

論文 鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱のせん断挙動に関する実験的研究

今泉 拓^{*1}・津田 和明^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱のせん断挙動(せん断力～せん断変形関係)は複雑であり,これに着目した研究は数少ない。そのため,両側袖壁付き柱のせん断挙動算定法は明確ではない。本研究では両側袖壁付き柱の実験と FEM 解析を行い,曲げ降伏しない場合のせん断破壊型両側袖壁付き柱の終局強度に至るまでのせん断挙動算定法の検討を行った。本報では,せん断終局強度を含むせん断挙動に関する現状の検討結果をまとめた。

キーワード：両側袖壁付き柱,せん断挙動,トラス剛性

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物には構造上や意匠上の都合により,柱に袖壁が取り付けられる場合があるため,袖壁付き柱の構造特性を把握することが構造設計上必要である。しかし,鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱のせん断挙動(せん断力～せん断変形関係)は複雑であり,これに着目した研究は数少ない。そのため,両側袖壁付き柱のせん断挙動算定法は明確ではない。このような背景を受け,本研究では両側袖壁付き柱の実験と FEM 解析を行い,曲げ降伏しない場合のせん断破壊型両側袖壁付き柱の終局強度に至るまでのせん断挙動算定法の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要及び材料特性

実験は,壁長さ,柱幅の差によるせん断挙動の違いを確認するために実施した。試験体諸元を表 - 1 に,試験体形状寸法,配筋状況を図 - 1 に示す。また,表 - 2 にコンクリート及び鉄筋の材料特性を示す。試験体は,両側に均等に壁を有する袖壁付き柱計 3 体である。

2.2 載荷計画

載荷状況を写真 - 1 に示す。軸力は 2 台の鉛直アクチュエーターで所定の値(全断面に対する軸力比 0.19 : コ

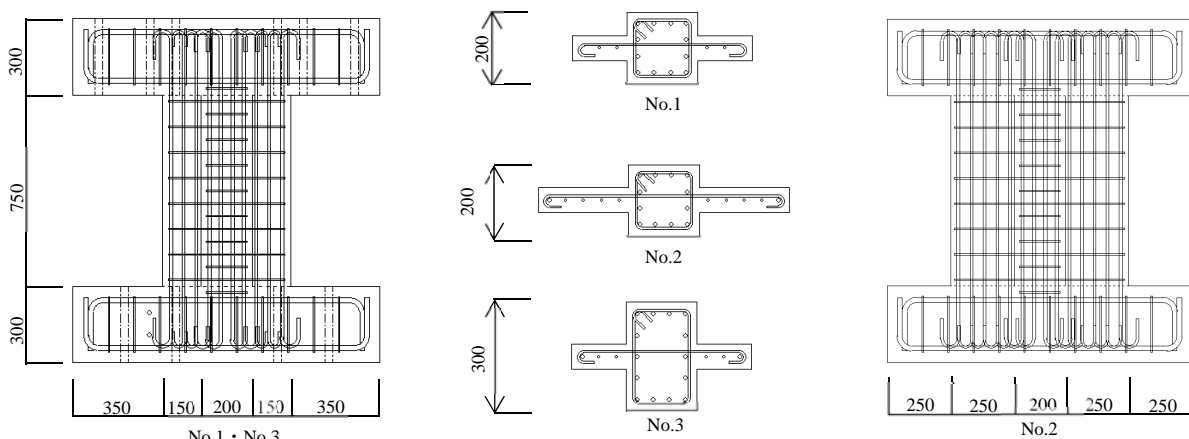


図 - 1 試験体寸法及び配筋状況

表 - 1 試験体一覧

| 試験体名 | 柱 | | | 袖壁 | | | | 軸力比 |
|------|-----------|--------|----------|------------------|-------------|-------|--------------|------|
| | B × D | 主筋 | 帯筋 | $t_w \times L_w$ | 縦筋 | 端部縦筋 | 横筋 | |
| No.1 | 200 × 200 | 12-D13 | 2-D6@100 | 70 × 150 | D6@50single | 1-D13 | D6@100single | 0.19 |
| No.2 | | | | 70 × 250 | | | | |
| No.3 | 300 × 200 | 14-D13 | 70 × 150 | | | | | |

