

# 論文 高圧縮変動軸力を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向加力実験

山田 諒\*1・谷 昌典\*2・西山 峰広\*3

**要旨**：本研究では、高圧縮変動軸力を受ける耐震壁において、面外方向変形量が耐力に及ぼす影響を検討するために、30%スケールの試験体2体を作製し载荷実験を行った。既往の研究において指摘されている、面外方向変形量の増加による面内方向耐力の減少傾向とは異なり、面内方向耐力には大きな差が見られなかった。断面解析の結果、既往研究の試験体に比べ軸圧縮力が大きいため、面外方向変形量により側柱主筋の降伏状況に差が生じにくい試験体であったと推察された。

**キーワード**：耐震壁，水平二方向载荷，高圧縮軸力，変動軸力，断面解析

## 1. はじめに

地震時、鉄筋コンクリート造建物内の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、水平二方向载荷に加え、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。このような背景より、過去

に著者らは変動軸力を含む様々な軸力条件が、水平二方向载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FEMによるパラメトリックスタディを行った5)。本研究では、面内方向加力のみではせん断破壊する耐震壁の载荷実験を行い、高圧縮変動軸力下で面外方向変形量が耐力と変形性能に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体は2体製作した。文献1)の試験体を含め、寸法・配筋は全試験体で共通であり、実大30%相当の縮小試験

表-1 試験体概要

部材	寸法(mm)	配筋		種別	鉄筋比(%)	
		主筋	10-D16			
側柱	250×250	せん断補強筋	面内	4-S6@75	SD345	3.18
		面外	6-S6@75	KSS785	0.68	
			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

試験体	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	ヤング係数* (GPa)
WB15-C20T00	23.0	2.49	20.8
WB30-C20T00	24.5	2.60	21.1
文献1)	28.9	2.41	24.6

\*  $f'_c/3$  割線剛性

(b)鉄筋

	D6	D16	S6
降伏強度(MPa)	474.1	381.0	866.9*
引張強度(MPa)	536.1	549.7	979.7
ヤング係数(GPa)	198.2	185.6	194.1

\*0.2%オフセット降伏強度

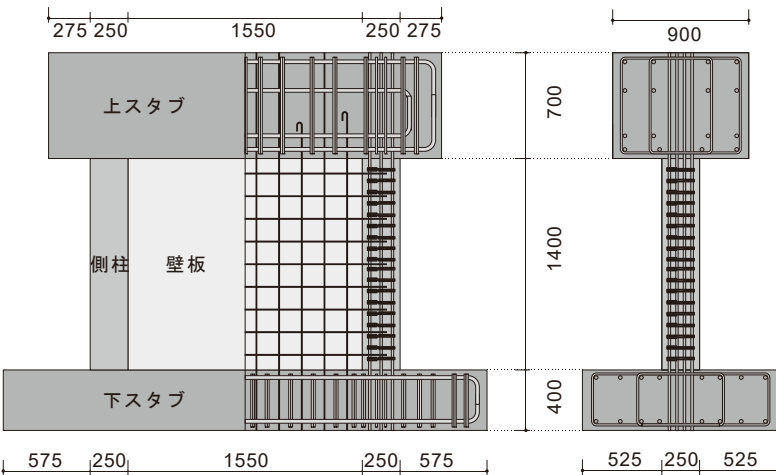


図-1 試験体図及び配筋図 (単位: mm)

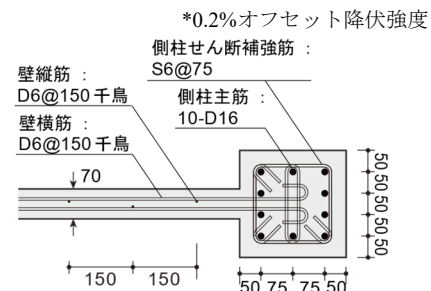


図-2 試験区間断面図 (単位: mm)

\*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 (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 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)

