

論文 鉄筋コンクリート造無開口耐震壁のせん断変形成分の実用的算定法に関する研究

津田 和明^{*1}, 萩尾 浩也^{*1}

要旨：鉄筋コンクリート造無開口耐震壁のせん断力～せん断ひずみ度関係の算定法に関して、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」に示された手法を用いてパラメトリックスタディーを行い、その変動傾向を確認した上で、ほぼ同様の精度を有する簡略手法を導いた。この手法には、せん断変形成分に大きな影響を及ぼす水平方向抵抗バネ剛性を考慮している。この簡略手法を既往の1層と連層の耐震壁実験結果に適用した結果、せん断ひびわれ後のせん断剛性は計算結果と実験結果で良好に対応することが分かった。ただし、連層耐震壁に関しては、検証試験体が少なく、今後さらなる検討を要する。

キーワード：耐震壁、せん断変形、せん断剛性低下率、FEM 解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造耐震壁は、せん断変形成分の弾塑性挙動が卓越する場合があります、その変形特性の評価は複雑となる。このせん断変形成分の算定法に関しては、既往研究において多々提案されているが、その大半は限られた実験結果に基づくものであり、汎用性に関してはやや疑問が残る。その中で、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」¹⁾（以降、性能評価指針と呼ぶ）に示された手法は、トラス剛性を用い比較的理論的にアプローチしている。この手法は、比較的良好な精度を有するものの、複雑であり、実務に適用するに当たっては簡略化が望まれる。そこで、この手法によるパラメトリックスタディーを行い、せん断変形成分に大きな影響を及ぼす因子を特定した上で、算定手法の簡略化を試みることにした。

2. 性能評価指針によるパラメトリックスタディー

2.1 性能評価指針の概要

ここでは、性能評価指針のせん断力～せん断変形関係の算定手法の概要を示す。

性能評価指針の基本的な概念を図-1に示す。性能評価指針では、せん断ひびわれ後の剛性はトラス剛性（側柱主筋と壁板縦筋による鉛直方向引張バネ、側柱と壁板横筋による水平方向引張バネおよびコンクリートの斜め方向圧縮バネより構成され、主圧縮方向角度は最小ポテンシャルエネルギーの原理に従って算定する）により求める。この際、軸方向応力度の影響を考慮している（軸力が圧縮の場合には、せん断強度時せん断ひずみ度を低減）。また、終局に至る前に曲げ降伏が生じる場合には、

曲げ降伏以降のせん断剛性をさらに低下させている。

2.2 簡略手法考案の基本方針

上述したように、性能評価指針では、曲げ降伏する場合にはせん断ひびわれ発生後のせん断剛性を低下させている。しかし、フレームの静的増分解析を行い、その結果に基づき、断面算定を行う場合や多質点系の動的解析を行う場合には、曲げ降伏後の挙動は、曲げ変形成分の剛性を低下することにより表現できると考えられることから、これらへの適用を目的とし、簡略手法では、せん断力～せん断変形関係をせん断ひびわれ点とせん断強度点から構成される2折れ線で表すことにした。この場合、限界変形点は、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」²⁾に示された手法等により、部材角で定めることになる。ただし、立体フレームにより動的解析を行う場合には、耐震壁の吸収エネルギーを妥当に評価するため、せん断剛性

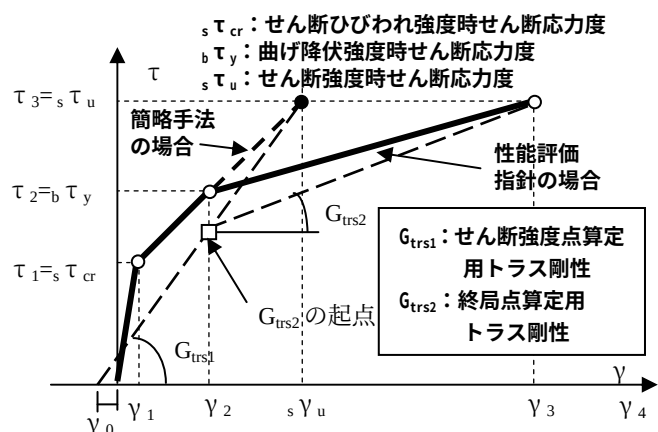


図-1 性能評価指針の耐震壁のせん断応力度～せん断ひずみ度関係の基本的概念

*1 大林組技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

も曲げ降伏以降低下させた方がよい³⁾。

2.3 パラメトリックスタディーの方針

パラメトリックスタディーのパラメーターは、以下のよう設定した。これにより、スタディーは384 ケースとなる。壁内法高さは、連層耐震壁を想定し、上限を12000mmとした。また、側柱の形状と鉄筋量は全ケース共通とした。

