

論文 壁梁付きRC柱におけるせん断応力の応力集中とそれによるせん断耐力の低下率

吉留 潤平^{*1}・塩屋 晋一^{*2}・町頭 洋平^{*3}・井田 昌宏^{*4}

要旨：腰壁・垂れ壁付きRC柱に関する既往の実験データを基に，それらの壁が柱幅中央位置に接合される柱のせん断耐力の低下量を定量的に示した。そして三次元有限要素解析を行い，柱の開口内法長さ部分におけるせん断応力状態をモデル化し，腰壁・垂れ壁を含めた壁梁が柱幅中央位置に接合されたRC柱のせん断耐力を評価するための，せん断耐力の低下率の評価式を提案した。その結果，壁梁付き柱のせん断耐力は，開口内法長さを柱長さとする柱のせん断耐力より低下し，その低下量は提案した式により概ね評価できることを確認した。

キーワード：応力集中，せん断耐力，鉄筋コンクリート，柱，壁梁，柱梁接合部

1. はじめに

既存のRC造学校校舎・病院建築では腰壁・垂れ壁が多く設けられている。それらの耐震診断を行う場合，柱のせん断耐力を評価する必要があるが，その明確な評価方法は未だ確立されていない。

研究代表者ら¹⁾は腰壁・垂れ壁を含めた壁梁が偏心接合される柱のせん断性状に関する研究を行っている。そこでは，加力破壊実験により，開口内法長さを柱長さとする柱に比べ，壁梁が偏心接合された柱のせん断耐力が低下することを確認し，その低下率の評価法を検討している。しかし壁梁が柱幅中央位置に接合(以後，中心接合)されている柱でも，せん断耐力が低下し，偏心接合だけでは説明できない低下量の存在が確認された。

本論文では，まず，腰壁・垂れ壁付きRC柱に関する既往の実験データを基に，それらの壁が中心接合される柱のせん断耐力の低下量を定量的に示す。そして三次元有限要素解析を行い，柱の開口内法長さ部分のせん断応力状態をモデル化し，腰壁・垂れ壁を含めた壁梁が中心接合される柱のせん断耐力を評価する方法について述べる。

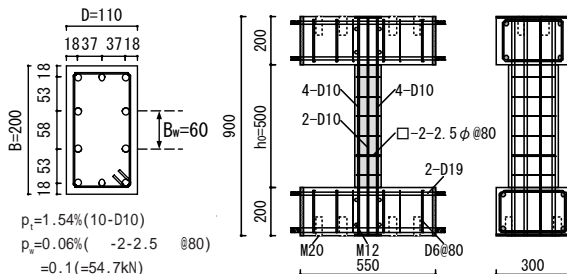
2. 壁梁が中心接合される柱のせん断耐力の低下

2.1 研究代表者らの破壊加力実験¹⁾の概要

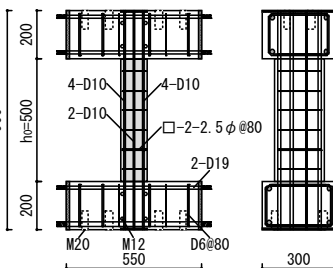
図-1に試験体形状と寸法を示す。壁梁が中心接合された壁梁付き柱試験体No.6と，その開口内法長さを柱長さとする比較用柱試験体No.2である。加力は，一定軸力を載荷後，繰り返しの水平

表-1 使用材料の力学的特性 (応力単位: N/mm²)

