

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01586

研究課題名（和文）3次元載荷を受ける耐震壁の耐力，変形性能および破壊性状解明と最適な設計手法の開発

研究課題名（英文）Clarification of load carrying capacity, deformability and failure mechanism of shear walls under 3D loading, and proposal of suitable design procedure

研究代表者

西山 峰広（Nishiyama, Minehiro）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：50183900

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は、水平2方向および鉛直方向外力を受ける耐震壁の耐力と変形性能の評価方法を提案したことである。耐震壁は強度と剛性が高く、建物の耐震性を支配する大きな構造要素である。建物に地震力が作用すると、その構成部材には様々な力が作用する。耐震壁には、面内および面外方向水平力、鉛直方向変動軸力が3次元的に作用する。このように複雑な力を受ける耐震壁を実務において設計する際には、一定軸力下での面内方向への設計のみが行われ、面外方向への変形の影響は無視されている。しかしながら、面外方向変形は面内方向せん断耐力を最大で2割程度低下させるという結果を実験的および数値解析的に示し、その評価方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震時、耐震壁には、面内および面外方向水平力、鉛直方向軸力が3次元的に作用する。このような実際の状況における耐震壁の耐力と変形性能評価はこれまでになされていなかった。これを実験的数値解析的に解明し、評価方法を提案した。また、現在の耐震設計においては、耐震壁を設計する際、一定軸力下での面内方向への設計のみが行われ、面外方向への変形が面内方向耐力を低下させることは無視されている。本研究では、面外方向変形は面内方向せん断耐力を最大で2割程度低下させるという結果を実験的および数値解析的に示し、その耐力評価方法を提案した。本評価法により、さらに安全な建物の設計が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Evaluation methods have been proposed for load carrying capacity and deformability of shear walls subjected to 3-dimensional loading. Shear walls have high load carrying capacity and stiffness, which dominate seismic performance of building structures. When earthquakes hit buildings, shear walls are subjected to 3-directional dynamic loading such as in-plane, out-of-plane and vertical axial loadings. In the current practical structural design of buildings shear walls are designed against in-plane loading with constant axial load. Deformation to out-of-plane direction is assumed not to affect the load capacity in the direction of in-plane loading. In the loading tests carried out in this study at most 20% reduction should be taken into consider in the capacity evaluation of shear walls subjected to multi-directional loading.

研究分野：コンクリート系構造学

キーワード：耐震 壁 せん断 破壊 二方向載荷 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造集合住宅では、桁行方向を柱梁骨組とし、スパン方向に耐震壁を設置することが多い。このため、地震時桁行方向への変形は、スパン方向の変形と比べて大きくなりやすい。スパン方向に配置された耐震壁は面外方向へ大きな変形を受けるとともに、面内方向で必要な水平抵抗力を発揮しなければならない。しかし、既往の実験では、耐震壁が面外へ変形を受けた場合に、面内耐力が低下することが指摘されている。例えば、井戸裕らが2015年に行った実験では、せん断破壊先行となるように設計された壁で、面内耐力が10～15%程度低下することが明らかになっている。それにもかかわらず、面外変形が耐震壁に与える影響については、現行の設計体系の中で考慮されていない。

立体的载荷を行った既往の研究には、地中壁を対象とした二方向载荷実験、二方向载荷が変形能力に与える影響を調べた実験、連層耐震壁が片足立ち状態で直交方向に繰り返し変形を受ける事例、高層RC造のコア壁の二方向加力時のせん断強度を調べた実験、面外方向の外力が耐震壁の耐力や変形性能に及ぼす影響を調べた実験がある。しかし、どのようなメカニズムにより耐力や変形性能の低下が生じるのかは十分に説明されておらず、定量的な検討もなされていない。

また、耐震壁の破壊モードは、曲げ破壊型、せん断破壊型、すべり破壊型に分類することができるが、面外方向では、曲げが支配的になるとしても、面内方向に関しては、曲げが支配的になる場合と、せん断が支配的になる場合がある。面外も面内も曲げが支配的になる場合に対しては、既往の研究があり、また、幾つかの解法が提案されている柱の二軸曲げと同様の評価ができるものと考えられる。これに対して、面外は曲げ、面内はせん断が支配的になる場合は、新たな評価法が必要になる。さらには、このような評価法を建物の設計にどのように組み入れるかも課題となる。面外変形に基づき、面内耐力を評価することになるため、建物主軸方向についてのみ検討するという従来の設計法とは異なる設計法が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、引張までを含めた軸力変動、壁脚部すべり破壊を含めた破壊モード、二方向载荷のような3次元载荷など、地震時に実際に建物中の耐震壁に起こり得る現象を幅広く考慮した、鉄筋コンクリート造耐震壁の地震時挙動予測を行うことである。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、軸力条件と面外方向変形量が耐力に及ぼす影響について検討する。さらには、これらの実験変数の影響を反映させることができる耐震壁の最適な設計法を、有限要素法を用いたパラメトリック数値解析結果も併せて検討し、提案する。

