

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：82658

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709037

研究課題名(和文)局所破壊情報を利用したPC部材の長期供用性能の評価

研究課題名(英文)Evaluation of long-term behavior of PC member based on fracture in local portion

研究代表者

渡辺 健(WATANABE, KEN)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員

研究者番号：40450746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、持続的荷重が作用したコンクリートの一連の挙動に対して、如何に収縮やクリープが寄与するか、画像解析法などにより明らかにすることを目的として検討した。そして、コンクリートの破壊を捉えるための、画像相関法の高速度化を実現するアルゴリズムを提案した。また、開発した画像相関法を用いて、収縮によりモルタルに発生する応力を、計測したひずみから厚肉円筒理論を用いて算出し、この応力状態が載荷中のひび割れ発生に与える影響について明らかにした。さらには、デジタル画像相関法を適用して、PCはりの斜めひび割れ発生以降、ひび割れ上部において最小主ひずみが卓越して発生する領域を把握した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to evaluate the contribution of shrinkage and creep of concrete on life of concrete subjected to sustained loading by using the digital image-correlation method. The high-speed image correlation algorithm for concrete fracture was developed. The stress caused by shrinkage of mortar was calculated based on thick cylinder theory and strain measured by using the digital image-correlation method. Then, the effect of the stress on the cracking load of mortar was evaluated. In addition, the digital image-correlation method evaluated the area where the minimum principle strain was occurred drastically in the loaded PC beam with diagonal cracks.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：プレストレストコンクリート 収縮クリープ 鉄筋 残留応力 画像相関法 高速化 ひび割れ スト  
ラット

## 1. 研究開始当初の背景

(1) プレストレストコンクリート(PC)構造物に生じるクリープは、過大なたわみ等、供用に悪影響を及ぼすことになるため、これらの変形の発生状況の把握や予測は重要となる。すなわち、水分が逸散することなどによりセメントペーストおよび骨材の収縮に起因した体積変化が生じ、拘束や外力の影響によりひび割れや変形が発生する。また、コンクリート中に応力が発生することは、強度に対する応力の余裕度が低下することから、部材の耐荷力の低下にもつながる可能性がある。また、複合材料であるコンクリートの収縮では、例えばセメントペーストと骨材や鋼材とのひずみ差により、材料の界面に集中して応力が発生するといった、応力やひずみが不均一に発生する。このコンクリート部材に残存する応力の分布を把握すること重要となっていた。

(2) コンクリート分野で用いられている画像解析法の一つに、デジタル画像相関法がある。この手法は、計測する対象の輝度値の分布と、変形後の分布の相関度が高い領域を逐一探索することで、着目した変形前後の移動量を推定する計測法である。一般に、十分な精度で変位の計測が可能であり、実験のみならず供用中の構造物に対しても、適用が期待されていた。

## 2. 研究の目的

(1) セメント系材料の破壊現象を捉えることを考慮した画像相関法の高速化アルゴリズムを提案し、持続的荷重が作用したコンクリートの一連の挙動において、収縮やクリープが寄与するか、画像解析法などにより明らかにすることを目的として検討を行った。

(2) 荷重中に PC はり試験体のひずみ分布を計測し、部材の耐荷力算定を行うために、コンクリート部材の応力流れをモデル化した格子解析におけるトラス材の設定について示すことを目的として検討を行った。

## 3. 研究の方法

(1) デジタル画像相関法における、変形後の標点位置の探索では、探索する範囲(探索範囲)の増大に伴う、計算時間の増加が課題となっており、特に数メートルの寸法を有する RC 構造物材に適用するうえで、大きな負荷がかかることが想定される。この探索の高速化について、全画素を対象に相関度を確認するのではなく、探索する点数を一部省略する

ことで計算回数を縮減した疎密探索などが提案されている。しかしながら、この方法は、本研究で着目しているコンクリートでは、ひび割れの発生など、対象物の変形の進行が短時間に著しく進行し、撮影画像における輝度値の分布が大幅に異なる条件では、相関度の低下を余儀なくされ、変位の計測精度が低下する可能性があった。

(2) PC はり試験体を製作し、養生の期間、PC鋼材による緊張力を導入したPCはり試験体に生じるひずみの経時変化を計測した。そして載荷試験においても複数のカメラを使用した画像計測・解析を実施した。

