

## 論文 振動台実験に基づく RC ボックス耐震壁の動的挙動に関する研究

白井 和貴<sup>\*1</sup>・勝俣 英雄<sup>\*2</sup>・津田 和明<sup>\*3</sup>・関 松太郎<sup>\*4</sup>

要旨：多方向から地震動入力を受ける鉄筋コンクリート造（RC）耐震壁の力学的特性は未だ不明な点が多く、十分には解明されていない。そこで、RC 耐震壁の地震時弾塑性挙動の把握を目的として、RC ボックス耐震壁の振動台破壊実験を実施した。実験パラメータは、地震動の入力方向と壁開口の有無であり、得られた実験結果に基づいて RC 耐震壁の動的応答性状や多方向入力の影響について検討した。

キーワード：振動台実験，耐震壁，多方向入力，動的挙動

## 1. はじめに

兵庫県南部地震に代表される近年の地震被害から、多次元入力時の地震動が建物に与える影響を無視できないという指摘がなされている。地震動は本来 3 次元の挙動であるので、鉄筋コンクリート造（RC）耐震壁構造の安全性を適切に評価するためには、多方向入力時の応答性状を把握する必要がある。しかし、多方向から地震動入力を受ける RC 耐震壁の力学的特性は未だ不明な点が多く、十分には検討されていない。

本研究では、RC 耐震壁の地震時挙動の把握を目的として、3 体の RC ボックス壁試験体に対して、地震動の入力方向と壁開口の有無をパラメータとした振動台破壊実験を実施し、得られた結果に基づき検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

実験パラメータと主な検討内容を表 - 1，試験体の概要を図 - 1，試験体の材料特性を表 - 2，表 - 3 にそれぞれ示す。

試験体は、(財)原子力発電技術機構の実施した RC ボックス型耐震壁の静的加力試験<sup>1)</sup>を参考にし、本実験で使用する振動台の加振性能を

考慮して、壁部分の形状寸法が 0.8 倍に相当する大きさとした。

試験体の壁芯スパンは 1200mm、内法高さは 760mm、壁厚は 60mm である。壁配筋は縦横共 D6@85 ダブル配筋とし、壁筋比は  $P_w=1.25\%$  である。壁筋のかぶり厚さは 11mm であり、コンクリートは骨材最大寸法 9mm の高流動コンクリートを使用した。

壁脚部におけるシアスパン比は、トップスラブの回転慣性によるモーメントの影響を無視した場合  $M/QD=0.8$  であり、曲げ降伏後にせん断破壊する設計となっている。トップスラブの上下には鋼板製の付加マス（重量 241kN）を設置しており、これにより試験体の総重量は 390kN、試験体を 1 質点系にモデル化した場合の頂部重量は 333kN であり、壁部分の軸方向応力度は  $1.14\text{N/mm}^2$  である。

試験体は 3 体とも同一寸法であるが、うち 1 体は直交する 2 壁面の中央部に開口（幅 360mm × 高さ 240mm、等価開口周比 0.31）を設け、開口による剛性・耐力の低下、および偏心によるねじれ振動が生じるようにした。開口の周囲には、開口隅角部の付加斜張力に対して必要な補強量を満足する様に、縦横に補強筋を配筋した。

\*1 (株)大林組 技術研究所建築振動制御研究室研究員 工修（正会員）

\*2 (株)大林組 技術研究所建築振動制御研究室主任研究員 工修（正会員）

\*3 (株)大林組 技術研究所建築構造研究室主任研究員 工博（正会員）

\*4 (株)大林組 技術研究所建築振動制御研究室室長 工博（正会員）

表 - 1 実験パラメータと主な検討内容

|                            |     | 無開口        | 有開口        |
|----------------------------|-----|------------|------------|
| 入力方向                       | 1   | CASE 1     | CASE 3     |
|                            | 2～3 | CASE 2     |            |
| 検討内容                       |     | 多方向入力による影響 | 偏心によるねじれ振動 |
| RC 耐震壁の動的挙動<br>振動台加振波形の再現性 |     |            |            |

[単位 mm]

