

被接合材片間に板厚差がある

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力

秋山 寿行* 木村 充** 西村 宣男***

被接合材片間に板厚差がある高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力について、有限要素解析法およびせん断変形を考慮したはり理論による簡易算定法によって調査を行った。有限要素解析法および簡易算定法の精度については実験データとの比較により検証を行った。有限要素解析法および簡易算定法による計算結果から、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工における被接合材片間の許容板厚差は、高力ボルトが等級 F10T でねじの呼び M22 の場合、連結板板厚が 16mm 程度までの範囲であれば 1mm (継手片面の板厚差が 0.5mm) 程度とすることができる。また、連結板板厚が 16mm を超える場合は、連結板の板厚に応じて継手中心部の母材の縁端距離を長くすることにより、すべり耐力に対する母材間の板厚差 1mm 程度の影響を緩和することができる。

キーワード：高力ボルト継手、摩擦接合、すべり耐力、板厚差、連結板

まえがき

鋼桁橋の設計・製作の合理化¹⁾の推進により、主桁の断面変化はフランジ幅を一定として、フランジ板厚を変化することとし、その変化位置は現場継手位置で行うことが一般的になった。このような現場継手が高力ボルト継手の場合、フィラーを用いて継手両側の被接合材片（ここでは継手母材およびフィラーを総称する際に被接合材片と称する）の板厚差を 0 とするように施工される。しかし、その板厚差が 6mm 未満の高力ボルト継手では、フィラーとして板厚がマーケットサイズの 2.3, 3.2, 4.5mm の鋼板を使用する場合、板厚差を 0 とすることは困難である。

高力ボルト摩擦接合継手において被接合材片間の板厚差が継手のすべり耐力に与える影響に関しては、宮崎ら²⁾が実験的な検討を行っている。それによると、被接合材片間の板厚差の影響が無視できないこと、および、ボルト継手における被接合材片間の板厚差は可能な限り小さく施工すべきであることを推奨している。そして、現行の道

路橋示方書³⁾では、「6.3.15 フィラー」の解説文において、「設計上は原則として板厚差が 0 となるようにフィラーを用いなければならない。」、また、「板厚が 6mm 未満の場合に 1mm 刻みの板厚が入手できない等のやむを得ない事情から板厚差が生じる場合にも、連結板の板厚や材質が同程度の実験データ等によって摩擦接合面のすべり係数が 0.4 以上確保できていることを確認しなければならない。」と記述されている。

このような現状に対して、社団法人 日本橋梁建設協会⁴⁾では、継手母材の板厚がほぼ 32mm でフィラーを含めた被接合材片間の片面板厚差が 1mm 以下である高力ボルト継手（ボルト列数 4 列）を対象とした一連の実験により、被接合材片間の板厚差がすべり係数に与える影響を調査している。その結果、ボルト継手の片面板厚差が 1mm 以下の場合、フィラーの有無に拘わらずすべり係数 0.4 は十分確保できることを確認している。

ここでは、高力ボルト摩擦接合継手における被接合材片間の板厚差がすべり耐力に与える影響について、有限要素解析によるパラメトリック解析を実施する。さらに、継手中心部の最内列ボルト

* 橋梁部部长 ** 鉄構富津工場技術課 *** 大阪大学名誉教授

について有効軸力（初期導入軸力の内、母材と連結板との間の接触圧に消費される軸力）の簡易算定式を提案し、関与する力学パラメータを同定する。これらを総合して、被接合材片間に板厚差がある高力ボルト摩擦接合継手について実務的対応を提案する。

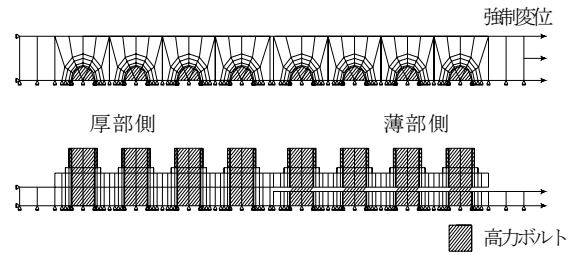


図-1 有限要素解析モデルの要素分割

1. すべり耐力の有限要素解析

(1) 解析プログラムの概要

有限要素法による高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力解析は解析プログラム SABOL⁵⁾を適用する。SABOL の要素ライブラリーは円形断面の高力ボルト、座金およびボルト孔を表現するため、20 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いている。また、母材と連結板の接触面の節点は2重節点としており、板厚方向の節点力の符号により接触面が接触状態か離間状態かを判別する。さらに、接触面に接線方向の節点力の差より固着状態かすべりかを判定する機能を与えている。