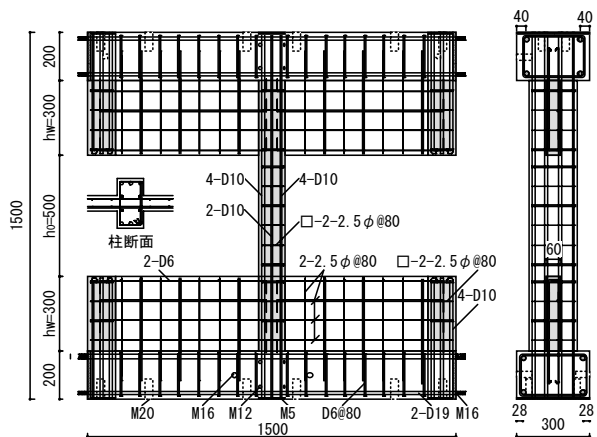
コンクリート		$E_c(\times 10^4)$	σ_{cB}	$\epsilon_{cB}(\%)$	E_c : コンクリートのヤング係数 σ_{cB} : 圧縮強度 ϵ_{cB} : 圧縮強度時ひずみ度
種類		2.29	24.4	0.24	
鉄筋		$E_s(\times 10^5)$	σ_{sy}	σ_{sB}	E_s : 鉄筋のヤング係数 σ_{sy} : 降伏強度 σ_{sB} : 引張強度
D10	USD785	1.77	1020	1138	
2.5φ	SS400	1.72	526	698	



(a) 柱断面と諸元



(b) 比較用柱試験体(No.2)



(c) 壁梁付き柱試験体(No.6)

図-1 試験体形状および寸法

*1 鹿児島大学 大学院理工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 鹿児島大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)
 *3 株式会社竹中工務店 (元鹿児島大学 大学院理工学研究科建築学専攻 学生)
 *4 三井住友建設株式会社 (元鹿児島大学 工学部建築学科 学生)

加力を行っている。詳細は文献⁹⁾を参照されたい。

表 - 1 に材料の力学的特性を示す。図 - 2 に壁梁付き柱試験体 No.6 の水平せん断力 - 部材角関係を示す。同図には比較用柱試験体 No.2 の包絡線を点線で示す。比較用柱試験体に比べて、壁梁付き柱試験体の剛性、最大耐力が低下することが確認される。これらの試験体はせん断破壊形式になるように計画されたが、最終的にはせん断破壊の様相に近い状態で付着割裂破壊して最大耐力が決定した。最大耐力については壁梁付き柱試験体は比較用柱試験体に対して 73.4% になった。

2.2 既往の研究の柱のせん断耐力の低下率

腰壁・垂れ壁付き柱のせん断耐力 Q_{su} は、開口内法長さを柱長さとする柱のせん断耐力 Q_{suo} より低下する。この低下量を論ずる場合、 Q_{suo} が基準になる。腰壁・垂れ壁付き柱に関する既往の研究^{2)~8)}は多くあるが、基準となる開口高さを柱長さとする柱の加力実験が行われていない。ここでは、その Q_{suo} にせん断耐力式による計算値を用いることにする。しかし、そのせん断耐力の計算値には、ある程度の推定誤差を伴う。その誤差の傾向を把握し、せん断耐力の低下量を論ずる必要がある。ここでは、まず Q_{suo} の推定誤差の傾向について述べ、その後、腰壁・垂れ壁が中心接合された柱のせん断耐力の低下量について述べる。

(a) Q_{suo} の推定精度

対象にする腰壁・垂れ壁付き柱試験体の開口内法区間の柱部分と構造因子が近い柱の既往の実験データを基に、せん断耐力式の推定誤差を把握する。せん断耐力式には、荒川 mean 式と短柱総プロ⁹⁾で提案された短柱式を用いる。腰壁・垂れ壁付き柱では開口内法長さが小さくなるため、そこでのせん断スパン比 M/QD が小さくなる。対象にした既往の腰壁・垂れ壁

付き柱試験体では、0.5 ~ 2.0 程度であった。これに該当する既往の実験データでせん断破壊した柱試験体として、5 体を選定した。表 - 2 にそれらの試験体の構造因子を示す。試験体は、明瞭にせん断破壊により最大耐力が決定したものである。

図 - 3 に各試験体の実験値を計算値で除した比を示す。No.10, No.30, S は構造因子はほぼ同じであるが、実験値自体にもばらつきが生じている。

せん断スパン比 M/QD が 1.0 であれば、短柱式による計算が実験値に適合し、 M/QD が 2.0 であれば、荒川 mean 式による計算値が適合している。

