摩擦履歴と速度則の履歴特性を有する制震ダンパーの調和入力による応答評価

宇野 裕惠[1]・佐藤 知明[2]・松田 泰治[3]・五十嵐 晃[4]・足立 幸郎[5]・八ツ元 仁[6]・篠原 聖二[7]

[1] 正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技師長（〒 541-0053 大阪府大阪市中央区本町 4-6-7）
E-mail : huno@oiles.co.jp

[2]正会員 JIP テクノサイエンス株式会社 システム技術研究所 研究員（〒 532-0011 大阪市淀川区西中島 2-12-11）
E-mail: tomoaki_sato@cm.jip-ts.co.jp

[3] 正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻 教授（〒 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1）
E-mail: mazda@kumamoto-u.ac.jp

[4] 正会員 京都大学防災研究所 教授（〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

[5] 正会員 阪神高速道路株式会社 保全交通部 保全企画課 課長（〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）
E-mail: yukio-adachi@hanshin-exp.co.jp

[6] 正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室 主任（〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）
E-mail: hitoshi-yatsumoto@hanshin-exp.co.jp

[6] 正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室 主任（〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）
E-mail: masatsugu-shinohara@hanshin-exp.co.jp

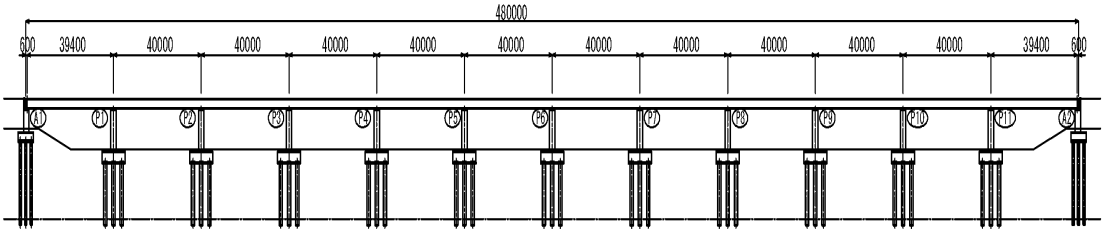
摩擦履歴と速度則の制震ダンパーに対し，調和入力により動的挙動の相違を検討した．速度則の抵抗力を速度 50kine で摩擦履歴の摩擦力とした．入力変位が大きくなると速度則の応答速度は相当速くなるが，摩擦履歴ではそれほど速くはなく，応答変位の変化に遅れて最大となる．応答速度は 50kine を超えるので速度指数の小さい制震ダンパーの応答抵抗力の方が大きくなり，安定した速度域にあるが，摩擦履歴の応答変位の方が小さい．また，摩擦力程度の入力レベルで摩擦履歴の応答抵抗力が乱れ，スティックスリップの現象が生じている．応答変位の位相差は，摩擦履歴で 0.7 π程度，速度則で 0.9 π程度である．このように，摩擦履歴と速度則の動的特性は異なり，速度則を摩擦履歴で解析すると，応答速度が速くても動的挙動を過大評価することがある．

Key Words : *response period, friction hysteresis, velocity dependent hysteresis, seismic control damper, harmonious wave, non-linear time history analysis, phase lag*

１． まえがき

ビンガム系や粘性系の制震ダンパー（以下，速度則）では，抵抗力が速度の指数乗（以下，速度指数）に比例して発現する．速度則の速度指数の小さい制震ダンパーの応答履歴形状はほぼ矩形であり，速度依存性を考慮しないすべり支承の履歴形状に類似していることから，摩擦履歴型（以下，摩擦履歴）ということがある．しかし，それぞれの応答履歴の発現形態は異なるため，動的挙動 [1), 2)]での応答は自ずと異なる [3), 4)]．

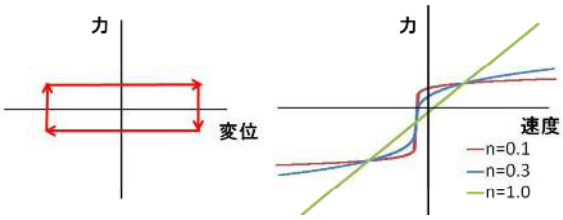
これまで，速度指数 n=0.1 の制震ダンパーを対象に，道路橋示方書の地震波 [1)]を用いて摩擦履歴と速度則の応答比較 [5)]が行われている．この研究では，速度則の速度 50kine での抵抗力を摩擦履歴の摩擦力と同値に設定している．この結果，それぞれのモデル化による応答変位は概ね整合しているが，応答速度が遅くなると摩擦履歴で解析した応答変位は速度則に比べて小さくなり，遅いほどその差は顕著に現れている．本論文では，摩擦履歴と速度則 [6)]，さらに速度指数の相違による応答の差異を，正弦波の変位による調和入力により明らかにした．



(mm)

