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実験的研究

孔令テキ[*1]・塩屋晋一[*2]・渡辺達也[*3]・岩崎まり恵[*4]

要旨：腰壁･たれ壁付柱において，壁の位置が中心接合と偏心接合の中間的な場合や，垂れ壁に上梁が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にしている。既往の研究の追加実験として，柱を正方形断面にした追加試験体と，柱を長方形断面にした腰壁・垂れ壁付柱試験体の加力破壊実験を行い，柱のせん断耐力の変化傾向を明らかにし，上梁が設けられた腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の評価方法を提案している。提案した評価方法には検証すべき事項が一部残されているが，それによる計算結果は上梁による柱のせん断耐力の変化量を精度良く推定することが明らかになった。

キーワード：鉄筋コンクリート，柱，せん断耐力，腰壁･たれ壁，偏心接合

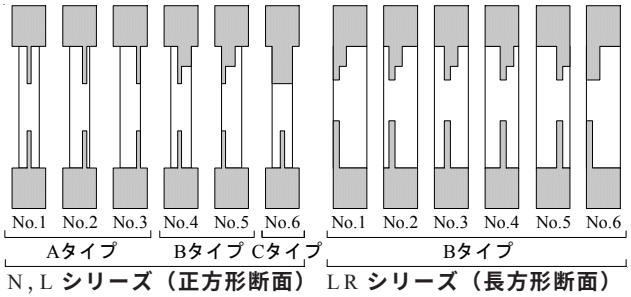
１．はじめに

塩屋ら[1),2)]は，腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力は柱に対する壁の接合状況や柱の断面形状により変化することを報告している。そこでは**図－１**に示すように腰壁と垂れ壁の寸法が同じで，壁が中心接合している場合(AタイプのNo.1)と，壁の側面と柱せい面が一致する偏心接合の場合(AタイプのNo.3)の柱のせん断耐力の評価式を提案している。しかし，実際の建物では壁の接合位置はそれらの場合の中間的位置(AタイプのNo.2)になる場合や，梁が設けられて腰壁と垂れ壁の寸法が異なる場合(Bタイプ，Cタイプ)が多く，これらの場合の評価方法は整備されていない。

また，既往の実験は柱断面が主に正方形断面で，長方形断面の場合については十分な実験資料が得られていない。

本研究は，壁の位置が中心接合と偏心接合の中間的な場合や，垂れ壁に上梁が設けられる場合の柱のせん断耐力の変化と評価方法を明らかにすることを目的にしている。

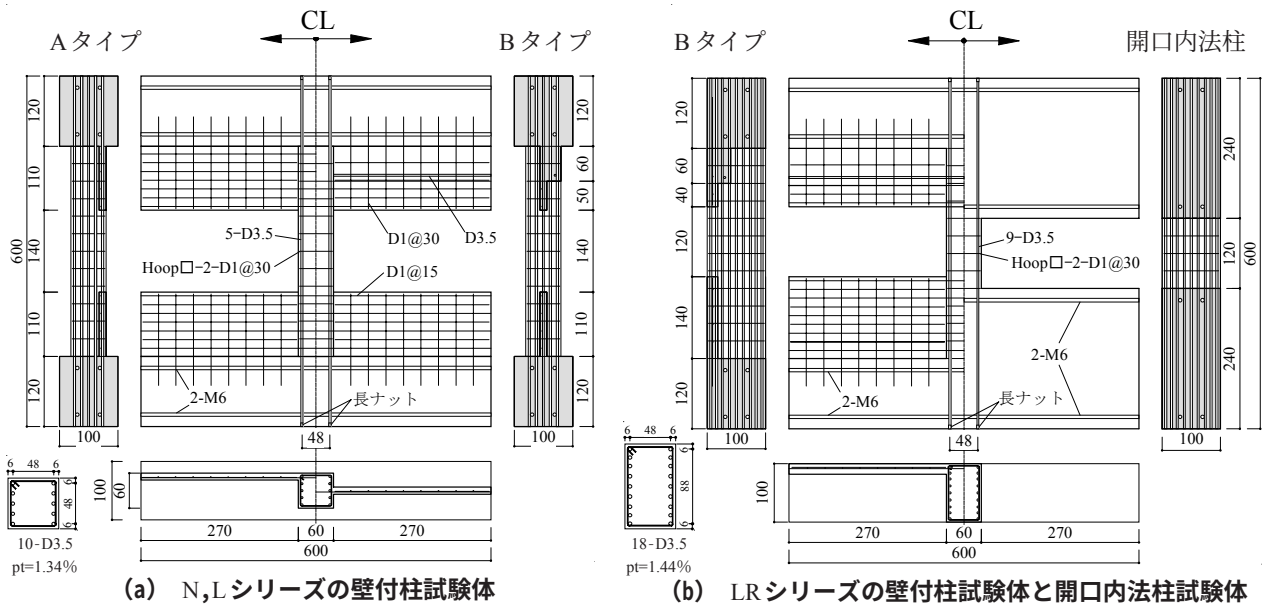
本論文では，柱を正方形断面にした文献3)の追加試験体と，柱を長方形断面にした腰壁･垂れ壁付柱試験体(以後，壁付柱試験体)の加力破壊実験の実験概要とせん断耐力の変化およびその評価方法について述べる。



