

木造軸組工法 超弾性合金 耐力壁
 ブレース 繰り返し地震 安全性

1. 研究の背景と目的

近年、南海トラフ地震で生じる長時間長周期地震動や2016年熊本地震で見られた繰り返し発生する地震動に対する耐震性能が求められているが、木造は繰り返しの地震に対して変形が大きくなるとめり込み等の劣化が生じ、復元力特性がスリップ型となる。形状記憶合金の一種で除荷のみで変形が回復する CuAlMn 超弾性合金は、ガイドワイヤーやメガネフレーム等を実用化している NiTi 合金では製造が困難な直径 3mm 以上の大径寸法の製造が容易であることから建築材料に適している。超弾性合金は降伏荷重に至ると応力が一定の状態に変形し、その後も復元力を有するため、木材に過度な負担をかけずに繰り返し地震に強い建物とすることが期待できる。CuAlMn 超弾性合金を用いたブレースに関しては、聲高ら¹⁾が実験や解析を用いて効果を確認している。また、近年 CuAlMn 超弾性合金の単結晶化技術が進んでおり、材料面での課題は克服しつつある²⁾。今回、木造軸組工法の実設計に必要な CuAlMn 超弾性合金の特性及び耐力壁の設計を示す。

2. CuAlMn 超弾性合金の基本特性

CuAlMn 超弾性合金に与える応力が降伏応力（変態臨界応力）に達すると、応力により誘起したマルテンサイト相により、母相とマルテンサイト相が共存する応力が一定のプラトー領域が発現する。そして、除荷時には母相への逆変態により載荷時と逆の現象を起こし元の状態に戻る。降伏後、全体がマルテンサイト相へ変態すると応力一定の領域は終了し、さらに変形を加えるとハードニングが起り、転位を伴い変形が回復しなくなる塑性変形を経てから破断に至る。ここで、耐力壁の設計に必要な材料定数として、ヤング率、降伏応力、ハードニング歪（超弾性歪）、破断歪を図1のように定義する。

CuAlMn 超弾性合金は単結晶の場合に優れた特性を発現

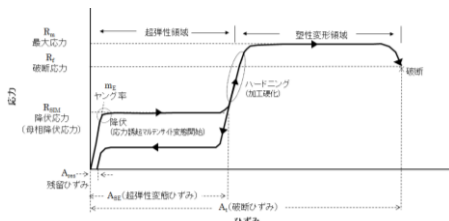


図1 超弾性合金の応力-歪関係

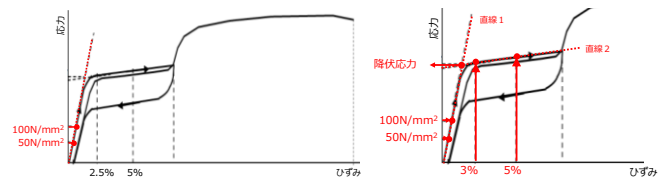
する。一方、単結晶の材料定数は結晶方位に依存することが知られている³⁾。

2.1 ヤング率

金属材料の引張試験方法の JIS Z 2241:2011 で示す、応力-歪曲線の弾性域の傾き (mE) をヤング率と定義する。ここでは、応力-歪関係 (図2(a)) における応力 50N/mm² 及び 100N/mm² の2点を結ぶ直線の傾きをヤング率とした。

2.2 降伏応力

JIS H 7103:2012 で示す、母相降伏応力 (RSIM) を降伏応力と定義する。弾性変形の直線部分と降伏後の直線部分とにそれぞれ接線を引き、これら二つの接線の交点から母相降伏応力を求める。ここでは、ヤング率を求める直線と歪 3% 及び 5% の2点を結ぶ直線の交点の応力を降伏応力とした。(図2(b))



(a) ヤング率 (b) 降伏応力

図2 用語の定義

2.3 ハードニング歪

Ni-Ti 形状記憶合金の引張試験方法 JIS H 7103:2012 で示す、M 相伸び (AM) をハードニング歪と定義する。応力微増部接線とその後の応力急増部とに接線を引き、応力微増部接線と応力急増部との交点 (応力微増部終了点) からの M 相伸びを求める。JIS H 7103:2012 では M (マルテンサイト) 相での伸びを定義しているが、超弾性においても応力誘起 M (マルテンサイト) 相からの変形も、応力急増するため同一の変形挙動であるとする。CuAlMn 超弾性合金のハードニング歪は結晶方位に依存することから、ヤング率の計測により品質管理できる。

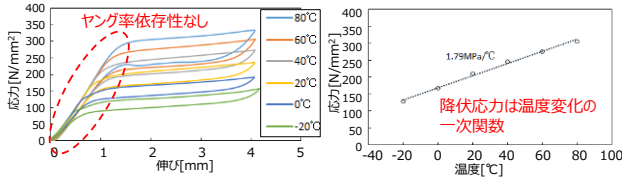
2.4 破断歪

塑性変形領域を経て、破断するときの歪を破断歪と定義する。CuAlMn 超弾性合金の破断歪は結晶方位に依存し、ヤング率が小さい CuAlMn 超弾性合金ほど破断歪は大きくなる。ハードニング歪同様、ヤング率の計測により品質管理できる。

3. CuAlMn 超弾性合金の各種依存特性

3.1 温度依存性

CuAlMn 超弾性合金は、降伏応力は温度が低いほど小さく、高くなると大きくなる特性を持つが、ヤング率は温度依存性がほとんどない。図3に示す試験片では、温度依存性は $1.79\text{MPa}/^\circ\text{C}$ である。



