

論文 RC造厚肉耐力壁 - 厚肉スラブ接合部のスラブの曲げ挙動

川島 弘毅*1・松井 智哉*2・稲井 栄一*3・今川 憲英*4

要旨: 本研究では、RC造厚肉耐力壁 - 厚肉スラブ接合部の 1/2 スケールの構造実験試験体を対象に FEM 解析を実施し、モデル化手法の妥当性の検討を行った。解析結果は実験結果を概ね模擬することができた。さらに試験体の基となる実大建物の部分架構を対象にスラブの曲げ挙動について検討を行った。FEM 解析により、スラブの加力直交方向の鉄筋がスラブの曲げ耐力に寄与することと水平荷重時にスラブに作用する軸力の影響でモーメントが変動すること、厚肉スラブに作用するモーメントは片側 1m を有効幅とした曲げ耐力計算値を上回ることが確認できた。

キーワード: RC厚肉壁式床壁構造, 厚肉スラブ, 厚肉耐力壁, FEM解析

1. はじめに

フラットプレート構造に関しては鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説¹⁾において長期荷重、水平荷重に対して許容応力度設計法が示されている。しかしながら、本研究で対象としている厚肉スラブと耐力壁により構成される RC 壁式厚肉床壁構造については、耐力壁-スラブ接合部のパンチング破壊に対する設計法(強度評価法)、スラブに生じる曲げ抵抗モーメント算定において有効な鉄筋の範囲など不明な点もあり検討の必要がある。

上記の検討においては、実験とともに解析的研究も有用な検討手段と考えられる。そこで、本研究では RC 造厚肉耐力壁-厚肉スラブ接合部の構造実験試験体²⁾を対象に FEM 解析を実施し、モデル化手法および解析結果の妥当性について把握するとともに、実大建物の部分架構を対象に解析を実施し、スラブの曲げ挙動について検討を行う。

2. FEM 解析モデルの検証

2.1 対象試験体

対象試験体は 1/2 スケールの厚肉耐力壁-厚肉スラブ接合部試験体 4 体である²⁾。試験体 1 の断面諸元および

配筋図を表-1 および図-1 に示す。各試験体は、1/2 スケールである。耐力壁の幅、壁梁および床梁の厚さはともに 175mm である。RC 造壁式厚肉床壁構造では、壁厚さおよび床厚さを実大で 250~450mm 程度を想定している。スラブには 100φ の中空管が配されている。試験体 2 (中空管は加力方向に配置) を基準として、試験体 1 はスラブ板厚方向鉄筋を有する点のみ異なり (他の試験体はス

表-1 試験体断面諸元 (試験体 1)

耐力壁	断面 bxD	175×500 mm
	主筋	両端部 8-D13, 中央部 6-D10
	せん断補強筋	フープ 2-D6@50 直交方向中子筋 2-D6@50
壁梁	断面 bxD	350×175 mm
	上端筋/下端筋	5-D13/5-D13
	せん断補強筋	スタラップ 2-D6@50 中子筋 1-D6@50
スラブ	断面 bxt	(500+325)×175 mm 梁両側
	中空管 100φ	加力方向 3 本, 長さ 1675mm
	加力方向配筋	5-D13 上端下端トモ
	直交方向配筋	17-D6 上端下端トモ
	板厚方向鉄筋	5-D4@175

鉄筋鋼種: SD295, コンクリートの設計基準強度: 33N/mm²

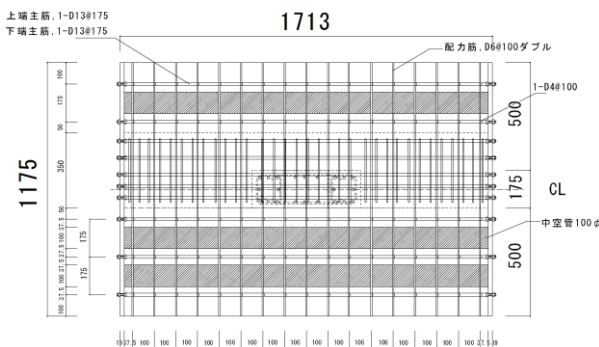


図-1 試験体配筋図 (試験体 1)

