

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04304

研究課題名(和文) ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用いたコンクリートの各種劣化機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of various deterioration mechanisms of concrete using line sensor type full-field strain measurement device

研究代表者

伊藤 幸広 (Ito, Yukihiro)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：90223198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートの微小領域における劣化機構を調べるためにラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用いて、劣化の進行とともに変化する表面ひずみ分布を実測、可視化を行った。その結果、次の知見を得た。健全な供試体では、粗骨材内部の外周部で特に収縮ひずみが集中する領域が多く見られた。アルカリ骨材反応が生じた供試体では、粗骨材とモルタルの境界部で特に収縮ひずみが大きい領域が存在する。収縮ひずみが集中する領域のひずみ値は健全な供試体よりもアルカリ骨材反応が生じた供試体の方が大きい。鉄筋の腐食によって発生する膨張ひずみを実測、可視化することができ、本方法により鉄筋腐食モニタリングの手法としての可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの微小領域における劣化機構を調べるためにラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用いて、劣化の進行とともに変化する表面ひずみ分布を実測、可視化した。その結果、乾燥により特に収縮が大きくなる部分が存在することを明らかにした。また、提案した手法による鉄筋腐食モニタリングの可能性を示した。各種劣化の進行過程・機構のさらなる解明ができれば、劣化潜伏期においてひび割れの発生を事前に予測することや劣化加速期における補修方法の選定確度を高めることができるものと考えられる。これらの知見の収集は予防保全型維持管理において重要であり、今後のインフラ構造物の更新・維持管理費の縮減に貢献する可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the deterioration mechanism in the microscopic area of concrete using line sensor type full-field strain measurement device. As a result, in the normal specimen, there were many areas where shrinkage strain was particularly concentrated in the outer periphery of the coarse aggregate. In the specimen in which the alkaline aggregate reaction occurred, there is a region with a particularly large shrinkage strain at the boundary between the coarse aggregate and the mortar. The strain value in the region where the shrinkage strain is concentrated is larger in the specimen in which the alkaline aggregate reaction occurred than in the normal specimen. It was possible to actually measure and visualize the expansion strain generated by corrosion of reinforcing bar, and this method showed its potential as a method for monitoring reinforcing bar corrosion.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート ひずみ 乾燥収縮 アルカリ骨材反応 ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置

## 1. 研究開始当初の背景

我が国では高度経済成長期から大量のインフラ構造物が建設され、現在までに 780 兆円を超えるインフラストックが蓄積された。高度経済成長期初期に建設された構造物は築後 50 年以上が経過する高齢化構造物となっており、高齢化構造物はこの先 20 年間で現在の 2 倍以上になるとされている。将来の更新・維持管理費の削減は喫緊の課題であり、国土交通省および農林水産省をはじめとし構造物を管理する自治体は、個々の施設の長寿命化修繕計画策定し定期的な点検の実施により、劣化の把握に努めようとしている。

鋼構造物に対してコンクリート構造物は、劣化の種類が多く劣化機構も複雑である。コンクリート構造物の代表的な劣化としては、乾燥収縮、塩害、中性化、アルカリシリカ反応が挙げられる。これらの劣化に共通する点は、コンクリートにひび割れを発生させ、そのひび割れ自体や防食機能低下に伴う内部の鉄筋腐食により構造物の性能を低下させるものである。

数十年以上前より多くの研究者により各種劣化機構の研究が進められており、劣化因子とその影響の整理はできつつあるが、微小領域を含めた劣化の進行過程や劣化の詳細なメカニズムは未だ明確となっていない。特に、モルタルマトリックス、粗骨材の収縮や鉄筋の腐食膨張といった物理的变化によってひび割れが発生する過程の実測やその機構の解明に関する研究は少ない。各種劣化の進行過程・機構の解明ができれば、劣化潜伏期においてひび割れの発生を事前に予測することや劣化加速期における補修方法の選定確度を高めることができるものと考えられる。すなわち、これらの知見の収集は予防保全型維持管理において重要であり、今後のインフラ構造物の更新・維持管理費の縮減に貢献する可能性が高い。

