

高力ボルト摩擦接合継手に関する 設計規準の国際比較

秋山 寿行¹⁾ 播本 章一²⁾

諸外国では鋼構造物の設計に対し限界状態設計法が導入されてきている。我が国においても、限界状態設計法の導入に対して、鋼構造物の終局強度に関する研究が蓄積されてきている。鋼構造物においては、板要素、部材および構造システムの終局強度と同様に、部材の継手部の終局強度も重要なことである。

本文は、鋼橋の高力ボルト継手の終局強度に関する基礎資料を得るため、高力ボルト摩擦接合継手に関する諸外国の設計規準の比較および引張材の継手を対象にした経済比較を行い、その結果について述べたものである。そして、日本の道路橋示方書の規定は諸外国の規準に比べ、より高い安全性を有していることを示している。

ま え が き

我が国における現行の鋼構造物の設計に関する規準類^{1), 2)}に示されている高力ボルト摩擦接合継手に関連する規定は、20年以上前の実験データに基づいたものであり、この設計規準は許容応力度設計法に準拠したものである。近年、諸外国においては鋼構造設計法が限界状態設計法に移行してきている。我が国においても、鋼構造設計への限界状態設計法の導入に対し、主として板要素、部材および構造システムの終局強度に関する研究が蓄積されてきている。その際、部材の継手部や格点の終局強度に関する検討が不足しているように思われる。そのため、鋼構造の一般的な継手である高力ボルト摩擦接合継手に関しても、使用限界状態および終局限界状態について系統的な見直しが必要である。そして、板要素、部材および構造システムの終局強度と同様に、高力ボルト継手部の強度および変形能の的確な評価法を確立し、継手部の設計の合理化を図ることも重要である。

このような観点から、ここでは高力ボルト摩擦接合継手に関する規定について、すでに限界状態設計法に移行している諸外国の鋼構造設計規準と我が国の設計規準とを比較する。そして、引張材の継手を対象にして経済比較を行い、鋼橋の継手部の合理的かつ経済的設計を達成するための基礎資料を得るものである。

1. 各国規準の比較

高力ボルト摩擦接合継手に関して、各国規準の主要項目について比較を行い、その相違点について具体的にまとめる。対象とする規準は、我が国の道路橋示方書¹⁾および鋼構造設計規準²⁾、アメリカのAASHTO³⁾、イギリスのBS 5400⁴⁾、スイスのSIA 161⁵⁾、ドイツのDIN 18800⁶⁾である。以下において、これらの規準をそれぞれ「道示」、「鋼規準」、「AASHTO」、「BS」、「SIA」、「DIN」と略する。

(1) すべり係数

各国の規準における摩擦面のすべり係数 μ の規定値を表-1に示す。すべり係数の値は摩擦面の処理方法によって大きく異なる。我が国においては一般に、黒皮を除去して摩擦面を粗面とした場合のすべり係数は0.4以上の値が、また、黒皮を除去した後、屋外にて自然放置により赤錆状態とした場合においても0.45以上の値が確保されていることが知られている^{1), 2)}。したがって、道示では前者の処理方法に対してすべり係数を0.4、鋼規準では後者の処理方法に対して0.45としている。そして、ブラスト処理の摩擦面に対しても、設計上は同様のすべり係数としている。

一方、AASHTOやSIAでは、黒皮状態のままの摩擦面に対するすべり係数が規定されており、その値はAASHTOで0.33、SIAで0.3となっている。そして、我が国以外の各国の規準では、ブラスト処理

1) 橋梁技術部技術課課長

2) 常務取締役

表-1 各国規準のすべり係数

規 準	すべり係数 μ	摩擦面の処理または状況
道 示	0.4	黒皮を除去して粗面とする。
鋼 規 準	0.45	黒皮を除去した後、屋外に自然放置して発生させた赤錆状態とする。 (許容力表示の値のまるめの影響により0.43程度となる。)
AASHTO	0.33 0.50	消浄な黒皮状態 ブラスト処理された炭素鋼および低合金鋼
BS 5400	0.45 0.50	原則として規定のすべり試験により決定する。 黒皮を除去した後、屋外曝露 ショットブラストまたはグリッドブラスト処理 (BS 4395 Part2 higher grade [parallel shank] を使用する場合、すべり試験により決定する以外は、このすべり係数を10%低減する。)
SIA 161	0.30 0.50	消浄、黒皮は除かれていない サンドブラストまたはフレームクリーニング処理 (すべり試験により決定してもよい。)
DIN 18800	0.50	ショットブラスト処理 2回の火炎放射 サンドブラスト処理

