

太径高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究

辻 岡 静 雄 ・ 崔 圭 弘

Strength of M30 High-Strength Bolted Friction-Type Joints

Shizuo TSUJIOKA and Kyo Hong CHOI

For the large-scale steel structures, the high-rise building etc., the high-strength and/or very thick section steel member are often used. Therefore, for the practical connections utilizing the welding and/or the high-strength bolting the higher performance is required. For the bolted joints, the important parameters affecting the slip resistance are the condition of the faying surface and the bolt clamping force. Thus, this paper deals with the friction-type joints using M30 high-strength bolt (F10T). The static tests of single and double bolted friction-type joints were conducted. The test parameters were the grade of the gripped member and the contact surface condition. The slip strength, the effect of the friction force in joint behavior and the fracture mode are discussed. And then the relationship between the slip strength of the joint and yield strength of the connected members is investigated.

1. 序

鉄骨構造物において、柱・梁部材や筋かいなどの引張材の継手に高性能接合要素、例えば、高性能高力ボルトを用いれば、従来に比べ継手のコンパクト化、合理化が可能である。一方、大スパン建築や超高層建築では部材の高強度化や極厚化に伴い高品質・高性能のコンパクトな接合部（継手、仕口や柱脚）あるいは新形式の接合方法が要求される。また、接合部の現行設計法や構造細則は通常の鋼材に対して規定されており、歴史的な経緯を考え合わせれば高張力鋼材や厚肉鋼材にその設計法などを適用することは問題が多い。高力ボルト摩擦接合¹⁾を考えた場合、現行の高力ボルトの鋼種・呼び径では高力ボルト本数の増大、継手長さの増加、施工手間の増大などの問題が生じる。高力ボルト摩擦接合に対する高性能化の要求は構造物における継手の必要性能によって異なると考えられるが、大別すれば、(1)摩擦面のすべり耐力、(2)ボルトのせん断耐力、(3)接合部母材の引張耐力、の各耐力に関してであろう。これらの各耐力を向上するためには、(1)の項目については高い材間圧縮力、大きなすべり係数、大きな摩擦面積の確保が、項目(2)では高力ボルトの高強度化、太径化で対処できる。一方、(3)の項目に関しては、ボルト穴欠損部応力あるいは欠損率の低減が考えられる。前者は添え板の有効利用あるいは摩擦力期待であり、後者はボルト配置あるいは鋼材の降伏比に大きく依存する。

よって、本研究では、高性能高力ボルト摩擦接合としての高性能の摩擦面とF10T、M30太径高力ボルトからなる摩擦接合を取り上げ、そのすべり耐力、力学性状を一連の実験により検討し、基礎的設計資料を得るものである。なお、これらの実験で使用した鋼材と高力ボルトは共通である(表1)。

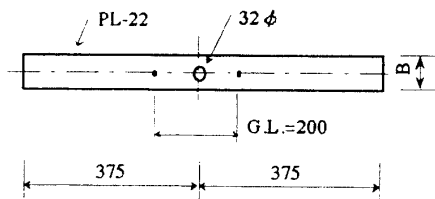
表 1-a 鋼材の機械的性質

Specimen	Grade	σ_y t/cm ²	σ_B t/cm ²	E t/cm ²	δ %	σ_y/σ_B	Appendix
PL-12	SS41	2.88	4.52	2151	28.5	0.637	1号試験片
	HT60	5.59	6.51	2143	34.6	0.859	5号試験片
	HT80	7.90	8.45	2098	27.9	0.935	5号試験片
PL-22	SS41	2.57	4.19	2152	32.4	0.613	1号試験片
	HT60	6.14	7.04	2091	41.6	0.873	5号試験片
	HT80	7.65	9.24	2093	35.3	0.829	5号試験片

表 1-b 高力ボルトの機械的性質

Specimen	Grade	σ_y t/cm ²	σ_B t/cm ²	E t/cm ²	δ %	絞り %
Bolt M30	F10T	9.87 (10.30)	10.69 (10.90)	2135	18.3 (17.0)	65.1 (57.0)

