

論文 片側袖壁付RC柱の終局強度評価法に関する一考察

高山 翔太^{*1}・白石 一郎^{*2}・高木 仁之^{*3}

要旨：耐震診断基準の袖壁付柱の終局強度評価法は、両側袖壁付柱を前提としており、片側袖壁付柱の強度評価法の妥当性については未解明な点も多い。本研究では、片側袖壁付柱の破壊挙動や応力伝達機構を解析的手法により考察し、せん断終局強度や曲げ終局強度の評価法について検討した。袖壁付柱のせん断終局強度を、壁部分と柱残余部分に分割して、強度を累加する方法が提案されているが、本報で実施した解析の応力・ひずみ状況では、この分割累加の考え方が妥当であるとの結果であった。この分割累加の考え方を、曲げ終局強度評価への応用も試みたが、耐震診断基準式よりも精度よく評価できるという結果であった。

キーワード：片側袖壁付柱、終局強度、分割累加、FEM 解析、トラスアーチ理論

1. 序論

1999 年版までの RC 規準では、図-1, 写真-1 のような袖壁付柱の強度に関する明瞭な規定がなく、2010 年版の RC 規準¹⁾から袖壁付柱に関する項目が追加されたが、その強度評価法には問題点も多く指摘されている。また、耐震診断基準²⁾には、袖壁付柱の終局強度式は示されているものの、両側袖壁付柱を前提としたものであり、片側袖壁付柱に対する強度評価法の妥当性については未解明な点も多い。例えば、図-2 に、袖壁付柱の既往研究^{3), 4)}での、曲げ破壊型の実験結果と耐震診断基準式との比較を示すが、強度評価が比較的容易とされる曲げ終局強度においても、片側袖壁付柱では大きな差異となっている。

このような背景から、構造設計では、柱と袖壁をスリットで分離するような対処方法が多く用いられている。しかしながら、袖壁付柱は有効な耐震要素であることが実証されており、この袖壁付柱を積極的に利用するためには、その終局強度評価法の確立が不可欠である。

本研究では、片側袖壁付 RC 柱の地震時挙動を解析的手法により検討し、片側袖壁付 RC 柱の終局強度評価法について考察する。

2. 耐震診断基準のせん断終局強度評価法に関する検討

2.1 解析手法概要

解析手法は、文献 5) に示す 2 次元非線形 FEM 解析であり、図-4 に応力-ひずみ関係を示すが、詳細は文献 5) を参照されたい。この FEM 解析法の精度を検証するために、表-1 に試験体諸元を示し、実験結果と解析結果の比較を図-5 に示す。図より、本研究で用いる FEM 解析は正負加力ともに実験結果とほぼ対応しており、破壊モードについても同様であった。

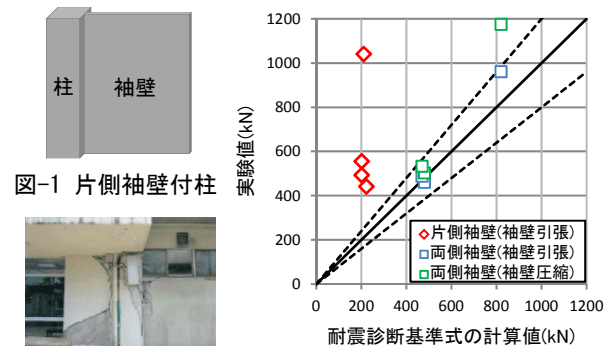


図-1 片側袖壁付柱 図-2 曲げ終局強度の比較

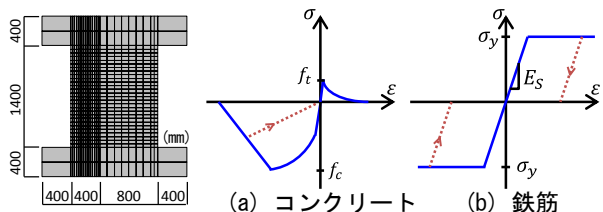


図-3 解析モデル図 (SWT-L) 図-4 応力-ひずみ関係 (FEM)

表-1 既往実験試験体諸元

試験体名	柱せい D(mm)	柱幅 b(mm)	袖壁長さ β D(mm)	壁厚 t(mm)	主筋比 Pg(%)	帯筋比 Pw(%)	壁筋比 Pww(%)	軸力比 η
SWT-L	400	400	800	100	2	0.32	0.32	0.2
SWT-LW	400	400	800	100	2	0.64	0.64	0.2

