

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：82707

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成 22 年度～平成 23 年度

課題番号：22760335

研究課題名（和文） 鉄筋コンクリートの劣化進行過程のマルチスケールモニタリング

研究課題名（英文） Multi-scale monitoring of degradation process of reinforced concrete

研究代表者

川端 雄一郎（KAWABATA YUICHIRO）

独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究領域・研究官

研究者番号：10508625

研究成果の概要（和文）：

本研究は、デジタル画像相関法（DIC）を用いて鉄筋コンクリート表面から劣化進行過程を捉えるための技術開発を行うとともに、ミクロスケールな観察・計測を行い、これらを組み合わせることでマルチスケールな計測技術の開発を行ったものである。ASR と鉄筋腐食に着目し、DIC を用いて劣化進行過程を評価し、その有用性を示した。また、ミクロな損傷過程とマクロな損傷過程を関連付けることにより、劣化による損傷機構を明らかにした。さらに、DIC とマルチロゼット解析法を組み合わせることで、ASR による過去の膨張履歴を推測できる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：

This research aims at developing the technique to track degradation process of reinforced concrete (RC) by using digital image correlation (DIC). In addition, combination of the developed method and microscopic observation gives “multi-scale monitoring” which can measure the damage of RC from microscopic level to macroscopic one. Alkali-silica reaction and steel corrosion were focused as the degradation of RC. The result of the experiment showed that DIC is promising tool to evaluate the degradation of RC. Multi-scale monitoring also enables to associate the macroscopic degradation process with the microscopic damaging process which can contribute to clarification of the degradation mechanism of RC. Finally, the combination of DIC and multi-rosette analysis showed one possibility to evaluate the induced strain in concrete due to ASR expansion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：土木材料

科研費の分科・細目：若手研究（B）

キーワード：画像解析，コンクリート，モニタリング，鉄筋腐食，ASR

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の合理的な維持管理のためには、適切な診断・予測・対策が必要である。このうち構造物の点検は目視で行われるのが一般的であるが、結果に対して各種要因に大きく影響されることが問題となっている。一方、高度な診断手法が多くの研究者により開発されているものの、局所的な情

報しか得られない、現場適用性が低い、計測機材が高価である、といった問題を抱えている。また、土木構造物は近接して計測出来ない状況が多々あるため、非接触で高精度に計測可能な技術開発が求められている。

一方、研究開発レベルにおいては、劣化損傷機構やその程度を定量的に評価するために、材料の微細損傷から構造物の全体系とし

ての損傷までが一連として関連付けられていない点が多く、それぞれの現象の関連性の解明が不可欠である。

これらの技術課題を解決する方法として、近年注目されている光学的全視野計測技術が考えられる。特に、光学的全視野計測技術の一つであるデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation: DIC) については、近年のデジタルカメラの高精度化によって、安価に高精度な変位・ひずみ計測が可能である。このような技術を活用することによって、微細な損傷から構造系もしくは部材レベルの損傷までをマルチスケールにモニタリングすることによってそれぞれの現象を関連付けることが可能になる。

2. 研究の目的

本研究は、DIC を用いて鉄筋コンクリート表面から劣化進行過程を捉えるための技術開発を行うとともに、ミクロスケールな観察・計測を行い、これらを組み合わせることでマルチスケールな計測技術の開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) DIC

DIC は空間の揺らぎや装置の振動などの外乱に弱いとされるレーザー光源を用いたモアレ干渉法やスペックル干渉法と比較して、ロバストな環境での適用が可能とされる光学的全視野計測手法である。DIC の解析原理は、測定対象物表面の模様ランダム性を認識させ、対象物の変形前後を撮影デジタル画像の輝度値分布から測定対象物表面の変形量と方向を同時に求めるものである。撮影画像として、256 階調のグレースケールのビットマップが使用される。

