

# 論文 耐震壁中間梁のせん断強度に及ぼす梁断面形状の影響

姜 優子\*1・江崎文也\*2・小野正行\*3

要旨：せん断破壊の恐れがある耐震壁中間梁の応力状態に近似できる中間梁要素試験体を用いて、梁断面幅が壁厚より大きい場合と壁厚と同じ場合のせん断実験を行い、梁断面形状が中間梁のせん断強度に及ぼす影響を検討した。その結果、中間梁の梁断面形状に関わらず、ほぼ同様な履歴曲線が得られ、中間梁の主筋量およびあばら筋量が同じであれば、梁幅の大小に関わらず、ほぼ同様なせん断強度となることがわかった。

キーワード：連層耐震壁，中間梁，せん断破壊，せん断強度，梁断面形状

## 1. 序

耐震壁付帯ラーメン中間部材の応力が再現できる要素試験体を用いて行ったせん断実験によれば、中間部材のせん断強度は、主筋強度に最も影響を受け、あばら筋には主筋ほどの効果がみられず、せん断強度を大きくするには主筋強度 ( $=a_g \sigma_{yg}$ ,  $a_g$ : 主筋総断面積,  $\sigma_{yg}$ : 主筋降伏点強度) を増大することが最も効果的であることがわかった<sup>1),2)</sup>。これらの結果によれば、連層耐震壁の中間梁については、梁主筋強度を増大すれば、梁幅が壁厚と同じであってもせん断強度が増大することが予測されると考え、梁幅が壁厚と同じ場合の実験を計画した。本論は、中間梁のせん断強度に及ぼす梁断面形状の影響を明らかにするために行った実験およびFEM解析の結果について述べるものである。

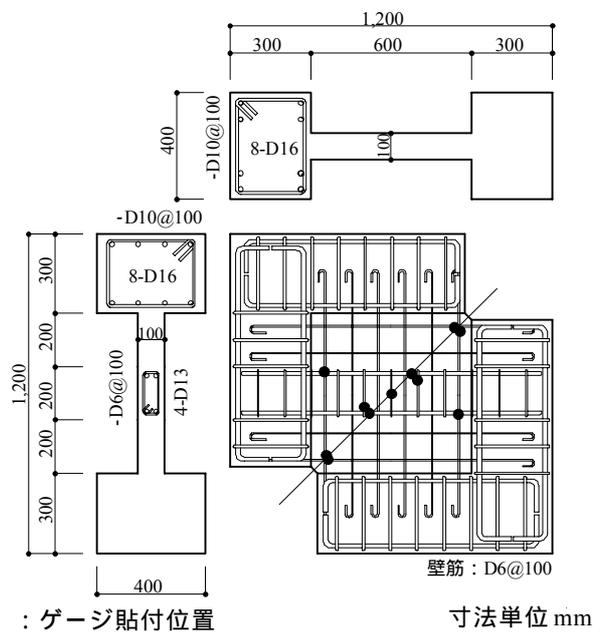


図 - 1 IW シリーズ試験体形状の一例およびゲージ貼付位置

表 - 1 試験体一覧

Specimen	Intermediate Beam			Wall	
	Section (mmxmm)	Longitudinal Reinforcement	Transversal Reinforcement	Thickness (mm)	Reinforcement
I30-0.7-0.3-0	200x200	4-D10 ( $p_g=0.7\%$ )	D6@100mm ( $p_w=0.32\%$ )	100	D6@100mm single layer ( $p_s=0.32\%$ )
I30-1.2-0.3-0		4-D13 ( $p_g=1.2\%$ )			
I30-2.0-0.3-0		6-D13 ( $p_g=2.0\%$ )			
IW32-1.4-0.6-0	100x200	4-D10 ( $p_g=1.4\%$ )	D6@100mm ( $p_w=0.64\%$ )		
IW32-2.4-0.6-0		4-D13 ( $p_g=2.4\%$ )			
IW32-4.0-0.6-0		6-D13 ( $p_g=4.0\%$ )			

$p_g$  = longitudinal reinforcement ratio,  $p_w$  = transversal reinforcement ratio,  $p_s$  = wall reinforcement ratio

\*1 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 修士(工学) (正会員)

