

2軸曲げを考慮した立体露出柱脚モデル

玉井宏章*・高松隆夫*・白木 剛**・山西央朗***・多田元英****

(平成19年10月31日受理)

3-Dimensional Analysis Model for Exposed Column-Base Considering Bi-Axial Bending Effect

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Tsuyoshi SHIRAKI,
Teruaki YAMANISHI and Motohide TADA

(Received Oct. 31, 2007)

Abstract

This paper presents a three-dimensional structural model of an exposed column-base, which takes account of bi-axial bending. The applicability of this model is confirmed by finite element analysis on a cantilever with exposed column-base subjected to bi-directional horizontal forces. The following observations were made:

- 1) The model takes account of variation of rotational rigidity due to initial anchor bolt tensioning and axial force of column-base.
- 2) The model adjusts the maximum bending moment capacity and rotational rigidity by changing the line of action of the compressive force line and rigidity modification coefficient.
- 3) The result of the present model agrees closely with finite-element-analysis results.

Key Words: three dimensional structural model, bi-axial bending, exposed column base, semi-rigidity

1. はじめに

柱脚は、上部建築物と下部基礎とをつなぐ重要な構造要素である。柱脚の中でも、鉄骨露出柱脚は、半剛接合状態となっており、アンカーボルトが先行して降伏する場合には、柱脚の軸力により、曲げ耐力や弾性回転剛性(固定度)が変化する¹⁾ことは周知のことである。

これまで、著者等は、平面架構の露出柱脚について、2種類の半剛接合状態を表すことができ、軸力変動が曲げ耐力、回転剛性に及ぼす影響を考慮した解析手法を提案し、

その精度を実験とつき合わせて検討している²⁾。しかしながら、地震動や建物の応答は、本来3次元的なものであり、柱脚は軸力と共に2軸曲げを受ける。

そこで、研究では、アンカーボルト先行降伏型の露出柱脚について変動軸力と2軸曲げを受ける際の抵抗性状を再現でき、弾性回転剛性を実状に合うように調整しうる解析モデルを提案する。まず、3次元柱脚解析モデルを導出し、軸力と1軸曲げを受ける露出柱脚付片持柱について解析を行い、実験値と、基礎との接触を考慮した3次元有限要素法からの解と比較して、本解析モデルと3次元有限要素法

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

*** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

**** 大阪大学大学院工学研究科総合地球工学専攻

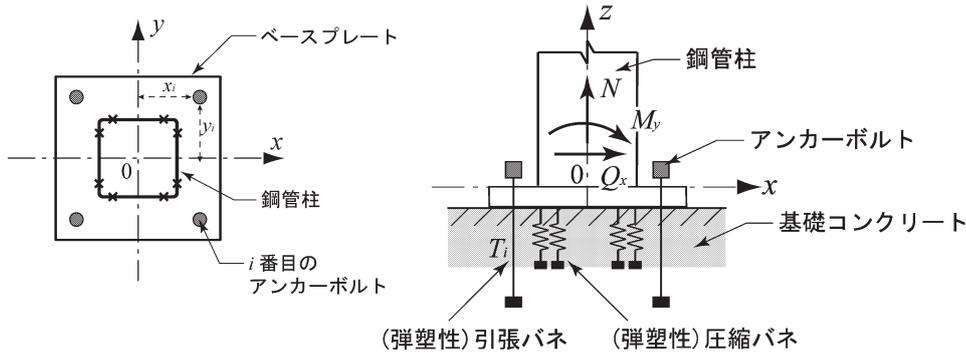


図1 柱脚の構造モデル

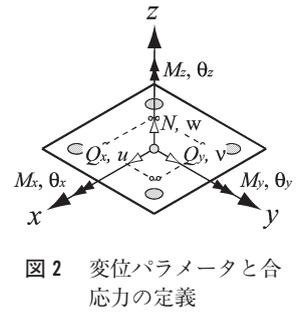


図2 変位パラメータと合応力の定義

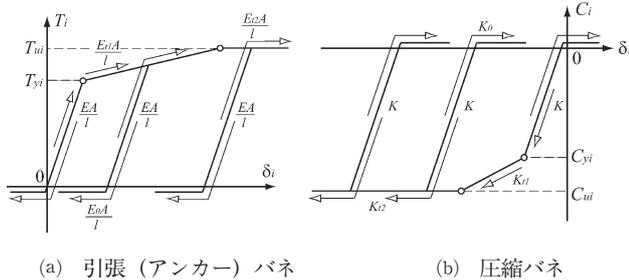


図3 引張・圧縮バネの履歴則

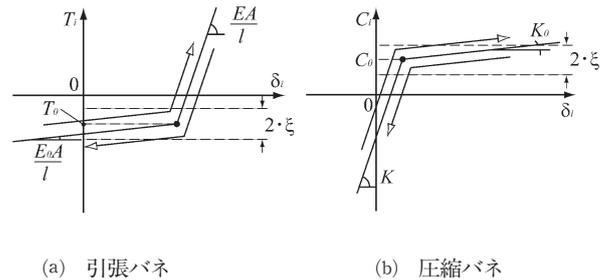


図4 引張・圧縮バネの接触・離間時の取り扱い

を用いた解法の有効性を検討する。次いで、載荷方向を様々に変えた、軸力と2軸曲げを受ける露出柱脚片持柱について解析を行い、3次元有限要素法からの解析結果と比較して、提案する解析モデルの有効性を示す。

