

2. 小型模型を用いた振動台実験による横変位摩擦ダンパーの動的特性の検証

Inspection of Dynamic Characteristics of Friction Damper for Lateral Displacement by Shaking Table Test Using Small Model

木村浩之* 波田雅也* 山崎 彬* 下村将之* 藤本和久*

ー概要ー

筆者らは、既設橋梁の上下部接続部にダイス・ロッド式摩擦ダンパーを設置することで、L1地震時に固定部材として機能し、L2地震時に橋脚基部の応答低減を図る耐震補強工法を提案している。現在、可動支承の橋軸直角方向に摩擦ダンパーを設置する場合に、上部構造の橋軸方向変位の大きさに左右されることなく制震効果を発揮する機構「横変位摩擦ダンパー」を開発している(図1、図2)。本報では、横変位摩擦ダンパーの動的加振に対する基本的な特性の確認を目的とした、小型模型を用いた2方向同時の正弦波加振による振動台実験(写真1、写真2)について報告する。

ー技術的な特長ー

横変位摩擦ダンパーは、直交するスライド方向成分を含む任意の方向から载荷を受けた場合でも、設置したダンパー軸方向に設計摩擦荷重と同程度の摩擦力が作用することが求められる。また、可動支承に設置するためには、上部構造の橋軸方向の挙動を妨げないことが求められる。

振動台実験の結果、横変位摩擦ダンパーは、2方向加振時のダンパー性能が1方向加振時と同程度であり、橋軸方向挙動の影響を受けにくいことが分かった。また、上部構造の橋軸方向の挙動を妨げないことが分かった。

