

## 鉄系形状記憶合金をかぶりに埋め込み プレストレスで曲げ補強した実大 RC 梁の実験

著：Raafat El-Hacha, Hothifa Rojob  
訳：高津 比呂人

鉄筋コンクリート（以下、RC）断面のかぶり深さ以内に座掘りを設け、鉄系形状記憶合金（以下、Fe-SMA）を埋め込むこと（near-surface-mounted: 以下、NSM 工法）で補強した実大 RC 梁の性能を確認する実験を行った。形状記憶合金（以下、SMA）は、大きな変形性能があり、荷重を除荷するか、加熱することで応力が解放され元の形状に戻るといった特徴がある。この Fe-SMA を用いて NSM 工法で補強した梁 3 体と比較用の RC 梁の計 4 体の実験を行った。実験の結果、NSM 工法で補強した梁の曲げ性能が向上したことを確認し、この工法が有効であることが明らかとなった。さらに、NSM 工法で補強した梁は、Fe-SMA が降伏した後にコンクリートが圧壊するじん性的な挙動を示した。Fe-SMA により NSM 工法で補強した梁は、同等のプレストレスを導入した炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）を用いて NSM 工法により補強した梁と比較して変形性能が優れており、Fe-SMA の優位性を確認した。

キーワード：鉄系形状記憶合金、補強、自己プレストレス

### 1. はじめに

北米のインフラについての危機的な状況が、いくつか報告されている。2016 年のカナダのインフラ報告では、地方自治体のインフラの 3 分の 1 が普通の状態（良い状態ではない）か、悪い状態、あるいはとても良くない状態にあり、橋梁の架替えだけの費用でも 208 億カナダドルかかると推定されている。2017 年のアメリカの報告では、アメリカの橋梁の 9.1% が構造的に不健全な状態であると報告されている。アメリカ連邦高速道路局では、2028 年までに橋梁の不健全な状態を解消するために、年間 205 億アメリカドルの投資をする必要があると試算している。これらの事実を鑑み、研究者は不健全な構造物を補修・補強するための、実用的、効率的かつ経済的な技術を探し求めてきた。

近年、SMA と呼ばれる高機能的なワイヤーと棒材の新材料が、さまざまな分野の研究者の注目を集めている。SMA は優れた合金で、大きな変形性能があり（最大 8%）、荷重を除荷（以下、超弾性効果）あるいは加熱（以下、形状記憶効果）によって元の形状に戻ることができる。この SMA の特異な性質は、材料の温度もしくは応力状態により生じるマルテンサイト（低温）相とオーステナイト（高温）相間における結晶状態の遷移によるものである。

SMA 材料は、逆マルテンサイト変態と呼ばれるプロセスにより、マルテンサイト相からオーステナイト相に変態する能力を有する。超弾性効果は、一定温度状態で材料に外部応力が加えられ、オーステナイトからマルテンサイトへ相変態する際に生じる。加えられた荷重を除荷すると、マルテンサイトからオーステナイトへ拡散のない固体状態の逆変態が起こり、材料の初期状態に戻る。

形状記憶効果は、析出したマルテンサイト相中の SMA 材料が形状回復温度を超えて加熱され、より熱力学的に安定なオーステナイト相となるとときに生じる。このプロ

セスは、巨視的には形状変化となる。

最近開発された Fe-SMA は、構造物の補修に新たな可能性をもたらすものである。Fe-SMA は従来のニッケルチタン SMA（以下、NiTi-SMA）よりも比較的安価であり、大規模な構造物への適用に向いている。NiTi-SMA の構造物への適用は、小規模の部材に限られており、以下の 2 つの課題から、実構造物への適用は実現していない。一つ目が材料と製造のコストが比較的高いことで、二つ目が大気温度にさらされたときの熱的不安定性で、形状記憶効果による逆変態が生じる可能性があることである。

SMA は、その超弾性や耐腐食性、耐疲労性に加え、固有の熱機械的特性の結果である形状記憶効果によって特徴づけられる。これは、さまざまな土木建築分野、たとえばブレースや免震装置、損傷制御デバイス、落橋防止装置などに適した材料である。この優れた特性はコンクリート構造物の耐震補強にも適している。

### 2. 最近の研究動向

SMA の形状記憶効果は、RC 梁への外付けプレストレス補強に適している。文献のレビュー結果から、NiTi-SMA は RC 梁の曲げ補強に実用化されていないことが分かった。これは、NiTi-SMA が現在使用されている繊維強化プラスチック（以下、FRP）などの材料に比べて、コストが比較的高いことが原因であると考えられる。

