

論文 厚肉床壁構造の耐力壁-スラブ接合部に関する非線形解析的研究

王 傑恵*1・楠 浩一*2

要旨: 本研究では、厚肉床壁構造の耐力壁-スラブ接合部の繰り返し水平加力実験結果をもとに、厚肉耐力壁-スラブ接合部の面内方向挙動の検討を目的とした有限要素解析を行った。各部材のモデル化において、コンクリートは3次元の六面体要素とし、耐力壁の縦筋、横筋およびスラブ筋はトラス要素を用い、異なる端部支持条件を受けるスラブを用いた十字型解析モデルを4体作成した。実験および解析による水平荷重-変形角の関係とひび割れ状況を比較し、モデル化の手法および解析の妥当性に関する検討を行った。その結果、壁梁端部を六面体要素で作ったローラー支持とした解析モデルが実験を概ね模擬できたことが判った。

キーワード: 鉄筋コンクリート厚肉床壁構造, 耐力壁-スラブ接合部, スラブ端部支持条件, FEM 解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説¹⁾(以下、RC規準)において、フラットプレート構造が示されている。このフラットプレート構造では、柱が直接スラブに連結され、十字型の構面が構成される。本研究で対象とした鉄筋コンクリート厚肉床壁構造は柱ではなく、厚肉耐力壁、厚肉スラブ、せいはスラブ厚さと同じ、幅は壁厚より大きい壁梁として構成された新たな構造システムである。一般的なフラットプレート構造と壁式鉄筋コンクリート構造の利点に加えて、耐震性能を確保し、凹凸の無い開放的な大空間を提供できることが特徴である。厚肉床壁構造において、耐力壁-スラブ接合部を設計する際には、RC構造規準¹⁾のフラットプレート構造で示されている長期荷重、水平荷重によるパンチング破壊に関する設計法を直接適用できるかを検証する必要がある。その手法に解析的研究があるが、精度の高い解析結果を得るためには有限要素解析モデルの精度を上げる必要がある。したがって、連続して配置される厚肉床壁構造の挙動をよく再現する為の解析モデルを作成するには、接合部の挙動に影響を及ぼすスラブ端部の支持状況を検討する必要がある。

そこで、本研究では、過去に実施された厚肉床壁構造の耐力壁-スラブ接合部の繰り返し水平加力実験²⁾³⁾に対して、スラブ両端部の支持条件を変えた4タイプのモデルについて解析を行い実験結果と比較することで、実際のスラブ両端の拘束状況を解明した。

2. 解析対象試験体

解析対象試験体の配筋図は図-1(側面)と図-2(平面)に示すように、厚肉耐力壁-厚肉スラブ接合部の試験体²⁾³⁾を対象とした。試験体の断面諸元及び配筋詳細

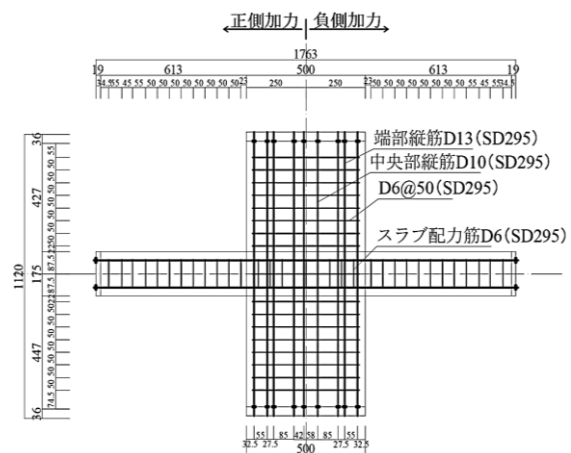


図-1 試験体配筋図(側面)³⁾

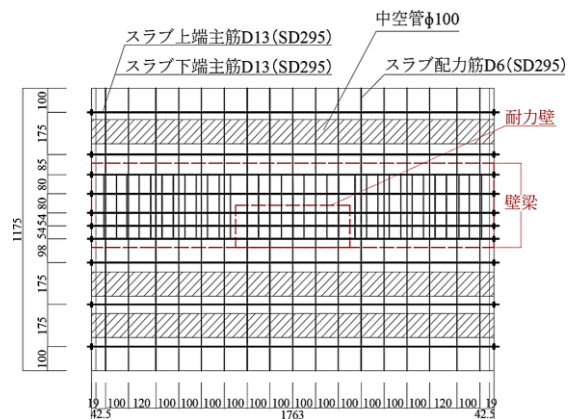


図-2 試験体配筋図(平面)³⁾

を表-1に示す。耐力壁の幅、壁梁せい及びスラブ厚さはともに175mmである。試験体のスラブには加力方向に100φの中空管が配置された。試験体の高さは、耐力壁上部と下部のピン治具間の高さとした1500mmである。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 地震研究所教授 (正会員)

