

論文 形状記憶合金を主筋にしたコンクリートはりの正負繰り返し載荷実験

田尻 清太郎^{*1}・高橋 潤^{*2}・塩原 等^{*3}・小谷 俊介^{*4}

要旨：超弾性の性質を示す形状記憶合金を主筋としたコンクリートはりに対して，正負繰り返し曲げ載荷実験を行い，その基本的な挙動を調べた。実験パラメーターはプレテンションの有無である。実験の結果，正負繰り返し曲げ載荷を受けても残留変形，残留ひび割れはほぼゼロに帰ること，プレテンションを導入しないはりでは，ひび割れ発生直後に大きなひび割れへと進展し，剛性が急激に低下し，降伏後はある程度の剛性を有するのに対し，プレテンションを導入したはりでは，ひび割れ発生後もしばらくは高い剛性を保ち，部材降伏後の剛性はほぼゼロになることが確認された。

キーワード：形状記憶合金，超弾性，はり，正負繰り返し載荷，プレテンション

1. はじめに

近年，高知能建築構造システムの開発に関する研究が盛んに行われるようになった。このような研究では，建築分野における新しい高知能材料の一つとして，形状記憶合金の応用方法が検討されている。

形状記憶合金は，その温度によって，形状記憶効果を示す状態，超弾性を示す状態，両者の遷移状態という3つの状態をとる。形状記憶効果を示す状態では，降伏したのち除荷すると残留変形が生じるが，それを所定の温度以上に加熱すると変形がゼロに戻る。超弾性を示す状態では，降伏したのち除荷すると直ちに変形がゼロに戻る。また，両者の遷移状態ではこれらの中間の性質を示す¹⁾。

これまで，超弾性の形状記憶合金の材料特性に関する実験や，それを筋かいなどの制振部材として用いた実験などが報告されているが^{2),3)}，コンクリートはりの主筋として超弾性の形状記憶合金を用いた実験は報告されていない。

そこで，本研究では，常温で超弾性の性質を示す Ti-Ni 系の形状記憶合金を主筋として用いたコンクリートはりで，プレテンションを導入したものとししないもの2体を作製し，そのはりに対して，単純ばり一点載荷型の正負繰り返し曲げ載荷実験を行い，その基本的な挙動を調べることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は，断面が 50 × 100mm，長さが 700mm のはりで，試験区間は 500mm である。主筋には直径 3.0mm の Ti-Ni 系の形状記憶合金を用い，断面内の上下にそれぞれ3本ずつ配筋した。せん断補強筋には直径 1.6mm の鉄製ワイヤーを用い，100mm 間隔で配筋した。また，主筋に用いた形状記憶合金は表面が滑らかであるため，表面をすべて鑢がけし，さらに，試験区間外の部分に1本の主筋に対して両端にそれぞれ2個，合計24個の定着治具を埋め込むことによって，

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (正会員)

*2 東京大学 工学部建築学科

*3 東京大学大学院 工学系研究科 助教授 工博 (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科 教授 工博 Ph.D. (正会員)

