

論文 鉄筋コンクリート造耐震壁の引張軸力下のせん断終局強度算定法に関する研究

宮脇 康誠*1・津田 和明*2

要旨: 圧縮軸力下の鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断終局強度算定法は数多く提案されており、それらは十分な算定精度を有している。しかし、引張軸力下における耐震壁のせん断性状に関する研究・検討はほとんど行われておらず、引張軸力下の精度の良い耐震壁のせん断終局強度算定法は提案されていない。そこで、筆者らによる鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断終局強度算定法を拡張し、引張軸力下に対応できるせん断終局強度算定法を検討することにした。検討手法の算定精度を FEM 解析結果を用いて検証した結果、既往算定法と同等以上の精度を示すことが分かった。

キーワード: 鉄筋コンクリート造, 耐震壁, 引張軸力, せん断終局強度

1. はじめに

現在、鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断終局強度算定法として、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」¹⁾のせん断終局強度式(以降、終局指針式と称す)、広沢式²⁾等、その他いくつかの算定法が用いられる。しかし、これらの算定法は壁板の全横筋の降伏を前提としており、実際の破壊現象と対応していない場合がある。また、引張軸力下での算定精度は、明確になっていない。しかし、比較的高層またはアスペクト比の大きい建物で、下層に耐震壁が設置されている場合、その耐震壁には地震時に引張力が作用する可能性がある。

耐震壁においては、トラス剛性に基づくせん断終局強度算定法を筆者らが提案している³⁾。その算定法は、実際の破壊現象をほぼ再現できている。また、暫定的な部分はあるものの、その算定精度は既往算定法と比べても遜色なくせん断終局強度を評価できる。しかし、この算定法も引張軸力下の算定精度は分からない。そこで、この耐震壁のせん断終局強度算定法(以降、圧縮軸力下提案手法と称す)や既往算定式の引張軸力下での算定精度を検討し、問題がある場合には新たな算定法を検討することにした。

2. 既往算定式

2.1 終局指針式

日本建築学会の終局指針式によるせん断終局強度は式(1)~(3)で表される。コンクリート有効圧縮度係数 ν は、式(4)で算定する。引張軸力を受ける場合、アーチ機構による負担分をゼロとすることとしている。

$$Q_{su} = t_w l_{wb} p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} \nu \sigma_B / 2 \quad (1)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\left(\frac{h_w}{l_{wa}}\right)^2} + 1 - \frac{h_w}{l_{wa}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{(1 + \cot \phi^2) p_s \sigma_{sy}}{\nu \sigma_B} \quad (3)$$

$$\nu = \begin{cases} 0.7 - \sigma_B / 200 & \sigma_B \leq 45 \text{ N/mm}^2 \\ 1.698 \sigma_B^{-0.333} & \sigma_B > 45 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式(1), (2)中、 t_w は壁厚、 l_{wb} および l_{wa} はトラス機構およびアーチ機構の等価壁長さ、 h_w は加力点高さ、 p_s はせん断補強比、 σ_B はコンクリート圧縮強度、 σ_{sy} はせん断補強筋強度、 ϕ はトラス機構のコンクリート圧縮ストラットの角度である。これらの単位は SI 単位系で、力が N、距離が mm である。

2.2 広沢式

広沢式を式(5)に示す。

$$Q_{su} = \left(\frac{0.068 p_{cg}^{0.23} (\sigma_B + 18)}{\sqrt{\frac{M}{Ql_{av}} + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} p_{wh} + 0.1 \sigma_0}} \right) b_e j \quad (5)$$

式(5)中、 p_{cg} は側柱主筋比、 l_{av} は壁全長、 σ_{wh} は壁板横筋強度、 p_{wh} は壁板横筋比、 σ_0 は軸方向応力度で、 b_e は壁厚であり、引張軸力を受ける場合はをゼロとする。

