

論文 コンクリート部材知能化のための形状記憶合金センサ・アクチュエータの特性

柿沢忠弘^{*1}、大野定俊^{*2}、米澤敏男^{*2}

要旨 :コンクリート部材の変形を検知し、かつ適正な状態に自動的に制御する知能化により新しい部材や構造物を造ることが可能と考えられる。知能化のためには高機能なセンサとアクチュエータが必要であり、従来のセンサ、アクチュエータにはない特性を有する形状記憶合金について、その性能を実験的に検証した。また、形状記憶合金センサ、アクチュエータにより知能化された部材の曲げ試験を行い、変形制御系部材の可能性について検討した。

キーワード :センサ、アクチュエータ、形状記憶合金、知能材料、変形

1. はじめに

部材変形を自動的に制御する知能部材としては、例えば軽量コンクリートなど剛性の低い材料を用いた部材で、積載荷重により生じる過大なクリープ変形を必要に応じて修復することなどが考えられる。変形を制御する手法としては、外ケーブルを緊張するなどして部材に上向きモーメントを作用させることが効果的である。その場合、予め部材に設置された緊張機構を用いてケーブルを自動的に緊張し、変形を制御できれば、部材の機能を容易に回復することができる。同時に、安全性向上や経済設計を実現することも可能である。

部材変形の検出と制御に必要なセンサとアクチュエータに要求される性能としては、センサはひずみの測定範囲が広いことや高感度であることなど、またアクチュエータとしては小型で部材内に設置でき、センサからの情報に基づいて簡易なエネルギー供給源により機能を発現できることが必要である。このような性能を有するデバイスとして形状記憶合金の応用が考えられる。

本研究では「変形量を検知し、その値が規定値に達した時点で変形を自動的に適正值にコントロールする」変形制御系コンクリート部材の可能性を検討することを目的とし、それを構成する形状記憶合金センサ・アクチュエータの特性を実験的に検討した。同時に形状記憶合金センサ・アクチュエータを設置した部材の曲

げ試験を行い、アクチュエータを適用する際の留意点について考察した。

2. 形状記憶合金をセンサ・アクチュエータとして応用するための検討課題

形状記憶合金(Shape Memory Alloys;以下SMA、Ni-Ti合金等)は外力が作用すると大きく変形し、その後に加熱すると、ある温度以上で結晶相変態が起こり、元の形状に回復する現象を有する。これらの現象が工学的に利用価値があるのは、外力による変形に伴って電気抵抗が大きく変化する点と、加熱によりある特定量の変形が強い駆動力で自発的に起きる(加熱回復現象)点である。

SMAをセンサとして応用するためには、SMAをワイヤ状に加工して設置し、その電気抵抗変化を測定することによりひずみを推定する手法が最も現実的であると考えられる。SMAは外力によって変形する際、結晶相がオーステナイト相(以下A相)からマルテンサイト相(以下M相)へと変態する。この時、SMAワイヤの断面積の変化によって電気抵抗が変化することに加え、応力により生成するM相の体積分率に応じた電気抵抗変化が加算されるため、電気抵抗の変化は一般の金属材料と比較すると特異なものになると予想される。従ってSMAワイヤのひずみと電気抵抗の関係を把握し、ひずみ測定範囲、感度、線形性を定量的に検討することが必要である。

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 研究開発部

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 研究開発部

材料第1グループ、工修(正会員)

材料第1グループ、主任研究員、Ph.D.(正会員)

