

論文 せん断破壊する鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二軸載荷挙動に関する実験的研究

堀田 久人^{*1}・柴北 洋佑^{*2}

要旨：本研究では水平二軸入力を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁の挙動を検討した。面内でせん断破壊、面外で曲げ降伏する縮小試験体3体を、面外変形/面内変形を0, 2, 4として水平二軸載荷実験を行った。その結果、面内せん断耐力は面外変形が大きい試験体ほど低下すること、面外耐力は曲げ降伏であるにも関わらず正側載荷時には面内せん断力の増加に伴って低下し、負側載荷時には低下しないことが観察された。この面外荷重の正負における性状の違いについて検討するとともに、ねじれを生じさせないように制御した際の面外荷重心について、実験と断面解析の比較を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート造耐震壁，水平二方向載荷，せん断破壊，断面解析，降伏曲線

1. はじめに

鉄筋コンクリート造耐震壁部材が地震力を受けるとき、面内方向、面外方向に同時に変形するため、耐震壁の二軸挙動を把握する意義は大きい。

曲げ降伏の先行する鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向入力実験^{例えば(1)(2)(3)}では、面内方向に比べて面外方向の耐力低下が著しいことなどが報告されている。また、せん断耐力の二軸相関に関する実験^{例えば(4)}も行われており、面内せん断耐力の低下が報告されている。

本研究では、壁体にねじれを生じさせないように制御した場合の回転拘束力、および面内方向-面外方向耐力の相関に着目し、面内方向にせん断破壊、面外方向に曲げ降伏する鉄筋コンクリート造耐震壁の縮小試験体を対象として、面外変形/面内変形を実験変数とした水平二軸載荷実験を行い、二方向入力時の挙動について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に配筋諸元、図-1に試験体配筋詳細図を示す。試験体は面内方向変形に対する面外方向変形の割合を実験変数とした鉄筋コンクリート造耐震壁の縮小試験体3体であり、寸法・配筋は全試験体で共通である。面外変形/面内変形が0(面内1方向載荷)、2, 4の変形を与える試験体をそれぞれSW-0, SW-2, SW-4として区別する。試験体の側柱は70mm×70mm、壁板の内法長さは530mm、高さは300mm、厚さ20mmである。側柱主筋は6-D6を配し、スタブ内で直線定着とした。側柱せん断補強筋は3φを20mm間隔で配筋した。壁板は縦筋、横筋ともに3φを50mm間隔でシングル配筋し、縦筋はスタブ内で横

筋は側柱内で180°フック定着させた。縦筋、横筋の干渉を避けるため横筋は千鳥配筋とした。上下スタブには加力装置を固定するための16φの穴と変形を計測するための端子を設けた。

表-2に試験体を使用した材料特性を示す。鉄筋の降伏強度は0.2%オフセット耐力である。

表-3に試験体の面内・面外耐力計算値を示す。面内方向ではせん断破壊、面外方向では曲げ破壊が先行するように計画した。なお、面内方向曲げ耐力、面外方向曲げ耐力は日本建築学会の略算式⁽⁵⁾により求め、面内方向せん断耐力、面外方向せん断耐力は広沢平均式によって算出した。鉄筋降伏応力とコンクリート圧縮強度は材料試験の値を用いた。面内方向のせん断耐力は壁を等価長方形断面に置き換えて算定した。面外方向の曲げ降伏荷重とせん断耐力は側柱2本分の耐力として算定し、壁板の寄与は考慮していない。せん断余裕度は面内方向で0.77、面外方向で1.08である。

2.2 加力計画

図-2に加力装置図を示す。試験体は下スタブをPC鋼棒でフレームに緊結した。上スタブに直接加力用ブロックを設置し、オイルジャッキ1基で面内水平力を加える。試験体を支持する鉄骨は曲げに対しては強軸で抵抗するが、せん断力に対しては耐力が不足するので、面内水平力を釣り合わせるために下スタブにも反力を与えるオイルジャッキを設置した。面外方向の載荷は上スタブの両端に取り付けた鉄骨部材を介して、2基のオイルジャッキによって水平力を加えつつ、同時に壁にねじれが発生しないように制御を行った。2基のオイルジャッキの間隔は800mmである。また、反曲点高さは面内方向