表-1 断面諸元³⁾

耐力壁	断面長さ	500mm
	断面幅	175mm
	主筋	8-D13 (端部) + 6-D10 (中央部) (SD295)
	せん断補強筋	2-D6 (SD295) @50
壁梁	断面高さ	175mm
	断面幅	350mm
	上端・下端主筋	5-D13 (SD295)
	せん断補強筋	2-D6 (SD295) @50
スラブ	断面長さ	1175mm
	断面幅	175mm
	加力方向配筋	5-D13 (SD295)
	直交方向配筋	17-D16 (SD295)

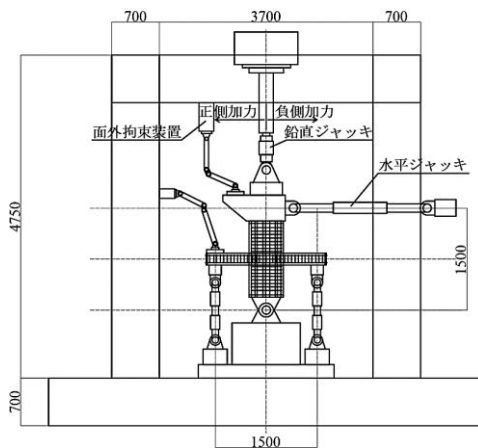


図-3 試験体の加力装置

実験時の支持条件は、耐力壁下部をピン、スラブ両端部をピン支持とし、耐力壁の上部は水平力を導入するため自由端とした。また、スラブの両端はピン支持としたが、水平力の作用とともにスラブ両端は回転の他に水平および鉛直方向にも移動を生じる機構となっている。なお、耐力壁頂部には軸力を導入せず、スラブには長期荷重を導入していない。加力サイクルは、図-3 に示したように、耐力壁頂部の自由端に水平変形角の最大値を $1/2000 \text{ rad}$, $1/1000 \text{ rad}$, $1/400 \text{ rad}$, $1/200 \text{ rad}$, $1/133 \text{ rad}$, $1/100 \text{ rad}$, $1/67 \text{ rad}$, $1/50 \text{ rad}$, $1/33 \text{ rad}$, $1/25 \text{ rad}$ とした水平変形角による正負繰り返しとした。

3.3 次元有限要素法解析

前述したように、実験の支持条件と同じように耐力壁下端をピン、上端を自由とした。また、スラブ両端は回転に加えて水平や鉛直方向への移動が生じることから、有限要素法解析（以下、FEM 解析）の汎用有限要素解析プログラム FINAL⁴⁾を用い、スラブ端部にピン支持の代わりに、ローラー支持を設置した解析モデル4体を作成し、3次元の解析を実施した。

表-2 コンクリート要素タイプ

番号	コンクリートの位置	鉄筋あり/なし
タイプ1	耐力壁下部中央	あり
タイプ2	耐力壁上部中央	あり
タイプ3	耐力壁かぶり部分	なし
タイプ4	スラブ	あり
タイプ5	壁梁	あり
タイプ6	耐力壁と壁梁接合部	あり
タイプ7	加力とローラー支持	剛にする

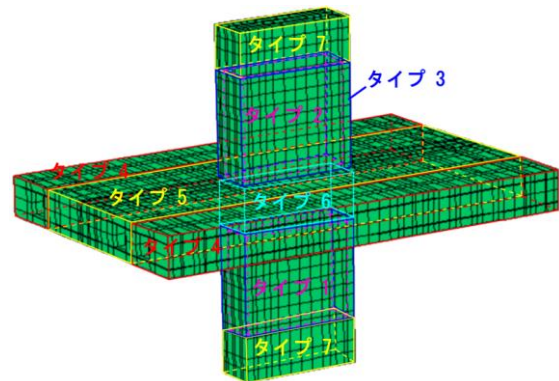
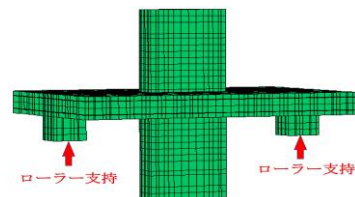
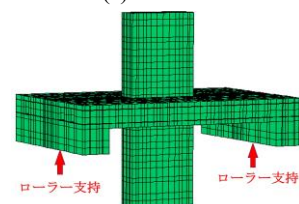


