

論文 RC造偏在戸型開口壁の独立柱を想定した柱の静加力実験

加藤大介*1・保坂敦史*2・中村友紀子*3・土井希祐*4

要旨: RC造偏在戸型有開口耐震壁には開口の偏在により独立柱が存在する。耐震壁が正負交番載荷を受ける場合、この独立柱には高変動軸力が生じる。本研究では既報で報告したRC造偏在戸型有開口耐震壁の独立柱をとりだして静加力実験を行った。その結果、主筋の座屈の影響により、引張力を与えた試験体の方が最小軸力が0の試験体より早期に耐力低下が生じており、80%耐力低下点として定義した靱性限界点も小さかったことが分かった。ただし、全主筋を引張降伏させるかどうかは軸力負担能力（軸力喪失点の変形）には影響しなかった。この結果は偏在有開口耐震壁の独立柱のモデル化に役立つ。

キーワード: 耐震壁, 偏在開口, 柱, 変動軸力, 静加力実験

1. はじめに

筆者らは文献 [1] において、RC造有開口連層耐震壁を靱性のある要素として設計する場合の、曲げ強度と変形能の評価法を検討した。その中で、偏在戸型開口を有する場合には、開口の影響により曲げ強度と変形能が無開口壁に比べ低下することを指摘し、その評価法を提案した。また、開口が偏在することによって生じる独立柱には、高変動軸力下で大きな強制変形が生じるため、強度だけでなく靱性も要求されることも示した。しかしながら、この独立柱の変形能の評価は難しい。すなわち、変動軸力を受ける柱の靱性評価の既往の研究は多いが、それらは、高層建物の隅柱を対象としており、本研究で対象としているような、引張軸力載荷が全主筋の降伏を伴うものではないからである。そこで、本研究では、文献 [2, 3] で示した偏在戸型開口壁の独立柱を想定した柱試験体の静加力実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に実験計画の概念を示した。図中の右は文献 [3] で示した片持ち梁加力形式の偏在有開口耐震壁の実験終了後のひび割れ図の例である。偏在開口により生じる独立柱には、正方向加力では圧縮軸力下で、負方向では柱型内の全主筋の引張降伏を伴う引張軸力下で、それぞれ強制的な水平変形を受ける。

この独立柱を模擬した柱試験体を図中の左側に示した。柱試験体の諸元を表-1に、寸法と配筋詳細を表-2に、それぞれ示した。柱部分の寸法は原型の壁試験体と同じである。原型の壁試験体は3体であるが、柱の主筋(4-D10)は共通で、帯筋の間隔は2通り(2-D6@50と2-D6@30)であった。そこで、柱試験体の主筋は原型と同じとし、試験体IC1とIC2は帯筋間隔50mm、試験体IC3とIC4は30mmとした。実験パラメータはこの帯筋配筋以外には変動軸力の与え方とし、試験体IC1とIC3は最小軸力比を0に、試験体IC2とIC4は柱型の全主筋が引張降伏する軸力比とした。すなわち、試験体IC2とIC4が偏在開口壁の独立柱を模擬した試験体で、試験体IC1とIC3が比較用の一般的な変動軸力を受ける試験体といえる。

*1 新潟大学教授 工学部建設学科 工博(正会員)
 *2 新潟大学自然科学研究科博士課程前期大学院生
 *3 新潟大学助手 工学部建設学科 博(工)(正会員)
 *4 新潟大学助教授 工学部建設学科 博(工)(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名	コンクリート強度 (MPa)	主筋	主筋強度 (MPa)	帯筋 (帯筋比%)	帯筋強度 (MPa)	最大軸力 (kN) (軸力比)	最小軸力
IC-1	30.8	4-D10	532	2-D6@50	541	221	0
IC-2				(0.42)		主筋降伏	
IC-3				2-D6@30			442
IC-4				(0.71)		主筋降伏	

表-2 試験体寸法と配筋の詳細

断面	150×150mm
柱全高さ	L=380mm
有効せい	d=129mm
帯筋の外端長さ (コア長さ)	Dc=130mm
横補強筋の端部	135度フック付き

表-3 加力履歴

サイクル	1・2	3・4	5・6	7・8	9・10
Rmax	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04
Rmin	-0.005	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02
ϵ_{min}	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04

