



変動軸力を受ける露出型柱脚の弾塑性解析

亀元, 靖彦
三谷, 勲
田中, 秀宣
伊藤, 倫夫

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 7:171-179

(Issue Date)

2003-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00406483>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00406483>



変動軸力を受ける露出型柱脚の弾塑性解析

Elastic-Plastic Analysis of Exposed-type Column Base Subjected to Variable Axial Force

亀元 靖彦¹⁾

Yasuhiko Kamemoto

三谷 勲²⁾

Isao Mitani

田中 秀宣³⁾

Hidenori Tanaka

伊藤 倫夫⁴⁾

Michio Itoh

概要：露出型柱脚を2本の軸方向バネでモデル化した骨組に鉛直荷重及び地震力(水平力)を作用させた場合の弾塑性挙動について検討するため、塑性関節法による弾塑性解析を適用し、骨組の弾塑性挙動を追跡した。

キーワード：復元力特性、側柱、アンボンド型アンカーボルト、マトリックス解析、軸方向バネ

1. はじめに

柱脚は上部架構の鉄骨またはCFT(Concrete Filled Steel Tube)構造の柱と鉄筋コンクリート構造との異種構造部材の接合部である。従って、建築物の中で重要な部位であり、かつ上部骨組からの応力がここに集中するため、その力学的性状が非常に複雑である。

1995年の阪神淡路大震災では、露出型柱脚を有する鋼構造建物のアンカーボルトの大きな伸びや破断に起因する地震被害が数多く報告された¹⁾。大きな地震被害の主要因として、阪神淡路大震災は直下型の地震であり、建築物への地震動入力は上下動が大きかったとされており、柱脚部に想定以上の大きな引抜力や、転倒モーメントによって大きく変動する軸力が作用したことが挙げられる。

ラーメン骨組に水平力が作用すると、梁にせん断力が生じ、それに伴い柱軸力が変動する。構造物の中柱においては両側の梁から逆方向のせん断力を受けるため、軸力変動幅は小さくなるが、側柱においては柱軸力の変動は大きいものとなる。多層骨組では各層に生じる梁せん断力によって、柱軸力が累積する。特に柱軸力が引張側に変動した場合、柱脚の曲げ耐力は低下し、アンカーボルトの塑性化が進むとともに構造物全体の変形も大きくなる。構造物全体の性能を評価するためには、構造物がどのような挙動を示すかを理解しなければならない。そのためには柱脚部の剛性と強度を定量的に把握する必要がある。

鋼構造架構の耐震性は、柱脚の曲げ耐力、回転剛性および復元力特性の影響を受けることが知られており、過去の研究において、それらに着目した多くの研究²⁾⁻⁵⁾が行われてきた。その結果、柱脚の構造性能は軸力の影響を受けることが明らかにされている⁶⁾⁻⁹⁾。しかし、これらの研究の多くは、圧縮または引張のいずれか一方の一定軸力が作用する柱脚に関する研究であり、実際の構造物に地震力が作用した場合を想定した圧縮軸力と引張軸力が交互に作用した場合の柱脚の挙動に関する研究¹⁰⁾⁻¹²⁾は少なく、未解明な点が多い。また、露出型柱脚では、弾性剛性を弾性回転バネとして評価する。弾性変形をアンカーボルトの伸び変形のみと仮定したときの弾性剛性は K_{bs} として、文献13)に評価式が提案されている。

本論文では、露出型柱脚のアンカーボルトの伸び変形およびコンクリートの局所変形を考慮した軸方向バネを提案し、この軸方向バネを用いてモデル化した骨組について塑性関節法(hinge-by-hinge method)による

弾塑性解析を適用した繰り返し载荷の応力増分解析を行う。転倒モーメントによる柱軸力の変動のもとで、モデル化の妥当性について検討し、実験結果¹⁴⁾との対応を調べる。

2. 解析

2-1. 弾塑性解析の概要

図1に示すように露出型柱脚を2本の軸方向バネを用いてモデル化した骨組に対して、弾塑性挙動の検討及び実験結果との比較検討を行う。

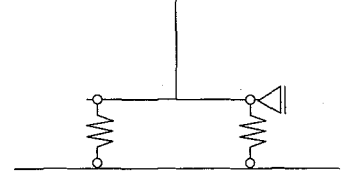


図1 柱脚部のモデル化

2-2. 解析仮定

解析に用いた仮定は以下の通りである。

- 1) 柱、梁部材は軸力とせん断力に対して弾性挙動し、モーメント-たわみ角関係は図2に示す完全弾塑性とする。
- 2) 軸方向バネは、両端ピン接合とし、応力-ひずみ関係は図3に示す完全弾塑性とする。
- 3) ヒンジ形成点は部材端のみとする。
- 4) 柱、梁部材は材端モーメント $(M) \geq 0.95 \times M_p$ で塑性ヒンジを形成する。
- 5) 軸方向バネは、軸方向応力 $(P) \geq 0.95 \times \sigma_y$ で塑性化する。
- 6) 全塑性モーメント M_p の軸力による低減は考慮しない。

