

論文 新設壁開口を有する壁式鉄筋コンクリート構造の弾塑性挙動に関する解析的研究

水野 生^{*1}・田才 晃^{*2}・楠 浩一^{*3}

要旨：過去にリニューアルの観点から既存壁に開口を新設し、開口補強を検討するため、壁式鉄筋コンクリート造壁の静的加力実験を行い、開口の影響、開口補強効果については明らかとなった。しかし、実際のニーズから開口は連層に亘って設けることとなる。開口のある壁が階毎に重なることにより、更に建物の全体の耐力が低下することが懸念される。そこで本研究では、開口を設けた連層耐力壁において有限要素解析を行い、開口の影響、溝形鋼補強による補強効果を検討した。開口を設けることにより、最大耐力は無開口に比べ5割程度低下したが、溝形鋼補強によって最大耐力は無開口とほぼ同等まで改善することを確認した。

キーワード：連層耐力壁、三次元有限要素解析、新設壁開口、溝形鋼、開口補強

1. はじめに

過去に、集合住宅のリニューアルにおいて、壁式構造の既存集合住宅における戸境の耐力壁に開口を設けることを想定し、開口の有無と補強方法をパラメータとした静的水平加力実験¹⁾を行った。この実験により、一枚壁における壁の強度、開口の影響・開口周辺の補強効果については明らかとなったが、想定した実際の既存集合住宅は4階建てであり、建物の全てのプランに対して開口を設ける場合、開口のある壁が階毎に重なることにより、更に建物の全体の耐力が低下することが懸念される。

そこで本研究では、実験のデータを元に、まず山崎らによって行われた新設壁開口に関する実験¹⁾を、汎用ソフト Marc によって三次元有限要素解析を行い再現することでモデル化の妥当性を検証した。その上で、連層耐力壁に関して、

開口の有無、実験で行われた補強方法をパラメータとした解析を行い、地震時における壁の強度、破壊性状等に及ぼす開口の影響と開口周辺の補強効果の把握・検討を行った。

2. 実験を再現した解析概要

2.1 試験体概要

表-1に解析試験体概要を、表-2に材料特性を示す。また、図-1に実験における試験体配筋図を、図-2に本解析で用いた要素分割図を、図-3に補強詳細図を示す。

本解析では試験体が厚さ方向において対称となるため、1/2領域のみをモデル化し、解析を行った。コンクリートには8節点立方体要素、鉄筋には2節点直線要素を用い、鉄筋はコンクリートと節点を共有するように定義した。

実験を再現するための試験体において、壁筋・

表-1 解析試験体概要

試験体名	壁長 (mm)	壁高 (mm)	壁厚 (mm)	開口形状 (mm)	壁筋	Pw ^{*2} (%)	端部補強筋	コンクリート		開口の有無	備考
								F _c (N/mm ²)	ヤング係数		
NO.1	1835	1220	90/2	1000×500	4φ@125 ダブル (SR235)	0.22	4-D13 (SD345)	25.2	22900	有	(無補強)
NO.2				開口周比 0.47 ^{*1}				25.6	23300	有	基準 ²⁾ による開口補強筋
NO.4				27.4				24900	有	溝型鋼設置	
NO.5				23.6				21400	無		

*1 $\sqrt{(h_0/h)}$

*2 Pw:壁筋比

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学 工学研究員システムの創生部門 教授 工博 (正会員)

*3 横浜国立大学 工学研究員システムの創生部門 准教授 工博 (正会員)

端部補強筋・スタブ筋の配置については実験試験体と完全に一致させた。長さ方向・高さ方向については、壁筋の125mmピッチに合わせて1/4の31.25mmピッチで要素を分割し、厚さ方向については、鉄筋配置の関係により25.5mmと19.5mmとした。スタブについては壁に追随する形でピッチを定めてある。解析試験体の長さ・内法高さは1/2スケールの実験試験体と同じ1835mm・1220mmとし、厚さは1/2領域のみモデル化したため45mmとした。開口は、壁中央に高さ1000mm、幅500mm、等価開口周比は0.47となった。解析対象は、無開口試験体(No.5), 有開口無補強試験体(No.1), 有開口通常開口筋補強試験体(No.2), 有開口溝形鋼補強試験体(No.4)とし、解析では実験試験体と同等の補強を施した。

