

論文 片側袖壁付き RC 柱のせん断耐力についての実験的研究

松本 豊*1・上原 修一*1・野口 聡仁*2・宮城 裕紀*3

要旨：本研究では、既往実験が少ない片側袖壁付き鉄筋コンクリート柱のせん断耐力を実験的に検討する。袖壁横筋の鉄筋量をパラメータとした3体の試験体について、正負交番の漸増繰返し載荷実験を行った。各試験体のせん断耐力と層間変形角を比較し、袖壁横筋量がどの程度影響するか検討する。さらに、2020年版建築物の構造関係技術基準解説書の袖壁付き RC 柱の分割累加式に関して、加力方向ごとに引張鉄筋を定義した計算値と実験値とを比較することで、分割累加式の適用性を検討する。

キーワード：片側袖壁、せん断耐力、破壊性状、引張鉄筋

1. はじめに

2011年の東日本大震災¹⁾、2016年の熊本地震²⁾では、1981年に施行された新耐震基準以降のRC造建物には、構造部材の脆性的なせん断破壊は殆ど見られなかった。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。このような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³⁾(技術解説書と呼ぶ)の袖壁付きRC柱のせん断耐力評価式(分割累加式と呼ぶ)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⁴⁾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、①建物の保有水平耐力を増加できる。②地震時の応答変形を抑えることができる。また、短所としては①構造設計時のモデル化が複雑になることがある。②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。しかしながら、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(以降、片袖壁付柱と呼ぶ)については、既往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。分割累加式は、片袖壁付柱のせん断耐力評価式が適用可能とされているが、加力方向別における袖壁および柱の引張鉄筋、袖

壁横筋についての詳細な説明がやや不十分である。裏ら^{5)~7)}は、「分割累加式による計算では、壁の長さ方向に分割するため、袖壁の長さが同じであれば、片側・両側関係なく同じ値となる。また、左右非対称の試験体においても正負の方向に関係なく計算値が同じ値となることである。」²つの改善点を述べて、分割累加式に柱と袖壁の形状により決定される、強度寄与係数を用いて柱の両側に袖壁がある場合は安全側の評価を可能にしている。しかし、左右非対称断面に対する検討までには至っていない。

また、著者ら^{8)~10)}は、拡張された修正圧縮場理論の解析モデル¹¹⁾を用いて、袖壁付きRC柱のせん断耐力について解析を行い、限られた範囲ではあるが解析モデルの袖壁付き柱のせん断耐力解析への適用性について検討しているものの実験的な研究については、行っていない。

そこで本研究の目的は、既往実験が少ない片袖壁付柱の試験体3体を製作し、袖壁横筋量を変数とした場合にどの程度、せん断耐力に影響を及ぼすか実験的に検討を行う。さらに、分割累加式において加力方向別の引張鉄筋の取扱について一提案を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

試験体は実大の1/3スケールものを3体製作する。本実験の試験体諸元を表-1に、図-1に試験体の形状をそれぞれ示す。柱は250x250mmおよび袖壁は70x250mmであり柱の高さは、500mmで計画する。柱部分でのせん断スパン比は2.0で、せん断破壊するように設計を行う。柱の帯筋比 $p_w=0.26\%$ とする。コンクリートは目標圧縮強度を30N/mm²とし、鉄筋には、D16、D13(SD295A)およびD6(SD295A)を用いる。表-2、3にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。

*1 久留米工業大学 建築・設備工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 久留米工業大学 ものづくりセンター 技術専門職員

*3 久留米工業大学 建築・設備工学科 学部生

表-1 試験体諸元

試験体名	b×D(mm)	主筋	フープ	袖壁厚さ×長さ	袖壁縦筋	横筋	N/N ₀	M/QD
CW-W1D-1.0-0.2N	250×250	4-D16	D6@100	70×250	D6@100	D6@100	0.2	2.0
CW-W1D-1.5-0.2N		+				D6@66		
CW-W1D-2.0-0.2N		2-D13				D6@50		

