

# 論文 接合位置や形状が異なる腰壁・垂れ壁付 RC 柱のせん断耐力の評価に関する研究

阿部友樹\*1・塩屋晋一\*2・孔令テキ\*3

**要旨:** 腰壁・垂れ壁付柱において、壁が様々な形で様々な位置に設けられる場合の柱のせん断耐力の簡便な評価式を誘導することを目的としている。既往の研究の追加実験を行い、これまでの実験結果も含め、柱に対する腰壁と垂れ壁および上梁の接合状況や柱の断面形状を系統的に変化させた場合の腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の変化傾向と、腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の体系的な相関関係とそのせん断耐力の評価方法を明らかにした。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 柱, せん断耐力, 腰壁・垂れ壁, 中心接合, 偏心接合, ねじり耐力

## 1. はじめに

RC造建物では腰壁・垂れ壁・袖壁が様々な形で様々な位置に設けられる。塩屋ら<sup>1), 2), 3)</sup>は、腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の評価式を構築する目的で、柱に対する壁の接合状況や、柱の断面形状を系統的に変化させた場合の柱のせん断破壊加力実験を行っている。

実験は2008年から行っている。残された腰壁・垂れ壁の形状と接合位置の場合の柱の実験を行い、また、これまでの実験でせん断耐力が異常に小さかった試験体やせん断破壊しなかった試験体の再実験を行った。

本論文では、これらの実験概要を述べ、これまでの腰壁・垂れ壁の形状と接合位置が系統的に変化する場合の柱のせん断耐力の体系的な相関関係と評価方法を述べる。

## 2. 加力破壊実験

### 2.1 試験体

図-1に試験体の柱幅に対する壁の位置と形状を示す。

長方形断面(LRシリーズ)では、腰壁と垂れ壁が偏心接合される柱(図-1のLR-No.1~No.3)、腰壁が偏心接合される柱と中心接合される柱(LR-No.4~No.10)、高さが異なる腰壁と垂れ壁が偏心接合される柱(LR-No.11~No.12)などを主な対象にした。このほか開口内法を柱長さとする柱(以後、開口内法柱)の5体の再実験を行った。正方形断面(Lシリーズ)では腰壁と垂れ壁が中心接合される柱(L-No.1)と、開口内法柱の1体を再実験を行った。図-2に試験体の形状・寸法・配筋・柱断面を示す。

