

絶縁性能を付与した摩擦接合継手の静的強度 および疲労強度試験

市川篤司¹・長嶋文雄²・山田稔³・羽田政浩⁴

¹正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 東日本鉄工 (株) 橋梁技術部 (〒338 埼玉県浦和市道場2-1-1)

⁴正会員 東日本鉄工 (株) 橋梁技術部 (〒338 埼玉県浦和市道場2-1-1)

超電導磁気浮上式鉄道の構造物では、鋼材に発生する誘導電流に起因して車両の走行抵抗やエネルギー損失となる磁気抗力が問題となるが、その対策として接合部を絶縁して誘導電流の一部を遮断する方法が有効である。その場合、接合面に絶縁材を挿入する高力ボルト摩擦接合継手が考えられる。本研究では、その設計法を確立することを目的に、数種類の絶縁材を用いた継手の絶縁性能、すべり係数および高力ボルトの軸力抜けを調査し絶縁材の適用性を検討した。さらに、その中から選定したエポキシ樹脂板を用いた絶縁摩擦接合継手について、繰り返し載荷試験および準動的載荷時の継手の内部応力測定を行い、繰り返し載荷が絶縁性能、すべり係数、ボルトの軸力抜けおよび疲労強度に及ぼす影響を検討した。

Key Words : *superconducting magnetic vehicle system(MAGLEV), magnetic drag force, insulated connection, friction-type connection, fatigue*

1. まえがき

超電導磁気浮上式鉄道(以下、浮上式鉄道)の構造物において、超電導磁石を搭載した車両が通過するとき、使用する鋼材には誘導電流が流れ、車両に磁気抗力と呼ばれる走行抵抗およびエネルギー損失が発生する¹⁾。特に前者の走行抵抗については、構造物毎に許容値が定められており浮上式鉄道用構造物の設計において考慮しなければならない重要な検討項目の一つとなっている。この磁気抗力の問題については、これまで宮崎実験線での実験的な研究、解析的な研究等を通して様々な検討が行われてきた。その結果、対策の一つとして、接合部を電氣的に絶縁するあるいは接触抵抗を大きくして誘導電流を遮断するか流れにくくすると有効なことが明らかとなった¹⁾。部材接合部の絶縁(以下、誘導電流の流れにくさの意で用いる)に関しては、接合面にエポキシ樹脂板を挿入する摩擦接合継手に関する実験的研究が既に行われている²⁾が、その性状はまだ明確になっていない部分が多く、設計手法を提案するまでには至っていない。

筆者等もこの問題について、具体的な設計手法を確立する目的で体系的に検討を進めてきた³⁾⁻⁸⁾。検討にあたっては、必要な絶縁性能(接触抵抗の大きさで表す)の程度および方法を明らかにすることから始め、最も適当と考えられる高力ボルト摩擦接合継手について、継手性能を把握するためのいくつかの実験を行った。本論文は、絶縁性能を付与した部材接合に関するこれらの研究成果をまとめたものである。

最初に、絶縁摩擦接合として必要な継手性能について述べる。次に、絶縁材に利用できると考えられる数種類の材料を用いた継手に関し、すべり試験、高力ボルトの軸力抜け試験および絶縁性能の調査(継手接触抵抗の測定)により明らかにしたそれぞれの継手の基本的な特性、およびそれらの継手を比較検討した結果について述べる。また、その中から最も良好な性能を示したエポキシ樹脂板を用いた継手供試体の繰り返し載荷試験を行い、すべり係数、絶縁性能、高力ボルトの軸力減少等の継手性能に及ぼす繰り返し荷重の影響および疲労強度に関する検討を行った結果についても述べる。疲労強度の検討

表-1 チタン酸カリウムの物理的性質

項目	物性値
化学組成	$K_2Ti_6O_{13}$
比重	3.53
引張強度	490~690(MPa)
縦弾性係数	27,400(MPa)
線膨張係数	$6.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$

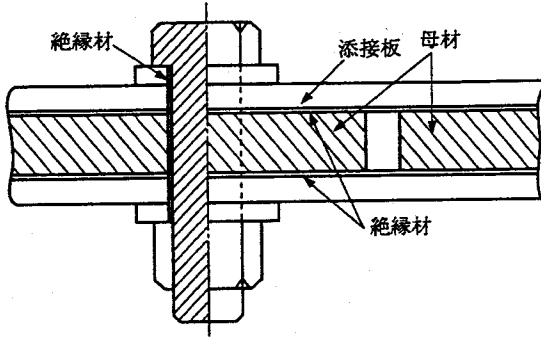


図-1 絶縁摩擦接合継手のボルト部詳細

においては、絶縁材を挿入することによって、挿入しない場合に比べて疲労強度の明らかな低下が認められたため、両タイプの供試体に準動的な繰り返し荷重を载荷し、そのときの継手の内部応力を測定することによりその原因について検討した。

2. 絶縁摩擦接合継手として必要な継手性能

前述したように磁気抗力の低減対策として、接合部を電氣的に絶縁するか接触抵抗を大きくすることによって、誘導電流を遮断するかあるいは流れにくくすることが有効である。その場合、鋼材間を直接接触させないことが必要になるため、部材接合方式としてボルト接合が適当である。ボルト接合には、摩擦接合、支圧接合等がある。前者の摩擦接合は、接合面に介在する絶縁材に高強度かつ摩擦接合として必要な性能を満たす材料が必要となる。一方、後者の支圧接合では、ボルトがボルト孔に接触しないように注入する極めて高強度の材料開発が必要になり、その施工性についても十分な検討が必要である。これらを比較すると、現時点では接合方式として既存の材料から絶縁材を選択できる余地のある摩擦接合が適当と考えられる。その他に接着接合なども考えられ検討も行ったが、施工性に難がある⁹⁾。

摩擦接合継手に絶縁性能を付与する構造としては、摩擦面およびボルト孔に絶縁材を挿入する図-1の構造が考えられる(以下、絶縁摩擦接合継手)。この構造では、以下に示す継手としての基本的な性能を満たす必要がある。

- ① 所要の絶縁性能が得られること。具体的には、文献4)の中で検討したように、部材間の接触抵抗値が $10^{-2} \sim 10^{-1} \Omega$ 程度以上が確実に確保できること。本研究では、 $10^{-1} \Omega$ を目標に検討を行った。
- ② 摩擦接合継手として必要なすべり係数が得られ

