

ゴムワッシャーを用いた 高力ボルト摩擦すべりダンパーに関する研究

アルミニウム合金板を摺動材に利用した動的加振実験

寺井雅和*, 佐藤孝典**, 吉岡智和***, 南 宏一*

STUDIES of BOLTED FRICTIONAL-SLIPPAGE DAMPER
with RUBBER WASHER

Dynamic Loading Test of Friction Damper using aluminum alloy sliding plates

Masakazu TERAJ, Takanori SATO, Tomokazu YOSHIOKA
and Koichi MINAMI

ABSTRACT

For developing high tension bolted frictional-slippage damper with much higher friction coefficients than conventional ones, the dynamic loading tests were conducted by using the bolted frictional-slippage connection specimens that sandwiched aluminum alloy sliding plates. In addition, for stabilization of frictional slipping behavior, specimens were also sandwiched by rubber washer. As the results, specimens using aluminum alloy sliding plates and rubber washer showed stable frictional slipping behavior. The results of these tests showed that slip coefficient of more than 0.60 for A1050P aluminum sliding plates and invariable slip coefficient of 0.36 for A2017P were confirmed respectively.

キーワード：摩擦ダンパー，高力ボルト，すべり係数，アルミニウム，動的載荷試験，ゴムワッシャー

Keywords : Friction Damper, High Tension Bolt, Slip Coefficient, Aluminum, Dynamic Loading Test, Rubber Washer

1. はじめに

地震の揺れを受け止め，吸収することで建築構造物を守る免震装置や制震装置が近年注目を集めている。特に，制震装置は，免震構造に比べて導入コストが低い上に，定期的な維持管理が不要というメリットがあり，近年の耐震改修促進と相まって，既存建物のリノベーションによる機能・性能向上でも期待されている。さらに，平成17年9月1日から「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算等の構造計算」の告示いわゆるエネルギー法が施行され，エ

ネルギー吸収能力により構造性能を評価することにより，これまで難しかったダンパーの効果を合理的に評価することが可能となり，制震構造はいずれ耐震構造の一部として一般化されることが期待されている。

こうした制震装置は，多くの研究グループにより，様々な技術開発，製品開発が行われ，実用化も進んできている^{1), 2)}。例えば，高力摩擦すべり接合を制震ダンパーへ応用した研究として，吉岡は鋼板の間にアルミニウム合金板や銅合金を摺動材として挿入

*建築学科 **アイディールブレン ***九州大学

することで、摩擦力の変化が少なく、摩擦すべり挙動が安定することを、定量的に評価している³⁾⁵⁾。この中で吉岡は、高強度のアルミ合金板 A2017P を摺動材として用いた場合に、摩擦面の損傷が少なく、すべり係数の変化が少ないことを確認している。しかし、そのすべり係数は 0.4~0.42 程度と、鋼材同士の摩擦係数とほぼ同じであった。一方、強度の低い純アルミニウム A1050P を摺動材に用いた場合は、すべり係数は大きくなるものの、アルミの損傷が大きく、履歴ループは安定しない結果を得ている。このことについて、ボルト摩擦を利用した制震装置の特徴の一つとして、摩擦が起こり少しでも摩耗を生じると、その性能は急激に変化し、安定した性能と装置としての耐久性を維持することが困難となることが知られている。これを克服するために、既往の事例では、締め付け用高力ボルトのワッシャーとして皿バネを使う製品が開発されているが、本論で提案するダンパーではゴムワッシャーを使用した。これは鋼管によりゴムを 3 軸拘束した筒状ワッシャーであり、弾性剛性が小さいため摩耗に対する軸力低下が小さいという特徴をもつものである。

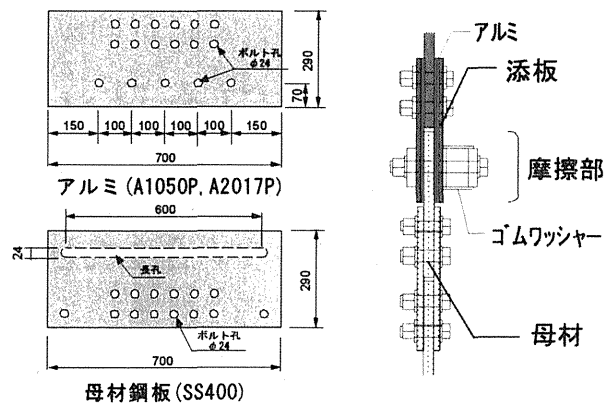
本報は、既往の高力ボルト摩擦すべり接合を用いた摩擦ダンパーに対して、より大きな摩擦係数を有する摩擦すべり挙動と安定した復元力特性を発揮するダンパーの開発を行う。各種要因を変数とする摩擦すべり部分の挙動を把握する目的で、このダンパーを組み込んだ加振フレームの動的載荷実験を行っている。

