

論文 締め付けボルト張力の異なる鋼-コンクリート摩擦ダンパーのすべり挙動

吉岡 智和*1・野口 和宏*2

要旨:PCaカーテンウォールと架構の取り付け部に設けるコンクリート摺動材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,初期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挿入した皿ばね座金によるボルト張力低下の抑制効果は比較的小さく,そのため初期ボルト張力が増大するほど繰り返し摺動時のボルト張力低下量が増加するためすべり係数が減少することを確認した。

キーワード:PCa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,鉄骨造建物の外壁として利用されるPCaカーテンウォール(以下,外壁と略す)の剛性と耐力をそれが損傷しない範囲で利用することを目指し,図-1に示す外壁のファスナー部分に制震ダンパーを組み込んだ外壁ファスナーダンパー¹⁾を提案している。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2では,そのような外壁ファスナーダンパーの必要性能として,大地震(速度50kine)に対する層間変形角を1/100rad以下に制限するために,外壁1枚毎に2ヶ所の摩擦型ファスナーダンパーを設けた場合には,1つのダンパーが20kN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,外壁ファスナーダンパーとして,コンクリート壁板と鋼製ファスナーを1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³⁾した。当該摩擦ダンパーは,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,鋼製ファスナーとコンクリート摺動材との摩擦面に生じる摩擦力が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される特徴を持っている。文献3で筆者らは,当該摩擦ダンパーにおいてボルト1本当たり25kNの張力を導入することで所要の減衰力(20kN以上の摩擦力)を発揮可能であることを確認した。しかしながら,より大きな摩擦力の発揮を期待し,25kNを超える初期ボルト張力を導入した場合のすべり係数に関する実験資料はなく,既往研究では繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下も観られているこ

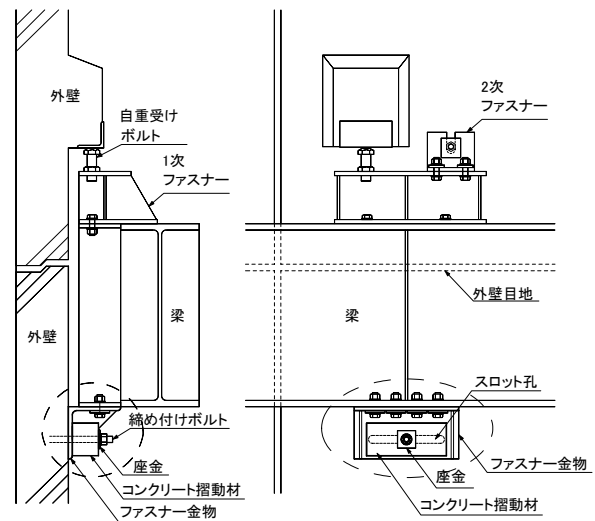


図-1 摩擦型ファスナーダンパー¹⁾

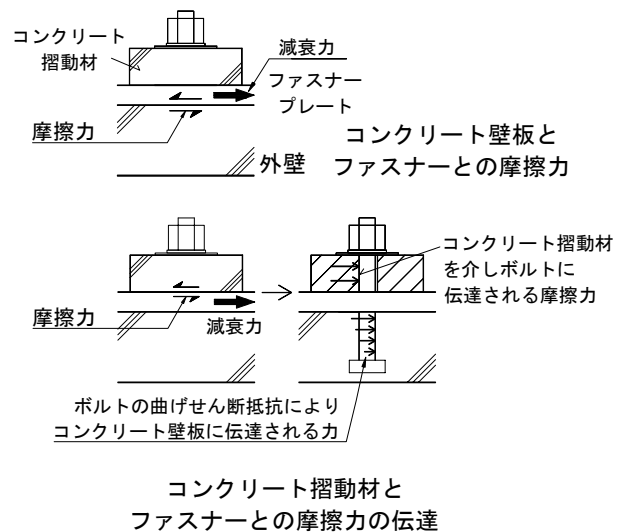


図-2 ボルトを介した2面摩擦型ダンパー³⁾

*1 九州大学大学院 芸術工学研究院環境計画部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 芸術工学府芸術工学専攻