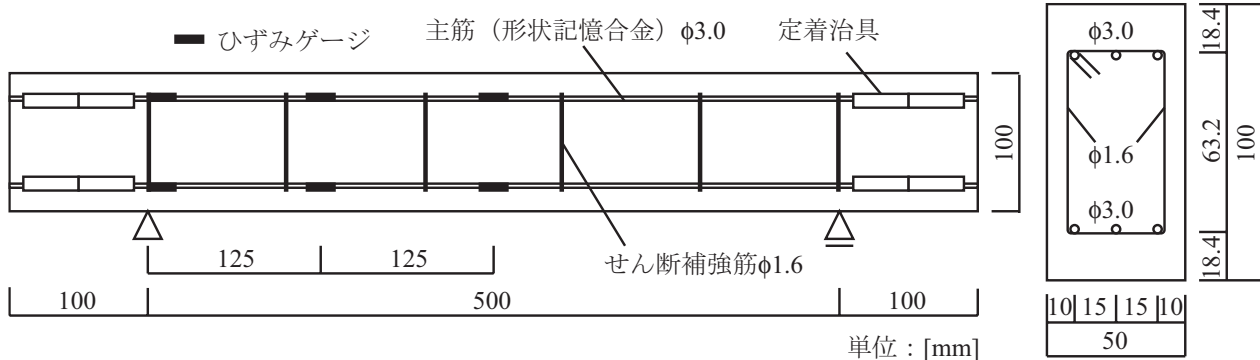


図 - 1 試験体詳細図

表 - 1 試験体諸元

試験体名	引張主筋比[%]	全緊張力[kN]
SC1	0.42	なし
SC2	0.42	9.32

表 - 2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
51.7	3.94	27.3

表 - 3 形状記憶合金の変態温度

M_f [K]	M_s [K]	A_s [K]	A_f [K]
238.0	300.0	265.5	308.0

表 - 4 形状記憶合金の材料特性

降伏強度 [MPa]	降伏ひずみ [%]	弾性係数 [GPa]
531	1.13	46.9

付着・定着性を高めた（図 - 1）。

試験体は SC1，SC2 の 2 体で，形状，配筋，使用材料は同一のものとし，プレテンションの有無をパラメーターとした。なお，プレテンションは図 - 2 のように，1 本の主筋をローラーに巻き付け両端から引っ張ることにより，全ての主筋に一様に導入できるようにした。両試験体の諸元を表 - 1 に示す。ここで，全緊張力は，実験直前の主筋のひずみの平均値から算出した値である。

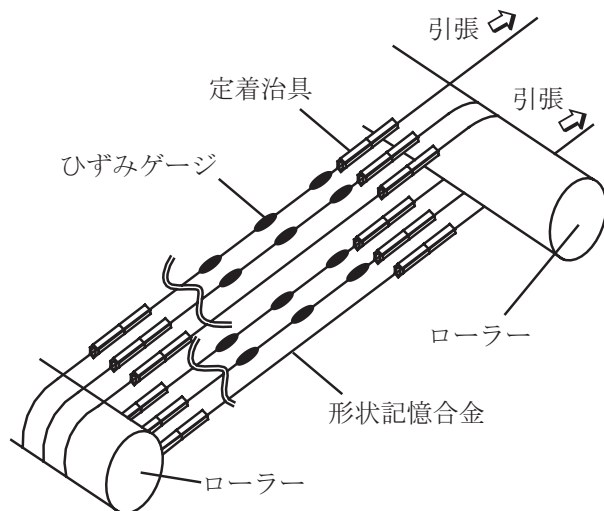


図 - 2 プレテンションの導入方法

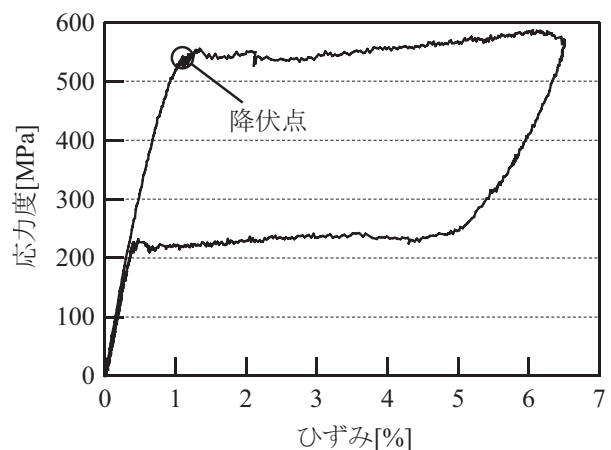


図 - 3 形状記憶合金の応力 - ひずみ曲線

2.2 材料特性

コンクリートの調合は，最大骨材寸法 5mm，水セメント比 45%，セメントと骨材の比率を 1:2 とした。これはモルタルに近いが，試験体の寸法，施工性を考慮した結果であり，実際はコン

