

2. ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの小振幅多数回繰返し载荷実験

Small Amplitude Multiple Cyclic Loading Test of Die and Rod Friction Damper

下村将之* 波田雅也* 木村浩之* 山崎 彬*

一 概要

筆者らは、おもに橋軸直角方向を対象として、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。

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摩擦機構で、完全剛塑性に近い履歴特性を有する特長がある(図1(a))。ボールジョイント等を介して、上・下部構造の各々に両端ピン接合で緊結する(図1(b))。また、図1(c)のように、橋軸直角方向に摩擦ダンパーを配した支承部において、上部構造が橋軸方向に移動すると、摩擦ダンパーが斜めに傾いて突っ張り、ダンパー軸方向に荷重・変位が発生する。

本報では、桁の温度伸縮によって作用することが想定される摩擦ダンパーの荷重・変位量と繰返し回数について整理するとともに、その作用に対する耐久性を確認することを目的として行った「小振幅多数回繰返し载荷実験」について示す。

一 技術的な特長

本研究では、桁の温度伸縮に伴い、弾性範囲の小さな振幅ながらも多数回の繰返し荷重が作用することを想定し、250kN級摩擦ダンパーに対して繰返し载荷実験を実施した(図2、表1、写真1)。

実験の結果、4万回におよぶ弾性繰返し载荷に対して、摩擦ダンパーの軸剛性が変化することなく、十分な耐久性を有することが確認された(図3)。

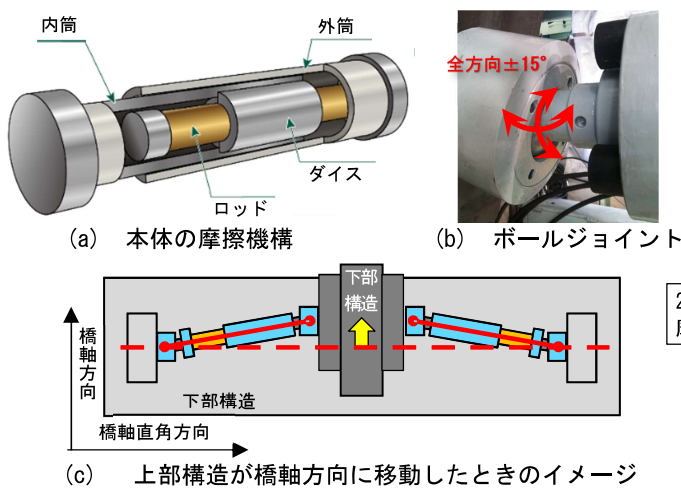


図1 摩擦ダンパーの概要

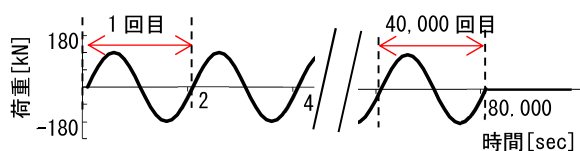


図2 入力波形

表1 载荷条件

波形	振幅	周期	繰返し回数	継続時間	
	kN			sec	回
正弦波	180	2	40,000	80,000	22.2

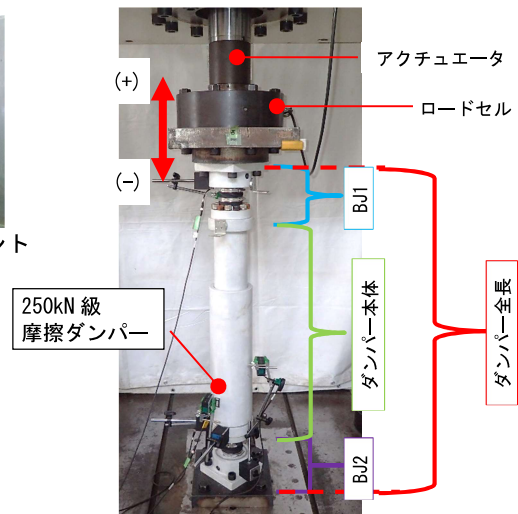


写真1 実験状況および変位計測範囲

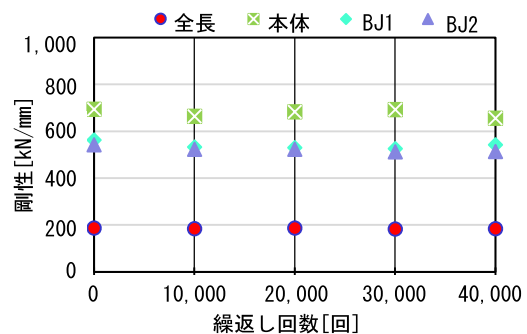


図3 繰返し回数・部位ごとの剛性一覧

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの小振幅多数回繰返し载荷実験 Small Amplitude Multiple Cyclic Loading Test of Die and Rod Friction Damper

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

ABSTRACT The authors have proposed a technology to improve seismic resistance by installing die and rod friction dampers (hereafter referred to as friction dampers) at the upper and lower joints of bridges, mainly in the direction perpendicular to the