

# 露出柱脚付低層鋼構造物の地震時応答性状と柱脚挙動について

## — その1 地震応答解析結果 —

山西 央朗\*

(平成28年11月1日受付)

### A SEISMIC RESPONSE OF FRAME & COLUMN-BASE FOR LOW-RISE STEEL STRUCTURE WITH EXPOSED COLUMN-BASE

— part 1 Results of seismic response analysis —

Teruaki YAMANISHI

(Received Nov. 1, 2016)

#### Abstract

Resistance characteristics of exposed column-base varied column axial force, and it many used in low-rise and middle-rise steel structures. Moreover, it is difficult to estimate of exposed column-base behaviour subjected to working stress of generally structure on ground motion.

The author discussed exposed column-base behaviour and structure response on ground motion, that uses seismic response analysis results obtain from low-rise steel structure with model that can reproduce the column-base behaviour.

In this paper, shown seismic response of structure with exposed column-base.

**Key Words:** *exposed column-base, collapse mechanism, joint factor, column-base working stress, column-base rotational rigidity, frame response, shear-key*

## 1. 序論

### 1.1 研究背景と目的

これまでの露出柱脚に関する研究の内容は、以下2つに大別できる。

- ・部材実験等の結果から、接合部挙動の理解を深める研究<sup>1~8)</sup>
- ・露出柱脚をスリップ型履歴形状を持つ弾塑回転バネ(以後、回転バネと記す)で再現した構造物の時刻歴応答解析結果から、露出柱脚と架構との相互関係を紐解こうとする研究<sup>1, 9~10)</sup>

前者は、露出柱脚の塑性変形能力を向上させることを目的に、アンカーボルト抜出しを防止するための埋め込み深

さ<sup>1)</sup>、アンカーボルト自身の伸び能力に関する知見<sup>2)</sup>、ベースプレートと基礎コンクリートとの支圧状態を詳細に表現するための評価法<sup>3~8)</sup>などの導出に注力しており、今日定められている露出柱脚細部の構造規定を築く礎となっている。後者は、構造規模や露出柱脚部の履歴形状を変数とした結果を比較して、露出柱脚の履歴形状が構造物応答に与える影響は少なく、更に、柱脚の特性を表現する上で最大耐力を表現することが重要である等、全体応答を議論する時の柱脚の取り扱いやその影響に関する知見が得られている<sup>1, 9, 10)</sup>。また、回転バネの曲げ耐力・回転剛性を変数とした応答解析結果から、接合部係数(柱と柱脚の耐力比)毎に確保すべきベースプレート回転角の値も示している<sup>11)</sup>。

しかしながら、これら研究では、局所抵抗特性または全

\* 広島工業大学工学部建築工学科

体応答を効率よく議論するため、実際の挙動・境界条件を一部簡略化して実施している。具体的には、部材実験では柱曲げモーメント反曲点高さを固定、柱軸力履歴を単純化し、更に、時刻歴応答解析では回転バネを用いることで柱軸力による付加曲げ抵抗等が精確には再現されない。このため、実構造物地震時における露出柱脚の存在応力や柱脚周辺の抵抗特性が十分には明らかにされていない。

結果、これら知見のみでは露出柱脚ディテールを一定の条件下に収める等の慣例に基づいた設計を実施せざるを得ず、実務設計において露出柱脚の設計合理性を追求することは困難である。

一方、いくつかの研究では、露出柱脚挙動を再現するモデルを用いた時刻歴応答解析<sup>12~15)</sup>が実施されているが、全体応答の議論や、全体応答を得るための回転バネの取り扱いに着目しているのみである。また、オンライン実験<sup>16,17)</sup>、部分架構実験<sup>18)</sup>や大型実験<sup>19)</sup>による研究も実施されており、構造規模や露出柱脚接合部係数を変数とすることで露出柱脚の実務設計に必要な諸量の一端は示しているが、各数値や知見が得られた論理的背景に対する追求は乏しい。

このような背景の下、本研究では、露出柱脚の詳細挙動を追跡できるモデルを設置した4層の低層構造物<sup>20)</sup>を対象とし、露出柱脚の接合部係数を変数とした時刻歴地震応答解析を実施する。本論“その1”では、得られた結果を用いて露出柱脚の局所応答、露出柱脚と架構との相互関係を議論する。

## 1.2 本論文の構成

2章では、まず、中柱および側柱の柱軸力を再現するため定型化した作用応力に対する露出柱脚の履歴形状を吟味する。露出柱脚で想定される状態変化を簡潔に延べることで、後の議論を理解するための助けとする。

3章では、露出柱脚の挙動を再現するモデルの構成および設定法を示す。また、再現精度を吟味するため、既報の5層鋼構造物のオンライン実験、圧縮・引張の一定柱軸力を入力した部材実験を、本論で取り扱う露出柱脚のモデルで再現し、各々の整合性を確認する。

4章では、本論文で対象とする4層鋼構造物の諸元、露出柱脚の詳細とその特性、入力加速度等の各種解析変数と表記方法を示す。

5章では、時刻歴応答解析結果の一部を用いて、露出柱脚付鋼構造物の露出柱脚部挙動、第一層の応答、柱脚を変数としたときの全体応答の変化等を議論する。

6章では、本論文で得られた知見を示す。

## 2. 露出柱脚の基本的な挙動と履歴形状

露出柱脚は、柱下端部に溶接接合したベースプレートを、

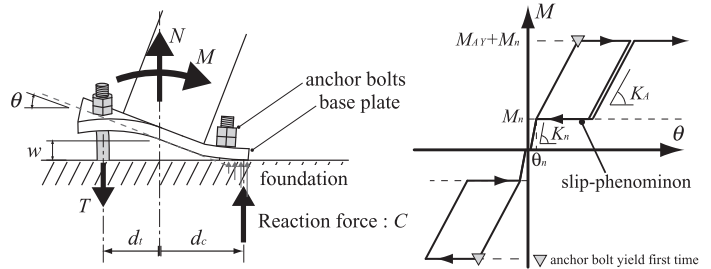


図1 露出柱脚の抵抗機構

図2 スリップ型復元力特性

表1 露出柱脚の支圧状態（正方向）

No.	Contact condition on base plate top surface	Contact condition on base plate bottom surface
①	0 : separate	contact to foundation
②	1 : row-a (elastic)	contact to foundation
③	1 : row-b (elastic)	contact to foundation
④	1 : row-a (plastic)	contact to foundation
⑤	2 : row-a, b (elastic)	contact to foundation
⑥	2 : row-a (plastic), row-b (elastic)	contact to foundation
⑦	2 : row-a, b (plastic)	contact to foundation
⑧	3 : row-a-c (elastic)	separate
⑨	2 : row-b, c (elastic)	separate

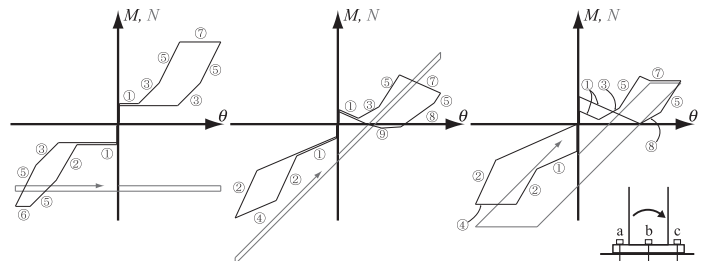


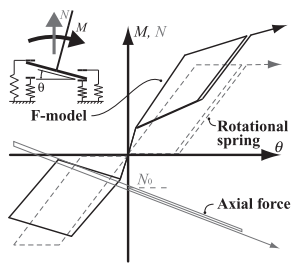
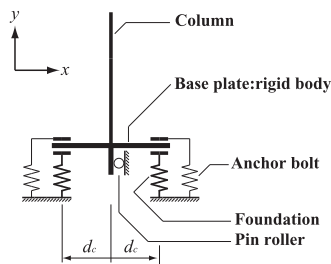
図3 露出柱脚の代表的な履歴形状

