

粘性ダンパーの速度依存性が橋の応答に及ぼす影響の一考察

宇野裕恵¹・葛 漢彬²・野口陽平³

¹正会員 工修 オイレス工業株式会社 免制震事業部(〒108-0075東京都港区南一丁目6番34号)

²正会員 工博 名城大学 理工学部建設システム工学科(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

³名城大学 理工学部建設システム工学科(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

1. はじめに

兵庫県南部地震後、橋への免震設計が一般化されている。しかし、免震設計では地震時挙動の長周期化を図ると共にエネルギー吸収による減衰の付与により耐震性を満足させるので、大きく変位しなければ免震支承は大きな抵抗力を発揮しない。このため、連続桁の免震設計では免震支承のみで上部構造慣性力を自在に分担調整することは難しいが、新設橋への適用であれば免震支承と橋脚に対し適切に免震設計を行うことは比較的容易である。これに対し、既設橋の耐震補強では立地条件やコスト等の面から全ての下部構造を同等に耐震補強することは難しいため、特定の下部構造に上部構造慣性力を集めてその下部構造を集中的に補強することがしばしば行われている。この場合、制震ダンパーを用いれば上部構造慣性力を特定の下部構造に比較的容易に集めることができる。

制震ダンパーは構造体の形状や履歴を発現するメカニズム等により様々な種類に区分される。橋の上部構造と下部構造との間に設置する制震ダンパーとしてはシリンダー型ダンパーが適用しやすく、繰返し载荷により部材が降伏することはないので地震時の履歴は安定している。シリンダー型ダンパーは充填されている材料により様々な特性を有し、抵抗力は速度の指数に比例することが多い。一般に、充填材料に粘性体を用いると速度の指数は小さく、オイルを用いると速度の指数は大きい。前者を粘性ダンパーといい、後者をオイルダンパーという。速度の指数が小さい場合は速度に対する抵抗力の変化は小さく、小さい変位状態でも最大抵抗力の変化は小さいことから、橋に多用されている。ただし、粘性体には速度のみならず温度に対する依存性があるので、温度条件も考慮して設計しなければならない。

近年では、温度依存性が極めて小さい粘性ダンパーが開発されており、温度の影響を受けやすい屋外に位置する橋に適用しやすい。

粘性ダンパーの減衰性能を履歴に置き換えて評価すると、免震支承に比べて極端に大きな等価減衰定数を有している。建築構造物やアーチ橋等では制震ダンパーを構造体内に設置するため減衰性能を最大限に発現させるように設定することが多い。これに対し、橋では粘性ダンパーを上下部構造間に設置したり上部構造どうしを連結するジョイントダンパーに用いられ、減衰性能を最大限に発現させることよりも慣性力を適切に分担させることに重点を置くが、同時に相応の減衰性能が付与される。また、粘性ダンパーにより応答変位を大きく低減できるが、振動系全体が短周期化するため入力される加速度が大きくなる。したがって、上部構造全体の慣性力の増大と制震ダンパーの減衰性能とがトレードオフの関係となり、橋では慣性力の分担調整を優先して慣性力の大きな低減を必ずしも期待しない。

本論文では、粘性ダンパーの基本的な特性を紹介し、粘性ダンパーを橋の上下部構造間に設置した場合に対して速度の指数や抵抗力をパラメトリックに解析することで、地震時の挙動をケーススタディした¹⁾。ここでは、粘性ダンパーに加えて速度の指数の大きいオイルダンパーも解析対象に含めた。ただし、本検討は上部構造の慣性力の分担に着目した解析ではなく、粘性ダンパーの基本特性の把握に着目した。また、建築分野では制震ダンパーの抵抗力を減衰力と呼ぶことが多いが、制震ダンパーが発現する力は減衰される力ではなく制震ダンパーにより伝達される力であることから“抵抗力”と呼ぶこととする。なお、温度依存性については考慮していないので、温度依存性のある粘性ダンパーを用いる場合には、その影響も考慮する必要がある。