N，L シリーズ（正方形断面）　LR シリーズ（長方形断面）

※追加試験として行なったのは，Nシリーズ：No.1，No.4，No.6
Lシリーズ：No.1，No.2，No.3である。

図－１　柱幅面における壁の取り付け方とタイプの分類



(a)　N,Lシリーズの壁付柱試験体　　**(b)　LRシリーズの壁付柱試験体と開口内法柱試験体**

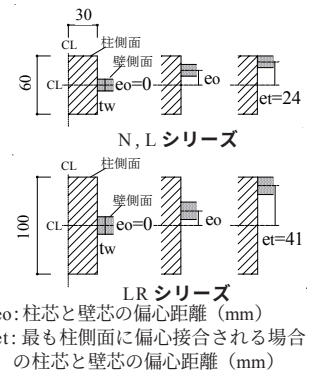
図－２　試験体の形状と配筋状況および寸法

*1 鹿児島大学　大学院理工学研究科建築学専攻　（正会員）
*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 (株)大林組　元鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻　大学院生
*4 宮崎県庁　元鹿児島大学工学部建築学科　学部生

表－１　試験体の一覧とコンクリート圧縮強度および寸法

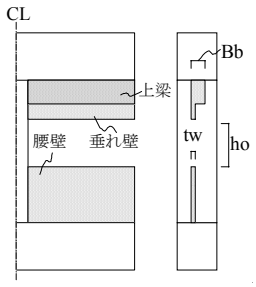
No.	試験体名	Fc (N/mm²)	ho (mm)	柱断面 B×D (mm)	梁幅 B_b (mm)	偏心距離 eo (mm)	偏心距離比 eo/B	壁厚 tw (mm)
N-No.1	N-CWA1(H)	19.3	140	60×60		0	0	12.0
N-No.4	N-CWB4(H)				36	0	0	
N-No.6	N-CWC6(H)				60	0	0	
L-No.1	L-CWA1	14.0				0	0.00	
L-No.2	L-CWA2					12	0.20	
L-No.3	L-CWA3					24	0.40	
L-No.7	L-CO							
LR-No.1(H)	LR-CWB1(H)	12.1	120	100×60	40	41	0.41	18.0
LR-No.2(H)	LR-CWB2(H)					26	0.26	
LR-No.3(H)	LR-CWB3(H)					11	0.11	
LR-No.4(H)	LR-CWB4(H)					4	0.04	
LR-No.5(H)	LR-CWB5(H)					19	0.19	
LR-No.6(H)	LR-CWB6(H)					41	0.41	
LR-No.7-1(H)	LR-COS(H)							
LR-No.7-2(HU)	LR-COS(HU)	12.9						

N,L,LR:シリーズ,CW:腰壁・たれ壁付柱,CO:開口内法柱(ho=140mm)
COS:開口内法柱(ho=120mm),A,B,C:壁の接合タイプ,H：柱主筋に高強度鉄筋使用，U:アンボンド処理,B:柱幅,D:柱せい,B_b:梁幅(**図－４**参照)
eo：偏心距離(**図－３**参照),tw：壁厚(**図－４**参照)



eo:柱芯と壁芯の偏心距離（mm）
et:最も柱側面に偏心接合される場合の柱芯と壁芯の偏心距離（mm）

図－３　柱芯と壁芯の偏心距離と記号

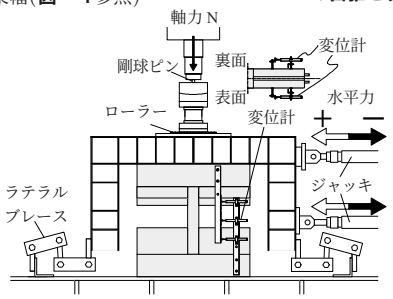


図－４　壁厚と梁幅の記号

表－２　材料の力学的特性

コンクリート	Ec(N/mm²)	σ_B(N/mm²)	ε_B
Nシリーズ	2.00×10^4	19.30	0.034
Lシリーズ	1.63×10^4	14.04	0.032
LRシリーズ	1.32×10^4	12.08	0.029
鉄筋	Es(N/mm²)	σ_y(N/mm²)	a(mm²)
D1	2.05×10^5	220	0.79
D3.5(N)	2.05×10^5	385	9.08
D3.5(H)	2.05×10^5	—	9.08

