

# 露出型柱脚における地震エネルギー吸収効率の改善

## Improvement of Earthquake Energy Absorption in Exposed-Type Column Bases

増田 久美子\*  
Kumiko Masuda

高橋 秀明\*  
Hideaki Takahashi

田中 秀宣\*  
Hidenori Tanaka

鉄骨造建物に広く使用されている露出型柱脚は、耐震のための地震エネルギー吸収が大きくない。そのため、露出型柱脚を使用した建物を設計する場合には、1階の必要とする耐力を通常よりも高く設定しなければならない。そこで日立機材は、一般的な露出型柱脚よりもエネルギー吸収効率の良い露出型柱脚を開発し、実大実験および地震応答解析により性能を確認した。本報では、改良した露出型柱脚の耐力および回転剛性評価方法とエネルギー吸収効率について報告する。

Exposed-type column bases, which is widely used in steel frame buildings, do not have adequate absorption energy for earthquake. The structure calculation for a building that uses exposed-type column bases must be established with a higher ultimate resistant force than other types of column bases. Therefore, we developed exposed-type column bases named HIBASE-NEO which improved about energy absorption, and confirmed their high energy absorption by conducting full-scale experiments and dynamic response analyses.

In this report, the energy absorption and the evaluation method for rotational rigidity and strength are discussed.

● Key Word : 露出型柱脚, エネルギー吸収

● R&D Stage : Development

## 1. 緒言

日本の鉄骨造建築物において、最も一般的な柱脚工法が露出型柱脚である。これは、1階基礎の鉄筋コンクリートに埋め込まれたアンカーボルトと鉄骨柱に溶接されたベースプレートを用いて、二つの異なる構造躯体を接合する工法であり、他の柱脚工法よりも建築工期を短くできる(図1)。日立機材は、このような露出型柱脚であるハイベースを市場に供給してきた。

日本の建築物の設計では、震度6強以上の巨大地震が起こった際、建築物を倒壊させずに建築物全体を塑性化させることによって地震のエネルギーを吸収し、人命を優先させる設計が行われる。建築物と基礎をつなぐ柱脚部は、構造設計者が意図しないかたちで破壊すると、建築物の倒壊

につながるため、構造設計の上で重要な部分である。

しかし、兵庫県南部地震(阪神大震災)では、露出型柱脚の被害が多く見られた。それを受けて、1997年には露出型柱脚を使用した場合の設計の考え方が法律に示され、2014年現在でも建築物の確認申請が行われる際の判断基準となっている。

この設計の考え方では、露出型柱脚は地震エネルギーの吸収効率が低いことから、露出型柱脚が取付く階の耐力に余裕を持たせるため、階が必要とする耐力を割増する。ただし、露出型柱脚の地震エネルギーの吸収効率を改善することで、その階が必要とする耐力を小さくすることが可能となり、断面の小さい梁や柱が採用できることから、建築物全体のコスト低減が可能となる。

\* 日立機材株式会社

\* Hitachi Metals Techno, Ltd.

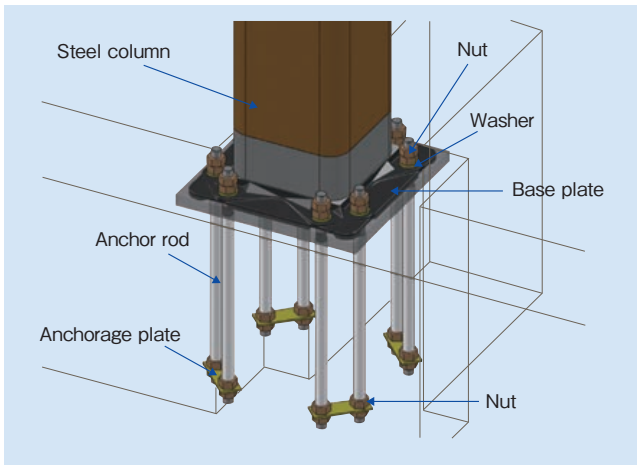


図1 露出型柱脚の構成  
Fig. 1 Exposed-type column base composition

このような背景から、日立機材は従来の露出型柱脚よりも地震のエネルギー吸収の良い露出型柱脚を開発した。新たな露出型柱脚の性能を確認するため、柱脚実物大曲げせん断実験を実施した。また、地震応答解析により、建築物に用いた場合のエネルギー吸収効率を確認した。本報では、それらについて報告する。

