

繰返し曲げを受ける偏心ウェブ接合梁継手の力学特性に関する研究

辻 岡 静 雄 *

Seismic Behavior of Steel Beams with Eccentric Web Bolted Friction-Slip Joints

Shizuo Tsujioka

This study is planned to clarify the inelastic behavior and the failure characteristics of the eccentric web bolted beam joints. To examine the bending characteristics of this joints, the cyclic loading tests were conducted on nine full scale cantilever-type beams having a web bolted beam joint. The test parameters are the eccentricity of the joint, the magnitude of the hole clearance and the thickness of the web plate. The rotation stiffness, the slip strength, the yield strength, the skeleton curve and the hysteresis loop in the joint behavior are discussed. And then the ductility and the fluctuation characteristics of the bolt tension are investigated.

1. はじめに

ウェブボルト接合のみで構成されるH形鋼梁継手(“ウェブ曲げ継手”と呼ぶ)はフランジに外観上突出部がないという利点があるが、耐力・剛性が小さいと見做してピン接合とされる。しかし、その力学性能や曲げモーメント伝達効率については十分解明されていない^{1~4)}。一方、高力ボルト接合では過大孔等を有効に使えばすべりにより接合部に大きな変形能力やエネルギー吸収能力が付加でき⁵⁾、構造躯体への入力エネルギーの低減、即ち、骨組の変形制御、柱等の構造躯体の無損傷化が可能である。

本研究は、高耐力・高剛性のウェブボルト接合形式継手の開発を目指し、その履歴特性を明らかにすることを目的とする⁶⁾。特に、本報では偏心ウェブ曲げ継手を有する片持梁の繰返し曲げ加力実験の概要を報告し、当該梁継手の剛性、すべり荷重、降伏荷重、変形能力、履歴性状等について検討・考察する。

2. 片持梁の繰返し曲げ加力実験概要

試験体は溶接組立 H 形鋼(BH-300x125x6(12)x9)と溝形鋼(2C-200x80x7.5x11)のウェブ曲げ継手を固定端より 24cm の位置に有する長さ 1.2m の片持梁である。ボルト配置は総て 3 行 3 列であるが、実験変数は接合部偏心量 (0, 25mm), ボルトピッチ (90, 120mm), ボルト孔径 (標準孔: 呼び径+2mm, 過大孔: 呼び径+6mm), 接合部のウェブ板厚 (6, 12mm) で、9 供試体を製作した。試験体一覧と形状寸法を各々表 1, 図 1 に示す。但し、H形鋼ウェブのはしあきは 60mm, 継手中心のボルト孔は標準孔とした。過大孔からなる接合部はすべり挙動を有効に利用するもので、支圧状態になるまでの継手回転角は $\pm 0.030 \sim \pm 0.037$ と大きな変形能力を期待するものである。また、ウェブ板厚 6mm, 12mm の試験体は、各々接合部の曲げ降伏先行形, すべり先行形を意図している。

* 建設工学科建築学専攻

ボルトセットには M20, S10T のトルシア形高力ボルトを使用した。摩擦面はショットブラスト処理を施した後薬剤処理により発錆させ 24 時間以上経過したものとした。また、使用鋼材は 400 級で、その機械的性質を表 2 に掲げておく。

加力フレームと油圧ジャッキ等からなる加力装置と変位測定の概要を図 2、3 に示す。加力点はピンとし、加力点の横変位拘束、横座屈拘束を設けている。なお、ジャッキの押し方向を正側加力としている。加力形式は片持梁の漸増変位振幅による交番繰返し加力で、加力経路は各変位振幅 Δ_i で 2 回ずつ、計 8 サイクル繰返し後、1 サイクル加力して正方向に加力した。なお、本実験に先立ち、弾性剛性を検討するため弾性範囲で 2 回正負の定荷重振幅繰返し加力を行った。

水平力 P はジャッキ先端に取付けられたロードセルで計測した。加力点の水平変位 δ_i 等は変位変換器 (D.G.) にて測定し、加力点での片持梁のたわみ Δ 、接合部のせん断変形角 γ 、接合部での回転角 ϕ を固定端での剛体移動、剛体回転を除去して求めた (図 3)。また、ボルト頭部に歪ゲージを貼付し、ボルト張力の変動を測定した。さらに、接合部等には歪ゲージを貼付して梁断面内の歪分布性状とフランジや接合部の塑性化の進展状況を調べた。また、ボルト頭部にも歪ゲージを貼付し、ボルト張力の変動を測定した。

