

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14064

研究課題名(和文)縦開口を有するRC壁の地震時挙動

研究課題名(英文)Seismic behavior of RC wall with vertical openings

研究代表者

市之瀬 敏勝 (Ichinose, Toshikatsu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10151474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート建物の耐震壁の設計にあたっては、ドアなどによる縦長開口の影響を適切に評価する必要がある。これまで、中高層建物では、ドア開口上下での地震被害がよく見られた。本研究では、開口がない場合、縦開口が上下に並ぶ場合、斜めに配置された場合について実験を行った。縦開口が上下に並ぶ場合、日本建築学会の計算規準に示された式より低い荷重で破壊することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In seismic design of walls in reinforced concrete buildings, one should consider the effect of vertical openings such as doors. Many damages were observed above door openings after severe earthquakes. In this research, three types of specimens were constructed: a wall without opening, a wall with openings aligned vertically, and a wall with openings aligned diagonally. The wall with openings aligned vertically showed significantly smaller strength than that predicted by the current design code.

研究分野：鉄筋コンクリート構造

キーワード：鉄筋コンクリート 耐震壁 縦開口

1. 研究開始当初の背景

2010年版RC規準¹⁾では、有開口耐震壁の設計方法に開口低減率 r_3 (以下、 r_3)が導入された。文献²⁾では、縦長開口を有する壁試験体(以下、縦長開口壁)の最大耐力は上下の開口によって挟まれた梁および壁脚部の耐力が同時に発現されないことに起因して r_3 の想定する耐力に達しないことが示されている。しかし、文献²⁾に示された1列開口壁試験体は各層の開口が壁中央に配置されていた。開口が偏在配置された連層耐震壁の実験的研究⁵⁾⁻⁸⁾は過去に行われているが、縦長開口が偏在配置される場合や不規則に配置される場合の実験がほとんど行われていないのが現状である。なお、既往の研究では壁の上下に載荷用の剛強なスタブが設けられており、これらが縦方向のせん断力伝達に寄与していると考えられ、破壊が連層にわたる場合の耐震性能は必ずしも正確に評価されていないと判断される。

表1 試験体詳細

		WN0 無開口	WV1 一列配置	WD1 一列配置
柱	b × D	180 × 200		
	主筋	12-D13 ($p_g=4.23\%$)		
	あばら筋	D4@50 ($p_w=0.31\%$)		
梁	b × D	60 × 180		
	主筋	4-D4 ($p_t=0.29\%$)		
	あばら筋	D4@100 ($p_w=0.47\%$)		
壁	$t_w \times l_w$	60 × 1700		
	h_w	1000		
	主筋	D4@50 千鳥配筋 ($p_s=0.47\%$)		
開口	$l_o \times h_o$	200 × 700		
	開口補強筋(縦)	-	3-D4	
	開口補強筋(横)	-	1-D10	

表2 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
WN0	27.0	25.7
WV1	27.7	25.9
WD1	27.2	25.7

表3 鋼材材料試験結果

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D13(SD785)	766	187	1017
D4(SD295)	347	182	491
PC 鋼棒 17	1003	208	-

表4 試験体構造特性計算値

	低減係数			計算耐力			
	r_1	r_2	r_3	Q_A (kN)	Q_{mu} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{su}/Q_{mu}
WN0				253	877	471	0.54
WV1	0.88	0.70	0.61	154	880	289	0.33
WD1			0.87	177	880	329	0.37

2. 研究の目的

縦長開口の配置が異なる壁試験体の静的載荷実験を行い、最大耐力および破壊性状の比較、短期許容せん断力時における損傷について検討する。

3. 研究の方法

(1) 試験体基本計画と構造詳細

試験体は中層のRC建物における連層耐震壁を想定した1/4スケールとし、3体を作成した。試験体の詳細を表1に、図1に試験体形状および配筋詳細を、図2に柱梁の断面形状を、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それぞれ示す。試験体計画時のコンクリートの設計基準強度は $F_c=24\text{N/mm}^2$ 、鉄筋材種は、側柱主筋およびスタブ引抜防止用補強筋がD13(SD785)、開口横補強筋がD10(SD295A)、その他の鉄筋がD4(SD295A)である。

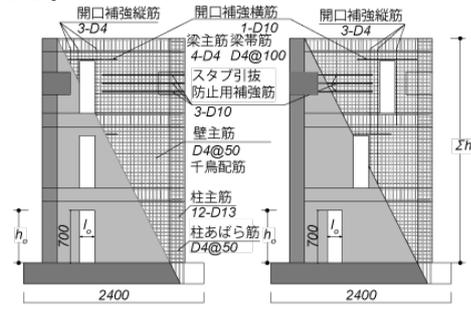


図1 試験体配筋

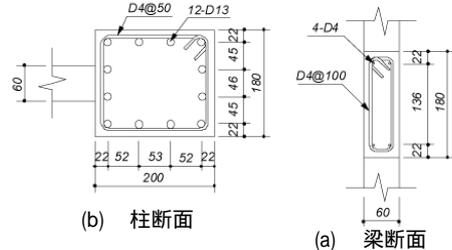


図2 部材断面図

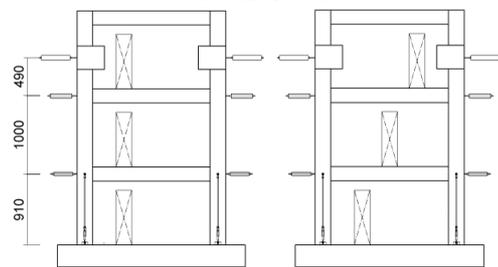


図3 変位計取り付け位置

実験変数は開口の有無および開口の配置状況である。試験体WN0は無開口壁試験体とし、試験体WV1およびWD1は各層の壁板に縦長開口を有する壁試験体である。試験体WV1は各層の縦長開口が水平方向の同一位置に偏在配置されたものである。一方、試験体WD1は縦長開口が斜めに配置されたものである。なお、試験体WV1およびWD1の開口面積は $h_0 \times l_0 = 700 \times 200\text{mm}$ である。

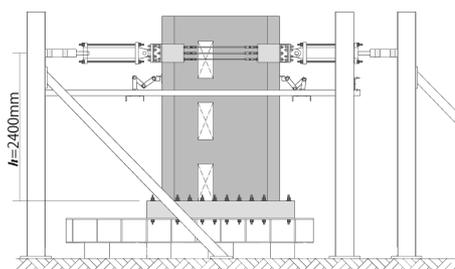
縦長開口を有する試験体である WV1 およびWD1の変位計の設置位置を図3にまとめる

表3に各試験体の各構造特性計算値の一覧を示す。試験体 WV1 では、各層の縦長開口が水平方向の同一位置に配置されていることから、 r_3 における開口高さ h_0 は $3h_0$ として計算した。その結果、 r_3 の計算値が r_1 および r_2 と比べて最も低くなる。一方、試験体WD1では各層の縦長開口が斜めに配置されていることから、 h_0 は1層の開口の高さ h_0 として計算した。その結果、 r_2 の計算値が最も低くなる。また、両試験体ともに h は1層脚部から最上階梁頂部までの高さ h (3,000mm)とした

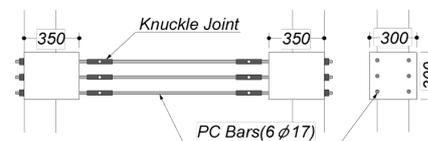
本論に示す連層耐震壁は文献²⁾で示した試験体と同様に荷重装置と接続するための部分的なスタブを設置し、両スタブ間を図4(b)のようにナックルジョイントを設けたPC鋼棒により緊結した。ここで、PC鋼棒は、実際の建物の2層から4層において協力幅1.5mと仮定した床スラブに配筋される鉄筋(D13@100ダブル)の軸剛性におよそ相当する6-17とした。また、本試験体では、3層において縦長開口の偏在によるスタブの引き抜けを防止するために壁板に水平方向補強筋3-D13を設けた(図1参照)

(2) 加力システム

図4(a)に荷重装置を示す。水平力の加力は左側から右側への荷重を正方向と定義する。なお、水平力の荷重は荷重フレームおよび上スタブに取り付けた左右2台の1000kN水平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つつ、両上スタブの水平変位の平均値を計測位置高さ $h=2,400\text{mm}$ で除した変形角 R で制御した。なお、本実験は軸力を加えない荷重計画とし、側柱の主筋量を割り増すことにより圧縮側柱に作用する力が



(a) 加力装置



(b) スタブ間詳細図

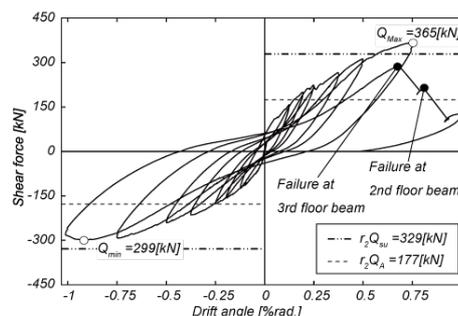


図4 加力装置

現実的な数値となるように設計した。

実験は正負交番繰り返し荷重とした。荷重プログラムは荷重制御による曲げひび割れモーメント⁷⁾時の水平力を1サイクル行った後、変位制御により荷重した。また、縦長開口壁試験体では、開口の偏在の影響により正荷重および負荷重の最大耐力の差が予測された。本試験体WD1およびWV1では、負荷側側の加力は正荷重側の加力と比べて壁板から一層および二層における開口上部付近のコンクリートに伝達される応力が低くなり、境界梁の損傷レベルが小さくなると考えられ、負荷側側の加力から実施することとした。

4. 研究成果

(1) 破壊経過および荷重変形角関係 試験体WD1

縦長開口が斜めに配置された壁試験体WD1の荷重変形角関係を図5に示す。同図には、無開口耐震壁のせん断終局強度に低減率を乗じた計算結果 r_{su} を二点鎖線で、短期許容せん断力に低減率を乗じた計算結果 r_{QA} を点線で、最大耐力点をそれぞれ示している。図6(a)および図7(a)に計算上の短期許容せん断力に達した荷重サイクル終了時の破壊性状を、図6(b)および図7(b)に実験終了時の破壊性状をそれぞれ示す。

正荷側側では、最初の荷重サイクルにおいて1層開口の左側上部付近の壁板にせん断ひび割れが発生した。0.125%radの荷重サイクルでは、2層開口の左上および右下隅部にせん断ひび割れ(図6(a)中の位置A-AおよびB-B)が発生した。1.0%radの荷重サイクルでは、図6(b)に示す位置D-Dおよび位置E-Eにおいてコンクリートの圧壊に伴い急激な耐力低下が生じた、またこの時3層梁の下端筋

と開口補強横筋，壁縦筋が開口と壁板の境界部分において座屈していた。

負荷荷側では，最初の載荷サイクルにおいて図7(a)のA-Aの位置にせん断ひび割れが生じた。0.125%radの載荷サイクルでは，1層の開口左下隅角部付近の壁板に曲げひび割れの発生および1層右側の壁板にせん断ひび割れの発生がそれぞれ確認された。0.195%radの載荷サイクルでは，1層の開口と2層の間でせん断ひび割れが発生した。0.375%radの載荷サイクルでは，3層開口上部の壁板にせん断ひび割れが生じた。1.0%radの載荷サイクルでは，3層梁のコンクリートの剥離および2層開口下隅角部付近のコンクリートの圧壊に伴って耐力が低下した。

正載荷側の最大耐力は365kNとなり，せん断終局強度の計算結果を上回った。しかしながら，負荷荷側の最大耐力は299kNとなり，せん断終局強度の計算結果を下回った。

変形状況 試験体WD1

図8(a)に+0.75%radの変形を示す。左側加力点 L_3 の鉛直変位(4.2mm)は水平変位(16.3mm)の約1/4である。この比率は，開口左側の壁脚の中立軸から引張縁までの距離(255mm)と壁脚から加力点までの距離(2,400mm)の比率よりずっと大きい。これは，+0.75%radの時点で開口上部の梁が健全であり，開口左側の壁が脚部の中立軸まわりに剛体回転していなかったことを意味する。また， L_1 の水平変位(3.4mm)は， L_2 と L_1 の水平変位の差(8.5mm)に比べて小さく，試験体WV1と異なる点である。3層梁の圧縮破壊が2層梁より早かったのも2層の曲げ変形に起因する。ただし， R_1 の水平変位(7.1mm)は， L_2 と L_1 の水平変位の差(8.3mm)と同程度である。つまり，開口の右側では1階脚部を中心とした曲げ変形が主であったといえる。その結果，2階の梁は左右に4.0mm伸びている。

図8(b)に-0.75%radの変形を示す。ここでも， R_1 の水平変位(4.1mm)が， R_2 と R_1 の水平変位の差(7.5mm)に比べて小さい。2層の壁板の圧縮破壊はこの曲げ変形に起因する。一方，開口の左側では1階脚部を中心とした曲げ変形が主である。2階の梁は左右に3.2mm伸びている。WV1試験体での梁の伸びは0.6~1.1mmであり，WD1に比べて小さい。

(2) 短期許容せん断力時における損傷

残留ひび割れ幅の推移

縦長開口壁試験体WV1およびWD1の計算上の短期許容せん断力付近の最大残留ひび割れ幅の推移を図9に示す。縦軸はサイクルピークの荷重を，横軸は除荷時の残留ひび割れ幅を示している。選択した残留ひび割れ幅

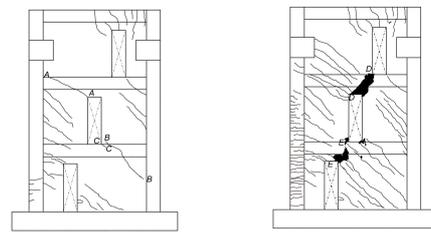


図5 荷重変形角関係

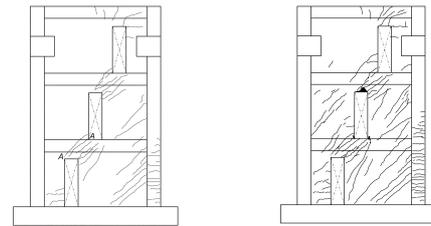


図6 破壊性状(正載荷時)

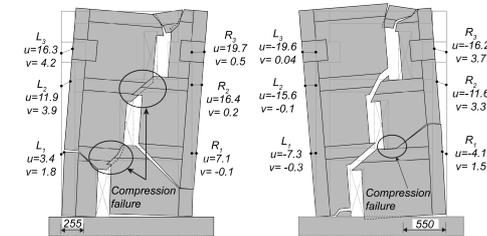


図7 破壊性状(負載荷時)

の位置は同図中の丸印の位置である。また，同図中には短期許容せん断力に低減率を乗じた計算結果 Q_A と縮尺による補正を行なった残留ひび割れ幅の制限値¹⁾を併せて示している。ここで，ひび割れ幅の縮尺による補正は文献²⁾を参考に実大の $(1/n)^{0.5}$ ($1/n$:試験体の縮尺)倍になるものと仮定した。すなわち，1/4縮尺の本試験体のひび割れ幅は実大のひび割れ幅の1/2程度になり，RC規準による残留ひび割れ幅の制限値(0.3mm)は0.15mmとなる。さらに，図9において，残留ひび割れ幅が制限値に達する荷重を Q_A で示し，これを短期許容せん断力の実験値とみなす。RC規準による短期許容せん断力の計算値と実験値の比較を図9(a)に示す。

試験体WV1では，正負載荷ともに短期許容せん断力近傍の荷重で残留ひび割れ幅が制限値に達した。また，試験体WD1の正載荷側でもほぼ同様の傾向が伺える。一方，試験体WD1の負載荷側では，短期許容せん断力に達する前に残留ひび割れが制限値に達した。これは，図8(b)で見られた梁の伸びと関係があると考えられる。

実験結果による試験体の耐力と計算値との比較

表4に実験で得られた試験体の耐力と計算値を示す。なお，その比較を図10(b)に示す。

計算値は、広沢式を用いた無開口耐震壁のせん断終局強度に RC 規準の低減率 r_3 、 r_2 を乗じて求めた。

試験体 WN0 および試験体 WD1 の正載荷側では実験値が計算値を上回っていたが、試験体 WV1 では正負載荷ともに計算値を下回っていた。これらのことから、現在の RC 規準による低減率 r を用いた耐力計算では、開口が偏在する有開口耐震壁の耐力を十分に評価できない場合があるといえる。

(3)まとめ

本研究では縦長開口が1列に偏在配置された壁試験体と斜めに配置された壁試験体の静的載荷実験を行い、以下の知見を得た。

縦長開口が右上から左下へ斜めに配置された壁試験体では、最大耐力は載荷方向により20%の差が生じた。右向きに載荷した場合の耐力低下は、図8(a)のように1層および2層における開口上部付近の梁の圧縮破壊により生じた。左向きに載荷した場合の耐力低下は、図8(b)のように2層開口下に隣接する壁脚部のコンクリートの圧縮破壊により生じた。

縦長開口が左よりに偏在配置された壁試験体では、RC規準の短期許容せん断力前後で残留ひび割れ幅が制限値に達した。

縦長開口が斜めに配置された壁試験体を右向きに載荷した場合では、RC規準の短期許容せん断力の7割で残留ひび割れ幅が制限値に達した。

縦長開口が水平方向の同一位置に偏在配置された壁試験体では、最大耐力が広沢式を用いた無開口耐震壁のせん断終局強度の計算結果に RC 規準による低減率 r_3 を乗じた計算結果と比較して、右向きに載荷した場合では、6割程度、左向きに載荷した場合では8割程度であった。