2. 解析モデルについて

○仮定と特徴

柱脚の構造モデルを図1に示す。

本構造モデルは、アンカーボルト位置に引張弾塑性バネと柱芯心に対して、点对称に圧縮弾塑性バネを設置したものである。解析モデルの仮定を以下のように置く。

- 1) ベースプレートには十分な耐力があり、アンカーボルトを引張強度まで引張しうる。
- 2) ベースプレート面と基礎コンクリートとの間に、せん断方向の滑りは生じない。
また、本解析モデルの特徴は、以下のように列挙できる。
1) 上部構造との連成効果、特に、軸力変動の耐力や固定度に及ぼす影響を考慮できる。
2) 柱脚の圧縮反力位置の移動が表現でき、引張軸力が作用した時の耐力劣化特性を表せる。
3) 柱脚の2軸曲げ応力下における抵抗性状を表しうる。
特に、柱脚特有のダブル・フラッグ型履歴特性と回転スリップ現象を追跡しうる。
4) 基礎コンクリートやベースプレートの変形に伴う、弾性回転剛性の低下を、実状に合うように調整できる。

○変位場

図2のような、3次元デカルト座標を置き、3並進自由度と3回転自由度の計6自由度のパラメータを用いて、ベースプレート面上の各バネ位置におけるz軸方向変位： δ_i を次式で表す。

$$\delta_i = w + y_i \cdot \theta_x - x_i \cdot \theta_y \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 w, θ_x, θ_y は、z方向変位、x軸回りの回転、y軸回りの回転などの一般化変位パラメータ（回転は、右回りを正方向とする。）、 x_i, y_i は、i番目のバネのx,y座標値である。

○引張・圧縮バネの履歴特性と接触・離間の取り扱い

アンカーボルトおよび基礎コンクリートとベースプレートとの間の抵抗特性を考慮し、図3(a),(b)に示す、引張力に抵抗するバネと圧縮力に抵抗するバネにより、それらの履歴特性を表す。各バネの抵抗しうる荷重領域では、材料の塑性化をPoly-linear型直線で表し、材の離間に伴う耐力損失や、再接触に伴う耐力回復は、図4(a),(b)に示すような、耐力損失以降では、非零の微小剛性を有する弾性要素として取り扱って、荷重値から材の離間・再接触時の特性を表す。

$$\begin{aligned} &|T_i - T_0| < \xi \text{ を満足し、} \\ &\text{離間かつ } \Delta\delta_i > 0 \text{ の時} \\ &\quad \text{状態を接触に変更する。} \quad \dots \dots \dots (2.a) \\ &\text{接触かつ } \Delta\delta_i < 0 \text{ の時} \end{aligned}$$

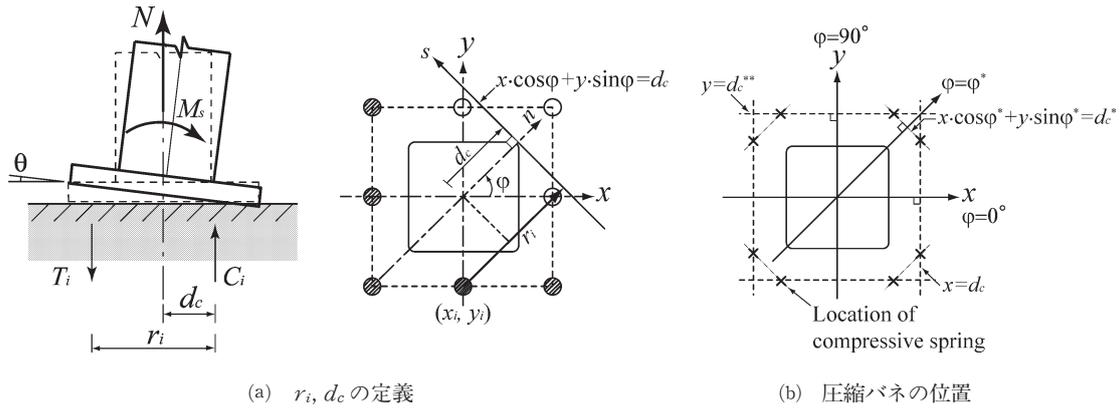


図 5 圧縮バネの位置の設定

状態を離間に変更する。……………(2.b)
 ここに、 T_i ：アンカーボルト軸力、 T_0 ：離間軸力、 ξ ：微小幅、 $\Delta\delta_i$ ： z 方向変位増分である。
 $|C_i - C_0| < \xi$ を満足し、
 離間かつ $\Delta\delta_i < 0$ の時
 状態を接触に変更する。……………(3.a)
 接触かつ $\Delta\delta_i > 0$ の時
 状態を離間に変更する。……………(3.b)
 ここに、 C ：基礎反力、 C_0 ：離間反力である。

