

論文 溶融亜鉛めっき座金を摺動材とした鋼-コンクリート摩擦ダンパーのすべり係数

國本 健太郎^{*1}・吉岡 智和^{*2}

要旨: プレキャストカーテンウォールと架構の取り付け部に溶融亜鉛めっき座金を挿入しボルトを介して一部の摩擦力を伝達する2面摩擦型鋼-コンクリート摩擦ダンパーを対象に、鋼製ファスナー摩擦面の発錆の有無、締め付けボルト本数が異なる場合にこれらの実験条件が摩擦面のすべり係数の大小に与える影響を摺動実験により確認した。その結果、実験条件の違いによるすべり係数への影響は明確には把握できなかったが、溶融亜鉛めっき座金の亜鉛付着量の大小が摩擦力に影響を与える可能性を確認できた。

キーワード: プレキャストカーテンウォール, ファスナー, 摩擦ダンパー

1. はじめに

筆者らの一人は、鋼構造物の外壁に利用されるプレキャストカーテンウォール(以下、外壁と略す)の剛性と耐力を損傷、落下が生じない範囲で利用することを目指し、図-1に示す外壁と架構との取り付け部分に摩擦ダンパーを組み込んだ外壁ファスナーを提案¹⁾している。この構法の利点は、外壁の剛性を利用することで中小地震に対する変形制限(損傷限界)を比較的容易に満たすことができ、さらに小減衰力の制震ダンパーを多数分散配置した制震構造が実現できる点にある。文献2では、そのような摩擦ダンパー型外壁ファスナーの必要性能として、大地震(速度50kine)に対し、層間変形角を1/100rad以下に制限するには、外壁1枚毎に1ヶ所の摩擦ダンパー型ファスナーを設けた場合に、1つのダンパーが40kN以上の減衰力を有し、その減衰力を累積すべり量1,000mmまで保持する必要があるとの知見が報告されている。

筆者らの一人は、外壁に設ける摩擦ダンパーとして、コンクリート壁板と鋼製ファスナーを2本ボルトで締め付け、溶融亜鉛めっき座金を摺動材とした鋼-コンクリート摩擦ダンパーを提案³⁾した。当該ダンパーは、図-2に示すように、コンクリート壁板と鋼製ファスナーとの摩擦面に生じる摩擦力に加え、鋼製ファスナーと溶融亜鉛めっき鋼製座金との摩擦面に生じる摩擦力を締め付けボルトの曲げせん断抵抗を利用しコンクリート壁板へ伝達する特徴を持っている。文献4では、当該ダンパーにおいてボルト1本当たり25kNのボルト張力を導入し、皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入することで、所要の減衰力(40kN以上の摩擦力)を発揮できること、その摩擦力が繰り返し摺動に伴い緩やかに増加することが確認された。さらに、ボルト張力が37.5、50kNと増加すると摩

