

鋼橋継手部への金属溶射摩擦接合の適用に関する性能検証と設計・施工

PERFORMANCE VERIFICATION OF HIGH STRENGTH BOLTED JOINT WITH METAL-SPRAYED CONTACT SURFACES

小坂 崇* , 金治英貞** , 山口隆司***

Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI, Takashi YAMAGUCHI

ABSTRACT High strength bolted friction type joints are often used on urban expressways. On the other hand, the number of rows of bolts has tended to increase as a result of the thicker base plate around corner. In addition, corrosion is actualizing on the existing bridge on the bolted joints. In response to this problem, the authors have investigated the use of thermal spraying for the contact surfaces between splices and base plates in order to achieve a high slip coefficient. This paper reports the performance verification by many experiments and the analysis of construction management data.

KEYWORDS : 金属溶射, ジンクリッチペイント, すべり係数, 摩擦接合
thermal spray, zinc rich paint, slip coefficient, friction joint

1. まえがき

近年、鋼橋において適用板厚の拡大や構造の簡素化に伴って、部材を構成する鋼板が厚板となる場合が多く、ボルトの多列化の限界や景観への配慮から現場継手として溶接継手を採用することが多い。一方、都市高速道路等においては、桁架設用のベント設置や架設時間に制約を受ける場合、施工性の面から高力ボルト摩擦接合継手とすることが多い。また、既設構造物のボルト継手部に腐食等の劣化が顕在化している。事例を写真-1に示す。原因は建設時における継手の現場塗装におけるボルト頭の素地調整不足や塗装の膜厚不足、雨水等の滞水と乾燥の繰り返しによる発錆が考えられる。

著者らは、多列化回避による性能安定化、施工における現場ボルト継手のニーズと、経年劣化に対する継手部のコンパクト化を実現するために、継手のすべり係数の向上に取り組むこととし、連結板の接合面に金属溶射を適用した構造について検討をおこなっている^{1)~4)}。本稿では、構造概要と開発経緯、提案構造の性能検証と品質安定化にむけた性能検証、実橋梁への適用を報告する。



写真-1 ボルト継手部の劣化状況例

*工修 阪神高速道路(株) 技術部 課長代理 (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町 4-1-3)

**博(工) 阪神高速道路(株) 技術部 技術戦略総括マネージャー (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町 4-1-3)

***博(工) 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪府住吉区杉本 3-3-138)

2. 摩擦接合継手への金属溶射の適用

2.1 摩擦接合継手の設計に用いるすべり係数

高力ボルト摩擦接合の設計に用いるすべり係数は、昭和 41 年に鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針において黒皮を除去したすべり面に対して 0.4 と規定された。道路橋示方書（以下道示という）では、昭和 48 年度版からボルト接合に関する基準が掲載され、平成 2 年度版から平成 24 年度版の道示が示されるまで、黒皮を除去した厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した状態において 0.4 とされていた。平成 24 年度版の道示⁵⁾では、研究成果⁶⁾をふまえて無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の条件をふまえて塗装する場合のすべり係数を 0.45（8 本を超える多列配置の場合には低減される）に改訂された。海外も含めた各種設計基準では摩擦面の処理状況によって設定されている⁷⁾。文献 8)では、すべり係数を大きくした場合の鋼橋の製作に及ぼす影響が検討されており、処理面を変更することは継手の合理化に寄与することから、ブラスト、赤錆、無機ジンク、有機ジンクなど様々な処理方法に対するすべり係数が研究されている⁹⁾。

2.2 摩擦接合継手への金属溶射の適用と既往の研究

金属溶射は、金属を電気や燃焼エネルギーによって、微粒子の溶融体として吹き付けて被膜を形成させる表面処理法である。金属溶射の模式図を図-1 に施工状況を写真-2 に示す。防食仕様として桁外面に金属溶射を採用する場合、継手についても金属溶射の仕様となる。指針には溶射を施した場合のすべり係数は示されておらず「個別にすべり試験をおこなうなど、継手の性能を確認して決定する」とされている。

既往の研究として継手部に金属溶射を使用する場合のすべり係数やめっきボルトをふまえたリラクセーションについて研究されている¹⁰⁾。また、金属溶射皮膜自体の摩擦係数に関する研究として、アルミ、亜鉛等の溶射を施した溶射面の摩擦係数についての研究があり¹¹⁾、摩擦力測定装置で計測した結果、グリットブラストした鋼材同士の摩擦係数 0.55 に対して亜鉛溶射同士が 1.06、アルミ溶射同士が 1.23 と約 2 倍以上となると報告されている。母板と連結板の間に接合面処理したフィラープレートを用いる研究もあり、フィラープレートにタングステンカーバイド系溶射を用い、すべり試験時軸力に対して 0.79~0.85 のすべり係数を得た実験結果も報告されている¹²⁾。建築の分野でも、接合面に金属溶射を有する継手が研究されている^{13),14)}。この継手における接合面は、連結板側はアルミ溶射（溶射方法：アーク溶射、溶射皮膜厚 300 μ m 以上、F14T）、母板側はブラスト（Sa2 1/2）とされ、これによってすべり係数を 0.7 に向上させている。特に施工的な不具合を故意に設けたすべり試験もおこなわれており、施工条件の影響の少ない安定した性能を有することが確認されている。この継手構造は、超高層ビルの梁継手やブレース継手に適用され、ボルト本数の軽減、連結板の縮小化が図られている¹⁵⁾。

