

1. 1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの断続的繰返し高速載荷実験

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

波田雅也* 木村浩之* 山崎 彬* 下村将之*

一概要一

筆者らは、橋梁支承部にダイス・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、図 1 のようにダイス(金属環)とロッド(金属棒)をはめ込んだシンプルな機構で、摩擦荷重 25kN~1200kN 級まで幅広い製作実績と実験的知見がある。

本研究は、1000kN 級摩擦ダンパー(規格荷重: 1000kN、最大振幅: ±150mm)に対して実施した高速載荷実験に関するものである(写真 1)。既報(技術研究所報 第 6 号 2021)では、レベル 2 地震応答時に想定される様々な変位履歴に対して、この摩擦ダンパーは安定した完全剛塑性型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。本報では、さらに、摩擦ダンパーの限界状態を把握する一環として行った「断続的繰返し高速載荷実験」(以下、断続載荷)について示す。

一技術的な特長一

断続載荷の目的は、設計想定を遥かに上回る過酷な載荷条件下における摩擦ダンパーの限界状態を把握することである。入力波形は、実施設計の時刻歴応答解析で得られたレベル 2 地震動時のダンパー応答変位波形とし、100 秒毎という短いインターバルで断続的に計 12 回繰返し載荷する(図 2)。

断続載荷の結果、繰返し回数を重ねる毎に徐々に荷重が減少するものの、計 12 回の繰返し載荷終了まで安定した剛塑性型の履歴を示し、抵抗力を完全に喪失することはなく、安定したエネルギー吸収性能を発揮し続けることが確認された(図 3)。

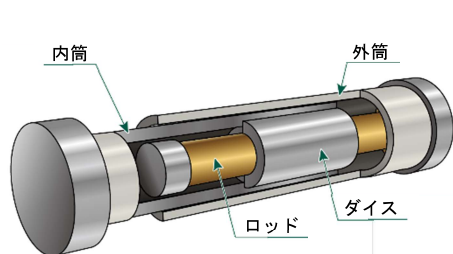


図 1 摩擦ダンパーの機構

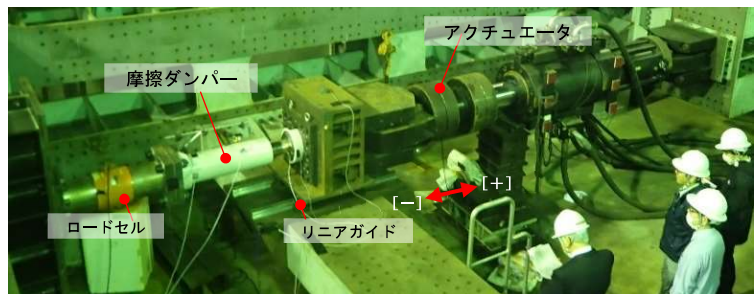
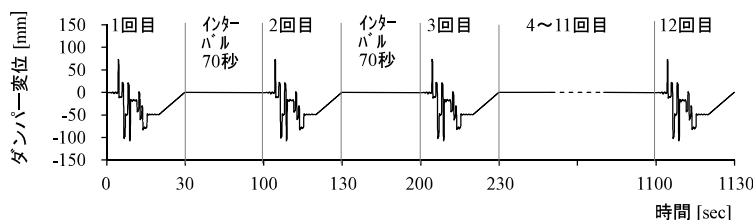


写真 1 実験状況の全景



入力波名	最大振幅		振動数	最大速度	波形時間	インターバル	繰返し数	載荷時間	エネルギー量
	+	-							
	mm	mm	Hz	cm/sec	sec	sec	回	sec	kN・m
(a) 地震応答波	73	-106	—	87	30.0	70.0	12	1130.0	10380

図 2 断続載荷の入力波形

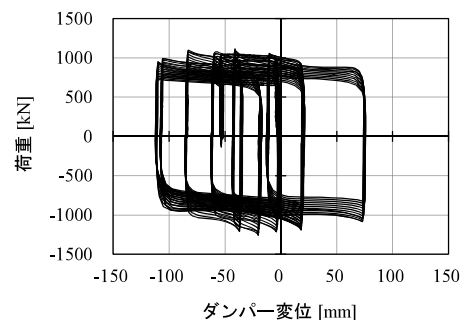


図 3 断続載荷の結果(荷重-変位履歴)

※本実験は首都高速道路(株)と青木あすなる建設(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 76 回年次学術講演会 (I-160、2021.9)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

1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの断続的繰返し高速載荷実験 Intermittent High-speed Loading Test of 1000kN Class Die and Rod Friction Damper