緊結材にアンカーボルトを用いたエンドプレート形式として基礎上面に設置したものである。基礎部材より上の構造物自重が作用するため、曲げモーメントが作用すると軸力による付加曲げ抵抗、アンカーボルトの弾性伸びによるベースプレートの回転離間が生じ、その抵抗機構と復元力特性履歴形状は図1、2となる。また、側柱で生じる変動軸力に対して付加曲げ抵抗は比例的に増減し、更に、引張軸力領域に達するとベースプレートと基礎との支圧状態に影響を与える。

なお、アンカーボルトに導入される初期軸力は降伏軸力の10~20%程度であり、復元力特性上における影響は小さいと判断し、ここでは議論しない。

本節では、4章以後に取り扱う一般的な露出柱脚挙動の理解を助けるため、下記仮定を設けて代表的な支圧状態と履歴形状を説明する。

- ・ 定常振幅繰返し時の曲げ変形を与える。
- ・ アンカーボルト列数は3列とし、うち1列は柱図心位置を通る。
- ・ アンカーボルトには曲げ載荷による塑性伸びが生じている。
- ・ 柱軸力は、中柱を想定した一定圧縮軸力<sup>1, 10, 12, 21)</sup>、側柱を想定してベースプレート回転角に対して線形で柱軸



Floor	Column	Layer	Beam
5	□ - 450 x 450 x 19	R	H - 400 x 300 x 11 x 18
4	□ - 500 x 500 x 19	5	H - 488 x 300 x 11 x 18
3	□ - 500 x 500 x 19	4	H - 488 x 300 x 11 x 18
2	□ - 550 x 550 x 22	3	H - 588 x 300 x 12 x 20
1	□ - 550 x 550 x 22	2	H - 588 x 300 x 12 x 20

column : BCR295 ( $\sigma_y = 295 \text{ N/mm}^2$ )  
 beam : SN400 ( $\sigma_y = 235 \text{ N/mm}^2$ )  
 $E = 205,000 \text{ (N/mm}^2)$   
 Effect from concrete slab to beam :  $1.4 \cdot E$

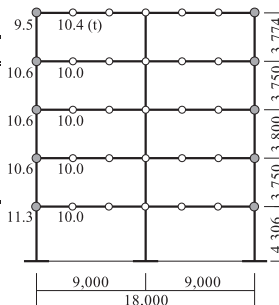


図4 露出柱脚のモデル化

図5 F-model と回転バネの差異

図6 オンライン実験対象架構概要

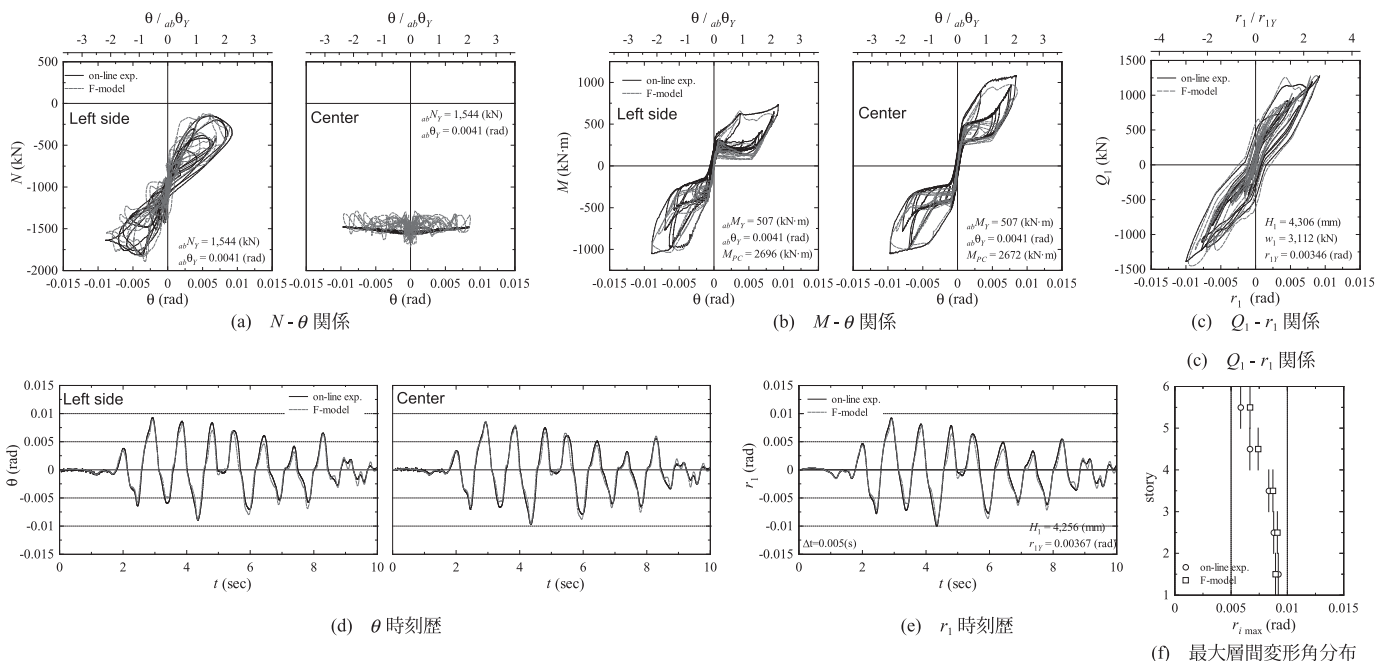


図7 オンライン実験結果

力が増減する変動軸力<sup>22~25)</sup>，同じく側柱を想定して更に梁の塑性化を加味した完全弾塑性型の軌跡（後述の5章参照）を採用し，計3種の柱軸力を与える。

表1に記号と支圧状態を，図3にM-θ関係上の履歴形状をそれぞれ示す。尚，図3右下のアンカーボルト名称は表1のボルト名称に対応する。また，図3中には軸力の軌跡を赤線で併記する。

図1(a)では，付加曲げ抵抗は一定値となり，正負での履歴形状の差異は小さく，更に，最大耐力は同一である。

図1(b)では，ベースプレート回転角の増減に対して線形的に柱軸力が増減するため，曲げ耐力が正方向回転では低下，負方向回転では増大する。また，正方向回転では引張軸力領域に達するため，除荷時にはベースプレートと基礎とが離間する。

図1(c)では，(b)と類似した履歴形状を示す。但し，軸力が完全弾塑性型の軌跡を描くので，同一回転角であっても載荷時と除荷時とで軸力の大きさが異なり，正方向では載荷時より除荷時の付加曲げ曲げ抵抗力が高く，負方向ではこの逆となる。

### 3. 露出柱脚挙動再現モデル

本章では，過去の研究知見に基づき構築した露出柱脚挙動を再現するモデルの説明と，既報の研究結果を用いて整合性の検証を行う。

#### 3.1 モデルの構成

露出柱脚の挙動を再現するため，ビーム要素，バネ要素を用いて図4に示すモデルを構築する。柱下端部に剛と見なせるビーム要素を設けてこれをベースプレートに見立て，その先端に基礎との接触離間，アンカーボルトとの接触離間を再現したバネを設置する。また，柱直下に水平変位を拘束するためのピンローラー支持を設ける。以後，本モデルをF-modelと記す。

F-modelであれば柱軸力による付加曲げ抵抗が現われ，例えば，柱軸力が圧縮一定の時に図2のフラッグシップ型を示す。更に，図5に示す変動する柱軸力（赤線）に対して，露出柱脚と同様に逐次柱軸力による付加曲げ抵抗が変化する。同図中には，回転バネの履歴（青色破線）も示しているが，回転バネは軸力に対して独立しているので，露出柱脚の挙動を再現しない。