軸力:N=0.2σ_cbD, 軸力比:N/N₀, せん断スパン比:M/QD

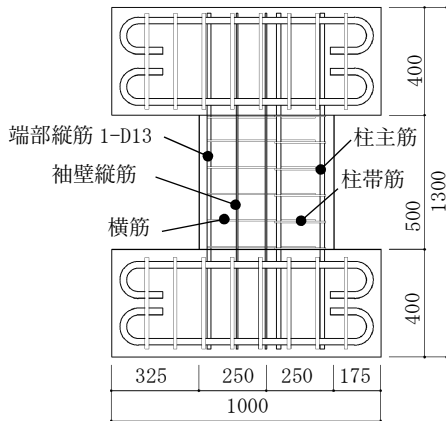
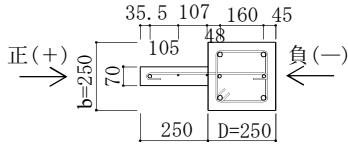


図-1 試験体 CW-W1D-1.0-0.2N

2.2 荷荷方法

図-2 に加力荷荷装置を示す。水平加力は片持ち型式とし、試験体区間頂部の水平変位 δ を試験体区間高さ h(=500mm)で除した層間変形角 R(=δ/h)により変位制御とした。軸力は、鉛直ジャッキにより一定軸力を与えた。荷荷プログラムは図-3 に示すように R=±0.25, ±0.5, ±0.75

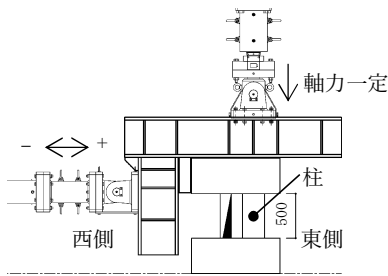


図-2 加力荷荷装置

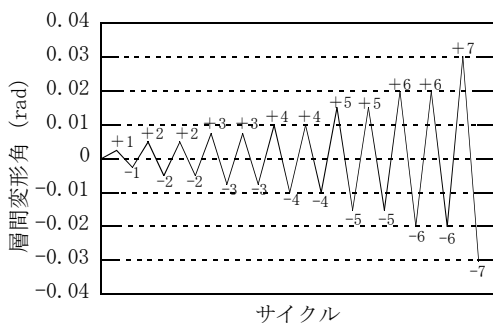


図-3 加力サイクル

表-2 コンクリートの材料強度

試験体名	σ _c (MPa)	ε ₀ (%)	E _c (GPa)
CW-W1D-1.0-0.2N	28.5	0.20	27.5
CW-W1D-1.5-0.2N	28.1	0.22	27.7
CW-W1D-2.0-0.2N	30.1	0.27	20.5

σ_c, ε₀:圧縮強度, ひずみ, E_c:コンクリートのヤング係数

表-3 鉄筋の材料強度

鉄筋	sσ _y (MPa)	E _s (GPa)	sσ _u (MPa)
D6	405.0	188.8	489.4
D13	390.0	178.8	549.9
D16	355.0	188.6	461.6

sσ_y:鉄筋の降伏強度, E_s:鉄筋のヤング係数, sσ_u:鉄筋の引張強度

, ±1.0, ±1.52, ±2.0 および±3.0%rad の順に変位を漸増しながら、袖壁側(西側)からの加力を正(+)とした正負交番の漸増繰返し荷荷を行った。

3. 実験結果

3.1 せん断力Q-層間変形角R関係および破壊性状

図-4(a)~(c)は、各試験体のせん断力 Q-層間変形角 R の関係を示す。図中には、柱せん断補強筋の降伏を□、柱主筋引張降伏を△、袖壁縦筋引張り降伏を▽、袖壁横筋引張降伏を×、最大せん断力を○で示している。写真-1(a)~(c)は破壊性状を示す。

図-4(a)から試験体 CW-W1D-1.0-0.2N は、層間変形角 R=0.5%rad 正負加力時に袖壁中央部分にせん断ひび割れが発生した。R=0.7%rad 正負加力時に柱のせん断補強筋が降伏□, R=1.0%rad 負加力時で、柱の破壊につながるせん断ひび割れが確認された。このせん断ひび割れが進展し始め、著しい剛性低下が生じると同時に袖壁が圧壊して最終破壊「せん断破壊」となった。なお、最大耐力は正加力で 182.3kN(R=1.52%rad)負荷力で、271.5kN(R=1.0%rad)となった。