E_c:コンクリートのヤング係数，σ_B:圧縮強度
ε_B:圧縮強度時ひずみ度,Es:鉄筋のヤング係数
σ_y:降伏強度,a:鉄筋１本当たりの断面積



図－５　加力状況と測定状況

N-No.1(H)　N-No.6(H)　L-No.1

写真－１　最終破壊状況の例

２．加力破壊実験

2.1 試験体

図－２に壁付柱試験体と比較用の開口内法柱試験体の形状と配筋状況および寸法を示す。試験体の縮尺は実大の約1/10である。壁の接合タイプは,腰壁と垂れ壁の形状・寸法が同じであるAタイプ,垂れ壁に上梁を設けたBタイプ,垂れ壁の厚さを柱幅と同じにして腰壁付柱にしたCタイプの3種類である。AタイプとBタイプでは柱幅に対する壁の接合位置を変化させた。開口内法柱試験体の柱の上下は直接スタブで支持している。

表－１に試験体の一覧とコンクリート圧縮強度Fcおよび寸法を示す。試験体はコンクリートの圧縮強度と柱の断面形状により3シリーズに分けられている。19.3N/mm²のNシリーズと，14.0 N/mm²のLシリーズおよび12.1 N/mm²のLRシリーズである。ただし,LRシリーズは柱断面が長方形断面であり,それら以外は正方形断面である。**表－２**に材料特性を示す。コンクリートの粗骨材は5mm以下の砕石とした。**図－３**には壁付柱試験体の柱芯と壁芯の偏心距離と記号を示している。**図－４**には**表－１**で用いる壁厚と梁幅の記号を示す。試験体名にN-No.1(H)のように(H)がついた試験体は主筋に高強度鉄筋を用いている。LRシリーズではLR-No.7-1(H)が付着破壊して開口内法柱のせん断耐力を把握できなかったため,主筋の付着を無くしたLR-No.7-2(HU)を追加した。

Nシリーズは昨年,実験を行っているが,それらの試験体のうち,曲げ降伏してせん断強度が把握できなかった試験体について,主筋を高強度にして追加実験を計画した。

2.2 加力方法と測定方法

図－５に加力状況と測定状況を示す。水平力による繰り返しの逆対称曲げせん断加力を行い,上下のスタブを平行に維持した。軸力は10.86kNの一定とした。軸力比はNシリーズで0.156,Lシリーズで0.215,LRシリーズで0.141,0.150である。上下のスタブ間のねじれ回転角は生じなかった。詳細は文献3）を参照されたい。

３．水平荷重－変形角関係と破壊状況

写真－１に代表的な最終破壊状況を示し，**図－６**と**図－７**に水平荷重－変形角関係を示す。Rは層間変形を柱全長h(360mm)で,Roは開口内法高さhoで除している。

(1)Nシリーズ(Fc19.3)

N-No.1(H)とN-No.4(H)は主筋に沿う付着割裂破壊が生じて最大荷重が決定し,せん断耐力を把握できなかった。N-No.6(H)は開口内法区間で対角せん断ひび割れが生じて最大荷重が決定した。

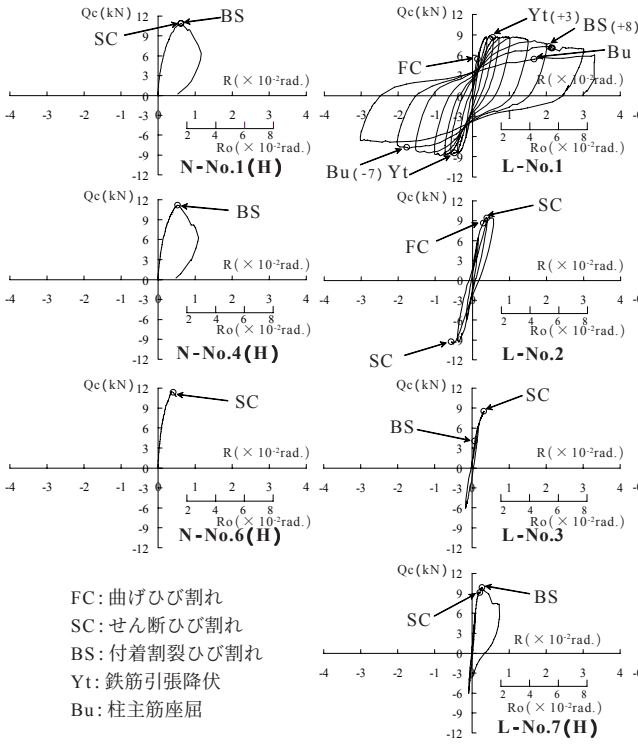
(2)Lシリーズ(Fc14.0)

L-No.1は+3サイクルのピーク時($R=0.577\times10^{-2}$ rad.)で主筋の降伏により剛性が低下し,耐力が決定した。

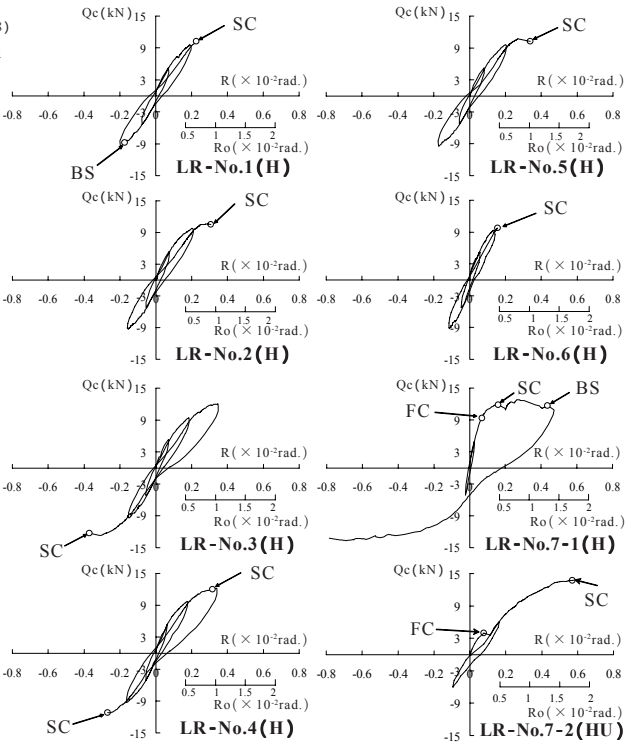
L-No.2とL-No.3は対角せん断ひび割れが生じてせん断破壊した。L-No.7(H)は主筋に沿う付着割裂破壊が生じて最大荷重が決定した。

(3)LRシリーズ(Fc12.1)

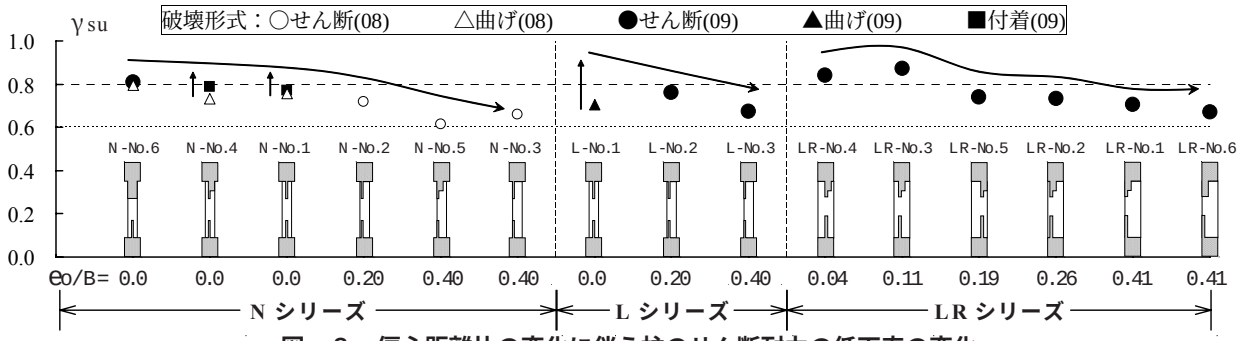
壁付柱試験体はいずれもせん断破壊して最大荷重が決定した。壁の偏心距離eoが大きいものほど,表面と裏面のせん断ひび割れの状況が異なった。開口内法柱のLR-No.7-1(H)は付着破壊して最大荷重が決定した。付着破壊を防ぐ目的で主筋の付着を無くしたLR-No.7-2(HU)は剛



図－６　N,L シリーズの水平荷重－変形角関係



図－７　LR シリーズの水平荷重－変形角関係



図－８　偏心距離比の変化に伴う柱のせん断耐力の低下率の変化

性が低下したが , せん断破壊して最大荷重が決定した。

４．せん断耐力の低下率

壁付柱のせん断耐力は開口内法柱のせん断耐力より低下する。文献1) ,2)では開口内法柱のせん断耐力に対する壁付柱のせん断耐力の比をせん断耐力の低下率γsu(以後, 低下率)と定義している。**図－８**にN,L,LR シリーズの偏心距離の変化に伴う低下率の変化を示す。白塗りは文献3)の実験データ,黒塗りは本論文のデータである。耐力がせん断破壊で決定した場合は○● , 付着割裂破壊で決定した場合は■ , 曲げ破壊で決定した場合は△▲で示す。

