

楔デバイス付柱梁接合部を有する多層多スパン鋼構造骨組の数値解析

高松 隆夫*・澤田 樹一郎**・玉井 宏章*・山西 央朗***
田邊 真二郎****・松尾 彰**

(平成22年11月8日受付)

Numerical analysis of multi-story-multi-layer steel-structure with wedge-device beam-to-column connection

Takao TAKAMATSU, Kiichirou SAWADA, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI,
Shinjirou TANABE and Akira MATSUO

(Received Nov. 8, 2010)

Abstract

Beam-to-column connections with a wedge device show linear-from-origin-type restoring force characteristics and can possess self-centering capability that reduces residual horizontal displacements of a structure acted by an earthquake force. The connection with the wedge device can be used at an outer column, but it can hardly to be applied to an inner column. An numerical-analytical study on frame with wedge-device beam-to-column connection was carried out to clarify deformation behavior of the multi-story structure. The analysis results showed that the reduced residual horizontal displacement was after the ground motion.

Key Words: non-slip-type resotoring force characteristics, wedge-device connection, Analytical study

1. はじめに

著者等はこれまでに、エンドプレート形式の接合部(柱脚部・柱梁接合部)において、楔デバイスを設置することで、原点立上り型および原点を指向する復元力特性を付与できることを示してきた¹⁻⁶⁾(以降、これらを楔デバイス付接合部と記す)。また、鋼構造架構の地震応答解析を行い、各接合部に楔デバイス付接合部を導入すれば、地震後残留変位をほぼ0にできることを、数値解析により明らかにしている⁸⁾。

しかしながら、楔デバイス付接合部は、構造部材を弾性状態に保つため、母材(柱・梁)よりも耐力を低目にする必要があり、架構の耐力・弾性剛性が、一般的な梁崩壊型架構より低目となる。このため、構造物に導入した場合、

最大層間変形角が大き目となるという問題点があった。

一方、柱梁接合部において、ボルト接合部の位置を、梁中央方向へ移動させれば、ボルト接合部の耐力を変えることなく、架構の耐力・弾性剛性を増加できることを明らかにしている⁷⁾。

そこで、本論文の目的として、ボルト接合部位置を調節した楔デバイス付柱梁接合部を導入することで、地震後残留変位を0とすることができ、更に、最大層間変形角を一般的な架構と同程度に抑えられる構造物が実現可能なことを示す。方法としては、ボルト接合部の位置を調節し、一般的な梁崩壊型架構と同等の保有水平耐力を有する楔デバイス付柱梁接合部を設計し、その特性を有した回転ばねを導入した鋼構造骨組の地震応答解析を行うものとする。また、比較のため、ボルト接合部位置を調節しない楔デバイ

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島大学大学院社会環境システム専攻

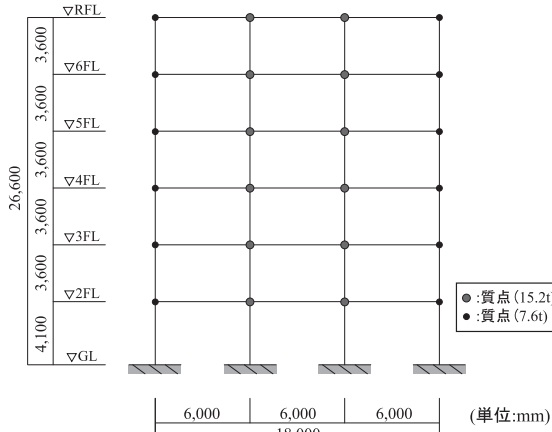
*** 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

**** 広島工業大学大学院建設工学専攻

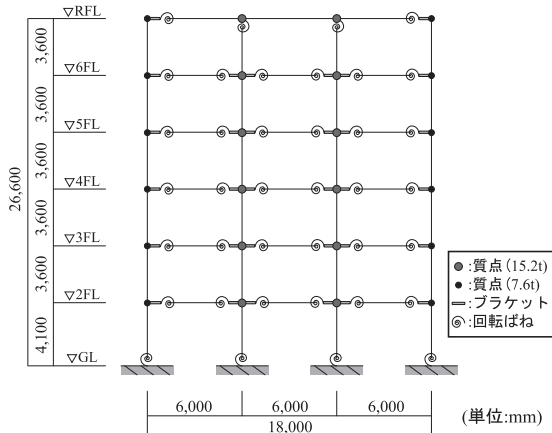
表1 部材の断面性能

| 層 | 種別 | 断面寸法 | σ_y (N/mm ²) | E (N/mm ²) | I_x (mm ⁴) | Z_p (mm ³) | M_p (kNm) |
|-----|-------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1,2 | 柱 | □-450x22 | 325 | 205,000 | 1.03x10 ⁸ | 5.49x10 ⁶ | 1784 |
| 3,4 | | □-450x19 | 325 | 205,000 | 9.22x10 ⁷ | 4.88x10 ⁶ | 1586 |
| 5,6 | | □-450x16 | 325 | 205,000 | 8.06x10 ⁸ | 4.23x10 ⁶ | 1375 |
| 2,3 | 梁 | H-600x200x11x17 | 325 | 205,000 | 7.56x10 ⁸ | 2.52x10 ⁶ | 819 |
| | ブラケット | BH-600x200x16x25 | 325 | 205,000 | 1.05x10 ⁹ | 3.50x10 ⁶ | 1138 |
| 4,5 | 梁 | H-500x200x10x16 | 325 | 205,000 | 4.68x10 ⁸ | 1.87x10 ⁶ | 608 |
| | ブラケット | BH-500x200x16x22 | 325 | 205,000 | 6.29x10 ⁸ | 2.52x10 ⁶ | 819 |
| 6,R | 梁 | H-450x200x9x14 | 325 | 205,000 | 3.29x10 ⁸ | 1.46x10 ⁶ | 475 |
| | ブラケット | BH-450x200x12x19 | 325 | 205,000 | 4.23x10 ⁸ | 1.88x10 ⁶ | 611 |

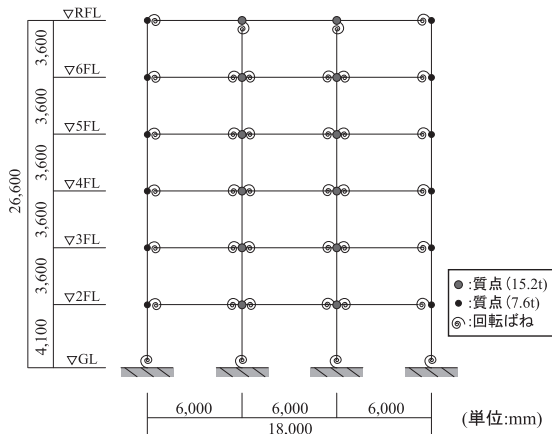
σ_y : 降伏応力 E : ヤング係数 I_x : 断面二次モーメント Z_p : 塑性断面係数 M_p : 全塑性モーメント



(a) N type



(b) B type



(c) NB type

図1 解析モデル

表2 楔デバイス付接合部特性値

| 部位 | K_I (kNm/rad) | K_{II} (kNm/rad) | M_Y (kNm) | M_u (kNm) |
|-----------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------|
| 柱脚部 | 1.85x10 ⁵ | 1.92x10 ⁴ | 1064 | 1359 |
| 2,3層柱梁接合部 | 2.55x10 ⁵ | 7.98x10 ⁴ | 385 | 646 |
| 4,5層柱梁接合部 | 1.65x10 ⁵ | 4.74x10 ⁴ | 294 | 480 |
| 6,R層柱梁接合部 | 1.16x10 ⁵ | 3.34x10 ⁴ | 229 | 375 |

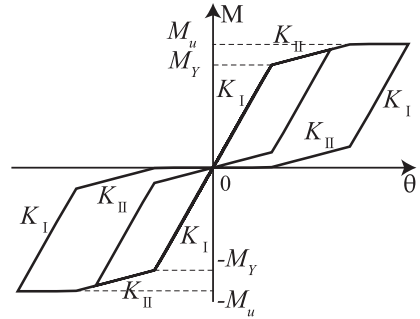
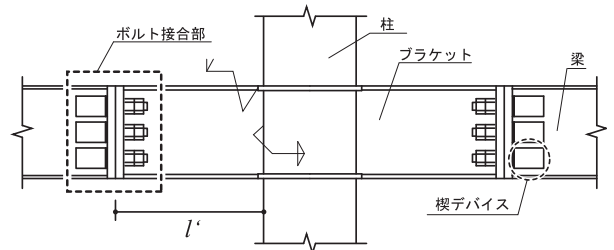
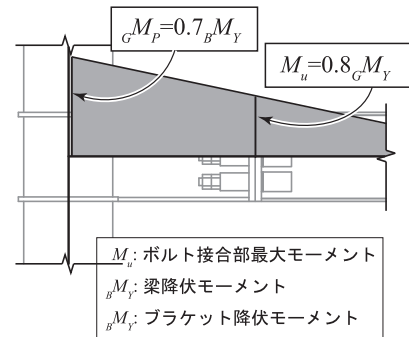