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

ABSTRACT The authors have proposed a technology to install die-rod friction dampers (hereafter referred to as friction dampers) at the bearings of bridges to improve earthquake resistance. The friction damper is a simple mechanism that utilizes the fitting of a die (metal ring) and a rod (metal bar), and has a wide range of manufacturing achievements and experimental knowledge, ranging from a friction load of 25kN to 1200kN class. This study relates to high-speed loading experiments on a 1000kN-class friction damper. Previous reports have confirmed that this friction damper exhibits stable hysteresis characteristics and energy absorption performance against various displacement histories assumed during level 2 earthquake response. In this report, intermittent repeated high-speed loading experiments were performed as part of understanding the limit state of friction dampers.

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

1. はじめに

筆者らは、橋梁の上下部接続部にダイス・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、図2）^{2),3)}。摩擦ダンパーは、ダイス（金属環）とロッド（金属棒）の嵌め合いを利用したシンプルな機構で、摩擦荷重 25kN～1200kN 級まで幅広く製作実績と実験的知見がある^{3),4),5)}。

本研究は、1000kN 級摩擦ダンパー（規格荷重：1000kN，最大振幅：±150mm）に対して実施した高速載荷実験に関するものである（写真1）。既報⁶⁾（技術研究所報 第6号 2021）では、レベル2 地震応答時に想定される様々な変位履歴に対して、この摩擦ダンパーは安定した剛塑性型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。

本報では、さらに、摩擦ダンパーの限界状態を把握する一環として行った「断続的繰返し高速載荷実験」（以下、断続載荷）について示す。

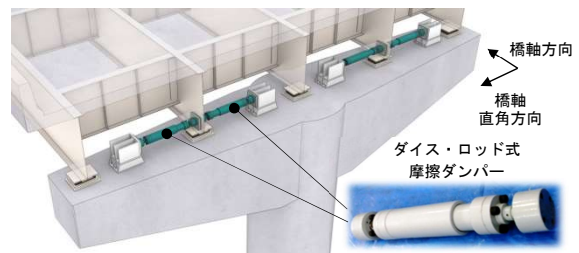


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

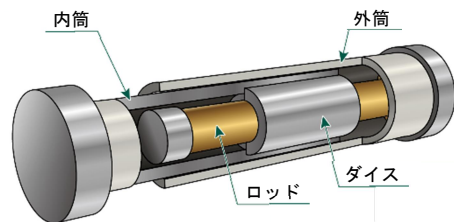


図2 摩擦ダンパーの機構

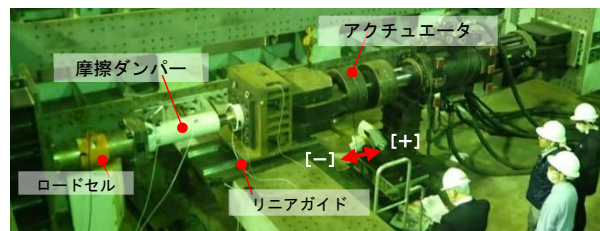


写真1 実験状況の全景

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

※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76 回年次学術講演会(2021.09、I-160)にて発表済みである。

2. 実験概要

2.1 実験目的

摩擦ダンパーは、振動エネルギーを摩擦熱に変換して吸収し、レベル2地震応答時にはダイス表面が100℃程度まで温度上昇することが想定される²⁾⁶⁾。既報^{2)や6)}では、レベル2地震時応答の範囲での挙動把握が目的であったため、载荷により蓄熱された摩擦熱を常温(24℃)以下まで空冷してから次の载荷を行った。そのような実験条件下では、ダンパー1体に対して様々な载荷パターンを行った後でも摩擦荷重が殆ど変化せず、優れた繰返し耐久性を有することがわかっている。しかし、近年の巨大地震や懸念される長周期地震動⁷⁾を鑑みると、設計想定を上回る変位履歴に対する挙動を把握しておくことが望まれる。例えばレベル2地震時相当の揺れが短いインターバルで多数回繰返し発生すると、空冷される間も無く最大温度が200℃を超え、ダイス・ロッド摺動部が変性する可能性がある。

本報の断続载荷の目的は、レベル2地震動に対する設計想定を遥かに上回る過酷な载荷条件下における限界状態を把握することである。

2.2 実験方法

実験方法は、摩擦ダンパーを軸方向に変位制御で载荷する方法とし、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、図3)。速度は変位を微分して算定、極性は荷重と変位ともに引