(1)形状 (1 層 1 スパン耐震壁)

スパン長 (側柱芯々間距離): $\ell_w=6000\text{mm}$

壁内法高さ: $h_0=3000, 6000, 9000, 12000\text{mm}$

壁厚: $t_w=200\text{mm}$

側柱せい, 幅: $D_c=B_c=200, 400, 600, 800\text{mm}$

加力点高さ: $h=h_0$

(2)鉄筋量

壁板 (縦横筋): $p_{wv}=p_{wh}=0.5, 1.0\%$

側柱 (主筋: 共通): $D_c=800\text{mm}$ で $p_{cg}=2.5\%$

側柱 (帯筋: 共通): $D_c=800\text{mm}$ で $p_{cw}=0.5\%$

(3)材料

コンクリート: 圧縮強度: $\sigma_B=30, 60, 90\text{N/mm}^2$

: 引張強度: $\sigma_t=0.33\sqrt{\sigma_B}$

: ヤング係数: E_c : RC 規準式⁴⁾

鉄筋 (全て): 降伏強度: $\sigma_y=400\text{N/mm}^2$

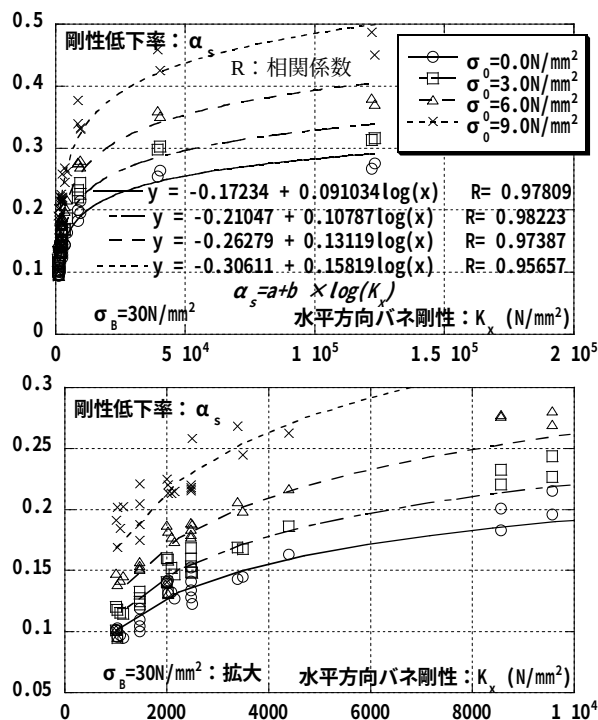
: ヤング係数: $E_s=2.0\times 10^5\text{N/mm}^2$

(4)軸方向応力度 (全断面に対して)

: $\sigma_0=0.0, 3.0, 6.0, 9.0\text{N/mm}^2$

2.4 パラメトリックスタディーの結果: 簡略手法の考案

せん断剛性低下率 (α_s : せん断強度時割線剛性/弾性剛性) とトラス剛性の水平方向バネ剛性 (K_x : 式(2)) の



関係をコンクリート強度毎に図-2 に示す。各図は、軸方向応力度に応じて記号を分けて示した。また、横軸の小さい範囲も拡大して示した。最初に水平方向バネ剛性に着目したのは、せん断強度への影響因子として壁板横筋とアーチ機構の占める割合が大きいと判断したことによる。性能評価指針の水平方向バネ剛性は、側柱による水平抵抗を考慮しており、これがせん断強度算定式のアーチ機構に対応する (詳細は性能評価指針を参照)。

