

論文 鋼 - コンクリート摩擦すべり接合部のすべり挙動

吉岡 智和^{*1}・中城 卓也^{*2}・野口 和宏^{*2}

要旨:PCaカーテンウォールの取付ファスナーを2面せん断型鋼 - コンクリート摩擦すべり接合部とすることで,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面せん断型鋼 - コンクリート摩擦すべり接合部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けボルトを介した摩擦力の伝達の有無を確認し,所定の摩擦力を得るために必要な摩擦面の処理方法,摺動材を明らかにするとともに,必要な初期導入ボルト張力を確認した。

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

現在,多くの高層鉄骨造建築物にパッシブ型制震デバイスを用いた制震構造が採用されている。そのような建築物では建築計画上の要求から制震デバイスの設置場所が限定され,コア周辺部等に大きい減衰力を有す制震デバイスを少数設けることが多い。そのため,その支持架構には十分大きな剛性と耐力が必要となり,制震構造の利点を減ずる結果となっている。他方,そのような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,損傷の発生を防ぐために,水平荷重による架構の変形に追従出来ないような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。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,ファスナー部分に制震ダンパーを組み込むことで,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可能となる。文献1では,そのような外壁ファスナーダンパーの制震効果が示されるとともに,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は,外壁1枚毎に2ヶ所のファスナーダンパーを設けた場合に1つのファスナーダンパーが20kN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。

筆者らの一人は,上記の性能を有する外壁ファスナーダンパーとして,図-1に示すコンクリート壁板と鋼製ファスナーをボルトで締め付けた鋼 - コンクリート摩擦すべり接合部を提案する。当該摩擦すべり接合部では,コンクリート壁板と鋼製ファスナーとの摩擦面(摩擦面1と称

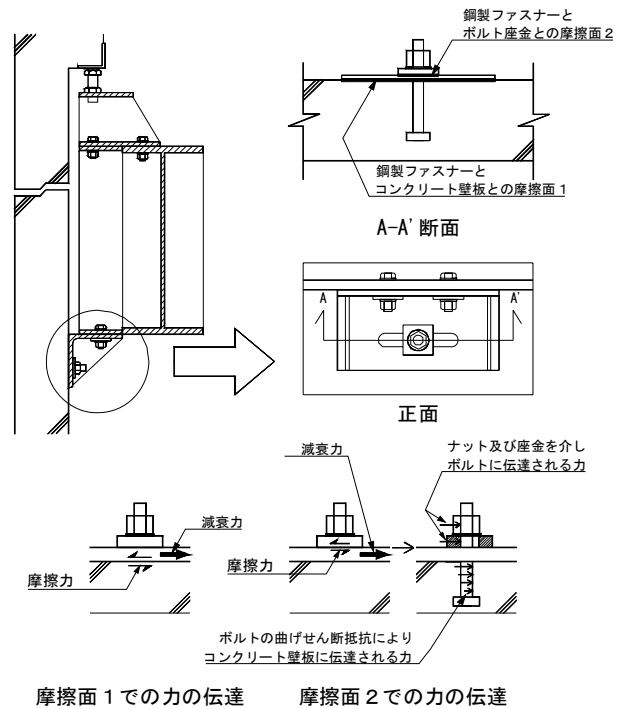


図-1 PCaカーテンウォールファスナーダンパー

す)と鋼製ファスナーと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に生じる摩擦力は締め付けボルトの曲げせん断抵抗を介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2面せん断型摩擦すべり接合となる。すでに,筆者は文献2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評価式として,式(1)を提案した。

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

$\Sigma\delta$: 累積すべり量(mm)

*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

1.2 研究目的

本研究では、黒皮未除去の鋼板とコンクリートの接合面を摩擦面1とした2面せん断型鋼-コンクリート摩擦すべり接合を対象として、(1)コンクリート壁板内に定着させた締め付け用ボルトを通して摩擦面2に生じた摩擦力を伝達可能であることを確認し、(2)所定の減衰力(20kN)を発揮するために必要な締め付けボルト張力を調査するとともに、(3)所定の減衰力(20kN)を累積すべり変位1,000mmにわたり発揮可能であることを、当該摩擦すべり接合部の接合面を模擬した試験体の動的摺動実験により確認する。

