

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	仕様の異なる接触面を含む高力ボルト摩擦接合継手の適用性
Title(English)	Applicability of Pretensioned Bolted Joints Including Different Contact Faces
著者(和文)	田村洋, 南邦明, 吉岡 夏樹, 内田 大介, 茂呂 充, 濱 達矢, 平尾賢生
Authors(English)	Hiroshi Tamura, Kuniaki Minami, Natsuki Yoshioka, Daisuke Uchida, Mitsuru Moro, Tatsuya Hama, Kensho Hirao
出典(和文)	土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 76, No. 2, pp. 255-274
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 76, No. 2, pp. 255-274
発行日 / Pub. date	2020, 6
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2020 Japan Society of Civil Engineers.

仕様の異なる接触面を含む 高力ボルト摩擦接合継手の適用性

田村 洋¹・南 邦明²・吉岡 夏樹³・
内田 大介⁴・茂呂 充⁵・濱 達矢⁶・平尾 賢生⁷

¹正会員 横浜国立大学准教授 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: tamura-hiroshi-jg@ynu.ac.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: minami.kun-e27b@jrtr.go.jp

³正会員 駒井ハルテック 橋梁設計部 (〒110-0843 東京都台東区上野1-19-10)
E-mail: yoshioka@komaihaltec.co.jp

⁴正会員 法政大学准教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)
E-mail: daisuke.uchida.53@hosei.ac.jp

⁵正会員 長大 東日本構造保全部 (〒104-0054 東京都中央区勝どき1-13-1)
E-mail: moro-m@chodai.co.jp

⁶正会員 三井E&S鉄構エンジニアリング 東部橋梁設計部 (〒290-0067 千葉県市原市八幡海岸通り1)
E-mail: tatsuya-hama@mes.co.jp

⁷正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail: hirao.k.ab@m.titech.ac.jp

現在、高力ボルト摩擦接合継手においては、継手ごとに統一された接触面仕様とすることが原則となっている。しかしながら、既設橋りょうの保全工事や耐候性鋼材を裸仕様で使用した箱桁の新設工事等においては、仕様の異なる接触面を含んだ摩擦接合継手を採用することで、施工の省力化・迅速化が図れる場合が多いものと考えられる。本研究では、仕様の異なる接触面を含んだ摩擦接合継手を異種接合面継手と呼び、11種類33体のボルト継手試験体を対象にリラクゼーション試験とすべり耐力試験を実施した。そして、5種類の異種接合面継手について初期軸力導入後のボルト軸力の推移と引張荷重下でのすべり挙動を明らかにし、先行研究の結果も引用してすべり係数確保の観点からの異種接合面継手の適用性や設計で使用するすべり係数値を検討した。

Key Words : *high strength bolted frictional joints, contact faces, bolt relaxation, slip coefficient*

1. はじめに

現在、鋼構造物において高力ボルト摩擦接合継手（以下、ボルト継手と呼ぶ）が多く用いられているが、一部に表面処理仕様の異なる接触面を含んだボルト継手のすべり耐力や安全性については不明な点が多く、継手ごとに統一された接触面仕様とすることが原則となっている。鋼橋では接触面に厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンクと呼ぶ）を塗布することが主流であるが、道路橋示方書¹⁾（以下、道示と呼ぶ）では「接触面にそれぞれ異なる無機ジンクリッチペイントを用いたり、他の塗料を併用したりしてはいけない」とされている。

しかしながら、既設橋りょうの保全工事においては、工場製作される連結板に合わせて既設部材（母材）を無機ジンク仕様とすることが、作業効率の低下を招く場合がある。これは、素地調整のための現場でのブラスト処理や塗膜の乾燥待ちに時間と工費を要するためである。既設部材を無機ジンク仕様とする代わりに現場作業性に優れた接触面仕様とすれば、工程上のボトルネック解消に寄与する場合も多いと考えられる。

新設工事においても、例えば、耐候性鋼材を裸仕様で使用した箱桁のボルト継手の場合、接触面仕様を統一するため、箱桁外面においても連結板との接触面に無機ジンク塗布が必要となっている。もし、箱桁外側で母板と

連結板の接触面仕様を無塗装（黒皮を除去した粗面状態相当）、内側で無機ジンクと、異なる仕様が採用できれば、製作工程の短縮および塗装面積の低減にもつながる。

このように、仕様の異なる接触面を含むボルト継手を採用することで施工の省力化・迅速化が図れる場合も多いものと考えられる。しかしながら、鋼橋においてそのような継手は今日まで基準化されておらず¹²⁾、知見が不十分な継手の場合には性能試験を逐一実施しすべり耐力や安全性の確認が必要な状況にある。

本論文では、表面処理仕様の異なる接触面を含んだボルト継手（以下、異種接合面継手と呼ぶ）の適用性を明確にすることを目的とした実験の結果を報告し、導入ボルト軸力の低下やすべり係数について論じる。異種接合面継手についてはこれまでいくつかの報告³⁹⁾がなされているが、本研究では、異仕様の接触面の存在が継手のすべり係数に及ぼす影響やボルトの締付け後における軸力低下にも着目し、すべり係数に関しては先行研究の結果も含めて考察を行う。

以下、第2章では、対象とする継手の分類と使用した試験体について述べる。第3章では、各試験体におけるボルトのリラクゼーション試験について報告し、異種接合面継手における初期軸力導入後のボルト軸力の推移について議論する。第4章では、すべり耐力試験結果を報告し、引張荷重下におけるすべり挙動について述べたうえで、先行研究の結果も引用しつつ異種接合面継手のすべり係数について考察する。第5章では、ボルト軸力低下後のすべり係数確保の観点からそれぞれの異種接合面継手の適用性について述べ、適用性が高いと判断される継手については設計で使用するすべり係数値を検討する。第6章では本論文の結論を述べる。

2. 異種接合面継手の分類と使用試験体

本章では、まず、本研究で対象とする異種接合面継手の分類を行う。つづいて、その適用性を検討するための試験体に関して、その諸元と接触面処理状況、ボルトの締付け状況について説明する。

(1) 異種接合面継手の分類

本論文では、異種接合面継手を次のように分類する。

a) タイプA

複せん断の継手において、接触面仕様が母板の表側と裏側で異なる場合は、異種接触面同士が母板によって隔てられ直に接触することはない。このような継手をタイプAの異種接合面継手と呼ぶこととする。図-1(a)に、次節で述べる試験体を例にとりてタイプAの継手における接合面構成を示す。同図のように、タイプAでは接触面が母板の板厚中心に対して非対称に配置されており、母板の表側と裏側それぞれの接合面において同じ仕様の接触面同士が相対している。

b) タイプB

複せん断の継手において、母板と連結板の接合面において仕様の異なる接触面同士が直に接している異種接合面継手をタイプBと呼ぶこととする。ただし、接触面の組み合わせは継手表裏で同一とする。タイプBの継手の接合面構成を次節で述べる試験体を例に示すと図-1(b)のようになる。同図に示されているように、タイプBでは接触面が母板の板厚中心に対して対称に配置されており、各接合面において異種の接触面が相対している。

(2) 試験体諸元

図-2に本研究で使用した試験体の形状と寸法を示す。試験体の母板と連結板には、それぞれ表-1に示す

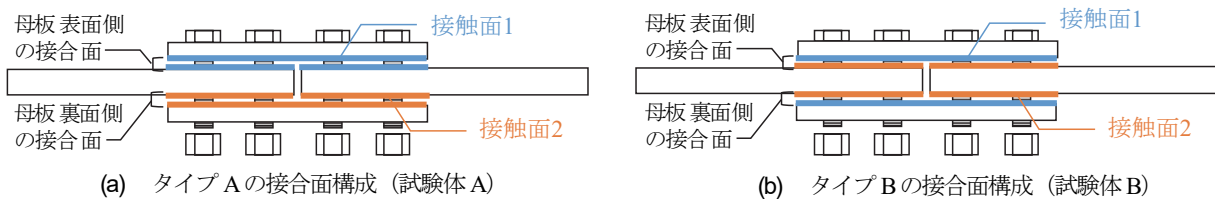


図-1 異種接合面継手の接合面構成

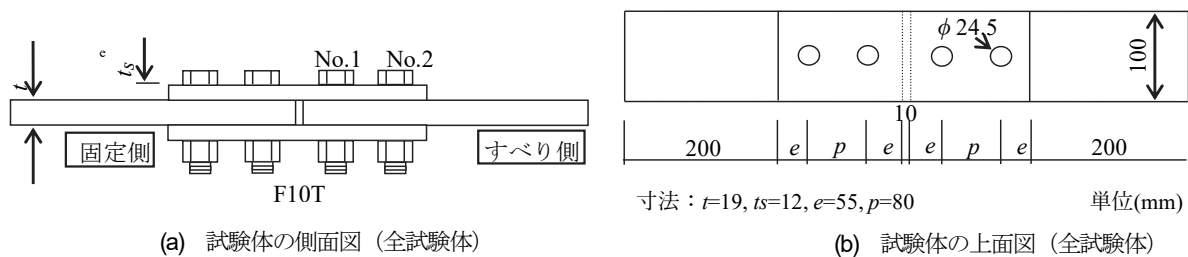


図-2 試験体の形状と寸法

表-1 試験体に使用した鋼板の材料特性 (鋼材検査証明書より)

鋼種	板厚 [mm]	機械的性質			化学成分[%]					適用部位
		降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	伸び[%]	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	12	430	519	23	0.15	0.19	1.1	0.011	0.005	連結板
SM490YB	19	437	530	23	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007	母板

表-2 試験体に使用した高力ボルトの材料特性 (製品検査証明書より)

等級	ボルト径	首下長さ [mm]	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			耐力 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	伸び[%]	絞り[%]	引張荷重 [kN]	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
F10T	M22	85	999	1054	18	70	328	33	29	39	0.137

表-3 本研究で使用した試験体一覧

継手 分類		試験体名 (接合面構成)	位置	接合面 (母板側-連結板側)	座金との接触面
異種接合面継手	タイプA	A-b	母板表側	ブラスト-同左	ブラスト
			母板裏側	無機ジンク-同左	無機ジンク
		A-n	母板表側	自然さび-同左	自然さび
			母板裏側	無機ジンク-同左	無機ジンク
	タイプB	B-v	母板表側	縦回転式-無機ジンク	無機ジンク
			母板裏側	同上	同上
		B-o	母板表側	有機ジンク-無機ジンク	無機ジンク
			母板裏側	同上	同上
		B-a	母板表側	薬剤さび-無機ジンク	無機ジンク
			母板裏側	同上	同上
同種接合面継手	C-b	母板表側	ブラスト-同左	ブラスト	
		母板裏側	同上	同上	
	C-v	母板表側	縦回転式-同左	*	
		母板裏側	同上	同上	
	C-i	母板表側	無機ジンク-同左	無機ジンク	
		母板裏側	同上	同上	
	C-o	母板表側	有機ジンク-同左	有機ジンク	
		母板裏側	同上	同上	
	C-n	母板表側	自然さび-同左	自然さび	
		母板裏側	同上	同上	
	C-a	母板裏側	薬剤さび-同左	*	
		母板表側	同上	同上	

*動力工具(ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用)により黒皮を完全に除去

SM490YB と SM490YA を用いた。高力ボルトには、表-2 に示す F10T (呼び径 22mm, 首下長さ 85mm) を用いた。試験体寸法は、試験体がすべり先行型となるよう、標準試験片¹⁰⁾を参照して決定した。すなわち、すべり係数を 0.40 とした場合のすべり降伏耐力比 β の設計値 (以下、 β と表す) は 0.64 となっている。ボルト孔は標準孔とし、ボルトピッチ P や縁端距離 e も標準試験片に準じるものとした。

本研究ではこのような試験体を、検討する接合面構成に応じて 11 種類製作した (表-3)。接合面構成は、継手内の各接合面の分類 (タイプ A, タイプ B, または接触面が継手内で統一) と、各板の接触面の状態や仕様を表す (同表参照)。試験体は接合面構成ごとに 3 体ずつ用意したため、その総数は 33 体である。

タイプ A の試験体 (試験体 A と呼ぶ) としては、耐候性鋼材を裸仕様で使用した新設箱桁等のボルト継手に

ついて外面を無機ジンク塗布せず製作する場合を想定し、2種類の接合面構成を対象とした。いずれもナット側の接触面を箱桁内面を想定した無機ジンク塗布としているが、試験体 A-b ではボルト頭側の接触面を発せい前の箱桁外面(粗面状態)を想定したグリットブラストによる接触面仕上げ(以下、ブラスト)とした。これに対して、試験体 A-n ではボルト頭側の接触面を発せい後の箱桁外面を想定し自然さびとしている。このように、試験体 A では、道示や鉄道構造物等設計標準(以下、鉄標と呼ぶ)で示されている接触面同士の組み合わせとなっている。

タイプBの試験体(試験体Bと呼ぶ)としては、既設部材への無機ジンクに代わる接触面の現場仕様を想定し、3種類の接合面構成を選定した。連結板はいずれも新設として無機ジンクであるが、母板の仕様はそれぞれ異なる。すなわち、試験体 B-v では、狭あいな空間での簡易工具による方法として、縦回転式動力工具(ブリストルブラスター)による接触面仕上げ(以下、縦回転式)としている。試験体 B-o では、ブラストによる素地調整が不要な塗装仕様として、有機ジンクリッチペイント(以下、有機ジンク)塗布とした。試験体 B-a では、数日程度での発せいが可能であり鉄骨建築のボルト継手に採用されている¹¹⁾、さび促進剤による赤さび面(以下、薬剤さび)としている。このように、試験体Bの母板では、道示や鉄標で示されていないが、現場施工性が高いと考えられる接触面仕様とした。

また、異仕様の接触面を含む影響を比較評価するための試験体として、接触面が継手内で統一された継手(以下、同種接合面継手と呼ぶ)の試験体Cも用いた。試験体Cでは、試験体Aまたは試験体Bとの比較により異仕様の接触面の影響を評価できるよう、接合面構成を6種類(C-b, C-v, C-i, C-o, C-n, C-a)とし、試験体Aおよび試験体Bと同様の条件で接触面を施工した。