使用鉄筋 主筋 $\sigma_y=372\text{N/mm}^2$ 帯筋 $\sigma_y=340\text{N/mm}^2$ 壁筋 $\sigma_y=340\text{N/mm}^2$
 コンクリート圧縮強度 $f_c=33\text{N/mm}^2$

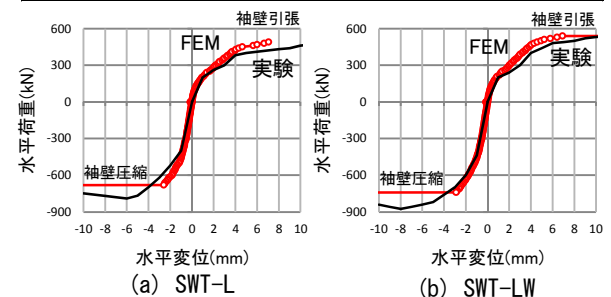


図-5 既往実験結果と解析結果の比較

*1 多田建設株式会社 (前 日本工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻) 修士 (工学)

*2 日本工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*3 明治大学 理工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 耐震診断基準のせん断終局強度式

耐震診断基準では、以下に示すように、4 ケースのせん断強度のうち、最大値をせん断終局強度とする規定となっている(図-6 参照)。

- ケース 1 Q_{su1} : 袖壁付柱と独立柱の平均の強度
- ケース 2 Q_{su2} : 等価断面耐震壁の強度
- ケース 3 Q_{su3} : 独立柱のみの強度
- ケース 4 Q_{su4} : 柱を無視した雑壁の強度

$$Q_{su} = \max(Q_{su1}, Q_{su2}, Q_{su3}, Q_{su4}) \quad (1)$$

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.053 p_{0.23}^{0.23} (18 + F_c)}{\left(\frac{M}{Q d_e} \right) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_{0e} \right\} b_e j_e \quad (2)$$

なお、各ケースで用いる計算式は式(2)と同一であるが、断面置換や壁筋比の置換方法が異なる。式の詳細については、文献2)を参照されたい。

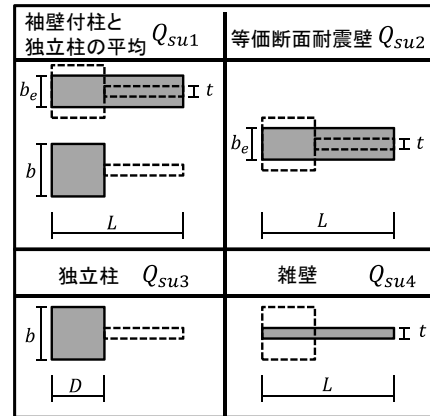


図-6 せん断終局強度評価法 (耐震診断基準)

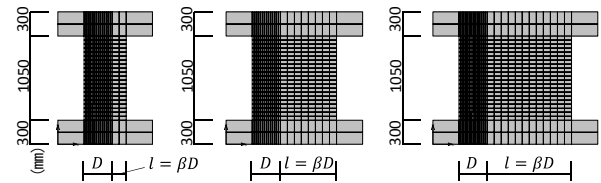


図-7 袖壁単体解析モデル ($\beta = l/D$)

2.3 せん断終局強度に関する検討

ここでは、耐震診断基準による片側袖壁付柱のせん断終局強度と FEM 解析結果の比較を行う。

図-7 に片側袖壁付柱の解析モデル、表-2 に解析に用いた断面、配筋および材料諸元を示す。この片側袖壁付柱の解析モデルは、文献 6) の柱試験体 N00-N04 に袖壁がついたモデルとし、せん断破壊型になるように計画した。この N00-N04 試験体は、3、4 階建ての学校建築の RC 柱を想定したもので、断面 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ 、高さ 1050mm で、およそ実大の $1/2$ スケールである。この解析モデルの袖壁端部には、端部縦筋を配置している。

この片側袖壁付柱への加力は、加力スタブ中心高さ位置に水平力を載荷し、軸力は載荷していない。解析は袖壁長さ比 (β) をパラメータとし、それぞれ袖壁圧縮側加力と、袖壁引張側加力の 2 ケースについて解析を行った。

