

変動軸力と曲げを受けるアンカーボルト降伏先行型 露出柱脚の復元力特性モデル

山西 央朗*・高松 隆夫**・玉井 宏章**

(平成22年10月29日受付)

Hysteresis models of restoring force characteristics for anchor-bolt-yield-type exposed column-base subjected to variable axial-force and bending

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU and Hiroyuki TAMAI

(Received Oct. 29, 2010)

Abstract

Experimental studies were carried out on anchor-bolt-yield-type exposed column bases subjected to constant compression or tension to obtain different types of resistant mechanisms and restoring force characteristics due to a magnitude of the constant axial force. In this paper, models of resistant mechanisms and restoring force characteristics are proposed on exposed column bases subjected to a variable axial force by use of the experimental results and the models of restoring force characteristics under constant axial forces.

Key Words: *Anchor-bolt-yield-type exposed column-base, Variable axial-force, Hysteresis models of restoring force characteristics, energy absorption*

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、柱軸力による付加曲げ抵抗力により耐力が増加する¹⁻⁵⁾。このため、変動軸力が作用する側柱では時々刻々と柱脚の耐力が増減する^{6,7)}。更に、軸力が引張軸力領域に入る場合、ベースプレートと基礎、ベースプレートとアンカーボルトのナットとの接触・離間条件による抵抗機構の変化が、復元力特性の履歴性状に支配的な影響を与える^{5,8)}。

また、著者等は既報の論文⁹⁾で、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚が引張軸力領域を含む変動軸力を受ける場合に、抵抗機構が様々に変化して、非常に複雑な履歴性状を示すことを明らかにしている。

一方、精確な復元力特性モデルの定式化を行うには、柱軸力、アンカーボルトの塑性伸び量、ベースプレート回転

角等から、抵抗機構の変化を予測した上で、逐次、各抵抗機構に対応した耐力・剛性の理論式を適用する必要がある^{5,8)}。しかしながら、一般的な復元力特性モデルの定式化を行うには、抵抗機構の変化を予測、各機構に対応した理論式を展開する必要があり、その手法を体系化することは容易ではない。

そこで、本論文では、変動軸力と曲げを受ける柱脚の復元力特性を簡便に評価できる手法を提案することを目的とする。方法としては、これまでの実験^{6,9)}における復元力特性の履歴性状から、履歴モデルを検討・提案し、実験結果との整合性を取る。更に、復元力特性上におけるエネルギー吸収量を比較検討して、本論文で提案する履歴モデルの実用性を確認する。

* 広島工業大学 高性能構造システム開発研究センター

** 広島工業大学 工学部 建築工学科

表1 素材特性と主要寸法

| 材質 | E (N/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | 主要寸法 (mm) |
|------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 柱 | STKR400 | 205,000 | 349 □-200x200x12 |
| ベースプレート | SS400 | 205,000 | 409 PL-50x400x400 |
| アンカーボルト : Type 0 | ABR400 | 205,000 | 295 $\phi_g = 14.6$, $abl = 590$ |
| : Type I, I' | ABR400 | 205,000 | 273 $\phi_g = 14.6$, $abl = 590$ |

