

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

山西 央朗*・高松 隆夫**・玉井 宏章**

(平成21年10月31日受理)

A experimental study on anchor-bolt-yield-type exposed column-base with multi-rows of anchor bolts subjected to variable axial-force and bending

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU and Hiroyuki TAMAI

(Received Oct. 31, 2009)

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, Multi-rows of anchor-bolt, Resisting mechanism, Restoring force characteristics*

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、柱からの圧縮軸力に比例して復元力特性の降伏曲げ耐力・弾性回転剛性が増減する¹⁻²⁾。また、柱から引張軸力を受ける場合、ベースプレートと基礎、および、ベースプレートとアンカーボルトのナットとの接触・離間条件により抵抗機構が変化し、これに伴い、復元力特性(履歴性状)が変化することが明らかとなっている³⁾。

著者等はこのようなアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性と抵抗機構との相互関係を明らかにするため、一定圧縮・引張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載荷実験を行い、以下のことを明らかにしている⁴⁻⁶⁾。

1) アンカーボルト列当たりの耐力により、軸力の領域を

分けることができ、領域毎に(軸力の大きさにより)復元力特性の履歴が変化する。

2) 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り各抵抗機構を定義して、抵抗機構毎に降伏曲げ耐力、弾性回転剛性等を評価できる。

3) 抵抗機構の変化等が予測できれば、各評価式を用いて実験結果を精確に評価できる復元力特性モデルが算出できる。

4) アンカーボルトの列数が増加すると、軸力の領域の種類が増加する。更に、抵抗機構の種類も増加する。

このため、アンカーボルト先行降伏型露出柱脚が引張軸力を受ける場合は、復元力特性は複雑な挙動を示すことが予想される。これまでに、アンカーボルトをベースプレート隅角部に1本ずつ配置した単純な試験体の変動軸力を受

* 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	ABR400	205,000	273	$\phi_g = 14.6, ab\ell = 590$

E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 ϕ_g : 軸部径 $ab\ell$: 有効長さ

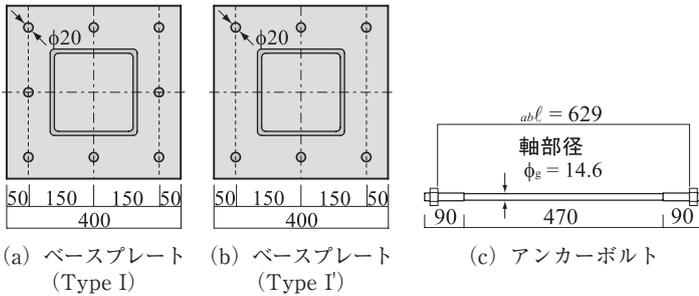


図 1 試験体

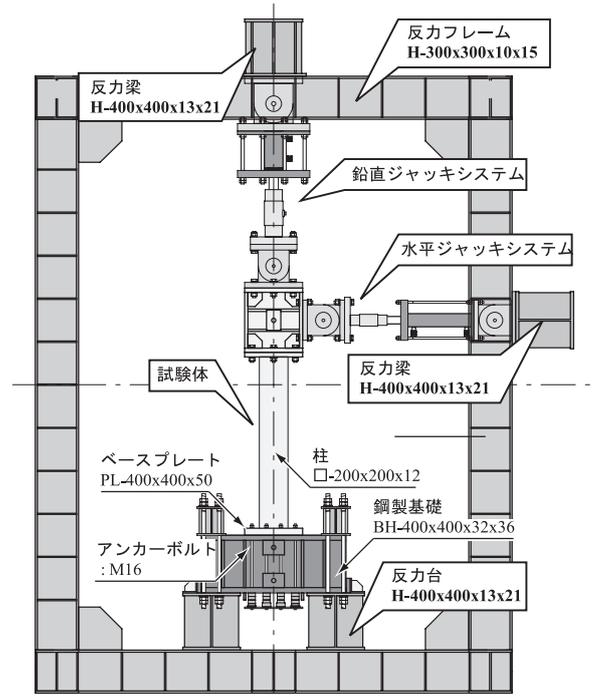


図 2 荷装置

ける場合については、荷重実験を行い、復元力特性と抵抗機構との相互関係を明らかにし、復元力特性モデルの定式化を行っている⁷⁻⁹⁾。しかしながら、アンカーボルトを多数配列した場合については、十分な検討を行えていない。