図2 復元力特性モデル



(a) 提案する楔デバイス付接合部 (4, 5層)



(b) 曲げ応力図

図3 提案する楔デバイス付接合部

ス付柱梁接合部を導入した骨組と、各接合部を剛接合とした骨組についても、同様の数値解析を行う。

2. 解析概要

本解析では、6層3スパンラーメン架構について、各接合部の接合方法を変数とした数値解析を行い、それぞれの解析結果を比較検討することで、楔デバイス付接合部を有した架構の性能を示す。

2.1 解析手法

地震応答解析には、「CLAP. f¹⁰」を楔デバイス付接合部の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⁷⁾。部材の塑性化は、一般化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-ひずみ度関係は、bi-linear型(降伏後剛性比1/50)としている。入力波には、標準3波(EL-centro NS, 八戸 NS, TAFT EW)を、それぞれ100kine級となるように基準化した波を用いる。

2.2 解析対象架構

図1、表1に、架構および部材の断面性能を示す。

架構は、柱に冷間成形角形鋼管を、梁にH型鋼を用いて、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作用させた時に全層1/200rad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。

柱脚部および柱梁接合部を剛としたN type、既報の楔デバイス付柱梁接合部として、ボルト接合部位置を一般的なものとするNB type^{5, 6)}、ボルト接合部位置を調節し、N typeと同程度の保有水平耐力を有するB typeの3つのモデルを作製する。NB type、B typeでは、原点立上り型復元力特性を有する楔デバイス付接合部の回転ばねを、図1に示すように各接合部に配置したものをモデルとする。

2.2 楔デバイス付接合部の設計

図2に楔デバイス付接合部の復元力特性モデルを、表2に各特性値を示す。

楔デバイス付接合部の設計には、母材(柱・梁)を弾性状態とするため、柱または梁に対して各接合部の最大耐力比が0.8倍程度となるように、以下の式を用いた⁷⁾。

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

$$M_{yi} = n_i \cdot A \cdot \sigma_y \cdot d_i \dots\dots\dots (2)$$

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

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

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

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

ここに、 M_{Yi} : i 列のボルトによる降伏曲げ耐力、 n_i : i

表3 各モデルの1次固有周期

| | N type | B type | NB type |
|-------------|--------|--------|---------|
| 1次固有周期(sec) | 0.86 | 0.878 | 0.991 |

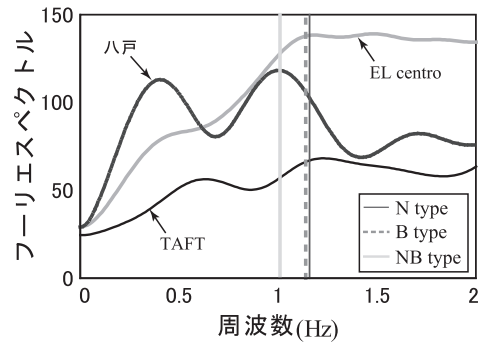


図4 入力時振動のフーリエスペクトル

列のボルト本数、 A : ボルトの断面積、 σ_y : ボルトの降伏応力度、 d_i : 圧縮合力点位置から i 列のボルト中心までの距離、 K_i : i 列の弾性回転剛性、 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)、 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 : 接合部の降伏曲げモーメント、 M_u : 接合部の最大曲げモーメントである。

また、設計条件として、以下の条件を満足するように接合部のディテール、寸法を決定した。

- ・原点を指向する復元力特性を付与するために、柱または梁断面図心上にボルトを有し、2列以上のボルトが抵抗するディテールにする。
- ・接合部の最大耐力 M_u は、以下の式を満足する。

$$M_u \cong 0.8 {}_c M_Y$$

ここに、 ${}_c M_Y$: 梁の降伏曲げモーメントである。

2.3 Btype 楔デバイス付柱梁接合部

図3に本論文で提案する楔デバイス付柱梁接合部と、その耐力関係を示した曲げ応力図を示す。

本機構としては、ボルト接合部を梁中央方向へ移動させるために、柱梁間にブラケットを設け、ブラケットと梁端部とをエンドプレート形式として接合する。更に、ブラケットの材長 l を調節することで、柱梁接合部の見かけの耐力を、梁の全塑性モーメントまで増加させるというものである(図3参照)。また、本機構では、ボルト接合部が塑性ヒンジとなるため、ブラケットに作用する最大曲げモーメントは、梁の全塑性モーメントとなる。このため、ブラケットの設計は、梁の全塑性モーメントに対して、弾性状態を保つよう設計する。また、梁からの応力伝播を考慮し、ブラケットの成は梁と同じものとする。