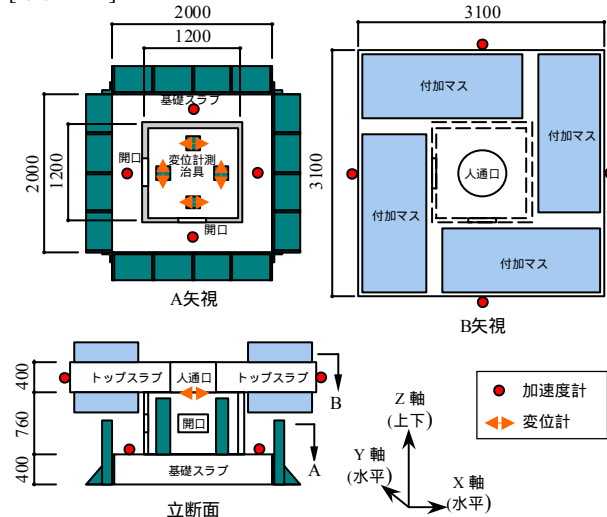


図 - 1 試験体概要 (CASE 3)

表 - 2 壁コンクリートの材料特性 (実験日)

| 試験体                                          | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 |
|----------------------------------------------|--------|--------|--------|
| 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )                    | 33.8   | 28.8   | 27.7   |
| 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )                    | 2.26   | 2.08   | 1.88   |
| ヤング係数<br>( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ) | 2.41   | 2.16   | 1.88   |
| ポアソン比                                        | 0.180  | 0.183  | 0.164  |

表 - 3 壁 D6 鉄筋の材料特性

| 試験体                                          | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 |
|----------------------------------------------|--------|--------|--------|
| 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )                    | 369    | 350    | 350    |
| ヤング係数<br>( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> ) | 1.98   | 2.02   | 2.02   |

## 2.2 入力地震動

XYZ 各軸の基準入力地震動の加速度時刻歴を図 - 2, 加速度応答スペクトルを図 - 3 に示す。基準入力地震動の位相特性は各軸それぞれ異なる乱数により与え、相関は持たせていない。

各 CASE とも、基準入力地震動の入力倍率を漸増し、10 回程度の加振により試験体を破壊さ

せた。CASE 1 は X 軸 1 方向入力とし、CASE 2 (2～3 方向入力) および CASE 3 (1～3 方向入力) では XYZ 各軸の目標入力比率を 3 : 2 : 1.5 (XY 軸 2 方向入力時には 3 : 2) となるように加振を行った。また、試験体の損傷の進行に伴う長周期化に対応させ、適宜入力波の時間軸を 1.0～2.44 倍に引き延ばして加振を行った。

振動台実験を行う場合、振動台と試験体相互の影響により加振波形の再現精度が悪化する問題が生じる。本実験では波形再現性を向上させるため、逆伝達関数を把握し試験加振により入力波を補正する入力補償と、フィードフォワード型のリアルタイム制御手法を併せて行った<sup>2)</sup>。

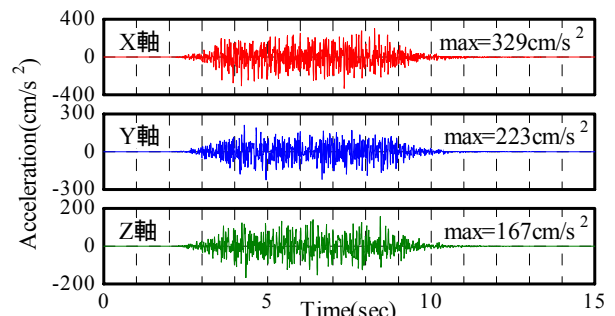


図 - 2 加速度時刻歴

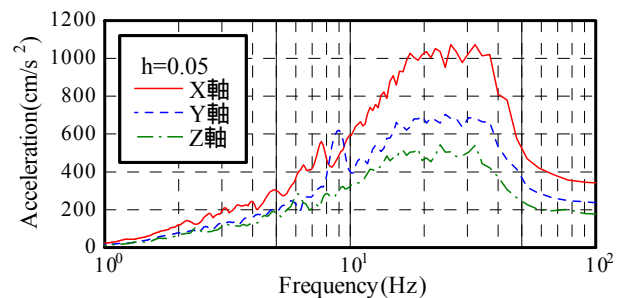


図 - 3 加速度応答スペクトル

## 3. 実験結果

### 3.1 最大応答値

実験結果から得られた各 CASE, 各 Run の最大応答値一覧を表 - 4 に示す。α は入力波の時間軸に乗じた引き延ばし係数を示す。A<sub>B</sub> は基礎スラブ上面における実現加速度である。F はトップスラブ重心位置での応答加速度に試験体頂部質量を乗じて求めた慣性力 (Z 軸は変動軸力) である。δ は基礎スラブ上端とトップスラブ下端間の相対応答変位である。