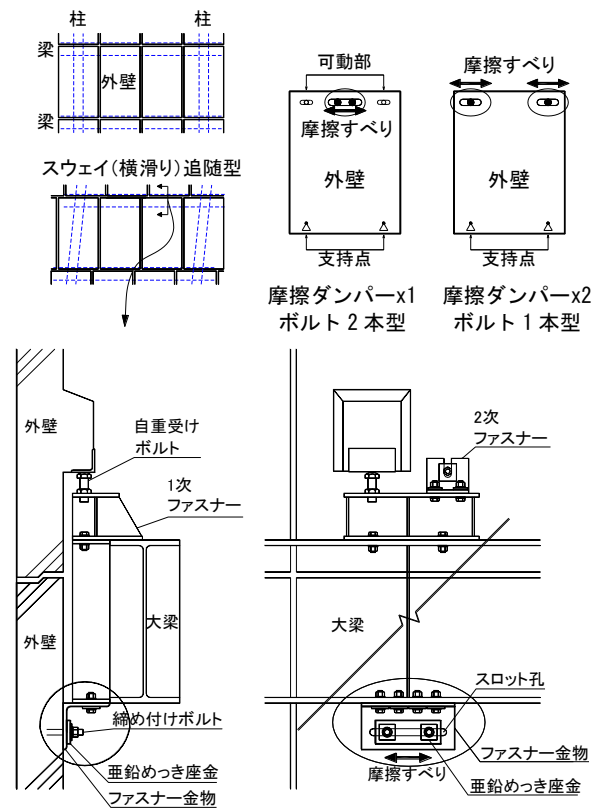


図-1 摩擦型ファスナーダンパー¹⁾

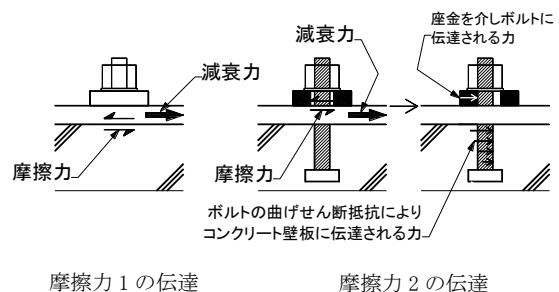


図-2 ボルトを介した2面摩擦型ダンパー³⁾

*1 九州大学芸術工学府 修士課程 (学生会員)

*2 九州大学大学院 芸術工学研究院環境・遺産デザイン部門 准教授 博士(工学) (正会員)

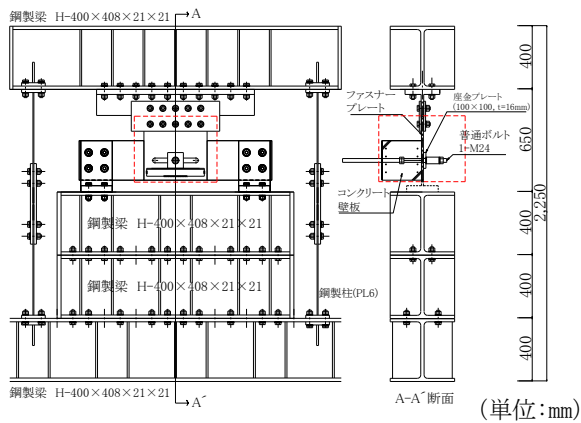


図-3 ダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組

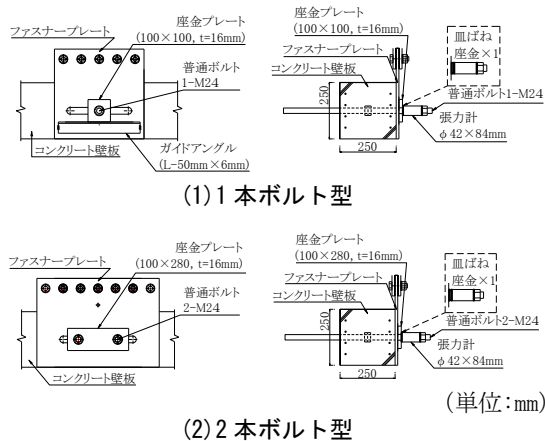


図-4 ダンパー要素試験体

摩擦力が概ね比例し増加することが報告されている。しかしながら、文献4では黒皮未除去・未発錆のファスナー鋼板を用いた場合の摩擦力であるため、ファスナー鋼板摩擦面の発錆の有無が摩擦力に与える影響は未解明である。加えて、図-1に示すように従来通りに外壁の四隅に配置されたファスナー接合部をそのまま摩擦ダンパーとして利用することを想定し、1本ボルトで締め付けた場合の摩擦力については調査されていない。

そこで本研究では、熔融亜鉛めっき座金を摺動材として使用した鋼-コンクリート摩擦ダンパー要素試験体を用いた動的摺動実験を行い、実験条件として2本ボルトで締め付けた場合を対象にファスナー鋼板摩擦面の発錆の有無、及びファスナー鋼板摩擦面が黒皮未発錆の場合を対象にボルト本数の違い(1本と2本)を設定し、それらが摩擦力、ボルト張力、すべり係数に与える影響を調査した。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験で使用したダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組の形状・寸法を図-3に、ダンパー要素試験体の形状・寸法を図-4に示す。2本ボルトで締め付けたダンパー要素試験体とそれを組み込んだ鋼製骨組の形状・寸法