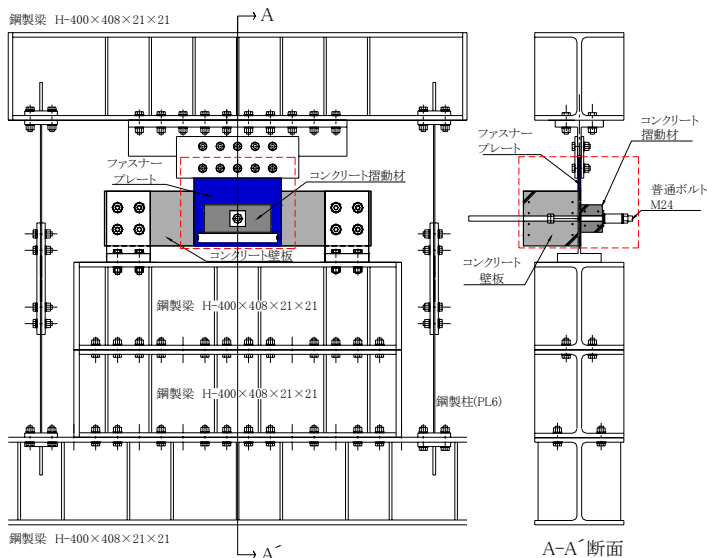


図-3 ダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組

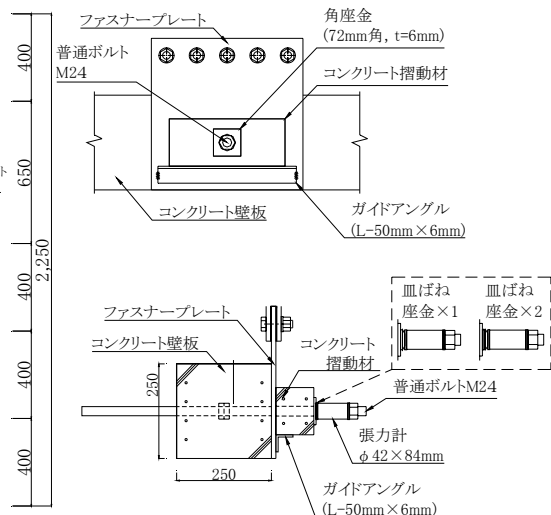


図-4 ダンパー要素試験体

とから、より大きなボルト張力を導入するとボルト張力の低下量が増大しすべり係数が減少することも予想される。そこで、本研究では、コンクリート摺動材を挿入しボルトを介した2面摩擦型鋼-コンクリート摩擦ダンパーの要素試験体を用いた動的摺動実験を行い、1) 初期ボルト張力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、摩擦係数、及びボルト張力、2) ボルト締め付け部への血ばね座金挿入による繰返し摺動時のボルト張力低下の抑制効果、3) 繰返し摺動時のすべり係数について調査を行った。

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。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、及びファスナープレートとボルト座金との間の摩擦面に挿入するコンクリート摺動材で構成し、それらをコンクリート壁板に機械式定着させた1本の普通ボルト(M24)で締め付け圧着した。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PCa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が、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、上記の摩擦面を採用した。コンクリートには、PCa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



