論文　曲げ破壊する RC 柱部材における DIC による詳細な変形挙動評価

川端　康平[*1]・山本　悠人[*2]・村田　裕志[*3]・畑　明仁[*3]

要旨：本研究では，曲げ破壊する RC 柱部材の正負交番載荷試験において，終局変位に至るまでの柱基部付近におけるひび割れ分布，柱中央の水平変位と部材角，軸方向鉄筋の伸出し，曲率，部材厚増分のそれぞれについて，細かな分布をデジタル画像相関法による計測結果から算出した。その結果，部材の曲げ変形挙動を詳細に評価するとともに，軸方向鉄筋の座屈範囲に対応する基部付近では主にかぶりコンクリートのはらみだしの影響によって終局変位に至る前から部材厚増分が大きくなることを明らかにした。

キーワード：RC 柱，曲げ破壊，デジタル画像相関法，部材角，曲率，部材厚増分

1. はじめに

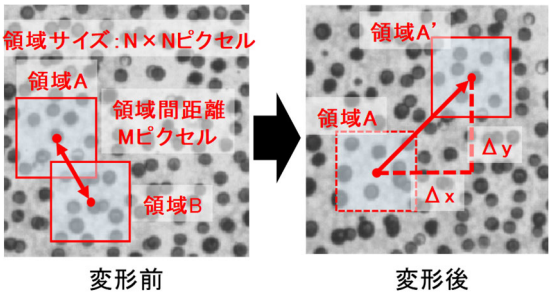
橋を構成する部材に対する耐震性能の把握には水平力―変形関係を適切に評価することが必要であり，特に降伏から終局に至るまでの詳細な挙動を計測することは地震時の応答を把握する上でも非常に重要である。そのため，RC 柱部材の耐震性能評価のために実施される構造実験において，対象とする部材の耐力や変形性能を正確に計測することで有益な情報が得られると考えられる。特に曲げ変形する RC 柱部材が破壊に至るまでの過程において，軸方向鉄筋の降伏や座屈の判定及び部材角や曲率を詳細に計測することができれば，塑性域における部材断面の曲げ変形挙動を詳細に評価できる。

しかし，一般的な変位計やひずみゲージによる接触型の計測手法ではその物理的制約から対象項目の局所的な計測しかできないこと，目視による判断では明確な損傷以前の微細な変化を確認できないなどの課題があった。そこで近年，計測位置の制約が少なく，計測することができる情報量を大きく増加させることが可能である，画像解析 [1)]やモーションキャプチャ [2)]等の非接触型の計測が適用される事例が増加している。その中でも本研究では，任意の節点における計測が可能であるデジタル画像相関法（Digital Image Correlation Method,　以下 DIC）を採用した。DIC は変形前後におけるランダムパターンの輝度分布の相関を用い，対象とする面の変位・ひずみを計測することが可能な手法であり，準備・計測作業や計測精度の観点において，接触型の計測手法よりも簡易的かつ画像解析手法の中では比較的高精度であることが確認されている [3)]。

本研究では，曲げ破壊型の RC 柱部材を対象とし，静的正負交番載荷実験において DIC を適用して，そこから得られた変位・ひずみ分布から曲げ変形におけるひび割れ，部材角と曲率の細かな分布，また，部材厚増分と軸方向鉄筋の降伏及び座屈によるかぶりコンクリートのはらみだしとの相関を調べることで，従来の計測手法では計測できなかったような部材が終局に至るまでの過程における詳細な変形挙動の把握を試みた。

2. DIC の概要

DIC は計測面に塗布されたランダムパターンの変形前後の輝度分布の相関を推定することで対象の変形を評価する光学的全視野計測技術である。以下に簡単な概要を示す。**図－1** に示すように，まず，変形前の画像において，任意の大きさ（領域サイズ，**図－1** 内の N ピクセル，以下 pix）と間隔（領域間距離，**図－1** 内の M pix）の領域内で画像濃淡分布から識別が可能な複数のランダムパターンを検知する。その後，変形後の画像において，変形前の領域 A 内のランダムパターンと相関の高い箇所を探索し，その箇所を領域 A’として領域の中心の任意の座標上における変位(Δx,　Δy)を算出する。また，算出の際には輝度分布をスプライン補間等で離散的なデータを直接補間することで，精度の高いサブピクセルでの計測処理での実施を可能としている。ひずみ分布については，分割領域の中心間距離を代表長さとした要素により生成される一定領域において平均化することで計算している。



