

論文 原子力施設円筒形耐震壁の耐震補強後のせん断性状

渡辺 英義^{*1}・小野 英雄^{*2}・岡村 丈史^{*3}・瀧口 克己^{*4}

要旨：既存原子力施設の円筒形耐震壁の耐震性を向上させる方策として、壁の片面に壁筋とシヤーコネクタを増設した後にコンクリートを打設して一体化・増厚する耐震補強法が考えられる。この補強方法の妥当性を確認し、せん断耐力や復元力特性の評価法を検討するため、縮小試験体による静的加力実験を実施した。試験体は補強後の状態を模擬して壁筋のダブル配筋内外の配筋量を変えたものと、比較対象として鉄筋総量を等しくし内外の壁筋を均等配筋したものの2体である。実験の結果、せん断破壊する終局状態まで両者の挙動に大きな差はみられず、せん断耐力も同等であることが明らかとなった。

キーワード：原子力施設, 円筒形耐震壁, 耐震補強, 構造実験, せん断耐力

1. はじめに

原子力施設には高度な耐震安全性が求められている。加圧水型原子炉の外部遮蔽壁は、円筒形の耐震壁として大きな地震力を負担するように設計されており、せん断耐力のより適切な評価が必要となっている。

原子力施設の耐震性向上の観点から、上記のような円筒形耐震壁を耐震補強する場合、壁の片面に縦横の壁筋を増量しコンクリートを打設して一体化・増厚する方法が考えられるが、このような補強法を対象とした実験的検証は少ない。本論では、上記の耐震補強法の妥当性の確認とせん断性状の把握のために行った構造実験の計画と結果について述べ、せん断耐力や復元力特性の評価法について検討する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体形状を図-1に、試験区間の配筋を図-2に示す。試験体は補強後の状態を模擬した試験体Aと比較対象の試験体Bの計2体である。試験区間の壁厚は110mm、外径寸法は2100mmであり、試験区間の上下には加力のための剛強な基礎スタブおよび加力スタブを設けている。壁内法高さは、補強を想定する部位の地震応答解析結果と試験体のシヤスパン比がほぼ等しくなるように1800mmとした。

試験体Aは壁の内面に補強を行うことを想定しており、壁筋にD6とD10を用いて表-1に示すように縦横とも内側に外側の約2倍の壁筋を配筋した試験体である。試験体Bは比較対象として、試験体Aと鉄筋総量を同等とし、既往の多くの実験と同様に内外の鉄筋の径と間隔を等しくした試験体である。内外を区別せずに鉄筋総量で

計算した両試験体の壁筋比 P_s は、縦筋が $P_{sv}=1.49\sim1.50\%$ 、横筋が $P_{sh}=0.73\%$ となっている。本実験の試験体は縮小試験体のため、コンクリートの打継面とシヤーコネクタは再現していないが、別途実施した実大実験の結果より打継面が存在する影響は殆どないことが明らかとなっている。また、ひび割れの発生状況やせん断耐力に寸法効果が影響することが懸念されるが、原子力施設の耐震壁を対象とした寸法効果についての既往の研究¹⁾より、試験体の寸法、鉄筋径、粗骨材の最大寸法による

表-1 試験体一覧

		試験体A (偏在配筋)		試験体B (均等配筋)	
		配筋	鉄筋比(%)	配筋	鉄筋比(%)
外側	縦筋	D6-@64	0.45	D10-@89	0.73
	横筋	D6-@120	0.24	D6-@80	0.36
内側	縦筋	D10-@61	1.06	D10-@85	0.76
	横筋	D6-@60	0.48	D6-@80	0.36
内外区別せず鉄筋総量 で計算した壁筋比(%)		縦筋	1.50	縦筋	1.49
		横筋	0.73	横筋	0.73