図-8 に解析結果の荷重-変位関係を示し、せん断終局強度に関する解析と耐震診断基準式の比較を図-9 に示す。図-9 より、耐震診断基準のせん断終局強度は、袖壁引張側と袖壁圧縮側で同一の値となる規定となっているが、解析においても、袖壁引張側と袖壁圧縮側で、せん断終局強度はおおむね同様の強度となっている。しかしながら、FEM 解析結果と比べると、耐震診断基準のせん断終局強度は、袖壁長さが長くなるほど、過大となる傾向となっている。

なお、本試験体では、耐震診断基準のせん断終局強度は Q_{su2} 、すなわち、袖壁付柱と等断面積の長方形断面とした場合のせん断終局強度により決定されている。

表-2 解析モデル諸元 (せん断型)

試験体名	柱せい D(mm)	柱幅 b(mm)	袖壁長さ βD (mm)	壁厚 t(mm)	主筋比 P _g (%)	帯筋比 P _w (%)	壁筋比 P _{wv} (%)	軸力比 η
WW-S0.5	350	350	175	70	2.48	0.1	0.25	0
WW-S1	350	350	350	70	2.48	0.1	0.25	0
WW-S2	350	350	700	70	2.48	0.1	0.25	0
WW-S3	350	350	1050	70	2.48	0.1	0.25	0
WW-S4	350	350	1400	70	2.48	0.1	0.25	0
WW-S5	350	350	1750	70	2.48	0.1	0.25	0
使用鉄筋 主筋 $\sigma_y = 500\text{N/mm}^2$ 帯筋 $\sigma_y = 366\text{N/mm}^2$ 壁筋 $\sigma_y = 350\text{N/mm}^2$								
コンクリート圧縮強度 $f_c = 13.5\text{N/mm}^2$								

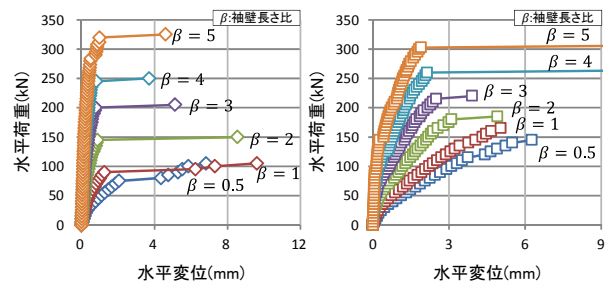


図-8 荷重-変位関係 (せん断型)

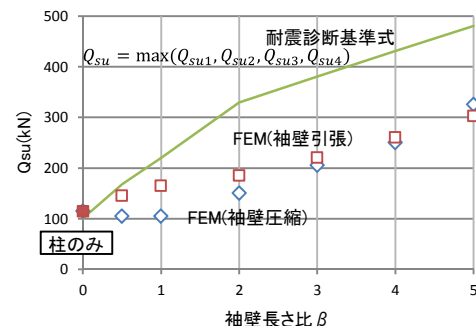


図-9 せん断終局強度の比較

このような長方形断面置換のせん断終局強度評価法は、袖壁端部の幅が実際より大きくなるため、せん断終局強度を過大評価する可能性のあることが、RC 規準でも指摘されており、図-9 の結果と符合している。

さらに、長方形置換による強度式には、柱帯筋の効果や等価壁厚に対する等価な壁筋比への置換方法などにも注意が必要との指摘もある。

以上のように、耐震診断基準における、片側袖壁付柱のせん断終局強度評価法には、改善すべき点が多く残されていると考えられる。

3. 耐震診断基準の曲げ終局強度評価法に関する検討

3.1 耐震診断基準の曲げ終局強度式

耐震診断基準では、図-10 に示すように、片側袖壁付柱の曲げ終局強度を、袖壁が圧縮側と引張側に分けて、下記のように算定する規定となっている(式(3)、(4)参照)。

袖壁圧縮側では、袖壁を考慮して下式により算定する。

$$M_u = (0.9 + \beta)a_t\sigma_y D + 0.5ND \left\{ 1 + 2\beta - \frac{N}{b_e D F_c} \left(1 + \frac{a_t\sigma_y}{N} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

袖壁引張側では、袖壁を無視し、柱のみとして下式により算定する。

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{b D F_c} \right) \quad (4)$$

3.2 曲げ終局強度に関する検討

耐震診断基準における片側袖壁付柱の曲げ終局強度評価法の妥当性について検討するために、図-11 に示すような袖壁付柱試験体に対して FEM 解析を実施した。この解析では、袖壁長さをパラメータとし、袖壁圧縮側と、袖壁引張側の2 ケースについて解析を行った。解析に用いた断面、配筋、材料の諸元を表-3 に示す。

図-12 に解析結果の荷重-変位関係を示し、耐震診断基準式と解析結果の曲げ終局強度の比較を図-13、図-14 に示す。図-13 には、袖壁長さを変化させた場合の曲げ終局強度の変化が示されている。図より、袖壁圧縮側では、耐震診断基準式と解析結果は同様の傾向となっているのに対して、袖壁引張側では、耐震診断基準式は袖壁長さによらず一定の曲げ終局強度となっており、解析結果に対して安全側評価ではあるものの、傾向が大きく異なっている。

このように、耐震診断基準における袖壁圧縮側の曲げ終局強度式は、おおむね妥当と判断されるが、袖壁引張側の曲げ終局強度評価法には、検討すべき点が残されていると考えられる。

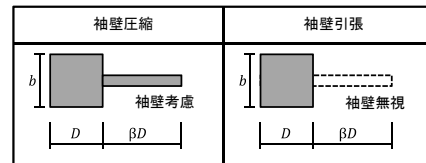


図-10 曲げ終局強度評価法

表-3 解析モデル諸元(曲げ型)

試験体名	柱せい D(mm)	柱幅 b(mm)	袖壁長さ β D(mm)	壁厚 t(mm)	主筋比 P _g (%)	帯筋比 P _w (%)	壁筋比 P _{wv} (%)	軸力比 η
WW-M0.5	350	350	175	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
WW-M1	350	350	350	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
WW-M2	350	350	700	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
WW-M3	350	350	1050	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
WW-M4	350	350	1400	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
WW-M5	350	350	1750	52.5	0.62	0.475	0.25	0.135
使用鉄筋 主筋 σ _y =348N/mm ² 帯筋 σ _y =366N/mm ² 壁筋 σ _y =350N/mm ²								
コンクリート圧縮強度 f _c =29.66N/mm ²								

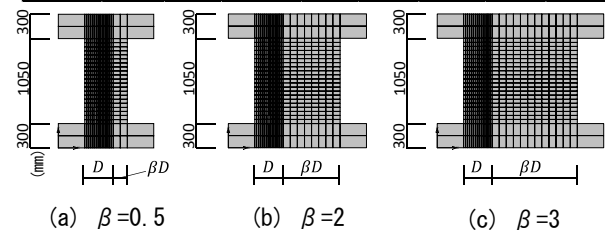


図-11 袖壁単体解析モデル

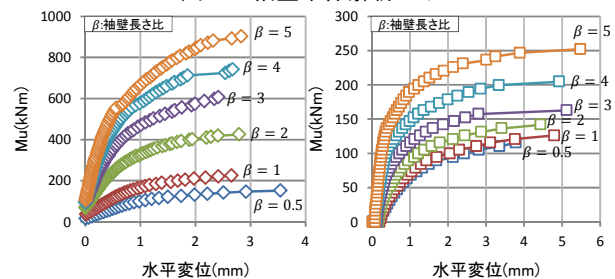


図-12 荷重-変位関係(曲げ型)

