

摩擦履歴型ダンパーの適用とその実例

斎藤 次郎¹・佐藤 英和¹・横川 英彰²・宇野 裕恵²・牧口 豊¹・下田 郁夫³

¹ オイレス工業株式会社 免制震カンパニー 支承設計部（〒105-8584 東京都港区芝大門 1-3-2）

² 正会員 工修 オイレス工業株式会社 免制震カンパニー 支承設計部（同上）

³ 正会員 工博 オイレス工業株式会社 免制震カンパニー（同上）

1. はじめに

近年、機能分離構造が増加しつつある。古くは、粘性ダンパーを固定装置として用いる方法¹⁾、最近では、ゴムバッファーとすべり支承を用いた方法²⁾や、ゴムの圧縮ばねを用いた方法³⁾、鋼製支承の摩擦履歴を用いた方法⁴⁾、鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承をダンパーとして用いた方法⁵⁾など、さまざまな方法が見られる。これらの方法は、支承部に直接減衰構造を用いる構造であるため、支承の高さが低いすべり支承などが設置されている橋梁などの耐震補強を行う場合など、スペースが限られている場所では設置が難しい場合がある。ここでは、比較的設置スペースの自由度が高く、支承と離れた場所に設置可能である摩擦履歴型ダンパーの特性・モデル化の方法について述べる。その後、摩擦履歴型ダンパーを機能分離構造以外に適用した場合も含めたいくつかの設計・施工の例を紹介する。

2. 摩擦履歴型ダンパー

ここでは、摩擦履歴型ダンパーの種類について紹介する。図-1 に LED⁶⁾ (Lead Extrusion Damper)、図-2 に BM-S (Bingum Material Stopper) を示す。どちらも、外見はシリンダー型であるが、摩擦履歴を持つダンパーである。

(1) LED の構造

LED の内部構造を図-3 に示す。LED は鉛の流動抵抗により、摩擦型の履歴を実現するものである。特徴として、LED の中に封入されている鉛は比較的低い降伏荷重を持つこと、流動性があること、また、再結晶する温度が他の金属と比較して低いため、繰返し荷重下でも、ダンパーとしての効果を期待することができる。LED の履歴特性は、図-5 に示すようなスクエアな形であり、効率良く減衰を付加することができる。

(2) BM-S の構造

BM-S の内部構造を図-4 に示す。BM-S は内部に封入された特殊な充填材と、ピストンによって形成されるオリフィスの抵抗力から、摩擦型の履歴を実現

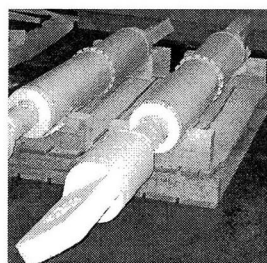


図-1 LED

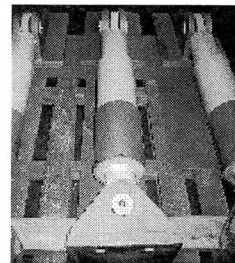


図-2 BM-S

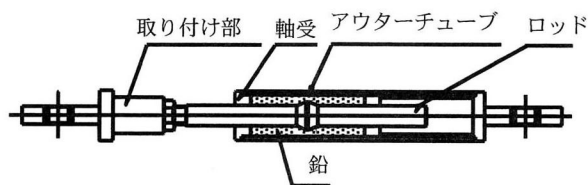


図-3 LED の構造

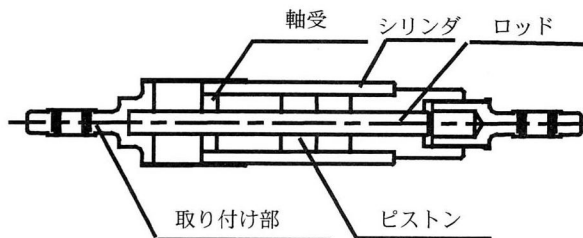


図-4 BM-S の構造

する装置である。

特徴として、BM-S は LED と比較して高い抵抗力を得ることが可能であることが挙げられる。BM-S の実測した履歴を図-6 に示す。これから、LED 同様摩擦に近い履歴減衰を得られることが分かる。