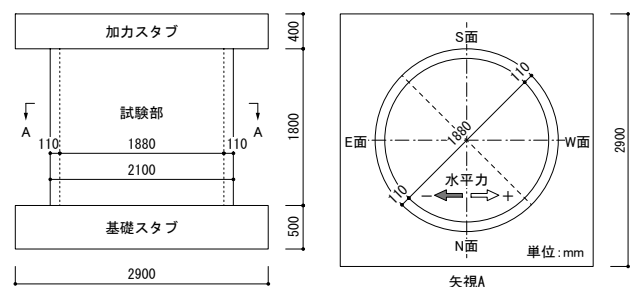


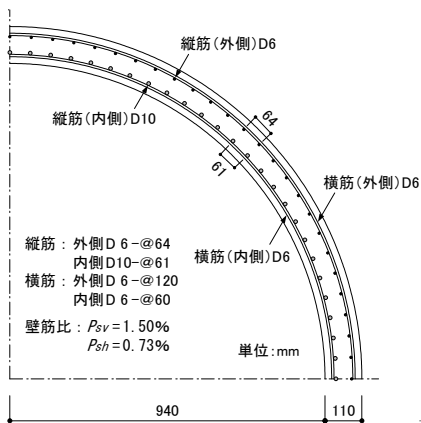
図-1 試験体形状

*1 大成建設(株) 技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 大成建設(株) 設計本部 博士(工学)

*3 関西電力(株) 原子力事業本部

*4 東京工業大学名誉教授 工博 (正会員)



図－2 試験区間の配筋（試験体 A）

差異は、耐震性能の評価・検討という観点からは実用上考慮する必要がない程度であることが示されている。

2.2 使用材料

コンクリートの材料試験結果を表－2 に示す。コンクリートには実験時の圧縮強度 30 N/mm^2 を目標とした普通コンクリートを用いた。打設は基礎スタブ、試験部、加力スタブの 3 回に分けて行い、試験部には呼び強度 27 N/mm^2 、目標スランプ 18 cm 、粗骨材最大寸法 13 mm のものを、スタブには呼び強度 24 N/mm^2 、目標スランプ 15 cm 、粗骨材最大寸法 20 mm のものを打設した。表－2 中の結果は、試験体 A、B の 2 体の加力実験日に実施した材料試験結果を平均したものである。

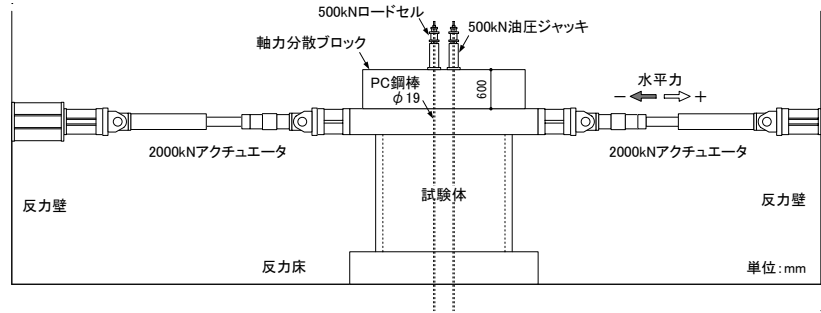
鉄筋の材料特性を表－3 に示す。壁筋 D6、D10 には SD345 を用い、D6 は冷間加工の影響で応力ひずみ関係の降伏棚が明確でなかったため、残留応力の除去と強度調整のための焼きなまし処理をしたものを用いた。

2.3 加力・測定

加力方法を図－3 に示す。せん断力は加力スタブに対向して取り付けた 4 台の 2000 kN アクチュエータを変位制御で押し引きすることによって加力した。壁に作用させる軸応力度は、既往の実験²⁾を参考に 1.46 N/mm^2 とし、加力スタブ上部に設置した軸力分散ブロックと 500 kN 油圧ジャッキ 4 台によって載荷し、試験中は常に目標値となるように定圧装置を用いて制御した。