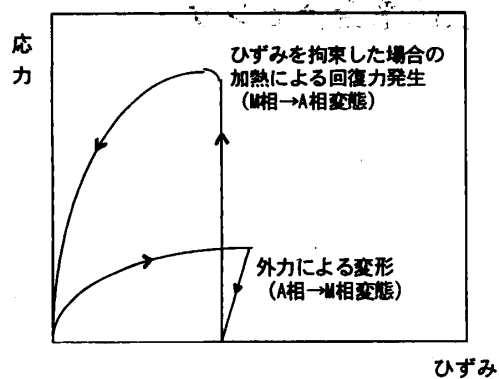


図-1 SMAの変形時および加熱回復時の
応力-ひずみ曲線

一方、SMAをアクチュエータとして応用する場合、形状としてはワイヤや板バネが考えられるが、いずれも図-1に示す加熱回復現象（加熱によるM相からA相への変態）による回復力の発現が期待できる。利用形態としてはケーブル全体をSMAとして端部定着する方法、またSMA板バネを緊張装置として端部定着する方法が考えられる。しかし加熱回復力を発現させるためには、ケーブルでは全体を加熱する必要があり効率が悪い。それに対し板バネの加熱は比較的容易であり、利用形態としては望ましいといえる。ただし、これまでSMAは直径数mmのワイヤとして製造されることがほとんどであり、部材制御に適用する形状寸法の板バネは特殊である。そこで、アクチュエータとして寸法が数十mm程度の板バネを用いる場合は、曲げ系として使用する時の機械的特性や加熱回復特性を適切に把握することが必要である。なお外力が作用している状態で常温に戻ると板バネの加熱回復特性は消失するので、形状回復温度までの板バネの変形特性、ならびに部材変形特性が本論文での主な検討課題である。

3. 実験概要

3.1 センサ試験

筆者らは既にSMAの電気抵抗変化とひずみの関係や温度変化などの影響について報告したが²⁾、ここではSMAアクチュエータ(板バネ)と同一ロットで製

表-1 SMAの材料特性

擬降伏応力	150 ~ 180N/mm ²	
引張強度	800 ~ 1500N/mm ²	
弾性係数	M相	25000N/mm ²
	A相	60000N/mm ²
電気抵抗	50 ~ 100 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	

造したSMAワイヤについて性能を再評価した。実験に用いたSMAはNi-Ti合金(Ni:Ti=50:50atomic%)であり、その材料特性を表-1に示す。引張応力下での基本特性を把握する目的で、SMAワイヤ(φ0.1mm、試験長200~300mm)を単調引張载荷し、応力、ひずみ、電気抵抗を測定した。試験はインストロン型試験機を用いて行ない、ワイヤの両端に約70mAの一定電流を通电して1.0mm/minのクロスヘッド速度で試験体を引張ったときの電圧変化を電気抵抗変化として測定した。

3.2 アクチュエータ試験

アクチュエータとしての板バネは、図-2に示すように部材端部に設置し、曲げ部材として使用することが考えられる。アクチュエータとしての性能を把握する目的で、板バネの曲げ試験と加熱変形試験を行った。使用した板バネの形状寸法は図-2に示す通りであるが、部材実験でも使用するためにPC鋼棒挿入用の孔を設けた。この板バネ(Ni-Ti合金)の材料特性はセンサとして用いたSMAワイヤと同じ(表-1)であり、変形後に温度が50℃以上になると形状回復するように材料設計されている。実験は、まず板バネ1枚の曲げ試験(図-3)を行い、荷重-変形特性を確認した。次に板バネ下縁のひずみが6%の段階で载荷を止めて変

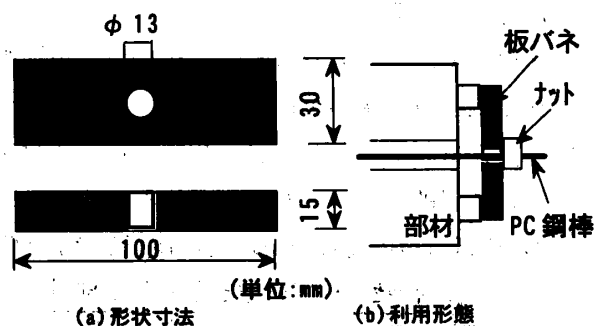
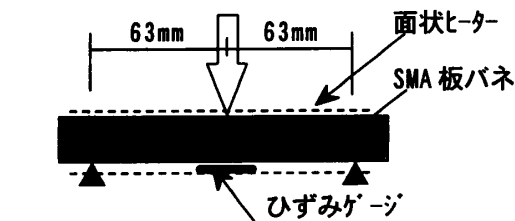
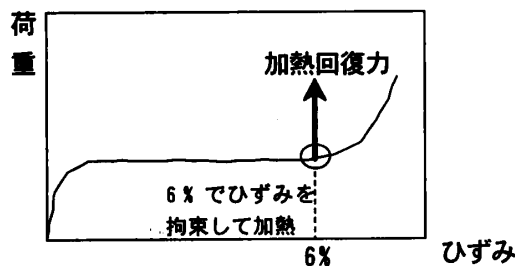


