

さび促進剤を適用した摩擦接合面のすべり係数

すぎたにがわばし 一杉谷川橋（下り線）拡幅工事一

大阪支店	土木技術部	武智愛
大阪支店	土木技術部	河中涼一
大阪支店	土木工事部	小原昇吾
大阪支店	土木工事部	西濱智博

概要：本工事は、供用中の新名神高速道路 杉谷川橋（下り線）を完成形に拡幅するものであり、拡幅床版を支持する鋼製ストラットの下端接合部は、鋼部材で構築する。波形鋼板ウェブとガセットプレートの接合には横向き溶接したトルシア形高力スタッドボルトによる摩擦接合を採用する。既往の研究では、高力スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手部はすべり係数が 0.40 以上となることが確認されているが、実績は少ない。また、本橋では、スタッドボルトの設置はウェブ背面に下床版コンクリートが存在する範囲に限定され、配置本数に制約を受ける。そのため、摩擦接合面にさび促進剤を適用し、すべり係数の向上に関する検討を行った。その結果、摩擦接合面にさび促進剤を塗布することですべり係数が 0.40 以上になることが確認できたため、本橋の波形鋼板ウェブとガセットプレートの摩擦接合面には、さび促進剤を塗布する方針とした。

Key Words：さび促進剤，トルシア形高力スタッドボルト，摩擦接合，すべり係数

1. はじめに

完成形拡幅工事を行っている新名神高速道路杉谷川橋（下り線）は波形鋼板ウェブ橋で、2024 年 6 月現在は暫定形で供用中である。完成形は、図-1 に示すように既設床版の両側に新設床版を拡幅してストラットで支持する計画である¹⁾。鋼製ストラットを支持する下端接合部は図-2 に示す構造で、鋼製ストラットとガセットプレートの接合（以下、接合部 A）には連結板を介したトルシア形高力ボルトによる摩擦接合を、ガセットプレートと波形鋼板ウェブの接合（以下、接合部 B）にはウェブに横向き溶接したトルシア形高力スタッドボルト（以下、スタッドボルト）による摩擦接合を採用する計画である。

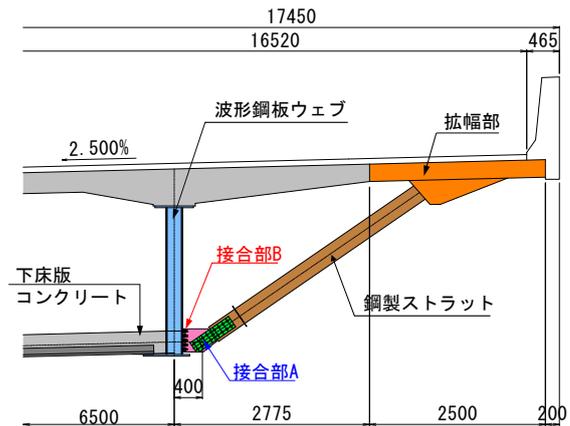
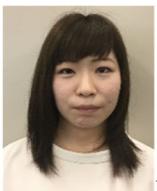


図-1 拡幅構造の概要



武智愛



河中涼一



小原昇吾



西濱智博

スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手は、既往の研究²⁾においてすべり係数が 0.40 以上となることが確認されているが、その使用実績は少ない。また既設部材の塗装を動力工具等により除去した場合、接合面の粗さが小さくなり、設計で求められているすべり係数を確保できない可能性がある。

下端接合部の設計では、接合部 B に変状が生じた場合、上下床版に接合された波形鋼板ウェブの交換または補修を要する可能性があり、接合部 A に比して修復が困難となることが想定されるため、すべり耐力は接合部 A より接合部 B の方が高いことが望まれる。また、ストラットからの軸力を受ける接合部 B は、ウェブ内側の補強が困難なため、ウェブ背面に下床版コンクリートが存在する高さおよび波形鋼板の平行部の幅に限定されてスタッドボルトの配置本数は制約を受ける。よって、接合部 B の十分なすべり耐力を確保するためには、すべり係数を向上させる必要がある。そこで、接合部 B にさび促進剤「ヒットロック K (NETIS : KT-190017-A)」³⁾を適用することで、すべり耐力の向上を図った。本稿では、スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手の試験体を用いて、接合面の処理方法をパラメータとしたすべり試験を行い、さび促進剤がすべり係数に与える影響を検討した。

