

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630198

研究課題名(和文) X線撮影とデジタル画像処理によるRC部材内の鉄筋腐食成長過程の3次元可視化

研究課題名(英文) Three Dimensional Visualization of Steel Corrosion Process in RC Member Using X-Ray and Digital Image Processing

研究代表者

秋山 充良 (Akiyama, Mitsuyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00302191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート(RC)部材内で生じる鉄筋腐食の進展を観察できれば、鉄筋腐食の不均一さ(腐食の空間分布)の程度と形成過程の理解、あるいは、それと部材表面に表れる腐食ひび割れ幅・密度の関係の把握など、RC構造物の維持管理の高度化につながる情報が得られると期待される。本研究では、RC部材内の鉄筋腐食成長過程のX線撮影による観察の可能性を検討した。電食にて劣化させたRC部材を連続的にX線撮影することで、鉄筋腐食成長過程、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係、あるいはそれらが部材曲げ耐力に及ぼす影響に関する基礎資料を得た。

研究成果の概要(英文)：It is important to estimate the amount of corrosion products in existing RC structures subjected to chloride attack. However, the corrosion process of rebar has not been investigated because of difficulties with observing it. Recently, X-ray technology has been applied to the visualization of concrete cracking to investigate the behavior of fracture process zone in concrete. In this study, digital picture processing method to estimate the amount of corrosion products in RC members is provided for X-ray photography. Then, based on the observation of deteriorated RC member using X-ray photography, corrosion process of rebar is visualized, and the effects of the amount of corrosion products on the corrosion cracking width and flexural strength of RC beam are examined.

研究分野：構造工学

キーワード：X線 維持管理 コンクリート構造物 デジタル画像処理 鉄筋腐食

1. 研究開始当初の背景

塩害環境下にある既存の鉄筋コンクリート(RC)構造物では、部材内で生じている鉄筋腐食の状態を精度良く把握することがその維持管理において重要である。目視検査で得られた腐食ひび割れ幅から RC 部材内の鉄筋腐食量を推定し、その結果を用いて構造物の現時点の安全性や将来的な残存寿命の評価などが行われている。現状では、部材内で不均一に進展している鉄筋腐食の空間分布の表現が困難であり、また、コンクリート表面に表れる腐食ひび割れから推定される鉄筋腐食量にも非常に大きなバラツキが含まれる。このため、最も断面力が大きな位置に最大の鉄筋腐食量が生じるとの仮定を設けたり、腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定する際に、過度に安全側の値を与えたりしている。これらの解決には、RC 部材内で不均一に生じる鉄筋腐食の成長過程や、それと部材表面に表れる腐食ひび割れ幅・密度の関係などを把握する必要がある。しかしながら、鉄筋はコンクリート内に存在しており、鉄筋腐食の成長を連続して実験的に観察することは極めて困難である。

コンクリート内部で生じるひび割れ進展の解明に X 線技術を適用した事例がある。X 線は、可視光と比べ短い波長をもつ電磁波であり、屈折率が 1 に近く、透過力が大きい性質を有している。この X 線技術により、RC 部材内の鉄筋腐食状態を可視化できれば、鉄筋腐食の成長過程を連続的に撮影することが可能となり、鉄筋腐食の空間分布をモデル化するための情報、さらには、鉄筋腐食とコンクリート表面に表れる腐食ひび割れ幅・密度の関係等について、有用な情報を得ることができると期待される。ただし、健全時から、例えば、10%程度の断面欠損が生じたコンクリート内の鉄筋の状態を X 線により定量的に評価可能であるのかは明らかでなく、このような研究目的の達成に X 線技術が適用できるのかをまず確認する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、上記の背景のもと、X 線によりコンクリート内の鉄筋腐食の状態を撮影し、鉄筋の非腐食域の境界を捉えるためのデジタル画像処理方法などを検討した。具体的には、予め電食にて腐食させた、腐食量と腐食の分布が既知の鉄筋をコンクリート中に埋め込み、その状態を X 線撮影し、デジタル画像処理方法の違いが X 線撮影画像(以下、単に X 線画像)から予測される鉄筋腐食量の精度に及ぼす影響などを検証した。次いで、電食にて劣化させた RC はり部材の X 線撮影を行い、鉄筋質量減少率の不均一さの程度や形成過程を観察した。また、鉄筋質量減少率とコンクリート表面に表れる腐食ひび割れ幅の関係、さらには、部材内部の鉄筋質量減少率の空間的な変動と曲げ耐力の関係などに関する基礎資料を得た。

