

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760424  
 研究課題名（和文） トライボロジー理論に基づく各種高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動の解明  
 研究課題名（英文） Study on slip behavior of high strength bolted connections based on tribology theory  
 研究代表者  
 橋本国太郎（HASHIMOTO KUNITARO）  
 京都大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：40467452

研究成果の概要（和文）：本研究では、鋼構造物の接合によく用いられている高力ボルト摩擦接合に着目し、その接合面の表面処理方法を変化させて、それらのすべり係数を定量的に評価するために、トライボロジー理論の考えを取り入れて、表面状態の計測およびすべり実験を行った。実験は 2 種類行い、より詳細に表面性状を計測する小型すべり実験、および実際のボルト接合を模擬したすべり実験を行った。

得られた研究成果として、表面処理がショットブラストのみの場合、既往の結果と同様に、算術平均粗さパラメータ Ra で評価できること、表面に異種材料が塗布された場合、すべり係数が各材料の材料特性に依存することがわかった。

研究成果の概要（英文）：This research focused on high strength bolted connections used steel structures frequently, and carried out slip tests and measurements of condition of contact surface in order to evaluate the slip coefficients of these connections changed treatment of surface condition based on tribology theory. Therefore we executed the two kinds of slip test which used small size specimens to measure the surface condition in detail and used real bolted connection specimens to consider the real slip behavior.

As the results of these tests, in the case of shot blast treatment, the slip coefficient can accurately estimate by the arithmetic average roughness parameter; Ra in the same result of past researches. And in the case of the surface treatment by other material, slip coefficients depend on the each material properties.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,555,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：高力ボルト摩擦接合，トライボロジー，すべり

## 1. 研究開始当初の背景

機械分野では、摩擦や摩耗などの現象を扱う学問として、トライボロジー分野があり、そこでは、特に機械の潤滑などを中心とした摩擦の低減手法の開発などを取り扱っている。その基本的な事項の中で、乾燥摩擦の原理としては、現在では以下の考えが一般的に知られている。

すなわち、文献 1)、2) によると、式 (1) に示すように、摩擦力  $F$  は、凝着による摩擦力  $F_a$ 、掘り起こしによる摩擦力  $F_p$  および弾性ヒステリシスによる摩擦力  $F_s$  の和で表される。また、式 (2) より、凝着による摩擦係数  $\mu_a$  は、材料の最大せん断強さ  $s_0$  と塑性流動圧力  $p_0$ （硬さ試験によりほぼ推定可能）によって決定でき、さらに、式 (3) より、掘

り起こしによる摩擦係数  $\mu_p$  は、掘り起こす側（硬い方の板）の表面突起形状によって決定できる。弾性ヒステリシスの影響は金属材料では無視できるため、結局、材料の機械的特性と表面形状がわかれば、おおよその摩擦係数の予測は可能であると考えられている。

$$F = F_a + F_p + F_e \doteq (\mu_a + \mu_p) \cdot W \quad (1)$$

$$\mu_a = s_0/p_0 \quad (2)$$

$$\mu_p = 2/\pi \cdot \cot \theta \quad (3)$$

ここで、 $W$ ：鉛直力、 $\theta$ ：表面突起形状を円錐と仮定したときの頂角の1/2の角度である。

上述の理論的なアプローチから、建築分野では、母板に比べ高強度の鋼板に対し、突起形状を機械加工した連結板を用いた高力ボルト摩擦接合継手により、すべり係数が1.0程度確保できる高すべり係数の摩擦接合継手の開発を実現している<sup>3)</sup>。しかし、機械加工費用が高価であるため、現実的には使用しづらい現状がある。

