

嵌合接合部のせん断強度に関する基礎研究

辻岡 静雄*, 永野 康行*

Push-Out Tests on Sear Strength of Traditional Dovetail Joints

Shizuo TSUJIOKA *, Yasuyuki NAGANO *

This study is planned to clarify the strength and the stiffness of traditional dovetail joints. To examine the shear properties of this joints, the push-out tests were conducted on six prototypical dovetail joints. The test parameters are the inclination and the fixation of the side on the section. The relationship between the shear force transmitted and the slip at the interface, the slip stiffness and the slip strength are discussed. And the theoretical results showed fairly good agreements with the experimental results.

1. はじめに

軒桁と小屋梁の伝統的仕口（大入れ蟻掛け仕口等）ではめ込み部の側面に僅かな傾斜を持たせてガタをなくすことがなされている。このスギ材を用いた大入れ蟻掛け仕口の、告示第 1460 号の“梁端部仕口のせん断試験”に準拠した確性試験において、傾斜角 $1/34$ を設けることで接合部剛性、短期基準接合耐力が大きくなり、仕口部のせん断強度の改善が可能なが得られた。

本報告は、伝統的仕口での側面のせん断に関する基本的な力学性状を把握し、面と面でのせん断接合の基礎的資料を得るために、鋼材を用いた押し抜きせん断試験により側面の傾斜角、拘束力等がせん断剛性やせん断強度に与える影響を検討・考察したものである。

2. 試験概要

梁-梁の仕口（大入れ蟻掛け仕口等）を模した嵌合接合部^{1),2)}について、せん断に関する力学特性（剛性、降伏耐力、弾塑性性状）を確認するため基礎試験（押し抜きせん断試験）である。

2. 1 試験体

試験体は、凸形の鞍形金物と凹形の梁で構成される大入れ蟻掛け仕口の単純模型で、総計 6 体とした。試験体一覧を表 1 に、試験概要と接合金物の形状を図 1 に示す。実験変数は嵌合部の傾斜角（ $2.5/80, 5/80$ ）、拘束度（=凹形の最小板厚/凸形の最小板厚： $0.5, 1.0$ ）、支持条件（2 点支持、3 点支持）とした。ここに、拘束度 0.5 は凹形の梁中央に 8ϕ の貫通孔を設けることとした。嵌合部の傾斜面は機械仕上げとしたが、その平均粗さ R_a, R_y, R_z は各々 $0.843, 10.9, 7.03$ であった。供試材には平鋼（SCM435）を用いた。使用鋼材の機械的性質を表 2 に示す。

* 建設工学科建築学専攻

表 1 試験体一覧

No.	形状・寸法				支持条件
	嵌合部傾斜角 θ	凹部最小板厚 t_w mm	凸部総板厚 t_m mm	嵌合部断面成 h mm	
A-1	2.5/80	16	15	80	2点支持
A-2	5.0/80	16	15	80	2点支持
C-1	2.5/80	16	15	80	3点支持
C-2	5.0/80	16	15	80	3点支持
C-3	2.5/80	8	15	80	3点支持
C-4	5.0/80	8	15	80	3点支持

表 2 鋼材の機械的性質

鋼材	降伏応力度 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	ヤング係数 N/mm ²
SCM435	255	448	44.6	213800

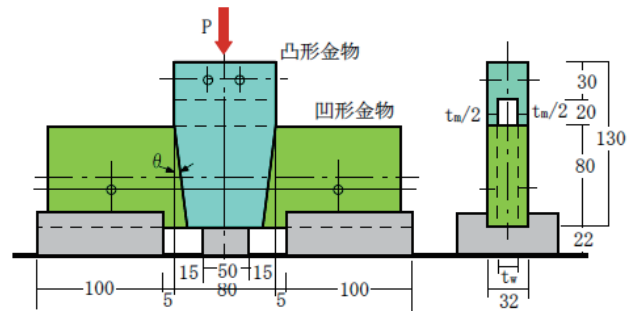


図 1 接合金物の形状寸法

2. 2 試験方法

試験体は2点或いは3点支持で、支点では支持する凹形の梁の回転を治具で拘束して、アムスラー型万能試験機を用いて中央の凸形の鞍形金物に集中加力した（写真1）。なお、試験体 C1～C4 では梁と支持治具、治具と載荷床との間には二硫化モリブデンを塗布し摩擦抵抗を極力少なくした。また、いずれも本実験後は逆加力で嵌合部を緩めた。

