

論文 水平2方向同時加力を受けるRC立体耐震壁の解析的検討

小野 英雄*1・新谷 耕平*2・草間 和広*3・前川 宏一*4

要旨：本報は、水平2方向から同時に地震力を受けるRC立体耐震壁の弾塑性挙動を明らかにするための試験の一環として実施した非線形 FEM 解析の結果を示すものである。解析に用いた鉄筋コンクリート構成モデルは、独立4方向までのひび割れを有する履歴依存型構成モデルである。解析は試験実施前に一度行い、試験後にコンクリートの実強度を反映して再度実施した。ボックス型及び円筒型の耐震壁について、さまざまな加力パターンに対して試験結果と解析値を比較した結果、本モデルによる解析値は試験結果と良好な一致を見た。本モデルを用いて、加力直交方向の損傷が壁の耐力・剛性に与える影響を検討した。

キーワード：RC構造, 耐震壁, FEM解析, 2方向加力, 4方向ひび割れ

1. はじめに

本試験は、RC造の立体耐震壁(ボックス型, 円筒型)を対象として、水平2方向から同時に加力を受けた場合の弾塑性性状を明らかにし、復元力特性を評価することを目的としたものである。2方向加力時の特性を包括的に評価するためには、無数の加力パターンに対する履歴性状を検討する必要があるが、非線形 FEM 解析はその有力な手段となり得る。そこで、ボックス型及び円筒型の耐震壁に対する水平2方向加力試験^{1) 2)}の解析を行い、解析に用いた鉄筋コンクリート構成モデルの適用性を検討する。

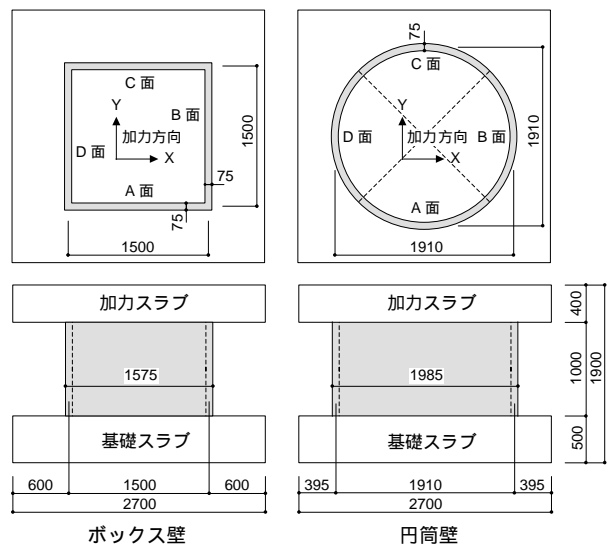


図-1 試験体形状

2. 試験の概要

2.1 試験体

図-1 に試験体形状を示す。ボックス壁と円筒壁の断面形状は、壁厚と壁全断面積が同じとなるように定めている。

2.2 加力パターン

図-2 に採用した加力パターンを示す。また、表-1 に試験を行った壁形状・加力パターンの一覧を示す。

表-1 壁形状・加力パターンの一覧

No.	試験体形状	加力パターン
1	ボックス壁	十字加力
2		斜め十字加力
3		矩形加力
4		円周加力
5	円筒壁	十字加力
6		矩形加力

*1 大成建設(株) 設計本部原子力設計グループ 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

*3 (財)原子力発電技術機構 耐震技術センター (正会員)