2.3 圧縮軸力下提案手法

耐震壁のせん断抵抗機構として、図-1に示すトラス抵抗機構を仮定する。これは、コンクリートの斜め圧縮バネと鉛直方向と水平方向の引張バネにより構成される。鉛直バネは側柱の主筋と壁板の縦筋、水平バネは壁板横筋と側柱による曲げ抵抗バネにより形成される。そして、斜め圧

*1 近畿大学 産業理工学部建築・デザイン学科 (学生会員)

*2 近畿大学 産業理工学部建築・デザイン学科 教授 博士 (工学) (正会員)

縮バネと水平引張バネのいずれかが強度に達したときを耐震壁のせん断強度としている。詳細については既報^{3),4),5)}を参照願いたい。圧縮軸力下提案手法によるせん断終局強度は式(6)~(15)で表される。

$$Q_{su} = \min(Q_{cc}, Q_{hy}) \quad (6)$$

$$Q_{cc} = \frac{v\sigma_B \sin 2\theta}{2} l_a t_w \quad (7)$$

$$l_a = l_w + D_c - h_a \tan \theta \quad (8)$$

$$h_a = \frac{K_2 \cos \theta \sin^3 \theta}{\frac{2K_x}{l_w}} \leq \frac{h_0}{2.7} \quad (9)$$

$$K_2 = 0.168 \sigma_B^{0.38} E_c \frac{1}{0.01 \sigma_B + 0.8} \quad (10)$$

$$Q_{hy} = \frac{\sigma_{hy} K_x}{E_{hs} \tan \theta} (l_w + D_c) t_w \quad (11)$$

$$\left(\frac{1}{K_x} - \frac{1}{K_y} \right) \cos^4 \theta - 2 \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_x} \right) \cos^2 \theta + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_x} = 0 \quad (12)$$

$$K_x = K_f + p_{wh} E_{hs} \quad (13)$$

$$K_y = 2 p_{cgd} E_{cs} + p_{wvd} E_{vs} \quad (14)$$

$$K_f = \frac{360 E_c I_c l_w}{t_w h_0^4} \quad (15)$$

上中、 Q_{cc} はコンクリートの斜め圧縮バネの強度で決定されるせん断強度、 v はコンクリートの圧縮強度有効係数、 θ は主圧縮方向角度（縦軸より反時計回り）、 l_a は耐震壁脚部の有効長さ、 l_w は両側柱の芯々間距離、 D_c は側柱せい、 h_a はコンクリート圧縮ストラットの引張縁での最下端の耐震壁脚部からの高さ、 h_0 は内法高さ、 K_2 は補正係数を乗じたコンクリートの圧縮方向のバネ剛性、 E_c はコンクリートヤング係数、 Q_{hy} は壁板横筋が降伏するときのせん断強度、 E_{hs} は壁板横筋のヤング係数、 K_x は水平方向の単位面積当たりの平均バネ剛性、 K_y は鉛直方向の単位面積当たりの平均バネ剛性、 p_{wh} は壁筋比、 K_f は側柱の曲げ抵抗による水平抵抗バネ剛性、 E_{hs} 、 E_{vs} 、 E_{cs} は壁板横筋、壁板縦筋、および側柱主筋のヤング係数、 E_c はコンクリートのヤング係数、 I_c は側柱の断面二次モーメントである。

3. FEM 解析の概要

引張軸力下の耐震壁のせん断性状に関する既往実験結果が少なく十分な精度検証が行えないため、FEM 解析結果を用いて検証対象を増やすことにした。

FEM 解析には、「FINAL」を用いた。まず、溝口らの実験結果 (I-H65TA1 試験体、 $\sigma_B=21.0$ (N/mm²), 鉄筋の材料特性：表-1) ⁶⁾ のシミュレーション解析を行い、解析仮定の妥当性を確認後、パラメトリック解析を行うことにした。

