

論文 引張軸力下の鉄筋コンクリート造柱部材のせん断挙動算定法に関する研究

山下 雄大*1・津田 和明*2

要旨：引張軸力下の鉄筋コンクリート造柱のせん断挙動（せん断力～せん断変形関係）に関する研究はほとんどない。そのため、既往算定法も数少なく、その算定精度も明確ではない。そこで、昨年度報告を行ったせん断終局強度算定法を用いて、筆者らによる鉄筋コンクリート造耐震壁と柱・梁のせん断挙動算定法を準用し、引張軸力下の柱のせん断挙動算定法を検討した。FEM 解析を用いてこの検討手法の算定精度の検証を行った結果、検討手法は十分な精度を有することが分かった。

キーワード：鉄筋コンクリート造，柱，引張軸力，せん断挙動，トラス理論

1. はじめに

鉄筋コンクリート造柱部材のせん断挙動（せん断力～せん断変形関係）は複雑であり、いまだ不明な点が多いが、圧縮軸力下のせん断挙動に関する研究は行われており、精度の良い算定法も提案されている。これに対し、引張軸力下のせん断挙動に関する研究はほとんどない。しかし、高層のラーメン架構においては、低層部の側柱は地震時に大きな引張力を受け、主筋量が多い場合には、せん断破壊に至る可能性もある。そこで、引張軸力下のせん断挙動に関する研究を行った。せん断挙動を算定するにあたって、せん断終局強度とせん断ひび割れ後の剛性を定める必要がある。せん断終局強度に関しては、中尾の提案式がベースのせん断終局強度算定法（検討手法）を用いる。せん断ひび割れ後の剛性の算定に関しては、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」⁵⁾（以下、耐震性能評価指針と称す）に示された手法を引張軸力下の柱に拡張することにした。本報では、その検討結果を報告する。

2. せん断終局強度（中尾式）の概要

中尾式のせん断抵抗機構として、図-1 に示すトラス機構を仮定する。これは、コンクリート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。鉛直バネは主筋、水平バネはせん断補強筋と耐震壁の側柱に対応する部位の曲げ抵抗により形成される。そして、斜め圧縮バネと水平引張バネのいずれかが強度に達した時を柱・梁のせん断終局強度としている。詳細については、既報^{1),2),3)}を参照願いたい。中尾式によるせん断終局強度は式(1)～(15)で表される。

$$Q_{su} = \max \{ \min \{ Q_{cc}, Q_{wy} \}, Q_{cr} \} \quad (1)$$

式(7)中、 Q_{cc} はコンクリート斜め圧縮バネの強度で決定されるせん断終局強度であり、式(1)で表される。

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

式(2)中、 v はコンクリートの圧縮強度の有効係数、 D_a は柱・梁の有効長さ、 θ は主圧縮方向角度（縦軸より反時計回り）であり、その算定方法は後述する。

図-1 で示した柱・梁端部の有効長さ（ D_a ）は、式(3)で求める。 D は部材せいである。

$$D_a = D - h_a \tan \theta \quad (3)$$

式(9)中、 h_a は圧縮ストラット最下端と最上端の柱・梁端部からの距離であり、式(4)より求められる。これらの基本的な算出方法は、既報²⁾を参照願いたい。

$$h_a = \frac{K_2 \cos \theta \sin^3 \theta}{2K_x} \leq \frac{L_s}{2.7} \quad (4)$$

式(4)中、 L_s は柱・梁の仮想せん断破壊領域であり、その算出方法は、後述する。 h_a に関しては、既報^{3),4)}と同様に、制限を設けている。式(4)中、 K_2 は補正係数を乗じたコンクリートの圧縮方向のパネ剛性であり、式(5)で算定する。

