

I-23 高力ボルト支圧接合に関する研究

一溝2本付きボルトの実験一

北海道大学工学部 正員 渡辺 昇
 北海道大学工学部 正員 佐藤 浩一
 北海道大学工学部 正員 林川 俊郎
 北海道大学工学部 及川 昭夫
 北海道大学工学部 学生員 ミツ木 幸子
 北海道大学工学部 高橋 渡

1. まえがき

高力ボルト摩擦接合の遅れ破壊の問題に対処すべく、「北海道における鋼道路橋の設計及び施工指針（昭和58年改訂版）」において高力ボルト支圧接合設計施工指針案が規定された。そして、実際に、北海道開発局留萌開発建設部の二俣橋で採用された。そこで、筆者らは、この高力ボルト支圧接合の力の伝達特性を把握するために溝2本付きボルトによる測定法を開発したので報告する。

2. 溝2本付きボルトによる力の伝達機構の推定法

図-1のような溝2本付きボルトを用いて、母材板厚中央部でボルトの軸方向歪 ε_1 および ε_2 を測定し、どのようにボルトによって力が伝達されるかを推定する。この場合、ボルトによる荷重分担を知ることは課題の1つとなるが、ボルトによる力の伝達には、(1)摩擦型と

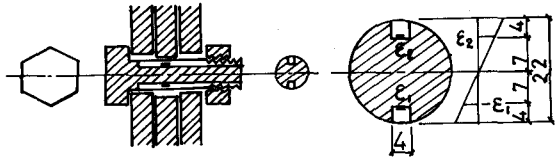


図-1 溝2本付きボルト

(2)支圧型の2種類があるので、この分担を知ることが、

各ボルトによる分担を知ることと共に本研究の課題である。一般に、ボルトの荷重分担はこの(1)と(2)の2成分を合計した各ボルトについての荷重分担を意味する。そこで、 ε_1 および ε_2 を用いて、1本のボルトで伝達される力の(1)摩擦型成分（以降 P_f と呼ぶ）と(2)支圧型成分（以降 P_b と呼ぶ）を算出する方法について述べる。

ボルトの軸の横断面の軸力 N および曲げモーメント M は、 ε_1 および ε_2 から次のように求まる。（図-1参照）

軸力 $N = E \times \frac{1}{2} \times (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times A$ A : 断面積 I : 断面二次モーメント E : ヤング係数

曲げモーメント $M = E \times \frac{1}{2} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times \frac{I}{y}$ y : 断面の中立軸から ε_1 または ε_2 の測定点までの距離

ここで、M22 を対象として図-1の断面を用いて、断面欠損を考慮して $A \cdot y \cdot I$ を求めると、

$$A = \pi \times \left(\frac{22}{2}\right)^2 - 2 \times 0.4 \times 0.4 = 3.48 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{\pi \cdot 22^4}{64} - 2 \times (0.4^2 \times 0.7^2 + \frac{0.4^4}{12}) = 0.989 \text{ cm}^4$$

$$y = 0.7 \text{ cm}$$

(注) ただし、欠損部は $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ の正方形として概算。なお、最大曲げモーメントの生ずる断面は、板厚方向中央断面であるが、ねじ切りによる断面欠損は考慮しなくてよいものとして、直径22mmをそのまま使用した。

これらの値を上述の N および M の式に代入し、 $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ 、 $\varepsilon_M = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}$ とおくと、

$$N = E \times \frac{1}{2} \times (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times A = 2.1 \times 10^6 \times \varepsilon_N \times 3.48 = 7.311 \times 10^6 \times \varepsilon_N \text{ kg}$$

但し、 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$$M = E \times \frac{1}{2} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times \frac{I}{y} = 2.1 \times 10^6 \times \varepsilon_M \times \frac{0.989}{0.7} = 2.967 \times 10^6 \times \varepsilon_M \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

となる。

次に、この軸力 N および曲げモーメント M を、これに相当するボルトの軸に垂直な荷重方向の力によって表現する。ボルトの軸力 N に対するこの換算力を P_f 、曲げモーメントに対して P_b とすると、添接板が2板使用されて

いる場合には、 P_f は摩擦力と垂直抗力の関係から、摩擦係数 μ を用いて、

$$P_f = 2\mu N \quad (\text{添接板2枚使用, 摩擦接合の2面摩擦に対応, 最大摩擦抵抗が得たと仮定})$$

で求められる。ここで、摩擦係数(すべり係数) μ は、道路橋示方書鋼橋編(昭和55年度版)³⁾のP110で"黒皮を除去した場合に小型試験片による実験値では、平均0.5以上得ることができるとな。ているので、この値0.5を1参考値として用いて計算すると、

$$P_f = 2\mu N = 2 \times 0.5 \times N = N$$

前述の N を用いて、

$$P_f = N = 7.311 \times 10^6 \times \varepsilon_N \text{ kg}$$

次に曲げモーメントに相当する荷重方向の換算力 P_b は、リベットの場合を参考にして、図-2のようにモデル化して考える。⁴⁾この場合、板厚方向の中央断面での最大曲げモーメント M は、次式にて概算される。

$$M = \frac{P_b}{2} \left(\frac{t}{2} + \frac{t_1}{4} \right)$$

この式に、 $t = t_1 = 1.0 \text{ cm}$ を代入すると、

$$M = \frac{P_b}{2} \times \left(\frac{1.0}{2} + \frac{1.0}{4} \right) = 0.375 P_b$$

となる。よって P_b は、

$$P_b = 2.667 M$$

前述の M を用いて、

$$P_b = 2.667 \times 2.967 \times 10^6 \times \varepsilon_M = 7.913 \times 10^6 \varepsilon_M \text{ kg}$$

以上より、 P_f と P_b は次式にて簡単に求まる。

$$\begin{aligned} P_f &= 7.311 \times 10^6 \times \varepsilon_N & \text{但し、(1) 図-1のボルトを使用} \\ P_b &= 7.913 \times 10^6 \times \varepsilon_M & \text{(2) } t = t_1 = 1.0 \text{ cm} \\ & & \text{(3) } P_f = 2\mu N (\mu = 0.5) \\ & & \text{(4) } M = \frac{P_b}{2} \left(\frac{t}{2} + \frac{t_1}{4} \right) \end{aligned}$$

3. 実験方法

図-3および表-1に示す供試体を上述の加工をしたF8T M22のボルトで図-4のように、メタルタッチさせてから締め付けてセットする。まず、すべての供試体について圧縮荷重を10tまで載荷して弾性実験を行なった。歪の測定は、1枚毎に上述の ε_1 および ε_2 を測定した。次にB1-10についてのみ弾塑性実験を行なった。これについては、約2~3枚毎に歪を測定した。なお、載荷は、弾性実験の場合下方から(上部固定)、弾塑性実験の場合上方から(下部固定)行われた。また、載荷の前後に孔径およびB1シリーズについては

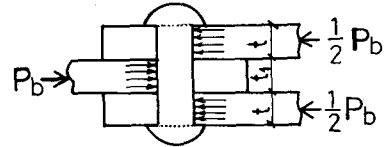
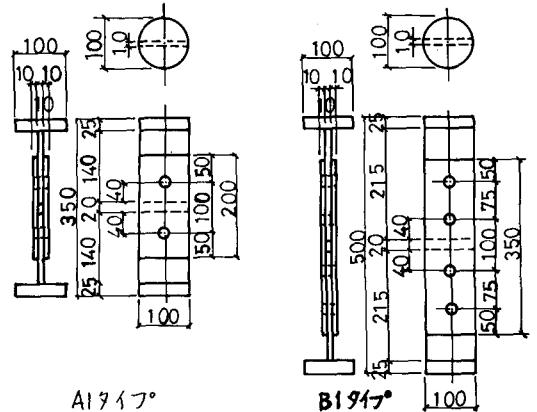


図-2 モデル化



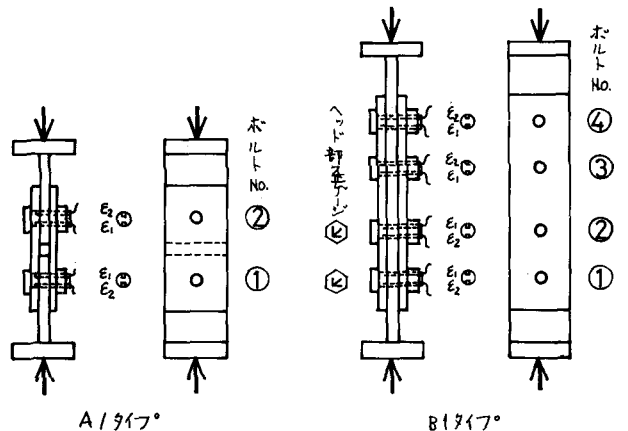
A1タイプ

B1タイプ

図-3 供試体

表-1 供試体 (各1本)

材料	SM58				SM50			SS41		
孔径	φ mm	23.0	23.6	25.0	23.0	23.6	25.0	23.0	23.6	25.0
A1	A1-1	A1-2	A1-3	---	A1-5	A1-6	---	A1-8	A1-9	A1-10
B1	B1-1	B1-2		B1-4	B1-5	B1-6	B1-7	B1-8	B1-9	B1-10



A1タイプ

B1タイプ

図-4 供試体の組み立てと歪ゲージの位置

孔間隔も測定した。孔径は、図-5のように1個につき4箇所測定した。測定器の精度は $\frac{1}{100}\text{mm}$ であるが、測定値の精度は $\frac{1}{10}\text{mm}$ 程度である。孔間隔は直接測定できなかったため、図-6のように孔端と孔端の最短距離を測定した。なお、ボルトは何回も使用し、B1シリーズのボルト①および②について、3軸歪ゲージでヘッド部の歪を測定した。

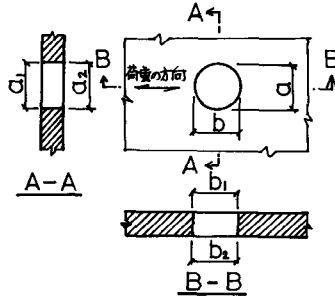


図-5 孔径の測定

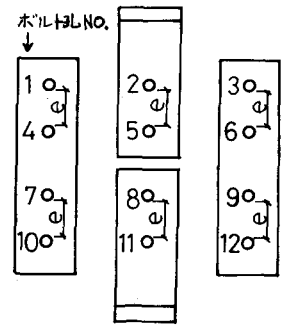


図-6 孔間隔の測定

4. 実験結果と考察

弾性範囲の荷重と ε_N または ε_M の関係の一例を A1-10 および B1-10 について 図-7-10 に示す。荷重- ε_M のグラフで、比較的長く、力学的性状の変化を把握することができる。4~6 次ぐらいで、浮いていたボルトもメタルタッチし、支圧型伝達が全ボルトで行なわれる様子が観察される。力学的性状が落ちついてくる比較的高い荷重段階 10t の場合について、前述の理論を用いて $P_1 \cdot P_2$ およびその合計値を求め、まとめると表-2 のようになる。B1-9 で P_1 が、B1-1・4・7 で P_1 が、まだ負の値で、支圧型伝達が全ボルトで行なわれていないという問題もあるが、その合計値はほぼ 10t となっており、溝 2 本付きボルトによれば力の伝達特性を測定できることがわかった。なお、負の値のところで合計値が 10t よりかなり小さくなる。またこの表から、手締めにて初期張力をとした場合にも、荷重 10t 載荷時には、力の伝達は約 2 割以上が摩擦型伝達で行なわれていることがわかる。

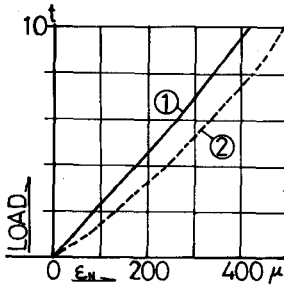


図-7 荷重- ε_N 曲線 (A1-10)

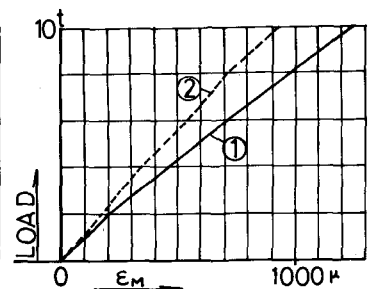


図-8 荷重- ε_M 曲線 (A1-10)

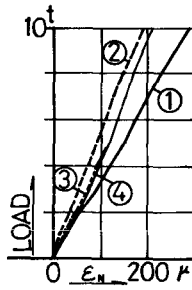


図-9 荷重- ε_N 曲線 (B1-10)

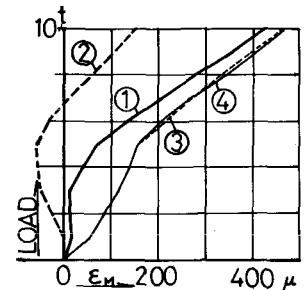


図-10 荷重- ε_M 曲線 (B1-10)

次に、供試体 B1-10 についての弾塑性実験から得られた荷重と ε_N または ε_M の関係を 図-11 と 図-12 に示す。荷重- ε_M 図から、荷重が増加するにつれて、各ボルトの荷重分担が均等になっていく様子が観察される。図-13 に、各荷重段階の各ボルトの荷重分担率を示す。図-14 には、1本のボルトにおける摩擦型と支圧型の分担率を示す。

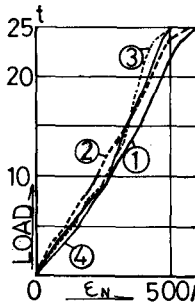


図-11 荷重- ε_N 曲線 (B1-10)

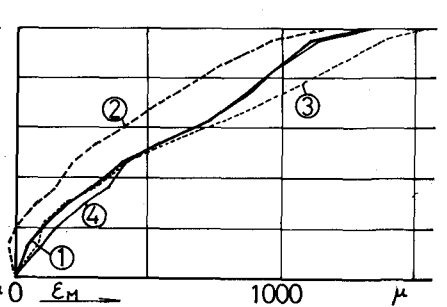


図-12 荷重- ε_M 曲線 (B1-10)

