

1 7年間供用された高力ボルト摩擦継手の すべり耐力に関する実験

Carrying Capacity Test for Friction Joint of High-Strength Bolt
from a Removed Foot-way Bridge Used under 17 Years

谷平 勉*・亀井 正博**・石原 靖弘***・田井戸 米好****

By Tsutomu TANIHIRA, Masahiro KAMEI, Yasuhiro ISHIHARA, Yoneyoshi TAIDO

It is well-known that the capacity of friction joint used high-strength bolts depends on two principal factors, namely the bolt clamping force and the slip coefficient of joint surface. In the past studies for above factors, the results of some tension test using the specimens exposed in field were reported. However, there is substantial difference between exposed specimen and actual bridge. This paper presents an investigation on the ultimate slip strength of the joint under uniaxial tension using connections cut out from a actual bridge which had used under past 17 years. As the results of this test, the slip strength had a lower value than the past paper.

1. まえがき

1964年摩擦接合のための高力ボルトに関する JIS1186が制定されて以来、現場継手に従来のリベットに代わって高力ボルトが急速に使われるようになり、架設後20年を経過する橋梁もでてきている。中には苛酷な環境のもとでそのすべり耐力の低下が懸念される事例も散見され、高力ボルトの継手部のすべり耐力を把握する事は、橋梁全体の耐久性評価に欠くことが出来ないものと考えられる。摩擦接合部の耐力を決める2大要素は、接合面のすべり係数とボルト軸力である。これらの経年変化について調査した例は多いが、いずれもよく管理された状態での試験片による実験が多く、供用中の構造物の実態を表わしているとは必ずしも言い難い。実際に供用されている構造物では、実験室または暴露試験場での環境条件よりもかなり厳しく、しかも予想しにくい環境下におかれている場合が多い。また施工時の締め付け力の管理が実際問題として大きな要素となっているようである。以上のような背景をもとに、架け替え、もしくは撤去などの機会に実橋の継手部の実態を調査することは、供用中の橋梁の健全性の評価に重要なデータを与えるものである。このような調査の例としては、西村らの実構造物の軸力調査¹⁾やすべり耐力に関する実験の報告²⁾などがあるが、実際に活荷重や温度変化、雰囲気などを受け経年した橋梁の継手部を用いて、直接そのすべり耐力を調査した例はほとんど見あたらない。

-
- | | | |
|------|----------------------|-------------------------|
| * | 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 | (577 東大阪市小若江3-4-1) |
| ** | 工修 大阪市建設局 街路部立体交差課 | (530 大阪市北区梅田1丁目2-2-500) |
| *** | ㈱片山鉄工所 | (551 大阪市大正区南恩加島6-2-21) |
| **** | 工博 石川島播磨重工業㈱ 関西支社 | (541 大阪市中央区本町4-29-1) |

標準設計と同じデッキプレートを用いた中路2主桁のプレートガーダー橋である。実験に用いた継手は主桁の継手部2体で橋梁を撤去する際に現場でガス切断して取り出したものである。継手部の形状を図-1に示す。この2体の継手からすべり試験用の試験体を切り出した。継手部の材質はフランジならびにウェブともSS41で、ボルトはサイズがW7/8、材質がF11Tである。またボルトの首下長さは、フランジで95mm、ウェブで70mmであった。ボルトの軸力の測定は、頭部に2mmの2軸ひずみゲージを張り付ける方法によった。ボルトの化学成分を表-2に、機械的性質を表-3に示す。

3. 試験体の設計

試験体の形状やボルト継手本数など、試験体を設計する際には、すべり耐力が試験片の母材の降伏強度を大きく上回らないよう留意することとした。端部の幅は出来るだけ大きくすべきであるが、試験機のチャック幅の制限から170mmとした。母材の降伏強度は、材質SS41の公称降伏応力2400kgf/cm²と母材純断面積との積により求めている。試験体は図-2のように上下フランジから一体づつ、ウェブから2体切り出す。フランジ試験体はボルトの2列をそのまま用いることにし、ウェブ部分はボルトが1列になるように切り出した。この場合の降伏強度は下フランジ、上フランジ、およびウェブの順で90tf, 58tf, 31tfとなる。一方、継手のすべり耐力は文献[5]を参考にしてすべり係数を0.6とし残存ボルト軸力を16.8tf(軸力減少率20%相当)と仮定すればボルト1本当りのすべり耐力 P_s は $2 \times 0.6 \times 16.8 = 20.2\text{tf}$ となる。そこでウェブの片側のボルト2本はそのまま使用し、フランジ部については片側3本のボルトのうち図-3に示すように中央寄りの1本を取り外した。中央よりのボルトを取り外したのはすべった後でも母材の支圧耐力が確保できるように配慮したものである。推定すべり耐力はそれぞれ81tf, 81tf, および40tfとなる。上フランジについてはすべり耐力が母材の降伏強度よりかなり大きくなるが、フランジの母材にはもとの主桁のウェブの一部が残されているこ