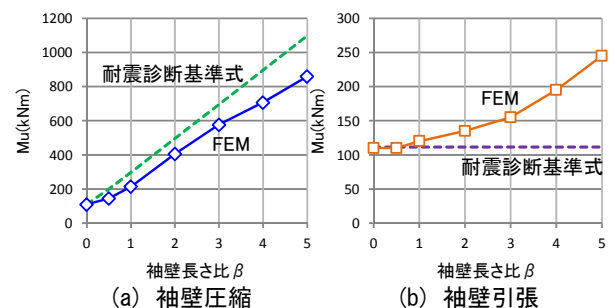


図-13 曲げ終局強度の比較

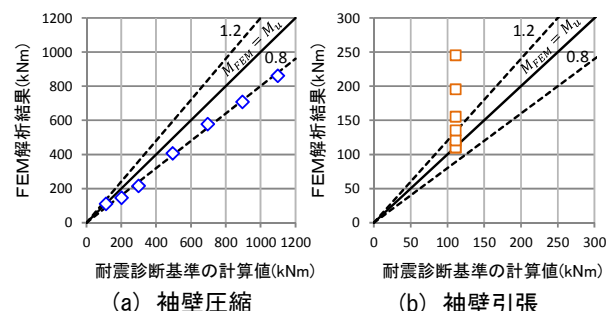


図-14 耐震診断基準式と解析結果の比較

4. 分割累加によるせん断終局強度評価法

本章では、片側袖壁付柱のより合理的なせん断終局強度評価法について検討する。

4.1 分割累加式の妥当性に関する解析的検討

文献 3)、4)に、図-15 のように袖壁付柱を壁部分と、柱幅から壁厚さを差し引いた柱残余部分に分割し、それぞれのせん断終局強度を累加する手法が提案されている。本節では、この分割累加の考え方の妥当性について、図-16 のような 3 次元 FEM 解析により検討する。使用した解析法は、2.1 節の FEM 解析と同じ解析プログラムで、解析モデルおよび試験体諸元は、2.3 節と同様である。なお、解析は、袖壁が圧縮側になる方向に加力した。

解析結果の主応力分布を図-17 に示すが、図-17(a)が最外面要素の主応力分布で、図-17(b)が厚さ方向の中央要素での主応力分布となっている。図より、壁部分の主応力分布には、外側要素と中央要素で大きな差異がみられないのに対し、柱部分では、外側要素と中央要素で、主応力の流れにやや差異がみられる。

さらに、図-18 には、解析結果の終局強度時の鉛直ひずみ分布を示す。柱の圧縮側脚部の鉛直ひずみに注目すると、柱幅方向の中央要素では、引張ひずみとなっているのに対し、柱の外側要素では圧縮ひずみとなっている。

このような応力・ひずみ状況から、図-19 のような、厚さ方向の中央部分では、柱頂部の加力点から、袖壁脚部に向けてのアーチ的な力の流れに対して、柱外側部分では、柱頂部から柱脚部に向けてのアーチ的な力の流れが存在していると考えることができる。

以上の解析より、片側袖壁付柱のせん断終局強度評価において、耐震診断基準のように袖壁付柱を等価な長方形断面として算定する手法よりも、袖壁付柱を柱残余部分と壁部分に分割し、それぞれのせん断終局強度を累加する分割累加の考え方が妥当であると考えられる。

4.2 分割累加式によるせん断終局強度

壁部分および柱残余部分のせん断終局強度には、式(3)～(5)に示すような、文献 7)のせん断強度式を用いた。

$$V_u = \mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \left(v \sigma_B - \frac{5 p_{we} \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \frac{bD}{2} \tan \theta \quad (3)$$

$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_B + p_{we} \sigma_{wy}}{3} b_e j_e \quad (4)$$

$$V_u = \frac{\lambda v \sigma_B}{2} b_e j_e \quad (5)$$

分割累加式によるせん断終局強度計算値と、図-9 の FEM 解析結果との比較を図-20 に示す。図より、解析結果のせん断終局強度は、分割累加式の結果とよく対応していることから、片側袖壁付柱のせん断終局強度評価