載荷履歴は既往の実験²⁾と同様とし、全体変形角 $R = \pm 0.5/1000$ 、 $\pm 1/1000$ 、 $\pm 2/1000$ 、 $\pm 4/1000$ 、 $\pm 6/1000$ 、 $\pm 8/1000$ を各 2 回ずつ計 12 回の正負交番繰返し載荷を行った後、終局状態での耐力低下状況を確認するため約 $R = 15/1000$ の大変形まで加力した。

測定はせん断力と軸力のほか、全体変形、変形成分を分離するための試験区間内の鉛直方向の区間変位、各所の壁筋ひずみ等について行った。



図－3 加力方法（立面図）

表－2 コンクリートの材料試験結果

部位	試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm^2)
試験部	A, B	36.2	29.5	0.22	2.58
	A	41.6	29.9	0.21	3.06
	B	36.5	28.3	0.20	3.03
加力スタブ	A	35.2	28.5	0.20	2.53
	B	31.7	26.4	0.20	2.34

表－3 鉄筋の材料特性

鉄筋種類		降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)
試験部	壁筋 D6	394	541	23.9
	壁筋 D10	406	574	22.5
スタブ	主筋 D22	372	562	26.1
	配筋筋 D16	394	584	22.0
	幅止筋 D13	345	480	27.5

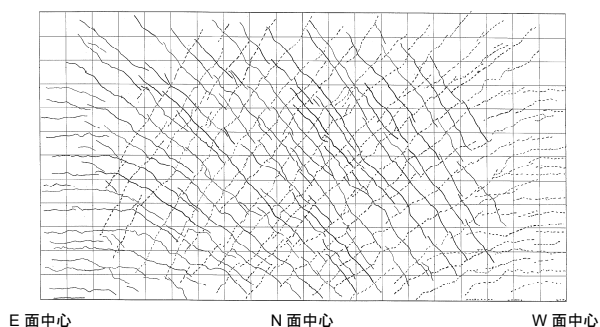
3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生状況

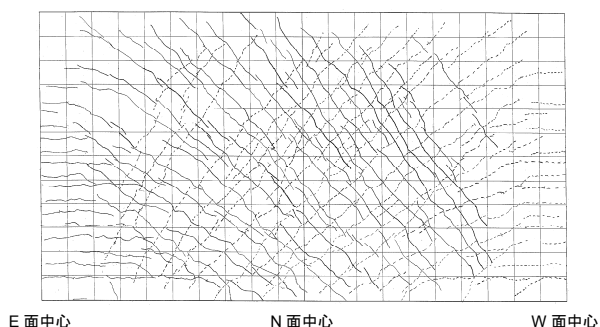
両試験体のひび割れ発生状況を図－4 に、最終破壊状況を写真－1 に示す。図－4 は $R = \pm 4/1000$ 時のひび割れ発生状況であり、図－1 中に示した試験部の N 面を中心とした ± 90 度の範囲の外側の展開図である。

実験開始後、両試験体とも $R = \pm 0.5/1000$ の加力で円筒壁のフランジに相当する E 面と W 面の脚部に曲げひび割れが、 $R = \pm 1/1000$ の加力でウェブに相当する N 面と S 面にせん断ひび割れが発生した。以降の加力で壁全面にそれらのひび割れが分散して多数発生したが、試験体 A、B でひび割れの発生状況に大きな違いはみられなかった。後述する変形分離による検討の結果、図－4 に示す $R = \pm 4/1000$ 時のせん断変形角は $\gamma = 2.8/1000$ 程度となっており、この時点で設計で考慮している範囲を超えているが、以後の $R = \pm 8/1000$ の加力まで顕著な損傷や破壊は観察されていない。

最終加力時には、試験体 A が $R = 12.5/1000$ 、試験体 B が $R = 15.1/1000$ で、写真－1 に示すようにウェブ面の N、S 面から圧縮フランジ面の W 面にかけての領域で激しい



(1) 試験体 A (偏在配筋)



(2) 試験体 B (均等配筋)