体である。面内方向ではせん断破壊，面外方向では曲げ降伏が先行するよう設計されている。図-1 に試験体図および配筋図を，図-2 に試験区間断面図を，表-1 に断面寸法と配筋の詳細をそれぞれ示す。詳細な設計方針については文献 1) を参照されたい。本実験の試験区間に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2 に示す。コンクリートは目標強度を 29MPa とした。参考として文献 1) の試験体の値を併せて示す。

下スタブのコンクリートを打設し，下スタブ上面の打ち継ぎ面に金属製ブラシで目荒らしを行った後に，後日，試験区間と上スタブのコンクリートを打設した。

## 2.2 実験変数

本研究では実験変数を面外変形倍率とした。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である。試験体名称は「WB (面外変形倍率) - (目標最大軸力比) (目標最小軸力比)」と定義した。なお，軸力比は，側柱を含めた耐震壁の全断面積とコンクリート実圧縮強度の積に対する軸力の比とする。試験体一覧を表-3 に示す。表中には材料実強度を用いて算出したせん断余裕度を併せて示す。各耐力算出には文献 6) を用いた。面外方向曲げ終局耐力は壁板の寄与を無視し，柱 2 本分の曲げ終局モーメントを文献 6) に基づき算出し，反曲点高さ (700mm) で除すことにより算定した。面外方向せん断終局耐力も壁板の寄与を無視し，柱 2 本分のせん断耐力である。

## 2.3 荷重履歴

水平二方向荷重履歴の概要を図-3 に示す。まず試験体を面外方向に加力し，所定の層間変形角 (図-3 中の [1]) に達した後，その面外方向変位を維持したまま面内

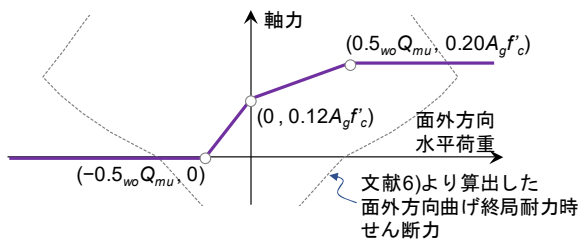


図-4 軸力荷重履歴

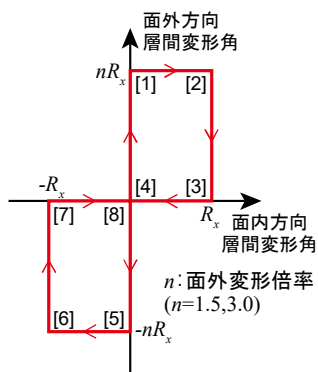


図-3 水平二方向荷重履歴

方向に加力を行った。所定の層間変形角 ([2]) 到達後は，面外，面内の順に層間変形角を 0 に戻し ([3], [4])，続けて負方向でも同様の荷重を行った ([5]→[8])。図-3 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  $R_x=0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 2.0\%$  の各ステップで 2 サイクルずつ荷重を行った。

軸力の荷重履歴を図-4 に示す。図中  $A_g$  は試験体全断面積を， $w_oQ_{mu}$  は各軸力における面外方向曲げ終局耐力時せん断力を表す。短辺方向が連層耐震壁，長辺方向が柱梁架構の建物を想定した場合，長辺の柱梁架構に水平荷重が作用すると，梁のせん断力が増減し，短辺の耐震壁に作用する軸力は変動する。したがって，本実験では軸力を面外方向水平荷重に応じて変動させた。面外方向水平荷重が 0 の時点での軸力を  $0.12A_gf_c$  とし，圧縮側と引張側の目標の軸力における面外方向曲げ終局耐力時せん断力の 0.5 倍の面外方向荷重で目標の軸力に到達するように軸力を変動させた。また，面外方向正側加力時に軸力を増加，負側加力時に軸力を減少させた。

## 2.4 荷重装置

図-5 に荷重装置図を示す。軸力および面外方向水平力は，試験体の上スタブに PC 鋼棒により緊結した荷重用スタブを介して，それぞれ 1000kN ジャッキ 2 本で試験体に作用させた。また，面内方向水平力は試験体の上スタブ両側面に PC 鋼棒により緊結した鋼製治具を介して，2000kN ジャッキ 2 本で試験体に作用させた。

