

4. 複合型露出柱脚の復元力特性モデルの提案

Proposal of Restoring Force Characteristic Model of Composite Exposed-Type Column Bases

寺内将貴* 生島優花* 柳田佳伸* 石鍋雄一郎**

一概要一

筆者らは、鉄骨造建物の柱脚部の部材として複合型露出柱脚の開発を行ってきた。既報¹⁾では、複合型露出柱脚の降伏曲げ耐力および弾性回転剛性の評価式を提案し、アンカーボルト降伏要素とベースプレート降伏要素の累加により算出可能であることを報告している。

本報では、複合型露出柱脚の復元力特性モデルの構築を目的とし、アンカーボルト降伏型とベースプレート降伏型の復元力特性モデルを参考にそれらの累加によりモデルの構築を試みた(図1)。構築した復元力特性モデルを実験結果と比較し(図2)、概ね評価できていることを確認した。

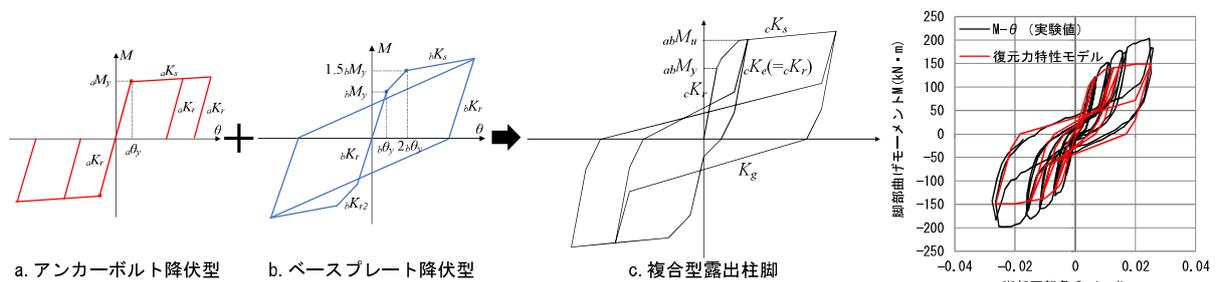


図1 複合型露出柱脚の復元力特性モデル

図2 復元力特性モデルと実験結果の比較

一技術的な特長一

複合型露出柱脚は、内側に配置された弾塑性要素のアンカーボルトと弾性要素のベースプレートでアンカーボルト降伏要素を形成し、外側に配置された弾性要素のアンカーボルトと弾塑性要素のベースプレートによりベースプレート降伏型を形成する2種類の降伏機構を有する柱脚である(図3)。

2種類の降伏機構がほぼ同程度の回転角で降伏するように設計することで、その曲げ耐力、剛性、復元力特性モデルはアンカーボルト降伏型(スリップ型)とベースプレート降伏型(最大点指向型)を累加したものになる。これにより、従来の露出柱脚では履歴面積が小さくエネルギー吸収能力が乏しいスリップ型の復元力特性となるアンカーボルト降伏後の領域において、ベースプレート降伏要素による耐力負担、剛性の上昇がある復元力特性となる。このことから、ベースプレート降伏要素を取り入れた本工法は繰返しの地震に対しても耐震性の高い柱脚となっている(図4)。

