

論文 水平二方向載荷および軸力が鉄筋コンクリート造耐震壁の構造性能に及ぼす影響に関する有限要素解析を用いた検討

山田 諒*1・谷 昌典*2・井戸 裕 勇樹*3・西山 峰広*4

要旨：本研究では変動軸力を含む様々な軸力条件が、水平二方向載荷を含む水平方向変形時の耐震壁の構造性能に及ぼす影響について検討を行うことを目的として、有限要素解析を用いてパラメトリックスタディを行った。一定軸力の大きさが最大耐力および履歴エネルギー吸収に及ぼす影響、および軸力の変動が最大耐力に及ぼす影響に関する知見が新たに得られた。また、面外方向変形が面内方向耐力を低下させるという既往研究による知見が、軸力の大きさおよび軸力変動に関わらず解析においても確認することができた。

キーワード：有限要素解析, 耐震壁, 水平二方向載荷, 高圧縮軸力, 引張軸力, 変動軸力

1. はじめに

地震時、耐震壁には面内方向荷重と面外方向荷重、さらには変動軸力が複合的に作用する。面外方向荷重が面内方向の耐力や変形性能に及ぼす影響に関しては、著者らをはじめとして実験的研究が既にいくつか行われている(例えば1),2)。また、耐震壁を対象に軸力比をパラメータとした研究も数多く行われている(例えば3)が、高圧縮軸力や引張軸力まで含めた検討は非常に少ない4)。さらに、水平二方向載荷に加え、変動軸力が耐震壁の構造性能に及ぼす影響を同時に検討した既往の研究は存在せず、実際の地震時の耐震壁の挙動には明らかではない点が多い。そこで、本研究では変動軸力を含む様々な軸力条件が、水平二方向載荷を含む水平方向変形時の耐震壁の構造性

能に対して及ぼす影響について検討を行うことを目的として有限要素解析を行ったため、その結果について報告する。検討においては、まず過去に著者らが行った実験試験体に対する解析により解析方法の検証を行い、その後パラメトリックスタディを行った。

2. 既往の実験

2.1 試験体概要

解析対象とした試験体は、過去に著者らが実施した実験1)の試験体である。試験体は30%スケール相当の縮小試験体である。図-1に試験体図及び配筋図を、表-1に断面寸法及び配筋の詳細を、表-2にコンクリートおよび鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

表-1 実験試験体概要

部材	寸法(mm)	配筋		種別	鉄筋比(%)	
		主筋	10-D16			SD345
側柱	250×250	せん断	面内	4-S6@75	KSS785	0.68
		補強筋	面外	6-S6@75		1.01
壁板	1550×70	縦筋	D6@150	SD295A	0.30	
		横筋				

表-2 材料特性

(a)コンクリート		
圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	ヤング係数* (GPa)
28.9	2.41	24.6

*1/3 f_c 割線剛性

(b)鉄筋			
	D6	D16	S6
降伏強度(MPa)	444.7	366.7	1024*
引張強度(MPa)	529.6	542.8	1177
ヤング係数(GPa)	178.7	190.4	205.1

*0.2%オフセット降伏点

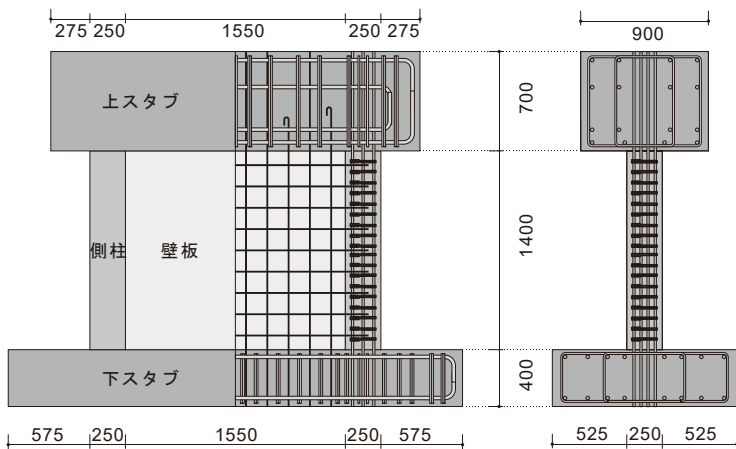


図-1 試験体図及び配筋図 (単位: mm)