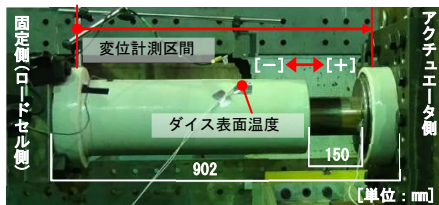


写真2 実験状況

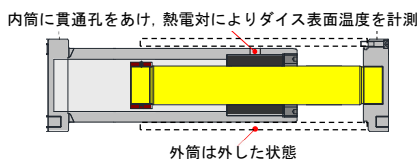


図3 温度計測

張側を正とした。

2.3 入力波形

断続载荷の入力波形を図4と表1に示す。入力波形は地震応答波と正弦波の2パターンとし、試験体数は各1体とする。図4(a)の地震応答波は、この摩擦ダンパーを実際に設置した橋梁⁸⁾の時刻歴応答解析において、3種地盤のレベル2地震動6波⁹⁾のうちエネルギー吸収量が最大であったII-III-1入力時のダンパー応答変位波形であり、100秒間隔という短いインターバルで断続的に計12回繰返し载荷した。図4(b)の正弦波は、最大変位と累積変位が地震応答波と同等の漸増・漸減付き正弦波(漸増2+目標振幅2+漸減2サイクルの計6サイクル)であり、100秒間隔で断続的に計8回繰返し载荷した。

3. 実験結果 (断続载荷)

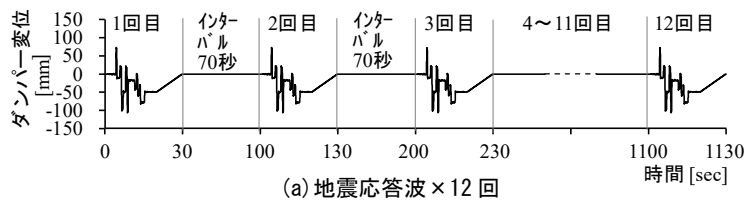
3.1 荷重-変位関係

断続载荷の開始から終了までの荷重-変位関係を図5に示す。地震応答波と正弦波ともに、小振幅時に荷重が大きく、大振幅時に荷重が小さい傾向があった。また、繰返し回数が増えると

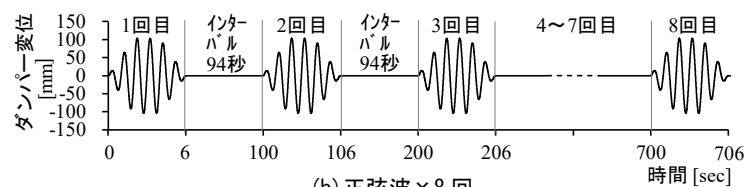
表1 入力波形の諸元

入力波名	最大振幅		振動数 Hz	最大速度 cm/sec	波形時間 sec	インターバル sec	繰返し数 回	载荷時間 sec	エネルギー量 kJ・m
	+	-							
(a) 地震応答波	73	-106	-	87	30.0	70.0	12	1130.0	10380
(b) 正弦波	100	-100	1.0	63	6.0	94.0	8	706.0	12608

※エネルギー量は、摩擦ダンパーの復元力特性を $F_y=1000kN$ 、 $\delta y=1.0mm$ のノーマルバイリニアモデルとした解析値。



(a) 地震応答波×12回



(b) 正弦波×8回

図4 断続载荷の入力波形

徐々に荷重が減少するものの、載荷終了まで概ね剛塑性型の履歴を示した。

3.2 エネルギー吸収量とダイス表面温度

エネルギー吸収量 (=履歴面積) およびダイス表面温度の時刻歴波形を図6に示す。まず、図6(a)より、地震応答波1回のエネルギー吸収量は平均800kN・m程度で、回数を重ねる毎に階段状にエネルギー量が累積され、12回終了時では約9,600kN・mであった。ダイス表面温度は時間遅れで上昇し、12回終了後の最大温度は217℃であった。また、図6(b)より、正弦波も同様に回数

を重ねる毎にエネルギー量が累積されるとともに、時間遅れでダイス表面温度が最大234℃まで上昇した。

3.3 平均摩擦荷重とエネルギー吸収量の推移

本節では、断続載荷中の平均摩擦荷重²⁾とエネルギー吸収量の推移を確認する。断続載荷1回毎の平均摩擦荷重は、地震応答波では図7(a)のように応答速度の大きい1ループ(赤線で示す評価区間)を抜き出し、正弦波では図7(b)のように目標振幅2サイクル目の1ループを抜き出して、文献²⁾と同様に1ループ間のエネルギー吸収量を摺動