## 2. 研究の目的

本研究は、コンクリートの微小領域における劣化機構を調べるためにラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用いて、劣化の進行とともに変化する表面ひずみ分布を実測、可視化することによって劣化発生メカニズムや劣化の進行過程の解明を行うことを目的として行ったものである。本研究で対象とした劣化は、乾燥収縮、塩害およびアルカリ骨材反応である。特に、モルタルマトリックスや粗骨材の乾燥による収縮、鉄筋の腐食膨張によってひずみが発生する過程やその領域の解明を中心に行ったものである。なお、セメントペースト - 骨材界面等の微小領域のひずみ計測を行う場合には、現状のひずみ計測方法では十分であるとは言えず、新たにひずみ解析時の基長を 1mm 以下とした場合でも高精度な計測精度が得られる解析方法を検討することも研究目的の一つとする。

## 3. 研究の方法

本研究で対象とした劣化は、乾燥収縮、塩害およびアルカリ骨材反応であるが、乾燥収縮およびアルカリ骨材反応については同様の実験方法により研究を行った。以下にそれぞれの実験方法について述べる。

### (1) 乾燥収縮およびアルカリ骨材反応に関する実験方法

実験で使用したラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置(以下、計測装置)の外観を写真-1に示す。円柱供試体をスキャンするためのアタッチメントの外観を写真-2に示す。実験では、アルカリ骨材反応の生じたコンクリートと健全なコンクリートについて乾燥収縮ひずみ分布を計測し比較検討した。

供試体の作製方法としては、100 mmの円柱供試体を所定の厚さに切断し、スキャンする面を研磨した。樹脂フォルダには、エポキシ樹脂で供試体を接着し固定した。図-1 に供試体および樹脂フォルダの形状を示す。実験手順を図-2 に示す。ひずみを前後1組の画像を用いてスキャンした画像はデジタル画像相関法により面内ひずみ分布を計測した。

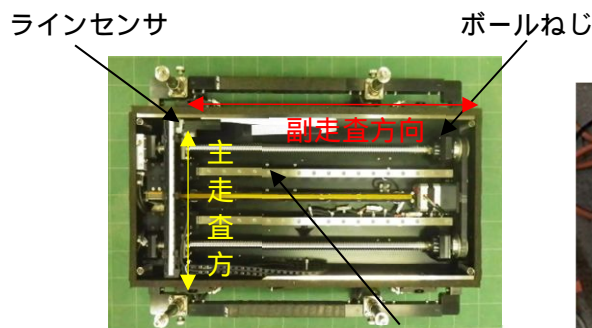


写真-1 リニアガイドレール計測装置の外観

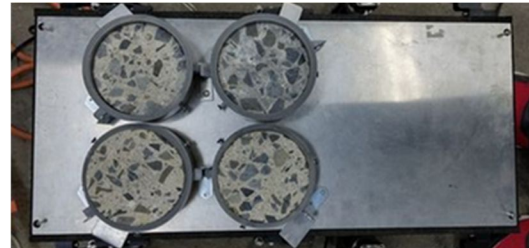


写真-2 アタッチメントの外観

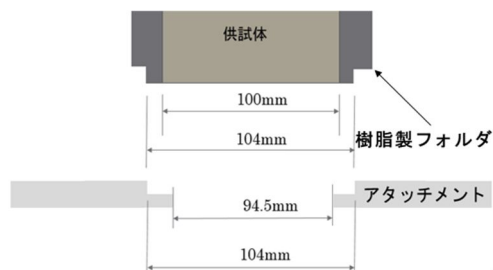


図-1 供試体および樹脂フォルダの形状

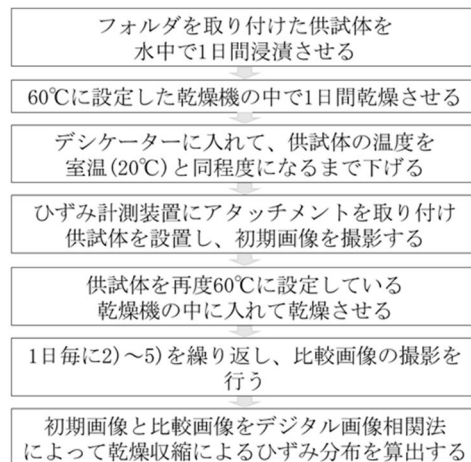


図-2 実験手順

## (2) 塩害に関する実験方法

本実験で用いたラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置およびアタッチメントは前述のものと同じ