代表的な解析方法として、変形前に撮影した画像における任意の位置を中心とする微小領域 (サブセット: $N \times N$ 画素) を基準として設定する。サブセットには N の 2 乗個から成る 256 階調の輝度値パターンが存在する。このパターンは設定されたサブセット固有のものであり、他のサブセットと区別可能なものである。変形後の画像より、変形前に設定した基準サブセットと最も良い相関を得る位置を算術的に求める。変形前後の画像間における層間を求める方法として、1 ピクセル単位の計測精度で変位量を求める方法 (粗探査) とサブピクセルオーダーの精度で変位量を求める精探査の 2 種類がある。粗探査の一例として最小自乗法を利用した算出が挙げられ、以下の式にて表される。

$$C_R(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_u(X+i, Y+j)]^2}{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X+i, Y+j)}$$

ここに、 $I_u(X, Y)$ および $I_d(X+u, Y+v)$ は変形前および後の画像強度、 X, Y はサブセットの中心座標である。また u, v はそれぞれ x 方向、 y 方向への移動量を示し、 $N=2M+1$ である。相関係数 C_R が最小となる位置は、設定したサブセットの移動後の中心位置と計算される。

しかしながら、上述した通り実際の移動量が最近接画像と一致することは稀であり、ほとんどの場合はサブピクセルオーダーの変形量を求める精探査が必要となる。精探査の方法として、最近接画素周辺の画素点での相関値を利用する方法や、離散的な画素の強度間に対して直接的に数値補間を導入し、相関が最も良い位置を求める方法がある。前者は、相関の最も高い画素位置とその周辺部の画素位置での相関値について、1 次曲線や 2 次曲線、ガウス分布などを利用して補間し、その交点やピークを基に 1 画素以下の変形量を求めるものである。一方、後者は、計測した画像の離散的な強度分布を直接、線形や 2 次曲線、Bi-cubic 等の補関関数を用いて補間し、相関関数 C_D を演算して相関の最も良い位置を求めるものである。本研究では、Uchino¹⁾が提案する以下の式を用いて後者の解析方法を採用している。

$$C_D(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X+i, Y+j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [I_d(X+u+i, Y+v+j)]^2 \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [I_u(X+i, Y+j)]^2}}$$

得られた変位量および変位方向から、ひずみを算出する。ひずみの算出には、任意の画素間における変形差を用いることで、3 軸ゲージと同様に水平、垂直、斜め方向のひずみを求める。

(2) DIC による劣化進行過程の計測

劣化として、主に ASR と鉄筋腐食を対象として、劣化進行過程におけるコンクリート表面のひずみ分布を計測することで、DIC による劣化進行過程の評価の有用性について検証を行った。

(3) 微細損傷とマクロな損傷の関連性の評価

ASR を対象として、コンクリート中における微細な損傷過程とコンクリートのマクロな損傷過程を関連付けるため、コンクリートのマクロな膨張過程と微細ひび割れの発生・進展状況を関連付け、その評価を行った。

(4) DIC を用いた診断技術の開発

ASR による劣化を生じた構造物の診断に関する問題点の一つとして、ASR の膨張履歴が不明であり、鉄筋に導入されたひずみかわからないことが挙げられる。本研究では DIC とマルチスケール解析法を組み合わせるこ

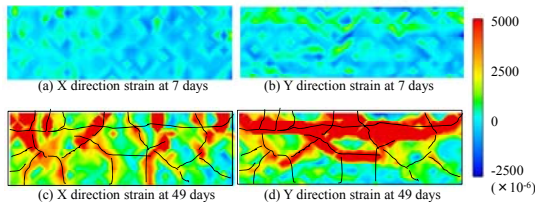


図-1 ASR による膨張を生じた
コンクリートのひずみ分布

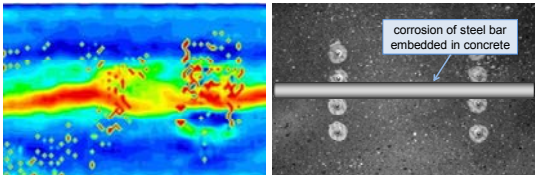


図-2 鉄筋腐食を生じた鉄筋コンクリート
表面のひずみ分布

とで、円孔周辺のひずみ分布を計測する手法 (DIC-マルチゾット解析法) によって ASR による過去の膨張量を推測する手法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) DIC による劣化進行過程の計測

図-1 に促進試験材齢 7 日および 49 日における ASR を生じたコンクリート表面のひずみ分布を示す。なお、材齢 7 日、49 日においてダイヤルゲージ法で計測したコンクリートの膨張量はそれぞれ 0.03%、0.25%である。材齢 7 日において既にコンクリート表面に亀甲状に類似したひずみの局所化が認められる。材齢 49 日では局所ひずみがさらに増大していることが分かる。図中には試験後において確認されたひび割れを黒線にて示しているが、ひずみの局所化箇所とひび割れ箇所には高い相関があった。

図-2 にコンクリート中の鉄筋を電食により腐食させた際のコンクリート表面のひずみ分布を示す。鉄筋軸方向に沿ってひずみが局所的に大きくなっていることがわかる。この時点においてコンクリート表面にひび割れは確認されなかったが、試験後におけるコンクリート表面の観察結果では、ひずみの大きな箇所とひび割れ箇所はほぼ一致していた。したがって、DIC を用いてひずみ分布を計測することによって、ひび割れの発生箇所などを事前に把握することが可能である。

これらの結果から、鉄筋腐食に伴う膨張や ASR の骨材の膨張などによるコンクリート表面のひずみ分布の変化等について、DIC を用いることで計測できることが示された。特に、目視で観察できるひび割れが発生する前に損傷の兆候を捉えることができる点は本手法の利点である。ただし、鉄筋腐食に関する一部の実験については、腐食生成物である錆汁によってコンクリート表面の色調が変

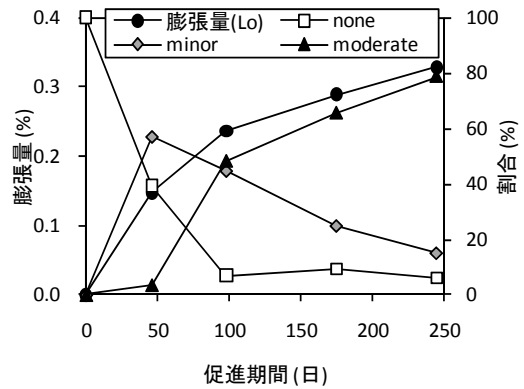


図-3 ASR 膨張量と微細損傷の関係

化し、解析が困難になった。本研究では、各時間の画像間の差分を初期画像から積分させることで画像自身の時間依存性の影響を極力排除したものの、色調変化が著しい試験体については画像解析の適用が困難であった。本実験は電食にて検討を行ったが、実構造物においては、コンクリートへのひび割れ発生以前に錆汁が認められることは稀である。したがって、鉄筋コンクリートの劣化進行過程として、ひび割れの発生・進展までの損傷過程であれば、DIC により評価が可能である。

(2) 微細損傷とマクロな損傷の関連性の評価

ASR による膨張現象を様々なスケールで計測することにより、作用機構の理解を深めた。ASR によるミクロな劣化進行過程は、Katayama の報告²⁾の通り、骨材中のひび割れ、骨材からペーストへのひび割れの進展、と進行する。ここで、Katayama の手法²⁾を参考に、微細領域における劣化度を以下の 3 つに区分した。

