

改良型ブレーキダンパーの開発

鈴井 康正 佐野 剛志
野村 潤 内海 良和
(本社建築本部) (本社建築本部)

Development of Advanced Brake Damper

Yasumasa Suzui Takeshi Sano
Jun Nomura Yoshikazu Utsumi

Abstract

“Brake Damper” is a friction-slip damper using high-tension bolts. It was developed in the latter half of the 1990s, and has been applied to many buildings. During an earthquake, the Brake Damper absorbs a building’s vibration energy using the frictional energy consumed by a brake pad and a stainless plate fastened with the high-tension bolts. This paper presents a new brake pad reinforced by a steel plate, which improves the frictional performance of the Brake Damper. Furthermore, it presents two new types of Brake Dampers with fourfold shear faces, which increase the magnitude of the sliding load of the Brake Damper and make it compact. Basic performance of new types of Brake Dampers has been confirmed by the dynamic loading tests.

概要

大林組は1990年代後半に架構内のボルト接合部にブレーキ材とステンレス板を一對にして挟み込み、地震時の建物の振動エネルギーを摩擦熱に変換することにより、建物の応答を低減する高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（以下、ブレーキダンパーと称す）を開発し、既に多くの建物に適用している。今回、摩擦性能の安定化と生産性・施工性の向上を目的として、ブレーキ材の固定面を鋼板で補強した強化型摩擦板を新たに考案し、強化型摩擦板を組み込んだブレーキダンパーの基本性能を要素試験体による加振実験で確認した。さらに、本ダンパーの高荷重化・コンパクト化を目的として、摩擦面を増設した4面摩擦ブレーキダンパーを2種類（基本型、パイプ利用型）考案し、基本性能を確認するために要素試験体を用いた加振実験を実施した。その結果、摩擦面を増設した場合においても、本ダンパーは安定したエネルギー吸収性能を有することを確認した。

1. はじめに

建物の主架構内に組み込んだ制震デバイスにより建物の損傷や応答を制御する技術が各方面で開発されている。大林組は1990年代後半より高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（以下、ブレーキダンパーと称す）の開発に着手し、多くの実験によりエネルギー吸収性能を確認し、実建物への適用を重ねてきた^{1)~4)}。最近では適用範囲の拡大に伴い、より一層の性能向上（摩擦性能の安定化、ダンパーの高荷重化・コンパクト化など）が要望されている。

今回、摩擦性能の安定化と生産性・施工性の向上を目的として、ブレーキ材の固定面を鋼板で補強した強化型摩擦板を新たに考案した。この強化型摩擦板を組み込んだブレーキダンパーの基本性能を確認するために加振実験を実施したので、その結果について報告する。

さらに、ダンパーの高荷重化・コンパクト化を図るために、摩擦面を増設した4面摩擦ブレーキダンパーを2種類（基本型、パイプ利用型）考案した。考案したダンパーの基本性能を確認するために要素試験体を用いた加振実験を実施したので、その結果について併せて報告する。

2. ブレーキダンパーの基本的な構成と特徴

従来から使用しているブレーキダンパーの基本的な構成をFig. 1に示す。ブレーキダンパーはブレースや間柱などの耐震要素内や耐震要素と主架構との接合部の中板と外板の間にブレーキ材とステンレス板とを一對にして挟み込んだ制震システムである。自動車等のディスクブレーキの技術を応用しており、一定の滑り荷重で摺動することで建物の振動エネルギーを摩擦熱に変換し、建物の

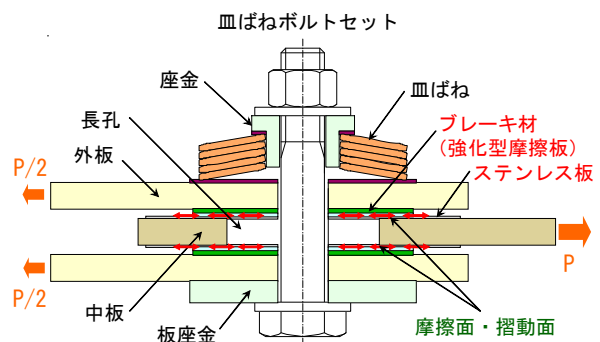


Fig. 1 ブレーキダンパーの基本的構成
Basic Composition of Brake Damper

応答や損傷を低減することが可能である。

安定した滑り荷重（摩擦力）を得るためには安定した摩擦係数が得られる材料（ブレーキ材とステンレス板）を用いるとともに、ダンパー作動時に摺動摩擦面の面圧を所定の範囲内に安定させる技術が必要となる。ブレーキダンパーの摺動摩擦面は皿ばね⁵⁾を介した高力ボルト（以下、皿ばねボルトセットと称す）で締め付けるため、ブレーキ材の磨耗等に伴い、ボルトの締め付け長さが多少変化しても、軸力の変動を少なくすることができ、安定した摩擦減衰特性（復元力特性）を得ることができる。