\*2 九州共立大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

\*3 近畿大学教授 九州工学部建築学科 博士(工学) (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図 - 1 に試験体形状を、表 - 1 に試験体一覧を示す。試験体の壁筋比は、いずれの試験体とも 0.32% である。試験体には I(IW)f-b-c-d の記号を付けている。I は梁幅が壁厚の 2 倍、IW は梁幅が壁厚と同じ、f はコンクリートシリンダー圧縮強度の値 (MPa)、b は主筋比の値 (%), c はあばら筋比の値 (%), d はスラブによる拘束の有無をそれぞれ示している。なお、本実験では、スラブによる拘束が作用しないようにしているので、d=0 としている。表 - 2 に、使用した材料の力学的性質を示す。

### 2.2 加力方法および測定方法

図 - 2 に示す加力装置を用いて、剛な梁の間に挟み込んだ上下のくさびを圧縮すれば、上下の壁板隅角部を結ぶ斜め 45 度の破壊面が形成され、中間梁中央部が直接せん断破壊を起こすものと考えられる。中間部材には耐震壁に正負繰り返し水平力が作用すると、斜めせん断ひび割れが交差して生じる。一方向単調荷重の場合には交差したひび割れは生じないが、耐震壁の水平耐力に及ぼす正負繰り返しの影響はオープンフレームの柱・梁の場合よりも小さいものと考え、一方向単調荷重により実験を行うこととした。また、測定方法は図 - 2 に示す高感度変位計により、中間梁の水平（材軸と直角方向）および鉛直（材軸方向）の各変形を測定した。また、図 - 1 に示すように、想定破壊線位置にゲージを貼付して、鉄筋のひずみを測定した。万能試験機によりおよそ 1.6kN/sec の荷重速度で連続的に荷重を載荷し、荷重、変形および鉄筋のひずみの測定は、0.1sec のサンプリング間隔で動ひずみ測定器によりパソコンに記録した。また、ひび割れおよび破壊状況については、目視、写真撮影およびビデオカメラ等により記録した。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

表 - 2 材料の力学的性質

#### (1) コンクリート

Specimen	$\sigma_B$	$E_C$
I30-0.7(1.2,2.0)-0.3-0	29.5	24.1
IW32-1.4(2.4,4.0)-0.6-0	31.6	23.2

$\sigma_B$  : シリンダー圧縮強度 (MPa)

$E_C$  : ヤング係数 (GPa)

#### (2) 鉄筋

Bar	a	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E_s$	$\epsilon$
D6	0.32	371	504	197	11.5
D10	0.71	375	528	178	21.6
D13	1.27	354	486	185	21.5

a : 断面積 (cm<sup>2</sup>),  $\sigma_y$  : 降伏点 (MPa)

$\sigma_u$  : 引張強度 (MPa),  $E_s$  : ヤング係数 (GPa),  $\epsilon$  : 伸び (%)

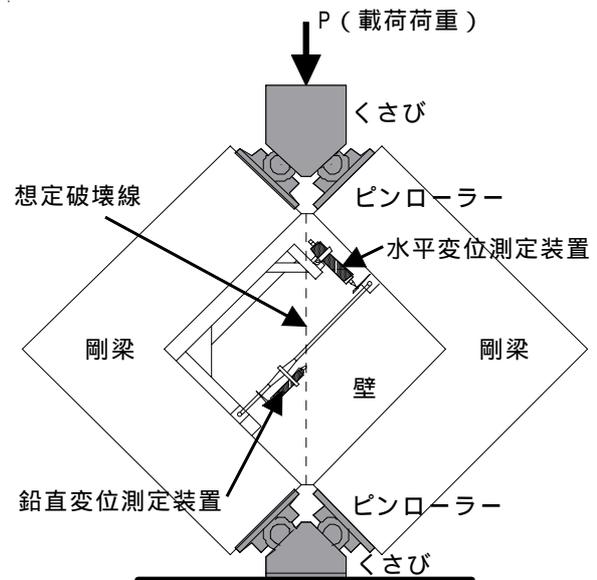


図 - 2 加力装置および測定装置

図 - 3 に、各試験体の水平荷重  $Q$  と中間梁部材角  $R$  との関係、中間梁軸方向平均ひずみ  $\epsilon_v$  と  $R$  との関係および実験終了時の試験体のひび割れ状況を示す。なお、水平荷重  $Q$  は試験機の荷重  $P$  の水平成分 ( $Q = P/\sqrt{2}$ ) とした。