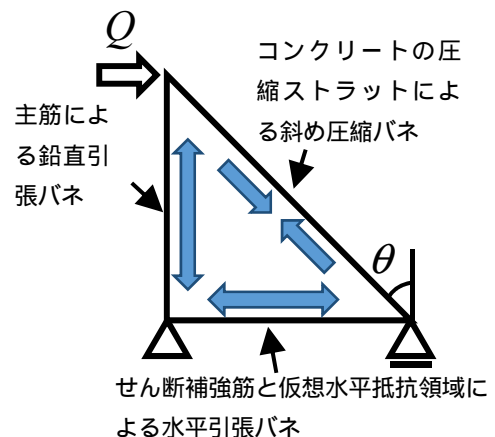


図-1 トラス抵抗機構

*1 近畿大学大学院 産業理工学研究科 (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)

$$K_2 = 0.168 \sigma_B^{0.38} E_c \frac{1}{0.01 \sigma_B + 0.8} \quad (5)$$

式(5)中、 E_c はコンクリートのヤング係数である。

Q_{wy} はせん断補強筋が降伏する時のせん断強度であり、式(6)で算定する。

$$Q_{wy} = \frac{\sigma_{wy} K_x}{E_{ws} \tan \theta} bD \quad (6)$$

式(6)中、 E_{ws} はせん断補強筋のヤング係数、 K_x は水平方向の単位面積当りの平均バネ剛性である。

ここで、主圧縮方向角度()の算定方法を式(7)に示す。

$$\left(\frac{1}{K_x} - \frac{1}{K_y} \right) \cos^4 \theta - 2 \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_x} \right) \cos^2 \theta + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_x} = 0 \quad (7)$$

式(7)中、 K_y は鉛直方向の単位面積当りの平均バネ剛性、 K_x は水平方向の単位面積当りの平均バネ剛性であり、それぞれ式(8)、(9)で算定する。

$$K_y = p_g E_{ts} \quad (8)$$

$$K_x = K_{fv} + \frac{1}{\frac{1}{p_w E_{ws}} + \frac{1}{K_{fh}}} \quad (9)$$

式(9)中、 K_{fh} は断面幅方向の拘束効果による水平バネ、 K_{fv} は部材長方向の拘束効果による水平バネであり、それぞれ式(10)、(11)で算出する。

$$K_{fh} = \frac{360 E_c I_{ch} (D - \alpha_h D)}{L_s b_s^4} \quad (10)$$

$$K_{fv} = \frac{360 E_c I_{cv} (D - \alpha_v D)}{b L_s^4} \quad (11)$$

式(11)中 b_s は中子筋の本数を考慮した主筋中心間距離、 I_{ch} は断面幅方向の拘束領域の断面二次モーメントであり、 α_h は断面幅方向の拘束領域係数である。 I_{ch} 、 α_h はそれぞれ式(12)、(13)で算定する。

$$I_{ch} = \frac{L_s (\alpha_h D)^3}{12} \quad (12)$$

$$\alpha_h = 0.1792 - 0.00233 (D/b_s) \leq 0.2 \quad (13)$$

式(11)中の I_{cv} は部材長方向の拘束領域の断面二次モーメント、 α_v は部材長方向の拘束領域係数であり、それぞれ式(14)、(15)で算定する。

$$I_{cv} = \frac{b (\alpha_v D)^3}{12} \quad (14)$$

$$\alpha_v = 0.2003 - 0.00372 (D/L_s) \leq 0.2 \quad (15)$$

3. せん断終局強度(中尾式)の修正(検討手法)

中尾式は軸力の影響を考慮していない。しかし、引張軸力の影響を受け、引張側の圧縮ストラット内の圧縮応力度の進展が遅れる可能性が高く、その場合には、圧縮ストラット内のコンクリートの剛性は圧縮軸力下に比べて高いのではないかと考えた。そこで、検討手法では、圧縮ストラットのパネ剛性をコンクリートのヤング係数とすることにした。

$$K_2 = E_c \quad (16)$$

4. 検討対象

4.1 FEM 解析

引張軸力下の柱部材のせん断挙動算定法に関する研究はほとんどなく、精度検証が十分に行えないため、昨年度のせん断終局強度算定法の精度検証を行う際に用いた FEM 解析のパラメトリック解析の結果を用いることにした。FEM 解析には、「FINAL」を用いた。まず、吉田らの実験結果⁶⁾のシミュレーション解析を行った。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。コンクリートは六面体要素とし、主筋及びせん断補強筋は線材要素としてモデル化した。コンクリートの圧縮応力度～ひずみ度曲線は修正 Ahmad モデル⁷⁾、テンションステイフニング特性は出雲らのモデル⁸⁾($C=1.0$)、圧縮強度到達後のひずみ軟化域曲線は修正 Ahmad モデルとした。主筋とコンクリートの間には、物理的な大きさを持たない接合要素を配置し、付着劣化によるすべり

