

論文 水平2方向同時加力を受けるRC立体耐震壁の静的加力試験

渡辺 英義^{*1}・小野 英雄^{*2}・北田 義夫^{*3}・瀧口 克己^{*4}

要旨：水平2方向から同時に地震力を受けるRC立体耐震壁の弾塑性性状を明らかにすることを目的として、静的加力試験を実施した。試験パラメータは壁形状（ボックス壁，円筒壁）と加力パターン（十字加力，斜め十字加力，矩形加力，円周加力）である。試験の結果，ボックス壁と円筒壁では耐力－変形性状やせん断力軌跡の性状が異なること，最大耐力の試験結果は既往の評価式による計算値を半径とする円弧の耐力曲面上に分布すること，などが明らかとなった。

キーワード：耐震壁，2方向加力，加力パターン，せん断耐力，耐力曲面

1. はじめに

多方向加力を受けるRC部材の挙動は十分には明らかにされていない。本論文では，水平2方向から同時に地震力を受けるRC立体耐震壁の復元力特性を評価することを目的として実施した静的加力試験の概要と結果について報告し，多方向同時加力を受ける立体耐震壁のせん断耐力評価法などについて検討を行う。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表-1に，試験体形状を図-1に示す。試験体はボックス壁4体，円筒壁2体の6体であり，壁部の上下には十分な剛性を有する基礎スラブと加力スラブを設けている。パラメータは壁形状と後述する加力パターンである。壁厚75mm，壁内法高さ1000mm，壁筋比1.2%（D6-@70ダブル）は壁形状によらず共通とした。ボックス壁と円筒壁で壁全断面積が等しくなるように計画し，壁芯々間距離はボックス壁1500mm（シアスパン比0.80），円筒壁1910mm（シアスパン比0.63）とした。

加力時の壁部コンクリートの材料試験結果を表-2に示す。壁部コンクリートは目標圧縮強

度35MPaとし，粗骨材最大寸法10mmの豆砂利コンクリートを用いた。基礎スラブと加力スラブには呼び強度30MPaのレディーミクストコ

表-1 試験体一覧

壁形状・加力パターン	シアスパン比	壁部
ボックス壁・十字加力	0.80	壁厚75mm D6-@70 ダブル 壁筋比1.2%
ボックス壁・斜め十字加力		
ボックス壁・矩形加力		
ボックス壁・円周加力		
円筒壁・十字加力	0.63	
円筒壁・矩形加力		

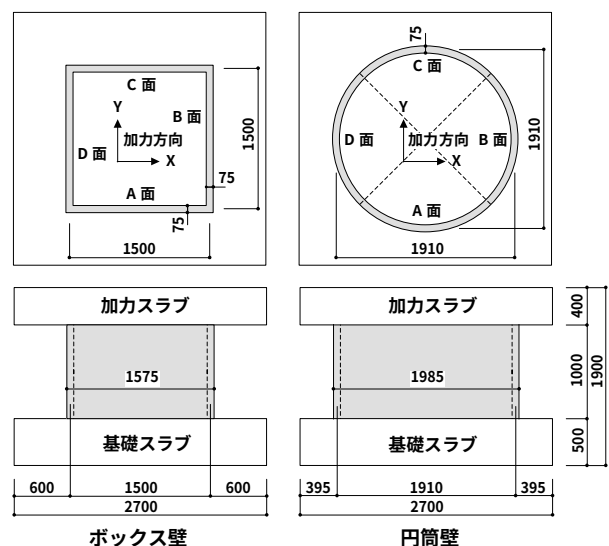


図-1 試験体形状

*1 大成建設(株) 技術センター建築技術研究所 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 設計本部原子力設計グループ 工修 (正会員)

*3 (財)原子力発電技術機構 耐震技術センター 工博

*4 東京工業大学大学院 情報環境学専攻 教授 工博 (正会員)

ンクリートを用いた。壁筋の材料特性を表-3に示す。壁筋には、降伏棚とSD345相当の強度を有するように、熱処理したものをを用いた。

2.2 加力・測定

加力方法を図-2に示す。X、Y各方向の水平力は、加力スラブに対向して取り付けた1MNアクチュエータにより加力し、試験体にねじれが生じないように500kN油圧ジャッキ2台によって偶力を作用させた。壁の軸力は、加力スラブ上部に設置した軸力分散ブロックおよびPC鋼棒を介して、300kN油圧ジャッキ4台により加えた。壁の軸応力度は、加力中常に目標値1.47MPaとなるように、定圧装置を用いて制御した。測定は全体変形、壁部鉛直方向変位、変形成分を分離するための鉛直方向区間変位、壁筋のひずみなどについて行った。