2. 実験方法

2.1 試験体及び実験条件

図 1 に本実験で使用した摩擦試験体部分の形状・寸法を示す。試験部分では、薄いアルミニウム合金板と鋼材を一对にして挟み込み、アルミニウムと鋼の接触面による滑りと摩擦によるエネルギー吸収を期待している。接合には、呼び径 M22 高力六角ボルト数本により中央の母材を 2 枚の添板で挟む 2 面摩擦接合形式のすべりダンパーとした。試験部分となる摩擦部には、母材と添板の間に厚さ 5mm のアルミニウム合金板を挿入した。母材および添板は、それぞれ厚さ 22mm, 12mm の鋼板 (SS400) とし、ボルト孔として母材には稼動時に締め付けボルトと母材孔縁との接触を避けるために直径 24mm, 長さ 600mm の長穴を、添板には直径 24mm のボルト孔を設けた。母材 (鋼板) と摺動材 (アルミ合金板) の接触面は、母材側はサンダーがけをして軽く荒らした状態、一方のアルミ材は表面加工を施さない圧延面 (素面) のままとした。

摺動中に母材と摺動材が溶解固着すると、摺動材



摩擦部の断面詳細図

図 1 試験部分詳細図

表 1 試験体諸元

記号	ボルト本数 (本)	ゴムワッシャー (個)	アルミ材種	ボルト軸力 (kN)	振動数 (Hz)	パラメータ
S1-1s-100-0.4-1050	1	1	A1050P	100	0.4	基本タイプ
S2-1d-100-0.4-1050	1	2	A1050P	100	0.4	ゴムワッシャー個数
S3-1s-100-0.4-2017	1	1	A2017P	100	0.4	アルミ材種
S4-1s-200-0.4-1050	1	1	A1050P	200	0.4	摩擦面圧
S5-2s-100-0.4-1050	2	1	A1050P	100	0.4	ボルト本数
S6-2s-100-0.4-2017	2	1	A2017P	100	0.4	ボルト本数・アルミ材種
S7-1s-100-0.8-1050	1	1	A1050P	100	0.8	振動数
S8-4s-50-0.8-2017	4	1	A2017P	50	0.8	ボルト本数・面圧
S9-2s-100-0.4-1050	2	1	A1050P	100	0.4	再現性

S1-1s-100-0.4-1050
 ボルト本数: 1:1本, 2:2本, 4:4本
 ゴムワッシャー個数: s:1個, d:2個
 ボルト軸力: 50:50kN, 100:100kN, 200:200kN
 振動数: 0.4:0.4Hz, 0.8:0.8Hz
 アルミ材料: 1050:A1050P, 2017:A2017P

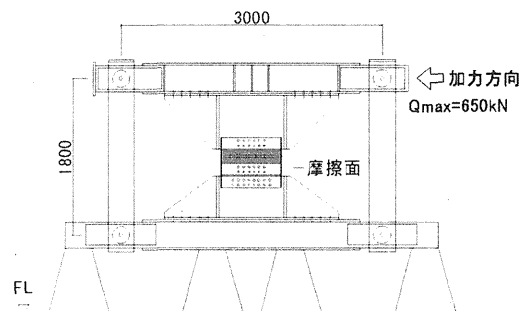


図 2 加振フレームとダンパー取り付け

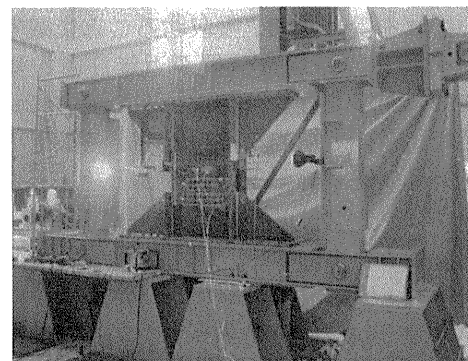


写真 1 加振フレームと摩擦ダンパー

の孔縁が締め付け用ボルトに接触し、そのような状態で摺動を生じると摺動材の固着部の大きな切削や摺動材の破断が発生し、ボルト張力の低下を誘発する。このような現象を回避するために、締め付け用ボルトに皿バネや皿ワッシャーを挟むダンパーが提案されているが⁶⁾、本研究ではゴムワッシャーを使用することで、ボルト張力の変動が起こらないよう工夫した。ゴムワッシャーは、直径約90mmの鋼管から内面を削りだして製作し、内部にゴムを充填し、鋼板 (SS400) で塞いだものであるが、M22の締め付けボルト1本当りの導入軸力200kNに対して、2面摩擦のダンパーは約400kNのせん断耐力を発揮できる点が特徴である。さらに、ゴムワッシャーの直径約90mmであるが、ボルト径22mmに対して4倍程度の空間的拘束を与えることに対して、ゴムワッシャーがない場合に対しておよそ3倍のすべり係数が期待できるので、コンパクトながら大きな力が発揮できる点も特徴と言える。本実験では、ゴムワッシャーを取り付けることによって、常に摩擦面の拘束圧を一定に保持したままアルミ板と鋼板を締め付け、安定した摩擦力と復元力特性を発揮することを確認する。

実験パラメータとしては、表1に示すように、挿入するアルミ種類 (A1050P, A2017P)、摩擦面の面圧 (ボルト本数1~4本, 初期導入ボルト軸力1本あたり 50, 100, 200kN)、フレームの加振振動数 (0.4Hz, 0.8Hz) を設定した。この他に、高力ボルトの軸力の安定性を確認する目的で、ゴムワッシャーの個数 (1個, 2個) による違いをみる実験と、加振の再現性を確認するために同一パラメータで再度実験を行った試験体も計画した。試験体名称は、表1下に示す通りであるが、本論では、簡単のために通し番号のみで試験体名を表記して区別する。

2.2 加力方法

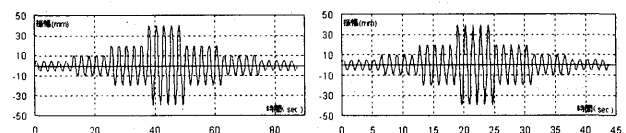
加振は、摩擦ダンパーを組み込んだ4ピンの柱梁フレームに対して動的1000kNアクチュエーターに

より正負繰返しの強制変位を与えた。図2および写真1に加振装置を示す。

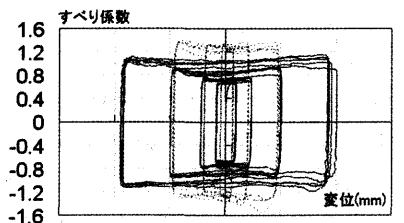
図3に与えた強制変位の時刻歴波形を示す。試験体S1~S9までの9体の試験体に与えた加振波は、いずれも正弦 (sin) 波とし、2種類の振動数 0.4Hz (加振波 W1) と 0.8Hz (加振波 W2) とした。振動数 0.4Hz の波形は、約 20 階~30 階程度の超高層建物を、振動数 0.8Hz の波形は、約 10 階程度の中高層建物を、それぞれ想定して設定した。加力フレームの目標水平変位は、振動数 0.4Hz, 0.8Hz とともに 5, 10, 20, 40, 20, 10, 5mm と順次変化させ、同振幅で各 5 回の繰り返しを行った。ただし、S2 試験体だけは、最大振幅 60mm まで加振した。すなわち、5, 10, 20, 40, 60, 40, 20, 10, 5mm と振幅を変化させ、同振幅で各 5 回の繰り返しとした。

2.3 計測方法

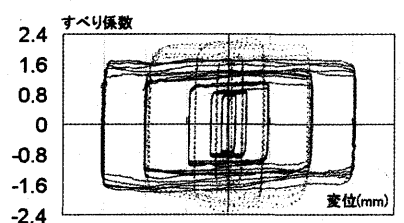
加振中の強制変位によって生じる荷重、フレームの層間変形、および摩擦面近傍のせん断変形、そして摩擦面を拘束する締め付け用高力ボルト張力の変化をそれぞれ計測した。なお、強制変位によって生じる荷重はアクチュエーターに取り付けたロードセルによる計測し、フレームの層間変位は、上下水平梁の相対変形として計測した。また試験部分 (摩擦部) の変形は、母材と添板の相対変形として計測した。さらに、ボルト張力は、高力ボルトに埋め込んだひずみゲージにより計測したひずみ測定値から換算して求めた。なお加振はアクチュエーター制御用コントローラーの関係から、アクチュエーター内蔵の変位計で目標とした時刻歴波形を満足するように、プログラムを組んで制御した。



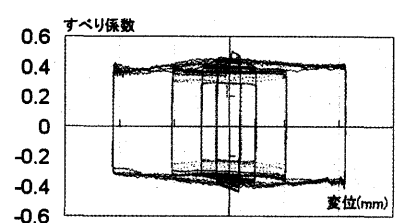
(a)W1:0.4Hz sin 波 5 回 (b)W2:0.8Hz sin 波 5 回
図3 時刻歴波形



