

# NbC 添加 Fe-Mn-Si 基形状記憶合金を用いた プレストレスト・コンクリートの開発

澤口孝宏<sup>1</sup> 菊池武丕児<sup>1</sup> 小川一行<sup>1</sup> 梶原節夫<sup>1</sup>  
池尾陽作<sup>2</sup> 小島正朗<sup>2</sup> 小川孝寿<sup>2</sup>

<sup>1</sup>物質・材料研究機構, 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

<sup>2</sup>竹中工務店, 〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1

J. Japan Inst. Metals, Vol. 69, No. 8 (2005), pp. 659-662  
Special Issue on Smart Materials  
© 2005 The Japan Institute of Metals

## Development of Prestressed Concrete Using Fe-Mn-Si-Based Shape Memory Alloys Containing NbC

Takahiro Sawaguchi<sup>1</sup>, Takehiko Kikuchi<sup>1</sup>, Kazuyuki Ogawa<sup>1</sup>,  
Setsuo Kajiwara<sup>1</sup>, Yosaku Ikee<sup>2</sup>, Masarou Kojima<sup>2</sup> and Takatoshi Ogawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047

<sup>2</sup>Takenaka Corporation, 1-5-1, Otsuka, Inzai, Chiba 270-1395

This article reports the mechanical properties of the concrete prestressed by the Fe-Mn-Si-based shape memory alloys containing NbC that exhibit an excellent shape memory effect without so-called the “training” treatment. A thermomechanically treated Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C (mass%) alloy was used for this purpose. Four rectangular shaped-specimens were embedded in mortar, and heated at above their reverse martensitic transformation start temperature after hardening of the mortar matrix. Three-point bending tests were performed for the mechanical property characterization. It was found that prestressing by the shape memory alloys increased the bending stress and cracking stress of mortar.

(Received February 22, 2005; Accepted March 23, 2005)

**Keywords:** prestressed concrete, shapememory alloy, iron-manganese-silicon-based alloy, niobium carbide, high cracking stress, smart composite

## 1. 緒 論

コンクリート系材料は優れた圧縮強度を示す一方で引張強度、曲げ強度、剛性および靱性は金属材料と比べて著しく低い。これに対し、鉄筋補強がコンクリート系材料の強化方法として、長年、広く一般的に行われてきた。近年、鋼繊維などの繊維質補強材を用いて、引張強度、曲げ強度、靱性およびひび割れ強度などを改善した繊維補強コンクリートも開発され、重量物の載るスラブや外装材など大きな曲げ荷重が作用する部材のひび割れ防止、靱性向上に利用されている。また、コンクリート中に PC 鋼材あるいはケーブルを配置し、コンクリートの強度が発現した後に、鋼材を緊張してコンクリートに圧縮応力を導入するプレストレスト・コンクリートが近年盛んに開発、実用化され、大スパン構造物に利用されている<sup>1)</sup>。

形状記憶合金 (SMA) の形状記憶効果に伴う大きな回復力をプレストレスとして用いた強化複合材料も提案されている<sup>2-8)</sup>。SMA によるプレストレス付与は、SMA に引張予ひずみを与えて (応力誘起マルテンサイト変態)、コンクリート等の母材に埋め込み、母材を硬化させた後に、SMA を加熱

(マルテンサイト逆変態による形状回復) することによってなされる。従って、鋼材の弾性変形を利用する従来のプレストレスト・コンクリートとは施工方法が異なり、特有の利用形態が考えられる。形状回復力をプレストレスとして利用する場合、後述するように、正逆マルテンサイト変態の温度ヒステリシスが大きい鉄系 SMA、なかでも Fe-Mn-Si 基合金<sup>9-11)</sup>が適している。Fe-Mn-Si 基合金は従来の SMA と比較して低コストであるという点も、構造材料への応用上好ましい特徴である。Watanabe et al. は Fe-27.2 Mn-5.7Si-5Cr (mass%) 合金繊維を用いて石膏系材料の強度を向上させた例について報告している<sup>6)</sup>。しかし、当該合金系を用いたコンクリート系材料の補強に関する研究例は、コストや性能の優位性にもかかわらず極めて少ない。

