

論文 画像相関法によるひずみ計測に基づく RC 部材ひび割れ進展過程における載荷速度の影響

根本 結衣^{*1}・高橋 典之^{*2}

要旨：中層 RC 造建築物の部分架構を模した実大試験体の静的載荷および動的載荷実験を実施した。梁降伏先行型の架構において、梁端部の部材表面ひずみ分布を、デジタル画像相関法を用いて計測した。画像計測システムには、コンクリート剥落時の粉じん発生に対しても機能する 4K アクションカムを用いた。本実験で用いたアクションカムは 4K の解像度で 30fps の撮影が可能な汎用品であるが、動的載荷時におけるひずみ計測にともなう損傷進展評価も可能であることが分かった。また、実験で得られたひずみ分布とひび割れ幅の関係から、静的載荷時と動的載荷時の部材の損傷過程の違いについて考察をした。

キーワード：画像相関法, ひび割れ進展, 損傷量計測

1 はじめに

建築物に要求される耐震性能として被災後の「使用性」や「修復性能」の評価が重視されるようになり、高度な損傷量の評価手法に関する研究が進められている。コンクリートに生じるひび割れ進展状況を解析的に評価する場合、RBSM¹⁾や X-FEM²⁾などで高密度な要素分割を適用する手法が用いられるようになってきた。一方、これら高精度な解析手法について実現象との比較検証を実験的に検討する際は、従来のひずみゲージ等による局所的な計測データ取得だけでは不十分であり、ひび割れ進展面の全域を計測対象とする画像処理技術を適用した計測手法の適用が有効である。近年、デジタル画像相関法³⁾ (Digital Image Correlation : 以下 DIC と呼ぶ) を用いた構造部材の損傷進展状況の計測技術が普及しつつあるが、洗練された市販の DIC 計測システムでは、撮影環境における外乱要因の低減を目的としてステレオカメラや赤外線照明など撮影環境維持のための付属装置が必要となっており、それらを安定的に設置するために DIC を適用した構造実験の多くは静的載荷実験である。

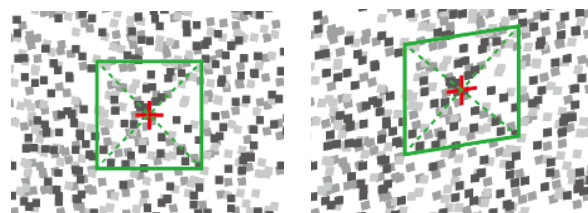
そこで本研究では、地震時の損傷進展を評価する振動実験や動的載荷実験に適用可能な DIC 計測装置を作成し、損傷量進展評価を試みた。損傷量評価においては、試験体表面のひずみ分布とひび割れ幅との関係を画像計測により求め、載荷速度の違いが部材損傷進展過程にどのように影響したかを検討した。

2 デジタル画像相関法の概要³⁾

DIC は光学的全視野計測法のひとつである。計測対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の計測対象物表面をデジタルカメラで計測したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲中のある点の変位の大きさ

と方向を求めることができる。解析原理は、デジタル画像が多階調で表現される画像であることを利用したものである。まず、変形前の画像において、任意の点 (1 画素) を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域 (サブセット) を指定する。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセットの中心点の移動より変位方向、変位量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって全視野の変位データを得ることができる (図-1)。

ひずみ分布は、以上の方法により得た全視野の変位データに基づき、変形前後での任意の二点間の長さ変化を求めて当該区間のひずみに換算することで求められる。



変形前 変形後
図-1 サブセットの位置の変化の簡略化図

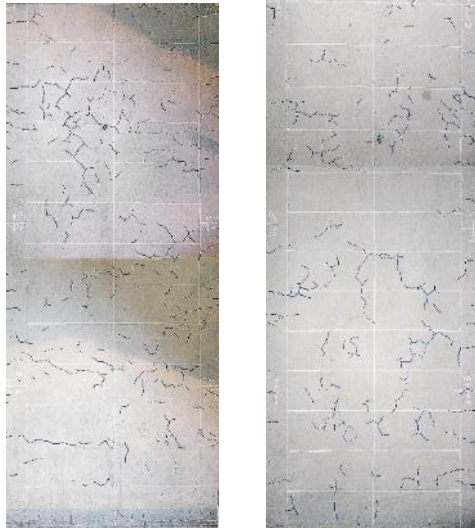
3 試験体概要

中層 RC 造建築物の部分架構を模した実大試験体 2 体を作成した。部分架構は、柱および梁を反曲点位置でピン支持としト型接合部を有する部分架構である。柱断面寸法は $400 \times 400 \text{ mm}$ 、梁断面寸法は $200 \times 540 \text{ mm}$ である。

