

8. 橋梁用“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”のL2地震時特性に関する実験

Level 2 Earthquake Characteristic of “Die and Rod Type Friction Damper” for Bridges

波田雅也* 木村浩之* 牛島栄** 蔵治賢太郎*** 和田新***

ー概要ー

筆者らは、“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー（以下、摩擦ダンパー）”を用いた既設橋梁の耐震補強工法を提案している（図1）。摩擦ダンパーは建築分野において実用化されており、摩擦ダンパーを組込んだブレースを建物の層間に外壁面から取付けて耐震補強する用途で、変形性能に乏しい中低層RC造建築物を中心に多数の実績を有している。ブレースとして用いる場合、L2地震動時に摩擦ダンパーが滑動する速度は最大10～20cm/sec程度、振幅は最大1～2cm程度であり、その範囲では速度依存性や振幅依存性、摩擦熱による温度依存性が小さいとされている。しかしながら、本工法のように橋梁の可動支承と並列に摩擦ダンパーを組込む場合、L2地震動時には100cm/sec以上の高速度かつ10cm以上の高振幅で滑動することが想定されるため、各種依存性を適切に評価する必要がある。

本報では、橋梁用に摩擦荷重やストロークを大容量化させた摩擦ダンパーに対して、L2地震動時における速度依存性を評価するために実施した高速加振実験の結果について述べる（写真1）。

ー技術的な特長ー

摩擦ダンパーは、ダイス（金属環）とロッド（金属棒）の接触面に生じる摩擦力を利用したダンパーであり、完全剛塑性型の履歴特性を有するという特長を有している（図2）。

本報で述べる高速加振実験では、L2地震動時（非定常加振時）にも摩擦ダンパーが安定した履歴形状やエネルギー吸収性能を有することを確認するとともに、既往の研究で提案されている手法に準拠して摩擦荷重の速度依存性の定式化を試みた（図3）。



図1 摩擦ダンパーを用いた
既設橋梁の耐震補強工法



写真1 高速加振実験状況

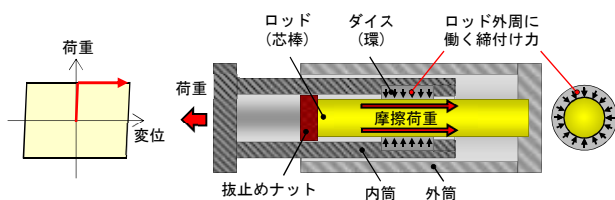


図2 摩擦ダンパーの機構

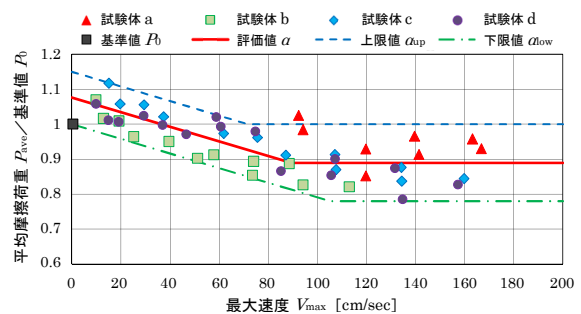


図3 非定常加振時の V_{max} と P_{ave} の関係

※本報は、首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究「既設橋梁の耐震性向上技術に関する研究」に関する研究成果の一部である。

*技術研究所耐震リニューアル研究室 **執行役員技術研究所長 ***首都高速道路(株)

橋梁用“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”のL2地震時特性に関する実験

Level 2 Earthquake Characteristic of “Die and Rod Type Friction Damper” for Bridges

○波田 雅也* 木村 浩之* 牛島 栄** 蔵治 賢太郎*** 和田 新***
Masaya HADA Hiroyuki KIMURA Sakae USHIJIMA Kentaro KURAJI Arata WADA

ABSTRACT In recent years, the remaining function after a Level 2 earthquake has become important challenges of road bridges design in Japan. A seismic retrofit method that can significantly reduce damage to bridge pier bases against a Level 2 earthquake by installing Die-and-rod friction dampers have been developed. This paper describes the results of an excitation experiment of a Die-and-rod friction damper developed for road bridge applications. As a result of the experiment, expected energy absorbing performance of this friction damper was confirmed when subjected to several times Level 2 earthquake motions.

