

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

秋山 充良¹・姜 海濤²・Lim Sopokhem³

¹正会員 博（工） 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

² 早稲田大学 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

³ 早稲田大学 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

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構造性能評価において極めて重要である。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^{1), 2), 3)}。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^{4), 5)}。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。この性質を利用して、大塚・武田の研究グループは、世界に先駆け、X線技術をコンクリート構造物に適用し、フラクチャープロセスゾーンの挙動解明などを精力的に行ってきた^{6), 7), 8)}。また、近年は、X線CTを用いたコンクリート円柱供試体の撮影も行われており、骨材や空隙の三次元的な位置・寸法に関する情報の抽出も試みられている^{9), 10)}。X線により撮影された画像を適切に処理することで、これまで可視化でき

なかったコンクリート内のひび割れや骨材の分布などをとらえている。

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。この背景のもと、著者ら¹¹⁾は、X線撮影によりコンクリート部材内で生じている鉄筋腐食量の同定を試み、X線写真とデジタル画像処理を組み合わせることにより、鉄筋腐食の成長の様子を可視化でき、さらに、画像から推定される鉄筋腐食量はコンクリート中から取り出した鉄筋より実測される腐食量とほぼ同じ値となることを示した。

本研究では、このX線撮影とデジタル画像処理を用いることで、電食により腐食させたRCはりで生じている鉄筋腐食量の空間的な分布を求め、それらとRCはりの曲げ耐力の関係などについて考察する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

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¹²⁾で使用されたRCはりを参考に設計した。図-1に供試体概要および電食の様子を示す。また、表-1に各供試体の実験条件を示す。4つの供試体は、全く同じ断面諸元・寸法を有しており、電食の方法のみが異なる。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、図-1に示すように、軸方向鉄筋と接す

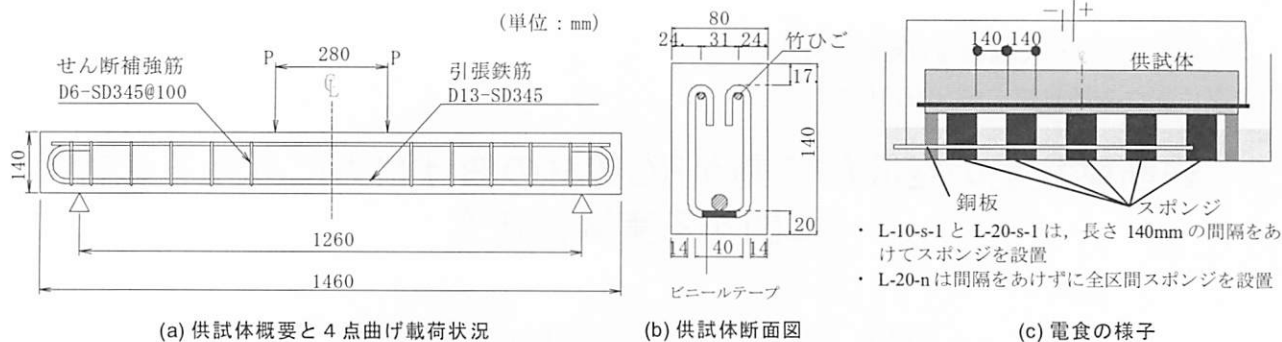


図-1 X線撮影に用いる鉄筋コンクリートはりの概要と電食の様子

表-1 各供試体の実験条件

供試体名	X線撮影時の中央 300mm 区間の平均断面減少率 (X線画像から推定) (%) ^{*1)}	腐食方法 ^{*2)}
L-0	撮影無	健全
L-20-n	0.0→0.7→2.9→9.7→19.7→25.6→27.3	一様
L-10-s-1	0.0→17.5	局所的
L-20-s-1	0.0→11.2→16.5→26.0→31.5	局所的