2.3 節で示した想定建物の構造形式より，面内方向は片持ち荷重，面外方向は鉛直ジャッキの制御により上下スタブの平行を保つことで逆対称曲げ荷重とした。また，面外方向ジャッキにより，試験体のねじれ変形が発生しないように制御した。

表-3 試験体一覧

試験体	面外変形倍率	せん断余裕度			
		面内方向		面外方向	
		正側	負側	正側	負側
WB15-C20T00	1.5	0.48	0.69	1.71	2.54
WB30-C20T00	3.0	0.48	0.71	1.70	2.56

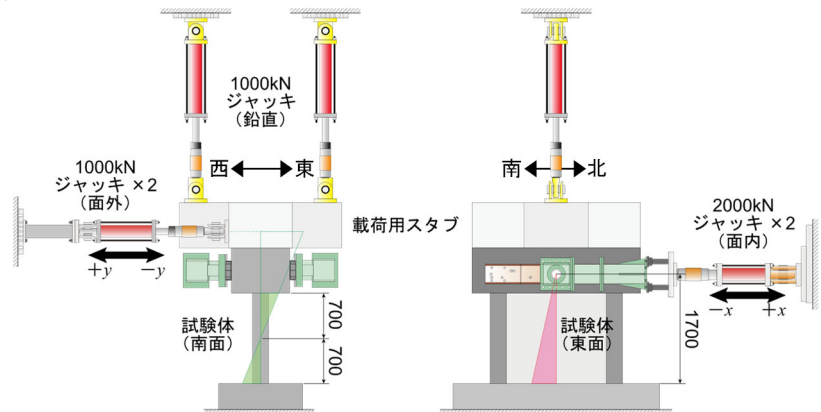


図-5 荷重装置 (単位: mm)

## 2.5 計測方法

面内方向および面外方向の層間変形角は、それぞれ試験体四隅に取り付けた4つの変位計から得た上下スタブ間の相対水平変位の平均値を試験区間高さ(1400mm)で除して算出した。鉄筋にはひずみゲージを貼り付け、ひずみを計測した。また、試験体に作用する荷重は各ジャッキに接続したロードセルにより計測した。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

図-6に $R_x=0.50\%$ サイクル終了時のひび割れ図を、図-7に載荷終了時の損傷状況をそれぞれ示す。図-6中の緑線は図-3中の[1]点において、青線は[2], [3]点において、橙線は[5]点において、赤線は[6], [7]点においてそれぞれ発生したひび割れを、灰色の部分は剥離箇所を、黒色の部分は剥落箇所を示す。

#### (1) WB15-C20T00

$R_x=0.05\%$  1回目サイクルにおいて、正負側ともに壁板にせん断ひび割れが発生した。曲げひび割れは、正側では同サイクル面内方向加力時に、軸力の小さい負側では面外方向加力時に発生した。その後のサイクルでは各ひび割れが発生および進展し、 $R_x=0.50\%$  1回目正側サイクルにおいて、側柱脚部および頭部、壁板内においてコンクリートの圧壊の兆候が見られた。また、このサイクルより柱脚部においてもせん断ひび割れが顕著に増加した。 $R_x=0.75\%$  1回目正側サイクルにおいて、壁板で圧壊の兆

候が見られた部分において剥離、剥落が発生した。また、負側においても剥離、剥落が発生したが、正側と比べ損傷は軽微であった。その後、壁横筋の破断を伴いながら壁板および側柱の損傷が進展し、 $R_x=2.00\%$  1回目サイクルの載荷終了時点で軸崩壊の恐れがあったため、載荷を終了した。