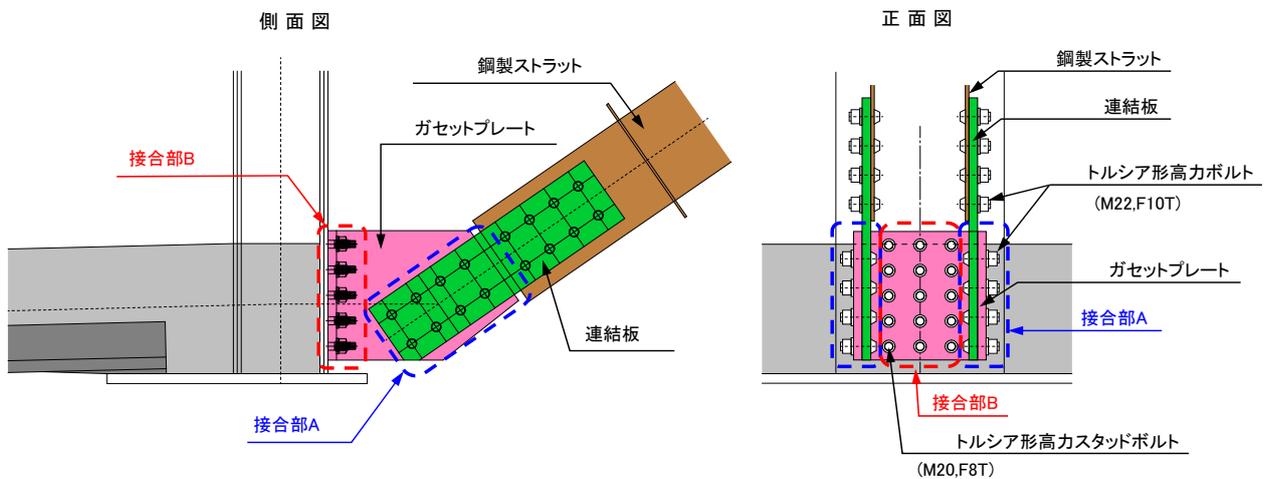


図-2 ストラット下端接合部の構造

2. すべり耐力試験

すべり試験体の形状および寸法を図-3 に、接合面の構成イメージを図-4 に示す。母材は、既設波形鋼板に合わせて SM490Y 材の板厚 10mm とし、連結板は母材と同じ材質および板厚とした。すべり側はスタッドボルト（呼び径 M20，F8T 相当）、固定側は高力ボルト（呼び径 M22，F10T）を用いた摩擦接合とし、スタッドボルトは実施工を想定して横向き姿勢で溶接した。ここで、実施工においては、波形鋼板ウェブのガセットプレート設置面は暫定形施工時の塗装をケレンで除去する必要がある。よって、本試験の母材は実施工の条件に合わせて、既設橋と同じ I 塗装系の下塗りである有機ジンクリッチペイントを塗布し、試験前にケレンで除去した後接合面の処理を行った。連結板は、構造物施工管理要領⁴⁾に記載されている接触面の塗装仕様に準じて無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を塗布し、さび促進剤を塗布する場合はケレンで除去した。本試験で、パラメータとした 3 ケースの接合面処理方法の組合せを表-1，I 系塗装下塗りまでの塗装仕様と無機ジンクの塗装仕様を表-2 に示す。

