

論文 RC 部材における鉄筋腐食の定量的評価方法に関する研究

木村 哲士¹・丸山 久一²・濱田 宏³

要旨:本研究では、主鉄筋の腐食により発生する腐食ひび割れに関して、スターラップなどでひび割れが拘束される場合のひび割れの性状、腐食量とひび割れ幅の関係、過去に提案されたひび割れモデルの妥当性を確認することを目的に実験、検討を行った。その結果、スターラップにはひび割れの発生を抑える効果があること、拘束があっても腐食量とひび割れ幅の関係には直線的な関係があること、腐食区間長が短くなると周辺のコンクリートの拘束によって同一腐食量におけるひび割れ幅が小さくなることが確認できた。また、ひび割れモデルは、腐食量とひび割れ幅の関係をある程度再現していることがわかった。

キーワード:鉄筋の腐食量、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れモデル、評価方法

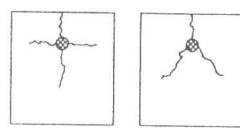
1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物をはじめとして劣化したコンクリート構造物の補修をする場合、いつ、どうやって、どんな補修をするかを決定することは非常に難しい問題である。一般に、構造物の劣化診断をする場合に行われる調査方法はたくさんあるが、文献[1]によると、目視検査、打診、クラックスケール等におけるひび割れの調査などの外観調査が数多く実施されていることが報告されている。既往の研究[2][3]では目視で観察できる劣化の状況を重要視し、観察できる事象から劣化レベルを推定できるか否かを検討してきた。これまでの室内実験では、鉄筋の腐食量とコンクリート表面のひび割れ幅に直線的な関係があることが確認できた。また、ひび割れのパターンをモデル化することによって内部の鉄筋の腐食量からひび割れ幅を算定する計算式を提案した。本研究では、既往の研究の結果を踏まえ、どこが、どの程度腐食しているかを推定するための一段階として、実構造物に近い配筋状態の供試体を用いることによりスターラップなどがひび割れに与えていく影響を明確にし、ひび割れから内部鉄筋の腐食の程度を推定できるか否かを実験的に検討したものである。

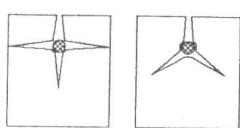
2. ひび割れのモデル

ここでは、室内実験の結果からひび割れモデルの妥当性を確認するため、ひび割れのモデルについて説明する。

既往の研究[2]では、内部の腐食量を知るための手段としてひび割れ幅に着目し、腐食量とひび割れ幅の関係をモデル化した。実験結果よりひび割れパターンは図-1に示すとおり2通りに分類され、このひび割れ状況をモデル的に表すと



(a) (b)



(a) (b)

図-1 ひび割れパターン

¹ ショーボンド建設(株)、工修(正会員)

² 長岡技術科学大学教授、Ph.D. (正会員)

³ 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

図-2の様になる。このモデルを使用すると鉄筋の腐食量とひび割れ幅の関係は次式で表される。

$$\delta = (a \cdot \Delta \theta + u \cdot \cos \beta) \\ = 2u [\cos \beta + a \cdot (\cos \alpha + \cos \beta) / \{h + u \cdot (\sin \alpha - \sin \beta)\}] \quad (1)$$

ただし、 $u_0 = u - u_0$ とする

u_0 ：ひび割れ発生時の腐食変位 (cm)

鉄筋が一様に腐食しているものと仮定すれば、腐食による実際の変位は式(2)で表される。既往の研究[2]では腐食生成物が健全な鉄筋の表面に堆積していくような形であったため、腐食による断面の欠損が考慮に入っていたなかった。このような場合、鉄筋の腐食が大きくなつた時に腐食変位がかなり大きめに算定されてしまいひび割れ幅が過大になることが予想される。そこで、腐食変位の式を図-3に示すような断面をモデルとした式に拡張した。

$$u = t_2 - t_1 \quad (2)$$

ここで、 t_1 ：腐食によって失われる厚さ (cm)

t_2 ：腐食による錆の厚さ (cm)

$$t_1 = \phi - (\phi_2 - 4W_{ca} \cdot \phi / \rho_s)^{0.5}/2 \quad (3)$$

W_{ca} ：単位表面積あたりの腐食量

ϕ ：鉄筋径 (cm)