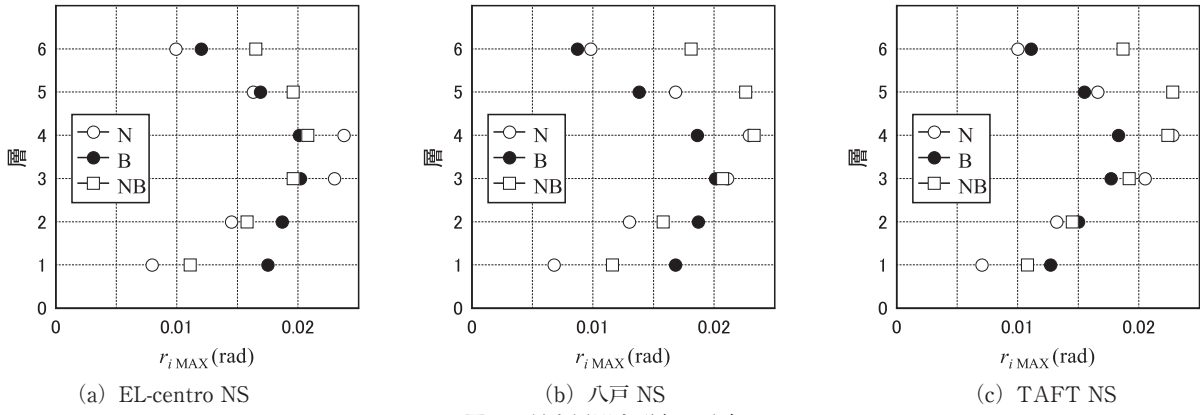


図5 最大層間変形角 r_i 分布

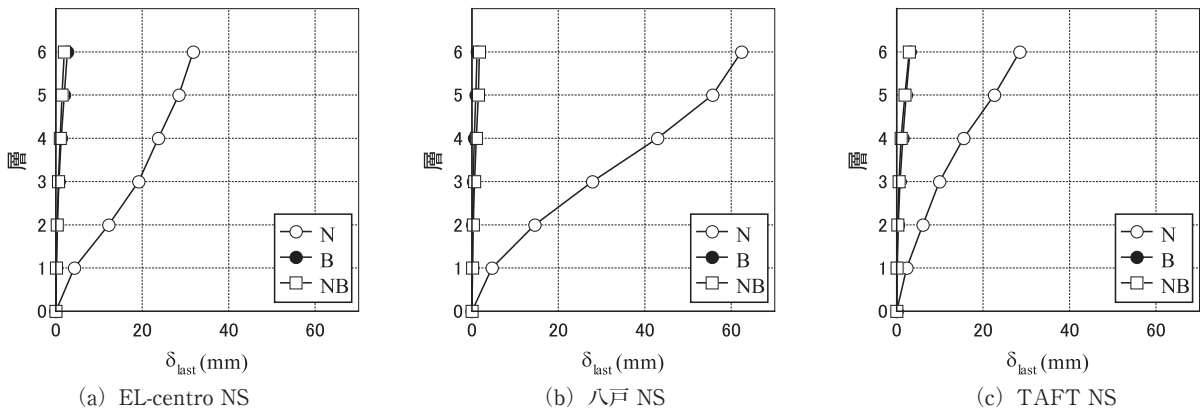


図6 残留変位

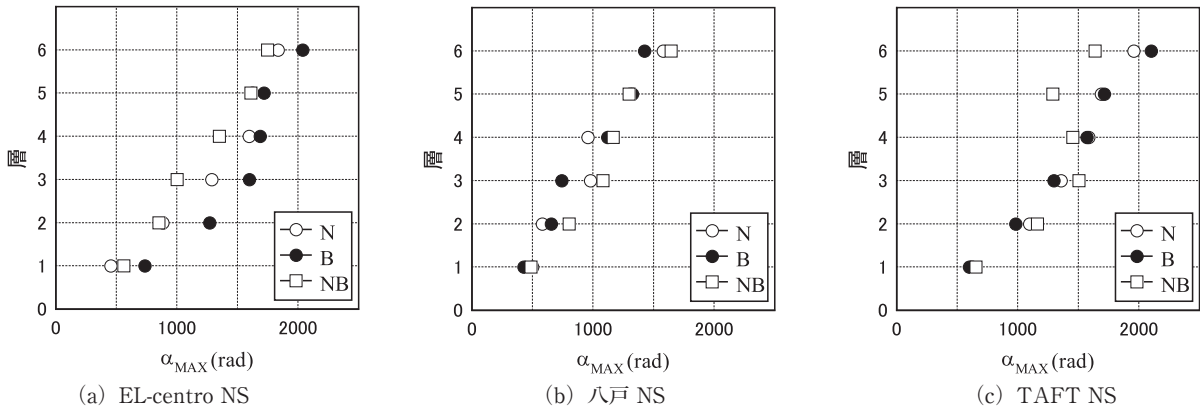


図7 最大加速度 α_{MAX} 分布

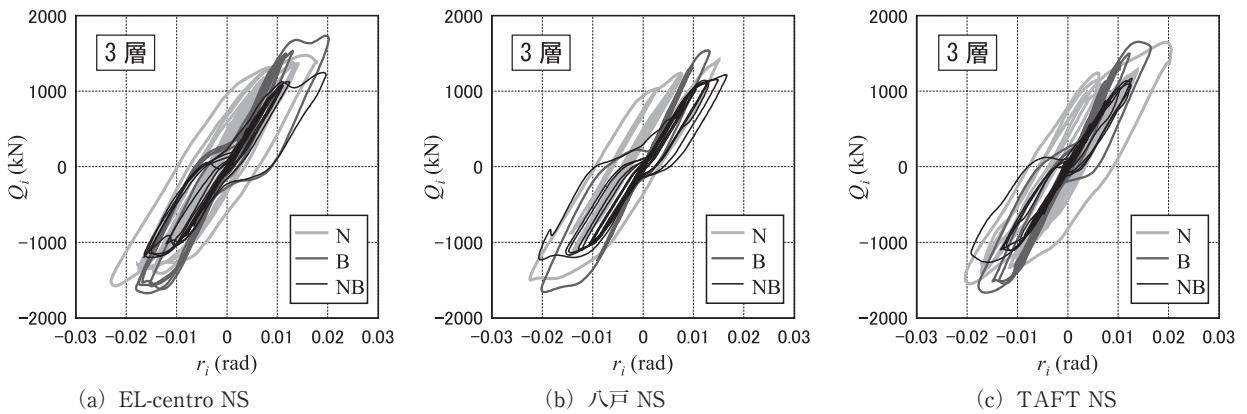


図8 層せん断力 Q_i 層間変形角 r_i 関係

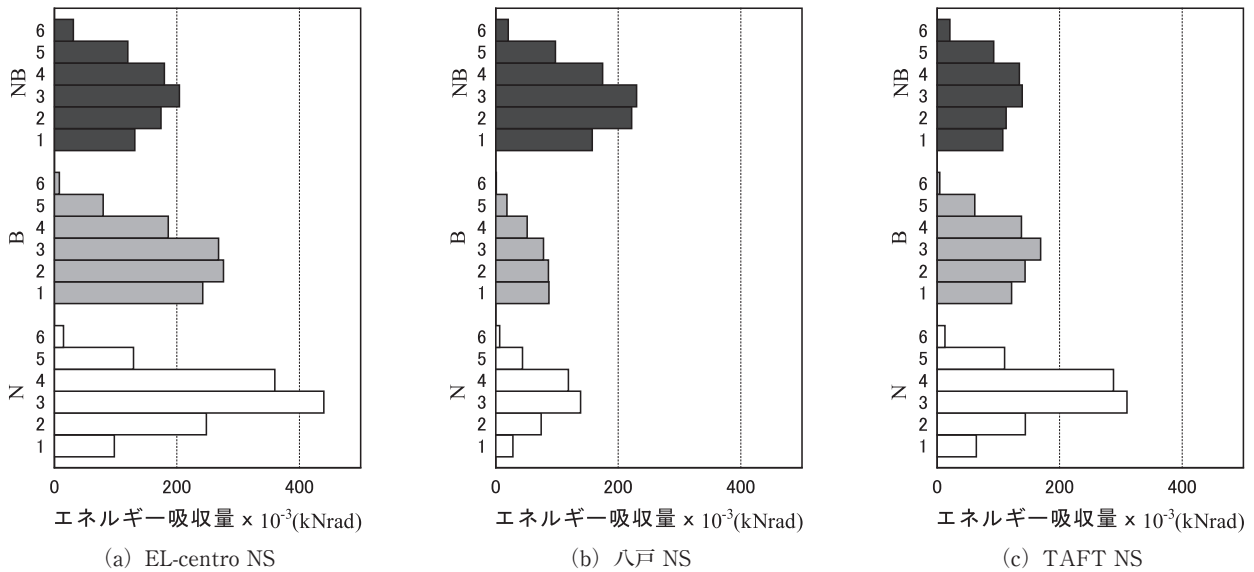


図9 層毎のエネルギー吸収量

3. 結果と考察

表3に各モデルの1次固有周期を、図4に入力地震波のフーリエスペクトルを、図5に最大層間変形角 r_i 分布を、図6に残留変位を、図7に最大加速度分布を、図8に層せん断力 Q_i -層間変形角 r_i 関係を、図9に層毎のエネルギー吸収量を、それぞれ、示す。尚、ここでは、解析時間中の最後に層せん断力が0になった時刻の変位を残留変位とし、図6では、層毎の残留変位を累加した地盤からの相対変位で示している。

表3、図4より、N type と B type とはほぼ同程度の固有周期となっているが、NB type は固有周期が長く、同一地震波を入力した際の入力量が異なることがわかる。このため、他の2つとエネルギー入力量は異なる。

図5～9より、それぞれの弾性剛性を比較すると、B type が最も低く、N type と B type は同程度になっていることがわかる。更に、B type の架構の耐力は、ボルト接合部位置を調節しているため(図3参照)、NB type よりも高くなっている。