bridge axis. A friction damper is a friction mechanism that utilizes the fitting of a die (metal ring) and a rod (metal bar), and is characterized by hysteresis characteristics close to perfect rigid plasticity. Both ends are pinned to each of the upper and lower structures via ball joints or the like. In addition, when the upper structure moves in the direction of the bridge axis, the friction damper tilts diagonally and stretches in the support section where the friction damper is arranged in the direction perpendicular to the bridge axis, and load and displacement occur in the direction of the damper axis. In this report, we summarize the load/displacement amount and the number of repetitions of the friction damper, which is assumed to act due to the temperature expansion and contraction of the girder. The following shows the "Small Amplitude Multiple Cyclic Loading Test" conducted for the purpose of confirming the durability against the action.

Keywords: 摩擦ダンパー, ダイス・ロッド式, 橋梁, 制震, 繰返し試験
Friction damper, Die and rod type, Bridge, Seismic control, Cyclic test

1. はじめに

筆者らは、おもに橋軸直角方向を対象として、橋梁の上下部接続部に¹⁾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),4)}。

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摩擦機構で、完全剛塑性に近い履歴特性を有する特長がある(図2(a))。ボールジョイント⁵⁾等を介して、上・下部構造の各々に両端ピン接合で緊結する(図1、図2(b))。そのため、図2(c)のように、橋軸直角方向に摩擦ダンパーを配した支承部において、上部構造が橋軸方向に移動すると、摩擦ダンパーが斜めに傾いて突っ張り、ダンパー軸方向に荷重・変位が発生する。

本報では、桁の温度伸縮によって作用することが想定される摩擦ダンパーの荷重・変位量と繰返し回数について整理するとともに、その作用に対する耐久性を確認することを目的として行った「小振幅多数回繰返し载荷実験」について示す。