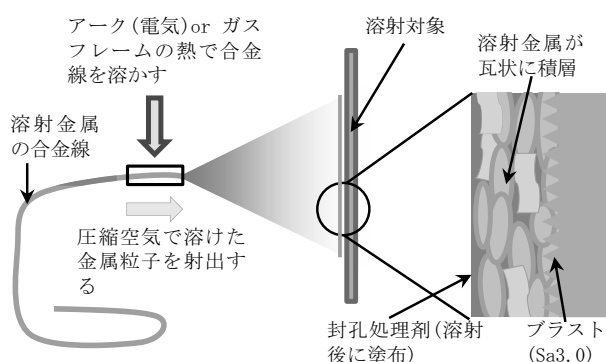


図-1 金属溶射の模式図

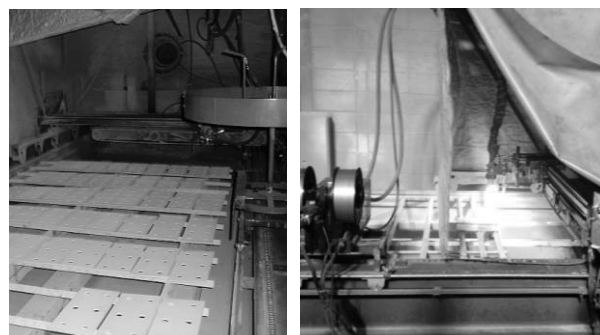


写真-2 金属溶射の施工状況（自動溶射）

3. 高力ボルト摩擦接合継手の設計

3.1 継手の設計

継手構造を開発するにあたって、すべり係数の向上を検討した L2 地震動に対する継手設計と、実設計における継手の決定要因を整理した。常時および L1 地震動に対する継手の設計方法については道示に準拠して行うものとし、作用力に対する設計によるほか、原則として母材の全強の 75%以上の強度をもつようにするものとする。L2 地震動に対する鋼上部構造の設計については塑性化を許容しない設計とされる場合が多い。ここで、継手については、母板の耐震性能 2 を確保するために、式(1)に示すように、L2 地震動による作用力～母材の全強の強度をもつように設計することとした。図-2 に母板の作用力と継手の設計力の関係を示す。L2 地震動の応答値が②または③の領域にあり、常時の応力度を上回っている場合については、L2 地震動による応答値によって継手を設計することとした。

$$\rho_{eq} = \frac{\sigma_{eq} \times A_g}{n} \leq \rho_y \quad (1)$$

ここで、 ρ_{eq} : L2 地震動によって決定されるボルト

作用力 (N)

σ_{eq} : 母材が降伏しない場合…L2 地震動による作用応力度 (N/mm²)

母材が降伏する場合…全強 σ_y の 105%.

A_g : 母材の有効断面積 (mm²)

n : 接合線の片側にあるボルトの全本数

ρ_y : ボルト耐力 (N) = $\rho_a \times 1.7$

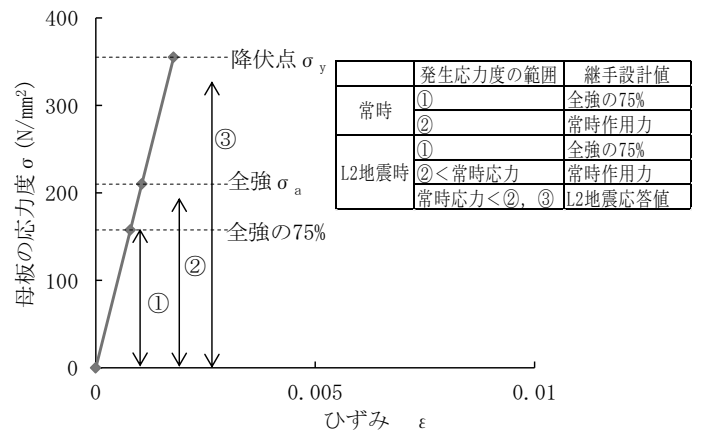


図-2 母材の作用力と継手の設計力

3.2 継手の決定要因

阪神高速道路における最近のジャンクション橋梁について、継手ボルト本数の決定要因を分類した。対象構造は、鋼 3、5 径間連続鋼床版箱桁と鋼 3 径間連続非合成箱桁、鋼製橋脚である。図-3 に鋼桁構造形式ごとの集計結果を示す。40.2～63.6%は常時作用力で継手のボルト本数が決定し、36.4～47.6%が全強 75%で決定していた。守口 JCT の 5 径間部については、主桁と橋脚が剛構造である事から、鋼桁 (母板) が L2 地震動で板厚が決定する断面が多いため、約 6 割が L2 地震動に対して全強で継手が決定していた。図-4 に鋼桁と鋼製橋脚の集計結果を示す。鋼製橋脚は全強の 75%で決まっている継手数が 45%と鋼桁に比べて多い。

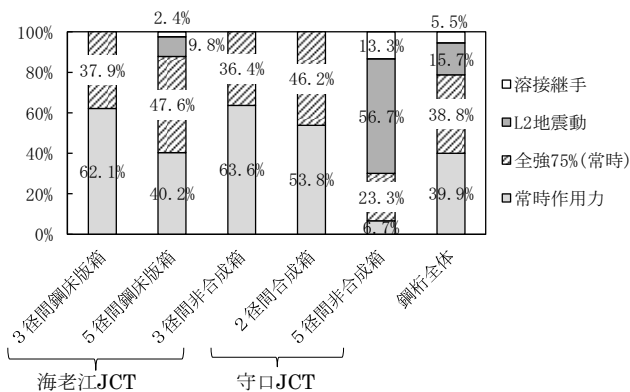


図-3 鋼桁の構造形式による集計

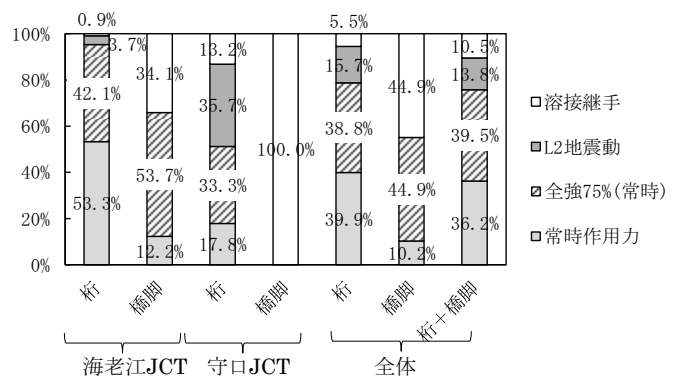


図-4 鋼桁および鋼製橋脚

4. 溶射・無機ジンク接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手の提案

提案する構造の模式図を図-5に示す。摩擦接合継手の母板側接合面を従来の厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装（以下無機ジンクという）とし、連結板側接合面に金属溶射した（以下、本構造を溶射継手という）。母板側を金属溶射とする場合、塗り分けのためのマスキング等が必要となり、塗装の製作工数が多くなりコストや製作時間への影響が大きい。連結板の金属溶射については、連結板を並べた状態で自動溶射機によって一括して金属溶射が可能であるため製作に与える影響は小さい。接合面の防食としての要求は現場でボルト締付けるまで期間であるため封孔処理剤は用いないものとした。

