

論文 X 形配筋を施した柱型のないせん断型 RC 造壁のせん断耐力に関する研究

直川 周平*1・孫 玉平*2・竹内 崇*3・魏 丞瑾*1

要旨：本研究では、比較的高い軸力下での柱型のないせん断型耐力壁に対する X 形配筋した集中鉄筋によるせん断耐力向上効果について明らかにすることを目的とし、軸力比と横筋比を実験変数として、3 体の RC 造せん断型耐力壁試験体について一定軸力下における繰り返し載荷実験を行い、せん断破壊の抑制と靱性能の向上効果について検討した。その結果、X 形配筋した集中鉄筋を有する耐力壁は、軸力比 0.15 の軸力下においても、一般的に配筋される程度の横筋比を有すれば、高い靱性を発揮することを明らかにした。また、終局強度型耐震設計指針に基づいたせん断耐力式により、耐力壁のせん断耐力を精度良く評価することが出来た。

キーワード：柱型のない壁、せん断型耐力壁、X 形配筋、終局せん断耐力、靱性

1. はじめに

現在、建物の耐震性能確保のために欠かせない部材として広く使用されている RC 造耐力壁の多くは、両端柱付き壁である。2010 年に改訂された RC 造計算規準¹⁾では、耐力壁の柱型の推奨規定が緩和され、柱型のない耐力壁の許容応力度設計法が提示されたので、日本においても柱型のない耐力壁が許容されるようになっている。

柱型のない耐力壁を採用することで建築空間を有効に活用できるほか、採光口や通路を容易に設けることが出来、設計の自由度が高いといった利点があり、耐震性能を確保しながらも、建物の利便性や快適性を高めることができる有効な構造要素として活用することが期待できる。

一方、水平抵抗力の構造要素として用いる場合、柱型のない耐力壁は両端柱付き壁よりも剛性と耐力が小さく、同規模の地震動を受ける際に、壁は大きく変形させられるので高い靱性を確保する必要がある。そのため、柱型のない耐力壁においては境界要素として壁の両端に集中的に縦筋（以下、集中鉄筋と称す）を配置して、壁の剛性と曲げ耐力を向上させることが一般的である。しかし、このような集中鉄筋の配置方法は壁のせん断耐力の向上につながらず、壁の靱性改善には寄与しがたい。

上下梁をもつ RC 造耐力壁においては、境界要素の存在は壁板中央部付近のコンクリートに大きなせん断応力を生じさせ、コンクリートの早期せん断破壊に繋がるため、靱性向上の妨げとなる。一方で、境界要素を構成する鉄筋を束ねて、壁の対角線方向に沿って X 形に配置すれば、壁板のコンクリートに生じるせん断応力を低く抑えることができるだけでなく X 形に配筋した集中鉄筋の軸耐力を活かし、柱型のない耐力壁の剛性、耐力およ

び靱性能の同時向上が期待できる。

著者らはこれまでに、前述した発想の妥当性と効果を実証するために、層崩壊機構が先行し、せん断変形が卓越するような中低層建築物に用いるせん断型耐力壁について一定軸力下における載荷実験を行った。軸力比 0.05 と比較的低い軸力を受ける場合、集中鉄筋を壁断面の両端に材軸方向に平行配置した試験体は典型的なせん断破壊をしたのに対して、集中鉄筋を X 形配筋した試験体はせん断破壊を抑制出来、大変形域まで紡錘形履歴ループを描き、高い変形性能とエネルギー吸収性能を示すことを明らかにした。²⁾

本研究では、その続きとして、軸力比 0.15 程度の一定軸力下での X 形配筋された柱型のないせん断型耐力壁の履歴挙動を明らかにすることを目的とした。また、X 形配筋したせん断型 RC 造耐力壁の終局耐力の評価方法に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 試験体概要

図-1 と表-1 に試験体の配筋詳細と一覧を示す。試験体は実大スケールの 1/2 程度の柱型のない壁を想定したもので、上下に加力スタブを有する厚さ($t=$)150mm、壁せい($D=$)600mm、高さ 1000mm の RC 壁である。試験体は 3 体で、実験変数は軸力比と横筋比である。

試験体 WD08-15XD03 と WD08-20XD03 は、壁の縦筋として D6 異形鉄筋を 130mm の間隔で 10 本ダブル配置し、横筋は 135 度フックのフープ筋を 130mm 間隔とした。X 形配筋された集中鉄筋の水平抵抗の効果を探るため、必要最低限の横筋を配置した。4 本の D13 異形鉄筋からなる集中鉄筋の早期座屈を防ぐため、集中鉄筋径の

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

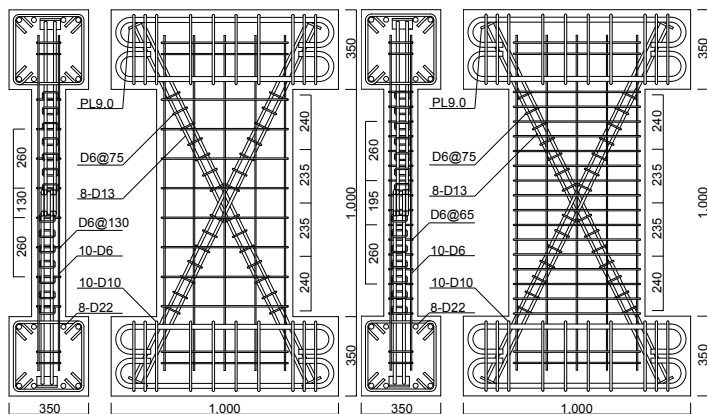
*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

表－1 試験体一覧

試験体	a/D	f_c (N/mm ²)	n	集中鉄筋			拘束筋	縦筋		横筋		Q_{exp} (kN)	R_{exp} (×10 ⁻² rad.)
				配筋	配筋形式	p_g (%)	配筋	配筋	p_{vv} (%)	配筋	p_{wh} (%)		
WD08-15XD03	0.83	31.7	0.15	8-D13	X形配筋	1.13	D6@75	10-D6	0.35	D6@130	0.32	466	1.02
WD08-15XD06		32.9								D6@65	0.65	481	1.47
WD08-20XD03		31.6	0.20							D6@130	0.32	494	0.73

ここに、 a/D ：せん断スパン比、 f_c ：コンクリート圧縮強度、 n ：軸力比 ($=N/tDf_c$ 、 N ：軸力)、 p_g ：集中鉄筋比 ($=a_g/tD$ 、 a_g ：集中鉄筋の全断面面積)、 p_{vv} ：縦筋比、 p_{wh} ：横補強筋比、 Q_{exp} ：最大水平耐力実験値（正負平均）、 R_{exp} ：最大水平耐力時部材角（正負平均）



(a) WD08-15XD03, WD08-20XD03 (b) WD08-15XD06

図－1 試験体の配筋詳細

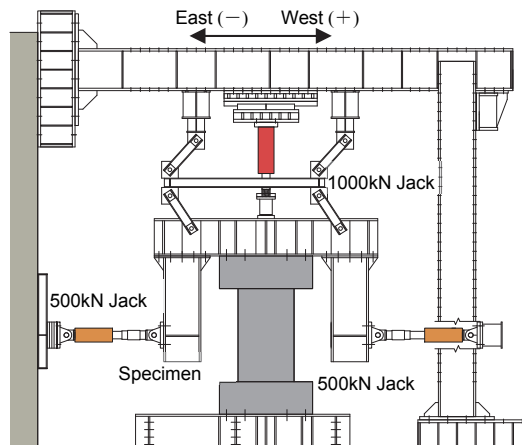
6倍以下の75mm間隔でD6帯筋を用いて束ねた。

試験体 WD08-15XD06 は、縦筋の配置と X 形配筋された集中鉄筋の配置は前述の二体の試験体と同様であるが、横筋は 135 度フックのフープ筋を 65mm 間隔で配筋し、一般的なせん断型壁の横筋比となるよう配置した。

D6 縦筋は上下端では直線定着としたが、D13 集中鉄筋は主筋端部を鋼板に溶接して定着した。使用した鋼材の引張試験結果を表－2 に示す。コンクリートは呼び強度 24N/mm² のレディーミクストコンクリートを使用し、各試験体の載荷日に行ったシリンダー圧縮強度は表－1 に示す通りである。使用した鋼材の引張試験結果を表－2 に示す。

2.2. 載荷方法・計測方法

図－2 に載荷装置を示す。1000kN 油圧ジャッキで所定の圧縮軸力を与えた状態で、2 本の 500kN ジャッキを用いて繰り返し水平力を作用させた。試験体は上下スタブと加力梁を PC 鋼棒で緊結する事で固定した。パンタグラフにより面外変形を抑制した状態で、上下スタブの平行を維持して載荷を行っており、反曲点は壁中央高さに位置する。載荷は部材角 R により制御し、図－3 に載荷プログラムを示す。水平および鉛直変位は図－4 に示す位置に設置した変位計で計測した。また、縦筋、横筋および集中鉄筋にひずみゲージを貼付し、鉄筋のひずみを計測した。縦筋においては、最外縁に位置する 2 本の鉄

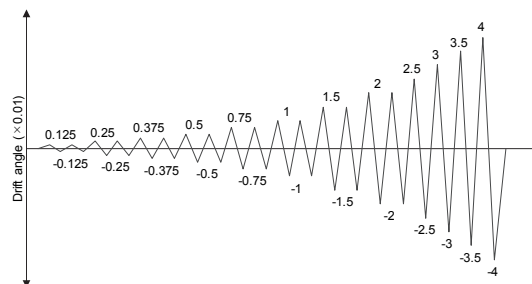


図－2 載荷装置概要

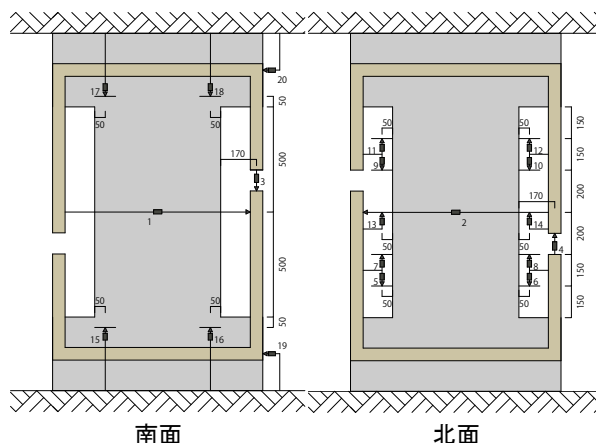
表－2 鋼材の力学的特性

		E_s (kN/mm ²)	f_y (N/mm ²)	ϵ_y ($\times 0.01$)	f_u (N/mm ²)
D6	SD295A	191	407	0.21	545
D13	SD345	184	403	0.21	581

E_s ：弾性係数、 f_y ：降伏点応力、 ϵ_y ： f_y 時ひずみ、 f_u ：引張強さ



図－3 載荷プログラム



図－4 変位計位置

筋に対して下スタブから 25mm, 975mm の位置でのひずみを計測し、横筋においては横筋比 0.3% の試験体は下スタブから 175mm, 435mm, 565mm, 825mm の位置のフープ筋のひずみを計測し、横筋比 0.6% の試験体は下スタブから 142.5mm, 402.5mm, 597.5mm, 857.5mm の位置のフープ筋のひずみを計測し、X 形配筋した集中鉄筋においては下スタブから 25mm, 265mm, 500mm, 735mm, 975mm の位置でのひずみを計測した。

3. 実験結果と考察

3.1. ひび割れ及び破壊性状

図-5 に各試験体の北面のひび割れ状況の変遷を示す。なお、図中のグリッド間隔は 50mm である。赤線は正側の載荷時に生じたひび割れ、青線は負側の載荷時に生じたひび割れ、黒塗り部は剥離した部分を示す。

試験体 WD08-15XD03：部材角 0.00125rad. のサイクルで曲げひび割れとせん断ひび割れが生じた。部材角 0.00375rad. のサイクルで D6 縦筋の降伏が確認され、0.005rad. のサイクルで X 形の集中鉄筋の降伏が確認された。同時に壁脚部で圧縮側コンクリートに軽微な剥離、縦ひび割れが確認された。部材角 0.0075rad. で圧縮側コンクリートの剥離が顕著となり、負側の最大耐力に達した。部材角 0.015rad. で圧縮側のかぶりコンクリートの崩落が発生し、この時点で、正側の最大耐力に達した。部材角 0.02rad. でせん断ひび割れの交差部のコンクリートの崩落が確認され、このサイクルの負側二回目の載荷途中 -0.01rad. 付近にて対角線上のせん断ひび割れの幅が顕著に拡大した。同時に施工上の困難により D6 拘束筋を配筋していなかった X 形配筋した集中鉄筋の交差部が座屈した。これらが要因となり、軸方向の変形、加力方向の水平変形が同時に急激に進行し、軸力の保持が困難となり実験終了に至った。

