

## 論文 RC はり部材の曲げ損傷過程評価のための変位指標の検討

島端 嗣浩\*1・中村 光\*2

**要旨:** 本論文は、曲げ破壊する RC はり部材の曲げ損傷過程を評価するための変位指標を実験ならびに数値解析により検討したものである。曲げ損傷過程を詳細に検討するため、RC はり部材の 4 点曲げ実験を行い、等曲げ区間内の曲げ損傷過程をモーションキャプチャーにより評価した。その結果、変位指標としては、圧縮破壊領域におけるコンクリートの部材軸方向圧縮変位とともに、部材厚の部材高さ方向変位、かぶり部やコア部の部材高さ方向変位の適用可能性を示した。また、実験を行った供試体の有限要素解析を行い、有限要素解析結果でも同様の変位指標が適用可能なことを示した。

**キーワード:** 損傷評価, 変位指標, 部材高さ方向変位, 曲げ破壊, モーションキャプチャー, 有限要素解析

## 1. はじめに

RC 構造物の性能評価方法として、有限要素法（以下、FEM）による解析を用いることが一般的となってきた。FEM 解析による性能評価方法には、全体挙動としての荷重-変位関係から判断するだけではなく、局所的な損傷進展と構造性能の関係を踏まえて要素ひずみに基づく方法もある。要素ひずみに基づく方法は、軟化材料であるコンクリートでは、ひずみの局所化によるひずみの要素寸法依存性が生じるため、適用時には留意が必要となる。この要素寸法の影響を緩和するために、重み付きの平均を行う方法がコンクリート標準示方書に示されている<sup>1)</sup>。

ひずみに基づく評価方法がある一方で、変位による評価方法も提案されている。FEM 解析では、ひずみの局所化が生じた場合、要素寸法が異なっても局所化した要素の変位が等しくなるように、圧縮・引張とも破壊エネルギーを考慮した応力-変位関係の変位を要素長さで除した応力-ひずみ関係が使用されるのが一般的である<sup>2)</sup>。破壊エネルギーを考慮した応力-ひずみ関係の原理に基づけば、要素変位は、要素寸法依存性が大幅に低減されることになる。この点に着目し、Yenchun ら<sup>3)</sup>は RC 部材の圧縮損傷に対し、FEM 解析で得た圧縮変位を用いることで、要素寸法に依らず RC 部材のせん断圧縮破壊耐力や曲げ破壊耐力を評価できる可能性を解析検討から示した。また、宮川ら<sup>4)</sup>は、せん断破壊に対するせん断耐力残留率評価方法として、斜めひび割れ位置の部材軸ずれに着目した部材厚方向変位の適用性を実験および解析から示している。

本研究では、耐力評価で使用されている変位指標の曲げ破壊する RC 部材の曲げ損傷過程評価への適用可能性を実験ならびに FEM 解析より検討した。曲げ破壊の指標の評価では、曲げ挙動の特徴から部材軸方向変位を用

いることが一般的であるが、コンクリートの損傷および三次元構造を含む RC 構造物全体系の性能を評価可能な変位指標を検討する観点から、曲げ破壊モード時に生じる部材高さ方向の変位挙動にも着目し、荷重-変位（部材中央たわみ）関係との関係やかぶり部やコアコンクリート（以降、コアと称す）部の損傷過程評価の検討を行った。

## 2. RC はり部材の曲げ実験

## 2.1 実験概要

曲げ破壊モードとなるように設計した供試体を図-1 に示す。供試体は、断面 400×300mm、長さ 3400mm で、かぶりを 80mm とし、主引張鉄筋に D32 (SD345) を 2 本、主圧縮鉄筋に D22 (SD345) を 2 本配置したものである。各供試体での材料強度を表-1 に示す。実験は、2 体の供試体に対し、4 点曲げにより等曲げ区間 750mm を設け、等曲げ区間でのスターラップ D10 (SD345) の有無をパラメータとして行った。これにより、コア部の拘束力による曲げ変形性能や損傷過程の相違を確認・計測することを目的とした。