表-1 パラメトリック解析の諸元

解析ケース	M/QD	pg	pw	N/Ag	備考
1	1	2.26	0.43	0.0	
2				108.8	
3				217.0	A3試験体
4				325.8	
5				434.1	
6			0.0		
7			108.8		
8			217.0		
9			325.8		
10			434.1		
11			0.0		
12			108.8		
13			217.0		
14			325.8		
15			434.1		
16			0.0		
17			48.1		
18			96.0		
19			144.2		
20			192.1		
21			0.0		
22			27.2		
23			54.4		
24			81.6		
25			108.7		
26			0.0		
27			108.8		
28			217.0		
29			325.8		
30			434.1		

をモデル化した。付着応力～すべり関係は Elmorsri らのモデル⁹⁾とした。コンクリートの圧縮破壊条件モデルは Ottosen の4パラメータモデル(畑中らの係数)とした。ひび割れ後の圧縮強度と圧縮強度時のひずみ度を長沼の提案式¹⁰⁾によって低減させた。ひび割れ面のせん断伝達特性については、「2.2 昨年度からの変更点」に示す。最上面の節点は鉛直方向のみを従属させ、下スタブと平行を維持し、底面の節点はすべて固定とした。上記の解析仮定を用いてパラメトリック解析を行った。パラメトリック解析の諸元を表-1に示す。パラメトリック解析では、主筋の降伏は見られなかった。

4.2 昨年度からの変更点

昨年度はひび割れ面のせん断伝達特性を Al-Mahaidi モデル¹¹⁾で検証を行ったが、シミュレーション解析の結果、最大耐力は実験結果と対応したが、荷重上昇域において

はあまり対応しなかった。今回、同特性を長沼モデルに変更し、シミュレーション解析を行った。その結果を図-2に示す。長沼モデルを用いた結果は、荷重上昇域においても実験結果と良好に対応することが分かった。この