ただし、摩擦面を塗装またはメッキ処理する場合には省略する。

の摩擦面に対して別途すべり係数0.5を規定している。また、BSおよびSIAでは規定されたすべり試験によってすべり係数を決定してもよいとある。

このように、摩擦面のすべり係数は、諸外国の規準では摩擦面の処理状態に応じて規定しており、またすべり試験によって決定することもできるが、我が国の規準では一種類の処理状態についてのみ規定している。

(2) すべりに対する安全率

各国の規準におけるすべりに対する安全率 ν を表-2に示す。我が国の道示における鋼橋の設計法は、許容応力度設計法の考え方に基づいている。そして、すべり耐力が鋼材における降伏点に相当すると考え、すべりに対する安全率を許容引張応力度に対する安全率と同様の1.7としている。

また、鋼規準におけるすべりに対する安全率は、長期荷重に対して1.5、短期荷重に対して1.0である。しかし、鋼構造限界状態設計規準(案)〔日本建築学会1990.2〕においては、使用限界状態設計における高力ボルトの設計耐力は、耐力係数($\phi_j=0.90$)および継手部降伏耐力(ここではすべり耐力、 jR_y)を用いて算定するとある(設計耐力= $\phi_j \times jR_y$)。この場合のすべりに対する安全率は1.11となる。終局限界状態設計における高力ボルトの最大耐力は、高力ボルトのせん断力に対する最大耐力を用いて算定される。

AASHTOにおけるすべりに対する安全率は、作用荷重設計法では1.33である。また、強度設計法では、設計フォーマットが作用荷重設計法と異なり、安全

表-2 各国規準のすべりに対する安全率

規 準	安全率 ν	備 考	
道 示	1.7	すべり耐力が鋼材における降伏点に相当すると考え、許容引張応力度に対する安全率と同じと考える。	
鋼 規 準	1.5 1.0	長期荷重に対して 短期荷重に対して	
AASHTO	1.33 1.0	作用荷重設計法 強度設計法 (許容伝達力、設計ボルト軸力およびすべり係数の規定値より算定した値である。)	
		使用限界状態 終局限界状態	
BS 5400	部分材料係数 γ_m 部分荷重係数 γ_{f3} k_h $\nu = \gamma_m \cdot \gamma_{f3} / k_h$	1.2 1.0 1.0 1.2	1.3 1.1 1.0 1.43
		ここに、 k_h はボルト孔形状に関する係数である。 標準孔 $k_h=1.0$ 過大孔 $k_h=0.85$ 短い長孔 $k_h=0.85$ 長い長孔 $k_h=0.70$	
SIA 161		すべりによる構造物の損傷に対し高価な補修が必要となる場合	その他の場合
	低減係数 α_R $\nu = 1 / \alpha_R$	0.7 1.43	0.8 1.25
DIN 18800	1.40 1.25	主荷重に対して (主荷重+従荷重)に対して	

率の考え方が本質的に違っているが、安全率は1.0である。BSでは限界状態設計法が導入され、使用限界状態、終局限界状態のそれぞれについて安全性を照査することとなっている。部分荷重係数をも含めたすべりに対する安全率は、ボルト孔が標準孔の場合、使用限界状態に対して1.2、終局限界状態に対して1.43となっている。この場合、終局限界状態の設計終局耐力は、摩擦耐力、せん断耐力および支圧耐力より決定される。SIAにおいても、まず使用性の照査すなわちすべりに対する照査を行い、その後、耐力の照査すなわちボルトのせん断と支圧に対する照査を行うこととなっている。そして、使用性の照査では、作用荷重に対し安全率1.0としている。摩擦接合のすべりに対する抵抗強度は、すべりの効果を考慮して低減係数 α_R を規定している。そして、構造物の重要度に応じてその値を0.7あるいは0.8としている。したがって、これを安全率に換算するとそれぞれ1.43あるいは1.25となる。また、DINでは、荷重の種別によって1.40あるいは1.25としている。高力ボルト摩擦接合においても、支圧耐力を照査することを規定している。

以上より、使用限界状態においてすべりを生じないこととして考えると、道示におけるすべりに対する安全率は、他の規準に比べて大きいものとなっている。

(3) 許容伝達力

各国の規準における摩擦接合高力ボルトの許容伝達力を表-3に示す。許容伝達力はすべり係数および安全率の値によって各国とも異なっている。ここで

表-3 各国規準の許容伝達力
(ボルト軸の単位断面面積あたりの伝達力)