## 2. 一般的な露出型柱脚と改良露出型柱脚の挙動

一般に露出型柱脚（以下、柱脚）の特性は、曲げモーメントとそれによる回転変形量（以下、回転角）により表される。一般的な露出型柱脚の挙動を図2に示す。正方向（図中左方向から右方向）に地震力（水平力）が加わると、柱脚部には曲げモーメントが発生し、引張側（I側）のアン

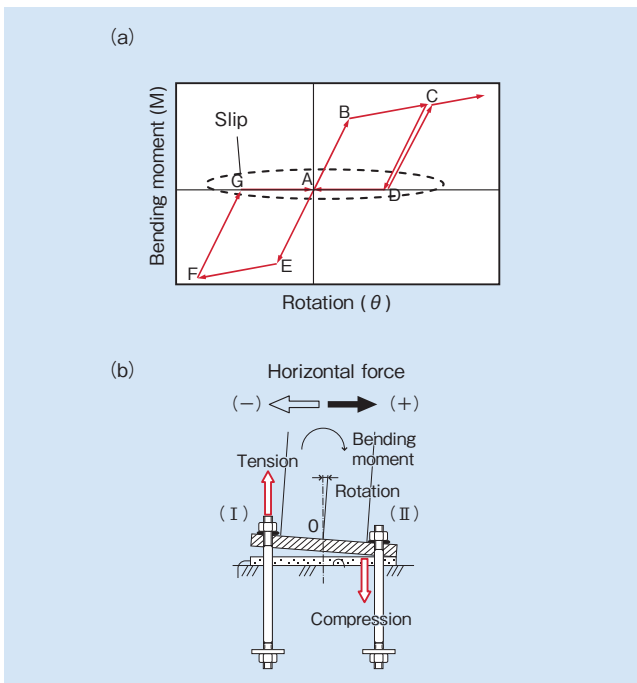


図2 スリップ型履歴特性とメカニズム  
(a)履歴特性 (b)メカニズム  
Fig. 2 Slip-type hysteresis and mechanism  
(a) hysteresis (b) mechanism

カーボルトが伸びて回転変形が生じる。アンカーボルトが降伏点（図2(a)のB点）に達すると柱脚の回転剛性は低下する。アンカーボルト降伏後に水平力を除荷し曲げモーメントがゼロになると（C点→D点）、アンカーボルトには塑性化による残留伸びが残り、ナットとベースプレート間に隙間ができる。この塑性変形のために、曲げモーメントがゼロでも回転変形が残る。その後、水平力が負方向へ作用しII側のアンカーボルトが降伏（E点）した後、再度水平力が反転すると、先の塑性変形により生じたナットとベースプレートの隙間がゼロになるまで（ナットとベースプレートが接するまで）は曲げモーメントが発生しない（G点→D点）。G点からD点の間のように力を負担せずに変形のみがすすむ現象をスリップと呼び、このような曲げモーメントと回転角の関係をスリップ型履歴特性という。スリップ型履歴特性を有する柱脚は、エネルギー吸収効率が低い。

本開発では、柱脚のスリップ型履歴特性を改善するために、従来とベースプレートの設計を変更した。

スリップ型履歴特性を有する柱脚は、ベースプレートを降伏させずにアンカーボルトのみを降伏させる設計をしている。新たに開発した柱脚は、ベースプレートを従来より薄くすることにより、アンカーボルトの降伏よりもベースプレートの降伏を先行させる。同回転角において、ベースプレートを降伏させる場合はアンカーボルトとともにベースプレートも変形するため、ベースプレートを降伏させない場合よりもアンカーボルトの塑性変形が小さくなる。そのため、スリップ型の履歴が改善され（以降、改良スリップ型履歴特性と言う）、地震エネルギーの吸収率が高くなる（図3）。