(a)S1-1s-100-0.4-1050



(b)S2-1d-100-0.4-1050



(c)S3-1s-100-0.4-2017

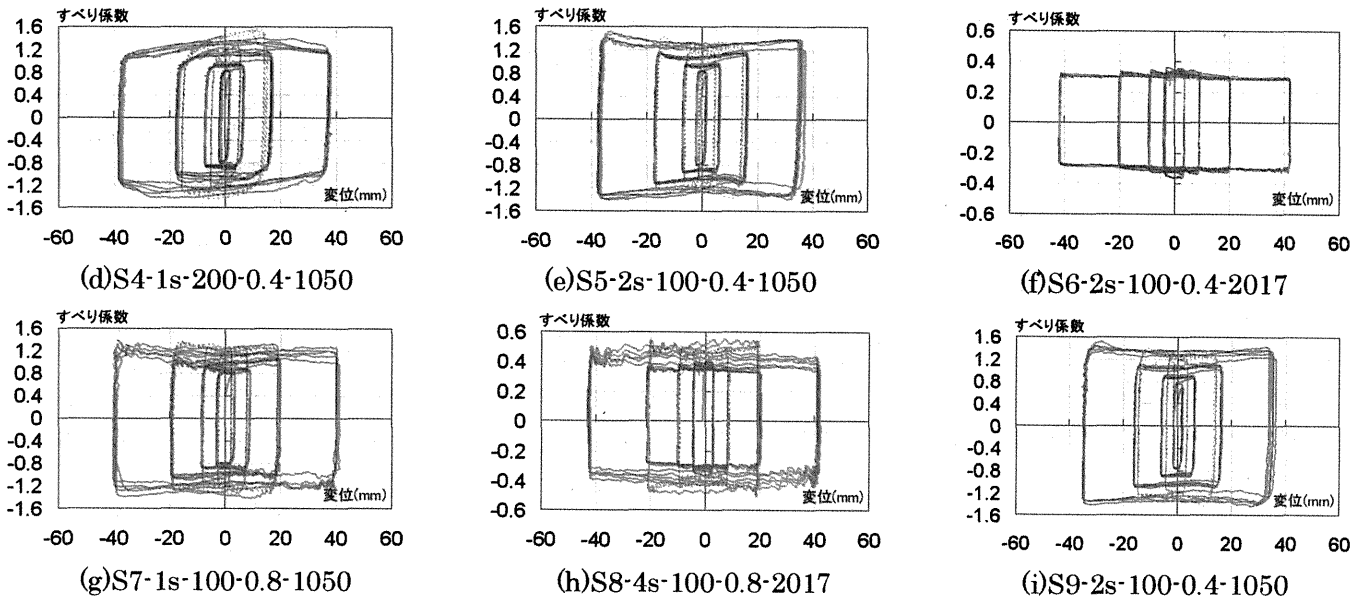
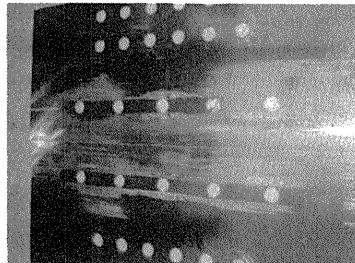


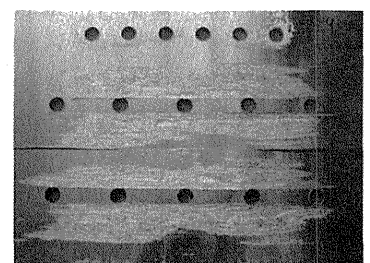
図4 各試験体のすべり係数-変位関係



(a)S1-1s-100-0.4-1050



(b)S8-4s-100-0.8-2017



(c)S5-2s-100-0.4-1050

写真2 実験終了後のアルミの損傷状況

3. 実験結果

3.1 すべり係数と変位の関係

本論では、当該すべりダンパーの繰り返し摺動時摩擦力を、すべり係数 μ によって評価する。すべりダンパーの摩擦力の評価にすべり係数を利用する理由は、繰り返し摺動時すべり係数に初期ボルト張力を乗じて摩擦力を計算することで、繰り返し摺動時の摩擦係数及びボルト張力の変化をそれぞれ考慮する煩雑さを避けるためである。高力ボルト摩擦接合の摩擦力の計算は、次式で表される⁷⁾、

$$F = m \cdot \mu \cdot N_i \quad (1)$$

ここに、 F ：摩擦力、 m ：摩擦面数（本論では2）、 μ ：すべり係数、 N_i ：初期導入ボルト張力

図4に、すべり係数-変位関係を示す。横軸の変位は、母材と添板（アルミ材）間の摩擦部分近傍の相対変位量である。また、縦軸のすべり係数は、式(1)より、ロードセルにより計測された荷重値を初期導入ボルト張力と摩擦面数(2)で除した μ 値を表している、実線部は、加振波の漸増部（5. 10. 20. 40mm）を、点線部は、漸減部（20. 10. 5mm）をそれぞれ表している。

いずれの試験体でも、繰り返し摺動中にすべり係数は

安定しており、摺動材に純アルミニウム A1050P を用いた試験体では、同一振幅の繰り返しではあまり変化しないものの、振幅が大きくなるに従って、すべり係数は少しずつ増加し、最大振幅時には、おおよそ 1.0 ~ 1.2 となる。一方、アルミ合金板に A2017P を用いたものは、同一振幅繰り返し、振幅の増減にかかわらず、0.3~0.4 程度のすべり係数で安定したループを描いている。