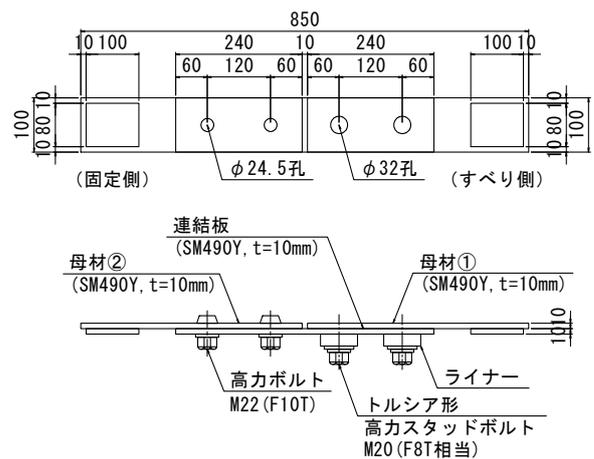


図-3 試験体形状



図-4 接合面の構成イメージ

NZ は母材をケレンして連結板に無機ジンクを塗布する組合せ, RZ は母材にさび促進剤を塗布して連結板に無機ジンクを塗布する組合せ, RR は母材と連結板の双方にさび促進剤を塗布する組合せである. ケレンは, 接合面の塗装や錆を除去するために行う動力工具を用いた素地調整であり, 素地調整面の算術平均粗さ Ra は既往の研究 ③より 5.0 μ m 以下を目標とした. 算術平均粗さ Ra とは, 基準長さの断面曲線における凹凸の絶対値を平均した値である. 無機ジンクは, 構造物施工管理要領 ④より標準膜厚を 75.0 μ m とした. さび促進剤は, 塗装範囲をケレンした後に製品の施工要領に準じて, 100g/m²を 2 回塗布した. さび促進剤による試験体の発錆状況を写真-1 に示す. 試験体数は, NZ および RZ を 3 体とし, 本橋で採用を検討している RR は多くデータを収集するため 6 体とした.

さび促進剤を塗布する試験体については, さび促進剤塗布後に屋内で 24 時間暴露し, その後スタッドボルトを締め付けた. 締め付け作業に先立ち, スタッドボルトの静弾性係数を試験で求め, ボルト軸部で計測したひずみに静弾性係数を乗じることで, 初期導入軸力の管理および試験中の軸力測定を行った. 導入軸力は, 設計ボルト軸力である 93.5kN とした. また, 母材間および母材-連結板間にクリップ型変位計を設置して相対変位を計測することで, 試験時の挙動を確認した. クリップ型変位計の設置要領を図-5 に示す. 連結板の降伏耐力とスタッドボルトのすべり耐力の比率は 0.31 であり, すべり先行型とした. すべり荷重は, 鋼構造物接合部設計指針 ⑥を参考に, すべり側中央ボルトの位置で母材と連結板の相対変位が 0.2mm となるまでに最大荷重が生じた場合はその最大荷重を, そうでない場合は相対変位が 0.2mm に達した荷重と定義した. 本試験に用いた試験体の諸元を表-3 に示す.

表-1 接合面の処理方法

試験ケース	接合面処理		試験体数(体)
	母材(接触面①)	連結板(接触面②)	
NZ	ケレン	無機ジンクリッチペイント	3
RZ	ケレン後さび促進剤	無機ジンクリッチペイント	3
RR	ケレン後さび促進剤	ケレン後さび促進剤	6

ケレン: Ra \leq 5.0 μ m
 無機ジンクリッチペイント: 標準膜厚75.0 μ m
 さび促進剤: 100g/m²×2回



写真-1 さび促進剤による試験体の発錆状況

表-3 試験体の諸元

母板厚(mm)	10
連結板厚(mm)	10
板幅(mm)	100
孔径(mm)	32
設計ボルト軸力(kN)	93.5
母板降伏強度Pym(N/mm ²)	355
連結板降伏耐力Pys(kN)	241
すべり耐力PsL(kN)	75
すべり耐力/降伏耐力比 β	0.31

表-2 各塗装区分の仕様

	工程		塗料または素地調整程度	標準使用量(g/m ²)	塗装間隔	標準膜厚(μ m)
	前処理	工場塗装				
I系塗装 下塗り (有機ジンク)	前処理	素地調整	G-a (プラスト処理 ISO Sa2×1/2)	—	—	—
		プライマー	無機ジンクリッチプライマー	スプレー 160	2時間以内	15
	工場塗装	2次素地調整	G-a (プラスト処理 ISO Sa2×1/2)	—	—	—
		下塗り	有機ジンクリッチペイント	スプレー 700	2時間以内	75
無機ジンク	前処理	素地調整	G-a (プラスト処理 ISO Sa2×1/2)	—	—	—
		プライマー	無機ジンクリッチプライマー	スプレー 160	2時間以内	15
	工場塗装	2次素地調整	G-a (プラスト処理 ISO Sa2×1/2)	—	—	—
		下塗り	無機ジンクリッチペイント	スプレー 600	2時間以内	75

