

東京工業大学 正員 西村俊夫  
東京工業大学 学生員。三木千壽

1. はじめに

高力ボルト 摩擦接合継手はリベット 接合継手と比較して疲労に対し有利な継手形式とされており、40～50キロ級鋼構造物の設計においては疲労を考慮した継手の許容応力度は平滑母材に対するものと同じ値を採用している。本形式継手の疲労破壊はかなりの応力が接触面間のまごつ抵抗によって伝達されるとはいえなおボルト孔を含んだ純断面およびその付近で発生している。この場合ボルト軸力の大小は継手の疲れ強さに大きい影響をもつものと考えられ、適正なボルト軸力を設定導入することは摩擦接合継手の安全性と経済性を確保する上に必要なことである。このことは最近開発使用されつつある60キロ級あるいはそれ以上高強度の鋼材の摩擦接合継手についてもいえることで、特にこれら高張力鋼では加工時の疲労強度の低下が大きいからその対策が重要な問題である。本稿は以上の様な事にもとづき、40キロ級および60キロ級鋼材で製作した摩擦接合継手においてボルト軸力と疲労強度との関係について実験、検討を行なった結果を報告するものである。

2. 試験片等

1) 試験片の製作

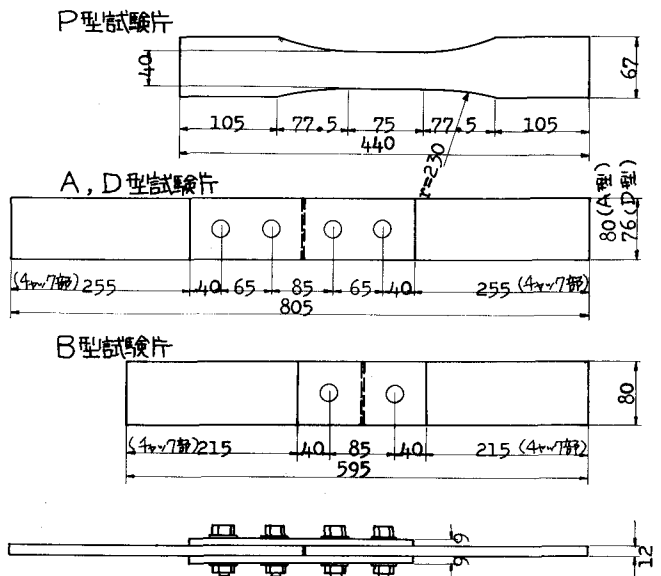
試験片用鋼材には40キロ級として溶接構造用鋼材SM41Bを、60キロ級としてWELTEN60を使用し、その機械的および化学的諸性質は表-1に示す通りである。高力ボルトにはF11T.W 3/4、首下長さ65mmを使用した。

試験片の形状は図-1に示すごとく、P型試験片は厚さ12mmの40キロ級および60キロ級鋼材の母材試験片であり、A、B、D型各試験片は厚さ12mmの母板に両側から9mmの添接板を当てた突合せ型の継手である。A型は40キロ級鋼材使用のものでボルト配列は継手各側に1列2本であり、B型はA型のボルト数を1列1本にしたものである。D型はボルトの配列はA型と同様であるが、60キロ級鋼材を使用した。鋼材表面はグリッドブラスト加工(グリッドの粒度は70<sup>#</sup>~100<sup>#</sup>)

表-1 使用鋼材の諸性質

規格	厚さ (mm)	引張試験 降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張試験 引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張試験 伸び (%)	化学成分					
					Cx100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	
SM41B	12	30	45	28	17	4	64	13	16	
規格	厚さ (mm)	引張試験 降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張試験 引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張試験 伸び (%)	化学成分					
					Cx100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	N x10000
WELTEN60	12	60	69	34	15	31	132	15	10	2.2