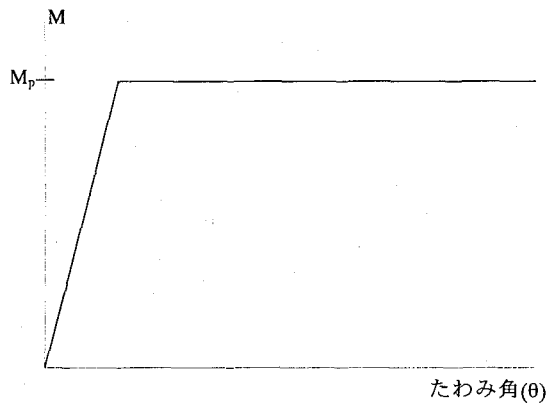


図2 部材の曲げモーメント-たわみ角関係

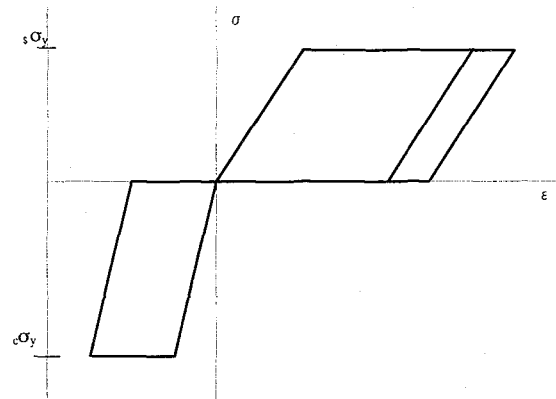


図3 軸方向バネの応力-ひずみ関係

2-3. 解析手法

2-3-1. 塑性関節法 (Hinge-by-Hinge method) について

塑性関節法は、部材応力が部材耐力に達するたびに、塑性ヒンジの発生の追跡を行いながら計算を進める増分解析法であり、構造物の全体挙動を押さえる上で非常に有効な手法である。この手続きを弾塑性解析というが、弾塑性解析によると、構造物の最大耐力、崩壊時の変形量がわかるだけでなく剛性・強度の劣化過程、エネルギー吸収能力、崩壊に至るまでのメカニズムの形成過程等、骨組みの崩壊過程に関する情報が得られ、構造物の特性を把握するのに役立つ。

塑性関節法は、ヒンジ形成後も次のヒンジが形成されるまで、(最終的には構造物が崩壊機構を形成するまで)弾性計算を行うため、解析より得られた復元力特性が塑性域の広がりやを考慮した場合と比較して、挙動追跡上荒くなる傾向がある。しかし、本研究では骨組みの全体傾向を把握するためにこの解析法を用いた。

2-3-2. 塑性関節法の適用

塑性関節法による弾塑性解析概要を弾性領域及び弾塑性領域に分けて以下に示す¹⁶⁾。また、弾塑性解析フ

ローを図5に示す。

(・)弾性領域：骨組みに最初の塑性ヒンジが発生するまでの計算方法

単位節点外力からなる荷重項 p と節点変位の項 d は骨組全体の剛性マトリックス $(CK_m C^t)$ を用いて、以下のようになる。

$$p = (CK_m C^t) d \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、

C :釣合マトリックスと座標変換マトリックスの積からなる式

K_m :各部材の弾性剛性マトリックス

P :単位節点外力からなる外力ベクトル

C^t : C の転置マトリックス

$$[C^t] = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & -L & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

θ :基準座標系における x 軸と部材座標系における x 軸のなす角

式(1)を、節点変位 d について解く。また、式(2)のように各部材間の両端の部材端応力 p_o を部材座標系で表現して求める。

$$p_o = (C_{on} K_m C^t) d_{mo} \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、