図-1　検討対象モデルの設定に用いた PC12 径間連続箱桁橋

図-2　1 質点系モデル



(a) 摩擦履歴　　(b) 速度則

図-3　履歴の模式図

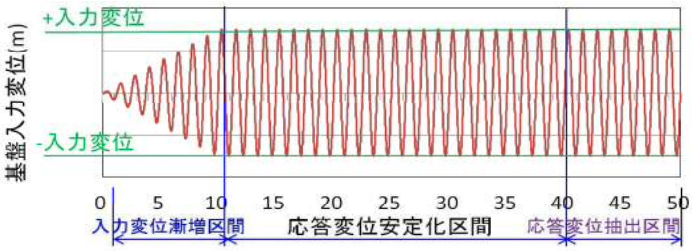


図-4 基盤での時刻歴入力変位(入力周期 T_I=1.25 秒の例)

2.　検討対象モデルとデバイスの設定

検討対象モデルは，**図-1**に示す PC12 径間連続箱桁橋 [7] を想定し，下部構造 1 基を取り出した**図-2**に示す 1 質点系（W=5,122kN）ばねモデルとした．

摩擦履歴は，摩擦係数を 0.1 とする**図-3 (a)** に示す完全剛塑性の履歴モデルとした．

速度則の履歴は，**図-3 (b)** に示す速度に則る履歴モデルであり，抵抗力は式(1)で求められる．ここで，減衰定数は速度 50kine での抵抗力が，摩擦履歴で摩擦係数 0.10 とした摩擦力 512kN に一致するように設定した．対象とする速度指数は，n=0.1，0.3 および 1.0 とした．

$$F(v) = A \cdot v^{n} \qquad (1)$$

ここに，$F(v)$ ：抵抗力　(kN)

A ：減衰係数　(kN・sec^n ／ m^n)

v ：速度　(m ／ sec)

n ：速度指数

3.　解析条件

(1) 入力波のパラメータ

1 質点系モデルの基盤面に式(2)の正弦波を強制変位 [8] により入力した．入力波の変位データは時間間隔を 0.0005 秒で与え，解析の積分間隔は 0.000025 秒として，解析誤差が大きくならないようにした．

$$Y(t) = \delta_I \cdot \sin \frac{2\pi}{T_I} \cdot t \qquad (2)$$

ここに，$Y(t)$ ：基盤面の入力変位　(m)

δ_I ：入力波の片振幅変位　(m)

T_I ：入力波の周期　(sec)

t ：時間　(sec)

入力波の周期（以下，入力周期）は，0.10 から 5.00 秒までを 0.05 秒刻み，入力継続時間は 50 秒とした．

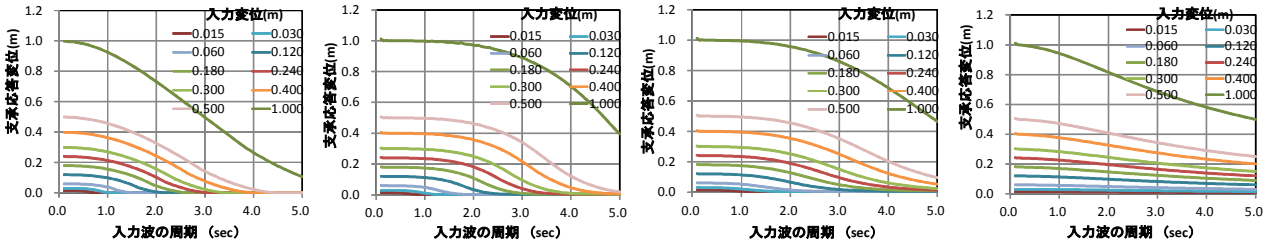
入力波の設定変位(以下,入力変位)は,0.015,0.03,0.06，0.12，0.18，0.24，0.3，0.4，0.5，1.0m とした．ここで，0.030m は対象橋の橋脚 [7] に設定した降伏変位に相当し，0.030m から 1.000m までをその半分および整数倍として与えた．

(2) 入力波の調整

入力開始より設定変位をいきなり入力すると，過大な過渡応答を引き起こすことがある,そこで,**図-4**に示すように入力開始より入力変位を漸増させて，10 秒後に所定の変位になるようにし，50 秒まで設定変位で入力した．ここで，10 ～ 40 秒間を応答を安定化させる時間と見なし，最大応答値は 40 ～ 50 秒間を定常振動としてそれより抽出した．

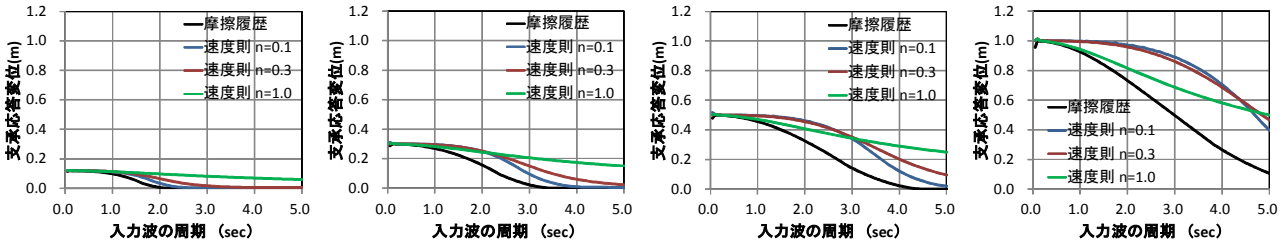
(3) 支承に設定する粘性減衰

支承には 0.03 の粘性減衰定数を与えた．すなわち，解析では検討対象橋に設定されている分散ゴム支承 [4] の固有周期 T_0=1.2535 秒において，レーリー減衰 [1),4)] の質量に係る α 値を式(3)で与える質量比例型減衰とした．



