

超弾性合金の免震ダンパーへの適用可能性に関する数値解析的検討

伊津野和行*

超弾性合金は、低ひずみ領域では通常の金属材料と同様に降伏後剛性が低下するが、その後除荷すると、数十%のひずみからも残留変形なく回復する特性を持っている。本研究では、その免震ダンパーへの適用可能性について、数値解析的手法によって基礎的な検討を行ったものである。

Key Words: *super elasticity, seismic damper, earthquake response analysis, functional alloy*

1. はじめに

近年各種の免震装置を用いた橋梁の建設や計画が注目を集めている。代表的なものは鉛プラグ入り積層ゴムや高減衰積層ゴムを用いた免震支承、及び鋼棒を用いた弾塑性ダンパーなどである。これらは、固有周期を長周期化して共振を避け、あるいは地震エネルギーを吸収し、橋梁本体の損傷を抑えるものである。これらの免震効果は、使用される材料特性に大きく左右され、いかに高性能な材料を開発するかが焦点となっている。

本研究では、機能性金属材料の1つである超弾性合金に着目した。この合金は特殊な非線形履歴復元力特性をもっており、エネルギー吸収能力に優れた材料であるとともに数十%のひずみからも復元するという特徴を持っている¹⁾。本研究では、その免震ダンパーへの適用可能性を検討するため、計算機による地震応答シミュレーションを行い、応答値やエネルギー吸収能など基礎的な動特性を明らかにすることを目的とした。

2. 超弾性効果

超弾性特性 (super elasticity) とは、低ひずみ領域では通常の金属材料と同様に降伏後剛性が低下するが、その後除荷すると履歴エネルギーを吸収した後弾性挙動に戻るものである。優れたエネルギー吸収能を持つ上、残留ひずみがない等、従来の鋼とは大きく異なった履歴復元力特性を持っている。

種々の材料の履歴復元力特性の例^{1), 2)}を Fig.1 に示す。Fig.1 (a) は通常の弾塑性挙動であり、1度載荷して (O → A → B) 塑性域に入った場合、除荷しても (B → C) 通常残留変形が生じる。Fig.1 (b) は超弾性合金とよ

く似た組成を持つ形状記憶合金の復元力特性である。形状記憶合金は残留変形が生じた後 (O → A → B → C)、ある一定温度以上に加熱することによって (C → O) 残留変形をなくすることができる。それに対して、Fig.1 (c) が超弾性合金の復元力特性である。非線形領域に入った後 (O → A → B) 除荷すれば (B → C → D)、形状記憶合金のように加熱しなくても、変形がすぐ0になるという特性を持っている。超弾性合金と形状記憶合金とはよく似た組成をしており、形状記憶合金として有名なニッケル・チタン合金の場合、ニッケルの量が50%前後で形状記憶効果を示し、50.5%を越えると超弾性効果を示すという¹⁾。

超弾性合金を用いた商品としては、眼鏡フレーム、歯科矯正ワイヤ、女性用下着などが実用化されている。

3. 免震ダンパーを付加した橋脚の地震応答解析

超弾性挙動を示す免震ダンパーを付加した場合と通常の弾塑性ダンパーを用いた場合、そしてダンパーを付加しなかった場合の3種類を考え、それぞれ非線形地震応答の数値シミュレーションを行った。

(1) 解析モデル

免震ダンパーを設置する対象構造物としては橋脚を考え、これを1自由度系線形はり部材としてモデル化した。この橋脚にゴム支承とダンパーを設置して桁を支えることとした。ゴム支承とダンパーの特性を非線形バネでモデル化し、そのうえに桁の質量を載せた Fig.2 のような全体で2自由度系として表現した。モデルの諸元を Table 1 に示す。

(2) 入力地震波

道路橋示方書耐震設計編に記載されているI種地盤用設計地震波を、最大値300 galに修正して入力した。残留変形についても検討するため、25秒間の地震波形の

*正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科
(〒525 草津市野路町1916)