ブレーキ材と外板間、ステンレス板と中板間の接触面はブレーキ材とステンレス板間の摺動面より摩擦係数が十分大きくなるように特殊な表面処理を施し、ブレーキ材とステンレス板を乾式で挟み込むだけで施工できるように工夫している。

3. 強化型摩擦板の開発

3.1 強化型摩擦板の構成と特徴

従来から使用しているブレーキ材の改良品として新たに考案した強化型摩擦板をPhoto 1に示す。強化型摩擦板は厚さ4.3mmで、ブレーキ材には摩擦係数の安定した複合摩擦材（フェノール系樹脂）を使用し、芯材である鋼板に加圧接着により固定している。加圧接着面と反対側の芯材表面には、摩擦係数が十分大きくなるよう特殊な表面処理を施し、強化型摩擦板を乾式で挟み込むだけで施工ができるようにしている。また、標準サイズ（150mm×150mm）にユニット化することにより、工場での生産性と建設現場での施工性を向上させている。

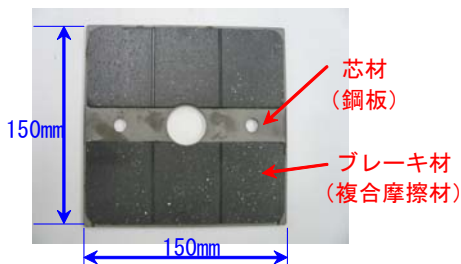
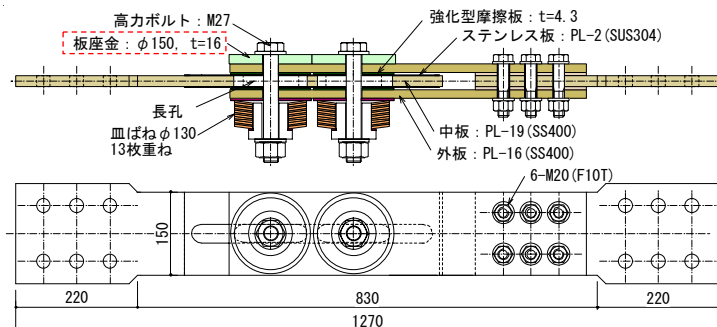


Photo 1 強化型摩擦板
Reinforced Brake Pad



※試験体N0-2-A: 板座金 (φ150) 使用, 試験体N0-2-N: 板座金 (φ150) 未使用

Fig. 2 試験体形状・寸法
Configuration and Dimensions of Test Specimens

3.2 加振実験によるダンパーの性能確認

3.2.1 実験計画

3.1節で述べた強化型摩擦板を組み込んだブレーキダンパーの基本性能を確認するために実施した加振実験について報告する。この実験では、ダンパー摺動面における摩擦係数の速度依存性を把握することが主な目的である。試験体形状・寸法をFig. 2に示す。高力ボルトM27と13枚並列重ねの皿ばね（外径130mm、内径65mm、板厚3.6mm）で構成した皿ばねボルトセットを使用した。ボルト1本あたりの目標導入軸力は166.6kNとした。予め皿ばねのたわみ量と皿ばね反発力との関係を確認し、皿ばねのたわみを計測することでボルト導入軸力の管理を行った。

試験体は2組の皿ばねボルトセット、強化型摩擦板、ステンレス板などで構成されている。ボルト導入軸力は計 $166.6 \times 2 = 333.2$ kNであり、摩擦係数を0.3、摩擦面数を2とすれば、目標滑り荷重は200kN（ $= 333.2 \times 0.3 \times 2$ ）である。試験体は、ボルト頭部と外板との間に板座金（外径150mm、板厚16mm）を使用したタイプ（試験体N0-2-A）、未使用のタイプ（試験体N0-2-N）の計2体である。

加振メニューをTable 1、加振波形をFig. 3に示す。500kN動的アクチュエーターにより試験体を伸縮させる方向に加振力を加えた。加振波形は正弦波で、立上がり部1波、定常部10波、減衰部1波を有する波形を1回の加振とした。各試験体について最大振幅±40mm、周期10、4、2、1、0.7secの加振を順に実施した後、再度2secでの加振を行った。

3.2.2 実験結果

加振状況をPhoto 2、ダンパーの滑り荷重—滑り変位関係の例をFig. 4に示す。2つの試験体でほぼ同様の傾向を示したので、Fig. 4には試験体N0-2-A

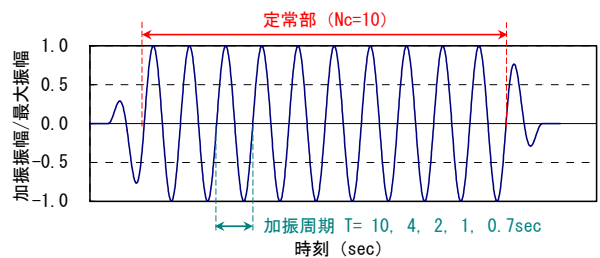


Fig. 3 加振波形
Excitation Wave of Test

Table 1 加振メニュー
Program of
Excitation Test

試験 No.	周期 T (sec)	振幅 δ (mm)	サイクル数 Nc (回)
1	10	±40	10
2	4		
3	2		
4	1		
5	0.7		
6	2 (2回目)		

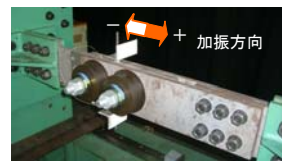


Photo 2 加振状況
View of Excitation Test

※加振メニューは試験体N0-2-A, N0-2-Nで共通

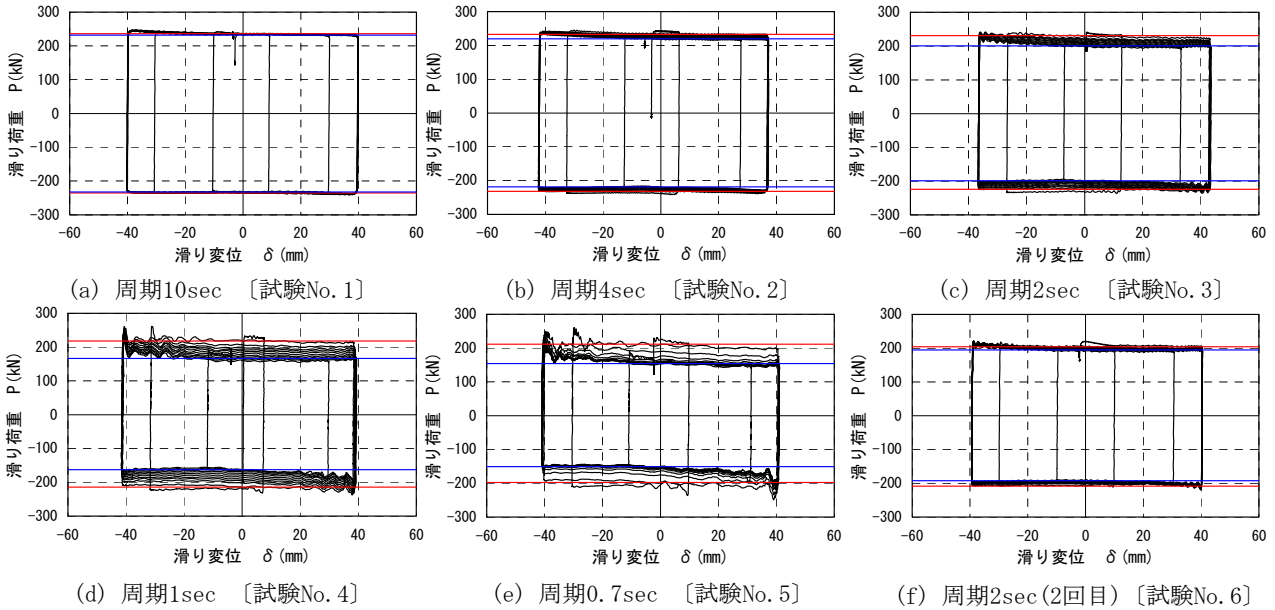


Fig. 4 滑り荷重(P)－滑り変位(δ)関係 (試験体N0-2-A)
Sliding Load P vs. Sliding Displacement δ

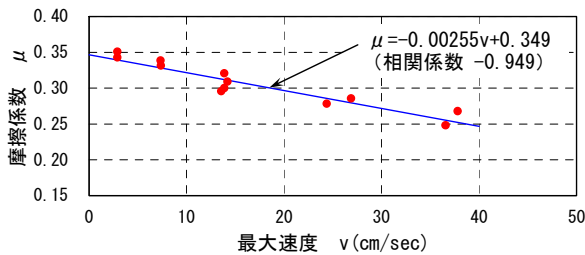


Fig. 5 摩擦係数 (μ)－最大速度 (v) 関係
Frictional Coefficient μ vs. Maximum Velocity v

の結果を示している。同図には、定常部におけるダンパーの滑り変位が0 (原点位置) の時の滑り荷重の最大値、最小値をそれぞれ赤線、青線で併記している。同図より、本ダンパーは周期によらず安定した剛塑性型の履歴特性を示すこと、周期が短くなる (すなわち、最大速度が大きくなる) につれて滑り荷重が若干低下することがわかる。また、周期0.7secの加振 (試験No.5) の際に滑り荷重は若干低下するが、その後、一定の時間間隔を設けて周期2.0secの加振 (試験No.6) を実施すると、滑り荷重は以前に経験した同一周期での加振 (試験No.3) 時とほぼ同じ大きさにまで回復した。

ダンパーの摩擦係数と最大速度との関係をFig. 5に示す。摩擦係数を評価する際の滑り荷重は、定常部での滑り荷重－滑り変位関係において変位が0 (原点位置) の時の荷重の平均値、ボルト軸力は初期導入軸力とした。同図によると、摩擦係数は最大速度の増加とともにほぼ線形的に低下するが、その低下量は比較的小さい。

4. 4面摩擦ブレーキダンパーの開発

4.1 4面摩擦ブレーキダンパーの構成と特徴

ダンパーの高荷重化・コンパクト化を目的化として考

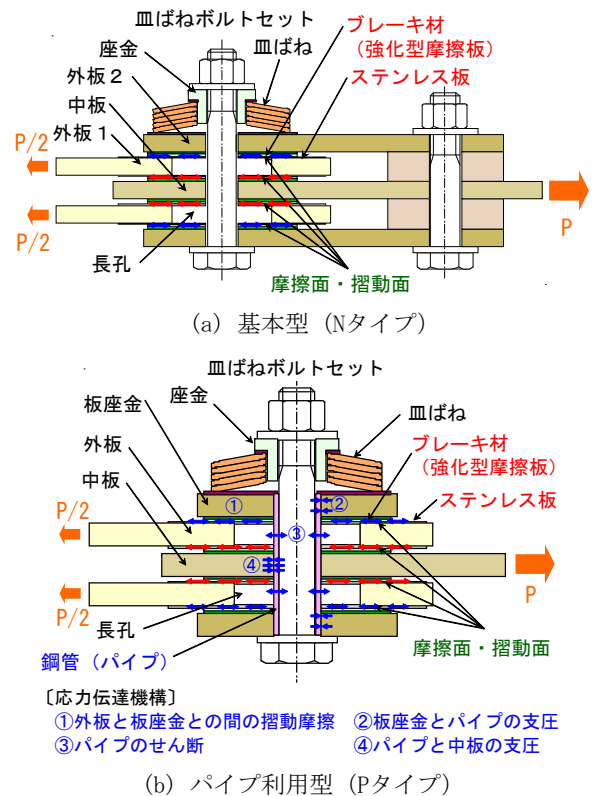
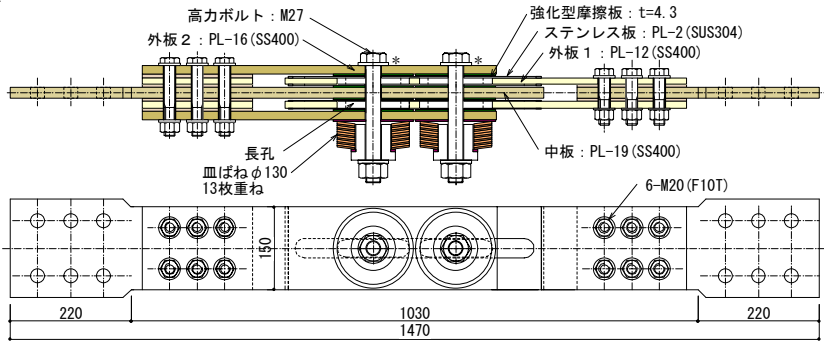
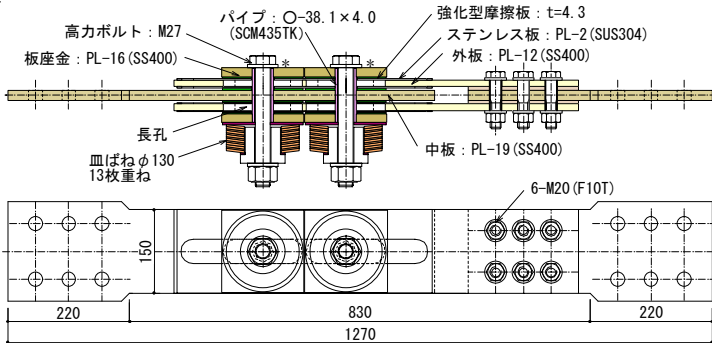


Fig. 6 4面摩擦ブレーキダンパーの構成
Composition of Fourfold Frictional Brake Damper

案した4面摩擦ブレーキダンパーの構成をFig. 6に示す。Fig. 6 (a) の基本型 (以下、Nタイプ) では、ダンパーに加わる荷重の全てを4つの摺動面の摩擦で直接伝達する。一方、Fig. 6 (b) のパイプ利用型 (以下、Pタイプ) では、滑り荷重の1/2を高強度の鋼管 (以下、パイプ) と中板および板座金との支圧を利用して伝達する。すなわち、Fig.



(a) 基本型 (Nタイプ) [試験体N-2]



(b) パイプ利用型 (Pタイプ) [試験体P-2]

※Nタイプの試験No. 6, Pタイプの試験No. 11では, *の箇所には板座金 (φ150, t=16) を使用

Fig. 7 試験体形状・寸法

Configuration and Dimensions of Test Specimens

6(b)において, 外板に作用する荷重の1/2を「①外板と板座金との間の摺動摩擦→②板座金とパイプの支圧→③パイプのせん断→④パイプと中板の支圧」により中板まで伝達する。従って, ボルトにせん断力は作用せず, 導入軸力を一定に保つことができる。また, PタイプではNタイプで必要な固定側高力ボルト継手を省略可能である。

4.2 加振実験によるダンパーの性能確認

4.2.1 実験計画 4.1節で述べた4面摩擦ブレーキダンパーの基本性能を確認するために要素単体を用いた加振実験を実施した。

試験体形状・寸法をFig. 7に示す。試験体はNタイプ1体 (試験体N-2), Pタイプ1体 (試験体P-2) の計2体である。各試験体は3章で扱った試験体と同様の高力ボルト, 皿ばねを使用した2組の皿ばねボルトセットで構成されている。ボルト導入軸力は計 $166.6 \times 2 = 333.2 \text{ kN}$ であり, 摩擦係数を0.3, 摩擦面数を4とすれば, 目標滑り荷重は $400 \text{ kN} (= 333.2 \times 0.3 \times 4)$ である。

Pタイプに使用するパイプは, クロムモリブデン鋼鋼管SCM435TK (JIS G3441)である (Photo 3参照)。クロムモリブデン鋼鋼管は一般に軽量かつ高強度であるため, 自転車のフレームなどに使用される。今回は焼入れ, 焼戻しによる熱処理を行い, 強度を高めたパイプO-38.1x4.0 (SCM435TK)を加振実験に使用した。パイプについては, 事前に引張試験, 曲げ試験を実施し, ダンパー摺動時に作用する荷重に対して十分な強度を有する



Photo 3 鋼管 (パイプ)
Steel Pipe

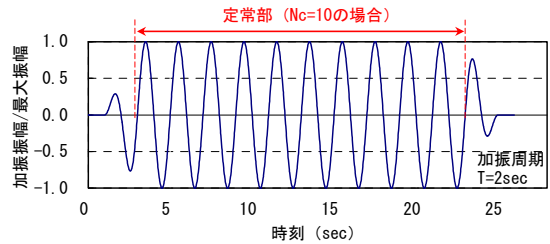


Fig. 8 加振波形
Excitation Wave of Test

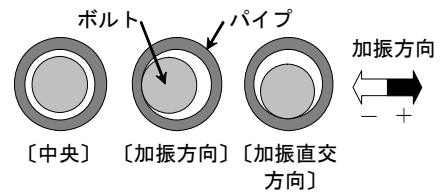


Fig. 9 パイプに対するボルトの偏り
Eccentric Disposition of Bolt
against Steel Pipe



(a) 基本型 (Nタイプ) (b) パイプ利用型 (Pタイプ)

Photo 4 加振状況
View of Excitation Test

ことを確認した。

加振メニューをTable 2, 加振波形をFig. 8に示す。加振周期を2secとし, 試験パラメータとして振幅, 板座金 (外径150mm, 板厚16mm) 使用の有無, ボルト導入軸力レベルなどを設定した。さらに, Pタイプでは, 実建物での施工を想定して, パイプに対するボルトの位置の偏り (Fig. 9参照) の影響についても調査した。

4.2.2 実験結果 加振状況をPhoto 4, 加振結果をTable 2, ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係の例をFig. 10に示す。目標ボルト導入軸力を166.6kNとした場合について, Nタイプ, Pタイプともに滑り荷重は400kN程度であり, 各加振ケースで安定した剛塑性型の履歴特性を示した。Pタイプでは, 滑り荷重の1/2をパイプと中板および板座金との支圧で伝達する。パイプと中板 (あるいは

板座金)の間には所定のクリアランスを設けており、荷重-変位関係係において滑り荷重の1/2付近(200kN程度)に実験計画時に想定した通りの荷重の棚を確認した。

各加振ケースにおける摩擦係数のばらつきをFig. 11に示す。同図には、摩擦係数0.3を青実線、および±10%の変動を示す青破線を併記している。実験で得られた摩擦係数は目標値0.3に対して概ね±10%の範囲に分布する。同図(a),(b)より、Nタイプ、Pタイプともに、最大振幅の増加とともに摩擦係数は若干低下する傾向があるが、板

座金(外径150mm, 板厚16mm)を使用して面圧の均一化を図ることにより改善する。また、同図(c)によると、Pタイプにおいてパイプに対するボルト位置の偏りがダンパー摺動面の摩擦係数に与える影響は小さい。

強化型摩擦板, ステンレス板の試験後状況の例をPhoto 5に示す。強化型摩擦板のブレーキ材が磨耗し, ステンレ

Table 2 加振メニューと加振結果
Program and Results of Excitation Test

(a) 基本型 (Nタイプ)

<共通条件> 入力波: 正弦波, 周期: T=2(sec), ボルト本数: n=2(本)

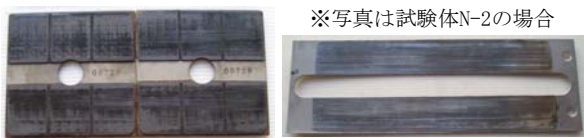
試験体名	試験No.	振幅 δ (mm)	サイクル数 Nc (回)	ボルト軸力 N/N ₀	板座金(φ150)の有無	滑り荷重 (kN)		摩擦係数 μ
						P(+)	P(-)	
N-2	1	±40	5	0.25	なし	82.0 64.5	81.1 72.0	(0.270)
	2	±40	5	0.5	なし	182.2 175.6	183.3 178.8	(0.295)
	3	±10	10	1	なし	453.5 431.2	422.5 404.8	0.321
	4	±20	10	1	なし	440.8 397.2	407.0 372.2	0.303
	5	±40	10	1	なし	423.2 345.8	383.4 323.3	0.277
	6	±40	10	1	あり	419.2 371.5	406.5 370.1	0.294

(b) パイプ利用型 (Pタイプ)

<共通条件> 入力波: 正弦波, 周期: T=2(sec), ボルト本数: n=2(本)

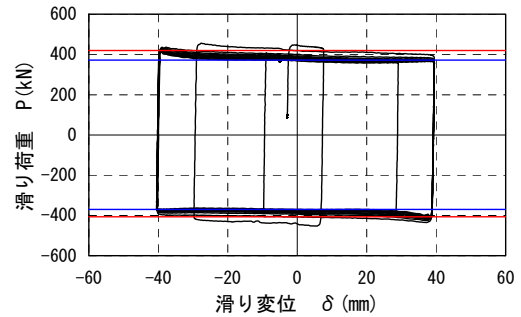
試験体名	試験No.	振幅 δ (mm)	サイクル数 Nc (回)	ボルト軸力 N/N ₀	パイプに対するボルトの偏り	板座金(φ150)の有無	滑り荷重 (kN)		摩擦係数 μ
							P(+)	P(-)	
P-2	1	±40	5	0.25	中央	なし	104.1 98.1	97.5 94.5	(0.290)
	2	±40	5	0.5	中央	なし	202.2 190.7	196.2 190.0	(0.286)
	3	±10	2	1	中央	なし	411.6 409.0	411.3 411.2	0.308
	4	±20	2	1	中央	なし	401.0 390.9	393.8 387.4	0.295
	5	±40	2	1	中央	なし	428.6 420.3	416.2 404.7	0.313
	6	±40	2	1	加振方向	なし	424.1 395.4	398.2 378.3	0.299
	7	±40	2	1	加振直交方向	なし	430.9 400.8	406.6 385.7	0.305
	8	±10	10	1	中央	なし	428.4 418.2	423.6 413.5	0.316
	9	±20	10	1	中央	なし	435.3 423.4	425.6 417.7	0.319
	10	±40	10	1	中央	なし	404.1 346.0	384.9 339.3	0.277
	11	±40	10	1	中央	あり	436.7 412.1	429.8 401.2	0.315

※N: 導入ボルト軸力, N₀: 設計ボルト軸力 (N₀=166.6kN)
※正側, 負側滑り荷重の 上段: 最大値, 下段: 最小値
※()内の摩擦係数は, ロードセルにより計測したボルト導入軸力を用いて算定

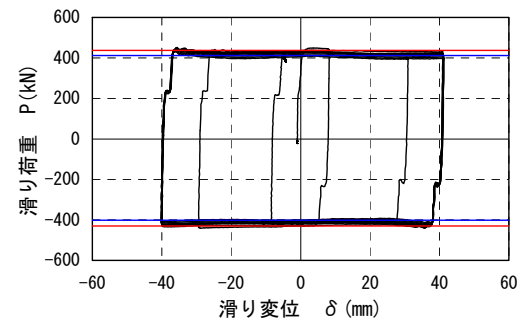


(a) 強化型摩擦板 (b) ステンレス板

Photo 5 強化型摩擦板, ステンレス板の試験後状況
Condition of Advanced Brake Pad and Stainless Plate after Excitation Test

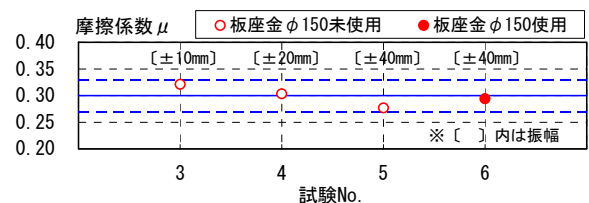


(a) 基本型 (Nタイプ) [試験No. 6]

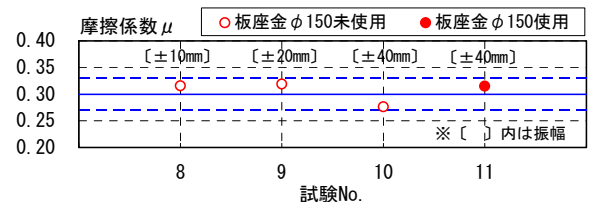


(b) パイプ利用型 (Pタイプ) [試験No. 11]

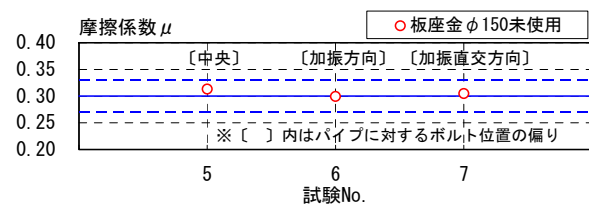
Fig. 10 滑り荷重 (P) -滑り変位 (δ) 関係
Sliding Load P vs. Sliding Displacement δ



(a) 振幅の影響 (Nタイプ)



(b) 振幅の影響 (Pタイプ)



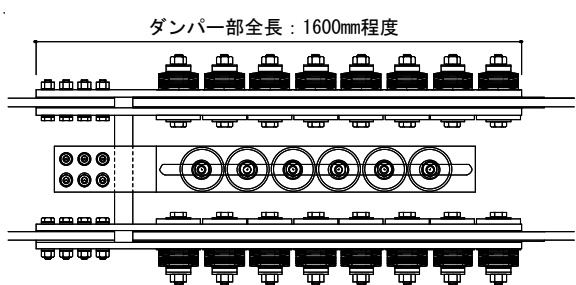
(c) ボルト位置の偏りの影響 (Pタイプ)