RC 梁の曲げ補強で FRP 材に引張力を導入するために、油圧ジャッキを使わない方法として、El-Hacha と Hadiserajji は、初期ひずみを与えた NiTi-SMA の棒材を、外付け FRP シートや NSM 工法による補強用 FRP ストリップ（細長い棒材）が取り付けられたエンドアンカーに接続し、アクチュエータとして適用する革新的な方法を提案した。FRP 材により生じるプレストレス力は、SMA を加熱することで発生させる。このプレストレス補強技術では、常時荷重によって梁に生じる応力に対して、それを一部打ち消すように梁にプレストレスを与える。一方、最近

開発された耐食性のある Fe-SMA (Cr と Ni を添加) は低コストが可能となり、回復応力がより大きく、逆変態を防ぐ大きな熱履歴がある。これにより、この新しい材料の実構造物への適用が可能になった。

初期ひずみを与えた SMA 材料が形状回復温度以上に加熱されると、形状記憶現象が誘発され、SMA 材料に導入されたひずみが回復する。一方、SMA 材料の端部が拘束されている場合、形状回復しないで材料に応力が発生する。この応力は、構造工学用途に適用可能である。

Soroushian らにより、構造物の補強で Fe-SMA の棒材を使用する試みが最初に報告された。Soroushian は、橋梁に 24 本の直径 10.4 mm の Fe-SMA を用いた外ケーブルによりせん断補強を行った。ケーブルをコンクリート梁の側面に、35 度傾けて定着した。1 000 A の電気抵抗加熱システムで加熱すると、棒材には 120 MPa の応力が発生し、ひび割れ幅が 40 % 減少し、梁のせん断強度が回復した。

Fe-SMA ストリップを活用した構造物のプレストレス補強への実現可能性を調べるために、Czaderski らは小さなコンクリート棒材 9 本を使用した実験を行った。Czaderski らは、NSM 工法を用いた鉄筋コンクリート梁の補強材として Fe-SMA を使用できると結論付けた。

最近 Rojob と El-Hacha は、NSM 工法を用いた全長 1.8 m の RC 梁の曲げ補強に、表面が滑らかな Fe-SMA の棒材を使用した。コンクリートの引張側にあらかじめ設けられた座掘りにこの棒材を配置し、両端を定着した。これと同じ補強方法、同じ梁を使用して、Rojob と El-Hacha は厳しい凍結融解および疲労荷重下での Fe-SMA 補強 RC 梁の性能も研究した。

Shahverdi らは、リブ付き Fe-SMA を用いて、NSM 工法で 2.0 m の RC 梁の曲げ補強を行った。プレカットした溝にセメント系グラウトを充填したのち、電流を用いてストリップを形状回復させた。また、Shahverdi らは上述した梁と同じ構成で Fe-SMA の棒材が梁の引張表面のショットクリート層に埋め込まれたものを使用して RC 梁を補強した。

Rojob, El-Hacha, Shahverdi らによる研究により、補強した梁は、補強していない梁に比べて、常時荷重時および終局荷重時の曲げ強度が大幅に向上することが分かった。

本研究では、形状記憶効果を利用して NSM 工法に Fe-SMA ストリップを用いて補強した大型梁の曲げ性能を調べることを目的とする 4 体の梁試験体の実験を行った。1 体目は比較用試験体で、2 体目は形状回復させていない Fe-SMA ストリップで補強した試験体、残りの 2 体はいずれも形状回復させた Fe-SMA ストリップで補強した試験体で、Fe-SMA の本数が異なる。これらの実験結果と、CFRP を用いた NSM 工法でプレストレスを導入して補強した既往の実験結果の比較を行った。その結果、大型の梁を補強するにあたって、Fe-SMA を用いた NSM 工法が有効であることが明らかとなった。

### 3. 実験計画

#### 3.1 試験体と荷重装置

4 体の大型 RC 梁試験体は、単調荷重の 4 点曲げ試験で実施した。比較用の RC 試験体 B-C が 1 体、残りの 3

体は Fe-SMA を用いた NSM 工法により補強を行った。B-SMA-0 は、5 本の Fe-SMA を形状回復させないで使用し、B-SMA-1 と B-SMA-2 はそれぞれ 5 本と 7 本の Fe-SMA ストリップを形状回復させて使用した。

荷重は変位制御で、250 kN アクチュエータにより荷重した。降伏荷重までは 1 mm/分 で荷重し、その後は 3 mm/分 で荷重を行った。

梁スパンは 5 m (支点間距離) で、断面は 200 × 400 mm とした。図 - 1 は、RC 梁の模式図を荷重計測装置の詳細とともに示したものである。梁は、3 本の 15 M 鉄筋 (訳者註: 公称断面積 200 mm<sup>2</sup>) を引張側に配置し、2 本の 10 M 鉄筋 (訳者註: 公称断面積 100 mm<sup>2</sup>) を圧縮側に配置しており、それぞれの断面積の合計は 600 mm<sup>2</sup> と 200 mm<sup>2</sup> である。10 M 鉄筋のせん断補強筋を等曲げ区間では 300 mm 間隔に、それ以外の区間では 200 mm 間隔で配置した。比較用試験体は、CSA (カナダの設計基準) に則ると鉄筋が不足している試験体であり、引張側鉄筋降伏後にコンクリートの圧壊で破壊する試験体である。