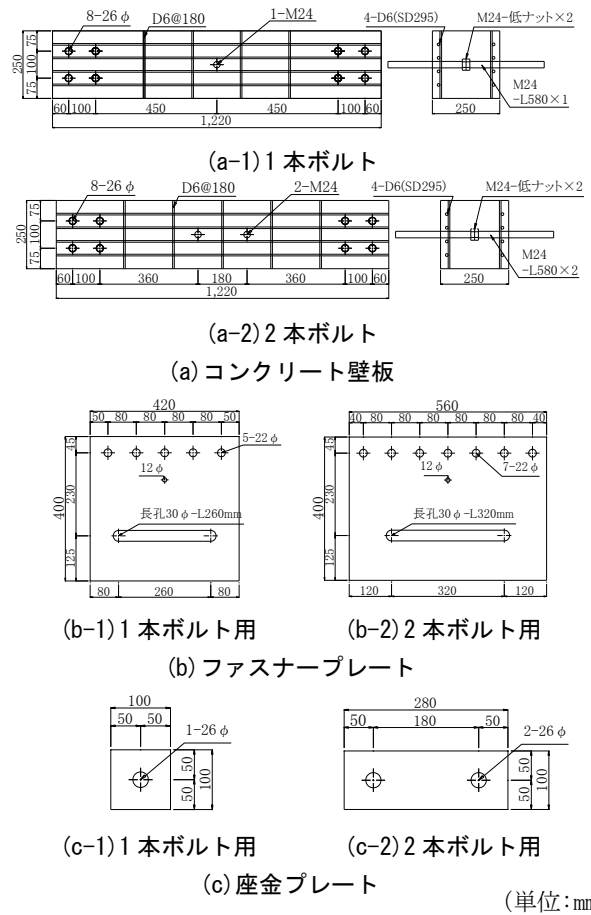


図-5 要素試験体の構成部材の形状・寸法

は文献4と同様であるので省略し、1本ボルトで締め付けた試験体についてのみ示す。試験体は、外壁のファスナー部分を抜き出した実大のファスナーダンパー要素であり、外壁を模したコンクリート壁板、ファスナー金物を模したファスナープレート、及び座金プレートで構成し、それらをコンクリート壁板に機械式定着させた普通ボルト(M24)で締め付け圧着した。摩擦ダンパー要素試験体を構成するコンクリート壁板、ファスナープレート、座金プレートの形状・寸法を図-5に示す。コンクリート壁板の寸法は長さ1220mm×高さ250mm×厚さ250mmとし、両側面に摩擦面を設定できるようにボルトを両側に突出させた。コンクリート壁板の摩擦面には木製型枠脱型面を用いた。コンクリートには、プレキャストカーテンウォールと同様に軽量1種コンクリートを用いた。ファスナープレートには厚さ12mmの鋼板(SS400)を使用し、摺動時に締め付けボルトとボルト孔縁との接触を避けるために長孔を設けた。1本ボルト用ファスナープレートには摺動時に座金の回転を防止するため、ガイドアングル(L-50mm×6mm)を設けた。締め付けボルトの丸座金とファスナープレート間に座金プレート(厚さ16mm, SS400)を挿入した。表面にはJIS H8461に規定されたHDZ35(亜鉛の付着量の計測値は798g/m²)の熔融亜鉛めっきを施した。この表面処理は、ファスナープレートと

座金プレートの同種金属間の摩擦摺動時に生じる焼き付き現象に伴う摩擦力の急増を防止するために施した。2本ボルトで締め付けた試験体に用いたコンクリート壁板、ファスナープレートと座金プレートの形状・寸法は文献4と同様とした。壁板に用いたコンクリートの調合計画と圧縮試験結果を表-1、表-2にファスナープレート、座金プレートに用いた鋼材の引張試験結果を表-3に示す。外壁ファスナーに動的な摺動を生じさせるため、文献4と同様に図-3に示した鋼製骨組内に設けた高さ800mmの鋼製架台上に前記のダンパー要素試験体を設置し、上梁に取り付けたT型金物に添板を介して高力ボルト摩擦接合により固定した上で、上梁に水平方向変位を与えた。なお、ダンパー要素試験体を構成するコンクリート壁板の両端は、鋼製架台上に設けたT型金物を介し、PC鋼棒(19φ)8本で締め付けすべりが発生しないよう固定した。