表-2 ボルト鋼材の化学成分

鋼種	ボルト等級	成分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM3	F11T	0.33 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.85	<0.030	<0.030	0.90 ~1.20	0.15 ~0.30

表-3 ボルト鋼材の機械的性質

種別	引張試験				カタサ試験 ロックウェル
	耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	
F11T	≥95	≥110	≥14	≥35	HRC 33-40

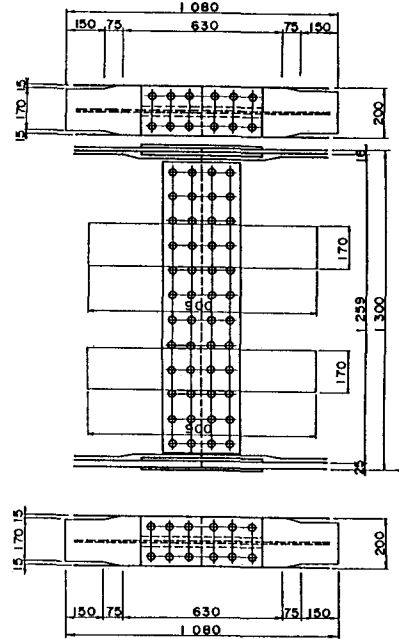


図-2 試験体の切断箇所

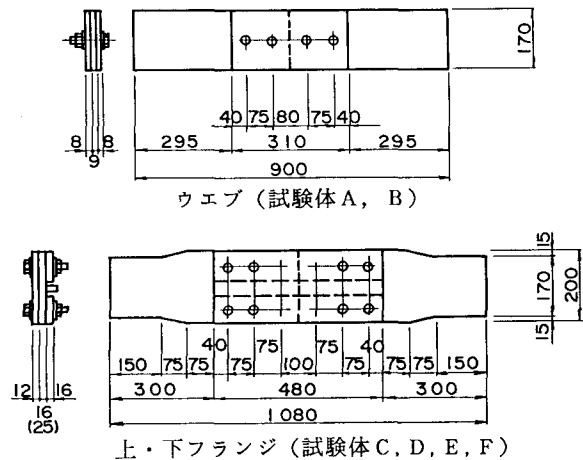


図-3 試験体の形状寸法

とから実断面積はかなり大きくなり、母材の細りによる影響はそれほど生じないと考えて以上のように決定した。

前述のように試験体は1つの継手部から上下フランジ各1体ずつと、ウェブ2体を取り出したが、ウェブの供試体は、フランジの供試体を切り出す際の熱の影響を避けるため、なるべく腹板中央を選んだ。

4. 試験体の切断法

表-4 検討した切断方法

現場から切断してきた継ぎ手から図-2に示すような試験体を切り出す際には、ボルト軸力や摩擦面の状態が供用中の状態と変化することがないように十分注意する必要がある。しかしこのような条件を満たすような切断方法について、過去に調査した例がなかった。そこで通常使われている切断方法についてそれぞれに考察を加え、そのうち比較的良好と思われる方法について実際に切断実験を行って、その結果より判断することにした。今回検討した切断方法を表-4に示す。

No.	方 法	問 題 点
1	ガス切断機により切断する方法	母材と添接板間で熱が滞留し、うまく切断できない。熱影響。
2	プラズマ切断機により切断する方法	同 上 厚板には不適
3	バンドソーで切断する方法	切削油がすべり面に影響
4	高圧水で切断する方法	研磨剤がすべり面に影響
5	ドリルで開孔後、ガス切断する方法	切削油、熱の影響
6	荒切後、フェーシングマシーンで仕上げる方法	治具必要

鋼板の切断には、通常第1案のガス切断が用いられているが、添接部のような重ね板を切る場合、板間に熱が滞留し、溶断状態となることが想定される。したがって切断部近辺の温度も非常に高くなると考えられ、高力ボルトの温度が350℃を超えると継手のすべり耐力に影響を与えるという報告⁸⁾もあるので、熱の影響は極力避けなければならない。

第2案のプラズマ切断機は第1案に比べて熱の影響は比較的小さいとされているが、重ね板の切断ではガス切断と同じ様な状態となり、やはり熱の問題を避けることは難しい。また30mmを超える厚板には適用できない場合が多い。

第3案のバンドソーで切断する場合、通常多量の切削油を使用することが多く、油分が添接板間に浸透し摩擦面の状態が変化する恐れがある。しかしながら長時間かけて切断することにより切削油の量をかなり少なくすることは出来る。