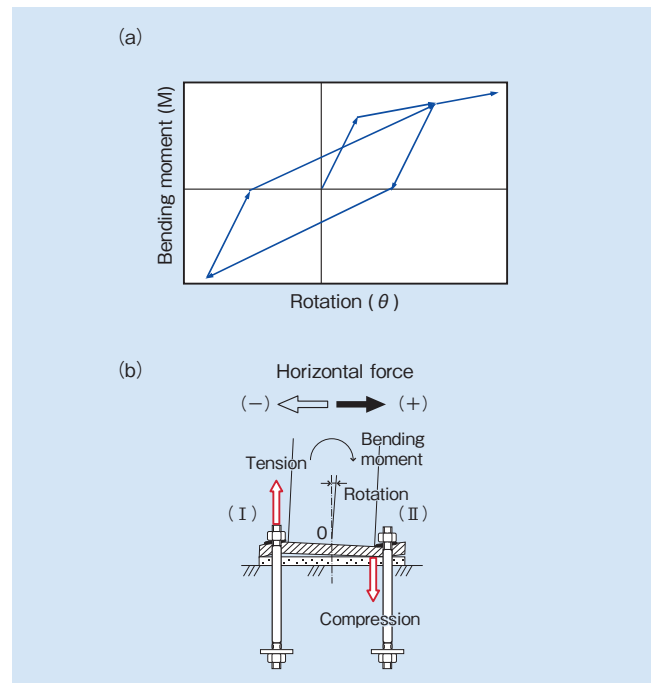


図3 改良スリップ型履歴特性とメカニズム  
(a)履歴特性 (b)メカニズム  
Fig. 3 Improved slip-type hysteresis and mechanism  
(a) hysteresis (b) mechanism

### 3. 柱脚実物大曲げせん断実験

#### 3.1 実験方法

改良スリップ型履歴特性を有する柱脚の構造性能の把握を目的として、柱脚実物大曲げせん断実験を実施した。試験体形状の一例を図4に示す。試験体は柱を鉄骨造、基礎を鉄筋コンクリート造とした、鉄骨造の柱脚を模した形状である。図5に荷重装置を示す。荷重は、油圧ジャッキにより柱上部に柱軸力と水平力を作用させた。柱軸力は一定とし、水平力は、所定の変形まで荷重した後、除荷し、逆方向へ荷重する変位制御の漸増正負交番荷重にて行った。