E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 ϕ_g : 軸部径 abl : 有効長さ

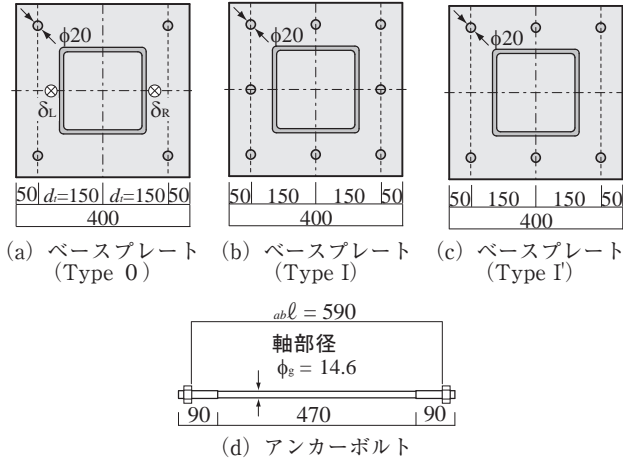


図1 試験体

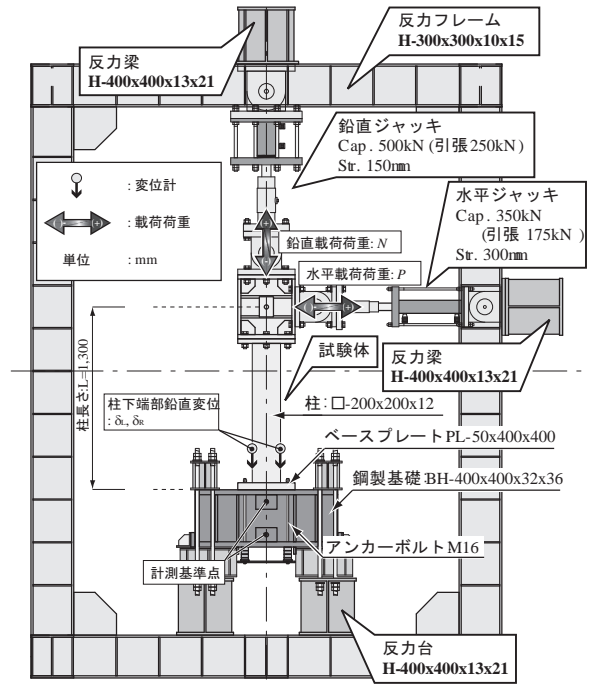


図2 載荷装置と計測計画

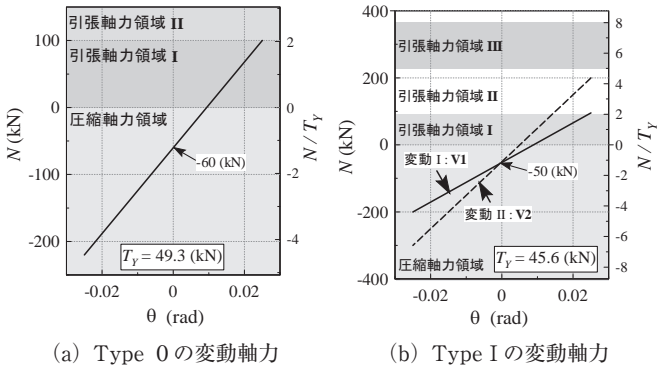


図3 変動軸力の制御方法

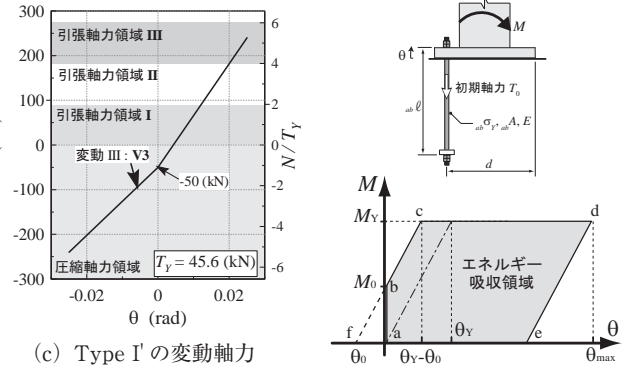


図4 無軸力下の復元力特性模式図

2. 実験概要^{6,9)}

本実験では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付き片持ち柱に、変動軸力と同時に水平力を繰返し載荷する実験を行う。試験体変数を、アンカーボルト配置と変動軸力とする。

表1、表2に試験体の素材特性と主要寸法を、図1に試験体形状を示す。尚、本実験では、アンカーボルトのみが降伏するように、各構成要素の素材特性・断面性能を決定している。

試験体には、単純なアンカーボルト配置の柱脚 (Type 0) に1種類の変動軸力を載荷、アンカーボルトを多数配列した柱脚 (Type I, Type I') に3種類の変動軸力 (V 1, V 2, V 3) を載荷する、合計4種類を用意した。