測定方法を図2に掲げる。集中荷重P、梁-梁仕口の相対変位（仕口の両側で4箇所、 π 形変位計）を計測し、ずれ変位 Δ はそれらの平均値とした。

歪測定については、試験体中央部（凹形の梁の縁端、鞍形金物の側面）では拘束力を計測するため1軸ゲージを、傾斜面では側面のせん断歪を測定するため3軸ゲージを貼付した。

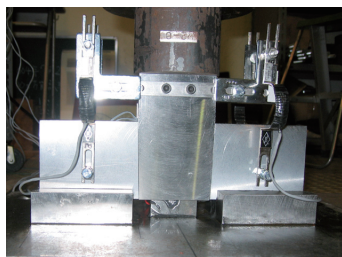


写真1 加力状況と支持条件
（上：2点支持，下：3点支持）

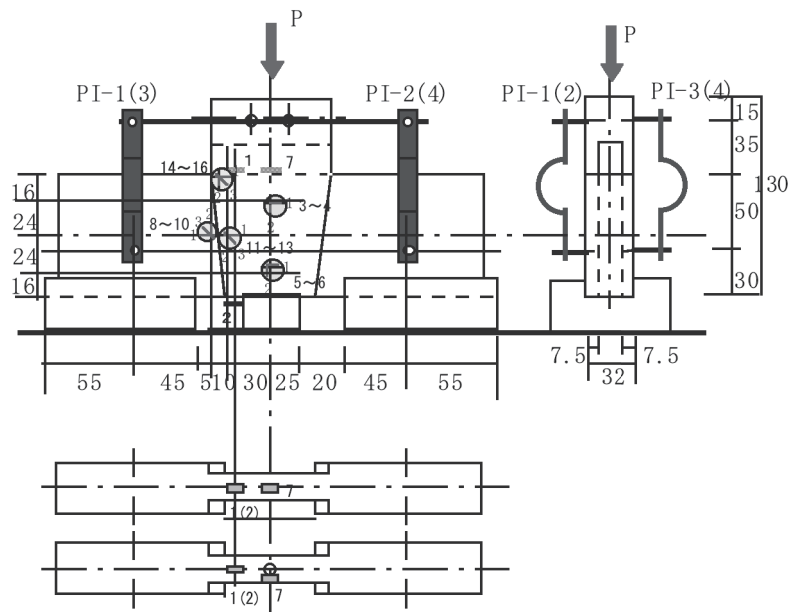


図 2 測定方法

3. 試験結果とその考察

荷重 P -変形 Δ 関係, 荷重-平均歪 ε_w , ε_m 関係の一例を図 3 に示す。平均歪は凹形梁縁端の平均歪 ε_w , 凸形中央部での平均歪 ε_m で, 各部の降伏を検討した。また, 剛性, 降伏荷重, すべり荷重, 最大荷重, 緩み荷重を表 3 に掲げる。ここに, 初期剛性 K_1 は荷重-変形関係において 20~80kN の荷重範囲を最小自乗法にて直線近似して求めた。すべり荷重はスティック-スリップ現象発生荷重レベル, 降伏荷重は包絡線における折れ曲がり点の荷重レベル, 二次剛性は折れ曲がり点後の接線剛性である。

3. 1 荷重変形関係と破壊状況

荷重とずれ変形は線形関係にあり, 拘束度 1.0 ではすべり発生とともに鋭い音を伴ったスティック-スリップ現象が生じ, 剛性低下が見られた。傾斜角が小さい場合はその後の耐力上昇は大きい傾向がある。拘束度 0.5 では折曲り点が見れて剛性低下し, 同時にあるいはその後すべりが生じ, スティック-スリップ現象が発生した。ただし, 拘束度 0.5, 傾斜角 2.5/80 では高荷重でスティック-スリップ現象が消滅した。

最大荷重は, すべりが断続的に生じて凹部の軸部の降伏が著しくなって生じた。終了後には, 傾斜角 5/80 の C-4 試験体では孔欠損部で絞りが観察された。また, 斜面の摩擦面には, 接触面での凝着摩耗による金属光沢, 掘り起し, 摩擦面の介在物による線条痕等が見られ, 特に, スティック-スリップ現象が消滅した拘束度 0.5, 傾斜角 2.5/80 では掘り起しが全面に生じていた。