4.1 壁の接合位置の影響

図－８のNシリーズにおいて,No.1,No.2,No.3を比較する。せん断破壊したNo.2,No.3は , 開口内法柱に対し低下率はそれぞれ0.72,0.66となり,壁付柱のせん断耐力は開口内法柱のせん断耐力より小さくなっている。付着破壊したNo.1のせん断耐力は,付着耐力より大きいため,No.1のせん断耐力の低下率は矢印の方向に移動する。このことから,壁の接合位置が中心接合から偏心接合に変化するにつれてせん断耐力が低下することが確認できる。

Lシリーズにおいて ,No.1は曲げ降伏したため , この低下率も矢印の方向に移動し,Nシリーズと同様の傾向が言える。

LR シリーズでも , 偏心距離比の増加に伴い , 低下率の減少が見られる。

全体的に見ると中心接合の試験体の低下率は0.8前後で, 偏心接合の試験体の低下率は0.6 に近い。

4.2 上梁の影響

図－８のNシリーズにおいて,壁が中心接合されたNo.1と垂れ壁に上梁が設けられたNo.4を比較すると,低下率はそれぞれ0.77,0.79となり , 多少No.4 の方が最大耐力は大きいが,ほとんど差は無く,上梁はほとんど影響を与えていない。また壁が偏心接合されたNo.3と垂れ壁に上梁が設けられたNo.5を比較すると , せん断耐力に多少の差が生じているが , せん断耐力のバラツキを考慮すると , その耐力の差も無視できる。しかし,垂れ壁の厚さを柱幅としたNo.6とNo.1を比較すると , 低下率はそれぞれ0.81,0.77でNo.6 の方が最大耐力が大きい。垂れ壁の壁厚が柱幅になり,柱頭の曲げ危険断面が開口端に位置したためである。No.6 のように垂れ壁の厚さを柱幅とするような梁を設

けると，その影響を考慮する必要がある。

5．せん断耐力の低下率の評価

文献1)では壁が中心接合される場合(**図－1**のAタイプのNo.1)のせん断耐力の低下率の評価式，文献2)では壁が偏心接合される場合(**図－1**のAタイプのNo.3)のせん断耐力の低下率の評価式をそれぞれ提案している。文献3)では壁がそれらの間の位置の場合(**図－1**のAタイプのNo.2)に壁の位置に応じて直線補間して評価する式(4)を提案している。

$$Q_{su} = \gamma_{su} \cdot Q_{suo} \quad (1)$$

$$\gamma_{suc} = 1 - \kappa (1 - t/B)^2 / (4 \kappa \cdot \tan\psi \cdot \cot\phi) \quad (2)$$

$$\gamma_{sut} = 1 / \{1 + 0.5e / (Kt \cdot D)\} \quad (3)$$

$$\gamma_{su} = \gamma_{suc} - (\gamma_{suc} - \gamma_{sut}) \cdot eo / et \quad (4)$$

ここに，Q_{suo}：開口内法柱のせん断耐力

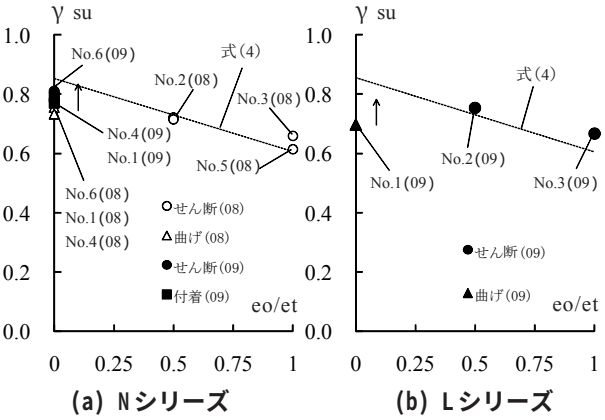
γ_{suc}：壁が中心接合される場合の低下率

γ_{sut}：壁側面が柱せい面に一致して最も偏心接合される場合の低下率

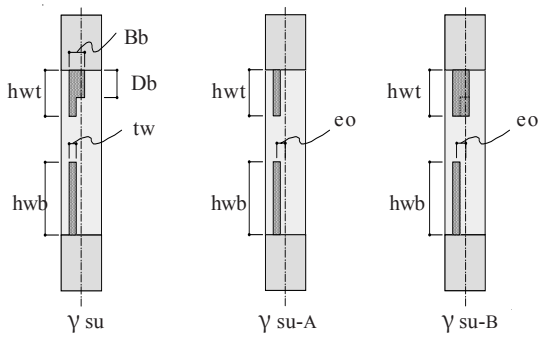
eo：柱芯と壁芯の偏心距離

et：最も柱面側に偏心接合される場合の柱芯と壁芯の偏心距離

この他の記号は文献1)，2)を参照されたい。



図－9　柱のせん断耐力の低下率の実験値と計算値の比較



図－10　対象にする柱と標準とする柱

図－9に**図－8**のせん断耐力の低下率の実験値と計算値を比較して示す。記号の意味は**図－8**と同じである。式(4)により求めた計算値を点線で示す。この計算では梁の影響は無視している。曲げ降伏した△▲，付着破壊した■のせん断耐力の低下率は矢印の方向に移動する。

両シリーズとも，壁の偏心距離が中心接合から偏心接合へと大きくなるにつれて低下率は小さくなる傾向が見られ，その低下率は式(4)によりほぼ近似できることが確認できる。

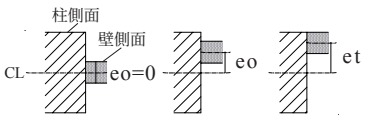
6．梁を考慮する場合のせん断耐力の低下率の評価方法

6.1 寸法比によるせん断耐力の低下率の近似方法

図－10に示すように対象にする壁付柱のせん断耐力の低下率γ_{su}を計算する場合に，AとBの2種類の柱を想定する。対象にする柱は垂れ壁の高さhwtに対する上梁のせいDbの比Db/hwtが0.0であればA柱

表－3　A柱とB柱のせん断耐力の低下率を計算するために標準とする柱

A柱 j	A柱 k=1	A柱 k=2	A柱 S	B柱 j	B柱 k=1	B柱 k=2	B柱 S
j=1	A柱	AI	AII	j=1	B柱	A	BII	0.5
j=2	AI柱	AI2	AII2	j=2	BII柱	BI2	BII2	eo/et
j=3	AII柱	AI3	AII3	j=3	BI2柱	BI3	BII3	hwt/hwb
				j=4	BII2柱	BI4	BII4	hwt/hwb



eo：柱芯と壁芯の偏心距離
et：最も柱側面に偏心接合される場合の柱芯と壁芯の偏心距離

になり，1.0であればB柱になる。

低下率γsuは，A柱の低下率γsu-AとB柱の低下率γsu-Bの間にあり，両者の値の間は寸法比Db/hwtに応じて直線的に変化するものとし，式(5)のように直線補間する。

$$\gamma_{su} = \gamma_{su\text{-}A} + (\gamma_{su\text{-}B} - \gamma_{su\text{-}A}) \cdot Db/hwt \qquad (5)$$

A柱とB柱の低下率も同様の考え方で近似する。**表－3**にA柱とB柱の低下率を計算するために標準とする柱を示す。

まずA柱(j＝1の場合)ではk＝1とk＝2の柱を想定し，それらをAIとAⅡ柱とする。A柱の低下率γsu-AはAIとAⅡ柱の低下率の間にあり，Sの欄の寸法比に応じて直線的に変化するものとして直線補間する。さらにAIとAⅡ柱も同様にj＝2とj＝3の場合に示すように柱を想定する。jの柱の低下率として式(6)で表す。

$$\gamma_{su}(j) = \gamma_{su}(j,1) + \{\gamma_{su}(j,2) - \gamma_{su}(j,1)\} Sj \qquad (6)$$

