第 I 部門　　各種高力ボルト摩擦接合面のすべり面観察によるすべり挙動の検討

神戸大学大学院工学研究科　学生員　　○金子　拓海
神戸大学都市安全研究センター　正会員　　橋本　国太郎

１．はじめに

高力ボルト摩擦接合は鋼構造物に広く用いられ，厳しい腐食環境下にある橋梁などのインフラ構造物においては，表面処理として防食性に優れた溶融亜鉛めっきや無機ジンクリッチペイントがよく適用される．しかし，これらは従来のブラスト面とは異なり，軟質な金属層や多孔質な塗膜層を有するため特異なすべり挙動を示す．トライボロジーの観点では，2 つの固体が接触する際，見かけの面積ではなく微小な真実接触面積で荷重が支えられ，突起の噛み合い（凹凸説）や原子間の結合（凝着説）の複合作用によって摩擦抵抗が発現する．これまで，膜厚や表面粗さとすべり係数の関係をマクロに評価した研究はあるものの [1]，軟質・多孔質な表面が高面圧下でどう変形・破壊されるかといったミクロな定量的評価は乏しい．

本研究では，3 種類の表面処理（グリットブラスト，溶融亜鉛めっき，無機ジンクリッチペイント）を施した継手を対象に，すべり試験およびデジタルマイクロスコープによる表面性状測定を実施した．ボルト軸力導入による静的変形と，すべりによる動的摩耗を分離して評価し，各表面処理固有のすべりメカニズムをトライボロジーの観点から定量的に解明することを目的とする．

２．実験方法

図-1 に示す二面摩擦の高力ボルト摩擦接合継手試験体（母板 9mm，連結板 6mm）を F10T-M12 ボルトで組み立てた．表面処理はシリーズ I（グリットブラスト），シリーズ II（溶融亜鉛めっき），シリーズ III（無機ジンクリッチペイント）の 3 種類とし，各 2 体を作製した．それぞれ 1 体を軸力導入のみ，もう 1 体をすべり耐力試験用とし，ボルトは標準軸力の 1 割増しで締め付けた．

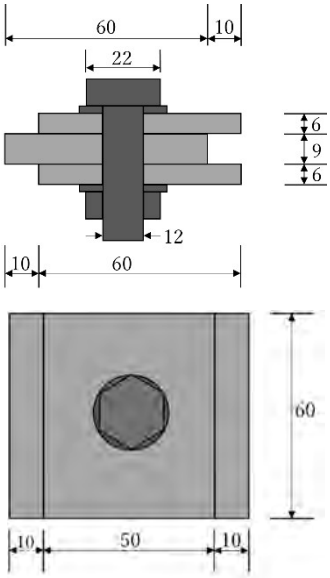


図-1　試験体概要　単位：mm

表面波形の計測にはデジタルマイクロスコープ（VHX-8000）および 3D 形状ソフトを使用した．ボルト孔を中心とした十字方向の 4 箇所において，孔縁から試験体端部方向へ幅 2mm，長さ 18mm の領域を撮影した．試験前後の同一箇所の波形データに対し，位置ずれや傾きの補正（デトレンド処理）を行い両者の差分を積分して増減断面積を算出した．

３．結果および考察

表-1 および図-2～4 に各シリーズの差分断面積を示す．図表において，正の値は体積減少（摩耗による削れや圧縮），負の値は体積増加（移着や塑性流動による堆積）を表す．すべり耐力試験の結果，各シリーズのすべり荷重およびすべり係数は，シリーズ I が 59.19kN（0.502），シリーズ II が 38.30kN（0.364），シリーズ III が 53.71kN（0.495）であった．ボルトの導入軸力である約 64.9kN から，24 時間後の試験前軸力約 59kN へのリラクセーションによる低下を考慮しても，シリーズ I および III は推奨値を上回る高い耐力を示した一方で，シリーズ II は低い値にとどまった．この耐力差をもたらす力学的メカニズムについて，図表から以下の違いが確認された．

シリーズI: 軸力導入による高い接触面圧が作用することで, 試験前には鋭利な山の頂部が平坦化する傾向がみられた．すべり試験ではボルト孔近傍の高面圧部で差分断面積が大きく減少し，凝着突起のせん断破壊と激しい摩耗が確認された．低面圧部では相手材からの移着による断面積の増加が見られた．シリーズ I の高いすべり係数(0.502)は，鋼材本来のせん断強度と強固な凝着効果により発現したといえる．

Takumi KANEKO，Kunitaroh HASHIMOTO
269t109t@cloud.kobe-u.jp

シリーズ II： 軟質な亜鉛層でありながら，垂直方向の圧縮に対しては高い剛性を示し，ボルト孔近傍を除いて軸力導入による形状変化は微小であった．すべり試験後はボルト孔近傍で軟質な亜鉛層がすべり方向に押し流されて堆積し，差分断面積が盛り上がるという他シリーズと逆の傾向を示した．この早期の塑性流動がせん断抵抗を阻害し，低いすべり係数(0.364)を招いたと考えられる．

シリーズ III： 軸力導入によりほぼ全域で波形の山が低くなる体積収縮が確認され，多孔質な塗膜内の空隙が押しつぶされたことが示された．この初期圧縮による塗膜の高密度化が，シリーズ I に匹敵する高いすべり係数(0.495)に寄与したと考えられる．すべりによって，ボルト孔近傍が大きく削れており，高面圧下で空隙が圧縮された箇所と，脆性的に破壊されて表面が剥離した箇所が混在していると推察される．