柱には□-200x200x12を、ベースプレートにはPL-50x400x400を用いて、柱とベースプレートは全周隅肉溶接接合している。アンカーボルトの配置方法は、ベース

プレート隅角部に1本ずつ配置した Type 0、アンカーボルト8本を3列に均等配置した Type I およびアンカーボルト6本を2本ずつ3列に均等配置した Type I' の3種類を採用する。アンカーボルトには転造ねじアンカーボルト M16 を使用し、また、実験時には軸部降伏軸力の30% (15kN) を初期軸力として導入する。基礎部には、いずれの載荷に対しても塑性化しない、鋼製基礎 BH-400x400x32x36 を使用する。

図2、3に載荷装置、変動軸力を示す。載荷は、試験体柱頭部のヨークに接合した鉛直・水平ジャッキにより、柱脚部分に柱軸力 N と曲げモーメント M を作用させるものである。

水平載荷は、制御値をベースプレート回転角 θ として、0.005 (rad) から 0.025 (rad) まで 0.005 (rad) ずつ振幅を漸増させる正負交番漸増繰返し載荷を行う。

鉛直載荷は、ベースプレート回転角 θ の一次の従属関数となるように変動軸力を載荷する。それぞれの試験体で、

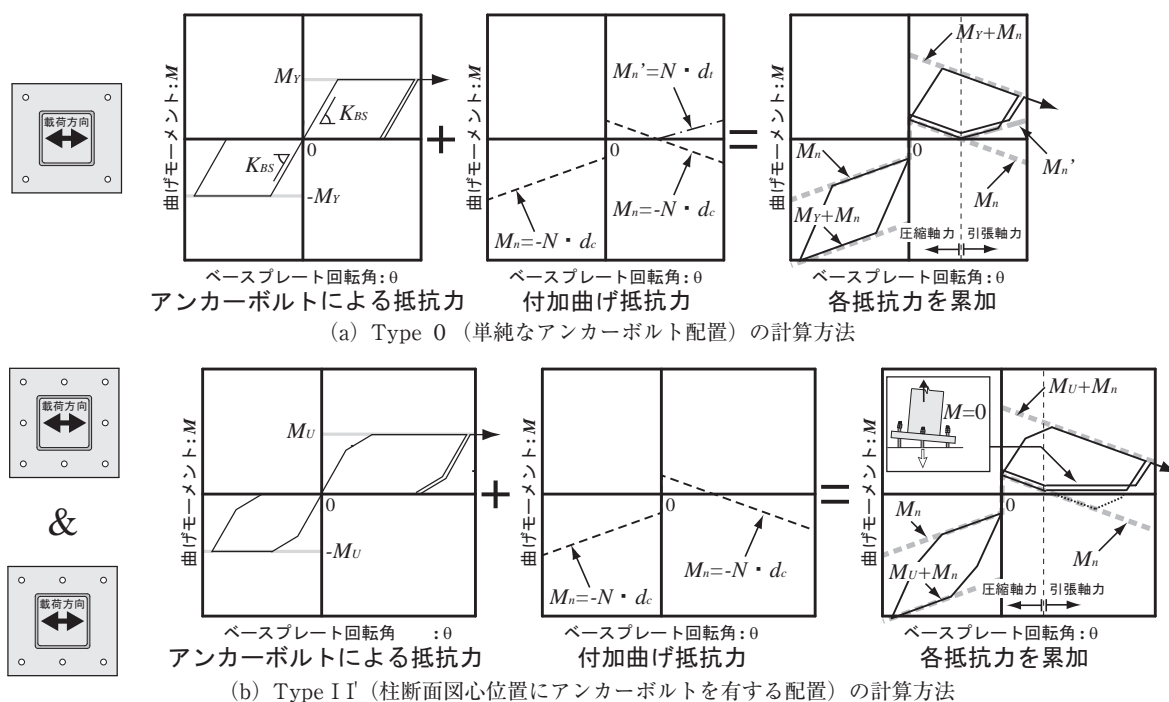


図5 復元力特性の履歴モデル

最大の引張軸力が、Type 0では引張軸力領域Iとなる変動軸力を、Type Iでは引張軸力領域I, IIとなるV1, V2を、Type I'では引張軸力領域IIIとなるV3を载荷する。

図2に計測位置を示す。変位としては、柱下端部の鉛直変位 δ_L , δ_R を計測してベースプレート回転角 θ を算出し。荷重としては、各ジャッキ先端に設置したロードセルにより水平荷重 P および鉛直荷重 N を計測する。

3. 復元力特性の履歴モデルとエネルギー吸収量計算値

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、引張軸力を受ける場合に複数の抵抗機構が発生する。本論文で取扱うType 0では3種類^{5, 8)}、Type I, I'では5種類⁹⁾の抵抗機構が発生し、それぞれの抵抗機構毎に、耐力および剛性の評価式が必要となる。しかしながら、これ等の抵抗機構の発生の予測と、各抵抗機構毎の評価式を包括した一般解は、非常に煩雑になることが予想される。そこで、本節では、既報の実験結果における復元力特性の履歴性状を考慮した履歴モデルを提案する。

また、引張軸力領域を含む変動軸力下の柱脚のエネルギー吸収効率を検討、履歴モデルの妥当性を検討するために、抵抗機構の変化が発生しない場合（無軸力下の場合）のエネルギー吸収量の計算値 e_{cal} を示す。

3.1 仮定

以下の仮定のもと、復元力特性モデルの定式化を行う。

1. 降伏要素をアンカーボルトに限定する。

2. 圧縮合力点位置をベースプレート端部に設ける。
3. 基礎、および、ベースプレートの弾性変形による弾性回転剛性の低減を考慮するため、低減係数 R を導入する。
4. 圧縮側に位置しているアンカーボルトの抵抗力は考慮しないものとする。
5. アンカーボルトによる復元力特性は、スリップ型復元力特性とする。
6. 複数列抵抗する場合は、各アンカーボルト列の復元力特性を累加したものを柱脚の復元力特性とする¹⁰⁾。
7. アンカーボルトの材料特性には、完全弾塑性体モデルを用いる。

3.2 降伏曲げ耐力、付加曲げ抵抗力と弾性回転剛性

任意 i 列のアンカーボルトによる、降伏曲げ耐力 M_y 、および、弾性回転剛性 K_{BS} を以下の式により求める。

$$M_y = n \cdot {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot (d_c + d_i) \tag{1}$$

$$K_{BS} = \frac{E \cdot n \cdot {}_{ab}A \cdot (d_c + d_i)^2}{R \cdot {}_{ab}l} \tag{2}$$

ここに、 n : i 列のアンカーボルト本数、 ${}_{ab}A$: アンカーボルト軸部断面積、 ${}_{ab}\sigma_y$: アンカーボルト降伏応力度、 d_i : i 列のアンカーボルト中心から圧縮合力点位置までの距離、 E : アンカーボルトのヤング係数、 R : ベースプレートと基礎の弾性変形を考慮した低減係数 (= 2.0)¹⁾、 ${}_{ab}l$: アンカーボルトの有効長さである。