である。塩害を模擬するために実験では、鉄筋に通電し腐食を促進させる電食実験を行った。鉄筋腐食の生じたコンクリートについてひずみの計測を行ったものである。供試体の作製方法としては、中心に呼び径 D13、D16、D19、D25 および D32 の鉄筋を配置した 100 mmの円柱供試体を所定の厚さに切断し、スキャンする面を研磨した。樹脂フォルダと供試体の隙間は、塩水の浸透防止のため供試体裏面からエポキシ樹脂で防水した。実験手順は、以下のとおりである。

樹脂フォルダを取り付けた供試体の初期画像を取得する。

供試体を 3%NaCl 水溶液に表面を除き浸漬させ、電食実験を行う。

10～24 時間おきに供試体を取り出し、ひずみ計測装置で撮影を行う。

撮影終了後、再度電食実験を行う。

鉄筋腐食状態を確認しつつ ～ を繰り返す。

## 4. 研究成果

### (1) 乾燥収縮およびアルカリ骨材反応に関する実験結果

計測により得られたひずみ分布は、最小主ひずみのコンター図として示し、さらに骨材トレース画像と重ね合わせて示した。健全な供試体（以下、NOR 供試体）の計測面全体の乾燥収縮ひずみ分布を図-3 に示し、アルカリ骨材反応が生じた供試体（以下、ASR 供試体）の乾燥収縮ひずみ分布を図-4 に示す。NOR 供試体では、粗骨材内部の外周部で特に収縮ひずみが集中す



る領域が多く見られた。また、A S R 供試体では、粗骨材とモルタルの境界部で特に収縮ひずみが大きい領域があることから、ひずみの集中領域の位置に違いがある<sup>1)</sup>。なお、特に収縮が大きい領域の乾燥収縮ひずみの値がN O R 供試体において-1600  $\mu$  から-4400  $\mu$  の範囲であるのに対し、A S R 供試体においては-3200  $\mu$  から-5600  $\mu$  の範囲であり、A S R 供試体の方が大きく収縮していると言える。

A S R 供試体の特定箇所における最小主ひずみの分布と最小主ひずみの方向を図-5 および図-6 に示す。なお、図-6 の灰色のラインはひび割れ箇所を示している。

収縮ひずみが大きい領域での最小主ひずみの方向は、粗骨材の外周部側面に対して垂直方向を向く傾向がある。なお、特に収縮ひずみが大きい領域のモルタル部では、最小主ひずみの方向は粗骨材側面に対して垂直方向であるが、骨材とモルタルの界面を境に、粗骨材内部では最小主ひずみの方向は垂直方向とは異なる方向を向く傾向がある。これは、アルカリ骨材反応による粗骨材の膨張が影響しているものと考えられる。

また、本研究では収縮ひずみが大きい箇所にスリットを切削し応力解放法により、解放ひずみから蓄積された応力の計測を試みている。モルタル部分の弾性係数は 20.0kN/mm<sup>2</sup>、粗骨材のヤング係数は 29.1kN/mm<sup>2</sup>である。収縮地点のひずみ分布と実際に解析した様子を図-7 に示す。また、解析ラインごとの対称点間距離変化率を図-8 に示す。

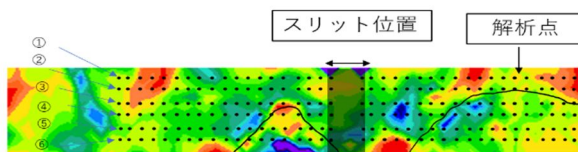


図-7 スリット位置と解析点  
中心からの距離X(mm)

