

制震橋の応答性状に関する検討

広瀬 剛¹・宇野裕恵²・横川英彰³

¹正会員 工修 中日本高速道路株式会社 中央研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

²正会員 工修 オイレス工業株式会社 第三事業部 免制震技術部 (〒105-8584 東京都港区浜松町1-30-5)

³正会員 工修 オイレス工業株式会社 第三事業部 技術開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000)

1. はじめに

制震橋とは地震による震動を制御する橋と定義され、制震ダンパーにより上部構造慣性力を任意の下部構造に分散させる、減衰を付与する、応答変位を制御するといった機能を有している。制震ダンパーは表-1に示すように履歴特性の違いから摩擦履歴型、粘性履歴型、弾塑性履歴型に大きく分類²⁾される。ここでは、減衰機能のない弾性ばね（以下、弾性ストッパーという）、摩擦履歴型ダンパーおよび抵抗力が速度の2乗に比例する粘性履歴型ダンパーを用いた制震橋の動的挙動を検討する。検討内容は、レベル1地震動における解析手法、レベル2地震動タイプIIにおける応答確認および制震ダンパーの評価である。なお、本検討対象モデルは支承部を固定とした固有周期が0.5sec程度であり、制震橋とした場合でもレベル2地震動ではタイプIIが支配的となっている。

2. 解析モデルと解析方法

この論文に用いる解析モデルは、既往文献¹⁾の5径間連続鈑桁橋より橋脚一本を取り出した図-1に

示す一本柱モデルとした。鉛直力を支持する支承としては地震時水平力分散ゴム支承（以下、RB）または免震支承（以下、LRB）を設定し、これに制震ダンパーを取り付けた。地盤種別はⅢ種とし、支承形状は道路橋示方書のレベル2地震動タイプIIの標準地震波3波を用い、非線形時刻歴応答解析により3波平均で支承の応答せん断ひずみが250%程度になるように設定した。また、橋脚の応答塑性率が1.0程度となるように橋脚基部の降伏曲げモーメントを調整した。RBおよびLRBの形状諸元を表-2に示す。また、弾性ストッパーおよび制震ダンパーの抵抗力は支承の応答作用力が支承単独状態の0.8, 0.6, 0.4, 0.2倍となるように設定した。解析条件を表-3に示す。

表-1 制震ダンパーの履歴による分類

	摩擦履歴型	粘性履歴型	弾塑性履歴型
履歴形状			

表-2 支承形状

	単位	RB	LRB
せん断弾性係数	N/mm ²	1.0	1.0
平面寸法	mm	950×950	750×750
ゴム層構成	層-mm	4層40	4層28
鉛プラグ	本-Φmm	—	4-Φ105

表-3 解析条件

動的解析	非線形時刻歴応答解析
入力地震波形	道路橋示方書標準波形
地盤種別	Ⅲ種地盤
減衰	レーリー減衰
積分法	Newmark-β (β=0.25)
積分時間間隔	0.002sec

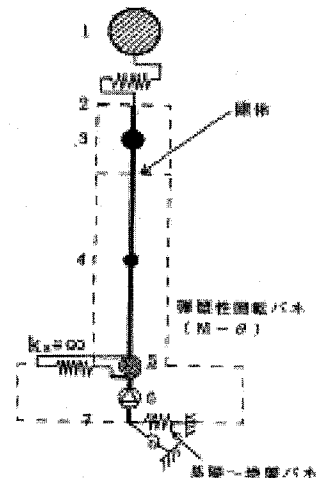


図-1 解析モデル

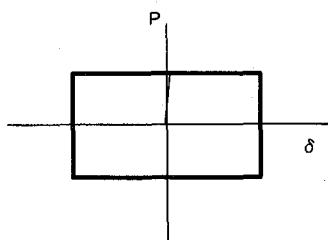


図-2 摩擦履歴

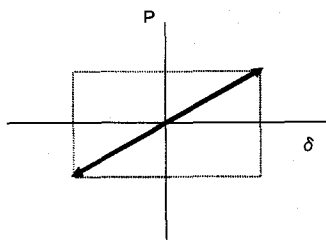


図-3 等価剛性モデル

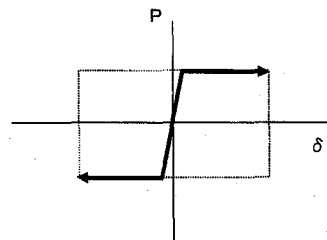


図-4 非線形弾性モデル

3. レベル1地震動における解析方法

従来、レベル1地震動における制震橋の挙動は等価剛性やプッシュオーバー解析などにより評価（以下、静的解析という）している。しかし、制震橋では制震ダンパーの設置状況は1振動系内で下部構造毎に大きく異なることが多いため、レベル1地震動でも複雑な動的挙動を呈している。したがって、制震橋の場合にはレベル1地震動においても動的挙動を適切に評価することが重要であり、制震ダンパーの非線形特性を考慮して非線形時刻歴応答解析を行うのがよいと考えられる。また、制震橋ではレベル2地震動に対して非線形時刻歴応答解析を実施することから、レベル1地震動に対しても同じ振動モデルを用いて動的解析することは設計の利便性を享受できる。ただし、レベル1地震動においては履歴減衰を考慮しないのが原則であるので、制震ダンパーの履歴の設定が重要となる。