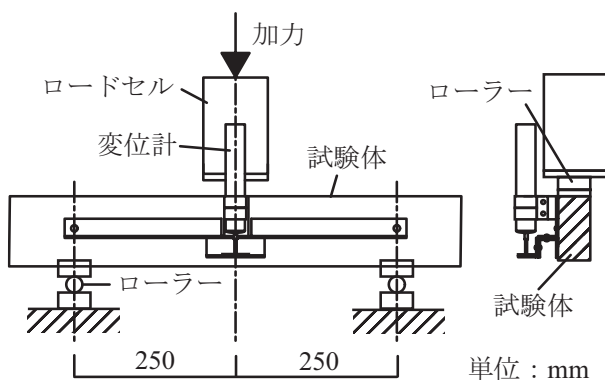


図-4 加力装置

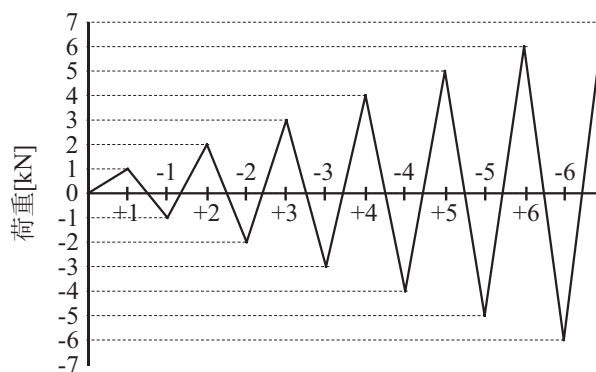
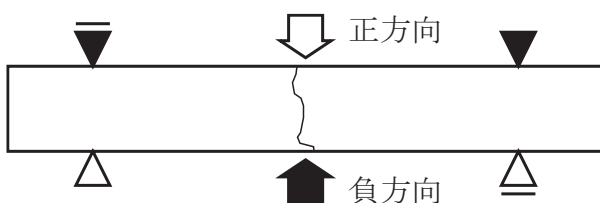
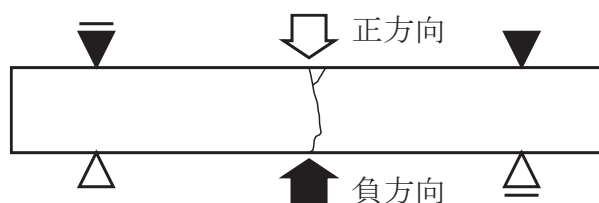


図-5 載荷履歴



(a) 試験体 SC1



(b) 試験体 SC2

図-6 実験終了時のひび割れ状況

クリートであることを意図しているため、以下もコンクリートと表記する。コンクリートの材料特性を表-2に示す。なお、ここで弾性係数は圧縮強度の $1/3$ の点における割線剛性として算出した。

主筋に用いたTi-Ni系の形状記憶合金のマルテンサイト変態開始温度 M_s 、マルテンサイト変態終了温度 M_f 、逆変態開始温度 A_s 、逆変態終了温度 A_f を表-3に示す。また、形状記憶合金の応力-ひずみ曲線を図-3に示すとともに、その材料特性を表-4に示す。なお、形状記憶合金の降伏強度・降伏ひずみは図-3に示す降伏点における応力・ひずみと定義し、剛性は降伏ひずみに対する降伏強度の比として定義した。

定着治具と形状記憶合金の間の定着強度は、引き抜き試験より定着治具1つあたり3.9kNで降伏強度を上回ることを確認した。

2.3 加力・測定方法

試験体の試験区間両端をピン・ローラー支持とし、試験体中央に加力用の鉄板とロードセルを置き、その上から試験機で加力するものとした。また、正負繰り返し曲げ載荷を行うにあ

って、加力・除荷のたびに、試験体を上下反転させた。

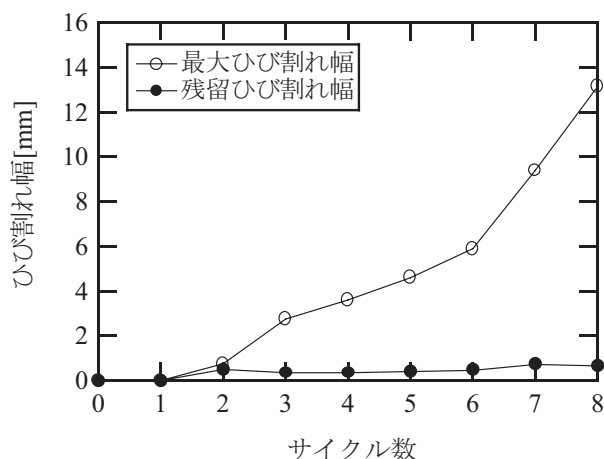
荷重は、加力点のロードセルで測定し、中央点の変位を図-4に示すように、両端のピン支持点でのみ支えられているフレームと試験体に固定されている変位計との相対距離として測定するとともに、上・下端筋の中央、片端の主筋のそれぞれについて、図-1のように試験区間の中央、端、それらの中間の3箇所、合計12箇所のひずみをひずみゲージにより測定した。さらに、ひび割れ状況、各サイクルの変形のピーク時の最大ひび割れ幅、除荷後のひび割れ幅を目視により測定した。