試験体 WD08-15XD06：部材角 0.00125rad. のサイクルで曲げひび割れとせん断ひび割れが生じた。部材角 0.00375rad. のサイクルで縦筋の降伏が確認され、0.005rad. のサイクルで X 形の集中鉄筋の降伏が確認された。同時に壁脚・壁頭で圧縮側コンクリートに軽微な剥離と縦ひび割れが確認された。部材角 0.0075rad. のサイクルで圧縮側コンクリートの剥離が顕著に進行し、部材角 0.01rad. でかぶりコンクリートの崩落が発生した。部材角 0.015rad. で縦ひび割れが発生した位置のかぶりコンクリートの崩落が進行した。この時点で、正側、負側ともに最大耐力に達した。部材角 0.02rad. のサイクルで壁脚の D6 縦筋の座屈を確認し、壁頭・壁脚で、圧縮側のかぶりコンクリートの崩落の範囲が拡大した。部材角 0.035rad. のサイクルで縦筋が破断し、コアコンクリートの崩落が確認された。部材角 0.04rad. のサイクルで壁脚・壁頭の X 形の集

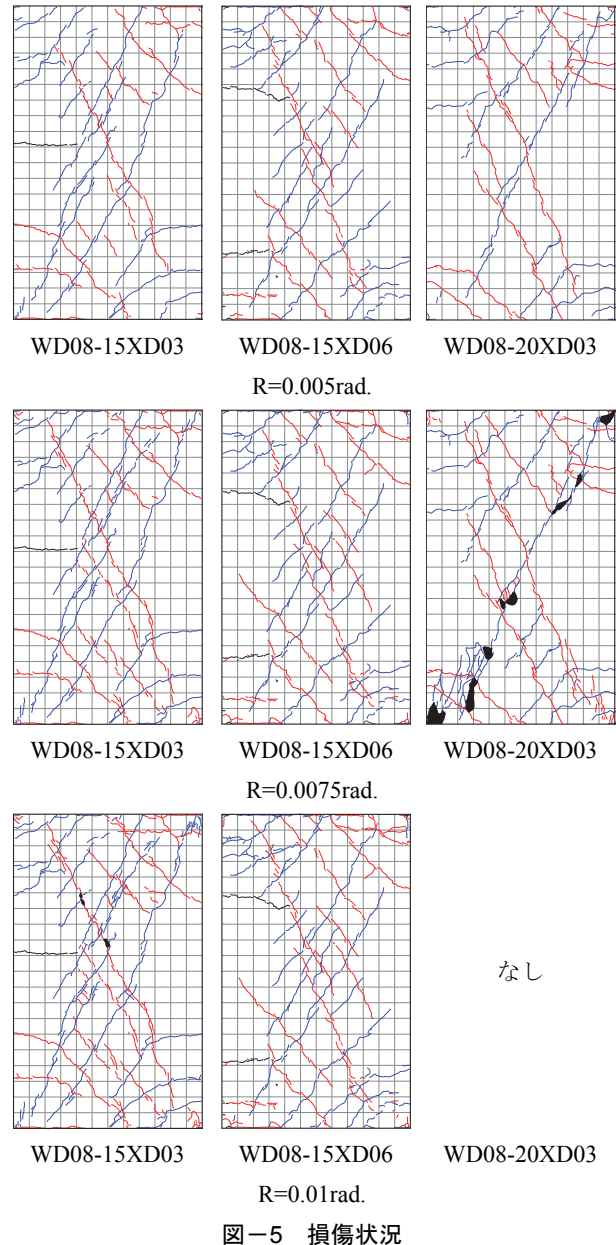


図-5 損傷状況

中鉄筋の座屈を確認し、負側の載荷途中軸力の保持が困難となり実験終了に至った。試験体 WD08-15XD03 と比較すると、試験体 WD08-15XD03 のせん断破壊の一因となった X 形配筋した集中鉄筋の交差部での座屈が、横筋比を増大させることで抑制できたことが分かる。

試験体 WD08-20XD03：部材角 0.00125rad. のサイクルで曲げひび割れが生じ、0.0025rad. のサイクルでせん断ひび割れが生じた。部材角 0.00375rad. のサイクルで D6 縦筋の降伏が確認され、0.005rad. のサイクルで X 形の集中鉄筋の降伏と圧縮側コンクリートに軽微な剥離が確認された。部材角 0.0075rad. のサイクルで縦ひび割れが確認され、壁の対角線上にせん断ひび割れの幅が顕著に拡大した。この時点で、正側、負側ともに最大耐力に達した。負側の目標部材角 0.0075rad. 付近で、耐力が低下すると同時に、水平変形が -0.01rad. 付近まで進んでしまい、コンク

リートの剥離といった損傷が急激に進んだ。部材角 0.01rad.のサイクルの負側の目標部材角時、壁の対角線に入ったせん断ひび割れに沿ってコンクリートの崩落、横筋の破断や X 形の集中鉄筋の交差部での座屈が起こり、軸力の保持が困難となり実験終了に至った。

3.2. 繰り返し履歴性状

図-6 に実験で得られた各試験体の水平力-部材角関係を示す。図中の破線は P- Δ 効果による耐力低下ラインを、赤丸は最大耐力点を示す。

試験体 WD08-15XD03 は曲げひび割れの発生や縦筋の降伏などが早期に発生するものの、水平力は上昇し続け、X 形集中鉄筋の降伏後、部材角 0.0075rad.サイクルの載荷途中で水平力はほぼ横ばいとなり、正側では部材角 0.015rad.サイクルの載荷途中 0.013rad.で最大耐力に達した。その後、部材角 0.02rad.の 1 回目のサイクルまで水平耐力をほぼ保持したが、試験体は負側 2 回目の載荷途中で、せん断ひび割れ幅の拡大と壁中央の X 形集中鉄筋の交差部での座屈により水平耐力が急激に低下し、曲げ降伏後のせん断破壊の履歴性状を示した。

試験体 WD08-15XD06 は、部材角 0.0075rad.サイクルまでは、試験体 WD08-15XD03 とほぼ同じ履歴性状を示し、正負側ともに部材角 0.015rad.サイクルで最大耐力に達した。その後、部材角 0.04rad.サイクルまで最大耐力の 8 割を保持し、非常に高い靱性能を示し、曲げ破壊の履歴性状を示した。

試験体 WD08-20XD03 は集中鉄筋の降伏後も水平力は上昇したが、部材角 0.0075rad.サイクルで最大耐力に達すると同時に、せん断ひび割れ幅の拡大と壁中央の集中鉄筋の交差部における座屈により急激な耐力の低下が生じ、せん断破壊の履歴性状を示した。

3.3. 軸方向変形

図-7 に実験で得られた各試験体の軸方向変形-部材角関係を示す。各部材角振幅の載荷終了後の上下スタブ間の鉛直変形を軸方向変形とし、図-4 の変位計 3, 4 で測定し、その平均値を表す。

試験体 WD08-15XD06 は部材角 0.035rad.サイクルまではほとんど初期の軸方向の変形量を保持していた。一方で試験体 WD08-15XD03, WD08-20XD03 はそれぞれ部材角 0.02rad.サイクル, 0.0075rad.サイクルで交差部が起因するせん断破壊に伴い大きく縮んだ。

3.4. 等価粘性減衰定数

図-8 は各試験体の等価粘性減衰定数の推移を示す。せん断破壊により耐力が大きく低下し、相対的に h_{eq} が上昇している箇所は点線で表している。どの試験体も 0.005rad.サイクルまでは h_{eq} は 5~10%の間にあった。

