

露出柱脚の有限要素法解析

高松 隆夫*・玉井 宏章**・山西 央朗***

(平成18年10月30日受理)

FEM Analysis of Exposed Column-Base

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

Restoring force characteristics of exposed column-base is very complicate because it contains the contact problem between base plate and base, elasto-plastic problem in anchor bolt, base plate and column. To get optimum shape and strength of exposed column-base, precise evaluation method is required. In this paper, we adopted the F.E.M. model that can treat contact problem. Several example analyses of column-base were carried out to verify the availability of the F.E.M. model.

Key Words: exposed column base, F.E.M. analysis, loading test, anchor-bolt-yield-type, base-plate-yield-type

1. は じ め に

鉄骨露出柱脚における、現在の一般的な崩壊機構は、柱降伏型およびアンカーボルト降伏型である。柱降伏型における弾性剛性および耐力は、柱の断面性能に大きく基因するため、比較的容易に評価ができる。一方、露出柱脚はベースプレート、アンカーボルトおよび基礎コンクリート部分から構成されているため、アンカーボルト降伏型の抵抗機構は、各要素の相関耐力関係により変動する。特に、ベースプレートの面外変形は支配的な影響を与える。

これまでに、降伏要素を限定した載荷実験を行い、復元力特性モデルの近似的な定式化を行ってきた^{1), 2)}。アンカーボルト降伏先行型では、スリップ型の復元力特性となり、また、ベースプレート降伏先行型では、除荷点指向型の復元力特性となる。しかしながら、これらのモデルは、予め抵抗機構を知り得ている必要があり、抵抗機構を予測する方法が確立されていない現段階では、汎用的に用いれ

ない。また、ベースプレート降伏先行型では、ヒンジラインが段階的に生成されるので、骨格曲線において明解な降伏挙動が表れず、明瞭な骨格曲線を評価できない。各ヒンジライン毎に剛性評価を行い、明瞭な骨格曲線を評価する方法が提案されている³⁾ものの、やはり段階的なヒンジラインを予め推定する必要がある。

文献4), 5)では、有限要素法解析により解析を行い、露出柱脚の抵抗機構を考察しているが、特定の抵抗機構を持つ試験体についての検討に留っており、抵抗機構の変動に対して追跡しうるか否かの判定は行われていない。更に、接触問題(基礎・ベースプレート間の離間・接触の判定と接触反力の算出)を含めた、モデルの検証も行われていない。

本論文では、様々な抵抗機構を示す露出柱脚を統一的に取扱える有限要素法モデルを提案することを目的に、まず、理想化された剛体の基礎との接触問題と、アンカーボルト、ベースプレートが塑性化する材料非線形問題を解析する。

* 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

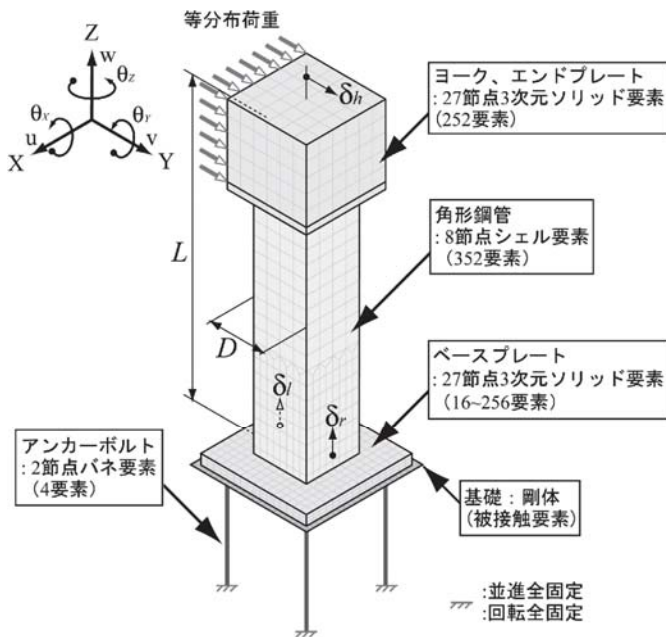


図1 有限要素法解析モデル

試験体には、アンカーボルトのみが降伏する場合、および、ベースプレートのみが降伏するものを採用し、載荷実験・有限要素法解析を行う。そして、載荷実験結果と有限要素法解析結果の整合性を検証し、本有限要素法モデルの有効性を検討する。

2. 有限要素法解析モデル

2.1 モデルの概要

有限要素法解析に用いた各部分の要素形式と要素分割および境界条件を図1に示す。

解析プログラムには、汎用構造解析プログラム「ADINA ver. 8.3」を用いる。解析領域は、柱脚全領域とした、いわゆる全解析とした。

○要素の形式

- ・アンカーボルトは、弾塑性バネ要素とする。
- ・基礎は、簡単のため剛体とする。
- ・ベースプレート、エンドプレートおよびヨークは27節点3次元ソリッド要素、柱は8節点シェル要素を用いる。
- ・ベースプレート下面と基礎上面の間には、加接触要素を配置する。

○幾何学的境界条件

- ・アンカーボルトは、上端部はベースプレート上面と接続し、下端部は固定(XYZ方向の並進・回転を拘束)とした。

○力学的境界条件

- ・通常、アンカーボルトには降伏軸力の0.3倍程度、初期張力が導入される。このことから、まず、アンカーボルトに所定の張力を導入する。
- ・Y軸方向への単調載荷を行う。ヨークのY方向に垂直な面への等分布荷重として与える。

○接触問題の解法^{6), 7)}

- ・ベースプレートと基礎(剛体)との間はCoulomb摩擦則に従う摩擦接触境界として扱う。被接触面と加接触面とを定め、反力と相対変位で接触、離間を判定し、Coulomb摩擦接触条件は、Lagrangeの未定乗数法を用いて導入している。尚、摩擦係数は0.4とした。
- ・ベースプレートと基礎との間に加接触要素を配置することにより、ベースプレート回転による沈み込み(Z軸負方向の変位)に対しては接触要素を介して基礎が抵抗し、浮上り(Z軸正方向の変位)に対してはアンカーボルトが抵抗する機構を表現している。

○塑性化の取り扱い

- ・素材特性は、角形鋼管、ベースプレートは素材試験値を用い、降伏条件はVonMisesの降伏条件を、硬化則は移動硬化側を用いた。また、アンカーボルトは素材試験値を用い、軸方向成分のみを考慮した、一軸の完全弾塑性型とした。

2.2 解析結果の整理方法

柱脚の性能は、骨組解析への利用を考慮して、柱脚部の抵抗曲げモーメント： M と、回転角： θ との関係で表わされる。 M および θ は次式により評価できる。

$$M = P \cdot L \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta = \frac{\delta_l - \delta_r}{D} \quad \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\theta = \frac{\delta_h}{L} - \frac{P \cdot L^2}{3 \cdot E \cdot I} \quad \dots\dots\dots (2.b)$$

