

# ダンパーブレースを用いた鋼製アーチ橋の 地震応答低減に関する研究

福田智之<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・渡辺学歩<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:tfukuda@cv.titech.ac.jp

<sup>2</sup> 東京工業大学教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:kawasima@cv.titech.ac.jp

<sup>3</sup> 東京工業大学土木工学科助手 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:gappo@cv.titech.ac.jp

アーチ橋は耐震性が高いと考えられてきたが、兵庫県南部地震以降の研究により、震度法に基づいて設計されたアーチ橋の中には兵庫県南部地震クラスの断層近傍地震動を受けると大きな被害を受ける可能性がある橋梁も存在することが指摘されている。本研究ではダンパーブレースを用いて鋼製アーチ橋の地震応答を低減させる方策を検討する。また、アーチ橋の自由振動を数値解析により再現し、ダンパーブレースによる地震応答低減の効果を評価する。

*Key Words* : damper brace, arch bridge, dynamic analysis

## 1. はじめに

従来、数ある橋梁形式の中でもアーチ橋は耐震性が高いと考えられてきた、しかし、兵庫県南部地震以降の地震時保有耐力法に基づく耐震検討に基づき、従来震度法で耐震設計されてきたアーチ橋の中には、兵庫県南部地震クラスの強震動を受けると、大きな被害を蒙る可能性があり得ることが明らかとなってきた<sup>1)</sup>。このため、耐震性が不十分なアーチ橋に対する耐震補強法の開発が重要となっている。

ここでは、ダンパーブレースを用いて上路式鋼製アーチ橋の地震応答を低減させ、耐震補強とする方式の適用性を検討した結果を示す。

## 2. ダンパーブレース

ダンパーブレースとは、ブレース材の両端に塑性部材を設け、ブレースに軸方向の伸縮が作用した場合に、エネルギー吸収できるようにしたものである。塑性部材の座屈を防止するために、図-1に示すように、ブレース材の両端に塑性部材を設けた構造が知られている。トラス系の既設構造物の耐震補強では、既存の斜材と入れ替えるか、新たに添設することによって、トラスが変形した場合に、エネルギー吸収をはかることが考えられる。既存の斜材と入れ替え

るのか、新たに添設するかによって、ブレースに必要とされる剛性や強度は異なるが、いずれにしても、圧縮力を受けた場合に全体座屈しないようにしておかなければならない。

## 3. 解析対象とする鋼製アーチ橋とその耐震性

解析対象とするのは、図-2に示すように、アーチスパン 99m、ライズ 17.5m の上路式鋼製アーチ橋である。アーチリブは両端で固定されている。アーチリブはボックス形式で、いずれの区間でも、ボックスの高さ、幅はそれぞれ 1000m、1100m であるが、板厚が変化している。

このアーチ橋は昭和 55 年道路橋示方書によって設計、施工されており、現在の道路橋示方書に基づく、アーチリブや斜材、鉛直材の耐震性が不十分と判断される。

動的解析では、アーチリブ、斜材、鉛直材を 3 次元梁要素でモデル化した。床板は、全断面有効剛性を有すると仮定し、床板剛性は無視している。ダンパーブレースは、バイリニア型履歴減衰を有するバネ要素としてモデル化する。

入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震によるJMA神戸海洋気象台とJR鷹取駅での記録、1994年Northridge地震によるSylmar Parking Lotにおける記