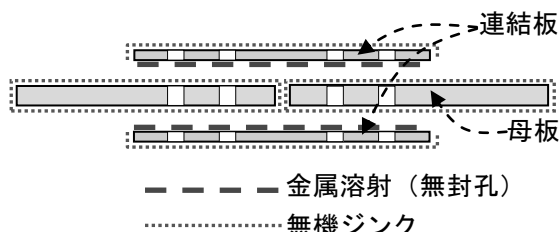


図-5 接合面処理の模式図

溶射継手の開発、性能検証の流れを図-6に示す。すべり耐力試験(1)において、金属溶射の溶射材料、溶射膜厚、溶射施工方法をパラメータにすべり耐力試験を実施した。あわせてボルト軸力のリラクゼーション試験を実施し、これらの結果を合わせて、金属溶射材料、膜厚、施工方法の最適な組合せを選定した。すべり耐力試験(2)として、選定した組合せに対して供試体数を追加した。すべり耐力試験(1)(2)の結果をふまえ、母板側の無機ジンクの膜厚や金属溶射の施工条件等をパラメータに試験を実施することによって溶射継手の性能を検証した。

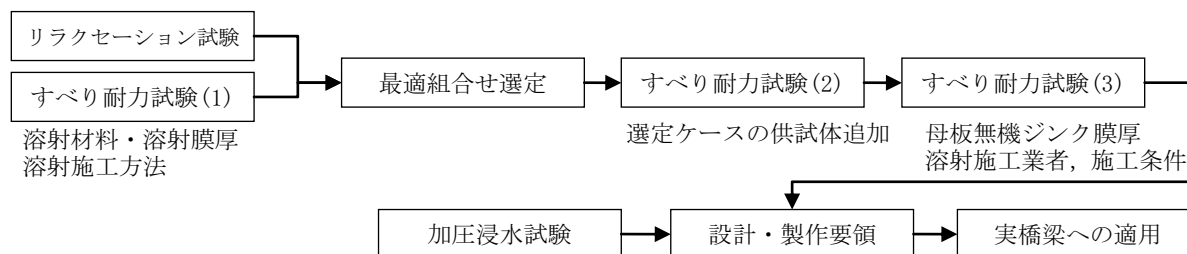


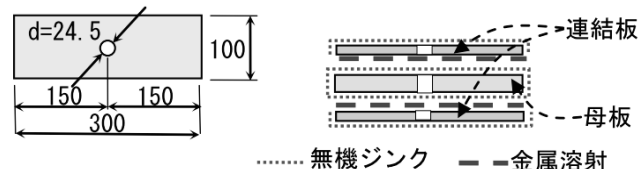
図-6 溶射継手の開発経緯

5. 金属溶射の最適組合せの選定

5.1 リラクゼーション試験

(1) 実験供試体

リラクゼーション試験に用いる供試体寸法を図-7に示す。供試体は、すべり耐力試験の供試体を基本に設定しており、すべり耐力試験の供試体は指針 7 に準拠して設定した。すべり/降伏耐力比 B は $\mu=0.4$ に対して 0.644 である。供試体の塗装及び溶射に関するパラメータを表-1に示す。溶射材料は JIS に規程される合金線材（径 1.6mm ）である。



母板 $t=19\text{mm}$ (SM490Y), 連結板 $t=12\text{mm}$ (SM490Y), M22 (F10T)

図-7 リラクゼーション実験供試体（単位：mm）

表-1 リラクゼーション試験の供試体パラメータ

供試体名	連結板			母板			導入軸力 (kN)	供試体数
	溶射材料 塗装種類	目標膜厚 (μm)	溶射方法	塗装種類 溶射材料	目標膜厚 (μm)	溶射方法		
A	無機ジンク	75	—	無機ジンク	75	—	230	1
A-b	ブラスト	—	—	ブラスト	—	—		1
B-50	Al-Mg	50	ガス フレーム	無機ジンク	75	—		1
B-150		150		—	—	—		1
B-150-b				—	—	—		1
B-150-c				Al-Mg	150	ガスフレーム		1
B-300				300	無機ジンク	75		—
C-150		150		アーキ				
C-300	300	1						
D-150	Zn-Al	150	ガス フレーム	—				
D-300		300			1			
E-150	150	アーキ	ブラスト	—	—	1		
E-150-b			Zn-Al	150	アーキ	1		
E-150-c			300	無機ジンク	75	—		1
E-300								1

ボルト軸力の計測は、ボルトの中心部に単軸型のゲージを埋め込むボルトゲージ (BTM-6C:東京測器研究所) を使用して計測した。ボルトの締付けについては、供試体を固定しトルクレンチでボルト軸力を見ながら設計ボルト軸力の1割増しを目安に230kNに締付けた。計測期間は13ヶ月間とした。

(2) 試験結果

リラクゼーション試験の結果を図-8に示す。縦軸は測定した軸力を初期ボルト軸力 (締付け1分後) で無次元化した軸力残存率である。図中の数値は371日経過後における計測結果を示す。接合面の違いによる比較としては、供試体A-bの軸力残存率が最も大きく、金属溶射の材料による比較は図-8(b)に示すように、Al-Mgに比べてZn-Alの方が、軸力残存率が小さい結果となった。溶射膜厚による比較は、表-2に示すように、いずれの溶射材料の場合も、150 μm に比べ300 μm と厚膜の軸力残存率が1~5%小さい結果となった。

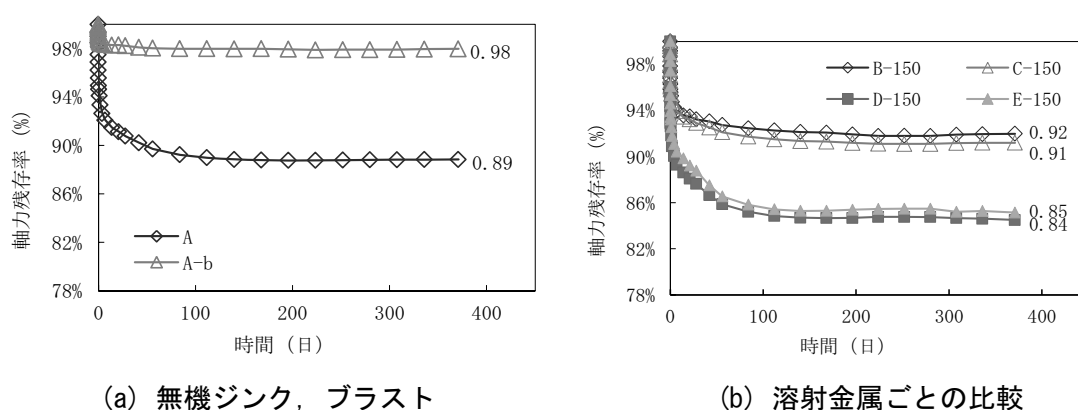


図-8 リラクゼーション試験結果 (13ヶ月間)

表-2 各供試体の軸力残存率

	B-150	B-300	C-150	C-300	D-150	D-300	E-150	E-300
軸力残存率 (13ヶ月目)	0.92	0.91	0.91	0.89	0.84	0.80	0.85	0.83

(3) 供用中における軸力残存率の推定

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の経年変化については、ボルト締付け後、長期間経過したボルト軸力や接合面の影響について研究されており¹⁷⁾、ボルトの残存軸力については漸減するが、すべり係数については設計値が確保されている場合が多いとされている。提案する構造は金属溶射を片面に用いる新しい継手構造であることから、安全側の配慮として供用期間中の軸力低下を推定して、すべり係数を低減することとした。長期的な残存軸力の推定についての既往の研究¹⁸⁾を参考に推定した。供試体 C-150 の 100 年後の軸力は設計軸力に対して 0.930 と算定された。

5.2 すべり耐力試験(1) (金属溶射に関する組合せ選定)

(1) 実験供試体

すべり耐力試験に用いる供試体の金属溶射パラメータおよび供試体寸法を表-3 に示す。なお、すべり試験開始 72 時間以上前にボルトを締め付けた。

表-3 すべり耐力試験(1)のパラメータおよび寸法

供試体名	連結板			母板	ボルト	鋼種	諸寸法(mm)	試験体数	
	溶射材料 塗装種類	目標膜厚 (μm)	溶射方法						
A	無機ジンク	75	—	無機ジンク 75 μm	F10T M22 2本 (片側)	SM490Y	縁端 e=55 ピッチ p=80 板幅 W=100 孔径 d=24.5 母板 $t_1=19$ 連結板 $t_2=12$	3	
B-50	Al-Mg	50	ガス フレーム					3	
B-150		150						3	
B-300		300						3	
C-150		150						アーキ	3
C-300	300	3							
D-150	Zn-Al	150	ガス フレーム					導入軸力 225kN	3
D-300		300	3						
E-150		アーキ	150					ブラスト	3
E-150-b			150					無機ジンク	3
E-300	300		2						

(2) 計測および载荷方法

すべり荷重 P の算定は、実験供試体の母材間に変位計（クリップゲージ）を取り付け、試験中に载荷荷重とすべり変位の関係を計測し、負荷荷重に対して変位が急激に大きくなった点とする。また、すべり音の発生および供試体側面のマーキングのずれ発生も参考にする。なお、明確な変化が確認できない際は、0.2mm の相対変位が生じた荷重とする。すべり試験は 2,000kN 万能試験機を用い、実験供試体に引張荷重を静的に载荷してすべり発生時の荷重 P を求める。写真-3 にすべり試験機に供試体をセットした状況、写真-4 にクリップゲージの取り付け状況を示す。



写真-3 すべり試験機

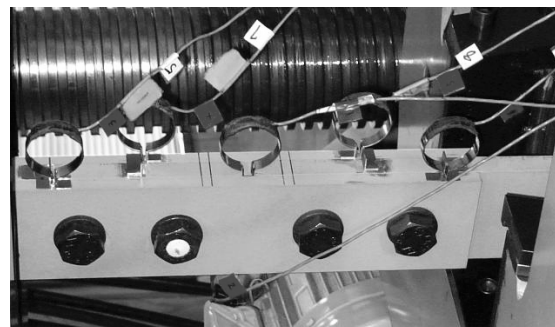


写真-4 クリップゲージ取り付け状況

(3) 試験結果

図-9 にすべり耐力試験(1)の荷重と相対変位の関係として A 供試体と金属溶射の比較を示す。荷重はピークに達したあとと漸減する。すべりが発生するまでの挙動は各供試体の 3 供試体においてばらつきは少なかった。150 μm の膜厚においては, Al-Mg は無機ジンクよりもすべり時の変位が大きく Zn-Al は同様であった。300 μm の膜厚におけるすべり時の変位は, E-300 は初期勾配が大きく, その他の組み合わせは無機ジンクと同様であった。

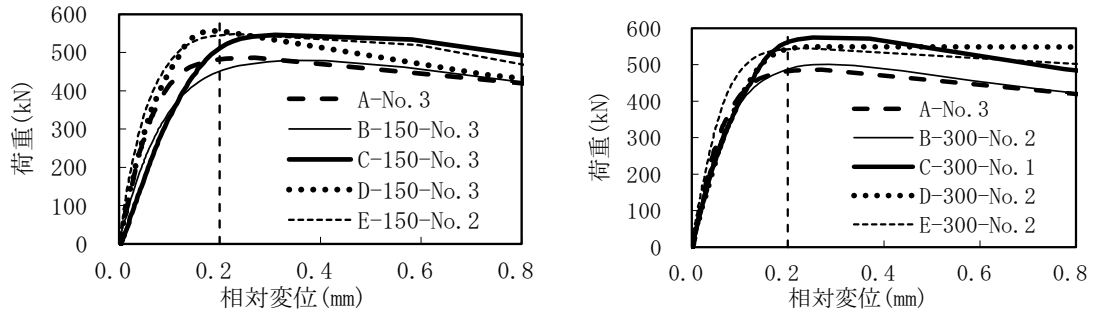


図-9 無機ジンクと金属溶射の比較

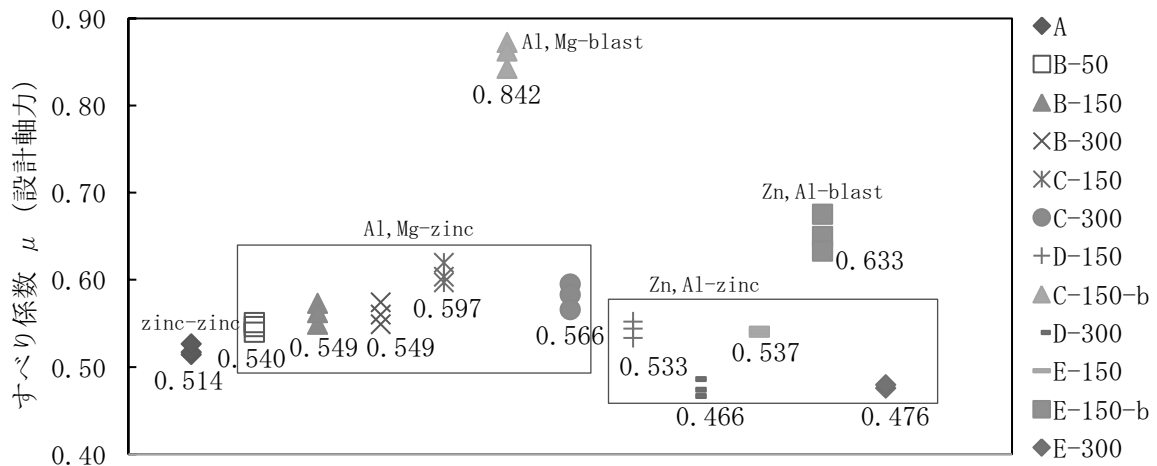


図-10 設計軸力から算出したすべり係数 μ (すべり耐力試験(1))

