

平成22年5月21日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206050
 研究課題名（和文） 統合的画像解析によるコンクリート構造物の破壊進展挙動の解明
 研究課題名（英文） Evaluation of Failure Progress Behavior of Structural Concrete by Integrated Image Analysis
 研究代表者
 二羽 淳一郎（NIWA JUNICHIRO）
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：60164638

研究成果の概要（和文）：

コンクリート構造物の破壊進展挙動の解明のため、コンクリート中のひずみの局所化をリアルタイムに同定できる画像解析システムを確立した。引き続いて、高速なひび割れ進展を把握する高速度画像撮影システムと、構造物の大型化に対応可能な広域的な画像解析システムを確立した。これらを統合化することにより、様々なコンクリート構造物の破壊進展挙動を、画像解析の手法により解明していく方法を提示した。

研究成果の概要（英文）：

To clarify the failure progress behavior of structural concrete, the image analysis system which can identify the localization of strain in real time has been completed. In addition, the super high speed photography system which can capture high-speed crack development and the wide-area image analysis system which can be applied to large-scale concrete structures have been established. Finally, by integrating these systems, the new image analysis system to capture the failure progress behavior of various concrete structures has been presented.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2008年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
年度			
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：画像解析、リアルタイム、デジタルカメラ、高速度カメラ、ひび割れ進展、破壊進展、コンクリート、ひずみ分布

1. 研究開始当初の背景

(1) はりや柱等のコンクリート構造部材の破壊実験を行う際に、何をモニタリングするかと言えば、多くは荷重と変位の関係が

利用されている。これは確かに有用な指標であり、部材の耐力や延性・脆性といった破壊モードの差異などを明示することができる。しかし、コンクリート構造の破壊

では、破壊現象が全体的に生じることは極めてまれであり、ほとんどの場合、局所的に破壊が生じる。したがって、荷重と変位の関係からだけでは、破壊が何故、何処で起こっているかを判断することはできない。この問題を解決するため、局所的なひずみ測定が行われることが多いが、全体的な破壊挙動の把握と無関係に測定されたひずみデータは、破壊進展の予測に実質的に役立つものとはいえない。

(2) 以上のような問題に対処するためには、コンクリート構造の破壊現象を視覚的に捉える画像解析の手法が効果的である。1970年代に町田博士らによって行われたコンクリート割裂試験の高速アナログ撮影、1990年代の池田博士らによる水平力を受けるRC柱のハイブリッド実験の静止画像の高速コマ送りによる動的破壊シミュレーションなど、有用な成果が得られている。

(3) しかし、現状では以下に挙げるような問題点のため、画像解析によるコンクリート構造物の破壊進展予測は汎用的な手法とはなっていない。

①コンクリート構造部材の破壊部位をリアルタイムに同定することが困難であること。

②コンクリート構造部材に破壊をもたらす卓越ひび割れの高速な進展に追従できなかったこと。

③コンクリート構造部材が大型化した際に、広域的な画像解析が困難であったこと。

(4) 本研究では、以上の問題点に対処する手法をそれぞれ提案し、その手法によって得られる成果を示して有効性を確認する。その後、これらを総合化することによって、最終的に統合的な画像解析手法を確立し、コンクリート構造の破壊進展挙動予測の高精度化を目指すものである。

2. 研究の目的

(1) 本研究の具体的な目的は以下の3点である。まず第一は、荷重を受けるコンクリート構造部材中のひずみ分布、ひずみの局所化をリアルタイムに同定し、高い信頼性をもって破壊部位を明らかにすることである。

(2) 図-1はせん断補強のないRCはりには荷重が作用し、斜めひび割れが発生した状況でのひずみ分布を示すものである。

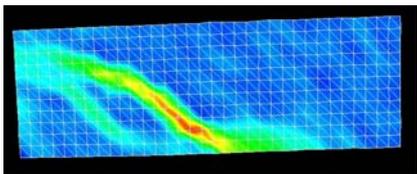


図-1 画像解析によるひずみの局所化

図-1に示す最大主ひずみ分布図によれば、斜めひび割れに沿ってひずみが局所化しており、斜め引張破壊の発生が予測される。しかし残念ながら、この図は実験終了後に、オフラインで描画されたものであり、実験中に得られたものではない。

したがって、実験中に、リアルタイムな情報として、図-1のようなひずみの局所化を描画できるシステムを確立する。このためには、デジタルカメラから得られるターゲット(標点)の動きを荷重と同期させながら、高速でコンピュータに転送し、数値処理を行うソフトが必要となる。

(3) 次の目的は、コンクリート構造部材内に生じる卓越ひび割れの高速な進展を捉える高速画像撮影システムの確立である。図-2はコンクリートの割裂試験を市販のデジタルビデオで撮影し、これを静止画として示したものである。



図-2 コンクリート中の高速ひび割れ進展

図から認められるように、載荷直後に既に直径に沿って上下のひび割れが進展しているが、通常の方法ではこの高速なひび割れの進展を捉えることは困難である。このため、高速画像撮影システムを構築することを第2の目的とした。

(4) 最後の目的は、コンクリート構造部材が大型化した際にも対応できる広域的な画像解析手法の確立である。これは複数台のカメラを配置して同期させることにより、部材の大型化に対応できる画像解析システムを確立するものである。

(5) 以上の3つの目的を達成することにより、最終的に統合的な画像解析によるコンクリート構造物の破壊進展挙動の解明を実現する。

3. 研究の方法

(1) 平成19年度は、1台のデジタルカメラを用いて、リアルタイムでひずみ計測が可能な非接触画像解析システムの構築を目指す。このシステムでは、供試体に貼り付けたターゲットを撮影した画像から、ひずみを算出する一連の作業を、オンラインかつ

リアルタイムに行うものである。これによって、実験中に供試体に生じているひずみ分布を把握することを可能とする。従来のこの種の計測は、画像を撮影した上で、ひずみ算出のための作業を、実験後ある一定の時間をかけて行っていたため、実験中にリアルタイムでひずみ分布を把握することができなかった。さらに、荷重や変位の情報と、得られたひずみ分布などの情報が時間的に関連付けられておらず、データの突合せなどの間接的な作業が必要であった。本研究によるこれらの点の改善は、本研究の特筆すべき点の一つである。

(2) 提案するシステムの基礎的な性能を検証するために、まず高精細デジタルカメラ（約 1000 万画素）を使用し、供試体に貼り付けたターゲット変位量を確実に捉え、画像処理できることを確認する。この際、1000 万画素クラスのカメラで確実に変位を捉えられるように、1 台のカメラでの最適な撮影範囲について検討する。そのために、コンクリート円板の割裂引張試験や無筋コンクリートの曲げ試験などの要素実験を系統的に実施する。さらに、システムの適用範囲をコンクリート構造部材へと拡張し、RC はりのせん断実験を実施していく。

(3) 平成 20 年度には、高速度画像撮影システムの確立を目指す。20 年度に購入する高速度カメラは、解像度 1024×1024 ピクセル、毎秒 3000 コマ、つまり撮影間隔 0.33 ミリ秒の高解像度でかつ超高速の撮影を可能とするものである。これを用いて、部材レベルで観測されるひび割れの進展位置、角度などの情報に加えて、高解像度という利点を活かし、従来では不可能であった高速で生じる卓越ひび割れの進展状況、およびその経路について、材料学の観点から考察していく。この超高速ビデオ撮影によるひび割れ進展挙動の解明は、リアルタイム計測技術の開発に加えて、本研究の特筆すべき成果となる。

(4) 平成 21 年度は、複数台のデジタルカメラを用いて、広域のひずみ計測を可能とする。広域化のためのカメラ間の同期機構を開発し、それらを複数制御ソフトとして導入する。具体的な制御方法として、2 台のデジタルカメラの撮影領域に重複部分を設け、その領域における節点の情報を共有する形で同期させる。なお、これ以降の作業工程は 19 年度に提案したシステムをそのまま利用できるため、大規模な変更は必要ない。これにより、さらに大型の供試体を用いた構造実験が可能となり、汎用的なひずみ計測システムに拡張できる。また、最終年度であるため、提案システムのまとめの実験も含め、RC 構造部材の破壊挙動解明を目的とした一連の実験を実施する。