2.3 加力パターン

水平2方向同時加力時の性状を把握するため、図-3に示す4種類の加力パターンを計画した。十字加力により主軸直交方向の損傷による影響を、矩形加力により主軸直交方向の応力と損傷の影響を把握することができる。また、斜め十字加力、矩形加力、円周加力の結果を比較する

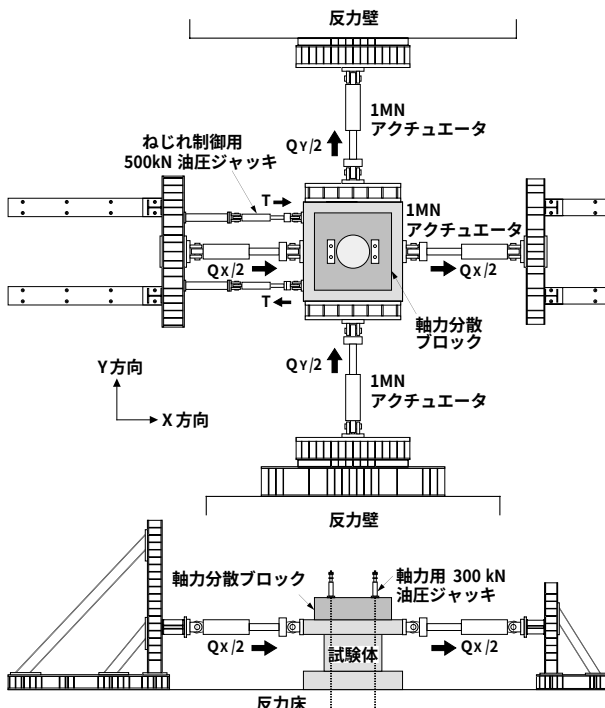


図-2 加力方法

ことによって载荷経路の影響を確認できる。

十字加力、斜め十字加力、矩形加力はX方向とY方向のピーク変形の比率を1.0:0.8とし、円周加力はピーク変形比率1.0:0.8の点を半径としている。図-3は $R_x=1.0 \times 10^{-3}$, $R_y=0.8 \times 10^{-3}$ の場合を代表として示しているが、各加力パターンとも $R_x=0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 \times 10^{-3}$ で2回ずつ繰り返す変位漸増载荷である。ボックス壁は4種類の加力パターンによって、円筒壁は十字加力と矩形加力によって試験を行った。

3. 試験結果

3.1 セン断力-全体変形角関係

各試験体のX方向とY方向のせん断力Q-全体変形角R関係を図-4~9に示す。各図中には、

表-2 壁部コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 σ_B (MPa)	ヤング係数 E (GPa)	ポアソン比
ボックス壁・十字加力	39.7	30.7	0.17
ボックス壁・斜め十字加力	34.9	32.0	0.19
ボックス壁・矩形加力	41.3	30.7	0.18
ボックス壁・円周加力	31.0	32.0	0.19
円筒壁・十字加力	31.8	32.2	0.18
円筒壁・矩形加力	34.3	31.9	0.20

表-3 壁筋の材料特性

	降伏強度 σ_y (MPa)	ヤング係数 E (GPa)	破断強度 σ_u (MPa)	伸び ϵ_u (%)
壁筋 (D6)	375	200	493	28.0

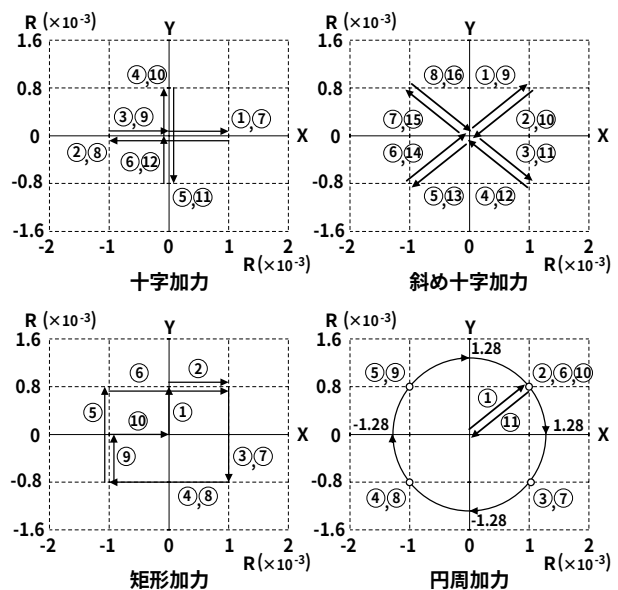


図-3 加力パターン

ひび割れ発生時、最大耐力時、XY 合力 $\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$ 最大時も示している。曲げおよびせん断ひび割れは、各試験体とも $R=0.5 \times 10^{-3}$ までの初期载荷時に発生した。以下に試験結果の概要を示す。

(1) ボックス壁・十字加力

最大耐力は $Q_x=1596\text{kN}$, $Q_y=-1325\text{kN}$ であった。最終サイクルは X 方向を $R_x=\pm 10.0 \times 10^{-3}$ で繰り返した後、Y 方向に押し切る計画であったが、試験では $R_x=-10.0 \times 10^{-3}$ を目標とした加力中に $R_x=-9.1 \times 10^{-3}$ で C 面がせん断すべり破壊し、耐力が急激に低下した。

(2) ボックス壁・斜め十字加力

最大耐力は $Q_x=1261\text{kN}$, $Q_y=-1034\text{kN}$ であった。

た。最終サイクルは $R_x:R_y=1.0:0.8$ の状態で正側に押し切る加力とした。最終サイクルでは、 $R_x=10.9 \times 10^{-3}$ で C 面のせん断ひび割れが大きく開口し、荷重が低下し始めた。その後、 $R_x=16.4 \times 10^{-3}$, $R_y=13.1 \times 10^{-3}$ で B 面にせん断すべり破壊が発生し、荷重が大きく低下した。

(3) ボックス壁・矩形加力

最大耐力は $Q_x=1376\text{kN}$, $Q_y=1381\text{kN}$ であった。最終サイクルは、Y 方向を $R_y=8.0 \times 10^{-3}$ で一定とし、X 方向正側に押し切る加力とした。最終サイクルでは $R_x=11.1 \times 10^{-3}$ で C 面が、 $R_x=14.6 \times 10^{-3}$ で A 面がせん断すべり破壊し、急激な耐力低下が発生した。

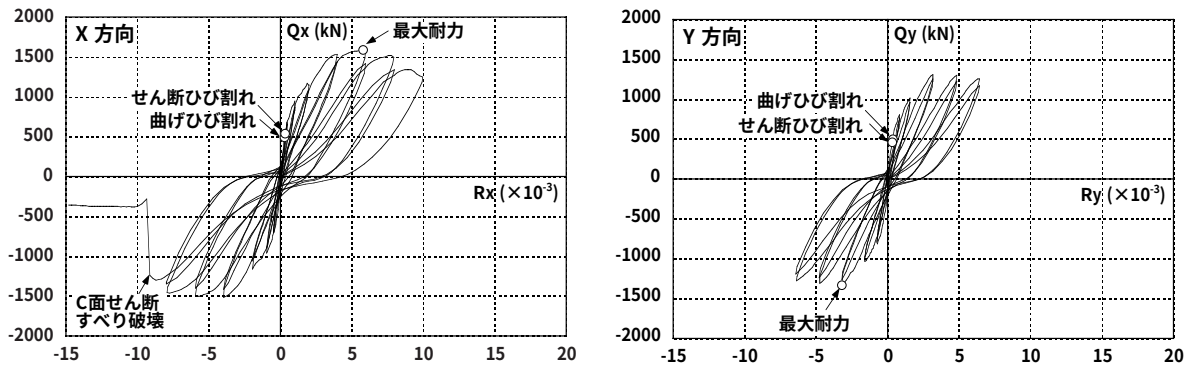


図-4 セン断力-全体変形角関係 (ボックス壁・十字加力)

