

論文 鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討

岡崎 雅弘^{*1}・下村 匠^{*2}・松尾 洋^{*3}

要旨：塩害によるコンクリート内部の鉄筋の腐食量とコンクリート表面の腐食ひび割れ幅について、部材軸方向の非一様性に着目して検討を加えた。通電により鉄筋を腐食させた室内実験結果を分析するとともに、腐食量から腐食ひび割れ幅を予測する方法を検討した。腐食量および腐食ひび割れ幅ともに鉄筋軸方向に一樣ではないが、そのばらつきの程度は腐食レベルによらずほぼ一定であること、ひび割れ幅の軸方向平均値は腐食量の軸方向平均値を剛体モデルに用いて予測した値よりも小さいことを明らかにした。

キーワード：塩害、腐食、腐食ひび割れ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化過程を予測する一般的なフローには、内部鋼材の腐食量からかぶりコンクリートの腐食ひび割れ幅を算定するステップが含まれる。そこでは、両者の一般性のある定量関係が必要となる。

鋼材の腐食量から腐食ひび割れ幅を予測する既往のモデルには、供試体の実験結果に基づき両者の関係を定式化したもの、破壊力学的モデルに代表されるように現象を力学モデルにより表したものなどいくつかあるが、それらの多くは、鉄筋の腐食、かぶりコンクリートの腐食ひび割れともに、現象を部材軸方向に一樣とみなす仮定に基づくものである¹⁾²⁾。現段階では腐食量の分布が精密に予測できないこと、腐食量やひび割れ幅の空間的非一様性が構造物の性能に具体的にどう影響するのか明らかでないことを鑑みると、現状では部材軸方向に一樣とみなす仮定を設けることにも合理性が認められる。

しかし、現実には、巨視的には境界条件が部材軸方向に一樣とみなされる場合でも、鉄筋の腐食量は軸方向に一樣ではなく、腐食ひび割れ幅も位置によって異なる。簡便な計算モデルを用いる場合であっても、その前提と適用限界を

正しく把握しておくことが重要であると考えられる。そこで本研究では、著者らが過去に行った鉄筋コンクリート供試体の腐食試験結果に対して、鉄筋の腐食量とコンクリート表面の腐食ひび割れ幅について、特に部材軸方向の分布の観点から再検討を加える。その結果を踏まえ、腐食ひび割れ幅予測手法についても検討する。

2. 実験概要

2.1 RC一軸供試体と単体鉄筋の腐食試験³⁾⁴⁾

(1) 供試体

RC一軸供試体は、100×100×1000mmのコンクリート角柱の中心にD19異形鉄筋を1本埋め込んだものである(図-1)。通電する積算電流量を実験変数として、表-1に示す種類の供試体を試験した。平行して鉄筋単体の電食試験も行った。実験水準を表-1に示す。

RC一軸供試体は、すべての同一配合のコンクリート(水セメント比55%)を使用して作製した。RC1シリーズの供試体はコンクリート打設後11週間、RC2シリーズの供試体は4週間、実験室内において湿布養生を行い、その後鉄筋を腐食させた。表-1中に示したコンクリート強度は腐食試験後に測定した値である。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻(正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博(正会員)

*3 (株)浜田建設(正会員)

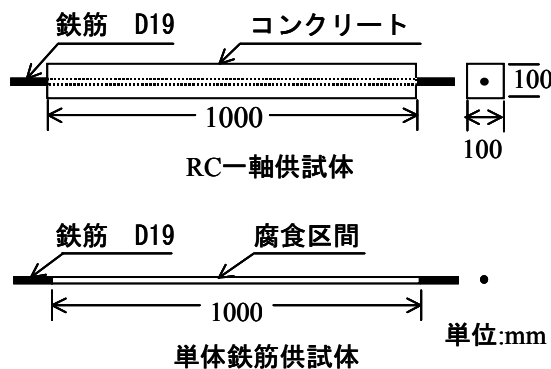


図-1 RC一軸供試体と単体鉄筋供試体の形状・寸法

表-1 RC一軸供試体および単体鉄筋供試体の種類

種類	供試体名	積算電流量 (A・hr)	コンクリート 28日圧縮強度 (N/mm ²)
RC一軸 供試体	RC1-1	44.5	40.20
	RC1-2	107.7	
	RC1-3	202.7	
	RC1-4	346.8	
	RC2-1	1.2	26.30
	RC2-2	25.0	
単体鉄筋	S3-1	45.8	—
	S3-2	108.6	
	S3-3	209.2	
	S3-4	347.0	

(2) 腐食試験

供試体中の鉄筋は、電解液中で強制的に鉄筋に直流定電流を通電させることにより腐食させた。RC一軸供試体、単体鉄筋ともに腐食区間のみ水槽中に入るようにし、両端部は水槽に穴を開けて気中に出した。電解液は海水相当の食塩水 (NaCl 3%) とした。電流の大きさは、電源装置の限界に近い 0.65A に設定した。

各供試体の腐食の程度は、積算電流量を目安として調整した。目標とした積算電流量に達した供試体は、水槽より取り出し通電を終了した。

(3) 腐食量とひび割れ幅の測定

腐食ひび割れが生じた供試体は、側面 4 面においてひび割れ幅の分布を鉄筋軸方向に 50mm 間隔でクラックスケールにより計測した。コンクリートから鉄筋をはつり出し、鉄筋径を 50mm ごとに計測し、腐食後の鉄筋断面積の軸

方向分布を求めた。また、鉄筋重量の減少量より、腐食区間における平均腐食量を算出した。

2.2 RC はり供試体の腐食試験⁵⁾

(1) 供試体

スターラップ間隔と腐食レベルを変化させた計 7 体の RC はり供試体を試験した。供試体形状を図-2 に、供試体の種類を表-2 に示す。引張主鉄筋に D19 を使用した。主鉄筋のかぶりは 40.5mm となる。主鉄筋の中央 1000mm を腐食区間とした。スターラップは腐食しないように、ウレタン系塗料を塗布し、その上からビニールテープを巻いた。

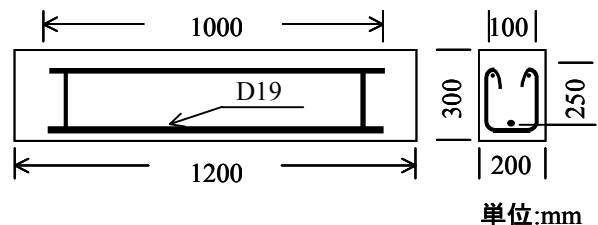


図-2 RCはり供試体 (SU0) の形状・寸法

表-2 RCはり供試体の種類

供試体名	スターラップ間隔 (mm)	目標ひび割れ幅 (mm)	コンクリート 28日圧縮強度 (N/mm ²)
SU0	無し	0.3	33.2
SU10-1	100	0.1	32.1
SU10-2		0.3	27.1
SU10-3		0.5	30.9
SU25-1	250	0.1	30.9
SU25-2		0.3	31.5
SU25-3		0.5	29.7

(2) 腐食試験およびひび割れ幅の測定

供試体中の鉄筋は、2.1(2)と同様、通電により腐食させた。本実験シリーズでは、通電中の適当な時間ごとに供試体を水槽より取り出し、底面の腐食ひび割れ幅の分布を鉄筋軸方向に 50mm 間隔で計測した。軸方向の平均ひび割れ幅が各供試体の目標とする値に達したら、通電を終了した。その後コンクリート中から鉄筋を取り出し、錆を落とした後、重量を測定し、腐食区間における平均腐食量を求めた。

3. 腐食量と腐食ひび割れ幅の軸方向非一様性に関する検討

3.1 鉄筋の腐食量

腐食試験終了後の RC 一軸供試体より取り出した鉄筋の、腐食後の鉄筋断面積分布の測定結果の例を図-3 に示す。腐食量は鉄筋軸方向に一定ではないことがわかる。

腐食前に比べた鉄筋断面積の減少量から各位置の腐食量（消費された量）を計算し、これを $1\text{mg}/\text{mm}^2$ ごとに階級分けし、度数分布を描いた例を図-4 に示す。平均値と標準偏差より定まる正規分布曲線を重ねて描いた。

このようにして計算される腐食量の軸方向分布における平均値と標準偏差を、RC 一軸供試体（RC1, RC2 シリーズ）、および鉄筋単体（S シリーズ）の全供試体について求め、プロットしたのが図-5 である。ここで、本実験に用いた D19 鉄筋の場合、腐食量 $1\text{mg}/\text{mm}^2$ が鉄筋断面積減少率 2.65%に相当する。

図-5 によると、全供試体を通じて、腐食量の平均値が大きくなるにつれて標準偏差も大きくなる傾向がみられる。そして、平均値と標準偏差の間には、大略的には、比例関係が認められる。つまり、腐食量の平均値が大きくなっても、軸方向分布の非一様性の程度（変動係数）はほぼ一定であることを示している。

また、図-5 では、RC 一軸供試体（RC1, RC2 シリーズ）、および鉄筋単体（S シリーズ）の実験結果は、同一傾向を示している。このことは、本実験においては、鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食の軸方向分布の非一様性は、コンクリートの有無に起因したものではないことを示している。

ただし、本実験では、鉄筋に強制的に通電させて腐食させたので、自然環境下における腐食とは異なると考えられること、軸方向非一様性の原因となると考えられるコンクリートの曲げひび割れ等がない状態で腐食させていることから、実験結果にみられる傾向が、そのまま直ちに実構造物にあてはまるわけではない。

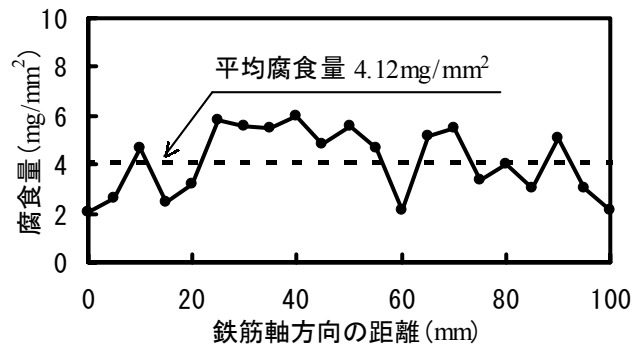


図-3 腐食量の軸方向分布 RC1-3

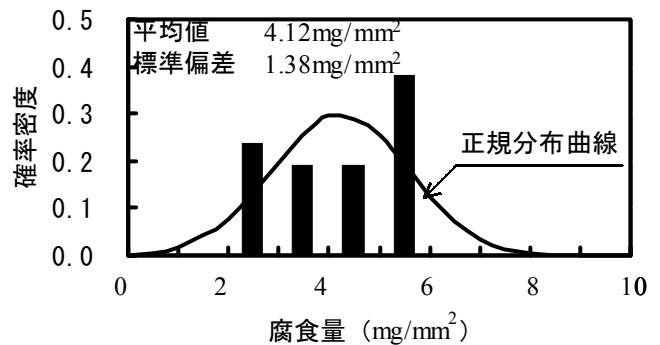


図-4 腐食量の確率分布 RC1-3

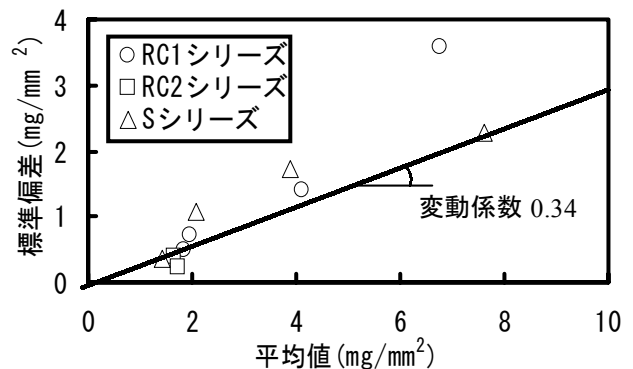


図-5 RC一軸供試体と単体鉄筋の腐食量の平均値と標準偏差の関係

3.2 腐食ひび割れ幅

腐食ひび割れが発生した RC 一軸供試体は RC1-2, 3, 4 の 3 体であった。このうち供試体 RC1-2 は 1 つの側面に、供試体 RC1-3, 4 では 4 面にひび割れが発生した。これらを統一的に扱うために、RC 一軸供試体の腐食ひび割れ幅は、4 面のひび割れ幅の合計値をその断面でのひび割れ幅として、データ整理を行った。

RC はり供試体では、底面のひび割れ幅のみを問題とした。

腐食ひび割れ幅の軸方向分布の測定結果から、腐食量の場合と同様に、平均値と標準偏差を求めた。図-6は、RC一軸供試体、RCはり供試体のすべてにおける、腐食ひび割れ幅の軸方向平均値と標準偏差の関係をプロットしたものである。RCはり供試体を用いた実験では、ひとつの供試体から複数の腐食段階でのひび割れ幅の分布のデータを採取するので、データ数が多い。