○初期柱軸力とアンカーボルト初期導入張力の考慮

初期の柱軸力やアンカーボルト導入張力によっても柱脚の耐力や回転剛性は変化する。これは、圧縮・引張バネに初期力を付与することで表現できる。

まず、初期の柱軸力： N_0 に釣り合う圧縮反力： C_i を導入した後、アンカーボルト初期張力： T_{0i} に釣り合う圧縮反力増分： ΔC_i を付加する。各導入過程の釣り合い式は次式で表される。

初期の柱軸力： N_0 の導入過程

$$N_0 + \sum_i^{n_c} C_i = 0 \quad \dots\dots\dots(4.a)$$

アンカーボルト初期張力： T_{0i} の導入過程

$$\sum_i^{n_t} T_{0i} - \sum_i^{n_c} \Delta C_i = 0 \quad \dots\dots\dots(4.b)$$

ここに、 ΔC_i ：圧縮反力増分、 C_i ：圧縮反力、 n_c ：圧縮バネの個数、 n_t ：引張バネの個数である。

上述のような系として釣り合った状態を初期状態として解析を行う。

○圧縮合力点距離： d_c の設定

柱脚の最大抵抗曲げモーメント： M_u は、引張側アンカーボルトが全塑性軸力： T_Y に達したときに生じる。従って、図 5 からわかるように、 T_Y の値と圧縮合力線距離： d_c が判れば、最大抵抗曲げモーメント値は定まる。

図 5 に示すように、加力方向が、 x 軸から φ だけ傾いた場合の最大抵抗曲げモーメント： M_{su} は、圧縮合力が作用する直線と柱圆心との距離を d_c とすると、次式で表される。

$$M_{su} = N \cdot d_c + \sum_i^T T_{Yi} \cdot r_i \quad \dots\dots\dots(5.a)$$

ここに、 T_{Yi} 、 r_i は、 i 番目のアンカーボルトの全塑性軸力及び、アンカーボルトと圧縮合力線との距離である。 \sum_i^T は、引張側アンカーボルト^{註1)}についての総和を表す。圧縮合力線は、ヘッセの標準形の式から d_c を用いて次式で表される。

$$x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi = d_c \quad \dots\dots\dots(5.b)$$

r_i は、アンカーボルトの座標値を (x_i, y_i) とすると次式で得られる。

$$r_i = d_c - x_i \cdot \cos \varphi - y_i \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(5.c)$$

従って、(5.c) 式を、(5.a) 式に代入整理すると、加力方向が φ だけ傾いたときの圧縮合力点距離： d_c は、次式で得られる。

$$d_c = \frac{M_{su} + \sum_i^T T_{Yi} \cdot (x_i \cdot \cos \varphi + y_i \cdot \sin \varphi)}{\sum_i^T T_{Yi} - N} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = \varphi^*$ 及び $\varphi = 90^\circ$ の時の (6) 式から求めた値を d_c 、 d_c^* 及び d_c^{**} とする。圧縮バネの位置は、これら $\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = \varphi^*$ 及び $\varphi = \varphi^*$ 、 $\varphi = 90^\circ$ の圧縮合力線の交点に置き、対称性を考慮して合計 8 個設定することにする。

これらの位置は、第 1 象限では、座標値は次式のように得られる。

$$x = d_c, y = (d_c^* - d_c \cdot \cos \varphi^*) / \sin \varphi^* \quad \dots\dots\dots(7.a, b)$$

$$x = (d_c^* - d_c^{**} \cdot \sin \varphi^*) / \cos \varphi^*, y = d_c^{**} \quad \dots\dots\dots(7.c, d)$$

従って、最大抵抗曲げモーメントを合わせるパラメータは、 d_c 、 d_c^* 、 d_c^{**} 又は 3 つの方向の最大抵抗曲げモーメン

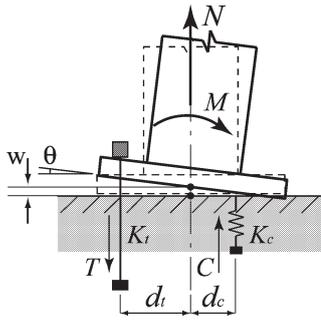


図6 弾性回転剛性の調整

ト M_{xu}, M_{su}, M_{yu} の3つとなる。

○弾性回転剛性の調整について

簡単のため図6に示す1軸曲げを受ける柱脚を例に考える。引張側アンカーボルトを集約した剛性： K_t の引張バネ及び基礎コンクリート圧縮反力を表す剛性： K_c の圧縮バネが、柱図心からそれぞれ、距離： d_t 及び d_c にあり、軸力： N と曲げモーメント： M が柱脚に作用し、ベースプレート回転角： θ および z 方向変位： w が生じている。この状態における軸力増分： ΔN と、曲げモーメント増分： ΔM は、次式で表せる。

$$\Delta M = K_t \cdot (\Delta w + d_t \cdot \Delta \theta) \cdot d_t - K_c \cdot (\Delta w - d_c \cdot \Delta \theta) \cdot d_c \quad (8.a)$$

$$\Delta N = K_t \cdot (\Delta w + d_t \cdot \Delta \theta) - K_c \cdot (\Delta w - d_c \cdot \Delta \theta) \quad \dots\dots (8.b)$$

