

曲げモーメントと軸力を受ける露出柱脚の抵抗機構について

高松 隆夫*・玉井 宏章**・山西 央朗***

(平成18年10月30日受理)

Resisting Mechanism of Exposed Column-Base under Bending Moment and Axial Force

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

Generally, an exposed column base consists of anchor bolts and an elastic thick base plate. Restoring force characteristics of the column base are observed to be slip-type due to a gap between a nut of the anchor bolt and the base plate, caused by the plastic elongation of the anchor bolt. Strength and restoring force characteristics of the column base vary under the influence of an axial force. The resisting mechanism and the models of restoring force characteristics of the column base subjected to bending moment and the axial force are proposed.

Key Words: exposed column-base, axial-force, restoring force characteristics, anchor-bolt-yield-type

1. はじめに

近年、各構造要素が保有する特性が、構造物全体にどのような連成効果を与えるか、また、その連成効果が構造物全体の挙動にどのような影響を与えるかを明らかにするための、オンライン実験や構造物全体解析が頻繁に行われている。しかしながら、全ての構造要素の精確な特性が明らかにされている訳ではなく、ある程度理想化した構造要素モデルを用いての研究となっている^{1), 2)}。

一方、本論文で取扱うアンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、部分架構試験体を用いた載荷実験、および、解析による研究で^{3)~7)}、以下の2つの特性が明らかにされている。1) アンカーボルトの塑性伸びにより、スリップ現象が発生し、柱脚の固定度が著しく劣化する。; 2) 構造物の自重が、柱軸力として露出柱脚に伝播し、露出柱脚の抵抗力、および、抵抗機構に大きな影響を与える。;

一般的な構造物における中柱の露出柱脚（構造物の内部に配置された柱の柱脚）では、地震外力作用下においても、柱軸力はほぼ一定である。また、側柱の露出柱脚（構造物の外周に配置されている柱の柱脚）では、地震外力により生じる、構造物の転倒モーメントの支持力が側柱の露出柱脚に作用するため、側柱の柱軸力が変動する。更に、ブレースを配置した場合にも、ブレース反力が露出柱脚部に作用し、柱脚部に作用する柱軸方向力が変動することとなる。このように、柱の軸力が変動しても、圧縮軸力の領域にある場合は、これまで提案されているモデルで評価できる。しかしながら、軸力の変動が大きく、柱軸力が引張軸力の領域に入る場合、現在提案されているモデルでは、その抵抗性状を追跡できず、オンライン実験や構造物全体解析にあたり大きな問題点となる。