図-4(b)から試験体 CW-W1D-1.5-0.2N は、層間変形角 R=0.5%rad では、正負加力時に袖壁および柱部でせん断ひび割れが発生した。さらに袖壁端部に圧壊も確認された。R=1.0%rad では、袖壁端部 D13 が降伏▽および袖壁端部の圧壊が進展しながら、柱の対角線状にせん断ひび割れが確認された。R=1.52%rad で、袖壁端部から柱側へ圧壊

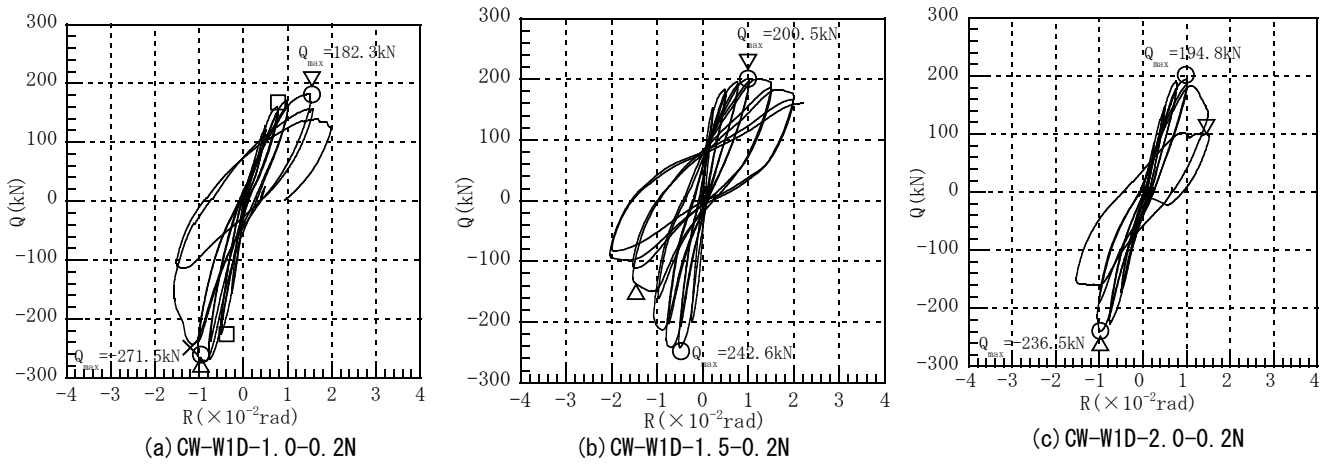
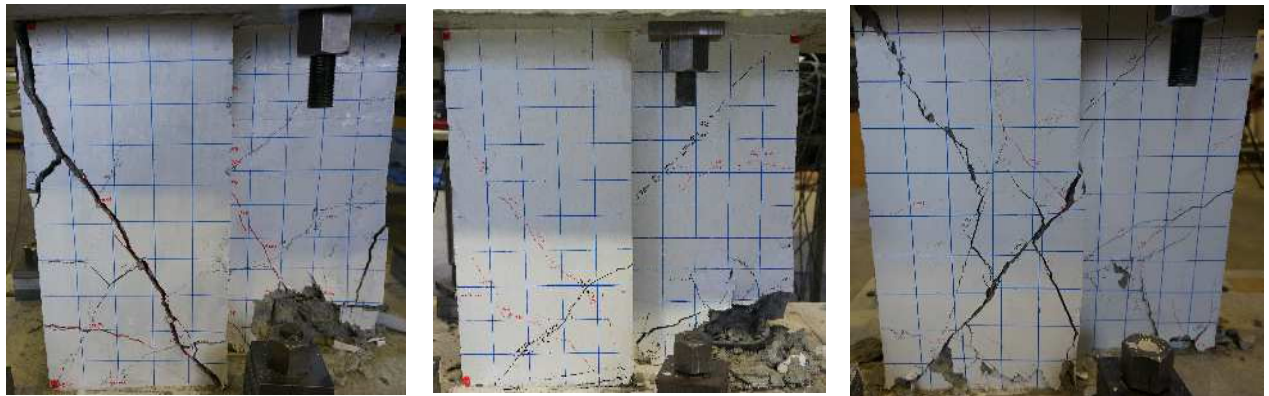


図-4 水平力-層間変形角関係



(a) CW-W1D-1.0-0.2 R=2%

(b) CW-W1D-1.5-0.2 R=2%

(c) CW-W1D-2.0-0.2 R=1.52%

写真-1 破壊性状

領域が確認された。R=2.0% rad で、袖壁および柱部のせん断ひび割れ幅が 1.3mm 程度拡がり袖壁端部から柱側へ圧壊領域が著しく拡がっていることを確認した。その後、負加荷途中で、急激に剛性低下が確認され最終破壊「袖壁圧壊(せん断)」となった。なお、最大耐力は正加力 200.5kN(R=1.0%rad)。負加力で、242.6kN (R=0.68%rad) となった。

図-4(c)から試験体 CW-W1D-2.0-0.2N は、層間変形角 R=0.5%rad では、正負加力時に袖壁中央部分にせん断ひび割れと柱脚に曲げひび割れを確認した。R=0.75%rad の正加力では柱にせん断ひび割れが発生した。それ以降、袖壁端部の圧壊および柱のせん断ひび割れが顕著となり、柱主筋および袖壁端部筋 D13 が降伏▽した。R=1.52%rad で最終破壊「せん断破壊」となった。なお、最大耐力は正加力で 194.8kN(R=1.0%rad)負加力で 236.5kN(R=0.92% rad)となった。また、全ての試験体において、正加力の最大せん断力は、負加力に比べ小さくなっていることが分かる。この理由は、負加力において柱の主筋が引張に大きく抵抗したと考えられる。また、袖壁横筋量が大きくなると、正加力側の最大せん断力も大きくなっている。これは、端部にフックで柱主筋および端部筋に緊結しているため、せん断力に抵抗している為と考えられる。一方、負加力は袖壁横筋量が小さくなると、最大せん断力も小さくなっ

ている。この理由は、袖壁端部の圧壊が先行しており端部が圧縮に抵抗できなかったと考えられる。

3.2 鉄筋のひずみ分布

図-5 は、袖壁縦筋と柱主筋のひずみゲージ位置を示す。なお、試験体 CW-W1D-1.0-0.2N のひずみゲージ②は、コンクリート打設中に破損しており計測不能となった。

図-6(a)～(c)は、正加力の袖壁縦筋、柱主筋のひずみ分布の推移を示したものである。図中の○、□、△は、層間変形角 R=0.5,1.0,1.52%rad 時点のひずみ値(+:引張, -:圧縮)を示す。この図から分かるように、全試験体とも、層間変形角 R=0.5%rad では、柱主筋④の位置の領域までは引