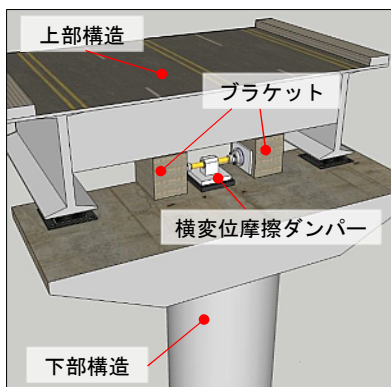


図1 横変位摩擦ダンパーの設置イメージ

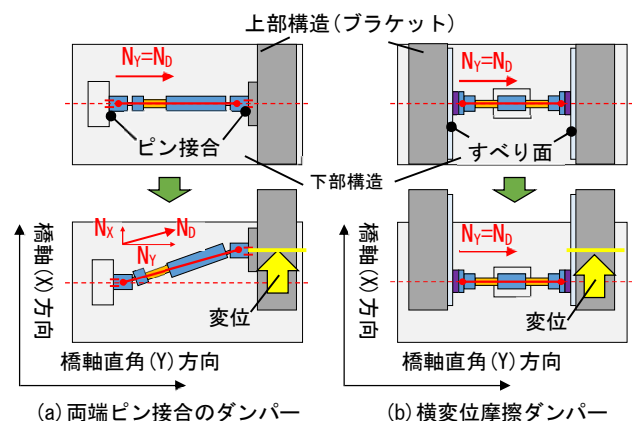


図2 橋軸方向変位に対する挙動の比較

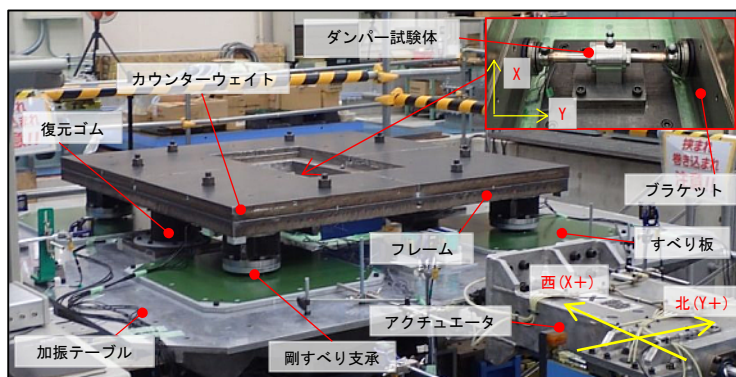


写真1 実験状況

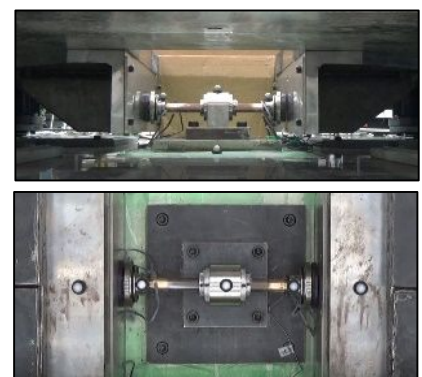


写真2 試験体設置状況

※本報は、(一財)首都高速道路技術センターと青木あすなろ建設(株)の共同研究「上部工耐震構造部材に関する研究」の研究成果の一部であり、本報の内容は、土木学会第76回年次学術講演会(2021.09、I-158 および I-159)にて発表済みである。

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

小型模型を用いた振動台実験による横変位摩擦ダンパーの動的特性の検証 Inspection of Dynamic Characteristics of Friction Damper for Lateral Displacement by Shaking Table Test Using Small Model

○木村浩之* 波田雅也* 山崎 彬* 下村将之* 藤本和久*
Hiroyuki KIMURA Masaya HADA Akira YAMASAKI Masayuki SHITAMURA Kazuhisa FUJIMOTO

ABSTRACT Authors have proposed seismic retrofitting technology that installs friction dampers at the bearings of bridges. And we are developing a mechanism in which friction dampers work as seismic control devices in the transverse direction, regardless of the longitudinal direction movement of the superstructure "Friction damper for lateral displacement". In order to inspect the basic characteristics of the damper in response to dynamic excitation, we conducted shaking table tests using a small model with simultaneous sinusoidal excitation in two directions. As a result of the tests, the performance of the dampers under simultaneous excitation in two directions was equivalent to that of unidirectional excitation.

Keywords: 摩擦ダンパー、ダイス・ロッド、橋梁、制震、振動台実験

Friction Damper, Die and Rod, Bridge, Seismic Control, Shaking Table Test

1. はじめに

筆者らは、既設橋梁の上下部接続部にダイス・ロッド式摩擦ダンパーを設置することで、L1 地震時に固定部材として機能し、L2 地震時に橋脚基部の応答低減を図る耐震補強工法を提案している^{1),2)}。現在、可動支承の橋軸直角方向に摩擦ダンパーを設置する場合に、上部構造の橋軸方向変位の大きさに左右されることなく制震効果を発揮する機構「横変位摩擦ダンパー」の開発を行っている(図1、図2)³⁾。

横変位摩擦ダンパーは、摩擦機構を内蔵した筒

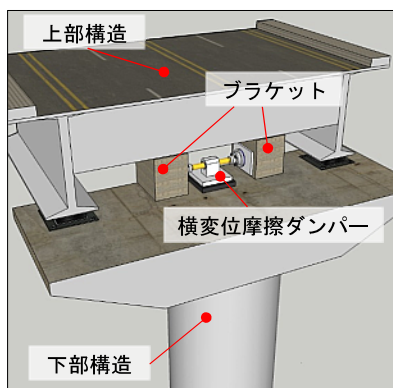


図1 横変位摩擦ダンパーの設置イメージ

部を下部構造に固定し、上部構造に設けたブラケット2基でダンパーの両端を挟み込むようにして設置され、ダンパー端部にすべり材を取り付けたスライド部を設けることで上部構造の挙動に追随する仕組みとなっている³⁾。

横変位摩擦ダンパーは、ダンパー軸と直交するスライド方向成分を含む任意の方向から载荷を受けた場合でも、設置したダンパー軸方向に設計摩擦荷重と同程度の摩擦力が作用することが求められる。また、可動支承に設置するためには、

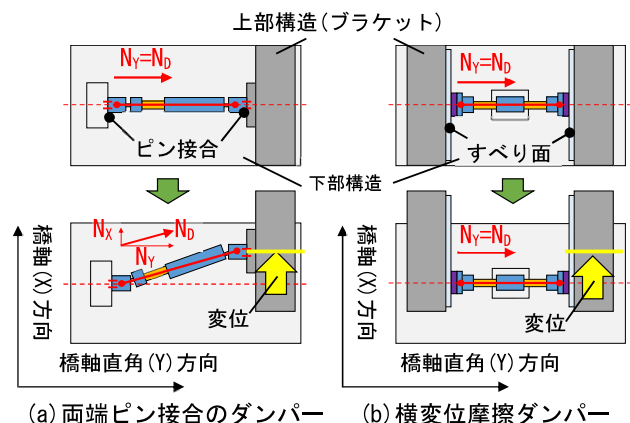


図2 橋軸方向変位に対する挙動の比較

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

※本報は、(一財)首都高速道路技術センターと青木あすなろ建設(株)の共同研究「上部工耐震構造部材に関する研究」の研究成果の一部であり、本報の内容は、土木学会第76回年次学術講演会(2021.9、I-158およびI-159)にて発表済みである。