(a) ヤング率 (b) 降伏応力

図3 温度依存性

3.2 振動数依存性

振動数 0.1Hz、0.5Hz、1Hz 及び 5Hz にて加力した際の履歴より、振動数依存性はないことが確認できる (図4)。よって、耐力壁の性能評価において振動数を考慮する必要はない。

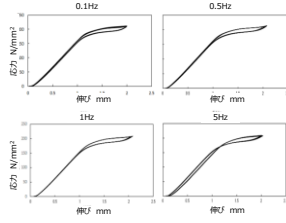


図4 振動数依存性

4. CuAlMn 超弾性合金を用いたブレース型耐力壁の設計

CuAlMn 超弾性合金を組み込んだ鋼材ブレース型耐力壁を設計するための標準モデルとして、梁芯距離 2742.5mm、梁内法 2600mm、柱芯距離 910mm、柱寸法 105mm の木造耐力壁を取り上げる。ここでは、柱・梁・土台の剛性は十分高く、変形を無視できるとし、フレーム剛性及び取付部材剛性は考慮しない。

4.1 目標性能

耐力壁の目標性能は、①壁倍率 2.5 相当、②最大変形角 $1/15\text{rad}$ 以上とし、履歴は図5に示すバイリニアとする。壁倍率は(1) P_y 、(2) $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$ 、(3) $2/3(P_{\max})$ 又は(4) P_{120} の最小値 P_0 。(3体のばらつき係数を乗じた値)に対して、 $P_0 \times$ 低減係数 $\alpha/1.96/0.91$ より求まる。ばらつき係数と低減係数の積を 0.85 とすると、(1)~(4)全てについて $2.5/0.85 \times 0.91 \times 1.96 \approx 5.24\text{kN}$ 以上である必要がある。ここで塑性率 $\mu=3.0$ 、 $P_y=0.5P_{\max}$ とすると(2) $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}=0.44P_{\max}$ 、(3) $2/3 \cdot (P_{\max})=0.67P_{\max}$ 、(4) $P_{120}=0.357P_{\max}$ で、降伏荷重 $P_y \geq 6.99\text{kN}$ 、剛性 $K \geq 0.229\text{kN/mm}$ となる。ブレースと梁のなす角 θ は $\cos \theta = 0.295$ より、ブレースの降伏荷重 23.64kN 以上及び軸剛性 2.624kN/mm 以上を満足する必要がある。

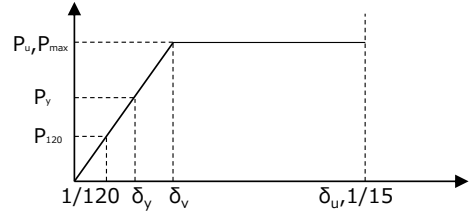


図5 耐力壁の包絡線モデル化

4.2 CuAlMn 超弾性合金の設計

目標性能を満足する CuAlMn 超弾性合金の降伏応力、軸径及び長さを求める。結晶方位に依存するヤング率、ハードニング歪、破断歪については要求値を規定する。

(1)降伏応力

CuAlMn 超弾性合金の温度依存性 $1.79\text{N/mm}^2/^\circ\text{C}$ とし、 40°C 時に鋼材の降伏応力 $235\text{N/mm}^2 \times 1.1 = 258.5\text{N/mm}^2$ よりも小さくなるように、 20°C 時降伏応力を 200N/mm^2 とする。

(2)合金軸径

ブレースの必要降伏荷重と(1)より定めた合金降伏応力より、合金の軸径は 12.27mm 以上必要であると求められることから、M14 の規格値 12.56mm を用いる。

(3)合金長さ

ブレース剛性 k_b は、合金剛性 k_g 及び丸鋼剛性 k_s より、 $k_b = 1/(1/k_g + 1/k_s) = 1/(L_g/A_g E_g + L_s/A_s E_s) \geq 2.624\text{kN/mm}$ 。ここで、 $L_g + L_s = 2721\text{mm}$ 、 $A_g = A_s = 123.8\text{mm}^2$ 、 $E_g = 35\text{kN/mm}^2$ 、 $E_s = 205\text{kN/mm}^2$ より、合金長さ $L_g \leq 1432\text{mm}$ を満足する必要がある。また、モデル寸法から幾何学的に求めた $1/15\text{rad}$ 時のブレース伸びは 59.57mm であり、破断ひずみに対する安全性として $1/15\text{rad}$ 時の合金歪が 25%以下になるように制限する場合、合金の降伏荷重時の丸鋼の弾性歪も見込み、合金長さは 228.6mm 以上であることが望ましい。以上より合金長さは 228.6mm 以上 1432mm 以下とする。

5. 結論

超弾性合金を用いた耐力壁の実用化に必要な各種特性の定義及び依存性の確認を行った。また、目標性能を壁倍率 2.5 倍及び変形能力 $1/15\text{rad}$ 以上としたときの、CuAlMn 超弾性合金の降伏応力、軸径及び長さを求めた。今後実験によりモデル化の妥当性能検証や取付部材剛性及びフレーム剛性を用いた最適化が必要となる。

参考文献 1) Cu-Al-Mn 超弾性合金を用いた残留変形抑制型ターンバックル筋かいの開発 2) サイクル熱処理による異常粒成長と銅系形状記憶合金単結晶の作製 3) Orientation Dependence of Plasticity and Fracture in Single-Crystal Superelastic Cu-Al-Mn SMA Bars

*積水ハウス株式会社

**株式会社古河テクノマテリアル

***名古屋大学大学院環境学研究科 教授

*Sekisui House LTD.

**Furukawa Techno Material Co., LTD.

***Nagoya University.