3. ダンパーの履歴特性のモデル化

多くの汎用ソフトウェアでは、摩擦履歴をバイリニア特性を用いてモデル化を行っているが、1 次剛性を考慮してレーリー減衰を評価すると、ダンパー

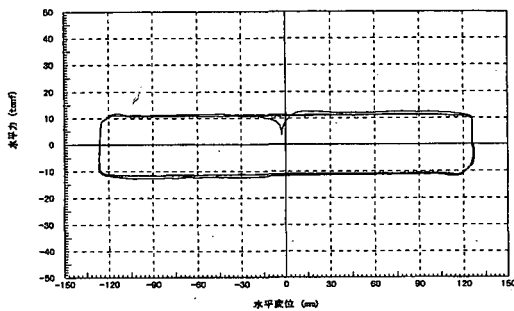


図-5 LEDの履歴

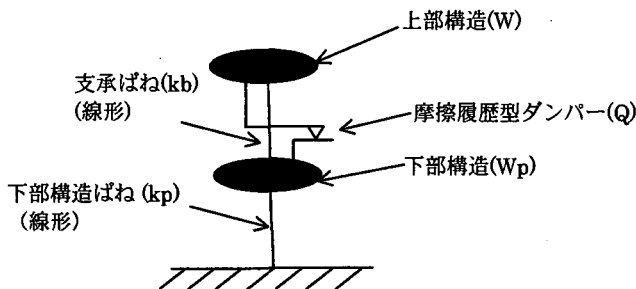


図-7 2自由度モデル

の履歴減衰と、ダンパーのモデル化によって導入される、1次剛性に比例した値の粘性減衰の両方見込んだ結果になってしまう⁷⁾。ここでは、レーリー減衰による減衰マトリックスの作成法について検討を行い、その結果から得られた知見に基づき履歴減衰のモデル化の方法を提案する。

(1) レーリー減衰による1次剛性の影響

レーリー減衰は以下の式によって示される。

$$C = a \cdot M + \beta \cdot K \quad (1)$$

ここで、 C は減衰マトリックス、 M は質量マトリックス、 K は剛性マトリックスである。つまり、減衰マトリックスは質量と剛性の線形結合により求められるという仮定で構造減衰が表現される方法である。しかし、レーリー減衰と併用して履歴型ダンパーのような非線形ダンパーを用いる場合、剛性マトリックス K の与え方が問題になることが知られている⁷⁾。ここでは、レーリー減衰を1次剛性を含んで評価した場合に付加される減衰係数を検討する。

(a) 1自由度系モデルによる検討

1自由度系モデルを用いて、摩擦履歴型ダンパーの1次剛性 K_1 をレーリー減衰に含んだ場合における応答の影響について検討する。

1自由度系の減衰定数は以下の式で示される。

$$h = \frac{C}{2 \cdot \sqrt{M \cdot K}} \quad (2)$$

ここで、 C は構造の減衰係数、 M は質量、 K は剛性である。また、摩擦履歴型ダンパーの1次剛性 K_1 によって付加される減衰係数 C_{dmp} は

$$C_{dmp} = \beta \cdot K_1 \quad (3)$$

で示され、これを式(2)に代入すると

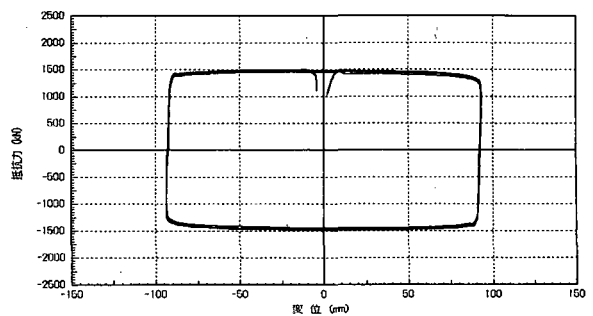


図-6 BM-Sの履歴

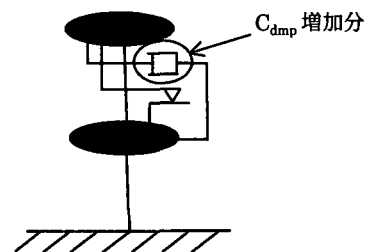


図-8 C_{dmp} を考慮したモデル

$$h = \frac{(C + C_{dmp})}{2 \cdot \sqrt{M \cdot K}} + h_{dmp} \quad (4)$$

となる。ここで、 h_{dmp} は、ダンパーによる履歴減衰である。式(4)に示したように、1次剛性 K_1 と係数 β を乗じた値は、ダンパーによる履歴減衰とともに付加されるために応答が減少し、ダンパーの性能が過剰に評価され、設計上危険側となることが考えられる。

