

論文 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の復元力特性の推定手法に関する検討

新関 倫乃亮*1・楠 浩一*2・毎田 悠承*3

要旨：壁縦筋を定着しない袖壁付き柱は地震後の継続使用性の確保に効果的であるが、本構造の設計法に関する検討は未だ行われていない。本論文では壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲げ終局強度に至るまでの復元力特性の推定手法を提案し、実験結果およびFEM解析結果との比較を行った。平面保持の仮定を基にした断面解析と、曲率が曲げモーメント分布に比例する手法または変形を曲げ、せん断、主筋の抜け出しの3成分に分離する手法により曲げ終局点に至るまでの復元力特性を推定した結果、前者の手法で実験結果を概ね再現することができ、FEM解析結果とも概ね良い対応関係が確認された。

キーワード：鉄筋コンクリート造、袖壁付き柱、定着、復元力特性、3次元FEM解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以下、RC造)建物においては、せん断破壊を防ぐため、構造スリットで雑壁を躯体と切り離すことが主流となっている。しかし、1995年の兵庫南部地震以降、多くの地震を経験する中で社会的要求は変化し、人命の確保に加えて地震直後の建物の機能継続に対する需要が高まっている。そのため、近年、袖壁等の雑壁を躯体と切り離すのではなく、構造部材と一体化して有効に活用する研究が進んでいる¹⁾。袖壁等の雑壁を構造壁として利用することにより、高い剛性と強度が付与され、地震応答変位が柱梁の骨組み構造に比べて低減する。これにより、建物の残存耐震性能の低下を抑え、非構造部材の損傷等による継続使用性の低下を防ぐことが可能となる。また、ヒンジリロケーションにより梁の危険断面が梁端部から袖壁端部に移るため、地震後の修復が困難な柱梁接合部の損傷が小さくなる。しかし、雑壁を構造壁として考慮する設計法の場合、ヒンジリロケーションと壁縦筋からの応力の伝達のため、壁端部に損傷が集中し、雑壁の損傷が増大する。また、壁縦筋が引張降伏した後に圧縮される場合、座屈が生じて周辺のコンクリートが剥落する可能性がある。

これらの背景から、本研究ではRC袖壁付き柱において壁縦筋を定着しない構造形式の構造性能についての検討を行った。壁縦筋を定着しない構造形式は、図-1のように壁縦筋を下階の梁に定着しないことで壁縦筋に引張応力を負担させず、壁縦筋が引張降伏することを防ぐ意図がある。これにより以下のメリットが期待される。袖壁が梁に接触し圧縮力に抵抗することで、柱単体と比べて剛性と耐力が増大する。壁縦筋が引張応力を負担し

なくなり周辺コンクリートのひび割れが低減される。また、短期許容曲げモーメントが向上する。さらに、引張側に位置する袖壁の壁縦筋が引張降伏しないため、座屈による壁縦筋周辺のコンクリートの剥落が生じず、圧縮側の壁脚部のコンクリートの圧壊が遅延され、変形性能が向上する。

既往の研究²⁾から、実験において壁縦筋を定着しない袖壁付き柱が従来の袖壁付き柱より使用限界、修復限界、安全限界変形が向上したことが確認された。また、筆者らは文献³⁾で壁縦筋を定着しないことにより変形性能が効果的に向上する構造因子の組み合わせを明らかにした。しかし、壁縦筋を定着しない袖壁付き柱部材の設計法に関する検討は未だ行われていない。本論文では壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲げ終局強度に至るまでの復元力特性を推定する手法を検討する。平面保持の仮定を基にした断面解析を行い壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲げモーメント-曲率関係を算出し、2つの手法で壁縦筋を定着しない袖壁付き柱のせん断力-変形角関係を推定する。また、本手法で推定した復元力特性を実験結果の骨格曲線やFEM解析結果と比較して精度の検証を行う。

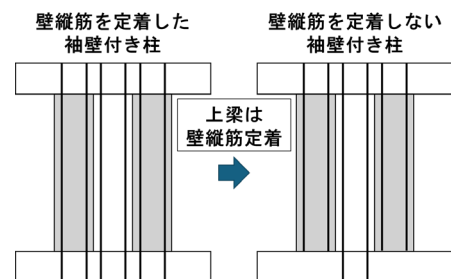


図-1 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の構造形式

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 地震研究所教授 工博 (正会員)