図-1 試験片の形状



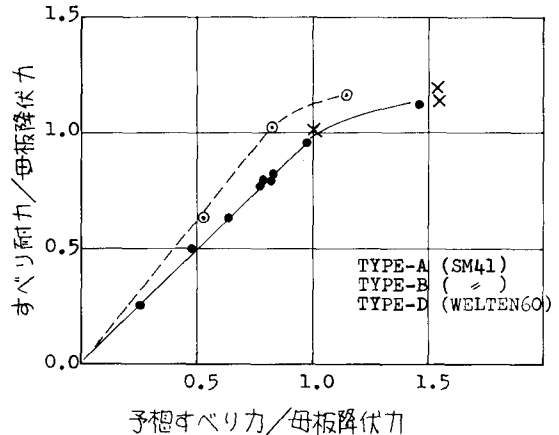
で黒皮を除去し、錆が終生しない状態で仕上げ加工および組立てを行なった。試験片の縁仕上げはすべて35S程度とし、ボルト孔はドリルであけ孔径は20.5mmである。

継手試験片のボルトへの軸力導入量はすべてボルト軸部に軸方向に貼った2枚のストレインゲージによって求めた。

## 2) ボルト軸力と適用荷重

ボルトに最大の軸力を導入した場合継手試験片に作用せしめる荷重の大きさを定めるための疲労試験に先だってA、B、D型各試験片について静的引張試験を行い、図-2のごとく予想すべり力(ボルト軸力×予想すべり係数0.5)とすべり耐力との関係を求めた。同図より締付力を高めるとすべり耐力は母板降伏力(純断面積に対するもの)と等しくなるまで直線的に上昇し、それ以上では上昇の割合は急激に低くなるが引続き増加。母板降伏力を2割程度上回る値まで到達した。なおこの値は純断面積で計算した降伏力の9割程度である。直線部分の勾配からはすべり係数は40キロ級鋼材使用の継手で0.5、60キロ級鋼材使用の継手に対し0.6であった。

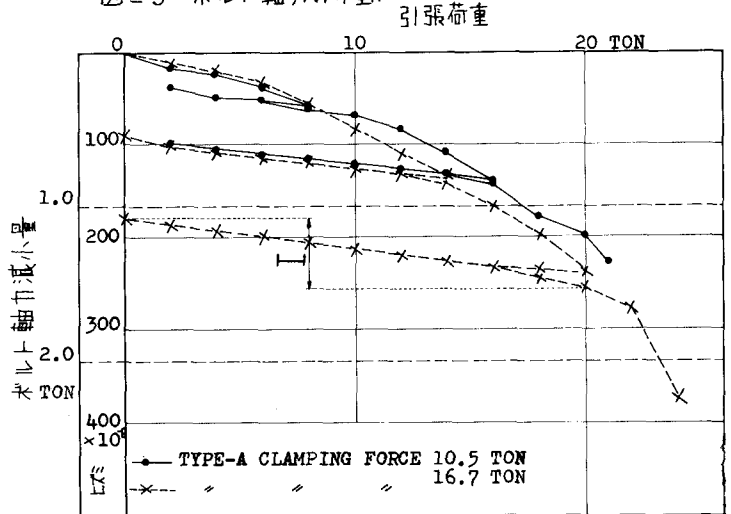
図-2 予想すべり力、すべり耐力、母板降伏力



## 3) ボルト軸力の挙動

引張試験時の大きさの異なるボルト軸力の挙動をストレインゲージで検出したものが図-3である。同図からボルト軸力は弾性的に変動する部分と塑性的に変動する部分があり、弾性的変形は引張荷重が作用する時の板厚減少によるもの、塑性的変形は載荷にともなう局所的な微小すべりによりあわせ面同志の凸凹部の噛み合いが深くなるためと考えられる。継手に繰返し荷重が働いた場合はこの弾性的変形部分に対応する変動応力がボルト軸に作用する。たとえばA型試験片ボルト軸力16.7 TONに対し0~20.0 TONの荷重が働いた時は図中IIで表わしたごとく荷重全振幅は約0.5 TON、応力全振幅は約1.8 kg/mm<sup>2</sup>である。原本らのボルトに対する疲労実験結果とも合わせてボルト軸力を大としてもボルト自身が疲労破壊することは考えられない。

図-3 ボルト軸力の挙動



## 3. 疲労実験

疲労試験はA、D型継手試験片およびP型試験片に対して行なった。使用した試験機は60TON/50TON

電気油圧型疲労試験機で載荷速度は600 cycle/min. 荷重は下限1 TON 応力度にしてP型試験片で2.1 kg/mm<sup>2</sup> A型試験片で1.0 kg/mm<sup>2</sup> D型試験片で1.1 kg/mm<sup>2</sup>であり、SIN 波形の引張部分片振荷重である。

