

楔デバイスを用いたセルフセンタリング架構のエネルギー吸収分布

高松 隆夫*・玉井 宏章**・景山 朋定***・國井 翔平****

(平成25年10月30日受付)

Energy absorption distribution of self-centering frame structure with wedge-device connection

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Tomosada KAGEYAMA and Shohei KUNII

(Received Oct. 30, 2013)

Abstract

Earthquake-response analysis of the frame structure with the wedge-device connection was carried out to evaluate story deformation angle and horizontal load-carrying capacity. Energy absorption capacity of the frame is investigated in this paper. Earthquake response analysis of the structure with some kinds of the connections as variable shows the result that the frame with the wedge-device connection absorbs less energy capacity than the rigid frame.

Key Words: wedge-device connection, End plate type, earthquake response analysis

1. はじめに

大地震時における鋼構造架構の柱脚部や梁端部には、塑性ヒンジとしてのエネルギー吸収が可能な変形能力を確保する必要がある。しかしながら、梁端部において、柱梁接合部のディテールによれば応力集中を起し、変形能力を確保できない場合がある。変形能力が確保された場合においても、過大な塑性変形によって構造物の継続使用が困難となり、経済的価値を喪失することとなる。近年の構造物には、地震に対して倒壊させないことだけでなく、部材が損傷しても、簡単な補修のみで構造物を継続的に使用できる性能が求められ、様々な研究が行われている。

著者等は、エンドプレート形式の柱脚部および梁継手部に楔デバイスを設置した楔デバイス付接合部を提案している^{1)~9)}。これらの接合部は、原点立上り型復元力特性を有しており、鋼構造架構に導入すれば、構造物の地震後残留変位をほぼ0にできることを、数値解析より明らかにしている。また、ボルト降伏型の接合部でありながら、継手

位置を調整することで、一般的な梁降伏型架構と同等の保有水平耐力を得ることが可能である⁸⁾。

しかしながら、これまで行われてきた解析は、残留変位低減性能を持った架構が実現可能なことを示すことを目的としており、そのエネルギー吸収量は、一般的な架構と比べ少ないことになる⁹⁾ことがわかっていたが、詳しい議論も行われていなかった。

そこで、本論文の目的として、楔デバイス付接合部を導入した架構のエネルギー吸収量について議論を行う。方法として、低層鋼構造物の梁継手と柱脚に楔デバイスを設置した場合の地震応答解析を行い、通常架構(各部剛接合)の解析結果と比較して、上記内容を検討する。

2. 楔デバイス付接合部

図1に楔デバイス付接合部を示す。

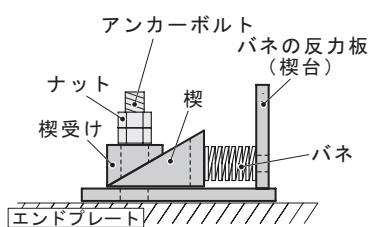
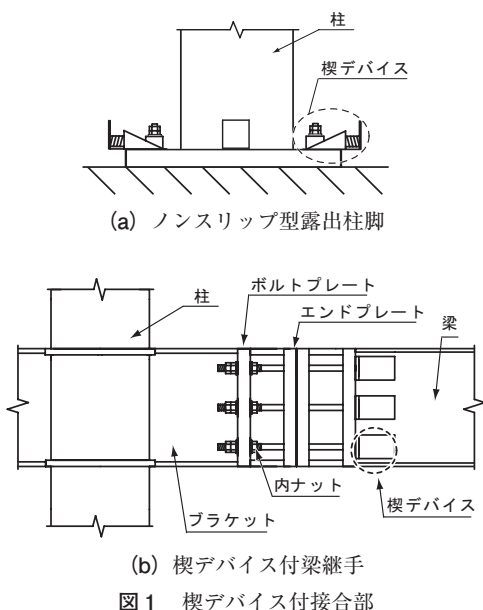
本工法は、ボルト降伏型の半剛接合接合部であり、接合部曲げ耐力を母材(柱・梁)の0.8倍程度とすることで、架構に生じる損傷を接合ボルトに集中させ、柱や梁端部を