(8.a, b)式から軸力が変化しない時 ($\Delta N=0$) の回転剛性は、次式で表せられる。

$$\frac{\Delta M}{\Delta \theta} = \frac{K_t \cdot K_c}{K_t + K_c} (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots\dots (8.c)$$

いま、圧縮バネと引張バネの剛性は、次の関係にあると仮定する。

$$K_c = K_t / (R - 1) \quad \dots\dots\dots (8.d)$$

ここに、 R は定数で、弾性回転剛性補正係数である。引張側アンカーボルトを集約した断面積： A_a 、ヤング係数： E 、アンカーボルト有効長さ： l_a を用いて、 K_t は次式で表せられる。

$$K_t = \frac{E \cdot A_a}{l_a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(8.d), (9)式を、(8.c)式に代入して整理すると、

$$\frac{\Delta M}{\Delta \theta} = \frac{E \cdot A_a}{R \cdot l_a} (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots\dots (10.a)$$

無軸力下の実験で、弾性範囲の割線剛性値： \bar{K}_{BS} が得られれば、(10.a)式から R の値は、次式で算出できる。

$$R = \frac{E \cdot A_a}{\bar{K}_{BS} \cdot l_a} (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots\dots (10.b)$$

尚、鋼構造設計規準では、この R の値として2.0の値を

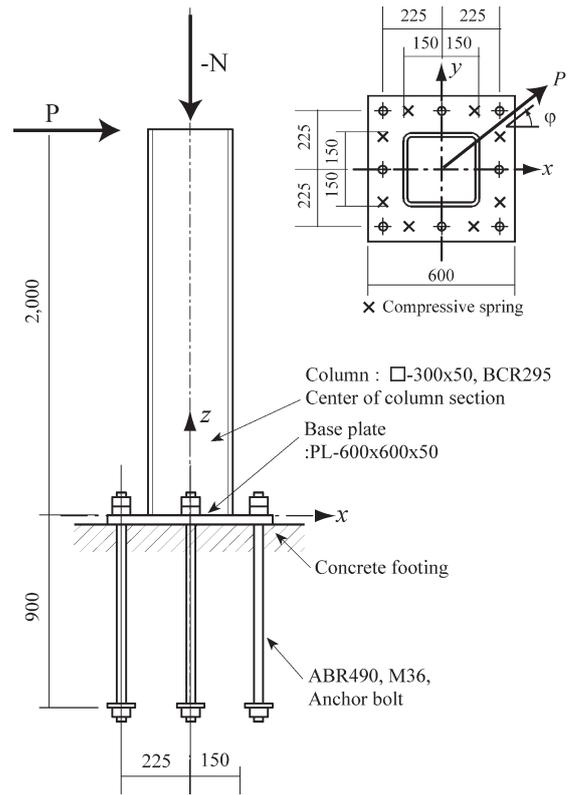


図7 柱脚の形状

採用している。

従って、弾性回転剛性を調整するための、各圧縮バネ単体の弾性剛性： \bar{K}_c は、図6における、圧縮側圧縮バネの本数を m_c として、次式で与えられる。

$$\bar{K}_c = \frac{1}{m_c \cdot (R - 1)} \cdot \frac{E \cdot A_a}{l_a} \quad \dots\dots\dots (11)$$

文献2では、集約したアンカーボルトの A_a, l_a, d_t は、次式で得られる。

$$A_a = \frac{1}{2} \sum_i A_i \quad \dots\dots\dots (12.a)$$

$$d_t = 2 \cdot \frac{\sum_i A_i \cdot r_i}{\sum_i A_i} - d_c \quad \dots\dots\dots (12.b)$$

$$l_a = \frac{\sum_i A_i (d_c + d_t)^2}{2 \cdot \sum_i \left(\frac{A_i}{l_i} \cdot r_i^2 \right)} \quad \dots\dots\dots (12.c)$$

ここに、 A_i, l_i, r_i は、 i 番目のアンカーボルトの断面積、長さ及び圧縮合力線からの距離である。

また、圧縮バネの第1、第2降伏荷重、接線剛性は、降伏荷重については、負担支圧面積と最大支圧応力度の実験値を参考に、接線剛性は K_c との比で与えることになるが、今回の解析では、弾性挙動すると仮定した。

3. 解析対象と解析シリーズ

解析対象を図7に示す。板厚50mmの角形鋼管柱に、露出

表1 柱材の断面性能

□-300x300x50		
A (mm ²)	I_x, I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)
5.0×10^4	5.41×10^8	1.14×10^9