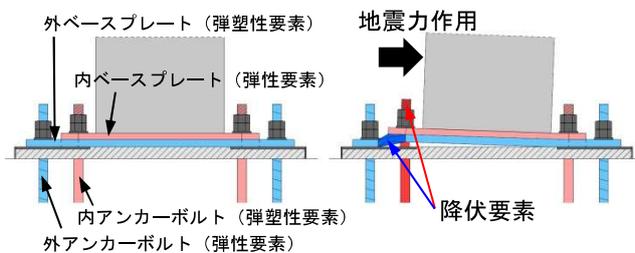


図3 複合型露出柱脚の降伏機構

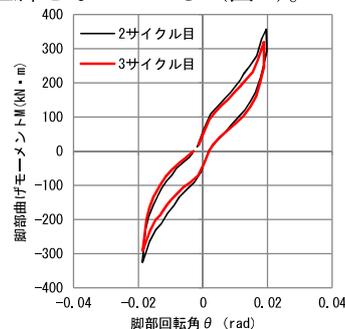


図4 脚部回転角 $\theta=1/50\text{rad}$ 時のM- θ 関係

1) 新井佑一郎, 柳田佳伸, 寺内将貴, 石鍋雄一郎: 複合型露出柱脚の設計用曲げ耐力式の提案, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2439-2448, 2018.11

※本報の一部は、日本建築学会大会学術講演会梗概集(2022.09 pp.915-918)にて発表済みの内容である。

複合型露出柱脚の復元力特性モデルの提案

Proposal of Restoring Force Characteristic Model of Composite Exposed-Type Column Bases

○寺内将貴* 生島優花* 柳田佳伸* 石鍋雄一郎**
 Masaki TERAUCHI Yuka IKUSHIMA Yoshinobu YANAGITA Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT The composite-type exposed column base is one type of exposed column base in steel frame building. In this paper, the restoring force characteristic model of the compound exposed type column base is constructed and evaluated. The restoring force characteristic model was evaluated with a model that combined the anchor bolt yield type and the base plate yield type, and the experimental results could be reproduced.

Keywords :露出型柱脚, ベースプレート降伏型, アンカーボルト降伏型, 復元力特性モデル
Exposed-type column bases, Base plate yield type, Anchor bolt yield type, Restoring force characteristic model

1. はじめに

複合型露出柱脚は、鉄骨造で用いられる露出柱脚の一形式であり、アンカーボルト降伏型¹⁾とベースプレート降伏型^{2), 3)}の要素を組み合わせた2種類の降伏機構を有する柱脚である。

これらは、独自の凸型のベースプレート形状とアンカーボルトの配置により形成され、内側に配置されたアンカーボルトと外側に配置されたベースプレート(図1)がほぼ同程度の回転角で降伏するように設計することで、その復元力特性がスリップ型と最大点指向型の累加となることは既報⁴⁾の通りである(図2)。しかし、厳密にはどちらかの先行降伏が考えられる。

そこで本報では、動的解析に組み込むための設計用の復元力特性モデルの構築を目的とし、既報の実験結果から得られた骨格曲線により初期剛性や除荷剛性を求め考察を行う。

2. 複合型露出柱脚の復元力特性モデル

アンカーボルト降伏型の復元力特性がスリップ型¹⁾(図2(a))となることは広く知られている。一方ベースプレート降伏型は、既往の研究²⁾

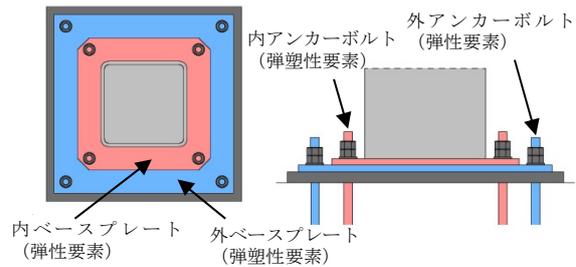
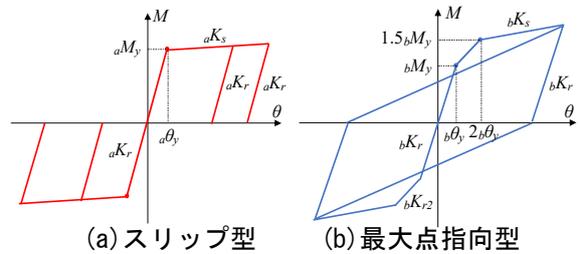
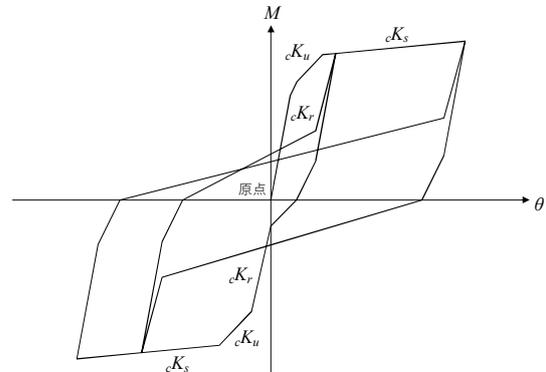


