

論文 縦長開口が不規則に配置された RC 連層耐震壁の開口高さによる耐力低減率に関する一考察

安本 柊太*1・劉 虹*2・永野 正行*3・市之瀬 敏勝*4

要旨：本稿は、縦長開口が不規則に配置された連層耐震壁を対象に、開口高さによる耐力低減率 r_3 の適用性を検討する。はじめに、縦長開口が斜めに配置された連層耐震壁の実験結果を対象に FEM 解析を実施し、実験結果を再現できることを明らかにした。実験では荷重方向によって強度と破壊機構が異なったが、この理由は壁に形成された圧縮ストラットの角度及び分布が異なるためであることがわかった。また、千鳥配置を含めて、各層の開口間における水平距離を変数としたパラメトリック解析を行い、異なる開口配置による応力伝達機構に基づいて破壊機構を検討し、 r_3 が適用可能であることを示した。

キーワード：有開口耐震壁、不規則な開口、FEM 解析、破壊機構、斜め開口、開口高さによる耐力低減率

1. はじめに

日本建築学会の 2010 年版鉄筋コンクリート構造計算規準¹⁾ (以下、RC 規準) では、有開口連層耐震壁のせん断強度算定法に開口高さによる耐力低減率 r_3 が導入され、筆者らは縦長開口が壁高さ方向に規則に配置された耐震壁を対象とした検証実験²⁻⁵⁾を継続的に実施してきた。一方、縦長開口が不規則に配置された連層耐震壁に対する検討は少なく、現行の RC 規準¹⁾においても明確な規定がないため、臨機応変な工学的判断が必要となる。先行研究⁶⁾では、縦長開口が斜めに配置された場合や一層開口をずらして配置された場合の連層耐震壁において、荷重方向によって破壊性状が大きく異なり、 r_3 が想定する連層の破壊機構が生じない場合があることを示した。以上より、縦長開口が不規則に配置された場合は r_3 の適用範囲外となる場合もあることが考えられる。

本稿では、縦長開口が不規則に配置された耐震壁の構造性能評価法の実現に資する基礎資料を整備することを目的として、縦長開口が斜めに配置された連層耐震壁試験体³⁾ (以後、斜め開口試験体) を対象に FEM 解析を行い、当該部材の応力伝達機構を明らかにするとともに、 r_3 の適用性を検討する。また、上記の試験体を基準に、各層の開口間における水平距離に基づき開口位置を変数としたパラメトリック解析を行い、不規則な開口配置が連層耐震壁の応力伝達機構や構造性能に及ぼす影響を検討し、破壊機構に基づき r_3 の適用性を確認する。

2. 解析対象の斜め開口試験体の実験概要³⁾

2.1 試験体の概要

解析対象とした既往の実験で用いられた斜め開口試

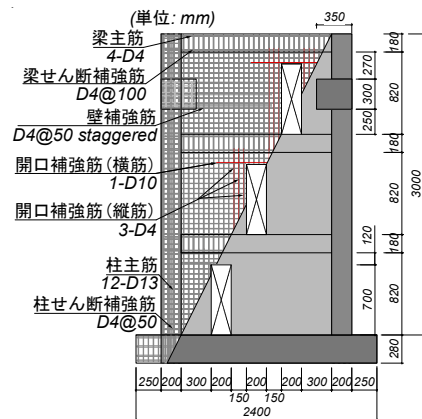


図-1 試験体 WD1 の形状及び配筋図
表-1 試験体構造詳細

WD1		
柱	$b \times D$ (mm)	180×200
	主筋	12-D13 ($\rho_g=4.23\%$)
	せん断補強筋	D4@50 ($\rho_{wc}=0.31\%$)
梁	$b \times D$ (mm)	60×180
	せん断補強筋	D4@100 ($\rho_{wb}=0.47\%$)
壁	$t_w \times l_w$ (mm)	60×1,700
	壁補強筋	D4@50 staggered ($\rho_s=0.47\%$)
開口	$h_o \times l_o$ (mm)	700×200
	縦筋	3-D4
	横筋	1-D10

ρ_g : 柱の全鉄筋比, ρ_{wc} : 柱の帯筋比, ρ_s : 柱の引張鉄筋比,
 ρ_{wb} : 梁のあばら筋比, ρ_s : 壁板の補強筋比である。