図－1　ランダムパターンと DIC の原理

*1 大成建設（株）　技術センター社会基盤技術研究部材工研究室　修士（工学）　(正会員)
*2 大成建設（株）　関西支店新名神宇治田原第二高架橋工事　修士（工学）　(正会員)
*3 大成建設（株）　技術センター社会基盤技術研究部材工研究室　博士（工学）　(正会員)

一方で，DIC はランダムパターンが塗布された計測面を固定カメラにて複数枚撮影し，変形前後のランダムパターンの任意の座標上の変化量を算出するという計測原理から，対象面のコンクリートのひび割れや剥落によりランダムパターンが追跡不能となると，変形前後でのランダムパターンの相関が計算できず，計測が不可能となる。

3. 実験概要

本実験では，壁式橋脚を模した試験体において，中間帯鉄筋に両端半円形フックを使用した試験体 1 体について静的正負交番載荷試験を行った。

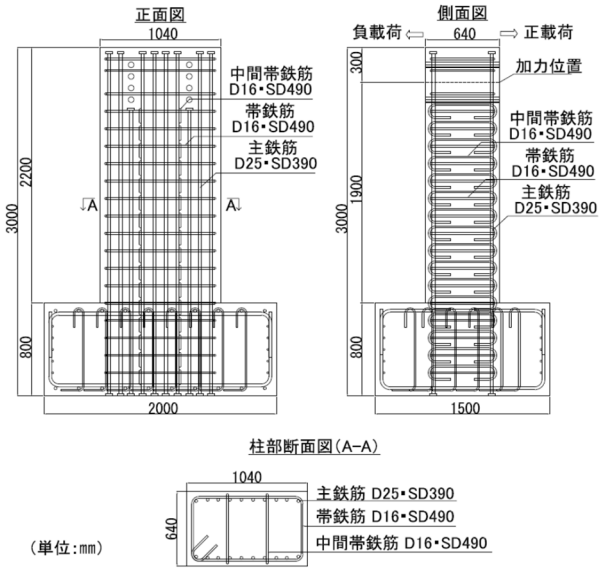
3.1 試験体概要

試験体諸元として，**表－2** に試験体の主な諸元を，**図－2** に試験体の形状・配筋を示す。

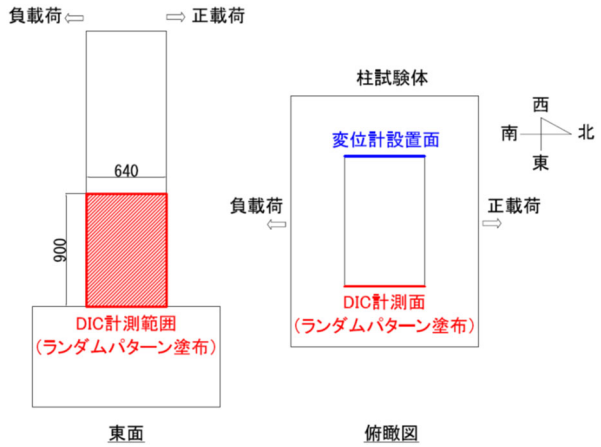
次に使用材料の物性値として，**表－3** に鉄筋の各諸元を，**表－4** に載荷試験時のコンクリートの材齢・圧縮強度とヤング係数を，**表－1** にコンクリートの配合を各々示す。鉄筋の種類は，軸方向鉄筋は SD390，帯鉄筋と中間帯鉄筋は SD490 とした。

3.2 載荷方法

鉛直荷重は基部応力が 2N/mm^2 となるように 1331kN の軸力を作用させ，試験中に一定値となるように制御した。水平荷重は 2000kN ジャッキを加力位置（基部から



