

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月28日現在

機関番号： 13903

研究種目： 挑戦的萌芽研究

研究期間： 2009～2011

課題番号： 21656114

研究課題名（和文）機能性金属材料の複合による自己復元ダンパーの開発と無損傷構造の実現

研究課題名（英文）Development of self-centering damper by the combination of functional metal materials and achievement of non-damaged structure

研究代表者

後藤 芳顕（GOTO YOSHI AKI）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90144188

研究成果の概要（和文）：鋼橋の無損傷構造の実現のために、形状記憶合金と超塑性合金を用いた自己復元型複合構造ダンパーの開発を行った。ダンパーの具体的構造を提案し、最適化手法による部材諸元の決定法を提示し、ダンパーの模型供試体による載荷実験によりその妥当性を検証した。そして、2径間連続橋を対象に構造最適化を行い、ダンパーの導入により地震後の残留変位を抑制できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：An self-centering damper which consists of shape memory alloy and super-plastic alloy are developed to realize non-damaged steel bridge. The detail structure of the damper and its optimum design method is proposed. To confirm the validity of proposed structure, the experiment by using damper specimen is carried out. Then, it is confirmed that the damper is able to recover the residual displacement of the 2-span steel bridge after seismic excitation by the numerical analysis with structural optimization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	0	1,500,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,100,000	210,000	3,310,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震構造

## 1. 研究開始当初の背景

金属ダンパーによる橋の制震設計では、生起頻度の高いレベル1地震動ではダンパーを塑性化させず、レベル2地震動でのみ塑性化しエネルギー吸収するように設計される。これは、レベル1地震動での塑性化を許容すると、残留変形の発生と繰り返し塑性によるダメージ蓄積が生じ、メンテナンスが必要となるためである。このような問題を解決し、レベル1地震動でのダンパーの塑性化を許容できると、レベル2地震動下において、広いレンジでのダンパーの効果が発揮されるのでより高い制震性能が期待できる可能性が

ある。

研究代表者らは自己復元型免震・制震機構を提案し、レベル2地震動下で現実的な無損傷構造が可能となることを最適設計により示したが、レベル1地震動でのダンパーの塑性化を許容することより効率的な構造が可能になることを確認している。ダンパー自体の自己復元機能については、すでに形状記憶合金を用いた研究例があるが、超弾性効果を期待する場合はエネルギー吸収能が不十分で、形状記憶効果を期待する場合は降伏点と剛性が低下することと、復元に加熱が必要という問題点があり、現状では実用化には至って

いない。

## 2. 研究の目的

(1) 塑性化しても残留変形が除去されるとともに塑性ひずみの累積による劣化を緩和できるダンパーの開発を目指す。具体的には超弾性効果による自己復元を期待するTi-Ni系形状記憶合金と高エネルギー吸収を期待するZn-Al系超塑性合金の複合構造からなる制震ダンパーを対象に許容残留変形を制約条件にエネルギー吸収量が最大になるように形状記憶合金と超塑性合金の幾何学形状と材料特性の最適化を行う。

(2) (1)で決定された性能を持つダンパーを各種鋼橋に導入し、構造レベルの最適化計算を行うことで無損傷自己復元型制震機構の高機能化を検討する。さらに、ダンパー特性を十分に引き出すような部材配置の検討も行う。

## 3. 研究の方法

形状の自己復元性能をもつ形状記憶合金と高塑性ひずみ下での耐劣化性能を持つ超塑性合金の複合構造としてメンテナンスフリーの制震ダンパーの開発を行う。まず、材料特性の調査、実験を通じてこれらの材料特性を表す解析モデルを構築する。そして、数値解析モデルにより幾何形状と材料特性を変数とし許容残留変形を制約条件とする最適化計算を行うことでダンパーとしての最適特性を明らかにする。この最適特性を基にダンパー部材の試験体を製作し繰り返し载荷実験により性能を検証する。

次に、上記の部材レベルでの最適化を行ったダンパーを鋼橋に適用し構造レベルでの最適化計算により最適特性を調べる。そして、主部材を無損傷とした自己復元機能をもつ橋梁を実現するための部材やダンパーの要件を明らかにする。

## 4. 研究成果

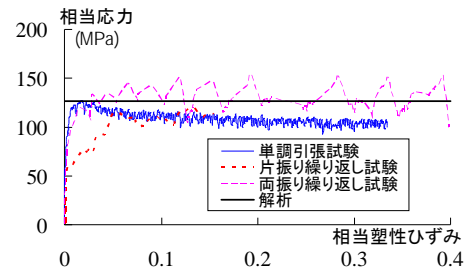
### (1) 超塑性合金と形状記憶合金の材料試験とモデル化

本ダンパーに適用する超塑性合金はZn-Al系合金であり延性に優れ、複合ダンパーでは地震エネルギーの逸散を担う。一方、形状記憶合金はNi-Ti系合金であり、除荷後の残留ひずみが回復する形状回復特性を持つもので、複合ダンパーでは自己復元能力を担う。

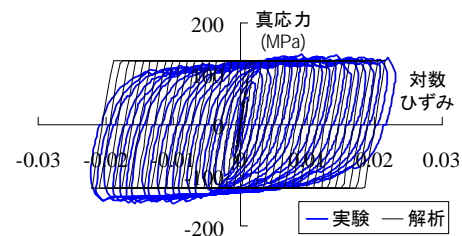
#### ① 超塑性合金

超塑性合金については単調引張試験と一軸繰り返し载荷試験を行う。図1(a)に示す単調引張試験では载荷に従いひずみ速度が低下したため、ひずみが約2%付近でピーク後は荷重が低下したが、繰り返し試験では図1(b)、に示す真応力-対数ひずみ関係、図1(a)に示

す相当応力-相当塑性ひずみの包絡線においても明確な強度低下は見られず優れた変形能を持つことを確認できる。また、材料モデルについては、载荷速度の影響が小さければ最大強度到達後はほぼ一定の応力を保つと考えられることから完全弾塑性モデルを適用する。図1の実験結果に解析モデルとの比較を重ねているが、载荷初期での剛性変化の再現は難しいものの簡易的にはその特性再現できると考えられる。



(a) 単調引張試験



(b) 繰り返し载荷試験

図1 超塑性合金の応力-ひずみ関係

### ② 形状記憶合金

形状記憶合金は太径の材料の製作が困難であることから、引張荷重下のみでの利用を想定し、片振り漸増型の繰り返し载荷試験を実施する。本研究では直径3mmの棒材を用いている。実験により得られた応力-ひずみ関係を図2に示す。これによると5%の引張ひずみを与えた後も残留ひずみが生じないことが確認できる。

次に、繰り返し载荷実験に基づき材料モデルについて検討を行う。図2に示すように降伏後の2次剛性を考慮するとともに、回復応力を除荷開始時ひずみの1次関数として表すことにより、実験結果の再現精度の改善を図った。

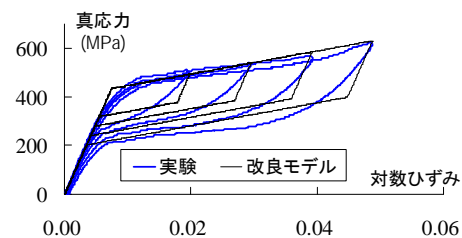


図2 超弾性合金の応力-ひずみ関係

## (2) 自己復元型複合構造ダンパーの開発

自己復元型複合構造ダンパーでは超塑性合金と形状記憶合金を並列に配置することにより自己復元能力と高いエネルギー吸収能を実現する。しかし、形状記憶合金は太径の棒材の製作が困難であり圧縮力を与えると容易に座屈が生じる。そこで、図3(a)のように超塑性合金を2層構造にし、形状記憶合金には引張力のみが作用して自己復元機能を発揮するような構造とする。すなわち、複合ダンパーに引張力が作用した際にはA層の形状記憶合金に引張力が生じ(図3(b)), 圧縮力が作用した際にはB層の形状記憶合金に引張力が生じるような構造とする(図3(c))。一方、超塑性合金については複合ダンパーの動きに同調して引張・圧縮の繰り返し荷重を受ける構造とし、圧縮時の座屈を抑制するための側方4面に拘束板を取り付けた上で複合ダンパー本体に固定する。

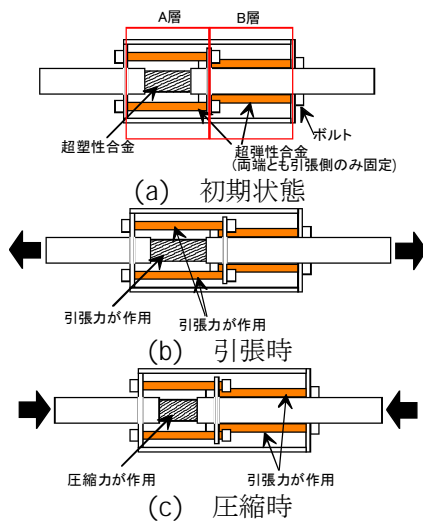


図3 ダンパー構造

## (3) 最適化手法による複合ダンパー諸元の決定

複合ダンパーの特性を決定するパラメータである超塑性合金および超塑性合金それぞれの長さ $L_e$ 、 $L_p$ と断面積 $A_p$ 、 $A_e$ を最適化手法により設計する。以下の4つの制約条件の下、目的関数として半サイクルにおける吸収エネルギー $Q$ として $Q$ の最大化を考える。

- I. 複合ダンパーの許容最大変位 $u_a$ での荷重 $P$ を従来型ダンパーと同一とする。
- II. 複合ダンパーの残留ひずみを許容値 $\varepsilon_{ra}$ 以下とする。
- III. 超塑性合金、超塑性合金に生じる最大ひずみがそれぞれの許容最大ひずみ $\varepsilon_{ea}$ 、 $\varepsilon_{pa}$ 以下とする。
- IV. 除荷時に残留変位の回復効果が十分機能するように、ひずみ回復域での回復荷重 $P_1$ を最大荷重 $P$ の10%以上とする。

各合金の許容最大ひずみは、繰り返し載荷

材料試験結果を踏まえ、超塑性合金では残留変位が生じてない範囲として $\varepsilon_{ea}=5\%$ 、超塑性合金では単調載荷試験では徐々に荷重が低下するものの繰り返し載荷試験では荷重の低下が見られないことから $\varepsilon_{pa}=10\%$ と設定する。また、降伏点が明確でない材料では降伏応力の代替として0.2%耐力が用いられることから、複合ダンパーの許容残留ひずみを $\varepsilon_{ra}=0.2\%$ と設定する。

## (4) 模型実験による複合ダンパー挙動の検証

従来型の軸降伏型履歴ダンパーを参考に複合構造ダンパーの模型供試体を製作し、実験的に本構造の妥当性を検証する。試験装置の載荷能力・寸法や入手可能な材料形状を考慮して実験供試体サイズを決定した。載荷方法は正負交番の両振り載荷とし、伸び計によるダンパー変位により載荷制御を行い、ひずみ換算で $\pm 1\%$ から $\pm 5\%$ まで1%ずつ振幅を漸増させる。

実験による荷重-変位関係を数値解析による予測結果と合わせて図4に示す。解析では、超塑性合金をソリッド要素、超塑性合金をトラス要素によりモデル化している。実験ではひずみ5%に相当する変位3.7mmを与えた際の残留変位は0.57mmでありひずみ相当で0.8%となっている。これは目標値と較べると大きな値であるが、原因としては小型模型供試体では製作誤差の影響が相対的に大きく、複数本設置している超塑性合金の自己復元力にばらつきが生じたためであると考えられる。しかしながら、変位を0とした際の荷重は最大荷重の約19%と小さいため、主構造に生じる残留応力や残留ひずみは小さく抑えられると考えられる。また、解析により予測と非常に近い挙動を示しており、想定した自己復元能力を十分発揮している。

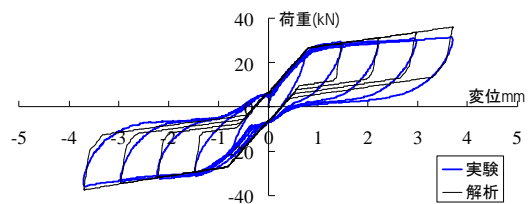


図4 複合ダンパーの荷重-変位関係

## (5) 鋼橋への自己復元型複合構造ダンパーの適用

### ① 検討対象

図5に示すように、両端を可動支承による橋台で、中央を不動支承による鋼製橋脚で支持された2径間連続橋を対象とする。上部構造については支間長40mで4車線のRC床板を持つ7主桁橋、中央橋脚は矩形断面鋼製橋脚として昭和55年道路橋示方書に従い設計する。そして、次に本ダンパーを両端の橋台

部に1個ずつ付加することで現行示方書のレベル2地震動に対する照査を満足するようにダンパーの設計を行う。ここでは、ダンパー付加前のモデル(基本モデル)と本ダンパー付加後のモデル(自己復元モデル)に加え、従来の軸降伏型金属ダンパーを用いたモデル(BRBモデル)についても検討する。

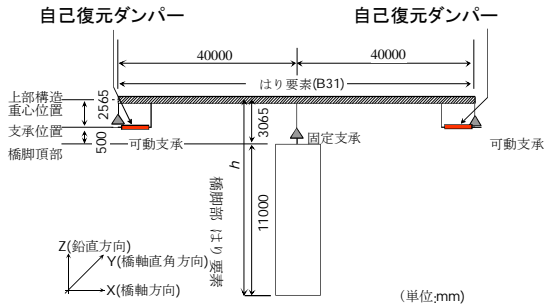


図5 検討対象橋梁

### ②ダンパーの最適設計

レベル2地震動に対する照査において、応答値の3波平均が表3に示す制約条件を満たすよう最適なダンパー諸元を決定する。設計変数としては、ダンパー部材の長さおよび断面積とし、目的関数はダンパー重量最小化とする。2種類の材料を用いる自己復元ダンパーでは形状記憶材料と超塑性材料の諸元をそれぞれ独立な変数とし、目的関数は価格比から定めた重み係数を乗じて算出する。ただし、ダンパー部材の強度と剛性を高くすることで、地震荷重のほとんどを橋台部で負担する構造が最適解となるので、橋台に生じるダンパー反力に制約を加える。具体的には反力の上限值を徐々に低下させ設計可能なダンパーを決定する。

### ③ダンパーの導入効果

橋脚残留変位：残留変位の許容値140.6mmを上回る基本モデルに対して自己復元モデル、BRBモデルともダンパーを付加することにより許容値以内に収めることができた。しかしBRBモデルでは許容値の6~24%の残留変位が生じており、また地震波による差異も大きい。一方、自己復元モデルでは、残留変位は許容値の約2%と非常に小さく、自己復元特性が得られていることがわかる。また、地震波の差異に対して敏感ではなくロバスト性を持つ。

エネルギー吸収：表6に示す2種類のダンパーにおけるエネルギー吸収量は地震波によるばらつきは大きいものの、自己復元モデルとBRBモデルの間に明確な優劣は生じなかった。

ダンパー反力：設計可能なダンパー反力の制限値は、自己復元モデルがBRBモデルの約1.3倍となった。これは、図4に示すように自己復元型ダンパーの荷重-変位関係では自己復元特性に起因して第2、4象限でのエ

ネルギー吸収が期待できないため、同等のエネルギー吸収能を確保するにはBRBモデルに比べダンパー反力が大きくならざるを得ないからである。なお、1履歴ループ当たりのエネルギー吸収能を等しくするには自己復元型ダンパーはBRBの約2倍の反力を必要とすることを考慮すると、自己復元型ダンパーを用いたことによる橋台における反力上昇は比較的小さいものと考えられる。

### (6) まとめ

形状記憶合金と超塑性合金を用いた自己復元型複合構造ダンパーの開発を行い、鋼橋への適用性について検討を行った。以下に、その成果をまとめる。

- ① 両合金の材料試験を実施し、地震時挙動予測解析のための繰り返し材料構成則を開発した。
- ② 自己復元型ダンパーの具体的な構造を提案し、最適化手法による部材諸元の決定法を提示した。
- ③ ダンパーの模型供試体を製作し、自己復元能力と高いエネルギー吸収能を有することを実験的に確認した。また、開発した材料モデルにより実験の挙動を精度良く再現できることを確認した。
- ④ 鋼橋への自己復元型複合構造ダンパーの適用について2径間連続橋を対象に検討を行った。その結果、自己復元型ダンパーの導入により地震後の残留変位を抑制できることを確認した。自己復元挙動は地震波の差異による影響も小さく、ロバスト性を持つことも判明した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計1件)

- ① 和田廣人, 後藤芳顯, 海老澤健正, 超塑性合金と超塑性合金からなる自己復元型複合構造ダンパーの検討, 第66回土木学会年次学術講演会, 2011年9月8日, 愛媛大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称：履歴型ダンパー  
 発明者：後藤芳顯, 海老澤健正  
 権利者：名古屋工業大学  
 種類：特許  
 番号：PCT/JP2009/071587

出願年月日：21年12月25日  
国内外の別：国内

名称：履歴型ダンパー  
発明者：後藤芳顯, 海老澤健正  
権利者：名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2011-062337  
出願年月日：23年3月22日  
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

後藤 芳顯 (GOTO YOSHI AKI)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90144188

### (2)研究分担者

海老澤 健正 (EBI SAWA TAKEMASA)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：90332709

### (3)連携研究者

井上 純哉 (INOUE JUNYA)  
東京大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70312973