

# 簡易復元力特性を用いたスリップ型および ノンスリップ型露出柱脚付き鋼構造物の地震応答解析

高松 隆夫\*・山西 央朗\*・玉井 宏章\*\*・松下 貴雄\*\*\*・石津 祐二\*\*\*

(平成28年10月31日受付)

## Seismic response analyses of Steel Structures with Slip-type & Non-slip-type Exposed Column Bases using Simplified Models of Restoring Force Characteristics

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI, Takao MATSUSHITA and Yuji ISHIZU

(Received Oct. 31, 2016)

### Abstract

This paper describes response analyses of structures with column bases of full and simplified models and the following conclusions are obtained. 1) The response results of the simplified models are in good agreements with those of the full models. The worst results are overestimated by 30%. Thus, simplified models can be used for rational design of steel structures. 2) For structures with the non-slip-type column bases, the seismic response results after column bases yielding decrease and the maximum ones of the first story in the column bases with cyclic yielding are less than those of the slip-type column bases.

**Key Words:** exposed column-base, simplified model of restoring force characteristics, additional bending resistance, variable axial force

### 1. はじめに

一定圧縮軸力と繰り返し曲げモーメントを受ける露出柱脚はフラグシップ型復元力特性[1, 2]を示すが、実務設計や架構の地震応答解析などでは図1に示す簡易復元力特性モデルを用いて設計、研究することが多い[3-5].

これまで、弾性回転剛性と付加曲げ抵抗を含む最大耐力のみで表現できる簡易復元力特性モデルを用いた解析により、架構全体の応答性状は概ね評価できること[2]が示されている。また、柱脚を弾性体とした場合その弾性回転剛性の増減が架構全体の最大層間変形角などにほとんど影響を及ぼさないこと[3]、多層骨組みの地震応答性状は柱脚の復元力特性(履歴形状)よりも、柱脚曲げ耐力の大きさ

やその塑性変形量に基づいた、骨組み層方向の耐力および塑性変形量の分布に影響されること[5]が明らかになっている。

このように、架構の応答には柱脚の復元力特性や弾性回転剛性の影響は少なく、曲げ耐力を適切に表現することが重要であるとの知見から、簡易復元力特性モデルを用いることの合理性は得られている。しかし、簡易復元力特性モデルでは付加曲げ抵抗が精確に表現されておらず、降伏後の挙動に着目すると曲げ耐力に差異が生じる(図1参照)。更に、側柱などでは地震時に柱軸力が変動し、これにより露出柱脚は付加曲げ抵抗が増減する[6].

簡易復元力特性モデルが構造物地震応答精度にどの程度の影響を及ぼすかを判断するには、露出柱脚挙動を精度よ

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 長崎大学工学部工学科

\*\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科

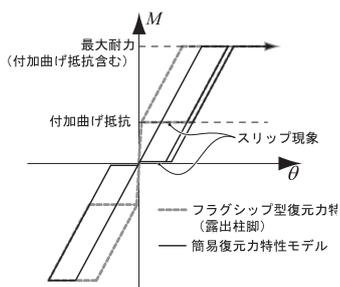


図1 フラグシップ型復元力特性と簡易復元力特性

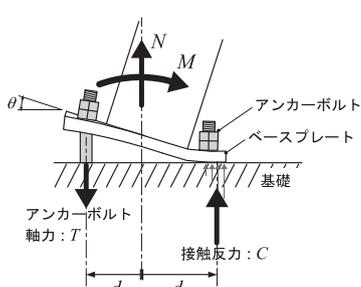


図2 露出柱脚の代表的な抵抗機構

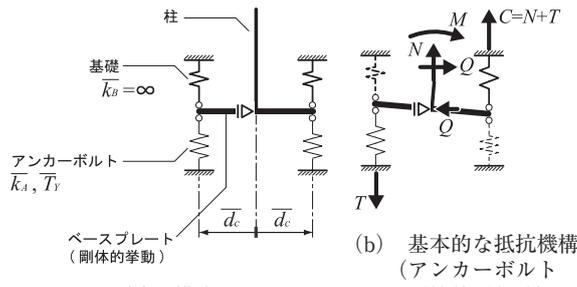


図4 軸バネによる露出柱脚のモデル化

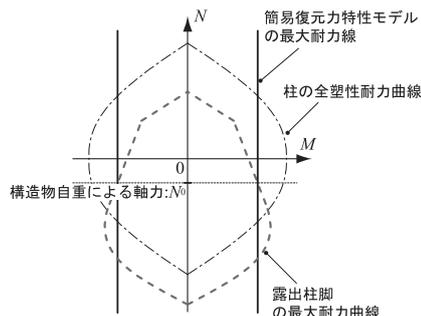


図3 各モデルのM-N耐力相関関係

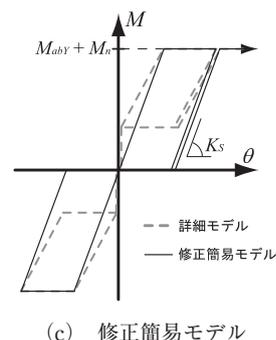
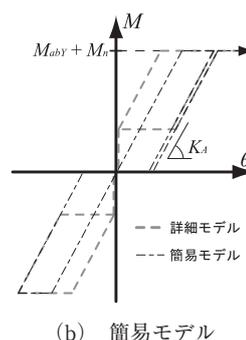
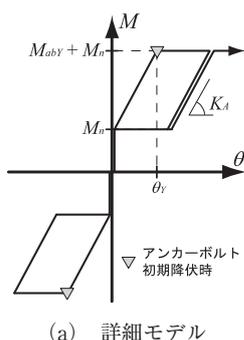


図5 各モデルの定義と諸量

く表現できるモデルを用い比較する必要があるが、そのような研究は少なく[2, 7], 議論の余地が残っている。

本研究では、ラーメン架構を対象として、露出柱脚に対する簡易復元力特性モデルの精度を検討する。方法としては、付加曲げ抵抗を正確に取り扱うことが可能な露出柱脚の詳細モデルを構築し、簡易復元力特性モデルと併せて地震応答解析を実施する。それぞれの解析結果を比較・検討することで、簡易復元力特性モデルの精度と使用する際の留意点を議論する。

次いで、著者等は楔デバイスと呼ぶ装置をアンカーボルト上端部に設置することで、アンカーボルト降伏型で現れる繰り返し載荷時のスリップ現象を改善する[8-12](以後、これをノンスリップ型露出柱脚と記す)こと、載荷時には常に弾性的挙動を示すため履歴形状が単純化されることを示している[8, 10, 12]。

ノンスリップ型露出柱脚は、澤田等と共に地震応答解析[9]により構造物への影響等を議論しているが、

- ・柱軸力による付加曲げ抵抗の考慮
  - ・簡易復元力特性モデルの精度の検討
- という課題を残している。ここでは、ノンスリップ型露出柱脚を表現した簡易復元力特性モデルも構築し、ノンスリップ型露出柱脚の有用性と、簡易復元力特性モデルによる評価精度を改めて吟味する。