図-2 を見ると、せん断剛性低下率 (α_s) には、水平方向バネ剛性 (K_x), 軸方向応力度 (σ_0) およびコンク

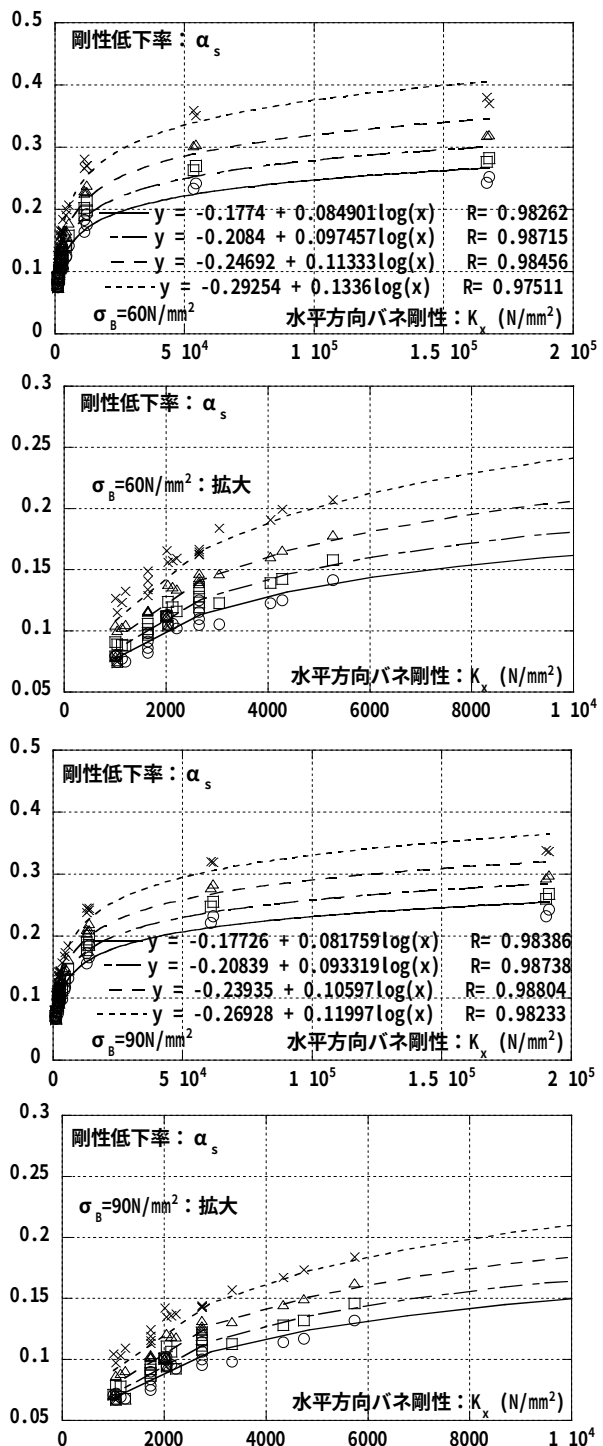


図-2 せん断剛性低下率～水平方向バネ剛性関係

リート圧縮強度 (σ_B) の影響が大きいことが分かる。そこで、これら因子を考慮した簡略手法を考案することにした。他の因子の影響は、比較的小さかった。

図-2 には、軸方向応力度毎に、せん断剛性低下率と水平方向バネ剛性の関係の近似式 ($\log$ は常用対数) を示した。この近似式は、基本的に式(1)で表せる。さらに、式(1)の係数 a , b と軸方向応力度の関係を求めると、図-3 となる。図はコンクリート圧縮強度で記号を分け、それぞれの近似式を示した。やはり、コンクリート圧縮強度に応じて、傾向が異なり、その差は軸方向応力度の増大に従って大きくなることから、ここでは、軸方向応力度ゼロの時は、コンクリート圧縮強度に因らず同じ係数となると仮定し、係数 a , b を定めるための係数 c , d とコンクリート圧縮強度の関係を求めることにした。そ