最近、Kajiwara et al. は、Fe-Mn-Si 基形状記憶合金に Nb および C を添加して、低コストで形状記憶特性を向上させる技術を開発した<sup>12-18)</sup>。この合金は加工熱処理を施すことにより 300 MPa 以上の大きな形状回復応力を発生する事も可能であり、プレストレス強化にも適している。そこで、本研究では、この NbC 添加型 Fe-Mn-Si 基合金を用いてコンクリート系材料にプレストレスを付与する事が可能であるか検討した。本報では、まず、NbC 添加 Fe-Mn-Si 基

SMA の諸特性について、プレストレスによるコンクリート強化に用いる観点から概説する。また、SMA を補強材として用いたモルタル<sup>19)</sup>の製造方法と機械的特性、および今後の展望について述べる。

## 2. NbC 添加 Fe-Mn-Si 基合金の形状記憶特性

Fe-Mn-Si 基 SMA の形状記憶特性は、変形と加熱による形状回復を複数回繰り返す「トレーニング」と呼ばれる一種の加工熱処理によって改善することがよく知られている<sup>10)</sup>。合金の形状記憶特性はこのトレーニング処理によってほぼ実用可能なレベルに達する。しかし、トレーニング処理は製造コストを上昇させることと、部材形状や利用形態に制限が生じることが欠点である。

一方、NbC 添加 Fe-Mn-Si 基合金はトレーニング処理を施すことなく、トレーニング処理材並みの形状記憶効果を示すことを特徴とする<sup>12,13)</sup>。この技術のポイントは、1070 K で短時間(10 分程度)熱処理をすることにより NbC 炭化物を微細析出させることである。時効前に温間あるいは冷間で圧延などの前加工を施すことにより、さらに形状記憶特性が改善され<sup>14-18)</sup>、形状回復ひずみ 4%以上、形状回復応力 300 MPa 以上に達する。この前加工と時効の組み合わせによる加工熱処理はトレーニング処理と比較して格段に低コストであり、部材形状の自由度も高い。また、加工熱処理により形状回復力が制御・改善できることも判明しており、プレストレスによるコンクリート強化への応用に適している。

## 3. SMA 強化プレレストレスト・モルタルの製造

NbC 添加 Fe-Mn-Si 基合金で補強したモルタルのミニサイズ試験片を製造し、三点曲げ試験による機械特性の評価を行った。

補強材として用いた合金の組成は、これまで最も良好な形状記憶特性が確認されている Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C(mass%)である。高周波溶解により作製したインゴットを、1270 K で熱間鍛造・圧延した後、1470 K で 10 時間溶体化処理を行った。また、形状記憶特性を向上させるため

の加工熱処理として、870 K で 14%の温間圧延と真空中 1070 K の時効熱処理を行った。放電加工により $4.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ の角棒を切り出し、これに約 5%の引張変形を施して補強材とした。また、補強材の両端部に $4.0 \text{ mm}^2 \times 2.0 \text{ mm}^T$ の同合金の板を TIG 溶接して、Fig. 1(a)に示すような端部形状とした。

4 本の SMA 補強材を $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ の型枠内に Fig. 1(b)および(c)のように配置した後、モルタルを投入した。モルタルの結合材には、低熱ポルトランドセメントとシリカフェーム( $\text{SiO}_2$  約 98%)を 8:2 に混合したものを用いた。骨材にはケイ砂を、分散剤としてポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた。モルタルの調合は、水結合材比を 0.17、結合材砂比を 1.2 とした。注水後、ソイルミキサで十分練り混ぜ後、型枠内に打設した。打設後、常温で二日間養生を行い、モルタルを硬化させた後脱型し、オートクレーブ中で高温養生を行った。オートクレーブ養生の工程を Fig. 2 に示す。第一段目の養生は、モルタル母材の圧縮強度向上を目的として、360 K で 24 時間行った。第二段目の養生は、SMA の形状回復力(プレストレス)発生を目的として、450 K で 6 時間、および 520 K で 30 分の二条件を試みた。比較のため、同形状・同サイズの SUS304 ステンレスを補強材として同じように配置した試料、および補強材を含まない試