図-2 SMA板バネの形状寸法と利用形態



(a) 曲げ試験



(b) 加熱回復試験

図-3 アクチュエータ試験方法

形を拘束し、面状ヒーターによって上下面を50℃以上に加熱した時の回復力の発現特性を確認した。この時、板バネの下縁ひずみの変化も測定した。さらに板バネの断面剛性を上げて回復力を増大させるために、板バネを2枚重ねた状態で同様の曲げ試験を行い、荷重-変形特性と加熱回復力を測定した。板バネの変形はクロスヘッドの変位量から読んだ。

3.3 部材曲げ試験

部材試験では大変形をモデル化するために、図-4に示すように部材中央部を蝶番により開口させた鉄骨部材を使用した。断面中央にPC鋼棒を通し、端部に緊張用のSMA板バネ（2枚）を定着した。PC鋼棒には部材形状保持のために予め約353N/mm²の引張応力を導入したが、これにより板バネ下縁に生じる応力はM相誘起応力以下になるようにした。試験概要を図-5に示す。試験体中央に重りを載せて変形を生じさせると、PC鋼棒に引張力が発生し、板バネを曲げ変形させる。その時の部材中央部の変形量を開口部の開口変位としてSMAワイヤ（φ0.1mm、長さ120mm）の電気抵抗によりモニターし、同時に変位計を用いて測定した。また板バネ下縁ひずみとPC鋼棒のひずみを測定した。

変形量がスパン長の1/70に達した時点で面状ヒ-

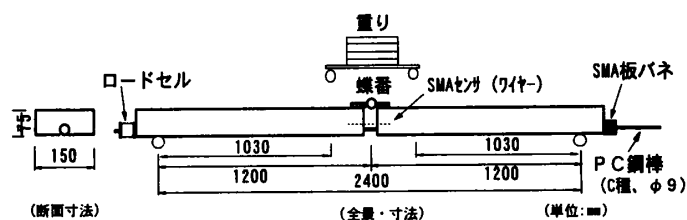


図-4 部材曲げ試験体寸法

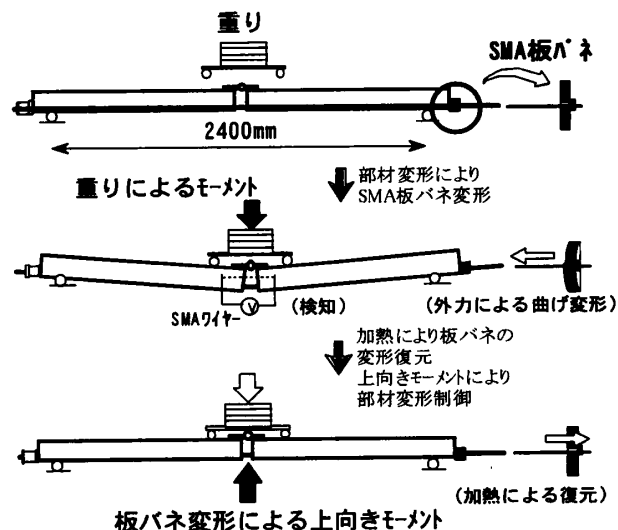


図-5 部材曲げ試験概要

ターに自動的に通電し、板バネを加熱した。板バネの加熱変形回復によってPC鋼棒は緊張され、部材には上向きのモーメントが発生し、その結果、部材変形が修復される。この時の部材中央部の変形量と、変形回復に要する時間を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 センサ特性

