

論文 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

山本 悠人*1・村田 裕志*2・畑 明仁*3

要旨: 本研究では、単調荷を受けるせん断破壊型の RC はりを対象にデジタル画像相関法を適用し、変位分布とひずみ分布の計測を実施した。またそれらのデータから現行の設計で示されているせん断破壊に対する損傷指標の算出を試み、結果として実験から直接的に算出された各損傷指標はそれらが示す破壊基準を良好に再現していることが確認された。

キーワード: デジタル画像相関法, 損傷指標, 偏差ひずみの第2不変量, 部材厚増分

1. はじめに

高性能計算機や汎用有限要素法（以下 FEM）コードの普及により、従来の断面計算や線材要素に代わりシェル要素やソリッド要素を用いる非線形 FEM 解析を設計に用いる事例が増えている。これに伴い非線形 FEM を用いた RC 構造物の設計の考え方が整備されて、その一環として解析結果である変位やひずみを利用した新たな損傷指標も提案されている。土木学会のコンクリート標準示方書¹⁾では2012年度から非線形 FEM により性能照査を実施する際には、偏差ひずみの第2不変量 ($\sqrt{J_2}$) や累積正規化ひずみ (Wn) を、それぞれ斜め引張破壊や曲げ破壊、せん断圧縮破壊の評価に適用するよう規定されている。また土木学会原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査マニュアル2018²⁾では、一定の条件下の部材に対し、材料非線形解析による照査には、面外せん断破壊の判定基準として部材厚増分 (ΔD) を適用するよう規定されている。これらの指標は実験とそれを再現する解析から適用性・妥当性が検証されてきた。

一方でデジタルカメラやその画像情報の処理技術の向上を背景に、RC 構造実験の変位や損傷の計測に、画像解析を用いる事例が近年増えてきている。従来の変位計を基本とした計測では局所的な固定点の変位を計測することとなるが、デジタル画像による計測では、撮影範囲内の構造物の面的挙動をとらえることができ、その情報は変位計による計測に比べ飛躍的に増大する。中でも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るデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method, 以下 DIC) は対象面の変位・ひずみを面的に計測できる手法として注目を集めている。

本研究ではせん断破壊する RC はりの単調荷試験に DIC を適用し、そこから得られた変位・ひずみ分布から損傷指標である偏差ひずみの第2不変量と部材増厚分の計測を行い、その精度検証を行った。この手法は実験の

再現解析を実施することなく今回の実験条件に対する各損傷指標の妥当性・適用性を直に判断でき、また実験の再現解析の妥当性評価・キャリブレーションの高精度化に寄与すると期待される。

2. 各損傷指標とデジタル画像相関法

2.1 偏差ひずみの第2不変量

斎藤ら³⁾は、RC 部材における曲げひび割れや斜めひび割れが形成する領域では局所的に過大な引張ひずみ・せん断ひずみが生じることから、この損傷指標として次式で示す偏差ひずみの第2不変量 ($\sqrt{J_2}$) を提案した。

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

また非線形解析時の要素長さの違いによるひずみの局所化に対する対策として、 $r=150\text{mm}$ の円 (2次元解析の場合。3次元解析の場合は球) で囲まれる領域でガウス点における損傷指標に対し距離により重みをつけた平均化を行うことを提案している。

これらの損傷指標は、はり部材への適用性から面部材・柱部材などへと適用性を広げ、2012年度制定の土木学会コンクリート標準示方書に新たに記載されている。その中では非線形有限要素解析による照査内の破壊に対する照査として、斜めひび割れ発生的事象に対して $r=150\text{mm}$ で重み付き平均された場合、偏差ひずみの第2不変量の限界値が 1000μ と規定されている。

2.2 部材厚増分

宮川ら⁴⁾は複数の片持ち形式または逆対象曲げ形式の柱試験体に対し、ポイントターゲットを用いた画像解析とそれらの再現解析の結果から、せん断破壊に対し部材厚増分を損傷指標とすることを提案した。この部材厚増分による評価手法はせん断破壊時に斜めひび割れや付着割裂ひび割れの開口により部材の厚さが未損傷時と比較して増加することを利用し、解析により得られた部材厚