(部材角の単位:rad、 ϵ_{min} は試験体IC2,3に適用)

なお、最大軸力比は、帯筋間隔が大きい試験体 IC1, 2では0.32、帯筋間隔が小さい試験体 IC3, 4では0.65とした。試験体 IC1と IC2の配筋図を図-2に示しておく。

2.2 加力方法

図-3に加力計画の概念図を示す。図-3(a)は最小軸力を0とする変動軸力試験体 IC1, 3の载荷方法であるが、これは文献 [4] に示した方法と同一である。すなわち、正加力方向へ向かう水平力0の時(図中①→②)に、所定の圧縮軸力を载荷し、その後軸力を保ったまま正方向加力を行い(②→④)、水平力が0の点で(④→⑤)軸力を抜き、その後軸力が0の状態では負方向加力を行った(⑤→⑥→①)。一方、図-3(b)は軸力引張り側で全主筋を引張降伏させる試験体 IC2, 4の場合である。正加力方向へ向かう水平力0の時から、正方向加力終了まで(①→④)は試験体 IC1, 3と同じであるが、水平力が0の点で軸力を抜いた上に、所定の軸歪度(ϵ_{min})まで引張った(④→⑤)。その後、軸歪度 ϵ_{min} を保ちながら負方向加力を行う(⑤→⑥→①)が、主筋が全て引張降伏しているので、水平方向の復元力は0となる。

表-3は加力履歴であるが、各サイクルで2回の同一部材角で繰り返す漸増载荷とした。ただし、原型の耐震壁の実験結果では、負方向の水平変形角がある程度以上進行しなかったため、その結果を反映させて負方向では部材角 Rmin は0.02radで打ち止めとした。また、試験体 IC2, 4の負方向载荷時の引張軸歪度 ϵ_{min} も原型の耐震壁の実験結果を参考にして、柱の水平変形角に比例させ、表に示した値とした。

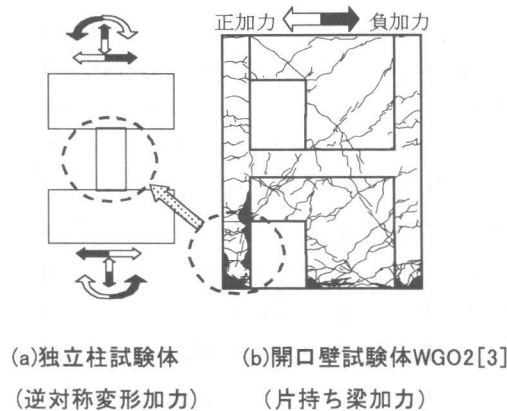


図-1 実験計画概念図

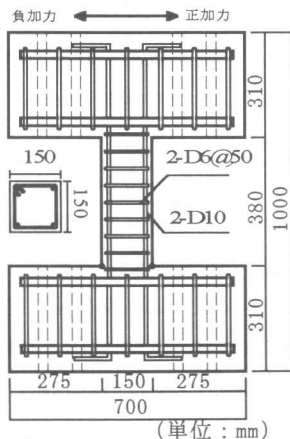
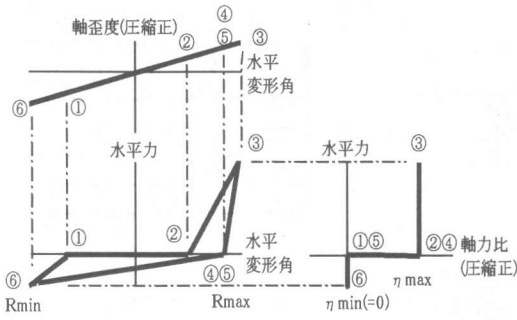
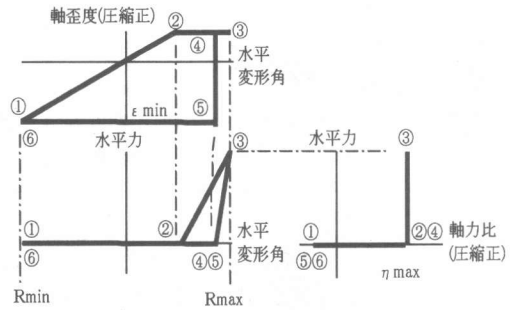