表 - 4 最大応答値一覧

a) CASE 1

| Run | $\alpha$ | 軸 | $A_B$<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | F<br>(kN) | $\delta$<br>(mm) | 備考        |
|-----|----------|---|------------------------------|-----------|------------------|-----------|
| 1   | 1.0      | X | 161                          | 64        | 0.09             |           |
| 2   | 1.0      | X | 341                          | 149       | 0.13             |           |
| 3   | 1.11     | X | 1125                         | 374       | 0.40             | 曲げひび割れ確認  |
| 4   | 1.47     | X | 1073                         | 465       | 0.97             |           |
| 5   | 1.47     | X | 1977                         | 640       | 1.55             |           |
| 6   | 1.9      | X | 1828                         | 691       | 2.43             | フランジ壁縦筋降伏 |
| 7   | 2.1      | X | 1706                         | 685       | 2.38             |           |
| 8   | 2.1      | X | 1758                         | 769       | 2.99             | せん断ひび割れ確認 |
| 9   | 2.2      | X | 2322                         | 924       | 3.86             |           |
| 10  | 2.44     | X | 2739                         | 1032      | 4.61             |           |
| 11  | 2.44     | X | 3213                         | 1011      | >15.0            | せん断すべり破壊  |

b) CASE 2

| Run | $\alpha$ | 軸 | $A_B$<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | F<br>(kN) | $\delta$<br>(mm) | 備考        |
|-----|----------|---|------------------------------|-----------|------------------|-----------|
| 1   | 1.0      | X | 153                          | 68        | 0.10             |           |
|     |          | Y | 123                          | 50        | 0.07             |           |
|     |          | Z | 170                          | 411       | 0.08             |           |
| 2   | 1.0      | X | 422                          | 145       | 0.12             |           |
|     |          | Y | 241                          | 93        | 0.10             |           |
|     |          | Z | 320                          | 486       | 0.09             |           |
| 3   | 1.0      | X | 936                          | 348       | 0.44             |           |
|     |          | Y | 644                          | 261       | 0.33             | 曲げひび割れ確認  |
|     |          | Z | 630                          | 659       | 0.27             |           |
| 4   | 1.0      | X | 1156                         | 465       | 0.86             |           |
|     |          | Y | 1307                         | 371       | 0.77             | せん断ひび割れ確認 |
|     |          | Z | 936                          | 853       | 0.41             |           |
| 5   | 1.41     | X | 1073                         | 469       | 1.20             |           |
|     |          | Y | 1406                         | 376       | 0.85             |           |
|     |          | Z | 1007                         | 866       | 0.48             |           |
| 6   | 1.41     | X | 1492                         | 531       | 1.71             |           |
|     |          | Y | 1229                         | 436       | 1.35             | コーナー部縦筋降伏 |
|     |          | Z | 1835                         | 681       | 2.38             |           |
| 7   | 1.41     | X | 1351                         | 491       | 1.68             |           |
|     |          | Y | 2473                         | 861       | 3.29             |           |
|     |          | Z | 1916                         | 656       | 2.47             |           |
| 8   | 1.41     | X | 3186                         | 952       | >15.3            |           |
|     |          | Y | 2092                         | 723       | >15.3            | せん断破壊     |
|     |          | Z |                              |           |                  |           |

