

論文 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

吉岡 智和^{*1}・池田 彩佳^{*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設ける2本ボルトで締め付け、締め付けボルトを介し一部の摩擦力を伝達する2面摩擦型の鋼 - コンクリート摩擦ダンパーを対象に、締め付けボルト張力が異なる場合の当該摩擦ダンパーの摩擦面のすべり挙動を摺動実験により確認した。その結果、ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入しボルト張力の変化を抑制することで、ボルト張力の大きさに係わらず、繰り返し摺動に伴いその摩擦力はすべり係数に換算し0.77から1.20に緩やかに上昇することが確認できた。

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、文献1,2で提案している。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出来る点にある。文献3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以下に制限するために、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は、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た鋼 - コンクリート摩擦ダンパーを提案^{1),2)}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。筆者らは、文献1,2で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を確認した。しかしながら、文献1,2

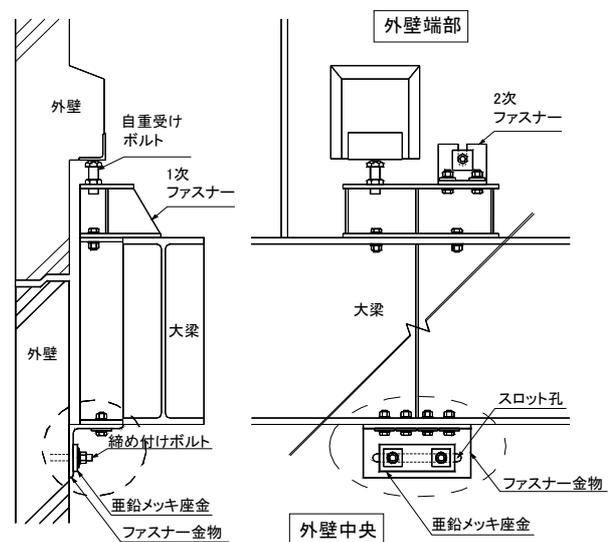


図-1 摩擦ダンパー型ファスナー^{1),2)}

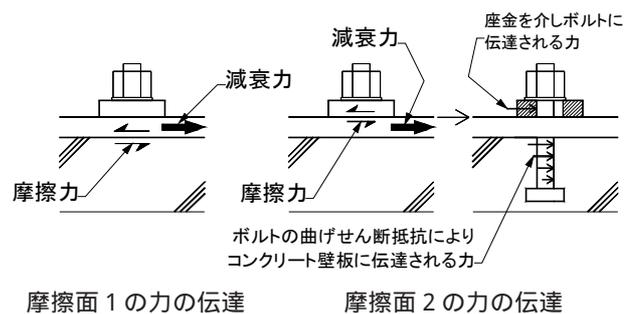


図-2 ボルトを介した2面摩擦型ダンパー^{1),2)}

では、軽量1種コンクリートが利用される外壁に相当するコンクリート壁板に普通コンクリートを用いた場合の実験結果であることに加え、より大きな摩擦力を期待し25kNを超えるボルト張力を導入した場合のすべり挙動に

*1 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)

