

論文 スラブ筋比がプレキャスト耐震壁のせん断強度に及ぼす影響

千釜 あやな*1・加藤 拓也*1・高瀬 裕也*2・溝口 光男*3

要旨: 既往の文献において実施された、壁よりも低い強度層を有するスラブ付き耐震壁の水平加力実験の結果に基づいて、FEM 解析による検討を行った。その結果、実験結果を再現しうるモデルを構築することが可能であった。また実験を行った試験体を基に壁とスラブの強度を変え解析を行い、スラブに伝わる応力の範囲が壁厚の3~4倍程度であることを確認し、その範囲内でスラブ筋の補強をしてスラブ筋の配筋量によってはより低い強度の層を有していない強度一体のスラブ付き耐震壁と同等の性能が得られる可能性があることを示した。

キーワード: PCa, 耐震壁, スラブ, 異種強度, FEM 解析

1. はじめに

筆者らは、板状集合住宅のプレキャスト(以下, PCa)連層耐震壁の省力化構法として壁パネル側面から接合筋(コッター筋)を省略し、鉛直接合部の滑りを許容する構法について研究している¹⁾。この構法による現場施工を考えると、工場生産の強度の高いPCa耐震壁と現場打ちコンクリートの床スラブが交互に重なることになる。一般に、床スラブコンクリートの設計基準強度 f_c は柱や梁、耐震壁と比べて低く、1/2程度の低い f_c でよいこともあるため、この工法の施工時には、床スラブの型枠にコンクリート止め(以下、コン止め)を使用してコンクリートを打設する方法と、PCa耐震壁と同様の f_c が高いコンクリートを床スラブに打設する方法のどちらかが行われる。前者ではコン止めの設置と脱型等の作業が必要となり、後者では、必要以上の高強度コンクリートを使用することになり、どちらも経済性に劣る。床スラブ打設時にコン止めを用いることなく、PCa耐震壁よりも低い強度のコンクリートを一様に打設することができれば、作業の省力化に繋がり、使用コンクリートのコストを削減できるという点で経済性にも優れると考えられる。本研究では、PCa耐震壁において、強度の高いPCa板の間にPCa板に比べて強度の低いコンクリートを床スラブに打設する、異なる強度が混在する壁板構法を実用可能にすることを目的としている。これまでの研究²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾では、水平方向の最大荷重は壁板の高いコンクリート強度を用いて計算した壁板のせん断耐力を上回ることが確認された。本論では、床スラブの応力、床スラブの配筋量が破壊性状及び最大強度に及ぼす影響について検討する。

2. 解析概要

2.1 FEM 解析モデル

解析は汎用非線形有限要素プログラム ATENA3D を用い、いずれの解析モデルもソリッド要素を用いてモデル化した。図-1にコンクリート及び鉄筋、壁とスラブ間に用いたインターフェイス要素の構成則を示す。コンクリートの応力-ひずみ関係には破壊・塑性理論に基づくコンクリート構成則を使用しており、圧縮側は CEB-FIPモデル⁶⁾、引張側は破壊エネルギーを考慮したHordijkモデル⁷⁾を用いた上にテンションステフィニングを考慮し、応力軟化後の下限応力値を $0.4f_t$ とした。破壊・塑性