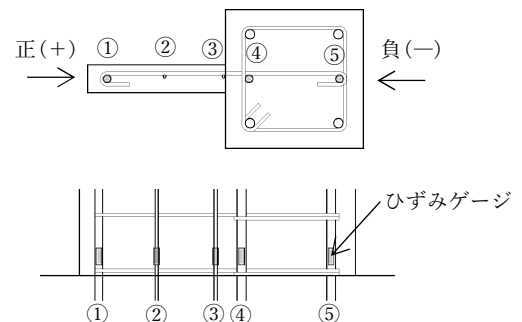


図-5 ひずみゲージ位置

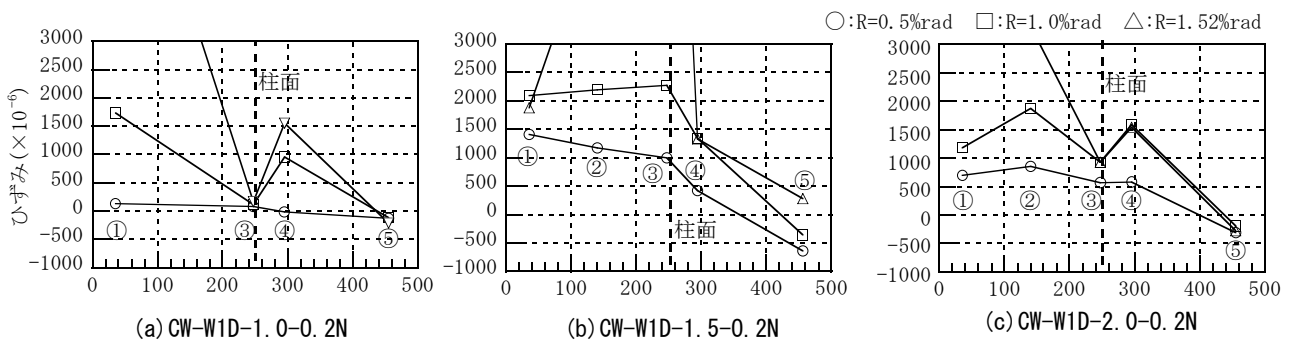


図-6 袖壁縦筋および柱主筋のひずみの推移（正加力）

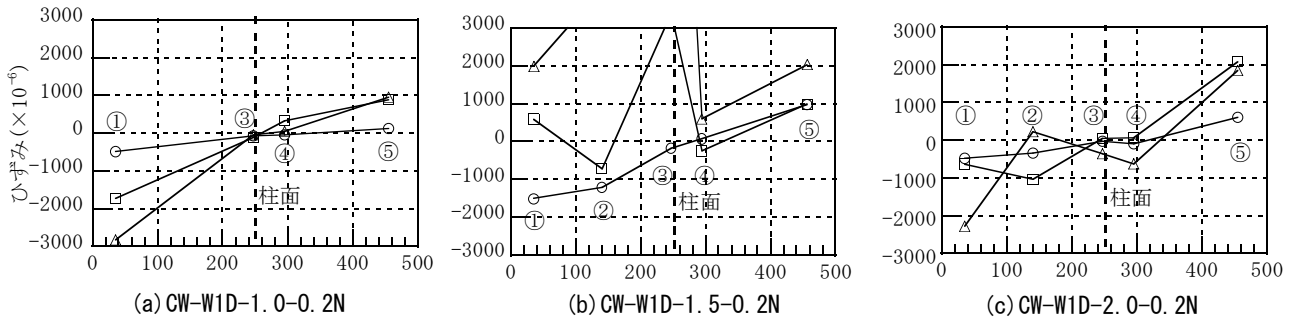


図-7 袖壁縦筋および柱主筋のひずみの推移（負加力）

張領域となり、柱主筋⑤の位置においては、圧縮領域となっていることが分かる。さらに、層間変形角が大きくなるにつれ袖壁縦筋①～③、柱主筋④の引張ひずみも増加する推移を示した。その後、 $R=1.52\%$ rad では、各試験体の袖壁縦筋①、②は降伏していることが分かる。

図-7(a)～(c)は、負加力の袖壁縦筋、柱主筋のひずみ分布の推移を示したものである。この図から分かるように、各試験体とも、層間変形角 $R=0.5\sim 1.0\%$ rad において柱主筋④、⑤の位置では引張ひずみとなることが分かる。また、袖壁と柱の接合部辺りで、引張と圧縮の境界領域になることが分かる。以上より、負加力では、各試験体とも柱主筋が引張に抵抗している。これは、3章で述べた正加力に比べ負加力のせん断力が大きくなった要因の一つであると考えられる。

4. 分割累加式について

分割累加式は、片袖壁付柱のせん断耐力を、図-8 に示すように、壁部分と壁厚さを差し引いた柱残余部分と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(3)、(4)より求め、式(5)のように累加してせん断耐力を求めている。

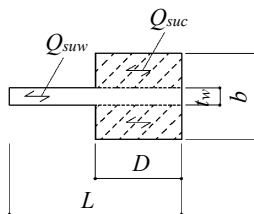


図-8 分割累加式の累加方法

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_{cve}^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_w) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{cve} \cdot \sigma_{cny}} \right\} \cdot b_{ce} \cdot j_{ce} \quad \dots (3)$$

$$Q_{siw} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_{cve}^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_w) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{wh}} \right\} \cdot t_w \cdot j_w \quad \dots (4)$$

$$Q_{st} = Q_{siw} + Q_{suc} + 0.1 \cdot N \quad \dots (5)$$

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 |
| $J_{ce} = 0.8D$ | $p_{cve} = a_{wc} \cdot 100 / (b - t_w) \cdot d_{ce}$ |
| $J_w = 0.8L$ | $p_{cve} = a_{wc} \cdot 100 / (t_w \cdot d_w)$ |
| σ_{cny} : 柱帯筋の降伏強度 | $p_{cve} = a_{wc} / (b - t_w) \cdot s$ |
| σ_{wh} : 袖壁横筋の降伏強度 | p_{wh} : 袖壁横筋比 |
| F_c : コンクリートの圧縮強度 | s : せん断補強筋間隔 |
| a_c : 柱の引張鉄筋断面積 | a_{wc} : 袖壁の引張鉄筋断面積 |

