

軸力を低減した高力ボルト継手の挙動

STATIC AND FATIGUE TESTS OF HIGH STRENGTH BOLTED JOINT WITH REDUCED AXIAL FORCE

三ッ木幸子* 近藤明雅** 山田健太郎***

By Yukiko MITSUGI, Akimasa KONDOU and Kentarou YAMADA

Friction type bolted joints require high axial forces to the bolts, while bearing type bolted joints usually need severe control of tolerance of bolt holes. In order to obtain mechanical model of bolted joints, the axial forces of the high strength bolts of 22 joints was intentionally reduced into a half of friction type's, and tensile tests and fatigue tests were carried out. In 18 specimens two bolts were placed in the load direction with some misfit and with 2.5 mm oversized holes. The relative displacement between the main plate and splice plates was influenced by the arrangements of the holes, amount of the misfit and previous loading history. Additional specimens had two bolts placed perpendicular to the load direction, which showed low fatigue strength.

1. まえがき

高力ボルト支圧接合では、ボルト軸部のせん断抵抗と、ボルト軸部とボルト孔壁間の支圧力によって抵抗する。支圧接合を設計方法により分類すると、(1) ボルト軸部に凹凸を設けて、ボルト孔との余裕(クリアランス)をなくし、打ち込み式に用いる方法¹⁾、(2) クリアランスを 1.6mm許して、常時荷重に対しては摩擦接合で設計し、非常時荷重に対してのみ支圧接合で設計するAASHTOに規定されている方法²⁾、および(3) クリアランスについては 1.3mmとAASHTOに近い値を許し、軸力は打ち込み式の約80%を導入し、AASHTOとは異な³⁾って、常時・非常時荷重に対して設計する、北海道で許されている接触式の方法⁴⁾などである。また、西ドイツのせん断支圧接合はボルトのクリアランスを0.3mmと比較的小さく押さえて、ボルトに軸力を導入せずに用いる方法⁵⁾である。

これに対して、摩擦接合では、伝達力はすべりを生じるときの荷重を基準に考える。このため、設計荷重以下ではすべりを生ぜず、ボルト孔にクリアランスをもたせることが可能で、そのため製作・施工が比較的容易になる。逆に摩擦抵抗力が導入軸力に依存するので降伏応力度に近い高応力度で締め付けるため、軸力の厳しい管理が必要となる。一方、支圧接合はボルト1本あたりの伝達力が摩擦接合より大きくなるが、製作上の制約を受ける。たとえば、材片間のずれを許さない打ち込み式では、施工性や騒音の問題から現在で

* 工修 関地域経営研究所 (〒102 千代田区五番町12五番町M-6)

** 工博 名城大学講師 理工学部土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜口)

*** Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

はほとんど使用されていない。

したがって、両接合法の長所を兼ね備えた高力ボルト継手を用いれば、従来の継手形式より有利となることが考えられる。たとえば、クリアランスのあるボルト孔に軸力を低減した高力ボルトを用いる支圧接合では、軸力を低減することから軸力の管理を簡略化することができ、せん断支圧抵抗力を有効に利用することができる。また、ある程度の変形（ずれ）を許容することにより、製作・施工上の容易さも確保される。しかしながら、軸力を低減した場合の高力ボルト継手の挙動については必ずしも明確にされているわけではない。

そこで本研究では、摩擦・支圧両接合法の長所を兼ね備えるような高力ボルト継手方法を検討するため、一本当りの軸力を通常の高力ボルト摩擦接合の1/2に低減した高力ボルト継手の静的引張試験と引張疲労試験を行ない、その力学的特性を検討した。

2. 試験体の製作

(1) 試験体

試験体は、Fig. 1 に示す L系 3タイプ（LS, LI, L0）および Tタイプである。材質は全てSM50YAで、2回に分けて製作した。降伏応力度はそれぞれ421MPaと392MPaで、引張強度は双方とも559MPaであった。板厚は主板、添接板ともに10mmで、添接板の合計断面積は主板の2倍になっている。表面はショットブラスト（表面粗さ80 μ Rz以下）で仕上げた。ボルト孔はNCボール盤で明け、