## 2. 露出柱脚のモデル化

露出柱脚は図2に示す抵抗機構を示し、以下の構造的特

徴を有している。

- ・アンカーボルトは引張変位のみに抵抗するので、一度塑性化した領域では抵抗しない。
- ・圧縮合力点位置が柱図心位置と一致しないため、柱軸力により付加曲げ抵抗が生じる。

これらは、復元力特性およびM-N耐力相関関係上にスリップおよび付加曲げ抵抗という形で影響を与え、図1, 3上の灰色太破線の軌跡(露出柱脚)を示す。

本研究では図4に示すモデルを用いて露出柱脚の精緻な挙動を求める。当該モデルは、ベースプレート縁端上下に軸バネを設置し、鉛直下向きの力を上側のバネ(基礎)が、鉛直上向きへの変形を下側のバネ(アンカーボルト)が引張抵抗することで、露出柱脚挙動を実現する。

柱せん断力については、柱とベースプレートの交点に設けたピンローラー支持が負担し、また、ベースプレートには無限大とみなせる剛性を入力して剛体的に挙動させる。

アンカーボルトと基礎とをベースプレート端部に設置し、かつベースプレートを剛体的に挙動させるため、圧縮合力点位置 $d_c$ 、アンカーボルト距離 $d_a$ 、回転中心位置、アンカーボルト回転半径は、同一値になり、これを加味して各バネの特性を決定する必要がある。

ただし、付加曲げ抵抗 $M_n$ に達するまでの区間は、通常、無限大の回転剛性を有しているとみなされている。これを踏襲するため、ここでは基礎のバネに当たる $k_B$ に無限大の軸剛性を与える。

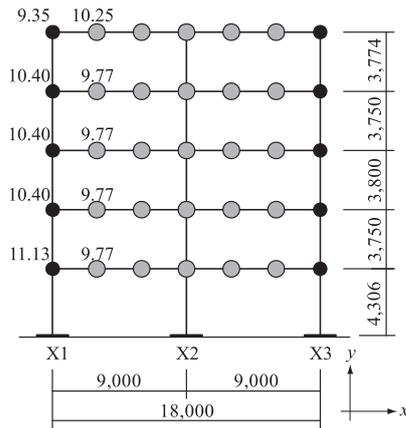


図6 解析対象架構

表1 部材リスト

階	柱	層	梁
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

柱: BCR295 ( $\sigma_y = 295 \text{ N/mm}^2$ ) 梁: SN400 ( $\sigma_y = 235 \text{ N/mm}^2$ )  
 $E = 205,000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  床スラブの剛性効果:  $1.4 \cdot E$

により導出する。

ここに、 $N$ : 柱軸力、 $d_t$ : 柱断面図心からアンカーボルトまでの距離、 $\sigma_y$ : アンカーボルトの降伏応力度、 $A_A$ : アンカーボルトの軸部断面積、 $M_{abY}$ : アンカーボルトによる降伏曲げ耐力、 $M_n$ : 付加曲げ抵抗、 $E$ : ヤング係数、 $\theta_n$ : 付加曲げ抵抗発揮時のベースプレート回転角、 $\bar{k}_A$ : アンカーボルトの軸剛性、 $K_A$ : アンカーボルトの弾性伸び領域の弾性回転剛性 (図5(a)参照)、 $n$ : 引張側アンカーボルト本数である。なお、トップバーの記号はモデルの値を指す。

簡易モデルおよび修正簡易モデルには、柱脚の最大曲げ耐力  $M_u (=M_{abY} + M_n)$  および、簡易モデルには  $K_A$  を、修正簡易モデルには  $K_S$  を弾性回転剛性として与える。

### 3. 解析概要

本解析では図1に示す露出柱脚挙動を吟味するため、中柱および、変動軸力が生じる側柱であっても常にアンカーボルト降伏型を実現させる。また、側柱で生じる変動軸力が第一層挙動へ与える影響、並びに中柱の挙動を吟味するには、中柱を確保しつつスパン数は少ないものが良い。

そこで、構造物自重作用下の露出柱脚接合部係数を0.3程度とすることで常にアンカーボルト降伏型を示し、かつスパン数が2である架構[14]を解析対象として地震応答解析を実施する。

また、解析には2章に示した露出柱脚を軸バネで表現したモデル (以後、詳細モデル) と、図2, 3中の柱軸力による付加曲げ抵抗を表現しない簡易な復元力特性モデル (以後、簡易モデル) を用いる。

#### 3.1 解析対象構造物

地震応答解析には clap.f を使い、減衰定数  $h=0.02$  のレーリー減衰、解析時間刻み  $0.005 \text{ (sec)}$  を基本条件として、平面架構に水平及び鉛直加速度を入力する。ただし、柱脚周りの減衰は0としている。

図6に解析対象架構、図7, 8に柱脚詳細と復元力特性を、表1～4に部材リスト、詳細モデルの諸量、各弾性回転剛性発揮時の構造物固有周期、入力加速度の一覧を示す。

解析対象[14]は、5層2スパンの鋼構造物で、各層の柱は中柱、側柱の区別無く同一断面としている。各部材には

## 2.1 復元力特性モデルの定義

図5に、本研究で取り扱う復元力特性を示す。(a)は図4のモデルにより得られる復元力特性であり、フラグスリップ型復元力特性を示す。これを、詳細モデルと呼ぶ。(b)は弾性回転剛性と付加曲げ抵抗を含む最大耐力で表現した簡易復元力特性モデルであり、これを簡易モデルと呼ぶ。更に、(c)は簡易モデルの精度の向上を目的に原点とアンカーボルト降伏点を結ぶ割線剛性[13]を与えたモデルであり、これを修正簡易モデルと呼ぶ。

柱脚部には、これら3モデルを採用する。

## 2.2 モデル諸量の決定

詳細モデルとした図4のモデル化には、圧縮合力点位置  $\bar{d}_c$ 、バネの軸剛性  $\bar{k}_A$ 、降伏軸力  $\bar{T}_Y$  を決定する必要がある。この諸量は、実験やFEM解析等から得られる復元力特性より、代表値として図5(a)に示す値を用いて以下の式により導出する。

まず、モデルの圧縮合力点位置  $\bar{d}_c$  は、柱脚曲げモーメント  $M$ 、アンカーボルト軸力  $T$ 、柱軸力  $N$  を用いて、

$$\bar{d}_c = d_c = \frac{M - \sum d_t \cdot T}{N - \sum T} \quad \dots \dots \dots (1)$$

とする。これにより、付加曲げ抵抗  $M_n (= -N \cdot d_c)$  の値の精度を確保する。

次に、アンカーボルトの降伏軸力  $\bar{T}_Y$  は、柱脚の降伏曲げ耐力を揃えるため、

$$\bar{T}_Y = \sigma_y \cdot A_A = \frac{(M_{abY} + M_n) + N \cdot \bar{d}_c}{2 \cdot d_c} = \frac{M_{abY}}{2 \cdot d_c} \quad \dots \dots (2)$$