c) CASE 3

| Run | $\alpha$ | 軸 | $A_B$<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | F<br>(kN) | $\delta$<br>(mm) | 備考               |
|-----|----------|---|------------------------------|-----------|------------------|------------------|
| 1   | 1.0      | X | 114                          | 71        | 0.10             |                  |
| 2   | 1.0      | X | 130                          | 71        | 0.09             |                  |
|     |          | Y | 97                           | 42        | 0.07             |                  |
|     |          | Z | 153                          | 412       | 0.07             |                  |
| 3   | 1.0      | X | 306                          | 133       | 0.21             |                  |
|     |          | Y | 229                          | 123       | 0.17             |                  |
|     |          | Z | 394                          | 534       | 0.08             |                  |
| 4   | 1.0      | X | 1282                         | 351       | 1.01             | 曲げひび割れ・せん断ひび割れ確認 |
| 5   | 1.0      | X | 965                          | 390       | 1.58             |                  |
|     |          | Y | 1918                         | 363       | 1.31             |                  |
|     |          | Z | 949                          | 834       | 0.47             |                  |
| 6   | 1.41     | X | 1150                         | 463       | 2.27             | コーナー部縦筋降伏        |
| 7   | 1.41     | Y | 844                          | 363       | 1.62             |                  |
|     |          | Z | 1222                         | 540       | 2.60             |                  |
| 8   | 1.41     | X | 1784                         | 558       | 3.27             | 開口補強筋降伏(縦横とも)    |
|     |          | Y | 1094                         | 442       | 2.51             |                  |
| 9   | 2.0      | X | 3170                         | 726       | >18.9            | せん断破壊            |
|     |          | Y | 2026                         | 564       | >19.0            |                  |

CASE 2 (2~3 方向入力) では, Run3~4 において入力波の強軸 (X 軸) 方向のせん断力を負担する C 面にせん断ひび割れが, その直交壁の B 面, D 面に曲げひび割れが多く発生した。最終的には各壁面ともほぼ同程度の損傷を示し, C 面および A 面脚部のせん断破壊によりトップスラブが落階した。このとき B 面, D 面ではかぶりコンクリートの剥落が見られ, CASE 1 とは異なる破壊状況を示した。

CASE 3 (有開口, 1~3 方向入力) では B 面, C 面において開口周辺に損傷が集中し, 壁脚部の損傷は比較的少なかった。最終的に C 面の開口隅部にてせん断ひび割れが進展し, そのひび割れが直交壁 B 面に流れて開口部を貫通する様に破壊が進行しトップスラブの落階に至った。

### 3.2 最終破壊状況

各 CASE の最終破壊状況を図 - 4 に示す。

CASE 1 (1 方向入力) では, 最終的にウェブ壁 (C 面, A 面) 脚部においてせん断すべり破壊に至った。フランジ壁 (D 面, B 面) はウェブ壁との交差部近傍以外は損傷が少なく, ウェブ壁のせん断破壊後も軸力を保持していた。