このことから、現在のRC規準による低減率 r_3 では、開口が偏在配置された有開口耐震壁の耐力を十分に評価できない場合があるといえる。

縦長開口が斜めに配置された壁試験体の正載荷では、最大耐力が広沢式を用いた無開口耐震壁のせん断終局強度の計算結果に RC 規準による開口低減率 r_2 を乗じた計算結果と比較して、右向きに載荷した場合では、計算値を2割程度上回った。しかしながら、左向きに載荷した場合では8割程度であった。このことから、現在の RC 規準による低減率 r_2 では、開口が斜めに配置された有開口耐震壁の耐力を十分に評価できない場合があるといえる。

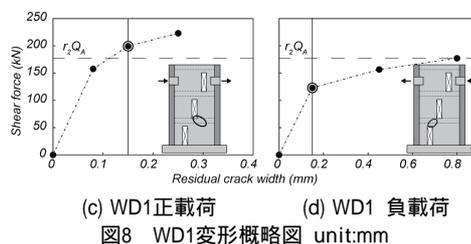
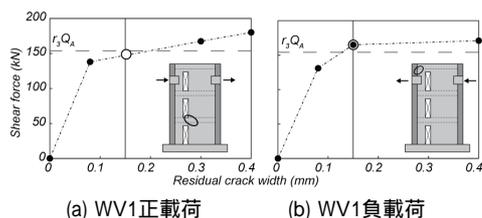


図8 WD1変形概略図 unit:mm

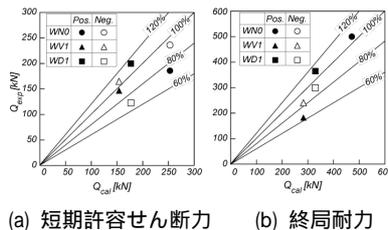


図9 残留ひび割れ幅の推移

表4 計算耐力と実験値における耐力比較

	Q_A (kN)		Q_{su} (kN)			
	実験値		計算値		計算値	
	+	-	+	-	+	-
WN0	186	236	253	500	-	471
WV1	147	165	154	183	241	289
WD1	200	123	177	365	299	329

< 参考文献 >

日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2014.9
 真田靖士，市之瀬敏勝，高橋之，飯塚桃子：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
 野田浩志，杉下腸一，加藤大介：RC造連層開口壁の静加力実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1077-10882，1997
 櫻井真人，松井智哉，鈴木健太，倉本洋：複数開口を有するRC造耐震壁の耐震性能に及ぼす開口位置の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.421-426，2008.7.
 土井公人，坂下雅信，河野進，田中仁史：開口が偏在する RC 造連層耐震壁のせん断性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.421-426，2009.7
 土井公人，坂下雅信，河野進，田中仁史：千鳥開口を有するRC造連層耐震壁のせん断耐力評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.355-360，2010.7.
 7)国土交通省住宅局建築指導課，ほか：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書，2015.5

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

劉虹，鈴木卓，真田靖士，市之瀬敏勝：縦長開口を有する RC 耐震壁の耐力低減

率に関する分析, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.367-372, 2015年07月
廣澤 光法, 劉 虹, Rado RAMAROZATOVO, 鈴木 卓, 高橋 之, 真田 靖士, 市之瀬 敏勝: 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, No.734, pp.579-588, 2017年4月

〔学会発表〕(計3件)

廣澤 光法, RAMAROZATOVO Rado, 木下 拓哉, 市之瀬 敏勝: 複数の縦長開口を有する RC 連層耐震壁の構造性能 その1 実験概要と荷重変形角関係, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第55号, 2017年02月20日~2017年2月21日, 名古屋工業大学

木下 拓哉, 廣澤 光法, RAMAROZATOVO Rado, 市之瀬 敏勝: 複数の縦長開口を有する RC 連層耐震壁の構造性能 その2 試験体の変形性状, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第55号, 2017年02月20日~2017年2月21日, 名古屋工業大学

Ramarozatovo Rado, 廣澤 光法, 木下 拓哉, 市之瀬 敏勝: 複数の縦長開口を有する RC 連層耐震壁の構造性能 その3 開口上部における梁の変形性状, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第55号, 2017年02月20日~2017年2月21日, 名古屋工業大学

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市之瀬 敏勝 (ICHINOSE, Toshikatsu)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10151474

(2) 研究分担者

高橋 之 (TAKAHASHI, Susumu)
大同大学・工学部建築学科・講師
研究者番号: 20620842

真田 靖士 (SANADA Yasushi)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 80334358

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()