C_{on} :部材座標系で部材端での応力を求める場合に用いる変換用のマトリックス

p_o :単位節点外力による対象としている部材の部材端の応力ベクトル

d_{mo} :対象としている部材の1端、2端の節点変位からなる変位ベクトル

次に、全部材の部材端応力の結果を用いて、最初に塑性化する部材端を検出し、塑性ヒンジが生じるまでの増分外力を計算する。塑性ヒンジとなる部材端は、各部材端について塑性ヒンジとなるまでの許容応力増分を、単位外力を加えた場合の部材端応力 $p_o(N, Q, M)$ で割った比(=AZ)の中で、最小値(=ALPHA)を示す部材端である。また、増分外力は、単位外力にその係数を掛けたものとなる。具体的には、全ての部材について、次式より計算を行う。

$$AZ = M_p / p_o(M) \quad \dots \text{式(3)}$$

$$AZ = P_y / p_o(N) \quad \dots \text{式(4)}$$

$$ALPHA = \min(AZ) \quad \dots \text{式(5)}$$

ここで、

P_y :軸方向バネ部材の降伏軸力

最初の塑性ヒンジ発生時の節点外力ベクトル p_p 、および最初の塑性ヒンジ発生時の部材端応力ベクトル p_m と節点変位ベクトル d_d は、

$$p_p = ALPHA \times p \quad \dots \text{式(6)}$$

$$p_m = ALPHA \times p_o \quad \dots \text{式(7)}$$

$$d_d = ALPHA \times d \quad \dots \text{式(8)}$$

となる。

(・)塑性領域：骨組中の2番目以降の塑性ヒンジ発生ステップでの計算方法

前のステップまでに、塑性ヒンジが発生した部材端をピン接合とし、塑性化した軸方向バネは軸剛性を0

とし、この新しい骨組に、単位節点外力ベクトル p を作用させて節点変位ベクトル d' を求める。ここで、 p と d' は、後で増分として、それまでの外力と変位に加えるためのものを計算するとき用いるものである。 p と d' は、直前のステップでの外力と変位を原点として測ったそのステップでの単位外力とそれによる変位である。

$$p = (CK_m' C') d' \quad \dots \text{式(9)}$$

ここで、

$(CK_m' C')$: 崩壊過程における新しい骨組の全体剛性マトリックス

K_m' : 崩壊過程の各部材の剛性マトリックス

骨組に単位節点外力を作用させた場合の対象部材の部材端応力ベクトル p_o' は弾性領域の場合と同様に、次式で表される。

$$p_o' = (CK_m' C') d_{mo}' \quad \dots \text{式(10)}$$

ここで、

d_{mo}' : 対象としている部材の1端、2端の節点変位からなる変位

次の塑性ヒンジが発生するまでの増分外力は、弾性領域の場合と同様に各部材の部材端について、以下のよう AZ を求め、 AZ の最小値 $ALPHA$ を求めることにより計算を進める。

$$AZ = (M_p - p_m(M)) / p_o'(M) \quad \dots \text{式(11)}$$

$$AZ = (P_y - p_m(N)) / p_o'(N) \quad \dots \text{式(12)}$$

$$ALPHA = \min(AZ) \quad \dots \text{式(13)}$$

次の塑性ヒンジ発生時までに加える節点外力ベクトル p_p' は、直前のステップまでに加えた節点外力ベクトル p_p に新しい骨組に新たな塑性ヒンジが発生するまでに与えられる増分外力を加えたものとなる。