(3) 接触面の施工条件

a) 粗面系

グリットブラスト仕上げは、黒皮を完全に除去し、表



写真-1 縦回転式動力工具による施工状況

面粗さパラメータ R_{Z15} が $75\mu\text{m}$ 以下となるように行った。縦回転式動力工具仕上げでは、ダブルアクションサンダー(パッドの回転軸も回転移動する動力工具)とディスクグライダー併用により黒皮を完全に除去した後、安定的な仕上がりを実現するため縦回転式動力工具による施工を熟練技術者に依頼した。下向き姿勢で試験体の長手方向に縦回転式工具を前後移動させ(写真-1)、1接触面(ボルト孔数2)当たり約2分かけて丁寧に仕上げた。

b) 塗膜系

無機ジンクと有機ジンクの塗布は、ボルト締めを行う約4か月前に実施した。乾燥塗膜厚は $75\mu\text{m}$ を目標値とした。無機ジンクは前項で述べたグリットブラスト仕上げと同等の除せい直後に日本ペイント製ニッペジンキー1000QC-Hを塗布し、有機ジンクはダブルアクションサンダーとディスクグライダーの併用により黒皮を完全に除去した後に日本ペイント製ニッペジンキー8000HBを塗布した。有機ジンクは、高摩擦型ではなく一般的なもの(以下、非高摩擦型と呼ぶ)とした。

c) さび系

自然さびと薬剤さびは、ダブルアクションサンダーとディスクグライダーの併用により黒皮を完全に除去した粗面上に生成させた。自然さびは約2か月間の沿岸部(千葉県富津市)における屋外曝露に依って生成させた。薬剤さびは、さび促進剤(ヒットロックB)に依って生成させた。さび促進剤は、ボルト締めを行う約48時間前に塗布(塗布量は $50\sim 100\text{g}/\text{m}^2$)し、その後室内環境で乾燥させた。生成後の自然さびおよび薬剤さびにおいて浮きさびは確認されなかった。

d) 各接触面の表面粗さ

各接触面の状況を把握するため、ボルト締め前に、表面粗さ計(サーフテスト SJ-210)を用いて粗さ計測を実施した。各接合面構成の試験体1体ずつを対象に、図-3に示す位置において、表面粗さパラメータ R_{Z15} ならびに R_a を計測した。表面粗さはすべり係数に影響するのでこれを把握しておくことは重要と考え、塗膜系やさび系の接触面についても計測した。また、各計測箇所では、評

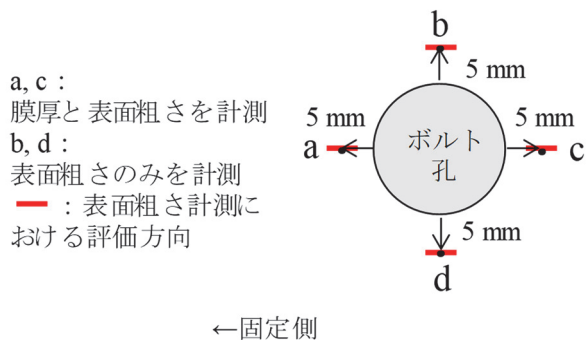


図-3 試験体表面特性の計測位置

表4 表面粗さ R_a の計測結果

試験体名	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板
A-b-1	プラスト	無機ジンク	プラスト	無機ジンク
	11.1	5.38	1.51	0.889
A-n-1	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク
	6.38	6.15	1.01	0.889
B-v-1	縦回転式	無機ジンク	縦回転式	無機ジンク
	5.72	5.82	2.12	1.16
B-o-1	有機ジンク	無機ジンク	有機ジンク	無機ジンク
	1.91	5.77	0.392	1.82
B-a-1	薬剤さび	無機ジンク	薬剤さび	無機ジンク
	3.93	5.91	0.624	0.642
C-b-1	プラスト		プラスト	
	10.0		1.33	
C-v-1	縦回転式		縦回転式	
	3.20		0.847	
C-i-1	無機ジンク		無機ジンク	
	5.40		1.14	
C-o-1	有機ジンク		有機ジンク	
	2.05		0.396	
C-n-1	自然さび		自然さび	
	6.47		1.29	
C-a-1	薬剤さび		薬剤さび	
	3.59		0.758	

表5 膜厚の計測結果

試験体名	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板
A-b	プラスト	無機ジンク	プラスト	無機ジンク
	-	79.1	-	10.6
A-n	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク
	58.2	74.7	7.52	14.1
B-v	縦回転式	無機ジンク	縦回転式	無機ジンク
	-	83.3	-	13.3
B-o	有機ジンク	無機ジンク	有機ジンク	無機ジンク
	101	83.6	16.6	14.8
B-a	薬剤さび	無機ジンク	薬剤さび	無機ジンク
	19.5	77.4	4.15	10.8
C-b	プラスト		プラスト	
	-		-	
C-v	縦回転式		縦回転式	
	-		-	
C-i	無機ジンク		無機ジンク	
	81.8		13.2	
C-o	有機ジンク		有機ジンク	
	87.0		14.0	
C-n	自然さび		自然さび	
	59.8		8.41	
C-a	薬剤さび		薬剤さび	
	19.8		5.40	

価長さを 4mm として 5 回ずつ計測した際の平均値を記録した (評価長さの影響については付録を参照された)。計測結果を表4に示す。グリットプラスト仕上げの接触面については、 R_{ZIS} が $75\mu\text{m}$ 以下であったことが確認された (付表-1)。有機ジンク塗布の接触面では、 R_{ZIS} と R_a が無機ジンクの場合の $1/3 \sim 1/2$ 程度であった。

e) 各接触面の膜厚

表面粗さと同様に、ボルト締めの前に、渦電流式膜厚計 (SWT9300) を使用して塗膜やさびといった被覆膜の膜厚を計測した。ただし、全試験体を対象とし、計測箇所は各ボルト孔周辺について 2 か所とした (図-3)。各計測箇所では、5 回ずつ計測した際の平均値を記録した。計測結果は表5の通りである。無機ジンクの膜厚は $80\mu\text{m}$ 程度 (目標値にほぼ一致) であり、有機ジンクの膜厚も無機ジンクと同等であった。自然さびの膜厚は薬剤さびの 3 倍程度で比較的厚かったことが確認された。

(4) ボルト締め

高力ボルトの締め付けはトルク法で行った。1 次締めは設計ボルト軸力 (205kN) の 60%、2 次締めは同 110% を目標に締め付けた。各試験体とも、リラクセーション試験に供するボルト 2 本を挿入する側をすべり側、その反対側を

固定側として区別した。すべり側の 2 次締めにおける導入ボルト軸力は、3. (1) で述べるひずみゲージの出力値を参照して管理した。その結果導入された軸力の計測結果は、3. (2) において示す。固定側については、すべり耐力試験において先行してすべらぬよう、さらに 20kN の増し締めとした。

3. 異種接合面継手のボルト軸力推移

本章では、リラクセーション試験の方法を説明し、得られた試験結果に基づいて、異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。

(1) リラクセーション試験の方法

リラクセーション試験は、ボルトの締め付け時点から 28 日間 (672 時間) かけて行った。試験対象は、すべり側の合計 66 本のボルトとし、ボルト軸力をひずみゲージ (ゲージ長 5mm) により計測するため、ボルト頭にリード線を通すための孔を明け、ボルト軸部 (母材の板厚中央の位置) にひずみゲージ 2 枚を貼付けた (図-4)。このゲージ 2 枚の出力の平均値をボルト軸部の軸ひずみ

とし、これに所定の換算率を乗じることでボルト軸力を取得した。この換算率は、事前に同じロットのボルト3本を対象とした引張試験に依って決定されたものである。ダミーボルト(締付けをせず、試験体と同じ環境で保管)についても軸ひずみを計測し、温度補正に用いた。

(2) リラクゼーション試験の結果

リラクゼーション試験の結果を表-6に示す。締付け直後(約30秒後)と672時間後(28日後)におけるボルト軸力の計測結果を、それぞれ導入ボルト軸力と残存ボルト軸力として示し、それぞれの軸力の設計ボルト軸力に対する比率(以下、設計軸力比率と呼ぶ)と、残存ボルト軸力の導入ボルト軸力に対する比率(以下、軸力残存率と呼ぶ)についても示している。なお、計測の不具合に因り軸力が計測できなかった項目もあり、それらは表中において×で示している。導入ボルト軸力の設計軸力比率は106%~118%であり、2.(4)で述べた目標値(110%)に近い値であった。

まず、試験体Cに関する軸力残存率の経時変化を図-5に示す。図中には、接合面構成ごとに求めた回帰直線と決定係数も示している。同図からは、試験体Cにおいて、軸力残存率が指数関数的に減衰したことが確認できる。ただし、その低下速度は接合面構成ごとに異なる傾向が

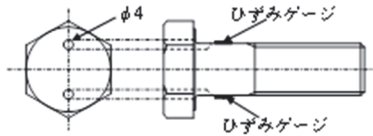


図-4 ボルト軸部におけるひずみ計測(単位: mm)

示されており、28日後における軸力残存率の3体平均値(接合面構成の特性を表す代表値)によると、軸力低下が著しい順に試験体C-i, C-n, C-o, C-a, C-b, C-vとなっている。

つづいて、試験体A, Bに関する軸力残存率の変化を図-6に示す。同図においても、軸力残存率が指数関数的減衰を示している。この傾向は以降も続くと推測され、異種接合面継手においても同種接合面継手と同様に、軸力残存率が指数関数的に減衰するとみなしてよいと考えられる。また、軸力残存率の低下速度は、接合面構成ごとに多少異なる傾向が示されており、28日後における軸力残存率の3体平均値からは、軸力低下が試験体B-o, B-v, A-n, B-a, A-bの順位に顕著であったことがうかがえる。ただし、いずれの試験体でも軸力残存率は粗面系の試験体(C-b, C-v)未満であったものの試験体C-i以上の値であった。

(3) ボルト軸力低下の支配因子

ここでは、試験体A, Bの軸力残存率を、接合面構成ごとに、試験体Cの減衰率に基づき推定することを試み、その結果から異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。推定にあたって参照する試験体Cは、試験体A, Bと同様の条件で施工された接触面を有する試験体である(以下、基準試験体と記す。異種接合面継手の各試験体について2種類ずつ存在する)。軸力残存率としては締付けから672時間後の試験体における軸力残存率の3体平均値(表-6)を用い、想定因子

表-6 リラクゼーション試験の結果

試験体	異種接合面継手の試験体										同種接合面継手の試験体												
	締付け直後					28日後					締付け直後					28日後							
	導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		軸力残存率 [%]		導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		軸力残存率 [%]				
A-b	-1	226	229	110.5	111.9	212	215	103.5	104.9	93.7	93.7	-1	226	228	110.4	111.1	×	224	×	109.3	×	97.8	
	-2	232	217	113.4	105.8	204	204	106.3	99.5	94.0	94.0	-2	242	235	117.8	114.8	234	234	113.9	113.9	96.7	96.7	
	-3	217	225	106.0	109.8	×	209	×	101.9	102.0	93.1	92.8	-3	239	234	116.6	113.9	231	227	112.6	110.7	96.6	97.2
A-n	-1	224	228	109.5	109.8	209	209	102.0	102.0	92.6	92.6	-1	218	224	112.2	109.4	213	218	103.8	106.5	97.6	97.4	
	-2	226	228	110.2	111.5	210	211	102.4	103.2	91.9	92.6	-2	230	228	112.4	110.4	224	218	109.2	106.5	97.2	97.4	
	-3	226	222	110.1	108.0	×	201	×	98.1	×	92.1	-3	241	234	117.6	114.2	235	235	114.5	114.5	97.4	97.4	
B-v	-1	218	224	106.4	108.0	208	208	101.4	101.4	92.8	92.8	-1	227	227	110.7	110.8	219	221	106.9	107.9	97.4	97.4	
	-2	224	221	109.2	108.0	×	208	×	98.1	×	92.1	-2	225	227	111.8	110.8	223	221	108.9	107.9	97.4	97.4	
	-3	219	226	106.7	110.0	203	209	99.1	101.8	92.3	92.5	-3	229	226	111.8	110.2	206	204	100.4	99.7	90.6	90.4	
B-o	-1	231	226	113.4	111.0	214	209	104.5	101.8	92.7	92.5	-1	227	226	110.8	110.2	206	204	100.4	99.7	90.6	90.4	
	-2	223	225	109.0	109.9	207	208	100.8	101.4	92.6	92.3	-2	225	225	109.6	109.7	203	202.6	99.0	98.8	90.3	91.0	
	-3	227	224	110.8	109.3	209	201	102.0	98.3	92.0	92.4	-3	227	225	110.9	109.7	×	×	98.8	×	91.0	91.0	
B-a	-1	218	224	106.4	109.3	201	201	98.3	98.3	92.4	92.4	-1	225	230	109.6	112.2	203	206	98.8	100.6	90.2	89.7	
	-2	230	224	112.2	109.3	×	201	×	98.3	×	92.4	-2	235	230	114.8	112.2	210	210	102.4	102.4	89.2	89.2	
	-3	232	229	113.4	111.6	212	210	103.4	102.3	91.2	91.6	-3	225	223	114.8	108.7	209	209	102.0	102.1	93.0	93.9	
C-b	-1	225	229	109.9	111.6	207	210	101.1	102.3	92.0	91.6	-1	221	223	107.7	108.7	210	209	102.2	102.1	94.9	94.9	
	-2	234	229	114.3	111.5	216	211	105.3	102.7	92.2	92.1	-2	223	222	109.0	108.1	211	210	103.1	102.6	94.6	94.9	
	-3	223	223	108.8	114.6	205	202	100.0	98.5	92.0	90.8	-3	220	238	107.2	116.0	209	225	102.1	109.8	95.2	94.6	
C-v	-1	247	235	120.7	114.6	×	202	×	98.5	×	90.8	-1	238	238	116.1	116.0	×	225	×	109.8	×	94.6	94.6
	-2	229	223	111.8	109	×	198	×	96.6	×	91.7	-2	231	234	112.6	113.9	225	219.3	106.1	107.0	94.2	93.9	
	-3	216	233	105.4	113.7	198	216	96.6	105.3	91.7	92.7	-3	236	224	115.2	114.8	221	210	107.8	102.6	93.6	93.8	
C-i	-1	231	233	112.8	112	217	211	105.9	103.1	92.5	92.3	-1	221	224	107.9	109.4	207	210	101.0	102.6	93.9	93.8	
	-2	235	229	114.5	112	217	211	105.9	103.1	92.5	92.3	-2	227	235	110.9	114.8	214	217	104.2	105.9	93.9	93.7	
	-3	231	229	112.8	112	213	211	103.8	103.1	92.0	92.3	-3	232	227	113.0	114.8	×	×	105.9	×	93.7	93.7	
C-o	-1	229	223	111.8	111.6	212	210	103.4	102.3	91.2	91.6	-1	233	229	113.8	111.8	224	220	109.4	107.5	96.1	96.1	
	-2	231	233	112.8	112	217	211	105.9	103.1	92.5	92.3	-2	225	225	109.8	111.8	217	220	105.6	107.5	96.2	96.2	
	-3	231	229	112.8	112	213	211	103.8	103.1	92.0	92.3	-3	222	221	108.5	110.5	214	219	104.6	106.7	96.8	96.6	

