

高力ボルトのキャリブレーション試験方法の改良提案

川田工業 正会員 藤野大地
鉄道・運輸機構 正会員 南 邦明
横浜国立大学 正会員 田村 洋
鉄道・運輸機構 正会員 筒井康平
東京都市大学 正会員 白旗弘実
法政大学 正会員 内田大介
駒井ハルテック 正会員 吉岡夏樹

1. はじめに

高力ボルト継手のボルト軸力計測を行う場合、ひずみゲージを取り付けたボルトに荷重を与え、荷重とひずみの関係を調べるキャリブレーション試験を実施し、ボルト軸力算出に用いる換算率を求める。そして、計測したひずみに換算率を乗じボルト軸力を算出するが、キャリブレーション試験方法が換算率に及ぼす影響やその特性は明確ではなかった。本研究は、換算率に及ぼす影響因子を明確にし、試験方法の改良案を示すことを目的とした実験研究および調査研究である。

2. キャリブレーション試験

(1) 使用ボルト 本研究では、六角ボルトF10T(M22)のボルト長85mmと90mmを使用した試験Ⅰ、F10TW(M22)のボルト長75mmを使用した試験Ⅱを行った。ボルト本数は各試験で3本ずつ使用した。

(2) 試験方法 ボルト軸部にひずみゲージを取り付け、専用治具にセットし引張荷重を与え、荷重毎にひずみを計測した。試験Ⅱについては、No.3ボルトのみ塑性域に入らない荷重で3回繰り返し行い、3回目は塑性域に達する荷重(300kN)まで載荷した。

(3) 試験結果 表-1、2に試験Ⅰ、表-3に試験Ⅱの結果を示す。ここで示す換算率は、荷重をひずみで除して求めた値であり、ここでは各ボルトの算出結果とその平均値を示している。これらの結果に示すように、製造ロットが同じボルトであっても、換算率はボルト No.1, 2, 3 によっても若干異なっていることが判る。また、荷重値によっても異なっており、試験Ⅱの No.1 ボルトを除けば、荷重が小さければ換算率が高くなる結果であった。

図-1、2にそれぞれ試験ⅠとⅡの荷重と換算率の関係を示す。必ずしも直線分布であるとは言えないが、右肩下りの傾向は明確であった。また、荷重値が最も小さい 50kN のデータはばらつきが大きいように思われ、さらに、

表-1 M22×85の荷重-ひずみ関係と換算率算出結果(試験Ⅰ)								
荷重 (kN)	ひずみ				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	680	665	660	668	0.07353	0.07519	0.07576	0.07481
100	1355	1340	1335	1343	0.07380	0.07463	0.07491	0.07444
120	1625	1610	1605	1613	0.07385	0.07453	0.07477	0.07438
140	1895	1875	1875	1882	0.07388	0.07467	0.07467	0.07440
160	2165	2145	2145	2152	0.07390	0.07459	0.07459	0.07436
180	2440	2415	2420	2425	0.07377	0.07453	0.07438	0.07423
200	2715	2690	2690	2698	0.07366	0.07435	0.07435	0.07412
220	2990	2960	2960	2970	0.07358	0.07432	0.07432	0.07407
240	3265	3240	3240	3248	0.07351	0.07407	0.07407	0.07388
260	3545	3515	3515	3525	0.07334	0.07397	0.07397	0.07376
280	3820	3790	3790	3800	0.07330	0.07388	0.07388	0.07368
300	4095	4070	4060	4075	0.07326	0.07371	0.07389	0.07362
A.平均換算率					0.07361	0.07437	0.07446	0.07415
B.標準偏差					0.00023	0.00041	0.00053	0.00055*
C.ヤング係数比(%)					94.47	95.44	95.55	95.15
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					0.83	1.90	2.41	1.09**

*: 全データ(36)での標準偏差。 **: 3本のボルト間でのヤング係数比 (2.05×10⁶で算出した場合との比率) の最大値と最小値との差

表-2 M22×90の荷重-ひずみ関係と換算率算出結果(試験Ⅰ)								
荷重 (kN)	ひずみ				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	670	640	670	660	0.07463	0.07813	0.07463	0.07576
100	1340	1300	1350	1330	0.07463	0.07692	0.07407	0.07519
120	1615	1565	1625	1602	0.07430	0.07668	0.07385	0.07492
140	1880	1830	1900	1870	0.07447	0.07650	0.07368	0.07487
160	2155	2105	2175	2145	0.07425	0.07601	0.07356	0.07459
180	2430	2375	2445	2417	0.07407	0.07579	0.07362	0.07448
200	2700	2640	2720	2687	0.07407	0.07576	0.07353	0.07444
220	2980	2915	2995	2963	0.07383	0.07547	0.07346	0.07424
240	3255	3190	3275	3240	0.07373	0.07524	0.07328	0.07407
260	3530	3465	3560	3518	0.07365	0.07504	0.07303	0.07390
280	3810	3755	3840	3802	0.07349	0.07457	0.07292	0.07365
300	4090	4040	4120	4083	0.07335	0.07426	0.07282	0.07347
A.平均換算率					0.07404	0.07586	0.07354	0.07447
B.標準偏差					0.00043	0.00108	0.00051	0.00124*
C.ヤング係数比(%)					95.01	97.35	94.37	95.56
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					1.64	4.96	2.32	2.98**

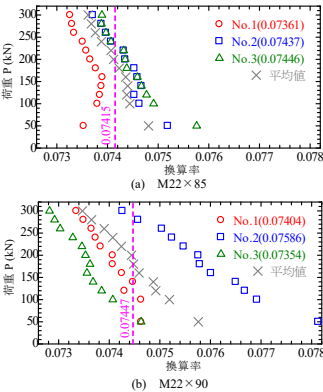


図-1 荷重と換算率の関係(試験Ⅰ)

表-3 M22×75の荷重-ひずみ関係と換算率算出結果(試験Ⅱ)								
荷重 (kN)	ひずみ				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	657	633	628	639	0.07610	0.07899	0.07962	0.07821
100	1298	1266	1255	1273	0.07704	0.07899	0.07968	0.07855
150	1935	1895	1882	1904	0.07752	0.07916	0.07970	0.07878
180	2318	2274	2260	2284	0.07765	0.07916	0.07965	0.07881
200	2576	2514	2516	2535	0.07764	0.07955	0.07949	0.07889
220	2833	2768	2769	2790	0.07766	0.07948	0.07945	0.07885
240	3092	3027	3026	3048	0.07762	0.07929	0.07931	0.07873
260	3350	3283	3280	3304	0.07761	0.07920	0.07927	0.07868
280	3613	3542	3520	3558	0.07750	0.07905	0.07955	0.07869
300	3874	3804	3784	3821	0.07744	0.07886	0.07928	0.07852
A.平均換算率					0.07738	0.07917	0.07950	0.07867
B.標準偏差					0.00048	0.00022	0.00017	0.00100*
C.ヤング係数比(%)					99.30	101.60	102.02	100.96
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					1.99	0.89	0.56	2.72**

表-4 No.3ボルトでの3回繰り返し載荷での換算率算出結果								
荷重 (kN)	ひずみ				換算率(荷重/ひずみ)			
	1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均
50	627	626	628	627	0.07974	0.07987	0.07962	0.07974
100	1257	1253	1255	1255	0.07955	0.07981	0.07968	0.07968
150	1887	1878	1882	1882	0.07949	0.07987	0.07970	0.07969
180	2263	2258	2260	2260	0.07954	0.07972	0.07965	0.07963
200	2518	2510	2516	2515	0.07943	0.07968	0.07949	0.07953
220	2771	2767	2769	2769	0.07939	0.07951	0.07945	0.07945
240	3024	3014	3026	3021	0.07937	0.07963	0.07931	0.07944
A.平均換算率					0.07950	0.07973	0.07956	0.07960
B.標準偏差					0.00013	0.00013	0.00014	0.00016*
C.ヤング係数比(%)					102.02	102.31	102.09	102.14
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					0.49	0.47	0.50	0.29**

注) 表-6のデータは表-5のNo.3ボルトの試験時において塑性域に入らない荷重範囲内で再載荷して算出した換算率。*: 全データでの標準偏差。 **: 3

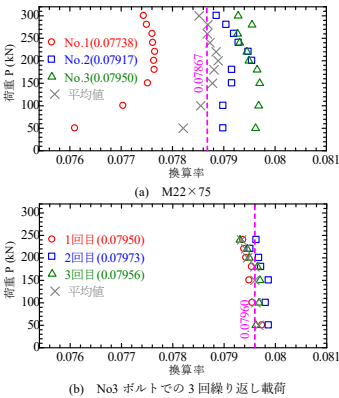


図-2 荷重と換算率の関係(試験Ⅱ)

キーワード：高力ボルト継手，キャリブレーション試験，換算率，ひずみ測定
連絡先：〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11 川田工業 TEL 03-3915-4154

表-5 キャリブレーション試験の統計調査結果の集計

ボルト			数量	換算率		ヤング係数比(%)	
規格	径	長さ		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
F10T	M22	> 70	37	0.07526	0.002177	96.59	2.7743
		≦ 70	6	0.08067	0.002105	103.52	2.7019
F10TW		> 70	9	0.07629	0.001920	97.89	2.4644
		> 70	21	0.07577	0.001805	97.26	2.3831
		≦ 70	3	0.08179	-	104.96	-
S14T		> 70	3	0.07678	-	98.53	-
F10T	M24	> 75	28	0.09389	0.002657	101.24	2.8641
		≦ 75	5	0.10673	0.001784	115.08	1.9218
S10T		> 75	3	0.09708	-	104.68	-
S14T		> 75	3	0.09090	-	98.02	-
F8T	M22	> 70	48	0.07507	0.001366	96.32	1.749
		≦ 70	9	0.08322	0.001630	106.8	2.092
	M24	> 75	39	0.09407	0.002101	101.43	2.2638
		≦ 75	9	0.10890	0.001786	117.42	1.9278

各ボルトの標準偏差にも違いが見られた。

表-4 および図-2(b)に、試験ⅡのNo.3ボルトにおける3

回繰り返し計測した結果を示す。これらの結果に示すように、同一ボルトで繰り返し载荷の計測では、必ずしも試験結果は一致しないが、図-2(a)と比較して誤差は小さく、標準偏差も小さくなっており、同一ボルトで行った場合、試験上(計測上)の誤差はほとんどないと考えられる。

3. キャリブレーション試験の統計調査

(1) 調査概要 本調査は、鋼橋技術研究会「高力ボルト継手施工部会」で実施したボルト試験^{1)~4)}、および部会構成会社でのボルト試験データを調査した。調査データ数量は74試験データあり、223本のボルト統計調査である。調査結果の集計値を表-5に示す。

(2) 調査結果

(a) ボルト長の影響 調査できたボルト種別は、F10T、F10TW、S10T、S14TおよびF8Tである。なお、M22では70mm以下、M24では75mm以下を短ボルトとして分けて整理した。短ボルトの換算率は他のボルトより高く、特にM24では顕著であったが、これらの短ボルトを除けば、換算率にはボルト長の影響は見られなかった。