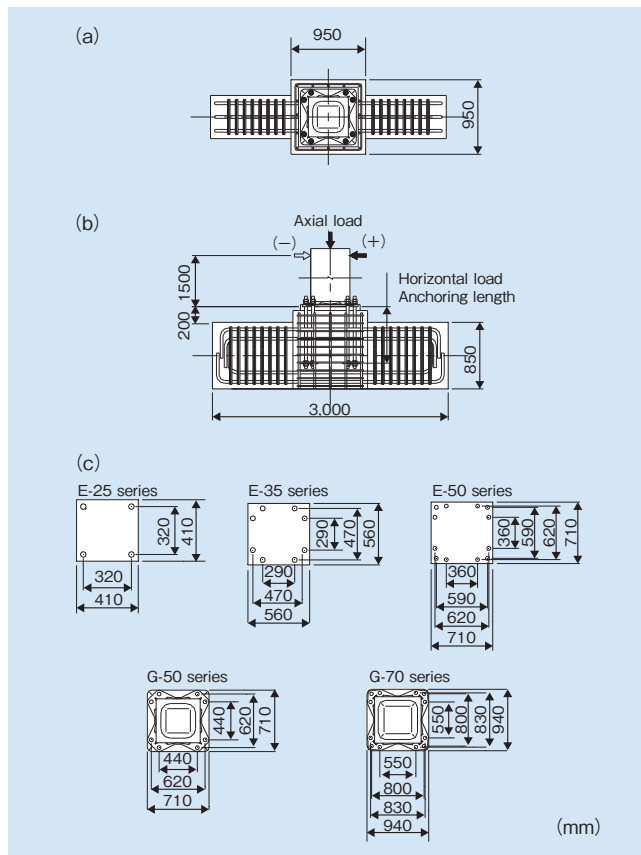


図4 試験体模式図 (a)俯瞰図 (b)断面図 (c)寸法図  
Fig. 4 Example of specimen  
(a) top view (b) sectional view (c) dimensional drawing

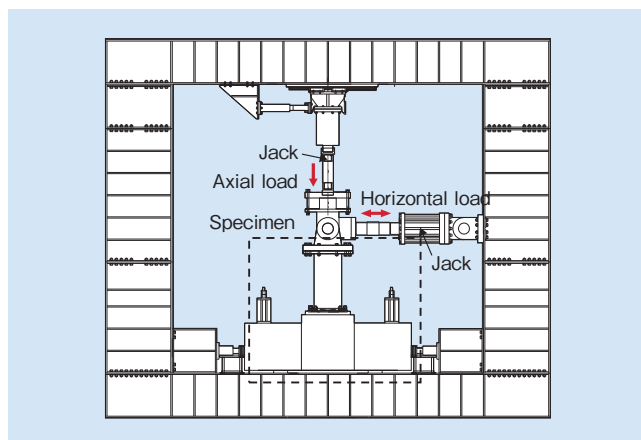


図5 荷重装置  
Fig. 5 Loading apparatus

表1に試験体一覧を示す。パラメータは、ベースプレート種類、アンカーボルト径、アンカーボルト本数、柱サイズ、柱軸力の有無とした。表2にベースプレートとアンカーボルトの材料特性を示す。なお、基礎部は実験中に破壊しないよう設計した。

表1 試験体一覧  
Table 1 List of specimens

試験体名称	柱サイズ (mm)	ベースプレート種類	アンカーボルト (定着長L(mm))	柱軸力* (kN)
G-50-0836-0	□500	鑄鋼 (HCW490b)	8-M36(720)	0
G-50-0836-C			12-M42(840)	880
G-70-1242-0	□700	鋼板 (SN490B)	4-M30(400)	0
E-25-0430-0	□250		8-M36(720)	0
E-35-0836-0	□350	鋼板 (SN490B)	12-M36(720)	0
E-35-0836-C				880
E-50-1236-0	□500	鋼板 (SN490B)	12-M36(720)	0
E-50-1236-C				880

\* 柱軸力は圧縮で荷重

表2 材料特性  
Table 2 Material characteristics

	試験体, アンカーボルト径	材質	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
ベースプレート (鑄鋼)	G-50-0836-0	HCW490b	352	528
	G-50-0836-C			
	G-70-1242-0			
ベースプレート (鋼板)	E-25-0430-0	SN490B	404	542
	E-35-0836-0			
	E-35-0836-C	SN490B	392	528
	E-50-1236-0			
	E-50-1236-C			
アンカーボルト	M30	HAB	567	838
	M36	HAB	566	831
	M42	HAB	552	800