本論文では、まず、各軸力レベル下における抵抗機構を明らかにすることを目的とし、一定軸力下における、それ

* 広島工業大学工学部建築工学科教授

** 広島工業大学工学部建築工学科助教授

*** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻大学院生

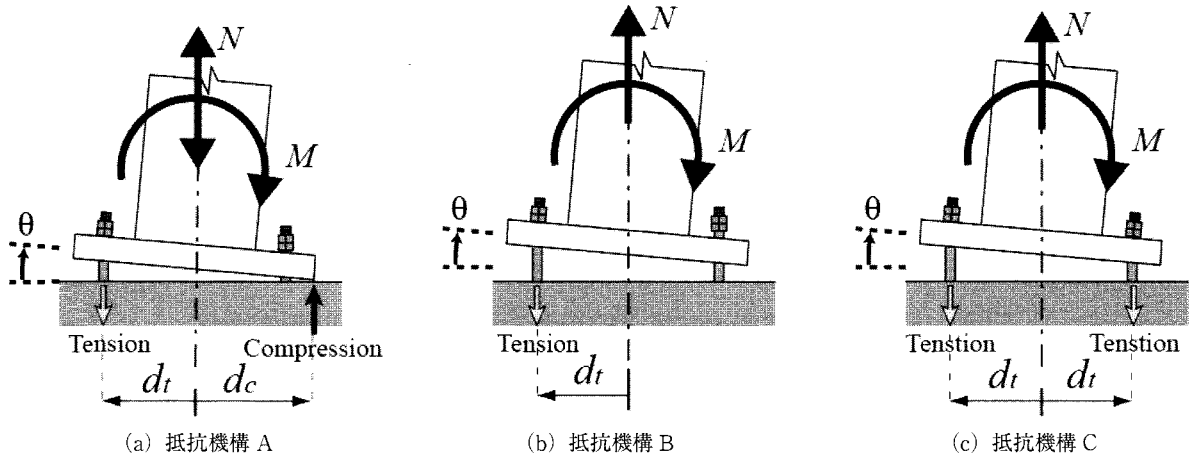


図2 曲げモーメントと柱軸力下における露出柱脚の抵抗機構

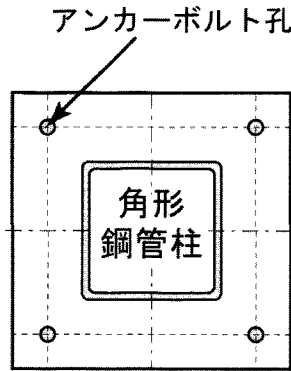


図1 露出柱脚の形状

ぞれの抵抗機構・復元力特性モデルを提案する。方法としては、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚の基本的な抵抗機構を基に、柱軸力が引張軸力の領域に入る場合の抵抗機構、並びに、耐力・剛性の評価式を求める。尚、比較のために、基本的な抵抗機構も記述する。試験体としては、ベースプレート隅各部にアンカーボルトを1本ずつ、計4本のアンカーボルトを配置した、一般的な固定形式露出柱脚を用いる。

2. 抵抗機構の提案

本論文で取扱う露出柱脚の概形を図1に、圧縮軸力、および、引張軸力作用下における各種抵抗機構を図2に示す。

2.1 仮定

本論文では、以下の仮定に基づいて、各抵抗機構を提案・考察する。

1. 柱脚の降伏要素を、アンカーボルトに限定する。
2. 露出柱脚の構成要素である、基礎コンクリート、ベースプレートは弾性変形のみを許容し、塑性化はしないものとする。このため、柱脚の幾何学的変形状より求める、アンカーボルトの伸び量の評価の際に、基礎

コンクリート、並びに、ベースプレートの弾性変形を考慮するための係数： R を導入する。

3. 圧縮合力点位置を、圧縮側のベースプレート端部に設ける。

いかなる軸力作用下においても、ベースプレートと基礎コンクリートが接した場合に、圧縮合力点位置は推移しないものとする。

4. ベースプレートと基礎コンクリート接触時には、引張側のアンカーボルトの抵抗力のみを考慮する。

処女載荷時には、圧縮側に位置するアンカーボルトも曲げに抵抗するが、引張側と比較して抵抗力・剛性が小さいため、また、繰返し載荷下ではベースプレートと接触し難くなるため、圧縮側は考慮しないものとする。

5. 柱せん断力は、ベースプレートと基礎コンクリート接触時には、ベースプレートと基礎コンクリート間に発生する摩擦抵抗力し、離間時には、アンカーボルトのせん断で抵抗するものとする。

ベースプレートと基礎コンクリートの間には、通常、0.4以上の摩擦係数が期待できる⁷⁾。第一層の層せん断力に対して、柱軸力は十分に大きいので、摩擦抵抗力で十分に抵抗できるとされている。

6. アンカーボルトの材料特性には、完全断塑性体モデルを用いる。

2.2 抵抗機構

曲げモーメントと柱軸力下における露出柱脚の抵抗機構、露出柱脚部せん断に対する抵抗機構を、それぞれ図2, 3に示す。各抵抗機構の特性と、各機構になるための柱軸力条件を示す。尚、以後に記述する記号は、 ${}_{ab}N_y$ ：配置してあるアンカーボルトの降伏張力を累加した値、 N ：柱脚に作用する柱軸力である。