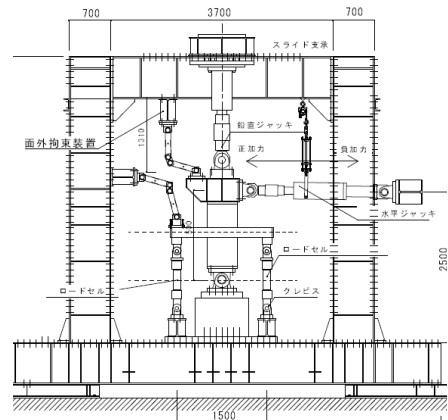


図-2 加力装置

*1 豊橋技術科学大学建築・都市システム学専攻大学院生 (学生会員)

*2 豊橋技術科学大学准教授 博士(工学) (正会員)

*3 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京電機大学未来科学部建築学科教授 (正会員)

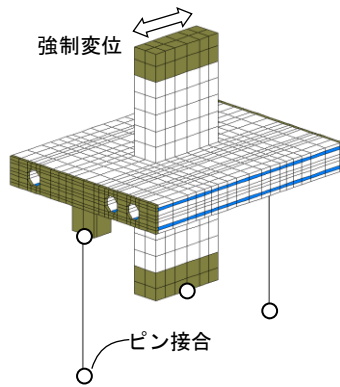


図-3 要素分割図 (試験体 2)

表-2 コンクリートの材料特性

試験体		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
試験体 1	上部耐力壁	29.6	29.6
	スラブ・ 下部耐力壁	38.5	31.9
試験体 2		36.8	32.2
試験体 3		37.5	31.1
試験体 4		35.6	32.4

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D4	367	182
D6	320	183
D10	332	188
D13	343	190

スラブ厚方向鉄筋なし)、試験体 3 は取り付くスラブが片側のみ、試験体 4 は中空管が加力直交方向に配され、スラブ配筋が異なる(加力方向配筋と直交方向鉄筋が入れ替わる)。試験体は耐力壁上下端部およびスラブ両端でピン支承を介して設置され(図-2 参照)、荷重は耐力壁の軸力 0kN を維持した状態で静的漸増繰り返し水平力荷重を行う。

2.2 解析モデル

図-3 に試験体 2 の要素分割図を示す。耐力壁下部をピン支持とし、スラブに取り付くロードセルは線部材によってモデル化して上下端部をピン支持とし、耐力壁頂部に正負繰り返しの強制変位を与え、変形角 1/33rad まで解析を行った。なお、解析には 3 次元非線形 FEM 解析ソフト“FINAL”³⁾を使用した。

2.3 コンクリートと鉄筋のモデル化

コンクリートは六面体要素とし、鉄筋を考慮する要素においては埋め込み鉄筋モデルを使用した。コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側の上昇域は修正 Ahmad モデル⁴⁾とした。破壊条件は Ottosen の 4 パラメータモデルを用いた。ひび割れ発生後の引張側の軟化域は、引張応力をほとんど負担しないものとして、出雲らのテンションステイフニングモデル⁵⁾において係数 $c=1.0$ とした。ひび割れ後のせん断伝達モデルは Al-Mahaidi モデルでモ

デル化した。また、繰り返し荷重による剛性低下を考慮した。鉄筋の履歴特性は修正 Menegotto - Pinto モデルを用い、降伏後の剛性低下率は 0.001 とした。なお、コンクリートと鉄筋の付着は完全付着としている。加力治具およびスラブ両端の定着板は鋼材としてモデル化した。中空管部分の断面は八角形となるように要素を除去することでモデル化した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2 および表-3 に示す。各試験体のコンクリートの引張強度はそれぞれ圧縮強度から推定する算定式⁶⁾による計算値の 0.8 倍(試験体 1, 2, 4)、1.0 倍(試験体 3)とした。

2.4 解析結果

実験および解析による水平荷重と変形角の関係を図-4 に示す。図中の破線はスラブ曲げ耐力の計算値である。スラブの終局曲げモーメントは(1)式より算定し、スラブ全幅の鉄筋を考慮している。

$$M_u = 0.9 a_t \sigma_y d \quad (1)$$

ここで、 a_t : 曲げ抵抗に有効とする鉄筋の断面積、 σ_y : 鉄筋の降伏応力度、 d : 有効せいである。

どの試験体も初期剛性を大きく評価しているが、1/400rad 以降の各サイクルピーク時のせん断力は、解析と実験の差は 1 割程度以下になっており、包絡線を概ね模擬できている。解析結果の剛性が高くなった理由として、試験体の養生期間中における乾燥収縮の影響や試験体設置の過程で試験体に生じた初期ひび割れにより、実験時の試験体の剛性が低下していることが考えられる。