ρ_s ：鉄の密度 7.85 (g/cm³)

$$t_2 = -(\phi - 2t_1) + ((\phi - 2t_1)/2 + 4W_{ca} \cdot (\phi - 2t_1)/\rho)^{0.5}/2 \quad (4)$$

ρ ：錆の密度 (g/cm³)， $\rho = \rho_s$ /腐食膨張率

3. 電食実験

3.1 材料および供試体

今回の実験で使用した供試体は、スターラップ間隔と腐食区間、腐食レベルを変化させた計16種類である。供試体形状を図-4に、供試体シリーズを表-1に示す。腐食区間を変化させるシリーズでは、主鉄筋の腐食区間が供試体中央に位置

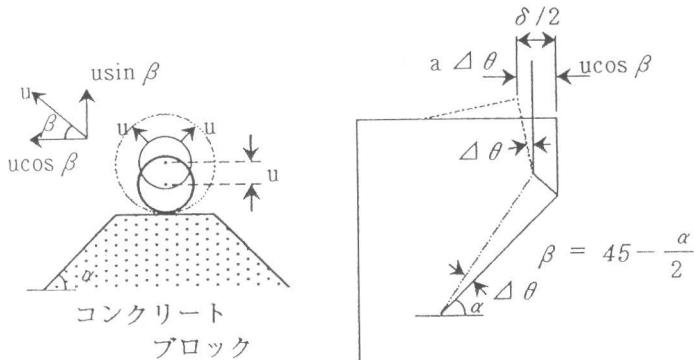
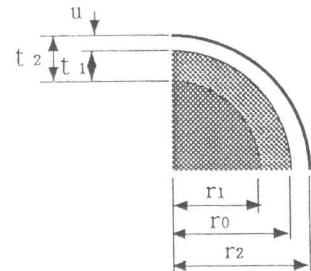


図-2 ひび割れモデル (腐食変位と変形の関係)



r_1 ：腐食後の純断面

r_0 ：腐食前の断面

r_2 ：腐食後の断面

図-3 腐食後の鉄筋断面

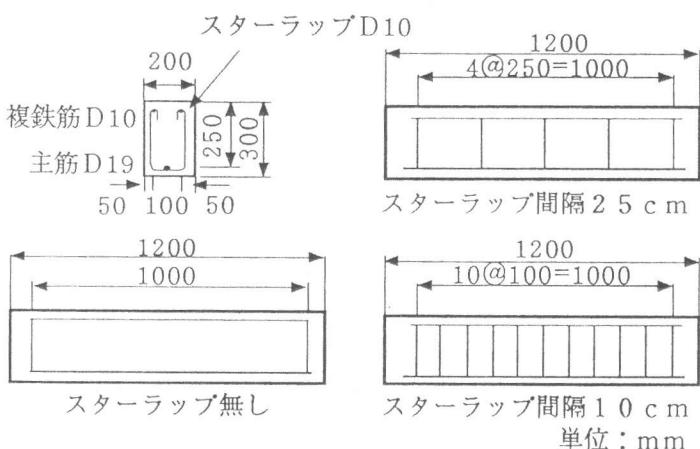


図-4 供試体形状

表-1 実験供試体

スターラップ間隔をパラメータとするシリーズ

腐食区間 (cm)	目標ひび割れ幅 (cm)	スターラップ間隔 (cm)
100	0.1	10
	0.3	10
	0.5	10
	0.1	25
	0.3	25
	0.5	25
	0.3	なし

腐食区間をパラメータとするシリーズ

腐食区間 (cm)	目標ひび割れ幅 (cm)	スターラップ間隔 (cm)
5	0.1	25
	0.3	25
	0.5	25
25	0.1	25
	0.3	25
	0.5	25
50	0.1	25
	0.3	25
	0.5	25

するようにし、非腐食区間

が発錆しないようにウレタン塗料にて塗装した。また、

スターラップも非腐食区間と同様に発錆しないよう塗装した。ウレタン塗装によりスターラップとコンクリー

トとの付着が小さくなることが考えられるが、主筋の腐食量とひび割れ幅の関係を明確にすることを優先した。

コンクリートは呼び強度29.4MPa、スランプ10cmのレディーミキストコンクリートを使用した。示方配合を表-2に示す。

表-2 示方配合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	単位量 (kg/m³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
46.0	36.4	146	318	673	1233	3.34

