

エンドプレート接合部の地震時履歴挙動と変形性能の改善

Hysteretic Behaviors of End-plate Connections Subjected to Earthquake Loading and Improvement on their Rotation Capacities

大井 謙一*・李 昇宰*・嶋 脇 與 助*・グズマン ルーベン*

Kenichi OHI, Seung-Jae LEE, Yosuke SHIMAWAKI and Ruben GUZMAN

1. はじめに

従来の鉄骨接合部の設計法は、保有耐力接合の考え方に代表されるように、接合部の強度確保を中心としたものであった。しかし1995年の阪神・淡路大震災の反省から分かるように、鉄骨架構の柱梁溶接による剛接合が必ずしも耐震設計上の最適解であるとはいえない。例えば、局所的な柱崩壊モードが生じるよりも、パネル崩壊型や接合部崩壊型のモードが生じるほうが骨組全体のエネルギー吸収能力については有利な場合があると考えられ、半剛接合部の使用法によっては、逆に地震時の崩壊モードやエネルギー吸収能力を制御できる可能性もある。すでに接合部自体のエネルギー吸収に期待した半剛接鉄骨架構の利用も検討されているが、一部の軽量鉄骨及び工業化住宅の鉄骨架構システムを除いて普及していない。

本研究は、接合部自体の弾塑性変形性状に立脚した新しい設計法提案を目的とし、柱梁接合部の接合方法としてエンドプレートと高力ボルトによる接合方法に着目し、突出形(Extended)及びフラッシュ形(Flush)の2種類の試験体を製作し、繰返し載荷実験及びハイブリッド地震応答実験を行う。さらに、接合部の回転能力改善を試みた実験結果についても併せて報告する。

2. 実験の概要

載荷実験装置を図1に示す。試験体は、梁(H-250×125×6×9, JIS SS 400級の形鋼)フランジの両側にEnd-plate(板厚16mm)を突出させて、高力ボルトを配置する突出形と梁フランジ間に高力ボルトを配置するフラッシュ形の2種類を用意し、トルシア型高力ボルト(M16-S10T)によってベースブロックに接合される。特に、突出形の場合は、高力ボルトの本数として、8本止めと4本止めの2種類を用意した。試験体のディテールを図2に示す。エンドプレートの摩擦面は赤

*東京大学生産技術研究所 第5部

錆処理を施しており、ボルト穴のクリアランスを2mmとしている。表1に試験体の材料実験結果から得られた機械的性質を示す。図3に示す計測及び測定は、突出形8本止めの場合、外付変位計による変位測定9箇所、歪みゲージによる歪み測定20箇所とし、主な測定項目は、変位計による梁のたわみ、エンドプレートの浮上がり及びスベリ、歪みゲージによる梁、エンドプレート及び高力ボルトの軸部の歪みなどである。

上記の試験体は繰返し載荷実験及びオンライン地震応答実験の部分構造試験体として使用される。実施した繰返し載荷実験とオンライン地震応答実験の詳細を表2に示しており、それぞれ3ケースの合計6ケースの実験となっている。

部分構造オンライン地震応答実験の振動モデルを図4に示す。ここでは、剛柱、柱脚及びエンドプレート形式の柱梁接合部をもつ3層鉄骨架構を想定する。地震応答実験では、試験体として1層分のエンドプレート付梁部分のみを載荷し、柱脚を含む残りのすべての部分をコンピュータ内でシミュレートするので、地震応答実験のセットアップは図1で示している載荷実験の場合と同じである。仮想部分である柱脚の弾塑性履歴挙動については進行スリップ型モデル(初期剛性と降伏強度は後述するフラッシュ形接合の載荷実験結果と同レベルと仮定)を採用している。表3に地震応答実験の諸元を示す。上記の3層の地震応答実験モデルは剛柱と仮定しているので1自由度系となり地震時の運動方程式は次式で表すことができる。

$$14H^2m\ddot{\theta} + 3M_j + M_b = -6Hm\ddot{y}_g \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 m は各層の等しい仮想質量、 M_j は載荷実験より得られる試験体の復元力、 M_b は柱脚の仮想復元力、 θ は剛柱の回転角加速度、 \ddot{y}_g は入力地震動、 H ($H=L=180$ cm)は層高である。なお、入力地震波としてはEl Centro NS 1940年記録の主要動を含む10秒間を使用している。入力レベルは 300 cm/sec^2 、地震応答解析の時間刻みは 0.005 sec としている。