ここに、 P :水平分布力の総和、 δ_h 、 δ_r :柱フランジ下端部左右両端の鉛直変位、 D :柱せい、 L :水平加力点からベースプレート位置までの距離、 δ_l :水平加力点の水平変位、 $E \cdot I$:柱の曲げ剛性である。

柱に塑性化が生じない場合、(2.a)、(2.b)は同一の値が得られるので、本研究では式(2.a)を採用した。

接触状況や柱脚の耐力を推定するには、基礎からの圧縮合力の位置が判れば良い。

そこで、次式により、圧縮合力点位置を算定した。

$$d_c = \frac{M}{\sum T_i} - d_l \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 d_c :柱図心から圧縮合力点位置までの距離、 $\sum T_i$:引張側アンカーボルトのアンカーボルト軸力の総和、 d_l :柱図心からアンカーボルト位置までの距離である。

アンカーボルトの塑性化は、相当応力度を、また、塑性変形の集中度合いを検討し、ヒンジラインを推定するため

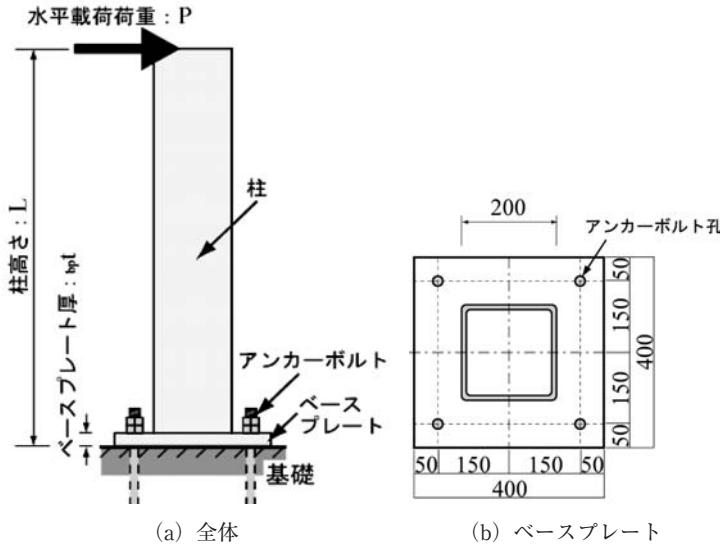


図2 解析対象

に、相当塑性ひずみ分布を利用する。

2.3 解析シリーズ

解析対象の概要を図2に示す。解析対象は、ベースプレート隅各部に4本のアンカーボルトを配置する、一般的な露出柱脚である。

本解析法の妥当性を検討すべく、アンカーボルト引張性能とベースプレート厚の相対関係を変数とし、アンカーボルト降伏先行型、アンカーボルトに降伏軸力近傍の負担が掛かるベースプレート降伏先行型 A、アンカーボルトは完全に弾性範囲に留まるベースプレート降伏先行型 B、合計3種類を選定する。各解析対象の接触状況を考慮し、それぞれの抵抗機構を図3に示す。各降伏時曲げモーメント： M_y は次式により求められる。

アンカーボルトが先行降伏する場合、

$$M_y = \sum_{ab} A_i \cdot ab \sigma_y \cdot d_i \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $ab A_i$ ：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_i ：圧縮合力点位置からアンカーボルト中心までの距離である。

ベースプレート降伏先行型 A 場合、図4(a)のヒンジライン位置を定義すると

$$M_y = {}_{bp}M_{0y} \left\{ D + 2H + \frac{4(H-X)(D+X)}{D+H} + \left(D + \frac{D^2}{H} + \frac{2(\alpha+1)(D+x)}{\alpha(D+2H)} \right) \left(1 + \frac{2H}{D} \right) \right\} + \frac{D \cdot h_b}{H} \cdot \sum ab A_i \cdot ab \sigma_y \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ${}_{bp}M_{0y}$ ($= {}_{bp}\sigma_y \cdot {}_{bp}t^2/4$)：ベースプレートの単位長さあたりの全塑性モーメント、 ${}_{bp}\sigma_y$ ：ベースプレート降伏点、 ${}_{bp}t$ ：ベースプレートの板厚、 h_a ：柱フランジからアンカーボルト中心までの距離、 h_b ：アンカーボルト中心からベースプレート外縁までの距離、 $H = h_a + h_b$ 、 $X = (D^2 - h_a \cdot D)/(4H)$ 、 $\alpha = D/(2X)$ である。

ベースプレート降伏先行型 B 場合、図4(b)のヒンジライン位置を定義すると、

$$M_y = {}_{bp}M_{0y} \left\{ D + 2H + \frac{4(H-X)(D+X)}{D + 2 \cdot h_a - 2\alpha \cdot h_b} + 4D \cdot h_a \cdot \frac{(1/\alpha^2 + 1)(\alpha + 1)}{D + h_a - 2h_b/\alpha} + \left(1 + \frac{2(D/\alpha^2 + D)}{D + h_a - 2h_b/\alpha} \right) (D + 2H) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