A : 断面積, I_x, I_y : 断面2次モーメント,
 J : ねじり定数

表2 素材特性

	σ_y (N/mm ²)	Dimension (mm)
Column	BCR295 380	□-300x300x50
Base plate	SN490 325	PL-600x600x50
Anchor bolt	ABR490 325	$\phi = 33.15\text{mm}, A = 863\text{mm}^2$

$E_{ij} = 0.0$ (kN/mm²), $E = 205$ (kN/mm²)

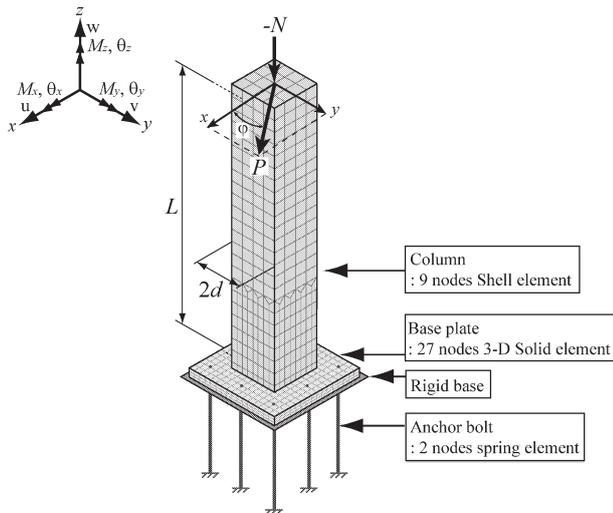


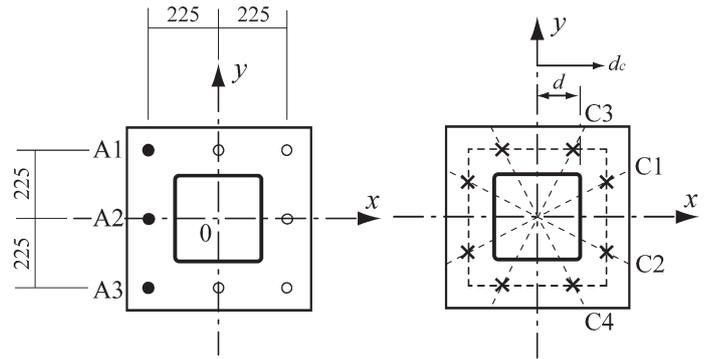
図9 比較用有限要素法のモデル

柱脚が取り付けられている。2000mm長の柱の先端から、 x 軸に ϕ 傾いた方向に水平力と z 軸方向に鉛直力が作用している。柱の断面性能を表1に、柱、ベースプレート、アンカーボルトの素材特性(実験値)を表2に示す。

図8には、引張バネと圧縮バネの個々の名称と位置を示す。

解析モデルのパラメータは、特に断りのない限り、 $R = 2.0$, $(d_c/d) = 1.75$, $\phi = 0^\circ$ とし、3つの方向の最大抵抗曲げモーメント M_{xu}, M_{su}, M_{yu} は、等しいと仮定した。

解析シリーズは 軸力を -500kN 、載荷角度 ϕ を 0° 、単調載荷とし、回転剛性補正係数: R を $1.5, 2.0, 2.5$ と変化させるシリーズ(解析シリーズI)、圧縮合力線位置比: (d_c/d) (ここに、 d は半柱幅) を $1.5, 1.75, 2.0$ と変化させるシリーズ(解析シリーズII)、載荷角度 ϕ を 0° 、単調載荷とし、軸力を $0, -250, -500, -750, -1000\text{kN}$ と変化させるシリーズ(解析シリーズIII)、軸力を -500kN 、単調載荷とし、載荷角度 ϕ を $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変化させるシリーズ(解析シリーズIV)、軸力を -500kN 、柱の部材角振幅を $0.015, 0.030\text{rad}$ と漸増させる漸増繰り返し載荷とし、載荷角度 ϕ を $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変化させるシリーズ(解析シリーズV)の5シリーズとした。



(a) 引張バネ(アンカーボルト) (b) 圧縮バネ(基礎コンクリート)の位置

図8 引張・圧縮バネの位置

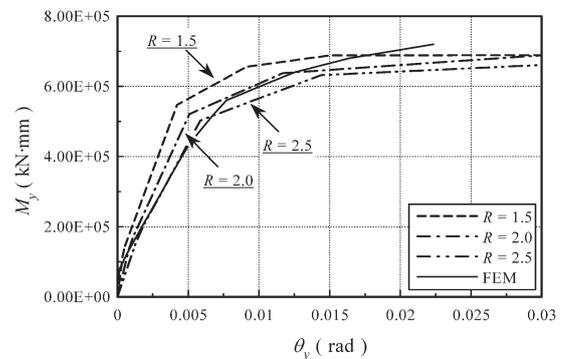


図10 R の $M_y - \theta_y$ 関係に及ぼす影響(解析シリーズ I)