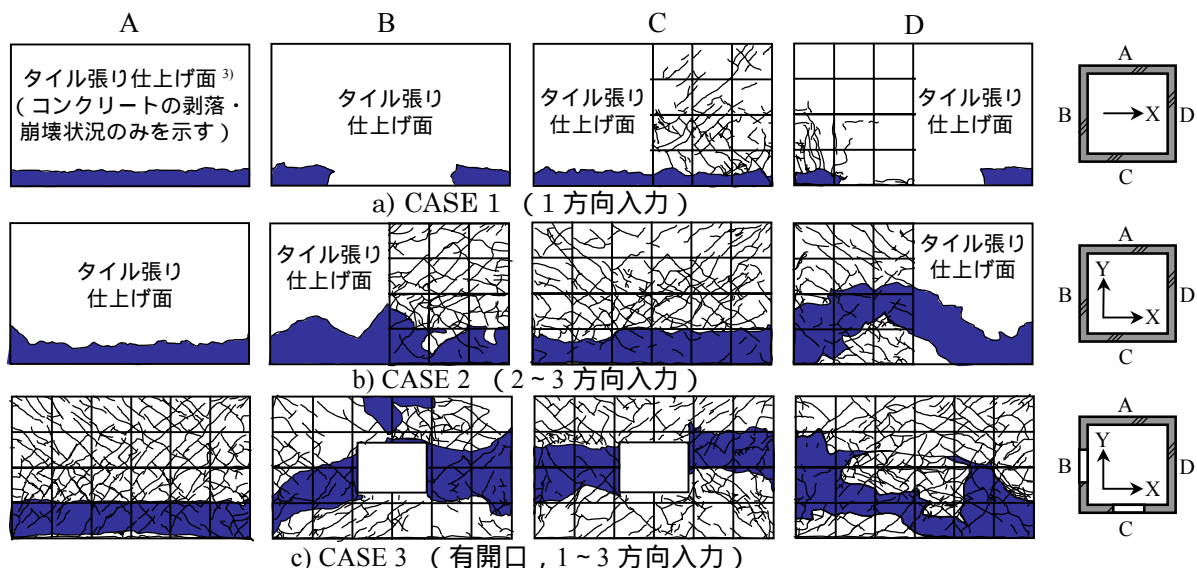


図 - 4 最終破壊状況

### 3.3 履歴ループ性状

各 CASE の実験結果から得られた X 軸, Y 軸の慣性力 - 変位関係を図 - 5 に示す。

CASE 1 (無開口, 1 方向入力) では, Run3 (曲げひび割れ確認) から Run4, Run6 (フランジ壁縦筋引張降伏) と, 試験体の損傷の進行に伴い逆 S 字型のスリップ性状が顕著となっていく様子が分かる。最終破壊に至った Run11 では, 最大耐力点以降にも耐力が低下しながら数回のループを繰り返す状況を示した。

CASE 2 (無開口, 2 方向入力) では, 入力波の強軸である X 軸の方が, Y 軸よりも大きな応答を示しているが, 損傷の進行による履歴ループ形状の進展に関しては CASE 1 と比べて大きな違いは見られなかった。

CASE 3 (有開口, 1~3 方向入力) に関しては, 水平面上での各壁の中央位置 (A~D 点) にそれぞれ対応する応答加速度・応答変位を, XY 軸の並進データおよび Z 軸まわりの回転データから算出し, 応答加速度には頂部質量の 1/2 の質量を乗じることで, 各壁の負担する擬似的な履歴ループを示した。Run6 に示される様に, 同じ X 軸 (または Y 軸) の最大応答を比較した場合, 有開口壁の C 点 (または B 点) よりも, 無開口壁の A 点 (または D 点) の方が最大慣性力, 最大変位ともに大きくなる傾向がみられた。動的なねじれに関しては, 剛性・耐力の高い無開口側の構面の方が, 剛性・耐力の低い有開口側の構面よりも最大変位が大きくなる場合がある事が示された。