図1に、試験体の載荷試験の状況を示す。材齢16日において、試験体のPC鋼材に100kNの緊張力を導入することで、試験体にプレストレス力を導入し、材齢29日まで、同一の環境にて養生を継続した。その後、材齢32日において、4点曲げ載荷試験を実施した。使用した載荷板は、幅100mmの鋼板である。養生期間および載荷試験では、本研究で開発した画像相関法を使用した画像撮影システムを用いて試験体表面の変位情報から、ひずみを計測した。



図1 PC はりの載荷試験と画像解析

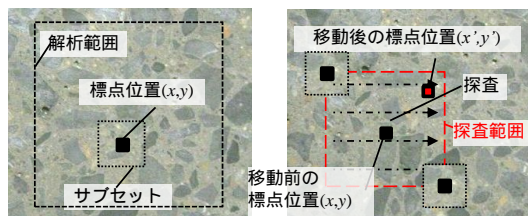
## 4. 研究成果

(1) デジタル画像相関法を省力化するためには、探索する範囲(探索範囲)の増大に伴う粗探索の計算時間の増加が課題であった。図2に、従来の粗探索のアルゴリズム(全数探索型粗探索)を示す。すなわち、粗探索では、相違度が最小となる画素位置を設定した探索範囲において網羅的に検証する。したがって、探索範囲を広域に設定することで、より相違度が最小となる位置が検出できる可能性があるが、一方で、探索に時間を要することが想定される。そこで、粗探索において計測対象の変形を考慮に入れることで、探索点位置をある程度見込むことと、解析時間の縮減を図ることとする。

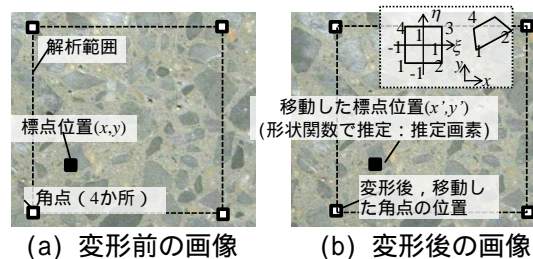
図3に、計算の短縮を図った粗探索のアル

ゴリズムを示す。ここで、デジタル画像相関法を適用する対象範囲（解析範囲）は、正方形および長方形に限定することとする。解析範囲の四隅（角点）の画素を中心としたサブセットを設定し、変形後のサブセットの位置を算出した。そして、この4つの角点の変位を内挿する形状関数を設定した。こうして得た形状関数と、角点の変位情報( $u_a, v_a$ )を使用して、解析範囲の標点の移動量( $u(\xi, \eta), v(\xi, \eta)$ )を算出する。推定された、移動した標点の画素を推定画素とすると（図3(b)）、非線形連立方程式をニュートンラプソン法で解くことで、推定画素の局所座標における座標( $x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)$ )を算出する。

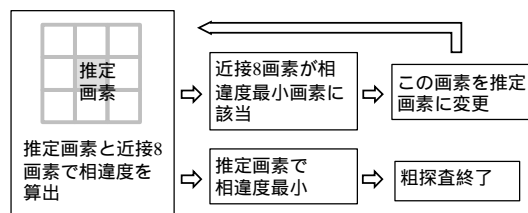
得られた推定画素に対して、図3(c)に示すアルゴリズムで相違度最小画素を探索する。すなわち、推定画素と隣接する8画素の相違度を算出し、推定画素と比較して相違度がさらに小さい画素がこの8画素に存在すると、これを推定画素と設定し、さらにその隣接する8画素を確認することとした。隣接する画素を含めて推定画素の相違度が最小であることを確認することで、粗探査は終了になるものである。この結果、推定画素に近接したごく少数の画素のみを対象に、相違度が最小になる位置を探索することとなり、相違度を算出する回数が膨大であった従来法と比較して、回数の低減という点で大幅な省



(a) 変形前の画像 (b) 変形後の画像  
図2 従来の「粗探査」アルゴリズムの概要



(a) 変形前の画像 (b) 変形後の画像



(c) 推定画素算出後の粗探査の過程

図3 提案した「粗探査」アルゴリズムの概要

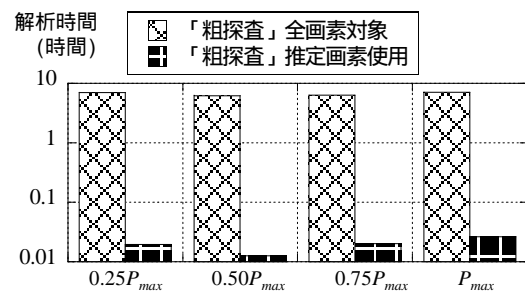


図4 探査時間の比較(荷重の最大値:  $P_{max}$ )