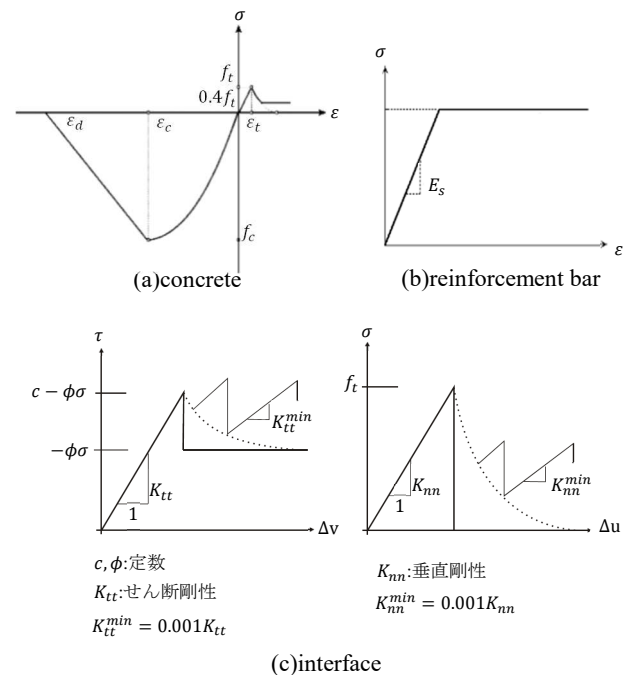


図-1 構成則

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科環境創生工学系専攻 (学生会員)
 *2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域教授 博士(工学) (正会員)

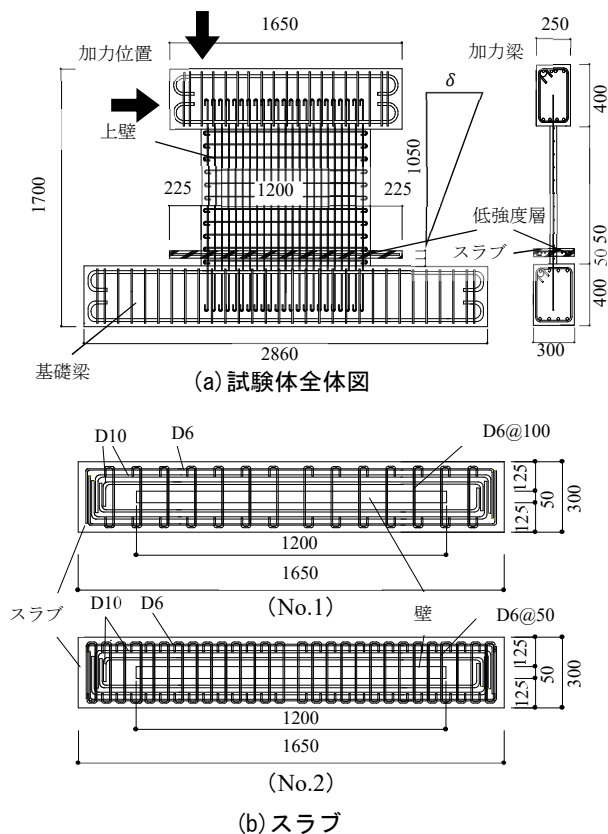


図-2 試験体概要

モデルに関しては、Menetrey-William の破壊面⁸⁾と Rankin 破壊基準を組み合わせたモデルを使用しており、ひび割れにはひび割れ方向を常に最大主応力方向と一致させる回転ひび割れモデルを用いた。また、鉄筋は構成則をバイリニアとし、壁やスタブにおいては埋め込み鉄筋モデルを用いてコンクリートとは完全付着とした。

2.2 FEM 解析モデルの検証

既往の実験試験⁴⁾⁵⁾について解析を行い比較検討する。表-1 に試験体 No.1, No.2 のスラブの配筋量を示し、表-2, 表-3 に使用したコンクリート及び鉄筋の物性値を示す。また、試験体の概要を図-2 に示し、作成したメッシュを図-3 に示す。メッシュはソリッド要素を用いており、躯体には6面体、載荷板には4面体の要素を用いている。試験体寸法は実験と同様 1/3 スケールで作成している。載荷方法に関しては、加力梁の片側及び上部に載荷板を設け、実験と同様に 200kN の軸力をかけながら、単調変位載荷をした。載荷板は降伏点のない三次元線形弾性構成則を用いており、今後の解析においてもこの構成則を用いた載荷板を使用するものとする。また実験の試験体をモデル化するにあたりスラブと上壁間に目荒らし等を施さなかった状況を考慮し、スラブを含めた壁全体をそれぞれ別の部材としてモデル化し、スラブと上壁及び下壁間については、インターフェイス要素を用いてモデル化している。図-4 に終局時の各試験体、各モデルのひび

