

超弾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

株式会社オリエンタルコンサルタンツ 正会員 ○和田廣人

名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤芳顕

名古屋工業大学大学院 正会員 海老澤健正

1. 目的 近年の制震設計では、履歴型制震ダンパーを主構造に組み込み、ダンパーの塑性化によって地震エネルギーを散逸させることで主構造の損傷を低減させる方法が提案されている。しかし、このようなダンパーには地震後に残留変形が生じ、地震後のダンパー部材の交換や原位置復帰作業が必須となる。そのため、現行では発生頻度の高いレベル1地震動に対してはダンパー部材を弾性範囲内に留め、レベル2地震動に対してのみ塑性化してエネルギー吸収をするよう制約が与えられ、非効率な設計となっている。そこで、エネルギー吸収性と形状回復特性を持つ超弾性合金と耐劣化性に優れた高いエネルギー吸収能を持つ超塑性合金を組み合わせた自己復元型複合構造ダンパーを提案し、履歴型制震ダンパーのメンテナンスフリー化を目指す。これにより、ダンパーの交換なしに繰り返し利用が可能となり、上記の制約にとらわれないより自由度の高い制震設計が可能となる。本研究では、この自己復元型複合構造ダンパーの開発のために、まず超弾性合金および超塑性合金の材料試験によりその特性を把握し材料モデルを構築する。次に、複合構造ダンパーが自己復元能力を備える構造およびその設計方法について提案し、模型供試体による実験および数値解析によりダンパーの挙動の確認し妥当性を検証する。

2. 各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、超弾性合金は 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。

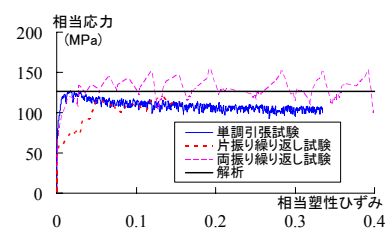
(1) **超塑性合金：** 超塑性合金については単調引張試験と一軸繰り返し載荷試験を行う。繰り返し載荷試験では引張・圧縮の両振り載荷試験と引張ひずみ漸増型の片振り載荷試験の2種類を実施する。まず、図1(a)に示す単調引張試験では荷重に従ひひずみ速度が低下したため、ひずみが約2%付近でピーク後は荷重が低下したが、繰り返し試験では図1(b), (c)に示す真応力-対数ひずみ関係、図1(a)に示す相当応力-相当塑性ひずみの包絡線においても明確な強度低下は見られず優れた変形能を持つことを確認できる。また、材料モデルについては、載荷速度の影響が小さければ最大強度到達後はほぼ一定の応力を保つと考えられる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、載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。

(2) **超弾性合金：** 超弾性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載荷試験を実施する。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。

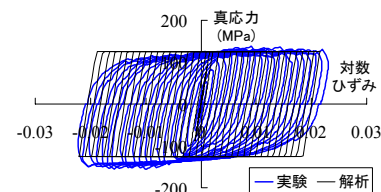
次に、繰り返し載荷実験に基づき2つの材料モデルについて検討を行う。第1のモデルは図2(a)に示すような2次剛性を0とした簡易モデルであり、簡便に複合ダンパーの諸元を決定することを目的とする。このモデルではヤング率と降伏応力、除荷時に線形弾性状態に復帰する応力である回復応力の3つのパラメータのみで表される。第2のモデルは、図2(b)に示すように降伏後の2次剛性を考慮するとともに、回復応力を除荷開始時ひずみの1次関数として表した改良モデルである。簡易モデルと比べ実験結果の再現精度が向上したモデルであり、複合ダンパー挙動の予測解析へ適用する。

3. 自己復元型複合構造ダンパーの開発

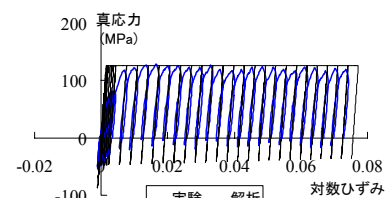
(1) **複合ダンパーの構造：** 自己復元型複合構造ダンパーでは超塑性合金と超弾性合金を並列に配置することにより自己復元能力と高いエネルギー吸収能を



(a) 単調引張試験

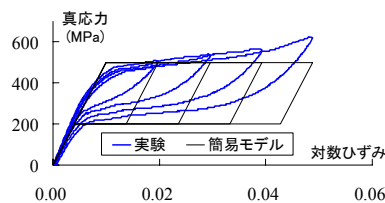


(b) 両振り繰り返し載荷試験

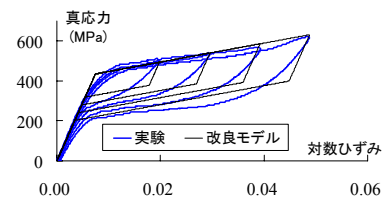


(c) 片振り繰り返し載荷試験

図1 超塑性合金の応力-ひずみ関係



(a) 簡易モデル



(b) 改良モデル

図2 超弾性合金の応力-ひずみ関係

キーワード：制震、自己復元、履歴型ダンパー、機能性材料

連絡先：〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL 052-735-5021 FAX 052-735-5563

実現する．しかし，超弾性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) のように超弾性合金を 2 層構造にし，超弾性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 層の超弾性合金に引張力が生じ(図 3(b))，圧縮力が作用した際には B 層の超弾性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．

(2) 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弾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 ε_{ra} 以下とする．

III. 超弾性合金，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 ε_{ea} ， ε_{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，2 での繰り返し载荷材料試験結果を踏まえ，超弾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载荷試験では徐々に荷重が低下するものの繰り返し载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．また，従来型ダンパーとして文献 1) のバイリニア型軸降伏型履歴ダンパーを想定しダンパーの最大変位 $u_a=40.7\text{mm}$ ，最大荷重 $P=330\text{kN}$ として表 1 に示す諸元を決定した．

図 4(a) には上記により最適設計した複合ダンパーの最大変位時サイクルでの荷重－変位関係を参照した従来型ダンパーと比較して示す．これによ

ると，残留ひずみは従来型ダンパーと比較して 95% 減となり十分な自己復元特性が得られている．一方，吸収エネルギーは 52% 減となっている．これは，自己復元型ダンパーの履歴挙動が必然的に第 1・3 象限のみに限定されるためであるが，減少量は最小限に抑えられていると考えられる．

4. 模型実験による複合ダンパー挙動の検証 3 にて諸元を決定した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．試験装置の载荷能力・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．载荷方法は正負交番の両振り载荷とし，伸び計によるダンパー変位により载荷制御を行い，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(b) に示す．解析では，超塑性合金をソリッド要素，超弾性合金をトラス要素によりモデル化し，材料モデルにはそれぞれ材料試験で同定した完全弾塑性モデルと改良モデルを用いている．これによると，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弾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．

5. まとめ 超弾性合金および超塑性合金を用いた自己復元型複合構造ダンパーを提案した．最適化手法により決定した諸元に基づき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．

参考文献 1) 加藤基規，宇佐美勉，葛西昭：座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2003．

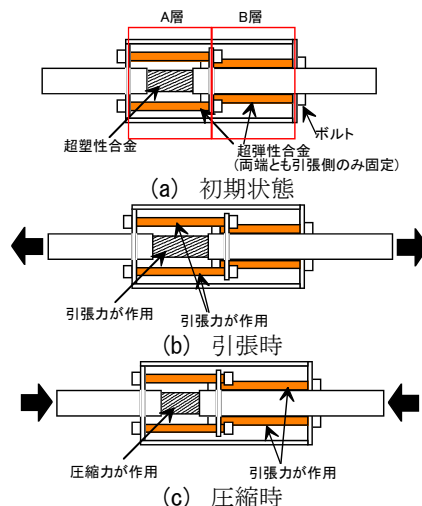
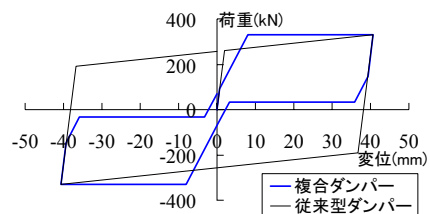


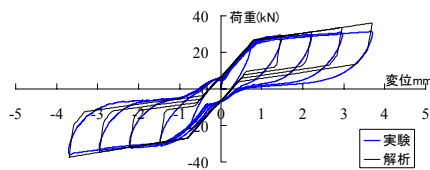
図 3 ダンパー構造

表 1 ダンパー諸元

L_e (mm)	L_p (mm)	A_e (mm ²)	A_p (mm ²)
813	407	660	522



(a) 実大構造の設計



(b) 模型実験結果

図 4 複合ダンパーの荷重－変位関係