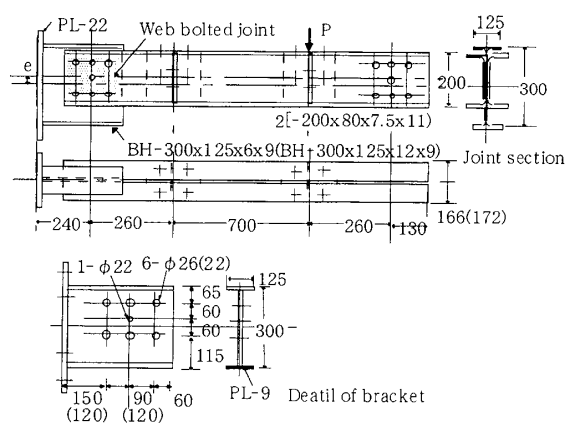


図 1 片持梁試験体

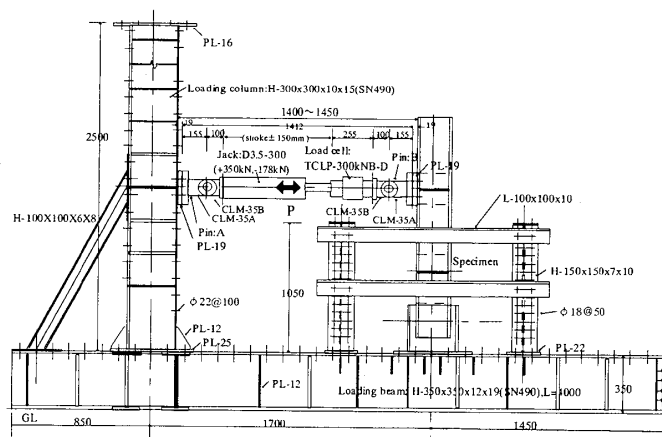


図2 実験装置

表 1 試験体一覽

No	Specimen	ウェブ接合部				弾性剛性 Ke kN/mm	曲げ耐力 (kNm)		
		ウェブ 鋼板	ピッチ p mm	偏心量 e mm	孔径		H形鋼 mMy	接合部 jMy	ボルト群 jMs
1	CN-6-90	PL-6	90	0	φ22	15.63	178.0	76.6	97.3
2	CN-6-120	PL-6	120	0	φ22	15.63	178.0	95.1	113.2
3	CN-12-90	PL-12	90	0	φ22	16.70	202.8	121.6	96.9
4	CNH-6-90	PL-6	90	25	φ22	15.63	178.0	76.6	91.9
5	CNH-6-120	PL-6	120	25	φ22	15.63	178.0	95.1	119.0
6	CNH-12-90	PL-12	90	25	φ22	16.70	202.8	121.6	92.4
7	COH-6-90	PL-6	90	25	φ26	15.63	178.0	76.6	93.3
8	COH-6-120	PL-6	120	25	φ26	15.63	178.0	95.1	120.6
9	COH-12-90	PL-12	90	25	φ26	16.70	202.8	121.6	96.9

表 2 鋼材の機械的性質

鋼材		降伏応力度 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	ヤング係数 N/mm ²
溝形鋼	PL-7.5(Web)	339	505	34.2	207500
	PL-11(Flange)	335	497	33.0	205300
溶接H形鋼	PL-6(Web)	355	489	35.7	211300
	PL-12(Web)	282	455	45.3	209900
	PL-9(Flange)	415	577	27.7	205000