2.2 実験条件

本研究では実験条件として、ファスナープレート摩擦面の発錆の有無、ボルト本数を設定し、実験条件毎に皿ばね座金の挿入の有無による影響を確認した。写真-1に実験前のファスナープレート摩擦面を、実験条件毎の試験体名称を図-6に示す。2本ボルトで締め付けた試験体を対象に、ファスナープレート摩擦面を黒皮未除去・未発錆(MFP)と黒皮未除去・発錆(RFP:露天に暴露、散水し赤錆発錆させ、目視によりJIS Z031のさび度Bに相当することを確認)の場合のすべり挙動を比較した。さらに、ファスナープレート摩擦面に黒皮未除去・未発錆とした試験体を対象に、締め付けボルト本数を1本と2本とした場合も比較した。初期ボルト張力に、ボルト本数に係らず、いずれの実験条件においてもボルト1本当たり37.5kNを導入した。実験条件毎に繰り返し摺動時のボルト張力低下を抑制するため皿ばね座金をボルト締付部に挿入した皿ばね座金はJIS B1251のM24軽荷重用1種とした。2本ボルトで締め付け黒皮未除去・未発錆のファスナー試験体(SW1)と未挿入の試験体(SW0)の実験結果は、文献4より引用し、比較のため再掲載した。また、文献4で使用したダンパー要素試験体の形状、寸法及び材料仕様は、前述した2本ボルト型試験体と同様である。使用されている材料強度は、コンクリート壁板のコンクリート圧縮強度は30.7N/mm²、ファスナープレート、座金プレートの降伏点強度はそれぞれ305N/mm²、330N/mm²、引張強度は417N/mm²、420N/mm²であり、座金プレートの溶融亜鉛めっき付着量の計測値は、647g/m²である。なお、その他2つの実験条件毎の試験体数として、同一実験条件で3体を計画し、総計12体の実験を実施した。

2.3 加力方法及び計測方法

加力は、文献4と同様に200kN動的アクチュエータで面外変形を拘束するねじれ防止装置を取り付けた鋼製骨

表-1 コンクリートの調合計画

Fc (N/mm ²)	スラン プ (cm)	空 気 量 (%)	水 セ メ ン ト 比 (%)	細 骨 材 率 (%)	(kg/m ³)				
					単 位 水 量	セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	混 和 剤
30	18	5.0	43.0	42.2	183	426	687	456	1.1

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

種類	単 質 量 体 積	呼 び 強 度	圧 縮 強 度	ヤ ン グ 係 数	材 令
	(t/m ³)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(×10 ⁴ N/mm ²)	(日)
軽量1種	1.79	30	37.4	1.56	170

表-3 鋼材の引張試験結果

使用 部位	鋼 種	厚 さ (mm)	降 伏 点	引 張 強 さ	ヤ ン グ 係 数
			(N/mm ²)	(N/mm ²)	(×10 ⁵ N/mm ²)
ファスナー	SS400	12	320	434	1.97
座金		16	320	423	1.98



(a) 黒皮(未発錆)

(b) 黒皮(発錆)

写真-1 ファスナープレート摩擦面(実験前)

M24 - { ×1 } - N375 - ZnP:溶融亜鉛めっき - FLT -
 ボルト径 { ×2 } 初期ボルト 座金プレート コンクリート
 ボルト本数 張力 壁板

{ MFP:黒皮(未発錆) } - { SW0:なし } - { 試験体 }
 { RFP:黒皮(発錆) } { SW1:あり } { 番号 }
 ファスナープレート 皿ばね座金 { 1-3 }

図-6 試験体名称

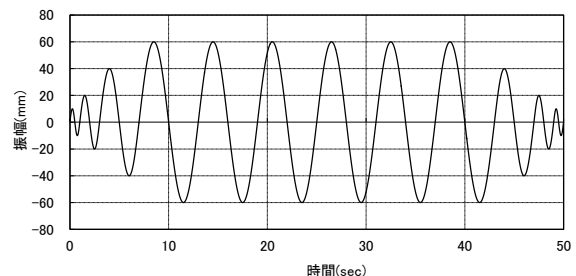


図-7 加振波

組上梁に水平方向強制変位を与え、変位片振幅10, 20, 40, 60mmに対し振動数1.0, 0.5, 0.25, 0.17Hzとなる図-7に示す正弦波とした。計測物理量は、水平力、締め付けボルト張力、鋼製骨組上下梁の相対水平変位、コンクリート壁板とファスナー金物とのすべり変位とし、2ミリ秒で計測した。