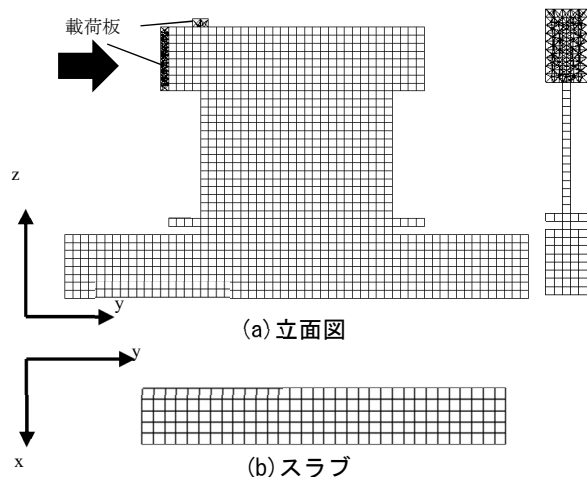


図-3 解析モデルメッシュ図

表-1 モデル名称及びスラブ内配筋量

モデル名	x 方向 スラブ量 (%)	y 方向 スラブ量 (%)
No.1	1.90	2.32
No.2	2.64	2.32

表-2 コンクリート物性値

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1	上壁	33.1	2.28
	下壁	40.5	3.08
	スラブ	26.7	2.14
No.2	上壁	34.5	1.96
	下壁	42.6	-
	スラブ	27.1	3.18

表-3 使用鉄筋物性値

種別	断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	備考
D19	286.5	553	380	基礎梁, 加力梁
D10	71.33	575	392	スラブ
D6	31.67	508	361	壁, スラブ

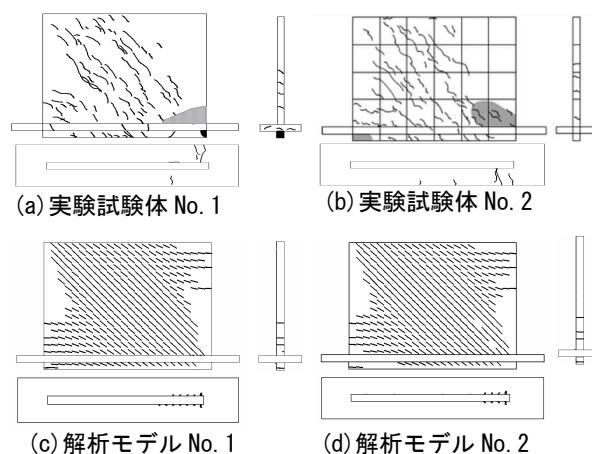


図-4 ひび割れ図

割れ図を示し、図-5 に、実験結果と解析結果の荷重変形関係を示す。横軸の変形角は、上下スタブの y 方向相対変位を、加力高さで割った値である。No.1, No.2 ともに、解析の荷重が実験を若干下回っているが、解析の最大荷

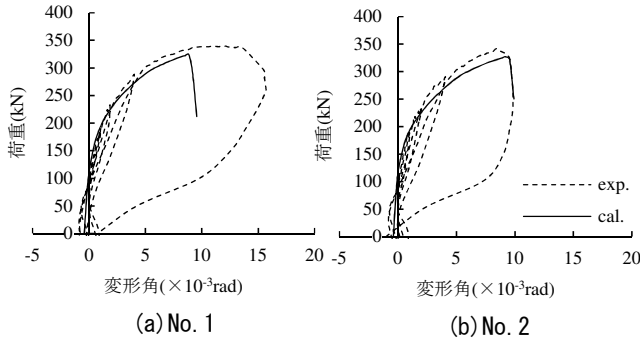


図-5 荷重変形曲線

重時まで、解析結果は実験結果と良い対応を示している。No.1 の最大荷重時付近における実験での変形角の増大は、低強度のスラブと高強度の壁の間で滑りが発生したためと考えられる。今後、この点について検討する必要があるものの、最大荷重がほとんど一致し、また、図-4より実験と同様に解析でもせん断ひび割れが顕著となっており、ピーク時にせん断ひび割れ周辺のコンクリートが応力低下していることから、本モデルは妥当であると考えられる。

