橋梁の制震化に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの速度依存性

青木あすなろ建設(株)　技術研究所　　正会員　○波田雅也　木村浩之　フェロー会員　牛島栄
首都高速道路(株)　技術部　技術推進課　　正会員　　蔵治賢太郎　松原拓朗　久保田成是

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)を設置する耐震補強工法を提案している[2)3)]．摩擦ダンパーは，ダイス(金属環)とロッド(金属棒)の接触面に生じる摩擦力を利用した制震デバイスであり，完全剛塑性型に近い履歴形状を有するという特長がある(**図-1**)．建築分野で既に実用化され，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多数の実績を有している[4]．ブレースとして用いる場合は，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 程度であり，その範囲では速度依存性が小さいとされている[5]．しかしながら，摩擦ダンパーを橋梁に適用する場合，L2 地震動時には 100cm/sec 以上の高速度で滑動することが想定されるため[2]，速度依存性を適切に評価する必要があった．

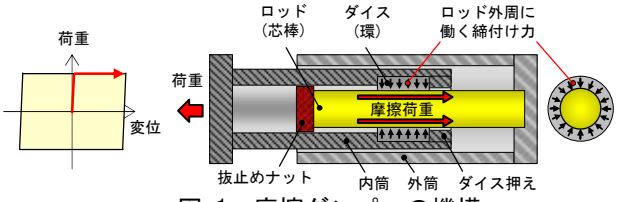


図-1　摩擦ダンパーの機構

写真-1　高速加振実験状況

本報では，橋梁用に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定式化するために実施した高速加振実験について述べる(**写真-1**)．

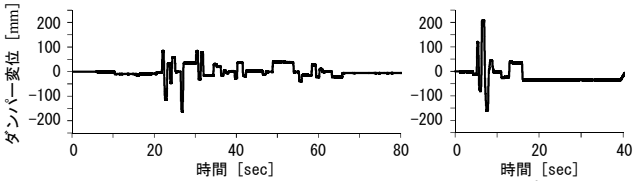


図-2　入力波形

2．高速加振実験

2.1 試験体　　摩擦ダンパー試験体は最大ストローク：±250mm，設定摩擦荷重：±600kN とし，試験体数は 4 体(a，b，c，d)製作した．

2.2 実験方法　　実験方法は，摩擦ダンパーの両端をピン接合として，軸方向に変位制御で加振する方法とした(**写真-1**)．計測項目は荷重と変位およびダイス表面温度とし，速度は変位を微分して算定した．極性は荷重と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，荷重と速度は 25Hz でハイカッ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．

2.3 入力波形と加振ケース　　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(**図-2**)．加振ケースは，**図-2** の入力波形を基本(100%)として，各々**表-1** に示すように速度倍率を変化させた計 24 ケースとした．

表-1　加振ケース

加振ケース名	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

3．実験結果および速度依存性の検討

3.1 速度倍率毎の履歴形状　　タイプ II の速度倍率を 8 段階に変化させた試験体 d の履歴曲線一覧を**図-3** に示す．図より，いずれの加振ケースでも概ね完全剛塑性型に近い履歴形状を示したものの，速度倍率の小さなケースは大振幅時に太鼓型[6]となり，速度倍率を大きくするにつれて鼓型[6]に変化する傾向が見られた．

キーワード　摩擦ダンパー，ダイス・ロッド式，橋梁，制震，速度依存性
連絡先　〒300-2622　茨城県つくば市要 36-1　青木あすなろ建設(株)技術研究所　構造研究部　TEL029-877-1112

3.2 平均摩擦荷重 P_{ave} と最大速度 V_{max} の関係　平均摩擦荷重 P_{ave} は，加振中で一度に経験する滑り量が大きかった履歴ループ(**図-4** 中の太線)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(1)式のように評価した．また，各々の履歴ループ内における速度のピーク値を最大速度 V_{max} とした．全 24 ケースの P_{ave} と V_{max} の関係を**図-5** に示す(縦軸の P_{ave} は，0.4cm/sec 一定速度の定常加振から評価した平均摩擦荷重の基準値 P_0 で除して無次元化)．図より，V_{max} が 20cm/sec 以下の範囲では P_{ave} が P_0 に比べて最大 10%程度大きくなり，20～90cm/sec の範囲では V_{max} の増大に応じて P_{ave} が低下する傾向があった．また，90cm/sec 程度を超えると P_{ave} の低下が頭打ちとなり，概ね横ばいになった．

3.3 速度依存性の定式化　本項では，文献 7)で武田らが提案した手法に準拠して，摩擦ダンパーの L2 地震動時における 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}＝89.5cm/sec で交わるため，P_{ave}/P_0 の評価値 α が(2)式のように表される．一方，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知られている [2)]．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せておく必要がある．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(3)式，下限値 α_{low} を(4)式のように整理した．α_{up} は，P_{ave}/P_0 が負勾配の領域は α と同じ傾きのまま切片を 1.15 とし，P_{ave}/P_0 が一定の領域は簡便のため 1.00 とした．α_{low} は，P_{ave}/P_0 が負勾配の領域は α の傾きのまま切片を 1.00 とし，P_{ave}/P_0 が一定の領域は実験結果の下限値 0.780 とした．図より，α_{up} は 10cm/sec 程度を下回る低速域で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，α_{low} は全ての実験結果の下限を包絡している．