また、アルミニウムを摺動材とした全て試験体で、摺動時に大きな摺動音は発生せず、ほぼ無音で摺動する性状を示した。

3.2 摩擦面の状況

写真2に、実験終了後に取り外したアルミニウム板のうち、代表的な3例を示す。A1050Pを用いたすべての試験体では摩擦面のアルミ材が溶け、母材となる鋼材側に溶着していた。この溶着の程度は、摩擦面の拘束圧が大きいほど、また振動数が大きいほど激しかった。一方、A2017Pの高強度アルミニウム合金板を用いた試験体は、表面に擦れた傷が付く程度で、アルミ材が溶けた形跡は見られなかった。

加振中は摩擦面でアルミがどのような状態になって

いるか確認する方法はないが、乾燥した固体表面の摩擦は、固体の表面の状態にかかわらず、固体の素地そのものの強い凝着（原子レベルの付着によるもの）が起こるため、この部分のせん断力が摩擦力の本質的なものだとする考え方がある（凝着説）⁹⁾。実験終了後のアルミ材の溶解の状況を見ると、特に強度の弱いA1050Pを摺動材に使用した実験で顕著であるが、加振中は半溶解したアルミが層を形成し、その部分のせん断抵抗を發揮していると考えられることができる。

4. すべり係数の評価法

ここでは、各種パラメータが、ダンパーのすべり係数に及ぼす影響を検討する。

4.1 ゴムワッシャーの影響 (S1, S2)

ゴムワッシャーを片面のみ付けた S1 試験体と、両側につけた S2 試験体を比較する。ゴムワッシャーは直径 90mm の鋼管を使用して製作しているため、その断面積は約 6400mm² である。一方、ゴムワッシャーをつけない側は、直径 28mm の鋼製ワッシャーを介して六角ナットで締め付けるため、その断面積は約 2500mm² である。したがって、ゴムワッシャーがある面では、接圧面積が非常に大きくなり、摩擦面の拘束が強くなることが予測される。試験後のアルミ表面の状況を見ると、S1 に比べると、S2 の方がアルミの溶解は激しく、S1 でもワッシャーがついた面のアルミ材の溶解が激しかった。図 5 に両試験体のボルト軸力の推移を示す。S2 は、ボルト軸力の変動が S1 に比べると非常に大きいことがわかる。S1, S2 ともに、始めは 90kN 程度まで低下するが、その後徐々に大きくなる。

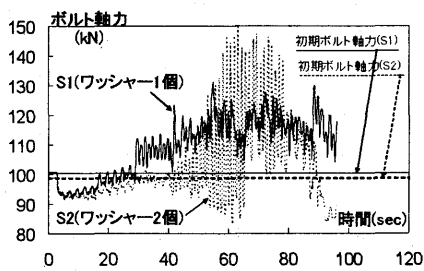


図 5 ボルト軸力の推移 (S1 と S2)

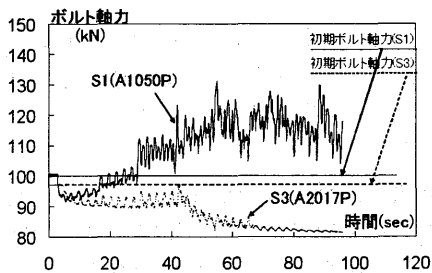


図 6 ボルト軸力の推移 (S1 と S3)

S1 は 110-120kN 程度で安定して推移するが、S2 は 80-150kN の範囲で激しく変動していることがわかる。初期軸力 100kN の 1.5 倍にまでボルト軸力が上昇することは、ボルト張力管理の点から好ましくない。図 4(b) に示されるように、S2 試験体のすべり係数は 2.3 程度まで上昇するが、S1 に比べると不安定なループを描いていることがわかる。

以上のことから、A1050P を摺動材に用いたダンパーにおいて履歴ループが安定し、一定のすべり係数を得るためには、ゴムワッシャー 1 個を用いることが適切であることが確認できた。

4.2 摺動材 (アルミ材種) の影響 (S1, S3)

吉岡³⁾が指摘しているように「A1050P はすべり係数は大きい、A2017P の方が安定している。」という結果が、本実験でも同じ傾向が確認できた。A1050P の場合、加振毎にすべり係数は、0.8 から 1.3 に上昇したが、A2017P の場合、逆に、0.5 から 0.35 に低下した。図 6 に示す S1 と S3 試験体のボルト軸力の推移を見ると、A1050P の S1 試験体は、加振直後少し低下するものの、徐々に上昇し、加振終了まで常に初期ボルト張力より高く推移した。これに対し、A2017P の S3 試験体は、初期ボルト張力が 100kN であったが、徐々に低下し、特に加振波の漸減時に急激に低下し、80kN にまでなった。

4.1 でも考察したように、強度の低い A1050P は、摺動に伴い溶解し、半固体の状態になると考えられる。そのため体積が膨張するので、ボルト張力は大きくなるが、ゴムワッシャーによる低剛性の拘束により締め付けボルトは弱く拘束されているので、振幅の増大と繰り返し摩擦を重ねることによって、せん断抵抗が

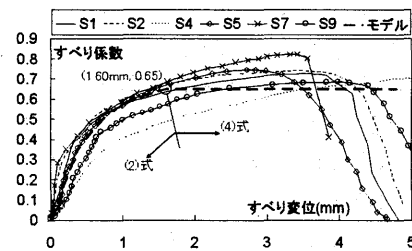


図 7 初摺動時の挙動 (A1050P の場合)

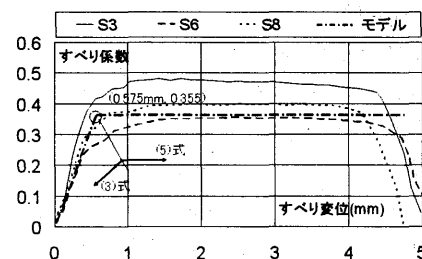


図 8 初摺動時の挙動 (A2017P の場合)

徐々に増大すると考えられる。

4.3 摩擦面圧の影響 (S1, S4, S5/S3, S6, S8)

摩擦面の面圧が、繰り返し摺動時すべり係数に与える影響を検討する。始めに、アルミ材として A1050P を用いた場合を考える。S1 は、ボルト本数が 1 本 100kN の面圧、これに対し、S4 は、ボルト 1 本 200kN と、S1 の倍の面圧が摩擦面に作用する。面圧が高くなることで、摺動に必要な抵抗力は大きくなるが、その程度は面圧に比例している。すなわち、すべり係数は変わらない。

ボルト 1 本当たりの初期導入張力は 100kN であるが、ボルト本数を 2 本とした S5 は、S4 と同じ面圧 200kN が摩擦面に作用している。この S4 と S5 を比較すると、小振幅時は履歴がほぼ同じであるが、大振幅時に違いがあることがわかる。これは、ボルトが 1 本の場合 (S4)、摩擦面が回転変形しやすくなること、逆にボルト本数が 2 本の場合には、大変形時に締め付けボルトが長孔の孔縁に接触し、指圧抵抗で荷重がやや上昇している事が考えられる。

次に、摺動材として A2017P を用いた、S6 と S8 の場合について検討する。S6 試験体はボルトが 2 本で、ボルト 1 本当たり 100kN を導入しており、S8 試験体はボルト 4 本で、導入軸力は 50kN なので、両試験体とも計 200kN の面圧力が摩擦面に作用している。先に述べた A1050P の場合と同様、小振幅時は履歴がほぼ同じであるが、大振幅時には、ボルトが 4 本 (S8) の場合、不安定な履歴を示している。また、大振幅時にすべり係数がやや高くなっていることから、締め付けボルトが長孔の孔縁に接触し、支圧抵抗していることが考えられる。

4.4 振動数の影響 (S1, S7)

加振波の振動数の違いが、すべり挙動に及ぼす影響について検討した。振動数 0.4Hz の加振波 W1 で実験した S1 と、0.8Hz の加振波 W2 の S7 を比較したが、振動数による影響はないと考えられる。

4.5 再現性 (S5, S9)

S5 と S9 は全く同じ条件の実験を行ったものである。履歴ループはほとんど同じ形状となり、確かな再現性を示すダンパーであることが確認できた。

5. 復元力特性

本研究で開発した摩擦ダンパーを、実構造物における制震装置として組み込むために、このダンパーの履歴モデルを提案する。

建物の変形が大きいほど吸収するエネルギー量は増えるが、ダンパーが効き始める (材料が降伏して塑性域に入り、ループを描き出す) 変形量を、適切に設定する必要がある。そこで、繰り返し摺動時すべり係

数の変化の特徴を、加振開始時からダンパーが動き出し、塑性域に入るまでの範囲と、その後安定したループ描き実験終了までの範囲に分けてモデル化する。ただし、本報では、加振波の漸増部のみを評価しモデル化する。

5.1 初摺動時のモデル化

図 7, 8 に、実験開始から摩擦接合部がすべり、5mm までのすべり係数-すべり変位関係を示す。摺動材として使用したアルミニウム合金板毎に、2 つに分けて示してあるが、実験パラメータが異なっても、初摺動時の挙動はアルミ材種による違いはないことがわかる。