比較のために大規模汎用有限要素法解析コード(ADINA ver. 8.4)を用いて解析を行った。図9に示すモデル化を行い、基礎を剛とした接触・弾塑性問題として取り扱った。

4. 解析結果とその考察

解析結果を図10~15に、それぞれ、示す。

図10, 11には、 R, d_c を変数とした解析結果(解析シリーズI, II)を示す。

図10には、回転剛性補正係数: R の $M_y - \theta_y$ 関係に及ぼす影響を、図11には、(a)圧縮合力線位置比: (d_c/d) の $M_y - \theta_y$ 関係に及ぼす影響を、(b)F.E.M.の解析結果をもとに(6)式から求めた $(d_c/d) - \theta_y$ 関係を、それぞれ、示す。

図12には、軸力: N を変数とした解析結果(解析シリーズIII)について、軸力: N の(a) $M_y - \theta_y$ 関係、(b)圧縮合力線位置比: (d_c/d) に及ぼす影響を示す。

図13には、載荷角度 ϕ を変数とした単調載荷下における解析結果(解析シリーズIV)について、載荷角度 ϕ の $(M_x, M_y) - (\theta_x, \theta_y)$ 関係に及ぼす影響を示す。

図14, 15には、載荷角度 ϕ を変数とした繰り返し載荷下における解析結果(解析シリーズV)を示す。

図14には、載荷角度 ϕ の $(M_x, M_y) - (\theta_x, \theta_y)$ 関係に及ぼす

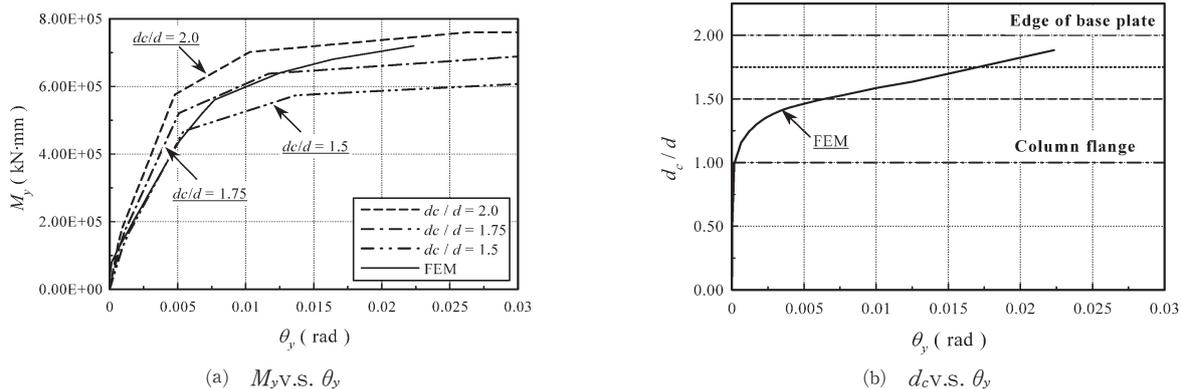


図 11 圧縮合力線距離 d_c の M_y - θ_y 関係に及ぼす影響 (解析シリーズII)

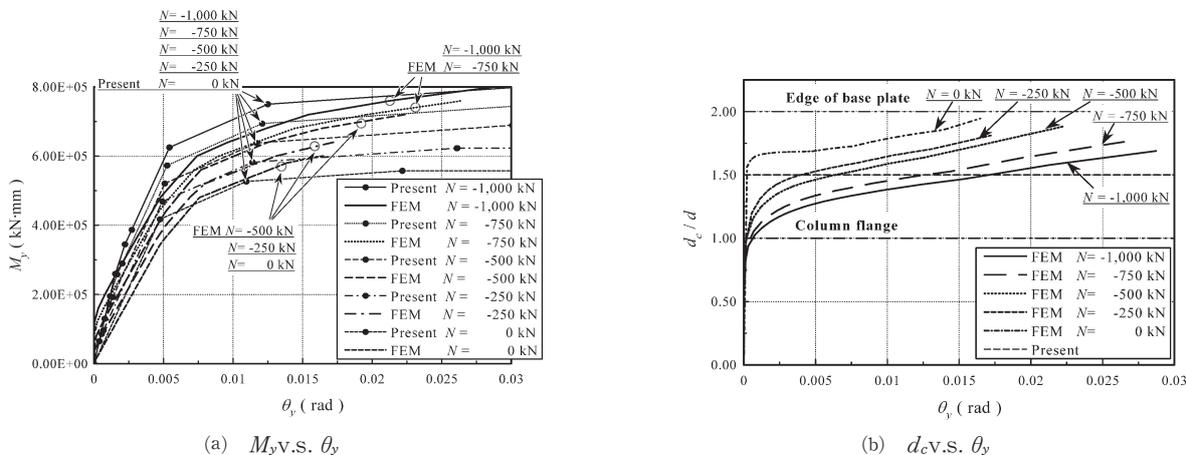


図 12 軸力 N の d_c と M_y - θ_y 関係に及ぼす影響 (解析シリーズIII)

