



Title	コンクリート中の鉄筋の腐食による付着性状の変化 (1)
Author(s)	和仁屋, 晴謹; 具志, 幸昌; 伊良波, 繁雄
Citation	琉球大学工学部紀要(24): 47-57
Issue Date	1982-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/17672">http://hdl.handle.net/20.500.12000/17672</a>
Rights	

コンクリート中の鉄筋の腐食による付着性状の変化 (1)

和仁屋晴謹\* 具志 幸昌\* 伊良波繁雄\*

**The Bond Behavior of Corroded Reinforcing Bars  
in Concrete. I**

Haruyoshi WANIYA, Yukimasa GUSHI, Shigeo IRAHA

**Synopsis**

This paper presents the effects of corrosion on bond behavior of reinforcing bars. Pull-out and push-out tests were performed for specimens of 15cm cube with a deformed bar D19 at the center where the bar was electrolytically corroded before the tests. The bond characteristics of specimens with corroded and non-corroded bars are investigated from the test results.

The following results are obtained from the test.

1. Initial surface cracks started when the cumulative current of 5 to 8 amp. hrs. was observed and the width ranged from 0 to 0.20mm.
2. Failure pattern of all specimens was splitting failure.
3. Total slip up to failure at free end with an electrolytically corroded bar was 1/5 to 1/10 times the one with a non-corroded bars. Existence of surface cracks due to corrosion of the bar has no effect on the slip.
4. As for the specimens with cumulative current of less than 5 amp. hrs. when no cracks was observed, the bond strength of electrolytically corroded bars ( $\sigma_{bk}$ ) was equal to or greater than one of non-corroded ( $\sigma_{bo}$ ).
5. The value of  $\sigma_{bk} / \sigma_{bo}$  dropped to 0.50 for the specimens with relatively small cracks showing cumulative current less than 8 amp. hrs. and scattered in the range of 0.25 to 0.50 for the ones having maximum crack width of 0.20 to 0.60mm where cumulative current of 9 to 17 amp. hrs. was observed.

It seems that the variance of these values was caused by the existence of different internal cracks.

6. For the specimens reinforced with a spiral bar around the center main bar where cracks observed, there was no reduction in bond strength and ductile capacity in bond. It is concluded that the reinforcement with a spiral bar around the center contributed beneficially on splitting bond failure.

**Key words :** Bond ; Cracks ; Crack width ; Deformed reinforcing bars ; Electrolysis ; Cumulative amount of current ; Corrosion.

---

受付 : 1982年4月30日

\*琉球大学工学部土木工学科

## 1. はじめに

沖縄県の塩害を受けたRC橋梁や校舎等は、すでにそのほとんどが改築されている。しかしその改築されたRC構造物の中には5~10年で、すでにコンクリートにひびわれが生じたものがあり、RC構造物の塩害の問題は、まだまだ続くものと思われる。

筆者らは、RC構造物の塩害の面からの耐久性の研究を継続中であるが、これまで実在構造物の被害調査、種々の要因を考慮したコンクリート中の鉄筋の発錆実験、コンクリート中の塩分量分布とその移動に関する実験等を行ってきた。

本実験もその一連の研究の一環をなすものであり、コンクリート中の鉄筋の腐食が力学的性状におよぼす影響を明らかにするための研究の第1段階として次のような実験を行った。すなわち電食によって種々の腐食状態を作り、コンクリートにひびわれが生じてない状態、初期ひびわれ状態（発錆によってコンクリート表面に初めてひびわれが発生した時点をこう呼ぶことにする）、さらに電食を進行させることによって、種々のひびわれ幅を有する状態の供試体を作製し、コンクリート中の鉄筋の発錆が付着性状にどのような影響をおよぼすかを明らかにしようとするものである。

コンクリートと通常使用されている鉄筋との付着特性に関する研究は、実験的研究から理論的・解析的研究および有限要素法を取り入れた研究まで数多くある<sup>7)~24)</sup>。しかし、付着特性に影響をおよぼす要因は、鉄筋径、ふし形状、ふし高さ、ふし間隔等の鉄筋の表面性状、コンクリートの品質、かぶり厚さ、横方向拘束の程度等々、種々の因子の影響を受け、その特性を検討する試験法も複雑で、引抜き、押抜き、両引きおよびはり試験体によるもの等色々な方法によって実験が行われているが、現在なお付着特性について十分明らかにされていない。

腐食鉄筋の付着に関する研究も1900年代初期から行われていて、文献3)、4)によると30年代まで、(Withy, Shank, Gillkey等)は丸鋼を対象であるが、固い錆(firm rust)なら付着強度は増進し、鉄筋の断面減少による付着強度の低下は見られなかったとしている。40年代から50年代(Johnston & Cox, Janny, Shermer)になると、初期の異形鉄筋およびPCワイヤーについて研究がなされているが、この場合も鉄筋の錆の状態によって付着強度に大きな影響をおよぼすことはない

と報告している。以上はいずれも現在のASTMの引抜き試験法によって実験したものである。

Kemp<sup>3)</sup>らは、鉄筋埋め込み位置付近のコンクリートに直接圧縮力が作用しないように工夫した偏心引抜き試験によって、種々の環境条件で腐食(腐食だけでなく、人工的に表面性状を変えたものも含む)させた異形鉄筋を用いて実験(コンクリート中で腐食させたのではない)しているが、鉄筋の物理的性質がASTM A305-56Tに合致すれば付着強度はむしろ増進し、逆の現象は見られないと報告している。