試験体の切り出しはすべて機械加工で行なった。高力ボルトは F10T(M22)を使用した。

a) LSタイプ：本実験で用いた標準タイプで、Fig. 1 a) に示す。道路橋示方書（以下、道示と略す）に定められている最大縁端距離の規定（外側の板厚の8倍）を守って、荷重に対し垂直方向の縁端距離を80mmとして、幅を160mmとした。ボルトのせん断許容応力度（ボルトの引張耐力／1.7 $\sqrt{3}$ ）を用いて、主板の全強（総断面積 $\times$ 許容応力度）に対し必要ボルト本数を求め

ると2本となるので、ボルト本数を2本として、荷重方向に並べた。荷重方向の縁端距離は摩擦接合の標準値40mmとし、ボルト孔間隔は75mmとした。ボルトと孔のクリアランスは2.5mmとし、孔径を24.5mm ϕ とした。このタイプでは、6体の試験体について試験を行なった。

b) LIタイプ：ボルトが接触したときの支圧力の不均衡の影響を検討するため、Fig. 1 b) に示すように添接板のボルト孔の間隔を標準に比べ2mm広げて77mmにした。この結果、Fig. 2 b) に示すように支圧状態では内側のボルトが先に接触する。このタイプも6体試験した。

c) L0タイプ：LIタイプと同様に、ボルトの支圧状態の不均衡の影響を検討するため、Fig. 1 c) に示すように、添接板のボルト孔の間隔を標準に比べ2mm狭めて73mmにした。この結果、Fig. 2 c) に示すように、

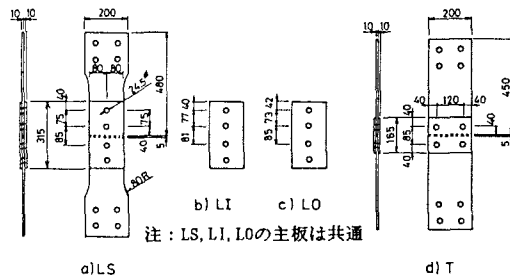


Fig. 1 試験体図

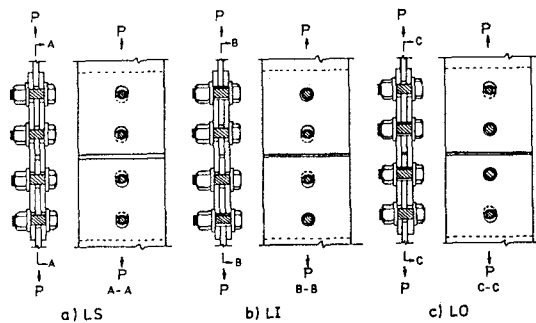


Fig. 2 ボルトと孔の位置関係（継手詳細図）

外側のボルトが先に接触する。このタイプも 6 体試験した。

d) T タイプ: Fig. 1 d) のように、2 本のボルトを荷重に対して直角方向に並べた。すなわち、縁端距離を一定 (40mm) にして、荷重方向のボルト本数が 1 本の場合 (T タイプ) と 2 本の場合 (LS タイプ) の継手の力学的特性の違いを検討する。このタイプは 4 体試験した。

(2) ボルトの締め付け

試験体の上側 2 本を試験の対象とし、この部分のボルトの締め付けは、道示で摩擦接合に対して規定されている軸力 (実際に現場で導入される軸力で、設計値の 10% 増し) の 50% となるように行なった。すなわち、下記の式から目標初期軸力を 110kN とし、トルクレンチを用いて 340Nm トルク (トルク係数 $k=0.137$) で締め付けた。

$$N = 0.75 \times \sigma_y \times A_e \times 1.1 \times 0.5 = 11300 \text{ (kgf)} = 110 \text{ (kN)}$$

ここで、 N : 目標初期軸力、 σ_y : ボルトの耐力 (90kgf/mm^2)、 A_e : ボルトの有効断面積 (303.4mm^2)