図1 複合型露出柱脚の構成図



(a) スリップ型 (b) 最大点指向型



(c) 複合型露出柱脚
 図2 復元力特性モデル

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室
 **日本大学短期大学部 准教授

により最大点指向型の復元力特性モデル(図2(b))となることがわかっている。文献⁵⁾によれば、弾性剛性 bK_r で降伏耐力 bM_y に達した後、2次剛性 $bK_{r2} (=0.5bK_r)$ で耐力が上昇し、降伏耐力の1.5倍程度から、塑性剛性 bK_s で最大耐力に到達する。その後の除荷では、耐力の正負が反転するまで弾性剛性を保持し、正負の反転後、半サイクル前の最大点を指向する。

複合型露出柱脚の復元力特性は、スリップ型と最大点指向型の復元力特性を単純累加することで得られる⁴⁾(図2(c))。アンカーボルト、ベースプレートそれぞれの弾性回転剛性を累加した初期剛性(弾性剛性) aK_r で降伏耐力まで耐力が上昇し、その後、内アンカーボルトまたは外ベースプレートが降伏、もしくはその両方が降伏した2次剛性 aK_{r2} を以てさらに耐力が上昇し、内アンカーボルト、外ベースプレートともに降伏した3次剛性(塑性剛性) aK_s となり最大耐力に達すると考えられる。

3. 実験結果から得られた骨格曲線

既報^{6)~9)}の実験結果から、脚部モーメント M 脚部回転角 θ 関係図より得られる骨格曲線を図3~図5に示す。試験体名は、「内ベースプレート板厚(mm)-外ベースプレート板厚(mm)・軸力(kN)」とする。試験体は主に鋼製基礎を用いており、40-16-645c 試験体と 60-32-0c 試験体はコンクリート基礎となっている。また、32-16-0R 試験体はリブ付きの試験体である。なお、試験体詳細については既報^{6)~9)}を参照されたい。

軸力なしの試験体(図3)は原点からの剛性を初期剛性とし、軸力ありの試験体(図4)は軸力による付加曲げモーメント M_n からの剛性を初期剛性とする。図5のように、軸力による付加曲げモーメント M_n が確認できない試験体は、計算で求めた M_n から初期剛性の最大点を結んだ線を初期剛性としている。2次剛性は初期剛性の骨格曲線上の最大点を起点とし、その剛性が変化したと考えられる点を、同様に3次剛性は2次剛性の

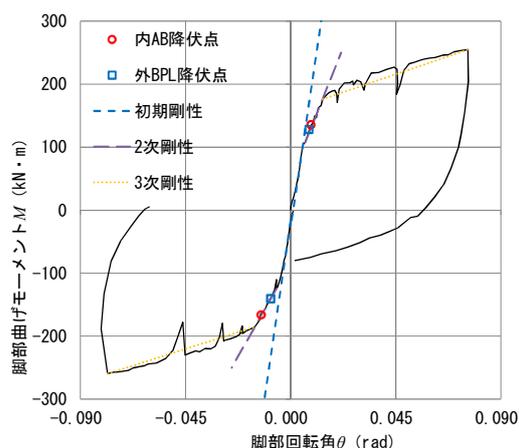


図3 32-16-0 試験体 M-θ 関係図

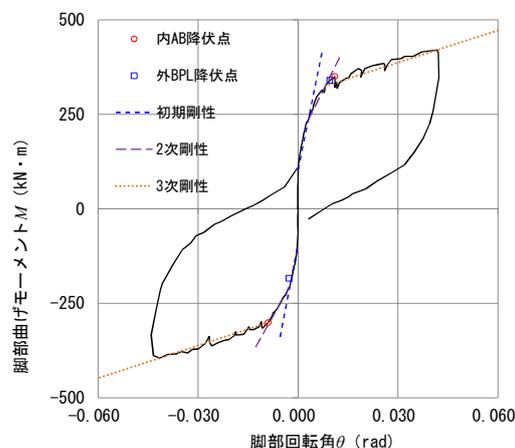


図4 40-16-645c 試験体 M-θ 関係図

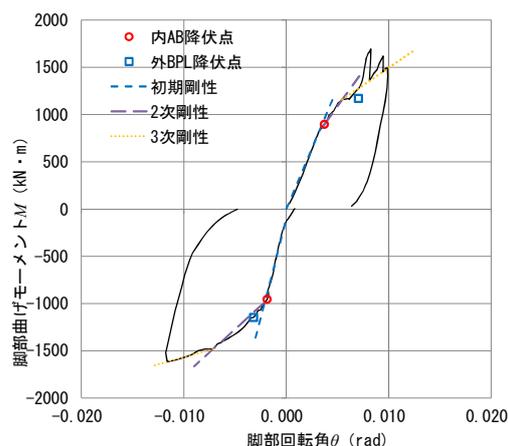


図5 60-32-0c 試験体 M-θ 関係図^{※1}

※1: 基礎コンクリート部が側柱を想定しT型となっているため、正負で骨格曲線に違いが発生している。

骨格曲線上の最大点を起点とし、その剛性が変化したと考えられる点を結び算出している。

既報⁸⁾の設計式により算出した各試験体の弾性剛性を表1に、実験の骨格曲線から求めた剛性を表2に示す。

複合型露出柱脚では、内アンカーボルトと外ベースプレートがほぼ同程度の回転角で降伏するよう設計しているが、実際には内アンカーボルトまたは外ベースプレートの先行降伏が考えられる。そこで、計算値における弾性剛性 abK_R に対する内アンカーボルトおよび外ベースプレート単体の剛性 aK_R 、 bK_R および bK_{R2} の比率を算出し、骨格曲線から求めた cK_R に対する cK_u および cK_s の比率を比較し、2次剛性および3次剛性時の各部材の降伏状況を確認する。

骨格曲線から初期剛性を算出した結果、40-16-645c 試験体と 60-32-0c 試験体以外で計算値と概ね一致する結果となった。また、初期剛性 cK_R と2次剛性 cK_u の比率は 0.23~0.60 となり、比率 cK_u/cK_R が bK_u/abK_R を上回る試験体では、ア

ンカーボルトが先行降伏していると考えられる。一方、 cK_u/cK_R が 0.26~0.28 の試験体はほぼ同時に降伏していると考えられる。

また、3次剛性は初期剛性の1割以下となったことからアンカーボルト、ベースプレートがともに降伏している塑性剛性と考えられる。このことから、2次剛性は内アンカーボルトの塑性剛性 aK_s と外ベースプレートの2次剛性 bK_{R2} の累加、3次剛性では内アンカーボルト、外ベースプレートの塑性剛性 ($aK_s + bK_s$) で評価可能であることを確認した。

4. 除荷剛性の算出と実験との比較

アンカーボルト降伏型の復元力特性モデル¹⁾などやベースプレート降伏型の復元力特性モデル⁵⁾などでは、除荷剛性は初期剛性と等しいものと定義している。このことから、既報^{6)~9)}の実験から得られた骨格曲線(図6)を用いて除荷剛性を算出し、初期剛性との比較を行う。除荷剛性は、除荷時に回転角が減少し始めた点(図6青点)を起点とし、直線的要素が終わったと思われる点

表1 弾性剛性の計算値と剛性比率

試験体名	弾性剛性 abK_R^{**} ($\times 10^3$ kN・m/rad)	内 AB 弾性剛性 aK_R ($\times 10^3$ kN・m/rad)	外 BPL 弾性剛性 bK_R ($\times 10^3$ kN・m/rad)	aK_R/abK_R	bK_R/abK_R	外 BPL 2次剛性 bK_{R2} ($\times 10^3$ kN・m/rad)	bK_{R2}/abK_R
32-16-0 32-16-0R 32-16-645	22.8	13.4	9.4	0.59	0.41	4.7	0.21
40-16-645c	21.0	11.7	9.4	0.55	0.45	4.7	0.22
32-9-645	18.7	13.4	5.3	0.72	0.28	2.6	0.14
60-32-0c	161.0	102.3	58.7	0.64	0.36	29.3	0.18

※ $abK_R = aK_R + bK_R$

表2 骨格曲線より算出した各剛性と初期剛性との比率

試験体名	初期剛性 cK_R ($\times 10^3$ kN・m/rad)		2次剛性 cK_u ($\times 10^3$ kN・m/rad)		3次剛性 cK_s ($\times 10^3$ kN・m/rad)	
	正	負	正	負	正	負
32-16-0 ⁶⁾	25.0	25.3	9.3	6.6	1.3	1.2
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.37	0.26	0.05	0.05
32-16-0R ⁶⁾	25.8	24.9	7.3	5.6	1.4	1.5
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.28	0.23	0.06	0.06
32-16-645 ⁷⁾	22.2	28.9	5.9	8.1	1.4	2.1
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.26	0.28	0.06	0.07
40-16-645c ⁸⁾	43.5	46.0	17.6	15.7	2.8	2.9
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.40	0.34	0.07	0.06
32-9-645 ⁶⁾	18.4	20.5	10.3	5.8	1.1	1.0
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.56	0.28	0.05	0.05
60-32-0c ⁹⁾	247.0	418.2	148.7	98.5	74.2	30.2
剛性比率 ($/cK_R$)	-	-	0.60	0.23	0.30	0.07

※R はリブ付き柱, c はコンクリート基礎を示している

(図6赤点)の2点間を結んだ線の傾きとした。

算出した除荷剛性 cK_e と初期剛性 cK_r を表3に示す。骨格曲線から求めた除荷剛性 cK_e は、正負方向で近い値となり、一部乖離する結果もあるが、文献1)、5) などと同様に初期剛性 cK_r と概ね一致する結果となった。

以上より、本工法においてもアンカーボルト降伏型やベースプレート降伏型の復元力特性モデルと同様に、除荷剛性 $cK_e =$ 初期剛性 cK_r でモデルを構築することとする。

また、最大荷重から除荷剛性 cK_e で脚部曲げモーメント $0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ まで除荷されていないが、これはアンカーボルトとベースプレートの除荷時の残留変位が異なることによる影響だと考えられる。

5. 復元力特性モデルの構築

算出した初期剛性 cK_r 、降伏後の2次剛性 cK_u 、3次剛性 cK_s 、除荷剛性 $cK_e (= cK_r)$ 、および最大点指向型の特長である疑弾性剛性 K_g を用いて、復元力特性モデルの構築を試みる。3次剛性は実験結果から初期剛性との比で算出した数値を用いた。作図した復元力特性モデルを図7に示す。疑弾性剛性 K_g は、図8のようなベースプレート降伏要素単体の復元力特性モデルを構築し、脚部回転角に応じた最大点を指向する疑弾性剛性を求め、図7に反映させている。

