

溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合部の履歴特性

辻 岡 静 雄*・小 端 高 行**・脇 山 廣 三***

Hysteresis Characteristics of HTB Friction Joints with Hot-Dip Galvanized Faying Surfaces

Shizuo TSUJIOKA, Takayuki KOHASHI and Kozo WAKIYAMA

This paper describes the cyclic slip behavior of the high-strength bolted friction joints with the hot-dip galvanized faying surface. The dynamic tests under the constant-amplitude displacement-cycling condition are conducted. The test parameters are the treatment condition of the faying surface, the loading amplitude. The slip coefficient, the fluctuation of the slip strength and the bolt clamping forces, and the hysteresis characteristics are discussed.

1. はじめに

鋼構造物の防錆・耐候性向上のために鋼材に溶融亜鉛めっきを施すのは有効な手段である。この鋼材を摩擦接合する場合、めっき面は平滑ですべりやすいのでめっき面にブラスト処理を施すべり係数を確保する方法が一般的に用いられてきた¹⁾。しかし、ブラスト処理によるめっき被膜の剥離、表面粗さのばらつき、ブラスト処理工程のコスト高などから、ワイヤーブラスト処理、無機ジンクリッチペイント、セラミック塗装、りん酸塩処理、接着剤等の方法が検討されている。著者の一人は簡単な方法で高い接合部性能(すべり係数やリラクゼーションなど)を得る手段としてりん酸塩処理を応用した溶融亜鉛めっき面の摩擦接合法を開発し、一連の実験を行ってきた^{2~6)}。溶融亜鉛めっきの摩擦接合部は繰返しすべりを受けるとグリップアップして圧着しこの箇所はすべらなくなるという現象が報告⁷⁾されているので、大地震等により一旦すべりが生じた後のりん酸塩処理を施した接合部性能を把握するために繰返しすべり試験を行っている。りん酸塩処理ではブラスト処理と同様に、すべりを繰返すと各サイクルのすべり荷重は低下してその後上昇する。しかし、ブラスト処理のように一体化して圧着することは直ぐには現れないが、その傾向は認められることが定性的に得られている。

よって、本研究では、りん酸塩処理を施した摩擦接合部のエネルギー吸収特性等を定量的に評価するために引張圧縮繰返し加力試験を実施した。実験では、ペーパーサンダー仕上げ後にりん酸塩処理を施す標準りん酸塩処理法以外に、新たに施工性に重点をおいて開発した塗布するのみのジェルタイプ固形りん酸塩処理剤を用いて処理した高力ボルト接合材と従来からのブラスト処理を施した摩擦接合材の各接合部性能の比較を行うこととした。また、溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合部における変位振幅の違いによる履歴特性(すべり係数、履歴形状)の差異についても検討・考察する。

2. 試験体

試験体は2本ボルトせん断形継手で、鋼材にはSM490A鋼材で溶融亜鉛めっきを施した。試験側のボルトにはM16溶融亜鉛めっき高力ボルト(F8T)を用いた。その一覧と形状寸法、使用鋼材の機械

* 建設工学科 建築学専攻, ** 株式会社スクラム, *** 大阪産業大学工学部環境デザイン学科

の性質を各々表1、図1、表2に掲げる。実験変数は定変位振幅(2, 3, 4mm)、摩擦面処理方法(銅カラミブラスト処理(Bタイプ)、標準りん酸塩処理(Nタイプ)、ジェルタイプりん酸塩処理(Jタイプ))で、試験体総数は12体である。ここに、No. 1～3は予備実験用で引張圧縮繰返し加力における圧縮側の座屈耐力を確認した。No. 4～12は本実験用で、その結果に基づきチャック間距離を400mmとした。試験側のボルト孔はドリル加工で標準孔(ボルト呼び径+2mm)としたが、変位振幅4mmの試験体では母材の試験側の孔径は過大孔(ボルト呼び径+4mm)とした。標準孔の試験体の耐力比(=すべり耐力/母材孔欠損部降伏耐力)は0.8程度とし、過大孔についての耐力低減係数⁸⁾は考慮していない。但し、添え板はすべて標準孔のドリル加工とした。なお、本実験における試験体記号は摩擦面処理方法[Bタイプ、Nタイプ、Jタイプ]、定変位振幅[2～4mm]の順に表されている。