なお、下側のボルト 2 本は、規定以上のトルクで締め付け、疲労試験時に、き裂が必ず上側で発生するようにした。

3. 静的引張試験

(1) 試験方法

静的試験では、上述の試験体を用いて、疲労試験時の上限荷重まで引張载荷を行ない、荷重-変位関係およびすべり荷重を測定した。Fig. 3 に示すように、4 枚の歪みゲージを試験体の 4 面のそれぞれの中央に貼り、静的試験前に、10tonf 以下の荷重で 5tonf 程度の荷重範囲に対するひずみの最大誤差が 5% におさまるように偏心管理を行なった。主板と添接板の相対変位 δ は、Fig. 3 に示すように精度 1/100 mm のダイヤルゲージと山形のアルミ切片をゲージ長 145mm に設置して測定した。

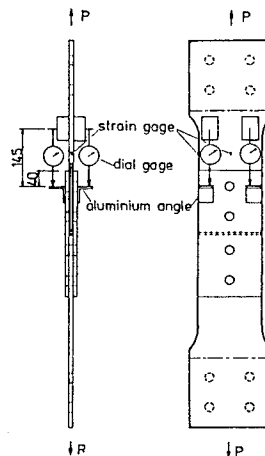


Fig. 3 偏心管理用歪みゲージ位置と変位測定装置

なお、T タイプの最大荷重は試験体の総断面応力度が許容引張応力度と等しくなる荷重 42tonf とし、このときの純断面応力度と L 系の試験体の純断面応力度とが等しくなる荷重 38tonf を L 系の最大荷重とした。

また、ボルトが支圧状態にある場合とない場合の力学的特性の違いおよび継手にすべりが生じた後の摩擦抵抗が小さくなった状態での力学的挙動を検討するため、次に示す A~C の 3 種類の方法により試験を行なった。

試験方法 A: ボルトを支圧状態にしないで締め付けた後、静的引張試験を行なう。

試験方法 B: 荷重 1 tonf 程度で支圧状態にしてからボルトを締め付け、静的引張試験を行なう。

試験方法 C: C 1 のあとに、C 2 を行なう。C 1 は、試験方法 B と同様に試験を行ない、C 2 は、C 1 を行なった後、ボルトを支圧状態から解放して締め付け直し、再度、静的引張試験を行なう。

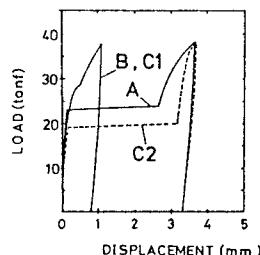


Fig. 4 試験方法の違いが荷重変形曲線に及ぼす影響 (試験体タイプ LS)

(2) 荷重変形曲線

a) ボルト締め付け時のボルトの支圧状態とすべり履歴の違い

ボルト締め付け時のボルトの支圧状態およびすべり履歴の影響を検討するため、Fig. 4に標準タイプの荷重変形曲線のうち、試験方法A、BとC1、C2の代表的な曲線を示す。試験方法Aでは、ボルト孔のクリアランス 2.5mmに相当するすべりが生じるが、すべり後の荷重変形曲線は、同レベルの初めから支圧状態にあるBおよびC1の曲線に似ている。また、一度すべりを起こしたC2では、すべりはAより低い荷重で起こる。すべり量は大きい、すべり後の荷重変形曲線の勾配が急になっている。他の試験体タイプについても同様な傾向が見られた。

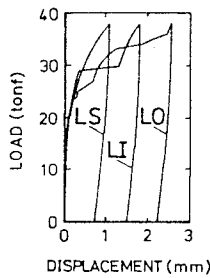


Fig. 5 支圧状態の不均衡が
荷重変形曲線に及ぼす影響
(試験方法B & C1)

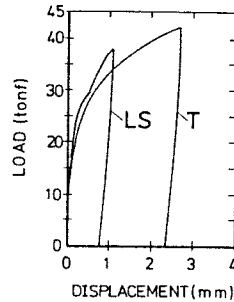


Fig. 6 荷重方向のボルト本数が1本
の場合と2本の場合の荷重変形曲線
(試験方法B & C1)

b) ボルトの支圧状態の不均衡の影響

次にボルトの支圧状態の不均衡の影響を検討するため、Fig. 5に試験方法BとC1で試験した、LS、LI、LOの代表的な荷重変形曲線を示す。LSでは急激な変形は観察されず、LIでは一定の荷重（この場合25～30tonf）ですべりのような急激な伸びが観察され、その後、LSに似た荷重変形曲線となっている。なお、偏心を持つLSでは、LIと似た荷重変形曲線が得られた。一方、LOでは、LIより低い荷重段階ですべりのような伸びが観察されるが、LIよりも小刻みな変形が繰り返され、かつ、より広い荷重段階（22～38tonf）で続けて生じている。最高荷重時の変形量はLS、LI、LOの順に大きくなる。

c) 荷重方向のボルト本数の違い

Fig. 6に試験方法BおよびC1で試験した、LSとTの代表的な荷重変形曲線を示す。同一荷重における変形量を比較するとTの方が大きいことがわかる。断面積の違いを考慮して、同じ応力レベルで比較した場合、この傾向はさらに大きくなる。

(3) すべり係数

明確なすべり点が見いだされたケースについて、このときの荷重をすべり荷重としてTable 1に示した。すべる前に摩擦のみで荷重を伝達するAおよびC2の場合では、摩擦抵抗の状態が破れてすべりを起こし、ボルトが1本でも支圧状態になるすべり（主すべり）である。また、BおよびC1のすべりはボルトの支圧によって塑性変形が生じ、これに伴って起こるすべりである。したがって、すべりの意味は異なるので、Table 1では、後者に括弧を付けて区別した。なお、表には、試験方法、最大荷重 P_{max} 、最大応力度 σ_{max} （純断面応力度）、および、ボルト軸力を110kNとして計算したすべり係数 μ も示した。

Table 1 各試験体の静的試験の条件とすべり係数

Specimen No.	Test Process	P_{max} (ton)	σ_{max} (MPa)	P_{slip} (ton)	Coeff. of Slip
LS 1	A	38.0	274.8	23.0	0.51
LS 2	A	38.0	274.8	27.5	0.61
LS 3	B	38.0	274.8	(32.0)	(0.71)
LS 4-1	C	C 1 38.0	274.8		
-2		C 2 38.0	274.8	19.0	0.42
LS 5-1	C	C 1 38.0	274.8		
-2		C 2 38.0	274.8	19.0	0.42
LS 6	A	38.0	274.8	21.5	0.48
LI 1	A	38.0	274.8	23.0	0.51
LI 2	A	38.0	274.8	22.0	0.49
LI 3-1	C	C 1 38.0	274.8	(25.0)	(0.55)
-2		C 2 38.0	274.8	12.0	0.27
LI 4-1	C	C 1 38.0	274.8	(29.0)	(0.64)
-2		C 2 38.0	274.8	15.0	0.33
LI 5	B	38.0	274.8	(24.0)	(0.53)
LI 6-1	C	C 1 38.0	274.8		
-2		C 2 38.0	274.8	12.0	0.278
LO 1	A	38.0	274.8	19.0	0.42
LO 2	A	38.0	274.8	19.0	0.42
LO 3-1	C	C 1 38.0	274.8	(22.0)	(0.49)
-2		C 2 40.0	289.3	13.5	0.30
LO 4-1	C	C 1 38.0	274.8		
-2		C 2 (31.0)	224.2	13.0	0.29
LO 5	B	38.0	274.8		
LO 6-1	C	C 1 38.0	274.8		
-2		C 2 38.0	274.8	13.0	0.29
T 1	B	42.0	272.5		
T 2	A	42.0	272.5	18.0	0.40
T 3	A	42.0	272.5	18.0	0.40
T 4	A	42.0	272.5	23.5	0.52