Keywords: 摩擦ダンパー、ダイス・ロッド、道路橋、耐震補強、加振実験、地震時特性、速度依存
Friction Dampers, Die-and-Rod, Road Bridges, Seismic Retrofit, Excitation Experiment, Earthquake Characteristic, Velocity Dependence

1. はじめに

筆者らは、既設橋梁の上部構造と下部構造の間(支承部)に制震デバイスとして“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(以下、摩擦ダンパー)”を設置する耐震補強工法を開発している¹⁾²⁾(図1)。

摩擦ダンパーは、建築分野において実用化されており、摩擦ダンパーを組込んだブレースを建物の層間に外壁面から取付けて耐震補強する用途で、変形性能に乏しい中低層RC造建築物を中心に多数の実績を有している³⁾⁴⁾⁵⁾。摩擦ダンパーをブレースとして用いる場合、L2地震動⁶⁾時に摩擦ダンパーが滑動する速度は最大10~20cm/sec程度、振幅は最大1~2cm程度であり、その範囲では速度依存性や振幅依存性、摩擦熱による温度依存性が小さいとされている⁵⁾。しかしながら、本研究で対象とするように、橋梁支承部に可動支承と並列に摩擦ダンパーを組込む場合、L2地震動時には100cm/sec以上の高速度かつ10cm以上の高振幅で滑動することが想定される¹⁾。

武田ら⁷⁾⁸⁾は、皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーについて、橋梁を想定した加振条件で実験を行い、性能評価および速度依存性を評価している。しかしながら、皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーと、本研究で対象とする摩擦ダンパーでは、同じ摩擦型でも摩擦材や形状・機構が全く異なるため、各種依存性についても異なる可能性がある。

本報では、橋梁用摩擦ダンパー(荷重:600kN、ストローク:±250mm)のL2地震時特性を確認するために実施した加振実験について述べる。



図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

*技術研究所耐震リニューアル研究室

**執行役員技術研究所長

***首都高速道路(株)

※本報は、首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究「既設橋梁の耐震性向上技術に関する研究」に関する研究成果の一部である。

2. 摩擦ダンパーの概要

摩擦ダンパーの機構を図2に、構成部品を写真1に示す。摩擦ダンパーの機構は、ダイス(環)とロッド(芯棒)で構成され、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により、ロッドの外周に締付け力が生じる仕組みを利用している。ダイスが内筒に、ロッドが外筒に固定されており、ロッドに軸力が作用するとダイスとロッドの接触面に摩擦力が発生する。摩擦ダンパーは、設定摩擦荷重に達するまでは滑動せず、設定摩擦荷重に達すると、その摩擦荷重を保持しながらダイスがロッド上を滑動し、振動エネルギーを摩擦熱に変換して消散させる。ダイスには焼入れを施した鋼材、ロッドにはりん青銅を使用し、摩擦ダンパーの設定摩擦荷重(F_d)は、ダイスの締付け力(P_d)にダイスとロッドの接触面の摩擦係数(μ)を乗じることで、(1)式のように算定される。

$$F_d = P_d \cdot \mu \quad \dots (1)$$

ここで、 F_d ：設定摩擦荷重 [kN]、

P_d ：ロッド外周に働くダイスによる締付け力、

μ ：ダイスとロッド接触面の摩擦係数

締付け力は弾性理論解³⁹⁾に基づいて算定され、ダイスとロッドの形状(ロッドの直径、ダイスとロッドの内外径差および接触長さ)を変えることで調整する。また、ダイスとロッドの接触面には二

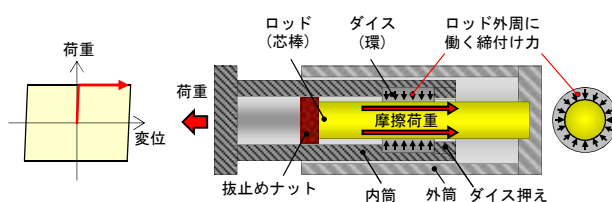


図2 摩擦ダンパーの機構



写真1 摩擦ダンパーの構成部品

硫化モリブデン系の固体グリースを塗布し、0.4cm/sec 未満の低速度で静的に滑動させて馴染ませる工程を数回繰り返すことで、摩擦係数を安定させる³⁾。

3. L2 地震時特性確認実験

L2 地震時特性確認実験では、摩擦ダンパーを橋梁で用いた場合に想定される高速度かつ高振幅で非定常加振した時の履歴形状やエネルギー吸収性能を確認するとともに、摩擦荷重の速度依存性を評価する。

3.1 摩擦ダンパー試験体

摩擦ダンパー試験体の容量は最大ストロークを±250mm、設定摩擦荷重を±600kNとし、試験体数は4体(a、b、c、d)作製した。

3.2 実験装置と計測項目

実験装置図を図3に、実験状況を写真2に示す。実験方法は、摩擦ダンパーを両端の接合部材を介して反力床およびアクチュエータに固定し、軸方向に変位制御で加振する方法とした。計測項目は、荷重、ダンパー変位、接合部材変位、およびダイス表面温度とし、速度はダンパー変位を微分することで算定した。また、極性は、荷重および変位ともに引張側を正とした。サンプリング周波数は500Hzとし、荷重および速度は25Hzでハイカッ

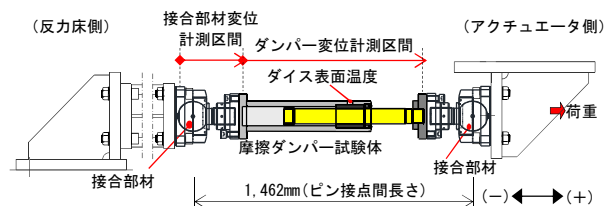


図3 実験装置および計測項目



写真2 実験状況

トフィルタ処理した。なお、各加振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(23℃)以下になったことを確認してから次の加振を行った。

3.3 入力波形と加振ケース

入力波形を図4に、加振ケースを表1に示す。入力波形は、文献1)の時刻歴応答解析で得られた摩擦ダンパーの変位応答波形であり、タイプI地震動およびタイプII地震動から各1波(I-III-3、II-III-3)とする。なお、解析時の履歴特性はノーマルバイリニア(摩擦荷重 600kN、滑出し変位 1.0mm)である。加振ケースは、図4の入力波形を基本(100%)として、各々表1に示すように速度

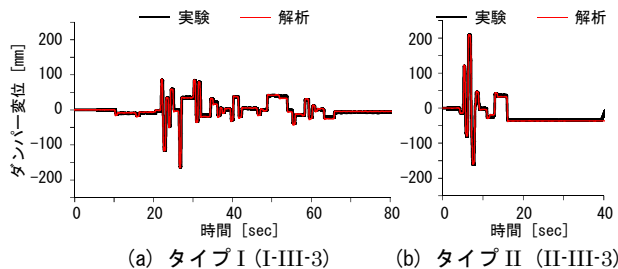


図4 入力波形 (L2地震時特性確認実験)

表1 加振ケース (L2地震時特性確認実験)

加振名	試験体 No.	入力波	最大振幅 a [mm]	速度倍率	最大速度 V_{max} [cm/sec]
a-133-100%-1	a	I-III-3	166	100%	122
a-133-100%-2		I-III-3	166		122
a-233-100%-1		II-III-3	209		179
a-233-100%-2		II-III-3	209		179
b-133-10%	b	I-III-3	166	10%	12
b-133-20%				20%	24
b-133-40%				40%	49
b-133-60%				60%	73
b-133-80%				80%	98
b-133-100%				100%	122
c-233-10%	c	II-III-3	209	10%	18
c-233-20%				20%	36
c-233-40%				40%	72
c-233-60%				60%	107
c-233-80%				80%	143
c-233-100%				100%	179
d-233-5%	d	II-III-3	209	5%	9
d-233-10%				10%	18
d-233-20%				20%	36
d-233-30%				30%	54
d-233-40%				40%	72
d-233-60%				60%	107
d-233-80%				80%	143
d-233-100%				100%	179