力化が見込まれる。開発したアルゴリズムをモルタル試験体 (100×100mm) に適用した結果、図4に示す通り、従来法が約7時間の解析時間を要したのに対し、提案法では0.02時間となり、同様の精度を保ったまま、解析時間の大幅な削減が可能であったことを確認した。

コンクリート構造物は、目的にも依存して計測する範囲の寸法が数センチから数メートルと幅広く、一方で、乾燥に伴う収縮、荷重作用に伴う変形やひび割れの発生など、様々なスケールで変位を捉える必要があるという特徴を有している。変形を一つの形状関数で概ね近似可能な領域に対して設定することが求められるため、コンクリート構造物の破壊形式に依存して、複数の領域に区分してそれぞれ形状関数を設定することになる。ただし、形状関数による粗探査とサブピクセル位置推定を併用する本手法は、探索開始点を移動後の探索点位置に極力近づけて行うことから、このような対象物にも適しており、適用範囲の拡大が期待されるものである。

(2) 図5に、PCはりの載荷試験において、画像解析法を適用することで把握した、載荷試験開始後に累積された主ひずみを示す。曲げひび割れ位置では最大主ひずみのみ卓越して発生したが、斜めひび割れ位置では最小主ひずみも併せて卓越して発生した。また、さらに斜めひび割れが発生した荷重の最大値 ( $P_{max}$ ) の6割 ( $0.6P_{max}$ ) 以降の最小主ひずみに着目すると、ひび割れ位置に合致しない領域でも、載荷点と支点間に最小主ひずみが卓越して発生している。これは、斜めひび割れ発生以降、圧縮力が卓越して発生することで、PCはりが荷重を保持していることを示していると考えられる。

このことを反映して、格子モデルの活用では、RC部材のコンクリート断面を、曲げ圧縮部材、曲げ引張部材、斜め圧縮部材、斜め引張部材、アーチ部材に、補強材は水平部材 (軸方向鉄筋) と鉛直部材 (せん断補強鉄筋) で構成される棒部材とした (図6)。こ

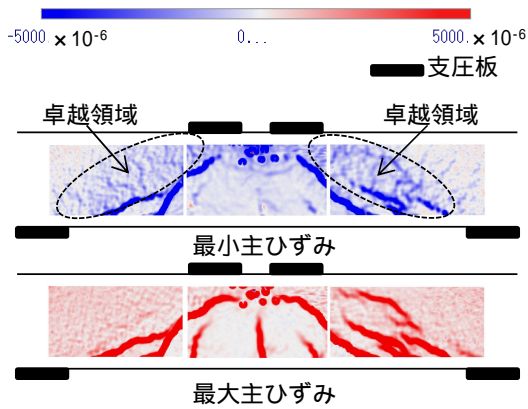


図5 荷重試験時に計測された主ひずみ

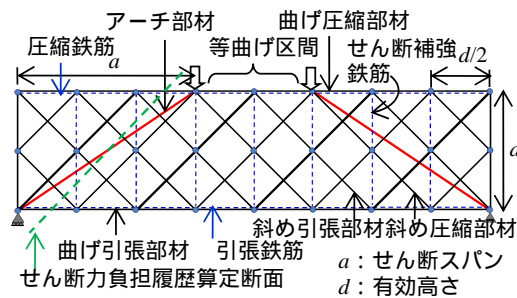


図6 格子モデル

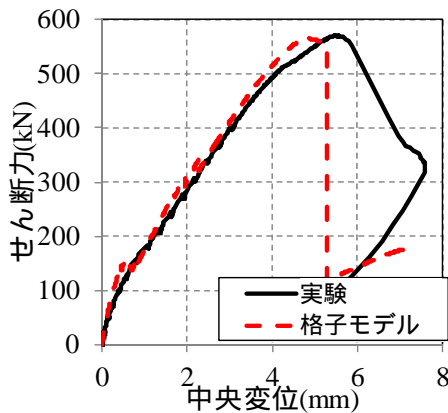


図7 せん断力-たわみ関係  
(せん断補強鉄筋比  $p_w=0.84\%$ )