表1には、図3に示した解析対象の材料特性、並びに、各抵抗機構を想定して、式(4)、(5)および(6)から求めた、それぞれの降伏曲げモーメント値を示している。

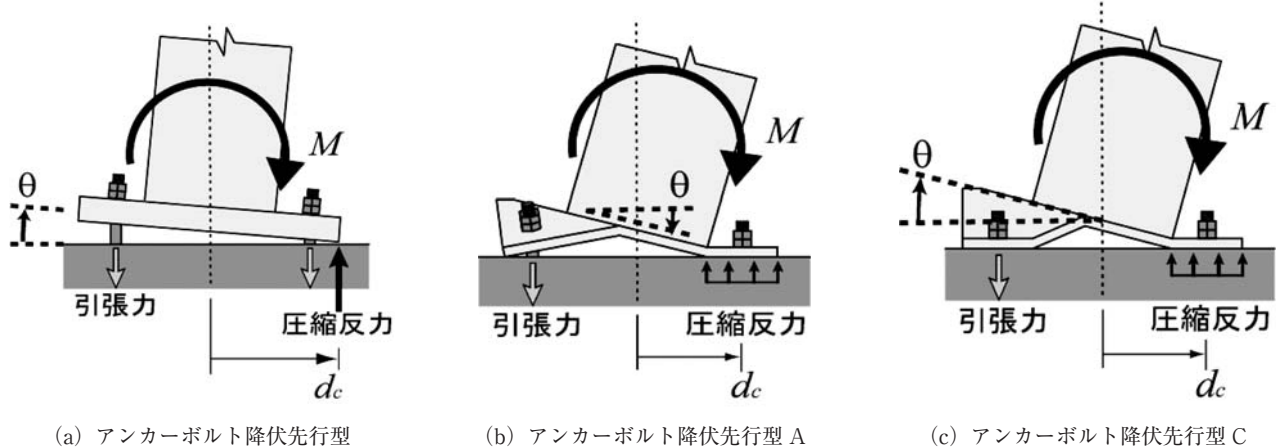


図3 抵抗機構

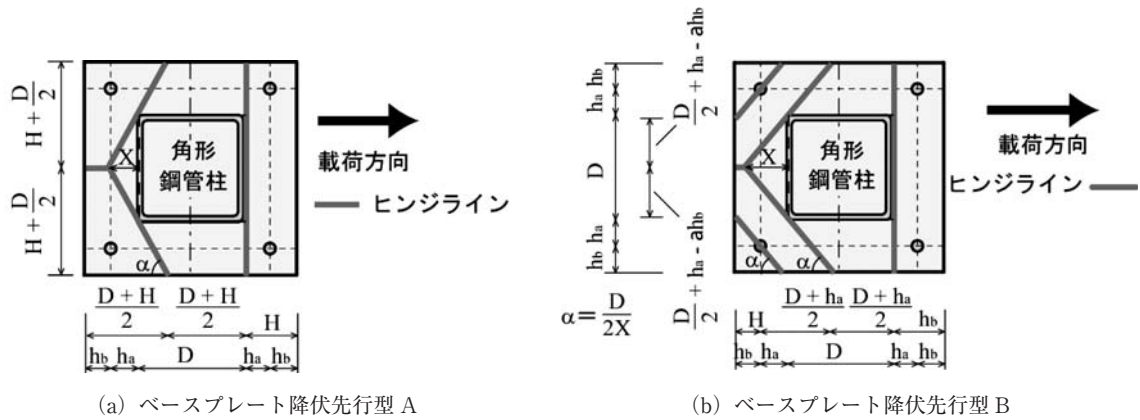


図4 ヒンジラインの位置

表1 材料特性

(a) アンカーボルト降伏先行型の材料特性

試験体 1	材質	E	σ_y	主要寸法	降伏時曲げモーメント
$t/\phi = 2.47$		(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(mm)	($\text{kN}\cdot\text{m}$)
柱	STKR400	205	349	Box-200x200x12	186
ベースプレート	SS400	205	409	PL-400x400x36	307 (式(6)より算出)
アンカーボルト	ABR400	205	305	$g\phi = 14.6, ab\ l = 445$	36.2 (式(4)より算出) 135 (式(5)より算出)

(b) ベースプレート降伏先行型 A の材料特性

試験体 2	材質	E	σ_y	主要寸法	降伏時曲げモーメント
$t/\phi = 0.59$		(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(mm)	($\text{kN}\cdot\text{m}$)
柱	STKR400	205	382	Box-200x200x12	204
ベースプレート	SS400	205	267	PL-400x400x19	83.4 (式(6)より算出)
アンカーボルト	SS400	205	295	$g\phi = 32, ab\ l = 529$	175 (式(4)より算出) 69.7 (式(5)より算出)

(c) ベースプレート降伏先行型 B の材料特性

試験体 3	材質	E	σ_y	主要寸法	降伏時曲げモーメント
$t/\phi = 0.62$		(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(mm)	($\text{kN}\cdot\text{m}$)
柱	STKR400	205	235	Box-200x200x12	125
ベースプレート	SS400	205	270	PL-400x400x9	15.1 (式(6)より算出)
アンカーボルト	ABR400	205	310	$g\phi = 14.6, ab\ l = 480$	36.8 (式(4)より算出) 17.5 (式(6)より算出)

E : ヤング率 σ_y : 降伏応力度 $g\phi$: 軸部径 $ab\ l$: 有効長さ

アンカーボルト降伏先行型、ベースプレート降伏先行型 A、および、ベースプレート降伏先行型 B を対称として、有限要素法解析を行い、ベースプレートの最適な要素分割方法を検討する。

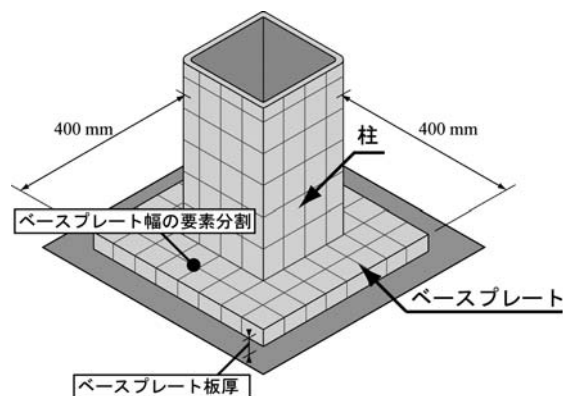
接触状況を良好に近似するため、ベースプレートには、板厚方向には 1 次変化、板幅方向には高次の変化が変位関数に要求される。ベースプレートの要素モデルとして、27 節点 3 次元ソリッド要素を用いることにすると、Lagrange 型の 2 次変位関数が定義されているので、板厚方向は要素分割数を 1 としてで十分であるが、板幅方向には多くの要素分割が必要とされる。

以上から、解析パラメータとしてベースプレート板厚とベースプレート幅の分割方法を選定し、図 5 (b) に示す解析名称で表わすこととした。解析は、36mm ベースプレート厚・M16 アンカーボルト、ベースプレート幅分

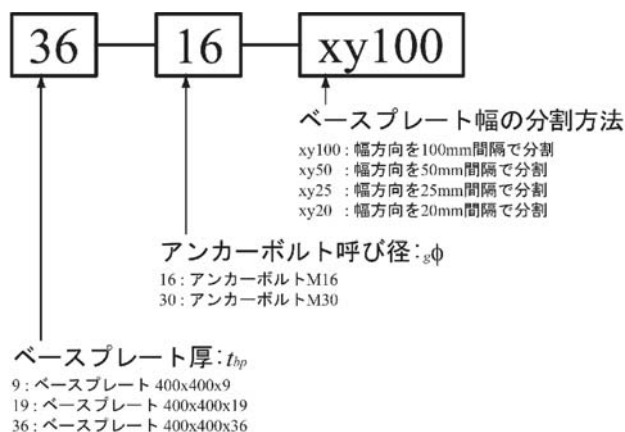
割を 100mm, 25mm 間隔と変化させるケース (36-16-xy100, 36-16-xy25), 19mm ベースプレート厚・M32 アンカーボルト、ベースプレート幅分割を 100mm, 50mm, 5mm 間隔と変化させるケース (19-30-xy100, 19-30-xy50, 19-32-xy25) と、9mm ベースプレート厚・M16 アンカーボルト、ベースプレート幅分割を 100mm, 50mm, 25mm, 20mm 間隔と変化させるケース (9-16-xy100, 9-16-xy50, 9-16-xy25, 9-16-xy20) の計 9 ケースについて解析した。