3. 研究の方法

2018年度には、これまでに蓄積された壁試験体に対する実験データに基づき、数値解析的な検討とともに、壁試験体の挙動追跡を行った。特に、過去に行った7体の壁試験体に対する二方向载荷試験を数値解析的に検討した。

これらの試験体は、せん断破壊するように設計され、最大耐力付近ではせん断破壊の様相を呈したが、最終的には、壁脚部でのすべりが顕著となった。このうち2015年に载荷試験が実施された3体については、せん断破壊するように設計し、設計通りにせん断破壊した。そこで、この

3体の試験体に対して行われた有限要素解析の結果と実験結果を比較し、有限要素解析のモデル化の妥当性を検証した後、有限要素解析によるパラメトリック解析を実施し、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及ぼす影響を検討した。

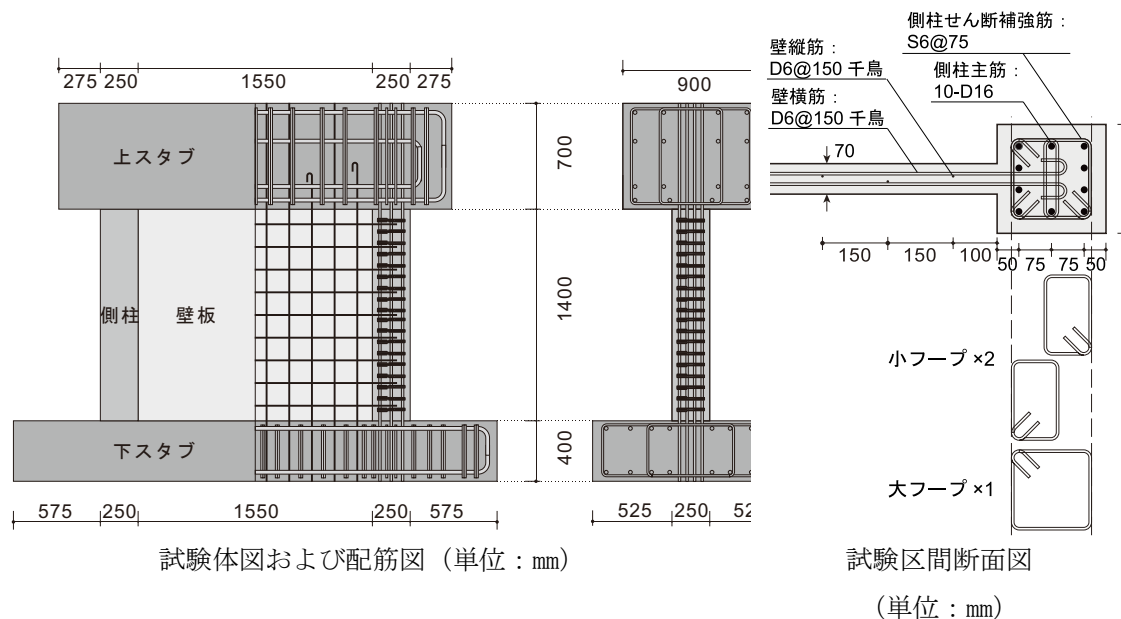
2018年度の検討に基づき、2019年度および2020年度に耐力壁試験体に対する载荷実験を実施した。試験体一覧を以下に示す。