腐食ひび割れ幅についても、全データを通じて、平均値と標準偏差の間に一意的な比例関係が認められる。スターラップの有無および間隔が、主鉄筋の腐食による腐食ひび割れ幅の非一様性に及ぼす影響は認められなかった。また、RC一軸供試体とRCはり供試体の実験結果は同一傾向を示した。

腐食ひび割れ幅の変動係数は64%で、腐食量の変動係数34%よりも大きな値となった。この差異は、コンクリート表面の腐食ひび割れ幅は、その直下の鉄筋の腐食量のみで決まるのではないことを示している。軸方向のひび割れ進展がその一因であると考えられる。

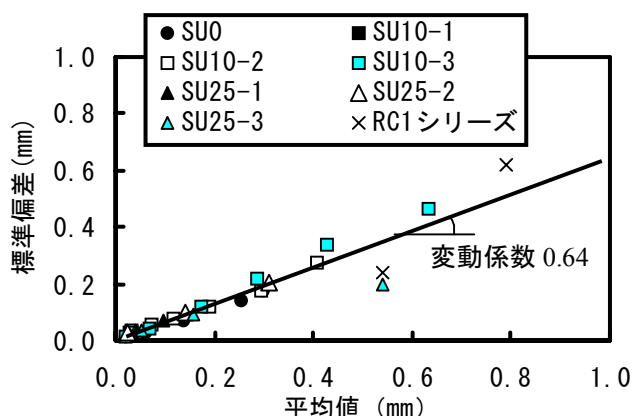


図-6 ひび割れ幅の平均値と標準偏差の関係

4. 腐食ひび割れ幅予測モデルの検討

4.1 検討方法

内部鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの腐食ひび割れの発生および開口幅を予測するモデルは、これまでいくつか提案されている¹⁾²⁾。その多くは、鉄筋軸方向に現象を一様とみなした二次元モデルであり、その中には、コンクリー

トの構成則、ひび割れのモデル化の方法、数値解析法の違いによって様々なものがある。

一方、今回の検討の結果、鉄筋腐食、腐食ひび割れともに、軸方向に一樣な現象ではないことが確認された。二次元モデルで腐食量とひび割れ幅の関係を予測する場合、面外（鉄筋軸）方向の非一様性を、何らかの形で面内情報に置き換えて考慮する必要がある。その検討のためには、まず、なるべく単純化された二次元モデルを用いるのがよいと考えた。

4.2 二次元剛体モデル

実験で見られた腐食ひび割れの開口は、0.1～1mmオーダーの可視レベルの現象であったので、著者らが捉えた物理イメージは、コンクリートの微小な弾性変形やクリープ変形よりも、鉄筋の腐食膨張にともないかぶりコンクリートが押し広げられる剛体変形が卓越するイメージである。そこで、腐食ひび割れ発生以降、内部鉄筋の腐食量とコンクリート表面の腐食ひび割れ幅を関係づける最も単純な力学モデルとして、二次元の剛体モデルを考える。

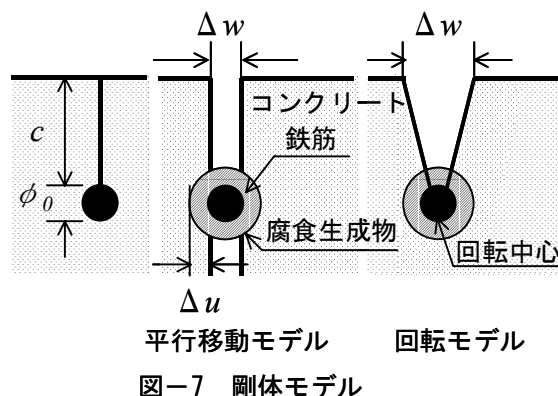


図-7 剛体モデル

図-7に、検討に用いた二種類の剛体モデルである平行移動モデルと回転モデルを示す。同一の鉄筋膨張率に対して、腐食ひび割れ幅が最小となるのは、鉄筋がコンクリートを平行に押し広げるモードである。平行移動モデルはこれを表現している。一方、表面の腐食ひび割れ幅が最大となるのは、これに回転変形が最大限に加わるモードであると考え、回転モデルにより

これを表現する。

それぞれのモデルに基づき算定される腐食ひび割れ幅の増加量 Δw は以下となる。

平行移動モデル：

$$\begin{aligned}\Delta w &= 2\Delta u \\ &= \phi_0 \cdot \varepsilon_s\end{aligned}\quad (1)$$