$$p_p' = p_p + ALPHA \times p \quad \dots \text{式(14)}$$

この塑性ヒンジ発生時まで $ALPHA$ に生じた部材端応力 p_m' と節点変位ベクトル d_d' は、直前のステップまでの部材端

応力ベクトルを p_m 、節点変位ベクトルを d_d とすると、節点外力 p_p' の場合と同様に考えて、

$$p_m' = p_m + ALPHA \times p_o' \quad \dots \text{式(15)}$$

$$d_d' = d_d + ALPHA \times d' \quad \dots \text{式(16)}$$

以下、順次骨組に塑性ヒンジが発生し、崩壊するまで前述の手順を繰り返す。

骨組の崩壊状態は、次の2つのどちらかの状態が生じたことで判断する。

(・) 崩壊過程の骨組における骨組全体の剛性マトリックスの逆変換が存在しない場合

(・) 外力の作用する節点で、外力の作用方向変位成分が急激に増加した場合

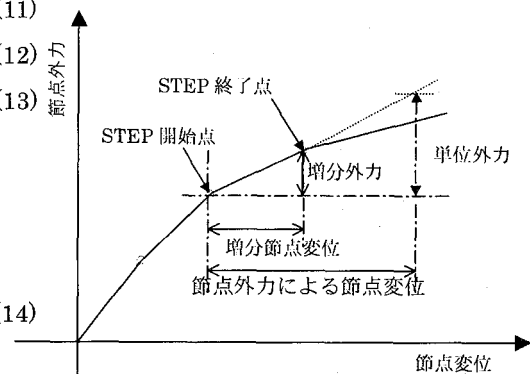


図4 塑性関節法の概念図

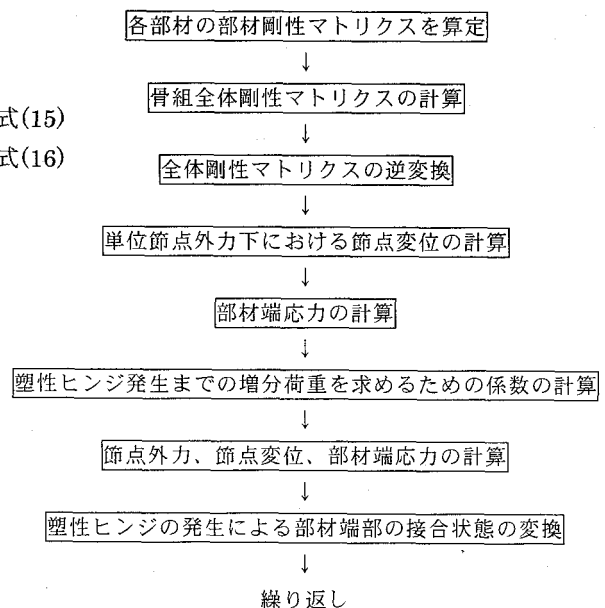


図5 解析フロー

2-4. 解析に用いた骨組

解析は 1) 1 層 1 スパン骨組に水平荷重のみ作用させた場合の弾塑性解析、2) 3 層 1 スパン骨組に水平荷重を作用させた場合の弾塑性解析、3) 実験に用いた骨組に対し、実験時の条件下での弾塑性解析の 3 種類とした。1) および 2) の解析では、固定柱脚と軸方向バネでモデル化した柱脚の 2 種類とした。解析に用いた骨組の形状寸法等を図 7 および図 8 に、各部材の基本定数を表 1 に示す。また、3) における解析モデルは、文献 14) で行った実験での、試験体をモデル化したもので図 9 に示す骨組を用い、部材定数は表 2 の値を用いた。ここで、コンクリートの断面積 A は図 6 に示す柱形部の斜線部分の面積である。

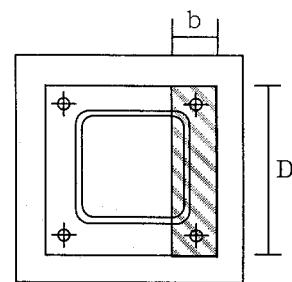


図 6 軸方向バネ（コンクリート）の断面積

D: ベースプレート外形
b: ベースプレート外縁からアンカーボルトまでの距離の 2 倍

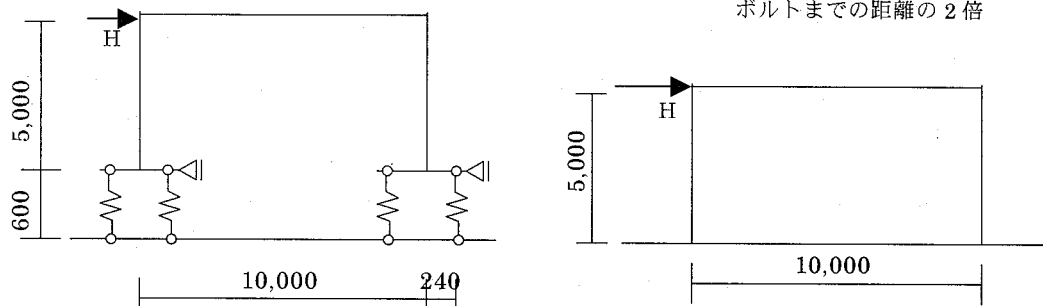


図 7 解析に用いた 1 層 1 スパン骨組(単位 mm)