3. 2 初期剛性と二次剛性

いずれの支持条件でも傾斜角 θ の増加に従って増大し, 初期剛性と傾斜角は線形関係になった。また, 初期剛性は凹部の最小断面幅にほとんど影響されない。これは凹部の軸耐力には孔欠損は大きく影響するが, 局所的であるため等価な軸剛性はあまり低減しないためである。一方, 折れ曲がり点後やすべり荷重後の包絡線の接線剛性 (二次剛性) は, 傾斜角の小さい場合には初期剛性の半分程度で, 傾斜角が大きい場合には 2 割程度となり, 傾斜角に大きく影響される。

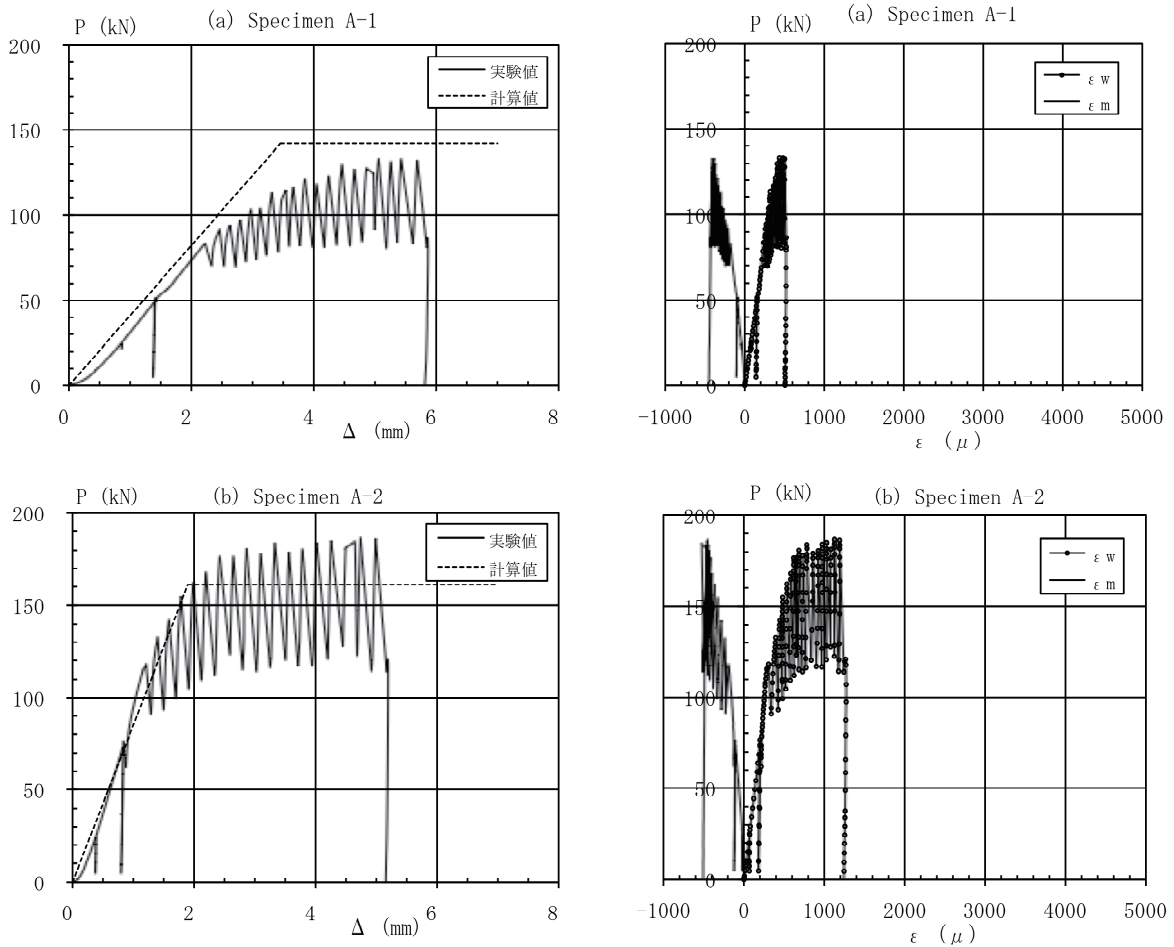
3. 3 降伏荷重, 最大荷重と緩み荷重

拘束度 1.0 では傾斜角が大きいと降伏荷重, 最大荷重共大きくなるが, 拘束度 0.5 では逆の傾向が認められた。また, 降伏荷重が大きければ最大荷重も大きいという傾向もある。