試験体 2 と試験体 4 の実験および解析による最終ひび割れ状況を図-5 に示す。試験体 2 はひび割れが耐力壁前後面から放射状に広範囲に広がっているが、試験体 4 は柱前後面主に中空管に沿って直線に伸びており、スラブ加力方向端部周辺ではごくわずかだった。いずれの試験体も実験における破壊状況を概ね模擬できる結果が得られた。

試験体 2 と試験体 4 の変形角 1/33rad 時の鉄筋降伏状況を図-6 に示す。どちらの試験体もスラブ筋の降伏範囲はスラブの全幅に達しており、実験結果でも全幅の鉄筋が降伏していることは確認されており実験結果に対応している。試験体 4 は耐力壁前後面の加力直交方向に配置されている中空管に沿ってスラブ全幅の鉄筋が降伏している。また、試験体 2 は試験体 4 に比べて若干スラブの加力端部の領域にも降伏範囲が広がっていることが確認でき、図-5 (b) で示したように、ひび割れが集中している領域と対応している。

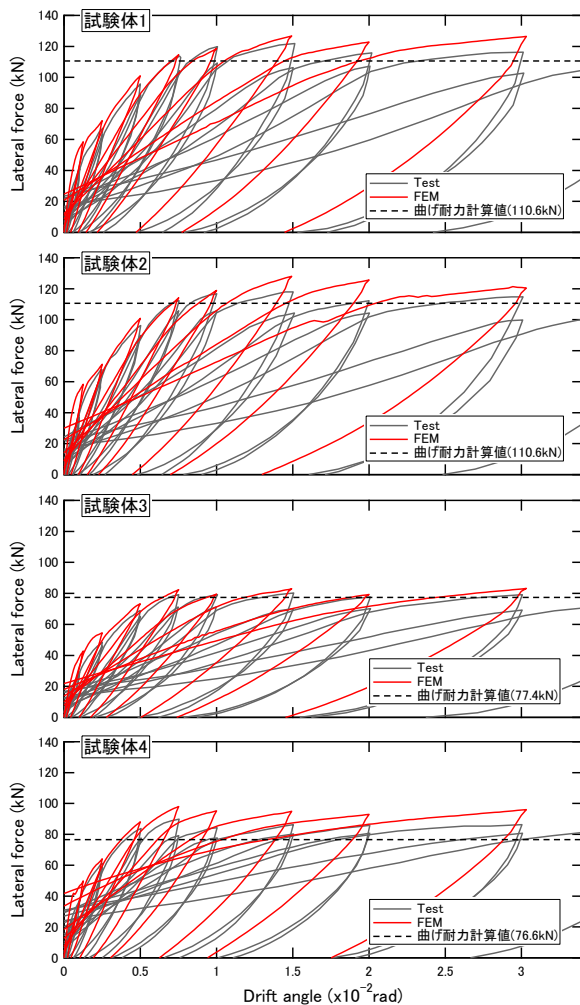


図-4 水平荷重-変形角関係

3. 厚肉スラブの曲げ挙動

2章で述べた実験試験体は実験の制約上スラブ幅が制限されたものである。本章では実験試験体の基となる実大建物の部分架構を対象に FEM 解析を実施し、スラブの曲げ挙動について検討を行う。

3.1 解析モデル

解析対象とする実大建物の断面諸元を表-4 に示す。想定する建物は階高 2900mm の 5 階建ての集合住宅で桁行方向の耐力壁スパンは 3000mm、張間方向 5600mm である。耐力壁の厚さは 350mm、長さは 1000mm である。壁梁のせいは 350mm、幅は 700mm である。スラブの厚さは 350mm で $\phi 200$ の中空管を梁間方向に有する。

解析モデルは架構から 1 層分を取り出した 3 種類のモデルを用いる。解析モデル図を図-7 に示す。Model-1 は建物の耐力壁 1 本を中心に加力方向および加力直交方向スパン中心までのスラブを取り出したモデルである。Model-2 は耐力壁が 2 本で加力方向にスパン中心までのスラブを取り出したモデルである。Model-3 は加力方向に 3 スパン、加力直交方向に 1 スパン取り出したモデルである。Model-1 と Model-2 では耐力壁下端をピン支持、