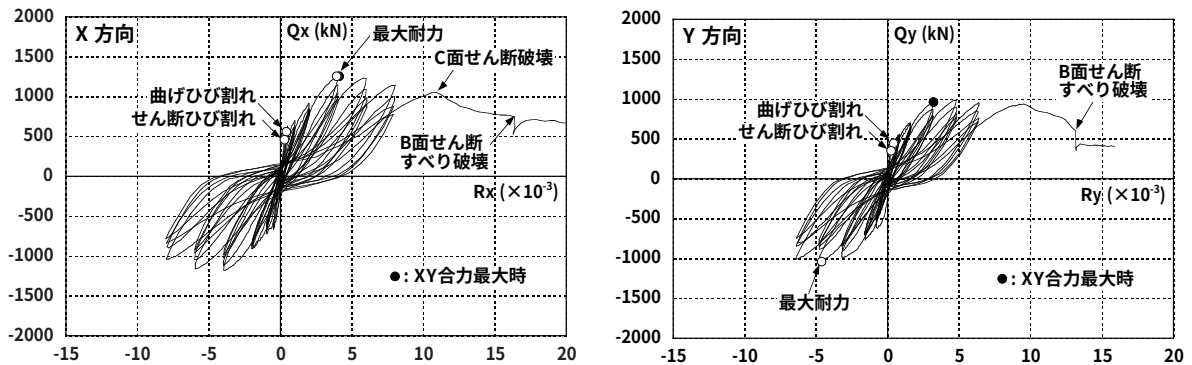


図-5 セン断力-全体変形角関係 (ボックス壁・斜め十字加力)

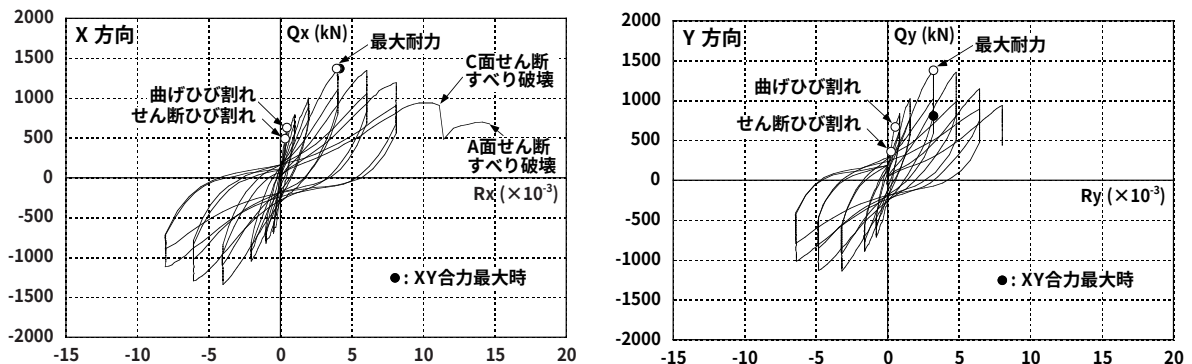


図-6 セン断力-全体変形角関係 (ボックス壁・矩形加力)

(4) ボックス壁・円周加力

最大耐力は $Q_x=1559\text{kN}$, $Q_y=-1504\text{kN}$ であった。最大耐力以降、加力の進展に伴って荷重が徐々に低下し、 $R_y=8.0\times 10^{-3}$ で B 面にせん断すべりが発生し始め、Y 方向の荷重が大きく低下した。最終サイクルは斜め十字加力と同様に $R_x:R_y=1.0:0.8$ の状態で正側に押し切ったが、 $R_x=12.26\times 10^{-3}$ で AB 面同時にせん断すべり破壊が発生し、荷重が急激に低下した。

(5) 円筒壁・十字加力

最大耐力は $Q_x=1567\text{kN}$, $Q_y=1576\text{kN}$ であった。最終サイクルはボックス壁・十字加力と同様としたが、最終の押し切り加力まで顕著な破

壊は観察されなかった。 $R_x=\pm 10.0\times 10^{-3}$ の繰り返し加力でも耐力を維持しており、最終的に Y 方向押し切り加力の $R_y=13.6\times 10^{-3}$ で D 面がせん断破壊し、荷重が大きく低下した。

(6) 円筒壁・矩形加力

最大耐力は $Q_x=1233\text{kN}$, $Q_y=1189\text{kN}$ であった。最終サイクルはボックス壁・矩形加力と同様とした。 $R_x=12.9\times 10^{-3}$ で C 面が、 $R_x=17.4\times 10^{-3}$ で A 面がせん断破壊し、荷重が急激に低下した。ボックス壁では XY 合力最大時が X 方向の最大耐力時と一致していたが、円筒壁ではその傾向はみられず、 $R_x=6.0\times 10^{-3}$ のサイクルで XY 合力が最大となっている。

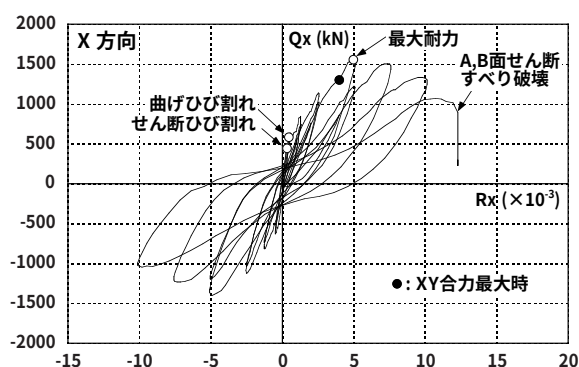


図-7 せん断力-全体変形角関係 (ボックス壁・円周加力)

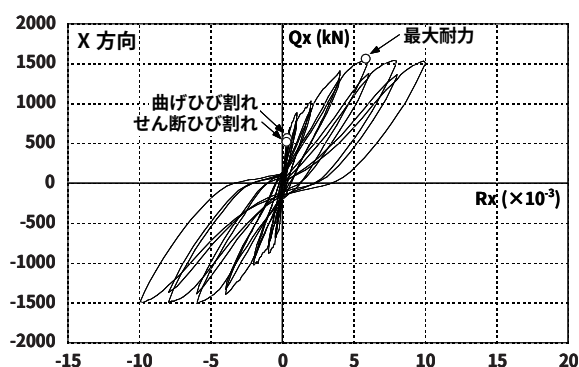
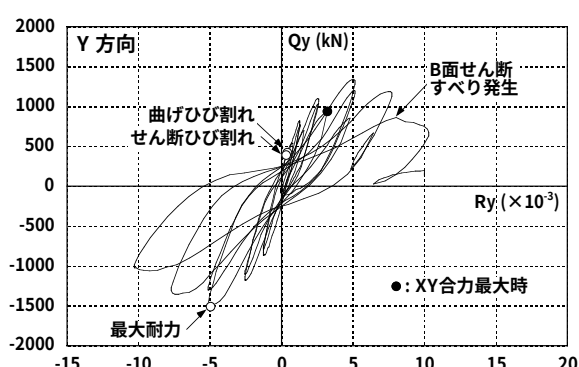


図-8 せん断力-全体変形角関係 (円筒壁・十字加力)

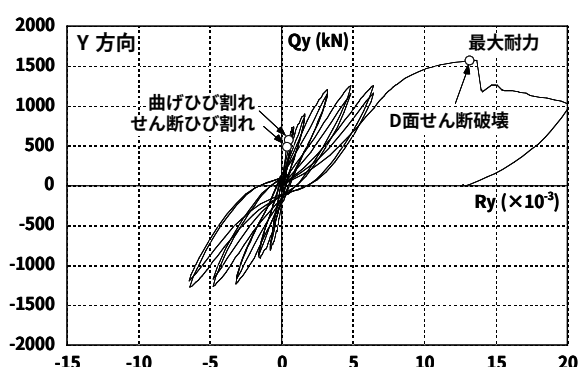


図-9 せん断力-全体変形角関係 (円筒壁・矩形加力)

