

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06283

研究課題名(和文) 載荷速度ファクターを取り入れた鉄筋コンクリート部材の損傷量評価手法の開発

研究課題名(英文) Damage Propagation Model of Reinforced Concrete Member considering the Loading Ratio

研究代表者

高橋 典之 (TAKAHASHI, NORIYUKI)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60401270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、載荷速度が鉄筋コンクリート建築構造部材の地震時損傷量評価に与える影響を見るため、損傷量を画像処理により計測できるシステムを開発し、鉄筋コンクリート実大断面架構の静的載荷および動的載荷実験を実施した。実験結果に基づき、ひずみ速度依存の材料強度変化分だけでなく、ひずみ速度によるひずみの空間分布の差を考慮することで、載荷速度が損傷量に与える影響を評価できるようにした損傷量評価システムを開発した。提案した新手法は、従来法(部材変形法)よりも動的載荷された鉄筋コンクリート建築構造部材の地震時損傷量を精度よく評価できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, damage measurement system using digital image processing was developed. And the static loading and dynamic loading tests of the real scale RC beam-column sub-assembly was carried out. Based on the experimental results, a new estimation method of quantitative damage of RC members was developed. The new method takes in account of not only the material strength change due to strain rate but also the spatial distribution of the strain due to the strain rate. And the proposed method was able to accurately evaluate the damage of reinforced concrete building structural member under dynamic loading rather than the conventional method.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート 載荷速度 損傷量評価 画像処理

### 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造物の損傷量（ひび割れ幅、ひび割れ長さ、剥落面積等の）評価は、耐震性能評価とくに修復性能評価および修復費用計算において重要な要素技術となる。近年、鉄筋コンクリート構造物の損傷量データの収集と評価手法の開発が進められつつあるが、いずれの研究も静的漸増（単調または繰返し）載荷実験に基づき、最大経験部材角に着目したデータ分析に終始しているのが現状である。しかし、研究代表者のこれまでの研究により、載荷速度による材料強度上昇分を考慮するだけでは説明のつかない損傷量に対する影響があることが分かってきた。そこで本研究では、これまで検討されてこなかった載荷速度が損傷量評価に与える影響を検討する。

### 2. 研究の目的

本研究では、載荷速度が鉄筋コンクリート建築構造部材の地震時損傷量評価に与える影響を見るため、鉄筋コンクリート実大部分架構の静的載荷および動的載荷実験を実施し、これまでの研究でひずみ速度依存の材料強度変化分の考慮を除き、定量的な検討がなされてこなかった載荷速度が損傷量（ひび割れ長さ、ひび割れ幅など）に与える影響のメカニズム解明に取り組むことを目的とする。また、解明するメカニズムに基づき、部材角に対して損傷量を推定する「部材変形法に基づく損傷量評価手法」に載荷速度ファクターを加味する方法を開発することも目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、載荷速度の異なる鉄筋コンクリート実大部分架構の載荷実験（静的載荷実験／動的載荷実験）を通して、載荷速度が損傷量進展に及ぼす影響の力学的メカニズム（ひずみ速度依存の材料強度上昇分だけでは説明のつかない損傷量進展メカニズムについて）を比較・検討する。また、初期ひび割れの有無がひび割れ進展に与える影響を考慮すべく、打設後1年間放置した乾燥収縮試験体を用意し、非乾燥収縮試験体と同様の載荷実験を実施し、ひび割れ進展に与える影響を比較する。

実験実施に当たっては、動的載荷にも適用可能な非接触式の損傷量画像計測システムを開発し、ひび割れ量の評価、および、ひび割れ進展域近傍のひずみ分布を評価できるようにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 動的載荷に適用可能な画像処理手法を用いた損傷量計測システムの開発

静的載荷および動的載荷実験を同一載荷システムで可能とすべく、防災科学技術研究所・大型耐震実験施設の振動台を用いた載荷

システムを構築した（図1）。

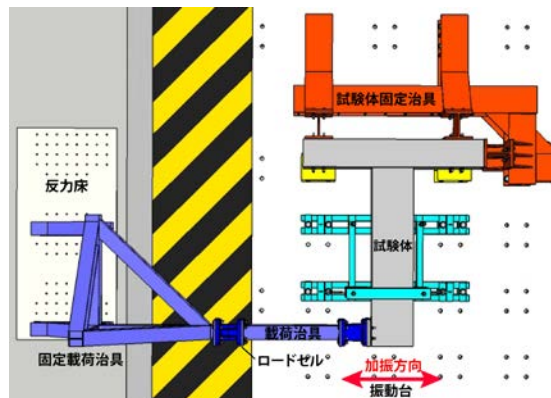


図1 載荷システム概要

当該載荷システムに適用することを前提とした非接触式損傷量計測システムを構築した。動的載荷時の損傷量を計測できるように4K解像度（本実験においては1pixel = 0.255mm）、30fpsの動画記録が可能で、損傷時のコンクリート粉塵にも耐えうるアクション・カムを4台使い、損傷量進展状況を録画した（図2）。なお、試験体の振動ではなくカメラ設置治具の固有振動が映像のブレとして含まれないよう、振動台上に直接カメラを設置できるようにしたが、損傷量を計測する試験体面と振動台との距離に制限があるため、当該システムに適した歪曲収差補正デジタルフィルタを作成し、補正画像により損傷量計測を実施した（図3）。



図2 4K ビデオカメラ設置状況（一部）

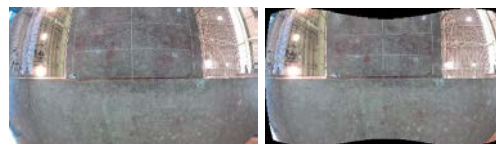


図3 画像のゆがみとその補正例

#### (2) 動的載荷に適用可能な画像相関法を用いたひずみ計測システムの開発

前項の画像処理による損傷量計測システムの適用と併せて、画像相関法（Digital Image Correlation：以下DIC）を用いたひずみ計測システムの適用も試みた。

DICは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の変位の大きさと方向を求める方法である。そこ

で、危険断面付近に DIC 計測領域を定め、水性塗料を用いてランダムパターンを塗布した (図 4)。ランダムパタ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、本計測システムでの解像度 (1pixel = 0.255mm) 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、DIC によるひずみ計測を実施した。

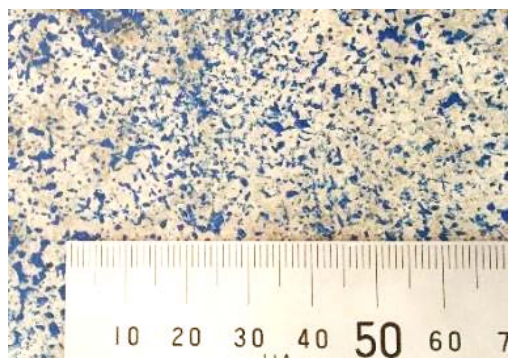


図 4 ランダムパターンの塗布

### (3) 実大部分架構載荷実験概要

中層 RC 造建築物の部分架構を模した実大試験体を作成した。部分架構は、柱および梁を反曲点位置でピン支持とシト型接合部を有する部分架構である。梁断面寸法は 200×540mm で、部材長 2578mm、梁危険断面から加力点位置までの長さ 2393mm、主筋 3-D16、補強筋 D6@100 である。梁曲げ降伏先行、曲げ破壊型とし、せん断余裕度 3.0 の梁となるよう設計した。一方、柱断面寸法は 400×400mm で、部材長 2588mm、反曲点間 (ピン支持間) 長さ 2000mm、主筋 12-D16、補強筋 D10@100 である (図 5)。

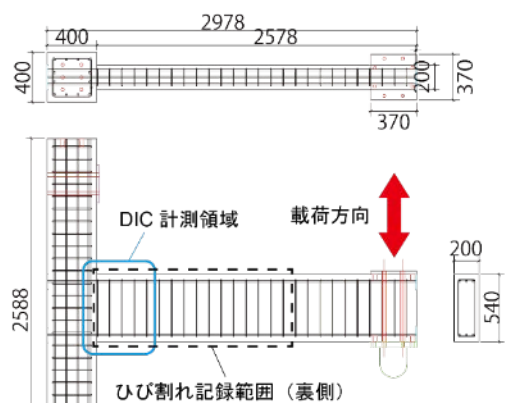
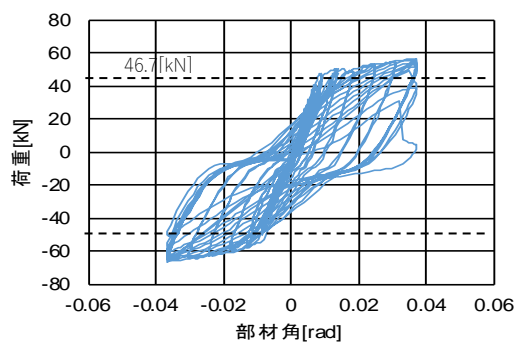


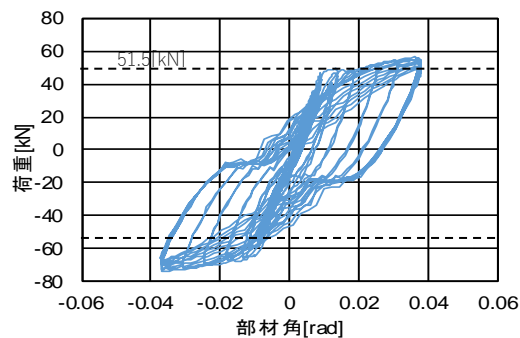
図 5 試験体概要 (単位: [mm])

試験体の荷重-変形関係は図 6 に示すようになり、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、本載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作動させることが出来ずに正負の計測耐力に差が生じたが、実際の破壊性状は正負で大きく異なることは無かった。そこで、正負最大耐力差を 2 で除した値を計算すると、静的載荷試験体で 61.4[kN]、動的載荷試験体で 64.9[kN]であり、載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。図 6 に、曲げ降伏強度略算値を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 120μ/sec、動的載荷実験で 12000 μ/sec より、細矢式<sup>①</sup> から材料強度上昇率をコンクリートで 1.182 倍、鉄筋で 1.103 倍とした) を考慮して算出した結果を併記しているが、略算値のひずみ速度による耐力上昇率は 1.102 倍であり、実験結果よりもひずみ速度の影響を大きく見積もっていた。



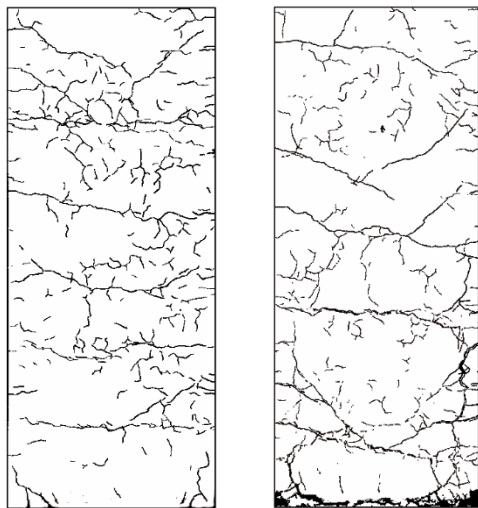
(a) 静的載荷



(b) 動的載荷

図 6 荷重-変形関係

図 7 に試験体の最終破壊状況を示す。ここで、1pixel=0.255mm として損傷量を画像処理計測したところ、静的載荷試験体では、小変形時に危険断面から離れた位置で最大ひび割れ幅が観測され、1/50rad.以降で明瞭なひび割れ進展を示し危険断面近傍の DIC 計測区間で最大曲げひび割れ幅 2.2mm を観測した。動的載荷試験体では、小変形時に危険断面から離れた位置で最大ひび割れ幅 0.15mm が観測され、部材角 1/100rad.からひび割れ進展が増加し加振終了時は DIC 計測区間で最大残留ひび割れ幅 3.0mm を観測した。



(a) 静的荷重試験体 (b) 動的荷重試験体  
図7 試験体最終破壊状況

図8にDICによるひずみ計測結果例を、図9にひび割れ進展部近傍においてDICから求めた主ひずみとひび割れ幅との関係を示す。図8より、前項のひずみ計測システムが動的荷重にも適用可能であることが分かった。また図9より、静的荷重試験体においては、ひび割れ幅とひび割れ近傍の主ひずみとの関係が概ね比例関係で、ひび割れ幅0.1mmあたり約1200 $\mu$ のひずみ度変化を示した。一方、動的荷重試験体においては、主ひずみの値が静的荷重試験体よりも11%ほど大きめに観測された。同じ部材角に対してDIC計測領域の動的荷重のひずみが大きい分、危険断面から離れたDIC計測領域外におけるひずみは静的荷重試験体よりも小さいと考えられる。また、動的荷重試験体では静的荷重試験体よりも、ひび割れ幅とひび割れ近傍の主ひずみとの関係がばらついた。動的荷重試験体では既発ひび割れをまたぐ後発ひび割れ進展が多かったことが影響したと考えられる。

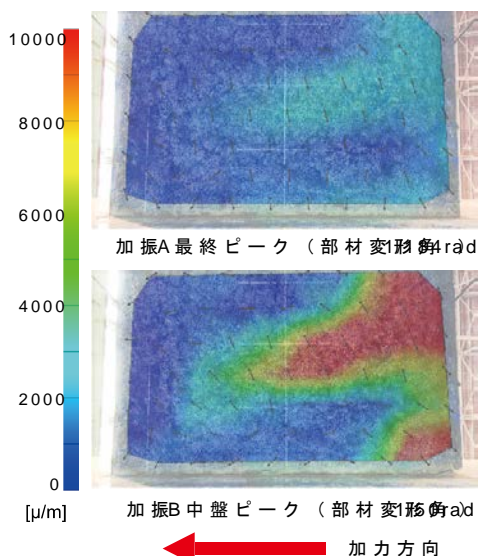
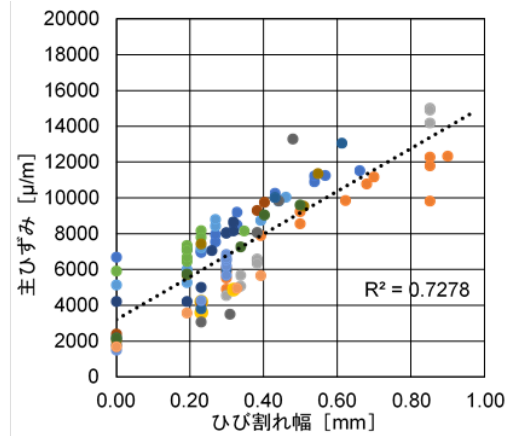
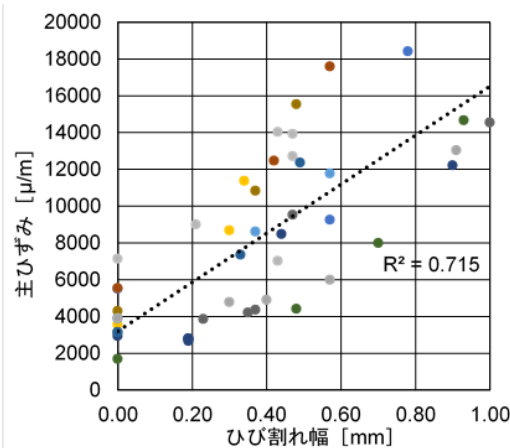


図8 DICによるひずみ計測例



(a) 静的荷重



(b) 動的荷重

図9 主ひずみーひび割れ幅関係

#### (4) 荷重速度を考慮した部材変形法に基づく損傷量評価手法の開発

実験から得られた知見をもとに、文献②で用いられている部材変形法にひずみ速度が材料強度およびひずみ分布に与える影響を考慮して、ひび割れ発生間隔式を修正する新手法を提案した。具体的には、ひずみ速度による材料強度上昇分の考慮に加えて、同じ部材角でも動的荷重試験体では静的荷重試験体より主筋降伏区間にひずみが集中していた実験結果を勘案し、ひずみ速度による主筋歪みの空間分布について、部材軸ひずみ $\epsilon_x$ が主筋降伏ひずみ $\epsilon_{y,s}$ の $\beta$ 倍を超えると、二次ひび割れが平均ひび割れ間隔 $S_{av}$ ごとに発生するものとした。このとき $\beta$ を塑性化進展域長さ係数と定めた(図10)。

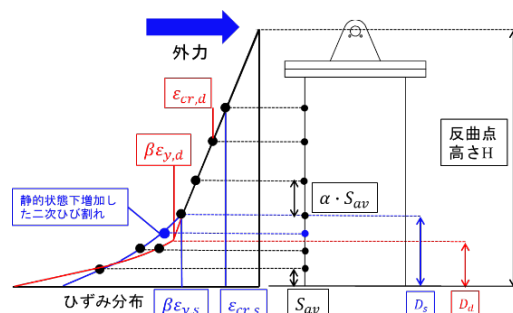


図10 曲げひび割れ発生とひずみ分布

提案した部材変形法を用いて前項の実験における損傷量を推定することは、実験結果を用いて設定した解析結果で実験結果を推定する行為となるため手法の汎用性に疑問が生じる。そこで、文献③の架構振動実験で得られた損傷量を推定できるかを検討した(図11)。図11より、提案した手法は、ひび割れ発生状況の概形及び進展過程を概ね捉えていることが分かった。また、新手法によるひび割れ長さ推定結果と、従来法によるひび割れ長さ推定結果とで、実験結果との誤差を求めたところ(図12)、ひずみ速度の影響を考慮した新手法では従来法より精度よくひび割れ長さを評価することが出来た。