*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)

表 - 2 材料特性

a) コンクリートの材料特性

| | |
|------------------------------|--|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²) |
| 39.2 | 2.85 |

b) 鉄筋の材料特性

| | | | |
|--|-------|-------|-------|
| 呼び径 | D6 | D10 | D13 |
| 降伏強度(N/mm ²) | 407 | 350 | 315 |
| 引張強度(N/mm ²) | 490 | 441 | 453 |
| ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²) | 2.13 | 1.906 | 1.709 |
| 伸び(%) | 12.50 | 24.1 | 25.5 |



写真 - 1 実験状況

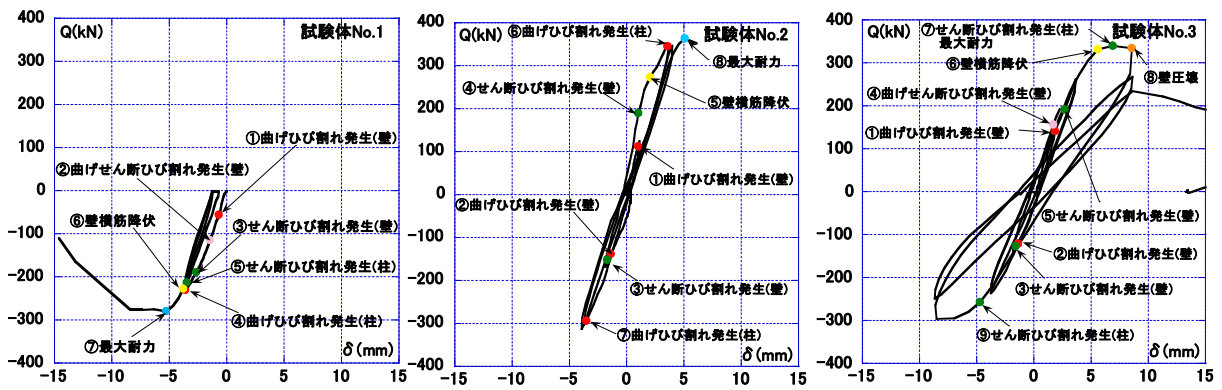


図 - 2 水平荷重 - 水平変形関係及び破壊経過

表 - 3 実験結果一覧

| 試験体名 | | 曲げひび割れ(壁) | | せん断ひび割れ(壁) | | 曲げひび割れ(柱) | | せん断ひび割れ(柱) | | 最大耐力 | |
|------|---|-----------|-------|------------|-------|-----------|------|------------|------|-------|------|
| | | Q(kN) | (mm) | Q(kN) | (mm) | Q(kN) | (mm) | Q(kN) | (mm) | Q(kN) | (mm) |
| No.1 | 正 | - | - | - | - | - | - | - | - | 280 | 5.30 |
| | 負 | 55.5 | 0.710 | 189.0 | 2.70 | 230 | 3.66 | 221 | 3.66 | | |
| No.2 | 正 | 112.5 | 0.990 | 190.0 | 1.030 | 346 | 3.54 | * | * | 364 | 5.07 |
| | 負 | 137.5 | 1.393 | 152.0 | 1.723 | 294 | 3.55 | - | - | | |
| No.3 | 正 | 141.5 | 1.840 | 192.0 | 2.68 | - | - | 306 | 4.70 | 341 | 6.88 |
| | 負 | 121.0 | 1.400 | 126.0 | 1.605 | - | - | 258 | 4.74 | | |

* : 正確な発生時期不明

ンクリート実圧縮強度に対して)となるように加え,上下スタブを平行に保ちながら水平力を正負交番で与えた。部材角R=1/400で1回,1/200,1/100で2回繰り返し,それまでに破壊に至らない場合は,正方向で片押しすることにした。変位は,加力梁下端と基礎上端の相対水平変位と袖壁両端面の相対鉛直変位を測定した。

3. 実験結果

図 - 2 に各試験体の水平荷重 - 水平変形関係,表 - 3 に実験結果一覧を示す。図中には主な事象を示した。試験体 No.1 は変位計の不具合により,正側載荷時の正確な値が計測できなかったため,負側のデータのみ示している。