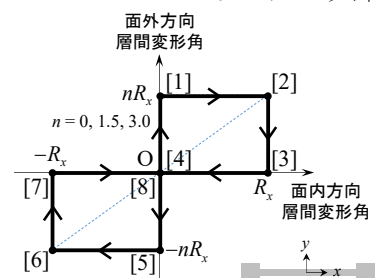


図-2 載荷履歴概形

*1 京都大学 工学部建築学科 (学生会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

*3 竹中工務店 技術研究所 研究員・博士(工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学) (正会員)

2.2 載荷履歴

実験では面外方向への変形量を変数としている。実験における載荷履歴の概要を図-2に示す。試験体はWB00, WB15, WB30の3体で、それぞれ面外方向の層間変形角を同一サイクルで与える面内方向の層間変形角の0倍, 1.5倍, 3.0倍としている。載荷履歴は、まず試験体を面外方向に加力し、規定の層間変形角に達した後、その面外方向変位を維持したまま面内方向に加力を行う。規定の層間変形角到達後は、面外・面内の順に除荷し、続けて負方向でも同様の載荷を行っている。図-2中の[1]→[8]までの経路を1サイクルとし、面内方向層間変形角 $R_x=0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0\%$ の各ステップで2サイクルずつ載荷を行っている。ただし、WB00は $R_x=0.75\%$ 、WB30は $R_x=1.0\%$ までで載荷を終了している。

3. 解析概要

3.1 モデル化

本解析では有限要素解析プログラム「FINAL/V11」⁹⁾を用いた。図-3に解析モデルの概形を示す。解析においては上下スタブを含む試験体全体を3次元でモデル化し、加力位置等の実験における載荷方法も再現した。解析対象試験体において、壁板に対しては厚さ70mmを10層に分割した積層シェル要素を用い、側柱と上下スタブに対しては六面体要素を用いた。壁板と側柱の接続部では、壁厚内に対応する柱側の要素の節点を壁板要素端の面内方向変位と一致させた。側柱の主筋に対してはトラス要素を用い、その他の側柱せん断補強筋、壁縦筋、壁横筋は各要素内への埋め込み鉄筋によりモデル化を行った。

軸力は上スタブ上面に分布荷重として作用させた。面内方向加力は壁脚から高さ1700mmの位置の上スタブ側面両側2節点(図-3の白丸)に同一の変位を与え、面外方向加力は上スタブ上面の4節点(図-3の黒丸)で同一の変位または荷重を与えることでそれぞれ行った。実験と同様に、面内方向へは片持ち載荷、面外方向へは逆対称変形載荷としている。また、スタブの六面体要素

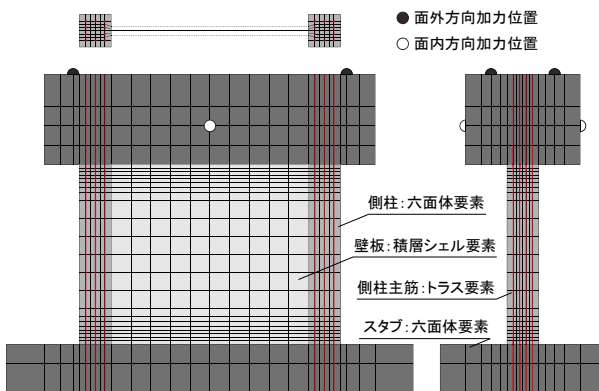


図-3 解析モデル図

は完全弾性要素とし、各載荷点周辺にはコンクリート以上の十分な剛性を与えた。下スタブ下面の全節点の3方向変位すべてを拘束した。

3.2 材料構成則

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを用いた。応力ひずみ関係には、圧縮側の応力上昇域では修正 Ahmad モデル⁶⁾を、応力下降域では壁板に対しては修正 Ahmad モデル⁶⁾を、側柱に対しては中村・梶貝モデル⁷⁾を採用し、ひずみ軟化を考慮した。三軸応力下での破壊条件としては、畑中らの係数⁸⁾を適用して Ottosen の4パラメータモデルを採用した。引張側においては若干の Tension-stiffening 効果を考慮し、出雲らのモデル⁹⁾を、付着性状を表すパラメータである c を 1.0 として採用した。ひび割れ発生後のせん断伝達特性については長沼の提案モデル⁹⁾を採用した。

側柱のせん断補強筋は材料試験において明瞭な降伏点を示さなかったため、 $2/3f_y$ 点、 0.2% オフセット降伏点を折れ点とするトリリニアモデルとし、降伏後剛性は初期剛性の $1/1000$ とした。その他の鉄筋には降伏点を折れ点とするバイリニアモデルを用い、降伏後の剛性を初期剛性の $1/100$ とした。いずれの鉄筋にも、繰返し応力下の履歴特性には修正 Menegotto-Pinto モデル¹⁰⁾を採用した。材料強度は基本的に実験における材料試験結果を用いたが、コンクリートの引張強度 f_t は、圧縮強度 f_c から以下の式(1)¹¹⁾を用いて算出した。

$$f_t = 0.33\sqrt{f_c} \quad (1)$$

3.3 モデル化妥当性の検証

(1) 水平荷重一層間変形角関係

図-4、図-5に実験試験体である WB00, WB15, WB30の載荷履歴で解析した場合の面内方向、面外方向それぞれの水平荷重一層間変形角関係を示す。解析は $R_x=0.75\%$ サイクルまで行っており、図中、実線で解析結果を、破線で $R_x=0.75\%$ サイクルまでの実験結果をそれぞれ示している。面内方向については、すべての試験体で $R_x=0.50\%$ サイクルまでの履歴性状を、初期剛性およびせん断ひび割れ後剛性を含め、概ね正確に再現できている。一方、面外方向については、解析による耐力が全体的に実験値より大きい、履歴性状の形状は概ね再現できた。

(2) 最大耐力

表-3に各試験体における最大耐力を示す。図-4、図-5中の○印は実験における最大耐力点、×印は解析における最大耐力点である。面内方向では、実験値が解析値を6~16%上回った。一方、面外方向では、実験値が解析値を11~15%下回った。本研究では面内方向耐力を主に検討の対象とすること、および、面内方向最大耐力が面外変形倍率の増加に伴い減少する傾向は再現できており、特に面外変形倍率が大きい場合には実験と解析の面

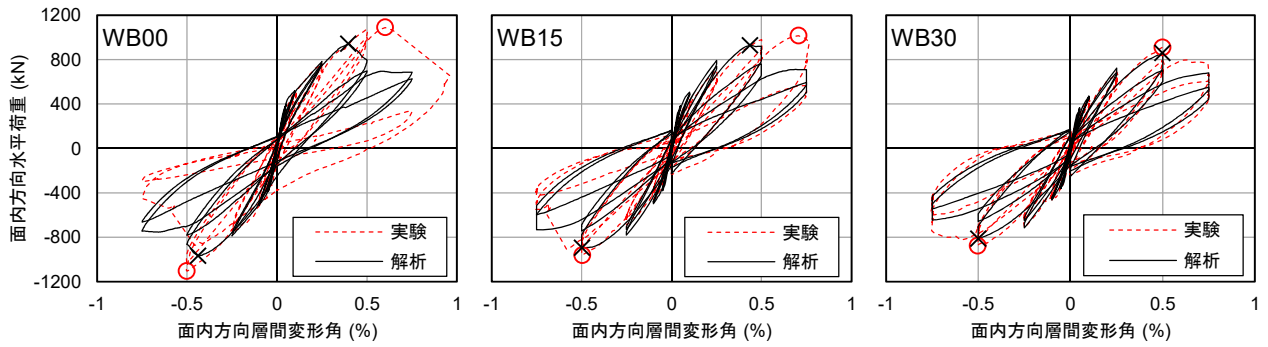


図-4 面内方向水平荷重－面内方向層間変形角関係

表-3 最大耐力

試験体		実験 (kN)	解析 (kN)	実験値/解析値
WB00	面内 正	1088	941	1.16
	面内 負	-1104	-968	1.14
WB15	面内 正	1014	925	1.10
	面内 負	-961	-895	1.07
	面外 正	235	264	0.89
	面外 負	-221	-262	0.85
WB30	面内 正	910	857	1.06
	面内 負	-876	-813	1.08
	面外 正	279	316	0.88
	面外 負	-261	-308	0.85

