

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0208

研究課題名（和文）体積変化に起因したコンクリート中不均一損傷がRCはりのせん断特性に与える影響評価
（国際共同研究強化）研究課題名（英文）Effect Evaluation of Heterogeneous Damage in Concrete Due to its Volumetric
Change on Shear Property in Reinforced Concrete Beams(Fostering Joint
International Research)

研究代表者

三木 朋広 (Miki, Tomohiro)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30401540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,300,000円

渡航期間： 13ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、既存コンクリート橋の耐震性、ならびに被災回復性の把握の高精度化を目指し、アルカリシリカ反応等によって材料劣化した部材と高強度コンクリート部材の性能評価を試みた。特に、画像解析を活用してASR劣化したコンクリートの引張軟化挙動や圧縮破壊挙動等の材料挙動を詳細に調べるとともに、超高強度繊維補強セメント系材料については、その急激に進展する圧縮破壊挙動の高速度変形画像計測に成功した。さらに、プレキャストコンクリート橋脚の耐震性評価の基礎検討として、鋼材とコンクリート間の付着特性を考慮できる非線形動的解析プログラムを改良するとともに、画像解析の広域化に関する技術展開の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims a development for an accurate evaluation of the seismic performance of existing concrete structures and resilience after a severe earthquake. The performance of concrete structural members damaged due to material deteriorations such as the Alkali-Silica Reaction (ASR) has been evaluated. In addition, the target is extended to the high strength concrete members. In the experiment, an image analysis was conducted by means of an image correction method in order to determine a crack propagation in the ASR damaged concrete under tension or compression stresses. The image-based detection for a very brittle compressive failure in the ultra-high strength fiber reinforced cementitious materials were successively carried out using a high-speed camera and its harmonized data accumulation system. Nonlinear analysis for precast concrete bridge columns was also conducted to be investigated in the extended technology for a large domain of the image analysis developed here.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：微細ひび割れ ASR 初期応力 弾性係数 超高強度繊維補強セメント系材料 せん断耐力 画像解析
プレキャストコンクリート橋脚

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造において、エネルギー吸収が小さく、荷重低下が急激に進行するせん断破壊は、設計上避けるべき終局状態である。このコンクリート構造部材のせん断破壊は、コンクリートの引張破壊挙動の影響を受ける。例えば、高強度コンクリートのように自己収縮が大きい場合や、骨材の影響による大きな乾燥収縮が生じる場合、コンクリートの体積変化に起因する初期応力や初期損傷が鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断特性に影響することが既往研究で指摘されている。ここでは、コンクリートの収縮やアルカリシリカ反応(ASR)によってコンクリート中に不均一に生じた微細損傷がコンクリートのひび割れ進展に与える影響、さらにその結果、RC部材のせん断特性に与える影響について調べる事が重要となる。

2. 研究の目的

この課題に対して、研究基課題の若手研究(A)(課題番号:25709040)では、劣化したコンクリート構造物の性能評価に向けて、体積変化に起因したコンクリート中不均一損傷がRCはりのせん断特性に与える影響を系統的に調べてきた。

その成果を展開するため、本研究では、コンクリート構造物、特にコンクリート橋を対象としたレジリエントな構造の提案を最終目的として、その実現に向けた様々な検討を行う。特に、既存コンクリート橋の耐震性能の評価、ならびに被災回復性の把握の高精度化を目指し、鉄筋腐食やアルカリシリカ反応等によって材料劣化した構造と高強度コンクリートを用いた構造の性能評価を試みる。

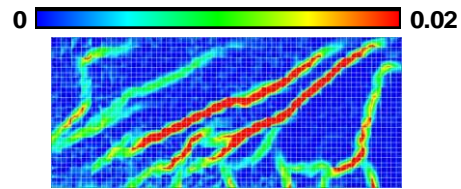
そのために、まず材料の力学的特性や破壊進展挙動を要素レベルで把握する。この要素実験では、図-1に示すような画像解析を用いて平面領域を対象としたひずみ計測を行い、コンクリートのひび割れの進展を計測し、構造部材が破壊に至るまでの挙動と関連づけることを目的とする。

また、性能評価手法の実構造レベルへの適用範囲の拡大を図るために、実大に近い大型の供試体を対象として、画像解析対象の広域化、動的挙動の評価への展開実用化の可能性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