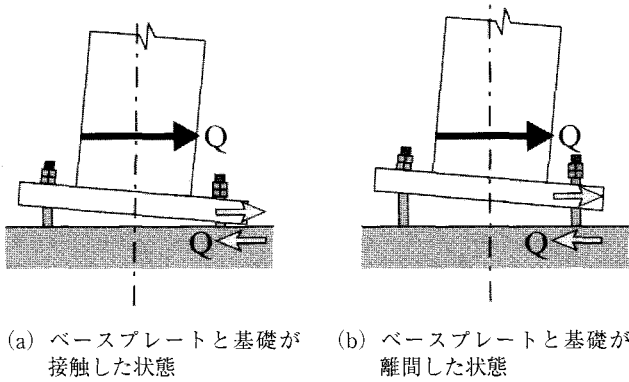


図3 露出柱脚部せん断力に対する対抗機構

○抵抗機構 A

図2 (a) に、ベースプレートと基礎コンクリートとが接触する場合の抵抗機構を示す。この場合、圧縮軸力下・引張側アンカーボルト抵抗時、圧縮軸力下・アンカーボルト離間時、および、引張軸力下・引張側アンカーボルト抵抗時の、計3ケースが考えられる。図3 (a) にせん断力に対する抵抗機構を示す。せん断力に対してはベースプレートと基礎コンクリート間の摩擦力が抵抗し、アンカーボルトは曲げに対してのみ抵抗する。

アンカーボルトとベースプレートが接触している場合、圧縮合力点位置は圧縮側ベースプレート端部に位置し、柱脚の降伏耐力は、アンカーボルトによる曲げ抵抗力と軸力による付加曲げ抵抗力で決定する。

仮定3) より、接触するアンカーボルトは引張側のみであるので、柱軸力が $0.5_{ab}N_y$ を超過した場合、アンカーボルトが降伏引張軸力に達して塑性伸びをし、基礎とベースプレートが離間する。よって、抵抗機構 A は、 $N \leq 0.5_{ab}N_y$ の領域で発生する。

○抵抗機構 B

図2 (b) に、ベースプレートと基礎コンクリートとが離間し、圧縮側、もしくは、引張側のどちらか一方のアンカーボルトとベースプレートが接触する場合の抵抗機構を示す。図3 (b) にせん断力に対する抵抗機構を示す。せん断力は、接触していない方のアンカーボルト軸部とベースプレートのアンカーボルト孔面とが接触して、基礎部に応力を伝播する。

引張軸力とアンカーボルト張力による偶力が、柱脚に作用する付加曲げ抵抗力となる。このため、柱脚の付加曲げ抵抗力は、柱軸力により決定する。

尚、柱軸力が $0.5_{ab}N_y$ を超過した場合、接触しているアンカーボルトが降伏・塑性伸びをして、もう片方のアンカーボルトと接触することとなる。よって、抵抗機構 B は、 $0 < N \leq 0.5_{ab}N_y$ の領域で発生する。

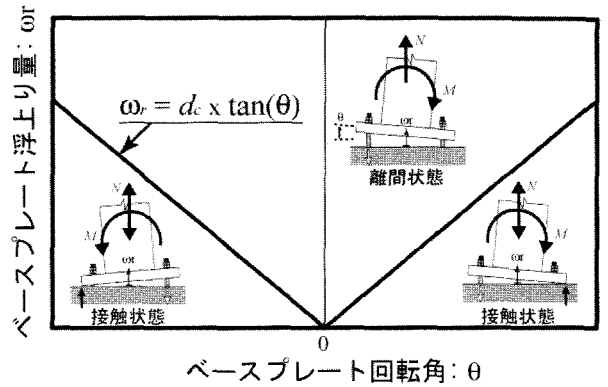


図4 接触条件の概念

○抵抗機構 C

図2 (c) に、ベースプレートと基礎コンクリートとが離間し、圧縮側、および、引張側の両アンカーボルトとベースプレートが接触する場合の抵抗機構を示す。図3 (b) にせん断力に対する抵抗機構を示す。せん断力は、全アンカーボルト軸部とベースプレートのアンカーボルト孔面とが接触して、基礎部に応力を伝播する。尚、一方が降伏張力に達している場合は、もう一方のアンカーボルトのみがせん断力を伝播する。

柱脚に作用する付加曲げ抵抗力は、圧縮側と引張側アンカーボルトの引張力の差により決定する。このため、両方のアンカーボルトが降伏している場合、曲げ抵抗力が生じず、せん断抵抗力が0となる。