規 準	許容伝達力 Pa (単位: tf/cm ²)		
道 示	F10T	1.25	
鋼 規 準	F10T	1.50	
AASHTO	ASTM A490について 黒皮状態のままの摩擦面 (μ=0.33) ブラスト処理の摩擦面 (μ=0.5)	標準孔の場合 1.34 2.14	
BS 5400	higher grade (parallel shank) について ボルトサイズM22、標準孔の場合		
		使用限界状態	終局限界状態
	黒皮除去の摩擦面 (μ=0.45×0.9) ブラスト処理の摩擦面 (μ=0.50×0.9)	1.81 2.01	1.52 1.69
SIA 161	強度クラス10.9について、ボルトサイズM22の場合		
		α _R =0.7	α _R =0.8
	黒皮状態のままの摩擦面 (μ=0.3) ブラスト処理の摩擦面 (μ=0.50)	1.20 1.99	1.37 2.28
	ここに、α _R は低減係数である。		
DIN 18800	主荷重に対し、接合される部材の鋼種St37、St52について		
	GV接合 GVP接合	1.82 3.38	

は、我が国で一般的に用いられているF10Tクラスの高力ボルトに対し、ボルト軸の単位断面面積あたりの許容応力度Paで比較する。

我が国において道示ではPa = 1.25tf/cm²、鋼規準ではPa = 1.50tf/cm²となっている。AASHTOにおいても摩擦面の処理方法やボルト孔の形状（たとえば標準孔、過大孔、長孔など）によって、それぞれPaが規定されている。BSおよびSIAではボルト1本あたりの摩擦伝達力の算定式が規定されている。そして、BSではAASHTOと同様にボルト孔の形状によって摩擦伝達力が低減されている。DINでは、ボルト孔のクリアランスによってGV接合（摩擦作用によって力が伝達される接合）と、GVP接合（摩擦作用と同時にせん断力と孔内面支圧によって力が伝達される接合）が規定されている。そして、荷重の種類（主荷重、従荷重）およびボルトのサイズに応じて、それぞれボルト1本あたりの摩擦伝達力が規定されている。GV接合は我が国の高力ボルト摩擦接合に相当する。GVP接合の許容伝達力はGV接合の約1.86倍であり、非常に大きい値となっている。

道示の許容伝達力とBSの黒皮除去の摩擦面に対する許容伝達力（使用限界状態、μ = 0.45 × 0.9の場合）とを比較すると、両社の比（BS/道示）は1.45となっている。

道示ではすべり係数を0.4として許容伝達力を規定しているが、ブラスト処理の摩擦面として外国と同様のすべり係数0.5とした場合、許容伝達力は1.56tf/cm²になる。この場合、各国の規準と比較するとその比（各国規準/道示）はAASHTOでは1.37、BSでは1.29、SIA（α_R = 0.7の場合）では1.28、DIN（GV接合）では1.17であり、安全率の違いが

現れている。

(4) ボルト孔による断面控除

高力ボルト接合部において圧縮荷重が作用する場合、圧縮力により部材の板厚が増大し、これによりボルト軸力が増加する。このため、摩擦伝達力が増加するので、部材の有効断面については全断面をとることができる。一方、引張荷重が作用する場合、ボルト孔を通る断面において板厚が減少し、これによりボルト軸力が減少する。その結果、摩擦伝達力が減少し、すべりが発生する恐れがある。したがって、引張部材の高力ボルト接合の設計において、部材の有効断面についてはボルト孔による断面控除を考慮する必要がある。

各国の規準における引張部材の有効断面面積の考え方を表-4に示す。道示および鋼規準においては純断面面積を有効断面面積とし、この断面に対する引張応力度が許容応力度以下になるようにしている。AASHTOおよびBSでは有効断面面積は純断面面積より大きいものとなっている。そして、SIAでは純断面面積における引張応力度の上限値を鋼の最小引張強度の80%としている。このことは我が国の規準とは大きく異なっている。また、DINでは純断面面積を有効断面面積としているが、ボルト孔による断面減少が始まる前に荷重の一部が摩擦作用により伝達されているものとしており、道示よりも緩和された考え方である。

以上、高力ボルト摩擦接合継手に関する各国の規準において相違のあることを示した。許容応力度設計法と限界状態設計法との違いもあるが、すべり係数およびすべりに対する安全率が大きく異なっている。その結果、道示における高力ボルトの許容伝達