Aldridge<sup>4)</sup>らは、屋内、屋外および海水散水の3腐食環境で異形鉄筋を腐食させ、これを用いて供試体(鉄筋1本、2本接触、2本を鉄筋の3倍の間隔で埋め込んだもの)を作り、偏心引抜き法で実験している。腐食程度、鉄筋径および鉄筋間隔等を考慮して、Fergusonの研究やACI Codeとの比較検討をし、実験結果の変動は大きい、付着性状におよぼす腐食の影響はほとんどないとしている。たゞし、海水散水鉄筋で断面減少の激しいものは実験から除外している。

森永<sup>5)</sup>らは、付着強度を求めるのが目的ではないが、円柱供試体に丸鋼を埋め込んで電食させ、押抜き試験をやっているが、初期ひびわれの入ったものでも、付着強度の低下はないと報告している。

最近では、Lin<sup>6)</sup>の研究があり、これははり供試体で曲げひびわれを入れたものとそうでないものに、鉄筋に沿う縦ひびわれが発生するまで通電腐食させているが、10mA/cm<sup>2</sup>を通電させたものは、腐食のないものに比較して、曲げ耐力で50%、付着耐力は35%も低下したと報告している。

以上現在調査時点での既往の研究の概括をしたが、あらかじめ鉄筋を腐食させ、これを用いて供試体を作製し実験したものがほとんどであり、本研究のようにコンクリート中で鉄筋を腐食させ、種々のひびわれを生じさせて付着性状を検討した研究はあまり見当たらない。

本実験では簡単に行える引抜きおよび押抜き試験の2方法を採用した。この方法はコンクリートに作用する応力は、実際のはりの主鉄筋周辺のコンクリートに作用する応力状態とは異なるという欠点はあるが、鉄筋の付着特性を比較する目的には適しているといわれており、また定着に関する概略の性質を知ることができる。したがって、本実験の目的を遂行するにあつ

ては、十分役立つ方法である。

## 2. 実験方法

### (1) 実験計画

本実験は、鉄筋の腐食の程度によって、付着性状がどのように変化するかを明らかにすることを主眼としているが、コンクリート中での鉄筋の腐食は自然暴露状態では長日時を要するので、今回は電食による促進試験とした。先ず積算電流量と腐食量との関係を調べ、これに基づいて、積算電流量を設定し腐食実験を行った。付着実験は表-4に示すように4段階に分けて実施したが、1段階終了ごとに、その結果をふまえて次の補足実験を計画し実施した。

### (2) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント(小野田, 比重3.17)を使用し、細骨材は台湾花蓮港産の川砂(大理石の砕砂混入)を、粗骨材は本部半島産の密実堅硬な石炭岩碎石を使用した。鉄筋はD19mmの横ふし形異形棒鋼(SD40)を使用した。ふし高・ふし間隔比が0.06~0.08で、通常使用されているJIS製品である。また混練水は、専売公社製の粗製塩を配合時コンクリート重量の1%をよく溶かして使用した。骨材および鉄筋の物理的性質と力学的性質は、それぞれ表-1および表-2に示す通りである。

### (3) コンクリートの配合

配合はすべて水セメント比60%, スランプ10cm, 空気量1%でACIの方法によって設計し打設した。ほとんどの所定の値が得られたが、コンクリートの強度は表-3に示した。

### (4) 供試体の製作および養生方法

付着試験用供試体は15×15×15cmの角柱体であるが、型枠は米国製の曲げ試験用鋼製型枠を、供試体中心に

表-1 骨材の物理的性質

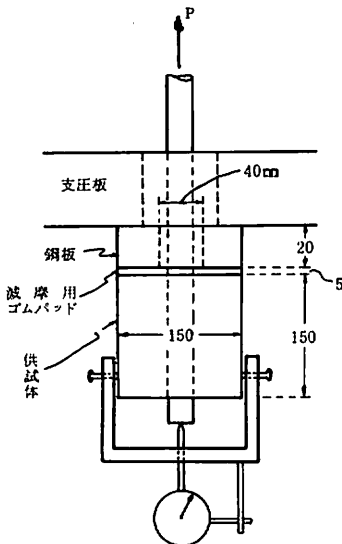
骨材	比重	吸水率 (%)	粗粒率	絶乾単位重量 (kgf/cm <sup>3</sup> )	最大寸法 (mm)
細骨材	2.64	1.35	2.65	1860	2.5
粗骨材	2.71	0.48	6.59	1600	20

表-2 鉄筋の力学的性質

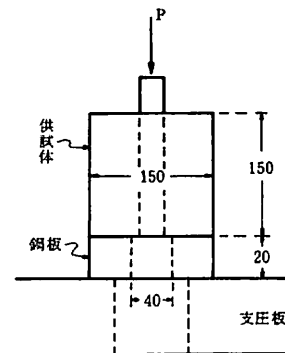
試験片	降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
2号	44.0	68.0	2.1×10 <sup>6</sup>	20.0

表-3 コンクリートの強度

強度	シリーズ	A	B	C	D
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		279.0	297.0	270.0	268.0
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		26.1	29.2	28.6	25.7



a) 引抜き試験



b) 押抜き試験

図-1 付着試験

鉄筋を挿入できるように加工したものの2個（1個で供試体6個作製）で、1シリーズ分計12個を同時に作製した。コンクリート打設時に鉄筋は水平に置かれた、いわゆる横打ち形供試体である。また同時に強度試験用のシリンダー（ $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ）を作製した。翌日脱型し、付着試験および圧縮・引張試験用供試体ともに、それぞれの試験日まで室内空中養生とした。なおコンクリートの混練には容量100ℓの強制練りミキサーを使用した。供試体の形状寸法および載荷方法を図-1に示す。

### (5) 試験方法

鉄筋の電食試験は、図-2に示すように、透明な実験用ポリ水槽に、供試体の一端に突出した鉄筋部分を電気が流れるのを遮断するためシーリングワックスで被覆した供試体を設置（同一シリーズのものは同時に）し、3% NaCl 水溶液を所定の位置まで満たし、鉄筋・電流計・直流電源・対極用銅板を連結し通電した。なお電圧は35Vの一定とし、電流値は、通電開始時から電流値がほぼ安定するまでは約10分間隔で、その後は30～60分間隔で測定した。

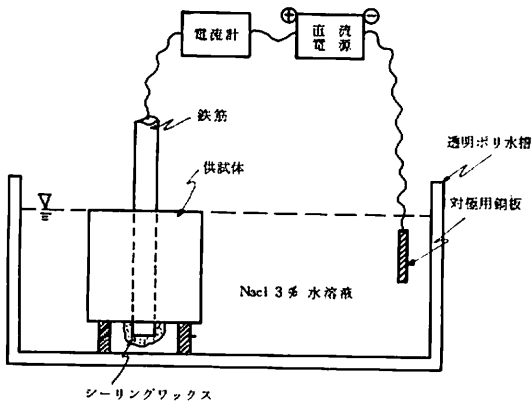


図-2 電食試験

この電食試験は付着試験の前日までに終了するように行った。これは予備実験で、鉄筋の腐食による膨脹圧によって現われるコンクリート表面のひずみ試験を実施したが、このひずみは、電食試験終了後、2～3時間のうちに急激に低下するため、付着試験当日終了

するようにすると、供試体内部の圧力を一定に保つことが困難であると思われたので、内圧が安定する時間を確保するためである。しかし、この電食試験終了時点からの経時変化を実験要因の一つとした実験も実施してみる必要があるかもしれない。

コンクリートの表面ひびわれ発生の確認は水槽壁面から、電流値の変化の状態も勘案して、視察およびクラック幅測定器（最小目盛1/20mm）を押し当てて行った。

また腐食減量の測定は、供試体から取り出した鉄筋を15% HCl 溶液に4～5分間浸漬した後、錆をワイヤブラシで落しながら水道水で洗浄し、さらにアルコールで表面を洗い、乾燥させてから鉄筋重量を測定した。

付着試験は、主体は引抜き試験であるが、押抜き試験も一部実施しており、Aシリーズは材令15日で、他は材令10日で行った。またAシリーズの引抜き試験だけは付着長が10cmであるが、その他は引抜きおよび押抜きともに付着長は15cmである。さらにDシリーズのNa3～Na8の引抜き供試体（表-4参照）はらせん鉄筋入りである。試験はいずれも万能試験機を使用した。載荷速度は200kgf/secとした。

引抜き試験にあたっては、図-1に示すように、載荷板（厚さ20mm、孔径40mm）と供試体間に厚さ5mmの減摩用ゴムパッドを挿入した。また鉄筋の自由端すべり量は1/1000mmダイヤルゲージで測定した。しかし押抜き試験の場合は、ゴムパッドも使用していないし、鉄筋のすべり量も測定していない。

## 3. 実験結果および考察

各シリーズの付着強度、積算電流量およびひびわれ幅等の測定結果をまとめて表-4に示す。

### (1) 電流の経時変化

一例として、AシリーズのNa8供試体の電流の経時変化を図-3に示すが、その他の供試体もほぼ同様な傾向を示した。電流値は、通電開始後、約2時間程度まではわずかに上昇する傾向にある。その後多少の増減はあるが、ある時間ほぼ一定値を保ち、さらに時間が経過すると、ひびわれ発生確認直前まで低下していき、それから上昇し、またやや低下していく傾向を示す。

