

[1127] 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

柿沢忠弘^{*1} 大野定俊^{*2}

1. はじめに

近年インテリジェント・マテリアルと呼ばれる新しい概念¹⁾が提唱されている。これは「センサー機能、プロセッサ機能、アクチュエーター機能を有する材料」であり、これらの基本機能の連携により自己診断、自己修復、環境応答などのインテリジェント機能を発現する「知的」材料と定義されている。土木・建築分野に将来応用が予想されるインテリジェント・マテリアルには、センサーとして光ファイバーや形状記憶合金、圧電材料、またアクチュエーターとしては形状記憶合金、圧電材料、電気粘性流体などが考えられている。

インテリジェント・マテリアルをコンクリート構造物に応用し「知能化」する一つの目的は、構造物の崩壊を誘起する変状の早期発見とタイムリーな修復であり、複雑な電気・機械システムによらず材料によって検知と修復を行う点に大きな特徴がある。このうち変状検知に関する研究としては、炭素繊維とガラス繊維で強化した複合材料の電気抵抗を計測することでコンクリート板のひびわれをモニタリングした例²⁾や、光ファイバーによりコンクリート梁の曲げひびわれの発生をモニタリングした例³⁾などがある。一方、自己修復に関しては小型の複合材料試験体を用いた検証実験に留まっており⁴⁾、材料のアクチュエーターとしての駆動効率、応答速度、応答精度など実構造部材として用いる際に解決しなければならない課題は多い。

いずれにしても、インテリジェント・マテリアルを用いた実構造部材の設計を可能にするデータの蓄積は極めて不十分であるので、基礎データの収集に努力を傾注する必要がある。本論文では形状記憶合金 (Shape Memory Alloy; SMA) をとり上げ、その基本特性を実験的に検討し、かつSMAをコンクリート部材に用いる場合の、設計上の問題点について考察したのでその結果について報告する。

2. 形状記憶合金

2.1 形状記憶合金の基礎特性⁵⁾

形状記憶効果 (Shape Memory Effect; SME) とは、ある形状に拘束したSMAをある臨界温度 (以下、結晶変態温度) 以上で加熱して形状記憶処理を行ったのち、急冷して低温安定相 (マルテンサイト相、以下M相) を形成させ、これにある程度の変形を加えた後に再加熱するとき、その変態温度を越えると結晶逆変態が起こり高温安定相 (オーステナイト相、以下A相) となって元の形状に回復する現象をいう。また、応力によっても相変態 (応力誘起相変態) を起こす。

工学的応用を考えた場合、TiNi合金などのSMEに伴って注目すべき点は、M相での変形応力よりも、加熱時の形状回復時に発生する回復応力が数倍以上大きく現れることである。図-1はc点で変形を拘束して加熱したときの回復応力発生の様式図であるが、加熱回復時の弾性係数も数倍上昇し、剛性を著しく向上することがわかる。この特異な現象をコンクリート構造物に応用するとプレストレッシングや変形・ひびわれ制御、あるいは可変剛性などの自己修復や破壊抑制機能が実現できることになる。

一方、図-2に示すようにTiNi合金を高温域 (A相) から冷却していくと、電気抵抗は低下するが、Ms点 (マルテンサイト変態開始点) に至るとマルテンサイトの発生に従って電気抵抗は増加に転じる。

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 PhD (正会員)

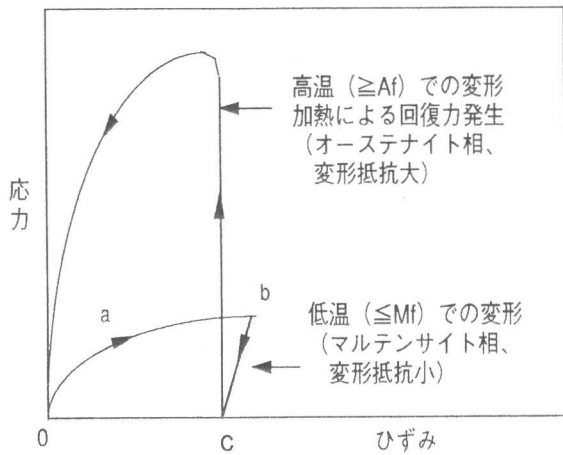


図-1 SMAの変形時および回復時の応力-ひずみ曲線⁵⁾

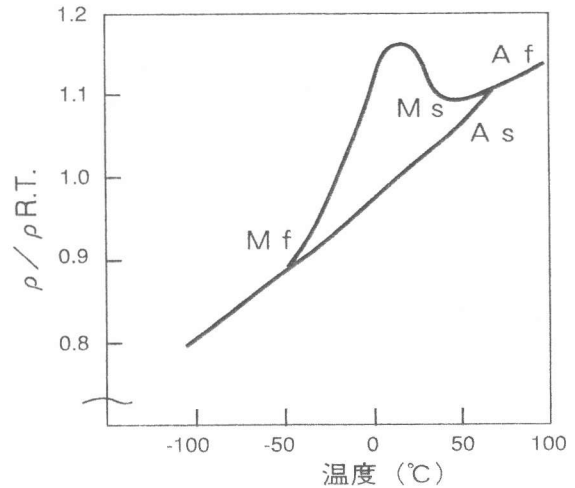


図-2 SMAの電気抵抗温度曲線⁵⁾ (Ni50-Ti50)

さらに温度を下げると、温度下降に伴ってマルテンサイト変態が進行して、その量が増えるほど電気抵抗は大きくなる。しかしある点からは冷却による電気抵抗の減少が優り、TiNi合金の電気抵抗は減少してMf点（マルテンサイト変態終了点）に達する。TiNi合金では温度変化だけではなく応力によってもマルテンサイト変態が進行し、以上に示すように鉄筋などの鋼材と比較すると数十倍大きく電気抵抗が変化する。この現象を利用すると、TiNi合金は材料内部の温度や応力状況を非破壊的にモニターできるセンサーとしての性質を有することがわかる。

形状記憶合金には、さらに「超弾性」と呼ばれる現象も現れるが、これは逆変態点温度 以上で塑性変形ひずみを与えても除荷によりひずみが消滅し、元の状態に戻る現象である。超弾性と形状記憶効果の違いは、その逆変態が応力除去に際して起こるか、あるいは加熱によって起こるかに過ぎず、本質的には弾性型マルテンサイト変態に関係する同じ現象に起因している。

2.2 研究の現状とその問題点

SMEにおいて利用価値があるのは、ある特定量の変形が非常に強い駆動力で自発的に起きる点と、変形に伴って電気抵抗などの物性値が変化するという点である。この現象を利用するとき、変形量や駆動力の大きさが重要になる場合（アクチュエーター）と、ひずみや応力と電気抵抗などの物性値の関係が重要になる場合（センサー）とがある。

(1) センサーとして用いた場合の問題点

光弾性エポキシ樹脂内にSMAファイバー（TiNi長繊維）を埋め込んだコンポジットを用いて一軸引張試験を行なった研究⁵⁾では、ファイバーの引張ひずみ量と電気抵抗増加率は図-3に示すように単調増加傾向を示すことが報告されている。その他同様の研究

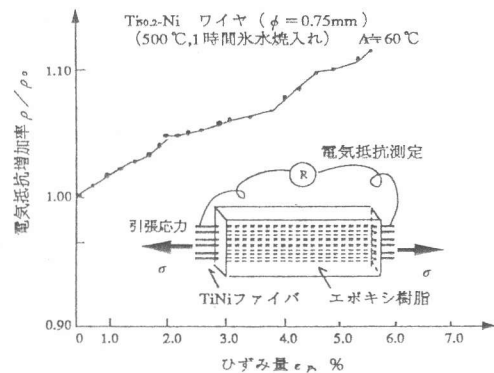


図-3 SMA (TiNi合金) 繊維の電気抵抗変化⁵⁾

からSMAファイバーは負荷応力・ひずみ変化を非破壊的にモニターできることがわかる。しかし、その時々、の負荷応力や損傷状況を評価するセンサーとして用いる場合、その精度やファイバーの径の影響、繰返し荷重下での特性等に関する定量的なデータはほとんど把握できていないのが現状である。

(2) 自己修復・材料強化として用いた場合の問題点

カーボン/エポキシの母材中にSMAファイバーを埋込んだ片持ち梁を用いた研究⁴⁾では、SMAファイバーに直接通電して加熱し、それに伴うファイバーの相変態により複合材料の内部応力や硬さ、剛性、強度、幾何学的形状を目的方向に変化させることが可能であることが確認されている。しかし、回復力の大きさなどに関するデータは乏しく、部材設計のために必要な情報は不足している。

3. 実験概要

研究の現状から考え、引張応力下での基本的性状を把握する目的で単調载荷と繰返し载荷を行い、試験体の引張応力、ひずみ、電気抵抗を測定する。また、回復力の発現状況を把握する目的で、ある応力レベルで試験体のひずみを保持し、加熱による回復力を測定した。試験に用いたSMA (Ti : Ni = 50 : 50 原子%) の基礎物性と試験体概要は表-1 に示すとおりである。ここでMsは载荷によって母相にマルテンサイトが開始する点、Mfは100%マルテンサイト変態が完了する点である。

表-1 試験体概要

	Test No.	材料	径 (mm)	長さ (mm)	繰返し荷重
単調载荷	1	SMA	φ 0.1	183	—
	2	SMA	φ 0.4	148	—
繰返し载荷	3	SMA	φ 0.4	148	0 ~ Ms間 Ms ~ Mf間 Mf ~ 間
	4	超弾性	φ 0.4	115	0 ~ Ms間
回復力発現	5	SMA	φ 4.0	157	ひずみ保持レベル 0 ~ Ms間 Ms ~ Mf間 Mf ~ 間

試験体径はφ 0.1、0.4、4 mmの3種類とし、φ 0.4に関してはSMAと超弾性合金を用いた。試験体の長さは180~230mmでインストロン型試験機を用いて引張試験を行った。電気抵抗の測定はSMAの両端に電極を接着した試験体に10mA~100mAの一定電流を通電した状態で、1.0mm/minのクロスヘッド速度で負・除荷を繰り返したときの電圧変化を電気抵抗変化として求めた。なお、試験体の引張ひずみはクロスヘッドの変位量から計算で求めた。さらにSMA φ 4 mm試験体は、表に示すひずみレベルで変形を拘束して変態点温度近傍 (70~80℃) までヒーターを用いて加熱し、回復力を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 マルテンサイト変態に伴う電気抵抗変化

(1) 単調引張载荷時の電気抵抗変化

単調引張载荷した場合の引張ひずみと応力、電気抵抗の測定結果の一例を図-4 に示す。一般的な傾向としては応力に比例してひずみも増加していくが、約20kgf/mm²でひずみのみが増加する領域に入り、その後再び応力が増加するようになる。この応力一定領域の始点と終点がそれぞれマルテンサイト変態開始点 (Ms)、変態終了点 (Mf) に相当する。電気抵抗の変化はひずみのみが増加する領域 (マルテンサイト変態領域; Ms~Mf) とそれ以外

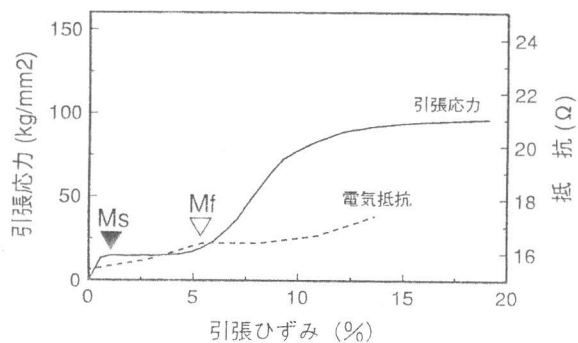


図-4 SMAの電気抵抗変化 (φ 0.1mm)

の領域とでは変化の割合が異なり、Ms~Mf領域での電気抵抗の変化の割合の方が大きい。このことを比抵抗の変化として図-5に表すが、特にφ0.4mmワイヤーではMs~Mf領域での比抵抗の増加割合、すなわちセンサー感度がMs以前の領域に比較して急激に増大していることが明瞭である。

Ti50at%のSMAでは、マルテンサイト変態開始点 (Ms : 15~30kgf/mm²) 以下の応力ではSMA中にオーステナイトとマルテンサイトがある割合で存在しているのみであり、この領域での電気抵抗の変化 (ΔR_s) は引張による試験体の断面変化に起因する。しかし、Ms~Mf領域でのひずみの増加は主にオーステナイトからマルテンサイトへの変態による体積膨張によるものであり、この間はマルテンサイト変態による電気抵抗の増加 (ΔR_m) が発生する。従って、見かけの電気抵抗の変化は両者に起因する電気抵抗の和 ($\Delta R_s + \Delta R_m$) となって現れるので、断面変化による電気抵抗の増分よりも大きいことになる。仮にSMAをセンサーとして用い、その電気抵抗の変化でコンクリート構造物の内部応力やひずみをモニタリングする場合は、応力やひずみの変化に対して電気抵抗の変化が明瞭で大きいマルテンサイト変態領域 (Ms~Mf) でのモニターが効果的であると考えられる。

(2) 引張繰返し载荷時の電気抵抗変化

SMA φ0.4試験体、ならびに超弾性 φ0.4試験体の引張繰返し载荷試験結果を図-6~図-8に示す。図-6から明らかなように、SMAはMs以前の弾性領域では応力とひずみは比例関係にあるが、Ms以後の領域 (繰返し-1 ; Ms点、繰返し-2 ; Mf点、繰返し-3 ; Mf点以降) では残留ひずみが発生し、一般の鋼材と同様な挙動を示している。

SMAの引張ひずみと電気抵抗の変化には図-7に示すような関係がある。これによるとMs以

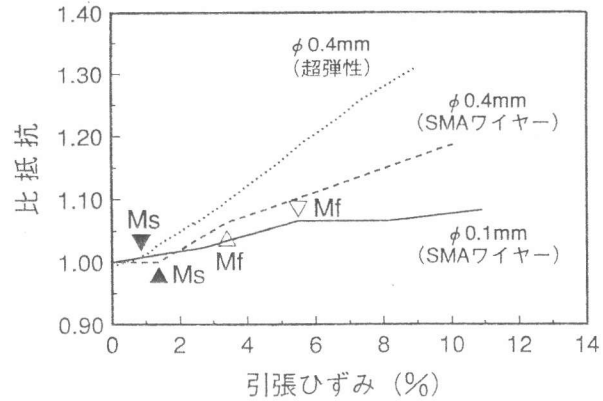


図-5 SMAの比抵抗の変化 (φ0.1mm)

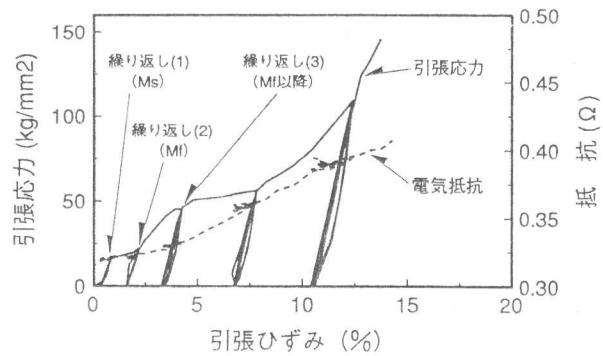


図-6 SMA (φ0.4mm) の引張繰返し試験結果

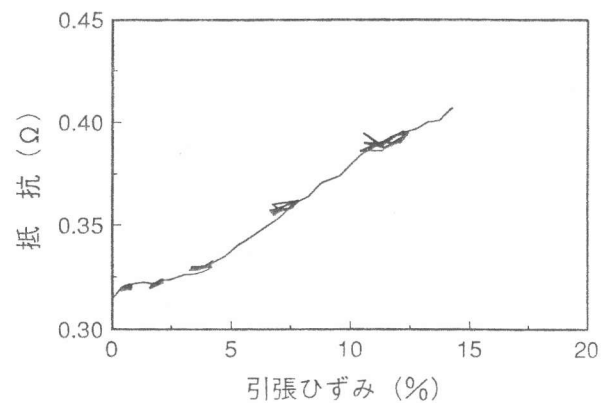


図-7 引張繰返し载荷時の電気抵抗変化 (φ0.4mm)

降での繰返し载荷に対して電気抵抗は残存しているが、これは $M_s \sim M_f$ で生成したマルテンサイトは引張力を除荷してもオーステナイトに逆変態せずに材料中に存在していることが理由である。

超弾性合金の M_s はSMAよりも高く、今回の実験では弾性域での繰返し载荷となるが、弾性域では応力とひずみはほぼ比例することがわかる。すなわち、 M_s 点以下の弾性域では図-8に示すように電気抵抗は载荷前のレベルに回復する。また $M_s \sim M_f$ で生成したマルテンサイトは除荷によってオーステナイトに逆変態し、ひずみは回復することが知られているので、電気抵抗も载荷前の値に回復することが予想される。

以上のことから考えると、超弾性合金はSMAよりも電気抵抗の変化が大きく現れるので、感度の面からはSMAよりも優れたセンサーとして適用できる可能性がある。しかし、SMAは電気抵抗が残留するので、ひずみと電気抵抗の関係を予め把握しておくことで過去の最大ひずみを推定することができる、いわばひずみ履歴を記憶するセンサーとしての適用が考えられる。

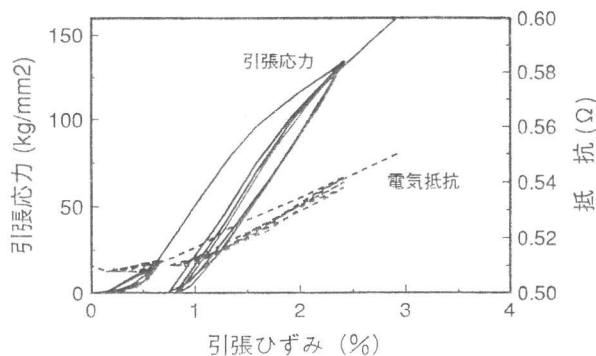


図-8 超弾性合金の引張繰返し载荷時の電気抵抗変化 ($\phi 0.4\text{mm}$)

4.2 加熱によるマルテンサイト逆変態に起因する回復力

SMA $\phi 4\text{mm}$ 試験体を用いて引張試験を行い、各応力レベルでひずみを拘束して試験体を加熱した時に発生する回復力を図-9に示す。前述したようにSMAの回復力はマルテンサイト逆変態によって発生し、その大きさは応力誘起相変態によって生成するマルテンサイトの量に依存する。図から明らかなように、拘束するひずみレベル、すなわち母材中のマルテンサイト量にほぼ比例して回復応力は増大しているが、最初保持した応力に対する回復応力の比はマルテンサイトの割合が少ない M_s 点以下のレベルで3.2~1.8と減少して行き、マルテンサイトが発生・増加する M_s 点を越えるひずみレベルでは1.6~1.8とほぼ一定となることがわかる。つまり、 M_s 点以降のマルテンサイト逆変態によって発生する最大回復応力は拘束ひずみに比例して大きくなるが、誘起された応力の2倍程度の回復応力に留まる。なお、期待される最大回復力はマルテンサイト変態応力の数倍程度と言われており、実験結果では回復応力の発現は拘束ひずみレベルが大きくなるとやや減少していく傾向が見られ、最終的に収束するものと思われる。

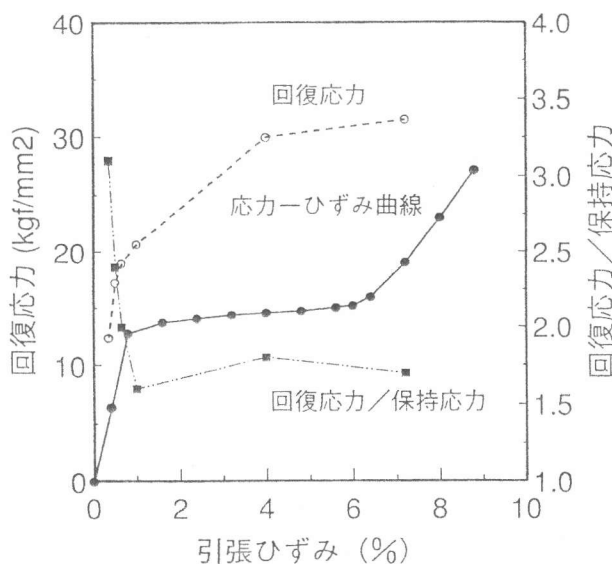


図-9 回復力の発現状況

5. コンクリート部材設計へのSMAの適用

以上の結果から、SMAの電気抵抗を計測することで部材のひずみを推定でき、しかも加熱により拘束ひずみレベルに応じた回復力の発生が期待できることが判明した。SMAはセンサーとしての機能とアクチュエーターとしての機能を兼ね備えたインテリジェント・マテリアルに近い材料であると考えることができ、これをコンクリート部材に埋め込むことによって部材を「知能化」することが可能であると思われる。しかし、SMAによる知能部材を設計するにはいくつかの点を念頭に置く必要がある。一つはモニタリングする現象の応力レベルであり、例えばコンクリート梁の初期の曲げひびわれ発生をモニタリングするような場合、SMAに作用する応力は小さいので、その変化は明瞭な電気抵抗の変化となつて現れない可能性が大きい。マルテンサイト変態応力 ($15\sim 30\text{kgf/mm}^2$) は一般的な鉄筋コンクリート用異形棒鋼SD35の降伏点 ($35\sim 45\text{kgf/mm}^2$) に近い値であり、電気抵抗はこのマルテンサイト変態応力レベルで顕著に変化することを考えあわせると、地震などによる部材の大変形や損傷など高い応力レベルでのモニタリングにSMAを利用することが有効であると考えられる。すなわち、コンクリート部材の設計レベルでのモニタリングには超弾性合金をセンサーとして用い、終局状態に近いレベルではSMAにより応力・ひずみ履歴を測定するといった、センサーとしての特性に応じた使い分けが必要である。

さらに回復力に関しては、母材中に予め存在するマルテンサイト量にもよるが、設計応力状態から終局に至る間では誘起された応力の2～3倍程度の回復力を発生することが期待できる。ここで留意すべき点は、回復力はマルテンサイト変態応力の数倍の値に近づいて行く傾向にあることである。従って、もしSMAが形状回復できる限界のひずみレベルが存在し、仮に母材にそれを上回るひずみが発生した場合は十分な回復力の発現が期待できないことも考えられる。

これらのことを勘案すると、コンクリートの通常の使用状態よりも高い応力レベル、すなわちSMAのマルテンサイト変態領域でセンサーとアクチュエーター機能を発揮させる設計が、より合理的なコンクリート部材の「知能化」であると思われる。

6. まとめ

本論文では、形状記憶合金 (SMA) の引張応力下での基本的性状と回復力の発現状況を実験的に検証し、それをを用いてコンクリート部材を知能化する際の設計の考え方について述べた。SMAのセンサー、アクチュエーター機能を利用する場合はマルテンサイト変態領域での使用が最も効果的であり、通常のコンクリート部材の使用状態よりも高い応力レベルでSMAを使用する設計の考え方が重要である。

参考文献

- 1) B.K.Wada, et al.: Adaptive Structures, J. of Intelligent Material Systems and Structures, pp.157-174, 1990
- 2) 柳田博明ら:インテリジェント ハイブリッド 複合材料による破壊自己診断設計、第2回インテリジェント材料シンポジウム、pp.12-15、1993
- 3) 真嶋光保ら:GFRPロッド筋を用いたコンクリートはりの曲げ変形挙動と光ファイバによるヘルスメタリング、材料、Vol.42、No.47、pp.442-448、1993
- 4) C.A.Rogers:Proc. of Smart Materials and Structures, Math. Issues, 1988
- 5) 古屋泰文:超先進構造・材料としての知的材料 (3)、機械の研究、第44巻、第9号、pp.87-91、1992