(b) 中心接合によるせん断耐力の低下率

図 - 4 に既往の腰壁・垂れ壁付き柱のせん断耐力の実験値 Q_{su} を、計算値 Q_{suo} で除した比を示す。対象にした試験体は、腰壁・垂れ壁が中心接合されたもので、最大耐力が明瞭に、せん断破壊により決定し、柱の開口内法部分のせん断スパン比 M/QD が 0.75 ~ 1.5 の範囲のものである。

せん断耐力の実験値のばらつきも考慮する必要があるが、荒川 mean 式、短柱式のいずれの計算値を用いても、腰壁・垂れ壁付き柱のせん断耐力 Q_{su} は、開口内法長さを柱長さとする柱のせん断耐力 Q_{suo} より、低下することが確認できる。

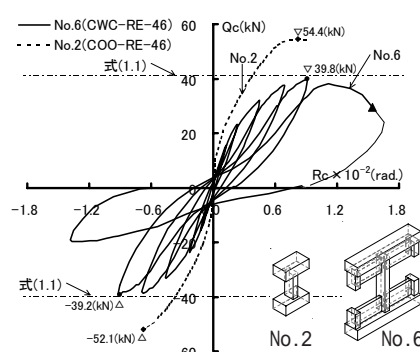


図 - 2 水平せん断力 - 部材角関係

表 - 2 試験体の構造因子

試験名	B × D (cm)	M/QD	σ_c (N/mm ²)	ρ_c (%)	ρ_w (%)	文献
No.10, No.30	25 × 25	1	21.5	0.63	0.25	2)
S		2	21.6			3)
No.50, No.70			27.2			4)

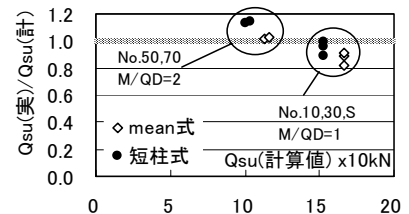


図 - 3 せん断耐力式の精度

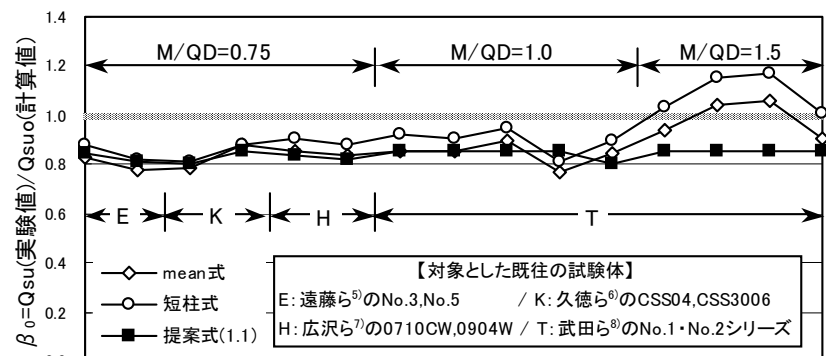


図 - 4 壁梁の中心接合による柱のせん断耐力の低下率

3. 三次元弾塑性有限要素解析

3.1 解析方針

腰壁・垂れ壁を含めた壁梁付き柱がせん断破壊する場合、開口内法区間で破壊する。壁梁の接合により、その区間の応力状態が変化してせん断耐力が低下する。ここでは、その応力状態の変化を明らかにし、その区間でせん断抵抗できる柱の有効幅のモデル化を行う。解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA8.1.2 を使用した。

3.2 解析モデルと解析仮定

解析で対象にした試験体の基本形状は、図 - 1 の壁梁付き柱試験体と比較用柱試験体の 2 種類とした。柱断面形状は長方形と正方形の 2 種類とし、長方形断面については開口内法長さ h_0 が 220mm の極短柱の場合についても解析を行った。図 - 5 に壁梁付き柱試験体のメッシュ分割を示す。これは、図 - 1 の No.6 試験体をモデル化している。他の比較用柱試験体や正方形断面柱試験体もこれに準じている。コンクリートには 20 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い、構成則には Drucker-prager モデルを使用した。鉄筋は埋め込み鉄筋モデルを使用した。鉄筋は柱主筋だけを考慮し、柱のせん断補強筋は補強筋比が 0.06% と極めて少ないため無視した。コンクリートと鉄筋の付着は完全付着とした。材料特性は、表 - 1 の実験値を基に仮定した。図 - 6 に仮定したコンクリートと柱主筋の応力 - ひずみ関係を示す。

境界条件は、上下のスタブの回転を完全に拘束した。加力は、軸力比 0.1 の一定軸力を載荷後、下スタブに水平変位を与えて水平力を加えた。

3.3 解析結果

(a) 水平せん断力 - 部材角関係

図 - 7 に解析による各試験体の水平せん断力 - 部材角関係を示す。また、同図中には比較のため実

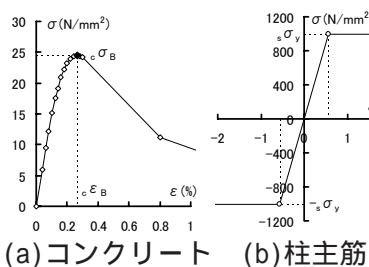


図 - 6 仮定した材料特性

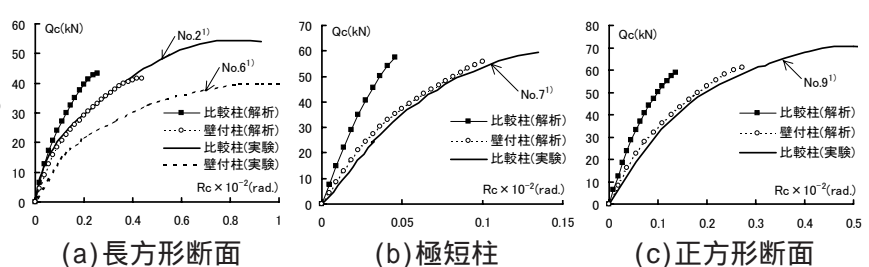


図 - 7 水平せん断力 - 部材角関係の解析結果と実験結果

験¹⁾による包絡線も示している。正方形断面柱、極短柱の壁梁付き柱試験体の実験は行っていないので示していない。いずれの試験体の解析でもコンクリートのせん断破壊により最大荷重が決定した。

極短柱の比較用柱試験体では、最大荷重の解析値は実験値に近いものになっているが、それ以外の試験体における解析値は実験値を過小評価している。せん断耐力を評価する観点では、構成則や解析モデルの修正が必要であるが、今回は応力分布の絶対値より、応力分布形状に基づいてせん断抵抗する有効な柱断面の割合を誘導することが重要であるため、解析仮定の修正は行わないことにした。

(b) せん断応力分布と垂直応力分布

図 - 8 に No.2 と No.6 の柱断面内の水平加力方向のせん断応力分布を示す。それらの分布は、図 - 5 で黒塗りで示した要素 A ~ C のもので、せん断破壊する直前の解析ステップのものである。比較用柱は曲げ圧縮域の全幅にせん断応力が生じているが、壁梁付き柱の開口端要素 C では壁梁の接合部分にせん断応力が集中している。しかし、開口端から離れた要素 A, B では応力集中が生じていない。それらの要素では、両側の柱せい面の応力が