の結果を図-3 に示す。図中、近似式も示した。

上述の検討結果をまとめると、せん断剛性低下率の算定式は、式(1)~(6)となる。

$$\alpha_s = a + b \log(K_x) \quad (1)$$

$$K_x = \frac{360 E_c I_c \ell_w}{t_w h_0^4} + p_{wh} E_s \quad (2)$$

$$a = -0.174 + c \sigma_0 \quad (3)$$

$$b = 0.088 + d \sigma_0 \quad (4)$$

$$c = -0.017 + 7.0 \times 10^{-5} \sigma_B \quad (5)$$

$$d = 0.010 - 7.0 \times 10^{-5} \sigma_B \quad (6)$$

上式の記号は SI 単位系である。 σ_B , E_c はコンクリー

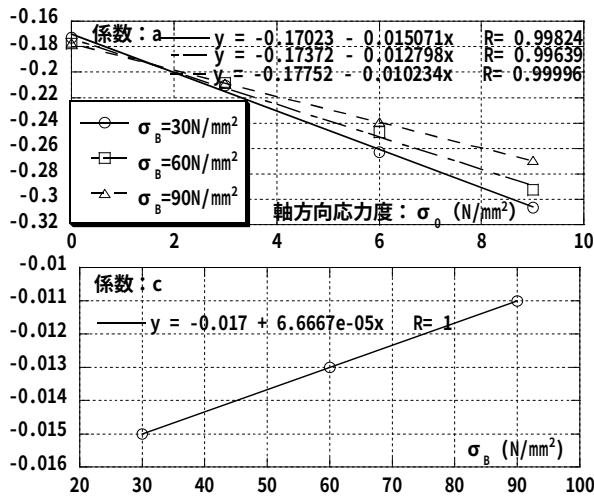


図-3 係数 a , b , c , d の検討

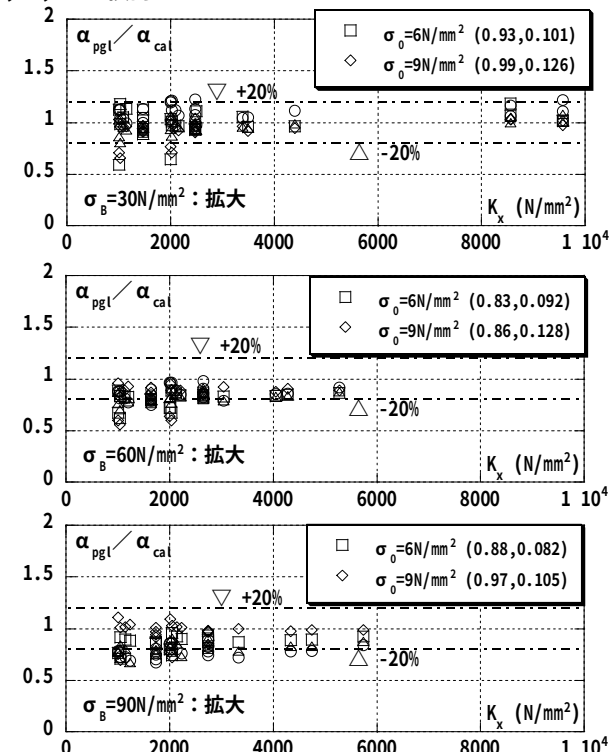
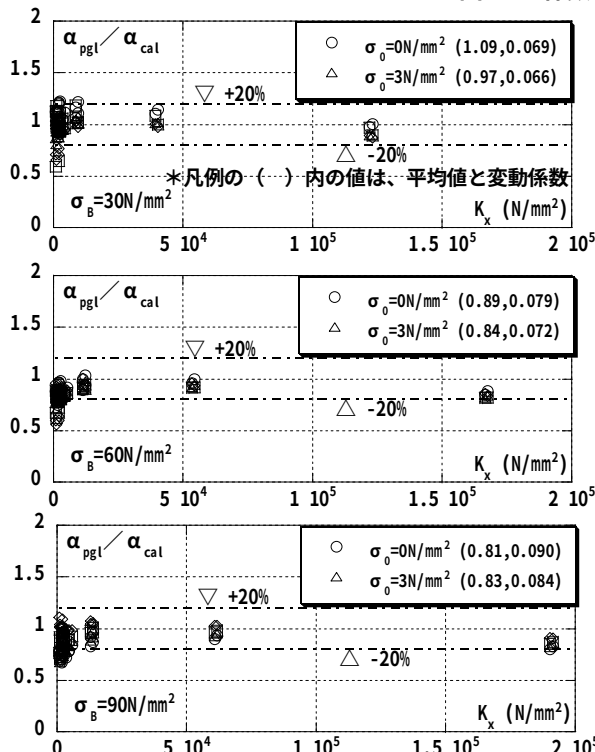