#### (2) WB30-C20T00

WB15-C20T00と同様に $R_x=0.05\%$  1回目サイクルにおいて、正負側ともに壁板にせん断ひび割れが発生した。 $R_x=0.25\%$  1回目正側サイクルにおいて、側柱脚部および頭部にコンクリートの圧壊の兆候が見られた。正側に関しては、 $R_x=0.50\%$  サイクルにおいて壁板内コンクリートに圧壊の兆候が見られ、 $R_x=0.75\%$  サイクルにおいて剥離、剥落が発生した。一方、負側に関しては $R_x=1.00\%$  サイクルにおいて新たに支配的なせん断ひび割れが発生するまで、著しい剥離、剥落は見られなかった。これは、 $R_x=1.00\%$  サイクルまでに発生したせん断ひび割れ(図中、破線で囲った辺り)の角度が非常に浅く、ひび割れに沿って滑ったためと考えられる。なお、脚部付近でひび割れの角度が浅くなる原因として、壁板が面外方向変形により、上下方向の引張応力を受けたことが考えられる。同様の理由により、西面では頭部付近で、浅い角度のひび割れが発生した。その後、壁横筋の破断を伴いながら壁板が大きく損傷し、南側上部と北側下部のコンクリートが完全に剥落したことにより変形が集中した。これにより、 $R_x=2.00\%$  サイクル[6]→[7]の面外方向加力中に軸力

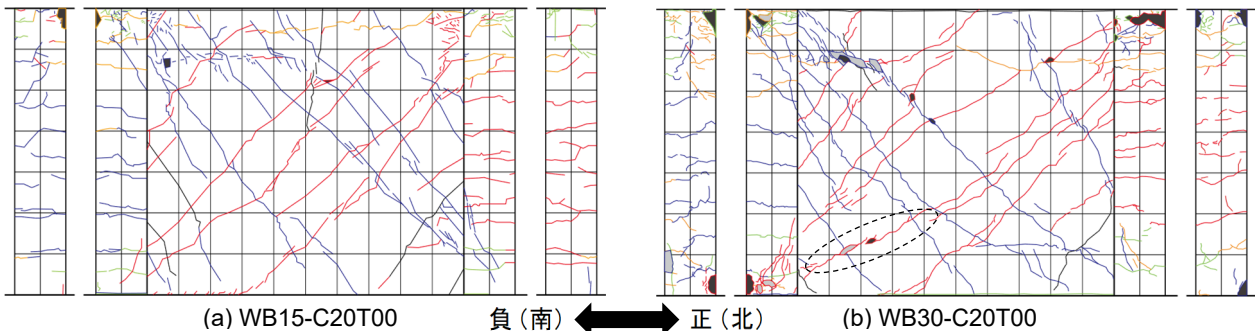


図-6 ひび割れ図 ( $R_x=0.50\%$ サイクル終了時、それぞれ左から南・東・北面)

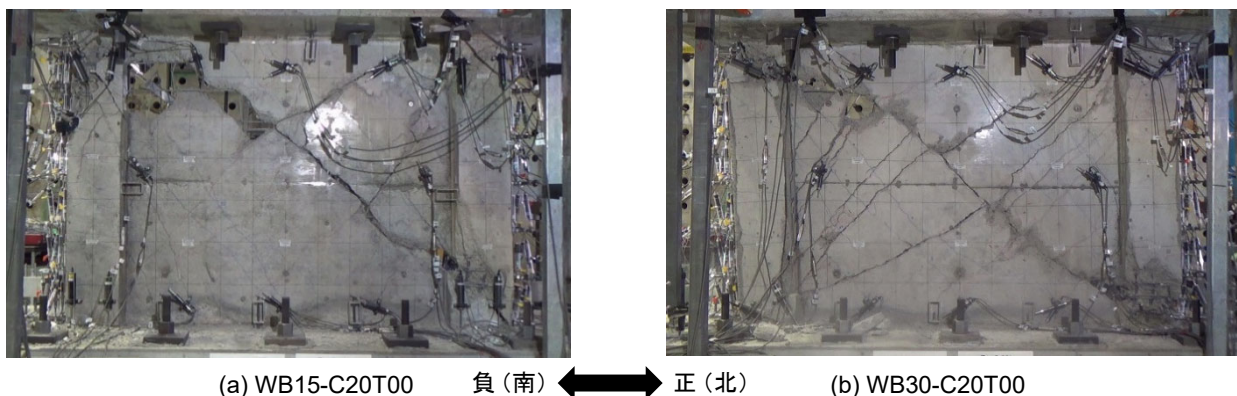


図-7 損傷状況 (載荷終了時、試験体東面より撮影)