ここに，　$\gamma_{su}(j)$：jの柱の低下率

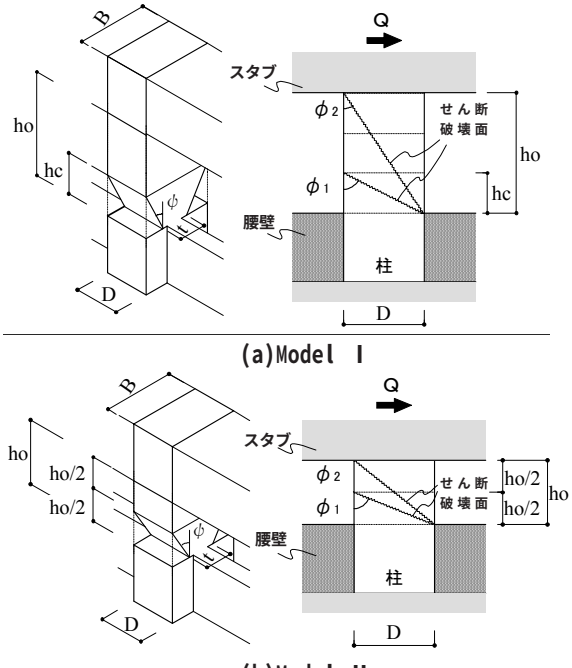
$\gamma_{su}(j,1)$：k＝1の柱の低下率

$\gamma_{su}(j,2)$：k＝2の柱の低下率

Sj：jの柱で考慮する寸法比

最終的には上下の腰壁と垂れ壁の寸法が同じで，壁が中心接合された柱(表中の①の柱)と偏心接合された柱(表中の②の柱)，また腰壁だけが設けられる柱（以後，腰壁付柱)で，中心接合された柱(表中の③の柱)と偏心接合された柱(表中の④の柱)などになり，これらのせん断耐力の低下率が特定できると，壁や梁が設けられる様々な柱のせん断耐力の低下率は式(6)により推定できることになる。

①と②の柱の低下率はそれぞれ文献1)，2)の式により評価できる。腰壁付柱の③と④の柱の低下率の評価方法は次章で述べる。またB柱も同様に近似する。ただしB柱(j＝1の場合)は寸法比で近似は難しく，k＝1とk＝2の柱の低下率の平均値で近似することにした。



図－11　腰壁付柱におけるせん断抵抗する領域のモデル

7．腰壁付柱のせん断耐力の低下率

7.1 中心接合の場合

文献1)の考えに基づきモデル化される腰壁付柱の開口内法区間におけるせん断抵抗する領域を**図－11**に示す。ModelⅠは開口端の応力集中の影響を受ける高さhcがho/2より小さく，応力集中の影響を受ける領域の割合が小さい場合で，ModelⅡはhcがho/2より大きく，応力集中の影響を受ける領域の割合が大きい場合である。せん断破壊面がhcの区間に納まる場合(φ＜φ1)の低下率は文献1)のType-Aと同じになり，せん断破壊面がhcの区間に納まらない場合(φ1＜φ＜φ2)のせん断耐力の低下率は文献1)のType-Bの評価式と同じになる。

7.2 偏心接合の場合

図－12に偏心接合された柱の変形状態を示す。文献2)では**図－12(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(7)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(7)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－12(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(7)は弾性解析に基づいている式(7)のhw/(h/2)をhwb/hとして適用できる。腰壁付柱の偏心距離比は式(8)で表して文献2)の方法で評価できる。

腰壁・垂れ壁付柱：　$e/B = (0.5\text{-}0.6 \cdot tw/B) \cdot (2hw/h)^{0.5}$　(7)

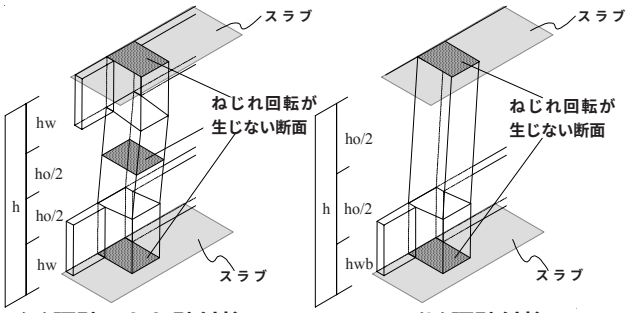
腰壁付柱：　$e/B = (0.5\text{-}0.6 \cdot tw/B) \cdot (hwb/h)^{0.5}$　(8)

8．せん断耐力の低下率の評価式の修正の検討

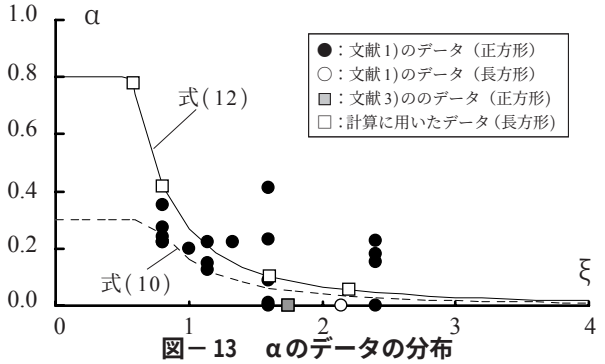
文献1)，2)のせん断耐力の低下率の評価式は力学モデルと実験結果に基づく半理論式である。そのため実験データの増加に伴い修正の検討が必要となる。修正事項を以下に述べる。

8.1 中心接合された柱の低下率γsutに用いるαの修正

文献1)では**図－11**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(9)のように表している。tは壁厚twより大き