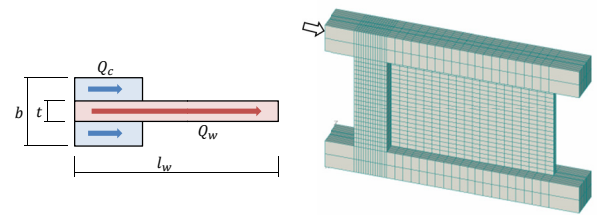


図-15 分割累加の説明

図-16 3次元解析モデル

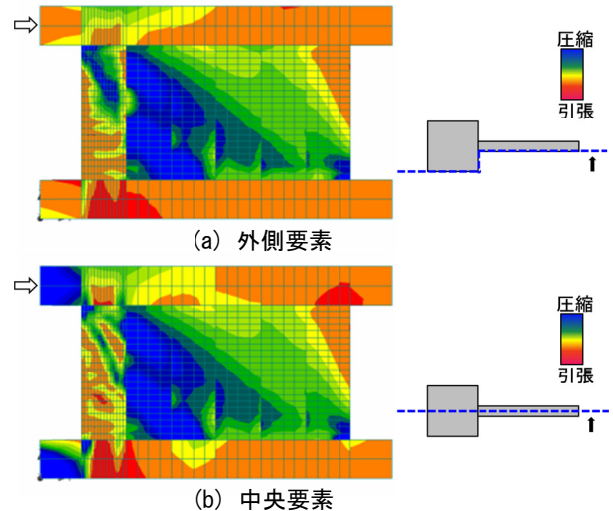


図-17 主応力分布（終局強度時）

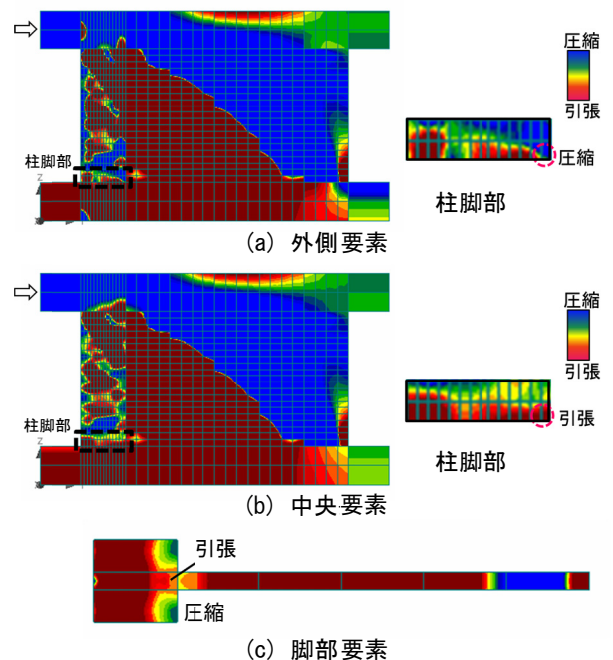


図-18 鉛直ひずみ分布（終局強度時）

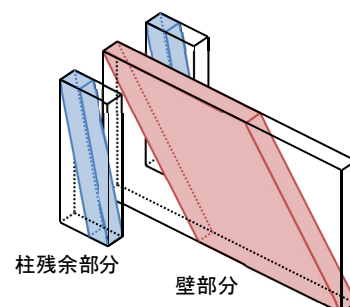


図-19 アーチ機構の力の流れ

には、壁部分と柱残余部分に分割して、それぞれの強度を累加するという考え方が妥当であると判断される。

5. 分割累加による曲げ終局強度評価法に関する検討

5.1 セン断の影響を考慮した断面の曲げ解析

ここでは、片側袖壁付柱の曲げ終局強度評価法について考察するが、前章のせん断終局強度評価と同様に、図-21のように、壁部分と柱残余部分に分割し、それぞれの強度を断面の曲げ解析により計算し、この2つを累加することにより曲げ終局強度を算定する。

ただし、断面の曲げ解析では、文献8)の方法により、せん断の影響も考慮したが、曲げ柱単体の計算結果を図-22、図-23に示す。これらの図より、せん断の影響も考慮した断面の曲げ解析は、通常の断面の曲げ解析に比べて、FEM解析結果に近くなっていることがわかる。

5.2 片側袖壁付柱の曲げ終局強度算定方法

せん断の影響も考慮した曲げ強度算定のフローチャートを図-24に示すが、詳細は文献8)を参照されたい。この方法で、壁部分と柱残余部分の曲げ強度を算定し、両者を累加し、袖壁付柱の曲げ強度とした。ここで、両者の累加に際しては、図-25のように、壁部分と柱残余部分の引張側鉛直ひずみが一致するときの曲げモーメントを累加することとした。

曲げ強度算定に用いた応力-ひずみ関係を図-26に示す。各分割要素の応力・ひずみ状態は、Collinsの修正圧縮場理論に基づき、図-27のモールの応力円とひずみ円、応力-ひずみ関係を用いて軸方向力の釣合い、およびせん断力の釣合いを満足するように収斂計算により求めたが、詳細は文献8)を参照のこと。

5.3 本評価法による曲げ終局強度計算結果

上述した曲げ強度算定法を、図-11に示す曲げ破壊型の片側袖壁付柱に対して計算を行った。

袖壁長さ比 $\beta=1$ と $\beta=2$ の2ケースについて、本評価法による鉛直ひずみ分布を図-28に示す。柱脚部圧縮側の鉛直ひずみ分布をみると、壁部分では引張ひずみとなっているのに対し、柱残余部分では圧縮ひずみになっていることがわかる。これは、図-18に示すFEM解析の鉛直ひずみの状況と符合しており、断面の曲げ解析に分割累加を応用する方法は妥当であると判断できる。