3. 研究の方法

本研究で用いた X 線装置の概要を図 1 に示す。図の右側にある X 線管球から X 線が照射され、供試体を通じた後に、イメージングテンシファイア(以下、I.I.)を通してテレビジョン装置に被写体の情報が取り込まれ、最終的にデジタル画像としてコンピュータにそれが出力される。装置内にある供試体設置用のテーブルは、本研究への助成を用いることで、図 2 に示すように、360 度回転できるように改良し、多方向からの被写体の撮影が可能となった。



図 1 本研究で使用した X 線装置

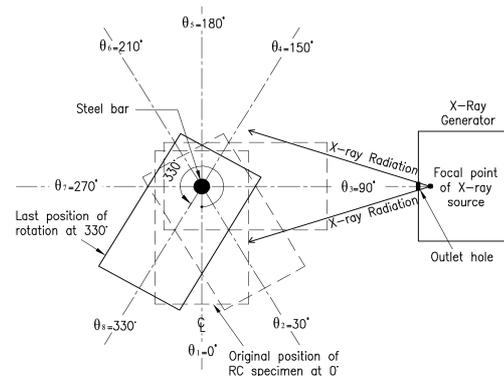


図 2 ターンテーブル改良のための設計図

図 1 の装置では、多方向からの被写体の撮影が可能である。本研究では、30 度毎に供試体を回転させ、12 方向から撮影を行い、鉄筋が腐食していない健全部の鉄筋面積をそれぞれ求め、それから非腐食域の体積を算定した。X 線画像に写る被写体の大きさは、実物の大きさではなく、X 線発生源や I.I. と目標とする物体(本研究では、コンクリートに埋設された鉄筋)の距離、および X 線管電流・電圧の大きさに依存している。そこで、X 線画像から距離の絶対値を測定するため、次のように対応した。まず、全ての撮影画像が等倍率となるように、供試体を回転させる際は、その回転中心が鉄筋位置と一致するように供試体を設置した。そして、健全鉄筋(質量

減少率 0%) の X 線画像における鉄筋リブ方向の幅に相当する画素数と、予めノギスにて実測した同位置の長さを対応させることで、画素数から長さの測定を行えるようにした。

なお、RC 部材から得られる X 線画像では、鉄筋、鉄筋腐食生成物、およびコンクリートの境界があいまいになることがある。そこで、本研究では、様々なデジタル画像処理方法を適用し、RC 部材の撮影結果に最も適当なものを試行錯誤した。図 3 は、デジタル画像処理前後の X 線画像の比較である。デジタル画像処理を施すことで、鉄筋腐食生成物までもはっきりと認識できるようになることが確認できる。

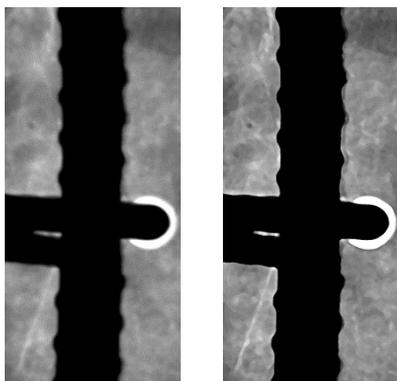


図 3 デジタル画像処理の効果
(左側：画像処理前，右側：画像処理後)

基本的な X 線撮影およびその画像処理の検討に続いて、電食にて鉄筋を腐食させる RC はり供試体の X 線撮影を行い、鉄筋腐食の成長過程や部材軸方向の腐食の不均一さの表れ方、さらにはそれとコンクリート表面のひび割れ幅や曲げ耐力の関係などについての基礎資料を得た。本研究で用いた RC はり供試体の一例を図 4 に示す。

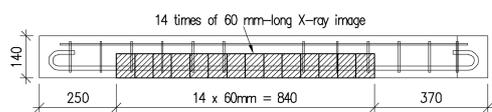


図 4 本研究で用いた RC はり供試体
(ハッチ部は X 線撮影範囲)