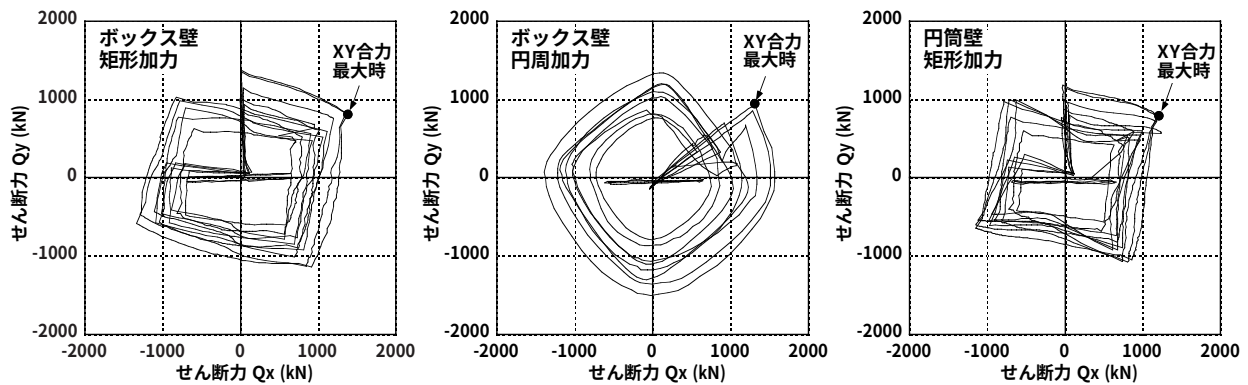


図-10 X方向とY方向のせん断力の軌跡

3.2 せん断力軌跡

ボックス壁・矩形加力, ボックス壁・円周加力, 円筒壁・矩形加力の X, Y 各方向のせん断力の軌跡を図-10 に示す。矩形加力のせん断力軌跡は壁形状によらず加力パターンと同じ矩形に近い。その形状は, ボックス壁では外側に凸, 円筒壁では外側に凹となっており, 両者とも X 軸, Y 軸に対して時計回りに回転した状態となっている。ボックス壁・円周加力のせん断力軌跡は菱形に近い。

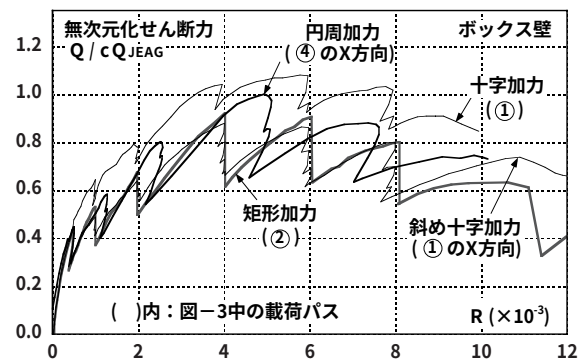
いずれの試験体とも各サイクルにおける XY 合力の最大は第 1 象限のピーク変形時に発生しており, 以後の加力に従って XY 合力が低下する傾向にある。2 方向加力によって壁部の損傷が累積するためであると考えられる。

4. 試験結果の検討

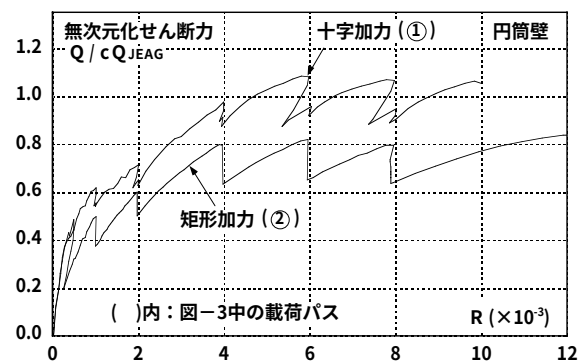
4.1 包絡線の比較

せん断力-全体変形角関係の包絡線の比較を図-11 に示す。同図は図-4~9 に示した X 方向の試験結果の変形更新载荷時の包絡線であり, 図中の○数字は図-3 に示した加力パターンにおける载荷パスを示している。(a)と(b)は加力パターンの影響に着目しており, (c)は壁形状の影響に着目している。図-11 ではコンクリート強度が各試験体で多少異なっていることを考慮し, せん断力の試験結果を文献 1) に示されている復元力特性モデル (JEAG モデル) の最大耐力計算値 cQ_{JEAG} で無次元化して比較している。

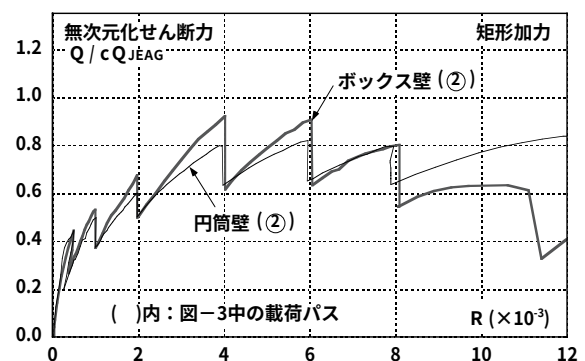
ボックス壁の結果(a)より, 斜め十字加力と矩



(a) ボックス壁 加力パターンの影響



(b) 円筒壁 加力パターンの影響



(c) 矩形加力 壁形状の影響

図-11 包絡線の比較

形加力は同様の傾向にあり, この程度の加力パターンの相違による剛性や耐力への影響は少な

いといえる。十字加力は直交方向の荷重が同時に作用していないため、斜め十字加力や矩形加力と比較して同一変形レベルのせん断耐力が大きい。円周加力は、斜め十字加力・矩形加力と十字加力の中間的な挙動をしている。円筒壁(b)においても、十字加力と矩形加力の関係はボックス壁と同様の傾向にある。

