

## 支承部の機能分離構造に適用されるダンパーの設計と今後の展望

竹ノ内 勇<sup>1</sup>・佐々木 浩介<sup>1</sup>・横川 英彰<sup>2</sup>・牧口 豊<sup>3</sup>・下田 郁夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup> オイレス工業株式会社 第二事業部 支承設計部 (〒105-8586 東京都港区芝大門1-3-2)

<sup>2</sup> 正会員 工修 オイレス工業株式会社 第二事業部 支承設計部 (〒105-8586 東京都港区芝大門1-3-2)

<sup>3</sup> 正会員 オイレス工業株式会社 第二事業部 支承設計部 (〒105-8586 東京都港区芝大門1-3-2)

<sup>4</sup> 正会員 工博 オイレス工業株式会社 第二事業部 (〒105-8586 東京都港区芝大門1-3-2)

### 1. はじめに

本文は、橋梁支承部の鉛直力支持機能と地震時水平力の分散・減衰機能を分離した構造を対象とし、実橋における適用法、設計法を検討したものである。支承の要求される複数の機能をそれぞれ分離することによって、こここの機能を確実に確保するとともに、性能の選択肢を広げることが可能となる。また、設計や構造の自由度の向上も期待される。

ここでは、鉛直力を支持するゴム支承と地震時水平力の分散・減衰を担当するダンパーからなる支承構造を対象とした。ダンパーには摩擦履歴型の特性を有する鉛押し出しダンパー(あるいは軟塑性ダンパー)および粘性減衰を利用した粘性せん断型ダンパーについて述べる。

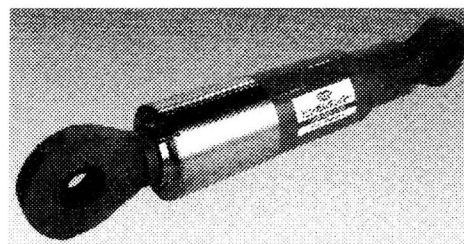


図-3 軟塑性ダンパー (BMD)

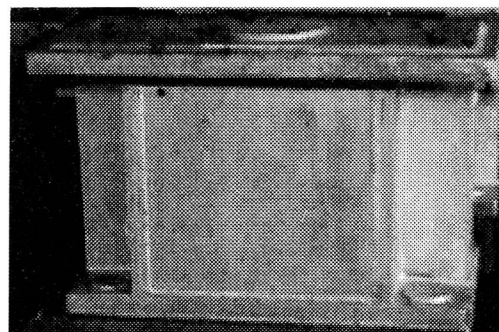


図-4 粘性せん断型ダンパー

### 2. ダンパーの構造と特性

図-1～図-4に地震時水平力分散・減衰機能を有する免震支承(LRB)、鉛押し出しダンパー(LED)、軟塑性ダンパー(BMD)、粘性せん断型ダンパーの構造を示す。

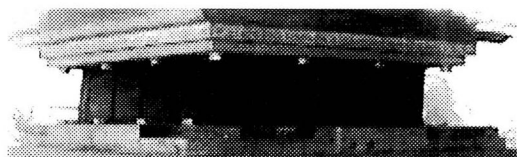


図-1 免震支承 (LRB)

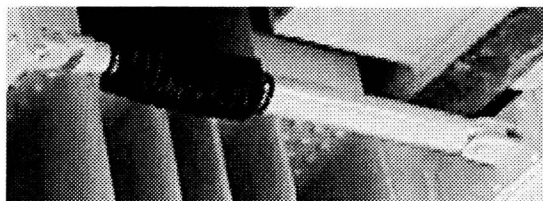
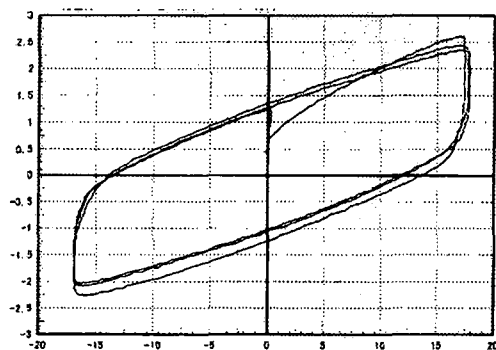


図-2 鉛押し出しダンパー (LED)

これらのダンパーは、いずれも非線型な履歴特性を有し、非線型動的解析による設計が一般的である。また、解析に際してはさまざまなモデルが提案されているおり、試験から得られた履歴特性と一般的な解析モデルを紹介する。

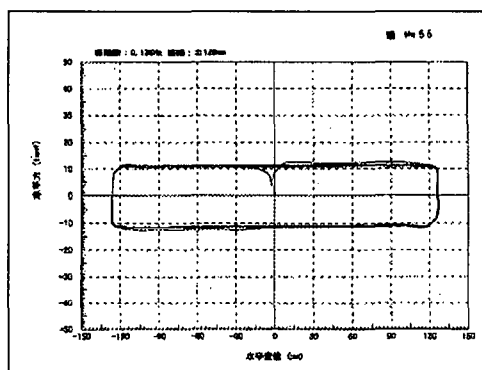
#### (1) LRBの履歴

LRBの履歴の一例を図-5に示す。通常パイリニアでモデル化される。



図—5 LRBの履歴の一例

## (2) LEDの履歴

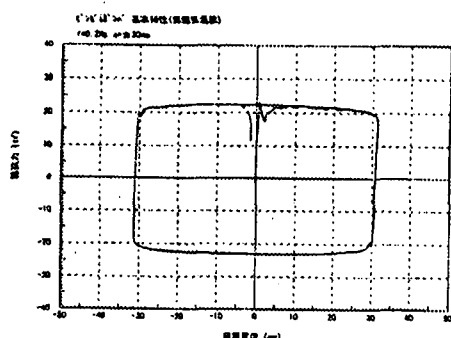


図—6 LEDの履歴の一例

ほぼ、摩擦履歴のような特性を持っており、モデル化を行う際には履歴を近似させるために1次剛性を大きく、2次剛性をきわめて小さい値のバイリニアモデルとする。これは、一つの装置で最大500kN程度の減衰力が得られる。

## (3) BMDの履歴

BMDも、LED同様に摩擦履歴のようなバイリニアでモデル化することができる。一つの装置で最大3000kN程度の減衰力が得られる。

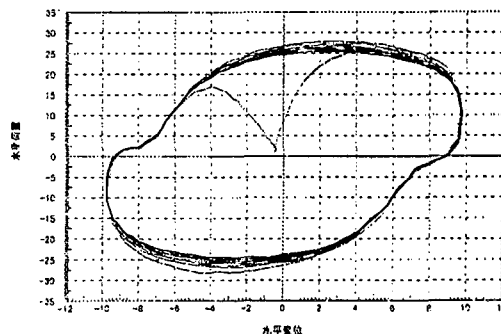


図—7 BMDの履歴

## (4) 粘性せん断型ダンパーの履歴

粘性せん断型ダンパーの履歴は、楕円の形に近く減衰力は振動速度に依存する。減衰力は $F = C V^n$ で表現され、 $n$ は0.6程度である。ここに、

$C$ は減衰係数、 $V$ は振動速度である。また、履歴の中で凹があるのは、製造上必要な隙間の影響である。



図—8 粘性せん断型ダンパーの履歴の一例

## 3. 各ダンパーの設計法について

ここでは、実設計例を用いてダンパーの適用法、設計法を説明する。

### 3.1 LED、BMDを用いた場合

#### (1) 適用法

LEDやBMDは自身では、復元機能を持たないので水平力分散ゴム支承との組み合わせで用いるか、一部の橋脚を固定構造とし他の橋脚では可動支承と組み合わせで用いるかいずれかが一般的である。

#### (2) 設計対象橋梁

図—9に設計対象橋梁を示す。

これは、谷に架橋されている既設橋梁で中間橋脚の橋軸直角方向の耐震補強を目的としてLRBを用いて免震化を行っている。

ところが、免震化によって、上部構造のの橋軸方向地震時最大変位が30cmとなるが、側径間橋との遊間が15cmしかなく、このままでは端部橋脚を破壊してしまう可能性があるので、LEDを用いて変位を押さえる検討を行なった。

#### (3) 解析モデル

解析に用いたモデルを図—10に示す。

支承部はLRBを用いているためバイリニアでモデル化した非線形バネを、橋脚はトリリニア武田モデルを用いている。LRBはP5、P8で同じ形状を、P6、P7で同じ形状であり、全部で2種類使用している。次に、LEDは比較的剛性の高いP5、P8橋脚の橋軸方向に設置する事とした。LEDは図—11に示すように降伏力 $Q$ を設定できるような極めて大きな値の一次剛性と、極めて小さな値の二次剛性をもつ摩擦履歴に近いバイリニアをモデル化した。また、減衰の設定はレーリー減衰を用い、モードごとの刺激係数と減衰定数からパラメータを決定した。入力地震波としては、1995年兵庫県南

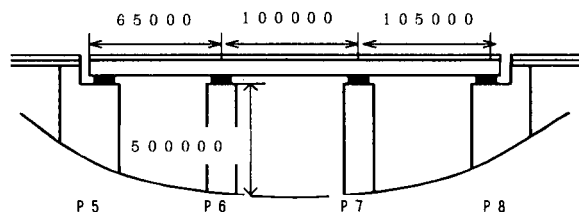


図-9 橋梁概略図  
F (水平力)

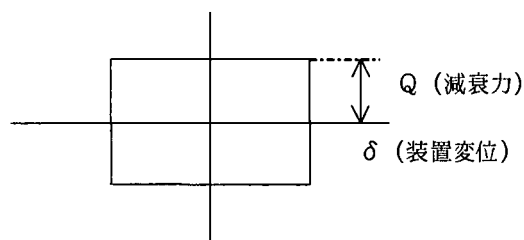


図-11 LED モデル

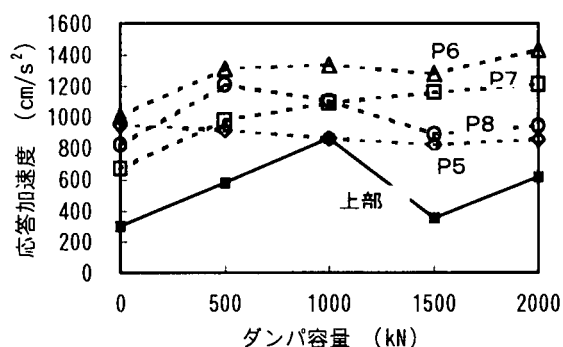


図-13 上部工および各橋脚天端の応答加速度

部地震・神戸海洋気象台地盤上—NS波を用いた。  
なお、解析にはTDAPIIIを用いた。

#### (4) 試解析

まず、LEDを設置したときの対象橋梁の挙動を知るために、LEDの降伏力 $Q$ をパラメータとして500kNから2000kNまで変化させて時刻歴応答解析を行い、変位、加速度、分担水平力を算出して、応答の傾向を検討した。

解析結果を図-12～14に示す。これらの結果より、LEDの容量 $Q$ が増えるに従い、上部構造変位は減少するが1500kNあたりから、変位がある一定の値に収束することが確認された。また、下部構造変位についてみると、中間橋脚は上部構造の変位と比較してほぼ同じあることから、支承よりも橋脚の方が大きな動きをする高橋脚の橋梁の特徴が現れている。加速度は橋脚すべてに関して増加する傾向にあることがわかった。変位の減少と併せて考えると全体が一体化したような剛な構造に近くなると考えられる。分担水平力に関して、LEDを設置した橋脚は近接した値となり、端部橋脚に力が集まるということがわかった。これは、変位の大きいスレンダーな橋脚に力を寄せることなく変位を押さえること

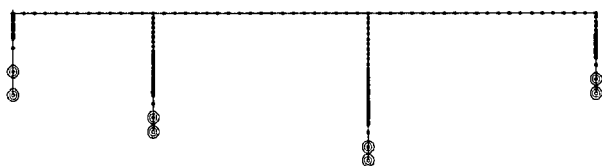


図-10 解析モデル

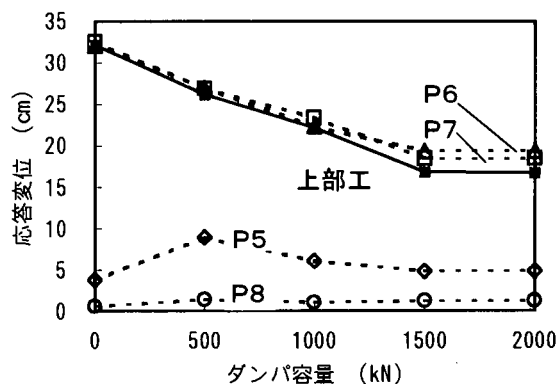


図-12 上部工および各橋脚天端の応答変位

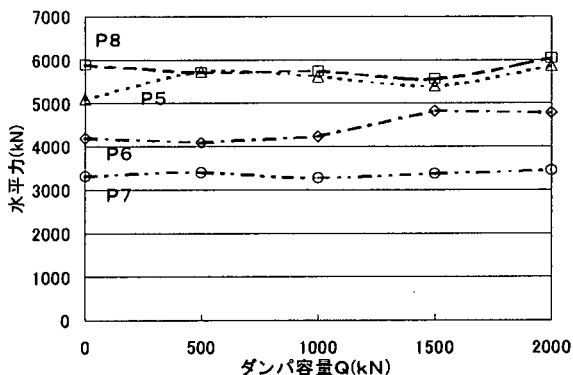


図-14 分担水平力

ができることを意味している。

#### (5) 実設計

解析の結果より、LEDのダンパー容量は1500kN以上であれば、変位17cm程度に収めることができることが確認されたが、実設計ではP5橋脚と、P8橋脚の保有水平耐力の相異からP5に1500kN、P8に2000kNのLEDを用いることとし、道路協会の標準3波を用いて改めて解析を行った。その結果を表-1に示す。効果を検討するために、LRBのみの場合についても、同様な解析を行った。その結果を表-2に示す。上部構造の変位の比較を図-15に示す。

表—1 L E D の場合の照査結果

|           |      | P5     | P6     | P7     | P8     |
|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| 橋脚基部モーメント | kN・m | 352870 | 198067 | 88147  | 180600 |
| 許容値       | kN・m | 366730 | 331860 | 133030 | 181990 |
| せん断力      | kN   | 36510  | 15950  | 9529   | 22273  |
| 許容値       | kN   | 455900 | 22150  | 14450  | 25410  |
| 橋脚天端加速度   | gal  | 874.4  | 1328.0 | 1103.3 | 1006.4 |
| 橋脚天端変位    | cm   | 6.38   | 18.34  | 19.09  | 1.44   |
| 橋脚残留変位    | cm   | 0.91   | 2.60   | 2.48   | 0.12   |
| 支承部せん断力   | t    | 5.938  | 4.946  | 3.464  | 5.647  |
| 支承変位      | cm   | 15.68  | 9.11   | 5.29   | 17.37  |
| 上部工加速度    | gal  | 592.5  |        |        |        |
| 上部工変位     | cm   | 17.51  |        |        |        |

## (6) 照査

橋脚基部の曲げモーメントの比較を行うと、L E D 設置後は中間橋脚で 15 % 程度の減少がみられる。端部橋脚では L E D 設置後に若干の曲げモーメントの増加がみられる。L E D 設置により、水平力が増加したことが原因と考えられる。橋脚のせん断力の比較を行うと、ほぼ L R B のみの時と同じであることがわかる。これは L E D を設置したことにより、橋全体の見かけの剛性が大きくなり、加速度が増加し慣性力が増加したためであると考えられる。橋脚の天端変位を比較すると、端部橋脚では L E D 設置前後でほとんど同じ値であるのに対して、中間橋脚では上部工変位に追従する形で減少する形で 30 % ほど変位が減少する傾向となった。これは、やはり高橋脚が一つの原因ではないかと考えられる。

これらの結果より、上部工変位で 20 % 低減し、橋脚部の照査を行った結果ではせん断力も、曲げモーメントも許容値内であり、この橋梁に問題がないことが確認された。また、L E D の取合いの概略を図—16 に示す。

## 3. 2 粘性せん断型ダンパーを用いた場合

### (1) 緒言

この装置は 20 年以上前に開発され数多くの実績<sup>3) 4) 5) 6)</sup>がある。機能分離構造の原型として考えることができる。ここでは、過去の文献を引用して説明を行う。

### (2) 粘性せん断型ダンパーを用いた設計

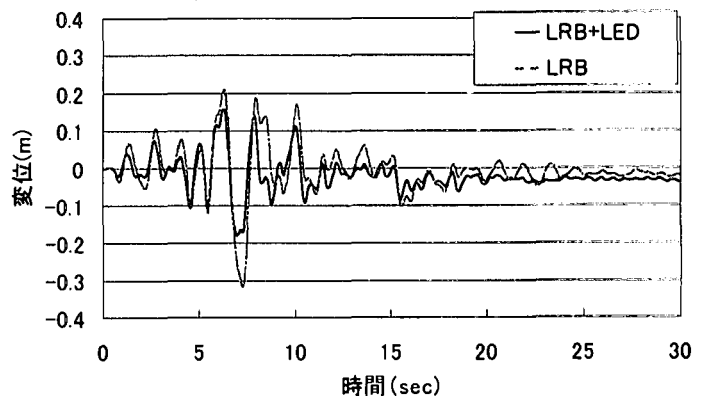
粘性せん断型ダンパーは温度依存性が高い粘性体を用いており、ダンパーをある最適の減衰係数に設定したとしても粘性体の温度変化によりダンパーの減衰係数が変化し最適値を常に保持することができない。そこで、減衰係数を高くして橋梁全体系で過減衰として地震時水平力を橋脚に分散させる構造に適用される。

### (3) 解析モデル

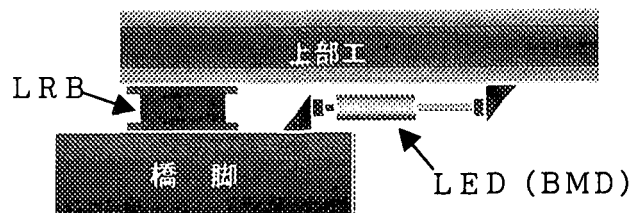
解析は、図—17 に示すようなモデルを用いる。このモデルは、簡易的なモデルではあるが、挙動の大枠を知るには有効な方法である<sup>3) 4) 5) 6)</sup>。

表—2 L R B のみの場合の照査結果

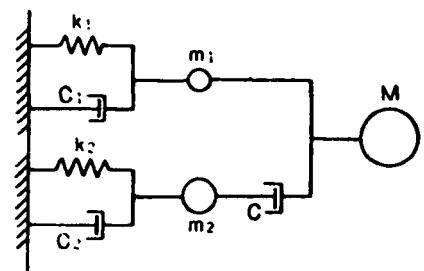
|           |      | P5     | P6     | P7     | P8     |
|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| 橋脚基部モーメント | kN・m | 353400 | 233800 | 101410 | 165430 |
| 許容値       | kN・m | 366730 | 331860 | 133030 | 181990 |
| せん断力      | kN   | 39130  | 15230  | 9407   | 20350  |
| 許容値       | kN   | 45590  | 22150  | 14450  | 25410  |
| 橋脚天端加速度   | gal  | 1028.0 | 1162.0 | 920.5  | 1017.6 |
| 橋脚天端変位    | cm   | 6.44   | 25.18  | 25.60  | 1.04   |
| 橋脚残留変位    | cm   | 0.82   | 0.84   | 0.74   | 0.09   |
| 支承部せん断力   | kN   | 5,147  | 4,582  | 3,663  | 4,343  |
| 支承変位      | cm   | 25.63  | 8.13   | 5.79   | 26.43  |
| 上部工加速度    | gal  | 359.3  |        |        |        |
| 上部工変位     | cm   | 22.71  |        |        |        |



図—15 上部構造変位の比較

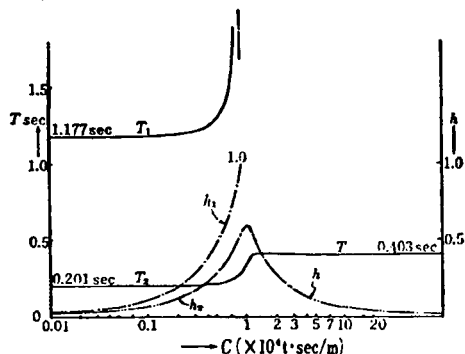


図—16 取合い概略図



M : 上部工の質量  
 $m_1$  : 固定橋脚の質量  
 $m_2$  : 可動橋脚の質量  
 $k_1$  : 固定橋脚の剛性  
 $k_2$  : 可動橋脚の剛性  
 $C_1$  : 固定橋脚の減衰  
 $C_2$  : 可動橋脚の減衰  
 $C$  : 粘性せん断型ダンパーの減衰

図—17 簡易解析モデル図



図—1 8 複素固有値解析

#### (4) 複素固有値解析

図—1 7 に示した  $C$  の値をパラメータとして、橋梁全体の減衰定数、固有周期の推移を図—1 8 に示す。この中で、 $C$  がある値になると 1 つのモードが消滅する。この点が橋梁全体系で可動が固定となる減衰係数で、臨界減衰係数 ( $C_{cr}$ ) と呼ばれる。これ以上の減衰係数をとることにより水平力分散を行うことができる。

#### (5) 分散水平力

図—1 9 に  $C$  の値の推移から、分散水平力を算出した結果を示す。 $C$  の値を大きくすることにより可動橋脚にも水平力が分散されることが確認される。

#### (6) 設計の手順

粘性せん断型ダンパーを用いると本来、可動固定支持構造でも、地震時は全点固定構造系と扱うことができる。全点固定構造系での概算分散水平力は式 1 で求められる。

$$F = \frac{K}{\sum K} \times H \quad (\text{可動橋脚})$$

$$F = \frac{K}{\sum K} \times H \times \alpha \quad (\text{固定橋脚}) \quad (\text{式 1})$$

ここで

$\sum K$  : 橋梁あたりの橋脚剛性の和

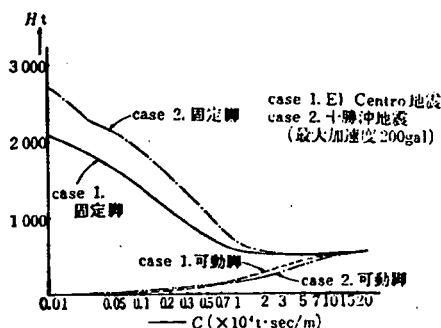
$K$  : 対象橋脚の剛性

$H$  : 橋梁あたりの設計水平力

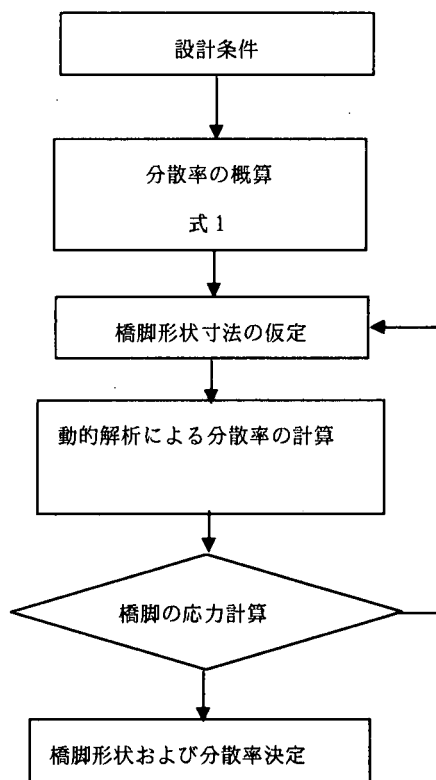
$\alpha$  : 固定橋脚の力の集中係数(1.1~1.2)

この水平力を用いて、橋脚の形状を仮定し、そこから求まる橋脚の剛性を用いて、動的解析を行い橋脚の分担水平力を求める。そのような計算の繰り返しで、設計を行う。これらの過程をまとめたフローチャートを図—2 0 に示す。また、取合いの概略を図—2 1 に示す。

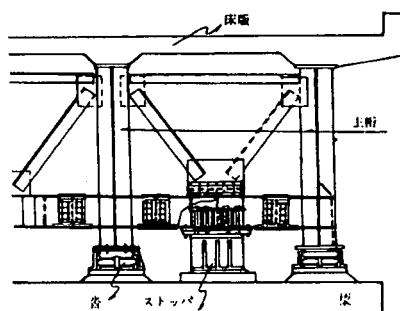
### 5. 免震支承、水平力分散支承と機能分離構造との比較



図—1 9 分散水平力



図—2 0 設計フロー



図—2 1 粘性せん断型ダンパー取合い

LED、BMD、粘性せん断型ダンパーの設計例を示した。ここでは、免震支承、分散支承のみを用いた場合と、機能分離構造を用いた場合の簡単な比較を表—3 に示す。

免震、分散支承のみとした設計と、機能分離構造にダンパーを用いた設計ではかなりの違いがあるこ

とがわかる。免震、分散支承では長周期化により地震の影響を避ける方法であるが、LED（BMD）や粘性せん断型ストッパーでは積極的に装置の減衰効果を得る方法を用いている。また、変位に関して、前述した理由により、ダンパの減衰性能を用いるために、変位を小さく押さえる事ができる。

装置の大きさでは、LED（BMD）では、ダンパーに応じた装置の設計を行われるが、粘性せん断型ダンパーでは、橋脚に加わる分散水平力がダンパーにそのまま加わるために装置が大きくなる。

免震、分散支承では、鉛直反力や、地震時のせん断ひずみなどにより、装置が大きくなることもある。

表一3 装置による比較

|          | LED(BMD) | 粘性せん断型ダンパー | 免震、分散支承 |
|----------|----------|------------|---------|
| 変位       | 小        | 極めて小       | 大       |
| 設計方法     | 動的解析     | 動的解析       | 静的・動的解析 |
| 装置の大きさ   | 小*       | 大*         | 比較的大    |
| 装置設計の容易さ | 容易       | 比較的 難      | 容易      |
| 全体系固有周期  | 短周期      | 短周期        | 長周期     |

\*ほかに鉛直支承が必要

6. 機能分離構造のこれからの展望

ダンパー機能を外に取り付けることにより、支承変位を小さくできる事より、支承も小さく設計する事ができる。また、設計例に示したように、耐震補強など場所に制限があるような場合でも装置がコンパクトであるので、比較的自由度が高く有効な方法であると考えられる。しかし、免震支承などにも一つの装置ですべてをまかなえる等の利点があり、このような視野から考えると機能分離構造は今までよりも選択の幅を広げるという意味があると考えられる。今後は、すべてが機能分離構造という選択ではなく適宜装置を使い分けるような視野が必要である。

謝辞：3節の解析データを提供いただいた千代田コンサルタント東京支店 石川氏、中島氏に謝意を示します。

参考文献

1) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編：  
社団法人 日本道路協会 1996,12

2) 道路橋の免震設計法マニュアル（案）：建設省  
財団法人 土木研究センター 1994,12

3) 伊関治郎：ダンパーを用いた多径間連続橋の耐震設計 橋梁と基礎 1982,5

4) 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 1980,2

5) 福岡悟：大神高速・大阪～西宮線粘性せん断型ストッパーを用いた多径間連続桁の設計 橋梁 1980,2

6) 下田郁夫：橋梁構造物の支承形式による耐震信頼性の検討 第3回振動制御コロキウム  
PART A pp.213～pp.228 1995,8