上部構造の橋軸方向の挙動を妨げないことが求められる。昨年度に報告した技術研究所報(第6号、2021)では、600 kN 級の実大サイズの横変位摩擦ダンパー試験体に対して静的载荷試験を実施し、ダンパー軸方向とスライド方向の同時载荷におけるダンパーの摩擦荷重が1方向载荷時と同程度であること、またスライド方向の摩擦係数が0.1程度であることを示した⁴⁾⁵⁾。しかしながら、横変位摩擦ダンパーを実橋梁に適用するには、動的加振に対しても同様に求められる性能を発揮することを確認する必要がある。

本報では、横変位摩擦ダンパーの動的加振に対する基本的な特性の検証を目的とした、小型模型を用いた振動台実験について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験模型

実験状況を写真1に、試験体設置状況を写真2に、試験機諸元を表1に、模型諸元を表2に示す。

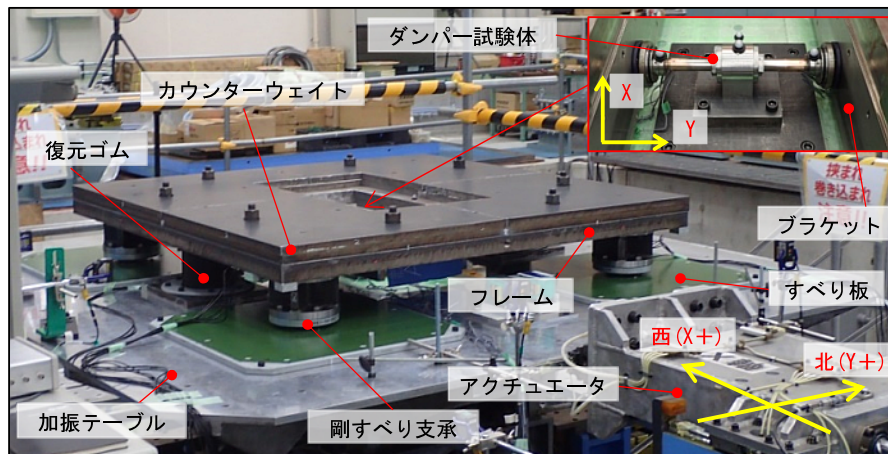


写真1 実験状況

表1 試験機諸元

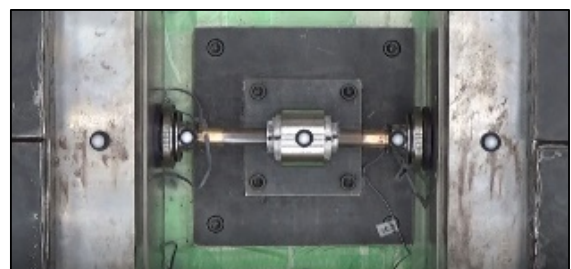
項目	数値
最大積載重量	19.6 kN
加振周波数	1~150 Hz
最大加速度(X)	1.7 G
最大加速度(Y)	1.7 G
最大変位量(X)	±100 mm
最大変位量(Y)	±100 mm