本研究で用いた実験供試体は、土木学会コンクリート委員会材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会で使用された RC はりを参考に設計した。軸方向鉄筋は、引張側に D13 を一本のみ配筋し、曲げせん断を受ける区間にはそこでのせん断破壊を防ぐためスターラップを配筋している。スターラップは、その腐食を避けるため、軸方向鉄筋と接するスターラップ下辺にビニールテープを巻き、絶縁している。

4. 研究成果

(1) X 線技術と、デジタル画像処理方法を工夫することで、コンクリート中にある鉄筋

の非腐食域を抽出することが可能である。本研究で設定した範囲の水セメント比や供試体形状、あるいはコンクリートとモルタルの違いなどは、X 線画像に大きな影響を及ぼさない。X 線画像から推定される質量減少率は、これらの因子によらず、概ね質量測定から得られる質量減少率に近い値となることを確認した。

(2) 鉄筋腐食の進展に伴い、RC はり部材内の鉄筋腐食分布は一様でなくなり、極端に腐食が進む箇所、あるいは腐食が進まない箇所が混在するようになる。劣化 RC 部材の曲げやせん断耐力などの耐荷力評価において、この知見は極めて重要であり、今後、腐食の空間変動性を考慮した構造解析が必要であることを指摘した。本実験で得られたデータは、このような空間変動性のモデル化に使用できる。図 5 には、各鉄筋腐食量で撮影した X 線撮影結果と、その腐食量のときに RC はり底面に現れる腐食ひび割れの関係を示している。また、図 6~図 10 に各供試体から得られた鉄筋腐食分布の変化を示す。

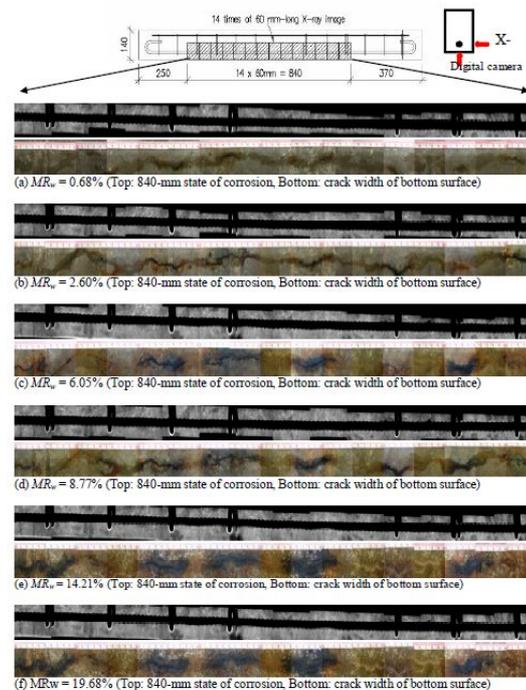


図 5 鉄筋腐食分布の X 線撮影結果

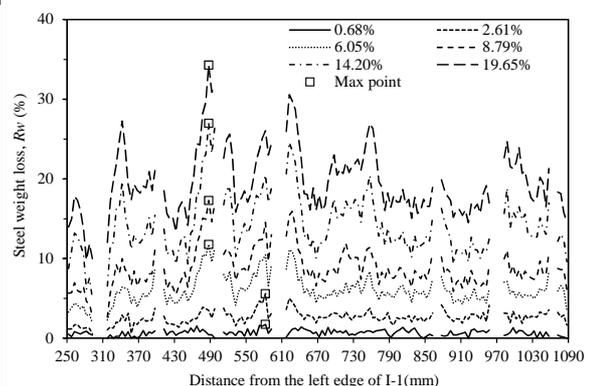


図 6 鉄筋腐食分布の変化 (供試体 I-1)

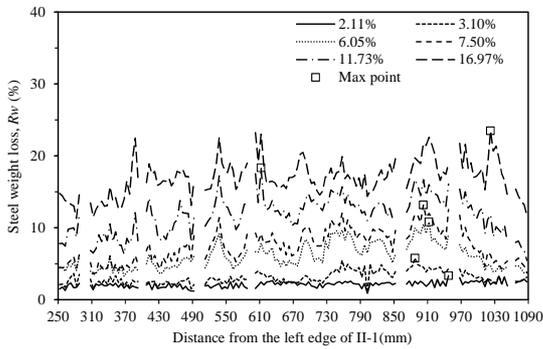


図7 鉄筋腐食分布の変化 (供試体 II-1)

