8. 1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの高速載荷実験

High-speed Loading Test of 1000kN Class Die and Rod Friction Damper

波田雅也* 山﨑 彬*

一概要一

筆者らは、既設橋梁にダイス・ロッド式摩擦ダンパー(以下、摩擦ダンパー)を設置して耐震性向上を図る技術を提案している。摩擦ダンパーは、ダイス(金属環)の内径より少し太いロッド(金属棒)をダイスにはめ込んだシンプルな機構であり、部品寸法を一様に変えるだけで摩擦荷重を調節できる。これまでに、摩擦荷重 25kN~1200kN 級まで幅広く製作実績があり、600kN 級の摩擦ダンパーに対しては高速載荷実験を実施し、正弦波や L2 地震応答波載荷による動的挙動を把握している。本研究では、さらに 1000kN 級の大容量摩擦ダンパーに対して高速載荷実験を実施した(写真 1)。本報は、正弦波時の基本特性と L2 地震応答波時のエネルギー吸収性能について示す。

一技術的な特長ー

摩擦ダンパーは、ダイスとロッドの接触面に生じる摩擦力を利用したダンパーであり、完全剛塑性に近い履歴形状を有する(図 1)。本報で述べる 1000kN 級の大容量摩擦ダンパーに対する高速載荷実験の結果、正弦波時には 600kN 級ダンパーでの既往実験と同様の基本特性を示すこと、L2 地震応答波時には設計で想定した通りの履歴特性とエネルギー吸収性能を発揮することが確認された(図 2)。

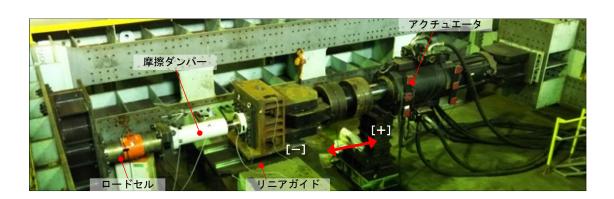
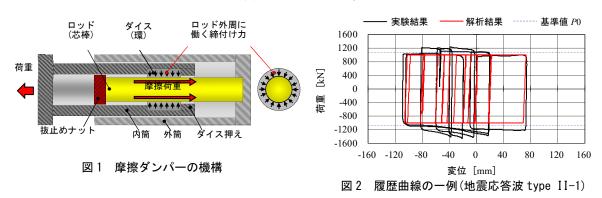


写真1 実験状況の全景



※本実験は首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究により開発したダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP)の品質確保のために実施したものであり、本報の内容は、土木学会第75回年次学術講演会(I-185、2020.9)にて発表済みである。

^{*}技術研究所 構造研究部 十木構造研究室

1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの高速載荷実験 High-speed Loading Test of 1000kN Class Die and Rod Friction Damper

○波田 雅也* Masaya HADA 山﨑 彬* Akira YAMASAKI

ABSTRACT The friction damper is a damper that utilizes the frictional force generated on the contact surface between the die and the rod, and has a history shape close to perfect rigid plasticity. As a result of the high-speed loading experiment on the large-capacity friction damper of 1000kN class described in this report, it shows the same basic characteristics as the previous experiment with the 600kN class damper at the time of sine wave, and the historical characteristics as expected in the design at the time of L2 earthquake response wave. It was confirmed that it exhibits energy absorption performance.

Keywords: 摩擦ダンパー, ダイス・ロッド式, 橋梁, 制震, 高速載荷 *Friction damper, Dice and rod type Bridge, Seismic control, High speed loading*

