

スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の動的履歴特性

辻 岡 静 雄*

Dynamic Hysteresis Characteristics on High-Strength Bolted Friction-Type Joints with Slotted Holes

Shizuo Tsujioka

This paper deals with the high-strength bolted friction-type joints using the cold-formed steel plate with the slotted holes. To clarify the slip load and the dynamic hysteresis characteristics, the quasi-static and the dynamic tests under the increasing-amplitude displacement-cycling were conducted. The test parameters are the hole type of the plate, the plate washer, the loading speed and the maximum displacement amplitude. Results indicate that the energy absorption capacity of the joints where the outer plates have a slot hole is larger than that of the joints where the inner plate has a slot hole and the hysteresis characteristic of the joints with the plate washers is stable through whole cycles.

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合は応力の流れが円滑で継手の剛性が高く疲労に強い優れた現場接合である。応力伝達機構上、若干の過大孔はすべり耐力には影響しないと考えられるが、過大孔や長円孔(以後、スロット孔と呼ぶ)ではボルト張力の減少、最大耐力の低下という問題^{1, 2)}が存在する。海外では設計基準³⁾で過大孔が規定されていること、クリアランス6mm程度であればボルト張力導入に大きな問題はないことなどの報告⁴⁾があるにも関わらず、施工精度の低下を伴う危険性から、現行の施工マニュアルや設計体系では過大孔は規定されていない。しかし、寸法誤差や施工誤差に対して過大孔、スロット孔の採用が望まれているのも事実で、一連の過大孔・スロット孔に関する実験⁵⁾が実施され、静的すべり耐力についてはECCSにおける耐力低減係数を採用することが提案されているが、過大応力下での繰返しすべり性状やエネルギー吸収能力については検討されていない。

ところで、兵庫県南部地震を耐えた建物の地震後の再利用に際して損傷は倒壊と同義語であり、耐震性能の維持、資産保持も重要な設計目標であることが改めて確認され、耐震構造にエネルギー吸収機構(ダンパー)を導入し柱・梁などの骨組の損傷を低減させる損傷制御法が注目されている⁶⁾。このダンパーの一つに摩擦接合部分での摩擦力によるエネルギー吸収能力を利用した摩擦ダンパー⁷⁾がある。摩擦材や摩擦面処理に工夫が見られるが、いずれも弾塑性型の履歴特性を示し、摩擦力の安定性、耐久性、耐火性、音の発生などが検討されている。一方、高力ボルト摩擦すべり接合を梁端の継

* 建設工学科 建築学専攻

手に用いてその弾塑性型の履歴特性を梁端ヒンジの力学特性とするための基礎実験⁸⁾も行われている。

本研究では高力ボルト摩擦接合部にすべりを生じさせて得られる履歴特性を利用することを目的として、スロット孔を外板に設けることにより高力ボルト摩擦接合部の高耐力化を計ったものであり、そのすべり荷重と履歴特性を準静的、動的繰返し実験により検討・考察する。

2. 実験概要

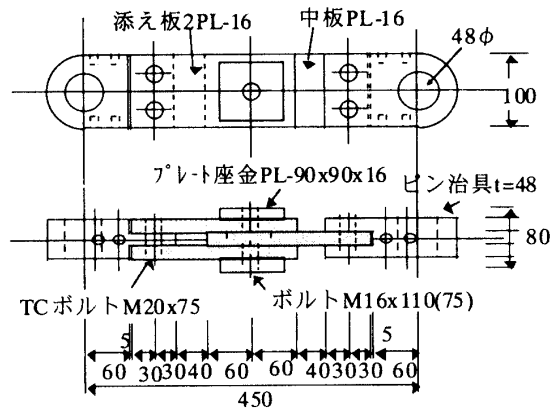
A～Cの実験シリーズがあるが、いずれも試験体は単一ボルトによる2面摩擦接合形式で、その形状寸法と一覧を表1、図1に掲げる。ボルトにはM16（10.9強力六角ボルト、F10T）を、中板・外板・板座金にはみがき平鋼FB-16（原板SS400材）を使用した。この板座金は孔周辺に接触圧が集中するのを防ぐためである。使用鋼材の機械的性質を表2に示すが、冷間加工を大きく受けている。ボルト孔は標準孔（18φ）あるいはスロット孔（18mm×58mm、18mm×88mm）で、CO₂レーザー加工機（3KW、AMADA製）により明けた。ボルトの締付け軸力（初期ボルト張力B₀）は10tとした。摩擦面にはグリッドあるいはショットブラスト処理を施したが、比較のためその後脱脂あるいは赤錆発錆（ヒットロックB使用）も行った。また、中板・外板の各摩擦面処理後の孔周辺での表面粗さを測定した（表3）。なお、Aシリーズでは板座金の表面処理は原板のままとし、B、Cシリーズでは各々ショット、グリッドブラスト処理を行った。