3. 比較実験の概要

解析と比較を行い、解析手法の妥当性を示すため、露出柱脚部分架構試験体を用いての載荷実験を行い、基準データを求める。

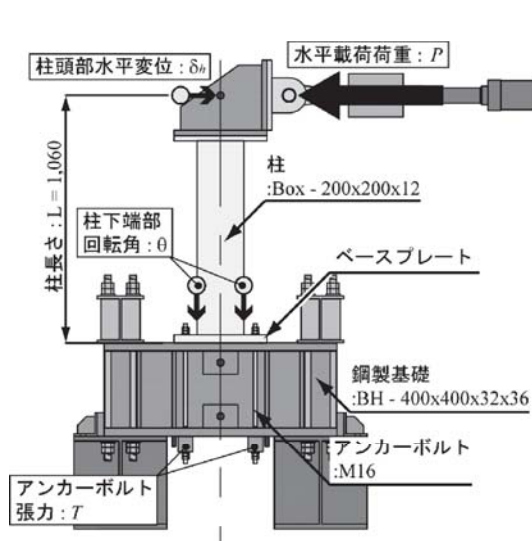


(a) ベースプレートの分割方法

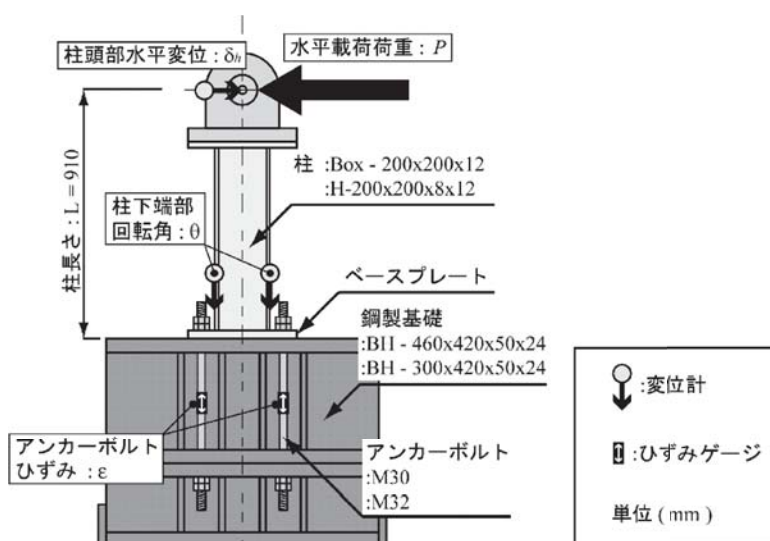


(b) 解析名称の説明

图5 解析名称



(a) 実験1の試験体設置状態



(b) 実験2の試験体設置状態

図6 実験装置と試験体

3.1 実験装置と試験体

○実験 1

載荷装置を図6(a)に示す。試験体柱頭部と水平油圧ジャッキを接続し、水平載荷を行う。載荷方式は、柱脚部の材端回転角を目標値とした回転角制御とする。アンカーボルト降伏先行型、ベースプレート降伏先行型Bを試験体とした2ケースとし、基礎部分には十分剛な鋼製基礎(BH-400x400x32x36)を用いた。アンカーボルト降伏先行型の試験体には単調載荷を、ベースプレート降伏先行型の試験体には正負交番の漸増繰返し載荷を行った。尚、初期不整(元たわみや緩みによる、ガタツキ)を防ぐために、アンカーボルトには初期張力として、降伏軸力の30%(15kN)を導入した。

○実験2

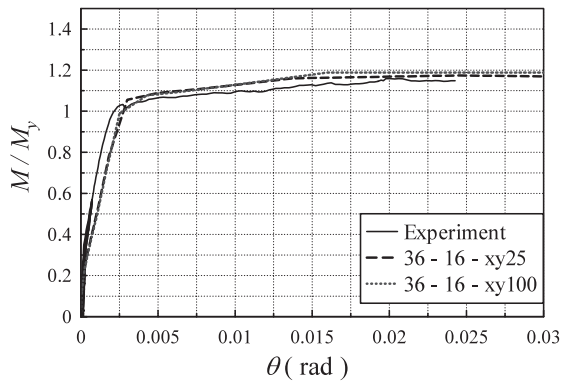
載荷装置を図6(b)に示す。反力床に、試験体を設置し、柱頭部に設置したピンに水平外力が作用するように水平油

圧ジャッキを接続する。水平載荷方式は、柱脚部の材端回転角を目標値とした回転角制御とする。ベースプレート降伏先行型 A を試験体とし、基礎部分には十分剛な鋼製基礎 (BH-400x400x25x50) を用いて、正負交番の漸増繰返し載荷を行った。

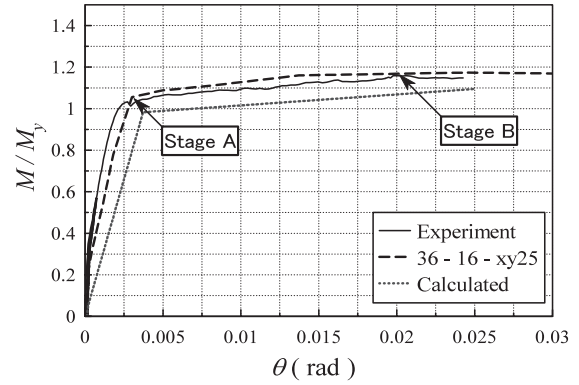
3.2 計測方法

計測位置を図6に示す。計測は、水平荷重： P 、アンカーボルト張力： T および柱脚部材端回転角： θ を測定する。水平荷重： P は、油圧ジャッキ先端部に取り付けたロードセルより測定する。アンカーボルト張力： T は、実験1においてはアンカーボルト下端部に設置したロードセルより θ は、柱脚材端部の左右の鉛直変位を測定して算出する。この鉛直変位には、柱下端部の鉛直変位を用いた。

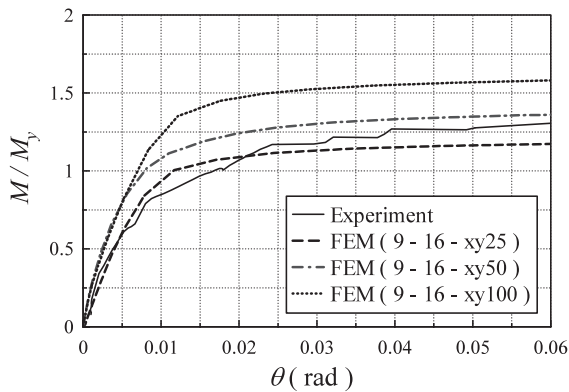
また、ベースプレート降伏先行型 A とベースプレート降伏先行型 B ついては、載荷試験後に、残留変形性状を