*3 東京大学 地震研究所准教授 工博 (正会員)

2. 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の復元力特性の推定手法

曲げ降伏型の壁縦筋を定着しない両側袖壁付き柱の復元力特性モデルに関する検討を行う。一般的に、架構の設計を行う際には部材を線材や面材でモデル化する。そのため、壁縦筋を定着しない袖壁付き柱部材の材軸直交方向（曲げとせん断）の復元力特性を再現することが必要となる。

本研究では、壁縦筋を定着しない袖壁付き柱のせん断力-変形角関係を、以下の図-2のように、4つの特性値からなる5折れ線モデルで表す。

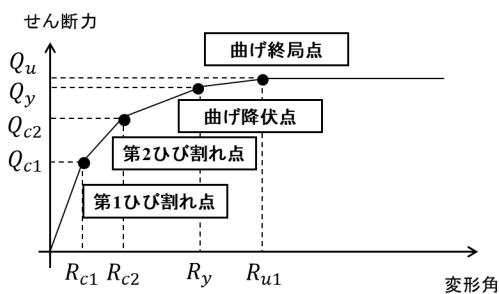


図-2 復元力特性モデルの概要

特性値は、状態変化が生じて剛性が著しく変化すると考えられる危険断面の第1ひび割れ点、第2ひび割れ点、曲げ降伏点、曲げ終局点の4つであり、その間を直線補間することでせん断力-変形角関係を表すこととする。

第1ひび割れ点は危険断面にて袖壁のコンクリートの引張縁がコンクリートの引張強度に達したとき、第2ひび割れ点は危険断面にて柱のコンクリートの引張縁がコンクリートの引張強度に達したとき、曲げ降伏点は危険断面にて引張側の柱主筋が降伏したとき、曲げ終局点は危険断面にて圧縮縁のコンクリートが終局ひずみに達したときとする。曲げ降伏点が存在しない場合は第2ひび割れ点と曲げ終局点を繋ぐものとする。

具体的な推定手法は2.1節、2.2節で詳述する。

2.1 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲げモーメント-曲率関係

平面保持の仮定を基にした断面解析により壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の断面の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係を推定する。軸力は柱芯に作用し、引張側の袖壁縦筋は引張応力を負担せず圧縮応力のみを負担すると仮定する。

第1ひび割れ点は材料が全て弾性範囲内で鉄筋が応力を負担しないものとして袖壁の引張縁コンクリートが引張強度に達したときの値を算出する。第2ひび割れ点は引張側袖壁コンクリートが引張応力を負担しないものとして柱の引張縁コンクリートが引張強度に達したときの

値を算出する。曲げ降伏点はコンクリートのひび割れ後に鉄筋が応力を負担するものとして引張側の柱主筋が引張降伏したときの値を算出する。曲げ終局点を推定する際はACIストレスブロック法⁴⁾で圧縮縁のコンクリートが終局ひずみに達したときの値を算出し、引張鉄筋は降伏後に降伏応力を保持すると仮定する。終局ひずみは0.003とする。また、ストレスブロック係数 k_1 は1.0、 k_2 は0.5、 k_3 は0.85とする。

文献5)の壁縦筋を定着しない袖壁付き柱試験体CWJ2について、以上の方法で算出した断面の曲げ終局点までの曲げモーメント-曲率関係を図-3に示す。対象は壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の試験体で保有水平耐力計算規準6)に基づき部材種別がFBと判定される条件(部材種別FBかつ拘束域鉄筋比0.6%未満)を満足する試験体である。断面図を図-4に構造詳細を表-1に、材料特性を表-2に示す。設計方針や配筋図等は文献5)を参照されたい。上スタブに壁縦筋は定着している。また、加力の反曲点は柱頭部である。

表-1 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱試験体CWJ2の構造詳細⁵⁾

		CWJ2
柱	幅×せい(mm)	250×250
	縦筋	10-D16 (pt=3.18%)
	横筋	D6@50 (pw=0.51%)
	カバーコンクリート厚さ(mm)	25
壁	横筋	2-D6@100
	縦筋	2-D6@100
	拘束域長さ	130
	拘束筋	D6@100
カバーコンクリート厚さ(mm)		20
コンクリートの設計基準強度(N/mm ²)		36
終局曲げ強度(kN)		140.8
終局せん断強度(kN)		209.2
せん断余裕度		1.49
部材高さ(mm)		1600

表-2 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱試験体CWJ2の材料特性⁵⁾

コンクリート		
圧縮強度(N/mm ²)	52.8	
ヤング係数(kN/mm ²)	30.3	
圧縮強度時のひずみ(μ)	2774	
引張強度(N/mm ²)	3.8	
鉄筋		
	D6(SD345)	D16(SD345)
降伏強度(N/mm ²)	403	389
引張強度(N/mm ²)	598	574
ヤング係数(kN/mm ²)	185	196
降伏強度時のひずみ(μ)	2187	1982

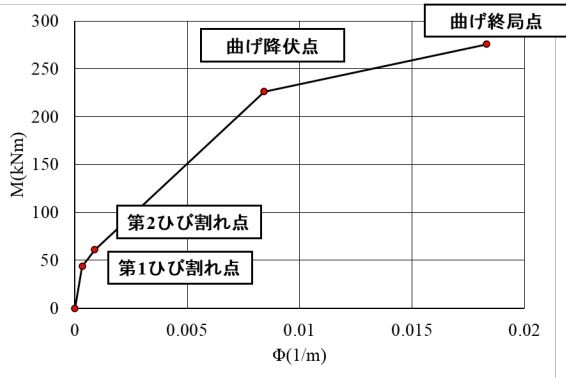


図-3 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱 CWJ2 における危険断面の曲げ終局点までの曲げモーメント-曲率関係

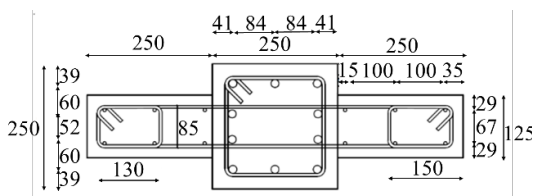


図-4 試験体 CWJ2 の断面図²⁾

2.2 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱のせん断力-変形角関係

壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の復元力特性におけるせん断力は、文献 5) の実験を参考に反曲点が柱頭にある場合を想定し、曲げモーメントが部材高さ方向に沿って三角形分布で作用するとして曲げモーメントを部材高さ h (試験体 CWJ2 の場合は 1600) で割って算出する。

変形角 R について、2 通りの方法で推定する。曲げ終局点の変形角も便宜的に曲げ降伏点までと同様の手法で算出する。1 つ目の方法は、各特性値における変形角を算出する際、曲げモーメント-曲率関係を原点とその特性値を通る線形弾性の関係と仮定して算出する手法である。上記の仮定によって非線形領域において生じる変形の差分は曲げ以外の変形成分と概ね同等となると仮定した。上記の仮定により、全成分を合計した曲率分布が曲げモーメント分布と比例関係になるため、図-5 のように、曲げモーメントが壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の高さ方向に三角形分布で作用すると考えると、全成分を合計した曲率分布も同様に三角形に分布することとなる。特性値における危険断面の曲率を用いて変形角は式(1)のように略算することができる。

$$R = \frac{\phi}{3} h \quad (1)$$

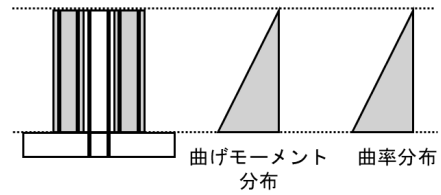


図-5 曲率比例手法における曲率分布概念図

また、2 つ目の方法は、変形角を曲げ変形成分とせん断変形成分と柱主筋の抜け出し成分の 3 つに分離して算出する方法である⁷⁾。曲げ変形による変形角 R_b 、せん断変形による変形角 R_s 、主筋の抜け出しによる変形角 R_x を式(2)のように足し合わせることで、壁縦筋を定着しない袖壁付き柱部材の変形角が推定される。

$$R = R_b + R_s + R_x \quad (2)$$

(1) 曲げ変形角

壁縦筋を定着しない袖壁付き柱において、曲げモーメントが部材の高さ方向に沿って三角形分布で作用すると仮定すると、2.1 節の断面の曲げモーメント-曲率関係から各特性点にて傾きが変わるため曲率分布は図-6 のように 4 折れ線の形で分布すると考えられる。そのため、曲率を積分計算することにより、式(3)~(6)で壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲げ変形成分が算出できる。