実験因子にはスロット孔部位（中板、外板）、板座金の有無、載荷（変位）速度（0.3, 6.0, 20cm/sec）、最大（変位）振幅（±3.5, ±15, ±30mm）を採用したが、Aシリーズではスロット孔位置、載荷速度の各影響を、Bシリーズでは同一載荷速度下での板座金の有無の影響を、Cシリーズでは大変位振幅に至る場合を検討した。なお、試験体記号は英記号〔動的(D)〕、シリーズ名〔A,B,C〕、スロット孔

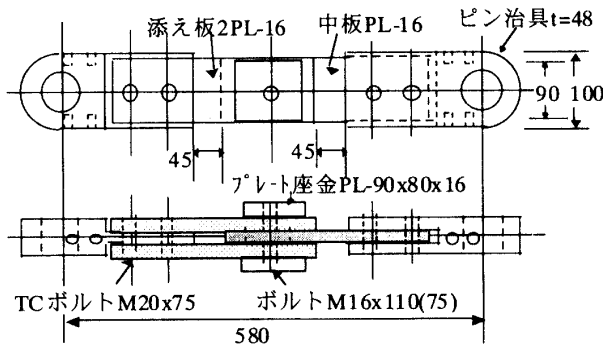
表1 試験体一覧

Series	No	記号	表面処理	ボルト	ボルト孔		プレート座金	最大振幅 (mm)	載荷速度 (cm/sec)	ボルト張力 (ton)
					(中板)	(外板)				
A	0	DANG0P	グリッド	M16x110	標準孔	標準孔	有	±3.5	0.3	10
	1	DAIG0P	"	"	スロット孔	標準孔	"	±15	0.3	"
	2	DAIG6P	"	"	"	"	"	±15	6	"
	3	DAIG20P	"	"	"	"	"	±15	20	"
	4	DAOG0P	"	"	標準孔	スロット孔	"	±15	0.3	"
	5	DAOG6P	"	"	"	"	"	±15	6	"
	6	DAOG20P	"	"	標準孔	スロット孔	"	±15	20	"
B	7	DAIGC6P	グリッド+脱脂	"	スロット孔	標準孔	"	±15	6	"
	10	DBNS6	ショット	M16x75	標準孔	標準孔	無	±3.5	6	10
	11	DBNS6P	"	M16x110	"	"	有	±3.5	"	"
	12	DBIS6	"	M16x75	スロット孔	標準孔	無	±15	"	"
	13	DBIS6P	"	M16x110	"	"	有	±15	"	"
	14	DBQS6P	"	"	標準孔	スロット孔	有	±15	"	"
C	15	DBOSR6P	ショット+赤錆	"	標準孔	スロット孔	有	±15	"	"
	20	DCNG0	グリッド	M16x75	標準孔	標準孔	無	±3.5	0.3	10
	21	DCIG0	"	"	スロット孔	標準孔	無	±30	0.3	"
	22	DCIG6	"	"	"	"	無	±30	6	"
	23	DCIG6P	"	M16x110	"	"	有	±30	6	"
	24	DCOG0P	"	"	標準孔	スロット孔	有	±30	0.3	"
	25	DCOG6P	"	"	"	"	有	±30	6	"
	26	DCOG20P	"	"	"	"	有	±30	20	"

* 載荷履歴：
 ・ ±3.5 = ±2mm, ±3.5mmの三角波を各2回加力
 ・ ±15 = ±5mm, ±10mm, ±15mmの三角波を各2回加力
 ・ ±30 = ±10mm, ±20mm, ±30mmの三角波を各2回加力