ること。すべり係数はできる限り大きいのが好ましいが、本研究では、少なくとも設計時に想定している0.40以上が確保できることを条件とした。

- ③ 絶縁材の挿入に伴う高力ボルトの軸力減少が大きくなること。
- ④ 繰り返し载荷に対して十分抵抗できること。
- ⑤ 施工性が損なわれないこと。

3. 絶縁材の検討

絶縁性能およびすべり特性を考慮して4種類の絶縁材を選定し、静的すべり試験、電気抵抗値の測定およびボルトの軸力抜け試験を行い継手性能の比較検討を行った。

なお、実際の浮上式鉄道の構造物に絶縁摩擦接合継手を用いる場合には、超電導磁石の近傍で低磁性鋼(高マンガン鋼等磁石に吸着しない性質を持つ鋼材)を利用することになると考えられるが¹⁾、本研究では絶縁継手としての特性の把握が主な目的であることから、通常の構造用鋼材を用いた継手を検討の対象にした。

(1) 検討の対象とした絶縁材

摩擦接合面に塗布する材料には、防錆を目的として無機ジンクリッチペイントが実用化されている。この材料は高いすべり係数と優れた防錆効果を発揮するが、電氣的な絶縁性能には劣る。また、絶縁性能が高く防錆効果が優れている塗布材としてエポキシ樹脂系塗料の利用が考えられる。しかし、この材料にはすべり係数が小さいという問題がある。このように現在利用できる塗装材料では、絶縁材としての要求を満足することができない。そこでこれらの材料の絶縁性能とすべり係数を高め得る素材として、表-1に示すチタン酸カリウムに着目した。これは、絶縁材として電線被覆に、また摩擦材として自動車のブレーキパッドなどに用いられている素材である。すなわち、チタン酸カリウムの粉末を上記の材料に

表-2 実験に用いたエポキシ樹脂板の材料特性

特性	単位	標準値	
比重	-	1.640	
吸水率	%	0.05~0.07	
膨張係数 (厚さ方向)	100℃以下	mm/℃	1.45×10 ⁻⁴
	100℃以上		
曲げ強さ	垂直	MPa	225
	平行		
引張り強さ	MPa	300	

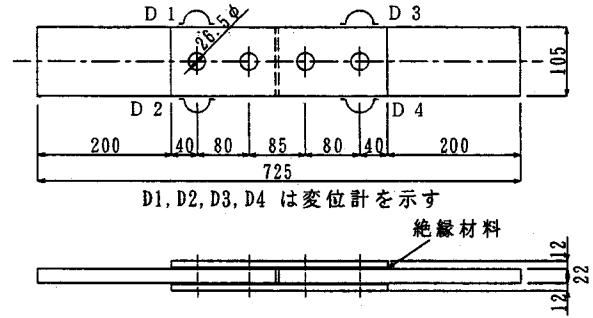


図-2 静的すべり試験の供試体形状

配合することにより塗料として使用した。本実験では、事前に種々の配合で行ったすべり試験および電気抵抗値の測定の結果を基に、無機ジンク系塗料およびエポキシ樹脂系塗料からそれぞれ配合を変えた3種類を選定した。また、タイプの異なる伸展材(アラミド繊維, パルプ)を加えペーパー状に加工することにより絶縁紙としてそれ自身単独でも使用した。なお、チタン酸カリウムは、素材の形状が異なるaタイプ, saタイプの2種類を用いた。aタイプの素材形状は板状, saタイプは試作品として素材形状をさらに偏平にしたものである。また、これまでに研究例^{2), 3)}のあるエポキシ樹脂板も、有力な材料であることから実験に加えた。実験に用いたエポキシ樹脂板はガラス繊維不織布を基材としたもので、軸力抜け特性を考慮して厚さを既往の研究より薄い0.5mmとした。その材料特性を表-2に示す。

(2) 継手性能の比較検討

a) 実験概要

静的すべり試験は、上記の4種類の絶縁材を用いた17ケースについて実施した(表-3参照)。また、比較のため摩擦面をプラスト処理しただけのものについても実験を行った。図-2に供試体の形状を示す。鋼材はSM490Y材を、高力ボルトはM22(F10T)を使用した。ボルトの導入軸力は設計軸力の10%増しとし、トルクレンチを使用して軸力を導入した。なお、ボルト胴部には絶縁材を挿入した。この絶縁材はボルトと母材あるいは添接板とを接触させないために必要なもので、摩擦面に用いる絶縁材に比べると制約は少なく様々な材料が考えられるが、この実験では比較的入手および加工が容易なクロロプレインゴムを用いた。

継手の部材接合面の接触抵抗値の測定は、上記すべり試験の供試体において、①水中に24時間浸し水中から取り出した直後の湿潤状態時、②すべり試験前の乾燥状態時、③すべり試験後の各段階毎に低抵

抗計により行った。なお、①は実橋への適用を考慮し、雨天時の絶縁性能を把握するために行ったものである。

高力ボルトの軸力抜け試験は、すべり試験と同じ供試体を用い、4本のボルトの内片側2本を実験の対象にした。ボルト胴部に貼り付けたひずみゲージにより軸力の測定を行った。軸力は設計軸力の10%増しを基本とした。実験は、エポキシ樹脂板(厚さ: 0.5mm)を用いた供試体(A-1)、無機ジンク系塗料を用いた供試体(B-2)、エポキシ樹脂系塗料を用いた供試体(C-3)および絶縁紙を用いた供試体(D-2)について行った。なお、エポキシ樹脂板については、施工時のボルト増し締めの効果を見るために軸力を20%増したものについても測定を行った。また、比較のため摩擦面をショットプラストしただけの供試体(E-1)も測定した。

b) 実験結果および考察

静的すべり試験の結果およびその前後での接触抵抗の測定値のうち代表的なものを表-3に示す。また、測定を開始してから135日後までの高力ボルトの軸力の変化(2本のボルトの平均)を図-3に示す。これらの実験から以下の点が明らかになった。

①すべり係数

エポキシ樹脂板のすべり係数は0.41~0.42とやや低い傾向にある。すべりは他の供試体と同様に瞬間的に発生した。すべりが発生した全てのエポキシ樹脂板が端ボルト位置で破断しており、エポキシ樹脂板の破断とともにすべりが発生したものと考えられる。また、すべり発生以前の添接板、母材間の相対変位はプラスト処理のみの供試体と同程度で、エポキシ樹脂板全体のせん断変形は認められなかった。

無機ジンク系塗料供試体については、摩擦係数を高める効果は亜鉛粉末とチタン酸カリウムと同程度であり、すべり係数は配合したチタン酸カリウム、亜鉛粉末の種類、割合に関わらず0.60程度の大きな

