

論文 縦長開口を有する RC 耐震壁の耐力低減率に関する分析

劉 虹*1・鈴木 卓*2・真田 靖士*3・市之瀬 敏勝*4

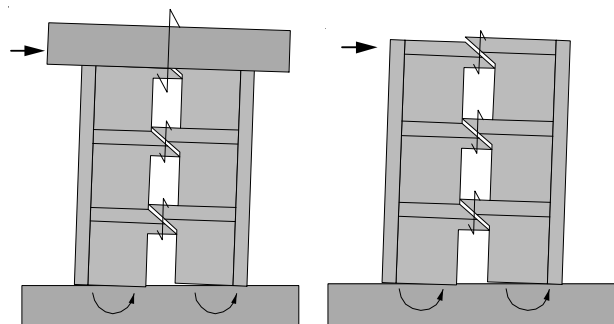
要旨：本研究では縦長開口を有する耐震壁を対象とした静的載荷実験および二次元 FEM 解析を行い、開口低減率 r_3 および各構成要素のせん断耐力に対する寄与について検討した。実験の破壊性状では、中間梁のせん断破壊は柱を含む壁脚の曲げ圧壊と比べて早期に生じており、RC 規準の開口低減率 r_3 における両者が同時に生じるとの仮定と異なることを示した。また、FEM 解析の結果から、中間梁の負担せん断力および柱を含む壁脚の負担モーメントとそれらの劣化が縦長開口を有する耐震壁の耐力に及ぼす影響について検討した。

キーワード：有開口耐震壁、開口低減率 r_3 、せん断耐力、模型実験、FEM 解析

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（以下、RC 規準）¹⁾ および国土交通省による 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書（以下、技術基準）²⁾ では、縦長開口を有する耐震壁（以下、縦長開口耐震壁と称する）の開口低減率がそれぞれ示されている。両低減率の主な特徴は、RC 規準では連層耐震壁を、技術基準では単層耐震壁をそれぞれ対象として導かれており、同じ開口壁においても異なる算定結果が得られる。さらに、RC 規準に示される開口低減率では、下階の影響を考慮し、崩壊メカニズムを仮定して算定された係数 λ も考慮されている。しかしながら、縦長開口耐震壁を対象とした実験的な検証は行われておらず、開口低減率の妥当性は不明である。

一方、文献 1) においても指摘されているように、縦長開口耐震壁の構造性能は開口上下の中間梁の影響を強く受けることが予想される。この場合、RC 部材の構造実験において一般的に計画される上下スタブを有する試験体では、上スタブを含む梁の負担するせん断力が開口壁全体の耐力に影響を及ぼすことから（図-1(a)）、その構造性能を適切に評価することができない。



(a) 上スタブを有する試験体 (b) RC 規準を想定する試験体
図-1 縦長開口耐震壁の想定メカニズム

そこで本研究では、上スタブの一部を取り除き、RC 規準の想定する破壊状況（図-1(b)）を模擬できる縦長開口耐震壁の試験体を対象とした静的載荷実験および二次元 FEM 解析を行い、RC 規準に示される開口低減率 r_3 の妥当性および各構成要素の構造性能に及ぼす影響を検討する。

2. 実験計画

2.1 試験体の基本計画および構造詳細

試験体は中層の RC 建物における連層耐震壁を想定した 1/6 スケールのものを 3 体作成した。表-1 に試験体の構造詳細を、図-2 に試験体形状および配筋詳細をそれぞれ示す。前述の通り、本稿で扱う試験体は載荷装置と接続するための小型スタブのみを設け、頂部梁の変形を許容している。梁幅および壁厚は同一の寸法（50mm）とし、断面積および形状は RC 規準¹⁾ に示される枠梁の推奨値を満足している。

実験変数は、壁板における縦開口の列数である。試験体 W0 は無開口とし、試験体 W1 は壁高さ方向の縦開口を 1 列、試験体 W2 は 2 列とした。また、開口面積は試験体 W1 および W2 とともに $h_{op} \times l_{op} = 400 \times 100 \text{ mm}$ とし、RC 規準¹⁾ および技術基準²⁾ において縦長開口における開口低減率 r_3 が最も低くなるよう設計した。なお、本論に示す試験体は図-2(b), (c) に示すように開口が中間梁の上下に接していることから技術基準では耐力壁に該当しないことを補足する。また、試験体 W1 および W2 は文献 1) の必要開口補強筋量を満足している。