3.1 破壊経過

各試験体とも 1/400 までに壁端部に曲げひび割れが発生し,1/200 までに壁部分にせん断ひび割れが発生した。その後,1/100 の載荷中に最大耐力に到達した。以下,試験体ごとの特徴を記す。

No.1: 最大耐力到達前に壁板中央の横筋が降伏した。最大耐力以降,部材角 1/100 時に柱部分に大きなせん断ひび割れが生じ,破壊に至った。

No.2: 最大耐力到達前に壁板中央の横筋が降伏した。損傷は試験体全域に生じた。

No.3: 最大耐力到達前に壁板横筋が降伏した。最大耐力以降,圧縮側壁板上端部のコンクリートが圧壊したが,

壁板縦筋の降伏は生じなかった。

4. せん断終局強度の提案手法の修正

以前に提案した両側袖壁付き柱のせん断終局強度算定法¹⁾の修正を行う。

提案手法のトラス抵抗機構を図-3に示す。これはコンクリート斜め圧縮バネ K_2 と壁板縦筋と柱主筋による鉛直引張バネ K_y と壁板横筋と仮想水平抵抗領域(耐震壁の側柱に対応する部位)の曲げ抵抗による水平引張バネ K_x により構成される。そして、斜め圧縮バネと水平引張バネの強度から求まるせん断力の小さい方と、せん断ひび割れ強度の大きい方を本手法でのせん断終局強度とする。修正項目は3点である。1点目は、水平方向バネ剛性に寄与する壁端部の拘束範囲である。これは、矩形断面耐震壁での検討結果を反映させたものである。2点目は、柱主筋の取り扱いである。今までは、実験結果と対応するよう柱主筋の寄与分を定めていたが、筆者らの耐震壁の手法²⁾に習い、柱主筋は全て考慮することにした。3点目は、柱の負担せん断力の考慮方法である。これまでは、壁部分のせん断終局強度時の柱の負担せん断力を算定するようにしていたが、これは複雑であることから、壁谷澤らの提案に準じ、柱のせん断終局強度を加算するように変更した。

4.1 拘束領域範囲の修正

これまで、両側袖壁付き柱はI型耐震壁と異なり、拘束領域の断面積が小さく、その部分のせん断変形の影響が大きいと判断し、せん断弾性剛性を考慮して、拘束領域のせいを wL_w としていた。 w は式(1)で表される。以下、式中の記号はSI単位系であり、応力はN、距離はmmである。

$$\alpha_w = 0.206 - 0.0372(L_w/h_0) \leq 0.2 \quad (1)$$

式(1)中、 h_0 は内法高さである。今回、矩形断面耐震壁の検討結果³⁾から、拘束領域のせいを壁厚以下に制限し

た。(図-4参照)

4.2 各バネ剛性の修正

袖壁付き柱は一般に、壁厚に対し、柱幅が大きいので、全主筋が全て寄与しないと考え、柱主筋による鉛直引張バネ剛性を暫定的に低減係数($=0.28$)により低減していた。しかし、I型耐震壁の手法では低減していないため、これを取りやめた。

水平引張バネ剛性は、壁板の柱部分は水平に伸びないと考え、式(2)のように修正した。式中の wK_f は部材長方向の拘束効果による水平バネであり、式(3)で求められる。

$$wK_x = \frac{L_w}{(L_w - D_c)} p_{wh} \cdot E_{hs} + wK_f \quad (2)$$

$$wK_f = \frac{360E_c \cdot I_w (L_w - \alpha_w L_w)}{t_w \cdot h_0^4} \quad (3)$$

式中の E_c はコンクリートのヤング係数、 I_w は壁板部分の仮想水平抵抗領域の断面二次モーメント、 p_{wh} と E_{hs} は

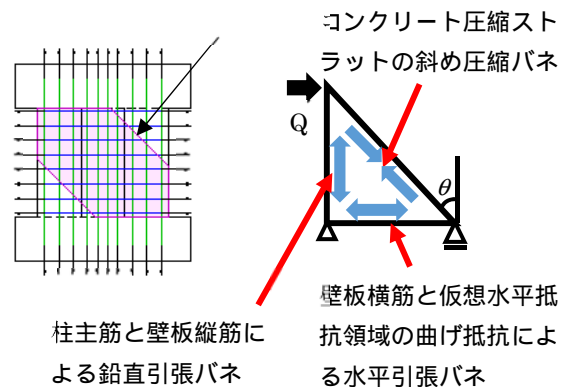


図-3 両側袖壁付き柱部材におけるトラス抵抗機構

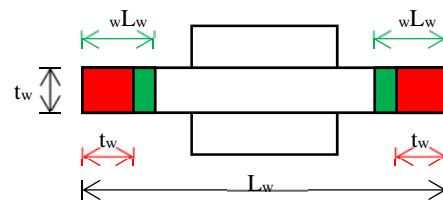
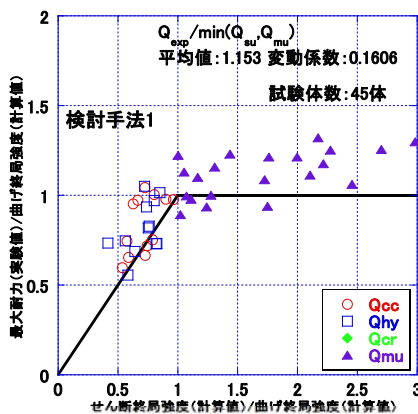
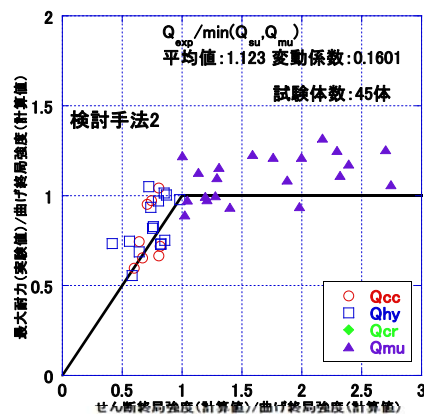


図-4 拘束領域の概念

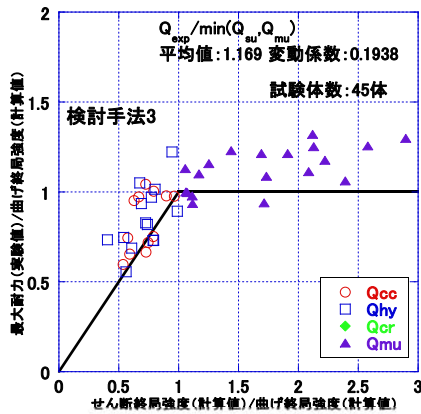


a) 水平引張バネ：式(2)使用
コンクリートの有効圧縮強度低減：有



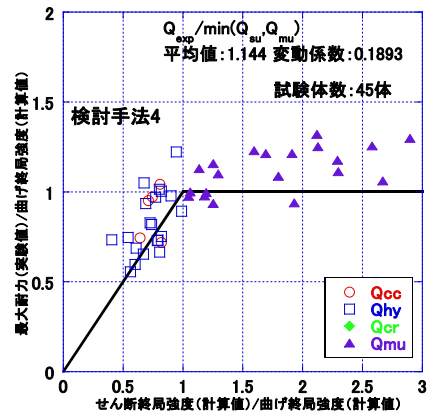
b) 水平引張バネ：式(2)使用
コンクリートの有効圧縮強度低減：無

図-5 せん断終局強度の検討手法の算定精度 1



c) 水平引張バネ：式(4)使用

コンクリートの有効圧縮強度低減：有



d) 水平引張バネ：式(4)使用

コンクリートの有効圧縮強度低減：無

図 - 6 せん断終局強度の検討手法の算定精度 2

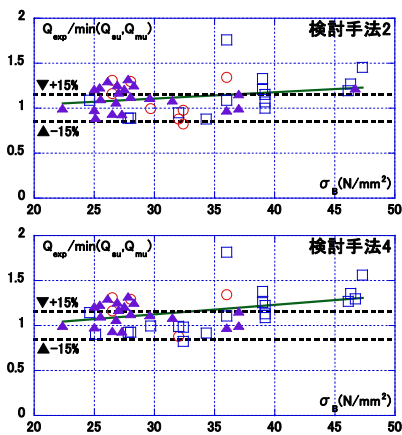
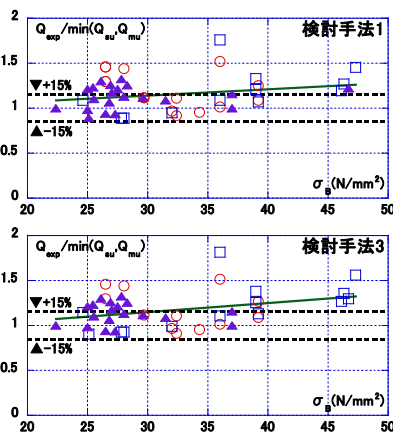


図 - 7 せん断終局強度算定法の検討手法の因子別分析

壁板横筋比とそのヤング係数である。

矩形断面耐震壁では、圧縮側から引張側にかけて、壁脚部圧縮応力度が変動すると判断し、コンクリートの有効圧縮強度(σ_c)を0.85倍していたが、これも取り止めた。

4.3 柱部分の考慮

これまで、袖壁部分と柱を壁谷澤らの分割累加式と同様に分割し、袖壁部分のせん断終局強度にその時点での柱の負担せん断力を加算して、袖壁付き柱のせん断終局強度を求めていた。これを柱部分も壁板部分と同様にせん断終局強度を算定し、それを累加するよう修正を行った。これは、中尾らの提案手法⁴⁾を用いた。ただし、柱幅方向の拘束バネは考慮していない。

5. せん断終局強度算定法の修正内容の検討

今回修正を行った内容について検討を行った。水平引張バネを式(2)のように変更した場合と壁板部分が水平方向に柱の幅(B_c)と壁厚の比の分だけ伸びると考えた、式(4)のように変更した場合とそれぞれコンクリートの有効圧縮強度を0.85倍する場合としない場合の計4パタ

ーンについて、既往実験結果(42体)⁵⁾⁻¹²⁾と本実験結果(3体)を用いて、精度検証を行った。

$$wK_x = \frac{L_w}{L_w - (t_w / B_c - 1)D_c} p_{wh} \cdot E_{hs} + wK_f \quad (4)$$

検証結果を図-5, 6に示す。ここでは、最大耐力決定要因(cc:コンクリート圧縮ストラットの圧壊で決定, hy:壁板横筋の降伏で決定, cr:せん断ひび割れ強度で決定)で記号を分けた。強度比の平均値, 変動係数は検討手法1が1.153, 0.1606, 検討手法2が1.123, 0.1601, 検討手法3が1.169, 0.1938, 検討手法4が1.144, 0.1893である。次に、因子別分析を行った。コンクリート圧縮強度(σ_c)に対する計算精度の変動傾向を図-7に示す。図中、±15%の横線を示した。また、変動傾向を最小二乗法で求めた近似直線を示した。

4パターンでの検討手法では、大きな差はないが、検討手法2(柱部分では、壁板は水平方向に伸びないと仮定し(式(2)を使用),コンクリートの有効圧縮強度を低減しない)が僅かに良い精度を示した。

6. せん断挙動算定法の検討

ここでは、せん断挙動(せん断力~せん断変形関係)の

算定に関する検討について記す。検討手法は、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」に示された耐震壁の算定法¹²⁾を準用したものである。図-8は検討手法のせん断応力度～せん断ひずみ関係のモデルである。せん断終局強度は前章の検討手法2の壁板部分の終局強度を用いる。また、せん断ひび割れ後の剛性(G_{trsl} :式(5))は、トラス剛性により算出する。この際、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(σ_0)左にシフトさせることで表した。壁板部分のせん断挙動算定後、せん断終局強度点において柱のせん断終局強度を加算することにした。

$$G_{trsl} = 1 / \left[\frac{1}{K_2 \cdot \cos^2 \theta_w \cdot \sin^2 \theta_w} + \tan^2 \theta_w / {}_wK_x + 1 / ({}_wK_y \cdot \tan^2 \theta_w) \right] \quad (5)$$

$$\gamma_{su} = \tau_{su} / G_{trsl} - \gamma_0 \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \sigma_0 / ({}_wK_y \cdot \tan \theta_w) \quad (7)$$

