

# 楔デバイス付接合部を有する鋼構造架構の地震応答解析

高松 隆夫\*・澤田 樹一郎\*\*・山西 央朗\*\*\*・田邊 真二郎\*\*\*\*

(平成23年10月27日受付)

## Earthquake response analysis of steel frame with wedge-device connection

Takao TAKAMATSU, Kiichirou SAWADA, Teruaki YAMANISHI and Shinjiro TANABE

(Received Oct. 27, 2011)

### Abstract

Earthquake response analysis of steel frames with wedge-device connections were carried out, and it was shown that non-slip-type restoring force characteristics of the connections worked upon reducing the residual horizontal displacements of the frames after an earthquake oscillation. The number of analytical models was small and so application area of the conclusions was limited. The analytical study on the influence of wedge-device beam joints on damage distribution of the frames to an earthquake was not conducted. In this paper, analytical models are employed introducing column-bases and beam connections as variables and earthquake response analysis of the models is carried out to clarify the influence of the connections on seismic behavior of the frames.

**Key Words:** non-slip-type restoring force characteristics, wedge-device connection, earthquake response analysis

### 1. はじめに

著者等はこれまでに、鋼構造架構の各接合部（柱脚部・柱梁接合部）において、楔デバイス付接合部を導入すれば、原点立上り型および変形角を0に戻す過程でエネルギーを必要としない復元力特性を付与できることを載荷実験によって示してきた（以降は、柱脚部においてはノンスリップ型露出柱脚、柱梁接合部においては楔デバイス付柱梁接合部と呼ぶ<sup>2-8)</sup>。

また、楔デバイス付接合部を導入した鋼構造架構について、地震応答解析を行い、楔デバイス付接合部を導入することで、架構の地震後残留変位をほぼ0にできることを明らかにしている<sup>9)</sup>。

更に、柱梁接合部において、ブラケット方式を採用し、ボルト接合部位置をスパン中央方向に移動させることで、

ボルト接合部の接合部係数を0.8程度しながらも、梁降伏型架構と同等の保有水平耐力を得られる工法を提案している（以降は、楔デバイス付梁継手と呼ぶ。また、楔デバイス付接合部とは、楔デバイスを用いたエンドプレート形式接合部の総称である<sup>10)</sup>。

一方で、既報の地震応答解析における解析対象としては、楔デバイス付接合部を各接合部もしくは柱脚部のみに導入した架構と、従来型架構（柱脚部をアンカーボルト降伏型露出柱脚もしくは固定柱脚とし、柱梁接合部を剛接合とした梁降伏型架構）とについて比較・検討を行っている<sup>9-11)</sup>。

しかしながら、柱梁接合部形式を変数とした地震応答解析は行っていない。また、楔デバイス付接合部を導入することで、架構の損傷分布に与える影響についても、十分な解析的検証は行われていない。

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 鹿児島大学大学院理工学研究科

\*\*\* 東京工業大学都市地震工学センター

\*\*\*\* 広島工業大学大学院建設工学専攻

本論文では、楔デバイス付接合部が鋼構造架構に与える地震時挙動特性（特に、残留変位や各層の損傷分布）を明らかにすることを目的とする。

方法としては、6層3スパン鋼構造架構において、柱脚部形式・柱梁接合部形式を変数とした解析モデルを作製し、地震応答解析結果を示す。

## 2. 楔デバイス付接合部

図1に楔デバイスを、図2に楔デバイス付接合部（楔デバイス付梁継手・ノンスリップ型露出柱脚）を、それぞれ、示す。

楔デバイス付接合部とは、エンドプレート形式の接合部において、ナット-エンドプレート間に楔デバイスを設置するものである。また、接合部係数を0.8程度とすることで、接合ボルト（エンドプレートを緊結するボルトを指し、以降は、ボルトと記す）のみを降伏させ、母材（柱・梁・ブラケット）を弾性状態を保つ。このため、残留変形を生じない機構となっている。

作動概念としては、楔デバイス付接合部に曲げモーメントが作用すると、ボルトが伸び変形し、降伏して塑性伸びが生じる。ここで、除荷によりエンドプレート回転角が0に戻る場合、ナット-エンドプレート間に隙が生じるが、この隙にはばねの復元力によって楔を貫入させることで隙が消滅する。このため、再び曲げモーメントが作用した