*2 福岡市役所

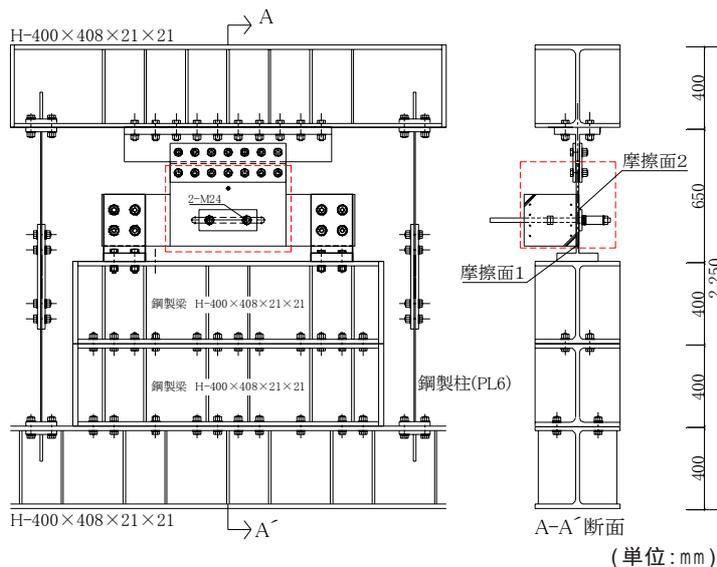


図-3 ダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組

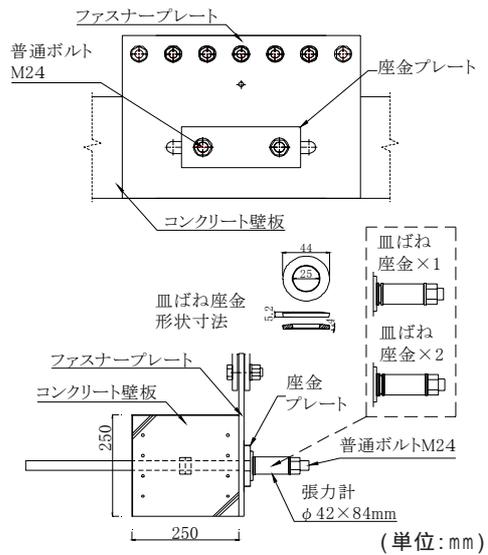


図-4 ダンパー要素試験体

については明らかになっていない。

そこで本研究では、通常の外壁と同様に軽量1種コンクリートを使用した2本ボルト型鋼-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、初期ボルト張力を25kN、37.5kN、50kNと変化させ締め付けた場合の繰返し摺動時の摩擦力、ボルト張力、及びすべり係数について調査を行った。

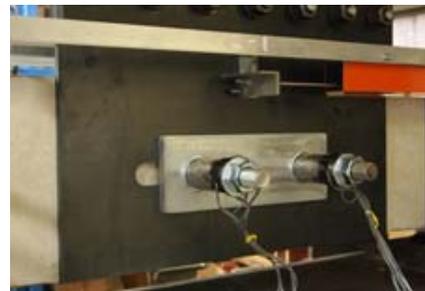


写真-1 ダンパー要素試験体

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、その外観を写真-1に示す。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2本の普通ボルト(M24)で締め付け圧着した。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、ファスナープレート、座金プレートの摩擦面(実験前)を写真-2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。実際のプレキャストカーテンウォールのファスナー取付部分はコンクリート直均し仕上げ(金ごて押さえ仕上げ)とされることが多い。文献4で、外壁摩擦面の金ごて押さえ仕上げによる不陸さが摩擦力に与える影響は小さいとの報告があるものの、ここでは摩擦面の不陸の影響を排除した摩擦すべり挙動を明らかにすることを意図し、上記の摩擦面を採

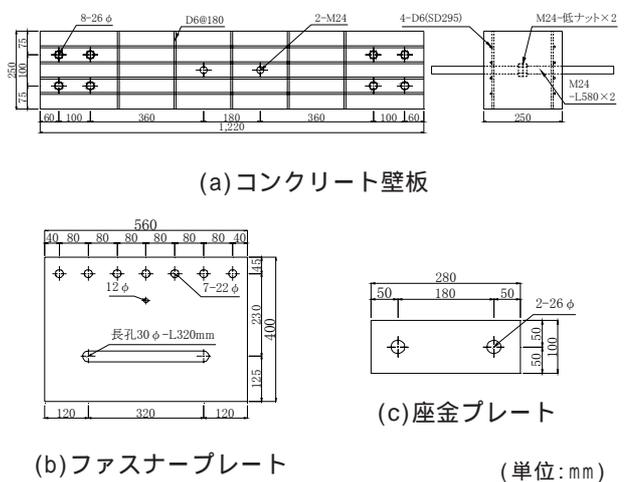


図-5 ダンパー要素試験体構成要素の形状・寸法



写真-2 ファスナープレートと座金プレートの摩擦面(実験前)