- none : ひび割れが認められない状況
- minor : 骨材内部のひび割れ発生
- moderate : 骨材からセメント硬化体へのひび割れ進展

図-3 に各促進期間におけるコンクリートの膨張量および微細領域における劣化度の割合の経時変化を示す。ASR による反応および膨張が認められた促進期間 46 日では骨材内部のひび割れ (minor) が卓越した。その後、骨材内部のひび割れはセメント硬化体へ進展 (moderate) した。コンクリートの膨張・ひび割れ挙動と比較すると、骨材内部のひび割れが卓越している促進期間 46 日では、コンクリートの膨張量が 0.1% を超えており、コンクリート表面にひび割れが発生している。セメント硬化体にはひび割れがほとんど無く、損傷が認められない。ただし、マクロ的にはコンクリート表層付近に非膨張層が形成されるため、コンクリート表面ではひび割れが発生したと考えられる。その後、コンクリートの膨張量はセメント硬化体へひび割

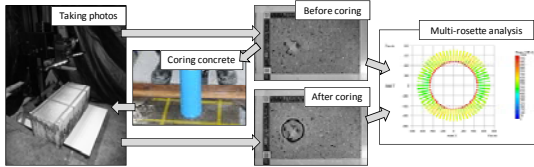


図-4 DIC-マルチロゼット解析法

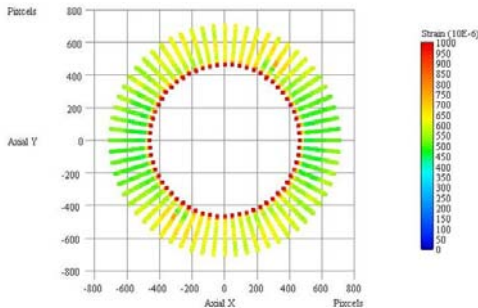


図-5 コア周囲の主ひずみ分布

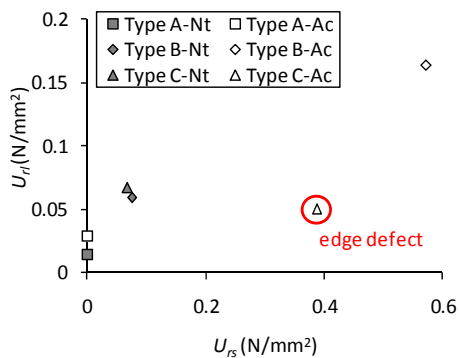


図-6 U_{rs} と U_{rl} の関係

れが進展した骨材量の増加に伴って大きくなった。この結果は、A-S-H が周囲から反力を得てコンクリートの膨張に寄与していることを示している。

(3) DIC-マルチロゼット解析法によるコンクリートの膨張履歴の推定

図-4 に DIC-マルチロゼット解析法の手順を示す。本手法により、円孔周辺のひずみを簡易に求めることができる (図-5)。本手法によって得られたひずみから、ひずみエネルギー (U_{rl}) を算出したところ、鉄筋に蓄積されたひずみエネルギー (U_{rs}) と高い相関が認められた (図-6)。

(4) マルチスケールモニタリングによる鉄筋コンクリートの劣化進行過程の評価

(1)~(3)の結果より、DIC を用いることで鉄筋コンクリート表面に顕在化する変状を目視で変状が確認できる前 (ひび割れ発生以前) に捉えることができた。また、マルチロゼット解析法との組合せにより、ASR 膨張に

よって鉄筋に蓄積されたひずみエネルギーを評価できる可能性を見出した。さらには、ミクロな損傷を観察・計測することによりミクロな現象とマクロな応答を関連付けることができた。このように、DIC を主として、様々な計測手法を組み合わせることで、マルチスケールな計測技術の有用性を示すことができた。

