

形状記憶合金制震ダンパーの開発とその応用に関する基礎的研究

名城大学 正会員 葛 漢彬
名城大学 フェロー 宇佐美 勉

1. まえがき

橋梁構造物の制震化に関する研究が盛んに行われ、施工例も近年少しずつ増えてきている。著者らは、これまで鋼材の塑性化を利用して地震エネルギーの吸収を図る座屈拘束ブレース (BRB) やせん断パネルダンパー (SPD) のような履歴型ダンパーを開発し、橋梁への応用に成功している。一方、地震後の使用性の観点から、巨大地震に遭遇した重要橋梁構造物の地震後の残留変位を一層小さくする必要がある。そこで、本研究は、形状記憶合金の変形特性 (超弾性変形特性) を生かした制震ダンパー (SMA ダンパー) の開発を試み、橋梁構造物への適用性に関する基礎的検討を行ったものである。

2. SMA ダンパーとその復元力特性

本研究で考案した SMA ダンパーを図-1 に示す。2つのブロック (すなわち、Part A と Part B) は鋼材から成っており互いに滑り通ることができるようになっている。また、2組のオーステナイトワイヤー (SMA Wire-A と SMA Wire-B) はいわゆる形状記憶合金ワイヤーである。さらに、潤滑材料 (Lubricating material) は Part A と Part B の摩擦を減らすために境界面に用いられている。このダンパーの作用原理として、ダンパーに引張荷重がかかるとき SMA Wire-B に引張力が生じるが、SMA Wire-A は働かない。反対に、ダンパーが圧縮荷重を受けるとき Wire A に引張力が生じ SMA Wire B は働かない。このように2組のオーステナイトワイヤーは引張だけがあり、反対方向に作用する仕組みとなっている。

SMA 材料の参照温度時にオーステナイト相にある場合の応力-ひずみ関係と考案した SMA ダンパーの多曲線復元力モデルの概要を図-2 に示す。図-2(a)において、A, B, D および E に対する応力 σ_{MS} , σ_{MF} , σ_{AS} および σ_{AF} は相変応力 (オーステナイト相とマルテンサイト相の間の変換応力) で、材料定数 C_A と C_M , 相変温度 T_{MS} , T_{MF} , T_{AS} および T_{AF} および参照温度 T_{ref} によって決まり、実験で得られることができる。 E_A と E_M はオーステナイト相とマルテンサイト相における弾性係数である。 ϵ_L は SMA の最大残留ひずみである。Motahari ら¹⁾の実験結果を参考に、本研究で用いた SMA の材料定数を表-1 に示す。図-2(b)の復元力モデルは、Motahari らのモデルに対し、温度変化に伴う相変応力の変動を考慮せず一定とし、また相変域

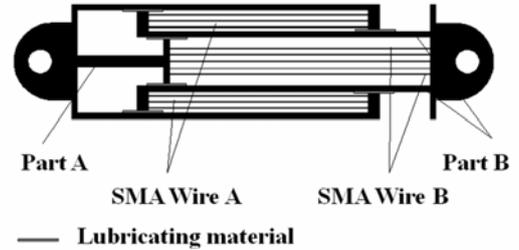
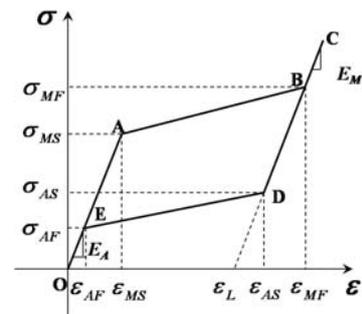
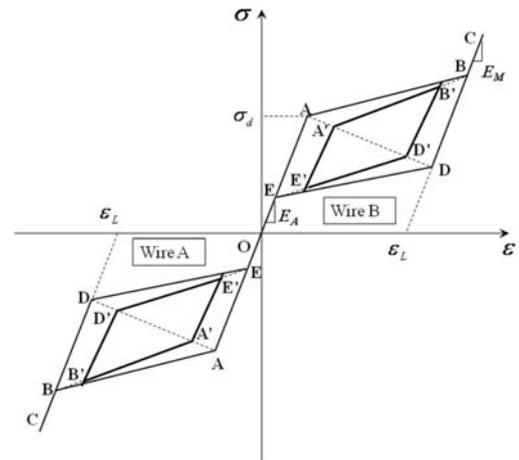


図-1 SMA ダンパー



(a) SMA 材料モデル



(b) SMA ダンパーの復元力モデル
図-2 構成則

表-1 SMA の材料定数¹⁾

E_A (GPa)	E_M (GPa)	ϵ_L	$T(^{\circ}\text{C})$
70	30	0.05	40
σ_{MS} (MPa)	σ_{MF} (MPa)	σ_{AS} (MPa)	σ_{AF} (MPa)
235	325	210	100