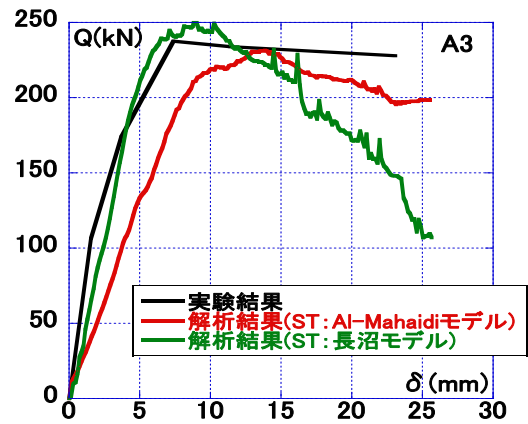


図-2 シミュレーション解析結果

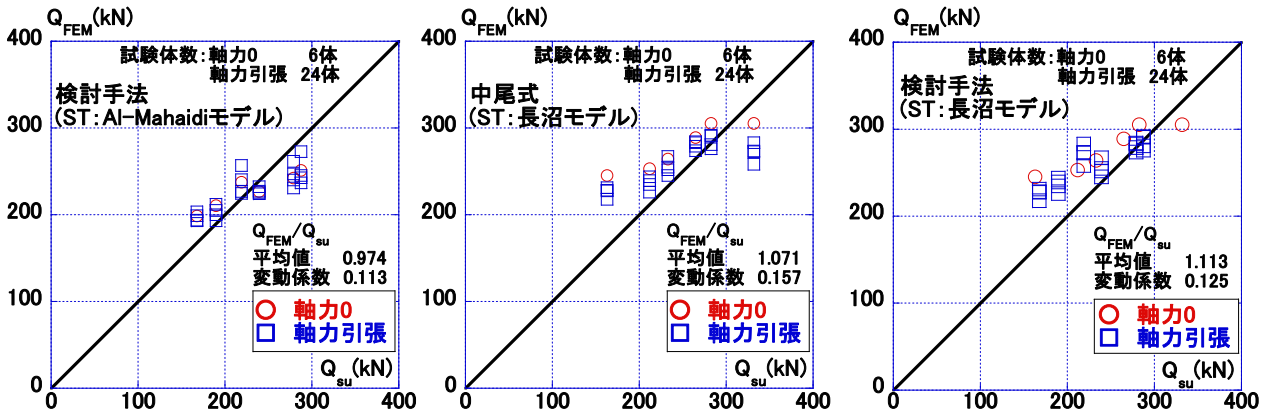


図-3 せん断終局強度算定法の精度検証

* ST : ひび割れ面のせん断伝達特性

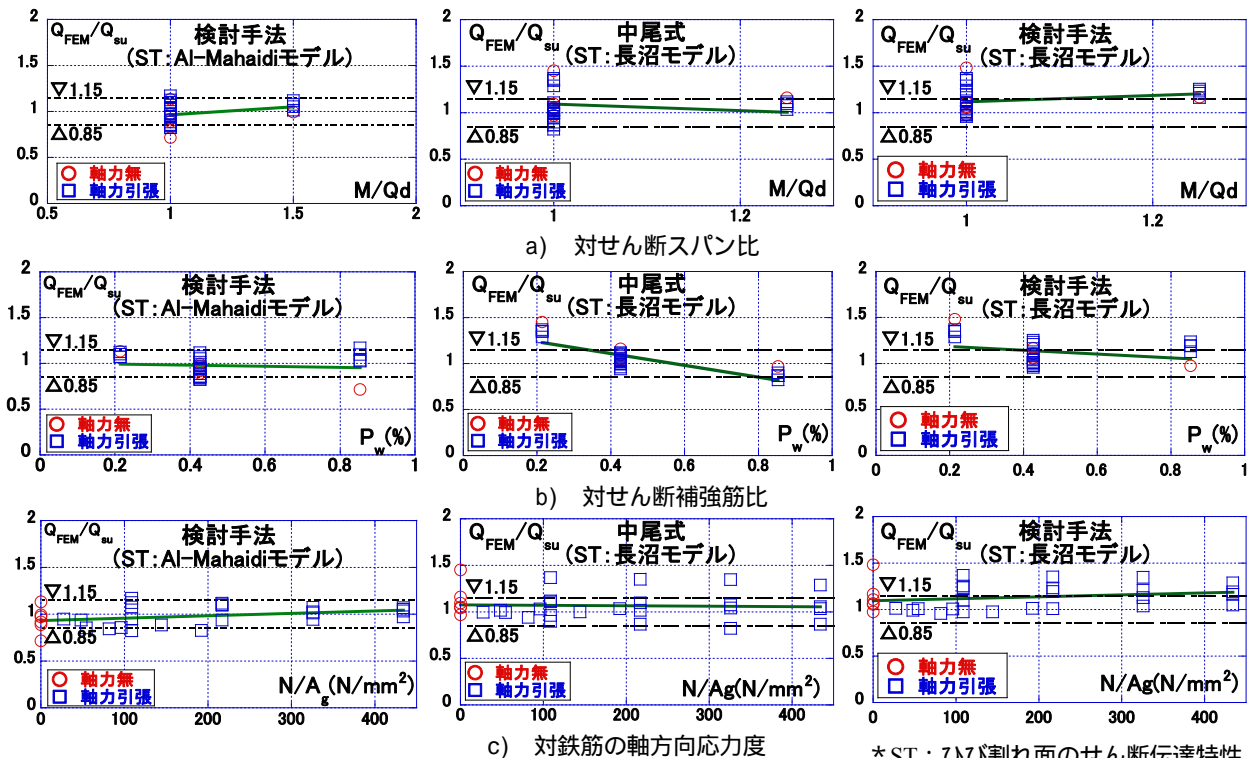


図-4 せん断終局強度算定法の因子別検証

* ST : ひび割れ面のせん断伝達特性

結果より、長沼モデルを用いた FEM 解析の値を真の値として今後はひび割れ後のせん断伝達特性に長沼モデルを用いて、更なる検証を行うこととした。そのため、ひび割れ面のせん断伝達特性に長沼モデルを用いて、再度パラメトリック解析を行った。

