

SMAダンパーを導入した鋼製ラーメン橋脚の 制震効果に及ぼす温度変化の影響に関する検討

丸山 陸也¹・葛 漢彬²

¹学生会員 名城大学大学院 理工学部建設システム工学専攻
(〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口1-501, E-mail: rikuya.maruyama@gmail.com)

²正会員 博(工) 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口1-501, E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp)

1. 緒言

橋梁構造物の制震化に関する研究が盛んに行われ、施工例も近年増えてきている。制震構造とは、構造内にエネルギー吸収を意図した取替え可能な2次部材を組み込み、地震時における塑性変形による損傷を、その部材に集中させることを目的とする構造である。つまり、履歴減衰を付与するために、制震部材を塑性化させ、柱や梁を極力弾性域に留めることで主構造の損傷を可能な限り抑制する構造である。

制震構造はさらに地震後の補修が容易となる利点も兼ね備えている。

このようなシステムは現在建築分野で活発に実用化されている。高層ビルなどの建築物には、大地震発生時に主部材である柱や梁の損傷を抑制して構造系全体の機能を保持するために、構造内に2次部材としてダンパーやブレースなどの制震部材を導入し、それらに損傷を集中させる方法が多く採用されている。これら建築分野で使用される制震部材の実験・研究は現在までに数多く行われてきている。

一方、土木構造物に対しても近年、制震部材を導入した検討例が増えつつあり、その効果と有用性について数多く報告されてきている。これらは実験や解析によって橋梁などに制震部材を導入することによるエネルギー吸収性能の実証を行うものである。現在の実験および解析において導入される制震部材はBRB（座屈拘束ブレース）やSPD（せん断パネルダンパー）が一般的であるが、近年SMA（形状記憶合金）を使用したSMAダンパーの研究が進められてきている¹⁾⁴⁾。

本研究では、耐震設計へのSMAダンパーの材料特性の効果的な適用を、解析的な検証によって論証する。

超弾性特性はSMAの魅力的な特徴であり、大きなひずみが生じて除荷すると残留変位を大幅に低減できる。しかしながら、超弾性特性は温度によっ

て敏感に反応してしまう。通常、この特徴はSMAを制震装置に導入するにあたって大きな制約として多くの研究者に考えられてきた。そこで、耐震設計においてSMAダンパーの温度影響を調査するにあたり、2つの側面を考慮した。1つは環境温度の影響であり、SMAのマルテンサイト変態開始温度MSやマルテンサイト逆変態終了温度AFなどの相変態応力を変化させる。もう1つは载荷によって誘発された熱の影響であり、断熱過程における応答ひずみおよび応答応力を変化させる。

これらの温度変化がSMAダンパーを導入した鋼製ラーメン橋脚の制震効果に及ぼす影響を検証する。

2. SMAダンパーの構成

(1) SMAの基本的性質

SMAには、主に2つの特徴的な性質がある。まず1つ目は形状記憶効果である。これはある一定の温度以下で塑性変形を与えた後、温度を上昇させることで元の形に戻るというものである。もう1つは超弾性である。ある一定の温度以上で载荷すると、初期の弾性変形に続いて降伏が起こる。ところが除荷時、弾性変形分が回復するだけでなく、载荷時の降伏現象と逆の現象を示して、数%に及ぶ大きな変形が元に戻ってしまう。その変形の様子から擬弾性とも呼ばれる。図-1にこれらの形状変化における原子の移動を示す。

(2) SMAの構成則

SMAの構成則はマルチリニア型構成則を用いる⁵⁾。これはMotahariら⁶⁾によって開発されたモデルに基づいている。これを図-2に示す。図中のA点とB点はそれぞれオーステナイト相からマルテンサイト相へ変換する始点と終点である。D点とE点はそれぞれマルテンサイト相からオーステナイト相へ変換する始点と終点である。OAとDCはそれぞれ完全なオ