3. スラブ応力

3.1 解析モデル

前章において検証した FEM 解析モデルを用いて床スラブの応力について検討する。表-4 に解析モデルのパラメータ、表-5 にモデルに使用したコンクリートの物性値、図-6 に解析モデルのメッシュ図をそれぞれ示す。解析モデルは壁板のコンクリート強度を 60 N/mm²、スラブの長辺方向の鉄筋比 p_y を 0.3% と固定し、スラブのコンクリート強度を 21 N/mm²、30 N/mm² の 2 種、スラブの短辺方向の鉄筋比 p_x を 0%、0.3%、0.6% の 3 種、図-4 に示すスラブ幅 w を 250 mm と 2050 mm の 2 種とした組み合わせで合計 12 モデルとする。なお、これらのパラメータは実験試験体³⁾を参考に設定した。またコンクリートの物性値は表-5 の注釈に示す式を用いて算出するものとし、コンクリート引張強度 σ_{st} 及びヤング係数 E は日本建築学会による式⁹⁾、引張破壊エネルギー G_f は Nakamura and Higai の研究¹⁰⁾による式とし、スラブについては、応力分布を把握することが目的であるため、分散鉄筋を用いた。加力方法は、前章と同様とする。

3.2 スラブの応力分布

図-7 に、壁板内のスラブ部分の各方向の最大荷重時の応力分布を示す。図の横軸は水平加力方向と同じ y 方向のスラブ位置、縦軸は各位置の応力を示している。同図によると、スラブの応力はスラブ幅 w による差が大きく、コンクリート強度による違いはほとんどみられない。圧縮側の壁端付近の応力は、スラブ幅 w が 250 mm では、

表-4 解析モデルパラメータ

スラブ幅 w (mm)	長辺方向スラブ筋比 p_x (%)	壁圧縮強度 wf_c (N/mm ²)	スラブ圧縮強度 sf_c (N/mm ²)
250,2050	0	60	21
	0.3		
	0.6		
	0		30
	0.3		
	0.6		

表-5 コンクリート物性値

圧縮強度 ²⁾ (N/mm ²)	引張強度 ¹⁾ (N/mm ²)	ヤング係数 ²⁾ (N/mm ²)	破壊エネルギー ³⁾ (N/mm)	使用箇所
60	2.56	36300	0.273	壁/スラブ
30	1.81	23600	0.193	スラブ
21	1.51	26600	0.161	

*1: $\sigma_{st} = 0.33 \times \sigma_B^{0.5}$

*2: $E = 3.35 \times 10^4 \times (y/24)^2 \times (F_c/60)^{1/3}$

*3: $G_f = 8.8 \sqrt{F_c} / 250$

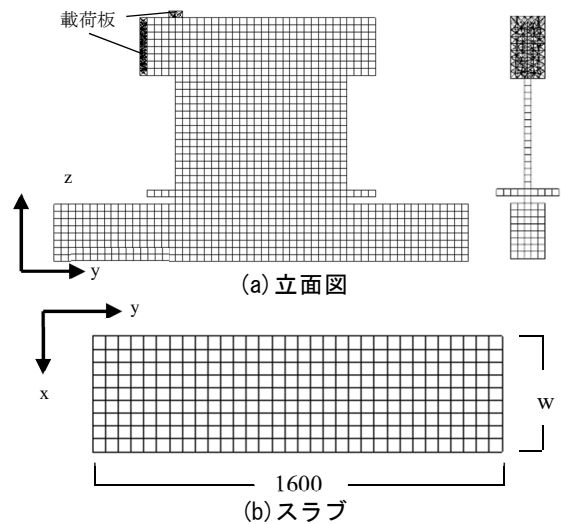


図-6 解析モデルメッシュ

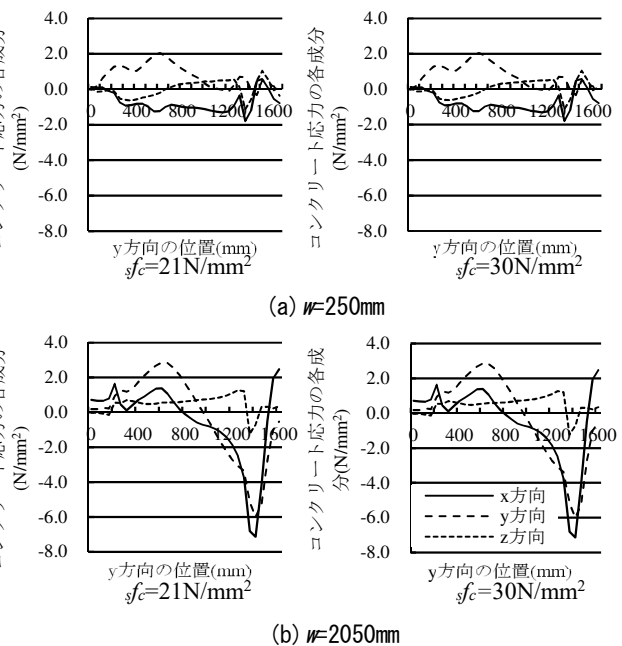


図-7 壁に沿ったスラブ内各方向応力分布

水平加力に直交する x 方向が圧縮側へ最も大きくなっている。スラブ幅 w が 2050mm でも、250mm と同様に x 方向が圧縮側へ最も大きくなっている。したがって、スラブに最も影響を及ぼす応力の方向は x 方向、つまりスラブを短辺方向に広げようとする方向であると考えられる。

3.3 スラブ有効幅

前節で述べた x 方向応力のスラブに対する影響を、壁からスラブに伝わる x 方向応力の範囲として、図-8 に示すように算出する。ここでは、この幅のことを便宜的に有効幅と呼称することにし、有効幅は、壁端部の応力と同等の応力が生じている範囲とする。図-8 は壁端部を 0 とした各要素の位置を横軸、スラブの各要素に作用している x 方向の応力を縦軸にとっており、各節点に作用する応力をそれぞれ示している。その曲線と横軸で囲まれる面積と、要素に作用する応力の最大の値を用いて作られる、図に示す斜線部分の長方形の面積が等しくなるような長方形の幅を算出する。図-9 に解析による有効幅の算出結果を示す。図の横軸は変形角であり、1/1000rad、1/500rad 及び最大荷重時の有効幅を、壁厚 50mm に対する有効幅の比として縦軸にそれぞれ示している。最大荷重時の値は●、▲で図中に表記している。なお、図の有効幅は壁を中心とした片側の幅を示している。同図(a)の $w=250\text{mm}$ についてみると、どのモデルでも最大荷重時の有効幅が 1/1000rad の時よりも小さくなっており、最大荷重時のスラブはすでに破壊しており、応力を負担して

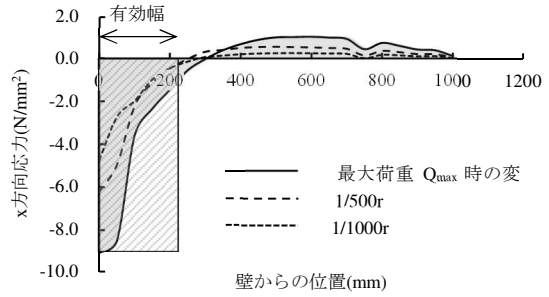


図-8 最大荷重 Q における有効幅算出の例
($f_c=30\text{N/mm}^2$, $w=2050\text{mm}$, $p_x=0.3\%$)

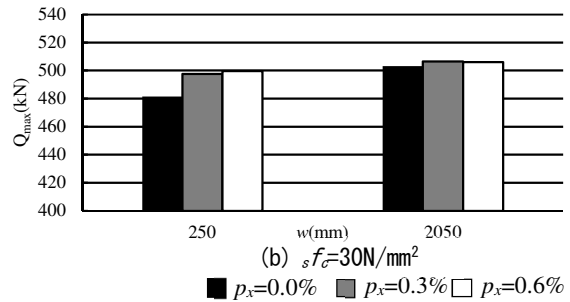
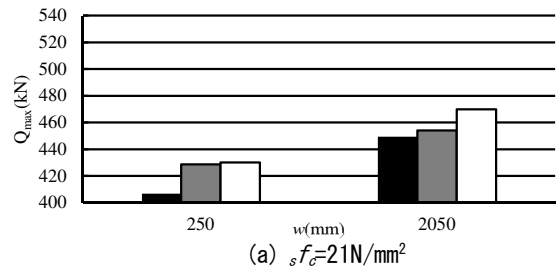