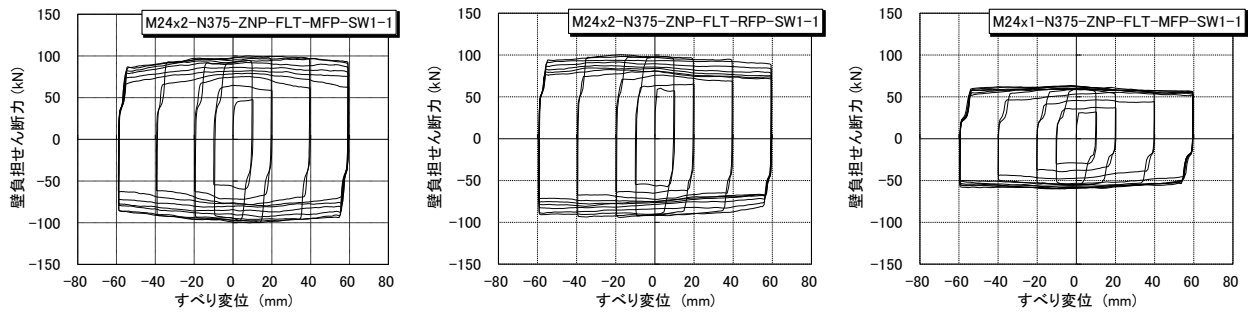


図-8 壁負担せん断力とすべり変位の関係

3. 実験結果

得られた実験結果より、皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入した試験体の壁負担せん断力とすべり変位の関係の代表例を、実験条件毎に図-8 に示す。ここで、壁負担せん断力は、強制変位に伴い生じた水平力から、鋼製骨組が負担するせん断力を除いたもので、摩擦ダンパーの摩擦力に相当する。鋼製骨組が負担するせん断力は、ダンパー要素試験体を設置せず行った鋼製骨組の加力試験結果より得られた骨組の水平剛性 0.0135kN/mm にダンパー要素試験体の加力試験時の層間変位を乗じ算定した。

本実験で設定した 2 つの実験条件 (M24x2-N375-ZNP-FLT-RFP シリーズと M24x1-N375-ZNP-FLT-MFP シリーズ) の試験体では、既往の実験結果⁴⁾ (M24x2-N375-ZNP-FLT-MFP シリーズ) と同様にサイクル毎の摩擦力とすべり変位の関係は概ね完全剛塑性型の履歴曲線を描いた。また、繰り返し撓動に伴い摩擦力は増加する傾向が見られた。

3.1 繰り返し撓動時のすべり係数

実験より得られた摩擦力から、繰り返し撓動に伴うすべり係数を計算し、それらに与える実験条件の影響を考察する。繰り返し撓動時のすべり係数と累積すべり量の関係を図-9 に、繰り返し撓動時のボルト張力保持率と累積すべり量の関係を図-10 に示す。すべり係数は、得られた摩擦力を初期ボルト張力の総和で除した値を示し、ボルト張力保持率は初期ボルト張力の和に対する撓動時に計測したボルト張力の和の比率を表す。また、累積すべり量は、計測時点までに摩擦面が経験したすべり変位の総和を示す。図-9、図-10 で示したすべり係数は、図を用いた比較を容易にするため、文献 4 と同様に図-11 に示す方法を用いて全計測データより抽出し図示した。図-10 のボルト張力保持率も抽出したすべり係数の計測点に対応したデータのみを示している。

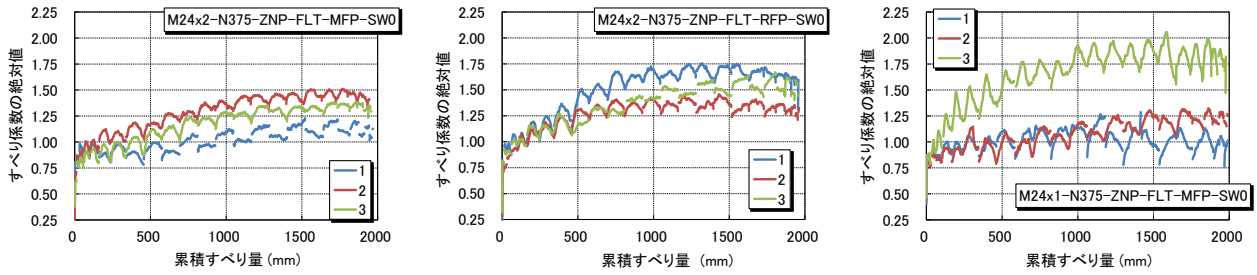
(1) 皿ばね座金挿入の有無による影響

繰り返し撓動時のすべり係数は、図-9 に示すように、実験条件に係らず、累積すべり量の増加に伴い上昇した後、一定値に漸近する傾向が見られた。皿ばね座金を挿入した試験体では、発錆したファスナープレートを用いた試験シリーズを除き、未挿入の試験体に比較し同一

