

露出柱脚三次元抵抗性状が 立体鋼構造物地震応答に与える影響について

山根 拓実*・山西 央朗**

(令和2年10月30日受付)

A study on three-dimension resisting performance of exposed column-base influence on seismic response steel structure

Takumi YAMANE and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 30, 2020)

Abstract

We need to examine exposed column-base resisting mechanism subjected to bi-axial bending, understand exposed column-base resistance characteristics. Moreover, resistance mechanism of exposed column-base varied working stress. Therefore, A study of exposed column-base generally behavior was necessary for moment resist frame with braced member on three dimension reaction of ground motion. Its problem understand are very difficult.

In this paper, the target structure was 1-bay-1-span solid of moment resist frame with brace and exposed column-base, its discussed three dimension resisting behavior subjected to simple loading pattern.

Key Words: anchor-bolt yield type, exposed column-base on three-dimension, bi-axial bending, brace in double structure plane and Horizontal displacement constraint plate

1. はじめに

現在、中低層鋼構造物では施工性を加味し基礎との接合部は露出柱脚が採用されることが多い。また、架構としては利便性を得るためにラーメン架構が採用されているが、耐震安全性を確保するために、制振ダンパーとしての機能を期待してブレースをラーメン架構に設置する形式も現われ始めている。

柱脚は柱に属する接合要素であるため、構造物の立体的な挙動による影響を理解しなければならない¹⁾。具体的には、露出柱脚のアンカーボルトは構面方向毎に独立して抵抗させることは不可能であるため、一方向の構面での変形影響

が、もう一方向の構面の抵抗挙動に影響を与えることとなる。従って、任意の載荷角度を有する二軸曲げ下における、露出柱脚の3次元挙動を追跡する必要がある。

次に、冒頭のようにラーメン架構にブレースが設置された場合を考えると、柱脚部には、構造物自重、ラーメン架構からの曲げ応力、ブレースからの水平・鉛直方向力が主な応力として作用する。ラーメン架構とブレースの弾性限界層間変形角は、概ね不一致であり、これを鑑みると柱脚に作用する応力作用の条件も相応に複雑となる。

以上のように、露出柱脚を取り扱うこと、またラーメン架構にブレースを設置することを想定すると、様々な要因を加味しながら抵抗状態を追跡しなければならないことは

* 広島工業大学建設工学専攻

** 広島工業大学建築工学

明らかである。

そこで、本論文では研究対象とする露出柱脚における基本的な作用応力および抵抗機構を理解するため、外力条件は単純とし、一方で架構としては複雑な隅側柱に2方向ブレースが取り付けいたものを研究対象とする。尚、ブレース軸力の水平成分がせん断力として大きな影響を及ぼすが、既報²⁾の水平変位拘束材を設置し、せん断力を負担させることで、露出柱脚は軸力と曲げで評価できるものとする。

前述の通り、露出柱脚は3次元的に理解する必要があるため、3次元解析モデルを構築して、2軸载荷時挙動³⁾を追跡し、次に、3次元挙動、並びにブレースを設置した場合の挙動について検討を行う。

2. 3次元露出柱脚の復元力特性解析概要

解析には、架構構面方向に対応した、x軸、y軸、载荷軸s、载荷軸と平面方向に直交で柱脚の主とした曲げ抵抗、回転を議論するための主軸nを有する露出柱脚を用いる。主軸n回りベースプレート回転角 θ_n ・载荷方向 ϕ (x軸から载荷軸sまでの水平平面角)・柱脚軸力Nが随時変化する場合の挙動を表現できる復元力特性を導出する。

2.1 解析対象構造物

図1に解析対象構造物を示す。1層1スパンの各構面にブレースを設置する。x1通り構面y1通り構面共にブレースが取り付け付く露出柱脚について以下で解析を行う。

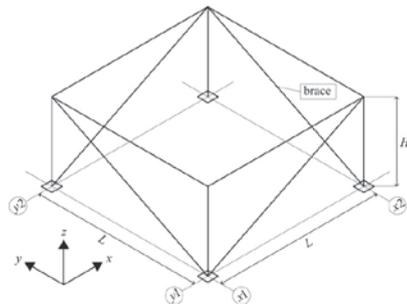


図1 解析対象構造物

2.2 解析モデルの基本条件

図2に解析対象の露出柱脚を示す。ベースプレートを剛面とし、 θ_n 、 ϕ 、Nから幾何条件を定める。また、既報研究で提案している水平変位拘束材を用い、露出柱脚に作用するせん断力を水平変位拘束材で抵抗させることで、アンカーボルトには軸力のみを抵抗させ、せん断力による耐力の低減を考慮せず、降伏張力 T_Y を発揮できるものとしている。これを簡易に実現するため、各種せん断力が作用しても柱脚の水平方向変位は生じないという拘束条件を設けている。従って、露出柱脚の3次元復元力特性は柱脚軸力N、载荷方向 ϕ と主軸n回りベースプレート回転角 θ_n で定める。また、 θ_s が生じることを拘束しており、これにより、 $\delta_n = 0$ が実現する。次にベースプレートと基礎間の接触力分布領域は、以下の仮定に基づき定める。

1. 接触力分布領域は、終局状態で定める。
2. 終局状態とは、Nと引張側5本のアンカーボルト降伏軸力 T_Y の和(=C)が生じた場合とする。

具体的には、 $\phi = 0$ 付近载荷時では $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ 、 $\beta 1$ 、 $\beta 2$ の $\phi = \pi/4$ 付近载荷時では $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ 、 $\beta 2$ 、 $\gamma 3$ のアンカーボルトが与える曲げ抵抗力の強度・剛性の支配率が高いこと、 $0 < \phi < \pi/4$ 载荷時では $\beta 1$ と $\gamma 3$ の位置関係による支配率の変化を考え、 $\beta 1$ と $\gamma 3$ で1本分の抵抗をするものとし、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ 、 $\beta 2$ 、 $\beta 1$ と $\gamma 3$ のアンカーボルトが与える曲げ抵抗力の支配率が高いので、引張側アンカーボルトを5本として解析を行う。