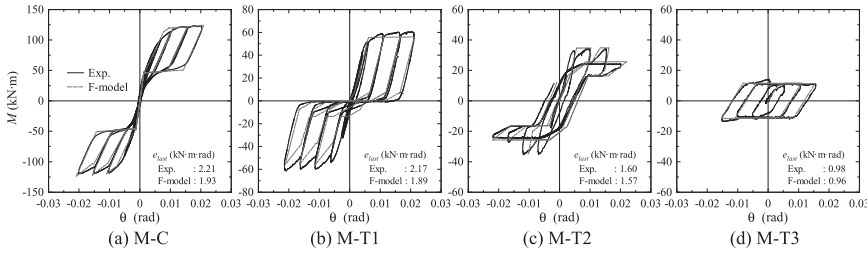


図9 部材実験の柱脚曲げモーメント  $M$ - ベースプレート回転角  $\theta$  関係

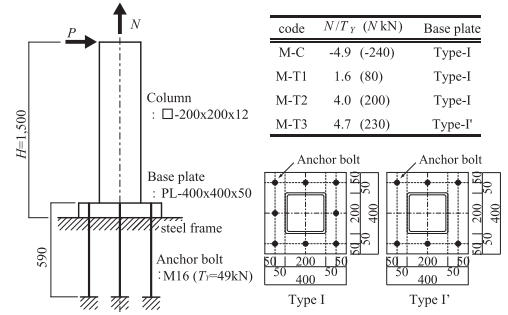


図8 部材実験試験体概要

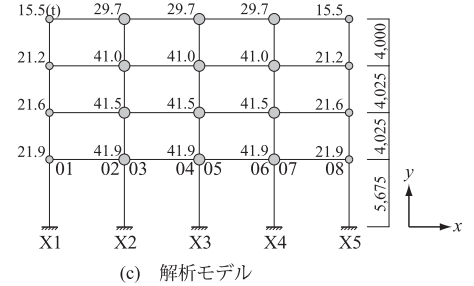
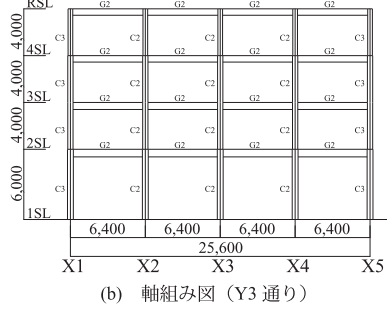
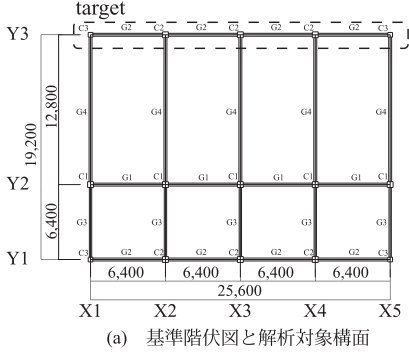


表2 解析対象部材リスト

(a) 柱材 (BCP-325)

position-layer	section shaped (mm)	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )
C2 - 4	□ - 400 x 16	205,000	357.5
C2 - 3	□ - 450 x 19	205,000	357.5
C2 - 2	□ - 450 x 19	205,000	357.5
C2 - 1	□ - 500 x 19	205,000	357.5
C3 - 4	□ - 350 x 16	205,000	357.5
C3 - 3	□ - 350 x 16	205,000	357.5
C3 - 2	□ - 400 x 19	205,000	357.5
C3 - 1	□ - 400 x 19	205,000	357.5

(b) 梁材 (SN490B)

position-floor	section shaped (mm)	$E^*$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )
G2 - R	H - 550 x 200 x 9 x 16	307,500	357.5
G2 - 4	H - 550 x 250 x 9 x 19	307,500	357.5
G2 - 3	H - 600 x 250 x 12 x 22	307,500	357.5
G2 - 2	H - 650 x 250 x 12 x 22	307,500	357.5

\*beam : Effect from concrete slab = 1.5 x E

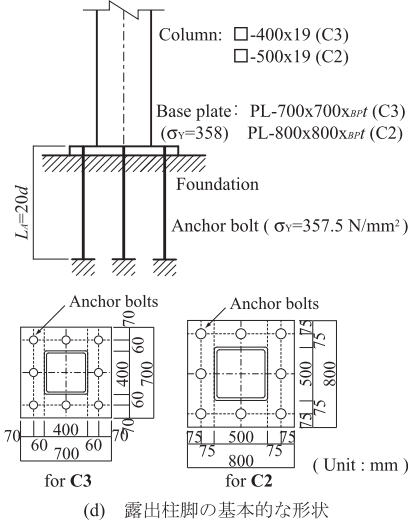


図10 解析対象構造物

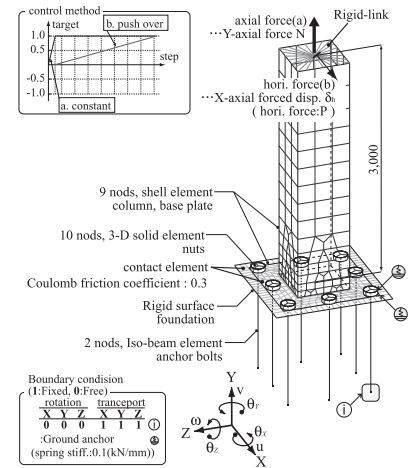


図11 FEM 解析モデル

尚, F-model の各種バネ特性の算定手法については付録 A に示す。

### 3.2 露出柱脚挙動の再現性検証

#### 3.2.1 軸力変動が生じる露出柱脚 (オンライン実験)

図6に既報のオンライン実験<sup>18)</sup>に採用した構造物概要を示す。5層鋼構造物に El Centro NS 波 (最大速度が 50 kine となるように基準化) を入力し, 側柱の挙動を実験で再現したものである。

図6に示す架構, 並びに露出柱脚の弾塑性挙動を再現するようにモデルを構築し, これに地震動を入力して得られた結果の整合性を見る。架構および露出柱脚の詳細は, 文献 18) 参照。

整合性確認のため, 図7に側柱左柱脚の柱軸力  $N$ - ベースプレート回転角  $\theta$  関係, 左側柱及び中柱の柱脚曲げモー

メント  $M$ - $\theta$  関係, 第1層層せん断力  $Q_1$ - 層間変形角  $r_1$  関係, 最大層間変形角  $r_{1max}$  分布, 左側柱及び中柱の  $\theta$  時刻歴,  $r_1$  時刻歴を示す。

図7 (a), (b) より, 左側柱柱脚の柱軸力は圧縮軸力領域で回転角に対して正の相関性を示し柱脚  $M$ - $\theta$  関係の履歴形状は正, 負の荷重方向で異なる。中柱の柱軸力はほぼ一定となり, 柱脚  $M$ - $\theta$  関係は正負の差異が無い履歴形状が得られている。これら, 露出柱脚周りの挙動, (c)~(f) の第一層履歴形状や全体の最大応答, そして, 柱脚および第一層の変形時刻歴は, F-model により精度良く再現できている。

#### 3.2.2 引張軸力を受ける露出柱脚 (部材実験)

図8に既報の部材実験試験体<sup>25)</sup>を示す。露出柱脚付片持ち柱に一定圧縮・引張の柱軸力と曲げモーメントを与えたものである。



表3 露出柱脚の接合部係数, モデル諸量, 最大耐力と各種回転剛性

$\alpha$	column	Anchro bolt ( $A_t$ mm <sup>2</sup> )	$b_p t$ mm	$d_c$ mm	$\bar{A}_F$ mm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{r-\alpha}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{r-\beta}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{L}_{r-\alpha}$ mm	$\bar{L}_{r-\beta}$ mm	$M_U$ kNm	$K_A$ kNm/rad	$K_S$ kNm/rad	$K_n$ kNm/rad
0.7	C2	M45 (1370)	55	288	559	384	358	1,935	1,694	1,558	160,016	220,213	1,899,150
	C3	M42 (1180)	45	219	466	391	358	1,313	1,451	944	114,567	139,149	914,819
0.8	C2	M48 (1550)	60	293	428	382	358	1,827	1,660	1,770	193,548	254,215	1,500,035
	C3	M45 (1370)	50	223	346	389	358	1,455	1,471	1,081	121,515	142,745	702,182
0.9	C2	M48 (1550)	65	302	687	379	358	2,480	2,035	1,915	199,200	267,061	2,575,712
	C3	M48 (1550)	55	227	353	386	358	1,559	1,576	1,214	132,842	153,392	743,182
1	C2	M52 (1820)	65	299	579	379	358	1,976	1,997	2,145	221,433	283,519	2,110,061
	C3	M48 (1550)	60	235	348	379	358	1,576	1,642	1,327	142,414	164,760	791,895
1.1	C2	M56 (2140)	70	296	718	380	358	1,915	2,157	2,373	264,653	328,128	2,576,020
	C3	M52 (1820)	55	220	369	394	358	1,647	1,633	1,469	138,235	155,996	731,344
1.2	C2	M60 (2480)	75	298	890	381	358	1,950	2,384	2,604	304,970	368,815	3,221,503
	C3	M56 (2140)	60	220	386	396	358	1,605	1,709	1,610	164,496	181,822	766,009
1.4	C2	M64 (2850)	80	298	763	381	358	1,948	2,420	3,022	348,401	409,503	2,781,852
	C3	M60 (2480)	65	219	500	399	358	1,590	1,816	1,873	192,774	210,700	984,861