表-4 引張部材のボルト孔による断面控除の影響

規 準	有効断面面積の考え方
道 示	総断面積からボルト孔の幅を控除した純断面積を有効断面積とする。
鋼 規 準	同 上
AASHTO	ボルト孔を控除した純断面積が総断面積の85%以上ならば総断面積を有効断面積とする。また、15%を超える孔引き分については総断面積から減じる。
BS 5400	有効断面積 $A_e = k_1 \cdot k_2 \cdot A_t \leq A$ k ₁ : ビン孔の場合は0.65、その他は1.0 k ₂ : 鋼材の材質による係数 (等級43は1.2、等級50は1.1、等級55は1.0) A _t : ボルト孔を控除した純断面積 A: 総断面積
SIA 161	総断面積における引張応力度 ≤ 降伏強度 純断面積における引張応力度 ≤ 引張強度×0.8
DIN 18800	GV接合あるいはGVP接合の場合、ボルト孔による断面減少が始まる前に、その断面にあるボルトの許容伝達力の40%がすでに摩擦作用により伝達されるものとする。

力が他の規準に比べて小さくなっている。また、外国の規準においては、継手部のすべり後の耐力についても規定している。ボルト孔による断面控除の影響について、道示では他の規準に比べて安全側に規定されている。

2. 継手設計に関する経済比較

前節で述べた各国の規準に従って引張材における高力ボルト摩擦接合継手の設計を行い、この継手に対して経済比較を行う。

摩擦接合継手の設計条件は次のとおりである。

基本母材断面：幅480×板厚25mm

(材質は50キロ級)

作用力：各国の鋼材の公称降伏強度に相当する引張力

高力ボルト：等級F10T、サイズM22相当

すべり係数：黒皮除去の表面状態

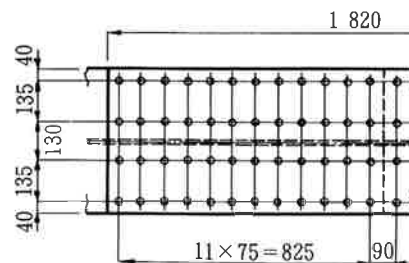
(参考として、AASHTOに基づくケースについては、黒皮のままの表面状態とする)

ボルト孔：標準孔

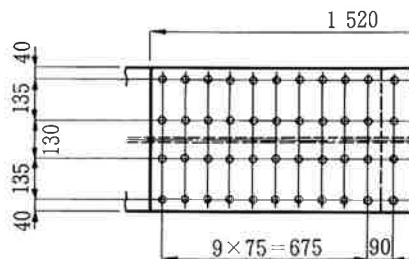
ボルト間隔：各国規準を満足する範囲内ですべて同様

これらの条件のもとで設計した継手部に対して、継手による工場製作費および現場工事費の増額を算出し、経済性の比較を行う。この場合、工場製作費および現場工事費は、鋼材費、製作加工費、桁架設工費、高力ボルト本締工費、塗装費などである。また、費用の算出においては参考文献9)をもとにする。これらの計算より、ボルト配置を図-1に、経済性の比較を表-5に示す。この結果、高力ボルトの本数は諸外国の規準によると、道示による場合の67~83%となる。また、鋼板重量増分については52~63%、合計工事費では55~66%となる。以上の比較より、高力ボルト摩擦接合の設計規準に関し、日本の道示は

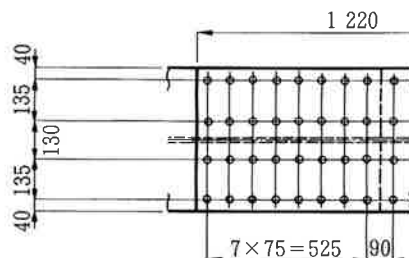
道示



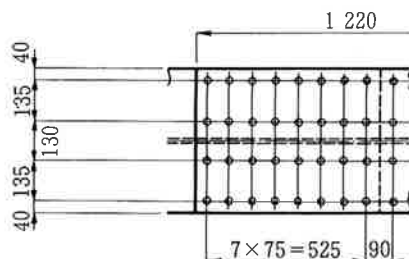
AASHTO



BS 5400



SIA 161



DIN 18800

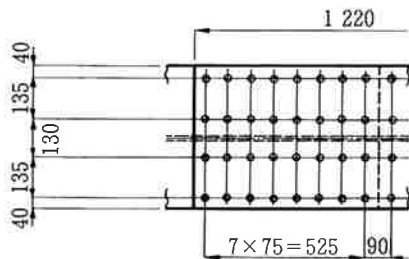


図-1 高力ボルト配置

表-5 引張材の高力ボルト摩擦接合継手による重量増および工事費(増額分)