溝口らの実験では、水平および鉛直に配置した3台のアクチュエータを用いて行い、水平方向の加力は変位漸増繰り返しとしとしている。変位振幅は、壁頂の x 方向部材角が各サイクルのピーク時で 1, 2, 4, 6×10⁻³rad としている。鉛直方向の加力は、図-3 に示すように、水平荷重に伴って変化させている (cQ_{su} は、計算せん断終局強度)。P₁(N=59kN)、P₂(N=228kN)の向きと加力時のモーメント分布を図-4 に示す。P₂は、引張であり、地震時に水平方向に対し圧縮側になる柱に引張軸力を受けることを想定している。正荷重時の最大耐力時の2台のアクチュエータの軸力の合計は、N=169.0kN (引張)であった。

解析モデルを図-5 に示す。コンクリートは四辺形要素とし、壁板縦横筋、側柱主筋およびせん断補強筋は埋め込み鉄筋として、モデル化した。テンションスティフニング特性は出雲らのモデル⁷⁾ (C=1.0)、コンクリートの圧縮応力度～ひずみ度関係は修正 Ahmad モデル⁸⁾、圧縮強度到達後のひずみ軟化域曲線は修正 Ahmad モデル⁸⁾、ひび割れ面のせん断伝達特性は長沼の提案モデル⁹⁾とした。コンクリートの破壊条件は、Kupfer-Gerstle モデル¹⁰⁾とした。鉄筋の応力度～ひずみ度関係の降伏後剛性をヤング係数の 1/100 とするバイリニア型とした。また、底辺の節点はすべて固定した。

シミュレーション解析より得られた I-H65TA1 試験体の正加力時の水平荷重～水平変位関係を実験結果と比較して、図-6 に示す。

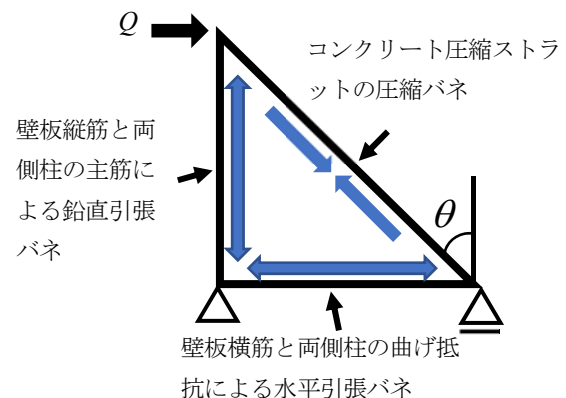


図-1 圧縮軸力下提案手法の概念

水平荷重～水平変位関係では、荷重上昇域において、同荷重時の水平変位はFEM解析のほうがやや大きかったが、最大耐力に関しては、良好に対応している。図-7に実験の最終破壊状況とFEMの最大耐力時の破壊状況を示す。図-7中のFEM解析の黄色、赤色部はコンクリート圧縮軟化部位である。実験の損傷が大きい部位と解析のコンクリート圧縮軟化位置はほぼ一致している。そのため、このFEM解析は妥当であると判断し、この解析モデルを用いて、パラメトリック解析を行うことにした。

パラメトリック解析の諸元を表-2に示す。パラメトリック解析は、コンクリート圧縮強度 (σ_B)、側柱主筋比 (p_{cg})、壁板縦横筋比 (p_w)、引張軸力 (N) をパラメータとし、54ケースを行った。また、コンクリート引張強度は式(16)を用いた。鉄筋は側柱主筋は弾性とし、その他はI-H65TA1試験体と同じである。なお、引張軸力のみで壁板縦筋が降伏したケースは除外した。

4. 引張軸力下のせん断終局強度算定法の概要

検討手法は、山下式¹⁾を参考に圧縮軸力下提案手法を修正することにした。山下式は、引張軸力下の柱のせん断終

局強度算定法であり、中尾の提案式^{12),13),14)}(圧縮軸力下のせん断終局強度算定法：基本形は圧縮軸力下提案手法と同じ)のコンクリート圧縮ストラットのバネ剛性をコンクリートのヤング係数に変更している。その結果、算定精度が向上している。ここでは、さらに圧縮ストラットの形状の検討を行った。