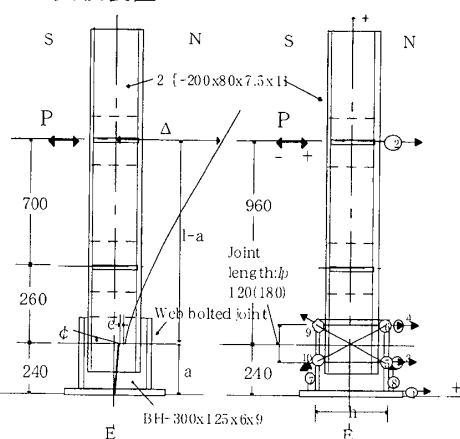


図 3 変位の測定

3. 実験結果とその考察

解析結果を表1に合わせて、表3に実験結果一覧を掲げる。ここに、降伏曲げ耐力 mMy と jMy は、各々H形鋼と接合部（最外縁のH形断面）の塑性モーメントで、ボルト群のすべり耐力 jMs は実験開始時の平均ボルト張力より得られた高力ボルトのすべり耐力（ $\mu=0.609^{7)}$ ）を用いて算定した。片持梁の弾性剛性 Ke は、せん断変形を考慮して曲げ継手を剛接と見做して算定した。降伏荷重 P_y は1サイクル目の正側の荷重 P -たわみ Δ 関係における接線剛性が初期剛性 K の $1/6$ の荷重レベルである。塑性率 μ はすべり前の骨格曲線の最大荷重時のたわみ Δ_m を弾性たわみ $\Delta_y (=jPy/K)$ で、塑性変形倍率 η は骨格曲線の最大荷重 P_m 時のたわみ Δ_m より得られた見掛けの塑性成分 $\Delta_p (= \Delta_m - P_m/K)$ を弾性たわみ Δ_y で除して算出した。

偏心有りと無の代表的な試験体の荷重-たわみ・接合部のせん断変形角関係を図4，5に掲げる。図中の破線は接合部の降伏曲げ耐力を，鎖線はボルト群のすべり耐力の荷重レベルを示す。

表3 実験結果

Specimen	初期剛性 K kN/mm	回転剛性 K_θ kNm	平均ボルト張力 (kN)			降伏荷重 P_y (kN)	最大荷重(kN)		変形能力	
			開始時	P_y 時	P_m 時		P_m+	P_m-	$\mu+$	$\eta+$
CN-6-90	10.51	17940	159.3	157.9	127.0	70.8	79.5	-79.1	3.16	2.16
CN-6-120	10.98	19010	154.5	149.8	146.2	84.2	88.8	-82.5	1.55	0.65
CN-12-90	11.51	51400	164.6	153.0	142.6	115.2	120.9	-98.0	1.64	0.68
CNH-6-90	9.80	16840	154.4	148.4	143.4	63.9	66.4	-61.3	1.49	0.66
CNH-6-120	10.15	26990	166.0	159.3	156.9	84.3	88.5	-87.2	1.44	0.54
CNH-12-90	12.10	29280	155.7	154.1	144.2	91.6	97.1	-81.0	1.63	0.86
COH-6-90	10.31	20600	161.5	155.9	153.0	68.9	74.7	-74.4	2.22	1.28
COH-6-120	10.27	32190	163.6	165.9	163.8	77.3	80.9	-73.5	1.15	0.34
COH-12-90	11.45	34230	160.1	159.3	156.7	75.3	80.6	-64.1	0.71	0.08

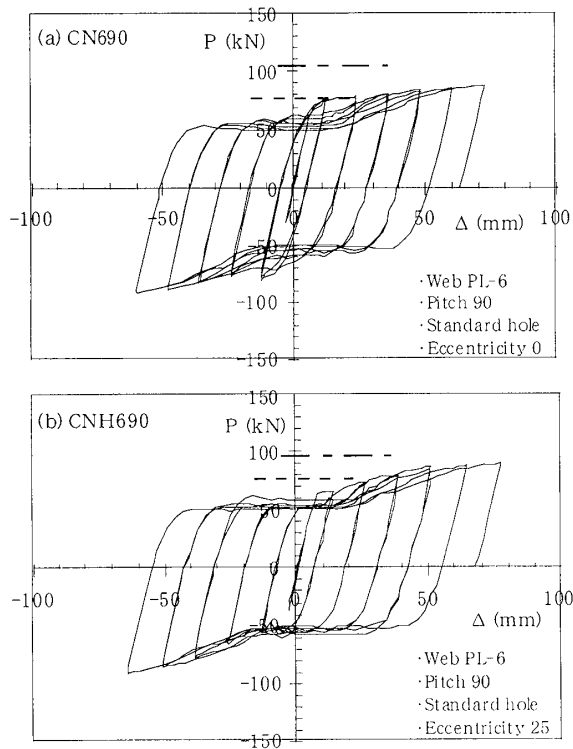


図4 荷重-たわみ関係

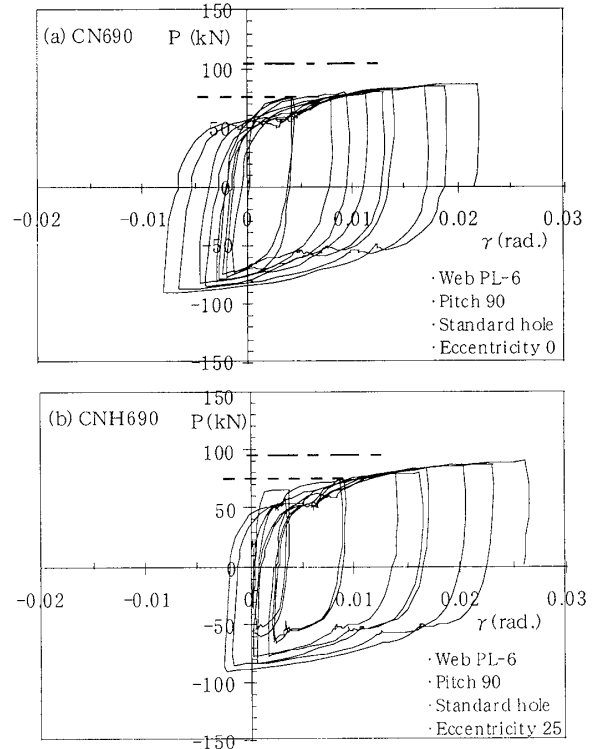


図5 荷重-せん断変形角関係

(1) 繰返し性状

たわみ性状は接合部変形に支配され、すべり発生までは紡錘形となり、すべり発生後はすべり荷重が大きく低下しほぼ一定となり、スリップ形で、孔の支圧変形、その後の接合部の塑性変形による耐力上昇が著しい。また、接合部のせん断変形角でのすべりの影響は小さく全般を通して紡錘形となるが、ピッチが 90mm の場合は履歴ループが正側に偏り累積する傾向がある。また、ウェブ板厚 12mm ではすべりが降伏に先行する傾向も認められた。いずれにしても履歴性状は、接合部でのすべり、H形鋼ウェブでのボルト孔の支圧変形、H形鋼ウェブの接合部領域（最外縁ボルト間）のせん断変形に大きく影響されると言える。なお、ボルトのせん断や溝形鋼の変形（せん断、孔）は認められなかった。

過大孔は標準孔に比べて初期剛性やすべり荷重で大きな違いはないが、支圧開始までのすべり量が大きいため、結果として耐力上昇が小さく、接合部のせん断変形が小さくなるという点が大きく異なる。偏心有りでは早期に接合部降伏が生じてスリップ性状になるが、偏心無しと大きな違いはない。

(2) 継手剛性

初期剛性 K は 9.8~12.1kN/mm の範囲で、弾性剛性 K_e の 62.7~72.5%（平均値 67.4%）である。偏心無しに対して偏心有りの方が、また、ウェブ板厚 12mm に対して板厚 6mm の方が初期剛性は小さい傾向があるが大きな差異はない。更に、当該接合部中心に回転バネ ($M=K_\theta \theta$) を有するモデルで評価すれば、試験体のたわみ $\Delta (=P/K)$ は弾性たわみ成分 $\Delta_e (=P/K_e)$ と回転バネ成分 $\Delta_\theta (=P(\ell-a)^2/K_\theta)$ の和として得られる。回転剛性 K_θ は 19000~51400kN・m となり、偏心有りの方が回転剛性は大きい傾向がある。

(3) 継手耐力

接合部降伏先行型の試験体の降伏耐力の実験値 P_y は接合部の計算値 jP_y に比べ 77.5~104%（平均値 90.1%）となり、偏心有りや過大孔の影響は小さいといえる。これはすべり係数が 0.45 以上ですべり耐力が大きいこと、接合部の塑性化が片側に偏るものの逆側は弾性に留まっていること等によると考えられる。

すべり発生までの履歴ループにおける最大荷重 (66.4~120.9kN) を初すべり荷重とすれば、実験開始時のボルト張力と平均的なすべり係数値の 0.609 を用いて算出したボルト群のすべり耐力 jP_s に対して実験値は 64.4~120%となる。ウェブ板厚 12mm のすべり先行型の試験体では 79.8~112%（平均値 100%）で、ほぼ対応しているが、接合部降伏先行型では 64.4~78.5%（平均値 72.6%）と小さくなった。これは、いずれもせん断ボルト群の最外縁のボルトでは塑性化が進展しボルト張力が大きく抜けたことによる。

(4) ボルト張力変動とすべり係数

接合部降伏時の最外縁のボルト（4本）の張力低下は他のボルトに比べ大きく、これらの平均ボルト張力は実験開始時に対して 91.8~99.5%（平均値 96.8%）となるが、実験変数の影響は小さいものと考えられる。また、すべり発生までの履歴ループにおける最大荷重時にはウェブの塑性化の進展でボルト群の平均ボルト張力は 85.7~97.7%（平均値 93.6%）となり、残存張力が小さくなった。

次に、曲げ継手の摩擦係数或いはすべり係数について検討する。ボルト張力と荷重との関係（ボルト張力低下曲線）において原点を通る直線との接点がすべり発生点であり、その直線の勾配より摩擦係数が得られる。最外縁のボルト（4本）の平均ボルト張力低下曲線より得られた摩擦係数は 0.459~0.851（平均値 0.564）となった。この時点での平均ボルト張力の残存率は 82.7~97.7%であるので、この値と摩擦係数よりすべり

係数を算出すれば、0.422～0.730（平均値 0.521）となり、ウェブ板厚 6mm，或いは過大孔ではすべり係数が小さいという傾向がある。

（５）骨格曲線と変形能力

表 3 のすべり前の塑性率は 1.15～3.16，塑性変形倍率は 0.097～2.16 となる。一般に，ウェブ板厚 6mm に比べて 12mm では塑性変形が少なく，また，過大孔や偏心有りの場合は塑性率，塑性変形倍率共小さくなった。

すべり前およびすべり後の荷重変形関係の包絡線として得られた正側の骨格曲線（スケルトンカーブ）を図 6 に掲げる。骨格曲線は，接合部でのすべりと降伏に大きく影響され，すべり後はすべり・支圧挙動と降伏挙動に支配される。特に，すべり後は偏心の有無に関わらず，また，過大孔では平行移動させることにより各ウェブ板厚の骨格曲線が一致することは注目すべきである。これは，いずれもボルトのクリアランスから算定される接合部の剛体回転，支圧挙動，接合部の塑性性状の順に影響されているからと考えられる。

（６）H形鋼ウェブのせん断歪

図 7 には接合部の最外縁のボルト位置での断面でボルト行列と H 形鋼フランジとの間のウェブに貼付した 3 軸歪ゲージから得られたせん断歪 γ_{xy} と荷重の関係の一例を示す。ウェブ板厚 6mm ではすべり前にせん断歪では紡錘形となり，すべり後も更に履歴ループは大きくなる。板厚 12mm ではすべり前はほぼ弾性であるが，すべり後は紡錘形の履歴を描く。また，偏心の有無に関わらずいずれも正側に履歴ループは偏っている。