2. 実験方法

2.1 試験体

図-2に試験体の形状寸法を示す。試験体は、PCaカーテンウォールと鋼製ファスナーの接合面を模擬するため、ファスナーの接合部分を模したT形金物の12mm厚ウェブをPCaカーテンウォールの接合部分を模したコンクリート壁板にPC鋼棒(呼び径26, C種)により締め付け接合した。さらに、接合面に生じる地震時すべり応答を与えるため、上記の試験部位を鋼製骨組(上下梁H-400×408×21×21, 柱PL6)内に設けた高さ600mmのH形鋼台上に取付金物を介して据え付け、T形金物と上部梁を固定した状態で上部梁に水平方向変位を与えた。図-3に示すT形金物には鋼種SS400の鋼材を使用し、摺動時にボルトとの接触を避けるためウェブ接合面に幅30mm×長さ140mmの長孔を設けた。接合面は未発錆の黒皮スケール面を用いた。コンクリート壁板は図-4に示す形状寸法とし、摺動方向に生じる引張力に対して長軸方向に6-D6(SD295)を配筋し補強した。壁板に使用したコンクリートとして、PCaカーテンウォールを想定し軽量一種コンクリート(設計基準強度30N/mm²)を採用した。表-1にコンクリート壁板に使用したコンクリートの調合計画を示す。なお、コンクリートの圧縮強度試験の結果から、当該壁板のコンクリート圧縮強度は31.9N/mm²であった。コンクリート壁板の接合面には木製型枠脱型後の未処理面を使用した。締め付けに用いたPC鋼棒はコンクリート壁板に機械式定着させ、埋込深さは壁板の板厚200mm, 150mm毎に、それぞれ150mm, 100mmとした。

2.2 実験条件

本研究では、実験条件ごとに3つの試験グループを設定し、所定の減衰力(20kN)を発揮可能な実験条件を調査した。表-2に実験条件を示し、図-5~図-7に実験グループ毎の摩擦面2の組合せを表す。実験1では、摩擦面2を構成するボルト座金の摩擦面処理方法、及びすべり速度の影響を調査した。実験2では、実験1の結果をもとに、摩擦面2に亜鉛溶融メッキを施したボルト座金を選

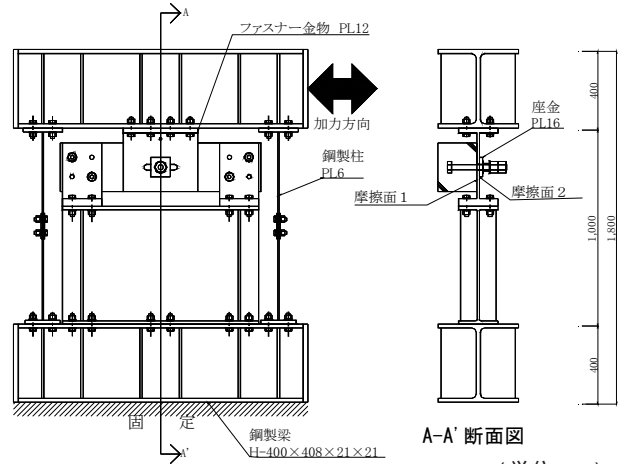


図-2 試験体形状

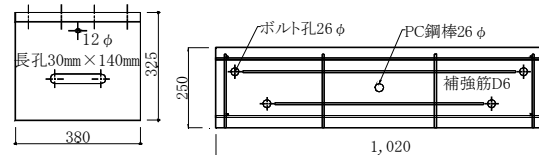


図-3 T形金物の形状寸法

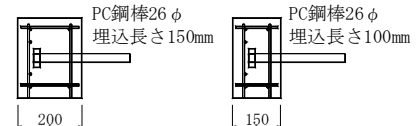


図-4 コンクリート壁板の形状寸法

表-1 壁板に用いた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 (%)	質量(kg/m ³)				
					単位水量	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
30	18	5	45	47.7	181	403	787	424	0.806