【参考文献】

- 1) M. Uchino: Sub-Micron Displacement Measurement Using a Digital Image Correlation Method, Proceedings of ATEM'03, CD_Paper No. OS01W0200, 2003
- 2) T. Katayama: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.862-873, 2008
- 3) M. Uchino, T. Okamoto, K. Hida, Y. Ito, P. Sumitomo and H. Matsuda: Strain analysis method using multi-rossette analysis by digital image correlation method, *Proceeding of the International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, pp. 2564-2569, 2010
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 9 件)
 - ① 川端雄一郎, 松下博通: 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.549-563, 2011
 - ② 合田寛基, 川端雄一郎, 内野正和, 岩波光保, 日比野誠: デジタル画像相関法による応力開放法の ASR 劣化コンクリートへの適用, 日本実験力学会講演論文集, No.11, pp.175-180, 2011
 - ③ 川端雄一郎, 広野真一, 岩波光保, 加藤絵万: 岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1031-1036, 2011
 - ④ 川端雄一郎, 徐超男: 見えないひび割れを可視化する, 土木学会誌, Vol.96, No.2, pp.28-29, 2011
 - ⑤ Takanori Ikeda, Yuichiro Kawabata, Hidenori Hamada and Kazuo Yamada: Mitigating Effect of Fly Ash on the ASR-Related Expansion of Mortar Using Reactive Aggregate at the Pessimum Proportion, *Advances in Concrete Structural Durability*, pp.473-481, 2010
 - ⑥ Yuichiro Kawabata, Ema Kato and

Mitsuyasu Iwanami: Structural Performance of Heavily Deteriorated RC Members Serviced in Marine Environment for 44 Years, Advances in Concrete Structural Durability, pp.491-497, 2010

- ⑦ Mitsuyasu Iwanami, Ema Kato and Yuichiro Kawabata: Corrosion Monitoring of Steel Bars in Superstructure of Open-type Wharf, Advances in Concrete Structural Durability, pp.361-366, 2010
- ⑧ 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: 海洋環境で著しく鋼材腐食を生じた RC はりの耐荷性能評価, 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, Vol.10, pp.193-198, 2010
- ⑨ 井上祐一郎, 濱田秀則, 川端雄一郎, 山田一夫: ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによる ASR 抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.953-958, 2010

[学会発表] (計 8 件)

- ① Yuichiro Kawabata, Kazuo Yamada and Hiromichi Matsushita: The effect of composition of cement hydrates with supplementary cementitious materials on ASR expansion, Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2012
- ② Yuichiro Kawabata, Takanori Ikeda, Kazuo Yamada and Yasutaka Sagawa: Suppression effect of fly ash on ASR expansion of mortar/concrete at the pessimum proportion, Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2012
- ③ Hiroki Goda, Yuichiro Kawabata, Masakazu Uchino, Mitsuyasu Iwanami, Makoto Hibino, Application of digital image correlation method to strain release for ASR deterioration, Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2012
- ④ Yuichiro Kawabata, Mitsuyasu Iwanami, Ema Kato, Takahiro Nishida and Chao-Nan Xu: Applicability of mechanoluminescent sensor to inspection tool for integrated maintenance of port structure, Proceedings of International Forum on Mechanoluminescence and Novel Structural Health Diagnosis 2011, 2011 (招待論文)
- ⑤ Yuichiro Kawabata, Ema Kato and Mitsuyasu Iwanami: Evaluation of induced strain in concrete due to ASR expansion by

digital image correlation, 10th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp.1-10 (Session 7, CD-R), 2011

- ⑥ 岩波光保, 加藤絵万, 川端雄一郎: 棧橋上部工における鉄筋腐食モニタリング実証実験, 土木学会第 65 回年次学術講演会 V 部門, pp.691-692, 2010
- ⑦ 池田隆徳, 川端雄一郎, 濱田秀則, 佐川康貴: 高温蒸気養生を行ったモルタルの DEF による長期膨張性状とその制御に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会 V 部門, pp.593-594, 2010
- ⑧ 井上祐一郎, 佐川康貴, 川端雄一郎, 山田一夫: コンクリートの ASR 促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会 V 部門, pp.545-546, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端 雄一郎 (KAWABATA YUICHIRO)
独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究領域・構造研究チーム・研究官
研究者番号: 10508625

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: