

〔 論 文 〕

# 片側袖壁付 R C 柱の終局せん断耐力評価に関する研究 (その 4 評価式の提案)

宮城 裕紀<sup>\*1</sup>・松本 豊<sup>\*2</sup>

## Experimental Study on Shear Strength for Reinforced Concrete Column with a Wing Wall on Either One Side (Part4 Proposal of Shear Evaluation Formula)

Hironori MIYAGI<sup>\*1</sup>, Yutaka MATSUMOTO<sup>\*2</sup>

### Abstract

This study investigates the shear strength of reinforced concrete columns with a single-sided wing wall—a structural aspect that is yet to be completely understood. In Part 4, a design formula for shear strength is proposed. Initially, the study assesses the accuracy of current shear strength evaluation formula for RC columns with a wing wall on one side by comparing the experimental outcomes with calculated results and considering tensile bars in both positive and negative directions. Additionally, the study also explores the validity applicability of the replacement section method. This method evaluates shear strength of a column with a wing wall on one side by substituting it with an equivalent rectangular section.

**Key Words** : RC wing wall, shear strength, design formula, replacement section method

### 1. はじめに

2011 年の東日本大震災<sup>(1)</sup>, 2016 年の熊本地震<sup>(2)</sup>では, 1981 年に施工された新耐震基準以降の鉄筋コンクリート(以下, RC)構造物には, 構造部材の脆性的なせん断破壊はほとんど見られなかった. しかし, 構造的に注目してこなかった袖壁付き RC 柱の袖壁には, スリットの有無に係わらず, せん断破壊が多く見受けられた. また, 非構造壁の損傷による建物の大破・倒壊はなかったものの, 建物の継続使用ができなくなる等の支障が生じていると考えられる. このような地震被害を経て, 2020 年版建築物の構造関係技術基準解説書<sup>(3)</sup>(以下, 技術解説書)では, 袖壁付き RC 柱のせん断耐力評価式を用いることで, 袖壁付き RC 柱を有効な耐震要素として積極的に利用する方法も提案<sup>(4)</sup>されている. 袖壁を耐震要素として利用する場合の長所としては, 建物の保有水平耐力を増加でき, 地震時の応答変形を抑えることができる. 短所としては構造設計時のモデル化が複雑になる. また, 袖壁が柱を拘束することで, せん断破壊が生じる危険性が挙げられる.

これらの袖壁を耐震要素として利用するためには, 袖壁の配置, 袖壁の形状(壁厚さ, 壁長さ), 袖壁の縦・横筋量および柱の主筋, 帯筋量, せん断スパン比などのせん断耐力評価に影響及ぼすとされる要因を, 定量的・定性的に把握することが必要不可欠である. また, 非対称断面を有する袖壁付き RC 柱については, 未解明な部分が残されており, 構造設計基準・指針が十分に整備されていない状況にある. 特に, 片側袖壁付き RC 柱(以下, 片袖壁付柱)については, 既往のせん断実験における試験体が少なかったため, 十分な検討に至っていない. そこで, 松本らは, 軸力比 0.2 に対する片袖壁付柱のせん断実験結果を報告<sup>(5)~(7)</sup>している.

また, 技術解説書に記されている袖壁付き RC 柱のせん断耐力評価式は, 分割累加強度式と等価壁厚置換強度式の 2 種類がある. 前者は, 袖壁付 RC 柱を壁部分と残った柱部分で分け, それぞれを修正荒川式に基づいたせん断耐力式で演算して, 最終的に足し合わせたせん断耐力式である. また, 後者では袖壁付 RC 柱の断面積を長方形に置換し, 修正荒川式に基づいたせ

<sup>\*1</sup> エネルギーシステム工学専攻

<sup>\*2</sup> 建築・設備工学科

令和 5 年 9 月 29 日受理

ん断耐力式である。分割累加強度式の長所としては、柱部分と壁部分を分割している為、袖壁の拘束効果を明確に評価できる。短所としては、壁筋量が多い場合、危険側に評価される可能性がある。一方で、等価壁厚置換強度式の長所としては、分割累加強度式に比べると簡易に扱うことができる。また、短所としては袖壁の幅を実際よりも大きくするため、過大評価する可能性がある。しかしながら、これらの評価式は、両側袖壁付きの場合であり、左右非対称断面に対する検討までには至っていないのが現状である。そこで本論では、その1、その3で報告した実験結果を用い、片袖壁付きRC柱のせん断耐力評価の一の試みとして、片袖壁RC柱に適用可能な等価壁厚置換強度式の提案と分割累加強度式の適用性の検証を行う。