なお、載荷履歴は図-5に示すように、1サイクルごとに1kNずつ増加させていき、正負方向とも変形角が $1/10$ に達するまで繰り返した。

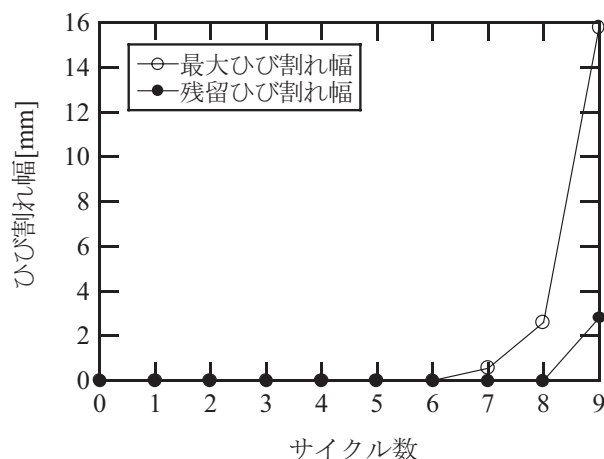
3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ状況

SC1とSC2の実験終了時のひび割れ状況を図-6に示す。SC1、SC2の両者ともひび割れは1本しか発生しておらず、そのひび割れはともに



(a) 試験体 SC1

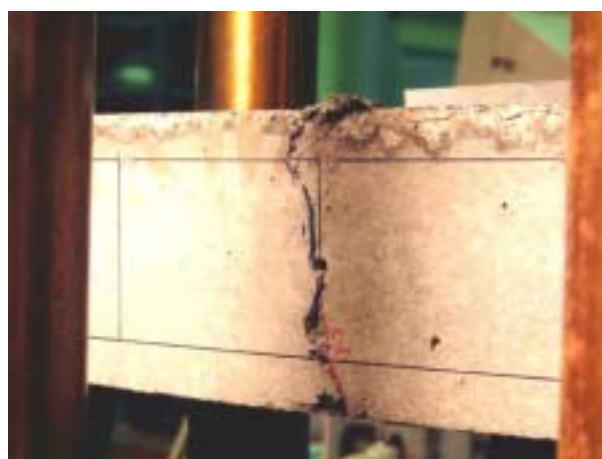


(b) 試験体 SC2

図 - 7 各サイクルにおける最大ひび割れ幅と除荷後の残留ひび割れ幅



(a) 最大変形時



(b) 除荷後

写真 - 1 試験体 SC1 の実験時の様子

試験体のほぼ中央部分を縦方向に貫通していることがわかる。これは、コンクリートと主筋の間の付着が十分でなかったため、主筋の抜け出しが大きくなり、最もモーメントの大きい中央部分のひびわれに変形が集中したためと考えられる。また、SC1 ではコンクリートの圧壊は見られなかったが、SC2 ではコンクリートの圧壊が見られた。

3.2 最大ひび割れ幅と残留ひび割れ幅

各サイクルの変位のピーク時における最大ひび割れ幅と除荷後の残留ひび割れ幅を図 - 7 に示す。SC1 では 2 サイクル目以降、最大ひび割れ幅は漸増しているが、除荷後の残留ひび割れ幅は各サイクルともゼロ近くで一定している。

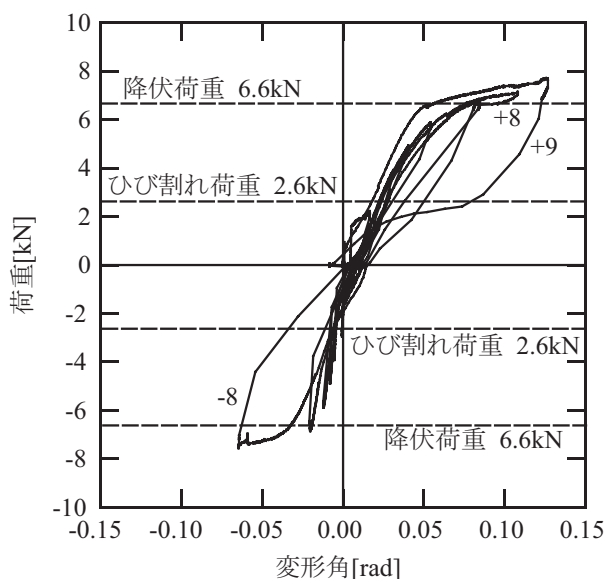
SC2 では 7 サイクル目以降、最大ひび割れ幅は急激に増加しており、残留ひび割れ幅は 8 サイクル目まではほぼゼロとなっている。このことから、加力時に大きなひび割れを経験しても、除荷すると、残留ひび割れ幅はゼロ近くまで戻るといえる。