各バネ(K_2 , ${}_wK_x$, ${}_wK_y$)は、前章の検討手法2で用いた壁板部のバネと同様である。この手法の算定精度の検討は、7項、8項においてFEM解析や実験との比較により、行う。

7. FEM 解析

将来、提案手法の精度検証データを増やすことを目的として、FEM解析を用いることを考えている。ここでは、既往実験結果と本実験結果を対象に行った解析結果を示す。FEM解析には、「FINAL」を用いた。まず、壁谷澤が行った両側袖壁付き柱試験体「SWS」⁶⁾を対象にシミュレーション解析を行った。コンクリートは六面体要素とし、鉄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¹⁴⁾、テンションスティフィニング特性は出雲モデル¹⁵⁾($C=1.0$)、ひび割れ後のせん断伝達特性は Al-Mahidi モデル¹⁶⁾とする。コンクリートの圧縮強度到達後のひずみ軟化域は、

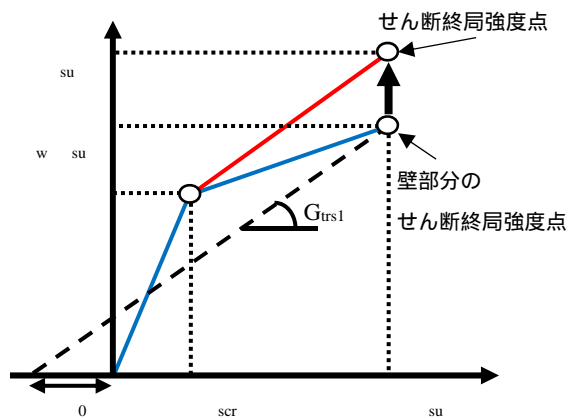


図-8 検討手法のせん断応力度～せん断ひずみ関係算定モデル

修正 Ahmad モデル¹⁴⁾とする。鉄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力～すべり関係は Elmorsi らのモデル¹⁷⁾とする。強度に配置し、付着劣化によるすべりをモデル化した。付着応は靱性指針¹⁸⁾に示された付着割裂強度式を用い、強度時すべりは1.0mmとした。解析は一定軸力を加えた後、変位制御で一方向単調載荷とした。

FEM解析による解析結果と実験結果(SWS)の対応を検討した。図-9に水平荷重～水平変形関係を示す。ひび割れ後の剛性、最大耐力ともに、良く対応している。この仮定条件を用いて、本実験に対する解析を行った。

8. せん断挙動と曲げ挙動算定法の検討

本実験結果とそれを対象としたFEM解析結果を用いて、せん断挙動算定法と曲げ挙動算定法(参考文献¹⁾の検討手法3で用いた算定法)の精度検証を行った。FEM解析を実施したのは、検証データを増やすための解析の精度を改めて示すためである。精度検証の結果を図-10に示す。図中には、それぞれ曲げ変形とせん断変形の成分ごとに示した。主にひび割れ後の荷重上昇域に着目する。No.1, No.2試験体では、実験とFEM、検討手法のせん断ひび割れ後の剛性、せん断終局強度は良好に対応している。No.2試験体の曲げ変形は実験と既往算定法で良好に対応しているが、FEMは曲げひび割れ後の剛性を大きく評価している。No.3試験体では、実験とFEM、検討手法のせん断ひび割れ後の剛性はやや対応が悪い。せん断終局強度は、実験よりもFEM、検討手法がやや小さく評価したが、概ね良好に対応している。曲げ変形は、実験とFEMが良好に対応しているが、既往算定法はひび割れ後の剛性を小さく評価した。