A1050P を摺動材に用いたシリーズ 6 実験の内、他とは少し応答が異なる S4 を除いた、5 体の実験から得られた曲線をもとに、回帰計算し平均的なモデルを算定した。

$$\mu_{i(1050)} = a\delta^5 + b\delta^4 + c\delta^3 + d\delta^2 + e\delta + f \quad (2)$$

ここに、 $\mu_{i(1050)}$: 初摺動時のすべり係数 (A1050P の場合)

δ : すべり変位 (mm)

係数(a, b, c, d, e, f) = (8.67×10⁻³, -1.14×10⁻¹, 5.26×10⁻¹, -1.13, 1.29, 0.0)

次項の考察を踏まえ、A1050P のモデル化では、第一サイクル 5mm ではすべり係数を 0.65 としたので、初摺動開始からすべり変位 1.6mm までは、(1)式により加振初期の挙動を示し、それ以降は、次項の履歴モデルに従って挙動することとする。

次に、摺動材に A2017P アルミニウム合金板を使用した実験シリーズでは、塑性域のすべり係数に少し差が見られるものの、おおよそ完全弾塑性型の挙動が確認できるので、簡単にバイリニア型にモデル化することとした。初期弾性剛性は、3 体の試験体でほぼ同じであり、初期摺動時の挙動は次式で表すこととした。

$$\mu_{i(2017)} = E_{2027} \times \delta \quad (3)$$

ここに、 $\mu_{i(2017)}$: 初摺動時のすべり係数 (A2017P の場合)

δ : すべり変位 (mm), E_{2027} : 初期剛性 (=0.617)

A1050P モデルと同様、次項の考察を踏まえ、A2017P モデルでは、接合面が降伏してすべり係数が安定する時の値は 0.355 としているので、すべり変位 0.575mm で塑性域に入り、それ以降次項に示すように一定のすべり係数を維持して履歴挙動を示す、バイリニア型のモデルを提案する。この関係を、図 8 中に一点鎖線で示す。

5.2 摩擦ダンパーのモデル化

図 9 に、初摺動開始から実験終了までの 1 サイクル毎の平均すべり係数と最大振幅の関係を示す。1 サイクル毎の平均すべり係数とは、1 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当該サイクルの振幅を2倍した値で除したものである³⁾。ここに記したのは、□印はアルミ材質 A1050P の場合 (S1 試験体)、○印は A2017P の場合 (S3 試験体) であり、本実験では、各振幅で5回の繰り返し加振を行っているため、プロットした点は5回の平均値とし、それぞれサイクルのばらつきを誤差範囲表示として示してある。アルミ材種 A1050P の場合は、振幅が大きくなるに従って、すべり係数も大きくなっている。一方、A2017P の場合は、振幅にかかわらずほぼ一定のすべり係数で安定している。また、各サイクル5回の繰り返しにおけるばらつきは A1050P の方が大きく、A2017P は振幅にかかわらず、安定したすべり係数を維持していることがわかる。

それぞれの材種で回帰曲線を算定する。A1050P を用いた場合は(4)式、A2017P を用いた場合は(5)式ですべり係数を表す。

$$\mu_{(1050)} = a\delta_A^3 + b\delta_A^2 + c\delta_A + d \quad (4)$$

ここに、 $\mu_{(1050)}$: A1050P を用いたときのすべり係数
 δ_A : 振幅 (mm)

係数 (a, b, c, d) = $(-4.18 \times 10^{-6}, 2.53 \times 10^{-4}, 6.41 \times 10^{-3}, 6.48 \times 10^{-1})$

$$\mu_{(2017)} = 0.355 \quad (\text{一定}) \quad (5)$$

ここに、 $\mu_{(2017)}$: A2017P を用いたときのすべり係数
 A1050P を摺動材に用いたダンパーの概要を模式図で示す (図 10)。振幅が大きくなる時、すなわち $\delta_{A1} \leq \delta \leq \delta_{A2}$ の範囲では、前振幅 ($-\delta_{A1} \leq \delta \leq \delta_{A1}$) のすべり係数 $\mu(\delta_{A1})$ を保ちながら、変位が増大する。

5.3 実験結果とモデルの比較

先の実験結果を踏まえて、制震ダンパーの復元力特性は、完全剛塑性型でモデル化した。図 11, 12 に提案した復元力特性と S1, S3 試験体漸増部の実験結果を重ねて比較する。ともに、おおよそ提案したモデルで実験結果を再現できていることが確認できる。

6. まとめ

本論では、摩擦すべり挙動の安定のために、ゴムワッシャーを使用した高力摩擦すべり型制震ダンパーの開発を目的とし、摺動材としてアルミニウムを用いた摩擦すべり接合試験体の動的加振実験を行った。実験によって得られた結果は、次の通りまとめられる。