被接合材片間に板厚差がある高力ボルト継手のすべり耐力解析に対する解析プログラムSABOLの適用性については、社団法人 日本橋梁建設協会の実験報告⁴⁾にある実験ケースを対象として、すべり耐力に関する実験値とSABOLによる解析値との比較により検証した。その実験ケース（ボルト配置：1行×4列）の有限要素解析モデルの要素分割を図-1に示す。この検証の結果、実験値と解析値は良く対応しており、解析プログラムSABOLが適用できることを確認した⁶⁾。

(2) 解析モデル

解析モデルの主要諸元の一覧を表-1に示す。母材および連結板の降伏応力度 σ_y については、道路橋示方書の規定を基にし、同一鋼種における全種類の板厚について共通として、鋼種 SM490Y は $\sigma_y=355\text{N/mm}^2$ 、鋼種 SM570 は $\sigma_y=450\text{N/mm}^2$ とする。母材間の板厚差は片側の母材板厚を標準値 t より板厚差分だけ増すことによって与える。各系列は片面板厚差が 0mm, 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm の 5 ケースを含み、個々のケースは板厚差の小さい順に、たとえば系列 A の場合は A-1, A-2, A-3, A-4, A-5 と表記する。

系列 A を基準モデル系列（母材板厚 32mm, 高力ボルト F10T・M22・1 行×4 列, 内側縁端

表-1 有限要素解析モデルの一覧

系列タイプ	板厚(mm)		鋼種	ボルトの配置		β 値
	母材 t	連結板 t _s		列数 n	a' (mm)	
A-	32	16	SM490Y	4	40	0.770
B-	40	16	SM490Y	4	40	0.770
C-	32	19	SM490Y	4	40	0.770
D-	32	16	SM570	4	40	0.607
E-	24	12	SM490Y	3	40	0.770
F-	40	20	SM490Y	5	40	0.770
G-	50	25	SM490Y	4	40	0.493
H-	20	10	SM490Y	4	40	1.232
I-	30	15	SM490Y	4	40	0.821
J-	40	20	SM490Y	4	40	0.616
K-	50	25	SM490Y	4	55	0.493
L-	50	25	SM490Y	4	70	0.493

a' : 継手中心部の母材の縁端距離
β = 継手の公称すべり耐力 / 公称降伏耐力

距離 40mm, 鋼種 SM490Y) とし、他の系列は以下のとおりである。

- ・系列 B : 母材板厚を増厚したモデル
- ・系列 C : 連結板板厚を増厚したモデル
- ・系列 D : 鋼種を SM570 に変更したモデル
- ・系列 E および F : ボルト列数を 3 列および 5 列としたモデル（すべり・降伏耐力比 β 値は系列 A と同じ）
- ・系列 G, K および L : 母材と連結板の板厚を増厚し、内側縁端距離を 40mm, 55mm および 70mm としたモデル
- ・系列 H, I および J : 母材と連結板の板厚を変化させたモデル

系列 G, K および L は高力ボルト摩擦接合継手が採用される最も厚板の場合に焦点を当てたモデルである。また、系列 H, I および J は連結板板厚の影響を調査するモデルである。

(3) 解析結果

すべり耐力の解析の結果、すべり耐力を板厚差

表-2 解析モデルのすべり耐力比
(有限要素解析結果)

系列 タイプ	t_s/a	b/a	すべり耐力比			
			*=2 ($\delta=0.5$)	*=3 ($\delta=1.0$)	*=4 ($\delta=1.5$)	*=5 ($\delta=2.0$)
A-*	0.376	2.353	0.958	0.925	0.855	0.800
B-*	0.376	2.353	0.980	0.928	0.859	0.798
C-*	0.447	2.353	0.887	0.849	0.801	0.780
D-*	0.376	2.353	0.984	0.930	0.871	0.813
E-*	0.282	2.353	0.924	0.847	0.807	0.715
F-*	0.471	2.353	0.938	0.890	0.840	0.787
G-*	0.588	2.353	0.891	0.799	0.786	0.712
H-*	0.235	2.353	0.974	0.922	0.909	0.843
I-*	0.353	2.353	0.943	0.895	0.857	0.799
J-*	0.471	2.353	0.942	0.869	0.798	0.757
K-*	0.435	1.739	0.968	0.883	0.872	0.819
L-*	0.345	1.379	0.970	0.910	0.888	0.860