これは曲げ圧縮部材を除く、圧縮力が作用する部材の強度を、横ひずみの影響を考慮した Collins らの圧縮モデルによって低減し、またアーチ部材と斜め圧縮・引張部材の断面積は、ポテンシャルエネルギーが最小となる際値としている。つまり、荷重に伴い進展する損傷の影響を、材料構成則を変化させることで対応させたものである。一方で、本研究では、荷重に伴う損傷の進展を、構成部材の断面積に反映させることで対応した点で、既往のモデルと異なる。以下に、各構成部材の断面積と構成則の設定について述べる。

実験では、初期の斜めひび割れ発生後にせん断力 - 変位関係の剛性が低下した。この実験におけるせん断力 - 変位関係の剛性変化

点のせん断力と、格子モデルにおいて斜め引張部材が軟化することによる荷重 - 変位関係の剛性変化点のせん断力が一致する断面積を設定した。ただし、実験における剛性変化点のせん断力は、160kN に統一した。

斜め圧縮部材の断面積(剛性)は、せん断補強鉄筋の荷重負担に大きく影響する。実験で得られたせん断補強鉄筋の負担分と格子解析における負担分が一致するように、斜め圧縮部材の断面積を設定した。本検討では、実験と解析でせん断スパン内に有するせん断補強鉄筋の平均負担応力  $\sigma_{s,ave}$  を一致させた。アーチ部材の断面積は、実験と解析におけるせん断力の最大値が一致するような値とした。なお、曲げ圧縮部材の高さは 200mm とした。

図7にせん断力 - 中央変位関係を示す。斜めひび割れ発生による剛性変化点のせん断力やせん断力の最大値は捉えられている。今回の検討においては、中央変位の結果に配慮を行っていないが、結果的に実験と解析で概ね一致する結果が得られた。

自由度が高い非線形解析法と比較して、本研究で進めた手法は、少数の要素で離散化されていることが特徴であり、簡便かつ間違いなく計算値を得られる手法として期待される。

#### <引用文献>

1) 二羽淳一郎、崔 益暢、田辺忠顕：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究、土木学会論文集、No.508/V-26、pp.79-88、1995

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

渡辺 健、野間康隆、セメント系複合材料を対象とした形状関数による高速画像相関アルゴリズムの提案、土木学会論文集 A2(応用力学)、査読有、Vol. 70、No.2、2015、pp.I\_929-I\_936

大野又稔、渡辺 健、野間康隆：デジタル画像相関法を用いたモルタルの収縮による応力発生の評価、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、No.1、2014、pp.508-512

大野又稔、渡辺 健、野間康隆：含水状態が異なる粗骨材を配置したコンクリートの収縮による内部応力の評価、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.14、2014、

pp.393-398

野間康隆、渡辺 健、大野又稔：画像相関法を用いた PC はりの耐荷機構の評価、第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、査読有、2014、pp.441-444

大野又稔、渡辺 健：圧縮作用下 RC 試験体のひずみ分布の経時変化に関する実験的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、2015、Vol.15、pp.179-184

〔学会発表〕(計 2 件)

大野又稔、渡辺 健、Evaluation of cracking load with considering internal stress caused by shrinkage and creep of mortar、Mechanics and physics of creep、shrinkage、and durability of concrete and concrete structures (Concreep-10)、2015 年 9 月 22 日、ウィーン(オーストリア)

大野又稔、渡辺 健、岡本 大：スターラップ間隔が持続荷重作用下 RC 供試体の載荷軸直角方向変形に及ぼす影響、土木学会第 70 回年年次学術講演会、2015 年 9 月、岡山大学(岡山県岡山市)。

〔図書〕(計 3 件)

土木学会コンクリート委員会、土木学会、コンクリート技術シリーズ109 鉄筋コンクリート構造の疲労破壊 破壊機構と性能評価の将来像を探る、2015、450

土木学会コンクリート委員会、土木学会、コンクリート技術シリーズ107 示方書連絡調整小委員会報告書 - 次世代の「コンクリート標準示方書」に向けて -、2015、191

土木学会コンクリート委員会、土木学会、コンクリート技術シリーズ106 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書、2015、359

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：変位又はひずみ算出プログラム、および変位又はひずみ測定方法  
発明者：渡辺 健、野間康隆  
権利者：鉄道総合技術研究所、安藤ハザマ  
種類：特許

番号：2015-56794

出願年月日：2015 年 3 月 19 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 健 (WATANABE KEN)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部

主任研究員

研究者番号：40450746