図-10 および 図-12 から、ボルト③と④で

は、比較的均等に荷重分担されているが、①と②では、低荷重段階すなわち塑性変形が、もしくは小さい時には荷重は不均等に分担されている。これを孔径および孔の位置の精度から検討すると、ボルト①が、鋼板に食い込んで、母材と添接板に相対的に $\Delta 2\text{mm}$ のずれが生ずるとボルト②も支圧状態に入っている結果が得られ、荷重- ε_M 曲線の傾向とあう。

すでに述べたように本研究では次の二つの仮定をしている。

(1) 摩擦係数を $\mu=0.5$ とし、 P_f を $P_f=2\text{MN}$ で求めている。

(2) リベットの場合を参考にしてモデル化し、 $M=\frac{P_f}{2}(\frac{t}{2}+\frac{t_1}{2})$ を用いて、 $M_{\max}$ を計算した。

これらの妥当性を実験により総合的に検討した。なお、仮定(1)において、摩擦抵抗は鋼板が相対的にずれようとした時に初めて働くので、軸力 N に對してその最大値 $P=MN$ がいつも働くとは限らない。しかし、支圧による弾塑性変形に基づく、比較的ゆっくりとした相対変位を考えると、本実験の検討に $P=MN$ を用いた妥当性はあ

5. あとがき

- (1) 溝2本付きボルトを用いることにより、ボルトの側から力の伝達特性を推定することができた。
- (2) 初期張力を0とした時でも、かなりの割合で、力は摩擦型で伝達される。
- (3) ボルトの荷重分担は、荷重が低い段階では孔の精度に大きく関係するが、高い段階ではほぼ等しくなる。今後、この溝2本付きボルトを用いて、高力ボルト支圧接合による継ぎの耐荷機構の研究を進めたい。

(参考文献)

- 1) 高橋、武藤、渡辺：高力ボルト支圧接合法の実験的研究(その一) 第15回日本道路会議論文集
- 2) 北海道における鋼道路橋の設計及び施工指針(昭和58年改訂版)
- 3) 道路橋示方書 鋼橋編 (昭和55年改訂版)
- 4) Timoshenko: Strength of Materials
- 5) 鋼構造接合資料集成(高力ボルト接合・リベット接合) 技報堂出版

表-2 P

(単位:kg)

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
$P_f 1$	3730	3730	3620		3440	3630		2740	3030	3070
$P_b 1$	7750	5460	6290		6170	6500		7870	8590	9890
$P 1$	11480	9190	9910		9610	10140		10610	11620	12960
$P_f 2$	3580	3450	3340		3630	3140		2570	3110	3580
$P_b 2$	7120	4960	4290		5910	8190		6900	7200	7360
$P 2$	10700	8410	7630		9540	11330		9470	10310	10940

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10
$P_f 1$	3510	2280		3050	1680	2010	2980	1440	690	2100
$P_b 1$	4710	4010		3810	1500	4040	3730	3100	-80	3340
$P 1$	8220	6290		6860	3190	6050	6710	4540	620	5440
$P_f 2$	480	1260		860	2030	1540	510	2300	2740	1400
$P_b 2$	-440	1360		-250	3660	360	-510	1460	4950	1200
$P 2$	40	2620		610	5680	1890	0	3770	7690	2610
P_1+P_2	8260	8910		7470	8870	7940	6710	8310	8300	8040
$P_f 3$	330	1320		1320	1510	1500	750	1540	800	1550
$P_b 3$	750	3680		1500	1720	3320	1680	3170	630	3660
$P 3$	1080	5190		2820	3230	4820	2420	4700	1640	5210
$P_f 4$	3330	2060		2030	1770	2570	2500	1840	2430	1540
$P_b 4$	6050	4210		5240	4170	2430	4410	2900	4880	3680
$P 4$	9380	6270		7260	5940	5000	6910	4750	7310	5210
P_3+P_4	10460	11460		10080	9170	9820	9330	9450	8940	10420

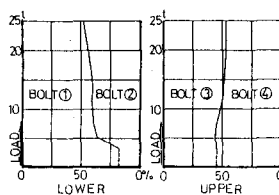


図-13 各ボルトの分担率

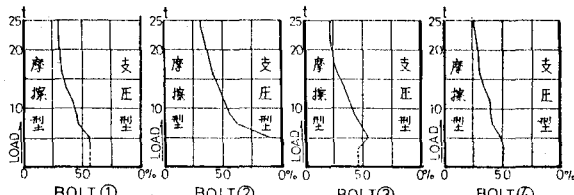


図-14 摩擦型と支圧型の分担率