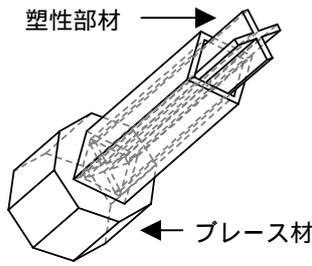


図-1 ダンパーブレース

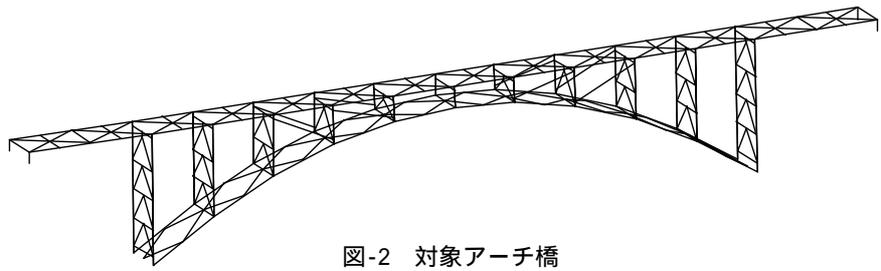
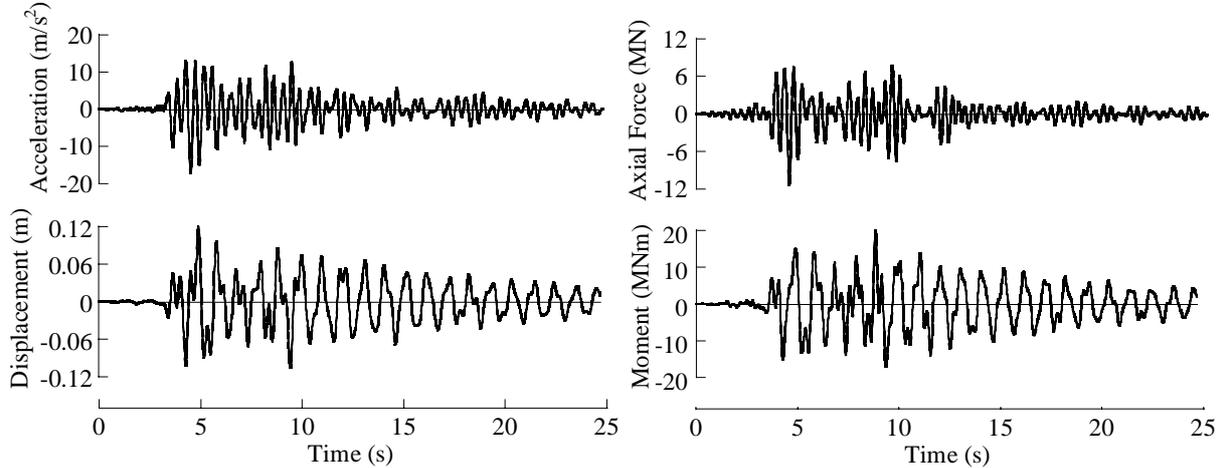


図-2 対象アーチ橋



(a) 桁中央点の加速度と変位

(b) アーチリブ左端点の軸力と曲げモーメント

図-3 ダンパーブレースを設置しない状態の地震応答

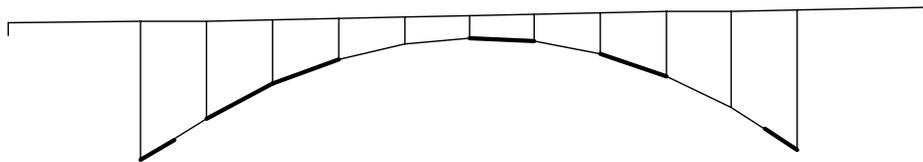


図-4 塑性ヒンジを形成する部材

録, 1999年Duzce地震によるDuzceでの記録, 1999年集集地震による日月潭の記録を用いた, これらは近年の地震で得られた代表的な断層近傍地震動である。解析には, 水平1成分と上下成分をペアとして用いた。

#### 4. ダンパーブレースの効果

兵庫県南部地震による JMA 神戸記録を橋軸方向+鉛直方向に作用させた場合の地震応答を図-3 に示す。桁中央の最大加速度, 最大変位はそれぞれ  $16.8\text{m/s}^2$ ,  $0.12\text{m}$  であり, また, 曲げモーメントが大きいアーチリブ端点の最大軸力, 曲げモーメントはそれぞれ  $11.5\text{MN}$ ,  $21.4\text{MNm}$  となる。上述した通り, このアーチ橋は震度法に基づいて設計, 施工されているため, JMA 神戸地震動のような強い断層近傍強震動を受けるとアーチリブも降伏する。図-4 は JMA 神戸記録を作用させた場合に塑性化するアーチリブの範囲を示した結果である。これによると, アーチリブ端点だけでなく, アーチリブ中央点,  $1/4$  点においても塑性ヒンジが形成されることがわかる。

耐震補強として図-5 に示す位置にダンパーブ

レースを設置する。ダンパーブレース - 1 は新規設置であり, ダンパーブレース - 2, 3 は既存の部材を置換するものである。また, ダンパーブレースの降伏耐力は, ダンパーブレース - 1, 2, 3 に対してそれぞれ,  $470\text{kN}$ ,  $657\text{kN}$ ,  $1196\text{kN}$  と変化させてある。図-6 はダンパーブレースを設置した場合の応答を示した結果である。桁中央では最大加速度および最大変位はそれぞれ  $11.8\text{m/s}^2$ ,  $0.065\text{m}$  となり, 現状と比較して, それぞれ,  $29.5\%$ ,  $46.6\%$  応答は小さくなる。また, ダンパーブレースを設置することにより最大軸力, 最大曲げモーメントはそれぞれ  $5.6\text{MN}$ ,  $14.4\text{MNm}$  となり, ダンパーブレースを設置しない場合と比較して, それぞれ,  $54.9\%$ ,  $55.2\%$  減少する。この結果, ダンパーブレースを設置しない場合にはアーチリブで形成された塑性ヒンジが, ダンパーブレースを設置すると塑性ヒンジを形成されなくなり, 耐震補強としてダンパーブレースが有効であることが分かる。

5種類の地震動を作用させた場合のダンパーブレースの耐震補強としての効果を, 軸力~曲げモーメントのインターアクションとして評価する。ダンパーブレースを設置することによってどの程度断面力の緩和効果があるかをアーチリブ左端部に対して示した結果が, 図-7である。ここには, アーチリブが

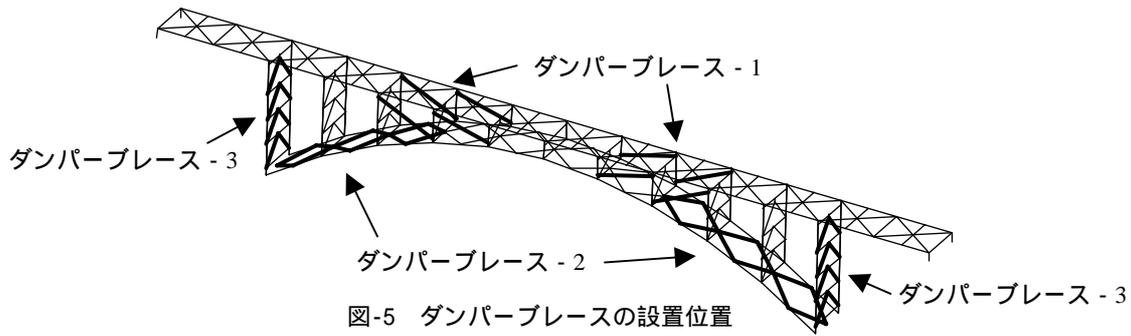
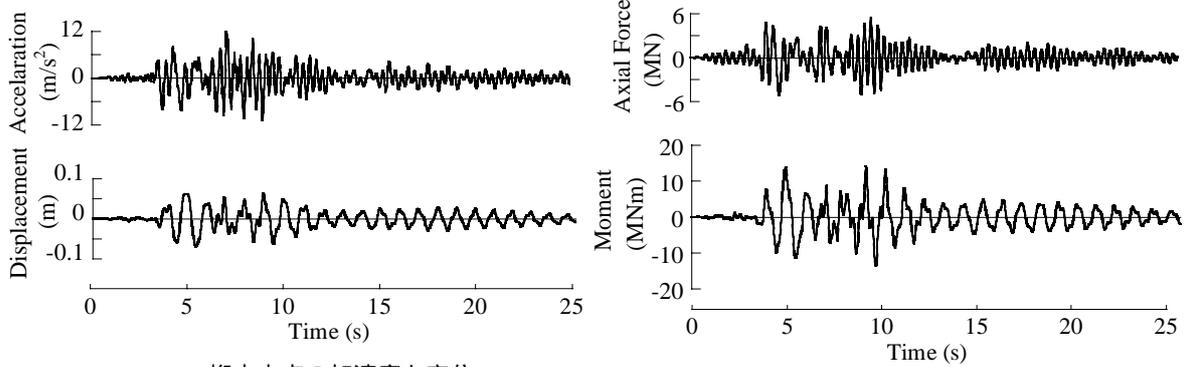