SMAワイヤを単調引張载荷した場合の応力-ひずみ曲線、ひずみに対する電気抵抗変化を図-6、図-7に示す。SMAワイヤは母相がA相であり、0.6%以下のひずみ領域は、A相の弾性領域である。ひずみが0.6~5%では応力が一定(147N/mm²)でひずみのみが増加する。この領域は擬降伏域と呼ばれ、結晶相がA相からM相に変態している領域である。ひずみが5%を越えると応力も増加するが、ここはM相の加工硬化域に相当する。

ひずみが約8%までは電気抵抗はひずみに比例して変化しており、電気抵抗を測定パラメータとする場合、非常に良好な線形性を有していることがわ

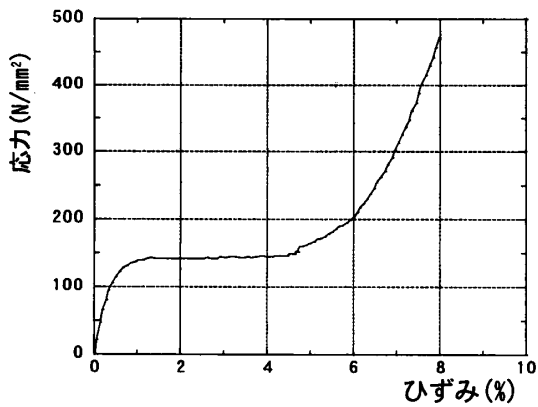


図-6 SMAワイヤの応力-ひずみ曲線

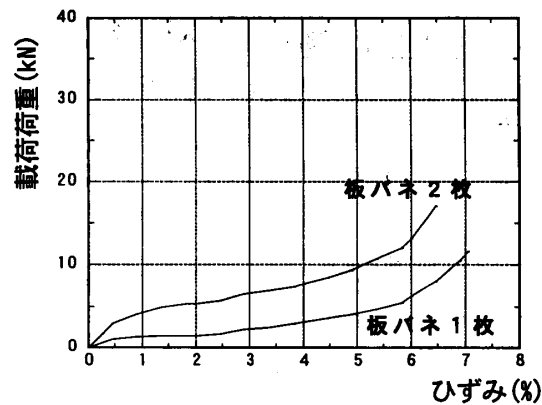


図-8 SMA 板バネの荷重-ひずみ曲線

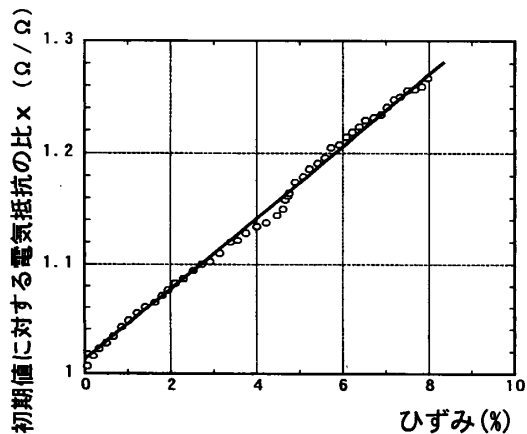


図-7 電気抵抗の変化

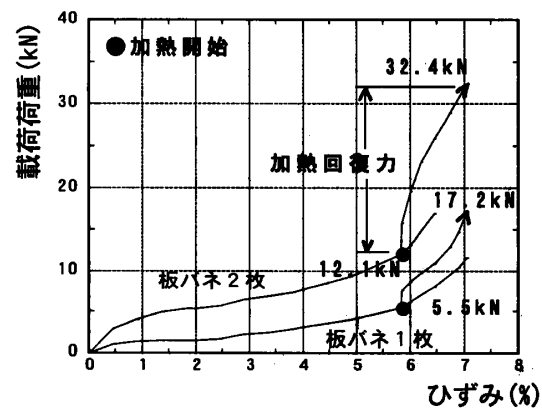


図-9 SMA 板バネの加熱回復力

かる。一般の金属材料では、塑性変形の影響で電気抵抗はひずみに対して γ に γ に変化する。これに加えてSMAの場合は、A相よりも電気抵抗の小さいM相が擬降伏域で生成されるため γ に γ な変化が緩和され、電気抵抗とひずみの間に比例関係が成立していると考えられる。

図-7からSMAワイヤのゲージファクターを計算すると約3.42となり、通常使用されている電気抵抗式ひずみゲージのゲージファクター(2.0)よりも大きな値を示す。このことは約8%の広いひずみ領域に対して、SMAワイヤはひずみゲージよりも高い感度でひずみを推定できることを意味している。実験結果から、SMAワイヤのひずみ ε (%)は、初期値に対する電気抵抗の比 x (Ω/Ω_0)を用いて以下の式で推定可能である。

$$\varepsilon (\%) = 32.3x - 32.9 \quad (1)$$

4.2 アクチュエータ特性

(1) 荷重-変形特性

SMA板バネの曲げ変形時の荷重-変形曲線を図-8に示す。板バネ1枚、2枚の場合でも下縁ひ

ずみが約0.5%を越えると、荷重がほぼ一定でひずみが増加する擬降伏領域(M相変態域)が現れている。ひずみが5%程度を越えると荷重も増加し始めて塑性変形を起こしている。この傾向は図-6に示すSMAワイヤ($\phi 0.1\text{mm}$)の特性とほぼ同じであることから、SMAを板バネとして曲げ系で使用しても、材料特性に応じた変形性状を示すと考えられる。ただし板バネ内部ではひずみ勾配が生じているため、板バネ縁部と内部ではM相の体積分率に差が生じていると予想される。ワイヤと比較して擬降伏域が明瞭に現れない原因として、そのような理由が考えられる。

(2) 加熱回復力

SMA板バネの加熱変形特性を図-9に示す。下縁ひずみが6%の時点で変形を拘束して加熱すると加熱回復力が発生する。加熱により回復力が発生する理由は、A相とM相の剛性が異なるためと考えられる。すなわち板バネの結晶相は、A相(常温)からM相(擬降伏域)へ、さらに加熱後はA相へと変態する。A相の剛性(60000N/mm^2)はM相の剛

性 (25000N/mm^2) よりも大きいので、加熱により結晶相がM相からA相に変態すると板バネの剛性が上がり、変形が拘束されているとこの剛性の変化分が回復力となって現れると推察される。

板バネ1枚の場合の回復力は約11.7kN (17.2-5.5kN)、また2枚重ねて用いた場合は約20.3kN (32.4-12.1kN) であり、板バネ2枚の回復力は1枚の場合の約2倍である。これは板バネを2枚重ねた場合は断面剛性が1枚の場合の2倍となるためである。従って回復力の大きさは断面剛性にほぼ比例すると考えられるので、より大きな回復力を得るためには板バネの断面積を増やして断面剛性を上げる必要がある。また板バネの断面積が同じ場合は数枚を重ねるよりも、一体とした方が効果的である。ただし、この板バネではひずみ5~6%が擬降伏が終了する点であり、これ以上のひずみを許容すると生成したM相が塑性変形して十分な回復特性が得られなくなると予想される。板バネの設計に当たっては、必要な回復力と板バネのひずみを考慮して寸法を決定することが重要である。なお加熱回復力発現時にひずみが増加しているのは板バネの熱膨張等が原因と思われる。

