

論文 UHP-SHCC で被覆した鉄筋による RC 部材の鉄筋座屈抑制効果に関する実験的研究

宋 博超*1・上田 尚史*2・中村 光*3

要旨: 本研究では、高強度で高靱性な繊維補強セメントモルタル (UHP-SHCC) を用いて鉄筋を被覆することにより鉄筋の座屈を抑制する方法を提案し、その抑制効果を正負交番載荷試験により検討した。また、被覆した鉄筋の表面形状が座屈の抑制に及ぼす影響を検討した。その結果、鉄筋を UHP-SHCC で被覆することで横方向鉄筋を用いることなく鉄筋座屈を抑制できることを明らかにした。また、鉄筋座屈を効果的に抑制するためには、鉄筋を被覆する材料と母材コンクリートとの一体性を確保する必要があることを明らかにした。
キーワード: 座屈メカニズム, 座屈抑制, 水平ひび割れ, 交番載荷試験, 被覆鉄筋, DIC

1. はじめに

コンクリート構造物の耐震設計においては、過大な地震動に対して構造物が崩壊しないことを前提として、部材の損傷を許容するのが一般的である¹⁾。そのため RC 柱部材は、過大な荷重が作用した場合においても十分に變形できることが望ましく、曲げ挙動が卓越するように設計されている。RC 柱部材の變形性能を向上させるためには、軸方向鉄筋の座屈を抑制する必要がある、設計においては帯筋を適切に配置することが求められる¹⁾、²⁾。

一方、所要の變形性能を確保するために帯筋が密に配筋されることで、しばしば過密配筋の問題が生じる。帯筋を用いることなく軸方向鉄筋の座屈を抑制できれば、経済性や生産性の面で大きな利点となり得る³⁾。

本研究では、新たな鉄筋の座屈抑制法として、高強度で高靱性な材料を用いて軸方向鉄筋を被覆する方法を考案し、それが繰返し荷重を受ける RC 部材の座屈挙動に及ぼす影響を実験的に検討した。具体的には、鉄筋に被覆する材料の力学特性と座屈抑制効果を明らかにするとともに、被覆した材料の表面形状の影響について考察した。その際、画像相関法 (DIC) を用いて表面ひび割れの進展挙動を明らかにすることを試みた。

2. 新たな座屈発生メカニズムに基づいた座屈抑制法

Nakamura らは、繰返し荷重を受ける RC 部材の内部のひび割れ状態を観察することにより、図-1 に示す新たな座屈発生メカニズムを提唱している⁴⁾。すなわち、(I) 軸方向鉄筋からの水平ひび割れの発生⁵⁾、(II) 当該ひび割れの進展による鉄筋變形に対するかぶりコンクリートの拘束力低下、(III) 軸方向鉄筋の座屈、である。このメカニズムに基づけば、座屈の起点となる軸方向鉄筋近傍の水

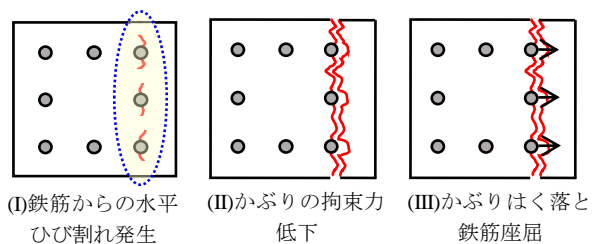


図-1 Nakamura らに提案された座屈メカニズム⁴⁾

平ひび割れの発生ならび進展を抑えることで、座屈を抑制することができる⁶⁾と考える。

本研究では、高強度で高靱性な UHP-SHCC⁵⁾により軸方向鉄筋を予め被覆することにより、鉄筋座屈を抑制する方法を提案する。この手法のコンセプトは、(I)被覆材の高強度特性により、軸方向鉄筋から生じる水平ひび割れの発生を抑制すること、(II)被覆材の高靱性特性により、ひび割れ発生後の進展を抑制すること、である。UHP-SHCC は、その緻密さから劣化因子の侵入を抑制できる材料である⁶⁾。そのため、UHP-SHCC により軸方向鉄筋を被覆することで、鉄筋の腐食抵抗性の向上も期待される。これは同時に、エポキシ鉄筋のような従来の μm の管理から、セメント系材料による cm の管理への、被覆鉄筋の概念の転換も意図している。