使用場所は限定されるが、高水圧を利用して鋼板を切断する第4案のジェットウォーター法がある。しかしながらこの方法はジェットウォーターの中に添加される研磨剤が高圧水とともに添接板の間に入り込み、摩擦面の状態を変化させる可能性が高いと考えられる。

第5案はガス切断による熱影響を極力少なくするために考案した方法である。これは、特に熱影響が問題となる添接板部の切断線に沿ってドリルで数カ所孔を開け、孔間のみガス切断する方法である。この場合もドリルに使用する切削油と、ガス切断時の熱の影響が懸念される。

第6案は、熱および油分の影響がないと思われる位置で仮に切断しておき、その後フェーシングマシーンによって実際の切断線の位置まで切削仕上げを行う方法である。この場合、試験体を固定するための治具が必要となり、また切削時の振動などが問題となる。

以上の各案の中から、比較的影響が少ないと考えられる、第3案と第5案について実際に切断試験を行った。第3案のバンドソーで切断する時の切削油の使用量を極力減らし長時間かけて切断した。この切断実験の結果、第3案では摩擦面に油分が浸透した形跡がみられず、切断面も整っていた。第5案では摩擦面に焼けた形跡がみられ、熱の影響がかなり大きいものと考えられたので、結局第3案を採用することにした。切断後の摩擦面の状況を写真-1及び2に示す。

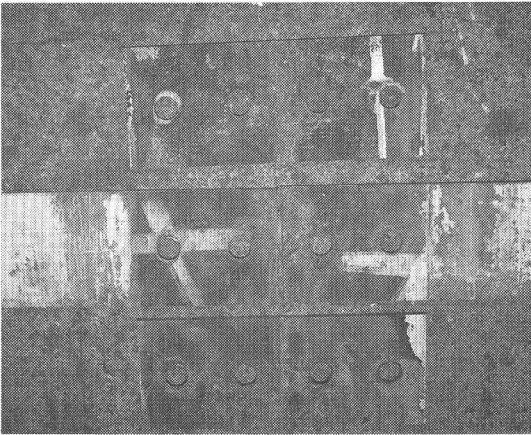


写真-1 切断後の摩擦面の状況（第3案）

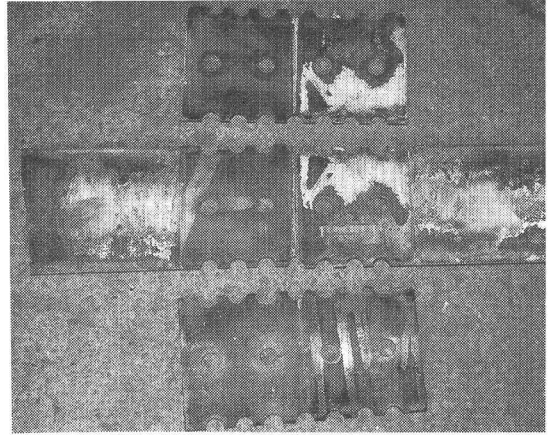


写真-2 切断後の摩擦面の状況（第5案）

5. すべり試験

表-5 試験体名と切出し箇所

継手部名	試験体名	切出し箇所
I	A-1	ウェブ
	A-2	
II	B-1	
	B-2	
I	C	上フランジ
II	D	
I	E	下フランジ
II	F	

現場で切断した2つの継手部、IおよびIIからそれぞれウェブ4体、上、下フランジ各2体ずつ、計8体のすべり試験用の供試体を前述の方法で切り出した。試験体の名称を表-5に示す。次に測定項目を表-6に示す。

測定項目①はボルトの残存軸力を調べるのが目的である。測定方法は前述の歪ゲージ法を用いた。すなわちすべり試験前にボルト頭部に2軸歪ゲージを貼付した後、歪測定器の0点を調整し、すべり試験後ナットを緩め、その時にえられたひずみ量を用いて、その後のキャリブレーションからボルト軸力を推定する方法である。また、母材降伏強度とすべり耐力の関係から予め抜いたフランジのボルトについても測定している。

表-6 測定項目

No.	測定項目	測定器機	測定箇所	測定目的
①	ボルト頭部のひずみ	2軸ひずみゲージ	ウェブ 4本 フランジ 8本	ボルト軸力
②	母材および添接板のひずみ	1軸ひずみゲージ	母材 2ヶ所 添接板 1ヶ所 計 3ヶ所	母材および添接板の応力
③	母材と添接板の相対変位	クリップゲージ	上下 各2ヶ所 中央 1ヶ所 計 5ヶ所	すべり時の確認

測定項目②は母材及び添接板の歪みを測定するもので载荷中に母材が弾性域にあるかどうかを確認するために設けたものである。ゲージは添接板中央と母材2箇所に設置した。

測定項目③は母材と添接板間の相対変位、すなわちすべりの確認である。試験体は2面摩擦の対称な突き合わせ継手であるから、す

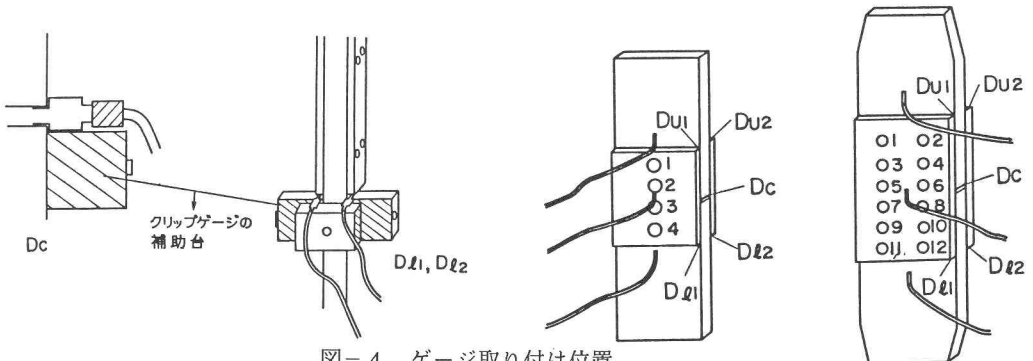


図-4 ゲージ取り付け位置

べり面は4面ある。したがってクリップゲージを添接板端部に4箇所設置し、母材間の開きを確認するために継手中央の両母材間の側面に一箇所とり付けた。ゲージ取り付け状況と、ボルト番号の位置を図-5に示す。載荷手順は予め母材の降伏荷重の半分程度の荷重を2度載荷して馴染ませた後、4面ともすべるまで載荷した。ボルトが支圧状態となっていてすべりが生じない場合には、載荷は母材の降伏が生じるまでとした。

6. 実験結果と考察

表-7 ボルトの残存軸力の測定値

6. 1 ボルトの残存軸力

ボルトの残存軸力の測定結果を表-7に示す。この表に示すようにウェブの平均残存軸力Nは12.0tf、変動係数Cvは25.8%。上フランジはN=13.8tf、Cv=16.5%、下フランジはN=10.7tf、Cv=29.7%であった。全ボルトの合計ではN=12.2tf、Cv=25.3%となった。ただし、この時下フランジのNo. 5, 7のボルトはほとんど軸力が入っていない、軸力の低下というよりも、施工不良の要因が大きいと考えられたためデータから除外した。なお、この2つのボルトはいずれもすべり試験時には前もって抜いた中央部のボルトであったため結果に影響はなかった。

また当時の設計ボルト軸力21.0tfと比較すると、軸力低下率は約42%となり残存軸力はかなり小さいといえる。測定結果の度数分布図を図-5、6、7にそれぞれ示す。これらから累積度数と、相対累積度数を計算し、正規確率紙にプロットした結果を図-8に示す。データは少ないが傾向を把握するために目分量で引いた直線より、ウェブよりもフランジの方が残存軸力のばらつきが大きいことがわかる。

箇所	記号	ボルト No.	残存軸力 (ton)	箇所	記号	ボルト No.	残存軸力 (ton)
ウェブ	A-1	1	14.6	ウェブ	B-1	1	20.0
		2	12.6			2	15.8
		3	11.9			3	10.7
		4	14.9			4	10.1
	A-2	1	10.8	B-2	1	8.5	
		2	10.3		2	7.8	
		3	12.6		3	9.7	
		4	11.0		4	10.0	
N = 12.0 t , Cv = 25.8%							
上 フ ラ ン ジ	C	1	10.1	下 フ ラ ン ジ	E	1	9.9
		2	16.5			2	13.9
		3	12.9			3	5.5
		4	15.4			4	9.7
		5	14.2			5	* 0.6
		6	10.3			6	11.9
		7	16.1			7	* 1.4
		8	16.4			8	9.5
		9	12.9			9	10.2
		10	12.8			10	3.6
		11	15.5			11	9.6
		12	12.5			12	15.7
上 フ ラ ン ジ	D	1	16.3	下 フ ラ ン ジ	F	1	12.2
		2	18.3			2	8.5
		3	13.1			3	11.7
		4	13.1			4	17.4
		5	13.4			5	10.2
		6	12.4			6	13.1
		7	12.3			7	11.3
		8	14.8			8	12.1
		9	8.6			9	10.5
		10	13.9			10	14.1
		11	13.2			11	9.4
		12	15.6			12	6.2
N = 13.8 t , Cv = 16.5%							
N = 10.7 t , Cv = 29.7%							
合 計		N = 12.2 t , Cv = 25.3%					