TEST PROCESS	SPECIMEN TYPE	COEFFICIENT OF SLIP μ
A	LS	
	LI	
	LO	
	T	
C2	LS	
	LI	
	LO	

Fig. 7 AとC2のすべり係数 μ

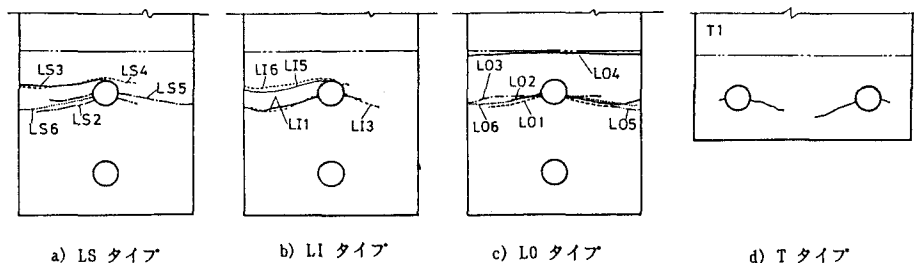


Fig. 8 各試験体の破断状況

試験方法AとC2のすべり係数 μ の比較をFig. 7 に示す。試験方法Aでは、試験体LIの μ が標準タイプLSとほとんど同じであるが、LOおよび Tは LS の約80%である。LSおよび LI のすべり係数は、黒皮を除去した場合に確保される値の0.5 をほぼ満足する。LOおよび Tは、それより若干小さいが道示などに示される値の0.4 を上回っている。一旦、すべりを生じた場合に相当する試験方法C2では、試験方法Aに対して、すべり係数は約80%に低下していた。

4. 疲労試験

(1) 試験方法

静的試験終了後、引き続き疲れ試験を行なった。疲労試験開始前に、再度、歪みゲージにより応力範囲に対し 5%以内に偏心が収まることをチェックした。

荷重条件は、上限荷重を静的載荷試験の最高荷重に保ち、応力比を 0~0.5 の間で変化させた。また、繰返し速さは 4.5Hzである。破断までの繰返し数を求め、破断しない時は約 300万回を超えた時点で試験を中断した。試験後、き裂形状を含む試験体の変状を観察し、破断した試験体については破面観察も行なった。

(2) 破断の状況と疲労変状

破断後の母材表面から見た破断状況をFig. 8 に示す。き裂は、i) ほぼ純断面上のボルト孔で発生し、純断面上あるいは荷重載荷側とは反対側にそれて進展するもの、ii) ボルト孔から少し荷重載荷側へ入った部分で発生し、き裂の一端は荷重方向に進展し、孔壁に貫通し、もう一端は荷重直角方向に進むもの、iii) 添接板の天端付近の母材で発生し、荷重直角方向に進むものなどが観察された。

本試験で得られた破断状況は、孔を通っている i) が最も多く13体で、次はii) の 4体、そして、iii) は LO4の1体であり、LI4はチャック部にき裂が発生した。試験体タイプ LO およびT の破断状況は、LO4 を

Table 2 疲労試験結果

Specimen No.	Test Process	R	σ_{max}, N (MPa)	σ_r, N (MPa)	$\sigma_{r,g}$ (MPa)	$N \times 10^3$	破断状況
LS 1-1	A	0.5	274.8	137.3	110.0	> 2789	
-2		0.4	274.8	164.9	139.7	> 3192	
-3		0.1	274.8	247.3	209.5	1558	
LS 2	A	0.1	274.8	247.3	209.5	491	I
LS 3	B	0.3	274.8	192.0	163.0	1659	II
LS 4	C	0.3	274.8	192.0	163.0	1514	II
LS 5	C	0.3	274.8	192.0	163.0	2539	I
LS 6	A	0.1	274.8	247.3	209.5	557	I
LI 1	A	0.1	274.8	247.3	209.5	291	I
LI 2	A	0.5	274.8	137.4	116.4	> 4045	
LI 3	C	0.3	274.8	192.3	163.0	585	I
LI 4	C	0.4	274.8	164.9	140.0	> 3782	
LI 5	B	0.3	274.8	192.3	163.0	1605	II
LI 6	C	0.3	274.8	192.4	163.0	1905	II
LO 1	A	0.1	274.8	247.3	209.5	384	I
LO 2	A	0.5	274.8	137.4	116.4	1356	I
LO 3	C	0.4	289.3	173.6	140.0	246	I
LO 4	C	0.5	274.8	137.4	116.4	3907	III
LO 5	B	0.4	274.8	164.9	140.0	3157	I
LO 6	C	0.4	274.8	164.9	140.0	1245	I
T 1	B	0.07	272.5	253.1	191.1	455	I
T 2	A	0.5	272.5	136.3	102.9	1451	I
T 3	A	0.1	272.5	245.3	185.2	223	I
T 4	A	0.5	272.5	136.3	102.9	> 3404	