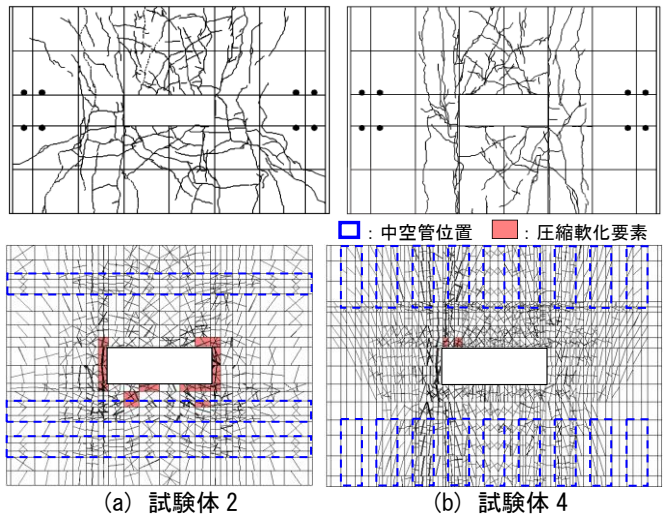


図-5 最終ひび割れ状況 (上: 実験, 下: 解析)

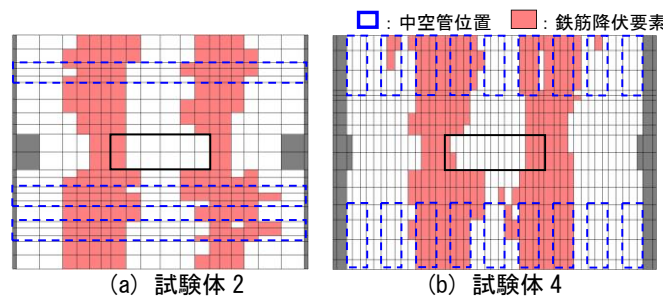


図-6 鉄筋の降伏状況 (変形角 1/33rad)

表-4 実大建物断面諸元

耐力壁	断面 b×D	350×1000 mm
	主筋	両端部 8-D22, 中央部 6-D16
	せん断補強筋	2-D10@100
壁梁	断面 b×D	700×350 mm
	上端筋/下端筋	5-D22/5-D22
	せん断補強筋	スタラップ 3-D13@100
スラブ	厚さ	350mm
	中空管 200φ	加力直交方向
	加力方向配筋	D13@200 上端下端トモ
	直交方向配筋	上端 中央: 2-D16@350 端部: 3-D16@350
	板厚方向鉄筋	D10@200
階高	2900mm	
耐力壁スパン	加力方向	3000mm
	加力直交方向	5600mm

鉄筋鋼種: SD295 (D10・D13・D16), SD345 (D22)
コンクリートの設計基準強度: 33N/mm²

耐力壁の加力方向上のスラブ端部をローラー支持とし、耐力壁上部に変位を与えて解析を行った。Model-3 は同じく耐力壁下端をピン支持とし、すべての耐力壁上部に同一の変位を与えて解析を行った。中空管についてはモデル化の簡略化のため等価な断面積をもつ矩形断面に置き換えてモデル化した。