*1 大成建設 (株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 修 (工) (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 博 (工) (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 (工) (正会員)

の増加分を損傷評価として用いる手法である。この指標はせん断破壊のみを対象とした点やひび割れの発生ではなく水平耐力が維持される状態を対象としている点で偏差ひずみの第2不変量とは異なる。

これらの研究を基に2018年度に制定された土木学会原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査マニュアル²⁾では材料非線形を用いた耐震性能照査の章に部材厚増分 (ΔD) を用いた照査として以下の式に示される指標を採用している。

$$\Delta D_{lim} = \max \{5, 2.5 p_w D\} \quad (2)$$

ここで ΔD_{lim} は部材厚増分の限界値である。式(2)は曲げひび割れの開きは検知せず、斜めひび割れの発生を許容しつつ、構造物全体としての水平耐力の低下が小さいと考えられるレベルに限界値が設定されている。ここで式(2)の第1項は面外せん断補強鉄筋の無い部材に、第2項は面外せん断補強鉄筋を有する部材に着目している。解析により部材厚増分を算出する際は、せん断破壊した区間の変形図の観察等に基づいて部材厚増分の最大値を解析者が抽出することとしている。

2.3 デジタル画像相関法

構造実験に光学的全視野計測法を適用する事例は近年増えてきている^{5,6)}。DICはその一種であり、計測対象面に対し、変位やひずみを計測することができる。

ランダムパターンの輝度分布の相関を用いた変形計測は、図-1の様に計測対象面に塗付されたランダムパターンを任意の大きさ(領域サイズ)と間隔(領域間距離)の領域に分割し、変形前の領域Aの輝度分布と相関の高い箇所を変形後の写真において探索し、その箇所を領域A'として領域Aの中心点の変形量を(Δx , Δy)と算出している。また、変位算出の際には輝度分布をスプライン補間等により離散的なデータを直接的に補間することで、精度の高いサブピクセルでの計測処理の実施を可能としている。ひずみ分布については計測された変位分布より計算されている。またひび割れ幅については、ひび割れをまたぐように2点を設定することでひび割れの鉛直方

向成分やせん断方向のずれ成分を2点の相対変位から算出することができる。

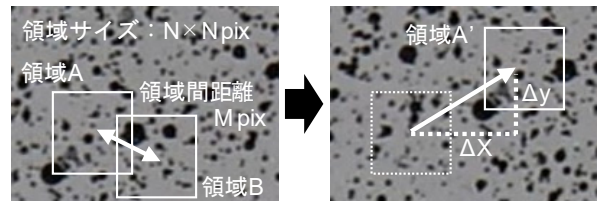


図-1 ランダムパターンとDICの計測原理

表-1 試験体の諸元

試験体幅		600 mm
試験体高さ		900 mm
有効高さ		825 mm
支点と載荷点の距離		1800 mm
軸方向鉄筋	本数-径	5-D38
	引張鉄筋比	1.15 %
せん断補強鉄筋	径@間隔	D13@200
	鉄筋比	0.21 %
せん断スパン比 (a/d)		2.18
コンクリート設計配合		27 N/mm ²
設計耐力	曲げ降伏耐力	2542.4 kN
	曲げ耐力	2639.1 kN
	せん断耐力 (棒部材式)	1676.4 kN
	せん断耐力 (DB式)	3290.4 kN

表-2 載荷時の材料諸元

鉄筋	径	材質	降伏強度 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]
軸方向鉄筋	D38	SD490	544	712
帯鉄筋	D13	SD295	358	504
コンクリート	材齢 [日]	弾性係数 [GPa]	圧縮強度 [N/mm ²]	
	27-18-20H	50	31.8	44.3