そこで、本論文では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を用いて、引張軸力領域を含む変動軸力下の荷重実験を行い、変動軸力下の復元力特性を明らかにすることを目的とする。また、アンカーボルト軸力、ベースプレートと基礎との接触反力等から、復元力特性と抵抗機構との相互関係も明らかにする。

尚、変動軸力を受ける柱脚として、本研究では中低層ラーメン構造物の側柱を想定し⁷⁾、主に軸力と曲げにより崩壊する柱脚を対象としている。

2. 実験

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繰返し荷重する実験を行う。試験体変数を柱軸力 N とする。

2.1 試験体

表 1 に試験体の素材特性と主要寸法を示す。また、図 1 に試験体形状を示す。尚、本実験では、ベースプレート、柱、および、基礎部分には、各荷重に対して弾性範囲に留まる素材特性・断面性能を採用している。

試験体には、アンカーボルトを多数配列した露出柱脚 (Type I, Type I') に 3 種類の変動軸力 (Var. I, Var. II, Var. III) を荷重する、合計 3 種類を用意した。

柱には □-200x200x12、ベースプレートには、PL-

50x400x400 にアンカーボルト 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' を用い、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、いずれの荷重に対しても塑性化しない、鋼製基礎 BH-400x400x32x36 を使用する。

2.2 荷装置と荷方法

図 2, 3 に荷装置、変動軸力を示す。荷重は、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。

水平荷重は、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荷重を行う。

鉛直荷重は、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荷重する。また、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚が引張軸力を受ける場合、引張軸力のみで何列のアンカーボルトが降伏するかにより、発生する抵抗機構が変化する。

このため、Type I においては、以下のように領域分けを行うことができる。

$0 < N < 8T_y$ を満足するとともに、

$N < 2T_y$:

引張軸力領域 I

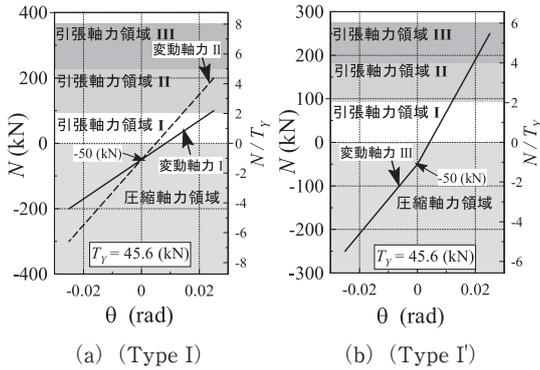


図3 変動軸力の制御方法

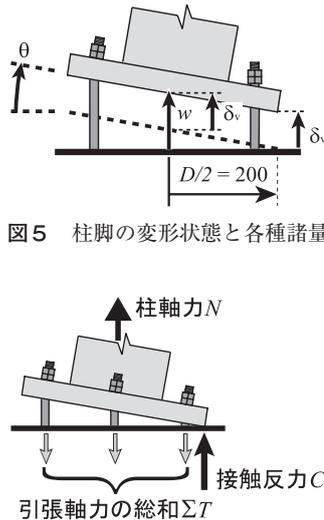


図6 柱脚の鉛直方向力

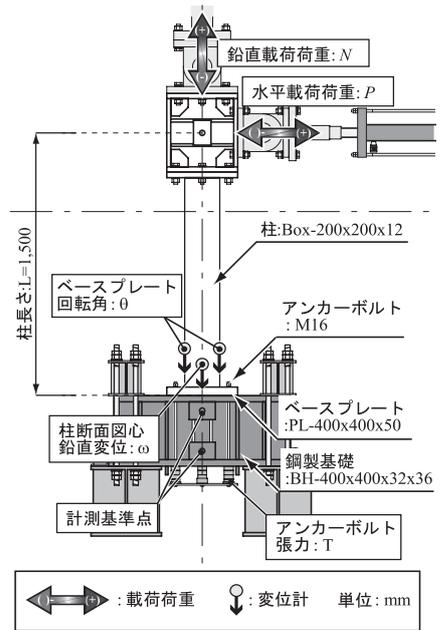


図4 計測位置

$$2T_y \leq N < 5T_y : \quad \text{引張軸力領域 II}$$

$$5T_y \leq N < 8T_y : \quad \text{引張軸力領域 III}$$

このように、中央の列に配置された2本のアンカーボルトが降伏するか否かと、中央と外側の一列の合計5本のアンカーボルトが降伏するか否かが境となり、3つの領域に分けられる。