9. まとめ

曲げ降伏しない場合のせん断破壊型両側袖壁付き柱の終局強度に至るまでのせん断挙動を検討するため、実

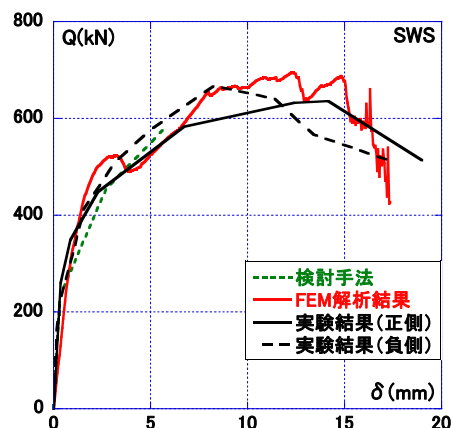


図-9 水平荷重～水平変形関係

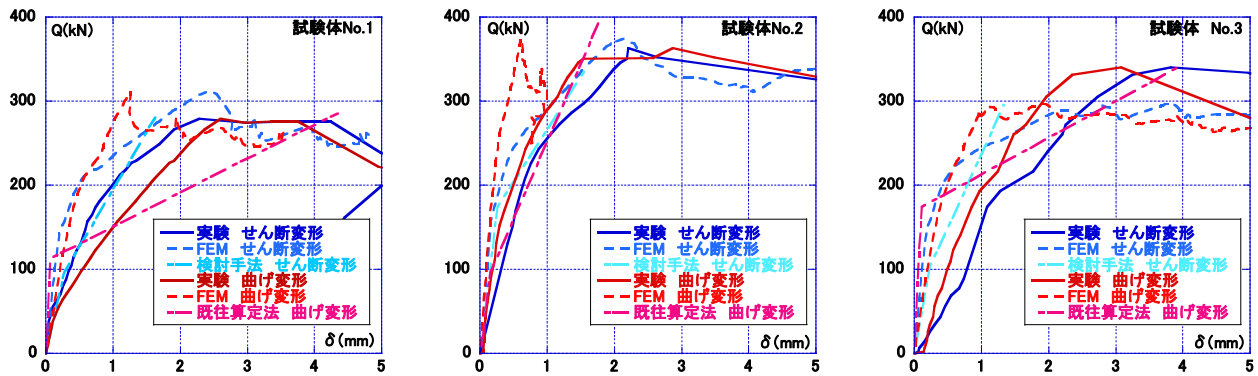


図 - 10 水平荷重～水平変形関係

験を行った。この実験結果と FEM 解析結果を用いて、せん断挙動算定法と曲げ挙動算定法の検討を行った。せん断挙動（せん断終局強度，せん断ひび割れ後の剛性）に関しては，概ね良く対応した。曲げ挙動に関しては，対応が悪い場合があるため，今後検討を行う必要があることが分かった。

参考文献

- 1) 今泉拓，津田和明：鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱の終局強度とせん断破壊型の復元力特性算定法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.115-120，2017.7
- 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) 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集，Vol.32，No.2，pp.349-354，2010.7
- 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の提案，コンクリート工学会年次論文集，Vol.39，No.2，pp.121-126，2017.7
- 5) 上原正敬，磯雅人，福山洋，田尻清太郎：袖壁付き RC 柱のせん断挙動に与える軸力，袖壁の偏心，壁横筋比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.103-108，2010
- 6) 壁谷澤寿成ほか：せん断破壊型で壁付き柱に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集（中国），pp.573-574，2008.9
- 7) 大宮幸，中村陽介，松浦康人，林静雄：RC 造柱耐力・破壊性状に及ぼす袖壁形状および袖壁横筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.169-174，2001
- 8) 斐根國，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
- 9) 田尻清太郎，澤井謙彰，磯雅人：鉄筋コンクリート造で壁付き柱のせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.163-168，2009
- 10) 佐藤充晴ほか：鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の変形性能，日本建築学会構造工学論文集，Vol.58B，pp.9-14，2012.3
- 11) 中村聡宏，今阪剛，勅使川原正臣，壁谷澤寿一：鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁付き柱の耐震性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.109-114，2015
- 12) 東洋一，大久保全陸，藤又康：鉄筋コンクリート袖壁付き柱の逆対称繰返し加力実験（その 2：壁厚の異なる場合，袖壁を付加して補強する場合），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1289-1290，1974.10
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 出雲淳一，島弘，岡村甫：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集，Vol.26，No.9，pp.107-120，1987.9
- 16) Al - Mahaidi ,R.S.H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members , Report 79 - , Dep.of Structural Engineering , Cornell Univ. , Jan. 1979
- 17) 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
- 18) 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，199