表 1 材料実験結果

	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	EL (%)	M 16-S 10 T T _y (kN) 140 T _u (kN) 170
Beam-flange	320	465	72	27	
Beam-web	345	465	73	29	
End-plate	430	570	75	18	

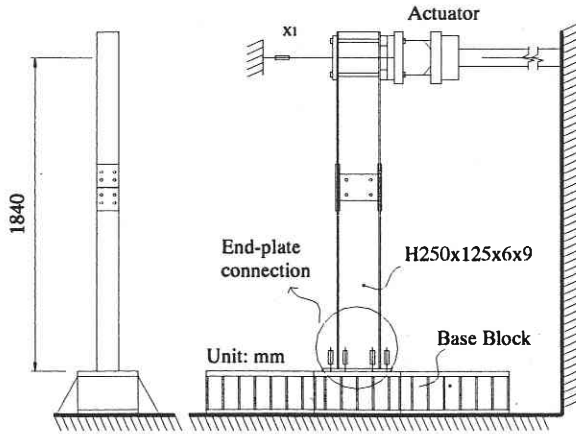


図 1 荷重装置

表 3 地震応答実験の諸元

Test Code	Natural period (sec)	Mass (kg)	M _b (kN*m) K _b (kN*m/rad)	h (%)	Δt (sec)	Input Wave
E 8 ON	0.55	5880	65.4 8450	0.1	0.005	El Centro NS 300 cm/sec ²
E 4 ON	0.57					
F 4 ON	0.57					

表 4 荷重実験結果及び予測値

Test Code	M _u (kN*m)		M _y (kN*m)		θ _{jmax} (rad)		K _j (kN*m/rad)	
	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.
E 8 SC	133	113	—	113	—	—	51,000	85,000*
E 4 SC	83	83	54	66	0.0300	0.0304	22,000	58,000**
F 4 SC	71	78	50	65	0.0220	0.0197	22,000	25,000**

3. 繰返し荷重実験の結果

図 5 に荷重実験結果を示す。縦軸はアクチュエータのロードセルより読取った荷重を梁の全塑性モーメントで無次元化しており、横軸は部材変形を含む回転角 (X1/L) を示している。繰返し荷重方法は変位制御による交番繰返し荷重 (回転角 1/200 の 1 回, 1/100 の 2 回, 1/50 の 1 回, 以後は単調荷重) で三角波及びランプ波より一定速度の荷重を行った。突出形 8 本止めの実験結果によると、接合部は保有耐力接合となっており、安定した紡錘形の履歴挙動を示している。エンドプレートは弾性範囲に留まっている。また、梁フランジ及びウェブには局部座屈現象が観察され

表 2 荷重実験及びオンライン実験の詳細

Type of End-plates	Number of HTB's	Loading	Test Code
Extended	8	Cyclic	E 8 SC
		Earthquake	E 8 ON
	4	Cyclic	E 4 SC
		Earthquake	E 4 ON
Flush	4	Cyclic	F 4 SC
		Earthquake	F 4 ON

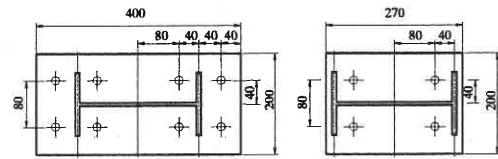


図 2 End-plate (板厚 16) 試験体のディテール

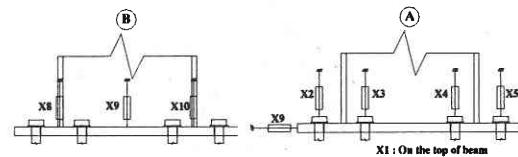


図 3 計測装置 (E 8 SC の場合)