現在、上述の連結板の突起加工のほかにも、無機ジンクリッチペイント<sup>4)</sup>やアルミ溶射<sup>5)</sup>を接合面に塗布することで、安定的で高いすべり係数が得られる検討がなされており、その実用化が既になされている。このような接合面処理によるすべり係数の向上策として、他にも接合面を赤錆<sup>6)</sup>状態とする仕様も実績がある。特に、土木分野では、新設橋梁の高力ボルト摩擦接合継手部の接合面には無機ジンクリッチペイントを塗布することが規定されている。しかしながら、これらの手法は実用化されているものの、膜厚の規定などは、個々にすべり実験を行うなどの経験的な結果から決められており、その理論的なアプローチからの検討はほとんどなされていない。また、無機ジンクリッチペイントの場合、金属材料ではない材料の摩擦挙動ということもあり、その力学的挙動に関して未解明な部分が多い。これは、赤錆やアルミ溶射を施した接合面処理の場合でも同様で、文献6)においても、赤錆面とした高力ボルト摩擦接合継手の表面粗さや錆厚を測定し、詳細にそのすべり係数との関係を調査しているが、ここでは、すべり係数が向上した理由を説明できていない。アルミ溶射に関しても、明確な理由が得られていないのが現状であるが、元々の金属材料としてアルミニウムは摩擦係数が高い材料として知られている。一方で、亜鉛も摩擦係数が高い材料と知られているが、亜鉛メッキされた高力ボルト摩擦接合継手は、ブラストや無機ジンクリッチペイントを施した接合面に比べすべり係数が低いことが知られている。

1) 橋本巨：基礎から学ぶトライボロジー、

森北出版、2006.6.

2) 山本雄二，兼田楨宏共著：トライボロジー，理工学社，1998.2.

3) 宇野ら：高摩擦係数高力ボルト接合部の耐力に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第502号，pp.127-133，1997.12.

4) 森ら：接合面処理方法と品質を考慮した高力ボルト摩擦接合継手すべり係数の提案，土木学会論文集A，Vol.64，No.1，pp.48-59，2008.1.

5) 佐藤ら：建築構造用高強度鋼材H-SA700Aを用いた柱梁材を弾性に留める乾式接合法の開発，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.646，pp.2355-2363，2009.12.

6) 森ら：赤錆面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，土木学会，構造工学論文集，Vol.53A，pp1305-1312，2007.3.

## 2. 研究の目的

上述の研究背景より、本研究では、トライボロジー分野で示されている固体間に発生する摩擦メカニズムの理論的なアプローチを取り入れ、また、その考えをさらに拡張することで、現在実用化されている接合面処理を施した高力ボルト摩擦接合のすべり挙動を解明することが大きな目的である。現在、土木・建築分野で実用化されている接合面処理の中でも代表的な処理方法として、①ブラスト処理、②赤錆、③無機ジンクリッチペイント、④アルミ溶射も本研究では取り扱うこととし、本研究では、これら4種類の接合面処理を施した高力ボルト摩擦接合継手に対し、そのすべり挙動を解明する。

## 3. 研究の方法

本研究では、大きく分けて2種類のすべり試験を行った。一つは、図-1に示す小型試験片を用いてすべり試験を行った。もう一つは図-2に示すように、実際の高力ボルト摩擦接合継手の試験体を製作しすべり試験を行った。

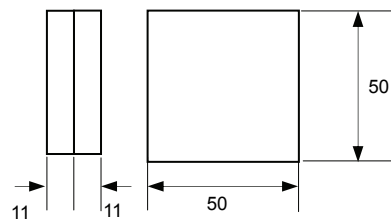
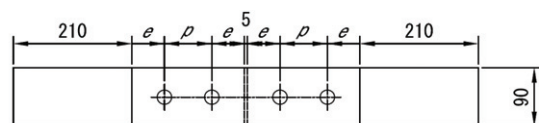
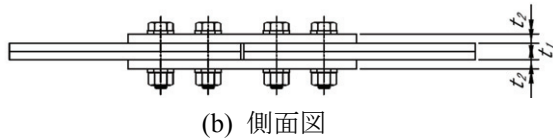


図-1 小型試験片



(a) 平面図



(b) 側面図  
図-2 高力ボルト摩擦接合継手試験体

実験供試体は、表-1 に示すように、4 種類（ショットブラスト、赤錆、無機ジンクリッチペイント、アルミ溶射）の表面処理を施したものを用意した。なお、小型試験片およびボルト継手の試験体は同じ表面処理された鋼板から切り出している。