4.3 部材変形特性

(1) 部材変形特性と変形制御機能

実験状況を写真-1に、また実験結果の一例を図-10に示す。部材中央部の変形は荷重(重り)にほぼ比例して増加しており、80kgf(重りによるモーメント $4800\text{kgf}\cdot\text{cm}$)で50mmの変形が生じた。载荷により板バネ下縁のひずみも増大し、80kgfの重りを载荷した時点で板バネの下縁ひずみは約6%に達した。これはSMAの擬降伏域の終了点に近い。式(1)を用いてSMAセンサの電気抵抗により部材の曲げ変形を精度良くモニターすることが可能であった。変形が35mm(スパンに対する変形角1/70)に達した時点で板バネの加熱が自動的に開始したが、この時点で板バネひずみ(4.5%)は擬降伏域にある。加熱により板バネが変形回復してPC鋼棒が緊張され、その結果部材には上向きモーメント($1400\text{kgf}\cdot\text{cm}$)が発生し、部材変形量は最終的に15mm(変形角1/160)にまで回復した。板バネの加熱回復に伴いPC

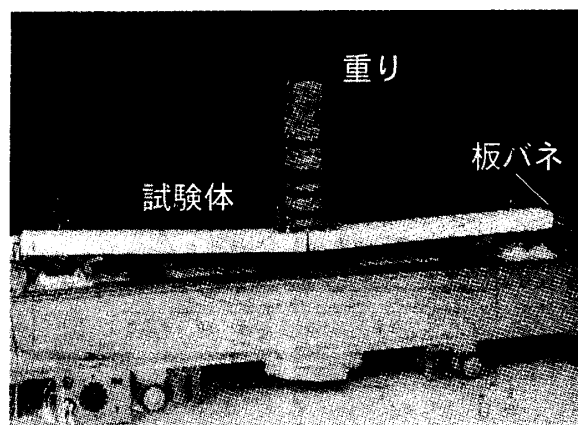
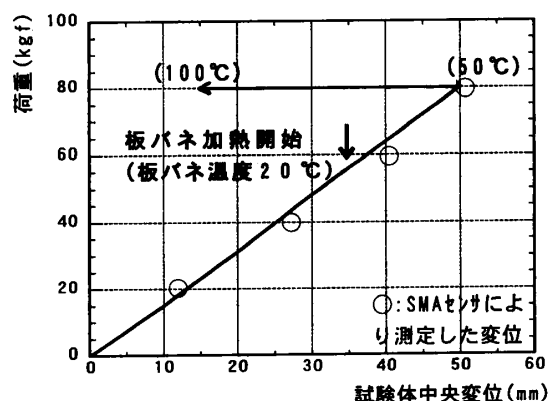
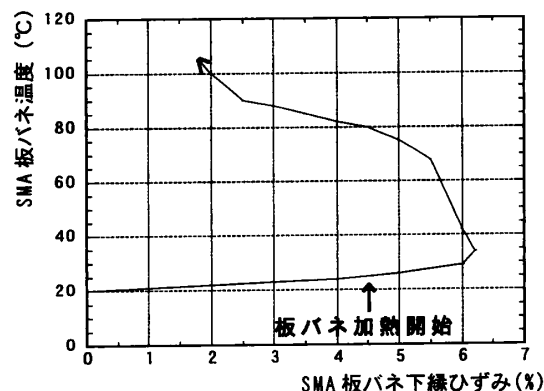


写真-1 部材試験状況



(a) 荷重-試験体中央変位関係



(b) 板バネ温度-ひずみ関係

図-10 部材変形特性と板バネの変形

鋼棒の引張軸力が増加したが、増分から回復力を計算すると3.0kNとなる。この時、板バネのひずみは2%程度にまで変化した。面状ヒータの加熱により部材変形が15mmに回復するまでに約20分を要したが、これは板バネ全体が形状回復温度(50℃)に達するまで時間を要したためである。