抵抗機構 C は、引張軸力の全領域にて発生する可能性があるため、発生領域は $0 < N \leq 0.5_{ab}N_y$ となる。

2.3 接触・離間条件

図4に、縦軸にベースプレート中央浮上り量： ω_r 、横軸にベースプレート回転角： θ とした概念図を示す。

ベースプレート、および、基礎コンクリートが剛体であると仮定したときの、柱脚回転時の幾何学的な接触条件式を以下に示す。

$$\omega_r = d_c \cdot \tan(\theta) \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 d_c ：柱図心位置からベースプレート端部までの距離、 ω_r ：ベースプレート中央の浮上り量である。

図中の接触条件式のラインより下にあるときには、ベースプレートと基礎コンクリートとが接触している状態なので、抵抗機構 A となる。また、接触条件式のラインより上にある場合においては、浮上り量、圧縮側、および、引張側のアンカーボルト塑性伸び量により、抵抗機構 B、C のどちらかとなる。

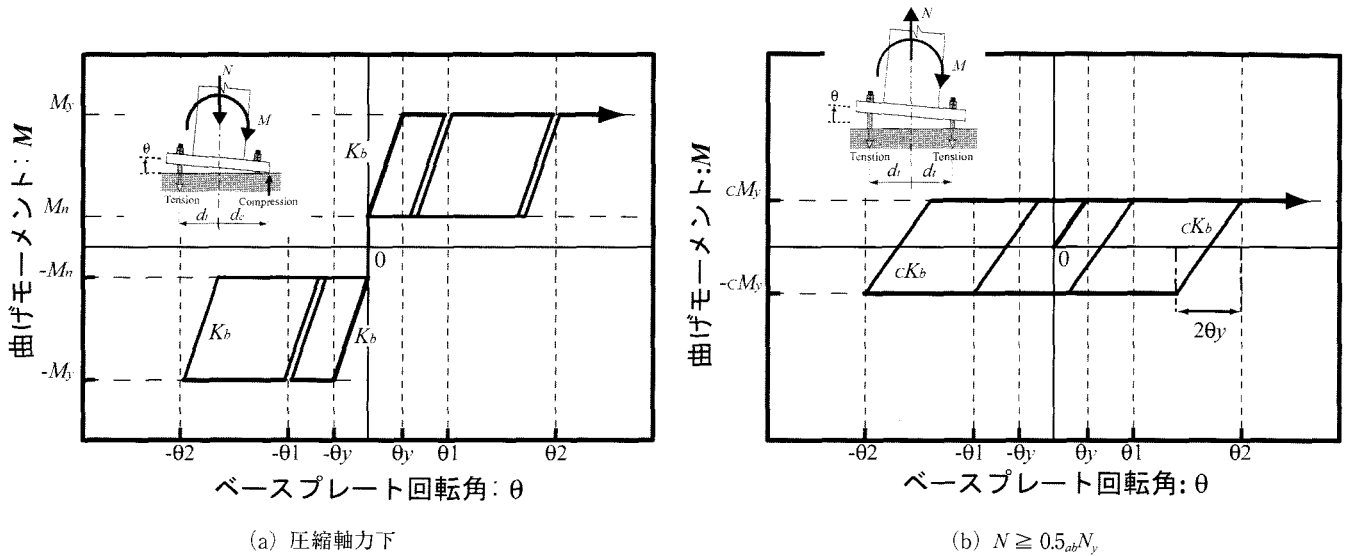


図5 復元力特性モデル

2.4. 耐力および剛性の評価式

各抵抗機構における評価式を以下に示す。

○抵抗機構 A

抵抗機構 A は、圧縮合力点位置が圧縮側ベースプレートの直下に発生し、アンカーボルトの抵抗曲げモーメント： ${}_a M_y$ は次式となる。

$${}_a M_y = n \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) \quad \dots \dots (2.a)$$

ここに、 n :引張側アンカーボルトの本数、 A_{ab} :アンカーボルト軸部断面積、 ${}_{ab} \sigma_y$:アンカーボルト降伏点、 d_t :柱断面図心より引張側アンカーボルト図心までの距離である。

