論文　内部鉄筋の腐食形態が鉄筋コンクリート部材の力学特性に及ぼす影響

コンクリート研究室　岡崎　雅弘
指導教官　下村　匠
丸山　久一

1.　はじめに

鋼材の腐食量とコンクリートの腐食ひび割れ幅を関係づける既往の計算モデルの多くは，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様とみなす仮定に基づくものである。計算が簡便であること，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非一様性が構造物の性能にどのように影響するのか不明であることを鑑みると，現状では部材軸方向に一様とみなす仮定を設けることは，理に適っていると考えられる。

しかし，現実には，巨視的には境界条件が部材軸方向に一様とみなされる場合でも，鉄筋の腐食量は軸方向に一様ではなく，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。

そこで本研究では，本研究室で過去に行った鉄筋コンクリート供試体の腐食試験結果 [1)2)]を用いて，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特に部材軸方向の分布の観点から検討する。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。また,腐食量の分布を変化させた鉄筋および RC 部材の一軸引張試験を行い,腐食量の非一様性が RC 部材の力学特性に及ぼす影響を検討する。

2.　実験概要

2.1　RC 一軸供試体と単体鉄筋の腐食試験

(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。

RC 一軸供試体は，すべて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。

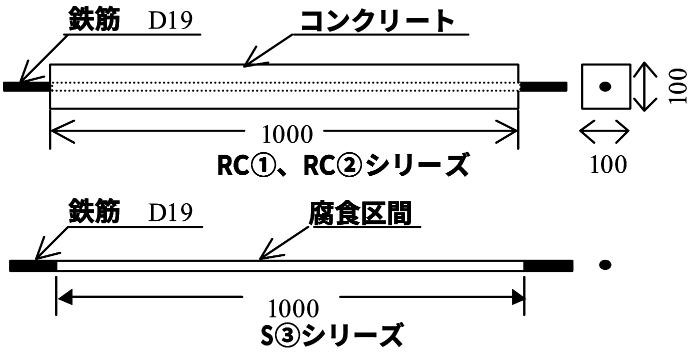

図-1　供試体の形状・寸法

表-1　松尾電食実験供試体の種類

種類	供試体名	積算電流量（Ahr）	コンクリート28日圧縮強度（N/mm²）
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。電解液は，腐食を促進するため海水相当の食塩水（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。

(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.　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

腐食試験終了後の腐食ひび割れ幅と 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-2** に示す。腐食量，腐食ひび割れ幅は鉄筋軸方向に一様ではないことがわかる。

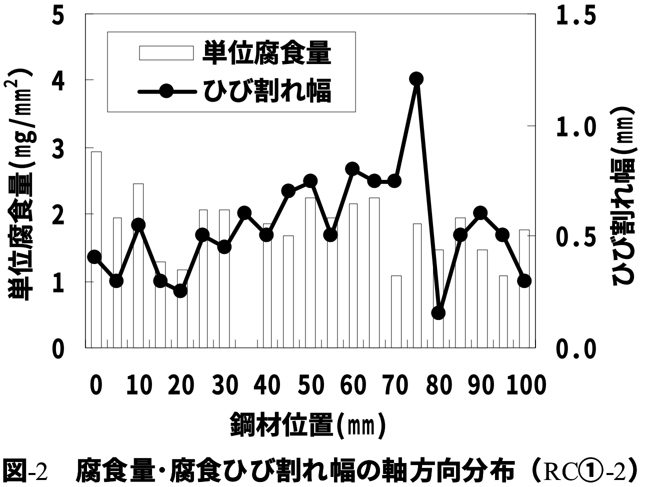

図-2　**腐食量･腐食ひび割れ幅の軸方向分布**（RC①-2）

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**図ー3** である。ここで，本実験に用いた D19 鉄筋の場合，腐食量 1mg/mm^2 が鉄筋断面積減少率 2.65%に相当する。

また，腐食ひび割れ幅の軸方向分布の測定結果からも，腐食量の場合と同様に，平均値と標準偏差を求めた。**図-4** は，RC 一軸供試体，木村の RC 梁供試体の電食実験，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。腐食ひび割れが発生した供試体は，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 RC①-2，3 は 4 面にひび割れが発生した。これらを統一的にあつかうために，供試体のひび割れ幅は 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。

全供試体を通じて，腐食量、ひび割れ幅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。

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，非一様性の原因となると考えられる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。

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

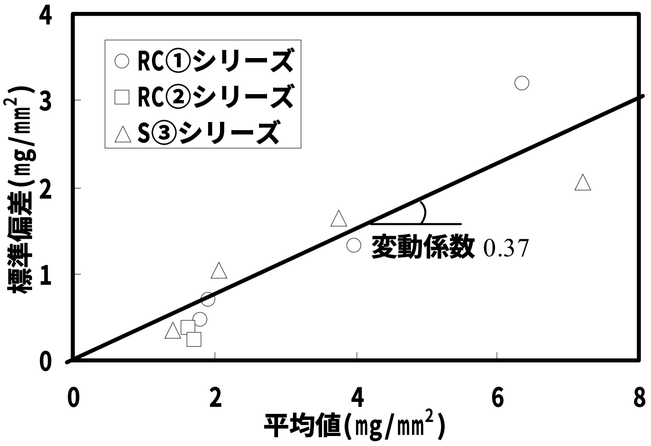

図-3　腐食量の平均値と標準偏差の関係

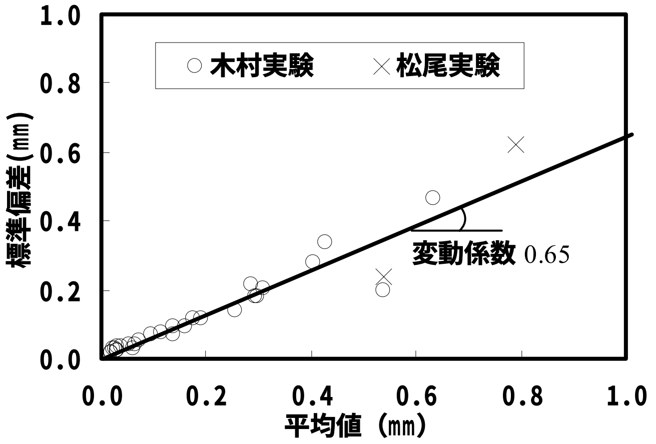

図-4　ひび割れ幅の平均値と標準偏差の関係

3.　腐食ひび割れ幅予測モデルの検討

3.1　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。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，その範疇では，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，軸方向に一様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。

3.2　二次元剛体モデル

腐食ひび割れの開口は，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ような物理イメージである。そこで，コンクリートの弾性変形よりはむしろコンクリート塊の剛体変位が卓越するメカニズムであると仮定し，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-6 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。

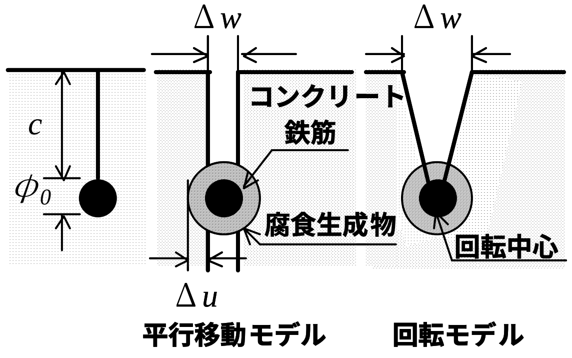

図-5　剛体モデル

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：

$$\Delta w = 2\Delta u = \phi_0 \cdot \varepsilon_s \tag{1}$$

回転モデル：

$$\Delta w = 2\Delta u + 2(c+\phi_0)\frac{\Delta u}{\phi_0/2} = (2c+3\phi_0)\cdot \varepsilon_s \tag{2}$$

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，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。

3.3　計算結果と実験結果の比較

図-7 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 を超える過大な腐食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り予測される値よりも小さい値となった。

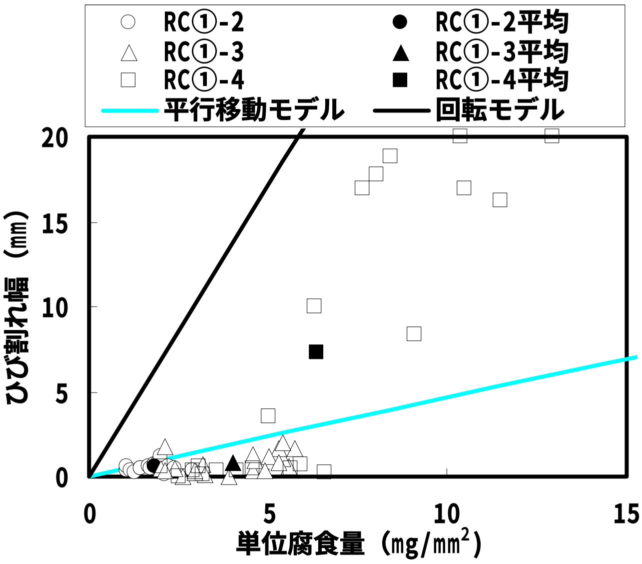

図-6　剛体モデルと実験値の比較

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がコンクリートの変形（弾性変形，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。

3.4 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用い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。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-8** に示す。

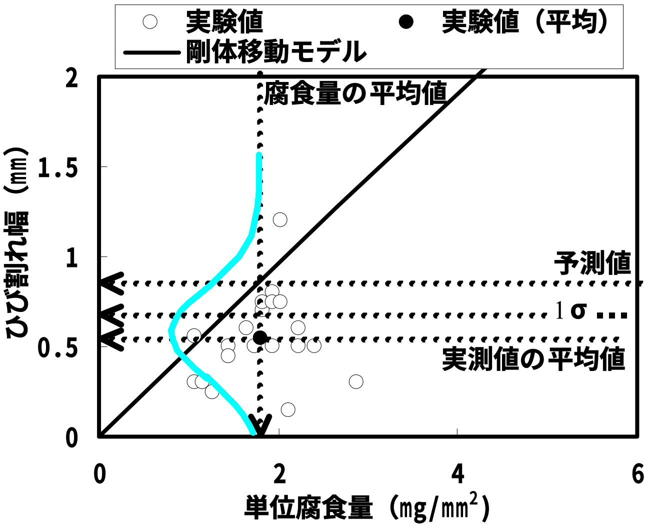

図-7　腐食量と腐食ひび割れ幅(RC①-2)

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＋1σ（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。

4.腐食量の分布を変化させた鉄筋コンクリート部材の一軸引張試験

4.1　実験方法

腐食量の軸方向の非一様性が鉄筋コンクリート部材の力学特性に与える影響を検討するために，腐食量と腐食区間長を変化させたRC部材，単体鉄筋の一軸引張試験を行った。供試体寸法は松尾の電食実験とほぼ同じである（図-8）。供試体の種類を表-2に示す。供試体はRC2，RC3シリーズともに同一配合のコンクリートを使用した。RC2シリーズの供試体は，鉄筋を腐食後に打設し3週間湿布養生を行った。RC3シリーズはコンクリート打設後3週間湿布養生を行い，その後鉄筋を腐食させた。図-9に実験装置を示す。供試体は，自重による曲げの影響を排除するために，反力フレーム内に垂直に設置した。鉄筋の平均ひずみは，供試体両端部において鉄筋の変位を変位計により測定し，変位差を供試体長で割ることで求めた。

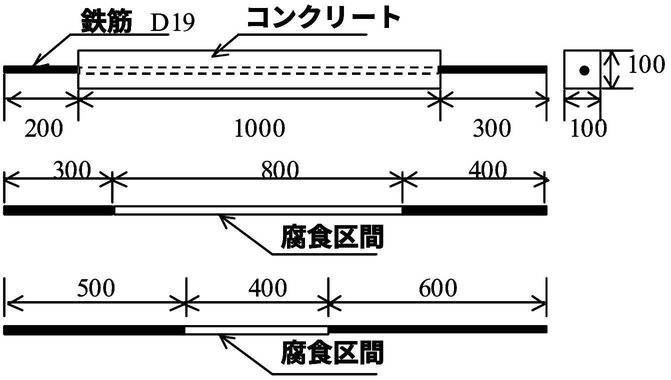

図-8　供試体形状・寸法

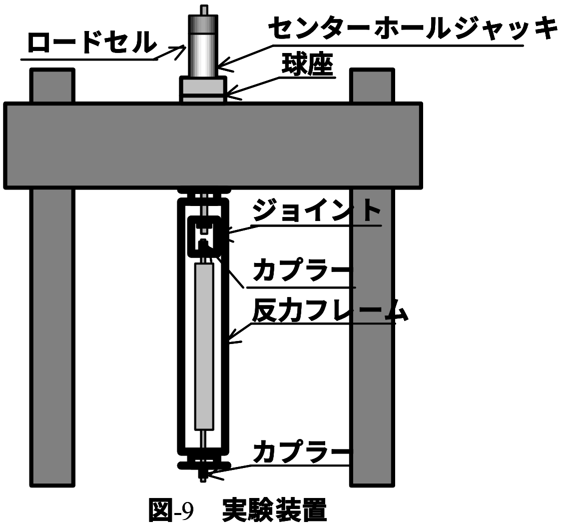

図-9　実験装置

表-2　一軸引張試験供試体の種類

供試体名	腐食区間における平均腐食量 (mg/mm^2)	腐食区間 (mm)	腐食時期	供試体種類
S1-0	0.00	-	-	単体鉄筋
S1-1	1.41	400	-	
S1-2	1.18	800	-	
S1-3	2.47	400	-	
RC2-0	0.00	-	-	RC部材
RC2-1	1.57	400	コンクリート打設前	
RC2-2	1.23	800		
RC2-3	2.44	400		
RC3-1	1.68	400	コンクリート打設後	
RC3-2	1.27	820		
RC3-3	2.08	600		

4.2 実験結果

腐食した鉄筋の降伏荷重の低下率と腐食区間の平均腐食量の関係（図-10）と断面剛性の低下率と供試体全体の平均腐食量の関係（図-11）を示す。

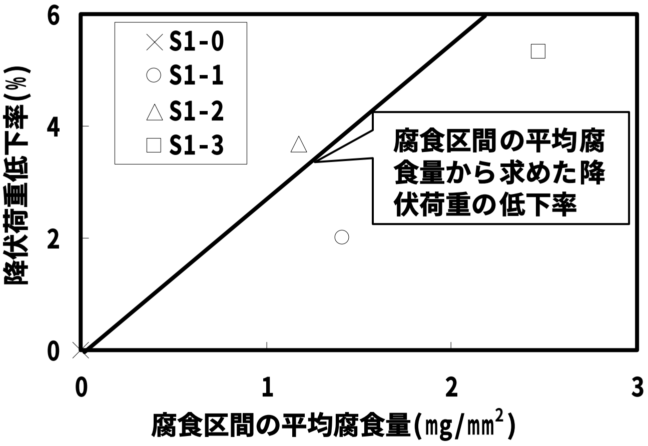

図-10　降伏荷重低下率と腐食区間の平均腐食量の関係

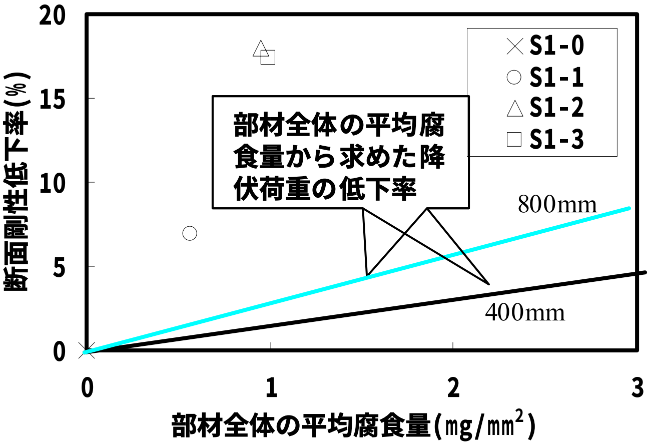

図-11　断面剛性定価率と部材全体の平均腐食量の関係

鉄筋の降伏荷重は腐食区間の平均腐食量と比例関係にあることがわかる。これは，鉄筋降伏は鉄筋断面積が最小の部分（腐食による断面欠損が最も大きい部分）で生じるためと考えられる。鉄筋の断面剛性は，供試体全体の平均腐食量と比例関係にある。これは，鉄筋の断面剛性は腐食区間だけでなく供試体全体の変形が関係しているためと考えられる。鉄筋の腐食区間の平均腐食量から求めた降伏荷重の低下率の理論値は実験値より大きくなった。これは腐食初期では応力負担の少ない鉄筋のリブで腐食が先行するためと考えられる。鉄筋の腐食量から求めた断面剛性の低下率が実験結果より小さくなった。これについては，原因はわからなかった。

コンクリートの平均応力と鉄筋のひずみの関係を図-12,13 に示す。コンクリートの平均応力は，RC 供試体が負担する荷重から鉄筋が負担する荷重を引いてコンクリートの断面積で除したものである。本実験では，RC2，3 シリーズの実験結果から、それぞれ対応する S1 シリーズの実験結果をモデル化した直線で引くことで求めた。

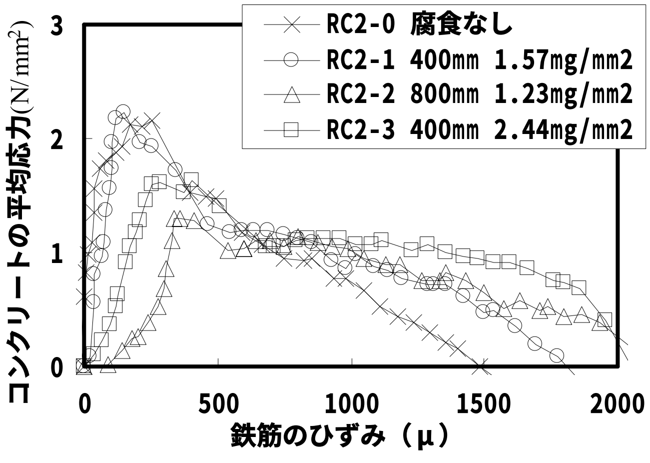

図-12　コンクリートの平均応力(腐食ひび割れなし)

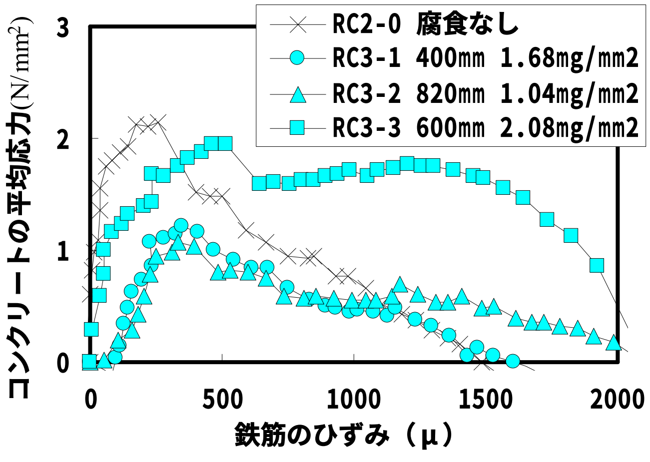

図-13　コンクリートの平均応力(腐食ひび割れあり)

図-12 と図-13 を比べると RC3-3 を除いて，腐食ひび割れのない供試体の方がコンクリートの平均応力が大きくなった。これは，腐食ひび割れの発生により，コンクリートの応力負担断面積が減少したこと，鉄筋とコンクリートの付着を多少なりともよくすると考えられる腐食膨張圧が腐食ひび割れの発生により消失することが原因だと考えられる。腐食区間長が同じで腐食区間の平均腐食量が同じ供試体を比較すると，腐食区間の平均腐食量が多い供試体の方がコンクリートの平均応力が小さくなった。また，腐食区間の平均腐食量が同じで，腐食区間長が異なる供試体を比較すると，腐食区間長が長い供試体の方がコンクリートの平均応力が低下した。

5．　まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 電食により鉄筋を腐食させた供試体では，腐食量，腐食ひび割れ幅の両方で軸方向では一様ではないことが確認され，非一様性の程度は腐食量レベルに関わらず一定となった。

(2) ひび割れ幅が 0～2mm の範囲では実際の腐食ひび割れ幅は，二次元剛体モデルを用いて平均腐食量から予測される値よりも小さい。

(3)腐食した鉄筋の降伏荷重は，腐食区間の平均腐食量，断面剛性は腐食量の分布で決まる。

(4)コンクリートの引張剛性は，腐食ひび割れにより低下する。また腐食区間の平均腐食量が大きいほど，腐食区間が長いほど低下する。

参考文献

1)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

2)木村　哲士：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,長岡技術科学大学修士論文,1995.3