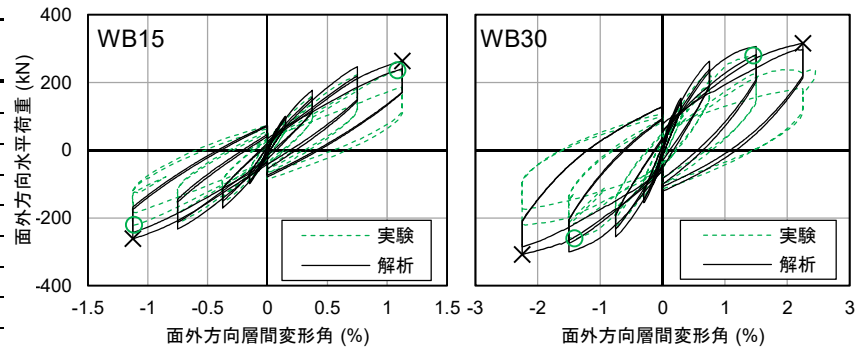


図-5 面外方向水平荷重－面外方向層間変形角関係

内方向最大耐力の差異が減少することから今後の検討に大きな影響は無いと判断した。

3.4 解析変数

(1) 解析ケース

解析変数は面外変形倍率と軸力比である。ここで、面外変形倍率とは同一サイクルで与える面外方向層間変形角の面内方向層間変形角に対する比、軸力比とは、原則として、圧縮側では耐震壁の全断面積とコンクリート強度の積に対する軸力の比、引張側では両側柱の主筋降伏耐力の和に対する軸力の比とし、圧縮を正とする。表-4に解析変数の一覧を示す。

解析ケース名称は「WB (面外変形倍率) - (最大軸力比) (最小軸力比)」と定義した。面外変形倍率は0倍の

表-4 解析変数一覧

面外変形倍率	0(一定軸力のみ), 1.5, 3.0	
軸力比	一定軸力	-0.67, -0.33, 0, 0.12, 0.20, 0.30
	変動軸力	-0.67~0.30, -0.33~0.30

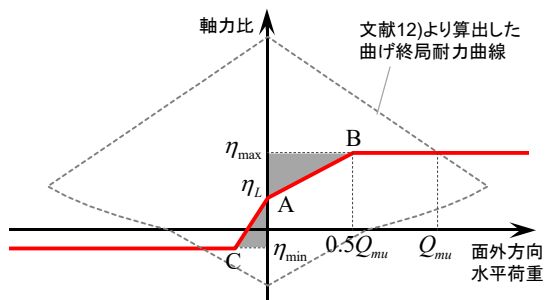


図-6 変動軸力時面外方向水平荷重－軸力比関係

場合は00, 1.5倍の場合は15R, 3倍の場合は30Rと表記、軸力比は小数第二位までの2桁を圧縮の場合C, 引張の場合Tを数字の前につけて表記する。最小軸力比の記述がないものは一定軸力での载荷である。

(2) 载荷履歴

水平二方向载荷の履歴は、実験と同様に図-2の履歴を用いた。

軸力には一定軸力と変動軸力の2種類を設定した。耐震壁に直交する方向のラーメン架構に水平荷重が作用し、耐震壁に面外方向に取り付く梁のせん断力が増加することで、外構面の耐震壁に作用する軸力は変動すると考えられる。したがって、変動軸力の解析ケースでは軸力を面外方向水平荷重に応じて変動させた。図-6に変動軸力の载荷履歴を示す。面外方向水平荷重が0の時点での軸力比を0.12 ($=\eta_L$) (A点)とし、圧縮側と引張側の目標の軸力比における面外方向曲げ終局耐力(側柱2本分)の0.5倍の面外方向荷重で目標の軸力比に到達する(B点およびC点)ように軸力を変動させた。側柱の面外方向曲げ終局耐力は文献12)に基づき算定した。目標とする軸力比は、圧縮側では0.30 ($=\eta_{max}$)で共通とし、引張側では-0.33または-0.67 ($=\eta_{min}$)とした。ただし、面内方向の载荷時および除荷時は軸力を一定に保持しており、図中の灰色の領域内に移動することがあるため、その場合は解析の都合上、図中のA, B, C点のうち次の目標点を直線で指向するように軸力を変動させた。