写真-1 ダンパー要素試験体

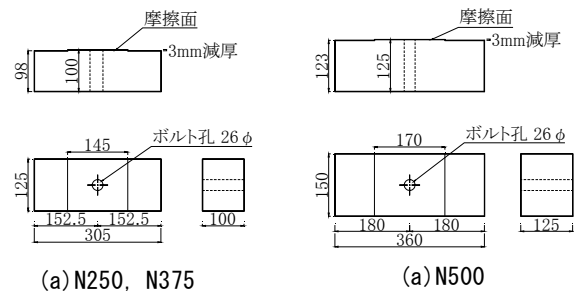


図-5 コンクリート摺動材の形状・寸法

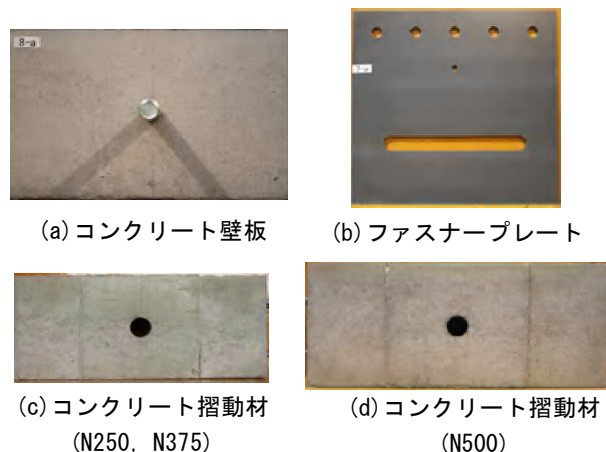


写真-2 構成要素の摩擦面

表-1 コンクリートの調合計画

使用 部位 (*)	F _c (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
CW	30	18	5.0	45.0	47.7	181	403	787	424	4.03
CP	42	18	4.5	40.5	30.0	234	577	420	1040	-

*CW:コンクリート壁板, CP:コンクリート摺動材

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

試験 体 名	使用 部 位 *	種 類	単 位 体 積	呼 び 強 度	圧 縮 強 度	ヤ ン グ 係 数	材 令
			(t/m ³)	(N/mm ²)	(×10 ⁴ N/mm ²)	(日)	
N250 N375	CW	軽量1種	1.84	30	35.6	1.79	42
N500			1.80		26.8	1.76	36
N250 N375	CP	早強	2.39	42	45.9	3.46	24
N500			2.37		52.5	3.61	22

表-3 ファスナープレート

鋼材の引張試験結果

試験 体 名	鋼 種	降伏点 (N/mm ²)	引張 強 さ (N/mm ²)	ヤ ン グ 係 数 (×10 ⁵ N/mm ²)
N250 N375	SS 400	318	466	2.10
N500		336	430	2.04

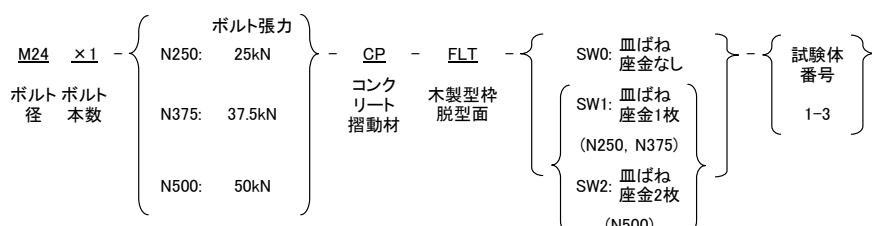


図-6 試験体名称

けるために幅30mm×長さ260mm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。コンクリート摺動材の形状・寸法は、初期ボルト張力に応じて長さ305mm×高さ100mm×幅125mmの直方体(25, 37.5kNの場合)、長さ360mm×高さ125mm×幅150mmの直方体(50kNの場合)とし、中央に26φのボルト孔を1つ設けた。使用したコンクリートは、実験準備期間を短縮するため早強コンクリートとし、摩擦面はコンクリート壁板と同様に木製型枠脱型面とした。また、摩擦接触面をボルト孔周辺(初期ボルト張力が25kN, 37.5kNの試験体では長さ145mm×幅125mmの範囲、50kNの試験体では長さ170mm×幅150mmの範囲)に限定するため、端部より80mm, 95mmの長さの範囲を厚さ3mmだけ減厚した。加力時にコンクリート摺動材の回転を防止するため、ファスナープレートにガイドアングル(L=50mm×50mm×6mm)を設けた。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に用いた鋼材の引張試験結果を表-3にそれぞれ示す。

外壁ファスナーに生じる地震応答を模擬するため、上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(19φ)8本で締め付けすべりを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。

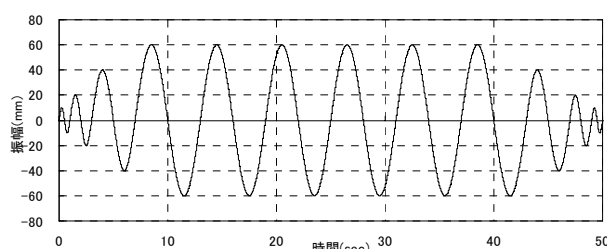


図-7 加振波

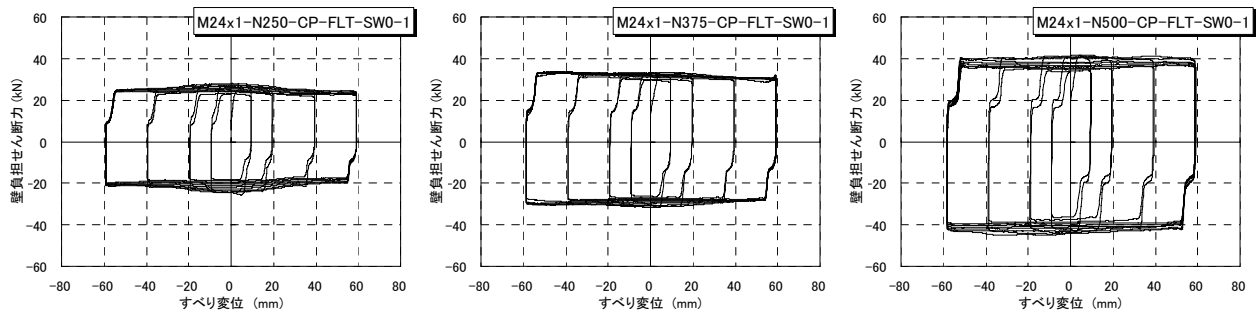
初期ボルト張力は25kN, 37.5kN, 50kNの3レベルを設定し、その範囲は、文献3で所要の摩擦力20kNを十分に発揮可能と予想される25kNを下限とし、M24普通ボルトの降伏軸耐力79.7kNの約2/3に相当する50kNを上限とした。繰り返し摺動時の摩擦面の磨耗に伴うボルト締め付け長さの減少によるボルト張力の低下を緩和するため、締め付けボルトの軸剛性を減少させることを企図し、皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入した試験体(1枚挿入:SW1, 2枚挿入:SW2)、及びそれを行わない皿ばね座金なし試験体(SW0)を計画した。皿ばね座金の枚数は、初期ボルト張力として25kN, 37.5kNを導入した試験体では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皿ばね座金なしの試験体は同一条件で1体、皿ばね座金を挿入した試験体では同一条件で3体をそれぞれ計画し、総計12体の実験を実施した。

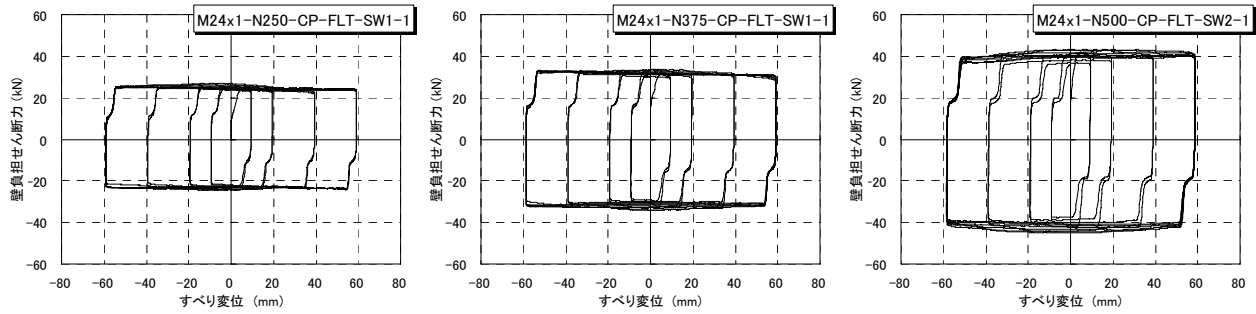
2.3 加力方法及び計測方法

加力は200kN動的サーボアクチュエータにより鋼製骨組の上梁に水平方向に強制変位を与え、その変位は片振幅10, 20, 40, 60mmに対し振動数1.00, 0.50, 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

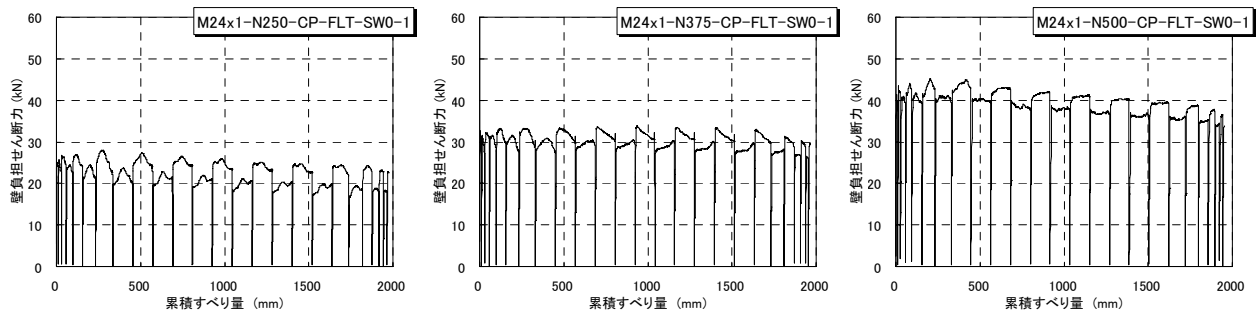


(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験体

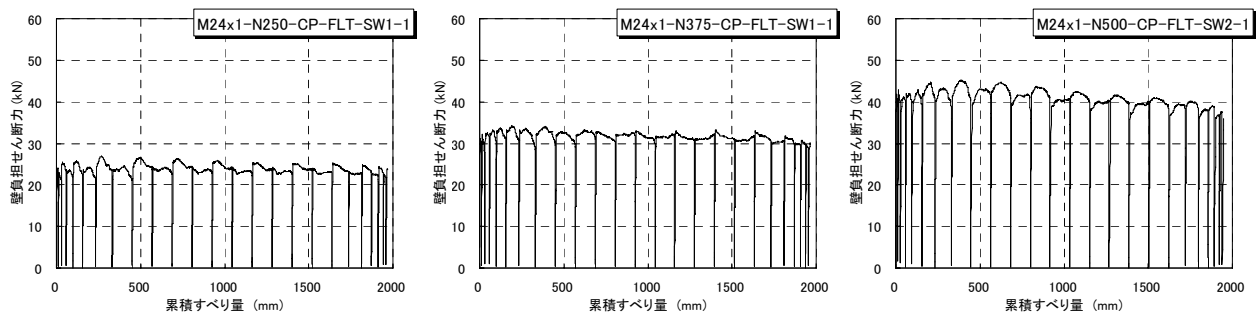


(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験体の代表例

図-8 壁負担せん断力とすべり変位の関係



(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験体



(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-9 壁負担せん断力の絶対値と累積すべり量の関係

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た。

3. 実験結果

壁負担せん断力とすべり変位の関係、壁負担せん断力の絶対値と累積すべり量の関係を、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、図-9に示す。な