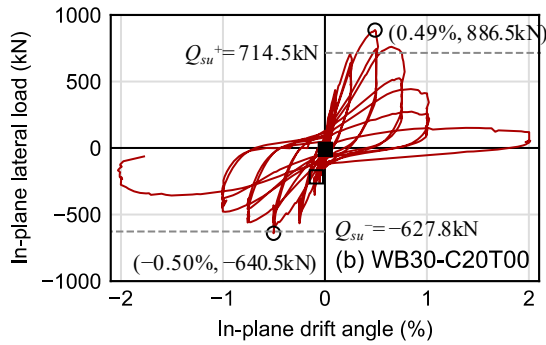
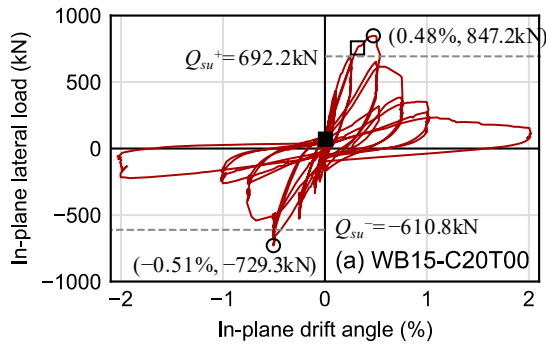


図-8 面内方向水平荷重－面内方向層間変形角関係

保持限界となったため、荷重を終了した。

### 3.2 水平荷重－層間変形角関係

図-8 および図-9 に各試験体の面内・面外方向それぞれの水平荷重－層間変形角関係を示す。図中、○印で示した点は、正負各方向の最大耐力点、□印および■印で示した点は、柱主筋がいずれかの計測箇所において最初に、それぞれ引張降伏および圧縮降伏した点である。図中の破線は面内方向については広沢 mean 式<sup>9)</sup>で算出した耐震壁のせん断終局耐力の計算値を、面外方向については柱 2 本分として求めた曲げ終局耐力<sup>9)</sup>時せん断力の計算値をそれぞれ示す。ただし、正負それぞれの計算値は目標軸力を用いて算出し、面外方向の曲げ終局耐力計算値については目標軸力での  $P-A$  効果による見かけの耐力低下を含む。

両試験体ともに最初の圧縮降伏は引張降伏に先行し、面外方向層間変形角  $R_y=0.75\%$  サイクル正側時、南柱南東隅頭部において発生した。一方で最初の引張降伏は WB15-C20T00 では圧縮降伏の直後に南柱北西隅頭部において、WB30-C20T00 では圧縮降伏と同サイクルの負側において北柱南西隅脚部において発生した。

#### (1) 面内方向

正側に関しては、 $R_x=0.50\%$  サイクルにおいて面内最大耐力を示すまで、試験体間に違いは見られなかった。一方で面内最大耐力点以降の耐力低下に関しては WB15-C20T00 の方が著しかった。これは前節でも示したように、WB30-C20T00 で支配的であったせん断ひび割れの角度が浅く、そのひび割れに沿って壁板が滑ったことにより、脆性的な壁板の破壊が軽減されたためと考えられる。

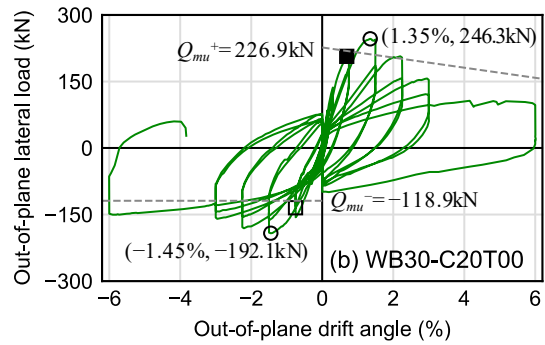
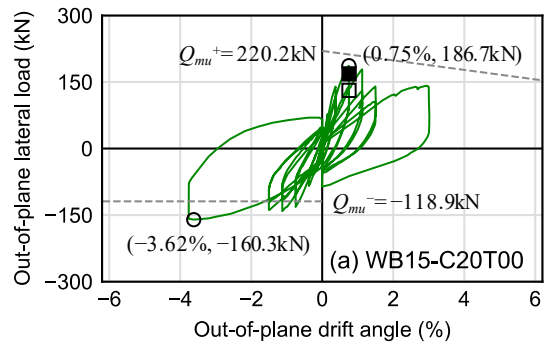