図-2 試験体配筋図(IC1, IC2)



(a)最小軸力が0の試験体(IC1,IC3)



(b)引張軸力を与える試験体(IC2,IC4)

図-3 加力計画概念図

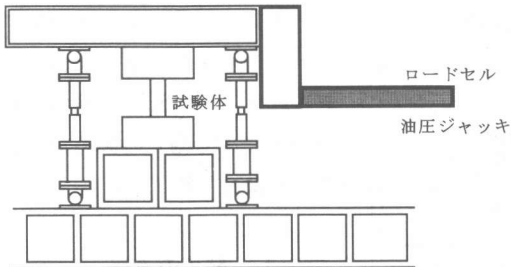


図-4 加力装置図

図-4に加力装置図を示した。原型となる耐震壁の独立柱には複雑な強制変形が生じるが、本実験でそれを再現するのは困難であるので、加力は逆対称変形となるように左右の軸力ジャッキで軸方向を制御している。

測定は水平変形その他、柱両側の側面での軸方向の変形を柱部材高さ方向に2分割して電気式変位計により測定している。

3. 実験結果

図-5に、各試験体の最大耐力時(IC1, 2, 3は+5サイクル、IC4は+3サイクル)および加力終了時のひび割れ図を示す。また、図-6(a)~(d)には各試験体の水平力-水平部材角関係、および、軸歪度-水平部材角関係を示した。図(a)(c)は最小軸力を0とした一般の隅柱を対象にした変動軸力試験体、(b)(d)は負方向で全主筋を引張降伏させた独立柱を模擬した試験体である。同図の水平力は軸力用ジャッキによる影響(P-Δ効果)を考慮したものであり、また、水平変

形角は上下の基礎間の水平変形をその高さで除したもので、軸歪度は柱軸芯位置での上下基礎間の垂直変形を高さに除した値である(縮みを正方向にしている)。試験体はいずれも±1サイクル(1/200rad)において柱頭、柱脚部に曲げひび割れが観察された。負方向において引張軸力を与えた試験体IC2, 4は柱全体に水平方向にひび割れが発生した。3サイクル(1/100rad)で柱脚部の亀裂が拡大し、コンクリートが剥落した。

試験体IC1, 2, 3は+5サイクル(1/50rad)で最大耐力を示したが、試験体IC4は+3サイクル(1/100rad)で最大耐力を示し、+5サイクルでは耐力が低下しはじめた。試験体IC1, 2, 3では、この最大耐力時に、せん断ひび割れが観察されたが、試験体IC4では、最大耐力時の部材角が他の3体より小さい1/100radだったので、ひび割れ図をみてわかるように、せん断ひび割れは発生していない。

最大耐力以降は、負方向において引張軸力を与えた試験体IC2, 4の耐力低下が比較したIC1, 3に比べ著しかった。試験体IC2は-5サイクル(1/50rad)で柱脚部の亀裂が拡大すると同時に柱中央のコンクリートが剥落し、帯筋が露出した。7サイクル(1/33rad)目には柱脚部のコンクリートが大きく剥落し、主筋が露出したが、目視では座屈が確認できなかった。最終サイクル(1/25rad)では柱左上および柱右下の主筋が座屈し、かぶりコンクリートが圧壊した。試験体IC4も同様に-5サイクル(1/50rad)で柱脚部が大きく剥落し、帯筋が露出した。このとき柱側面でも