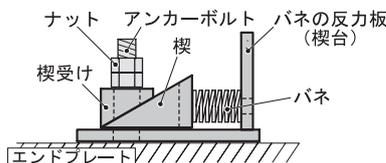
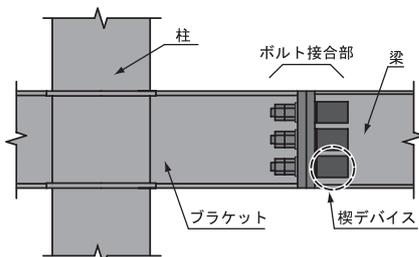
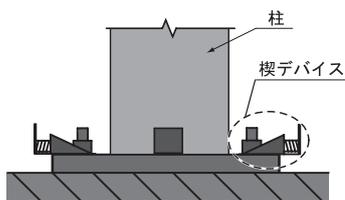


図1 楔デバイス



(a) 楔デバイス付梁継手



(b) ノンスリップ型露出柱脚

図2 楔デバイス付接合部

場合においても、スリップ現象が起こらず、即座にボルトが抵抗する。

## 3. 地震応答解析

本解析では、6層3スパンラーメン架構について、柱脚部形式と柱梁接合部形式を変数とした解析モデルを作製し、数値解析を行う。

### 3.1 解析手法

地震応答解析には、「CLAP.f<sup>12,13)</sup>」を原点立上り型復元力特性を有する回転ばねが利用できるようにコード修正したものを用いる<sup>9-11)</sup>。部材の塑性化は、一般硬化ヒンジ法により考慮する。

本解析例では、ニューマークβ法のβ値0.25、数値積分時間間隔1/200秒、減衰のタイプは瞬間剛性比例減衰とし、一次減衰定数は、一般的な構造物を想定して0.02としている。また、部材の応力度-ひずみ関係は、bi-linear型（降伏後剛性比1/50）としている。

入力波には、EL-centro波と八戸波とTAFT波を、それぞれ、100kine級となるように最大加速度を基準化した波を用いる。

### 3.2 ボルト接合部の評価式

図3に抵抗機構を、図4にボルト接合部の復元力特性モデルを、図5に楔デバイス付接合部の寸法値概要を、それぞれ、示す。

本ボルト接合部に曲げモーメントが作用した場合、エンドプレート端部を圧縮合力点位置とし、最外列および、

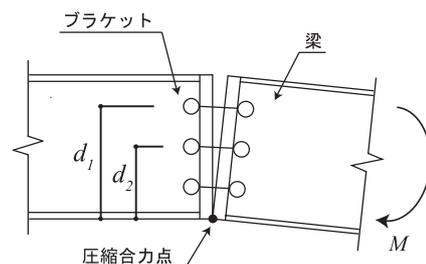


図3 抵抗機構

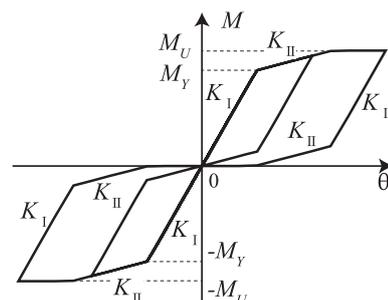
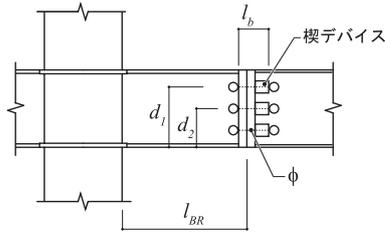
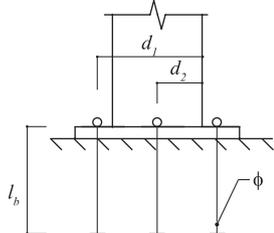


図4 復元力特性モデル



(a) 楔デバイス付梁継手



(b) ノンスリップ型露出柱脚

図5 楔デバイス付接合部

中央列のボルトが引張抵抗する。尚、最内列のボルトは、最外列と比較して、5%程度の回転剛性しか有していないため、考慮しない<sup>14)</sup>。また、最外列が降伏した時点を降伏時、中央列が降伏した時点を最大耐力発揮時と考え、それぞれの時点のボルト接合部曲げモーメントを、降伏曲げモーメント、最大曲げモーメントとする。