復元力特性については、N type は紡錘形となっているのに対して、B type および NB type は、どちらも、ほぼ原点立上り型荷重変形関係を示している。尚、N type の層せん断力が、B type よりも低目となっている。これは、梁端部や柱脚部等の各要素は部分的に塑性化しているが、崩壊機構が形成される(全崩壊状態)までは達していないためである。

架構の最大層間変形角について、B type は、N type と同程度に抑えられていることがわかる。また、B type と NB type とは、同様の柱脚部としているが、B type の1、2層目が大き目になっている。

最大加速度分布に着目すると、 A_i 分布のような、逆三角形型の分布になっていることがわかる。このことから、楔デバイス付接合部を導入した構造物において、接合部の設計以外に特殊な設計方法を検討する必要はないと考えられる。また、N type では残留変位が生じているが、B type, NB type においては、どちらもほぼ0となっていることから、本論文で提案した設計方法によって、母材(柱・梁)を弾性状態に保つことが可能であることがわかる。

4. 結論

本論文では、梁崩壊型と同等の保有水平耐力を有する楔デバイス付接合部を導入した鋼構造骨組について数値解析を行い、以下の知見を得られた。

- 1) 本論文で提案する楔デバイス付接合部を導入することで、100kine 級の極大地震時においても、最大層間変形角を、一般的な梁崩壊型架構と同程度に抑えられ、残留変位をほぼ0とできる構造物が実現できる可能性を示した。
- 2) 楔デバイス付接合部を導入した場合においても、架構の最大加速度分布は、 A_i 分布と類似した逆三角形型となる。このため、楔デバイス付接合部を実構造物に導入する場合、接合部の設計以外に特殊な設計法を必要としないと考えられる。

尚、本論文で提案した楔デバイス付柱梁接合部の機構については、現時点では考案段階に留まっている。今後、部分架構を用いた载荷実験によって、検証を行う予定である。

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。

参考文献

- 1) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI: Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Reserch, Vol.61, pp. 942-961, 2005.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 田邊真二郎, 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章: 中柱型セルフセンタリング柱梁接合部の載荷実験, 日本建築学会中国支部研究報告集 CD-ROM 論文番号 -243, 2010. 3.
- 8) 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章, 弘永佑太, 澤田樹一郎, 松尾彰: セルフセンタリング柱梁接合部を用いた構造物の残留変位に関する解析的研究, 広島工業大学紀要, 研究編, 第 44 巻 pp. 129-134, 2010. 2.
- 9) 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, pp79-84, 1994. 12.
- 10) 多田元英: CLAP. f 利用説明書・解析方法説明書, 鋼材倶楽部