

引張とせん断を同時にうける ボルト接合部実験

— 高張力ボルト引張接合 —

東京大学 仲 威 雄
" 吉 本 昌 一

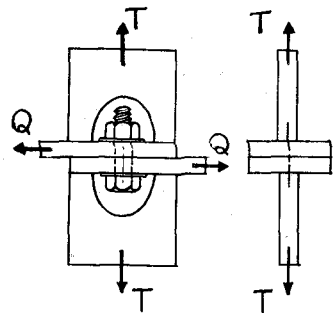
概 要 高張力ボルトを鋼構造物の接合に利用する当初の目的が、リベットの代用としての摩擦接合にあつたため、リベットの場合と同様、外力によつてボルトに軸力が付加されて接合形式(引張接合：仮称)についての研究はせん断型継手に較べて立ち遅れている。本報告は引張接合の一例として、軸方向引張外力と直角方向のせん断力を同時にうける簡単なボルト接合部について行つた実験報告であるが、これは、高張力ボルトを摩擦接合の範囲に止めず、高張力の利点を生かし、ボルト軸方向の外力(曲げモーメントの成分としての応力も含む)をも同時に伝える接合に拡張利用することを目的とする一連の研究の一部である。

本論文はⅠ、接合の理論 およびⅡ、接合部実験より成立つ、引張接合において、ボルト軸方向外力による接合部材間圧縮力およびボルト軸力の変化は一義的に起り、それらの量は接合部形状、ボルト寸法、ねじ精度その他の因子によつて決定されるものであるが、これらの個別的な影響を定量的に扱うことが困難であり、ねじ部の局部降伏現象あるいは引張リベットにおけるリベットの付加応力についての議論がこの場合も適用されるので、まず〔Ⅰ〕で、理想化した接合部模型について接合部性状を理論的に考察し、これと〔Ⅱ〕の実験結果とを対比して、このようなボルト接合部の問題点を検討するものである。

Ⅰ 接合の理論

1.1 接合部模型と仮定

1図に示した接合部模型を考える。ボルト穴周辺の接合部材間圧縮力(板間圧縮力)は一定の面積に一樣に分布するものと仮定し、引張外力によるボルト付加軸力に関係ある接合部形状の影響を含め、これを板間有効圧縮面積と定義する。有効圧縮面積は実際に圧縮力が分布する面積ではなく、便宜的に設けた概念であつてボルトの付加応力に影響を与える因子を包括する。したがつて、その物理的意味は明瞭でないが、板間圧縮力変化に対する等価断面積に相当するものとする。またボルトはね



1 図 接合部模型

じ断面における面積および締めつけ長とそれに含まれるねじ長によつて剛性が変化するが、これらの影響を考慮した等価断面をもつてボルトの有効面積とする。上のように板間有効圧縮面積およびボルト有効面積を定めた上で、各応力が弾性範囲にあれば定値をとると仮定する。さらに簡単のためねじ部の局部降伏は起らないと仮定する。

1.2 外力と接合部応力

記号 P : ボルト軸力 (引張を正)

P_0 締めつけ時ボルト軸力

C 板間圧縮力 (圧縮を正)

C_0 締めつけ時板間圧縮力

A ボルト有効断面面積

A_c 板間有効圧縮面積

μ 板間摩擦係数

T ボルト軸方向引張外力

Q せん断外力

まずボルト締めつけ状態において、ボルト軸方向の釣合より

$$P_0 - C_0 = 0 \quad (1)$$

外力 T が作用したときは

$$P - C - T = 0 \quad (2)$$

また、ボルト軸に直角なせん断外力 Q によつて板間に滑りが起らないための条件は

$$Q \leq \mu C \quad (3)$$

で表わされる。各応力が弾性範囲にあれば、ボルトおよび板間有効圧縮部の変形量が等しいことから

$$\frac{P - P_0}{A} = \frac{C - C_0}{A_c} \quad (4)$$

(1), (2)および(4)式から

$$P = P_0 + \frac{A}{A + A_c} T \quad (5)$$

すなわち外力 T によりボルトに付加される軸力は(5)式右边第2項で表わされ、一般に T より小さいことがわかる。同様に板間圧縮力は(1), (2)および(4)式より