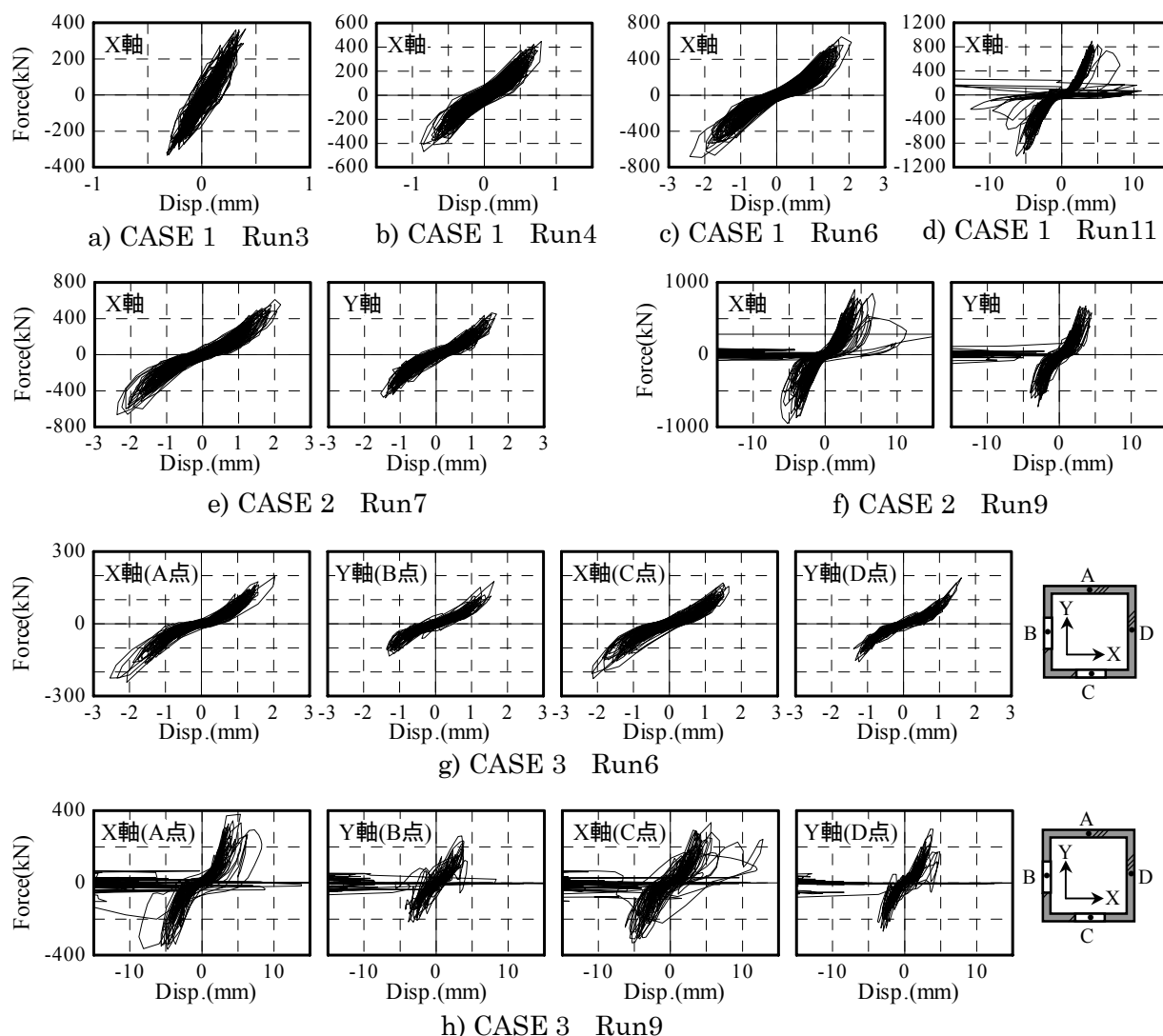


図 - 5 慣性力 - 変位関係

### 3.4 スケルトンカーブの比較

各 CASE, 各 Run の XY 各軸, 正負両側についての最大変形更新時の慣性力 - 変形角  $R$  の包絡線を図 - 6 に示す。 $R$  は応答変位  $\delta$  を測定間高さ 760mm で除して求めた。各 CASE とも, 耐力ピーク点近傍から正負で包絡線に差異が現れた。また CASE 2, CASE 3 では入力波の弱軸 (Y 軸) の方が最大耐力, ピーク時変形とともに強軸 (X 軸) よりも小さくなった。

さらに, アーチ・トラス理論に基づくせん断強度式<sup>4)</sup>により, 各 CASE のせん断終局強度を算定して図 - 6 に併せて示す。なお CASE 3 の有開口壁 (B 点, C 点) については, 等価開口周比 (=0.31) を用いて無開口時の算定値を低減した値を示した。各 CASE とも, 算定値は X 軸実験結果の耐力ピーク点と概ね対応している。

試験体のポストピーク挙動を検討するため, 包絡線の耐力ピーク点以降に, ピーク値の 80% 以上の慣性力を維持できた限界変形点を図 - 6 に併せてプロットする。耐力ピーク点と限界変形点それぞれの変形角を, CASE 1, CASE 2 の X 軸正負両側について平均値をとって比較すると, 80% 限界点 (平均値  $R=8.2 \times 10^{-3}$ ) は耐力ピーク点 (平均値  $R=6.4 \times 10^{-3}$ ) よりも約 3 割ほど

大きい変形角となった。

CASE 1 および CASE 2 について, XY 各軸正負両側のせん断応力度  $\tau$  - 変形角  $R$  の包絡線を図 - 7 に示す。ここに,  $\tau$  は応答慣性力をウェブ壁断面積で除した平均せん断応力度とした。ただし, 試験体の材料強度が異なることを考慮して, せん断強度式<sup>4)</sup>により CASE 1 と CASE 2 のせん断終局強度  $cV_{CASE1}$ ,  $cV_{CASE2}$  をそれぞれ算定し, その比  $cV_{CASE1}/cV_{CASE2}$  を CASE 2 実験結果の  $\tau$  に乗じて包絡線を基準化し比較を行った。

図 - 7 より CASE 2 の X 軸 Y 軸の包絡線を比べると Y 軸の方が最大せん断応力度  $\tau_{max}$  が低下している。X 軸に関して CASE 1 と CASE 2 を比べると  $\tau_{max}$  に大きな違いは見られない。