$$R_{c1} = \frac{\phi_{c1}}{3} h \quad (3)$$

$$R_{c2} = \frac{M_{c2a}}{6 M_{c2}^2} h \quad (4)$$

$$M_{c2a} = M_{c2}^2 \phi_{c1} - M_{c1}^2 \phi_{c2} + 2 M_{c2}^2 \phi_{c2} + M_{c1} M_{c2} (\phi_{c1} - \phi_{c2})$$

$$R_y = \frac{M_{ya}}{6 M_{c2}^2 M_y^2} h \quad (5)$$

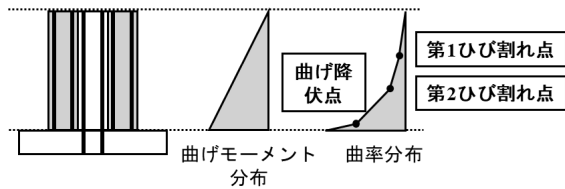
$$M_{ya} = M_{c2}^4 (\phi_{c1} - \phi_y) - (M_{c2}^2 - M_{c1}^2) M_y^2 \phi_{c2} + 2 M_{c2}^2 M_y^2 \phi_y + M_{c2}^3 M_y (\phi_{c2} - \phi_y) + M_{c1} M_{c2}^2 M_y (\phi_{c1} - \phi_{c2})$$

$$R_{u1} = \frac{M_{ua}}{6 M_{c2}^2 M_y^2 M_u^2} h \quad (6)$$

$$M_{ua} = M_{c2}^4 M_u^2 (\phi_{c1} - \phi_y) + M_{c2}^2 M_y^4 (\phi_{c2} - \phi_u) + M_{c2}^3 M_u M_y^2 (\phi_{c2} - \phi_y) + M_{c2}^2 M_u M_y^3 (\phi_y - \phi_u) - M_{c1}^2 M_u^2 M_y^2 (\phi_{c2}) + 2 M_{c2}^2 M_u^2 M_y^2 \phi_u + M_{c2}^2 M_u^2 M_y^2 (\phi_y) + M_{c1} M_{c2}^2 M_u^2 M_y (\phi_{c1} - \phi_{c2})$$

ここで、 R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_y 、 R_{u1} はそれぞれ危険断面が第 1 ひ

び割れ点, 第2ひび割れ点, 曲げ降伏点, 曲げ終局点の際の部材の曲げ変形角, M_{c1}, M_{c2}, M_y, M_u はそれぞれ第1ひび割れ点, 第2ひび割れ点, 曲げ降伏点, 曲げ終局点にて危険断面に作用する曲げモーメント, h は部材の高さである。



図一六三 成分分離手法における曲率分布概念図

(2) セン断変形角

せん断変形角 R_s については, 文献 8)を参考にせん断変形が非ひび割れ部のせん断弾性変形成分のみであると仮定して式(7)~(8)により算出する。危険断面から高さ方向に沿って中立軸位置は直線的に推移すると考える。

$$R_s = \kappa \int_0^h \frac{Q}{G_c A_c} dh \frac{1}{h} \quad (7)$$

$$G_c = \frac{E}{2(1 + \gamma)} \quad (8)$$

ここで, Q は作用する水平力, G_c はコンクリートのせん断弾性係数, A_c はコンクリートの非ひび割れ領域の断面積, γ はポアソン比, E はコンクリートのヤング係数である。

また, 仮想仕事法からせん断補正係数 κ を算出すると, 式(9)のようになる。

$$\kappa = \frac{6A_{xy}}{5B} \frac{\kappa_a}{(P_1 + P_2 + D^3B)^2} \quad (9)$$

$$\kappa_a = D^5 B^2 + G_1 + G_2 + 15D(L_1^2(L_1 + D)^2 + L_2^2(L_2 + D)^2)$$

$$G_1 = BL_1 t_1 (16L_1^4 + 25DL_1^3 + 10D^2L_1^2 + 5D^3L_1 + 5D^4)$$

$$G_2 = BL_2 t_2 (16L_2^4 + 25DL_2^3 + 10D^2L_2^2 + 5D^3L_2 + 5D^4)$$

$$P_1 = L_1 t_1 (4L_1^2 + 6DL_1 + 3D^2)$$

$$P_2 = L_2 t_2 (4L_2^2 + 6DL_2 + 3D^2)$$

$$A_{xy} = BD + L_1 t_1 + L_2 t_2$$

ここで, B : 柱幅, D : 柱せい, L_1 : 引張側袖壁長さ, t_1 : 引張側袖壁厚さ, L_2 : 圧縮側袖壁長さ, t_2 : 圧縮側袖壁厚さである。

また, κ : せん断補正係数で, 試験体 CWJ2 の場合は 1.19 である。

(3) 柱主筋の抜け出し変形角

柱主筋の抜け出し変形角 R_x は, 引張側主筋の定着部のひずみ ϵ が必要定着長 l_{ab} まで直線的に分布すると仮定す

ることで, 式(10)のように算出する。

$$R_x = \frac{\Delta S}{j_n} = \frac{l_{ab} \frac{\epsilon}{2}}{yCs(n) - x} \quad (10)$$

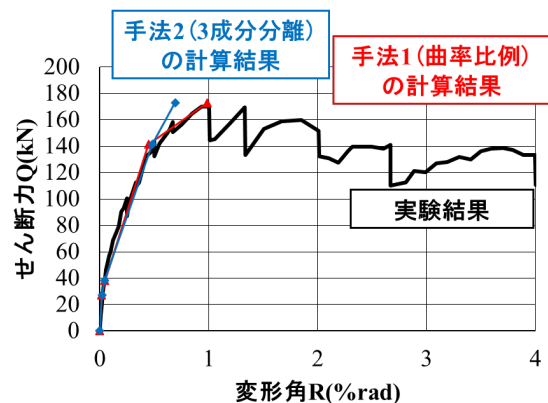
ここで, ΔS : 抜け出し量, j_n : 柱主筋から中立軸位置までの距離, $yCs(n)$: 圧縮縁から柱主筋までの距離, x : 圧縮縁から中立軸位置までの距離である。文献 9)を参考に, 必要定着長 l_{ab} は以下の式(11)で推定する。

$$l_{ab} = \alpha \frac{S \sigma_t d_b}{10 f_b} \quad (11)$$

ここで, S : 修正係数, σ_t : 鉄筋の短期許容応力度, d_b : 異形鉄筋の呼び名に用いた数値 (mm), f_b : 付着割裂の規準となる強度, α : 拘束されたコア内に定着する場合は 1.0, それ以外は 1.25 である。

3. 提案手法による計算結果と実験結果の比較

第2章の推定手法により計算された曲げ終局点までのせん断力-変形角関係と実験で観測されたせん断力-変形角関係の正側の載荷時の骨格曲線を図-7に示す。対象は文献 5)の試験体 CWJ2 である。



図一七 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱 CWJ2 のせん断力-変形角関係の実験結果と計算結果の比較

実験結果と提案手法による計算結果の曲げ強度点までのせん断力-変形角関係を比較した結果, 3成分分離手法による曲げ終局時変形角の計算値が若干小さくなったが, 曲率比例手法による計算結果は実験結果と概ね一致した。曲げ降伏時変形角は, 曲率比例手法による計算結果で 0.45%rad, 3成分分離手法による計算結果で 0.48%rad, 実験結果で 0.5%rad のサイクルとなり, 良い対応関係が確認された。曲げ終局強度は, 計算結果で 173.08kN, 実験結果で最大強度点とした場合に 170kN となり, 概ね一致した。曲げ終局時変形角は, 曲率比例手法による計算結果で 0.99%rad, 3成分分離手法による計算結果で 0.69%rad, 実験結果で 1.0%rad のサイクルとなり, 3成分分離手法による計算値は若干小さくなったが,

曲率比例手法による計算値は概ね一致した。曲げ終局時変形角について2つの手法を比較して曲率比例手法による計算結果が3成分分離手法による計算結果より大きくなったのは、曲げ降伏点から曲げ終局点にかけて危険断面の非線形領域は増大したがせん断変形角と柱主筋の抜け出し変形角は大きく増加しなかったためだと考えられる。