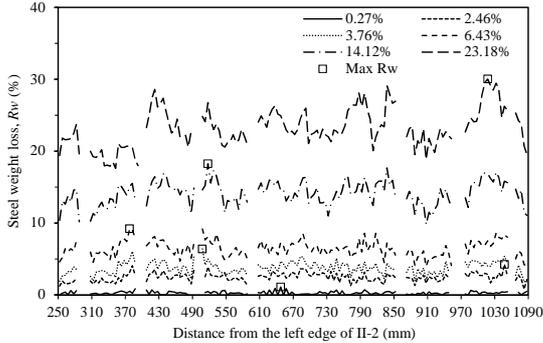


図8 鉄筋腐食分布の変化 (供試体 II-2)

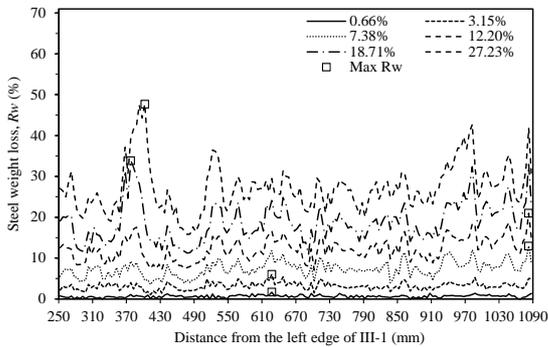


図9 鉄筋腐食分布の変化 (供試体 III-1)

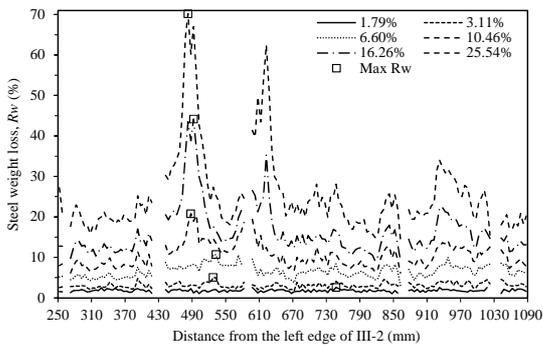


図10 鉄筋腐食分布の変化 (供試体 III-2)

図11には、RC はり内に生じている鉄筋腐食量の最大値と最小値を横軸にとり、縦軸に鉄筋腐食量の分布より求めた標準偏差の関係を示す。鉄筋腐食量の最大値と最小値の差が大きくなるほど、鉄筋腐食量のばらつきは大きくなっており、両者には強い線形関係が認められる。確率場の考えで鉄筋腐食分布を解析的に再現する際、この関係は極めて有用

なものとなる。

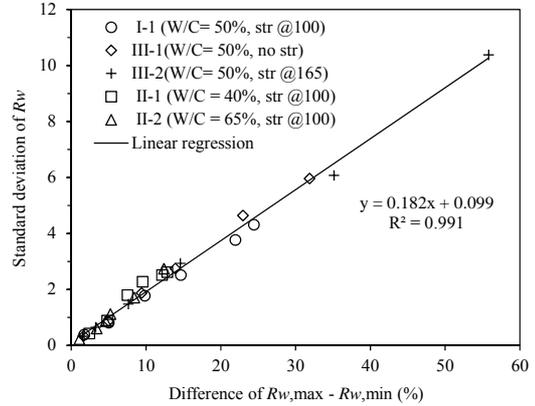


図12 鉄筋腐食分布の統計量の一例



図13 RC 曲げ載荷実験時の様子

表1 RC はりの曲げ載荷実験結果

供試体	純曲げ区間の腐食量	最大荷重の計算値 (kN)	実験最大荷重 (kN)
I-1	19.68%	17.44	18
I-2	7.66%	8.38	8.45
I-3	16.80%	8.98	11.2
II-1	16.97%	18.32	19
II-2	23.18%	16.67	17.6
III-1	27.23%	15.97	15.65
III-2	25.54%	16.33	9.3
IV-1	9.88%	9.13	9.45