図-4 せん断剛性低下率算定法の精度 (対パラメトリックスタディー)

トの圧縮強度（正値）とヤング係数、 I_c は側柱の断面 2 次モーメント、 ℓ_w は側柱芯々間距離、 t_w は壁厚、 h_0 は壁板内法高さ、 p_{wh} 、 E_s は壁板横筋の鉄筋比とヤング係数、 σ_0 は全水平断面積に対する軸方向応力度（圧縮を正）である。

3. 簡略手法の精度

3.1 パラメトリックスタディーの結果に対して

せん断剛性低下率に関して、パラメトリックスタディーの結果と簡略手法による結果を比較した。その結果を図-4 に示す。図は、縦軸が性能評価指針によるパラメトリックスタディーのせん断剛性低下率を簡略手法のそれで除した値であり、横軸は水平方向バネ剛性である。図-2 と同様に、水平方向バネ剛性の小さい領域を拡大した場合も示した。

全般的には、軸方向応力度の増大に伴い、変動係数が大きくなる傾向を示したが、平均値は 0.81~1.09、変動係数の最大値は 0.126 であり、実用的には十分な精度であると言える。

3.2 既往実験結果（一層耐震壁）^{5)~7)}に対して

せん断剛性低下率を求める簡略手法を既往実験結果に適用し、せん断力～せん断ひずみ度関係を比較した。この際、せん断ひびわれ強度とその時のせん断ひずみ度、およびせん断強度は性能評価指針に従って求めた。その結果を図-5 に示す。対象とした既往実験結果は、論文中にせん断力～せん断変形関係が明示されているものである。ただし、側柱型がない試験体に関しては、せん断力～せん断ひずみ度関係に関する情報が得られなかったため、FEM 解析（使用プログラム：FINAL）の結果からせん断力～せん断ひずみ度関係を求めた。この解析の詳細は文献 8) を参照されたい。また、図中には、性能評価指針による結果（曲げ降伏が生じる場合は、その後の剛性と強度を低下させている）と RC 規準に掲載された菅野の提案式(7)による結果も併せて示した。