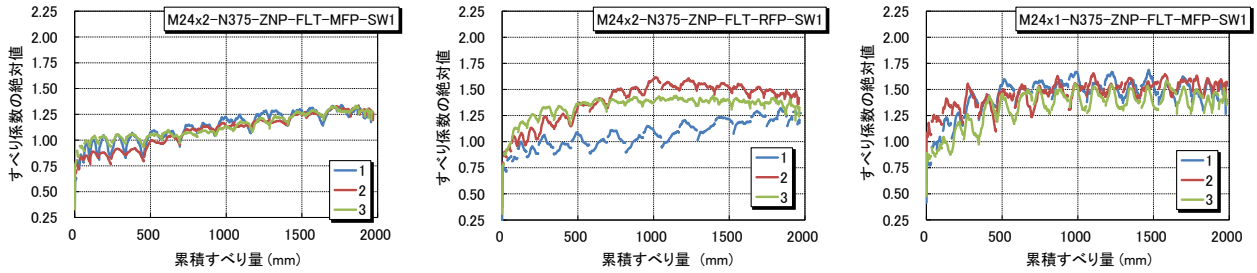
累積すべり量におけるすべり係数の大きさのばらつきが小さくなった。実験終了時までには発揮される最大すべり係数が、皿ばね座金未挿入の試験体の一部では 2.00 に達し、皿ばね座金を挿入した試験体に比較し大きくなる傾向にあった。これらの要因として、図-10 に示すように、皿ばね座金を挿入した試験体では、ボルト張力が繰り返し撓動に伴い、緩やかに低下し、ボルト張力保持率は 0.8 ~ 0.9 に漸近するものの、皿ばね座金未挿入の試験体と比較して同一累積すべり量での大きさのばらつきが小さくなったためと推測できる。また、皿ばね座金未挿入の試験体の一部には、繰り返し撓動に伴い、ボルト張力が大きく上昇するものがあり、大きなすべり係数が生じた原因と考えられる。

(2) ファスナープレートの発錆の有無、及びボルト本数の違いによる影響

次に、実験条件毎のすべり係数への影響を確認する。なお、前述したようにボルト張力のばらつきに起因する同一累積すべり量でのすべり係数のばらつきが小さくなる皿ばね座金を挿入した試験体のみを対象に比較を行った。既往の実験結果 (M24x2-N375-ZNP-FLT-MFP シリーズ) では、すべり係数は、繰り返し撓動に伴い緩やかに上昇し、累積すべり量 1500mm 前後よりすべり係数の大きさが約 1.25 に漸近している。一方、本実験で設定した 2 つの実験条件 (M24x2-N375-ZNP-FLT-RFP シリーズ及び M24x1-N375-ZNP-FLT-MFP シリーズ) の試験体では、発錆したファスナーを使用した試験体全体を除き、すべり係数は累積すべり量が 500mm を超過するあたりより 1.50 に漸近し、概ねその大きさを実験終了 (累積すべり量 2000mm) まで維持した。以上の結果、発錆したファスナープレートを用いた場合、又はボルト 1 本で締め付けた場合は、既往の実験結果 (未発錆のファスナープレートを用い、2 本ボルトで締め付けた場合) に比較し、繰り返し撓動に伴うすべり係数の上昇率が大きく、より大きなすべり係数 (約 1.2~1.3 倍) を発揮した。しかしながら、本実験で設定した 2 つの実験条件 (M24x2-N375-ZNP-FLT-RFP シリーズと M24x1-N375-ZNP-FLT-MFP シリーズ) の試験体より得られた繰り返し撓動時のすべり係数の変化及びその大