また、基礎とベースプレートとが接触している場合の付

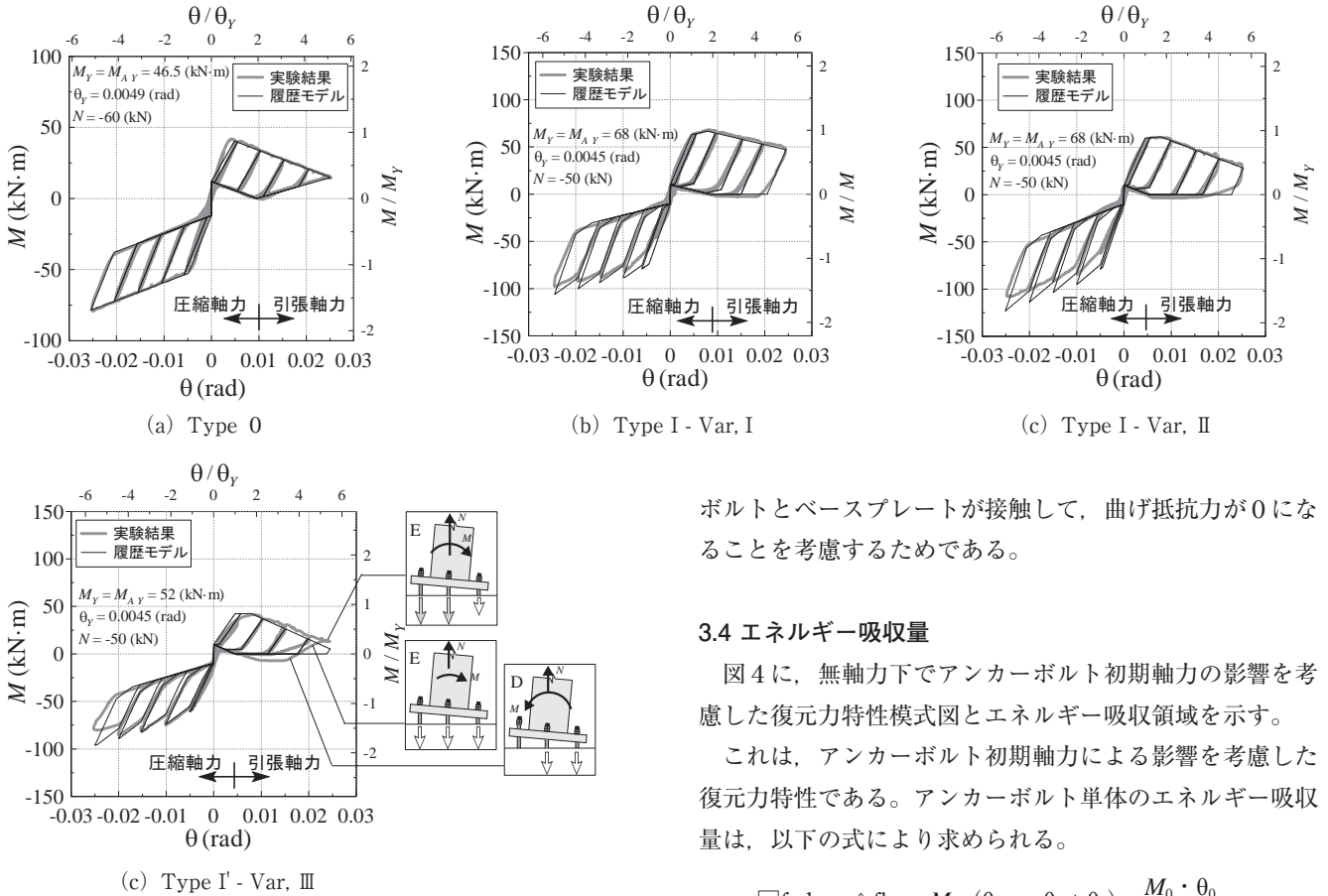


図6 曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係

加曲げ抵抗力 M_n 、引張軸力下で、基礎とベースプレートとが離れて外側のアンカーボルトとベースプレートが接触している場合の曲げ抵抗力 M_n' を以下の式より求める。

$$M_n = -N \cdot d_c \tag{3}$$

$$M_n' = N \cdot d_i \tag{4}$$

3.3 履歴モデル

図5に復元力特性の履歴モデルを示す。

まず、Type 0の場合、圧縮軸力下ではアンカーボルトの復元力特性に付加曲げ抵抗力 M_n を累加したものとす。引張軸力下では、降伏耐力の曲線は圧縮軸力下と同様にアンカーボルトによる抵抗力に付加曲げ抵抗力を足し合せた値 $M_y + M_n$ で算出し、付加曲げによる抵抗力は M_n' で算出した値とする。このため、引張軸力下の復元力特性の履歴面積は、引張軸力が大きくなる程減少する。

次いで、Type I, I'の場合、柱脚の復元力特性をそれぞれの列の復元力特性を累加して算出し、それに付加曲げ抵抗力 M_n を累加したものとす。但し、引張軸力下においては、曲げモーメントを0以下（負方向においては0以上）とする。これは、柱断面図心位置にアンカーボルトが配置してある場合、引張軸力下のスリップ区間（アンカーボルトが塑性伸びした区間）では、柱断面図心位置のアンカー