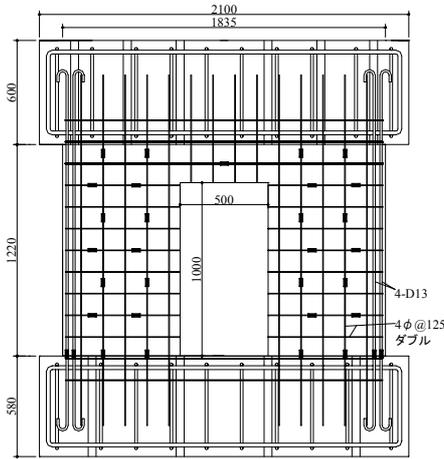


図-1 試験体配筋 単位(mm)

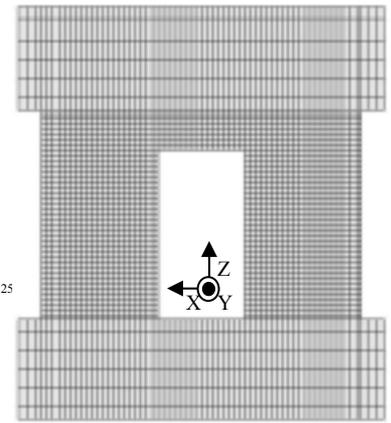


図-2 要素分割図

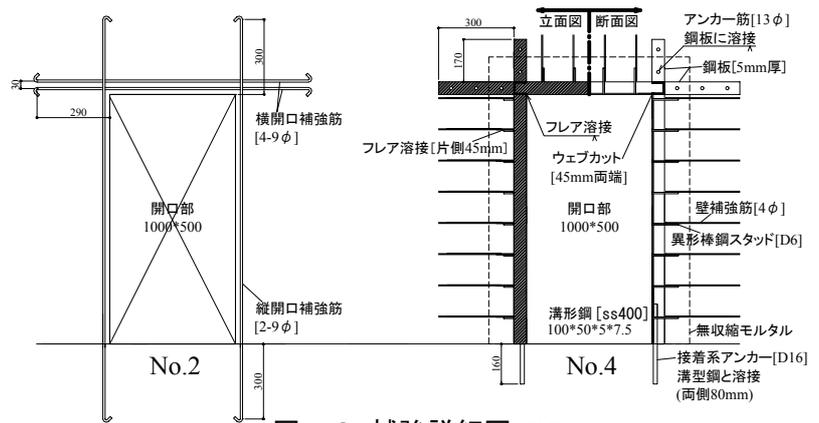


図-3 補強詳細図 単位(mm)

2.2 材料構成則と補強方法

解析に用いたコンクリート、鉄筋の材料モデルを図-4に、コンクリートモデルの除荷経路図を図-5に示す。材料特性は実験を再現するために行った解析では実験値を用いた。

コンクリートは von Mises の降伏条件を用い、等方性材料とした。コンクリートの材料定数は圧縮試験による圧縮強度 σ_B 、ポアソン比は 0.2 とした。なお、ヤング係数は、コンクリート圧縮強度の 1/3 の応力の値における割線勾配とした。最大圧縮応力度までの圧縮上昇域は右図の Saenz の提案式³⁾を用いた。最大応力度に至った後は $(4 \epsilon_{cu}, 0.2 \sigma_B)$ の点まで直線的に応力が減少し、その後、応力は $0.2 \sigma_B$ の一定値を保ちながら歪のみが増加するモデルとした。また、除荷時にはヤング係数の傾きで戻る履歴とした。一方、引張域では圧縮側と同じヤング係数を有しながら引張強度 $\sigma_T = 0.56 \sqrt{\sigma_B}$ に達した時、ひび割れが発生するものと仮定し、その後、軟化勾配 10 kN/mm^2 で直線的にゼロまで応力を減少