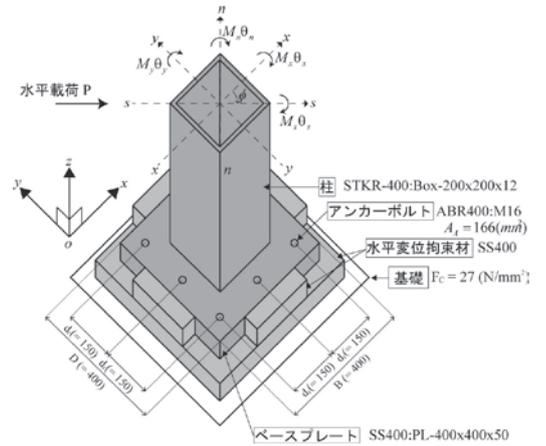


図2 解析対象の露出柱脚

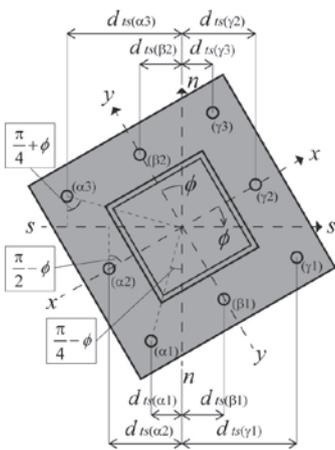


図3 载荷方向 ϕ 配置時 d_i 関係

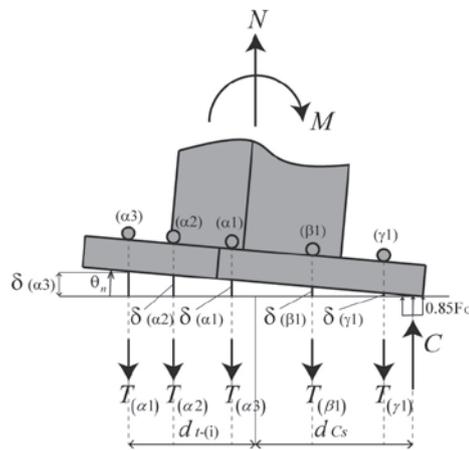


図4 回転角 θ_n 配置時 δ 関係

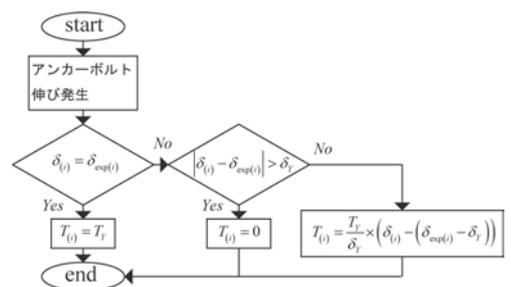


図5 張力フローチャート

本解析方法では、張力はベースプレート回転角 θ_n を与え、アンカーボルトの伸び・回転中心までの距離を用いて与えているが、それには後述する柱図心から圧縮合力作用点までの距離 d_c が必要となり、これはアンカーボルトの張力に依存するため、張力か圧縮合力作用点を定めて算出しなければならない。そのため張力を初期から T_Y が発生しているものとして扱っている。

2.3 解析方法

θ_n 、 ϕ 、 N を与え、 M_n を得る手順を、 $0 < \phi \leq \pi/4$ の範囲を代表値として、また、ブレース設置時の露出柱脚に作用する軸力 N を以下に示す。尚、各アンカーボルトに対応する記号として (i) を用い $\alpha 1$ のアンカーボルトは ($\alpha 1$) とする。

荷重方向 ϕ 時のコンクリート圧縮領域は図 6 の三角形圧縮領域のパターン 1、図 7 の台形圧縮領域のパターン 2 が考えられる。圧縮合力作用点は、パターン 1 では図中 l を、パターン 2 では図中 B' を用い、それぞれ以下の式で表す。

$$\frac{1}{2} \times l \sin \phi \times l \cos \phi \times 0.85 F_C = C = (5T_Y - N) \quad (1)$$

$$l = \sqrt{\frac{2}{0.85} \times \frac{5T_Y - N}{F_C \sin \phi \cos \phi}} \quad (2)$$

$$C2 = C - C1 \quad (3)$$

$$C2 = B' \times D \times 0.85 F_C \quad (4)$$

$$B' = \frac{(5T_Y - N) - \left(\frac{1}{2} \times D^2 \tan \phi \times 0.85 F_C\right)}{0.85 F_C \times D} \quad (5)$$

圧縮合力 C はコンクリート圧縮領域の面積に、コンクリートの終局強度を乗じたものとなる。また、パターン 2 では三角形圧縮領域を $C1$ 、平行四辺形圧縮領域を $C2$ とし、パターン 1 で適合しない場合にパターン 2 を用いる。

圧縮合力作用点までの距離は図 6、図 7 に示すように主軸 n 、 x 軸 y 軸から圧縮合力作用点までをそれぞれ、 d_{cs} 、 d_{cy} 、 d_{cx} とする。圧縮合力作用点はコンクリート圧縮領域の重心に作用するのでパターン 1 では直角三角形の重心を、パターン 2 では台形の重心と図 8 に示す釣合いを考え、圧縮合力作用点を以下の式で表す。

$$d_{cx} = \frac{B}{2} - \frac{1}{3} l \sin \phi \quad (6)$$

$$d_{cy} = \frac{D}{2} - \frac{1}{3} l \cos \phi \quad (7)$$

$$g_x = \frac{\frac{D^2}{4} B' \tan \phi + \frac{D^3}{6} \tan^2 \phi}{B'D + \frac{D^2}{2} \tan \phi} \quad (8)$$

$$d_{cx} = \frac{B}{2} - \frac{B'}{2} - g_x \quad (9)$$

$$g_y = \frac{D \left\{ (D \tan \phi + B') + 2B' \right\}}{3 \left\{ (D \tan \phi + B') + B' \right\}} \quad (10)$$

$$d_{cy} = \frac{D}{2} - g_y \quad (11)$$

$$d_{cs} = d_{cx} \cos \phi + d_{cy} \sin \phi \quad (12)$$

ベースプレート回転角 θ_n 時の各アンカーボルトの伸び量 $\delta_{(i)}$ は図 3 の主軸 n から各アンカーボルトまでの距離 $d_{is(i)}$ 、図 4 の変形状態により以下の式で表す。但し、ベースプレートは剛面とし各式を構築しているが、実際の挙動を追跡するために低減係数 R を用いて、ベースプレートの面外曲げ変形を考慮する。

$$\delta_{(i)} = \frac{1}{R} (d_{is(i)} \pm d_{cs}) \quad (13)$$

アンカーボルトの最大伸び量経験値 δ_{exp} の初期値として降伏時伸び量 δ_Y 、降伏張力 T_Y を据え、図 5 のフローより、各アンカーボルト張力 $T_{(i)}$ を決定する。

上記で算出した値を用いて図 4 より、軸時計回りを正とした、主軸 n 回り圧縮合力作用点中心の曲げ抵抗 M_s 、 x 軸・ y 軸周りの曲げ抵抗 M_x ・ M_y は以下となる。

$$M_s = \sum \left\{ T_{(i)} \cdot (d_{cs} \pm d_{is(i)}) \right\} \quad (14)$$

$$M_x = \sum \left\{ T_{(i)} \cdot (d_{cy} \pm d_{iy(i)}) \right\} \quad (15)$$

$$M_y = \sum \left\{ T_{(i)} \cdot (d_{cx} \pm d_{ix(i)}) \right\} \quad (16)$$

図 9 に示すブレース挙動より、露出柱脚に作用する軸力 N は、構造物自重 N_c 、各通り構面ブレース軸力 N_{bx} 、(N_{by}) を元に、層間変形角 r_x 、(r_y) がベースプレート回転角 θ_x 、(θ_y) の 2 倍生じると仮定して以下の式で示す。

$$\begin{aligned} N &= +N_c + N_{bx} \sin \alpha + N_{by} \sin \alpha \\ &= +N_c + \frac{A_{bx} E}{l_{bx}} \times \delta_{bx} \sin \alpha + \frac{A_{by} E}{l_{by}} \times \delta_{by} \sin \alpha \\ &= +N_c + \left(\frac{A_{bx} E}{l_{bx}} \sin \alpha \right) \times \frac{\delta_x}{\cos \alpha} + \left(\frac{A_{by} E}{l_{by}} \sin \alpha \right) \times \frac{\delta_y}{\cos \alpha} \\ &= +N_c + \left(\frac{A_{bx} E}{l_{bx}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \right) \times r_x \cdot H + \left(\frac{A_{by} E}{l_{by}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \right) \times r_y \cdot H \\ &= +N_c + \left(\frac{A_{bx} E}{l_{bx}} \tan \alpha \right) \times 2\theta_y H + \left(\frac{A_{by} E}{l_{by}} \tan \alpha \right) \times 2\theta_x H \quad (17) \end{aligned}$$