注) N, Cvには*印のデータを除外している。

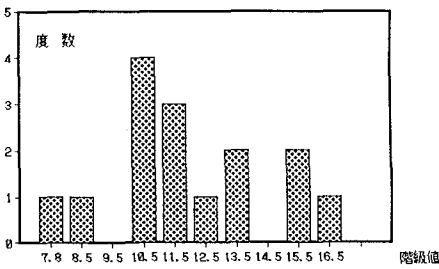


図-5 ウェブの残存軸力の度数分布

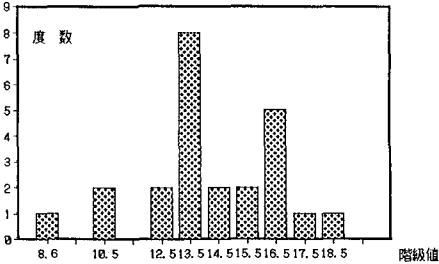


図-6 上フランジの残存軸力の度数分布

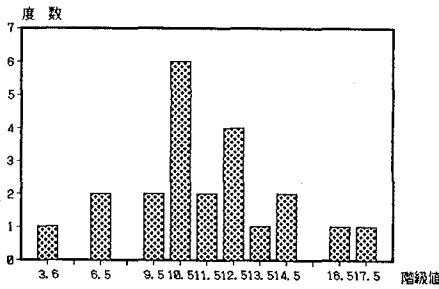
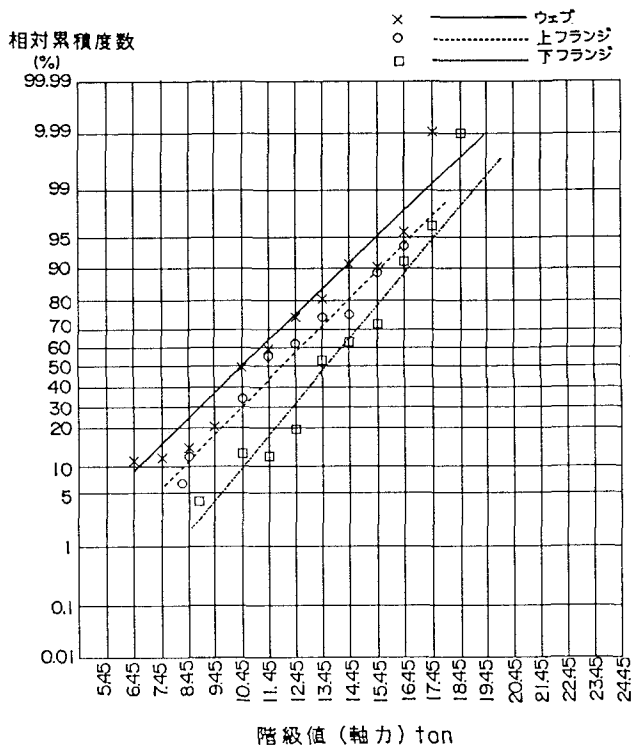


図-7 下フランジの残存軸力の度数分布



図－8 正規確率紙へのあてはめ

6. 2 すべり試験

8体の試験体について、5箇所に取り付けたクリップゲージの変位と荷重との関係を示したのが図－9～16である。A－2やCなどのように明瞭に、また、音を伴って大きくずれるものや、A－1、B－2のように、最初のずれでボルトが孔壁に支圧される位置までずれず、さらに高い荷重でまたずれるというように複数のずれ荷重が存在する場合もある。またD、Eのように、ずれと荷重がともに増大していき明瞭なずれが判断し難いものもある。接合面の状況によってはそれらが混在しているFのようなものもある。B－1の片側はまったくずれが生じなかったが、他の試験体のずれ状況から判断して、これだけが異常にすべり係数が大きいとは考えにくいので、ボルトが最初から孔壁に接触していたものと考えられる。段階的にずれる場合は、最初のずれをずれ荷重とし、漸増的にずれていく場合には、音の発生や塗料のひび割れの観察などから判断してずれ荷重を決めた。これを荷重－ずれ曲線のグラフでみると曲線の傾きが急変した当りに対応しているようである。ずれについては今後、目視的なデータとずれ荷重関係の量的な基準をもとに判断できるように検討する必要があると考えられる。なお理論的には D_u と D_l の合計が D_c になるはずであるが、試験体B－2、Eのように合わないものがあった。最初のずれ発生時の衝撃でクリップゲージがずれていた、試験体自身に初期不整があり、面外曲げ、面内曲げ、ねじりなどによる影響を受けたことが原因と考えられる。今回の実験では試験機の都合で片側にしかゲージをセットしなかったが、両側に設けることによりそれらの影響についてもある程度把握できるものと思われる。