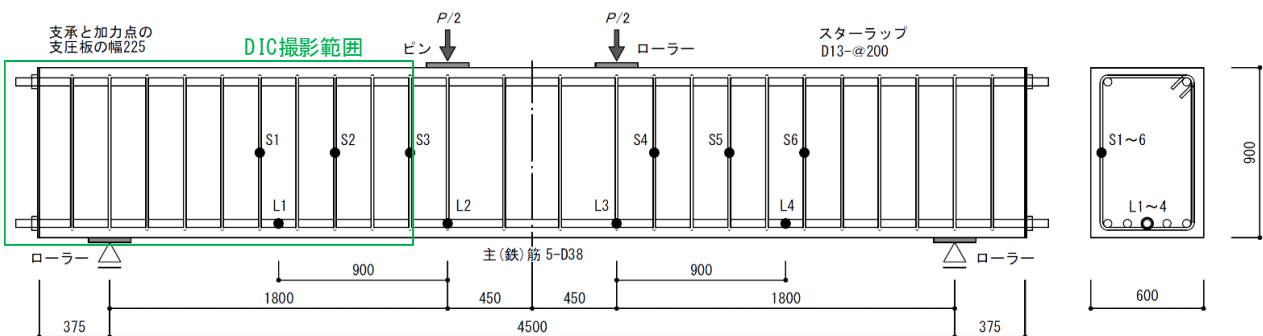


図-2 RCはり試験体配筋図面

3. せん断破壊する RC はり試験

3.1 実験概要

せん断破壊が想定される RC はり試験体の2点荷重試験を実施した。図面を図-2に、試験体の諸元を表-1に、材料の諸元を表-2にそれぞれ示す。なお設計耐力については、斜め引張破壊を二羽ら⁷⁾が提案する式にて、ディープビーム式を谷村ら⁸⁾が提案する式にて、曲げ耐力を土木学会コンクリート標準示方書に基づく断面解析にて算出した。

加力は単調荷重とし、荷重が低下するまで荷重を実施した。変形計測は試験体中央と支点位置において鉛直変位を計測した。DIC の撮影は図-2 に示す片側のせん断区間の一部とした。撮影はせん断応力度を基準として 0.25N/mm² ごとに実施し、荷重低下まで撮影した。

3.2 実験結果

図-3 に荷重-変位関係を示す。同時に DIC 撮影のタイミングも記した。試験体は 265kN で等曲げモーメント区間において鉛直方向の曲げひび割れが、756kN で両方のせん断区間において斜めひび割れが生じた。その後最大耐力の 2335kN を示した後に片側の斜めひび割れが大きく開口し、せん断破壊により耐力が低下した。DIC にて対象とした計測面はこの大きく開口した斜めひび割れが発生した区間である。図-4 に荷重終了後のせん断破壊した区間の破壊状況の写真を示す。破壊形態はせん断破壊を示したが、斜め引張破壊を対象とする既往の耐力式と比べると高い耐力を示した。また付着割裂ひび割れも確認された。

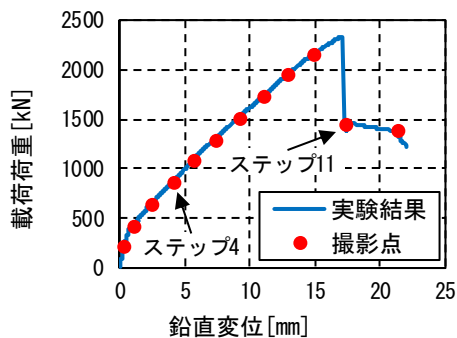


図-3 荷重-変位関係と DIC の撮影点

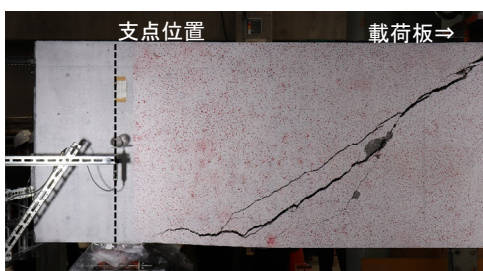
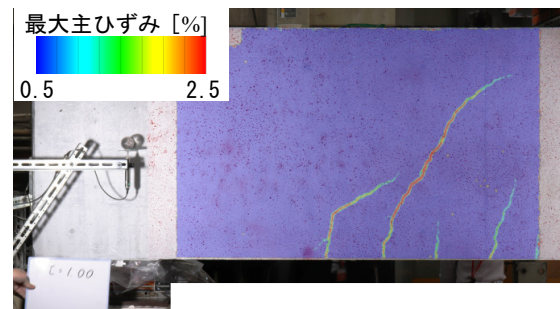


図-4 試験体最終破壊状況

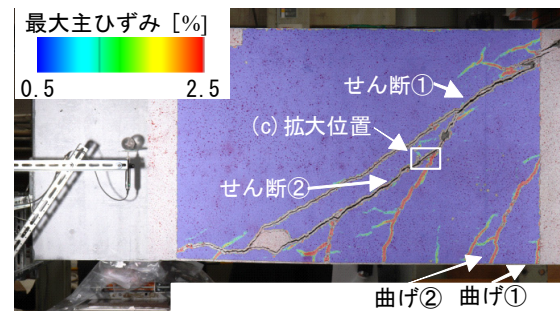
3.3 DIC の適用

計測対象の範囲は片側せん断区間内の 1410×900mm とし高解像度の一眼レフカメラ（撮影サイズ 6000×4000pix）にて撮影し、得られた画像データは 1pix ≒ 0.404mm となった。領域サイズは 26×26pix、領域間の距離は 20pix として DIC を実行した。なお、一眼レフカメラでの撮影により生じる樽型の歪曲収差はカメラキャリブレーション⁹⁾を実施した。カメラが対象面に対して正対していないことに由来するあおり補正については対象面に長方形を生成し、その4点を用いて補正を行った。

DIC により得られた最大主ひずみ分布を図-5 に示す。この図は実際に撮影された写真に DIC のコンターを透過して示している。ここでは代表的な撮影ステップとして、斜めひび割れが発生した直後のステップ 4（上図）、最大耐力を示した直後のタイミングであるステップ 11（中図）を示す。ひび割れ付近でコンターが表示されていない箇所については、大きく開口したひび割れにより分割領域のランダムパターンの輝度分布が急変し、相関探索



(a) ステップ 4 (全体図)



(b) ステップ 11 (全体図)



(c) ステップ 11- (拡大図)

図-5 DIC 計測結果・最大主ひずみ

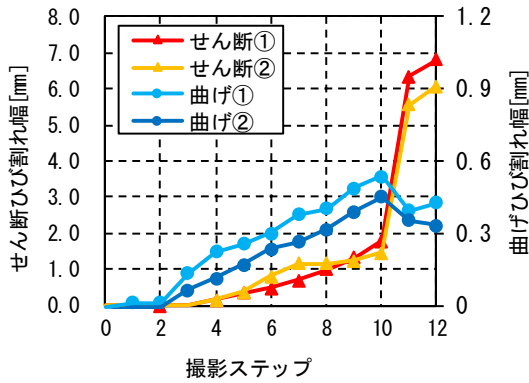


図-6 ひび割れ幅の変化

が不可能となったために表示されていない箇所である。
 斜めひび割れ位置における最大主ひずみ分布の拡大図を図-5(c)に示す。ひび割れの発生とともに最大主ひずみがひび割れと同じ位置で局所的に増大し、適切にひび割れ分布を再現していることが確認された。またひび割れの進展に着目すると、図-5(a)に示す通り、ひび割れ先端(圧縮縁側)のひずみが小さい値を示している。圧縮側となる上面側ではひび割れ幅が進展するにつれ小さくなる実験結果を再現しており、ひび割れの進展・開口幅まで分布として計測できていることが示されている。各撮影ステップにおけるDICにより計測されたひび割れ幅を図-6に示す。なお各ひび割れの計測位置は図-5(b)に示す。また開口幅は2点間の距離として定義し、探索が不可能となった領域も含まれている。せん断破壊により耐力が低下した時点(ステップ11)で当然ながら斜めひび割れ幅は急伸している。反対に曲げひび割れ幅は前のステップ10に比べ低下していることが確認される。これは最大耐力までは曲げひび割れと斜めひび割れ双方で変形を負担している状態が、せん断破壊後は斜めひび割れの開きが主として変形を負担し曲げひび割れが閉口したためだと考えられる。

4. DICによる損傷指標評価

4.1 偏差ひずみの第2不変量

(1) 算出法

DICにより得られる変位分布において、図-7のように50mm間隔に格子点を設定し、DICにより得られた変位分布を線形補間し格子点上の x, y 方向(x 方向:写真横方向)の変形量を抽出した。その後9点の格子点を利用し、9節点のアイソパラメトリック要素を構築し、その形状関数を用いて各要素の Gauss 点上の各ひずみを算出、そこから式(1)により偏差ひずみの第2不変量を算出した。

コンクリート標準示方書に示される斜めひび割れ発生に対する指標と合わせるため、算出した偏差ひずみの第2不変量を以下の式(3),(4)により重み付け平均を行った。

$$\bar{D} = \frac{\int_A D \cdot w(x) dA}{\int_A w(x) dA} \quad (3)$$

$$w(x) = \begin{cases} 1-x/L & x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases} \quad (4)$$

なお重み付けの要素代表長さ L はコンクリート標準示方書に従い $r=150\text{mm}$ とした。

(2) 算出結果と考察

上記により得られた偏差ひずみの第2不変量の分布を図-8に示す。ここで偏差ひずみの第2不変量が対象とする事象が斜めひび割れの発生であるため、実験で斜めひび割れが発生した前後の撮影ステップであるステップ

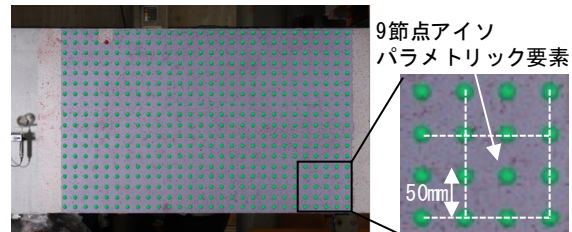


図-7 格子点とアイソパラメトリック要素

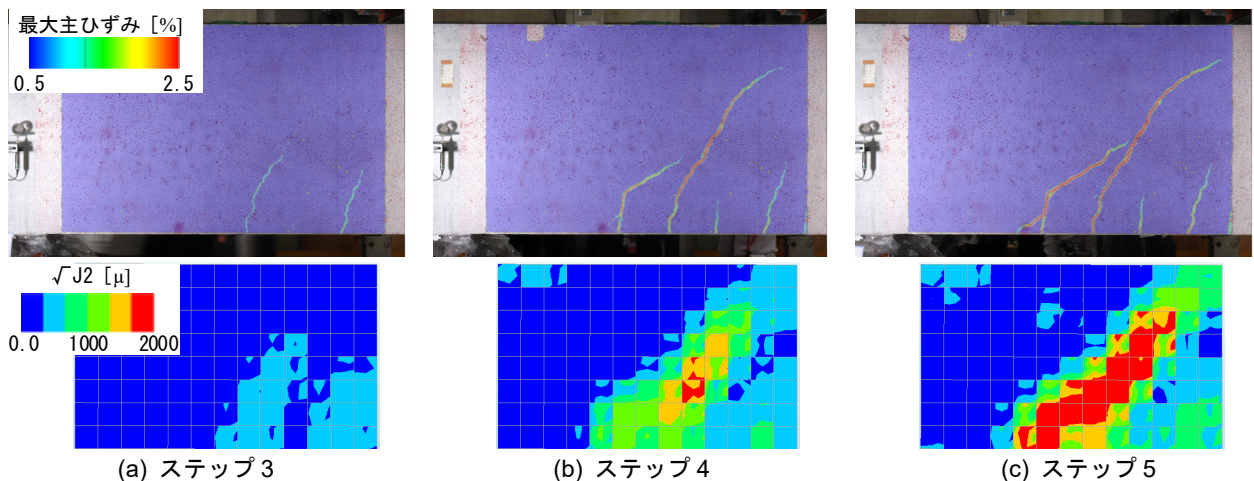


図-8 $\sqrt{J_2}$ 算出結果

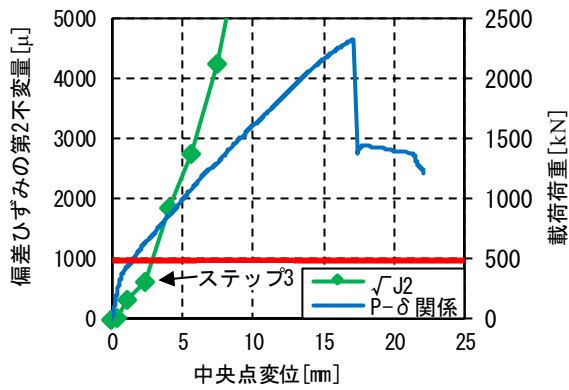


図-9 撮影ステップと $\sqrt{J_2}$ の最大値の関係

3とステップ4、ステップ5の結果を示している。またひび割れ位置の参考としてDICにて得られた最大主ひずみの分布も示す。ステップ3では鉛直方向に延びる曲げひび割れの箇所が高い値を示している。ステップ4,5では斜めひび割れ発生位置において偏差ひずみの第2不変量が高い値を示しており、特に2本の斜めひび割れが近傍にある個所で最大値を示している。