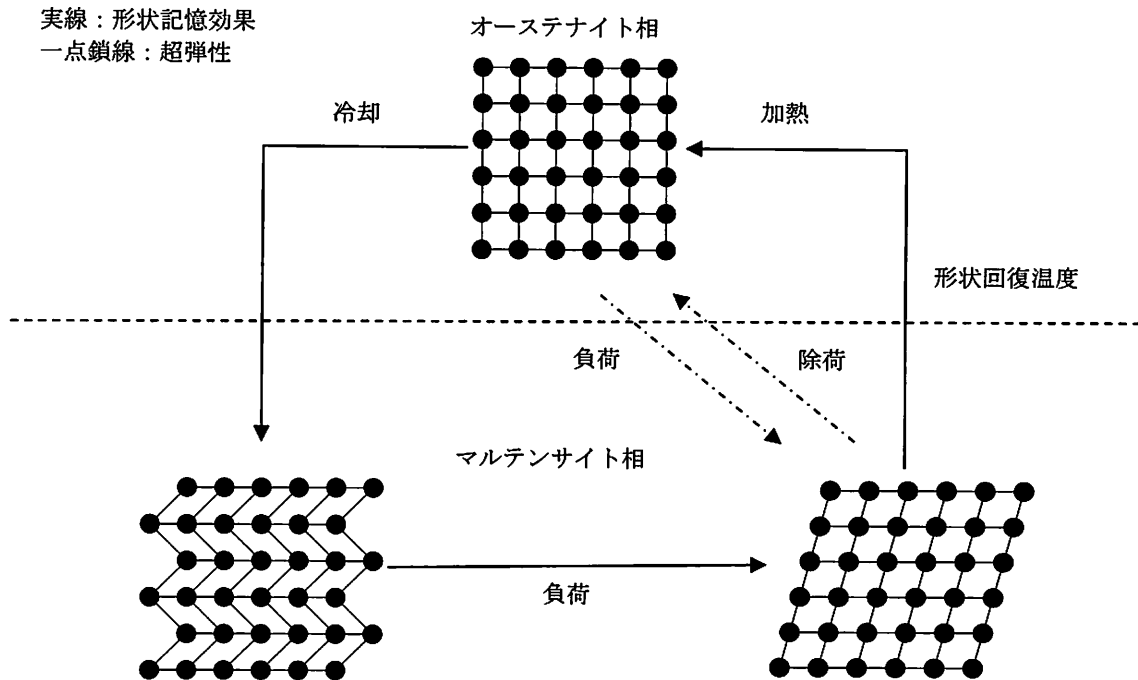


図-1 SMAの形状変化における原子の移動

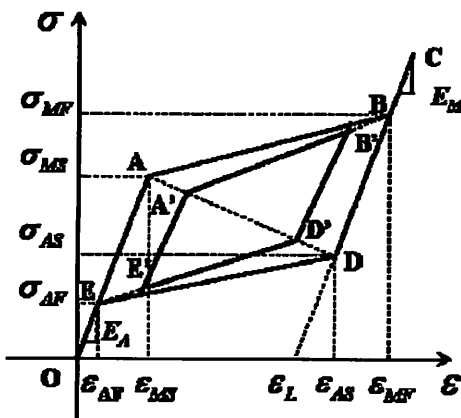


図-2 SMAのマルチリニア型構成則

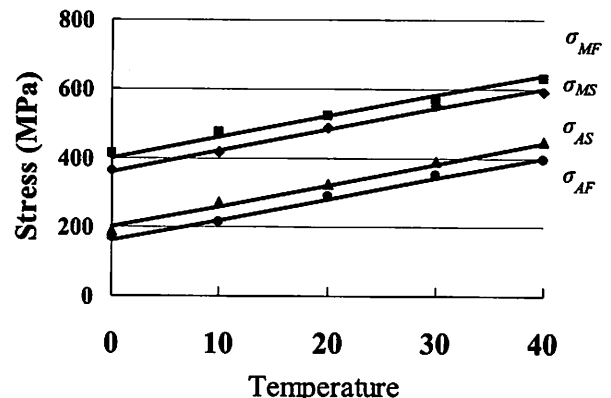


図-3 SMAの温度—応力関係²⁾

ーステナイト相とマルテンサイト相での载荷または除荷を表している。ABとDEは降伏棚のようなもので、それぞれオーステナイト相からマルテンサイト相への正相変換過程と、マルテンサイト相からオーステナイト相への逆相変換過程を表している。EAとEMはそれぞれオーステナイト相とマルテンサイト相の弾性係数である。ε_LはSMAの最大残留ひずみである。

(3) 温度による影響を受けた場合のSMAの特性

SMAの機械的特性は温度による影響を受ける。図-3に示されるようにSMAの相変態開始時と終了時の応力と環境温度は線形関係にある。図-3に示した4種類の応力は上から、図-2中の点A, B, D, Eを表している。この傾向は既往の研究で実験的に確かめられている⁷⁾。

一方、地震時のような大きな荷重がかかる場合、相変態時に発生する熱は素早く消散することが出来

ずSMAの温度が上がる。この効果はMotahariら⁶⁾が示唆したことにより、断熱過程まで単純化され、その温度上昇は以下の式で表される。

$$T_f = T_s e^{-\Delta s_0 / c} \quad (1)$$

ここで、 T_f は最終温度、 T_s は開始温度、 c は比熱、 Δs_0 はエントロピー増分を表している。

(4) SMAダンパーの概要

SMAダンパーは図-4に示されるようにPart A, Part Bの二つの部材に分かれている。Part A, Part B内のSMA部材をそれぞれSMA Wire A, SMA Wire Bとし、ダンパーの軸方向の挙動に反応する。また、SMA Wire A, SMA Wire Bは引張時のみ機能しSMA Wire Aが機能しているときSMA Wire Bは機能せず、その逆もまた同様である。つまりSMAダンパーが圧縮を受けるときSMA Wire Aが引張を受け機能し、SMAダンパーが引張を受けるときSMA Wire Bが引