とする。

最後に、アンカーボルトの軸剛性は、

$$\bar{k}_A = \frac{n \cdot A_A \cdot E}{n \cdot A_A \cdot E \cdot 4d_c^2} = \frac{K_A}{4d_c^2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

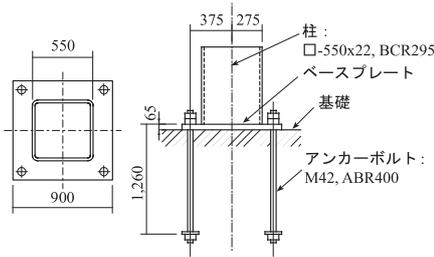


図7 露出柱脚ディテール

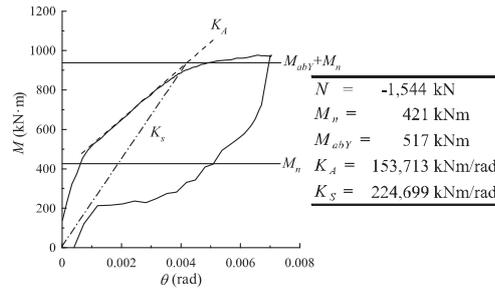


図8 露出柱脚復元力特性 (X2)

表2 露出柱脚モデルに用いる諸量

$\bar{d}_c$	280 mm
$\bar{T}_Y$	902 kN
$\bar{k}_A$	575 kN/mm

表3 柱脚回転剛性と架構固有周期

	固有周期 (s)	
	1次	2次
詳細モデル	0.830	0.278
簡易モデル	0.884	0.296
簡易修正モデル	0.867	0.291

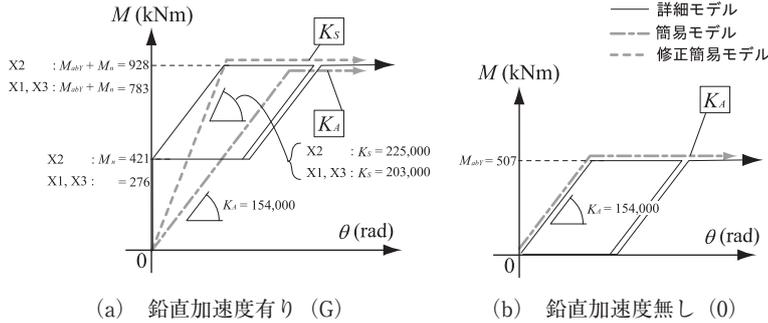


図9 復元力特性の諸量

表4 入力加速度

(a) 水平方向

表記	地震波名称	最大加速度 gal	継続時間 s
E-L2	El centro NS	510	70
H-L2	Hachinohe EW	239	70
T-L2	Taft EW	492	70
BCJ-L2	BCJ-L2	356	150

(b) 鉛直方向 (一定)

表記	内容	加速度 gal	継続時間 s
0	0	0	70, 150
G	重力加速度	981	70, 150

断面形状, 降伏応力度, ヤング係数, 歪硬化係数 (0.01 としている) を入力し, 移動硬化則と断面形状によって決定される  $M-N$  相関曲線の特性を与える. なお, 梁については床スラブによる剛性効果を加味するため, 鋼材のヤング係数 (205,000 (N/mm<sup>2</sup>)) を 1.4 倍する.

また, 当該架構の柱脚には図7に示す露出柱脚を設置し, 載荷実験を実施して図8の復元力特性を得ている. まず, 復元力特性とアンカーボルト軸力から  $d_c$  の代表値を定める. 次に, 図8および式(2), (3)を用いて, 詳細モデルの諸量を表2の値と定めた.

### 3.2 解析変数

解析変数は, 加速度と柱脚のモデルとする.

加速度は, 水平方向には El centro NS 波, Hachinohe EW 波, Taft EW 波を最大速度が 50kine となるように基準化した3波と BCJ-L2 を, 鉛直方向には重力加速度 981 (gal)一定と, 構造物の自重の影響を排除するために 0 (gal)一定を入力する. なお, 地震後の残留変形を議論するため, 地震後の自由振動がほぼ収まるまでの時間 (10 (s) 以上) を確保している.

柱脚には 2.1 節に記した3種類のモデルを用いる. ただし, 柱軸力が作用しない場合 (鉛直加速度: 0) は  $K_A$  と  $K_S$  とは同一の値となるので, 簡易モデルのみを用いる.

## 4. 簡易復元力特性モデルによるアンカーボルト降伏型露出柱脚挙動の精度検討

解析は, 以下の2シリーズを実施する.

- ・解析 I : 鉛直方向の加速度を G として水平方向の加速度 4 波を入力し, 柱脚を詳細モデル, 簡易モデル, 修正簡易モデルとした, 計 12 ケースの解析.
- ・解析 II : 鉛直方向の加速度を 0 として水平方向の加速度 4 波と, 柱脚を詳細モデル, 簡易モデルとした, 計 8 ケースの解析.

解析結果として, 図10に最大・最小・残留層間変形角分布, 図11に最大・最小層せん断力分布, 図12にエネルギー吸収量の分布の一例を, 図13に柱脚モデルの違いによるベースプレート最大回転角の比を, 図14~18に H-L2 を入力した場合の第一層層せん断力  $Q$ -層間変形角  $r$  関係, 第一層層間変形角  $r$  時刻歴, 柱脚曲げモーメント  $M$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係, ベースプレート回転角  $\theta$  時刻歴, 柱脚曲げモーメント  $M$ -軸力  $N$  耐力相関関係を示す.

なお, 各荷重-変形関係は, 履歴形状を確認するため時間を 0~15 (s), 15~30 (s) に分けて示す. また, 簡易モデルおよび修正簡易モデルの結果は, 修正簡易モデルの精度が若干高めであったが劇的な違いは見られなかった. 従って, 解析 I では荷重-変形関係や変形の時刻歴等には, 代表値として詳細モデルと修正簡易モデルを示す.

### 4.1 全体応答および第一層応答

図10より, 解析 I の簡易モデル・修正簡易モデルの全体応答最大値は概ね整合している. 散見される不整合な部

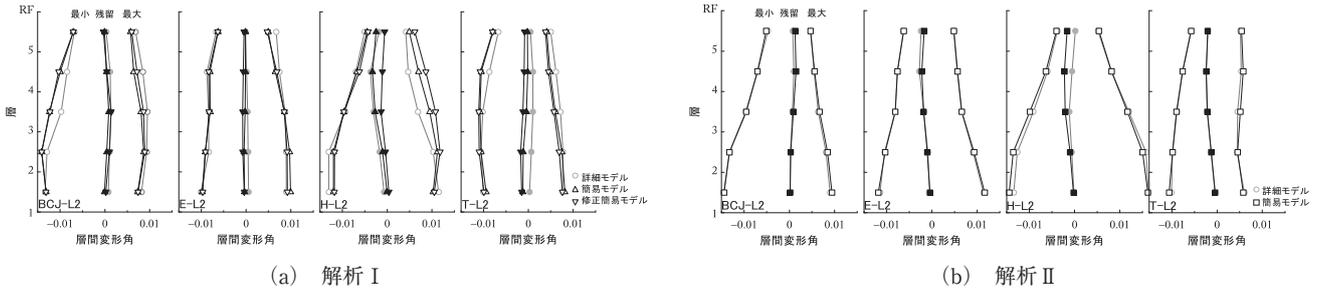


図 10 最大・最小・残留層間変形角分布

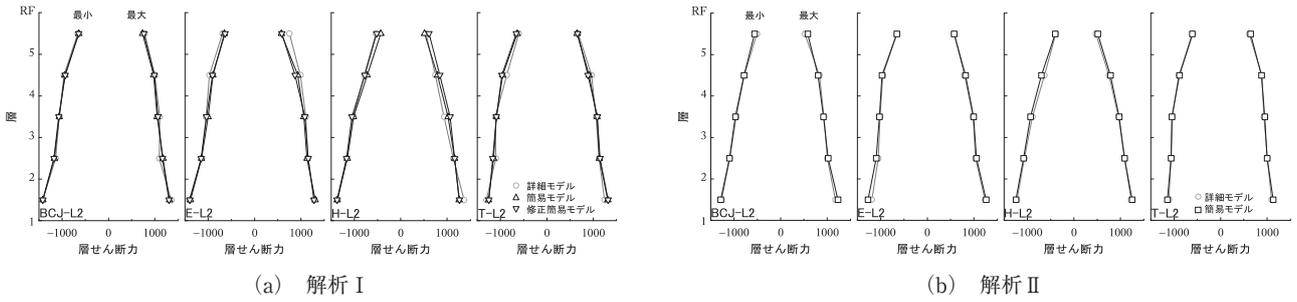


図 11 最大・最小層せん断力分布

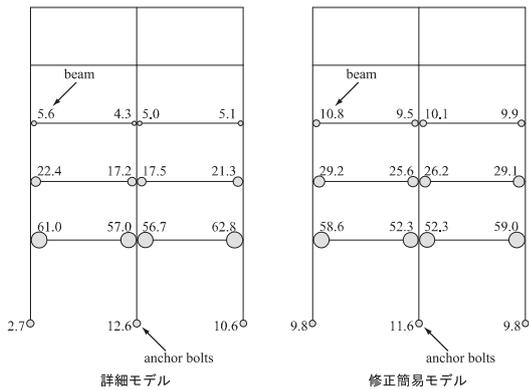


図 12 エネルギー吸収量分布 (解析 I : H-L2) [kN・m]

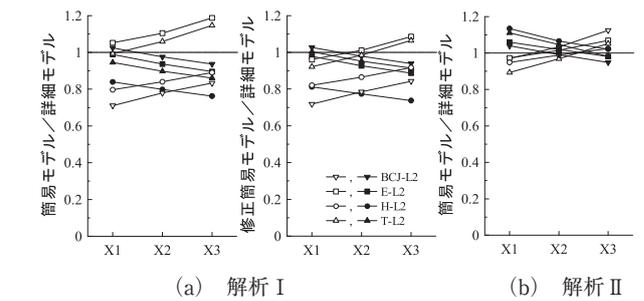


図 13 柱脚モデルの違いによるベースプレート最大回転角の比

分においても、応答は3割程度過大評価となっており、最大応答という観点から安全側に評価していることが分かる。更に、IIではほぼ整合している。

また、図 12 のエネルギー吸収量の分布を比較すると、柱脚部のエネルギー吸収量をやや過小評価しているが、全体の分布は整合していることがわかる。

図 14(a)より、履歴曲線が重複しているので確認し難いが、第一層の応答については解析 I であっても柱脚の初期降伏が生じるサイクル (6(s)前後) まではほぼ整合している。しかし、初期降伏が生じた後の履歴形状は整合が取れていない。一方、図 14(b)の解析 II では、柱脚の降伏に関係なく随時整合している。

これらは、図 15 の第一層  $r$  の時刻歴からも読み取ることができる。更に、図 15(a)からは最大応答時の不整合のみではなく、15(s)以後で位相差等も生じており、構造物応答の精度が低下していることが分かる。

なお、第三層以上については履歴形状の違いは見られず、図 10(a)に見られた詳細モデルとの差異は、図 11 の荷重分布の違いにより生じたものである。

#### 4.2 柱脚部の挙動

図 13 より、ベースプレート回転角は、解析 I では2割程度の差異が生じているものもある。一方、全体および第一層の応答がほぼ整合が取れていた解析 II であっても、柱脚 X1 と X3 で1割程度の差異が生じている。

まず、解析 II について検討するが、図 18(b)の X1 では変動軸力が生じており、この影響で図 16 の X1 の  $M-\theta$  関係上では曲げ耐力の増減が生じている。簡易モデルはこのような挙動を表現できないので、第一層の層間変形角などが表現できていたとしても、X1 と X3 は耐力増減による見た目の剛性変化により、ベースプレート最大回転角には1割程度の差異が生じている。

次に、解析 I については、図 16(a)中の X2 を見ると、最大耐力や弾性回転剛性はほぼ表現できており、図 17(a)中の X2 においても大きく塑性化する前の 10(s)程度まで

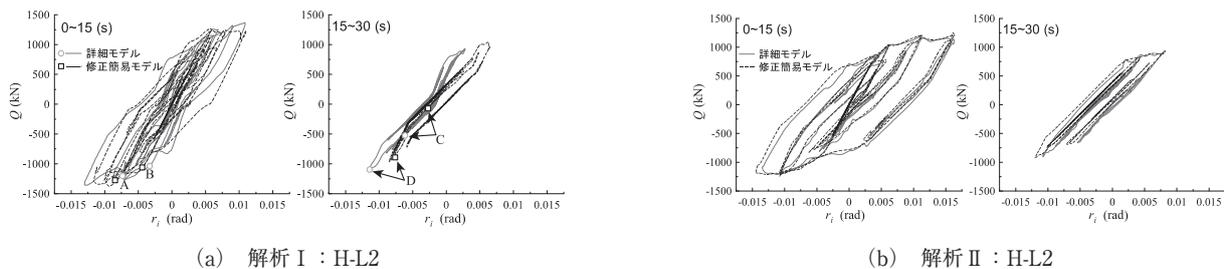


図 14 第一層  $Q$ - $r$  関係

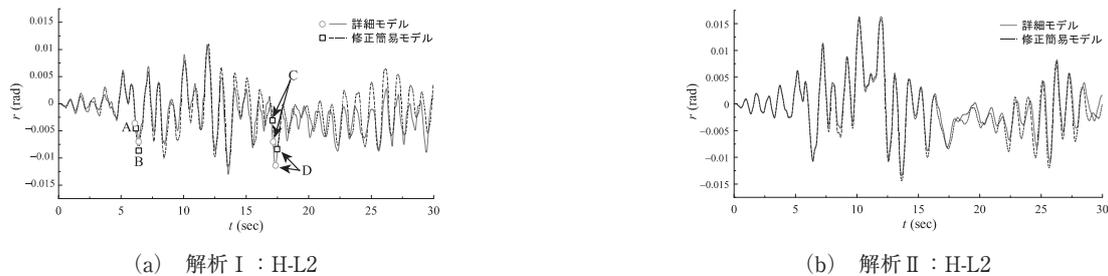


図 15 第一層  $r$  時刻歴

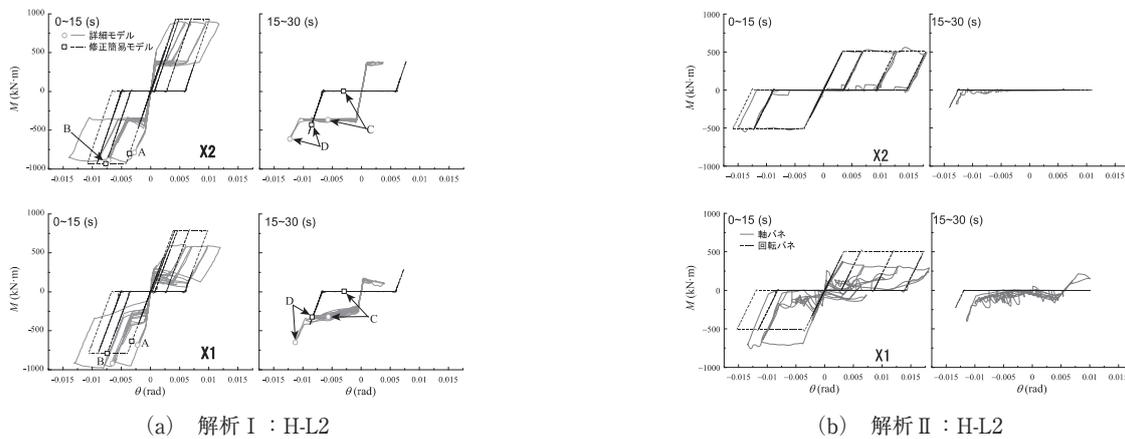


図 16  $M$ - $\theta$  関係

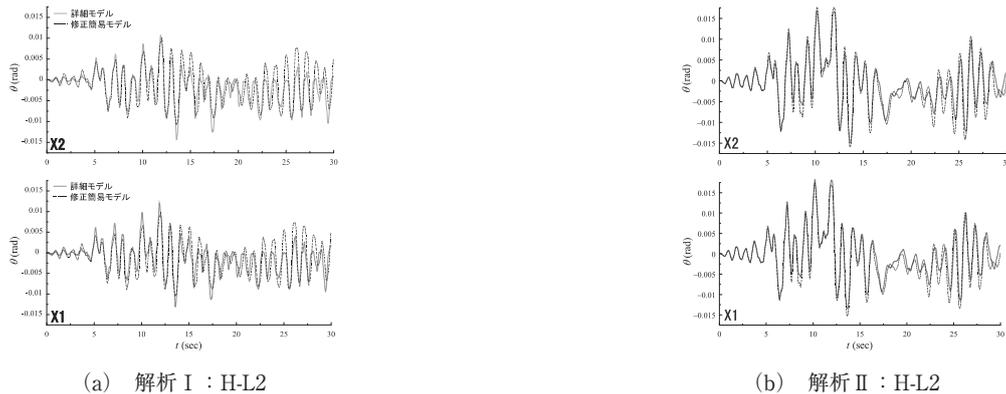


図 17  $\theta$  時刻歴

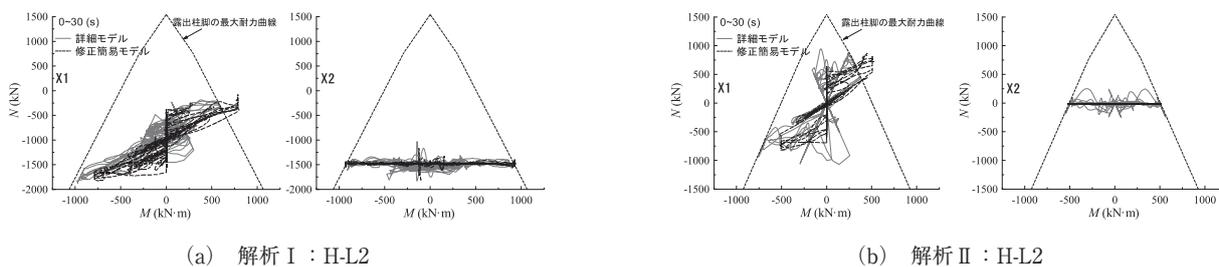


図 18  $M$ - $N$  耐力相関関係

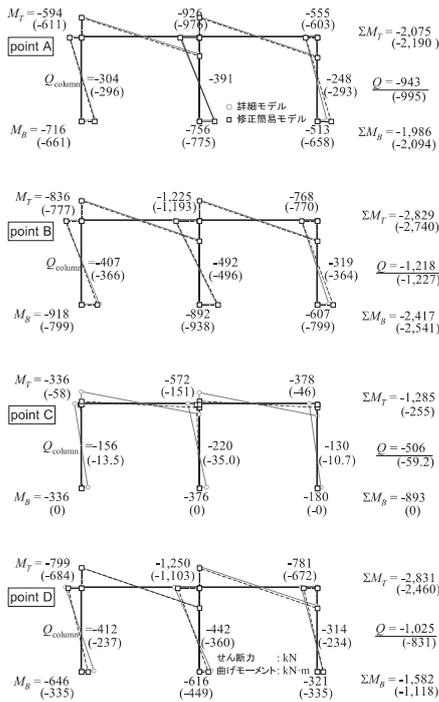


図 19 第一層曲げモーメント分布 (解析 I, H-L2)

はほぼ対応している。しかし、付加曲げ抵抗が表現できていないため、大きな塑性化を被った後の履歴形状 (15 ~ 30(s)の履歴) が異なり、図 17(a)の 15 秒以後は明らかに差異が生じ、若干ではあるが位相差も見られる。X1 と X3 は解析 II と同じ理由により、精度は更に低下している。

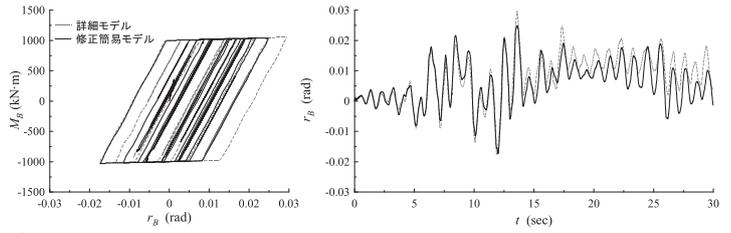
4.3 柱脚部の挙動が周辺架構に与える影響

図 19 に、図 14 ~ 図 16 中に記した A ~ D の位置における、第一層の曲げモーメント分布を示す。それぞれは、A= 弾性限界手前、B= 初期降伏が生じたサイクルのピーク時、C= 塑性化以後でスリップ現象が発生する載荷時、D= 塑性化以後のアンカーボルト弾性抵抗時、である。

なお、図 19 には柱上下端部のモーメント値  $M_T$ 、 $M_B$ 、各柱のせん断力  $Q_{column}$ 、層せん断力  $Q$ 、柱脚のモーメント容量  $\Sigma M_B$ 、柱頭のモーメント容量  $\Sigma M_T$  を併記し、更に、括弧内の数値は簡易モデルの場合の結果である。

図 19 より、初期降伏が生じたサイクルの A、B は、左右側柱柱脚の値は整合が取れないが、柱脚、柱頭のモーメント容量、層せん断力は整合性が得られている。しかし、C では柱脚の曲げモーメントが簡易モデルは 0、詳細モデルは構造物自重による付加曲げ抵抗を發揮しており、柱脚のモーメント容量は整合していない。この差異が、第一層の履歴形状と構造物の周期特性に影響し、4.1 節に記した層間変形角の位相差等を招いたと考えている。

次に、第一層上梁に着目するため、図 20 に X1 柱に取りつく第一層上梁の曲げモーメント  $M_B$ 、部材角  $r_B$  関係と、部材角  $r_B$  の時刻歴を示す。図 20 より、 $r$  の整合が取れている範囲 (6 秒以前) では、ほぼ整合性が取れている。当



(a)  $M_B$ - $r_B$  関係 (b)  $r_B$  時刻歴

図 20 第一層上梁の挙動 (解析 I, H-L2)

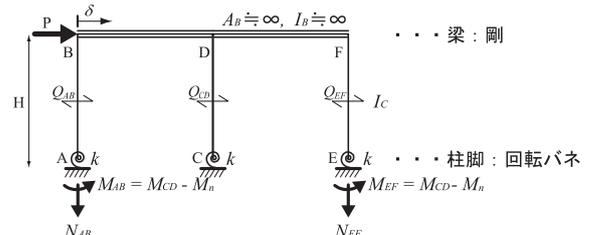


図 21 剛梁と柱脚に回転バネを有する架構

該梁は、側柱で発生する変動軸力による影響を受けるが、これが及ぼす影響は小さいとみなせる。他の解析結果でも、同様の傾向を示し、柱脚の挙動が第一層上梁に与える影響は小さい。ただし、層間変形角を精度よく表現することが重要であると言える。

一方、側柱の露出柱脚では変動軸力の影響が現れ、図 13、16 ~ 18 から簡易モデルは対応できていないことが分かる。しかし、それが層の応答にほぼ影響を与えておらず、前述のように第一層上梁に与える影響も小さい。そこで、図 21 に示す剛梁を有したモデルから、側柱の変動軸力の影響を検討する。

図 21 より中柱の層間変位は、

$$\delta = \frac{H^2}{E \cdot I_c} \left( \frac{Q_{CD} \cdot H}{3} - \frac{M_{CD}}{2} \right) = \frac{H^2}{E \cdot I_c} \left( \frac{P \cdot H}{9} - \frac{M_{CD}}{2} \right) \quad \dots (4)$$

と表現できる。一方、梁を剛としているため、各柱に作用する層間変位は一致するので、側柱のせん断力は以下となる。

$$Q_{AB} = \frac{3}{H} \left( \frac{E \cdot I_c}{H^2} \cdot \delta + \frac{M_{AB}}{2} \right) = Q_{CD} - \frac{3}{2} \cdot \frac{A \cdot d_c}{H} \cdot N_{AB} \quad \dots (5)$$

$$\therefore Q_{EF} = Q_{CD} - \frac{3}{2} \cdot \frac{E \cdot d_c}{H} \cdot N_{EF} \quad \dots (6)$$

最後に、層せん断力は各柱のせん断力の累加値として算出でき、更に、左右側柱で生じる柱軸力の変動は釣合う ( $N_{AB} = N_{EF} = \Delta N$ ) ので、

$$\sum Q_c = Q_{AB} + Q_{CD} + Q_{EF} = P - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{H} \cdot \Delta N \cdot (A \cdot d_c - E \cdot d_c) \quad \dots (7)$$

が得られ、右辺第二項が柱軸力の変動により生じる影響を表現している。

式(7)より、例えば左右側柱柱脚の圧縮合力点位置が同

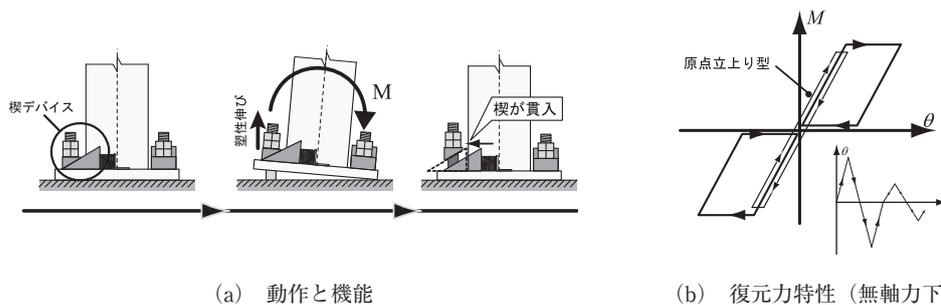


図 22 ノンスリップ型柱脚の機能動作と機能

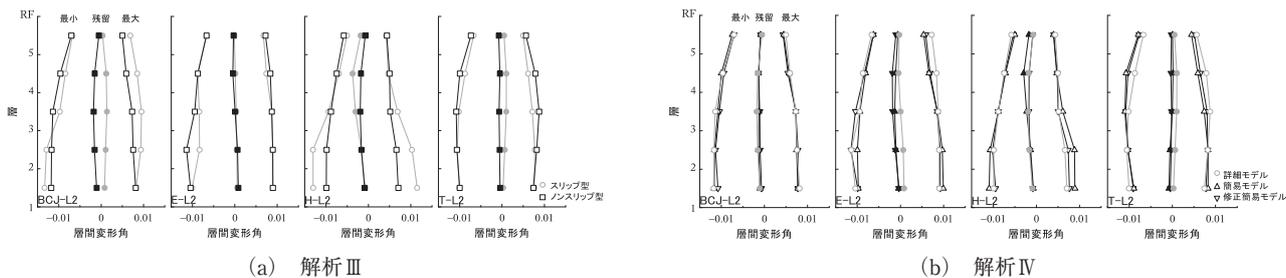


図 23 最大・最小・残留層間変形角分布 (ノンスリップ型)