H系列は降伏耐力比を示す。

a:継手中心から第1ボルトまでの距離(=a'+2.5mm)

δ :片面板厚差(単位:mm)

が無いケース ($\delta=0\text{mm}$) を基準としたすべり耐力比として表-2に示す。表-2より、母材間の板厚差がある継手のすべり耐力比の低下率は板厚差にほぼ比例して増加していることがわかる。

基準系列Aの母材板厚のみを変化させた系列Bのすべり耐力比は、基準系列Aとほとんど変わらない。これに対して、基準系列Aの連結板板厚のみを変化させた系列Cのすべり耐力比の減少は、基準系列Aに比べて大きい。これらより、母材間の板厚差がすべり耐力に及ぼす影響は、連結板板厚が重要であるといえる。

系列Dは基準系列Aから鋼種のみを変えている。より高強度の鋼板の使用によって板曲げ応力による連結板の降伏荷重が上昇することにより、母材間の板厚差によるすべり耐力の低下は若干緩和されるが、それほど顕著ではない。

2. 最内列ボルト軸力の簡易算定法

高力ボルト摩擦接合継手において母材間に板厚差がある場合、高力ボルト締め付け時に連結板は継手中心部において板曲げ変形を生じる。その際、継手中心に近いボルトの導入軸力の一部は連結板の板曲げ変形に寄与することになり、母材と連結板との間の接触圧がボルト軸力の合計より小さくなる。そのことにより、母材間に板厚差がある継手のすべり耐力は、板厚差がない場合に比べて低

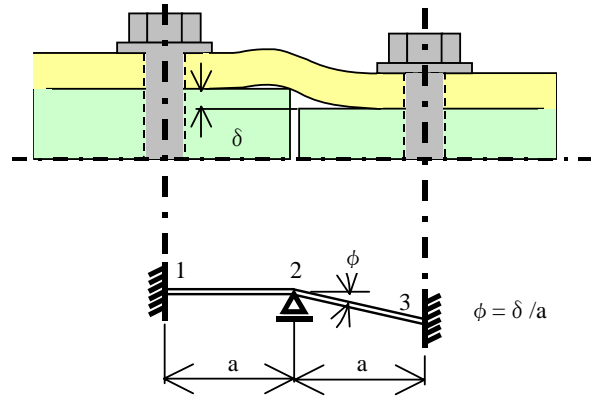


図-2 母材間の板厚差がある継手における連結板の連続ばりモデル

下する。この低下は連結板が厚いほど、板厚差が大きいほど著しくなる。

高力ボルト摩擦接合継手において、被接合材片間の板厚差によるすべり耐力への影響に関与する力学パラメータとして、以下が考えられる。

①直接的関与：

- ・片面板厚差 δ × 板幅 b / ボルト断面積 A_b
- ・連結板板厚 t_s / 母材端部のボルト縁端距離 a
- ・ボルト列数 n

②間接的関与：

- ・接触面処理状態
- ・すべり耐力/降伏耐力
- ・フィラー板厚/母材板厚

これらのパラメータの関係を明らかにするために、接触面の支圧力としてボルトの有効軸力を考え、せん断変形を考慮したはりの3連モーメント公式によりボルトの有効軸力の簡易算定式を誘導する。図-2に示すように、両端の回転変形が拘束された2径間連続ばりを考える。右側の径間には片面板厚差 δ に対応した部材回転角 ϕ ($= \delta / a$) が存在する。はり理論を適用するにあたり、以下の条件が満たされているものとする。

- ・最内列ボルトの締め付けにより、板厚差(すきま)が閉じる程度の比較的小さな板厚差を対象とする。
- ・板厚差(すきま)を閉じるために消費されるボルト軸力は最内列ボルトに限定される。
- ・はり理論によるボルトの有効軸力推定式に調整係数 S を導入することによって、連結板のボルト孔の存在や局部曲げにおけるボルトの曲げの影響を考慮する。調整係数 S は有限要素解析結果によって同定する。

・連結板は弾性範囲にあるものとする。簡易式によって曲げによる応力を算出し、降伏限界を明らかにする。

図-2 に示す連続ばりモデルの各支点における回転角の適合条件により、3 連モーメント式は式(1a), (1b), (1c)となる。

$$2M_1(1+3\lambda)+M_2(1-6\lambda)=0 \quad (1a)$$

$$M_1(1-6\lambda)+4M_2(1+3\lambda)+M_3(1-6\lambda)+6\phi EI/a=0 \quad (1b)$$

$$M_2(1-6\lambda)+2M_3(1+3\lambda)-6\phi EI/a=0 \quad (1c)$$

支点上モーメント M_1 , M_2 , M_3 について連立方程式を解き、 M_1 , M_2 , M_3 は式(2a)~(2e)となる。

$$M_i=C_iEI\delta/a^2 \quad (i=1, 2, 3) \quad (2a)$$

$$C_1=3(1-6\lambda)/2(1+3\lambda)/(1+12\lambda) \quad (2b)$$

$$C_2=-3/(1+12\lambda) \quad (2c)$$

$$C_3=9(1+6\lambda)/2(1+3\lambda)/(1+12\lambda) \quad (2d)$$

$$\lambda=\kappa EI/GAa^2 \quad (2e)$$

ここに、 κ : 形状係数(=1.2)

E : ヤング係数

G : せん断弾性係数

I : 連結板の断面二次モーメント

A : 連結板の断面積

支点反力 R_1 および R_3 は連結板の板曲げ変形に消費されるボルト軸力を意味しており、支点 3 の反力 R_3 (式(3a)) が最大となる。

$$R_3=-C_4EI\delta S/a^3 \quad (3a)$$

$$C_4=3(5+24\lambda)/2(1+3\lambda)/(1+12\lambda) \quad (3b)$$

ボルトの初期導入軸力 P_0 を式(4)のように表す。

$$P_0=c\sigma_{yb}A_b \quad (4)$$

ここに、 σ_{yb} : 高力ボルトの降伏応力度

A_b : 高力ボルトの有効断面積

c : 高力ボルトの初期導入軸力の降伏軸力に対する比率

ボルトの初期導入軸力 P_0 の内、連結板の板曲げ変形に消費される割合として、式(5)のとおり R_3 と P_0 との比とする。

$$R_3/P_0=C_4\times(E/c\sigma_{yb})\times(b\delta/A_b)\times(t_s/a)^3\times S/12 \quad (5)$$

ここに、 S : 調整係数 (有限要素解析結果にフィットするように同定する。)

ボルト n 列の継手における接触圧すなわち継手効率の減少率 γ は式(6)と表すことができる。

$$\gamma=(nP_0-R_3)/nP_0=1-R_3/nP_0 \quad (6)$$

母材間に板厚差がある高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の低下は、式(5)に示されるように材料特性 ($E/c\sigma_{yb}$)、片面板厚差の無次元量 ($b\delta/A_b$) および連結板板厚・内側縁端距離の比 (t_s/a) で評価できることが明らかになった。なお、連結板のせん断パラメータ λ は式(7)であり、 t_s/a の関数である。

$$\lambda=\kappa EI/GAa^2=1.2E(bt_s^3/12)/Gbt_sa^2=0.1(E/G)(t_s/a)^2 \quad (7)$$

なお、支点上モーメント M_3 より最内列ボルト位置における連結板の曲げ応力を計算することができるので、継手の引張荷重載荷による連結板の直応力と合算して、連結板の初期降伏荷重を推定することができる。