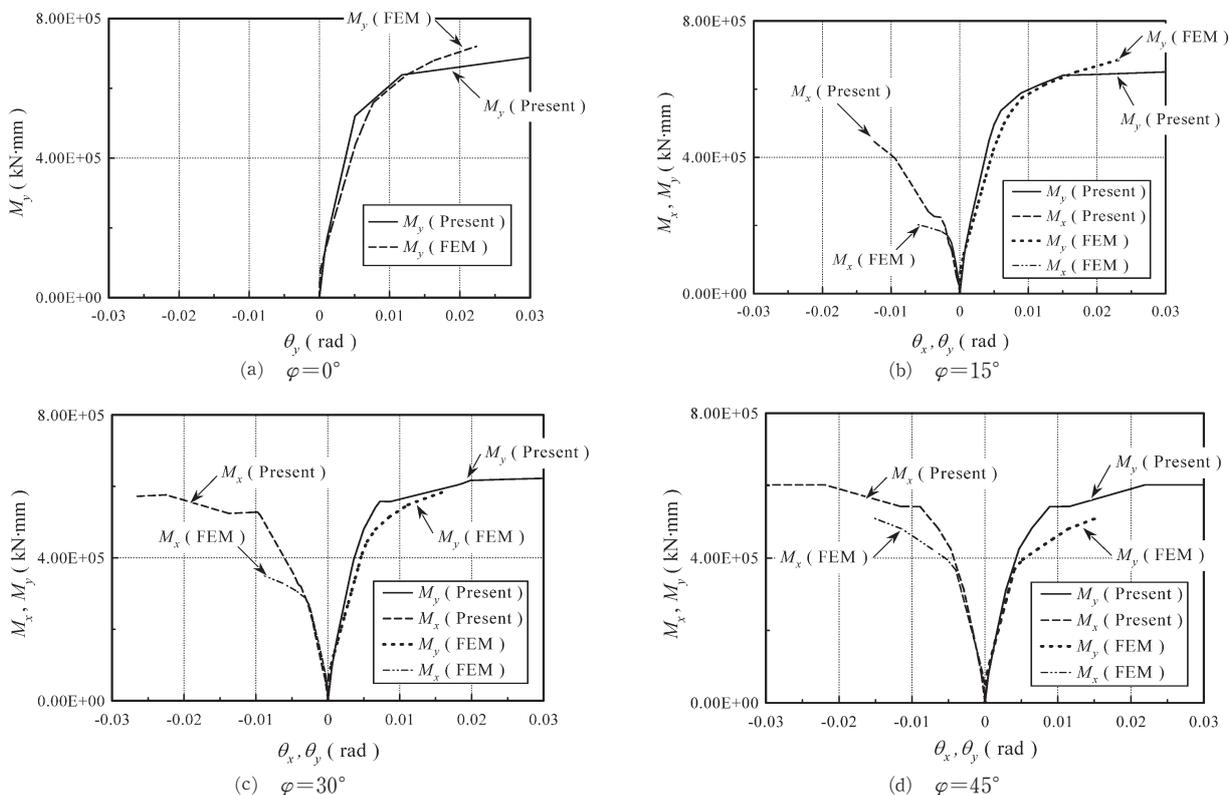


図 13 载荷角度 φ の (M_x, M_y) - (θ_x, θ_y) 関係に及ぼす影響 (単調载荷時) (解析シリーズIV)