図-10 各モデルの最大耐力

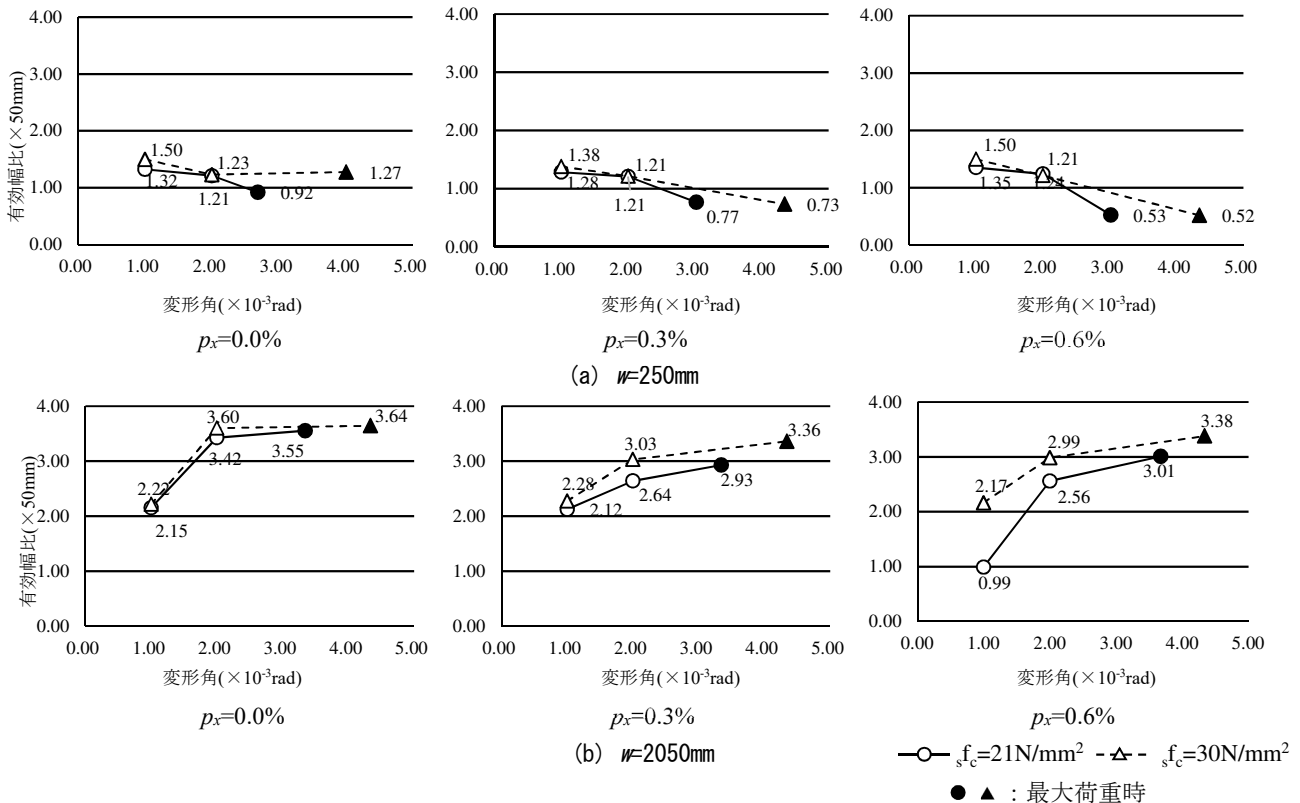


図-9 有効幅

いないために有効幅が小さくなっていたことが推測される。また、同図(a)の $w=2050\text{mm}$ についてみると、どの条件においても最大荷重時では有効幅が壁厚の3倍から4倍程度になっており、壁端部からおおよそ 150mm から 200mm であることがわかる。スラブは壁を中心に対称であるため、両側の有効幅を考慮すると、スラブ幅は 350mm から 450mm 程度あればよいと考えられる。図-10に、各モデルの最大荷重を示す。図をみると、最大荷重はスラブのx方向鉄筋が少ないと小さくなっている。また、 $w=2050$ はスラブの拘束効果の影響で最大荷重が大きく、 $w=250$ はスラブの拘束効果が小さく $w=2050$ に比べて最大荷重は小さくなっている。 $w=250$ の $w=2050$ に対する減少率は、スラブのコンクリート強度が 21N/mm^2 では $5.58\% \sim 9.46\%$ 、 30N/mm^2 では $1.29\% \sim 4.32\%$ となり、コンクリート強度が低い方が大きく低下している。