圧縮ストラットの形状の検討では、引張軸力下の場合、圧縮軸力下の場合に比べ、耐震壁脚部有効長さが減少している可能性があると考えた。耐震壁脚部有効長さは、図-2に示すようにコンクリート圧縮強度に対するせん断強度算定位置である。その有効長さの算定(式(8))に用いられる h_a は、コンクリート圧縮ストラットの引張縁での最下端の耐震壁脚部からの高さであり、圧縮の場合は制限が設けられている ($h_0/2.7$ 以下)。

パラメトリック解析結果を用い、制限値を変動させて計算した結果、得られた強度比(FEM最大耐力/計算強度)の平均値、変動係数の制限値に対する変動傾向を図-8に示す。基本的に h_a は、内法高さ以下としておりその範囲で検討した。

$$\sigma_t = 0.333\sqrt{\sigma_B} \quad (16)$$

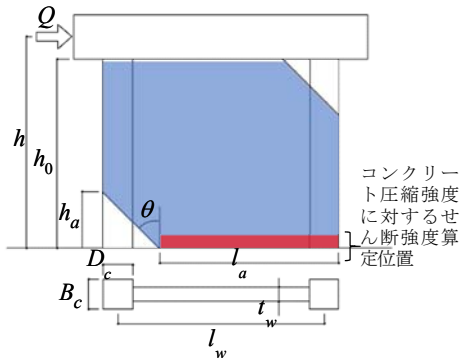


図-2 耐震壁各部の記号

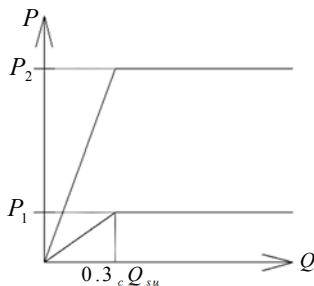


図-3 鉛直荷重の設定

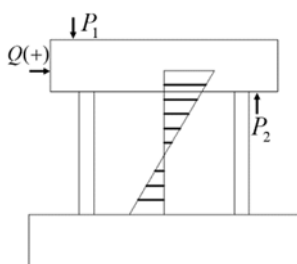


図-4 モーメント分布

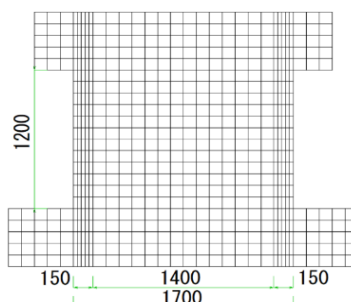


図-5 解析モデル

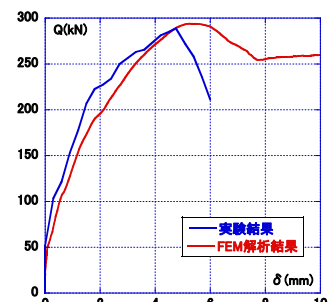


図-6 FEM解析結果と既往実験結果の比較

表-1 鉄筋の材料特性

| 鉄筋 | 断面積 (cm ²) | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 伸び (%) | 備考 |
|-----|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
| D22 | 3.87 | 386 | 587 | 24 | 梁主筋 |
| D13 | 1.267 | 369 | 547 | 27 | 柱主筋・肋筋 |
| 4φ | 0.122 | 245* | 316 | 46 | 帯筋・壁筋 |

*:0.2%耐力

表-2 解析諸元

| 構成因子 | 設定値 | | | 水準数 |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------|--------------|-----|
| | σ_B (N/mm ²) | p_w (%) | p_{cg} (%) | |
| σ_B (N/mm ²) | 21.0 | 42.0 | 63.0 | 3 |
| p_w (%) | 0.25 | 0.49 | 0.98 | 3 |
| p_{cg} (%) | 3.38 | | 6.76 | 2 |
| N (kN) | 169.0 | 338 | 507 | 3 |

計：3×3×2×3=54 ケース

平均値，変動係数の変動傾向より，引張軸力を受ける場合は h_a の制限を内法高さ ($h_0/1.0$ 以下) とするのが最も良いと判断した。しかし，**図-10**の通り，圧縮軸力下提案手法よりも改善されたが，横軸が1.0の場合でも，平均値は 0.728 であり算定精度としては不十分である。これに関しては，5章で検討する。