図－2　試験体の形状および配筋



図－3　DIC および変位計の計測位置

表－2　試験体の諸元

載荷方向幅(mm)			640
載荷直角方向幅(mm)			1040
載荷高さ(mm)			1900
せん断スパン比(a/d)			3.33
軸方向鉄筋	本数－径@間隔(mm)		20-D25@150
	総断面積(mm^2)		5067
	軸方向鉄筋比(%)		1.52
横拘束鉄筋	帯鉄筋	径@間隔(mm)	D16@150
	中間帯鉄筋	本数－径@間隔(mm)	2-D16@150
	総断面積(mm^2)		794.4
軸力(kN)（基部応力(N/mm^2)）			1331(2.0)

表－3　鉄筋の諸元

鉄筋種	径	材質	ヤング係数 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)
軸方向鉄筋	D25	SD390	1.93×10^5	423
帯鉄筋 中間帯鉄筋	D16	SD490	1.91×10^5	562

表－4　コンクリートの圧縮強度とヤング係数

材齢（日）	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/ mm^2)
10	28.2	2.82×10^4

表－1　コンクリート配合

G_{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
					セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
20	12±2.5	4.5±1.5	62.4	43.3	253	158	818	1096	2.53

高さ 1900mm）に 1 基取り付け片側からの載荷とした。制御用の変位測定位置は加力位置と同じ高さとして，水平変位は両側面に設置した 2 つの変位計の平均値を用いた。

水平載荷は以下に示すステップで実施した。まず始めに，実材料強度に基づく降伏荷重の計算値(P_y=732kN)を基に，±1/3 P_y と±2/3 P_y までそれぞれ正負 1 回ずつ載荷し，その後，軸方向鉄筋のひずみを確認しながら降伏変位（以下，1δ_y）まで載荷した。1δ_y が 15mm と得られた後は，1δ_y の整数倍の強制変位を与え，各載荷ステップで 3 回の正負繰返しを伴う載荷を行った。試験は 8δ_y の 1 サイクル目において最大荷重の 40%以下まで荷重が低下した時点で載荷を終了した。

3.4 DIC の諸条件

図－3 に DIC および変位計による試験体の計測位置を示す。変位計による計測を西面で，DIC による計測を東面で実施した。柱の基部付近に設けた東面の計測範囲（幅 640mm，高さ 900mm の範囲）にランダムパターンを塗布し，それを計測用のカメラ（撮影サイズ 4096×3068 ピクセル）で撮影した。撮影した画像データは 1pix≒0.278mm であり，領域サイズは 25×25pix，領域間距離は 20pix とした。なお，カメラレンズや外気温から生じる歪曲収差はキャリブレーション [4]を実施し補正を行った。カメラが対象面に対して正対していないことに起因するあおり補正については対象面上に作成したに任意の 2 次元座標を用いて補正を行った。

4. 実験結果

4.1 荷重—変位関係

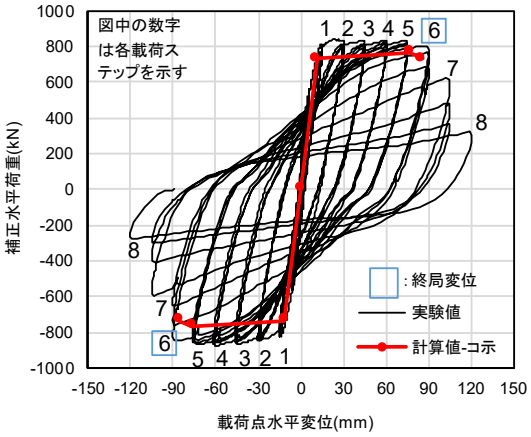
図－4 に本試験の補正水平荷重—水平変位関係を示す。なお，水平荷重は軸力の偏芯を考慮し補正を行っている。

本研究では，1 サイクル目の水平荷重が降伏荷重 P_y =732kN を下回らない最大水平変位を終局変位とした。これより，終局変位は±6δ_y となった。また，参考として，実材料強度を用いて算出したコンクリート標準示方書に基づく伸出しを考慮した骨格曲線 [5]を併せて示すが，終局変位は概ね一致している。

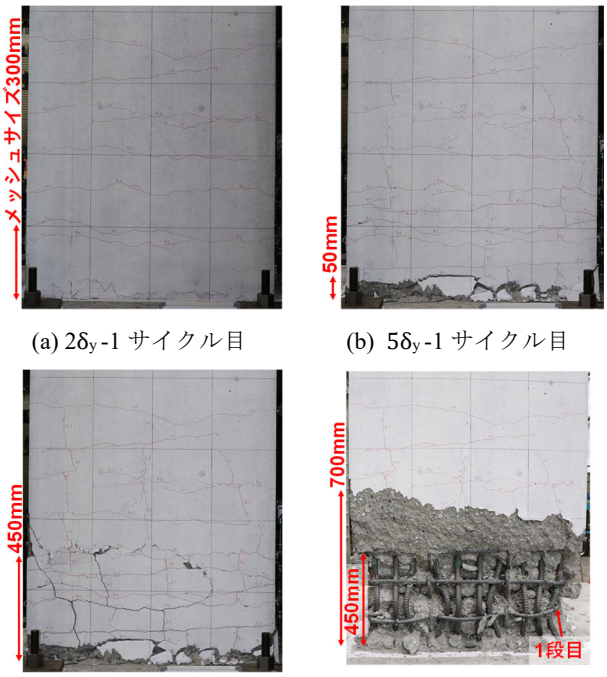
4.2 基部の損傷状況

写真－1 に 2δ_y，5δ_y ，6δ_y の 1 サイクル目における正載荷の最大変形時および試験終了後のそれぞれの基部の損傷状況を示す。

2δ_y では，既に軸方向鉄筋は降伏しており，基部からおよそ 20~50mm の高さのコンクリートで圧縮ひび割れが生じたが，目視による判断では大きな損傷や変形は見られない。5δ_y では，基部から高さ約 50mm 以下のかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じたが，かぶりコンクリートのはらみだしは確認できない。終局変位である 6δ_y-



図－4　補正水平荷重—水平変位関係



(a) 2δ_y-1 サイクル目　(b) 5δ_y-1 サイクル目

(c) 6δ_y-1 サイクル目　(d) 試験終了後

写真－1　正載荷時圧縮側の基部損傷状況

1 サイクル目の時点で，基部から高さ約 450mm のかぶりコンクリートではらみだしによる剥離が生じており，これは軸方向鉄筋の座屈が生じたことによる影響だと思われる。その後，6δ_y-2 サイクル目の負載荷においてかぶりコンクリートが剥落し始め，荷重の低下と目視による軸方向鉄筋の座屈を確認した。試験終了後では，基部から高さ約 700mm に至るまでのコンクリートが剥落し，軸方向鉄筋と帯鉄筋の 2 段目までが完全に露出している状態となった。高さ 150mm（図における帯鉄筋の 1 段目）の位置の帯鉄筋が大きく変形し，軸方向鉄筋も座屈しており，スケールを用いて座屈区間を確認したところ基部から帯鉄筋 3 段分に相当する 450mm の領域であった。

5. DIC を用いた詳細な変形挙動の評価

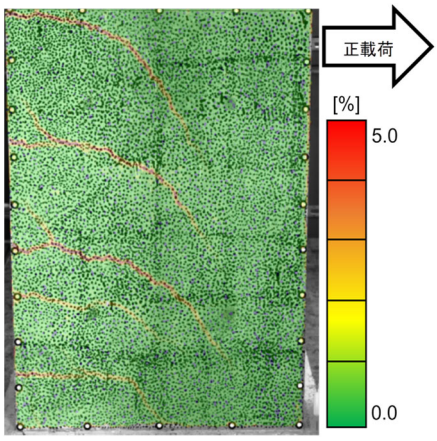
本研究では各載荷ステップ（$1\delta_y$，$2\delta_y$，…）における正載荷の 1 サイクル目の最大変形時に着目し，その計測結果について検討を行った。

5.1 ひび割れの評価

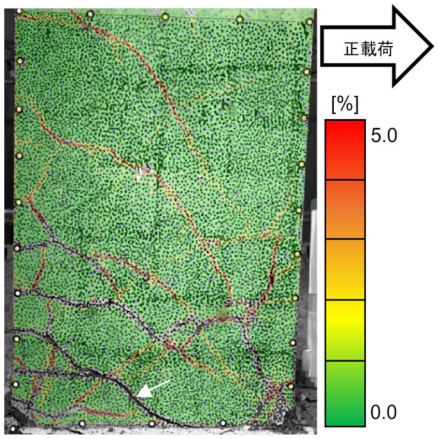
図－5 に DIC により得られた最大主ひずみ分布を示す。なお，ここでは代表的なものとして $1\delta_y$ と $5\delta_y$ の結果を示す。この図は実際に撮影された写真上に DIC により作成したコンターを透過して示したものである。ひび割れが生じている箇所は，2%以上のひずみが計測され，黄色～赤色で表示されている。ひび割れ付近でコンターが表示されていない箇所（**図－5** 中の矢印の箇所）については，ひび割れ開口幅が大きいため生成した領域内のランダムパターンを追跡できず，相関の計算が不可能となったためである。**図－5** から最大主ひずみが大きくなっている位置とひび割れ位置は概ね一致しており，ひび割れの先端（圧縮縁側）にいくに連れてひずみが小さくなっていることから，曲げひび割れや軸方向鉄筋に沿ったひび割れの進展状況を詳細に把握することができた。

5.2 水平変位と部材角の評価

図－6 に DIC による水平変位と部材角に関する計測結果を示す。(a)に $3\delta_y$ の最大主ひずみ分布を，(b)(c)に $1\delta_y$，$3\delta_y$，$5\delta_y$ における柱中央の水平変位の高さ方向の分布，およびその差分を計測間隔で除した傾きとして得られる部材角の高さ方向の分布を示す。なお，(a)中の円は引張縁から進展した曲げひび割れが柱中央の変位抽出点と交差した位置を示す。この位置の高さと，水平変位が増加している高さおよび部材角が増加している高さが一致していることが分かる。また，載荷ステップが進行するにつれて水平変位が一定の増加量で変化していること，部材角がひび割れ位置において大きく増加していることから，高さ方向に細かく水平変位と部材角を算出することで，各載荷ステップにおける部材の変形状況を詳細に捉えることができた。そして，柱中央では水平変位の増加に伴い部材角も増加し，ひび割れ部以外の範囲ではほぼ一定の勾配で推移することが確認された。

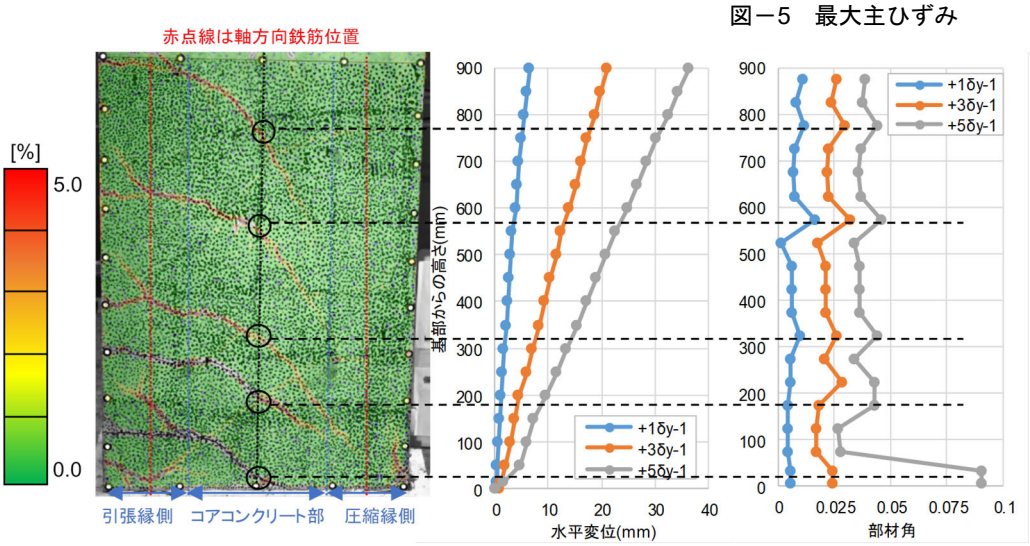


(a) $1\delta_y$ -1 サイクル目



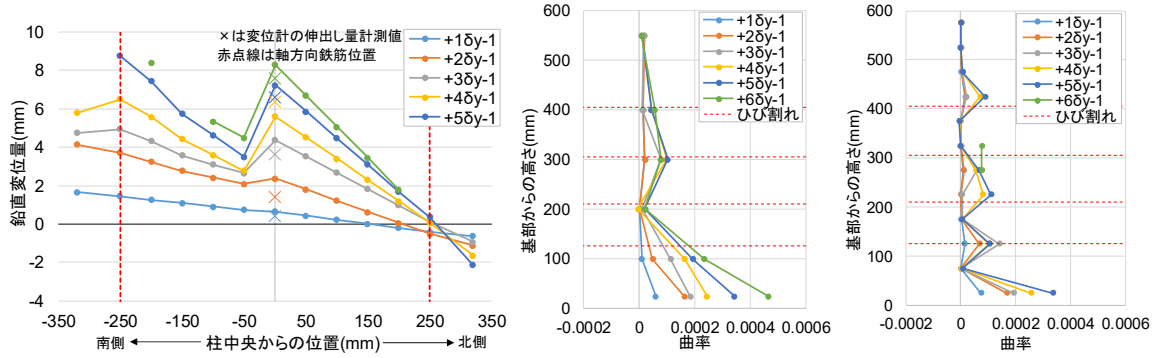
(b) $5\delta_y$ -1 サイクル目

図－5　最大主ひずみ



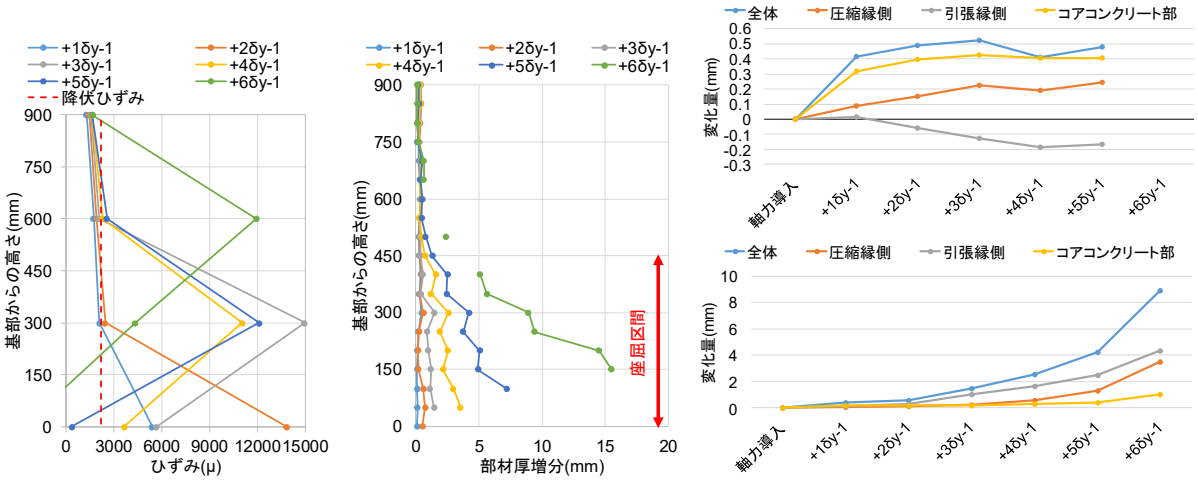
(a) 最大主ひずみ分布（$+3\delta_y$ -1 サイクル目）　(b) 水平変位分布　(c) 部材角分布

図－6　水平変位と部材角に関する計測結果(DIC)



