

# [1089] 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究

正会員 ○田森 清美 (秋田県庁)  
 正会員 丸山 久一 (長岡技術科学大学工学部)  
 正会員 小田川昌史 (東電設計株式会社第一土木本部)  
 正会員 橋本 親典 (長岡技術科学大学工学部)

## 1. はじめに

近年、RCおよびPC構造物においてコンクリート中の鉄筋あるいはPC鋼材が発錆し、かぶりコンクリートにひびわれや剥離を引き起こして構造物の美観や寿命を著しく損なう塩害の損傷事例が数多く報告され問題となっている。塩害対策には、発錆メカニズムを解明することやその予防措置、また損傷した構造物の補修・補強工法などを確立する必要がある。補修・補強を行うに当たっては、損傷を受けた構造物の評価方法すなわち、内部鉄筋がどの程度腐食し、構造物の劣化がどの程度進んでいるかを評価判断する診断技術の開発が急務である。そのような診断技術に基くならば、耐用年数等を考慮した合理的な補修・補強工事が行われるものと考えられる。

そこで本研究では、塩害を受けたRC構造物の耐久性診断法開発の為に基礎資料として、先ず、かぶり面に発生するひびわれ幅と内部鉄筋腐食量の関係を明らかにすることを目的とした。実験方法として、短期間に腐食促進が可能な電食試験を用い、ひびわれ発生時、及びその後のひびわれ性状について検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

本実験はコンクリート表面に現れるひびわれ幅と内部鉄筋の腐食量との関係を得ることを目的としており、鉄筋配置状態により表-1に示すように3シリーズに分けられる。シリーズIは1本の鉄筋を腐食させた基本的な場合であり、シリーズII(2本の鉄筋を並行に配置して腐食させた場合)、シリーズIII(鉄筋を交差して腐食させた場合)はシリーズIと比較することにより鉄筋配置の影響を検討するものである。シリーズIでかぶりは、示方書の規定に従い通常の最小かぶりとして2.5cm、最大値として7cm、海岸構造物などの

表-1 実験の要因と水準

要因		水準		
シ リ ズ I	かぶり(cm)	2.5	7	10
	鉄筋径(mm)	φ9	φ19	
シ リ ズ II	かぶり(cm)	2.5	7	
	鉄筋間隔(cm)	3, 5, 7.5		3, 7, 14
シ リ ズ III	かぶり(cm)	2.5	7	
	腐食状態	上側筋腐食, 下側筋腐食, 上下両鉄筋腐食		

但し シリーズII, IIIで用いた鉄筋はφ19である

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)				混和剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
63	43	165	260	793	1053	0.650
設計強度	210kg/cm²	目標スランプ		8±2.5cm		
配合強度	280kg/cm²	目標空気量		4±1%		

特殊環境下におけるかぶりとして10cmの3種を設定した。シリーズIIにおいて鉄筋間隔は、鉄筋中心から最小かぶり面までを直径とする影響円を想定し、この影響円の混在状態(交差した場合や接した場合など)を考えて決定した。但し、示方書の規定により鉄筋の最小あき間隔は3cmと

した。シリーズⅢでは、かぶり面に近い側（以下上側筋と呼ぶ）が錆びたとき、かぶり面から遠い側（以下下側筋と呼ぶ）が錆びた場合、そして両方同時に錆びた場合の3ケースを想定した。

## 2.2 コンクリートの配合及び供試体

本実験に用いたコンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。骨材は細骨材として川砂（比重2.59）を、粗骨材として碎石（比重2.60、最大寸法20mm）を使用した。混和剤はAE減水剤を使用した。なお、鉄筋腐食をより促進させるために練り混ぜ水として海水相当の食塩水（NaCl 3.13%水溶液）を用いた。このコンクリート中の塩分量は $5.33\text{kg/m}^3$ であり、セメント重量の2.05%に相当する。

供試体の形状を図-1に示す。ここでコンクリート内部鉄筋にはみがき丸鋼を用いた。

供試体は材令1日で脱枠してから空气中養生とし、試験開始は材令10日以降で行った。試験時の圧縮強度の平均は $305\text{kg/cm}^2$ であった。

## 2.3 電食試験方法

コンクリート表面のひびわれ幅と内部鉄筋の腐食量の関係を連続的に求めようとする場合、鉄筋をコンクリートから取り出すことなく腐食量を推定する必要がある。ここでは、腐食量は積算電流量に比例するというファラデーの法則に着目し、本供試体における実際の腐食量と積算電流量との関係を先ず求めた。その結果を図-2に示す。既往の研究によると、コンクリート内部の鉄筋では、ファラデーの法則が成立するものの、ひびわれ発生前後で比例定数（電気化学当量）が変化すると報告もある[1][2]。本実験においては電流値が200mAと多いことや、コンクリート中の塩分が比較的多いので電食係数が大きくなったものと考えられるが[3]、ひびわれが早期に発生したため、ひびわれ発生前後で積算電流量と腐食量の関係は同一と見なせる結果となった。図-2より積算電流量と鉄筋腐食量との関係を最小二乗法で直線近似すると次のようになる。

$$W = 0.766 * IT \quad (1)$$

ここで W: 腐食量 (g)

IT: 積算電流量 (A\*hr)

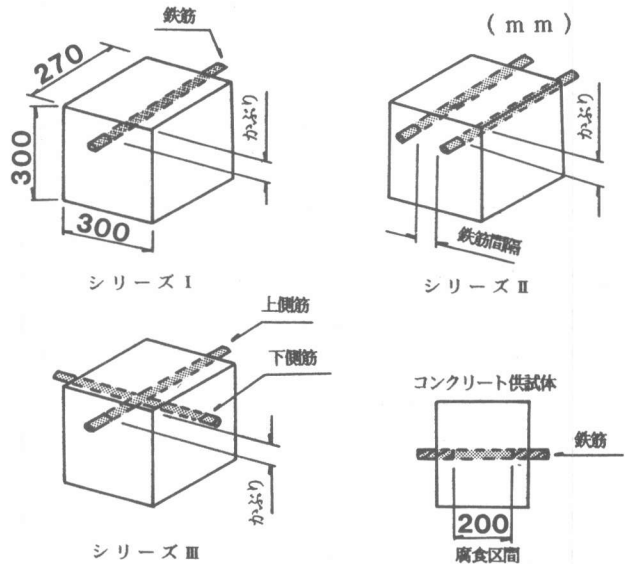


図-1 供試体形状

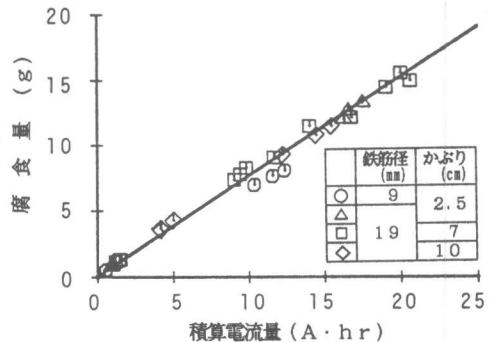


図-2 積算電流量と腐食量の関係

この試験結果を基に、実験では電流値を測定して積算電流量を算出し、式(1)より内部鉄筋腐食量を推定した。また、ひびわれ発生を明確にするためにかぶりコンクリート表面には鉄筋軸直角方向にコンクリートゲージを貼付して、歪測定も同時に行った。ひびわれ幅は、クラック測定器(顕微鏡タイプ)を用いて任意時間に行った。測定箇所は腐食区間を10等分(2cm 間隔)した線上であり、約10個の測定データから平均値を求めた。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 1本の鉄筋を腐食させた場合(シリーズI)

##### (1) ひびわれ状況

鉄筋の腐食膨張圧によるひびわれはかぶりコンクリートに現れるだけでなく、供試体の深部にまで伸展していることが観察された。そのひびわれパターンとしては図-3に示すようにはほぼ2種類に分類できた。かぶりや鉄筋径により一意的に(a)及び(b)の状態が決定されているとは言いが、かぶりが大きくなるにしたがい十字形に広がる(a)のひびわれパターンになる傾向にあった。

##### (2) ひびわれ発生

かぶりコンクリート表面歪の測定結果の一例を図-4に示す。歪の急激な上昇点が明確に現れており、この時点でひびわれが発生していると考えられる。これは実際に目視観察でも確認されたので、この歪の急変点をひびわれ発生時として取り扱った。かぶり厚とひびわれ発生時腐食量の関係を表したのが図-5である。これより、ひびわれ発生時腐食量はかぶり厚の増加に伴い増大し、その割合はかぶりの増加比に比べてはるかに多くなっている。これは逆に考えればかぶりの増加は、ひびわれ発生に対するコンクリートの力学的抵抗力を著しく増強させていることになる。

鉄筋径の影響については、本実験からはかぶり2.5 cmの場合についてしか比較できず、さらにこの場合の腐食量がきわめて小さいためはっきりとは言えないが、同一のかぶりならば鉄筋径の大きい方が少ない単位表面積当り腐食量でひびわれが発生する傾向が見られた。

##### (3) 腐食量とひびわれ幅の関係

実験で得られた腐食量とひびわれ幅の関係を図-6に示す。なお一つのパラメータに対しては、供試体3体の結果を示している。かぶり厚や鉄筋径が変化しても両者はほぼ線形な関係にあることが認められる。図

中の直線は最小二乗法で求めた近似結果(相関係数はいずれも0.98以上、図中の近似式でXは腐食量(mg/cm<sup>2</sup>)を、Yはひびわれ幅(mm)を表している)であるが、かぶり厚の増加にともないその傾きは大きくなっており、ひびわれ幅の拡大速度が速くなることを示している。またφ9とφ19

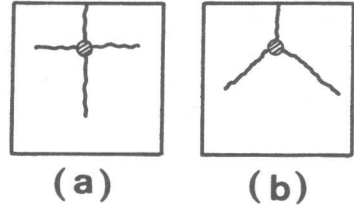


図-3 ひびわれパターン(シリーズI)

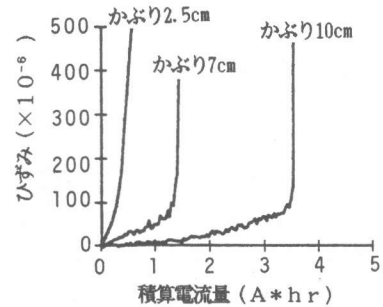


図-4 歪測定結果の一例

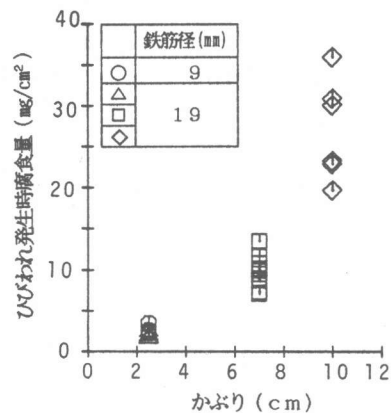


図-5 かぶり厚とひびわれ発生時腐食量の関係

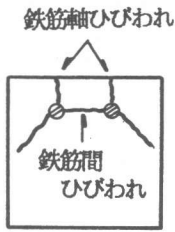


図-7 ひびわれパターン (シリーズII)

を比較すればそれほど大きな差はみられず、したがって鉄筋径の影響は少ないと考えられる。実験結果にみられる若干の差異は鉄筋径よりむしろ、鉄筋中心までの距離（かぶり+ $\phi/2$ ）が影響しているものと思われる。  
 3.2 2本の鉄筋を並行に配置して腐食させた場合 (シリーズII)

(1) ひびわれ状況

かぶり7cmの供試体では、影響円が接する鉄筋間隔の場合には各鉄筋に沿って2本のひびわれが発生したが、影響円が交差した場合には鉄筋間に1本のひびわれしか発生しなかった。これに対してかぶり2.5cmの場合には影響円の交差にかかわらず各鉄筋に沿って2本のひびわれが発生しており、かぶり厚もひびわれ