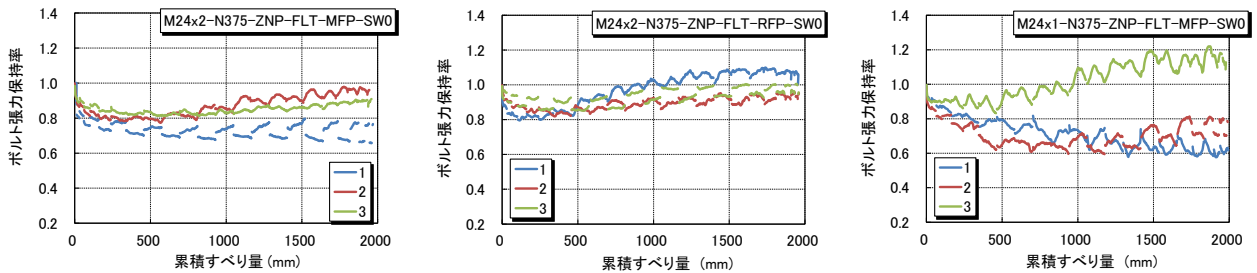


(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入の試験グループ

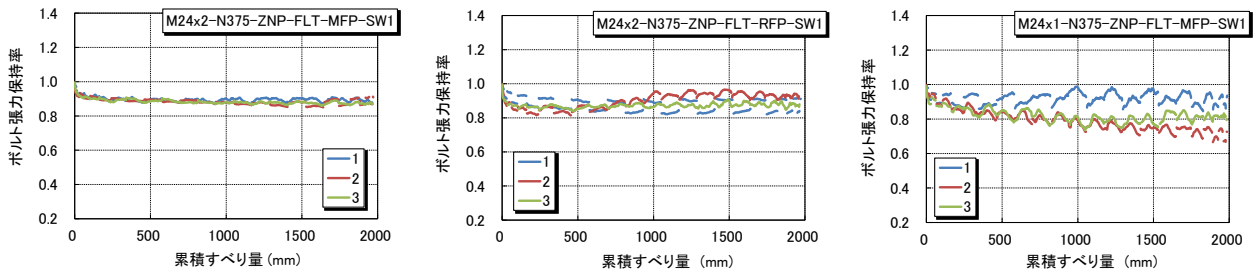


(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験グループ

図-9 繰り返し摺動時のすべり係数と累積すべり量の関係



(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入の試験グループ



(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験グループ

図-10 繰り返し摺動時のボルト張力保持率と累積すべり量の関係

きさは概ね類似しており、上記の差はファスナープレートの発錆の有無及びボルト本数の違いによらず、摺動材として用いた溶融亜鉛めっき座金の亜鉛附着量の大小が影響を与えていると推測できる。

3.2 繰り返し摺動に伴うすべり係数の差異に関する考察

ここでは、溶融亜鉛めっき座金の亜鉛附着量が摩擦力の大小に影響を与えることをより明確にするため、前述した繰り返し摺動のすべり係数の違いが、コンクリートとファスナープレートとの摩擦面（以下、摩擦面1と称す）とファスナープレートと溶融亜鉛めっき座金の摩擦面（以下、摩擦面2と称す）にそれぞれ生じるすべり係数のどちらに起因するか確認した。本摩擦ダンパーでは、

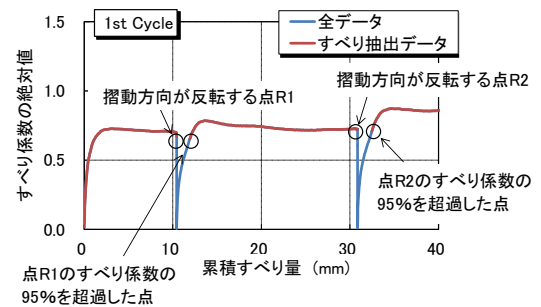


図-11 繰り返し摺動時のすべり係数の抽出方法

図-12に示すように、サイクル毎のすべり係数とすべり変位の関係曲線において、除荷後の再載荷曲線上にガタが生じる。これは、摩擦面2に生じる摩擦力は、ボルト

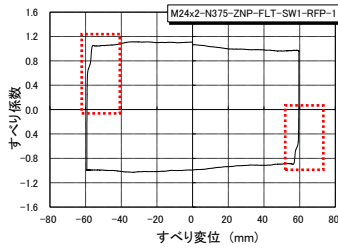


図-12 すべり係数とすべり変位の関係

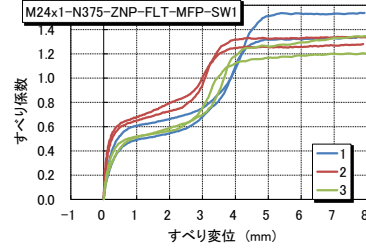
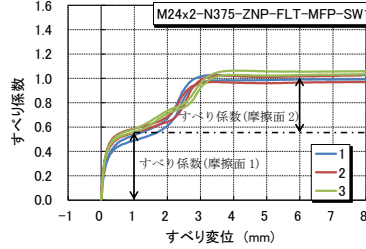