(b) 2自由度系モデルによる検討

表-1に示すような構造物で C_{dmp} の影響について検討する。対象は図-7に示すような、履歴減衰のみを考慮したモデルと、図-8に示すような履歴減衰と C_{dmp} 両方を付加させた場合のモデルとする。

ここで用いたダンパーの履歴モデルを図-9に示す。ダンパー以外の構造要素はすべて線形とし、入力地震動はⅢ種地盤上のL2地震・タイプⅡの1波目とした。ダンパー抵抗力 Q と上部構造重量 W との比で示した無次元化パラメータ(Q/W)を用いて、下部構造変位、ダンパー変位について考察を行う。 C_{dmp} を考慮した応答と、 C_{dmp} を考慮しない応答で除した値を応答比として評価を行う。なお、パラメータ Q/W は0.01から0.8まで変化させた。

(c) 検討結果と考察

ダンパー変位と応答比を図-10に、下部構造変位と応答比を図-11に示す。図-10より、 $\beta \cdot K_1$ の値が小さい Q/W が0.1以下までは、 $\beta=0.001$ 、 $\beta=0$ 両方の応答は一致しているが、 $Q/W=0.3$ では、応答比が0.9程度であるが、 $Q/W=0.8$ になると、応答比が0.5まで下がり、 C_{dmp} が応答にかなり寄与していることが分かる。また、図-11から、下部構造変位も、ダ