表-2 RC 規準¹⁾に基づく計算値

	$\sum h_o$ (mm)	r_3	$r_3 Q_{su}$ (kN)	$Q_{rest} (-)/r Q_{su}$	$Q_{rest} (+)/r Q_{su}$
$r_{3min} Q_{su}$	2100	0.61	290	1.03	1.26
$r_{3max} Q_{su}$	700	0.87	411	0.73	0.89

Q_{su} : 広沢 mean 式¹⁾を用いた無開口耐震壁(三層)のせん断終局強度である。

験体 WD1 は中層の RC 建物における連層耐震壁を想定した 1/4 スケールのものである。図-1 に試験体 WD1 の形状及び配筋詳細を、表-1 に試験体の構造詳細をそれぞれ示す。試験体の開口面積は $h_o \times l_o = 700\text{mm} \times 200\text{mm}$ である。試験体に用いたコンクリートの圧縮強度は

*1 東京理科大学 創域理工学部建築学科 (学生会員)

*2 東京理科大学 創域理工学部建築学科 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 創域理工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 名城大学 理工学部建築学科 教授 工学博士 (正会員)

27.2N/mm²で、壁筋等(D4)の降伏強度は347N/mm²で、柱主筋(D13)は766N/mm²であった。実験の詳細については文献3)を参照されたい。

2.2 現行のRC規準¹⁾に基づくせん断終局強度の計算

縦長開口が不規則に配置された連層耐震壁では異なる開口配置により破壊機構の特定が困難であるため、連層の損傷を想定した r_3 (式(1))の適用性が不明である。現行のRC規準¹⁾では、開口部高さの和 Σh_0 を上限と下限とした任意の値を許容し、 r_3 の許容範囲を算定する。

表-2に現行のRC規準¹⁾に基づく計算結果を示しており、 Σh_0 を上限及び下限とした場合の低減率を r_{3min} 及び r_{3max} とした。

$$r_3 = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_0}{l} \right) \frac{\Sigma h_0}{\Sigma h} \quad (1)$$

ここで、 Σh ：当該階床から最上階の梁上端までの高さ、 l_0 ：開口部の長さ、 l ：柱を含む壁部材の全せいである。

斜め開口試験体WD1に対して Σh_0 を下限700mmとした場合の r_{3max} では、当該耐震壁の壁高さ方向における破壊が生じにくいと想定している。一方、 Σh_0 を上限2100mmとした r_{3min} では壁高さ方向の破壊が想定され、開口が一行に規則に配置された場合と同様な扱いであるため、安全側の評価になる傾向がある。

2.3 実験結果の概要

斜め開口試験体WD1の荷重-変形角関係を図-2に示しており、載荷終了時の最終破壊状況も併せて示している。同図では表-2のせん断終局強度の計算結果 $r_{3max}Q_{su}$ 及び $r_{3min}Q_{su}$ も併記した。また、本試験体は載荷時に開口上下の梁の損傷レベルが相対的に小さくなると予想された負荷側の加力から載荷を行った。

負荷荷では、変形角 $R=-0.125\%$ radのサイクルにおいて、右側柱に曲げひび割れ、開口隅角部、また一層と二層開口右側の壁板にせん断ひび割れが生じた。 $R=-0.75\%$ radのサイクルでは二層開口左側の壁板におけるひび割れが生じており、二層開口の右側上部の壁板におけるひび割れが拡幅した。 $R=-1.0\%$ radのサイクルにおいて二層開口右側脚部でコンクリートの圧壊(図-2の(a))に伴う耐力低下が確認された。

正載荷では、 $R=+0.5\%$ radのサイクルで、一層開口右側における壁板にせん断ひび割れが生じた。 $R=+0.75\%$ radのサイクルにおいて二層開口左側の壁板におけるひび割れが拡幅しており、二層開口上部におけるせん断ひび割れ上のコンクリートが剥落し始め(図-2の(b))、損傷が顕著になった。その後、 $R=+1.0\%$ radのサイクルにおいて、二層開口上部及び一層開口上部(図-2の(c))でコンクリートの圧壊に伴い耐力が急激に低下した。