倍率を変化させた計24ケースとした。

3.4 実験結果

3.4.1 履歴形状とエネルギー吸収性能 (試験体 a)

試験体 a の加振ケース(a-133-100%-1、a-233-100%-1)で得られた履歴曲線を図5に、エネルギー吸収時刻歴を図6に、解析結果と比較して示す。また、実験で得られた最大荷重、最大変位、最大速度およびエネルギー吸収量を、解析値と比較して表2に示す。図5より、実験で得られた履歴曲線は、小振幅時に荷重が高く、大振幅時に荷重が低くなる傾向があるものの、概ね安定した剛塑性型の履歴形状を示している。また、図6より、エネルギー吸収時刻歴は、解析結果と概ね対応しており、L2地震動に対して摩擦ダンパーが想定通りのエネルギー吸収性能を有することが確認できた。なお、累積エネルギー吸収量の実験値が、解析値に比べて1~5%小さかったのは、大振幅時の荷重低下の影響と考えられる。

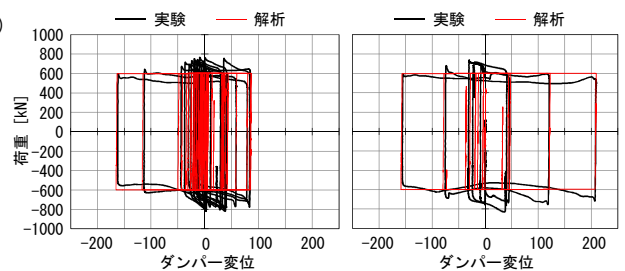


図5 履歴曲線 (試験体 a)

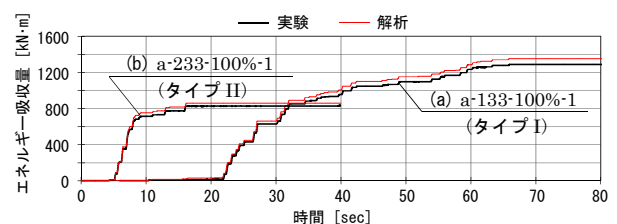


図6 エネルギー吸収時刻歴 (試験体 a)

表2 実験値と解析値の比較 (試験体 a)

	L2地震動	最大荷重 [kN]		最大変位 [mm]		最大速度 [cm/sec]		エネルギー 吸収量 [kJ・m]	
		+	-	+	-	+	-		
(a)	a-133-100%-1 (タイプI)	実験	766	-822	85	-163	120	-100	1289
		解析	600	-600	87	-166	122	-99	1352
		実/解	128%	137%	98%	98%	98%	102%	95%
(b)	a-233-100%-1 (タイプII)	実験	734	-831	209	-157	163	-140	847
		解析	600	-600	209	-159	179	-142	859
		実/解	122%	138%	100%	99%	91%	99%	99%

3.4.2 速度倍率毎の履歴形状（試験体 d）

速度倍率を 5%から 100%の範囲で 8 段階に変化させた試験体 d の履歴曲線一覧を図 7 に示す。図 7 より、速度倍率の小さな加振ケースでは大振幅時に太鼓型¹⁰⁾の履歴形状となり、速度倍率を大きくするにつれて鼓型¹⁰⁾の履歴形状に変化した。これは、文献 1)の正弦波加振結果や文献 8)の地震応答波加振と同様の傾向であった。このように、同じ摩擦ダンパーに対して同一振幅の変位波形で加振しても、加振する速度倍率に応じて履歴形状が変化することがわかった。