梁にはスパン中央の圧縮側、引張側鉄筋にそれぞれ 2 か所ずつ、計 4 か所のひずみゲージを取り付けた。梁の表面と裏面の 2 か所でレーザー変位計により中央のたわみを計測した。接触型変位計によりスパン中央の圧縮鉄筋と引張鉄筋の位置のコンクリートひずみを計測した。B-SMA-0 の Fe-SMA ストリップには長さ方向に沿って 8 か所でひずみゲージを設置した (図 - 1)。他の試験体の Fe-SMA は、Fe-SMA を形状回復させる際に行う加熱によりひずみゲージが損傷することが考えられたため、ゲージを設置しなかった。

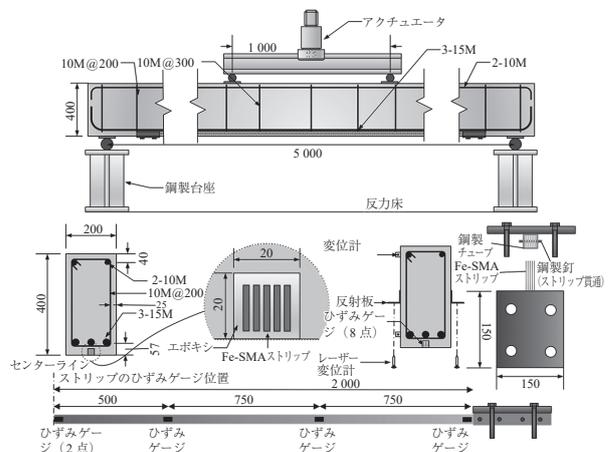


図 - 1 試験体図 (単位: mm)

#### 3.2 鋼材とコンクリートの材料特性

15 M 鉄筋の降伏強度と弾性係数はそれぞれ  $410 \pm 3.2$  MPa,  $175.2 \pm 6.3$  GPa であり、10 M 鉄筋は  $474.7 \pm 1.2$  MPa,  $177.7 \pm 3.8$  GPa であった。これは ASTM の方法による 3 本の試験体の引張試験結果によるものである。コンクリートの練混ぜは 2 バッチ行ない、最初のバッチで B-C と B-SMA-0 を打設し、次のバッチで B-SMA-1 と B-SMA-2 を打設した。コンクリートの設計基準強度は 40 MPa とした。表 - 1 に 28 日と実験実施日の圧縮強度を示す。各試験とも 3 本のテストピースを用いた。

表 - 1 コンクリート圧縮強度

試験体	圧縮強度 MPa	
	28 日	試験時
B-C	46.1 ± 1.8	51.3 ± 0.6
B-SMA-0		
B-SMA-1	45.8 ± 1.3	48.6 ± 0.9
B-SMA-2		

### 3.3 Fe-SMA 材料

#### (1) 材料特性

Fe-SMA ストリップの応力-ひずみ曲線は、ASTM A370 の方法で決定された。Fe-SMA は終局ひずみが比較的大きく、ひずみゲージでは3~5%以上のひずみを計測することができないため、デジタル画像相関法（以下、DICT）を用いて引張試験中のひずみを計測した。ダンベル形試験片の表面に DICT の追跡点としての3つの黒い標点をつけた。図 - 2 に Fe-SMA の応力-ひずみ曲線を示す。Fe-SMA ストリップは、トリリニアで近似できる。最初は剛性が高い領域で、応力 400 MPa まで剛性は 116 GPa である。応力 400 MPa から 600 MPa までは剛性が 38 GPa となり、600 MPa から終局までは剛性が 1 MPa と小さくなる。

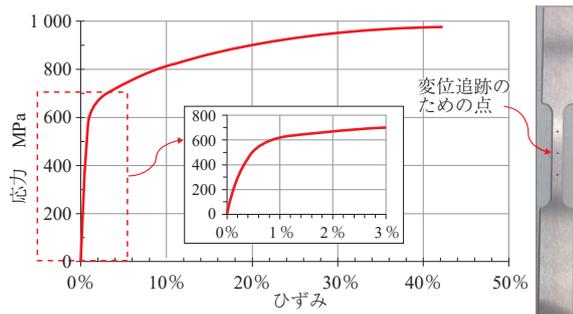


図 - 2 Fe-SMA の応力-ひずみ曲線

#### (2) Fe-SMA の製造

ストリップは、長さ 5000 mm、幅 100 mm、厚さ 1.5 mm の Fe-SMA の板材から切り出した。ウォータージェット切断機を用いて板材から幅 15.8 mm のストリップを切り出した。レーザー切断ではなくウォータージェットで切断したのは、レーザー切断の際に発生する熱により、材料特性が変化する可能性があるためである。