また、この曲げ強度算定法による結果と、耐震基準式およびFEM解析結果の曲げ終局強度を比較した結果を図-29に示す。図より、袖壁圧縮側では、本報の曲げ終局強度計算結果は、耐震診断基準式に比べて、よりFEM解析結果に近くなっていることがわかる。また、袖壁引張側では、本報の曲げ終局強度計算結果は、FEM解析結果との差異もみられるものの、耐震基準式に比べて、FEM解析結果に近づいている。

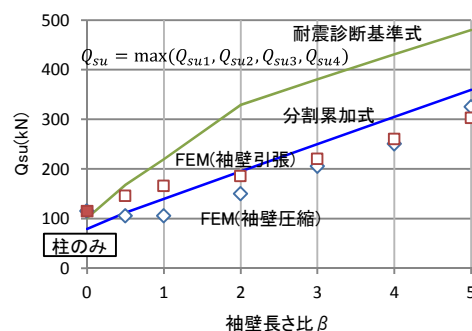


図-20 分割累加式の計算値の比較

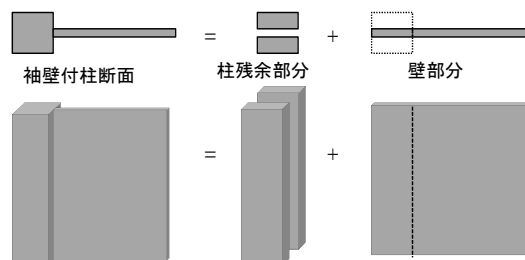


図-21 分割累加方法

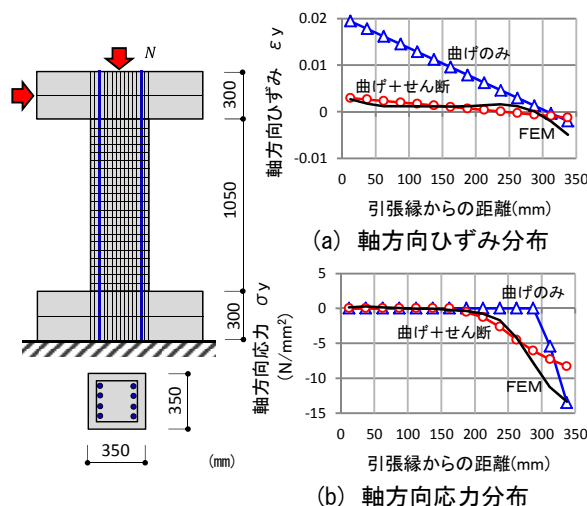


図-22 N00-N4 試験体 図-23 FEM 解析結果との比較

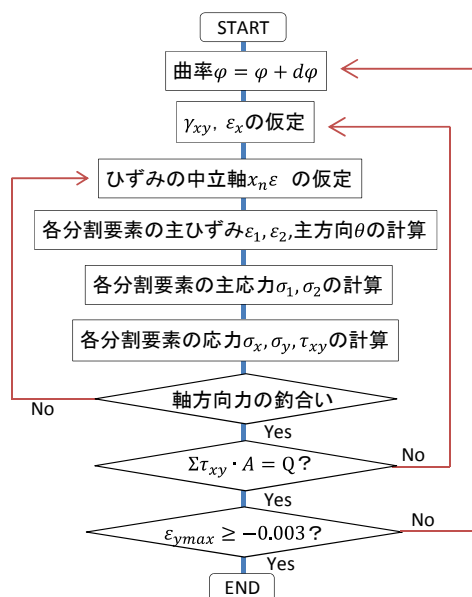


図-24 フローチャート

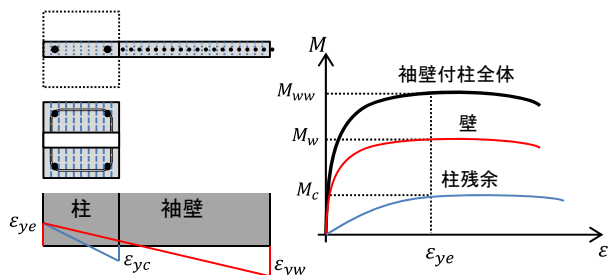
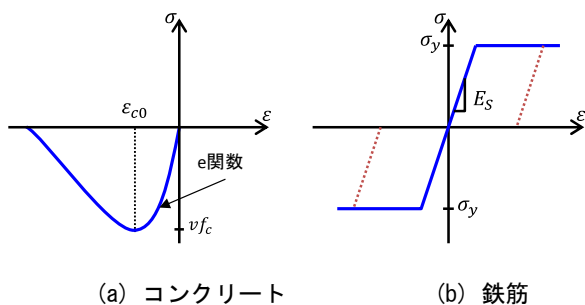


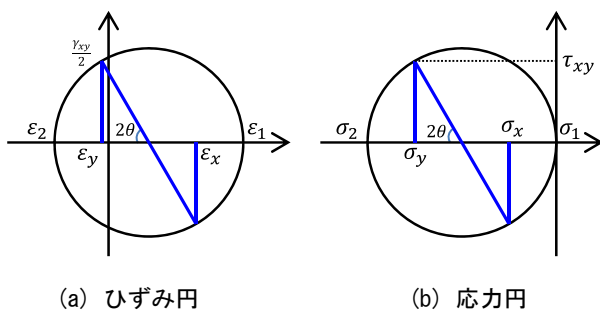
図-25 収斂計算プログラムの断面分割



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

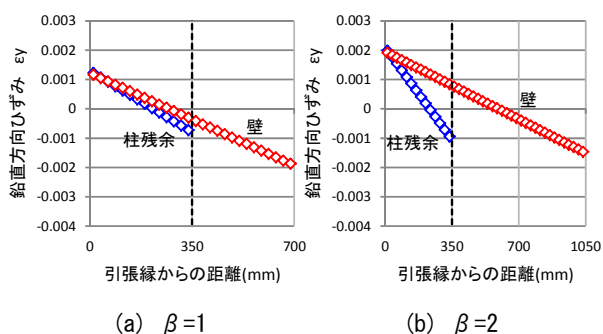
図-26 曲げ強度算定に用いた応力-ひずみ関係



(a) ひずみ円

(b) 応力円

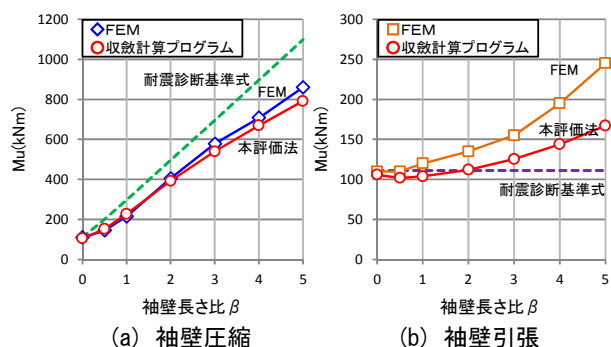
図-27 モールのひずみ円、応力円



(a) β=1

(b) β=2

図-28 本評価法の鉛直ひずみ分布



(a) 袖壁圧縮

(b) 袖壁引張

図-29 本評価法と FEM 解析結果の比較

以上より、分割累加の考え方を曲げ終局強度算定にも応用した、本報の曲げ終局強度算定法は、およそ妥当であると考えられる。

6. 結論

本研究では、片側袖壁付柱の終局強度評価法について解析的な検討を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 耐震診断基準による、片側袖壁付柱のせん断終局強度式は、FEM 解析結果に比べて過大評価であった。
- 2) 耐震診断基準による片側袖壁付柱の曲げ終局強度式は、FEM 解析と比較して、袖壁圧縮側ではおおむね妥当であったが、袖壁引張側では袖壁を無視しているため安全側の評価となっていた。
- 3) 3次元 FEM 解析結果によれば、片側袖壁付柱の壁部分と柱残余部分で異なる応力伝達機構がみられ、壁部分と柱残余部分のせん断終局強度を累加するという分割累加の考え方^{3),4)}は妥当であると判断される。また、トラスアーチ理論を用いた分割累加の計算結果は、FEM 解析結果とよく対応していた。
- 4) 片側袖壁付柱の曲げ終局強度算定に、分割累加の考え方を応用した計算結果は、耐震診断基準式に比べて、FEM 解析結果に近いという結果であった。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造 計算規準・同解説、pp.274-325, 2010.2
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、pp.229-244, 2001.10
- 3) 妻根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：片側袖壁付き柱と両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
- 4) 妻根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：袖壁付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
- 5) ATENA：Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, Cervenka Consulting, Revision Oct.31, 2005
- 6) 白石一郎，高木仁之：地震被害を受けたRC柱の残存軸耐力に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.121-126, 2010
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.142-162, 1999.8
- 8) 白石一郎，門倉利通，高木仁之，狩野芳一：曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の終局時変形に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.931-936, 2005