復元力特性モデルの経路は図示のように、
 原点 $\rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow b \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow o \rightarrow g \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow s \rightarrow t \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow u \rightarrow q$ となる。原点から a までは初期剛性 cK_r の傾きで降伏耐力 abM_y まで上昇し、2次剛性 cK_u で b に到達、除荷剛性 cK_e で c に除荷され、 c から d へはBPL単体の除荷剛性 bK_e で除荷される。

負側の荷重では、ベースプレート降伏要素単体の剛性 bK_r で d からアンカーボルトに引張力が作用する e まで耐力が上昇し、 e から cK_r で降伏耐力 abM_y (f) に到達する。

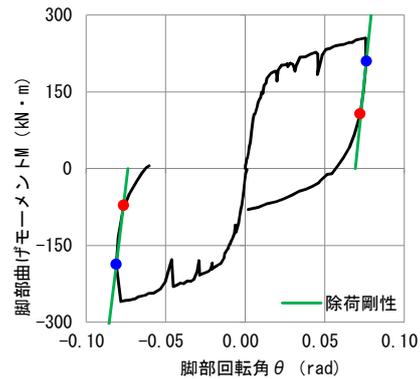


図6 32-16-0 試験体の除荷剛性

表3 除荷剛性と初期剛性の比率

試験体名	除荷剛性 cK_e ($\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$)		初期剛性 cK_r ($\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$)		cK_r / cK_e	
	+	-	+	-	+	-
32-16-0	29.9	25.2	25.0	25.2	0.84	1.00
32-16-0R	29.8	39.8	25.8	24.9	0.87	0.62
32-16-645	28.8	27.2	22.2	28.9	0.77	1.06
40-16-645c	49.5	45.7	43.5	46.0	0.88	1.01
32-9-645	33.0	32.4	18.4	20.5	0.56	0.63
60-32-0c	574.6	404.8	247.0	418.2	0.43	1.03

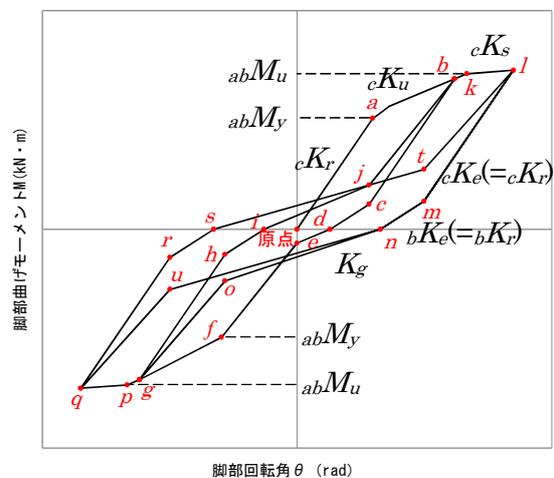


図7 復元力特性モデル

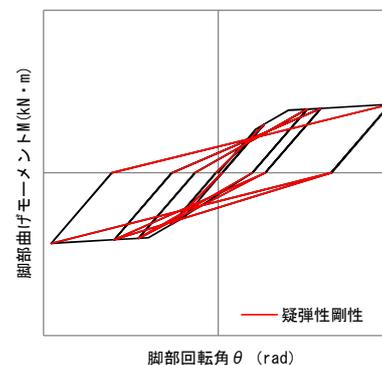


図8 疑弾性剛性 K_g の算出

2サイクル目以降は、最大荷重から除荷されたのち、アンカーボルトに引張が作用する回転角まで、ベースプレートの疑弾性剛性 K_g を以って耐力が上昇する。つまり、2サイクル目以降の同一回転角では同じ履歴を描くことになる。これは、実験結果（図9）からも確認できる。

降伏耐力 $abM_y (f)$ 以降は、脚部回転角が進むと2次剛性 cK_u で荷重 abM_u まで上昇する。

6. 実験値と復元力特性モデルの比較

図7で定義した復元力特性モデルをもとに、実験との比較を行う。なお、復元力特性モデルのサイクルごとの脚部回転角は実験の脚部回転角に合わせ、降伏曲げ耐力 abM_y は既報⁸⁾ の計算式から算出した計算値を用いた。