4. 一定軸力下での水平二方向荷重履歴

4.1 解析結果概要

一定軸力の解析結果例として、WB30R-T67、WB30R-C00、WB30R-C30の面内方向および面外方向水平荷重一層間変形角関係を図-7および図-8にそれぞれ示す。引張軸力下では軸力載荷時に試験区間全体に水平方向のひび割れが発生した。面内方向においては、引張軸力下では曲げ破壊、圧縮軸力下ではせん断破壊が先行し、面内方向の破壊モードはいずれのケースでも、後述の曲げ終局耐力およびせん断終局耐力の計算値の比較から概ね予想できた。面外方向ではいずれの軸力下でも曲げ挙動が卓越した。

4.2 最大耐力点

図-9に面内方向最大耐力-軸力比関係を示す。なお、図中の引張側の軸力比は圧縮側と同様に全断面のコンクリート圧縮耐力に基づき算出した。図中には、式(2)¹²⁾より算出した曲げ終局モーメント M_{mu} を加力点高さ (1700mm) で除して求めた面内方向曲げ終局耐力時せん断力 Q_{mu} を一点鎖線で、文献4)を参考に式(3)¹²⁾より算出した面内方向せん断終局耐力 Q_{su} を1.4倍した値を破線でそれぞれ示す。式の記号については文献12)を参照

されたい。また、図-10には一定軸力におけるWB00シリーズの面内方向水平荷重一層間変形角関係の包絡線を示す。図中に示した○印は最大耐力点である。

$$M_{mu} = a_r \sigma_y l_w + 0.5 a_w \sigma_{wy} l_w + 0.5 N l_w \quad (2)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_w^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M / QD + 0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wy} p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} l_w \quad (3)$$

図-9に示す通り、軸力比0.20未満のWB00シリーズでは、最大耐力が Q_{mu} と $1.4Q_{su}$ のいずれか小さい方の値と概ね一致した。一方、文献4)によると実験例が少ないとされる軸力比0.20以上のケースでは、軸力比の増加に伴って、式(2)および式(3)による計算値は単調に増加するのに対して、最大耐力は面外方向変位に関係なく頭打ちもしくは減少する結果となった。文献12)では式(2)、式(3)に対しては軸力の適用範囲が設けられていないが、軸力比0.20以上の高圧縮軸力での適用に関しては今後の検討が必要である。また、軸力比が0.20から大きくなるにつれて、最大耐力を示す層間変形角が小さくなった。

一方で、同一の軸力比で比較すると、軸力比0.20のケースを除き、文献1)で示した傾向と同様に面外方向変位の増加に伴い、面内方向最大耐力は減少した。

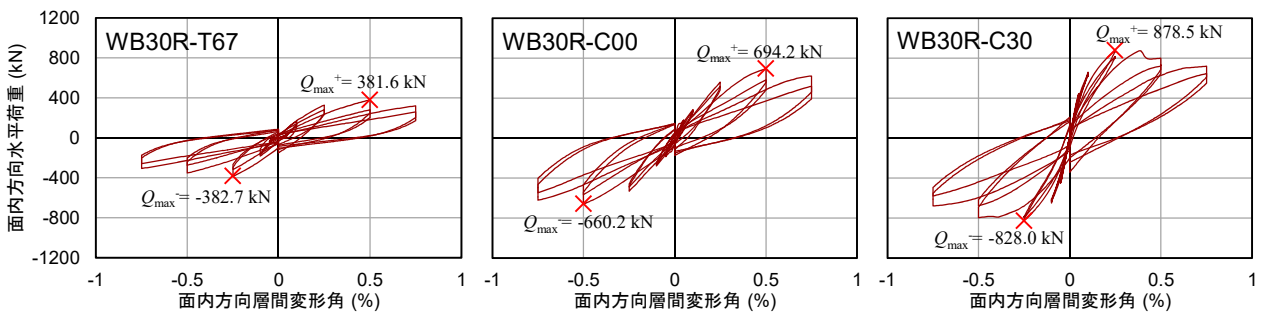


図-7 面内方向水平荷重一層間変形角関係 (一定軸力)