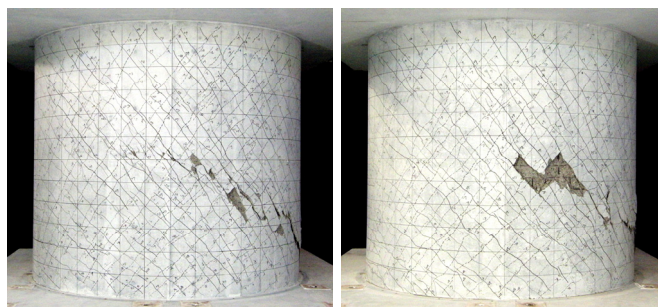
図-4 ひび割れ発生状況 ($R=\pm 4/1000$ 時)

破壊が発生した。両試験体ともせん断ひび割れが大きく開口してせん断破壊しており、破壊モードに大きな違いはみられなかった。また、実験終了後に両試験体の内面の破壊状況を観察したが、外側と内面の破壊状況に顕著な差異はみられなかった。

3.2 せん断力-全体変形角関係

両試験体のせん断力 Q - 全体変形角 R 関係の実験結果を図-5 に示す。図中の破線は原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008³⁾ に示されている評価式によるせん断耐力の計算値であり、ウェブに相当する面に大きなせん断ひび割れが発生した時点を○で、最大耐力時を▼で示している。

両試験体の初期剛性やひび割れ発生荷重はほぼ同等であった。せん断ひび割れの発生による剛性低下後には、ウェブ面の横筋の降伏が $R=\pm 4/1000$ の加力で、引張側フランジ脚部の縦筋の降伏が $R=\pm 6/1000$ の加力で観察された。最大耐力 Q_{max} は $R=\pm 8/1000$ の加力終了後の最終加力時に確認され、試験体 A では $Q_{max}=1966\text{ kN}$ 、試験体 B では $Q_{max}=2067\text{ kN}$ であった。試験体 A の Q_{max} は計算値よりも約 5% 低くなっているが、JEAC4601-2008 の評価式は 57 体の実験結果から得られたせん断耐力の実験値の平均を評価する式⁴⁾ であり、両試験体の結果は文献⁴⁾ に示されている実験データの分布 (実験値/計算値の平均 1.00, 標準偏差 0.12) と同等の範囲内にあり、最大耐力は JEAC4601-2008 に示されているせん断耐力式



(1) 試験体 A (偏在配筋)

(2) 試験体 B (均等配筋)

写真-1 最終破壊状況 (N 面)