最大耐力 Q_{Test} は正載荷で365kN、負載荷で-299kNを記録した。壁高さ方向における破壊が生じにくいと想定

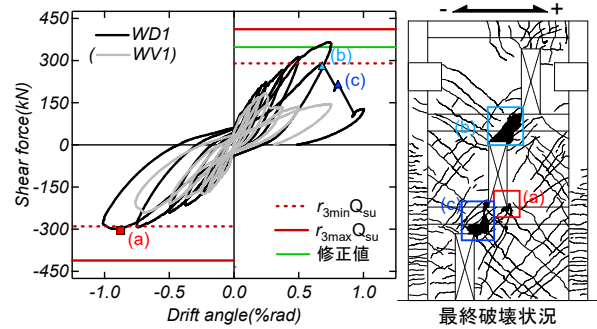


図-2 荷重-変形角関係

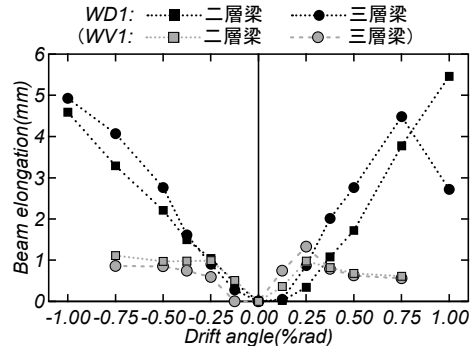


図-3 梁の軸方向の伸び

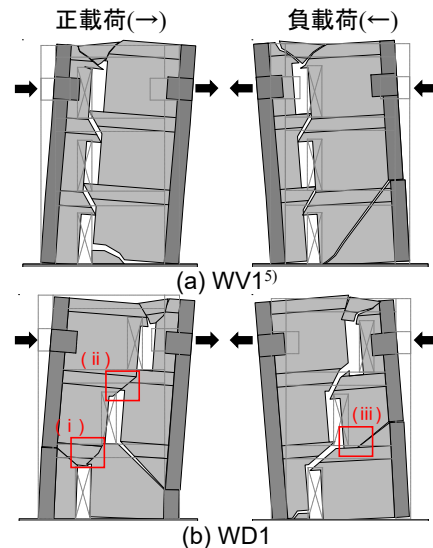


図-4 $R=\pm 0.75\%$ radの変形概略図(10倍拡大)

した場合の計算値 $r_{3max}Q_{su}$ では正載荷と負載荷ともに実験結果 Q_{Test} を過大評価した。この原因については後述の2.3節で解説するが、実験による破壊性状は連層の破壊機構に近い結果を呈したためであると考えられた。一方、 r_{3min} を用いた計算値では、実験結果を下回ったが、表-2に示すように正載荷における最大耐力 Q_{Test} を1.26倍過小に評価した。これは、 Σh_0 を上限としたことで開口が一行に規則に配置された場合と同様な計算仮定であり、開口をつなぐようなせん断ひび割れが想定され上下層を結ぶ破壊が生じることを前提としたことに起因した。

2.4 斜めな開口配置が連層耐震壁の変形性状に及ぼす影響

斜めな開口配置が連層耐震壁に及ぼす影響を検討するため、標準試験体とした縦長開口が規則に一行偏在配

置された試験体 WV1 の実験結果⁵⁾と比較する。

二層梁(床位置)及び三層梁の各サイクルピーク時における軸方向伸びの推移を図-3 に示した。また、 $R=\pm 0.75\%$ rad の载荷サイクルピーク時の変形概略図を図-4 に示す。同図の変形は実験で得られた水平、鉛直変位計の実測値を 10 倍して表現した。

斜め開口試験体 WD1 では、変形角の進行に伴い二層梁の伸びが増大する傾向が確認されたが、三層梁においては $R=+0.75\%$ rad のサイクルで二層開口上部のコンクリートが圧壊し始めること(図-4(b)の(ii))により梁の伸びが減少した。一方、標準試験体 WV1⁵⁾では梁におけるひび割れの拡幅やコンクリートの剥離が確認された $R=\pm 0.25\%$ rad のサイクルから、梁の伸びが確認できなかった。また、試験体 WV1 より試験体 WD1 の梁における軸方向伸びが大きく、試験体の最大耐力及び変形性能も高い(図-2 を参照)。これは、試験体 WD1 では開口上下における中間梁の領域が広く、梁の早期的な破壊が抑制されたためであると考えられる。

図-4(a)に示した標準試験体 WV1 の変形概略図⁵⁾をみると、開口上下のせん断破壊及び壁脚部の曲げ圧壊が生じており、縦長開口を境界とした左右の壁板がそれぞれ壁脚部を支点として回転する挙動が観察され、 r_3 が想定する連層の破壊機構を呈したと判断できる。斜め開口試験体 WD1 の負荷荷では、図-4(b)に示すように二層開口下隅角部におけるコンクリートが圧壊したが(図-4(b)の(iii))、試験体 WV1 とほぼ同様に開口を境界とした左右の壁板がそれぞれ剛体回転する挙動が確認できた。一方、正載荷では一層及び二層開口上部(図-4(b)の(i)、(ii))における梁の圧壊により壁板は二層以上の部分のみ剛体回転していると観察され、 r_3 が想定する連層の破壊機構が二層以上で生じたと判断できる。

以上の検討より、斜め開口試験体 WD1 の破壊機構は総じて r_3 の想定に近いと判断でき、開口が規則に配置された標準試験体 WV1 と同様の r_3 を適用してよい。しかしながら、正載荷では二層以上の連層の破壊機構が生じたため、評価の基準とすべき無開口耐震壁を二層以上の部分まで変更する必要があると考えられる。そこで、破壊機構に基づいて斜め開口試験体 WD1 の正載荷に対して、評価基準である無開口耐震壁のせん断終局強度を三層の耐震壁の計算値($Q_{su-3F}=472kN$)から二層耐震壁の方($Q_{su-2F}=567kN$)まで修正する。また、 r_3 (式(1))の算定においても二層の破壊機構を想定し、 $\Sigma h_o/\Sigma h$ を $1400mm/2000mm$ として r_3 を求める。図-2 に修正結果 $r_3 \times Q_{su-2F}$ ($348kN$) を緑線で示しており、正載荷における最大耐力 Q_{Test} を精度良く評価できた。以上より、縦長開口が斜めに配置された耐震壁において破壊機構を考慮することにより、 r_3 が適用可能であることを確認した。

3. 応力伝達機構を解明するための再現解析

不規則な開口配置が連層耐震壁の応力伝達機構や構造性能に及ぼす影響を検討するため、本章では斜め開口試験体 WD1 に対して最大耐力を発揮するサイクルまでの実験結果 ($R=+0.75\%$ rad と $R=-1.0\%$ rad まで)を対象に FEM 解析を実施する。また、解析モデル化手法及び材料モデルは先行研究⁷⁾と同様としており、以下では解析の概要について抜粋して示す。

3.1 解析方法

FEM 解析には汎用ソフトの FINAL⁸⁾を用いた。図-5 に要素分割図及び境界条件を示す。二次元解析とし、コンクリート要素については平面応力場を仮定した。実験では試験体の上部に設置した左右のスタブに等しい荷重を作用させたが、解析では実験時の左右スタブで最大耐力が確認されたサイクルまでの水平変位と等しくなるように、変位制御による単調載荷とした。その後、当該サイクルの除荷変位まで追跡した。

コンクリートは 4 節点四辺形要素で定義しており、コンクリートの二軸応力下の破壊条件は Kupfer らの提案⁹⁾

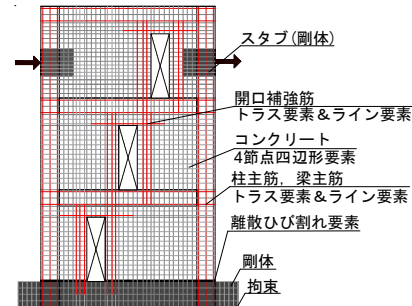


図-5 試験体の要素分割図

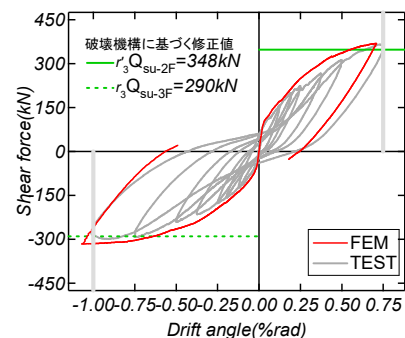


図-6 解析結果と実験結果の履歴挙動の比較

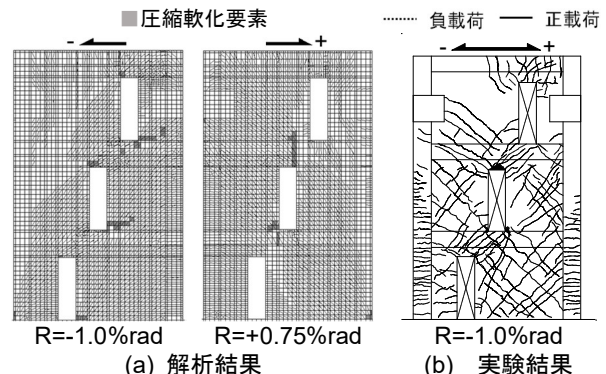


図-7 最大耐力時における損傷状況

モデル	斜め開口モデル $l_{s1-2}=l_{s2-3}$		一層開口をずらしたモデル $l_{s2-3}=0$		千鳥開口モデル $l_{s1-3}=0$	
変数	WD1	WD2	WD3	WD4	WS1	WS2
開口間の水平距離 (mm)						
l_{s1-2}	350	200	700	200	-350	-500
l_{s2-3}			0	0	350	500
l_{s1-3}	700	400	700	200	0	0

l_{s1-2} , l_{s2-3} , l_{s1-3} : 一層開口と二層開口間, 二層開口と三層開口間, 一層開口と三層開口間の水平距離

図-8 パラメトリック解析モデルの概要

に従った。応力ひずみ関係については、圧縮側の応力上昇域は修正 Ahmad モデル¹⁰⁾とし、軟化域は Nakamura モデル¹¹⁾とした。ひび割れ発生後における圧縮特性の劣化は長沼モデル¹²⁾によって考慮した。引張特性についてはひび割れ発生まで線形を仮定し、ひび割れ発生後の軟化域は出雲らのモデル¹³⁾ ($c=0.4$) を用いた。ひび割れ後のせん断伝達モデルは Al-Mahaidi モデル¹⁴⁾とした。なお、壁脚部に生じた曲げひび割れを考慮するために、壁脚部の節点と下スタブの節点を別々に定義し、離散ひび割れ要素を設けた。離散ひび割れ要素のせん断伝達特性は山田・青柳の提案モデル¹⁵⁾を採用した。

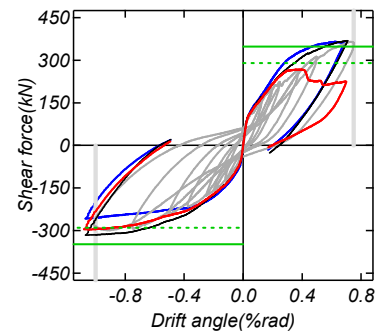
鋼材については、壁筋、帯筋及びあばら筋は埋め込み鉄筋としてコンクリート要素内に層状置換した。また、柱と梁の主筋及び開口補強筋はトラス要素で定義しており、鉄筋とコンクリートの間の付着挙動は4節点ライン要素を接合要素としてモデル化した。主筋とコンクリートの間の付着応力-すべり関係は、長沼らのモデル¹⁶⁾とした。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルを適用し、履歴特性は Ciampi らの提案する修正 Menegotto-Pinto モデル¹⁷⁾を用いた。

3.2 解析結果と実験結果の比較

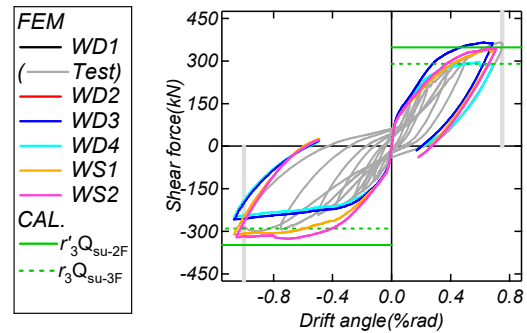
図-6 に最大耐力を発揮するサイクルまでの解析結果と実験結果の履歴挙動の比較を示す。解析における荷重-変形角関係は実験における初期剛性及び最大耐力をよく捉えることができた。試験体の最大耐力時における損傷状況に関する実験と解析の比較を図-7 に示す。同図の灰色はコンクリートが軟化域に達したものを意味する。解析結果は実験結果と比較して損傷の範囲はやや広域であるが、実験における曲げひび割れ及びせん断ひび割れ、開口上下の梁の損傷状況は概ね良好に再現できた。

3.3 最小主応力分布に基づく応力伝達機構の分析

後述の図-10 に最大耐力を発揮した時 ($R=+0.75\%$ rad と $R=-1.0\%$ rad) におけるコンクリートの最小主応力分布を示す。負荷荷では右上のスタブ付近から一層開口の右側における同壁脚部にかけて圧縮ストラットが形成されており、左側壁の側柱脚部にも高い圧縮応力が生じた。開口の上部における梁、特に三層梁に圧縮応力が生じており、右側壁から左側壁に圧縮力が伝達されている。こ



(a) 解析モデル WD1 と WD2 と WD3



(b) 解析モデル WD3 と WD4 と WS1 と WS2

図-9 変数解析による荷重-変形角関係

のことから試験体 WD1 の負荷荷における破壊機構では r_3 の想定に近いと判断できる。一方、正載荷では左上のスタブ付近から一層開口と二層開口の上部における中間梁を介した高い圧縮力が伝達されており、右側の壁脚部にかけて圧縮ストラットが形成された。しかし、左側壁の同壁脚部までの圧縮力の伝達が確認できず、2.3 節で示した連層の破壊機構が正載荷において二層以上で生じた考察を裏付けている。以上より、斜め開口試験体 WD1 で載荷方向によって強度と破壊機構が異なる理由が応力伝達機構の相違であることが確認された。壁に形成された圧縮ストラットの角度及び分布が異なるため、 r_3 が想定する連層の破壊機構が負載荷では確認されたが、正載荷では二層以上で生じた。

4. 開口位置が連層耐震壁の破壊機構に及ぼす影響

4.1 パラメトリック解析の概要

縦長開口が不規則に配置された連層耐震壁に対して r_3 の適用性を検討するため、斜め開口試験体 WD1 を基準に、開口位置を変数としたパラメトリック解析を実施し、当該部材の応力伝達機構に基づく r_3 の妥当性を検証する。ここでは、各層の開口間の水平距離に着目して図-8 に示すように斜め開口モデル、一層開口をずらしたモデル及び千鳥開口モデルの変数解析を行う。

解析モデル WD1 を標準モデルとし、開口間の水平距離 l_{s1-2} と l_{s2-3} が開口高さの半分 350mm とした解析モデルである。解析モデル WD2 は l_{s1-2} と l_{s2-3} を開口幅 200mm としたものである。また、解析モデル WD3 と WD4 は、二層開口と三層開口間の水平距離 l_{s2-3} をゼロとし、一層