お、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、ファスナーダンパーの摩擦力に相当する。また、累積すべり量は、実験中に摩擦面が経験したすべり変位の総和を表している。

いずれの試験体においても、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、コンク



(a) コンクリート壁板 (N250試験体) (b) コンクリート壁板 (N500試験体) (c) コンクリート摺動材 (N250) (d) コンクリート摺動材 (N500)

写真-3 実験終了後のコンクリート壁板, コンクリート摺動材の摩擦面

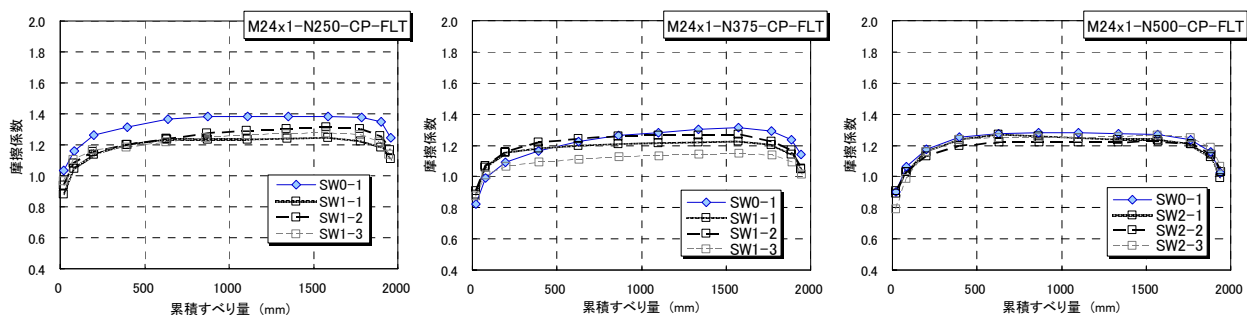


図-10 サイクル毎の平均摩擦係数と累積すべり量の関係

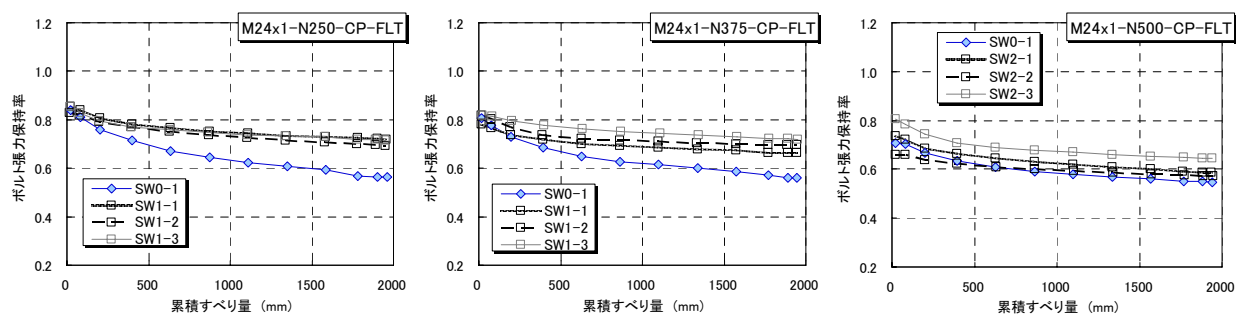


図-11 サイクル毎のボルト張力保持率と累積すべり量の関係

リート摺動材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。初期ボルト張力が25kN, 37.5kNの試験体では、皿ばね座金が未挿入の場合に繰り返し摺動に伴い摩擦力がやや低下するが、初期ボルト張力が50kNの試験体では、皿ばね座金の有無に係わらず、繰り返し摺動に伴い摩擦力が漸減した。なお、初期ボルト張力の増加に伴い発揮できる摩擦力は増加するものの、その大きさは初期ボルト張力に必ずしも比例しない傾向が観られた。

写真-3に示すように、初期ボルト張力の大小による摩擦面の摺動痕の状況は違いは見られず、破損もなかった。

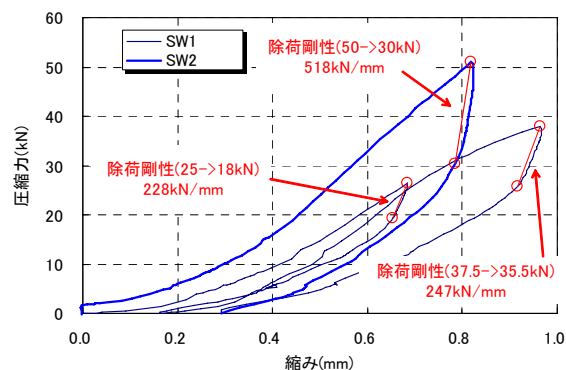


図-12 皿ばね座金の除荷剛性

4. 初期ボルト張力の違い、及び皿ばね座金の有無が摩擦すべり挙動に与える影響

ここでは、初期ボルト張力の違いが摩擦力に与える影響、及びボルト締め付け部への皿ばね座金の挿入による繰り返し摺動時のボルト張力の低下を抑制する効果を確認する。サイクル毎の平均摩擦係数と累積すべり量の関係、及びサイクル毎のボルト張力保持率と累積すべり量の関係を図-10、図-11に示す。こ

こで、サイクル毎の平均摩擦係数は、各サイクルの摩擦係数(=摩擦力/摺動時のボルト張力)とすべり変位の曲線が囲む面積をそのサイクルの累積すべり量で除した値を表し、サイクル毎のボルト張力保持率は、各サイクルで観測された最大、最小のボルト張力の平均値を初期ボルト張力で除した値を用いている。