まず材料の力学的特性や破壊進展挙動を把握する。この要素実験では、画像解析を用いて平面領域を対象としたひずみ計測を行い、コンクリートのひび割れの進展の様子を計測し、構造部材が破壊に至るまでの挙動と関連づける。

載荷試験における計測では、撮影環境に関する感度、特に撮影時の照明やコンクリート表面の状態などを適切に設定するとともに、載荷試験において荷重や変位等、他のセンサーデータと同期させることによって、ひび割れ



(1) 画像解析によるひび割れの再現



(2) 載荷実験後のRCはりの写真

図-1 ひび割れ進展に関する画像解析の例

進展といった変位場の情報と荷重や逆解析によって算出した応力度とを結びつける。また、様々な種類のカメラを利用し、多様なひび割れの形態を捉えるよう測定手法の測定精度の向上を図る。

一方、実構造における性能評価手法の適用範囲の拡大を図るために、実大に近い大型の供試体を対象として、画像解析対象の広域化、動的挙動の評価への展開の実用化の可能性を検証する。

以上の成果を総括し、コンクリート中の微細損傷がひび割れ進展挙動に与える影響について、微視構造的破壊力学に基づく考察を加えた。

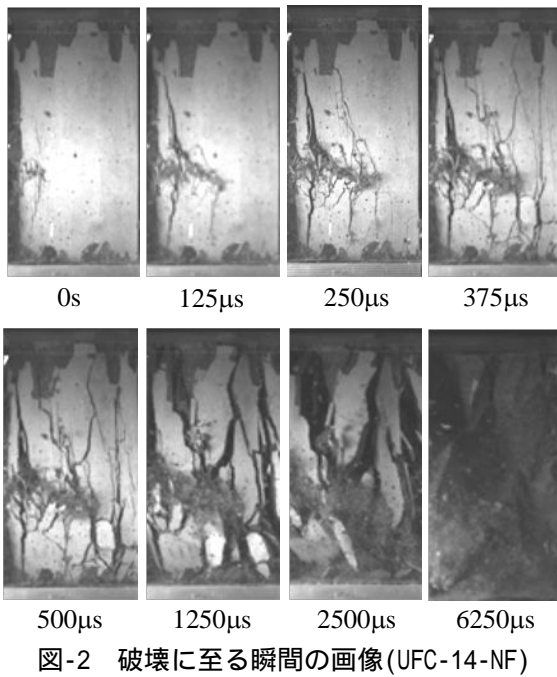
4. 研究成果

(1) 材料力学的特性と破壊進展挙動の把握

まず材料の力学的特性や破壊進展挙動を把握するための要素実験を神戸大学にて実施した。ここでは、画像解析を用いて平面領域を対象としたひずみ計測を行い、コンクリートのひび割れの進展と構造部材が破壊に至るまでの挙動と関連づけることができた。この一連の検討によって得られた成果は以下の通りである。

成果(1) 超高強度繊維補強セメント系材料の非常に急激に進展する破壊挙動を捉えることを目的として、ハイスピードカメラとデータロガーを用いた破壊現象計測を実施した。この材料の急激に進展する破壊挙動を、実験・撮影環境を工夫することで破壊に至る瞬間の画像とセンサーデータを得ることに成功した。また、測定した荷重データから、圧縮強度が高いとエネルギー解放速度が大きくなる傾向があるが、圧縮強度が異なると繊維補強の有無によって載荷軸直交方向の膨張変形が異なることがわかった。今後の課題として、計測機材の応答周波数を考慮するとともに、微弱なノイズを除去する必要があることを指摘した。

成果(2) 画像解析に用いる画像相関法をC++に実装したプログラムを開発した。開発プロ



グラムによって、測定効率を向上させることができると共に、測定エラーとなる供試体の表面輝度値に関する感度を向上させることに成功した。

成果(1)と成果(2)における測定結果の一例として、高速度カメラによって得た超高強度コンクリートの破壊の瞬間を捉えた画像を図-2に示す。図中に示す画像の下の数値は、撮影開始時の最初の画像を基準とした経過時間(10⁻⁶秒)を示している。この測定結果のように、すべての供試体において非常に短い時間で破壊が進展するといった非常に脆性的な破壊挙動を示したが、破壊に至る性状は供試体条件によってそれぞれ異なるものであった。

そこで、破壊に至るまでのすべての供試体のひび割れ進展の違いを比較し、破壊の種類を大まかに以下の4つに分類した。それぞれの特徴的な破壊性状を図-3に示す。1つ目は図-3(1)に示すように、載荷軸方向に発生した割裂ひび割れが供試体全体に伝播し広がるような破壊挙動を示したものである。2つ目は、同図(2)のように破壊が一部に集中し、破裂し潰れるような破壊挙動を示したものである。3つ目は同図(3)のように割裂ひび割れ、横方向ひび割れなどが直線的に発生し、ひび割れが広がっていく破壊挙動を示したもので、4つ目は同図(4)のように上部にひび割れが網羅的に亀甲状に広がり、供試体が折れるような挙動を示したものである。これらの破壊性状のいずれか1種類の破壊性状、または2種類の破壊性状が複合的に発生するような破壊挙動を示すことがわかった。

これらの画像と同期した荷重データについてみると、荷重が低下し始める直前の点を基準点(時刻0の点)としてそれ以降のデータ2000点(約0.1秒間)を直線近似し、その傾きの絶対値を「荷重速度」と新たに定義し

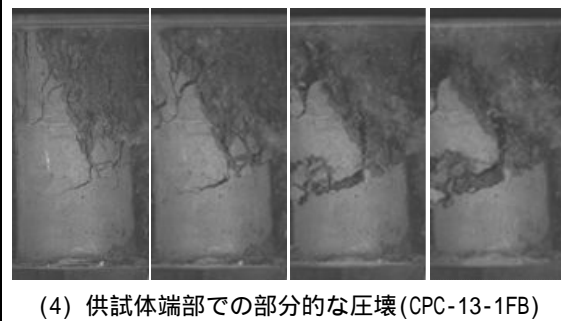
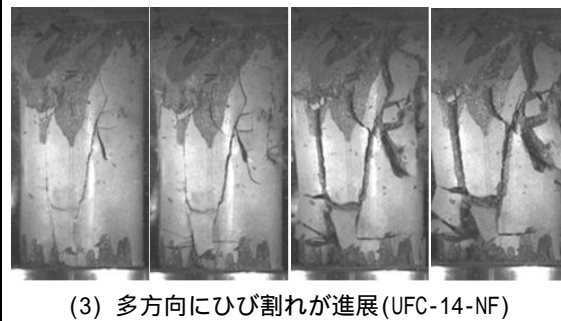
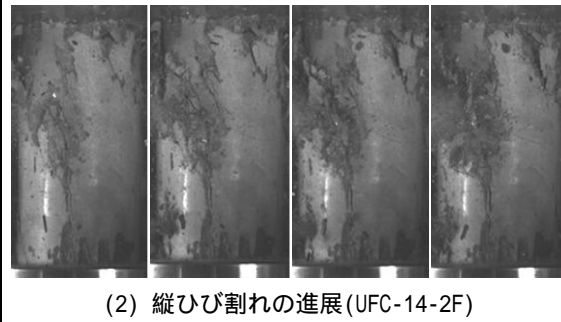
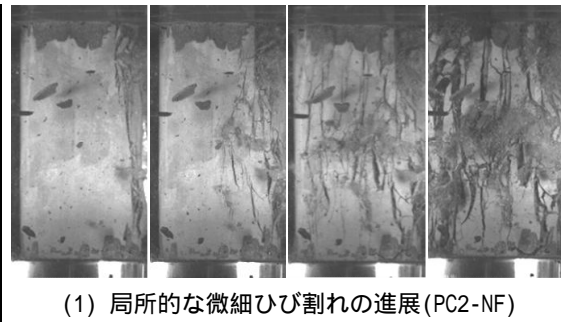


図-3 破壊性状の分類

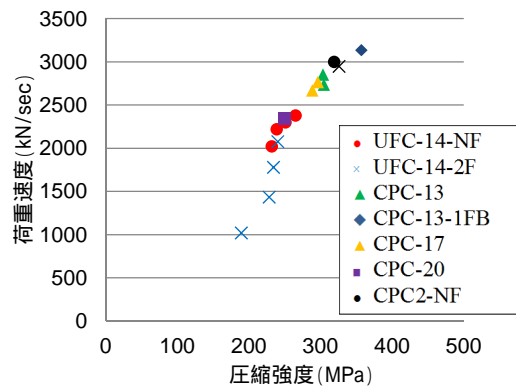


図-4 荷重速度と圧縮強度(荷重計)