3.2 水平荷重-変形角関係

各モデルのスラブの曲げ耐力と架構の水平耐力を表-5 に示す。終局曲げモーメントは、(1)式を用いて考慮す

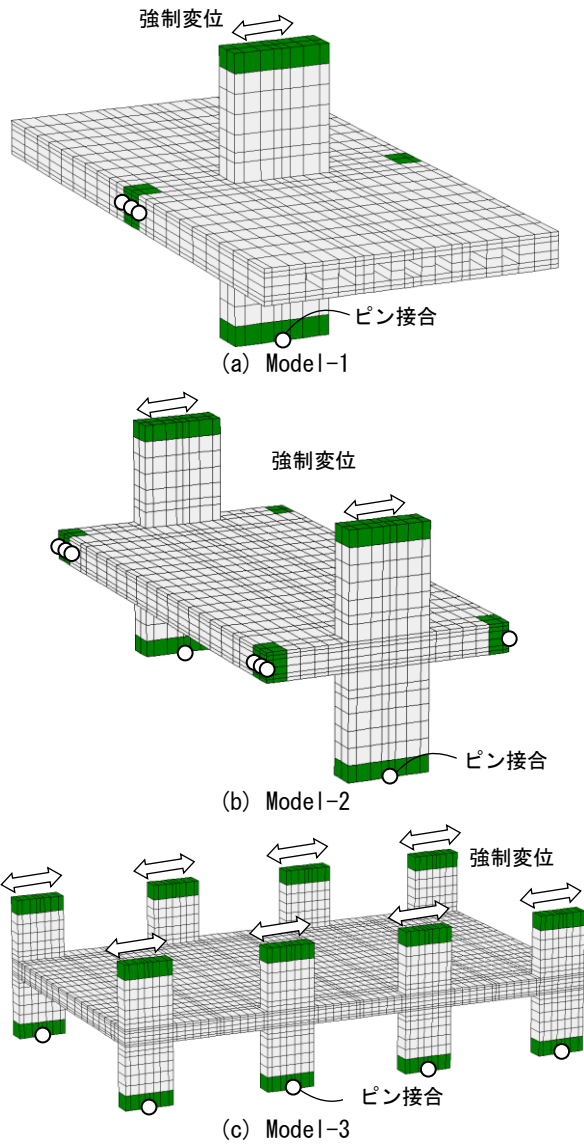


図-7 解析モデル要素分割図

る鉄筋の有効範囲は、壁梁幅、スラブ有効幅 1m、スラブ全幅の 3 通りの計算結果を示している。水平耐力はスラブが終局曲げモーメントに達した時の耐力壁頂部の水平荷重である。解析による水平荷重と変形角の関係を図-8 に示す。

Model-1, Model-2 の解析による最大耐力は、いずれもスラブ全幅の鉄筋を考慮した曲げ耐力計算値を上回った。Model-1 および Model-2 の解析による最大耐力とスラブ全幅の曲げ耐力計算値の差はそれぞれ 17%, 19% だった。

Model-3 の解析による最大耐力とスラブ全幅を有効とする場合の耐力計算値を約 22% 下回ったが、梁幅のみを有効とする場合の曲げ耐力計算値に対しては解析の最大耐力は 37% 上回った。また耐力壁頂+部せん断力は、1/800rad, 1/400rad を除くすべてのサイクルで、梁幅有効時と全幅有効時の曲げ耐力計算値の中間で推移している。

3.3 鉄筋の応力分布

図-9 に変形角 1/100rad における加力方向上端鉄筋の

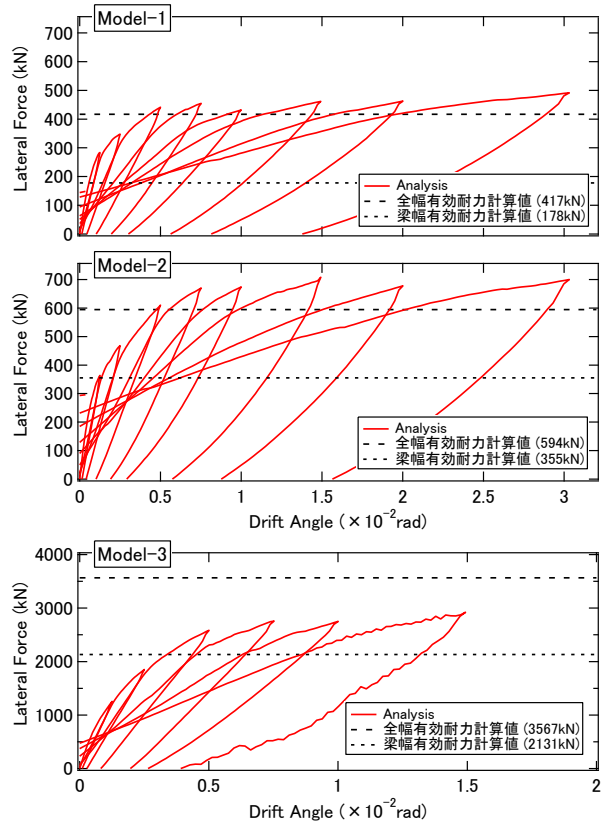


図-8 水平荷重-変形角関係

表-5 部材および架構の耐力

		Model-1	Model-2	Model-3
終局曲げ モーメント (kNm)	壁梁幅	172	343	2060
	有効幅 1m [*]	244	409	2457
	スラブ全幅	403	574	3448
水平耐力 (kN)	壁梁幅	178	355	2131
	有効幅 1m [*]	252	423	2541
	スラブ全幅	417	594	3567
	解析	491	708	2921