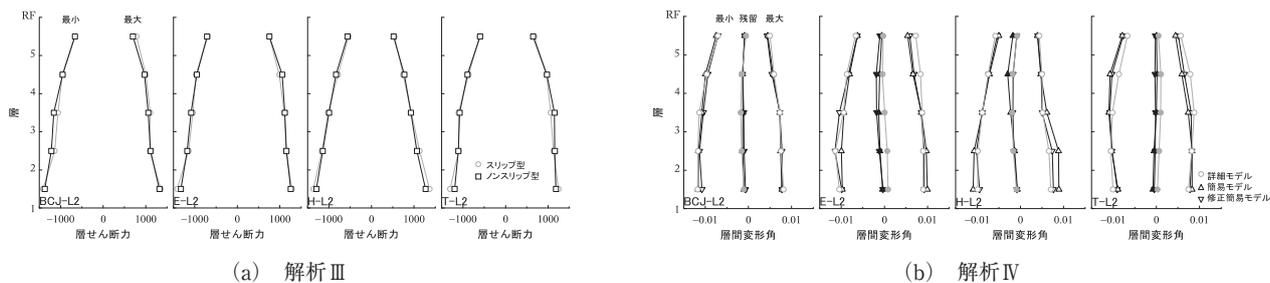


図 24 最大・最小層せん断力分布 (ノンスリップ型)

一であれば、変動軸力の影響を無視でき、前述の結果を裏付けしている。

また、圧縮合力点位置の移動による影響は、例えば 3 章の架構から、最も影響が大きくなる条件を抽出すると、

- ・圧縮軸力が低下したときにベースプレート面外変形が小さくなり圧縮合力点位置を  $d_c=900/2=450(\text{mm})$ 、圧縮軸力が増大したときにベースプレート面外変形が大きくなり圧縮合力点位置を  $d_c=550/2=275(\text{mm})$  と考える。

・第一層の階高は  $H=4,306(\text{mm})$

・図 18 より側柱のおよその柱変動軸力量を  $\Delta N=1,000(\text{kN})$

とすれば、式(7)より、

$$\sum Q_c = P - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{4,306} \cdot 1,000 \cdot (450 - 275) \approx P - 61(\text{kN})$$

であり、図 14 に代表される架構第一層の保有水平耐力 (1,000 (kN) 超) と比較すると、その影響は小さい。

### 5. ノンスリップ型柱脚に着目した解析結果と考察

ノンスリップ型柱脚は、図 22 に示す機能と原点立ち上

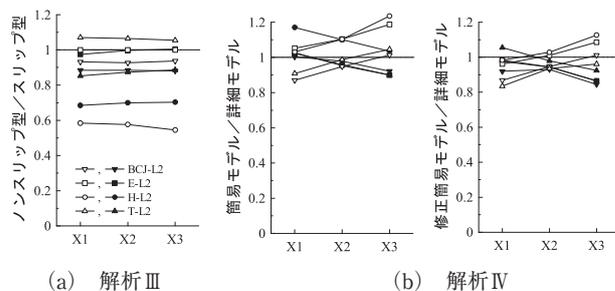


図 25 柱脚モデルの違いによるベースプレート最大回転角の比 (ノンスリップ型)

がり型復元力特性を有しており、繰り返し塑性化を伴う架構において、効率よく抵抗することは明らかである。

本章では、ノンスリップ型柱脚が設置された構造物の特徴と、その有用性について考察を行う。そのため、3 章に示した各条件を用い、かつアンカーボルトの詳細モデルおよび簡易モデルに塑性化しても原点から荷重が立ち上がる履歴を採用したモデルを用い、以下の 2 シリーズの解析を実施する。

- ・解析 III：アンカーボルトとなる軸バネに原点立ち上がり型復元力特性を与えることでノンスリップ型柱

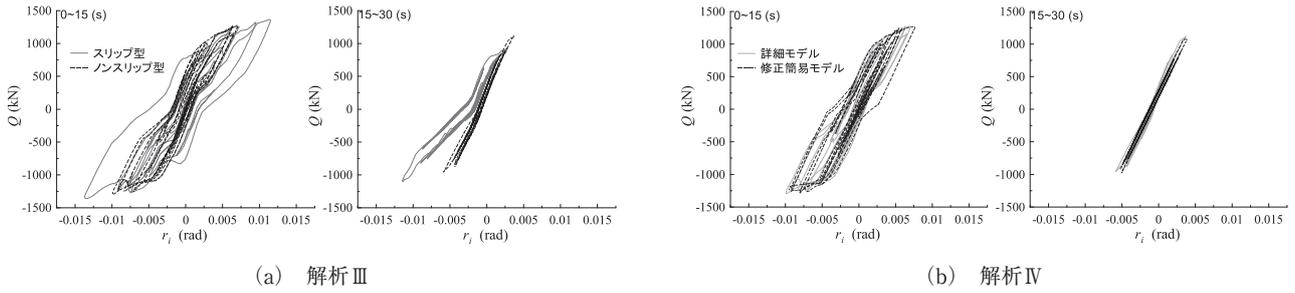


図 26 第一層  $Q$ - $r$  関係 (ノンスリップ型)



図 27 第一層  $r$  時刻歴 (ノンスリップ型)

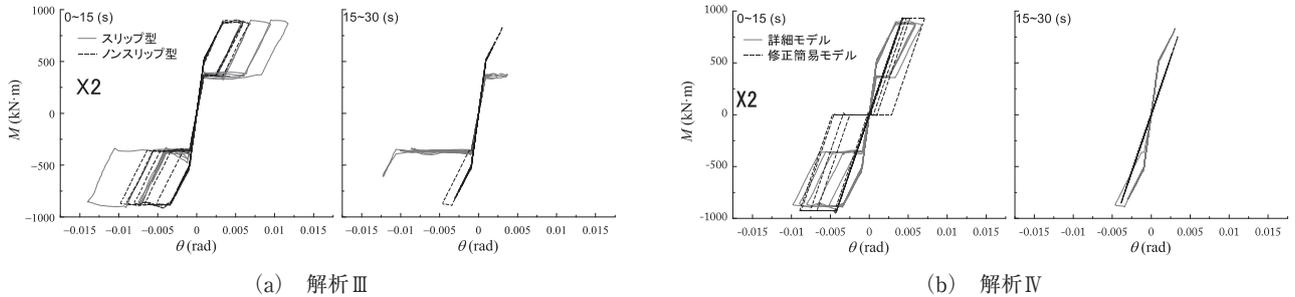


図 28  $M$ - $\theta$  関係 (ノンスリップ型)



図 29  $\theta$  時刻歴 (ノンスリップ型)

脚を表現し、水平方向の加速度 4 波を入力した解析を行う。これを、解析 I の詳細モデルから得られた露出柱脚（以後、スリップ型と記す）の結果と比較することでスリップ型の優位点を検討する。

- ・解析IV：簡易モデルおよび修正簡易モデルに原点立ち上がり型復元力特性を与えて水平方向の加速度 4 波を入力し、計 8 ケースの解析を行う。解析IIIで得られた、ノンスリップ型柱脚挙動の精度を検討する。

解析結果として、図 23 に最大、最小、残留層間変形角分布、図 24 に最大、最小せん断力分布、図 25 に柱脚のモデルの違いによるベースプレート最大回転角の比を、図 26～29 に H-L2 を入力した場合の第一層層せん断力  $Q$ -

層間変形角  $r$  関係、第一層層間変形角  $r$  時刻歴、柱脚曲げモーメント  $M$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係、ベースプレート回転角  $\theta$  時刻歴を示す。