×は計測できなかった項目を表す。平均値の計算ではこれらを除外している。

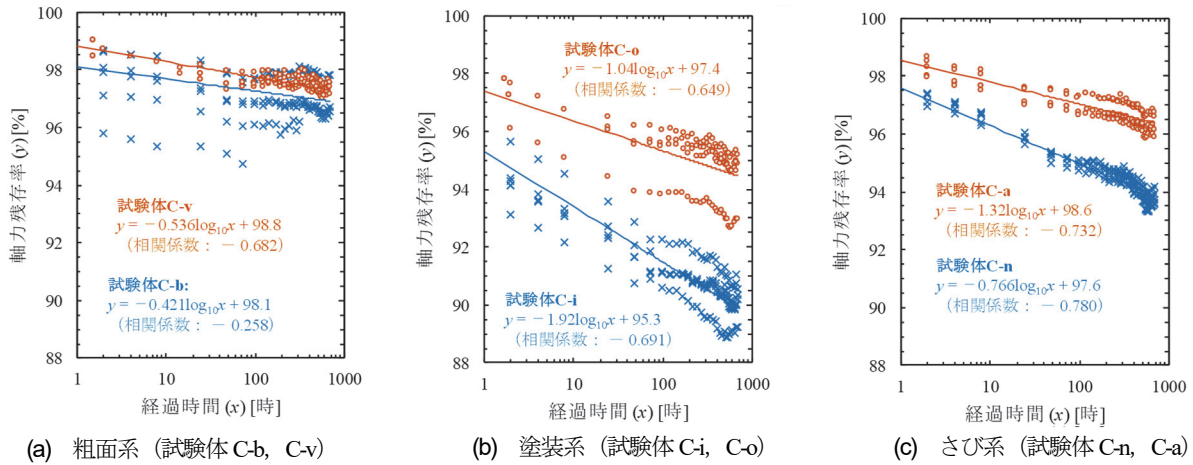


図-5 軸力残存率の経時変化 (同種接合面継手の試験体)

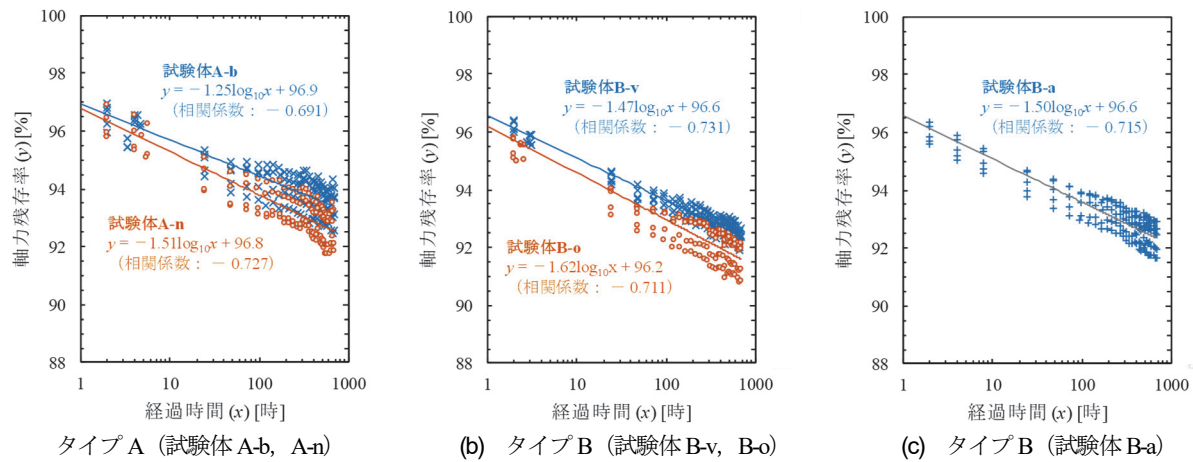


図-6 軸力残存率の経時変化 (異種接合面継手の試験体)

の異なる2つの方法で推定した結果の推定精度比較から支配因子を検討する。

a) 基準試験体軸力残存率の平均値による推定 (方法 I)
ある接合面構成の軸力残存率 r を次式により求める。

$$r = 1 - \delta$$

$$= 1 - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_{\text{others}}) \quad (1)$$

ここに、 δ はその構成の軸力減衰率、 δ_1 はその構成の第1種被覆膜に関連した軸力減衰率、 δ_2 は同第2種に関連した軸力減衰率、 δ_{others} は被覆膜以外の因子(鋼材のリラクゼーション、ねじ部・ワッシャー等の影響)による軸力減衰率である。 $\delta_i (i = 1, 2)$ は、粗面系の接触面では0とする。

δ_i は、基準試験体における実測の軸力残存率 r_i (3体平均値)より、次のように表せるものとする。

$$\delta_i = \frac{1}{2}(1 - r_i - \delta_{\text{others}}) \quad (2)$$

ここで、 δ_{others} は試験体によらないと仮定している。結局、式(1)、(2)より、 r は次のように求まる。

$$r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) \quad (3)$$

このように、基準試験体軸力残存率の平均値により r を推定する方法を、方法Iと呼ぶこととする。

b) 被覆膜以外の因子と膜厚差も考慮した推定 (方法 II)
次式で求まる δ_i を式(1)に代入することで r を算定する。

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{t_i}{t_{i,r}}(1 - r_i - \delta_{\text{others}}) & (\text{被覆膜あり}) \\ 0 & (\text{被覆膜なし}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 t_i は r を推定する接合面構成の第 i 種被覆膜の推定合計膜厚、 $t_{i,r}$ は第 i 種被覆膜を有する基準試験体の推定合計膜厚¹²⁾である。推定合計膜厚は、各試験体における実測膜厚の3体平均値(表-5)をボルトに締め付けられる被覆膜面数(例えば、試験体 B-v では4、C-i では6)で乗じることによって得られる。式(4)においても δ_{others} は試験体によらないと仮定している。ただし、式(3)では δ_{others} は相殺されているが、式(4)に基づき r を算定する際には δ_{others} は必ずしも相殺されない。そこで、 δ_{others} を次のように求めることとした。

$$\delta_{\text{others}} = 1 - \frac{1}{2}(r_{\text{blast}} + r_{\text{vertical}}) \quad (5)$$

ここで、 r_{blast} と r_{vertical} は、それぞれ接合面構成 C-b と C-v の軸力残存率(3体平均値)であり、 δ_{others} は2.69%となった。

このように、被覆膜以外の因子として、基準試験体と

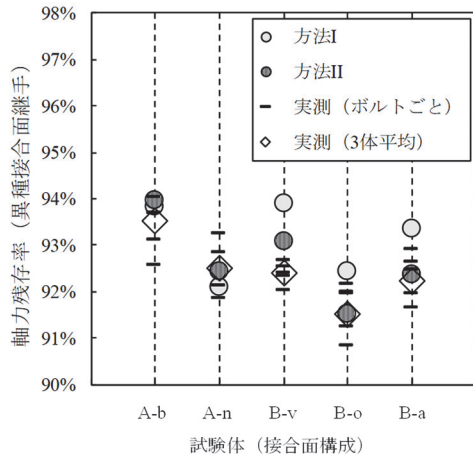


図7 基準試験体(試験体C)の試験結果に基づく軸力残存率の推定結果

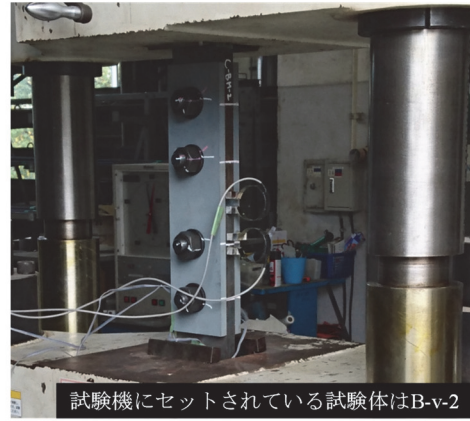


写真2 すべり耐力試験の状況

の膜厚の違いや、鋼材のリラクゼーション、ねじ部・ワッシャー等の影響をより具体的に考慮して r を推定する方法を、方法IIと呼ぶこととする。

c) 推定結果の比較

試験体A, Bの r について、実測値と方法I, IIによる推定値を比較した結果を図7に示す。同図は、方法Iにより r を推定した場合、試験体Aに対しては実測値より小さな r を、試験体Bに対しては実測値より大きな r を与え、ボルト軸力の低下を過小評価する傾向があることを示している。一方、方法IIを用いると軸力残存率の推定値の精度が向上することが示されている。

方法IIによってより高い精度で実測値を再現できたことから、次のことが示唆される。すなわち、異種接合面継手においては、各接合面における被覆膜の有無・種類、被覆膜の膜厚、鋼材のリラクゼーション、ねじ部・ワッシャー等がボルト軸力低下の支配因子であると考えられる。一方、タイプBにおいて、異種の接触面が接触している影響については、これを考慮しない方法IIによって実測値が高い精度で再現されたことから、今回検討した組合せにおいてその影響は小さく、高々方法IIの再現誤差程度であると推察される。

4. 異種接合面継手のすべり挙動

本章では、はじめにすべり耐力試験について説明する。つづいて、得られた試験結果と観察されたすべり性状について報告し、先行研究の結果も引用して、異種接合面継手におけるすべり係数について考察する。

(1) すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は、リラクゼーション試験後に実施した。いずれの試験体も、試験日の2日前から当日までの

間に最後のボルト軸力計測(得られた軸力を以下、試験直前のボルト軸力と呼ぶ)を行ってから載荷した。試験状況を写真2に示す。

載荷においては、載荷能力1000kNの万能材料試験機を用い、引張荷重を2kN/s程度の速度で主すべりが発生するまで単調増加させた。載荷中は、100Hzのサンプリングレートで荷重を計測した。また、母板間の相対変位、第1ボルト(すべり側の試験体内側ボルト)のボルト孔における母板-連結板間の相対変位(以下、第1ボルト孔の相対変位と呼ぶ)についても同じサンプリングレートで計測した。すべり耐力は、主すべりの発生によって大きな音(すべり音)と共に荷重低下が始まった時点の荷重値とした。

(2) すべり耐力試験の結果

すべり耐力試験の結果を表7に示す。計測の不具合に因り計測できなかった項目は×で示している。表中には、主すべり発生状況も表記している。いずれの試験体も主すべり発生時に明瞭な荷重低下を示したため、すべり耐力は明確に特定できた。ただし、縦回転式、有機ジンク、自然さびの接触面を有する試験体では、すべり音が確認されない場合が多かった。

表中のすべり係数は次式により算出した。

$$\mu_i = \frac{P_{cr}}{mnN} \quad (6)$$

ここに、 P_{cr} はすべり耐力、 $m(=2)$ は接合面数、 $n(=2)$ はボルト本数、 N はボルト軸力、 μ_i はすべり係数であり、添え字 i はすべり係数が設計軸力を N として求めたもの($i=1$)か、試験直前のボルト軸力を N として求めたもの($i=2$)かを表している。表7には、すべり係数のばらつきを表す推定量として標準偏差も表記している。標準本数が3ではあるが、異種接合面継手の各試験体に関する標準偏差は、標準的な継手の各試験体に関する標準