$$M / (Q \cdot d_{ce}): \text{柱残余部分のせん断スパン比} \quad 1 \leq M / (Q \cdot d_{ce}) \leq 3$$

$$M / (Q \cdot d_w): \text{壁部材のせん断スパン比} \quad 0.5 \leq M / (Q \cdot d_w) \leq 2$$

分割累加式では、柱等価帯筋比 p_{cve} 評価する際のせん断補強筋の断面積 a_{wc} について、袖壁横筋を柱内で定着する場合は、袖壁横筋相当の鉄筋量を減じるとされている。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本試験体では、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、袖壁横筋の相当する鉄筋量を柱のせん断補強筋量から減ずる式(6)および含める式(7)を用いてせん断耐力の評価を行う。

$$a_{wc} = a_c - a_w \quad \dots (6)$$

$$a_{wc} = a_c \quad \dots (7)$$

ここで、

a_c : 柱帯筋 1 組の断面積

a_w : 袖壁横筋の断面積

4.1 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。

本研究においては、図-9に示すように袖壁は0.2L以内の領域に存在する袖壁縦筋とし、柱は1段目を引張鉄筋とする。

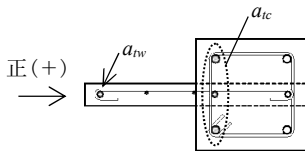


図-9 正加力の引張鉄筋

4.2 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。そこで、本研究においては、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

本試験体では、柱の中段筋があるため柱が圧縮側になる場合で算定されたせん断終局強度と同じとなる。しかし正負加力の実験結果は、異なる。そこで、図-10に示すように柱の引張鉄筋は、正加力と同様1段目を有効とする。また、袖壁の引張鉄筋については、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、0.2L以内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。

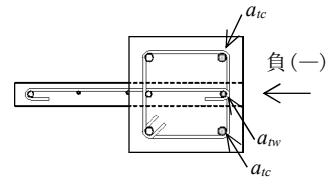


図-10 負加力の引張鉄筋(1)

(2) 柱の全主筋を有効

柱の引張鉄筋は、図-11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。

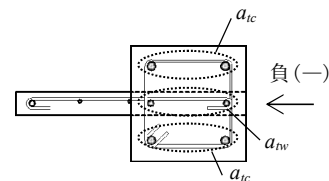


図-11 負加力の引張鉄筋(2)

5. 評価式の適用性

表-4は、各試験体の実験から得られた最大せん断力、終局曲げ耐力および分割累加式から得られた各加力方向別の計算値と各々の耐力比(実験値/計算値)を示す。

この表から分かるように、 Q_{su} は各試験体共に、正加力において、若干危険側に評価しているものもあるが、概ね実験値を捉えている。 Q_{bu} は、危険側に評価している。一方、負加力においては、(1)柱の1段目を有効とした場合の計算値では、実験値より小さめで安全側に評価していることが分かる。(2)柱の全主筋を有効とした場合の Q_{su} は、(1)より実験値に近づき、精度よく評価しているものと考えられる。この理由は、負加力では、柱の全主筋が引張ひずみとなっているため、柱主筋が引張りに大きく抵抗しているためと考えられる。

表-4 実験結果と計算結果との比較

試験体名	加力方向	a_w 考慮	$p_{tcc}(\%)$	Q_{exp} (kN)	Q_{bu} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{exp}/Q_{bu}	Q_{exp}/Q_{su}
CW-W1D-1.0-0.2N	正	減じる	1.22	182.3	204.6	188.6	0.89	0.97
		含める				199.8		0.91
	負	減じる	0.93	271.5	227.6	186.0	1.19	1.46
		含める				197.2		1.38
		減じる	1.86			201.4		1.35
		含める				212.7		1.28
CW-W1D-1.5-0.2N	正	減じる	1.22	200.5	209.4	186.0	0.96	1.08
		含める				208.0		0.96
	負	減じる	0.93	242.6	225.6	183.4	1.08	1.32
		含める				205.4		1.18
		減じる	1.86			198.7		1.22
		含める				220.6		1.10
CW-W1D-2.0-0.2N	正	減じる	1.22	194.8	219.0	180.6	0.89	1.08
		含める				218.9		0.89
	負	減じる	0.93	236.5	236.6	177.9	0.99	1.33
		含める				216.2		1.09
		減じる	1.86			193.9		1.22
		含める				232.2		1.02