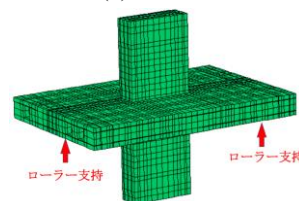
図-4 要素分割図



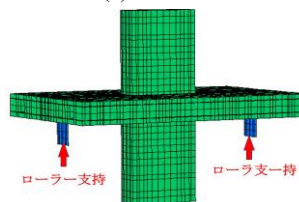
(a) Model a



(b) Model b



(c) Model c



(d) Model d

図-5 解析モデル

3.1 解析モデル概要

モデルの寸法は、前述の試験体と同じである。コンクリートは8節点の六面体要素で、鉄筋は2節点のトラス要素で構築した。試験体はコンクリートの位置、配筋率、境界条件により、表-2と図-4に示した7タイプのコンクリート要素で作られた。支持条件については、スラブ両端の回転に加え、水平および鉛直方向の動きも再現できるローラー支持を設置した。図-5にローラー支持与スラブの接続部を拘束し、スラブ両端までの水平距離が一定となるように作成した4体のモデルを示す。(a)モデルaは六面体要素を用いて実験と同じ支持条件とし、(b)モデルbは六面体要素を用いてスラブ端部の全幅を拘束し、(c)モデルcはスラブ端部節点を直接拘束し、(d)モデルdは四辺形要素を用いて実験と同じ支持条件とした。

3.2 材料構成モデル

(1) コンクリート

コンクリートの圧縮破壊条件においては、耐力壁とスラブ中央のコンクリートは拘束側圧を考慮し、一軸圧縮強度の0.2倍程度までの比較的側圧下でのOttosenの4パラメータモデル(畑中らの係数)⁵⁾を用いた。また、かぶりコンクリートは拘束側圧を受けないコンクリートを対象とし、Ottosenの4パラメータモデルの提案⁵⁾を採用した。テンションスティフニング特性は、長沼・山口モデル⁶⁾を採用し、一例として耐力壁とスラブ中央のコンクリートの鉄筋比pwを4.28%、コンクリートの強度f'cを300kg/cm²としたケースを図-6に示した。また、かぶりコンクリートは、ひび割れ発生後引張応力をほとんど負担しないものとして、鉄筋比と無関係の図-7に示した出雲らのモデル⁷⁾(ひび割れ後は小さくなるため係数C=1.0を採用した)を用いた。それ以外のコンクリート材料特性は以下とした。圧縮強度点までの応力～ひずみ曲線と圧縮強度到達後のひずみ軟化域特性には図-8に示した修正Ahmadモデル⁵⁾を採用した。鉄筋の降伏判定方法はひび割れ部の局所ひずみから求めた応力で判定し、ひび割れ後の圧縮強度低減方法はコンクリートの一軸圧縮強度と鉄筋軸方向の圧縮軸力を考慮する長沼の提案式⁸⁾を用いた。コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性は長沼提案モデル⁸⁾を採用した。なお、コンクリートの繰返し応力下の履歴特性は、正負繰返し荷重を行う場合、曲線モデルの方が実際の挙動に近くなるため、図-9に示した曲線モデル⁹⁾を用いた。