小型試験片のすべり試験は、鉛直方向および水平方向 2 本のアクチュエーターと反力フレームを用いて、鉛直力 50kN を作用させながら、すべりが発生するまで水平方向に変位

表-1 実験供試体の種類

試験体名	試験体の種類	表面処理	鉛直力 (kN)
Bs	小型試験片	ショットブラスト	50
Rs		赤錆	50
Ps		無機ジンクリッチペイント	50
As		アルミ溶射	50
Br	高力ボルト摩擦接合試験体	ショットブラスト	226
Rr		赤錆	226
Pr		無機ジンクリッチペイント	226
Ar		アルミ溶射	226

制御で載荷した。高力ボルト摩擦接合継手は、高力ボルトに M22 高力ボルトの標準軸力 226 kN を導入したのち、万能試験機ですべりが発生するまで引張力を与えた。また、すべり試験を行う前に、それぞれの試験体で表面形状、表面粗さパラメータ、錆厚や膜厚および硬さなどの表面状態を測定した。なお、表-1 中には、鉛直力も示している。

#### 4. 研究成果

本研究の結果として、初めにショットブラスト試験体のすべり係数と表面粗さパラメータである算術平均粗さ Ra との関係を図-3 に示す。図-3 より、すべり係数と Ra は、強い相関関係が見られることから、表面処理をショットブラストとした場合は、Ra で評価することが妥当であると考えられる。

次に、表面処理を赤錆とした試験体のすべり係数と錆厚との関係、すべり係数と鉛直力との関係を図-4 に示す。図-4 よりすべり係数は錆厚との関連性もあるが、鉛直力との関係のほうが大きいことがわかる。これは、鉛直力が大きいと表面に付着している赤錆の集合体を圧縮し、高密度化させると考えられ、その結果すべり係数が大きくなると説明できる。したがって、赤錆集合体が圧縮力を受けた状態におけるせん断強度がすべり係数

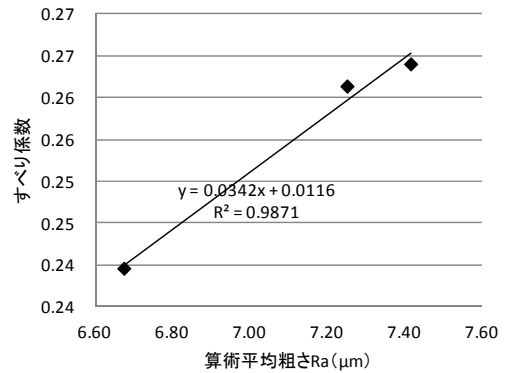


図-3 すべり係数と算術平均粗さ Ra の関係 (ショットブラスト試験体)

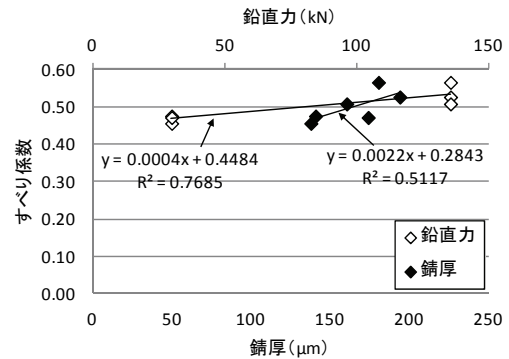


図-4 赤錆試験体の結果

に大きく依存すると考えられる。

さらに、図-5 には、表面処理が無機ジンクリッチペイントのすべり係数と膜厚や鉛直力との関係を示している。図-5 より、すべり係数とペイント膜厚、鉛直力には関連性がないことがわかる。ただし、すべり係数は 0.6 以上と大きな値が安定的に得られていることがわかる。これは、すべり後の接合面の状態を観察した結果、すべり時にはペイント自体が凝集破壊していることから、すべり係数が無機ジンクリッチペイントの材料強度（せん断強度）に依存しているためと考えられる。

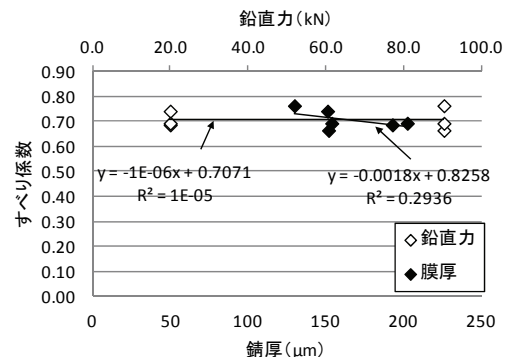


図-5 無機ジンクリッチペイント試験体の結果

最後に、図-6 にアルミ溶射試験体の結果とし

て、すべり係数と膜厚および鉛直力との関係を示している。図-6より、アルミ溶射においては、大きな鉛直力が作用すると0.9程度の大きなすべり係数が得られることがわかる。また、すべり係数と鉛直力との間に強い相関がみられるものの、膜厚にはあまり相関が見られないことがわかる。これは、アルミ溶射では、鉛直力が大きいとアルミ溶射そのものが塑性変形し、接合面内で溶射同士が一体化し、せん断強度が増加したものと考えられる。したがって、溶射された材料の支圧強度やせん断強度などの材料特性によって、すべり係数が評価できる可能性があることがわかった。

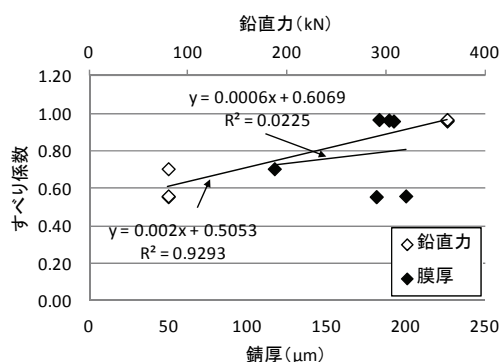


図-6 アルミ溶射試験体の結果

以上の結果より、表面処理方法によってすべり挙動に影響する因子が違っていたことがわかった。ショットブラストなどの鋼材そのものの表面を機械的に処理する場合は、既往の研究成果のように表面粗さパラメータの中でも算術平均粗さ Ra によって高精度に評価できることがわかった。しかしながら、鋼材の表面に異種材料を塗布もしくは溶射などした場合、それぞれの材料の材料特性や鉛直力によって、すべり係数が変化することがわかった。したがって、表面処理が溶射や赤錆の場合、すべり係数自体が鉛直力に依存するため、式(1)による評価が難しいことがわかる。しかし、テーバーとパウデンによって提唱されている凝着部成長理論では、すべり係数を式(4)<sup>1)</sup>で評価できると考えられている。

$$\mu = k/\sqrt{\alpha} (1-k^2) \quad (4)$$

ここで、 $k=s/s_0$ 、 $s$ :せん断強さ、 $\alpha$ :修正係数(3~25程度)

この式(4)で $k=1$ のとき、接触面間ですべり係数は無限大になる。しかし、材料には破壊強度が存在することから、接触面間ですべりが生じなくても材料が破壊することですべりが発生する。表面が無機ジンクリッチペイントやアルミ溶射では、鉛直力の大きさによって、接触面のすべりもしくは材料の破壊が生じ、すべり係数が変化すると考えら

れる。無機ジンクリッチペイントは、本研究での範囲内の鉛直力では、ペイントの凝集破壊が生じたことから、すべり係数が一定値となったと考えられ、さらに小さい鉛直力では、接触面間ですべりが発生するものと考えられる。接触面が赤錆のときも、ほぼ同様の考えで、鉛直力が小さいときは、赤錆同士のすべり係数もしくは赤錆と鋼材との付着強度などによってすべり係数が決まるのに対し、鉛直力が大きい場合、赤錆が接触面に密に分布するため、すべり係数はその赤錆集合体のせん断強度に依存すると考えられる。

今後は、各種接合面に塗布されている各材料の強度などの影響を考慮し、すべり係数を予測するための定式化を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本国太郎 (HASHIMOTO KUNITARO)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40467452

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし