する。加えて、壁面の圧縮側基部を支点とする回転挙動が発生することから、圧縮側基部の接合部付近の狭い領域にせん断力が集中することとなり、接合要素をモデル化しない解析に比べ早期にせん断による破壊へと至った可能性がある。実験と解析では繰り返し载荷とプッシュオーバーの違いはあるが、実験における最終破壊面に近い性状を示すのは接合要素なしのモデルである。したがって、接合要素の剥離により連続性を保つ接合面の面積の減少とせん断力の局所的な集中が生じた結果、最終破壊面位置が下方へと移動し最大耐力の低下

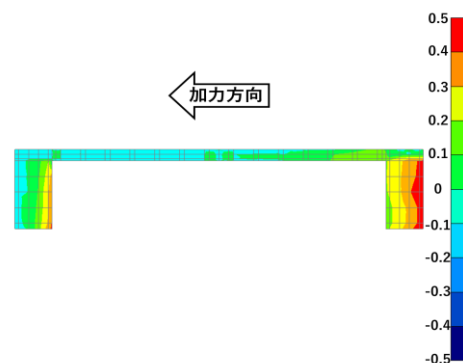


図-11 接合部における鉛直変位 (単位: mm)

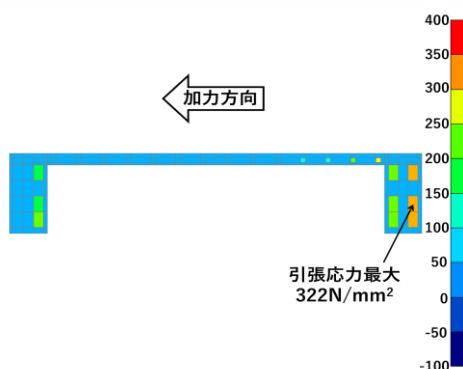


図-12 接合部における鉄筋応力 (単位: N/mm²)

が発生したと考えられる。

3.3 接合部の剥離ならびに鉄筋の抜け出し

図-11、図-12 に WCD-A の载荷変位 4.2mm における接合要素の鉛直変位ならびに鉄筋の応力分布を示す。両図は耐震壁試験体の接合部を上方から見た場合の図である。接合部の鉛直変位については接合要素の壁面側の節点の鉛直変位から下側の節点の鉛直変位を差し引くことで算定し、正值が接合部での剥離方向の変位を表す。また、今回の解析では要素に鉄筋比を設定することで鉄筋コンクリートとしての挙動を表現しており、解析にて発生する応力はその要素に発生する荷重を要素の面積で除した平均的な値となる。ただし、鉄筋コンクリート要素に引張力が作用した場合、鉄筋とコンクリートの引張強度の違いから、その荷重は鉄筋がすべて負担することとなる。すなわち、鉄筋比を設定した接合要素においても、解析結果として得られる応力は鉄筋が負担していた

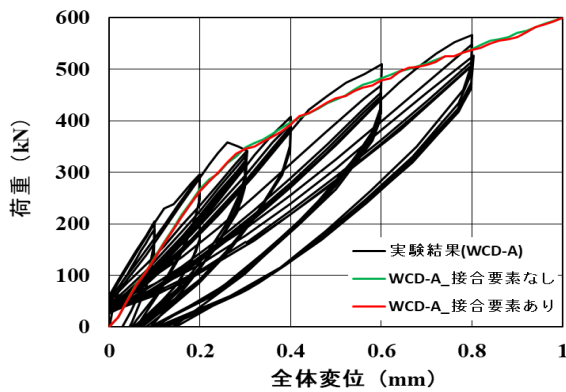


図-13 微小変形領域における荷重-変位曲線 (WCD-A)

応力を接合要素の断面積で割り戻した値であると考えることができる。したがって、接合部における鉄筋の応力を算定するために、鉄筋比を設定した接合要素に生じる要素応力を当該要素の鉄筋比で除している。なお、図-12の作成においては鉄筋の引張に着目するために、引張力が作用し、かつ鉄筋比が0でない要素においてのみ除算を実行し、圧縮力が作用、または鉄筋比が0の要素においては鉄筋応力を0とする処理を行っている。

両図より、最大耐力付近における鉛直変位ならびに鉄筋応力はいずれも加力に対して引張側となるフランジに集中していることが確認できる。一方、壁面についてはこのいずれも小さく、上下方向の顕著な変形は発生していない。ここで、鉄筋応力が最大となっている部位に着目すると、当該箇所の鉄筋のひずみは 1.83×10^{-3} となる。Maekawaら⁴⁾を参考に、鉄筋径の5倍の区間 ($5 \times 16\text{mm} = 80\text{mm}$) で上記のひずみが発生している仮定とすると、鉄筋の変形は0.15mm程度となる。図-11より、当該箇所の剥離量は0.5mm程度であることを考慮すると、鉄筋のすべり量は0.35mmであると推測できる。

ここで、既往の研究⁵⁾において着目していたせん断変形角 $1/1250\text{rad}$ (変位0.8mm) までの微小変形領域における耐震壁基部の挙動との対応を考察する。図-13は図-9の荷重-全体変位曲線において変位1.0mmまでの範囲を拡大した図であり、この範囲の解析結果は接合要素の有無によらず一致している。したがって、本試験体を対象とした微小変形領域での耐震壁の挙動評価においては、接合要素を考慮せずとも十分な評価が可能である。

本論文においては接合部の剥離量や鉄筋の応力等について、代表してWCD-Aの結果を示しているが、同時に実施したWD3やWD4についても結果は同様である。

4. まとめ

本研究ではRC造耐震壁のマルチスケール解析の実施にあたり、接合要素を導入し接合部における挙動の精度向上を図った。本研究により、以下のことを確認した。

- ・ 接合部に鉄筋抜け出し挙動を考慮できる要素を導入した耐震壁モデルのプッシュオーバー解析結果では、壁面と下スタブの接合部における曲率が増大し実験結果に近づくことを確認した。なお、大きな曲率が発生するのは接合部のみであり、その他の箇所の曲率はほとんど発生していないことについても実験と整合している。
- ・ 荷重-曲げ変位曲線における実験と解析の比較により、接合要素を解析モデルに適用した場合に第1折れ点から終局点付近にかけての挙動が接合要素の導入前と比較して改善していることを確認した。
- ・ 接合部の剥離量と鉄筋の応力から鉄筋のすべり量を評価した。その結果、鉄筋のすべり量は接合部の剥離量の7割程度の値となることを確認した。
- ・ 本研究で対象とした耐震壁試験体では、フランジ基部の剥離と鉄筋の抜け出しにより曲げ変位が10%~20%程度増大することを確認した。
- ・ 今回の解析では、接合要素の導入により最終破壊面位置が変わり、その結果、最大耐力の低減が見られたと考えられる。これにより、実験結果から乖離が発生したことから、破壊面の位置を実験と整合させることが今後の課題となる。

参考文献

- 1) 根本結衣, ほか: 微小変形領域におけるRC造耐震壁の非線形性に関する検討(その24), 日本建築学会大会学術講演梗概集2020(構造II), pp.1171-1172, 2020
- 2) 櫻井真人, ほか: 微小変形領域におけるRC造耐震壁の非線形性に関する検討(その25), 日本建築学会大会学術講演梗概集2020(構造II), pp.1173-1174, 2020
- 3) 及川有也, ほか: 微小変形領域におけるRC造耐震壁の非線形性に関する検討(その26), 日本建築学会大会学術講演梗概集2020(構造II), pp.1175-1176, 2020
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2009
- 5) 根本結衣, ほか: マルチスケール解析を用いたRC造耐震壁試験体の構造性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.505-510, 2022
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Taylor & Francis, 2003
- 7) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991