#### 3.2 実験結果および考察

図6に柱脚の曲げモーメントと回転角関係の一例を示す。軸力によらず加力の正負反転時にスリップが発生しておらず、履歴特性が改善されていることが確認できた。図

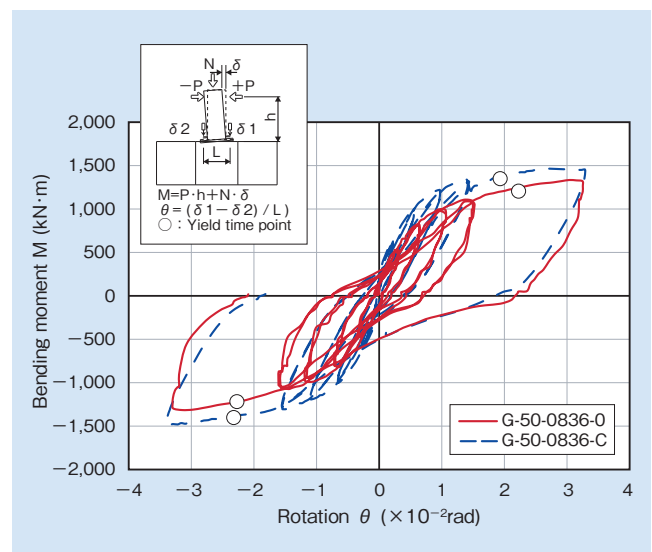


図6 曲げモーメントー回転角の関係  
Fig. 6 Bending moment-rotation relationship

中の○印は実験にてアンカーボルト軸部降伏が測定された時点の曲げモーメントである (eMu)。アンカーボルトは、 $1.9 \sim 2.3 \times 10^{-2}$  rad で降伏しており、それ以降は塑性変形がすすみ変形が増大した。この挙動はいずれの試験体も共通であった。開発品柱脚のアンカーボルト降伏時曲げ耐力計算値 (cMu) は次の (1) 式より求められる<sup>1)</sup>。

$${}_cM_u = n_t \cdot T_u \cdot D_t + \frac{(N + n_t \cdot T_u) \cdot D}{2} \left( 1 - \frac{N + n_t \cdot T_u}{N_u} \right) \quad (1)$$

- N : 柱軸力
- $N_u$  : 柱脚部の終局圧縮軸耐力
- $T_u$  : アンカーボルト軸部降伏耐力
- $d_t$  : ベースプレート中心から引張側アンカーボルト図心までの距離
- D : ベースプレート幅
- $n_t$  : 引張側アンカーボルト本数

(1) 式は、アンカーボルト強度や基礎部のコンクリート強度から圧縮力と引張力の応力中心距離を求めて柱脚部の降伏曲げ耐力を算出している。表3には各試験体のアンカーボルト降伏時曲げ耐力の実験値 (eMu) と計算値 (cMu) の一覧表を示す。eMu の cMu に対する比は 1.02 ~ 1.21 となり、(1) 式によるアンカーボルト降伏時曲げ耐力の計算値は、実験値とよく一致した。このことから、(1) 式は実際の設計に用いることが可能であると判断できる。

ベースプレート降伏までの弾性限の回転剛性 ( $K_{BS}$ ) は、アンカーボルト定着長や圧縮力と引張力の応力中心距離を考慮した (2) 式により求められる。

$$K_{BS} = \left( 1 + \frac{N \cdot X_c}{T (X_c + d_t)} \right) \cdot \frac{0.7 \cdot \alpha \cdot E \cdot n_t \cdot A_b}{L} (d_c + X_c)^2 \quad (2)$$

- T : 引張側アンカーボルトの引張力(ベースプレートの降伏を考慮)
- $X_c$  : 柱芯から圧縮合力の中心までの距離
- $\alpha$  : ベースプレート変形を考慮した係数(表4)
- E : アンカーボルトのヤング係数
- $A_b$  : アンカーボルト軸部断面積
- L : アンカーボルトの定着長

表4に各試験体の回転剛性の実験値 (eK) および計算値 (cK) を示す。cK の eK に対する比は 1.04 ~ 1.35 となり、(2) 式を用いて設計が可能である (図7)。