※壁梁+スラブ片側 1m ずつ耐力に考慮

降伏状況を示す。Model-1 および Model-2 の降伏はスラブ全幅 6000mm には到達せず、Model-1 の降伏領域の幅は 2850mm, Model-2 は 2950mm, いずれも降伏範囲はスラブ全幅の約 5 割程度だった。Model-3 は、T字型接合部周辺では降伏範囲が大きく、ほぼスラブ全幅にわたる降伏が見られる。一方で、架構中央の十字型接合部周辺では、Model-1 および Model-2 と概ね同じ降伏範囲となり、降伏幅は 2600mm でスラブ全幅の約 4 割程度だった。

図-10 に変形角 1/100rad における加力方向上端鉄筋の応力分布を示す。Model-1 および Model-2 については、中空管位置の要素で鉄筋の応力が比較的大きくなっていることが確認できる。図-9 から伺えるが、耐力壁近傍の要素は降伏応力度に達しており、そこから幅方向、斜め方向に応力が高い領域が広がっており、壁梁の端部の支点周辺でも降伏応力度の 1/2 以上の応力に達している。Model-3 は図-9 で降伏応力に達していない要素も、概ね降伏応力の 1/2 程度以上は負担しており、曲げ抵抗

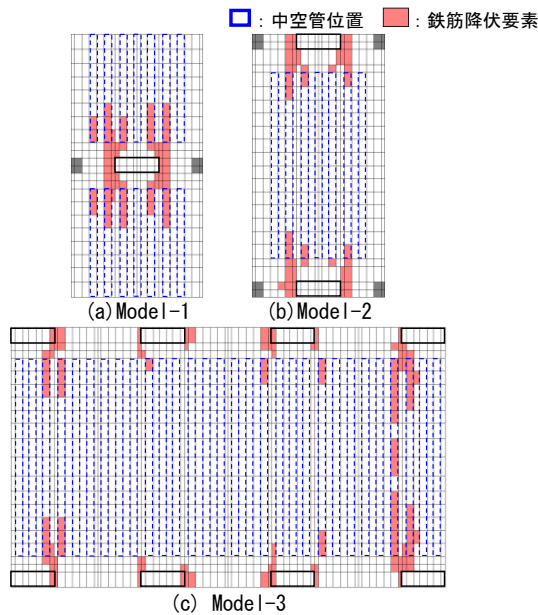


図-9 加力方向上端鉄筋の降伏状況（変形角 1/100rad）

に寄与していることがわかる。

図-11 に変形角 1/100rad における加力直交方向上端鉄筋の応力分布を示す。Model-1 および Model-2 については中空管位置の要素でいずれのモデルでも、耐力壁周辺と耐力壁から斜め方向の領域で鉄筋の応力が比較的大きくなっている。Model-1, Model-2 ではスラブ端部の支点からみると、加力方向の鉄筋による曲げ抵抗力に直交方向鉄筋による曲げ抵抗力が加わり、スラブ端部のせん断力が大きくなる。そのため、加力方向の鉄筋は全幅で降伏しているわけではないが、水平荷重はスラブ全幅を考慮した場合の計算値程度になったと考えられる(図-8)。

3.4 モーメント分布

図-12 に Model-3 の 1/100rad におけるモーメント分布を示す。梁のモーメントは、耐力壁上下端部の水平力から算出し、内部接合部の梁モーメントは 1/2 ずつ振り分けた。図-13 に 1/100rad, 1/200rad におけるスラブのモーメント分布を示す。ここでのモーメントは要素の軸方向応力を用いて算出した。Model-1 および Model-2 は耐力壁-スラブ接合部を中心に前後 1m までの範囲で抽出し、Model-3 は全 3 スパンのうち中央 1 スパンの範囲を抜き出している。