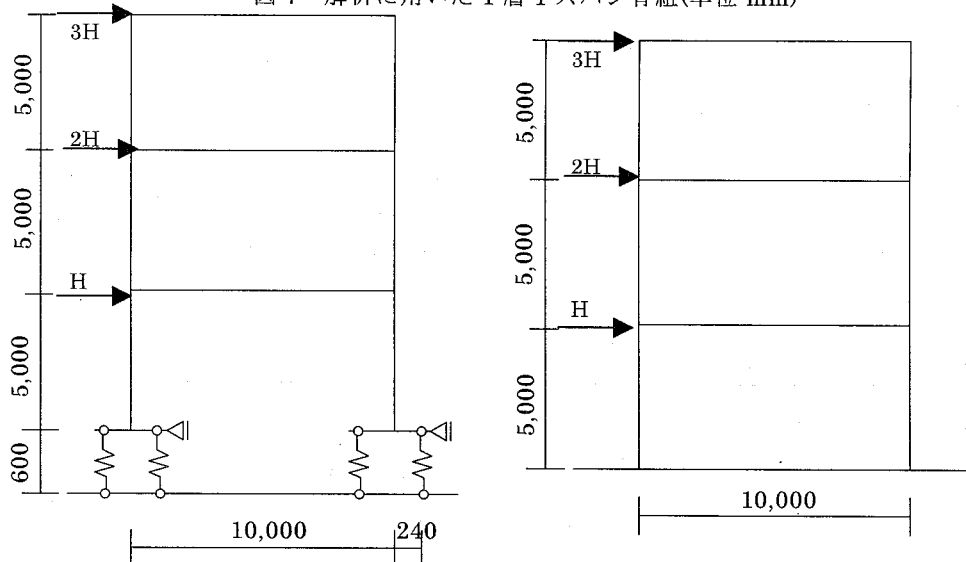


図 8 解析に用いた 3 層 1 スパン骨組(単位 mm)

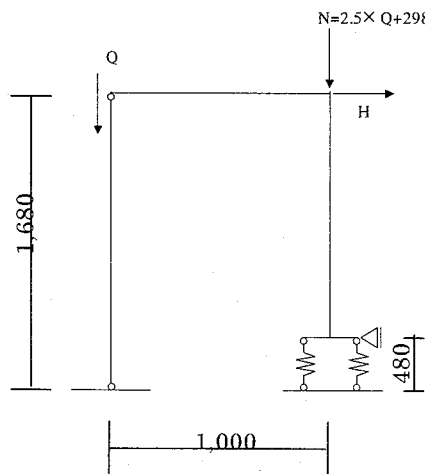


図 9 実験試験体骨組(単位 mm)

表 1 各部材の部材定数(1 層 1 スパンおよび 3 層 1 スパン)

	E(kN/cm ²)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	Z _p (cm ³)	σ _y (kN/cm ²)
アンカーボルト	20594.0	7.1	-	-	49.0
コンクリート	1961.3	480.0	-	-	2.9
ベースプレート	20594.0	140.0	-	-	-
柱	20594.0	237.0	57100.0	3370.0	23.5
梁	20594.0	171.9	39800.0	2520.0	23.5

表 2 各部材の部材定数(実験試験体モデル)

	E(kN/cm ²)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	Z _p (cm ³)	σ _y (kN/cm ²)
アンカーボルト	20594.0	4.5	-	-	49.0
コンクリート	1961.3	230.0	-	-	2.9
ベースプレート	20594.0	100.0	-	-	-
柱	20594.0	86.5	4980.0	975.0	23.5
梁	20594.0	71.5	4980.0	565.0	23.5

2-4. 解析結果

2-4-1. 曲げモーメント-回転角関係

1層1スパン骨組みにおける柱脚部の曲げモーメント M -回転角 θ 関係を図10に示す。図7において左側の柱脚を柱脚1、右側の柱脚を柱脚2とする。同図より、柱脚1と柱脚2では、耐力と剛性の値が若干異なる。これは、同じ回転角における軸力の値が異なるからである。具体的には、柱脚1の回転角が正側の範囲では、引張軸力が作用しており、負側の範囲では圧縮軸力が作用している。また、柱脚2はその逆側の軸力が作用している。このことより、圧縮軸力では、耐力、剛性は上昇し、引張軸力下では、耐力、剛性が低下するという知見が、本解析プログラムと対応していることがわかる。