表-2 実験条件

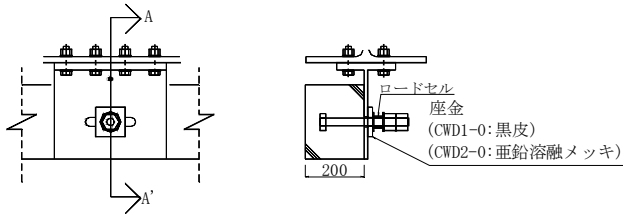
実験	試験体名	壁板の厚さ (mm)	摩擦面2 摺動材	想定すべり係数		初期ボルト張力 (kN)	加力方法
				摩擦面1	摩擦面2		
1	CWD1S-0	200	鋼製座金板 (黒皮スケール)	0.7 ^{*1}	0.2 ^{*2}	22.2	静的
	CWD1-0						
	CWD2-0						
2	CWD2-1	150	鋼製座金板 (亜鉛溶融メッキ)	0.8 ^{*3}	25.0	動的	
	CWD2-150mm						
3	CWD3-1	200	コンクリート薄板 (厚さ45mm)	0.7 ^{*1}	0.7 ^{*1}	14.4	動的
	CWD3-150mm	150	コンクリート薄板 (厚さ90mm)	1.0 ^{*4}		20.0	

*1 文献2の実験結果をもとに想定したすべり係数

*2 文献3の実験結果をもとに想定したすべり係数

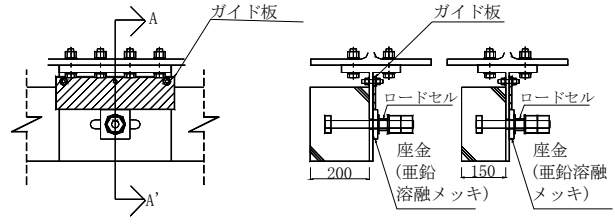
*3 実験1・CWD2-0の実験結果をもとに想定したすべり係数

*4 実験3・CWD3-1の実験結果をもとに想定したすべり係数



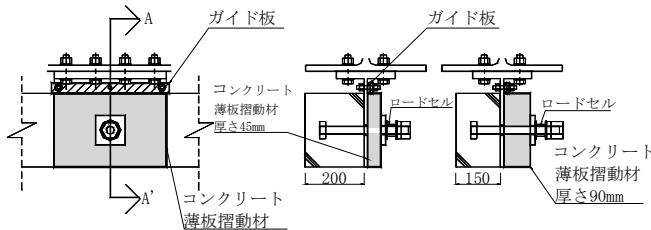
(単位:mm)

図-5 実験1試験体の摩擦面2の組合せ



(単位:mm)

図-6 実験2試験体の摩擦面2の組合せ



(単位:mm)

図-7 実験3試験体の摩擦面2の組合せ



写真-1 CWD3-1に用いたコンクリート薄板

折し、ボルト座金の回転を防ぐガイド板の取り付け、想定すべり係数の修正を行った上で、コンクリート壁板の板厚(ボルトの埋込長さ)の影響を調査した。実験3では、実験1の結果をもとにして、摩擦面2を構成するT形金物ウェブとボルト座金の間にコンクリート薄板を挿入した上で、コンクリート板厚の影響を調査した。なお、CWD3-150mmでは、CWD3-1の実験結果をもとに想定すべり係数を修正した。また挿入したコンクリート薄板の寸法は幅250mm、長さ380mmで、 $F_c 42\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを用いた。コンクリート薄板の摩擦面は木製型枠脱型面とした。