本実験では、最大の引張軸力が引張軸力領域 I, II, III に入る3つの変動軸力 Var. I, Var. II, Var. III を载荷する。但し、8本を均等配置した試験体では、引張軸力領域 III の载荷を行うのに、約 300 (kN) 以上の荷重が必要であり、本実験装置の鉛直ジャッキでは载荷能力が不足し、载荷できない。このため、外側に配置されたアンカーボルト本数を2本に減らした Type I' で载荷実験を行う。このため、引張軸力領域 III の範囲は以下ようになる。

$$0 < N < 6T_y \text{ を満足するとともに,}$$

$$4T_y \leq N < 6T_y : \quad \text{引張軸力領域 III}$$

このため、Var. III は図3 (b) に示すものを载荷する。

2.3 計測方法と整理方法

図4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 を算出する。また、図5に示す幾何学的条件から求めた以下の式を用いて、ベースプレートと基礎との離間変位 δ_v を算出する。

$$\delta_v = w - \frac{D}{2} \cdot \sin \theta = \frac{\delta_L + \delta_R}{2} - \frac{D}{2} \cdot \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 D : ベースプレートの幅である。

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、アンカーボルト下端部に設置したセンターホール型ロードセルによりアンカーボルト軸力 T を計測する。また、ひずみゲージを柱の2箇所 (1箇所当たり、4枚) に貼付して、柱の軸方向

直ひずみを計測し、曲率と柱の曲げ剛性から柱脚部に作用する曲げモーメント M を算出する。尚、ひずみゲージより算出した曲げモーメント勾配から柱のせん断力を算出し、水平荷重 P と一致することを確認している。

更に、図6に示す柱脚回りの鉛直方向力の釣合から以下の式を導出して、接触反力 C を算出する。

$$C = N - \sum T \quad (2)$$

ここに、 $\sum T$: アンカーボルト軸力の総和である。但し、 N, T, C のいずれも、引張側を正 (+) とする。

3. 抵抗機構

本論文の試験体が圧縮、引張軸力を受ける場合、図7に示す5種類の抵抗機構が発生する。以下に、各抵抗機構の特徴と発生領域を示す。

(a)の抵抗機構 A は、ベースプレートが基礎に接触している場合の抵抗機構である。圧縮軸力領域にある場合は常にこの抵抗機構となり、引張軸力の場合は、引張軸力領域 I, II で発生する。

(b)の抵抗機構 B は、ベースプレートが基礎から離間し、中央のアンカーボルト列のナットがベースプレートに接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構は、引張軸力領域 I のみで発生する。この抵抗機構では、柱軸力に対して中央のアンカーボルトが抵抗し、柱軸力とアンカーボルトの抵抗力との間の距離が0であるので、曲げ耐力は0となり、柱脚はピン接合状態となる。

(c)の抵抗機構 C は、ベースプレートが基礎から離間し、外側のアンカーボルト列のナットがベースプレートに接触

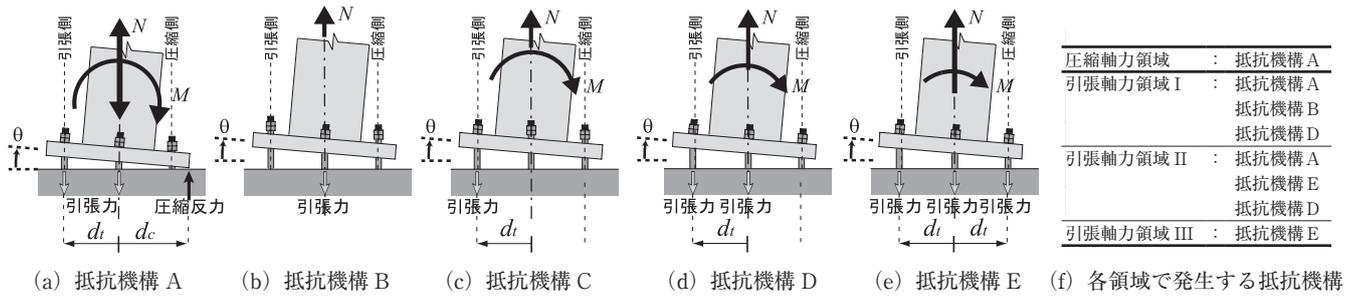


図7 曲げに対する抵抗機構

している場合の抵抗機構である。この抵抗機構は、引張軸力領域 I, II で発生する。この抵抗機構では、耐力は常に付加曲げ耐力となる。

(d)の抵抗機構 D は、ベースプレートが基礎から離間し、中央のアンカーボルト列および外側片方のアンカーボルト列のナットがベースプレートに接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構は、引張軸力領域 I, II で発生する。この抵抗機構では、中央の列が降伏している場合と、外側の列が降伏している場合とで降伏曲げ耐力が異なる。

