

## 摩擦履歴型ダンパーを用いた桁端ダンパーシステム

広瀬 剛<sup>1</sup>・宇野裕恵<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

### 1. はじめに

免震構造や分散構造では、ゴム支承の形状はレベル2地震動に対してせん断ひずみを250%以下に設定され、活荷重たわみに伴う回転変形に対してゴムに引張が生じないようにゴム層が決定される。したがって、地震力が大きくなるとゴム支承の平面寸法が大きくなり、それに伴い総ゴム層高さも高くなる。この結果、応答変位が大きくなり、桁遊間量が大きくなることで、伸縮装置の増大を招くだけではなく、落橋を助長しかねない。これに対して、制震構造では地震力の一部を支承を介することなく下部構造に直接に伝達させると共に減衰機能を発揮し、地震時の応答を任意に制御できる。本論文では、橋台で挟まれた連続桁に対して、橋台と桁とを”シリンダー状の制震ダンパー”（以下、ダンパー）で連結することにより、耐震性の向上、落橋防止効果の向上、維持管理の向上、ならびにコストの縮減を図った<sup>1)</sup>。これを”桁端ダンパーシステム”と呼ぶことにする。

### 2. 桁端ダンパーシステム

#### (1) 基本構造

桁端ダンパーシステムのイメージを図-1に示す。本システムでは橋台と桁端とをダンパーで連結することを基本としているが、必要に応じて橋脚にもダンパーで連結する。

#### (2) 期待する機能

桁端ダンパーシステムには、図-2のような機能を期待している。すなわち、橋台は地震時に大きい

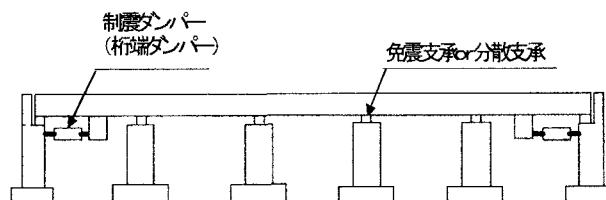


図-1 桁端ダンパーシステムのイメージ

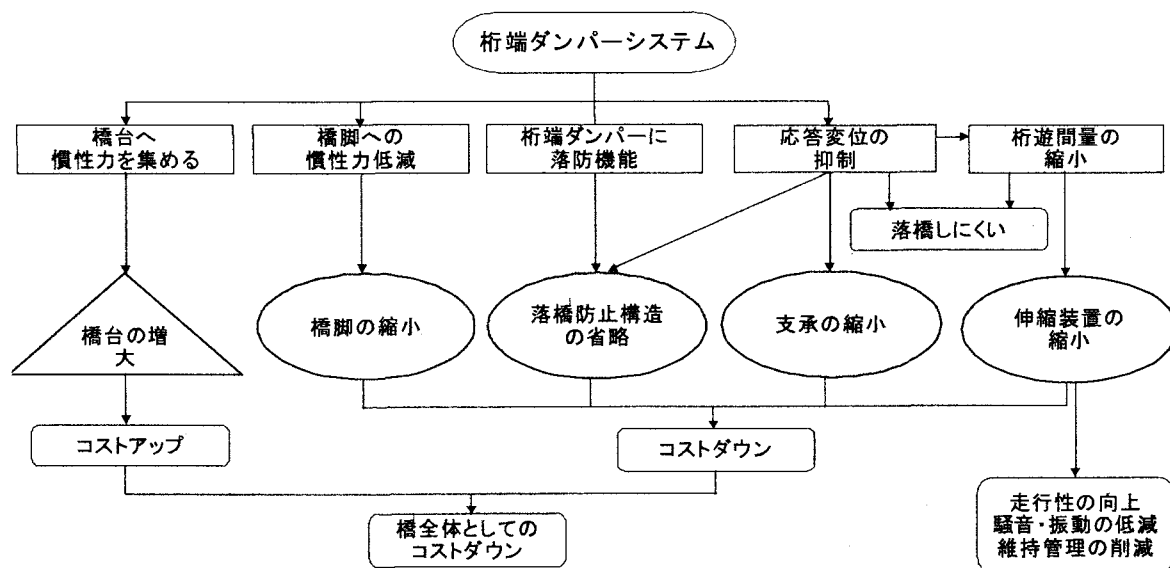


図-2 桁端ダンパーシステムに期待する機能

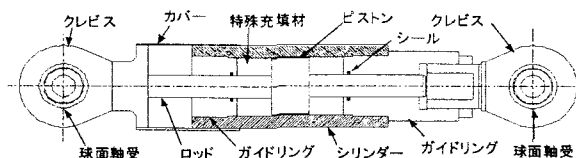


図-3 ダンパーの構造例イメージ



図-4 ダンパーの制震挙動

図-5 ダンパーの端板による変位拘束状態

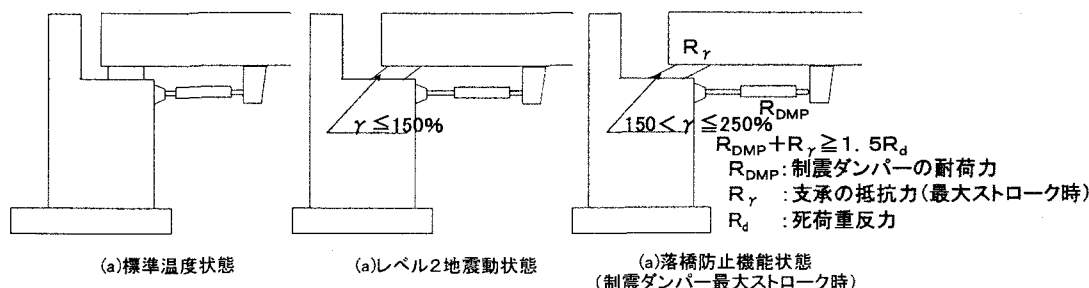


図-6 変位制御方式の模式

負荷を受けてコスト増大の一因となるが、支承、橋脚、伸縮装置、落橋防止構造のコストを縮減できるので、橋全体としてのライフサイクルコストを縮減することが可能である。さらに、レベル2地震動の桁の変位が小さいことと桁遊間量を小さくすることで、落橋しにくい構造となる。特に、レベル1地震動の桁の変位は大きく抑制されるため、伸縮装置の設計変位は常時の温度変化により決定されることになる。この結果、伸縮装置が小さくなり、走行性の向上、騒音・振動の低減、維持管理の削減を期待できる。