## 2. 実験結果および材料特性

表1に袖壁の横筋、既往実験の実験結果を、表2、3にコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。また、著者らが実施した実験の試験体の断面形状を図1に示す。試験体は実大の1/3スケールのもので、柱は250×250mmおよび袖壁は70×250mmであり、柱の高さは $h=500\text{mm}$ である。柱部分でのせん断スパン比は2.0とし、柱の帯筋比 $P_w=0.26\%$ とする。せん断破壊するように設計を行い、載荷方法は水平加力を片持ち型式とし、鉛直ジャッキにより一定軸力を与えた。袖壁側の加力を正加力(+), 柱側からの加力を負加力(−)としている。

Table 1 Experimental results

Specimens	Wing Wall	$Q_{exp}$ (kN)		Failure mechanism	
	Hori.reinf.	Positive(+)	Negative(−)	Positive(+)	Negative(−)
CW-W1D-1.0-0.1	D6@100	166.7	234.6	compression(flexure)	compression(shear)
CW-W1D-1.5-0.1	D6@60	219.9	247.7	compression(shear)	compression(shear)
CW-W1D-2.0-0.1	D6@50	173.3	251.9	compression(flexure)	compression(shear)
CW-W1D-1.0-0.2	D6@100	182.3	271.5	compression(shear)	shear failure of column
CW-W1D-1.5-0.2	D6@60	200.5	242.6	compression(flexure)	compression(shear)
CW-W1D-2.0-0.2	D6@50	194.8	236.5	compression(flexure)	shear failure of column
CW-W1D-1.0-0.3	D6@100	200.1	280.1	compression(flexure)	shear failure of column
CW-W1D-1.5-0.3	D6@60	232.8	281.4	compression(shear)	shear failure of column
CW-W1D-2.0-0.3	D6@50	194.9	299.8	compression(flexure)	shear failure of column

Table 2 Concrete material test results

Specimens	$\sigma_c$ (MPa)	$\varepsilon_0$ (%)	$E_c$ (GPa)
CW-W1D-1.0-0.1	28.4	0.25	26.9
CW-W1D-1.5-0.1	29.3	0.25	26.3
CW-W1D-2.0-0.1	28.0	0.25	25.7
CW-W1D-1.0-0.2	28.5	0.20	27.5
CW-W1D-1.5-0.2	28.1	0.22	27.7
CW-W1D-2.0-0.2	30.1	0.27	20.5
CW-W1D-1.0-0.3	27.0	0.22	28.4
CW-W1D-1.5-0.3	26.5	0.22	25.2
CW-W1D-2.0-0.3	27.3	0.23	26.0