- ① アルミニウムと鋼材による高い摩擦係数により、大容量まで対応することが可能となる。また M22 の高力ボルト1本当たり約 400kN のせん断耐力を負担できる点が特徴である。
- ② 高力ボルト軸力の変動を一定に保つゴムワッシャーにより、摺動材としてのアルミ材種にかかわらず、安定した履歴性能を発揮できる。また、ゴムワッシャーが無い場合に対して、約3倍のすべり

係数が期待できるので、ダンパーのサイズをコンパクトに出来る。このために、制震ダンパーが大地震時あるいは火災で損傷を受けた際に、補修または取り替える必要がある場合は、作業が容易になることが期待できる。

- ③ ダンパーがすべる時の音がほとんどない。
- ④ 初摺動時の挙動として、A1050P 純アルミを摺動材に用いた場合は、(2)式の非線形型のモデルを、A2017P アルミニウム合金を用いた場合は、(4)式の線形モデルで表すことができる。
- ⑤ ダンパーが塑性域に入り、安定したループを描く範囲のモデルは、完全剛塑性型でモデル化できる。A1050P の純アルミを使用した場合、そのすべり

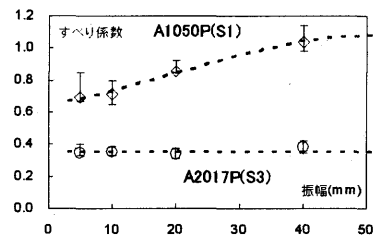


図9 サイクル毎のすべり係数の変化

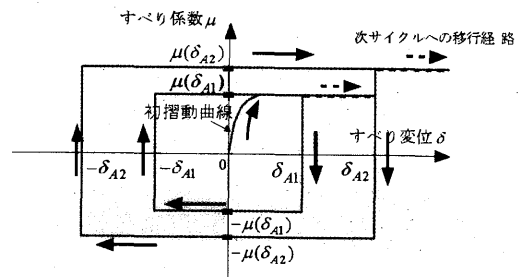


図10 履歴モデルの概略 (A1050P の場合)

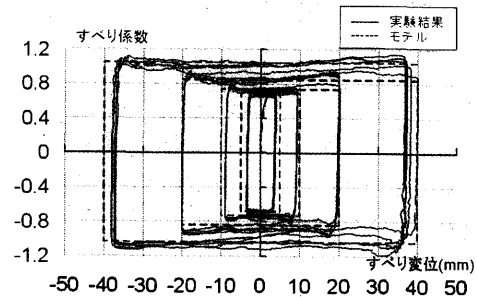


図11 モデルと実験の比較 (S1 試験体 ; A1050P の場合)

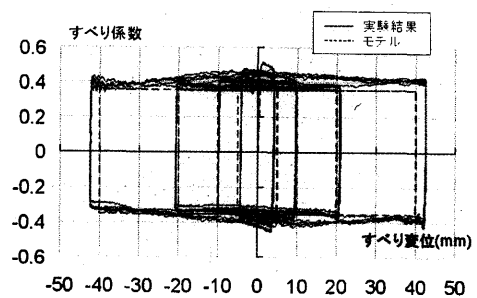


図12 モデルと実験の比較 (S3 試験体 ; A2017P の場合)

係数は(3)式で与えることができ、すべり係数は0.65以上となり、すべり係数は変位量に依存する。A2017P のアルミ合金を使用した場合、その履歴モデルは(5)式で与えることができ、すべり係数は0.355 で安定する。

謝辞 本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO 技術開発機構）による「産業技術実用化開発助成事業（一般企業向）」の補助を受けて行われた。本実験の遂行において、福山大学学部生（当時）竹縄哲也君、山本英司君の協力を得ました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、建築防災 特集『既存鉄筋コンクリート造建築物の免震・制震による耐震改修ガイドライン』、(財)日本建築防災協会、2006年3月号
- 2) 例えば、清水建設免制震研究会著：耐震・免震・制震のわかる本、彰国社、1999.
- 3) 吉岡智和：高力ボルト摩擦すべり接合に関する研究 その1. アルミニウム合金板を摺動材に利用した接合要素実験、日本建築学会構造系論文集、第573号, pp.217-222, 2003.11
- 4) 吉岡智和：高力ボルト摩擦すべり接合に関する研究 その2. 銅合金板を摺動材に利用した接合要素実験、日本建築学会構造系論文集、第579号, pp.119-123, 2004.5
- 5) 吉岡智和：高力ボルト摩擦すべりダンパーの履歴特性を応用した建築耐震構造に関する開発研究、九州大学博士論文、2004
- 6) 佐野剛志、鈴井康正、日野泰成、高橋泰彦：高力ボルト摩擦接合滑りダンパー(ブレーキダンパー)の開発、大林組技術研究所報、No.62, pp.13-20, 2000
- 7) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、丸善、2001
- 8) 曾田範宗：摩擦の話、IV摩擦のメカニズム、pp.121-180, 岩波新書、1971