(2) 鉄筋

鉄筋の繰返し応力下の履歴特性については、図-10に示した除荷・再荷剛性は弾性剛性のバイリニアモデルを用いた。鉄筋降伏後の剛性低下率は0.001とし採用し

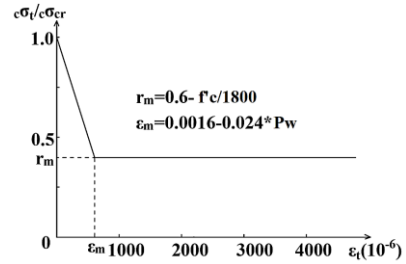


図-6 長沼・山口のモデル⁷⁾

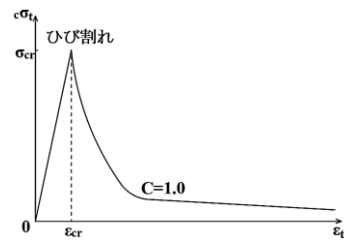


図-7 出雲らのモデル⁸⁾

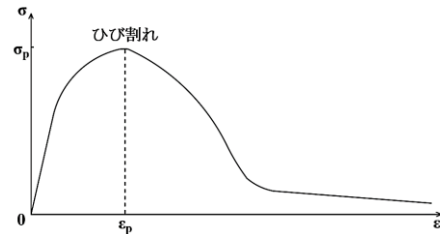


図-8 修正 Ahmad モデル⁵⁾

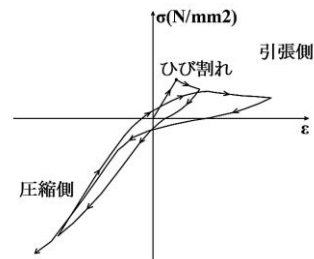


図-9 繰返し応力下の履歴特性¹⁰⁾

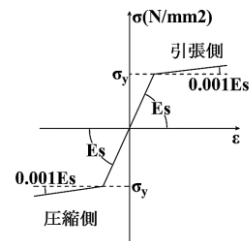


図-10 バイリニアモデル (Es:鉄筋ヤング係数)

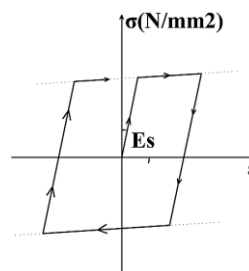


図-11 移動硬化則¹¹⁾

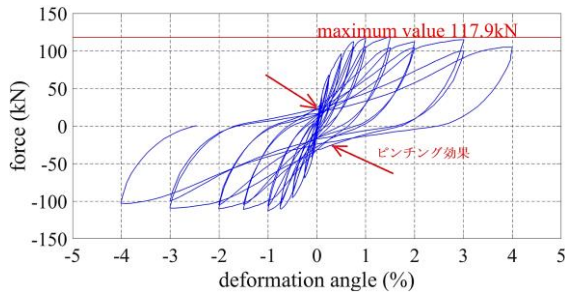


図-12 水平荷重－水平変形角(%)関係の比較

た。鉄筋のひずみ硬化則には、Bauschinger 効果を表現し、加工硬化を表現しない図-11 に示した移動硬化則¹⁰⁾を採用した。

(3) 付着

鉄筋とコンクリートの付着効果は、鉄筋のコンクリートからの抜け出し効果を考慮せず、鉄筋とコンクリートの間に完全付着を仮定した。

4. 解析結果

4.1 荷重－変形関係の比較

実験結果および4体の解析結果による耐力壁頂部の水平荷重と水平変形角(%)の関係を図-12 と図-13～図-16 それぞれに示す。

耐力壁頂部の水平荷重と水平変形角(%)の関係において、実験では、水平変形角1.3%の時に、耐力壁頂部の最大水平荷重の117.9kNが得られた。それに対して、Model a, Model b, Model c, Model dの最大水平荷重はそれぞれ水平変形角1.3%, 1.3%, 1.3%, 3.5%の時、131.1kN, 126.9kN, 132.3kN, 127kNとなった。

4.2 解析結果の検討

(1) 耐力壁頂部の水平荷重と水平変形角の関係

実験結果の履歴関係をみると、せん断成分の増加により、くびれを呈する特徴となる逆S字型の履歴ループ、また、荷重が正負反転する付近で、くびれを呈する特徴であるピンチング効果が表された。また、降伏後の水平荷重の耐力低下が見られた。

解析 Model a の結果と実験結果を比較すると、実験結果のピンチング効果を表現できないことが分かった。なお、水平変形角が大きくなるとともに、解析ではスリップ破壊による変形の進展が実験より小さくなる。しかしながら、全履歴をみると、解析結果では実験結果とほぼ一致している降伏後の水平荷重の耐力低下が表現された。解析 Model b と Model c の結果をみると、水平荷重の最大値が少しだけ異なるが、Model a の結果と概ね同じである。実験結果のピンチング効果を表現できない、水平変形角が大きくなるとともに、スリップ破壊による変形の進展が実験より小さくなる傾向があったが、降伏後の