熔融亜鉛めっきを施した試験体に対して用いた摩擦面処理方法は次の通りである。

- 1) ブラスト処理(Bタイプ): 研削材として銅カラミ(#4+#5, 1:1)を用いて圧空ブラスト処理を施した。研削密度はISO 8501-1 Sa2・1/2以上で施工した。
- 2) 標準りん酸塩処理(Nタイプ): 標準りん酸塩処理法はすべり係数試験に適合する摩擦面処理法で、ペーパーサンダー#80を用いて亜鉛めっきを1皮剥く程度軽く仕上げた後塗布型りん酸塩処理剤を専用刷毛を用いて2往復塗布し、施工性を考え自然乾燥とした。
- 3) ジェルタイプりん酸塩処理(Jタイプ): ジェルタイプりん酸塩処理は標準りん酸塩処理法に対しサンダー仕上げを省略することで施工性をより改善した方法である。ジェルタイプりん酸塩処理剤をスポンジに取り罫書いた内側をまんべんなく2回塗布し、自然乾燥まで濡らさず保管した。

ここに、試験体の熔融亜鉛めっきの平均膜厚は母材、添え板に対して各々123, 135 μm であった。また、摩擦面の表面粗さ R_y の測定結果は摩擦面処理方法のBタイプ、Nタイプ、Jタイプジェルタイプに対して各々101.0, 20.7, 23.0 μm であった。

3. 試験概要

試験に当っては試験側、固定側共同摩擦面処理を行い、試験側は熔融亜鉛めっき高力ボルト M16, F8Tで、固定側は高力ボルト M20, F10Tで締付けた。M16ボ

表1 試験体一覧

No	記号	鋼材		周波数 (Hz)	変位振幅 (mm)	繰返し数 (cycle)	初期ボルト 張力(ton)	備考
		材質	表面処理					
1	B-0	SM490	ブラスト	1	2	20	9.37	予備実験
2	N-0	"	りん酸塩	"	"	"	"	"
3	J-0	"	ジェル	"	"	"	"	"
4	B-2	"	ブラスト	1	2	20	9.37	本実験
5	N-2	"	りん酸塩	"	"	"	"	"
6	J-2	"	ジェル	"	"	"	"	"
7	B-3	"	ブラスト	1	3	20	9.37	"
8	N-3	"	りん酸塩	"	"	"	"	"
9	J-3	"	ジェル	"	"	"	"	"
10	B-4	"	ブラスト	1	4	20	9.37	"
11	N-4	"	りん酸塩	"	"	"	"	"
12	J-4	"	ジェル	"	"	"	"	"

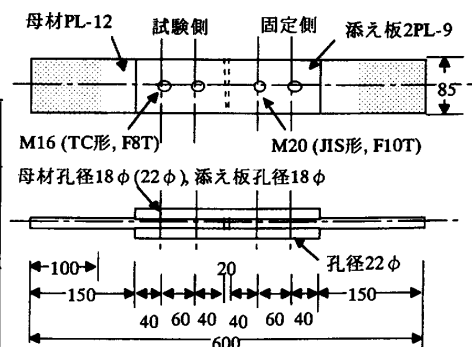


図1 試験体

表2 鋼材の機械的性質

鋼材	鋼種	降伏点 t/cm^2	引張強さ t/cm^2
PL-12	SM490	4.10	5.42
PL-9		4.00	5.37

ルトの一次締めトルクは1000kg・cm, M20ボルトでは1500kgf・cmとした。一次締め後マーキングを行い、本締めはナット回転角法により行ったが、M16ボルトではナットを120°回転させた。また、M20ボルトは接合強度を上げ固定側とするため210°回転させた。