表-2 材料特性

鉄筋種	ヤング係数 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	降伏歪 (%)	引張強度 (N/mm^2)	破断歪 (%)
4φ	189000	509.8	0.473	562.4	8.4
D13	179000	379.1	0.344	579.5	15.9

補強材料	ヤング係数 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	降伏歪 (%)	
9φ	開口補強筋	196000	336.5	0.166
D6	スタッド筋	204000	368.4	0.160
D16	鋼材補強下部アンカー	192000	374.4	0.257
SS400	溝形鋼	205000	400	0.2

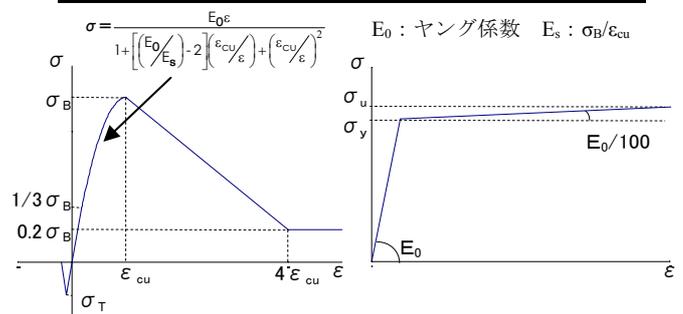


図-4 材料モデル (左コンクリート, 右鉄筋)

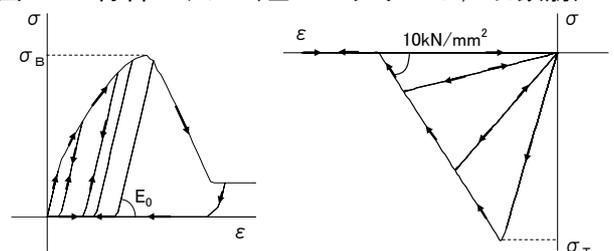


図-5 コンクリート除荷経路図 (左圧縮, 右引張)

させ、除荷時には原点に戻る履歴とした。また、ひび割れは、要素内に無数に一様に分布しているとす一様ひび割れモデルを用いた。

ひび割れを生じたコンクリートでも材料間の連続性が保たれていると仮定し、ひび割れが発生すると、ひび割れと直角方向の剛性を0に低下させ、その要素全体を直行異方性体として扱い、ひび割れを表現するモデルである。

鉄筋についても、von Mises の降伏条件を用いた。鉄筋のヤング係数および降伏応力は実験値とし、ポアソン比は全て0.3とした。鉄筋の応力-歪モデルは、初期勾配 E_0 をヤング係数とし、鉄筋降伏強度に達した後、第二勾配が初期勾配の1/100 になるような bi-linear 型モデルで近似した。

溝形鋼については、コンクリートと同様に立方体要素として扱い、応力度-歪モデルは鉄筋と同じく bi-linear 型モデルで近似した。接するコンクリートとは節点を共有させ、異形棒鋼スタッド D6 を溝形鋼・壁筋と節点を共有させることにより、溝形鋼と壁筋との定着を、アンカー筋 D16 を溝形鋼・下スタブと節点を共有させることにより溝形鋼と下スタブとの定着を図り、補強した。

2.3 拘束条件と加力方法

拘束条件は、試験体の底面全節点において、X・Y・Z 方向の変位を拘束し、上スタブの上面全節点において、厚さ方向の変位を拘束することにより回転制御した。また、対称性を考慮して実験試験体の1/2領域のみをモデル化したため、対称の中心となる断面の全節点に、面に対して垂直方向の変位を拘束し、他方向については自由とした。