計測としては、等曲げ区間のコンクリート表面でモーションキャプチャーによる計測を行うことにより、部材表面の損傷過程と変位分布の対応を確認した。マーカーの位置を図-2 に示す。計測点は、主に圧縮損傷領域に多くのマーカーを配置した。また、圧縮損傷発生領域については、かぶりと圧縮鉄筋より内側（それぞれ圧縮縁から 40mm、100mm）にアクリル棒（弾性係数 3.13GPa）を設置することで、かぶり部およびコア上部での軸方向ひずみ分布も計測した。アクリル棒には、スリットを設け付着を確保できるように処理し、部材中央も計測点とするように 75mm 間隔でひずみゲージを貼り付けた。

\*1 東電設計（株） 土木本部耐震技術部 修（工）（正会員）

\*2 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）

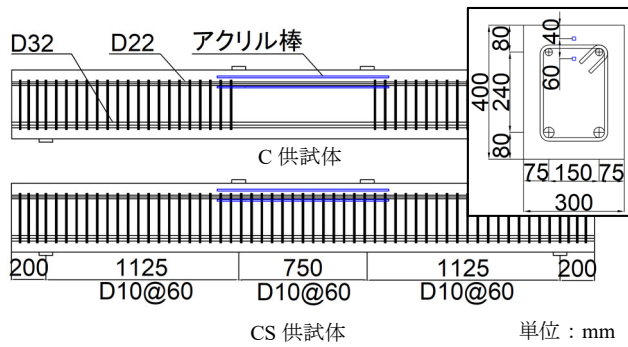


図-1 供試体概要

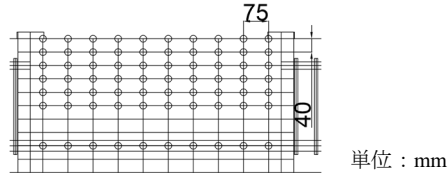


図-2 マーカー計測点

表-1 材料強度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

供試体	圧縮強度 $f_c$	降伏強度 $f_y$		
		D32	D22	D10
C	33.6	379	392	375
CS	32.3			

## 2.2 実験結果

### (1) 荷重-たわみ関係とひび割れ状況

荷重-たわみ関係を図-3 に、実験終了後の損傷状況を図-4 に示す。荷重は、載荷位置に設置した 500kN ロードセルにより計測し、たわみは、等曲げ区間中央たわみである。

両供試体ともに中央たわみが約 12mm 時に部材降伏が確認でき、最大荷重に至った後にかぶりが剥離するようなひび割れが発生した。その後は、スターラップのない C 供試体では、圧縮鉄筋による応力分担の影響で最大荷重の 80% 以上は保持していたものの、徐々に荷重が低下し、最終的には圧縮鉄筋の座屈とともに荷重が大きく低下した。スターラップを有する CS 供試体では、スターラップによる拘束効果で靱性能が大幅に向上し、載荷可能な変位では荷重低下には至らなかった。

### (2) 相対変位分布

部材軸方向 ( $\delta_x$ ) および高さ方向 ( $\delta_z$ ) の相対変位分布 (引張: 正, 圧縮: 負) ならびにひび割れ図を図-5 に示す。同図は、モーションキャプチャーによる計測結果から、一次の形状関数に基づく要素平均としての変位分布を示している。なお、計測時において、ノイズが多く計測されていたため、移動平均処理等でのデータ補正を行い、モーションキャプチャーから得られた結果が、後述するひずみゲージの計測値を用いて算定した変位履歴な

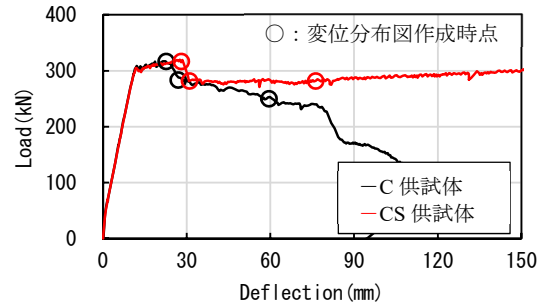
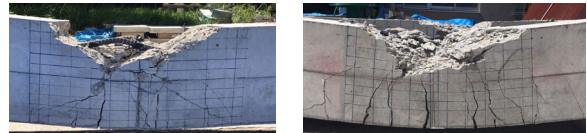


図-3 荷重-たわみ関係



(a) C 供試体 (b) CS 供試体

図-4 損傷状況 (実験終了後)