ボルトとベースプレートが接触して、曲げ抵抗力が0になることを考慮するためである。

3.4 エネルギー吸収量

図4に、無軸力下でアンカーボルト初期軸力の影響を考慮した復元力特性模式図とエネルギー吸収領域を示す。

これは、アンカーボルト初期軸力による影響を考慮した復元力特性である。アンカーボルト単体のエネルギー吸収量は、以下の式により求められる。

$$e = \square fcde - \triangle fba = M_y \cdot (\theta_{\max} - \theta_y + \theta_0) - \frac{M_0 \cdot \theta_0}{2} \tag{5}$$

$$= {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot d \cdot \left[\theta_{\max} - \frac{{}_{ab}\ell \cdot \left({}_{ab}\sigma_y - \frac{T_0}{{}_{ab}A} \right) \cdot R}{E \cdot d} \right] - \frac{T_0 \cdot d \cdot {}_{ab}\ell \cdot T_0 \cdot R}{2 \cdot {}_{ab}A \cdot E \cdot d}$$

ここに、 M_y ：アンカーボルト降伏時曲げ耐力、 θ_0 ：初期軸力による降伏回転角の減少量（図4参照）、 d ：圧縮合力点位置からアンカーボルト中心までの距離である。

また、柱脚のエネルギー吸収量は各アンカーボルトのエネルギー吸収量を累加した値として求める。

4. 実験結果と考察

図6～8、表2にそれぞれの結果を示す。

図6に曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係を、図7に曲げモーメント M - 柱軸力 N 耐力相関関係を、図8に実験終了時エネルギー吸収量 e_{Exp} と履歴モデルによるエネルギー吸収量 e_{Model} を式(5)の無軸力下のエネルギー吸収量計算値 e_{Cal} で除した値を、表2に実験および履歴モデルのエネルギー吸収量の値と比を、それぞれ、示す。また、図6、図7には履歴モデルを、表2には実験結果を追跡するために履歴モデルの値に補正係数 α ($= 1.1$) を乗じた値 $\alpha \cdot e_{\text{Model}}$ を括弧内に、併せて示す。尚、実験および履歴モデルのエネルギー吸収量は、図6の復元力特性の履歴を積分して算出している。