加力は、実験を忠

実に再現するため、まず、軸力を上スタブの上部の面に軸力比0.1となる150kN (0.24N/mm^2) を等分布荷重として与え、解析を通して一定に保った。その後、上スタブの上面における全節点に水平力を加え、変位制御により正負繰り返し漸増载荷を行った。加力サイクルは実験と同様に、層間変形角 $R=\pm 1/2500(\text{rad.}), \pm 1/1500(\text{rad.}), \pm 1/800(\text{rad.}), \pm 1/400(\text{rad.}), \pm 1/200(\text{rad.}), \pm 1/100(\text{rad.}), \pm 1/50(\text{rad.})$ とした。ただし、実験においては2回繰り返し载荷を行ったサイクルもあったが、解析では全てのサイクルで1回みの载荷とした。

3. 実験を再現した解析結果

3.1 破壊性状

図-6に各試験体の最終破壊時のクラック歪分布図を実験におけるひび割れ図と比較して示す。クラック歪が大きいものほど濃く表示されている。

実験において有開口無補強試験体 No.1, 通常の開口補強筋による補強を施した試験体 No.2 においては開口上部のコンクリートにはひび割れが全く見られず、溝形鋼により補強を施した試験体 No.4 は実験では開口上部の斜めひび割れが見られ、解析もその特徴を良く捉えていた。解析での最大耐力時の破壊形式は全試験体共にせ

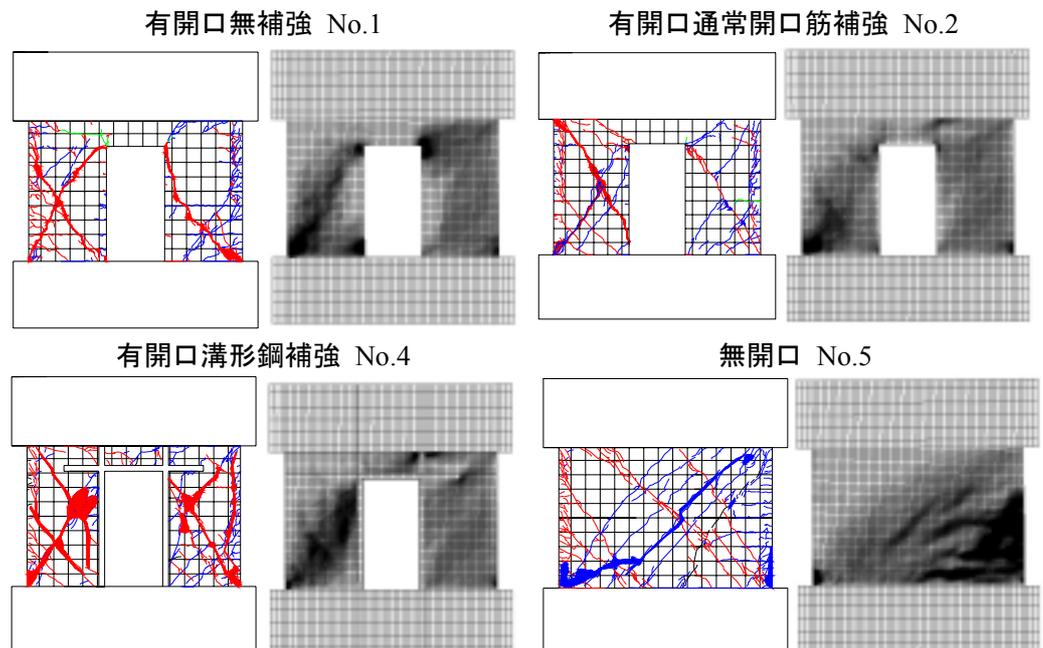


図-6 実験と解析によるひび割れ図比較(左実験, 右解析)