*1) L-0 は電食を施さない供試体であり、X線撮影を行っていない。その他の3体は、表中の数字で X線撮影を続け、その後に曲げ荷重を行っている(例えば、L-20-n では、X線撮影により純曲げ区間で 27.3%の質量減少率が生じていることを推定後、曲げ荷重実験を行っている)。*2) 「一様」とは、図-1(c)で間隔をあけずにスポンジを設置した場合であり、「局所的」とは、長さ 140mm の間隔をあけてスポンジを設置した場合を指す。

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。供試体に使用したコンクリートの圧縮強度は、電食開始日で23.9 N/mm²、曲げ荷重試験実施日で26.3 N/mm²である。使用したコンクリートの示方配合は表-2に示した。軸方向鉄筋 (D13) とスターラップ (D6) の降伏強度は、それぞれ379 N/mm² と426 N/mm²である。

本研究では、鉄筋腐食の不均一さが極端に異なる供試体をつくるため、RCはりは塩水内に直接浸水させず、供試体L-10-s-1とL-20-s-1は、図-1 (c)に示すように、スポンジを離散的に設置することで、腐食が極端に進行する領域と進行しない領域を設けている。一方、L-20-nは、全ての区間にスポンジを設置した。供試体L-0は、電食させない供試体である。供試体L-20-nとL-20-s-1は、積算電流量が所定の値に達したら供試体を水槽から取り出してX線撮影を行い、撮影後に再び水槽に戻している。供試体L-10-s-1は、荷重直前のみX線撮影している。

(2) 鉄筋腐食成長過程の観察

供試体L-20-nを対象にX線撮影した結果を図-2に示す。撮影区間は、電食試験後に行う4点曲げ荷重実験で純曲げを受ける区間 (280 mm) を含む中央 300 mmである。300 mmを50 mm間隔毎に6分割してX線撮影を行い、各画像に対してエッジ検出によるデジタル画像処理を施している。エッジ検出の概要は参考文献11)に示されている。図-2 (a)~(d)の各上段に示すX線画像は、RCはりの右側面からX

表-2 コンクリート示方配合

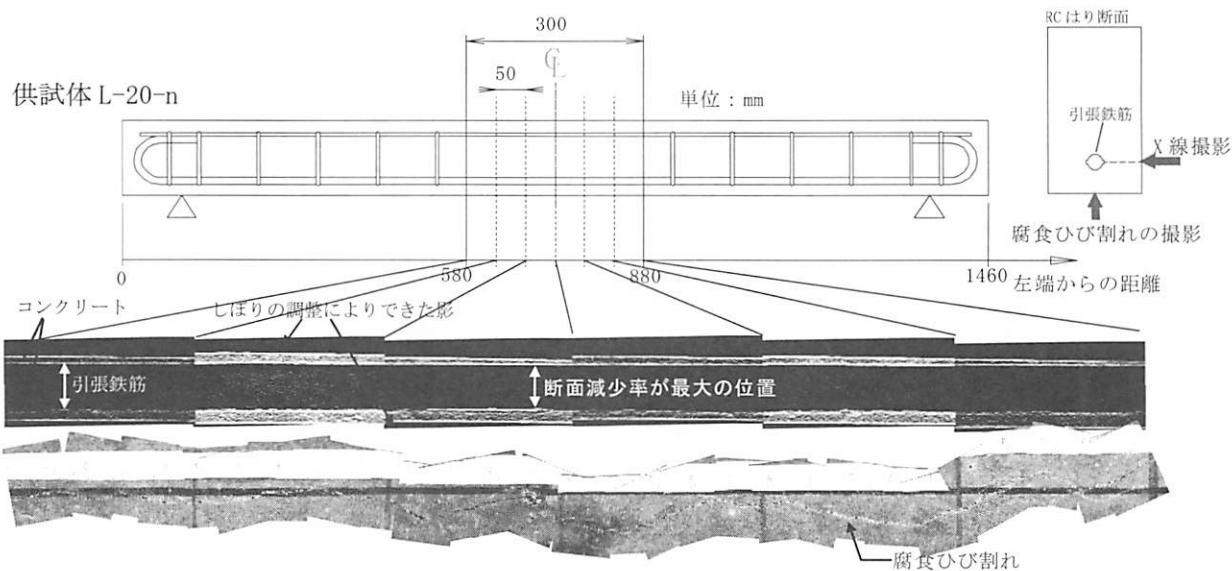
G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	混和剤
20	68	50	186	274	876	901	2.74