> means runout data

除いて、すべて i) であった。ii) のき裂タイプは、試験体タイプ LS および LI に見られ、この破断状況となった試験体の破断寿命は約 100 万回以上で、比較的長寿命になっている。

なお、疲労試験後の観察では、どのボルトにも異常な変形は見られなかった。

(3) 疲れ寿命の比較

a) 各タイプの疲れ強さ

Table 2 に全供試体の疲労試験結果を示す。応力範囲は純断面応力 σ_r, n および総断面応力 σ_r, g で表示し、N は破断までの繰り返し数を示す。

標準タイプ LS の疲労試験結果を ▲印で Fig. 9 に示す。縦軸の応力範囲は純断面応力で表わした。過去のデータを用いて高力ボルト摩擦接合との比較をするため、主板の断面積がほぼ等しく、軸力がほぼ等しい場合と軸力については約 2 倍の場合の試験結果として桜井らの試験結果¹⁰⁾を用い、それぞれ ●、◇ の印でプロットし、それぞれの 50% 破壊確率線を示す。●印はボルトに 127kN の軸力が導入された場合の結果を、また ◇印は 225 または 265kN の軸力が導入されたときの試験結果を示す。LS タイプの試験結果（導入軸力 110kN）は、導入軸力が 225、265kN の場合より、かなり疲れ寿命が小さく、軸力が 127kN の試験結果に近いことがわかる。なお、桜井らが使用した継手では、F11T(M20) の高力ボルト 2 本を LS タイプと同様に配置し、主板の断面寸法は 100×16 mm (SS41) で、応力比を 0 として試験を行なっている。

LS, LI, L0 タイプの結果を純断面応力で Fig. 10 に示した。外側のボルトが先に支圧状態になる L0 タイプでは、LS より疲れ寿命が短くなる傾向にある。一方、内側のボルトが先に支圧状態になる LI タイプでは、LS に近い疲れ寿命を示している。L0 の疲れ寿命の低下は、一列目のボルトを通る純断面では、主板の純断面平均応力が大きい上に、この部分の支圧応力が LS タイプより大きくなるので、L0 の疲れ寿命が LS より低下したものと考えられる。

LS および T タイプの試験結果を Fig. 11 に純断面応力で示す。荷重方向のボルト本数が 1 本の場合の T タイプでは、LS (2 本) より疲れ寿命が低下している。T タイプでは、き裂が生じる部分のボルトに対する縁端距離が LS より小さくなり、LS より大きい支圧応力が生じた結果、このような低下が生じたものと考えられる。

b) 各試験結果と支圧接合に対する JR の基準との比較¹¹⁾

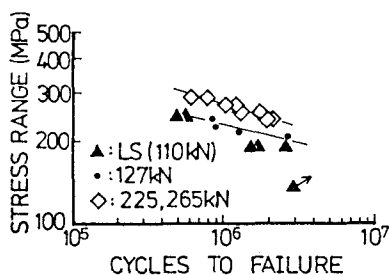


Fig. 9 LSの結果と過去の試験結果との比較

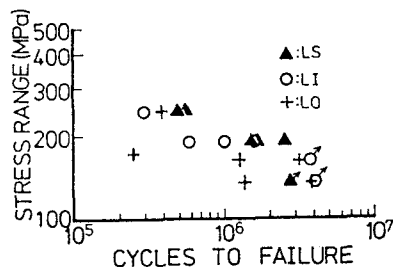


Fig. 10 LIタイプおよびL0タイプとLSタイプの比較

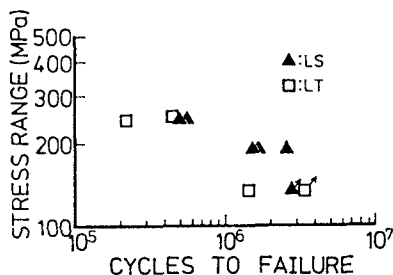


Fig. 11 TタイプとLSタイプの比較

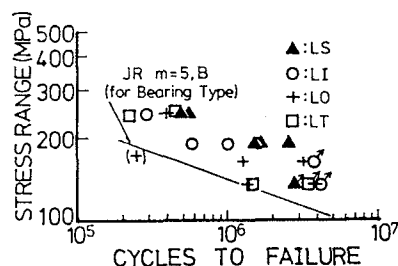


Fig. 12 各試験結果とJRの支圧接合の基準との比較

Fig. 12は、各試験結果を純断面応力でS-N線図上にプロットし、支圧接合に対するJ Rの疲労基準と比較したものである。最高荷重を少し大きくして試験方法Cで行なった L03を除いて、すべての試験結果が支圧接合に対する基準を満足した。