* 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研究科知的機能科学専攻

**** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻



弾性状態に留めるものである。楔デバイスを使用することで、原点立上り型復元力特性を有する。特に柱脚をノンスリップ型露出柱脚、梁継手を楔デバイス付梁継手と呼ぶ。

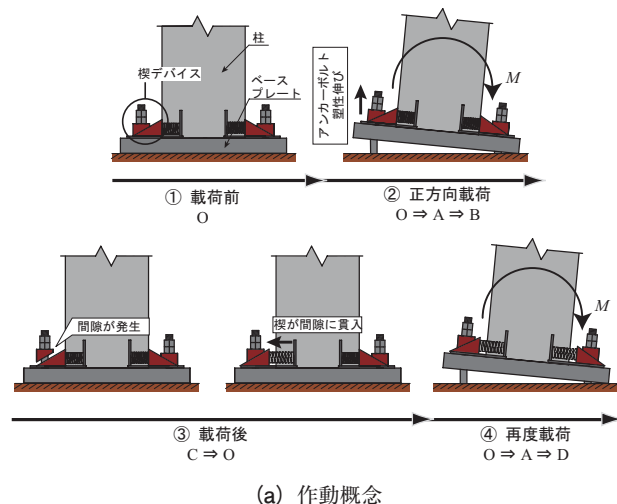
2.1 楔デバイス

図2に楔デバイスの構成を示す。楔デバイスは、楔・楔受け・バネ及び反力板により構成され、ナット・ベースプレート間に楔、楔受けおよび楔台を、楔と半力板との間にばねを設置するのみの簡単なものである。また、楔貫入角度を 30° とし、楔と楔受けの接触面には、高い摩擦係数となるように発生処理をおこなっている。

2.2 作動概念と復元力特性

図3にノンスリップ型露出柱脚の作動概念と復元力特性を示す。尚、図3(a)中に示したアルファベットは、図3(b)の復元力特性における履歴ルートの記号と対応している。

ノンスリップ型露出柱脚に地震外力が作用すると、従来型露出柱脚と同様にアンカーボルトが伸ばされ、降伏して塑性伸びを生じる($O \Rightarrow A \Rightarrow B$)。アンカーボルトの塑性伸びにより、ナットとベースプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にバネの力により楔を貫入させることで間隙が消滅する($C \Rightarrow O$)。逆方向に曲げを受けた場合も



同様である。このため、再度地震外力が作用した際も、すぐに地震外力に抵抗する($O \Rightarrow A \Rightarrow D$)。

このような楔デバイスの機能により、弾塑性繰り返し载荷下におけるスリップ現象が解消され、図3(b)に示すように、原点立上り型復元力特性となる。

2.3 楔デバイス付梁継手

楔デバイス付梁継手は梁継手位置でボルト接合を行う。そのため、継手部の応力よりもブラケットに作用する応力が大きくなり、弾性範囲に留めるにはブラケットの断面を大きくする必要がある。その際、ブラケットは、梁からの応力伝播を考慮し、梁と同一の成とする。また、ブラケット位置と梁継手耐力を調整することで、通常の架構と同等の保有水平耐力を得ることができる。

3. 地震応答解析

本解析では、4層4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地震応答解析を行い、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や地震時挙動特性を示す。

3.1 解析手法

地震応答解析には、「CLAP. $f^{(10, 11)}$ 」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。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。入力地震波には、El Centro波NS成分、Taft波EW成分および八戸波NS成分の最大速度が50kineとなるように、それぞれ最大加速度を基準化した波を用いる。

3.2 ボルト接合部評価式

図4に復元力特性モデルを、図5に抵抗機構を、それぞれ、示す。

本解析では、ボルト接合部に図4に示す復元力特性を有する回転ばねを設置する。それぞれの特性値の算出には、以下の式を用いる。尚、ボルトを多数配列としているためmulti-linear型となるが、簡単のために引張側全ボルトによる弾性回転剛性と最大曲げ耐力を有するbi-linear型として取り扱う。