た。試験機の荷重計によって得たデータによる荷重速度と圧縮強度の関係を図-4に示す。この結果から、圧縮強度が高い供試体ほど荷

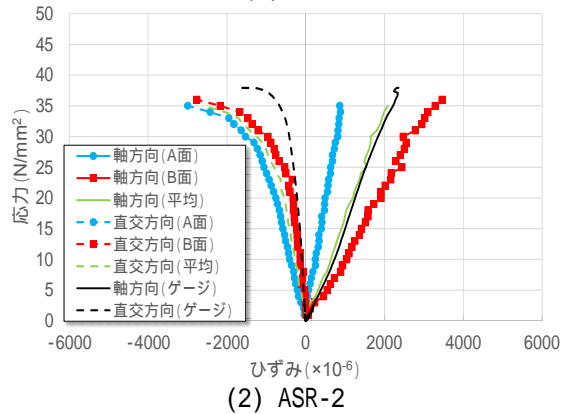
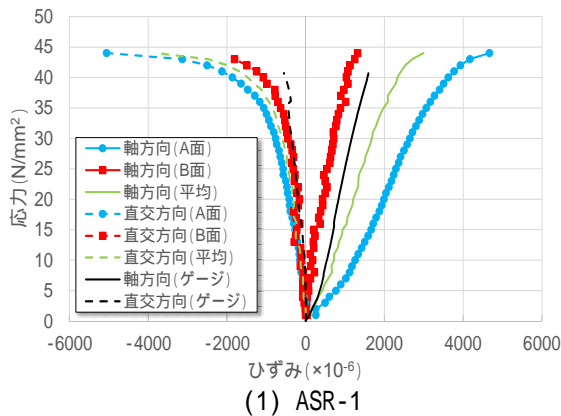


図-5 応力 - ひずみ関係 (各応力レベルのひずみは画像解析とひずみゲージによって計測した値を示している)

重速度が大きく、ほぼ比例関係を示していることがわかる。ただし、鋼繊維を体積率 2% 混入した UFC-14-2F においては、その他の結果が直線的な荷重速度の変化を示していることに比べ、圧縮強度に対して荷重速度が小さい値となっていることがわかる。これは繊維補強の効果が影響していると考えられる。また、今回着目した荷重速度の変化は、破壊によるエネルギー解放の時間変化の割合程度を意味していると考えられるため、高強度コンクリートの圧縮強度に与える繊維補強の影響を調べるために、さらにデータの蓄積が必要であり、今後の課題とする。

成果(3) ASR によってひび割れが生じたコンクリートの圧縮応力下における力学特性を評価することを目的として、圧縮荷重試験において画像解析を用いてひずみ計測を実施した。まず、図-5の結果の一例を示すように、画像解析を用いて圧縮応力下のひずみを妥当な精度で計測できることを示した。さらに、ASR が生じたコンクリートのポアソン比に相当する縦横ひずみ比を計測して、その値の圧縮応力下での変化、特に荷重軸直交方向ひずみの推移を把握することができた。

(2) 画像解析対象の広域化、動的挙動の評価
実構造における性能評価手法の適用範囲の拡大に向けて、画像解析対象の広域化、動的挙動の評価への展開の実用化の可能性を検証した。海外共同研究者であるカリフォル

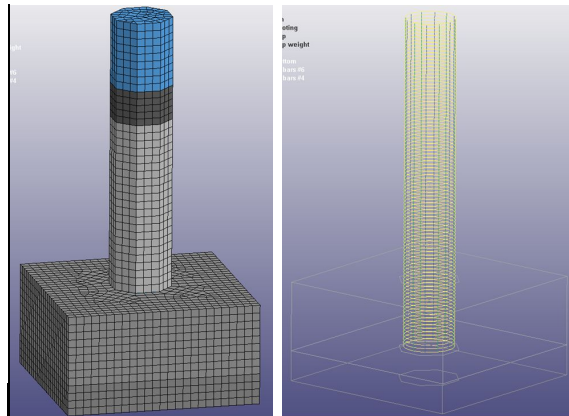


図-6 プレキャストコンクリート橋脚と鋼材のモデル化

ニア大学サンディエゴ校 (UCSD) の Benson Shing 教授の下に客員研究者として所属し、画像解析によるひび割れなどの損傷を捉える方法の開発を試みた。本年度得た成果は以下の通りである。

成果(4) プレキャストコンクリート橋脚の耐震性能の評価のため、Shing 教授との共同研究によって、鋼材とコンクリート間の付着特性を考慮できる非線形動的解析プログラムを改良した (図-6)。この検討によって、本研究による解析対象の広域化に関する展開の実施可能性を示した。

以上の成果は、現在、論文投稿の準備段階であり、それらがまとまり次第公表する予定である。なお、この成果の海外共同研究に関する展開の方向性を確認することができたため、今後は本研究の成果の展開として、実構造物の動的地震時挙動の評価などの分野が想定される。

本研究の今後の展開としては、将来的には初期応力と破壊力学特性を考慮した RC 部材のせん断耐力の評価法を提案し、コンクリート構造の合理的なせん断設計の新たな方向性を提示することを目指す。さらに、本研究の成果を基に、プレキャストコンクリート橋脚の耐震性評価手法への展開など、コンクリート構造物、特にコンクリート橋を対象としたレジリエントな構造の提案に向けた検討を実施する。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 6 件)

Miki, T., Tsukahara, H., Crack Propagation in ASR Damaged Concrete Detected by Image Analysis, Proceedings of 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9)、査読有、Vol.9、2016、pp.1-7
DOI : 10.21012/FC9.280
<http://framcos.org/FraMCoS-9/Full-Papers/280.pdf>

Miki, T., Kita, K., Oya, A., Kono, K., Experimental Study on Shear Capacity of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, Proceedings of 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 査読有、Vol.9、2016、pp.1-8

Simao, R.M., Miki, T., Cumulative Seismic Damage Assessment in Circular RC Columns using Multi-Directional Polygonal 3D Lattice Model, Proceedings of 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有、Vol.11、2016、pp.517-524

http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/fib_PhD2016/conf_proceedings.htm

渡邊大基、三木朋広、河野克哉、超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮破壊挙動の同定、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.39、No.2、2017、pp.433-438
http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2073.html

星野翔太郎、三木朋広、アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートを対象とした圧縮応力下での表面ひずみ計測に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.39、No.2、2017、pp.91-96

http://data.jci-net.or.jp/data_html/39/039-01-2016.html

三木朋広、渡邊大基、河野克哉、超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮破壊挙動の高速度変形画像計測、建設工学研究所論文報告集、査読有、Vol.59、2017、pp.11-18

http://www.kensetsuk.or.jp/work/memoir/h29_2miki.pdf

〔学会発表〕(計 8 件)

渡邊大基、三木朋広、世界最高レベルの圧縮強度を有する超高強度繊維補強コンクリートの圧縮破壊挙動の高速度計測、平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2016.6.11、立命館大学(滋賀)

渡邊大基、三木朋広、河野克哉、超高強度繊維補強コンクリートの圧縮破壊挙動に関する高速度画像計測、土木学会第 71 年次学術講演会、2016.9.9、東北大学(仙台)

塚原宏樹、三木朋広、表層研磨した ASR 劣化コンクリートはり供試体におけるひび割れ進展挙動に関する研究、土木学会第 71 年次学術講演会、2016.9.8、東北大学(仙台)

江宮文音、三木朋広、超高強度繊維補強コンクリートにおける単繊維の付着特性に与えるマトリックスの収縮の影響、平成 29 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2017.5.27、大阪工業大学(大阪)

田中敦士、三木朋広、軸方向鉄筋が部分的に腐食した RC ディー・プビームのせん断耐荷機構評価に関する実験的研究、平成 29 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2017.5.27、大阪工業大学(大阪)

渡邊大基、三木朋広、河野克哉、超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮破壊挙動に関する高速度画像計測、土木学会第 72 年次学術講演会、2017.9.13、九州大学(福岡)

江宮文音、三木朋広、収縮低減剤を用いた超高強度繊維補強コンクリートにおける単繊維の付着特性に関する研究、土木学会第 72 年次学術講演会、2017.9.11、九州大学(福岡)

田中敦士、三木朋広、部分的鉄筋腐食をさせた RC ディー・プビームにおけるせん断耐荷力の実験的研究、土木学会第 72 年次学術講演会、2017.9.12、九州大学(福岡)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-concrete/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 朋広 (MIKI, Tomohiro)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30401540

(2) 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

Benson Shing

Professor and Chair, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego (UCSD), U.S.A.

〔その他の研究協力者〕

該当なし