### (3) 落橋防止構造としての補完機能

一般に、ダンパーは図-3に示すように鋼製のシリンダーとロッドにより構成されているため、ダンパーの構造体は大きな耐力を有している。また、制震機能により上部構造の変位が大きく抑制される。

一方、落橋防止構造は設計で想定していない地震動に対して、上部構造が落橋に至らないように抵抗するものである。そこで、桁端に設置するダンパーが落橋を防止する機能を有していれば、「落橋防止構造の設置を必要としない」と考える。

落橋防止構造を設置しなくてよい場合として、以下の2通りを提案する。

#### ①” 落防兼用方式”

”落防兼用方式”とは、ダンパーの構造体が落橋防止構造として要求される設計力以上の耐力を有している場合をいう。

#### ②” 変位抑制方式”

”変位抑制方式”とは、ダンパーにより上部構造の応答変位が大きく抑制され、「構造特性により橋軸方向の変位が生じにくい橋」と位置づけら

れる場合をいう。

#### 1) ” 落防兼用方式”

ダンパーは、設計で想定する地震動に対して、図-4のようなシリンダー内の流体抵抗と減衰を発揮する。さらに、設計の想定を超える地震動に対してロッドが大きく移動し、図-5のようにピストンがシリンダーの端板に拘束される。この状態ではダンパーは構造体としての大きい耐力を発揮する。そこで、耐力が落橋防止構造の設計力より大きい場合には、落橋防止構造を設置する必要はないとした。これは、制震時におけるダンパーの抵抗力は構造体の耐力に比べて十分に小さいことより、制震時の挙動により構造体の耐力が損なわれる危険性は極めて小さいものと考えたものである。

#### 2) ” 変位抑制方式”

桁端ダンパーシステムにより上部構造の応答変位が大きく抑制されれば、その橋は「橋軸方向に変位しにくい橋」と位置づけることができる。一方、道路橋示方書<sup>2)</sup>では、「構造特性により橋軸方向の変位が生じにくい橋については落橋防止構造を省略してもよい」と記されている。そこで、本システムでは、レベル2地震動に対して全てのゴム支承の応答せん断ひずみがレベル1地震動の許容せん断ひずみ以下に抑制されている場合を「変位しにくい橋」と定義し、ダンパーの耐力が落橋防止構造の設計力を満足していなくても落橋防止構造を省略してもよいとした。これは、ダンパーは相応の耐力を有していることに加え、レベル2地震動に対して支承のせん断ひずみが150%以下であれば支承は健全であることを考慮したものである。すなわち、図-6に示す

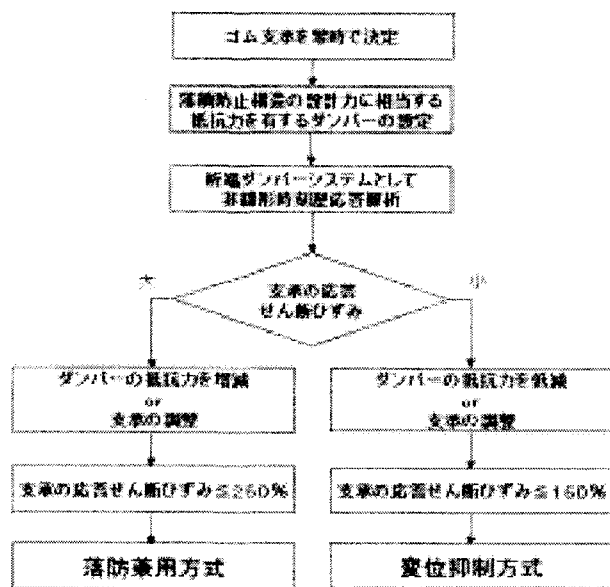


図-7 桁端ダンパーシステムの概略流れ

表-1 制震ダンパーの履歴

|      | 摩擦履歴型                                               | 粘性型                            | バイリニア型                              |
|------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 履歴形状 |                                                     |                                |                                     |
| 特徴   | ・変位依存性は極めて小さい<br>・安定した矩形の履歴                         | ・速度依存性が高い<br>・速度が速くなると抵抗が大きくなる | ・変位依存性が高い<br>・変位が大きくなると大きい抵抗を呈する    |
| 例    | ビンガムマテリアルダンパー<br>摩擦ダンパー<br>リリース付オイルダンパー<br>摩擦拘束ダンパー | オイルダンパー<br>粘性ダンパー              | 免震支承ダンパー<br>(鉛プラグ入り積層ゴム)<br>(高減衰ゴム) |

ようにダンパーの耐力とダンパーの最大変位に相当する変位状態での橋台のゴム支承の抵抗力との合計が、落橋防止構造の設計力以上であれば落橋防止構造を省略してよいとした。ただし、ダンパーの最大変位に相当する変位時での橋台のゴム支承のせん断変形が250%を超えないことを条件とする。