地震応答解析では、ボルト接合部を回転ばねとし、それぞれの特性値は、以下の式を用いて算出した。

$$K_1 = \frac{E \cdot n_i \cdot A \cdot d_i^2}{R \cdot l_b} \quad \dots (1)$$

$$M_{Y_i} = n_i \cdot A \cdot \sigma_Y \cdot d_i \quad \dots (2)$$

$$K_I = K_1 + K_2 \quad \dots (3)$$

$$K_{II} = K_2 \quad \dots (4)$$

$$M_Y = M_{Y1} + \frac{d_2}{d_1} M_{Y2} \quad \dots (5)$$

$$M_U = M_{Y1} + M_{Y2} \quad \dots (6)$$

ここに、 $M_{Y_i}$ :  $i$ 列目のボルトによる降伏曲げ耐力、 $n_i$ :  $i$ 列目のボルト本数、 $A$ : ボルトの断面積、 $\sigma_Y$ : ボルトの降伏応力度、 $d_i$ : 圧縮合力点位置から  $i$ 列目のボルト中心までの距離、 $K_i$ :  $i$ 列目の弾性回転剛性、 $E$ : ヤング係数、 $R$ : ボルト以外の要素の弾性変形を考慮した低減係数 (=2)<sup>1)</sup>、 $l_b$ : ボルトの有効長さ (ナット間距離)、 $K_I$ : 弾性剛性、 $K_{II}$ : 2次勾配、 $M_Y$ : ボルト接合部の降伏曲げモーメント、 $M_U$ : ボルト接合部の最大曲げモーメントである。また、最外列を1列目、中央列を2列目とする。

次いで、エンドプレート間に滑りが生じないように、必要静止摩擦係数  $n\mu$  を検討する。梁せん断力と、ボルトの曲げに対する抵抗で発生するエンドプレート間の接触反力との関係から、必要静止摩擦係数  $n\mu$  は以下の式で表現できる。

$$n\mu = \frac{2}{B \cdot L} \cdot \frac{d_1^2 + d_2^2}{d_1 + d_2} \quad \dots (7)$$

ここに、 $B \cdot L$ : ボルト接合部間の距離である。

式 (7) より、一般的なディテールであれば、 $n\mu \leq 0.4$  となり、エンドプレート間に発錆処理等を施すことで、地震時に滑りは生じない事が分かる。