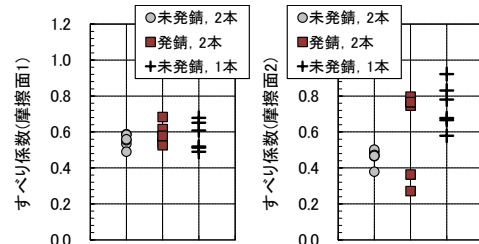
図-13 再載荷時のすべり係数とすべり変位の関係 (5 サイクル目)

と座金のボルト孔縁が接触するまで発揮されないことに起因する。そこで、M24x2-N375-ZNP-FLT-MFP-SW1 シリーズと M24x1-N375-ZNP-FLT-MFP-SW1 シリーズを対象に、5 サイクル目 (累積すべり量約 500mm) の再載荷時のすべり係数とすべり変位の関係を図-13 に示す。なお、ここで示したすべり変位はすべり係数が 0 となる点のすべり変位を原点として、そこからすべり変位の変化量を示している。なお、当該ダンパーでは、ラウンド型の壁負担せん断力-すべり変位曲線を描き、明瞭なすべり出しが見られないため、得られた負担せん断力を初期ボルト張力で除した値をすべり係数とした。ここで、図-13 をもとに摩擦面 1 でのすべり係数として、すべり変位 1mm でのすべり係数を、摩擦面 2 のすべり係数として、すべり変位 6mm と 1mm のすべり変位の差を便宜的に採用し抜き出した。実験条件毎に皿ばね座金を挿入した試験体を対象に、上記の方法より抜き出した 5, 9 サイクルにおける摩擦面 1, 2 のすべり係数の比較を図-14 に示す。なお、5, 9 サイクルのすべり係数は累積すべり量 500, 1500mm 前後で計測した値に相当している。

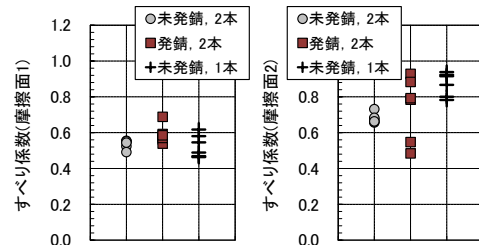
図-14 に示すように、摩擦面 1 でのすべり係数は実験条件に係らず、概ね 0.6 前後となった。一方、摩擦面 2 のすべり係数は、既往の実験結果 (実験条件 1) に比較し、本実験で実施した実験条件 2, 3 の結果が大きくなり、繰り返し摺動時のすべり係数の差の主因と考えられる。また、この原因としては、溶融亜鉛めっき座金の亜鉛の付着量 (付着量試験の結果より、既往研究では 647g/m²、本実験では 798g/m²) が大きいほど、摩擦接触面での亜鉛の固着量が大きくなり摩擦力を増加させたものとも推測できる。また、発錆したファスナープレートを用いた試験体 (実験条件 2) の一体は摩擦面 2 のすべり係数が小さくなっており、発錆により摩擦接触面での亜鉛の鋼板への固着が起こりにくくなる可能性も考えられる。

4. まとめ

ファスナープレート摩擦面の発錆の有無、ボルト本数を実験条件とし、溶融亜鉛めっき座金を摺動材として使用した鋼-コンクリート摩擦ダンパー要素試験体を用いた動的摺動実験を行った結果、コンクリートと鋼製ファスナーの間の摩擦力に対する前記の実験条件の影響はほ



(a) 5 サイクル (累積すべり量約 500mm)



(b) 9 サイクル (累積すべり量約 1500mm)

図-14 摩擦面毎のすべり係数の比較

とんど観測されず、鋼製ファスナーと溶融亜鉛めっきとの間の摩擦力への影響は明確には把握できなかったが、座金の亜鉛付着量の大小が影響を与える可能性を確認できた。

参考文献

- 1) 安井信行, 河野昭彦, 九谷和秀, 吉岡智和, 許斐信三, 尾宮洋一: 外壁ファスナーのダンパー化に関する研究 その 1 研究概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 47 号, pp.493-496, 2008.3
- 2) 平田寛, 河野昭彦, 安井信行, 九谷和秀: 外壁ファスナーをダンパーとして用いた鉄骨ラーメン骨組の動的応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.959-960, 2007.8
- 3) 吉岡智和, 中城卓也, 野口和宏: 2 本ボルト型鋼-コンクリート摩擦ダンパーのすべり挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1123-1128, 2009.7
- 4) 吉岡智和, 池田彩佳: 2 本ボルト型鋼-コンクリート摩擦ダンパーのすべり係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.925-930, 2012.6