どと比較して、傾向を捉えられるデータであることを確認した上で実験結果を整理した。その結果、かぶり部では、かぶりの剥離に伴う荷重低下直後程度まで、コア部については、C 供試体では部材中央たわみが 60mm 程度、CS 供試体では 80mm 程度までは傾向分析可能なデータであると判断した。上段から、最大荷重時、かぶり剥離直後、そして、C 供試体は中央たわみが約 60mm、CS 供試体では約 80mm での分布図であり、図-3 中の○印時点にそれぞれ対応する。また、重ねて描いたひび割れ図は、モーションキャプチャー計測面とは反対側でのひび割れ状況である。なお、図中●は、後述する部材高さ内 2 点間の部材高さ方向変位の算出位置を示している。

マーカの計測誤差と考えられる分布も見られるものの、部材軸方向変位では、最大荷重に至るまでは、曲げひび割れと概ね対応するように引張鉄筋側の要素で部材軸方向引張変位が確認された。また、圧縮縁側では圧縮変位が計測できていることから、一般的な曲げ損傷の進展傾向を概ね捉えることができたと考える。いずれの供試体においても、かぶり剥離直前から圧縮縁での軸方向圧縮損傷と対応する圧縮変位の分布が見られた。

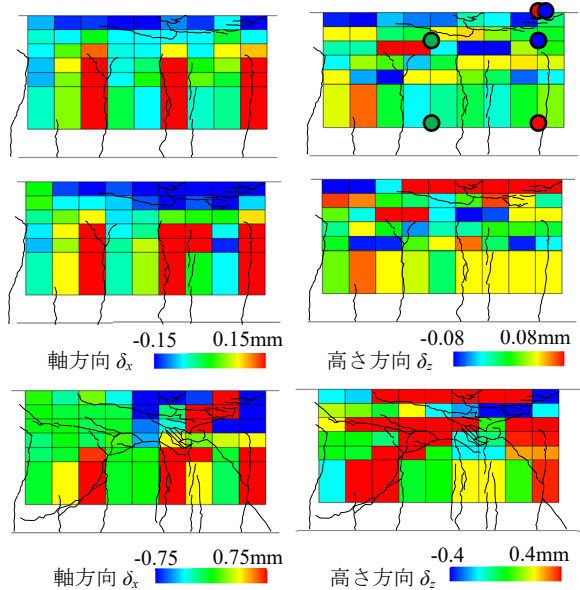
一方、部材高さ方向変位分布では、曲げひび割れの進展が、軸方向の圧縮変形領域下部で枝分かれして水平方向に進展していたことと対応するような引張変位が計測されている。また、圧縮縁で生じたかぶりの剥離挙動と対応するような引張変位や、変位が進行するに従ってコア部で新たな水平方向に進展するひび割れ発生に伴うような引張変位が計測された。

### (3) 軸方向圧縮変位

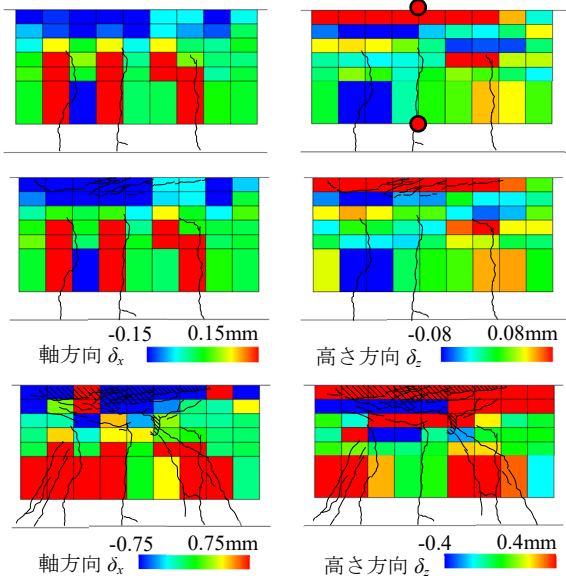
アクリル棒位置 (かぶり部 (圧縮縁から 40mm)、コア上部 (圧縮縁から 100mm)) のひずみから算定した軸方向圧縮変位分布を図-6 に示す。かぶり部については、

圧縮損傷による影響を含まない時点まで、コア上部については図-5 に示した変位分布と同じ時点における圧縮変位分布（凡例  $P_{max}$  : 最大荷重,  $P_d$  : かぶり剥離時,  $\delta$  : 部材中央たわみ）であり、計測間隔である 75mm をひずみに乗じて変位に換算し、圧縮を負値とした。

かぶり部の圧縮変位は、両供試体ともにかぶりの剥離前後から、他の範囲と比較してより圧縮変位が進展し続ける領域が確認された。この領域を圧縮損傷区間と考え、図-5、図-6 のかぶり部の変位分布より、C 供試体は 375mm、CS 供試体は 525mm と判断した。その後荷重を継続すると、コア上部においても圧縮変位が急増している領域が見られた。



(a) C 供試体



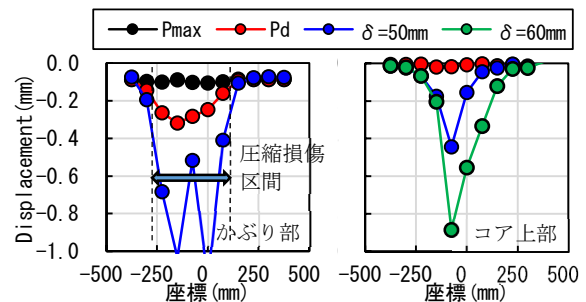
(b) CS 供試体

上段：最大荷重時 中段：かぶり剥離時

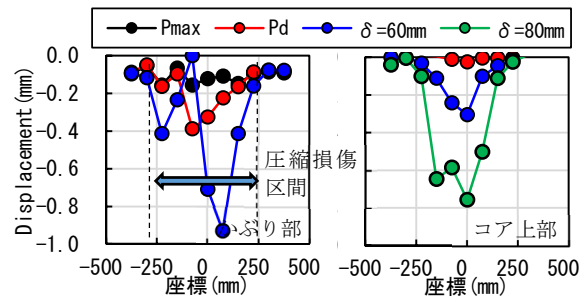
下段：C（中央たわみ 60mm 時） CS（80mm 時）

図-5 相対変位分布

図-6 から圧縮損傷領域と判断した区間での軸方向圧縮変位履歴を図-7 に示す。同図には、同高さ位置でのモーシオンキャプチャーで計測した節点変位による軸方向圧縮変位履歴も示した。かぶりの剥離が見られるまでは、アクリル棒とモーシオンキャプチャーの結果は概ねよく対応しているものと考えられる。かぶり剥離に伴う荷重低下後の圧縮変位履歴については、モーシオンキャプチャーとアクリル棒による計測に差が見られるが、これは、部材表面に発生したひび割れや圧縮損傷が、マーカに影響したものと考えられる。

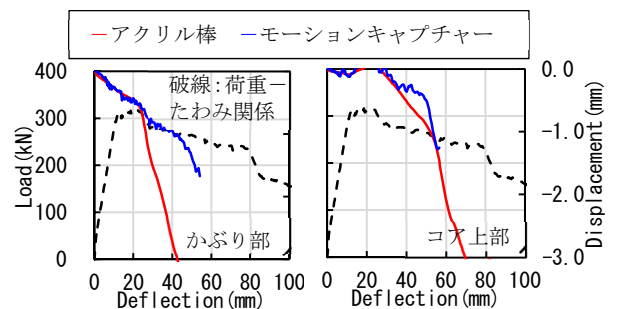


(a) C 供試体

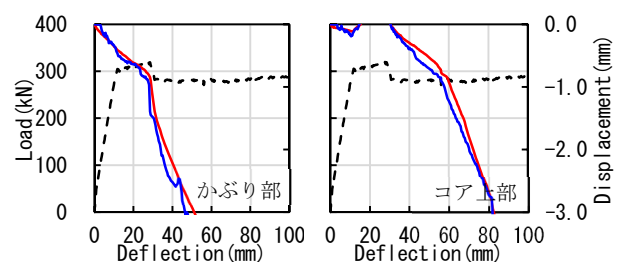


(b) CS 供試体

図-6 アクリル棒による部材軸方向圧縮変位分布



(a) C 供試体



(b) CS 供試体

図-7 軸方向圧縮変位履歴

軸方向圧縮変位の履歴は、両供試体ともにかぶり部での圧縮変位履歴が、曲げ降伏後の最初の荷重低下時の変位に対応するように急増する傾向となった。また、コア上部においても圧縮変位の増加が確認される。Yenchun ら<sup>3)</sup>は、有限要素解析結果から圧縮破壊により局所化した要素の相対変位が 0.5mm 程度の時せん断圧縮破壊や曲げ破壊する部材の耐力時に対応すると報告しているが、急増する軸方向圧縮変位は、Yenchun らの指摘と概ね一致する結果となった。

さらに荷重を継続すると、コア上部においても、中央たわみが約 40~60mm 時点から圧縮変位の急増点が見られた。C 供試体ではコア上部の損傷の増加とともに荷重の低下割合が徐々に大きくなった。CS 供試体では、コア上部の圧縮変位履歴勾配が変化しても、コアコンクリートを拘束している影響で、圧縮変位が進展しているにも関わらず、試験を終了するまで RC はり部材としての曲げ変形性能を十分に有する結果であった。

#### (4) 部材高さ方向変位

モーションキャプチャーの結果から作成した部材高さ方向の任意の 2 点間の相対変位履歴を図-8 に示す。相対変位算出位置は図-5 中の●印に示しており、部材上縁~引張鉄筋位置(赤線:部材全体)、上縁~圧縮鉄筋間(青線:かぶり部)、圧縮鉄筋~引張鉄筋間(緑線:コア部)について示した。

実験で確認されたかぶりが剥離する挙動や図-7 で示したかぶり部の軸方向圧縮変位の急増時点と対応するように、部材高さ方向変位が急増していることが確認できた。また、部材全体における増分は、かぶりの剥離に伴う変位増分がほぼ占めていることがわかる。このことから、かぶり部の曲げ圧縮損傷に関する評価において、軸方向ひずみではなく、部材高さ方向の変位からも評価できる可能性があるものと考えられる。

次に、コア部での変位履歴に着目すると、C 供試体では、図-7 に示すコア部における軸方向圧縮変位が急増する点と対応するように、中央たわみ約 40mm 時からコア部の相対変位が増加し始めた。さらに、中央たわみ約 80mm 時での荷重低下と対応するように高さ方向変位の急増が確認された。CS 供試体においても、図-7 に示す軸方向圧縮変位が急増する点と対応するように、中央たわみが約 60mm 時からコア部の相対変位が増加し始めた。C 供試体と異なり増加量は小さく増加量も徐々に小さくなる傾向を示した。これは、CS 供試体では荷重変位関係の低下が見られず、コア部の損傷が徐々に増えてはいるが構造性能への影響を及ぼす挙動となっていないことを示している可能性が考えられる。スターラップの有無による変位履歴の相違は、図-7 の軸方向圧縮変位では明確に現れなかった挙動である。

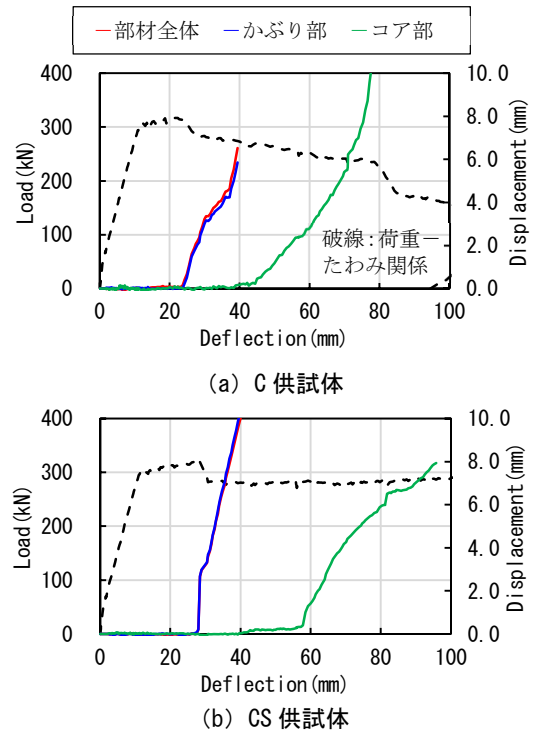


図-8 部材高さ方向変位履歴

以上の結果から、RC 部材の曲げ破壊挙動において、軸方向の圧縮損傷だけではなく、部材軸方向と直行する方向の挙動からも損傷過程を捉えられると考える。また、かぶりやコア等の各部位での挙動に着目することで、より合理的に評価できる可能性があると考えられる。

### 3. FEM 解析による RC 部材の曲げ損傷過程評価

#### 3.1 解析概要

解析モデルを図-9 に示す。解析コードには COM3<sup>5)</sup> を用いた。解析手法の概要<sup>6)</sup>としては、ひび割れモデルと使用要素はアクティブクラック法に基づく非直交多方向固定・分散ひび割れモデルの 20 節点アイソパラメトリック立体要素である。鉄筋は、分散鉄筋モデルである。等曲げ区間の要素寸法は、部材軸方向が 75mm、部材高さ方向が 40mm または 80mm である。コンクリートの非線形特性は、引張側は付着の影響を考慮し、圧縮側については、要素寸法の影響を考慮した軟化特性を設定した。圧縮鉄筋については座屈の影響も考慮した。

#### 3.2 解析結果

##### (1) 荷重-たわみ関係と相対変位分布

荷重-たわみ関係を図-10 に示す。図中実線が解析結果を、破線が実験結果である。供試体 C について、実験では圧縮鉄筋の座屈とともに荷重がさらに低下したが、解析においても、実験と概ね同じ時点で荷重低下に至った。CS 供試体では、変位約 114.1mm の時点から荷重低下が生じ始めた。ポストピークでの荷重低下時点は実験と解析で異なるものの、等曲げ区間における拘束効果の

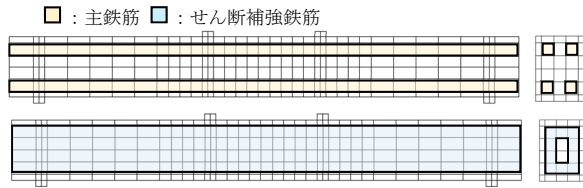


図-9 解析モデル

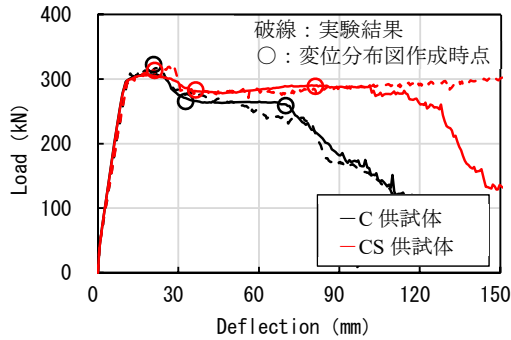


図-10 荷重-たわみ関係

違いによる変形性能が異なる挙動を解析でも表現できた。

部材軸ならびに高さ方向の各要素の相対変位分布を図-11に示す。同図は、圧縮を負値、引張を正值とし、図-10に示した時点（最大荷重時、かぶり剥離直後、そして、C 供試体では荷重低下前（中央たわみ約 67mm 時）、CS 供試体は、 $8\delta_y$  ( $\delta_y$ : 降伏変位) 時)における変位分布である。なお、図中●は後述する部材高さ方向相対変位履歴算出位置である。

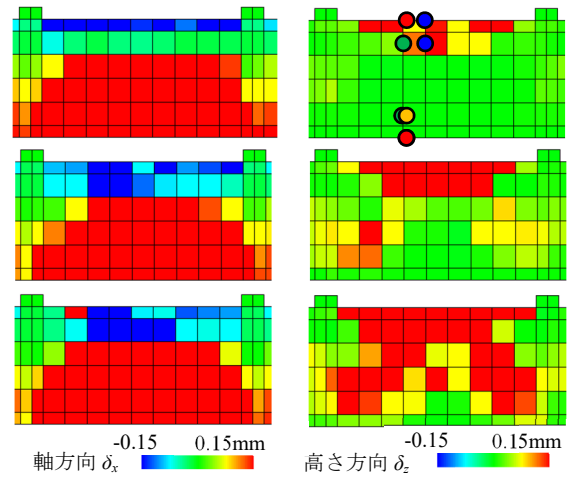
図-11 より、部材軸方向だけでなく、高さ方向においても、圧縮縁の損傷領域で引張変位が発生し、また、変位が大きくなるにつれてコア部でも引張変位が発生していることが確認できる。モーションキャプチャーでは、かぶりの剥離やコア上部の損傷に伴う引張変位が計測されたが、FEM 解析においても部材高さ方向の引張変位分布が確認された。