表-7 すべり耐力試験の結果

異種接合面継手の試験体													同種接合面継手の試験体														
試験体	試験直前のボルト軸力 [kN]				すべり耐力 [kN]	すべり係数				主すべり発生状況				試験体	試験直前のボルト軸力 [kN]				すべり耐力 [kN]	すべり係数				主すべり発生状況			
	第1ボルト	第2ボルト	試験体平均	試験体ごと		μ_1		μ_2		すべり音**	第1ボルト孔	母板間***	試験体ごと		試験体平均	試験体ごと	試験体平均	試験体ごと		μ_1		μ_2		すべり音**	第1ボルト孔	母板間***	
						3体平均	標準偏差*	試験体ごと	3体平均											標準偏差*	3体平均	標準偏差*	3体平均				標準偏差*
A-b	-1	212	218	215	489	0.597	0.575	0.569	0.564	1	0.127	0.301	C-b	-1	×	223	223	515	0.628	0.655	0.577	0.591	1	0.123	0.366		
	-2	204	×	204	461	0.562	0.019	0.566	0.007	1	0.153	0.290		-2	233	×	233	522	0.637	0.040	0.560	0.040	1	0.163	0.378		
	-3	208	209	209	464	0.566		0.556		1	×	0.247		-3	230	222	226	575	0.702		0.636		1	(0.161)	(2.926)		
A-n	-1	209	212	211	520	0.634	0.607	0.616	0.603	1	(0.057)	(0.202)	C-v	-1	213	224	219	415	0.507	0.491	0.475	0.456	1	0.053	0.230		
	-2	×	200	200	459	0.560	0.041	0.573	0.026	1	0.107	0.286		-2	234	222	228	335	0.408	0.076	0.368	0.080	1	0.044	0.174		
	-3	208	×	208	514	0.627		0.618		1	0.043	0.248		-3	218	×	218	457	0.557		0.524		1	0.051	0.313		
B-v	-1	203	214	208	466	0.568	0.546	0.560	0.544	2	0.019	0.272	C-i	-1	205	202	203	464	0.566	0.597	0.571	0.602	1	0.057	0.202		
	-2	207	209	208	426	0.519	0.025	0.511	0.028	3	0.077	0.213		-2	201	×	201	508	0.619	0.028	0.631	0.030	1	0.116	0.271		
	-3	201	×	201	451	0.549		0.559		3	0.111	0.289		-3	201	209	205	496	0.605		0.604		1	0.090	0.275		
B-o	-1	212	207	210	333	0.406	0.401	0.398	0.397	3	0.052	0.183	C-o	-1	207	208	208	263	0.321	0.311	0.317	0.299	3	0.051	0.167		
	-2	215	205	210	331	0.404	0.007	0.395	0.003	3	0.044	0.164		-2	212	209	211	262	0.319	0.015	0.311	0.027	3	0.056	0.154		
	-3	202	×	202	323	0.394		0.400		3	0.038	0.148		-3	×	225	225	241	0.294		0.268		3	(0.100)	(1.784)		
B-a	-1	×	198	198	487	0.594	0.593	0.615	0.585	1	0.108	0.256	C-n	-1	217	220	218	642	0.783	0.780	0.736	0.745	1	(0.397)	(2.037)		
	-2	215	217	216	489	0.596	0.003	0.566	0.026	1	0.101	0.281		-2	206	212	209	633	0.771	0.008	0.756	0.010	3	0.227	0.522		
	-3	212	210	211	484	0.590		0.574		1	0.084	0.235		-3	×	216	216	644	0.786		0.745		1	0.174	0.535		
													C-a	-1	224	217	221	653	0.796	0.790	0.740	0.745	1	0.111	0.321		
														-2	214	212	213	648	0.790	0.006	0.760	0.013	1	0.114	0.375		
														-3	223	214	218	643	0.784		0.736		1	0.055	0.327		

×は計測できなかった項目を表し、平均値の計算ではこれらを除外している。
 *：母集団のばらつきを表す推定量として、不偏分散の平方根を記載した。
 **：確認された場合は1、純く小さい音が確認された場合は2、確認されなかった場合は3とした。
 ***：固定側からすべった試験体については、すべり側で主すべりが発生した際の値を参考値として括弧書きで記載した。

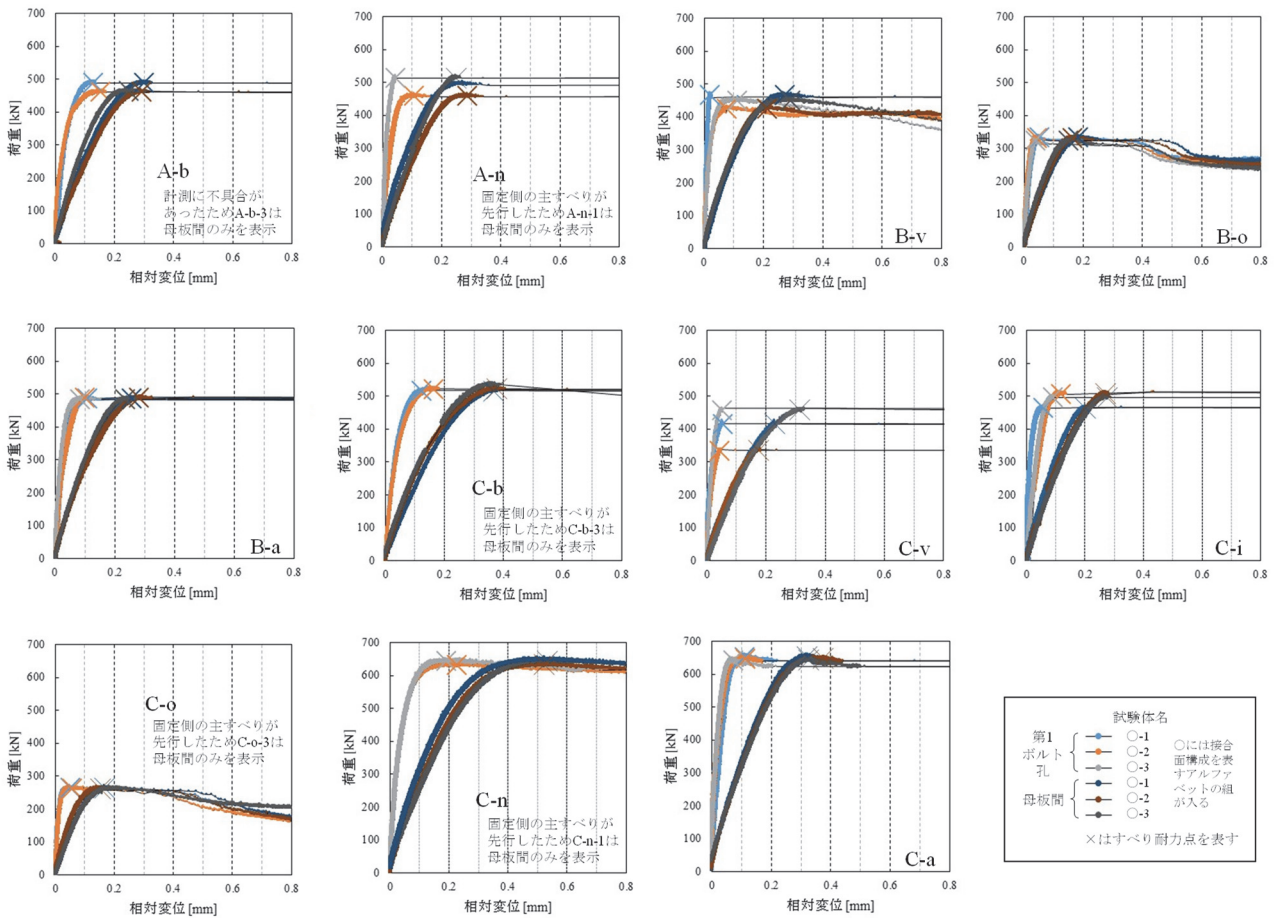


図-8 各試験体の荷重-相対変位関係

偏差と同等の値であった。得られたすべり係数の具体的な比較は、4.(4)において行う。

すべり耐力試験で得られた、各試験体の荷重-相対変位関係を図-8に示す。同図からわかる通り、主すべりが発生するまでの間、試験体 A, B においても荷重は単調に増加した。すべり耐力までの荷重領域において、異種接合面継手は同種接合面継手と同等に安定的な荷重伝達を果たし得るものと考えられる。

(3) 観察されたすべり性状

a) すべり後の接触面性状

すべり後の接触面性状を把握するため、3次元形状測定機(キーエンス VR-3200)を用いた光学計測を行った。計測は、接触面の損傷が著しいボルト孔周辺の状況を比較するため第1ボルト孔周辺を主対象とし、各接触面のすべり前後の状況を比較するため母板と接触していなかった表面(以下、非接触部と呼ぶ)についても対象とし

た。

まず、試験体Cの連結板に対する計測結果を図-9に示す。いずれもすべり方向を紙面横方向としており、コンター図は計測で得られた高さデータを撮影画像と合成させたものである。試験体 C-b の高倍率画像からは、ボルト孔周辺では粗面の細かい凸部が消失しすべり方向に筋目状の傷が発生していることが確認できる。試験体 C-v の高倍率画像では、非接触部において確認できるブラシによる傷が、ボルト孔周辺では凸部を中心に消失していることがわかる。試験体 C-i の高倍率画像からは、ボルト孔周辺では広い範囲で素地が露出し、塗膜が残存しているのは素地がくぼんでいる部分に限られていることがわかる。一方、試験体 C-o においては、低倍率のコンター図からわかる通り、塗膜が剥離した領域と対面で剥離した塗膜が付着した領域が入り乱れていた。高倍率画像はボルト孔周辺の中でも塗膜の剥離・付着が起きていない領域を撮影したものであり、一部に素地の露出が確認できる。このように、試験体C-oでは塗膜-素地間の界面破壊が支配的であったことがわかる。さび系の試験体 C-n, C-a に関しては、ボルト孔周辺では素地の凸部を中

心にさびがすり減っている様子が示されている。

つづいて、試験体Bの連結板と母板について第1ボルト孔周辺の計測結果を図-10に示す。いずれもすべり方向を紙面横方向としており、同図には比較のために試験体Cの非接触部に対する計測結果(図-9)を一部再掲している。試験体 B-v においては、高倍率画像から連結板のボルト孔周辺において接触面が著しくすり減り素地も平坦化していることが確認できる。ブラストによる素地の凹凸がほぼなくなるほど表層が素地ごと削り取られており、その程度は基準試験体(C-i)よりも著しいといえる。一方、母板側にはブラシによる傷の凸部において、連結板から絡め取られたと考えられる塗膜が多く残されており、各部ですべり方向に直交するブラシの傷が連結板の接触面に食い込みながらすべっていたものと推察される。試験体 B-o では、高倍率画像に示されているように、ボルト孔周辺においても連結板の膜厚の減少が比較的小さかったことが見てとれ、試験体 B-v とは対照的であった。母板においては、低倍率画像からわかる通り、ボルト孔周辺で塗膜が広い範囲で剥離しており、剥離と付着が入り乱れていた試験体 C-o と状況は異なっていた。

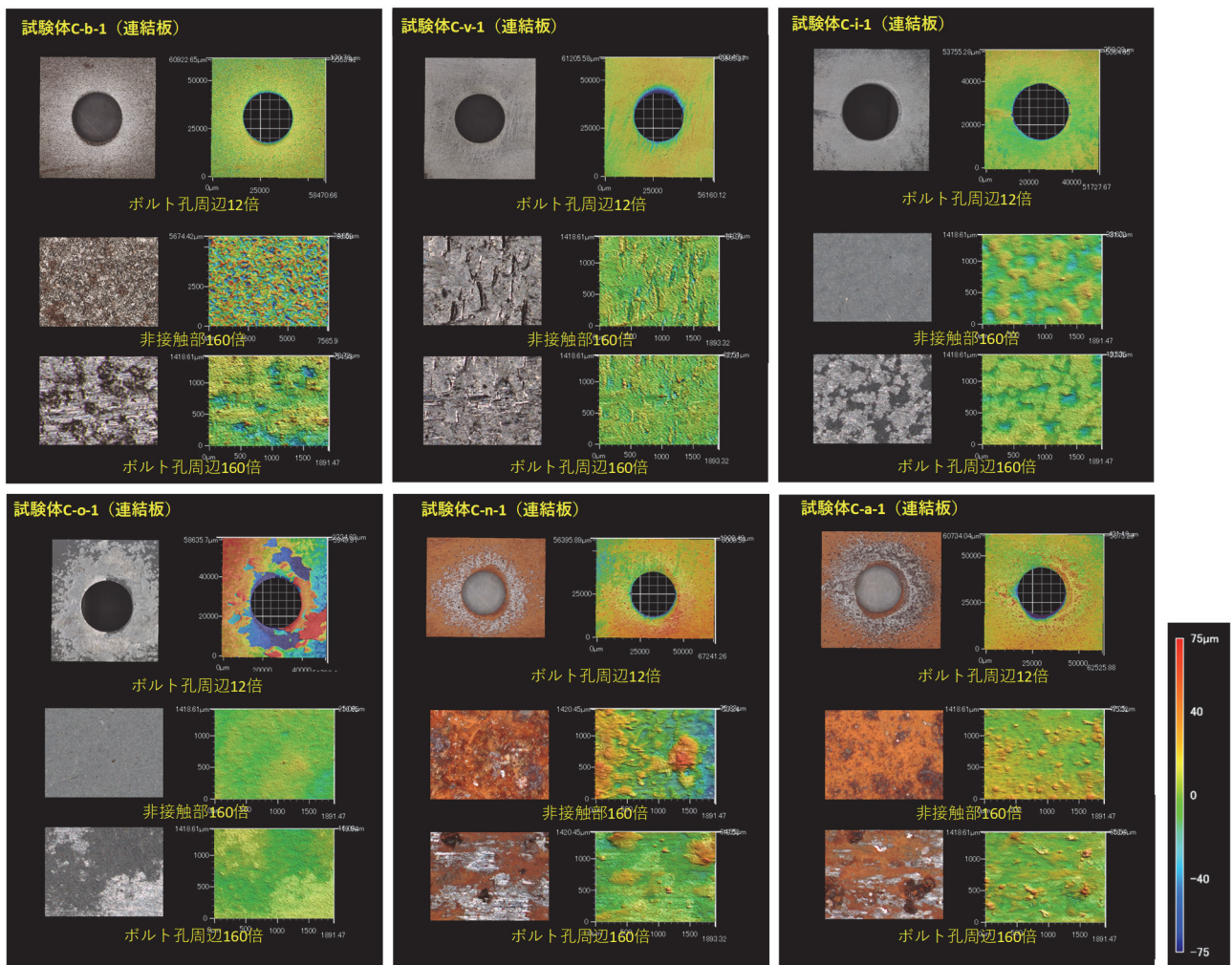


図-9 すべり後の接触面の計測結果(試験体C)

剥離した塗膜は連結板に付着し残存するものもあれば、試験体解体時に剥がれ落ちたものもあった。試験体B-oでは、付着が弱いことで母板側の有機ジンク塗膜が選択的に剥離したものと考えられる。試験体B-aでは、基準試験体(C-a, C-i)の接触面の損傷状況と大きな違いは見受けられなかったが、高倍率画像に示されているように連結板側には粉末化した自然さびの付着が認められ、無機ジンクとともに自然さびもすり減っていたことが確認された。

b) すべり後の膜厚

前項で確認された接触面における被覆膜の減少・剥離

状況について更に検討するため、すべり試験後の接触面に対する膜厚計測を実施した。計測箇所としては、リラクゼーション試験前にも計測した各ボルト孔周辺2か所のほか、一般部としてボルト孔の縁から28mm離れた2か所も含めた(図-11)。すべり試験後のボルト孔周辺には、ボルトによる締付けの影響とすべり時の擦れの影響が考えられる。一般部ではすべり時の擦れの影響のみが主として考えられる。