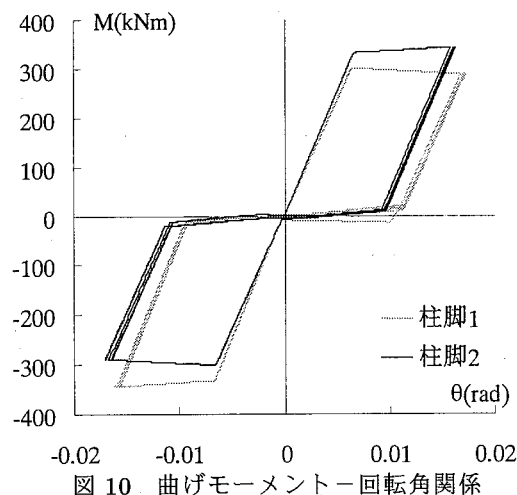


図10 曲げモーメント-回転角関係

2-4-2. 水平荷重-水平変位関係

1層1スパン骨組の水平荷重作用点における水平荷重-変形関係を図11に、3層1スパン骨組の最上層における水平荷重-変形関係を図12に示す。露出型柱脚をモデル化した1層1スパン骨組におけるヒンジの形成過程は柱脚1の引張側アンカーボルト、柱脚2の引張側アンカーボルトが塑性化した後、梁の端部にヒンジが生じ、崩壊機構に至った。アンカーボルト降伏後、 $M-\theta$ 関係におけるスリップ現象の影響が水平荷重-水平変位関係にも現れている。また、アンカーボルト塑性化後の載荷曲線は、前ステップの除荷曲線に沿うようにして上昇している。これは、アンカーボルトが梁端部に先行して塑性化するモデルであったため、梁の塑性化の影響を受けていないことが理由である。3層1スパン骨組におけるヒンジの形成過程は、引張側軸方向バネが降伏した後、1層梁端部、2層梁端部、3層梁端部の順にヒンジが発生している。よって、3層1スパン骨組では梁端部の塑性化以降の挙動が現れており、1層1スパン骨組と比較して荷重変形関係に相違が生じている。また、どちらの骨組も柱脚部の耐力、剛性の違いによる影響で骨組の耐力、剛性は固定柱脚の場合と比較して低下している。また骨組の水平力-水平変位関係には $M-\theta$ 関係に現れるスリップ現象が認められない。これは、柱脚の $M-\theta$ 関係がスリップ領域にある間、柱頭の曲げモーメントの増加で水平力の増加に対応するためである（図13参照）。

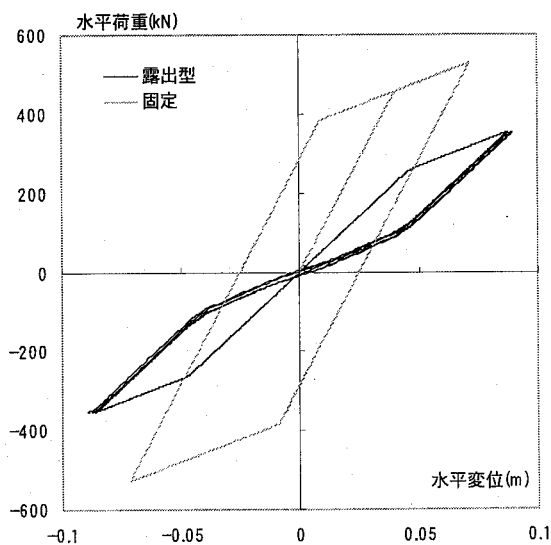


図11 水平荷重-水平変位関係(1層1スパン)

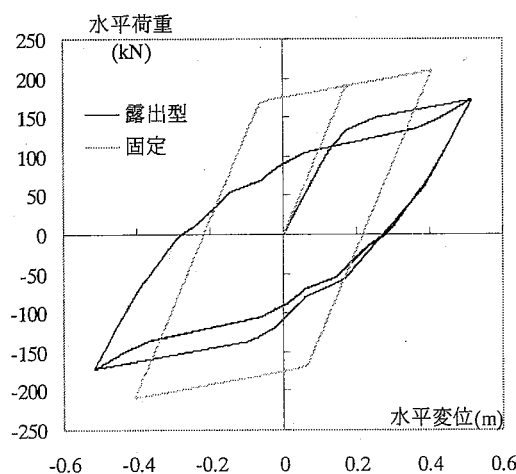


図12 水平荷重-水平変位関係(3層1スパン)

2-4-3. 柱頭および柱脚モーメント-層間変形角関係

3層1スパン骨組における1階柱頭モーメントおよび柱脚モーメントと1階層間変形角関係を図13に示す。文献17)-18)では、門型ラーメンの実験で固定柱脚や埋込柱脚の場合、1階柱の反曲点の移動はほとんど無く、

柱頭と柱脚のモーメントの負担比率はほとんど変化しないが、露出型柱脚の場合、反曲点が低いほうへ移動し、柱頭のモーメントの負担比率が増加することが示されている。本解析の条件下でも固定柱脚の場合は柱頭および柱脚のモーメント負担比率はほとんど増減しないが、露出型柱脚を想定した骨組解析では、柱脚モーメントがスリップしている時に柱頭モーメントは増加していることがわかる。つまり、露出型柱脚を有する骨組では上部骨組の応力状態が変化していることがいえる。

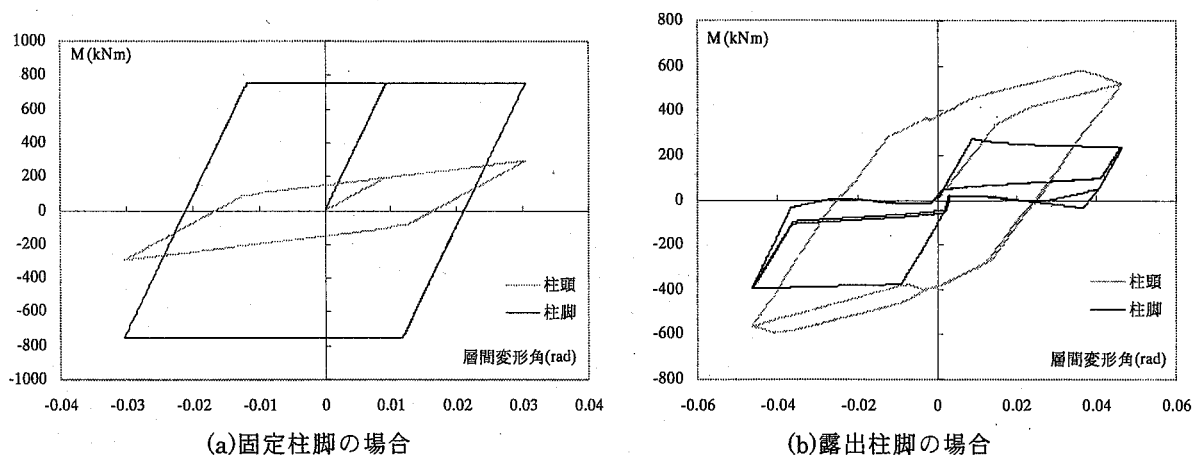


図 13 第 1 層の柱頭および柱脚モーメント－層間変形角関係

2-4-4. 水平荷重 - 水平変位関係 (実験結果との比較)

水平荷重 H - 水平変位 δ 関係を図 14 に示す。同図において、計算値は本解析手法による値であり、実験値は文献 14) で行った実験の試験体のうち、アンカーボルト傾斜の影響が比較的小さい S20W-VQ-P2 試験体の実験結果である。実験値及び計算値ともに、梁端部が全塑性耐力に達しヒンジを形成した後、引張側アンカーボルトが降伏し、崩壊機構を形成した。最大水平耐力に関して、計算値は実験値を適切に評価しており、変動軸力によって圧縮軸力が作用する場合 (正軸荷側) では耐力の上昇、引張軸力が作用する場合は耐力の低下が見て取れる。本解析において、軸方向バネが圧縮を受ける場合の軸剛性はコンクリート・モルタル強度や、せん断パネル部の変形、アンカーボルトの傾斜等の影響を受けるため、適切に評価することは困難である。実験ではそれらの影響に起因する剛性低下が見られるため、計算値と比較して弾性剛性は小さくなっている。このことより、軸方向バネを用いてモデル化した露出型柱脚で、実験挙動を追跡することは可能であるが、その場合軸方向バネの軸剛性を適切に評価する必要があることがわかる。

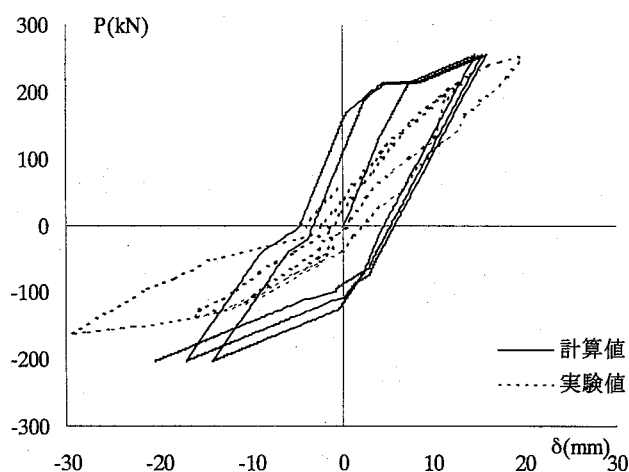


図 14 水平荷重－水平変位関係
(実験試験体との比較)

3. 結び

露出型柱脚を軸方向バネを用いてモデル化した骨組について塑性関節法 (hinge-by-hinge method) による弾塑性解析を適用し、繰り返し载荷の応力増分解析を行い、骨組挙動の追求及び実験結果との比較検討を行った。以下に得られた知見を記す。

1) 露出型柱脚を軸方向バネで構成し、適切な部材定数を与えることで、スリップ型の復元力特性を持つ柱脚が再現できる。

2) 軸方向バネを用いてモデル化した露出型柱脚で、実験挙動を追跡することは可能であるが、その場合軸方向バネの軸剛性を適切に評価する必要がある。

3) 露出型柱脚の場合、柱脚の曲げモーメント一回転角関係がスリップ状態にある間、水平力の増加に対して柱頭の曲げモーメントの増加で対応する。このため、層せん断力-層間変形関係にはスリップ現象は現れない。

謝辞 本研究の一部は錦織隆史氏および嶋村洋子氏（ともに神戸大学工学部建設学科学生）の卒業研究であり、加力実験、数値解析に多大なご協力を得ました。大谷恭弘助教授、藤永隆助手からは有意義なアドバイスを賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会:1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書,1995.5
- 2) 田口武一:鋼柱脚の固定度に関する実験的研究,日本建築学会論文報告集, No. 55, 1957.2
- 3) 増田貫志:鉄骨柱脚の力学的性状に関する実験的研究(その1),日本建築学会構造系論文報告集 No. 297, pp11-23, 1980
- 4) 秋山宏,黒沢稔,和国信之,西村功:鋼構造露出型柱脚の強度と変形,日本建築学会論文報告集,第342号, pp46-54, 1984.8
- 5) 九谷和秀,増田貫志:鉄骨構造露出形式柱脚部の終局耐力に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文報告集,第433号, pp39-49, 1992.3
- 6) 伊藤倫夫,三谷勲,大谷恭弘,藤永隆,田中秀宣:基礎部の配筋を簡略化したアンボンド型アンカーボルトを用いた露出型柱脚の構造性能,鋼構造論文集,第8巻第31号, pp43-55, 2001.9
- 7) 田中剛,田淵基嗣,金桂妍:引張軸力を受ける露出柱脚の弾塑性挙動に関する研究(その1.実験概要),日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp633-634, 1999.9
- 8) 田中剛,田淵基嗣,金桂妍:引張軸力を受ける露出柱脚の弾塑性挙動に関する研究(その2.実験結果),日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp635-636, 1999.9
- 9) 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, pp181-188, 1998.11
- 10) 鎌形修一,前田祥三,西村功:柱脚固定度を考慮した骨組構造の地震時挙動の研究 露出型柱脚の復元力モデルの提案,日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp871-872, 1986.8
- 11) 土井信,玉井宏章,近藤一夫:変動軸力の影響を考慮した露出型柱脚の弾塑性解析について,鋼構造年次論文集,第8巻, pp655-662, 2000.11
- 12) 宗宮由典,福知保長,陳文慶:変動軸力を受ける露出型鉄骨柱脚の弾塑性挙動及び耐力評価に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp973-974, 2001.9
- 13) 日本建築学会:鋼構造接合部設計指針,第1版, 2001
- 14) 三谷勲,亀元靖彦,藤永隆,大谷恭弘,田中秀宣,伊藤倫夫:梁せん断力に依存する変動軸力を受ける露出型柱脚の曲げ挙動,神戸大学都市安全研究センター研究報告, pp323-337, 2002.3
- 15) 秋山宏:鉄骨柱脚の耐震設計,技報堂出版, 1985
- 16) 青山博之,上村智彦:マトリックス法による構造解析,培風館, 1988
- 17) 丸尾将満,鈴木豊朗,中島茂壽:鋼構造柱脚部の接合形式が門型ラーメンの力学的性状に及ぼす影響(その1),日本建築学会大会梗概集, 1990.10, pp. 1375-76
- 18) 川崎育男,丸尾将満,鈴木豊朗,中島茂壽:鋼構造柱脚部の接合形式が門型ラーメンの力学的性状に及ぼす影響(その2),日本建築学会大会梗概集, 1991.9, pp. 1389-90

筆者: 1) 亀元靖彦、自然科学研究科建設学専攻博士前期課程修了(現:大阪府庁建築都市部); 2) 三谷勲、工学部建設学科、教授; 3) 田中秀宣、日立機材(株); 4) 伊藤倫夫、日立機材(株)、博士(人間環境学)

Elastic-Plastic Analysis of Exposed-type Column Base Subjected to Variable Axial Force

Yasuhiko Kamemoto, Isao Mitani
Hidenori Tanaka, Michio Itoh

Abstract

Analytical study was carried out to examine structural performance of steel frames with exposed-type column base under variable vertical load and cyclic horizontal force. Hinge-by-Hinge method is employed for elastic-plastic analysis. Anchor bolts are replaced with a set of axial springs. Analytical parameter is the type of column base and the number of stories of the frame. Analytical results of frames with fixed type base are compared with ones with exposed type base.