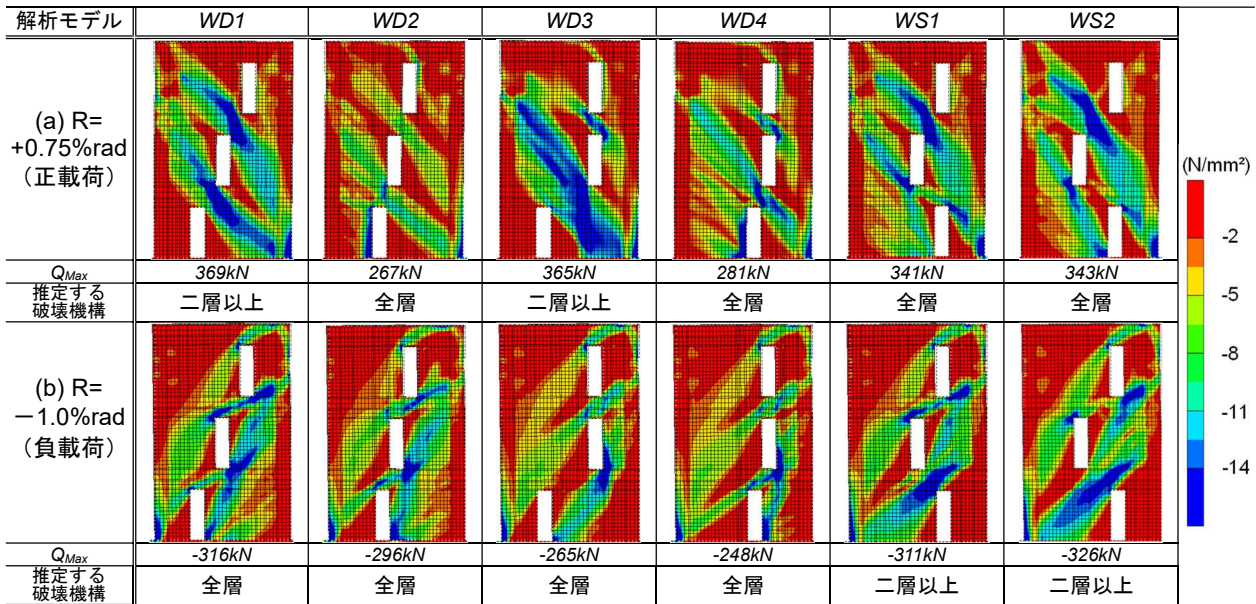


図-10 最大耐力時におけるコンクリートの最小主応力分布

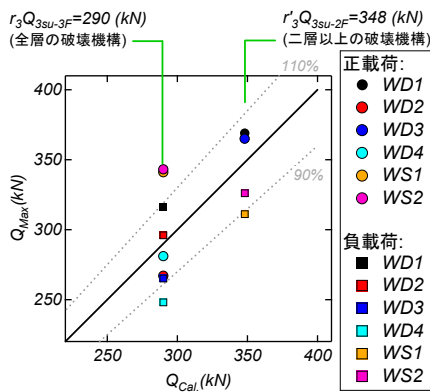


図-11 破壊機構に基づく耐力評価

開口を開口高さ700mmと開口幅分200mmをずらしたモデルである。千鳥開口モデルWS1とWS2では、一層開口と三層開口間の水平距離 l_{1-3} をゼロとし、二層開口を350mm, 500mmをずらした。本解析における材料特性は試験体WD1の値を用いた。

4.2 解析結果

図-9に各解析モデルの荷重-変形角関係を示す。同図では二層と全層の破壊機構に基づく r_3 よりせん断終局強度の計算値を併せて示す。図-10に最大耐力時の最小主応力分布を示しており、各解析モデルの最大耐力 Q_{Max} を併せて表記する。ここで、3.3節と同様に圧縮ストラットがスタブから同壁脚部にかけて形成されず、一層開口上部を介して片側の壁脚部にかけて形成された場合は連層の破壊機構は二層以上で生じると推定する。

斜め開口モデルWD2の最大耐力は、負載荷において試験体WD1と比べて同程度の値であるが、開口間の水平距離を短くすることで、正載荷では試験体WD1と比べて減少する傾向が認められた。これは、図-10(a)に示すように解析モデルWD2では正載荷において r_3 が想定する連層の破壊機構が全層に生じたためである。

一層開口をずらした両解析モデルでは、負載荷において荷重-変形角関係及び圧縮応力分布に有意な差は見られなかった。一方、正載荷では一層開口を開口高さ分ずらしたモデルWD3の最大耐力及び剛性は開口幅分ずらしたモデルWD4より大きく上昇した。これは、一層と二層開口間距離を大きくすることで中間梁を介した圧縮力の伝達が大きくなり、異なる破壊機構が生じたためであると考えられる。また、正載荷においてモデルWD3の最大耐力は標準モデルWD1と比べて同程度の値となっており、二層開口の配置位置の影響が限定的である。千鳥開口モデルWS1とWS2では、正載荷と負載荷ともに荷重-変形角関係及び圧縮応力分布に有意な差を確認できず、いずれも標準モデルWD1と近い結果を示した。

本稿の解析モデルでは、一層と二層の開口間における水平距離を小さくすることで、斜め開口モデルと一層開口をずらしたモデルの正載荷における最大耐力が減少する傾向が確認された。これは、一層開口上における中間梁の領域が広い場合では梁を介した圧縮力の伝達が大きいに起因し、 r_3 が想定する連層の破壊機構は二層以上で生じる可能性が高くなる傾向がある。開口間の水平距離が開口高さの半分350mmより大きい場合、荷重方向によって形成された圧縮ストラットの分布が異なるため、 r_3 が想定する連層の破壊機構が二層以上で生じる場合があることを本稿の解析モデルにおいて確認できた。