図-12は、試験体C-i, C-o, C-nについて、ボルト締め前におけるボルト孔周辺とすべり試験後における一般部の計測結果を比較した結果である。試験体C-i, C-nでは、

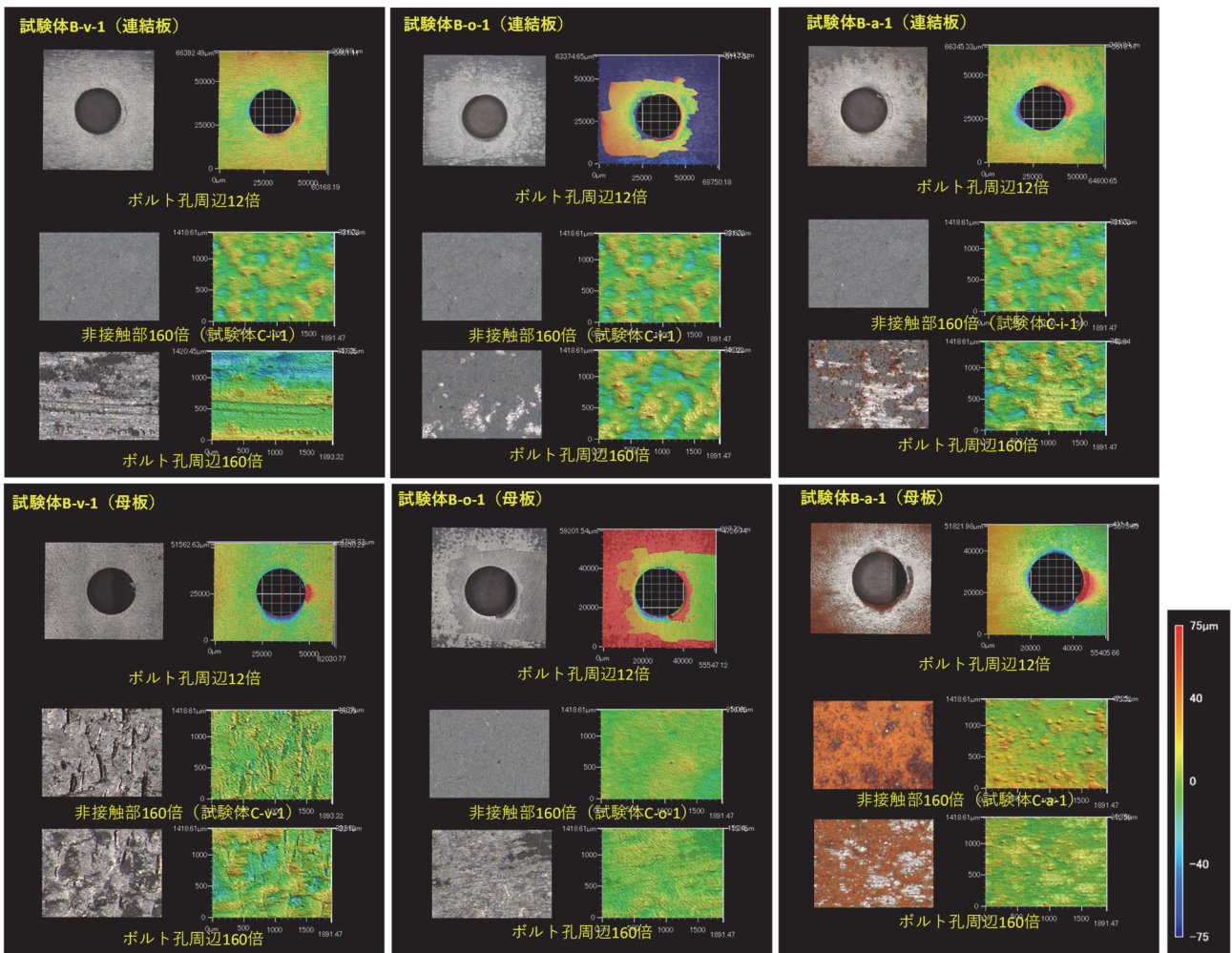


図-10 すべり後の接触面の計測結果(試験体B)

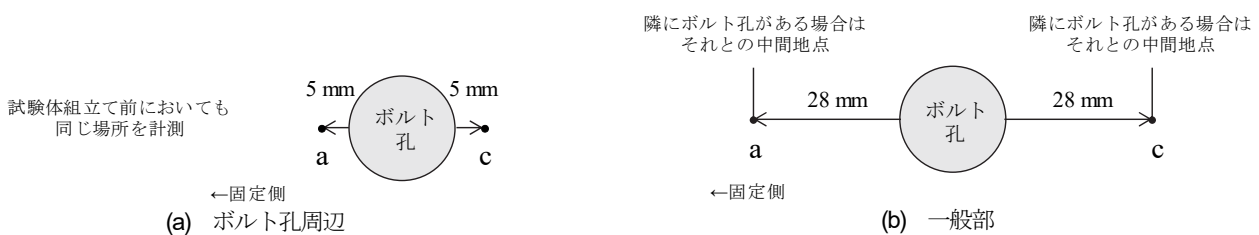


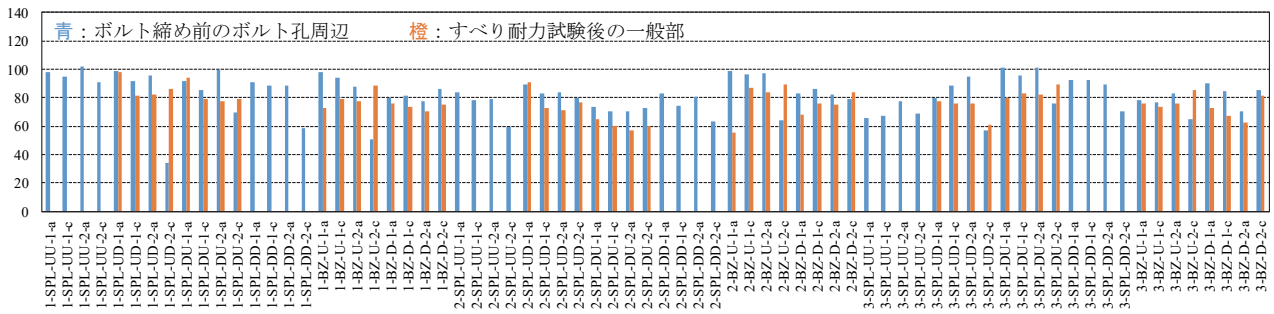
図-11 すべり耐力試験後における膜厚の計測箇所(a,c)

前者に対して後者がそれぞれ一定に近い割合で低い値を示しており、すべりに因り被覆膜の表層で擦れが生じていたと考えられる。一方、試験体 C-o では両者の差が小さく擦れはほとんど発生しなかったものと推察される。

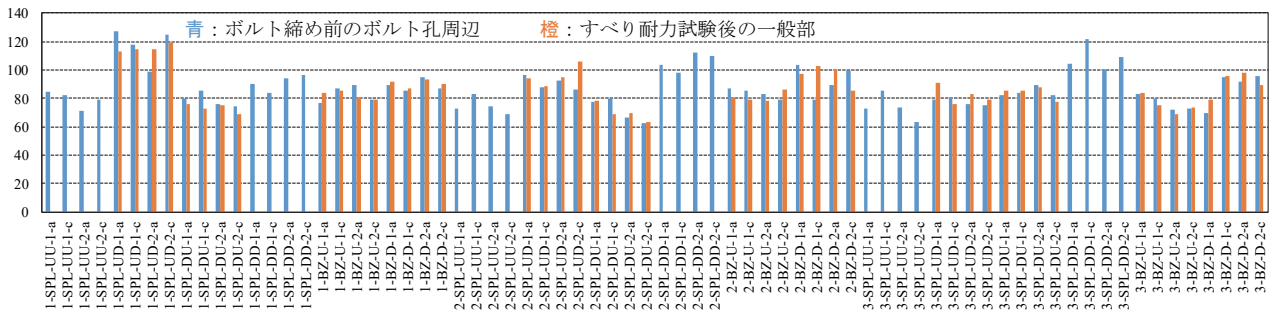
図-13 では、これらの接合面構成の試験体について、ボルト締め前とすべり試験後におけるボルト孔周辺の計測結果を比較している。試験体 C-i, C-n については、図-12 でみたよりも大きな割合で膜厚が低下しており、すべりによる被覆膜の擦れに加え、ボルトの締付けによる被覆膜のクリープによる膜厚減少も大きかったことが示唆されている。一方、試験体 C-o では塗膜の剥離・付着によって複数の箇所においてすべり後の膜厚が大きな増

減を示している。

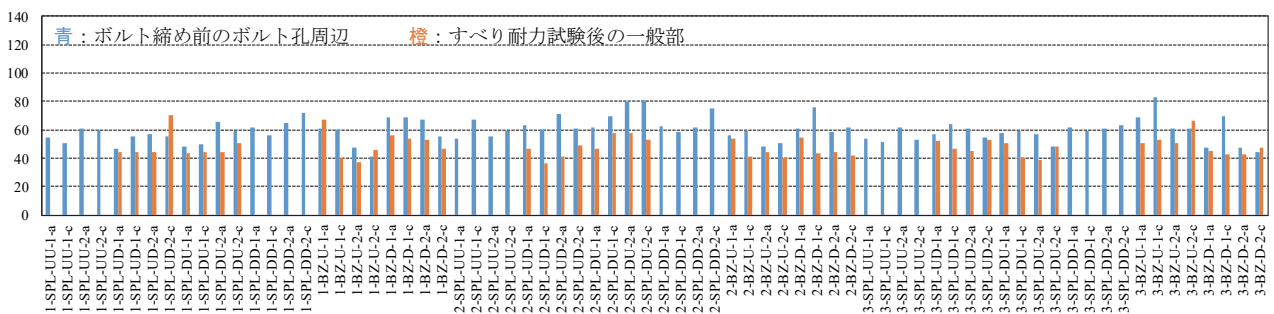
図-14 では、試験体 B の連結板に関して、ボルト締め前におけるボルト孔周辺とすべり試験後における一般部の計測結果を比較している。試験体 B-o では塗膜の剥離が広範囲に及んでいたため、一般部においても8か所で大幅な膜厚の増加が計測されている。その8か所を除いた計測箇所の平均値の差分(ボルト孔周辺—一般部)は、試験体 B-v では19.7 μm 、試験体 B-o では2.30 μm 、試験体 B-a では14.8 μm である。連結板における無機ジंकの擦れによる膜厚減少は試験体 B-v, B-a において大きい傾向にあり試験体 B-o では極端に小さかったことが示されている。



(a) 試験体 C-i における膜厚 (単位: μm)



(b) 試験体 C-o における膜厚 (単位: μm)

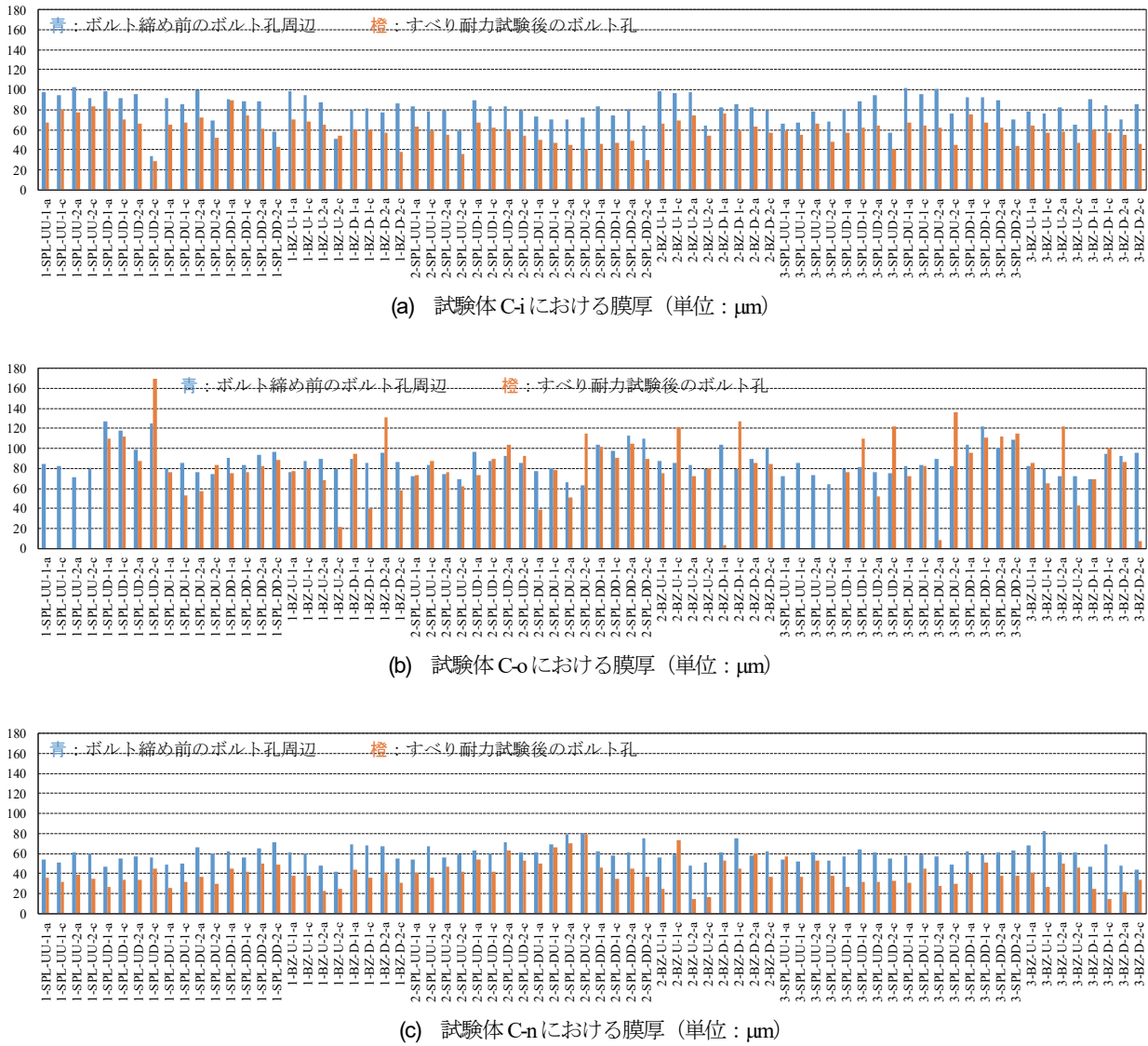


(c) 試験体 C-n における膜厚 (単位: μm)