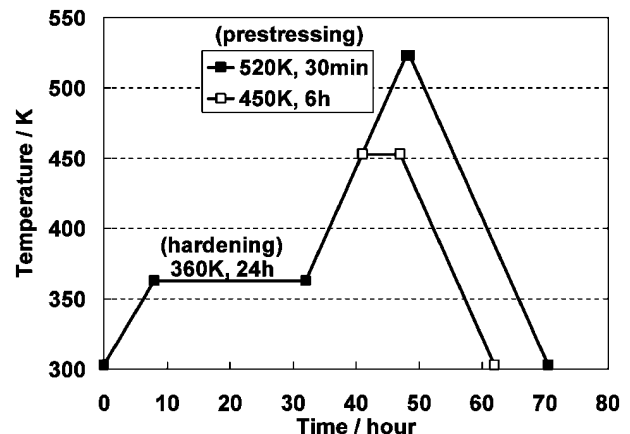


Fig. 2 Two-step curing procedure of SMA prestressed mortar.

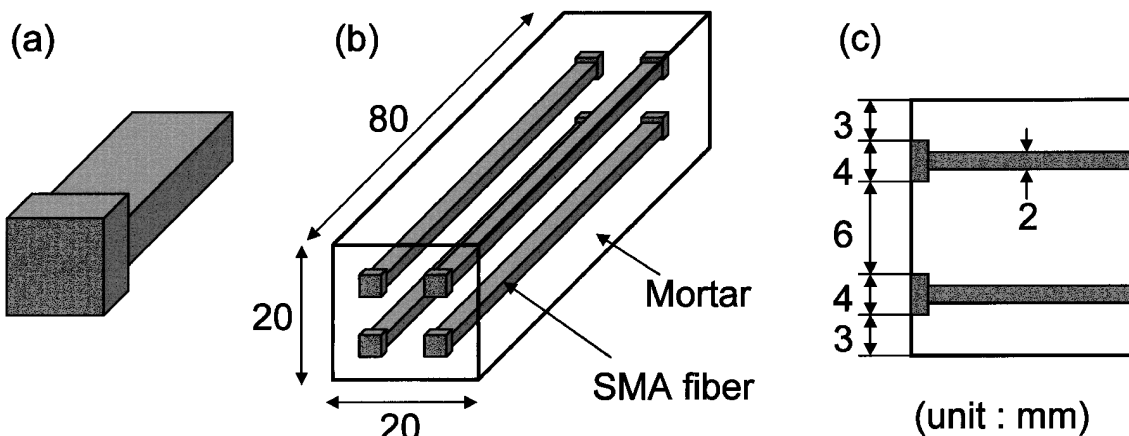


Fig. 1 (a) Edge shape of SMA, (b) 3D perspective of SMA/mortar composite and (c) configuration of SMA rods in mortar.

料も作製した。SMA 補強, ステンレス補強, 補強材なし, のそれぞれについて, 450 K 加熱養生二本, 520 K 加熱養生一本作製した。

また, 通常より高温で加熱養生されたモルタル自体の機械的性質を調査するため, 補強材なしのモルタルについて, 圧縮強度試験を行った。モルタルの圧縮強度試験に用いた試験片サイズは  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  および  $\phi 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  である。

#### 4. SMA 強化プレストレスト・モルタルの機械的特性

##### 4.1 SMA 補強材の形状記憶特性

Fig. 3 は, 870 K で 14% 圧延後 1070 K, 10 分時効した Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C (mass%) 合金の形状回復応力-温度特性である。5% の初期ひずみを与え, 両端を固定した状態で赤外線イメージ炉を用いて 670 K まで加熱後, 室温まで冷却した際に, 形状記憶効果により発生する応力を測定した。昇温時約 360 K で逆マルテンサイト変態が開始して形状回復力が発生する。その後, 温度が上昇するほど逆変態の進行に伴って応力が上昇し, 670 K で 190 MPa に達する。降温時は試料の熱収縮により更に応力が上昇して室温で約 250 MPa の回復応力が得られる。

以上は十分高温まで加熱した場合の特性であって, 昇温を 450 K あるいは 520 K で止めて冷却した場合には, 図中点線で示したような降温曲線を示す。従って, 450 K および 520 K で養生した SMA 強化モルタル中に発生するプレストレスは, それぞれ, 80 MPa および 130 MPa 程度であると考えられる。

##### 4.2 モルタル母材の強度

Fig. 4 にモルタル母材の圧縮強度試験結果を示す。450 K 加熱養生材の圧縮強度は 3 本の試験体の平均値として求めた。450 K 加熱養生したモルタルの圧縮強度は, 520 K 加熱

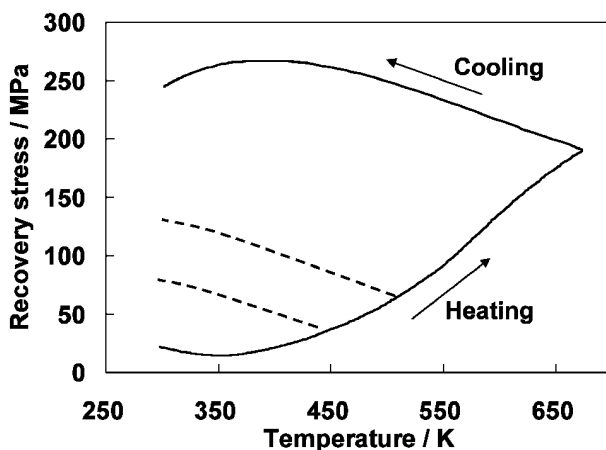


Fig. 3 Change in shape recovery stress on heating above reverse transformation temperature and subsequent cooling to room temperature for Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C (mass%) alloy. The sample was pre-rolled by 14% at 870 K and aged at 1070 K for 10 min.

養生に比べて低下していることが判明した。

##### 4.3 SMA 強化プレストレスト・モルタルの機械的特性

Fig. 5 に 450 K 加熱養生を施した試験片の曲げ荷重-変位曲線を, SMA 補強, ステンレス補強および補強材なしのそれぞれについて示す。初期ひび割れが発生した変位を曲線上の矢印で示した。また, 全試験片について曲げ試験結果より算出した曲げ強度およびひび割れ強度をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 にまとめる。Fig. 5 から, SMA を用いた場合, 補強材なしの場合やステンレス補強の場合に比べ, 曲げ強度, ひび割れ強度とも高くなったことがわかる。高温養生時に SMA が母材による拘束下で逆マルテンサイト変態することにより形状回復力が発生し, これがプレストレスとして作用しているためであると考えられる。

より高温の 520 K まで加熱養生すれば, より大きな形状回復力(プレストレス)により, さらにモルタルを強化するこ

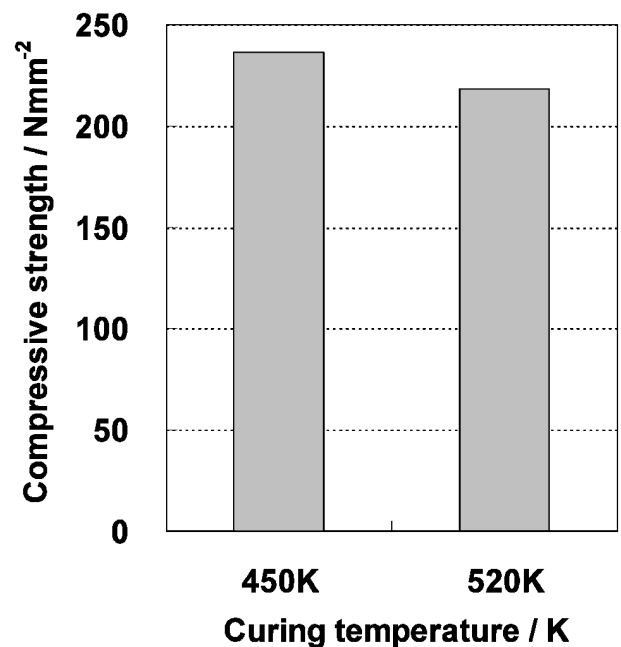


Fig. 4 Compressive strengths of the mortar heated at 450 K and 520 K.