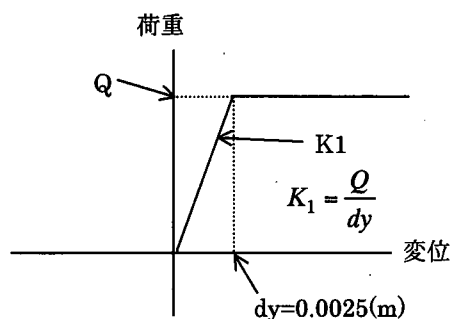


図-9 ダンパーの履歴モデル

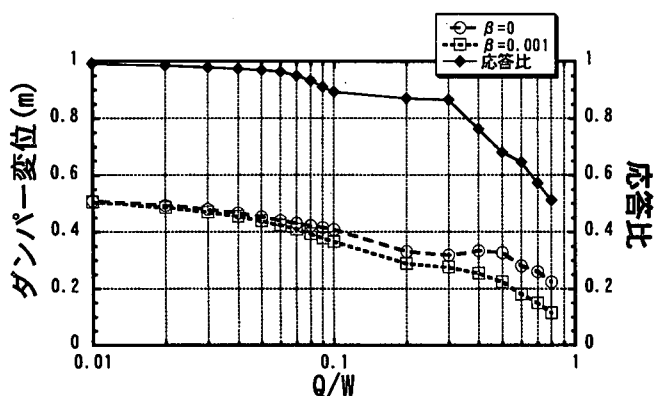


図-10 ダンパー変位と応答比

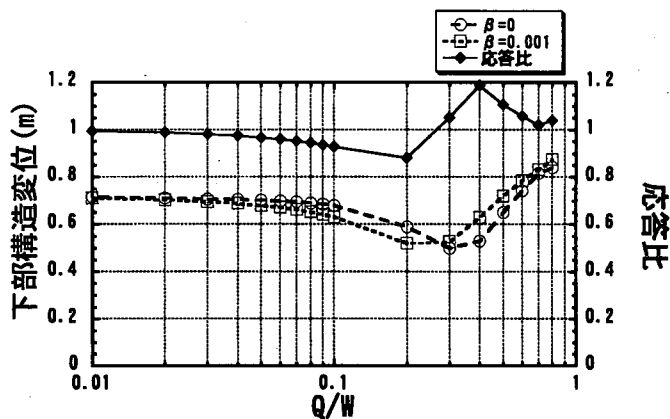


図-11 下部構造変位と応答比

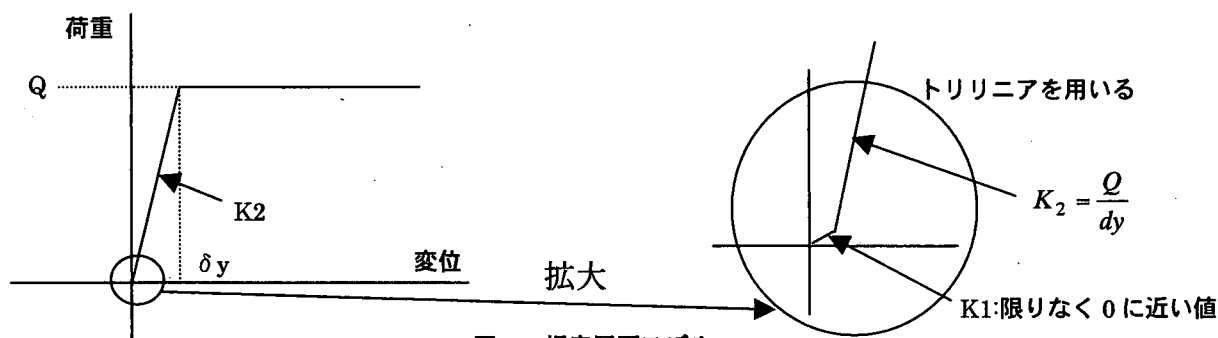


図-12 提案履歴モデル

表-1 モデルのパラメータ

上部構造重量(w)	5844	kN
下部構造重量(wp)	3432.3	kN
支承ばね定数(kb)	11688.3	kN/m
下部構造ばね定数(kp)	11504.9	kN/m
1次モード周期	2.19	sec
2次モード周期	0.71	sec
1次モード減衰定数	2.54	%
2次モード減衰定数	7.87	%

ンパー変位ほど応答比の低下はないが、 C_{dmp} の影響が少なからず見られる。Q/W が 0.3 以下では、 $\beta = 0.001$ は $\beta = 0$ と比較して応答が低下しているが、さらに Q/W を増加させると、 $\beta = 0.001$ は $\beta = 0$ と比べると応答が増大する。その理由として、ダンパーの変位が減少し、ダンパーが固定構造に近くなるためであると考えられる。いずれにせよ、 C_{dmp} を含めた応答解析は、ダンパー、下部構造ともに、誤差が大きくなる傾向あることが分かる。減衰の与え方によっては、ダンパーの性能を過大評価することになり、危険側な設計になることが考えられる。以上の結果から、レーリー減衰を用いて応答解析を行う場合、減衰マトリックスの作成方法と、履歴減衰の入力方法の両方についてソフトの仕様を確認する必要がある。

(2) 新たな履歴モデルの提案

(a) モデルの概要

履歴モデルの設定方法について提案する。既往の研究で、摩擦履歴などのモデル化の方法としてとして、Park, Wen などの提案⁸⁾がある。この方法は、

少ないパラメータで詳細なモデルを設定することができるが、あまり実際に使われていないのが現状である。一般的に摩擦履歴減衰のモデル化を行う場合、図-9 に示したようなバイリニア特性でモデル化を行うのが一般的である。しかし、一部の汎用ソフトでは前述したような問題があるため、ここでは、トリリニアを用いたモデル化の方法を提案する。モデル化の方法を図-12 に示す。トリリニアの 1 次剛性と、1 次降伏変位を非常に小さな値を取るることによって、 K_1 の影響を小さくするものである。これにより、摩擦履歴型ダンパーを用いてモデル化を行った構造系で、レーリー減衰を考慮しても応答を危険側に評価することがなくなると考えられる。

(b) 時刻歴応答解析による比較検討

図-7 に示したモデルで、バイリニアとトリリニアの応答の比較を行う。モデルのパラメータは(1)と同じ表-1 に示した値を用いる。データ作成の関係上、Q/W の比はトリリニアとバイリニアで若干異なることを付け加えておく。

