

アンカーボルト初期張力や柱軸力の効果を考慮した 平面露出柱脚簡易解析モデル

玉井 宏章*・高松 隆夫*・山西 央朗**・白木 剛***

(平成19年10月31日受理)

Simple Analysis Model for Exposed Column-Base Considering Effect of Initial Tensioning of Anchor Bolt and Column Axial Force

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI
and Tsuyoshi SHIRAKI

(Received Oct.31,2007)

Abstract

This paper presents a two-dimensional structural model of an exposed column-base, which takes account of initial tensioning of anchor bolts and column axial force. The applicability of this model is confirmed by loading tests on a canti-lever with exposed column-base subjected to horizontal forces. The following observations were made:

- 1) The model takes account of variation of rotational rigidity due to initial anchor bolts 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 loading-tests results.

Key Words: analysis model, 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)~3)}ことは周知のことである。

この柱脚の固定度に着目し、柱脚の解析モデルを作成して、骨組の地震応答を調査した研究は、加藤ら⁴⁾、河野・松井ら⁵⁾、山田・秋山ら⁶⁾によって行われている。山田・秋山

らは、露出柱脚特有の履歴である、いわゆるダブルフラッグ型の復元力特性を表すモデルを用いる重要性を指摘し、これを用いて平面架構の地震応答解析を行って、その耐震性能の検討を行っている。

著者等も、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⁷⁾。

しかしながら、文献7は、アンカーボルト初期張力の効果を考慮したり、立体解析モデルに拡張する際に、定式化

* 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知的機能科学専攻

*** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

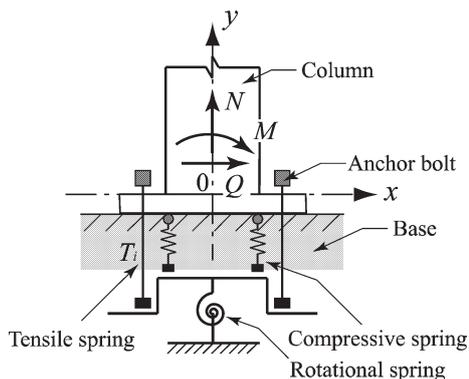


Fig.1 Structural model for exposed column-base

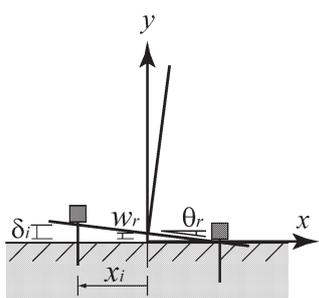


Fig.2 Nomenclature of generalized displacement parameter

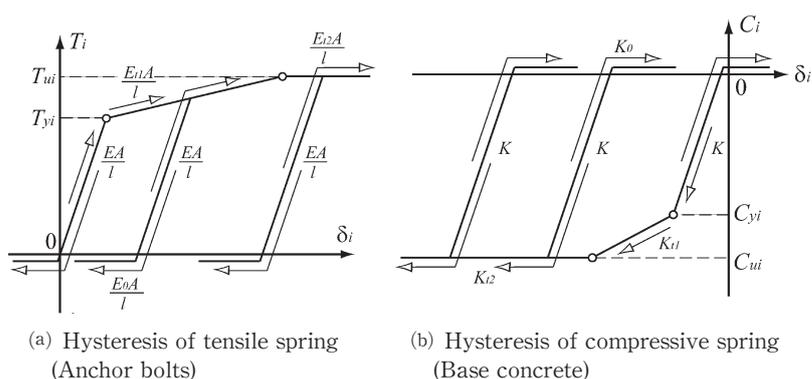


Fig.3 Hysteresis rule of tensile and compressive spring

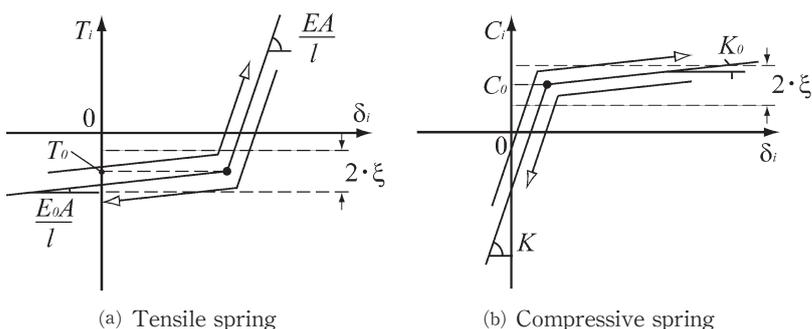


Fig.4 Treatment for contact and separation condition of tensile and compressive spring

が複雑となる傾向にある。

そこで、本研究では、柱軸力やアンカーボルト初期張力の影響を考慮でき、また容易に拡張できる簡易な平面露出柱脚解析モデルを提案する。

次節以降では、まず平面柱脚解析モデルを導出し、アンカーボルト初期張力を変えて、軸力と曲げを受ける露出柱脚付実大持柱について解析を行い、既報の実験値と比較して、本解析モデルの有用性、妥当性を検証する。