$n_a = 3, n_b = 2, E = 205,000 \text{ N/mm}^2$

表4 加速度リスト

(a) 主要解析				
code	earthquake	direction	max. acc. gal	note
E-L2	El Centro	NS	510	for 50 kine
H-L2	Hachinohe	EW	239	for 50 kine
T-L2	Taft	EW	492	for 50 kine
B-L2	BCJ-L2	-	356	-
G	Gravity	UD	981	constant
(b) 終局状態を議論する解析				
code	earthquake	direction	max. acc. gal	note
E-L3	El centro	NS	765	for 75 kine
H-L3	Hachinohe	EW	359	for 75 kine
G	Gravity	UD	981	constant
(c) 鉛直加速度を議論する解析				
code	earthquake	direction	max. acc. gal	note
JMA - UD	Kobe-JMA	NS	821	original
		UD	1297	original
Takatori - UD	Kobe-takatori	NS	601	original
		UD	1201	original

図8の試験体形状・境界条件を満足するようにモデルを構築し、同じく、柱上部に鉛直力、水平変位を入力し、得られた結果の整合性を見る。

整合性確認のため、図9に柱脚曲げモーメント  $M$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係を示す。また、各図中の右下には、実験終了時の履歴吸収エネルギー量を併記している。

図8より、引張軸力領域では軸力の大きさにより  $M$ - $\theta$  関係の履歴形状は変化する。(b)ではフラッグシップ型を示しているが(d)では完全弾塑性型を示し、これは、アンカーボルトが柱軸力を負担することに起因<sup>25)</sup>する。F-modelは、引張軸力領域で現われる特異な履歴形状も再現でき、更に、最終時のエネルギー吸収量もほぼ整合が取れている。

以上より、各種バネ特性を適切に設定すれば、図4に示すモデルで露出柱脚の構造特性を再現できることが示された。4章以降の考察では、F-modelによる解析結果が実際の挙動であるとして議論する。

#### 4. 時刻歴地震応答解析概要

解析には「任意平面骨組みの複合非線形解析プログラム CLAP.f」を用い、時間刻み 0.005 秒、減衰定数はレーリー型で  $h=0.02$  とする。

解析の対象は、文献20)に示されている例題建物(低層)のY3通りの構面とする。但し、柱脚は固定端として取り扱われており、露出柱脚のディテールは定められていない。ここでは、試設計の後にFEM解析を実施して柱脚性能を定め、その結果を用いてF-modelを構築する。

尚、柱脚降伏型となる場合は、一般的には第一層上梁の断面を大きくして第一層保有水平耐力の低減を回避する

が、ここでは、柱脚以外の部材は文献20)と同一の部材を使用する。

#### 4.1 解析対象の基本情報

図10、表2に解析対象とする構造物の概要を示す。

対象架構は4層ラーメン架構であり、梁中立軸を構造階高とするフレームモデルへ置換し、表2に示す部材の断面諸量を入力する。尚、各部材は断面諸量を加味した  $M$ - $N$  耐力相関関係、2次勾配を1/100とする移動効果則が再現されている。また、床スラブの合成効果を再現するために梁のヤング係数を1.5倍とし、各質量は柱梁接合部に集約して配置する。

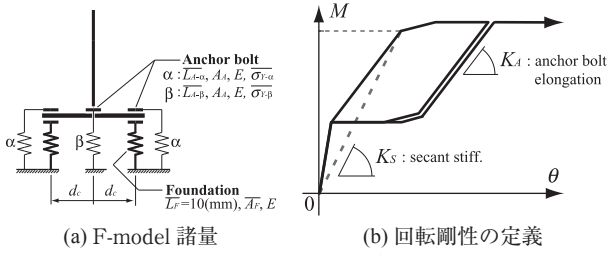
#### 4.2 露出柱脚の設定

図10(d)に示す形状を露出柱脚の基本とし、アンカーボルト断面を変数としたFEM解析モデル(図11参照)を構築する。FEM解析から得られた最大耐力を指標に、各柱脚の接合部係数  $\alpha$  を定める<sup>21)</sup>。

$$M_u = \alpha \cdot M_{pc} \quad (1)$$

ここに、 $M_u$ : 柱脚の最大曲げ耐力、 $M_{pc}$ :  $M$ - $N$  耐力相関関係を考慮した柱の全塑性モーメント、 $\alpha$ : 柱脚の接合部係数である。

FEM解析は、柱材を弾性部材、柱軸力を一定(C2では-1,541kN、C3では-802kNとして、長期の柱軸力を与える)として実施し、露出柱脚の接合部係数  $\alpha$  を0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.4とするためのディテールを決定する。更に、付録Aに示した手法により、図12(a)のモデルに置換するための諸量を得る。表3に各柱脚の性能、ディテールを、図12(b)に表3中の割線弾性回転剛性  $K_S$  の定義を、



(a) F-model 諸量 (b) 回転剛性の定義  
 図12 露出柱脚の定義

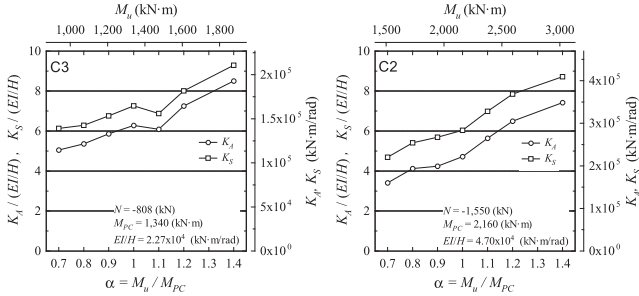


図13 柱脚回転剛性 - 接合部係数関係

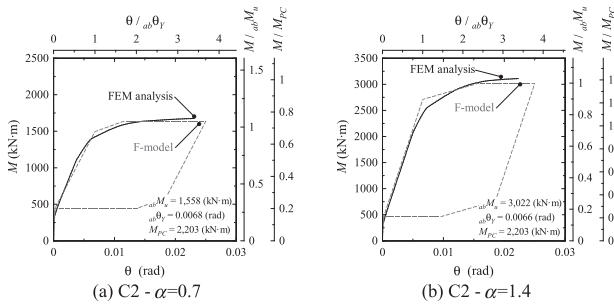
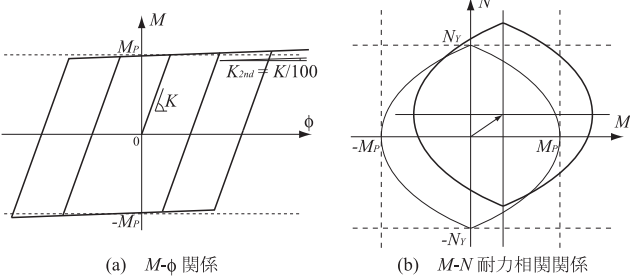


図14 FEM 解析結果と F-model の比較



(a) M-φ 関係 (b) M-N 耐力相関関係  
 図15 柱・梁部材に用いる移動硬化則モデル

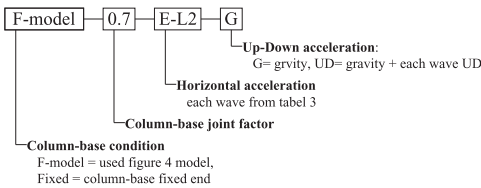


図16 解析変数の表記方法例

図13に各接合部係数 - 柱脚回転剛性の分布を、それぞれ示す。また、図14に FEM 解析と F-model の  $M-\theta$  関係の一例を示すが、ほぼ整合が取れていることが分かる。

尚、柱軸力の変動により接触反力の最大値が変化し、結果、柱軸力と共に圧縮合力点位置が増減する。図12(a)に示すモデルでは、これを再現し得ないが、露出柱脚の最大耐力の推移は概ね追跡できることを確認している。