4. 計算結果とFEM解析結果の比較

提案手法による計算結果と軸力比、コンクリート強度、壁厚さを変数としたFEM解析結果の比較を行う。壁縦筋を定着しない袖壁付き柱では特に袖壁のコンクリートの損傷が低減されることで構造性能に変化が生じると考えられるため、軸力比とコンクリート強度、壁厚さを変数に設定した。解析対象は文献5)の試験体CWJ2を基準として上記のパラメータを変化させたものである。

本論文では汎用有限要素法プログラム“FINAL ver11¹⁰⁾”を用いて試験体CWJ2のFEM解析を行った。解析モデル(対称性を利用して半分に分割)や載荷条件、拘束条件を図-8に示す。材料構成則や詳細なモデル化手法は文献3)を参照されたい。また、解析におけるパラメータは表-3に示すように変化した。表中の赤字が基準試験体である。柱断面に対する軸力比が0.1,0.2,0.3,0.4の各ケースにおいて、基準試験体からコンクリート強度または壁厚さを変化させた。

解析結果と実験結果のせん断力Qと変形角Rの関係を、図-9に示す。解析においては微小ひずみ理論を用いているのに対して、実験においては自重による付加的な曲げモーメントの影響が存在するため、実験結果にP- δ 効果として軸力と変形角の積を足し合わせた。図中にはACIストレスブロック法⁴⁾によって計算した袖壁付き柱の曲げ終局耐力を併せて示す。

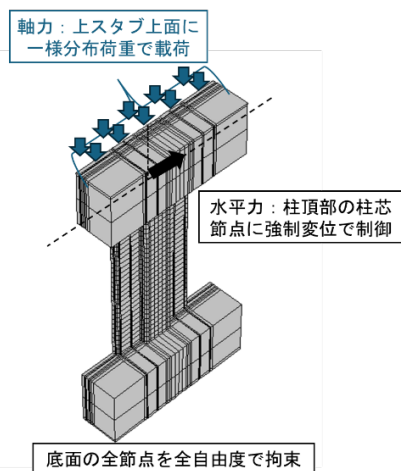


図-8 解析モデル

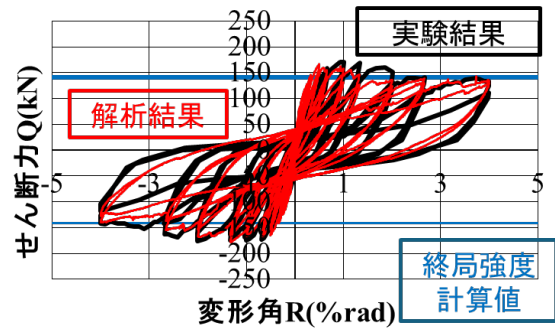


図-9 試験体CWJ2のせん断力-変形角関係

表-3 FEM解析におけるパラメータ

変数	値			
軸力比 η	0.1	0.2	0.3	0.4
コンクリート強度 $F_c(N/mm^2)$	24	36	48	60
壁厚さ $T_w(mm)$	100	125	150	175

R=0.25%rad~0.50%radのサイクルにおいて解析結果のせん断力が実験結果と比較して大きな値となったが、概ね解析結果と実験結果で良好な対応関係を示した。また、解析結果は設計時の曲げ終局強度計算値とも良好な対応関係を示した。損傷状況についても柱主筋の引張降伏や圧壊が確認されたカバーコンクリートの領域について概ね一致した。以上から、本解析モデルにおいて曲げ終局強度と曲げ終局時変形角を含むせん断力-変形角関係と損傷状況の実験結果を概ね再現できることを確認した。

図-10、図-11、図-12に、壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の曲率比例手法と3成分分離手法の曲げ終局強度時変形角、曲げ終局強度に関するFEM解析の結果と提案手法による計算結果を比較した図を示す。曲げ終局強度時変形角は最大荷重時の変形角として算出した。