また、SC1 の最大変形時の様子とその除荷後の様子を写真 - 1 に示す。

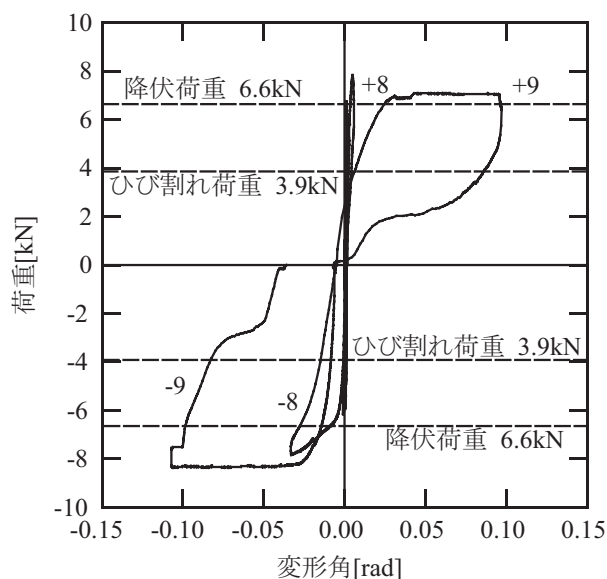
3.3 荷重と変形角の関係

試験区間 500mm に対する中央部のたわみの比を変形角とし、SC1 と SC2 の荷重 - 変形角曲線を図 - 8 に示す。

SC1 では、+2 サイクル目の+1.6kN の点で曲げひび割れが発生し、それによって剛性が急激

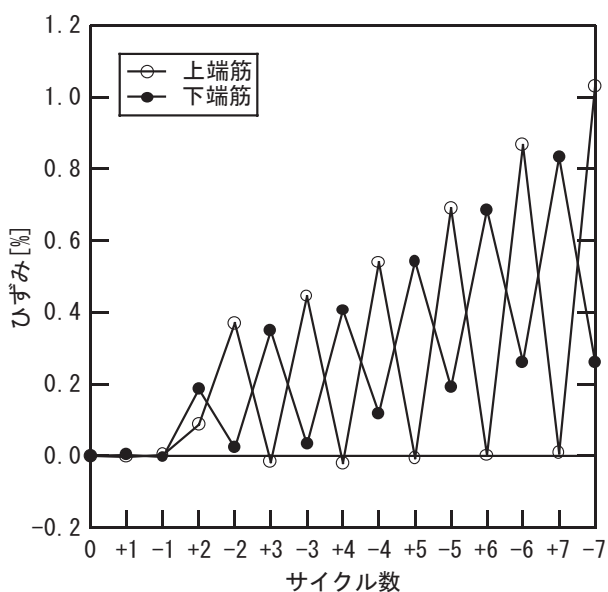


(a) 試験体 SC1

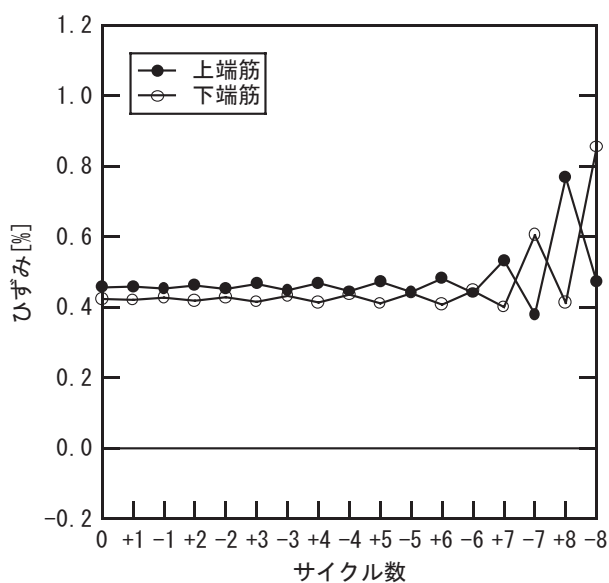


(b) 試験体 SC2

図 - 8 荷重 - 変形角関係



(a) 試験体 SC1



(b) 試験体 SC2

図 - 9 各サイクルピーク時の中央の主筋の中央部のひずみ

に低下していることがわかる。これは、形状記憶合金の弾性係数がコンクリートのおよそ2倍程度で、ひび割れが発生した断面の中立軸が圧縮側に大きく遷移したことや、主筋とコンクリートの付着力低下により、アーチ機構に移行したことなどが原因であると考えられる。