(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-5　入力周期に対する応答変位 [4)]



(a) 入力変位 0.120m　(b) 入力変位 0.300m　(c) 入力変位 0.500m　(d) 入力変位 1.000m

図-6　入力変位 0.120m，0.300m，0.500m，1.000m の応答変位比較

$$\alpha = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot h \qquad (3)$$
$$= 0.3008$$

ここに，f：振動数（$1/T_0$ = 1/1.2535 = 0.7978 Hz）

h：粘性減衰定数（0.03 kN・s^n/m^n）

n：速度指数

4．　応答結果と考察

(1) 最大応答変位

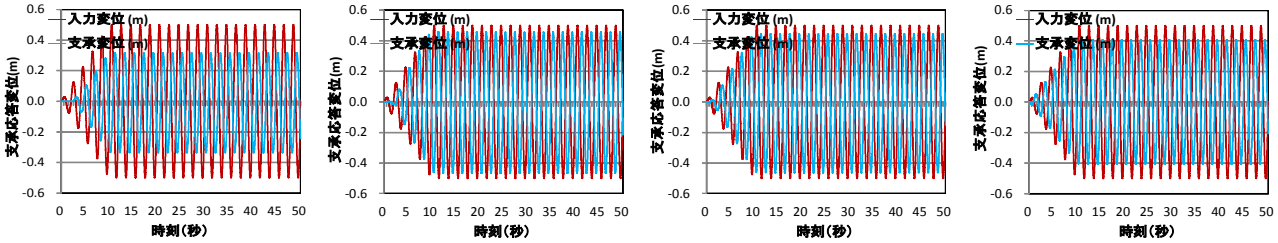
入力変位に対する入力周期毎の最大応答変位を既発表論文 [4)] より**図-5**に示す．これより，いずれの最大応答変位も入力周期が大きくなるにしたがい，また入力変位が小さくなるにしたがい，小さくなる傾向にある．同図より入力変位 0.120m，0.300m，0.500m および 1.000m の最大応答変位を抽出して，その比較を**図-6**に示す．それぞれの最大応答変位の変化傾向は概ね類似しているが，速度指数 n=1.0 の応答変位は他の変位傾向と大きく異なっている．これは，速度指数 n=1.0 では速度と抵抗力が線形の関係にあり，応答抵抗力は応答速度により鋭敏に変化するためである．ここでは，入力変位 0.500m の入力周期 2.0 秒を代表として，応答を分析する．

(2) 応答変位，応答抵抗力，応答速度

時刻歴応答変位および時刻歴応答抵抗力を入力変位と共にそれぞれ**図-7**および**図-8**に，応答抵抗力の履歴および応答速度の抵抗力をそれぞれ**図-9**および**図-10**に，時刻歴応答速度および応答速度と応答抵抗力をそれぞれ**図-11**および**図-12**に示す．

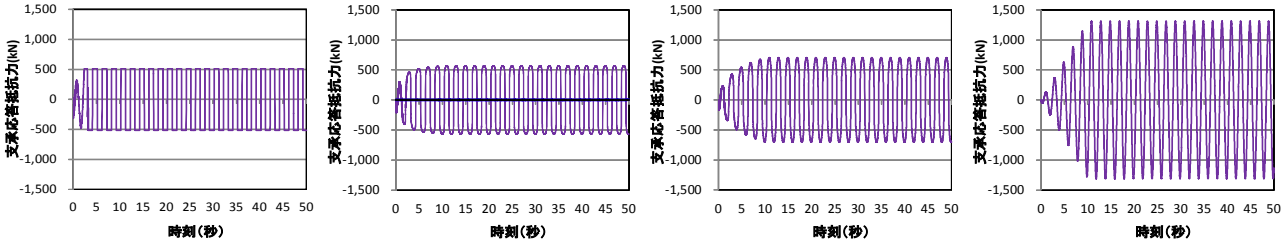
図-7より応答変位は入力変位の増大に伴い円滑に増大し，10 秒あたりよりほぼ一定になっている．これに対し，**図-8**より応答抵抗力は，摩擦履歴では 2 秒余りで摩擦力が発現し始めるため，それ以降では一定の摩擦力を繰り返し発現している．速度則では速度指数が小さい場合の応答抵抗力は早期に増大し始め，10 秒当たり以降では一定の応答抵抗力を示している．これに対し，速度指数 n=1.0 では速度と抵抗力が線形の関係があるため，応答抵抗力は時間の経過と共に線形に増大するが，10 秒当たりから n=0.1, 0.3 と同様に一定の応答抵抗力を示している．

応答抵抗力の履歴は**図-9**のように，摩擦履歴では完全な矩形に，速度則では速度指数が小さい場合には矩形に近く，速度指数が大きくなるにしたがい丸みを帯びて，速度指数 n=1.0 で円形状の履歴形状となる．また，入力変位 0.500m の入力周期 2.0 秒の条件では，同図より摩擦履歴の最大応答変位および最大応答抵抗力は速度則に比べて小さく，最大応答速度は約 50kine である．これは速度則の抵抗力の設定に用いた速度に匹敵し，速度指数が小さい場合には抵抗力が速度に対して敏感に大きくなることなく，速度と抵抗力の関係が安定した領域である．速度則の応答変位は n=0.1 → n=0.3 → n=1.0 の順で小さく，応答抵抗力はこの順で大きい．これは，**図-10**に示すように，速度則の応答速度は摩擦履歴に比べて相当に速く，速度指数が小さい方が応答速度はやや速くなっているためであり，速度指数が小さい場合には抵抗力が大きくなりにくい．これに対し，摩