Note : () : according to mill sheet



Specimen	B(mm)
SS41-0.7	105
HT60-0.7	
HT80-0.7	
SS41-0.6	75

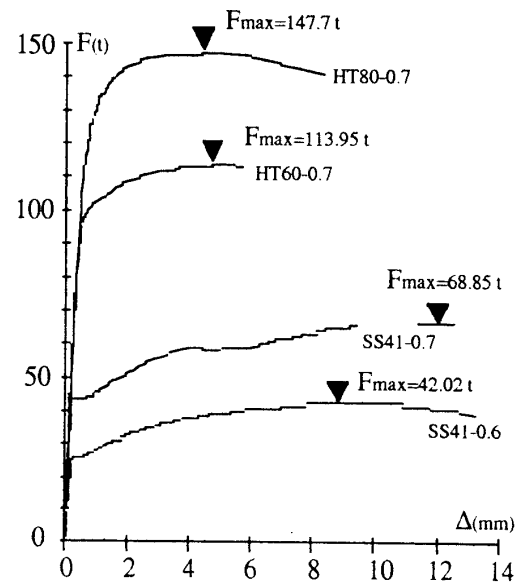


図 1 穴あき鋼板引張試験片

図 2 荷重－平均伸び関係

表 2 理論値と実験値

試験体	理論値			実験値				
	Δy mm	P_{yc} t	P_B t	F_{yc} t	F_y t	F_{max} t	$\Delta_{max}/\Delta y$ %	$\Delta u/\Delta y$ %
SS41-0.6	0.239	24.08	39.27	25.70	-	42.02	4.41	7.81
SS41-0.7	0.239	40.97	66.80	43.25	58.80	68.85	-	11.20
HT60-0.7	0.588	98.82	113.17	99.75	-	113.95	2.36	9.60
HT80-0.7	0.732	121.22	146.32	126.32	-	147.70	2.19	7.73

備考：・降伏変位は変位測定長さ200mmに降伏歪を乗じて算定。

・破断伸びは標点距離200mmに対して算定。

2. 穴あき鋼板の引張試験

ボルト穴の様な断面欠損がある鋼板の最大応力が素材に比べて上昇することが指摘されている^{2,3)}。しかし、HT80材やPL22鋼板については不明である。ここでは、穴あき鋼板試験片の引張試験により、引張材ボルト継手の母材の力学性状及び穴欠損部での耐力を検討する。試験片の形状と一覧を図1に掲げる。実験変数は鋼種と有効断面積比率(=有効断面積/全断面積)である。変位測定は標点200mmの伸びを2台の変位計で行った。

荷重-平均伸び関係を図2に、実験値と理論値を表2に示す。ここに、HT60, HT80材では欠損部降伏荷重は接線剛性が初期剛性の1/3の点の荷重である。SS41材では明瞭な踊り場が、有効断面積比率が鋼材の降伏比より小さい場合には軸部が十分に塑性変形しないため破断伸びは劣ることが認められる。また、欠損部降伏荷重、最大荷重は鋼種にかかわらず理論値より大きく、同一鋼材では断面欠損率が大きいほどこの上昇度合は大きい傾向にある。

3. 単一太径高力ボルト摩擦接合のすべり実験

今日までに摩擦接合に関しては多くの研究があるが、高張力鋼材の摩擦接合を対象としたものは少ない。また、一般に太径高力ボルトはせん断ボルトとしてであり、コンパクトな締付けツールが開発されていなかったのも摩擦接合に使用した例は見当たらない。よって、軟鋼・高張力鋼に太径高力ボルトを用いた場合のすべり係数、太径高力ボルトのせん断耐力などを実験的に検討する。

3-1、試験体

試験体は、比較的取り扱いが容易なM30(F10T, L=100)太径高力ボルトと、PL-22, PL-12鋼板の母材、添え板からなる単一高力ボルト供試体である。実験因子は鋼種、摩擦面処理方法で、試験体総数は32体である。すべり試験体の形状寸法と概要を図3、表3に示す。ここで、試験体名は鋼種、摩擦面処理、試験体番号の順に表されている。

摩擦面の表面処理方法には赤錆、グリッドブラスト、アルミ溶射を採用し、いずれも摩擦面全面に行った。赤錆処理は母材、添え板ともミルスケール除去剤を塗布し約2週間発錆させた。グリッドブラスト処理は母材、添え板ともに行ったが、アルミ溶射については添え板のみとしその下地処理および母材にはグリッドブラスト処理を施した。グリッドブラスト処理、アルミ溶射の下地処理については表面粗さを測定し、十点平均粗さで評価した。その表面粗さの平均値は各々43 μ m、80 μ mであった。また、アルミ溶射における摩擦面のボルト穴周辺の平均塗膜厚は86-111 μ m(全平均97 μ m)であった。