以上より、研究全体の成果をまとめて、統合的画像解析による広域ひずみ計測システムを提案する。

4. 研究成果

(1) 平成 19 年度は、デジタルカメラ 1 台を用いて、リアルタイムでコンクリート供試体の対象領域全体のひずみ評価が可能な非接触画像解析システムを構築した。すなわち、コンクリート供試体表面に設けたターゲットを撮影したデジタル画像から、ひずみを算出する一連の作業を、オンラインかつリアルタイムに行うことを可能とするシステムを開発した（図-3）。これによって、実験中にコンクリート供試体に生じているひずみ分布を把握することが可能となった（図-4）。具体的には以下のような手法である。

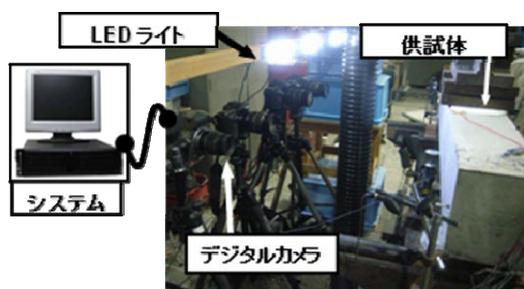


図-3 リアルタイム計測システム

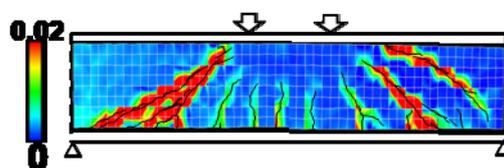


図-4 ひずみの局所化画像（リアルタイム）

(2) コンクリート供試体に設置したターゲットを各荷重レベルで撮影する。この画像を2次元化し、ターゲットを節点として認識させる。節点の重心を抽出し、その座標を評価する。それを用いて、無載荷時のターゲットの座標との差から節点変位ベクトルを算出する。この節点変位ベクトルを有する任意の有限要素から、要素内のひずみを計算し、コンクリート供試体の対象領域全体に対するひずみ分布を求める。19年度に購入した画像取込ソフト、ひずみ解析ソフト、ビューアソフトを使用し、これら一連の作業を自動的に行うシステムを完成させた。この結果、リアルタイムで、コンクリート供試体の対象領域のひずみ分布を直接、目視により確認することを可能とした（図-4）。

(3) この結果、従来は、ひずみゲージによっ

て、局所的で離散的にしか把握できなかったコンクリート供試体表面のひずみが2次元的に、また視覚的に把握できるようになった。このことは、コンクリート構造物、あるいはコンクリート構造部材が破壊する際に、どのような破壊モードによって破壊に至るかを、直感的に判断することを可能とするものであって、コンクリート構造分野におけるひび割れ進展や破壊予測に関する研究の進歩発展に大いに寄与するものといえる。

(4) 平成20年度は、高速度画像撮影システムの確立を目指した。20年度に購入した高速度カメラは、解像度800×600ピクセル、毎秒6600コマ、つまり撮影間隔0.15ミリ秒であり、高解像度でかつ超高速の撮影が可能である。この高解像度という利点を活かし、従来では不可能であった高速で生じる卓越ひび割れの進展状況、およびその経路について、材料学の観点から考察を加えた。この超高速画像撮影によるひび割れ進展挙動の解明は、19年度に開発したリアルタイム計測技術とともに、本研究の特筆すべき成果となっている。図-5はこのシステムにより撮影した割裂ひび割れ進展の超高速撮影結果である。