用した。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幅30mm×長さ320mmの長孔を設けた。摩擦面は特別な表面処理を施していない未発錆状態の黒皮未除去面とした。締め付けボルトの丸座金とファスナープレートの間に座金プレート(厚さ16mm, SS400)を挿入した。座金プレートの寸法は文献1と同様とした。表面にはJIS H8461に規定されたHDZ35(亜鉛の付着量350g/m²以上, 2種)の溶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。使用し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、前記のダンパー要素試験体を鋼製骨組(上下梁H-400×408×21×21, 柱PL6)内に設けた高さ800mmの鋼製架台上に設置し、上梁に取り付けられた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、ファスナー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(19)8本で締め付けずべりが発生しないよう固定した。

2.2 実験条件

本実験では、締め付けボルトの初期ボルト張力、及びボルト締め付け部への皿ばね座金の挿入の有無を実験変数に設定した。実験条件毎の試験体名称を図-6に示す。

ボルト1本当たりの初期ボルト張力は25kN, 37.5kN, 50kNの3レベルを設定した。なお、その範囲は、文献1, 2で所要の摩擦力20kNを十分に発揮可能と予想される25kNを下限とし、M24普通ボルトの降伏軸耐力79.7kNの約2/3に相当する50kNを上限とした。繰り返し摺動時の摩擦面の磨耗に伴うボルト締め付け長さの減少によるボルト張力の低下を緩和するため、締め付けボルトの軸剛性を減少させることを企図し、皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入した試験体(1枚挿入: SW1, 2枚挿入: SW2)、及びそれを行わない皿ばね座金なし試験体(SW0)を計画した。皿ばね座金の枚数は、初期ボルト張力として25kN, 37.5kNを導入した試験体では1枚, 50kNの試験体では2枚を並列型でそれぞれ挿入した。使用した皿ばね座金はJIS B1251のM24用軽荷重用の1種とした。

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18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1, 2と同様に200kN動的アクチュエータ

表-1 コンクリートの調合計画

使用部位(*)	Fc (N/mm ²)	スランブ (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
CW	30	18	5.0	45.0	47.7	181	403	787	424	4.03

*CW:コンクリート壁板

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

使用部位*	種類	単位量	呼び強度	圧縮強度	ヤング係数	材令 (日)
		(t/m ³)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(×10 ⁴ N/mm ²)	
CW	軽量1種	1.78	30	30.7	14.3	392

*CW:コンクリート壁板

表-3 鋼材の引張試験結果

使用部位	鋼種	厚さ (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
ファスナー	SS400	12	305	417	1.98
座金		16	330	420	1.95

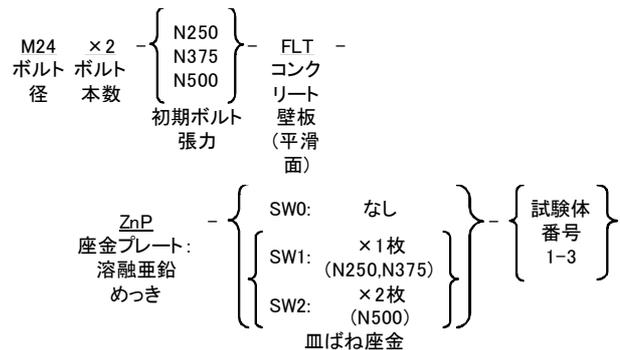


図-6 試験体名称

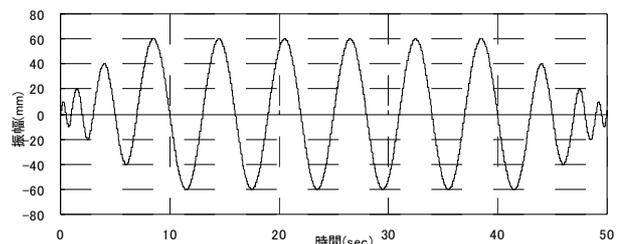
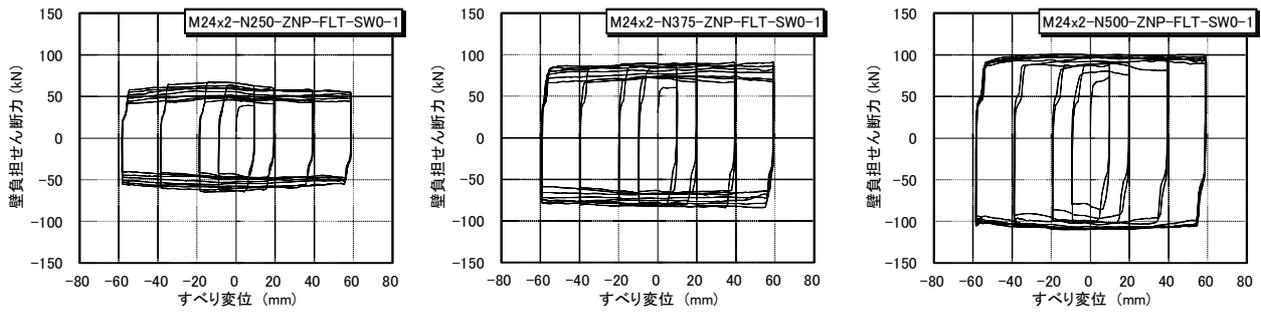
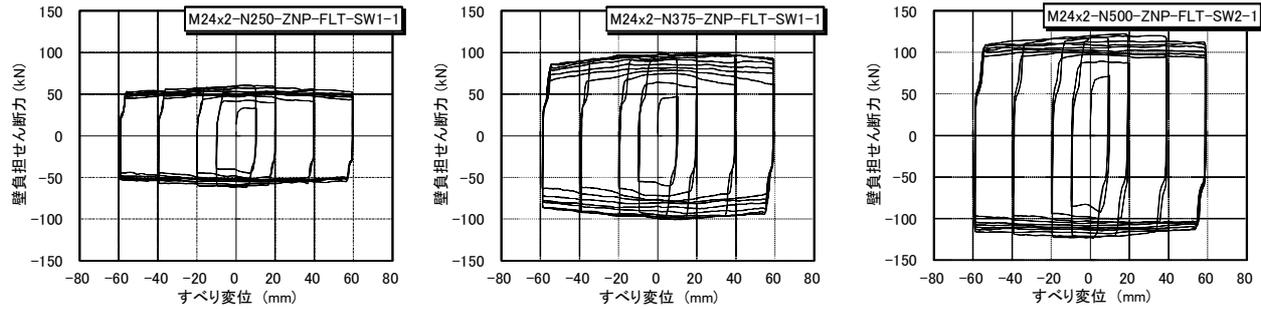


図-7 加振波

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。計測した物理量は、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プレートとのすべり変位とした。



(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験体の代表例



(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験体の代表例

図-8 壁負担せん断力とすべり変位の関係

3. 実験結果

3.1 摩擦力とすべり変位の関係

壁負担せん断力とすべり変位の関係の代表例を、ボルト締め付け部への皿ばね座金の挿入の有無、及び初期ボルト張力毎に図-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の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。

いずれの試験体においても、1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。但し、履歴曲線上での摺動開始前の立ち上がり直線途中に見られるスリップは、座金プレートがボルトに接触することで、摩擦力の伝達が可能となるまでのガタが原因と考えられる。初期ボルト張力の大小、及びボルト締め付け部への皿ばね座金が挿入の有無に係わらず、繰り返し摺動に伴い摩擦力が増加する傾向が、ほとんどの試験体で見られた。なお、初期ボルト張力の増加に伴い発揮される摩擦力は増加した。

写真-3に、皿ばね座金を挿入した試験体のコンクリート壁板の摩擦面（実験終了後）の代表例を示す。いずれの試験体においても、コンクリート壁板の摩擦面には、ボルト周辺にファスナープレートから分離した黒皮スケールが付着し、摺動方向に入った摺動痕は見られるものの大きな亀裂等の損傷は観測されなかった。ただし、初期