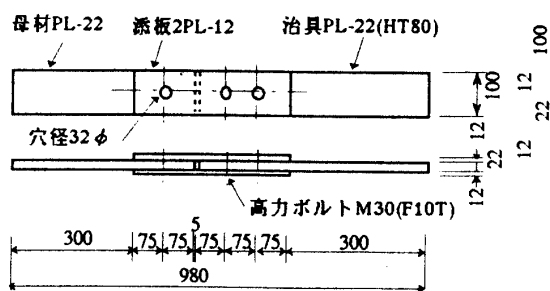


図3 単一高力ボルト供試体

表3 試験体一覧

記号	数量	鋼種	摩擦面処理
SS41-R	5	SS41	赤錆
SS41-GB	5		グリッドブラスト
SS41-AL	5		アルミ溶射
SS41-M	1		黒皮
HT60-R	5	HT60	赤錆
HT60-GB	5		グリッドブラスト
HT60-AL	5		アルミ溶射
HT60-M	1		黒皮

共通事項 ・母材PL-22、添え板PL-12
・高力ボルトM30,F10T

3-2、実験方法と測定方法

各ボルトの張力導入は、軸部に貼付した歪ゲージで制御しつつギヤーレンチ(日本ブラダ製)により行った。一次締め付け(標準ボルト張力の80%程度)を全てのボルトに実施した後、試験側の単一ボルトについては標準ボルト張力(公称値:41.62t)まで締め付けた。加力は単調引張で、試験体の全伸び、母材と添え板との相対変位およびボルト軸力をX-Y記録計、歪測定器で計測した。

3-3、実験結果とその考察

実験結果の一覧を表4に、荷重-全体伸び(チャック間伸び)関係の一例を図4に示す。

1) 変形性状と崩壊性状 SS41材試験体では、一般的に、主すべりが生じた後母材の欠損部降伏、軸部降伏が起こり、引き続き加力すれば治具側のボルトがすべり、母材欠損部で破断した。一方、HT60材試験体では最初に主すべりが生じた後、ボルト軸部のせん断で破断した。これは母材の各降伏耐力がボルトのせん断破断耐力より大きいためである。ところで、主すべり直後の荷重低下性状において、アルミ溶射面が他の処理面に比べ低下量が小さいという傾向が両鋼種とも認められた。

表4 実験結果

Specimen	F _s (t)	F _{ye} (t)	F _y (t)	F _{max} (t)	μ	F _{max} /P _B
SS41-R-1	41.50	52.50	61.75	68.40	0.499	1.103
SS41-R-2	39.50	52.40	59.20	67.85	0.475	1.094
SS41-R-3	38.35	54.10	61.30	68.20	0.461	1.100
SS41-R-4**	42.75	49.90		64.15	0.514	1.035
SS41-R-5	47.85	54.95	60.40	68.90	0.575	1.111
SS41-GB-1	54.40			>61.70	0.654	0.995
SS41-GB-2	52.65			65.40	0.633	1.055
SS41-GB-3	52.60		60.00	64.95	0.632	1.048
SS41-GB-4	52.95		56.10	63.10	0.636	1.018
SS41-GB-5*	50.60		57.50	66.55	0.608	1.073
SS41-AL-1	51.15	52.15	59.35	>65.85	0.614	1.062
SS41-AL-2	50.70	54.30	62.30	67.10	0.609	1.082
SS41-AL-3	47.75		58.20	66.50	0.574	1.073
SS41-AL-4*	52.95			63.30	0.636	1.021
SS41-AL-5*	53.75	53.10	58.60	67.80	0.646	1.094
SS41-M-1^	-			67.75	-	1.093
HT60-R-1	57.50			92.55	0.691	1.134
HT60-R-2	54.85			90.25	0.659	1.106
HT60-R-3	53.8^^			88.20	-	1.081
HT60-R-4	54.70			92.20	0.657	1.130
HT60-R-5	45.90			92.20	0.551	1.130
HT60-GB-1	59.55			83.00	0.715	1.017
HT60-GB-2	51.15			83.15	0.614	1.019
HT60-GB-3	45.80			83.95	0.550	1.029
HT60-GB-4*	57.00			84.50	0.685	1.036
HT60-GB-5*	50.70			85.80	0.609	1.052
HT60-AL-1	57.50			87.00	0.691	1.066
HT60-AL-2	58.25			86.05	0.700	1.055
HT60-AL-3	54.85			87.00	0.659	1.066
HT60-AL-4*	49.85			89.55	0.599	1.098
HT60-AL-5*	46.45			89.70	0.558	1.100
HT60-M-1^	-			86.70	-	1.063