2.3 加振方法及び計測方法

加振は、鋼製骨組の下部梁を固定し、上部梁に取り付けた200kN動的サーボアクチュエータにより水平方向に強制変位を与えた。動的加力試験体では、片振幅10, 20, 40, 60mmに対して振動数1.0, 0.5, 0.25, 0.17Hzとなる正弦波を与え、累積すべり量が文献1で示された必要累積変位の2倍に相当する2000mmとなるように加振を行った。図-8に加振波を示す。一方、静的加力試験体では、動的加力と同様の加振履歴を与え、力が釣り合い摺動速度がゼロとなった状態で物理量を計測した。

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である。図-9に変位計測位置を示す。なお、締め付けボルト張力は、図-10に示す直径40mm、高さ30mm、板厚6mmの鋼管の側面に6ヶ所にひずみゲージを貼り付け得られたひずみの値より圧縮力を換算し計測した。動的加力試験体の物理量は、動ひずみ測定器を利用して2ミリ秒間隔で計測を行った。

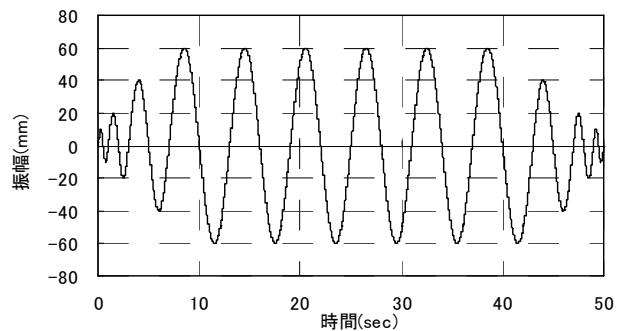


図-8 加振波

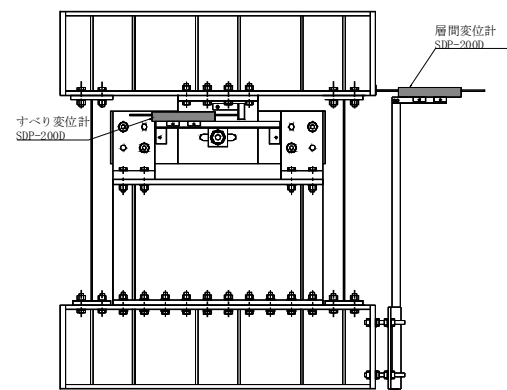
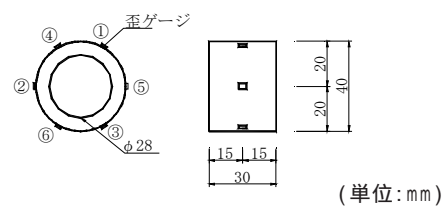


図-9 変位計測位置



(単位:mm)