$$\beta = 0.46 p_{wh} \frac{\sigma_{wy}}{\sigma_B} + 0.14 \quad (7)$$

上式の β は、簡略手法のせん断剛性低下率 α_s と同じも

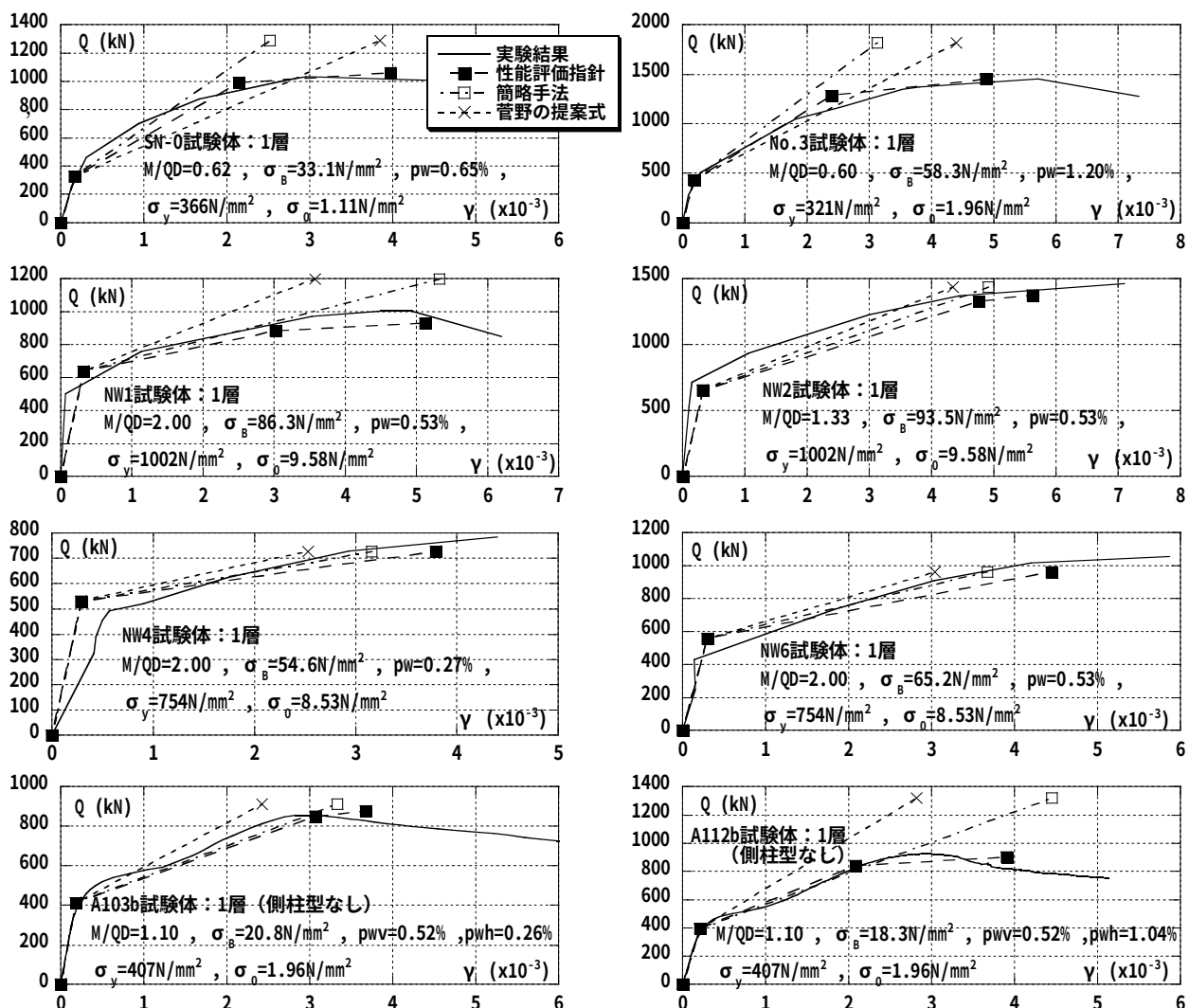


図-5 せん断力～せん断ひずみ度関係の比較（対既往 1 層耐震壁実験）

のであり、式中の σ_{wy} は壁板横筋の降伏強度である。この式の適用に当って、せん断ひびわれ強度点とせん断強度は、簡略手法と同様に性能評価指針により求めた。既往実験の試験体は、側柱幅／壁厚＝1.00～3.57、シアスパン比（側柱芯々間距離を用いた場合）＝0.6～2.0、コンクリート圧縮強度＝18.3～93.5N/mm²、壁板横筋比＝0.26～1.20%、壁板横筋強度＝321～1002 N/mm² であり、比較的広範囲に亘っている。

全般的には、簡略手法による第二せん断剛性（第一折れ点と第二折れ点を結んだ線の傾き）は実験結果（もしくは FEM 解析結果）と良好に対応しており、この簡略手法が十分な精度を有していることが分かる。

菅野の提案式は、簡略手法に比べてやや精度が低下する（特に側柱型が存在しない場合）ものの、ほぼ実験結果の第二せん断剛性を的確に表している。しかしながら、この式は実験式であることから、この式を設計に用いるに当たっては、十分にその適用範囲を検討することが必要と思われる。

また、性能評価指針は、全般的に実験結果と良好に対応しており、曲げ降伏する場合のせん断剛性がさらに低下する様子を良く再現できている。

3.3 既往実験結果（連層耐震壁）⁹⁾ に対して

今回の簡略手法を連層耐震壁に適用するに当たり、性能評価指針に準じ、中間梁主筋をせん断強度、せん断剛性低下率の算定に考慮することにした。各層のせん断強度算定に当たっては、計算対象層の脚部に対する外力の等価高さ位置（脚部の曲げモーメントが同じになる高さ）を壁板高さとして仮定し、性能評価指針に従って算定した。また、せん断剛性低下率の算定に用いる水平方向バネ剛性算定時の壁内法高さを、最下層は壁脚部から2層下部梁の中心位置までの距離、中間層はその層の上下の

梁の中心間距離、最上層はその下部梁の中心位置から上部梁下端までの距離とした。これは、最上層の上部梁以外の中間梁は損傷が大きく、側柱に対する固定度が低下すると仮定したことによる。上述した仮定条件を図-6に示す。

