

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挙動

吉岡 智和*1・中城 卓也*2・野口 和宏*2

要旨:PCaカーテンウォールと架構とをボルトを介した2面摩擦型の鋼-コンクリート摩擦ファスナーダンパーで接続することで,PCaカーテンウォールの耐力と剛性をそれに損傷が生じない範囲で利用できるPCaカーテンウォールファスナーダンパーを提案した。本報では,2本ボルトで締め付けた2面摩擦型鋼-コンクリート摩擦ファスナー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,本接合部の特徴である締め付ボルトを介して伝達される摩擦力へのボルトの強度と径の影響を確認し,当該摩擦ダンパーの減衰力が鋼とコンクリートとの摩擦力,及び黒皮付鋼と溶融亜鉛メッキ鋼との摩擦力の累加により求められることを確認した。

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

1.1 研究背景

鉄骨造建物の外壁の1つとしてコンクリート系PCaカーテンウォールが用いられている。カーテンウォールは水平荷重による損傷を防ぐため,架構の変形に追随出来るファスナーにより取り付けられた非耐力壁として扱われている。筆者らの一人は,そのようなPCaカーテンウォールの剛性と耐力をそれが損傷しない範囲で利用出来るように,図-1に示す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1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40kN以上の減衰力を有し,その減衰力を累積変形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,図-2に示す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³⁾を提案した。当該摩擦ダンパーは,コンクリート壁板と黒皮未除去の鋼製ファスナーとの摩擦面(摩擦面1と称す)と黒皮未除去の鋼製ファスナーと亜鉛メッキを施したボルト座金との摩擦面(摩擦面2と称す)に摩擦力が生じ,摩擦面2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てコンクリート壁板から鋼製ファスナーに力が伝達される特徴を有している。文献3において筆者らは,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

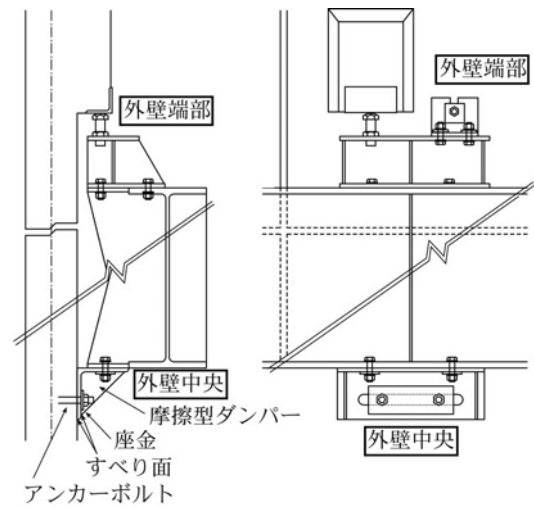
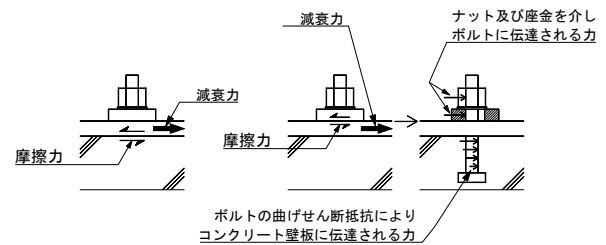
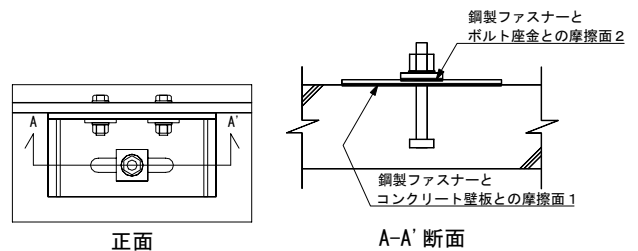


図-1 摩擦型ファスナーダンパー¹⁾



摩擦面1での力の伝達 摩擦面2での力の伝達

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

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。但し、1本ボルトで締め付けた場合には、ファスナー金物とボルト座金との接触面に摩擦摺動が生じると、ボルト座金が回転し締め付けナットを緩めボルト張力の低下を誘発する問題点が明らかとなった。