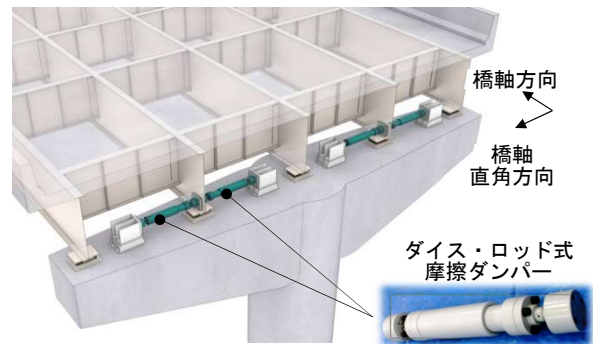


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

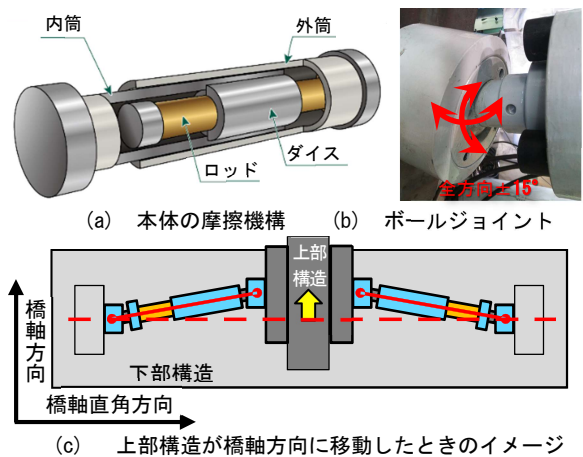


図2 摩擦ダンパーの概要

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

2. 鋼桁の温度伸縮と摩擦ダンパーの作用

本章では、鋼桁の温度伸縮に伴う可動支承部の橋軸方向への移動量 ΔL_{Gt} と、可動支承部の橋軸直角方向に設置した摩擦ダンパー伸び量 δ_D の関係について整理する(図3)。

まず、鋼桁の温度伸縮による可動支承部の移動量 ΔL_{Gt} は、伸縮する桁長さ L_G に温度変化 ΔT と線膨張係数 α を乗じた式(1)によって算出される⁹⁾。

$$\Delta L_{Gt} = \Delta T \cdot \alpha \cdot L_G \quad \dots (1)$$

ここに、 ΔL_{Gt} : 可動支承部の移動量(mm)、 ΔT : 温度変化(°C)、 α : 線膨張係数(1/°C)、 L_G : 伸縮桁長(mm)である。文献6)を参考に $\Delta T = \pm 30^\circ\text{C}$ (鋼橋の温度の範囲: $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$)、 $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ として、式(1)に代入すると、可動支承部の移動量は式(2)のように整理できる。たとえば、 $L_G = 100\text{m}$ ($= 1.0 \times 10^5\text{mm}$)のとき、 $\Delta L_{Gt} = 36\text{mm}$ である。

$$\Delta L_{Gt} = 36 \times 10^{-5} \cdot L_G \quad \dots (2)$$

また、図3のように、温度変化により桁長が伸びる(+ ΔL_{Gt})、縮む(- ΔL_{Gt})いずれの場合にも、摩擦ダンパーは斜めに傾き、原点時のピン接点間長さ L_D より長くなる。桁温度伸縮に伴う可動支承部の移動による摩擦ダンパーの伸び量 δ_{Dt} は、三平方の定理より式(3)のように表される。

$$\delta_{Dt} = \sqrt{(L_D^2 + \Delta L_{Gt}^2)} - L_D \quad \dots (3)$$

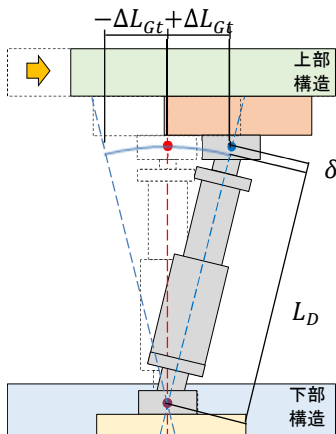


図3 可動支承移動量とダンパー伸び量の関係

ここに、 δ_{Dt} : 摩擦ダンパーの伸び量(mm)、 L_D : 摩擦ダンパーのピン接点間長さ(mm)である。

摩擦ダンパー実機の実験値の一例を纏めて図4と表1に示す。表中の軸剛性 K_D は、ダンパー本体と両端ピン部材を直列接合した全体の軸剛性の実験値であり、降伏変位 δ_{Dy} は、平均摩擦荷重³⁾を軸剛性で除して算出した値である。なお、ダンパー本体はほぼ剛塑性であり、降伏変位のうち約70%は接合部材の変位(ガタ)が占めている^{2),3),5)}。