図-12 より、3 スパンモデルの Model-3 のスラブには軸力が生じている。これは、スラブの変形の増大とともに軸方向に伸びが生じるが、解析上隣り合う耐力壁の上端（下端）のスパンは変化しないようになっているためである。そのため、左下および右上の耐力壁のせん断力は、加力方向と逆方向の水平力が作用することになる。図-13 では、スラブの軸力の影響により、スラブの曲げモーメントは解析によるスラブ全幅有効としたときの曲げ耐力を上回る結果となっている。しかしながら、上述

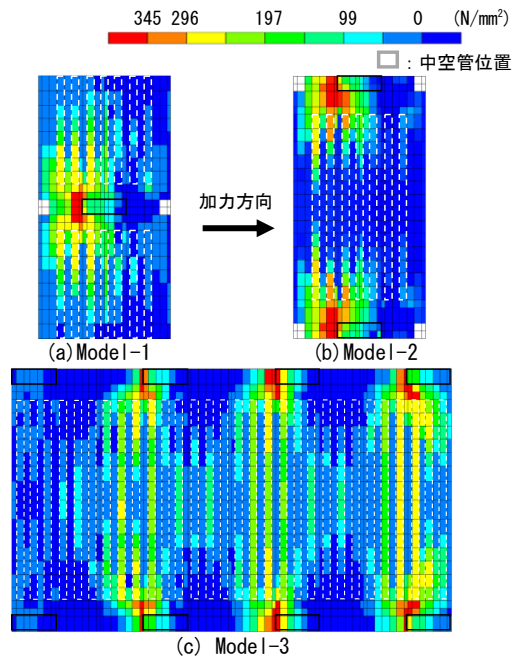


図-10 加力方向上端鉄筋の応力分布（変形角 1/100rad）

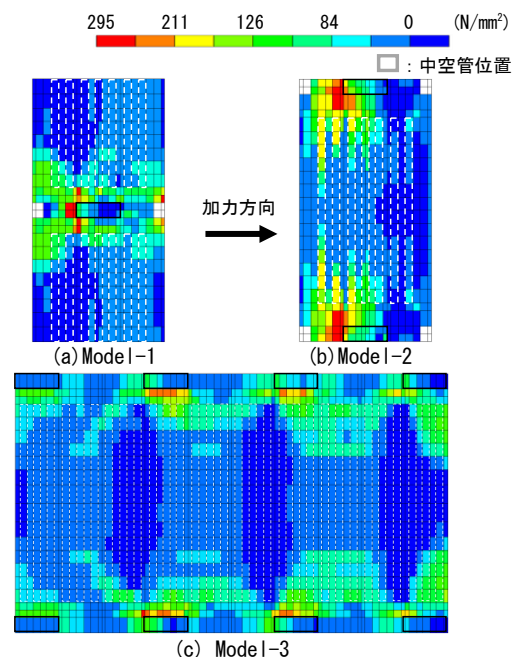
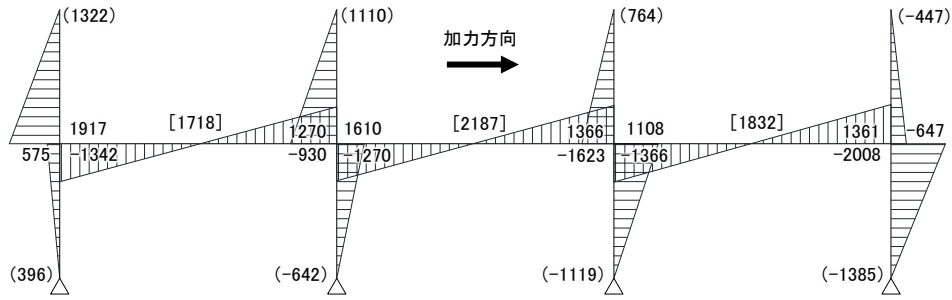


図-11 加力直交方向上端鉄筋の応力分布（変形角 1/100rad）

した逆方向の水平力の影響もあり、結果として図-8 で示すように水平荷重は Model-3 の壁梁を有効としたときの水平耐力と全幅有効としたときの水平耐力の間になったと考えられる。Model-1 および Model-2 では、解析による曲げモーメントは壁梁の曲げ耐力を上回っているが、全幅の曲げ耐力を下回っており、図-9 および図-10 で示した鉄筋の応力分布に対応した結果となっている。