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系准教授 工博 (正会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 修士2年

表-1 試験体諸元

試験体	SW-0	SW-2	SW-4
柱部材	$b \times D$ 70mm×70mm		
主筋(鉄筋比)	6-D6(3.88%)		
横補強筋(せん断補強筋比)	3φ@20(1.01%)		
壁部材	$t \times bw'$ 20mm×530mm		
鉛直方向(鉄筋比)	3φ@50(0.71%)		
水平方向(鉄筋比)	3φ@50(0.71%)		
面内変形/面外変形	0(面内1方向入力)	2	4

表-2 材料特性

鉄筋			
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
D6	405	538	190
3φ	572	621	205
コンクリート			
	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	
	32.5	2.37	

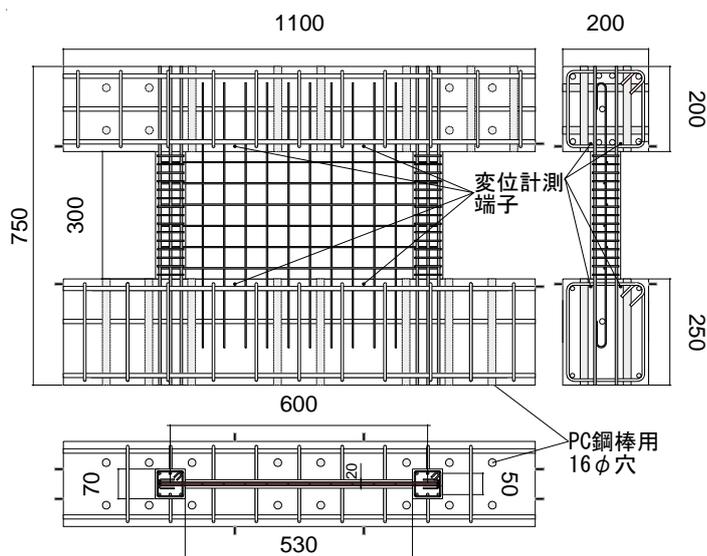


図-1 試験体配筋詳細図(単位:mm)

表-3 試験体耐力計算値

	曲げ耐力	せん断耐力	せん断余裕度
面内	112.4kN	86.6kN	0.77
面外	28.4kN	30.9kN	1.08

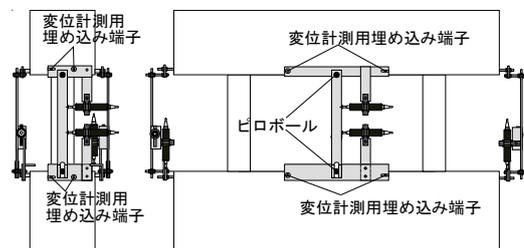


図-3 変位計測治具装着図

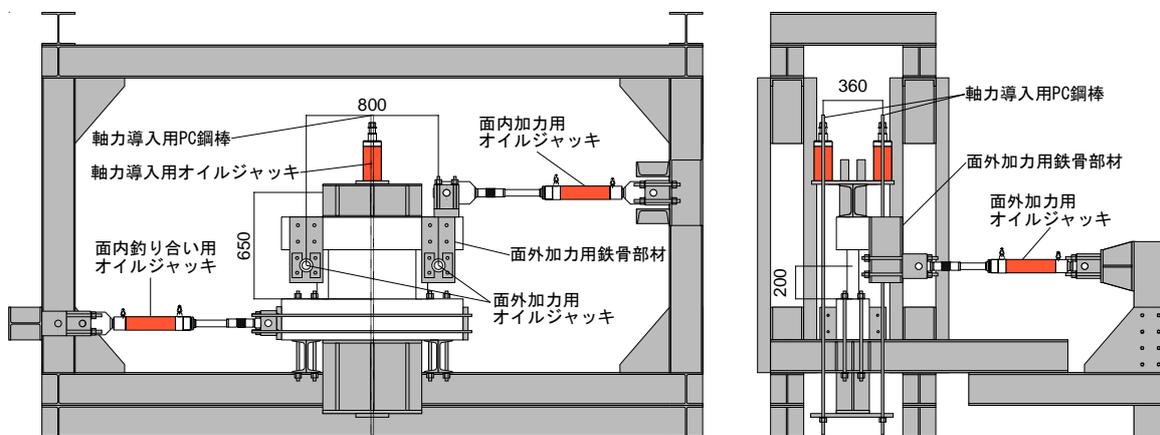


図-2 加力装置図(単位:mm)

で650mm, 面外方向で200mmである。

上下スタブに鉄骨ブロックを取り付け, 壁体前後に PC 鋼棒を配し, 上部鉄骨ブロックに 360mm 間隔で設置した軸力導入用オイルジャッキで下部鉄骨ブロックを引張ることで, 一定軸力 60kN(軸力比は側柱のみに対して 0.19, 全断面に対して 0.09)を加えた。

载荷サイクルは全試験体で面内方向変位を目標部材角 $\pm 0.0005\text{rad}$, $\pm 0.001\text{rad}$, $\pm 0.0025\text{rad}$, ± 0.005 , $\pm 0.01\text{rad}$, $\pm 0.02\text{rad}$ を与え, SW-0 は面外方向変形を与えず, SW-2 は面内変形の 2 倍の面外変形, SW-4 は 4 倍の面外変形

を同時に与えつつ制御し, せん断破壊するまで正負交番繰り返し载荷を行った。

2.3 変位測定方法

図-3 に変位測定治具装着図を示す。変位測定治具は, 上下スタブに埋め込まれた 4 本の端子にピン固定し, 端子間の伸びと相互の回転を計測している。端子の鉛直変位から軸方向変形, 下部の変位計から水平変形角, 下部変位計と上部変位計から壁体上部の回転を計測した。これを試験体の 4 面に設置し, 面内方向と面外方向でそれぞれ 2 面の変形の差からねじれ角を計測した。

上下スタブをつなぐ測定治具のピン部、ピンローラー部にはピロボールを利用し、面外変形、面内変形のどちらにも追従できる機構とした。

3. 実験結果

3.1 面内荷重-変形角関係

図-4に各試験体の面内方向の荷重-変形角関係を示す。赤線はSW-0、青線はSW-2、緑線はSW-4である。また、それぞれせん断破壊が発生した点を○で示し、せん断耐力計算値を同時に示す。

SW-0は面内変形0.001radのループと0.005radのループで剛性が低下した。0.001radのループではせん断ひび割れが増加し、0.005radのループから引張側柱内鉄筋の降伏が始まったためと考えられる。0.005radのループ以降、変形が増加していったが、曲げ降伏耐力に達する前に面内変形角-0.01rad付近でせん断破壊し、荷重が大きく低下した。面内変形が0.067radまで増加したため、載荷を終了した。

SW-2は面内変形0.001radのループまでは、SW-0とピーク時の荷重も同程度であったが、0.0025radのループからピーク時荷重が低くなった。0.009rad付近でせん断破壊し、変形は0.042radまで増加した。

SW-4は面内変形0.001radのループからSW-0と比べてピーク時荷重が低くなった。0.02radのループの正側載荷時、0.012rad付近でせん断破壊し、耐力が大きく低下し、変形が0.035radまで増加した。せん断破壊時、0.01radでのピーク荷重までは増加せず、最大耐力を發揮したのは0.01radのループであった。

3.2 面外荷重-変形角関係

図-5にSW-2とSW-4の面外方向の荷重-変形角関係を示す。また、せん断破壊をした点と、略算式による曲げ降伏荷重を示す。両試験体とも、面外変形0.005rad付近で曲げ降伏した。

SW-2では、0.01radのループから正側載荷時に面内方向の荷重の増加に伴って面外方向の耐力が低下したが、負側載荷時には荷重低下は発生しなかった。SW-4においても、0.04radのループ以降で同様の傾向が確認された。