ん断ひび割れが成長し、圧縮側脚部が圧壊し解析を終えた。破壊形式・ひび割れの進展状況共に実験で見られた傾向と良く対応していた。

3.2 荷重変形関係

解析結果を表-3に、各試験体の荷重-変形関係を実験より得られた包絡線と共に図-7に示す。

全ての試験体を通して、層間変形角 $R=\pm 1/800$ (rad.)までは解析値と実験値の比率が $\pm 5\%$ 以内と、初期剛性は良く対応していたが、 $R=\pm 1/400$ (rad.)、 $R=\pm 1/200$ (rad.)では剛性低下が実験よりも早く起こった。また、内部ループに関しては解析は実験に比べ原点指向が強くエネルギー吸収量が小さなものとなった。この理由として、実験ではせん断ひび割れ幅は除荷時であってもあまり閉じず、一方解析では除荷時にはせん断ひび割れも曲げひび割れも幅がほぼ0となったことが挙げられる。これは、解析ではコンクリートと鉄筋が完全付着であるため、除荷時に鉄筋に追従してコンクリートのせん断ひび割れが閉じてしまい、変形が小さくなったと考えられる。

最大耐力は全ての試験体において解析値と実験値の比率がおよそ $\pm 10\%$ 以内となり良く対応した。しかし、各試験体で実験時に発揮した変形性能まで追跡することはできなかった。

4. 連層耐力壁架構モデルの解析概要

4.1 架構概要

表-4に架構概要、表-5に材料特性を示す。

架構解析では、まず実験試験体プロトタイプとした柱・梁のない実在壁式構造既存集合住宅の壁とそれに付随する直交壁・スラブを1層分抜き出し解析を行った。スケールは実大

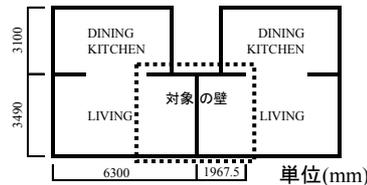


図-8 連層耐力壁架構対象図

表-4 連層耐力壁架構解析概要

壁長 (mm)	壁高 (mm)	壁厚 (mm)	スラブ厚 (mm)	開口形状 (mm)	壁筋	端部補強筋	スラブ筋	コンクリート	
								F_c (N/mm^2)	ヤング係数
3670	2440	180/2	110	2000×1000 開口周比 0.47	9φ@250ダブル(SR235)	2-16φ(SR235)	短辺方向 13φ@250(SR235)	18	16300
					4階のみ 6φ@250ダブル(SR235)	4階のみ 2-9φ(SR235)	長辺方向 9φ@250(SR235)		

表-3 実験を再現した解析結果

試験体	実験値(正側)		解析値(正側)		最大耐力 解析値/実験値
	最大耐力(kN)	層間変形角R	最大耐力(kN)	層間変形角R	
No.1	264.6	+1/200	270.8	+1/200	1.02
No.2	298.2	+1/240	292.0	+1/200	0.98
No.4	317.5	+1/200	352.5	+1/200	1.11
No.5	492.9	+1/100	488.1	+1/80	0.99

