

論文 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

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,外壁摩擦面の平滑さ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,外壁摩擦面を金ごて押さえ仕上げとしてもボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入しボルト張力の低下を抑制することで,平滑な型枠脱型面が摩擦面となる場合と同程度の大きさの摩擦力を繰り返し摺動時に発揮できることを確認した。

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,鋼構造建物の外壁に利用される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に損傷,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),4)}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する特徴を持っている。文献4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。さらに,ボルト張力を37.5, 50kNに変更すると摩擦力は増加するが,ボルト張力が大きいほど繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下が大きくなるためすべり係数(=摺動時の摩擦力/初期導入ボルト張力)がやや減少する傾

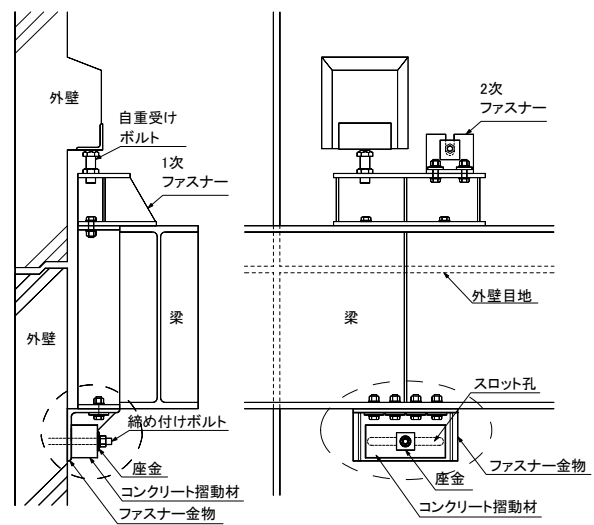


図-1 摩擦型ファスナーダンパー¹⁾

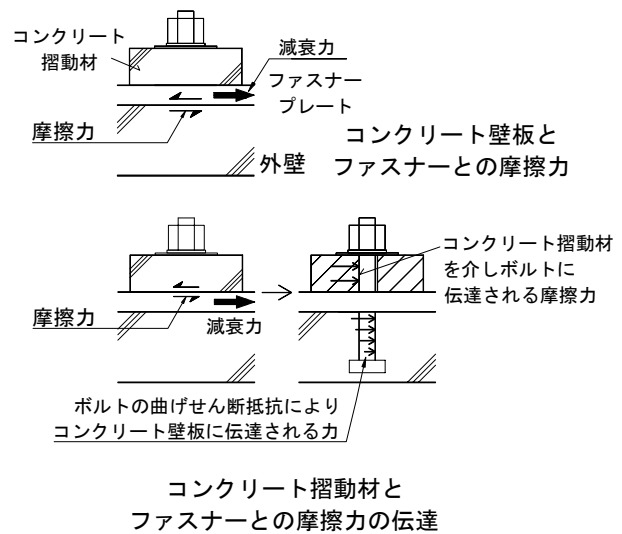


図-2 ボルトを介した2面摩擦型ダンパー⁴⁾

*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

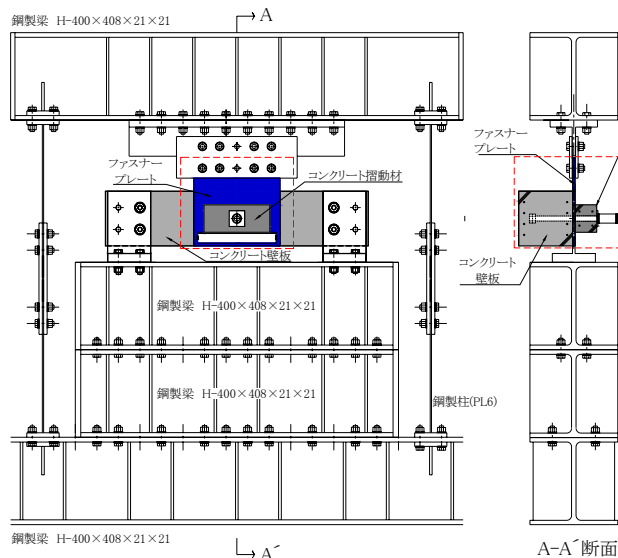


図-3 ダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組

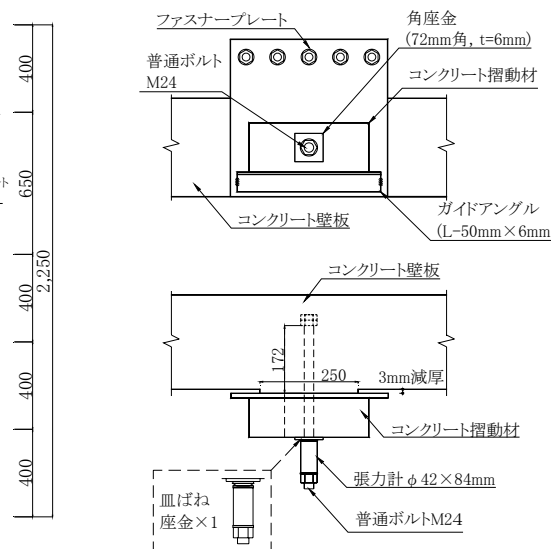


図-4 ダンパー要素試験体

向となることを明らかにした。しかし、文献4では外壁に相当するコンクリート壁板の摩擦面に木製型枠脱型面を用いたが、外壁のファスナーを取り付ける屋内側の仕上げはコンクリート直均し仕上げ面(金ごて押え仕上げ面)となることが想定される。そのような金ごて押え仕上げを行った不陸を持つコンクリート摩擦面と鋼板をボルトで締め付け圧着させ摺動させた場合の摩擦力は未解明である。

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、外壁摩擦面の仕上げが異なる場合に関して、1) 繰返し摺動時の摩擦力、2) 外壁摩擦面の不陸が大小が摩擦係数、ボルト張力へ与える影響、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。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、コンクリート摺動材の形状寸法を図-5から図-7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、片側に普通ボルト(M24)を埋め込み、埋め込みボルト端部にナット2個(ダブルナットとして固定)を設け有効埋め込み深さが172mm(呼び径の7倍)となるように、壁板内に機械式定着させた。摩擦接触面をボルト埋め込み部周辺(250mm

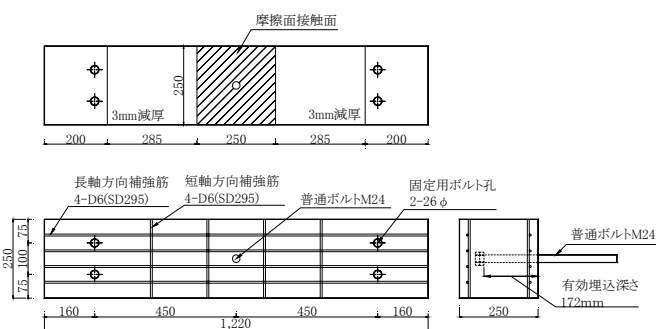


図-5 コンクリート壁板の形状寸法・配筋

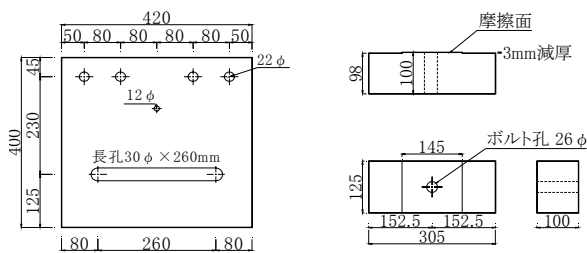


図-6 ファスナープレート 図-7 コンクリート摺動材の形状寸法

×250mmの範囲)に限定するため、中央摩擦面と両端固定面との間の285mmの長さの範囲を厚さ3mmだけ減厚した。そのコンクリートには、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、降伏点強度318N/mm²、引張強さ466N/mm²)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、長さ305mm×高さ100mm×幅125mmの直方体とし、中央に26φのボルト孔を1つ設けた。それに使用した

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
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

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 (日)
		(t/m ³)	(N/mm ²)	(×10 ⁴ N/mm ²)		
CW	軽量1種	1.84	30	35.6	1.79	42
CP	早強	2.39	42	45.9	3.46	24

*CW:コンクリート壁板, CP:コンクリート摺動材

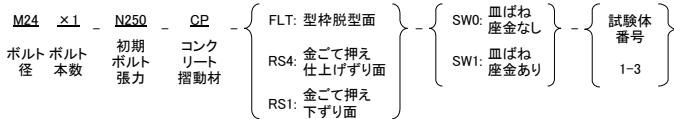


図-8 試験体名称

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、摩擦面は木製型枠脱型面とした。なお、既往研究^{3),4)}により早強コンクリートを使用した場合も普通コンクリートを使用した場合と同程度のすべり係数が発揮できることを確認している。その摩擦接触面をボルト孔周辺(長さ145mm×幅125mmの範囲)に限定するため、端部より80mmの長さの範囲を厚さ3mmだけ減厚した。また、ファスナープレートには、加力時にコンクリート摺動材の回転を防止するため、ガイドアングル(L-50mm×50mm×6mm)を設けた。文献4と同様に、目標減衰力20kNを発揮させるため初期導入ボルト張力25kNを導入した。使用コンクリートの調合計画と圧縮試験結果を表-1、表-2に示す。

外壁ファスナーに動的な摺動を生じさせるため、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)4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、コンクリート壁板摩擦面の平滑さ、及びボルト締付部への血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-8に示す。コンクリート壁板の摩擦面仕上げには、金ごて押さえ仕上げ面(RS4)、金ごて押さえ下すり面(RS1)を設定し、文献4で報告したコンクリート壁板の摩擦面を木製型枠脱型面としたM24×1-N250-FLT試験体グループの実験結果と比較した。比較対象の試験体グループは、コンクリート壁板の摩擦面仕上げを除き、本実験と同様の条件で実験を行っている。金ごて押さえ仕上げ面(RS4)と金ごて押さえ下すり面(RS1)は、文献5の「15.3 床コンクリート直均し仕上げ」に規定された表-3に示す作業手順の手順6と手順4に該当するものとした。なお、金ごて押さえ仕上げに当たり、ボルト埋め込み周辺にファスナープレートとの接触領域

表-3 金ごて押え仕上げ作業手順

手順	作業内容	実験条件
1	中むら取りを木ごてで行う	-
2	金ごて押えを行い、セメントペーストを十分に表面に浮き出させる	
3	締め具合を見て、金ごてで強く押え平滑にする	
4	金ごて押さえ下すり	RS1
5	金ごて押さえ中すり	-
6	金ごて押さえ仕上げすり	RS4



写真-1 コンクリート壁板の摩擦面

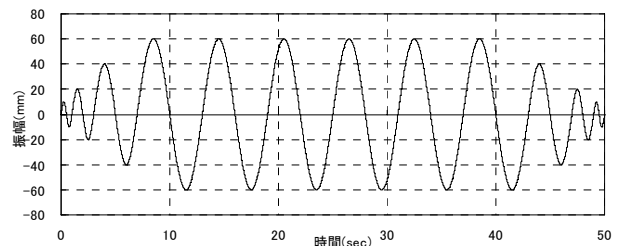


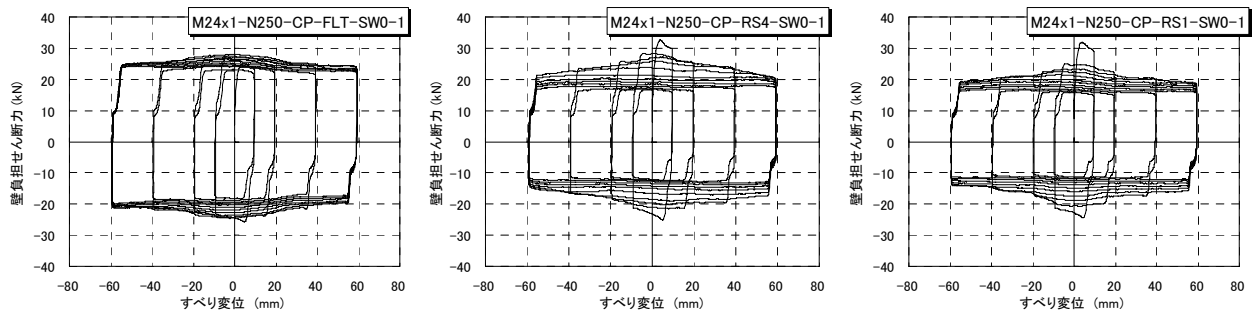
図-9 加振波

が限定できるように、ボルト埋め込み部周辺を若干盛り上げる均しを行った。コンクリート壁板の木製型枠脱型面(FLT)、金ごて押さえ仕上げ面(RS4)、金ごて押さえ下すり面(RS1)の代表例を写真-1に示す。加えて、繰返し摺動時のボルト張力低下の抑制のため血ばね座金をボルト締付部に1枚挿入した試験体(SW1)と血ばね座金なし試験体(SW0)を計画した。使用した血ばね座金は、JIS B1251のM24用軽荷重1種とした。

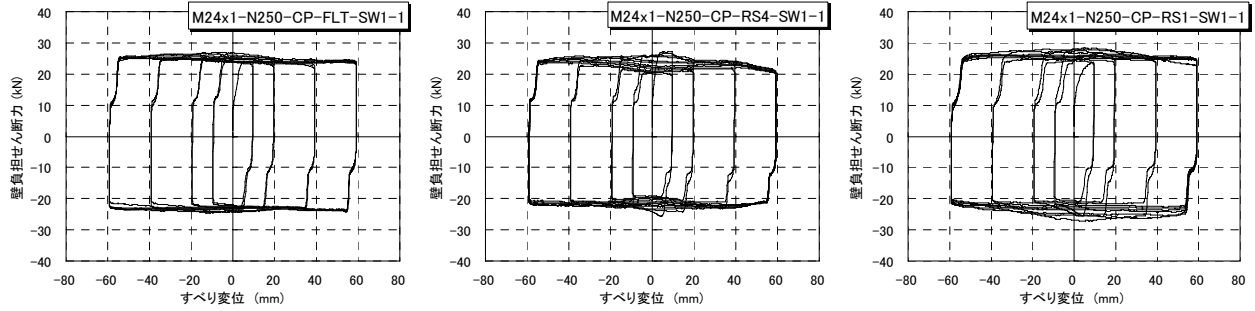
実験条件毎の試験体数として、血ばね座金なし試験体は同一条件で1体、血ばね座金を挿入した試験体では同一条件で3体を計画し、総計8体の実験を実施した。

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-9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た。

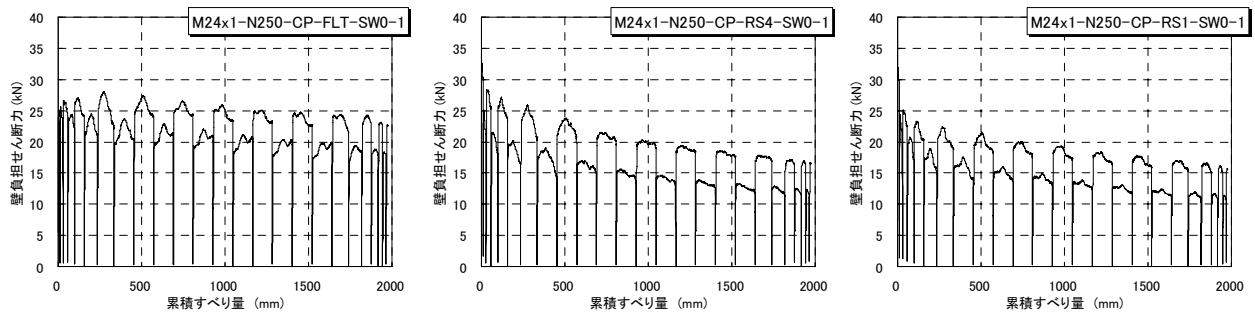


(a) ボルト締め付け部に皿ばね座金未挿入試験体

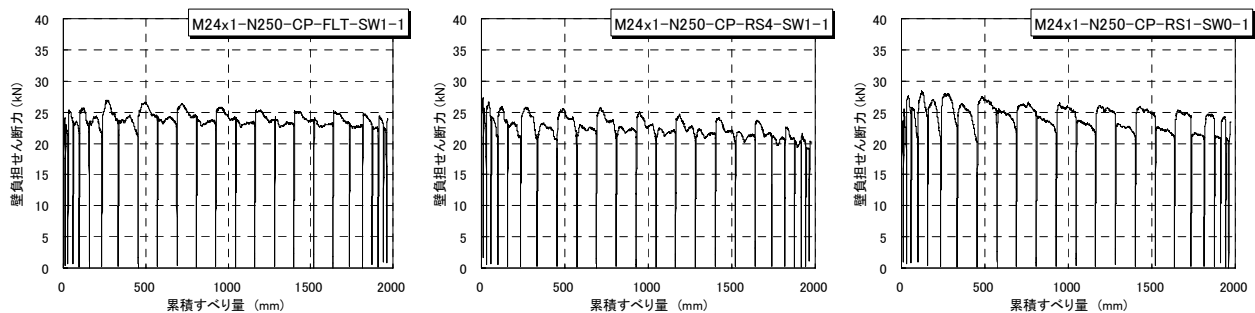


(b) ボルト締め付け部に皿ばね座金を挿入した試験体の代表例

図-10 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-11 壁負担せん断力の絶対値と累積すべり量の関係

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、及び摩擦面の仕上げ条件毎に図-10、図-11に示す。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。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。M24×1-N250-FLT試験グループの実験結果は文献3で報告したものを再掲載した。

皿ばね座金未挿入のRS4、RS1-SW0-1試験体では、摺動開始とともに摩擦力が急増した後に、繰返し摺動に伴ない摩擦力が大きく減少した。一方、皿ばね座金を挿入したRS4、RS1-SW1試験グループでは、繰返し摺動に伴ない摩擦力は漸減するもののコンクリート壁板の摩擦面が平滑なFLT-SW1試験グループと

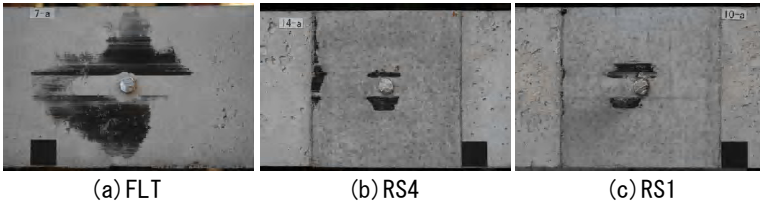


写真-2 実験終了後のコンクリート壁板の摩擦面

表-4 コンクリート壁板の接触面積

摩擦接触面積 (cm ²)		摩擦面仕上げ			
		FLT	RS4	RS1	
皿ばね 座金の 有無	SW0	1	179	16.7	25.4
	SW1	1	249	23.7	21.7
		2	235	15.9	30.7
		3	225	34.1	32.8

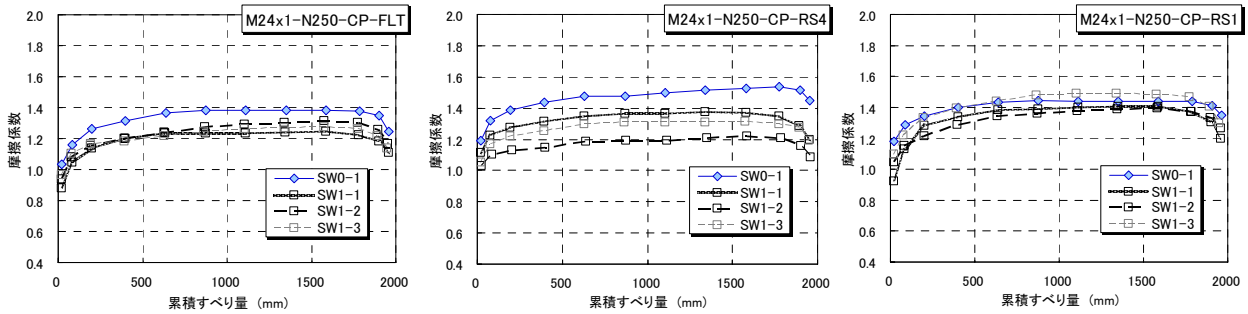


図-12 サイクル毎の平均摩擦係数と累積すべり量の関係

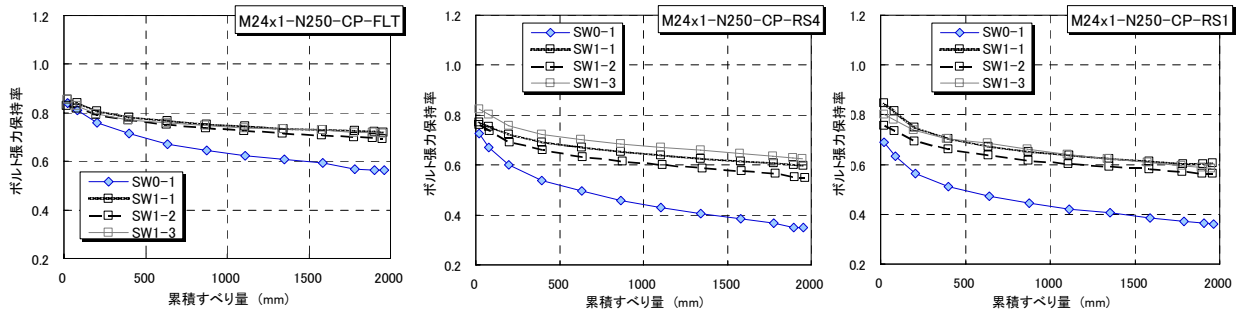


図-13 サイクル毎のボルト張力保持率と累積すべり量の関係

概ね同程度の摩擦力を発揮した。そのため、皿ばね座金を挿入した場合は、コンクリート壁板の摩擦面が金ごて押さえ仕上げの場合でも、摩擦力とすべり変位の関係は摺動開始時にSlip型の性状を持つ剛塑性型の履歴曲線を概ね描いた。

続いて、コンクリート壁板の実験終了後の摩擦面を写真-2に示す。コンクリート壁板の摩擦面にはファスナープレートからの黒皮スケールが、概ね埋め込みボルト周辺に集中して付着し、摩擦接触面積が想定通り埋め込みボルト周辺に限定できたことが伺える。表-4に示した黒皮付着部分の面積(摩擦接触面積の総和)は、金ごて押さえ回数や皿ばね座金挿入の有無による違いは見られなかったが、RS1, RS4試験グループではFLT試験グループに比較しその大きさは約1/8であった。

4. 外壁摩擦面の平滑さが摩擦係数に与える影響

コンクリート壁板の平滑さの違いによる摩擦接触面積の大きさが摩擦係数に与える影響を確認する。サイクル毎の平均摩擦係数と累積すべり量の関係を図-12に示す。サイクル毎の平均摩擦係数として、各サイクルの摩擦係数(=摺動時の摩擦力/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用いている。ボルト張力低下

の影響を取り除いた摩擦係数を対象とするため、皿ばね座金の挿入の有無(SW0, SW1試験グループ)を区別せず比較した。

RS4, RS1試験グループの摩擦係数は、繰り返し摺動に伴い1.4前後の摩擦係数に漸近する傾向があり、平滑な摩擦面を持つFLT試験グループに比較し大きな摩擦係数を発揮する傾向があった。そのため、当該摩擦ダンパーの摩擦係数はコンクリート壁板の摩擦接触面積が小さくなると増加する可能性が指摘できる。初めと終わりの3サイクルにおいて、サイクル毎の平均摩擦係数が急増、急減しているが、当該摩擦ダンパーでは摺動方向逆転時にコンクリート摺動材のボルト孔縁とボルトが接触するまで1面摩擦となり摩擦力が低下し、振幅が小さいサイクルではその影響によりサイクル毎の平均摩擦係数を小さく見積もるためである。コンクリート壁板摩擦面の金ごて押さえの回数の差による摩擦係数の影響は概ね見られないと考えられる。

5. 皿ばね座金の挿入によるボルト張力低下の抑制効果

ここでは、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。サイクル毎のボルト張力保持率と累積すべり量の関係を図-13に示す。ここで、サイクル毎のボルト張力保持率は、各サイク

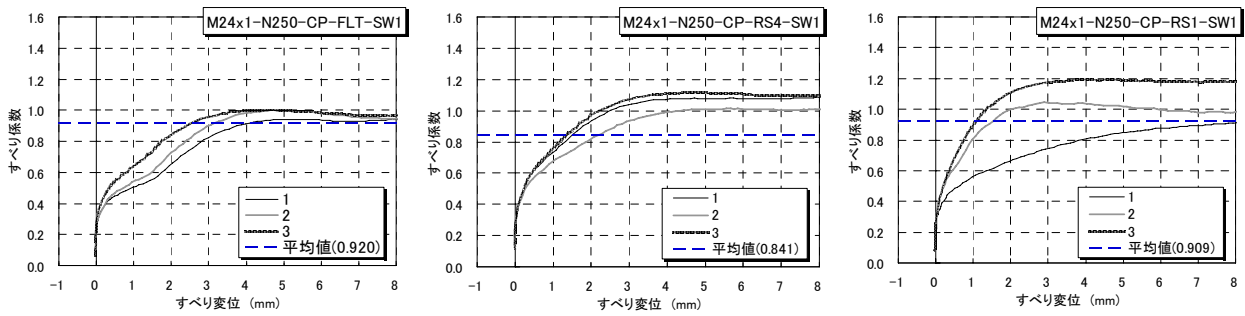


図-14 初摺動時のすべり係数とすべり変位の関係

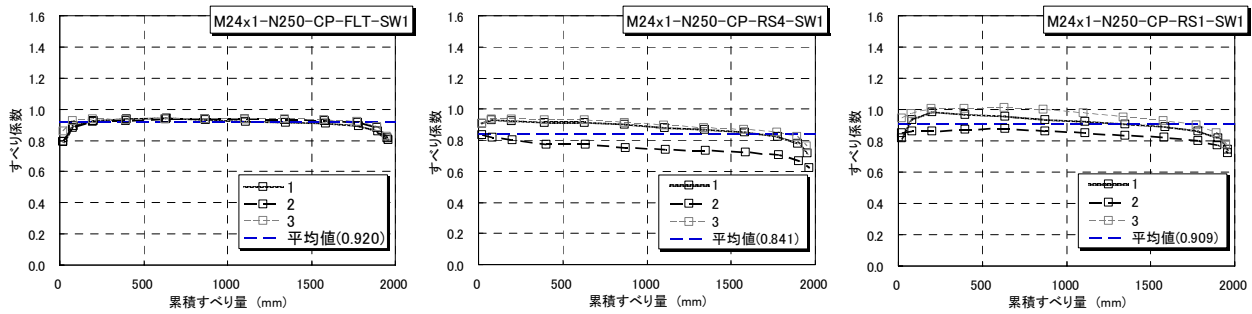


図-15 サイクル毎の平均すべり係数と累積すべり量の関係

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としている。

皿ばね座金を挿入しない場合には,FLT,RS4,RS1試験体(SW0)の実験終了時のボルト張力保持率は0.63,0.42,0.43となり,不陸があり摩擦接触面積が小さいRS4,RS1試験体でボルト張力がより大きく低下した。これは,ボルト張力の低下が摺動に伴う摩擦面の摩耗によるボルト締め付け長さの縮減に起因するため,摩擦接触面積が小さく接触圧が大きいほど摩耗が発生しやすことが原因と考えられる。皿ばね座金の挿入によりいずれの試験グループ(SW1)でも,未挿入の場合に比較し実験終了時のボルト張力低下量が約2/3に減少したものの,RS4,RS1試験グループではFLT試験グループに比べ1.5倍程度その低下量が大きく,皿ばね座金をボルト締め付け部に挿入することによるボルト張力低下の抑制効果は限定的であった。

6. 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グループ(SW1)の初摺動時のすべり係数とすべり変位の関係を図-14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-15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。すべり係数は摺動時の摩擦力を初期ボルト張力で除した値としており,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3~4mm前後で試験グループ毎のすべり係

数の平均値(0.92~0.84)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。コンクリート壁板摩擦面の平滑さの差違に係わらず,いずれの試験グループでもすべり係数として0.9前後を發揮可能であった。

7. まとめ

当該摩擦ダンパーにおいて,外壁摩擦面を金ごて押さえ仕上とすると,皿ばね座金を挿入しても摺動時のボルト張力低下が大きくなるものの,摩擦係数の上昇が見られるため,平滑面を持つ場合と同程度の摩擦力が發揮可能であった。

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, 他: 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, No. 3, pp. 1117-1122, 2008. 7
- 4) 吉岡智和, 野口和宏: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 943-948, 2010. 7
- 5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修, 建築工事共通仕様書, 社団法人公共建築協会