*4 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

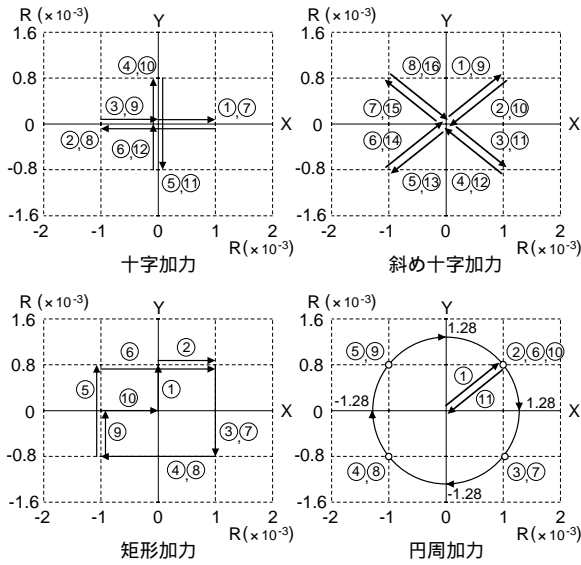


図-2 加力パターン

3. 解析方法

3.1 ひび割れモデル

水平2方向加力時の非線形挙動を解析的に表現するには、軸方向力に対するひび割れと、正負交番せん断力に対するひび割れの計3方向以上のひび割れが考慮できるモデルが必要となる。

ここでは前川、福浦が開発した、擬似直交座標系を2つ取り入れた独立4方向ひび割れモデル³⁾を導入した解析プログラムを用いる。4方向ひび割れモデルの概念を図-3に示す。

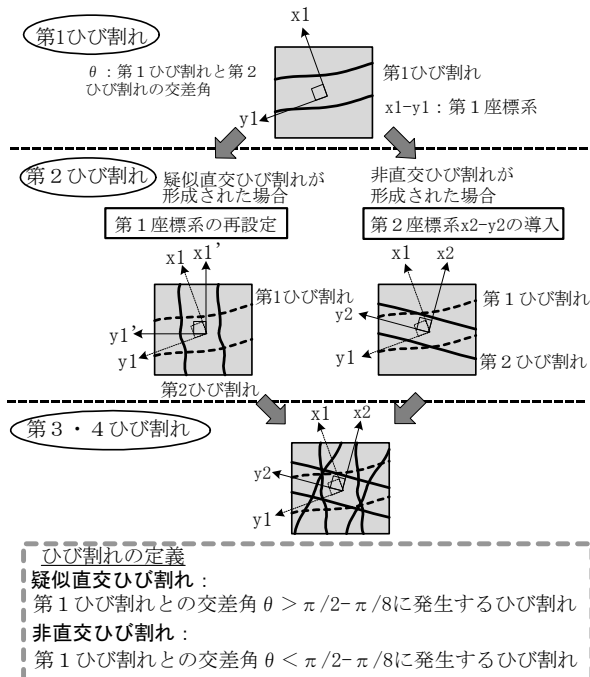


図-3 4方向ひび割れモデルの概念

また、ひび割れ面でのせん断伝達構成則は、軸力とせん断力を同時に受ける場合を想定して開発されたモデル⁴⁾を用いる。

4. 2方向加力解析

4.1 解析条件

解析モデルは、壁部および上部スラブを8点積層シェル要素でモデル化し、壁脚部には基礎からの壁筋の抜け出しを表現する接合要素を配置した。加力は上部スラブの上端中央位置において変位制御とし、試験と同じ荷履歴にて解析を実施した。ボックス壁の解析モデルを図-4に示す。

解析は試験実施前に一度実施し、試験後にコンクリートの実強度を反映して再度実施した。

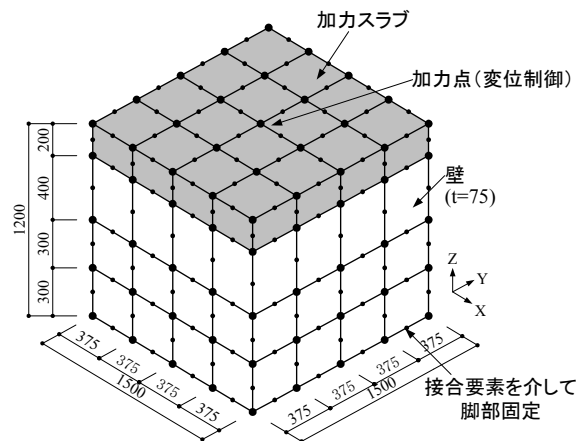


図-4 ボックス壁の解析モデル

4.2 試験結果と解析結果の比較

表-2に最大耐力の試験値と解析値の比較を示す。図-5に各ケースのせん断力-全体変形関係の比較を示す。また、図-6に矩形加力及び円周加力のX方向とY方向のせん断力の軌跡を示す。