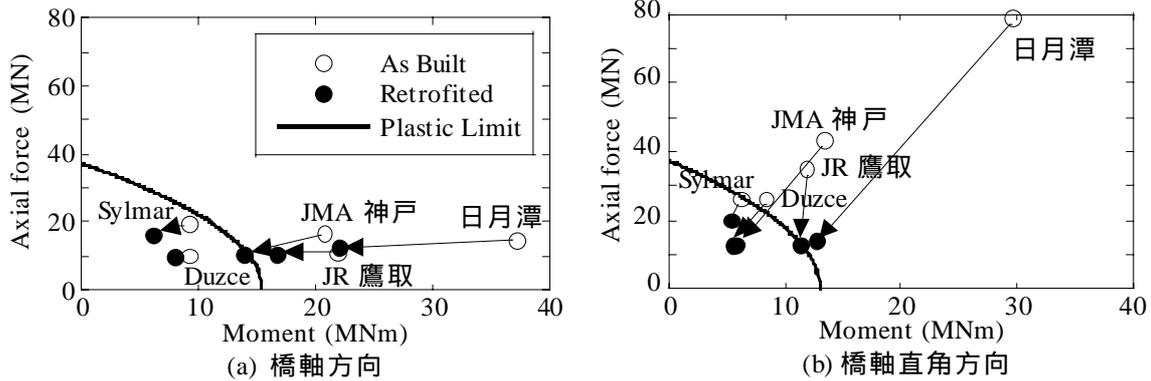
図-5 ダンパーブレースの設置位置



(a) 桁中央点の加速度と変位

(b) アーチリブ左端点の軸力と曲げモーメント

図-6 ダンパーブレースを設置した場合のアーチ橋の時刻歴応答



(a) 橋軸方向

(b) 橋軸直角方向

図-7 アーチリブ左端点の軸力 - 曲げモーメント関係

全塑性状態となるインターアクションカーブも示している。これによれば、入力時振動によって応答の低減度合いは異なるが、ダンパーブレースを用いることにより、アーチリブ端部の軸力および曲げモーメントはともに減少する。インターアクションカーブの内側に収まることを耐震補強の目的とすると、ダンパーブレースを設置することにより、5地震動のうち、橋軸方向には3地震動、橋軸直角方向には4地震動に対して、耐震補強の目的を達成することができる。

### 5. ダンパーブレースによる減衰定数の増加量の推定

ダンパーブレースがアーチ橋の地震応答の低減に効果があるのは、ダンパーブレースによるエネルギー吸収作用によるものである。このため、ダンパーブレースのエネルギー吸収に基づくアーチ橋として

の減衰定数を評価することが重要である。ここでは、1次振動モードに対するアーチ橋の自由振動を数値解析により再現し、次式により対数減衰率から減衰定数  $h$  を求める。

$$\delta = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} = \ln \frac{u_{m+1}}{u_m} \quad (3)$$

ここで、 $u_m$  は自由振動の  $m$  番目のピーク応答変位である。

以上の方法によって求めたアーチ橋の1次振動モードに対する自由減衰振動を橋軸方向を例に示すと、図-8 のようになる。ここでは桁中央点における応答変位  $u_c$  を基準にして表している。これから、式(3)によってアーチ橋の減衰定数  $h$  を求めると、図-9 のようになる。ダンパーブレースを設置した場合には、桁中央点の変位  $u_c$  が大きくなるにつれて減衰定数  $h$  は小さくなる。