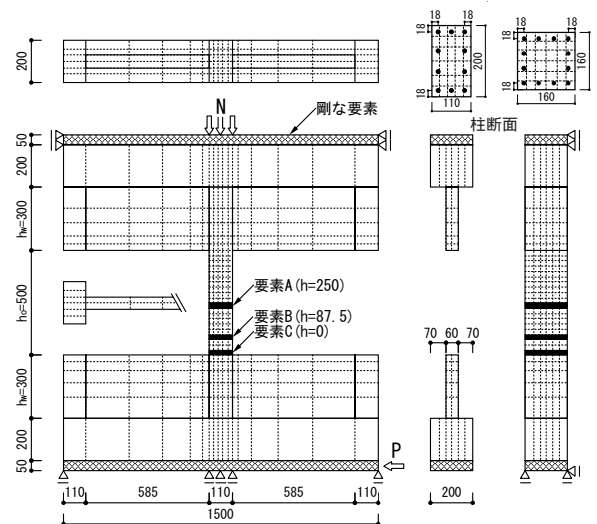
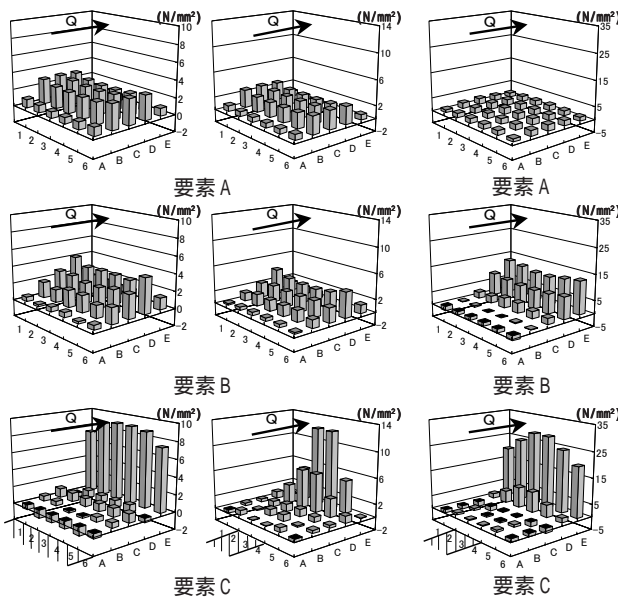
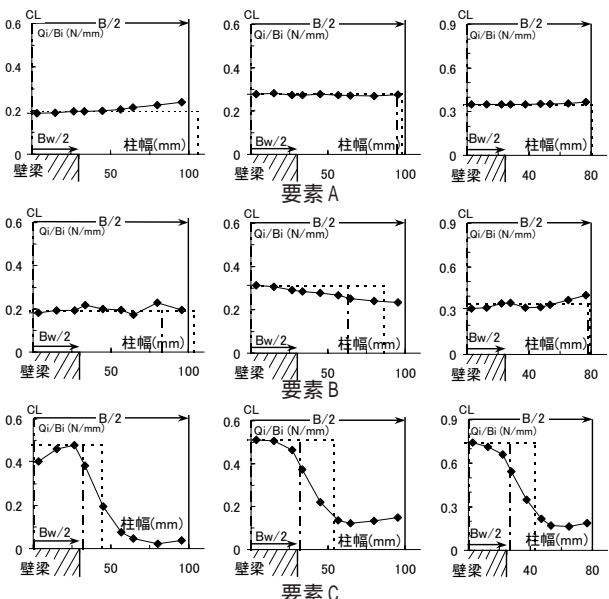


図 - 5 解析モデルとメッシュ分割



(a)No.2 (b)No.6 No.6
 図 - 8 せん断応力分布



(a)長方形断面 (b)極短柱 (c)正方形断面
 図 - 9 垂直応力分布

わずかに大きくなっている。これは、内部要素では隣接した要素に連続しているが、外周要素では外周面に要素が連続しないことによる影響である。

図 - 9 にNo.6の垂直応力分布を示す。垂直応力度については、壁梁開口端の要素Cでは壁梁幅に応力が集中する分布となっているが、せん断応力ほどの応力集中は生じていない。

(c)柱のせん断抵抗有効幅

柱の開口端では壁梁の接合部分にせん断応力が集中し、柱全断面がせん断力に対して有効に抵抗しない。応力集中が生じる壁梁の接合部分でせん断破壊が先行し、柱のせん断耐力は低下することになる。ここでは、応力集中が生じる開口端近傍でせん断抵抗する有効な柱幅をモデル化する。

図 - 10 に断面内において柱幅の単位幅あたりに負担しているせん断力の分布を柱幅方向に示す。単位幅あたりのせん断力は、コンクリート要素の各種分点の応力と負担面積に基づいて算出している。示した分布は図 - 8, 9 で示した要素と同じである。図 - 8 と同様に、開口端の要素Cでは壁梁の接合部分にせん断力が集中し、それから離れるとその応力集中は生じなくなっていることがわかる。断面内において、壁梁の接合部分における最大のせん断力が一様に分布しているとする仮定の幅を考える。そこで負担できるせん断力が部材のせん断力と等しくなるように仮定の幅を定