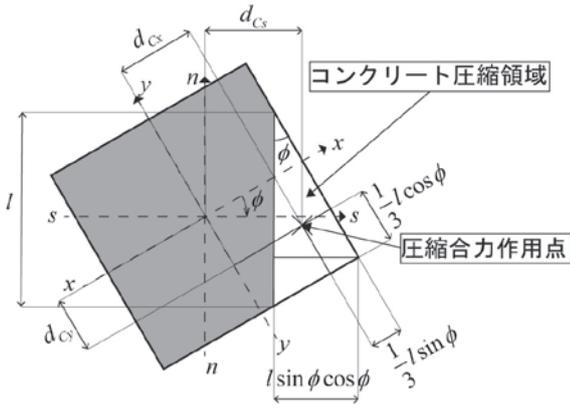


図6 圧縮合力作用点 (パターン1)

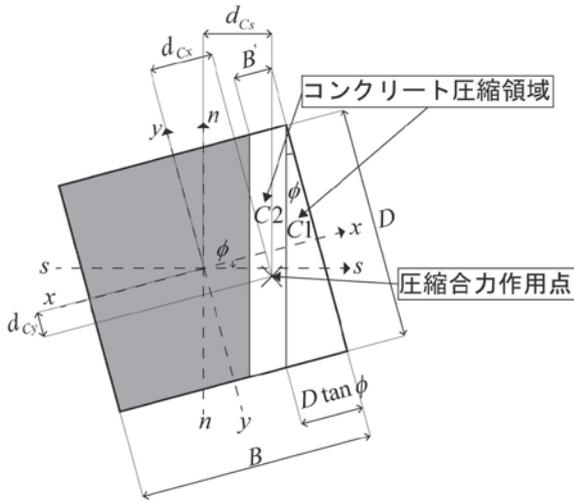


図7 圧縮合力作用点 (パターン2)

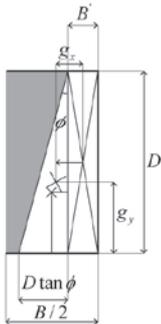


図8 重心図

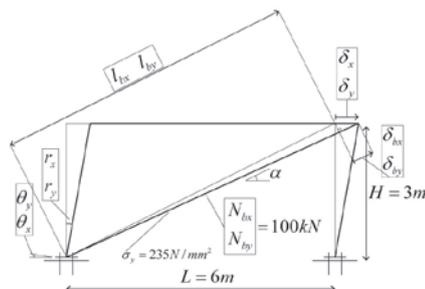


図9 プレース挙動図

2.4 解析変数

解析は2.2節に記した解析モデルに対して、 ϕ を一定とし、それぞれ θ_n を正負交番漸増繰返した解析I、構造物の立体挙動としての影響を吟味するために $\phi=0$ で正負載荷した後 $\phi=\pi/2$ で正負載荷するII-1、または $\phi=\pi/4$ で正負載荷した後 $\phi=3\pi/4$ で正負載荷するII-2を与える解析II、露出柱脚として最も厳しい条件となる、x1通り構面・y1通り構面ブレースからの変動軸力を加味した検討をすることを目的に、図1、図9に示すように設置し、 ϕ と θ_n に関しては解析IIと同一の入力を与える解析III-1、2も実施する。

解析Iでは後述する3節の実験結果を追跡するために、 $\phi=0, \phi=\pi/4$ とし θ_n を制御値として0, 005, 0, 01, 0, 015, 0, 02 (rad) を目標値とした正負交番漸増繰返し載荷を入力する。解析IIでは立体挙動を構面としての評価に落とし込みそれぞれの結果を比較するために、x軸時計回りを正としたベースプレート回転角を θ_x 、y軸時計回りを正としたベースプレート回転角を θ_y とし、 θ_x または θ_y が $\sqrt{2}/100$ radとなる θ_n を与える。また、 θ_x, θ_y は以下の式で表す。

$$\theta_x = \theta_n \sin \phi \quad (18)$$

$$\theta_y = \theta_n \cos \phi \quad (19)$$

解析IIIでは、各通り構面のブレース軸力を算定し、この鉛直成分に構造物自重を考慮した $N_c=100$ kNを加えたものを柱脚軸力として与える。また、ブレースは圧縮引張変形に対して完全弾塑性型履歴形状を有するものを用いる。

解析I～IIIの入力方法については、解析Iは図11、解析II、IIIは図12に示すとおりである。

3. 実験概要

図10に載荷実験で用いた試験体を示す。

露出柱脚付片持ち柱を試験体とし、柱頭部に軸力 N と水平力 P を載荷して柱脚に軸力 N と曲げモーメント M を作用させる部材実験を実施する。

柱には冷間成形角形鋼管 STKR: 200x200x12 を、ベースプレートには完全に弾塑性を示すものとして一般構造用鋼材 SS400: PL-50x400x400 を、アンカーボルトには伸び能力の確保できる転造ねじアンカーボルト ABR400: M16 を採用し、更に、基礎には一般構造用鋼材 SS400 による BH-400x400x32x36 を用いる。このディテールは、アンカーボルト降伏型の抵抗特性が発現する。

また二軸曲げを再現するために、載荷方向に対して試験体を $\phi=0, \pi/4$ 回転させて水平力を載荷する。

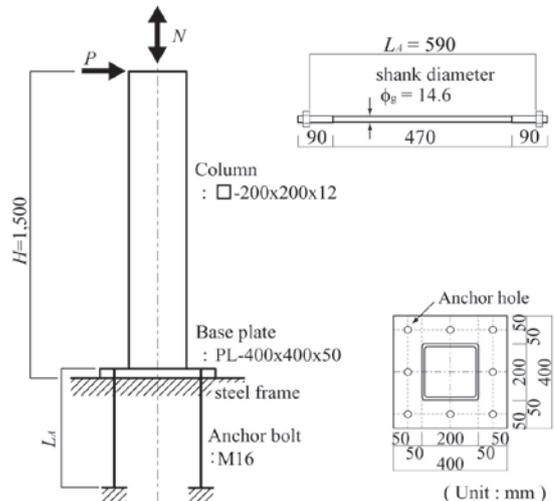


図10 実験対象構造物

4. 結果と考察

図13には、解析Iと実験挙動の復元力特性との比較を、図14～18には、解析IIの $M_n-\theta_n$ 、 $M_x-\theta_x$ 、 $M_y-\theta_y$ 関係、 $T_{(i)}-\theta_x$ 、 $T_{(i)}-\theta_y$ 関係を、図19～20には、 $M_n-\theta_n$ 、 $M_{Nn}-\theta_n$ 、 $N-\theta_n$ 、 $N_{bx}-\theta_n$ 、 $N_{by}-\theta_n$ 関係を示す。