軸力： N による曲げ抵抗曲げモーメント： M_n は次式により求められる。尚、柱軸力は引張軸力を正 (+) とする。

$$M_n = -N \cdot d_c \quad \dots \dots (2.b)$$

以上、式 (2.a), (2.b) より柱脚部の降伏曲げモーメント： M_y は、次式により求められる。

$$M_y = n \cdot {}_{ab} \sigma_y \cdot A_{ab} \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \quad \dots \dots (2.c)$$

次いで、アンカーボルトの弾性伸び変形より求められる弾性回転剛性： K_b は次式により求められる。

$$K_b = \frac{n \cdot A_{ab} \cdot E \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot l_{ab}} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 E :アンカーボルトのヤング係数、 R :ベースプ

レートおよび基礎の弾性変形による剛性低下を考慮した低減係数 ($R = 2$)、 l_{ab} :アンカーボルト有効長さである

○抵抗機構 B

抵抗機構 B は、ベースプレートと基礎コンクリートが離間し、片方のアンカーボルトが接触しているときの、軸力： N による抵抗曲げモーメント： ${}_B M_n$ は次式により求められる。

$${}_B M_n = -N \cdot d_t \quad \dots \dots (4)$$

○抵抗機構 C

抵抗機構 C は、ベースプレートと基礎コンクリートが離間し、両方のアンカーボルトが接触しており、片方のアンカーボルトが降伏している時の降伏曲げモーメント： ${}_c M_y$ は次式により求められる。

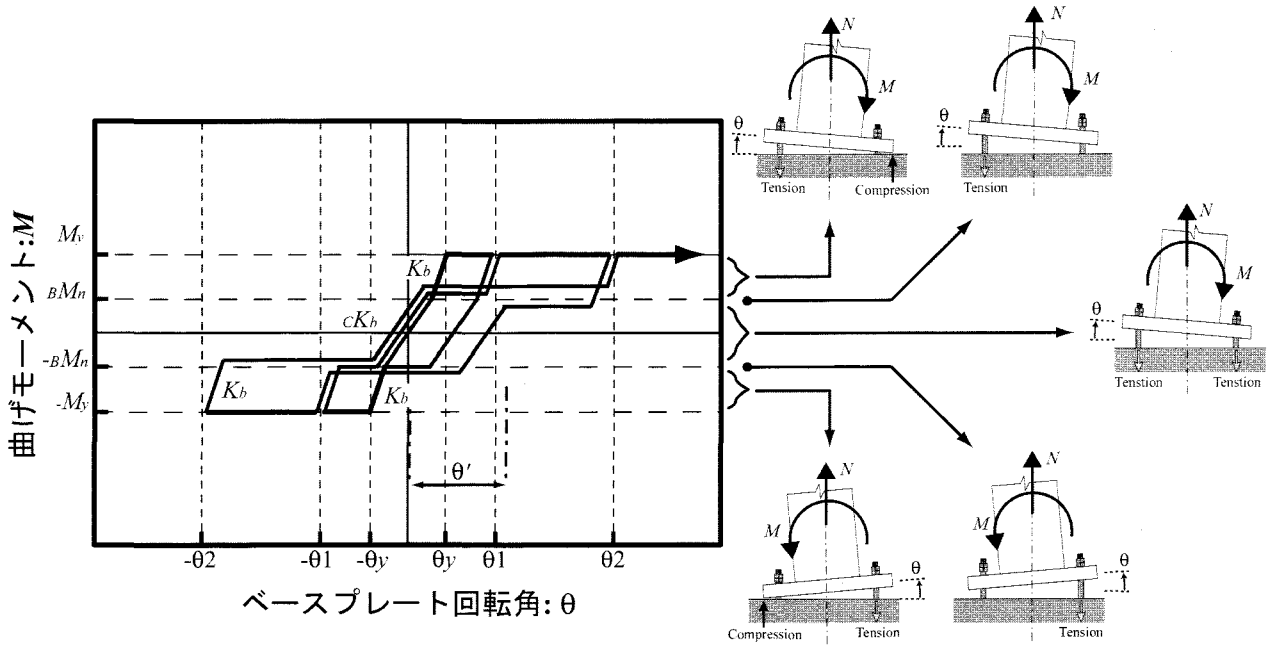
$${}_c M_y = n \cdot {}_{ab} \sigma_y \cdot A_{ab} \cdot 2d_t - N \cdot d_t \quad \dots \dots (5)$$