3. 試験結果

3.1 接合面の表面粗さと塗装厚の計測

すべり耐力には接合面の状態が影響するため、部材製作完了時に連結板の塗装厚、スタッドボルト締付け前にすべり側の母材および連結板の表面粗さ (Ra) を計測した。計測位置は図-6 に示すとおり、ボルト孔中心から 25mm はなれた位置の 4 点とした。

表面粗さは接合面処理がケレンまたはさび促進剤となる部材に対して計測した。その結果、素地調整面の算術平均粗さは 1.9~2.1 μm と、いずれの試験体でも 5.0 μm 以下であった。さび促進剤を塗布した面については平均 7.8 μm ~9.8 μm であり、目視でさびが均一に発現していた。各試験体の算術平均粗さを表-4 に示す。また、塗装厚は接合面処理が無機ジンクとなる NZ, RZ の連結板に対して計測した。その結果、いずれの試験体も構造物施工管理要領に記載された判定基準を満足した。塗装厚の計測結果を表-5 に示す。

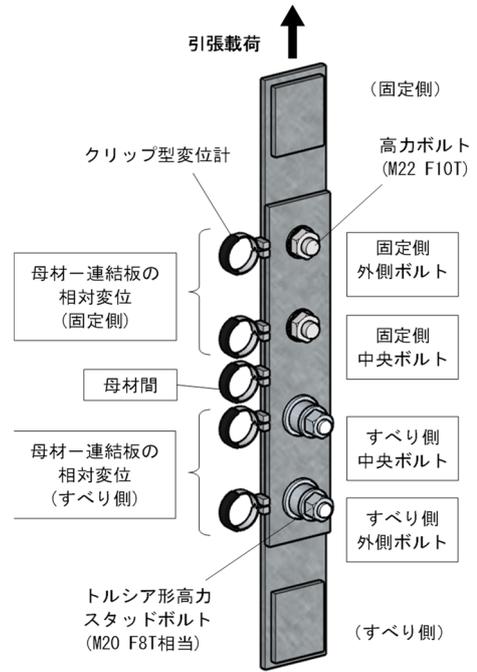


図-5 クリップ型変位計の設置要領

3.2 スタッドボルト軸力の計測

スタッドボルトのリラクゼーション後の軸力残存率を把握するため、スタッドボルト軸部のひずみを計測した。スタッドボルト締付けから約 216 時間 (9 日間) 後の各ケースの軸力残存率を図-7 に示す。リラクゼーション後のボルト軸力の残存率の平均値は、NZ が約 86.4%, RZ が約 90.3%, RR が約 91.2%となり、いずれも同程度となった。

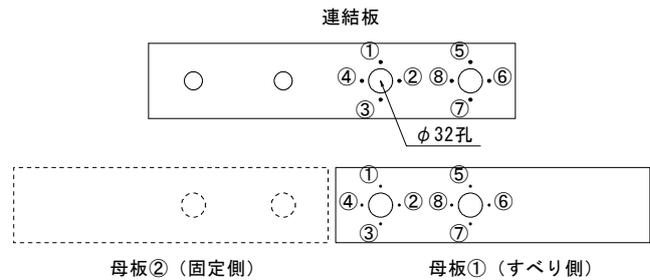


図-6 塗装厚などの計測位置

表-4 算術平均粗さ (Ra) の計測結果

試験ケース	Ra(μm)	備考
NZ 母板	1	2.0
	2	2.1
	3	1.9
RZ 母板	1	9.2
	2	9.8
	3	8.9
RR 母材	1	7.8
	2	9.4
	3	9.1
	4	5.9
	5	8.1
	6	7.4
RR 連結板	1	9.7
	2	7.1
	3	5.5
	4	5.1
	5	7.0
	6	5.9