2. 解析モデルの概要

○仮定と特徴

柱脚の構造モデルを Fig.1 に示す。本研究では、アンカーボルトが先行して降伏する露出柱脚を対象とする。

本構造モデルは、アンカーボルト位置に引張弾塑性バネを、柱図心に対して対称に圧縮弾塑性バネと基礎の弾性回転変形を表す回転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設定する。

- 1) ベースプレートの塑性変形及び基礎部に破壊は生じない。
- 2) アンカーボルトは、せん断降伏せず、かつ、柱脚部のせん断方向の相対変形は無視できる。
- 3) 基礎からの圧縮反力は、ある回転中心線に集中して生じ、同一の抵抗機構では、その位置は変動しない。
- 4) ベースプレートと基礎との間の離間変位は、回転中心線を起点に直線的に変化する。

5) ベースプレート及び基礎の弾性変形による回転剛性の低下の度合いは、アンカーボルトの伸び量から求める回転剛性と比例関係にある。

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、アンカーボルト初期張力の固定度や耐力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

Fig.2 のような、2次元座標を置き、2並進自由度と1回転自由度の計3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 y 軸方向変位: δ_i を次式で表す。

$$\delta_i = w_r - x_i \cdot \theta_r \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 w_r, θ_r は、y 方軸方向変位、回転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 は、i 番目のバネの x 座標値である。

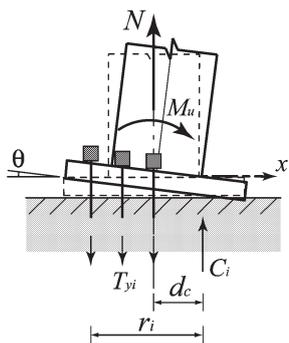


Fig.5 Resisting mechanism of column-base

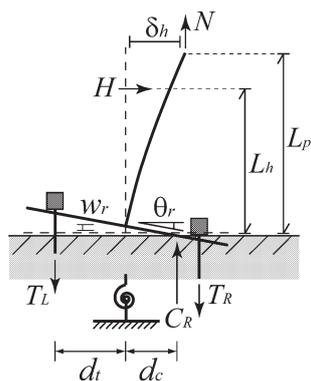


Fig.6 Illustration of measured value in tests and analysis

○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、Fig.3 (a),(b)に示す、引張力： T_i に抵抗するバネと圧縮力： C_i に抵抗する弾塑性バネにより、それらの特性を表す。各バネの抵抗しうる荷重領域では、材の塑性化に伴う剛性低下をPoly-linear型直線で表し、離間に伴う抵抗力の消失や、再接触に伴う回復は、Fig.4 (a),(b)に示すような、非零の微小剛性を有する弾性バネとして取り扱って、材の離間・再接触時の特性を表す。接触・離間は、次式で判定する。

$$|T_i - T_{0i}| < \xi \text{ を満足し,} \\ \text{離間かつ } \Delta\delta_i > 0 \text{ の時,} \\ \text{状態を接触に変更する。} \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\text{接触かつ } \Delta\delta_i < 0 \text{ の時,} \\ \text{状態を離間に変更する。} \dots\dots\dots (2.b)$$

ここに、 T_i ：アンカーボルト軸力、 T_{0i} ：離間軸力、 ξ ：微小幅、 $\Delta\delta_i$ ： z 方向変位増分である。

$$|C_i - C_{0i}| < \xi \text{ を満足し,} \\ \text{離間かつ } \Delta\delta_i < 0 \text{ の時,} \\ \text{状態を接触に変更する。} \dots\dots\dots (3.a)$$

$$\text{接触かつ } \Delta\delta_i > 0 \text{ の時,} \\ \text{状態を離間に変更する。} \dots\dots\dots (3.b)$$

ここに、 C_i ：基礎反力、 C_{0i} ：離間反力である。

○初期の柱軸力とアンカーボルト導入張力の考慮

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となる。

初期の柱軸力： N_0 の導入過程

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

アンカーボルト初期張力： T_{0i} の導入過程

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

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。

○圧縮合力線距離の設定

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_{Yi} に達したときに生じる。従って、Fig.5 からわかるように、アンカーボルトの位置： r_i の値と圧縮合力線距離： d_c が決まれば、最大抵抗曲げモーメント値は定まる。

本解析モデルは、最大抵抗モーメントが設定値となるよう、モデルの圧縮合力線距離： d_c を以下の手順で定める。

Fig.5 での最大抵抗曲げモーメント： M_u は、圧縮合力が作用する直線と柱図心との距離を d_c とすると、次式で表される。

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

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^{注1)}についての総和を表す。また、 r_i は次式で表される。

$$r_i = d_c - x_i \dots\dots\dots (5.b)$$

従って、(5.a,b)式を整理すると、圧縮合力線距離： d_c は、次式で得られる。

$$d_c = \frac{M_u + \sum_i^T T_{Yi} \cdot x_i}{\sum_i^T T_{Yi} - N} \dots\dots\dots (6)$$