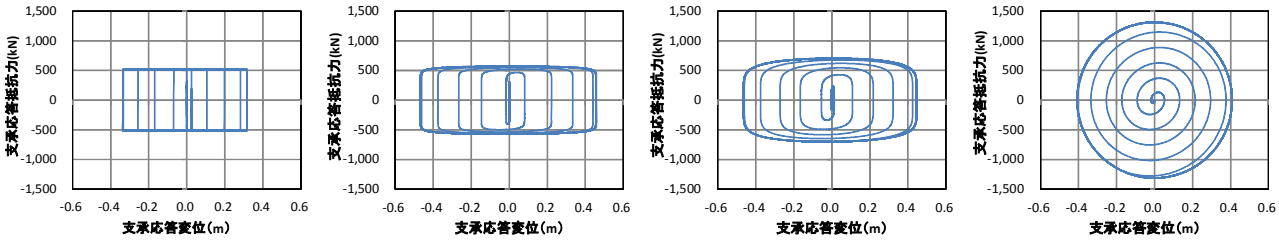
(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-7　入力変位と支承の時刻歴応答変位



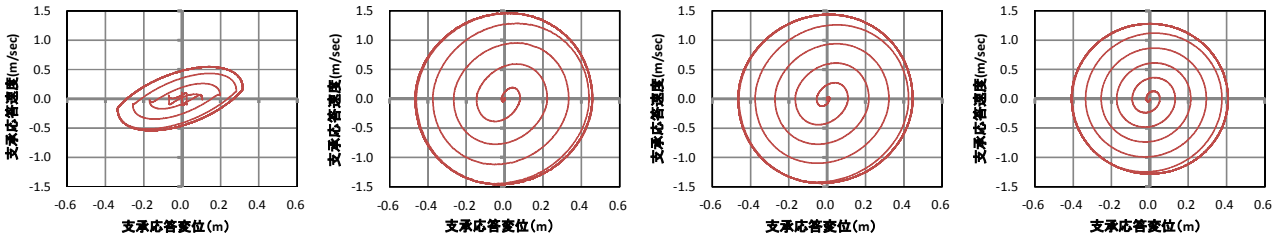
(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-8　支承の時刻歴応答抵抗力



(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-9　支承の応答抵抗力の履歴



(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

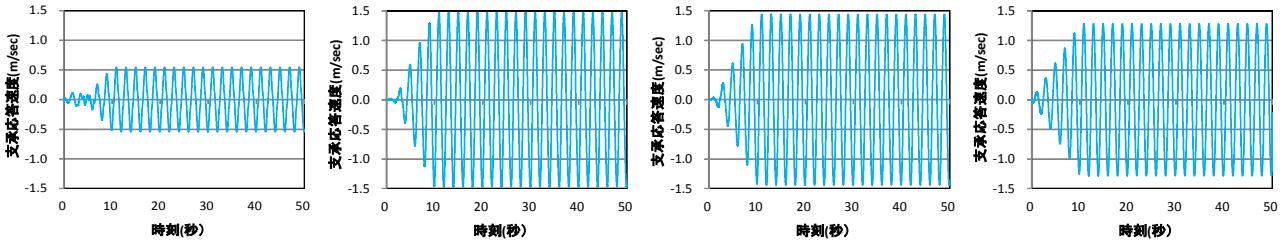
図-10　支承の応答速度の履歴

擦履歴では変位し始めるとすぐに大きな抵抗力を発現するため，応答変位は増大しにくい．その上，変位すると同時に一定の抵抗力を発現するため，応答速度の増大が抑制され，変位の方向が反転に近づくと応答速度は低減し，右に傾いた楕円の応答速度の履歴となっている．ここで，応答速度がゼロで支承が極大値になっていないのは，摩擦履歴に設定した1次剛性の弾性ばねが影響しているためである．

入力開始時の 20kine 程度以下の低速度での速度と抵抗力の関係は，**図-10**(a)，**図-11**(a)および**図-12**(a)からわかるように安定していない．これに対し，速度則では応答速度に対する応答抵抗力は安定して変化している．これは，摩擦履歴の履歴特性は応答速度とは関係なく，応答変位に対して完全剛塑性の矩形で設定しているためであり，特に応答抵抗力が変化しやすい低速度では，応答速度に対する抵抗力の規則性はない．

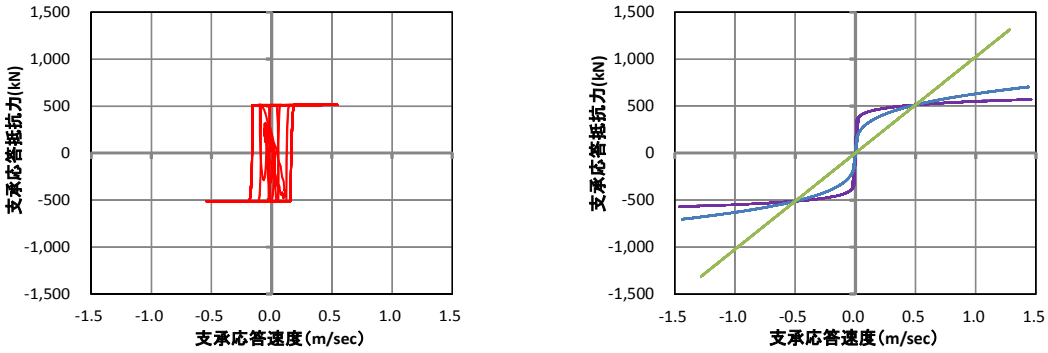
(3) 初期時刻での応答

入力開始直後の 0 ～ 10 秒までおよび 45 ～ 50 秒の時刻歴応答変位，時刻歴応答抵抗力および 2 秒までの時刻歴応答抵抗力を**図-13**に示す．



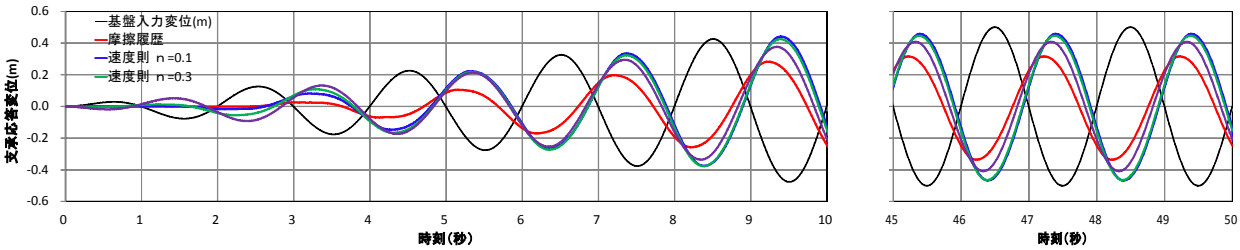
(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1　(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-11　支承の時刻歴応答速度