5.1(3)に記載した供用中のリラクゼーションによるボルト導入軸力の低減を考慮したすべり係数を図-10 に示す。Zn-Al のリラクゼーションが大きいことから, Al-Mg の方がすべり係数が大きく算定された。膜厚については, 膜厚が厚い方がリラクゼーションが大きいことから, 300 μm に比べ 150 μm の方がすべり係数が大きく算定された。よって, 低減後のすべり係数が 0.55 と最も大きくなる C-150 (溶射材料: Al-Mg, 膜厚: 150 μm , 溶射方法: アーク) を最適な組合せとして選定した。なお, C-150-b と E-150-b の母板をブラストとしたすべり係数は高くなっているが, 施工性から今回は採用を見送った。

(4) すべり面の状況

試験後のすべり面の状況を写真-5 に示す。すべり面の状態を確認しながら膜厚計で計測した結果, 母板側のジンクが孔まわりと付近の一部で剥がれ連結板側に粉状に付着していた。その部分の膜厚は 20~40 μm (実施工膜厚 75 μm 程度) であり, 鋼材が露出しているわけではなくジンクが残っている状態であった。連結板側については, 孔まわりの擦れている部分の金属溶射は 150 μm (実施工膜厚 200 μm 程度) ほどとなっており, 表面の状態は擦れた様な状態であった。

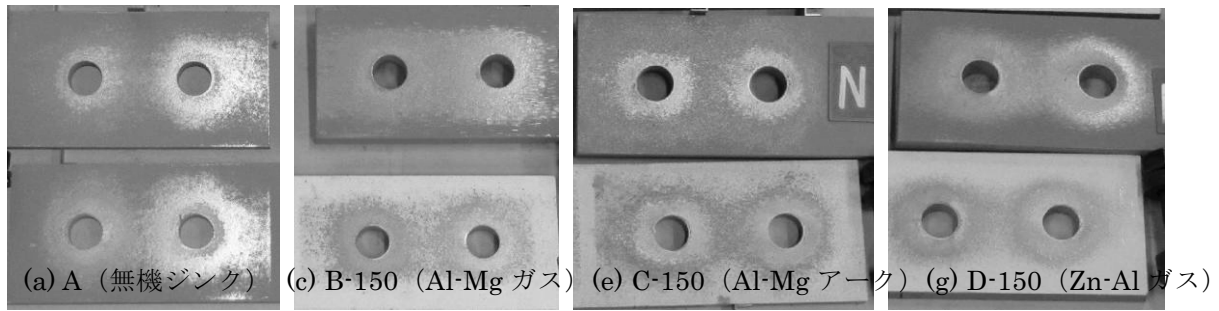


写真-5 すべり耐力試験(1)のすべり面の状況(上段が母板, 下段が連結板)

5.3 すべり耐力試験(2) (品質のばらつき確認のための供試体追加)

(1) 実験供試体

金属溶射の最適な組合せとした選定した組合せ(溶射材料: Al-Mg, 膜厚: 150 μ m, 溶射方法: アーク)について, 品質のばらつきに関するデータを得るために, 同条件のすべり耐力試験を実施した。供試体の寸法等については, すべり耐力試験(1)と同じとした。ただし, 金属溶射の施工会社については, 施工会社によるばらつきのデータを得るために, 別会社による製作とした。供試体 GA (試験体数 2) は, すべり耐力試験(1)と同様の A 社, 供試体 GB (試験体数 5) は別の B 社による施工である。

(2) 試験結果

すべり係数を算出した結果を表-4 に示す。供試体 GA-1, GB-2~GB-4 のリラクセーションを考慮したすべり係数が 0.550 を下回る結果となった。

表-4 すべり耐力試験(2)の結果一覧表

供試体 No.	導入ボルト軸力	試験前ボルト軸力	設計ボルト軸力	すべり荷重	すべり係数			リラクセーション低減係数	すべり係数 (最小値を0.05丸め)	
					導入軸力	試験前軸力	設計軸力		$\mu \times \gamma$	採用値
	N_1 (kN)	N_2 (kN)	N_0 (kN)	P (kN)	μ_1	μ_2	μ	γ		
C-150	236.9	213.7	205	526.5	0.556	0.616	0.642	0.930	0.597	0.55
	238.7	225.7	205	532.5	0.558	0.590	0.649	0.930	0.604	
	233.7	202.6	205	546.5	0.585	0.674	0.666	0.930	0.619	
GA	233.2	211.2	205	461.0	0.494	0.546	0.562	0.930	0.523	0.50
	234.0	212.2	205	516.0	0.551	0.608	0.629	0.930	0.585	
GB	254.3	228.2	205	501.0	0.493	0.549	0.611	0.930	0.568	0.50
	232.8	205.9	205	460.0	0.494	0.559	0.561	0.930	0.522	
	229.7	200.1	205	468.5	0.510	0.585	0.571	0.930	0.531	
	236.2	210.0	205	453.0	0.479	0.539	0.552	0.930	0.513	
	237.2	209.3	205	475.5	0.501	0.568	0.580	0.930	0.539	

6. 品質安定化にむけた性能検証実験

すべり耐力試験(1)(2)の結果, 供試体 GA, GB のすべり荷重が C-150 よりも小さくすべり係数も耐力試験(1)で算定した $\mu=0.55$ を下回る結果であった。そこで, 連結板の金属溶射や母板の無機ジンをパラメータとした実験をおこなうことで, $\mu=0.55$ を確保できる条件を把握し製作要領に反映することとした。また, 供用中に雨水等が接合面に浸水することが懸念されたため, 加圧浸水試験を実施した。

6.1 すべり耐力試験(3) (無機ジンクの膜厚および金属溶射の施工条件の影響確認)