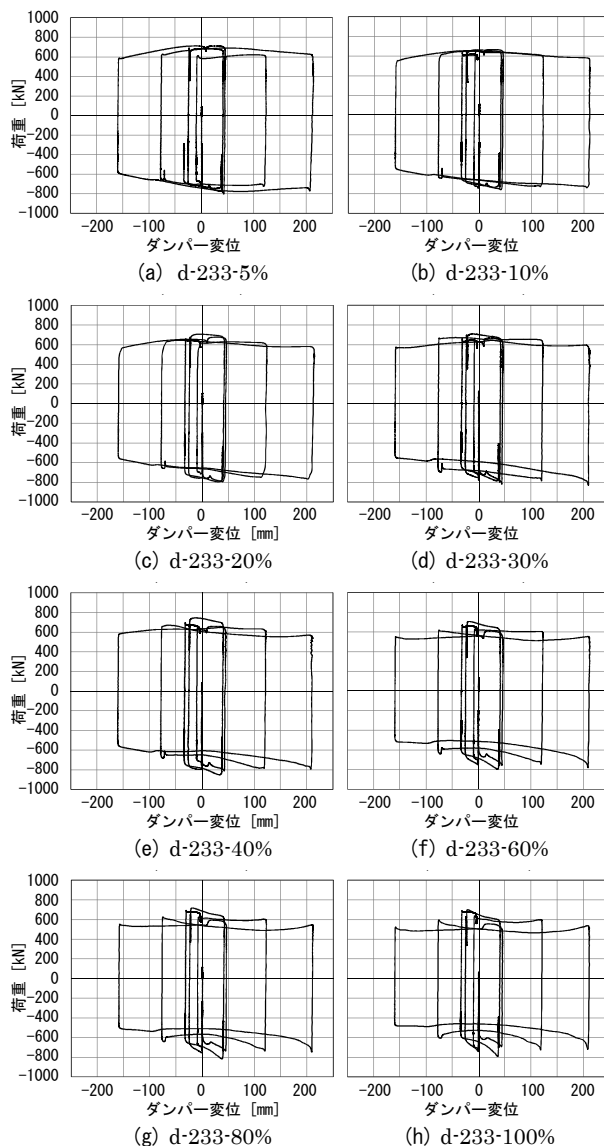


図 7 履歴曲線一覧（試験体 d）

3.5 摩擦ダンパー速度依存性の検討

3.5.1 最大速度と平均摩擦荷重の評価区間

以下では、非定常加振において摩擦ダンパーが滑動する速度と摩擦荷重の関係について検討する。タイプ I の平均摩擦荷重 P_{ave} の評価区間を図 8 に、タイプ II の P_{ave} の評価区間を図 9 に示す。地震時における P_{ave} は、図中に太線で示すように、タイプ I、タイプ II の各々について、一度に経験する滑り量が大きかった履歴ループを 2 つ抽出し、その履歴ループ各々におけるエネルギー吸収量 E (履歴面積) を滑り量 $\Sigma \delta$ で除することで、(2)式