既往の静的試験<sup>1)</sup> (本実験の試験体は SD-08 シリーズ試験体の 80% 縮尺である) の SD-08-00 試験体の  $\tau$  -  $R$  関係を図 - 7 にプロットして示す。このとき, せん断強度式<sup>4)</sup>により CASE 1 および SD-08-00 の最大せん断応力度  $c\tau_{CASE1}$ ,  $c\tau_{SD-08-00}$  を算定し, その比  $c\tau_{CASE1}/c\tau_{SD-08-00}$  を SD-08-00 実験結果の  $\tau$  に乗じることで包絡線を基準化して示した。CASE 1 と SD-08-00 の包絡線は概ね対応しているが,  $\tau_{max}$  は CASE 1 の方が若干大きい値を示した。

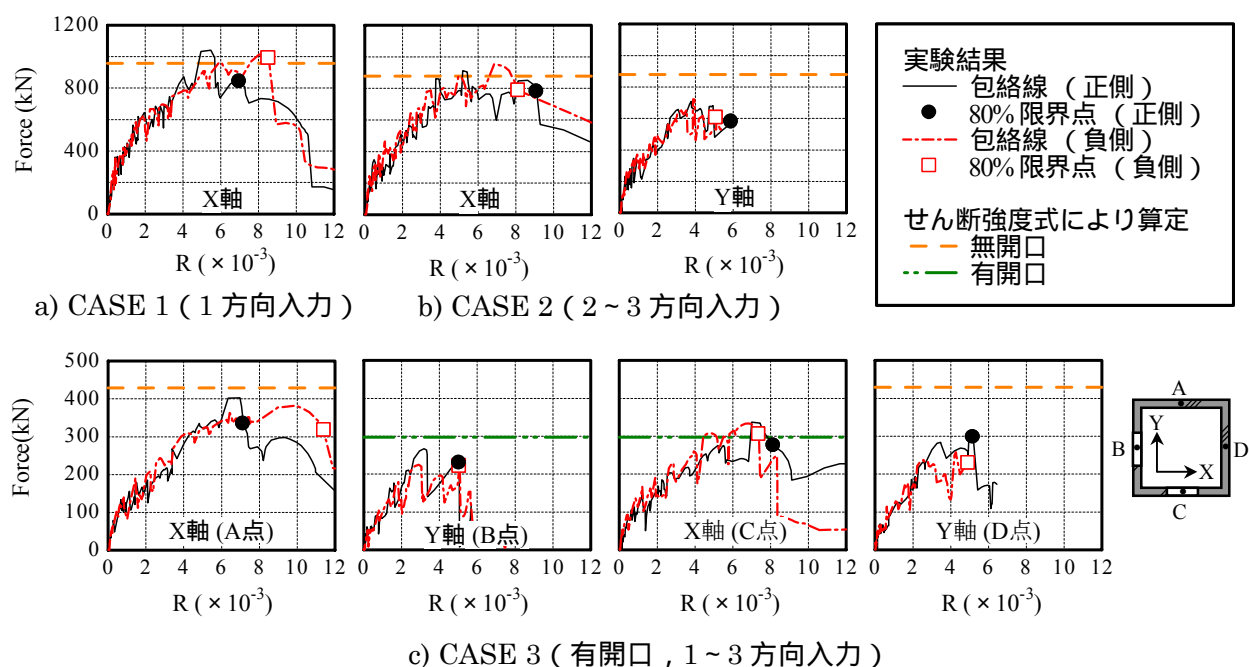


図 - 6 応答加速度変形角  $R$  関係の包絡線

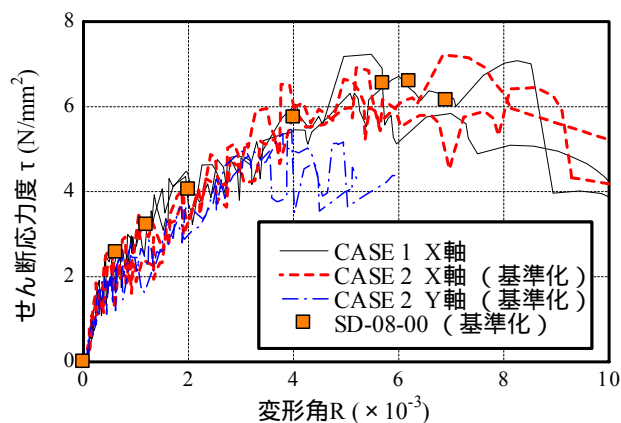


図 - 7 τ - R 関係の包絡線

### 3.5 慣性力オービットの検討

水平 2 方向入力の影響を検討するため、CASE 2 全 Run の X - Y 軸の慣性力オービットを重ねて図 - 8 に示す。ここに、 $Q_{XU}$  は CASE 1 実験結果の X 軸最大耐力 ( $Q_{XU} = Q_{YU}$ ) であり、 $Q_X$ 、 $Q_Y$  は CASE 2 実験結果の XY 各軸の慣性力に  $V_{CASE1}/V_{CASE2}$  を乗じて基準化した慣性力である。 $Q_X$ 、 $Q_Y$  をそれぞれ  $Q_{XU}$ 、 $Q_{YU}$  で除すことで無次元化し、正負両側とも絶対値をとってグラフの第 1 象限に示した。また、既往の静的加力試験<sup>1)</sup> (SD-08-00, SD-08-26, SD-08-45 試験体) より得られた最大耐力点の水平 2 軸相互関係を ■ 印でプロットし、さらに式 (1) で示される円弧状の曲線を図 - 8 に併せて示す。

$$(Q_X / Q_{XU})^2 + (Q_Y / Q_{YU})^2 = 1 \quad (1)$$