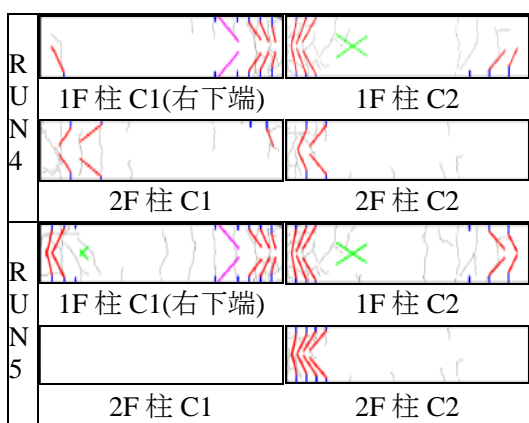


図11 新手法によるひび割れ進展推定例

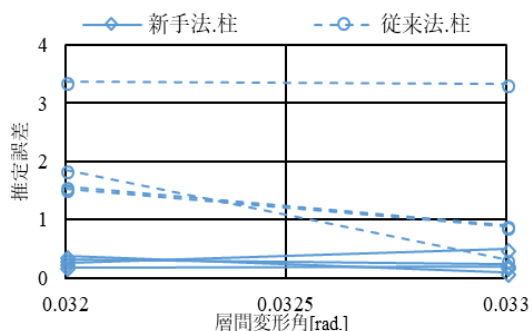


図12 新手法と従来法のひび割れ長さ推定誤差の比較

(5) まとめと本研究から得られた今後の課題

- ①観測時の部材角が同一であり幾何学的関係を考慮すると、危険断面近傍のDIC計測領域外における動的載荷時のひずみが(静的載荷よりも)当該分だけ小さくなったと考えられる。
- ②動的載荷試験体は、静的載荷試験体に比べて、主ひずみとひび割れ幅との関係がばらついた。これは、既発ひび割れをまたぐひび割れ近傍で、ひび割れが分割進展したためと考えられる。
- ③載荷速度を考慮した部材変形法に基づくひび割れ進展状況推定手法を提案した。提案した手法は、ひび割れ発生状況の概形及び進展過程を概ね捉え、従来法より精度よくひび割れ長さを評価することが出来た。

- ④本報告では詳述していないが、本研究の今後の課題として、架構全体の損傷量を評価する際には、梁に作用するわずかな軸力の影響が無視できないこと、残留変位時のひび割れ閉鎖を考慮できるようにする必要があること、剥落によりひび割れ領域が欠損することを解析上評価できるようにすることなどが挙げられる。

#### <参考文献>

- ①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
- ②佐藤真俊，高橋典之，菅野秀人，西田哲也：非定常変位を受けるRC造柱部材の損傷量計測および推定手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.931-936，2016.7
- ③長江拓也，田原健一：4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.669，pp.1961-1970，2011.11

#### 5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計10件)
- ①山本拳大，高橋典之，西脇智哉：RC造梁部材に設けたUHP-FRCC埋設型枠が架構の構造性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.49-54，2018年
  - ②周塬，高橋典之：実大RC造架構の地震時部材損傷量簡易推定手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.853-858，2018年
  - ③根本結衣，高橋典之：画像関連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，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.859-864，2018年
  - ④千田紘之，高橋典之：人工知能を用いたモルタル系建築外装材の損傷画像診断と危険度判定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1339-1344，2018年
  - ⑤山本拳大，高橋典之，西脇智哉：RC梁部材の一面に設けたUHP-FRCC埋設型枠が曲げ耐力に与える影響についての考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.175-180，2017年  
[http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/39/039-01-2030.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2030.html)
  - ⑥根本結衣，高橋典之：デジタル画像関連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年  
[http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/39/039-01-2125.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2125.html)
  - ⑦周塬，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 年  
[http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/39/039-01-2126.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2126.html)

⑧佐藤真俊, 高橋典之, 櫻井真人, 相澤直之: 深層学習を用いた画像計測手法による RC 部材の地震損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.739-744, 2017 年  
[http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/39/039-01-2124.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2124.html)

⑨Takahashi, N.: Influence of Loading Ratio on Quantified Visible Damages of R/C Structural Members, Proc. of the Sixteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1458, Jan. 2017

⑩佐藤真俊, 高橋典之, 菅野秀人, 西田哲也: 非定常変位履歴を受ける RC 造柱部材の損傷量計測および推定手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.931-936, 2016 年  
[http://data.jci-net.or.jp/data\\_html/38/038-01-2157.html](http://data.jci-net.or.jp/data_html/38/038-01-2157.html)

[学会発表] (計 21 件)

①高橋典之, 周塬: 動的載荷を受ける RC 造架構の簡易ひび割れ長さ評価手法 その 1 評価手法概要と解析対象, 日本建築学会大会, 2018 年

②周塬, 高橋典之: 動的載荷を受ける RC 造架構の簡易ひび割れ長さ評価手法 その 2 解析結果と実験結果の比較検討, 日本建築学会大会, 2018 年

③根本結衣, 高橋典之, 長江拓也, 丸山一平, 松宮智央, 岡崎太郎, 中澤博志, 御子柴正, 梶原浩一: 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その 7 動的載荷実験における画像相関法の適用と部材損傷進展評価, 日本建築学会大会, 2018 年

④高橋典之, 根本結衣, 長江拓也, 松宮智央, 岡崎太郎, 丸山一平, 梶原浩一, 中澤博志, 御子柴正: 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第 6 報 画像相関法を用いたひび割れ計測によるひび割れ幅と載荷速度の関係, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2018 年

⑤根本結衣, 高橋典之, 長江拓也, 丸山一平, 松宮智央, 岡崎太郎, 中澤博志, 御子柴正: 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その 3 モノラルカメラを用いた画像相関法による損傷量解析, 日本建築学会大会, 2017 年

⑥高橋典之, 根本結衣, 長江拓也, 丸山一平, 松宮智央, 岡崎太郎, 中澤博志, 御子柴正: 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その 4 RC 造試験体の実験結果と損傷量分析, 日本建築学会大会, 2017 年

⑦周塬, 高橋典之, 小林淳, 櫻井真人, 佐藤真俊, 尾形芳博, 相澤直之: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する

検討 (その 13) 画像処理手法によるひび割れ量計測結果, 日本建築学会大会, 2017 年

⑧佐藤真俊, 高橋典之, 小林淳, 櫻井真人, 尾形芳博, 相澤直之: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する検討 (その 14) ディープラーニングを用いたひび割れのデジタル検出手法, 日本建築学会大会, 2017 年

⑨高橋典之, 根本結衣, 長江拓也, 松宮智央, 岡崎太郎, 丸山一平, 梶原浩一, 中澤博志, 御子柴正: 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第 3 報 画像処理技術の適用検証と RC 造試験体の損傷量評価, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2017 年

⑩佐藤真俊, 高橋典之, 櫻井真人, 小林淳, 鶴飼和也, 尾形芳博: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する検討 その 7 ひび割れ発生状況・ひび割れ幅のデジタル検出, 日本建築学会大会, 2016 年

[その他]

①高橋典之: RC 造建築物の地震時損傷評価 (2) RC 造建築構造部材の外力作用条件と損傷量評価, コンクリート工学, Vol.54, No.11, pp.1123-1128, 2016 年

②[http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2017\\_7.pdf](http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2017_7.pdf)

③[http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2017\\_3.pdf](http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2017_3.pdf)

④[http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2016\\_1.pdf](http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/PBE/research/OC2016_1.pdf)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 典之 (TAKAHASHI, Noriyuki)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60401270

### (2) 研究分担者

長江 拓也 (NAGAE, Takuya)  
名古屋大学・減災連携研究センター・准教授  
研究者番号: 90402932

梶原 浩一 (KAJIWARA, Koichi)  
国立研究開発法人防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センター・統括主任研究員  
研究者番号: 10450256

土佐内 優介 (TOSAUCHI, Yusuke)  
国立研究開発法人防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センター・特別技術員  
研究者番号: 10737597