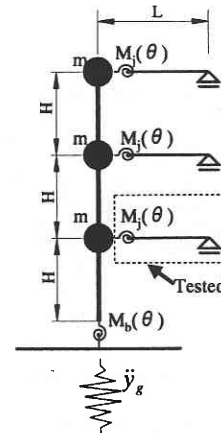


図 4 地震応答実験の振動モデル

た。突出形 4 本止めの場合では、回転角 0.035 rad (約 1/30 rad) で引張側の高力ボルト 2 本の破断によって実験を中止した。履歴挙動はボルトの離間後の伸びによる若干の pinching 現象を含む逆 S 字形のループを示している。フラッシュ形 4 本止めの場合も回転角 0.025 rad (1/40 rad) で引張側の高力ボルト 2 本の破断によって実験を中止した。進行スリップ型の履歴挙動を示しており、梁及びエンドプレートは弾性範囲に留まっており、またスベリも殆ど生じていない。このケースの崩壊モードはボルトの離間によるボルト崩壊モードとなっており、ボルトの伸び能力で回転能力が決定されることになる。

荷重実験結果の最大耐力 (M_u)、降伏耐力 (M_y)、回転

研究速報

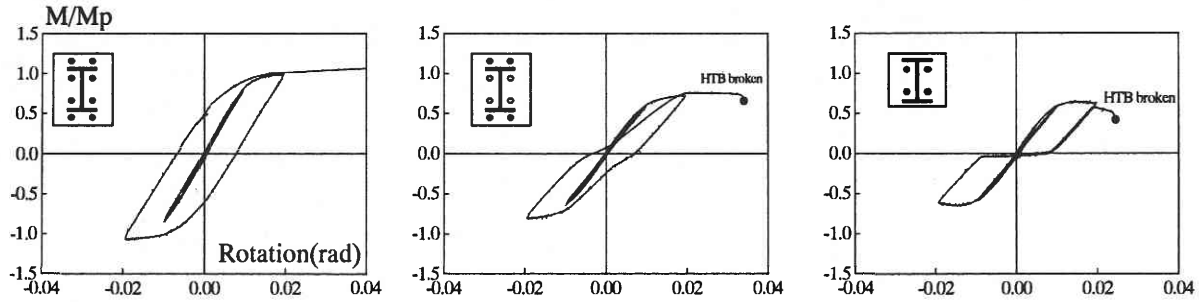


図5 荷重実験の結果 (E 8 SC, E 4 SC, F 4 SC)

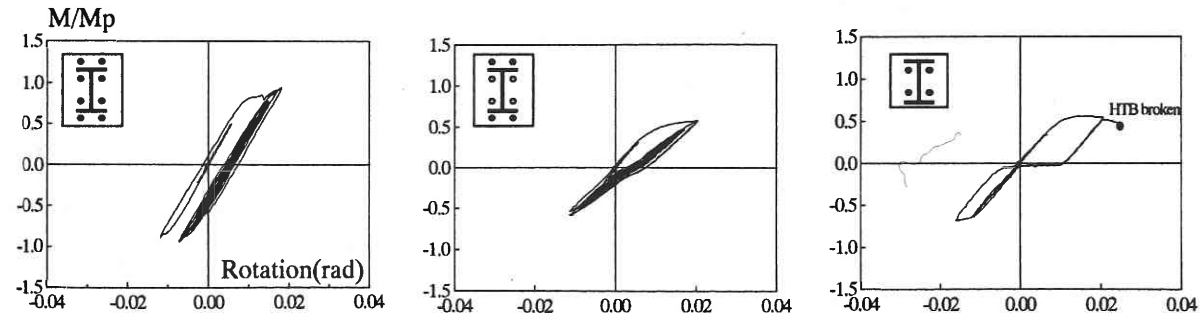


図6 地震応答実験の結果 (E 8 ON, E 4 ON, F 4 ON)