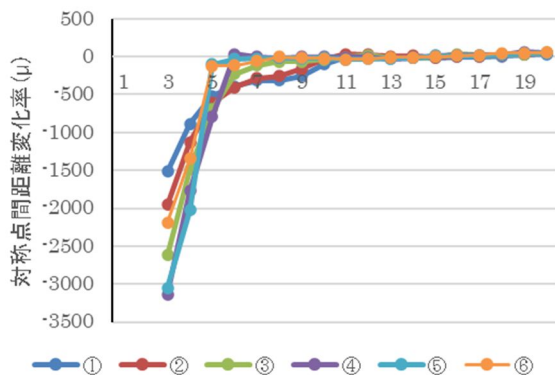


図-8 対称点間距離変化率

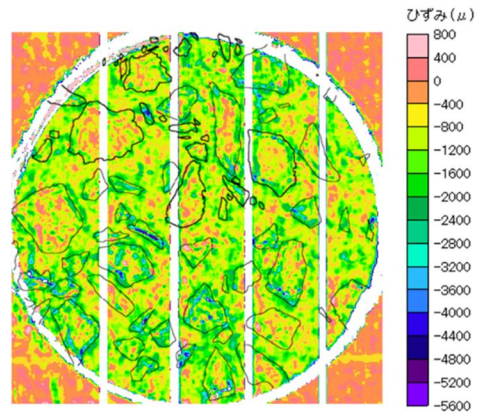


図-3 N O R 供試体全面の乾燥収縮  
ひずみ分布

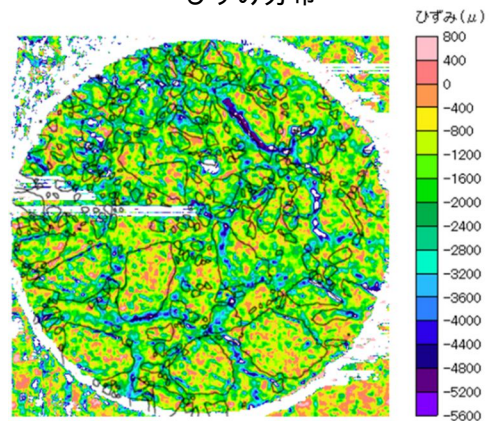


図-4 A S R 供試体全面の乾燥収縮  
ひずみ分布

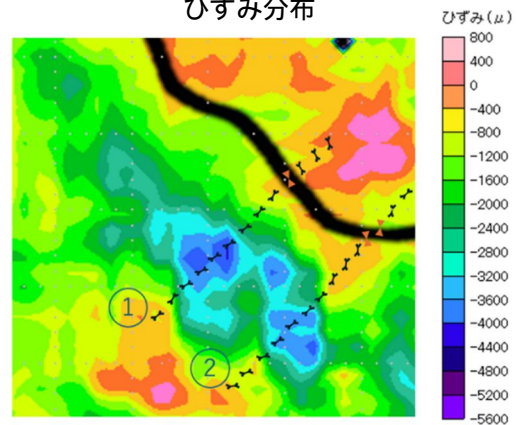


図-5 乾燥収縮ひずみが大きい領域の最小主ひずみの分布と方向

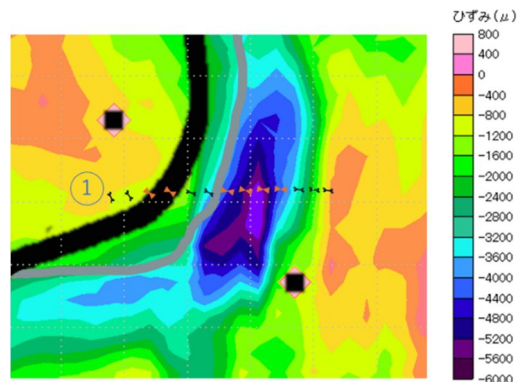


図-6 ひび割れが発生した箇所の  
最小主ひずみの分布と方向

対称点間距離のグラフから5mm地点で から で近い値が出ているため求める現有応力は5mm地点の値を平均し16.61N/mm<sup>2</sup>となった。また、 から の5mmから6mm地点のグラフが急激にひずみの値が小さくなった。