(a) ボルト張力 25kN
皿ばね座金あり

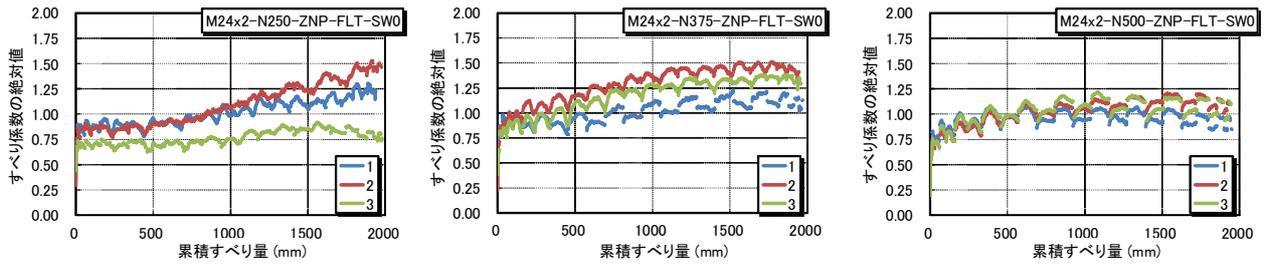
(b) ボルト張力 50kN
皿ばね座金あり

写真-3 実験終了後のコンクリート壁板の摩擦面

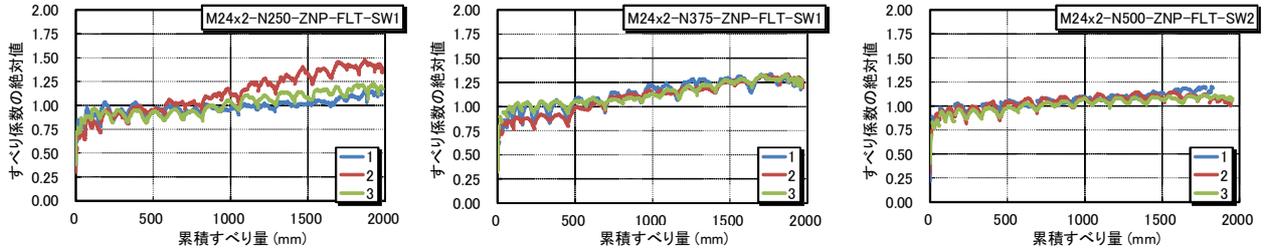
ボルト張力 50kN を導入した試験体では、埋め込みボルトの根元で、わずかにコンクリートの表面に圧壊による剥落が見られた。

3.2. 繰り返し摺動時のすべり係数とボルト張力

ここでは、得られた摩擦力から、繰り返し摺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。さらに、繰り返し摺動時のボルト張力の変化がすべり係数の大小に与える影響を併せて確認する。繰り返し摺動時のすべり係数と累積すべり量の関係を図-9に、繰り返し摺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、得られた摩擦力をボルト2本の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ボルト2本の初期ボルト張力の和に対する摺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。ここ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、図-11に示す方法により全計測データより抽出し図示した。図-10のボルト張