試験体 WD08-20XD03 と WD08-15XD03 はそれぞれ部材角 0.0075rad.と 0.02rad.サイクルでせん断変形が大きく

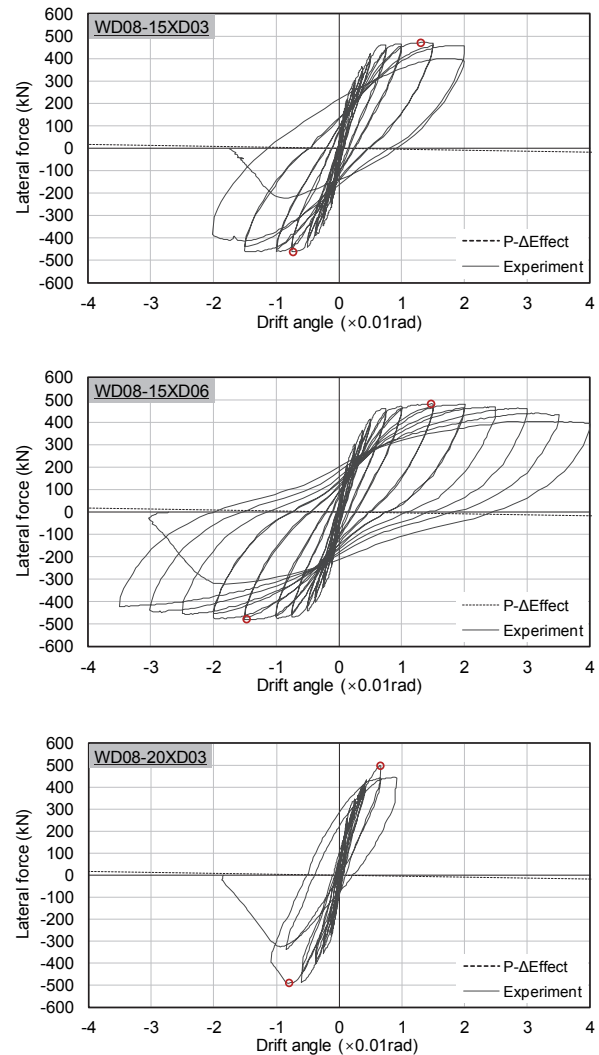


図-6 水平力-部材角関係

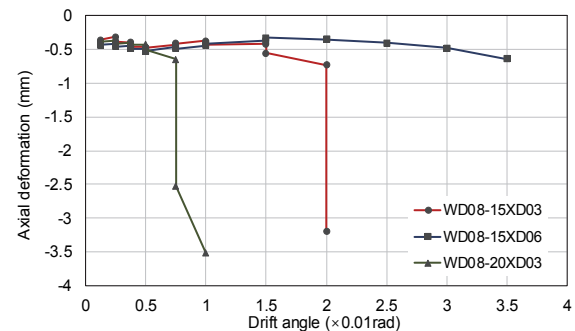


図-7 軸方向変形-部材角関係

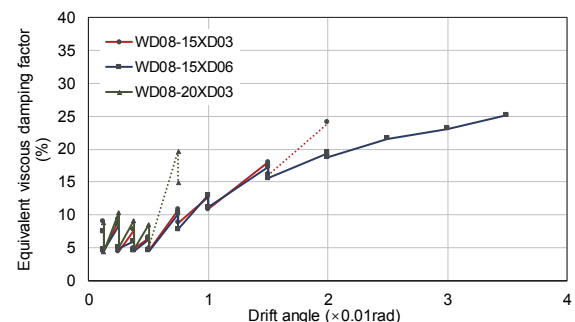


図-8 等価粘性減衰定数

表-3 主な実験結果一覧

	$cal Q_{pmu}$ kN	$cal Q_{xmu}$ kN	$cal Q_{mu}$ kN	$cal Q_{psu}$ kN	$cal Q_{xsu}$ kN	$cal Q_{su}$ kN	$exp Q_{mu}/cal Q_{su}$	$exp Q_u$ kN	$exp Q_u/cal Q_{mu}$	$exp Q_u/cal Q_{su}$
WD08-15XD03	301	178	479	240	178	418	1.15	466	0.97	1.11
WD08-15XD06	309	178	487	275	178	453	1.08	481	0.99	1.06
WD08-20XD03	377	178	555	251	178	429	1.29	494	0.89	1.15

ここに、 Q_{expu} ：最大水平力実験値

進行するまでは、 h_{eq} は他の試験体のそれらとほぼ同じ値で推移していることが分かる。また試験体 WD08-15XD06 は部材角 0.035rad.サイクルまで h_{eq} は上昇し続け、安定したエネルギー吸収性能を示した。

4. 終局耐力の評価

4.1. 試験体設計時の耐力評価

試験体の設計にあたっては、各試験体の終局曲げ耐力は式 (1)～(2)を、終局せん断耐力は式 (3)～(4)をそれぞれ単純累加して算定した。式 (1),(3),(4)は現行規準^{3,4)}に推奨されている算定式で式 (2)は X 形集中鉄筋の曲げ耐力への寄与分を表している。式 (1)～(4)で計算された終局耐力は主な実験結果とともに表-3 に示す。表-3 から分かるようにいずれの試験体もせん断破壊となるように設計された。