2.2 材料特性

表-2 にコンクリートの材料特性を、表-3 に鉄筋の材料特性を示す。コンクリートの設計基準強度は $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋は、側柱主筋が D10(SD345)、その他の鉄筋が D4(SD295A)である。

*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (学生会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 教授 工学博士(正会員)

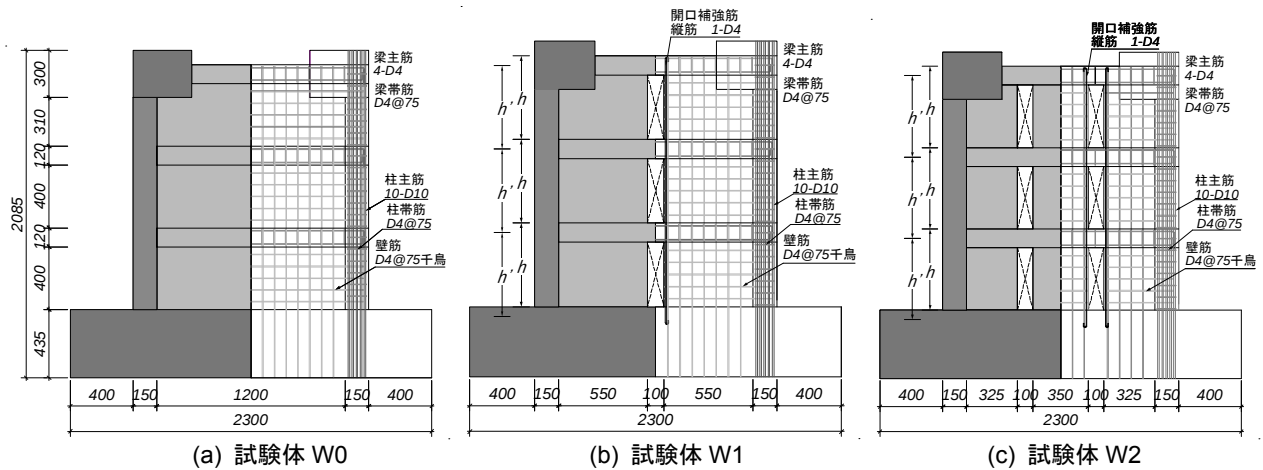


図-2 試験体の形状および配筋図

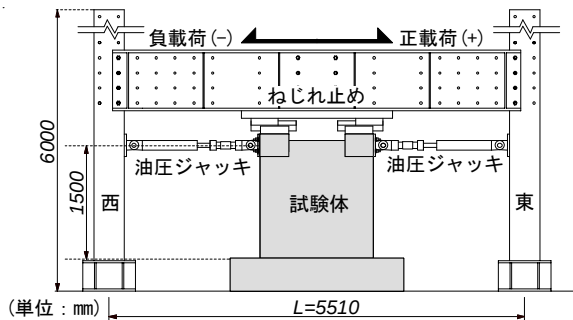


図-3 荷装置

表-1 試験体概要

柱	b×D (mm)	150×150
	主筋	16-D10 ($p_a=5.0\%$)
	帯筋	D4@75 ($p_w=0.25\%$)
梁	b×D (mm)	50×120
	主筋	4D4 ($p_t=0.54\%$)
	肋筋	D4@75 ($p_w=0.75\%$)
壁板	$t_w \times l_w$ (mm)	50×1350
	縦横筋	D4@75 千鳥 ($p_s=0.37\%$)
	開口補強筋	1-D4

表-2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 時ひずみ (μ)
W0	25.8	25.6	1,838
W1	26.5	26.3	1,993
W2	26.6	25.7	1,920