線を照射して撮影した。なお、ハレーションを抑えるため、鉄筋に焦点をあて、その上下にあるコンクリートができる限り写らないようにしぼりを調整した。そのため、X線画像の上下には、黒い影が撮影されている。なお、しぼりの調整は、撮影毎に行っており、影の大きさは写真毎に異なっている。

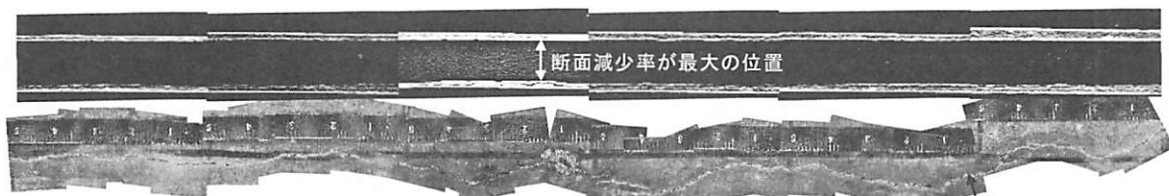
図-2 (a)~(d)の各下段には、この300 mm区間に対応したRCはりの底面 (塩水に接する面) に表れた腐食ひび割れをデジタルカメラにて撮影した写真も示している。図中にある平均断面減少率 W_{xray} は、RCはりを30度毎にX線撮影装置内で回転させ、12枚の画像から非腐食域の鉄筋体積を50mm間隔で推定し、その撮影区間 (300mm) の平均値と健全鉄筋の差から求めた値である。 W_{xray} に鉄筋密度と撮影区間長さ (300mm) を乗じた質量減少率と、曲げ荷重後にはつり出した鉄筋の質量測定値との比較は後述される。図-2に示されるように、 W_{xray} の増加とともに、電食の影響を受け易い側 (図-2 (a)~(d)のX線画像の下側) の鉄筋が劣化し、細くなっていく様子が観察され、それに対応するように、RCはりの底面に表れる腐食ひび割れ幅が大きくなっている。供試体L-20-nは、スポンジをRCはりの底面全体に設置し、電食を行っているが、鉄筋の腐食は不均一に進展した。

(3) 鉄筋腐食の空間的変動がRCはりの曲げ耐力に及ぼす影響

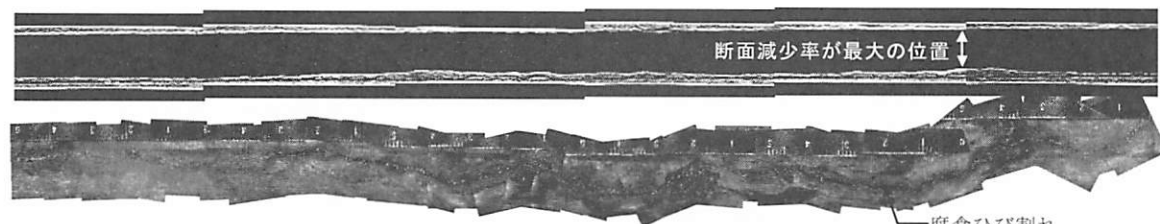
図-1 (a)に示す荷重条件にて、RCはりの4点曲げ荷重実験を行った。X線撮影により推定された純曲げ区間内の各位置の鉄筋断面減少率の分布を図-3に示す。得られた各供試体の荷重-変位関係の一覧を図-4に、また、各供試体の断面減少率と曲げ耐力の関係を表-3に示す。図-4と表-3に示されるように、純曲げ区間内で平均化した断面減少率が



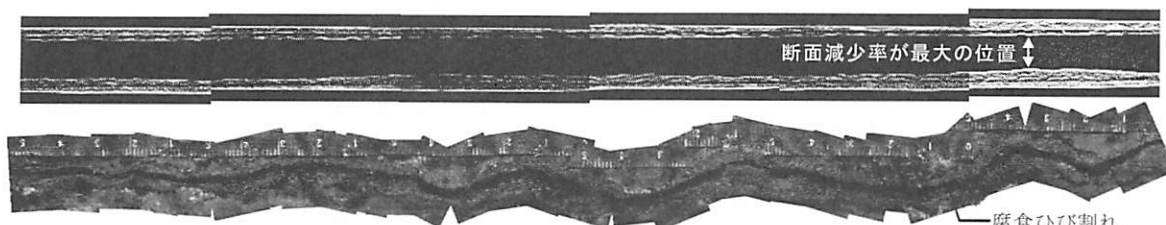
(a) $W_{\text{ray}} = 2.9\%$ (上段：スパン中央 300mm の引張鉄筋の腐食の様子，下段：はり底面に表れた腐食ひび割れ)



(b) $W_{\text{ray}} = 9.7\%$ (上段：スパン中央 300mm の引張鉄筋の腐食の様子，下段：はり底面に表れた腐食ひび割れ)



(c) $W_{\text{ray}} = 19.7\%$ (上段：スパン中央 300mm の引張鉄筋の腐食の様子，下段：はり底面に表れた腐食ひび割れ)



(d) $W_{\text{ray}} = 27.3\%$ (上段：スパン中央 300mm の引張鉄筋の腐食の様子，下段：はり底面に表れた腐食ひび割れ)

図-2 純曲げ区間内の引張鉄筋の腐食進展と腐食ひび割れ幅の成長

概ね等しいL-20-nとL-20-s-1の挙動は全く異なるものであり，一方で，純曲げ区間内の最大の断面減少率が概ね等しいL-20-nとL-10-s-1は，最大荷重が概ね等しいものの，変形性能は，純曲げ区間内で平均化した断面減少率が小さいL-10-s-1の方が優れていることが図-4より確認される。

現状は，わずか3体の実験結果であり，定性的な考察しか提示できないが，本実験の範囲では，曲げ

耐力は純曲げ区間の最大の断面減少率，変形性能は純曲げ区間で平均化された断面減少率に依存する結果となった．RC部材の曲げ耐荷性状は，鉄筋の断面減少が最小となる位置とその大きさに依存することを，齊藤ら¹³⁾は数値解析による検討に基づき報告している．今後，解析的検討も行うことで，鉄筋腐食の空間分布と耐荷力の関係などについての知見を蓄積したい。

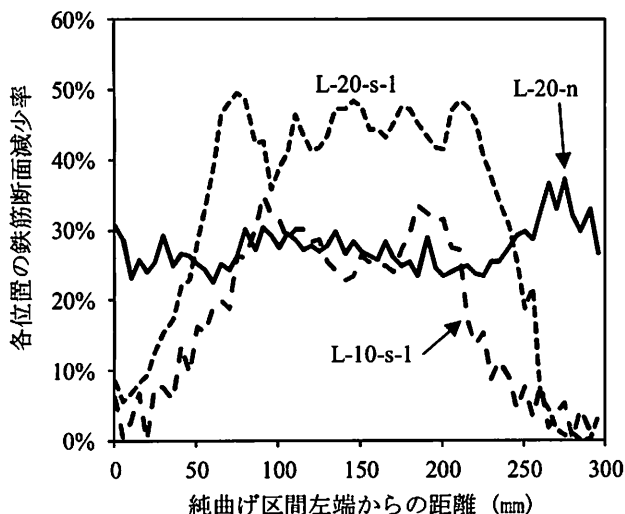


図-3 曲げ載荷時の各供試体の鉄筋腐食の分布

表-3 断面減少率と曲げ耐力（最大荷重）の関係

供試体名	断面減少率 ^{*)} (%)		質量減少率 ^{*)} (%)	最大荷重 (kN)
	平均値	最大値		
L-0	—	—	—	22.8
L-20-n	27.3	37.1	29.9	17.7
L-10-s-1	17.5	34.9	21.4	18.6
L-20-s-1	31.5	49.4	33.8	8.6