FEM 解析より得られた最小主応力度コンターと計算による圧縮ストラット形状の比較例を**図-9**に示す。同図からも， h_a の制限値を $h_0/1.0$ 以下としたほうが，FEM 解析のコンクリート最小主応力度が大きい部分と計算の圧縮ストラットがほぼ一致している。

5. 精度検証

5.1 既往算定法と検討手法の精度検証

3章のFEMパラメトリック解析結果を用いて既往算定法と検討手法の精度検証を行った。その結果を**図-10**に示す。強度比の平均値，変動係数は，終局指針式（トラスのみ）が 2.904, 0.501, 終局指針式が 0.879, 0.141, 広沢式が 0.970, 0.146, 圧縮軸力下提案手法が 0.673, 0.224, 山下式が 0.671, 0.224, 検討手法が 0.728, 0.189 であった。広沢式は多少のばらつきがあるものの比較的良好に評価できている。終局指針式はアーチ抵抗機構も考慮して算定する方が精度が良い。圧縮軸力下提案手法，山下式は，ほとんどのケースで危険側に評価し，対応が悪かった。検討手法は，圧縮軸力下提案手法，山下式に比べ，算定精度は，向上したが危険側に評価した。

さらに，引張軸力 (N)，コンクリート圧縮強度 (σ_B)，壁板横筋比 (p_w) に対する算定精度の変動傾向を検討した。それらの強度比 (FEM 最大耐力/計算強度) の関係を**図-11**に示す。図中， $\pm 15\%$ の横線を示した。

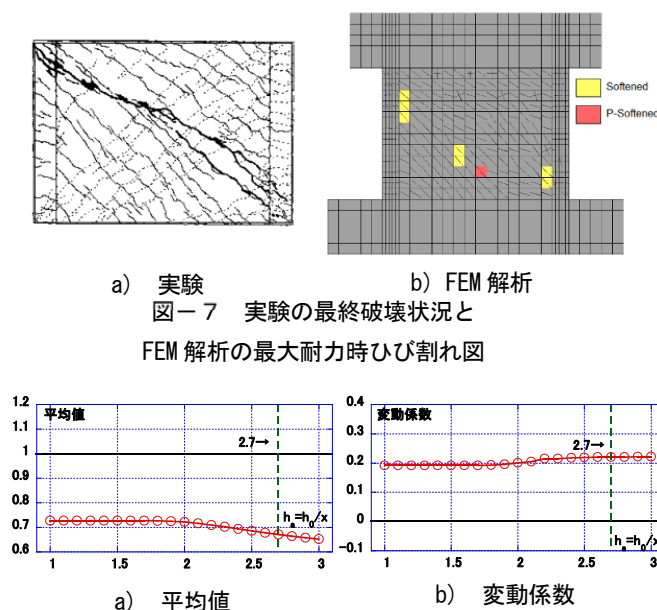


図-8 制限値と強度比の平均値，変動係数の関係

引張軸力に関しては，終局指針式（トラスのみ），終局指針式，広沢式は，引張軸力が大きくなると，強度比が小さくなる傾向を示している。その他の算定式は，回帰直線の傾きは，ほとんどなかった。コンクリート圧縮強度に関しては，終局指針式（トラスのみ），検討手法以外の算定法は圧縮強度の増大に伴い，強度比が小さくなる傾向を示している。終局指針式（トラスのみ）はそれらと逆の傾向となり，検討手法は回帰直線の傾きがほとんどなかった。壁板横筋比に関しては，終局指針式は回帰直線の傾きがほとんどなかった。終局指針式（トラスのみ）以外の算定法は，壁板横筋比の減少に伴い，強度比が小さくなる傾向を示している。