図-10 ボルト張力計測用ロードセル

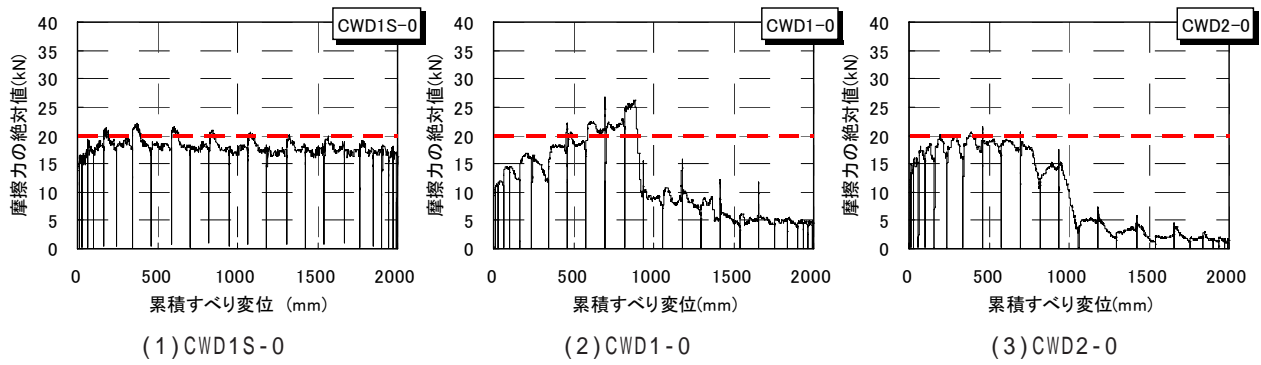


図-11 実験1試験体の摩擦力の絶対値と累積すべり変位の関係

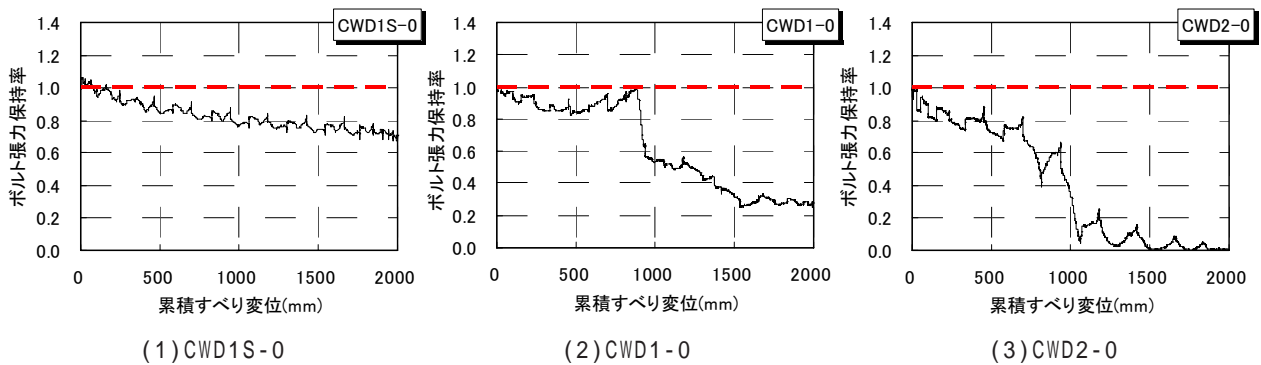


図-12 実験1試験体のボルト張力保持率と累積すべり変位の関係



写真-2 実験1試験体の摩擦面2側T形金物の摩擦面(実験終了後)

3. 実験結果

3.1 実験1の実験結果

図-11にCWD1S-0,CWD1-0,CWD2-0の摩擦力の絶対値と累積すべり量の関係を、図-12にボルト張力保持率と累積すべり量の関係を示す。ここで摩擦力は試験体に作用させた水平力より鋼製骨組の負担せん断力を除いた値を示しており、ボルト張力保持率は初期ボルト張力に対する加力時に計測したボルト張力の比率を示す。

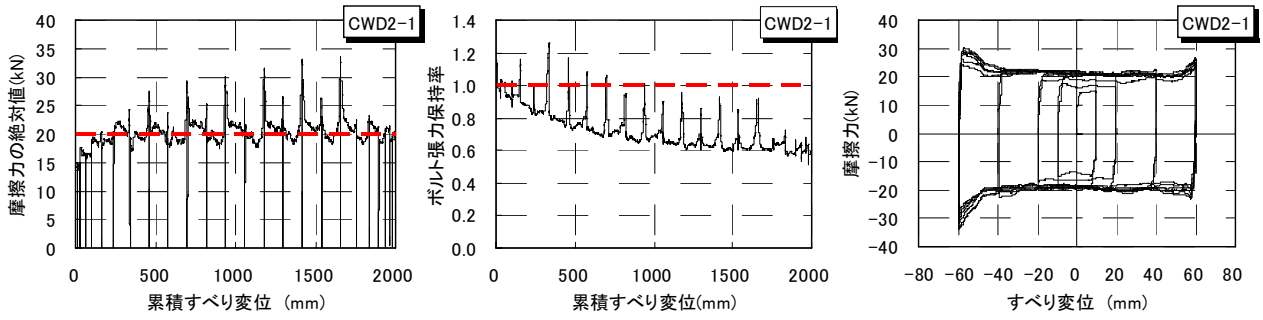
CWD1S-0では累積すべり量200mm程度まで摩擦力が上昇した後に概ね18kN前後の摩擦力を保持し摺動した。繰り返し摺動に伴うボルト張力の低下により想定した摩擦力を発揮し得なかった。

CWD1-0では累積すべり量900mm程度まで摩擦力は上昇し20kNを超過後に急落した。摩擦力が上昇した要因は、写真-2に示すように、CWD1S-0には観察されなかった実験終了後の摩擦面2のT形金物ウェブ面とボルト座金面

に固着に伴う大きな摺動痕が見られることから同種金属間の焼付が生じたものと推測される。また摩擦力の急落は摺動に伴いボルト座金が回転し、ナットの緩みが生じて起きたボルト張力の急減に起因するものと考えられる。

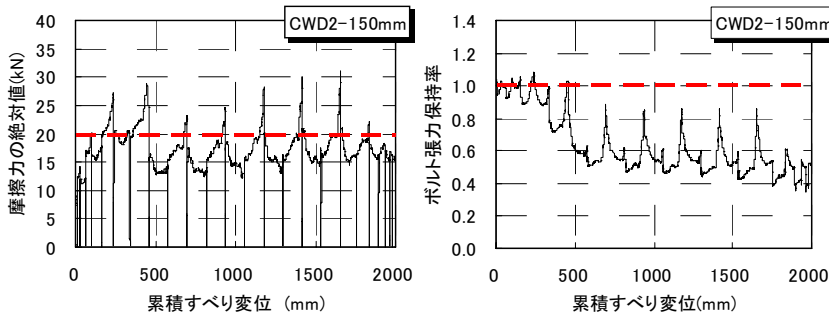
一方、CWD2-0では累積すべり量200mm程度まで摩擦力が上昇し後に18kN前後の摩擦力を保持し摺動したが、累積すべり変位約750mmからCWD1-0と同様の現象により摩擦力が急落した。写真-2に見られるように、実験終了後のT形金物のウェブ摩擦面には亜鉛の付着はあるが固着に伴う大きな摺動痕は見られなかった。

従って、ボルト座金に亜鉛溶融メッキを施したCWD2-0でより安定した摩擦力が得られるが、ボルト張力を急落させないためにボルト座金の回転を防ぐ必要がある。また、CWD2-0ではボルト張力の低下により想定したすべり係数よりやや小さいすべり係数(0.8)しか発揮できない結果となった。



(1) 摩擦力と累積すべりの関係 (2) ボルト張力と累積すべり量の関係 (3) 摩擦力とすべり変位の関係

図-13 実験2・CWD2-1試験体の実験結果



(1) 摩擦力と累積すべりの関係 (2) ボルト張力と累積すべり量の関係

図-14 実験2・CWD2-150mm試験体の実験結果



写真-3 CWD2-150mm試験体のコンクリート壁板の摩擦面(実験終了後)

3.2 実験2の実験結果

図-13, 図-14にCWD2-1, CWD2-150mmの実験結果をそれぞれ示す。

ボルト座金の回転防止用のガイド板を設けたCWD2-1では, 累積変位200mm程度まで摩擦力が上昇後は実験終了時までで約20kNの摩擦力を保持し摺動し, CWD2-0(実験1)で見られた摩擦力の急減は防止できた。ただし, 片振幅60mmサイクルの最大振幅時に大きな摩擦力の増加が見られた。これは, 図-15に示すように大きな水平変位に伴い鉄骨骨組の上部梁が降下し, それに連動しガイド板がボルトを下側に押し倒すために起こるボルト張力の増加に起因すると考えられる。図-16は片振幅60mmサイクルにおける最大振幅時と変位ゼロ時に計測したボルト張力計測用ロードセルの上下方向位置のひずみの値を示している。これには変位ゼロ時には見られない大きなひずみ勾配が最大振幅時に計測され, 最大振幅時にガイド板がボルトの押し下げを起こしていることを示している。