比較は、軸力なしとした32-16-0試験体（図10）と32-16-0R試験体（図11）、60-32-0c試験体（図12）を対象とした。なお、60-32-0c試験体については、初期剛性が計算値と実験値で乖離する結果となったため、本報では実験値の正負の平均値を復元力特性モデルの初期剛性として設定しモデル化を行った。

図10～図12より、降伏点や降伏後の剛性が変化する2次剛性および、2サイクル目以降のアンカーボルトに伸びが発生した領域など実験結果と概ね一致している。このことから、提案した復元力特性モデルにより実験結果を再現できていると考える。

詳細に見ると、除荷時に最大点から除荷剛性までの間に回転角にほとんど変化が生じず脚部モーメントが低下する領域（①）や、2次剛性から3次剛性に変化する領域をベースプレート降伏要素の2次剛性の範囲（脚部回転角 $\theta=1/100\text{rad}$ ）までとしたが、それ以降の回転角でも脚部モーメントが上昇している（②）ことが実験値から確認できる。ただし、その評価には設計式が複雑化することが考えられるため、アンカーボルト降伏要素とベースプレート降伏要素の累加により評価可能である本モデルを設計用の復元力特性モデルとして提案する。

ルとして提案する。

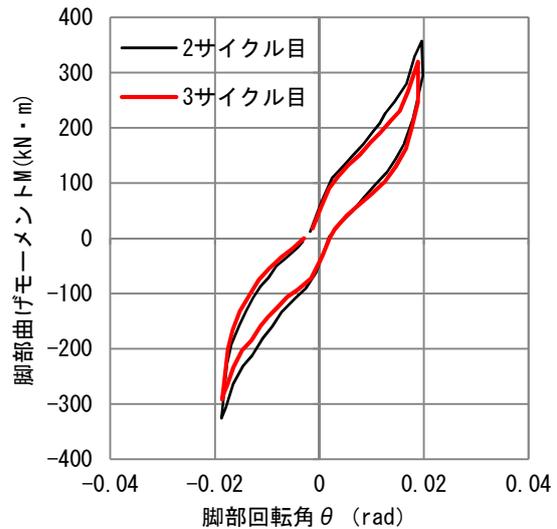


図9 40-16-645c 試験体 M-θ 関係図
(脚部回転角 $\theta=1/50$ 加力時抜粋)