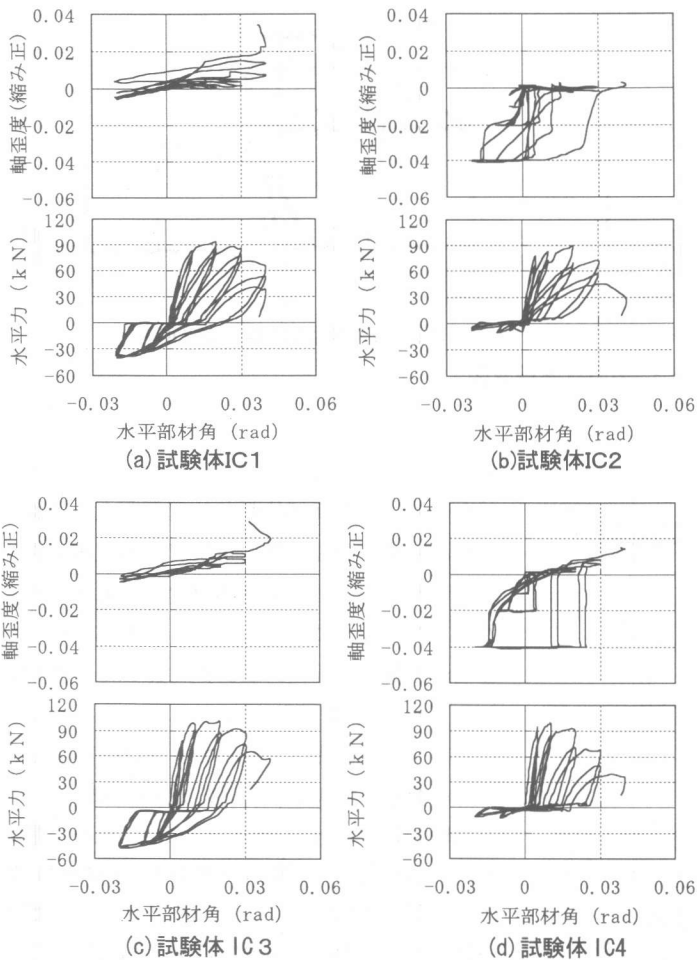


図-6 水平力-水平変形、軸歪度-水平変形関係

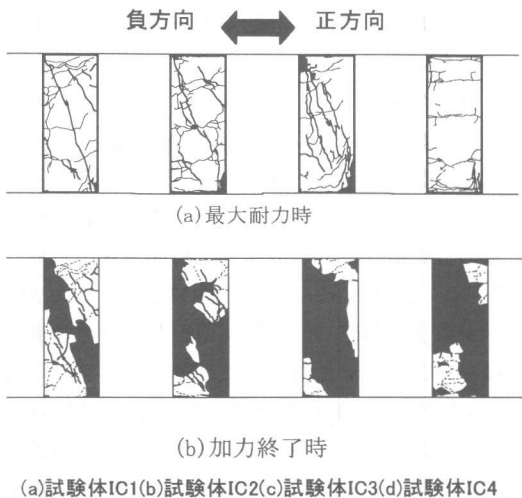


図-5 ひび割れ図

表-4 限界変形実験値

試験体名	80%低下時 変形能(rad)	軸力 変形能(rad)
IC-1	0.03	0.04
IC-2	0.02	0.04
IC-3	0.03	0.04
IC-4	0.02	0.04

コンクリートの剥落、帯筋の露出が確認された。その後、柱脚の基礎から浮き上がりが見られた。+9サイクル(1/25rad)では柱右下部の剥落、かぶりコンクリートの圧壊、主筋の座屈が確認された。いずれの試験体も最終サイクルで軸力の保持が不能となり加力を終了した。

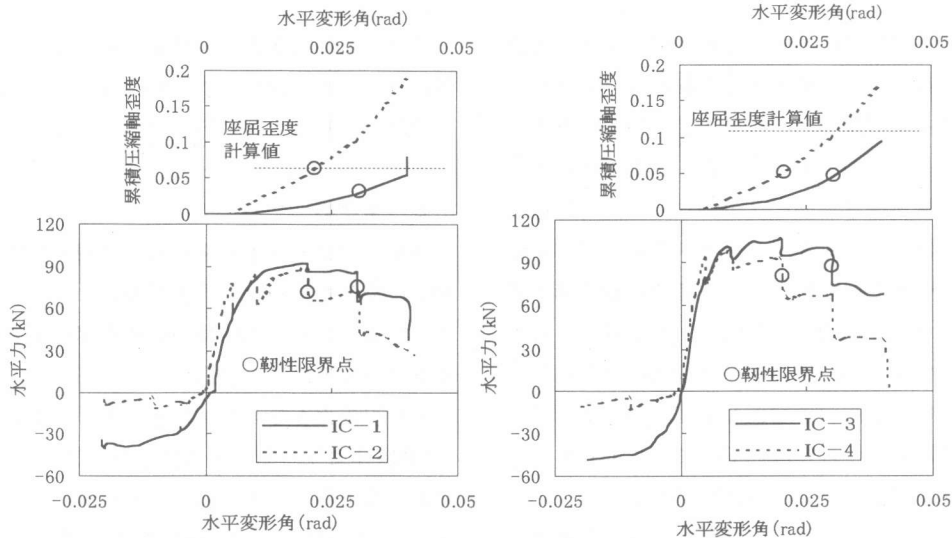
4. 結果の考察

4.1 限界変形の既往の実験との比較

本節では、圧縮軸力を受ける正方向加力時の限界変形能について考察する。本実験のように負方向で引張軸力を受ける場合には、正方向加力時のせん断抵抗機構にも影響を及ぼす可能性があり、せん断

抵抗機構に依存する変形能も検討する必要もある。しかしながら、本実験レベルでの軸力比では、圧縮コンクリートに依存する曲げ靱性の影響が大きいため、曲げ靱性のみ検討した。

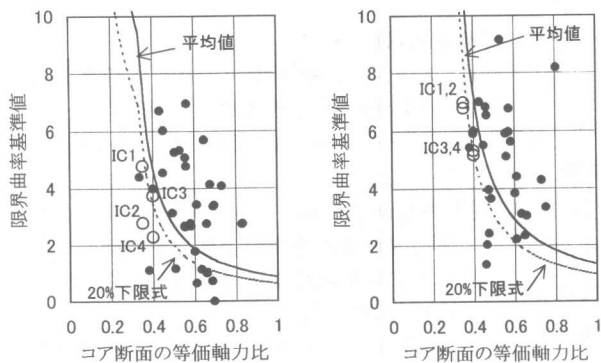
文献[5]では、柱試験体の変形能と軸力との関係を検討し、設計式として柱のコア軸力比と限界曲率基準値(変形能を基準化した値で詳細は同文献参照)の関係提案している。図-7は同文献で示した柱コア断面と限界曲率基準値の関係に本実験結果を加筆したものである。限界変形としては、復元力が最大耐力の80%に低下した点と、所定の軸力を負担できなくなった点(軸力喪失点)の2通りを考えている。



(a) $\eta_{max}=0.32$ (帯筋間隔50mm)の試験体

(b) $\eta_{max}=0.65$ (帯筋間隔30mm)の試験体

図-8 包絡線と主筋累積軸歪度の関係



(a) 耐力80%低下時

(b) 軸力喪失時

図-7 試験体の変形能の検討(文献[5])のコア断面の軸力比と限界曲率基準値の関係に本実験結果を加筆(図中○)

試験体の耐力80%低下点として定義した靱性限界点は後述する図-8に○印で示したが、3章で述べたように、最小軸力が0の試験体より全主筋を引張降伏させた試験体の方が小さい値となった。一方、いずれの試験体も最終サイクルが軸力喪失点となるが、このときまでに経験した最大部材角はいずれの試験体もほぼ等しかった。80%低下点として定義した変形能が大きく違うにも関わらず、軸力喪失点が変わらなかったこ

とは注目に値する。これらの値を表-4に示しておく。

これらの点を既往の試験体と比較してみると、80%に耐力が低下した点では(図-7(a))、最小軸力が0の試験体では既往のデータの20%下限値(同破線)付近に位置し、全主筋を引張降伏させた試験体では既往のデータの20%下限のさらに下に位置した。一方、軸力喪失点では(図-7(b))、いずれの試験体も既往のデータの20%下限値(同破線)付近に位置した。

4.2 主筋の座屈歪度の検討

軸力荷荷法が限界変形に及ぼす理由としては、荷荷法の違いにより主筋の座屈の発現に差が生じたことが考えられる。そこで、本節では、主筋の座屈歪度について考察する。図-8に包絡線と主筋累積軸歪度の関係を示す。図は軸力荷荷法だけが異なる試験体をまとめて示しており、図(a)は軸力比が0.32(帯筋間隔50mm)の試験体、図(b)は軸力比が0.65(帯筋間隔30mm)の試験体である。いずれも下の図が試験体の水平変形角と水平力の包絡線、上の図が水平変形

角と主筋の累積圧縮軸歪度の関係である。主筋の累積軸歪度は主筋の歪度の履歴をバイリニアモデルに置換し、圧縮降伏している時の歪度を累積したものである。また、主筋の歪度の履歴は試験体高さ方向に2分割して測定した電気式変位計による軸変形のデータより、負方向加力で引張を受ける側の主筋位置での軸変形に換算し求めた（上下2カ所あるので図はその平均）。すなわち、この歪度は危険断面から部材中央までの主筋の平均的な歪度といえる。従って、危険断面付近では局部的にこれよりも大きい累積歪度になっていると想定できる。

包絡線については、引張軸力を与えた試験体（破線）の方が最小軸力が0の試験体（実線）より早期に耐力低下が生じており、図中の○で示した靱性限界点も小さいこと、および、軸力を負担できる限度は加力終了時なので、この限度はいずれの試験体も同じであることは、既に説明した。

主筋の累積歪度をみると、いずれの図においても、破線で示した全主筋が引張降伏する試験体の方が倍程度大きいことがわかる。文献 [6] によれば、主筋の座屈はその累積圧縮軸歪度が座屈歪度を超えたときに生じる。また、同文献では座屈歪度の評価式が提案されており、図中にはその座屈歪度計算値も点線で示してある。この計算値は安全側に設定されており、また、精度もあまり良い式ではないが、座屈を生じたかどうかの目安にはなる。すなわち、本実験結果に当てはめると、図-8(a)をみて分かるように、最小軸力が0の試験体IC1は主筋の座屈が生じる限界前、全主筋を引張降伏させた試験体IC2は加力中に主筋が座屈した、と判断できる。すなわち、全主筋を引張降伏させた試験体が最小軸力が0の試験体より耐力低下が激しかったのは、主筋が座屈したためと判断できる。その結果、最大耐力の80%低下時として定義した変形性能は全主筋を引張降伏させた試験体が小さくなった。ただし、図-8(b)ではそのような明確な傾向は見られなかった。

一方、断面の軸力負担性能に対する主筋の影響は余り大きくないので、軸力喪失点の変形はいずれの試験体も同じ値になっている。

5. まとめ

鉄筋コンクリート造偏在有開口耐震壁の独立柱を模擬した柱の静加力実験を行い、以下の結果を得た。これらの結果は偏在有開口耐震壁の独立柱のモデル化に役立つ。

- (1) 引張力を与えた試験体の方が最小軸力が0の試験体より早期に耐力低下が生じており、80%耐力低下点として定義した靱性限界点も小さかった。これは主筋の座屈が原因と考えられる。
- (2) 全主筋を引張降伏させるかどうかは軸力負担能力（軸力喪失点の変形）には影響しなかった。

[参考文献]

- [1] 加藤大介, 杉下陽一: R C 造連層開口壁の設計法に関する考察, 第21回コンクリート工学年次論文報告集21-3, 1999年, pp. 721-726
- [2] 野田浩志, 杉下陽一, 加藤大介: R C 造連層開口壁の静加力実験, 第19回コンクリート工学年次論文報告集19-2, 1997年, pp. 1077-1082
- [3] 小倉宏一, 加藤大介, 他: 鉄筋コンクリート造連層偏在有開口耐震壁の静加力実験, 構造工学論文集, Vol. 46B, 2000年
- [4] 本多良政, 加藤大介: 主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受けるR C 柱の静加力実験, 第16回コンクリート工学年次論文報告集16-2, 1994年, pp. 455-460
- [5] 保坂敦史, 加藤大介: 曲げ降伏するR C 造偏在有開口壁の曲げ設計法に関する考察 (その2: 独立柱の軸力喪失時の変形の評価法), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2構造IV, pp. 391-392, 1999年
- [6] 加藤大介: 鉄筋コンクリート造部材の配筋設計法に関する研究 (コンクリートの拘束筋と主筋の座屈防止筋に関する考察), 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, 1993年, 10月, pp. 99-107