$$C = C_0 - \frac{A_c}{A + A_c} T = P_0 - \frac{A_c}{A + A_c} T \quad (6)$$

なお、(3)式が満足あれていれはせん断力 Q によつてボルトに応力が付加されることはないと思なせる。

1.3 迂り荷重 Q_g および離間荷重 T_g

迂り荷重は(3)式において等号をとつた Q で与えられる。(6)式の関係を用いれば、

$$Q_g = \mu c = \mu \left(P_0 - \frac{A c}{A + A c} T_g \right) \quad (7)$$

ここに T_g は迂り荷重 Q_g における引張外力を示す。また、板間に離間が生ずるのは $c=0$ のときであるから離間荷重は(6)式より

$$T_g = \frac{A + A c}{A c} P_0 \quad \text{あるいは} \quad \frac{T_g}{P_0} = \frac{A + A c}{A c} \quad (8)$$

次に T_g と T_g の大きさを比較する。

(7)式より

$$\frac{T_g}{P_0} = \frac{A + A c}{A c} \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{Q_g}{P_0} \right) \quad (9)$$

(8)および(9)式より

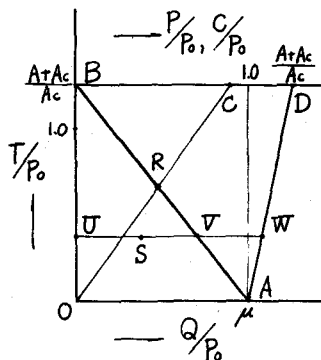
$$T_g - T_g = \frac{A + A c}{A c} \frac{Q_g}{\mu} \quad (10)$$

(10)式において、 $Q_g \geq 0$ であるから、 $T_g \geq T_g$ をうる。 $T_g = T_g$ が成立するのは $Q_g = 0$ のときであるが、摩擦係数 $\mu > 0$ であるから、これは(7)式より、 $c=0$ のときであり純引張の場合にはかならない。したがつてこの場合迂り荷重が定義されず T_g は T_g そのものである。以上のことから引張外力 T およびせん断外力 Q が同時に働くボルト接合部では迂りが離間に先行することがわかる。

1.4 引張接合としての荷重範囲

縦軸に T/P_0 横軸に Q/P_0 をとつた2図において(9)式の関係は直線 AB で表わされる。したがつて板間に迂りが生じないための外力範囲は $\triangle OAB$ で与えられる。A点は純せん断の場合(摩擦接合)の迂り点を示し、B点は純引張の場合の離間外力点を示す。いま、引張・せん断比を k とすれば

$$T/P_0 = k \cdot Q/P_0 \quad (11)$$



第2図 接合部模型

(11)式は2図において勾配 k の原点を通る直線 OC で表わされるから、 AB と OC との交点 R によつて迂りを生ずるときの外力 T_g および Q_g が与えられる。

(9)式を変形して

$$P/P_0 = 1 + A/A + A_c \cdot T/P_0 \quad (12)$$

とすれば、ボルト軸力は2図において、縦軸をそのまま、横軸に P/P_0 をとつたとき直線 AD で表わされる。たとえば、荷重点 S におけるボルト軸力の大きさは、 S 点を通り横軸に平行な直線と AD 、 OB との交点 W 、 V の距離で与えられる。同様に板間圧縮力は(6)式より

$$C/P_0 = 1 - A_c/A + A_c \cdot T/P_0 \quad (13)$$

となるから、2図において横軸に C/P_0 をとれば直線 AB に一致する。

以上は、接合部形状等の影響を簡単な形状常数 A_c および A に含めて理想化した場合の弾性域における接合部機構である。

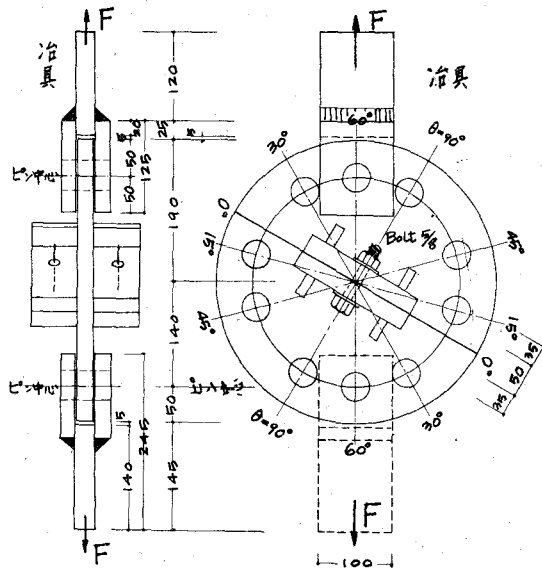
II 接合部実験

2・1 試験体および実験方法について

摩擦係数は錆、黒皮、油その他の付着状況によつて大きく変動する。本実験では、摩擦係数のバラツキをできるだけ排除し、

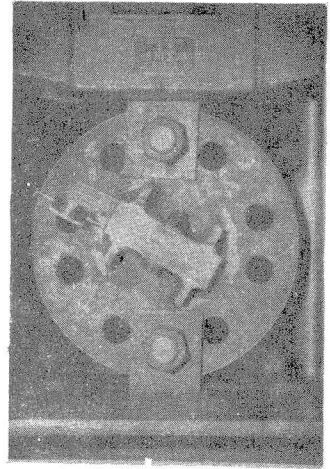
実験結果を統一するために同一摩擦面について実験が行えるように試験体を製作した。3図に示す試験体の半円板（加力部）には5ヶの穴を開け、これと治具の穴にピンを通し引張、せん断比を変えて加力が行えるようにした。

実験に供したボルト鋼材は
JIS G3102第9種(S50C)、
呼径 $\frac{5}{8}$ 、ボルトの平均引張強度(10本について) $F_B = 13.16t$ 、 $\sigma_B = 89.8 \text{ Kg/mm}^2$
(最大 $F_B = 13.53t$ 最小 $F_B = 12.83t$)の比較的均質な



第3図 試験体形状寸法

ものである。試験体の各部応力は純引張における最大荷重およびその他の場合の迂り荷重において十分降伏点以下となるように設計した。したがって、上の荷重範囲におけるは残留変形がなく、接合部条件はほぼ同一であるとみなすことができる。摩擦面の相対迂りは試験体の両側面にダイヤルゲージをとりつけて測定を行つた。外力の軸方向成分によるボルト軸力変化を調べるためにボルト頭下にロードセル（直交する2直径上の母線にW、S、G計4点貼布）を挿入した予備実験と、これを取り去つた本実験との2通りについて、ボルト締めつけ力および引張・せん断比をかえて反復的に迂り試験を行つた。すなわち、加力の上限を迂り荷重とし、ボルトに大きいせん断力付加が起らぬ範囲



にとどめ、迂り方向が逆向きとなるよう外力角（3図 θ ）を 15° 、 30° 、 45° 、 60° の順にかえた。なお摩擦面は予めサンドペーパーがけを行い黒皮、錆を除去したが、ボルト締めつけに先立ち毎回サンドペーパーがけを行つた後乾布でよごれを拭きとり摩擦面の均一性をうるようにした。

2.2 予備実験

ボルトの締めつけにあつては、予めロードセルの歪（W、S、G、測定値）と圧縮力との関係を求めておき、この歪から左右のボルト軸力が均等になるよう締めつけを調整して接合部の偏心を選けた。加力の前後および加力中適宜ロードセルの歪およびダイヤルゲージの変化を測定した。

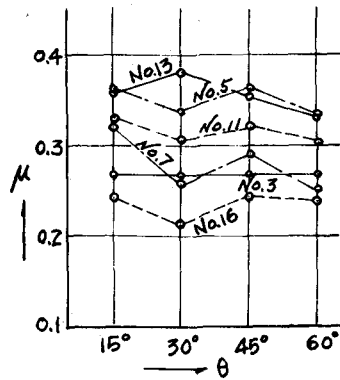
1表に迂り荷重を示す。迂り荷重 F_g における板間圧縮力 C はボルト軸力 P と外力のボルト軸方向成分 $T_g = F_g \sin \theta$ との差であり、迂りせん断荷重は $Q_g = F_g \cos \theta$ である。したがって板間摩擦係数 μ は次式に θ および測定値

$$\mu = \frac{Q_g}{C} = \frac{F_g \cos \theta}{P - F_g \sin \theta}$$

P 、 F_g を代入して計算される（4図）。

従来の実験によると、ねじ部の局部降伏はボルト応力が大きいほど、付加軸力が大きいほど起り易く、初張力減少が大きくなることを示している。この実験では迂り試験に供した前後のボルト軸力の間の差が小さいので、局部降伏はほとんど起らていないと考えられる。また加力中および除荷中のボルト軸力変化が小さいことから、付加応力そのものが小さいと判断されるが、これは1.2で導いた(5式)の右辺第2項において $A/A + A_c \neq 0$ を与える。すなわち、ボルト有効断