図-9 面外方向水平荷重－面外方向層間変形角関係

負側においては、面内最大耐力を示した  $R_x=0.50\%$  サイクルまでは、面内方向変形がピークの状態、面外荷重の除荷により軸力が圧縮方向に増加するため、面内荷重の増加が見られた。また、軸力が小さいことにより、載荷時の履歴性状が正側に比べて若干スリップ形状となった。負側も正側と同様に WB15-C20T00 の方が、面内最大耐力点以降の耐力低下が著しかった。

#### (2) 面外方向

両試験体において剛性に大きな差は見られないが、面内方向において、せん断ひび割れが側柱にまで進展し始める  $R_x=0.50\%$  サイクルに対応する層間変形角 (WB15-C20T00 では  $R_y=0.75\%$ 、WB30-C20T00 では  $R_y=1.50\%$ ) 以降では耐力が低下した。これによって WB15-C20T00 の面外方向最大耐力は WB30-C20T00 より小さくなり、正側では計算値を下回る結果となった。なお、WB15-C20T00 では  $R_x=2.0\%$  1 回目サイクル負側において、変位計の不調により目標の  $R_y=3.0\%$  を大きく上回る変形 ( $R_y=3.7\%$  程度) が生じた。

### 3.3 最大耐力

表-4 に実験結果より得られた各試験体の最大耐力と限界変形角を示す。表中には、面内方向ではせん断終局耐力計算値、面外方向では曲げ終局耐力時せん断力計算値を併せて示す。なお、面外方向の最大耐力実験値に関しては、曲げ終局耐力計算値との比較のために  $P-A$  効果による付加曲げを加算した値を示している。限界変形角は最大耐力の 80% まで耐力が低下した点での層間変形角としている。また、表中、最大耐力の括弧内の値は最大耐力を試験体全断面積で除したせん断応力度をそれぞれ

表-4 最大耐力および限界変形角

試験体		面内方向				面外方向		
		最大耐力			限界変形角 (%)	最大耐力		
		実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値		実験値* (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値
WB15-C20T00	正	847.2 (0.158)	692.2 (0.129)	1.22	0.54	202.8 (0.0378)	220.2 (0.0410)	0.92
	負	-729.3 (-0.136)	-610.8 (-0.114)	1.19	-0.73	-160.3 (-0.0298)	-118.9 (-0.0221)	1.35
WB30-C20T00	正	886.5 (0.155)	714.5 (0.125)	1.24	0.75	277.2 (0.0485)	226.9 (0.0397)	1.22
	負	-640.5 (-0.112)	-627.8 (-0.110)	1.02	-0.75	-192.1 (-0.0336)	-118.9 (-0.0208)	1.62

\*P-A 効果による付加曲げ分を含む

のコンクリート圧縮強度で除して基準化した値を示す。面内方向の最大耐力は両試験体、正負ともに広沢 mean 式による計算値を上回った。ただし、負側面内方向最大耐力時において、軸力は目標軸力比 0 とならず圧縮軸力を受けていた。目標最小軸力下で観測した最大耐力に関しては、WB30-C20T00 では-590.4kN となり広沢 mean 式の値を下回った。一方で、面外方向の最大耐力は、WB15-C20T00 の正側において計算値を下回る結果となった。これは前節でも示したように、面内方向载荷による柱の損傷が原因だと考えられる。