2.3 開口低減率を用いた終局強度計算

表-4にRC規準¹⁾および技術基準²⁾に示される縦長開口耐震壁の開口低減率(式(1)~式(4))を用いた耐力計算の結果を示す。また、同表では、各試験体の曲げ終局強度(式(5))²⁾およびせん断終局強度(式(6))²⁾をそれぞれ示す。以下に各計算式をそれぞれ示す。

$$r_1 = 1 - 1.1 \times \frac{l_0 p}{l} \quad (1)$$

$$r_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_0 p l_0 p}{hl}} \quad (2)$$

$$r_3 = 1 - \lambda \frac{\sum h_0}{\sum h} \quad (3)$$

$$r_3' = 1 - \frac{h_0'}{h} \quad (4)$$

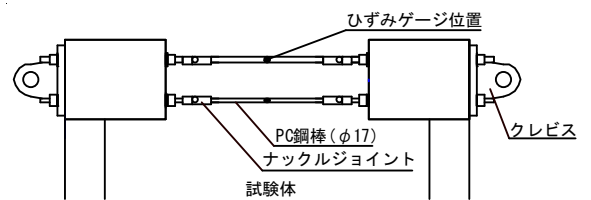


図-4 ナックルジョイント

表-3 鉄筋の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D10 (SD345)	379	174	479
D4 (SD295A)	323	153	458

表-4 開口低減率を用いた計算耐力

試験体		W0 無開口	W1 開口1列	W2 開口2列
開口低減率	RC規準	-	0.93	0.85
	r_1 (1)		0.75	0.65
	r_2 (2)		0.59	0.45
	r_3 (3)		0.23	0.23
技術基準 r_3' (4)			0.23	0.23
曲げ終局強度 (5) (kN)		418	416	414
せん断終局強度 (kN)	RC規準(3)×(6)	322	190	146
	技術基準(4)×(6)		74	74
せん断余裕度		0.77	0.18	0.18

$$Q_{mu} = \{a_t \cdot \sigma_y \cdot l_w + 0.5 \sum (a_w \cdot \sigma_{wy}) \cdot l_w + 0.5 N \cdot l_w\} / H \quad (5)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/Ql + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{se} \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_{0e} \right\} b_e j_e \quad (6)$$

ここで、 $\sum h_0$: 開口上下の破壊の原因となりえる開口高さの和 ($\sum$ は当該階から最上階まで)、 $\sum h$: 当該階床から最上階の梁上端までの高さ、 h_0' : 開口部の高さ、 h' : 開口部を有する耐力壁の上下の梁の中心間距離(ただし、1階は数値の簡略化のため上階と同一の基礎梁せいを仮定)である。その他の記号は参考文献を参照されたい。

無開口試験体W0のせん断余裕度より、破壊形式はせん断破壊先行型である。開口試験体の開口低減率は、RC規準の結果が技術基準の結果と比べて大きく、試験体W1では2.6倍、試験体W2では2.0倍である。

2.4 荷計画

図-3に荷装置を示す。水平荷は、荷フレーム

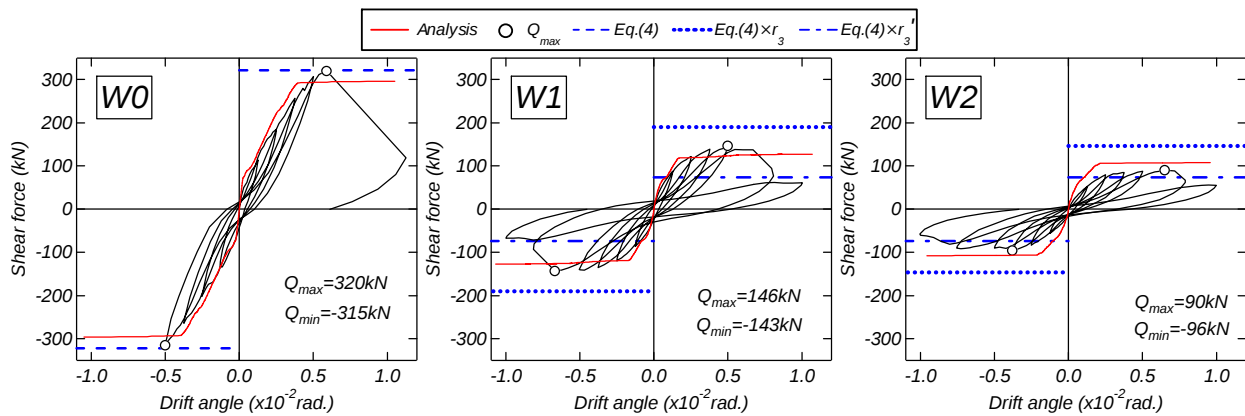


図-5 各試験体の履歴特性の比較

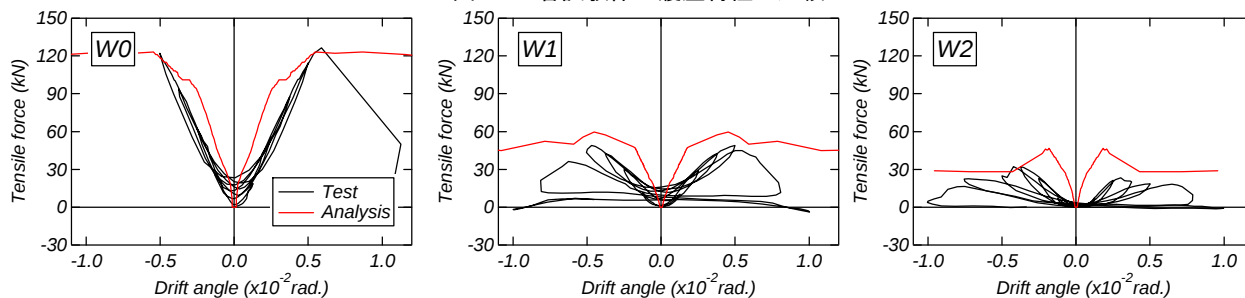


図-6 上スタブ間PC鋼棒の合計引張力

および頂部スタブに取り付けた2台のオイルジャッキによって行い、左右のオイルジャッキの荷重の絶対値が等しくなるように制御した。また、部分的な上スタブを有する本試験体では、水平力の載荷時に、左右スタブの間に引張力の作用が予想されたため、両スタブ間を図-4に示すようにナックルジョイントを設けたPC鋼棒により緊結した。

また、本研究の目的は各規・基準の開口低減率の検証である。そのため、本実験では必ずしも鉛直軸力を載荷する必要はないと判断し、軸力を与えない計画とした。ただし、本試験体では側柱主筋量を割り増すことで、メカニズム時において圧縮側柱に作用する圧縮力が現実的な数値となるように計画した。

載荷は試験体頂部の水平変位 δ を計測位置高さ $H=1,500\text{mm}$ で除した変形角 R で制御した。載荷プログラムは $R=1/800, 1/400, 1/267, 1/200, 1/133, 1/100\text{rad.}$ までの各1サイクルである。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および履歴特性

図-5に履歴特性をそれぞれ示す。なお、同図では、2.3節において示した各試験体のせん断終局強度の計算結果および後述の5章に示すFEM解析結果も併せて示す。なお、後述の図-8に各試験体の $R=1/200\text{rad.}$ のサイクル終了時における破壊性状を示す。

無開口試験体W0では、壁板のせん断ひび割れおよび側柱の曲げひび割れの損傷が顕著であった。 $R=1/133\text{rad.}$

の正載荷において、上部スタブ境界付近のコンクリートの圧壊により最大耐力に達した後、急激な耐力低下が生じた。

1列開口試験体W1および2列開口試験体W2では、壁板のせん断ひび割れおよび側柱の曲げひび割れの他に、 $R=1/200\text{rad.}$ のサイクルまでに開口上下の中間梁のせん断破壊が顕著であった。また、試験体W1では $R=1/133\text{rad.}$ のサイクルにおいて左右の袖壁脚部におけるコンクリートの曲げ圧壊に伴う耐力低下が生じた。一方、試験体W2では、左袖壁脚部の曲げ圧壊は $R=1/133\text{rad.}$ の正載荷時に、右袖壁脚部の曲げ圧壊は $R=1/100\text{rad.}$ の負載荷時にそれぞれ生じ、耐力低下がみられた。なお、試験体W2の中央壁板では、最終サイクルまで顕著な圧壊は認められなかった。

以上の結果から、縦長開口を有する試験体の破壊性状は、中間梁のせん断破壊および左右袖壁脚部の曲げ圧壊が顕著となり、文献1)に示される開口低減率 r_3 の想定する破壊状況とおおよそ対応している。しかし、中間梁のせん断破壊は壁脚の曲げ圧壊と比べて早期に生じたことから、メカニズム時の各部材の壁せん断耐力への寄与は開口低減率 r_3 の想定するものと異なることが予想される。

3.2 上スタブ間PC鋼棒の引張力

図-6に各試験体の上スタブ間PC鋼棒の合計引張力の推移を示す。PC鋼棒の引張力は上スタブ間に取り付けた4本のPC鋼棒に貼り付けたひずみゲージから算定した。(ひずみ計測位置は図-4参照)。

各試験体ともに変形角の増大に伴いPC鋼棒の負担引

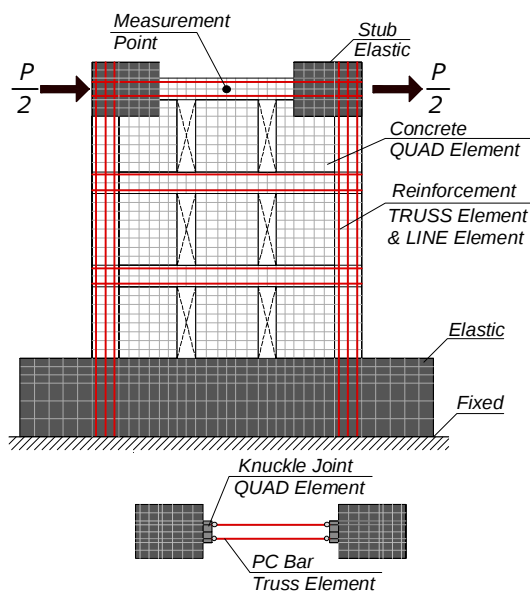


図-7 試験体の要素分割

張力の増大が認められ、PC 鋼棒の最大引張力は、試験体 W0 では 126kN、試験体 W1 では 49kN、試験体 W2 では 32kN に達している。すなわち、上スタブ間のコンクリートは PC 鋼棒に作用する引張の反力として、圧縮力を負担していることが伺える。特に、試験体 W0 では、上スタブ付近の壁板に圧壊が生じており、PC 鋼棒によるスタブ間の緊結が影響した可能性がある。

4. FEM 解析

4.1 モデル化方法

図-7 に要素分割図を示す。解析は二次元解析とし、平面応力場を仮定した。解析は荷重制御による単調載荷とし、実験と同様に左右の上スタブに等しい水平力を作用させた。また、上スタブ間の PC 鋼棒およびナックル

ジョイントは PC 鋼棒と等価な断面積を有するトラス要素および四辺形要素を用いて簡易的に再現した（図-7）。なお、解析に用いた材料特性は表-2 および表-3 の値を用いた。

4.2 材料モデル

コンクリートは 4 節点四辺形要素で定義し、壁筋および帯筋は埋め込み鉄筋とした。また、ひび割れは非直交ひび割れモデル³⁾により表現した。二軸応力下の破壊条件は Kupfer らの提案⁴⁾に従い、応力-ひずみ関係は、上昇域では修正 Ahmad モデル⁵⁾を、柱・梁の軟化域では修正 Ahmad モデルを、壁板の軟化域では Nakamura モデル⁶⁾を仮定した。また、ひび割れ発生後は圧縮特性の劣化を長沼モデル⁷⁾によって考慮した。テンションステイニング特性は出雲らの提案モデル⁸⁾（モデル係数 $c=1.0$ ）とし、ひび割れ後の応力をほとんど負担しないものとした。ひび割れ後のせん断伝達モデルは長沼モデル⁷⁾を用いた。鉄筋は 2 節点トラス要素で定義し、応力-ひずみ関係はバイリニアモデルを用いた。また、柱および梁の主筋およびコンクリートの節点の間に接合要素を配置し、付着の影響を考慮した。付着応力-すべり関係は、Naganuma らのモデル⁹⁾とし、最大付着応力は文献¹⁰⁾に示される付着割裂強度とした。

5. 解析結果

5.1 解析結果と実験結果の比較

図-8 に $R=1/200\text{rad}$ における実験および解析結果の破壊状況をそれぞれ示す。なお、解析結果の荷重-変形角関係は図-5 に、PC 鋼棒の引張力-変形角関係は図-6 にそれぞれ示している。

図-5 より、無開口試験体 W0 および 1 列開口試験体

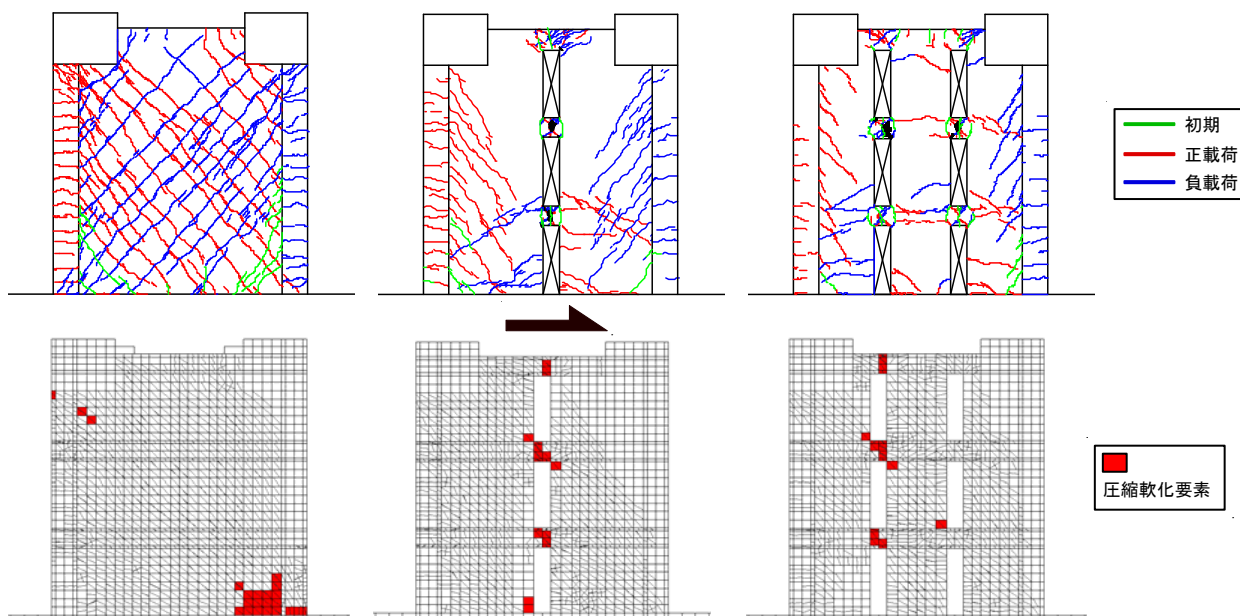


図-8 $R=1/200\text{rad}$ における破壊状況（上段：実験結果 下段：解析結果）

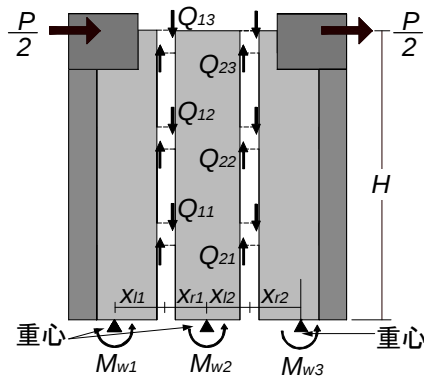


図-9 力の釣り合いモデル

表-5 RC 規準が想定する縦長開口耐震壁のせん断力

試験体		W1	W2
壁 Q_{w0}^{*1} (kN)	各壁	74	31
	Σ	148	92
梁 Q_{b0}^{*2} (kN)	各梁	13	9
	Σ	39	52

*1: RC 規準の想定する壁のせん断力 (解 19.27 式)

*2: RC 規準が想定する梁のせん断力 (解 19.30 式)

W1 では、最大耐力を僅かに過小評価するものの、荷重-変形角関係の解析結果は実験結果を概ね捉えることができた。一方、2 列開口試験体 W2 における解析の初期剛性と最大耐力は実験結果を過大評価した。これは、試験体 W2 では実験時に開口上下の梁および壁板の下隅角部に初期ひび割れが生じた影響が一因と考えられ、引き続きの分析を要する。一方、図-6 より、試験体の変形に伴う PC 鋼棒の引張力の増大の解析結果も試験体 W0 および W1 の実験結果については総じて良好に評価できた。初期剛性の差より、実験で用いたナックルジョイントには僅かな遊びがあった可能性がある。試験体 W2 については図-5 の考察と同様の理由によりとくに小変形域の再現精度が悪かった。