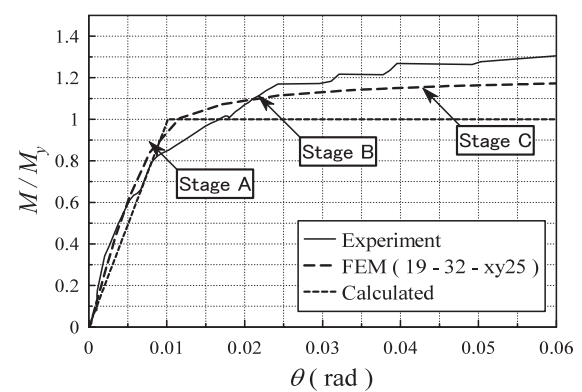
(a) 要素分割数の影響



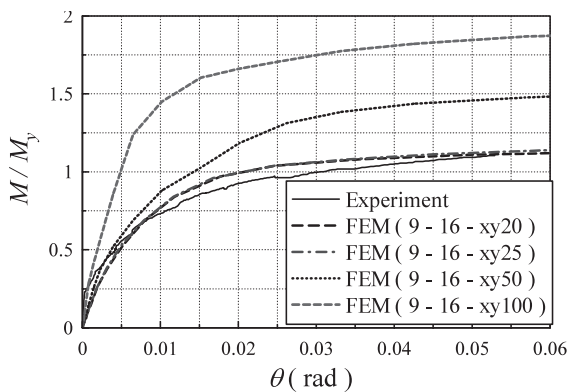
(b) 簡略モデルとの比較

図7 アンカーボルト降伏先行型柱脚の $M-\theta$ 関係

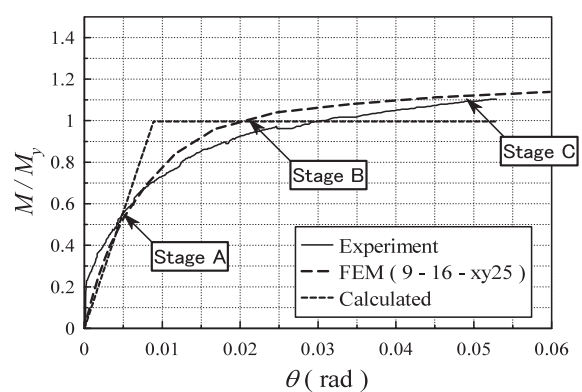
(a) 要素分割数の影響



(b) 簡略モデルとの比較

図8 ベースプレート降伏先行型柱脚 A の $M-\theta$ 関係

(a) 要素分割数の影響



(b) 簡略モデルとの比較

図9 ベースプレート降伏先行型柱脚 B の $M-\theta$ 関係

観察した。

4. 解析に関する結果とその考察

ベースプレート板厚およびベースプレート幅方向要素分割方法を変化させた場合について、頂部水平力を受ける露出柱脚の単調載荷解析を行い、実験結果と比較した。以降では、柱脚の各力学特性に着目して考察を行う。

4.1 要素分割数の復元力特性に及ぼす影響

各解析の、降伏耐力で無次元化した柱脚の曲げモーメント： M/M_y - ベースプレート回転角： θ 関係を、実験値および略算値とともに図8、9に示す。尚、降伏耐力値は、アンカーボルト降伏先行型は式(4)、ベースプレート降伏先行型 A は式(5)、ベースプレート降伏先行型 B は式(6)より算出した値とする。また、ベースプレート降伏先行型の実験結果は、解析値との比較を簡単にするために、骨格曲線を示している。

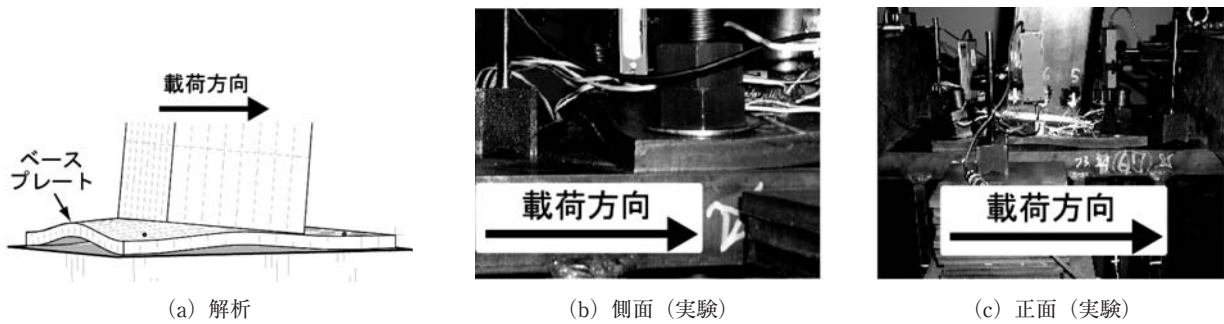


図 10 ベースプレート降伏先行型柱脚 A のベースプレート変形状 (Stage C)

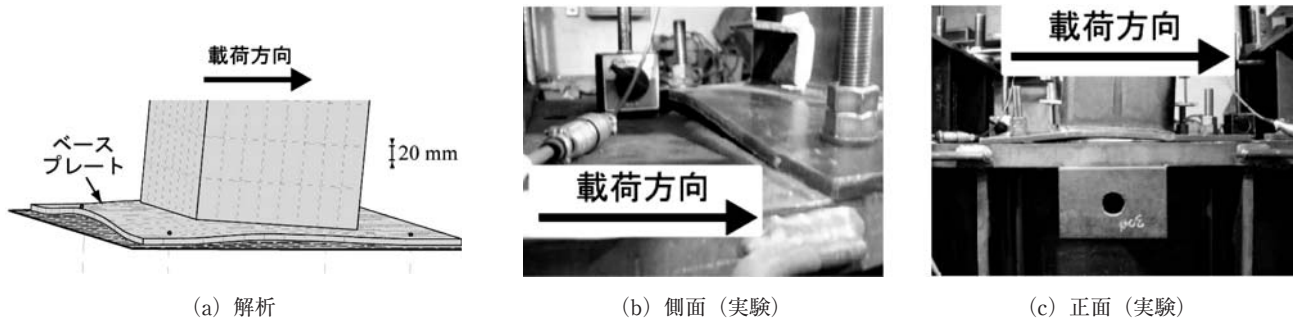


図 11 ベースプレート降伏先行型柱脚 B のベースプレート変形状 (Stage C)