5.2 水平抵抗バネ剛性の低減を考慮した検討手法の精度検証

前項の検討において，検討手法と FEM 解析結果との対応がやや悪かったためさらに検討を行った。引張軸力下の場合，圧縮軸力下の場合に比べ，側柱の水平曲げ抵抗が弱くなる可能性を考えた。側柱の水平曲げ抵抗は，耐震壁が水平方向に膨らもうとするのを拘束する両側柱の抵抗のことであり，式(15)で求められる。この詳細は参考文献 3)を参照願いたい。

そこで検討手法の側柱による水平抵抗バネ剛性 (K_f) に係数を乗じることにした。ここでは，FEM 解析結果と対応が最もよかった係数 0.3 の場合を示す。その結果を**図-12**に示す。その時の強度比の平均値，変動係数は，0.943, 0.143 であり，検討手法と比べ，精度良く算定した。水平抵抗バネ剛性 (K_f) に係数を乗じることで算定制度がよくなることに関しては，今後，詳細に検討を行いたい。

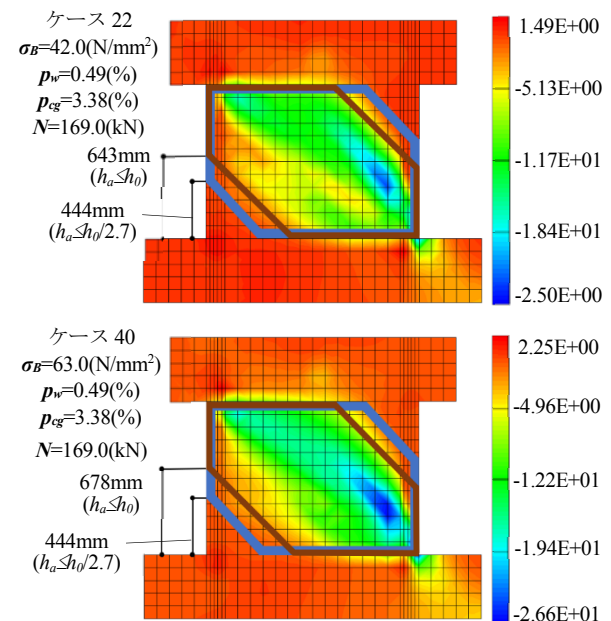


図-9 FEM 解析と計算による圧縮ストラットの形状の比較

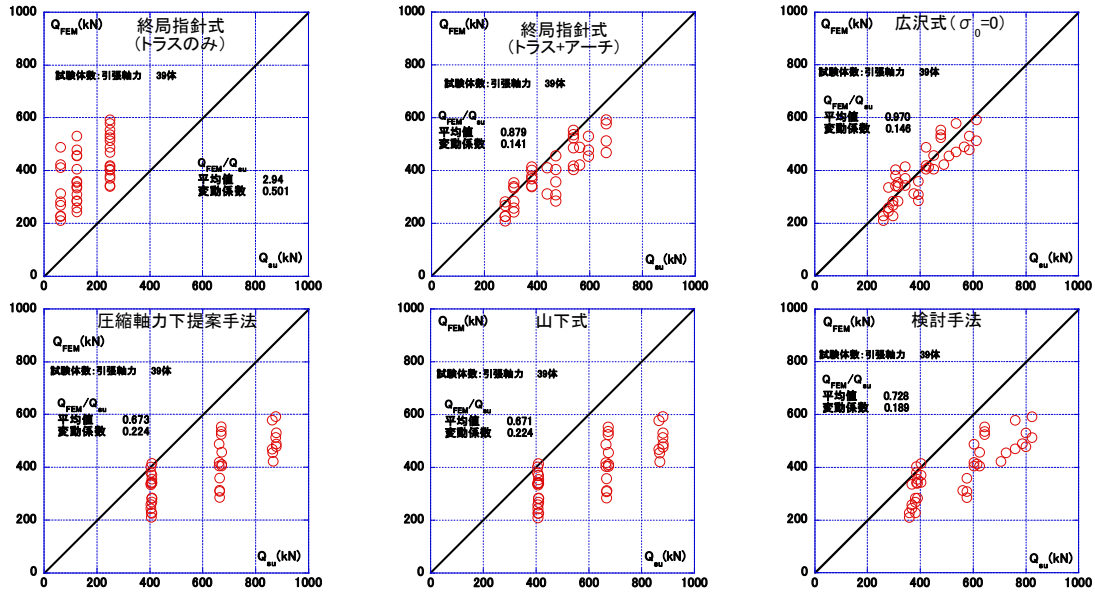
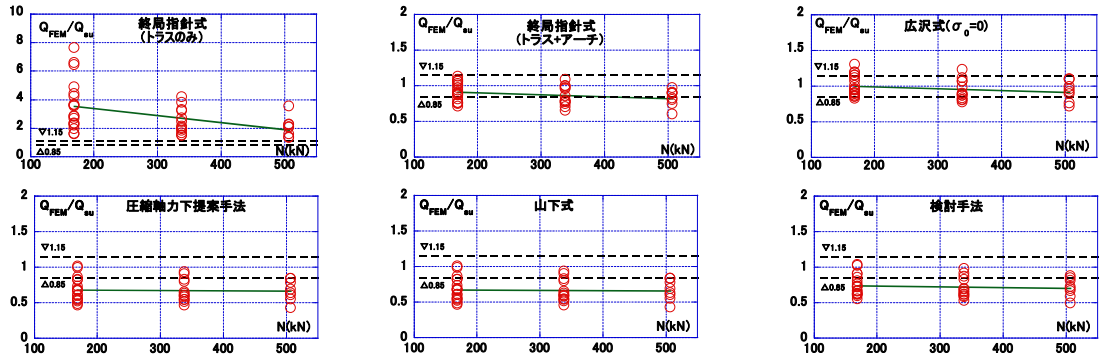
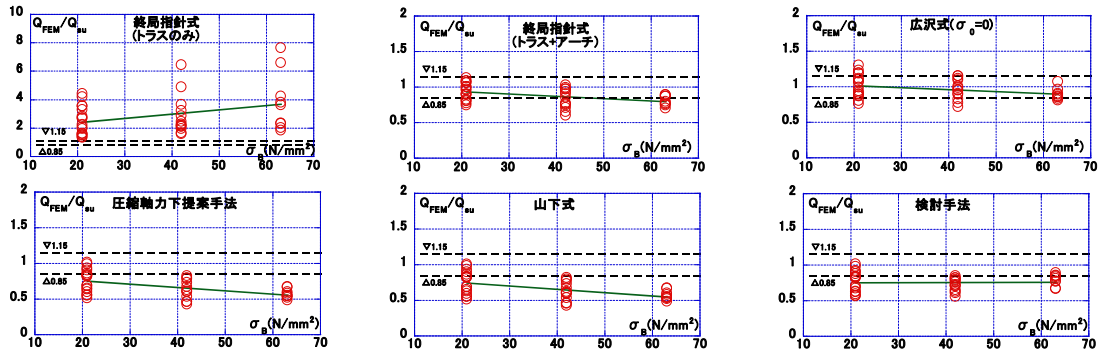