壁形状の比較結果(c)より、ボックス壁の方が円筒壁よりも同一変形レベルの耐力は高いが、最大耐力以降の耐力低下が大きいことが分かる。

4.2 水平 2 軸耐力相関関係

以下、本試験結果以外の既往の試験結果も検討対象に加え、立体耐震壁が多方向同時加力を受ける場合のせん断耐力評価法について検討を行う。検討対象とした試験体は、本試験の 6 体のほか文献 2)～5)に示されているボックス壁 14 体を合わせた計 20 体である。文献 2)～4)では斜め方向加力時の、文献 5)では水平 1 方向＋上下方向加力時の性状が検討されており、各試験体の形状や使用材料などは本試験の試験体とほぼ等しい。

検討対象とした全試験体の水平 2 軸耐力相関関係を図-12 に示す。図-12 は前述の cQ_{JEAG} で無次元化して示しており、本試験結果は X, Y 各方向のせん断力の合力 $\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$ 最大時であり、斜め方向加力の試験結果は最大耐力を載荷角度に応じて X 方向と Y 方向の分力に換算したものである。図-12 より、ほとんどの試験体の試験結果は JEAG モデルの最大耐力計算値を半径とする円弧の近傍に安全側に分布しており、多方向同時加力を受ける場合のせん断耐力はこの耐力曲面によって評価することが可能であると考えられる。

5. まとめ

水平 2 方向から同時に地震力を受ける RC 立体耐震壁の加力試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) ボックス壁と円筒壁では耐力－変形状やせん断力軌跡の性状が異なる。
- (2) 多方向同時加力を受ける場合のせん断耐力

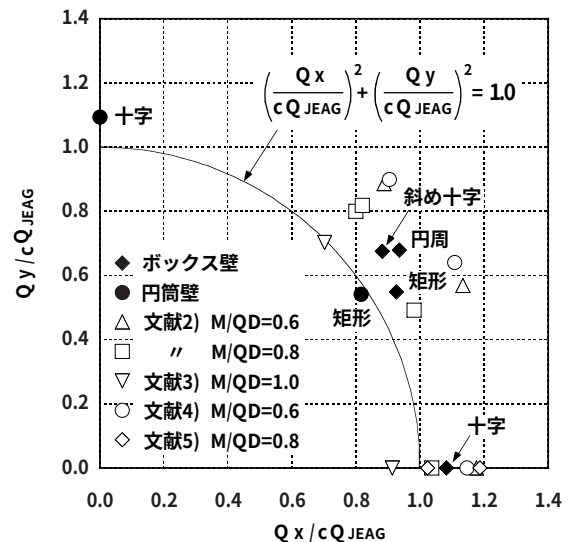


図-12 水平 2 軸耐力相関関係

は JEAG モデルの計算値を半径とする円弧状の耐力曲面で評価することができる。

本試験は(財)原子力発電技術機構が経済産業省の委託による耐震安全解析コード改良試験事業の一環として、「原子炉建屋の多入力試験分科会」の審議の下に実施している。

参考文献

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 1991 年追補版
- 2) 鳥田晴彦ほか：斜め加力による RC ボックス型耐震壁の復元力特性(その 1 試験の概要)、(その 2 試験結果および結果の検討)、建築学会大会梗概集 C-2, pp.865-868, 1998.9
- 3) 山崎和彦, 北田義夫ほか：斜め加力による RC ボックス型耐震壁の復元力特性(その 3 試験の結果 II), 建築学会大会梗概集 C-2, pp.441-442, 1999.9
- 4) 宮内靖昌ほか：二方向入力によるボックス壁の力学性状に関する実験的研究(その 2 斜め方向加力実験)、建築学会大会梗概集 B-1, pp.829-830, 1985.10
- 5) 小野英雄ほか：繰返し変動軸力と水平力を受ける RC ボックス型耐震壁の復元力特性(その 1 試験計画および結果概要)、建築学会大会梗概集 C-2, pp.869-870, 1998.9