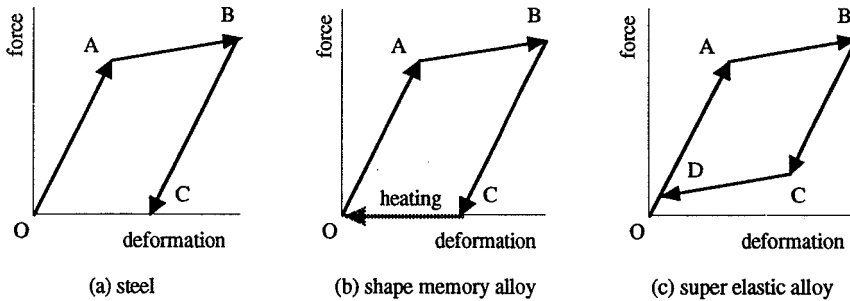


Fig.1 Comparison of force-deformation relationship between steel, shape memory alloy and super elastic alloy.

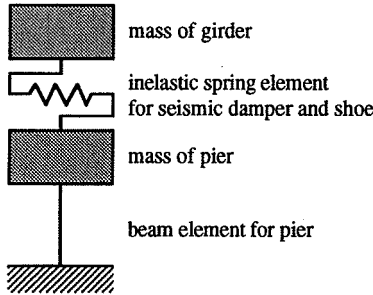


Fig.2 Analytical model used for simulations.

Table 1 Assumed parameters used for the simulations.

Mass of Pier	$M_1=3.1 \times 10^5$ kg
Mass of Girder	$M_2=3.7 \times 10^6$ kg
Yield Point (point-A in Fig. 1)	$\delta_y=1.0$ cm $F_y=1.0 \times 10^6$ N
Return Point for Super Elastic Model (point-D in Fig. 1-c)	$\delta_o=0.1$ cm $F_o=1.0 \times 10^5$ N
Initial Stiffness	$K_o=1.0 \times 10^8$ N/m
Stiffness Ratio after Yield Point	$K_1/K_o=0.2$
Initial Natural Period	$T_o=1.29$ sec
Modal Damping	$h=0.05$ for all modes

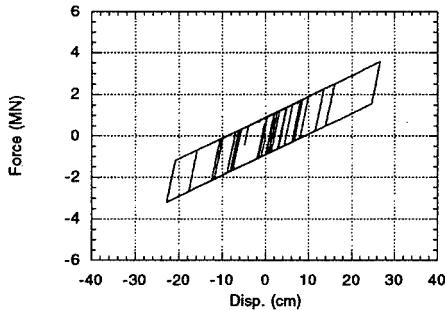


Fig.3 Hysteretic response of bilinear model.

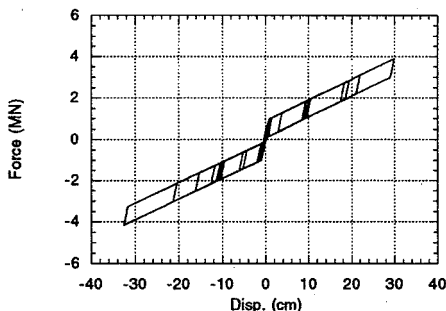


Fig.4 Hysteretic response of super elastic model.

後、5秒間の自由振動も観察した。合計30秒間の応答終了時には、自由振動もほぼ収まっていた。

(3) 履歴復元力特性

本研究では、ゴム支承の履歴復元力特性として線形を

仮定し、通常の弾塑性ダンパーと組み合わせることによってバイリニア型の履歴復元力特性を示すものと仮定した。それに対して超弾性ダンパーは、ごくわずかな弾塑性域にバイリニア型履歴復元力特性を示す領域を加えた形でモデル化した。これは、具体的な超弾性合金を実験に試験した結果ではなく、このような復元力特性を示す材料があればという仮定のものである。従来、超弾性合金の実用化に当たっては、動的な履歴復元力特性を利用したものは見あたらず、実際に今存在している超弾性合金が、必ずしもこのような動的履歴復元力特性を持つとは限らない。しかし本研究では、このような特性をもつ材料を開発することに利点があるのか考察することも含めて、超弾性効果の利用について検討するものとし、弾塑性域+バイリニア型というモデル化を行った。

4. 応答解析結果

(1) 履歴応答曲線

桁の橋脚に対する履歴応答曲線を Figs.3, 4 に示す。Fig.3 がバイリニア型復元力特性を示す弾塑性バネ（以下、弾塑性ダンパーと呼ぶ）を用いた場合、Fig.4 が超弾性効果を示すバネ（以下、超弾性ダンパーと呼ぶ）を用いた場合である。Fig.3 の弾塑性ダンパーに比べて、Fig.4 の超弾性ダンパーでは履歴曲線が細長くなる分、変形が大きくなっているのがわかる。また、履歴曲線が

Table 2 Comparison responses between bilinear model and super elastic model.