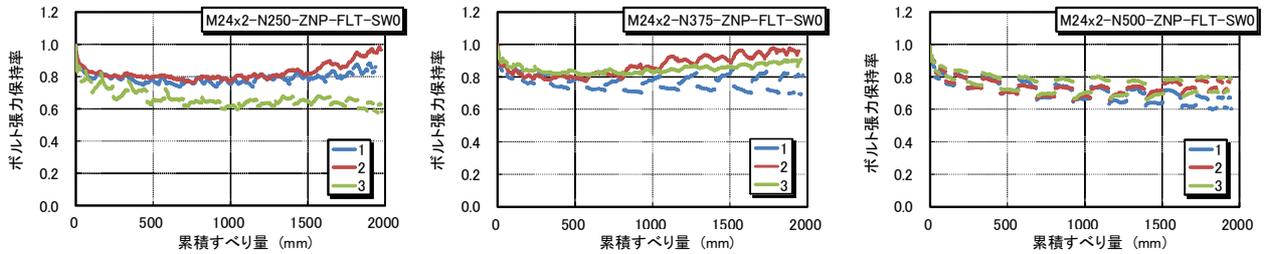


(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験グループ

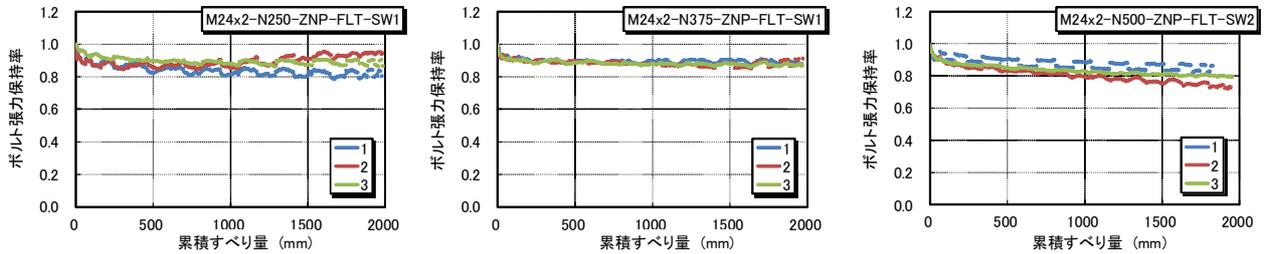


(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験グループ

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 繰り返し摺動時のすべり係数と累積すべり量の関係

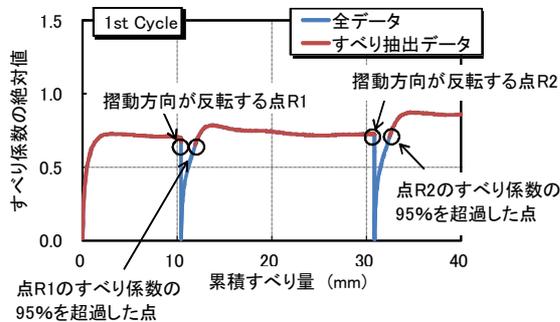


図-11 繰り返し摺動時のすべり係数の抽出方法

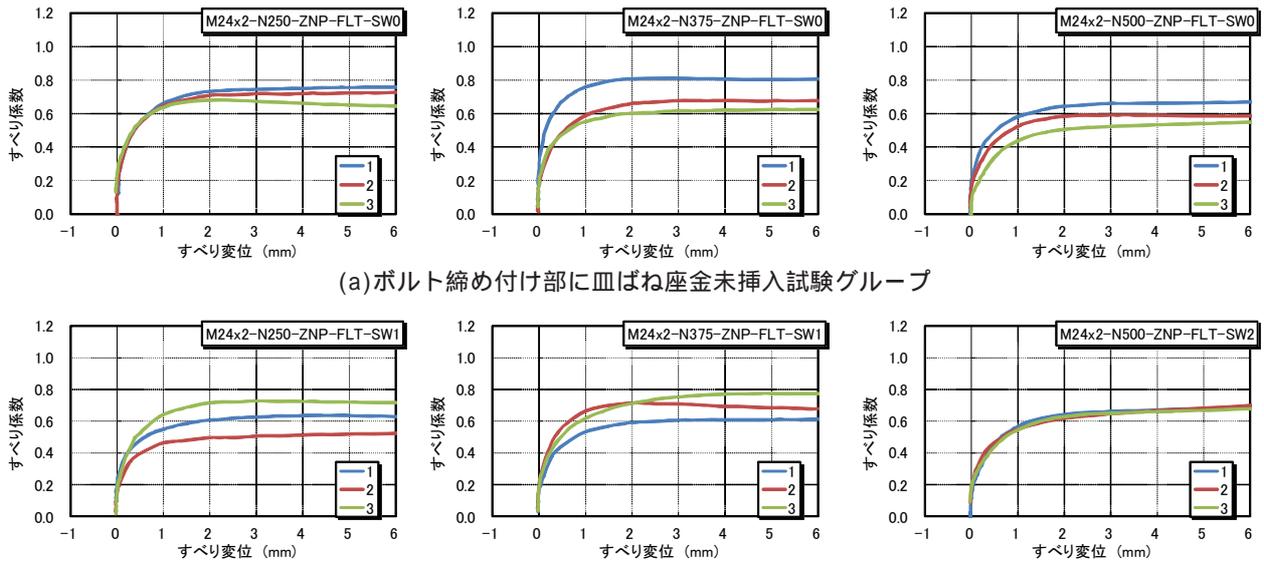
力保持率も抽出したすべり係数の計測点に対応したデータのみを示している。

いずれの試験体でも繰り返し摺動に伴いすべり係数は概ね増加している。一方、ボルト張力は、皿ばね座金を

表-4 サイクル毎の平均すべり係数

皿ばね座金	統計値	最小すべり係数			最大すべり係数		
		N250	N375	N500	N250	N375	N500
SW0	Ave.	0.790	0.825	0.700	1.17	1.30	1.07
	C.V.(%)	10.2	8.6	6.8	24.9	12.2	7.2
SW1	Ave.	0.737	0.791	0.784	1.23	1.28	1.10
	C.V.(%)	9.6	7.6	1.9	11.8	0.5	3.0