める。ここではその幅を等価幅と定義する。

図 - 11 に開口端から柱中央高さまでの等価幅の分布を示す。等価幅の広がる角度を $\tan \theta$ とすると、 $\tan \theta$ は、長方形断面柱、極短柱、正方形断面柱とも、0.6程度となる。図 - 10 に等価幅の境界を点線で示す。等価幅の範囲には両境界線の近傍でせん断力が小さくなる領域が生じる。弾性範囲での柱の剛性や応力を推定する場合には、等価幅の考え方が適していると考えられるが、部材内部で局部的にコンクリートがせん断破壊する時の耐力を評価する場合には、せん断応力がより集中している領域でせん断抵抗する幅を考えた方が適していると考えられる。ここでは、図 - 11 に一点鎖線で示すように壁梁幅の両端から $\tan \theta (=0.6)$ で広がる幅をせん断抵抗する有効幅と定義する。また図 - 10 に有効幅の境界を一点鎖線で示す。

4. せん断耐力の低下率の評価

4.1 評価方針

前節の有効幅に基づいてせん断抵抗できる柱領域を図-12の薄塗り領域のようにモデル化する。開口端にせん断応力の応力集中が生じてせん断破壊する場合、開口端から斜め上方にせん断破壊面(波線で囲んだ領域)が形成される。そこで、図-12に示すabcdの平面をせん断破壊面と仮定する。壁梁幅が柱幅に等しくて応力集中が生じないと、その

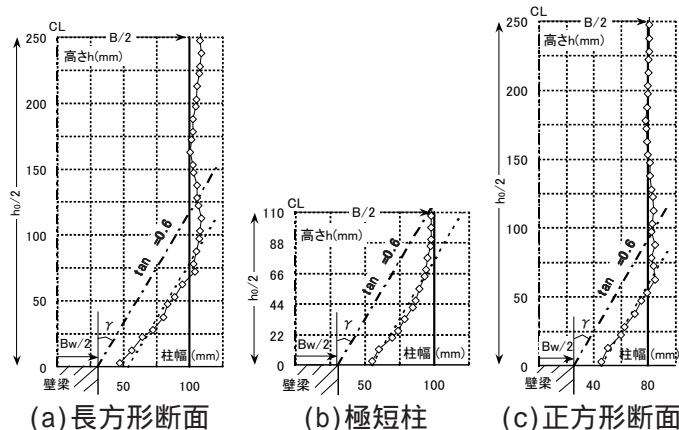


図 - 11 せん断抵抗する柱の有効幅

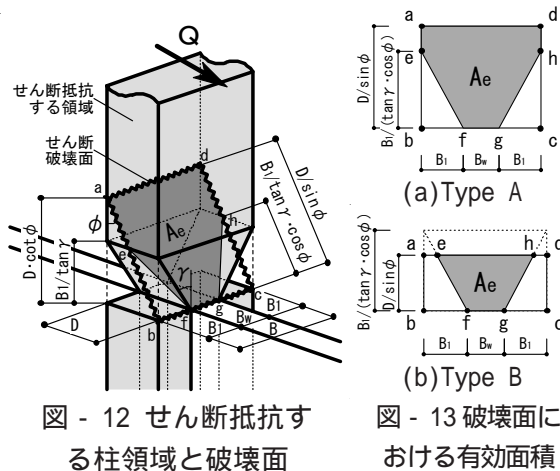


図 - 12 せん断抵抗する柱領域と破壊面

図 - 13 破壊面における有効面積

破壊面は全面で有効にせん断抵抗するが、壁梁幅が一般的な小さな寸法になり応力集中が生じると、その有効な面積は減少する。ここでは、その破壊面 abcd の面積 A に占める有効な部分の面積の割合 A_e が、せん断耐力と密接な関係があるものと考え、その割合をせん断耐力の低下率 β_0 とする。

4.2 評価式

図-13(a), (b)にせん断破壊面とせん断抵抗する有効な面積 A_e の関係を示す。破壊面が柱材軸となす角度を ϕ とすると、 ϕ の大きさにより、有効な面積の形状が TypeA と TypeB の2種類に分かれる。低下率 β_0 は、つぎのように表される。