また、各図は以下のように無次元化している。図6中の右縦軸と上横軸は、降伏曲げ耐力の計算値 M_y と降伏時ペー

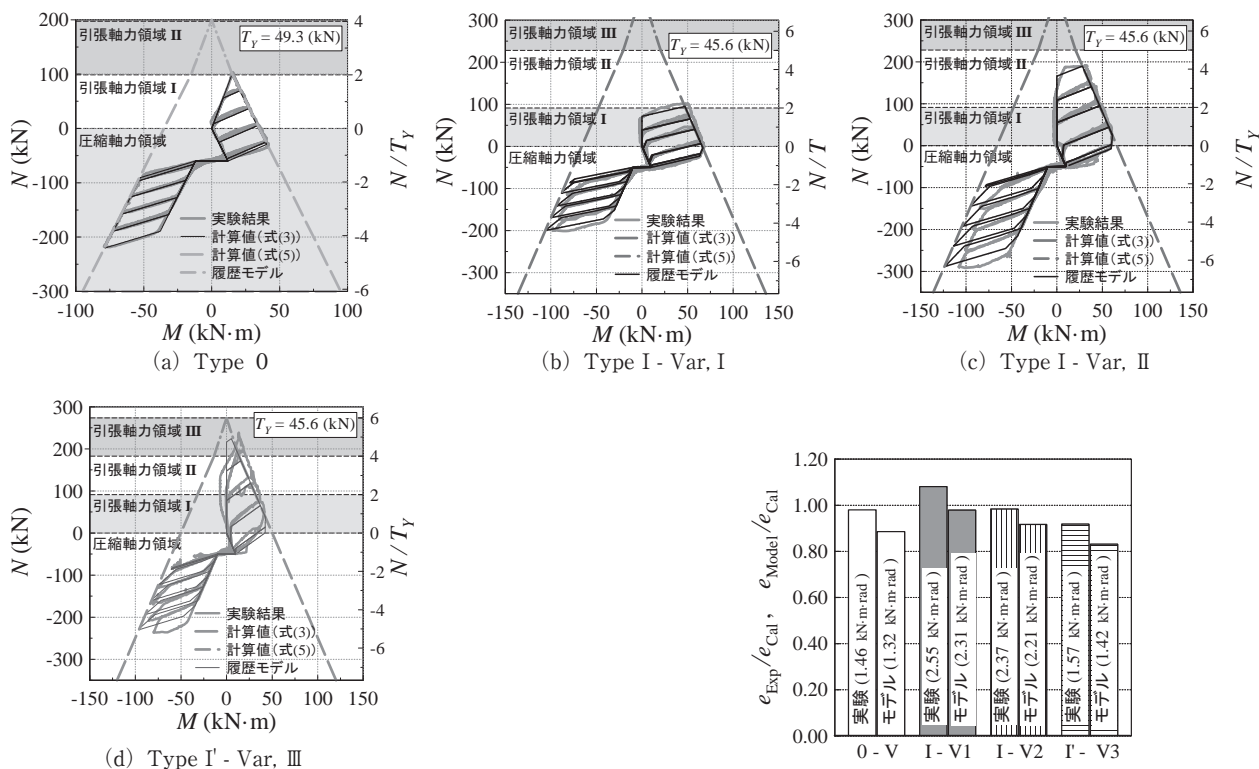


図7 曲げモーメント M - 軸力 N 関係

スプレート回転角の計算値 θ_y で、図7中の右縦軸はアンカーボルト1本当たりの降伏軸力 T_y で、それぞれ、無次元化している。

図6より、実験結果と履歴モデルとは、ほぼ対応している。変動軸力による、降伏耐力の増減や弾性回転剛性の変化、また、スリップ区間における特異な履歴性状を、追跡できている。既報の論文でも示したように、引張軸力下では抵抗機構が様々に変化して、復元力特性の履歴性状も非常に複雑ではあるが、本論文で提案している履歴モデルであれば、抵抗機構の変化等を予測しなくても、簡便に実験結果を追跡できるモデルを作製できることが分かる。

尚、引張軸力が大きくなるに従い、細部において多少の差異が生じている。まず、Type I - V 2と Type I' - V 3の負方向の耐力が、履歴モデルが高目となっているが、これは、柱断面図心位置のアンカーボルトが負方向で期待通りに抵抗しない為である。この原因としては、実験においては、柱断面図心位置のアンカーボルトは正方向荷重時の柱軸力のみで塑性伸びることがあり、履歴モデルでは、その影響を考慮できていないためである。また、Type I' - V 3の正方向の最終サイクルの除荷時に、履歴モデルが実験結果を追跡できていない。これは、引張軸力領域IIIに入ることで、柱軸力および曲げにより引張側および柱断面図心位置のアンカーボルトが大きく塑性伸びして、除荷時に圧縮側のアンカーボルトとベースプレートとが接触して、回転と同じ向きの曲げ抵抗が生じるためである。

また、図7より、 M - N 耐力相関関係上においても、実

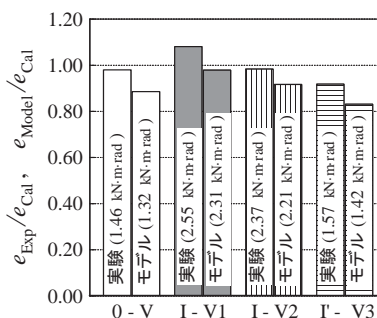


図8 復元力特性上におけるエネルギー吸収量

表2 実験とモデルのエネルギー吸収量の比

| 試験体名称 | エネルギー吸収量 (kN·m·rad) | | |
|-------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| | 実験結果 | 履歴モデル | 実験/計算 |
| | e_{Exp} | $e_{Modl} (\alpha = 1.1)$ | e_{Modl} / e_{Exp} |
| Type0 - V | 1.46 | 1.32 (1.45) | 0.90 (0.99) |
| TypeI - V1 | 2.54 | 2.31 (2.54) | 0.91 (1.00) |
| TypeI - V2 | 2.37 | 2.21 (2.43) | 0.93 (1.03) |
| TypeI' - V3 | 1.57 | 1.42 (1.56) | 0.90 (0.99) |