$\sigma_c, \varepsilon_0$ : stress and strain of concrete at peak point

$E_c$ : Young's modulus of concrete

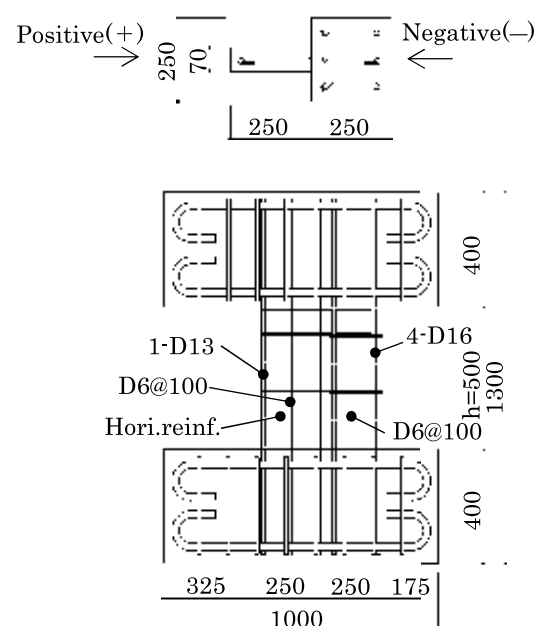


Fig.1 Specimen

Table 3 Steel material test results

Diameter	0.1,0.3 series			0.2 series		
	$\sigma_y$ (MPa)	Es(GPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Es(GPa)	$\sigma_u$ (MPa)
D6	432.3	189.7	543.5	405	188.8	489.4
D13	357.1	200.5	500.3	390	178.8	549.9
D16	349.8	183.9	492.4	355	188.6	461.6

$\sigma_y$  : Yield strength of steel    Es : Young's modulus of steel     $\sigma_u$  : Tensile strength of steel

### 3. せん断耐力評価式

#### 3.1 分割累加強度式

分割累加強度式は、片袖壁付柱のせん断耐力を図 2 に示すように、壁部分と柱から壁厚さを引いた柱部分に、分割して各々のせん断耐力を修正荒川式に基づいた式(1)、(2)より求め、式(3)のように累加してせん断耐力を求めている。

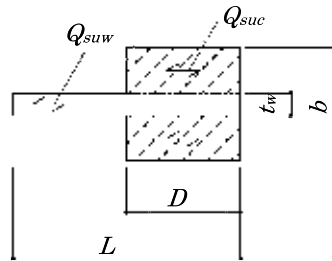


Fig.2 Splitting method

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_{tce}^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_{ce}) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{cwe} \cdot \sigma_{cwy}} \right\} \cdot b_{ce} \cdot j_{ce} \quad \dots (1)$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_{twe}^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_w) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{why}} \right\} \cdot b_w \cdot j_w \quad \dots (2)$$

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1 \cdot N \quad \dots (3)$$

ここで、

$D$ : 柱せい	$b$ : 柱幅
$d_{ce}$ : 柱有効せい (=0.95D)	$b_{ce}$ : (柱幅－袖壁厚さ)
$d_w$ : 壁有効せい (=0.95L)	$L$ : 部材全せい
$t_w$ : 袖壁厚さ	$N$ : 軸力
$j_{ce}$ : $7d_{ce}/8$	$p_{tce} : a_{tc} \cdot 100 / (b - t_w) d_{ce}$
$j_w$ : $7d_w/8$	$p_{twe} : a_{tw} \cdot 100 / (t_w \cdot d_w)$
$\sigma_{cwy}$ : 柱帯筋の降伏強度	$p_{cwe}$ : 柱等価帯筋比 ( $a_{wc} / (b - t_w) S$ )
$\sigma_{why}$ : 袖壁横筋の降伏強度	$p_{wh}$ : 袖壁横筋比
$a_{tc}$ : 柱の引張鉄筋断面積	$F_c$ : コンクリートの圧縮強度
$a_{tw}$ : 袖壁の引張鉄筋断面積	$a_{tc}$ : 柱の引張鉄筋断面積
$a_{wc}$ : 柱の帯筋断面積	$S$ : せん断補強筋間隔
$M / (Q \cdot d_{ce})$ : 柱残余部分のせん断スパン比 $1 \leq M / (Q \cdot d_{ce}) \leq 3$	
$M / (Q \cdot d_w)$ : 壁部材のせん断スパン比 $0.5 \leq M / (Q \cdot d_w) \leq 2$	

柱等価帯筋比  $p_{cwe}$  を評価する際、柱の  $a_{wc}$  について、技術解説書では、「壁横筋が柱に定着する場合は壁横筋相当の鉄筋量を減じる。」と記載されている。一般的な RC 造の建築物の袖壁の鉄筋は、端部にフックを施工されておらず寸切状態で定着されていることが多いが、既往の試験体では、袖壁横筋を柱および袖壁端部の主筋、端部縦筋に 180° フックにて堅固に緊結している。