		Bilinear (=A)	Super Elastic (=B)	Ratio (=B/A)
Max. Acceleration (gal)	Pier	471	577	1.22
	Girder	103	118	1.15
Max. Velocity (kine)	Pier	10.2	12.9	1.26
	Girder	73.5	77.9	1.06
Max. Displacement (cm)	Pier	0.616	0.674	1.09
	Girder	26.7	32.6	1.22
Max. Restoring Force (MN)	Pier	2.55	3.03	1.19
	Girder	3.57	4.16	1.16
Residual Deformation (cm)	Pier	0.00	0.00	—
	Girder	4.43	0.00	0.00
Energy (MN·m)	Input Energy	5.03	5.05	1.00
	Hysteretic Energy	3.09	1.92	0.62

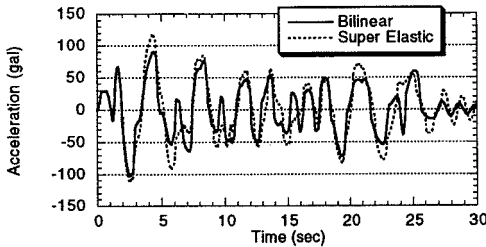


Fig.5 Acceleration responses of girders for both models.

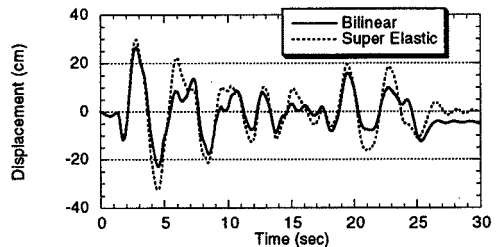


Fig.7 Displacement responses of girders for both models.

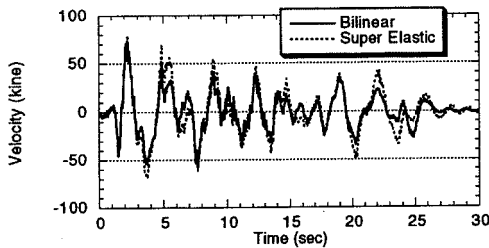


Fig.6 Velocity responses of girders for both models.

必ず原点を通るのが特徴である。

(2) 時刻歴応答波形

桁の時刻歴応答波形を Figs.5~7 に示す。Fig.5 が絶対加速度応答波形、Fig.6 が橋脚に対する相対速度応答波形、Fig.7 が同じく相対変位波形である。いずれも弾塑性ダンパーを用いた場合と超弾性ダンパーを用いた場合の両者の波形を重ねてプロットしている。いずれの波形も位相は両ダンパーで同じであるが、最大値は超弾性ダンパーの方が 20% 程度大きくなっている。

また、Fig.7 の弾塑性ダンパーの変位応答波形は、応答が終了する 25 秒以降、自由振動が収まっても残留変形が残っている様子がわかる (残留変形の具体的な変形

量に関する考察については後述する)。これに対して超弾性ダンパーを用いた場合の変位波形は、時間とともに 0 に収束しているが、収束に要する時間は弾塑性ダンパーの場合よりも長く、最後まで自由振動が残っている。

(3) 応答諸量

Figs.5~7 の応答波形の応答諸量を比較したのが Table 2 である。表の右端の欄には、超弾性ダンパーを用いた場合の応答値が弾塑性ダンパーを用いた場合に対する比を記入した。

a) 最大応答値

最大加速度応答、最大速度応答、最大変位応答、最大復元力のいずれも、超弾性ダンパーを用いると 10~20% 弾塑性ダンパーを用いる場合より増加した。

なお、比較のため、ダンパーをつけない場合のシミュレーションを、桁の質量を直接橋脚に付加した 1 自由度系モデルで行うと、桁および橋脚天端の加速度応答に関しては最大 600 gal 程度になった。この値と超弾性ダンパーを付加した場合の最大加速度応答とを比べると、まず橋脚の加速度応答は、ダンパーがない場合とほぼ同じレベルである。桁の加速度応答も、ダンパーをつけない場合と比較すれば、超弾性ダンパーを用いることによって、その 20% に小さく抑えている。これは弾塑性ダン

パーの場合の17%という値と比較しても遜色のない値である。

b) 残留変形

次に残留変形について検討をする。Table 2に示したとおり、超弾性ダンパーを用いた桁の残留変形はない。これに対して弾塑性ダンパーでは約4.5cmと、ダンパーに対して仮定した降伏変位の4倍以上の残留変形が生じた。残留変形を0にしたいという要求がある場合には、超弾性ダンパーも有効ではないかと考えられる。

c) エネルギー吸収能

最後に、構造物の損傷と関連の深いエネルギー吸収量について検討を行った。履歴応答曲線からも明らかなように、履歴エネルギー吸収量はTable 2の最下段に示すとおり、超弾性ダンパーでは弾塑性ダンパーの62%と、約2/3の値を示した。しかしながら、ある程度エネルギーを吸収できる点は免震ダンパーとして評価できると考えられる。なお、どちらのダンパーを用いた場合も、1次固有周期、総質量、降伏点などは等しいと仮定しているため、構造物全体への入力エネルギー (Table 2) はほぼ等しい³⁾。ダンパーの履歴吸収エネルギー量が少ない分、超弾性ダンパーを設置した構造物では、仮定した粘性減衰機構によって吸収されるエネルギー量が増えることになる。また、地震波入力終了時における弾性振動エネルギーも、超弾性ダンパーを設置した構造物の方が多く、自由振動が0に収束するまでに時間を要する一因となっている。

5. おわりに

本研究では、機能性金属材料の1つである超弾性合金に着目し、その免震ダンパーへの適用可能性を検討した。

そのため、超弾性効果を利用した免震ダンパー (超弾性ダンパー) と、通常の弾塑性ダンパーとを設置した橋脚の地震応答を、数値シミュレーションによって比較検討した。本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 弾塑性ダンパーと比較した場合、超弾性ダンパーでは最大応答値が10~20%大きくなった。しかし、ダンパーを設置しない場合と比較すると、例えば桁の加速度応答は約20%にすることができ、弾塑性ダンパーの17%という値と比較しても遜色のない値である。

(2) 超弾性ダンパーを用いた場合、応答終了後の残留変形がないのが特徴である。弾塑性ダンパーでは残留変形が問題になる場合には、有効であると考えられる。

(3) 構造物全体系への入力エネルギーは、弾塑性ダンパーと超弾性ダンパーの場合でほぼ同じであった。しかし、履歴エネルギー吸収量では、超弾性ダンパーの場合、弾塑性ダンパーの約2/3であった。

以上、超弾性合金の免震ダンパーへの適用性に関して、基礎的な検討を数値解析的に行った。機能性金属材料の利用に関しては、形状記憶合金で地震災害後の補修を容易にするなど、まだまだ利用方法があるのではないかと考えられる。今後、実用化への可能性の検討などを、実験的に行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 鈴木雄一：形状記憶合金のはなし，日刊工業新聞社，1988年8月。
- 2) 伊藤邦夫・大塚和弘・神野公行・小野修一郎：機能性金属材料，東京大学出版会，1985年10月。
- 3) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，第2版，東京大学出版会，1987年9月。

(1994.3.11 受付)

NUMERICAL EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF BRIDGE PIER WITH SUPER ELASTIC SEISMIC DAMPERS

Kazuyuki IZUNO

Applicability of the super elastic alloy to the seismic dampers was discussed analytically using the numerical simulations. Super elastic alloy restores from more than 10% strain without residual deformation. Seismic behavior of the damper made of super elastic alloy was compared with that of the conventional elasto-plastic damper. The results showed that the maximum responses of the super elastic damper became 20% larger than the elasto-plastic damper. However, the super elastic damper became zero deformation after the earthquake responses while the elasto-plastic damper showed residual deformation of four times as large as its yield deformation. Furthermore, the super elastic damper could absorb 2/3 hysteretic energy to the elasto-plastic damper. The super elastic alloy would be applicable for the case that the residual deformation is critical.