

無機ジンクを塗布した接触面の摩擦係数計測と 高力ボルト摩擦接合継手の解析精度検証

法政大学大学院 学生会員 ○豊原 匡織 法政大学 正会員 内田 大介
東日本旅客鉄道株式会社 正会員 網谷 岳夫

1. はじめに

接触面に無機ジンクリッジペイント（以下、無機ジンク）を塗布した高力ボルト摩擦接合継手の解析では、従来は母板－添接板間の摩擦係数を一定とすることが一般的であったが、摩擦係数を接触圧と関連付けることで、摩擦係数が一定の場合と比較して、解析精度が向上することがわかっている¹⁾。この接触圧と摩擦係数の関係式（以下、既存式）は、文献2の接触面にアルミ溶射を施した場合の関係式を基に、土木学会の標準試験体（以下、標準試験体）を用いた無機ジンクでのすべり試験結果を用いて補正し、構築したものである。しかし、表面形状や気孔率がアルミ溶射と無機ジンクでは異なるため、標準試験体と板厚が異なる場合には、解析精度がやや低下する結果となった³⁾。

本稿では、接触面に無機ジンクを塗布した高力ボルト摩擦接合継手の解析精度向上を目的とする。その為に、摩擦係数計測方法を検討するとともに、無機ジンクの種類や塗布厚をパラメータとした実験を行い、新たな摩擦係数と接触圧の関係式（以下、提案式）を構築した。さらにすべり試験の結果と提案式を用いた解析結果を比較し、計測方法と提案式の妥当性を検証した。

2. 摩擦係数計測実験

2.1 実験方法

実験には高速二軸試験機を用い、鉛直力を与えながら試験片を水平方向にすべらせた際の最大静止摩擦力を計測する。試験体は六角柱に加工した鋼材（以下、固定材）と鋼板を試験片とする。試験体の形状・寸法を図1に示す。高い接触圧を与える場合に鋼材が降伏することが考えられたため、使用鋼材はHT780とし、固定材には接触面外周部の応力集中を緩和するために、半径1mmのRで面取りを行っている。各試験片の接触面はブラスト処理後に無機ジンクを塗布している。無機ジンクは、鉄道鋼構造物に使用されることの多いA、B、C社の計3社の塗料とし、接触面の塗膜厚は $75 \pm 15 \mu\text{m}$ とした。さらに、B社については、鉄道鋼構造物における塗膜厚許容値の最小値60 μm 未満の試験片を使用し、塗膜厚の違いによる摩擦係数の差異を確認した。実験手順を図2に示す。固定材の側面下半分を固定し、鉛直方向に接触面を鋼板と接触させ、目標の接触圧となるように、鉛直荷重を与えたのち、鋼板に水平方向変位(0.01mm/s)を与えることで着目部にすべりを生じさせた。実験は最大荷重かつ水平方向変位が急激に増大する時点での荷重を最大静止摩擦力として判断した。接触圧は、過去の解析での値を参考にして、50,100,150,200,300,400,500(N/mm²)とし、接触圧毎に2体ずつ実験を実施した。なお、別途実験を模擬したFE解析の結果では、固定材の接触面外周部付近の接触圧が高くなり、中央に向かって低下する傾向が見られ、この実験における接触圧は、鉛直荷重の載荷面積内に生じた接触圧の平均値となる。

実験は最大荷重かつ水平方向変位が急激に増大する時点での荷重を最大静止摩擦力として判断した。接触圧は、過去の解析での値を参考にして、50,100,150,200,300,400,500(N/mm²)とし、接触圧毎に2体ずつ実験を実施した。なお、別途実験を模擬したFE解析の結果では、固定材の接触面外周部付近の接触圧が高くなり、中央に向かって低下する傾向が見られ、この実験における接触圧は、鉛直荷重の載荷面積内に生じた接触圧の平均値となる。

2.2 実験結果

摩擦係数と接触圧の関係と各提案式（2次近似）を図3に示す。2体ずつ行った同一条件の試験では小さい接触圧ではややばらつきが生じたが、大きい接触圧ではばらつきが生じなかった。無機ジンクの種類が異なると、摩擦係数と接触圧の関係も異なり、A社の結果が既存式に最も近くなった。ただし、既存式はB社の塗料を基に構築されている。

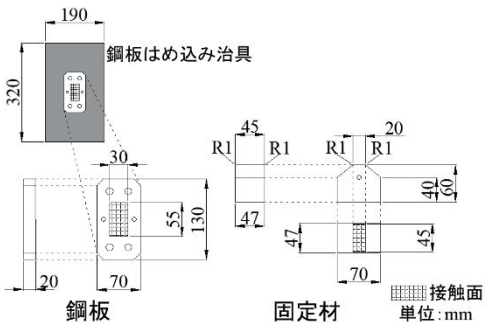


図1 摩擦係数計測試験体 形状寸法図

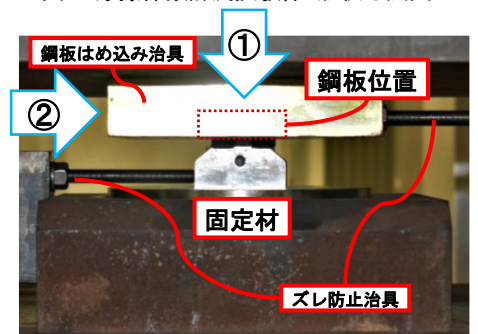


図2 試験体設置状況

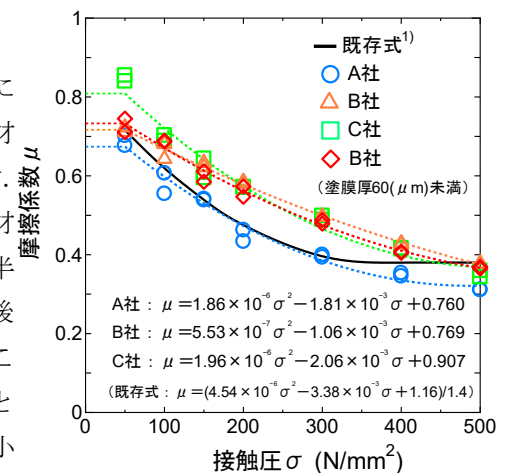


図3 摩擦係数と接触圧の関係

キーワード 高力ボルト摩擦接合継手, 摩擦係数, 接触圧, 無機ジンクリッジペイント, すべり試験

連絡先 〒184-8584 東京都小金井市梶野町3丁目7番地2号 法政大学鋼構造研究室 TEL042-387-6287

また、B社で比較した塗膜の厚薄による傾向の違いは、塗料メーカーの違いと比較して小さかった。

3. すべり試験⁴⁾

試験体の形状寸法を図4に示す。鋼材にSM570を使用した標準試験体で、ボルト種別はF10TM22とした。接合面には無機ジンクを塗膜厚 $75\pm 15\mu\text{m}$ で塗布し各塗料で3体の計9体用意した。試験体には、ボルト内部にひずみゲージを埋め込んだボルトを使用し、組立ての際にはトルクレンチを用いて設計軸力の15%増しとなるように締め付けた。すべり試験は、組立てから25日後に実施した。試験は2000kNの万能試験機で実施し、載荷速度は2kNとした。

塗料メーカーごとに整理したすべり試験結果を図5に示す。すべり係数は、試験直前の軸力と、荷重が低下した直前の荷重または母板と添接板の相対変位0.1mm時の荷重を用いて算出した。図5より、無機ジンクの種類がすべり係数の値に影響を及ぼすことを確認した。

4. FE解析による提案式の精度検証

解析にはAbaqus2021を用い、幾何学的非線形と材料非線形を考慮したFE解析を実施した。解析対象はすべり試験を実施した標準試験体(図4)と、文献3で実施したボルトピッチの異なる2種類の厚板試験体(図6)である。解析手順は、各ボルトの試験直前軸力を導入し、その後引張荷重を母板に強制変位として与えた。摩擦係数は各試験体のジンクの種類ごとに提案式を適用し、B社については既定の塗膜厚で実験した際の式を使用する。ただし、各提案式では、接触圧 50N/mm^2 以下、 500N/mm^2 以上の接触圧を計測していない為、便宜上一定の値とした。また比較のため、既存式でも解析を実施した。なお、文献3の試験体はB社の無機ジンクが塗布されている。

図7に標準試験体について解析値と試験値を比較した結果を示す。提案式と、既存式の結果を比較すると、A社ではやや低下したものの、B、C社では精度が向上し、全ての試験体ですべり係数が誤差10%以内に分布していること確認した。図8に厚板試験体の解析値と試験値を比較した結果を示す。既存式と提案式での変化が小さく、解析精度はあまり向上していない。ここで、B社は、図7.8の解析結果より、すべり係数が実験値より解析値のすべり係数が高い傾向を示している。理由として提案式における接触圧は、平均の接触圧であることが考えられ、さらに解析精度を向上させるためには、異なる構造パラメータの継手試験体でも再現解析を実施して傾向を把握した上で、提案式を補正することが考えられる。

5. まとめ

摩擦係数計測の結果から、新たに無機ジンクの種類毎に摩擦係数と接触圧の新たな関係式を構築し、標準試験体や厚板試験体のすべり試験結果の再現解析を実施した。その結果、標準試験体では解析精度が向上したが、厚板試験体ではほぼ変化がなかった。より解析精度を向上させるためには、他種類の継手試験体でも解析を実施し、式を補正する必要があると考える。

参考文献 1) 森ら：高力ボルト摩擦接触継手のすべり係数に対するボルト軸力の影響，土木学会論文集A1（構造・地震工学）第75巻，第1号，PP. 58-66，2019 2) 東ら：アルミ溶射接触面の力学特性に関する基礎的研究，鋼構造論文集，第21巻第83号，2014.9 3) 網谷ら：太径高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に対する添接板厚・ボルトピッチの影響，構造工学論文集，第68A巻，pp361-373，2022 4) 網谷ら：接合面を湿潤状態とした高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力，土木学会第78回年次学術講演会，2023

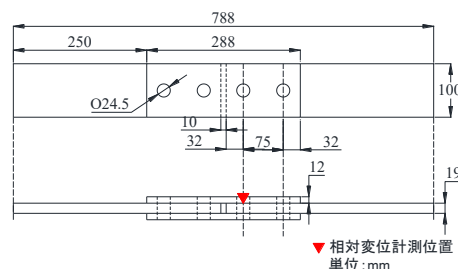


図4 継手試験体 形状寸法図

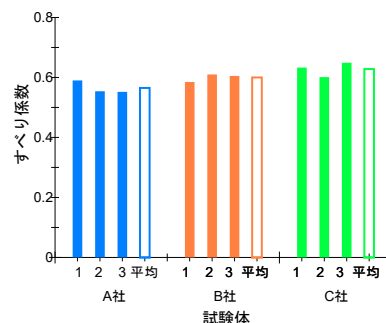


図5 試験体とすべり係数

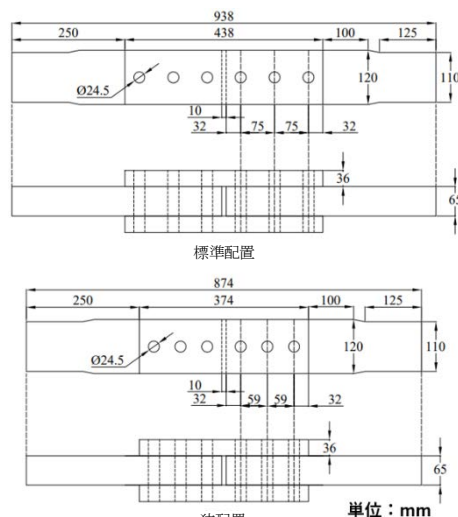


図6 厚板試験体 形状寸法図

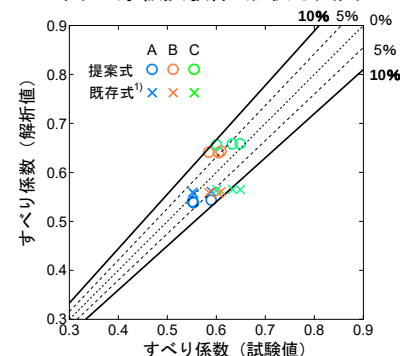


図7 試験値と解析結果(標準)

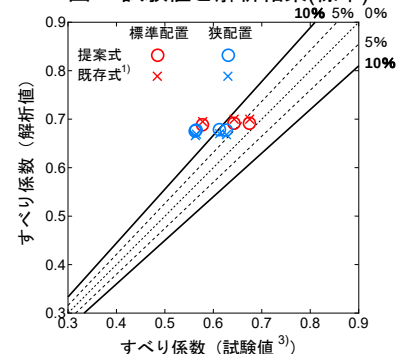


図8 試験値³⁾と解析結果(厚板)