3.3 試験体の最大耐力

表-4に正負面内荷重最大時の面内荷重、面外荷重の値を試験体ごとに示す。せん断破壊時の面内荷重はSW-0、

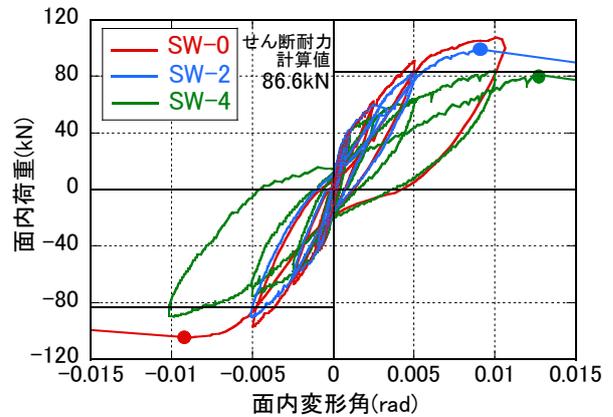


図-4 面内荷重-変形角関係

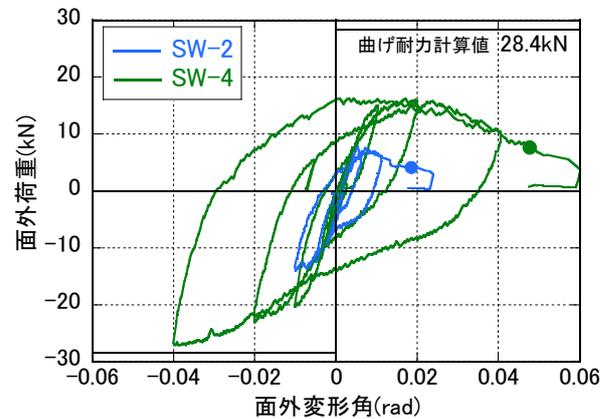


図-5 面外荷重-変形角関係

表-4 各試験体面内荷重最大時の荷重

試験体		面内荷重(kN)	面外荷重(kN)
SW-0	正側	107.4	-
	負側	-104.6	-
SW-2	正側	99.0	4.3
	負側	-90.1	-13.8
SW-4	正側	84.0	10.5
	負側	-89.6	-27.0

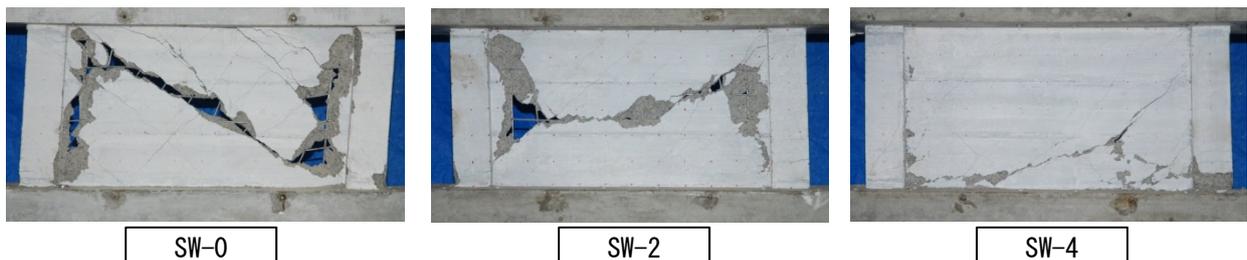


図-6 試験体最終状態写真

SW-2, SW-4 でそれぞれ 104.6kN, 99kN, 84kN であった。面外変形が大きな試験体ほど小さい耐力で面内せん断破壊する傾向があり、SW-0 と比較し SW-2 では 5%, SW-4 では 20% 耐力が低下した。SW-4 では広沢平均式によるせん断耐力をわずかに下回った。また、面外変形を与えた SW-2, SW-4 の両試験体において正側載荷時と負側載荷時の面外耐力差が著しく、負側載荷時の方が大きい耐力を示した。

3.4 試験体最終状態

図-6 に載荷終了後の試験体写真を示す。いずれの試験体も荷重低下時にせん断ひび割れが大きく進展し、コンクリートの剥離が観察された。壁板の損傷が大きかったが、せん断破壊後も軸力は保持していた。

4. 正負耐力差の要因

4.1 軸力によるモーメント

導入軸力は、面外/面内加力中一定となるように制御したが、1 系統の油圧システムで制御したため、2 基のオイルジャッキに荷重の差が生じ、その差分と軸力オイルジャッキの距離によって曲げモーメントが生じた。

図-7 に水平荷重と軸力ジャッキの差によって生じる壁脚部モーメントのピーク毎の推移を示す。青色が面外水平ジャッキによるモーメント、緑色が軸力の差によるモーメント、赤色が補正したモーメントである。