4.1 解析I

図13(a)(b)より、各復元力特性は、アンカーボルト降伏型で現れるスリップ型復元力特性を示している。また、載荷方向 ϕ によることなく、実験結果と解析結果の履歴形状は対応しているが、これは低減係数 R を $\phi=0$ 時には $R=2.3$ 、 $\phi=\pi/4$ 時には $R=2.5$ となる実験結果を追跡するために、 R を以下の関数としたことによる。

$$R = 2.3 + |0.2 \sin(2\phi)| \quad (20)$$

2.2、2.3節で示した、ベースプレートを剛面として扱った際の抵抗機構や力学的境界条件のみでは、ベースプレートの変形挙動を追跡することができないが、低減係数 R のみを調整することでベースプレートを実際の挙動に落とし込むことができ、実験結果を合理的に追跡できることがわかる。尚、上記の関数については載荷方向 ϕ が $\pi/4$ に近づくにつれ大きな低減係数となるがこれは、実際のベースプレートの面外変形が $\phi=0$ では、基礎にベースプレートの辺を接触させ変形させるのに対して、載荷方向 ϕ が $\pi/4$ に近づくにつれ、基礎とベースプレートとの接触が隅角部に移動し、面外変形が大きくなるからである。また、(b)の初期載荷時に解析結果が実験結果と適合していないがこれは、解析モデルでは圧縮合力作用点までの距離が初期から終局の条件を満たすのに対し、実験結果では、ベースプレート回転角の増大と共に徐々に終局値に近づくという、乖離によるものである。

4.2 解析II

図14(a)、(b)より、II-1、II-2共に2ステップ目から、スリップ現象が現れており、著しい曲げ抵抗力の劣化が見て取れる。この原因は、図15～18に示す $x \cdot y$ 構面でのアンカーボルト張力から読み取れる。図15より、載荷方向 $\phi=0$ 時には載荷時初期から全アンカーボルトが抵抗を開始し α 列・ β 列のアンカーボルトが降伏していることがわかる。これにより逆方向載荷時初期には γ 列アンカーボルトのみ抵抗をしており、一定のスリップ後に β 列アンカーボルトが抵抗していることがわかる。また、図16より、2ステップ目では1ステップ目の載荷により全てのアンカーボルトが降伏しているため、2ステップ目初期からスリップが生じ、 $\alpha 2 \cdot \gamma 2$ のアンカーボルトは抵抗力を発揮しないことがわかる。

載荷方向 $\phi=\pi/4$ 時でも図15と同様な挙動を生じさせ、図17より、 $\beta 1 \cdot \gamma 2$ アンカーボルトに着目すると、載荷時初期から抵抗を開始し弾性を保ち、逆方向載荷時初期から抵抗を開始していることがわかる。図18より、載荷方向 $\phi=3\pi/4$ 時には載荷時初期からスリップを生じていることがわかる。

上記より、一方向の弾塑性載荷が行われ、アンカーボルトが降伏することで、繰返し載荷時や他方向載荷時にスリップが生じ曲げ抵抗力の低下が起きるので、想定していた曲げ抵抗力を発揮できない場合があることがわかる。また、 $M_x \cdot M_y$ の構面で評価する場合、圧縮合力作用点までの距離が一軸曲げに比べ小さくなり曲げ抵抗力が小さくなるので、二軸曲げ時には構面として曲げ抵抗力を大きく見積もっている場合もあるといえる。このことは以下に示す式で表す。

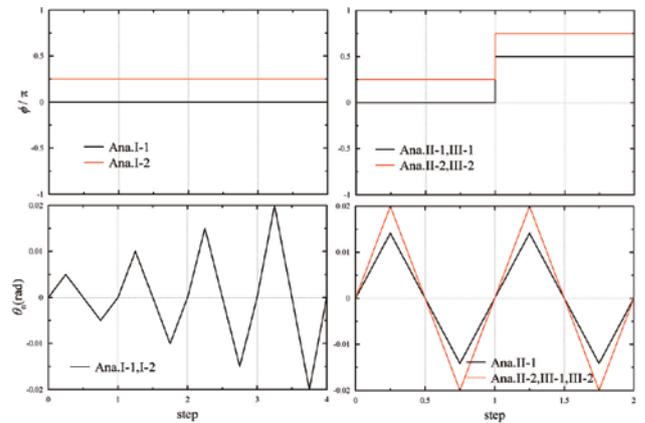
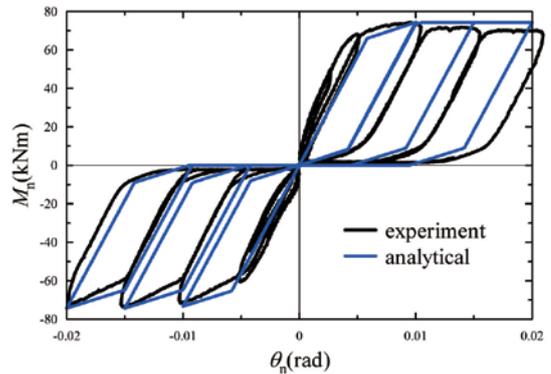
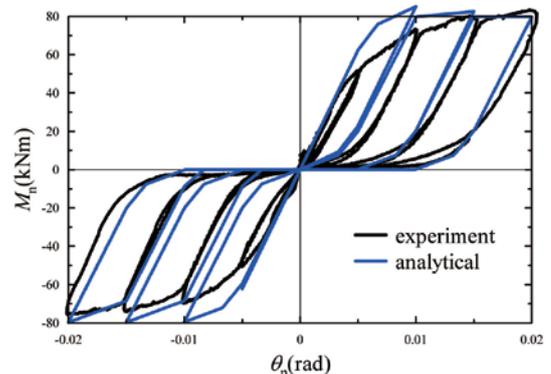


図11 解析I入力方法

図12 解析II, III入力方法



(a) $M_n-\theta_n$ (解析I-1)



(b) $M_n-\theta_n$ (解析I-2)

図13 $M_n-\theta_n$ 関係(解析I)

$$d_{Cs} < \sqrt{d_{Cx}^2 + d_{Cy}^2} \quad (21)$$

4.3 解析Ⅲ

図 19(a)、図 20(a)、に示す $M_n-\theta_n$ の復元力特性は、解析Ⅱの露出柱脚に作用する軸力の影響が含まれ、挙動を理解することが容易ではない。これを分析するために、以下では軸力による成分を分解し挙動の追跡を行う。(b)には露出柱脚に作用する軸力の主軸 n 回りの曲げ抵抗力 M_{n0} を示す。(a)の履歴形状はアンカーボルトによる曲げ抵抗力に(b)による曲げ抵抗力を加えたものとなり、履歴形状の分解が可能となる。図 19、20 の(b)は共に初期から作用する構造物自重により、付加曲げが生じていることが読み取れる。また、(c)は露出柱脚に作用する軸力の変動を表しており、構造物自重による初期軸力 -100kN から開始し、軸力が増減をしている。軸力の変動は、 y 軸通り構面に取り付くブレースの軸力 N_{bx} 、 x 軸通り構面に取り付くブレースの軸力 N_{by} 、により生じるので(d)(e)にブレース軸力の変動を表した図を示す。図 19 の(d)、(e)は一軸曲げである特徴を読み取ることができる。(d)は $\phi = 0$ 正負荷荷時に軸力が変動しており、 $\phi = \pi/2$ 正負荷荷時には軸力の変動が生じず、降伏軸力を保っている。(e)も同様な履歴となり、(d)(e)の鉛直成分と初期軸力を組み合わせたものが(c)となり、履歴形状を構築していることがわかる。また、二軸曲げが生じた場合の軸力の変動についても図 20 (c)~(e)に特徴が現れている。(c)に着目すると、 $\phi = \pi/4$ 正負荷荷時には構造物自重による初期軸力 -100kN を保ったままであり、 $\phi = 3\pi/4$ 正負荷荷時には最大約 200kN の変動軸力が生じたことがわかる。(d)、(e)についてブレースの挙動の追跡を行うと、 $\phi = \pi/4$ 正負荷荷時には N_{bx} 、 N_{by} 共に抵抗を行っており、軸力の大きさは同じで常に引張軸力と圧縮軸力でお互いに打ち消しあっていることがわかる。このことより(c)の $\phi = \pi/4$ 正負荷荷時には軸力の変動が起らないといえる。 $\phi = 3\pi/4$ 正負荷荷時には N_{by} が先に、 N_{bx} が後に圧縮軸力 -100kN に達し、その後は同一の履歴で軸力変動を生じさせていることがわかる。これが先に説明した(c)での最大変動軸力約 200kN を生じさせた要因である。