表-3 すべり係数, 接触抵抗値測定結果

絶縁板種類	供試体番号	配合・形状	すべり係数	電気抵抗値			塗膜厚測定値	備考	
				湿潤状態	すべり前	すべり後			
エポキシ樹脂板	A-1-1	厚さ 0.5mm	0.42	1200Ω	∞	1000kΩ	—		
	A-1-2		0.41	1200Ω	∞	300kΩ	—		
塗料	無機ジンク系	B-1-1	0.5 / 7/22	—	900Ω	1.5Ω	55μ	亜鉛粉末 少ない	
		B-1-2	(sa717°)	0.62	—	2.0Ω	150mΩ		55μ
		B-1-1	0.5 / 7/22	0.55	—	1.0Ω	6.08mΩ		60μ
		B-1-2	(a717°)	0.60	—	3.0Ω	8.57mΩ		60μ
		B-2-1	10 / 7/22	0.57	48.5mΩ	51.0mΩ	7.14mΩ	95μ	亜鉛粉末 多い
		B-2-2	(sa717°)	0.58	98.7mΩ	66.5mΩ	5.43mΩ	95μ	
		B-3-1	80 / 0/20	0.59	—	0.23mΩ	56.2μΩ	80μ	通常の無機 ジンク
		B-3-2	(-)	0.60	—	0.31mΩ	52.1mΩ	85μ	
	エポキシ系	C-1-1	26/100	0.42	5.4mΩ	4.5mΩ	0.68mΩ	75μ	目標塗膜厚 75μ
		C-1-2	(a717°)	0.43	10.0mΩ	3.3mΩ	0.72mΩ	85μ	
		C-1-1	26/100	0.36	—	3.1mΩ	0.60mΩ	65μ	目標塗膜厚 125μ
		C-1-2	(sa717°)	0.36	—	5.8mΩ	1.87mΩ	65μ	
		C-2-1	40/100	0.46	170mΩ	155mΩ	42.0mΩ	120μ	
		C-2-2	(a717°)	0.45	57.8mΩ	63.2mΩ	21.6mΩ	130μ	
C-3-1	0/100	0.24	—	4.0Ω	61.3mΩ	75μ	チタン酸含 まない		
C-3-2	(-)	0.24	—	∞	174mΩ	70μ			
絶縁紙	D-1-1	(a717°)	0.56	—	50kΩ	4.7kΩ	480μ	160μ*3枚	
	D-2-1		0.48	72.1mΩ	52.2mΩ	8.8mΩ	410μ		
	D-2-2	(a717°)	0.48	173mΩ	54.3mΩ	6.4mΩ	410μ		
無	E-1-1	摩擦面	0.59	48.2μΩ	48.1μΩ	47.0μΩ	—		
	E-1-2	プラスト	0.59	48.5μΩ	48.8μΩ	46.7μΩ	—		

注) 配合・形状欄において, A/B/Cは亜鉛粉末/チタン酸カリウム/混合液の重量比を示す。

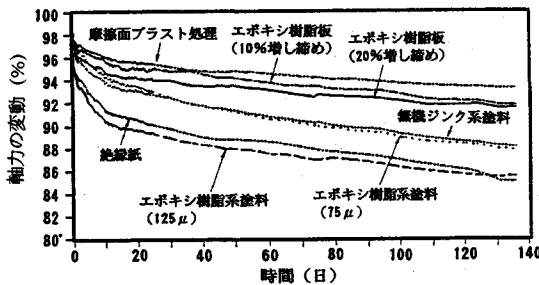


図-3 ボルト軸力の変化

値を示した。

エポキシ樹脂系塗料供試体は, 塗料のみではすべり係数は0.24と非常に小さいが, チタン酸カリウムの混入量が多く塗膜厚が厚い供試体程すべり係数は大きくなっている。このように, チタン酸カリウムを混入することによってすべり係数を大きくすることができる。

絶縁紙については, タイプによって多少の差はあるが, すべり係数は0.50程度の大きな値を示した。

②絶縁性能

鋼材間の接触抵抗値は, 摩擦面をプラスト処理しただけの供試体と比べてどの供試体も大きい, 絶縁材の種類によって大きな差が認められる。

エポキシ樹脂板供試体は他の材料に比べ安定しており, 確実な絶縁が可能と考えられる。すべり後も絶縁板が破断したにも係わらず300~1000kΩと大きな抵抗値を示したが, これはエポキシ樹脂板が比較的厚くすべり後も粉々になるような破壊形態を示さないからと考えられる。なお, 湿潤状態では, 絶縁性能は多少低下するが, 必要な絶縁性能に比べてはるかに大きく1200Ωであった。

無機ジンク系塗料供試体の抵抗値は亜鉛粉末の割合により変化し, 亜鉛粉末が多くなると急激に小さくなり絶縁性の確保が困難となる。これは, 本来亜鉛は導体であることから, 通常用いられている無機ジンクリッチペイントに含まれる亜鉛量では, チタン酸カリウムの添加量を増やしても絶縁性能を高める効果が発揮できないからと考えられる。一方, 絶縁性能を確保するため亜鉛量を少なくすると, 供試体に錆の発生が認められるなど防錆効果は期待できない。

表-4 絶縁摩擦接合継手のすべり試験データ

No.	ボルト 列数	鋼材種別	絶縁板 厚さ(mm)	ボルト軸力 (kN)	すべり荷重 (kN)	すべり係数	備考
1	2	SM490Y	0.5	221(M22)	373/372	0.42/0.42	表-3再掲
2	2	SM490Y	0.5	221(M22)	-/364	-/0.41	表-3再掲
3	2	低磁性鋼	1.0	178(M22)	345/345	0.48/0.48	
4	2	SS400	1.0	216(M22)	434	0.50	文献2)より
5	2	SS400	1.0	286(M22)	519	0.45	-/-
6	6	SM490Y	0.5	114(M16)	586/-	0.43/-	
7	6	SM490Y	0.5	115(M16)	514/-	0.37/-	
8	6	SM490Y	0.5	115(M16)	591/-	0.43/-	

注) No.4はトルク法, No.5はナット回転角法で締め付けており, それぞれ供試体3体の平均値を示す。

絶縁紙供試体は, ばらつきが大きいものの厚いほど抵抗値が大きくなる。また, すべり発生後は大幅に低下するが, これはすべり時に粉状に破壊し鋼材間に部分的に接触部が生じるためと考えられる。