さらに、筆者らの1人は文献4において、摩擦面1に適用可能な黒皮未除去の鋼板とコンクリートの摩擦面のすべり係数 μ の評価式として式(1)を提案している。

$$\mu = \begin{cases} 0.69 - 1.25 \times 10^{-5} \times (\sum \delta - 180)^2 & (\sum \delta \leq 180 \text{mm}) \\ 0.69 & (\sum \delta > 180 \text{mm}) \end{cases} \quad (1)$$

$\sum \delta$: 累積すべり量(mm)

しかし、摩擦面2を構成する黒皮未除去の鋼板と溶融亜鉛メッキを施したボルト座金との摩擦すべり挙動は明らかではない。

1.2 研究目的

本研究では、図-1に示すような摺動方向に2本のボルトを並べ座金回転を抑制できる摩擦ファスナーダンパーを対象として、文献3と同様にボルト1本当たり25kNの初期ボルト張力を導入した条件の下で、締め付けボルトの強度と径を変更した場合においても、所要の減衰力(40kN以上の摩擦力)を最大片振幅60mm(階高4mの架構において最大層間変形角1/67に対応)を受け、累積変位1,000mmに渡り発揮可能であることを、当該摩擦ダンパーの接合面を模擬した要素試験体の動的摺動実験により確認する。また、それに先んじて、黒皮未除去の鋼板と溶融亜鉛メッキを施した鋼板との摩擦すべり挙動を、2面摩擦型接合要素試験体の動的摺動実験を行い確認する。得られた実験結果と式(1)により当該摩擦型ファスナーダンパーの摩擦挙動の評価を併せて試みる。

2. 黒皮付き鋼板と亜鉛メッキ鋼板の摩擦すべり挙動

2.1 実験方法

図-3に試験体の形状寸法を示す。試験体は、黒皮未除去の母材(鋼板)を亜鉛溶融メッキを施した添板(鋼板)で挟み、呼び径M24の普通ボルト1本で締め付けた2面摩擦接合形式の要素試験体とした。母材、添板の材質はSS400とし、板厚をそれぞれ22mm, 16mmとした。中板には直径30mm、長さ70mmの長孔を設け、摺動時に締め付けボルトと母材との接触を防止した。写真-1に母材、添板の摩擦面を示す。締め付けボルトへの初期ボルト張力として、文献3と同様に25kNを導入した。

加力は、添板を固定した状態で母材に強制変位を与えた。与えた変位は、最大振幅10, 20, 40, 20, 10mm、振動数0.8, 0.4, 0.2, 0.4, 0.8Hzとなる正弦波とし、同振幅で各々9サイクル繰返し、総計45サイクル、累積

変位2000mmとなる加振を行った。なお、加力装置の性能により、強制変位の片振幅は想定した最大片振幅60mmの3分の1に設定した。計測した物理量は、強制変位に伴い生じる摩擦力、母材と添板の間の相対変位、ボルト張力である。ボルト張力は、一方の添板外側に取り付けた外径42mm、内径26mm、高さ84mmの円筒型ロードセルにより計測し、ボルト締付長さは150mmとした。

以上の実験条件下において、Zn-1~Zn-3試験体の3体の摺動実験を行った。

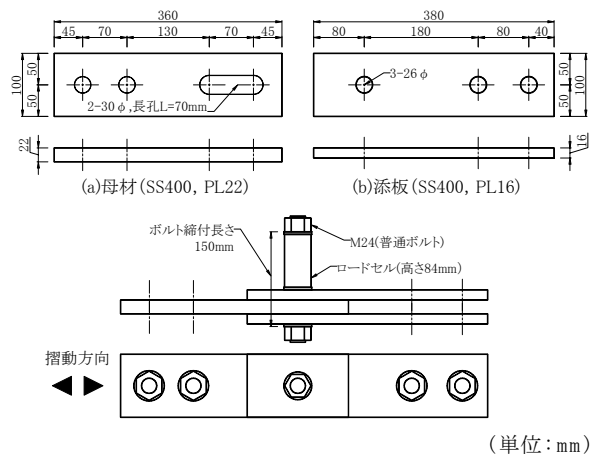


図-3 Znシリーズの試験体形状



写真-1 Zn-1試験体の鋼材摩擦面(実験前)



写真-2 Zn-1試験体の鋼材摩擦面(実験後)

2.2 実験結果

図-4に摩擦力と変位の関係を示す。いずれの試験体でも各サイクルで剛塑性型の履歴曲線を描いているが、繰り返し摺動に伴い摩擦力が増加する傾向が認められた。写真-2に実験終了後の母材、添板の摩擦面の一例を示す。母材の摩擦面には亜鉛が固着する一方、添板の摩擦面は固着部分の剥がれによる摺動痕が認められた。従って、このような摩擦力の増加は、固着部分の成長に伴う、1)いわゆる焼き付き現象による摩擦係数の増加、及び2)ボルト

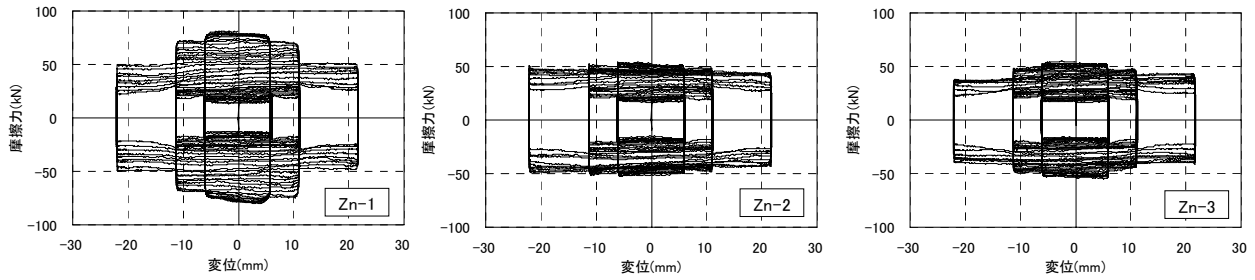


図-4 摩擦力と変位の関係

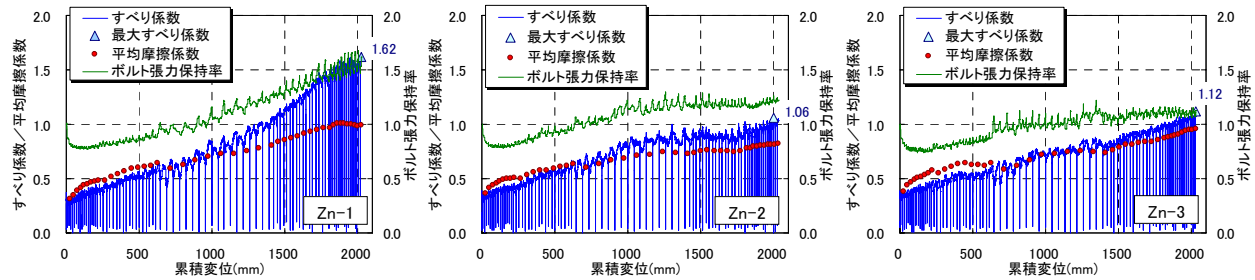


図-5 すべり係数, サイクル毎の平均摩擦係数, ボルト張力保持率と累積変位の関係

ト締め付け長さの伸長によるボルト張力の増加に起因すると考えられる。そこで、このような摩擦力の増加に対する摩擦係数とボルト張力の増加の影響を確認するため、図-5にすべり係数, サイクル毎の平均摩擦係数, ボルト張力保持率と累積変位の関係を示す。ここで、すべり係数は摩擦力を初期ボルト張力と摩擦面数で除した値, 摩擦係数は摩擦力を摺動時に計測したボルト張力と摩擦面数で除した値, ボルト張力保持率は初期ボルト張力に対する摺動時ボルト張力の比率とした。Zn-1~3試験体のサイクル毎の平均摩擦係数は繰り返し摺動に伴い増加し, 第1サイクルでは0.32, 0.36, 0.38であるのに対し, 実験終了時(累積変位が約2000mm)には0.99, 0.82, 0.96に達するものの, 0.9前後の値に漸近する傾向が認められる。一方, ボルト張力保持率は, 摺動に伴い一旦初期張力の8割程度に低下後に上昇し, Zn-2, 3試験体では実験終了時に初期張力の1.1~1.2倍程度に回復するのに対し, Zn-1試験体では初期張力の1.5倍程度まで上昇した。

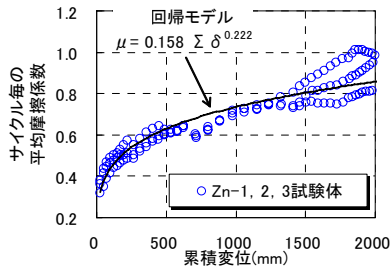


図-6 サイクル毎の平均摩擦係数と累積変位の関係

図-6にZn-1~3試験体より得られたサイクル毎の平均摩擦係数と累積変位の関係を示す。当該摩擦面の摩擦係数の評価式として, 累乗回帰モデルを採用し, 次章に示す摩

擦型ファスナーダンパーの実験結果との比較のために, その係数を最小二乗法により求め図中に示した。

3. 2本ボルト型鋼-コンクリート摩擦ファスナーダンパー要素のすべり挙動

3.1 実験方法

図-7にダンパー要素試験体を組み込んだ鋼製骨組の形状を, 図-8にダンパー要素試験体の詳細を示す。試験体は, PCaカーテンウォールの接合部位を模したコンクリート板とファスナー金物を模した鋼板(板厚12mm)を2本のボルトにより締め付けた摩擦面を両側面に有するダンパー要素試験体とした。対象とする外壁ファスナーダンパーは片側壁面のみ摩擦面を持つが, 加力時の偏心によるねじれを避けるため両側面に摩擦面を持つ要素試験体を用いた。そのため,

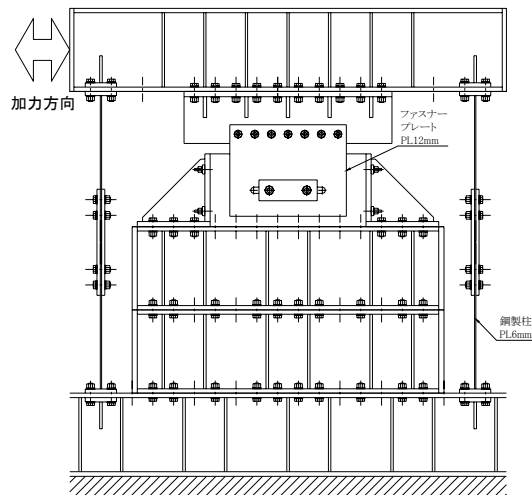


図-7 摩擦ファスナーダンパー試験体の形状

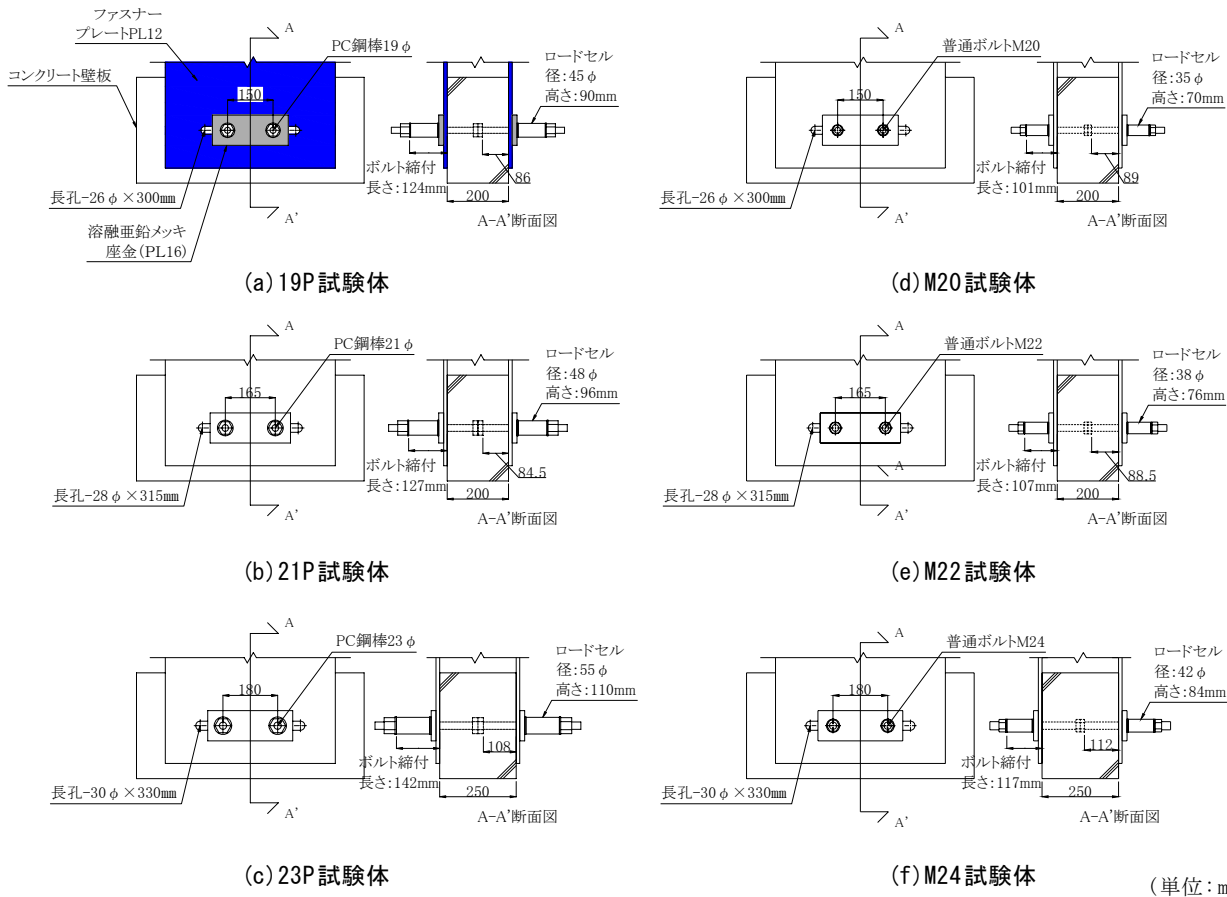


図-8 ファスナーダンパー要素試験体の詳細

1つの要素試験体で2つの外壁ファスナーダンパーの摩擦面を模擬している。外壁ファスナーダンパーに生じる地震時応答を与えるため、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の鋼製梁上に置き、前後をエンドスッパで固定した上で、ファスナープレートを上梁に取り付け金物を介して固定し、上梁に水平方向変位を与えた。コンクリート板には、普通コンクリート（圧縮強度31.5N/mm²）を用い、摩擦面は木製型枠脱型面を未処理のまま使用した。ファスナープレートにはSS400材を用い、摺動時にボルトとの接触を避けるため長孔を設け、摩擦面は発錆のない黒皮スケール面を未処理のまま使用した。ボルト座金には、溶融亜鉛メッキを施した鋼板を用いた。

表-1に示すように、ボルトの強度および径が、ボルト座金とファスナープレートとの間に生じる摩擦力の伝達性能に与える影響を調査するため、コンクリート板に埋め込むボルトとしてPC鋼棒3種類（呼び径19φ、21φ、23φ）、普通ボルト3種類（呼び径M20、M22、M24）を計画した。初期ボルト張力として、文献3で所要の減衰力（ボルト1本当たり20kN以上）が発揮できることが確認されている張力25kN/本を一律導入した。ボルト締付長さは、ボルト張力計測用ロードセルを挿入したため、図-8に示す値をそれぞれ設定した。所定のボルトの埋め込み深

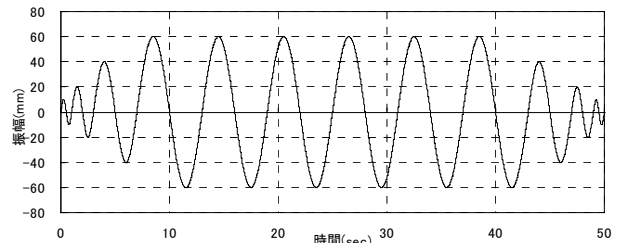


図-9 加振波

表-1 実験条件

試験体名称	コンクリート壁板		締め付けボルト				初期張力
	強度	厚さ(mm)	呼び名(径)	種類	ピッチ(mm)	埋め込み深さ(mm)	
19P	普通コンクリート Fc=31.5(N/mm ²)	200	19φ(M20)	PC鋼棒	150	86	25kN
21P			21φ(M22)		165	84.5	
23P			23φ(M24)		180	108	
M20	200	M20	普通ボルト	150	89		
M22		M22		165	88.5		
M24		M24		180	112		

さ(4d, dはボルト呼び径)を確保できるよう、コンクリート板の厚さを19P、21P、M20、M22試験体では200mm、それ以外は250mmとした。

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

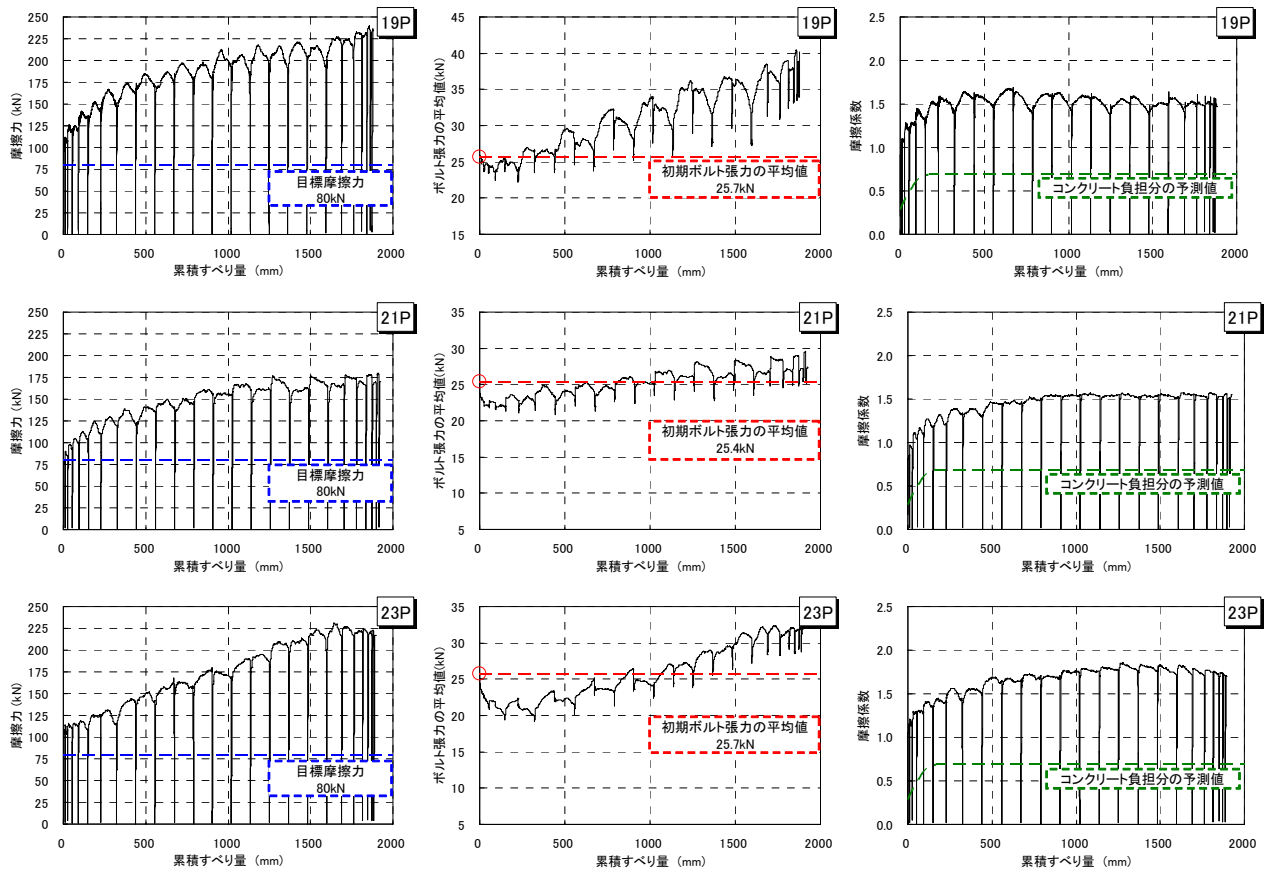


図-10 PC鋼棒を使用した試験体の摩擦力、ボルト張力の平均値、摩擦係数と累積すべり量の関係



写真-3 PC鋼棒を使用した試験体の加振終了後のコンクリート摩擦面(左から、19P, 21P, 23P試験体)

幅 10, 20, 40, 60mm に対し振動数 1.00, 0.50, 0.25, 0.17Hz となる図-9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金物とのすべり変位とした。

3.2 実験結果