上下の壁板隅角部を結ぶ斜め 45 度方向に、せん断ひび割れが発生するが、そのひび割れの進展は梁との境界部または梁主筋位置で一旦止まった。この時一時荷重が低下するが、その後ひび割れ時の荷重以上に荷重が増大する。その

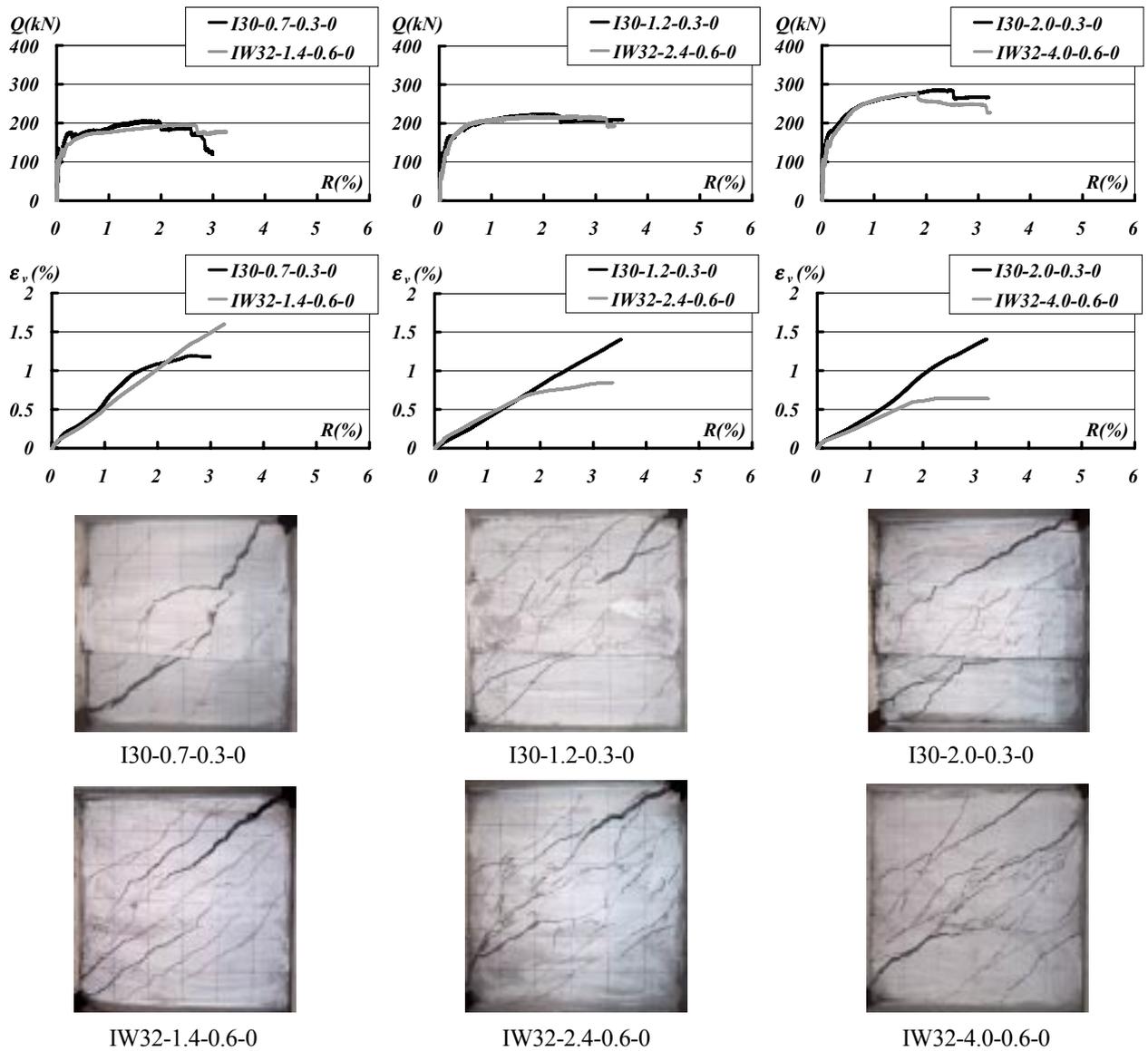


図 - 3 水平荷重  $Q$ - 中間梁部材角  $R$ , 中間梁軸方向平均ひずみ  $\epsilon_v$ - $R$  との関係および実験終了時の破壊状況

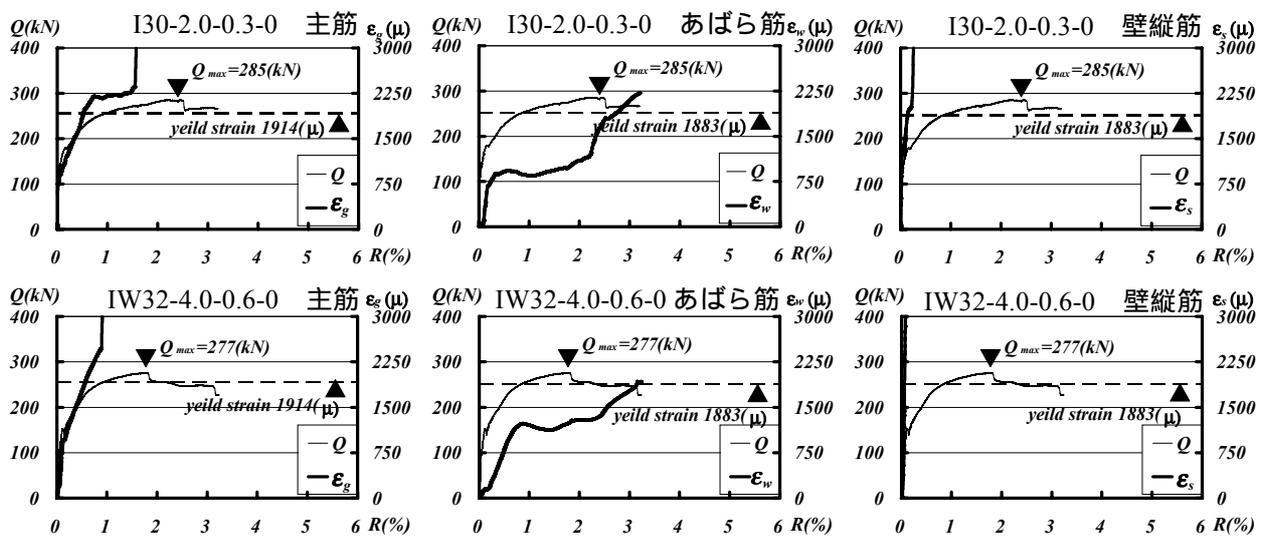


図 - 4 水平荷重  $Q$ - 主筋のひずみ  $\epsilon_g$ , あばら筋のひずみ  $\epsilon_w$  および壁横筋のひずみ  $\epsilon_s$  との関係の一例

履歴曲線は、梁断面の形状にかかわらず同様である。主筋比が小さい試験体では、初期ひび割れが拡幅するが、主筋比が大きい試験体になると、ひび割れが分散する傾向が見られる。梁断面の形状にかかわらず、ほぼ同様な破壊性状が見られた。梁の軸方向平均ひずみ履歴曲線によれば、部材角の増大とともに引張ひずみが徐々に増大していることから、中間梁が斜め引張破壊を起こし、壁筋と主筋が斜めひび割れの広がり抵抗する機構が形成されたものと判断される。いずれの実験シリーズとも連層耐震壁の実験結果から観察された中間梁のせん断破壊に極めて類似した破壊性状を示していることから、本実験で計画した要素試験体を用いて耐震壁中間梁のせん断強度を検討できると思われる。

図 - 4 に、水平荷重  $Q$  と主筋のひずみ  $\varepsilon_g$ 、あばら筋のひずみ  $\varepsilon_w$  および壁縦筋のひずみ  $\varepsilon_s$  との関係の一例を示す。これらによると主筋および壁縦筋は、ひび割れ後急激に引張ひずみが生じ、水平荷重が最大になる以前に降伏していることがわかる。このことから、主筋が載荷荷重に対して有効に抵抗していることがわかる。しかし、あばら筋はひび割れ後、引張ひずみが大きくなっているが、降伏ひずみまで達していないものもあり、壁縦筋ほどの抵抗はしていないようである。

### 3.2 強度性状

主筋強度が増大すると最大水平荷重が上昇する傾向が見られるが、最大水平荷重に及ぼす梁断面形状の影響は見られなかった。これは中間梁がせん断力のほか、主に壁板の広がりを拘束する抵抗機構を形成しているため、せん断ひび割れ後の広がりに対する材軸方向の抵抗要素が主に主筋であることから、強度に及ぼす中間梁コンクリート断面の影響がほとんど見られなかったものと思われる。荷重 - 中間梁部材角の履歴曲線によれば、いずれの試験体とも  $R$  が 2% 近傍までは荷重が維持されていることから、材軸方向の降伏により耐力に達していることが考えられる。そこで、図 - 5 に示す水平せん断強度時の応力

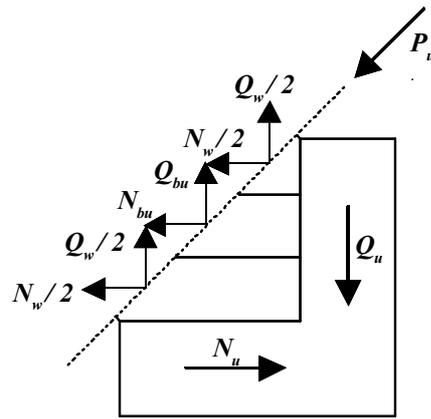


図 - 5 水平せん断強度時の応力

せん断強度時の応力から、(1) ~ (3) 式を用いて軸方向力を求め、表 - 3 に計算した結果を示した。

$$Q_u = N_u = P_u / \sqrt{2} \quad (1)$$

$$Q_u = Q_{bu} + Q_w \quad (2)$$

$$N_u = N_{bu} + N_w \quad (3)$$

ここで、

$P_u$  : 最大荷重  $Q_u$  : 最大水平荷重

$N_u$  : 最大軸方向荷重  $Q_{bu}$  : 梁せん断強度

$N_{bu}$  : 梁軸方向力

$Q_w$  : 壁縦筋強度 ( $a_s \sigma_{ys}$  :  $a_s = 1.92 \text{ cm}^2$ )

$N_w$  : 壁横筋強度 ( $a_s \sigma_{ys}$ ,  $a_s \sigma_{us}$  :  $a_s = 1.28 \text{ cm}^2$ )

表 - 3 によれば、主筋比が最も小さい試験体は実験値の  $N_u$  が算定値  $N_y$  を超え  $N_t$  に近いことから、主筋比が小さい試験体は軸方向力で強度が決まっているものと思われる。一方、主筋量が多くなると算定値  $N_t$  まで達していない。梁幅が壁厚と同じ場合は、終局時には伸びひずみが停止していることから、せん断破壊を起こしているものと考えられ、主筋強度を高くする場合には、大変形時の履歴性状に梁断面形状の影響が見られるようである。

## 4. FEM 解析

### 4.1 解析概要

本解析では、解析コードとして汎用 FEM 解

表 - 3 実験結果一覧

Specimens	Experiment					Analysis					
	First crack		Maximam			Long. Rein.		Wall Rein.		$N_u$	
	$Q_{cr}$ (kN)	$R_{cr}$ (%)	$Q_u$ (kN)	$N_u$ (kN)	$R_u$ (%)	$a_g \sigma_{yg}$	$a_g \sigma_{ug}$	$a_s \sigma_{ys}$	$a_s \sigma_{us}$	$N_y$ (kN)	$N_t$ (kN)
I30-0.7-0.3-0	136	0.02	206	206	1.66	107	150	47	65	154	215
I30-1.2-0.3-0	124	0.02	224	224	2.09	180	247	47	65	228	312
I30-2.0-0.3-0	129	0.01	285	285	2.48	270	370	47	65	318	435
IW32-1.4-0.6-0	104	0.01	196	196	2.57	107	150	47	65	154	215
IW32-2.4-0.6-0	71	0.02	219	219	2.65	180	247	47	65	228	312
IW32-4.0-0.6-0	107	0.01	277	277	1.77	270	370	47	65	318	435

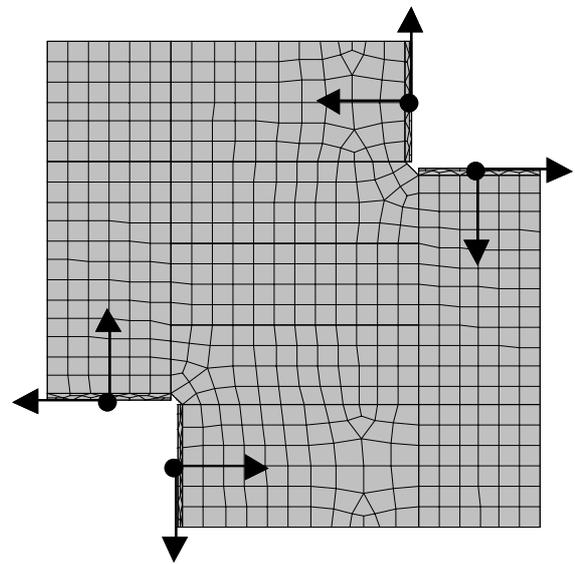
$a_g \sigma_{yg}$  : Yeild strength of longitudinal reinforcement(kN)  
 $a_s \sigma_{ys}$  : Yeild strength of horizoutal wall reinforcement(kN)  
 $N_y$  : Axial strength based on yeild strength ( $=a_g \sigma_{yg} + a_s \sigma_{ys}$ )

$a_g \sigma_{ug}$  : Tensile strength of longitudinal reinforcement(kN)  
 $a_s \sigma_{us}$  : Tensile strength of horizoutal wall reinforcement(kN)  
 $N_t$  : Axial strength based on tensile strength ( $=a_g \sigma_{ug} + a_s \sigma_{us}$ )

析プログラム ATENA2D<sup>3)</sup> を用いた。

解析では、コンクリートを SBATEMaterial<sup>3)</sup> でモデル化し、あばら筋による拘束効果を孫らの提案式<sup>4)</sup> により算定し、拘束効果を考慮した。鉄筋については、柱主筋と剛梁の主筋を離散要素でモデル化し、鉄筋とコンクリート間の付着すべり<sup>5)</sup> を考慮した。その他の鉄筋においては分散要素でモデル化し、鉄筋とコンクリート間の結合は完全付着とした。

試験体は平面応力状態にあると仮定して、図 - 6 に示すように要素分割を行った。破壊後の軟化領域まで荷重-変形曲線をトレースすることを目的として変位制御とし、図 - 6 に示すくさびが開く方向に 1step につき各  $10^{-4}m$  の変位を作用させた。解析方法は各イタレーションごとに更新される接線剛性を用いた Newton-