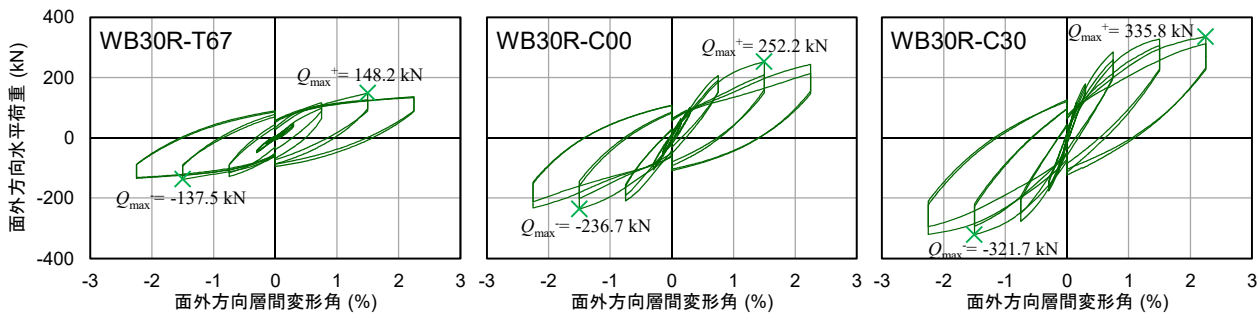


図-8 面外方向水平荷重一層間変形角関係 (一定軸力)

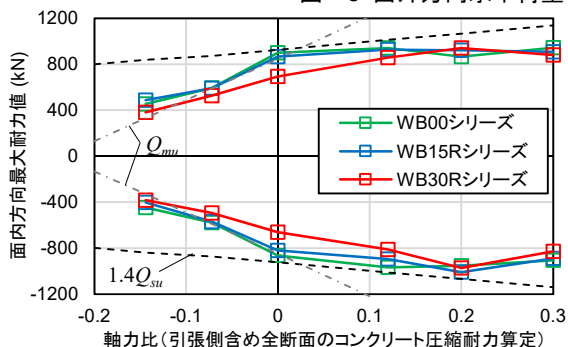


図-9 面内方向最大耐力-軸力比関係 (一定軸力)

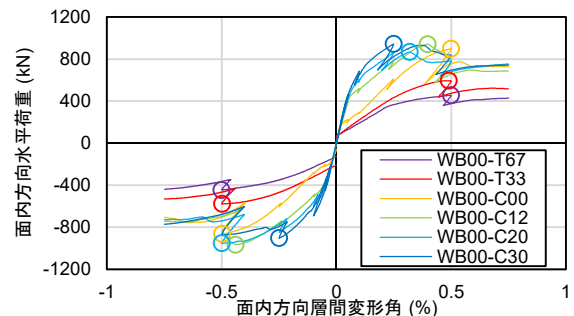


図-10 面内方向水平荷重一層間変形角関係包絡線 (WB00一定軸力)

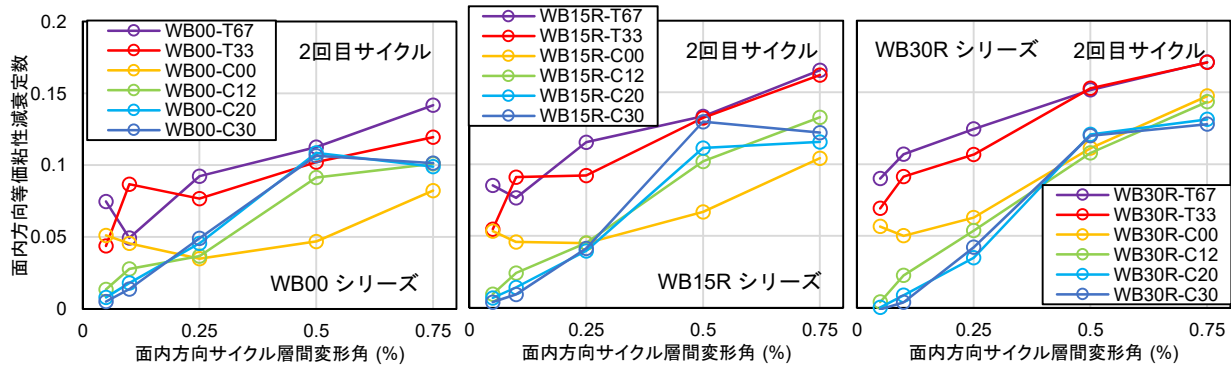


図-11 面内方向等価粘性減衰定数（一定軸力）

4.3 履歴エネルギー吸収

図-11 に一定軸力時の各載荷ステップ 2 回目サイクルの面内方向等価粘性減衰定数（以降 h_{eq} と表記）を示す。同一の面外変形倍率で比較すると、WB30R シリーズを除き、変形が進んだ場合に軸力 0 のケースが最小となり、引張、圧縮に関係なく軸力の絶対値が大きくなるほど h_{eq} が増加する傾向が見られた。4.2 節で示した Q_{mu} および $1.4Q_{su}$ の関係によれば、軸力比 0 のケースは曲げ破壊とせん断破壊の境界付近にあたるため、せん断余裕度と h_{eq} の関係は今後検討が必要である。一方、同一の軸力比で比較すると、WB00, WB15R, WB30R シリーズの順で h_{eq} の増加の傾向が確認できる。