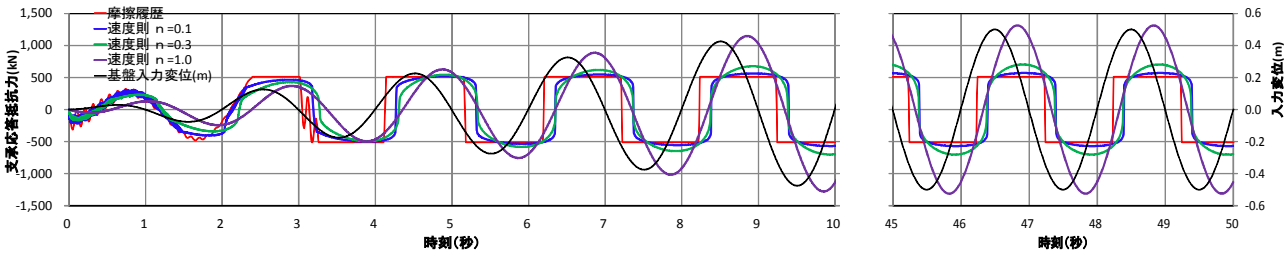


(a) 摩擦履歴 f=0.1　(b) 速度則 n=0.1，0.3，1.0

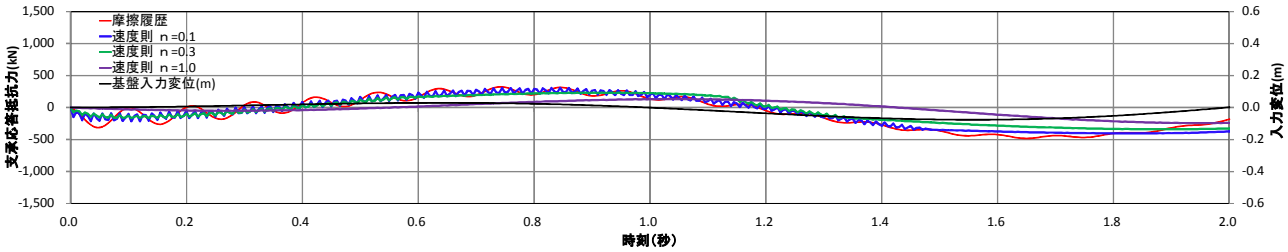
図-12　支承の応答速度と応答抵抗力関係



(a) 支承の時刻歴応答変位（0 ～ 10 秒，45 ～ 50 秒）

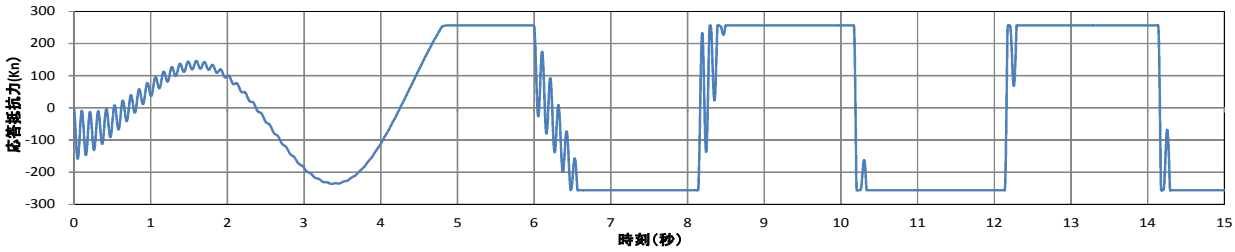


(b) 支承の時刻歴応答抵抗力（0 ～ 10 秒，45 ～ 50 秒）

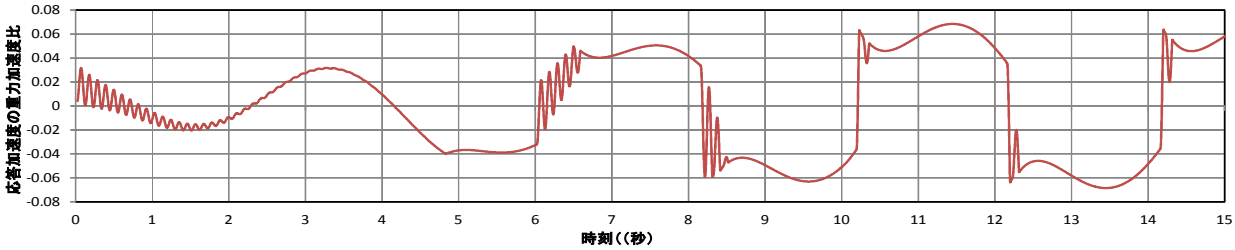


(c) 支承の時刻歴応答抵抗力（0 ～ 2 秒）

図-13　0 ～ 10 秒の特定時間の支承の時刻歴応答変位と時刻歴応答抵抗力



(a) 時刻歴応答抵抗力



(b) 応答加速度の重力加速度比

図-14　時刻歴応答抵抗力と応答加速度の重力加速度比（摩擦履歴の摩擦係数 f=0.5，入力周期 T_I=4.00 秒）

0 ～ 10 秒までは入力変位の漸増区間であり，摩擦履歴は 2.42 秒までは剛な弾性として挙動しているため，応答変位は小さい．入力レベルが大きくなると摩擦力に達してすべり状態となり，摩擦力相当の抵抗力を発現する．これに対し，速度則では入力開始より応答速度に応じた抵抗力が発現し，それに応じて応答変位が徐々に大きくなる．入力変位が大きくなると応答速度が速くなって応答抵抗力が大きくなるが，入力変位が設定変位になると安定した挙動を示すようになる．

また，**図-13**(b) より，応答抵抗力は応答速度が 50kine となる時刻（n=0.1：5.635 秒，n=0.3：4.705 秒，n=1.0：4.680 秒）までは摩擦履歴の方が大きく，その時刻を超えると速度則の方が大きくなる．これは，速度則では 50kine での抵抗力を摩擦履歴の摩擦力に設定しているためである．

なお，**図-13**(b) の応答抵抗力が反転して符号が変化する時刻 3.0 ～ 3.3 秒付近で，応答抵抗力が急激に増減する乱れた波形が見られる．これは，スティックスリップ現象と考えられ，入力レベルが摩擦力に達する程度の場合に生じると考えられる．ただし，入力が大きくなるとこの乱れは見られなくなる．この現象が継続的に発現している解析ケースとして，摩擦係数 0.05 で入力レベルが比較的大きくなりにくい入力周期 4 秒における時刻歴応答抵抗力および時刻歴応答加速度を重力加速度で除した値を**図-14** に示す．**図-14**(a) のようにすべり始めからスティックスリップの現象が見られ，全解析時間 50 秒まで継続し，応答加速度を重力加速度で除した値が摩擦係力より大きくなれば，すべりが生じる．本解析では上下動も考慮しているため，全時間解析時間 50 秒にわたって，**図-14**(b) のように摩擦係数に相当する 0.05 前後に変動している．

一方，入力開始直後では，**図-13**(c) のように摩擦履歴および速度則ともに応答抵抗力に微小な振動が見られる．これは，入力レベルが小さいとはいえ，停止している振動系に急激に動的荷重が作用するための避けられない過度応答であり，本論文ではこれが大きくならないように入力変位を漸増している．これに対し，地震波を入力する場合は入力開始直後の加速度は小さく，徐々に変動しながら大きくなるので，応答結果に影響する過度応答は発現しにくいもとの考えられる．