上記のことより、図 20(a)の $\phi = \pi/4$ 正負荷荷時には変動軸力が生じていないため、正負共に、解析Ⅱ-2の挙動に近づき、図 19(a)、図 20(a)の $\phi = 3\pi/4$ 正負荷荷時には、他方向載荷、二軸曲げの影響による軸力の変動を適切に考慮しなければ解析Ⅱシリーズのような構面での評価は難しいといえる。

5. 結論

1. 一方向の弾塑性載荷によるアンカーボルトの降伏は、

続く他方向の載荷時にスリップを生じさせるため、3 次的に露出柱脚挙動を理解しなければならない。

2. M_x 、 M_y の値は、二軸曲げ時の抵抗力に基因するため、二軸曲げ時 d_{cs} を理解し、 M_x 、 M_y を定めることが重要である。
3. ブレースが設置された柱脚の場合、着目する構面にブレースが存在していなくても、ブレースの存在応力を考慮しなければ露出柱脚の抵抗力を追跡できなくなる。

参考文献

- [1] 崔宰赫、大井謙一、伊藤拓海、：2 軸曲げを受ける露出型鉄骨柱脚の耐力相関面の評価と弾塑性挙動モデルに関する研究、構造工学論文集、B (51B)、285-291、2005-03-20。
- [2] 郷原良太、清水斉、山西央朗：水平変位拘束材付き露出柱脚を有する低層ブレース架構に関する研究、日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集、第 26 巻、pp.204-211、2018.11。
- [3] 山西央朗、高松隆夫、玉井宏章、竹本泰聖、松尾彰：2 軸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研究、日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集、第 17 巻、pp.515-522、2009.11。

付録A

2.3 節、式 (17) で使用した、層間変形角がベースプレート回転角の 2 倍生じる条件を、載荷方向 $\phi = 0$ を例に、 α 列アンカーボルトのみ降伏した場合の、曲げ抵抗力 M_n 、ベースプレート回転角 θ_y 、柱脚回転剛性 K_{BS} を用いて、変形量 δ の比較で確認をモデル化した図と以下に示す式で表す。

$$M_n = n \times T_y \times (d_{Cs} + d_{ts(i)}) \quad (A-1)$$

$$\begin{aligned} \theta_y &= \frac{\delta_y}{d_{Cs} + d_{ts(i)}} \\ &= \frac{1}{d_{Cs} + d_{ts(i)}} \times \frac{T_y \cdot L_A}{A_A \cdot E} \end{aligned} \quad (A-2)$$

L_A ：アンカーボルト埋め込み長さ

A_A ：アンカーボルト断面積

$$\begin{aligned} K_{BS} &= \frac{M_n}{\theta_y} \\ &= \frac{n \cdot A_A \cdot E \times (d_{Cs} + d_{ts(i)})^2}{L_A} \\ &= \frac{n \cdot A_A \cdot E \times (d_{Cs} + d_{ts(i)})^2}{R \times L_A} \end{aligned} \quad (A-3)$$

$$\delta = P \cdot H \left(\frac{H}{K_{BS}} + \frac{H^2}{3E \cdot I_c} \right) \quad (A-4)$$

$$\delta = 2\theta \times H \quad (A-5)$$

I_c : 柱の断面二次モーメント

今回変形量を算出するにあたり、代表値として $\theta = 0.001\text{rad}$ を与える。式 (A-4) よりばね付きモデルの変形量は、 $\delta = 5.53\text{mm}$ となり、層間変形角がベースプレート回転角の2倍生じる条件である式 (A-5) の変形量は $\delta = 6\text{mm}$ となり、大まかに適合する。

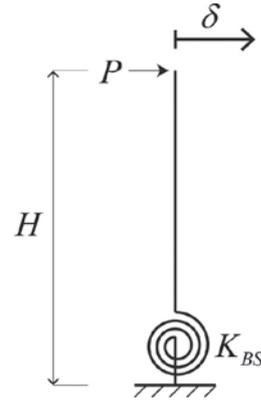
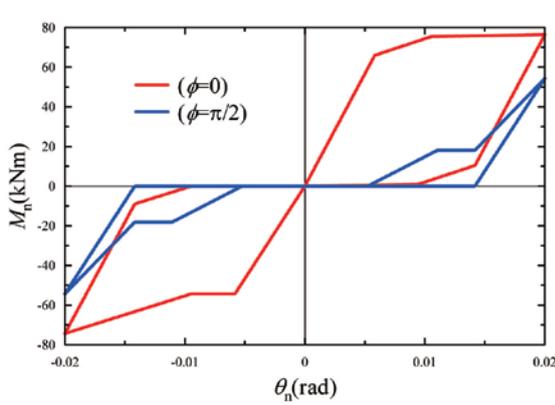
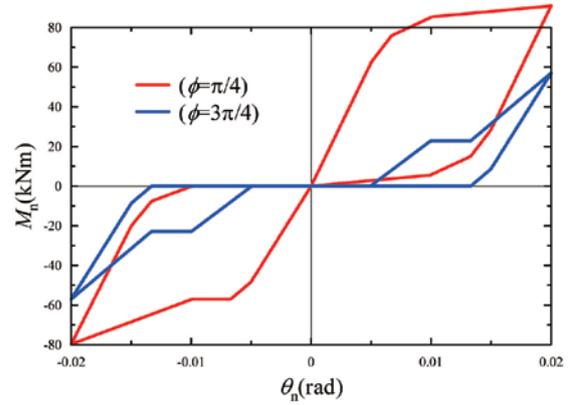


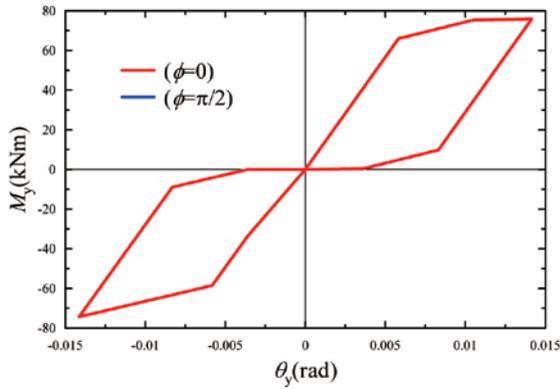
図 ばね付きモデル



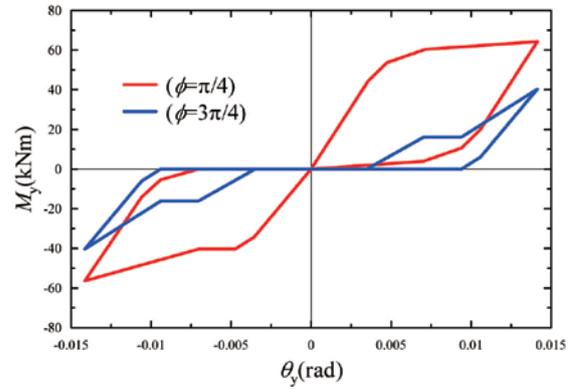
(a) $M_n-\theta_n$ (解析 II-1)