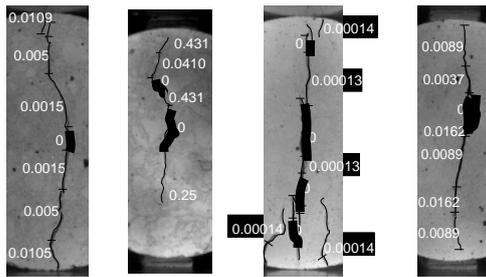


図-5 割裂ひび割れ進展の超高速撮影

(5) 平成21年度はコンクリート構造部材が大型化した際にも対応できる広域的な画像解析手法の確立を目指した。

具体的には、複数台のデジタルカメラを用いて、広域のひずみ計測を可能とすることを旨とした。一台のデジタルカメラを用いたリアルタイム計測システムは既に19年度に完成しており、21年度はこのシステムを拡張していくものである。すなわち、カメラ間の同期機構を開発し、それらを複数台制御するソフトを導入した。具体的な制御方法としては、2台のデジタルカメラの撮影領域に重複部分を設け、その領域における節点の情報を共有する形で同期させることとした(図-6)。これ以降の作業工程は19年度に提案したシステムをそのまま利用できるため、大規模なシステムの変更は必要ない。21年度に完成したシステムを大型の供試体を用いた構造実験に適用し、RC構造物に対する汎用的な広域ひずみ計測システムの確認を行なった(図-7)。最後に、研究全体の成果をまとめて、統合的画像解析による広域ひずみ計測システ

ムを確立した。

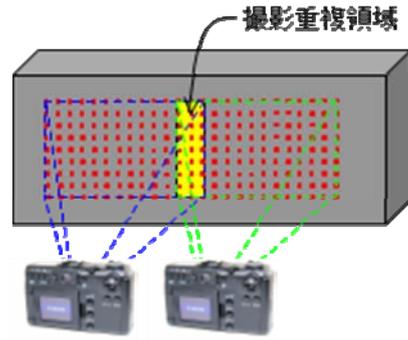


図-6 2台のデジタルカメラと撮影重複領域

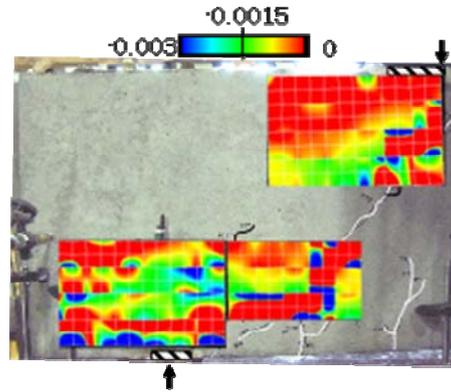


図-7 複数カメラを用いた画像解析の広域化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計20件)

① 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、査読有

② 野間康隆、渡辺 健、二羽淳一郎、画像解析による高強度コンクリートの圧縮破壊性状の可視化ならびに評価、土木学会論文集 E、Vol.66、No.1、68-79、2010、査読有

③ 野間康隆、渡辺 健、二羽淳一郎、画像解析を用いた高強度コンクリートの圧縮破壊進展評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、523-528、2009、査読有

④ 東 広憲、渡辺 健、二羽淳一郎、破断した軸方向鉄筋を有するRCはりの破壊に対する画像解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.2、727-732、2009、査読有

⑤大石峻也、渡辺 健、米花 萌、二羽淳一郎、せん断補強鉄筋を有する円形断面 RC はりのせん断耐力評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.2、13-18、2009、査読有

⑥川口哲生、富田六郎、白井一義、片桐 誠、二羽淳一郎、超高強度繊維補強コンクリートと補強用鋼材の付着応力伝達機構、土木学会論文集 E、Vol.65、No.1、1-15、2009、査読有

⑦Sivaleepunth, C., Niwa, J., Nguyen, D.H., Hamada, Y., Shear Carrying Capacity of Segmental Prestressed Concrete Beams, 土木学会論文集 E、Vol.65、No.1、63-75、2009、査読有

⑧野間康隆、渡辺 健、三木朋広、二羽淳一郎、高強度コンクリート中の局所挙動の画像解析による評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、481-486、2008、査読有