次に、24時間室温にて放置した後、油圧サーボ式疲労試験機にて周波数1Hzのsin波形の引張圧縮繰返し加力試験を行った。その繰返し数は定常波20サイクルと設定したが、制御上、定振幅に至る過程で漸増振幅で5サイクル、その後定常と見做せる振幅で12～27サイクルの加力となった。試験は変位制御で行い、その振幅は各表面処理に対して2mm,3mm,4mmとした。

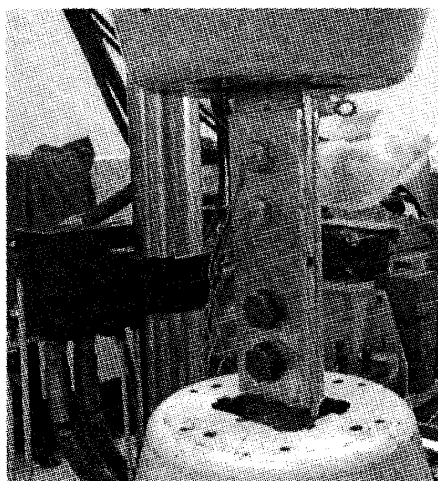


写真1 試験体の設置状況

荷重、チャック間伸びは試験機の記録装置で計測し、ボルト軸力はボルト軸部側面に貼付けた歪ゲージでボルトの締め付けから加力終了まで計測した。

4. 実験結果と考察

すべり荷重、すべり係数と各レベルでのボルト張力を表3に掲げる。振動数1Hzの正弦波形の加力であるから変位振幅により変位速度は異なる。即ち、4mm振幅で最大速度25.12mm/sec、平均速度16 mm/secであるので主すべりへの速度の影響は小さく、また、主すべり時には横たわみは小さいと考えられるので、ここでは各表面処理毎の平均値で考察する。

4-1. 主すべり時のすべり係数とボルト張力

(1) すべり係数

実験開始時のボルト張力に対してすべり係数を算定した。銅カラムブラスト処理(Bタイプ)0.679、標準りん酸塩処理(Nタイプ)0.573、ジェルタイプりん酸塩処理(Jタイプ)0.553の順にすべり係数は小さくなった。一方、これは締め付け直後の導入ボルト張力に対して各々0.589、0.521、0.509に相当し、溶融亜鉛めっき鋼材の50μmRy以上のブラスト処理では0.45～0.50程度のすべり係数が得られること¹⁾と対

表3 すべり係数とボルト張力

記号	すべり荷重 (t)	すべり係数	締め付け直後(t)		実験開始時(t)		主すべり時(t)		終了時(t)		備考
			bolt1	bolt2	bolt1	bolt2	bolt 1	bolt 2	bolt 1	bolt 2	
B-0	29.35	0.682	11.67	12.59	10.22	11.30	9.97	11.17	-	-	横たわみ
J-0	25.65	0.573	11.96	12.2	11.21	11.17	10.34	10.65	-	-	"
N-0	24.85	0.552	11.86	12.4	11.02	11.47	10.63	11.07	-	-	"
B-2	29.9	0.700	12.39	12.26	10.78	10.56	10.31	10.39	8.70	9.04	
J-2	25.2	0.565	12.46	12.33	11.20	11.11	10.64	10.55	9.16	8.88	
N-2	27.05	0.589	12.86	12.49	11.56	11.42	11.25	11.20	9.49	9.60	
B-3	30.35	0.691	12.46	12.53	10.74	11.24	10.48	11.28	7.73	5.19	支圧後の横たわみ
J-3	25.45	0.558	12.34	12.67	11.12	11.68	10.39	11.30	7.45	6.80	
N-3	26.75	0.576	12.52	12.74	11.47	11.75	11.17	11.40	7.41	3.35	
B-4	27.45	0.642	12.06	12.43	10.56	10.83	10.47	10.66	8.23	7.32	
J-4	24.25	0.516	12.37	12.46	11.96	11.54	11.36	11.19	7.29	6.86	
N-4	26.05	0.575	12.98	12.62	11.35	11.31	10.88	11.09	7.81	7.22	