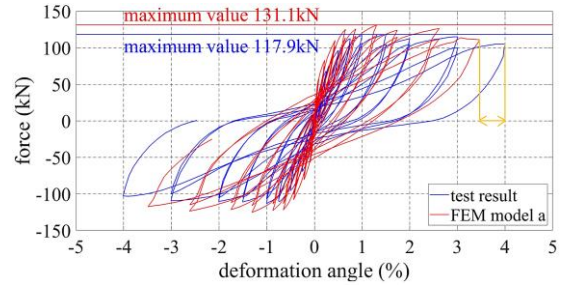


図-13 水平荷重－水平変形角(%)関係 (model a)

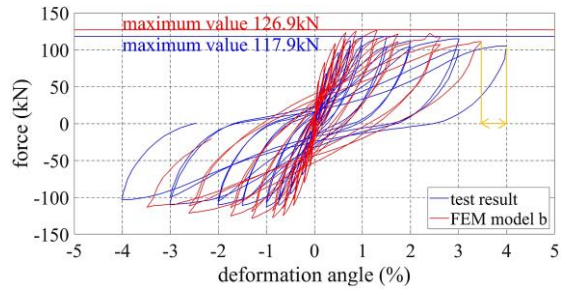


図-14 水平荷重－水平変形角(%)関係 (model b)

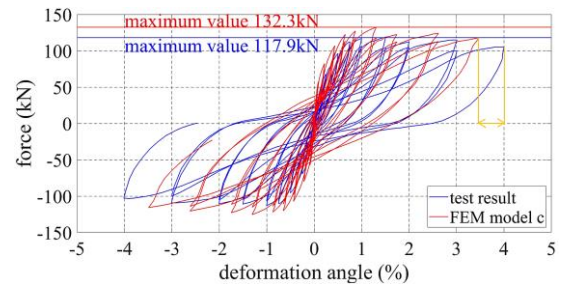


図-15 水平荷重－水平変形角(%)関係 (model c)

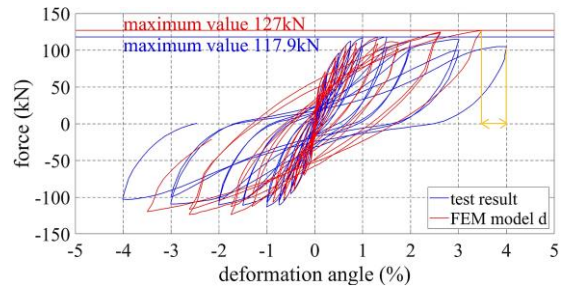


図-16 水平荷重－水平変形角(%)関係 (model d)

水平荷重の耐力低下は表現できた。解析 Model d の結果と実験結果を比べると、他の3体のモデルより、実験結果のピンチング効果をさらに表現できない。また、このモデルは降伏後の水平荷重の耐力低下を再現できない。

(2) 最終破壊のひび割れ

実験および解析による最終破壊時のスラブ上面と耐力壁のひび割れをそれぞれに図-17～図-20 に示す。解析 Model a のひび割れ図と実験結果を比較すると、スラブの上面には、両者とも全体的にスラブと耐力壁の境界からスラブの端部まで放射状ひび割れが多く発生した。耐力壁と連結するスラブ付近に大きなひび割れがあり、耐力壁から遠いスラブの端部はひび割れが少なくなった。