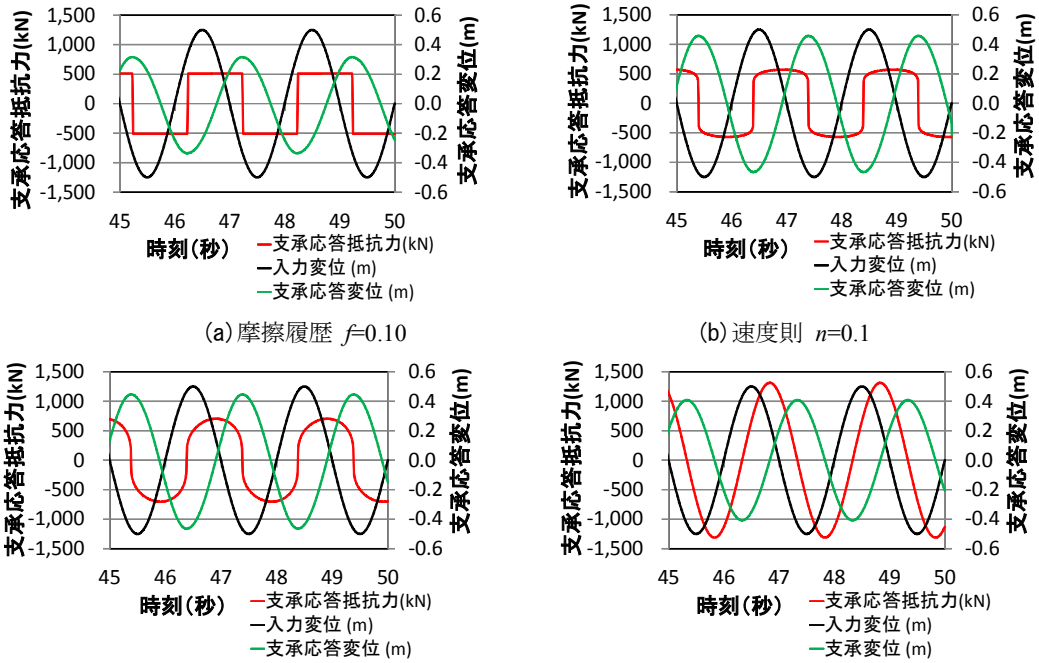
(4) 時刻45～50秒の応答

応答が安定する時刻 45 ～ 50 秒でのそれぞれの時刻歴入力変位，時刻歴応答変位および時刻歴応答抵抗力を**図-15**に示す．

応答抵抗力の符号は，変位の極大を境に変位方向が逆転する時点で変化する．この状況では，摩擦履歴は瞬時に完全剛塑性として抵抗するのに対し，速度則では応答速度により抵抗力が増減するため，時刻歴応答抵抗力は丸みを帯びた波形となり，速度指数 n=1.0 では正弦波となる．

(6) 位相差

図-13(a) の 45 ～ 50 秒までの時刻歴応答変位より，それぞれの最大応答変位を示す時刻は入力変位の最大変位より遅延している．この遅延による位相差を**図-16**に示す．同図から，摩擦履歴より速度則の方が位相差は大きいが，速度指数の大きい方が位



(a) 摩擦履歴 f=0.10　(b) 速度則 n=0.1

(c) 速度則 n=0.3　(d) 速度則 n=1.0

図-15　支承の時刻歴応答変位と応答抵抗力

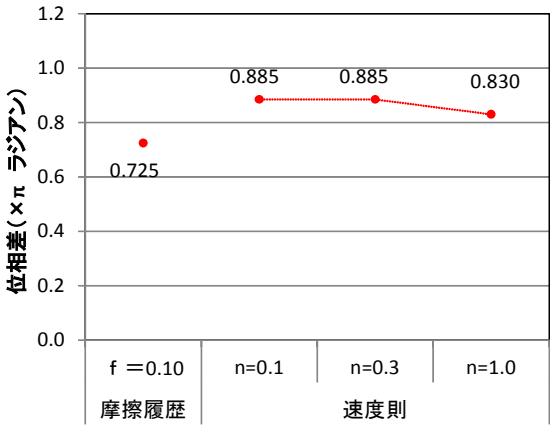


図-16　支承の最大応答時の位相差

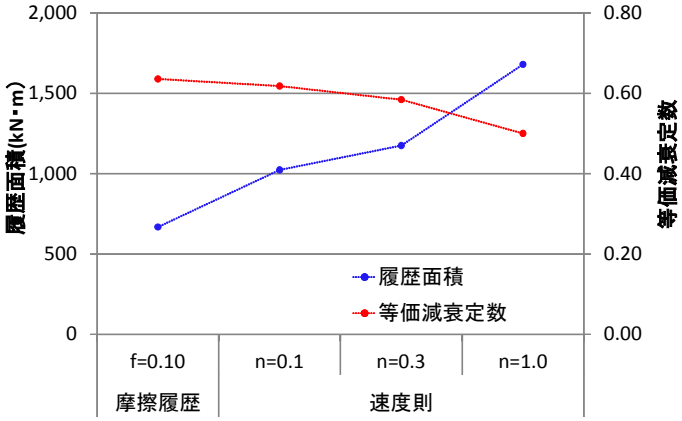


図-17　支承の履歴面積と等価減衰定数

相差が小さい．これは，摩擦履歴では変位開始と同時に大きな抵抗力が発現することにより入力エネルギーを早く消費するためである．速度則では，速度指数 n=0.1 と n=0.3 の位相差はほとんど変わらない．速度指数 n=1.0 の位相差の方がやや小さいのは，大きな抵抗力を発現するため，入力エネルギーの消費がやや早いためと考えられる．

(5) 履歴減衰エネルギーと等価減衰定数

50 秒手前の安定した履歴における 1 サイクルの履歴減衰エネルギーと等価減衰定数を図-17に示す．履歴面積が摩擦履歴→速度則 n=0.1 → n=0.3 → n=1.0 の順に大きいのは，速度指数が大きくなると変位の増大に比べて抵抗力の増大が顕著になるためである．等価減衰定数は履歴形状が矩形に近いほど大きくなり，摩擦履歴→速度則 n=0.1 → n=0.3 → n=1.0 の順に小さくなっている．