応している。また、いずれも設計用のすべり係数 0.40 を満足している。

(2) ボルト張力

導入ボルト張力は 11.67～12.98t の範囲で摩擦面処理方法による違いは小さい。この締付け直後のボルト張力に対して実験開始時(24時間後)の平均ボルト張力(2本ボルトの平均)は銅カラミブラスト処理(Bタイプ)0.867倍、標準りん酸塩処理(Nタイプ)0.909倍、ジェルタイプりん酸塩処理(Jタイプ)0.921倍と、大きく抜けている。銅カラミブラスト処理の結果は従来のリラクゼーション結果に対応している。

主すべり時の接合部の平均ボルト張力は実験開始時に対してBタイプ0.982倍、Nタイプ0.971倍、Jタイプ0.950倍となる。また、いずれもボルト1(外側のボルト)の低下がボルト2に比べて張力の抜けが若干大きい。これらの事柄は通常の高力ボルト摩擦接合部と変わらないといえる。なお、締付け直後のボルト張力を基準とすれば、主すべり時はBタイプ0.851倍、Nタイプ0.883倍、Jタイプ0.875倍となり、摩擦面処理方法で大きな違いはないといえる。

4-2. 繰返し加力時の履歴性状、耐力変動

(1) 履歴性状

本実験における荷重 P -すべり量 δs 関係を図2に示す。ここに、すべり量 δs は接合部変形 δ (チャック間変位)より接合部弾性変形 δe ($=P/K_e$, K_e :初期弾性剛性)を差し引いたもので、接合部の母材の塑性変形や接合部の幾何学的変形(横たわみ)に伴う軸縮みを含んでいるので見掛け上のすべり量である。従って、本実験では変位振幅より1mm程度小さい振幅となっている。

・2mm振幅の場合(No.4～6):

漸増域(最初の5～6サイクル)では中板支圧による耐力上昇が認められ、スリップ型となってボルト中板の孔のクリアランスが片方に偏ることになる。また、漸増域から定常域にわたっては各サイクルのすべり荷重の上昇(繰返し硬化)が生じる。従って、定常域ではBi-linear型となりすべり後負勾配を示す。

・3mm振幅の場合(No.7～9):

漸増域、定常域にわたって、中板の支圧により耐力上昇が生じるためすべり後の耐力がステップを描く。これは、外板は支圧状態でないので接合部としては完全な支圧状態ではないからである。なお、B-3試験体では繰返しによりすべり荷重が増大した後横たわみが生じ、結果として圧縮側のすべり耐力の低下、引張側の初期剛性の低下や肩部のRound化が認められた。これは変位に占める幾何学的変形に伴う軸縮みの割合が大きくなるので中板が支圧状態に至らなくなったことによるものと考えられる。

・4mm振幅の場合(No.10～12):

このシリーズの試験体では、中板はクリアランスが6mmの過大孔であり、この振幅では中板は支圧状態とならないので、履歴ループ形状は負勾配を有するBi-linear型となる。いずれも繰返しによる摩擦面の圧着ですべり耐力が増大していくが、履歴ループが安定せず結果としてすべり耐力が繰返しとともに低下し、履歴ループが縮小することとなる。