1) 母材の疲労試験結果

P型試験片による母材のSN線図を応力全振幅で整理したものが図-4である。同図より200万回疲労強度を推定すると、SM41Bは24kg/mm<sup>2</sup>、WELTEN60は37kg/mm<sup>2</sup>となり、これらの値の降伏応力に対する比はそれぞれ0.80, 0.62である。なお引張強さに対する比は両方とも0.53であった。

2) 継手の疲労試験結果

A型試験片についてはボルト軸力を10.5t, 16.7t, 20.0t, D型試験片についてはボルト軸力を10.5t, 16.7t, 23.0t, とろ種にかえて実験を行なった。ここに16.7tは鉄道橋における標準ボルト軸力、20.0tはA型試験片の孔壁が降伏しない限界、23.0tはこのボルトに導入可能な軸力の最大値である。

図-5に実験結果と純断面積あたりの応力全振幅で整理したSN線図を示す。またボルト軸力の影響を明らかにするため同一応力振幅による破断回数の比較を行なったのが表-2であり、A型、D型ともに軸力を高めることにより疲労寿命の向上が認められる。

3) 継手試験片の疲労破断位置

図-6はA型試験片における代表的な破断状況を示したものである。疲労キレツはいずれも母板の4ヤック寄りボルト部分から発生しているが、ボルト軸力が10.5tの場合は疲労キレツはすべてボルト孔壁のIッ4部から始まり、ボルト孔を通る最小断面積(純断面積)位置で疲労破壊を起している。これに対しボルトに16.7t以上の軸力を導入すると疲労キレツは孔壁をやや離れた位置から始まり、孔壁および試験片側縁に向かって成長していることが破断面の観察より明らかとなった。

疲労試験終了後の材片接触面には全面的に赤錆が発生しているが、ボルト軸力の大きさによってはボルト孔周辺部に赤錆の発生しない領域が認められる。この領域は繰返し荷重が作用した時にも接触面間にずれが生ぜず完全に一体化しており、したがって摩擦による錆の発生がなくそれにもとれない生成する

図-4 母材の疲労試験結果

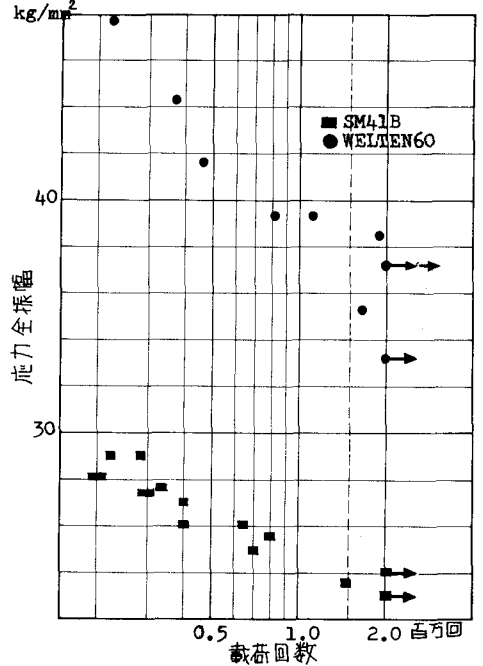


図-5 継手の疲労試験結果

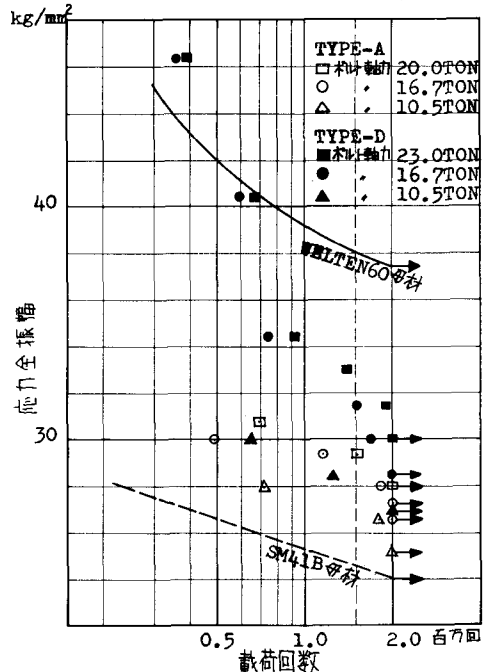


表-2 破断回数の比較

A型試験片		〈単位万回〉		
ボルト軸力 応力全範囲	10.5 TON	16.7 TON	20.0 TON	
25.2kg/mm <sup>2</sup>	200万回以上			
26.6 "	183	200万回以上		
28.0 "	72	184	200万回以上	
29.4 "		116	152	
30.8 "			69	