記号は計測箇所を表している。記号A-B-C-D-Eにおいて各アルファベットは次の意味である。

- A: 試験体の個体番号 (1, 2, 3)
- B: 鋼板 (SPL: 連結板側, BZ: 母板側)
- C: 接合面の位置 (UU: 上側連結板の上側, UD: 上側連結板の下側, U: 母板の上側など。ボルト頭側を上, ナット側を下と定義する)
- D: ボルト番号 (第1ボルト: 1, 第2ボルト: 2)
- E: 計測箇所 (図-11参照)

図-12 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後における一般部の膜厚 (試験体 C)



記号は計測箇所を表している。その意味は図-12を参照のこと

図-13 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後におけるボルト孔周辺の膜厚 (試験体 C)

(4) すべり係数

a) タイプ A

図-15は、タイプ A の試験体のすべり係数 μ_2 と基準試験体のすべり係数 μ_2 (後者は基準すべり係数と記す) を比較したものである。また、清水・石崎³⁾の試験結果 (試験体の β_d は 0.84。試験体 A-b 相当) と、南ら⁴⁾の試験結果 (試験体の β_d は 0.64) も併せて示している。(c)の溶射は、亜鉛アルミ擬合金溶射を指している。図中には、タイプ A の試験体における接触面の組み合わせを記号で示しており、例えば「ブラスト | 無機ジンク」は母板の表面側がブラストで裏面側が無機ジンクであることを意味する (以下、タイプ A に関して同様に表す)。同図では、試験体 A のすべり係数の 3 体平均値は、2 つの基準すべり係数の 3 体平均値のうち低いほう (以下 $\bar{\mu}_2^{low}$ とし、他方を $\bar{\mu}_2^{high}$ とする) に近い値をとる傾向が示されてい

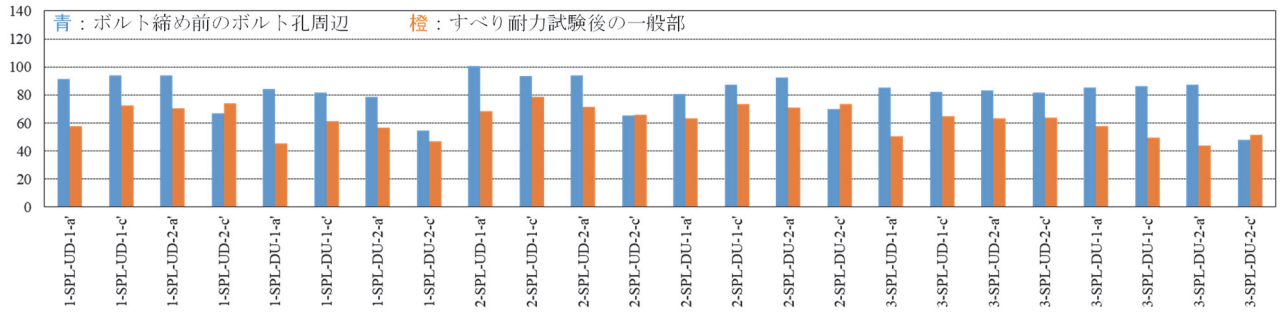
る。

図-16 は、次式で定義する相対評価指標 ρ_2 によって、 $\bar{\mu}_2^{low}$ 、 $\bar{\mu}_2^{high}$ それぞれに対するタイプ A の試験体で得られたすべり係数 μ_2 の 3 体平均値の近接度を評価した結果である。

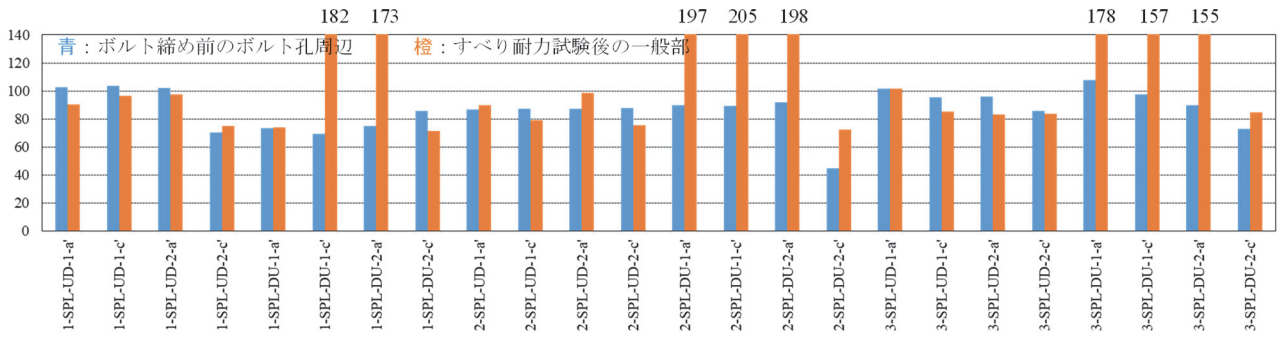
$$\rho_2 = \frac{\bar{\mu}_2 - \bar{\mu}_2^{low}}{\bar{\mu}_2^{high} - \bar{\mu}_2^{low}} \quad (7)$$

ここに、 $\bar{\mu}_2$ は異種接合面継手の試験体のすべり係数 μ_2 の 3 体平均値であり、 ρ_2 は $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{low}$ に近ければ 0 に、 $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{high}$ に近ければ 1 に近づく。また、 $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{low}$ より小さければ負の値を示す。

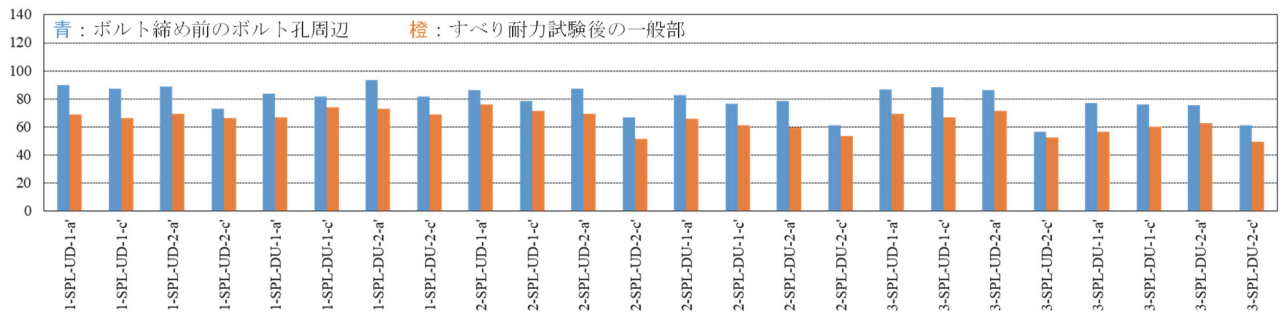
図-16 に示されているように、試験体 A-b の結果以外の試験体に関して ρ_2 は 0 付近の値となった。試験体 A-b に関しては ρ_2 が -2.54 と他よりもかなり低い値を示しているが、これは試験体 A-b では $\bar{\mu}_2^{low}$ と $\bar{\mu}_2^{high}$ が近接して



(a) 試験体B-vにおける膜厚 (単位: μm)



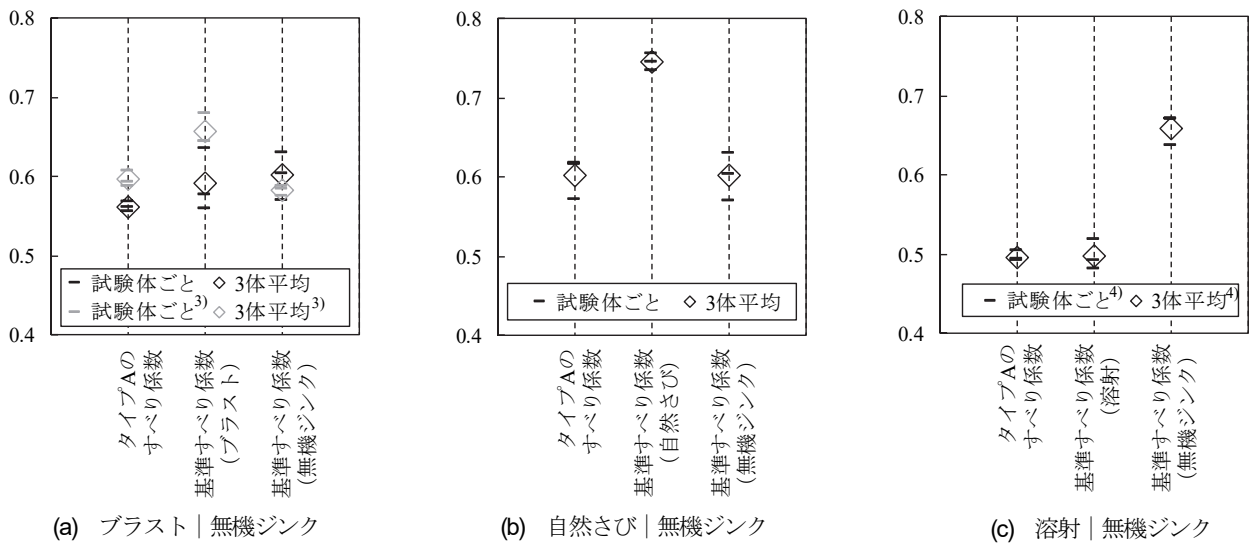
(b) 試験体B-oにおける膜厚 (単位: μm)



(c) 試験体B-aにおける膜厚 (単位: μm)

記号は計測箇所を表している。その意味は図-12を参照のこと

図-14 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後における一般部の膜厚 (試験体B)



(a) プラスト | 無機ジンク

(b) 自然さび | 無機ジンク

(c) 溶射 | 無機ジンク

図-15 異種接合面継手タイプAの試験体に関するすべり係数 μ_2 の比較

おり ρ_2 の定義式(7)の分母が0.01と小さかったためである。分子の絶対値も0.03とまた小さいことから、試験体A-bについても $\bar{\mu}_2$ は $\bar{\mu}_2^{low}$ に近い値であるといえる。

このように、タイプAの試験体の3体平均値から、タイプAの継手のすべり係数は2種類の接触面のうちすべり係数(同種接合面継手での値)の低いほうに近い値を示す傾向が確認された。タイプAの継手において、主すべりは基準すべり係数が低い側の接合面での主すべりに誘発されているものと考えられる。

b) タイプB

図-17では、タイプBの試験体のすべり係数 μ_2 を基準すべり係数と比較している。ここでは、連結板の接触面を本試験の試験体と同様に無機ジンクとした丹波ら^{5,6}、橋本ら⁷、本多ら⁸、吉岡ら⁹による結果も示している(試験体の β_d はそれぞれ、0.66, 0.72, 0.44, 0.44)。特に、本研究と試験体接触面の施工条件が近いと考えられるものは同じ図に併記している。また基準すべり係数について、土木学会の指針(案)¹⁰において推奨されている μ_d も赤線で併記している。また図中には、タイプBの試験体における接触面の組み合わせを記号で示しており、例えば「縦回転式-無機ジンク」は母板側が縦回転式で連結板側が無機ジンクであることを意味する(以下、タイプBに関して同様に表す)。(f)の回転式は、ディスクグライダー等の回転式動力工具で仕上げた接触面(2種ケレン)を指している。

同図に示されているように、すべり係数は一定のばらつきを有しているものの、基準すべり係数の平均値は橋本ら⁷の自然さび-無機ジンクの結果以外は土木学会の指針(案)¹⁰における μ_d の推奨値以上の値であった。タイプBのすべり係数についてみると、接触面の組み合わせが縦回転式-無機ジンクと薬剤さび-無機ジンクの試験体では0.5以上の値が得られている。ブラスト-無機ジンクのすべり係数においては橋本ら⁷の結果以外ではすべて0.5以上となっている。有機ジンク-無機ジンクでは、すべり係数が0.35~0.40程度に留まっているが、これは一般の有機ジンク塗料を用いたためと考えられる。実際、高摩擦型の有機ジンクと無機ジンクを組み合わせたタイプBの試験体では μ_1 として0.51が得られている¹³。一方、タイプBのすべり係数と各基準すべり係数を比較すると、その関係性は非接触型と異なり様々であることがわかる。

基準すべり係数に対するタイプBのすべり係数の関係性を ρ_2 によって評価した結果を、図-18に示す。本試験と吉岡ら⁹における薬剤さび-無機ジンクのすべり係数および橋本ら⁷のブラスト-無機ジンクのすべり係数に関しては、 ρ_2 が0付近の値を示している。一方、本試験における縦回転式-無機ジンクと有機ジンク-無機ジンクのすべり係数については、 ρ_2 がそれぞれ0.60と0.33で

あり、異仕様の接触面を含む影響として $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{low}$ よりも高い値であったことを示している。逆に、本多ら⁸の薬剤さび-無機ジンクや橋本ら⁷の自然さび-無機ジンクでは ρ_2 がかなり低い値となっている。

縦回転式-無機ジンクの組み合わせで $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{low}$ よりも高かった理由としては、前節で試験体B-vに関して述べた連結板側塗膜(無機ジンク)が著しく削り取られた状況から、連結板の接触面に母板の接触面が深く食込みながらすべった影響が考えられる。有機ジンク-無機ジンクで $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{low}$ よりも高かった理由としては、低いすべり係数を示した有機ジンクの接触面数がタイプBの試験体と基準試験体で異なっていたことが考えられる。すなわち、有機ジンクの接触面数が2面の前者では同4面の後者よりも塗膜の剥離を起こす弱点の数が少なかったことが影響した可能性がある。実際、前節で述べた通り、試験体B-oでは有機ジンク塗膜においてのみ剥離が認められており、有機ジンク塗膜の弱点が主すべりを誘発したことが示唆されている。一方、本多ら⁸の結果に関して ρ_2 がかなり低い値であった要因としては、理由は不明であるが他の薬剤さび-無機ジンクと比べて、 $\bar{\mu}_2^{low}$ (無機ジンク)が高かった点が挙げられる。 $\bar{\mu}_2$ については他の薬剤さび-無機ジンクとほぼ同等である。

なお、基準すべり係数データの不足により、縦回転式-無機ジンク、有機ジンク-無機ジンク、ブラスト-無機ジンク、回転式-無機ジンクに関する丹波ら^{5,6}、回転式-無機ジンクに関する橋本ら⁷の ρ_2 は算出できなかったが、得られている基準すべり係数とタイプBのすべり係数の大きさから、多くの場合 ρ_2 は0付近以上になると推察される。

5. 異種接合面継手の適用性

本章では、第3章と第4章で述べた知見に基づき、タイプAとタイプBの異種接合面継手に関して、ボルト軸力低下後のすべり係数確保の観点からその適用性を考察する。そして、適用可能性が高いと考えられる継手については設計すべり係数も検討する。

(1) タイプA

4.(4)で述べたように、タイプAの継手においては2つの接合面のうちすべり係数の低いほうに誘発されてすべりが発生すると推察され、双方の接合面の基準すべり係数が十分把握されていればタイプAは適用可能であると考えられる。特に、ブラスト|無機ジンク、自然さび|無機ジンクの組み合わせについては、個々の基準すべり係数についてこれまで十分なデータがあることから適用可能性は高く、道示または鉄標に準じてすべり係数の設

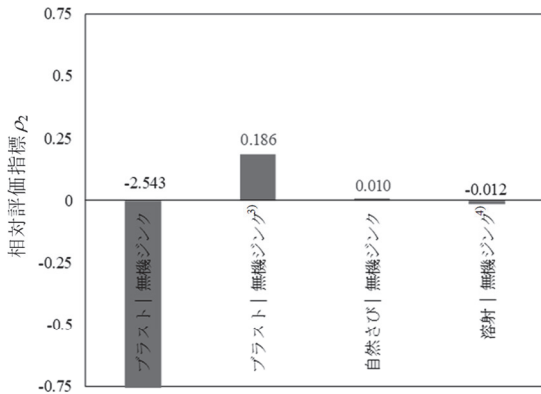


図-16 タイプAの試験体で得られたすべり係数の基準すべり係数に対する近接度

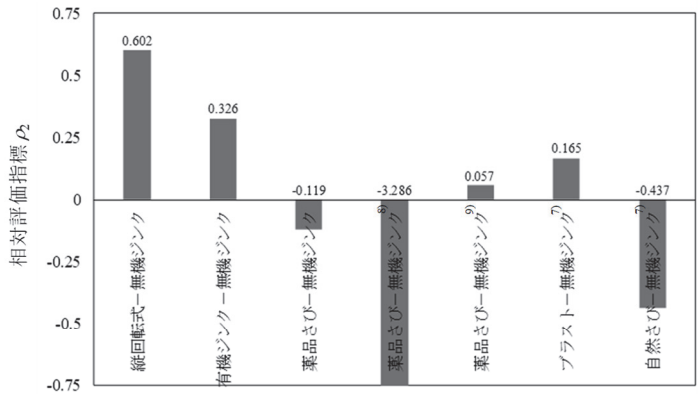


図-18 タイプBの試験体で得られたすべり係数の基準すべり係数に対する近接度

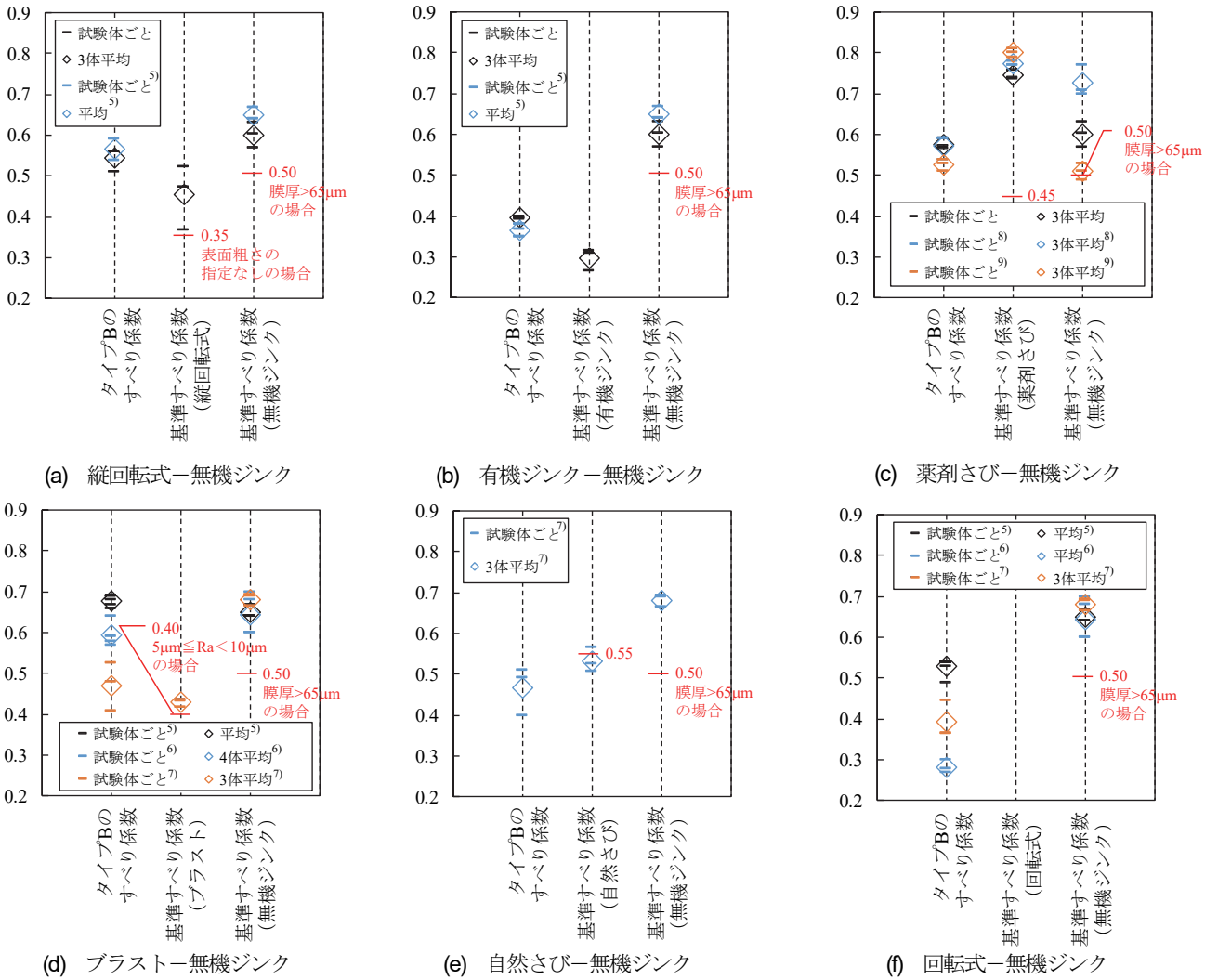


図-17 異種接触型の試験体に関するすべり係数の比較

計値 μ_d を0.40(粗面状態相当)としてよいと考えられる。

表-8は、実際に得られるすべり係数の設計値に対する余裕に関して、 $\bar{\mu}_2$ (試験値)と μ_d の比(以下、余裕度)をとり、タイプAの各試験体とそれに対応する基準試験体(無機ジンク)で値を比較したものである。比較のた

めに、双方の試験体における余裕度の比も示している。余裕度の算定にあたって、基準試験体(無機ジンク)については道示より $\mu_d = 0.45$ 、タイプAについては上記により $\mu_d = 0.40$ とした。同表では、タイプAの試験体の余裕度が基準試験体(無機ジンク)の余裕度と同等以

上であったことが示されている。これは、ブラスト | 無機ジンクと自然さび | 無機ジンクのタイプ A に関して $\mu_d = 0.40$ とすれば、道示で設計された無機ジンクの継手と同等あるいはそれよりやや大きな余裕度が期待できることを意味している。

このように、ブラスト | 無機ジンクおよび自然さび | 無機ジンクの組み合わせによるタイプ A の継手については、 $\mu_d = 0.40$ として適用可能であると考えられる。ただし、接触面が粗面系の同種接合面継手よりボルト軸力の低下が若干大きい (3. (2) 参照) ため、無機ジンクの塗膜厚が過大とならないようにするなどの配慮がなされることが望ましいと考えられる。

(2) タイプ B

タイプ B の継手は、主に既設構造物において $\mu_d = 0.40$ で設計された既設継手の取替え時における適用が想定される。したがって、 μ_d が 0.40 程度になることをひとつの要件として適用性を検討する。

表-9 は、タイプ B の試験体とその基準試験体 (無機ジンク) に関して、実際に得られたすべり係数の設計値に対する余裕度を比較している。有機ジンク-無機ジンクと自然さび-無機ジンクについては、タイプ B の試験体ですべり係数 μ_2 が 0.40 を下回ったため除外して評価している。同表は、本多ら⁸⁾の薬剤さび-無機ジンク、橋本ら⁷⁾のブラスト-無機ジンクおよび自然さび-無機ジンク以外においては、タイプ B の試験体の余裕度が基準試験体 (無機ジンク) の余裕度と同等以上であったことを示している。本多ら⁸⁾の結果に関しては、4. (4) で述べた通り、タイプ B の試験体で他の薬剤さび-無機ジンクとほぼ同等の $\bar{\mu}_2 = 0.573$ が得られており、すべり係数自体は高いといえる。橋本ら⁷⁾の結果ではいずれもタイプ B の試験体の余裕度が低いが、母板の基準すべり係数

(ブラスト) も 0.43 と低く耐候性鋼材でもあるため、ブラストや自然さびの接触面状況に起因している可能性がある。なお同表の他のブラスト-無機ジンクでは基準試験体 (無機ジンク) と同等以上の余裕度が示されている。

このように、縦回転式-無機ジンクと薬剤さび-無機ジンクについては、基準試験体 (無機ジンク) と同等以上の余裕度または 0.57 程度の平均すべり係数が得られている。また、リラクセーション試験ではこれらのタイプ B の試験体におけるボルト軸力の低下が基準試験体 (無機ジンク) 以下であったことが確認されている (3. (2) 参照)。一方、縦回転式や薬品さびの適用に際しては、作業速度、作業姿勢、作業者の熟練度等の施工条件によってすべり係数が異なる可能性があり、接触面の仕上がりに注意が必要と考えられる。これらのことから、縦回転式-無機ジンクと薬剤さび-無機ジンクの継手については、接触面の仕上がりに留意のうえ (表面粗さと膜厚の参考値は表-4, 表-5 を参照のこと)、0.40 程度の μ_d の下で適用してもよいと考えられる。

ブラスト-無機ジンクについても、 μ_d を 0.40 程度として適用できる可能性は十分あると考えられるが、上述の通り一部では低いすべり係数が報告されており、またボルト軸力の低下挙動が未確認であることから、母板の基準すべり係数 (ブラスト) の影響やボルト軸力の低下挙動の確認を行ってから適用することが望ましいと考えられる。

有機ジンク-無機ジンク (有機ジンクは非高摩擦型の塗料を使用) については、得られるすべり係数が 0.40 を下回る可能性が明らかとなった。タイプ B の継手のすべり特性を把握したうえで、慎重に適用の検討を行うべきである。自然さび-無機ジンクについても、今後さらに試験データを蓄積する必要があると考えられる。

表-8 異種接合面継手タイプ A の試験体で得られたすべり係数の設計値に対する余裕度

	ブラスト 無機ジンク	自然さび 無機ジンク	
	本試験	本試験	清水・石崎 ³⁾
基準試験体 (無機ジンク) の余裕度	1.33	1.33	1.30
タイプ A の試験体の余裕度	1.40	1.50	1.49
余裕度の比	1.05	1.13	1.15

基準試験体 (無機ジンク) における設計すべり係数は 0.45 とした。
タイプ A の試験体における設計すべり係数はいずれも 0.40 とした。

表-9 異種接合面継手タイプ B の試験体で得られたすべり係数の設計値に対する余裕度

	縦回転式-無機ジンク		薬剤さび-無機ジンク			ブラスト-無機ジンク			自然さび-無機ジンク
	本試験	丹波ら ⁵⁾	本試験	本多ら ⁸⁾	吉岡ら ⁹⁾	丹波ら ⁵⁾	丹波ら ⁶⁾	橋本ら ⁷⁾	橋本ら ⁷⁾
基準試験体 (無機ジンク) の余裕度	1.33	1.44	1.33	1.62	1.13	1.44	1.43	1.52	1.52
タイプ B の試験体の余裕度	1.35	1.41	1.48	1.43	1.32	1.70	1.49	1.18	1.17
余裕度の比	1.01	0.98	1.11	0.89	1.16	1.17	1.04	0.78	0.77

基準試験体 (無機ジンク) における設計すべり係数は 0.45 とした。
タイプ B の試験体における設計すべり係数はいずれも 0.40 とした。

6. 結論

本研究では、仕様の異なる接触面を含む高力ボルト摩擦接合継手（異種接合面継手）の適用性を明確にすることを目的に、タイプAとタイプBの双方の試験体を対象としたリラクセーション試験とすべり耐力試験を行い、ボルト軸力の低下挙動や軸力低下の支配因子、すべり挙動等の評価を行った。そして、先行研究の結果も引用して、適用可能性の高い継手について設計すべり係数を接触面の組み合わせごとに検討した。本研究の結論は、次の通りである。