2軸曲げを考慮した立体露出柱脚モデル

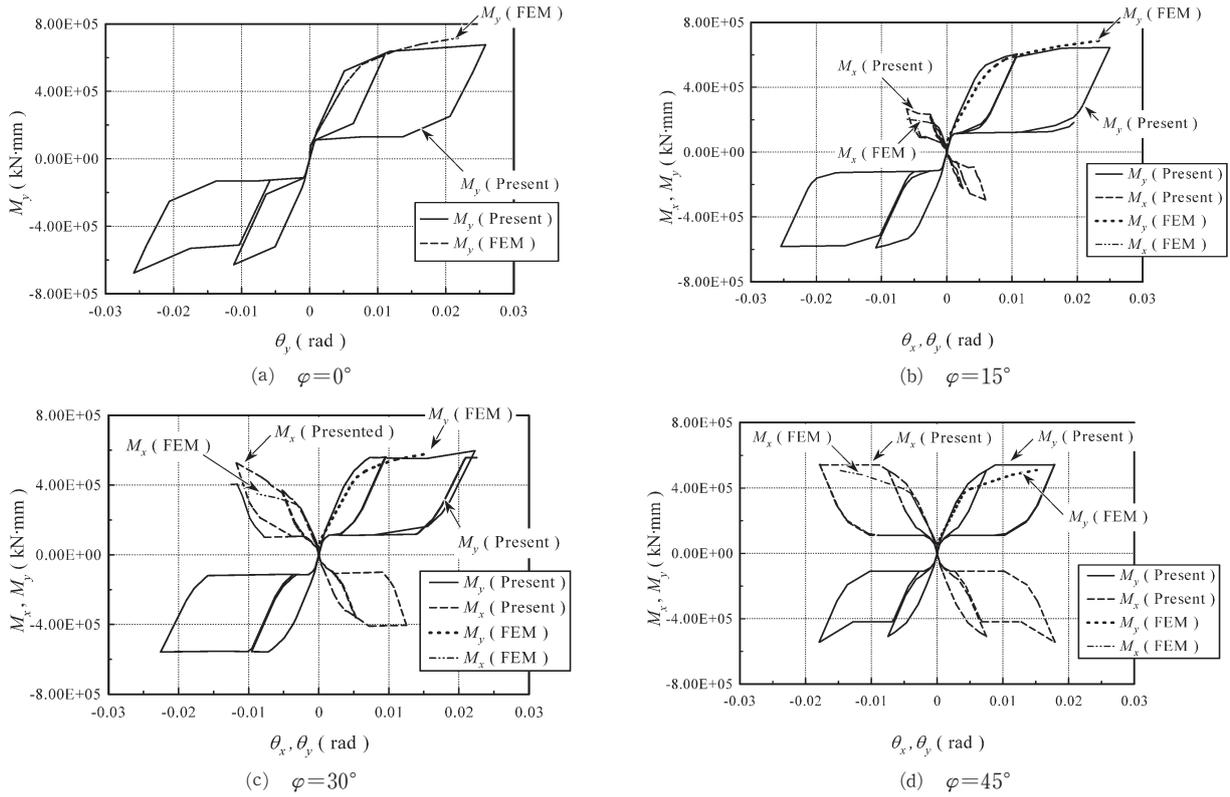


図 14 載荷角度 φ の $(M_x, M_y) - (\theta_x, \theta_y)$ 関係に及ぼす影響 (繰返し載荷時) (解析シリーズ V)

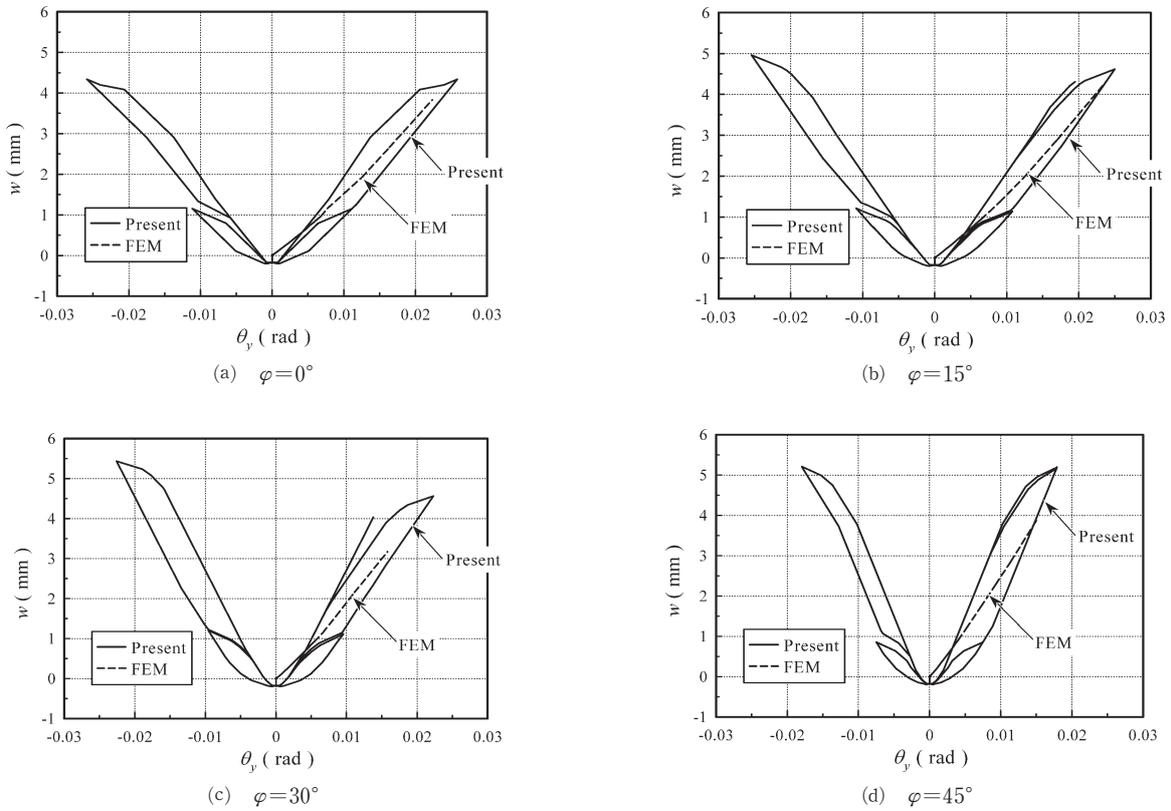


図 15 載荷角度 φ の $w - \theta_y$ 関係に及ぼす影響 (繰返し載荷時) (解析シリーズ V)