備考 * ボルト軸力測定無し

** 黒皮除去、赤錆発生無し

^ ボルト締め付け無し

^^ すべり量0.2mmの荷重

P_B 破断耐力(母材又はボルト)

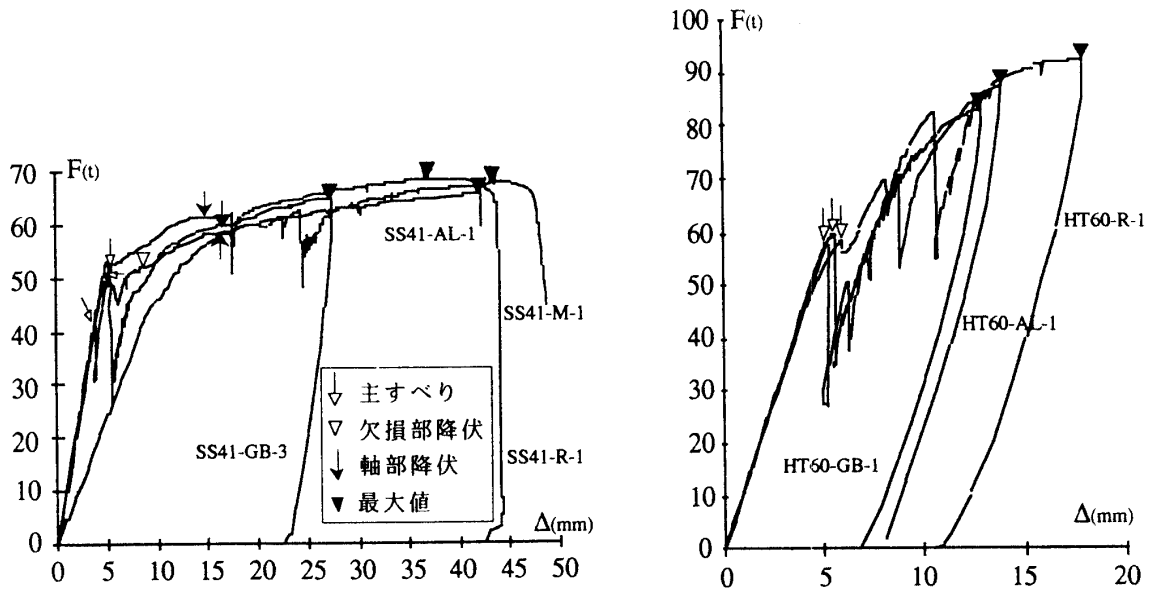


図4 荷重-全体伸び関係

2) すべり係数 すべり係数は、すべり荷重(主すべり時の荷重)より標準ボルト張力(公称値)に対して求めた。各摩擦面のすべり係数の平均値は0.51-0.64で、従来の成果^{1, 2)}と大差なくボルトの太径化の影響は小さいものと推察される。SS41材において、グリッドブラストやアルミ溶射面では0.63程度であるが、赤錆面は0.51と小さい値を呈する。しかし、HT60材では摩擦面の違いはなく0.64程度である。

3) 降伏耐力と最大耐力 SS41材の欠損部降伏荷重は理論値(38.0t)より29-45%上昇する。これは標準ボルト張力の26-41%に相当し、塑性化による応力上昇は小さいので摩擦面で応力が添板に伝達されたことによるものと考えられる。また、母材軸部降伏荷重は理論値(55.92t)の1.0-1.11倍で、摩擦面の差異の影響も認められない。