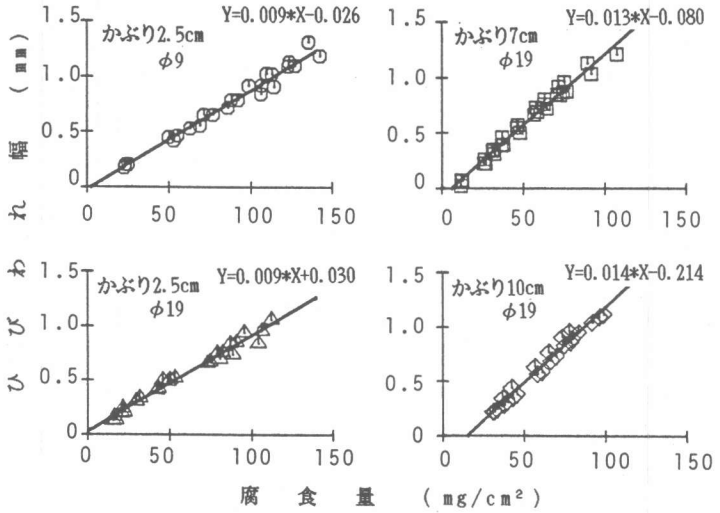


図-6 腐食量とひびわれ幅の関係 (シリーズI)

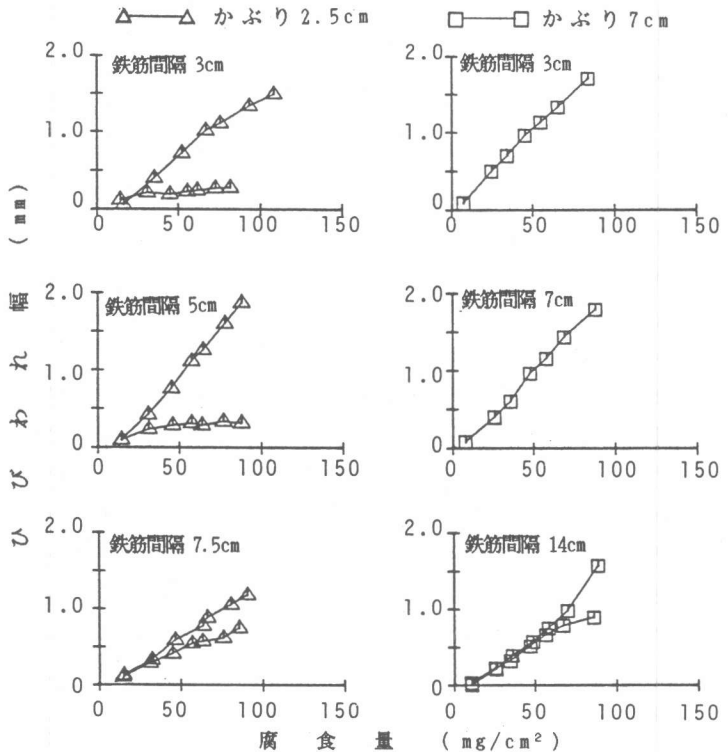


図-8 腐食量とひびわれ幅の関係 (シリーズII)

パターンに影響する要因と言える。かぶりによる差異は、ひびわれ発生エネルギー（あるいはコンクリートの抵抗力）の大小に関係すると考えられる。つまり、かぶりが小さい場合にはひびわれ発生の生起エネルギーが小さく、各鉄筋間の干渉が少なくなるためと考えられる。またいずれの供試体においても、水平方向に鉄筋と鉄筋を結ぶように発生するひびわれが認められた。その

ひびわれパターンを図-7に示す。これら鉄筋間と鉄筋軸に沿って発生するひびわれにより、かぶりコンクリートの浮き上がり・剥離現象が起こるものと考えられる。

(2) 腐食量とひびわれ幅の関係

実験で得られた腐食量とひびわれ幅の関係を図-8に示す。1点のプロットはひびわれ幅に関しては約10個の平均値であり、腐食量に関してはひびわれが2本発生したものについては各々の鉄筋腐食量を、1本しか発生しなかったものについては各鉄筋腐食量の平均値を用いている。これより

鉄筋間隔が小さいときには2本発生したひびわれは、どちらかが卓越して拡大していく傾向が認められた。この結果は鉄筋の腐食状態が同一でも、それに沿って発生するひびわれ幅は極端に異なることを意味し、かぶりコンクリートに発生したひびわれ幅から内部鉄筋腐食量を推定するときには注意を要する。また鉄筋間隔が大きい場合には2本のひびわれは途中まで同傾向を示し、かつシリーズIの結果と同様となった。この結果とひびわれ状況より、少なくとも影響円が交わらない鉄筋間隔で並行に存在する鉄筋は、ある程度の腐食量まではそれぞれ単体として扱えるものと考えられる。

次に、実験結果を基に鉄筋の平均腐食量と鉄筋1本当たりの平均ひびわれ幅(2本のひびわれが発生した供試体ではその平均値、1本のひびわれが発生した供試体ではそれを鉄筋本数2で除した値)の関係を図-9に示す。図中の破線はシリーズIで得られた直線近似式であるがこれとほぼ同傾向を示している。この結果は、ひびわれと平行に配置された全鉄筋が均一に腐食していると仮定すれば、ひびわれ幅の合計を鉄筋本数で割って得られる鉄筋1本当たりの平均ひびわれ幅から、シリーズIの結果を基に鉄筋腐食量を推定できる可能性を示すものと考えられる。

### 3.3 鉄筋を交差して腐食させた場合(シリーズIII)

実験により得られた結果を図-10に示す。ここで、片方の鉄筋にのみ通電して腐食促進を計った供試体では、鉄筋は供試体内で接触していたため他方の鉄筋も若干の発錆がみられた。そこで腐食量は通電した鉄筋については積算電流量から換算したものを、無通電の鉄筋については実験終了時に取り出して実測した値を用いて示してある。なお破線はシリーズIで得られた結果である。これより、上側筋に通電して腐食させた場合にはシリーズIと同傾向を示していることが

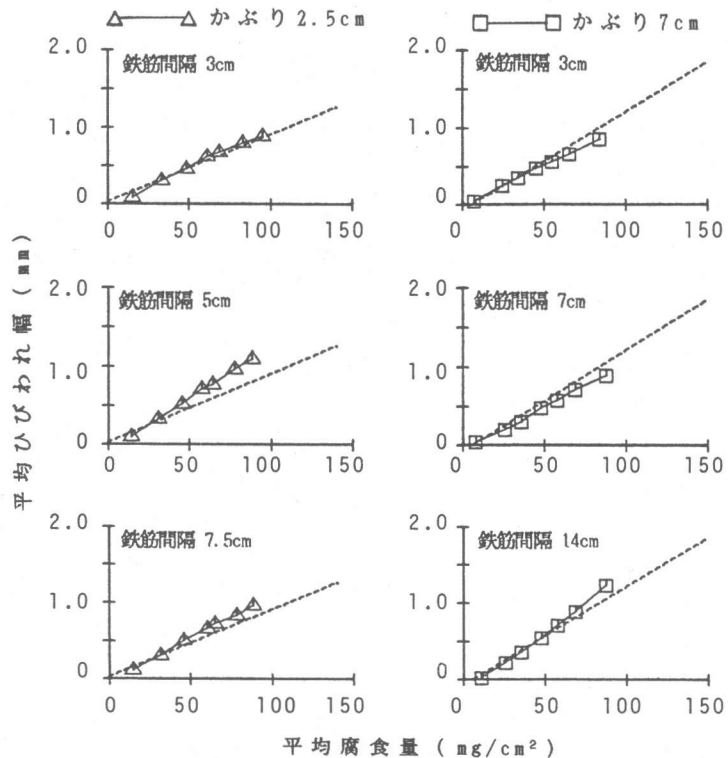


図-9 平均腐食量と平均ひびわれ幅の関係

認められる。下側鉄筋に通電して腐食させた場合には上側筋の拘束によるためと考えられるが、シリーズIに比べてひびわれ幅は減少傾向になっている。上下両鉄筋に通電して腐食させた場合のひびわれ幅はシリーズIに比べて増加傾向にあり、特に上側筋に沿って発生したひびわれにおいてこの傾向が顕著である。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果は次のとおりである。

