

論文

[1099] 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ特性に関する研究

正会員 ○高岡 祐二 (香川県)  
 正会員 丸山 久一 (長岡技術科学大学工学部)  
 清水 敬二 (長岡技術科学大学工学部)  
 学生員 中田 泰広 (長岡技術科学大学大学院)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の寿命、すなわち耐久性に関して注目されるようになってきて、コンクリート構造物の劣化問題が、単にコンクリート技術者のみならず、一般の人々の関心も呼んで、いまや大きな社会問題にまでなっている。特に、アルカリ骨材反応とともに、コンクリート中の鉄筋が腐食し、かぶりコンクリート面にひびわれや剥離を引き起こす塩害は、鉄筋コンクリート構造物の美観や寿命を損ない、耐久性に対する社会的信頼を著しく低下させている。この塩害問題に対して、鉄筋腐食が構造物に及ぼす力学的影響や、各種の防止対策、補修・補強対策等に関する研究が積極的に進められてきているが、いまだ未解明な点が多く、塩害を受けた構造物に対しての補修・補強あるいは維持管理の為の統一的评价基準は確立されていない。

本研究は、コンクリート構造物の耐久性診断の一環として、コンクリート表面に現れたひびわれから内部の鉄筋の腐食性状を判断することを目的として、両者の関係を実験的に検討したものである。

2. ひびわれ性状

著者らの既往の研究で<sup>1)</sup>、一辺が 30 cm の立方体供試体 (図 1) を用いた場合、鉄筋の発錆によるひびわれ状況には図 2 に示すような 2 種類のパターンが現れることが認められている。この原因については明かでないが、主として、かぶり厚の影響が大きいと考えられる。また、鉄筋の発錆量 (腐食量) とコンクリート表面のひびわれ幅とは強い線形関係が認められたことから、実際に求められたひびわれパターンに基づき、ひびわれが生じている部分のコンクリートを剛体として扱うモデル (図 3) を提案し、内部鉄筋の発錆量とコンクリート表面のひびわれ幅の関係を次式で示した。<sup>2)</sup>

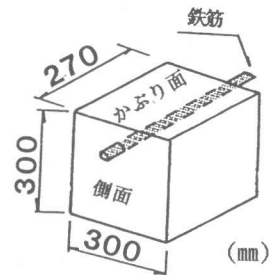


図-1 供試体形状

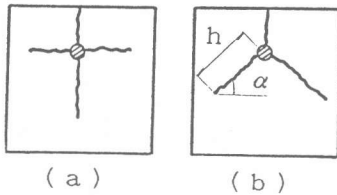


図-2 供試体側面のひびわれパターン

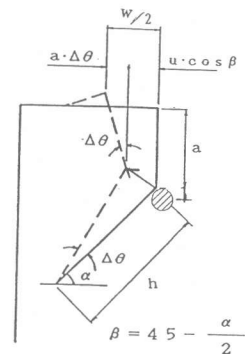


図-3 ひびわれモデル

$$w = 2u (\cos \beta + \frac{a(\cos \alpha + \sin \beta)}{h + u(\sin \alpha - \sin \beta)}) \quad (1)$$

ここで、w:表面ひびわれ幅の増分、u:鉄筋の膨張量の増分、a:鉄筋中心からコンクリート表面までの距離、h および  $\alpha$  は図2に示すひびわれ長さおよび角度、 $\beta = 45 - \alpha / 2$  さらに、鉄筋の膨張量の増分は鉄筋径 ( $\phi$ )、単位表面積当りの発錆量 (Wr) および錆の密度 ( $\rho$ ) を用いて次式のように示される。

$$u = (-\phi + \sqrt{\phi^2 + 4Wr/\rho}) / 2 \quad (2)$$

既往の実験結果<sup>1)</sup>と比較すると図4のようになり、比較的良い精度で関係が示せる。<sup>2)</sup> しかしながら、この算定式には供試体断面のひびわれ長さ・角度という実構造では観測できない量を変数としているため、実用には不十分である。そこで、これら諸量を以下のように実験的に検討することとした。