調整係数 S については前述の有限要素法によるパラメトリック解析結果を用いて決定する。調整係数 S を式(8)のように定数項、 t_s/a の線形項、 b/a の線形関数と自乗項の和で表し、未定係数 (s_i , $i=1\sim 4$) を同定する。

$$S=s_1+s_2(t_s/a)+s_3(b/a)+s_4(b/a)^2 \quad (8)$$

表-2 の A-2, G-2, K-2 および L-2 の 4 つのモデルの解析結果を用いて未定係数 (s_i , $i=1\sim 4$) を求めると、調整係数 S は式(9)となる。

$$S=0.8847-0.0471(t_s/a)-0.8232(b/a)+0.2251(b/a)^2 \quad (9)$$

全ての系列について、最内列ボルトのみに板厚

表-3 簡易算定式によるすべり耐力比と有限要素解析結果との比較

解析モデル	すべり耐力比		A/B
	A	B	
A-2	0.958	0.958	1.000
B-2	0.958	0.980	0.978
C-2	0.846	0.887	0.954
D-2	0.958	0.984	0.974
E-2	0.972	0.924	1.052
F-2	0.944	0.938	1.006
G-2	0.891	0.891	1.000
I-2	0.967	0.943	1.025
J-2	0.930	0.942	0.987
K-2	0.968	0.968	1.000
L-2	0.970	0.970	1.000

A：簡易算定式(式(6))によるすべり耐力比

B：有限要素解析によるすべり耐力比

差が影響するモデル ($\delta = 0.5\text{mm}$) を対象とし、式(9)の調整係数を用いて式(6)によるすべり耐力比の算定値と有限要素解析によるすべり耐力比との比較を表-3に示す。ここにすべり耐力比は、母材間の板厚差がない継手のすべり耐力に対する母材間の板厚差のある継手のすべり耐力の比である。なお、系列 H は β 値が 1.232 で降伏先行型のモデルであるため、比較の対象外としている。

3. 板厚差がある継手のすべり耐力特性

図-3に内側縁端距離 (a') が 40mm の場合について、簡易算定式を用いて求めたすべり耐力比とパラメータ t_s/a (ここに $a=42.5\text{mm}$) の関係を示す。図-3の中に有限要素解析の結果もプロットしている。図-3より、内側縁端距離 40mm の継手において連結板板厚 t_s が 16mm 以下の場合、母材間の板厚差を 1mm (片面板厚差 0.5mm) で管理すれば、板厚差に起因するすべり耐力の低下は 5%以内であり、実務上許容できると考える。

図-4にすべり耐力比と内側縁端距離の関係を示す。連結板板厚が 20mm および 25mm の場合、内側縁端距離をそれぞれ 50mm および 55mm とすることにより、許容板厚差を 1mm (片面板厚差 0.5mm) とするとすべり耐力の低下を 5%に制御することができる。したがって、連結板板厚が 16mm を超える厚板の高力ボルト継手では、設計時にこのような連結板板厚と連動した内側縁端距離を考慮することにより、母材間の板厚差の影響