表2 模型諸元

項目	数値
フレーム重量	17.0 kN
復元ゴム剛性	113.6 kN/m
固有周期	0.75 s
すべり支承摩擦係数	0.116



(a) 正面



(b) 上面

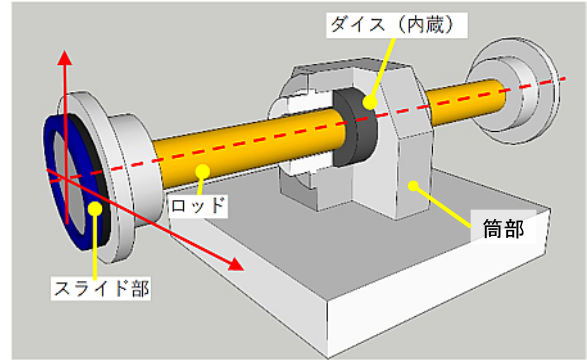
写真2 試験体設置状況

2.2 試験体

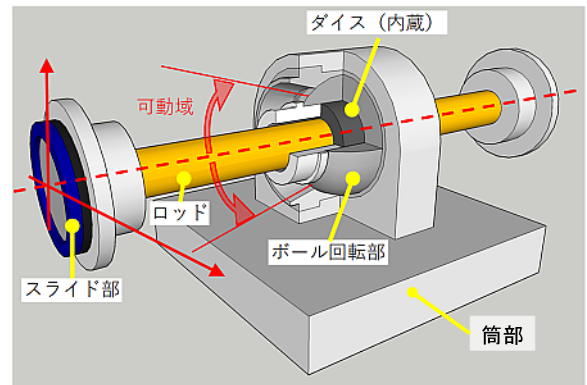
横変位摩擦ダンパーの機構を図3に、試験体外観を写真3に示す。横変位摩擦ダンパーの摩擦機構は、従来のダイス・ロッド式摩擦ダンパーと同様に、ダイス(環)とロッド(芯棒)の接触面に摩擦荷重が発生する仕組みとなっている。ダイスを内蔵した筒部は、ダイスを直に固定する仕様(=固定タイプ、図3(a))と、上部構造に回転挙動が生じた際に追従するよう球体を内蔵した仕様(=ボールタイプ、図3(b))の2タイプとした。本実験におけるダンパー試験体は、設計摩擦荷重5kN、最大ストロークは ± 70 mmとした。

2.3 実験方法

入力波形は、漸増1サイクル、本加振5サイクル、漸減1サイクルの正弦波で、周波数はフレーム固有周期に合わせて1.3Hzとした(図4)。本報では、表3に示したX・Y方向の加振を組み合わせた1方向および2方向同時加振、計6ケースについて報告する。計測項目は、モーションキャプチャを用いた変位とした。加速度は変位を2階微分して算定した。荷重はフレーム質量に加速度を乗じた慣性力から、復元ゴム剛性にフレーム変位を乗じたゴム反力を差し引いた値として算出した。Y方向荷重はダンパーと剛すべり支承の摩擦荷重の和、X方向荷重はスライド部と剛すべり支承の摩擦荷重の和である。また、履歴吸収エネルギーおよび平均荷重を、文献1)に準拠して算出した。



(a) 固定タイプ



(b) ボールタイプ

図3 横変位摩擦ダンパーの機構

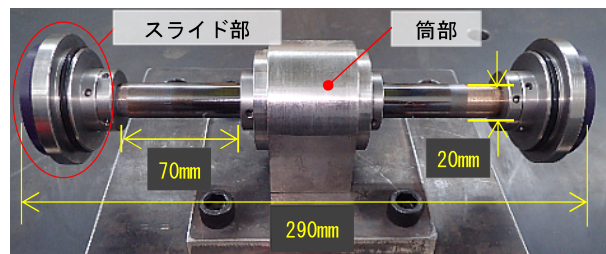


写真3 5kN級ダンパー試験体(固定)外観

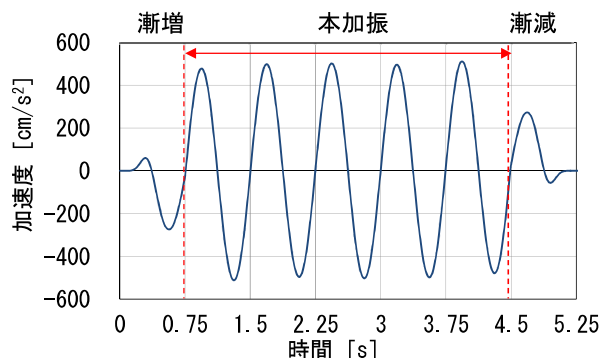


図4 入力正弦波
(最大加速度 500 cm/s²)

表3 加振ケース一覧

試験名	試験体タイプ	最大加速度[cm/s ²]	
		X方向	Y方向
F _a	固定	0	500
F _b		200	500
F _c		200	300
F _d		200	0
B _a	ボール	0	450
B _b		200	450

表4 Y方向の応答値一覧

試験名	最大フレーム 加速度	最大フレーム 変位	最大ダンパー 変位	最大荷重	ダンパー 累計変位	履歴吸収 エネルギー	平均荷重
	cm/s ²	mm	mm	kN	mm	kN・m	kN
F _a	598.1	26.7	25.3	8.63	210.2	1.558	7.42
F _b	577.8	25.1	23.4	8.56	234.3	1.707	7.29
F _c	279.5	7.9	0.3	4.7	—	—	—
F _b /F _a	96.6%	93.9%	92.4%	99.2%	111.5%	109.6%	98.3%
B _a	506.8	19.9	18.2	7.79	165.4	1.095	6.62
B _b	612.0	51.7	48.8	8.26	689.4	4.339	6.29
B _b /B _a	120.7%	260.4%	267.7%	106.1%	416.9%	396.1%	95.0%

3. 実験結果

3.1 ダンパー性能特性

Y方向に加振した各ケースの応答値一覧を表4に、横変位摩擦ダンパーの荷重—変位関係を図5に示す。Y方向の加振に対して、横変位摩擦ダンパーは入力加速度 300 cm/s² の F_c では撓動せず、450 cm/s² 以上のケースでは撓動した。F_b におけるダンパー累計変位および履歴吸収エネルギーは、F_a の約 110 % であり、F_a と F_b の平均荷重は同程度であった。一方、B_b におけるダンパーの累積変位および履歴吸収エネルギーは、B_a の約 4 倍だが、B_a と B_b の平均荷重は同程度であった。

以上の結果から、横変位摩擦ダンパーは2方向同時の動的加振に対して、1方向加振と同程度の摩擦力が作用することが分かった。また、固定タイプではX方向加振の有無によるダンパー性能の変化が小さく、ボールタイプではX方向加振が加わることによってダンパーの変位量が増加したと考えられる。

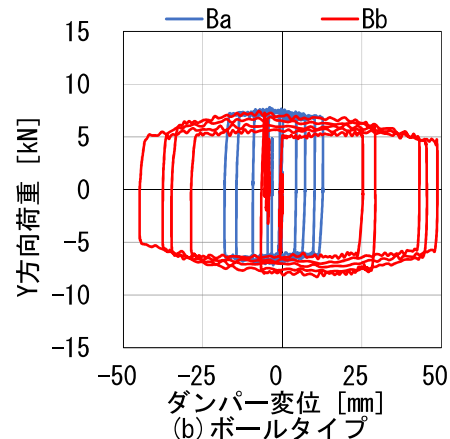
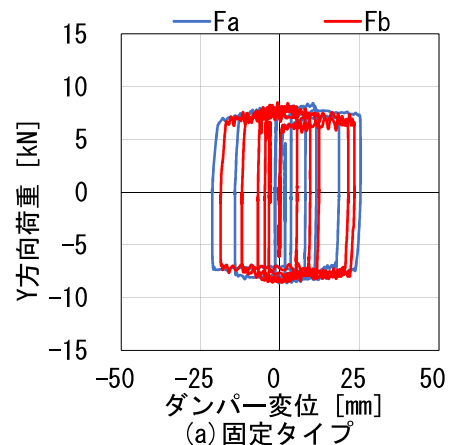