Ra : 算術平均粗さ

表-5 連結板の塗装厚の計測結果

	NZ			RZ			[μm]
	1	2	3	1	2	3	
①	75	80	85	60	85	80	
②	75	85	75	75	85	85	
③	70	65	90	80	70	75	
④	90	90	90	80	90	60	
⑤	75	80	90	70	70	80	
⑥	70	75	80	75	75	85	
⑦	80	85	85	65	80	75	
⑧	60	90	95	60	85	80	
平均	74	81	86	71	80	78	
	$\geq 75\mu \times 90\% = 67.5\mu\text{m}$						
最小値	60	65	75	60	70	60	
	$\geq 75\mu \times 70\% = 52.5\mu\text{m}$						
標準偏差	8.08	7.81	5.99	7.68	7.07	7.50	
	$< 75\mu \times 20\% = 15\mu\text{m}$						

3.3 すべり係数および荷重－変位関係の比較

すべり試験の実施状況を写真-2、すべり試験の結果を表-6、各ケースのすべり係数を図-8 に示す。すべり係数は、試験前のボルト軸力と試験時のすべり荷重から、下式を用いて算出した。

$$\mu = \frac{p}{(m \times n \times N)}$$

μ : すべり係数, p : すべり荷重 (kN), m : 接合面の数 (=1), n : ボルト本数 (=2), N : 計測ボルト軸力 (kN)

NZ はすべり係数が 0.34~0.47 で既往の研究⁵⁾と同様に 0.40 以下となる場合があった。RZ は 0.58~0.59, RR は 0.60~0.78 であり、いずれも 0.40 以上となった。また、RR は RZ よりすべり係数が大きく、0.40 を大きく上回る結果となった。各ケースでのすべり係数は、RR が最も大きく、次は RZ, そして NZ が最も小さくなった。

各ケースですべり荷重が最も小さかった試験体の荷重と相対変位の関係を図-9、図-10 および図-11 に示す。すべり側の挙動を確認するために、すべり側中央ボルトの相対変位に着目すると、NZ は載荷荷重が 58.2kN に達した時点で荷重が低下し、変位が増加しはじめたことから、載荷荷重 58.2kN ですべりが生じたと判断した。RZ および RR は、載荷荷重 95.6kN および 104.2kN で変位が増加しはじめ、すべりが生じた。一方、いずれの試験体でも母材間の相対変位はすべり荷重に達するまで線形的に増加しており、固定側中央ボルトの荷重に対する相対変位も小さいことから、固定側にはすべりが生じていないことを確認した。

4. まとめ

スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手の試験体を用いて、接合面の処理方法をパラメータとしたすべり試験を行った。計測ボルト軸力とすべり荷重から算出したすべり係数を比較した結果、さび促進剤を塗布した接合面を有する試験体では全てのケースにおいてすべり係数が 0.40 以上であった。また、母材と連結板の両面にさび促進剤を塗布した場合、すべり係数の平均値は 0.71 であり、0.40 を大きく上回る結果であった。なお、さび促進剤を塗布した面を有していない試験体では、設計値である 0.40 を下回る試験体があり既往の研究と同じ結果となった。