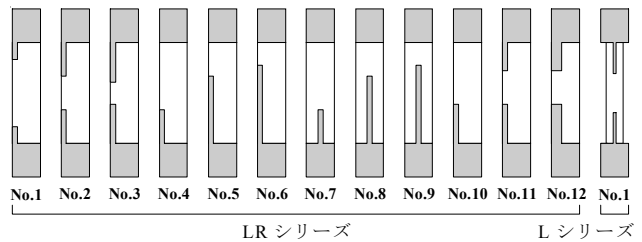


図-1 柱側面における壁の位置

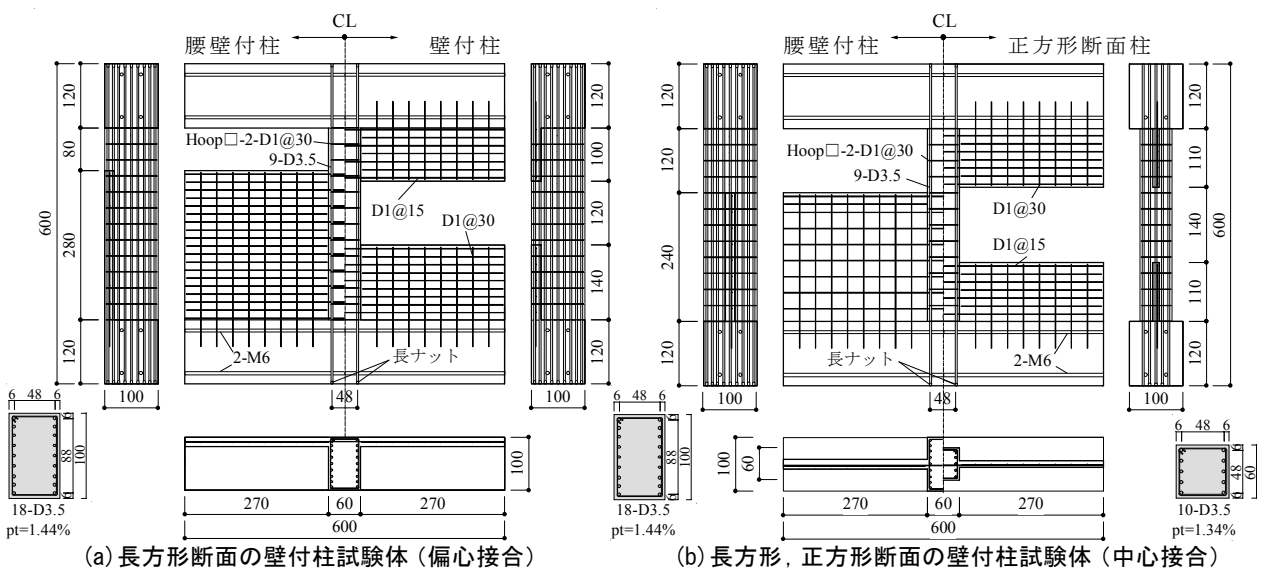


図-2 試験体の形状と配筋状況および寸法

\*1 鹿児島大学 大学院理工学研究科建築学専攻 (学生会員)  
 \*2 鹿児島大学 大学院理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)  
 \*3 清水建設(株) 元鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生