ここでは、摩擦履歴型ダンパーを用いた制震橋に対するレベル1地震動の動的解析手法を示し、その妥当性を示す。

(1) 制震ダンパーのモデル化

摩擦履歴型ダンパーの履歴特性は図-2に示すようにほぼ矩形であり、応答変位に応じた履歴減衰が発現する。この履歴では、図-3に示すような免震設計でよく使われる等価剛性を用いた動的解析を実施すれば履歴減衰が発現することなく設計できる。しかし、等価剛性を用いる方法では応答変位に応じて等価剛性を繰返し設定し、収束計算を行わなければならない、設計作業が繁雑になる。さらに、収束判定によっては応答に誤差が大きくなり、設計上のばらつきを生む原因となる。そこで、PC ラーメン橋の上部構造に用いられている履歴モデル²⁾を参考に、図-4に示すようなダンパーの抵抗力だけを考慮できる鍵型の非線形弾性履歴を設定した。この履歴を用いれば、実際の動的挙動を近似でき、かつ履歴減衰を発現しない動的挙動を把握することができると考えられる。ここでは、鍵型履歴および摩擦履歴

を用いた非線形時刻歴応答解析の結果と静的解析の結果から、鍵型履歴の妥当性を検証した。

(2) 解析結果

代表的な応答および最大応答時の制震ダンパーの吸収エネルギーをそれぞれ図-5～図-9および図-10に示す。摩擦履歴の応答は概して鍵型履歴より小さいが、ダンパー抵抗力が大きくなるとそれぞれの応答は漸近する。これは、摩擦履歴では制震ダンパーの抵抗力と応答変位の積に応じてエネルギー吸収するが、制震ダンパーの抵抗力を過度に大きくすると図-10に示すように応答変位が小さくなり、エネルギー吸収量はかえって減少するためである。また、静的解析結果は動的解析結果より小さい傾向にあり、危険側の評価となる可能性がある。また、上下部構造の相対速度は図-9に示すように動的解析結果の方が静的解析結果より大きく、動的挙動では上下部構造間で位相差が大きく発現していることがわかる。

(3) 履歴の変動の評価

鍵型履歴を用いた動的解析では履歴減衰が発現しないため、応答は摩擦履歴を用いた場合より大きく、また静的解析結果より大きいことから安全側の評価となっている。これより、鍵型履歴を用いた動的解析による評価でも設計を行う上では妥当があると考えられる。

また、弾塑性履歴型ダンパーは本検討のような摩擦履歴型ダンパーとRBを組み合わせたデバイスに相当するため、摩擦履歴と同様に図-11に示すような非線形弾性履歴を設定することでよいと考えられる。

一方、粘性履歴型ダンパーでは、履歴が速度に依存するため動的解析を行わなければ履歴形状が定まらないので、摩擦履歴型ダンパーのように非線形弾性履歴を設定することができない。また、粘性履歴型ダンパーの履歴を無視して動的解析を行うのは必ずしも安全側の挙動にならず、実際の挙動と大きく