以上の結果より、本橋の接合部 B における摩擦接合面には、すべり耐力の向上を目的にさび促進剤を塗布する方針とした。

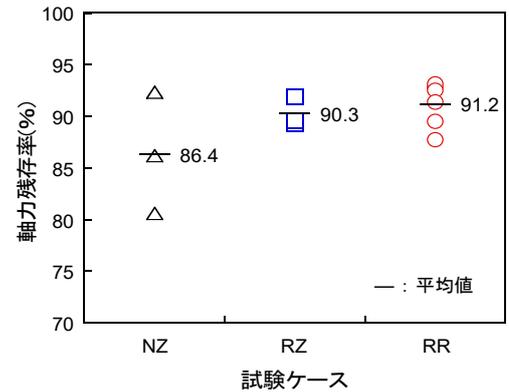


図-7 スタッドボルトの軸力残存率



写真-2 すべり試験の実施状況

表-6 すべり試験結果

試験ケース		試験前ボルト軸力 (平均)	すべり荷重	すべり係数	
		kN	kN		平均
NZ	1	86.4	58.2	0.34	0.40
	2	75.9	72.0	0.47	
	3	79.6	60.2	0.38	
RZ	1	84.2	99.8	0.59	0.59
	2	86.5	101.4	0.59	
	3	82.8	95.6	0.58	
RR	1	84.3	124.6	0.74	0.71
	2	86.6	104.2	0.60	
	3	82.0	118.8	0.72	
	4	87.1	127.9	0.73	
	5	86.7	122.3	0.71	
	6	85.8	134.4	0.78	

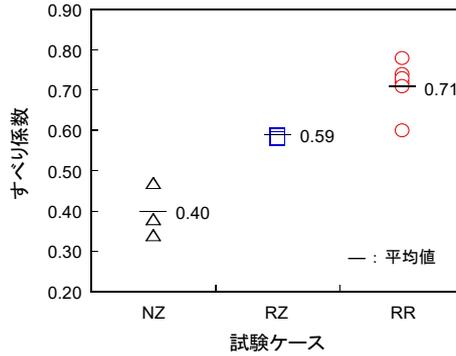


図-8 各ケースのすべり係数

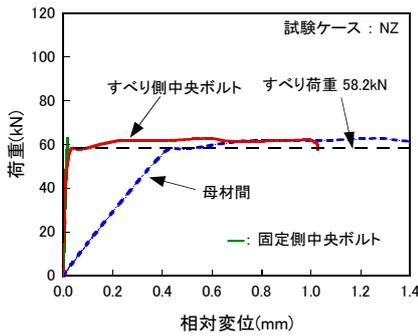


図-9 荷重と相対変位の関係 (NZ-1)

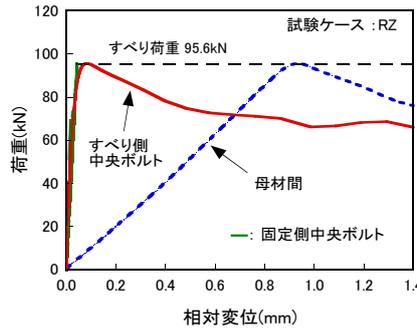


図-10 荷重と相対変位の関係 (RZ-3)

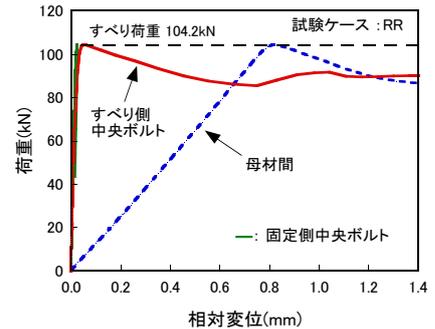


図-11 荷重と相対変位の関係 (RR-2)

謝辞

本試験では、スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手の試験体を用いて、接合面の処理方法をパラメータとしたすべり試験を行い、さび促進剤がすべり係数に与える影響を検討した。2024年6月現在、拡幅工事の施工に向けて設計中である。本試験の実施において多大なるご指導、ご助言を頂きました大阪公立大学大学院・山口隆司教授、駒井ハルテック様および関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 河中涼一他：波形鋼板ウェブ橋の改築工事における鋼材溶接温度に関する検討，令和5年度土木学会全国大会，CS6-52，2023
- 2) 彭雪他：スタッドボルト摩擦接合継手の接合面塗膜のすべり係数への影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.26，pp.293-300，2018,11
- 3) 桑原英之他：さび促進剤の適用による高力ボルト摩擦接合面におけるすべり係数の向上，令和3年度土木学会全国大会，pp.1-183，2021
- 4) 西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，pp.2-109，2023,10
- 5) 丹波寛夫他：接合面が鋼材粗面と無機ジンクリッチペイント面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の提案，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.70，No.1，pp.137-149，2014
- 6) (社)日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp.446-453，2006
- 7) (社)土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，p.45，2006