母材破断荷重(SS41材)は破断耐力の0.995-1.11倍で従来の結果¹⁾と差異はない。SS41-M-1試験体や穴あき鋼板試験体(SS41-0.7)の結果を参照すれば、母材の穴近傍での2軸応力の影響が大きく、ボルトを太径化してもボルト軸力の影響は小さいと言える。

ボルトがせん断破壊するHT60材試験体においては理論値(せん断断面が2面とも軸部にある場合で引張強さとして10t/cm²を使用)の1.02-1.13倍で通常の呼び径の高力ボルトの結果⁴⁾と比較しても大差ない。

4. 太径高力ボルト摩擦接合部の引張実験

すべり耐力が接合材の降伏耐力を上回るように設計された継手では、材の降伏によりすべり耐力が相対的に低下するという問題がある。この低下性状は、穴部周辺の局所的な降伏、母材の全面降伏、添板の降伏、ボルト一本当たりの摩擦力の大きさとその低下特性などの影響を受けると考えられ、一義的に評価することは困難である。図5に多列ボルト継手^{1, 2, 5, 6)}のすべり荷重とすべり耐力(すべり係数を0.45または0.6と設定)との関係を降伏耐力(母材軸部の降伏軸力)で規準化して示す。図より、すべり荷重には大きなバラツキが見られるものの、すべり荷重が降伏耐力より十分小さい場合すべり荷重とすべり耐力はほぼ線形関係にある。しかし、すべり耐力が降伏耐力程度から、母材降伏の影響ですべり荷重は降伏耐力の0.8-1.0倍となり、すべり耐力と対応しなくなる。また、ボルト本数が多いほどすべり荷重は降伏耐力に漸近する。すべり耐力が降伏耐力より十分に大きい場合、すべり荷重は降伏耐力より大きくなる傾向が

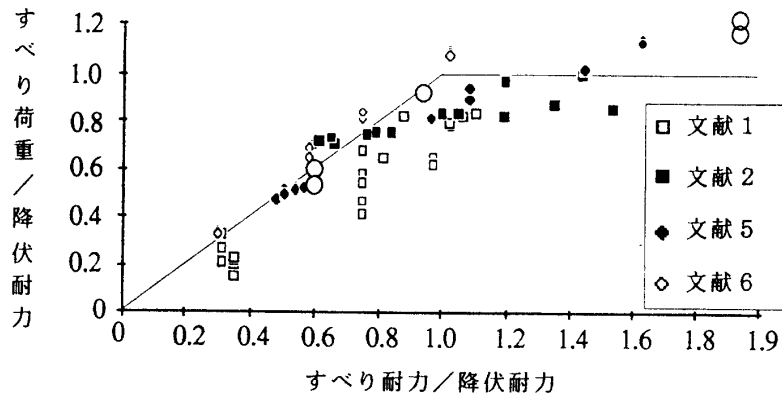


図5 すべり荷重-すべり耐力関係

ある。なお、これらの実験では、ボルト穴による断面欠損率は14-43%、添板断面積は母材軸部の1-1.45倍であり、添板断面積が母材と同程度の場合すべり荷重は母材軸部降伏の影響を受け易いようである。ここでは、太径高力ボルトを用いた継手のすべり荷重と降伏耐力の相関について実験的に検討すると共に、破断耐力についても考察する。

4-1. 試験体

試験体は2本太径高力ボルト継手供試体(図6)である。実験因子は鋼種、母材幅およびボルト張力であり、すべり耐力、降伏耐力、破断耐力の関連を調べ、母材破断となるよう計画されている。摩擦面にはグリッドブラスト処理を施した。実験では、試験側の高力ボルトには標準ボルト張力あるいはその半分に相当する張力を導入し、単調引張加力下での標点間の伸び、ボルト軸力を計測した。

4-2. 実験結果とその考察

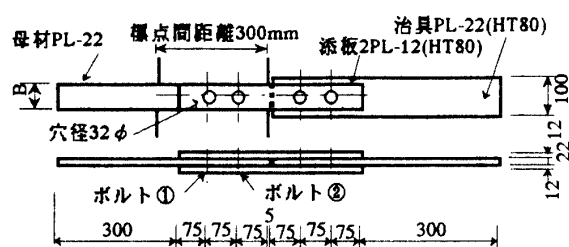
実験結果を表5に、荷重 F -伸び δ 関係を図7に示す。ただし、グリッドブラスト処理のすべり係数は0.63としてすべり耐力を算定した。また、すべり係数は標準ボルト張力に対して求めた。

主すべりはすべり耐力より破断耐力が大きい試験体で認められ、総ての試験体が母材欠損部で破断した。

主すべりが母材軸部降伏に先行した試験体では大きなすべり係数が得られ、その数値は単一ボルト実験結果(前述)と同程度であった。これは穴周辺部での局所的な降伏は生じているものの母材の大部分が弾性で、ボルト①の張力は、SS41材で初期締付け軸力の7割程度、HT60材で9割程度とすべり耐力の低下は小さいことによると考えられる。一方、母材軸部降伏が主すべりに先行した試験体(SS41-0.7)ではすべり係数が低下した。これは、母材の全面降伏によるボルト張力の低下・摩擦面積の減少により真のすべり耐力が小さくなったことによる。特に、この試験体ではボルト①の張力の低下は著しく、主すべり時に張力は初期締付け軸力の4割程度であった。なお、総ての試験体でボルト②の張力は主すべり時でも数%低下したに過ぎない。次に、すべり荷重の実験値を前述の図5に○印で示す。すべり荷重を降伏耐力より大きくすることは、その上昇度合いは小さいものの可能である。しかし、すべり耐力を降伏耐力よりかなり大きくする必要があると言える。

荷重伸び関係における欠損部降伏荷重 F_{ye} は、穴前面の摩擦面で応力伝達が行われるため理論値より大きく、その差はボルト1本のすべり耐力の30-46%に相当する。また、最大荷重(母材破断荷重)は、素材の引張強さから求まる有効断面での母材の引張破断耐力の1.13-1.28倍である。この現象は、材間圧縮力による添板と母材との一体化、有孔板のボルト穴による横方向収縮の拘束効果に伴う2軸効果の複合されたものと考えられる。

太径高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究



記号	数量	母材 鋼種	母材幅 (mm)	備考
SS41-0.7-1.0	2	SS41	100	すべり耐力>降伏耐力(軸部)
SS41-0.7-0.5	2		100	降伏耐力(軸部)>すべり耐力
SS41-0.6-1.0	2		83	降伏耐力(軸部)=破断耐力(欠損部)
SS41-0.5-1.0	2		65	降伏耐力(軸部)>破断耐力(欠損部)
HT60-0.5-1.0	2	HT60	65	降伏耐力(軸部)>破断耐力(欠損部)
HT60-0.5-0.5	2		65	破断耐力(欠損部)>すべり耐力

注・摩擦面処理:グリッドブラスト(平均表面粗さ $47\mu\text{m}$)
・高力ボルトM30(F10T)

図6 2本高力ボルト継手供試体

表 5 理論値と実験値

Specimen	理論値				実験値				
	Pye	Py	Ps	PB	Fye	Fy	Fs	Fmax	μ
SS41-0.7-1.0-1	38.73	56.66	105.32	63.15	54.82	59.67	66.85	71.9	0.402
SS41-0.7-1.0-2	38.41	56.37	105.32	62.62	55.35	60.15	68.25	71.75	0.410
SS41-0.7-0.5-1	38.32	56.24	52.66	62.48	50.3	58.94	51.25	71.25	0.616
SS41-0.7-0.5-2	38.23	56.17	52.66	62.34	50.55	59.35	51.95	70.45	0.624
SS41-0.6-1.0-1	28.52	46.44	105.32	46.49	44.5	47.97	-	54.85	-
SS41-0.6-1.0-2	28.98	46.91	105.32	47.25	44.75	49.02	-	55.45	-
SS41-0.5-1.0-1	19.01	36.95	105.32	30.99	34.04	-	-	38.35	-
SS41-0.5-1.0-2	18.58	36.49	105.32	30.30	35.3	-	-	38.57	-
HT60-0.5-1.0-1	46.28	89.58	105.65	52.99	65.1	-	-	66.8	-
HT60-0.5-1.0-2	46.44	89.68	105.65	53.19	66.49	-	-	67.95	-
HT60-0.5-0.5-1	46.01	89.31	52.82	52.68	-	-	53.8	59.25	0.646
HT60-0.5-0.5-2	46.18	89.56	52.82	52.89	-	-	47.3	59.5	0.568

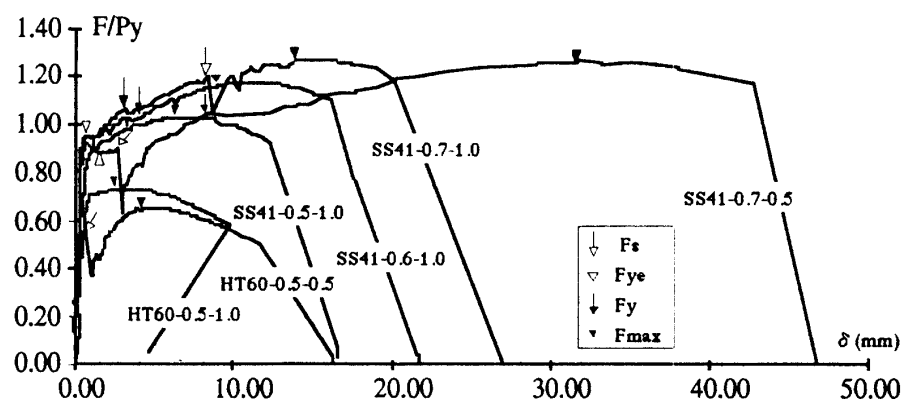


図 7 荷重-伸び関係

5. 結語

本研究では、鋼種、摩擦面処理を実験変数として、単一太径高力ボルトM30(F10T)摩擦接合のすべり実験を行い、すべり係数、高性能摩擦面を検討すると共に、接合母材の引張耐力、高力ボルトのせん断耐力についても検討・考察した。また、太径高力盛ると摩擦接合部のすべり耐力についても実験的に検討した。得られた結論を要約すれば次の通りである。

- 1) 摩擦面の処理方法としてグリッドブラストが有効で、すべり係数の平均値は0.63である。
- 2) HT60材のすべり係数の平均値はいずれの摩擦面でも0.64程度である。
- 3) 母材の破断耐力は破断荷重を安全側に評価し、この耐力上昇は母材の2軸応力の影響による。
- 4) 太径高力ボルトのせん断破断荷重は理論値で評価できる。
- 5) すべり荷重を降伏耐力より大きくするためにはすべり耐力を降伏耐力よりかなり大きくする必要がある。
- 6) 欠損部降伏荷重は、穴前面の摩擦面で応力伝達が行われるため理論値より大きく、その増加量はボルト単体のすべり耐力の1/3程度である。

ところで、本研究は大阪大学五十嵐定義、脇山広三両教授のご指導の下に行ったものである。また、実験に当たり、平成元年度卒研究生の加藤清次、角 浩次、白崎新也、山田泰弘諸君、そして新日鉄(株)、川鉄建材(株)、片山鉄工所(株)の協力を得た。ここに、記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説、技報堂、pp.60-71,1966.
- 2) 藤本盛久他1名：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)、日本建築学会関東支部研究報告集、pp189-192,1977.
- 3) 青木博文他2名：ボルト孔を有する鋼板の最大強度に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.253-256,1980.
- 4) 橋本篤秀：高力ボルトの剪断強度、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1833-1834,1982.10.
- 5) 田中淳夫他1名：保有耐力接合された高力ボルト接合はり継手の挙動、日本建築学会論文報告集、第346号、pp.101-110,1981.12.
- 6) 高木正光他3名：建築用低YR鋼(53、60キロ鋼)の開発、その5、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1057-1058,1989.10.

記号

B : 標準ボルト張力($=1.1 \times 0.75 \times \sigma_y \times 0.25 \pi (d - 0.9382p)^2$)	Py : 軸部降伏耐力
d : 呼び径	Pye : 欠損部降伏耐力
F : 引張荷重	δ : 相対変位、伸び
Fmax : 最大(破断)荷重	μ : すべり係数
Fs : すべり荷重	Δ : 平均伸び、全体伸び
Fy : 軸部降伏荷重	Δ_{max} : 最大荷重時の伸び
Fye : 欠損部降伏荷重	Δu : 破断伸び
p : ねじピッチ	Δy : 降伏伸び
P _B : 破断耐力	σ_y : ボルト(F10T)の耐力 (90kg/mm ²)
Ps : すべり耐力	

(平成2年12月18日 受理)