図-10、図-11にPC鋼棒及び普通ボルトを用いた試験体の摩擦力、ボルト張力の平均値、摩擦係数と累積すべり量の関係をそれぞれ示す。ここで摩擦力は、作用させた水平力から鋼製骨組の負担せん断力を除いた値を、ボルト張力は4本のボルトに取り付けたロードセルにより計測したボルト張力の平均値を、摩擦係数は摩擦力を4本のボルト張力の総計で除した値としている。

いずれの試験体でも、撓動に伴うボルト座金の回転が生じておらず目標値80kNを超える摩擦力を発揮しており、その挙動は撓動に伴い摩擦力が緩やか増加した後に一定値に漸近する試験体(21P, M20, M22, M24)と摩擦力が

単調に増加する試験体(19P, 23P)に大別された。これは、繰り返し撓動に伴いボルト張力が一旦低下した後に実験終了までに初期張力前後の値まで緩やかに上昇した21P, M20, M22, M24 試験体に対して、19P, 23P 試験体では大きくボルト張力が上昇したためと考えられる。なお、いずれの試験体でも摩擦係数は繰り返し撓動に伴い1.5から1.8程度に漸近する傾向が観られた。この大きさは、式(1)により求めたコンクリート負担分(すべり係数0.69)に前章で示した黒皮付き鋼板と熔融亜鉛メッキ鋼板との摩擦面の摩擦係数0.8~1.0程度を加えた値に概ね一致する。また、前章に示す要素実験の結果と比較し、当該実験結果において撓動に伴い摩擦係数が一定値に漸近する傾向が顕著に観られた。

写真-3、写真-4に各試験体の加振終了後のコンクリート摩擦面を示す。いずれの試験体でもコンクリート表面に鋼材からの黒皮の付着が観られる。なお、ボルトの根元にわずかにコンクリートの圧壊が観られるが亀裂、ボ