さらに, 嵌合部の緩み荷重はいずれも最大荷重より小さくなった。

表 3 実験結果

No.	初期剛性 K_1 (kN/mm)	二次剛性 K_2 (kN/mm)	降伏荷重 P_y (kN)	すべり荷重 P_s (kN)	最大荷重 P_m (kN)	緩み荷重 P_1 (kN)
A-1	42.5	22.8	—	85.8	138.1	113.4
A-2	104.6	45.9	—	117.6	188.0	112.8
C-1	53.8	27.4	—	107.4	158.6	114.1
C-2	109.2	22.1	—	142.3	167.9	90.1
C-3	60.7	36.3	136.1	136.1	191.5	127.7
C-4	101.5	22.6	105.9	124.2	153.3	81.3


 図3 荷重 P -変形 Δ , 荷重 P -平均歪 ε_w , ε_m 関係 (A-1, A-2)

3. 4 剛性評価

図4に示す嵌合部の半分を考える。材軸線上の aa 断面が傾斜面上の o 点にて軸方向力 N_x を受けて、凸部は $a'a'$ へ移動、即ち、 o 点は o_m 点へずれることになる。

算定に当り、凹部の両端厚肉部は剛体で、傾斜面で応力は一様分布し、傾斜角 θ は微小と仮定する。凹部の伸び δ_w 、凸部の縮み δ_m は、次式で求められる。

$$\delta_w = N_x / EA_w \cdot b / 2 \quad (1-a)$$

$$\delta_m = N_x / EA_m \cdot b / 2 \quad (1-b)$$

ここに、 b , EA_w , EA_m は嵌合部の平均幅、各々凹部、凸部の軸剛性である。

従って、材軸方向の全ずれ変位 δ はこれらの和となるから、次式となる。

$$\delta = N_x / E \cdot b / 2 \cdot (A_w + A_m) / (A_w A_m) \quad (2)$$

一方、斜面の摩擦係数を μ とすれば、直交方向の力の釣合いより外力 P は次式で得られる³⁾。

$$P \doteq 2 N_x (\mu + \theta) \quad (3)$$

よって、ずれ変位 δ と直交方向のずれ変位 Δ の適合条件を考慮すれば、ずれ剛性 K_1 は、

$$K_1 = P / \Delta = P \theta / \delta \doteq 4E / b \cdot (A_w) / (A_w / A_m + 1) \cdot \mu \cdot \theta \quad (4)$$

となり、剛性は凹部断面積、傾斜角、摩擦係数に比例し、嵌合部の平均幅、拘束度 (A_w/A_m) に反比例することがわかる。

次に、貫通孔を有する場合には、(4)式を凹部の等価断面積 A_{we} で検討すればよい。この変断面部材の断面積は、貫通孔を辺長 d の正方形孔で近似し、部材の伸びを等しいとして得られる。

$$A_{we}=A_w/(1+d^2/(b \cdot (t_w-d))) \quad (5)$$

ここに、 A_w 、 t_w は各々凹部の無孔部分の軸断面積、板厚である。

次に、孔部降伏後のずれ剛性について検討する。鋼材の応力歪関係を歪硬化係数 e_{st} のバイリニア形にモデル化すると、孔部降伏後の等価な均等断面部材の断面積は次式となる。

$$A_{we}=A_w/(1+((1-e_{st}) t_w + d^2 \cdot e_{st})/(b \cdot (t_w-d) \cdot e_{st})) \quad (6)$$

表 4 に計算結果を掲げる。ずれ剛性は凝着による摩擦係数 μ を 0.2⁴⁾ として算定した。また、孔部降伏後のずれ剛性の計算値 eK_2 は歪硬化係数 0.01 として算定した。等価断面積は軸断面積の 90.4～90.6% で貫通孔による低減は約 10% 程度となり、当該試験体では貫通孔によって拘束度に大きな違いはない。また、傾斜角による平均幅の変動も小さいので、ずれ剛性は傾斜角とほぼ線形関係にあり、ずれ剛性の計算値 eK_1 は実験値 eK_1 を安全側で評価している。さらに、(4)式を用いて実験値に対応する見掛けの摩擦係数を導いた。その値は 0.206～0.342 の範囲にあり、2 点支持の方が小さいという傾向があるが、摩擦係数 0.2 はほぼ最小値で、妥当な値と言える。