(a) 組立図 (シリーズA,B)



(b) 組立図 (シリーズC)

図1 単一ボルト試験体 (板座金有の場合)

表2 鋼材の機械的性質

鋼材	寸法	降伏応力度 MPa	引張強さ MPa	伸び %	ヤング係数 MPa
みがき	PB-16x100	585	625	27.5	207800
平鋼	PB-16x90	613	648	23.1	215300

注) ・5号引張試験片

表3 平均表面粗さ

Series	表面処理	Ra (μm)	Rmax (μm)	Rz (μm)
A	グリッド	5.75	53.4	39.6
B	ショット	7.68	68.1	51.8
	ショット+赤錆	7.60	71.0	55.6
C	グリッド	7.83	76.4	56.5

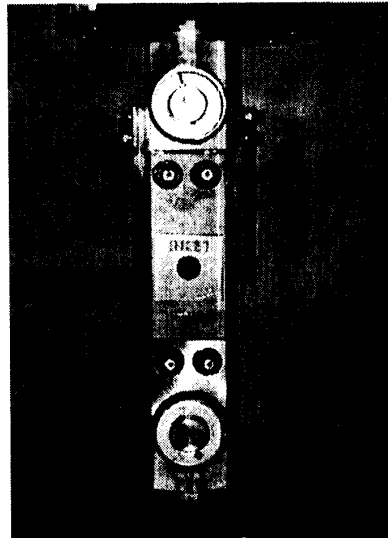


写真1
載荷状況

位置 [無し(N), 中板(I), 外板(O)]、摩擦面処理 [グリッド(G), ショット(S), 赤錆(SR), 脱脂(GC)]、載荷速度 [0, 6, 20]、板座金の有無 [有(P)] の順に表されている。

試験体の設置状況を写真1に示す。試験体の両端部にピン治具を取付け、コンピュータ制御高速載荷試験システムを用いて三角波の変位波形で引張圧縮繰返し加力を行った。なお、各変位振幅で2サイクルの漸増変位振幅とした。加振力 (荷重 P)、チャック間伸び (すべり δ) は試験機の計測装置で、ボルト張力 B はボルト軸部に貼付した歪ゲージで計測した。

3. 実験結果

(1) 初すべり性状とすべり荷重

最初の半サイクル時の荷重-すべり関係の一例を図2に、初すべり荷重、すべり係数を表4、図3に掲げる。

すべり性状について、標準孔 (N)、中スロット孔 (I) 共初すべりは中板のすべりで生じた。標準孔ではその後荷重が低下し支圧状態に至れば荷重が上昇するが、中スロット孔ではすべり後大きく荷重は低下し初すべり荷重の5割程度に収斂する傾向を示す。外スロット孔 (O) の場合、中板がすべり荷重が低下するが、ボルトと中板孔壁が接触して支圧状態になり荷重が上昇する。その後、板座金と外板との間ですべりが生じ再び荷重が低下する。その低下性状は中スロット板の場合と同様である。ここで、最初の中板のすべり、2回目の外板のすべりの各荷重を P_{s1} 、 P_{s2} とし、各々のすべり係数 μ は初期ボルト張力 B_0 を用いて $P_{si}/(2B_0)$ で算定した。

表4 実験結果

Series	No	記号	初期ボルト 張力 (ton)	1/2サイクル				平均すべり荷重(kN) (最終サイクル)			
				初すべり荷重 (kN)		すべり係数*		引張側		圧縮側	
				Ps ₁	Ps ₂	μ_1	μ_2	Ps ₁	Ps ₂	Ps ₁	Ps ₂
A	0	DANG0P	10.03	58.70	-	0.299	-	-	-	-	-
	1	DAIG0P	10.08	55.81	-	0.282	-	24.26	-	-24.67	-
	2	DAIG6P	9.59	56.43	-	0.300	-	23.59	-	-22.86	-
	3	DAIG20P	9.55	55.76	-	0.298	-	22.93	-	-22.66	-
	4	DAOG0P	9.99	56.12	67.29	0.287	0.344	21.80	40.89	-21.14	-40.89
	5	DAOG6P	9.53	54.59	69.45	0.292	0.372	20.51	40.27	-20.22	-39.92
	6	DAOG20P	9.80	53.29	65.97	0.277	0.343	18.47	36.05	-17.66	-35.40
B	7	DAIGC6P	10.06	57.23	-	0.290	-	27.22	-	-27.27	-
	10	DBNS6	9.91	52.84	-	0.272	-	-	-	-	-
	11	DBNS6P	9.83	53.36	-	0.277	-	-	-	-	-
	12	DBIS6	9.67	51.17	-	0.270	-	25.91	-	-26.64	-
	13	DBIS6P	10.06	50.41	-	0.256	-	25.77	-	-25.71	-
	14	DBOS6P	10.10	54.44	77.81	0.275	0.393	22.97	43.35	-22.48	-43.63
C	15	DBOSR6P	9.73	137.0	176.6	0.718	0.926	41.67	-71.01	-43.60	-70.88
	20	DCNG0	8.93	70.08	-	0.400	-	-	-	-	-
	21	DCIG0	10.08	69.38	-	0.351	-	27.89	-	-29.14	-
	22	DCIG6	10.04	69.60	-	0.354	-	27.54	-	-29.54	-
	23	DCIG6P	10.01	74.37	-	0.379	-	27.03	-	-27.42	-
	24	DCOG0P	9.95	71.79	87.32	0.368	0.448	25.40	40.68	-22.23	-41.37
	25	DCOG6P	9.89	74.66	76.66	0.385	0.395	26.90	43.69	-24.13	-43.52
	26	DCOG20P	9.92	72.40	91.87	0.372	0.472	26.69	42.65	-23.07	-43.77

* 2面摩擦として算定

すべり係数については赤錆処理を除けばA、Bシリーズでは μ_1 は0.256～0.3、 μ_2 は0.343～0.444、Cシリーズでは μ_1 は0.351～0.4、 μ_2 は0.395～0.472にあり、すべり係数 μ_1 にはA,BシリーズとCシリーズに差異が認められるものの、標準孔とスロット孔の差異、スロット孔の位置、板座金の有無、載荷速度、表面処理や脱脂の影響は小さい。シリーズの違いは端部ピン治具との取付けボルト配置の違いによると考えられる。外スロット孔の試験体では摩擦面数が多くなるのですべり係数 μ_2 は μ_1 より大きくなるが、初すべり後中板の孔のクリアランスやボルトの曲げ変形、支圧変形に相当するすべりにより荷重が低下するため見掛け上あまり大きくならない場合があり、摩擦面数に比例しない。しかし、中板のボルト孔のクリアランスを小さくすることによりこの荷重低下を抑制することが出来るものと考えられる。

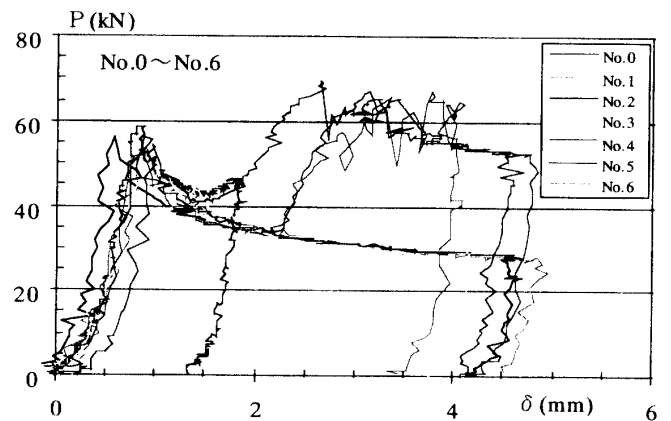


図2 荷重-すべり関係 (1/2 サイクル)

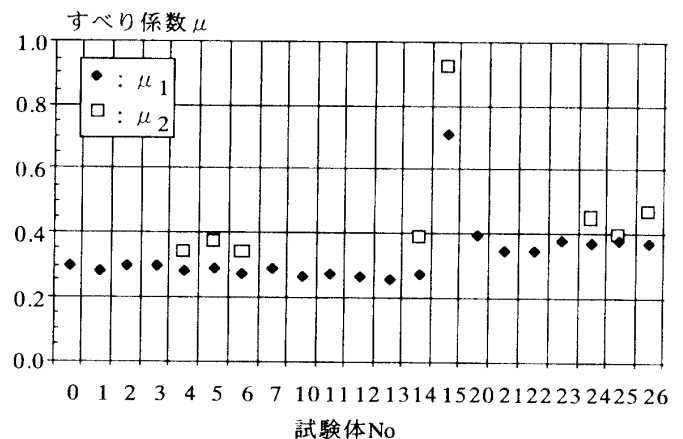


図3 すべり係数

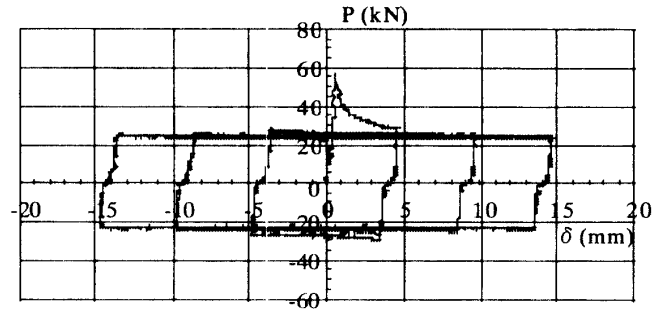
(2) 履歴性状

荷重 - すべり関係の一例を図4に掲げる。ここに、図中の荷重零レベルでのずれは端部ピンのクリアランスによる影響である。また、スロット孔の荷重 - 累積すべり関係の一例を図5に示す。さらに、最終の1サイクル(11/2, 12/2サイクル)の平均すべり荷重も表4に合わせて掲げる。

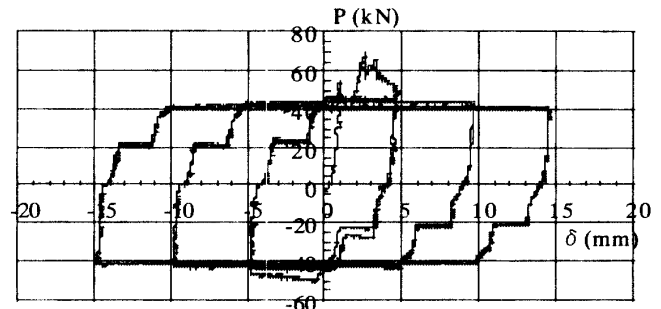
中スロット孔では、2/2サイクル以降は安定した剛塑性型の履歴性状を示し、すべり荷重は繰返しとともにやや低下しているが25～30kNとほぼ一定で、1/2サイクルの最大すべり荷重(50～70kN)に比べ大きく低下している。載荷速度が非常に速いと定常状態への収斂が遅くなる傾向が、また、板座金が無いと加振中にすべり荷重が一定値になった後漸増したりすべり荷重が変動する傾向が認められる。

外スロット孔の場合、マクロ的には剛塑性型の履歴性状を呈し、繰返しとともに定常となるが、中板のすべり、外板のすべりに対応して1/2サイクル時と同様2段階のすべり荷重が存在する。一般に、20～27kNですべり荷重は一旦一定となり、約2mm程度のすべりの後35～44kNで再びすべり荷重は一定となる。中スロット同様、載荷速度が非常に速いと定常状態への収斂が遅くなること、1/2サイクルの最大すべり荷重に比べ大きく低下することが得られた。また、加振中にすべり荷重が一定値になった後漸増する傾向は認められない。さらに、赤錆の場合にはすべり荷重は70kN程度と大きい履歴性状に大きな違いはない。

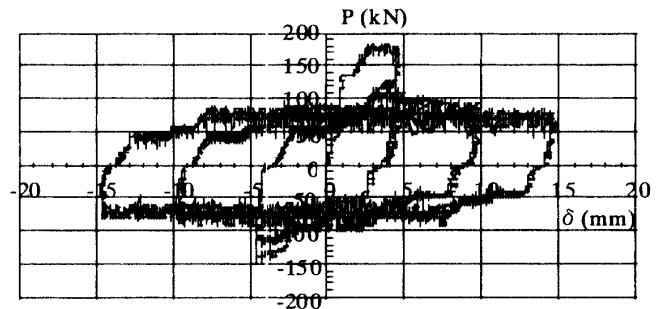
以上、いずれの場合もスロット孔では、繰返し加力時のすべり荷重は摩擦面数に比例すると言える。