挿入していない一部の試験体を除き、繰り返し摺動に伴い減少する傾向にあり、特に初期ボルト張力50kNの試験体ではその低下量が大きくなっている。そのため、繰り返し摺動に伴うすべり係数の増加は、文献1で示したように、黒皮未除去のファスナープレートと溶融亜鉛めっき座金プレートと間で生じる摩擦において、繰り返し摺動に伴い摩擦力が増加する挙動に起因すると考えられる。



(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験グループ

(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-12 初摺動開始時のすべり係数とすべり変位の関係

なお、皿ばね座金の挿入により、繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下を抑制できることに加え、同一累積すべり量におけるボルト張力の大きさのばらつきを減ずる効果が確認できた。

さらに、初期ボルト張力の相違がすべり係数の大きさに与える影響を確認するため、試験グループ毎にサイクル毎の平均すべり係数の最大値と最小値の平均値(Ave.)と変動係数(C.V.)を表-4に示す。サイクル毎の平均すべり係数は、サイクル毎のすべり係数とすべり変位の曲線が囲む面積を対象サイクルのすべり振幅を2倍したもので除した値を示している。皿ばね座金を挿入した試験グループ(SW1、SW2)では、平均すべり係数の最小値は0.77前後、最大値は1.20前後となり、ボルト一本当たり初期ボルト張力が25kN～50kNの範囲では概ね一致した。ただし、初期ボルト張力が50kNの試験グループでは、繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下量が25kN、37.5kNの試験グループに比較し大きいため、平均すべり係数の最大値がやや減少している。平均すべり係数の変動係数は、N250-SW1試験グループの平均すべり係数の最大値を除き、10%以下であり、前述した効果により皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入することで、未挿入の場合に比較しすべり係数のばらつきを小さくできた。

3.3 初摺動開始時のすべり係数

続いて、初摺動開始時のすべり挙動を確認する。初摺動開始からすべり変位6mmまでのすべり係数とすべり変位の関係を図-12に示す。

いずれの試験体においても、明瞭なすべり出しが見られず、すべり変位2mmですべり係数0.6前後に達するまで、摺動に伴いすべり係数が上昇するラウンド形のすべり係数とすべり変位の曲線が得られた。皿ばね座金の挿

入の有無に係わらず、同一初期ボルト張力におけるすべり係数のばらつきがやや大きい結果が得られた。

4. まとめ

本実験の範囲において、以下の知見が得られた。

- (1) 繰り返し摺動に伴い摩擦力は緩やかに上昇する。
- (2) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入することで、繰り返し摺動に伴うボルト張力の変化を抑制でき、同一累積すべり量でのボルト張力のばらつきを減少できた。
- (3) 皿ばね座金を挿入した試験グループでは、1本当たりのボルト張力が25kN～50kNの範囲では、サイクル毎の平均すべり係数の最大値、最小値は0.77、1.20前後の値となった。
- (4) 初摺動時には明瞭なすべり出しが見られず、すべり変位2mmですべり係数0.6前後に達した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 野口和宏、吉岡智和：2本ボルト型鋼-コンクリート摩擦ダンパーの摩擦力、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.561,562, 2010.7
- 3) 平田寛、河野昭彦、安井信行、九谷和秀、吉岡智和：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、日本鋼構造協会、鋼構造年次論文報告集、Vol.15, pp.469-474, 2007.11
- 4) 吉岡智和、野口和宏：外壁摩擦面の平滑さが異なる鋼-コンクリート摩擦ダンパーの摩擦力、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.2, pp.979-984, 2011.7