1. はじめに

筆者らは、既設橋梁の上下部接続部 1)にダイ ス・ロッド式摩擦ダンパー(以下、摩擦ダンパー) を設置して耐震性向上を図る技術を提案してい る(図 1)²⁾³⁾。摩擦ダンパーは、ダイス(金属環)とロ ッド(金属棒)の接触面に摩擦荷重が発生する機構 である(図 2)。ダイス内径より少し太いロッドを ダイスにはめ込むことで生じる締付け力を利用 したシンプルな機構であり、部品寸法を一様に変 えるだけで摩擦荷重を調節できる。これまでに、 摩擦荷重 25kN~1200kN 級まで幅広く製作実績 があり、何れも完全剛塑性型に近い理想的な履歴 特性が得られている 3)4)5)。また既報 2)では、 600kN 級(25kN~1200kN の概ね中間値)の摩擦 ダンパーに対して高速載荷実験を実施し、正弦波 や L2 地震応答波載荷による動的挙動を把握して いる。本研究では、さらに 1000kN 級の大容量摩 擦ダンパー(規格荷重:1000kN、最大ストロー ク: ±150mm)に対して高速載荷実験を実施した。 本報は、正弦波載荷時の基本特性と L2 地震応答 波載荷時のエネルギー吸収性能について示す。

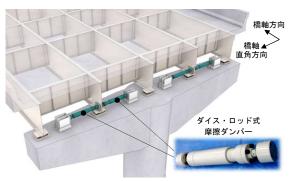


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

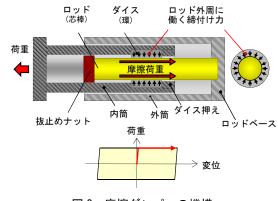


図2 摩擦ダンパーの機構

2. 実験概要

載荷装置は、JFE テクノリサーチ(株)が保有する高速サーボ試験機を用いた(写真 1)。実験方法

^{*}技術研究所 構造研究部 十木構造研究室

[※]本実験は首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究により開発したダイス・ロッド式摩擦ダンパーの品質確保のために実施したものであり、本報の内容は、土木学会第75回年次学術講演会(2020.09、I-185)にて発表済みである。

は摩擦ダンパーを軸方向に変位制御で載荷する 方法とし、計測項目は荷重と変位およびダイス表 面温度とした(写真 2)。速度は変位を微分して算 定、極性は荷重と変位ともに引張側を正とした。 なお、載荷後はダンパーが蓄熱した摩擦熱を空冷 し、ダイス表面が常温(24°)以下になったことを 確認してから次の載荷を行った。

3. 正弦波載荷(基本特性の確認)

本章では、高速載荷時の基本特性を確認するために実施した正弦波載荷の概要について示す。

3.1 入力波形と載荷ケース

入力波形は、既報 2)に準拠して目標振幅 2 サイクルの前後に漸増・漸減波を 2 サイクルずつ加えた正弦波とし、目標振幅 2 サイクル目で摩擦荷重 (切片荷重 $P_{\delta=0}$ 、平均摩擦荷重 P_{ave})2)を評価した(図 3)。載荷ケースは目標振幅と振動数をパラメータとして最大速度 V_{max} を変化させた計 13 ケースとした(表 1)。試験体数は表 1 中の 40mm シリ

ーズと 80mm シリーズを 2 体、その他を 1 体と した。

3.2 実験結果

各ケースの目標振幅 2 サイクルの履歴曲線を抽出し、シリーズ毎に重ね合わせたものを図 4 に示す。図 4 中には、0.4cm/sec 一定の三角波載荷 2 から平均摩擦荷重を評価した基準値 P_0 を破線で示している。また、13 ケースの V_{max} と P_{ave}/P_0 (P_{ave} を P_0 で除して無次元化)の関係を図 5 に示す。図 5 には、参考値として既報 2)の 600kN 級ダンパーの実験結果を記載している。図 4 より、各シリーズとも振動数や振幅、速度によらず概ね完全弾塑性型の履歴形状を示すことが確認できる。また、図 5 より、入力する正弦波の V_{max} と P_{ave} との間には、既報 2)、5)で示した摩擦ダンパーと同様の相関関係(V_{max} が 10cm/sec 未満の載荷ケースでは P_{ave} が P_0 より大きく、10cm/sec 以上では V_{max} が大きくなるほど P_{ave} が低下する)が認められる。