	継手断面						鋼材重量増				塗装面積 (m ²)	工事費		
	母材板厚(mm)	高力ボルト本数(本)	高力ボルト長さ(mm)	添接板板厚(mm)	添接板長さ(mm)	継手長さ(mm)	鋼材重量増 (kgf)			ボルト重量 (kgf)		工場製作費	現場工事費	合計 (円)
							母材	添接板	合計					
道示	25→32	2×48=96	110	16	19	1,820	48	227	275 (1.00)	65 (1.00)	2.39 (1.00)	106,000	99,000	205,000 (1.00)
AASHTO	25→27	2×40=80	100	14	16	1,520	11	162	173 (0.63)	52 (0.80)	2.00 (0.84)	69,000	67,000	136,000 (0.66)
BS 5400	25→29	2×32=64	105	15	17	1,220	18	139	157 (0.57)	42 (0.65)	1.60 (0.67)	62,000	59,000	121,000 (0.59)
SIA 161	25→28	2×32=64	100	14	16	1,220	14	130	144 (0.52)	41 (0.63)	1.60 (0.67)	57,000	55,000	112,000 (0.55)
DIN 18800	25→30	2×32=64	105	15	18	1,220	23	143	166 (0.60)	42 (0.65)	1.60 (0.67)	65,000	61,000	126,000 (0.61)

注) () 内の値は道示を1.00とした場合の比率を示す。

諸外国の規準に比べ、より高い安全性を有しているように思われる。

3. ま と め

高力ボルト摩擦接合継手に関する規定について、我が国の設計規準と諸外国の鋼構造設計規準とを比較すると、以下のような相違点が挙げられる。

- ① 摩擦面のすべり係数について、諸外国の規準では摩擦面の処理状態に応じて規定しているが、我が国の規準では、黒皮を除去した場合の実験値をもとに一種類のみ規定している。
- ② 摩擦接合のすべりに対する安全率に相違がある。
- ③ 母材および添接板の有効断面積の計算におけるボルト孔控除について、諸外国の規準では摩擦による伝達力を考慮して有効断面積の割増しを行っているが、我が国の規準では純断面積を考えている。
- ④ 一部の外国規準にはフィットボルトに関する規定が設けられており、高力ボルトの支圧ないしはせん断強度の利用を可能にしている。

この結果、引張材の摩擦接合継手を例にとり経済性の比較を行うと、我が国に比べ諸外国の方が経済的に設計されることになる。したがって、これらの相違点について我が国の規準を見直すことにより、摩擦接合継手をさらに合理的かつ経済的に設計することができるものと思われる。将来、鋼橋の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行する場合を考慮し、特に、次の2点について検討する必要があるものと思われる。

- ・高力ボルト摩擦伝達力の安全率の考え方
- ・引張材でボルト孔による部材の断面控除の影響

あ と が き

高力ボルト摩擦接合継手に関して各国の設計規準を比較し、さらに、継手設計に関する経済比較を行った。その結果、道示が諸外国の規準に比べて、より高い安全性を有しているものと思われる。

高力ボルト摩擦接合継手に関する既往の実験的研究はすべり耐力に着目したものが多く、継手部の強度および変形能など終局限界状態までを考慮した実験は少ない⁸⁾。現在、筆者らは系統的に計画した継手供試体を用いて、高力ボルト摩擦接合継手部の使用限界状態および終局限界状態に着目した実験的研究を進めている。この研究成果については、次号にお

いて報告する予定である。

最後に、終始懇切なご助言、ご指導をいただいた西村宣男 大阪大学教授をはじめ、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1990. 2
- 2) 日本建築学会：鋼構造設計規準、1970
- 3) AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges, fourteenth edition, 1989
- 4) BSI：BS 5400, Part 3. Code of practice for design of steel bridges, 1982
- 5) SSEA：SIA 161, Steel Structures, 1979
- 6) DIN：DIN 18800 Teil 1, Stahlbauten, 1988
- 7) 伊藤鉦一：DIN規格の鋼構造用ボルト接合に関する規定、橋梁と基礎、1989. 5
- 8) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集—リベット接合・高力ボルト接合一、技報堂、1977
- 9) (社)日本建設機械化協会編：橋梁架設工事の積算、平成二年度版
- 10) 秋山・播本・西村：高力ボルト摩擦接合継手に関する設計規準の国際比較、第46回土木学会年次学術講演会概要集、I-270、1991. 9