

新規銅系超弾性合金を用いた引張制振ブレースの開発

京都大学大学院工学研究科建築学専攻 荒木慶一

東北大学大学院工学研究科マテリアル・開発系 貝沼亮介, 須藤祐司, 大森俊洋, 石田清仁

1. 序

近年、建築物の設計で考慮すべき地震動のレベルが増大しており、これに伴い耐震性能の高性能化が求められている。このような背景の下で、新規及び既存の住宅・建築物の耐震性を、簡便かつ安価に向上する技術開発が強く求められている。

このような要請の下で本研究では、新規開発中の銅系超弾性合金¹⁾を用いた引張制振ブレースを試作し、1/3 スケールの縮小鋼構造骨組の振動台実験を行い、試作した引張制振ブレースの有効性を実証することを目的とする。

2. 超弾性合金を用いた引張制振ブレース

超弾性合金は旗 (flag) 状の応力-ひずみ関係を持ち、(1)荷重を除くことで変形が回復する形状回復機能、(2)力の伝達を抑制する応力伝達抑制機能、(3)エネルギー吸収機能を持つ²⁻⁴⁾。

通常の鋼材ブレースを用いた建物の復元力特性は図 1(a)のようになり、繰返し载荷時に強度劣化や残留変形が発生する。一方、超弾性合金ブレースを用いた建物の復元力特性は図 1(b)のようになり、地震中に変形が一方に累積して倒壊に至ることや、大きな残留変形が発生することを回避できる。また、応力伝達抑制機能があるため、柱や梁などの本体構造 (既存建物の場合は既存骨組) が負担する地震力を抑制できる。さらに、エネルギー吸収機能により建物に 10~15%程度の減衰性能を付与することが可能である。

3. 関連研究の動向と本研究の特徴

超弾性合金を用いた構造物に関する本格的な研究開発としては、1990年代後半の EC からの助成による欧州のプロジェクト²⁾、1990年代後半から 2000年代前半にかけて建築研究所が中心となって実施した日米共同構造実験研究プロジェクト³⁾、2000年代前半から現在に至り米国ジョージア工科大学の DesRoches 教授が NSF の助成の下で実施している研究プロジェクト⁴⁾が挙げられる。

これらの研究開発では超弾性合金として Ni-Ti 合金が用いられている。しかし Ni-Ti 合金部材は

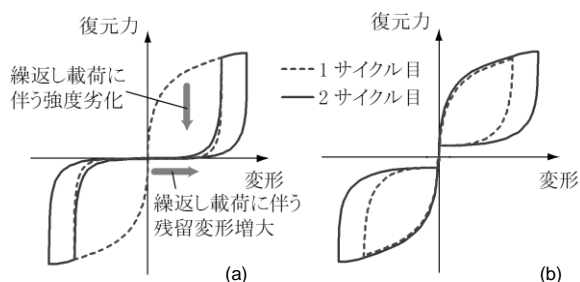


図 1 復元力特性: (a)鋼材ブレース, (b)超弾性ブレース

単体としては優れた機械特性をもつものの、材料自体が高価で、板や棒材の成形にかかる加工コストや、超弾性合金部材を他の建築部材と接合するために必要なねじ切りや穴あけなどに要する切削加工コストが、材料コスト以上に高価であることが問題点として繰返し指摘されてきた⁴⁾。

本研究では新規開発中の Cu-Al-Mn 合金棒¹⁾を引張制振ブレースの一部に用いることで、上記問題の解決を試みる。銅系超弾性合金の材料コストは Ni-Ti 合金の 1/10 以下であり、その研究開発は古くから行われている。Cu-Al-Mn 合金はそれらの合金と比較して疲労特性に優れ、Ni-Ti 合金と同程度の超弾性 (変形回復) 特性を持つ点が大きく異なる。切削加工性や冷間加工性が非常に優れている点も、Cu-Al-Mn 合金の大きな特徴である。