○弾性回転剛性の調整について

(1)式のように変位場を仮定すると、ベースプレートや基礎は弾性変形を生じるため、柱脚の回転剛性は実験値と較べて剛くなる^{1),2)}。そこで、ベースプレートと基礎の弾性変形の影響を考慮して、ベースプレートの回転角： θ は、アンカーボルトの変形に基因する基礎とベースプレートとの間の相対回転角： θ_r と基礎及びベースプレートの弾性変形に基因する回転角： θ_b との和として、次式で表す。

$$\theta = \theta_r + \theta_b \dots\dots\dots (9)$$

柱脚下端部の曲げモーメント増分： ΔM と基礎及びベースプレートの弾性変形に基因する回転角増分： $\Delta\theta_b$ との間には、次の関係があると仮定する。

$$\Delta M = K_b \cdot \Delta\theta_b \dots\dots\dots (10)$$

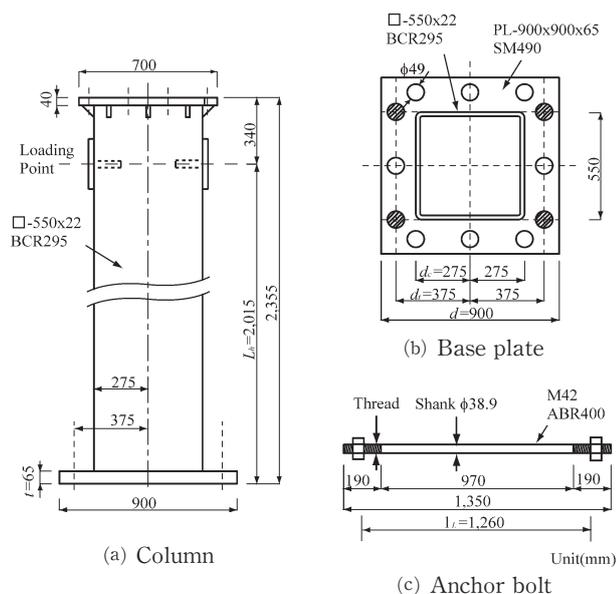


Fig.7 Test specimen

ここに、

$$K_b = \frac{1}{R-1} \cdot \frac{d_c + d_t - \frac{N}{T_Y} \cdot d_c}{\left(1 - \frac{T_0}{T_Y}\right) \cdot (d_c + d_t)} \cdot K_r \quad \dots\dots (11.a)$$

であり、

$$K_r = \frac{E_L \cdot A_L}{\ell_L} \cdot (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots (11.b)$$

($E_L, A_L, \ell_L, T_0, T_Y$) は、引張側アンカーボルトのヤング率、総断面積及びピナット間長さ、総初期導入張力、総降伏軸力であり、(d_c, R) は、圧縮合力線と柱図心との間の距離、弾性回転剛性補正係数である。また、 d_t は、引張側アンカーボルト群の平均的な位置と柱図心との間の距離であり、次式で定義される。

$$d_t = 2 \cdot \frac{\sum_i A_i \cdot r_i}{\sum_i A_i} - d_c \quad \dots\dots (11.c)$$

ここに、 \sum_i は、引張側アンカーボルトについての総和を表す^{注1)}。

尚、(11.a)式、(11.c)式の導入の詳細は、付録A, B に示す。

○圧縮バネ特性の設定

圧縮バネのバネ特性は、基礎コンクリートの圧縮反力を表現し、過度の沈下を生じないように、以下の手順で決定する。

簡単にするため、 y 軸回りの曲げモーメントと軸力を受ける柱脚を考える。引張側アンカーボルトを集約した軸剛性： K_t の引張バネと、基礎コンクリートの圧縮反力を表す軸剛性： K_c の圧縮バネが、柱図心から d_t 及び d_c にあり、柱軸力： 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_r と y 軸方向変位： w_r が生じてい

る。この状態における柱軸力増分： ΔN と曲げモーメント増分： ΔM は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta M &= K_t \cdot (\Delta w_r + d_t \cdot \Delta \theta_r) \cdot d_t - K_c \cdot (\Delta w_r - d_t \cdot \Delta \theta_r) \cdot d_c \\ \Delta N &= K_t \cdot (\Delta w_r + d_t \cdot \Delta \theta_r) - K_c \cdot (\Delta w_r - d_t \cdot \Delta \theta_r) \end{aligned} \quad \dots\dots (12.a,b)$$

(12.a,b)式から、柱軸力が変化しない時($\Delta N=0$)のベースプレートと基礎の間の回転剛性は、次式で表される。

$$\frac{\Delta M}{\Delta \theta_r} = \frac{K_t \cdot K_c}{K_t + K_c} \cdot (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots (13)$$

(11.b)式と(13)式との誤差を(11.b)式の α 倍に抑えるよう K_c を求めると、 K_c は次式で表される。

$$K_c = \frac{1 + \alpha}{\alpha} \cdot K_t = \frac{1 + \alpha}{\alpha} \cdot \frac{E_L \cdot A_L}{\ell_L} \quad \dots\dots (14)$$