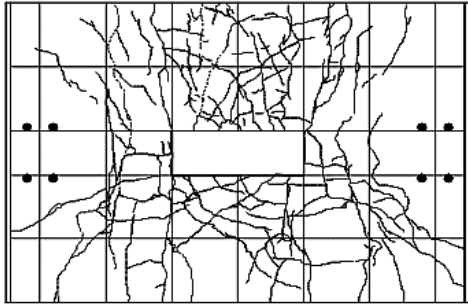


図-17 実験最終ひび割れ (スラブ上面)³⁾

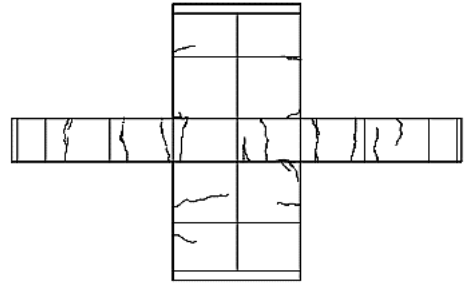
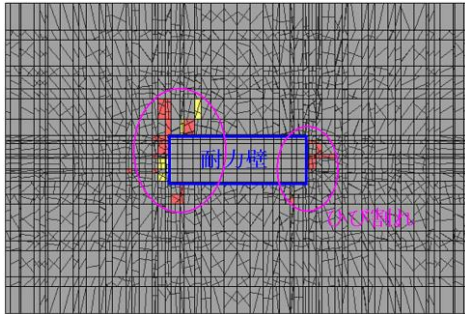
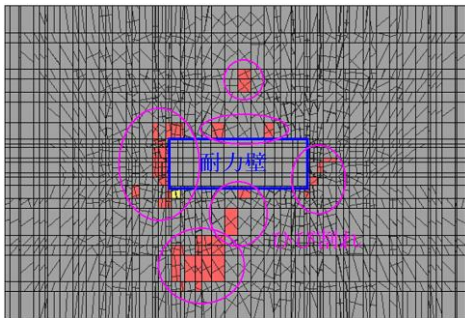


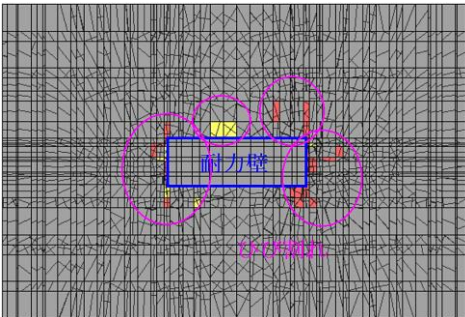
図-19 実験最終ひび割れ (壁梁ない側耐力壁)³⁾



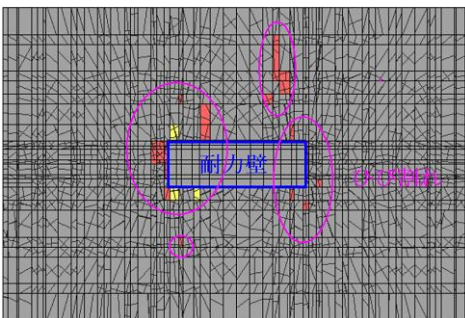
(a) Model a



(b) Model b

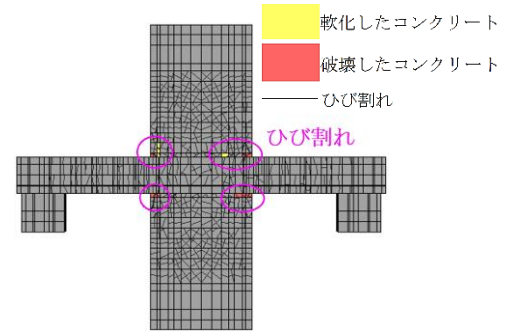


(c) Model c

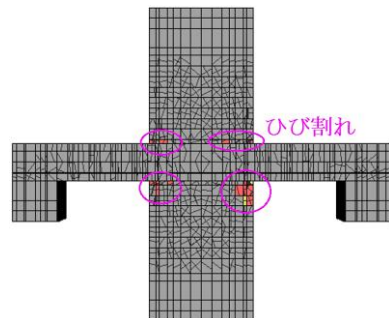


(d) Model d

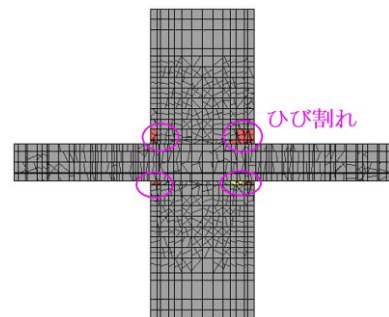
図-18 解析最終ひび割れ (スラブ上面)



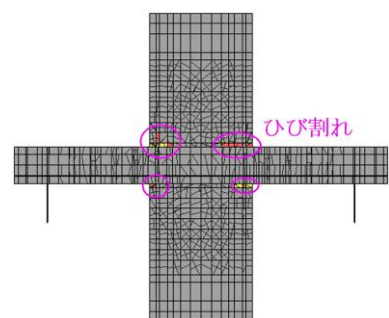
(a) Model a



(b) Model b



(c) Model c



(d) Model d

図-20 解析最終ひび割れ (壁梁ない側耐力壁)