また、性能評価指針では、側柱による水平方向バネ剛性算定時において、連層耐震壁の場合は、最上層と最下層に対し側柱を一端固定、他端を水平変位自由とした梁に置換し、両端固定と仮定する1層耐震壁に比べ小さな係数を用いている（具体的には、式（2）の360を22.5に変更する）。さらには、中間層においては、側柱による水平方向バネ剛性の影響は小さいと判断し、無視している。これに関しては、後述するが、中間層と最下層および最上層の第二せん断剛性がほとんど同じであることが確認されたため、ここでは、中間層においても、側柱による水平方向バネ剛性を考慮することにした。また、

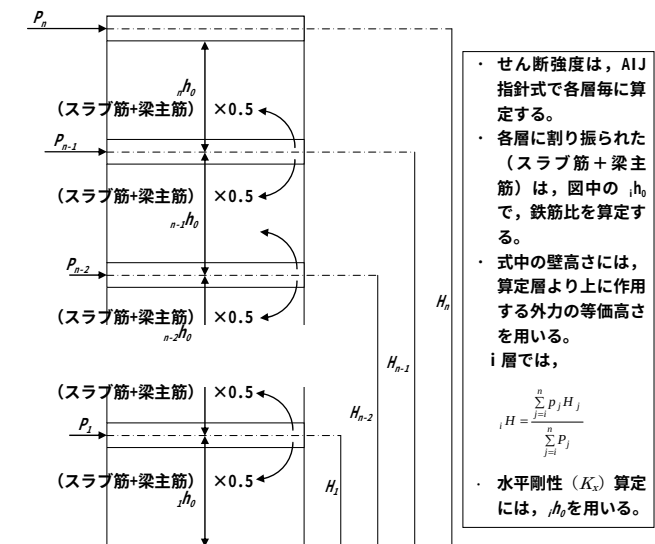


図-6 連層耐震壁を対象とした場合の計算仮定

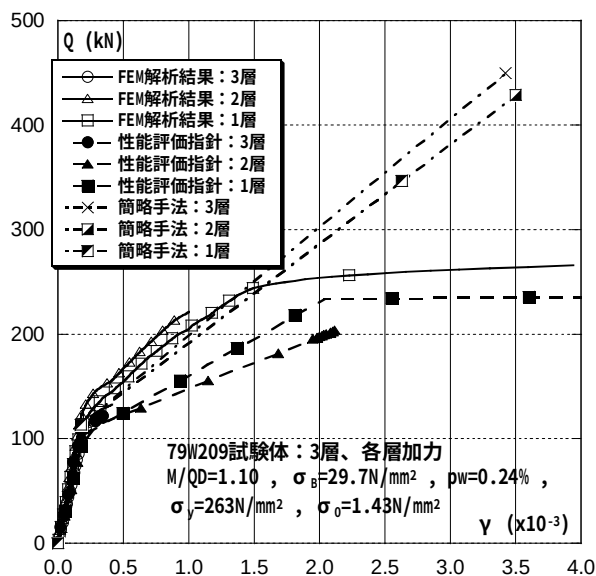
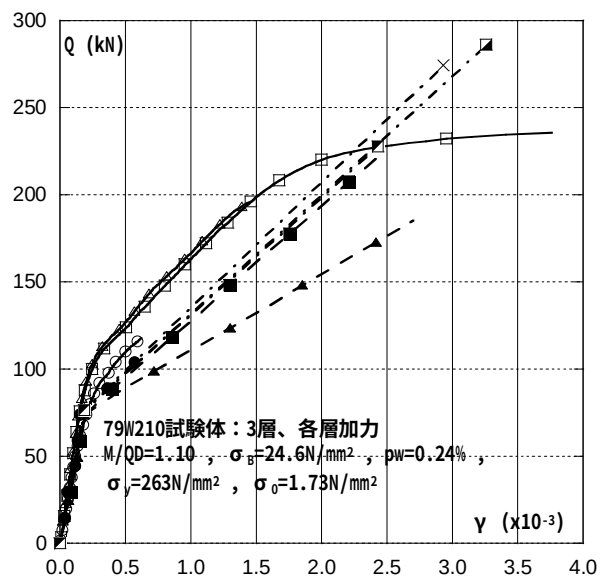