一方で、面内方向最大耐力をコンクリート圧縮強度で基準化したせん断応力度の最大値で両試験体を比較すると、WB30-C20T00 の方が 2.8%低い値となり、既往の研究<sup>7)</sup>で示された面外方向変形の影響 (10.3%) に比べれば軽微であった。文献 1) では面外変形倍率が大きくなることにより、面内方向最大耐力到達以前に引張降伏した側柱主筋の割合が大きくなったが、本実験では圧縮軸力が大きく、側柱主筋の引張降伏が抑制され、最大耐力点での側柱の引張降伏状態が面外変形倍率の大小によってあまり変化しなかった。これにより、文献 7) において示されているような、壁板に対する側柱の拘束に大きな差がなく、最大耐力が大きく変化しなかったと考えられる。

また、WB30-C20T00 の方が限界変形角が大きくなった。これは文献 1) の試験体の傾向と一致する。

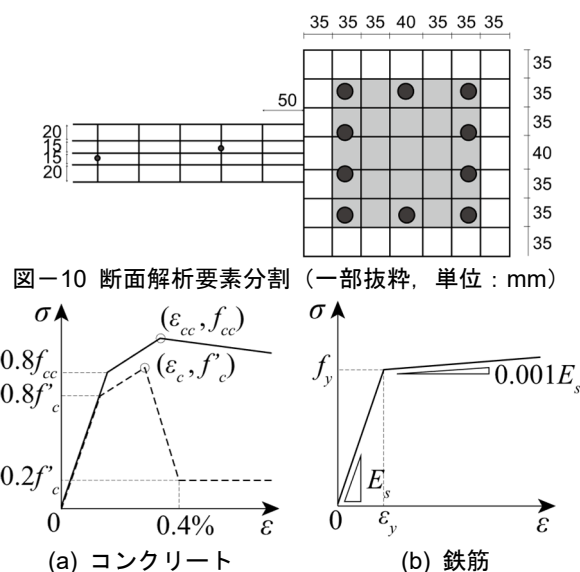


図-11 応力-ひずみ関係概形

#### 4. 側柱主筋に対する面外方向変形の影響の検討

##### 4.1 解析概要

図-4 に示したように、本実験では壁板を無視した場合の目標最大軸力比が釣合軸力比を超えている。よって、面外方向変形による側柱の主筋降伏やコンクリート圧壊等への影響の程度が文献 1) の場合と異なっていたと考えられる。このような高軸力下で、面外方向変形が側柱主筋の降伏状況に及ぼす影響について検討するために、面外方向载荷時の断面解析を行った。また、前述の計算値では過小評価となった面外曲げ耐力についても検討した。

本検討では、壁板を含む壁ありモデルと壁板を無視した壁なしモデルの 2 つのモデルで解析した。図-10 に壁ありモデルの断面要素分割を示す。図中、灰色の部分はコアコンクリートとしてモデル化した。また、図-11 にコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。図中、実線はコアコンクリートを、破線はカバーコンクリートをそれぞれ示す。最大強度の 0.8 倍の応力まで材料試験から得られたヤング係数で線形弾性とし、その後、NewRC モデル<sup>8), 9)</sup>をもとに算出した最大強度点を指向した後、コアコンクリートでは、ひずみ 1% 時の NewRC モデルによる応力点を、カバーコンクリートでは、ひず

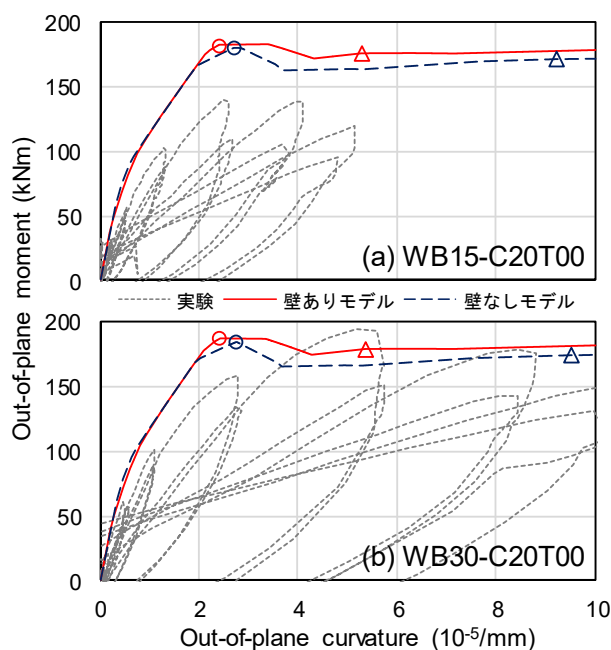


図-12 断面解析結果

み 0.4%で  $0.2f'_c$  となる点をそれぞれ最終折れ点とし、それ以降のひずみでは応力一定とした。解析では軸力比 0.20 の一定軸力とした。

#### 4.2 解析結果

図-12 に材料実強度を用いて解析を行った結果を示す。図中、赤線は壁ありモデル、青線は壁なしモデルそれぞれの解析結果である。灰色の点線は、実験において、南北の側柱の柱頭および柱脚それぞれ 250mm 区間、計 4 箇所計測した曲率の平均値と  $P-M$  効果を考慮した面外方向モーメントの関係である。図中○印は 1 段目主筋の引張降伏、△印は 2 段目の主筋の引張降伏を示す。

WB30-C20T00 では、いずれのモデルも実験最大耐力を概ね評価できた。一方で、WB15-C20T00 では、解析による最大耐力に比べて実験最大耐力が 20~22%小さく、実験において本来の曲げ耐力を発揮しなかったとみられる。また、壁の有無が最大耐力および 1 段目主筋降伏時曲率に及ぼす影響は小さい一方で、2 段目主筋降伏時曲率には大きく影響することが分かった。

文献 1) と本実験の試験体を比較するために、文献 1) の試験体の材料強度、軸力条件を適用した同様のモデルで同様の解析を行った。解析結果より得られた側柱主筋引張降伏時曲率を表-5 に示す。文献 1) の試験体では、壁の有無に関わらず、本実験の試験体に比べて主筋の降伏が早期に発生した。本実験の試験体では面内方向のせん断耐力に影響を及ぼすほど、面外方向変形により側柱主筋の降伏状況が変化しなかったと考えられる。側柱主筋の降伏状況が面内方向のせん断耐力に及ぼす影響については今後さらなる検討を行う必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では軸力変動を受けた場合において面外方向変形量が耐力に及ぼす影響について検討を行うため、耐震壁の載荷実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- コンクリートのひび割れや圧壊の性状に関しては最大耐力を示した  $R_c=0.50\%$  時点では大きな差は見られなかった。
- 面内方向最大耐力は正側負側ともに 2 試験体間で文献 1) で示されたような差は見られなかった。これは、文献 7) で示されている側柱の拘束に大きな差が生じなかったためだと考えられる。
- 面外方向最大耐力は正側負側ともに面外変形倍率の小さい試験体で大きい結果となった。これは面内方向変形によるせん断ひび割れ等が影響していると考えられる。
- 面内方向最大耐力到達点は 0.5%付近で差は見られなかったが、耐力が最大耐力の 80%まで低下した時点で

表-5 側柱主筋引張降伏時曲率 (単位:  $10^{-5}/\text{mm}$ )

試験体	壁ありモデル		壁なしモデル	
	1 段目	2 段目	1 段目	2 段目
WB15-C20T00	2.40	5.27	2.69	9.22
WB30-C20T00	2.42	5.37	2.74	9.51
文献 1)	1.94	3.87	1.99	4.56

ある限界変形角に関しては面外変形倍率の大きい試験体のほうが大きい結果となった。これは文献 1) の傾向と一致した。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H01586 の助成を受けたものです。本実験の遂行に当たり、灰孝小野田レミコン株式会社、京都大学技術職員野村昌弘氏には多大なるご協力を頂きました。また、横浜国立大学杉本訓祥准教授、国土技術政策総合研究所坂下雅信氏には様々なご助言を頂きました。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
- 5) 山田諒, 谷昌典, 井戸裕勇樹, 西山峰広: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, 2019
- 6) 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
- 7) 津田和明: 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断強度算定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 645 号, pp.2069-2075, 2009
- 8) 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
- 9) 田福勝, 崎野健治, 孫玉平: 拘束 RC 柱の曲げ圧縮性状に及ぼす断面ひずみ勾配の影響, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.43B, pp.191-198, 1997