図 7 (a), (b) には, アンカーボルト降伏先行型のものについて, 図 8 (a), (b) には, ベースプレート降伏先行型 A のものについて, 図 9 (a), (b) には, ベースプレート降伏先行型 B のものについての結果を, それぞれ, 示している。

図 7 (a), 図 8 (a), 図 9 (a) は, ベースプレート幅方向要素分割方法を変化させた場合について, 図 7 (b) は, 文献 1) の簡略モデルとの比較を, 図 8 (b), 図 9 (b) は, 文献 2) の簡略モデルとの比較を, それぞれ, 示している。

これらの図より, アンカーボルト降伏先行型では, ベースプレート幅方向要素分割方法によらず, $M-\theta$ 関係の解析値は, 実験結果と良好に一致する。一方, ベースプレート降伏先行型柱脚では, ベースプレート幅方向要素分割数が粗いと, 解析値の $M-\theta$ 関係は高目となる。つまり, ベースプレートを硬めに評価するものの, 本試験体では要素分割を 25mm 以下の間隔とすれば, 解析値と実験値はほぼ一致する。なお, ベースプレート降伏先行型 A において, 回転角 0.01 付近より, 解析値と多少の差異が生じているように見えるのは, 実験では, 繰返し載荷を行ったものを骨格曲線化していることに起因しているものと思われる。

ベースプレートの塑性化が耐力値に影響を及ぼす場合は, 高次要素を用いても幅方向に十分な要素分割を必要とすることがわかる。

アンカーボルト降伏型柱脚の簡略モデルは, 実験値, 解析値とがほぼ一致するものの, アンカーボルトの初期軸力を考慮できていないため, 全体的に耐力が低目となってい

る。ベースプレート降伏型柱脚 A の簡略モデルは, 降伏までの回転剛性・耐力はほぼ一致するものの, 降伏後の耐力上昇が考慮できていないため, 回転角の増加と共に耐力の差が広がる傾向にある。また, ベースプレート降伏型柱脚 B の簡略モデルは, ベースプレートの段階的な塑性化を表現できないため, 回転剛性および初期の耐力 (Stage B 近傍まで) に差異が生じる事がわかる。

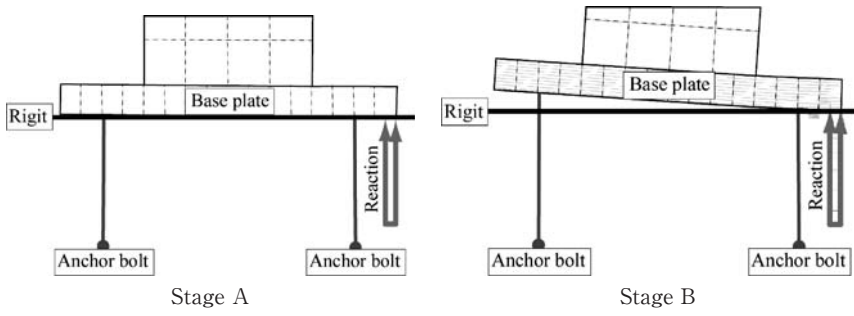
4.2 ベースプレート変形状

ベースプレート降伏先行型柱脚について, Stage C の載荷時のベースプレート面外変形状を図 10, 図 11 に, 実験結果と共に示す。

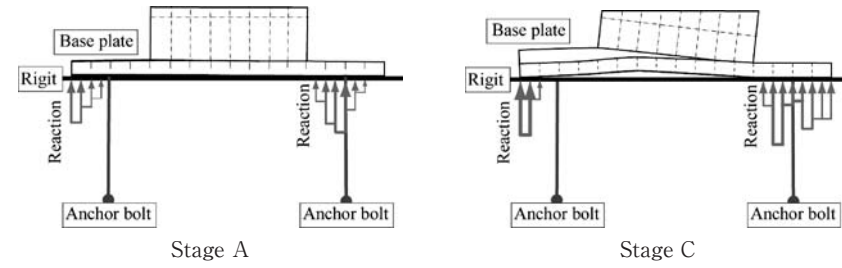
ベースプレート降伏先行型 A では, 引張側ベースプレートに, 柱隅角部を通る斜めの線上に折れ曲がりが生じ, また, 圧縮側ベースプレートに, 柱フランジ辺線上に沿って折れ曲がりが生じている。ベースプレート降伏先行型 B では, 上述の 2 本の線に併せて, 引張側アンカーボルト位置を通る斜めの線上にも折れ曲がりが生じている。この複雑なベースプレートの面外変形状を, 解析は良好に再現できており, この種の柱脚の抵抗機構をほぼ表現し得ることがわかる。

4.3 接触反力分布と圧縮合力点位置

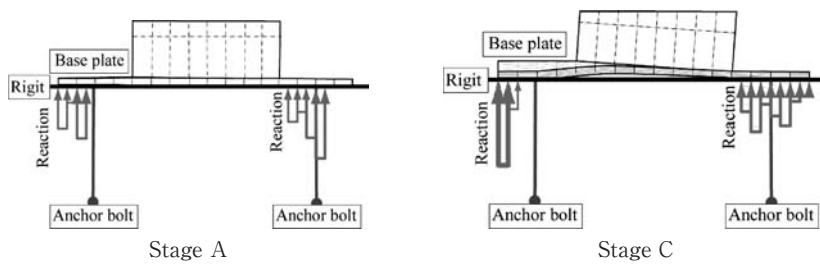
解析から得られた, 各試験体の接触力分布を図 12 に, 接触離間領域を図 13 に示す。検討した接触力は, 初期降伏時および実験試験体の最大変形時 (終局時) のものであ



(a) アンカーボルト降伏先行型柱脚

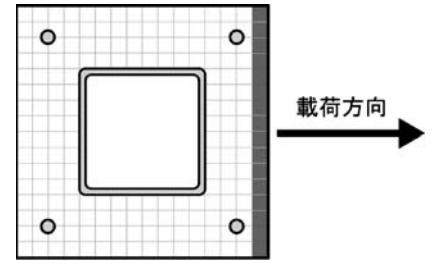


(b) ベースプレート降伏先行型柱脚 A

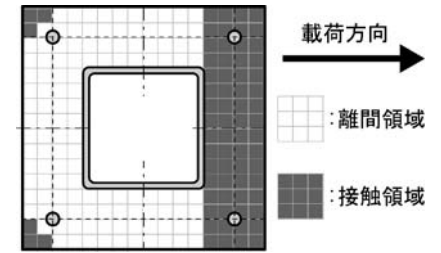


(c) ベースプレート降伏先行型柱脚 B

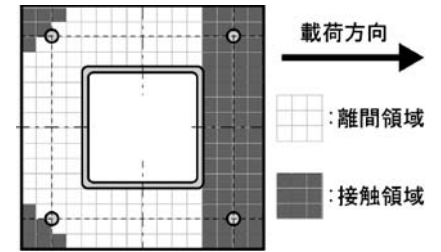
図 12 接触反力分布



(a) アンカーボルト降伏先行型 (Stage B)