SC2 では、+7 サイクル目でひび割れが発生した後もしばらく高い剛性を保っているが、-8 サ

イクル目の-6.3kNを超えると剛性が急激に低下していることがわかる。また、部材の降伏後においては、剛性がほとんどゼロになっていることがわかる。これは、ひび割れが発生した断面で中立軸が圧縮側に遷移し、その後、主筋が降伏したためだと考えられる。

また、式(1)、(2)により略算したひび割れ荷重、降伏荷重を図-8に併せて示す。

$$M_c = (\sigma_t + T_p / A) \cdot Z \quad (1)$$

$$M_y = 0.9a_t f_t d \quad (2)$$

ここに、 M_c ：ひび割れモーメント、 M_y ：降伏モーメント、 σ_t ：コンクリート引張強度、 f_t ：主筋降伏強度、 T_p ：全緊張力、 d ：有効せい、 A ：断面積、 Z ：断面係数、 a_t ：引張主筋断面積。

SC1 のひび割れ荷重は実験値が計算値をわずかに下回り、SC1、SC2 の降伏荷重は実験値が計算値をわずかに上回った。SC2 のひび割れ荷重の実験値は 4.9kN であり、目視による計測であったため、より低い荷重でひび割れが発生していた可能性もあるが、いずれにしても、プレテンションを導入すると、ひび割れ後もしばらく高い剛性を保つことがわかる。

さらに、SC1、SC2 とともに正負繰り返し載荷を受けても、各サイクルの残留変形はほぼゼロに戻っていることがわかる。

3.4 主筋中央部のひずみ

各サイクルのピーク時における中央の主筋の中央部のひずみを図 - 9 に示す。

SC1 の上端筋のひずみ度は正方向の載荷においてはゼロに近いが、負方向の載荷においてはサイクル数が大きくなるにしたがって漸増している。SC1 の下端筋のひずみ度は正負両方向の載荷において漸増しており、しかも両方向の載荷時とも引張になっていることがわかる。

SC2 の上端筋のひずみ度は-6 サイクルまではほぼ一定だが、+7 サイクル以降は負方向の載荷において増大している。SC2 の下端筋のひずみ度は-6 サイクルまではほぼ一定だが、+7 サイクル以降は正方向の載荷において増大している。

4. まとめ

本研究では、超弾性の形状記憶合金を主筋に用いた 2 体のコンクリートはりの基本的な挙動を調べるために、正負繰り返し曲げ載荷実験を行い、プレテンションの有無による挙動の違いを調べた。その結果を以下に要約する。

- (1) 形状記憶合金とコンクリートの間では付着力が小さいため、モーメントが大きい箇所

にひび割れが生じると、そこに変形が集中する。

- (2) 形状記憶合金をコンクリートはりの主筋として用いる場合、コンクリートと形状記憶合金の間の付着力が弱く、いかにして付着を確保するかが大きな課題となる。
- (3) 正負繰り返し載荷や大変形により変形角 1/10 程度の大きなひび割れ・変形を生じても、除荷後の残留ひび割れ幅・残留変形はほぼゼロに戻った。
- (4) プレテンションを導入しないはりは、ひび割れが入ると同時に急激に剛性が低下したが、プレテンションを導入したはりでは、ひび割れが生じても、部材降伏するまで高い剛性を保った。
- (5) プレテンションを導入しないはりは、部材の降伏後、部材降伏時剛性の 10% 程度の剛性を有したのに対し、プレテンションを導入したはりは、部材降伏後の剛性がほぼゼロとなった。
- (6) ひび割れが生じると、急激にひび割れが進展することがあるが、この現象は、プレテンションを導入することによってある程度抑制された。
- (7) ひび割れ荷重、降伏荷重は、鉄筋コンクリートはりとは仮定して算出したものと同程度のものとなった。

参考文献

- 1) 鈴木雄一：実用形状記憶合金 工業調査会，1987.10
- 2) 岸川聡史，塩原等，小谷俊介：形状記憶合金の基本的性質と建築構造物への応用，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1065-1066，1999.9
- 3) 嶋脇助助ほか：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究（その 24：超弾性筋かい部材の繰返し載荷実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.229-230，2001.9