なお, 湿潤時と乾燥時の抵抗値は, エポキシ樹脂板供試体を除き大きな変化がない。

③高力ボルトの軸力減少

締め付け後 135日後のボルト軸力の減少率は, 摩擦面をショットブラストしただけの供試体が最も小さく6.0%であった。エポキシ樹脂板を用いた供試体では, それより少し大きく, 軸力の10%増しの供試体で8.4%であった。軸力の10%増しのボルトと20%増しのボルトでは, 両者でそれほどの差はない。なお, 文献2)では, 厚さ1mmの同種のエポキシ樹脂板を用いた3カ月後までの軸力抜け実験を行っており, このなかで11%程度軸力が減少すると報告している。エポキシ樹脂板の実験結果が今回の実験結果に比べて大きくなっているのは, 厚さによるクリープの差が影響しているためと考えられる。また, 摩擦面をブラスト処理しただけの供試体との差もエポキシ樹脂板のクリープの影響と考えられる。

無機ジंक系塗料供試体の軸力減少は11.9%であった。文献10)によれば, 無機ジंकリッチペイントを用いた場合, 膜厚 100 μ 程度までの軸力減少の上限が大略 5+0.1t (t:膜厚 μ) で与えられるが, この値は上式から得られる14.5%に比べて小さい。

エポキシ樹脂系塗料供試体では無機ジंक系塗料供試体に比べさらに大きい。また, 75 μ 厚のものが12.1%, 125 μ 厚のものが14.1%と, 塗膜厚とともに増加する傾向を示している。これもエポキシ樹脂系塗料のクリープの影響と考えられるが, この値は, 上記の無機ジंकリッチペイントを塗布した場合の軸力減少の, 文献10)で与えられる計算値とほぼ一致している。

絶縁紙を用いた供試体の軸力減少は, 14.8%と全

供試体中最大であった。これは, 厚さによるクリープの影響が大きかったためであろう。

④絶縁材の選定

以上のように, 実験に用いた材料にはそれぞれ特長があり, 絶縁摩擦接合用の材料として一義的に定めることができないが, 2章で述べた条件を満たす継手性能が得られたものは, エポキシ樹脂板供試体(A-1) および無機ジंक系塗料供試体(B-1)であった。ただし, 前者のエポキシ樹脂板は, 材質が化学的に安定し鉄道でも軌道材料(スラブの充填材等)に用いられるなど長期耐久性も期待できるのに対し, 後者の無機ジंक系塗料については, 安定した塗料として供給できるようになるにはさらに検討が必要ことから, 現時点では前者のエポキシ樹脂板がよいと判断し, 以後の検討ではエポキシ樹脂板を用いた継手について検討を行った。

4. エポキシ樹脂板を用いた継手のすべり係数

エポキシ樹脂板(以下, 絶縁板)を用いた継手のすべり係数は2供試体とも0.40をわずかに超える程度で, 確実に0.40以上確保できるかどうかを判断するにはデータ不足である。そこですべり係数に関する検討を行った。表-4に筆者以外²⁾も含めてこれまで実施された静的すべり試験のデータをまとめた。No.1およびNo.2が3章に述べた実験結果で, No.3は本研究とは別途実施した低磁性鋼を用いた供試体での実験結果である。また, No.4およびNo.5は, 文献2)から抜粋したものである。これを見ると, No.3~No.5のすべり係数は, 0.50程度の比較的大きな値になっている。

また, 上記の実験結果は全て2列ボルトの供試体での結果であるため, ボルト本数による影響を把握する目的で, 同じ絶縁板を用いた6列ボルトの供試体(図-4)のすべり試験を行った。表-4にはその結

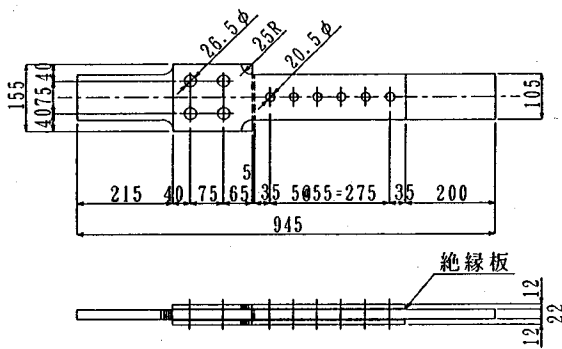


図-4 多列ボルトすべり試験の供試体形状

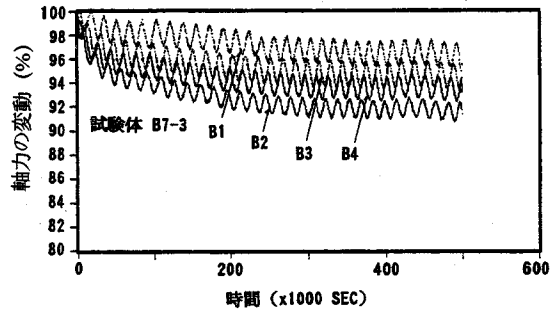


図-6 ボルト軸力の計測結果

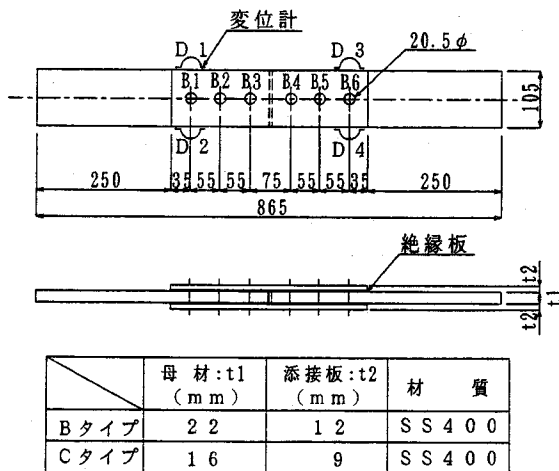


図-5 3列ボルト供試体の形状

果も示す。試験体3体の内1体が0.40以下となったが、他の2体および平均値は0.40を超えており、2列ボルト供試体での実験結果とそれほど差はない。通常の摩擦接合継手では、6列程度までの列数に対してすべり係数は変わらないとの報告もある¹⁰⁾が、絶縁摩擦接合継手も同様に6本程度までのボルト列数に対してすべり係数はほとんど変化しないか、低下しても僅かかと考えてよさそうである。

これらは静的すべり試験の結果であるが、後述する繰り返し載荷試験においてもすべり係数は、静的すべり試験の結果と同程度であった(表-5参照)。このようなことから、絶縁板を用いた摩擦接合継手のすべり係数は、0.40を確保できると判断してよいと考えられる。

なお、通常の摩擦接合継手では、ボルト軸力導入の偏差、クリープやリラクゼーションによる導入軸力の減少等を考慮して20%程度の安全を見込み、小型試験片の平均的なすべり係数である0.50の80%と