CWD2D-150mmでは, 累積変位約500mmまではCWD2-1と同様の摩擦力を発揮したが, その後の摺動に伴いボルト張力の大きな低下に伴い摩擦力が低下した。本試験体では, 実験終了後に写真-3に示すようなボルト埋め込み位置からコンクリート壁板の下方に斜めにひび割れが発生しており, これがボルト張力の低下を誘引した可能性がある。コンクリート板厚が小さい場合に壁板に亀裂が生じる点に関しては今後の検討課題と考えられる。

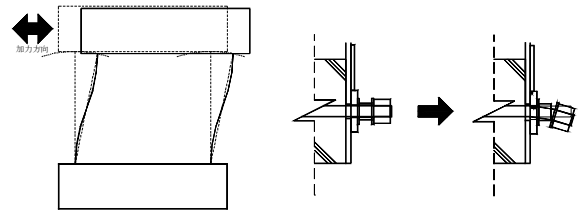
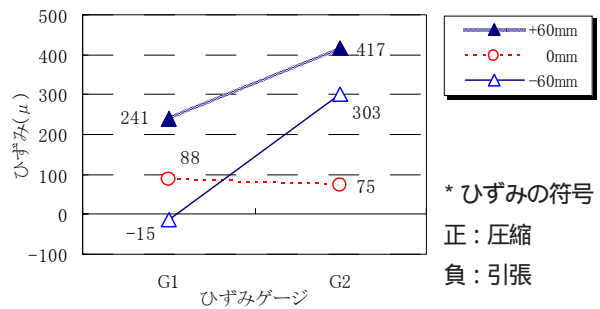


図-15 上部梁の沈降とガイド板によるボルト押し下げ



* ひずみの符号
正: 圧縮
負: 引張

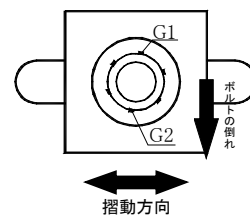
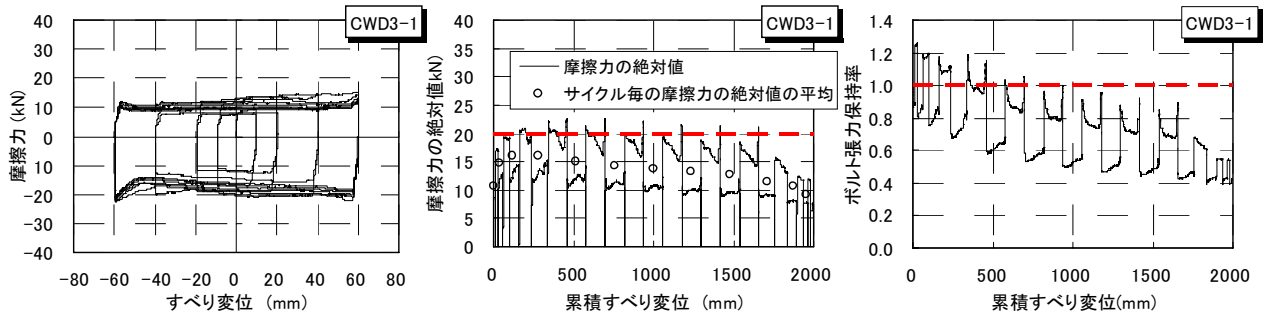
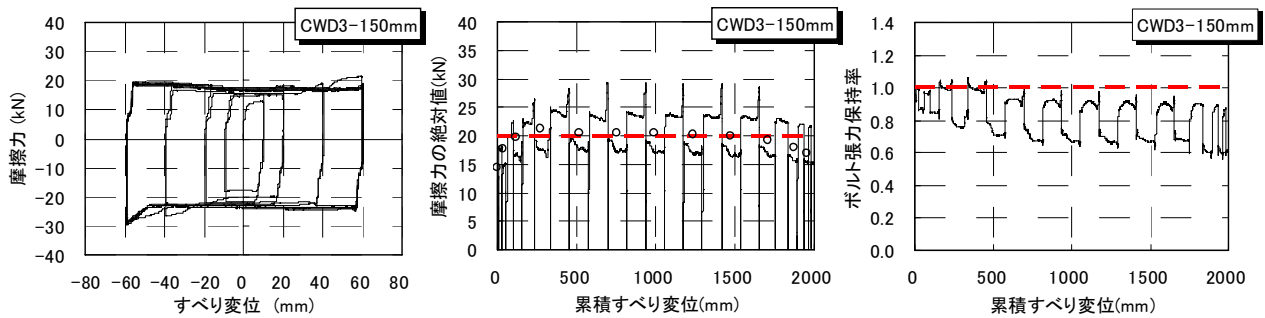