耐力壁には、実験と同じように、耐力壁の上下端部まで放射状ひび割れが発生した。実験より解析の方がひび割れは多いが、実験と同じ位置のスラブと耐力壁の隅角部で大きなひび割れがみられた。Model a では実験のひび割れ状況を良好に再現できることが判った。

解析 Model b のひび割れ図と実験結果を比較すると、スラブの上面上には、スラブと耐力壁の境界からスラブの端部まで放射状ひび割れが発生したが、耐力壁から遠いスラブの端部はひび割れが Model a より大きな範囲でみられた。耐力壁には、スラブと耐力壁の隅角部で大きなひび割れがみられたが、Model a 結果より破壊したコンクリートが多くなった。

解析 Model c のひび割れ図と実験結果を比較すると、スラブの上面上には、スラブと耐力壁の境界からスラブの端部まで放射状ひび割れが生じたが、ひび割れの量は Model a より多く、Model b より小さくなった。耐力壁には、スラブと耐力壁の隅角部で大きなひび割れがみられたが、破壊したコンクリートが Model a より多くなった。

解析 Model d のひび割れ図と実験結果を比較すると、スラブの上面上には、耐力壁の境界からスラブの端部まで放射状ひび割れが再現できたが、ひび割れの量は Model a より多く、破壊したコンクリートの範囲は大きくなった。耐力壁には、放射状ひび割れが発生し、破壊したコンクリートが Model a より多くなった。

上記の検討により、耐力壁頂部の水平荷重と水平変形角の関係を考えると、Model a, b, c は実験を概ね良好に対応しているが、Model d は実験の最大水平耐力については大差がないが、ピンチング効果を再現できていない。ただし、ひび割れ状況は、4 体のモデルの結果に大差がなく、スラブとも耐力壁とも放射状ひび割れとスラブと耐力壁の隅角部で大きなひび割れの発生をよく表現できる。

5. まとめ

厚肉床壁構造の耐力壁－スラブ接合部を対象とした 3 次元 FEM 解析を行い、以下のことを得られた。

1) スラブ両端に異なる支持要素を有するモデル 4 体の解析結果において、実験と同じ支持条件である Model a だけではなく、実験とは拘束条件の長さを変えたモデル b, c も概ね良好に実験の水平力－変形角の関係と対応できる。モデル d は最大水平耐力が実験と大差がないが、全体的に水平力－変形角の関係、特に曲線のピンチング効果を表現できないことが分かった。

2) 実験ではスラブ両端の壁梁部分にピン支持が設置されたが、水平方向の移動を考慮できるローラー支持としたモデルの解析結果は実験結果と良好に対応できた。

3) 壁梁のみ拘束されたモデル a とスラブ全幅にわた

って拘束されたモデル b の解析結果は実験結果と良好に対応できたから、壁梁のみ拘束されたピン支持が実際のスラブ端部全幅に拘束される効果になったと考えられる。

今後、本研究で検証された解析手法を用い、耐力壁－スラブ接合部のピンチング破壊を検討する。

謝辞

本研究では平成 28 年度の壁式厚肉床壁構造の厚肉耐力壁・厚肉床接合部の面内方向加力実験の報告書を参考し、山口大学大学院・創成科学研究科教授稲井栄一先生から数々の貴重なご資料を頂いた。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造設計・計算規準・同解説, 2010
- 2) 稲井栄一, 川田侑子, 秋田知芳, 今川憲英：壁式厚肉床壁構造の厚肉耐力壁・厚肉床接合部の面内方向加力実験 その 1 実験プログラム, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 40 巻, pp.247-250,2017.3
- 3) 川田侑子, 稲井栄一, 秋田知芳, 今川憲英：壁式厚肉床壁構造の厚肉耐力壁・厚肉床接合部の面内方向加力実験 その 2 試験体 2 の実験結果, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 40 巻, pp.251-254,2017.3
- 4) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL/Ver.11
- 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) 長沼一洋, 山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.649-650,1990.10
- 7) 出雲淳一, 他：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, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 8) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48,1991.3
- 9) 長沼一洋, 大久保 雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 536 号, pp.135-142,2000.10
- 10) Ciampi, V.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov.,1982