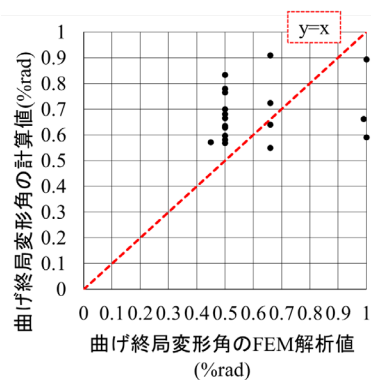


図-10 手法1(曲率比例手法)の計算結果とFEM解析結果における曲げ終局強度時変形角

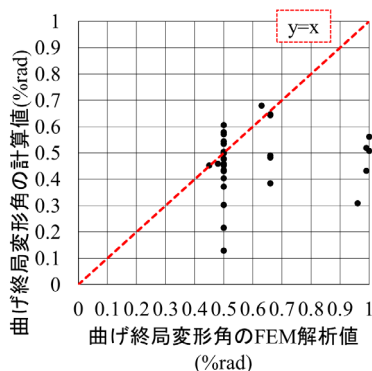


図-11 手法2(3成分分離手法)の計算結果とFEM解析結果における曲げ終局強度時変形角

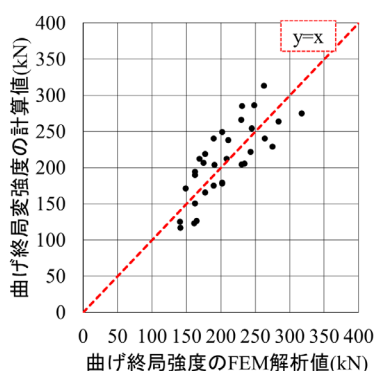


図-12 計算結果とFEM解析における曲げ終局強度

曲げ終局強度時変形角について、曲率比例手法による計算値はFEM解析値と概ね良い対応関係を見せた。FEM解析値を計算値で割った値の平均値は0.88で、全体の約67%のケースで0.7~1.3(誤差30%以内)の範囲内になった。3成分分離手法による計算値はFEM解析値より概ね小さくなった。FEM解析値を計算値で割った値の平均値は1.40で、全体の約63%のケースで0.7~1.3(誤差30%以内)の範囲内になった。曲げ終局強度について、計算値はFEM解析値と良い対応関係を見せた。FEM解析値を計算値で割った値の平均値は1.00で、全体の約94%のケースで0.7~1.3(誤差30%以内)の範囲内になった。

5. まとめ

本論文では壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の復元力特性の推定手法の提案と実験結果およびFEM解析結果との比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 平面保持の仮定を基にした断面解析と、曲率が曲げモーメント分布に比例する手法または変形を曲げ変形、せん断変形、主筋の抜け出し変形の3成分に分離する手法により壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の実験における曲げ終局点に至るまでの復元力特性を推

定した結果、実験結果と比較して、3成分分離手法による曲げ終局時変形角の計算値は若干小さくなったが、曲率比例手法の計算値は概ね一致した。

- (2) 曲げ終局強度時変形角について、曲率比例手法による計算値は全体の約67%、3成分分離手法による計算値は約63%のケースでFEM解析値の誤差30%以内になった。曲げ終局強度は、計算結果全体の約94%のケースでFEM解析値の誤差30%以内になった。

謝辞

本論文の執筆にあたり、大阪大学大学院工学研究科真田靖士教授には、データの提供並びに関連資料の収集にご協力頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 諏訪田晴彦, 壁谷澤寿一, 向井智久, 坂下雅信, 加藤博人, 福山洋, 勅使川原正臣, 楠浩一: 袖壁・腰壁・垂れ壁を有する実大5層鉄筋コンクリート造立体架構の静的載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.780, pp.259-266, 2021.2
- 2) 百家祐生, 真田靖士, 張政, 尹ロク現, 楠浩一, 日比野陽, 向井智久: 壁縦筋の定着の有無が袖壁付柱の短期許容曲げ耐力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 778, pp. 1611-1621, 2020.12
- 3) 新関倫乃亮, 楠浩一, 毎田悠承, ヤオトレポー: 壁縦筋を定着しない袖壁付き柱の変形性能に関する解析的研究, 日本地震工学会論文集, Vol. 24, No. 5, pp. 234-243, 2024
- 4) American Concrete Institute.: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) And Commentary (ACI318R-14), 2014
- 5) 張政: 壁縦筋を定着しないRC袖壁付柱の構造性能に関する研究, 博士学位論文, 大阪大学学術情報庫, 2021
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021
- 7) 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
- 8) 浅井竜也, 勅使川原正臣, 諏訪田晴彦: RC造曲げ破壊型柱部材の主筋降伏までにおける詳細な変形機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 88, No 804, pp. 276-287, 2023.2
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 10) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V11 HELP, 2011