柱および梁には図15に示す移動硬化則と  $M-N$  相関関係を与える。

### 4.3 解析変数

架構は、柱脚を4.2節に記した露出柱脚(F-model,  $\alpha = 0.7 \sim 1.4$ )、または固定端(Fixed)とした8体を用意し、表4(a)に示す水平加速度(記録波については、最大速度が50kineとなるように加速度を基準化したもの)を入力する。当該、計32ケースを主な解析変数とする。更に、 $A_i$ 分布による静的荷重増分解析も実施する。尚、各解析には鉛直方向加速度として、表4(a)最下段に記した重力加速度(G)を同時に入力し、露出柱脚にて柱軸力による付加曲げ抵抗力を発現させる。

また、表4(a)の波では、終局状態に到達していないケースもある。終局状態を議論するため、表4(b)に示す El Centor NS, Hachinohe EW を最大速度が75kineとなるように基準化した波も入力する。ここでも、鉛直方向には重力加速度(G)を入力する。

最後に、建築構造物の地震時応答を議論する場合、鉛直方向の加速度による影響は小さいとして水平加速度のみを入力するのが一般的である。一方、序論にも述べたように露出柱脚の弾塑性挙動は柱軸力に大きく依存するため、鉛直加速度による柱軸力の変動が全体・局所応答に与える影響を吟味すべきである。そこで、表4(c)に示す水平・鉛直地震動の組合せを F-model で露出柱脚を再現した架構に入力した解析も実施する。当該結果については、次報(その2)で議論する。

図16に、上述の解析変数の表記方法例を記す。

### 5. 露出柱脚付鋼構造物の基本挙動

本章では、露出柱脚を有する構造物の基本的な挙動を検討する。まず、図17に F-model の静的荷重増分解析時の層せん断力  $Q_i$ -層間変形角  $r_i$  関係を示す。次いで、F-model, Fixed に表4(a), (b)に示す波を入力した時刻歴地震応答解析結果について議論する。

解析結果として、図18に F-model の各接合部係数毎のベースプレート最大回転角  $\theta_{max}$  を、図19に露出柱脚の正方向および負方向塑性率  $\eta^+$ ,  $\eta^-$  を、図20~23に第一層柱下端部、第一層上梁端部の最大塑性率および累積塑性変形倍率を、図24~30に代表的な変数の柱脚部曲げモーメント  $M$ -柱軸力  $N$  耐力相関関係、 $M$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係、柱軸力  $N$ - $\theta$  関係、 $M$ -柱下端変形角  $Q_c$  関係、第一層上梁端曲げモーメント  $m$ -梁端変形角  $Q_b$  関係、第一層の層せん断力  $Q_1$ -層間変形角  $r_1$  関係、第一層各柱の  $Q_c$ - $r_1$  関係を、図31に任意時刻の架構の変形状態(地盤からの相対変位)を、図32に最大変形角  $r_{imax}$  の分布と地震後残留変形  $r_R$ (地震動による振動がほぼ終了している、70秒時点の層間変形角とする。但し、B-L2は地震継続時間が120秒であるので、150秒時点の層間変形角とする。)

の分布を示す。

但し、図26, 27, 30については、中柱の代表値としてX3のみを示し、更に図30については、履歴が重複することによる見難さを回避するため、X1, X5の結果を0.025 (rad) 平行移動して描画している。また、図19~23の各塑性率、塑性変形倍率は図25, 図27, 図28に示す局所の応力-変形角関係の履歴から算出している。

尚、無次元化軸として、図24上横軸は柱脚最大耐力  $M_U$  (長期荷重による軸力で算定)、右縦軸はアンカーボルト降伏軸力の総和  $\Sigma T_Y$  で、図25上横軸は柱脚降伏回転角  $\theta_Y$ ,

右縦軸は  $M_U$  と柱の全塑性曲げ耐力  $M_{PC}$  で、図29右縦軸は層に作用する重量  $w_l$  で除した軸を設けている。また、図18には各柱脚の降伏回転角を併記している。

5.1 露出柱脚の挙動

図18, 19より、中柱に位置するX2~X4のベースプレート回転角はほぼ一致しているが、側柱に位置するX1およびX5の  $\theta_{max}$  は差異が生じている。後者の結果は、以下二つの挙動に基因したものである。