全ての電食実験が終了したのち、RC はりの曲げ載荷実験を行っている。曲げ載荷試験終了後の一例を図13に示す。鉄筋腐食生成物の膨張圧により、かぶりコンクリートには腐食ひび割れが発生している関係で、鉄筋腐食のない健全なRC はりと異なり、容易にかぶりコンクリートの剥落が生じる。載荷実験により得られた各供試体の最大荷重と、その供試体の純曲げ区間に生じていた平均腐食量の関係を表1に示す。表1には、あわせて、平均腐食量から単純に鉄筋断面積を減少させ、RC断面の曲げ解析により推定される最大荷重も示している。供試体 III-2 など、供試

体によっては、平均腐食量で推定した最大荷重よりも大幅に小さい荷重で破壊する場合もあり、局所的に進展する鉄筋腐食の影響を考慮しなければならないことを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

狩野淳一, 秋山充良, 吉田郁政: 点検・検査情報を活用した既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp.81-90, 2015. (査読有)

Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Long-term seismic performance of RC structures in an aggressive environment: emphasis on bridge piers, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 7, pp. 865-879, 2014. (査読有)

竹中孔信, 萩野統也, 秋山充良, 吉田郁政: 更新理論とマルコフ連鎖モデルを用いた鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1357-1362, 2014. (査読有)

Yoshida, I. and Akiyama, M.: Particle filter for model updating and reliability estimation of existing structures, Smart Structures & Systems, Vol.11, No.1, pp.103-122, 2013. (査読有)

〔学会発表〕(計9件)

Lim, S., Jian, H., Akiyama, M. and Frangopol, D.M. 2014. Experimental investigation on the relationship between the spatial variation of steel weight loss and the cracking width of RC member using X-ray photographs. Proceedings of 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, pp. 429-436, Tokyo, Japan. Nov., 18, 2014.

Mitsuyoshi Akiyama and Dan. M. Frangopol. Long term performance of concrete bridges under extreme events. Proceedings of 9th Austroads Bridge Conference, Sydney, New South Wales, Australia, Oct. 10, 2014. (invited lecture)

宮本祥平, 萩野統也, 秋山充良: 劣化予測パラメータの空間変動性を考慮した鉄筋コンクリート構造物のライフサイクル解析に関する基礎的研究, 土木学会第 69 回

年次学術講演会, pp. 343-344, 2014.9.10

Takenaka, K., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Yoshida, I. 2014. Life-cycle reliability of RC jetties in a marine environment using Markov model and sequential Monte Carlo simulation, Proceedings of the 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp. 231-236, Shanghai, China. July, 10, 2014.

Hagino, T., Akiyama, M. and Frangopol, D.M. 2014. Reliability assessment of RC structures subjected to carbonation by incorporating spatial variations, Sustainable Development of Critical Infrastructure, 115-122, Shanghai, China, May 16, 2014.

Akiyama, M., and Frangopol, D.M. Life-cycle reliability of concrete bridges under both extreme events and hazard associated with continuous deterioration, IStructE Conference on Structural Engineering in Hazard Mitigation 2013, Shanghai, China, Oct., 31 1, 2013; 691-703. (invited lecture)

竹中孔信, 萩野統也, 秋山充良, 吉田郁政: 更新理論とマルコフ連鎖モデルを用いた鉄筋コンクリート橋の塩害劣化予測に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp. 543-544, 2013.9.4

秋山充良, 姜海涛, Lim Sopokhem: 鉄筋腐食量の空間的変動が RC 部材の曲げ耐力に与える影響に関する実験的研究, 第 16 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.317-320, Jul. 17, 2013.

M. Akiyama and Dan M. Frangopol: Life-cycle design of bridges under multiple hazards: Earthquake, tsunami and continuous deterioration, 11th ICOSSAR (International Conference of Structural Safety and Reliability), New York, USA, Jun., 18, 2013. (Early Career Keynote Lecture)

〔図書〕(計1件)

Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Matsuzaki, H. Reliability-based durability design and service life assessment of concrete structures in an aggressive environment. Chapter 1 in Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (Edited by D.M. Frangopol and Y. Tsompanakis), CRC

Press/Balkema, Taylor & Francis Group,
London, 2014, pp. 1-26. (全 738 頁)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

秋山 充良 (AKIYAMA , Mitsuyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00302191