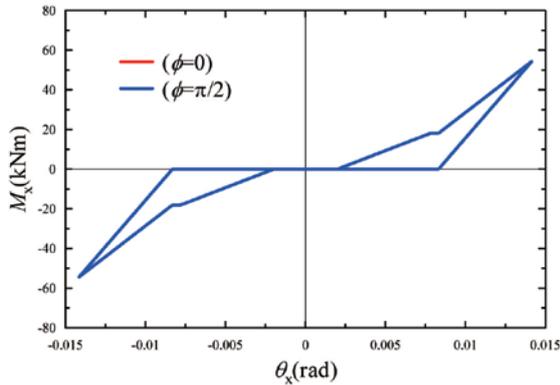
(b) $M_n-\theta_n$ (解析 II-2)



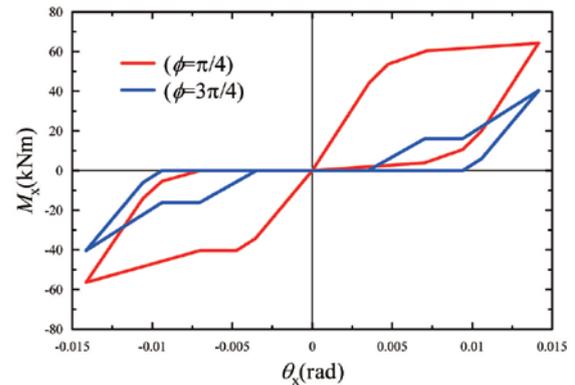
(c) $M_y-\theta_y$ (解析 II-1)



(d) $M_y-\theta_y$ (解析 II-2)



(e) $M_x-\theta_x$ (解析 II-1)



(f) $M_x-\theta_x$ (解析 II-2)

図14 $M_n-\theta_n, M_x-\theta_x, M_y-\theta_y$ 関係(解析 II)

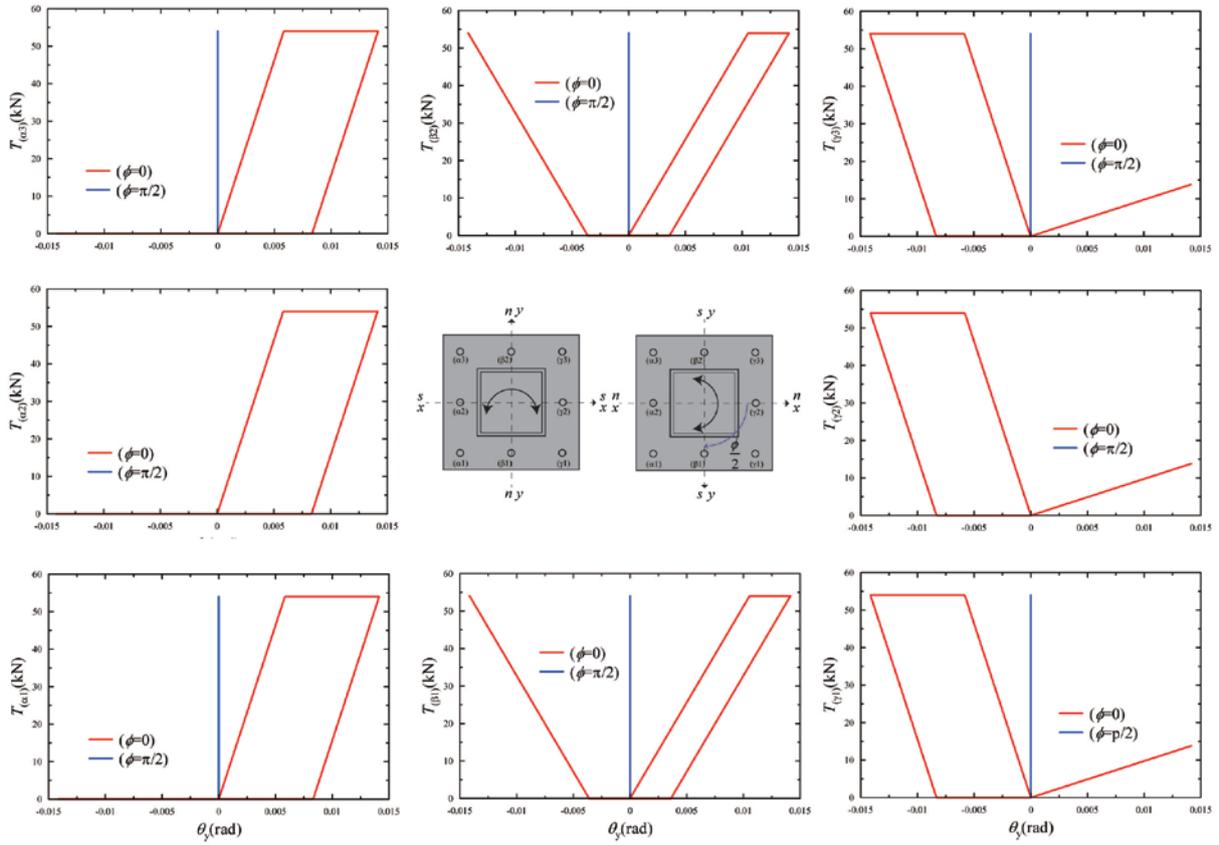


図15 $T_{(i)} - \theta_y$ 関係(解析II-1)