Fe-SMA ストリップは、製造業者が推奨するように、梁に定着させる前に約 3% のひずみを与えた。この初期ひずみ値は、加熱時の回復応力をもっとも高くなる最適値である。

### 3.4 補強手順

#### (1) 定着システム

Fe-SMA ストリップに初期ひずみを与えた後、別途設計された定着アンカー（角型鋼管）に挿入し、直径 3 mm の 5 本の鋼製釘をストリップを貫通させて打ち込んだ。形状回復過程で、Fe-SMA ストリップが十分固定されるよう鋼製釘のサイズおよび数を比例的に増加させた。次にさや管内にエポキシ樹脂接着剤を充填した。ストリップは鋼製チューブの端部で曲げて、チューブの側面に溶接した（図 - 3）。エポキシ接着剤が硬化するまでの間、

ストリップ間の離隔を一時的に確保するために、スペーサーを配置した。この隙間は、形状回復プロセスのための加熱テープをストリップ間に挿入するために必要であった。

定着システムの妥当性を確認するため、別の試験片を準備して引張試験を実施した（図 - 4）。終局荷重 80 kN に達すると、1 つ目の釘が打ち込まれた断面位置でストリップが引張破断した。加熱によって Fe-SMA ストリップにより生じるプレストレス力は合計 32.5 kN と推定されるので、定着部には十分な耐力があると考えられる。

端部定着した Fe-SMA ストリップを、RC 梁の引張側にあらかじめ設けられた座掘りに配置した。そののち、金属拡張アンカーを使用して、鋼板を梁の下面に固定した（図 - 5）。拡張アンカーをアンカー用孔に打ち込む前に、孔にエポキシ樹脂接着剤を充填した。

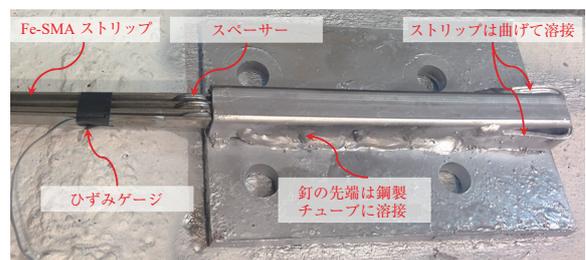


図 - 3 定着アンカー（梁セット前）

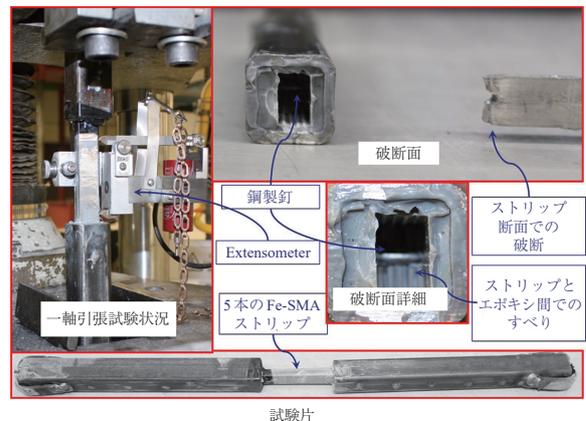


図 - 4 定着アンカーの引張試験

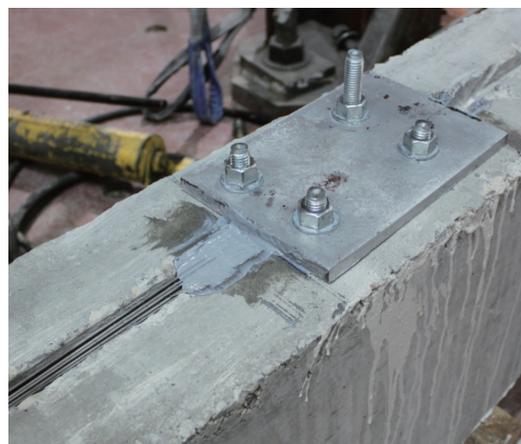


図 - 5 定着アンカー（梁セット後）

(2) Fe-SMA ストリップの形状回復

初期ひずみを与えた Fe-SMA ストリップを形状回復させるために、ストリップを 150℃ の形状回復温度以上に加熱した。伸縮性のある加熱テープをストリップ間に配置した。Fe-SMA ストリップ上に設置した 3 つの熱電対により、異なる位置で加熱過程の温度を観測した。加熱過程に生じる引張鉄筋のひずみにより、Fe-SMA ストリップにより発生するプレストレス力を間接的に測定した。