Q_{exp} : 実験値, Q_{bu} : e 関数法から得られた終局曲げ耐力時のせん断力, Q_{su} : 式(5)から得られた計算値

表-5 は、実験値と分割累加式による耐力比の平均値を示す。この表から分かるように、正加力において、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および含める場合における耐力比の平均値は、1.04 および 0.92 となった。含めた場合は、若干危険側の値となったが、概ね実験値を捉えていることが分かる。一方で、負加力においては、(1)柱の 1 段目を有効とした場合において、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、1.37 および 1.22 となった。(2)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、1.26 および 1.13 となった。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、正加力では、技術解説書で記載されているように引張鉄筋を評価すれば、計算値は実験値を概ね捉えた。また、袖壁横筋を柱のせん断補強筋量に含めた場合は、若干危険側に評価している。負加力では、柱の全主筋を有効とした場合が、実験値をよく捉えていた。ただし、袖壁の長さが、引張領域に影響するものと考えられるため、今後は袖壁長さを変数とした検討を行う必要がある。

表-5 耐力比の平均値

加力方向	a_w 考慮	$p_{fice}(\%)$	平均値
正	減じる	1.22	1.04
	含める		0.92
負	減じる	0.93	1.37
	含める		1.22
	減じる	1.86	1.26
	含める		1.13

6. まとめ

本研究では、袖壁横筋量を変数とした片袖壁付き柱の試験体 3 体について正負交番の繰返し載荷実験を行った。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) 袖壁横筋量が大きくなると正加力側の最大せん断力も大きくなることが分かった。これは袖壁横筋がせん断力に対して抵抗しているためと考えられる。
- 2) 負加力の最大せん断力は、各試験体共に柱の主筋が引張りに大きく抵抗しており、正加力に比べ負加力側が大きくなっていることが分かった。
- 3) CW-W1D-1.0-0.2N, CW-W1D-2.0-0.2N の破壊性状は、せん断破壊となった。また、CW-W1D-1.5-0.2N においては、袖壁圧壊(せん断)となった。
- 4) 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および含める場合における耐力比の平均値は、1.04 および 0.92 となった。含めた場合は、若干危険側の値となったが、概ね実験値を捉えていることが分かる。

- 5) 分割累加式において、負加力では、柱の全主筋を有効とした場合においては、実験値をよく捉えており、袖壁横筋を柱のせん断補強筋量に含めると、せん断耐力を精度よく捉えていることが分かった。

謝辞

本研究においては、(公財)大林財団研究助成金、JSPS 科研費 22K14368 の助成を受けたものです。また、実験計画に際し大分大学 黒木正幸教授ならびに福井大学 磯雅人教授に貴重なご助言を頂きました。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，全国官報販売共同組合，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，pp. 219-222，2019.9
- 5) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一，PHAN Van Quang，石井貴子:鉄筋コンクリート造片側そで壁付き柱の終局強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.55B，pp.385-390，2009.3
- 6) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：片側袖壁付き柱と両側袖壁付き柱のせん断耐力算定法の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.169-174，2009
- 7) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：袖壁付き柱の構造特性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.115-120，2010
- 8) 松本豊,栗原和夫,大嶺齋,島津勝：拡張された修正圧縮場理論による袖壁付き RC 柱のせん断耐力の検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.35，No.2,pp.613-618，2013
- 9) 松本豊,島津勝,東康二，栗原和夫：拡張された修正圧縮場理論による片袖壁付き RC 柱のせん断耐力の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2,pp.703-708，2016
- 10) 松本豊,上原修一，栗原和夫：拡張された修正圧縮場理論による各種袖壁付き RC 柱のせん断耐力についての検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.44，No.2,pp.859-864,2022
- 11) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. :Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory, ACI Structural Journal, May-June, pp.258-268, 1988