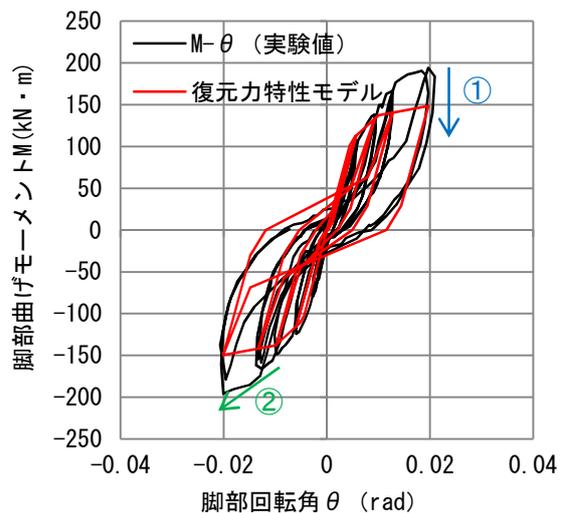


図10 32-16-0 試験体 M-θ 関係図

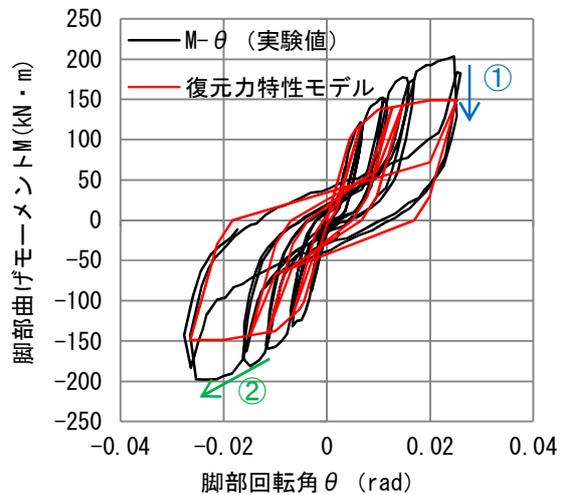


図11 32-16-0R 試験体 M-θ 関係図

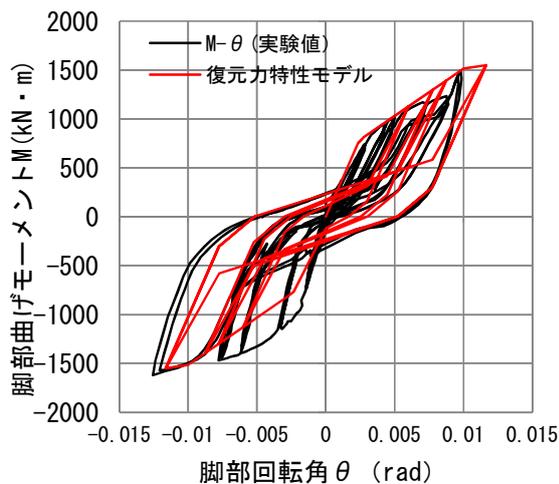


図 12 60-32-0c 試験体 M-θ 関係図

7.まとめ

本報で得られた知見を以下にまとめる。

骨格曲線から得られた剛性(実験値)と計算値を比較し、初期剛性=除荷剛性で検討を進め、復元力特性モデルを構築した。その結果、降伏点は概ね一致し、降伏点以降の2次剛性は、内アンカーボルトの塑性剛性と外ベースプレートの2次剛性の累加で評価可能であった。

その結果、提案した復元力特性モデルにて実験結果を、概ね再現できたと考える。

今後は、この復元力特性モデルを用いて1サイクル目と2サイクル目以降のエネルギー吸収性能の比較などを実施していく予定である。

【参考文献】

- 1) 秋山宏, 鉄骨柱脚の耐震設計, 技法堂出版, 1985.3
- 2) 柳田佳伸, 半貫敏夫, 秋山宏: 露出型鉄骨柱脚の履歴特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.303-310, 2005.4
- 3) 田中尚, 高梨晃一, 大井謙一, 前田祥三: 鋼構造露出柱脚部の弾塑性挙動に関する研究 その1 柱脚模型の曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1331-1332, 1980.8

- 4) 寺内将貴, 柳田佳伸, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎: 複合型露出柱脚の特性に関する実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.301-304, 2016.3
- 5) 柳田佳伸, 半貫敏夫, 秋山宏: ベースプレート降伏先行型柱脚のもつ鋼構造物の損傷分布, 鋼構造年次論文報告集, pp.197-200, 2005.11
- 6) 寺内将貴, 柳田佳伸, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎: 2種の降伏機構を有する複合型露出柱脚の開発, 青木あすなる建設技術研究所報 Vol.2, p.3, 2017.4
- 7) 寺内将貴, 柳田佳伸, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎: 複合型露出柱脚の耐力・回転剛性の累加要素に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1331-1332, 2018.9
- 8) 柳田佳伸, 寺内将貴, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎: 基礎コンクリートを配した複合型露出柱脚の性能確認実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1483-1488, 2019.6
- 9) 新井佑一郎, 柳田佳伸, 寺内将貴, 石鍋雄一郎: 中低層建物の柱脚部を想定した複合型露出柱脚の実験に関する報告, 青木あすなる建設技術研究所報 Vol.3, p.2, 2018.4