軸力載荷時から 0.7kNm 程度の脚部曲げモーメントが発生し、面外方向の荷重をかけるごとに増減していったが、常に正側に曲げモーメントが発生していたことより正負耐力差が発生したと考えられる。載荷中に生じた軸力ジャッキの差は最大で 3kN 程度であり全体軸力の 5% 以下であったが、最大で 1.2kNm 程度の曲げモーメントが生じていた。これは補正前の SW-2 の正側載荷時の最大曲げモーメントの 72% に相当する。

また、SW-2 において面外荷重-変形角関係で荷重低下の発生した区間を矢印で示す。補正前ではせん断破壊直前に水平荷重によるモーメントは 0.5kNm 低下したが、この区間において軸力ジャッキによる脚部モーメントが 0.3kNm 程度増加しており、補正後では面外モーメントの低下量は小さくなっている。

4.2 壁上部の回転による反曲点位置の変化

図-8 に SW-4 の面外荷重-壁体上部面外回転関係を示す。赤色と青色は面外方向の両面の計測治具からそれぞれ測定される面外回転であり、緑色は面内方向計測治具の軸変形の差から計測される面外回転である。3 つの計測変形が等しい傾向から、試験体の上部スタブは載荷中では回転のみ自由度を持っており、剛体であると考えられる。

面外荷重の増加とともに面外回転も増加しているが、

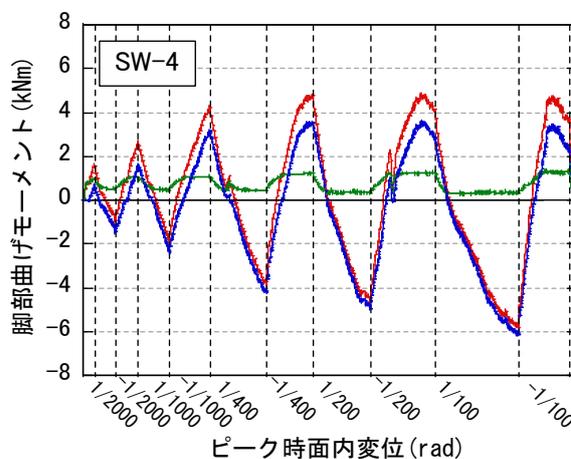
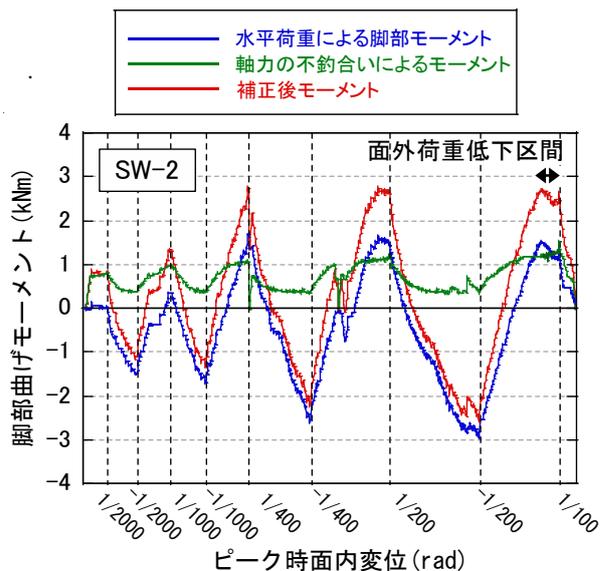


図-7 軸力ジャッキによる脚部モーメント

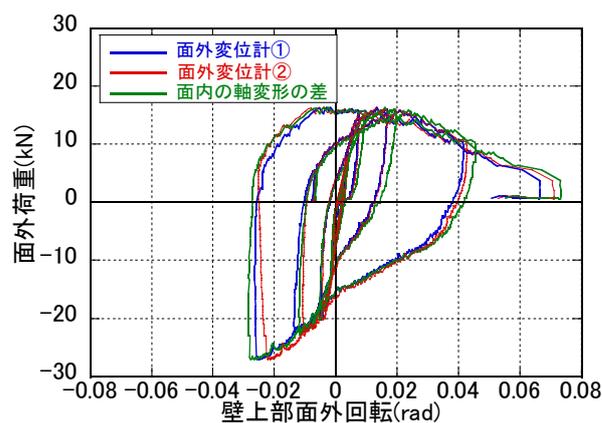


図-8 壁上部回転計測

耐力低下の発生した正側載荷時と比較し、負側載荷時の回転が小さく、半分程度の変形に留まっていた。

図-9 に壁体上部の回転による反曲点位置の変化を模式的に示す。面外方向の載荷中、壁体上部の面外回転により加力位置が変化する。本実験では、正側載荷時は押しで制御したことから反曲点位置が上昇し、負側載荷時は引きで制御したことから下降する。このこともまた、

正側荷重が負側荷重よりも小さな値となった一因であると考えられる。しかしながら、例えば正側載荷時の0.04radの変形時、反曲点位置の変化は20mm程度で、脚部曲げモーメントに与える影響は10%以下である。軸力ジャッキによるモーメントと比較するとその影響は小さい。

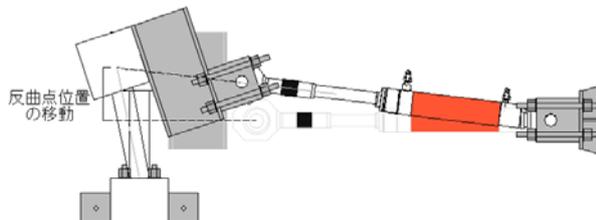


図-9 上部回転による反曲点位置の変化

4.3 面内-面外脚部モーメント履歴

図-10にSW-2, SW-4の壁脚部が負担する面内-面外曲げモーメント履歴を示す。赤色で軸力用ジャッキの差によるモーメントと壁体上部の回転による反曲点位置を補正したものを、青色で補正していないものを示す。また、断面解析によって計算した、破線で一本目の鉄筋の降伏が始まる曲線を、実線で最大曲げ耐力線を示す。

SW-2, SW-4 はともに補正前は面外正負耐力差が顕著であったが、補正後は概ね同程度の荷重負担であった。

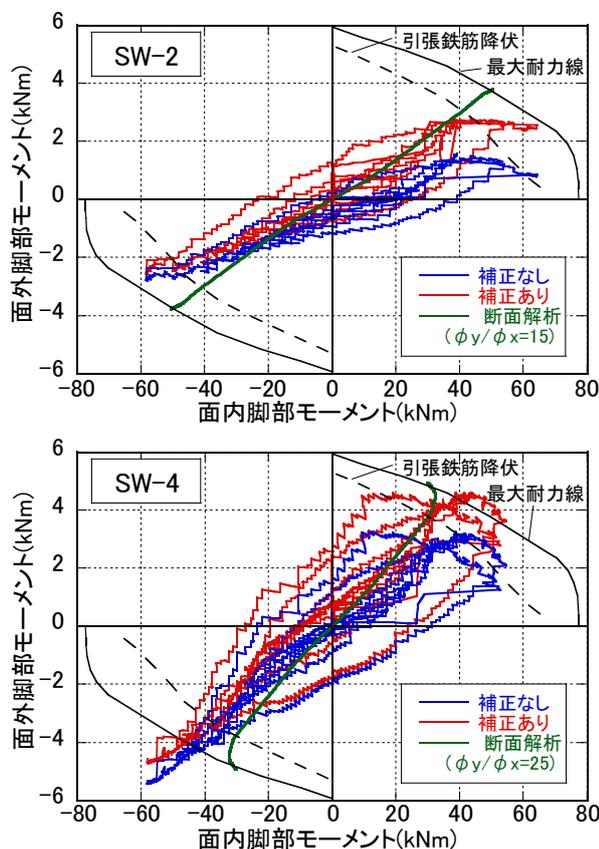


図-10 面内-面外壁脚部モーメント履歴

SW-2 は補正後では、引張鉄筋降伏耐力線付近から面外方向のモーメントがわずかに低下したが、面内方向荷重が増加し続け、最大曲げ耐力線に達する前にせん断破壊したと考えられる。面外耐力は軸力のモーメントの増加から、補正前ほどの顕著な低下は発生していない。