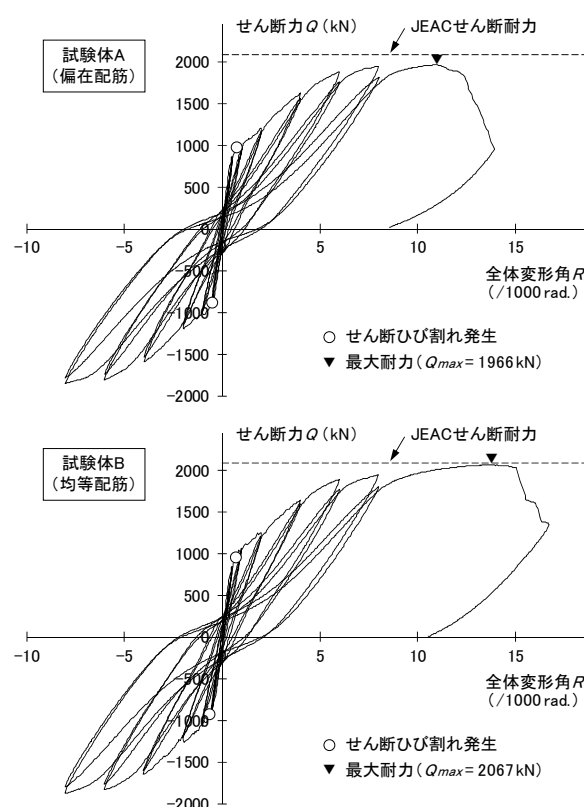


図-5 せん断力-全体変形角関係

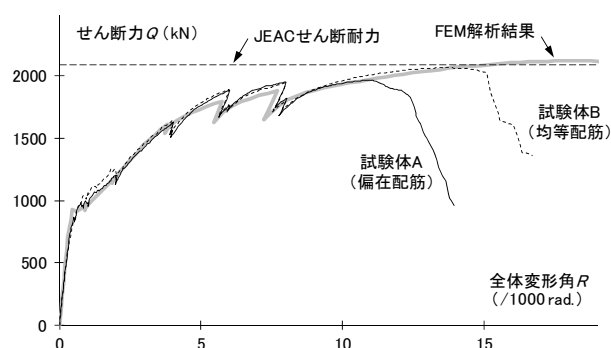


図-6 包絡線の比較

で評価できていると言える。最大耐力後は、前節で述べた通り、ウェブから圧縮フランジにかけての領域が激しくせん断破壊し、大きく耐力低下している。

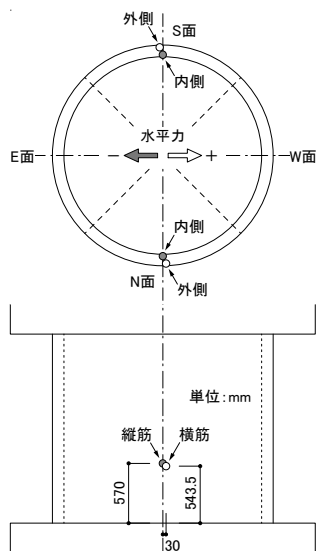


図-7 壁筋のひずみ測定位置

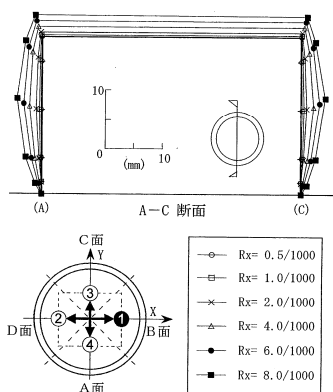
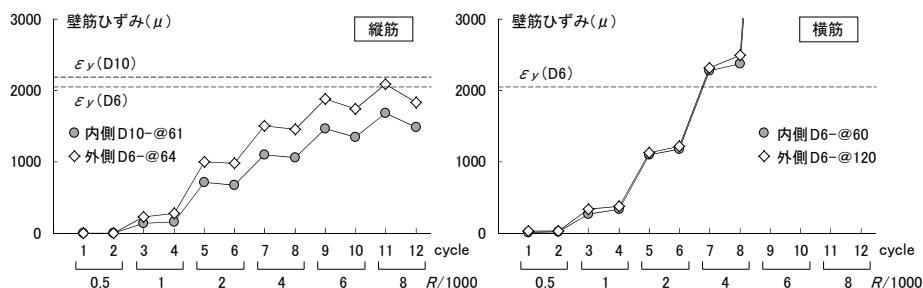
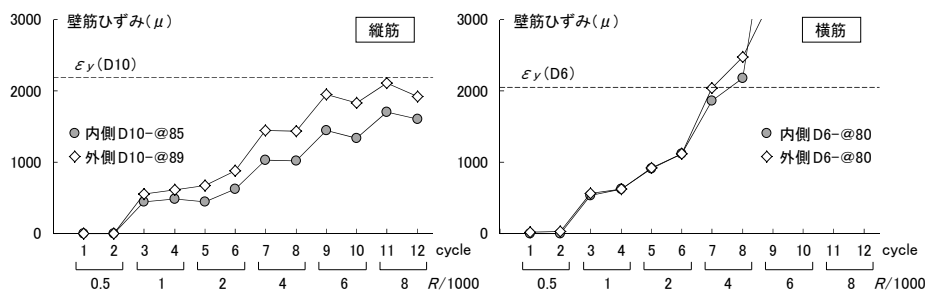


図-9 円筒壁ウェブ面の変形状態
(文献²⁾のpp. 5-56を加工して転載)



(1) 試験体 A (偏在配筋)



(2) 試験体 B (均等配筋)