図-13、にダンパー変位、図-14 に下部構造変位を、上部構造加速度を図-15、下部構造加速度を図-16 に示す。図-13、図-14 より、ダンパー変位と、

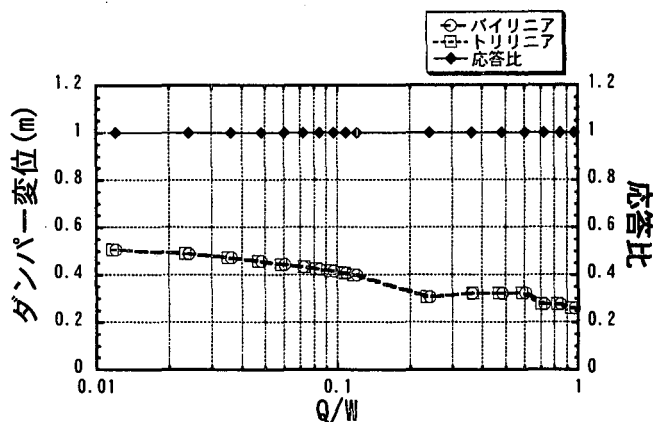


図-13 ダンパー変位

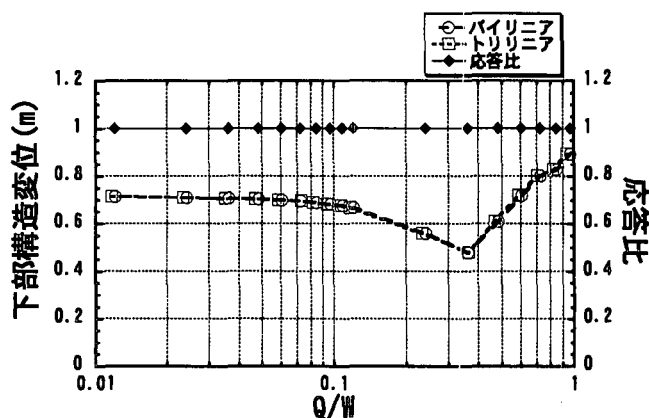


図-14 下部構造変位

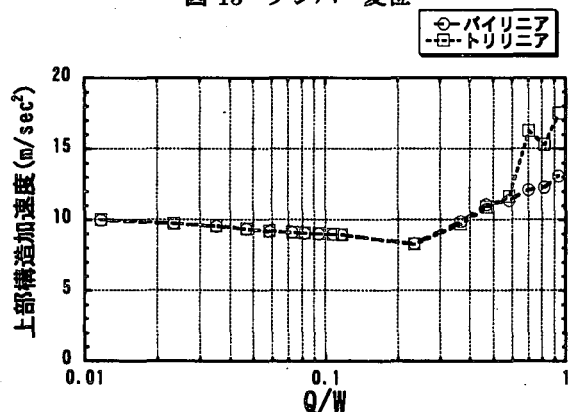


図-15 上部構造加速度

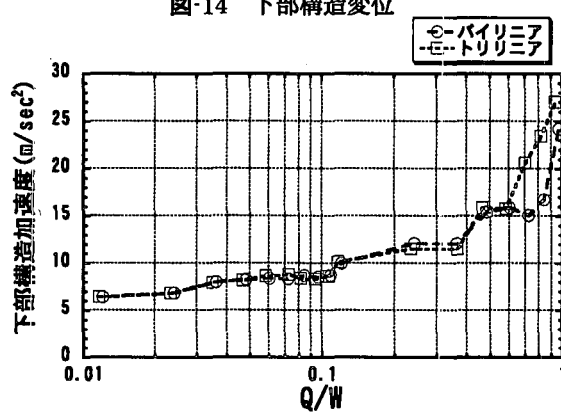


図-16 下部構造加速度

下部構造変位からは、双方の差はまったく見られない。これはバイリニアでもトリリニアでも同じ履歴減衰が得られていることを示している。ところが、図-15 から上部構造加速度に関しては Q/W が 0.6 以上では増大しており、トリリニアを用いた場合は、バイリニアを用いた場合よりも最大で 1.3 倍程度に増加する。また、図-16 から下部構造加速度に関しても同様に、 Q/W が 0.6 以上で加速度の増加が起きていることが分かる。その理由として、バイリニアでは、1 次剛性と 2 次剛性の間に急激な剛性変化が起きないようにソフト上考慮されているのに対して、トリリニアでは剛性が遷移する際に、急激な剛性変化を緩和する仕組みができておらず、瞬間的に衝撃的な加速度が生じていると考えられる。本モデルを用いることにより、 Q/W が大きな値の場合は、加速度の評価に問題があると考えられるが、変位照査に関しては問題が無いと考えられる。

今後、履歴減衰を忠実に再現できるモデルを用いて応答解析を行うことが望まれる。

4. ダンパーの用途と実例

ここでは、ダンパーの用途と実例について述べる。また、最初に用途・適用方法について述べた後に設計施工の実例について説明を行う。

(1) ダンパーの用途

(a) 機能分離構造

機能分離構造とは、鉛直支持機能と水平支持機能を分離させた構造が多いが、ここでは、水平支持機能

と摩擦履歴型ダンパーを用いた構造を提案している。摩擦履歴型ダンパーは復元力を持たないため、積層ゴム支承などの水平力支持機能を併用するのが一般的である。これらは、免震支承と同等もしくは、それ以上の減衰を得られるような抵抗力を設定することが可能である。

(b) 地震時水平力分散構造

基本的に(a)と同じ考え方である。既往の免震支承のような、ゴムの平面積に比例して得られる限られた減衰性能ではなく、比較的自由に減衰性能を設定できる。免震支承を用いた場合、支承にあわせて橋脚の耐力を設定するような設計を行うこともあったが、摩擦履歴型ダンパーは橋脚の耐力に合せて、ダンパー抵抗力を自由に設定することが可能である。

(c) 既設橋の耐震補強

鋼製支承は比較的支承高さが低いため、ゴム支承のような構造高さが高い支承に取り換えることが不可能な場合に、既存の支承をそのままにして、ダンパーを追加するだけで、耐震補強が可能である。また、ダンパーを減衰機能としてではなく、後述するような変位制限構造や、ジョイントプロテクターとしての機能として補強が行われる例もある。

(d) 振動特性の改善

摩擦履歴型ダンパーはジョイントダンパー⁹⁾としても用いることが可能である。けた間変位を減少させることができる他、免震橋のように変位が大きな橋梁で、緩衝材の代わりに摩擦履歴型ダンパーを用いて、隣接橋との衝突回避を行うことができる。また、共振、位相差による遊間の増大などを回避することが可能である。

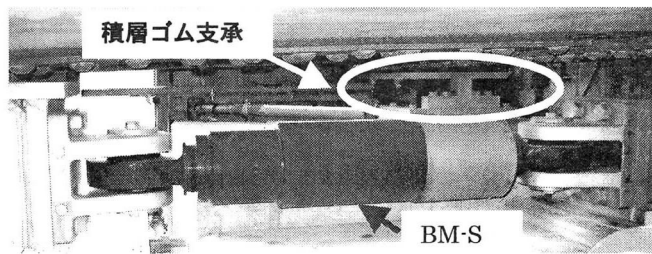


図-17 機能分離構造

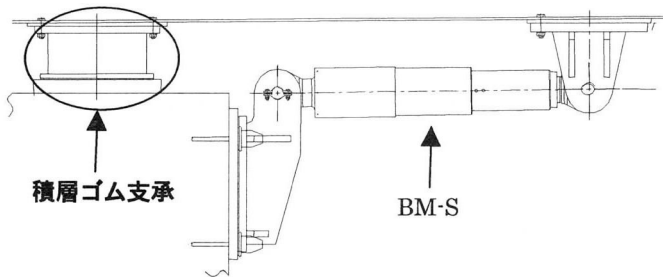


図-18 水平力分散構造

(e)落橋防止システム

(c)でも述べたように、ダンパーを減衰機能としての設計ではなく、落橋防止システムとしての設計も可能である。通常サイドブロックなどで設計されている構造と比較して、構造部材同士の衝突が回避されるため、各個撃破などの衝突によって予想される現象から橋梁全体を保護することが可能である。

(2)ダンパー設計・施工の実例

(a)機能分離構造

図-17 に機能分離構造としてダンパーを設置した例を示す。この橋は中間橋脚がラーメンの2径間連続鋼箱げた橋である。地震時変位が大きく、中間橋脚の塑性ヒンジも許容塑性率を超えていたため、橋軸方向の地震時変位を低減させる必要が生じた。これを解消する方策として、橋台に BM-S を設置し、橋軸方向の変位を調整する機能分離構造が採用された。この橋梁に期待する機能分離構造とは、支承機能と減衰機能に分けて、機能を明確化させ、維持管理を容易にした構造である。ダンパーの設計抵抗力の決定方法としては、ダンパー抵抗力をパラメータとした動的解析を実施し、中間橋脚の塑性ヒンジが許容塑性率に入るような抵抗力とした。

また、BM-S を設置することにより、地震時変位はわずか 50mm 程度になった。これにより、鉛直・水平力支持機能として用いられている積層ゴム支承は、常時の条件のみで設計された。

(b)水平力分散構造

図-18 に水平力分散構造として用いられたダンパーを設置した一例を示す。本橋梁は上路式鋼製アーチ橋である。地震時において、主部材に過大な圧縮力が作用することがわかり、部材圧縮力を低減させる必要が生じた。これを解消する方策として、橋台に BM-S を設置し、橋軸方向の水平力分担率を調整

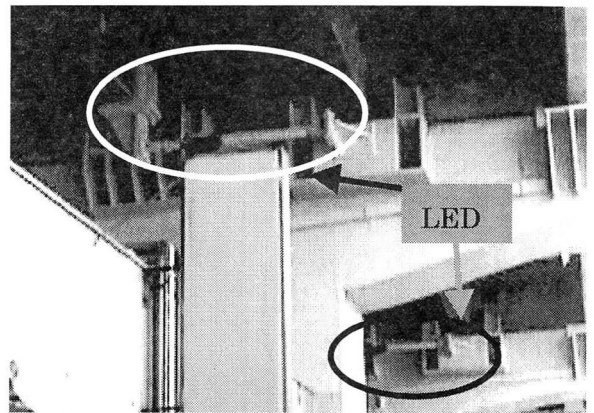


図-19 耐震補強に設置された例

する事となった。ダンパーの設計抵抗力は、抵抗力をパラメータにして動的解析を実施し、下部構造の分担死荷重比率程度とした。ダンパーを設置した場合、下部構造の断面寸法を抑えることが可能となり、しかも、地震時変位はわずか±65mmであった。

また、(a)同様、併用される積層ゴム支承は地震時変位が減少したことから常時の条件のみで設計された。

(c)耐震補強

本橋梁は、図-19 に示すようにけた下や橋脚周りに店舗や駐車場があるため、橋脚の補強が非常に困難であった。そこで、地震時に下部構造に生じる水平力をダンパーに持たせ、鋼板巻きたて補強を最小限に留める方法とした。

計画段階で、動的解析を行ったところ、橋軸方向の耐震性は満足していることが確認されたが、橋軸直角方向では固定橋脚の耐震性が確保されていなかった。そこで、全ての可動橋脚の橋軸直角方向に LED を配置して、橋梁全体の地震力の低減をはかる事となった。ダンパーの抵抗力は、可動橋脚の許容耐力以下となるように決定したところ、固定橋脚の巻きたて補強を最小限にとどめ、可動橋脚の補強が困難な箇所を補強せずに耐震性を確保することが可能となった。

(d)振動特性の改善

図-20 に振動特性改善として、ダンパーを設置した例を示す。この橋梁¹⁰⁾は、河川流路を跨ぐ主げた部がゲルバーヒンジ付きの連続鋼ばんげたである。

当初、緊急交通路等の耐震補強対策として、RC 巻き立てによる橋脚補強と、落橋防止システム強化が計画・設計されていた。しかし、河川流路内の橋脚が RC 巻き立てによる河川阻害率が 5%以上になることや、巻き立て補強のための仮設工事の費用が多くなることが予想された。その対策として、既設の鋼製支承をゴム支承に交換し、河川阻害の影響が少ない橋脚の補強を強化することによって、地震時水平力の分担比率を調整して、河川流路内橋脚の耐震補強を行わないこととした。

この設計では、上部構造が一体化した挙動を期待しているため、ゲルバーヒンジ部の連結する必要が

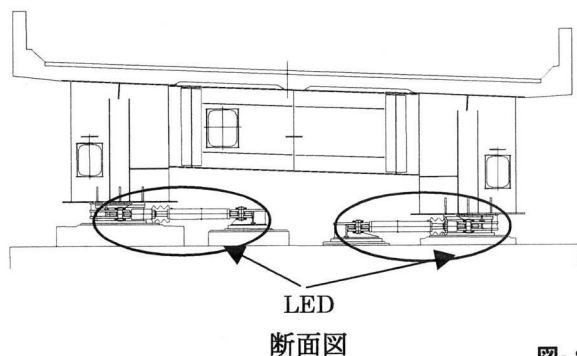


図-21 変位制限構造

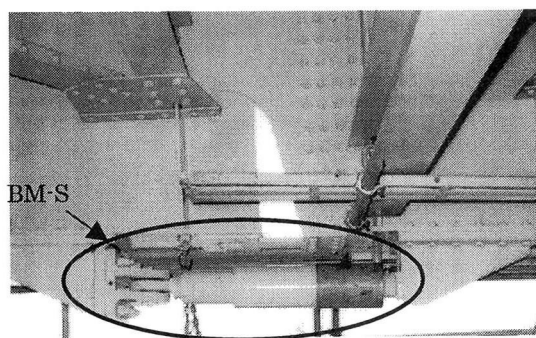
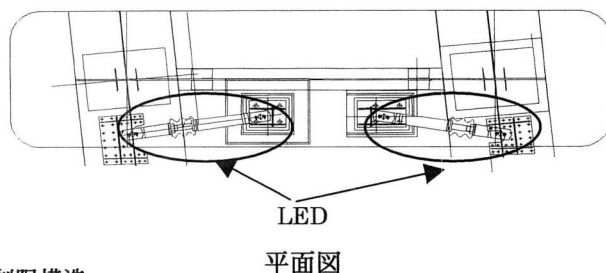


図-20 ゲルバーヒンジ部に設置された例

あった。ダンパー（BM-S）をゲルバーヒンジ部に付加することにより、地震時に対しては大きな抵抗力を発生させ、温度変化のような緩慢な動きに対しては定格の 1/5 程度の抵抗力に減少させるダンパーの性能を最大限利用した設計を行った。ダンパー抵抗力は、抵抗力をパラメータとした動的解析を行ない、ゲルバーヒンジ部の変位が 5mm 以下となるような抵抗力を設計抵抗力とした。

(e)変位制限構造(落橋防止構造)

図-21 に、変位制限構造として設置された例を示す。この橋梁は全方向水平力分散設計された橋であるが、曲線橋であり、斜角があったため、橋軸直角方向の変位制限構造を必要とした。変位制限構造案として、サイドブロックや鋼製ブラケットで検討されたが、これらは耐震性に問題があるだけでなく、サイドブロックと上査の間に遊間があるためジョイントプロテクターを兼ねることができない等の問題点があり、それらを克服するため、LED が採用された。設置個所については、亘り線で幅員が小さいため端支点だけに LED を取付けると橋中央部との相対変位が大きくなり上部構造に悪影響を及ぼす恐れがあったので、LED は全橋脚に取り付けられた。端支点の LED のみ変位制限構造としての設計力 ($3 \cdot R_d \cdot kh$) に耐える設計とした。ダンパー抵抗力の決定に関しては、抵抗力をパラメータとした動的解析を行い、けた変位が 250mm 以下となるような値に設定した。この解析により、LED を設置した場合と設置しない場合を比べて地震時の上部構造変位が平均して約 180mm 低減されることが確認され、変位低減と変位制限構造の両方の有用性が確かめられた。

6. まとめ

本論文では、最初に実務上問題となる動的解析に関する問題点を簡単なモデルを用いた解析によって検証し、それらを解決したモデルの提案を行った。

次に、今まで設計・施工されたダンパーの例を挙げ、設計法、用途についての説明を行った。

今後、より簡単に耐震機器を設計できるような手法を開発し、今後の耐震機器の発展に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 伊関治郎:粘性せん断型ストッパー —多径間連続桁への一提案—, 橋梁, Vol. 16, 1980. 2.
- 2) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田譲, 吉野伸:ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集, No. 563/ I -39, pp. 71-78, 1997. 4.
- 3) 伊津野和行, 袴田文雄, 中村一平:機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 654/ I -52, pp. 233-244, 2000. 7.
- 4) 玉木利裕, 小川一志, 河東鎬, 西田徹, 比志島康久, 鶴野禎史, 和田正明:摩擦減衰型免震装置の摩擦特性に関する実験的検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, 第 I 部 B, pp. 688-689, 1998. 10.
- 5) 南雲広幸, 日紫喜剛啓, 竹田哲夫:新しい免震工法の応答特性の確認, 第 1 回免震・制震コロキウム講演論文集, pp. 275-282, 1996. 11.
- 6) R. I. スキナー, W. H. ロビンソン, G. H. マックベリー:免震設計入門/川島一彦, 北川良和監訳, 鹿島出版会, 1996. 11.
- 7) 藍崎達也, 伊津野和行:すべり摩擦型免震支承のモデル化における初期剛性と減衰の与え方に関する検討, 第 26 回地震工学発表会講演論文集, 地震工学会 pp1073-1076. 2001. 8.
- 8) Y. J. Park, Y. K. Wen, A. H.-S. Ang: Random Vibration of hysteretic systems under ground motions, *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 14, pp. 543-557.
- 9) 佐藤 壮, 庄司 学:隣接橋梁間にジョイントダンパーを設置した場合の地震応答低減効果に関する一考察, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, 第 I 部 B, 2002. 9.
- 10) 藤井左規, 春和則, 内藤静男, 新谷毅:河川を横過する既設橋梁の支承改造による耐震性強化事例, 第二回免震制震コロキウム講演論文集, pp. 233-240, 2000. 11.