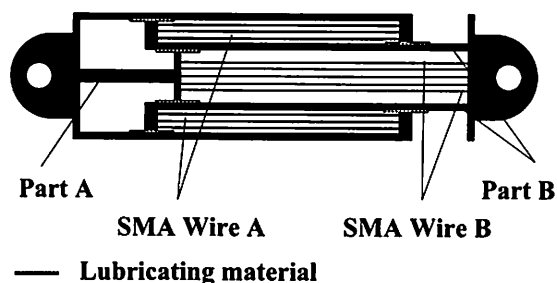


図-4 SMA ダンパーの概要図

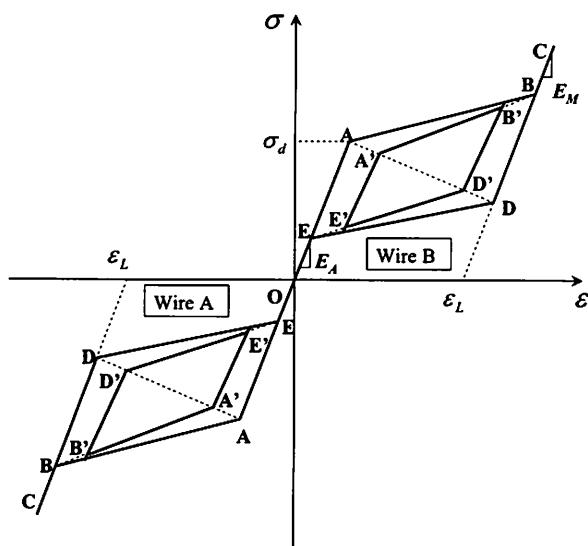
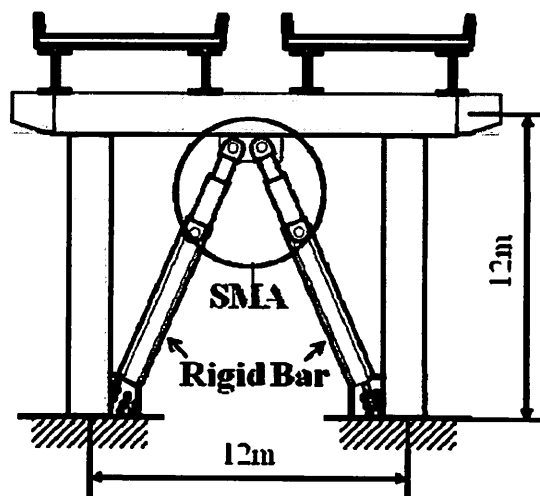
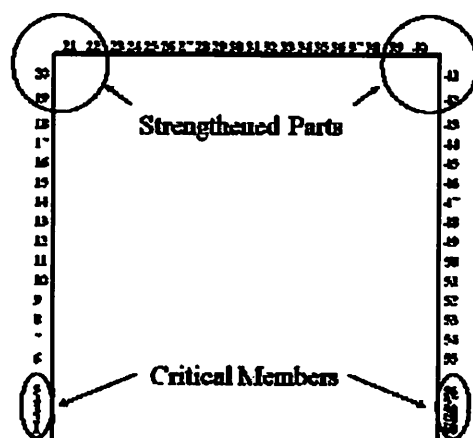


図-5 SMA ダンパーの構成則



(a) SMA ダンパーを導入した鋼製ラーメン橋脚



(b) フレームの分割

図-6 鋼製ラーメン橋脚の構造形式

張を受け機能するというものである。

また、これらのワイヤーの構成則を組み合わせたものを図-5に示す。内側のヒステリシスループは、オーステナイト相からマルテンサイト相への変換、またその逆相変換過程で除荷または載荷をした場合のループの動きを表す。

3. 解析概要

(1) 鋼製ラーメン橋脚の解析モデル

今回の解析では図-6(a)に示すような鋼製ラーメン橋脚を使用する。メインフレームにはSM490材を用い、高さ、幅は共に12mであり、断面は補剛箱形断面とする。また、汎用解析プログラムABAQUSを用いて図-6(b)に示すような要素分割とした⁸⁾。非制震フレームの降伏せん断力と頂部変位はPushover解析によって定めた。基本的な寸法と構造特性の詳細を表-1に示す。

入力する地震動は、日本道路協会が提案しているⅡ種地盤用のレベル2タイプⅡ地震動である、兵庫県南部地震において観測されたJR鷹取駅観測地震動のEW成分、NS成分、大阪ガス荻合供給所観測地震動の3波を用いる⁹⁾。また、SMAダンパーには前節で示したマルチリニア型構成則を、フレームには修正2曲面モデルを用いる¹⁰⁾。

(2) 制震デバイスの設計

ここで温度影響を調査するためにCuベースとNiベースの2種類のSMAを使用する。そして、等温過程の異なる環境温度での相変態応力は表-2に示される^{2),4)}。また、断熱過程を考慮した温度増加は式(1)によって得られ、相変態応力は表-2を補完することによって得られる。Motahariら⁶⁾の結果を参照して、比熱 c とエントロピー増分 Δs_0 はそれぞれ2.12と-0.35とする。

本研究で用いられる制震デバイスは2つのSMAダンパーと2つの剛なブレースから構成される。そしてSMAの機械的特性と基本的な寸法は図-7に示される。ここで l は制震デバイス全体の長さ、 EA_{SMA} 、 l_{SMA} はそれぞれSMAの剛性と長さを、 EA_b 、 l_b はそれぞれ鋼製ブレースの剛性と長さを表す。 F_{SMA} 、 δ_{SMA} はそれぞれ水平荷重、変位を表す。 α_L は鋼製ブレースとSMAダンパーの長さの比率を表す。

$$l = l_{SMA} + l_b \quad (2)$$

$$\alpha_L = \frac{l_b}{l_{SMA}} \quad (3)$$

既往の研究により、構造設計における支配的なパラメータとして以下に示すような3つの式が提案さ

表-1 鋼製ラーメン橋脚の基本的な寸法と構造特性

非制震モデル		柱部断面		梁部断面	
鋼種	SM490	フランジ幅 [mm]	2000	フランジ幅 [mm]	2000
高さ [m]	12	ウェブ幅 [mm]	2000	ウェブ幅 [mm]	1000
幅 [m]	12	板厚 [mm]	32	板厚 [mm]	32
質量 [ton]	2042	補剛材幅 [mm]		140	
δ_{top} [m]	0.078	補剛材板厚 [mm]		32	
V_y [kN]	6758				