(1) 実験供試体

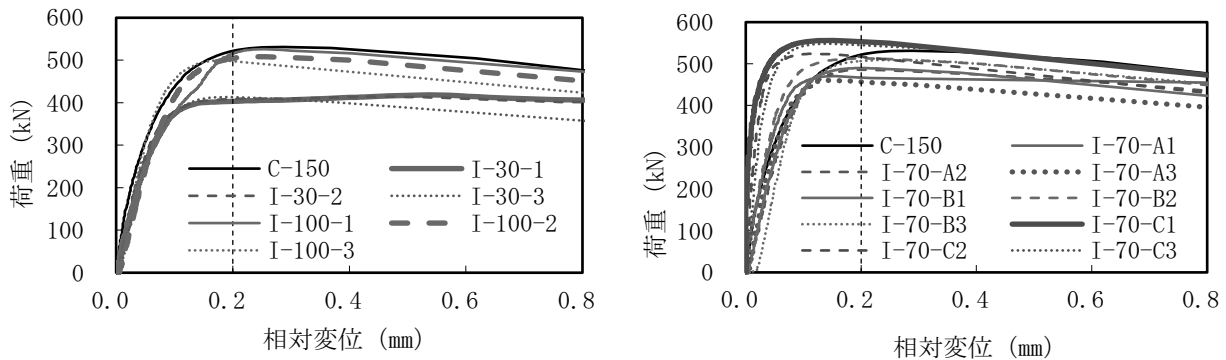
表-5 に実験供試体のパラメータを示す。連結板の溶射膜厚と溶射の表面粗さ、母板の無機ジンクの膜厚に管理目標値を設定して供試体を製作した。なお、溶射施工会社は、会社によるばらつきのデータを得るために、すべり耐力試験(1)(2)の A, B 社に C 社を加えた 3 社によって施工した。表におけるエア圧とは、金属溶射の合金線材を熱で溶かして溶融粒子を対象に射出する圧力である。

表-5 すべり耐力試験(3)のパラメータおよび寸法

供試体名	連結板 (Al-Mg・アーク)			母板	ボルト	鋼種	諸寸法 (mm)	試験体数
	金属溶射 施工会社	目標膜厚 表面粗さ	エア圧 (kg/cm ²)	(無機ジンク) 膜厚				
I-30	B 社	150 μm (±50 μm)	3.0	30±10	F10T M22 2本 (片側)	SM490Y	縁端 e=55 ピッチ p=80 板幅 W=100 孔径 d=24.5 母板 t ₁ =19 連結板 t ₂ =12	3
I-100				100±10				3
I-70-A				70±10				3
I-70-B	A 社	4.5	70±10	3				
I-70-C	C 社	Rz 100~120 以上	4.5	70±10				3
J-3.0			3.0	90±25				3
J-4.5			4.5	90±25				5
J-6.0			6.0	90±25				3

(2) 試験結果

無機ジンクの膜厚をパラメータとした I-30 と I-100 について、荷重と変位の関係を図-11(a)に示す。I-100 は C-150 とほぼ同様の荷重-変位となった。I-30 については、すべり荷重が C-150 や I-100 よりも小さいが図(b)に示すように、すべり荷重に到達するまでの勾配については同様であった。金属溶射の溶射施工会社をパラメータとした I-70-A~C について、荷重と変位の関係を図-11(b)に示す。I-70-C (C 社) は、すべり荷重に到達するまでの勾配が他社にくらべて大きく (変位が小さい)、すべり荷重についても大きくなった。



(a) I-30 と I-100 の比較

(b) I-70-A, B, C の比較

図-11 すべり耐力試験(3)の荷重-相対変位曲線

すべり係数を算出した結果を図-12に示す。I-30 と I-70-A については、リラクセーションの低減を考慮したすべり係数の最小値が 0.55 を下回る結果となった。金属溶射のエア圧をパラメータとした供試体 J-3.0~J-6.0 については、表面粗さにおいては微細化の影響がみられたが、すべり係数には有意な差が確認できなかったが、いずれのケースについてもすべり係数については 0.55 以上となることを確認した。

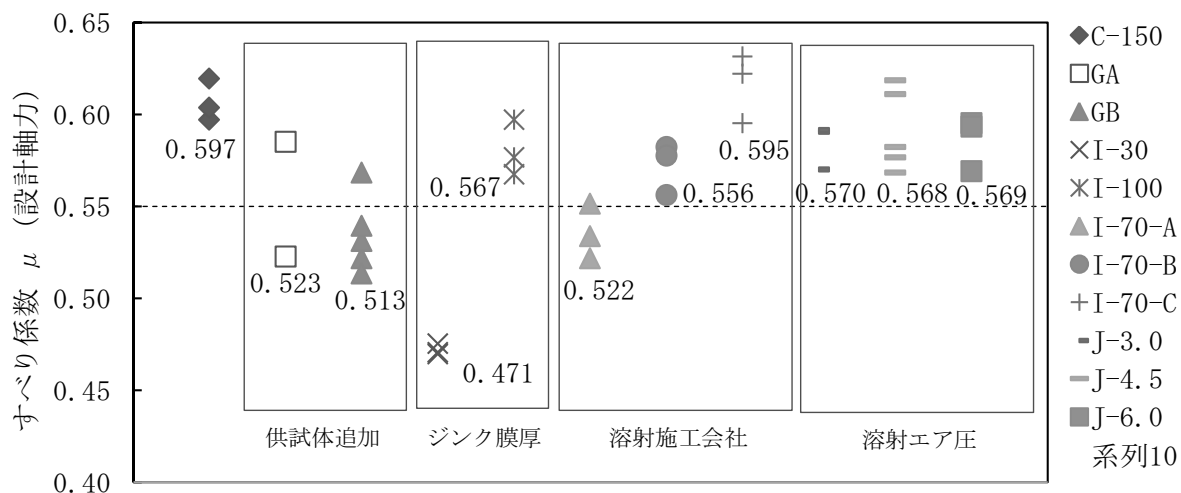


図-12 設計軸力から算出したすべり係数 μ (すべり耐力試験 (2) (3))

(3) すべり係数と無機ジンク膜厚の関係

図-13 に金属溶射の表面粗さとすべり係数の関係を示す。図-14 に母板の無機ジンク膜厚とすべり係数の関係を示す。I-30 の様に膜厚が薄い場合はすべり係数が低く、 $120 \mu\text{m}$ 程度以上の厚い場合も低くなっている。よって、図に示す $65 \mu\text{m}$ から $115 \mu\text{m}$ の間ではすべり係数 μ が 0.55 を確保できる結果となった。