4. 実験

4.1 材料試験

φ8mm, 長さ 150mm の Cu-Al-Mn 超弾性合金棒を作成した。合金棒の作成は株式会社古河テクノマテリアルが実施した。ねじ切り部での破壊を避けるため、図 2 に示すように中央 100mm を φ4mm に切削加工し、端部にねじ切り加工を施した。

準静的繰返し引張载荷 (0.001Hz) 試験の結果を図 3 に示す。図 3 より、4.5%程度のひずみを与えても残留ひずみがほぼ 0 であることが観察できる。また、同一の棒材に対して動的载荷 (1Hz) 試験を実施し、準静的载荷時と比較して機械的性質の変化が無視できるほど小さいことを確認した。



図 2 本研究で用いた Cu-Al-Mn 超弾性合金棒の写真

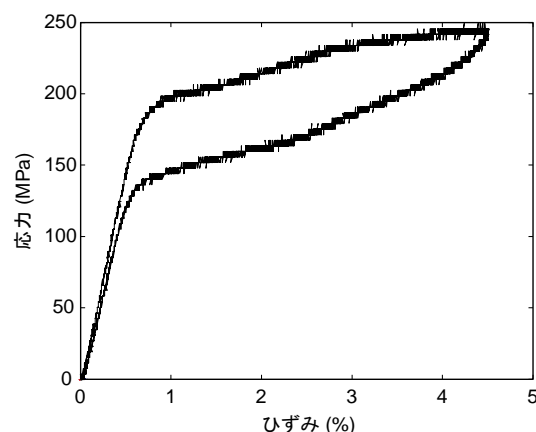


図 3 超弾性合金棒の準静的繰返し引張試験結果

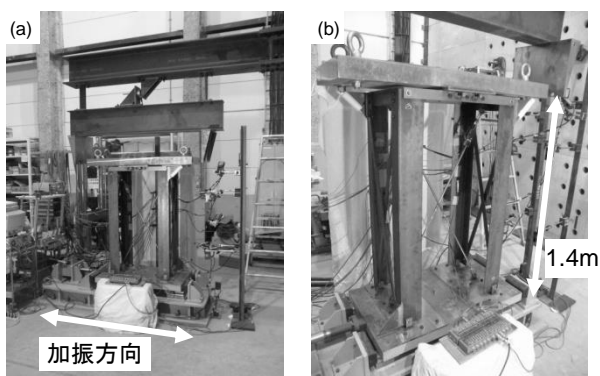


図4 縮小鋼構造骨組試験体の写真

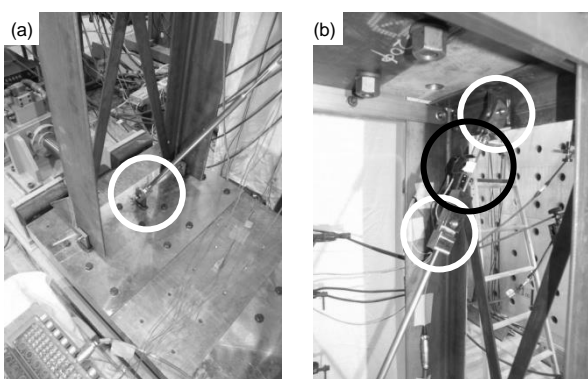


図5 引張制振ブレースの拡大写真

4.2 振動台実験

振動台の上に設置した縮小鋼構造骨組試験体の写真を図4に示す。図4(a)は、上部を固定して準静的な荷重を行うための荷重治具を含む全体写真であり、図4(b)は骨組試験体の拡大写真である。骨組の高さは約1.4mであり、骨組の上に約350kgの錘(鋼板)を設置する。振動台の加振方向に、一組の引張制振ブレースをたすき掛けで設置した。部材間の接合は全てベアリングを用いたピン接合であり、水平力は全てブレースが負担する。