SW-4 は補正後には、最大曲げ耐力線に達した後、面外方向の荷重低下が起きたが、面内方向荷重はそれ以降も増加し続け、面内方向がせん断耐力に達したと考えられる。SW-4 の負側載荷時においては、脚部モーメントの最大耐力線を超える耐力を発揮する結果となった。荷重低下は発生していない。

緑線は断面解析において、SW-2, SW-4 それぞれの補正後のモーメント履歴に近くなるように面外/面内曲率比(ϕ_y/ϕ_x)を入力したときのモーメント履歴である。SW-2 では $\phi_y/\phi_x=15$, SW-4 では $\phi_y/\phi_x=25$ としたとき鉄筋降伏以前のモーメントの比が概ね対応した。鉄筋降伏以降、断面解析においては曲率比を一定で入力しても面外方向の耐力低下が発生しなかった。実験においては、鉄筋の降伏以降、面外方向は曲げヒンジ長さが増大することにより変形が増加し、面外/面内曲率が低下したと考えられる。

5. 荷重心の検討

図-11にSW-2, SW-4のねじれ角の推移を示す。載荷荷重が増えるほど、ねじれ角の値は増加したが、SW-2, SW-4ともにねじれ角を概ね1/1000rad程度の変形で制御することができた。

図-12にSW-2, SW-4のピーク毎の面外方向の荷重心を示す。赤色で面外方向のオイルジャッキから算出した荷重心を示す。荷重心は面外ジャッキによるねじりモーメントを面外荷重で除したものである。中心に荷重が作用するとき0であり、正側載荷時に圧縮となるほうを正方向とした。同時に荷重心に対応する壁断面を示す。

SW-2では1/2000radのループ時に面外荷重が非常に小さい値のため荷重心は大きな値となった。SW-2, SW-4ともに作用荷重が増加するごとに、圧縮側柱と引張側柱の軸力負担の差が大きくなり、面外荷重心は圧縮側柱に近づいていく傾向があった。SW-2では面内1/200radのループ、SW-4では1/400radのループから荷重心の偏心が大きくなり、SW-4の1/100radのループではほぼ圧縮側柱に荷重心が位置している。1/100radの負側面外耐力は一方向荷重の計算に近い耐力を発揮したにも関わらず、面外の荷重心の偏心は正側載荷時と同程度であった。

青色で断面解析における荷重心位置を示す。断面解析では、図心からの面内方向距離が等しい断面要素群が負担する面外曲げモーメントが、高さ200mmの水平荷重によって発生していると仮定し、壁せい方向の分割要素

に対応して分布する水平荷重の重心位置を荷重心とした。実験値とモーメントがおおよそ等しくなる点で比較しており、鉄筋の降伏以前はSW-2では $\phi_y/\phi_x=15$ 、SW-4で

は $\phi_y/\phi_x=25$ 、鉄筋降伏以降はSW-2では $\phi_y/\phi_x=10$ 、SW-4では $\phi_y/\phi_x=15$ とした。

SW-2では実験値と断面解析の計算値の差が顕著であった。SW-4では鉄筋降伏の発生以前は断面解析と実験における荷重心が同程度で推移した。鉄筋降伏後、断面解析と比較し、実験での荷重心が圧縮側柱側に移動するのは、引張側柱の曲げヒンジ長さが圧縮側柱よりも長くなることによる剛性の低下が考慮されていないことが原因であると考えられる。

6. まとめ

鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二軸裁荷実験を行った。実験結果と検討結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 面外方向に変形を与えた試験体の面内方向せん断強度は、面内一方向入力の場合と比べて、SW-2で5%、SW-4では20%耐力が低下した。SW-4は広沢平均式によるせん断耐力をわずかに下回った。
- 2) 面外方向と面内方向の比を一定にして加力して降伏曲面に達したとき、面外荷重が低下しつつ、面内方向の荷重は増加し続ける荷重の推移をした。
- 3) 実験結果と断面解析による荷重心の推移は、SW-2では値に差があったが、SW-4の曲げ降伏が始まる以前では概ね対応していた。
- 4) 実験で観測された耐力に軸力ジャッキと壁上面の回転による影響を検討し、補正を行った。正負耐力差は減少したが、負側載荷時脚部モーメントは断面解析における最大耐力を超えており、定量的な評価は今後の課題である。