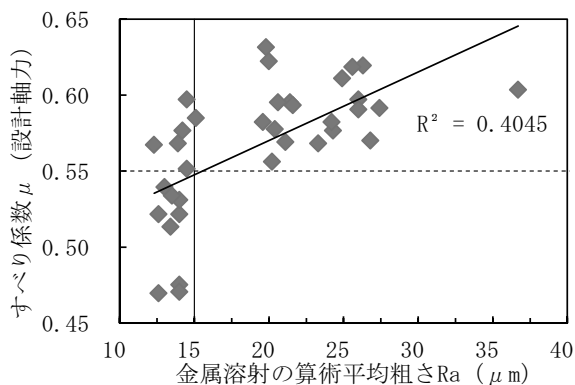


図-13 金属溶射の表面粗さとすべり係数

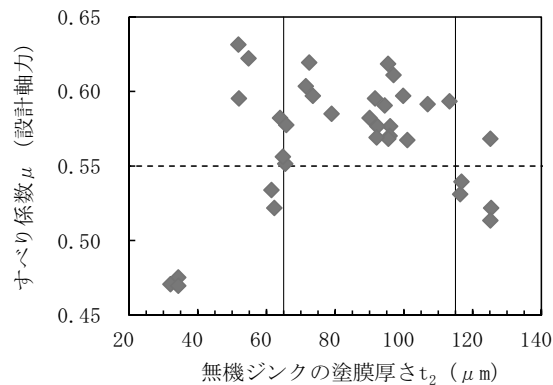


図-14 無機ジンクの塗膜厚とすべり係数

6.2 加圧浸水試験

(1) 実験供試体

実験供試体はすべり耐力試験と同様の寸法とし、シール材ありの供試体には変成シリコン系シール材（セメダイン POS シールスピード）を用い、 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の三角形状となるよう施工した。加圧に用いた装置を写真-6 に示す。この装置内に実験供試体を挿入しコンプレッサで加圧した。加圧装置内の水に赤色の水性インクを溶かし接合面への浸水状況を目視によって確認した。


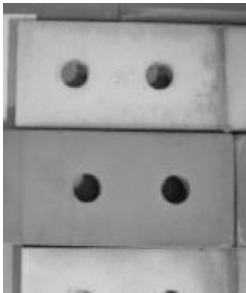

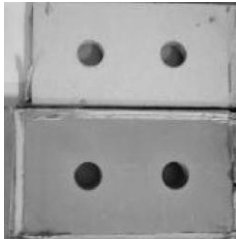
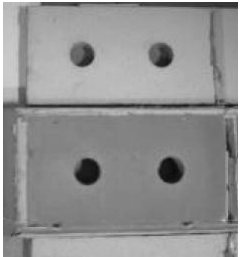

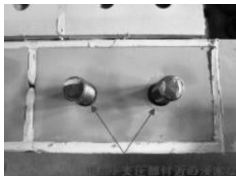



写真-6 加圧装置

(2) 試験結果

加圧浸水試験の結果を表-6に示す。シールした case4 においても加圧の影響によって浸水が確認された。ただし、加圧しない case5 には浸水が確認されなかったこと、いずれのケースにおいてもボルトによって圧力がかかっている孔まわりには浸水なかったこと、実橋梁においては水圧がかかるほどの滞水は考えられないことから、シールを施工すれば継手性能としては問題ないと判断した。

表-6 加圧浸水試験結果一覧表

試験前	Case2	Case3	Case4	Case5
	水圧 0.8MPa	—	水圧 0.8MPa	—
	シール無し	シール無し	シールあり	シールあり
				
				
	浸水=大	浸水=小	浸水=小	浸水=無し

7. 実橋梁への適用

7.1 設計に用いるすべり係数

実橋の設計に用いるすべり係数としては、すべり耐力試験(1)~(3)の結果をふまえ $\mu=0.55$ とする。ただし、連結板の金属溶射、母板の無機ジンクについては、実験結果をふまえて設定する管理値によって製作するものとする。また、設計に用いるすべり係数は 0.55 の適用は常時における母板の全強 75%に対する設計および、L2 地震動による応答値に対する設計に用いるものとし、常時および L1 地震動の作用力に対する設計については、当面、安全側の値として道示 (H14 版) の $\mu=0.4$ を用いることとした。設計の結果、全強の 75%や L2 地震動で継手が決まっている場合においては 1~3 列程

度低減できる結果となった。

7.2 実橋梁の施工

溶射継手の施工状況を写真-7に示す。加工した鋼板を金属溶射の工場に搬入し、グリットブラストによって素地調整し、自動機によって接合面に金属溶射を施工した。金属溶射の施工は18m²/時程度であり、2m×1.5mの連結板であれば10分程度で施工が完了する。その後、外面側の無機ジンクを塗装したあと、橋梁メーカー工場へ輸送した。工場で品質記録後、母板に仮固定して現場へ輸送した。金属溶射の施工工場から橋梁メーカー工場を経て現場搬入までの期間は1~6ヶ月程度であった。現場での施工は従来の継手と同様であり、ボルトを本締めし、連結板周囲をシールの上で現場塗装した。



素地調整前



素地調整後



金属溶射施工



工場からの輸送



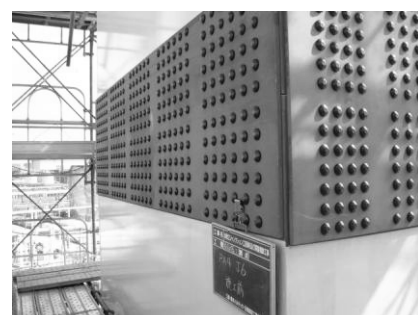
現場搬入



ブロック架設



ボルト本締め



ボルト本締め完了



継手部塗装

写真-7 溶射継手の施工状況

7.3 品質確認のための統計分析

実橋梁への適用にあたっては、性能検証実験の結果をふまえ、無機ジンク膜厚、金属溶射の膜厚に管理値を設けて施工した。施工後の計測値の統計分析結果を下記に示す。

(1) 母板の無機ジンク塗膜厚

母板の無機ジンク塗膜厚に関する統計分析結果を図-15に示す。3社の施工データの頻度をそれぞれ図化している。塗膜厚の管理値は90±25μmである。頻度の分布は、K社において二峰性の部分も

あるがほぼ正規分布である。平均値は管理値より若干小さく $83.4\sim 87.5\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $8.7\sim 11.6\ \mu\text{m}$ であった。

(2) 連結板の金属溶射膜厚

連結板の金属溶射膜厚に関する統計分析結果を図-16に示す。3社の施工データの頻度をそれぞれ図化している。膜厚の管理値は $100\sim 300\ \mu\text{m}$ である。頻度の分布は、M社において中央値の頻度が高くなっていたがほぼ正規分布である。平均値は標準膜厚 $150\ \mu\text{m}$ よりも若干厚く $175.6\sim 192.6\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $27.8\sim 30.1\ \mu\text{m}$ であった。