4. 最大強度

4.1 解析モデル

本章では、最大強度に及ぼす鉄筋比の影響について検討する。表-6に解析モデルの一覧を示す。前章で有効幅が片側 150mm から 200mm であることが分かった。そのため、このモデルは壁端部から片側 200mm 、さらに壁厚 50mm と考慮して、スラブ幅をとして、スラブの鉄筋比を違えて解析する。鉄筋比は短辺方向の鉄筋比を p_x 、長辺方向の鉄筋比を p_y とし、それぞれの値を $0.0\% \sim 3.0\%$ の間で変化させた。スラブのコンクリート強度は 21N/mm^2 と 30N/mm^2 の二種である。また、比較のため、 $p_x=p_y=0.3\%$ とし、スラブのコンクリート強度を壁板強度と同じ 60N/mm^2 としたモデル（以下、強度一体モデル）も加えた。

4.2 最大強度とコンクリート強度、鉄筋比

図-11 (a), (b)に、スラブのコンクリート強度別に最大荷重をそれぞれ示す。図中の●印は、 $p_x=p_y=0.3\%$ とし、スラブのコンクリート強度を 60N/mm^2 とした比較用モデルの値をプロットしている。図によると、コンクリート強度に関わらず、スラブのx方向鉄筋比が大きくなるほど、またy方向鉄筋比が大きくなるほど最大荷重は大きくなっている。この鉄筋比の変化による最大荷重の増加割合は、コンクリート強度が 21N/mm^2 の方が 30N/mm^2 よりも大きい。実際にスラブに配筋するときには、短辺方向ばかりでなく長辺方向にも配筋することが必要と考えられ、強度一体モデルと同程度の最大荷重とするためには、コンクリート強度 21N/mm^2 では、 $p_x=p_y=3.0\%$ 程度の鉄筋比となっている。図-12に、スラブのコンクリート強度別に $p_x=p_y=0.3\%$ と $p_x=p_y=3.0\%$ および強度一体モデルを比較した荷重-変形曲線を示す。スラブの強度が 30N/mm^2 では、 $p_x=p_y=0.3\%$ の最大荷重時部材角が僅かに

表-6 鉄筋比を変数とした解析モデルパラメータ

スラブ 圧縮強度 $f_c(\text{N/mm}^2)$	スラブ幅 $w(\text{mm})$	$p_y(\%)$	$p_x(\%)$		
21,30	450	0.0	0.0		
			0.3		
			0.6		
		0.3	1.0		
			2.0		
			3.0		
		0.6	0.3		
			0.6		
			1.0		
		1.0	2.0		
			3.0		
			0.3		
		2.0	0.6		
			1.0		
			2.0		
		3.0	3.0		
			0.3		
			0.6		
		60		0.3	0.3
					2.0
					3.0