### 3.3 曲げ損傷過程評価

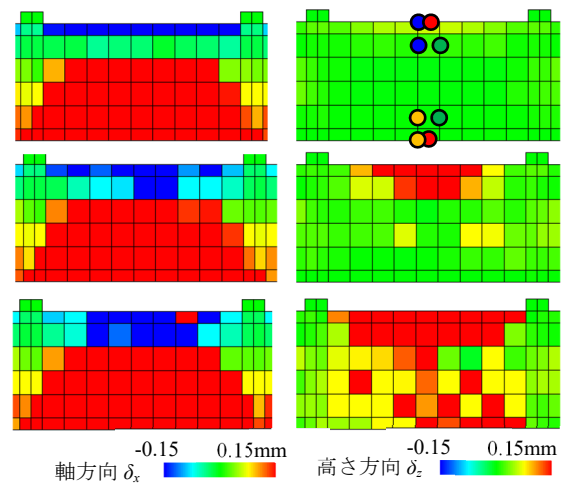
部材軸方向の圧縮変位履歴を図-12に示す。同図は、図-7で示した時と同じ圧縮損傷領域区間（C 供試体：375mm CS 供試体：525mm）での相対変位とした。また、圧縮変位を負値として示した。

実験で計測された傾向と同様に、FEM 解析においてもかぶり部の圧縮損傷に伴う荷重低下時からかぶり部の軸方向圧縮変位が急増した。急増時の圧縮変位は約 1.0mm であったが、Yenchun ら<sup>3)</sup>の提案した耐力時点に対応する圧縮変位 0.5mm の時は、概ね荷重低下直前の最大耐力時に対応していた。コア上部においても、実験と同様に圧縮変位が増加傾向となっており、C 供試体ではコア上部の圧縮変位急増点と荷重低下時が概ね対応していた。

部材高さ方向の 2 点間の相対変位履歴を図-13に示す。履歴算出位置は図-11中に●に示す部材表面での 2



(a) C 供試体



(b) CS 供試体

上段：最大荷重時 中段：かぶり圧縮損傷後  
下段：供試体 C (荷重低下時) CS ( $8\delta_y$  時)

図-11 相対変位分布

点間であり、それぞれ上下端間（赤線：部材全体）、圧縮縁～圧縮鉄筋間（青線：かぶり部（圧縮））、圧縮鉄筋～引張鉄筋間（緑線：コア部）、そして、引張鉄筋～引張縁間（橙線：かぶり部（引張））の相対変位を示している。

図-13 より、C 供試体では、部材全体の変位と圧縮側のかぶり部の変位が同様の履歴を呈しており、このことは、実験で計測された履歴と同様の傾向であった。コア部においても、かぶり部の圧縮損傷が見られた時点から増加傾向となっており、さらに、図-12に示すコア部の圧縮損傷が進展し始めた時点で、部材高さ方向変位増分の勾配が変化した。その直後、荷重が急激に低下する挙動を示すと部材高さ方向変位が減少する傾向もみられるが、これは、圧縮に伴う局所化が他の部位で発生していること、また、局所化に伴い変位急増点異なる部位に移り変わったこと等が考えられる。このことから、部材性能評価においては、この局所化現象を踏まえて、変位急増箇所を捉えることが重要と考える。

CS 供試体では、スターラップによる拘束効果の影響から、C 供試体よりもコア部の高さ方向変位の増加傾向は緩やかであった。かぶりの剥離に伴う圧縮損傷後に、わずかな変化ではあるものの、コア部でも部材高さ方向変位が増加傾向となり、コア上部の圧縮損傷履歴と対応するように、部材高さ方向変位が増加した。その直後、部材高さ方向変位が減少したことはC 供試体と同じ現象によるものと考えられる。

以上のことから、曲げ破壊モード時の部材の挙動として、部材軸方向の圧縮縁変位だけでなく、部材高さ方向変位からもかぶり部の剥離やコア部の圧縮損傷、また、圧縮鉄筋の座屈等の損傷過程を FEM 解析からも実験と同様に確認することができた。

#### 4. まとめ

RC 部材の曲げ損傷過程を評価する変位指標を提案することを目的として、曲げ破壊モードで生じる挙動について実験および FEM 解析より検討した。

曲げ破壊モードにおける変形性能や損傷度の評価で従来用いられてきた軸方向圧縮変位だけではなく、かぶり部やコア部など、各部位に着目した部材高さ方向の変位挙動によっても、荷重-たわみ関係の特徴的な挙動を捉えながら曲げ損傷過程を評価できる可能性を実験結果から明らかにした。また、実験で確認した挙動を FEM 解析でも再現しており、部材高さ方向変位が FEM 解析を使用する場合の荷重-たわみ関係に影響を及ぼす曲げ損傷過程を評価する変位指標となり得る可能性を示した。

本論文では、等曲げ区間における部材軸方向と高さ方向の挙動に着目して整理したが、今後は、片持ちはりやせん断破壊モード等の条件においても適用性を検討するとともに、三次元挙動の観点から部材幅方向の挙動にも着目した RC 構造物の損傷評価と性能評価指標について検討する。

#### 謝辞

本研究で使用した三次元非線形有限要素解析プログラムは、前川宏一教授（横浜国立大学）のご厚意により使用させて頂きました。深く感謝の意を申し上げます。

#### 参考文献

1) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書・設計編，2018。  
 2) Nakamura, H. and Higai, T. : Modeling of Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ACI-SP205, pp.273-292, 2001.

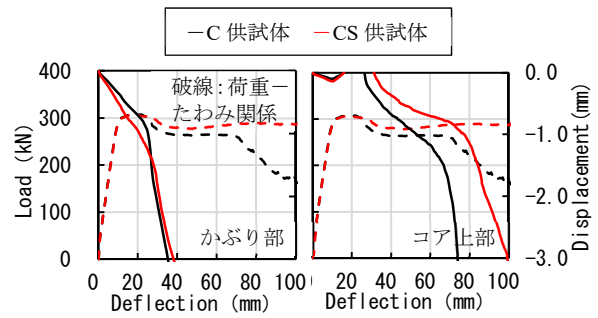
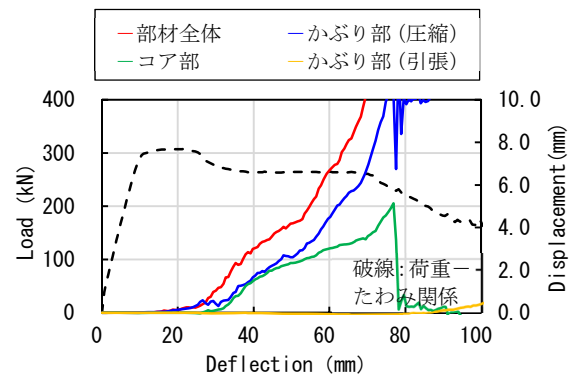
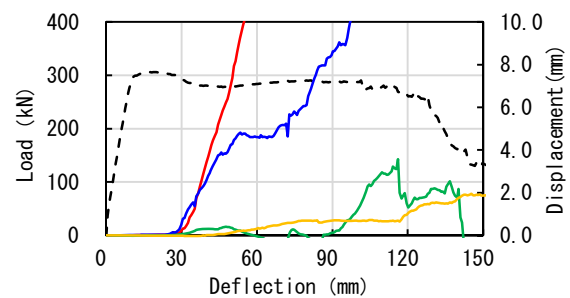


図-12 圧縮変位履歴



(a) 供試体 C



(b) 供試体 CS

図-13 部材高さ方向変位履歴

3) Yenehun, L., T., Nakamura, H., Miura, T. and Nanri, T.: Proposal of local index for damage evaluation of RC beam failed in shear and flexure mode, Annual Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.39, No.2, 2017.  
 4) 宮川義範, 永田聖二, 松村卓郎: せん断補強筋の無い鉄筋コンクリート部材の横膨張と残存耐力の関係, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.402-416, 2014.  
 5) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.  
 6) 牧剛史, 土屋智史, 斉藤成彦, 渡邊忠明: コンクリートの損傷指標を用いた RC 部材の三次元耐荷機構の数値解析的評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.78, No.1, pp.121-137, 2022.