長沼モデルを用いた FEM 解析の結果を用いて再度検討手法の精度検証を行った結果を示す(図-3)。また、比較用としてひび割れ後のせん断伝達特性に Al-Mahaidi モデルを用いた場合と中尾の提案式の精度検証結果も示す。縦軸は FEM 解析の最大耐力、横軸は計算によるせん断終局強度である。Al-Mahaidi モデルを用いた場合よりも、計算結果が FEM 解析結果を上回るものが少なくなった。中尾の提案式では一部計算結果が FEM 解析結果を大きく上回るものが見られるが、検討手法では改善されていた。また、因子別検証の結果を図-4 に示す。先ほどと同

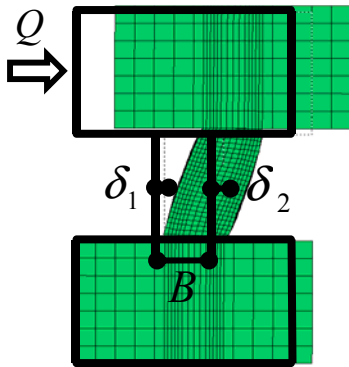


図-5 FEM 解析の変形モード

様に、比較用に Al-Mahaidi モデルを用いた場合と中尾の提案式の結果も示す。縦軸は FEM の最大耐力を検討手法によるせん断終局強度で除したものを、横軸は構成因子である。その結果、検討手法は中尾の提案式に比べ回帰曲線の傾きが小さくなり、計算精度が良くなったことが分かった。

5. せん断挙動(せん断応力度～せん断ひずみ度関係)の検討手法

5.1 水平方向のバネ剛性の検証

せん断挙動算定法の検討をするにあたって、まずは水平方向のバネ剛性の検証を行った。せん断ひび割れが発生することにより柱は水平方向に膨らむ。その挙動をせん断ひび割れ点とせん断終局強度点の2折れ線型で表し、検証を行った。図-5にFEM解析の変形モード例を示す。FEM解析の水平方向のひずみ度は、柱の右縁の変位 δ_2 と左縁の変位 δ_1 の差を柱幅 B で除し算出した(式(17))。これは柱の中央の節点の水平ひずみ度と内法の全ての節点の平均値を求め、検討手法の計算結果と比較を行った。