表－8にすべり試験の結果を示す。この表のすべり係数 μ は、すべり荷重 P_s を摩擦面の数 m ($=2$) とボルト軸力の和 ΣN で除して求めたものである。すなわち $\mu = P_s / m \cdot \Sigma N$ である。すべり試験の結果から

箇所	記号	合計軸力(t)	すべり荷重(t)	すべり係数
ウェブ	A-1	上 27.2	29.1	0.54
		下 26.7	29.1	0.54
	A-2	上 21.1	29.0	0.69
		下 23.6	29.0	0.61
	B-1	上 35.8	すべり無し	—
		下 20.8	21.0	0.51
	B-2	上 16.3	23.0	0.71
		下 19.7	24.3	0.62
	平均	—	—	0.60
上フランジ	C	上 54.8	76.3	0.70
		下 53.7	76.3	0.71
	D	上 61.1	84.6	0.69
		下 61.2	81.1	0.79
	平均	—	—	0.72
下フランジ	E	上 38.9	55.1	0.71
		下 39.1	50.1	0.64
	F	上 49.7	64.6	0.70
		下 40.2	66.1	0.82
	平均	—	—	0.72
総平均		—	—	0.66

注) 合計軸力はウェブでは2本、フランジでは4本の合計を示す。

表－8 すべり荷重とすべり係数の実験値

箇所	記号	ボルト1本当りのすべり荷重P(t)	設計すべり耐力R(t)	安全率P/R
ウェブ	A-1	14.6	9.88	1.48
	A-2	14.5		1.47
	B-1	10.5		1.06
	B-2	12.2		1.23
	平均	12.9		1.31
	C	19.1		1.93
上フランジ	D	20.7	9.88	2.10
	平均	19.9		2.01
	E	13.2		1.33
下フランジ	F	16.3	9.88	1.65
	平均	14.8		1.49

表－9 実験値と設計すべり耐力との比較

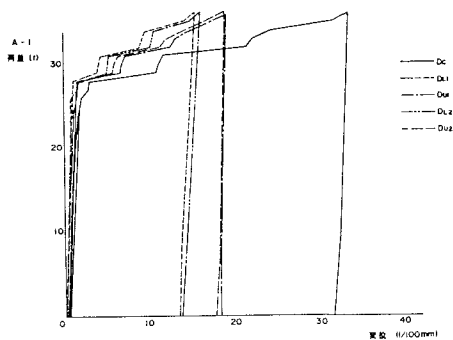


図- 9 荷重すべり関係図 (試験体 A-1)

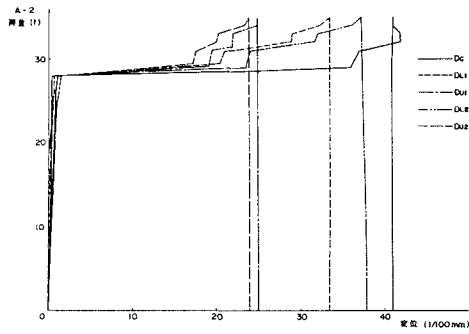


図- 10 荷重すべり関係図 (試験体 A-2)

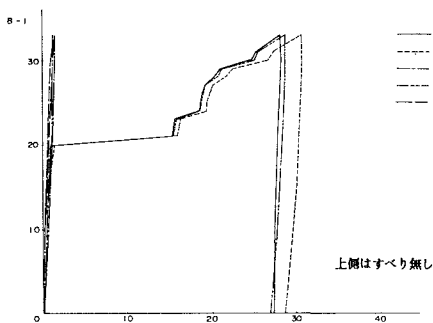


図- 11 荷重すべり関係図 (試験体 B-1)

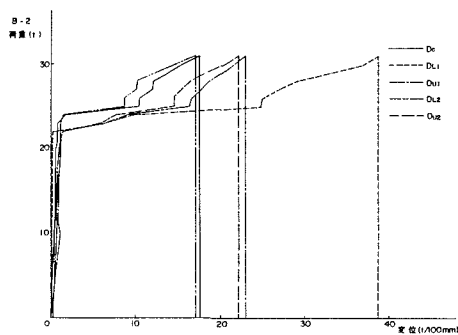


図- 12 荷重すべり関係図 (試験体 B-2)

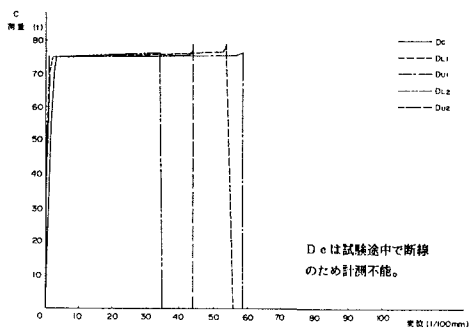


図- 13 荷重すべり関係図 (試験体 C)