そこで、本論においては、袖壁横筋に相当する鉄筋量を、柱のせん断補強筋量から減ずる式(4)、および含める式(5)を用いてせん断耐力の評価を行う。

ここで、

$$a_{wc} = a_c - a_w \quad \dots (4)$$

$$a_{wc} = a_c \quad \dots (5)$$

$a_c$  : 柱帯筋 1 組の断面積

$a_w$  : 袖壁横筋の断面積

### 3.1.1 正加力について

技術解説書では、「柱の引張鉄筋は 1 段目を有効とする。袖壁縦筋の引張鉄筋比は、引張端部で有効な領域(部材全せい  $L$  の 0.2 倍以下とする)を定義してその範囲に配筋された鉄筋を引張主筋として有効とする。」と記載されている。

既往の試験体においては、図 3 に示すように袖壁は、0.2 $L$  以下の領域に存在する袖壁縦筋(端部 1-D13)とし、柱は 1 段目を引張鉄筋として評価する。

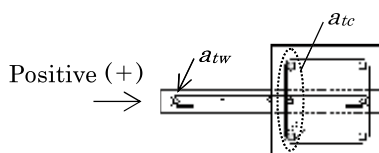


Fig.3 Positive loading tensile steel

### 3.1.2 負加力について

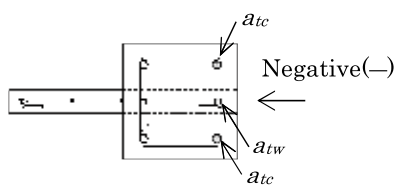
技術解説書では、「柱が引張側になる場合は、全柱主筋の合計が算定上有効な引張鉄筋とみなすこともできるが、一般的には、柱の中段筋は柱が圧縮側になる場合の算定で用いた引張鉄筋量よりも大きいため、これが確認できる場合は、簡略に圧縮側になる場合で算定されたせん断終局強度と同じであるとしてよい。」と記載されている。そのため、中段筋がある既往の試験体では、圧縮側の場合で算定したせん断終局強度と同じになる。しかしながら、正負加力の実験値は異なっている。これは、負加力において、圧縮側になる時以上の鉄筋量で抵抗しているかと考えられる。そこで、本論においては、以下の 2 つの評価法にてせん断耐力を算出する。

#### (1) 柱の 1 段目を有効

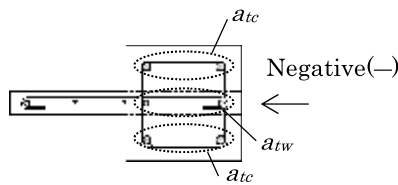
既往の試験体では、図 4(a)に示すように柱の引張鉄筋に、正加力と同様 1 段目を有効とする。また、袖壁の引張鉄筋の取扱いについては、明確な記述がなく設計者の判断に委ねられている。そこで、0.2 $L$  以下かつ分割された袖壁領域に存在する柱主筋を、引張鉄筋とした。

#### (2) 柱の全主筋を有効

柱の引張鉄筋は、図 4(b)に示すように柱部分の全主筋を有効とする。袖壁の引張鉄筋は、分割された袖壁領域かつ、柱内にある柱主筋を引張鉄筋とした。



(a) First layer of column main reinf.



(b) All of the column main reinf.

Fig. 4 Negative loading tensile steel

### 3.2 等価壁厚置換強度式

現在の等価壁厚置換強度式は、両側に袖壁がある場合を対象としている。そこで、片袖壁付柱にも適応可能な等価壁厚置換強度式の提案を行う。図 5(a), (b)は、等価壁厚置法を示している。図の斜線部分は、袖壁と柱を等価断面積の長方形に置換したものを示す。また、柱の 1 段目を引張鉄筋と定義し、袖壁横筋と柱の帯筋は、せん断耐力に寄与すると考えられているため、柱の帯筋は長辺  $d_{w2}$  / 袖壁横筋の辺長  $d_{w1}$  を、柱のせん断補強筋比  $P_w$  に乗じて修正を行っている。