### 3.3 解析対象架構

図6に解析モデルを、表1に部材リストを、表2に回転ばね特性値を、表3に各接合部寸法値を、表4に解析モデルの各接合部形式と後述する1次固有周期を、それぞれ、示す。

尚、図6 (a), (b) には、柱梁接合部を剛接合としたモデルを、図6 (c) には、柱梁接合部を楔デバイス付梁継手した解析モデルを示している。

架構は、柱に角形鋼管を、梁に細幅H形鋼を用いて、各接合部を剛とした場合、1次設計用地震荷重と鉛直荷重を

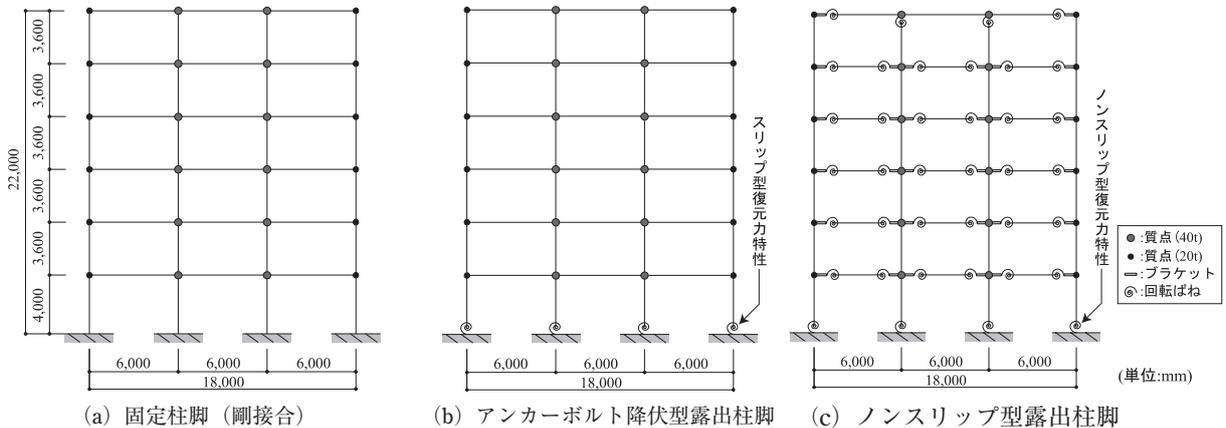


図6 解析モデル

表1 部材リスト

層	種別	断面寸法	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$I_x$ (mm <sup>4</sup> )	$Z_p$ (mm <sup>3</sup> )	$M_p$ (kNm)
1,2	柱	□-450×22	325	205,000	$1.03 \times 10^9$	$5.49 \times 10^6$	1,784
3,4		□-450×19	325	205,000	$9.22 \times 10^8$	$4.88 \times 10^6$	1,586
5,6		□-450×16	325	205,000	$8.06 \times 10^8$	$4.23 \times 10^6$	1,375
2,3	梁	H-600×200×11×17	325	205,000	$7.56 \times 10^8$	$2.90 \times 10^6$	943
	ブラケット	BH-600×200×16×25	325	205,000	$1.05 \times 10^9$	$3.50 \times 10^6$	1,138
4,5	梁	H-500×200×10×16	325	205,000	$4.68 \times 10^8$	$2.16 \times 10^6$	692
	ブラケット	BH-500×200×16×22	325	205,000	$6.29 \times 10^8$	$2.52 \times 10^6$	819
6,R	梁	H-450×200×9×14	325	205,000	$3.29 \times 10^8$	$1.65 \times 10^6$	536
	ブラケット	BH-450×200×12×19	325	205,000	$4.23 \times 10^8$	$1.88 \times 10^6$	611

$\sigma_y$ : 降伏応力度  $E$ : ヤング係数  $I_x$ : 断面2次モーメント  $Z_p$ : 塑性断面係数  $M_p$ : 全塑性モーメント

表2 回転ばね特性値

脚 部	$K_I$ (kNm/rad)	$K_{KII}$ (kNm/rad)	$M_Y$ (kNm)	$M_U$ (kNm)
柱脚部	$1.73 \times 10^5$	$2.12 \times 10^4$	1,219	1,397
2,3層柱梁接合部	$1.82 \times 10^5$	$8.45 \times 10^4$	575	660
4,5層柱梁接合部	$1.23 \times 10^5$	$5.06 \times 10^4$	423	492
6,R層柱梁接合部	$8.60 \times 10^4$	$3.55 \times 10^4$	330	384
R層柱頭部	$4.39 \times 10^5$	$5.37 \times 10^4$	892	1,022

表3 各接合部寸法値

部 位	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$l_b$ (mm)	$\phi$	$l_{BR}$ (mm)
柱脚部	525	225	1,040	M52	-
2,3層柱梁接合部	440	300	300	M45	850
4,5層柱梁接合部	390	250	300	M42	800
6,R層柱梁接合部	350	225	300	M39	800
R層柱頭部	525	225	300	M48	-

$l_{BR}$ : ブラケット材長,  $\phi$ : ボルト呼び径

表4 解析モデルと1次固有周期

柱脚形式	柱梁接合部形式	1次固有周期 (sec)
R type	R type	1.29
	W type	1.35
S type	R type	1.36
	W type	1.42
N type	R type	1.36
	W type	1.42

R type: 剛接合, S type: アンカーボルト降伏型露出柱脚

N type: ノンスリップ型露出柱脚, W type: 楔デバイス付梁継手

作用させた時に全層 1/200 rad 以内に収まり、梁崩壊型を示す架構である。構成要素としては、柱には2節点ビーム要素、梁には節点に質量を有する2節点ビーム要素を用いる。また、各質点は、事務所ビルを想定して算出している。

解析モデルは各接合部形式を変数としており、柱脚部には、固定柱脚(剛接合(Rtype))、アンカーボルト降伏型露出柱脚(Stype)、ノンスリップ型露出柱脚(Ntype)を、柱梁接合部には剛接合(Rtype)、楔デバイス付梁継手(Wtype)を、それぞれ用いた、計6種類のモデルを作製する。

Stypeの柱脚部には、スリップ型復元力特性を有する回転ばねを、Ntypeの柱脚部には、原点立上り型復元力特性を有する回転ばねを、Wtypeの柱梁接合部には、原点立上り型復元力特性を有する回転ばねとブラケットとを配置する。また、ブラケットはWtypeにのみ配置するものとし、Rtypeの梁は均一断面とする。