図-8 内側と外側の壁筋ひずみの比較

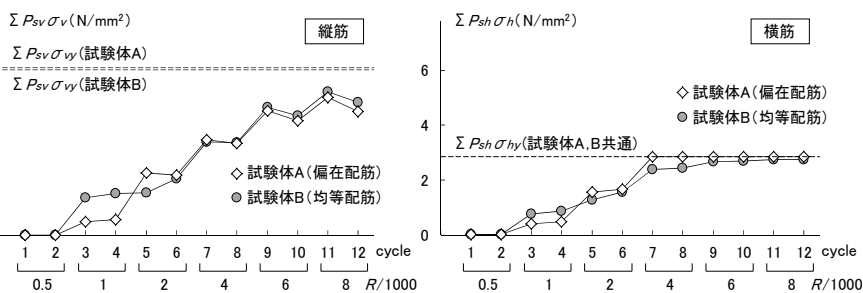


図-10 縦筋と横筋の補強効果

$Q-R$ 関係の正側包絡線の比較を図-6 に示す。同図中には、本実験の材料試験結果と文献⁵⁾に示されている RC 要素の構成モデルを用いた試験体 A の FEM 解析結果をあわせて示している。両試験体の包絡線は、最終加力時のせん断破壊発生タイミングが多少異なるものの、 $R=\pm 8/1000$ の加力終了時までにはほとんど一致しており、 $Q-R$ 関係に及ぼす壁筋の内外偏在の影響はないといえる。FEM 解析結果は、せん断破壊し大きく耐力低下する最終状況までは再現できていないが、 $R=10/1000$ 程度の大変形時までは実験結果とよく一致しており、文献⁵⁾の構成モデルを用いた FEM 解析によって円筒形耐震壁の地震時挙動を精度よく評価できると考えられる。

4. 結果の検討

4.1 壁筋のひずみ性状と補強効果

ここでは円筒形の耐震壁において、ダブル配筋された壁筋の配筋量が内側と外側で異なることによる影響について検討を行う。実験では、ウェブに相当する N, S 面の図-7 に示す位置で内外の縦筋と横筋のひずみをゲージ

によって測定している。両試験体の壁筋ひずみを内側と外側で比較して図-8 に示す。同図は各加力サイクルのピーク時の結果であり、正負および南北のひずみの測定結果を平均したものである。

両試験体とも図-7 の位置での壁筋のひずみは、せん断ひび割れが発生した $R=\pm 1/1000$ の加力から増加し始めており、以後の加力でも試験体 A, B の全体的なひずみ性状に大きな違いはみられない。横筋は $R=\pm 4/1000$ の加力で降伏しており、内側と外側のひずみはほぼ等しい。縦筋については、 $R=\pm 8/1000$ の加力まで降伏しておらず、また、内側よりも外側の壁筋ひずみが大きい傾向にある。この現象は均等配筋された試験体 B においても観察されており、配筋量が内側と外側で異なることによる影響ではなく、円筒壁のウェブ面が面外に変形していることが原因で発生していると考えられる。本実験では測定していないが、文献²⁾の円筒壁の実験では基礎スタブを基準とした壁面各所の変位測定が行われている。文献²⁾に示されている円筒壁のウェブ面の変形状態を図-9 に転載