まず、試験値と解析値を比較する上で、試験に用いた加力パターンをコンクリート構成モデルにおける履歴経路を尺度として分類する。

十字加力, 斜め十字加力：応力-ひずみ関係の履歴経路は1方向加力と同じである。即ち、荷重/除荷でひずみベクトルの向きはあまり変化しない。

表-2 最大耐力の試験値と解析値の比較

	X 方向			Y 方向			X Y 合力		
	試験値 (kN)	解析値 (kN)	試験値 解析値	試験値 (kN)	解析値 (kN)	試験値 解析値	試験値 (kN)	解析値 (kN)	試験値 解析値
1 ボックス壁 十字加力	1596	1432	1.11	1325	1255	1.06	—	—	—
2 ボックス壁 斜め十字加力	1261	1203	1.05	1034	1008	1.03	1588	1520	1.04
3 ボックス壁 矩形加力	1376	1321	1.04	1381	1341	1.03	1600	1586	1.01
4 ボックス壁 円周加力	1559	1361	1.15	1504	1170	1.26	1610	1481	1.09
5 円筒壁 十字加力	1567	1406	1.11	1576	1380	1.14	—	—	—
6 円筒壁 矩形加力	1233	1315	0.94	1189	1064	1.12	1440	1435	1.00

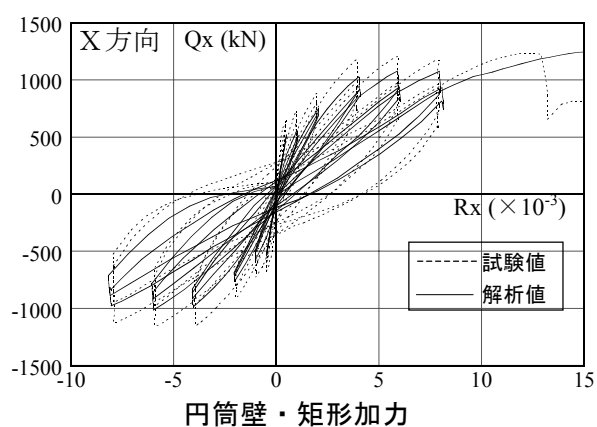
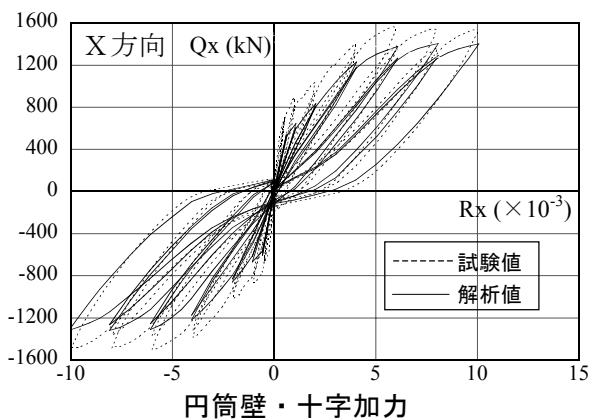
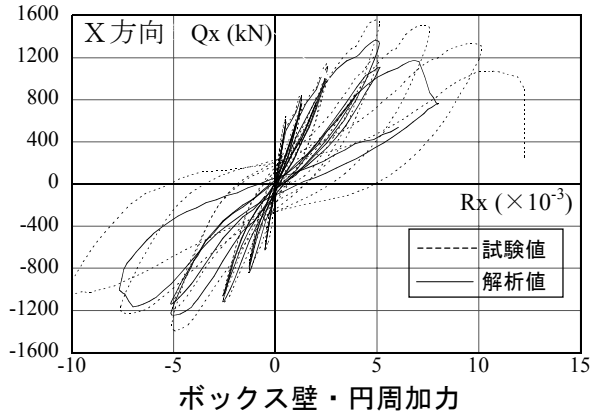
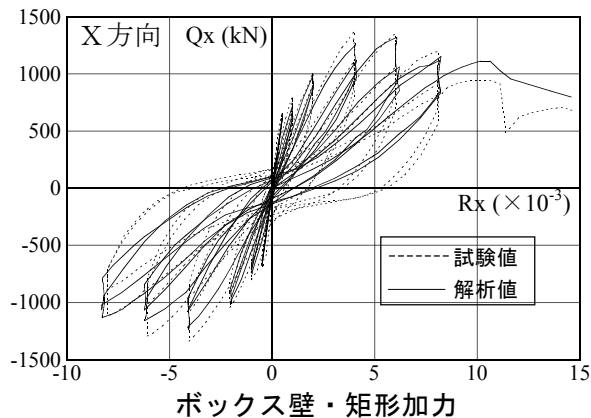
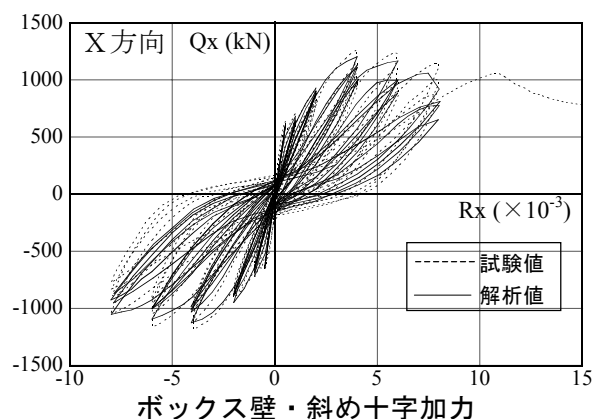
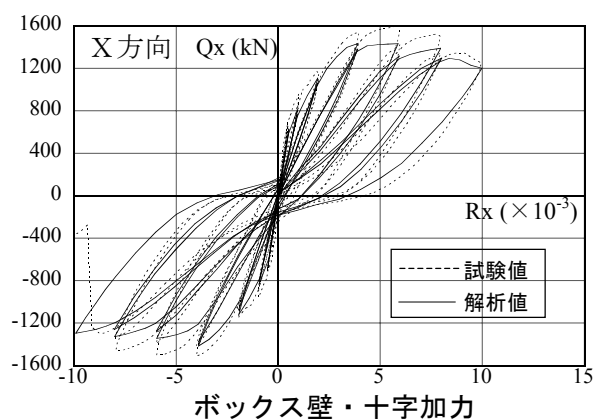