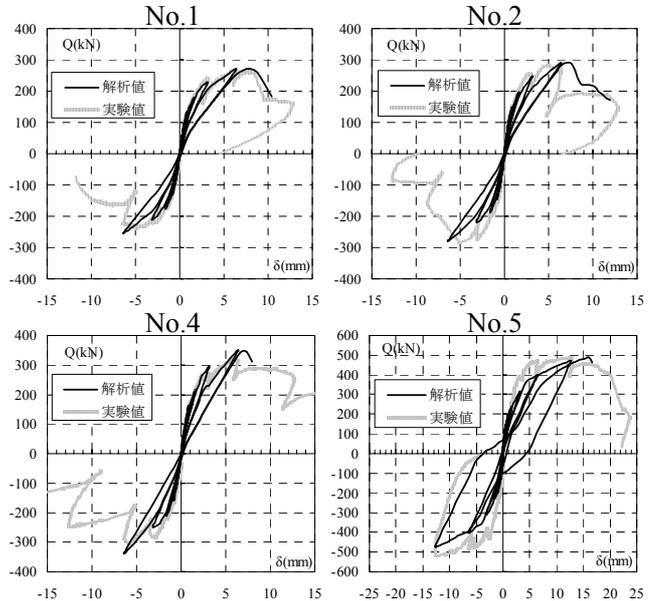


図-7 実験を再現した解析荷重-変形関係

とした。対象とした部分を図-8に示す。その後、これを4層に積み重ねて解析を行った。要素分割は125mmピッチを基本とし、厚さ方向のみ51mm、39mmとした。また、2節同様、厚さ方向1/2のみをモデル化し、材料の構成則は解析試験体と同一とし、値については規格値を用いた。解析対象は、無開口架構(No.5)、有開口無補強架構(No.1)、有開口溝形鋼補強架構(No.4)とし、溝形鋼によって補強したNo.4は、解析試験体と同等の補強を施した。

4.2 加力方法

1) 一層耐力壁架構 加力は、対象建物の構造計算

表-5 連層耐力壁架構解析材料特性

鋼種	ヤング係数 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	降伏歪 (%)	引張強度 (N/mm^2)
SR235	205000	285	0.14	490
SD345	205000	345	0.17	550
SS400*1	205000	400	0.2	605

*1:溝形鋼

書より引用した軸力を対象の壁、直交壁に等分布荷重として与え、解析を通して一定に保った。その後、スラブの全節点に水平力を加え、変位制御により静的単調載荷を行った。

2) 連層耐力壁架構 加力は、軸力を各階の対象の壁、直交壁に等分布荷重として与え、一定に保った。その後、各階のスラブにおける壁の厚さ範囲の面へ A_i 分布により求めた水平力を面荷重として与え、静的単調載荷を行った。

5. 連層耐力壁架構モデルの解析結果

5.1 破壊性状

図-9 に一層耐力壁・連層耐力壁架構の最大耐力時ステップのクラック歪の分布図を示す。

1) 一層耐力壁架構

No.5 無開口一層架構は、斜めひび割れの成長と共に壁左下部と右上部で直交壁との間で変形が増加し、解析を終えた。

No.1 一層架構は、解析試験体 No.1 では開口上部にひび割れが入らなかったのに対し、一層架構解析ではひび割れが集中する結果となった。その後、開口上部左隅角部は圧縮、右隅角部は引張による変形が急増し、破壊に至った。

No.4 一層架構は、解析試験体 No.4 と同様の経過を辿り、最終的には圧縮側壁右中部の溝形鋼と接する部分のコンクリートの変形が急激に進み、破壊に至った。

2) 連層耐力壁架構

No.5 無開口連層架構は 1 階引張側下部に曲げひび割れが発生し、そのひび割れから徐々に上部に斜めひび割れが広がっていった。壁全体が片持ち梁的な挙動を示し、1 階壁左下部

が圧壊する結果となった。

No.1 連層架構は、 $R=1/3000(\text{rad.})$ で開口右上隅角部から右上へ斜めひび割れ、1 階・2 階圧縮側壁右下部から水平ひび割れが発生し、壁梁にひび割れが集中していった。その後、各階の壁梁の変形が急激に進み、壁梁左下部、1 階引張側壁左下部で圧壊が起こり破壊に至った。

No.4 連層架構は、 $R=1/1500(\text{rad.})$ で 1 階、2 階、3 階の壁梁に斜めひび割れ、1 階引張側壁、圧縮側壁右下部より水平方向のひび割れが発生した。 $R=1/770(\text{rad.})$ では 1 階両壁に斜めひび割れ、 $R=1/250(\text{rad.})$ では 2 階両壁に斜めひび割れが発生した。その後、 $R=1/100(\text{rad.})$ で 1 階圧縮側壁左下部、開口左上隅角部周辺で圧壊が起こり、最終破壊に至った。