以上のことから、必要な回復力を得るための板バネ寸法は小型で、部材端部に組み込むこと

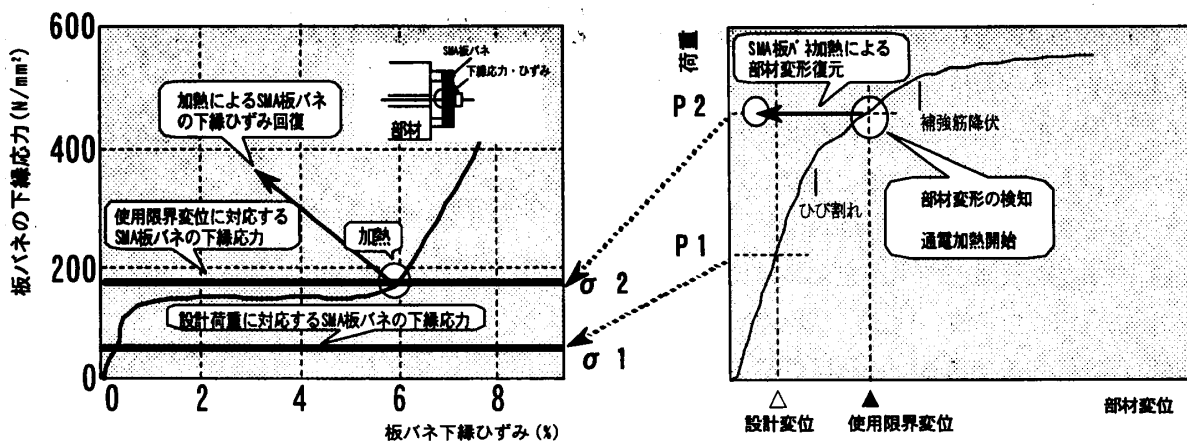


図-11 SMA板バネを適用する場合の考え方

ができ、モデル化した部材の変形制御に十分な性能を有していると考えられる。

(2) SMA板バネを適用する場合の留意点

SMAのM相変態応力は $150 \sim 180 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ であり、SMAの応力がこの値を超えるとSMAは擬降伏変形を起こす。加熱変形によって板バネの回復力を発現させるためには、加熱時にSMAがM相変態を起こしていることが条件である。回復力の大きさはSMA中のM相の体積分率、すなわち擬降伏域でのSMAのひずみの大きさに応じて変化すると考えられるので⁹⁾、必要な回復力を得るためにはSMA板バネの下縁ひずみは6%程度で加熱回復できるよう、板バネ寸法と部材変形の規定値を設定する必要がある。この考え方を模式的に表したのが図-11である。コンクリート部材使用時の設計荷重レベル(P1)ではSMA板バネの下縁引張応力が σ_1 (M相変態応力以下)になるように設計し、また部材の使用限界変位の荷重(P2)に相当するSMA板バネの下縁応力を σ_2 (M相変態応力以上)になるように設計しておけば、部材変位が規定値を超えた段階で板バネの加熱が始まり、部材変形が制御されることになる。

5. 結論

変形制御系コンクリート部材の可能性を検討した結果、本実験の範囲内で得られた知見は以下のようにまとめられる。

(1) SMA(形状記憶合金)の電気抵抗はひずみに比例して変化する。電気抵抗を測定することによ

り、広範囲のひずみを感度良く検出するセンサとして利用することが可能である。

(2) SMA板バネは部材の変形を制御するアクチュエータとして応用可能である。板バネ断面積を大きくすると加熱回復力は大きくなるが、板バネの設計に当たっては、必要な回復力と板バネのひずみを考慮して寸法を決定することが重要である。

(3) SMAセンサにより部材の曲げ変形量が検知可能である。またセンサの情報に基づいて板バネを自動的に加熱し、アクチュエータとしての機能を発現させることが可能である。

(4) 板バネの加熱回復力により、部材の曲げ変形を制御可能である。ただし板バネの寸法や熱容量の関係から、変形回復には時間を要する。

(5) コンクリート部材の変形制御にSMA板バネを適用する場合は、部材使用時の板バネ下縁応力をM相(M相変態以下)変態応力以下となるようにし、使用限界変形時にM相変態応力以上となるように板バネを適用する必要がある。

参考文献

- 1) 特許、特願平08-247954
- 2) T.Kakizawa, et al.: UTILIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOY AS A SENSING MATERIAL FOR SMART STRUCTURE, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, pp. 67-74, 1996
- 3) 柿沢忠弘ほか: コンクリート部材の知能化のための機能性材料の基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻、第1号、pp. 771-776, 1994