5. 変動軸力下での水平二方向載荷履歴

5.1 解析結果概要

変動軸力の解析結果例として、WB30R-C30T33, WB30R-C30T67 の面内方向および面外方向水平荷重一層間変形角関係を図-12および図-13にそれぞれ示す。面内方向変形が負側ピークするとき、軸力が引張から圧縮へと転じるため、図-12中に示す矢印の方向に面内方向耐力が増加した。変動軸力のケースでは、引張軸力下で

コンクリートに発生したひび割れによって、 $R_s=0.25\%$ サイクルまではコンクリートの損傷の進行が一定軸力のケースよりも早く、面内方向正載荷時の耐力が一定軸力の場合に比べて小さくなった。なお、すべての変動軸力解析ケースにおいて、 $R_s=0.25\%$ サイクル以降の面内方向正載荷時には、軸力比は目標値の 0.30 で一定であり、一定軸力（軸力比 0.30）の場合と軸力条件は一致した。一方、 $R_s=0.50\%$ サイクルでは、一定軸力のケースの方が、負載荷時に圧縮側となる側柱の柱脚におけるコンクリートの損傷が早期に進展し、変動軸力のケースに比べて早期に面内方向耐力の大きな低下が見られた。面外方向では一定軸力と同様に、正負両方向で曲げ挙動が卓越していた。

5.2 最大耐力点

表-5 に変動軸力解析ケースの $R_s=0.25\%$ 1 回目サイクルおよび載荷全体での面内方向最大耐力を示す。また、一定軸力（軸力比 0.30）の WB15R-C30 および WB30R-C30, 一定軸力（軸力比 0.12）かつ面内方向のみ載荷した WB00-C12 の結果も、比較のために表中に併せて示した。なお、設計時には、一般的に検討を行う面内方向と直交する面外方向の変形に伴う変動軸力は考慮しないと考

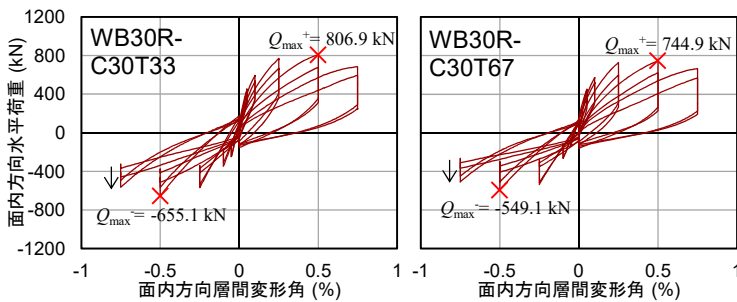


図-12 面内方向水平荷重一層間変形角関係（変動軸力）

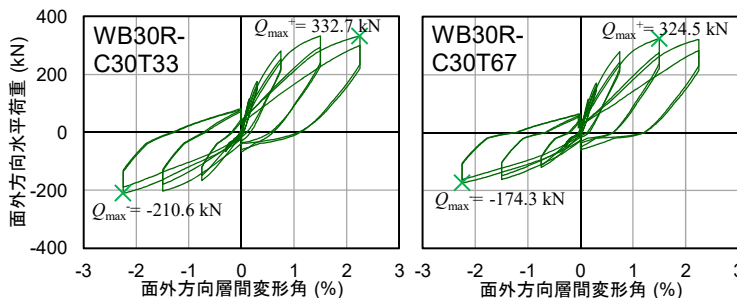


図-13 面外方向水平荷重一層間変形角関係（変動軸力）

表-5 面内方向最大耐力（変動軸力）

解析ケース	0.25% 1 回目		全サイクル		
	最大耐力 (kN)	比*	最大耐力 (kN)	比*	
WB00-C12	784.0	—	940.8	—	
WB 15R	C30	908.0	—	908.0	—
	C30T33	872.2	0.96 (1.11)	945.2	1.04 (1.00)
	C30T67	796.7	0.88 (1.02)	838.6	0.92 (0.89)
WB 30R	C30	878.5	—	878.5	—
	C30T33	769.2	0.88 (0.98)	806.9	0.92 (0.86)
	C30T67	728.0	0.83 (0.93)	744.9	0.85 (0.79)