図-5 せん断力-全体変形関係

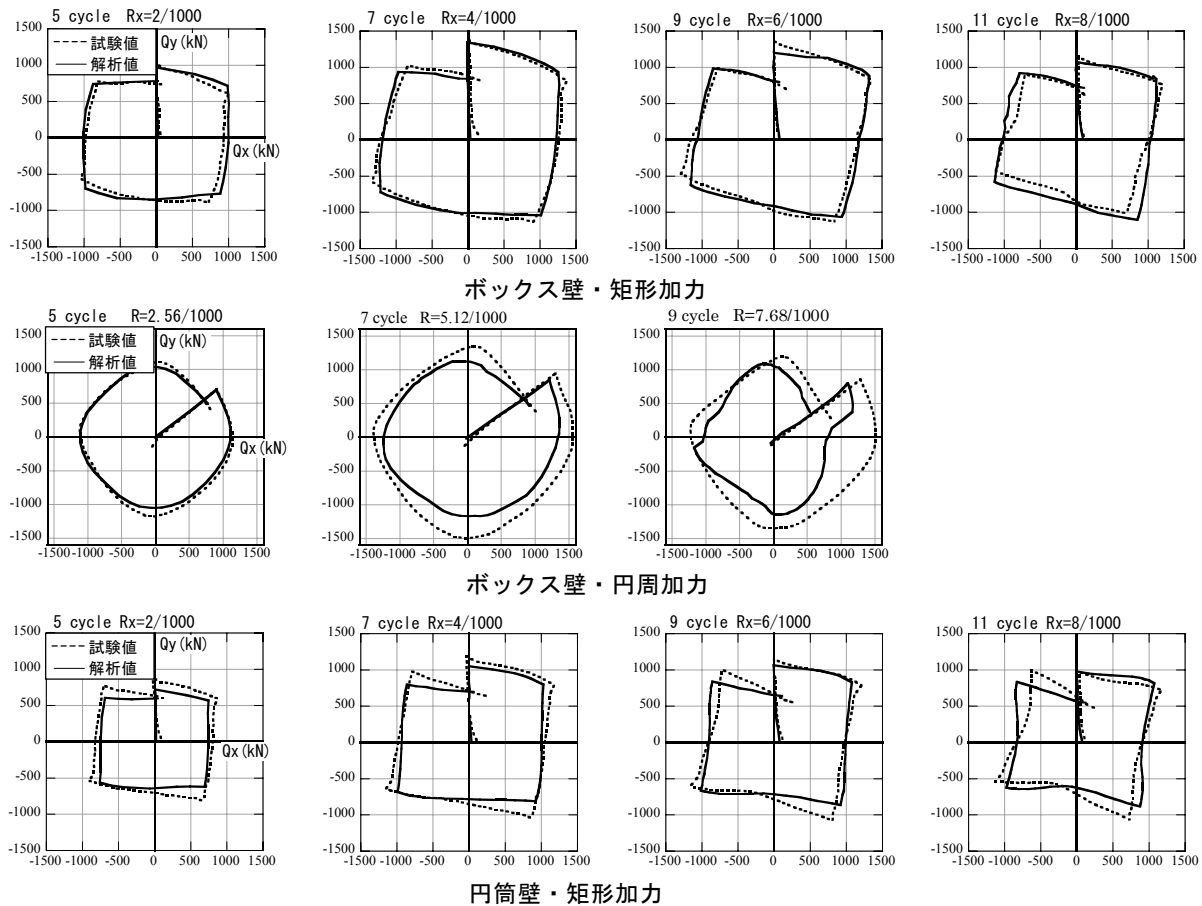


図-6 X方向とY方向のせん断力の軌跡

しかし、曲げひび割れ発生し、そのひび割れが閉じた状態でせん断ひび割れが発生する等、過去に損傷を受けた方向と直交しない方向に非線形履歴を受ける。

矩形加力： 載荷／除荷の過程でひずみベクトルの向きが変化する。具体的には、ひび割れが開いた状態で主応力軸の回転を伴うひずみの変動が生じ、ひび割れ発生時、或いは再開時とは異なる応力状態でひび割れが閉じる。

円周加力： 構造体全体としては変形ベクトルの大きさが同じ、即ちひずみベクトルの大きさが変わらず、ベクトルの方向のみが変化する。

試験値との適合度は、上記の3種類に分類した加力パターンごとに似た傾向を示している。

(1) 十字加力・斜め十字加力

最大耐力を比較すると、ボックス壁・円筒壁共に試験値に対して解析値は1割ほど小さい。最も差が大きいのは円筒壁の十字加力であり、次いでボックス壁の十字加力、斜め十字加力の

順であった。

せん断力-全体変形関係を比較すると、ループの形状は載荷時／除荷時共に解析値は試験値と非常に良く合っている。

(2) 矩形加力

ボックス壁、円筒壁共X/Y方向毎の最大耐力は試験値と解析値にやや差があるが、XY合力では差が無い。

せん断力-全体変形関係を比較すると、載荷時のループ形状は試験値と解析値は良く整合しているが、除荷ループの膨らみは、試験値より解析値が小さくなっている。この一因として、矩形加力では載荷／除荷の過程でひずみベクトルの向きが変化するため、ひび割れが発生した状態とは異なる状態でひび割れ面の再接触が生じることが考えられる。

XYせん断力の軌跡を比較すると、その形状がボックス壁で外側に凸、円筒壁では外側に凹となる特徴は解析にも現れているが、変形レベ

ルが大きくなるにしたがい軌跡全体が時計廻りに回転する試験の傾向が、解析では十分出ていない。

(3) 円周加力

円周加力において最大耐力に達するのは、X/Y合力では原点から半径方向に加力し円周軌道に乗る時点であり、X/Y方向別の最大値は、円周軌道上で最初にX軸、或いはY軸を横切る時点である。X/Y合力の解析による最大耐力は試験値より9%小さく、またX、Y方向ごとの最大値はX方向で15%、Y方向で26%小さく、他の加力パターンに比べて試験値と解析値の差が大きい。せん断力-全体変形関係で明らかのように、解析値は全体変形角 $=5.12 \times 10^{-3}$ 以降で急激な耐力低下が生じているが、試験値では耐力の低下は小さい。