以上より、解析による応力伝達機構に基づいて、各解析モデルの荷重方向別のせん断終局強度の修正値と最大強度における関係を図-11に示す。修正した計算値はモデルWD4の負載荷において解析の最大耐力を多少上回ったが、その他の斜め開口モデルと一層開口をずらしたモデルでは最大耐力を約10%の誤差内で良好に評価することができた。

5. まとめ

本稿では縦長開口が斜めに配置された RC 造連層耐震壁を対象に FEM 解析を実施し、載荷方向によって強度と破壊機構が異なったことを精度よく再現できるとともに、当該部材の応力伝達機構を検討した。また、千鳥配置を含めて、各層の開口間における水平距離を変数としたパラメトリック解析を行い、不規則な開口配置が連層耐震壁の強度及び破壊機構に及ぼす影響を確認し、 r_3 の適用性を検討した。本稿より得られた知見を以下に示す。

- 1) 斜め開口試験体 WD1 の破壊機構は総じて r_3 の想定に近いが、正載荷では二層以上の連層の破壊機構が生じたため、評価の基準とすべき無開口耐震壁は二層耐震壁であることを示した。破壊機構に基づく修正結果は実験結果を精度良く評価できた。
- 2) 一層と二層の開口間の水平距離が小さくなるほど、本稿の斜め開口モデル及び一層開口をずらしたモデルの正載荷における最大耐力が低下する傾向があった。
- 3) 一層開口上部における中間梁の領域が広い場合は、載荷方向によって壁に形成される圧縮ストラットの角度及び分布が大きく異なる可能性がある。梁を介した圧縮力の伝達が大きくなることにより、連層の破壊機構は二層以上で生じる可能性が高く、最大耐力が上昇する傾向がある。

以上より、開口の配置から応力伝達機構と破壊機構を特定し、RC 規準りの r_3 を適用することが可能である。ただし、この結論は限られた解析変数の範囲のものであり、開口配置・形状などの条件によっては、破壊機構が明確に生じない場合も考えられる。同指標の適用範囲について継続的な検討が望ましい。

謝辞

本稿は JSPS 科研費 21K20465 の助成を受けたものです。日本大学・長沼一洋教授には FEM 解析に関してご助言いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018.12
- 2) 真田靖士，市之瀬敏勝，他：RC 耐震壁の開口高さによる耐力低減率の検証，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.709，pp.481-490，2015.3
- 3) 廣澤光法，劉虹，他：複数の縦長開口を有する RC 連層耐震壁の構造性能：縦開口が 1 列に偏在配置される場合と斜めに配置される場合の実験，日本建築学会構造系論文集，Vol.82，pp.579-588，No.734，2017.4
- 4) 高橋広人，他：一階の縦長開口をずらして配置した RC 連層耐震壁の静的載荷実験，日本建築学会大会

学術講演梗概集（構造 IV），pp.11-12，2018.7

- 5) 劉虹，他：RC 耐震壁の開口高さによる耐力低減率の追検証と曲げ降伏を先行させる保証設計への適用，日本建築学会構造系論文集，Vol.86，No.780，pp.267-277，2021.2
- 6) 劉虹，真田靖士，市之瀬敏勝：RC 連層耐震壁の短期許容せん断力の評価に用いる開口高さに関する耐力低減率の検証，日本建築学会構造系論文集，Vol.88，No.806，pp.621-632，2023.4
- 7) 劉虹，他：縦長開口を有する RC 連層耐震壁の FEM 解析及び開口周囲の梁型・柱型の効果に関する分析，構造工学論文集，67B，pp.49-60，2021.2
- 8) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL/V11 HELP，2019.8
- 9) Kupfer, H.B, Gerstle, K.H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 99, No. EM4, pp.853-866, 1973.8
- 10) 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，No.474，pp.163-170，1995.8
- 11) H. Nakamura and T. Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Postpeak Behavior of RC Structures Subjected of Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, 1999.10
- 12) 長沼一洋：平面応力場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，No.421，pp.39-48，1991.3
- 13) 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，Vol.25，No.9，pp.107-120，1987.9
- 14) Al-Mahaidi, R.S.H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Report No:79-1:357,1979.1
- 15) 山田一字，他：ひび割れ面におけるせん断伝達，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C5，pp.19-26，1983.1
- 16) K. Naganuma et al : Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.586, 2004.8
- 17) Ciampi, V et al : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitations, Report No. EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, 1982.11