$$\varepsilon = \frac{\delta_2 - \delta_1}{B} \quad (17)$$

検討手法による水平方向のひずみ度は、式(2)、式(3)によって求められる。

$$\sigma_x = \tau \times \tan \theta \quad (18)$$

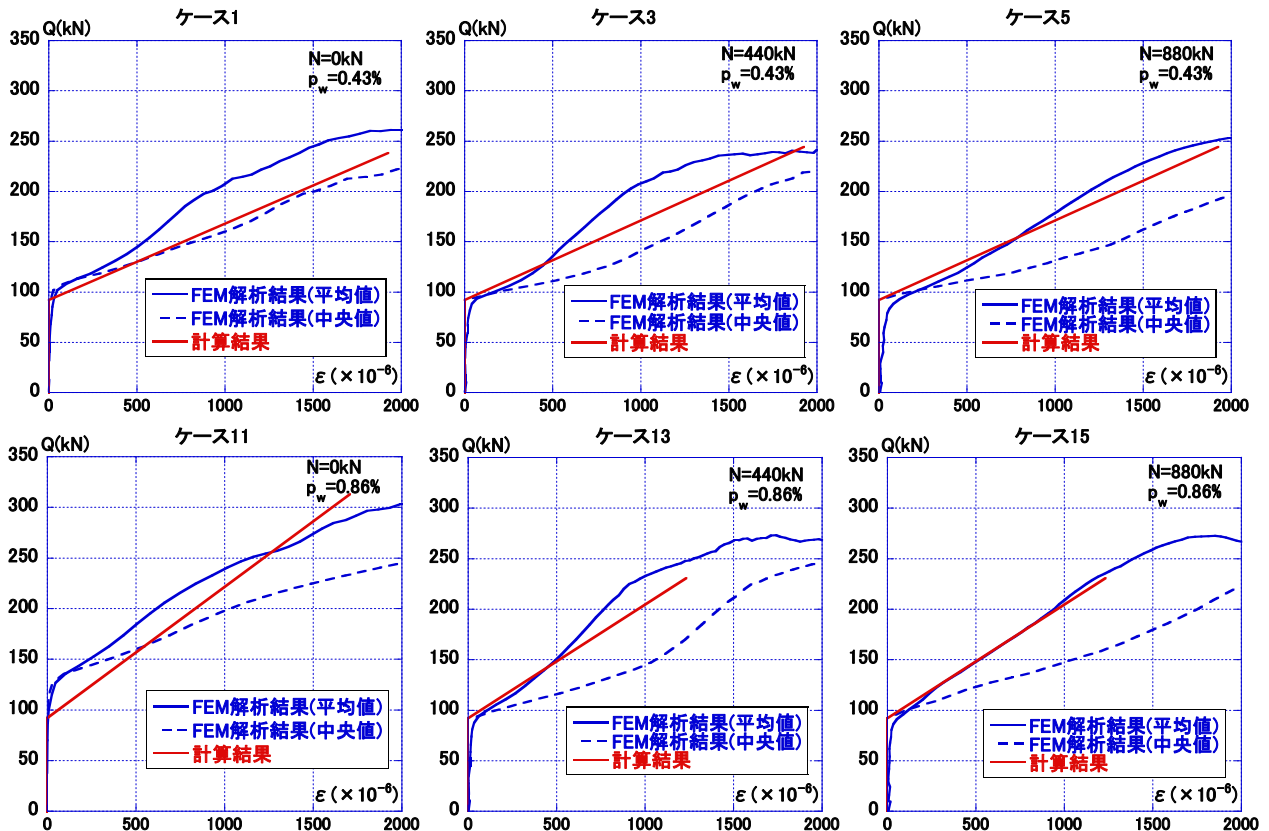


図-6 水平方向のバネ剛性の検証結果

$$\varepsilon_x = \sigma_x / K_x \quad (19)$$

式(18)中の σ_x 、式(19)中の K_x はせん断終局強度算定法の検討手法で用いたものと同じである。引張軸力によって水平ひび割れが生じており、水平ひび割れ後の軸力は主筋が伝達し、新たに発生するせん断ひび割れには引張軸力は影響していないと仮定した。せん断ひび割れ強度式は後項に示した式(20)である。

その検証結果を図-6に示す。図-6の縦軸はせん断力、横軸は水平方向のひずみ度である。この結果、計算値はFEM解析の平均値と良好に対応することが分かった。

5.2 せん断挙動算定法

続いて、せん断挙動（せん断応力度～せん断ひずみ度関係）算定法の検討を行った。検討手法は、基本的に耐震性能評価指針に記された耐震壁の算定法に基づいてい

る。耐震性能評価指針に記されている手法の算定モデルを図-7に示す。この手法は、せん断ひび割れ点とせん断終局強度点の2折れ線型で表されている。第1折れ点は、せん断ひび割れ点である。せん断ひび割れ強度は、式(20)を用いて求める。

$$Q_{scr} = \left(\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0} \right) \cdot b \cdot D / 1.5 \quad (20)$$

上式中、 σ_T はコンクリートの引張強度(= $0.33 \sqrt{\sigma_B}$)、 σ_0 は軸方向応力度（圧縮を正）である。

終局点は、せん断終局強度点である。せん断終局強度時のせん断ひずみ度(γ_u)はトラス剛性(G_{trs} ；式(21))を用いて、式(22)で算定する。この際、圧縮の軸方向力により、せん断ひずみ度の進展が遅れる挙動をトラス剛性の起点を軸方向応力度分(γ_0)左にシフトさせることにより表現している。