(b) 荷重値の影響 図-3(a)は、横軸に荷重値、縦軸にF10T-M24(≦75mm)およびF8T-M24(≦75mm)を除いた換算率差の平均値を示し、これらを用いた回帰直線を示している。この回帰直線を用い縦軸が0(y=0)になる荷重値は182kNであり、現在の換算率算定方法は、182kN付近のボルト軸力であれば精度よくボルト軸力を計測できるが、それより大きくても小さくてもボルト軸力の誤差が生じてくるものと考えられる。その影響度は、 $4.858 \times 10^{-6} / \text{kN}$ (回帰式の傾き)となる。図-3(b)は、横軸に荷重値、縦軸に換算率差の標準偏差を示す。F10T-M24(>75mm)ではばらつきが大きかったが、その他のデータでは、ボルト種別やボルト径による標準偏差に大きな違いは見られないが、50kNの標準偏差はボルト種別に依らず高く、分布幅が広いことが判る。よって、精度よく換算率を算出するには、ばらつきが大きい50kNのデータは除外するのがよいと考えられる。

(c) キャリブレーション試験の考察と改良提案 キャリブレーション試験は荷重(ボルト軸力)依存性がある。現在の換算率算定方法では、ボルト軸力が182kN付近では精度よく計測できる換算率であると考えられる。以上より、キャリブレーション試験の改良案をまとめると、キャリブレーション試験は、ボルトの導入軸力(例えば、F10T-M22:226kN、F10T-M24:262kN)である荷重値を载荷し、そのひずみから換算率を算定する。これを1本のボルトで5回、3本のボルト行いその平均値を用いる。なお、換算率は軸力依存性があるので、予備締め計測を行う等、導入軸力と大きく異なるボルト軸力を計測する場合には、 $4.858 \times 10^{-6} / \text{kN}$ に応じた換算率の補正を行うのがよい。なお、この補正は、M24でボルト長が75mm以下では行わないのがよい。

5. まとめ

本研究結果より、キャリブレーション試験方法の精度を向上させる方法として、ボルトの導入軸力となる荷重を载荷し、そのひずみから換算率を算定することを提案する。また、導入軸力と大きく異なるボルト軸力域を計測する場合には、 $4.858 \times 10^{-6} / \text{kN}$ に応じた換算率の補正を行うのがよい。なお、本研究は鋼橋技術研究会「高力ボルト継手施工部会(部会長:南邦明)」の活動の一環で行ったものである。

【参考文献】

1) 南邦明, 田村 洋, 吉岡夏樹, 内田大介, 茂呂 充, 安藤光希: 高力ボルト継手における摩擦面の数に応じた導入ボルト軸力に関する検討, 土木学会論文集A1, Vol. 75, No. 1, pp. 46-57, 2019.2.
2) 南邦明, 田村 洋, 白旗弘実, 内田大介, 吉岡夏樹, 濱 達矢: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験におけるすべり発生時の変位量, 土木学会論文集A1, Vol. 75, No. 2, pp. 249-256, 2019.8.
3) 白旗弘実, 南邦明, 藤野大地, 宮井大輔, 矢野将太, 横田 渉: F10Tを用いた高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角法の適用の検討, 土木学会論文集A1, Vol. 76, No. 1, pp. 1-14, 2020.1.
4) 南邦明, 斉藤雅充, 横山秀喜, 杉本一朗, 能島隆男, 増永寿彦, 長崎英二: 亜鉛アルミ合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究, 土木学会論文集A1, Vol. 68, No. 2, pp. 427-439, 2012.6.

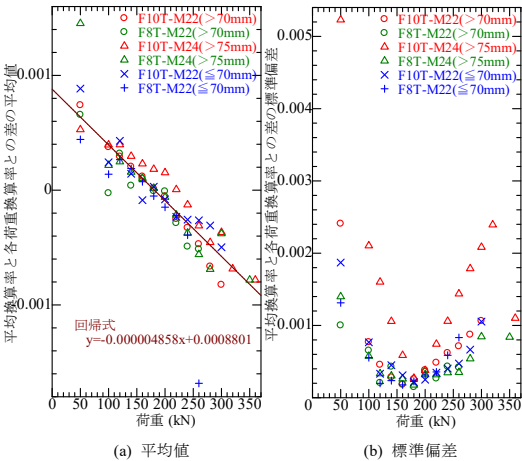


図-3 平均換算率と各荷重値換算率との差