式(2)と式(3)および表1中の数値を用いて、伸縮桁長 L_G とダンパー伸び量 δ_{Dt} の関係を図5に示す。図5の縦軸 δ_{Dt}/δ_{Dy} は、ダンパー規格毎の伸び量を降伏変位で除した値であり、 δ_{Dt}/δ_{Dy} が1.0未満となる概ね伸縮桁長150mまでは、摩擦ダンパーが弾性範囲内で追従することを示している。

表1 摩擦ダンパー実機の実験値

	仕様			実験値		備考
	設定摩擦荷重	最大振幅	ピン接点間長さ L_D	平均摩擦荷重	軸剛性 K_D	
	kN	mm	mm	kN	kN/mm	mm
(a)	250	200	1,112	281	181	1.5
(b)	400	100	1,035	408	288	1.4 文献5)
(c)	605	250	1,514	613	211	2.9 文献3)
(d)	715	200	1,458	725	311	2.3 文献2)
(e)	880	200	1,386	853	297	2.9
(f)	1100	150	1,436	1079	360	3.0 文献2)
(g)	1320	300	1,822	1325	406	3.3

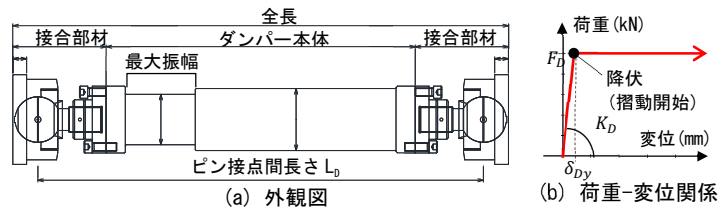


図4 摩擦ダンパー外観と荷重-変位関係の概念

- (a) 250kN±200mm (b) 400kN±100mm (c) 605kN±250mm
- (d) 715kN±200mm (e) 880kN±200mm (f) 1100kN±150mm
- (g) 1320k±300mm

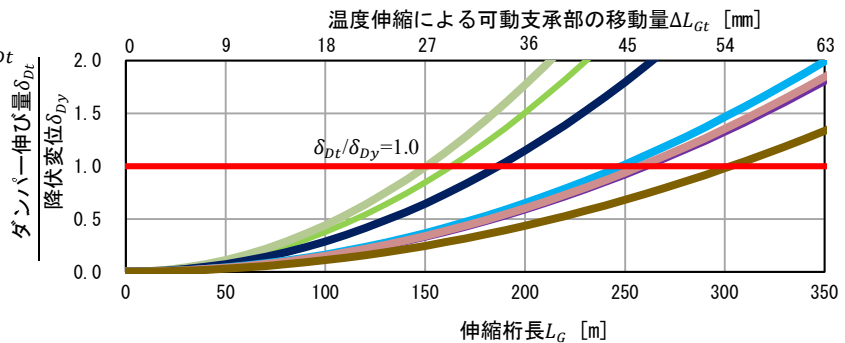


図5 鋼桁に摩擦ダンパーを適用した場合

橋梁の供用期間を100年とし、温度変化により1日に1回桁伸縮すると仮定する η と、桁温度伸縮の繰返し回数は $100(\text{年}) \times 365(\text{回}) = 36,500$ 回となる。前述の通り、摩擦ダンパーは桁温度伸縮に対して弾性範囲内で追従するため、摩擦摺動面が摩耗することはない。一方で、供用期間中の桁温度伸縮によって生じる数万回の繰返し荷重に対して、摩擦ダンパーの特性値が変化しない耐久性を有することが求められる。

3. 小振幅多数回繰返し載荷実験

前章(2章)では、橋軸直角方向の摩擦ダンパーは、桁の温度伸縮に伴い、弾性範囲の小さな振幅ながらも約4万回におよぶ多数回の繰返し荷重が作用することを示した。本章では、この作用に対する摩擦ダンパーの耐久性を確認することを目的として行った載荷実験について示す。

3.1 実験条件

(a) ダンパー試験体と実験方法

実験状況を写真1に示す。実験に用いる試験体は、表1中(a)に示す摩擦荷重250kNかつ最大振幅±200mm仕様の摩擦ダンパーとする。載荷方法は、動的500kN疲労試験機(島津製作所製)を用いて、摩擦ダンパー試験体を鉛直にセットし、ダンパー軸方向に荷重制御で載荷する方法とする。極性は引張側を正とする。計測項目は荷重および変位とする。荷重は、アクチュエータ内臓のロードセルにて、変位は写真1に示す全長、本体およびBJ1、BJ2(ボールジョイント1、2)の計4区間について、非接触型のレーザー変位計にて計測する。

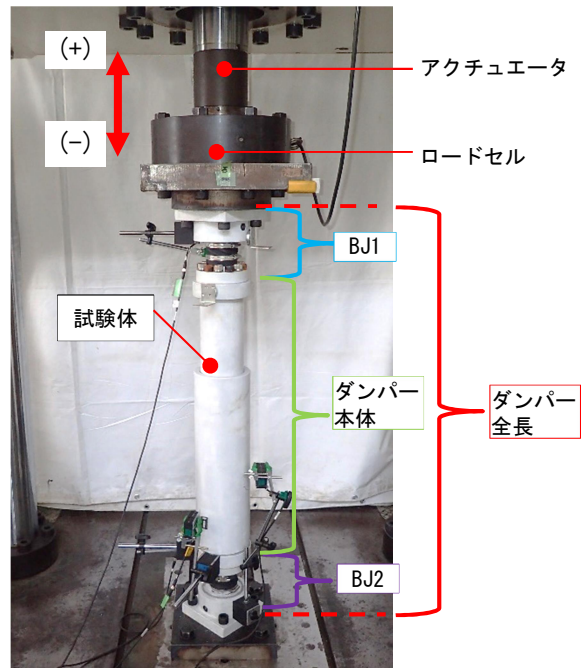


写真1 実験状況および変位計測範囲

表2 載荷条件

波形	振幅	周期	繰返し回数	継続時間	
	kN	sec	回	sec	h
正弦波	180	2	40,000	80,000	22.2

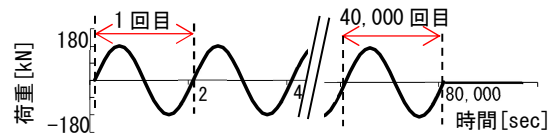


図6 入力波形

(b) 入力波形と繰返し回数

載荷条件を表2に、入力波形を図6に示す。入力波は、本試験体の設定摩擦荷重250kNの約70%に相当する180kNの荷重を正負交番に0.5Hzで繰返す荷重制御波とし、繰返し回数は2.1節を参考に、供用100年相当(36,500回)を上回る40,000回とする。

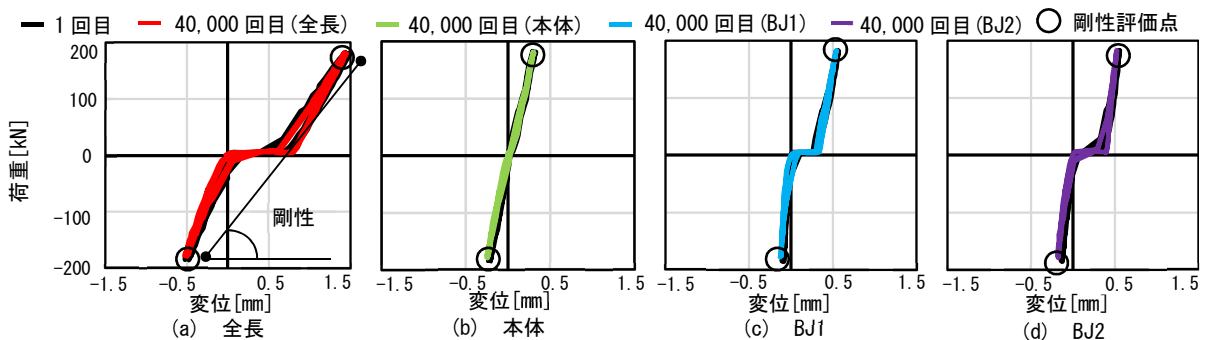


図7 繰返し1回目・40,000回目各部位の荷重-変位関係

表3 繰返し回数・部位ごとの剛性一覧

繰返し回数	剛性 [kN/mm]			
	全長	本体	BJ1	BJ2
1	187.0 (1.00)	693.1 (1.00)	562.2 (1.00)	541.5 (1.00)
10,000	183.1 (0.98)	662.9 (0.96)	532.1 (0.95)	523.6 (0.97)
20,000	186.6 (1.00)	682.8 (0.99)	529.2 (0.94)	523.0 (0.97)
30,000	182.9 (0.98)	691.3 (1.00)	525.8 (0.94)	512.3 (0.95)
40,000	184.2 (0.99)	654.6 (0.94)	542.5 (0.96)	513.1 (0.95)

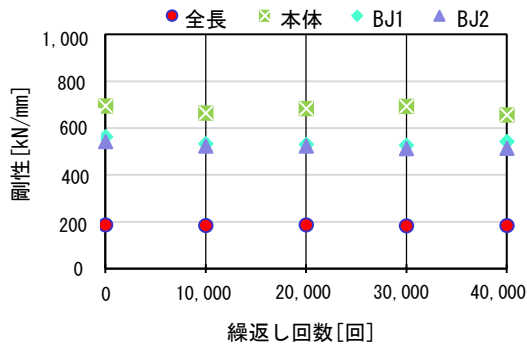


図8 繰返し回数・部位ごとの剛性一覧

3.2 実験結果

繰返し1回目と40,000回目における変位計測区間ごとの荷重-変位関係を図7に示す。また、1、10,000、20,000、30,000、40,000回目における変位計測区間ごとの軸剛性を表3と図8に示す。各区間の軸剛性は、図7中に丸印で示す正負の荷重ピーク点を直線で結んだ割線剛性で評価する。また、表中の括弧内の値は、1回目の数値で除して基準とした比率である。

まず、図7より、各区間の荷重-変位関係は、いずれも1回目と40,000回目で比較して変化なく、良く一致していることがわかる。また、表3と図8より、各区間の繰返し载荷中の軸剛性は、いずれも1回から40,000回までほとんど変動することなく安定している。

以上より、桁の温度伸縮に伴う作用を想定した4万回におよぶ弾性繰返し载荷に対して、摩擦ダンパーの軸剛性が変化することなく、十分な耐久性を有することが確認された。

4. まとめ

以上、本報では、桁の温度伸縮により作用する

摩擦ダンパーの伸び量と、橋の供用期間100年で想定される繰返し回数について整理し、その作用に対する耐久性を確認するために行った「小振幅多数回繰返し载荷実験」について示した。

実験の結果、4万回におよぶ弾性繰返し载荷に対して、摩擦ダンパーの軸剛性が変化することなく、十分な耐久性を有することが確認された。

なお、本報では桁温度伸縮に伴うダンパー作用を対象としたため、弾性範囲での多数回繰返し载荷を扱ったが、レベル1地震動時における支承変位などを対象とすると、摩擦ダンパーが数ミリ摺動する程度の小振幅が多数回繰返し作用するシチュエーションも考えられる。そういった作用に対する耐久性については、稿を改め報告したい。

【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：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
- 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
- 4) 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
- 5) 波田雅也、木村浩之、山崎 彬、下村将之：ダイス・ロッド式摩擦ダンパーに用いるボールジョイントの性能確認試験、土木学会第77回年次学術講演会、I-122、2022.8
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編、2012.3
- 7) 道路橋の免震構造研究委員会：道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案)、2011.12