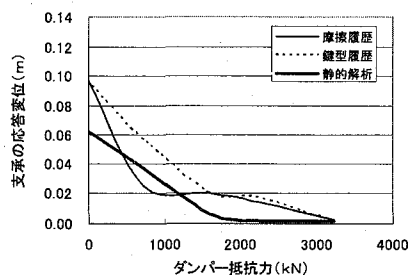


図-5 支承の応答変位

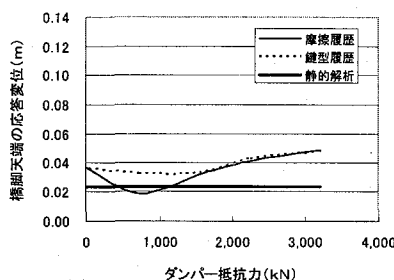


図-6 橋脚の応答変位

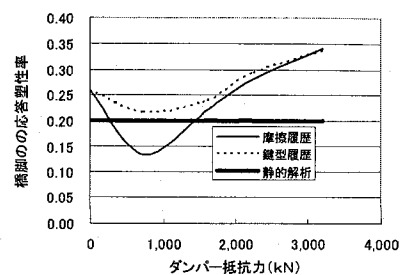


図-7 橋脚の応答塑性率

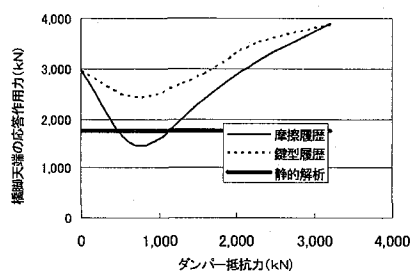


図-8 橋脚の応答作用力

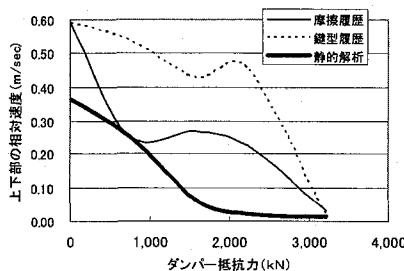


図-9 上下部構造の相対速度

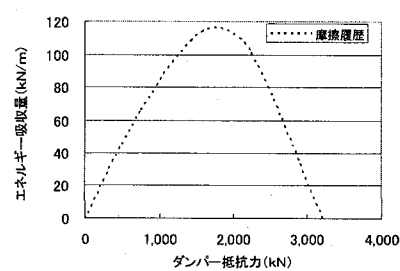


図-10 ダンパーの吸収エネルギー

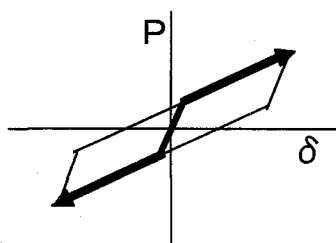


図-11 弾塑性履歴型ダンパーの非線形弾性履歴

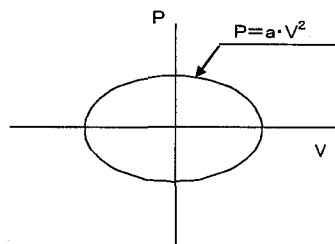


図-12 粘性履歴型ダンパーの履歴

異なることも懸念される。プッシュオーバー解析からイメージするとわかるように、粘性履歴型ダンパーでは最大変位時に抵抗力がゼロとなることから、実際の挙動を非線形弾性履歴として近似することができない。このため粘性履歴型ダンパーを用いる制震橋では、図-12に示すような制震ダンパー固有の履歴を用いて動的解析を行うのがよいと考えられる。ただし、粘性履歴型ダンパーを用いる場合はあいまいさがあるため、橋脚が過小な設計とならないように留意する必要がある。

4. 地震波特性が応答に及ぼす影響

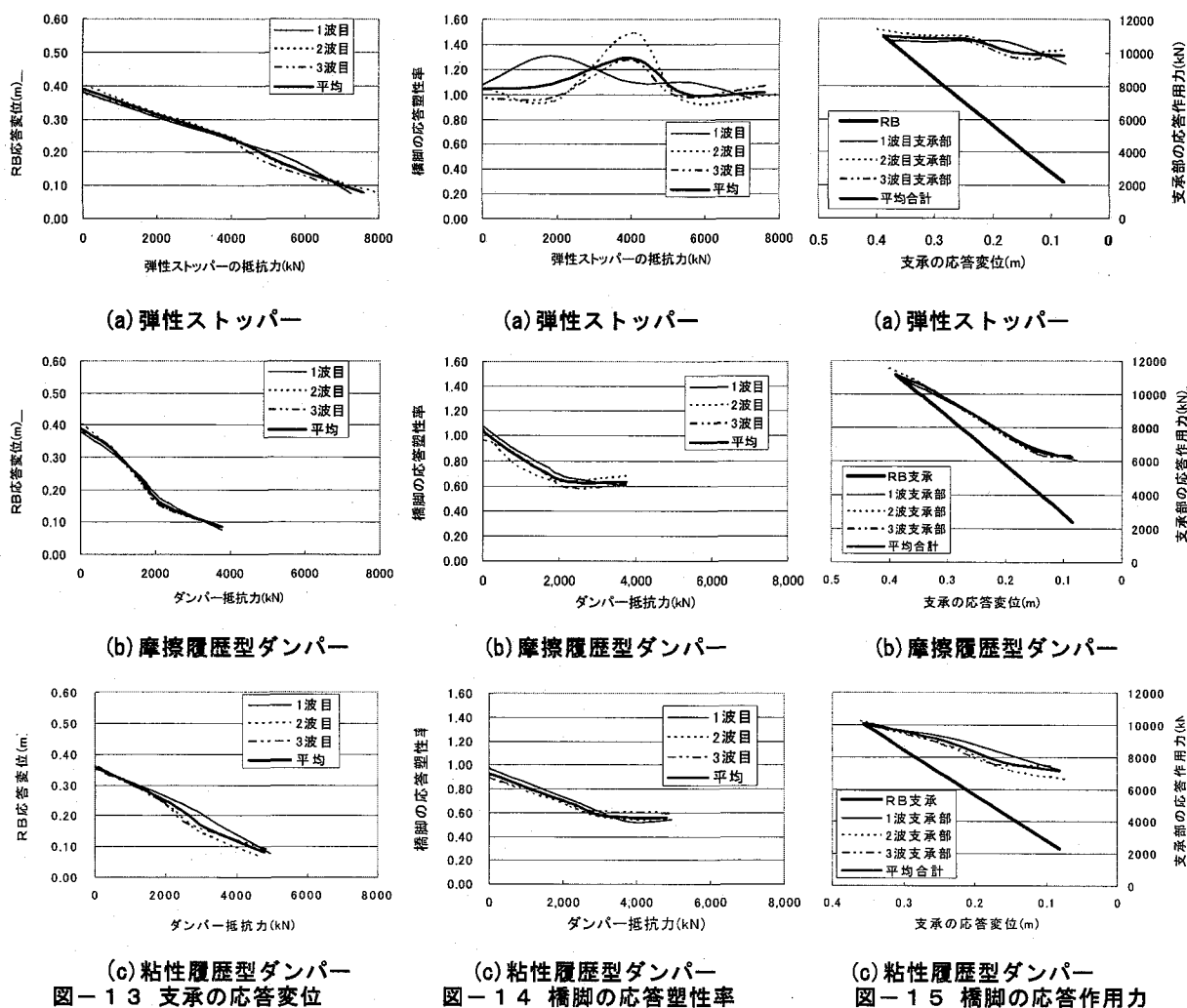
Ⅲ種地盤のような軟弱地盤に架かる橋にゴム支承を用いる場合には、橋が地盤と共振するなど地震波の特性に影響されることが懸念される。これに対して、制震橋では制震ダンパーによる上部構造慣性力を下部構造に伝達する効果（以下、バイパス効果という）および減衰効果によって地震時の応答を抑制

できるので、制震橋はⅢ種地盤では特に有利な構造と考えられる。ここでは、レベル2地震動タイプⅡに対する制震ダンパーの特性による効果を確認するため、RBを用いる橋に弾性ストッパーと摩擦履歴型または粘性履歴型制震ダンパーによって支承の応答変位を低減する場合について検討した。

(1) 解析結果

道路橋示方書の標準地震波3波それぞれによる支承の応答変位、橋脚の応答塑性率および橋脚の応答作用力をそれぞれ図-13、図-14および図-15に示す。

支承の応答変位は図-13(c)に示すように粘性履歴型ダンパーでは変動が大きく、ダンパー抵抗（減衰係数）が大きくなると変動は顕著になる。これは粘性履歴型ダンパーの抵抗力は上下部構造の相対速度に依存するためと考えられる。摩擦履歴型ダンパーを用いた制震構造の支承種類（RB、LRB）に



よる応答について示す。

橋脚の応答塑性率は弾性ストッパーでは図-1 4 (a) に示すように変動が大きい。これは弾性ストッパーは減衰性能が小さいため、橋脚が地震エネルギーを吸収し応答塑性率に大きく影響していることによると考えられる。これに対し、制震ダンパーでは図-1 4 (b) (c) に示すように摩擦履歴型、粘性履歴型に関わらず減衰により橋脚の応答塑性率を制御するので橋脚の応答塑性率の変動は小さい。

支承部の応答作用力の合計は弾性ストッパーでは図-1 5 (a) に示すように概ね一定値であるが、単に周期を変化させているだけなので地震波の周期特性による変動が大きい。一方、制震ダンパーではダンパー抵抗を大きくすると図-1 5 (b) (c) に示すように支承部の応答作用力が大きく低減される。地震波毎の応答作用力は摩擦履歴型ダンパーではダンパー抵抗は変位に依存しないため地震波の周期特性の影響をあまり受けず、大きな変動はない。これに対して、粘性履歴型ダンパーでは応答速度が地震

波に大きく依存するため、地震波の周期特性によりダンパー抵抗が大きくなると支承部の応答作用力の変動が大きくなる傾向にある。これは前述したように、粘性履歴型ダンパーの抵抗は上下部構造の相対速度に依存することによると考えられる。

(2) 評価

弾性ストッパーおよび粘性履歴型ダンパーは地震波の特性の影響を受け、応答が変動しやすい。特に、弾性ストッパーでは橋脚の塑性率に大きな変動を与えることに留意を要する。このことから、弾性ストッパーや粘性履歴型ダンパーのように地震波の特性に影響を受けやすいデバイスを用いる場合、地震波3波それぞれの応答の平均ではなく地震波3波のうちの最大応答で評価するのがよいと考えられる。