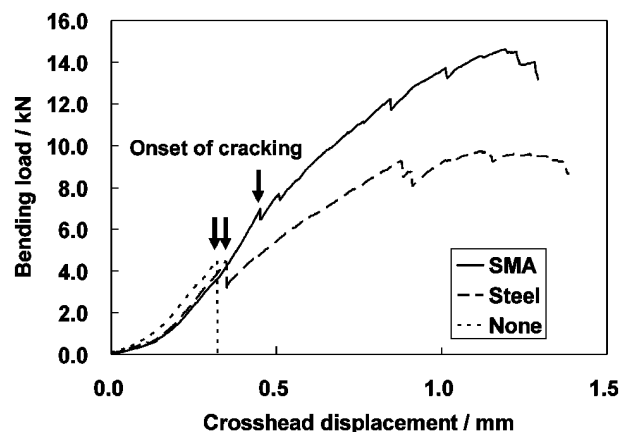


Fig. 5 Bending load versus crosshead displacement curves of the mortar with SMA, steel and without reinforcement.

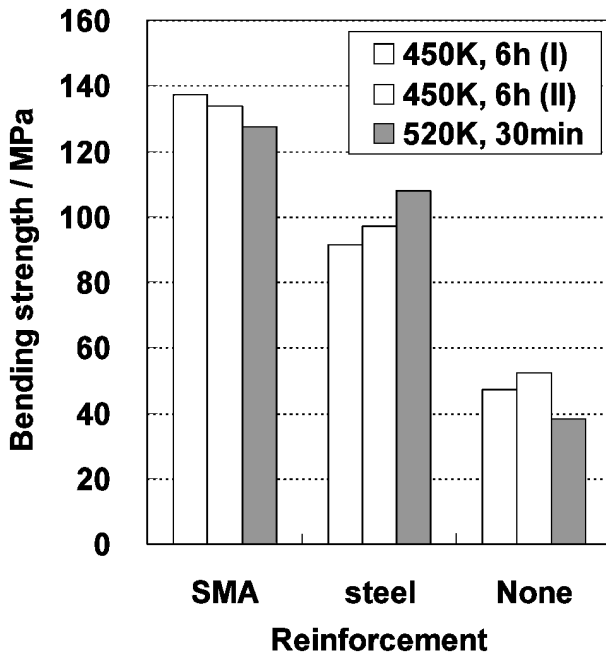


Fig. 6 Bending strengths of the mortar with SMA, steel and without reinforcement.

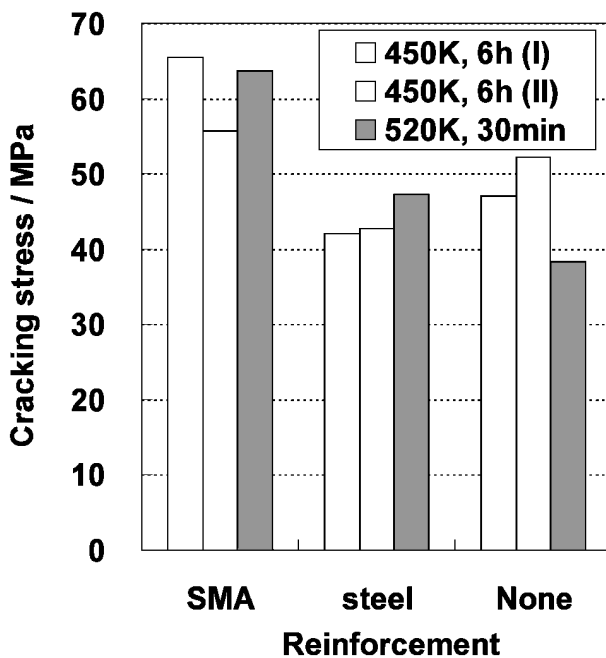


Fig. 7 Cracking stresses of the mortar with SMA, steel and without reinforcement.