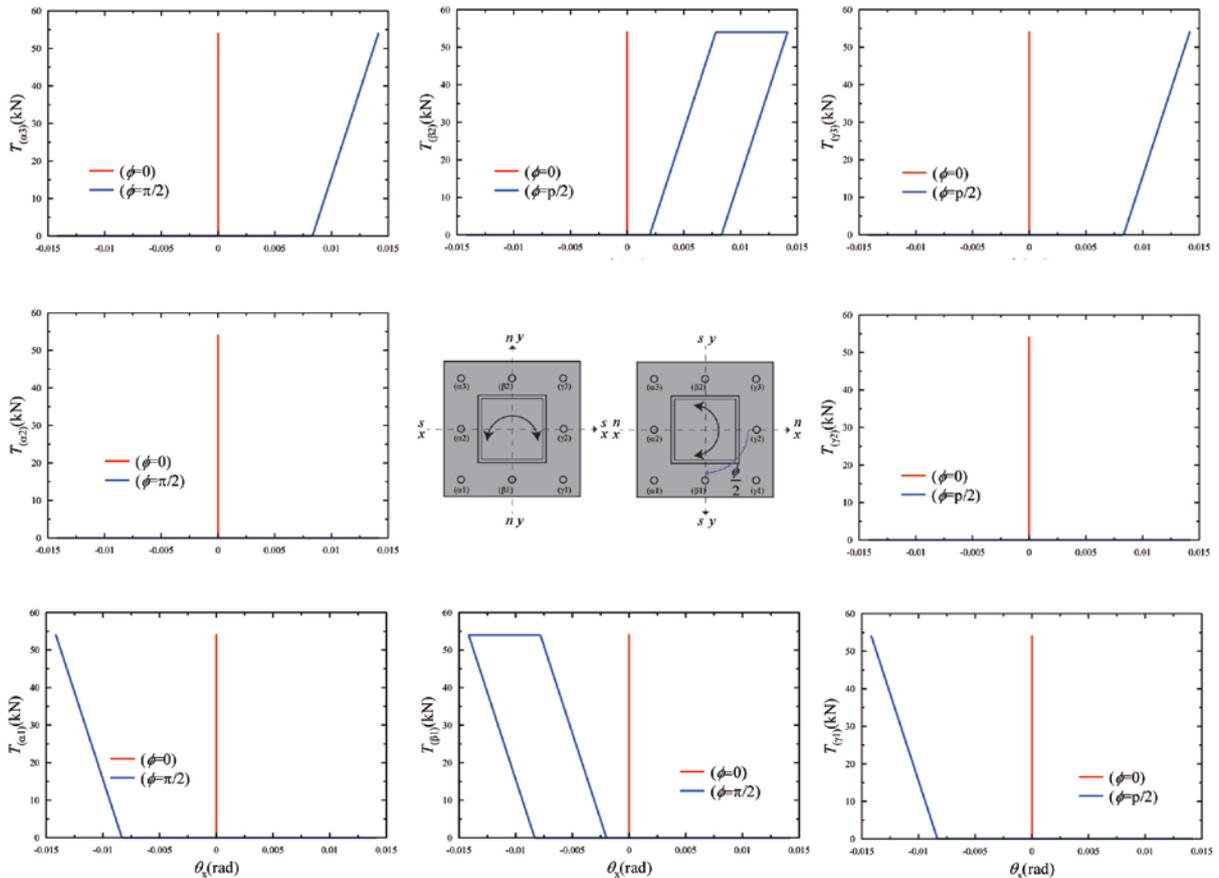


図16 $T_{(i)} - \theta_x$ 関係(解析II-1)

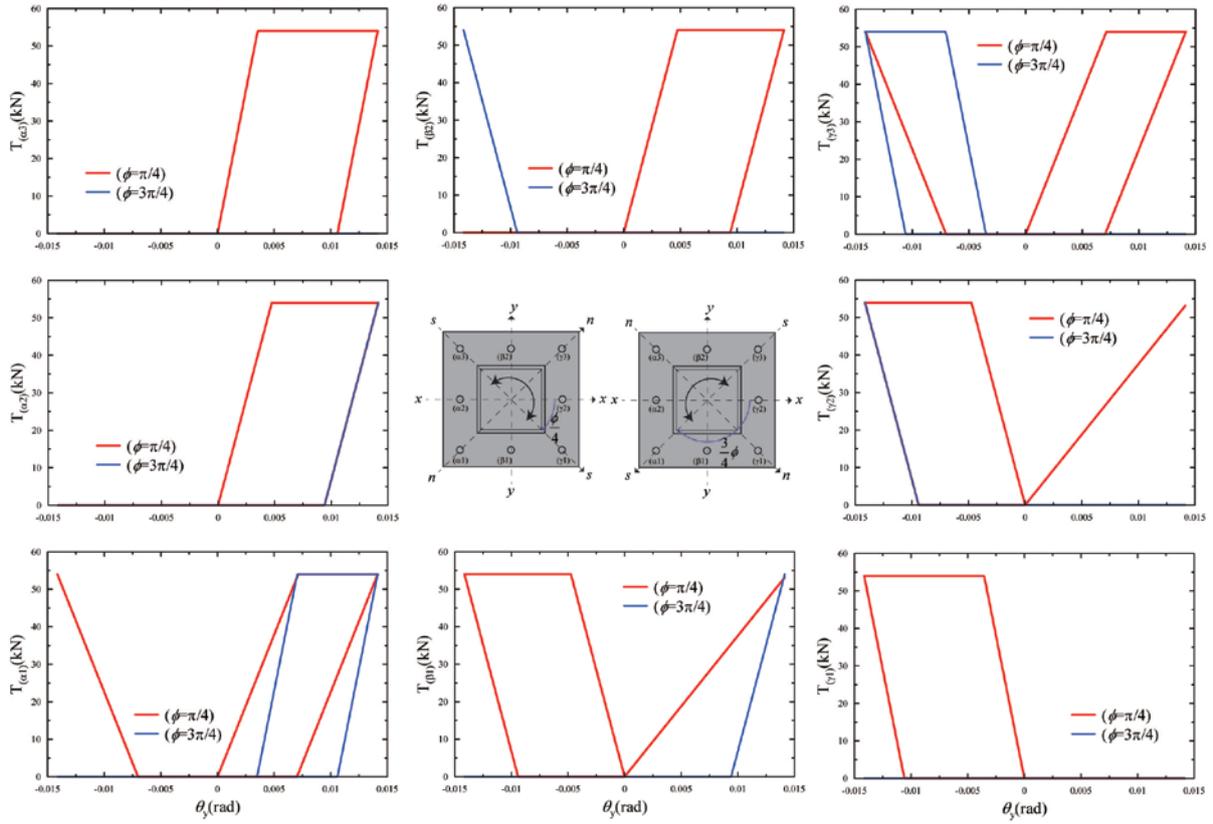


図17 $T_{(i)} - \theta_y$ 関係(解析Ⅱ-2)

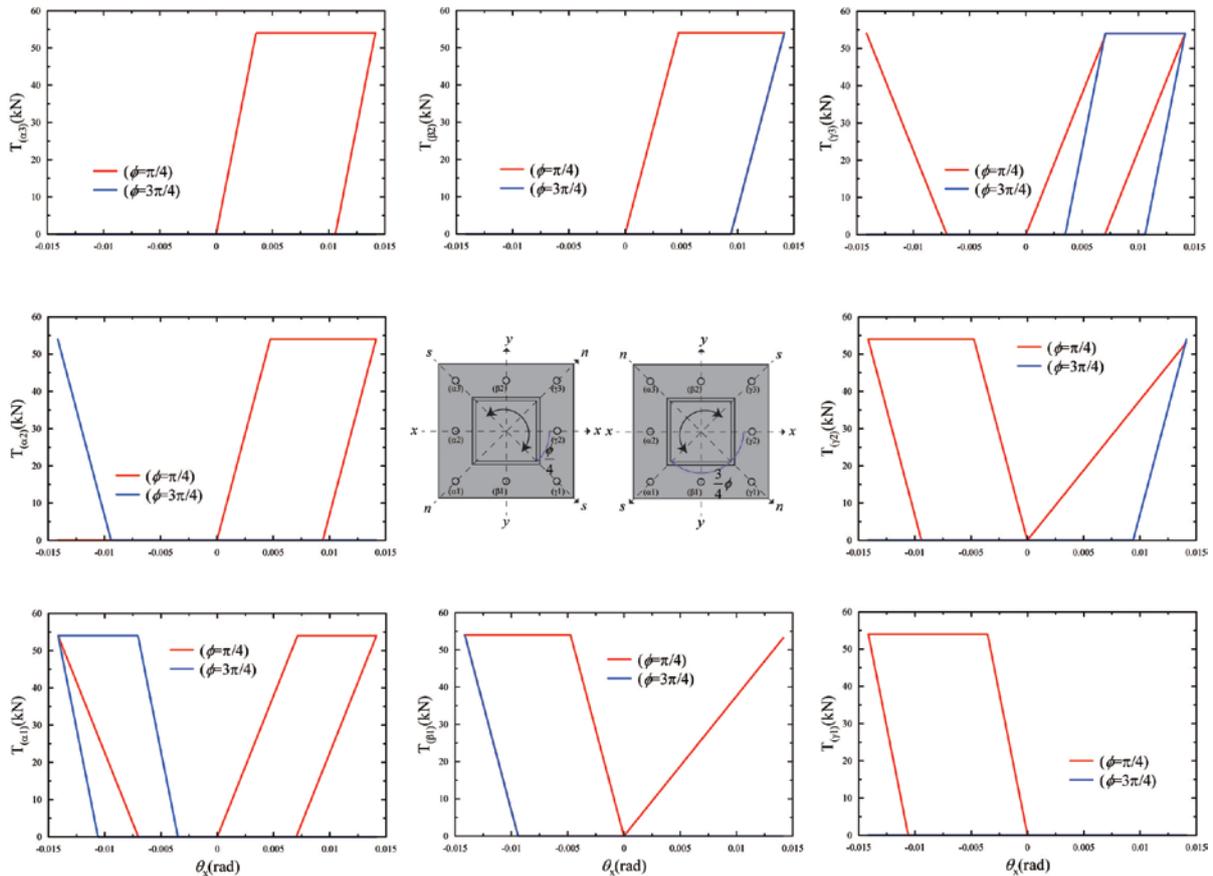
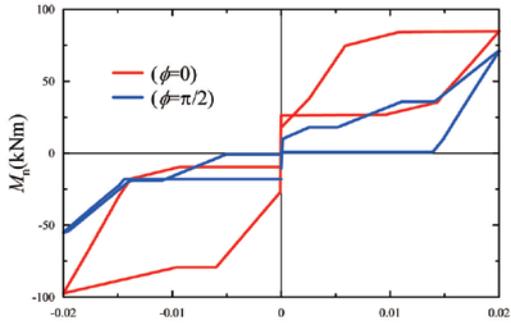
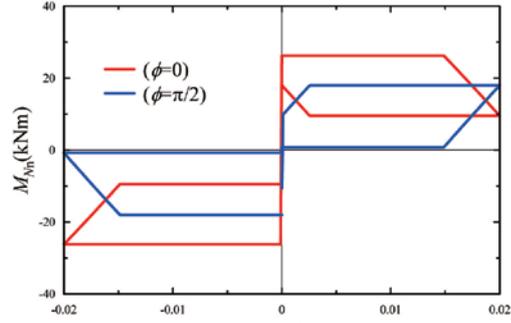