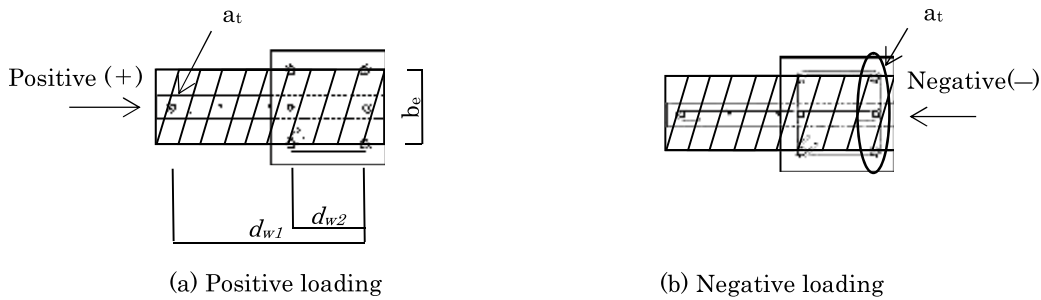


Fig.5 Replacement section method

### 3.2.1 修正荒川 min 式

修正荒川 min 式に基づいた式(6)によりせん断耐力を求める.

$$Q_{min} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_{we} \cdot \sigma_{wh}} \right\} \cdot b_e \cdot j_e + 0.1 \cdot N \quad \dots (6)$$

$p_t$ : 柱の引張鉄筋比	$P_{we}$ : $P_w \cdot (b/b_e) \cdot (d_{w2}/d_{w1}) + p_s \cdot (t_w/b_e)$
$d_e$ : 等価断面の有効せい(=460mm)	$P_w$ : 柱の帯筋比
$b_e$ : 置換長方形断面における幅(mm)	$p_s$ : 壁の補強筋比
$j_e$ : $7d_e/8$	$M/(Q \cdot d_e)$ : せん断スパン比 (=1.09)
$a_t$ : 引張鉄筋の断面積	

### 3.2.2 修正荒川 mean 式

修正荒川 mean 式に基づいた式(7)によりせん断耐力を求める.

$$Q_{mean} = \left\{ \frac{0.068 \cdot p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_{we} \cdot \sigma_{wh}} \right\} \cdot b_e \cdot j_e + 0.1 \cdot N \quad \dots (7)$$

分割累加強度式において,  $b_e$  (置換長方形の有効性における幅) において式(8)のように定義する.

$$b_e = \frac{\text{袖壁断面面積} + \text{柱断面面積}}{L} \quad \dots (8)$$

## 4. 結果の比較および検討

### 4.1 分割累加強度式

図6および図7(a), (b)は, 正および負加力の実験結果と, 分割累加式による計算結果とを比較したものである. なお, 図中に耐力比(実験値/計算値)の平均値および変動係数を示した. また, 分割累加式において, 式(4), 式(5)による計算値を□, ○でプロットした.

図6から分かるように, 正加力の式(4)および式(5)の耐力比の平均値は, 各々1.07, 0.94で, 変動係数は0.08, 0.08となった. 式(4)の計算結果は, 実験結果に比べて若干大きい試験体があるものの, 大部分が小さく, 安全側の評価となっていることが分かる. 式(5)の計算結果は, 実験結果より若干大きくなり危険側の評価となっていることが分かる. 一方で, 図7(a), (b)から分かるように負加力では, 以下ようになった. 柱の1段目を有効とした場合( $P_t=0.93$ )において, せん断補強筋量を減ずる式(4), および含めた式(5)の耐力比の平均値は, 各々1.44および1.27で, 変動係数は0.07, 0.07となった. 柱の全主筋を有効とした場合( $P_t=1.86$ )において, 耐力比の平均値は, 各々1.34および1.19で, 変動係数は0.08, 0.07となった.

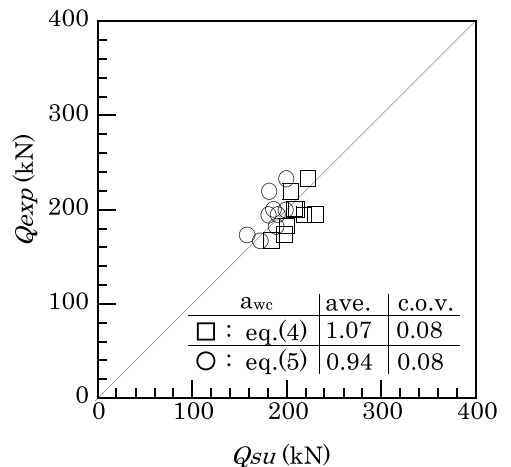


Fig.6 Relationship between experimental and calculated result (Positive)

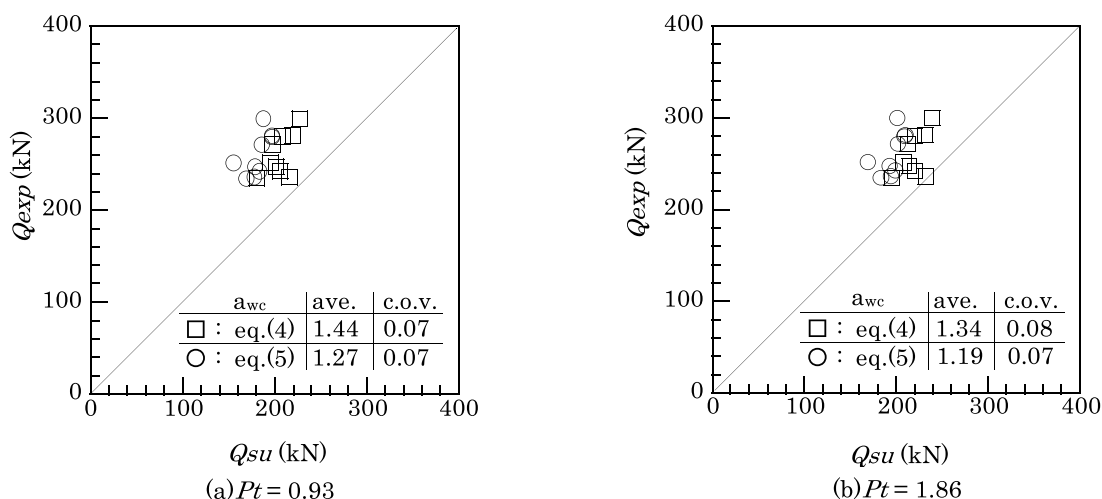


Fig.7 Relationship between experimental and calculated result (Negative)

したがって、袖壁横筋を柱のせん断補強筋量に含めた場合が、実験値に近づいており、柱の全主筋を有効とした場合においては、さらに実験値に近づき、せん断耐力を精度よく捉えていることが分かった。

以上より、分割累加式の正加力においては、袖壁横筋の相当する鉄筋量を、柱のせん断補強筋量から減ずる式(4)、すなわち、柱のせん断補強筋量に含めない場合は、安全側に評価した。負加力においては、式(4)および(5)共に安全側の評価となることが分かった。

#### 4.2 等価壁厚置換強度式

図8および図9は、正および負加力の実験結果と、等価壁厚置換強度式による計算結果とを比較したものである。なお、図中に耐力比(実験値/計算値)の平均値および変動係数を示した。また、等価壁厚置換式において、修正荒川 min 式, mean 式による計算値を□, ○でプロットした。

この図から分かるように、等価壁厚置換強度式による正加力の修正荒川 min 式, mean 式による耐力比の平均値は、各々0.96, 0.87で、変動係数は0.09, 0.08となった。min 式の計算結果は、実験結果に比べて若干大きい試験体があるものの、概ね実験値を捉えていることが分かる。mean 式の計算結果は、実験結果より大きくなり、危険側の評価となっていることが分かる。一方、負加力の min 式, mean 式の耐力比の平均値は、各々1.10, 0.96で、変動係数は0.08, 0.08となった。min 式の計算結果は、実験結果に比べて小さくなり、安全側の評価となっていることが分かる。mean 式の計算結果は、若干実験結果より大きくなり、危険側の評価となっていることが分かる。

以上より、本論で提案した等価壁厚置換強度式は、片袖壁付柱に十分適用性があるものと考えられる。

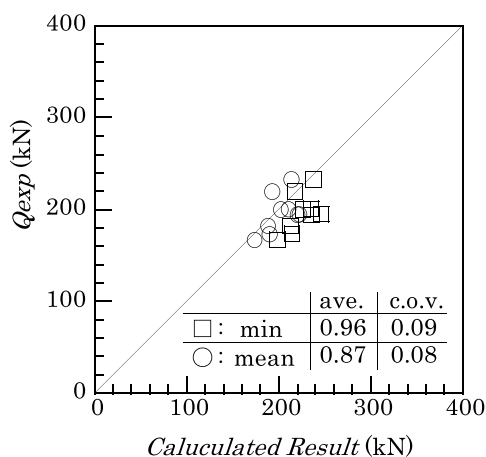


Fig.8 Relationship between experimental and calculated result (Positive)