とが期待される。しかし、Fig. 6 および Fig. 7 に示されるように、520 K 加熱養生を施した SMA 添加モルタルの曲げ強度やひび割れ強度は、450 K 加熱養生との有意差を示さなかった。この一因として、モルタル母材の高温加熱養生中の劣化が考えられる。

## 5. まとめ今後の展望

SMA によりコンクリートにプレストレスを付与する新しいアイデアと、この用途に適した安価・高性能な NbC 添加 Fe-Mn-Si 基合金について概説するとともに、SMA 強化モルタルのミニサイズ試験片を作製して NbC 添加 Fe-Mn-Si 基 SMA によるプレストレス付与が可能であることを確認した結果について報告した。SMA の変態温度をモルタル中の加熱に適した温度領域に設定することにより、プレストレスの導入効率が向上し、さらなる強化が可能であると考えられる。

プレストレス・コンクリートの製造単価は、コンクリート母材そのものよりも、主に補強材により決定されることを考えると、低コストで製造可能な NbC 添加 Fe-Mn-Si 基 SMA でコンクリート系材料を強化できたことは意義深い。また、この技術を活用すれば、コンクリート中に SMA 繊維をランダム配向させて、3 次元的にプレストレスを付与した新しい強化コンクリートも考えられる。今後、こうした特有の用途開拓も期待される。

## 文 献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協, コンクリート便覧, (技報堂出版株式会社, 東京, 1976) pp. 654-984.
- 2) A. K. Maji and I. Negret: *J. Eng. Mech.-ASCE* **124**(1998) 1121-1128.
- 3) F. Auricchio and L. Petrini: *Int. J. Num. Meth. Eng.* **61**(2004) 716-737.
- 4) J. P. Briggs and P. P. Castaneda: *J. Appl. Mech.-Trans. ASME* **69**(2002) 470-480.
- 5) S. El-Tawil and J. Ortega-Rosales: *ACI Struct. J.* **101**(2004) 846-851.
- 6) Y. Watanabe, E. Miyazaki and H. Okada: *Mater. Trans.* **43**(2002) 974-983.
- 7) O. Soderberg, P. G. Yakovenko, K. Ullakko, V. G. Gavriljuk and V. K. Lindroos: *Mater. Sci. Forum* **318-3**(1999) 763-768.
- 8) P. Soroushian, K. Ostowari, A. Nossoni and H. Chowdhury: *Trans. Res. Rec.* 2001 (2001) 20-26.
- 9) A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori: *Acta Metall.* **30**(1982) 1177-1183.
- 10) H. Otsuka, M. Murakami and S. Matsuda, *MRS Int. Mtg. Adv. Mater.*, vol 9, Tokyo, 1989, 451-456.
- 11) H. Otsuka, H. Yamada, T. Maruyama, H. Tanahashi, S. Matsuda and M. Murakami: *ISIJ Int.* **30**(1990) 674-679.
- 12) S. Kajiwara, D. Liu, T. Kikuchi and N. Shinya: *Scr. Mater.* **44**(2001) 2809-2814.
- 13) S. Kajiwara, D. Z. Liu, T. Kikuchi and N. Shinya: *J. Phys. IV* **11**(2001) 199-204.
- 14) A. Baruj, T. Kikuchi and S. Kajiwara: *Mater. Sci. Eng. A* **378**(2004) 337-342.
- 15) A. Baruj, T. Kikuchi, S. Kajiwara and N. Shinya: *Matfier. Sci. Forum* **394-3**(2002) 403-406.
- 16) A. Baruj, T. Kikuchi, S. Kajiwara and N. Shinya: *Mater. Trans.* **43**(2002) 585-588.
- 17) A. Baruj, T. Kikuchi, S. Kajiwara and N. Shinya: *J. Phys. IV* **112**(2003) 373-376.
- 18) A. Baruj, T. Kikuchi, S. Kajiwara and N. Shinya: *Mater. Sci. Eng. A* **378**(2004) 333-336.
- 19) 5 mm 以上の大きい骨材(粗骨材)を含むものをコンクリート、最大寸法 5 mm 以下の砂までしか使用しないものをモルタルと呼ぶ。