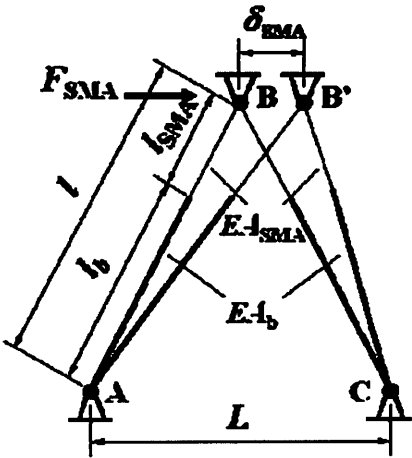


図-7 制震デバイスの概要図

表-2 等温過程の異なる環境温度での相変態応力

SMA	T [°C]	σ_{MS} [MPa]	σ_{MF} [MPa]	σ_{AS} [MPa]	σ_{AF} [MPa]
Cu-	40	349	439	322	212
	30	292	382	266	156
	20	235	325	210	100
	10	178	268	154	44
	0	121	211	98	-12
Ni-	40	640	600	440	400
	30	580	540	380	340
	20	520	480	320	280
	10	460	420	260	220
	0	400	360	200	160

表-3 SMA ダンパーの構造特性

SMA	α_F	α_K	A [mm ²]	L [mm]
Cu-	0.9	3	35000	3797
Ni-	0.9	3	17100	1859

$$\delta_{SMA} = \frac{\sigma_{SMA}}{E_{SMA}} \frac{l^2}{L} C_1 \quad (9)$$

ここで、 C_1 は以下のように定義する。

$$C_1 = \frac{2}{(1 + \alpha_L)} \quad (10)$$

さらに、式(8)、(9)を(7)に代入すると式(11)を得る。

$$F_{SMA} = \sigma_{SMA} A_{SMA} \frac{L}{l} \quad (11)$$

α_F と α_K が与えられることによって、 F_{SMA} と K_{SMA} は式(4)、(5)、(6)から得られる。SMAダンパーの断面積は式(11)と、式(1)、(8)、(10)から得られるSMAダンパーの長さによって求められる。

既往の研究において1層の鋼製ラーメン橋脚では、 $\alpha_F \geq 0.8$ 、 $\alpha_K \approx 3$ を用いることが提案されている¹²⁾ため、本研究では $\alpha_F=0.9$ 、 $\alpha_K=3$ を用いることとする。また、20℃の常温での σ_{MS} を σ_{SMA} と定義する。SMAダンパーの構造特性を表-3に示す。

4. 解析結果

例としてJRT-EW-Mを用いた前述のパラメータの時刻歴応答を図-8、9、10に示す。

鋼製ラーメン橋脚に導入したSMAダンパーの、地震時における温度影響を検証するために、以下の3つのパラメータを調査した。

- 1) 橋脚頂部の変位、 δ_{top}
- 2) 無次元化した橋脚基部の平均圧縮ひずみ、 $\varepsilon/\varepsilon_y$
- 3) 無次元化したSMAダンパーの応力-ひずみ関係

(1) 環境温度の影響

図-8は異なる温度でCuベースのSMAダンパーを導入した場合の橋脚頂部の時刻歴応答変位だが、温

れている¹¹⁾。

$$\alpha_F = \frac{F_{y,d}}{F_{y,f}} \quad (4)$$

$$\alpha_K = \frac{K_{y,d}}{K_{y,f}} \quad (5)$$

$$\alpha_\delta = \frac{\delta_{y,d}}{\delta_{y,f}} \quad (6)$$

ここで、 α_F 、 α_K 、 α_δ はそれぞれ制震デバイスとフレームの荷重の比率、剛性の比率、変位の比率を表しており、 $F_{y,d}$ 、 $K_{y,d}$ 、 $\delta_{y,d}$ はそれぞれ制震デバイスの降伏荷重、降伏剛性、降伏変位を、 $F_{y,f}$ 、 $K_{y,f}$ 、 $\delta_{y,f}$ はそれぞれフレームの降伏荷重、降伏剛性、降伏変位を表している。以下にSMAの荷重と剛性、変位の関係を表す。

$$F_{SMA} = K_{SMA} \delta_{SMA} \quad (7)$$

次に、図-7に示された制震デバイスの機械的特性と寸法から、式(4)、(5)、(6)を考慮すると K_{SMA} 、 δ_{SMA} は以下のように表せる。

$$K_{SMA} = A_{SMA} \cdot \frac{1}{C_1} \frac{E_{SMA} L^2}{l^3} \quad (8)$$

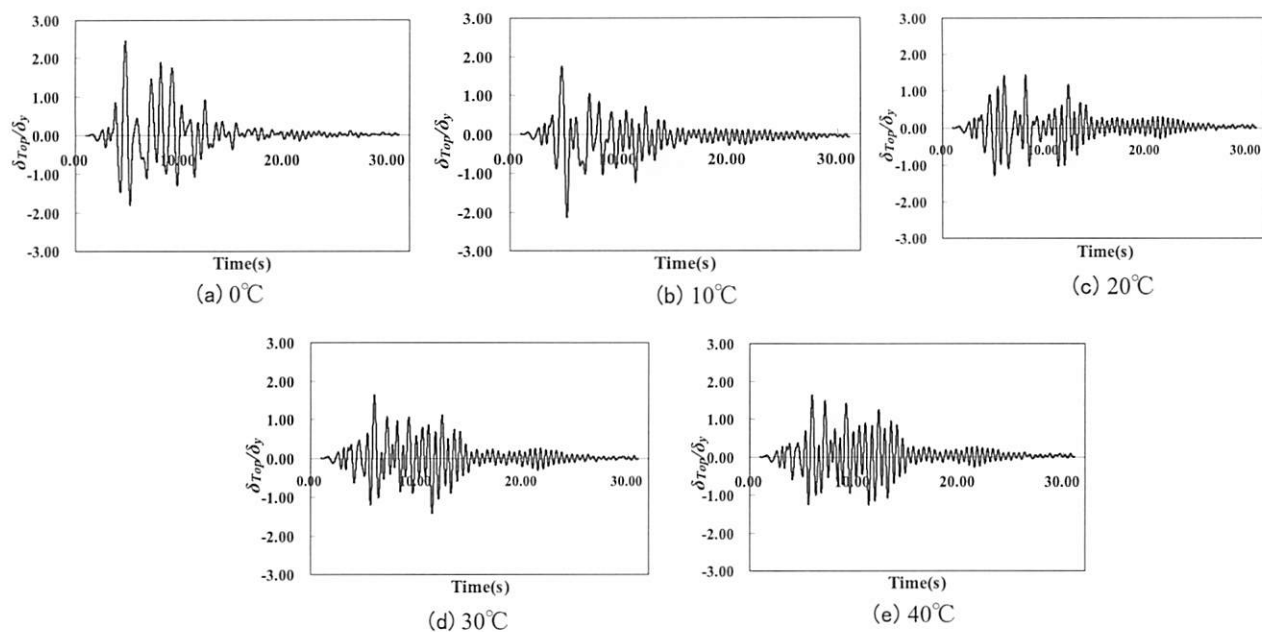


図-8 橋脚頂部での時刻歴応答変位

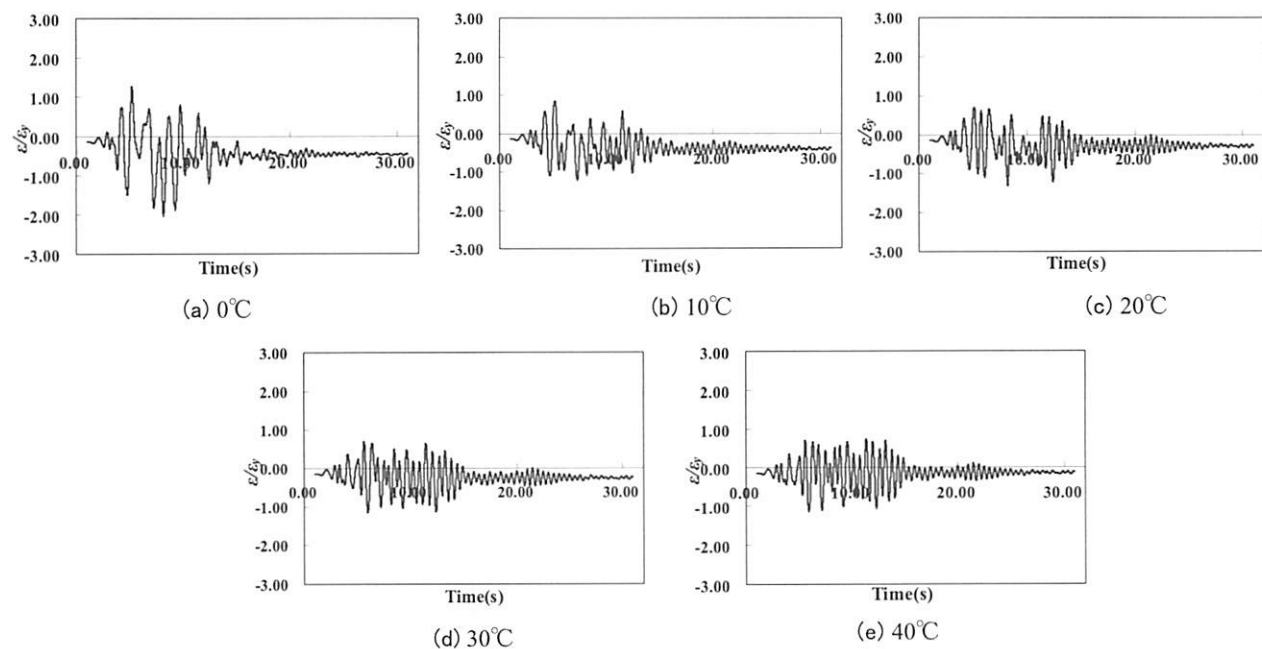


図-9 橋脚基部での時刻歴応答ひずみ

度を上昇させるに従って橋脚頂部の最大応答変位が小さくなっていることが分かる。0°Cでは最大応答変位が $2.5\delta_y$ 付近まで発生しているのに対し、40°Cでは $1.6\delta_y$ に留まっている。このような傾向は橋脚基部の最大応答ひずみ（図-9）でも同様に見られ、0°Cでは $2.0\varepsilon_y$ を若干超えているのに対し、40°Cでは $1.15\varepsilon_y$ 程度になった。しかしながら、どの温度においても橋脚頂部の残留変位はとても小さい値を示した（図-8）。