尚、Wtype最上階の中柱接合部については、他の柱梁接合部とは異なり、柱頭部に回転ばねを配置している。これは、一般的な梁降伏型架構において、節点振り分け法によって塑性ヒンジ生成位置を考慮した場合、柱頭部に塑性ヒンジが生成されるためである。

また、スラブの合成効果等による耐力・梁の曲げ剛性の増加は考慮せず、純鉄骨架構としている。

#### 4. 結果と考察

表4に解析モデル毎の1次固有周期を、図7には最大層間変形角 $_{max}R_i$ を、図8には地震後残留変位 $_{last}\delta_i$ を、図9にはエネルギー吸収量を、それぞれ、示す。

尚、図9のエネルギー吸収量は、各層の層せん断力-層間変形角関係の履歴面積から算出している。以降は、これを損傷量として取り扱う。

表4より、剛接合となる箇所が増すことで、1次固有周期が短くなる傾向となっており、柱脚部と、柱梁接合部を剛接合としたR-Rtypeが最も短い固有周期となっている。

図7より、柱梁接合部に楔デバイス付梁継手を導入した架構の最大層間変形角は、剛接合とした架構とを比較して、EL-centro波と八戸波においては小さく、TAFT波に

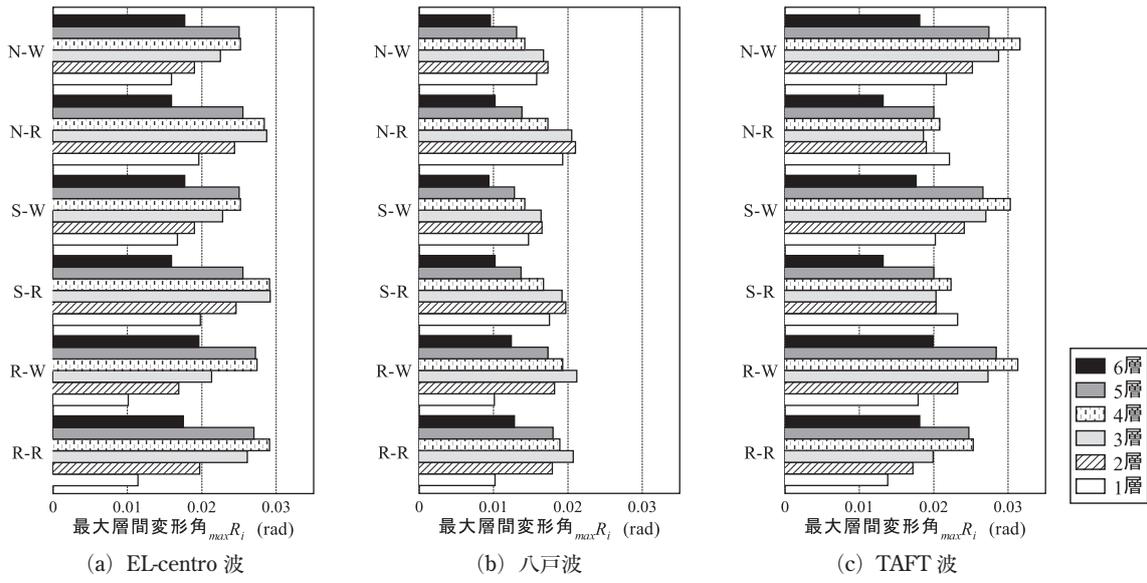


図7 最大層間変形角  $max R_i$

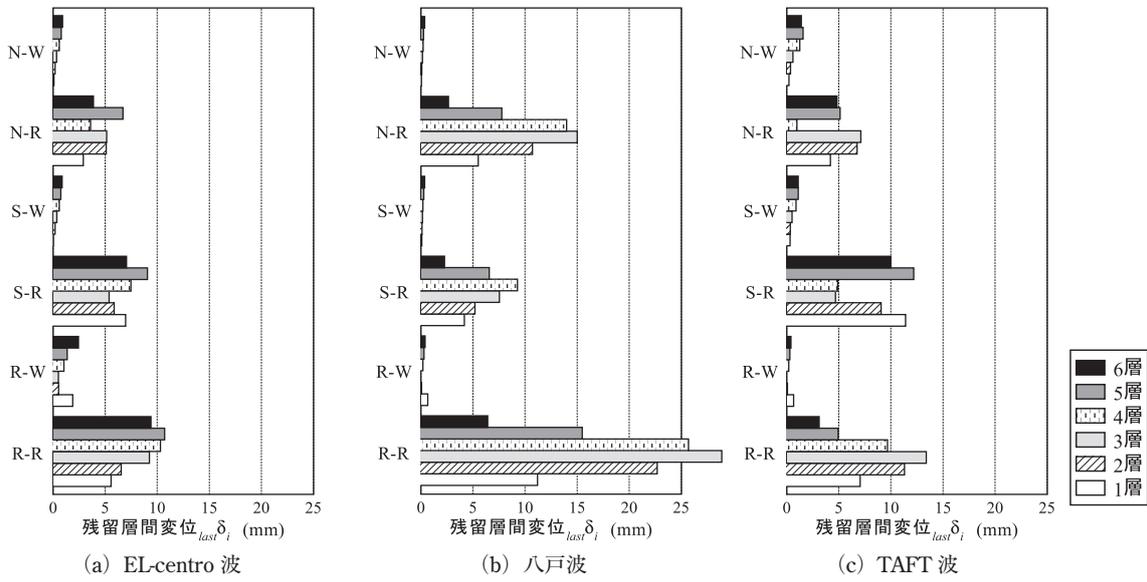


図8 地震後残留変位  $last \delta_i$

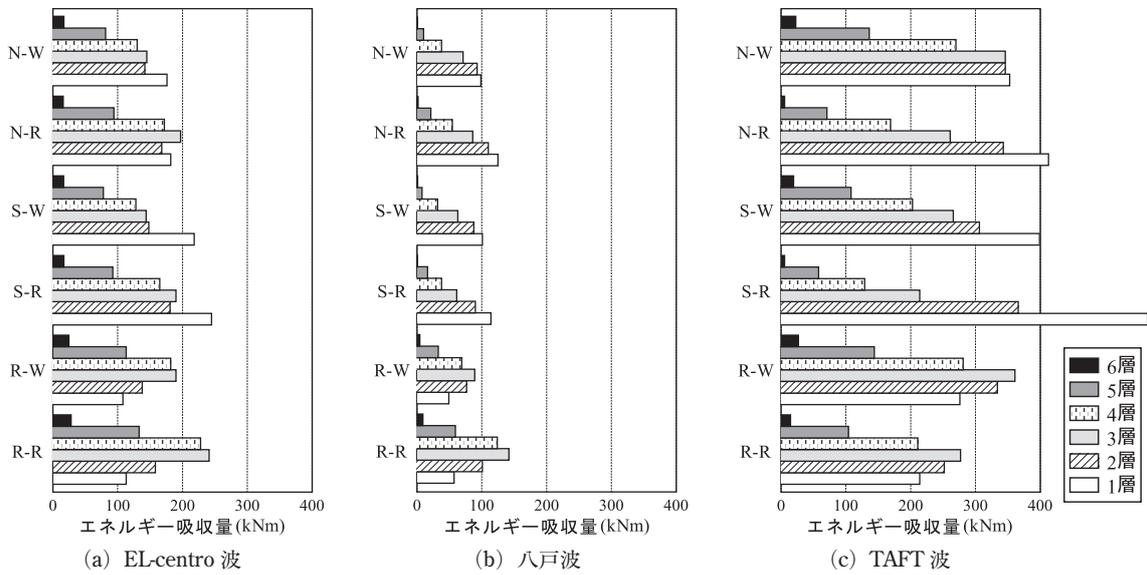


図9 エネルギー吸収量

においては大き目になっていることがわかる。これは、各接合部の復元力特性の違いによるものである。剛接合の場合、塑性ヒンジの復元力特性は完全弾塑性型であるため、応答値が一方に漸増する場合がある<sup>10)</sup>。また、最大層間変形角が生じる直前に、その反対方向に塑性変形を生じていた場合には、最大層間変形角が減少する。一方、楔デバイス付接合部の復元力特性は、原点立上り型であり、応答値は常に原点から生じる。このため、柱梁接合部に楔デバイス付梁継手を導入した架構と、剛接合とした架構の最大層間変形角を比較すると、地震波によって大き目になる場合も小さ目になる場合もある。