験結果と履歴モデルとはほぼ対応している。このため、本モデルにより、 M - N 耐力相関関係も追跡できることが分かる。

最後に、図8、表2より、実験結果のエネルギー吸収量と履歴モデルのエネルギー吸収量は、1割程度の誤差を有しているが、引張軸力領域を含む変動軸力を受けることで復元力特性上の履歴面積が減少する傾向を追跡できている。実験結果より、履歴モデルが低目の値を示しているのは、履歴性状を追跡できていないためではなく、実験にて生じる僅かな遊びや各部の摩擦抵抗力を累加したために、計算値との差異が生じているのだと考えている。このため、実験に含まれるアンカーボルトの塑性伸び以外の履歴エネルギーを補正するための係数 α ($= 1.1$: 本実験における値) を乗じれば、実験結果と良好に一致する値を得ることができる。(但し、当該補正値は実験条件等により変動することが予想されるため、今後、多くの実験結果を用いて検討する必要がある。)

5. まとめ

アンカーボルト配置および軸力の大きさを変数とした変動軸力下の復元力特性を評価する履歴モデルを提案し、実験結果と比較検討を行い、以下の知見が得られた。

1. 本論文で示す復元力特性の履歴モデルは、引張軸力領域を含む変動軸力下の履歴性状を、抵抗機構等の変化を考慮することなく、簡便に評価できる。
2. $M-N$ 耐力相関関係においても、履歴モデルは実験結果を追跡できている。
3. 柱脚のエネルギー吸収量は、引張軸力領域を含むことで減少するが、履歴モデルはこの傾向を追跡できている。また、本実験においては、補正係数 α を 1.1 とすれば柱脚の復元力特性上におけるエネルギー吸収量を精確に評価できる。

本論文では、履歴モデルを提案し、実験結果の復元力特性履歴性状およびエネルギー吸収量を追跡できることを示した。本論文の履歴モデルは、非常に簡便であり、比較的容易に体系化できるので、数値解析等に組み込んで、引張軸力領域を含む変動軸力による影響を考慮した構造物の数値解析を行う予定である。

謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施されました。

また、試験体の転造ねじアンカーボルトを提供していただきましたフルサト工業株式会社に対して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.
- 2) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究，鋼構造年次論文

報告集，第 11 巻，pp.563-570, 2003.11.

- 3) 高松隆夫，玉井宏幸，山西央朗：ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，構造工学論文集，Vol.51B, pp.293-302, 2005.3.
- 4) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰：露出柱脚の弾性回転剛性について－アンカーボルト降伏先行型の場合－，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻 第 624 号 pp.317-324, 2008.2.
- 5) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松村高良，松尾彰：一定引張軸力を受ける露出柱脚の抵抗機構と復元力特性モデル，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻 第 637 号 pp.561-567, 2009.3.
- 6) 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，白木剛，多田元秀：統合化評価法を用いた実大ノンスリップ型露出柱脚の仮動的実権，鋼構造年次論文報告集，第 14 巻，pp.269-276, 2006.11.
- 7) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，福原章宏，三好行則：ノンスリップ型露出柱脚付き門型フレームに関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第 17 巻，pp.73-80, 2009.11.
- 8) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松村高良，松尾彰：引張領域を含む変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚の抵抗特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻 第 642 号，pp.1495-1502, 2007.11.
- 9) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章：変動軸力と曲げを受けるアンカーボルト多数配列型露出柱脚に関する実験的研究，広島工業大学紀要，研究編，第 44 巻，pp.207-213, 2010.2.
- 10) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰：アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力特性－無軸力下の場合のセルフセンタリング性能－，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp.155-162, 2007.11.