試験体は載荷日の約 1 年前に打設し、脱型後、室内 (試験体作成工場内) に放置しており、乾燥収縮によるひび割

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)



(a) 静的荷重試験体 (b) 動的荷重試験体
図-2 乾燥収縮による初期ひび割れ発生状況

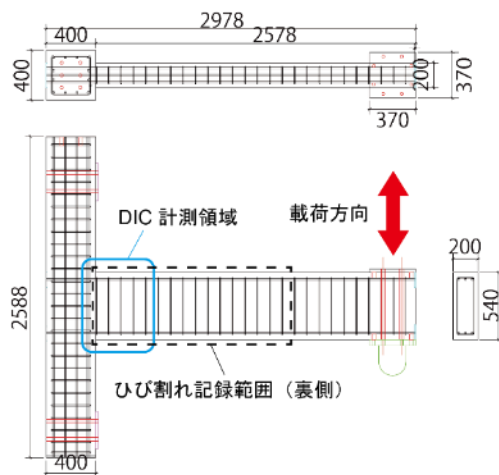


図-3 RC 造梁試験体配筋図（見上図と断面図）

表-1 試験体諸元

梁[mm]	B×D	200×540
	主筋	3-D16(SD390)
	あばら筋	D6(SD295)@100
柱[mm]	D	400×400
	主筋	12-D16(SD390)
	帯筋	D10(SD295)@100
コンクリート [MPa]	σ_B	21.4
	E_c	20000
	σ_T	1.55

れが初期ひび割れとして生じている状態である。図-2 にひび割れ記録範囲（図-3 参照）の乾燥収縮ひび割れの様子を示す。図-2 下側が梁危険断面位置である。これは、一般の既存建築物の多くで、地震被害発生前に生じているであろう損傷状態を模擬したものを想定している。

試験体概要を図-3 に、試験体諸元を表-1 に示す。図-3 上の DIC 計測領域には、水性塗料と目の粗いスポンジを用いてランダムパターンを塗布した。ランダムパタ

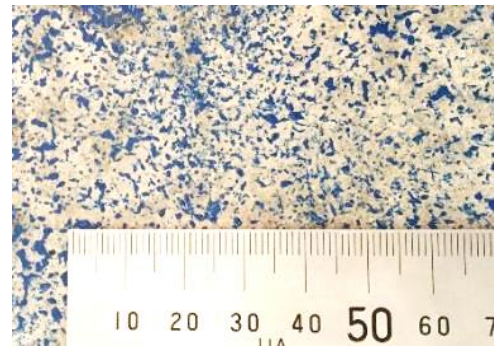


図-4 DIC 計測領域のランダムパターンの様子

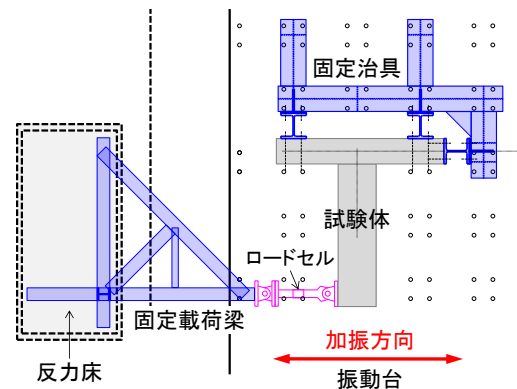


図-5 荷重システム概要

ーンは使用するカメラの画素数に対して 3~5 ピクセルほどの大きさが望ましいといわれており⁴⁾、本実験でも事前にカメラと試験体との距離などを加味し、ランダムパターンの大きさが 1mm~3mm ほどになるように塗布した（図-4）。

4 荷重方法

防災科学技術研究所の大型耐震実験施設を利用して、静的荷重および動的荷重が可能な荷重システムを構築した。柱を振動台に対して単純支持とし、梁先端（反曲点位置）は荷重梁を介して振動台外の反力床に結合した。振動台の動きによって、梁に繰り返し変形を生じる仕組みである。荷重梁の両端に付けたピン型 2 軸ロードセルで荷重を計測した。図-5 に荷重システムの概要を示す。

5 荷重計画

静的荷重および動的荷重ともに、同じ変位履歴を経験するものとして荷重計画を定めた。具体的な荷重計画をそれぞれ表-2 および図-6 に示す。図-6 中の赤線は表-2 に示す経過時間の段階に対応している。段階静的荷重では図-6(a)~(c)に示す 3 つの漸増連続 sin 波を周期 100s で、動的荷重では図-6(d), (e)に示す 2 つの漸増連続 sin 波を周期 1s で、振動台に入力・加振した。

6 画像計測方法

本研究で採用した DIC 計測用システムは、予備検討⁵⁾において載荷時のコンクリート剥落片や粉じんにより一部のデジタルカメラが故障したことを踏まえ、コンクリート剥落片や粉じんに対しても故障せず機能することを目的として、アクリル製ドームをカバーとして配し、粉じん等に強い汎用品の 4K アクションカムを用いた。また、カメラと試験体との距離を一定に保つ必要があるため、カメラは振動台上に固定し、図-3 中の DIC 計測領域を見上げるように撮影した。DIC 撮影状況概要を図-7 に示す。

アクションカムと試験体との距離が制約されており、試験体全域を撮影できる広角撮影としているため、収録した動画には樽型収差が生じる。そこで、動画から静止面を切り出した後、本実験用に作成したデジタルフィルタ⁶⁾を用いて樽型収差を補正し、補正画像に対して DIC 計測を適用することとした。図-8 に収差補正結果例を示す。

7 実験結果および考察

7.1 荷重－変位関係

静的載荷および動的載荷の荷重－変形関係のグラフを図-9 に示す。試験体はせん断余裕度が 3.0 の梁曲げ破壊型で設計しており、曲げ降伏強度略算値を破線で示す。なお、静的載荷試験体では材料試験結果の値を代入した曲げ降伏強度略算値を、動的載荷試験体は作用するひずみ速度による材料強度上昇分（降伏点に到達する載荷サイクルでの平均ひずみ速度が静的載荷実験で $120\mu\text{sec}$ 、動的載荷実験で $12000\mu\text{sec}$ であったことから、既往の研究⁷⁾から材料強度上昇率をコンクリートで 1.182 倍、鉄筋で

表-2 加振計画

(a) 静的加振

静的加振 A				
段階	変位振幅	繰り返し回数	経過時間	部材角
1	10 mm	6	10'00"	1/240 rad
2	13 mm	6	20'00"	1/184 rad

静的加振 B

段階	変位振幅	繰り返し回数	経過時間	部材角
1	18 mm	6	10'00"	1/133 rad
2	24 mm	4	16'40"	1/100 rad
3	36 mm	2	20'00"	1/61 rad

静的加振 C

段階	変位振幅	繰り返し回数	経過時間	部材角
1	32 mm	2	3'20"	1/75 rad
2	48 mm	2	6'40"	1/50 rad
3	65 mm	2	10'00"	1/37 rad
4	80 mm	2	13'20"	1/30 rad
5	96 mm	9	20'20"	1/25 rad

(b) 動的加振

動的加振 A

段階	変位振幅	繰り返し回数	経過時間	部材角
1	10 mm	6	0'06"	1/240 rad
2	13 mm	6	0'12"	1/184 rad

動的加振 B

段階	変位振幅	繰り返し回数	経過時間	部材角
1	18 mm	6	0'06"	1/133 rad
2	24 mm	4	0'10"	1/100 rad
3	36 mm	2	0'12"	1/61 rad
4	32 mm	2	0'14"	1/75 rad
5	48 mm	2	0'16"	1/50 rad
6	65 mm	2	0'18"	1/37 rad
7	80 mm	2	0'20"	1/30 rad
8	96 mm	9	0'29"	1/25 rad

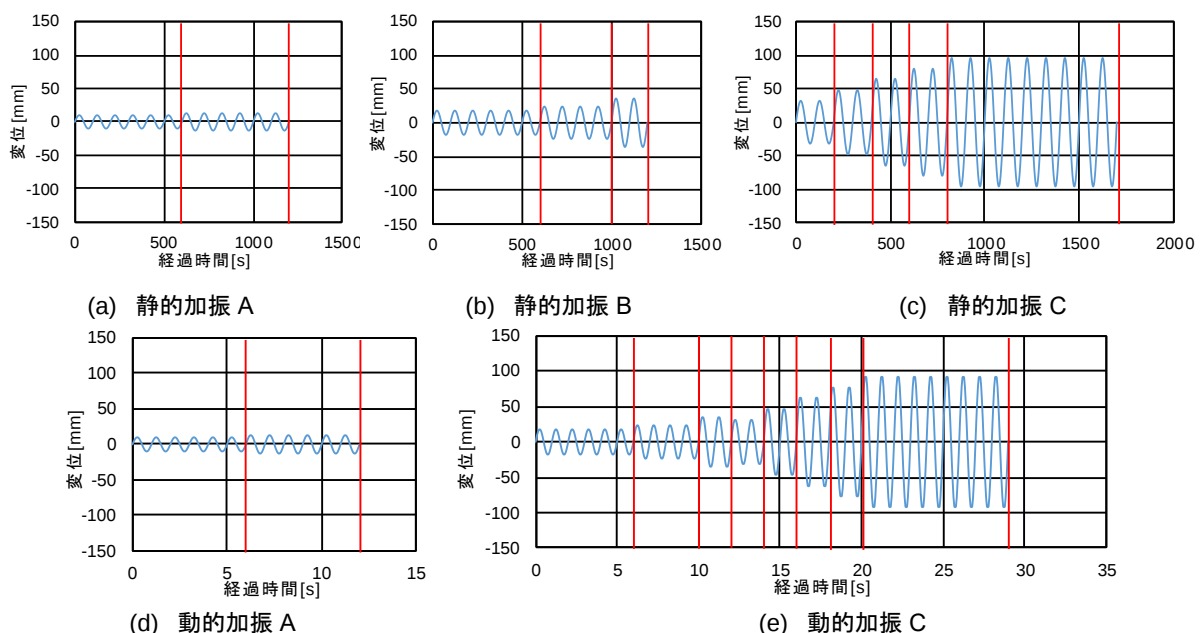


図-6 入力加振波（sin 波、静的加振：周期 100s、動的加振：周期 1s）

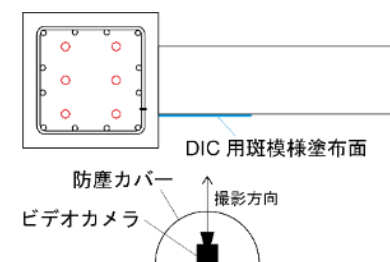


図-7 試験体撮影の概要



補正前

補正後

図-8 収差補正の例

1.103 倍とした) を考慮した値を代入した曲げ降伏強度略算値を併記している。

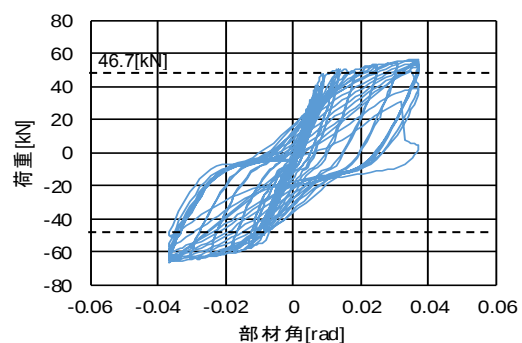
両試験体ともに、曲げ降伏先行の曲げ破壊挙動を示し、紡錘状の履歴を描いた。なお、本载荷システムでは試験体設置に際して資格を有する作業員が作業したあとに、計測機器の設置をしなければならず、試験体と加力梁を緊結する前の応力ゼロの状態では計測器を作動させることが出来なかった。そのため、初期応力が生じた状態を初期値として計測を開始しているため、正負の計測耐力に差が生じている（特に負側の耐力が大きく計測されている）が、実際の破壊性状は正負で大きく異なっていない。そのため実験結果の最大耐力は、静的载荷試験体の正側 56.6[kN]、負側 66.2[kN]、動的载荷試験体の正側 56.1[kN]、負側 73.7[kN]とそれぞれ異なっているが、正負最大耐力差を 2 で除した値を計算すると、静的载荷試験体で 61.4[kN]、動的载荷試験体で 64.9[kN] であり、载荷速度による耐力上昇率が 1.057 倍程度であったことが分かる。