図-10では異なる温度でのSMAダンパーの応力-ひずみ関係を示しているが、ここで応力とひずみは無次元化のために相変態応力と常温で20°Cでの相変態時のひずみによって除される。結果から、最大応

答応力、降伏応力、最大応答ひずみが環境温度の違いによって変化していることが分かる。

さらに、式(8)、(11)に従うと、温度は剛性の比率 α_K に影響を及ぼさないと考えられる。しかし、温度が低くなるほど強度の比率 α_F は小さくなる。つまり、温度が低くなると相変態応力 σ_{MS} が小さくなり、ひずみとエネルギー消散が大きくなるということが分かる。

上記の結果より、SMAの相変態応力は温度変化に影響を受けるということが分かった。

(2) 载荷によって誘発された熱の影響

地震動のような载荷を行う場合、SMAの相変態

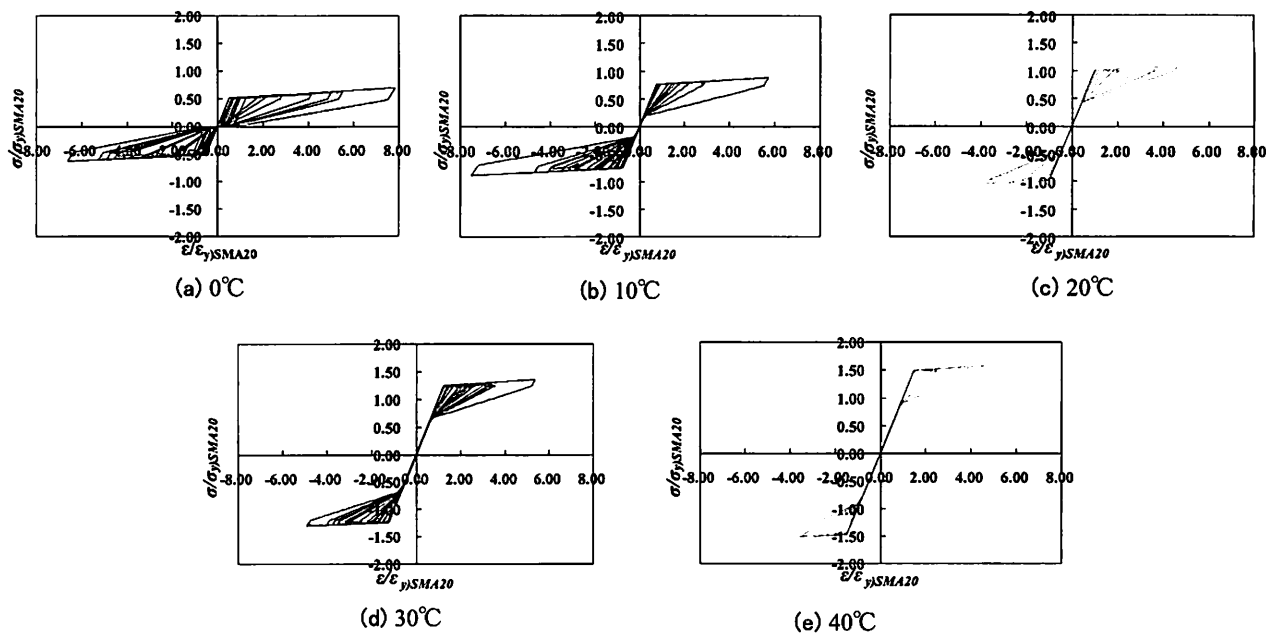


図-10 SMAの応力-ひずみ関係

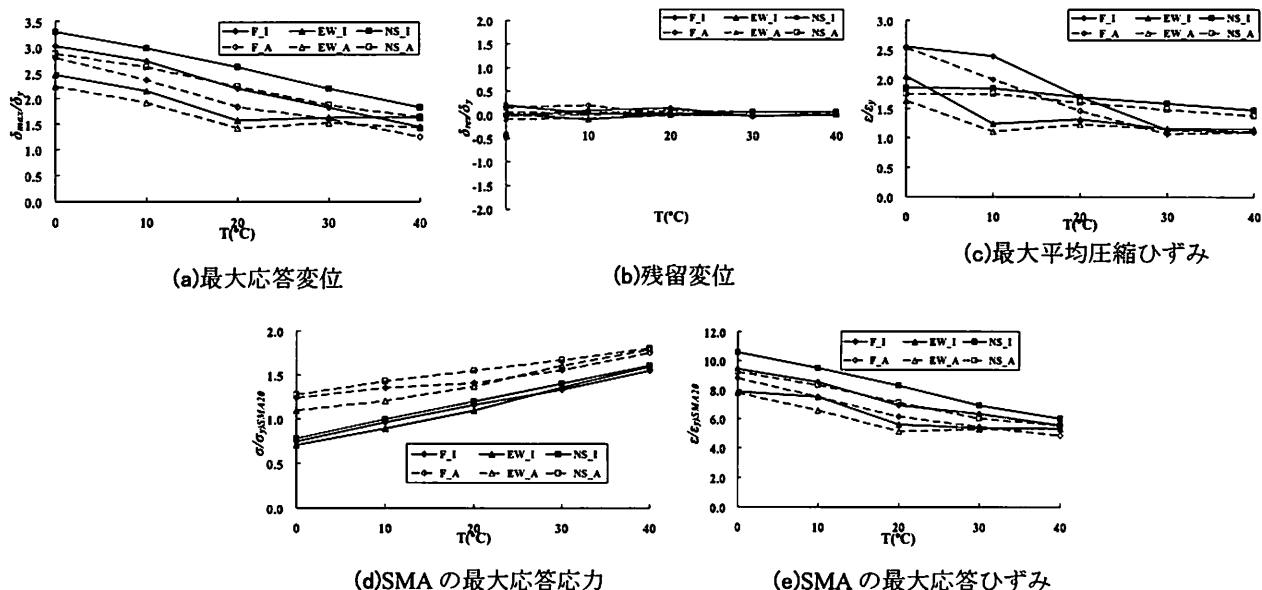


図-11 等温過程と断熱過程の地震応答比較

時に誘発される熱は短い時間で消散することはできない。よって温度は上昇することになり、式(1)で示した単純化された断熱過程で調査することができる。図-11にCuベースのSMAを用いたケースにJRT-EW-M, JRT-NS-M, FUKIAI-Mの3つの地震動を入力した場合の各パラメータを示す。ここで検証に用いるのは橋脚頂部の最大応答変位、橋脚頂部の残留変位、橋脚基部の平均圧縮ひずみ、SMAの応答応力、SMAの応答ひずみの5つである。図中ではEW, NS, FがそれぞれJRT-EW-M, JRT-NS-M, FUKIAI-Mの3つの地震動を、I, Aがそれぞれ等温過程と断熱過程を表す。

JRT-EW-Mを用いた場合の橋脚頂部の最大応答変位(図-11(a))は等温過程の場合、20°Cで $1.57\delta_y$ 、

断熱過程で $1.42\delta_y$ となった。図-11(b)をみると、等温過程、断熱過程共に残留変位はほとんど発生しなかった。そして、図-11(c)での20°Cの時の最大平均圧縮ひずみも等温過程で $1.32\delta_y$ 、断熱過程で $1.24\delta_y$ となり、等温過程の場合は断熱過程より大きな応答が現れる結果となった。また、図-11(d)を見るとSMAの最大応答応力が断熱過程のケースでは等温過程のものと比べて大きくなっていることがわかる。図-11(e)では最大応答ひずみは断熱過程のケースより等温過程のケースの方が大きくなることがみてとれる。