して0.40を設計に用いるすべり係数としている(材片間の黒皮の除去が前提)^{10),11)}。絶縁摩擦接合継手の場合も同様に考え、設計ではすべり係数として0.35程度を用いるのがよいと考えられる。

5. 絶縁摩擦接合継手の繰り返し載荷特性

絶縁摩擦接合継手に繰り返し荷重が作用した場合、すべり係数への影響、絶縁板摩擦面の劣化・損傷、ボルトの軸力減少への影響、絶縁性能への影響が問題になる可能性がある。また、疲労強度についても検討する必要がある。このようなことから、200万回以上を目標に繰り返し載荷試験を実施し、これらについて検討を行った。

(1) 実験概要

実験は、3章で述べたすべり試験と同じ形状の2列ボルト供試体(Aタイプ)と図-5に示す形状の3列ボルト供試体(B, Cタイプ)について実施した。絶縁板はすべり試験と同じエポキシ樹脂板を使用した。厚さの影響を検討するため $t=0.5, 0.7\text{mm}$ の2種類とした。また、Cタイプについては、摩擦面をブラスト処理しただけの供試体も実験に加えた。

実験は動的最大荷重490kNの疲労試験機を使用して実施した。載荷速度は2列ボルト供試体では4Hz、3列ボルト供試体では8Hzである。荷重は、Aタイプの供試体ではすべり係数への影響を検討するために静的すべり試験のすべり荷重付近の引張力を片振り載荷した。また、Bタイプの供試体では鋼鉄道橋の設計基準¹¹⁾に定める200万回疲労強度に相当する荷重を、Cタイプの供試体では絶縁板の有無による影響が明確に現れるようにBタイプより多少大きい荷重を載荷した。なお、繰り返し載荷中のボルト軸力、母材間の相対変位および実験前後の接触抵抗に

表-5 繰り返し載荷試験結果

種類	供試体番号	ボルト列数	荷重(kN)	応力度 σ_s (MPa)	応力度 σ_n (MPa)	すべりの発生	すべり係数	亀裂	載荷回数	備考	
A タ イ プ	A5-1	2	382	166	235	○	0.43	—	600	絶縁板 t=0.5mm	
	A5-2	2	372	162	229	×	(0.42)	無	2,000,000		
	A5-3	2	392	170	241	○	0.44	—	20		
	A5-4	2	372	162	229	○	0.42	—	280		
	A5-5	2	372	162	229	○	0.42	—	1620		
	A イ プ	A7-1	2	421	182	259	○	0.48	—	632	t=0.7mm
		A7-2	2	402	173	247	○	0.45	—	210	
		A7-3	2	353	153	217	×	(0.40)	無	2,000,000	
		A7-4	2	372	162	229	×	(0.42)	無	2,000,000	
	B タ イ プ	B5-1	3	265	115	143	×	(0.38)	無	2,000,000	t=0.5mm
B5-2		3	284	123	154	×	(0.41)	無	3,000,000		
B5-3		3	304	131	165	×	(0.44)	有	3,025,000		
B5-4		3	314	136	170	○	0.45	—	360		
B5-5		3	304	131	165	×	(0.44)	無	3,000,000		
B5-6		3	304	131	165	×	(0.44)	無	3,000,000		
B5-7		3	304	131	165	×	(0.44)	有	2,210,000		
B イ プ		B7-1	3	265	115	143	×	(0.38)	無	2,000,000	t=0.7mm
		B7-2	3	284	123	154	×	(0.41)	無	3,000,000	
		B7-3	3	304	131	165	○	0.44	—	80	
	B7-4	3	294	127	159	×	(0.43)	有	3,000,000		
C タ イ プ	C5-1	3	274	164	205	×	(0.40)	有	930,000	t=0.5mm	
	C5-2	3	"	"	"	×	(0.40)	有	1,110,000		
	C5-3	3	"	"	"	×	(0.40)	有	1,020,000		
	C0-1	3	274	164	205	×	(0.40)	有	1,610,000	絶縁板無	
	C0-2	3	"	"	"	×	(0.40)	有*	2,850,000		
	C0-3	3	"	"	"	×	(0.40)	有	1,550,000		

* 孔縁以外からも亀裂発生

表-6 繰り返し載荷試験におけるボルト軸力の減少率

供試体番号	載荷回数*10 ⁶	載荷前後の軸力減少率			静的試験との比較
		端	中央	全平均	
A5-2	200	0.933	0.933	0.933	95.3%
A7-3	200	0.926	0.964	0.945	100.0%
A7-4	200	0.940	0.945	0.942	99.8%
B5-3	300	0.928	0.953	0.943	(95.5%)
B5-6	300	0.954	0.962	0.959	(97.6%)
B5-7	300	0.972	0.974	0.973	(99.0%)
B7-1	200	0.894	0.913	0.909	(94.9%)
B7-2	200	0.835	0.918	0.890	(94.3%)

着目して計測を行うとともに、実験後に摩擦面の状況を確認した。

(2) 実験結果および考察

実験結果を表-5に示す。

a) 繰り返し載荷が継手性能に及ぼす影響

表-5から、載荷のごく初期にすべりが発生した供試体と200~300万回の繰り返し載荷に耐えた供試体

に分類することができ、これからすべり係数（初期締め付け軸力を基に算出した）が0.42~0.44にすべり発生の限界があると考えられる。この値は、静的すべり試験で得られたすべり係数とほぼ同等であり、絶縁板の厚さとの相関関係は認められない。また、繰り返し載荷完了後の供試体では、絶縁板の摩擦面には特に損傷は見られなかった。このようなことから、繰り返し載荷によってすべり係数が低下するようなことは考えなくてよいものと思われる。なお、この実験においても、すべりの発生した全ての供試体の絶縁板は端ボルト部においてボルト孔を通る位置で破断したり孔縁に欠けが認められた。

図-6には供試体（B7-3）の各ボルト軸力の計測結果を示す。繰り返し載荷試験はボルト軸力導入後1時間後から開始したため、軸力はその時点からのものを表わしている。疲労試験機とひずみ計測器の内蔵時計に日差約1秒の誤差があり、徐々に計測時の荷重にずれが生じたために測定結果が波形を示している。これからボルト軸力は5kN程度変動していることがわかる。この値は、ポアソン比による板厚の変

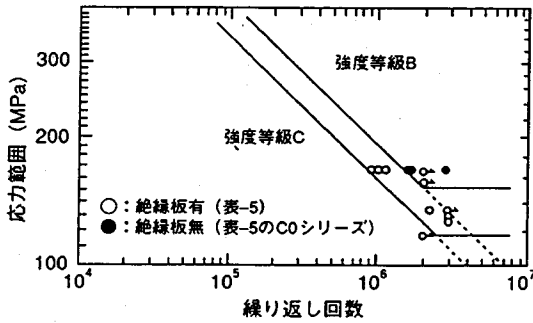


図-7 絶縁摩擦接合継手のS-N線図

化の計算結果とほぼ一致する。母材と添接板の相対変位も 0.1mm程度変動していたが、変位計取り付け間隔での鋼材の伸びの計算結果とほぼ一致しており、また、絶縁板を挿入した供試体としない供試体ではほとんど差が認められなかった。表-6には、200万回以上の繰り返し载荷を行った供試体各ボルトの実験開始から実験後までの軸力の変化の状況を示す。繰り返し载荷試験はボルト軸力導入後1時間後から開始したため、表の軸力減少率もその時点からの変化率を表わしている。表には、3章に述べた2列ボルト供試体における静的な軸力抜け試験の結果（2本のボルトの平均値）に対する比率も併せて示す。これから、2列ボルト供試体ではボルト位置で軸力減少にほとんど差がないこと、3列ボルト供試体では端ボルトの減少が中央部のボルトに比べて少し大きくなる傾向にあることがわかる。また、繰り返し载荷によって数%程度は軸力の減少が大きくなると考えられる。

繰り返し载荷後の電気抵抗値については、すべりの発生したのものも含めて、完全な絶縁性が保たれていた。

b) 絶縁摩擦接合継手の疲労強度

表-5において、Cタイプの継手の実験結果の内、絶縁摩擦接合継手であるC5シリーズと絶縁板を挿入しない通常の継手のC0シリーズを比較すると、両者とも同じ応力度で载荷したものであるが、後者に比べて前者は明らかに疲労強度が低いことがわかる。図-7には载荷の初期にすべりの発生しなかった供試体の総断面応力で求めたS-N線図を示す。図にC0シリーズの実験結果も黒丸で示しており、実線は継手の強度等級BおよびCを示す^{11), 12)}。鉄道橋では、高力ボルト摩擦接合の疲労設計曲線として継手片側のボルト本数が4本以下の場合強度等級B¹¹⁾を用いているが、C0シリーズの疲労強度がこれを上回る一方で、

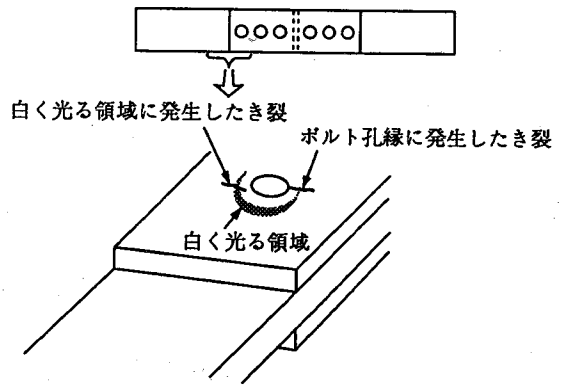


図-8 絶縁板無しの継手供試体のき裂発生状況

C5シリーズではこれを下回っていることがわかる。ただし、強度等級Cは満足しており、絶縁板を挿入することで継手強度等級は1ランク程度小さくなると考えられる。

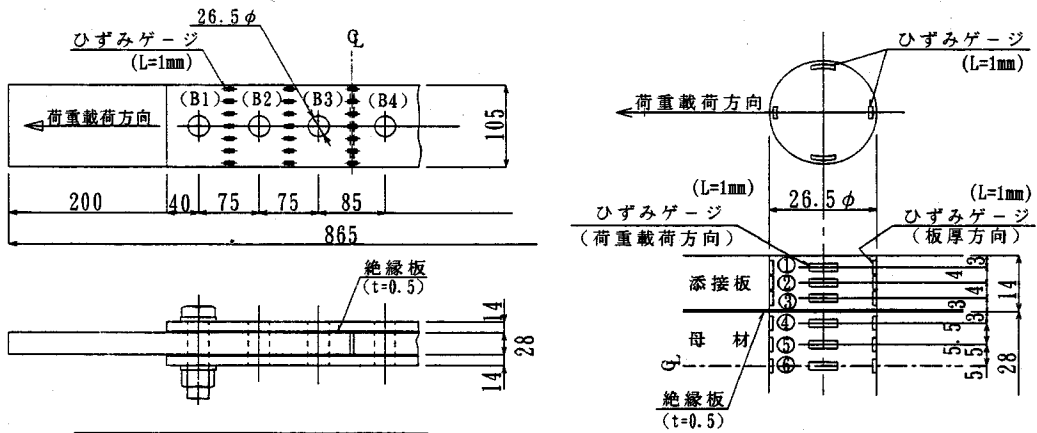
また、300万回の载荷が完了したのものには母材および絶縁板にき裂等の異常は認められなかった。破断した供試体は、全て一番外側のボルト孔中央部の縁にき裂が生じて破断に至った。なお、通常の摩擦接合継手の繰り返し载荷試験では、ボルト孔周辺のほとんど表面状態の変化しない領域の外側に表面が強くこすられてできる白く光る領域が存在し、軸力が高くなるとき裂は継手外側部のこの部分から発生するようになると報告されている¹³⁾。図-8に示すように、今回行った絶縁板無しの継手供試体3体の内1体(C0-2)に、ボルト孔中央部の縁のき裂の他、上記の白く光る領域からもき裂が発生したが、絶縁摩擦接合継手の繰り返し载荷試験ではそのような現象は認められなかった。

6. 繰り返し载荷時の継手の内部応力

5章に述べたように、絶縁摩擦接合継手の疲労強度が一般の摩擦接合継手に比べて低下することが明らかとなったため、その原因を把握することを目的に、両タイプの供試体に準動的な繰り返し荷重を载荷し、継手内部の内部応力性状を把握するための測定を行った。

(1) 実験概要

供試体は、摩擦面をプラスト処理しただけのAaタイプおよび絶縁板を挿入したBbタイプのそれぞれ2体である。その形状およびひずみゲージの貼り付け位置を図-9に示す。添接板上面のひずみゲージは、