5.2 縦開口耐震壁の構成要素の耐力寄与

文献1)に示される開口低減率 r_3 は、下階を剛と仮定し、壁脚の曲げ強度および梁のせん断応力から仮想仕事法を用いることで導出されている。しかしながら、前述の実験結果では、梁のせん断破壊は壁脚の曲げ圧壊と比べて早期に生じたため、本稿で対象とした縦長開口耐震壁は RC 規準の想定する崩壊メカニズムを満たさないと想定された。

本節では、FEM 解析結果から求まる各壁脚のそれぞれの曲げモーメント M_w 、各列中間梁のせん断力 Q と、水平力 P の力の釣り合いから壁の各構成要素のせん断力に対する寄与を抽出する。図-9 に 2 列開口試験体 W2 を例とした算定概念図を示す。試験体に作用する外力とその結果から生じる応力より、式(7)の曲げモーメントの釣り合いが成立する。ここで、壁脚の曲げモーメントは柱を含む壁板の脚部におけるコンクリート要素と鉄筋要素

の鉛直方向応力に面積を乗じ、各柱を含む壁の重心までの距離を乗じて算定した。各層の梁のせん断力は境界梁のコンクリート要素のせん断応力に断面積を乗じることによって算定した。

$$P = \frac{\sum_i^m M_{wi} + \sum_j^n \left\langle \sum_k^o [Q_{jk} \cdot (x_{lj} + x_{rj})] \right\rangle}{H} \quad (7)$$

ここで、 m : 壁数、 n : 開口列数、 o : 梁数、 M_w : 柱を含む壁の曲げモーメント、 Q : 梁のせん断力、 x_l , x_r : 梁中心から左右の壁重心までの距離、 H : 試験体の高さである。

図-10 に式(7)を用いて算定した壁全体のせん断耐力に対する各構成要素の耐力寄与の推移を、図-11 に試験体の中間梁の負担軸力の推移を示す。なお、両図では、各層梁の耐力寄与 (合計せん断力) が最大となった変形角を点①として示している。

図-10 に示す各構成要素の負担せん断力の寄与に着目すると、両試験体ともに梁が最大耐力点①に達することにより全体のせん断力も概ね最大耐力に達しており、とくに 1 層および 2 層の梁せん断力が全体せん断力に大きく寄与している。これは、図-11 に示す中間梁の負担軸力の推移に示すように、梁が最大耐力に達する点①において、試験体 W1 では 1 層および 2 層の梁の軸力が 3 層のものと比べて大きく、試験体 W2 では 1 層および 2 層における左右の軸力の平均が 3 層のものと比べて大きいことに起因するものである。なお、図-8 の破壊状況に示すように、実験結果では両試験体ともに 1 層および 2 層中間梁は 3 層中間梁と比べて損傷が大きく、実験結果と解析結果の傾向は概ね対応したものと判断できる。また、点①に達した後、両試験体ともに 1 層および 2 層における梁の耐力低下および左側の柱を含む壁のせん断力の増加がそれぞれ顕著となったが、せん断力の合計は概ね一定の値のまま推移した。すなわち、左側の柱を含む壁の負担せん断力は、中間梁が健全な状態では梁からの引張軸力の影響により小さいものの、梁せん断耐力の劣化に伴う引張軸力の減少により増加したと考えられる。

次に、FEM 解析結果を RC 規準の想定耐力と比較する。表-5 に RC 規準に示される開口低減率 r_3 が想定する各構成要素の耐力寄与を示す。なお、同表の数値は四捨五入した値である。

図-10 をみると、両試験体ともに RC 規準の想定耐力は解析結果を過大評価しており、特に試験体 W1 ではその差が顕著である。各構成要素に着目すると、FEM 結果は引張側柱を有する左側壁を除くすべての構成要素において RC 規準の想定を下回った。従って、 r_3 の適切な運用には、有開口耐震壁の各構成要素の想定耐力が確実に発現されることを確認する保証設計が必要と判断される。