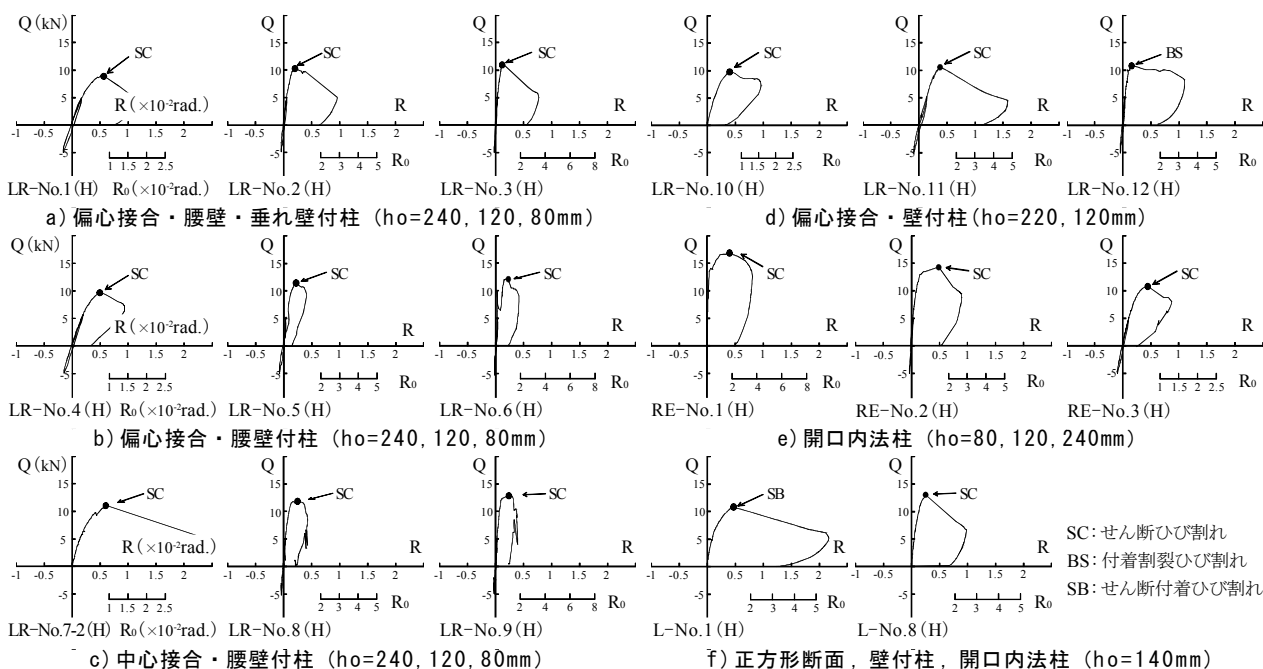


図-5 水平荷重-変形角関係

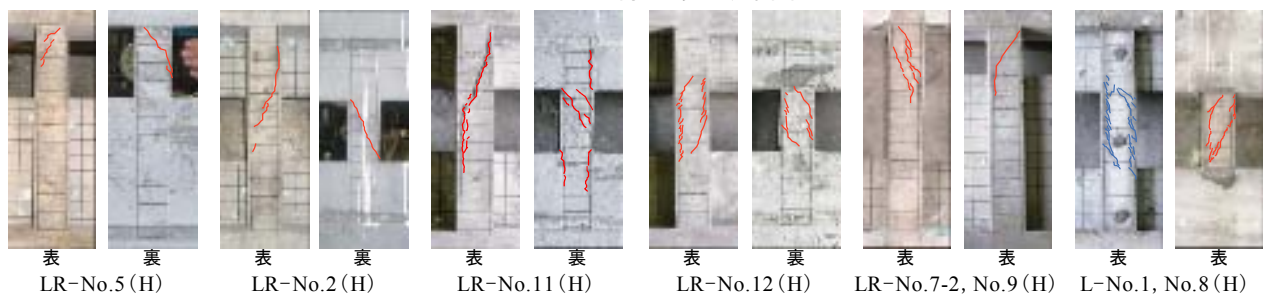


写真-1 LR,Lシリーズの最終破壊状況の例

LR-No.12(H)だけせん断ひび割れが発生した直後に、付着ひび割れも多数発生して最大荷重が決定した。それ以外はせん断破壊して最大荷重が決定した。写真-1に最終破壊状況の例を示す。壁が偏心接合される試験体は表と裏の状況を示している。表と裏で破壊状況が異なった。中心接合された試験体は表だけを示している。裏も同様であった。

### 3. せん断耐力の変化傾向

実験データに基づいて腰壁と垂れ壁の形状・寸法・位置が系統的に変化した場合のせん断耐力の変化傾向を述べる。

#### (1) 柱幅に対する壁の位置が変化する場合

図-6(a), (b)に正方形断面の腰壁・垂れ壁付柱で、中心接合、偏心接合とこれらの中間位置の接合の場合のせん断耐力の変化を示す。また両側には開口内法柱と長柱のせん断耐力も示している。これらは腰壁・垂れ壁付柱の上限と下限の耐力になる。図-6(a)はコンクリート圧縮強度が $19.3\text{N/mm}^2$ のNシリーズで、図-6(b)は $14.1\text{N/mm}^2$ のLシリーズである。横軸の $eo/B$ は柱幅の中央から壁芯までの偏心距離 $eo$ を柱幅 $B$ で除した値である。0.0は中心接合を意味し、0.5に近づくとも最も偏心していることを意味する。中心接合の□はせん断ひび割れの発生と同時に付着破壊したものである。○はせん断破壊したものである。

□の値はせん断耐力に近いものと考え、壁付柱のせん断耐力は $eo/B$ に応じて直線的に変化している。

#### (2) 柱幅に対する壁の接合位置と上梁の影響

図-6(c)は横軸に $eo/B$ をとり、せん断耐力の変化を示している。長方形断面柱の腰壁・垂れ壁付柱で、上梁が設けられた場合と上下の壁高さや厚さが多少異なる場合も含めて、柱幅に対する壁芯の位置を変化させた場合のせん断耐力の変化を示す。開口内法高さは全て同じである。耐力は両側の開口内法柱の上限耐力と下限耐力の間にある。

壁芯が偏心するほどせん断耐力が低下している。●は上梁が設けられたものである。一点鎖線は腰壁と垂れ壁が中心接合されたNo.3(10)の○と偏心接合されたNo.11(11)の○を結んだ。梁が付いている場合のせん断耐力は、その一点鎖線の前後になり、一点鎖線はそれらのせん断耐力の下限値をほぼ推定する結果になっている。今回、設けた梁であれば、梁を無視して $eo/B$ の値に応じてせん断耐力を直線補間でほぼ近似できる結果になっている。

#### (3) 開口内法柱のせん断耐力

図-7(a)に長方形断面の開口内法柱のせん断耐力と $ho/D$ の関係を示す。 $ho$ は開口内法高さで、 $D$ は柱せいである。 $ho/D$ の変化に伴ってせん断耐力は双曲線的に変化している。この変化傾向は、一般的な柱のせん断耐力の変