以上の結果から、解析値は、過去に受けた損傷が履歴性状に大きく影響する十字加力の場合には試験値を良く模擬でき、また载荷途中で応力ベクトルの向きが変化する矩形加力の場合にもほぼ試験値を模擬できると言える。しかし、载荷/除荷がはっきりせず、応力ベクトルの方向のみが大きく変動する円周加力では、復元力を最大2割ほど低く評価し、実際よりも構造靱性を過小評価する。本解析では簡略化した接触面密度関数モデルを採用しているが、主にひび割れ開口方向に拘束が高い場合に適合する。しかし、円周加力のようにひび割れ開口中のせん断変形が顕著な場合には、接触面で塑性異方性と損傷軟化が顕著となる⁵⁾。円周加力においては、せん断力伝達に関するこれらの要因を今後検討する必要がある。

5. 直交方向損傷の解析的評価

試験値と解析値の比較から、4方向ひび割れを考慮したプログラムによって直交方向に損傷・あるいは変形を受けた状態の復元力特性を概ね評価できた。そこで、このプログラムを用いて加力直交方向の損傷が壁の耐力・剛性に与える影響を定量的に検討する。

5.1 検討方法

Y方向に正負载荷して損傷を与えた後にX方向に1方向载荷し、無傷の場合と比べてX方向の耐力・剛性の低減率を評価する。

評価対象とする構造体はボックス壁と円筒壁で、前章で解析に用いたものと同じ形状である。Y方向の損傷レベルをパラメータとして、全体変形角として $2,4,6 \times 10^{-3}$ の3レベルを設定した。加力パターンを図-7に示す。

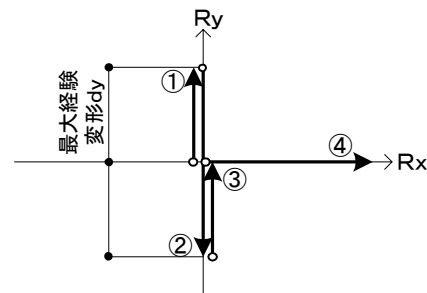


図-7 損傷影響評価用の加力パターン

5.2 検討結果

Y方向の損傷レベルを変化させたX方向のせん断力-全体変形角関係を、Y方向の損傷が無い場合と合わせて図-8に示す。また、損傷が無い場合のせん断力を基準として、Y方向に損傷を与えた場合の同一変形レベルにおけるせん断力比を図-9に示す。

ボックス壁、円筒壁共Y方向の経験変形が 4×10^{-3} 以下では、Y方向の損傷が無い場合に対する耐力・剛性の低下は変形レベルが小さい領域を除いて殆ど無い。しかし、経験変形が 6×10^{-3} では明らかな低下が見られ、X方向の全体変形角が 4×10^{-3} の時点でせん断力は約20%低下した。全体変形角が 4×10^{-3} では壁縦筋の降伏が、 6×10^{-3} では脚部コンクリートの圧壊が発生しているため、コンクリートの圧壊が発生するまでは直交方向損傷の影響は小さいと言える。