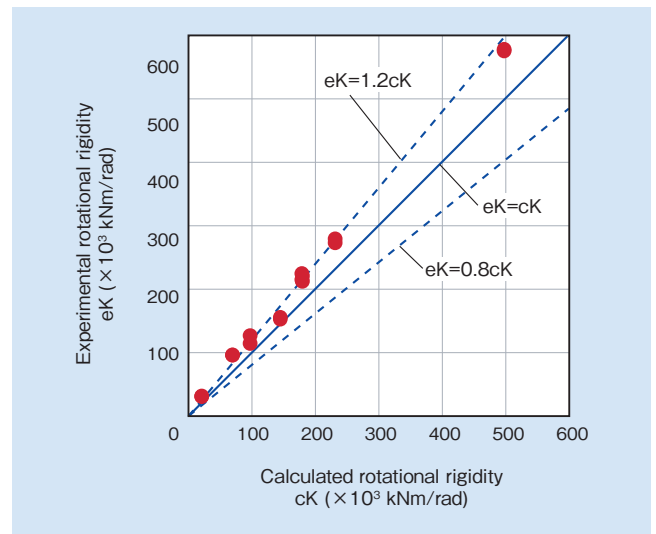


図7 回転剛性の計算値と実験値  
Fig. 7 Calculated and experimental rotational rigidity

表3 アンカーボルト降伏時曲げモーメントの計算値と実験値一覧  
Table 3 List of calculated and experimental bending moment at yield times of anchor bolt

試験体	実験値eMu(kN・m)		計算値cMu(kN・m)		eMu/cMu	
	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷	正載荷	負載荷
G-50-0836-0	1,206	-1,217	1,052	-1,052	1.15	1.16
G-50-0836-C	1,350	-1,401	1,267	-1,267	1.07	1.11
G-70-1242-0	3,002	-3,123	2,816	-2,816	1.07	1.11
E-25-0430-0	273	-	259	-259	1.05	-
E-35-0836-0	912	-980	815	-815	1.12	1.20
E-35-0836-C	1,068	-1,085	899	-899	1.19	1.21
E-50-1236-0	1,648	-	1,622	-1,513	1.02	-
E-50-1236-C	1,891	-1,938	1,791	-1,791	1.06	1.08

表4 回転剛性の計算値と実験値一覧  
Table 4 List of calculated and experimental rotational rigidity

試験体	$\alpha$	軸力N(kN)	実験値eK ( $\times 10^3$ kNm/rad)		計算値cK ( $\times 10^3$ kNm/rad)	eK/cK	
			正載荷	負載荷		正載荷	負載荷
G-50-0836-0	0.78	0	153.6	150.9	145.7	1.05	1.04
G-50-0836-C	0.78	880	223.0	213.4	179.7	1.24	1.19
G-70-1242-0	0.67	0	578.2	575.7	499.3	1.16	1.15
E-25-0430-0	0.43	0	28.3	29.1	21.5	1.31	1.35
E-35-0836-0	0.72	0	94.0	94.0	70.1	1.34	1.34
E-35-0836-C	0.72	880	112.5	124.8	98.1	1.15	1.27
E-50-1236-0	0.62	0	210.9	219.2	180.5	1.17	1.21
E-50-1236-C	0.62	880	278.1	271.7	232.3	1.20	1.17

## 4. 地震応答解析

### 4.1 解析モデル

改良スリップ型履歴特性をもつ柱脚が建築物に使用された際の耐震性能を確認するため、地震応答解析を行った。パラメータおよび解析モデルの一例を表5および図8に示す。パラメータは柱脚の履歴特性、階数および第1階の階高である。

表5 解析パラメータ一覧

Table 5 List of dynamic response analysis parameters

シリーズ	階数	第1階階高 (mm)	上階階高 (mm)	履歴特性
2L	2	4,000	4,000	スリップ型 改良スリップ型 (完全弾塑性型)
2H		6,000		
4L	4	4,000	4,000	
4H		6,000		
6L	6	4,000	4,000	
6H		6,000		