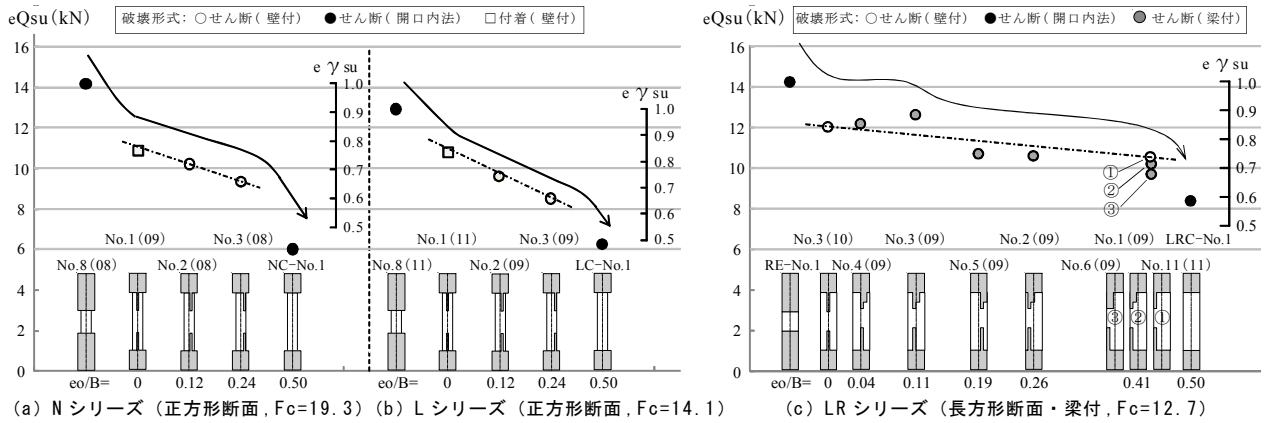


図-6 柱側面に対する壁の位置と梁を変化させた腰壁・垂壁付柱のせん断耐力の変化

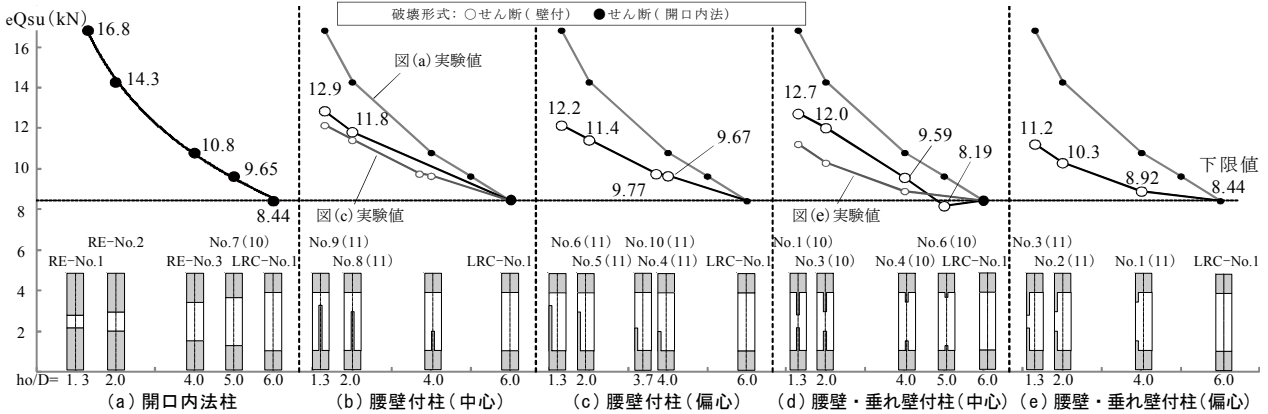


図-7 開口内法高さを変化させた腰壁・垂壁付柱のせん断耐力の変化 (LRシリーズ, 長方形断面柱)

化傾向と一致しており,今回基準にする開口内法柱のせん断耐力は妥当な実験値と判断される。

#### (4) 壁高さを变化させた壁付柱のせん断耐力

図-7 (b), (c)に長方形断面柱で腰壁だけが中心接合された場合と偏心接合された場合のせん断耐力と $h_o/D$ の関係を示す。腰壁高さが低くなり,開口内法高さ $h_o$ が大きくなると,せん断耐力は低下して長柱の下限耐力に近づく。図中(b)には薄線で同図(c)の偏心接合のデータを示す。偏心接合の耐力が小さいが,その差はあまり大きくない。

同図(d), (e)に腰壁と垂れ壁が中心接合された場合と偏心接合された場合のせん断耐力と $h_o/D$ の関係を示す。壁高さが低くなり,開口内法高さ $h_o$ が大きくなると,せん断耐力は低下して長柱の下限耐力に近づく。図中(d)には薄線で同図(e)の偏心接合のデータを示す。腰壁・垂れ壁付柱では,中心接合に対して偏心接合の耐力が大きく低下する。

### 4. せん断耐力の低下率の評価式の修正の検討

文献1), 2)のせん断耐力の評価式は力学モデルと実験結果に基づく半理論式である。そのため実験データの増加に伴い修正の検討が必要となる。修正事項を以下に述べる。

#### 4.1 中心接合された柱の低下率 $\gamma_{suc}$ に用いる $\alpha$ の修正

文献3)では図-8に示すように内法区間において有効にせん断抵抗する領域をモデル化している。その領域の開口端位置の幅 $t$ を式(1)のように表している。 $t$ は壁厚 $t_w$ より大きく柱幅 $B$ より小さいため $\alpha$ は0.0~1.0になる。実験値に適合

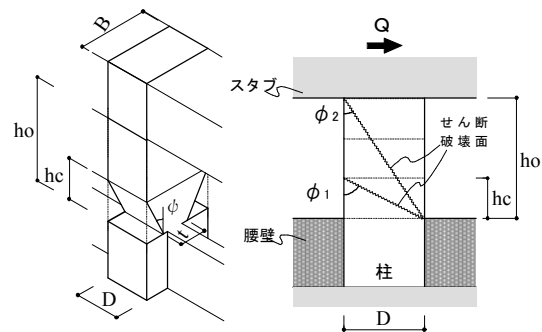


図-8 腰壁付柱におけるせん断抵抗する領域のモデル<sup>3)</sup>

する  $\alpha$  を特定し,その推定式として式(2)を示している。

図-9に $\alpha$ のデータの分布を示す。図中の●は文献1)の正方形断面柱の腰壁・垂れ壁付柱のデータである。○は図-6 (a), (b)の正方形断面柱のNとLシリーズのデータである。□は図-7 (d)の長方形断面柱( $B/D=1.7$ )で腰壁・垂れ壁付柱のデータで, ▣は図-7 (b)長方形断面柱( $B/D=1.7$ )で腰壁付柱のデータである。横軸は開口内法区間における応力集中の程度を表す寸法比 $\xi$ である。 $\alpha$ は $\xi$ が1.5より小さくなると増加する。式(2)は正方形断面柱だけのデータに基づいて決定している。図-7 (b), (d)の長方形断面柱のせん断耐力の実験データを精度良く評価するためには断面形状比 $B/D$ の影響を考慮する必要が生じた。そこで,式(2)を式(4)のように修正する。正方形断面柱の場合には式(2)と同じになる。式(4)は図-9の□と▣に対して近似するように整理している。

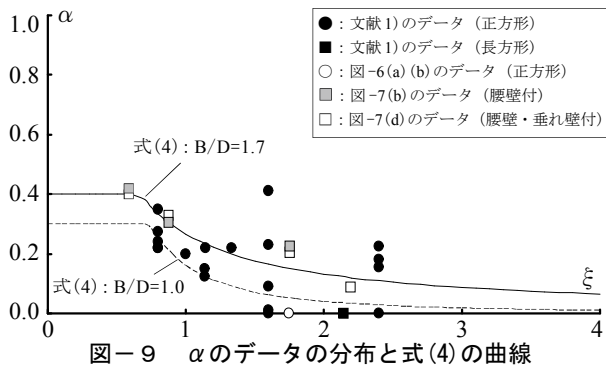


図-9  $\alpha$ のデータの分布と式(4)の曲線

$$t = tw + \alpha \cdot (B - tw) \quad (1)$$

$$\alpha = 0.16 / \xi^2 \quad \text{かつ} \quad \alpha \leq 0.3 \quad (2)$$

$$\text{ここに, } \xi = 0.6 \cdot ho / (B - tw) \quad (3)$$

$$\alpha = 0.16 \cdot (B/D) / \xi^n \quad \text{かつ} \quad \alpha \leq 0.15 \cdot (B/D + 1) \quad (4)$$

$$\text{ここに, } n = -1.5 \cdot (B/D) + 3.5 \quad (5)$$

#### 4.2 偏心接合された腰壁付柱の偏心距離比

図-10に偏心接合された柱の変形状態を示す。文献2)では図-10(a)に示すように上下の腰壁と垂れ壁が同じ柱のねじりモーメントの影響を表す指標として偏心距離比 $e/B$ を式(6)で表している。その場合、ねじれ回転が生じない断面は上下のスラブ位置と中央高さとなる。式(6)の最終項の $2hw/h$ を $hw/(h/2)$ に表現し直すと、ねじれ回転が生じない断面の中央高さ $h/2$ に対する腰壁高さ $hwb$ の比を意味する。腰壁付柱では図-10(b)に示すように柱頭の断面がねじれ回転を生じない位置になる。式(6)は三次元の有限要素弾性解析に基づいている。式(6)の $hw/(h/2)$ を $hwb/h$ として適用できる。次章で図-7(c)の腰壁付柱のせん断耐力を評価するが、それらの試験体のデータでは式(6)の $hw/(h/2)$ を $hwb/h$ とした値に70%を乗じた方が実験値を評価できる。ここでは、腰壁付柱の偏心距離比 $e/B$ を式(7)で近似することにする。

$$\text{腰壁・垂れ壁付柱: } e/B = (0.5 - 0.6 \cdot tw/B) \cdot (2hw/h)^{0.5} \quad (6)$$

$$\text{腰壁付柱: } e/B = 0.7 \cdot (0.5 - 0.6 \cdot tw/B) \cdot (hwb/h)^{0.5} \quad (7)$$

### 5. 腰壁・垂壁付柱のせん断耐力の変化曲面と評価

#### 5.1 柱のせん断耐力の曲面

図-11に開口内法柱と壁付柱のせん断耐力の変化を示す。壁厚 $tw$ の柱幅 $B$ に対する比 $tw/B$ と柱せい $D$ に対する開口内法高さ $ho$ の比 $ho/D$ を変数の軸にしている。 $tw/B$ が1.0の場合は開口内法柱のせん断耐力 $Q_{suo}$ を意味する。0.0の場合は壁が設けられない長柱のせん断耐力 $Q_{suL}$ を意味する。腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力は、それらの間の耐力となる。

図-11には図-7(a)~(e)の実験データを示している。○は中心接合された壁付柱で、□は偏心接合された柱である。

図中の破線は式(4)の $\alpha$ を用いて文献1)の方法により計算したせん断耐力の線である。この破線は○の実験値をほぼ推定している。示した試験体の $tw/B$ は0.18で壁は圧縮破壊し

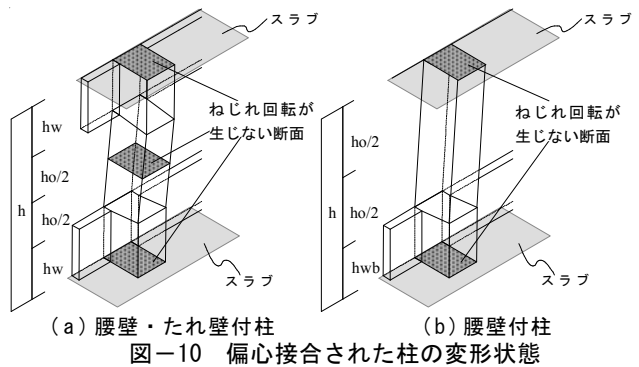


図-10 偏心接合された柱の変形状態

なかった。しかし $tw/B$ がそれより零に近づくとき壁が圧縮破壊して、その破壊が上下のスタブ方向に進展する。見かけ上、壁高さが減少する形になり耐力も $Q_{suL}$ に近づく。点線はその変化を模式的に表している。

一方、壁が同じ寸法で偏心接合されていると柱にねじりモーメント $M_t$ が生じて、偏心接合の柱のせん断耐力 $Q_{sut}$ は中心接合されている柱のせん断耐力 $Q_{suc}$ より低下する。図-12にねじりモーメントとせん断力を同時に受ける場合の柱のせん断耐力 $Q_{sut}$ の耐力線を模式的に示す。 $M_t$ は式(6)または式(7)の偏心距離 $e$ とせん断耐力 $Q_{su}$ の積で表される。柱の純ねじり耐力 $M_{to}$ が精度良く評価できれば、図中の一点鎖線で示す $Q_{su} - M_t$ の耐力線を仮定して推定できるが、柱の上下端が壁で支持されている場合の $M_{to}$ を精度良く評価するのは困難である。 $Q_{sut}$ は次節の方法で近似する。

#### 5.2 偏心接合の柱の耐力 $Q_{sut}$ の近似方法

図-13(a)に図-12中の $Q_{su} - a - M_t$ の平面を示す。腰壁・垂れ壁付柱における式(6)または式(7)における偏心距離 $e$ の上限は $0.5B$ である。これは偏心接合において壁厚が零に限りなく近づいた状態である。偏心接合において偏心距離は、ねじりモーメントを表す指標であると同時に壁厚を表す指標にもなる。偏心接合のせん断耐力 $Q_{sut}$ は中心接合の耐力 $Q_{suc}$ と長柱の耐力 $Q_{suL}$ の間にある。図-12において壁厚比 $tw/B$ が零に近づくとき壁の破壊の進展より $Q_{suc}$ は $Q_{suL}$ に近づく。すなわち、偏心接合において偏心距離 $e$ が上限 $0.5B$ である時、 $Q_{sut}$ は下限の $Q_{suL}$ と見なせる。この時の柱のねじりモーメント $M_{tL}$ は計算上は $Q_{suL} \cdot 0.5B$ となる。しかし、壁が破壊するため、そのねじりモーメントは現実には生じない。ここでは、偏心接合のせん断耐力を評価するために、便宜上、そのねじりモーメント $M_t$ が $M_{tL}$ に近づけば、 $Q_{sut}$ は $Q_{suL}$ に近づくものとする。図-13(a)において横軸の値が $M_{tL}$ で縦軸の値が $Q_{suL}$ の点を点Bとする。偏心接合される柱のせん断耐力の耐力線は点Bを通過するように修正する。当然、同図中の一点鎖線で示す $Q_{su} - M_t$ 耐力線にも $Q_{suL}$ に対応する耐力もある。それを図中において点Aとする。点Aでのせん断力とねじりモーメントの組み合わせの比率は、図-10のような腰壁・垂れ壁付柱では生じないことを意味する。ここでは、図-13(a)中の一点鎖線の $Q_{su} - M_t$ 耐力線の形状の線が点Bを通過するように純ねじり耐力 $M_{to}$ に低減係数 $\lambda$ を乗じて表される曲線を耐力線とする。

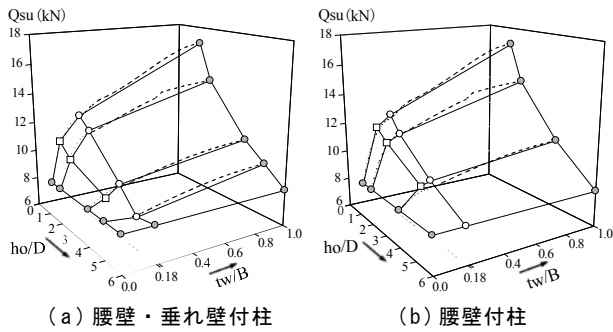


図-11 壁厚と開口内法高に伴うQsuの実験値の変化状況

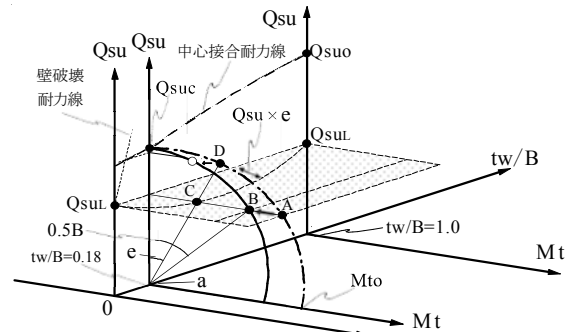


図-12 壁付柱のせん断耐力の相関耐力線

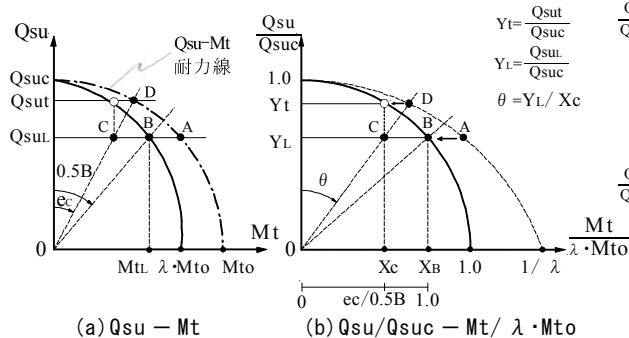


図-13 壁付柱のせん断耐力とねじり耐力の相関曲線

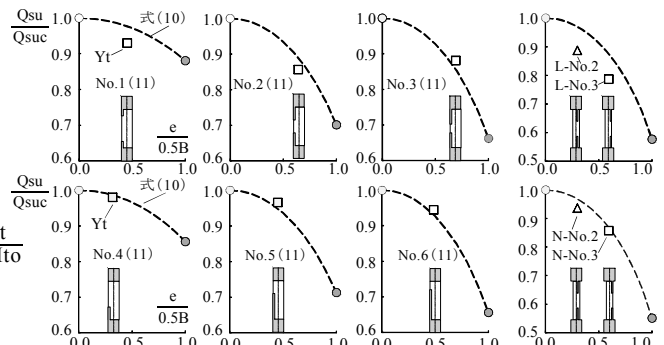


図-14 Qsu/Qsuc - e/0.5B関係

図-13(b)に縦軸のせん断耐力を中心接合のせん断耐力Qsucで除した比を縦軸とし、ねじり耐力を $\lambda \cdot Mto$ で除した比を横軸として図-12(a)を表現し直したものを示す。点Bを通過する耐力線を円の1/4の円弧で近似する。横軸と縦軸をX, Yとすると、耐力線は式(8)で表される。この耐力線に基づくと偏心接合される柱のせん断耐力Qsutは式(9)で表される。

$$X^2 + Y^2 = 1 \quad (8)$$

$$Qsut = Yt \cdot Qsuc \quad (9)$$

$$\text{ここに、} Yt = (1 - 4 \cdot q)^{0.5} \quad (10)$$

$$q = \{1 - (Qsul/Qsuc)^2\} \cdot (e/B)^2 \quad (11)$$

### 5.3 偏心接合の柱の耐力Qsutの評価

図-14に各試験体に対して式(10)によるYtの変化を破線で示す。横軸は $e/(0.5B)$ としている。横軸の値が1.0の点は図-13(b)中の点Bを意味する。式(11)のQsul/Qsucは実験値を用いた。Ytは式(9)からも評価できる。中心接合のせん断耐力に対する偏心接合のせん断耐力の比を意味する。図中にQsul/Qsucの実験値を●で示す。横軸の値は式(6)と式(7)による値を用いた。Ytの破線は実験値を概ね近似している。式(6)と式(7)および式(10)によりYtを評価できる。

このYtに中心接合の柱のせん断耐力Qsucを乗じることで偏心接合の柱の耐力Qsutを評価できる。Qsucに図-13の破線の計算方法による計算値を乗じて求めたQsut値を図-11に□で示す。各試験体のtw/Bの値に $(1-e/0.5B)$ を乗じた値をtw/Bの軸上に写像している。式(10)によるQsutの曲線を破線で示す。tw/Bの軸上の値は□を概ね近似している。中心接合のせん断耐力Qsucの計算精度にもよるが、

式(9)によるQsutの計算値は概ね□の実験値を評価できる。

## 6. まとめ

柱に対する腰壁と垂れ壁および上梁の接合状況や柱の断面形状を系統的に変化させた場合の柱のせん断耐力の変化傾向と、各種形状の柱のせん断耐力の体系的な相関関係と耐力の評価方法を明らかにした。以下に結果をまとめる。

- (1) 壁付柱のせん断耐力は、開口内法柱の耐力と壁を設けない長柱の耐力の間になる。壁の接合位置が柱幅に対して中心から偏心するにつれて、柱のせん断耐力は低下する。壁が偏心接合される場合、同じ開口内法高さでも、柱のせん断耐力は腰壁付柱より、腰壁・垂れ壁付柱の方が小さくなる。垂れ壁に上梁が設けられる場合、上梁を無視してもせん断耐力を安全側で評価できる。
- (2) 中心接合される柱のせん断耐力は、修正した有効幅の係数の式(4)を用いて精度よく評価できる。また偏心接合される柱のせん断耐力は、せん断耐力の体系的な相関を表す耐力線の式(8)を用いて精度よく評価できる。

## 参考文献

- 1) 塩屋晋一, 當房和博: 腰壁・垂れ壁が中心接合されるRC柱のせん断耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第619号, pp.145-156, 2007. 9
- 2) 塩屋晋一, 町頭洋平, 吉留潤平: 壁梁が偏心接合されるRC柱のせん断特性, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp.103-110, 2006. 6
- 3) 孔令テキ, 塩屋晋一, 渡辺達也, 他: 接合位置や形状が異なる腰壁・垂れ壁付RC柱のせん断耐力の評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集Vol.32, No.2, pp.85-90, 2010