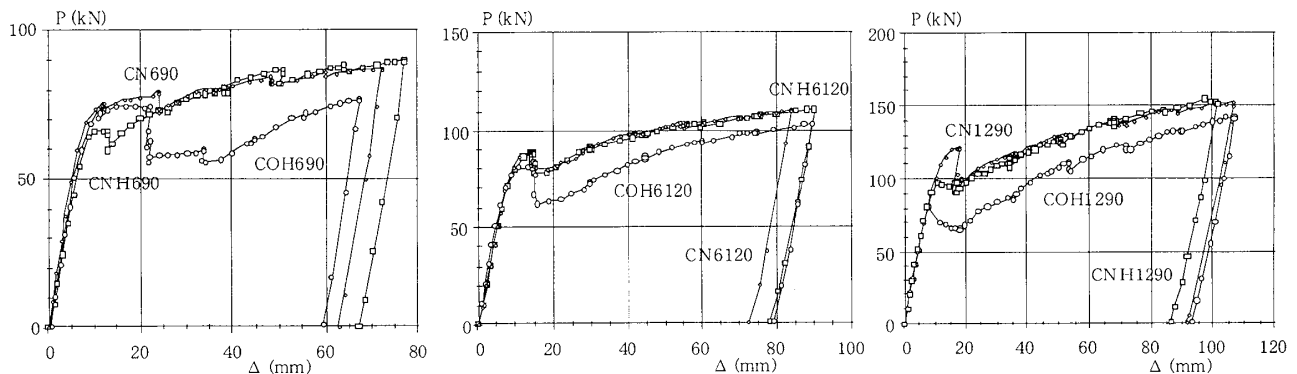


図 6 骨格曲線

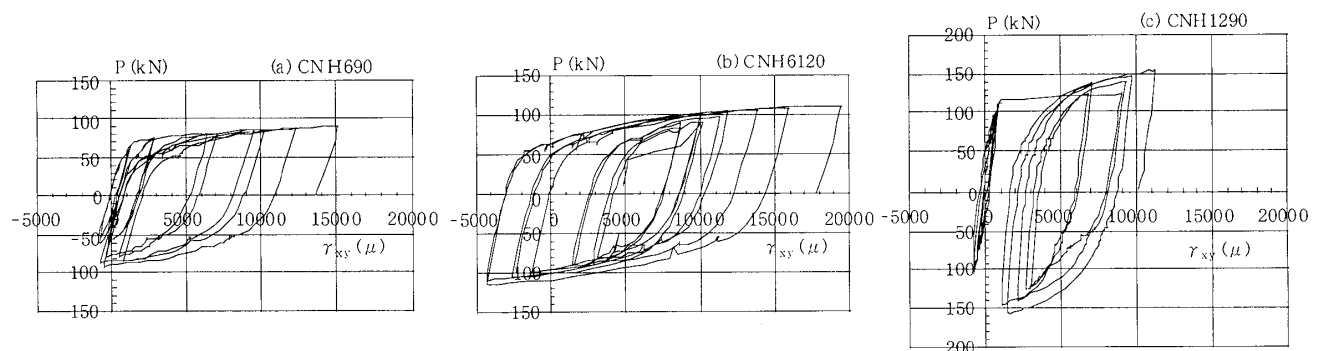


図 7 荷重-せん断歪 γ_{xy} 関係

4. まとめ

本報では、標準孔・過大孔を用いた高力ボルト摩擦接合部から構成される偏心ウェブ曲げ継手の曲げ耐力、骨格曲線、履歴性状を繰返し曲げ加力実験により検討・考察した。剛性は接合部領域とウェブ板厚に僅かに影響されるが接合部を剛接とした片持梁の弾性剛性の 67.4% となること、曲げ耐力は偏心有りでは僅かに危険側に評価するが計算値の 90.1% 程度となること、過大孔を用いた曲げ継手では塑性変形は小さく損傷が小さくなること、すべり後はスリップ型の履歴ループとなり動的すべり・支圧挙動・接合部の塑性性状でモデル化できること等が得られた。今後は、これらの基礎資料を元に、ハンチ付梁等へのウェブ曲げ継手の適用・拡張を解析的・実験的に検討する予定である。

謝辞 本研究は福井工業大学特別研究費の助成を受けた。試験実施に当り福井工業大学の卒研究生諸君に多大な協力を得ました。

ここに、記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 高 江梁, 関美和, 上杉英樹, 大山宏, 斉藤光: 高張力鋼板を用いたウェブ曲げ継手に関する実験的研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp. 659-662, 1996. 9
- 2) 加藤 勉, 金子洋文, 宇佐美 徹: ウェブ高力ボルト摩擦接合の梁の力学性能, 鋼構造論文集, 第 10 巻第 40 号, pp. 1-7, 2003. 12
- 3) 田中直樹, 富田昭夫, 河本克巳, 鈴木宏一: 鉄骨梁端部に位置する高力ボルト摩擦接合部の弾塑性性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 566 号, pp. 169-176, 2003. 4
- 4) 辻岡静雄: ウェブボルト接合形式梁継手の力学特性に関する研究, 鋼構造論文集, 第 12 巻第 48 号, pp. 11-16, 2005. 12
- 5) 田中淳夫, 増田浩志, 脇山廣三, 辻岡静雄, 平井敬二, 立山英二: 過大孔・スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状, 鋼構造論文集, 第 5 巻第 20 号, pp. 35-44, 1998. 12
- 6) 辻岡静雄, 永野康行: 繰返し曲げを受けるウェブ接合形式梁継手の力学特性に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp. 745-752, 2006. 11
- 7) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, pp. 222-223, 1998. 10

(平成 20 年 3 月 31 日受理)