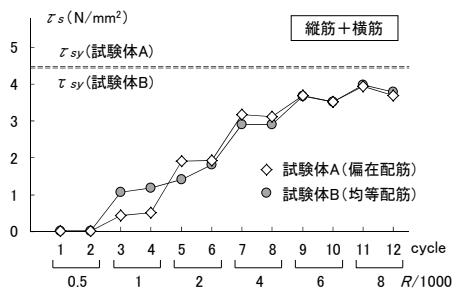


図-11 壁筋の補強効果の比較

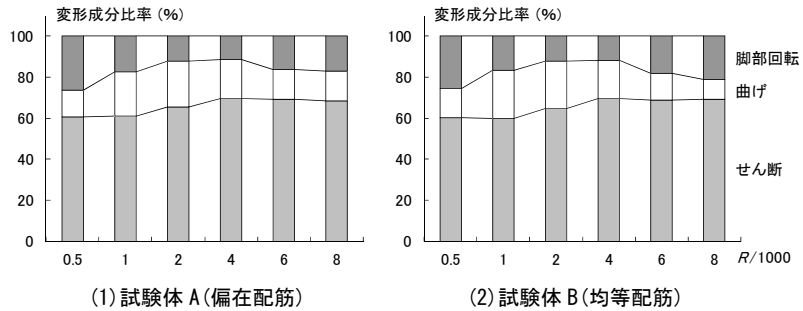


図-12 各変形成分の比率の推移

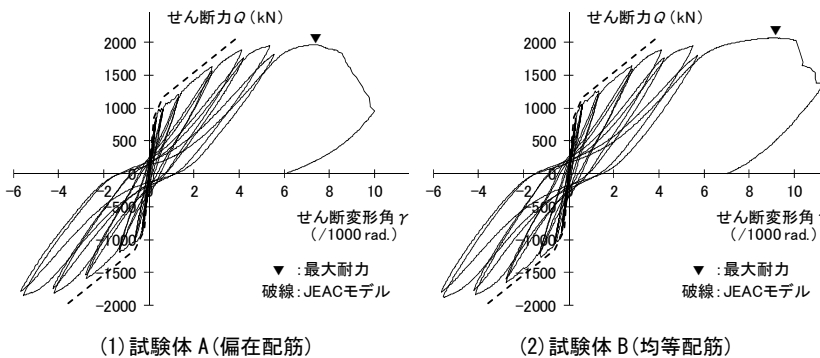


図-13 せん断力-せん断変形角関係

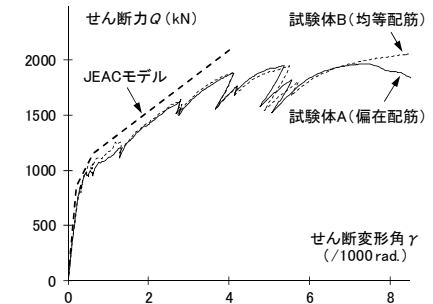


図-14 Q-γ関係の包絡線と既往の評価法との比較

して示す。同図は図中①の方向に加力した時のウェブに相当する A, C 面中央位置での壁高さ方向の変位分布であり、水平力を受ける円筒壁のウェブ面は、加力初期の段階から提灯形に面外変形していることが分かる。本実験の試験体も同様の変形状態となっており、その結果として外側の縦筋のひずみが内側よりも大きくなっているものと推測できる。

JEAC4601-2008 に示されているせん断耐力式では、壁筋の補強効果 τ_s は、縦筋の補強効果と横筋の補強効果を平均した式(1)によって評価されている。

$$\tau_s = (P_{sv} + P_{sh}) \sigma_y / 2 \quad (1)$$

ここに P_{sv} :縦筋比 P_{sh} :横筋比 σ_y :降伏強度
両試験体の縦筋と横筋の補強効果の実験結果を図-10に示す。同図は図-8 の内側および外側の壁筋ひずみの実験結果に各々の壁筋比とヤング係数を乗じたものの和であり、試験体 A, B の結果を比較して示している。図-10 より、加力初期で多数のせん断ひび割れの発生途中の $R = \pm 2/1000$ までの加力は、ゲージ貼付位置での限られた測定値を用いた検討のため両試験体の補強効果に多少の違いがみられるが、せん断ひび割れの発生がほぼ収束した $R = \pm 4/1000$ の加力以後は両試験体の壁筋の補強効果はおおむね等しくなっている。

式(1)と同様に縦筋と横筋の補強効果を平均した結果を図-11に示す。同図より、本実験で確認した範囲内では、壁筋の配筋量が内側と外側で異なる場合でも、その補強効果は均等配筋の場合と同等と考えて良く、