#### (4) 検討手法

桁端ダンパーシステムは”落防兼用方式”とすることを基本とする。ただし、”落防兼用方式”で必要とするダンパーの抵抗力より十分に小さい抵抗力で応答変位を大きく抑制できる場合には”変位抑制方式”を採用する方が合理的となる。桁端ダンパーシステムの検討の概略流れを図-7に示す。

#### (5) 検討に用いたダンパー

ダンパーは以下の3タイプに大別される。

- ①摩擦履歴型
- ②粘性型
- ③バイリニア型

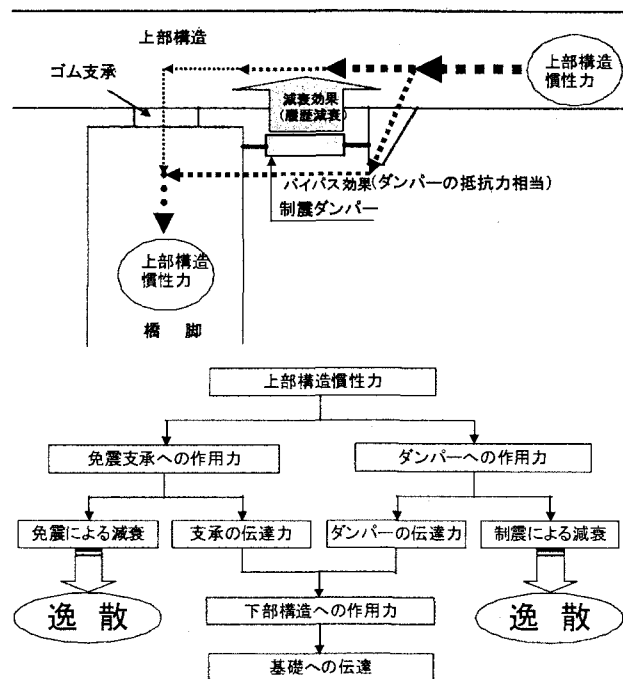


図-8 基本機能

この履歴の特徴を表-1に示す。

桁端ダンパーシステムに用いるダンパーには以下の理由により摩擦履歴型のビンガムマテリアルダンパーを想定する。

- ① 摩擦履歴型では一次剛性が極めて大きい。すなわち、ダンパーは支承より先行して力を受けるため、ほとんど変位していない状態で慣性力が下部構造に伝達される(バイパス効果)。したがって、支承の変位を抑制する効果が大きく、各下部構造への力の分担調整も容易となる。
- ② 最大抵抗力を発揮している状態で変位追従する安定した履歴を呈する。
- ③ 速度依存性、温度依存性、変位依存性が極めて小さく、設計上無視しうる。
- ④ 充填材料の特性に経年変化が小さく、橋の供用期間中に交換する必要がない。
- ⑤ 減衰性能が大きい(減衰効果)。

ここで、ビンガムマテリアルダンパーの基本機能を図-8に示す。

#### (6) ダンパーの変位量の設定

ダンパーは橋台部で橋軸方向に設置されるため、温度変化による桁の伸縮に追従しなければならない。したがって、温度による上部構造の伸縮の影響を無視して変位可能量を設定すると、地震時に設計で想定する挙動を満足できなくなることがある。このため、ダンパーの変位可能量の算定には、温度と地震時の変位を重ね合わせることにした。

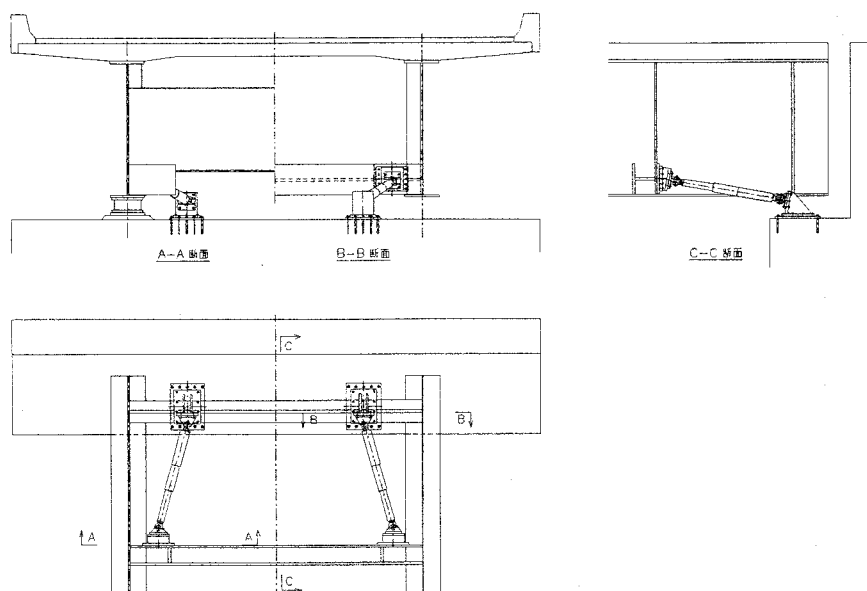


図-9 桁端ダンパーの取付けイメージ

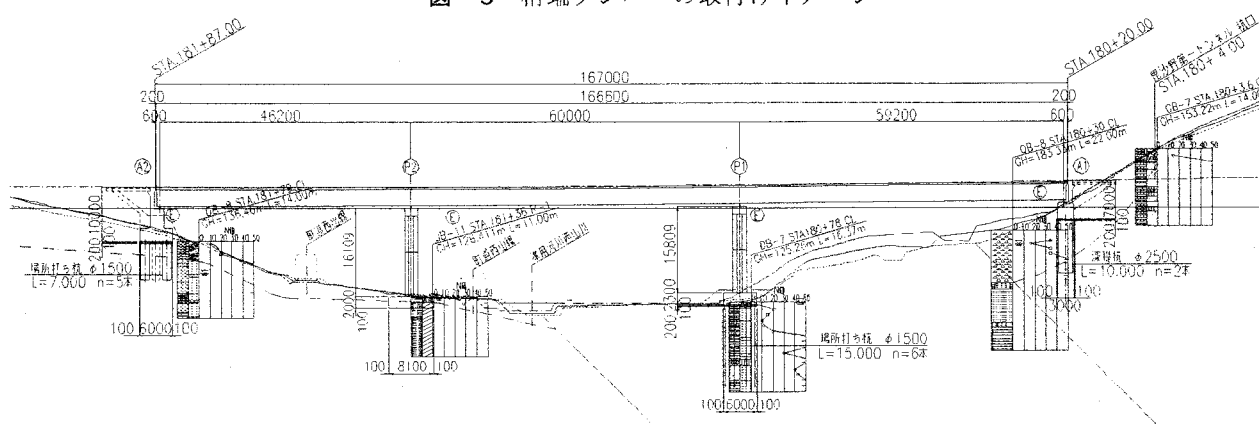


図-10 対象橋梁の一般形状

### (7) 地震に対する橋台の照査

桁端ダンパーシステムではレベル2地震動に対する上部構造慣性力を橋台に大きく負担させる。しかし、ビンガムマテリアルダンパーの抵抗力は速度依存性が極めて小さいため、レベル1地震動においてもレベル2地震動と同等の力が橋台に作用する。そこで、橋台はレベル1地震動のみならずレベル2地震動に対しても設計することとした。なお、レベル2地震動でも弾性挙動を基本とするが、基礎には副次的な塑性化であれば許容することとした。

### (8) 桁端部の遊間量

道路橋示方書<sup>2)</sup>によれば、両端部を橋台で挟まれた免震橋の桁端部の遊間量は、レベル2地震動による上下部構造間の最大相対変位に余裕量 15mm 程度を考慮した値でよい。これに対して、桁端ダンパーシステムの設定では、温度伸縮に余裕量を見込んだ値を満足させるほか、「温度+地震時」の変位量を満足させることとした。これは、桁端ダンパーの

変位可能量は「温度+地震時」の変位量で設定しているのに対し、桁端部の遊間量がそれより小さければ、設計で想定する地震時挙動を阻害することがあることを考慮したものである。なお、桁端ダンパーシステムのような制震構造では応答変位が大きく低減されるため、温度と地震時の変位を重ね合わせても免震構造のように大きな遊間量とならない。

### (9) 桁端ダンパーの取付け

2主桁橋に対する桁端ダンパーの取付けイメージの一例を図-9に示す。桁端ダンパーシステムは新設橋への適用を想定しているため、同図では景観性を考えて、ダンパーを下フランジより下に位置しないように配慮した。

## 3. ケーススタディ

桁端ダンパーシステムの効果を確認するため、既設計の橋を対象にビンガムマテリアルダンパーを用いてケーススタディを実施した。

表-2 既設計 RB の形状

|         | A2   | P2    | P1    | A1   |
|---------|------|-------|-------|------|
| せん断弾性係数 | G8   | G12   | G12   | G8   |
| 平面寸法    | □850 | □1050 | □1050 | □850 |
| ゴム厚     | 8×34 | 4×41  | 4×41  | 8×34 |
| 一次形状係数  | 6.3  | 6.4   | 6.4   | 6.3  |
| 二次形状係数  | 3.1  | 6.4   | 6.4   | 3.1  |

表-3 RB の形状

|         | A2   | P2   | P1   | A1   |
|---------|------|------|------|------|
| せん断弾性係数 | G8   | G12  | G12  | G8   |
| 平面寸法    | □650 | □950 | □950 | □650 |
| ゴム厚     | 3×27 | 3×32 | 3×32 | 3×27 |
| 一次形状係数  | 6.0  | 7.4  | 7.4  | 6.0  |
| 二次形状係数  | 8.0  | 9.9  | 9.9  | 8.0  |

表-4 LRB の形状

|         | A2     | P2     | P1     | A1     |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| せん断弾性係数 | G8     | G10    | G10    | G8     |
| 平面寸法    | □700   | □1050  | □1050  | □700   |
| ゴム厚     | 5×25   | 3×37   | 3×37   | 5×25   |
| 鉛プラグ    | 5×Φ115 | 5×Φ170 | 5×Φ171 | 5×Φ115 |
| 一次形状係数  | 6.3    | 6.4    | 6.4    | 6.3    |
| 二次形状係数  | 5.6    | 9.5    | 9.5    | 5.6    |

表-5 落橋防止構造相当の公称抵抗力

|        |                  | (単位:kN) |       |
|--------|------------------|---------|-------|
|        |                  | A2      | A1    |
| 落橋防止構造 | 死 荷 重            | 2,983   | 3,824 |
|        | 落橋防止構造の設計力(×1.5) | 4,475   | 5,736 |
| ダンパー   | 構造体の必要降伏耐力*1     | 5,071   | 6,501 |
|        | 必要公称抵抗力*2        | 1,268   | 1,625 |
|        | 合計必要公称抵抗力        | 2,900   |       |

\*1:落橋防止構造としての許容応力度の割増しより算定

\*2:構造体の降伏耐力は公称抵抗力の4倍と仮定

## (1) 対象橋梁

本橋の既設計条件は以下のようであり、一般形状を図-10に示す。

橋 種: 鋼3径間連続非合成2主鈑桁橋

橋 長: 167m (46.2 + 60.0 + 59.2m)

支承条件: 橋軸方向 地震時水平力分散構造

橋軸直角方向 固定支持

地盤種別: II種地盤

## (2) 検討概要

本橋は橋軸直角方向の支承条件を固定としているため、支承形状(ゴム体)は常時と橋軸方向の地震時に設定される。しかし、桁端ダンパースystemでは橋軸方向慣性力の多くが支承を介することなく下部構造に伝達されることから、支承形状を常時で設定し、ダンパーの抵抗力を調整することで地震時に満足させることができる。検討した支承形式はRBおよびLRBの2種類である。既設計のRBおよび常時で設定したRB、LRBの形状をそれぞれ表-2および表-3、表-4に示す。

レベル1地震動に対する解析は、プッシュオーバーによる非線形静的解析とした。レベル2地震動に対しては非線形時刻歴応答解析とし、道示標準3波

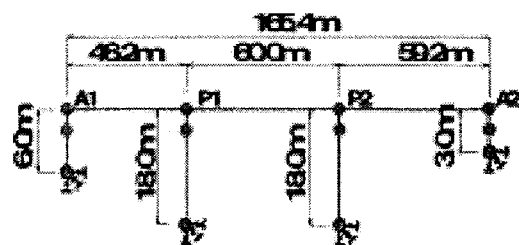


図-11 動的解析モデル

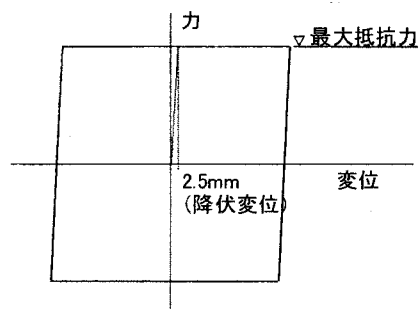


図-12 ダンパーの履歴モデル例

平均で評価した。動的解析モデルは、図-11のような離散系モデルである。ここで、RBおよびLRBをそれぞれ線形モデルおよびバイリニアモデルとし、ダンパーは図-12のような完全剛塑性モデルとした。

## (3) 落橋防止構造の機能を有するダンパー

”落防兼用方式”に適用できるダンパーの公称抵抗力は、落橋防止構造としての設計力である「1.5×死荷重反力」を満足できるように設定すると、表-5のようになる。ここで、ダンパーの降伏耐力は公称抵抗力の4倍と仮定した。公称抵抗力とは制震時における設計上の最大抵抗力をいう。なお、鋼材の許容応力度の割増しは、地震時に1.7、落橋防止構造機能時に1.5である。

## (4) 検討結果

各下部構造でのレベル1およびレベル2地震動に対する支承の応答変位を図-13～図-16に示す。ダンパーの設置によりレベル1地震動での支承の応答変位は非常に小さく、ほとんど変位していない状態になる。これはダンパーの抵抗力をレベル2地震動で設定しているが、ダンパーは速度依存性が極めて小さいことにより、レベル1地震動でもダンパーの抵抗力は同等であるためである。一方、レベル2地震動ではダンパーにより橋台の支承の応答変位が大きく低減される。

ダンパーの抵抗力に応じたレベル2地震動に対する支承の応答せん断ひずみを図-17および図-18に示す。支承のせん断ひずみはダンパーのバイパス効果と減衰効果により大きく低減している。特にRBの場合では大きく低減されている。こ

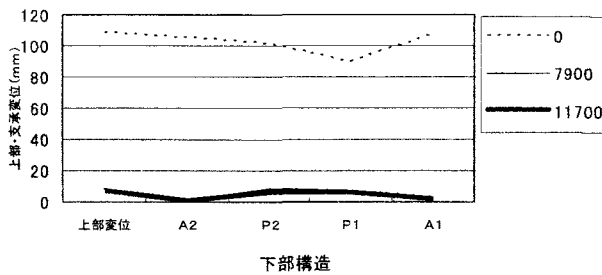


図-13 支承の応答変位 (RB: レベル1)

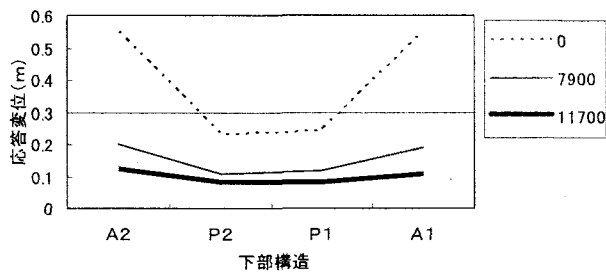


図-14 支承の応答変位 (RB: レベル2タイプII)

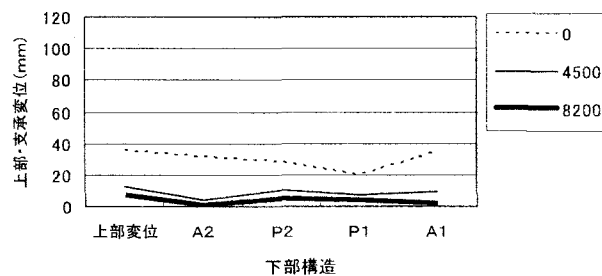


図-15 支承の応答変位 (LRB: レベル1)

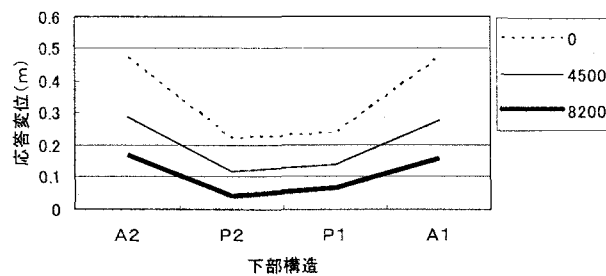


図-16 支承の応答変位 (LRB: レベル2タイプII)