(e)の抵抗機構 E は、ベースプレートが基礎から離間し、全てのアンカーボルトのナットがベースプレートに接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構は、引張軸力領域 I, II, III で発生する。

以上より、各軸力領域で発生する抵抗機構は、図 7 (f) に示すようになる。

4. 実験結果と考察

図 8 ~ 11 に各試験体の実験結果を、それぞれ、示す。図 8 に曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係を、図 9 にアンカーボルト軸力 T - θ 関係を、図 10 に接触反力 C - θ 関係を、図 11 にベースプレート離間変位 δ_0 - θ 関係を、それぞれ、示す。但し、離間変位は式(1)より算出し、接触反力 C は式(2)より算出している。

また、図 8 においては、最終サイクルの履歴を極太線として各時点での抵抗機構を表しているものも併せて示している。図 9 においては、最終サイクル除荷時のアンカーボルト抵抗状態を明確に示すために、最終サイクルのみの履歴も併せて示している。

尚、図 8 中の抵抗機構については、図 9 の T - θ 関係から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状態を、図 10 の C - θ 関係からベースプレートと基礎との接触離間状態を判断し、3 節と図 7 の定義に基づいて抵抗機構を決定している。接触離間状態の判断においては、 T および C 共に、値が 0 となったら離間状態であると判断した。

4.1 復元力特性 (M- θ 関係) と抵抗機構

図 8 より、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、変動軸力の大きさに関係なく、いずれの場合においてもスリップ現象が生じている。また、負方向载荷では圧縮軸力が増加するため回転角の増加と共に耐力が増加、正方向载荷では圧縮軸力が減少した後に引張軸力が増加するため回転角の増加と共に耐力が減少している。

変動軸力 I の場合については、正方向の最終サイクルでは、载荷時の抵抗機構が $A \Rightarrow B \Rightarrow A$ となり、抵抗機構 A で柱脚が降伏している。また、除荷時には、耐力が 0 になると共に抵抗機構 B となり、軸力が圧縮軸力領域に入るまで耐力が 0 のままであった。塑性化した区間では、ほぼ抵抗機構 B で耐力が 0、また、引張側アンカーボルト (左側ボルト) が接触すると同時にベースプレートと基礎とが接触するため、無軸力下の復元力特性に類似している。

変動軸力 II の場合については、履歴性状は変動軸力 I の場合に近いが、最大引張軸力が大きいため正方向载荷時の耐力の減少が大きい。抵抗機構 B の発生により、耐力が 0 になることと、引張軸力による耐力の減少が変動軸力 I に比べて大きいため、復元力特性の履歴の減少が明瞭に現れている。更に、除荷時においては、抵抗機構 D が発生している。

変動軸力 III の場合については、他の変動軸力の場合と比較して、多目の抵抗機構が発生している。これは、各軸力領域を通る影響と、図 11 から分かるように離間変位が大きいためである。また、その履歴性状は非常に複雑であり、復元力特性のみではスリップ現象が発生している部分の判定も困難である。更に、引張軸力が大きいため、正方向载荷での中央ボルトの塑性伸び量が大きく、負方向载荷で抵抗し難くなっている。このため、負方向载荷の履歴がノコギリの刃のような形状となり、他の変動軸力の場合と異なる履歴となっている。

4.2 離間変位

図 11 より、引張軸力が大きくなるほど、離間変位が大きくなっている。これは、引張軸力をアンカーボルトが負

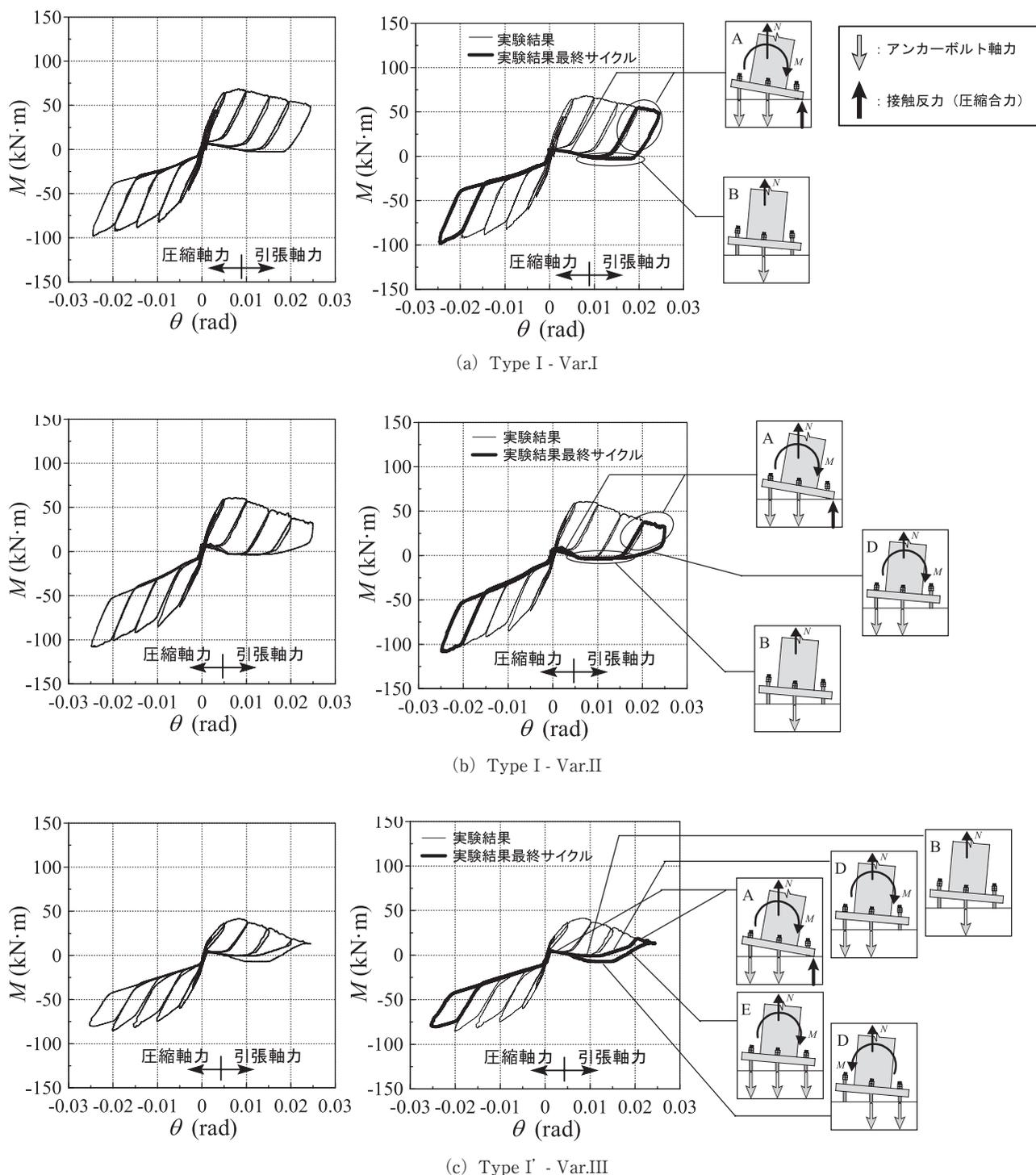


図8 部曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係

担し、また、引張軸力に抵抗できない（引張軸力のみで降伏する）場合に、ボルトが大きく塑性伸びするためである。このため、変動軸力 III では、6 mm 近くの離間変位が生じている。

また、アンカーボルトが塑性伸びした場合、引張軸力を受けるとベースプレートとナットとが接触するまで、鉛直上方向に変位するので、塑性化した区間では離間変位が大きくなる。

以上より、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、変動軸力を受ける場合もスリップ現象が生じる。また、引張軸力を受ける場合、引張軸力の大きさにより発生する抵抗機構が変化する。