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

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

$$K = \sum_{i=1}^{j-1} K_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$M_U = \sum_{i=1}^{j-1} M_{Yi} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 K_i : i 列目の弾性回転剛性、 E : ヤング係数、 n_i : i 列目のボルト本数、 A : ボルトの断面積、 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、 R : ボルト以外の要素の弾性変形を考慮した低減係数 (=2)¹²⁾、 l_b : ボルトの有効長さ (ナット間距離)、 M_{Yi} : i 列目のボルトによる降伏曲げモーメント、 σ_Y : ボルトの降伏応力度、 K : 弾性回転剛性、 j : ボルト列数、 M_U : ボルト接合部の最大曲げモーメントである。

3.3 解析対象架構

表1に部材断面リストを、表2に回転ばね特性値を、表3に固有周期を、図6に解析モデル例を、それぞれ、示す。架構は、制震構造テーマストラクチャーの4層モデル¹³⁾を基本として使用している。また、各荷重は、事務所ビルを想定しており、各節点に入力している。

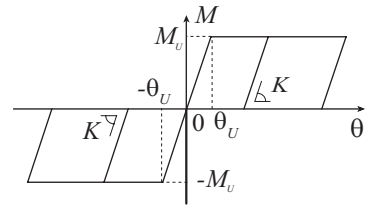


図4 復元力特性モデル

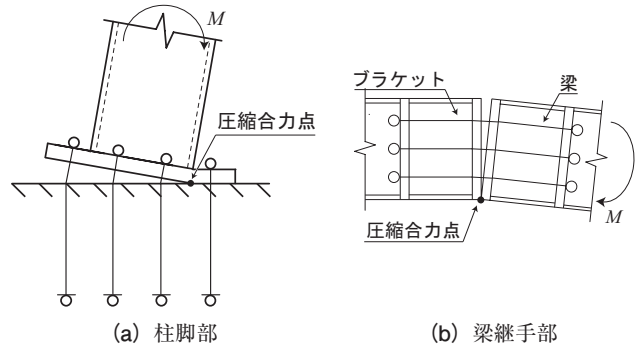


図5 抵抗機構

解析対象としては、接合部形式を変数としたモデルを作成する。柱脚には、固定柱脚 (R type)、アンカーボルト先行降伏型露出柱脚 (S type)、ノンスリップ型露出柱脚 (N type) を、梁継手には、剛接合 (R type)、楔デバイス付梁継手 (W type) を用い、それぞれの組合せにより、計6種類のモデルを作成する。

S type の柱脚にはスリップ型復元力特性を有する回転ばねを、N type の柱脚、Wtype の梁継手には原点立上り型復元力特性を有する回転ばねを、設置する。また、W type の梁継手を設置する場合、ブラケットを設けるので、例えば N-Wtype は図6 (b) のようになる。回転ばねは、柱心から 640mm の位置としている。

各架構の耐力は、S type・N type は柱脚の耐力を低減しているため R type と比較して弱くなっている。W type では、ブラケット位置を調整することで、通常と同等の保有水平耐力が得られるため、梁継手形式の違いで架構の耐力の差はない。

固有周期は、CLAP.f 付属の固有値解析用プログラムから求めている。表3より、固有周期は、楔デバイス付梁継手を適用することで、0.05s 長くなる。

4. 結果と考察

図7に残留層間変形角 $last R_i$ の分布を、図8に最大層間変形角 $max R_i$ の分布を、図9にエネルギー吸収量を、それぞれ、示す。尚、図7の最大層間変形角 $max R_i$ は、各層の層間変形角の最大値を示したものである。図9のエネルギー吸収量は各タイプの平均を取ったもので、引き出し線で示す値は、各モデルの総エネルギー吸収量に対する各接合部が吸収したエネルギーの割合を示し、円の面積は、吸