3.2 実験方法

電食試験装置を図-5に示す。供試体を水槽の中にいれ、主筋に陽極、側面に配置した銅極板を陰極とし、直流安定化電源を使用して通電した。水槽内の電解液は腐食を促進するため海水相当の食塩水 (NaCl 3 %) を使用した。電流値は一定時間ごとにデータロガーを通して測定し、積算電流量を求めた。

通電が進むと主筋に沿ってひび割れが発生するので、ひび割れ長さとひび割れ幅を計測し (5cmごとにクラックスケールで計測) 、平均ひび割れ幅を算出した。所定のひび割れ幅になったところで電食試験を終了する。

電食試験終了後、鉄筋を取り出し、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し錆を落した後、重量を測定し、腐食量を求めた。

4. 結果および考察

4.1 ひび割れの位置的変化

図-6にひび割れ幅の位置的変化の一例を示す。この図は、ひび割れ幅を測定した位置とひび割れ幅の関係を表したもので、スターラップ間隔と平均ひび割れ幅が同一で腐食区間の違うものについて示している。この図より、供試体全体で腐食している腐食区間100cmと腐食区間50、

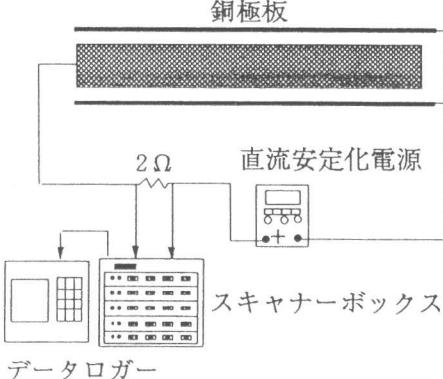


図-5 電食試験装置

25cmのものはあきらかに異なることがわかる。しかし、腐食区間50cmと25cmの違いは明確には認められなかった。

4.2 ひび割れ幅とひび割れ長さの関係

図-7にひび割れ幅とひび割れ長さの関係を示す。この図から、ひび割れ長さがある程度長くなるまではひび割れ幅は大きくならないことがわかった。これは、ひび割れが腐食区間の外側に位置するスターラップ付近に達するまではひび割れ長さが長くなり、ひび割れがその位置で拘束されると、ひび割れ幅が拡大するためではないかと推測される。

ひび割れからどこが腐食しているかを推定する場合、この関係を利用すれば腐食区間をある程度推定できると思われるが、非常に大まかなものでしかない。また、ひび割れ幅が小さい場合には腐食区間長が違っていても同じような傾向を示すのでさらに曖昧なものになることが予想される。現状では、ひび割れから得られる情報だけで腐食区間を推定することは難しいことがわかった。

4.3 ひび割れ幅と腐食量の関係、スターラップの影響

(1) スターラップ間隔を変化させた場合 (腐食区間100cm)

図-8にスターラップ間隔を変化させたシリーズの腐食量とひび割れ幅の関係を示す。同図中に式(1)による計算結果もプロットした。この図より、スターラップ間隔が狭いと同一腐食量において小さいひび割れ幅になっているが、顕著な差はみられなかった。次に、スターラップ間隔とひび割れ発生時の積算電流量の関係を図-9に示す。

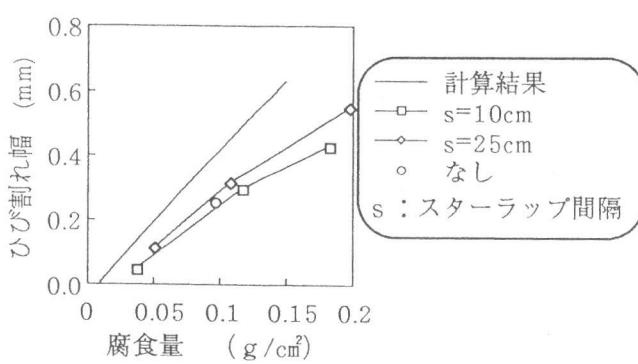


図-8 腐食量とひび割れ幅の関係

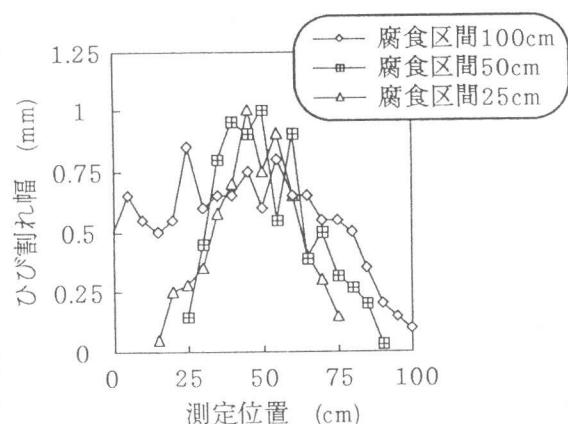


図-6 ひび割れ幅の位置的変化

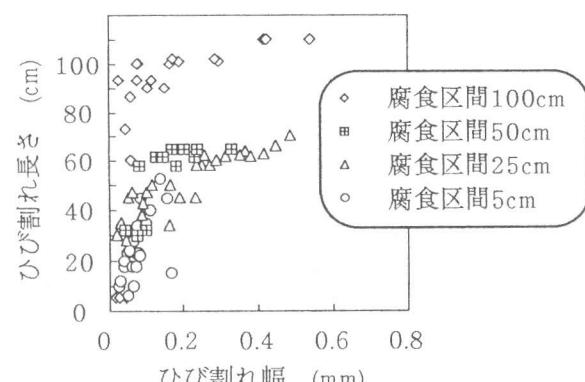


図-7 ひび割れ幅とひび割れ長さの関係

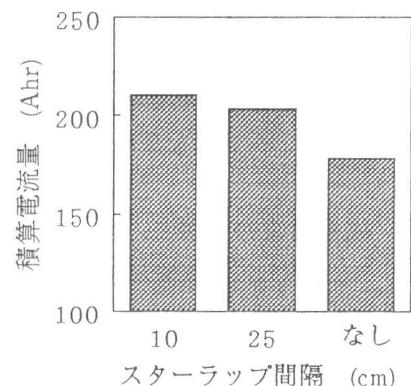


図-9 ひび割れ発生時の積算電流量

スターラップの間隔が狭くなるとひび割れ発生時の積算電流量が大きくなっていることがわかる。積算電流量と腐食量は比例関係にあることが確認されているので[2][3]、スターラップ間隔が狭いほどひび割れの発生が抑えられていると考えることができる。以上のことからスターラップ間隔を変化させてもひび割れの成長には顕著な影響はないが、ひび割れの発生を抑制していることがわかった。

次に、ひび割れモデルの妥当性について考察する。図-8中の計算値は、式(1)に実際に測定した値を代入して求めた。計算に使用した値を表-3に示す。

腐食膨張率は、文献[4][5]を参考にして電食試験での腐食膨張率を2.0程度に仮定した。

ひび割れモデルは腐食区間100cmの供試体の腐食量とひび割れ幅の関係をある程度再現している。ただし、同一腐食量で少し大きなひび割れ幅を算出していることがわかる。ひび割れ幅から腐食量を推定する場合、腐食量をかなり過小に評価してしまうことになる。計算結果と実験の違いとして、第一に、ひび割れ発生腐食量が違うことが考えられる。第二に、電食試験中コンクリート表面への錆の析出が激しかったため錆が鉄筋の表面に堆積しきれていない可能性が大きいことが考えられる。ひび割れ発生腐食量は一般的に、かぶり4cmでスターラップがない場合、6~10mg/cm²程度といわれている[4][5]。しかし、スターラップ量が多くなるとひび割れ発生積算電流量が大きくなることから、スターラップがある場合にはひび割れ発生腐食量がもっと大きいのではないかと考えられる。

(2) 腐食区間を変化させた場合

腐食区間を変化させたシリーズの結果は、図-10のようになった。腐食区間が短くなつても腐食量とひび割れ幅の関係には直線的な関係があること、腐食区間が短くなると同じ腐食量でもひび割れ幅が小さくなることが確認できた。これは腐食区間が短いため、コンクリートを変形させるのにより大きな腐食量を必要とするためである。