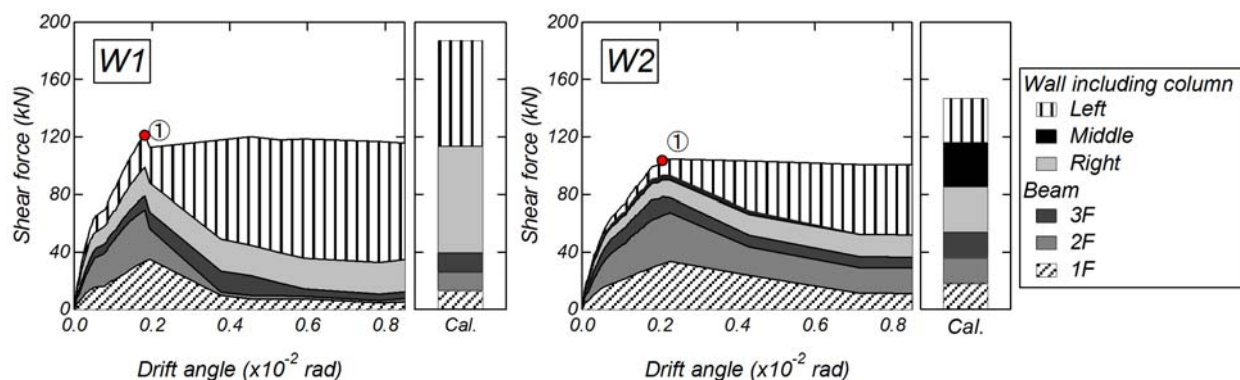


図-10 各部材の負担せん断力の推移

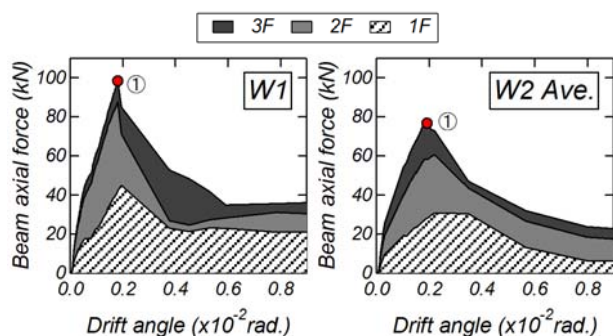


図-11 中間梁の負担軸力の推移

6. まとめ

本研究では縦長開口を有する耐震壁を対象として、静的載荷実験および二次元 FEM 解析を行い、開口低減率 r_3 の適合性および有開口耐震壁の各構成要素の耐力寄与について検討した。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 頂部の中間梁の変形を許容し、文献 1) に示される縦長開口耐震壁の開口低減率 r_3 の想定メカニズムを再現可能な試験体の破壊性状から、中間梁のせん断破壊が壁の曲げ圧壊と比べて早期に生じ、各構成要素の耐力寄与は開口低減率 r_3 の想定と異なることを示唆した。
- 2) FEM 解析結果より、開口低減率 r_3 が想定する各構成要素の耐力寄与と比較して、大部分の梁と引張側の柱を含む壁では解析値が想定を上回ったが、これらを除く壁では大幅に下回る傾向があった。
- 3) 縦長開口壁試験体では小変形領域から梁の耐力寄与が大きく、 r_3 の想定メカニズムを実現するためには梁のせん断破壊を防止する、あるいはせん断耐力劣化を抑制する必要がある。一方、引張側の柱を含む壁は中間梁が健全な状態では梁からの引張軸力の影響により負担せん断力が小さかった。ただし、引張側の壁は梁の耐力劣化に伴う引張軸力の減少により耐力寄与が急激に増大する傾向が認められた。

以上の実験、解析より得られた知見を総合して、 r_3 の

適切な運用には保証設計が必要だと判断される。

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，2010.2
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課，ほか：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2007.8
- 3) 長沼一洋，栗本修，江戸宏彰：鉄筋コンクリート壁体の FEM による正負繰返し及び動的解析，日本建築学会構造系論文集，No.544，pp.125-132，2001.6
- 4) 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
- 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，No.474，pp.163-170，1995.8
- 6) H. Nakamura and T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected of Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, 1999.10
- 7) 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
- 8) 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，コンクリート工学論文，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9
- 9) K. Naganuma, K. Yonezawa, O. Kurimoto and H. Eto.: 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.
- 10) 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，1999.8