### 3. 実験概要

実験は表1に示すように4シリーズからなっている。既往の研究で<sup>1)</sup>、ひびわれパターンはかぶり厚に関係していることが認められたので、S-1シリーズでは4種類のかぶり厚を変数として、供試体側面のひびわれ長さ・角度を測定することとした。ここでは、供試体形状・寸法は既往の研究のものと同様とした。

S-2シリーズでは供試体の寸法効果を検討するため、かぶり厚2.5 cmの場合について供試体の幅だけを大きくしたもの(42cm)、および幅と高さを大きくしたもの(52x45 cm)について、ひびわれ長さ・角度を調べるものである。

S-3シリーズでは、ひびわれの発生・発達に及ぼすコンクリート中の粗骨材の影響を除く意味で、モルタルについて検討することを目的とした。配合は、粗骨材量を等量の細骨材で置き換えたものを用いた。

S-4シリーズは、特殊な場合として、鉄筋の錆を局在させたものである。この目的は、外力としての錆による膨張力の分布を限定し、ひびわれパターンを有限要素法等で解析的に求める際の検証データとするものである。鉄筋表面にビニールテープを貼布すると、電食試験を行ってもテープで覆われた部分は発錆しない。そこで、図5に示すように、鉄筋表面の下四分

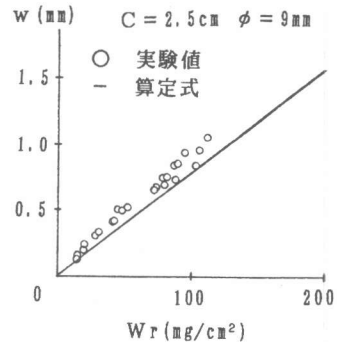


図-4 ひびわれ幅の算定結果

表-1 供試体および要因

供試体シリーズ	形状・寸法 WxHxT (cm)	材料	かぶり厚さ (cm)	供試体数
S-1	30x30x27	C	2.5, 5.0, 7.0, 10.0	各5~8
S-2	42x30x27	C	2.5	2
	52x45x27	C	2.5	1
S-3	30x30x27	M	2.5, 10.0	各2
S-4	30x30x27	C	2.5, 10.0	各2

W:幅、H:高さ、T:奥行き  
C:コンクリート、M:モルタル  
鉄筋は径 $\phi$  19 mmの丸鋼を供試体幅中央に配置した。

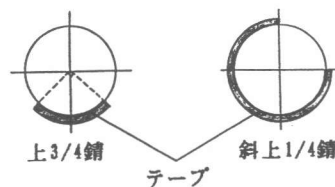


図-5 テープによる錆の抑制

をテープで覆ったもの、および鉄筋表面の斜め上四半分だけが錆びるようにしたものについて、2種類のかぶり厚さで検討することとした。使用したコンクリートは全て同一配合とし、その示方配合を表2に示す。混和剤はAE減水剤を使用し、鉄筋腐食を促進させるために、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。

試験方法は既往の研究<sup>1)</sup>

と同様に、電食試験を応用した。通電中は電流量の測定を行い、積算電流量から鉄筋の腐食量を算定した。コンクリート表面のひびわれ幅は、ひびわれ発生位置をはさんでチップを貼付し、コンタクトゲージで測定した。

#### 4. 実験結果及び考察

供試体側面に現れたひびわれ状況は、基本的には図2に示すパターンであった。そこで、鉄筋位置を中心として、左側、中央、および右側に分けて、発生したひびわれの長さ・水平からの角度を測定した。その結果を表3、4に示す。データが左・右側にしかないのは、ひびわれが鉄筋の下方で八の字に発達していることを表しており、左・中・右側にデータがあるものは、ひびわれが十字になっていることを意味している。