図-7 せん断力～せん断ひずみ度関係の比較（対既往連層耐震壁実験）



性能評価指針に準じ、せん断剛性低下率算定式における側柱による水平方向バネ剛性算定式は、連層耐震壁用の式を用いることにした(式(2)の係数を22.5とした)。既往実験結果(79W209 試験体:曲げ降伏後のせん断破壊, 79W210 試験体:曲げ降伏せずにせん断破壊)を対象として簡略手法より求めたせん断力~せん断ひずみ度関係をFEM解析結果と比較し、図-7に示す。FEM解析結果を用いたのは、論文中にせん断力~せん断ひずみ度関係が示されていなかったことによる。FEM解析に用いた仮定条件は文献8)に示した通常の場合の耐震壁用のものであり、FEM解析より得られた試験体頂部のせん断力~水平変位関係が実験結果と良好に対応することを確認した。また、図中には、性能評価指針による結果も示した。

図より、FEM解析による各層の第二せん断剛性は全てほぼ同じで、中間層では側柱による水平方向バネ剛性を無視する性能評価指針と異なる傾向を示した。また、一般的に性能評価指針による第二せん断剛性はFEM解析よりも小さい。しかし、最下層においては、曲げ降伏後にさらにせん断剛性が低下する様子を性能評価指針は良く再現できている。

一方、簡略手法による第二せん断剛性は、一般的にFEM解析結果とほぼ対応した。これは、せん断剛性低下率算定式における側柱による水平方向バネ剛性算定式を性能評価指針の連層耐震壁用の式を用いたことに起因している。また、曲げ降伏せずにせん断破壊した79W210試験体では、計算最大強度は実験の最大耐力と対応している。しかしながら、今回は2体の試験体を用いて検証しただけであり、今後、さらなる検討を要する。

4. まとめ

鉄筋コンクリート造無開口耐震壁のせん断力~せん断ひずみ度関係の簡略手法の考案を目的として、性能評価指針の手法を用いてパラメトリックスタディーを行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 性能評価指針の手法を用いたパラメトリックスタディーの結果から導いた簡略手法を1層耐震壁の既往実験結果に適用した結果、簡略手法は十分な精度を有していることが分かった。
- 2) RC規準に示された菅野のせん断剛性低下率に関する提案式は、今回の検討では実験結果とほぼ対応することを確認したが、これを設計に用いる場合には、提案式の適用範囲を十分に検討

する必要がある。

- 3) 簡略手法(せん断剛性低下率算定式における側柱による水平方向バネ剛性算定式を性能評価指針の連層耐震壁用の式を用いた)を連層耐震壁の既往実験結果に適用した結果、簡略手法によるせん断ひびわれ後のせん断剛性は、既往実験結果とほぼ対応した。しかしながら、今回は2体の試験体を用いて検証しただけであり、今後、さらなる検討を要する。
- 4) 簡略手法の適用範囲に関しては、基本的には性能評価指針と同等と考えているが、これに関しては、今後、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耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004.1
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8
- 3) 津田和明, 杉本訓祥, 江戸宏彰:鉄筋コンクリート造連層耐震壁の曲げ及びせん断ひびわれ幅の算定法:鉄筋コンクリート造連層耐震壁の性能評価手法に関する研究(その2), 日本建築学会構造系論文集, 第575号, pp.97~104, 2004.1
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.2
- 5) 前田安治・多賀 章・川崎清彦・斉藤芳人・加藤慎司:高強度コンクリートを用いた耐震壁の復元力特性に関する研究ー(その1)水平加力実験ー, 前田技術研究所報, Vol.27, pp.97-107, 1986
- 6) 小林 譲・渡部征男・井元勝慶・加藤朝朗・高見信嗣・大場政章:原子力発電所建物のRC有開口耐震壁の耐力評価(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.1129-1132, 1996
- 7) 松本和行・壁谷澤寿海:高強度鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形能力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2, pp.545-550, 1990
- 8) 津田和明:側柱型のない鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 32-2, pp.349-354, 2010
- 9) 佐藤稔雄・小野 新・安達 洋・白井伸明・中西三和:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1625-1626, 1980.9