(3) グラウト

Fe-SMA ストリップが室温まで冷却されたのち、座掘りをペースト状の接着剤で埋めた。ヘラを用いてストリップ間にペーストを押し込んだ。

4. 実験結果と考察

4.1 プレストレス導入

Fe-SMA ストリップにより発生したプレストレス力は、形状回復過程で引張鉄筋に発生したひずみにより推定した。図 - 6 は、B-SMA-1 と B-SMA-2 試験体の引張鉄筋のひずみの変化を示した図で、プレストレス力による圧縮ひずみは正の値で示される。形状回復過程の初期におけるひずみの減少は、熱膨張の影響である。温度 110℃ でひずみが増加し始めた。すなわち、Fe-SMA ストリップによるプレストレス力が発生し始めた。このひずみは、加熱の終了段階 (155℃) まで徐々に増加した。冷却段階の間、形状回復および熱膨張効果の除去によりプレストレス力は増加し続けた。室温では、一部オーステナイト相からマルテンサイト相への逆変態のためひずみが減少した。試験体 B-SMA-2 では、7 本のストリップを同時に加熱するのに十分な加熱テープが無かったため、ストリップを 2 段階で加熱した。図 - 6 では最後のストリップを加熱した時点を示している。加熱冷却サイクルの開始時と終了時の圧縮ひずみの差が、プレストレス力に対応するひずみの量である。Fe-SMA ストリップにより発生したプレストレス力 P を算出するために以下に示す線形弾性解析における式を使用した。

$$P = \frac{\epsilon_c E_c}{\left(\frac{1}{A_g} + \frac{ey}{I_g}\right)}$$

$\epsilon_c$ : 引張鉄筋位置のコンクリートのひずみ (引張鉄筋のスパン中央に貼り付けたひずみゲージの値、鉄筋とコンクリートが完全付着と仮定)

$E_c$ : コンクリートのヤング係数 (= 4 500  $\sqrt{f'_c}$ , CSA 規準)

$f'_c$ : コンクリート圧縮強度

$A_g$ : 梁の断面積

$e$ : Fe-SMA ストリップの偏心距離 (= 192 mm)

$y$ : 梁の重心と引張鉄筋の重心間距離 (= 150 mm)

$I_g$ : 梁の断面 2 次モーメント

試験体 B-SMA-1 と B-SMA-2 のプレストレス力は、それぞれ 31.7 kN と 49 kN と計算された。このプレストレス力は B-SMA-1 と B-SMA-2 のストリップの応力に換算すると、それぞれ 268 MPa と 295 MPa になる。この形状回復過程における回復応力値は、製造業者による形状記憶効果試験によって得られた回復応力値 274 MPa に匹敵した。形状回復の過程で定着部に変化はなく、定着部の有効性を示すことができた。Rojob と El-Hacha によって報告されているように、定着部では引張鉄筋の圧縮ひず

みが急激に低下した。

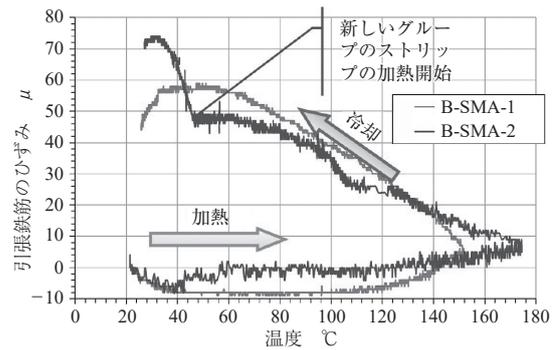


図 - 6 Fe-SMA 形状回復中の引張鉄筋のひずみの推移

4.2 加力実験

(1) 荷重変形関係

図 - 1 に示したようにすべての試験体は 4 点曲げ試験で終局まで単調荷重で行った。図 - 7 に全試験体の荷重 - 中央たわみ曲線を示す。試験体 B-SMA-2 は技術的な問題で一度 136.5 kN で除荷した後、終局まで再荷重した。比較用の RC 試験体は鉄筋が降伏したのち、コンクリートの圧壊により破壊した。補強した試験体も、同様に鉄筋が降伏し、Fe-SMA ストリップの応力 - ひずみ曲線における剛性が低い領域に入った (以降、この領域を Fe-SMA 降伏域とよぶ) あと、コンクリートの圧壊により破壊した。