供試体断面寸法が 30 x 30 cm の S-1 シリーズをまとめた表3の結果から、かぶり厚とひびわれ角度の関係を示したのが図6である。かぶり厚の増加にともなって、ほぼ線形でひびわれ角度が水平に近くなっているのが認められる。

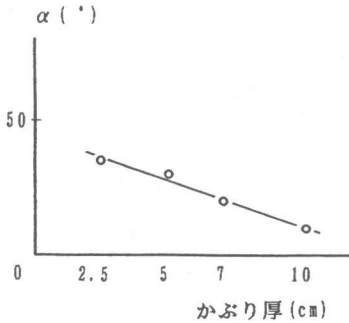


図-6 ひびわれ角度 ( $\alpha$ ) とかぶり厚との関係

表-2 示方配合

a max. (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	混和剤
20	63	43	165	260	793	1053	.65

配合強度: 280 kg/cm<sup>2</sup>、 目標スランプ: 8 cm  
目標空気量 : 4 %

表-3 S-1シリーズ実験結果  
(ひびわれ長さ、角度)

かぶり (cm)	左側		中央		右側		平均値	
	h (mm)	$\alpha$ (°)	h (mm)	$\alpha$ (°)	h (mm)	$\alpha$ (°)	h (mm)	$\alpha$ (°)
2.5	115	10	-	-	170	45	157	36
	120	10	-	-	170	40		
	165	40	-	-	175	45		
	140	45	-	-	170	40		
	160	35	-	-	175	50		
	145	25	-	-	175	45		
5.0	145	25	-	-	170	45	155	29
	150	25	-	-	145	20		
	155	35	-	-	155	40		
	155	30	-	-	140	15		
	150	10	-	-	155	25		
	140	15	-	-	140	20		
	185	45	-	-	165	35		
170	40	-	-	165	40			
7.0	60	45	-	-	80	15	130	22
	145	50	-	-	135	15		
	140	20	-	-	150	30		
	130	20	-	-	145	30		
	115	0	90	65	130	20		
	120	0	80	75	150	35		
	160	30	-	-	140	15		
	150	30	-	-	130	0		
	130	10	60	85	95	5		
10	90	5	45	80	110	0	103	9
	115	0	15	80	105	15		
	120	5	5	80	60	25		
	120	5	5	80	60	25	(中央)	32
	110	-5	35	85	90	25		
	110	-5	35	85	90	25		

更に、ひびわれを図7のように模式化し、ひびわれに沿って鉄筋位置から供試体端までの距離を(H)としたとき、ひびわれ長さ(h)とこの距離(H)との比を表3の平均値で計算すると、かぶり厚が2.5 cmで0.85、5 cmで0.90、7 cmで0.80、10 cmで0.66となっている。かぶり厚が薄くなるとひびわれ角度が大きくなり、ひびわれも供試体端部近くまで進展するようである。

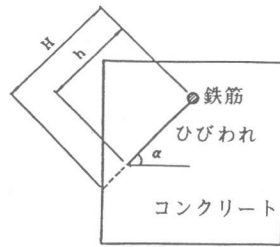


図-9 ひびわれの模式図

ひびわれパターンが主としてかぶり厚で決まることを確認するために、かぶり厚2.5 cmについて、粗骨材の影響を排除するためにモルタルを使用したもの(a)、供試体の寸法効果を検討するために供試体の幅を大きくもの(b)、および錆を鉄筋表面の3/4に局在させたもの(c)について検討を加えた。ひびわれ状況を図8に示す。この図は、かぶり面および左右側面を展開して、ひびわれ状況を表している。全く同じとは言えないが、いずれも八の字型のパターンを示している。