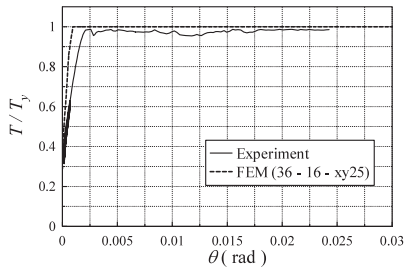


(b) ベースプレート降伏先行型柱脚 A (Stage C)

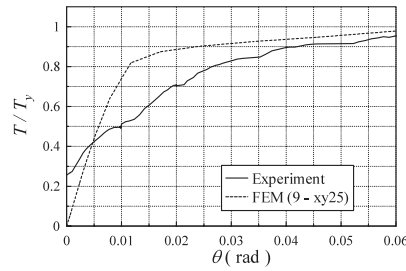


(c) ベースプレート降伏先行型柱脚 B (Stage C)

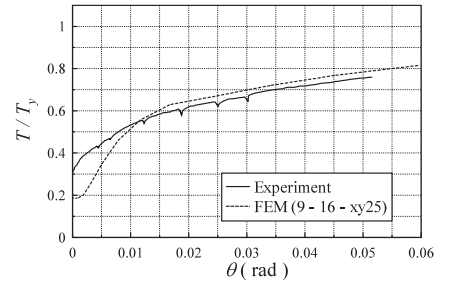
図 13 接触・離間領域



(a) アンカーボルト降伏先行型

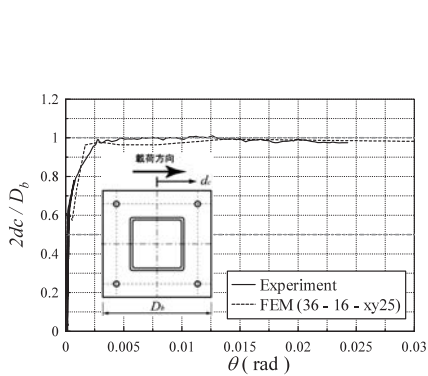


(b) ベースプレート降伏先行型柱脚 A

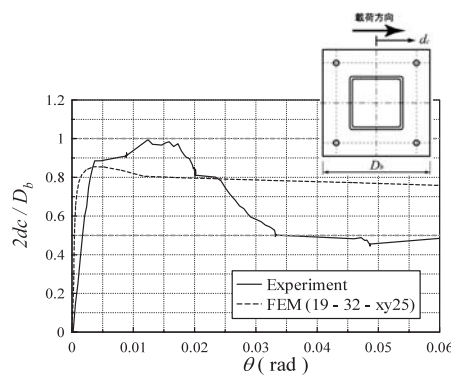


(c) ベースプレート降伏先行型柱脚 B

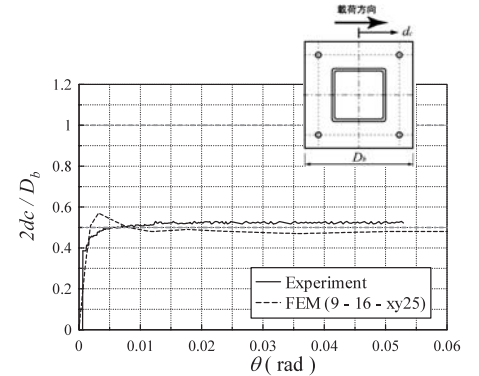
図 14 引張側アンカーボルトの軸力の推移



(a) アンカーボルト降伏先行型



(b) ベースプレート降伏先行型柱脚 A



(c) ベースプレート降伏先行型柱脚 B

図 15 圧縮合力点位置の推移

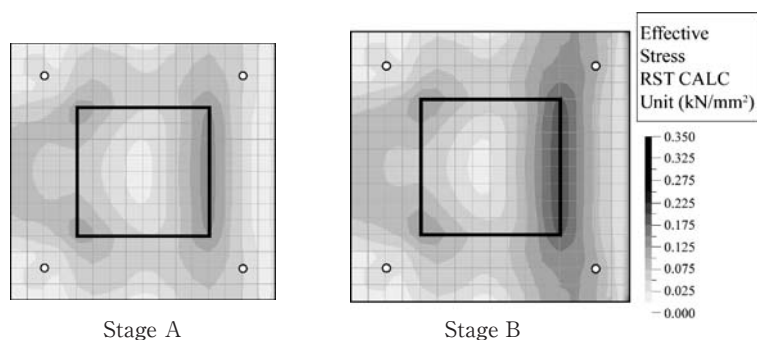
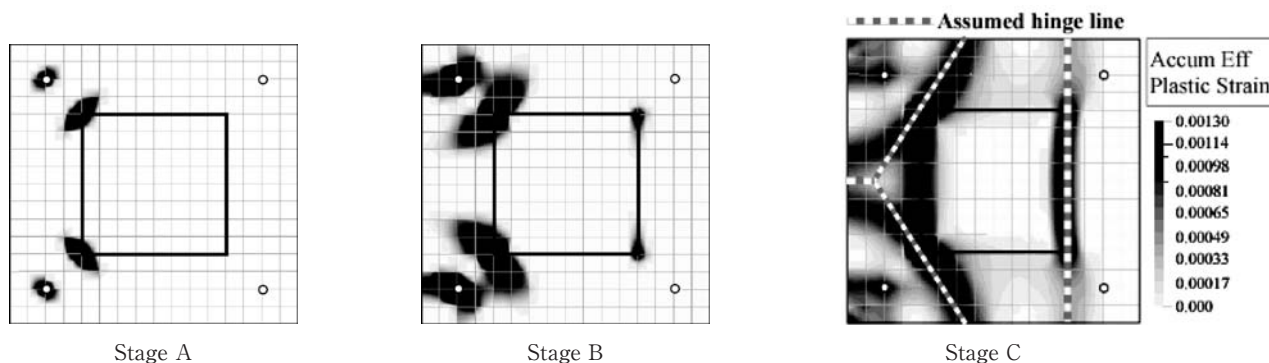
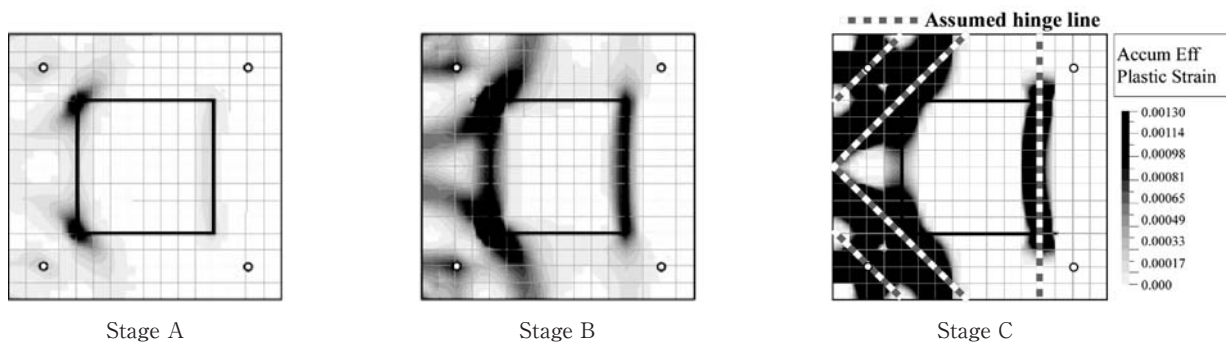