① 露出柱脚では、 $N$ の圧縮方向への増減に比例し付加曲げ抵抗力も増減する。図26より、 $N$ - $\theta$ 関係の履歴が

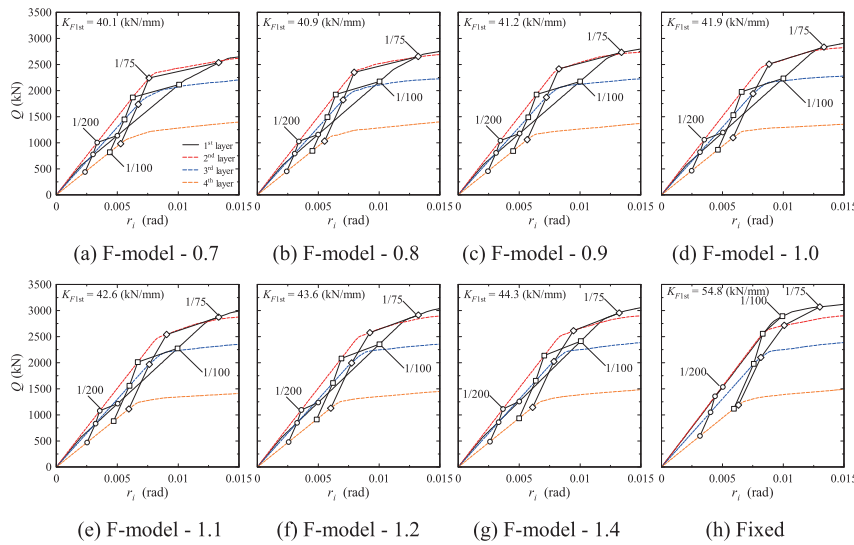


図17 静的荷重増分解析時の層せん断力  $Q_i$ -層間変形角  $r_i$  関係

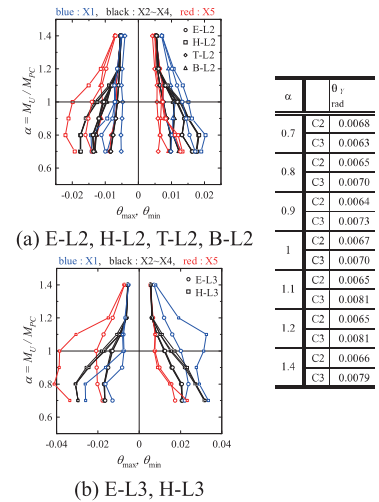


図18 接合部係数毎のベースプレート最大回転角

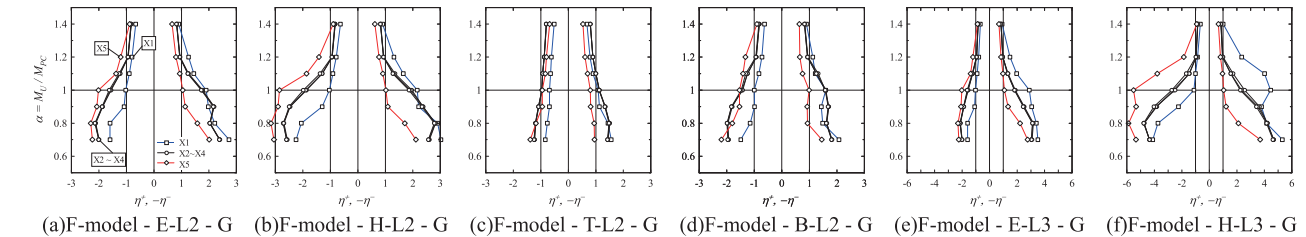


図19 接合部係数毎の露出柱脚の正方向および負方向塑性率  $\eta^+$ ,  $\eta^-$

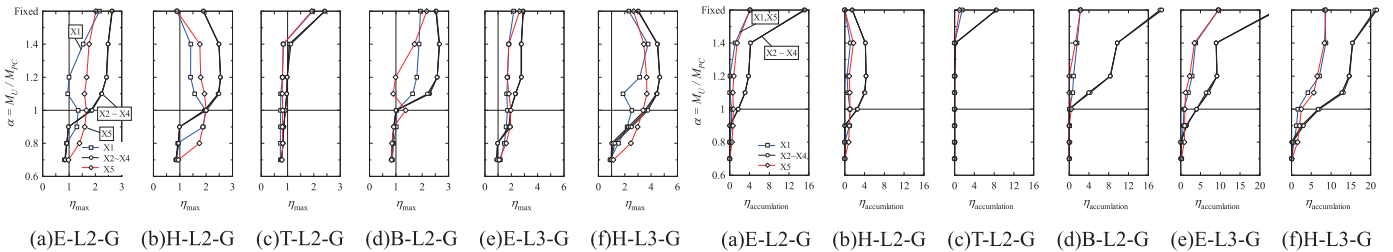


図20 接合部係数毎の柱下端部の最大塑性率  $\eta_{max}$

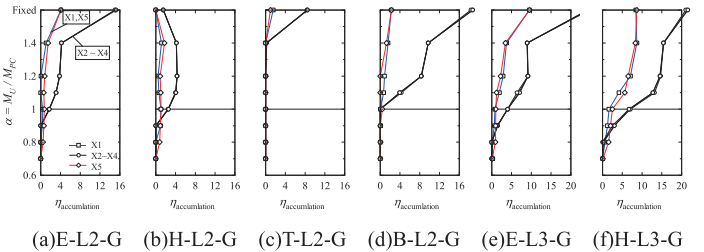


図21 接合部係数毎の柱下端部の累積塑性変形倍率  $\eta_{accumulation}$

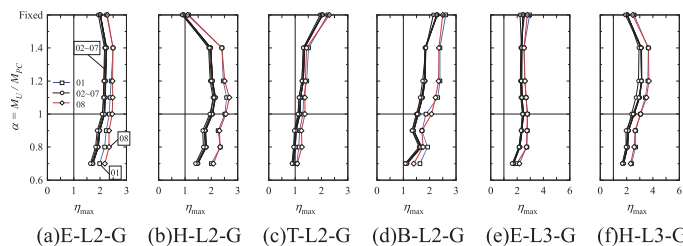


図22 接合部係数毎の第一層上梁の最大塑性率  $\eta_{max}$

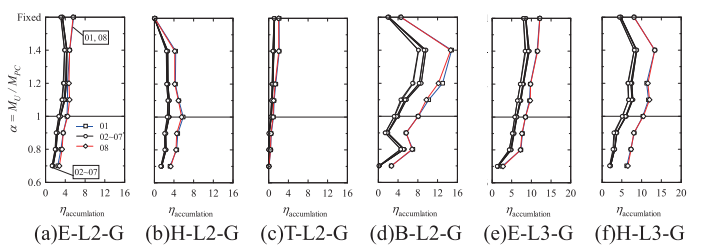
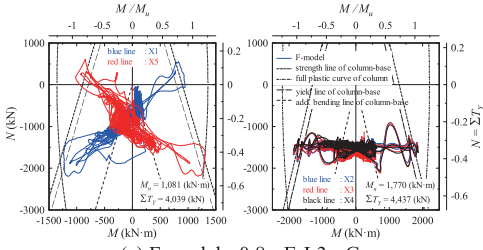
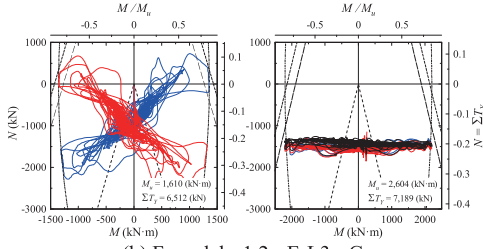


図23 接合部係数毎の第一層上梁の累積塑性変形倍率  $\eta_{accumulation}$



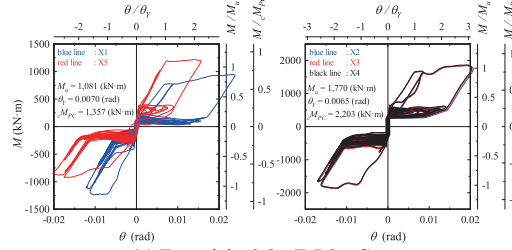


(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G

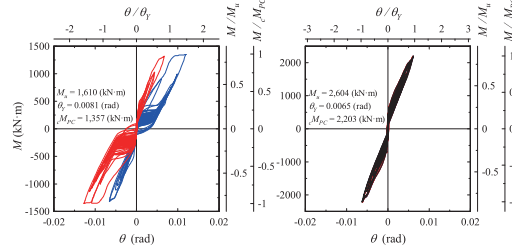


(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

図 24 柱脚部の M-N 耐力相関関係

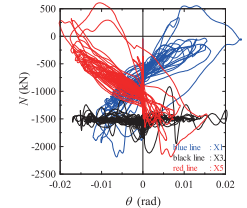


(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G

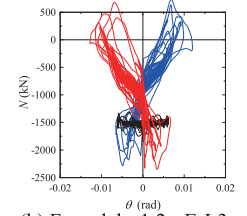


(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

図 25 柱脚曲げモーメント M-ベースプレート回転角 θ 関係

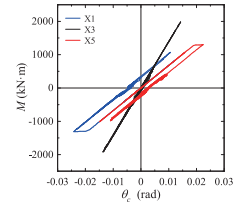


(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G

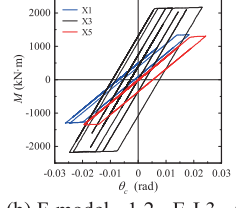


(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

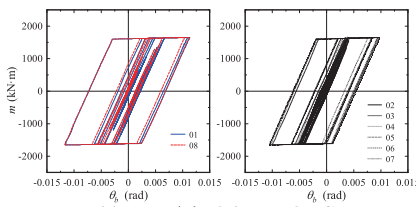
図 26 N-θ 関係



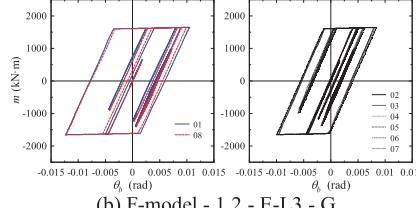
(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G



(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

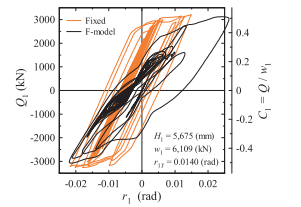


(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G

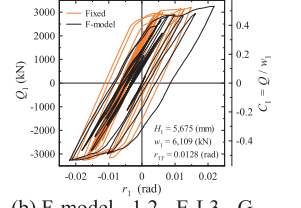


(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

図 28 m-梁端変形角 Q\_b 関係



(a) F-model - 0.8 - E-L3 - G



(b) F-model - 1.2 - E-L3 - G

図 29 第一層の Q\_1-r\_1 関係

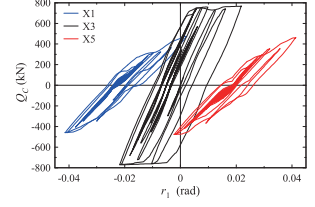


図 30 第一層各柱の Q\_c-r\_1 関係 (F-model - 1.2 - E-L3 - G)

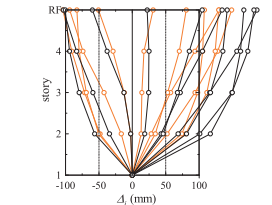
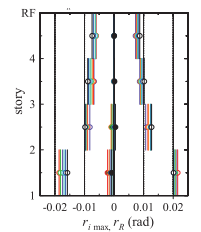
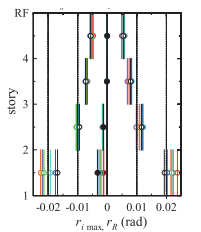


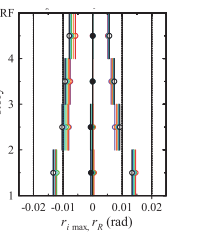
図 31 架構の変形状態 (F-model - 1.4 - E-L3 - G (with Fixed))