図-16 ガイド板によるボルト押し下げに伴うボルト張力計測用ロードセルのひずみ勾配



(1) 摩擦力とすべり変位の関係 (2) 摩擦力と累積すべり量の関係 (3) ボルト張力と累積すべり量の関係

図-17 実験3・CWD3-1試験体の実験結果



(1) 摩擦力とすべり変位の関係 (2) 摩擦力と累積すべり量の関係 (3) ボルト張力と累積すべり量の関係

図-18 実験3・CWD3-150mm試験体の実験結果

3.3 実験3の実験結果

図-17、図-18にCWD3-1, CWD3-150mmの実験結果をそれぞれ示す。

CWD3-1では、繰返し摺動に伴い概ね一定の摩擦力を保持したが、正負加力時に大きな摩擦力の違いが見られた。これはボルト張力の変動に伴うものであるが、その原因については今後の検討課題である。また、正負加力時の平均摩擦力は15kN前後であり、繰返し摺動に伴うボルト張力の低下により想定摩擦力を発揮し得なかった。

一方、CWD3-1に比較しボルト張力を増加させ、より厚いコンクリート薄板を挿入したCWD3-150mmは、CWD3-1と同様に正負加力時に摩擦力の違いは見られるものの、摺動に伴うボルト張力の低下も少なく概ね平均摩擦力20kNを発揮することが可能であった。

4. まとめ

2面せん断型鋼-コンクリート摩擦すべり接合部の摺動実験を行い以下の知見が得られた。

- (1) 当該摩擦すべり接合部では、ボルト座金が摺動時に回転しボルト張力の低下をもたらす。
- (2) ガイド板を取り付けることにより、(1)に示したボルト座金の回転に伴うボルト張力の低下は抑制された。ただし、大変形時にガイド板の沈降に伴い締付ボルトが押し下げられ、ボルト張力が増加し摩擦力の急増を招いた。
- (3) 黒皮未除去の鋼製ファスナーとボルト座金を用いたCWD1-

0試験体では、当該摩擦面で動的加力時に同種金属間の焼付に伴う摩擦力の増加が認められた。

- (4) 黒皮未除去の鋼製ファスナーと亜鉛溶融メッキを施したボルト座金を用い初期ボルト張力25kNを導入したCWD2-1試験体では、所定の摩擦力20kNを累積すべり変位2,000mmの範囲において発揮した。
- (5) 黒皮未除去の鋼製ファスナーとボルト座金の間にコンクリート薄板を挿入し初期ボルト張力20kNを導入したCWD3-150mm試験体では、正負加力時にボルト張力の差に伴う摩擦力の差異が見られたが、累積すべり変位2,000mmの範囲ではその摩擦力の平均値として概ね20kNを発揮できた。

参考文献

- 1) 平田寛, 河野昭彦, 安井信行, 丸谷和秀: 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
- 2) 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
- 3) 石崎誠, 大久保全陸, 吉岡智和: 高力ボルト摩擦すべり接合部の繰返しすべり試験(その1実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.711-712, 1999.9