\* 矢印は変位作用方向

図 - 6 要素分割図

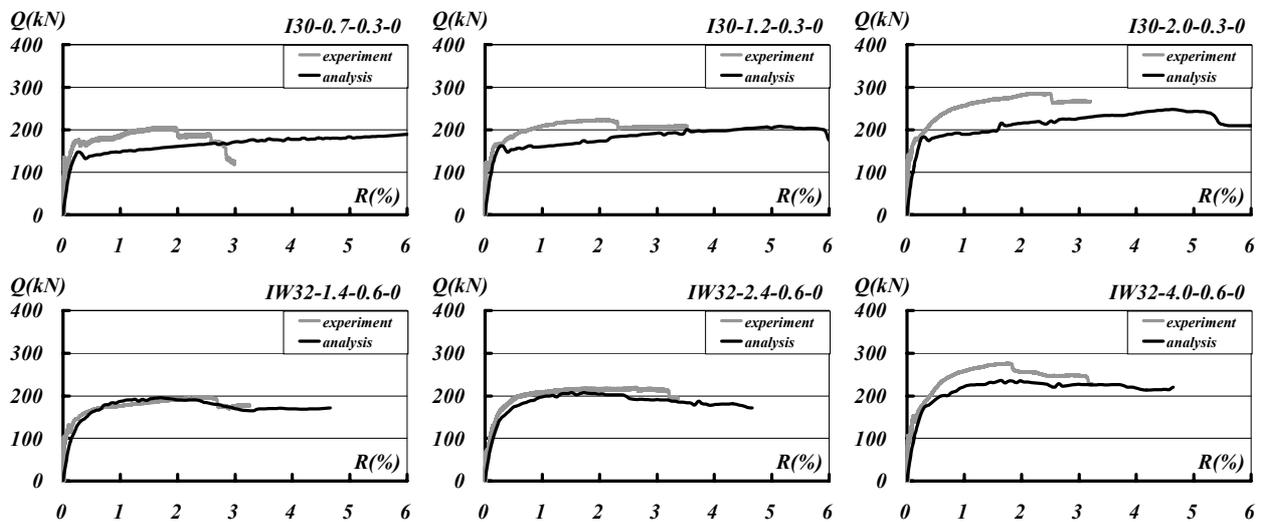


図 - 7 FEM 解析による水平荷重  $Q$  - 中間梁部材角  $R$  の関係

Raphson 法とラインサーチ法を同時に用いた。

#### 4.2 解析結果

水平荷重  $Q$ - 中間梁部材角  $R$  の関係を図 - 7 に示す。解析では実験結果とは異なり、梁の断面形状の違いにより、履歴曲線の相違が見られたが、梁幅が壁厚と同じ試験体においては、ほぼ同じ履歴曲線が得られた。梁幅が壁厚の 2 倍ある試験体に関しては、最大荷重時の部材角が、実験値の倍以上になる傾向が見られた。解析結果からも、主筋強度が増大すると、せん断強度が増大する傾向がみられた。

表 - 4 に水平せん断強度一覧を示す。FEM 解析値は、実験値とほぼ同じである。一方、終局強度による算定式<sup>6)</sup>で求めた算定値は実験値よりかなり小さいことから、中間部材のせん断強度を適切に評価するためには、オープンフレームの部材せん断強度算定式の適用法を含め、新たな評価法を検討する必要があるものと思われる。

#### 5. 結論

連層耐震壁中間梁の応力状態を再現した要素試験体モデルのせん断実験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 中間梁要素試験体のせん断破壊は、既往の連層耐震壁の水平力載荷実験から得られた中間梁のせん断破壊とほぼ同じ性状であった。
- 2) 中間梁の梁断面形状に関わらず、ほぼ同様な履歴曲線が得られ、中間梁の主筋量およびあばら筋量が同じであれば、梁幅の大小に関わらず、ほぼ同様なせん断強度となった。
- 3) 主筋強度が高くなると、梁幅が壁厚と同じ場合は、大変形時にせん断破壊を起し、履歴性状に梁断面形状の影響が見られた。
- 4) 主筋比の小さい試験体は、軸方向耐力で強度が決まった。
- 5) 中間梁のせん断強度は、FEM 解析でおおよそ評価することが可能である。
- 6) 耐震壁中間部材せん断強度を適切に評価するためには、オープンフレームの部材せん

表 - 4 水平せん断強度一覧

Specimens	Experiment	Analysis	
	$ex Q_u$ (kN)	$FEM Q_u$ (kN)	$cal Q_{ul}$ (kN)
I30-0.7-0.3-0	206	191	176
I30-1.2-0.3-0	224	208	176
I30-2.0-0.3-0	285	247	176
IW32-1.4-0.6-0	196	196	151
IW32-2.4-0.6-0	219	208	151
IW32-4.0-0.6-0	277	237	151

$ex Q_u$  : せん断強度実験値

$FEM Q_u$  : FEM 解析によるせん断強度

$cal Q_{ul}$  :  $cal Q_u$  (終局強度型梁せん断強度<sup>6)</sup>) +  $Q_w$

断強度算定式の適用法を含め、新たな評価法を検討する必要がある。

#### 謝辞

試験体製作および実験の実施にあたっては、九州共立大学技師 高田一俊、米原義則、青木治の各氏および平成 14 年度九州共立大学工学部建築学科江崎研究室、近畿大学九州工学部建築学科小野研究室の卒論生の協力を得た。ここに、関係者各位に感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 姜優子, 江崎文也, 小野正行: 軸力が作用しない中間柱のせん断強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.457-462, 2001.7
- (2) 姜優子, 江崎文也, 小野正行: 耐震壁中間柱のせん断強度に及ぼす補強筋強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.541-546, 2002.6
- (3) Cervenka Consulting: ATENA2D program documentation
- (4) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力 - ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.461, pp.95-104, 1994.7
- (5) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE, Thomas Telford Service Ltd., 1993
- (6) 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, 日本建築学会, 1990