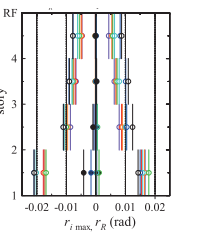
(a) F-model - E-L2 - G



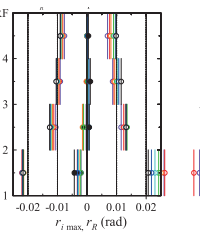
(b) F-model - H-L2 - G



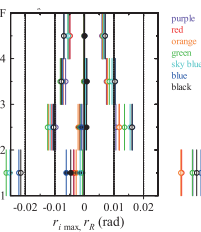
(c) F-model - T-L2 - G



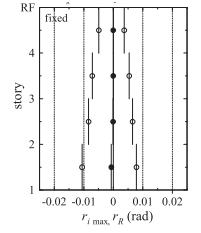
(d) F-model - B-L2 - G



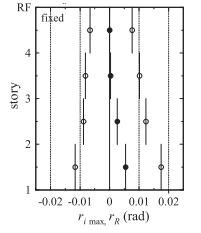
(e) F-model - E-L3 - G



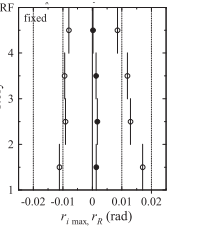
(f) F-model - H-L3 - G



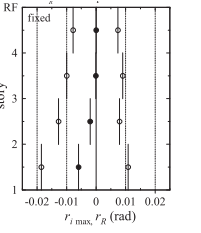
(g) Fixed - E-L2 - G



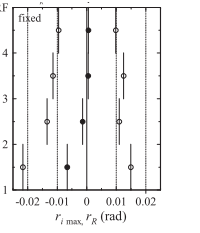
(h) Fixed - H-L2 - G



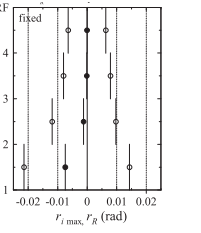
(i) Fixed - T-L2 - G



(j) Fixed - B-L2 - G



(k) Fixed - E-L3 - G



(l) Fixed - H-L3 - G

図 32 時刻歴地震応答解析の最大層間変形角, 残留変形角分布



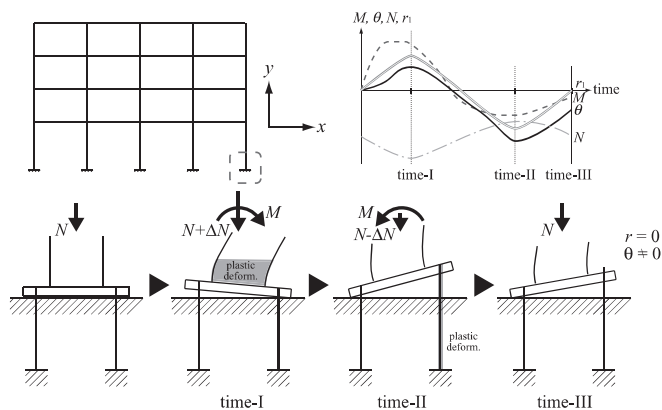


図 33 軸力変動による露出柱脚部の降伏要素の変化 (柱脚位置:X5)

回転角に対して正または負の相関性が得られている場合、 $M-\theta$  関係においては弾性回転剛性が増減することに等しい結果が現われ、具体的には、正方向では X1 に比較して X5 の弾性回転剛性は高い。これに基因して X1 と X5 では柱脚と柱の変形負担比が異なり、正方向では X1、負方向では X5 の  $\theta_{max}$ 、 $\eta$  が大きい値を示す。これは、柱脚が弾性挙動に留まる場合 (図 19 の  $\alpha=1.4$ ) にも明瞭に現われている。

② 側柱では柱軸力の変動により、図 24(a)では  $\alpha=0.8$  という指標値に対して X5 の正方向は柱の全塑性耐力曲線に接触、図 24(b)では  $\alpha=1.2$  に対して X1 の正方向は柱脚の最大耐力直線に接触する。このため、図 25、27 の X1 と X5 は柱、柱脚共に塑性化している。柱軸力の変動による柱および柱脚の最大耐力の増減により降伏要素が変化する当該現象は、図 19~21 より  $\alpha=0.8 \sim 1.2$  の間で生じていることが分かる。

この柱脚周りの挙動を図 33 にまとめる。正負に同一の層間変形角が作用する時の X5 を想定すると、まず、正方向では柱が降伏・塑性化するので回転角  $\theta < \theta_y$  となる。その後、負方向では柱脚の降伏・塑性化による回転角に加え、正方向で生じた柱塑性曲げ変形に伴う回転角が累加されるので、正方向に比較して大きな回転角  $\theta$  が生じる。従って、X1 と X5 の  $\theta_{max}$  の差異は、 $\alpha=0.7$  よりも図 33 の挙動が発現する  $\alpha=0.8$  の方が大きくなる可能性がある。その傾向は、本解析では図 19 (a), (b), (e), (f) に現われている。

以上、側柱の露出柱脚には、その弾塑性挙動に影響を与える程の柱軸力の変動が生じている。従って、柱軸力の変動は現在の接合部係数で定めた設計思想の実現を阻害する要因となる。また、①および②の挙動から、付加曲げ抵抗力を再現しない解析モデルでは、側柱露出柱脚の局所応答を表現できないことは明らかである。

応答量としては、柱脚降伏型 ( $0.7 < \alpha < 1.0$ ) とした低層鋼構造物に対して最大速度が 50kine クラスの地震動が入

力して、第一層の層間変形角が最大で 0.02 (rad) 程度であるとき、その  $\theta_{max}$  は中柱で 0.02 (rad)、側柱で 0.025 (rad) は生じることが分かる。

### 5.2 全体応答

図 29 より、第一層の  $Q_1-r_1$  関係は  $\alpha=0.8$  では柱脚の復元力特性により除荷点指向型に近い履歴形状を、 $\alpha=1.2$  ではほぼ bi-linear 型の復元力特性を示している。図 30 に示すよう、側柱の X1 と X5 には前節で議論した①、②の影響が現われているが、本解析の対象構造物のようにスパンが多く、中柱が層の挙動をほぼ支配するときには、接合部係数による設計思想が実現できていると言える。

また、最大層間変形角の分布より、

- ③ 図 29(b) の  $\alpha=1.2$  においても Fixed に比較すると明らかに剛性が低い。これは図 17 の静的荷重増分解析の結果からも読みとれる。 $\alpha=1.4$  として柱脚に十分な耐力を付与しても、第一層の層剛性は Fixed と比較して 8 割程度であり、図 32 の最大層間変形角の分布、図 31 の架構の変形状態からも本解析で採用した接合部係数の範囲では、Fixed と整合の取れる結果は得られていない。従って、露出柱脚付鋼構造物においては、接合部係数によらず露出柱脚の変形に伴う第一層層剛性の軟化を再現することが重要である。
- ④ 一方、図 31(a)~(e) に着目すると、各接合部係数の応答値に大きな違いはない。図 31(f) のように一部に差異が現われるものもあるが、基本的に本解析で扱っている範囲の接合部係数の変化が最大層間変形角の分布に与える影響は、大きくないと判断できる。

### 5.3 第一層上梁の局所応答

図 22、23 より、本解析の範囲では接合部係数が増大する程、梁の最大塑性率・累積塑性変形倍率も増大する傾向にある。これは、

- ⑤ ④に記述したように接合部係数に対して最大層間変形角は大きく変化しない。一方、柱脚の回転剛性は接合部係数に比例的に増大 (図 13 参照) し、任意変形角下での梁の変形負担率は高くなるため、梁の塑性率等が増大したと考える。

柱降伏型 ( $\alpha > 1.0$ ) として第一層の履歴形状を bi-linear 型へと近づけてエネルギー吸収効率を確保していても、上述のように梁の変形は寧ろ増大する可能性がある。更に、図 23 から、Fixed に比較して柱降伏型の累積塑性変形倍率はほぼ等しいか高い。従って、露出柱脚を設置する場合は、柱降伏型として設計しても、第一層上梁には塑性変形能力を確保することが重要である。