表1 部材断面リスト

層	種別	断面寸法	σ_y (N/mm ²)	I_x (mm ⁴)	Z_p (mm ³)	M_p (kNm)
1	柱	□-500x500x22	325	1.61x10 ⁹	7.55x10 ⁶	2,452
2		□-450x450x22	325	1.15x10 ⁹	6.05x10 ⁶	1,966
3		□-450x450x19	325	1.02x10 ⁹	5.30x10 ⁶	1,722
4		□-400x400x16	325	6.05x10 ⁸	3.54x10 ⁶	1,151
2	梁	H-650x250x12x25	325	1.44x10 ⁹	4.99x10 ⁶	1,621
3		BH-650x300x16x28	325	1.91x10 ⁹	6.64x10 ⁶	2,157
3	梁	H-600x250x12x22	325	1.10x10 ⁹	4.11x10 ⁶	1,335
4		BH-600x300x16x25	325	1.46x10 ⁹	5.52x10 ⁶	1,795
4	梁	H-550x250x9x19	325	7.71x10 ⁸	3.11x10 ⁶	1,011
R		BH-550x300x12x22	325	1.05x10 ⁹	4.25x10 ⁶	1,382
R	梁	H-550x200x9x16	325	5.61x10 ⁸	2.31x10 ⁶	752
		BH-550x250x12x19	325	8.04x10 ⁸	3.31x10 ⁶	1,075

σ_y : 降伏応力度 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

部位	K (kNm/rad)	M_U (kNm)
柱脚部	3.28x10 ⁵	1,898
2階梁継手部	5.51x10 ⁵	1,235
3階梁継手部	3.99x10 ⁵	968
4階梁継手部	2.80x10 ⁵	748
R階梁継手部	1.64x10 ⁵	416

K : 弾性回転剛性 M_U : 最大曲げ耐力

表3 固有周期

柱脚形式	梁継手形式	1次固有周期(sec)
R type	R type	1.02
	W type	1.07
S type	R type	1.11
	W type	1.16
N type	R type	1.11
	W type	1.16

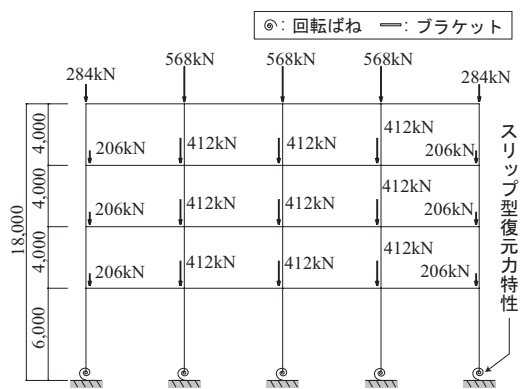
収したエネルギーの大きさを示している。

図7より、50kine級の地震波を使用しており、残留変形角が生じている場合も許容残留変形角1/200¹⁴⁾と比較すればそれほど大きな値ではないが、楔デバイス付梁継手を適用すれば、構造物に生じる残留変形をほぼ0できる。

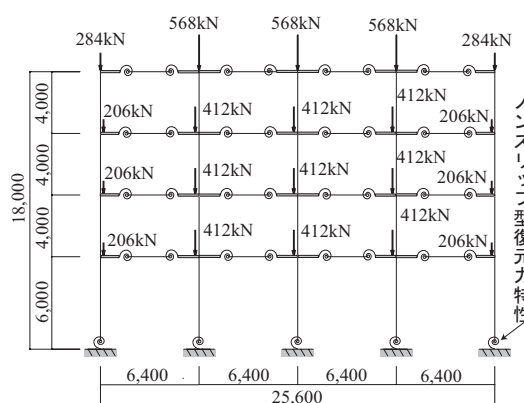
図8より、最大層間変形角は、楔デバイス付梁継手を適用したモデル(W type)が大き目になる傾向がある。これは、楔デバイス付梁継手の復元力特性に起因する。通常の紡錘型であれば、地震時における塑性変形の生じる方向により、図10(a)に示すように、地震外力による層間変形角が相殺されることがある。一方、原点立上り型復元力特性は、常に原点から応答が始まる。これらの影響により、本解析では、R typeの最大層間変形角が小さ目になっている。したがって、楔デバイス付梁継手を適用することで、架構の応答値が決まって大き目になるわけではなく、地震波や解析モデルにより、図10(b)のように、地震時残存変形に層間変形角が累加されれば、R typeの方が大きくなる場合もある^{8),9)}。