*1) 中央 300mm 区間の X 線撮影による鉄筋の断面減少率の推定値

*2) 曲げ載荷試験の終了後、供試体からはり出し鉄筋より測定

3. まとめ

今後、電食と実環境や乾湿繰り返し環境に暴露される RC はりで生じる鉄筋腐食の成長過程の違いや、せん断補強鉄筋が腐食ひび割れ幅の成長に及ぼす影響など、本研究で検討できていない内容についての継続的な研究が必要である。しかし、本研究で実施した基礎検討から、RC はりを X 線撮影することで、部材内の鉄筋腐食成長過程の観察、鉄筋腐食の不均一さの形成過程と不均一さの程度のモデル化に必要な情報の入手、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係、また、鉄筋腐食の分布と曲げ耐力の関係などの考察が可能であることが示された。

参考文献

- 1) Darmawan, M. S., and Stewart, M. G. : Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders, Structural Safety, Vol. 29, pp. 16-31, 2007
- 2) Val, D. V., and Chernin, L. : Serviceability reliability of reinforced concrete beams with corroded reinforcement, Journal of Structural Engineering, Vol. 135, No. 8, pp. 896-905, 2009
- 3) 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，コンクリート技術シリーズ71，2006.

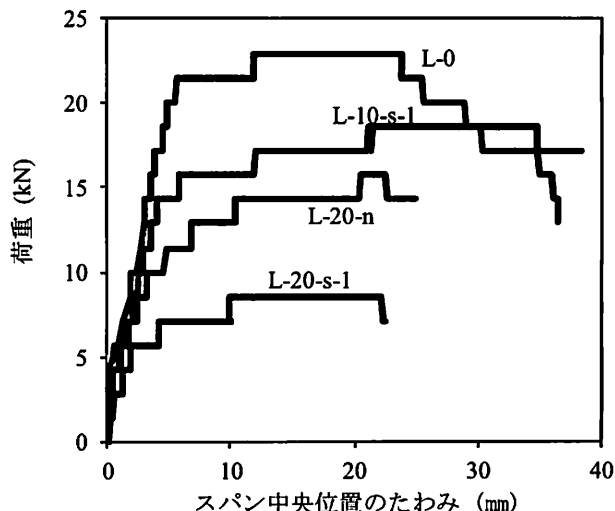


図-4 各供試体の荷重－たわみ関係

- 4) Akiyama, M., Frangopol, D. M., and Yoshida, I. : Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, Engineering Structures, Vol. 32, No.11, pp.3768-3779, 2010
- 5) Vidal T., Castel A., and François R. : Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 165-174, 2004
- 6) Otsuka, K., and Date H. : Fracture process zone in concrete tension specimen, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, pp. 111-131, 2000
- 7) 武田三弘，大塚浩司：X線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究，土木学会論文集，No. 725/ V-58, pp. 143-156, 2003.
- 8) 武田三弘，大塚浩司：X線造影撮影によるコンクリート強度の推定，土木学会論文集E，Vol. 62, No. 2, pp. 376-384, 2006.
- 9) 天明敏行，堤知明，村上祐治，尾原祐三：X線CT法によるコンクリート供試体の非破壊検査，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1643-1648, 2003.
- 10) 若木伸也，高橋良和，澤田純男：X線撮影を用いたコンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出，土木学会地震工学論文集，Vol. 30, pp. 399-405, 2009.
- 11) Akiyama, M., and Frangopol, DM.: Estimation of steel weight loss due to corrosion in RC members based on digital image processing of X-ray photogram, IALCCE (International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering), Vienna, Austria, 2012.
- 12) 土木学会コンクリート委員会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ85，2009.
- 13) 斉藤成彦，高橋良輔，檜貝勇：鉄筋の腐食分布がRC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響，土木学会論文集E，Vol. 64, No.4, pp. 601-611, 2008.