試験体一覧

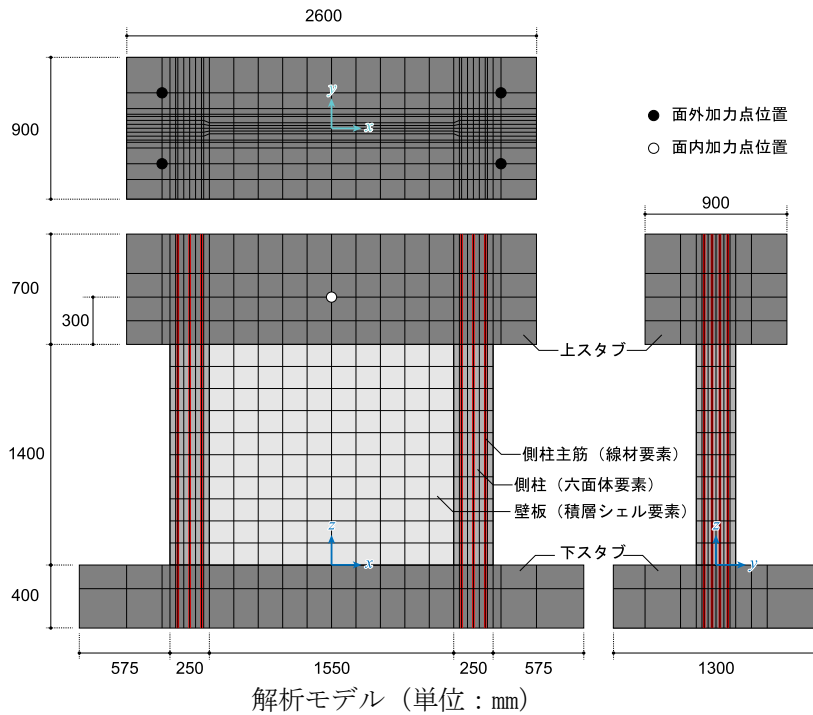
面外 変形倍率	軸力比			
	一定軸力		変動軸力	
	0.12	0.20	0~0.12~0.20	-0.33~0.12~ 0.20
0	WB00-C12	WB00-C20		
1.5	WB15-C12	WB15-C20	WB15-C20T00	WB15-C20T33
3.0	WB30-C12		WB30-C20T00	WB30-C20T33

本研究における試験体設計に反映された過去の試験体の位置付けを見るため、表には、2015年度に当研究室において井戸砦らが実施した3体の試験体 WB00-C12, WB15-C12, WB30-C12 も記載している。

試験体を下図に示す。寸法・配筋は全試験体で共通であり、実大30%相当の縮小試験体である。



さらには、有限要素解析コード「FINAL/V11」を用いて、実験試験体の挙動を追跡できるようなモデル化を行った。また、実験試験体では設定できなかった実験変数に対して数値解析的な知見が得られるように、パラメトリックスタディーを行った。解析モデルを下図に示す。上下スタブを含む試験体全体を三次元でモデル化した。上下スタブ、側柱のコンクリート要素は六面体要素（ソリッド要素）で、壁板については四辺形要素（積層シェル要素）でモデル化した。側柱主筋は線材要素で、側柱のせん断補強筋、壁縦横筋は埋め込み鉄筋要素としてモデル化した。側柱主筋の線材要素と側柱コンクリートの六面体要素は完全付着とした。上下スタブは、材料試験より得られたヤング係数で完全弾性要素とした。



4. 研究成果

得られた知見は以下の通りである。

載荷実験結果

- WB00-C20, WB30-C20T33 両試験体共に、 $R_s=0.50\%$ 1 回目サイクルの面内方向変形ピークにおいて面内方向最大耐力が確認された。WB30-C20T33 の面内方向正側最大耐力は WB00-C20 の面内方向最大耐力の 9 割程度であった。
- 変動軸力により引張軸力を受けた WB30-C20T33 試験体は、引張軸力下では脚部すべり変形が面内方向全体変形の 1 割程度発生していた。脚部すべり変形を含むせん断変形は、WB00-C20, WB30-C20T33 両試験体共に面内方向全体変形の 8 割程度であった。

一定軸力下における面内一方向加力時挙動の検討

- 実務設計において利用される広沢式では軸力の増加によって、せん断耐力が単純増加するとされているが、本実験では軸力比 0.12 の場合と比べ、軸力比 0.20 の場合の方が最大耐力が低くなり、傾向が一致しなかった。
- 軸力比 0.12 では見られなかった、最大耐力点以降の鉛直方向ひずみの圧縮側への増大が、軸力比 0.20 の場合には見られた。実験時の損傷状況や鉄筋の降伏状態からも、軸力比 0.12 の場合には見られなかった圧縮的損傷が軸力比 0.20 では発生していた。このことから、勅使川原らの研究で示されている「柱の圧壊を伴うせん断破壊」が軸力比 0.20 でのみ発生していたと考えられる。

一定軸力下における二方向加力時耐力の検討

- 本研究で実施した載荷実験結果と過去の実験結果およびそれに基づく解析結果により、軸力比 0.12 および 0.20 のいずれにおいても、面外変形倍率の増大に伴い面内方向最大耐力の低下が確認された。面内方向最大耐力の低下程度は、軸力比 0.12 と比べ軸力比 0.20 の方が緩やかであった。
- 耐震壁のせん断耐力評価法である津田の手法に基づき、新たな水平二方向加力時せん断耐力の評価法を提案した。本手法は、井戸裕らの手法とは全く異なる、より力学メカニズムに