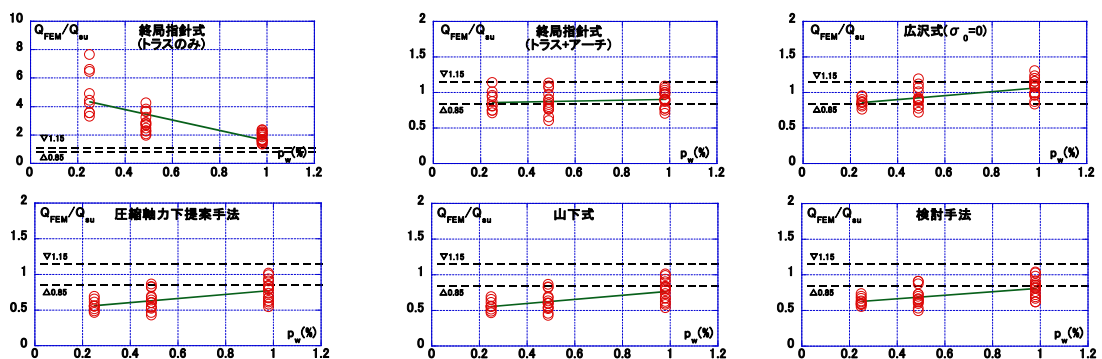
図-10 各算定式の精度検証



a) 引張軸力

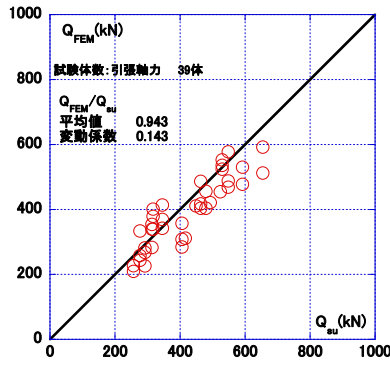


b) コンクリート圧縮強度



c) 壁板横筋比

図-11 各算定式の因子別検証



図一 1 2 K_f に係数を乗じた場合の精度検証

6. まとめ

引張軸力下の鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断終局強度の既往算定法の精度検証を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 広沢式は、FEM 解析結果の最大耐力と比較し、良好に評価するものの算定制度に多少のばらつきがあった。
 - 2) 終局指針式は、トラス抵抗機構だけでなく、アーチ抵抗機構も考慮して算定するほうが精度が良い。
 - 3) 圧縮軸力下提案手法、山下式による算定結果は FEM 解析結果と対応しなかった。
- また、検討手法に関しては、精度検証の結果、以下のことが分かった。
- 1) 圧縮軸力下提案手法、山下式に比べ算定精度のばらつきが小さくなった。
 - 2) 圧縮軸力下提案手法、山下式に比べ構成因子（軸力）の大小によって算定精度が変動する場合がある。

今後は、検討手法の精度が向上するよう、FEM 解析結果を詳細に分析し、さらに検討したい。また、圧縮軸力下との違いをより詳細に検討したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11
- 2) 日本建築学会：建築耐震設計における保有水平耐力と変形性能（1990）、1990、10
- 3) 津田和明：鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断強度算定法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、

第 74 巻、第 645 号、pp.2069-2075、2009.11

- 4) 津田和明：面内せん断力を受ける平板のせん断応力度～せん断ひずみ度関係の評価法、日本建築学会構造系論文集、第 517 号、pp.125-132、1999.3
- 5) 津田和明、江戸宏彰：鉄筋コンクリート造連層耐震壁の復元力特性（スケルトンカーブ）の算定法、日本建築学会構造系論文集、第 569 号、pp.97-104、2003.7
- 6) 溝口光男、荒井康幸、坂本亨：引張軸力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.2、pp.919-924、2002.6
- 7) 出雲淳一、他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル、コンクリート工学論文、No.87.9-1、pp.107-120、1987.9
- 8) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第 474 号、pp.163-170、1995.8
- 9) 長沼一洋、鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1）、日本建築学会構造系論文報告集、第 421 号、pp.39-48、1991.3
- 10) Kupfer,-H.B.and Gerstle,K.H.:Behavior of Concrete under Biaxial Stress,Journal of the Engineering Mechanics Division,ASCE,Vol.99,No.EM44,pp.853-866,Aug.,1973.
- 11) 山下雄大、津田和明：引張軸力が作用する鉄筋コンクリート柱部材のせん断終局強度算定法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.40, No.2、pp103-108、2018.7
- 12) 中尾駿一、津田和明：鉄筋コンクリート造柱・梁のせん断終局強度算定法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.2、pp.205-210、2015.7
- 13) 中尾駿一、津田和明：鉄筋コンクリート造柱・梁の曲げ降伏しない場合のせん断挙動算定法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, No.2、pp.127-132、2016.7
- 14) 中尾駿一、津田和明：鉄筋コンクリート造柱・梁の曲げ降伏しない場合のせん断挙動算定法の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.2、pp.121-126、2017.7