5．　まとめ

入力変位 0.500m，入力周期 2.00 秒の条件では摩擦履歴と速度則の履歴特性を有する制震ダンパーの動的性状は大きく異なっていることを確認した．これは，それぞれの履歴特性の生業によるもので，摩擦履歴は完全剛塑性であるのに対し，速度則は速度指数に比例するためである．ただし，入力変位および入力周期の条件によって応答の差異は異なり，入力周期が短い場合には，摩擦履歴と速度則との応答変位の差異は小さくなり，入力周期が長くなると速

度則 n=0.1 と 0.3 の差異が大きくなる傾向にある．これに対し，n=1.0 では応答抵抗力が速度に対して線形で変化するため，入力周期により n=0.1 や 0.3 との差異は変化している．これは，速度則では入力周期により応答速度の変化が抵抗力に大きく影響するためである．このように，速度指数の違いにより応答は異なるため，速度則を用いた設計では，それぞれの制震ダンパーに忠実な速度則を用いて解析する必要がある．

摩擦履歴と速度則の制震ダンパーに調和入力した場合の応答を，以下にまとめる．

① 摩擦履歴，速度則の最大応答変位は，入力周期が長いほど，入力変位が小さいほど小さくなる傾向にあり，その大小関係は入力変位や入力周期によって異なる．

② 速度則の応答速度の履歴は，応答変位に対して円形状で円滑に増減するが，摩擦履歴の応答速度の履歴は応答変位に対して位相ずれがあり，右に傾いた楕円状となっている．

③ 速度則では速度指数の大きいほど応答変位が小さくなる傾向にあるが，応答抵抗力はそれ以上に大きくなることに留意が必要である．

④ 摩擦履歴の応答抵抗力は，摩擦状態でも摩擦力に近い入力レベルでは乱れが見られるので，大きい摩擦力を設定する場合には留意が必要である．

⑤ 速度則で速度指数が大きいほど履歴面積が大きいのは，応答変位の低減に比べて応答抵抗力の増大が大きいためである．これに対し，等価減衰定数は速度指数が小さいほど大きい．

⑥ 最大応答変位時の位相差は，摩擦履歴の方が速度則よりやや小さく，速度則では速度指数が大きい方がやや小さい．

６． あとがき

摩擦履歴と速度則は履歴特性の生業が異なるため，応答特性は異なる．したがって，設計においては，それぞれの履歴特性を適正に用いて動的解析を行うことが重要である．なお，本論文では調和入力として応答を評価したので，速度則では大きな応答速度が発現し，摩擦履歴では応答速度はそれより十分に小さかった．一般に，地震波入力での速度則はこのように大きな応答速度にならず，50 ～ 100kine 程度の応答速度となり摩擦履歴の応答速度と大きく異ならないので，速度指数の小さい場合の応答は摩擦履歴と大きく異ならない．しかし，振動系の特性によっては，速度則に対し摩擦履歴を用いて解析すると，応答を小さく評価することがあるので留意されたい．

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.

2) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2008.

3) 佐藤知明，五十嵐晃，松田泰治，足立幸郎，宇野裕惠，北聖大：反重力すべり支承等を有する振動系の共振現象，第 34 回地震工学研究発表会講演論文集，2014，pp.1-9.

4) 宇野裕惠，佐藤知明，五十嵐晃，松田泰治，足立幸郎，八ツ元仁：支承部の非線形性に着目した調和入力に対する応答評価, 第 18 回応用力学シンポジウム，2015，pp.227-228.

5) 柚木浩一，松田泰治，宇野裕惠，宮本宏一：制震ダンパーのモデル化の相違に基づく応答値の変動に関する一考察，土木学会地震工学論文集，Vol.30，pp.378-387，2009.

6) 宇野裕惠・葛 漢彬・野口陽平：粘性ダンパーの速度依存性が橋の応答に及ぼす影響，第 13 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2010.

7) 松田泰治，宇野裕惠，宮本宏一，柚木浩一：温度による桁の伸縮を考慮した橋梁の応答評価に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1039-1044，2008.

8) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第２巻 動的解析の方法，技報堂出版，1989.

（???受付）

COMPARISON OF DAMPER RESPONSE UNDER HARMONIC EXCITATION : FRICTION HYSTERETIC MODEL VS VELOCITY POWER LAW

Hiroshige UNO, Tomoaki SATO, Taiji MAZDA, Akira IGARASHI,
Yukio ADACHI, Hitoshi YATSUMOTO and Masatsugu SHINOHARA

Difference of the damper responses caused by two types of nonlinear hysteretic models, namely the

friction hysteretic model and the velocity power law, is investigated for harmonic excitation cases. When the excitation amplitude exceeds the reference velocity of 50 kines, the load of the damper with the velocity power law even with a small exponenet becomes larger than that with the friction hysteretic model, and the latter model results in larger displacement response amplitudes. The stick-slip phenomenon is observed with moderate excitation amplitudes for the friction hysteretic model. The difference is also observed in the the phase of the displacement response. Due to those difference in the dynamic response, modeling of a damper with the velocity power law using a friction hystereteic model can result in overestimate of the displacement response amplitude.