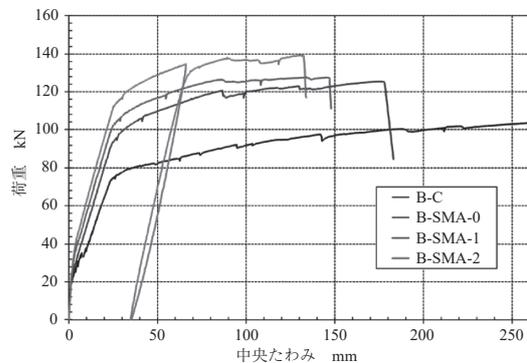


図 - 7 荷重 - 中央たわみ曲線

(2) 補強法の有効性

表 - 2 に実験結果の一覧を示す。常時荷重の領域では、Fe-SMA を形状回復させて補強した B-SMA-1 および B-SMA-2 試験体は、比較用の B-C 試験体に比べ、ひび割れ荷重がそれぞれ 29%、59% 増加し、降伏荷重はそれぞれ 40%、53% 増加した。Fe-SMA を形状回復させていない B-SMA-0 試験体は、ひび割れ荷重、降伏荷重ともに 25% 増加した。試験体 B-SMA-0、B-SMA-1、B-SMA-2 試験体の終局荷重は、比較用 RC 試験体に対してそれぞれ 21%、23%、34% 増加した。さらに重要なことは、Fe-SMA ストリップの降伏特性から、補強した梁が降伏してからコンクリートが圧壊するまでに大きなたわみ変形を示したことである。5 本の形状回復させた Fe-SMA ストリップで補強した試験体 B-SMA-1 の終局時変形の減少率は、形状回復させていない Fe-SMA ストリ

ップを用いた B-SMA-0 試験体に対して 16% であった。言い換えれば、Fe-SMA ストリップを形状回復させても、梁の変形性能が著しく低下することは無いといえる。さらに、試験体 B-SMA-1 と B-SMA-2 のコンクリート圧壊までの荷重 - 中央たわみ曲線で囲まれる総エネルギー吸収量は、形状回復させていない B-SMA-0 に比べてそれぞれ 16%、18% 減少し、比較用の B-C 試験体に比べるとそれぞれ 29%、31% 減少した。

表 - 2 実験結果一覧

実験値	B-C	B-SMA-0	$\Delta$ , %	B-SMA-1	$\Delta$ , %	B-SMA-2	$\Delta$ , %
ひび割れ荷重 $P_{cr}$ , kN	19.6	24.5	25	25.2	29	31.2	59
降伏荷重 $P_y$ , kN	73.5	92	25	103	40	112.6	53
終局荷重 $P_u$ , kN	103.5	124.8	21	127.3	23	138.9	34
降伏時のたわみ $\Delta_y$ , mm	23.8	24.6	3	25.6	8	25	5
終局時のたわみ $\Delta_u$ , mm	258.0	175.0	-32	146.5	-43	132	-49
じん性指標 $\Delta_u/\Delta_y$	10.8	7.1	-34	5.7	-47	5.3	-51
エネルギー吸収量, *kN-mm $\times 10^3$	23.2	19.4	-16	16.5	-29	15.9	-31

(3) ひずみ分布

図 - 8 にスパン中央梁断面の、ひび割れ時、降伏時、終局時の梁せい方向のひずみ分布を示す。すべての荷重段階で梁せい方向のひずみ分布は線形であった。スパン中央の Fe-SMA ストリップのひずみは前述のように B-SMA-0 試験体のみ計測を行った。Fe-SMA ストリップのひずみは、等曲げ区間の 3 か所のひずみゲージの値の平均値を採用した。ひび割れ時および降伏時には試験体 B-SMA-0 のひずみ分布は線形であり、Fe-SMA ストリップと周囲のグラウトが完全に一体となっていたことを示している。しかし、終局荷重では、Fe-SMA ストリップのひずみは引張鉄筋のひずみより小さく、これは Fe-SMA ストリップと周囲のグラウト間ですべりが生じたことを示すものである。

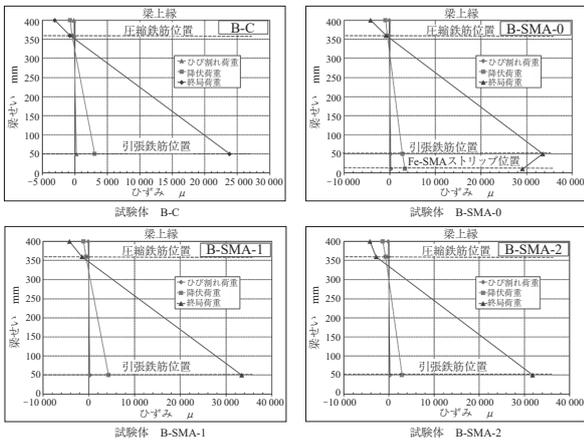


図 - 8 スパン中央梁断面の梁せい方向ひずみ分布

(4) 付着特性

補強した梁に、ペースト状の接着剤の材料分離やひび割れは目視で確認されなかった。図 - 9 に試験体 B-SMA-0 の Fe-SMA ストリップのひずみ分布を示す。定着部付近のひずみが小さいのは、付着によって Fe-SMA ストリップからコンクリートに荷重が伝達されていることを示している。モーメント一定区間のひずみは 120 kN (スパン中央たわみ 100 mm に相当) までほぼ一定だが、その後スパン中央から左側のひずみが右側のひずみに比