5. 履歴特性が応答に及ぼす影響

レベル2地震動タイプⅡに対する制震ダンパーの特性による効果を確認するため、①制震ダンパーの

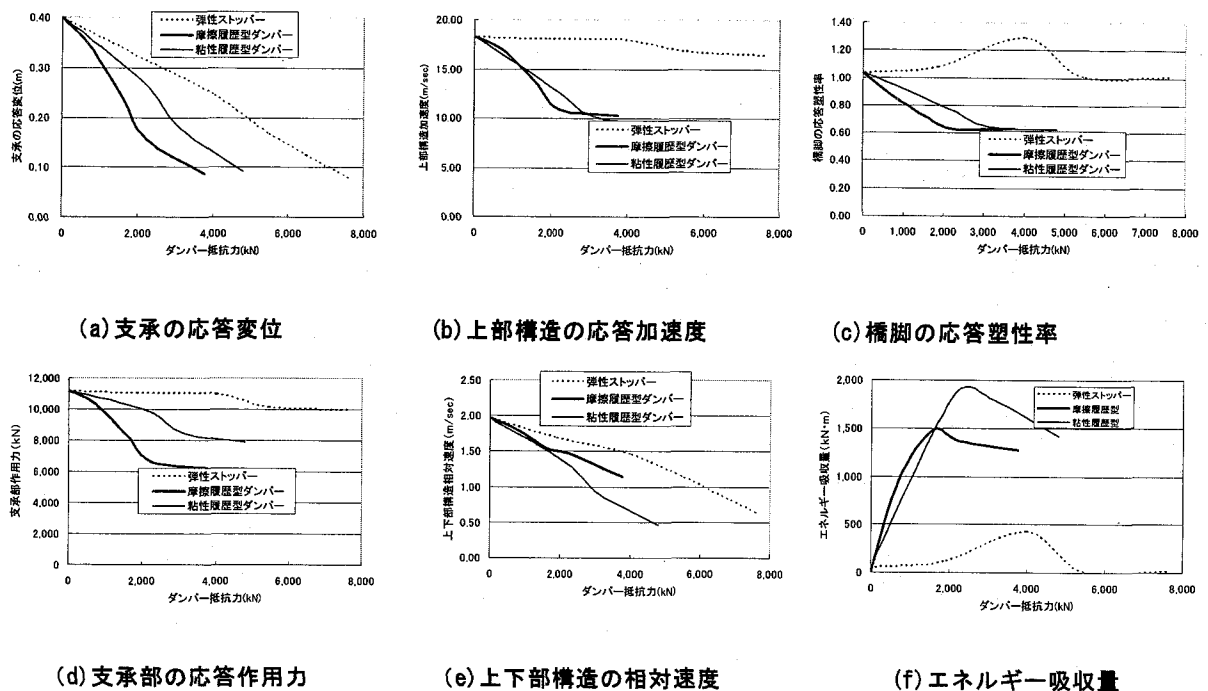


図-16 摩擦履歴ダンパーの支承種類の相違 (LRBとRB) による応答比較

履歴の違いによる応答, ②摩擦履歴型ダンパーと速度 0.1 乗則の粘性履歴型ダンパーの応答および③摩

(1) 制震ダンパーの履歴の違いによる応答比較

4の解析結果より弾性ストッパー, 摩擦履歴型ダンパーおよび速度2乗則の粘性履歴型ダンパーについて, 支承の応答変位, 上部構造の応答加速度, 橋脚の応答塑性率, 支承の応答作用力および上下部構造の相対速度についてそれぞれ図-16の(a)~(f)に示す。

これより, 支承および橋脚の応答は(a)(c)(d)に示すように摩擦履歴型ダンパー, 粘性履歴型ダンパー, 弾性ストッパーの順に低減していることがわかる。これは, 同じダンパー抵抗では摩擦履歴型ダンパーの方が履歴面積が大きくエネルギー吸収量やバイパス効果が大きいことによると考えられる。ただし, 上下部構造の相対応答速度の抑制効果は(e)に示すように粘性履歴型ダンパーが最も大きい。これは, 粘性履歴型ダンパーは相対速度に応じて抵抗力が変動し, 相対速度を抑制する効果があることによると考えられる。また, 橋脚の応答塑性率は(f)に示すように弾性ストッパーでは減衰性能が小さく, 抵抗力が大きくなると固有周期が短周期化し, 地震時慣性力が増大することから, 橋脚の塑性化が進むと考えられる。一方, エネルギー吸収量は(c)に示すように粘性履歴型ダンパーの方が摩擦履歴型ダンパーより大きい傾向にある。これは支承の応答変位が(a)に示すように粘性履歴型ダンパーの方が

摩擦履歴型ダンパーより大きくなっているためである。

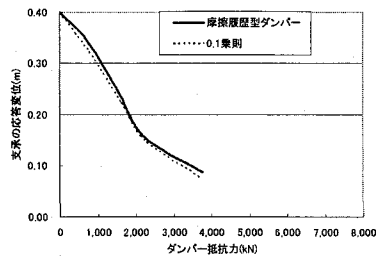
以上より, 摩擦履歴型ダンパー・粘性履歴型ダンパー共に同様な震動制御効果を有しているが, 同程度の震動制御効果を得るには粘性履歴型ダンパーの方が大きい抵抗力が必要であることがわかる。これは, 摩擦履歴型ダンパーの方が減衰性能およびバイパス効果が大きいためであると考えられる。