圧縮バネの第1・第2降伏荷重、第2・第3分枝剛性は、各バネの負担支圧面積と基礎コンクリートの最大支圧応力度等の実験値を参考に決定することになるが、本論文では、基礎コンクリートは弾性挙動のみを対象とすることにする。

○弾性割線剛性について

ベースプレートを単調に回転させた時の原点とアンカーボルトが降伏する時点とを結ぶ弾性回転剛性は、圧縮バネによる回転剛性への影響が十分に小さいとして無視すると、次式のように表される。

$$K_{BS} = \frac{M_u}{\theta_{bu} + \theta_{ru}} \quad \dots\dots (15.a)$$

ここに、

$$M_u = T_Y \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \quad \dots\dots (16.a)$$

$$\theta_{ru} = \langle T_Y \cdot (d_c + d_t) - T_0 \cdot (d_c + d_t) \rangle / K_r \quad \dots\dots (16.b)$$

$$\theta_{bu} = \langle T_Y \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \rangle / K_b \quad \dots\dots (16.c)$$

θ_{ru}, θ_{bu} は、アンカーボルトが降伏する時点にかける θ_r 及び θ_b の値である。

(16.a~c)式及び(11.a)、(11.b)式を(15.a)式に代入し、整理すると、弾性割線剛性： K_{BS} は次式で与えられる。

$$K_{BS} = \frac{E_L \cdot A_L}{R \cdot \ell_L} (d_c + d_t) \cdot \frac{d_c + d_t - \frac{N}{T_Y} \cdot d_c}{1 - \frac{T_0}{T_Y}} \quad \dots\dots (15.b)$$

3. 試験体と解析シリーズ

本解析モデルの有効性を検討するため、軸力と曲げを受ける露出柱脚付片持柱の載荷試験に基づいて解析を行う。本節では、その試験体と解析シリーズを示す。

用いた試験体を Fig.7 に示す。

試験体は、 \square -550x22 (BCR295) の角形鋼管柱に12個の孔を有する PL-900x900x65 (SM490) の既製品ベースプレートを溶接し、図中ベースプレートの斜線の孔の位置で

Table 1 Material and Sectional properties of members in Analysis

(a) Column (□-550x22, BCR295)

A_c	I_c	Z_p	L_h	σ_y
mm ²	mm ⁴	mm ³	mm	N/mm ²
4.48x10 ⁴	2.04x10 ⁹	8.75x10 ⁶	2,015	300

A_c : Sectional area, I_c : Moment of inertia,
 Z_p : Plastic section modulus,
 L_h : Length of column as shown in Fig. 6,
 σ_y : Yield stress

(b) Anchor bolt (M42, ABR400)				(c) Base plate	
A_L	ℓ_L	σ_y	ϕ	t	σ_y
mm ²	mm	N/mm ²	mm	mm	N/mm ²
2,380	1,260	325	38.9	65	295

A_L : Sectional area of anchor bolts,
 ℓ_L : Length between nuts,
 σ_y : Yield stress, ϕ : Diameter

t : Thickness,
 σ_y : Yield stress

Table 2 Analysis model parameters

Series	N_o	T_o	M_u
	kN	kN	kN·m
	-150	100	544
Test I	-150	300	544
	-150	500	544
	0	200	502
Test II	-600	200	668
	-1,200	200	833
Test III	-400	150	612

T_Y	R	d_c	d_t	d	M_Y	θ_Y
kN	-	mm	mm	mm	kN·m	rad
773.5	1.5	275	375	275	503	3.07x10 ⁻³

$\theta_Y = M_Y / K_r$

M_Y : Yield bending moment without axial force

K_r : Elastic rotational rigidity due to elongation of tensile anchor bolts

T_Y : Yield axial force in tensile anchor bolts

R : Rotational rigidity modification coefficient

d_c, d_t : Distance between centroid of column and reaction line, centroid of column and anchor bolt

d : Base plate width

転造ネジアンカーボルト (M42, ABR400) 4 本を用いて、鋼製基礎ばりと緊結した露出柱脚付片持柱である。尚、ナット間の距離は 1,260mm である。これら試験体の断面性能、素材特性を **Table 1** に示す。**Table 2** には、解析モデルの設定パラメータと圧縮バネ、引張バネの座標値を示す。

解析シリーズとして、降伏曲げモーメント： M_u の 0.8 倍を荷重振幅とする弾性载荷解析について、柱軸力： N を T_Y の -0.19 倍 (-150 kN) とし、引張側アンカーボルトの初期導入張力： T_o を T_Y の 0.13, 0.39, 0.65 倍 (100, 300, 500 kN) と変化させるシリーズ (解析シリーズ I), 引張側アンカーボルトの初期導入張力： T_o を降伏軸力： T_Y の 0.26 倍 (200kN) とし、柱軸力： N を、引張側アンカーボルトの降伏軸力： T_Y の 0.0, -0.78, -1.55 倍 (0, -600, -1,200kN) と変化させるシリーズ (解析シリーズ II), 解析シリーズ I・II と同様の試験体とし、軸力： N を -400 kN ($N_o/T_Y = -0.52$), 引張側アンカーボルトの初期導入張力の和： T_o を

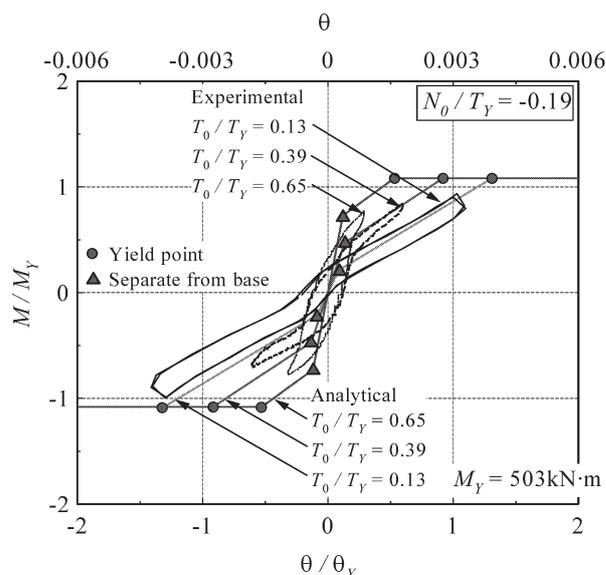


Fig.8 M/M_Y vs. θ/θ_Y relation in Series I

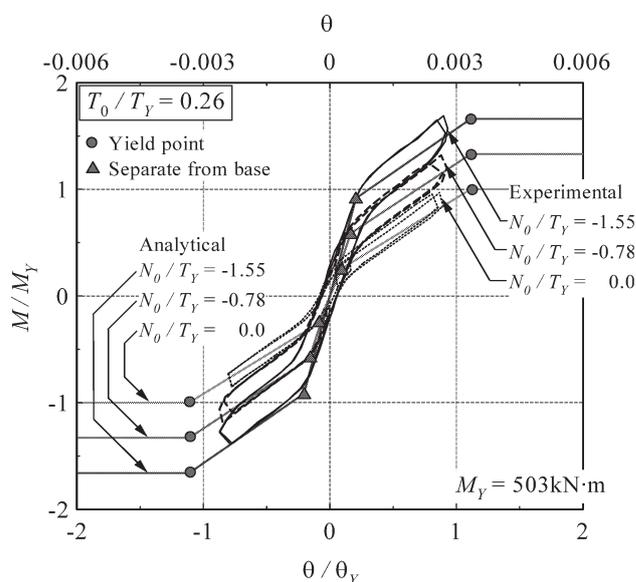


Fig.9 M/M_Y vs. θ/θ_Y relation in Series II

150 kN ($T_o/T_Y = 0.19$) とし、頂部変形角： δ_h/L_p の振幅を 0.00595, 0.00119rad と漸増させ、各振幅で 1 サイクル载荷する正負交番漸増振幅繰り返し载荷解析 (解析シリーズ III) の 3 つを用意した。载荷装置の詳細については、文献 9 を参照されたい。

4. 解析結果とその考察

解析シリーズ I の結果を **Fig.8** に、解析シリーズ II の結果を **Fig.9** に、解析シリーズ III の結果を **Fig.10** に、それぞれ、示す。

Fig.8, Fig.9 には、無軸力下の降伏曲げモーメントで無次元化した柱脚の抵抗曲げモーメント： (M/M_Y) と、基礎とベースプレートの弾性変形を無視した時の降伏回転角で無次元化したベースプレート回転角： (θ/θ_Y) の関係を、実験

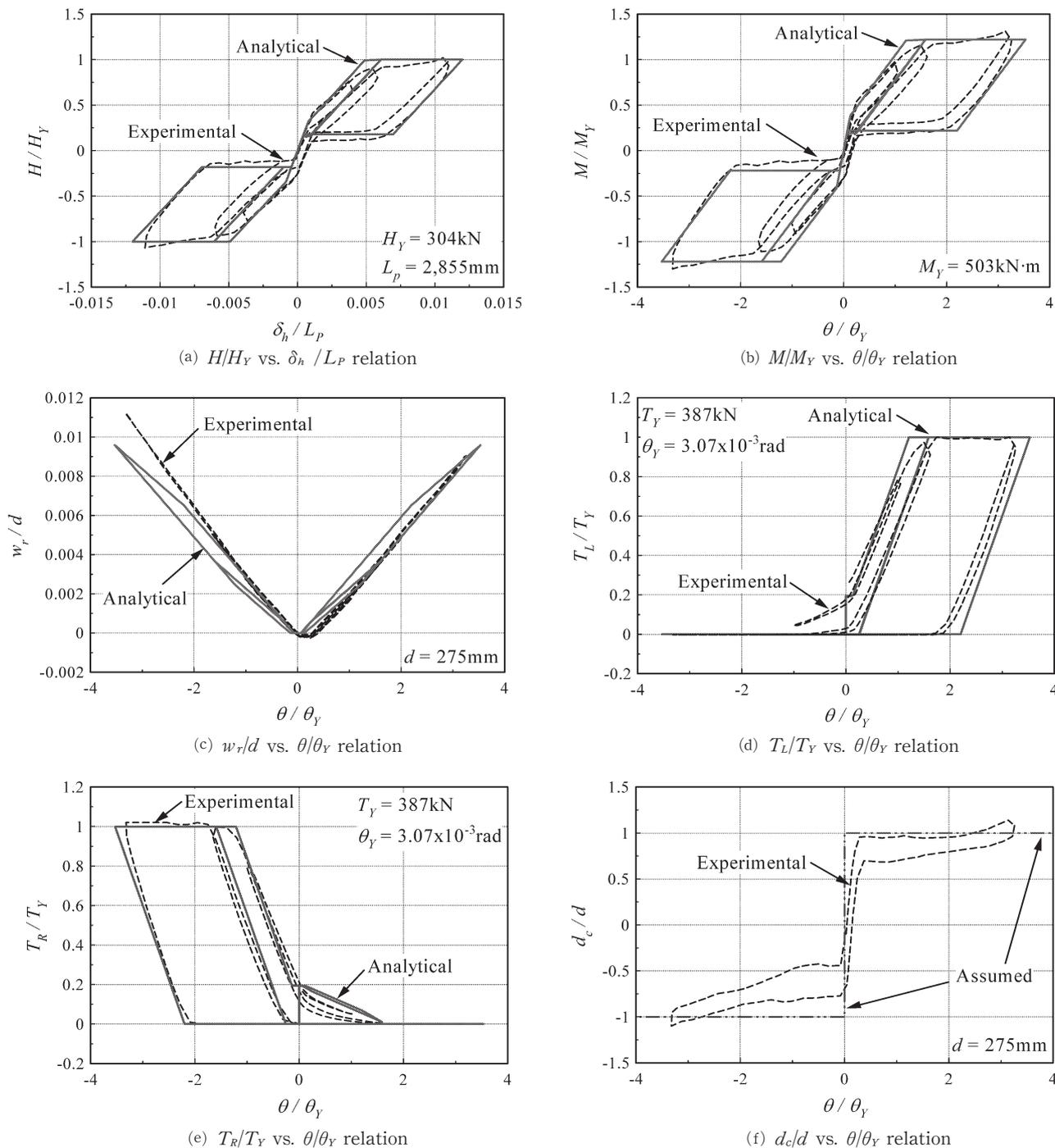


Fig.10 Analytical results of Series III

値とともに示す。

尚、計算値でのベースプレートと基礎とが離間する時点を▲で、アンカーボルトが降伏する時点を●で、それぞれ、示している。

Fig.10 (a)には、降伏水平力で無次元化した水平力： (H/H_Y) と頂部水平変形角： (δ_h/L_P) との関係を、Fig.10 (b)には、無軸力下の降伏曲げモーメントで無次元化した柱脚の抵抗曲げモーメント： (M/M_Y) と基礎とベースプレートの弾性変形を無視した時の降伏回転角で無次元化したベースプレート回転角： (θ/θ_Y) との関係を、Fig.10 (c)には、柱フ

レンジと柱図心との間の距離で無次元化した柱脚の鉛直方向相対変位： (w_r/d) と (θ/θ_Y) との関係を、Fig.10 (d),(e)には、降伏軸力は無次元化した左右アンカーボルトの軸力： $(T_L/T_Y, T_R/T_Y)$ と (θ/θ_Y) との関係を、Fig.10 (f)には、柱フランジと柱図心との間の距離で無次元化した圧縮合力線距離： (d_c/d) と (θ/θ_Y) との関係を、それぞれ、示す。

これらの結果から、以下のことがわかる。

○アンカーボルト初期導入張力の効果の評価

Fig.8 より、アンカーボルトの初期導入張力： T_0 を大きくするにつれ、第1・第2分枝回転剛性は大きくなる。解

析値は、 T_0/T_Y の値が0.13~0.39の範囲内では、実験値と良好に一致し、アンカーボルトの初期導入張力： T_0 が大きくなると、弾性回転剛性が大きくなるという傾向を表現しうることがわかる。

○柱の初期張力の効果の評価

Fig.9より、柱軸力： N_0 を大きくするにつれて、第1・第2分枝回転剛性は変化しないものの、第1分岐曲げモーメント値は大きくなるのがわかる。解析値は、 N_0/T_Y の値が0~-1.55の範囲内では、実験値と良好に一致し、柱軸力： N が大きくなると第1分岐曲げモーメントが大きくなった結果、弾性割線剛性が大きくなるという傾向を表現しうることがわかる。

○弾性回転剛性について

Fig.10(a),(b)から、载荷初期の第1・第2分枝回転剛性と第1分岐曲げモーメント値は、解析値が実験値と良好に一致していることがわかる。第1分岐曲げモーメント値と除荷時の回転スリップ現象が生じる曲げモーメント値の差は、アンカーボルトの初期導入張力に基因している。従って、本解析モデルは、柱軸力やアンカーボルト初期導入張力の弾性回転剛性に及ぼす影響も良好に表せることがわかる。