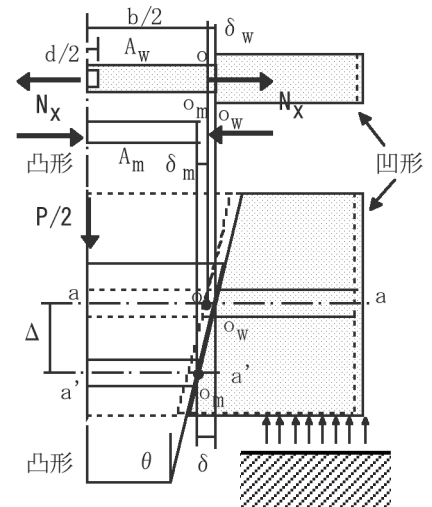


図 4 嵌合部の力と変位

表 4 剛性の計算値

No.	凸部断面積 A_m (mm ²)	凹部断面積 A_w (mm ²)	凹部等価断面積 A_{we} (mm ²)	拘束度 A_{we}/A_m	ずれ剛性 eK_1 (kN/mm)	eK_1/eK_1	見掛けの摩擦係数 μ_e	ずれ剛性 eK_2 (kN/mm)	eK_2/eK_2
A-1	1200	1280	1280	1.067	41.1	1.03	0.207	0.84	—
A-2	1200	1280	1280	1.067	85.0	1.23	0.246	1.74	—
C-1	1200	1280	1280	1.067	41.1	1.31	0.262	0.84	—
C-2	1200	1280	1280	1.067	85.0	1.28	0.257	1.74	—
C-3	1200	1280	1160	0.967	39.2	1.55	0.310	3.76	9.65
C-4	1200	1280	1157	0.964	80.8	1.26	0.251	7.54	3.00

3. 5 降伏耐力評価

図 5 の嵌合部の力学モデルを考える。傾斜角 θ は微小で、各応力は一様分布すると仮定する。傾斜面の任意点での x 、 y 方向の応力を X 、 Y とすれば

$$X \doteq \sigma_n - \tau_n \theta \quad (7-a)$$

$$Y \doteq \tau_n + \sigma_n \theta \quad (7-b)$$

ここに、 σ_n 、 τ_n は反力、摩擦力に相当し、 $\tau_n = \mu \sigma_n$ の関係にある。

y 方向の力の釣合いと、斜面の原理より、嵌め込む場合の嵌合耐力 P^+ は次式で近似できる。

$$P^+ \doteq 2htX(\mu + \theta) \quad (8)$$

ここに、 t は傾斜面の接触面の幅 t_m あるいは孔欠損部の板厚 ($=t_w-d$) で評価する。

同様に、嵌合部を緩める場合の緩み耐力 P^- は次式で得られる。

$$P^- \doteq 2htX(\mu - \theta) \quad (9)$$

上記の耐力式において、降伏は凸部の圧縮、凹部軸部あるいは孔部の引張のいずれかで生じ、最大は凹部軸部あるいは孔部の引張破断で生じる。

耐力の計算値を表5に掲げる。ここに、傾斜面の摩擦係数は 0.2 とした。緩み耐力は(8)式において X が不明なので、最大荷重に $(\mu - \theta)/(\mu + \theta)$ を乗じることで算定した。また、比率 P_y/cP_y^+ においては拘束度 1.0 (無孔試験体) では P_y は P_m で評価した。

C-3 の試験体を除けば降伏荷重を良く近似している。また、最大荷重については孔明き試験体では安全側に評価している。一方、緩み荷重についても計算値は実験値を近似している。なお、C-3 試験体については計算値に比べ実験値は相当大きくなっているが、掘り起しによる損傷が多くなって摩擦係数が 0.2 よりも大きくなっていたためと推察される。