$$Q_{pmu} = (0.5a_w\sigma_{wy}l_w + 0.5Nl_w)/a \quad (1)$$

$$Q_{xmu} = (a_{td}\sigma_y d_x \sin\theta)/a \quad (2)$$

$$Q_{psu} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (f_c + 18)}{\sqrt{a/D + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} b j \quad (3)$$

$$Q_{xsu} = 2 a_{td} \sigma_y \cos\theta \quad (4)$$

ここに、 a はせん断スパン、 $l_w=0.9D$ 、 D は壁の断面全せい、 a_w は縦筋 (D6) の総断面積、 σ_{wy} は縦筋の降伏点応力、 N は軸力、 a_{td} と a_{sy} はそれぞれ X 形配筋した集中鉄筋(D13)一束の総断面積と降伏点応力で、 d_x は壁脚部における X 形鉄筋束の重心間の距離で、 θ は X 形鉄筋束が材軸となす角である。

終局耐力の実験結果と計算結果との比較を表-3 に示す。表-3 より、いずれの試験体においても計算せん断耐力は実験結果を過小評価する傾向にある。これは参考文献 3)で示されている柱型のない壁に対する式 (3)の評価精度と同程度である。また、いずれの試験体も、実験では曲げ降伏後のせん断破壊あるいは曲げ破壊の性状を示しているのに対して式 (3)に基づく予想破壊形式はせん断破壊と異なっている。これは、式 (3)では本耐力壁のせん断耐力を精度よく評価できないことを示唆している。終局曲げ耐力に関しては、曲げ降伏したものの終局曲げ

耐力に達する前にせん断破壊した試験体 WD08-20XD03 を除く試験体は、二体とも精度よく評価できた。

4.2. 終局せん断耐力の評価

本節では、前節の結果を受けて、X 形集中配筋した終局せん断耐力評価に関して、他の評価手法による評価精度を検証することを試みる。また、曲げ降伏後のせん断破壊を示した試験体に関して、部材角の増加に伴うせん断耐力の劣化を考慮することによって、せん断破壊を予測できるかを、終局強度型耐震設計指針⁵⁾のせん断耐力評価式を用いて検討する。壁筋とコンクリートの負担するせん断終局耐力は A 式(式 (5)～(8))により算出し、X 形の集中鉄筋が負担するせん断終局耐力は式 (4)で評価する。

$$V_u = t j p_{wh} \sigma_{wy} \cot\phi + \tan\theta (1 - \beta) b D v f_c / 2 \quad (5)$$

$$\tan\theta = \sqrt{(H/D)^2 + 1} - H/D \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 + \cot^2\phi_0 p_w \sigma_{wy} / \phi_c < R < 0.005 \end{cases} \quad (7)$$

$$v = \begin{cases} (1.2 - 40R_u) v_0 & 0.005 \leq R < 0.02 \\ 0.4 v_0 & 0.02 \leq R \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 t は壁厚、 D は壁の断面全せい、 H は壁高さ、 f_c はコンクリート強度、 v は降伏ヒンジ領域の有効係数、 $v_0(=0.7f_c/2000)$ 、 R は部材角、 ϕ はトラス機構のコンクリートの圧縮束の角度とする。

図-9 に実験によって得られた各試験体の水平力-部材角関係の包絡線を黒の実線で、最大耐力点を赤の丸で、せん断破壊した点を×印で、終局強度型耐震設計指針のせん断耐力線及び誤差±10%の領域をそれぞれ赤の実線と点線で示す。またせん断破壊した試験体についてせん断破壊を生じた部材角における水平力と計算耐力の比較を表-4 に示す。

試験体 WD08-15XD03 の実験結果の包絡線とせん断耐力線との比較を見ると、試験体が曲げ降伏し、耐力が頭打ちとなる辺りでは、計算せん断耐力が実験結果より大きい値となっているが、その後変形が進むにつれて、計算せん断耐力が低下していき、実験でせん断破壊を生じた部材角辺りで計算せん断耐力が実験結果と交差しており、曲げ降伏後のせん断破壊を精度良く評価できたといえる。

表－4 実験値と計算値の比較

試験体名	$exp R_u$ ($\times 10^{-2}$ rad.)	$exp Q_u$ (kN)	$cal V_u$ (kN)	$exp Q_u / cal V_u$
WD08-15XD03	-1.50	-458	-454	1.01
WD08-20XD03	-0.80	-490	-490	1.00

ここに、 $exp R_u$ ：せん断破壊が生じた部材角、 $exp Q_u$ ：せん断破壊が生じた水平耐力、 $cal V_u$ ： $exp R_u$ 時のせん断耐力