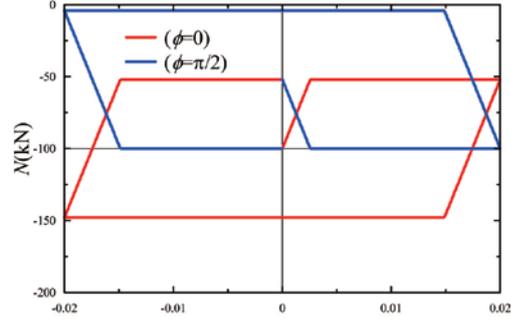
図18 $T_{(i)} - \theta_x$ 関係(解析Ⅱ-2)



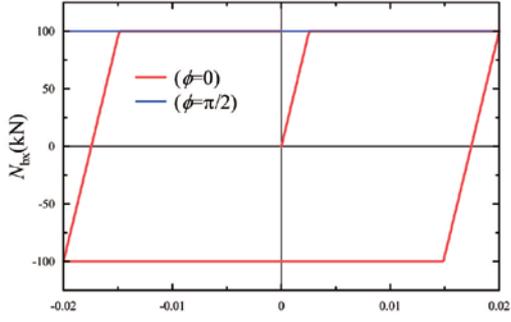
(a) $M_n-\theta_n$ (解析 III-1)



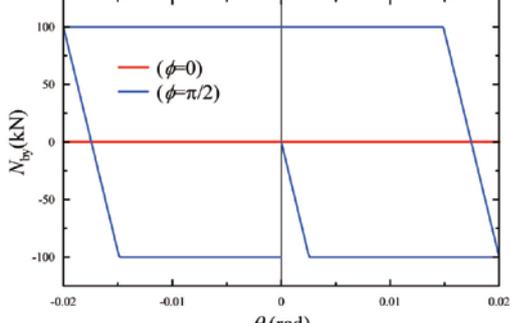
(b) $M_{Nn}-\theta_n$ (解析 III-1)



(c) $N-\theta_n$ (解析 III-1)

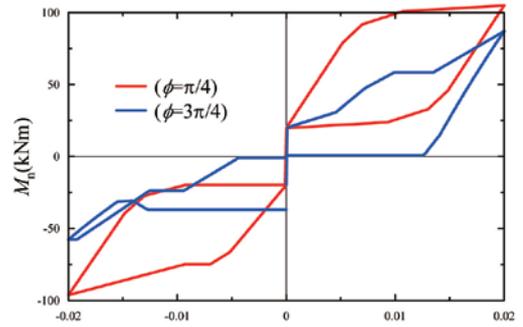


(d) $N_{bx}-\theta_n$ (解析 III-1)

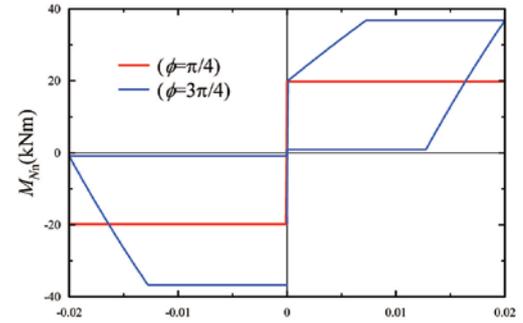


(e) $N_{by}-\theta_n$ (解析 III-1)

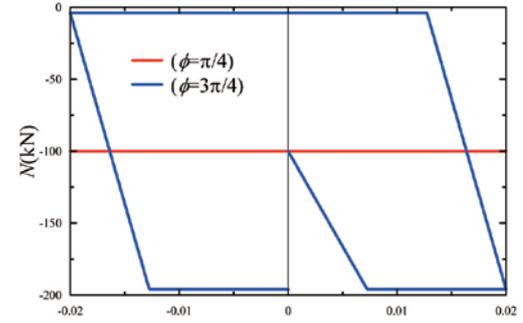
図19 $M_n, M_{Nn}, N, N_{bx,y} - \theta_n$ 関係(解析 III-1)



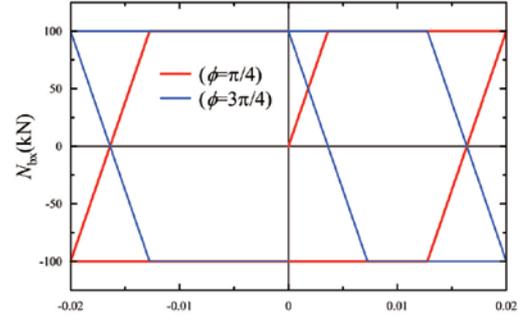
(a) $M_n-\theta_n$ (解析 III-2)



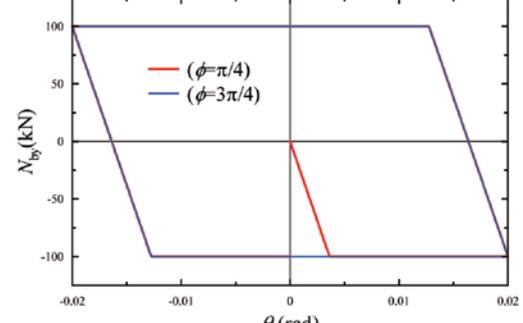
(b) $M_{Nn}-\theta_n$ (解析 III-2)



(c) $N-\theta_n$ (解析 III-2)



(d) $N_{bx}-\theta_n$ (解析 III-2)



(e) $N_{by}-\theta_n$ (解析 III-2)

図20 $M_n, M_{Nn}, N, N_{bx,y} - \theta_n$ 関係(解析 III-2)