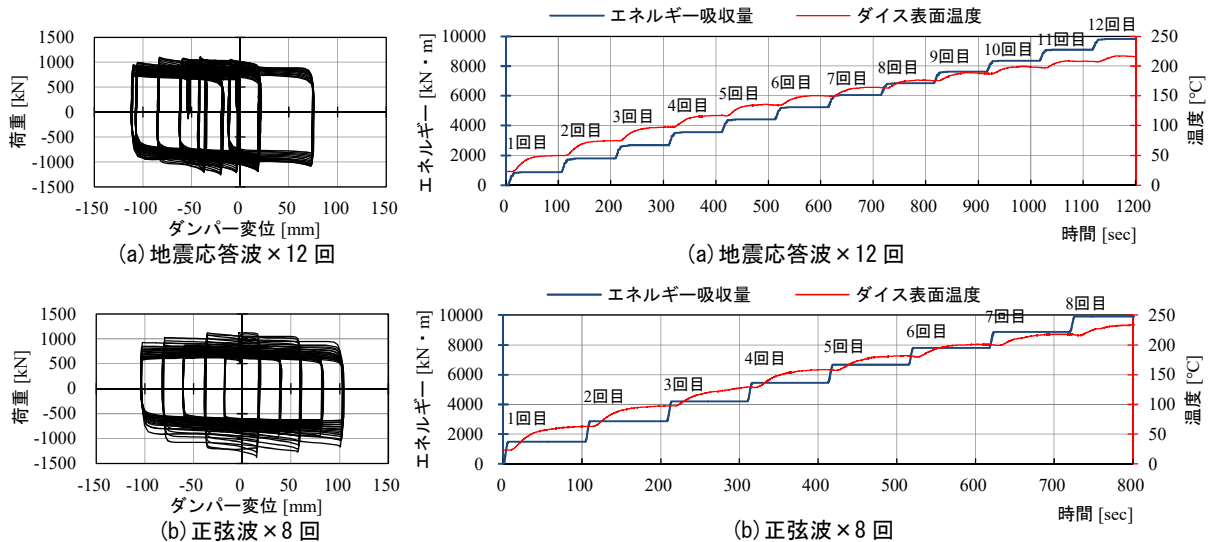


図5 荷重—変位関係(断続載荷)

図6 エネルギー吸収量とダイス表面温度の時刻歴波形(断続載荷)

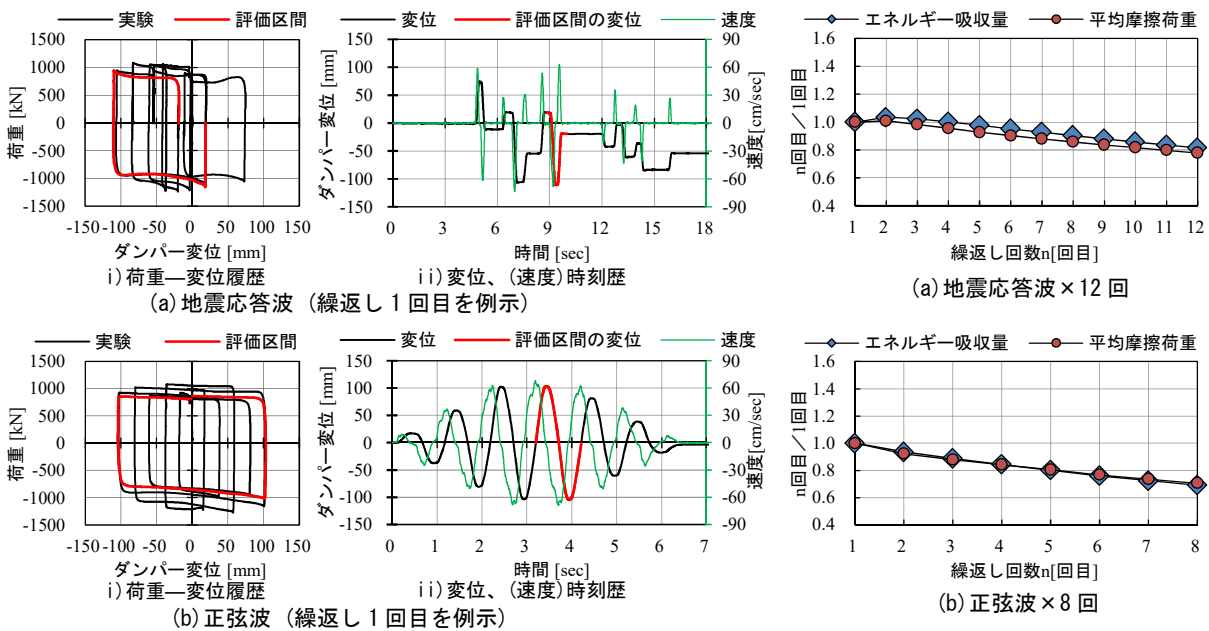


図7 平均摩擦荷重の評価区間

図8 平均摩擦荷重とエネルギー吸収量の推移

距離で除することで評価する。断続载荷 1 回毎の平均摩擦荷重とエネルギー吸収量の推移を図 8 に示す。平均摩擦荷重とエネルギー吸収量の推移は同じ傾向を示し、地震応答波と正弦波ともに 1 回目または 2 回目で最も大きく、回数を重ねる毎に徐々に小さくなった。地震応答波 12 回目の平均摩擦荷重とエネルギー吸収量は 1 回目の約 80%、正弦波 8 回目は 1 回目の約 70% まで低下したものの、レベル 2 地震動に対する設計想定を遥かに上回る変位履歴を与えても抵抗力を完全に喪失することはなく、安定したエネルギー吸収性能を発揮し続けることが確認された。

4. 断続载荷前・後の摩擦荷重の変化(静的载荷)

断続载荷後の摩擦荷重と履歴特性を確認するため、断続载荷の前・後にて、図 9 に示す荷重確認用²⁾の静的载荷(三角波、振幅: ±120mm、速度: 4.0mm/sec 一定、2 サイクル)を常温以下の状態で行った。静的载荷で得られた荷重-変位関係を図 10 に示す。断続载荷の前(黒)・後(赤)を比較すると、断続载荷後の摩擦荷重は、断続载荷前に比べて 20~30% 小さくなった。これは、断続载荷によって 200℃ 以上の高温状態となり、ロッドが膨張かつ物性変化(降伏点、ヤング率が微減)した状態で摺動したことにより、ロッド径が絞られるかダイス内径が広がるなどして、空冷後に収縮することで嵌め合いが緩くなったことが一因と考えられる。しかしながら、座屈やねじ破断のように急激に抵抗力を喪失することはなく、断続载荷後も安定した剛塑性型の履歴特性を保持することが確認された。

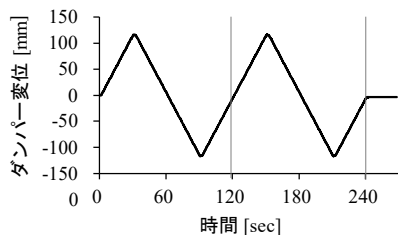
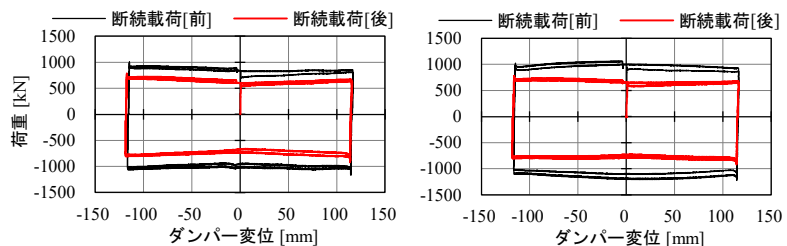


図 9 静的载荷の入力波形(三角波)



(a) 地震応答波×12回の前・後

(b) 正弦波×8回の前・後

図 10 荷重-変位関係(断続载荷前・後の静的载荷)

5. まとめ

以上、1000kN 級摩擦ダンパーに対して断続的繰返し高速载荷を行い、レベル 2 地震時応答を遥かに上回る過酷な载荷条件での履歴特性とエネルギー吸収量および荷重変化を確認し、摩擦ダンパーの限界状態を把握した。

【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
- 2) 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、Vol.75、No.2、pp.95-110、2019
- 3) 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報告集、Vol.39、No.2、pp.859-864、2017.7
- 4) 山崎 彬ほか：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
- 6) 波田雅也ほか：1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの高速载荷実験、青木あすなろ建設 技術研究所報、第 6 号、2021
- 7) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について、国住指第 1111 号、2016.6
- 8) 波田雅也ほか：摩擦ダンパーを用いた既設橋脚の地震時損傷制御技術の適用、土木学会 インフラメンテナンス実践研究論文集、Vol.1、No.1、pp.261-268、2022.3