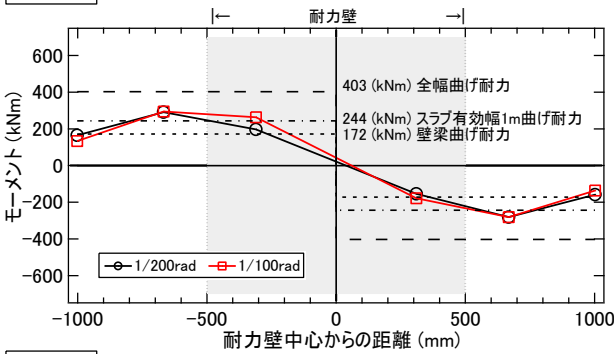
壁式鉄筋コンクリート構造における壁梁およびラーメン構造における梁の終局強度の算定に関する規準類⁷⁾において、引張側にスラブが接続する場合は、壁梁



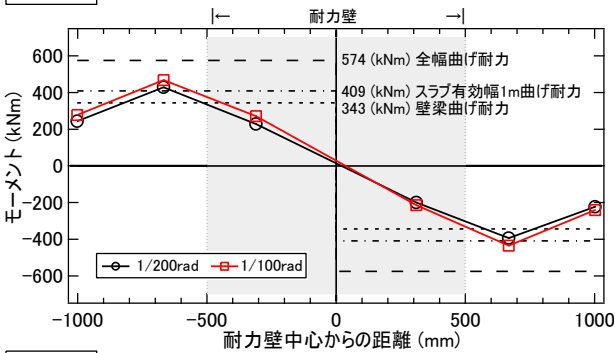
モーメント (kNm), (): せん断力 (kN), [] : スラブ軸力 (kN)
 ※加力方向に作用する力・上端側引張のモーメントを正とする

図-12 Model-3 モーメント (変形角 1/100rad)

Model-1



Model-2



Model-3

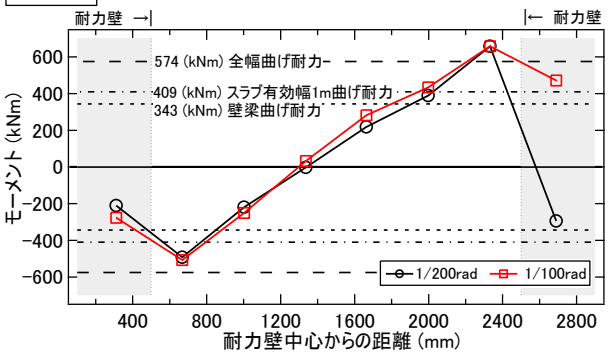


図-13 モーメント分布 (変形角 1/100rad)

または梁の終局耐力に片側 1m までのスラブ筋を耐力に考慮している。いずれのモデルにおいても、図-13 の耐力壁付近の要素におけるモーメントは、スラブ 1m を有効幅とした計算値を上回っており、壁梁の終局耐力の算定においてスラブ 1m までの鉄筋を耐力に見込める結果となっている。ただし、今回は限られたモデルでの検討であるため、異なるモデルを用いた検討も必要である。

4. まとめ

本論で得られた知見を以下に示す。

- 1) RC 造厚肉耐力壁-厚肉スラブ接合部の FEM 解析により、実験結果を概ね模擬できた。
- 2) 鉄筋の応力分布より、加力直交方向の鉄筋がスラブ曲げ耐力に寄与していることがわかった。
- 3) 3 スパンモデルの解析により、スラブに作用する軸力の影響でモーメントが変動することが確認できた。
- 4) 今回用いたモデルでは、厚肉スラブの曲げモーメントは片側 1m の有効幅とした曲げ耐力の計算値を上回ることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 2) 稲井栄一ほか：壁式鉄筋コンクリート厚肉床壁構造の耐力壁・床接合部の面内方向の地震時挙動に関する研究その 1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.881-888, 2017.8
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL/Ver.11
- 4) 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
- 5) 出雲淳一, 島 弘, 岡村 甫: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, Vol.25, No.9, pp.134-147, 1987.9
- 6) 友澤史紀, 野口貴文, 小野山貴造:高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A (材料・施工), pp.497-498,1990.10
- 7) 日本建築学会：壁式鉄筋コンクリート造設計・計算規準・同解説
- 8) 国土交通省ほか:2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書