柱脚形式毎で比較すると、S type, N typeでは柱脚の塑性化割合が小さいため、大きな違いは表れていない。また、R typeは固定であるため、1層目における変形角の値が他の柱脚に比べ小さい。

図9より、各モデルとも全体崩壊形の崩壊機構を示しており、層崩壊とはなっていない。エネルギー吸収割合が大きい1層目側柱の梁端部を梁継手形式で比較すると、R typeの方が損傷の割合が大きくなっており、W typeにすることで、損傷集中が緩和され、3層中柱側の梁端部や4層側柱の梁端部も塑性化し、エネルギー吸収をしている。ま



(a) S-R type



(b) N-W type

図6 解析モデル

た、2~4層が吸収したエネルギー量も大きくなっており、これらの層が負担した割合で見ると、S-R typeは5%程度の負担量であるが、N-W typeは20%負担している。これらを要因として、楔デバイス付梁継手をを用いることで、1層目梁端部の損傷が緩和される。

柱脚形式の違いで比較すると、スリップ型柱脚と nonslip型露出柱脚では、柱脚自体のエネルギー吸収量は、スリップ型柱脚の方が値が小さ目になる。しかしながら、S-R typeと N-R typeの総エネルギー吸収量を比較すれば、S-R typeの値の方が大きくなっている。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の固定度が無くなることで、1層目柱頭部の応力が大きくなり、中柱側梁端部の損傷が増大したためである。これらから、楔デバイス付梁継手の影響により、架構全体に塑性ヒンジが形成され、バランスのよい崩壊機構となる。

また、エネルギー吸収量の総量はW typeが小さ目になっている。これは、復元力特性の違いが起因して、通常の紡錘型の半分ほどの履歴面積しか持たない原点立上り型履歴では、エネルギー吸収量が小さくなると考えられる。