(a) 伸出し分布(DIC)　　(b) 曲率分布（左：変位計　右：DIC）

図－7　基部の伸出しと曲率に関する計測結果



(a) 軸方向鉄筋ひずみ分布（ひずみゲージ）　(b) 部材厚増分の分布 (DIC)　(c) 部材厚増分の内訳(DIC)（上：高さ 600mm　下：高さ 300mm）

図－8　部材厚増分に関する計測結果

5.3 基部の伸出しと曲率に関する評価

図－7 に DIC による基部の軸方向鉄筋の伸出しと曲率に関する計測結果を示す。(a)に DIC によって得られた基部から 50mm 高さの鉛直変位の幅方向の分布と西面で同じ高さに設置した変位計による伸出し量の計測値を併せて示す。基部の伸出しにより引張縁である南側の鉛直上向きの変位が最も大きく，圧縮縁の北側にいくにつれて鉛直下向きの変位へと変化しており，載荷ステップが進むにつれてこの挙動が顕著になっている。また，$2\delta_y$ から -50mm~0mm の間で勾配が大きく変化しているのは，その範囲にひび割れが発生しひび割れの上側が鉛直上向きに変位したためである。変位計による計測結果と比較すると，多少の違いはあるがその差は±1mm 以内であることから誤差の範囲内であるか，西面と東面での伸出し量の違いであると考えられる。伸出しの分布から，基部では引張縁から圧縮側の軸方向鉄筋位置までの範囲で浮き上がりが生じ，圧縮縁のかぶり部分では沈み込んでいることが確認された。

(b)に変位計と DIC それぞれで算出した曲率の高さ方向の分布に，$6\delta_y$ において引張縁の南面に発生していたひび割れ位置の高さ方向の分布を併せたものを示す。なお，ひび割れ位置の高さは DIC の結果より判断したものである。曲率は土木研究所資料 [6]に基づき算出している。2 つの曲率分布を比較すると，伸出しにより基部の曲率が最も大きいことは同様である。その一方で，高さ方向により細かく曲率を計測することで，ひび割れ位置とほぼ同範囲で曲率が大きく増加していることとひび割れが無い区間の曲率は大きく減少することを確認したことから，塑性域での断面の曲げ変形状態を詳細に評価できたといえる。

5.4 部材厚増分に関する評価

図－8 に DIC による部材厚増分に関する計測結果を示す。(a)に北面の東から 3 本目の軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージで計測したひずみの高さ方向の分布と鉄筋の実材料強度から算出した降伏時のひずみを，(b)に部材厚増分の高さ方向の分布を示す。ひずみゲージは基部から 300mm ピッチの位置に貼付しており，DIC は基部から 50mm ピッチの位置で部材厚増分の計測を行った。

$1\delta_y$ と $2\delta_y$ では，高さ 300mm 以下の軸方向鉄筋が降伏している一方で，部材厚は $1\delta_y$ では変化が無く，$2\delta_y$ では

高さ 150mm 以下で最大 0.8mm 増加している。部材厚が増加し始める高さがひずみの増加し始める高さより低いのは，横拘束鉄筋が高さ 0mm から 150mm ピッチで配置されており，高さ 150mm 位置で横拘束鉄筋が軸方向鉄筋の座屈を拘束することで，コンクリートのはらみ出しを抑制したことが要因の一つとして考えられる。$3\delta_y$ から $5\delta_y$ では，高さ 600mm 以下で降伏が生じている一方で，部材厚は 3δyでは高さ 350mm 以下で最大 1.5mm，$4\delta_y$ と $5\delta_y$ では降伏範囲と同様に高さ 600mm 以下でそれぞれ最大 3.5mm，7.2mm 増加している。$6\delta_y$ では，高さ 900mm 以下で降伏が生じている一方で，部材厚は高さ 750mm 以下で最大 15.5mm 増加している。$3\delta_y$ と $6\delta_y$ において部材厚が増加し始める高さがひずみの増加し始める高さと異なるのは，$1\delta_y$ と同様に横拘束効果の影響だと推測する。以上の結果から，軸方向鉄筋の座屈によりはらみだす範囲と部材厚の増加範囲が概ね一致していることとその増加し始める載荷ステップ，そして，横拘束鉄筋の位置を境に部材厚が増加している状況を詳細に把握できた。

次に，本研究では(b)で示した部材厚増分の要因は，圧縮縁側または引張縁側のかぶりコンクリートのはらみだしによるものとコアコンクリート部のひび割れによるものが主体的であると考え，**図－6** の(a)に示すように柱を引張縁側，圧縮縁側，コアコンクリート部の 3 つの領域に分割し，それぞれで部材厚増分を計算した。代表的なものとして高さ 300mm と 600mm の結果を(c)に示す。高さ 300mm では，圧縮縁側の増分は $3\delta_y$ で 0.3mm 増加し，そこから徐々に増加量が大きくなり，$5\delta_y$ と $6\delta_y$ の間で明確に勾配が大きくなり，最終的に 3.5mm 増加している。このことから，圧縮側の軸方向鉄筋は $3\delta_y$ からはらみだし始め，$6\delta_y$ で大きく座屈したことが分かる。また，$3\delta_y$ 以降において，全体の増分の 85%以上が圧縮縁側と引張縁側の増分によるものであることから，高さ 300mm における部材厚増分の要因ははらみだしによるものが支配的であることが分かった。一方で，座屈区間よりも上に位置する高さ 600mm では，高さ 300mm より全体の増分が小さく，$2\delta_y$ 以降のサイクルで全体の増分の 80%以上がコアコンクリート部の増分によるものであることから，高さ 600mm における部材厚増分の要因はコアコンクリート部の曲げひび割れの開口によるものが支配的であることが分かった。以上から，任意の高さの部材厚増分がどのような要因に起因するものであるかをその割合も含め明確に示した。

6. まとめ

本研究では，RC 柱部材の基部付近における曲げ変形挙動をより詳細に把握するため，正負交番載荷試験において DIC による変位計測を適用した。本実験の計測結果より得られた結論を以下に示す。

(1) DIC を用いた変位・ひずみ計測によって，接触型計測よりも細かい分布の曲率，計測自体が困難な部材角分布，部材厚増分を算出することで，塑性域も含めた柱部材の詳細な曲げ変形挙動を把握することができた。

(2) 計測対象面の最大主ひずみ分布の変化から，水平力載荷に伴う曲げひび割れや軸方向鉄筋に沿ったひび割れの進展状況を詳細に把握できた。

(3) 柱中央での水平変位と部材角を高さ方向に細かい区間で算出することで，各載荷ステップにおける部材の変形状況を詳細に評価できた。また，水平変位の増加に伴って部材角は増加するが，ひび割れのない領域での分布はほぼ一定の勾配で推移することが明らかになった。

(4) 幅方向の伸出しの分布から基部の浮き上がり領域と沈み込み領域を把握できた。また，高さ方向の曲率分布を細かい区間で計測することで，曲率が大きい領域と小さい領域を高さ方向に詳細に分割でき，塑性域での断面の曲げ変形状態を詳細に評価することができた。

(5) 曲げ変形時の柱基部付近における部材厚増分を算出することで軸方向鉄筋の降伏・座屈やかぶりコンクリートのはらみだしとの関係性を詳細に把握できた。軸方向鉄筋の座屈が生じ部材厚増分が大きい範囲では $3\delta_y$ から部材厚が増加し始め，特にかぶりコンクリートのはらみだしが支配的であることを明らかにした。

参考文献

1) 北川大祐，岡河雅人，梅村恒：画像解析による RC 部材の変形状態の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，733-738，2016.7

2) 浅井竜也，勅使川原正臣：詳細な変形性状計測に基づく RC 造曲げ柱部材の高精度変形評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，145-150，2020.7

3) 山本悠人，村田裕志，畑明仁：デジタル画像相関法を用いた RC はり部材の損傷評価の試み，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No2，55-60，2019.7

4) CG-ARTS 協会編：ディジタル画像処理[改定新版]，公益財団法人画像情報教育振興協会，2015.3

5) 土木学会：2017 年制定　コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3

6) 運上茂樹，星隈順一，西田秀明：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案），土木研究所資料第 4023 号，2006.8