5.2 荷重変形関係

各架構の荷重-変形関係を図-10 に、解析結果を表-6 に示す。

1) 一層耐力壁架構

No.5 無開口一層架構は、層間変形角 $R=1/1300(\text{rad.})$ から $R=1/500(\text{rad.})$ の間で、右下部より斜めひび割れが徐々に上へ進展、壁頂部に達するまで、耐力が 200kN 程低下した。その後、耐力は緩やかに上昇し、その途中の $R=1/400(\text{rad.})$ で端部補強筋が引張降伏、 $R=1/260(\text{rad.})$ で最大耐力 1943kN

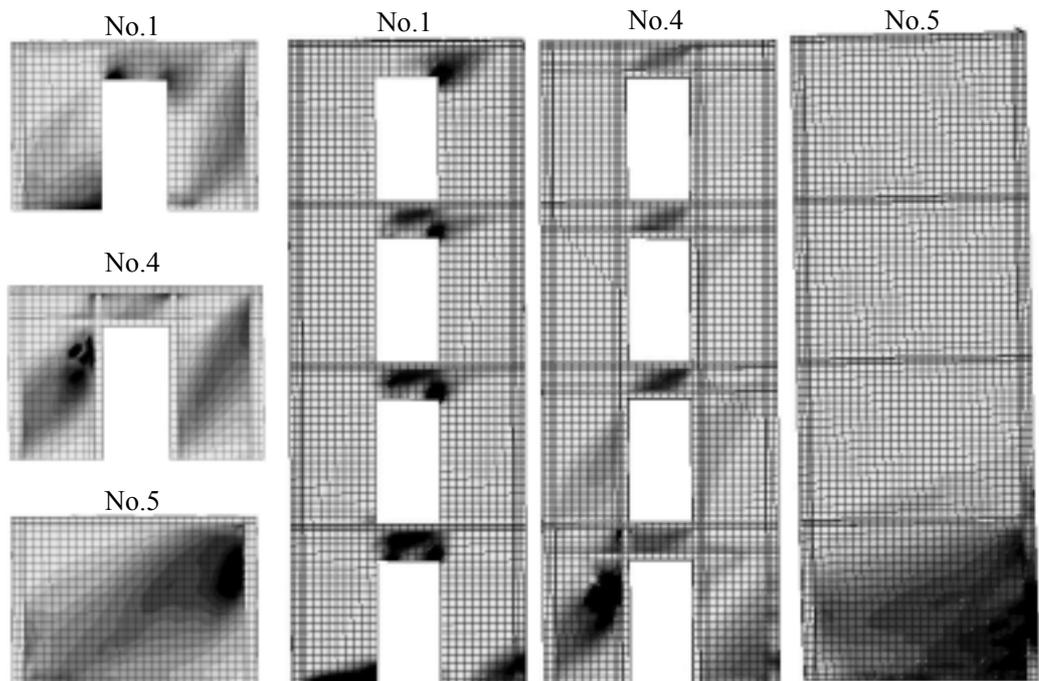


図-9 連層耐力壁架構解析ひび割れ図

となった。最大耐力後は壁左下部と右上部で直交壁との間で圧壊が起こり、耐力が低下した。

No.1 一層架構は、 $R=1/1000(\text{rad.})$ で引張側壁の対象の壁と直交壁の間で壁横筋が徐々に降伏を始め一時耐力が低下、 $R=1/350(\text{rad.})$ 以降、開口上部の壁梁における縦筋が引張降伏と同時に引張側壁左下縦筋が圧縮降伏し、 $R=1/240(\text{rad.})$ で最大耐力 1107kN となった。最大耐力を No.5 と比較すると 57%であった。最大耐力後は耐力が壁梁の変形と共に低下していった。

No.4 一層架構は $R=1/1000(\text{rad.})$ 付近で圧縮、引張側壁それぞれの斜めひび割れと共に壁横筋の降伏範囲が広がり、せん断耐力が 65kN 程低下していった。その後、緩やかに耐力が上昇、 $R=1/250(\text{rad.})$ で最大耐力 1739kN となった。最大耐力を No.1 と比較すると 157%となり補強効果が見られた。