(a) No.2, 中スロット, 6.0cm/sec



(b) No.5, 外スロット, 6.0cm/sec



(c) No.15, 外スロット (赤錆), 6.0cm/sec

図4 荷重 - すべり関係

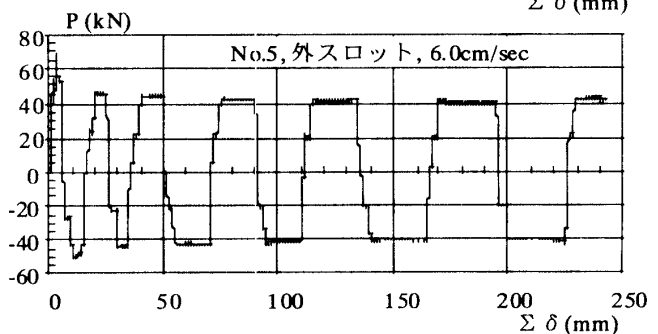
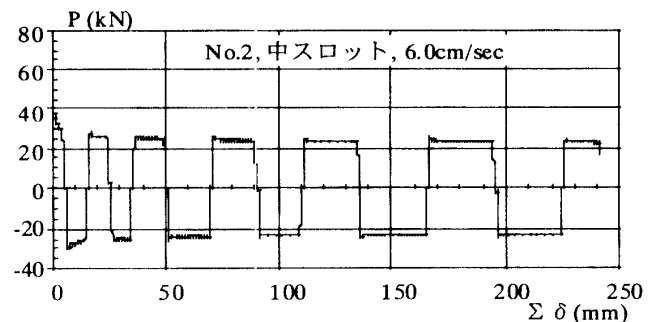


図5 荷重 - 累積すべり関係

(3) ボルト張力変動

荷重 - ボルト張力関係の代表例を図6に示す。いずれも中板のすべりによる初すべり荷重まではほとんど変動はない。これは母材応力が小さく、長締めボルトを用いていることによる。すべり後の繰返しでは、標準孔では10%程度低下し支圧状態になると複雑な応力状態となる。中スロット孔では5~8%程度変動し、既往の研究成果⁸⁾と同等で、摩擦面が摩耗して平滑になるためである。外スロット孔では中板のすべり後の外板のすべりで5~10%と大きく変動し、その後の繰返しに対してさらに大きく変動している。これは、長締めボルトにせん断と曲げが作用すること、平滑となる面が多いことによる。

(4) スロット孔の摩擦面とすべり音

実験終了後のスロット孔の摩擦面の一例を写真2に示す。繰返し加力により中スロットでは中板と外板、外スロットでは中板と外板および外板と板座金の接触面で凝着摩耗による金属光沢が見られる。また、掘り起こしによる損傷もNo.12では摩耗領域の中央部分で局所的にみられ、No.20~22では摩擦面に生じた介在物による線条痕が生じている。これらの試験体は前述の履歴性状の変動が見られた板座金の無い試験体である。