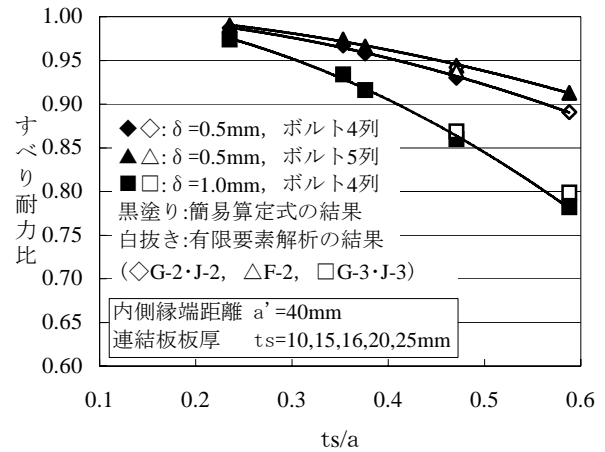


図-3 すべり耐力比とパラメータ t_s/a の関係

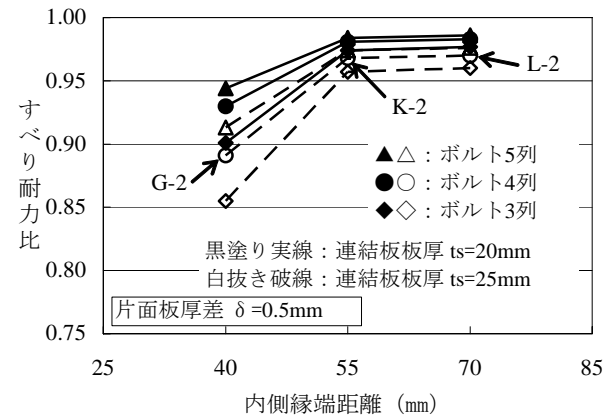


図-4 すべり耐力比と内側縁端距離の関係

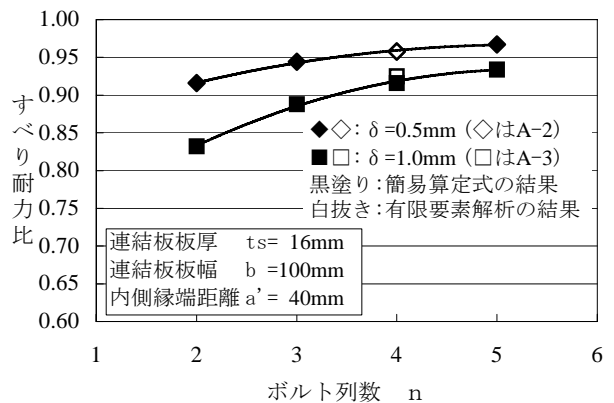


図-5 すべり耐力比とボルト列数の関係

を緩和することができる。

図-5にすべり耐力比とボルト列数の関係を示す。図中の曲線は簡易算定式によるものであり、該当する有限要素解析の結果もプロットしている。最適に設計された高力ボルト継手ではボルト列数と母材断面積とは連動している。そのため、連結板の板厚および板幅を固定してボルト列数のみを

変化させることの問題はあるが、明らかにボルト列数の増加は母材間の板厚差によるすべり耐力の低下を緩和している。

4. 結論

被接合材片間に板厚差がある高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力特性について、有限要素解析および最内列ボルトの有効軸力の簡易算定式を用いてパラメトリックに調査した。本研究により得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) 被接合材片間の板厚差によって連結板に局部的な板曲げが発生するが、高力ボルトの導入軸力の一部がこの板曲げに消費される。最内列ボルトの導入軸力の内、継手接触面の支圧力に寄与する有効軸力の簡易算定式を、せん断変形を考慮したはりの3連モーメント公式を用いて誘導し、このすべり耐力特性に関与する力学パラメータを同定した。そして、各パラメータのすべり耐力に与える影響を明らかにした。
- 2) 高力ボルトが等級F10Tでねじの呼びM22の場合、連結板の板厚が16mm程度までであれば、継手の内側縁端距離が一般的に適用されている40mmであっても、被接合材片間の板厚差の管理値を1mm(片面板厚差0.5mm)程度とすることで高力ボルト継手の品質を保証することができる。
- 3) 連結板の板厚が16mmを超える場合は、設計段階で当該継手の内側縁端距離を大きめにすることによって、すべり耐力に対する母材間の板厚差1mm(片面板厚差0.5mm)程度の影響を緩和することができる。

あとがき

本研究は、鋼桁橋の高力ボルト摩擦接合継手における被接合材片間の板厚差がすべり耐力に与える影響について研究したものである。本研究の成果が、鋼桁橋の高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工の参考になれば幸いである。

本研究を進めるにあたって社団法人 日本橋梁建設協会より、被接合材片間に板厚差がある高力ボルト摩擦接合継手の引張実験データをご提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

なお、本論文は文献7の一部を再編集してまとめたものである。

参考文献

- 1)建設省:鋼道路橋設計ガイドライン(案),1995.
- 2)宮崎晴之・黒田充紀・田中雅人・森 猛:板厚の異なる材片を接合した高力ボルト摩擦接合継手の滑り耐力,構造工学論文集,Vol.44A,pp.61-70,1998.3.
- 3)日本道路協会:道路橋示方書・同解説,II 鋼橋編,pp.224-226,2002.3.
- 4)日本橋梁建設協会 製作技術部会,高力ボルト部会:高力ボルト摩擦接合における1mm以下の板厚差がすべり係数におよぼす影響,2004.6.
- 5)亀井義典・池端文哉・西村宣男:高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分に関する解析的研究,土木学会論文集, No.584/I-42,pp.243-253,1998.1.
- 6)秋山寿行・木村 充・西村宣男:母材板厚差のある高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力,土木学会第60回年次学術講演会講演概要集,1-173,pp.343-344,2005.9.
- 7)秋山寿行・木村 充・小澤克郎・西村宣男:被接合材片に板厚差を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力,土木学会論文集A,Vol.63, No.1,pp.66-74,2007.1.