- タイプAの継手に関して、ブラスト|無機ジンクおよび自然さび|無機ジンクの組み合わせであれば μ を0.40として適用可能であると考えられる。ただし、接触面が粗面系の同種接合面継手よりボルト軸力の低下が若干大きいため、無機ジンクの塗膜厚が過大とならないようにするなどの配慮がなされることが望ましいと考えられる。
- タイプBの継手に関して、縦回転式-無機ジンクと薬剤さび-無機ジンクの組み合わせであれば、 μ を0.40程度として適用可能であると考えられる。ただし、縦回転式と薬剤さびの仕上がりは本研究の試験体と同等であることを前提とする。ブラスト-無機ジンクの組み合わせの場合も、 μ を0.40程度として適用できる可能性は十分あると考えられるが、母板の基準すべり係数（ブラスト）の影響やボルト軸力の低下挙動の確認をしてから適用することが望ましいと考えられる。

本研究では標準的と考えられる仕上がりを目指して接触面を施工したが、施工条件の違いによってすべり係数がある程度ばらつくことも想定される。したがって、異種接合面継手に関して今後もさらにデータが蓄積されていくことが望ましいと考えられる。

謝辞：本研究は、鋼橋技術研究会「高力ボルト継手施工部会（部会長：南 邦明）」の活動の一環で行ったものである。その実施において、鋼橋技術研究会技術委員会（委員長：森 猛）の委員の方々および当部会の方々から数々のご意見・ご協力を賜った。また、極東メタリコン工業(株)の小寺 健史氏には、縦回転式動力工具による施工においてご協力を賜った。ここに記して各位に心より感謝申し上げます。

付録 表面粗さ評価値に及ぼす評価長さの影響

JIS B 0633:2001¹⁴⁾では、非周期的な粗さ曲線をもつ計測対象面に対して、推定される粗さパラメータ R_a に応じ

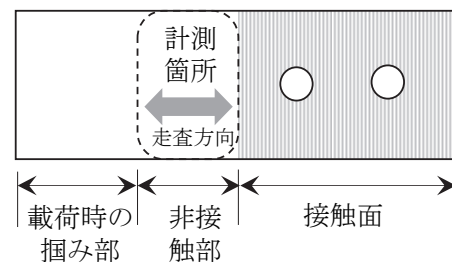
て異なる評価長さを採用し表面粗さを計測することとしている。例えば、推定される R_a が $0.1\mu\text{m} < R_a \leq 2\mu\text{m}$ の場合は評価長さを4mm、 $2\mu\text{m} < R_a \leq 10\mu\text{m}$ の場合は評価長さを12.5mmとしている。ボルト継手の接触面で計測される R_a は後者の範囲に含まれる場合が多いと考えられるが、接触式の粗さ計を用いる場合、評価長さ4mmでの計測時間は同12.5mmに対して約1/3に縮減される。そこで、本研究の試験体における6種類の接触面について評価長さを12.5mmとした計測と4mmとした計測をそれぞれ実施し、接触面の粗度を評価する際の評価長さの影響を検討することとした。

計測箇所は、固定側母板の非接触部（付図-1）とし、各試験体について長手方向にそれぞれの評価長さで5回ずつ計測した。計測には表面粗さ計（サーフテスト SJ-210）を用い、接触式計測であるため位置をずらしながら計測し、 R_a と R_{zms} の3体平均（15データの平均値）を比較することで評価長さの影響を検討した。なお、ノイズ除去のために計測結果では Gaussian フィルター¹⁴⁾が使用されている。

計測結果は付表-1に示す通りであった。この結果に基づいて異なる評価長さを用いた計測結果の相関を示したものが付図-2である。同図は、15データの平均値で比較すれば、 R_a と R_{zms} のどちらのパラメータにおいても、両者の間に高い相関が顕れることを示している。

付図-3は、それぞれの評価長さの場合について3体平均の変動係数を示している。まず R_a に関してみると、いずれの評価長さの場合も縦回転式と有機ジンクの接触面において高い変動係数をとる傾向が示されており、これらの接触面において粗度のばらつきが大きいことがうかがえる。ブラストについては変動係数が試験体 C-b で小さいものは試験体 A-b では高い値が示されている。

その理由を検討するため、評価長さ12.5mmで計測した場合の R_a について、各試験体に関する平均値の変動係数および各計測値の変動係数を比較したものが付表-2である。同表には参考として無機ジンクの接触面に対する計測の変動係数も示している。これより、ブラストでは接触面ごとの粗度のばらつきが大きく、付図-3に示された試験体 C-b と A-b の変動係数の違いはその影響によ



付図-1 固定側母板の非接触部における表面粗さ計測箇所

るものと考えられる。

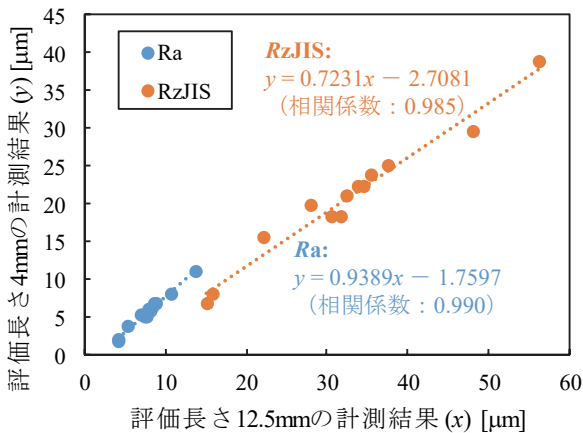
付図-3における R_a の変動係数に関して、評価長さの違いの影響についてみると、評価長さが4mmのほうが高い変動係数を示す傾向が認められるものの、評価長さ12.5mmによる計測の変動係数が0.15以上のもので、評価長さを4mmとした計測の変動係数より1.5倍以上高い値を示すものはなかった。

つぎに、付図-3において R_{zIS} の変動係数についてみると、 R_a と同様に縦回転式と有機ジンクに関して高い変動係数をとる傾向が示されており、ブラストに関しては R_a と同様の傾向となっている。評価長さの違いの影響につ

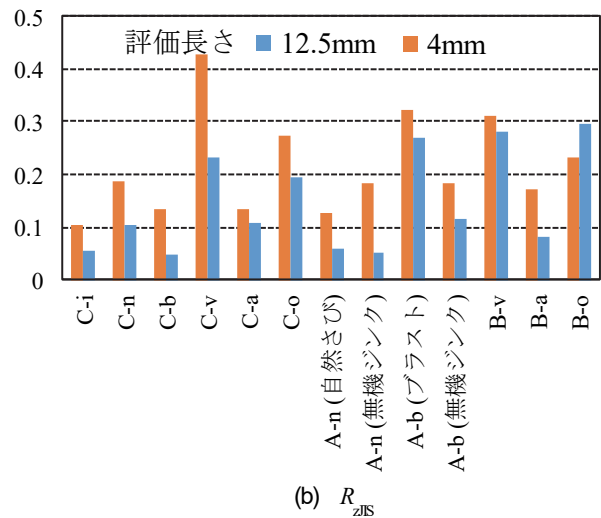
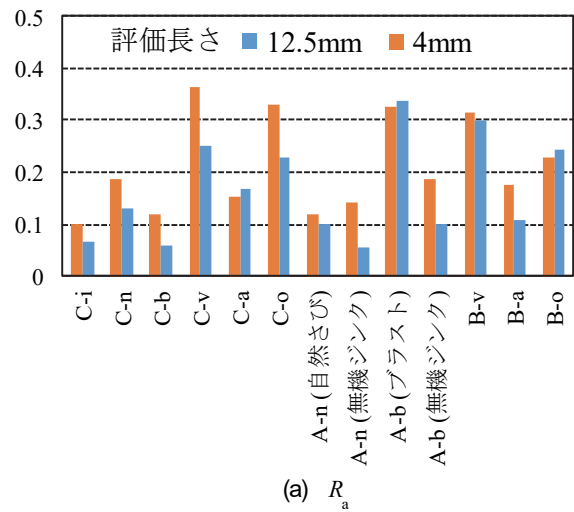
いてみると、全体として R_a の場合よりも評価長さの違いの影響が大きく顕れている。これは、 R_a が評価長さに含まれるすべての計測点高さを平均化したパラメータであるのに対し、 R_{zIS} が評価長さにおいて高さに関する上位10位までの計測点高さを平均化したパラメータであるためと考えられる。試験体C-vでは評価長さ4mmの場合の計測結果において変動が0.4を超えており、ブラシに因る微細な傷が点在した縦回転式特有の接触面性状(図-8参照)に因り評価長さの影響が特に強く顕れている可能性がある。しかしながら、試験体C-vを除けば、 R_a と同様に、評価長さ12.5mmによる計測の変動係数が

付表-1 固定側母板の非接触部における表面粗さ計測結果

粗さパラメータ		R_a		R_{zIS}	
評価長さ		12.5mm	4mm	12.5mm	4mm
試験体	A-b(ブラスト)	10.83	8.1	48.0	29.7
	A-b(無機ジンク)	7.75	5.01	31.7	18.3
	A-n(自然さび)	8.16	5.84	32.5	21.1
	A-n(無機ジンク)	7.99	6.13	33.8	22.4
	B-v	8.70	6.70	37.7	25.0
	B-o	4.26	1.81	15.20	6.8
	B-a	7.61	5.04	30.6	18.2
	C-b	13.8	11.1	56.3	38.9
	C-v	5.53	3.8	22.1	15.5
	C-i	8.36	6.3	34.5	22.4
	C-o	4.32	2.1	15.88	8.1
	C-n	9.02	6.78	35.5	23.7
	C-a	7.02	5.39	28.1	19.7



付図-2 異なる評価長さを用いた計測結果の間の相関



付図-3 表面粗さの計測値の3体平均における変動係数

付表-2 各試験体に関する平均値と各計測値の変動係数 (n=5)

試験体名	平均値 [μm]	変動係数	試験体名	平均値 [μm]	変動係数
A-b-1(ブラスト)	15.8	0.0612	A-b-1(無機ジンク)	7.48	0.0527
A-b-2(ブラスト)	8.21	0.112	A-b-2(無機ジンク)	8.50	0.0667
A-b-3(ブラスト)	8.48	0.140	A-b-3(無機ジンク)	7.27	0.0933
C-b-1	13.8	0.0445	C-i-1	8.33	0.0822
C-b-2	14.0	0.0704	C-i-2	8.53	0.0313
C-b-3	13.6	0.0531	C-i-3	8.20	0.0712
変動係数	0.235	-	変動係数	0.0616	-

0.15以上のもので、評価長さを4mmとした計測の変動係数より1.5倍以上高い値を示すものはなかった。

以上から、本研究では十分なデータ数の平均値を用いることを前提として、ボルト評価長さを4mmとして R_a と R_{z15} の計測を行うこととした。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編，2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），2009.
- 3) 清水織恵，石崎雄一：仕様の異なる摩擦接合面の継手性能に関する試験報告，土木学会第67回年次学術講演会，I-340，2012.
- 4) 南邦明，斉藤雅充，横山秀喜，杉本一朗，能島隆男，増永寿彦，長崎英二：亜鉛アルミ擬合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究，土木学会論文集A1，Vol. 68，No. 2，pp. 429-439，2012.
- 5) 丹波寛夫，木村聡，杉山裕樹，山口隆司：無機ジンクリッチペイント面とそれと異なる接合面処理がなされた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，構造工学論文集，Vol. 58，pp. 803-813，2012.
- 6) 丹波寛夫，行藤晋也，木村聡，山口隆司，杉浦邦征：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，Vol. 70，No. 1，pp. 137-149，2014.
- 7) 橋本国太郎，山口隆司，鈴木克弥，石原一伸，杉浦邦征：経年無塗装耐候性鋼材を用いた異種接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 632-641，2014.
- 8) 本多克行，山口隆司，橋肇，吉岡夏樹，齊藤史朗，中村定明：既設構造物の高力ボルト摩擦接合継手接合面への改良した錆促進剤の適用に関する検討，構造工学論文集，Vol. 64A，pp. 491-502，2018.
- 9) 吉岡夏樹，橋肇，岡田幸児：錆促進剤塗布後の曝露期間に着目した高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験，駒井ハルテック技報，Vol. 8，pp. 39-46，2019.
- 10) 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），2006.
- 11) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.
- 12) 南邦明，田村洋，吉岡夏樹，内田大介，茂呂充，安藤光希：高力ボルト継手における摩擦面の数に応じた導入ボルト軸力に関する検討，土木学会論文集A1，Vol. 75，No. 1，pp. 46-57，2019.
- 13) 南邦明，森猛，杉谷隆夫：土木学会第59回年次学術講演会，I-587，2004.
- 14) 日本工業標準調査会：JIS B 0633: 2001 製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状：輪郭曲線方式—表面性状評価の方式及び手順，2001.

(Received June 18, 2019)

(Accepted April 3, 2020)

APPLICABILITY OF PRETENSIONED BOLTED JOINTS INCLUDING DIFFERENT CONTACT FACES

Hiroshi TAMURA, Kuniaki MINAMI, Natsuki YOSHIOKA,
Daisuke UCHIDA, Mitsuru MORO, Tatsuya HAMA and Kensho HIRAO

In frictional type pretensioned bolted joints, one specification is employed for contact faces in each joint in principle. Meanwhile, in some cases such as protection works of existing bridges and fabrication of box girders made of weathering steel without coating, introduction of usage of different contact faces in one joint might often allow labor-saving and accelerated works.

In present study, bolted joints including different contact faces are defined as a hybrid faying surfaces joint, and 33 bolted joint specimens were used in bolt pretension relaxation test and slip test. This paper reports these results and compares degree of pretension loss and slip resistance in hybrid faying surface joints with homogeneous (i.e. normal) joints. Finally, also on the basis of previous research, the applicability and slip coefficient for designing of hybrid faying surfaces joints are discussed regarding.