CASE 2 の XY 慣性力ベクトルの最大点に対応する角度は  $\theta = 14.1^\circ$  となり、地震動の XY 入力比率 3 : 2 ( $\theta = 33.7^\circ$ ) よりも低下した。これは各軸の基準入力地震動の位相特性に相関を持たせていないためと考えられる。1 方向入力時にやや近い  $\theta$  ではあるが、CASE 2 の XY 慣性力ベクトルの最大点は式 (1) の曲線からやや外側に達しており、SD-08 シリーズの静的試験により示される傾向と対応する結果となった。

### 4. まとめ

3 体の RC ボックス壁試験体に対して、地震動の入力方向と開口の有無をパラメータとした振動台実験を行い、以下の知見を得た。

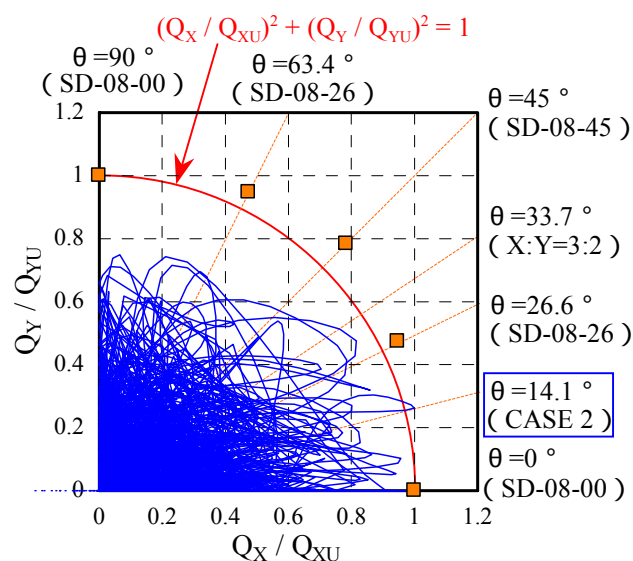


図 - 8 慣性力オービット (CASE 2)

- (1) 地震動の入力方向の違いと開口の有無により、異なる損傷・破壊状況を示した。
- (2) 2 方向入力時と 1 方向入力時の最大せん断応力度  $\tau_{max}$  を比較すると、入力波の弱軸 (Y 軸) 方向に関しては 2 方向入力時の方が  $\tau_{max}$  が低下したが、強軸 (X 軸) 方向に関しては  $\tau_{max}$  に大きな違いはなかった。
- (3) 既往の静的試験と比べて本実験の方が  $\tau_{max}$  が若干大きい、せん断応力度 - 変形角関係の包絡線に大きな違いは見られなかった。

### 参考文献

- 1) 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, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.865-868, 1998.9
- 2) 白井和貴ほか：鉄筋コンクリート造ボックス壁の三次元振動台破壊実験, 大林組技術研究所報, No.66, pp.43-50, 2003.1
- 3) 三谷一房ほか：振動台実験によるタイル張り仕上げの耐震性に関する研究 (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.565-568, 2001.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 丸善, pp.122-135, 1990.9