サイクル毎の平均摩擦係数は、初期ボルト張力の大小、及び皿ばね座金挿入の有無による大きな違いは見られず、いずれの

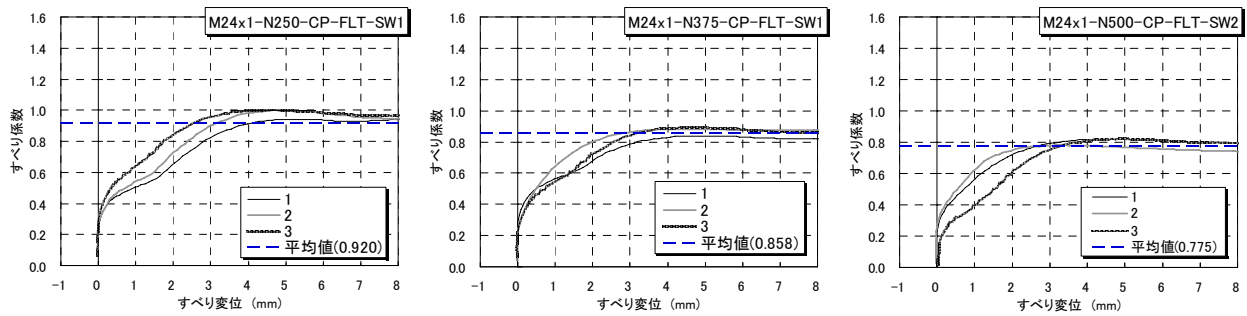


図-13 初摺動時のすべり係数とすべり変位の関係

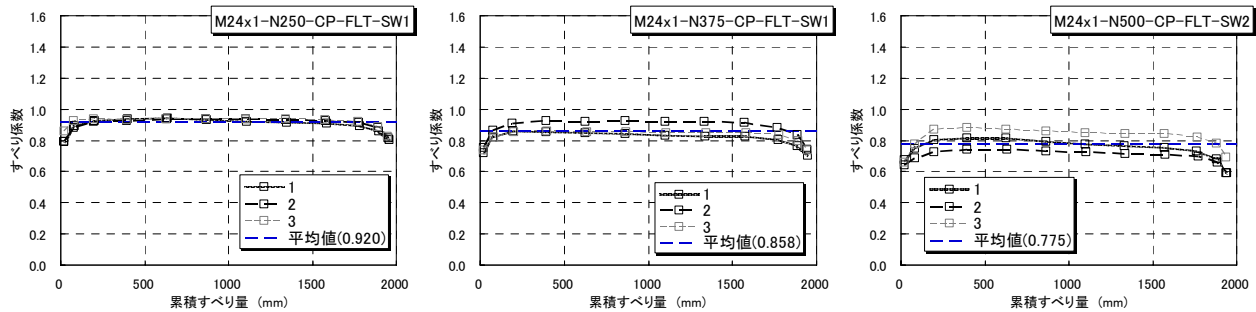


図-14 サイクル毎の平均すべり係数と累積すべり量の関係

試験体でも、繰返し摺動に伴い摩擦係数は1.2前後の値を発揮した。続いて、実験終了時のボルト張力保持率の比較を行う。実験終了時のボルト張力保持率は、皿ばね座金未挿入(SW0)の場合に、N250, N375, N500 試験体では0.57, 0.56, 0.55となり、初期ボルト張力の大小による差は観られなかった。一方、皿ばね座金を挿入した(SW1, SW2) 場合には、N250, N375, N500 試験体の実験終了時のボルト張力保持率の平均値は0.71, 0.69, 0.60となり、皿ばね座金挿入によりボルト張力低下量は皿ばね座金なしの試験体に比較し、N250, N375, N500 試験体でそれぞれ67, 70, 89%に低減された。これに対し、図-12に示した皿ばね座金の除荷剛性の実測値を用い計算した皿ばね座金の有無によるボルト張力低下量の抑制効果(=皿ばね座金未挿入のボルト軸剛性に対する皿ばね座金を考慮したボルト軸剛性の比率)の予測値はN250, N375, N500 試験体で40, 42, 59%であり、一致していない。これは、ボルト張力の低下抑制により、コンクリート壁板の摩耗量が増加したこと、皿ばね座金の除荷剛性の非線形性(除荷直後は大きく、徐々に載荷時剛性に近づく)を考慮していないためと考えられる。

5. 繰返し摺動時のすべり係数

皿ばね座金を挿入しボルト張力の低下を限定的ながら抑制できた試験体(SW1, 2)の初摺動時のすべり係数とすべり変位の関係を図-13に、サイクル毎の平均すべり係数と累積すべり量の関係を図-14に示す。図中の平均値は、試験体毎に求めた摺動開始から実験終了までにすべり係数とすべり変位の曲線が囲む面積の総和を実験終了時の累積すべり量で除した値に関する各試験グループ3体の平均値を示している。すべり係数は摩擦力

を初期ボルト張力で除した値で、4章の摩擦係数とは異なる。

いずれの試験体においても、摺動開始とともにすべり係数は上昇し、すべり変位3～4 mm前後で試験グループ毎のすべり係数の平均値(0.92～0.77)に達し、繰返し摺動時には、概ね一定のすべり係数を維持し摺動した。また、初期ボルト張力が大きいほど、すべり係数の平均値が小さくなるが、先に示したように初期ボルト張力が大きいほど、繰返し摺動に伴うボルト張力の低下量が増大するためと考えられる。

6. まとめ

当該摩擦ダンパーでは、ボルト締め付け部に挿入した皿ばね座金によるボルト張力低下の抑制効果は比較的小さく、初期ボルト張力が增大するほど繰返し摺動時のボルト張力低下量が増加するためのすべり係数が減少することを確認した。

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: 鋼-コンクリート摩擦すべり接合部のすべり挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No3, p. 1117～1122, 2008. 7