図-10のグラフの傾きに何らかの関係があるか否かを調べたのが図-11である。この図は図-10中のプロットされた点を、ひび割れ発生腐食量を通る直線で近似した時(図-10中の実線)のグラフの傾きをプロットしたものである。この図から、腐食区間長とグラフの傾きには比例関係にあることが確認できた。このことから、部材全区間で腐食

表-3 計算に使用した値

ひび割れ角度 α (°)	ひび割れ長さ h(cm)	腐食膨張率	ひび割れ発生時 腐食変位 u_0 (cm)
0.00	6.00	2.00	0.00122

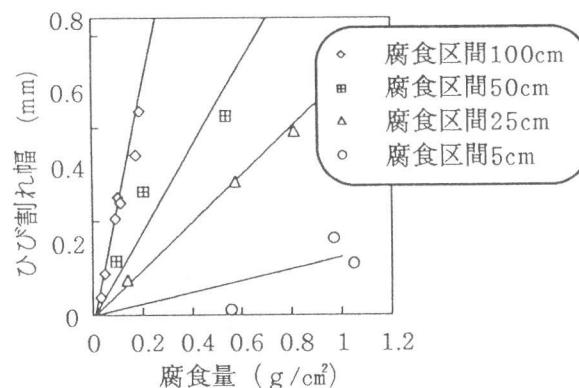


図-10 腐食量とひび割れ幅の関係

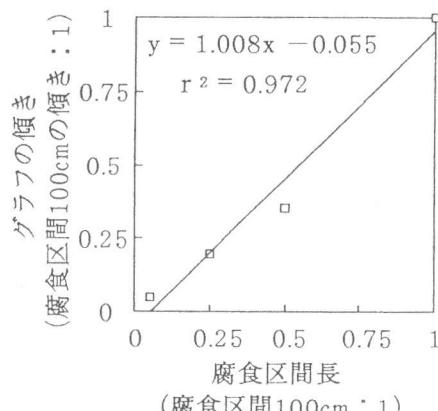


図-11 腐食区間長と
グラフの傾きの関係

している場合の腐食量とひび割れ幅の関係が得ることができれば、部分的に腐食した場合の腐食量とひび割れ幅の関係を得ることができる可能性があるといえるだろう。この関係が一般のRC構造物に適用できれば、ある程度腐食量を推定できると考えられる。ただし、腐食区間長とひび割れ発生腐食量がどの程度かが明確でないと推定精度が極端に悪くなる。また、ひび割れ幅の成長にはひび割れを拘束する因子（スターラップなど）が密接に関係しているため、腐食区間の位置、長さおよびスターラップ量を変化させ、さらに検討を進める必要がある。

5. まとめ

本研究では、腐食レベルを推定するための一階級として、スターラップの拘束や腐食区間長がひび割れの幅や長さに与える影響について電食試験を行って検討した。さらに、ひび割れのモデルと実験結果を比較し、モデルの妥当性について検討を加えた。

その結果、以下に示すことがわかった。

1. ひび割れから得られる情報で腐食している位置を推定することはある程度可能であるが、かなり大まかにしか推定できない。特にひび割れ幅が小さい場合には曖昧なものになる。
2. スターラップ間隔を変化させてもひび割れの成長（幅）には顕著な影響はないが、ひび割れの発生を抑制していることがわかった。
3. ひび割れのモデルは腐食区間100cmの供試体の腐食量とひび割れ幅の関係をある程度再現している。ひび割れ幅から腐食量を推定する場合には、ひび割れ発生時の腐食量を正確に推定しなければならないことが確認できた。
4. 腐食区間が短くても腐食量とひび割れ幅の関係には直線的な関係があり、腐食区間が短くなると同じ腐食量でもひび割れ幅が小さくなることが確認できた。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学会：鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術、日本コンクリート工学会,pp.13-15,1989.1
- [2] 田森清美、丸山久一、小田川昌史、橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.10,No.2,pp.505-510,1988
- [3] 高岡祐二、丸山久一、清水敬二、中田泰広：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.11,No.1,pp.591-596,1989
- [4] 長沼清、関博、高橋宏直：異形鉄筋の腐食とコンクリートのひび割れ、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集,第五部,pp.591-596,1987
- [5] 須田久美子、MISARA Sudhir、本橋健一：腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.14,No.1,pp.591-596,1992