また表-1 より，全シリーズにおいてすべりに伴う表面の体積減少や真実接触面積の増加は，鋼板端部からの距離 70〜100%の領域（ボルト孔近傍）に集中していることが明らかとなった．この領域は座金の投影面積（外径）に概ね相当し，主要な荷重伝達および真実接触面積の増加は，座金直下の高面圧領域で支配的に生じることが示唆された．

表-1 すべり試験前後における差分断面積の総和

端部からの距離[%]	差分断面積[μm^2]		
	シリーズI	シリーズII	シリーズIII
0〜10	-15173.2	303.1	-4440.8
10〜20	-9918.8	-1578.0	8175.0
20〜30	-37.8	3780.6	7486.8
30〜40	-4598.7	3222.7	-655.4
40〜50	1139.9	-2814.2	778.3
50〜60	-589.6	-2239.5	-2519.5
60〜70	74.8	-1320.2	-956.8
70〜80	1391.8	898.1	2474.9
80〜90	3971.1	4276.3	2736.7
90〜100	41329.2	-5827.2	38027.7

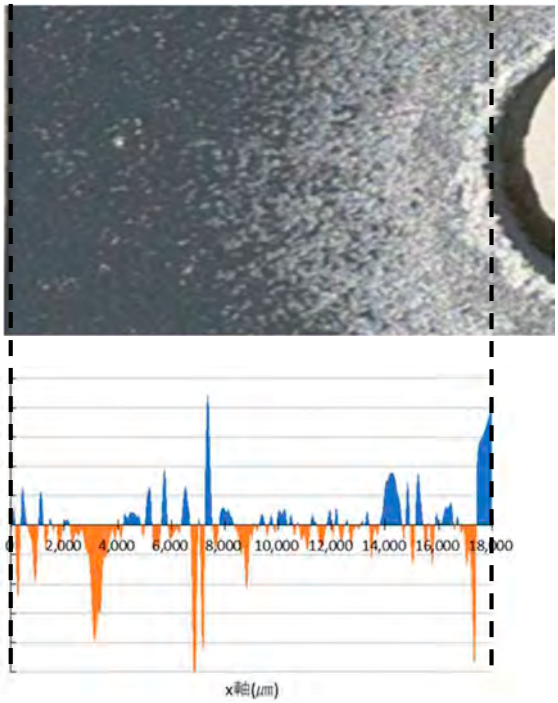


図-2 シリーズ I におけるすべり試験前後の差分断面積

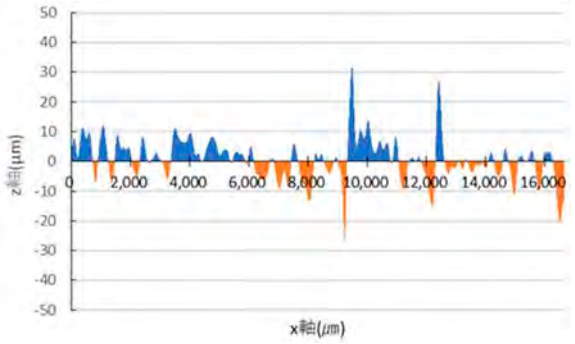


図-3 シリーズ II におけるすべり試験前後の差分断面積

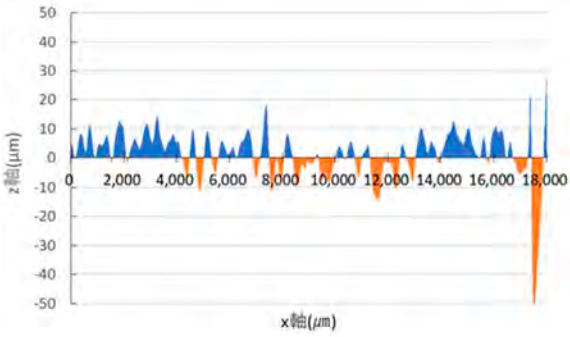


図-4 シリーズ III におけるすべり試験前後の差分断面積

4．まとめ

本研究では，試験前後の波形データと差分断面積の比較から，各表面処理のすべり機構を明らかにした．グリットブラスト面は微小突起の噛み合いと凝着摩耗が支配的であり，溶融亜鉛めっき面は亜鉛層の塑性流動と堆積が物理的障壁として働くことが確認された．無機ジンクリッチペイント面は，軸力導入による塗膜内空隙の圧縮が高密度化を促し，せん断強度を向上させる強化メカニズムとして機能することが定量的に示された．さらに，これら全ての処理において摩擦に伴う表面の変形や体積減少は面全体ではなく，ボルト孔周辺（鋼板端部から 70〜100%の範囲）の局所的な高面圧領域に集中して発生することが判明した．以上より，継手の摩擦抵抗は，見かけの接触面積全体ではなく，この局所領域における表面の相互作用（凝着，塑性流動，圧縮）によって支配的に決定されると考えられる．

参考文献

1) 森猛ほか：鋼材の表面粗さパラメータと高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数，土木学会論文集 A1，Vol.67，No.2，446-453，2011.