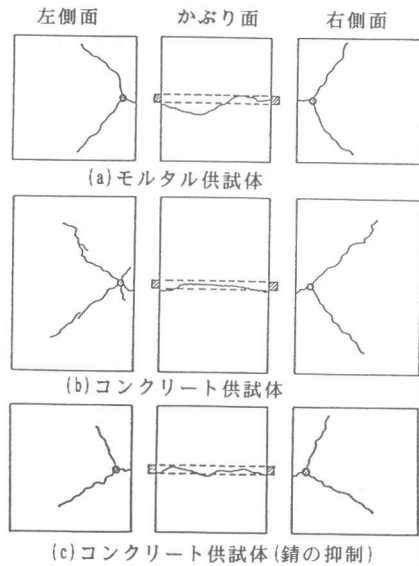


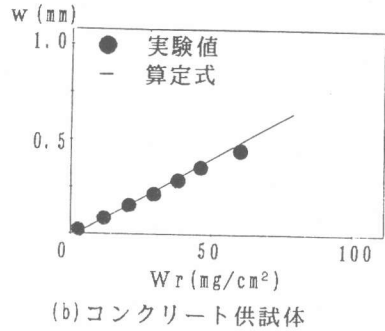
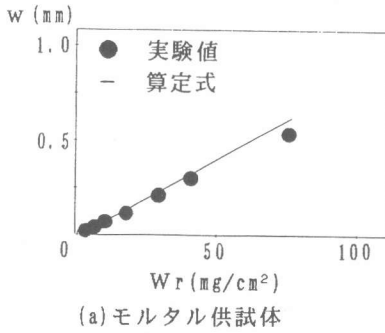
図-8 ひびわれ状況図

なお、供試体の寸法効果に関しては、表4のS-2シリーズで示されているように、断面寸法が大きくなると、かぶり厚が2.5 cmであっても、供試体を2分するような一本の縦ひびわれが発生することもあった。

表-4 S-2~4 シリーズの実験結果

これらのケースについて、S-1シリーズで求めたかぶり厚とひびわれ角度、 $h/H$ の関係を式(1)に代入して、鉄筋の発錆量と表面ひびわれ幅の関係を求めると図9のようになる。供試体の寸法が大きくなっても、また、モルタルであっても、かなりの精度で算定できている。

シリーズ	供試体断面寸法(cm) W x H	かぶり (cm)	左側		中央		右側		備考
			h (mm)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	h (mm)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	h (mm)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	
S2	42x30	2.5	190	47	-	-	215	52	寸法効果の検討
	52x45		-	-	200	72	-	-	
S3	30x30	2.5	150 160	44 46	- -	- -	170 160	45 39	モルタル供試体
		10	120 125	36 34	- 60	- 85	135 115	55 26	
S4	30x30	2.5	105 150	38 35	175 -	71 -	- -	- -	上3/4 発錆 斜上1/4発錆
		10	- 155	- 56	160 -	86 -	- -	- -	上3/4 発錆 斜上1/4発錆



鉄筋表面に部分的にテープを貼布してその箇所の発錆を抑制し、錆を偏って発生させた場合、かぶり厚が小さいとひびわれが非対称に発生する。その影響もあって、図9では、実験におけるひびわれ幅の方が大きめにでている。

#### 5. 有限要素法による解析結果

鉄筋の発錆によるひびわれパターンがかぶり厚により異なることを、解析的に表現可能か否かを検討する目的で、有限要素法（弾性域）を用いて、鉄筋周辺の応力状態を調べてみた。

供試体断面の半分(15 x 30 cm)を図10に示すように要素分割し、かぶり厚を3 cmと9 cmにした。また、鉄筋周辺はかぶり厚にかかわらず同一の分割形式とした。錆は鉄筋の表面に平均的に生じると考えると、錆の膨張圧は等分布荷重または等分布変位で与えるのが適当であるが、その結果は図11に示すように、鉄筋周辺の引張主応力にはかぶり厚による差が殆ど認められなかった。すなわち、初期ひびわれが存在しなければ、鉄筋周辺のコンクリートにはほぼ等引張応力が発生するし、鉄筋から真上のかぶりコンクリートに初期の鉛直ひびわれを仮定すれば、鉄筋の真下で最大主引張応力が発生している。