※上段：一定軸力（軸力比 0.30）の場合に対する比
下段：WB00-C12 に対する比

られるため、ここでは軸力を、変動軸力解析ケースの載荷開始時の軸力比 0.12 で一定軸力とした WB00-C12 も比較対象とした。

一定軸力（軸力比 0.30）のケースと比較すると、負側の引張軸力が大きくなるにつれて、 $R_x=0.25\%$ サイクルでの面内方向最大耐力が低下した。これは、変動軸力下で引張軸力を経験することにより、コンクリートの損傷が早期に進展したため、また鉄筋の降伏状況が変化したためだと考えられる。また、載荷全体の最大耐力で比較しても、WB15R-C30T33を除き負側の引張軸力の増加に伴って面内方向最大耐力が同様に低下した。なお、 $R_x=0.25\%$ サイクルに比べて最大耐力の低下率が小さくなるのは、一定軸力のケースのほうが早期に急激な耐力低下をしており、変動軸力のケースの方がより大きな変形角で高い最大耐力を示したためだと考えられる。

WB00-C12 との比較では、面外変形とそれに伴う変動軸力によって、面内方向最大耐力が最大で21%低下した。低下の割合は面外変形倍率が大きいケースでは増加する傾向にある。4章に示した一定軸力下での面外変形倍率による耐力低下の傾向は、変動軸力下でも同様であった。以上の結果から、建物形状等を考慮した場合に、耐震壁に作用する面外方向変形や変動軸力が大きくなると考えられる場合には、耐震壁が通常期待される耐力を発揮できない可能性が高く、今後適切な評価方法を構築する必要がある。

6. まとめ

本研究では、変動軸力を含む様々な軸力条件が水平二方向載荷時を受ける耐震壁の構造性能に及ぼす影響の検討を行うことを目的とし、有限要素解析を用い、過去の実験試験体による解析手法の検証を行った後、パラメトリックスタディを行った。以下に本研究から得られた主な知見を示す。

- 1) 軸力比 0.20 未満の一定軸力では、面内方向の曲げ終局耐力計算値 (Q_{mu}) とせん断終局耐力計算値を 1.4 倍した値 ($1.4 Q_{su}$) のいずれか小さい方の値と水平一方向載荷時の面内方向最大耐力が概ね一致した。
- 2) 軸力比 0.20 以上の一定軸力では、圧縮軸力が増加しても最大耐力が頭打ちまたは減少した。また、最大耐力時層間変形角が小さくなった。
- 3) いずれの一定軸力ケースにおいても、面外変形倍率の増加と変形量の増加に伴い、面内方向の等価粘性減衰定数は増加した。
- 4) 変動軸力下で引張軸力を経験した場合、引張軸力の大きさに応じて面内方向耐力が減少した。
- 5) 軸力比 0.20 で一定軸力の場合を除き、変動軸力を含めたすべての軸力条件において、面外方向変位が

大きい解析ケースの方が面内方向最大耐力は小さくなる傾向が確認された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H01586 の助成を受けたものです。また、解析にあたり大林組・米澤健次氏からご助言いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 井戸裕勇樹, 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, 第 735 号, pp.683-692, 2017
- 2) 佐藤充晴, 壁谷澤寿海, 金裕錫, 福山洋: 2 方向水平力を受ける RC 造耐震壁に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012
- 3) 溝口光男, 荒井康幸, 坂本亨: 引張軸力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002
- 4) 向井智久ほか: 実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証, 建築研究資料第 175 号, 2016.11
- 5) FINAL: コンクリート構造物非線形 FEM 解析プログラム: <http://www.engineering-eye.com/FINAL/> (閲覧日: 2019 年 1 月 13 日)
- 6) 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, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 7) H. Nakamura, T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 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, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 9) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 10) Ciampi, V, et al.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982
- 11) ACI committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14), 2014
- 12) 国土技術政策総合研究所ほか監修: 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6