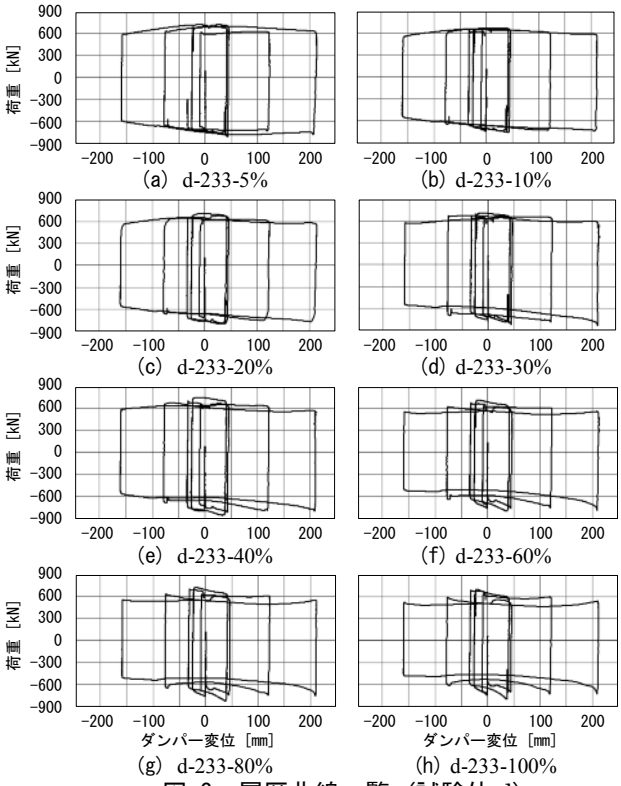
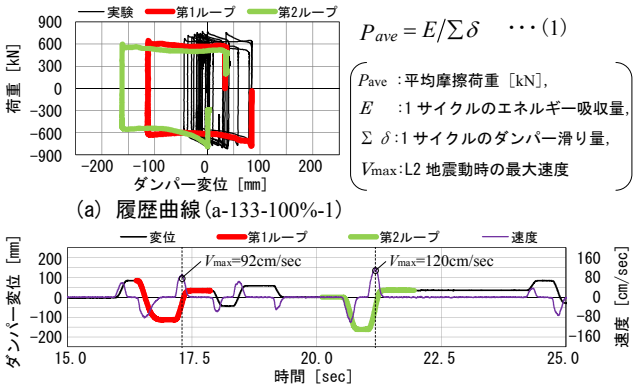


図-3　履歴曲線一覧（試験体 d）



$$P_{ave} = E/\Sigma\delta \quad \cdots(1)$$

P_{ave} ：平均摩擦荷重［kN］，
E ：1 サイクルのエネルギー吸収量，
$\Sigma\delta$ ：1 サイクルのダンパー滑り量，
V_{max}：L2 地震動時の最大速度

図-4　平均摩擦荷重の評価区間の一例（タイプ I）

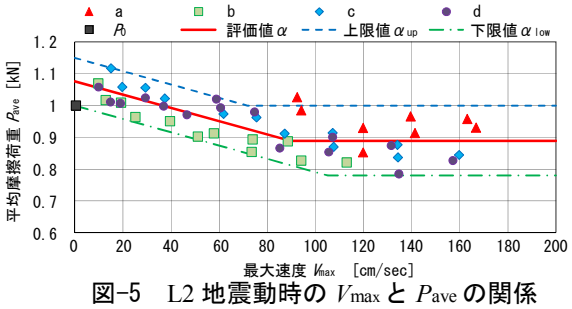


図-5　L2 地震動時の V_{max} と P_{ave} の関係

4．まとめ

以上，橋梁に用いる摩擦ダンパーの高速加振実験を行い，L2 地震動時における速度依存性を定式化した．

$$\alpha = -0.00209V_{max} + 1.076 \geq 0.889 \quad \cdots(2)$$

α：速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の評価値
ただし，V_{max} ≧89.5 のとき，α＝0.889

$$\alpha_{up} = -0.00209V_{max} + 1.15 \geq 1.000 \quad \cdots(3)$$

α_{up}：速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の評価値
ただし，V_{max} ≧72.0 のとき，α_{up}＝1.000

$$\alpha_{low} = -0.00209V_{max} + 1.00 \geq 0.780 \quad \cdots(4)$$

α_{low}：速度依存性を考慮した P_{ave}/P_0 の評価値
ただし，V_{max} ≧105.5 のとき，α_{low}＝0.780

【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：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報告集，Vol.38，No.2，pp.1003-1008，2016.7　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) 上田英明ほか：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，pp.1-11，2016.3　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) 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)，2011.12　7) 武田篤史ほか：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.492-503，2012.3