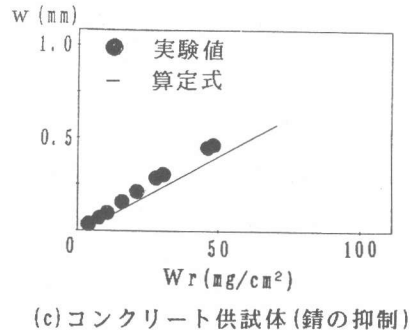


図-9 鉄筋の発錆量とひびわれ幅

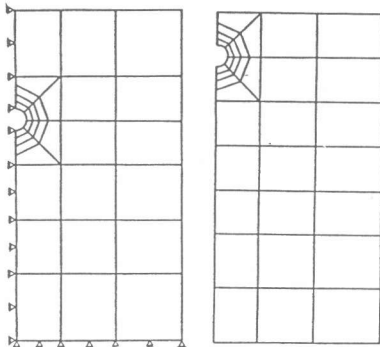


図-10 要素分割図

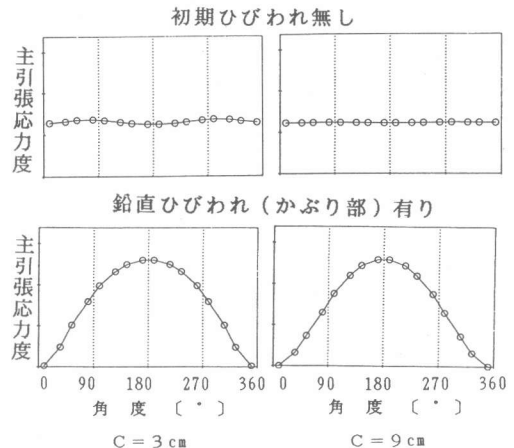


図-11 鉄筋周辺の主引張応力度

錆の膨張圧については、他に集中荷重としていろいろな方向から入力してみたが、荷重を作用させた節点近傍に最大主引張応力が発生するだけで、かぶり厚の違いによる異なるひびわれパターンは表現できなかった。このことから、鉄筋の発錆による膨張圧がどのようにコンクリートに作用しているのかを、更に、詳しく検討する必要があるとともに、ひびわれの発生条件を、コンクリートの構成則の検討および非弾性解析法の適用の下で、再検討する必要がある。

## 6. 結論

はり部材で代表される、かぶり厚に比べて断面高さが大きく、かつ断面幅がある程度限定されている鉄筋コンクリート部材において、鉄筋の発錆に伴う断面内のひびわれパターンについて以下のことが明らかになった。

- ①かぶり厚が2.5 cm程度だと、鉄筋からコンクリート内部のひびわれは八の字になる。ひびわれが水平軸となす角度は、かぶり厚の増加とともに小さくなり、かぶり厚が10 cmではほぼ水平になり、かつ十字のパターンになる。
- ②断面内のひびわれ長さ鉄筋からひびわれに沿った供試体端までの距離は、かぶり厚が7 cm以下では0.8~0.9となる。ただし、かぶり厚が10 cmでは0.7程度であった。
- ③以上の結果をひびわれモデルに反映させると、鉄筋の発錆量とコンクリート表面に現れるひびわれ幅の関係が定式化でき、これから逆に、表面ひびわれ幅を測定することでコンクリート内部の鉄筋の発錆量が予測可能となる。
- ④弾性論による有限要素法では、錆の膨張圧の表現法、および、ひびわれ発生条件を十分に検討しないと、上記のひびわれパターンを再現することができない。

## 謝辞

本研究の実施にあたっては、小田川昌史氏（東電設計㈱）の協力を得ました。ここに、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 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われ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 第10巻 第2号、1988、pp.505-510.
- 2) 高岡祐二、丸山久一、清水敬二、小田川昌史；鉄筋の腐食量とコンクリートのひびわれ幅の関係のモデル化、第43回 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部、1988、PP.290-291.