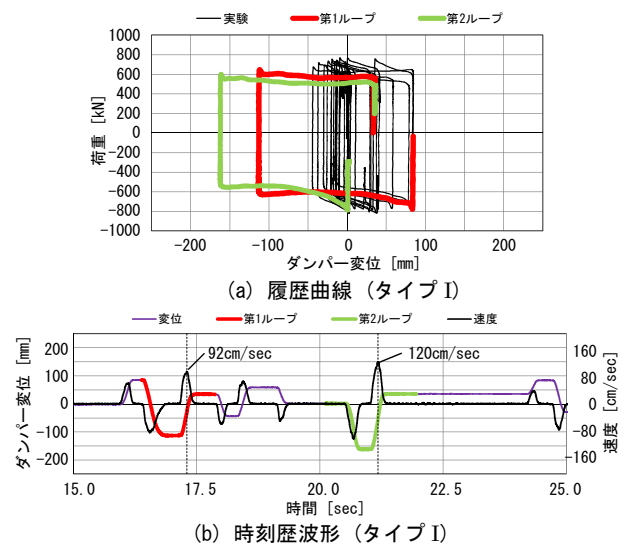


図 8 タイプ I における平均荷重評価区間

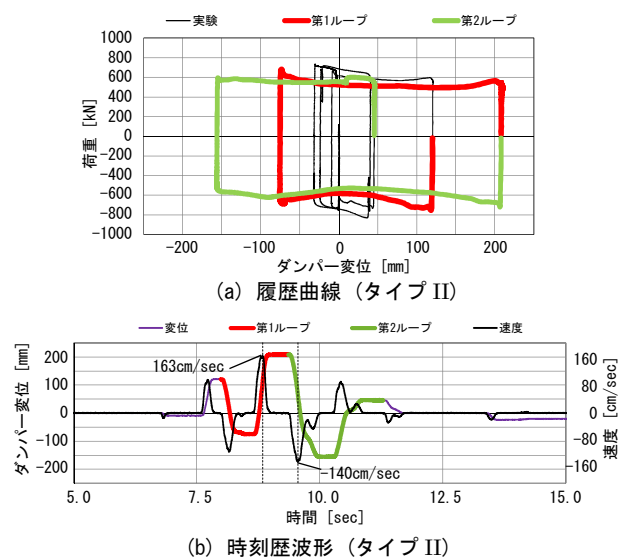


図 9 タイプ II における平均荷重評価区間

を用いて評価した。また、各々の履歴ループ内において変位を微分することで算定した速度のピーク値 $V_{\max}$ とした。

$$P_{ave} = E / \sum \delta \cdots (2)$$

ここで、 P_{ave} : 平均摩擦荷重 [kN]、

E : 1サイクルのエネルギー吸収量 [kN・mm]、

$\sum \delta$: 1サイクルのダンパー滑り量 [mm]

3.5.2 摩擦荷重と最大速度の関係（非定常加振）

前項の要領で評価した非定常加振時における平均摩擦荷重 P_{ave} と最大速度 $V_{\max}$ の関係を図 10 に示す(縦軸 P_{ave} は、事前に実施した 0.4cm/sec 一定の静的確認実験により得られた平均摩擦荷重(=基準値 P_0)で除することで無次元化して表記)。図 10 では、全 24 ケースの実験結果毎に 2 点ずつ、合計 48 点プロットしている。また、図中には参考のため P_0 も合わせてプロットしている。図 10 より、まず、 $V_{\max}$ が 20cm/sec 程度までの範囲では、 P_{ave} が P_0 に比べて最大で 10% 程度大きくなる傾向があった。これは文献 1) の正弦波加振で得られた結果と共通する。つぎに、概ね 90cm/sec 以下の範囲では、 $V_{\max}$ の増大に応じて P_{ave} が低下していること、さらには、90cm/sec 程度を超えると、 P_{ave} の低下が頭打ちとなり、概ね横ばいになっていることがわかる。このように、摩擦ダンパーは、入力波形(タイプ I、タイプ II)にかかわらず非定常加振時の $V_{\max}$ に応じて P_{ave}

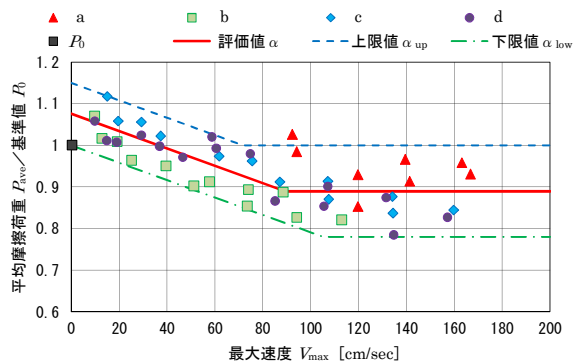


図 10 非定常加振時の P_{ave} と $V_{\max}$ の関係

が変化することから、摩擦ダンパーを用いた橋梁の実施設計に際しては速度依存性を適切に考慮する必要があることがわかった。なお、摩擦荷重の変化は、滑動時に生じる摩擦熱の影響で、ダイスとロッドの締付け力ないし接触部の摩擦係数が変化したものと考えられる³⁾。

3.5.3 速度依存性の評価式

本項では、文献 8) で武田らが提案している手法に準拠して、摩擦ダンパーの非定常加振時における P_{ave}/P_0 と $V_{\max}$ の関係(速度依存性)の定式化を試みる。まず、90cm/sec 以下の範囲のプロットは、最小二乗法を用いて直線に近似する。次に、90cm/sec を超える範囲のプロットは、平均値一定の直線として近似する。これら 2 つの直線は $V_{\max} = 89.5\text{cm/sec}$ で交わるため、摩擦ダンパーの速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の評価値 α が(3)式のように表される。