1) Type A : $D \cdot \cot \phi > B_1 / \tan \gamma$ の場合

$$\beta_0 = A_e / A = 1 - \frac{B_1^2}{B \cdot D \cdot \cot \phi \cdot \tan \gamma} = 1 - 1.67 (B_1^2 / B \cdot D) / \cot \phi \quad (1.1)$$

2) Type B : $D \cdot \cot \phi < B_1 / \tan \gamma$ の場合

$$\beta_0 = A_e / A = B_w / B + (D/B) \cdot \cot \phi \cdot \tan \gamma = B_w / B + 0.6 (D/B) \cdot \cot \phi \quad (1.2)$$

ここに B : 柱幅, D : 柱せい, B_w : 壁梁幅または腰壁・垂れ壁では壁厚, $B_1 = 0.5(B - B_w)$

式(1.1)と式(1.2)を適用する条件の境界式は式(2.1)であり、それを整理すると式(2.2)となる。

すなわち、 B_w/D が右辺の値以上であれば、式(1.1)を適用し、その値以下であれば式(1.2)を適用することになる。

$$D \cdot \cot \phi = B_1 / \tan \gamma \quad (2.1)$$

$$B_w / D = B/D - 2 \cot \phi \cdot \tan \gamma \quad (2.2)$$

図-14に式(2.2)において $\tan \phi$ を0.6として B/D と $\cot \phi$ を変化させた場合の $B_w/D - \cot \phi$ 関係を示す。示した範囲ではほとんどが負の値となり、実際の柱では B_w/D は0.2 ~ 0.5の正の値となるため、式(1.1)をほとんど適用することになる。

せん断破壊面の角度 ϕ については、せん断補強筋量により変化し、せん断補強筋量が少ないと小さくなり、多いと大きくなる。学会指針式ではトラス機構の破壊断面の角度 ϕ として $\cot \phi$ を1.0 ~ 2.0の範囲で定義している。ここでは、式(1.1)による低下率の計算値が2.2節(b)で示した試験体の実験値に適合するように試行計算を行い、 $\cot \phi$ を式(3.1)で表すことにした。

$$\cot \phi = 1.8 - 2 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} / c \sigma_B} \quad \text{かつ} \quad \cot \phi \geq 1.0 \quad (3.1)$$

ただし、 $D \cdot \cot \phi > h_0$ の場合は以下による。

$$\cot \phi = h_0 / D \quad (3.2)$$

ここに、 p_w : せん断補強筋比, σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度, c : コンクリートの圧縮強度

柱の内法長さが $D \cdot \cot \phi$ より小さくなると式(3.2)のように修正する必要があると考えられる。

4.3 計算値と実験値の比較

図-4に式(1.1)によるせん断耐力の低下率の計算値を β_0 で示す。式(1.1)による低下率はせん断スパン比が1以下の試験体ではいづれの Q_{sub} を用いた低下率にもほぼ近く、壁梁が中心接合される柱のせん断耐力の低下率を概ね推定している。

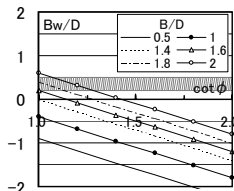
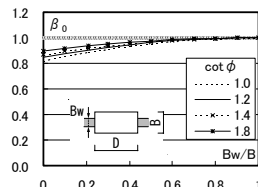
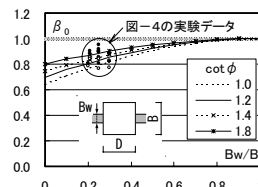


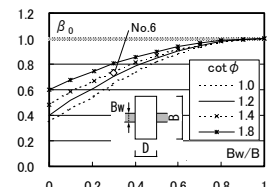
図 - 14 (2.2)式による
B_w/D - cot φ 関係



(a) B/D=0.5



(b) B/D=1.0



(c) B/D=2.0

図 - 15 壁梁幅比(B_w/B)の変化に伴うせん断耐力の低下率 β₀ の変化

図 - 2 には、比較用柱試験体 No.2 の実験による最大耐力に式(1.1)による低下率を乗じて算出されるせん断耐力を水平の一点鎖線で示す。同試験体は開口内法部分のせん断スパン比が約 2.3 であるが、式(1.1)による計算値で最大耐力はほぼ推定している。せん断スパン比が 2 前後でも、基準となる柱の開口内法部分におけるせん断耐力が精度良く推定されると、式(1.1)を用いて壁梁が中心接合される柱のせん断耐力を推定できると判断できる。

4.4 壁梁幅の変化に伴うせん断耐力の低下率

せん断耐力の低下率は、柱断面寸法と壁梁幅およびせん断補強筋量の影響を受ける。柱断面を正方形、長方形として、壁梁幅を変化させた場合の低下率の変化を図 - 15 に示す。長方形断面については、辺長比を 2 として、柱せいが大きい場合と小さい場合について示している。また、cot φ を 1.0 ~ 1.8 で変化させた 4 種類の曲線を示している。図 - 15(b) の正方形断面には、図 - 4 の試験体の実験データを β_0 で示している。 β_0 は Q_{suo} に荒川 mean 式を、 β_0 は Q_{suo} に短柱式を用いたものである。それらの試験体は全て正方形柱断面のものだけであった。柱幅に対する腰壁・垂れ壁の厚さの比が 0.2 ~ 0.3 になっており、低下率の実験値はほとんど、cot φ を 1 または 1.4 とした 2 種類の曲線の間の値となっている。また実験の低下率が 0.8 ~ 0.9 の範囲で限定的な値となっている。これは、既往の研究において、既存建物のモデル化により試験体形状が限定されていることによる。試験体形状によっては壁梁が中心接合された場合でも、せん断耐力の低下率はさらに低下することになる。

図 - 14(c) には No.6 (B/D=1.82) の低下率を β_0 で示す。その実験値は cot φ を 1.4 とした曲線に近い。図 - 15(a) と (c) の比較により、長方形断面については、柱せいが小さく、柱幅が大きい断面形状の方がせん断耐力が低下することが確認できる。

5. まとめ

- (1) 既往の実験データを整理した結果、腰壁・垂れ壁付き柱のせん断耐力は、柱へのせん断力が壁を介して伝達するため、柱の開口内法区間に応力集中が生じて、開口内法長さを柱長さとする柱のせん断耐力 Q_{suo} よりも低下する。
- (2) 腰壁・垂れ壁を含めた壁梁が中心接合されている柱のせん断耐力は、前述の Q_{suo} に式(1.1)または式(1.2)による低下率を乗じて推定できる。
- (3) Q_{suo} に対するせん断耐力の低下率は、式(1.1)または式(1.2)によると、柱断面と壁梁幅、およびせん断破壊面の角度の影響を受ける。その定性的な傾向を図 - 15 に示した。

参考文献

- 1) 當房和博・塩屋晋一ほか：壁梁が偏心接合された RC 柱のせん断破壊性状に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，pp321-324，2005.3
- 2) 大久保全陸ほか：震害を受けた鉄筋コンクリート部材の補修・補強に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，pp281-284，1984.3
- 3) 佐藤直昭ほか：破壊モード別 1/2 模型柱の被災度測定実験，日本建築学会学術講演梗概集，pp2189-2192，1983.9
- 4) 大久保全陸ほか：被災 RC 柱に対する袖壁付加補強復旧方法に関する実験，日本建築学会学術講演梗概集，pp67-68，1985.10
- 5) 遠藤理根穂ほか：珪器質材質を利用して腰壁垂壁付柱における脆性破壊を防止するための実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp1293-1294，1982.1
- 6) 久徳琢磨ほか：鉄筋コンクリート造垂壁・腰壁付柱の剛性・強度及びじん性に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，pp233-236，1986.3
- 7) 澤口祐樹・広沢雅也ほか：偏心接合を有する RC 造腰壁・垂壁付柱の耐震性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，pp229-240，2002
- 8) 武田寛：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁付きラーメンの耐力及び変形性状に関する実験的研究 その 6，日本建築学会学術講演梗概集，pp1939-1940，1983.9
- 9) 末永政悦・荒川卓：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 その 51，日本建築学会学術講演梗概，pp1513-1514，1977.10