4図 摩擦係数



第1表 送り荷重 P_g (t)

実験番号	$E P_0$	$\theta = 15^\circ$	30°	45°	60°
No. 1	1 1.0	3.5	3.45	4.15	4.90
2	1 2.2	3.95	3.50	4.10	4.53
3	1 2.3	3.20	3.20	3.50	4.28
4	1 4.0	3.43	2.80	3.92	3.85
5	1 3.4	4.60	4.50	5.20	5.85
6	1 3.5	4.30	3.20	4.20	4.65
7	1 5.6	4.75	3.95	4.80	5.20
8	1 6.4	5.60	4.40	5.60	5.70
9	1 6.5	5.25	4.80	5.40	5.70
10	1 7.0	5.50	4.10	5.00	6.00
11	1 7.8	5.60	5.00	5.65	5.85
12	1 7.9	6.30	5.20	6.75	6.80
13	1 8.2	6.20	6.50	6.80	8.00
14	1 8.5	5.90	4.60	5.85	6.15
15	1 9.4	7.40	5.20	6.60	6.20
16	2 1.2	5.00	4.20	5.25	6.30

面積に比して板間有効圧縮面積が極めて大きいことを示している。1表の結果を2図の表現にしたがつて表わしたのが5図である。図中の番号は1表の実験番号に相当するもので、外力角を加

えて連続的に迂り試験に供した同一系列を示す。同一系列の実験結果が直線上に並ばないものもあるが、これは摩擦係数のバラツキが大きいことに原因する（4図参照）。No.3の場合は4ヶの迂り点が完全に一直線上にあり、これを延長すると（0.10），（0.268，0）を通る。横軸と交わる点の座標0.268は各外力角における摩擦係数結果と一致している。また、縦軸との交点の座標が1.0であることは $A + A_c / A_c = 1$ すなわち $A / A + A_c = 0$ であることを意味し、軸方向の外力成分による付加軸力が極めて小さいという前述の結果に矛盾しない。その他の各迂り点と点（0，1.0）を結んで直線が横軸と交わる点の座標は各々の摩擦係数結果に等しいから個々の場合についても同様のことがいえる。

2.3 本 実 験

本実験においては、ロードセルを挿入しないため予備実験で使用したボルトより短いボルトを用いた。このことは、同一の板間圧縮部伸縮変化量に対して、ボルト軸方変化が相対的に大きくなることを意味している。本実験で測定しうるのは迂り荷重だけであるから、たとえば初張力減少量は迂り実験を繰返して迂り荷重の低下量から間接的に求めなければならない。とになるが、2.2で述べたように摩擦係数のバラツキが大きいので明確には求められない。ロードセルの有無による境界条件の相異による変動は興味ある問題であるけれども、接合部性状の細部については本実験と予備実験の結果とを比較して推定しなければならない。

本実験における摩擦面の条件、加力方法および迂り試験の順は予備実験の場合と同一である。ただし、迂り試験は各締めつけトルクに対して $15^\circ \sim 60^\circ$ の系列を5回繰返して行つた。