引張制振ブレースの拡大写真を図5に示す。図5(a)はブレースと振動台、図5(b)はブレースと梁の接合部を示す。図5(b)の黒丸で囲った部分に、4.1節で材料試験を行った棒材を設置した。また、図5の白丸で囲った部分はベアリング設置箇所を示す。本試験体のブレースには、両端2点、部材内1点、合計3点のピン接合部を設けており、圧縮軸力を負担しない設計となっている。

振動台の加振能力が限られているため、骨組の固有周波数(約5.5Hz)に近い振動数の6Hzの正弦波により共振を利用し加振を行った。最大振幅は0.5mmから4mmまで0.5mm刻みで大きくした。

最大振幅が3.5mmの場合の計測時刻歴データを図6に示す。図6(a)は振動台上で計測した加速度、図6(b)は柱の傾斜角から求めた層間変形角、図6(c)はブレース中の超弾性合金棒の伸びである。これらの図から、この骨組は塑性率で3程度の変

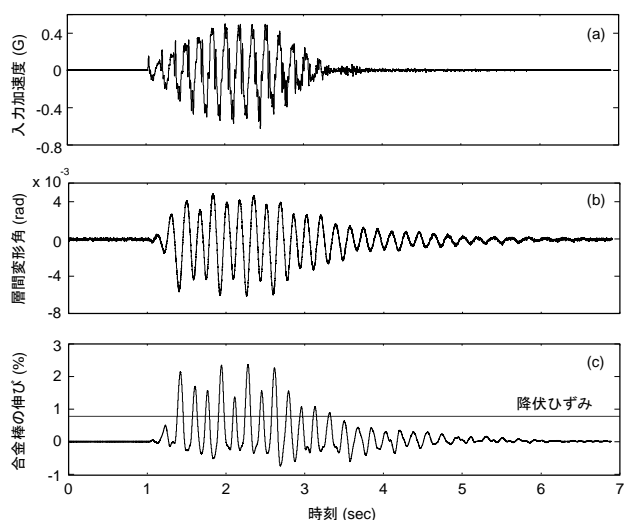


図6 (a)入力加速度, (b)層間変形角, (c)合金棒の伸び

形を受けても、残留変形がほとんど発生しなかったことが確認できる。

5. 結論と今後の展望

Cu-Al-Mn 超弾性合金を用いた引張制振ブレースを試作し、1/3スケールの縮小鋼構造骨組の振動台実験を実施した。その結果、塑性率が3程度の変形を与えても、無視できるほど小さな残留変形しか発生しないことを確認した。

本研究で提案するように、Cu-Al-Mn 超弾性合金を引張制振ブレースの一部として利用することで、粘弾性ダンパーよりも安価で汎用性が高い部材を実現できる見込みは高い。そのため将来的には広い普及と、それに伴う木造や軽量鉄骨の住宅や低層建物の高耐震化に多大な貢献が可能であると期待できる。

参考文献

- 1) Y Araki, T Endo, T Omori, Y Sutou, Y Koetaka, R Kainuma, K Ishida: Potential of superelastic Cu-Al-Mn alloy bars for seismic applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, pp. 107-115, 2011.
- 2) M Dolce, D Cardone, R Marnetto: Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 945-968, 2000.
- 3) 酒井優二, 北川良和, 福田俊文, 飯場正紀: Ti-Ni系形状記憶合金を用いた建築構造物のスマート構造化に関する基礎的研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 50B, pp. 635-640, 2004.
- 4) R Desroches, B Smith: Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 7, pp. 1-15, 2003.

謝辞

本研究は日本免震構造協会「免震構造・制振構造に関わる研究助成」と、International Copper AssociationのTechnology Programの研究助成の下で実施した。本研究の実施に当たり、京都大学の髯高裕治先生(准教授)、前川奈緒さん(修士課程学生)、吉田亘利さん(非常勤技術職員)から多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。