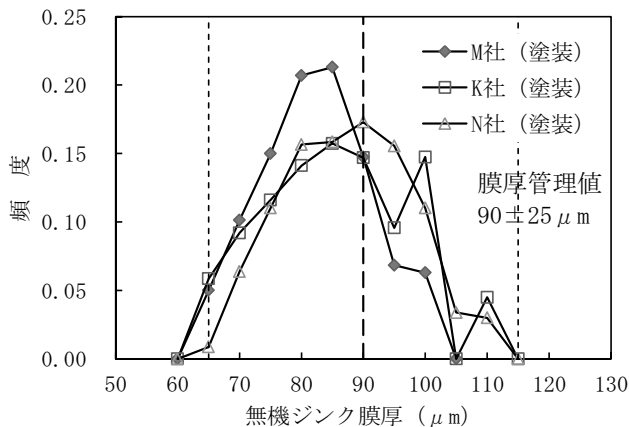


図-15 母板無機ジंक塗膜厚の統計分析

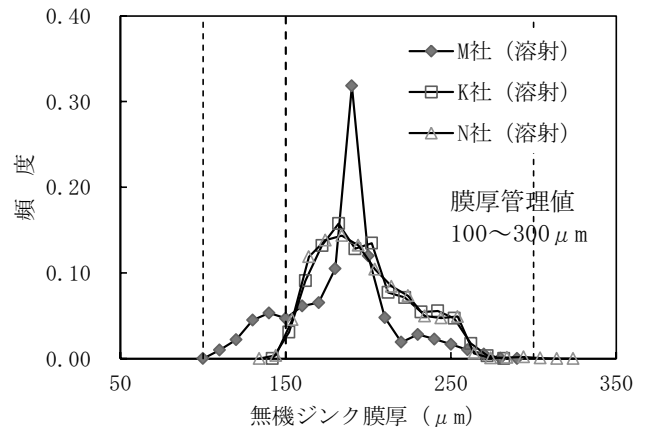


図-16 連結板金属溶射膜厚の統計分析

表-7 母板の無機ジंक塗膜厚の統計値 (管理値 $90\pm 25\ \mu\text{m}$)

	M社	K社	N社
平均値 (μm)	83.4	85.6	87.5
分散	75.7	133.5	103.6
標準偏差 (μm)	8.7	11.6	10.2

表-8 連結板の金属溶射膜厚の統計値 (管理値 $100\sim 300\ \mu\text{m}$)

	M社	K社	N社
平均値 (μm)	175.6	192.6	191.9
分散	906.7	770.9	793.2
標準偏差 (μm)	30.1	27.8	28.2

8. まとめ

鋼橋継手部における多列化回避による性能安定化，施工面での優位性による現場ボルト継手のニーズとボルト継手部の経年劣化に対する継手部のコンパクト化を実現するために，連結板の継手接合面に金属溶射を施した構造を提案した。本構造の性能検証として種々のすべり耐力試験を実施し，設計・施工要領を作成するとともに，施工後の品質確認のための統計分析をおこなった。

本提案構造は継手構造のコンパクト化によって施工性の向上，維持管理コストの低減に資するものといえる。性能検証は実験によって基準における要求性能を満足するようにことを検証することとし，基準における安全余裕に配慮して設計・施工要領を作成した。本構造については，さらなるすべり係数の安定化や向上を目指して金属溶射の施工条件などを詳細に検討する必要があると考えている。

謝辞

本検討を進めるにあたり、共同研究者である大阪市立大学大学院の黒野氏、三菱重工鉄構エンジニアリング(株)の山根氏、(株)新免鉄工所の新免氏のそれぞれ各位にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小坂崇・金治英貞・山口隆司・山田潤・北川淳一・山根茂春：設計施工の合理化を目指した金属溶射接合面を有する摩擦接合継手の実験的検討，土木学会年次学術講演会概要，2011.
- 2) 黒野佳秀・山口隆司・金治英貞・松村政秀・小坂崇・山根茂春：片面に金属溶射を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に関する2,3の考察：土木学会関西支部年次学術講演会概要，2012.
- 3) 黒野佳秀：片面に金属溶射を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動の解明，大阪市立大学卒業論文，2012/2.
- 4) 小坂崇・金治英貞・山口隆司・北川淳一・山根茂春：設計施工の合理化を目指した金属溶射接合面を有する摩擦接合継手の実験的検討(その2)，土木学会年次学術講演会概要，2012.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2012/3.
- 6) 土木研究所：構造合理化に対応した鋼橋の設計法に関する研究，平成23年度 重点プロジェクト研究，重27，2011.
- 7) 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)，鋼構造シリーズ15，2006/12.
- 8) 南邦明・森猛：高力ボルト摩擦継手の設計すべり係数が鋼橋のコストに及ぼす影響，橋梁と基礎，p22-29，建設図書，2007/2.
- 9) 森猛・南邦明・井口進・山口隆司：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，p48-89，2008/1.
- 10) 南邦明・斉藤雅充・横山秀喜・杉本一郎・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，p427-439，2012.
- 11) 二俣正美・有田敏彦：溶射被膜の摩擦特性の解明と高力ボルト摩擦接合部への応用，北見工業大学地域共同研究センター研究成果報告書，第3号，1996.
- 12) 久保全弘・杉山直也・伊藤巧・小田博孝：フィラープレートによる高力ボルト継手のすべり耐力向上に関する実験，鋼構造論文集，第11巻第42号，p29-39，2004/6.
- 13) 高田遼太・東清三郎・松尾真太郎・井上一朗：添板にアルミ溶射を施した高力ボルト接合部のすべり試験，日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系，p409-p412，2008/5.
- 14) 小島一高・佐分利和宏・松尾真太郎・井上一朗：アルミ溶射添板を用いた高力ボルト摩擦接合部のすべり係数およびリラクゼーション特性，日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系，p385-p388，2009/5.
- 15) 平川恭章：あべのハルカスの構造設計・施工概要，JSSC，Vol.12，p18-p21，日本鋼構造協会，2013/1.
- 16) 村田省三・牛尾正之・西村昭：塗膜，溶射膜を接合面にもつ高力ボルト継手の耐力とその経年変化，土木学会年次学術講演会概要，1980.
- 17) 谷平勉・亀井正博・石原靖弘・田井戸米好：17年間供用された高力ボルト摩擦継手のすべり耐力に関する実験，構造工学論文集，Vol.36A，p1087-1096，土木学会，1990/3.
- 18) 大倉一郎・萩澤亘保・長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，p827-837，土木学会，2010/3.