図－12　偏心接合された柱の変形状態



図－13　αのデータの分布

く柱幅B以下なることから，αは0.0～1.0の範囲になり，実験値に適合するαを特定し,その推定式として式(10)を示している。

図－13にαのデータの分布を示す。図中の●は文献1)の正方形断面柱(B/D＝1.0)のデータで，○は長方形断面柱(B/D＝1.8)のデータある。 は文献3)で行った正方形断面柱のNとLシリーズのデータである。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ξである。αはξが1.5より小さくなると増加する。式(10)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－15**で示す長方形断面柱のLRシリーズで得られたせん断耐力の低下率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(10)を式(12)のように修正することにした。正方形断面柱の場合には式(10)と同じになる。**図－13**の□は次章のLRシリーズの計算で用いた低下率のデータであり，式(12)で表される実線上のデータになる。

$$t = tw + \alpha \cdot (B - tw) \quad (9)$$

$$\alpha = 0.16/\xi^2 \quad \text{かつ} \quad \alpha \leqq 0.3 \quad (10)$$

$$\text{ここに，} \xi = ho/(2 \cdot hc') = 0.6 \cdot ho/(B - tw) \quad (11)$$

$$\alpha = 0.16 \cdot (B/D)/\xi^2 \ \text{かつ} \ \alpha \leqq 0.8 \quad (12)$$

8.2 偏心接合された柱の低下率γ sutの下限値の設定

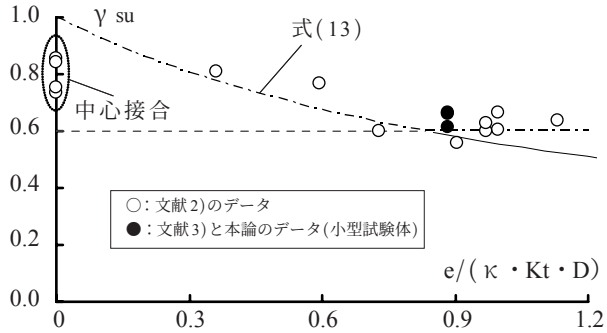
文献2)でγ sutの評価式を誘導する際に用いたデータを**図－14**に示す。○は文献2)のデータである。●は文献3)と本論文の小型試験体で，上下の腰壁と垂れ壁が同じ寸法で壁が偏心接合される柱のデータである。

横軸の値が0.9以上になると低下率が0.6より減少しなくなる。図中の曲線は偏心接合のせん断耐力の低下率の評価式によるものである。同式による計算値に式(13)のように下限値の制限を設けることにする。この制限値については工学的意味も含めて今後、検討をする必要がある。

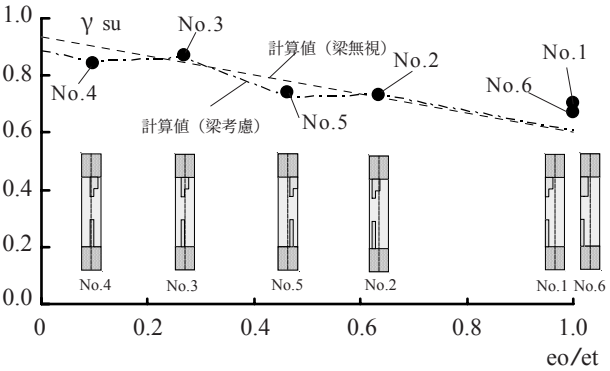
$$\gamma_{sut} = 1/\{1 + 0.5e/(Kt \cdot D)\} \ \text{かつ} \ \gamma_{sut} \geqq 0.6 \quad (13)$$

9．上梁が設けられる腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の低下率の評価

6.1節の近似方法に基づき，式(5)から式(8)，8章の式(12)と式(13)を用いてLRシリーズのせん断耐力の低下率を算出した。



図－14　柱のせん断耐力の低下率と評価式



図－15　柱のせん断耐力の低下率の実験値と計算値

図－15にせん断耐力の低下率の実験値と計算値の比較して示す。一点鎖線は計算値を結んだものである。せん断耐力の低下率の計算値は実験値をほぼ推定している。また，梁の影響を無視して垂れ壁の厚さだけを考慮した計算値を破線で示す。本論文で設けた梁は低下率にあまり影響を与えない計算結果になっている。これは実験結果とほぼ一致している。

10．まとめ

(1)腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の低下率は,接合位置が中心位置から偏心位置へ変化するにつれて減少する。この傾向の結果と低下率は既往の提案式により説明できることを確認した。

(2)上梁が設けられる腰壁・垂れ壁付柱のせん断耐力の低下率の評価方法を提案した。実験結果について，提案した式により上梁の影響をほぼ推定することができた。

(3)中心接合と偏心接合のせん断耐力の低下率の評価式の修正事項の妥当性については今後，実験と解析による追加の検証が必要である。

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)渡辺達也，塩屋晋一，他：接合位置や形状が異なる腰壁・たれ壁付柱のせん断耐力と終局変形角に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集Vol.31,No.2,pp.181-186,2009