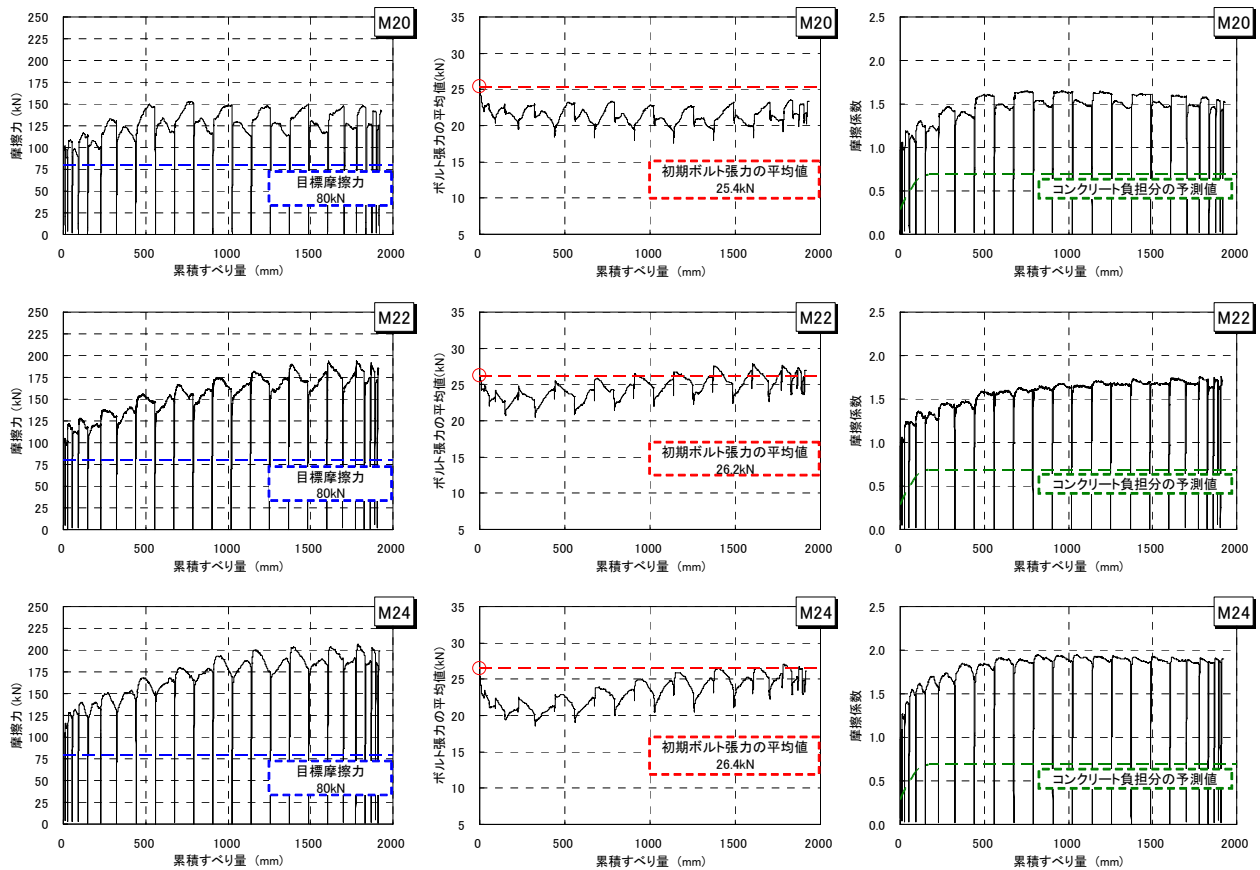


図-11 普通ボルトを使用した試験体の摩擦力、ボルト張力の平均値、摩擦係数と累積すべり量の関係



写真-4 普通ボルトを使用した試験体の加振終了後のコンクリート摩擦面(左から、M20、M22、M24試験体)

ルトの抜け出しはなく、ボルト1本当りの導入張力が25 kNの場合では、ボルト強度、ボルト径によらずファスナープレートとボルト座金との間の摩擦力をボルトを介して十分に伝達可能であったと考えられる。

4. まとめ

本実験において、以下の知見が得られた。

- (1) 黒皮付き鋼板と溶融亜鉛メッキ鋼板との摩擦力は、焼付現象によるボルト張力の増加により急増する試験体も観られるが、摩擦係数として概ね0.9前後を發揮する。
- (2) 2本ボルトで締め付けた当該ダンパーでは、ボルト座金の回転に伴うボルト張力の低下が起こらず、所要の摩擦力を發揮した。
- (3) ボルト1本当たり25kNの張力を導入し締め付けた当該ダンパーでは、呼び径20～24mmの普通ボルトを介し摩擦力を伝達でき、その摩擦力は、ボルト張力が急増しない場合では、式(1)で示される鋼とコンクリートの摩擦力、及び(1)項の摩

擦力の累加により概ね評価できる。

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
- 4) 吉岡智和, 大久保全陸: コンクリートと鋼材摩擦面の摩擦すべり挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No3, p. 1165~1170, 2001. 6