回転モデル：

$$\begin{aligned}\Delta w &= 2\Delta u + 2(c + \phi_0) \frac{\Delta u}{\phi_0/2} \\ &= (2c + 3\phi_0) \cdot \varepsilon_s\end{aligned}\quad (2)$$

ここに、 Δw ：ひび割れ幅の増加量 (mm)， Δu ：腐食膨張による鉄筋の半径の増加量 (mm)， ϕ_0 ：腐食前鉄筋径 (mm)， c ：コンクリートかぶり厚 (mm)， ε_s ：腐食による鉄筋の面内膨張ひずみ (=鉄筋径の増加率) である。

腐食膨張による鉄筋の半径の増加量 (Δu) は、鉄の腐食膨張率 (=腐食生成物と腐食前の鉄の体積比) を 3.1 とし⁶⁾、かつ鉄筋の剛体膨張を仮定することにより、腐食量より計算する。

また、式(1)(2)はいずれもひび割れ幅の増加量 Δw を算定するものであり、ひび割れ幅の絶対値 w を計算するには初期値が必要である。次節では簡単のため Δu が 0 (すなわち腐食量も 0) のときひび割れ幅 w も 0 と仮定して計算する。

4.3 計算結果と実験結果の比較

RC 一軸供試体の実験では、各供試体について、鉄筋軸に沿って 50mm 間隔で、各断面位置における鉄筋の腐食量とコンクリート表面のひび割れ幅を測定している。そこで図-8 に、腐食ひび割れが発生した供試体 RC1-2, 3, 4 について、すべての測定位置における鉄筋の腐食量とひび割れ幅の測定値の関係をプロットし、あわせて二種類の剛体モデルによる計算値を示した。ひび割れが複数の側面に生じた断面では、4 面のひび割れ幅の合計値を測定値とした。

剛体変位によるひび割れ開口メカニズムの仮定に基づき、腐食量より予測される腐食ひび割れ幅の最小値 (平行移動モデル) と最大値 (回転モデル) の間に実験値が収まったのは、供試体 RC1-4 に見られる 2mm を超える過大なひび

割れ幅のデータのみである。実質的に問題となる 0~2mm の範囲では、実測ひび割れ幅は平行移動モデルによる計算値よりも小さい。

腐食量が小さい範囲で、腐食ひび割れ幅が剛体モデルによる計算値より小さくなった原因は、内部鉄筋の腐食膨張の一部がコンクリートの変形 (塑性変形、クリープ変形等) に吸収されたこと、計算に用いた腐食膨張による鉄筋の半径の増加量 (Δu) の値が正確ではないことなどが考えられる。このうち、コンクリートの変形には、材料としてのコンクリートの実際の変形特性だけでなく、ひび割れの開口現象が鉄筋軸方向に様ではないこと、コンクリートの見かけの面内変形特性に影響を及ぼすことも含まれる。

ひび割れ幅が大きい領域では、腐食ひび割れ開口メカニズムは、剛体モデルにより表される状態に近づくといえる。

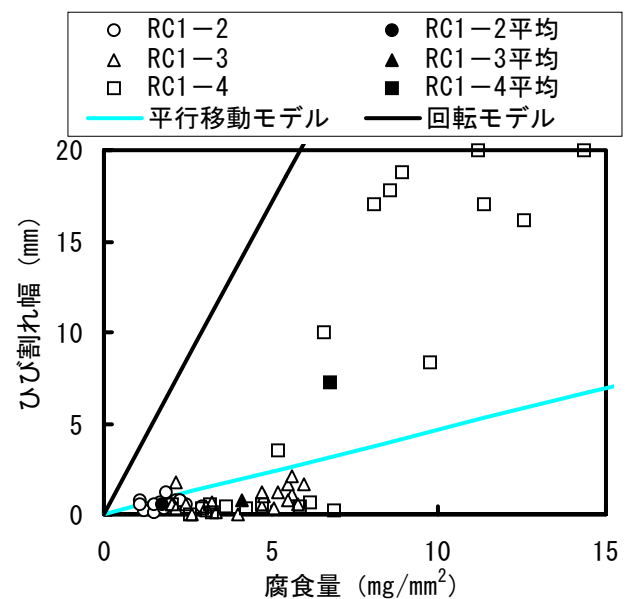


図-8 腐食量とひび割れ幅の関係

4.4 腐食ひび割れ幅の軸方向非一様性から見た剛体モデルによる予測値の検討

現状のコンクリート中の鉄筋腐食予測技術では、腐食量の空間的な非一様性を精密に予測することは困難であり、予測できるのは、せいぜい腐食量の平均値である。そこで、仮に腐食量の平均値の真値を知ることができた場合、これ