一方、横筋比が大きく、曲げ破壊した試験体 WD08-15XD06 は、横筋比が増加したことで、計算せん断耐力線が全体的に高くなり、大変形域でも実験の包絡線と交差しなかった。

試験体 WD08-20XD03 は、軸力比の増加に伴い曲げ耐力が上昇したため、試験体 WD08-15XD03 に比べ、早期にせん断耐力線と実験の包絡線と交差し、その点でせん断破壊を生じた。表－4 より分かるように、終局強度型耐震設計指針のせん断耐力線は最終的にせん断破壊した試験体二体ともに実験値を精度よく評価できたことが分かる。

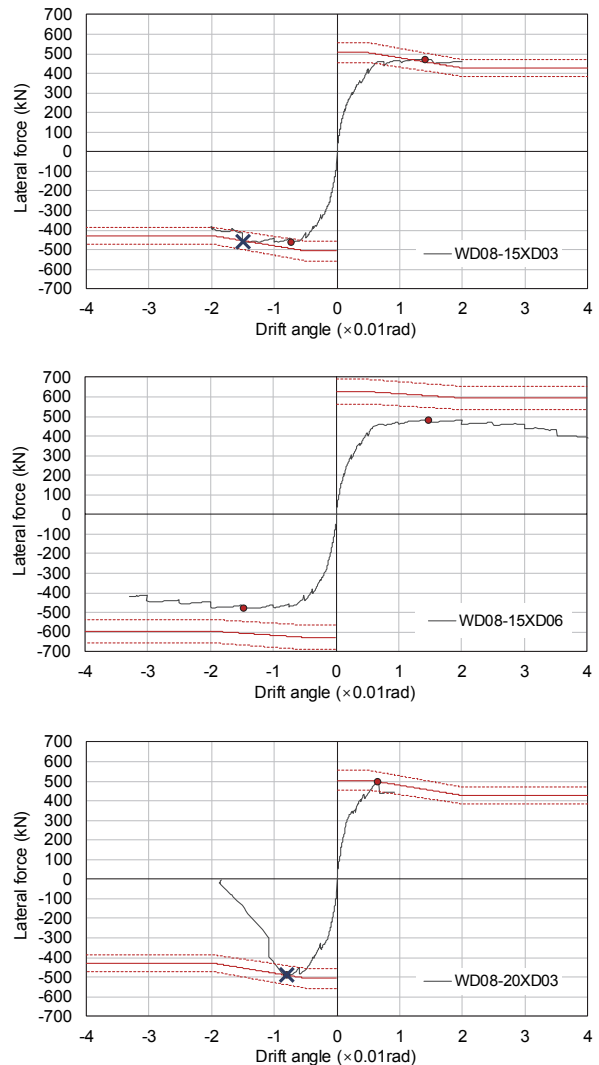
5. まとめ

本研究では、X 形配筋した柱型のないせん断型 RC 造耐力壁の耐震性能に関して、軸力比・横筋比をパラメータとして作製した 3 体の試験体の履歴挙動に関する検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) X 形に配筋した集中鉄筋を有する柱型のない壁に関して、軸力比 0.15 においても、一般的に配筋される程度の横筋比を有すれば、高い靱性を発揮することが出来る。
- 2) 終局耐力評価において、曲げ耐力に関しては、現行の規準に推奨されている設計式を準用すれば比較的精度よく評価できる。せん断耐力に関しては、大野荒川式に基づいた計算式では実験値を過小評価する傾向がある。
- 3) 終局強度型耐震設計指針に基づいたせん断耐力式を用いれば、せん断耐力を精度良く評価することが出来るのみならず、曲げ降伏後のせん断破壊の開始時点が精度良く予測できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院生・大仲菜保子氏、孫玉宇氏及び神戸大学技術職員・金尾優氏の多大な協力を得た。ここに記して謝意を示します。



図－9 計算値と実験値の比較

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.274-275，2010
- 2) 直川周平，孫玉平，竹内崇，藤永隆：X 形配筋を施した柱型のない RC 造壁の耐震性能に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，vol.38，No.2，pp.421-426，2016.7
- 3) 建築物の構造関係技術基準解説書，pp.648-695，2015
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート X 形配筋部材設計施工指針・同解説，p.44，2010
- 5) 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，pp.122-132，1988