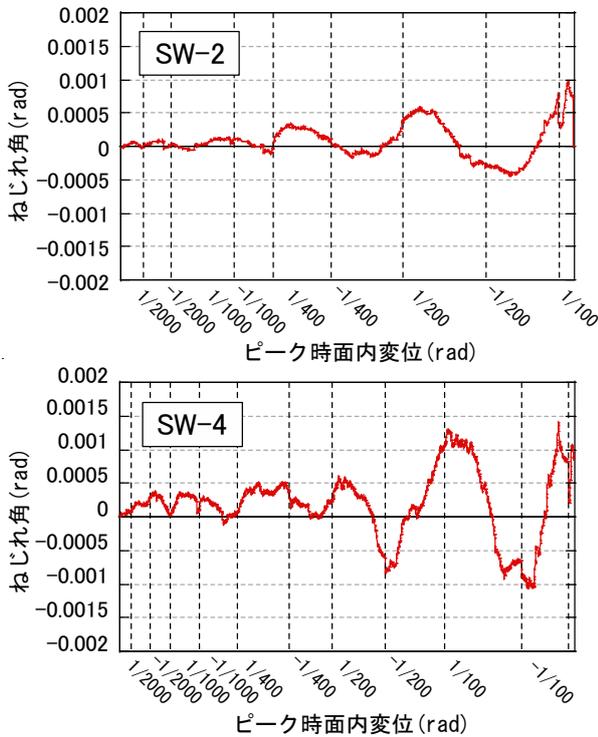


図-11 ねじれ角の推移

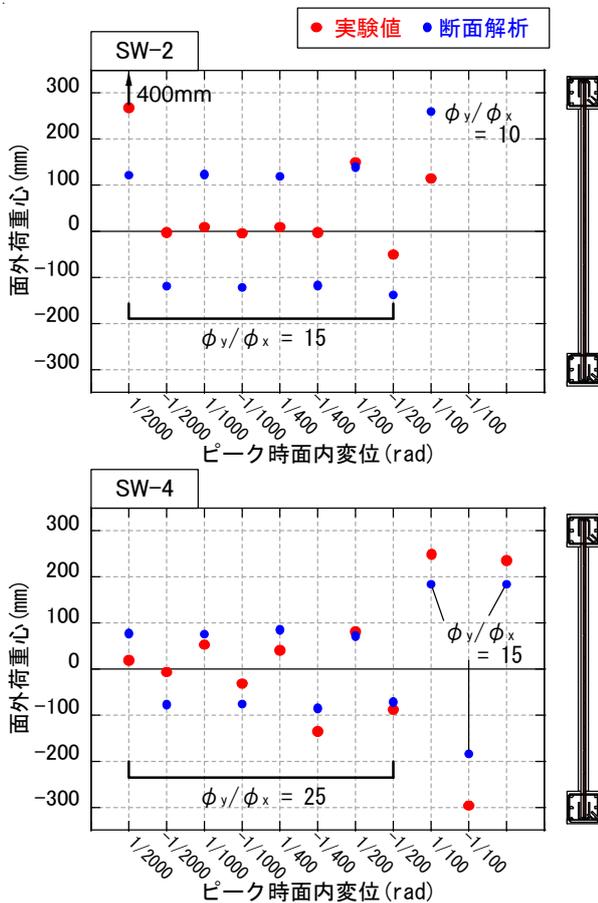


図-12 荷重心の推移

参考文献

- 1) 遠藤文明, 関松太郎, 勝俣英雄, 杉山公一: 連層耐震壁の水平二方向加力実験(その1)(その2), 日本建築学会関東支部研究報告集 1990
- 2) 今西達也, 平石久廣, 藤井栄, 森田司郎: 二方向変形を受ける鉄筋コンクリート構造耐震壁の面外方向の構造性状, 日本建築学会構造系論文集 No.466 1994
- 3) 今西達也, 西永雅一, 板倉康久, 森永司郎: 二方向の水平荷重を受ける鉄筋コンクリート増耐震壁の曲げ破壊性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18 No.2 1996
- 4) 井戸裕祐樹, 坂下雅信, 谷 昌典, 西山峰広: せん断挙動が支配的な鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向加力実験, 日本建築学会構造系論文集 Vol.82 No.735 2017.5
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説