D型試験片		〈単位万回〉		
ボルト軸力 応力全範囲	10.5 TON	16.7 TON	23.0 TON	
27.0kg/mm <sup>2</sup>	200万回以上			
28.5 "	129	200万回以上		
30.0 "	66	173	200万回以上	
31.5 "		154	193	
34.5 "		75	94	
40.5 "		61	68	

と考えられる赤錆の発生がなかったものと推測できる。この一体化領域はボルト軸力が10.5tの試験片には認められず、軸力が16.7tになると現れ、かつ軸力の増大とともに微小ではあるが拡大する傾向にある。疲労キレツは一体化領域が存在する場合はこの領域の4チャック部寄り境界から始まり、存在しない場合は孔壁のエッチ部から始まっている。

#### 4. 実験結果に対する考察

実験結果より上述の一体化領域が得られれば継手の疲労強度がかなり向上することがわかったがこれはボルトを十分締付けることによりボルト孔の存在による孔周辺部の応力集中がかなり緩和され、反面一体化領域の出現(継ぎ応力の伝達に際し新たに領域周辺部に集中応力を生ずる結果となり、その大きさがボルト孔周辺部のものより大きくなったためこの部分よりキレツの発生をみたものであろう。しかし集中応力の性状が一体化領域の生じたりボルト孔周辺部の場合より苛酷ではなかったために疲労強度はその場合より向上したものとと思われる。

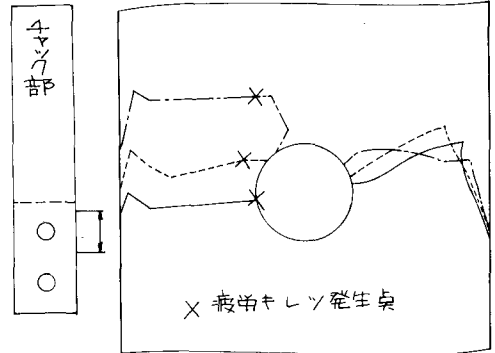
本実験結果より40キロ級鋼材使用の継手でボルト軸力を16.7tと一体化領域を確保すれば、200万回疲労強度は純断面積で計算して母材の降伏点応力の90%程度であり、また母材の200万回疲労強度を上回っているから、疲労設計時の許容応力度を現在鉄道橋で採用しているごとく母材と同様にとること(おさしつかがない。しかし60キロ級鋼材使用の継手においては最大の疲労強度が得られたボルト軸力23tの場合においても載荷回数70万回程度からその強さは母材強度より低くはなり、200万回疲労強度は母材の200万回疲労強度の85%程度の値におちこみ、また40キロ級鋼材使用の場合に近くなることもあるから設計に際しては十分留意する必要がある。

一体化領域が得られた後はボルトの軸力をそれ以上増大させても疲労強度の向上は本実験ではどれ程大きくはなかったことや、また一体化領域の形成は試験片の形状、材質、あるいは作用応力の大きさに関係があると思われるので今後これらの点について解明を続ける予定である。

#### 参考文献

- 1) 財団法人建設者協会 "ボルトの疲れ強さ" のじと技術 1967年6月
- 2) 国鉄 "建造物設計標準(鋼鉄道橋)" 昭和45年

図-6 代表的疲労破断位置(A型)



—————	ボルト軸力	10.5 TON
	荷重範囲	20.0 TON - 1.0 TON
	寿命	1835990 CYCLES
-----	ボルト軸力	16.7 TON
	荷重範囲	21.0 TON - 1.0 TON
	寿命	1837520 CYCLES
-----	ボルト軸力	20.0 TON
	荷重範囲	22.0 TON - 1.0 TON
	寿命	1521950 CYCLES