(2) 耐力、ボルト張力の変動

荷重 P -累積すべり量 $\Sigma \delta s$ 関係を図3に、変位振幅4mmの試験体のボルト張力 B_i ・摩擦係数 μ -累

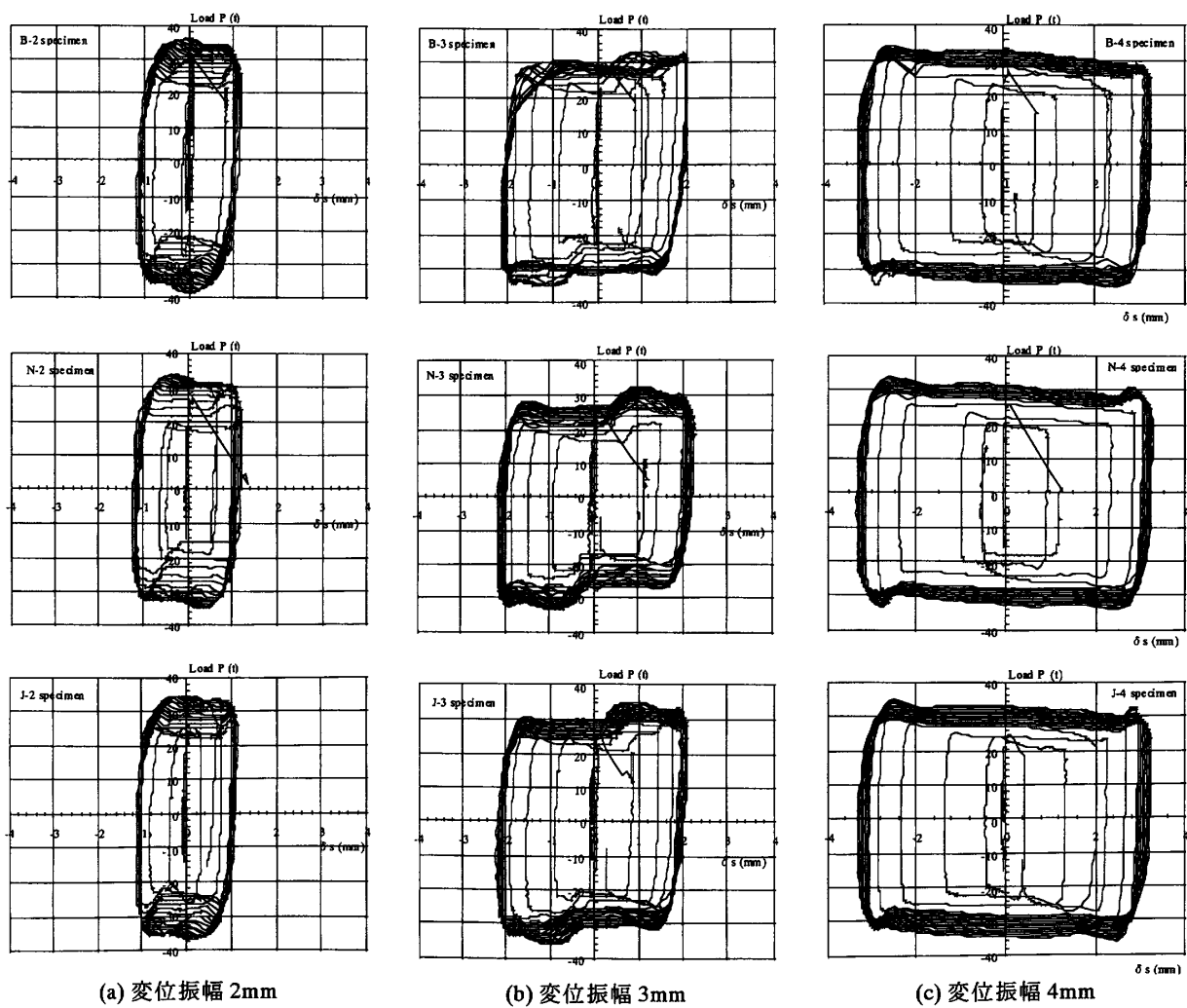


図2 荷重 P -すべり量 δs 関係

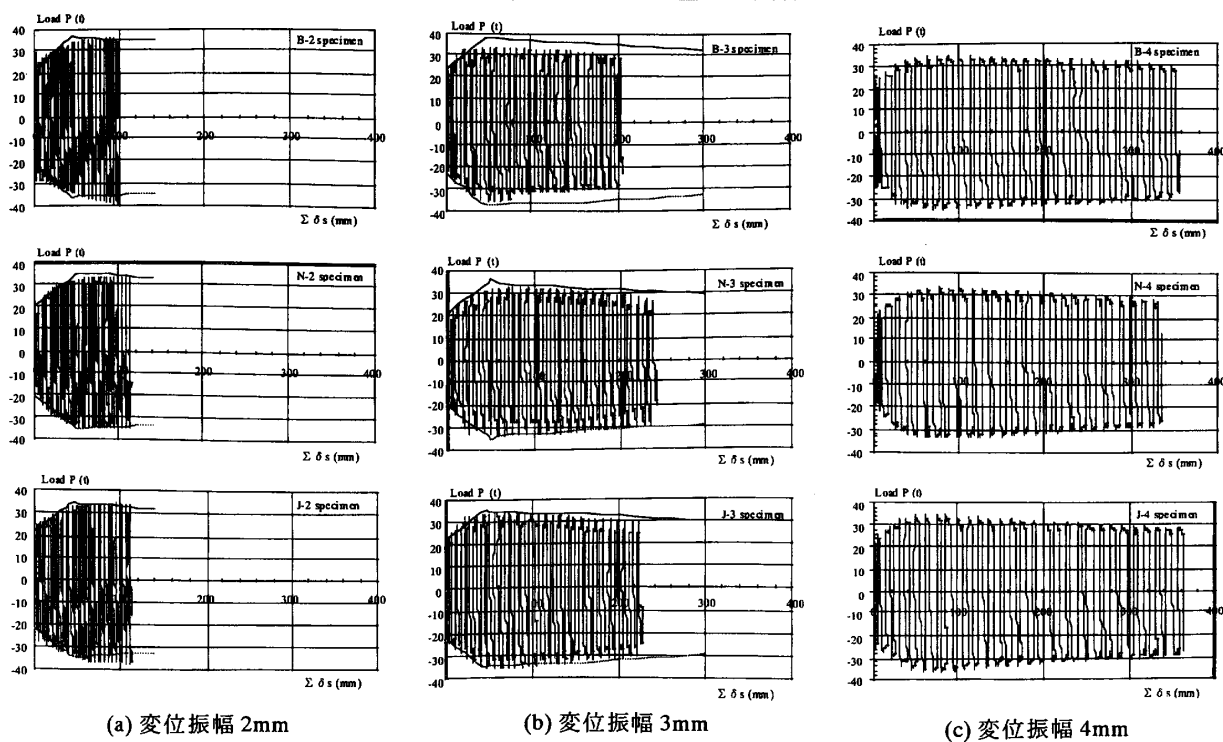


図3 荷重 P -累積すべり量 $\Sigma \delta s$ 関係

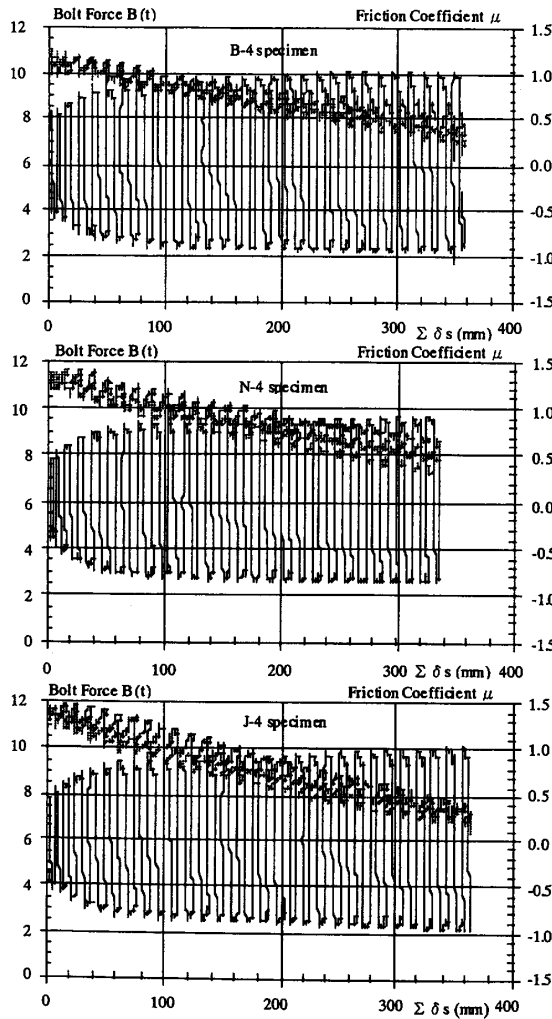


図4 ボルト張力 B_i ・摩擦係数 μ - 累積すべり量 $\Sigma \delta s$ 関係

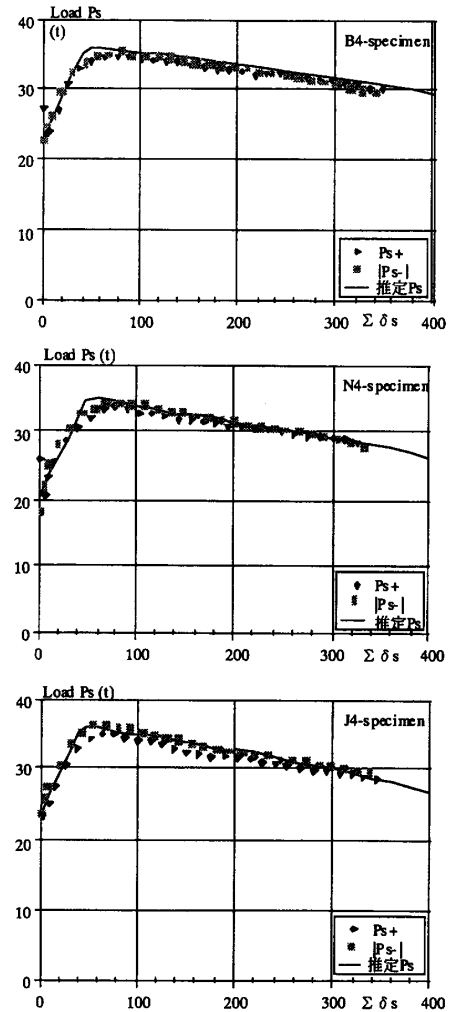


図5 すべり荷重 P_s - 累積すべり量 $\Sigma \delta s$ 関係

積すべり量 $\Sigma \delta s$ 関係を図4に示す。

まず、算出したすべり量 δs を見掛け上のすべり成分と考え、図3-c、図4に示す4 mm振幅の場合の荷重・ボルト張力と累積すべり量 $\Sigma \delta s$ の関係について検討する。図より次の事柄が得られる。