供試体	絶縁板	材質	供試体数
Aaタイプ	無	SS400	2
Bbタイプ	有	SS400	2

図-9 供試体形状およびひずみゲージの張り付け位置

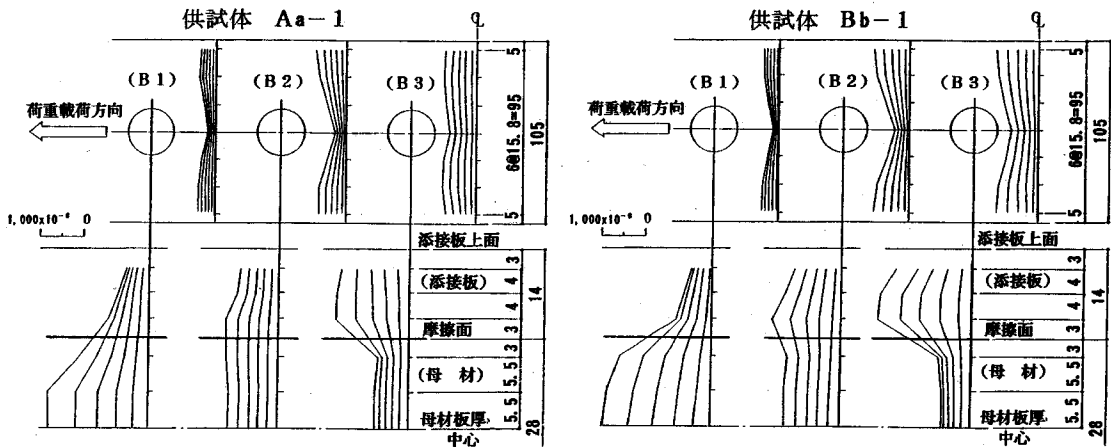


図-10 添接板上面とボルト孔縁の荷重載荷方向ひずみの測定結果

荷重載荷方向の応力分布を確認するために各ボルト間に貼り付けた。ボルト孔縁のひずみゲージは、孔縁の応力分布を確認するため、添接板と母材の荷重載荷方向および板厚方向に貼り付けた。特に、端ボルトの母材孔縁には、他より多くのひずみゲージを貼り付けている。絶縁板の厚さは0.5mmである。高力ボルトはM22(F10T)を使用し、導入軸力は220kNとした。ボルト孔径は、絶縁材(クロロプレングム)を挿入するために26.5φの拡大孔としている。

荷重方法は、荷重を段階的に増加させ、すべり荷重の90%程度の490kNまで荷重し、その後徐々に荷重を減少させて0kNに戻した。このサイクルを3回繰り返した。

(2) 実験結果および考察

図-10に添接板上面とボルト孔縁の荷重載荷方向のひずみの測定結果を示す。図は供試体Aaおよび供試体Bbにおける0~490kNまでの98kN毎の測定結果で、ひずみが増加していく状況を表している。孔縁のひずみはボルト(B1)の母材が大きく、ボルト(B3)では添接板が大きくなっている。添接板上面でもボルト(B3)とボルト(B4)間のひずみが最も大きくなっており、応力が母材から添接板に徐々に伝達されていく様子がわかる。また、板厚方向のひずみは、荷重載荷方向に比べて1/5程度の値であった。これらは両供試体とも同様な傾向を示している。

これらの内部応力の分布から、端ボルト(B1)の母材孔縁の荷重載荷方向ひずみに着目する。図-11に両

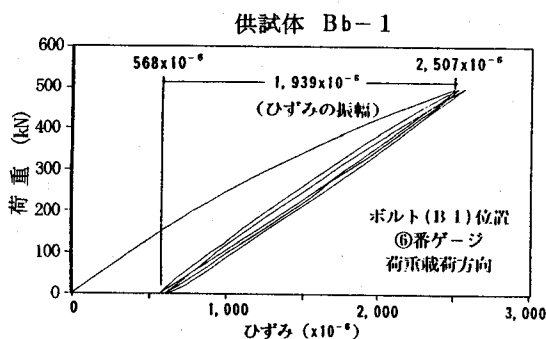
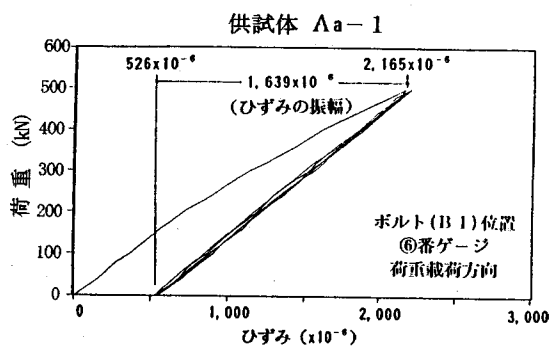


図-11 端ボルト(B1)の母材板厚中心位置の計測結果

供試体の端ボルト(B1)孔の母材板厚中心(⑥番ゲージ)位置の計測結果を示す。荷重を徐々に増加させると、両供試体ともひずみは緩やかな曲線を描きながら増え、荷重を減少させるとほぼ直線的に減っていき、除荷後も残留ひずみが残っている。その後の2サイクルは、ほぼその直線上を増減している。繰り返し荷重が作用したときのひずみの変動はその差と考えられる。図-12に、端ボルト(B1)位置の孔縁の490kN載荷時のひずみ変動を示す。横軸に母材と添接板のひずみゲージの貼り付け位置を示しており、各位置でのひずみ変動幅の分布状況を知ることができる。図中の△、×印は全て供試体の測定結果を示しており、実線および破線は各測定個所の平均値を結んだものである。図から絶縁材を挿入した供試体Bbの方が繰り返し載荷時のひずみの振幅が大きくなっていることがわかる。供試体Aaでは、母材側のひずみと添接板側のひずみの差が比較的少なく、摩擦面付近でも連続性があり滑らかな曲線となっている。一方、供試体Bbについては、母材側のひずみと添接板側のひずみ差が大きく摩擦面に境に急な勾配になっている。これから、この継手のボルト孔付近の絶縁材には、母材と添接板の相対変位の測定からはわからなかった微小な変形が生じていると考えられる。

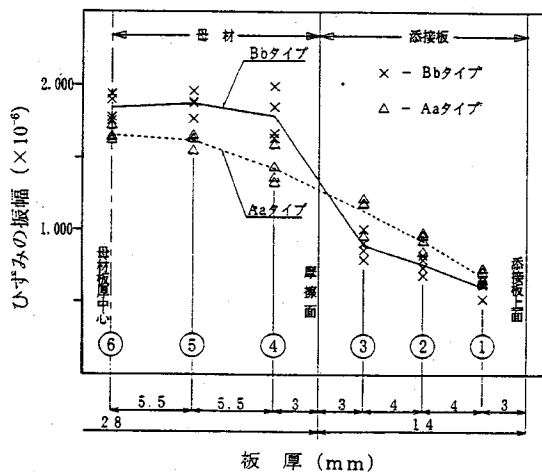


図-12 端ボルト(B1)位置の孔縁のひずみの振幅

また、母材の載荷方向のひずみの変動は供試体Bbの方が供試体Aaよりもピーク値(⑥番ゲージ)で11%大きい。すなわち、摩擦面に絶縁板を挟み込んだ場合、端ボルトの母材孔縁は繰り返し載荷時のひずみ(応力)の変動が大きくなることがわかる。このように絶縁摩擦接合継手の疲労強度が低下する要因は、絶縁板を挟み込むことにより、端ボルト母材の孔縁に作用する応力範囲が絶縁板を挟み込まない場合に比べ10%程度大きくなるためと考えられる。このことから、絶縁摩擦接合継手の設計においては、継手強度等級を1ランク下げて用いるのがよいと考えられる。なお、応力範囲が大きくなる要因は、端ボルト孔周辺部の絶縁板が微小変形するために見掛け上ボルトによる拘束力が弱まり、ボルト孔孔縁の応力集中の度合いが高まるためであると考えられる。