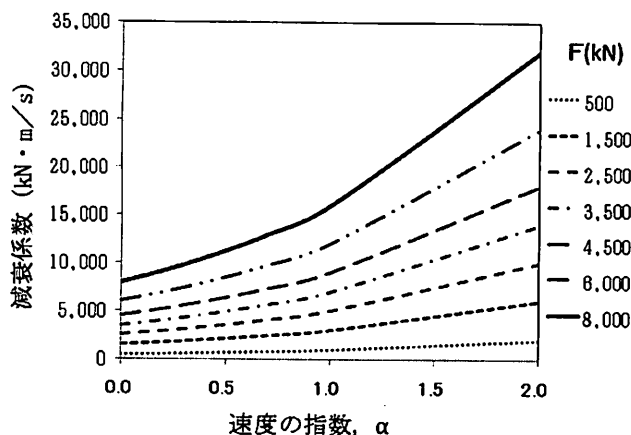


図-1 50m/s で設定した抵抗力の変化

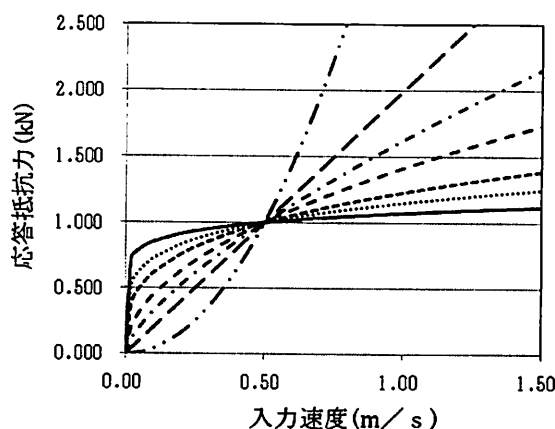


図-3 50m/s で 1,000kN に設定した抵抗力の変化

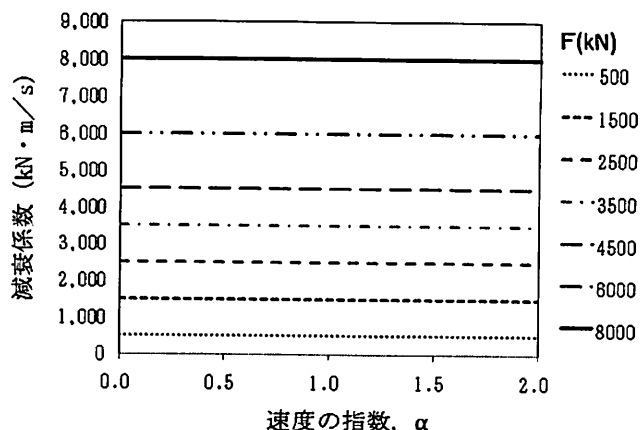


図-2 100m/s で設定した抵抗力の変化

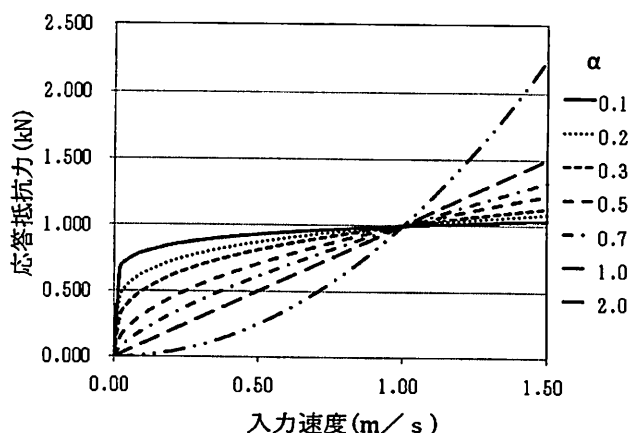


図-4 100m/s で 1,000kN に設定した抵抗力の変化

2. 粘性ダンパーの機能

本論文で扱う粘性ダンパー（以下、ダンパーという）の抵抗力は、式(1)に示すように速度の指数に比例する。ただし、温度依存性は考慮しない。

$$F = C \cdot V^{\alpha} \quad (1)$$

ここに、 F ：応答抵抗力 (kN)

C ：減衰係数 (kN·m/s)

V ：応答速度 (m/s)

α ：速度の指数

上式では減衰係数 C によりダンパーの特性を表現している。しかし、減衰係数ではダンパーの特性をイメージできないため、特定の速度で発現する抵抗力により表現されることが多い（以下、仕様抵抗力という）。また、減衰係数が同じ値あるいは特定の速度で同じ抵抗力であっても、これらのダンパーは異なる特性を有している。減衰係数は抵抗力の設定速度と抵抗力により表され、例えば 0.50m/s で

500, 1,500・・・8,000kN と設定すると減衰係数は図-1に示すように速度の指数の増大にしたがい大きくなる。ここで、設定速度を 1.00m/s とすると、図-2に示すように速度の指数にかかわらず減衰係数は一定で、1.00m/s の抵抗力と同値となる。このように減衰係数は速度の指数が異なるダンパーを比較する指標ではなく、ダンパーの特性を設定するパラメータである。すなわち、設定速度はダンパーの仕様を定義するための便宜上の指標であり、製品検査に用いる速度ではない。

速度 0.50m/s および 1.00m/s で抵抗力を設定すると、入力速度に対する抵抗力はそれぞれ図-3および図-4に示すように変化する。これより、速度の指数が小さいダンパーでも入力速度が設定した速度より顕著に遅くなると抵抗力は急激に小さくなることがわかる。したがって、仕様抵抗力を用いて摩擦履歴型として動的解析すると最大応答速度が設定速度より顕著に遅くなる場合では、速度の指数を用いた動的解析より応答抵抗力を大きく見込んでしまうため、応答変位を小さく評価することになる。

速度の指数を 0, 0.1・・・2.0 と変化させ、入力

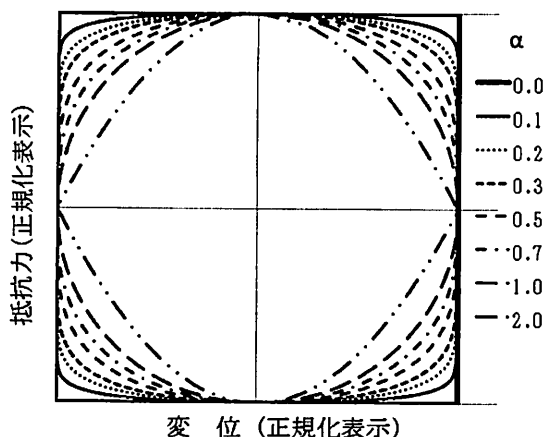


図-5 履歴の典型的形状

変位を正弦波とした抵抗力を正規化した典型的な履歴形状を図-5に示す。速度の指数が 0.0 の履歴では矩形の完全弾塑性型であり、速度の指数が大きくなるにしたがい丸みを帯び、1.0 ではなめらかな円に、2.0 では鈴形状となる。同図より、最大速度時すなわち変位 0 の位置で最大抵抗力を呈し、速度の指数が大きくなる程、変位の増大すなわち速度の低下にしたがい抵抗力は小さくなり、最大変位時すなわち速度 0 で速度の指数 0.0 以外の抵抗力が 0 となる。また、入力変位を正弦波とした場合の速度の指数毎の典型的な時刻歴応答変位および時刻歴応答抵抗力を図-6に示す。これから、速度の指数が小さい場合は最大変位となる直前まで抵抗力の変化は小さく、最大変位時近傍で急激に抵抗力が小さくなることがわかる。速度の指数 1.0 の場合では、変位と抵抗力の最大値の位相が明らかに $\pi/2$ ずれている。

つぎに、上下部構造間にダンパーと分散ゴム支承を併設した場合について、3. のケーススタディの解析結果から仕様抵抗力 0, 500, 1,500, 2,500, 3,500kN の場合の最大応答抵抗力と最大応答変位を取り出し、正弦波加振した場合の最大応答値であるとして正規化した典型的な履歴形状を図-7に、正規化しない履歴形状を図-8に示す。図-7から、ダンパーの速度の指数、設定するダンパーの抵抗力、分散ゴム支承のせん断ばねにより履歴形状は変化することがわかる。すなわち、ダンパーの応答抵抗力が小さい場合は弾性に近い挙動であるが、ダンパーの応答抵抗力が大きくなるにしたがいダンパーの挙動が支配的となって最大抵抗力が発現する変位も 0 に近づいてくる。実挙動ではダンパーにより応答が制御されるので、ダンパー抵抗力が大きくなると応答変位が小さくなって図-8のように履歴形状が大きく変化する。なお、図-8の凡例はダンパーの最大応答抵抗力を示したもので、図-7も同じである。

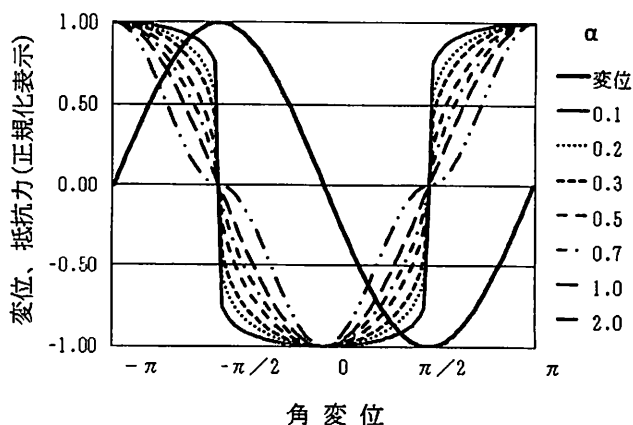


図-6 抵抗力と変位の時刻歴の典型的形状

表-1 橋脚の降伏時および終局時の変位と荷重/基

	変位 (m)	荷重 (kN)
降伏時	0.078	3,307
終局時	0.498	3,681

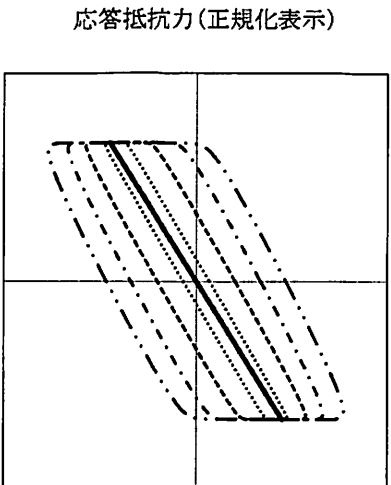
3. 粘性ダンパーを用いたケーススタディ

本章では、ダンパーの速度の指数をパラメトリックに変化させて動的解析し、応答の変化を把握した。動的解析ソフトは ABAQUS(ver.6.8)である。

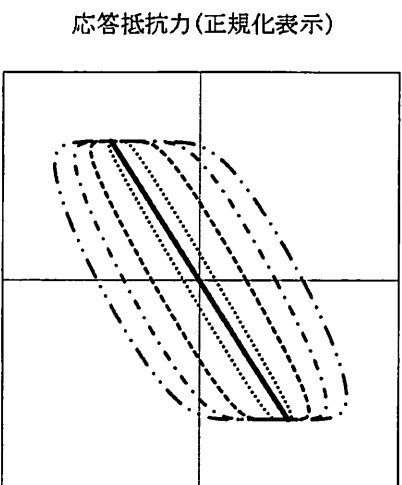
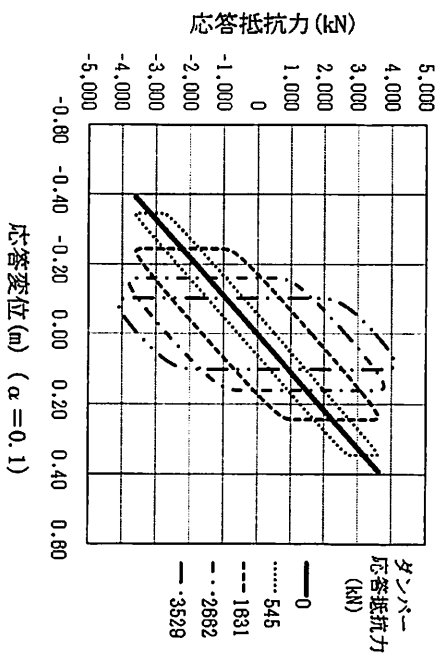
(1) 検討条件

本検討に用いる対象橋を図-9に示す²⁾。支承は分散ゴム支承であり、ダンパーを上部構造と両側の橋脚の間に配置した。上部構造および橋脚はそれぞれ鋼桁および鋼製橋脚であり、基部を固定とした。解析モデルは図-10に示すようであり、鋼部材は等断面で、せん断変形を考慮できるチモシェンコ(平面)梁要素を用いた。材料非線形性はファイバーモデルにより考慮した。鋼材の構成則は、鋼材の繰返し挙動を精度よく表現するために修正 2 曲面モデルを用い、橋脚を 14 要素分割、梁を 20 要素分割、さらに橋脚基部の要素を 5 分割した。部材の粘性減衰は 5 %とし、質量比例型減衰を用いて解析した。分散ゴム支承の形状寸法は常時状態を満足できる最小形状とし、ダンパーにより地震時の応答を制御した。振動系全体の荷重-変位図はプッシュオーバー解析より図-11に示すようである。これから、各橋脚の降伏時および終局時の変位と荷重を表-1に示す。

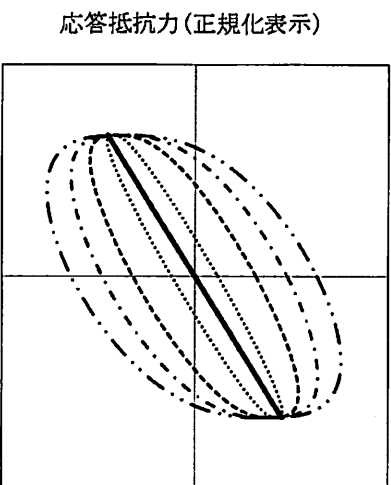
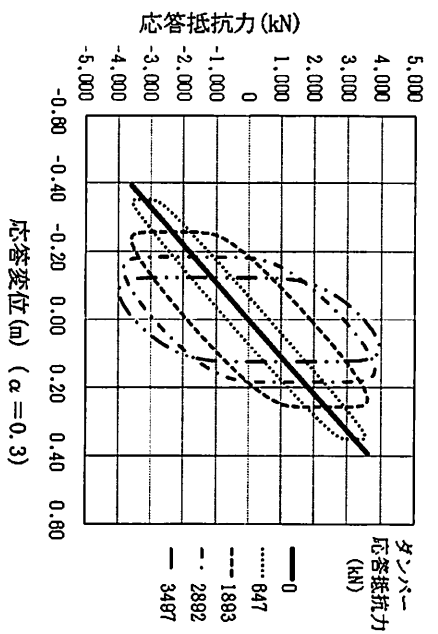
分散ゴム支承の死荷重反力および活荷重反力をそれぞれ 10,210kN および 2,803kN、死活荷重合計反力は 13,013kN である。これより、支承形状は 1,350 × 1,350 × 4 層 × 50mm (G10)となり、水平ばねは



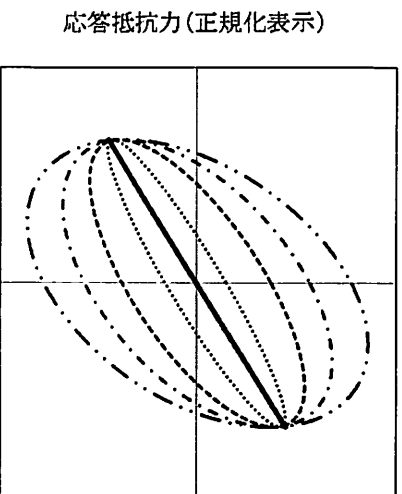
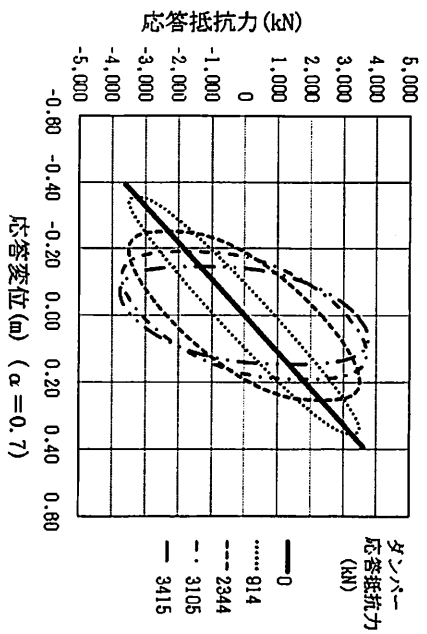
応答変位(正規化表示) ($\alpha = 0.1$)



応答変位(正規化表示) ($\alpha = 0.3$)



応答変位(正規化表示) ($\alpha = 0.7$)



応答変位(正規化表示) ($\alpha = 1.0$)

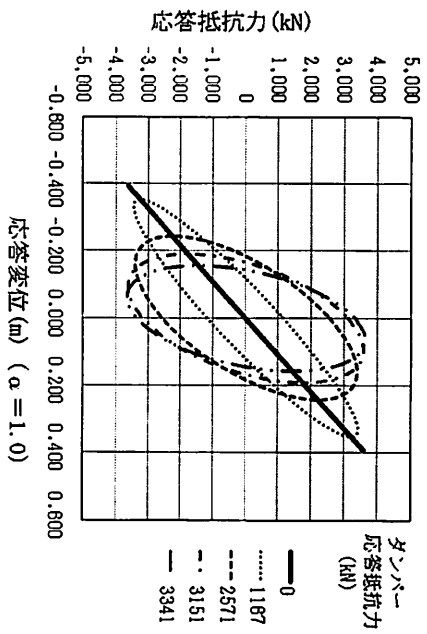


図-7 重ね合わせ履歴の典型的形状

図-8 応答値に基づく重ね合わせ履歴例

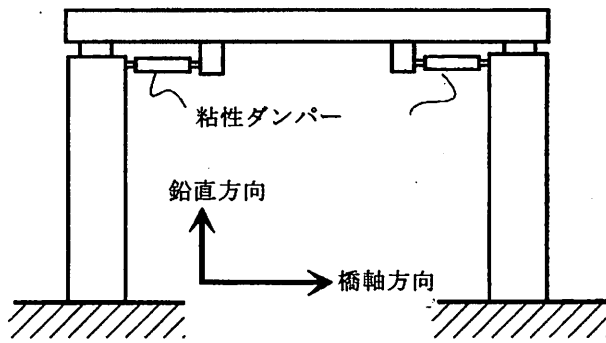


図-9 対象橋の一般形状

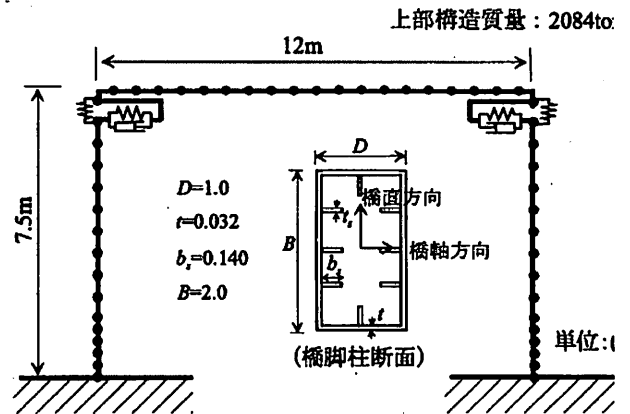


図-10 解析モデル

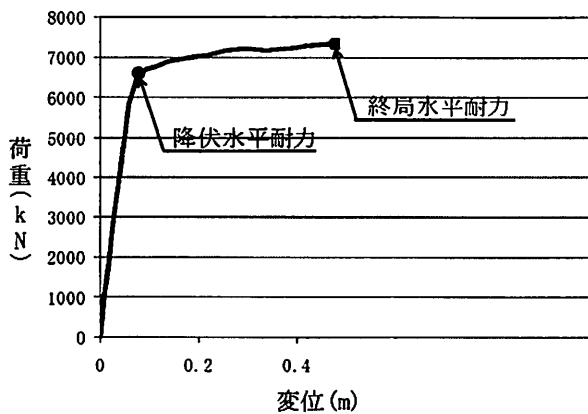


図-11 橋脚の荷重-変位図

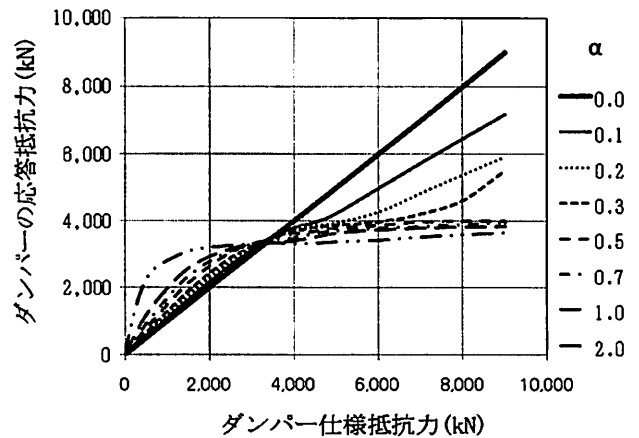


図-12 ダンパーの仕様抵抗力に対する最大応答抵抗力

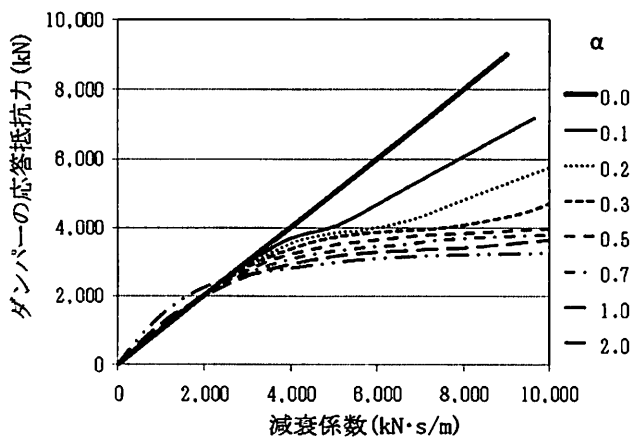


図-13 ダンパーの減衰係数に対する最大応答抵抗力

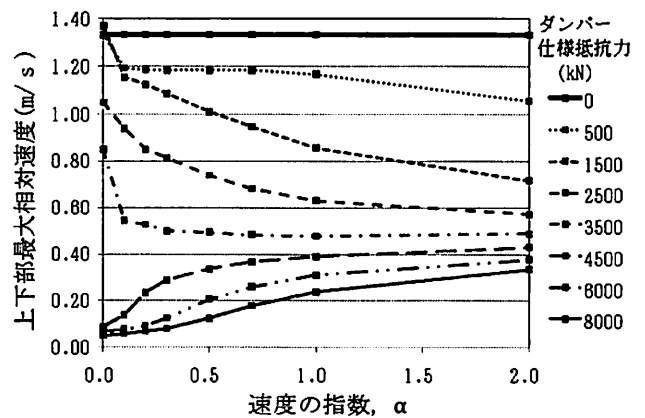


図-14 指数に対する上下部構造最大相対速度

9,113kN/m/基である。

ダンパーの速度の指数は、0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 の 8 通りとした。ダンパーの仕様抵抗力は、速度 0.50m/s で 0, 500, 1,500, 2,500, 3,500, 4,500, 6,000, 8,000kN の 8 通りとした。

入力地震波は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編³⁾に記載されている II 種地盤のタイプ II 地震動の

JR 西日本鷹取駅構内地盤上 N-S 波とした。

(2) 解析結果

a) 最大応答抵抗力と上下部構造最大相対速度
仕様抵抗力、減衰係数に対する最大応答抵抗力および上下部構造最大相対応答速度をそれぞれ図-12、図-13および図-14に示す。速度の指数が 0.0 では速

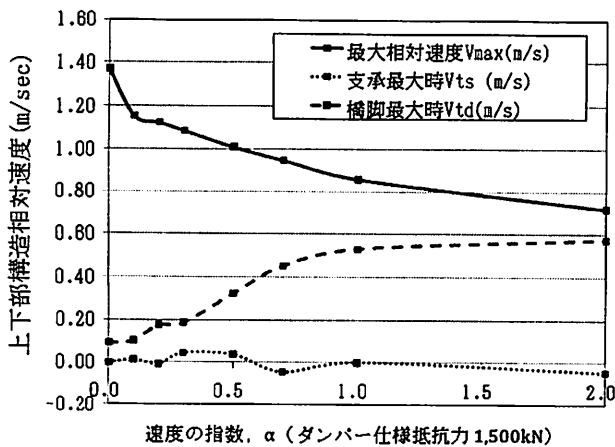


図-15 イベント毎の上部構造相対速度例

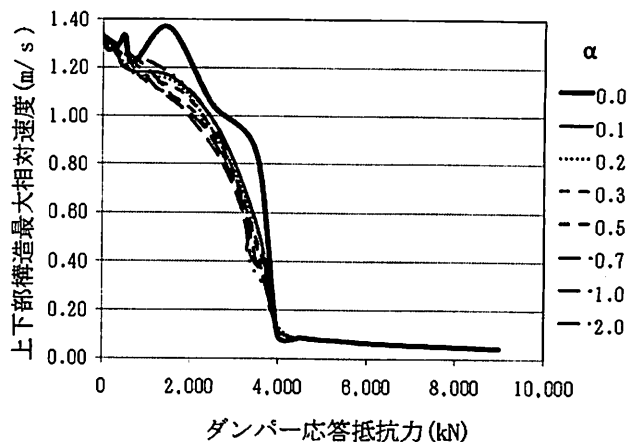


図-16 応答抵抗力に対する上下部構造相対速度

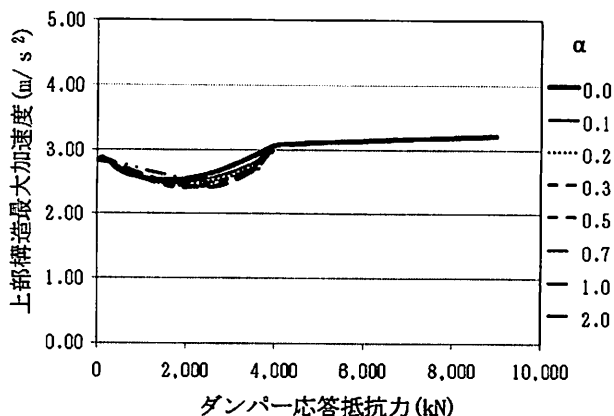


図-17 応答抵抗力に対する上部構造加速度

度に関係なく仕様抵抗力相当の抵抗力を発現するため、応答抵抗力と仕様抵抗力は一致し直線で表される。これは、解析では応答抵抗力が± 0.05m/s の範囲程度内を線形としているため、単一橋脚の終局荷重 3,681kN より大きい仕様抵抗力のダンパーを用いても上下部構造間に相対変位および相対速度が生じ、設計式上、応答抵抗力が必然的に仕様抵抗力相当になったものである。同様な要因により、速度の指数が小さい場合でも橋脚の終局荷重 3,681kN より相当に大きくなっているが、速度の指数が大きくなると5kine程度の速度では大きな抵抗力とならないので、ダンパーの応答抵抗力は橋脚の終局荷重程度となっている。すなわち、低速度域での解析精度が確保されれば、全てのケースにおいて橋脚の終局荷重程度を大きく越えることはないと考えられる。また、仕様抵抗力が橋脚の終局荷重 3,681kN より小さい場合の応答抵抗力は仕様抵抗力より大きくなり、指数が大きいほど大きい。特に指数が 2.0 の場合の応答抵抗力は仕様抵抗力に比べて相当大きくなっている。一方、図-13から減衰係数で整理すると、橋脚の終局荷重までの応答抵抗力は速度の指数にかか

わらず同等の値になっていることから、減衰係数により応答抵抗力を評価できるようなのである。

図-14から、仕様抵抗力が橋脚の終局荷重程度より小さい場合には上下部構造最大相対速度が設定速度である 0.50m/s 以上となり、橋脚の終局荷重より大きい仕様抵抗力の場合には応答速度が 0.50m/s 以下となっている。なお、実設計においては、橋脚の終局荷重より大きな抵抗力が生じるように設定することはほとんどないと考えられる。

ここで、仕様抵抗力を 1,500kN とした場合の支承および橋脚の最大変位時の上下部構造相対速度と最大相対速度を図-15に示す。同図では、支承の最大変位時の上下部構造相対速度はほぼ 0m/s であり、橋脚の最大変位時では速度の指数が小さい場合は上下部構造相対速度が遅く、速度の指数が大きくなるほど速くなっている。これは、速度の指数が小さい場合は上下部構造間の位相は小さく、速度の指数が大きい場合には位相が大きいことを意味している。ここで、速度の指数が大きいほど最大相対速度が遅くなり、速度の指数が大きい方が一見振動性状の抑制効果が大きく見えるが、図-12のダンパー仕様抵抗力1,500kNを見ると、速度の指数が大きくなれば速度は遅くなっているにもかかわらず抵抗力は速度の指数が小さい場合より大きくなっていることがわかる。

上下部構造最大相対速度および上部構造最大加速度をダンパーの応答抵抗力でグラフ化したものをそれぞれ図-16および図-17に示す。このように、ダンパーの速度の指数にかかわらず、応答抵抗力で見ると上下部構造最大応答速度および上部構造加速度に大きな相違はない。ただし、速度の指数 0.0 の場合のみ傾向は異なっている。

b) 支承の最大応答変位

ダンパーの仕様抵抗力および最大応答抵抗力に対

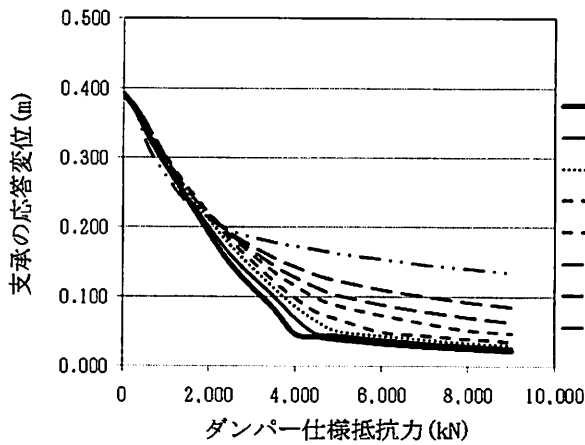


図-18 仕様抵抗力に対する支承の最大応答変位

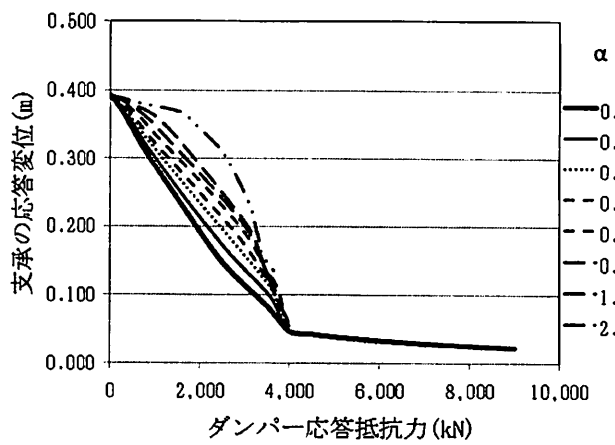


図-19 最大抵抗力に対する支承最大応答変位

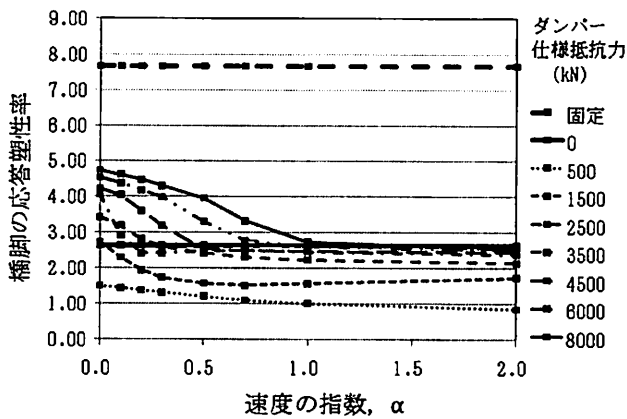


図-20 速度指数に対する橋脚の応答塑性率

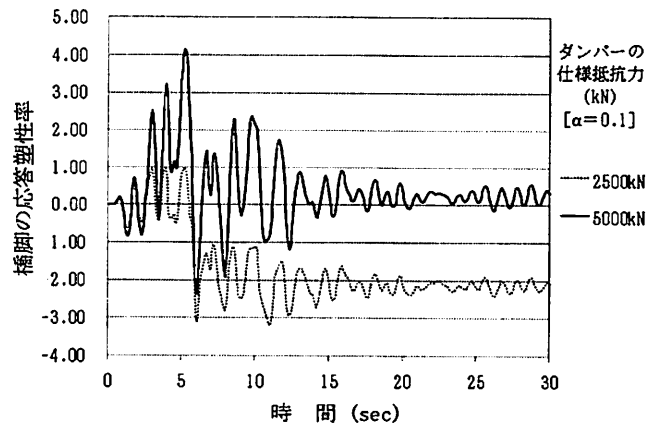


図-21 時刻歴応答塑性率例

する支承の最大応答変位をそれぞれ図-18および図-19に示す。この内、ダンパーの仕様抵抗力で示した支承の最大応答変位は特異な傾向を呈しており、支承の応答変位の傾向を把握することはできないと考えられる。これに対して、応答抵抗力は実挙動を表しているの、それで支承の最大応答変位を示すと傾向が現れ、応答抵抗力により評価できると考えられる。すなわち、最大応答抵抗力が大きくなれば支承の応答変位は確実に低減し、速度の指数が小さい方が支承の応答変位は小さい。これは、ダンパーにより支承に作用する上部構造慣性力が小さくなるためである。また、ダンパー最大応答抵抗力が橋脚の終局荷重3,681kNに相当する最大応答抵抗力より大きくなると支承の最大応答変位は0に近づく。これは、橋脚に終局荷重以上の慣性力は伝達しないため、ダンパーが変位しにくくなることを意味する。

c) 橋脚の応答塑性率

ダンパーの速度の指数に対する橋脚の応答塑性率を図-20に示す。同図に固定支持の場合も付記したが、ダンパーを用いることにより橋脚の応答塑性率

は確実に低減されている。

ここで、速度指数0.1におけるダンパーの仕様抵抗力を2,500kNと5,000kNとした場合の時刻歴応答塑性率を図-21に示す。これから、2,500kNでは負側の応答塑性率が大きい、5,000kNでは正側の応答塑性率が大きくなっている。これは、ダンパーの仕様抵抗力により応答塑性率が大きくなる方向が異なることが影響しているようである。また、2,500kNの場合の残留変位の方が大きくなっている。これは、5,000kNでは正方向に塑性化した後に負方向に塑性化したのに対して、2,500kNでは正方向に塑性化することなく負方向に塑性化したことで、負方向の残留変位として現れたものである。