表-4 実験結果

実験名	供試体番号	付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	きれつ発生時積算電流量 (A・hr)	きれつ発生までの通電時間 (hr)	最終積算電流量 (A・hr)	最終通電時間 (hr)	きれつ幅 (mm)	実験名	供試体番号	付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	きれつ発生時積算電流量 (A・hr)	きれつ発生までの通電時間 (hr)	最終積算電流量 (A・hr)	最終通電時間 (hr)	きれつ幅 (mm)
A シリズ	1	192.5			0	0	0	B シリズ	1	69.7			0	0	0
	2	180.0			0	0	0		2	58.6			0	0	0
	3	197.5			3.02	14.3	0		3	68.1			3.78	12.0	0
	4	195.0			3.47	14.3	0		4	72.2			3.83	12.0	0
	5	67.5	6.11	21.0	6.11	21.0	0.10~0.10		5	51.4	6.67	21.0	6.67	21.0	0.05~0.15
	6	120.8	6.84	22.3	6.84	22.3	0~0.05		6	76.1	8.15	22.3	8.15	22.3	0.025~0.05 0~0.075
	7	74.2	5.51	24.3	9.80	42.0	0~0.15 0~0.10		7	37.8	7.51	24.0	14.38	46.6	0.15~0.05 0~0.05 0.05~0.025
	8	50.0	6.12	22.6	10.71	40.2	0.30~0.30		8	31.1	7.37	22.8	17.72	47.0	0~0.20 0.05~0.40
	9	102.7			0	0	0		9	111.1			0	0	0
	10	109.6			4.93	14.3	0		10	130.6			3.75	12.0	0
	11	57.0	7.21	25.4	7.21	25.4	0~0.10		11	82.8	6.76	21.0	6.76	21.0	0~0.05
	12	33.3	8.31	22.3	15.73	40.0	0.40~0.40		12	57.0	7.20	24.0	13.93	46.6	0.10~0.20
C シリズ	1	59.7			0	0	0	D シリズ	1	62.4			0	0	0
	2	63.1			0	0	0		2*	66.1			0	0	0
	3	59.4			4.64	12.0	0		3*	81.9			0	0	0
	4	45.3	5.01	12.0	5.01	12.0	0.10~0.10		4*	73.3			0	0	0
	5	42.2	7.22	18.3	7.88	20.0	0.20~0.20		5*	81.7	5.66	18.3	5.66	18.3	0.025~0.05
	6	33.6	7.19	18.3	7.78	20.0	0.15~0.20		6*	86.7	6.13	18.3	6.13	18.3	0~0.05
	7	16.1	6.74	18.3	17.11	46.0	0.50~0.50		7*	83.6	5.84	18.0	9.77	29.8	0.15~0.15
	8	30.6	7.15	18.3	17.75	46.0	0.50~0.60		8*	80.0	6.10	19.0	9.78	29.8	0.15~0.20
	9	90.8			0	0	0		9	101.4			0	0	0
	10	105.3			4.54	12.0	0		10	63.9	5.53	15.8	5.53	15.8	0.15~0.20
	11	59.7	6.64	18.0	7.16	20.0	0.05~0.05		11	38.9	5.37	15.8	8.10	22.8	0.20~0.30
	12	39.4	7.77	22.5	14.98	46.0	0.10~0.15		12	42.2	5.33	15.8	11.10	29.8	0.40~0.50

注：1. 各シリーズともNo1～No8は引抜き試験, No9～No12は押抜き試験である。

2. Dシリーズの\*印はφ2.5mm筋の内径10cm, ピッチ2cmのらせん鉄筋入りである。

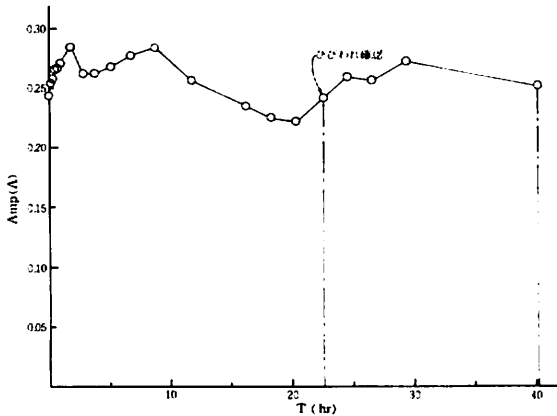


図-3 電流の経時変化 (Aシリーズ, Na 8)

通電直後、電流値が上昇するのは、養生期間中に供試体表面付近が乾燥していたのが、徐々に湿潤状態になっていくためであると考えられる。その後ある程度腐食が進行すると、供試体内の酸素が欠乏すると、腐食生成物が、コンクリートと鉄筋との接触面に蓄積し、鉄筋表面において分極現象が生じ電流値が低下してくるものと思われる。しかしこの低下もごくわずかであるので腐食は進行し、ついにその膨脹圧によってコンクリートにひびわれが生じ、それが表面まで達すると、塩水中の溶存酸素の補給と塩素イオンの没入によって鉄筋表面の分極現象がくずれ、再び腐食反応が活発になるが、腐食生成物がひびわれ部分を充填するようになり、また反応が鈍くなっていくのではないかと考えられる。

コンクリート表面のひびわれ発生は、電流値が低下する谷間を越え、さらに上昇する途中で確認しているが、実際には谷底の部分で発生しているのではないかと考えられるので、今後ひびわれ発生の観察はもっと注意して行う必要があるのではないかと考えている。

## (2) 積算電流量と腐食量

この関係の測定値は、あらかじめ積算電流量と腐食減量との関係を測定した6供試体と押抜き試験後測定した6個の計12個である。引抜き供試体の場合、コンクリートから露出している部分の鉄筋長が相当に長く、また天秤の容量の関係もあって、腐食量を精度良く測定することが困難であったので測定していない。

ここでいう腐食量とは次のようにして求めたものである。すなわち腐食前の無処理鉄筋(たゞし、使用にあたっては、鉄筋表面をアルコール液で拭いてある)重量から試験後15%塩酸溶液で処理をほどした後の鉄筋量を差引いた値から、さらに電食させてない供試体の鉄筋を腐食鉄筋と同様な処理をほどした時の減少量を差引いた重量を附着面積で除した単位面積当りの腐食量である。また附着面積は、鉄筋(D19)の公称周長( $u = 6.0 \text{ cm}$ )と附着長との積を用いた。なお後述の附着強度などの算出にあたっては、この附着面積を用いている。次に、積算電流量は図-3に示す電流と通電時間との関係のグラフと縦・横軸との囲む面積を求めた値である。

積算電流量( $Q$ )と腐食量( $W_c$ )との関係は理論的には比例関係にあるが、この場合図-4に示すように、ほとんどの傾向は示しているものの、必ずしも直線関係

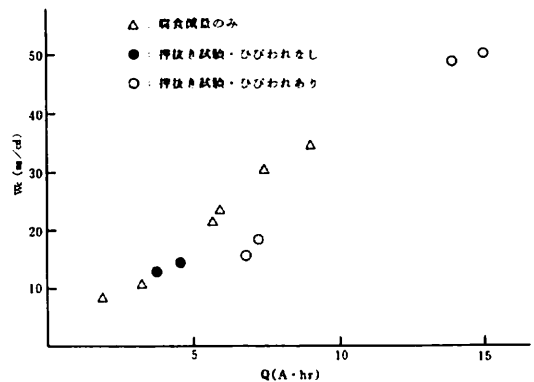


図-4 積算電流量( $Q$ )と腐食減量( $W_c$ )

にあるとはいえない。これは、コンクリート自体が不均質材料であること、また供試体の乾湿の程度の相違、ひびわれの有無等によって、電気抵抗にも差異があると思われるので、ある程度のばらつきは避けられないのではないかと考えている。また表-3に示したように、コンクリート表面のひびわれ発生を確認した時点の積算電流量は5~8 A·hrの範囲にある。図-4では5 A·hr付近を境にして腐食量の変化の傾向に差異が見られるが、このことは、5 A·hr付近で供試体にひびわれが発生し、腐食反応が活発になり、腐食が増加したものと思われる。

積算電流量と腐食量との関係は、供試体中の含塩量によって相違し、塩分量が一定であれば直線関係にあ

り, さらに塩分量が増えると腐食量の実測値と理論値が一致してくるという報告<sup>5)</sup>もある。したがって, 統一した関係式を当てはめるのは無理であるかもしれない。しかし今後試料を増して検討したいと考えている。

(3) 積算電流量とひびわれ幅

図-5は実測ひびわれ幅をプロットしたものであり, 最大値と最小値を示しておいた。表面ひびわれは, 全断面ほぼ一樣な大きさで入っているのもあるし, 最大

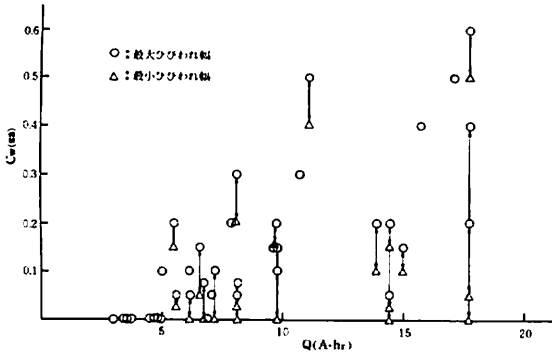


図-5 積算電流量とひびわれ幅

値と最小値との間にはかなりの差があるものもあり, また断面の途中までしか進展していないというものもあるが, ほとんどの場合1本だけ入っていた。ひびわれ幅の範囲は大きい, その最大値は, 積算電流量の増加につれて段々大きくなっていることがわかる。また図-4の腐食量ともほぼ対応している。

(4) 自由端すべり量と付着応力度

図-6と図-7はCシリーズの, 図-8はDシリーズの各供試体の自由端すべり量 ( $S_f$ ) と平均付着応力度 (以下, 単に付着応力度と略称する) との関係を示したものである。ただし, 電食供試体のすべり量や付着応力度と電食なし供試体 (以下, 無錆供試体とする) のそれらとの比較がしやすいように次のようにした。すなわち, 各荷重段階での個々の供試体の付着応力度を  $\sigma_b$ , 各供試体の付着強度を  $\sigma_{bk}$ , 無錆供試体の付着強度を特に  $\sigma_{bo}$  として, 図-6および図-8は, それぞれCおよびDシリーズの  $\sigma_b/\sigma_{bk} \sim S_f$  の関係, 図-7はCシリーズの  $\sigma_b/\sigma_{bo} \sim S_f$  の関係を示している。なお, A, Bシリーズのこの関係はCシリーズの場合と大差ないので省略した。

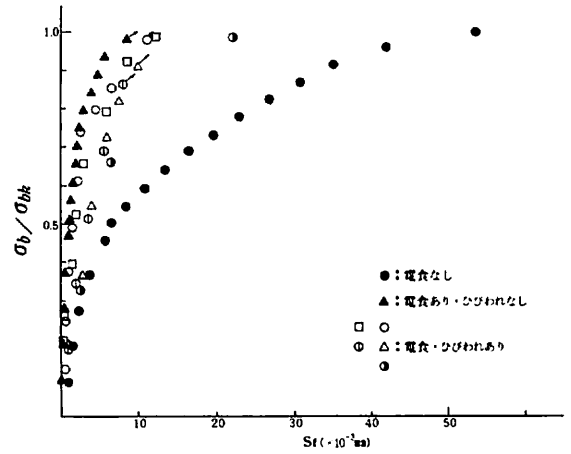


図-6 自由端すべり量 ( $S_f$ ) と付着応力度比 ( $\sigma_b/\sigma_{bk}$ ) {Cシリーズ}

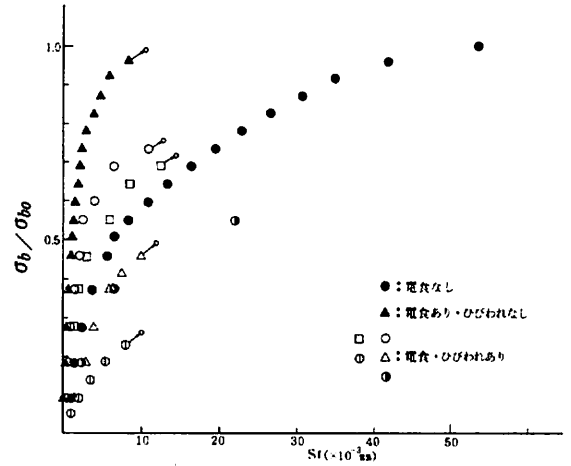


図-7 自由端すべり量 ( $S_f$ ) と付着応力度比 ( $\sigma_b/\sigma_{bo}$ ) {Cシリーズ}

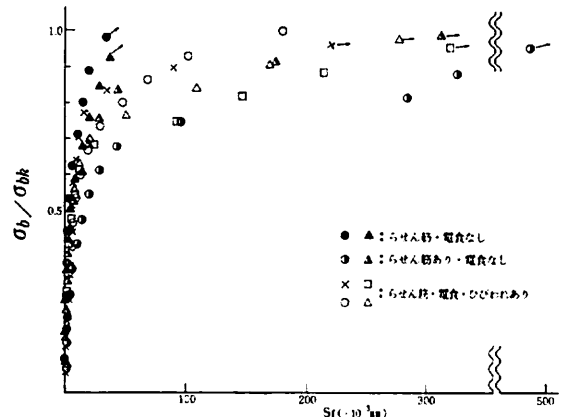


図-8 自由端すべり量 ( $S_f$ ) と付着応力度比 ( $\sigma_b/\sigma_{bk}$ ) {Dシリーズ}



図-6と図-7からわかるように、無錆供試体の終局すべり量と電食供試体のそれとは、明らかな差異があり、電食供試体のすべり量は顕著に小さくなっている。付着試験は、前述のように、電食試験が終了してから約24時間経過してから行っているの、錆圧による内部応力もかなり緩和した状態で行っているわけである。したがって、電食供試体のすべり量が小さいのは、次のような理由によるのではないかとと思われる。すなわち鉄筋の発錆によって、腐食生成物がコンクリートと鉄筋間のすき間を埋めると、その膨脹圧によって鉄筋周辺のコンクリートが押し固められて、ある程度強固になったためではないかと考えられる。

ひびわれの発生までにはいたらない供試体は、鉄筋周辺の押し固められたコンクリートにささえられて、すべりも小さく、付着強度も少々増加するが、一旦ひびわれが入ると急激に表面までひびわれが進展し、小さいすべりで破壊に至る。

一本程度の小さいひびわれの入った供試体は、やはり前述の理由で、初期のすべりは小さいが、すでにひびわれが入っているの、これが引金となって別のひびわれを誘発し、無錆供試体より小さい荷重で破壊に至る。

0.2~0.6 mm程度の大きなひびわれの入った供試体は、当然内部ひびわれも多数発生していると考えられるので、初期の段階からひびわれも開いていき、無錆供試体の50~25%位の荷重で破壊してしまうのではないかとと思われる。

以上は横補強のない供試体の場合であるが、図-8に示したDシリーズの場合には、錆が発生し、しかもひびわれ(ただし、最大0.20 mmである)が生じていても、付着耐力および付着に対するダクティリティもなんら低下することがないことを示している。

人工的な縦ひびわれを入れた実験結果によると、一本の縦ひびわれがあっても、らせん鉄筋を入れた場合、付着強度の低下はないこと、強度低下をきたすのは2本以上のひびわれが入っていて、極端に横方向拘束が小さい場合であること、ただし横補強のない場合には、別の縦ひびわれが発生しやすく、付着強度は小さくなるという報告もある<sup>24)</sup>。

本実験の場合、表面ひびわれは一本であるが、内部ひびわれはかなりあるものと推察されるので、前述の研究とは直接比較はできないが、本実験のような条件

でも、らせん鉄筋の補強効果は十分認められた。

### (5) 積算電流量および最大ひびわれ幅と付着強度の変化

図-9は、A~Dシリーズの個々の供試体の付着強度( $\sigma_{bk}$ )と各シリーズにおける無錆供試体の付着強度( $\sigma_{bo}$ ) (ただし、2個の平均値)との比と積算電流量との関係を示したものである。図-5および表-4にも示してあるように、らせん鉄筋のない供試体の場合、積算電流量が5 A・hr付近までは表面ひびわれは発生していない。また図-9で明らかなように、この付近までの発錆に対しては、付着耐力の低下は見られず、多少大きくなる傾向にある。

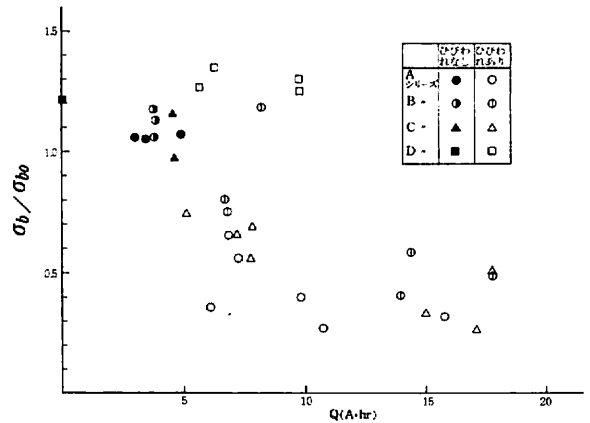


図-9 積算電流量と付着強度の変化

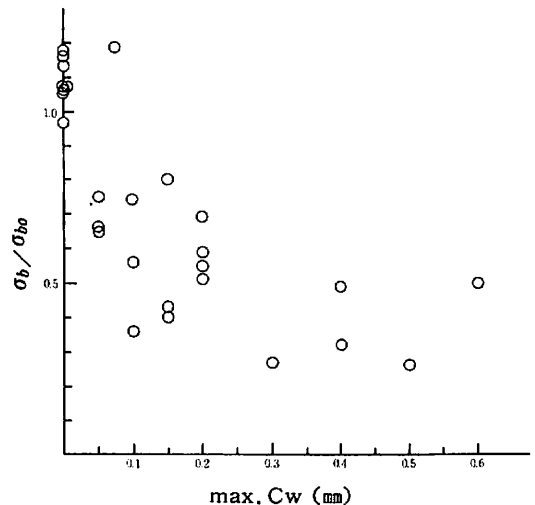


図-10 最大ひびわれ幅と付着強度の変化

本実験の場合、コンクリート表面に現われたひびわれは、ほとんど一本であるが、図-10の最大ひびわれ幅と付着強度の変化との関係でもわかるように、一旦ひびわれが発生した供試体の付着強度は急激に低下していくことがわかる。

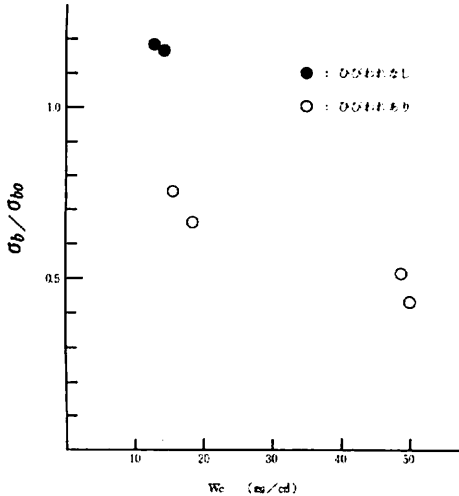


図-11 腐食量と付着強度の変化

初期ひびわれが発生するまでの積算電流量の最大値である約8 A・hr (最大ひびわれ幅0.20mm以下)までは、50%程度まで低下していき、積算電流量がそれ以上になると50~25%位の範囲にあるようである。この範囲では、最大ひびわれ幅は0.20~0.60mmの広い範囲にわたっており、大体ひびわれ幅の大きいものほど強度低下も大きい、本実験範囲での最大値0.60mmの供試体でも50%の耐力を有していて、必ずしもひびわれ幅に対応していない面もある。このようなばらつきが現われたのは、表面ひびわれだけでなく、内部ひびわれの影響も大きく関与しているためではないかと考えている。コンクリートの割裂は、電食時のひびわれを伴っていることまでは確認してあるが、その他のひびわれについて観察しなかったのは、今回の実験の手落ちであった。今後、なんらかの方法で内部ひびわれの観測までやる必要があるものと考えている。

次にDシリーズのらせん鉄筋入り供試体の場合、図-9で明らかなように、積算電流量が10 A・hrまで、最大ひびわれ幅0.20mmまでの本実験の範囲までなら、付着耐力の低下は全くないこと、割裂破壊に対しては、横方向補強が有効な措置であることがわかる。

図-11は、腐食量 (Wc) と  $\sigma_{bk}/\sigma_{bo}$  の関係を示したものである。付着試験を実施した鉄筋の腐食減量を測定したのは押抜き試験の6個だけで、試料は少ないが、腐食量の増加につれて  $\sigma_{bk}/\sigma_{bo}$  は減少している。また、図-9および図-10と大体対応している。しかし、試料が少ないので、今後はこの関係の試料を増して、腐食量と付着強度の変化の関係を確立したいと考えている。

#### 4. まとめ

本実験は、コンクリート中に埋め込んだ鉄筋を電食させ、その発錆程度によって、コンクリートの付着性がどのように変化するかを明らかにするために行ったものである。付着試験は、主として引抜き試験によるものが、一部押抜き試験も行い、無錆供試体の付着強度と電食供試体のそれとを比較検討した。その主な結果は次の通りである。

(1) 供試体の表面にひびわれが発生するまでの積算電流量 (電圧は35Vの一定) は、およそ5~8 A・hrの範囲にあり、初期ひびわれ幅は0~0.20mm程度であった。

(2) 本実験の供試体の破壊は、すべてコンクリートの割裂破壊であった。

(3) 電食供試体の自由端すべり量は、表面ひびわれの有無に関係なく、無錆供試体のその1/5~1/10程度であった。

(4) 電食供試体の付着強度 ( $\sigma_{bk}$ ) は、表面ひびわれがない場合 (積算電流量が約5 A・hrまで) は、無錆供試体の付着強度 ( $\sigma_{bo}$ ) と同程度か、わずかに大きい傾向を示した。

(5) 供試体に初期ひびわれが発生すると、電食供試体の付着強度は約50%程度まで低下し、積算電流量が9~17 A・hr (最大ひびわれ幅が0.20~0.60mm) の範囲では、およそ50~25%の範囲にばらついている。このばらつきは、コンクリートの内部ひびわれの相違によるものと考えられる。

(6) らせん鉄筋入り供試体では、ひびわれが発生 (ただし、最大0.20mmである) しても付着強度の低下はみられず、また付着に対するダクティリティも十分あり、付着割裂破壊に対して、補強効果があることが認められた。

以上、今回判明した主な点を列挙したが、今回は引抜き供試体の鉄筋の腐食量を測定することができな

ったので、腐食量と付着強度の変化の関係を十分究明することができなかった。

この面の関係の確立や、コンクリートの品質や付着長の影響等、また鉄筋の発錆が付着疲労性状におよぼす影響等、今後検討しなければならない事項も多い。

謝辞：この実験の実施にあたっては、コンクリート研究室の卒業研究生の親泊宏、喜屋武哲君をはじめ、研究室の諸君の多大な協力をあおいだ。こゝに深謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) 村田二郎：鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法，コンクリート工学 vol. 18, No. 4, PP. 14～22, Apr. 1980.
- 2) 森田司郎：鉄筋とコンクリートとの付着性状，コンクリート工学 vol. 16, No. 10, PP. 1～10, Oct. 1978.
- 3) E. L. Kemp, F. S. Brezny & J. A. Unterspan: Effect of Rust and Scale on the Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Bars, J. of ACI, vol. 65, PP. 743～756, Sept. 1968.
- 4) W. W. Aldridge, M. Ghaffarzadeh & K. Farhadi: Effect of Corrosion and Bar Spacing on Bond Properties of Reinforcing Bars in Concrete, Univ. of Oklahoma Research Institute.
- 5) 森永，野萱，近藤：鉄筋のさびの許容量に関する検討，鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム，日本コンクリート会議，PP. 17～20，昭和50年3月.
- 6) C. Y. Lin: Bond Deterioration due to Corrosion of Reinforcing Steel, ACI, SP-65-15, Performance of Concrete in Marine Environment, PP. 255～269, 1980.
- 7) R. G. Mathey & D. Watstein: Investigation of Bond in Beam and Pull-Out Specimens with High-Yield-Strength Deformed Bars, J. of ACI, vol. 57, PP. 1071～1090, Mar. 1961.
- 8) R. E. Untrauer & R. L. Henry: Influence of Normal Pressure on Bond Strength, J. of ACI, vol. 62, PP. 577～586, May, 1965.
- 9) P. M. Ferguson, J. E. Breen & J. N. Thompson: Pullout Test on High Strength Reinforcing Bars, J. of ACI, vol. 62, PP. 932～950, Aug. 1965.
- 10) B. B. Broms: Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members, J. of ACI, vol. 62, PP. 1237～1256, Oct. 1965.
- 11) E. S. Perry & J. N. Thompson: Bond stress Distribution on Reinforcing Steel in Beams and Pullout Specimens, J. of ACI, vol. 63, PP. 865～875, Aug. 1966.
- 12) L. A. Lutz & P. Gergely: Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete, J. of ACI, vol. 64, PP. 711～721, Nov. 1967.
- 13) A. H. Nilson: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method J. of ACI, vol. 65, PP. 757～766, Jour. 1968.
- 14) L. A. Lutz: Analysis of Stresses in Concrete Near a Reinforcing Bar due to Bond and Transverse Cracking, J. of ACI, vol. 67, PP. 778～787, Oct. 1970.
- 15) Y. Goto: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, J. of ACI, PP. 244～251, vol. 68, Jour. 1971.
- 16) A. H. Nilson: Internal Measurement of Bond Slip, J. of ACI, vol. 69, PP. 439～441, July 1972.
- 17) J. Cairns: An Analysis of the Ultimate Strength of Lapped Joints of Compression Reinforcement, Magazine of Concrete Research, vol. 31, No. 106, PP. 19～27, March 1979.
- 18) R. Tepfers: Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars, Magazine of Concrete Research, vol. 31, No. 106, PP. 3～12, March 1979.
- 19) R. Tepfers: Bond Stress along Lapped Reinforcing Bars, Magazine of Concrete Research, vol. 32, PP. 135～142, Sept. 1980.
- 20) S. Somayaji & S. P. Shak: Bond Stress Versus Slip Relationship and Cracking Response of Tension Members, J. of ACI, vol. 78, PP. 217

～ 225, May-June 1981.

- 21) 第 2 回異形鉄筋シンポジウム, コンクリート・ライブラリー第14号の一連の研究, 土木学会, 1965年12月.
- 22) 野口博: 有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析 (第 2, 3 報・異形鉄筋とコンクリートの付着), 日本建築学会論文報告集, 第 258 号, PP. 27 ~ 37, 第 261 号, PP. 49 ~ 58, 昭和52年8月, 11月.
- 23) 後藤, 大塚: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発注するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, PP. 85 ~ 100, 1980年2月.
- 24) 池田尚治: 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 307 号, PP. 85 ~ 97, 1981年3月.