以上の剛性と耐力の計算値を前掲の図3に合わせて示しておく。

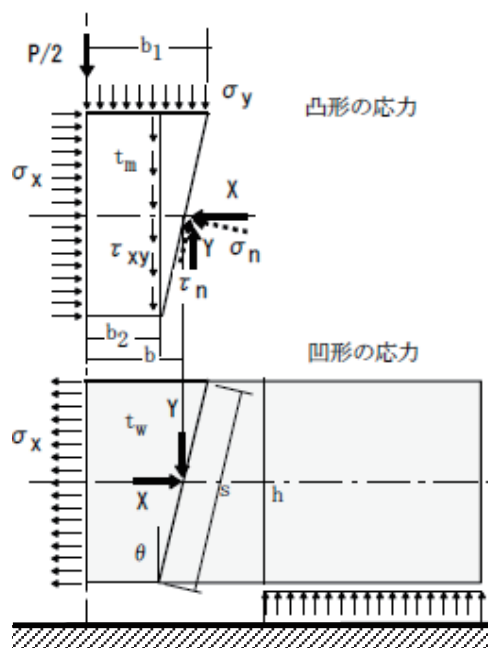


図5 嵌合部の力学モデル

表5 耐力の計算値

No.	凸部断面積 A_m (mm ²)	凹部断面積 A_w (mm ²)	凹部正味断面積 A_{wn} (mm ²)	拘束度 A_{wn}/A_m	降伏耐力 cP_y^+ (kN)	最大耐力 cP_u^+ (kN)	緩み耐力 cP_i^- (kN)	P_y/cP_y^+	P_m/cP_u^+	P_i/cP_i^-
A-1	1200	1280	1280	1.067	142.0	248.4	100.8	0.973	0.556	1.125
A-2	1200	1280	1280	1.067	161.1	282.0	98.5	1.166	0.667	1.146
C-1	1200	1280	1280	1.067	142.0	248.4	115.7	1.117	0.638	0.986
C-2	1200	1280	1280	1.067	161.1	282.0	87.9	1.042	0.595	1.024
C-3	1200	1280	640	0.533	75.7	132.5	139.7	1.798	1.445	0.914
C-4	1200	1280	640	0.533	85.9	150.4	80.3	1.233	1.019	1.013

4. まとめ

大入れ蟻掛け仕口等を模した嵌合接合部の押し抜きせん断試験により傾斜角、拘束力等が力学特性に与える影響について基礎的な検討・考察を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 荷重とずれ変形は線形で、すべり発生とともに鋭い音を伴ったスティックスリップ現象が生じた。最大荷重はすべりが断続的に生じて凹部の軸部の降伏で生じた。
- (2) 初期剛性と傾斜角は線形関係にあり、初期剛性は凹部の最小断面幅（孔欠損）にほとんど影響されない。また、すべり荷重後の接線剛性（二次剛性）は傾斜角の影響を受ける。

- (3) 降伏荷重，最大荷重共拘束度 1.0 では傾斜角とともに大きくなるが，拘束度 0.5 では逆の傾向が認められた。
- (4) ずれ剛性は(5)式で算定でき，ずれ剛性の計算値 ${}_cK_1$ は実験値 ${}_eK_1$ を安全側で評価する。
- (5) 見掛けの摩擦係数は 0.206～0.342 の範囲にあり，摩擦係数 0.2 はほぼ妥当な値である。
- (6) 降伏荷重を計算値は良く近似し，最大荷重についても孔明き試験体では安全側に評価する。
- (7) 最大荷重に $(\mu - \theta)/(\mu + \theta)$ を乗じて算定した緩み荷重の計算値で実験値を近似できる。

本実験では，拘束度が剛性と耐力で異なるということで問題を難しくした面がある。今後は，支圧とせん断を受ける場合の伝統的仕口の実験を通して，仕口側面のせん断に関する基本的な力学性状を把握する予定である。

【参考文献】

- 1) 矢崎光彦，坂田弘安，岩田衛，和田章：嵌合接合部を用いたシステムフレームの力学的性状に関する研究（その 1，その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.1167-1170，1991.9
- 2) 村上巧，中野達也，増田浩志，及川宏安：引張力を受ける接合金物を用いた嵌合接合部の力学性状，鋼構造年次論文報告集，第 15 巻，2007.11
- 3) 山本晃：ねじ締結の原理と設計，養賢堂，1995.3
- 4) 宇野暢芳，井上一朗，志村保美，脇山広三：硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 494 号，123-128，1997.4

(平成 21 年 3 月 31 日受理)