○履歴特性について

Fig.10(a),(b)から、柱脚の最大耐力、最大抵抗曲げモーメント及び除荷時の回転スリップが生じる耐力及び曲げモーメント値は、解析値は実験値とほぼ等しい。また、解析値は、実験値の示すダブルフラッグ型の復元力特性を忠実に再現していることがわかる。このことから、最大抵抗曲げモーメント値を適切に設定し、この値と(6)式から圧縮合力線距離を評価すれば、本解析モデルは、実験値とほぼ一致するダブルフラッグ型の復元力特性を再現できることがわかる。

○引張・圧縮バネの抵抗性状について

Fig.10(C)より、ベースプレートの回転により、ベースプレートと基礎とが離間し、半剛接状態となり、柱脚の図心が浮き上がる現象が生じる。回転バネのみ用いる通常のモデル化では、この現象を表せないが、本解析モデルはこの現象を再現していることがわかる。

Fig.10(d),(e)より、各アンカーボルトの軸力とベースプレート回転角との関係は、解析値と実験値とが良好に一致していることがわかる。

Fig.1に示すように、回転剛性を補正する回転バネを配し、回転剛性補正係数： R を1.5と適正な値とすれば、引張バネの抵抗性状や柱脚の弾性回転剛性は実験値と整合することがわかる。

○圧縮合力線距離について

本解析モデルは、圧縮合力線距離は、同一の抵抗性状機

構では、その位置は変化しないと仮定している。その妥当性を考察する。Fig.10(f)から、圧縮合力線距離は、ほぼフランジ端及びベースプレート端位置にあり、同一载荷方向では、一定の値となっている。従って、軸力が大きく変動しなければ、本解析モデルの仮定は妥当であることがわかる。

以上のことから、本解析モデルは、第1・第2分枝回転剛性、第1分岐曲げモーメント、降伏曲げモーメント及びスリップ時の曲げモーメントともに、実験値をよく再現でき、妥当なモデルであることがわかる。

5. まとめ

柱軸力やアンカーボルト初期張力の影響を考慮した簡易な平面露出柱脚解析モデルを提案し、4本のアンカーボルトを有する実大露出柱脚を対象とした実験結果と比較して、解析モデルの有用性、妥当性を検討した。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) アンカーボルト初期導入張力の増大に伴って、第1・第2分枝回転剛性が増大する傾向や、柱軸力の増大に伴って、第1分岐曲げモーメント値が増大する傾向等の初期弾性挙動を良好に再現しうる。
- 2) 傘折れや圧縮折れと呼ばれるベースプレートの曲げ変形によって、アンカーボルト軸力挙動は、本モデルと異なるが、回転剛性補正係数で調整することにより、アンカーボルトの抵抗特性は実験値と整合する。
- 3) 最大曲げ耐力は、圧縮合力線距離で、弾性回転剛性は、回転剛性補正係数で調整すれば、繰返し载荷下における柱脚特有の履歴性状、ダブルフラッグ型履歴特性と回転スリップ現象を良好に追跡しうる。

本解析モデルは、2節で示したように、柱軸力が圧縮から引張に変化した時の耐力劣化特性も追跡できる。この実験結果と本解析モデルによる検討については、報を改めて報告する予定である。

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、日本学術振興会科学研究費補助金(代表者：玉井宏章 課題番号18560569)、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いた。また、実験データ整理には、広島工業大学学生 三好行則君、平成17年度卒論生 藤井博規君には多大な協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。

文 献

- 1) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説，pp.127-128，1990.
- 2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp.255-279，2006.3.
- 3) 玉井宏章：変動軸力と繰り返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験－変動軸力下の半剛接特性－，日本建築学会構造系論文集，第567号，pp.149-156，2003.5.
- 4) 加藤勉，佐藤邦昭，鎌形修一，田上淳：鋼構造露出型柱脚の復元力特性が上部架構に与える影響について（その1）（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.867-870，1986.8.
- 5) 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.
- 6) 山田哲，秋山宏，貞許美和：スリップ型の復元力特性を有する柱脚の弾塑性挙動が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第502号，pp.141-147，1997.12.
- 7) 玉井宏章：変動軸力の影響を考慮した露出柱脚付骨組の弾塑性解析法，日本建築学会構造系論文集，第571号，pp.127-135，2003.9.
- 8) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂，pp.20-29，pp.111-131，1985.
- 9) 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，白木剛，多田元英：統合化評価法を用いた実大ノンスリップ型露出柱脚の仮動的実験，鋼構造年次論文報告集，第14巻，pp.269-276，2006.11.

注

注1) 引張側アンカーボルトとは，ベースプレート回転角が0.03 radの時に於いてアンカーボルト軸力が全塑性軸力： T_Y に達するアンカーボルトのことをいう。

付録A 基礎回転バネ剛性の設定について

柱脚に軸力： N と曲げモーメント： M が作用し，アンカーボルトの伸び量のみに基づくベースプレート回転角： θ_r が生じている。引張側アンカーボルトの降伏軸力は T_Y で，柱図心から d_t の位置にあり，初期導入張力は T_0 であり，基礎からの反力は，柱図心から d_c の位置にあるとする。その時の M と θ_r との関係は，Fig.A-1に示すようになる。

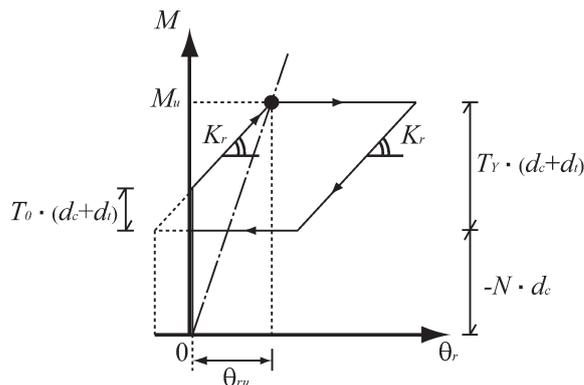


Fig.A-1 M vs. θ_r relation

$M-\theta_r$ 関係で原点とアンカーボルトが降伏して最大抵抗曲げモーメントに達した点を結ぶ割線剛性： M_u/θ_{ru} は，次式で表される。

$$\frac{M_u}{\theta_{ru}} = \frac{d_c + d_t - \frac{N}{T_Y} \cdot d_c}{\left(1 - \frac{T_0}{T_Y}\right) \cdot (d_c + d_t)} \cdot K_r \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

ここに，

$$K_r = \frac{E_L \cdot A_L}{\ell_L} \cdot (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots\dots (A-2)$$

(11.a)式は，(A-1)式を参考に， $M_u-\theta_{ru}$ 関係における割線回転剛性： K_{BS} が次式となるように回転剛性補正係数： R を用いて仮定した。

$$K_{BS} = \frac{E_L \cdot A_L}{R \cdot \ell_L} \cdot (d_c + d_t) \cdot \frac{d_c + d_t - \frac{N}{T_Y} \cdot d_c}{1 - \frac{T_0}{T_Y}} \quad \dots\dots (A-3)$$

(11.a)式は，ベースプレート及び基礎の弾性変形に基因する回転剛性： K_b は，軸力： N が圧縮で大きな値，アンカーボルト初期導入張力： T_0 が引張で大きな値となると，ベースプレートと基礎との接触面が広がり，剛性値が大きくなる傾向を表したものである。 $N=0$ ， $T_0=0$ の時には，(A-3)式は，鋼管構造設計施工指針の式と一致する。

付録B 引張側アンカーボルトの位置： d_t について

本解析法は，1本あるいは多数本のアンカーボルトを有する一般的な露出柱脚を，剛なベースプレートと左右対称に配置されたアンカーボルトにモデル化して，その抵抗性状を表す方法を採用する。露出柱脚の弾塑性性状は，主に $M-N$ 耐力相関関係と弾性回転剛性により特徴づけられるので， $M-N$ 耐力相関関係及び半剛接状態での弾性回転剛性を近似するようにモデルのパラメータを決定する。簡単のため，集約したアンカーボルトのヤング率，断面積，長さ，初期降伏応力は， (E, A, ℓ, σ_y) と表す。

解析モデル及び代表的柱脚部における，全アンカーボルトの降伏軸力，無軸力下におけるアンカーボルト降伏時の曲げモーメント及び弾性回転剛性は，それぞれ，次式で求

められる。

○解析モデル

$$N_Y = 2 \cdot A \cdot \sigma_y, \quad M_Y = A \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t),$$

$$K_\theta = \frac{E \cdot A}{\ell} \cdot (d_c + d_t)^2 \quad \dots\dots\dots (B-1.a \sim c)$$

○代表的柱脚

$$N_Y = \sum_i A_i \cdot \sigma_{yi}, \quad M_Y = \sum_i A_i \cdot \sigma_{yi} \cdot r_i,$$

$$K_\theta = \sum_i \left(\frac{E_i \cdot A_i}{\ell_i} \cdot r_i^2 \right) \quad \dots\dots\dots (B-2.a \sim c)$$

ここに、 d_c ：柱図心から回転中心点(フランジ端)までの距離、 d_t ：柱図心から解析モデルの引張側アンカーボルト軸心までの距離、 $(E_i, A_i, \ell_i, \sigma_{yi})$ ： i 番目のアンカーボルト

のヤング率、断面積、長さ、初期降伏応力、 r_i ：回転中心(フランジ端)から i 番目のアンカーボルト軸心までの距離、 \sum_i ：全アンカーボルトの総和、 \sum_i^T ：引張側アンカーボルトについての総和である。

$E = E_i, \sigma_y = \sigma_{yi}$ とおくと、(B-1.a~c)、(B-2.a~c)式から、解析モデルのパラメータ： A, d_t, ℓ は、次式のように求まる。

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sum_i A_i, \quad d_t = 2 \cdot \frac{\sum_i (A_i \cdot r_i)}{\sum_i A_i} - d_c,$$

$$\ell = \frac{\sum_i A_i \cdot (d_c + d_t)^2}{2 \cdot \sum_i \left(\frac{A_i}{\ell_i} \cdot r_i^2 \right)} \quad \dots\dots\dots (B-3.a \sim c)$$