の弾性係数 E と E_A , E_M との関係式を修正して新たに提案した簡易的なもの²⁾である。

3. SMA ダンパーの導入による鋼製ラーメン橋脚の制震効果

ここで、制震効果の検討例として、図-3 に示すような鋼製ラーメン橋脚³⁾に適用した結果について述べる。本検討では、①制震ダンパーデバイスと主構造の強度比 α_F ($=0.5, 1.0$ および 1.5) ; ②マルテンサイトの割合 ξ ($=0\%, 25\%, 50\%, 75\%$ および 100%) ; ③SMA ダンパーと連結ブレースの長さ比 ($l_{SMA}/l_b = 1/6, 1/4.69, 1/4, 1/2$ および $1/1$; このとき、SMA ダンパーの長さはデバイス全体長さの約 $10\% \sim 25\%$ となっている) ; ④入力地震動 (JRT-EW-M, JRT-NS-M, FUKUI-M および米国 SAC の LA16 の 4 つ) の影響について調べた。また、BRB を導入した場合との比較も行った。

まず、制震ダンパーデバイスと主構造の強度比 α_F の影響についてであるが、表-2 に基本モデル (Bare) と、BRB および SMA ダンパーを設置したときの解析結果を示す。ここで、 $\xi=0\%$, $l_{SMA}/l_b=1/4.69$, 入力地震動は JRT-EW-M である。また、BF05, BF10 および BF15 は BRB を導入したモデル、SF05, SF10 および SF15 は SMA を導入したモデルを表わす。同表から分かるように、基本モデルの応答値に比べ、BRB や SMA を導入した場合、最大応答変位と残留変位は大きく低減できている。特に、BRB の場合に比べると、SMA を導入した場合、最大応答変位は若干大きいですが、残留変位は格段に小さくなっている。

次に、マルテンサイトの割合などのパラメータの影響について述べる。 ξ が 0% から 100% まで増大すると、ラーメン橋脚基部の平均圧縮ひずみ、最大応答変位は小さくなる。これに対し、残留変位は大きくなる傾向がある。また、 l_{SMA}/l_b の影響に関しては、その比率が大きくなると、橋脚基部の平均圧縮ひずみ、最大応答変位および残留変位はいずれも増大する傾向がある。言い換えれば、 l_{SMA}/l_b の値を小さくすることで、SMA ダンパーの吸収エネルギーが大きく、経済的である。さらに、地震動の影響については、ばらつきがあるものの、ほぼ同様なことが言える。

4. あとがき

本研究は、SMA ダンパーの開発を目的とした研究の第 1 段階として実施した解析的検討を行ったものである。ただし、温度変動の影響を考慮して検討していく必要がある。また、コスト削減の観点から SMA の使用を減らして他の材料 (例えば鋼ケーブルやアルミ合金) と組み合わせた場合の検討も必要であろう。

謝辞：本研究は、平成 23 年度科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「自己修復機能を持つ超高性能ダンパーの開発研究」(研究代表者：宇佐美 勉；課題番号：23656292) の助成を受けて実施されたものである。

参考文献：1) Motahari, S.A. and Ghassemieh, M. (2007): Multilinear One-dimensional Shape Memory Material Model for Use in Structural Engineering Applications, Engineering Structures, Vol.29, pp.904-913. 2) Luo, X.Q., Ge, H.B. and Usami, T. (2010): Dynamic Numerical Simulation of Steel Frame-Typed Piers Installed with SMA Damping Devices Based on Multi-linear One Dimensional Constitutive Model, Int. J. of Advanced Steel Construction, Vol.6, No.2, pp.722-741. 3) Chen, Z.Y., Ge, H.B., Kasai, A. and Usami, T. (2007): Simplified Seismic Design Approach for Steel Portal Frame Piers with Hysteretic Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, Vol. 36, No. 4, pp. 541-562.

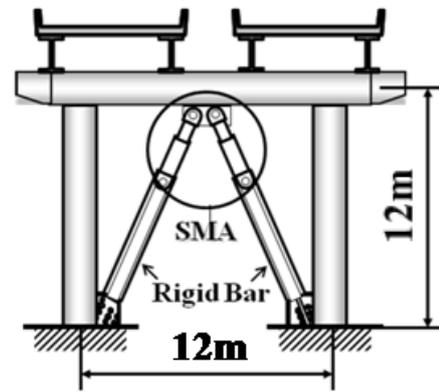


図-3 SMA ダンパーを有する鋼製ラーメン橋脚

表-2 解析結果

解析モデル	応答値				
	$\frac{\epsilon_{a,max}}{\epsilon_y}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_{y,f}}$	$\frac{\delta_{res}}{\delta_{y,f}}$	$\frac{V_{b,max}}{F_{y,f}}$	$\left. \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_y} \right)_{BRB} \quad \left. \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_y} \right)_{SMA}$
Bare	20.4	3.33	0.981	1.19	--
BF05	2.01	1.69	0.138	1.10	14.5
SF05	3.77	2.15	0.023	1.65	18.8
BF10	0.889	0.995	0.151	1.28	4.36
SF10	1.43	1.91	0.002	1.70	8.38
BF15	0.653	0.945	0.046	1.57	2.84
SF15	0.731	1.00	0.008	1.65	3.06