を剛体モデルに適用して予測される腐食ひび割れ幅の値は、ひび割れ幅の実測値の統計分布のどの辺に位置するのか検討する。

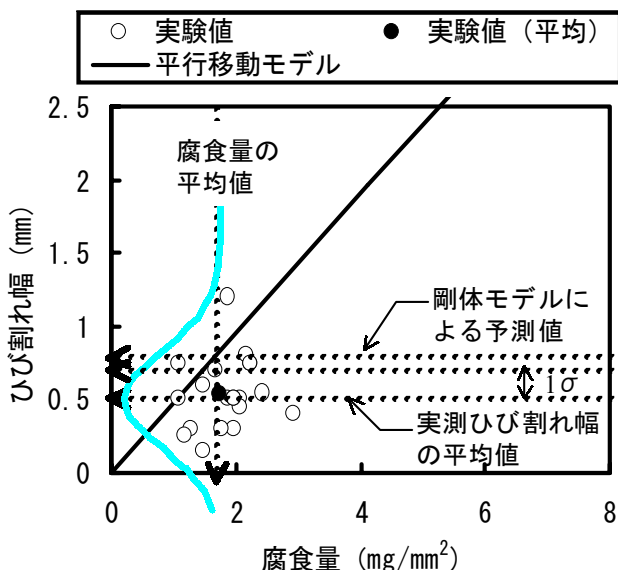


図-9 腐食量と腐食ひび割れ幅の関係
(供試体RC1-2)

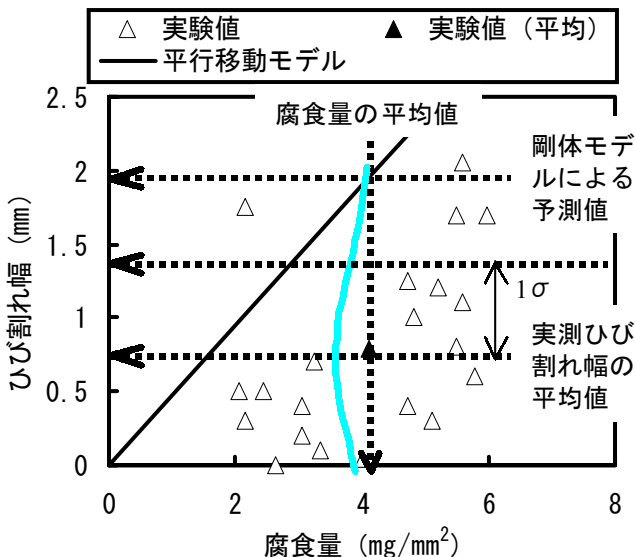


図-10 腐食量と腐食ひび割れ幅の関係
(供試体RC1-3)

腐食ひび割れ幅が比較的小さい供試体 RC1-2 と RC1-3 について検討を行った。その結果を図-9 と図-10 に示す。これらの結果より、ひび割れ幅が 0～2mm 程度の腐食ひび割れに対しては、剛体モデルによる腐食ひび割れ幅の予測値は、ひび割れ幅の実測値の統計分布における平均値 +1 σ (σ は標準偏差) の値よりも大きいことがわかる。二次元剛体モデルを用いて腐食ひび割

れ幅を予測する場合は、このことを踏まえて予測値を用いる必要があるといえる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食量の軸方向分布の非一様性の程度(変動係数)は、腐食レベルによらずほぼ一定となった。
- (2) 腐食ひび割れ幅の軸方向分布の非一様性の程度(変動係数)は、腐食レベルによらずほぼ一定となった。
- (3) 腐食ひび割れ幅の軸方向非一様性の程度は、腐食量のそれよりも大きい。
- (4) ひび割れ幅が 0～2mm の範囲では、実際の腐食ひび割れ幅は、平均腐食量を二次元剛体モデルに適用して予測されるひび割れ幅よりも小さい。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(II)，1994.10
- 2) コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書，1998.7
- 3) 松尾 洋：鋼材が腐食した鉄筋コンクリート部材の力学特性，長岡技術科学大学修士論文，2001.3
- 4) 松尾 洋，五角 亘，下村 匠：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1327-1332，2001.6
- 5) 木村哲士，丸山久一，濱田 宏：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.771-776，1996.6
- 6) 須田久美子，Sudhir, M.，本橋賢一：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.751-756，1992.6