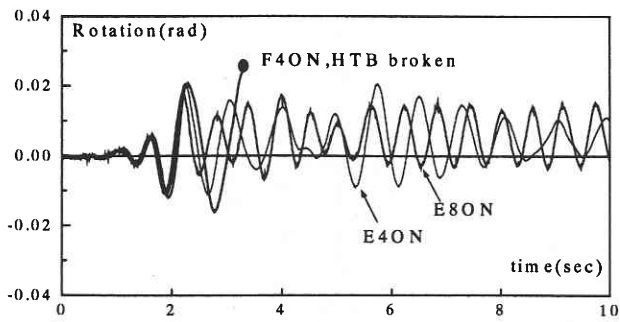


図7 回転角の時刻歴応答

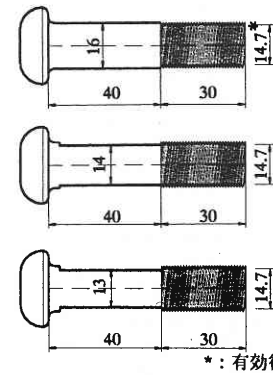


図8 高変形能高力ボルトの形状

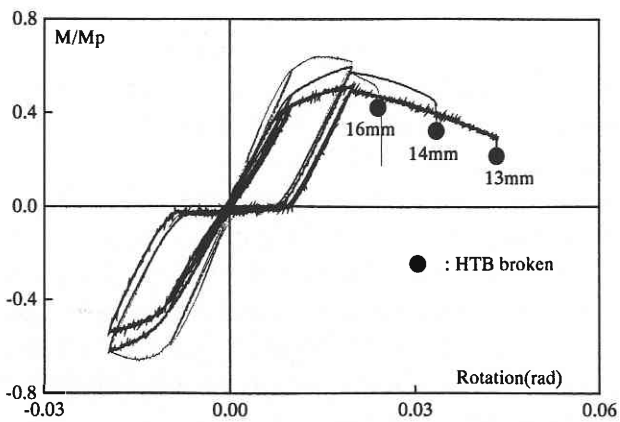


図9 高変形能高力ボルトによる繰返し荷重実験の結果

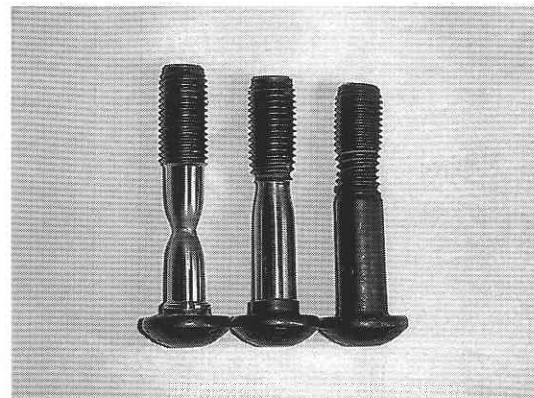


写真1 高変形能高力ボルトの破断場所

能力及び初期剛性 (K_j) を表 4 に簡単な予測式による計算値とあわせて示す。まず、最大耐力は、エンドプレート接合部で、梁と接合する部分及びナット下の部分を剛域とした線材梁モデルとして取り扱い、エンドプレート及び高力ボルトの σ_u , T_u レベルでの極限解析を行った。その結果、実験値と計算値は良い対応を示している。降伏耐力においては、実験結果より、接合部の回転角 θ_j (回転角 θ から梁の弾性変形分を除いたもの) が $1/500$ (rad) 時の耐力を実験降伏耐力とした。また計算降伏耐力は、最大耐力で用いた耐力評価式にエンドプレート及び高力ボルトの σ_y , T_y レベルの耐力を用いた極限解析結果である。突出形 8 本止めの場合には梁の全塑性モーメントを示している。回転能力は、実験で計測された接合部の回転能力を高力ボルトの破断伸びから予測した。算出方法としては、崩壊モード (塑性ヒンジ部以外のプレート変形なしと仮定) に高力ボルトの破断伸びを当てはめて推定した回転角である。実験で計測された接合部の回転角 θ_j が $1/500$ (rad) のときの割線剛性を求めた。計算剛性の算出方法は、* の値は鋼構造限界状態設計指針¹⁾の露出形式柱脚の回転剛性評価式を準用したものである。また、** の値は、高力ボルトを塑性ばねに置換し崩壊モードの塑性ヒンジをピンとし、塑性ヒンジ部以外のプレートは変形しないと仮定して求めた剛性に慣用の修正係数 $1/2$ を乗じた値である。