(2) 制震ダンパーの履歴相違による応答の変化

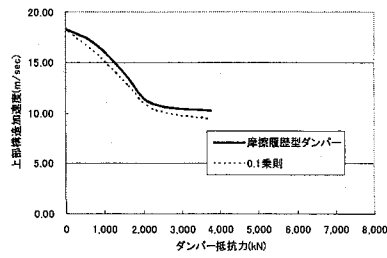
一般に, 摩擦履歴型ダンパーの履歴は完全な矩形形状ではなく, 僅かに速度依存性を有している。例えば, 0.1乗則程度の速度依存性では速度が2倍あるいは半分になっても抵抗力は±7%程度の変化であり, この履歴を摩擦履歴型と見なしても応答に大きな相違はない³⁾。しかし, 文献³⁾は質点系の解析結果であり, 橋脚を含んだ解析を行った例ではないため, 前述の離散型モデルを用いて両者の応答の比較を行った。支承の応答作用力, 上部構造の応答加速度, 橋脚の応答塑性率, 支承部の応答作用力および上下部構造の相対速度をそれぞれ図-17に示す。

これより, 各部の挙動はよく一致しているが, 上下部構造の相対速度に差異が見られる。これは前述のように速度依存性を考慮して解析すると上下部構造の相対速度が抑制されるためである。

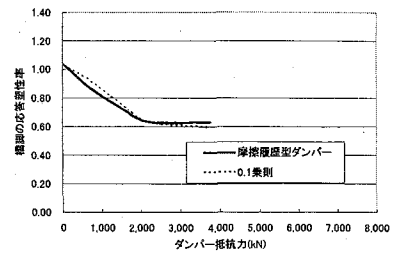
以上より, 0.1乗則程度の速度依存性のある粘性履歴型ダンパーであれば, 摩擦履歴型ダンパーとし



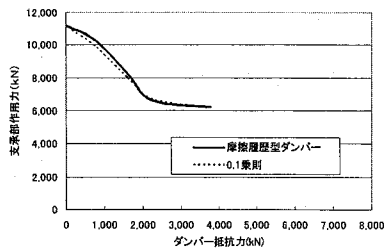
(a) 支承の応答変位



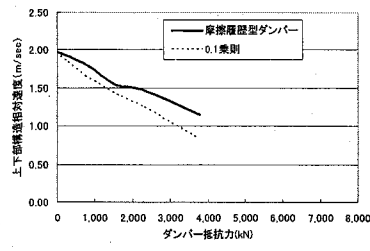
(b) 上部構造の応答加速度



(c) 橋脚の応答塑性率

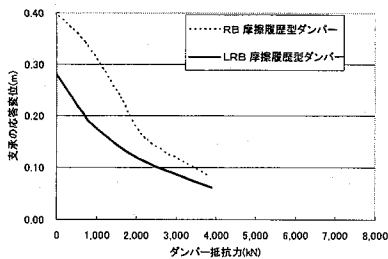


(d) 支承部の応答作用力

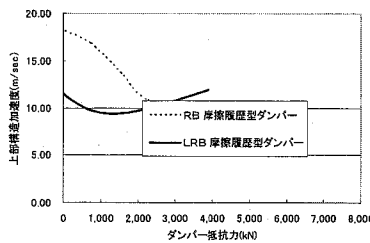


(e) 上下部構造の相対速度

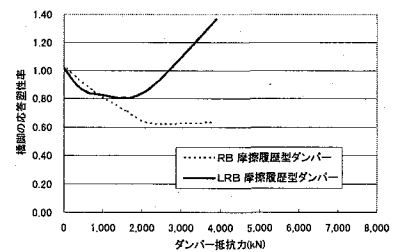
図-17 制震ダンパーの履歴の相違による応答比較



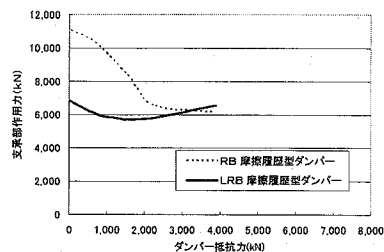
(a) 支承の応答変位



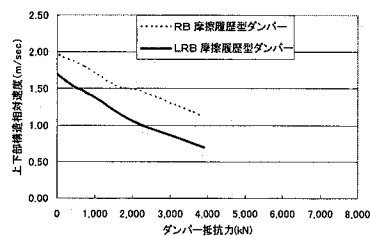
(b) 上部構造の応答加速度



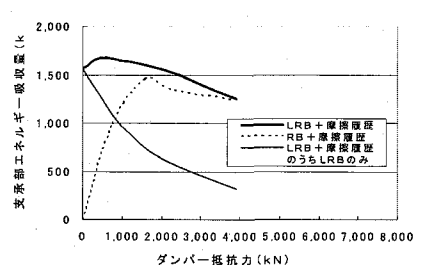
(c) 橋脚の応答塑性率



(d) 支承部の応答作用力



(e) 上下部構造の相対速度



(f) エネルギー吸収量

図-18 制震ダンパーの履歴の相違による応答比較

て解析しても橋全体の応答に及ぼす影響は極めて小さく摩擦履歴型と等価であるとしてよいと考えられる。

(3) RBまたはLRBとした制震構造の応答の相違

摩擦履歴型ダンパーを用いた制震橋において、支承をRBまたはLRBとした場合のそれぞれの応答を比較した。支承の応答変位、上部構造の応答加速

度、橋脚の応答塑性率、支承部の応答作用力および上下部構造の相対速度をそれぞれ図-18に示す。

摩擦履歴型ダンパーの抵抗力を大きくすると、(a)から支承の応答変位はバイパス効果と減衰効果により当然小さくなる。しかし、上部構造応答加速度、橋脚の応答塑性率、支承部の応答作用力は、ダンパー抵抗が小さい範囲ではLRBを用いた方が小さいが、ダンパー抵抗がある程度以上の大きさに

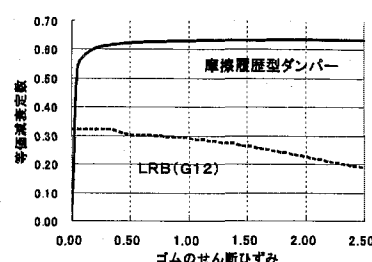
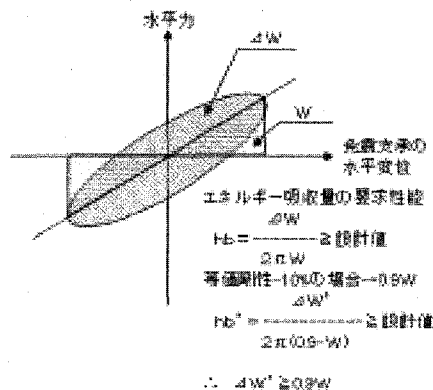
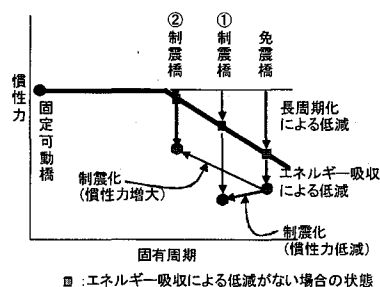


図-19 制震橋の応答加速度 図-20 エネルギー吸収量の下限値 図-21 摩擦履歴型ダンパーの等価減衰定数

ると逆に大きくなっている。これは、(f)からわかるように LRB のエネルギー吸収機能が大きいので、LRB を用いた方が RB を用いた場合と比較してダンパー抵抗が小さい段階で応答変位が小さくなることから履歴面積が小さくなり、減衰効果が小さくなるためである。すなわち、短周期化による慣性力の増大の方がエネルギー吸収による慣性力の低減より大きくなっていることを示している。この状況は図-19 のような現象で示すことができる。また、上下部構造の相対速度は、摩擦履歴型ダンパーのバイパス効果により振動系が一体として挙動し始めるため、ダンパー抵抗が増加するほど低減している。

6. 制震ダンパーの抵抗力のばらつき

橋に用いる免震支承の性能のばらつきは、等価剛性および等価減衰定数を設計値に対しそれぞれ±10%以内および設計値以上と定められているが、制震ダンパーに対する性能のばらつきは特に定められていない。そこで、摩擦履歴型ダンパーを対象に、ダンパー抵抗のばらつきが動的応答に及ぼす影響を検討し、ばらつきに対する性能評価について考察する。

(1) ダンパーの性能評価

免震支承の減衰性能は等価減衰定数で評価され、エネルギー吸収量を入力ひずみエネルギーで除することにより定義されている。等価減衰定数の要求性能は設計値以上であるが、等価剛性のばらつきは±10%以内が許容されているので、ひずみエネルギーのばらつきは図-20 に示すように-10%まで許容されていることになる。一方、摩擦履歴型ダンパーの履歴は矩形であるので、等価剛性のばらつきを±10%以内とするためには、抵抗のばらつきを±10%以内とすることになる。また、摩擦履歴型ダン

パーの等価減衰定数は図-21 に示すように 60%を超え、変位やダンパー抵抗に依存しない。以上より、抵抗のばらつきは目標値の±10%以内で管理することでよいと考えられる。

以下、ダンパー抵抗のばらつきとして±10%、±20%の変動を想定し、動的挙動に及ぼす影響を考察する。

(2) 解析結果

支承の応答変位、橋脚の応答塑性率、支承部の応答作用力、最大変位時のエネルギー吸収量、および抵抗のばらつきのない(±0%) 応答値で正規化した橋脚の応答塑性率を、それぞれ図-22～図-26 に示す。

(3) 履歴の変動の評価

ダンパー抵抗のばらつきを±20%とした場合、橋脚の応答塑性率は図-26 に示すように 10%程度の変動が見られるが、ダンパー抵抗のばらつきを±10%とすれば 5%程度の変動となっている。しかし、同図より抵抗が+側に変動しても応答は必ずしも+側に変化するわけではなく-側に変化することもあり、橋全体の振動特性に大きく依存するようである。すなわち、ダンパー抵抗の変化と地震波の特性により応答が変化するもので、見かけ上、ダンパー抵抗が大きく変化する領域では、ダンパー抵抗のばらつきの影響が大きく応答に発現していることになる。

7. まとめ

本論文では代表的な制震ダンパーである摩擦履歴型ダンパーと粘性履歴型ダンパーおよび比較のために減衰機能のない弾性ストッパーを対象とし、レベル1およびレベル2地震動タイプⅡにおける応答特

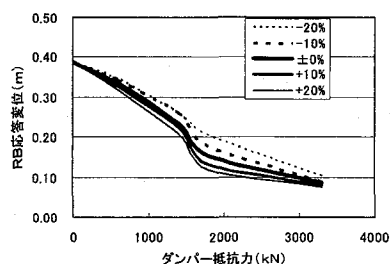


図-2.2 支承の応答変位

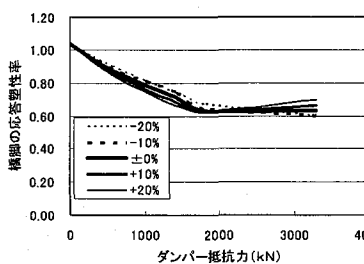


図-2.3 橋脚の応答塑性率

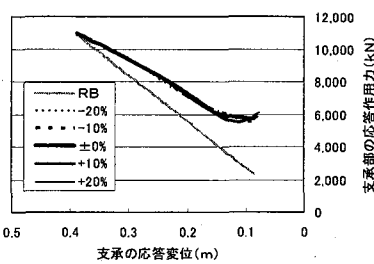


図-2.4 支承部の応答作用力

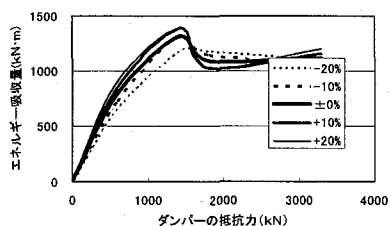


図-2.5 エネルギー吸収量

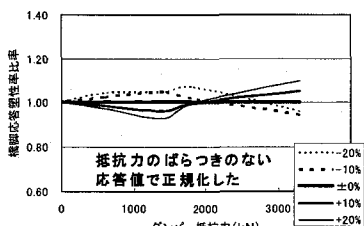


図-2.6 橋脚の塑性率変動

性を把握した。ここで得た知見を以下に示す。

- ① レベル1地震動では摩擦履歴型ダンパーや弾塑性履歴型ダンパーを非線形弾性モデルとして非線形動的解析を行うことで安全側の評価となり、履歴減衰を考慮しない動的挙動を考慮することができる。一方、粘性履歴型ダンパーは速度に依存するため履歴形状が変化することから非線形弾性モデルとして設定できないため、動的挙動を把握することを優先し、制震ダンパー固有の履歴減衰を考慮した動的解析を行うことが考えられる。ただし、下部構造などが過度に小さな構造とならないよう留意する必要がある。
- ② 地震波の特性に影響を受けやすい粘性履歴型ダンパーでは、道路橋示方書の標準地震波3波による応答のうち最大応答により評価するのがよいと考えられる。
- ③ 摩擦履歴型ダンパーおよび粘性履歴型ダンパーは同等の震動制御機能を有しているが、同じ応答変位とするためには粘性履歴型ダンパーの方が大きい抵抗力を必要とする。
- ④ 制震橋に用いる支承は免震支承を用いた方がダンパー抵抗力を小さくできる。しかし、免震橋では既に慣性力が大きく低減しているため、ダンパー抵抗力を過大にすると応答変位は確実に低減されるものの、減衰性能の増加による地震時慣性力の低減より短周期化が促進されることで地震時慣性力の増大の方が大きくなり、制震ダンパーのメリットが小さくなる。したがっ

て、減衰性能が高い免震支承を用いて制震橋とする場合は、慣性力の橋脚への分担調整や応答変位の抑制を目的として制震ダンパーを用いるのがよい。

- ⑤ 摩擦履歴型ダンパーのばらつきは、免震支承のばらつきの管理にならい、エネルギー吸収量に着目してダンパー抵抗力を目標値の±10%以内とすると、橋脚の応答塑性率は5%程度の変動となり、ばらつきの影響は大きくない。

おわりに

制震橋では、制震ダンパーを適切に用いることにより震動を適切に制御できる。すなわち、対象とする橋の要求性能を満足できるように制震ダンパーの種類、抵抗力および取付け箇所を適切に設定することが重要である。また、さらに検討を重ね、橋全体のコストを考慮し、コストパフォーマンスの高い制震橋の設計を行えるようにする所存である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3
- 2) 東・中・西日本高速道路（株）：設計要領第二集橋梁建設編，2006.4
- 3) 横川，宇野，竹ノ内：履歴型ダンパーのモデルによる応答比較，日本地震工学会，2004