迂り荷重の結果を6図に示した。この場合はボルト軸力が測定できないので座標に T, Q をとっているが、5図の表現を相

似である。締めつけトルク

$T_g = 200 \text{ ft-lb}$,

180 ft-lb の場合とも完

全には直線をなしていない

が、全体としてはそれぞれ

直線a-a、b-bの周囲

に集つている。しかもa-

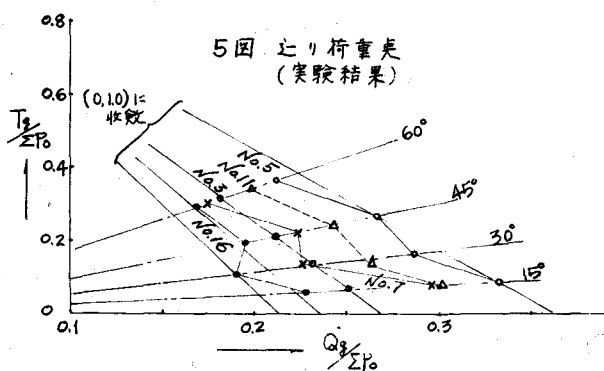
aおよびb-bがほぼ平行

であることは同一の傾向と

示していることを意味する。

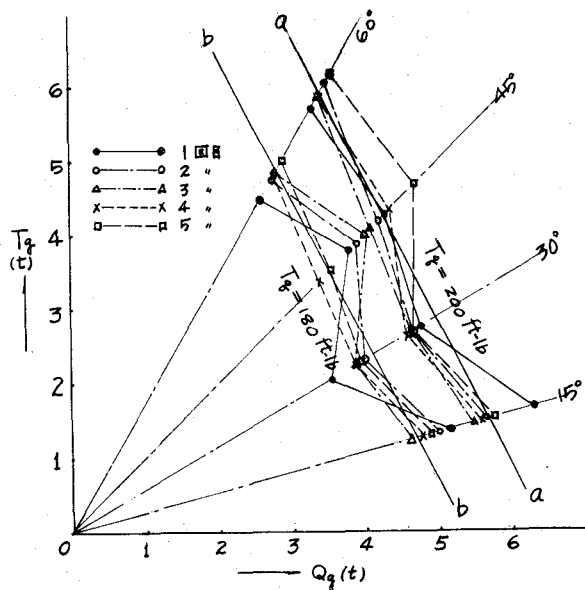
トルク試験の結果から P_0 を求め、5図の表示を行うとa-a、b-b直線が重なり、縦座標と

（0，1.0）で交わる。したがってこれは予備実験の結果と同等である。各締めつけトルクに対す



第4図 摩擦係数

繰り荷重は、繰りを繰返すことによって変化したとは認められない。さらに、各外力角における予備実験と本実験でえた繰り荷重比（同一系列の実験において $\theta = 60^\circ$ の繰り荷重に対するその他の角の繰り荷重比）の平均がほぼ等しいことから、前述の境界条件の相異による差は一応僅小であると判断される。



第5図 繰り荷重点（実験結果）

2・4 む す び

実験結果を総括すれば次のとおりである。

- 1) 引張およびせん断を同時にうける図のようなボルト接合部においては、ボルト軸方向の外張外力によるボルトの付加軸力は極めて小さい。したがって、荷重時板間では引張外力にはほぼ等しい圧縮力が解除されている。
- 2) 一定のねじ精度およびナット丈を確保すれば繰返し荷重に対しても適当な大きさのボルト軸力を保持することができる。
- 3) 接合部材間にはじめか繰りが起ると、ボルト軸力が多少とも低下するが、これはボルト締めつけ部のなじみに原因するもので、2回目以降の繰りによるボルト軸力変化は僅小である。
- 4) 高張力ボルトを引軸接合に利用することが可能であると考えられるが、ボルト締めつけ力の大きさについてはリラクセーションを考慮し適当な値を撰定しなければならない。しかし、板を直接締めつける場合は1)から、かなり大きい値を期待することができよう。
- 5) 予備実験および本実験の結果は、Iで導いた2図の表示を用いて比較的簡単な形で説明することができた。したがって、1・1で設けた仮定は十分妥当なものであるといえよう。ただし、接合部材が薄い場合はボルト穴周辺の局部変形が大きくなり、事情が異なってくると予想されるので、この問題についてはさらに検討する必要があると考える。

参 考 文 献

1. 'Specifications For Structural Joints Using ASTM A325 Bolts, Commentary' 'Approved by Research Council On Riveted and Bolted Structural Joints of the Engjneering Foundation
March, 1960
2. 'Development of a Moment Connection for Rigid Frames' by B.E.S. Ranger, The Institute of structural Engineers
10th June, 1959
3. 'Joints in High Tensile, Pre-loaded Bolts-Tests on Joints Designed to Develop Full Plastic Moments of Connected Members' by L.G.Johnson, J.C.Cannon and L.A.Spooner
全 上
4. 'Note on the Load Carrying Characteristics of pre-Tensioned Bolts-Tensioned Joints' by P.J.Gill
全 上
5. '佐久間発電所屋外鉄構継手及仕口強度試験結果の解析' 新三菱重工kk 研究報告
昭和31年1月
6. '高張力ボルト接合に関する研究(引張ボルトによる柱梁接合部実験)' 仲、加藤、吉本、日本建築学会論文報告集第60号
昭和33年10月
7. '高張力ボルト接合に関する研究-引張接合(1)-' 仲、吉本、日本建築学会関東支部第28回学術研究発表会
1960年6月