図5 Y方向の荷重—変位関係

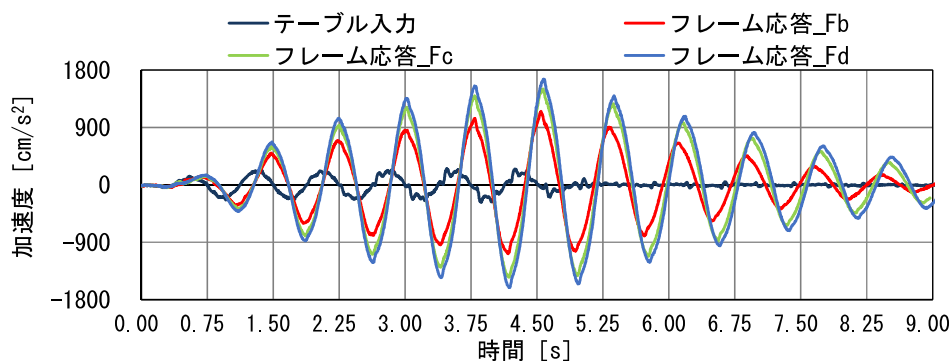


図6 X方向の加速度時刻歴

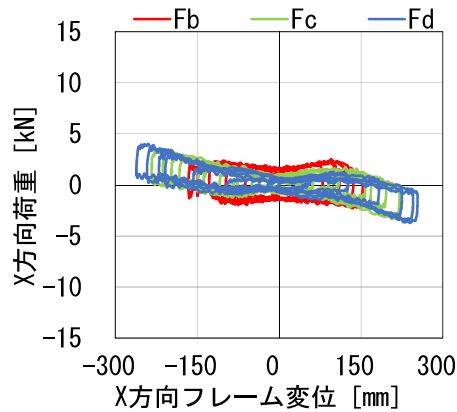


図7 X方向の荷重—変位関係

3.2 スライド性能特性

固定タイプで X 方向に加振した各ケースの加速度時刻歴を図 6 に、フレーム X 方向の荷重—変位関係を図 7 に、応答値一覧を表 5 に示す。X 方向の加振では、いずれのケースもスライド部への引っ掛かり等を生じることなくフレームが挙動し、応答加速度は入力加速度よりも大きくなった。応答加速度振幅は小さい順で F_b 、 F_c 、 F_d であり、 F_b の最大値は F_d の約 70 % であった。この順序は Y 方向の入力加速度の大きい順 (500、300、0 cm/s^2) と対応しており、平均荷重の大きい順、X 方向フレーム変位が同じ時の X 方向荷重の大きい順(図 7、復元ゴムのハードニングの影響が小さい変位 $\pm 150 \text{ mm}$ 以内)とも対応していた。

以上の結果から、横変位摩擦ダンパーは、X 方向の動的加振によるフレームの挙動を妨げないことが分かった。また、Y 方向への入力加速度が大きいほどスライド部の摩擦も大きくなり、X 方向のフレーム応答が小さくなったと考えられる。なお、ボールタイプも同様の傾向であった。

4. まとめ

本報では、小型模型を用いた振動台実験によって、横変位摩擦ダンパーの動的加振に対する基本特性を検証した。固定タイプは、2 方向加振時のダンパー性能が 1 方向加振時と同程度であり、橋軸方向挙動の影響を受けにくいことが分かった。

表5 X方向の応答値一覧

試験名	最大フレーム 加速度	最大フレーム 変位	平均荷重
	cm/s^2	mm	kN
F_b	1152.7	166.1	1.44
F_c	1502.3	233.6	1.06
F_d	1658.1	261.3	0.96
F_b/F_d	69.5%	63.6%	150.1%
F_c/F_d	90.6%	89.4%	110.4%

一方ボールタイプは、2 方向加振時のダンパー累計変位および履歴吸収エネルギーが 1 方向加振時と比べて大きく、橋軸方向の力もダンパーに伝わる可能性が示された。また、いずれの仕様であっても横変位摩擦ダンパーを設置することで上部構造の挙動を妨げないことが分かった。なお、上部構造が橋軸直角方向に変位し、ダンパー軸方向に荷重が生じる条件では橋軸方向の応答が若干小さくなる可能性が示された。

今後は、実大サイズの試験体を用いた振動台実験を実施することで地震時性能を検証し、横変位摩擦ダンパーの実橋梁への適用を目指す。

【参考文献】

- 1) 波田雅也ほか：橋梁の耐震補強に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、75 巻、2 号、pp.95-110、2019
- 2) 波田雅也ほか：ダイス・ロッド式摩擦ダンパーを用いた橋梁模型の振動台実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.2、pp.859-864、2017
- 3) 山本一貴ほか：損傷制御を目的とした橋軸直角方向に設置する摩擦ダンパーの開発、土木学会第 74 回年次学術講演会、I-235、2019
- 4) 木村浩之ほか：橋の挙動に対する追随性とダンパー軸方向の保持を両立する摩擦ダンパーの考案、青木あすなろ建設 技術研究所報、Vol.6、2021
- 5) 下村将之ほか：可動支承を有する橋脚の橋軸直角方向に適用する「横変位摩擦ダンパー」の開発、土木学会第 76 回年次学術講演会、I-157、2021