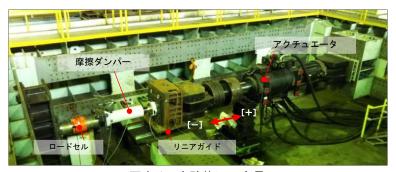
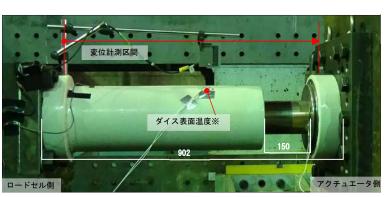


写真1 実験状況の全景



※ダイス表面温度は、内筒に貫通孔をあけ、そこからダイス表面に熱電対を貼付けて温度を計測

写真2 摩擦ダンパー設置状況

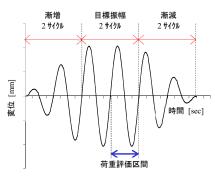
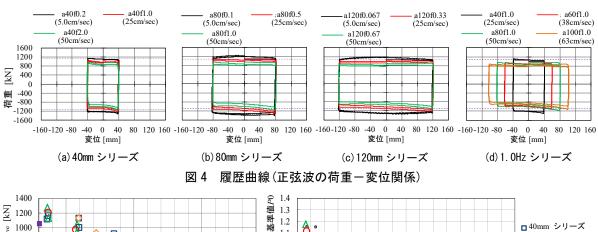


図3 入力波形(正弦波)

表1 載荷ケース(正弦波)

	試験名	シリース゛	目標 振幅 a [mm]	振動 数 f [Hz]	最大 速度 V _{max} [cm/sec]
1	a40f0.2	40mm シリース゛	40	0.2	5
2	a40f1.0		40	1.0	25
3	a40f2.0		40	2.0	50
4	a80f0.1	80mm シリース*	80	0.1	5
5	a80f0.5		80	0.5	25
6	a80f1.0	シリース	80	1.0	50
7	a120f0.067	120mm シリース゛	120	0.067	5
8	a120f0.33		120	0.33	25
9	a120f0.67	シリース	120	0.67	50
10	a40f1.0	1.0Hz シリース゛	40	1.0	25
11	a60f1.0		60	1.0	38
12	a80f1.0		80	1.0	50
13	a100f1.0	1	100	1.0	63



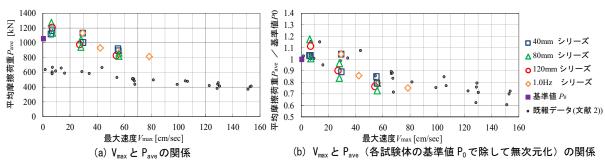


図 5 正弦波載荷時における最大速度 V_{max}と平均摩擦荷重 P_{ave}の関係

4. L2 地震応答波載荷 (エネルギー吸収の確認)

本章では、摩擦ダンパーが解析時に想定したエネルギー吸収性能を有することを確認するために実施した地震応答波載荷の概要について示す。

4.1 入力波形と載荷ケース

荷ケース一覧を表 2 に、入力波形の一例を図 6 に載示す。入力波形は、1000kN 摩擦ダンパーを用いた橋梁の時刻歴応答解析で、L2 地震動 ¹⁾入力時に得られたダンパーの応答変位波形であり、計6 ケース実施した(試験体数は各 1 体)。

4.2 実験結果

履歴曲線の一例を**図7**に、各ケースのエネルギー吸収量の実験値と解析値の関係を**図8**に示す。

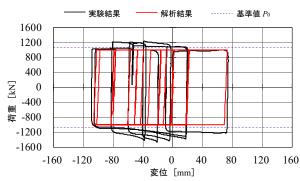


図7 履歴曲線の一例(地震応答波 type II-1)

表 2 載荷ケース(地震応答波)

	試験名	シリース゛	最大 変位δ [mm]		最大 速度 V _{max}	継続 時間 t	エネルキ゛- 吸収量 E
			+	_	[cm/sec]	[sec]	[kN • m]
1	type I-1	type I 地震動 シリーズ	1	-92	61	120	142
2	type I-2		20	-60	53	240	249
3	type I-3		10	-31	42	240	91
4	type II-1	type II 地震動 シリーズ	73	-106	87	50	865
5	type II-2		59	-95	100	50	790
6	type II-3		64	-140	93	50	558