JEAC4601-2008 に示されている式(1)を用いてせん断耐力を評価することができるといえる。

4.2 Q-γ関係と既往の評価法との比較

実験では、試験部の高さ方向を9区間に分割し、フランジに相当する E, W 面の中心位置で各区間の鉛直方向変位を測定している。それらの計測データから各区間の平均曲率を算出し、最下段から脚部回転変形を、上部の8区間から曲げ変形を計算でき、全体変形から両者を差し引くことによってせん断変形を求めることができる。上記の方法によって算出した両試験体のせん断変形、曲げ変形、脚部回転変形の各変形成分の比率の推移を図-12に示す。同図は、各加力サイクルの正負1回目ピーク時の結果を平均したものである。

両試験体の第1サイクルの $R = 0.5/1000$ 時の各変形成分の比率は、せん断変形成分 60%、曲げ変形成分 15%、脚部回転変形成分 25%程度であり、以後の加力でもせん断変形成分が大部分を占めている。 $R = 1 \sim 2/1000$ の加力では、フランジに相当する E, W 面の中央付近の領域まで曲げひび割れが発生したため、曲げ変形成分が増加し、脚部回転変形成分が減少する傾向にあるが、 $R = 4/1000$ の加力以降は引張側フランジ脚部の縦筋が降伏しはじめたため、脚部回転変形成分が漸増している。

両試験体のせん断力-せん断変形角 γ 関係を図-13に、 $Q - \gamma$ 関係の正側包絡線を比較して図-14に示す。両図のせん断変形角 γ は上記の変形分離の検討から得られたせん断変形を試験部の内法高さで除したものである。

前章で示した $Q-R$ 関係と同様に、両試験体の $Q-\gamma$ 関係は $\gamma=6/1000$ の大変形レベルまではほぼ一致しており、壁筋の内外偏在の影響はみられない。

図-13,14 中には JEAC4601-2008 に示されている復元力特性モデル（以下、JEAC モデル）による $Q-\gamma$ 関係の評価結果を破線で示している。 $Q-\gamma$ 関係の初期剛性やせん断ひび割れ発生後の剛性低下の状況など、JEAC モデルによる評価結果と両試験体の実験結果はよく一致しており、本実験と同等の諸元を有する円筒形耐震壁の復元力特性は JEAC モデルによって精度良く評価できると考えられる。

5. まとめ

円筒形の耐震壁を耐震補強することを想定して壁筋のダブル配筋内外の配筋量を変えた試験体と、比較対象として鉄筋総量を等しくし内外の壁筋を均等配筋した試験体の計 2 体の静的加力実験を実施した。得られた知見を以下に列挙してまとめとする。

- (1) 本実験で確認した範囲内では、ひび割れ発生状況や荷重-変形関係におよぼすダブル配筋された壁筋の内外偏在の影響はない。
- (2) 配筋量が内側と外側で異なる場合でも、壁筋のせん断補強効果は均等配筋の場合と同等と考えて良く、JEAC4601-2008 に示されている方法によってせん断耐力を評価することができる。
- (3) 本実験と同等の諸元を有する円筒壁の復元力特性は、JEAC モデルによって精度良く評価できる。

参考文献

- 1) 岡田恒男, 秋野金次, 吉崎征二, 稲田泰夫, 菅野俊介: 原子炉建屋の復元力特性試験 (その 6) スケール・イフェクト試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.1089-1090, 1986.8
- 2) 原子力安全基盤機構: 耐震安全解析コード改良試験に関する報告書 原子炉建屋の多入力試験 (URL: http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/gijyutsu/itakujigyo/2002_nupec.html), 2002.3
- 3) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008), 2009.12
- 4) 吉崎征二, 江崎哲朗, 是永健好, 外村憲太郎: 多数の小開口を持つ耐震壁の強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp.201-204, 1983
- 5) 小野英雄, 北田義夫, 新谷耕平, 西川孝夫: 水平 2 方向同時加力を受ける RC 造立体耐震壁のせん断耐力・変形性能に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.139-146, 2004.1