(1) かぶり厚の増加はかぶりコンクリートのひびわれ発生に対する抵抗力を著しく増大させる。

(2) ひびわれ幅は鉄筋腐食量と線形的な関係にあり、かぶり厚が増加するほどその拡大速度は速くなる。

(3) 鉄筋を2本並列配置した場合には、2本ひびわれが発生するとその内の1本のひびわれが卓越して拡大する傾向にある。また鉄筋1本当たりの平均ひびわれ幅と平均腐食量の関係は1本の鉄筋の場合とほぼ同一となる。

(4) 鉄筋が交差する場合には腐食状況によりひびわれ幅の挙動は変化する。特に上下両鉄筋が腐食した場合に、上側鉄筋に沿って発生するひびわれの進展は著しい。

[謝辞] 本研究を行うに当たっては、オリエンタルコンクリート(株)新潟工場の御協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 〈参考文献〉

- 1) 武若耕司、松本 進：鉄筋腐食によって生じるRC構造物の劣化に関する研究(その1) - 鉄筋の腐食膨張による縦ひびわれ発生性状について -、土木学会第38回年次学術講演会講演概要集、1983, PP. 259~260
- 2) 森川雅行、関 博、奥村 隆：鉄筋の腐食膨張によるひびわれ発生機構に関する基礎的研究、土木学会論文報告集 第378号、1987, PP. 97~105
- 3) 大森研一郎、田沢栄一、竹村和夫：電食実験による鉄筋コンクリートのひびわれ挙動の評価、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、1986, PP. 547~548

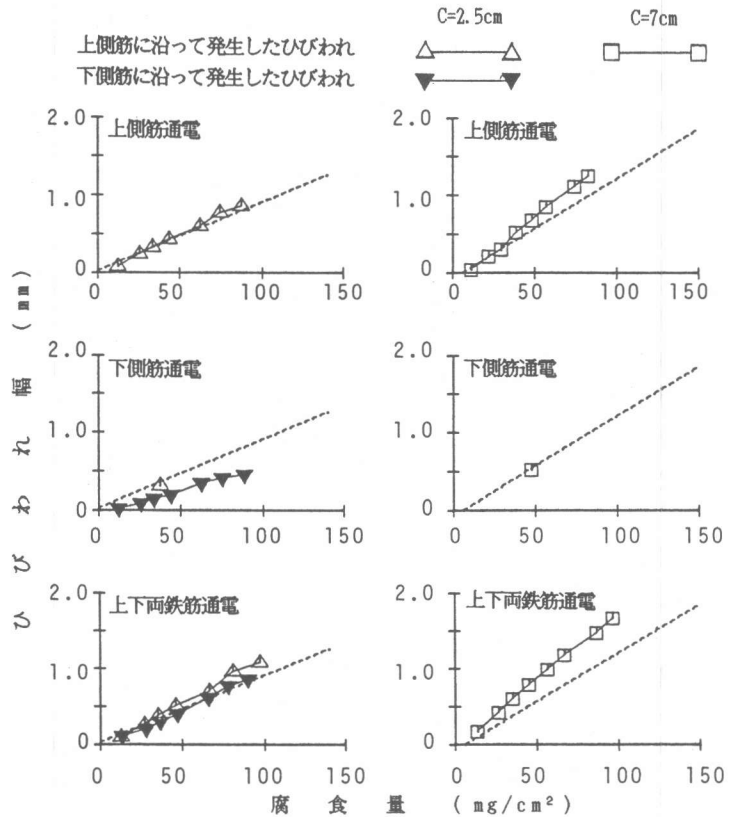


図-10 腐食量とひびわれ幅の関係(シリーズIII)