4. オンライン地震応答実験

図 6 に試験体の復元力特性を示す。突出形 8 本止めの実験結果では、梁は塑性化 (最大約 3000μ) を経験しており、エンドプレート及び高力ボルトは弾性範囲に留まっている。また、梁の局部座屈は観察されなかった。応答時間 2 秒前後で正負側の最大変位応答 (0.017 rad) が生じており、復元力の履歴ループは紡錘形に近い形状を示している。突出形 4 本止めの実験結果では、エンドプレート (最大約 2000μ) 及び高力ボルトのねじ部は塑性化を経験しているが、梁は弾性範囲に留まっている。最大変位応答は突出形 8 本止めと同様に 2 秒前後で正負側の最大変位応答 (0.02 rad) が生じている。復元力の履歴形状は Pinching による紡錘形よりは若干瘦せた逆 S 字形のループを示している。フラッシュ形 4 本止めの実験では、梁及びエンドプレートは弾性範囲に留まっているが高力ボルト 2 本の破断によって実験を中止した (破断時の変位応答は約 0.025 rad)。履歴形状は進行スリップ型を示しておりそれにより変位応答も大きくなっていることが分かる。図 7 に変位応答の時刻歴を示している。図 6 の履歴形状によると、突出形 4 本止めでは pinching 現象が生じてはいるが最大変位応答では突出形 8 本止めと大差ないことが分かる。

5. 高変形能高力ボルトによるフラッシュ形エンドプレートの変形能力改善

フラッシュ形の載荷実験では、ボルト崩壊モードになるのでボルトの伸び能力で接合部の回転能力が支配される。高力ボルトは、軸部とねじ部からなっており、一般に塑性変形はナット下ねじ底部分に集中し、軸部での塑性変形は起こらない。ここではボルトの変形能力を改善する一つの方法として、図 8 に示すような載荷実験で用いた JIS 規格 M 16-S 10 T の高力ボルトの軸径を 14 mm 径と 13 mm 径まで切削により低減した 2 種類のボルトを製作し、前述の載荷実験と同一条件での実験を行った。その結果を図 9 に示す。最大耐力は若干低くなるものの、変形能力は改善されていることがわかる。特に、破断時の伸びにおいては、規格品 16 mm 径と 13 mm 径を比較してみると 2 倍くらいの変形能力の差があることがわかる。最終的に破断した場所を写真 1 に示す。 16 mm 径はナット下ねじ底部分、 14 mm 径は軸部とねじ部の境界部分、また 13 mm 径の場合は軸部の中間部分であった。

6. ま と め

本研究では、柱梁接合方法としてエンドプレート形式の半剛接合方法について、載荷実験及び地震応答実験によって検討した。その結果、最大耐力及び変形能力の実験値と計算値は良い対応を示しているが、降伏強度及び初期剛性については若干の予測誤差が生じている。突出形 8 本止めの場合は保有耐力接合となっており、突出形 4 本止めの場合は Pinching 現象を含む逆 S 字形の履歴挙動を示してはいるが、地震応答実験の最大変位はほぼ同レベルの応答を示した。フラッシュ形 4 本止めの場合は進行スリップ型履歴形状を示しており、ボルト崩壊モードによる塑性変形能力が乏しい結果となっている。フラッシュ形の変形能力は高変形能高力ボルトの使用によって 2 倍程度改善されることがわかった。

(11 年 12 月 16 日受理)

参 考 文 献

- 1) 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 1998.
- 2) 大井謙一他 2 名, 鋼構造露出型柱脚部の終局耐力, 日本建築学会論文報告集, 第 308 号, pp. 14-23, 1981.
- 3) 諸岡伸他 4 名, 軸平行部が細い高力ボルトの力学的挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 6 巻, pp. 9-16, 1998.

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、半剛接合骨実用化検討委員会 ((社) 鋼材倶楽部, (財) 生産技術奨励会) の研究費を使用した。ここに記して謝意を表す。