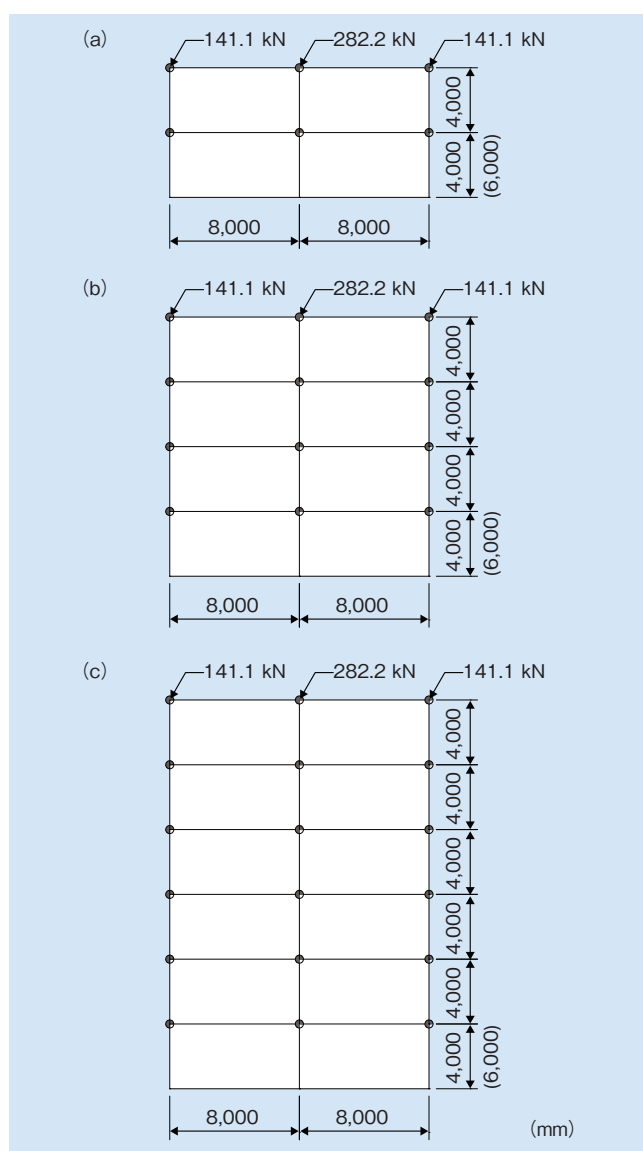


図8 解析モデル一例

(a) 2階モデル (b) 4階モデル (c) 6階モデル

Fig. 8 Example of analysis model

(a) 2-story series (b) 4-story series (c) 6-story series

解析は非線形地震応答プログラム“NRES”<sup>2)</sup>により、入力地震波は、エルセントロ (NS), タフト (EW), 八戸 (EW) の3種(震動時間40秒間)とし、最大速度は600 mm/s, 900 mm/sの2種とした。