以上の結果から、SMAダンパーにおいて断熱過程でのひずみの減少と応力の上昇が見られるが、これは異なる環境温度で類似した傾向が見られる。よ

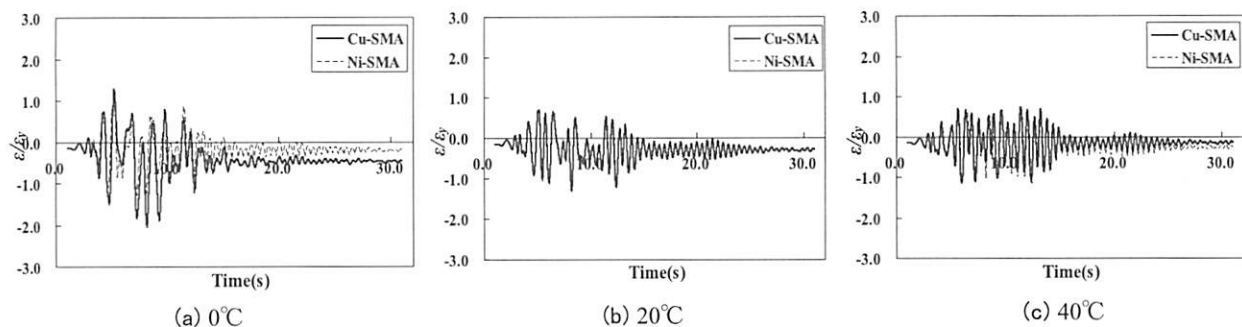


図-12 Cu と Ni の SMA の平均圧縮ひずみ比較

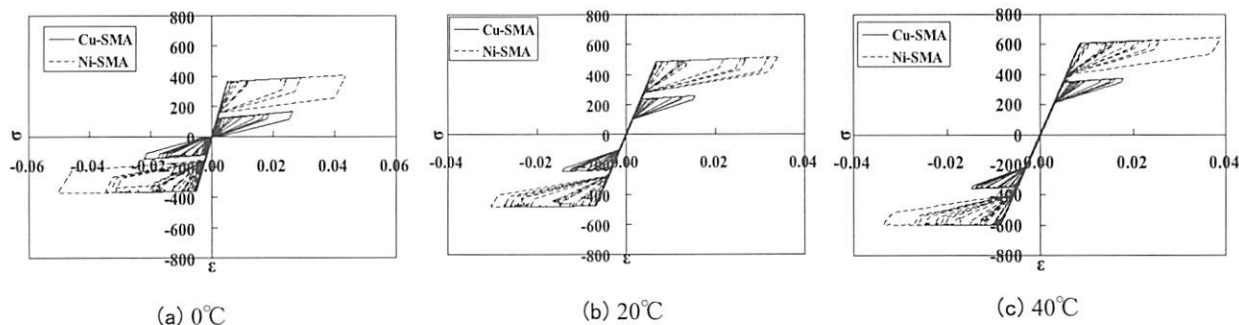


図-13 Cu と Ni の SMA の応力-ひずみ関係比較

って、温度上昇によって誘発される熱はSMAダンパーの機能に大きな影響を与えないと結論付けることができる。

(3) SMA材料の影響

前章ではCuベースのSMAがダンパーに用いられた例を紹介した。この合金材料の常温での相変態応力の基準は一般の炭素鋼SS400材の降伏応力と等しい235MPaである。ここでは次に、より広く用いられているNiベースのSMAを適用したSMAダンパーについて調べる。この合金材料の相変態応力の基準は500MPaである。これら2種類のSMAの地震応答の比較をJRT-EW-Mを用いて等温過程において行う。またSMAダンパーの構造特性は $\alpha_F=0.9$ 、 $\alpha_K=3$ と環境温度20°Cの時の設計応力 $\sigma_{SMA}(\sigma_{MS})$ によって与えられる。

橋脚基部の平均圧縮ひずみの時刻歴応答は図-12に示される。ここで実線はCuベースのSMA、点線はNiベースのSMAを表している。また、無次元化のためにそれぞれを降伏ひずみ ε_y で除している。図からわかるように0°Cの場合以外、2つの結果が概ね一致していることが分かる。この理由としてCuベースのSMAは0°Cの場合、逆相変態応力 σ_{AF} がマイナスになることが挙げられる。つまり、SMA Wireは引張にのみ機能するため σ_{AF} がマイナスになると超弾性特性を活かすことができにくくなる。

次に2つのSMAの応力-ひずみ関係を図-13に示す。こちらを見るとCuベースのSMAに比べNiベースのSMAがより大きなループを描いているのが分かる。しかし、表-3に示すようにNiベースのSMA

の方が断面積、長さともに小さくなっている。これらのことから同じ強度比、同じ剛性比でも、NiベースのSMAダンパーの方が応答変位、応答ひずみ等を低減させる効果は大きいといえる。

5. 結言

SMAの制震効果に及ぼす温度変化の影響を、環境温度と载荷によって誘発される熱の2つの側面から調査した。また、制震デバイスとしてCuベースとNiベースの2種類の軸方向型SMAダンパーを用い、それらの挙動を解析的に検証した。そして、異なる温度、異なる地震動、異なるSMAを用いて比較を行った。以上によって得られた知見を以下にまとめる。

1. SMAダンパーの制震効果は環境温度に大きな影響を受ける。それらを詳細に考慮するために更なる検討が必要である。
2. 载荷によって誘発される熱の影響でSMAの機械的性質が変化するが、制震効果に対する影響はほとんど出なかった。したがって、SMAを用いた解析的シミュレーションは断熱過程の代わりに等温過程で行うことができると考えられる。
3. 2つのSMAを適用したSMAダンパーの部材挙動の比較を通して、制震効果に対し、相変態応力が大きな影響を与えることが分かった。

参考文献

- 1) Wilde, K., Gardoni, P. and Fujino, Y. (2000): Base Isolation

System with Shape Memory Alloy Device for Elevated Highway Bridges, *Engineering Structures*, Vol.22 , pp.222–229.