図 16 ベースプレート裏面（接触側）の相当応力分布（アンカーボルト降伏先行型）



(a) ベースプレート降伏先行型柱脚 A



(b) ベースプレート降伏先行型柱脚 B

図 17 相当塑性ひずみ分布によるヒンジラインの推定（ベースプレート降伏先行型）

る。

アンカーボルト降伏先行型の接触反力分布は、初期降伏時および終局時共に、圧縮側ベースプレート端部に集中して生じている。ベースプレートの剛性・耐力が十分ある場合には、圧縮合力点位置はベースプレートの先端部に位置することがわかる。

ベースプレート降伏先行型の接触反力分布は、圧縮側のベースプレート面および引張側のベースプレート隅角部に生じている。

ベースプレートに著しい面外変形が生じる場合、接触反力はベースプレートの先端部に収束しない。特に、引張側のベースプレートに大きな面外変形が生じる場合は、ベースプレート端部が基礎と接触し、引張側アンカーボルト近傍からベースプレート隅角部にかけて接触反力が生じるこ

とに留意すべきである。

図 14 には、アンカーボルトの降伏軸力は無次元化した引張側アンカーボルト軸力： T/T_y - ベースプレート回転角： θ 関係を、図 15 には、ベースプレート幅で無次元化した圧縮合力点位置： $2d_c/D_b$ - ベースプレート回転角： θ 関係を示す。

アンカーボルト降伏先行型柱脚では、早期にアンカーボルトが降伏する一方、ベースプレート降伏先行型柱脚では、アンカーボルトは降伏していない。圧縮合力点位置は、ベースプレートの剛性が十分確保できる場合はベースプレート端部（ $2d_c/D_b=1.0$ ）に位置し、ベースプレートに著しい面外変形が生じる場合はベースプレート端部より柱中心方向に推移し、ベースプレート降伏先行型 B においては柱フランジ線上（ $2d_c/D_b=0.5$ ）まで推移している。また、アン

カーボルト軸力の推移と、圧縮合力点位置の推移は、変形が大きくなるにつれ、解析値が実験値と良好に一致することから、本解析法は、柱脚の接触問題を取り扱える方法であることがわかる。なお、ベースプレート降伏先行型 A においては、アンカーボルトに貼り付けたゲージから引張力を算定しているため、安定した挙動が得られていない。

4.4 ベースプレートのヒンジラインの推定

図 16 に、アンカーボルト降伏先行型柱脚のベースプレート相当応力分布を示す。図 17 に、ベースプレート降伏先行型柱脚のベースプレート相当塑性ひずみ分布からヒンジラインを推定した結果を示す。

アンカーボルト降伏先行型柱脚のベースプレート裏面の相当応力値から、降伏応力 (0.49kN/mm^2) に達しておらず、応力が集中しているのは、圧縮側柱フランジ上であることがわかる。

ベースプレート降伏先行型柱脚 A のベースプレートの相当塑性ひずみは、傾向として、圧縮側柱フランジ上、引張側柱隅角部に応力が集中する。また、ベースプレート降伏先行型柱脚 B のベースプレートの相当塑性ひずみは、傾向として、圧縮側柱フランジ上、引張側柱隅角部および引張側アンカーボルト位置の周辺に応力が集中する。

両結果とも、初期降伏状態 (Stage A) では、圧縮側柱フランジ辺線上は降伏しておらず、この時点では、引張側にのみヒンジラインが生成されている。回転剛性が一定となり始める時点 (Stage B) においては、圧縮側にもヒンジラインが形成され始めている。この後、回転剛性が一定となっていることと、大変形時 (Stage C) に達しても新たなヒンジラインが形成されていないことから、本試験体では、Stage B の時点で崩壊機構が働き始めること、ヒンジラインは段階的に形成されることが分かる。

6. ま と め

アンカーボルト降伏先行型、ベースプレート降伏先行型、および、任意の抵抗機構を有する露出柱脚について、基礎とベースプレートとの接触問題を考慮したモデルを用いて有限要素法解析を行い、載荷実験結果と比較した。得られた知見は、以下のように要約できる。

- 1) ベースプレート厚が薄く、ベースプレートの変形が柱脚の耐力に影響する場合には、27 節点 3 次元ソリッド要素では、板幅方向の要素分割を細かくすれば、十分な精度で曲げモーメント耐力が評価できる。
- 2) 本有限要素解析法によれば、通常、実験では計測の困

難な、基礎からの圧縮力分布 (圧縮合力点位置) やベースプレートのヒンジラインを推定することができる。

- 3) 基礎の変形が無視しうる場合では、アンカーボルト降伏先行型からベースプレート降伏先行型までの幅広い形状の露出柱脚の弾塑性抵抗性状を本有限要素解析法により追跡できる。

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。更に、フルサト工業株式会社より転造ねじアンカーボルトを提供して頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章: ベースプレート降伏先行型露出柱脚の復元力特性に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 27 巻, pp.223-226. 2004. 3.
- 3) 柳田佳伸, 半貫敏夫, 小久保彰, 秋山宏: 露出型鉄骨柱脚の履歴特性に関する実験的研究 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.721-724, 2004. 8.
- 4) 角屋治克, 川口淳, 森野捷輔: 曲げモーメントを受ける露出型固定柱脚の弾塑性挙動及び終局耐力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, pp.123-130, 2004. 9.
- 5) 橋本篤秀, 他: 露出型固定柱脚構成要素の弾塑性挙動解析手法に関する研究 (その 1) ~ (その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.525-532, 1998. 9.
- 6) Bathe, K. J. and Chaudhary, A., "A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems," *Int. J. Num. Meth. in Eng.*, Vol.21, pp.65-88, 1985.
- 7) Eterovic, A. and Bathe, K. J., "On the Treatment of Inequality Constraints Arising From Contact Conditions in Finite Element Analysis," *J. Computers & Structures*, Vol. 40, No.2, pp.203-209, July. 1991.