$$\alpha = -0.00209V_{\max} + 1.076 \geq 0.889 \cdots (3)$$

ここで、 $V_{\max}$: 非定常加振時の最大速度、

α : 速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の評価値

ただし、 $V_{\max} \geq 89.5$ のとき、 $\alpha = 0.889$

一方、既往の研究²⁾より、支承部に摩擦ダンパーを用いた橋梁では、下部構造の応答値を最小とするダンパー摩擦荷重の最適値が存在し、最適値より大きくとも小さくとも応答値が増大することがわかっている。評価値 α は、実験値に対して最大±10%程度の差異があるため、実施設計において摩擦ダンパーのエネルギー吸収性能を過大評価しないためには、速度依存性の上下限を押さえておく必要がある。そこで、摩擦ダンパーの速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の上限値 α_{up} を(4)式、下限値 α_{low} を(5)式のように整理した。

$$\alpha_{up} = -0.00209V_{\max} + 1.15 \geq 1.000 \cdots (4)$$

ここで、 α_{up} : 速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の上限値

ただし、 $V_{\max} \geq 72.0$ のとき、 $\alpha_{up} = 1.000$

$$\alpha_{low} = -0.00209V_{max} + 1.00 \geq 0.780 \quad \dots (5)$$

ここで、 α_{low} ：速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の下限值
ただし、 $V_{max} \geq 105.5$ のとき、 $\alpha_{low} = 0.780$

上限値 α_{up} の P_{ave}/P_0 が負勾配で比例する領域は、評価値の傾きのまま実験結果の最大値を通るように切片に1.15を用いた。また、 P_{ave}/P_0 が一定の領域は、簡便のため1.00を用いた。下限値 α_{low} の P_{ave}/P_0 が負勾配で比例する領域は、評価値の傾きのまま切片に1.00を用いた。また、 P_{ave}/P_0 が一定の領域は、実験結果の下限值0.780を用いた。 α_{up} は、10cm/sec程度を下回る低速域において実験結果と対応しないものの、1点を除いて実験結果の上限を包絡しており、また、 α_{low} は、全ての実験結果の下限を包絡している。以上より、文献8)の手法に準拠し、ダイス・ロッド式の摩擦機構を採用した摩擦ダンパーの速度依存性を定式化することができた。

4. まとめ

以上、本論文では、橋梁用に大容量化したダイス・ロッド式摩擦ダンパーの概要およびL2地震時特性確認実験について述べた。

実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 摩擦ダンパーは、L2地震時に想定される条件下(最大応答速度100cm/sec以上、最大振幅10cm以上)においても完全剛塑性に近い安定した履歴形状を発揮した。また、解析時に想定した通りのエネルギー吸収性能を発揮した。
- (2) 摩擦ダンパーは、入力する非定常加振波の最大速度と平均摩擦荷重との間に負の相関関係が認められた。また、既往の研究に準拠し、非定常加振時における摩擦ダンパーの速度依存性を定式化することができた。

【参考文献】

- 1) 波田雅也, 蔵治賢太郎, 右高裕二, 牛島栄: 既設橋梁の耐震性向上に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1003-1008, 2016.
- 2) 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集, Vol.39, No.2, pp.859-864, 2017.
- 3) 大西博之, 北嶋圭二, 中西三和, 安達洋: 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.
- 4) 上田英明, 滝口純一, 竹内健一, 北嶋圭二: 制震ブレース工法—施工実績—, 青木あすなろ建設技術研究所報, Vol.1, 2016.
- 5) 上田英明, 横内基, 斉藤富士雄, 北嶋圭二, 安達洋: 400kN摩擦ダンパー並列配置による大容量制震ブレースの開発(その1 400kN摩擦ダンパーの繰返し限界性能), 日本建築学会学術講演梗概集(中国), B-2, pp.533-534, 2008.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.
- 7) 武田篤史, 田中浩一: 摩擦型ダンパーを用いた橋梁系の振動台実験, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp.628-643, 2011.
- 8) 武田篤史, 佐野剛志: 皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーの性能評価, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.492-503, 2012.
- 9) 日本機械学会: 機械工学便覧 A4 材料力学, 丸善, 1989.
- 10) 土木研究センター: 道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案), 2011.