各荷重-変形関係は、履歴形状を確認するため時間を 0～15(s)、15～30(s)に分けて示し、また、柱脚については代表値として中柱 X2 の履歴のみを示している。更に、簡易復元力特性モデルを用いた解析の履歴などには、修正簡易モデルを代表値として示している。

### 5.1 ノンスリップ露出柱脚を有する構造物の応答

図 23(a) より、ノンスリップ型とスリップ型は、E-L2 や T-L2 では大きな違いは見られないが、BCJ-L2 や H-L2 では特に第一層、第二層の最大・最小応答が低減している。

まず、ノンスリップ型の履歴形状はスリップ型のそれと同一であり、初期降伏時のサイクルで最大応答が決定した

E-L2 や T-L2 では、最大応答に大きな違いは現れない。しかし、図 28(a), 29(a)にあるように、柱脚塑性化以後も載荷時にスリップ現象が現れない挙動は構造物として明らかに有利であり、繰り返し塑性変形が生じるような応答時には変形の低減に寄与することが確認できた。図 26(a), 図 27(a)の第一層にも同様の挙動が見られ、これが H-L2 や BCJ-L2 の第一、二層の最大応答を低減したメカニズムである。

第三層以上では、柱脚の違いによる履歴形状の差異は出てこないで、図 24 に示した最大層せん断力の分布にはほぼ依存する。

また、図 25(a)の柱脚でも、ノンスリップ型は回転角を大きく低減する結果も得られている。

ただし、図 23(a)の残留層間変形角に着目すると、比較的ノンスリップ型柱脚の値が小さめとなっているものの、劇的な違いは見られない。これは、スリップ型であっても、付加曲げ抵抗により構造物変形を戻そうとする効果が発揮されるためであると考えられる。

## 5.2 簡易復元力特性モデルによるノンスリップ型柱脚の精度検討

図 23(b)より、いずれの結果も簡易モデルは整合する結果を示しており、特に  $K_S$  とした場合には精度が高いことがわかる。ここで、図 28(b)に着目すると、付加曲げ抵抗が表現されていないために履歴形状全体が完全に一致しているわけではないことがわかる。しかし、同図の 15~30(s)では詳細モデルがスリップを生じることのない弾性 bi-linear 型に対して簡易モデルの linear 型により追跡している状態は、図 16(a)に示したスリップ型の場合と比較して明確に精度が向上している。結果、 $\theta$ 時刻歴、 $Q$ - $r$ 関係、 $r$ 時刻歴のいずれも、簡易モデルによる精度はスリップ型と比較して向上している。以上より、ノンスリップ型露出柱脚とすることで、繰り返し載荷下の履歴形状が単純化し、これを簡易モデルで表現することが比較的容易であるため、簡易モデルによるノンスリップ型柱脚を有する架構の応答精度は、スリップ型と比較して向上する。

## 6. 簡易復元力特性モデルの弾性回転剛性について

簡易復元力特性モデルの弾性回転剛性として、 $K_A$  および  $K_S$  を採用している。

図 9(a)より、本解析では  $K_S$  は  $K_A$  の 1.3 倍~1.5 倍程度の値を有しており、これが図 10(a), 11(a), 23(b), 24(b)に示す弾塑性領域の最大層間変形角分布および最大層せん断力分布に与える影響は小さい。ただし、弾性時の応答は  $K_S$  の整合が良く、また、図 13(a), 25(b)のベースプレート最大回転角を見ると、若干ではあるが  $K_S$  の精度が高いことが分かる。

## 7. まとめ

軸バネにより露出柱脚挙動（フラグシップ型）を表現した詳細モデルを真の解に据えて、詳細モデルと簡易復元力特性モデルを設置した 5 層架構の地震応答解析を実施し、以下の知見を得た。

1. 構造物自重により柱脚部に付加曲げ抵抗が生じる場合、柱脚降伏後に簡易復元力特性モデルの第一層層間変形角や柱脚回転角の精度が低下する。これは、簡易復元力特性モデルと詳細モデルの間で、付加曲げ抵抗分の耐力差異を生じるためである。
2. 1 の知見に起因して、本解析では柱脚降伏後の応答で最大値が決定した Hachinohe において、簡易復元力特性モデルの最大層間変形角分布は 3 割程度の過大な値を示した。  
しかし、全体の層間変形角応答分布は概ね一致し、かつ安全側に評価する。これより、簡易復元力特性モデルを用いた設計が耐震安全性を判断する上では簡便かつ有効であることを確認した。
3. 第一層の層間変形角などが精度よく対応する場合も、側柱の柱脚では、変動軸力による柱脚耐力の増減で、簡易復元力特性モデルのベースプレート最大回転角は 1 割程度の誤差が生じた。
4. 側柱で発生する変動軸力による柱脚の耐力増減が、構造物第一層の層間変形角、および構造物第一層上梁の部材角に与える影響は小さい。

次に、ノンスリップ型柱脚を設置した場合の地震応答解析も実施し、以下の知見を得た。

5. ノンスリップ型柱脚は柱脚が塑性化した後の応答を低減できるため、一般的なアンカーボルト降伏型露出柱脚と比較して、第一層層間変形角およびベースプレート回転角の回転角振幅を小さくする。  
さらに、繰り返し塑性化が生じる場合（本解析では Hachinohe が該当）においては、一般的なアンカーボルト降伏型露出柱脚と比較して、第一層最大層間変形角およびベースプレート最大回転角も低減できる。
6. ノンスリップ型柱脚は、弾塑性領域の履歴形状が単純化でき、それは線形で表現される簡易モデルと親和性が高い。このため、簡易モデルによるノンスリップ型柱脚を有する架構は一般的なアンカーボルト降伏型露出柱脚と比較して、変位応答の精度が向上する。

## 参考文献

- [1] 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.46B，pp.657-665，2000.3.
- [5] 河野昭雄，松井千秋：柱脚の復元力特性の違いがよ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.
- [7] 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.
- [8] 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰：アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力特性－無軸力下の場合のセルフセンタリング性能－，日本建築学会構造系論文集，第621号，pp.155-162，2007.11.
- [9] 澤田樹一郎，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰，山西央朗：地震応答解析によるノンスリップ型露出柱脚付鋼構造骨組のセルフセンタリング性能と累積損傷応答評価，日本建築学会構造系論文集，第73巻第629号，pp.1151-1157，2008.7.
- [10] 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松村高良，松尾彰：2軸曲げを受ける従来型およびノンスリップ型露出柱脚に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第73巻第634号，pp.2223-2230，2008.8.
- [11] 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.
- [12] 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ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性と簡易履歴モデル，日本建築学会構造系論文集，第77巻第681号，pp.1755-1762，2012.11.
- [13] 山西央朗，玉井宏章，高松隆夫，松尾彰：露出柱脚の弾性回転剛性について－アンカーボルト降伏先行型について－，日本建築学会構造系論文集，第73巻第624号，pp.317-324，2008.2.
- [14] 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，多田元英，松陰知明：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.