基づいた方法である。提案手法では津田の手法における K_y , K_f を低減することによって水平二方向加力時のせん断耐力の低下を再現している。結果として、軸力比 0.12 および 0.20 のいずれにおいても高い精度で評価することができた。

変動軸力下における二方向加力時耐力の検討

- 実験結果では、コンクリートの材料強度に差異が見られたため、基準化せん断応力を用いたところ、軸力変動による、最大耐力を含む水平荷重の低下および、経験した最小軸力が引張側となった場合、水平荷重低下割合の増大が見られた。
- 材料特性値を統一した有限要素解析を行ったところ、軸力変動による面内方向最大耐力への影響は、面外方向変形によるそれと比べ非常に小さいことが明らかとなった。ただし、鉛直方向ひずみの推移から推定される損傷過程に関しては、軸力条件による差異が見られた。
- 新たに提案した水平二方向加力時せん断耐力評価手法を、変動軸力に対しても適用したところ、一定軸力の場合よりは若干ばらつきが大きいものの、 $-9\sim 0\%$ の範囲で評価することができた。

パラメトリックスタディによる各検討結果の適用範囲に関する検討

- 一定軸力下面内一方向加力時の破壊モードに関しては、配筋や壁形状が異なっても、パラメトリックスタディを行った範囲では、すべて実験と同様の傾向を示した。
- 新たに提案した水平二方向加力時せん断耐力評価手法は、一定軸力時、変動軸力時のいずれにおいても $\pm 10\%$ の範囲で、最大耐力を評価することができた。

まとめ

軸力の大きさによって破壊モードが変化する可能性があり、高圧縮軸力下では、通常のせん断破壊とは異なる破壊モードが発生することが明らかとなった。高圧縮軸力時においては、軸崩壊（軸力を支持できなくなる）の早期化の可能性があるため、今後のさらなる検討が必要である。特に、既往の研究で示された方法に基づき、本実験のような水平二方向加力や軸力変動を受ける場合にも適用可能な破壊モード評価法を検討する必要がある。

面外方向変形は面内方向せん断耐力の低下を引き起こし、最大で 8 割程度にまでせん断耐力が低下した。これは、軸力の大きさに関わらず発生することが新たに明らかとなった。建物中において耐力の大部分を負担する耐震壁のせん断耐力が低下することは、設計時に曲げ降伏と判定された部材がせん断破壊し、建物が想定された崩壊メカニズムとは異なる破壊となる可能性や、保有水平耐力の低下を引き起こす可能性がある。本研究では新たに水平二方向加力時せん断耐力評価手法を提案したが、それを用いた建物レベルでの検討を行うことで、より安全な建物の設計が可能となる。

軸力変動は面外方向変形と比べ、せん断耐力に及ぼす影響が軽微であることが明らかとなった。今後様々な試験体形状に対する検討を行うことで、軸力変動を考慮した設計の必要性の有無に関して検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山田諒, 谷昌典, 井戸裕勇樹, 西山峰広	4. 巻 41
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 439-444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山田諒, 谷昌典, 西山峰広	4. 巻 42
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 325-330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山田諒, 谷昌典, 西山峰広	4. 巻 59
2. 論文標題 水平二方向載荷経路がRC 造耐震壁の構造性能に及ぼす影響に関する解析的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集構造系	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 YAMADA Ryo
2. 発表標題 Analytical Study on Effect on Bi-directional Lateral Loading and Axial Loading on Structural Performance of R/C Shear Walls by Finite Element Analysis
3. 学会等名 The 21th Taiwan-Korea-Japan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Hsinchu Taiwan, 2019.12 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田諒
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2019（札幌）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田諒
2. 発表標題 水平二方向載荷経路がRC 造耐震壁の構造性能に及ぼす影響に関する解析的研究
3. 学会等名 2019年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田諒
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2020（広島）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山峰広
2. 発表標題 軸力条件の異なる鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向加力実験（その1：研究背景および実験概要）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須貝太郎
2. 発表標題 軸力条件の異なる鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向加力実験（その2：面外変形倍率1.5試験体の実験結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田諒
2. 発表標題 軸力条件の異なる鉄筋コンクリート造耐震壁の水平二方向加力実験（その3：面外変形倍率3.0試験体の実験結果および最大耐力の検討）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会（関東）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂下 雅信 (Sakashita Masanobu) (50456802)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官 (82115)	
研究分担者	谷 昌典 (Tani Masanori) (50533973)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	杉本 訓祥 (Sugimoto Kuniyoshi) (60758233)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	米澤 健次 (Yonezawa Kenji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関