べ大きくなった。これは付着切れが起こったことを示すものである。図 - 10 は、試験体 B-SMA-0 のスパン中央の Fe-SMA ストリップおよび引張鉄筋のひずみと荷重の関係を示したものである。Fe-SMA ストリップのひずみは降伏荷重までは引張鉄筋のひずみより大きかった。これは、スパン中央で Fe-SMA とグラウト間で付着切れが生じたことを示すものである。

(5) ひび割れ性状

典型的な曲げひび割れがすべての梁に生じた (図 - 11)。ひび割れは比較用の B-C 試験体と同様に均一に分布した。定着アンカー付近には B-SMA-2 試験体を除いてひび割れが見られなかった。B-SMA-2 試験体では、終局荷重 138.9 kN に近い荷重 134 kN で定着部付近でひび割れが観測された。

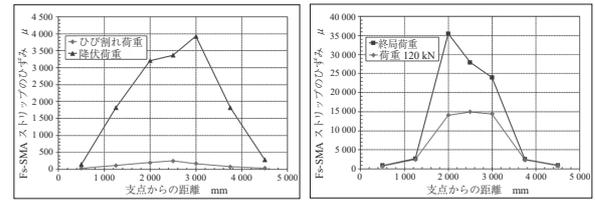


図 - 9 Fe-SMA のひずみ分布 (B-SMA-0 試験体)

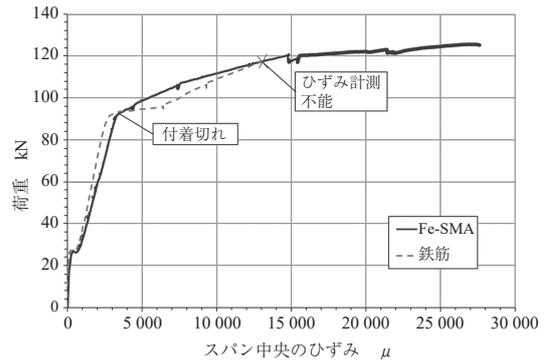


図 - 10 スパン中央の Fe-SMA と引張鉄筋の荷重とひずみの関係 (B-SMA-0 試験体)

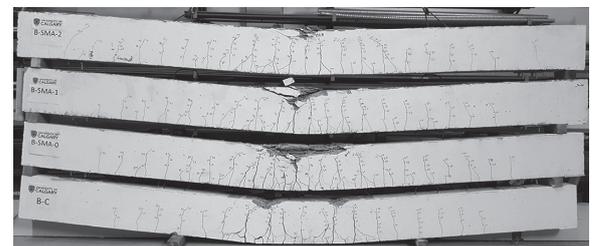


図 - 11 ひび割れパターン

4.3 NSM 工法を用いて CFRP でプレストレス補強した試験体との比較

SMA で補強した B-SMA-1 および B-SMA-2 の性状について、El-Hacha と Gaafar によって実験された NSM 工法を用いて CFRP でプレストレス補強した試験体との比較を行った。CFRP で補強した比較用試験体は CFRP-20 と CFRP-40 とし、それぞれ CFRP の棒材のプレストレスレベルを終局強度の 20%、40% としたものである。

El-Hacha と Gaafar は、十分な変形性能を確保しつつ、梁の曲げ強度が向上した 40% のプレストレスレベルのものを最適なプレストレスレベルと選定した。CFRP-20 と CFRP-40 のプレストレス力は、それぞれ 27.4 kN と 52.6 kN であった。CFRP の棒材に導入されたプレストレス力は、Fe-SMA ストリップによって B-SMA-1 と B-SMA-2 に導入されたプレストレス力 31.7 kN、49 kN に匹敵する。図 - 12 に CFRP で補強した梁と、SMA で補強した梁の荷重 - 中央たわみ曲線を示す。

表 - 3 に CFRP で補強した梁と SMA で補強した梁の比較を示す。常時荷重状態では、SMA 補強のものと CFRP 補強のものは同等の性状を示した。終局状態において、CFRP-20 と CFRP-40 試験体では、B-SMA-1 および B-SMA-2 と比較してそれぞれ 11% と 2% の強度上昇を示した。CFRP 補強梁の終局強度の増加は見られたが、梁の変形性能を著しく損なうものであった。さらに、El-Hacha と Gaafar の報告には、NSM 工法で取り付けられた CFRP の棒材が突然破断することによって、CFRP-20 および CFRP-40 がぜい性的に破壊したとある。試験体 CFRP-20 と CFRP-40 のじん性指標は、試験体 B-SMA-1 および B-SMA-2 と比較してそれぞれ 71% および 90% 小さいという結果であった。したがって、SMA で補強した梁は、CFRP で補強した梁と同等の常時荷重と終局荷重時の強度を維持しながら、梁の変形性能を著しく損なったり、破壊モードが変化することも無かった。SMA で補強した梁は、補強されていない梁と同様にじん性のあるモードで破壊した。