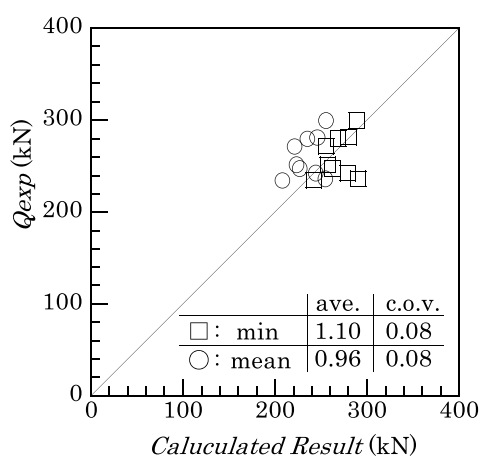


Fig.9 Relationship between experimental and calculated result (Negative)

## 5. まとめ

本論では、片袖壁付柱のせん断耐力評価の一の試みとして、片袖壁付柱に適用可能な等価壁厚置換強度式の提案と、分割累加強度式の適用性の検証を行った。限られた範囲であるが、本検討により得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 分割累加式において、正加力では、袖壁横筋の鉄筋量を、柱のせん断補強筋量から減ずる場合、含める場合における耐力比の平均値は、1.07, 0.94 となった。含めた場合は、若干危険側の値にはなるものの、概ね実験値を精度よく捉えていることが分かる。
- (2) 分割累加式において、負加力では、柱の1段目を有効とした際、せん断補強筋量を減ずる場合、および含める場合の耐力比の平均値は、1.44 および 1.27 となった。一方、柱の全主筋を有効とした場合において、耐力比の平均値は、1.34 および 1.19 となった。したがって、袖壁横筋を、柱のせん断補強筋量に含めた場合が、実験値に近づいた。柱の全主筋を有効とした場合においては、さらに実験値に近づき、せん断耐力を精度よく捉えていることが分かった。
- (3) 等価壁厚置換式において、正加力および負加力では、修正荒川 min 式、mean 式における耐力比の平均値は、0.96, 0.87 および 1.10, 0.96 となった。min 式の場合は、若干危険側の値にはなるものの、概ね実験値を捉えていることが分かる。よって、提案した等価壁厚置換強度式は、片袖壁付柱に十分適用性があるものと考えられる。

## 謝辞

本研究においては、久留米工業大学学部生の 2022 年度卒業研究として実施しました。2020 年度(公財)大林財団研究助成金の一部(研究代表者:松本豊)、JSPS 科研費 22K14368 の助成を受けたものです。(研究代表者:松本豊)ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本建築学会：東日本大震災合同調査報告 建築編 1 鉄筋コンクリート造建築物，pp.110-112，2015
- (2) 日本建築学会：2016 年熊本地震災害調査報告会，2016 年度日本建築学会(九州)災害部門 緊急報告会資料，pp.35-38，2016.8
- (3) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，全国営報販売共同組合，pp.685-688，2020.11
- (4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の現状と将来，pp219-222，2019.9
- (5) 松本豊，上原修一，野口聡仁，呉済元：片側袖壁付き RC 柱の終局せん断耐力評価に関する研究(その 1)，久留米工業大学研究報告 第 45 号，pp.61-68，2023
- (6) 松本豊，上原修一，野口聡仁，宮城裕紀：片側袖壁付き RC 柱のせん断耐力についての実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.2，pp.463-468，2023
- (7) 宮城裕紀，松本豊，上原修一，野口聡仁，呉済元，栗原和夫：片側袖壁付き RC 柱の終局せん断耐力評価に関する実験的研究(その 1)，日本建築学会九州支部研究報告 第 62 号，pp353-356，2023