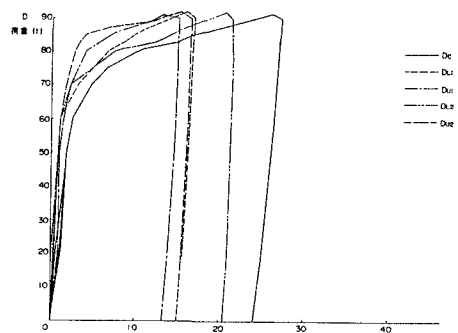


図- 14 荷重すべり関係図 (試験体 D)

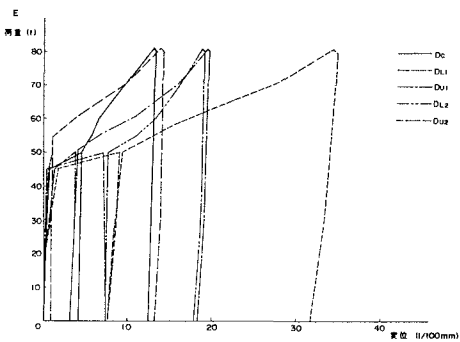


図- 15 荷重すべり関係図 (試験体 E)

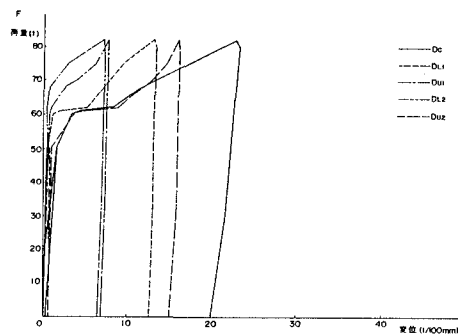
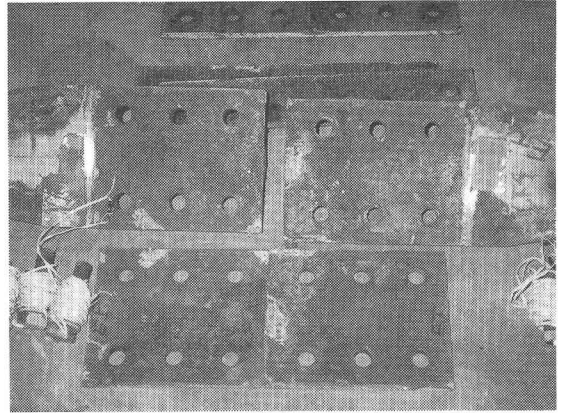


図- 16 荷重すべり関係図 (試験体 F)

ウェブとフランジの試験体のボルト本数の違いを除くために、ボルト1本あたりのすべり荷重（実すべり耐力）を算出し、設計すべり耐力と比較した。その結果を表－9に示す。ここで設計すべり耐力とは道路橋示方書に示されたすべり係数 $\mu = 0.4$ と安全率 $\nu = 1.7$ を用い、設計ボルト軸力 $N = 21.0\text{tf}$ として求めたものである。すなわち $R = m n \mu N / \nu = (2 \times 1 \times 0.4 \times 21.0) / 1.7 = 9.88\text{tf}$ である。表－8から、ウェブのすべり係数 μ は $0.54 \sim 0.71$ とばらついており、その平均は 0.60 であった。同様に上フランジは $\mu = 0.70 \sim 0.79$ で平均値は 0.72 、下フランジは $\mu = 0.64 \sim 0.82$ と上フランジよりばらつきが大きい、平均は 0.72 となっている。フランジに比べてウェブのすべり係数は



写真－3 すべり試験後の摩擦面（下フランジ試験体E）

若干小さい値がえられた。板厚の影響や発錆量の

違いなど種々の要因が考えられるが、今回の少ないデータでははっきりしたことはいえない。全体の平均値は 0.66 となり、これは現行の道路橋示方書の規定値 0.40 を約 65% 上回っている。なおすべり試験後摩擦面を観察したが、写真－3のように母材ならびに添接板ともかなり発錆しており、部分的には塗料、黒皮の付着しているものもあった。表－9に示すように、ボルト1本当たりのすべり荷重（実すべり耐力）はウェブでは $P = 10.5 \sim 14.6\text{tf}$ で、その平均は 12.9tf であった。フランジは2体の平均であるが、上、下フランジそれぞれ、 $P = 19.9\text{tf}$ 、 14.8tf であった。ボルトの残存軸力は、下フランジよりウェブの方が大きい傾向にあったが、実すべり耐力でみた場合、逆の傾向がみられた。これはすべり係数の違いが大きく影響したからである。