また、アンカーボルトの弾性伸び変形より求められる弾性回転剛性： ${}_c K_b$ は次式により求められる。

$${}_c K_b = \frac{n \cdot A_{ab} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot l_{ab}} \quad \dots \dots (6)$$

3. 復元力特性モデル

各定軸力下における復元力特性モデルを図5に示す。各図中に、主な耐荷機構を併せて記載する。算定する軸力は、圧縮軸力下、引張軸力 $0 < N < 0.5 {}_{ab} N_y$ 、および、引張軸力 $0.5 {}_{ab} N_y \leq N < {}_{ab} N_y$ の3ケースとする。



(c) $0.5_{ab}N_y \leq N < abN_y$

図5 復元力特性モデル

一定圧縮軸力下における復元力特性モデルを図5 (a) に示す。圧縮軸力が作用しているため、降伏耐力は付加曲げ抵抗力を累加した耐力となり、スリップ現象は付加曲げ抵抗力値の軌跡上で発生する。付加曲げ耐力、降伏曲げ耐力および弾性回転剛性は、式 (2.b), (2.c) および (3) により求められる。

引張軸力 $0.5_{ab}N_y \leq N < abN_y$ の範囲の、一定引張軸力下における復元力特性モデルを図5 (b) に示す。柱脚に作用する引張軸力は、アンカーボルトが負担する。片側のアンカーボルトが引張軸力 $0.5_{ab}N_y$ を負担するような機構になると、 $0.5_{ab}N_y$ を負担する側のアンカーボルトは降伏・塑性伸びをする。このため、常に引張側と圧縮側の両列で引張軸力および曲げモーメントに抵抗し、抵抗機構Cとなる。また、常に引張側と圧縮側が抵抗しているため、除荷開始と同時に、主に抵抗をするアンカーボルト ($0.5_{ab}N_y$ を負担する側) が引張側から圧縮側へと移行する。この影響により、軌跡が第4象限へと推移し、スリップ区間が存在することなく、更に、履歴性状が紡錘型となる。降伏曲げ耐力および弾性回転剛性は、式 (5) および (6) により求められる。

引張軸力 $0 < N < 0.5_{ab}N_y$ の範囲の、一定引張軸力下における復元力特性モデルを図5 (c) に示す。柱脚に作用する引張軸力は、アンカーボルトが負担する。このため、柱脚の曲げ降伏耐力は、アンカーボルトによる降伏曲げ耐力から引張軸力による付加曲げ耐力を差引く形となり、無軸力下における耐力よりも減少していく。アンカーボルト

降伏時は抵抗機構 A となるので、曲げ降伏耐力および弾性回転剛性は、式 (2.c) および式 (3) により求められる。また、スリップ区間では、抵抗機構 B となるので、付加曲げ耐力は式 (4) により求められる。

次いで、載荷を正方向から開始した場合、正方向除荷時には、引張側アンカーボルトが、圧縮側アンカーボルトと比較して有効長さ (ナット間距離) が長くなる。この影響により、正方向除荷時には、回転角 θ' の時点でベースプレートと圧縮側アンカーボルトが接触し、抵抗機構 C へと移行していく。この影響により、付加曲げ耐力の軌跡が、第4象限へと推移することとなる。この抵抗機構の移行時の剛性は式 (6) により求められる。また、抵抗機構の移行が開始する時の回転角 θ' は、次式により求められる。

$$\theta' = \left\{ (d_t + d_c) |\theta_n| - (d_t + d_c) |\theta'_{n-1}| + \frac{N \cdot l_{ab}}{n \cdot A_{ab} \cdot E} \right\} \cdot \frac{1}{2d_t} \quad \dots (7)$$

ここに、 θ_n : n サイクル時における正方向最大回転量、 θ'_{n-1} : n-1 サイクル時における負方向最大回転量である。

復元力特性モデルの1サイクル目では、圧縮側アンカーボルトに全く塑性伸びがないので、ベースプレートと圧縮側アンカーボルトは常に接触しており、スリップ区間において、除荷後直ぐに抵抗機構 C へと移行する。圧縮側アンカーボルトに塑性伸びが生じている場合には、除荷時にスリップ区間に入ると抵抗機構 B となり、回転角 θ' の時点で抵抗機構 C へと移行を開始する。

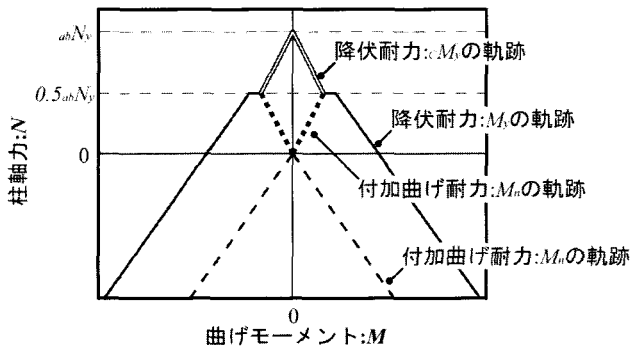


図6 柱軸力と曲げモーメントの関係

4. 柱軸力と曲げモーメントの関係

図6に、縦軸を柱軸力： N 、横軸を柱脚曲げモーメント： M とした時の概念図を示す。尚、図中における実線は柱脚の降伏曲げの軌跡、点線は付加曲げ抵抗力の軌跡とする。

降伏耐力値は、圧縮軸力が上昇すると共に増加し、引張軸力が上昇すると共に耐力が低下する。引張軸力下では、柱軸力が $0.5_{ab}N_y$ に到達すると降伏耐力： M_y の軌跡から降伏耐力： cM_y の軌跡へと推移し、柱軸力が $_{ab}N_y$ に達すると曲げ抵抗力が0となる。 $0.5_{ab}N_y$ の時点で軌跡が推移するのは、アンカーボルト降伏時の抵抗機構が、抵抗機構Aから抵抗機構Cに切り替わることによる影響である。また、柱軸力が $_{ab}N_y$ に達することで曲げ耐力が0となるのは、全アンカーボルトが柱軸力のみで降伏するためである。

付加曲げ耐力は、圧縮軸力下、および、引張軸力下共に、軸力値が上昇すると共に耐力が上昇する。圧縮軸力下では、抵抗機構が変化しないので、抵抗曲げ耐力は上昇を続ける。引張軸力下では、柱軸力 $0.5_{ab}N_y$ を境に、抵抗機構Bが発生しなくなるので、付加曲げ抵抗力は存在しなくなる。

5. ま と め

柱軸力を変数とした、露出柱脚の抵抗機構、各種評価式、および、復元力特性モデルの検討を行い、以下の知見を得た。

1. 柱脚の抵抗機構は、3種類に大別でき、各抵抗機構における、曲げ耐力、回転剛性の評価が行えた。
2. 圧縮軸力下では、常に抵抗機構Aとなり、一般的なスリップ型の復元力特性モデルとなる。
3. 引張軸力が $0 < N < 0.5_{ab}N_y$ の範囲では、抵抗機構A、

BおよびCが全て発生する可能性があり、複雑な復元力特性モデルとなる。

4. 引張軸力が $0 < N < 0.5_{ab}N_y$ の範囲では、常に抵抗機構Bとなり、スリップ現象を示すことは無く、紡錘型の復元力特性モデルとなる。
5. 各軸力レベルにより、抵抗機構が様々に変化し、各機構に対応した評価式、復元力特性モデルを用いることが必要である。

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しました。また、本研究の経費の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2005年度鋼構造研究・教育助成事業（建築）」の助成金から支出しました。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河野昭雄, 松井千秋: 柱脚の復元力特性の違いがはり降伏型鉄骨ラーメンの地震応答性状に与える影響について, 日本建築学会構造系論文集, 第507号, pp.139-146, 1998.5.
- 2) 河野昭雄: 地震動による鋼ラーメン骨組の残留水平変位に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第589号, pp.165-171, 2005.5.
- 3) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3.
- 4) 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, 2003.11.9
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 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. 51 B, pp.293-302, 2005.4.
- 6) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 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, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.181-188, 2005.11.
- 7) 九谷和秀, 増田貫志: 鉄骨構造露出柱脚部終局耐力に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第433号, pp.39-49, 1992.3.