また、最終载荷サイクルにおいて、静的载荷試験体では動的载荷試験体に比べて繰り返し载荷による耐力劣化が大きいことが図-9 より読み取れる。

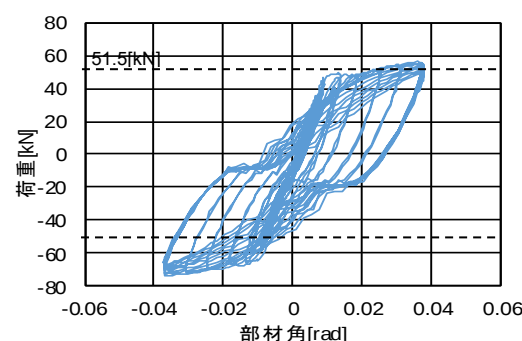
7.2 ひび割れ進展状況

前述したように、試験体の破壊メカニズムは梁部材の曲げ破壊型であり、ひび割れ損傷も主に曲げひび割れが進展し（一部曲げせん断ひび割れも生じるが）、純せん断ひび割れは生じなかったため、本節以降では曲げひび割れに着目して分析を進める。図-10 に両試験体のひび割れ記録範囲（図-3 参照）の最終破壊状況を示す。図-10 下側が梁危険断面位置である。

静的载荷試験体は、加振 A 終了時の最大残留ひび割れ幅が 0.15mm であったが、危険断面に近い DIC 計測区間内ではなく（区間内最大残留ひび割れ幅は 0.08mm）加力点位置に近い（危険断面から離れた）位置で最大ひび割れ幅となるひび割れが観測された。これは、試験体表面の乾燥収縮ひび割れが载荷初期段階においてひび割れ拡張を促したと考えられる。その後、加振 B 終了時においても、危険断面位置の離間ひび割れ（最大残留ひび割れ幅 0.5mm）以外の曲げひび割れは、危険断面に近い DIC 計



静的载荷



動的载荷

図-9 荷重変形関係



(a) 静的载荷試験体

(b) 動的载荷試験体

図-10 試験体最終破壊状況

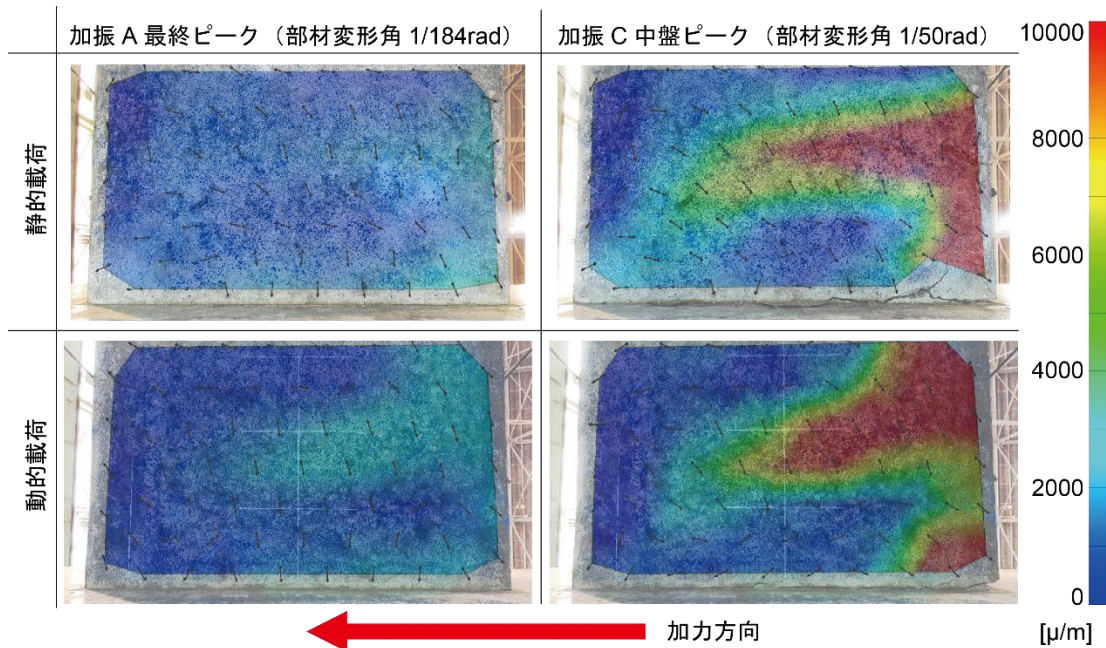


図-11 ひずみ分布図の変化

測区間内（区間内最大残留ひび割れ幅は 0.15mm）ではなく加力点位置に近い（危険断面から離れた）位置で最大残留ひび割れ幅が観測され、その値は 0.25mm であった。加振 C 終了時になると、危険断面位置の離間ひび割れ（最大残留ひび割れ幅 7.0mm）以外の曲げひび割れが危険断面に近い DIC 計測区間内で最大となり、最大残留ひび割れ幅 2.2mm を観測した。

動的載荷試験体では、加振 A 終了時の最大残留ひび割れ幅は、危険断面位置と加力点位置に近い（危険断面から離れた）位置でともに観測され、その値は 0.15mm であった。このとき、危険断面に近い DIC 計測区間内では残留ひび割れ幅は小さかった（最大で 0.08mm）。加振 B 終了時になると、危険断面位置の離間ひび割れ（最大残留ひび割れ幅 8.0mm）以外の曲げひび割れは、危険断面に近い DIC 計測区間内で最大となり、最大残留ひび割れ幅 3.0mm を観測した。

DIC 計測動画においては、静的載荷試験体では加振 C の部材角 1/50rad.以降で急に明瞭なひび割れ進展が観測され、動的載荷試験体では加振 B の途中（部材角 1/100rad.）から徐々にひび割れが進展し、既発ひび割れを後発ひび割れがまたぐように進展する過程が観測された。明瞭なひび割れは、両試験体とも、危険断面における主筋残留ひずみの増大に伴い観測されるようになった。

7.3 ひずみーひび割れ幅関係

ひび割れ進展画像を動画から切り出し、前述の収差補正フィルタを適用した画像に DIC を適用し、ひずみの計測を行った。図-11 に得られたひずみ分布図を示す。加力方向は右から左であり、ひずみ分布図中の黒色細線矢

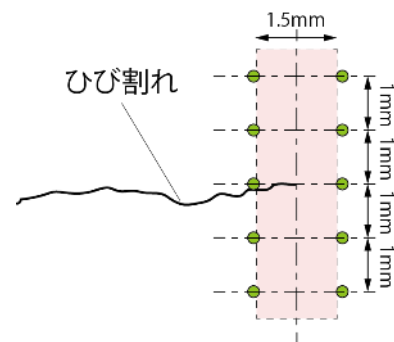


図-12 仮想ひずみゲージと DIC 歪計測点

印は主ひずみ方向を示している。ひずみ計測は、計測対象面の任意の点に対して可能であるが、本節では（事前に予測できない）ひび割れ進展部に仮想ひずみゲージが貼られているものと想定し（図-12）、ひび割れ進展域近傍 10 か所の DIC ひずみ計測値の平均⁵⁾を分析することとした。計測された主ひずみーひび割れ幅関係のグラフを図-13 に示す。グラフ上の縦軸は DIC によって得られた主ひずみの大きさを示し、横軸はひずみ計測箇所のひび割れ幅を示している。プロットの色はひび割れ箇所の違いを示し、同じ色のプロットは部材変形が進むごとにデータの追跡ができています。DIC 計測面のひび割れ幅は撮影画像 1 ピクセルの大きさ（1pixel = 0.255mm）を基に算出した。

図-13(a)より、静的載荷試験体においては、ひび割れ幅とひび割れ近傍の主ひずみとの関係が（多少のばらつきがあるものの）概ね比例関係にあることが分かる。一方図-13(b)より、動的載荷試験体においては、主ひずみの値自体が静的載荷試験体よりも 12%ほど大きめに観測された。その分、DIC 計測領域外で材軸方向に危険断面位置

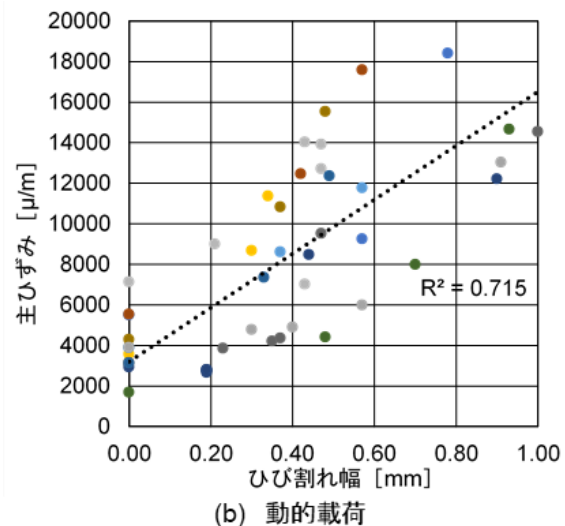
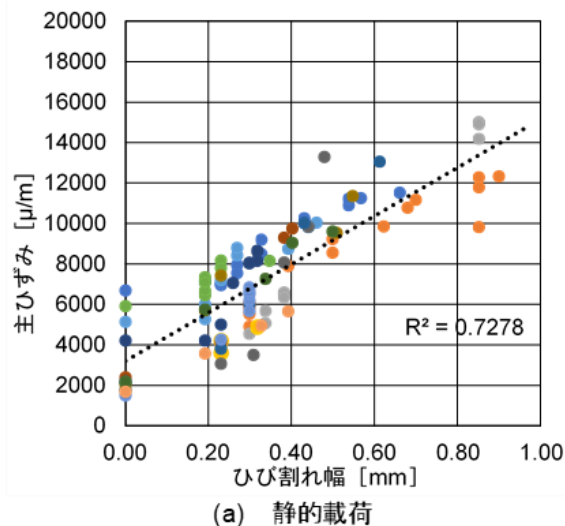


図-13 主ひずみ - ひび割れ幅関係

から離れた部位のひずみは（変形角は同じであることから）動的载荷試験体の方が小さくなると考えられる。

また、図-13(b)では、ひび割れ幅とひび割れ近傍の主ひずみとの関係が、図-13(a)よりも大きくばらついた。動的载荷試験体では加振 B の途中（部材角 1/100rad.）から徐々に進展した既発ひび割れをまたぐ後発ひび割れの進展が多く、これらを含んだ DIC 計測であったことを踏まえると、図-13(b)は既発ひび割れをまたぐ際に分割して進展するひび割れ先端における主ひずみのばらつきが反映されたものと考えられる。

8 まとめ

DIC を用いて、静的载荷および動的载荷をうける RC 造実大部分架構試験体梁せい面のひずみ計測実験を実施した。動的载荷時の撮影環境外乱要因（コンクリート剥落片の飛散等）を考慮し、粉じん等に強い汎用品の 4K アクションカムを用いた計測システムを構築し、動的载荷に対しても DIC 計測が適用可能であることが分かった。また、ひずみ計測結果とひび割れ幅との関係から、静的载荷および動的载荷の損傷進展を比較し、以下の知見を得た。

- 1) DIC 計測動画において、静的载荷試験体では加振 C の部材角 1/50rad.以降で明瞭なひび割れの急な進展を観測し、動的载荷試験体では加振 B の途中（部材角 1/100rad.）から徐々にひび割れが進展し、既発ひび割れを後発ひび割れがまたぐように進展した。
- 2) 動的载荷試験体は静的载荷試験体に比べて、主ひずみの値が静的载荷試験体よりも大きめに観測された。また、主ひずみとひび割れ幅との関係がばらついた。既発ひび割れをまたぐひび割れ近傍では、計測ひずみ値に対しひび割れ幅が分割進展したためと考えられる。

謝辞

本研究は、岡崎太一郎教授（北海道大学）、長江拓也准教授（名古屋大学）、丸山一平教授（名古屋大学）、松宮智央准教授（近畿大学）、梶原浩一氏（防災科学技術研究所、兵庫耐震工学研究センター・センター長）の協力のもと実施したものである。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究 C 15K06283）の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T. (2004): Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBMSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374.
- 2) Belytschko T., Black T. (1999): Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 45, Issue 5, pp.601-620.
- 3) M. A. Sutton, W. J. Wolaters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeill (1983): Determination of Displacements using an Improved Digital Image Correlation Method, Computer Vision, pp.133-139.
- 4) 出水亭ら：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, pp.I_683-I_690, 2012
- 5) 根本結衣, 高橋典之：デジタル画像相関法を用いたひずみ計測による RC 部材損傷進展過程の追跡, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.745-750, 2017.7
- 6) 周堀, 高橋典之, 佐藤真俊：静的加振と動的加振を受けた RC 梁部材の損傷量評価についての研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.751-756, 2017.7
- 7) 細谷博ほか：実大 3 層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験(その 7 地震時に部材に生じる歪速度の検討), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造 IV, pp.815-816, 1996.9