最後に、履歴形状に着目すると、

- ⑥ 図28に示す梁の履歴形状を見ると、側柱直上の01と08とはほぼ整合が取れている。また、図22、23の01と08結果もほぼ整合が取れている。従って、①、②のような露出柱脚の側柱柱脚の弾塑性挙動に対して、第一層上梁は影響を受けないことが分かる。

## 6. 結論

露出柱脚を有する低層鋼構造物の時刻歴応答解析を実施し、露出柱脚挙動が鋼構造物に及ぼす影響等を明らかにした。以下に、得られた知見をまとめる。

なお、ここでは、2章に示した露出柱脚再現モデル(F-model)による解を実際の挙動として記述する。

- 側柱では柱軸力の変動が生じ、これに伴って付加曲げ抵抗力も変動するため、 $M-\theta$ 関係上において弾性回転剛性が増減するに等しい結果が現われる。更に、柱および柱脚の最大耐力も増減するため、接合部係数が1.0に近い領域では、載荷方向によって降伏要素が変化する。  
従って、側柱では設計思想が確保されない可能性があるため、設計思想によらず、側柱柱脚では柱、アンカーボルト共に塑性変形能力を確保しておくことが重要である。
- 柱脚降伏型 ( $0.7 < \alpha < 1.0$ ) とした低層鋼構造物に対して最大速度 50kine クラスの地震動を入力し、第一層の層間変形角が最大で 0.02(rad) 程度であるとき、ベースプレート最大回転角は中柱で 0.02(rad)、側柱で 0.025(rad) 生じる。
- 露出柱脚を設置した場合、接合部係数を 1.4 程度としても固定端と見なせる結果は得られない。また、露出柱脚の耐力変化に対して、層剛性の変化は緩慢である。
- 露出柱脚を設置する場合は、柱降伏型として設計しても固定端と比べて第一層層剛性は 8 割程度となり、第一層に変形集中が生じる傾向にあるため、第一層上梁には塑性変形能力を確保することが重要である。  
一方、側柱の露出柱脚などで生じる特異な挙動に対して、第一層上梁が受ける影響は小さい。

## 参考文献

- 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.
- 日本鋼構造協会：建築構造用アンカーボルトを用いた露出柱脚設計施工指針・同解説，第1版，2009.10.
- 増田貫志：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究（その1）曲げモーメントを受ける柱脚の変形挙動，日本建築学会論文報告集，第297号，pp.11-22，1980.11.
- 九谷和秀，増田貫志：鉄骨構造露出柱脚部の終局耐力

に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第433号，pp.39-49，1992.3.

- 九谷和秀，増田貫志：鉄骨構造露出柱脚部の耐荷機構に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第440号，pp.113-124，1992.10.
- 河野昭雄，田中秀宣，伊藤倫夫：露出型柱脚の回転剛性を考慮したラーメン骨組の水平剛性の評価について，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第10巻第40号，pp.45-52，2003.12.
- 宮坂博信，新井聡，内山政彦，山田丈富，橋本篤秀：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 曲げモーメントのみが作用する柱脚—，日本建築学会構造系論文集，第550号，pp.167-174，2001.12.
- 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.
- 山田哲，秋山宏：柱脚の固定度が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第496号，pp.113-118，1997.6.
- 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.
- 長谷川隆，露出柱脚を有する鉄骨造骨組の地震応答性状，日本建築学会 構造工学論文集，Vol.46 B，pp.657-665，2000.3.
- Kuniaki SATO : A research on the a seismic behaviour of steel column base, PSSC, 1986.
- 佐藤邦昭：柱脚の性能と構造設計（特集：耐震工学から学ぶ鉄骨柱脚の設計・施工），建築技術（668），pp.122-131，2005.5.
- 鎌形修一，前田祥三，西村功：柱脚固定度を考慮した骨組み構造の地震時挙動の研究 露出型柱脚の復元力モデルの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，pp.871-872，1986.8.
- 加藤勉，佐藤邦昭等：鋼構造露出柱脚の復元力特性が上部構造物に与える影響について（その1：スリップ型モデルの応答解析）（その2：完全弾塑性型モデルの応答解析），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，pp.867-870，1986.8.
- 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，多田元英，松蔭知明：分散型実験システムによる統合化耐震性能評価法に関する研究—露出柱脚を有する5層鉄骨建物の評価—，日本建築学会構造系論文集，第73巻第631号，

pp.1665-1671, 2008.9.

- 17) 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.
- 18) 田中秀宣, 三谷勲, 嶋村洋子, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性挙動, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第12巻第45号, pp.171-184, 2005.3.
- 19) 山田哲, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 島田侑子: 震動台実験における弾塑性応答特性と崩壊メカニズムの形成, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻第644号, pp.1851-1859, 2009.10.
- 20) 日本免震構造協会, パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 第2版, 2007.7.
- 21) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 一定引張軸力を受ける露出柱脚の抵抗機構と復元力特性モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻第637号, pp.561-567, 2009.3.
- 22) 玉井宏章: 変動軸力と繰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.
- 23) 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.
- 24) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 引張軸力領域を含む変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚の抵抗特性, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻第642号, pp.1495-1502, 2009.8.
- 25) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 松尾彰: 引張軸力領域を含む変動軸力と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, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻第660号, pp.397-405, 2011.2.
- 26) 玉井宏章, 山西央朗, 白木剛, 高松隆夫, 松尾彰: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻第628号, pp.991-997, 2008.6.

27) 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針, 第3版, 2012.3.

## 付録 A 露出柱脚挙動再現モデル (F-model) 各種バネ特性の算定手法

図1に示す露出柱脚の抵抗機構の柱断面図心位置に着目した曲げモーメントの釣合いを利用して, 柱断面図心から接触反力(ベースプレートが基礎を圧縮する力)の合力  $C$  までのモーメントアーム  $d_c$  を定義すると, 以下の式となる。

$$d_c = \frac{M - \sum T_i \cdot d_{ii}}{C} = \frac{M - \sum T_i \cdot d_{ii}}{N - \sum T_i} \quad (\text{A.1})$$

また, 図4に示すように, F-model では  $d_c$  の位置にアンカーボルトを設ける。アンカーボルトの抵抗による曲げ耐力を再現するため, 以下の式を用いて, アンカーボルトの降伏応力度を調整する。尚, F-model のために調整した諸量にはトップバーを振る。

$$\overline{\sigma_{Yi}} = \frac{M_{AYi}}{n_i \cdot A_{Ai} \cdot 2 \cdot d_c} \quad (\text{A.2})$$

ここに,  $\sum T_i \cdot d_{ii}$ : 柱断面図心周りのアンカーボルト軸力に基因した曲げモーメント総和,  $\sum T_i$ : アンカーボルト軸力の総和,  $M_{AYi}$ : アンカーボルト降伏軸力による柱脚曲げ耐力,  $n_i$ :  $i$  列のアンカーボルト本数,  $A_{Ai}$ : アンカーボルト断面積,  $\overline{\sigma_{Yi}}$ : アンカーボルトの降伏応力度である。

次いで, 基礎からの抵抗を再現したバネ(基礎バネ)と, アンカーボルトの抵抗を再現したバネは, 図2に示す露出柱脚の  $M-\theta$  関係上で得られる諸量を用い, 以下の式を用いてバネ特性を定めるための各値を定義する。

$$\overline{A_F} = K_n \cdot \frac{\overline{L_F}}{2 \cdot E \cdot d_c^2} = \overline{L_F} \cdot \frac{N}{2d_c \cdot \theta_n \cdot E} \quad (\text{A.3})$$

$$\overline{L_A} = \frac{n_i \cdot A_{Ai} \cdot E \cdot (2d_c)^2}{K_{Ai}} - n \cdot \overline{L_F} \cdot \frac{A_{Ai}}{A_F} \quad (\text{A.4})$$

ここに,  $\overline{A_F}$ ,  $\overline{L_F}$ : 基礎バネの断面積と長さ,  $K_n$ ,  $\theta_n$ : 付加曲げ抵抗域の回転剛性と付加曲げ抵抗力到達時回転角,  $N$ : 柱脚に作用する柱軸力(長期),  $\overline{L_A}$ : アンカーボルトの抵抗を再現したバネの長さ,  $K_{Ai}$ : アンカーボルトの弾性伸びに基因した柱脚回転剛性である。