また設計すべり耐力との比をとって見かけの安全率を計算した結果、上フランジ 2.01 、下フランジ 1.49 ならびにウェブ 1.31 となった。上フランジ以外は現行の設計上の安全率 1.7 を下回ることになる。しかしながら継手全体のすべり耐力の安全性には、全ボルトが寄与するものと考えられるので、実際にはもっと大きな安全率が得られることになる。また、一般に歩道橋の継手部は設計応力が小さく、母材の全強の 75% で決まることが多いことなど、余裕のある設計がなされていることなどから、供試体の一部で安全率が 1.7 を下回ったからといって、これがただちに橋梁の安全性を左右するということにはならない。

7. あとがき

今回、実橋における高力ボルト摩擦接合部のボルト残存軸力を測定するとともに、継手部から切り出した試験体を用いて、すべり試験を行った。従来の報告では、ボルト締め付け後、長時間経過した場合、ボルト残存軸力はクリープやリラクゼーション、発錆ならびに締め付け順序などにより漸減するが、一方ではすべり係数が大幅に増加するため、継手全体としての耐荷力は、極端な腐食の進行がないかぎり問題はないとされていた。しかし本実験結果から、すべり係数は設計値を上回るが、従来の調査結果より小さ目であることや、ボルト残存軸力がかなり小さいことなどから継手ボルト個々の耐荷力としてはむしろ減少の傾向であり設計時の安全率を維持できていないものもあった。今回の結果が、既往の報告データより低いすべり耐力となった要因としては、以下のような施工管理上の問題が考えられる。

1) ボルトの残存軸力が小さい目にでたことはボルト軸力自身の低下以外に、締め付け不足による影響も大きいと考えられる。これはボルト軸力が極端に低い、締め忘れではないかと思われるボルトがあることや、ボルトの締めにくいウェブ端部と下フランジのボルト軸力が低い傾向にあることから推察できる。ただし

ウェブおよび下フランジが上フランジに比べて、腐食環境が悪いことや試験体を切りだしたことによる影響などについても今後検討していく必要があるものと考えられる。

2) すべり試験後に観察した摩擦面には一部に塗料や黒皮が残っているものもあった。これがすべり係数を小さくさせた一因と考えられる。当時の施工記録がないので明言は出来ないが、前述のボルト締めの問題とも併せて、当時の施工管理上から来る問題であろう。

既に述べたように過去の研究事例はほとんどの場合、十分な管理のもとに試験体が製作されており施工不良の問題はあまり考えられない。したがってデータとしては上限に近い値が得られているものと思われる。今回対象とした橋梁は建設当時まだ高力ボルトが使用されだした初期の頃であり、指針⁹⁾は発行されていたが、道路橋示方書にはまだ記述されていない時期であった。このような時代背景を考えると、実構造物、特に今回調査したような歩道橋などの比較的小規模の構造物では、従来の研究で得られた結果より多少すべり耐力が低くすることは十分想定できる。

いずれにしても、実橋継手部の耐力力を直接調査した例はほとんどなく、今回の調査結果だけでは一般的傾向を把握するには不十分と考えている。しかしながら今後とも機会をとらえ実橋からの切り出し試験を続け、実構造物の健全性の判断資料の基礎資料となるようデータを蓄積していきたいと考えている。

最後に本実験を行うにあたり、ボルトメーカーの諸氏、並びに近畿大学理工学部土木工学科の学生諸氏のご協力をいただいたことを付記し感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西村博一、田原文男、西村昭：“15年経過した高力ボルトの軸力測定”、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集I-113, 1980
- 2) 田島二郎：“12年半経った高力ボルト継手の試験”、橋梁、p38~44、1979. 7
- 3) 鋼構造協会接合小委員会：“高力ボルトの遅れ破壊”、p1~15、JSSC、Vol15、No. 158、1979. 3
- 4) 西村昭、宮永佳明、梶谷義昭：“実橋摩擦接合高力ボルト軸力の経年変化”、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集I-113, 1980
- 5) 菊川春三、村田勝弘、西村昭：“実構造物の高力ボルト摩擦継手耐力の経年変化”、土木学会第34回年次学術講演会講演概要集I-145, 1979
- 6) 菊川春三、田中淳之、寺田弘：“妨錆処理した高力ボルト摩擦継手挙動の経年変化に対する実験的研究”、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集I-110, 1980
- 7) 関西道路研究会接合小委員会第1分科会：“締め付け後14年経過した高力ボルト軸力の調査”、委員会資料No. 87-7-16-2、1987
- 8) 虫賀恭一、佐藤章次、二宮隆史：“高温用合金鋼ボルト材を使用した高力ボルト摩擦接合部の耐熱実験”、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集I-247, 1987
- 9) (社)日本道路協会：鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針、1966. 7

(1989年10月2日受付)