一方、A、Bシリーズでは中板の摩耗位置は孔から離れたところで、外板と板座金の接触面の摩耗位置は孔近傍となる。また、Cシリーズではいず

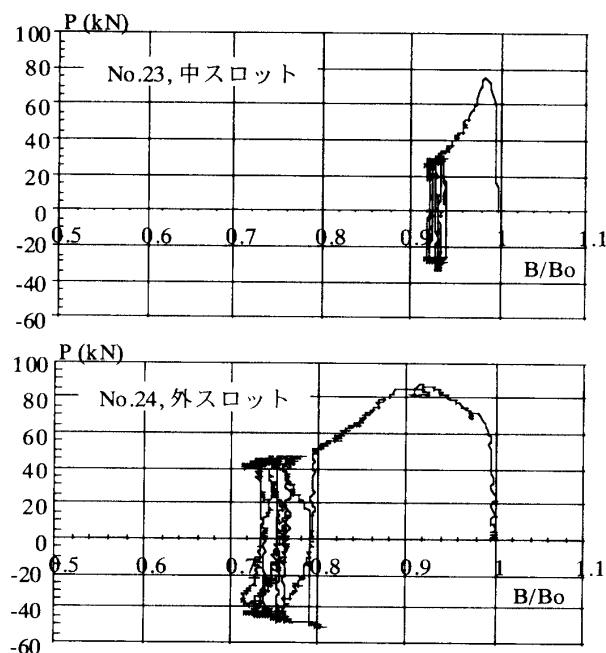
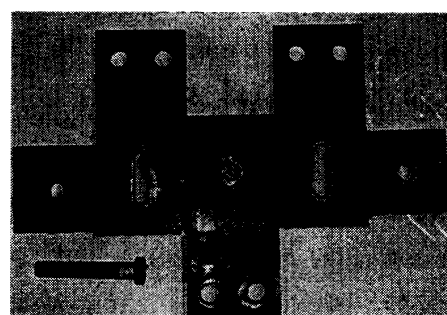
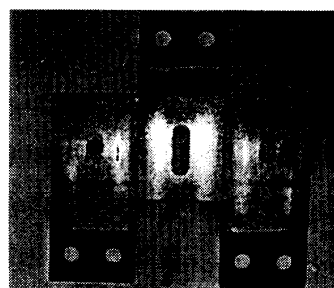


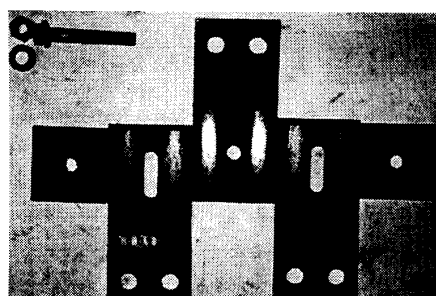
図6 荷重 - ボルト張力関係



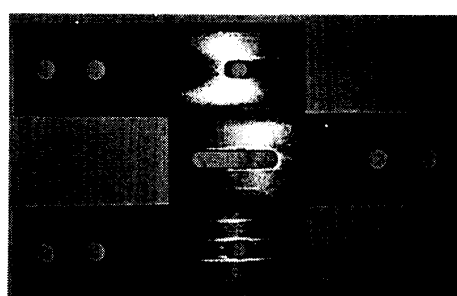
(a) No.5



(b) No.12



(c) No.15



(d) No.22

写真2 摩擦面状況

れも摩耗位置は孔近傍となり、孔縁に線条痕が認められる。

次に、すべりに伴う音の発生については、赤錆処理ではすべり後履歴全域に渡って鋭いすべり音が生じたが、スロット孔の他の表面処理では無騒音であった。

4. 纏め

本報告では、スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の準静的、動的繰返し実験を行い、すべり荷重と履歴特性を検討・考察した。外スロット孔では2段階のすべり荷重が存在し、中スロット孔に比べより大きなエネルギー吸収能力を呈する履歴性状を示すこと、板座金は摩擦面の局所的損傷や線条痕によるすべり荷重の漸増や変動の防止に役立つこと等が得られた。今後、摩擦ダンパーなどに利用するには摩擦面の損傷防止の点から累積すべり限界を明らかにすることが必要である。

謝辞 本研究は1999-2000年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)の助成を受けた。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造接合資料集成、技報堂、1977年3月。
- 2) 藤本盛久、田中淳夫：過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部の性状について（その1）、昭和52年度、日本建築学会関東支部研究報告集。
- 3) AISC：Specification for High Strength bolted Connection.
- 4) 東清三郎他2名：過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力導入に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.353-354、1995.8.
- 5) 田中淳夫他5名：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20号、pp.35-44、1998.12.
- 6) 日本建築学会：動的外乱に対する設計の展望、pp.308-311、1996.11.
- 7) 例えば、小野聡子他3名：アルミ溶射摩擦ダンパーの静的および動的履歴特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41B、pp.1-8、1995.3.
- 8) 吉田智洋他3名：鉄骨造骨組における高力ボルト摩擦すべり接合に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集B構造III、pp.245-246、1997.9.

（平成12年11月22日受理）