※表中のエネルギー吸収量は、1000kN 摩擦ダンパーの解析値

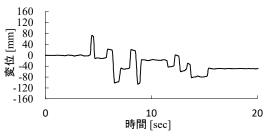


図 6 入力波形の一例(地震応答波 type II-1)

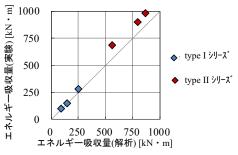
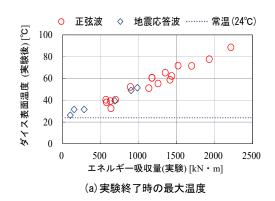


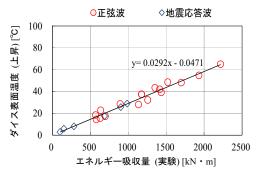
図8 エネルギー吸収量の実験値 と 解析値の関係(地震応答波)

図7と図8より、地震応答波載荷においても概ね 完全弾塑性型の履歴形状を示すこと、各ケースと もエネルギー吸収量の実験値が解析値を上回っ ていることから、1000kN摩擦ダンパーが想定通 りのエネルギー吸収性能を発揮したことが確認 できる。

5. ダイス表面温度の確認

摩擦ダンパーは振動エネルギーを摩擦熱に変えて吸収するため、ダイスとロッドが各々蓄熱し温度上昇するが。本章では、ダイス表面温度とエネルギー吸収量の関係に着目する。まず、図9(a)は、実験終了後のダイス表面の最大温度とエネルギー吸収量の関係である。図9(a)より、正弦波、地震応答波によらず、エネルギー吸収量が大きいほどダイス表面温度が高くなる傾向が確認できる。また、図9(b)はダイスの温度上昇(最大温度と実験開始時温度の差分)とエネルギー吸収量の関係である。図より、本実験で用いた試験体と入力波による限られた実験条件で得られた結果で





(b) 温度上昇 (開始時温度と最大温度の差)

図 9 ダイス表面温度とエネルギー吸収量の関係

はあるが、ダイスの温度上昇とエネルギー吸収量には、概ね正比例の相関関係が確認された。

6. まとめ

以上、1000kN 級摩擦ダンパーの高速載荷実験を行い、正弦波載荷時の基本特性と L2 地震応答波載荷時のエネルギー吸収性能を確認した。得られた知見を以下に示す。なお、L2 地震時特性の詳細については、稿を改めて報告したい。

- (1) 正弦波載荷より、各シリーズとも振動数や振幅、 速度によらず概ね完全剛塑性型の履歴を示した。 また、 V_{max} と P_{ave} との間には、既報で示した摩 擦ダンパーと同様の相関関係が確認された。
- (2) 地震応答波載荷より、1000kN 摩擦ダンパーが 想定通りの履歴特性とエネルギー吸収性能を発 揮することが確認された。
- (3) 正弦波および地震応答波載荷ともに、エネルギー吸収量が大きいほどダイス表面の最大温度が高くなる傾向が確認された。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設 計編、2012.3
- 波田雅也、蔵治賢太郎、右高裕二、牛島 栄: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、Vol.75、No.2、pp.95-110、2019
- 3) 波田雅也、和田 新、右高裕二、牛島 栄: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報告集、Vol.39、 No.2、pp.859-864、2017.7
- 4) 山崎 彬、波田雅也、木村浩之、牛島 栄、蔵治賢太郎、松原拓朗、久保田成是:1200kN 級の"大容量ダイス・ロッド式摩擦ダンパー"の開発、土木学会第73回年次学術講演会、I-316、pp.631-632、2018
- 5) 北嶋圭二ほか: 既存 RC 造建物の制震補強用摩擦ダンパーに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、 Vol.21、No.1、pp.385-390、1999