- ・ すべり耐力： $\Sigma \delta s$ に対して、いずれの摩擦面処理でも主すべり後の繰返し加力によりすべり耐力が増大するが、その後各履歴ループのすべり耐力はほぼ線形的に低下する。
- ・ ボルト張力：主すべりでボルト張力は低下した後、繰返しに対して増減するがその変動は小さく、しかも $\Sigma \delta s$ に対してはほぼ線形的に低下する。また、ボルト2の方がボルト1に比べ低下が大きいという傾向がある。

この耐力変動は繰返しすべりによる摩擦面の削れ等によるボルト張力の変動と低下性状が大きく影響していると考えられる。よって、摩擦係数の変動でもって溶融亜鉛めっき摩擦面の繰返し特性を検討することとする。図4の摩擦係数-累積すべり量関係より、繰返しとともに摩擦係数は増大してほぼ定常状態に至り、摩擦係数の上限は0.9～1.0程度であることが得られる。

これらを鑑み、各履歴ループのすべり荷重を次式で表現する。ただし、ボルト張力 B は各履歴ループの荷重零でのボルト張力を直線 g で近似し、摩擦係数 μ は二本の直線 f で近似することとした。

$$P_s = m \cdot n \cdot \mu \cdot B \quad (1)$$

$$\mu = f(\Sigma \delta s), \quad B = g(\Sigma \delta s) \cdot B_o$$

ここに, m , n は摩擦面数とボルト本数で, B_o は実験開始時のボルト張力である。図 3, 4 より関数 f , g は次式と得られるが, 摩擦面処理による大きな差はないものと考えられる。

$$B4 \quad f=0.0082 \Sigma \delta s+0.5434 \quad \Sigma \delta s \leq 48.3 \quad (2-a)$$

$$f=0.0003 \Sigma \delta s+0.8898 \quad \Sigma \delta s > 48.3 \quad (2-b)$$

$$g=-0.0007 \Sigma \delta s+0.9678 \quad (2-c)$$

$$N4 \quad f=0.0072 \Sigma \delta s+0.4610 \quad \Sigma \delta s \leq 51.4 \quad (3-a)$$