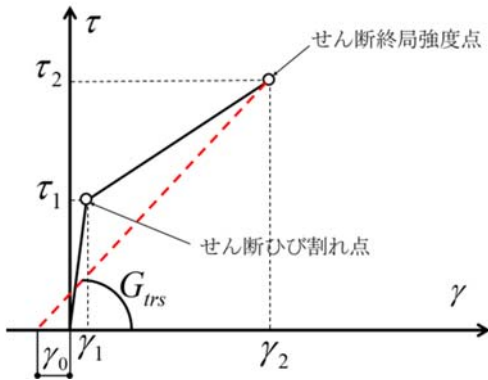


図-7 耐震性能評価指針の算定モデル

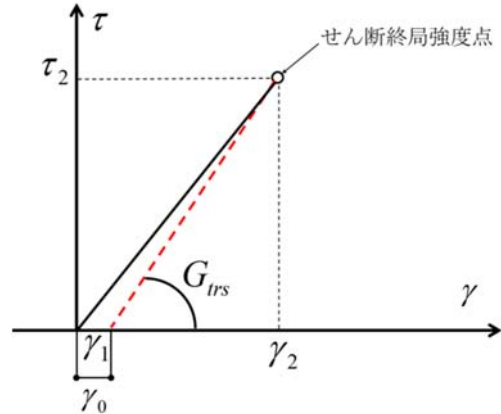


図-8 引張軸力下での算定モデル

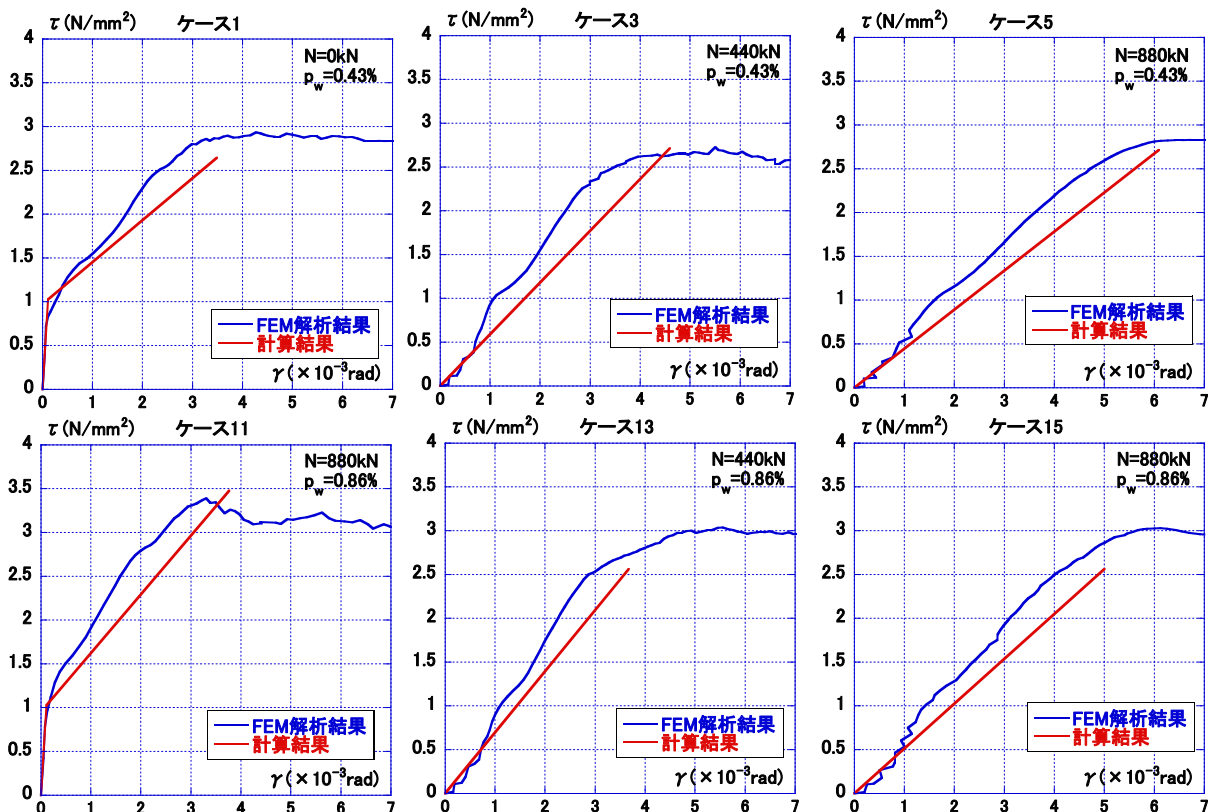


図-9 せん断応力度～せん断ひずみ度関係の精度検証

$$G_{trsl} = 1 / \left[\frac{1}{K_2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta} + \tan^2 \theta / K_x + 1 / (K_y \cdot \tan^2 \theta) \right] \quad (21)$$

$${}_s \gamma_u = {}_s \tau_u / G_{trsl} - \gamma_0 \quad (22)$$

$$\gamma_0 = \sigma_0 / (K_y \tan \theta) \quad (23)$$

上式中、 ${}_s \tau_u$ はせん断終局強度時せん断応力度である。 K_2 、 K_y はせん断終局強度算定法の検討手法で用いたものである。

この手法は主に圧縮軸力下での挙動を想定しているため、引張軸力の影響を考慮していない。そこで、この手法を引張軸力下の柱部材に拡張した。この算定モデルを図-8に示す。ひび割れ後の剛性等の算定方法については基本的に上記の手法と同じであるが、引張の軸方向力によって、せん断ひずみ度の進展が進む可能性がある。そのため、せん断終局強度時のせん断ひずみ度を算定する際、トラス剛性の起点を軸方向応力度分右にシフトさせて算定を行った。また、FEM解析の結果、引張軸力によって柱部材にひび割れが生じると、明確なせん断ひび割れ点が現れないことが分かった。そのため、せん断ひび割れ点を無視し、原点とせん断終局強度点を結び、FEM解析との比較を行った。その結果を図-9に示す。縦軸はせん断応力度、横軸はせん断ひずみ度である。この結果から、軸力が0kNでせん断ひび割れ点が現れている場合も、引張軸力が載荷されている場合も、計算結果はFEM解析結果と良好に対応していることが分かった。FEM解析ではせん断力～水平方向のひずみ度関係では明確なせん断ひび割れ点を示したが、せん断応力度～せん断ひずみ度関係ではせん断ひび割れ点は確認できなかった。これは、せん断ひび割れ発生時において、主筋が鉛直方向引張力によって大きく伸びていることに起因していると思われるが、今後詳細に検討したい。

6. まとめ

引張軸力下の鉄筋コンクリート造柱のせん断挙動算定法について検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 昨年度よりも精度の良いFEM解析を用いて、パラメトリック解析を行った結果、検討手法(中尾の提案式のコンクリート斜め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)によって算定したせん断終局強度は解析の最大耐力と良好に対応することが確認でき、検討手法は十分な算定精度を有していることが分かった。
- 2) せん断挙動算定法の検討手法を日本建築学会の耐震性能評価指針の耐震壁の項に記された手法に準じて考案した。これをFEMによるパラメトリック

解析結果に適用した結果、検討手法によるせん断挙動は解析結果と良好に対応することが確認できた。

今後、FEM解析のせん断応力度～せん断ひずみ度関係で明確なせん断ひび割れ点が得られなかった等の不明事項の解明や、計算精度の向上を図っていきたい。

7. 参考文献

- 1) 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, コンクリート工学会年次論文集, vol.40, No.2, 2018.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004
- 6) 吉田格英, 高橋裕幸, 北山和宏, 西川孝夫: 引張り軸力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第1995号, pp.401-402, 1995.7
- 7) 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
- 8) 出雲淳一, 他: 内面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
- 9) Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K.: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000.
- 10) 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
- 11) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Member, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan.1979
- 12) 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