れは、ダンパーの減衰機能に負うところが大きく、減衰機能の乏しい RB に対しては減衰機能が大きく付与され、慣性力の低減効果が大きいことによる。これに対し、LRB は元々減衰機能が大きいので、減衰機能の増大による慣性力の低減効果は大きくない。また、同図に 250%せん断変形時および 150%せん断変形時のダンパーの抵抗力を付記した。250%せん断変形時の桁端ダンパーの抵抗力は落橋防止構造としての設計力を満足しているので、本橋では”落防兼用方式”の採用が適切となる。ここで、RB

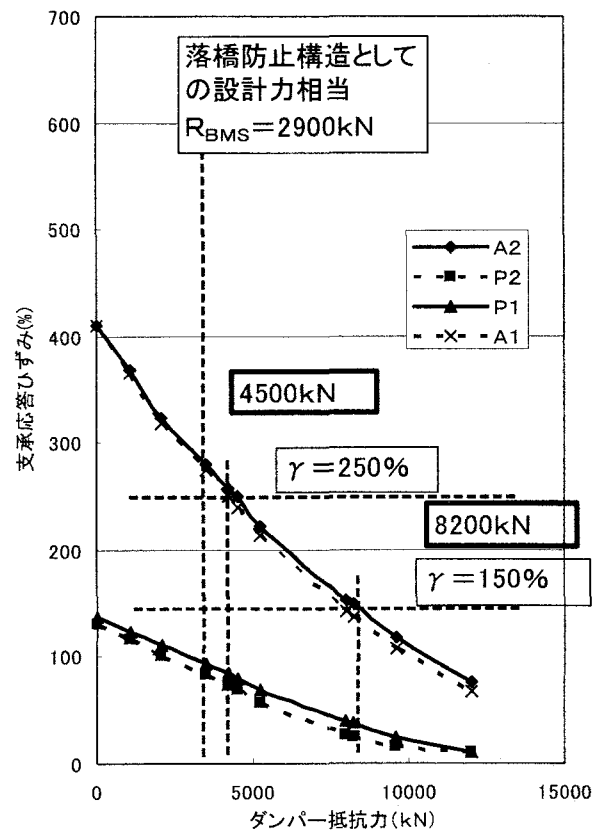


図-17 支承の応答ひずみ (RB: レベル2)

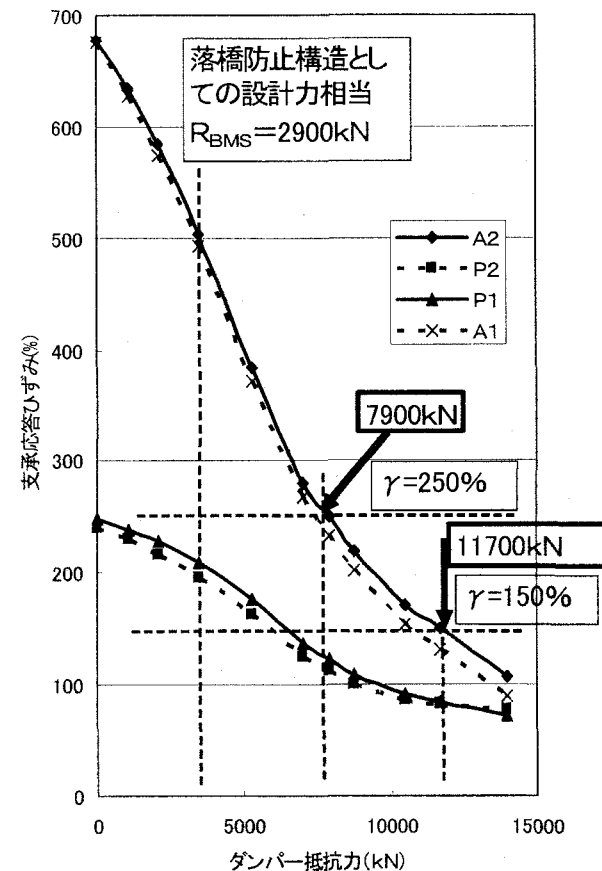


図-18 支承の応答ひずみ (LRB: レベル2)

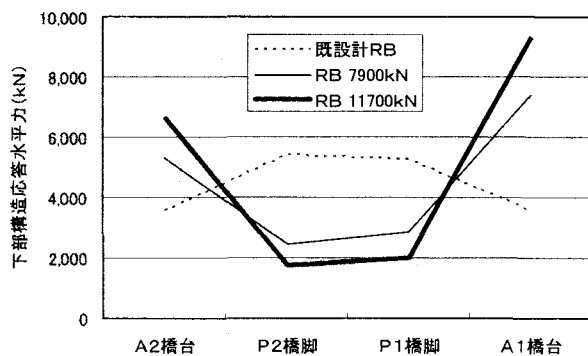


図-19 下部構造の最大応答水平力 (RB : L 2)

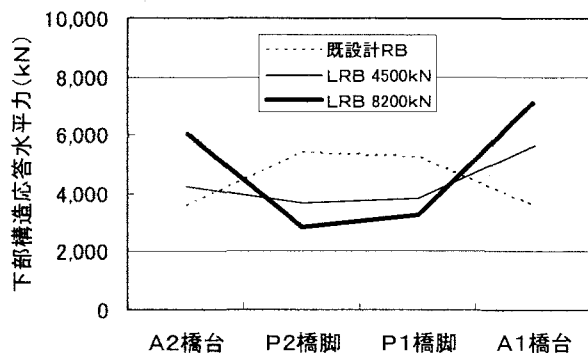


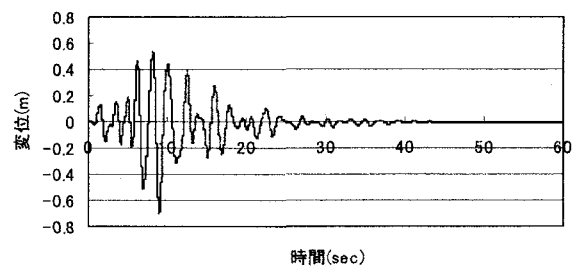
図-20 下部構造の最大応答水平力 (LRB : L 2)

に比べて LRB の方が必要とするダンパー抵抗力が小さいのは、LRB は元々ゴム支承内部にある鉛プラグがダンパー機能を有しているためである。一方、150%せん断変形時でダンパーは落橋防止構造としての設計力を超えているので”変位抑制方式”として採用することはできるが、ダンパーの抵抗力が大きくなり過ぎると経済性を損なうことから、本橋には適切でないと判断した。

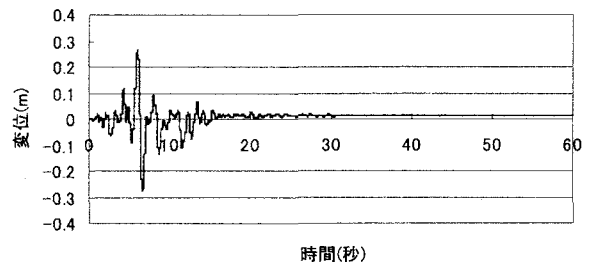
下部構造の応答水平力を図-19および図-20に示す。橋台にダンパーを設置したことにより、橋台に大きな慣性力が作用している。したがって、ダンパー抵抗力の設定に当たっては、橋台に過大な慣性力が作用すれば橋台が大きくなることを考慮し、橋全体としてコスト増にならないようにする必要がある。

#### (6) 上部構造の応答変位波形

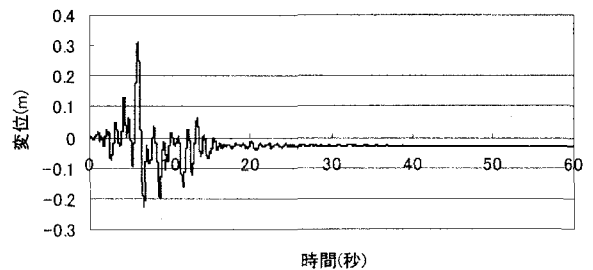
RB の既設計および LRB・RB を用いた”落防兼用方式”の上部構造応答変位波形を図-21に示す。これより、桁端ダンパーシステムを採用することによって応答変位が低減されると共に、それぞれの振動性状が近似している。これは、減衰機能が付与されたことにより、RB の位相差の影響が抑制されていることが現れているものと思われる。



(a) 当初設計 (RB)



(b) ”落防兼用方式” (RB) <7,900kN



(c) ”落防兼用方式” (LRB) <4,500kN

図-21 上部構造の応答変位波形

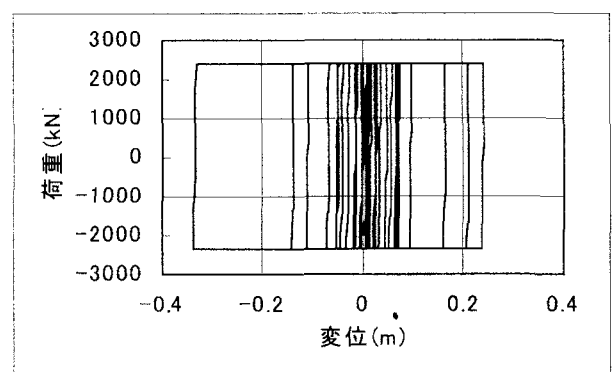


図-22 ダンパーの応答履歴例

#### (7) ビンガムマテリアルダンパーの応答履歴

ビンガムマテリアルダンパーの応答履歴例を図-22に例示する。ダンパーの履歴は同図のように、ダンパーの抵抗力は設定値を超えることなく、応答変位のみが変化する完全剛塑性の履歴を呈している。

表-6 下部構造の形状

| 設計方式      |        | ダンパー抵抗力 |             | 単位             | A2   | P2   | P1   | A1   | 合計    |
|-----------|--------|---------|-------------|----------------|------|------|------|------|-------|
| 既設計<br>RB | 分散設計   | なし      | 躯体鉄筋 主鉄筋    | t              | 0.9  | 24.5 | 24.5 | —    | 49.9  |
|           |        |         | フーチングコンクリート | m <sub>3</sub> | 135  | 143  | 134  | 68   | 479   |
|           |        |         | 杭φ1500 延長   | m              | 35.0 | —    | 90.0 | —    | 125.0 |
|           |        |         | 杭φ2500 延長   | m              | —    | —    | —    | 21.0 | 21.0  |
| RB        | 落防兼用方式 | 7,900kN | 躯体鉄筋 主鉄筋    | t              | 2.6  | 16.9 | 24.5 | —    | 44.0  |
|           |        |         | フーチングコンクリート | m <sub>3</sub> | 135  | 116  | 124  | 83   | 458   |
|           |        |         | 杭φ1500 延長   | m              | 35.0 | —    | 75.0 | —    | 110.0 |
|           |        |         | 杭φ2500 延長   | m              | —    | —    | —    | 0.0  | 0.0   |
|           |        |         | 杭φ3000 延長   | m              | —    | —    | —    | 26.0 | 26.0  |
|           |        |         | 躯体鉄筋 主鉄筋    | t              | 1.2  | 16.9 | 24.5 | —    | 42.6  |
|           |        |         | フーチングコンクリート | m <sub>3</sub> | 135  | 116  | 124  | 83   | 458   |
|           |        |         | 杭φ1500 延長   | m              | 35.0 | —    | 75.0 | —    | 110.0 |
| LRB       | 落防兼用方式 | 4,500kN | 杭φ2500 延長   | m              | —    | —    | —    | 0.0  | 0.0   |
|           |        |         | 杭φ3000 延長   | m              | —    | —    | —    | 25.0 | 25.0  |
|           |        |         | 躯体鉄筋 主鉄筋    | t              | 2.6  | 16.9 | 24.5 | —    | 44.0  |
|           |        |         | フーチングコンクリート | m <sub>3</sub> | 135  | 120  | 124  | 83   | 462   |
|           | 変位抑制方式 | 8,200kN | 杭φ1500 延長   | m              | 35.0 | —    | 75.0 | —    | 110.0 |
|           |        |         | 杭φ2500 延長   | m              | —    | —    | —    | 0.0  | 0.0   |
|           |        |         | 杭φ3000 延長   | m              | —    | —    | —    | 26.0 | 26.0  |
|           |        |         | 躯体鉄筋 主鉄筋    | t              | 1.2  | 16.9 | 24.5 | —    | 42.6  |

#### (8) 下部構造の検討

各方式に対する下部構造の概略検討結果を表-6に示す。同表より、桁端ダンパーシステムでは橋脚が大きく、橋脚が小さくなるが、下部構造全体で見ると大きな差はない。

#### (9) コスト比較

桁端ダンパーシステムの初期コストを、下部構造、支承、ダンパー、伸縮装置、および落橋防止構造のそれぞれについて、RB 既設計の合計工費を基準として図-23に示す。この結果、本橋では”落防兼用方式”でコストの縮減効果を得た。一方、”変位抑制方式”ではコスト増となっている。これはダンパーの抵抗が必要以上に大きくなっているためである。すなわち、本橋には、”落防兼用方式”が適切であり、”変位抑制方式”は適切でない。

なお、本検討は概略検討であるため、ダンパーの抵抗のみの調整とし、支承形状による調整を行っていない。ここで、詳細に検討を行えば、さらなるコストの低減が期待できると思われる。

#### 4. 今後の展望

橋の規模が大きくなると”落防兼用方式”として必要とするダンパーの抵抗が大きくなり、適用が難しくなる。また、常時で設定した支承を用いると必要とするダンパーの抵抗が大きくなることがある。このような場合には支承平面寸法を大きくし、ダンパーの抵抗を大きくならないようにすることで対応するのがよい。しかし、応答変位が大きくなるとダンパーのストロークが長くなり、かえってコストアップになることがある。したがって、ダンパーの抵抗は落橋防止構造の機能を満足できる程度とし、支承の応答せん断ひずみが250%となるように支承寸法を調整するのがよいと考えられる。ただ

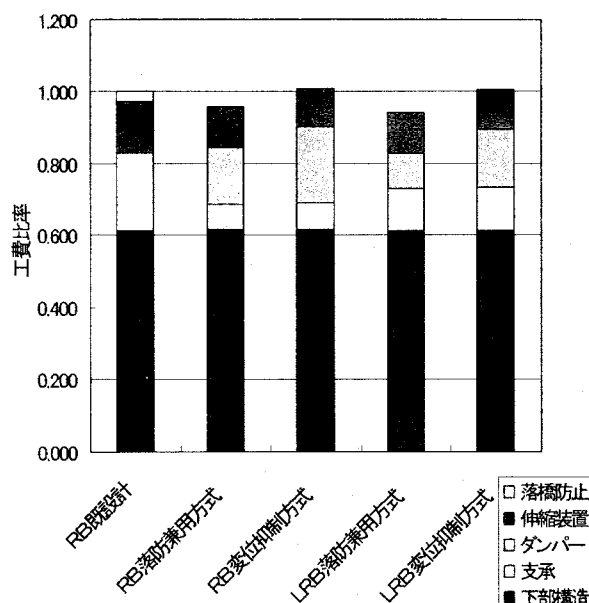


図-23 コスト比較グラフ

し、変位が大きくなりすぎる場合には、ダンパーの抵抗を大きくするか、橋脚にもダンパーを設置するなどにより変位を制御するのがよいと考えられる。

一方、地震力の小さい場合では、ダンパーの抵抗が落橋防止構造の設計力を満足していなくても、支承のせん断ひずみを150%以下にしやすい。このような場合には、”変位抑制方式”を適用するのが合理的であると考えられる。

#### 5. まとめ

桁端ダンパーシステムは耐震性の向上やコストの縮減を期待できるだけでなく、伸縮装置の規模を小さくできるため、維持管理の省力化、走行性の向上、振動・騒音の低減を期待できるなど、ライフサイクルアセスメントの観点からも非常に有用な耐震システムであると考えている。

6. 謝辞：今回の考察は、平成15、16年度『コスト縮減を考慮した橋梁の耐震設計に関する検討』委員会（日本道路公団が財団法人高速道路技術センターに委託）での検討結果の一部を紹介したものである。当委員会の委員の方々をはじめ、関係各位に深く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 広瀬、福永、宇野、横川：制震ダンパーを用いた橋の耐震性向上とコスト縮減、土木学会第60回年次学術講演会、2005.9
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V、2002.3