## (2) 塩害に関する実験結果

電食を行った供試体の最大主ひずみ分布を図-9(電食時間146時間)および図-10(電食時間262時間)に示す。なお、埋設した鉄筋は呼び径D19である。電食時間146時間において中央の鉄筋上端および左端から微かなひび割れが発生(図中、黒色破線)し、その周囲には1500μ程度の引張ひずみが大きな領域が発生していた。電食開始から262時間後にはひび割れ幅が拡大し、引張ひずみの領域も1800μ以上となった。以上のように、鉄筋の腐食によって発生する膨張ひずみを計測、可視化することができ、本方法により鉄筋腐食モニタリングの手法としての可能性が示された。

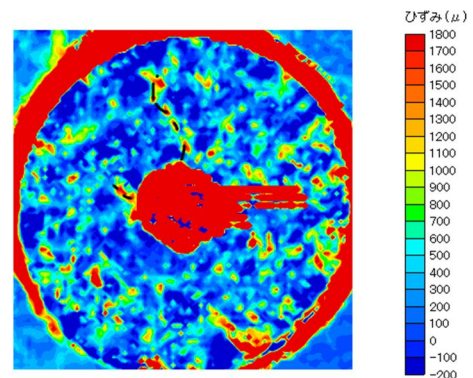


図-9 電食供試体の最大主ひずみ分布(電食時間146時間)

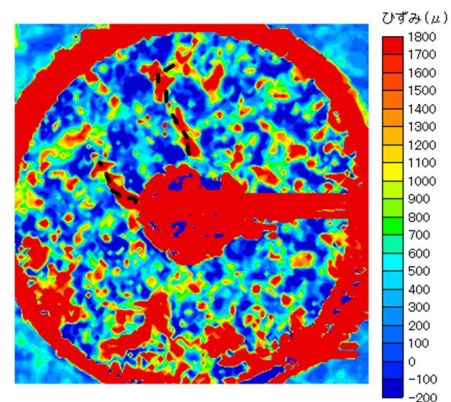


図-10 電食供試体の最大主ひずみ分布(電食時間262時間)

## (3) まとめ

本研究により得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

- ・ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置およびアタッチメントで、コンクリートの各種劣化に伴うひずみ分布の変化を可視化および計測することができた。
- ・健全な供試体では、粗骨材内部の外周部で特に収縮ひずみが集中する領域が多く見られた。
- ・アルカリ骨材反応が生じた供試体では、粗骨材とモルタルの境界部で特に収縮ひずみが大い領域があることから、健全な供試体とはひずみの集中領域の発生位置に違いがある。
- ・収縮が大い領域での乾燥収縮ひずみの値は、健全な供試体において-1600μから-4400μの範囲であるのに対し、アルカリ骨材反応が生じた供試体においては-3200μから-5600μの範囲であり、アルカリ骨材反応が生じた供試体の方が大きく収縮している。
- ・収縮ひずみが大い箇所にスリットを切削し応力解放法により、解放ひずみから蓄積された応力の計測を試みた結果、現有応力は16.61N/mm<sup>2</sup>程度であった。
- ・鉄筋の腐食によって発生する膨張ひずみを計測、可視化することができ、本方法により鉄筋腐食モニタリングの手法としての可能性が示された。

## <参考文献>

- 1) 寺本篤史・渡部雅貴・村上亮太・大久保孝昭：ペシマムを有するアルカリ骨材反応における内部ひび割れ進展の可視化に関する研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.40，No.1，pp.849-854，2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 出水 享, 松田 浩, 伊藤 幸広, 森田 千尋	4. 巻 60 (2)
2. 論文標題 デジタル画像相関法を用いた橋梁の亀裂・変位・ひずみ計測に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 32-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤幸広, 松田浩, 出水享, 木本啓介	4. 巻 34
2. 論文標題 デジタル画像による構造物の維持管理技術の現状	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 11-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	出水 享  (Demizu Akira)  (00533308)	長崎大学・工学研究科・技術職員    (17301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------