Fig. 11 摩擦係数のばらつき
Distribution of Frictional Coefficient

ス板に転写したためステンレス板が黒く変色しているが、摩擦性能に影響する損傷がないことを確認した。

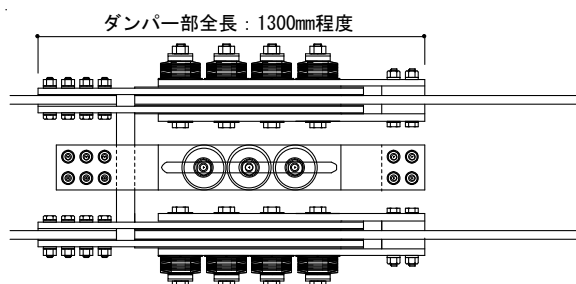
4.3 ブレース型ダンパーへの適用検討

4面摩擦ブレーキダンパーをH形ブレース部材に適用した場合の納まりの例を2面摩擦の場合と比較してFig.12に示す。同図のダンパーでは、いずれも滑り荷重3800kNを想定している。4面摩擦のNタイプでは、2面摩擦の場合と比較して、皿ばねボルトセット1組あたりの滑り荷重を2倍にできるため、皿ばねボルトセット個数を減らし、ダンパー部全長を短くすることが可能である。4面摩擦のPタイプでは、Nタイプに必要な固定側高力ボルト継手を省略できるため、更なるコンパクト化が可能である。



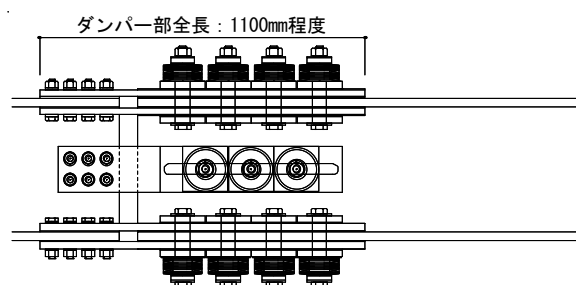
(皿ばねボルトセット：フランジ：16×2=32組，ウェブ：6組)

(a) 2面摩擦の場合



(皿ばねボルトセット：フランジ：8×2=16組，ウェブ：3組)

(b) 基本型（Nタイプ）4面摩擦の場合



(皿ばねボルトセット：フランジ：8×2=16組，ウェブ：3組)

(c) パイプ利用型（Pタイプ）4面摩擦の場合

※ダンパーの滑り荷重を3800kN，ダンパーのストロークを±40mm，ブレース断面をH-470×350程度とした場合

Fig. 12 ブレース型ブレーキダンパーへの適用
Application for Brace Type Brake Damper

5. まとめ

ブレーキ材の固定面を鋼板で補強した強化型摩擦板を考案し、この強化型摩擦板を組み込んだ2面摩擦ブレーキダンパーの基本性能を確認するために要素試験体を用いた加振実験を実施した。さらに、ダンパーの高荷重化・コンパクト化を目的として、摩擦面を増設した4面摩擦ブレーキダンパーを2種類（基本型、パイプ利用型）新たに考案し、その基本性能を確認するために加振実験を実施した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 強化型摩擦板を組み込んだ2面摩擦ブレーキダンパーの滑り荷重－滑り変位関係は、加振周期によらず安定した剛塑性型の履歴特性を示す。
- 2) 加振最大速度0～40cm/secの範囲において、2面摩擦ブレーキダンパーの摺動面での摩擦係数は、最大速度の増加とともに線形的に低下する傾向があるが、その低下量は比較的小さい。
- 3) 4面摩擦ブレーキダンパーでは、同じ皿ばねボルトセットを有する2面摩擦タイプの2倍の滑り荷重を得ることができる。また、滑り荷重－滑り変位関係は安定した剛塑性型の履歴特性を示す。
- 4) パイプ利用型4面摩擦ブレーキダンパーでは、滑り荷重の1/2をパイプと中板および板座金との支圧で伝達する。従って、滑り荷重の1/2付近にパイプと中板（あるいは板座金）との間に設けた所定のクリアランスに伴う荷重の棚が生じる。
- 5) 本報で提案する4面摩擦ブレーキダンパーをブレース部材等に適用することにより、高荷重かつコンパクトな架構内制震装置を実現できる。

参考文献

- 1) 高橋，他：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発 その1～その7，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.979-992，(2000.9)
- 2) 佐野，他：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－ブレーキダンパーの性能確認実験と実建物への適用－，大林組技術研究所報，pp.13-20，No.62，(2001)
- 3) 佐野，他：制震・免震用ブレーキダンパーの紹介と実建物への適用事例，大林組技術研究所報，pp.1-4，No.67，(2003)
- 4) 佐野，他：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（その2）－実物大ブレース型・間柱型ブレーキダンパーの性能確認試験－，大林組技術研究所報，pp.1-6，No.70，(2006)
- 5) ばね技術研究会：第3版 ばね，丸善株式会社，pp.283-292，(1982)