7. まとめ

本研究では、浮上式鉄道用構造物の磁気抗力対策の一環として、絶縁性能を付与した継手に関して実験的な検討を行った。検討の結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 部材接合部を絶縁する継手方式としては、高力ボルト摩擦接合継手が適当である。
- (2) 数種類の絶縁材料を用いた継手の静的すべり試験、電気抵抗値の測定および高力ボルトの軸力抜け試験を実施し、絶縁摩擦接合継手としての基本的な特性を明らかにした。その結果、絶縁材としてエポキシ樹脂板と亜鉛量を減らした配合の無機ジソクリッチ系の材料が絶縁摩擦接合に必要な継手性能を満

たすことが明らかとなった。ただし、絶縁材としては、現時点ではエポキシ樹脂板がよいと考えられる。

(3) エポキシ樹脂板を用いた絶縁摩擦継手の静的試験により得られた基本特性は、以下のとおりである。

① すべり係数は、摩擦面をブラスト処理した継手および無機ジンクリッチペイントを塗布した継手に比べると小さいが、6列程度までのボルト本数に対して0.40以上を確保できる。ただし、設計に用いる場合のすべり係数は、通常の摩擦接合継手と同様にボルト軸力導入の偏差、ボルトの軸力減少等を考慮し、0.35程度とするのがよいと考えられる。

② すべり発生後も確実な絶縁性能を得ることができる。また、湿潤状態で材片間の接触抵抗は低下するが、絶縁性能としては充分である。

③ 高力ボルトの軸力減少は、3カ月で8%程度であった。これは、摩擦面をブラスト処理した一般の継手に比べて多少大きい程度である。

(4) 繰り返し載荷が絶縁摩擦接合継手に与える影響は以下のとおりである。

① 繰り返し載荷による絶縁板の劣化・損傷は認められなかった。

② 繰り返し載荷によるボルトの軸力減少への影響は、3列ボルト供試体の端ボルトで比較的大きく現れたが、平均的には数%程度の軸力減少であった。

③ 繰り返し載荷試験の結果、絶縁板を挟み込んだ場合、疲労強度が多少低下する。疲労設計に用いる継手強度等級は、一般の摩擦接合継手のランクより1ランク下げて用いればよいと考えられる。

(5) 絶縁摩擦接合継手の疲労強度低下の原因は、端ボルト母材の孔縁に作用する応力範囲が、絶縁板を挟み込まない場合に比べ10%程度大きくなるためである。これは、端ボルト孔周辺部の絶縁板が微少変形するために、見掛け上ボルトによる拘束力が弱まり、ボルト孔孔縁の応力集中の度合いが高まるためであると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり田島元埼玉大学教授に助言をいただきました。また、本研究は国庫補助を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 市川篤司：超電導磁気浮上式鉄道の構造物における電磁気対策，土木学会誌，Vol. 81, No. 2, 1996.
- 2) 鳥取誠一，志村雄三，菊川春三：FRPを挿入した高力ボルト摩擦継手の力学的特性，土木学会第42回年次講演会概要集 I-243, 1987. 9.
- 3) 山田稔，長嶋文雄，赤崎浩司，成田信之：高マンガン非磁性鋼継手および絶縁継手に関する一試験報告，土木学会第46回年次学術講演会 I-281, 1991. 9.
- 4) 市川篤司，穴見源八，杉本一郎，長嶋文雄，山田稔：絶縁性能を有する高力ボルト摩擦接合継手に関する研究，鋼構造年次論文報告集，Vol. 1, 1993. 7.
- 5) 杉本一郎，市川篤司，穴見源八，山田稔，羽田政浩，長嶋文雄：絶縁摩擦接合継手の性能に関する試験報告，土木学会第47回年次学術講演会 I-385, 1992. 9.
- 6) 杉本一郎，市川篤司，穴見源八，長嶋文雄，山田稔，羽田政浩：絶縁摩擦接合継手の繰返し載荷試験報告，土木学会第48回年次学術講演会 I-494, 1993. 9.
- 7) 市川篤司，杉本一郎，長嶋文雄，羽田政浩，山田稔：絶縁摩擦接合継手の疲れ強さに関する一報告，土木学会第49回年次学術講演会 I-103, 1994. 9.
- 8) 市川篤司，杉本一郎，長嶋文雄，羽田政浩，山田稔：絶縁摩擦接合継手の内部応力分布と疲労特性に関する一考察，土木学会第50回年次学術講演会，I-A403, 1995. 9.
- 9) 北村明彦，市川篤司，穴見源八，岩崎雅紀：浮上式鉄道に用いる低磁性高力ボルト継手に関する一実験，土木学会第46回年次学術講演会 I-282, 1991. 9.
- 10) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，pp. 58-67，技報堂，1966.
- 11) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，1992. 10.
- 12) (社)日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993. 4.
- 13) 日本鋼構造協会，鋼材倶楽部：鋼構造接合資料集成一リベット結合・高力ボルト接合一，pp. 676-677，技報堂出版。

(1996. 1. 29受付)

STATICAL AND FATIGUE STRENGTH TESTS OF INSULATED FRICTION-TYPE CONNECTIONS

Atsushi ICHIKAWA, Fumio NAGASHIMA, Minoru YAMADA and Masahiro HATA

For the steel bridges and structures in the magnetic levitation (MAGLEV) guideway systems, electrically insulated connections must be used to reduce the magnetic drag forces acting on the MAGLEV cars. The objectives of this paper are to investigate the behavior of the insulated friction-type connections and to establish their design method. Basic performance tests of connections with various kinds of insulating materials such as epoxy glasslaminates, inorganic zinc paint including potassium titanate and insulating sheet are carried out to choose an adequate material. Using the butt-type connections insulated by the chosen material, zero-to-tension cyclic loading tests are also carried out to certify their fatigue strength.