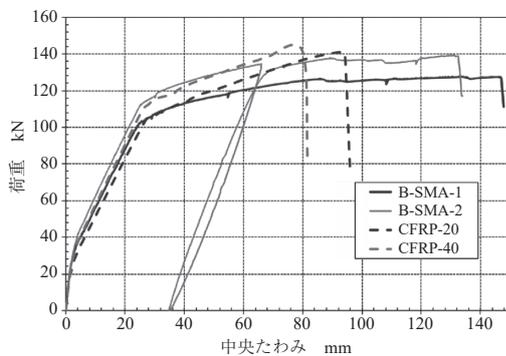


図 - 12 荷重 - 中央たわみ曲線 (CFRP 試験体との比較)

表 - 3 実験結果一覧 (CFRP 試験体との比較)

実験値	B-SMA-1	CFRP-20	SMA/CFRP*	B-SMA-2	CFRP-40	SMA/CFRP
ひび割れ荷重 $P_{cr}$ , kN	25.2	22.1	1.14	31.2	27.9	1.12
降伏荷重 $P_y$ , kN	103	105.7	0.97	112.6	114.5	0.98
終局荷重 $P_u$ , kN	127.3	141	0.90	138.9	141.7	0.98
降伏時のたわみ $\Delta_y$ , mm	25.6	27.7	0.92	25	28.6	0.87
終局時のたわみ $\Delta_u$ , mm	146.5	92.5	1.58	132	79.3	1.66
じん性指標 $\Delta_u/\Delta_y$	5.7	3.34	1.71	5.3	2.77	1.90
エネルギー吸収量, *kN-mm $\times 10^3$	16.5	9.9	1.66	15.9	8.7	1.84

## 5. ま と め

NSM 工法により取り付けられた Fe-SMA による自己プレストレスを用いた技術は、RC 梁の、現場でのジャッキを用いた緊張作業を必要としない曲げ補強工法として有効であることが明らかとなった。全部で 4 体の実大 RC 梁の実験を実施し、そのうち 3 体は Fe-SMA ストリップで補強を行った。以下の結論が導き出された。

- 1) NSM 工法で取り付けられた Fe-SMA ストリップを形状回復させることで補強した梁は、常時荷重時および終局時の曲げ性能が向上した。
- 2) 補強した梁は、補強していない梁と同様に、引張鉄筋と Fe-SMA ストリップの降伏後にコンクリートの圧壊により破壊した。補強した梁の変形性能は、Fe-SMA ストリップの降伏特性の影響で、補強していない梁と同等であった。
- 3) この研究のために設計された定着アンカーは、形状回復過程および荷重載荷過程で、定着部に特に変状も無く、力を伝達することができた。Fe-SMA ストリップの形状回復によって生じるプレストレス力は、製造業者による推定値に近い結果となった。
- 4) Fe-SMA ストリップとグラウト間の付着は、スパン中央で局所的な付着切れが生じた降伏荷重までは強固であった。補強した梁では、グラウトに縦割れの兆候は無かった。
- 5) NSM 工法による、同等のプレストレス力を有する CFRP でプレストレス補強した梁と、SMA で自己プレストレスにより補強した梁の比較から、2つのシステムが常時荷重時には同等の性状を示すことが明らかになった。CFRP で補強した梁は、SMA で補強した梁に比べやや高い終局強度を示したが、CFRP で補強した梁では変形性能が著しく低下し、CFRP の棒材がぜい性的に破断することにより破壊した。対照的に SMA で補強した梁ではじん性挙動を示し、破壊モードは補強していない梁と同様であった。

NSM 工法による、Fe-SMA を用いた自己プレストレス補強システムは、その適用が容易で、比較的安価な材料であり、補強していない梁と同様の破壊モードを保証できるので、既存建造物の補修補強技術として有望な技術である。

## 原 典

Raafat El-Hacha and Hothifa Rojob: Flexural strengthening of large-scale reinforced concrete beams using near-surface-mounted self-prestressed iron-based shape-memory alloy strips, PCI Journal, vol.63, No.6, pp.55-65, 2018

Appendix: Flexural strengthening of large-scale reinforced concrete beams using near-surface-mounted self-prestressed iron-based shape-memory alloy strips

([https://www.pci.org/PCI\\_Docs/Publications/PCI%20Journal/2018/November-December/17-0007\\_El-Hacha\\_Appendix\\_ND18.pdf](https://www.pci.org/PCI_Docs/Publications/PCI%20Journal/2018/November-December/17-0007_El-Hacha_Appendix_ND18.pdf))

【2019 年 3 月 7 日受付】