3. 実験概要

3.1 実験供試体および実験ケース

本実験では、RC はりを用いた正負交番載荷を行った。図-2 に供試体の一例を示す。供試体の断面を $200 \times 200\text{mm}$ とし、軸方向鉄筋には D10 を圧縮縁から 35mm と 165mm の位置にそれぞれ 2 本ずつ配置した。このとき、既往の研究と同様に側方かぶりを 45mm とした⁵⁾。また、せん断スパンには D10 の閉合スターラップを配置した。

*1 関西大学大学院 理工学研究科都市システム工学分野 (学生会員)

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

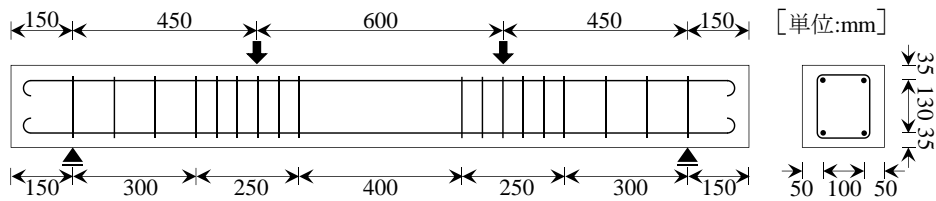


図-2 供試体概要 (NC 供試体)

表-1 実験ケースと材料特性

	等曲げ区間の補強方法	被覆鉄筋の表面形状	コンクリートの圧縮強度(N/mm ²)	被覆材料の圧縮強度(N/mm ²)	鉄筋の降伏強度(N/mm ²)
NC	—	—	50.4	—	380
NC*	—	—	50.2	—	360
ST	横方向鉄筋	—	53.8	—	380
HM	高強度モルタル	節わずか	54.4	69.5	
US	UHP-SHCC	節わずか	56.9	92.9	360
US*		節わずか	44.8	97.0	
US-R		節なし	45.6	109.9	
US-D		節多数	42.9	99.8	

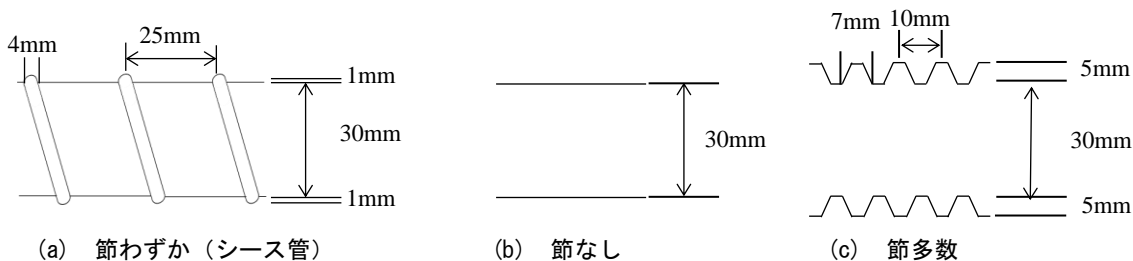


図-4 被覆鉄筋の表面形状



図-3 軸方向鉄筋を UHP-SHCC で被覆した状態

表-1 に供試体の一覧を示す。実験では、等曲げ区間内の 400mm の範囲において軸方向鉄筋が座屈することを意図している。当該区間に横方向鉄筋を配置しない供試体を NC とした。それに対し、等曲げ区間に 100mm 間隔で D10 の閉合スターラップを配置した供試体を ST とした。ST 供試体は、従来の座屈抑制法として位置づけられる。また、NC 供試体に対して、図-3 のように等曲げ区間を含む 900mm の範囲の軸方向鉄筋を UHP-SHCC により被覆した供試体を US とした。UHP-SHCC の被覆に際しては、被覆厚さがおよそ 10mm となるように図-4(a) に示す内径 30mm のステンレス製のシース管を用いた。なお、以降では、UHP-SHCC 等のセメント系材料により被覆された鉄筋を被覆鉄筋と称し、被覆する材料を被覆モルタルと称することとする。

本研究では、被覆モルタルの力学特性が座屈抑制効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、被覆モル

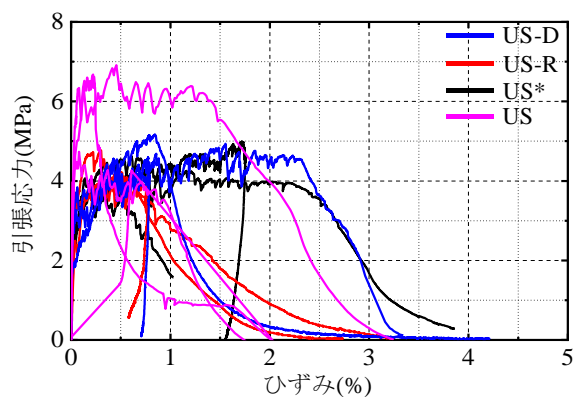


図-5 引張応力-平均ひずみ関係

タルに高強度モルタルを用いた供試体も実験に供した。被覆材料に高強度モルタルを用いた供試体を HM とした。

また、被覆鉄筋の表面形状の違いによる影響を検討するために、被覆鉄筋として表面に凹凸(節)がないものと多数あるものを用意した。図-4 に表面形状の幾何学的な違いを示す。シース管を用いたものは、節高さは 1mm、節間隔は 25mm であるのに対して、節が多数あるものは、節高さは 5mm、節間隔は 10mm である。本研究では、節がない被覆鉄筋を用いた供試体を US-R、節が多数ある被覆鉄筋を用いた供試体を US-D とした。なお、被覆鉄筋に用いた UHP-SHCC には、長さ 6mm、直径

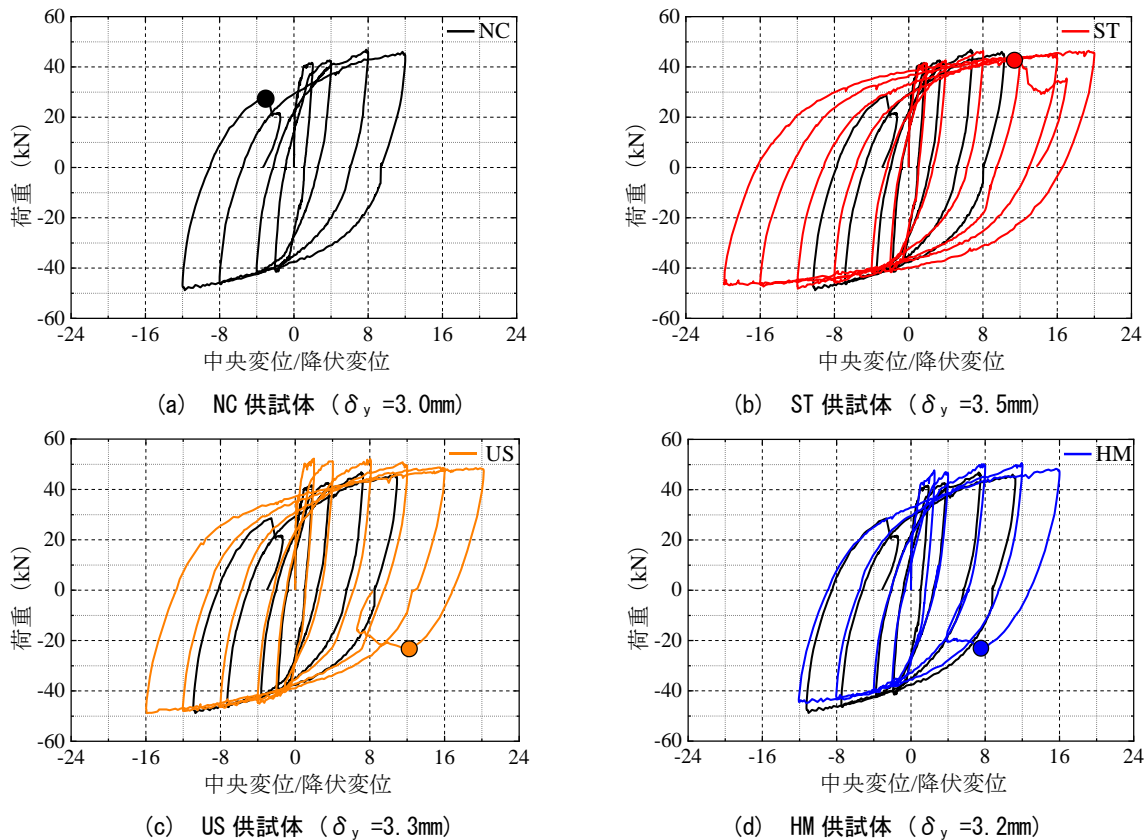


図-6 荷重-変位関係

12 μ m の高強度ポリエチレン繊維（公称引張強度 2700MPa, 公称弾性係数 88GPa）を 1.5vol% 混入した。被覆鉄筋は、中心に鉄筋を固定した管に対して被覆材料を流下させることで作製した。また、打設の翌々日に脱型した。

図-5 には、ダンベル供試体（断面 30×13mm, 検長 100mm）を用いた直接引張試験から得られた UHP-SHCC の引張応力-平均ひずみ関係を示す。それぞれの被覆鉄筋には同一配合の UHP-SHCC を用いたが、作製時期と試験材齢が異なるため、供試体ごとの結果を区別して示している。図より、ばらつきはあるものの、最大で 2% 程度のひずみまで引張応力を保持できる材料である。

3.2 載荷方法および計測項目

実験では、せん断スパン長を 450mm, 等曲げ区間を 600mm とした 4 点曲げ載荷条件とした。所定の変位まで載荷した後に除荷し、供試体の上下を反転させて再度荷重を加えることで正負交番載荷とした。除荷変位は、降伏変位 δ_y の整数倍とした。なお、実験において降伏変位を明確に定めることが困難であったため、3.0mm ~ 3.5mm の範囲で荷重の増加が停滞したと判断した変位を降伏変位とした。

計測項目は、荷重の他に、供試体の中央位置の変位とした。また、一部の供試体に対してはデジタルカメラを用いた画像相関法 (DIC) によりひび割れの進展状況の把握を試みた。

4. 被覆鉄筋による座屈抑制効果

被覆鉄筋による座屈抑制効果を確認するために、NC 供試体、ST 供試体、US 供試体および HM 供試体に対して載荷試験を行った。本章における実験では、載荷履歴の除荷時変位を、 $\pm \delta_y, \pm 4 \delta_y, \pm 8 \delta_y, \dots$ 、(以降は $\pm 4 \delta_y$ の整数倍) とした。また、 δ_y は、それぞれの供試体において決定した。

図-6 にそれぞれの荷重と降伏変位 δ_y で正規化した変位の関係を示す。図中には、軸方向鉄筋の座屈発生時を●で示している。なお、図-6(b), 6(c) および 6(d) 中には、比較のために NC 供試体の結果を併記している。

NC 供試体では、 $-12 \delta_y$ から $+16 \delta_y$ への載荷時に軸方向鉄筋が座屈し、荷重が低下する結果となった。また、等曲げ区間に横方向鉄筋を配置した ST 供試体では、NC 供試体と比較して変形性能が向上する結果が得られた。最終的には、 $-20 \delta_y$ から $+24 \delta_y$ への載荷時において座屈が発生し、荷重が低下する結果となった。このとき、図-7(a) に示すように軸方向鉄筋の座屈は等曲げ区間に配置した横方向鉄筋間で生じており、横方向鉄筋により座屈が抑制されたことが確認された。軸方向鉄筋を UHP-SHCC で被覆した US 供試体では、 $+20 \delta_y$ から $-20 \delta_y$ への載荷時に座屈が生じる結果となり、ST 供試体と概ね同程度の変形性能が得られた。一方、高強度モルタルで被覆した HM 供試体では、NC 供試体よりも変形性能は若干向上したものの、 $+16 \delta_y$ から $-16 \delta_y$ への載荷時に座屈

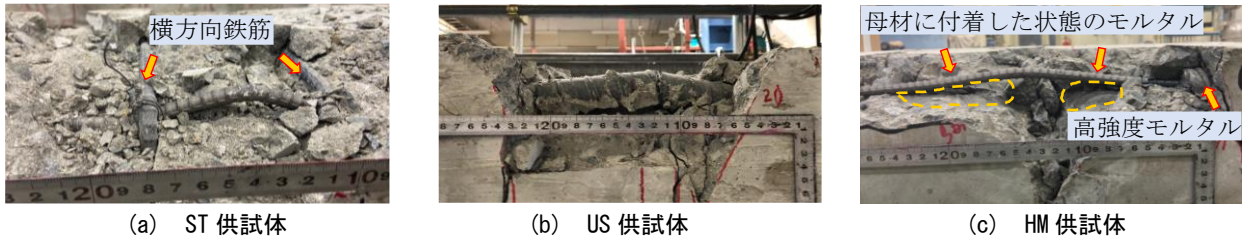


図-7 鉄筋座屈の状況

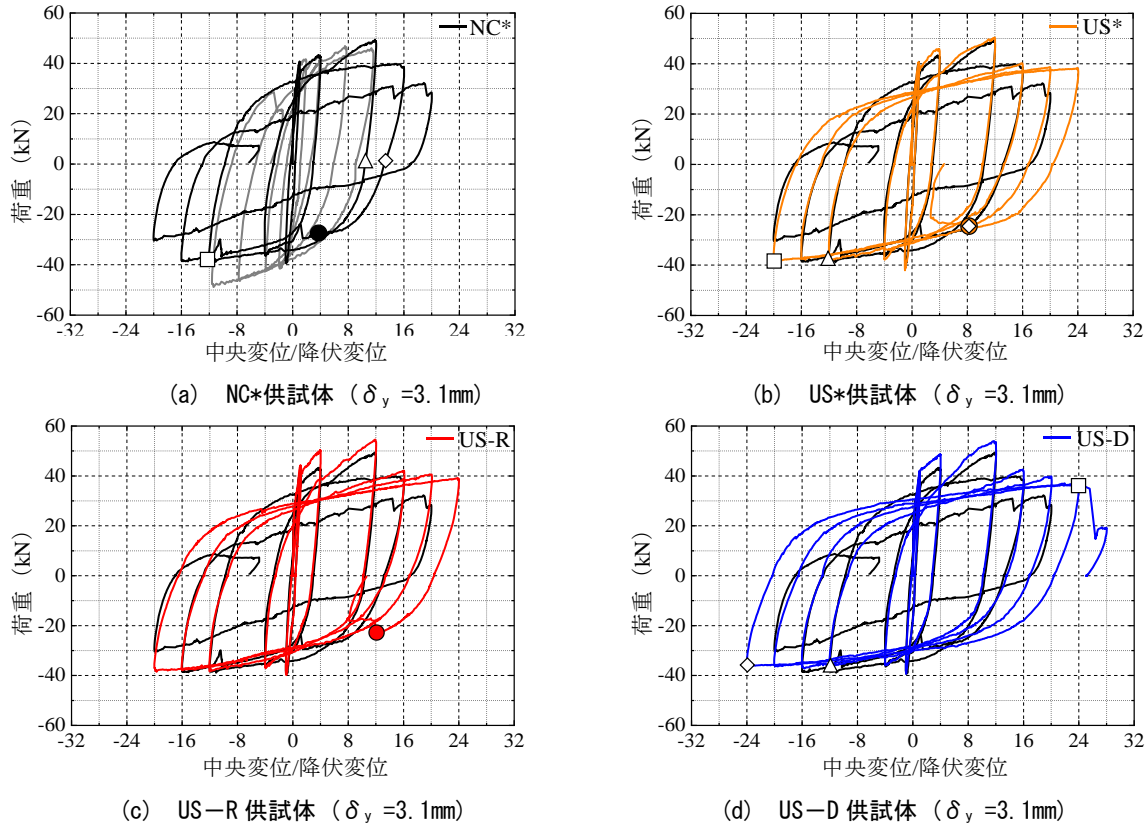


図-8 荷重変位関係（被覆鉄筋の表面形状の違い）

が生じる結果となった。

図-7(b)および7(c)に、US 供試体と HM 供試体における軸方向鉄筋の座屈の様子を示す。US 供試体では、UHP-SHCC が母材コンクリートから剥離し、被覆鉄筋そのものが座屈しているのに対し、HM 供試体では、高強度モルタルは割裂しており、鉄筋のみが座屈していたことが確認された。このとき、高強度モルタルは母材コンクリートに付着した状態であった。

HM 供試体のように被覆材料に高強度材料を用いた場合、軸方向鉄筋を起点とした水平ひび割れの発生をある程度抑制できるものの、ひび割れの発生と同時に被覆材料は割裂破壊し、水平ひび割れが母材コンクリートに進展することで、鉄筋座屈を抑制する効果が低下したものと考えられる。また、この結果から、モルタルの被覆による軸方向鉄筋の曲げ剛性の増加は、座屈を抑制するための直接的な要因ではないといえる。一方、US 供試体では UHP-SHCC は高強度かつ高靱性な特徴を有すること

から、ひび割れ発生後も進展を抑制できるため、座屈を効果的に抑制できたものとする。ただし、前述のように、被覆モルタルが母材コンクリートから剥離することで、座屈に対する抵抗性が低下し、最終的に座屈が生じたと考えられる。

5. 被覆鉄筋の表面形状の違いが座屈抑制に及ぼす影響

前章で述べたように、被覆材料として UHP-SHCC を用いることにより、鉄筋の座屈を抑制できることが確認された。一方、終局時には被覆鉄筋が座屈することも確認された。この要因としては、被覆鉄筋が母材から剥離したことが考えられた。そこで、被覆鉄筋の表面形状を前述した図-4(b)、4(c)とした供試体の荷重試験を行い、被覆鉄筋の表面形状が座屈抑制に及ぼす影響を確認した。なお、本章における実験では、荷重履歴の除荷時変位を、 $\pm \delta_y$, $\pm 4 \delta_y$, $\pm 12 \delta_y$, $\pm 16 \delta_y$, \dots , (以降は $\pm 4 \delta_y$ の整数倍)とした。4章とは異なる荷重履歴としたこと

から、横補強鉄筋の無い供試体 (NC*) とシーブ管を用いて被覆鉄筋を作製した供試体 (US*) に対しても、改めて載荷試験を行った。なお、本章においては、前章の結果を参考として降伏変位 δ_y を一律 3.1mm とした。

図-8 に、NC* 供試体、US* 供試体、US-R 供試体および US-D 供試体の荷重と降伏変位 δ_y で正規化した変位の関係を示す。図-8(a) 中には NC 供試体の、図-8(b)、8(c) および 8(d) 中には NC* 供試体の荷重-変位関係を併せて示している。図中の●印は、軸方向鉄筋の座屈発生時を示している。

図-8(a) より、NC* 供試体は NC 供試体とは異なり、鉄筋座屈による明確な荷重の低下は認められなかった。ただし、 $-16\delta_y$ から $+20\delta_y$ への載荷以降において明らかにエネルギー吸収量が低下する挙動が得られた。最終的には、 $-20\delta_y$ から $+24\delta_y$ への載荷途中で荷重が低下する結果となった。なお、後述するひび割れ進展状況からは、 $-12\delta_y$ から $+16\delta_y$ への載荷途中において引張側のかぶりの一部が剥落し、直後の負側載荷 ($+16\delta_y$ から $-16\delta_y$ への載荷) 途中において、かぶりが剥落した領域で圧縮側の鉄筋が局所的に座屈変形を生じていたことが確認された。このことから、鉄筋の座屈は $+16\delta_y$ から $-16\delta_y$ の載荷において生じていたと判断できる。

図-8(b) および 8(c) から、US* 供試体と US-R 供試体はほぼ同様の挙動を示した。どちらの供試体も、 $\pm 16\delta_y$ までは NC* 供試体と概ね同様の挙動を呈し、その後も $+20\delta_y$ までは鉄筋の座屈は認められなかった。US* 供試体、US-R 供試体ともに、 $+20\delta_y$ から $-20\delta_y$ の載荷において被覆鉄筋が座屈することで、急激に荷重が低下する挙動が得られた。座屈の状況からは、US* 供試体、US-R 供試体ともに被覆鉄筋が母材から剥離しており、前章の US 供試体と同様の破壊形態となっていたことが確認された。

一方、図-8(d) より、US-D 供試体は $\pm 24\delta_y$ に至るまで、紡錘型の履歴曲線が得られており、被覆鉄筋の座屈は認められなかった。その後、 $-24\delta_y$ から $+28\delta_y$ へ載荷する途中において、急激に荷重が低下する挙動が得られた。このとき、供試体の外観からは鉄筋の座屈やコンクリートの圧壊は認められなかった。載荷終了後に曲げひび割れ部を観察したところ、鉄筋が破断していることが確認された。また、被覆鉄筋は母材コンクリートから剥離しておらず、強固に付着していたことが確認された。

以上の結果から、被覆鉄筋と母材コンクリートが一体となることで、被覆鉄筋そのものの座屈が生じることはなく、部材の変形性能が大きく向上するものといえる。また、前章の結果と併せて考えると、被覆鉄筋と母材コンクリートの一体性を保持することで、従来の横補強筋を用いた場合以上の座屈抑制効果が得られる可能性が確

認できた。

6. DIC によるひび割れ進展挙動の評価

前章で述べた実験供試体に対しては、DIC により供試体表面のひび割れ進展挙動を確認した。図-9~11 に NC* 供試体、US 供試体および US-D 供試体の等曲げ区間の最大主ひずみの分布を示す。それぞれ、図-8 の荷重-変位関係における Δ 、 \square 、 \diamond の時点に対応する。図において、青紫色の領域はひずみが生じていない領域であり、黄緑色、黄色、赤色となるにつれてひずみが大きくなっていることを表している。

図-9 より、NC* 供試体においては、 $+12\delta_y$ からの除荷直後において、圧縮側と引張側の両側の鉄筋位置に水平ひび割れが生じていることが確認できた。これらのひび割れは、 $-12\delta_y$ 時点においても明確であった。その後、 $-12\delta_y$ から $+16\delta_y$ への載荷の途中で、引張鉄筋のかぶりが一部剥落したため、 $+16\delta_y$ からの除荷時点で、図のように断面欠損が生じた。このかぶりの剥落は、明らかに水平ひび割れの影響であると考えられる。その後の載荷において、前述のようにかぶりが剥落した箇所鉄筋の座屈が確認された。

一方、図-10 より、US* 供試体においても $-12\delta_y$ の時点で水平ひび割れが確認された。ただし、このひび割れは、 $-20\delta_y$ 時点においても大きく開口することはなく、座屈の起因となるようなひび割れではないと判断される。US* 供試体では、 $-24\delta_y$ へ載荷途中で被覆鉄筋の座屈が生じた。この時、被覆鉄筋の座屈に伴い圧縮側に水平ひび割れが生じたことが確認された。なお、座屈に至るまでのひび割れ進展挙動は US-R 供試体においても同様であった。

図-11 より、US-D 供試体においても同様に $-12\delta_y$ の時点で水平ひび割れが確認されたが、その後の載荷において、水平ひび割れが開口することはなかった。

前述のように、NC* 供試体の水平ひび割れは、軸方向鉄筋位置のコンクリートに発生した後、繰返し載荷を受けることで開口した。その後、かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋の座屈に至った。この結果から、NC* 供試体の座屈は、2 章で述べたように Nakamura らによる内部のひび割れ状態観察から確認された^{4),5)}、鉄筋から生じた水平ひび割れに起因していると考えられる。それに対して、US* 供試体と US-R 供試体では、水平ひび割れは観察されたものの、その後の繰返し載荷において当該の水平ひび割れが座屈を誘発するようなことはなかった。一方、座屈の直前には鉄筋位置に新たな水平ひび割れが発生し被覆鉄筋は座屈した。この水平ひび割れは、座屈直前までは認められなかったことから、座屈のメカニズムは NC* 供試体とは異なるものと考えられる。すなわち、前

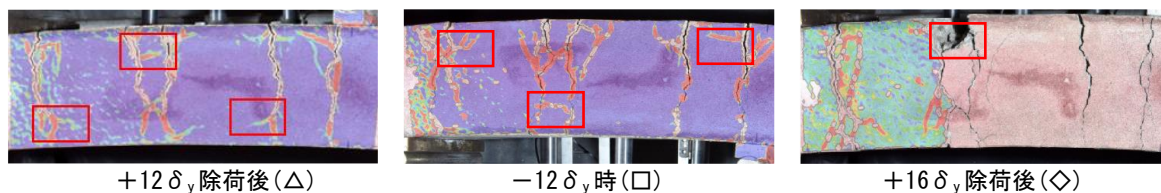


図-9 NC*供試体の主ひずみ分布

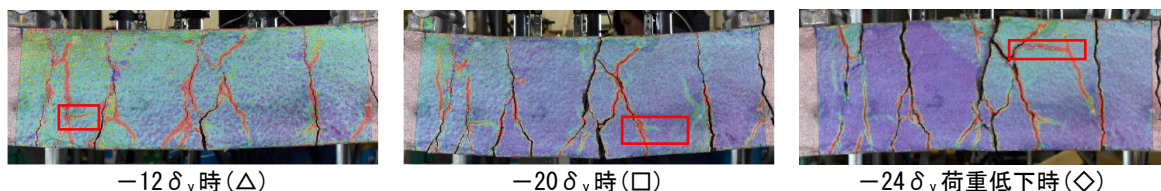


図-10 US*供試体の主ひずみ分布

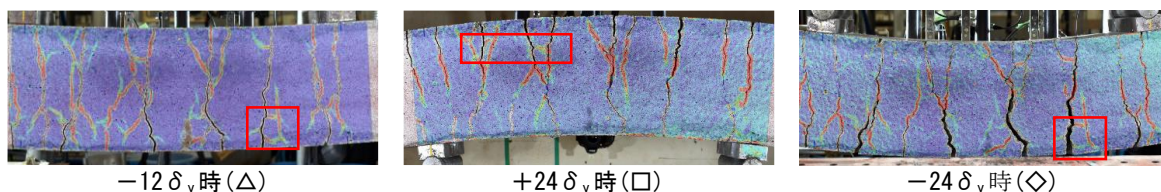


図-11 US-D 供試体の主ひずみ分布

章でも述べたように、US*供試体と US-R 供試体では、被覆鉄筋が母材コンクリートから剥離しており、剥離が座屈の起因となるとともに水平ひび割れを誘発したものと考えられる。これに対して、US-D 供試体では被覆鉄筋と母材コンクリートの一体性が保持されていたため、座屈に起因するような剥離は生じず、また、水平ひび割れも生じなかったと考えられる。

なお、繰返し荷に伴い生じた曲げひび割れの本数に着目すると、US*供試体や US-R 供試体では NC*供試体と同程度であったのに対して、US-D 供試体はより多くのひび割れが確認された。被覆鉄筋を用いた場合のひび割れ間隔は、被覆鉄筋が引張力を受けた際の被覆材料に生じるひび割れ間隔や、被覆鉄筋と母材コンクリートの付着挙動に影響を受けると考えられる。この点については、今後詳細な検討が必要であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、Nakamura らにより提唱された座屈メカニズムに基づく座屈抑制法として、UHP-SHCC で被覆した鉄筋を用いた方法を提案し、その可能性を被覆モルタルの材料特性と表面形状を要因とした正負交番荷重実験と画像相関法 (DIC) により検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 軸方向鉄筋を高強度で高靱性な UHP-SHCC により予め被覆することで従来の横方向鉄筋による方法と概ね同程度の座屈抑制効果を示し、横方向鉄筋を用いない新たな座屈抑制法となる可能性を示した。
- (2) DIC による表面ひび割れの詳細な検討から、鉄筋座屈に至るまでの水平ひび割れの進展挙動を明らか

にした。UHP-SHCC による被覆がない通常の鉄筋では、座屈は先行して生じた水平ひび割れの開口に起因する可能性が示された。また、UHP-SHCC による被覆の有無により、鉄筋の座屈メカニズムは異なることが示唆された。

- (3) 被覆鉄筋の座屈抑制効果を高めるためには、被覆モルタルと母材コンクリートの一体性を確保することが重要であることが確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2023。
- 2) 例えば，日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2017。
- 3) 土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリー148，2016。
- 4) H. Nakamura, T. Miura, Y. Yamamoto: A new buckling mechanism of longitudinal rebar related to horizontal crack propagation in beam cross section under cyclic loadings, fib congress 2018.
- 5) 水野さおり，中村光，國枝稔，上田尚史：繰返し荷重を受ける RC 部材の断面内ひび割れ進展に関する研究，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-095，2013。
- 6) 国枝稔，清水康祐，江口輝行，上田尚史，中村光：超高強度ひずみ硬化型モルタルの基礎物性と補修材料としての利用法，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.67, No.4, pp.508-521, 2011。