また、ボックス壁と円筒壁では直交方向損傷の影響が異なり、ボックス壁では小さな損傷があることにより剛性及び最大耐力以降の靱性が向上している。

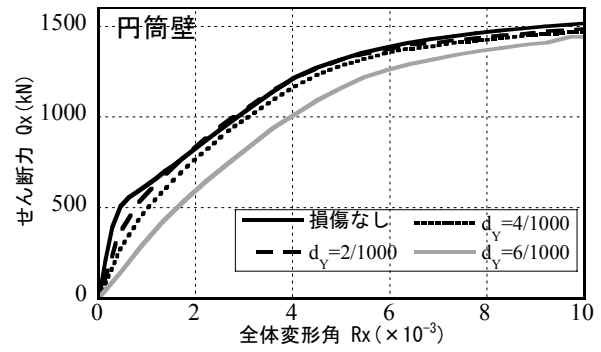
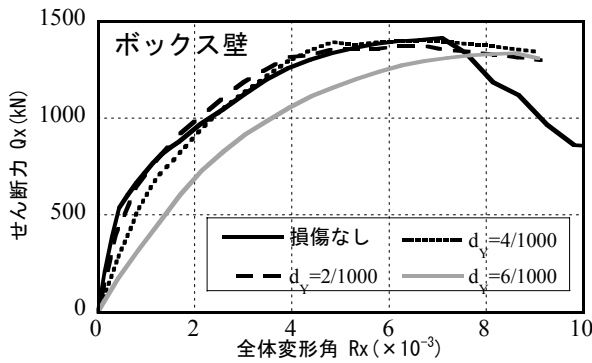


図-8 直交方向最大経験変形の大きさがせん断力-全体変形角に及ぼす影響

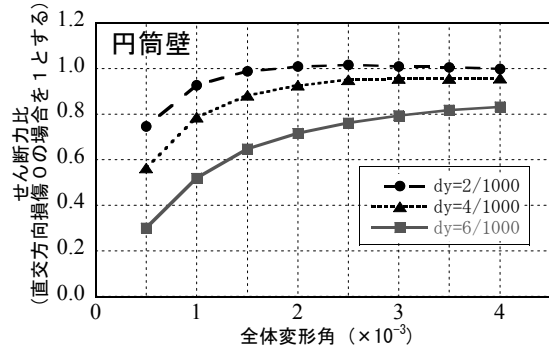
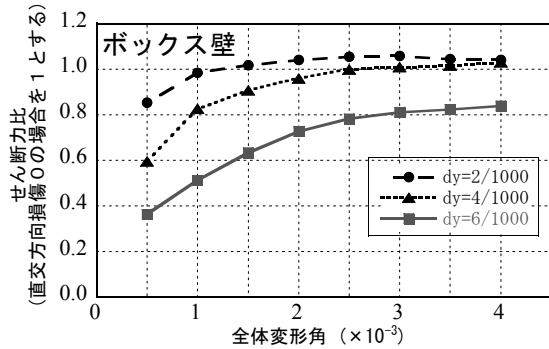


図-9 直交方向最大経験変形の影響によるせん断力の低下率

6. まとめ

水平2方向から同時に地震力を受けるRC立体耐震壁の弾塑性挙動を明らかにするための試験の一環として、独立4方向までのひび割れが考慮できるコンクリート構成モデルによるボックス壁及び円筒壁の加力解析を実施し、以下の知見を得た。

(1) 試験結果と解析結果を比較した結果、本プログラムで水平2方向同時加力を受けるRC立体耐震壁の挙動を概ね模擬できることがわかった。ただし、円周加力の様にひずみレベルの変化が小さく、主軸だけが変化するような加力パターンに対しては、最大復元力を2割程度低く見積もる結果となった。

(2) 本プログラムを用いて加力直交方向の損傷が耐力・剛性に与える影響を検討した。

その結果、直交方向加力による損傷が、全体変形角でコンクリートの圧壊が生じない 4×10^{-3} 程度であれば、最大耐力及び耐力時の剛性に与える影響はごく小さいことがわかった。

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) 寺崎 浩, 北田 義夫ほか: 水平2方向同時加力を受けるRC立体耐震壁の復元力特性(その3:試験概要), (その4:試験結果), 建築学会大会梗概集, C-2, pp573-576, 2001.9
- 2) 寺崎 浩, 北田 義夫ほか: 同名(その6)追加試験の結果と概要, 建築学会大会梗概集, C-2, pp459-460, 2002.8
- 3) 福浦 尚之, 前川 宏一: 非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集 No. 634/V-45, pp177-195, 1999.11
- 4) 山田 守ほか: ひびわれを有するRC平板の軸力・せん断力組合せ応力下のせん断挙動(その4: ひびわれ面せん断伝達モデルの提案) 建築学会大会梗概集, C-2, pp363-364, 1999.9
- 5) Bujadham, B. and Maekawa, K.: The universal model for stress transfer across cracks in concrete, Proc. of JSCE, No.451/V-17, pp.277-287, August, 1992.