2) 連層耐力壁架構

No.5 無開口連層架構は、 $R=1/2500(\text{rad.})$ で壁右下部から中央までの水平ひび割れと同時に壁縦筋が降伏し、剛性が低下した。 $R=1/1000(\text{rad.})$ 以降斜めひび割れと同範囲で壁筋が降伏、 $R=1/60(\text{rad.})$ で 2 階中央部にまで達し、最大耐力 1370kN に至った。

No.1 連層架構は、 $R=1/2000(\text{rad.})$ で圧縮側壁右下部からの水平ひび割れに沿って壁縦筋が引張降伏し剛性がやや低下した。 $R=1/500(\text{rad.})$ で壁梁右、1 階引張側壁右下部は引張降伏、壁梁左、1 階引張側壁左下部は圧縮降伏を起こし、 $R=1/230(\text{rad.})$ で最大耐力 791kN となった。その後、急激に耐力低下し、解析を終えた。最大耐力を No.5 と比較すると 58%であった。

No.4 連層架構は、 $R=1/1500(\text{rad.})$ で剛性がやや低下し、 $R=1/770(\text{rad.})$ で壁梁の壁筋が降伏し始めた。 $R=1/250(\text{rad.})$ では 1 階、2 階圧縮側壁、引張側壁で壁筋が降伏し、その後急激に変形が進み、 $R=1/170(\text{rad.})$ で最大耐力 1305kN となり解析を終えた。最大耐力を No.5 と比較すると 95%、No.1

表-6 連層耐力壁架構解析結果

一層架構	解析値		連層架構	解析値	
	最大耐力(kN)	層間変形角R		最大耐力(kN)	層間変形角R
一層No.1	1106.9	1/240	連層No.1	791.7	1/230
一層No.4	1738.9	1/250	連層No.4	1304.8	1/170
一層No.5	1943.4	1/260	連層No.5	1369.5	1/60

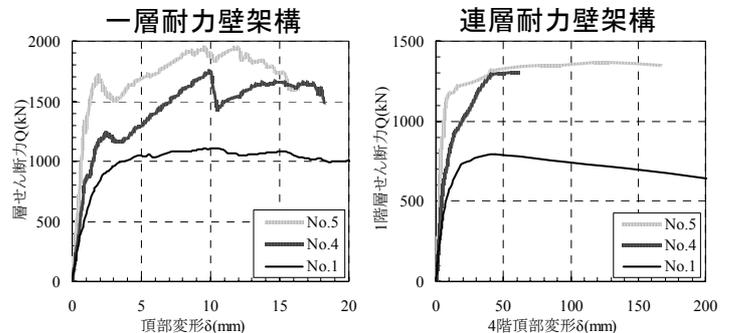


図-10 連層耐力壁架構解析荷重-変形関係

と比較すると 164%と顕著な補強効果が見られた。

6. 結論

既存壁式鉄筋コンクリート造耐力壁の三次元有限要素解析を行い、以下のような知見が得られた。

- 1) 実験を再現した解析では、初期剛性、最大耐力、破壊経過など、解析と実験は良い対応を示した。
- 2) 実験を再現した解析の有開口無補強試験体において開口上部の壁梁となったコンクリートに目立った損傷は見られなかったが、連層耐力壁における解析では、特に損傷が集中し、脆性的な破壊に至った。
- 3) 開口を設けた耐力壁に対し、溝形鋼補強は一層、連層耐力壁において最大耐力が無開口とほぼ同等となり、顕著な補強効果が見られた。

参考文献

- 1) 山崎智博: 既存鉄筋コンクリート造集合住宅における新設壁開口の補強に関する研究, 横浜国立大学大学院工学府修士論文 2005
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 pp218-241, 1999
- 3) 色部 誠等 監訳: コンクリート構造物の塑性解析 pp20-43, 1985
- 4) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 pp615-633, 1990