⑨小林央治、渡辺 健、三木朋広、二羽淳一郎、高強度コンクリートを用いた RC はりの斜め圧縮破壊に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、625-630、2008、査読有

⑩東 広憲、渡辺 健、三木朋広、二羽淳一郎、画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、793-798、2008、査読有

⑪渡辺 健、阪本陽一、二羽淳一郎、画像解析による RC ディープビームの局所的圧縮破壊領域の同定、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、805-810、2008、査読有

⑫Sivaleepunth, C., Niwa, J., Nguyen, D.H., Hamada, Y., Shear Failure Mechanism of Segmental Concrete Beams Prestressed with External Tendons, コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、817-822、2008、査読有

⑬木村利秀、渡辺 健、二羽淳一郎、鋼繊維と帯鉄筋の併用による RC 柱のせん断補強効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、1399-1404、2008、査読有

⑭角田真彦、渡辺 健、三木朋広、二羽淳一郎、局所的な鉄筋腐食を有する RC はり部材のせん断耐荷性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、1705-1710、

2008、査読有

⑮三木朋広、鈴木暢恵、二羽淳一郎、鉄筋腐食した RC はりのせん断耐荷機構に関する解析的研究、コンクリート工学論文集、Vol.19、No.3、61-70、2008、査読有

⑯川口哲生、片桐 誠、白井一義、二羽淳一郎、超高強度繊維補強コンクリートの引張抵抗力が曲げ破壊性状に及ぼす影響、土木学会論文集 E、Vol.64、No.3、435-448、2008、査読有

⑰野間康隆、三木朋広、河野克哉、二羽淳一郎、再生骨材を用いたコンクリートのひび割れ進展挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、397-402、2007、査読有

⑱阪本陽一、三木朋広、二羽淳一郎、画像解析によるコンクリートの局所的圧縮破壊領域の同定、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、43-48、2007、査読有

⑲Toma, I.O., Miki, T., Niwa, J., Predicting the Shear Crack Location in RC Beams with Random Cracks Using the Crack Density Parameter, コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、673-678、2007、査読有

⑳Toma, I.O., Miki, T., Niwa, J., Shear Behavior of Doubly Reinforced Concrete Beams with and without Steel Fibers Affected by Distributed Cracks, 土木学会論文集 E、Vol.63、No.4、590-607、2007、査読有

[学会発表] (計 6 件)

①Watanabe, K., Jongvivatsakul, P., Niwa, J., Shear-resistant Mechanisms of RSF Beams Based on Fracture Mechanics, Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5), 2009.9.18, Kumamoto

②Makmur, A.S.M., Watanabe, K., Niwa, J., Fracture Properties of High Strength Concrete Reinforced with Various Fibers, 土木学会第 64 回年次学術講演会、2009.9.4、福岡

③Jongvivatsakul, P., Watanabe, K., Niwa, J., Study on Shear Carried by Steel Fibers in RSF Beams Based on Fracture Mechanics, 土木学会第 64 回年次学術講演会、2009.9.4、福岡

④梁田真広、渡辺 健、二羽淳一郎、高速度カメラを用いたコンクリートのひび割れ進展評価、土木学会第 64 回年次学術講演会、2009.9.3、福岡

⑤米花 萌、渡辺 健、大石峻也、二羽淳一郎、せん断補強鉄筋のない円形断面 RC はりのせん断耐力に関する実験的研究、土木学会第 64 回年次学術講演会、2009.9.3、福岡

⑥ Watanabe, K., Higashi, H., Niwa, J., Real-time Image Analyzing System for Evaluating the Shear Failure Mechanisms of Reinforced Concrete Beams, Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat '09), 2009.8.28, Nagoya

[その他]

ホームページ等:

<http://www.cv.titech.ac.jp/~niwa-lab/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

二羽 淳一郎 (NIWA JUNICHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60164638

(2)研究分担者

渡辺 健 (WATANABE KEN)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40450746

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

(3)連携研究者

なし

以上