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

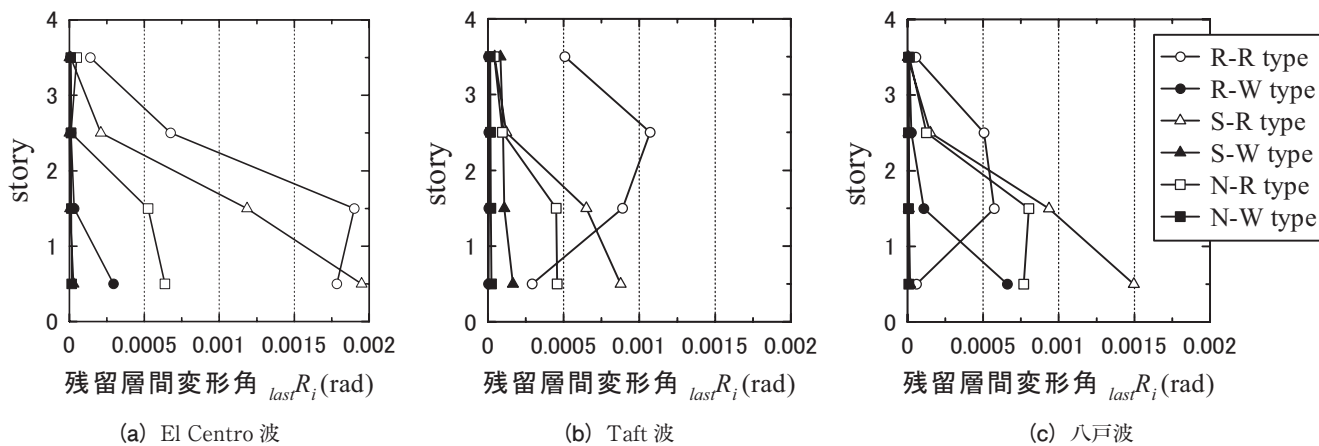


図7 残留層間変形角 $last R_i$ の分布

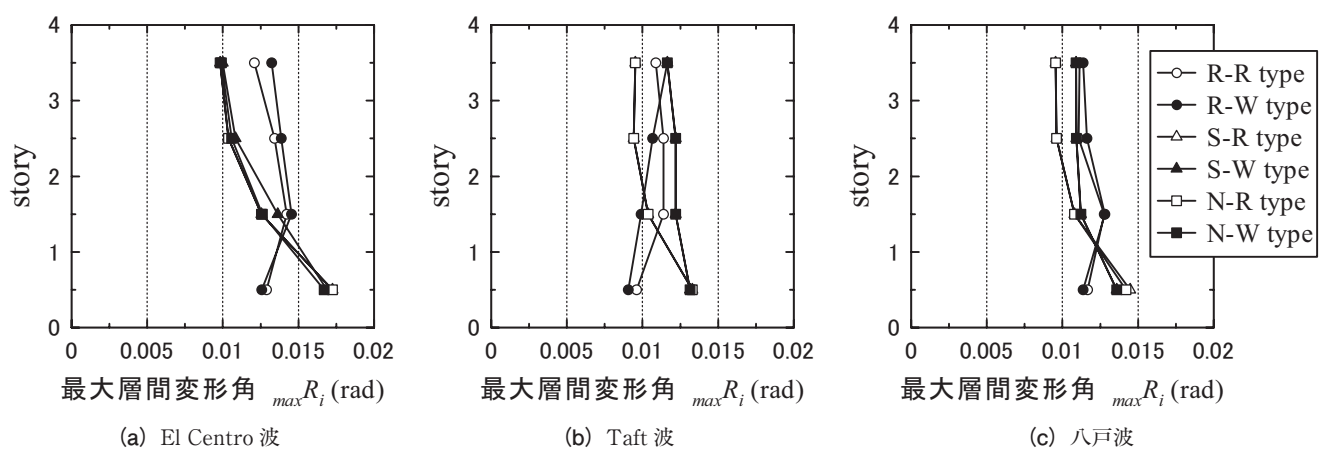


図8 最大層間変形角 $max R_i$ の分布

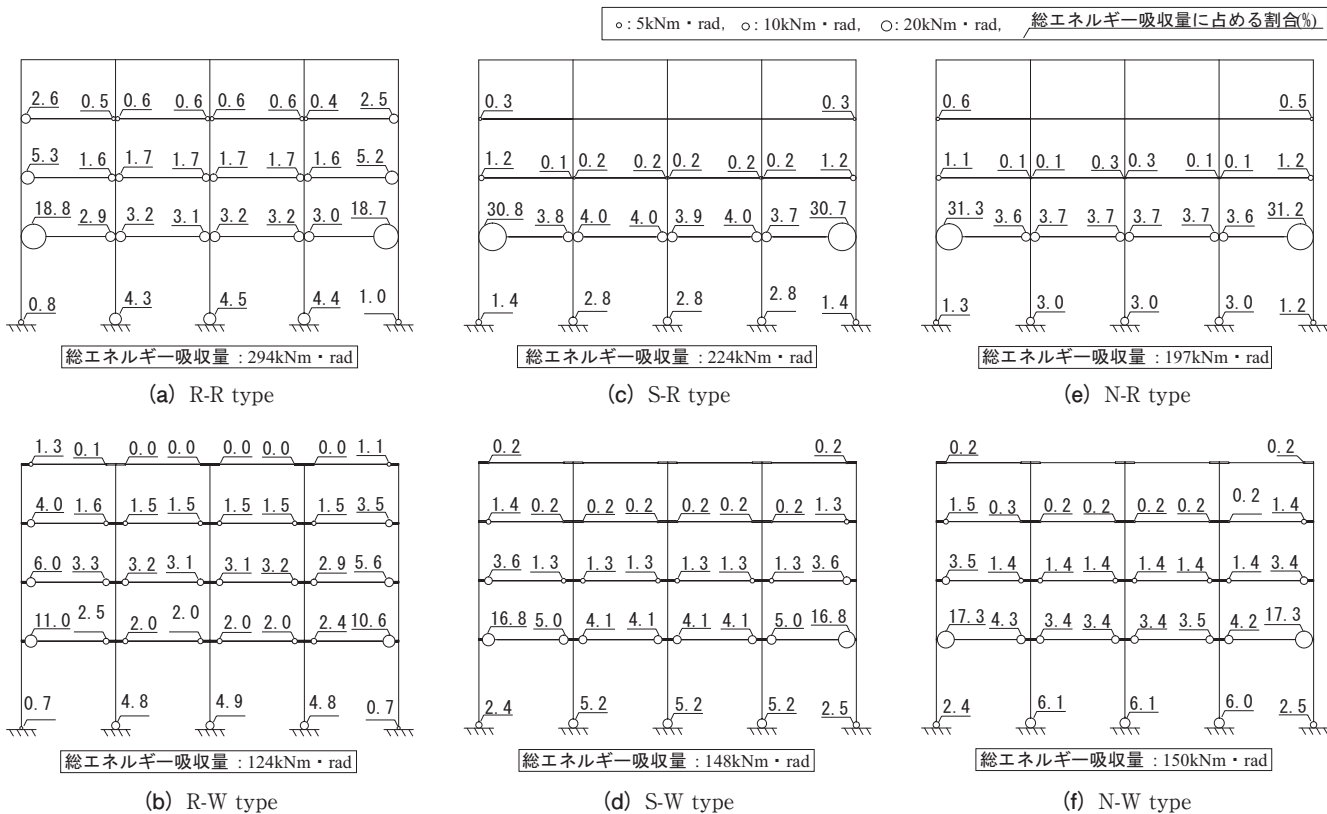


図9 エネルギー吸収量

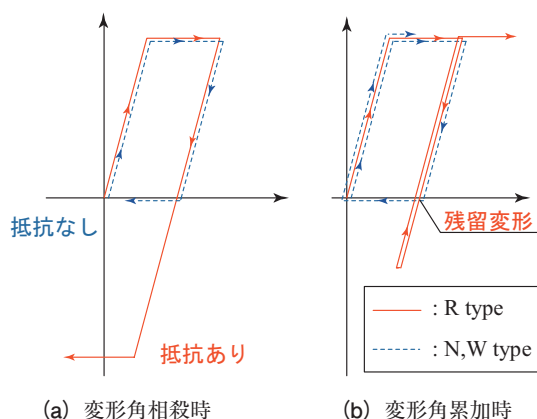


図10 荷重-変形関係

について地震応答解析を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 本解析モデルにおいても、楔デバイス付梁継手を導入した架構は、地震後残留変位がほぼ生じない。
- 2) 楔デバイス付梁継手は架構全体でエネルギー吸収を行い、1層目梁端部の損傷集中を緩和できる。
- 3) 楔デバイス付梁継手を適用することで、通常架構では塑性ヒンジが形成されなかった層の梁においても塑性ヒンジが形成され、エネルギー吸収が可能である。復元力特性によって総エネルギー吸収量は小さいが、塑性ヒンジごとのエネルギー吸収量の割合は減少する。

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部形式である。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¹⁶⁾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・塑性変形等異なる崩壊機構が発生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。さらに、複雑な形状になるため施工面についても課題が残される。

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や、施工性にも考慮したディテールの提案を行って、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）のプロジェクト研究の一環として実施されました。ここに記して、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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.

- 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) 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.
- 7) 景山朋定, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: 楔デバイス付梁継手の載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), CD-ROM論文番号-22641, 2012.9
- 8) 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, pp.755-760, 2011.11.
- 9) 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 山西央朗, 景山朋定: 楔デバイス付接合部を有する架構の地震応答性状, 鋼構造年次論文報告集, 第20巻, pp.807-814, 2012.11.
- 10) 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
- 11) 多田元英: CLAP.f利用説明書・解析方法説明書, 鋼材倶楽部
- 12) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技法堂出版, 1985.3.
- 13) 日本免震構造協会: パッシブ制震構造設計施工マニュアル, 2003.10
- 14) 油野弘, 池永昌容, Jason McCormick, 中島正愛, 生活・技術・安全から見た許容残留変形-文献調査と1970年に建設された建物調査-, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.221-224, 2007.
- 15) 社団法人日本鋼構造協会: 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, 2009.10.
- 16) 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.