ダンパーの応答抵抗力に対する橋脚の応答塑性率を図-22に示す。同図より、ダンパーの応答抵抗力の増加に対して、橋脚の応答塑性率は一旦低減してから再び大きくなることわかる。この現象は、ダンパーの減衰性能により橋脚の塑性化が抑制されることと、同時に短周期化すると入力される加速度が大きくなり、ある抵抗力を境として応答塑性率が増加するためである。

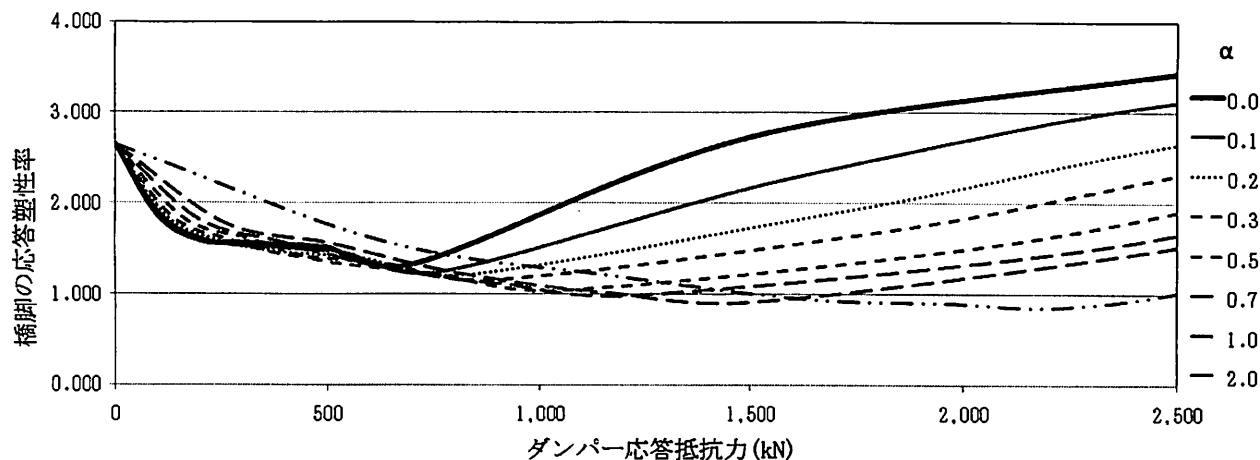


図-22 ダンパーの応答抵抗力に対する橋脚の応答塑性率

(3) まとめ

本論文では、抵抗力が速度の指数に比例するダンパーの基本的挙動を履歴として示すことで、動的挙動を理解しやすくした。ここで示したように、ダンパーの性能だけでは耐震性にどのような効果を及ぼすかはわからず、併設するゴム支承の特性、ダンパーの仕様抵抗力などと関係する。そこで、ケーススタディにより地震時の応答特性を例示した。概して、固定とする場合に比べて耐震性の改善が図られ、速度の指数にかかわらず有用であることを確認した。以下にダンパーによる制震効果の知見を示す。

- ① ダンパーの仕様抵抗力が橋脚の終局耐力以下では、速度指数が大きい方が上下部構造相対速度は遅くなるが、ダンパーの応答抵抗力が大きくなる傾向にある。
- ② ダンパーの設置により支承の応答変位は確実に低減し、速度指数が小さい方が小さくなる傾向にある。ただし、ダンパーの応答抵抗力が橋脚の終局耐力以上になると、支承は変位しなくなる。
- ③ ダンパーの応答抵抗力が増大するにしたがい、橋脚の応答塑性率は低減した後再び大きくなるので、仕様抵抗力を大きく設定し過ぎないようにする必要がある。

以上、抵抗力が速度の指数に比例するダンパーを用いた場合について、動的解析により得られた応答から速度の指数の相違による傾向を把握した。概して、速度の指数が大きくなればなるほど仕様抵抗力から応答値を予測することは難しいと思われる。

4. おわりに

本検討では、抵抗力が速度の指数によって変化するダンパーを概括し、速度の指数が異なる様々なダンパーの抵抗力をパラメトリックに設定して応答の

傾向を把握した。これらの概ねの傾向は変わらないと思われるが、対象とする振動系や抵抗力の設定速度、地震波の特性などにより応答が変化する。しかし、速度指数が 2.0 のような大きな場合を除き、動的挙動の差は大きなものではないので、それぞれのダンパー毎に適切な耐震性をを設定すればよい。

橋の耐震補強では上部構造慣性力を特定の下部構造に誘導させるために用いることが多く、変位を抑制するために用いることもあり、減衰性能を最大限に発現させるように設計しているわけではない。ダンパーの設定に当たって重要なことは、性能が安定していること、高い信頼性が検証されていること、油漏れ等長期間の耐久性に優れていること等である。なお、ダンパーの適用範囲は製品毎に異なるので、適用に当たっては製造会社に確認しておく必要がある。また、ダンパーの取付部に大きな慣性力が作用しないように、地震波の特性を考慮して適切に評価しておくことが重要である。

5. 謝辞：本論文の一部は 2007～2009 年にわたり社団法人 日本鋼構造協会 鋼橋の性能・信頼性向上に関する研究委員会の耐震設計部会で検討したものである。ここに、後藤主査、川神副主査、奥村幹事ならびに各委員に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上, JSSC No.85, 2009.9
- 2) Zhiyi Chen, Hanbin GE and Tsutomu Usami (2007) : Study on Seismic Performance Upgrading for Steel Bridge Structures by Introducing Energy-Dissipation Members, JSCE, Vol.53A, pp.540-549, 2007.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3