図8より、楔デバイス付梁継手を導入した架構の残留変位は、ほぼ0になっていることがわかる。また、柱脚部が剛接合であるR-Wtypeにおいても、1層目の残留変位が低減していることがわかる。これは、1層目の損傷として、柱脚部よりも柱梁接合部の方が著しく大きく、柱脚部の復元力特性が残留変位に与える影響が比較的少なかったためである。

図9より、地震波毎に総損傷量が大きく異なっているが、解析モデルの損傷分布傾向は、概ね同様であることがわかる。

柱脚形式毎に比較すると、Rtypeにおいては、下層の損傷が少なく、中間層の損傷が大きくなっている。これは、Rtypeの柱脚部では、柱にヒンジができるため、半剛接合であるStype、Ntypeよりも耐力・剛性が高いことに起因している。また、Stypeでは、1層目に損傷が集中していることがわかる。これは、柱脚部の復元力特性がスリップ型であるため、柱脚部がスリップしている間、1層目の剛性率が著しく低下したためだと考えられる。一方、Ntypeでは、上述のRtype、Stypeにみられた損傷集中傾向が緩和されていることがわかる。

柱梁接合部毎に比較すると、Wtypeの総エネルギー吸収量は、Rtypeよりも低目となっているが、損傷分布の傾向は概ね同様となっていることがわかる。総エネルギー吸収量が低目となっている原因としては、Wtypeは原点立上り型復元力特性であるため、Rtypeの完全弾塑性型復元力特性と比較すると、履歴面積が生じる象限が半分であるためだと考えられる。

## 5. 結論

本論文では、楔デバイス付接合部を導入した鋼構造架構の地震応答解析を行い、架構の地震時挙動の特徴を明らかにした。得られた知見を、以下に示す。

1) 楔デバイス付梁継手を導入した架構は、柱梁接合部を剛接合とした架構の最大層間変形角を比較すると、地震波によって、大小関係が変化する。しかしながら、最大層

間変形角が大き目になる場合においても、地震後残留変位を大幅に低減できる。

2) 柱脚形式が損傷分布に与える影響として、アンカーボルト降伏型露出柱脚は1層に、固定柱脚では中間層に損傷集中する傾向がみられるが、ノンスリップ型露出柱脚を導入することで、損傷集中が緩和する。

尚、本研究で提案・検討している接合部は、エンドプレート間で接触・離間が発生する接合形式である。このため、床スラブの影響や、柱の拘束効果による圧縮軸力<sup>15)</sup>が生じ、ボルト接合部耐力の上昇や母材(梁・ブラケット)の降伏曲げモーメントが低下することが考えられる。その場合、母材が降伏・塑性変形することで、崩壊機構が変化する可能性があるが、本論文では、これらを考慮できていない。

今後、上述の影響を考慮した検討を行い、更に、一般的な復元力特性モデルの定式化を行って、数値解析等により楔デバイス付接合部の有効性を明らかにしていく予定である。

## 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されました。

## 文 献

- 1) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技法堂出版，1985.3.
- 2) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI: Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 942-961, 2005.
- 3) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗：ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，構造工学論文集，Vol. 51 B, pp. 293-302, 2005.4.
- 4) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松尾彰：ノンスリップ型露出柱脚のセルフセンタリング性能に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp. 173-180, 2005.11.
- 5) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 白木剛, 多田元秀：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.
- 6) 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.

- 7) 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, 2008.12.
- 8) 高松隆夫, 玉井宏章, 山石健司, 山西央朗: エンドプレート形式ト字型柱梁接合部のセルフセンタリング性能, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp. 237-244, 2008.11.
- 9) 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 田邊真二郎, 山西央朗: 楔デバイス付柱梁接合部を有する架構の地震後残留変位, 鋼構造年次論文報告集, 第18号, pp. 47-54, 2010.11.
- 10) 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 田邊真二郎, 山西央朗: 楔デバイス付接合部を有した架構の保有水平耐力と最大層間変形角, 鋼構造年次論文報告集, 第19号, No. 112
- 11) 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629号, pp. 1151-1157, 2008.7
- 12) 小川厚治, 多田元英, : 柱・はり接合部変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第17回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集, pp. 79-84, 1994.12
- 13) 多田元英: CLAPf 利用説明書・解析方法説明書, 鋼材倶楽部
- 14) 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.
- 15) 吉敷祥一, 山田哲: 高力ボルト半剛接合部に対する柱の拘束効果に関する基礎検討, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp. 81-86, 2009.11.