撮影ステップと偏差ひずみの第2不変量の最大値の関係を図-9に示す。斜めひび割れが発生したステップ4以降、最大値は急伸し既往の研究³⁾にて非線形FEM解析で示されている傾向と一致した。

斜めひび割れが発生したステップ4時点で基準値である 1000μ を超え、今回の実験ではコンクリート標準示方書が示す損傷指標と斜めひび割れの発生のタイミングが合致した。今回の実験条件の寸法や鉄筋比が、既往の研究³⁾で検証されている試験体の諸元と類似しており、 $r=150\text{mm}$ の平均化が適切であったと考えられる。

4.2 部材厚増分

(1) 算出法

DICにより算出された変位分布から、図-10の上図に示すように100mm間隔で部材厚増分を算出した。なお対象面の左上の一部領域において、ランダムパターンの輝度分布クオリティが低いことが原因の計測不良領域が生じているため、部材厚増分の上辺は、試験体から50mm低い位置を指定している。計測対象面の上辺付近には付着割裂ひび割れやコンクリートの圧縮破壊は生じてなく、部材厚増分の計算に対しての影響は小さいと考えられる。距離計測の間隔は、実際に鉄筋コンクリートの非線形FEM解析を実施するにおける標準的なメッシュサイズである約200mmの半分となる100mmとした。

なお図-10(上図)は撮影ステップ11時の部材厚増分の算出結果であり、両端を含む4本の赤いラインは輝度分布の探索不良により計測ができなかった箇所を示し

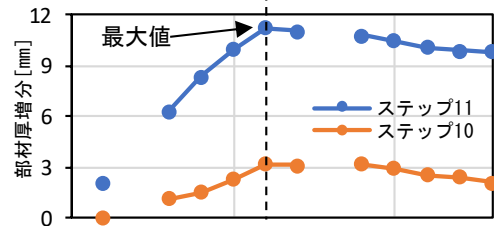
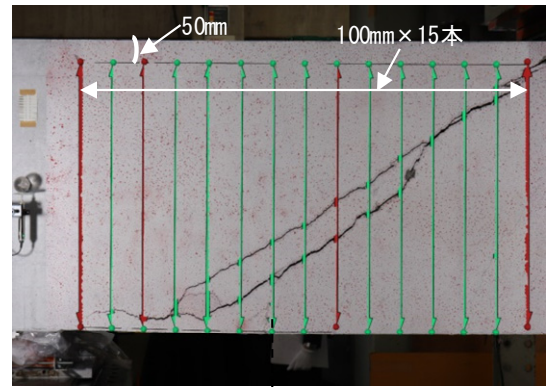


図-10 ΔD 算出位置(上)とその変形量分布(下)

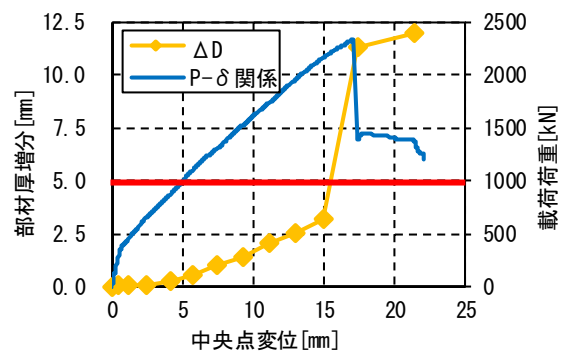


図-11 ΔD 算出結果

ている。

(2) 算出結果と考察

上記により得られた部材厚増分を図-11に示す。なお各撮影ステップにおける部材厚増分の最大値を示している。部材厚増分は斜めひび割れが発生した撮影ステップ4から微増し、破壊が生じた撮影ステップ11で急伸した。せん断破壊前後である撮影ステップ10,11の部材厚増分の分布を図-10の下図に示す。横軸は上図の位置と対応しており、両端と左から3,9本目の計測ができていないためデータが欠測している。どちらのステップにおいても支点付近から荷重点方向に向かうにつれ部材厚増分が増加し、せん断区間の中央付近で最大値となりそこからは緩やかに減少する傾向を示している。支点付近では付着割裂ひび割れが部材厚増分の主要因であり、斜めひび割れに比べ変形量が小さいため部材厚増分も小さくなっているものと考えられる。せん断破壊後はせん断区間全体で部材厚増分が増大していることが示された。

土木学会原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能

照査マニュアルに示される照査基準を本実験条件に適用すると、部材厚増分の限界値 $\Delta D_{lim}=5\text{mm}$ となる。荷重低下前の撮影ステップ 10 では部材厚増分が 3.21mm、荷重低下後の撮影ステップ 11 では 11.25mm となっており、照査指針である ΔD_{lim} を示すタイミングとせん断耐力の低下が一致した。原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<技術資料>¹⁰⁾の技術資料 VII では Salem & Maekawa¹¹⁾の手法を利用し、角柱試験における鉄筋比・部材長さや角柱の引張試験時に発生するひび割れ本数の関係を解析的に求め、それをはり部材におけるせん断ひび割れ本数と関連させる手法を提案している。本実験の条件であるせん断補強鉄筋比 0.21%、部材高さ 900mm の条件を同手法に適用すると想定されるひび割れ本数は 1 本となる。実際のひび割れは 2 本となったが、少ないひび割れ本数に変形が集中したため部材厚増分のような長さの次元を有する損傷指標が有効に適用できる結果を示したと考えられる。

5. まとめ

以下に本研究のまとめを示す。

- (1) せん断破壊する RC はりの載荷試験に対して DIC を適用した。最大主ひずみを求めることでひび割れ位置と幅の分布を示すことを確認した。
- (2) DIC により得られた格子点上の変位分布から、9 節点アイソパラメトリック要素を用いて偏差ひずみの第 2 不変量を算出した。本手法による計算値はこれまで主に再現解析で妥当性が示されていたコンクリート標準示方書に定められる斜めひび割れ発生の事象を実験により直接評価し、適切に破壊事象を表現することを示した。
- (3) DIC により得られた変位分布から部材厚増分を算出した。実験は付着割裂ひび割れに伴うせん断破壊となったが、本手法により算出された部材厚増分は原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査マニュアルに示される耐力の保有限界とする指針として再現

することを示した。

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]，2018.3
- 2) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2018.10
- 3) 斎藤成彦，牧 剛史，土屋智文，渡邊忠朋：非線形有限要素法による RC はり部材の損傷評価，土木学会論文集 E2，Vol. 67，No.2，166-180，2011.9
- 4) 宮川義範，永田聖二，松村卓郎：せん断補強鉄筋の無い鉄筋コンクリート部材の横膨張と残留耐力の関係，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.4，402-416，2014.3
- 5) 渡辺健，東広憲，三木朋広，二羽淳一郎：コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発，土木学会論文集 E，Vol. 66，No.1，94-106，2010.3
- 6) 出水享ら：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究，土木学会論文集 A2，Vol.68，No.2（応用力学論文集 Vol.15），I_683-I_690，2012.3
- 7) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和男，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 8) 谷村幸裕，佐藤勉，渡邊忠朋，松岡茂：スターラップを有するディープビームのせん断耐力に関する研究，土木学会論文集，Vol.760/V-63，29-44，2004.5
- 9) CG-ARTS 協会編：デジタル画像処理[改定新版]，公益財団法人画像情報教育振興協会，2015.3
- 10) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<技術資料>，2018.10
- 11) Salem, H. and Maekawa, K : spatially Averaged Tensile Mechanics for Cracked Concrete and Reinforcement under highly Inelastic Range, Conc. Struct. , Pavements, JSCE, No.613/V-42, pp.277-293, Feb.1992.