5. まとめ

軸力を低減した高力ボルト継手の力学的挙動を検討するため、Fig. 1に示す試験体を用いて静的引張試験を行ない、ボルト締め付け時の、ボルトと鋼板の支圧状態の違いおよびすべり履歴の違いを、試験方法を変えて検討した。まず、ボルト2本が荷重方向に並んだL系の試験体で、ボルトの支圧状態の不均衡の影響を添接板のボルト孔間隔を変えて検討した。さらに、荷重方向のボルト本数が1本のT系との違いを検討した。

a) どの試験体タイプでも、試験方法Aのすべり後の荷重変形曲線は、支圧状態からスタートする試験方法BとC1のものにはほぼ等しい。一度すべらせた試験方法C2のすべり荷重はAよりも低く、すべり後の荷重変形曲線の勾配も急であった。

b) 荷重方向のボルト本数が1本の場合(T)と2本の場合(LS)では、Tの場合のほうが変形が大きくなる。

c) 最初のすべりでは標準タイプのすべり係数は0.5以上となった。試験体L0およびTの場合のすべり係数は、標準タイプ(LS)の約80%であった。一方、一度すべらせた試験方法C2のときのすべり係数は、試験方法Aのときの約80%に低下した。

また、疲労試験から得られた結果は次のようである。

d) 今回の試験から得られた破断状況は、全部で22体のうち、純断面でボルト孔を通っているものが最も多く13体で、その次は孔のすぐ上部で生じたものが4体あった。

e) 標準タイプLS(軸力110kN)の疲れ寿命は、軸力が225kNまたは265kNの軸力が導入された過去の試験結果より短く、軸力が127kNの結果に近い。

f) 外側のボルトが先に支圧状態になるL0タイプでは、LSより疲れ寿命が短くなる傾向にあった。荷重方向のボルト本数が一本のTタイプについても、LSより疲れ寿命が短くなる。

g) ほとんどの結果が支圧接合に対するJ Rの基準を満足していた。

今後、導入すべき軸力、構造物の施工性と施工精度にかかわるボルト孔のクリアランスの大きさの検討および多列ボルトに対するシュミレーション解析等を進める予定である。

謝辞

本研究にあたり、当時名古屋大学工学部修士課程2年生の永津省吾(現在、川崎製鉄㈱に勤務)、名城大学工学部4年生の金井卓也(現在、宮下組㈱に勤務)両氏に御協力頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 社団法人鋼材倶楽部・日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成(リベット接合、高力ボルト接合)：pp. 447～548, 1977.
- (2) 田島二郎・木村富夫：打込式高力ボルト継手の性状，土木学会第23回年次学術講演会講演集(第1部) 1968, 5.
- (3) Lindner, J.: Laschenverbindungen mit Vergrössertem Lochspiel, Technische Universität Berlin Bericht Nr. vr 2002, 1978. 3.

- (4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1980.
- (5) American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specifications for Highway Bridges, Twelfth Edition, AASHTO ,1977 . (米国道路橋示方書) .
- (6) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，1984 .
- (7) DIN 1073, Zulässige Spannungen (N/mm^2) für Bauteile und Verbindungsmittel bei Strassenbrücken ,1974. 7 (西ドイツ道路橋示方書) .
- (8) 社団法人全日本建設技術協会，建設省土木研究所編：建設省制定土木構造物標準設計第23～28巻（活荷重合成プレートガーダー橋），1979.
- (9) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，技報堂出版，p. 49, 1966 .
- (10) 桜井季男・西村昭・皆田理：摩擦接合の疲労強度について（統報），土木学会第30回年次学術講演会講演集， 1-273, 1975.
- (11) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983.

(1987年10月16日)