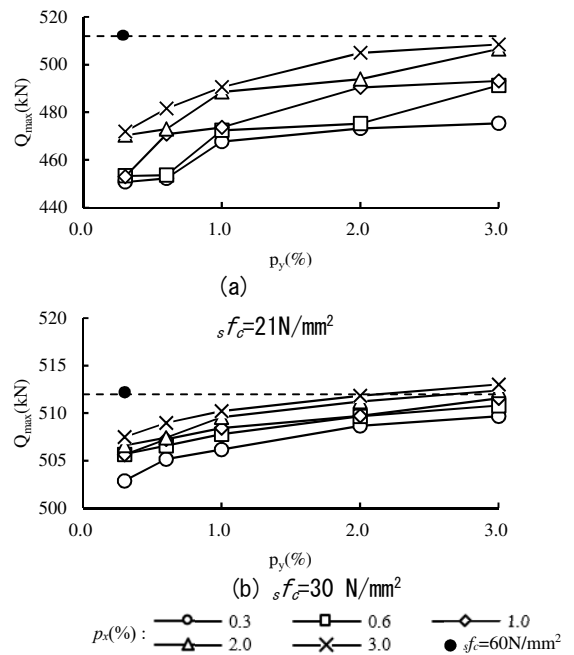


図-11 最大耐力比較

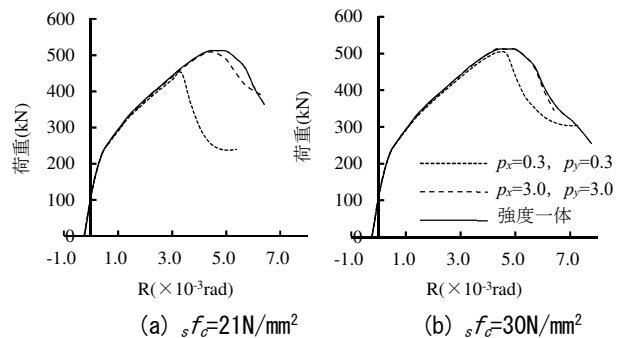


図-12 荷重変形曲線

小さいものの、 $p_x=p_y=3.0\%$ とともに強度一体モデルと最大強度時までほぼ同じ挙動を示しており、鉄筋比の影響は小さなものとなっている。スラブの強度が 21N/mm^2 では、 $p_x=p_y=3.0\%$ は強度一体モデルとほぼ同様の挙動を示すものの、 $p_x=p_y=0.3\%$ は最大荷重時部材角が小さく最大荷重が10%程小さい結果となっている。コンクリート強度が小さい場合には、鉄筋比の影響が大きいことを示している。

5. まとめ

本論では低強度層を含むスラブ付き耐震壁の実験に基づいて解析を行い、その結果について解析的に検討を行った結果以下の知見を得た。

- (1)低強度層を有するモデルは有効幅を考慮して鉄筋による補強を行う方がよいと考えられ、その幅は壁を中心として $350\text{mm}\sim 450\text{mm}$ 程度である。
- (2)スラブの鉄筋比を変動させた結果、短辺方向の鉄筋比を増減させる方が、耐震壁のせん断耐力の観点からは効率的である。
- (3)長辺方向短辺方向ともに鉄筋比を 3.0% 程度にすることで、強度が一体で構成されたモデルと同等の性能が得られる可能性がある。
- (4)壁に対してスラブ部分のコンクリート強度が小さく、二つの強度差が大きい場合は、その強度差が小さい場合と比較して鉄筋比の影響が顕著である。

以上の知見を以て、今後は壁の耐力とモデルの耐力との関係を明らかにし、スラブが耐力に影響を及ぼす条件と影響をほとんど及ぼさない条件の境界を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1)小坂英之, 溝口光男, 荒井康幸: 鉄筋コンクリート連

層耐震壁の強度算定法, 日本建築学会構造系論文集, pp. 129-136, 2014.1.

- 2)松永健太郎, 磯崎翼, 溝口光男, 小坂英之: 異種強度コンクリートが混在する RC 耐震壁に関する実験的検討 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.165-166, 2016.8
- 3)磯崎翼, 松永健太郎, 溝口光男, 小坂英之: 異種強度コンクリートが混在する RC 耐震壁に関する実験的検討 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.167-168, 2016.8
- 4)小坂英之, 加藤拓也, 溝口光男, 松永健太郎, 江頭寛: 異種強度コンクリートが混在する RC 耐震壁に関する実験的検討 (その3) (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.437-438, 2017.7
- 5)加藤拓也, 溝口光男, 松永健太郎, 江頭寛, 小坂英之: 異種強度コンクリートが混在する RC 耐震壁に関する実験的検討 (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.439-440, 2017.7
- 6)Comittee Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990. 1993.
- 7)Hordijk, P. A: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Thesis: Delft University of Technology, 1991
- 8)MENETREY, P., WILLAM, K.J. (1995), Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. ACI: Structural Journal, 1995, 92(3), pp 311-318
- 9)日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 10)Nakamura, H. and Takeshi H.: Fracture zone and fracture energy of concrete under uniaxial compressive stress. Int. Conf: On Uiban Engineering in Asian Cides in 21st Century, pp. d105 -d110, Nov. 20-23, 1996