- 2) Dolce, M. and Cardone, D. (2001): Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys for Seismic Applications 2. Austenite NiTi Wires Subjected to Tension, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.43 , No.11 , pp.2657-2677.
- 3) Song, G., Ma, N., Li, H.N. (2006): Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures, *Engineering Structures*, Vol.28 , pp.1266-1274.
- 4) Zhang, Y.F., Camilleri, J.A. and Zhu, S.Y. (2008): Mechanical Properties of Superelastic Cu-Al-Be Wires at Cold Temperature for the Seismic Protection of Bridges. *Smart Mater. Struct*, Vol.17 , pp.1-9.
- 5) 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 Multilinear One Dimensional Constitutive Model, *Advanced Steel Construction*, Vol.6 , No.2 , pp.722-741.
- 6) 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.
- 7) Wang X.M., Yue, Z.F., Wang, Y.F., Zhi, Y.H. and Lv Z.Z. (2009): Superelastic Property and Application of NiTi SMAs. Beijing:Science Press, China (in Chinese).
- 8) Chen, Z.Y., Ge, H.B. and Usami, T. (2007): Study on Seismic Performance Upgrading for Steel Bridge Structures by Introducing Energy-Dissipation Members. *Journal of Structural Engineering*, Vol.53A , pp.540-549.
- 9) 日本道路協会 (2012) : 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善.
- 10) Shen, C., Mamaghani, I.H.P., Mizuno, E. and Usami, T. (1995): Cyclic Behavior of Structural Steels. II: Theory, *J. of Eng. Mech.*, ASCE, Vol.121 , No.11 , pp.1165-1172.
- 11) Ye, L.P., and Ouyang, Y.F. (2000): Dual Seismic Structure System and its Parametric Analysis, *Engineering Mechanics*, Vol.17 , No.2 , pp.23- 29.
- 12) Luo, X.Q., Ge, H.B. and Usami, T. (2009): Parametric Study on Damage Control Design of SMA Dampers in Frame-typed Steel Piers, *Front. Archit. Civ. Eng. in China*, Vol.3 , No.4 , pp.384-394.