### 4.2 解析結果および考察

図9に地震応答解析におけるスリップ型履歴特性柱脚と改良スリップ型履歴特性柱脚の柱脚吸収エネルギーの比較を示す。縦軸および横軸は各履歴特性の柱脚の吸収エネ

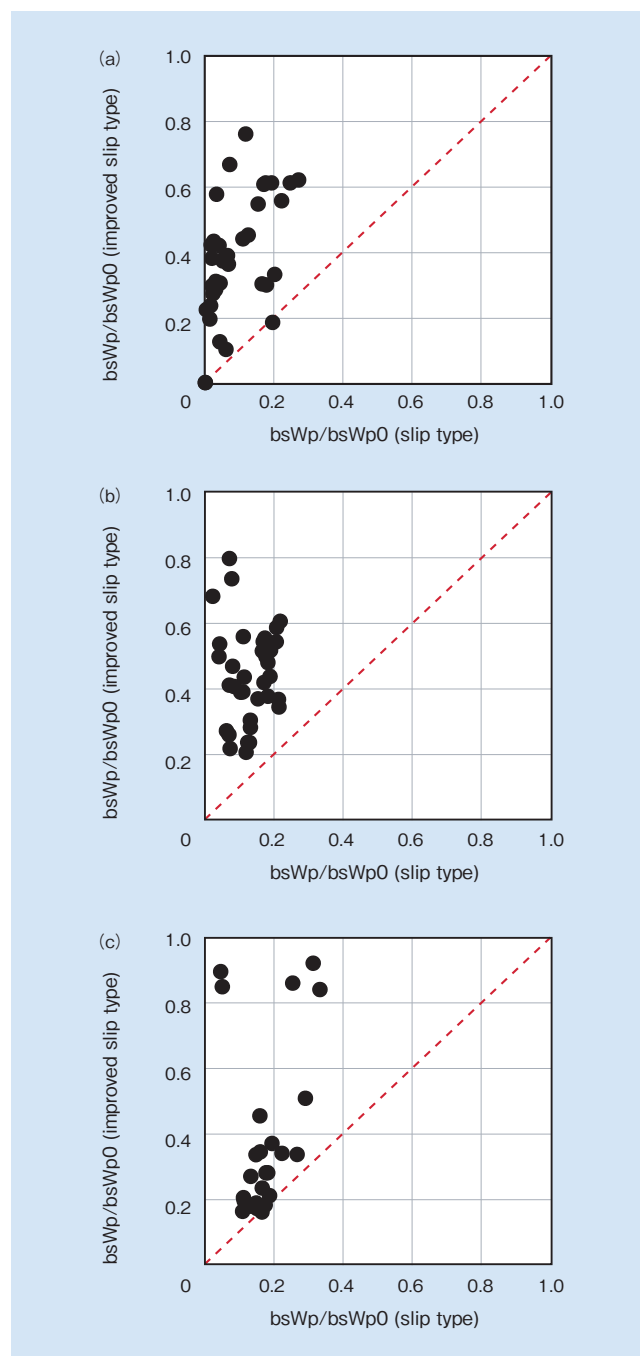


図9 スリップ型履歴特性柱脚と改良スリップ型履歴特性柱脚の第1階柱脚吸収エネルギーの比較

(a) 2階モデル (b) 4階モデル (c) 6階モデル

Fig. 9 Comparison of the first-story column base energy absorption of the improved slip-type column base hysteretic behavior and slip-type column base hysteretic behavior

(a) 2-story series (b) 4-story series (c) 6-story series



ルギー (bsWp) を完全弾塑性履歴特性でモデル化した柱脚の吸収エネルギー (bsWp0) により除し、無次元化している。スリップ型履歴特性柱脚に対する改良スリップ型履歴特性柱脚の柱脚吸収エネルギーの比は2階モデルは0.95～79.0倍(平均9.9倍)、4階モデルは1.61～32.8(平均5.0倍)、6階モデルは0.99～38.9倍(平均5.7倍)であった。パラメータの変動に関わらず、ほぼすべての解析結果において、改良スリップ型履歴特性柱脚の吸収エネルギーはスリップ型履歴特性柱脚の吸収エネルギーよりも大きくなる。この結果から、実際の建築物において、改良スリップ型履歴特性を有する柱脚を用いた場合、スリップ型履歴特性柱脚よりもエネルギー吸収効率が良く、大地震時における終局時の耐震性能を改善するといえる。

## 5. 結 言

露出型柱脚のベースプレートをアンカーボルトより先行降伏させることによって、スリップ型の履歴特性を改善した改良スリップ型履歴特性を有する露出型柱脚を開発し、以下の知見を得た。

- (1) 柱の降伏曲げ耐力や弾性限回転剛性の評価式の妥当性を確認し、従来の露出型柱脚と同様にあつかえる。
- (2) 改良スリップ型履歴特性は従来のスリップ型履歴特性よりも5倍程度エネルギー吸収効率が良く、建築物の耐震性能を改善できる。

## 引用文献

- 1) 田中秀宣ら：変動軸力を受ける露出型柱脚の曲げ挙動と復元力特性，鋼構造論文集，第10巻第39号，pp.39-49，2003.9
- 2) 大崎順彦：建築振動理論，彰国社，1996.11



増田 久美子

*Kumiko Masuda*

日立機材株式会社  
テクニカルセンター



高橋 秀明

*Hideaki Takahashi*

日立機材株式会社  
テクニカルセンター



田中 秀宣

*Hidenori Tanaka*

日立機材株式会社  
テクニカルセンター  
博士 (工学)