$$f=0.0002 \Sigma \delta s+0.8207 \quad \Sigma \delta s > 51.4 \quad (3-b)$$

$$g=-0.0008 \Sigma \delta s+0.9681 \quad (3-c)$$

$$J4 \quad f=0.0075 \Sigma \delta s+0.5167 \quad \Sigma \delta s \leq 43.2 \quad (4-a)$$

$$f=0.0005 \Sigma \delta s+0.8190 \quad \Sigma \delta s > 43.2 \quad (4-b)$$

$$g=-0.0010 \Sigma \delta s+0.9600 \quad (4-c)$$

この予測値と主すべり後の実験値の関係を図 5 に示す。引張側, 圧縮側ともよく評価していることが判る。

次に, これらの結果を 2 mm 振幅, 3 mm 振幅の実験結果 (荷重 - 累積すべり量関係) に適用する。

2 mm 振幅に対しては, 予測曲線は耐力上昇を若干過大に評価するものの, 繰返しによるすべり荷重の低下性状をよく予測していると言える。一方, 3 mm 振幅ではすべり耐力の増大とその後の低下性状を予測しているといえるが, すべり荷重を相当過大に評価する。これは実験曲線では支圧の影響があり, 純すべり量が小さいので, 耐力上昇が遅れることとなったことによると考えられる。また, ボルト張力の近似式は過大孔に対するものであり, ボルト張力の抜けを過大に評価していることも一因である。

5. 総 括

溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合部における履歴特性としてすべり係数, 各サイクルでのすべり荷重と履歴形状について検討・考察し, すべり荷重の予測式を導いた。その結論を要約すれば以下の通りである。

- 1) 実験開始時のボルト張力に対して主すべり時のすべり係数は銅カラミブラスト処理(Bタイプ), 標準りん酸塩処理法(Nタイプ), ジェルタイプりん酸塩処理(Jタイプ)に対して各々 0.679, 0.573, 0.553 となる。
- 2) 主すべり後すべり耐力は上昇するもののその後すべり耐力が低下する性状を示し, その履歴ループ形状は Bi-linear 型で, すべり後若干負勾配を示す。また, 支圧に至る振幅ではすべり後耐力が変動する。
- 3) 各サイクルのすべり荷重にはボルト張力の低下性状が大きく影響し, 繰返しすべりによる摩擦係数の上限は 0.9 ~ 1.0 程度である。これは摩擦面処理方法に依存しない。
- 4) 支圧状態でなければボルト張力と摩擦係数の積として定義されるすべり耐力の評価式 ((1) 式)

で履歴ループのすべり荷重を十分予測可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針，1993.3
- 2) 小端高行，佐藤正康：溶融亜鉛めっき摩擦接合面へのりん酸塩処理の適用に関する研究，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，Vol.5,No18,pp49-59,1998.6.
- 3) 小端高行，佐藤正康：りん酸塩処理を摩擦接合面処理に適用する場合の実施工上の問題点の検討，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，Vol.5,No19,pp55-64,1998.9.
- 4) 小端高行，佐藤正康：りん酸塩処理を施した摩擦接合部のリラクセーションと経年後のすべり試験，日本鋼構造協会，Vol.6,No21,pp45-54,1999.3.
- 5) 小端高行，佐藤正康：りん酸塩処理を施した溶融亜鉛めっき摩擦接合部の疲労性能調査，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，Vol.6,No23,pp9-18,1999.9.
- 6) 小端高行，佐藤正康：りん酸塩処理を施した溶融亜鉛めっき摩擦接合部のすべり係数変動範囲，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，Vol.6,No23,pp19-26,1999.9
- 7) W.H.Munse, P.C.Birkemore :High Strength Bolting of Galvanized Connections,"Symposium :Bolting Galvanized Connections and New Steel Design Specifications",The Australian Institute of Steel Construction and Austrarian Zinc Development Association, Melbourne, August,1969.
- 8) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2001.11.

(平成15年11月12日受理)