いま、アーチ橋の地震応答を基本固有周期  $T$  を有する1自由度系に近似できるとすれば、アーチ橋の

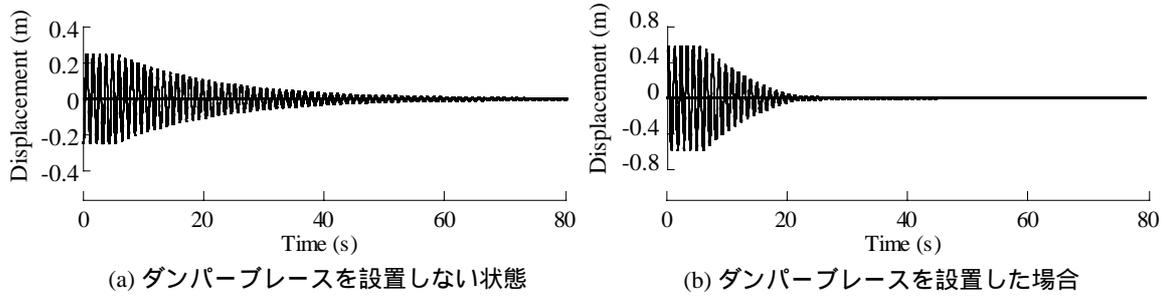


図-8 自由振動解析における桁中央点の変位

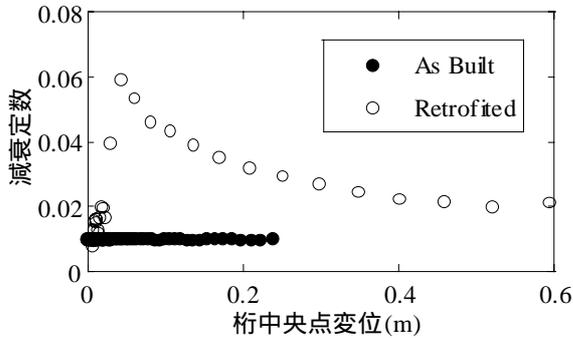


図-9 アーチ橋の減衰定数

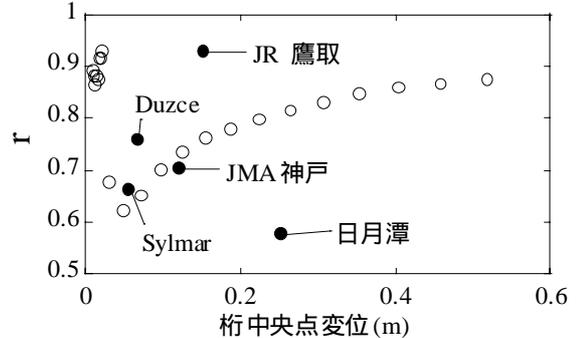


図-10 加速度応答の低減率

地震応答は加速度応答スペクトル  $S_A(T, h)$  から推測可能である。現状の減衰定数を  $h_0(u_C)$ 、ダンパーブレースを設置した場合の減衰定数を  $h(u_C)$  とすれば、ダンパーブレースを設置することによる加速度応答の低減率  $\tilde{r}$  は、

$$\tilde{r} = \frac{S_A(T, h(u_C))}{S_A(T, h_0(u_C))} \quad (4)$$

減衰常数補正係数  $c_D(h)$  は減衰定数 0.05 の場合の加速度応答スペクトルに対する減衰定数  $h$  の場合の加速度応答スペクトルとして定義されており、近似的に次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$c_D(h) = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入すると、

$$\tilde{r} = \frac{c_D(h(u_C))}{c_D(h_0(u_C))} \quad (6)$$

図-8 に示したアーチ橋の減衰定数  $h(u_C)$  を用いて式(6)によりダンパーブレースを設置することによる加速度応答の低減率  $\tilde{r}$  を求めると、図-10 のようになる。ここでは、後述する動的解析から求めた低減率  $\tilde{r}$  も比較のために示している。桁中央点の変位  $u_C$  が 50mm 程度以下と小さい場合を除けば、 $u_C$  が大きくなるにつれて 1 に近づく。

一方、上述した非線形動的解析から求めた現状とダンパーブレースを設置した場合の桁中央点の加速度応答を、それぞれ  $a_0^C$ 、 $a_{DB}^C$  とすれば、ダンパーブレースを設置することによる加速度応答の低減率  $r$  を次式のように定義することができる。

$$r = \frac{a_{DB}^C}{a_0^C} \quad (7)$$

式(7)から求めたダンパーブレースを設置すること

による加速度応答の低減率  $r$  を図-10 に示している。これによれば、式(6)によって与えられるダンパーブレースを設置することによる加速度応答の低減率  $\tilde{r}$  は式(7)によって与えられる動的解析から求めた低減率  $r$  をある程度の精度で表すことができる。

## 6. 結論

- 1) ダンパーブレースの設置は鋼製アーチ橋の地震応答の低減に効果がある。これは、ダンパーブレースによるエネルギー吸収効果によるものである。アーチリブ端点の断面力に着目すると、いくつかの地震動に対して全塑性状態に至らないようにすることができる。
- 2) アーチ橋の1次振動モードに対する減衰定数を推定できれば、ダンパーブレースを設置することによる加速度応答の低減率  $r$  をある程度の精度で推定することができる。

謝辞：本解析に用いたアーチ橋のデータは、三菱重工業（株）広島製作所に提供していただきました。井上幸一氏、田島啓司氏等、御関係の皆様は厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 例えば、榊原泰造，川島一彦，庄司学：動的解析に基づく上路式2ヒンジ鋼製アーチ橋の耐震性に関する検討，構造工学論文集，Vol. 45A，935-946，1999
- 2) 川島一彦，相沢興，減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法，土木学会論文集，344/I-1，351-355，1884

(2003. 10. 10 受付)