このため、復元力特性モデルの定式化を精確に行うには全ての抵抗機構を考慮して抵抗機構発生の判定式を設け、更に、抵抗機構毎の降伏曲げ耐力および弾性回転剛性を評

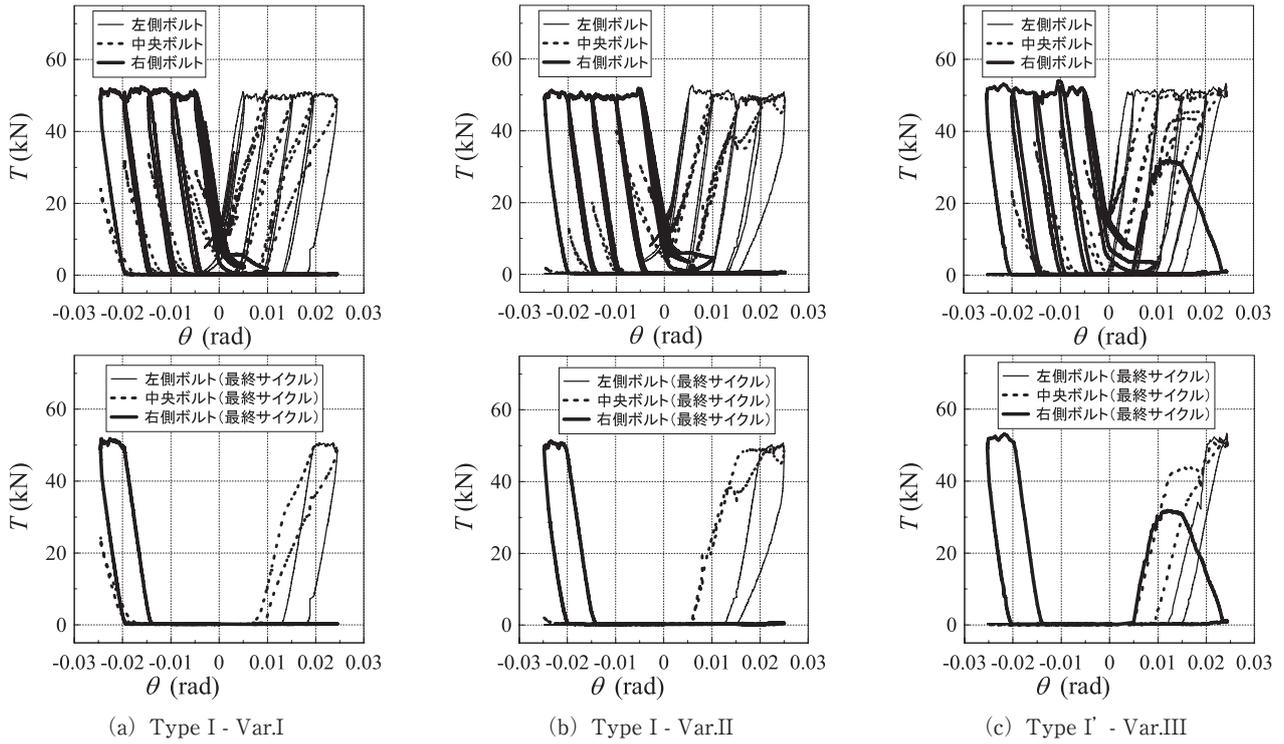


図9 アンカーボルト軸力 T - ベースプレート回転角 θ 関係

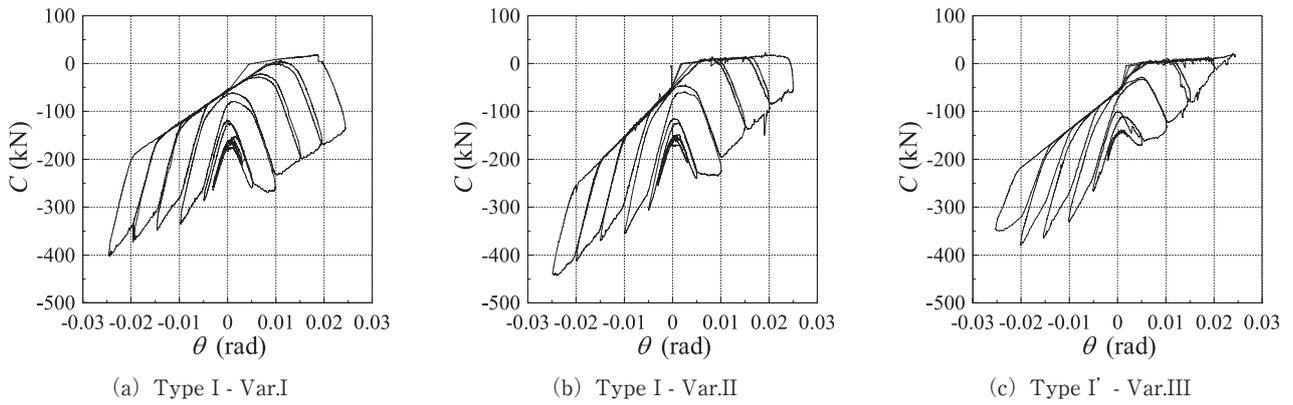


図10 接触反力 C - ベースプレート回転角 θ 関係

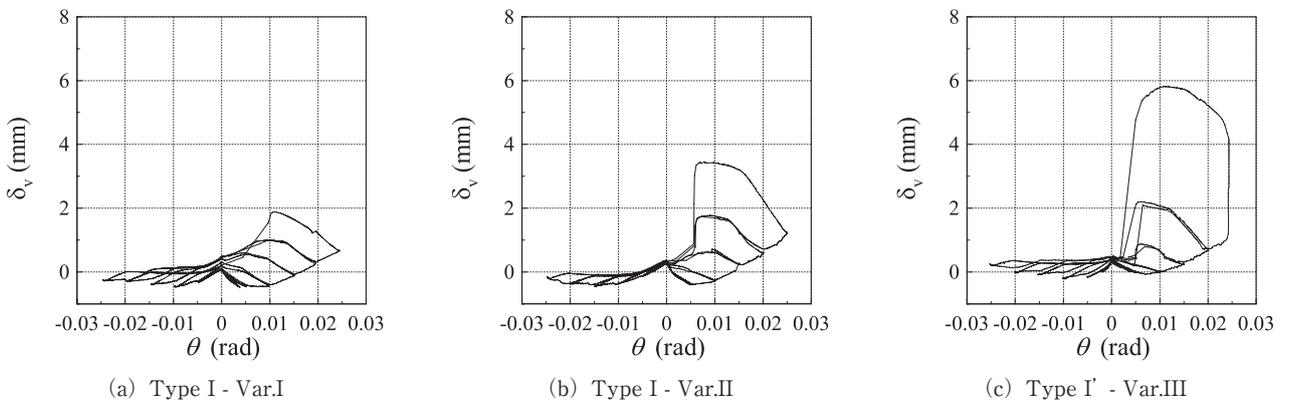


図11 離間変位 δ_v - ベースプレート回転角 θ 関係

価することになる。各アンカーボルトをスプリングに置き換えて増分解析を行うか、有限要素法解析等を行えば解析できるが、実務設計を考えた場合、容易に評価できるとは考え難い。また、復元力特性の履歴性状においても、規則性はないと思われ、回転バネ等を用いた設計式を導出するのも困難と思われる。

5. まとめ

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を用い、軸力の大きさを変数とした、変動軸力下の繰返し载荷実験から以下の知見が得られた。

1. 様々な変動軸力を受ける場合においても、スリップ型復元力特性を示す。
2. 変動軸力が引張軸力領域に入る場合においては、変動軸力の大きさにより、発生する抵抗機構が異なり、引張軸力が大きくなるにつれて復元力特性が複雑化する。
3. 抵抗機構が複数個有り、また、その発生条件が容易に想定し難いこと、復元力特性に規則性が見られないことから、実験結果を追跡できる復元力特性モデルを定式化することは容易ではない。
4. 離間変位は、引張軸力が大きくなる程大きくなり、最大で6 mm程度の離間変位が生じた。

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) 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.
- 3) 田沼吉伸，橋本健一：引張軸力を受ける露出形式柱脚の終局挙動，鋼構造年次論文報告集，第6巻，pp.181-188, 1998. 11.
- 4) 高松隆夫，玉井宏章，松村高良，山西央朗，松尾彰：一定軸力下の鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.97-104, 2007. 11.
- 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) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松村高良，松尾彰：一定軸力を受けるアンカーボルト多数配列型露出柱脚の復元力特性，鋼構造年次論文報告集，第16巻，pp.267-274, 2008. 11.
- 7) 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.
- 8) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，小澤拓雄，松尾彰：変動軸力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，鋼構造年次論文報告集，第16巻，pp.283-290, 2008. 11.
- 9) 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.

