

論文

[1113] 腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係

正会員 島 弘 (徳島大学建設工学科)

正会員○山本恭史 (日本電信電話)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物において鉄筋が腐食した場合、鉄筋のリブの欠損および鉄筋に沿ったひびわれの発生によって付着強度の低下が生じる。この付着強度の低下によって、鉄筋が腐食した構造物では健全な構造物の破壊形式と異なったものになる可能性がある。著者ら[1]が昨年行った鉄筋が腐食したスラブの曲げ試験において、ひびわれ幅の大きい部分で鉄筋の定着破壊が認められた。そこで本研究は、鉄筋の腐食によって付着性状がどのように変化するかを実験的に調査・検討するものである。そのために、かぶり厚さと腐食の程度を変化させたときの局所付着応力-局所すべり関係を求めた。

2. 既往の研究と問題点

腐食した鉄筋の付着特性に関する研究は今までにいくらか報告されている[2],[3]が、これらの研究では定着長の短い場合の引き抜き荷重と自由端すべりから平均付着応力-平均すべり関係を求めている。しかし、付着応力-すべり関係は、定着長さ、自由端すべりの有無、荷重端からの距離など、条件によって異なるということが報告されており[4]、これらの研究の問題点として、現実の構造物へ適用するには適用範囲が限られてくる。そこで本研究では定着長を長くとり、鉄筋にひずみゲージを貼付することによって局所付着応力-局所すべり関係を求めることとした。

3. 実験

3.1 実験条件

実験要因は、腐食の程度、かぶり厚さおよび補強筋の有無である。各供試体の条件を表-1に示す。かぶり厚さは、土木構造物の一般腐食性条件下で最小とされている4cm、実際に施工された可能性のある1cm、その中間の2.5cmの3種類とした。腐食の程度は、腐食率として重量減少率で表した。実験では、腐食のないものから、補強筋のないシリーズIでは鉄筋の断面欠損が1/3程度のもの(腐食率30%程度)、補強筋のあるシリーズII, III, IVについては鉄筋全体に断面欠損がみられるもの(腐食率15%程度)までのそれぞれ4段階とした。

表-1 実験条件

シリーズ	供試体番号	かぶり (cm)	腐食率 (%)	補強筋	コンクリート強度 (MPa)
I	1	4.0	0.0	無	27.2
	2		2.5		28.4
	3		11.9		24.4
	4		28.9		24.7
II	5	4.0	0.0	有	19.5
	6		2.7		22.0
	7		4.8		23.7
	8		10.8		25.2
III	9	2.5	0.0	有	22.8
	10		3.4		27.6
	11		7.9		25.3
	12		9.9		26.0
IV	13	1.0	0.0	有	20.5
	14		2.6		22.5
	15		8.1		23.1
	16		10.9		23.3

3.2 供試体

(1)形状および寸法

供試体は図-1に示すように、四角柱状のコンクリートブロックに鉄筋を垂直に埋め込んだものであり、断面は40x30cm、高さは50cmとした。コンクリート中に非定着部は設けていない。

## (2) 使用材料

使用鉄筋はD22の高強度ねじふし鉄筋で、降伏点および引張強さがそれぞれ $f_y=606\text{MPa}$ 、 $f_u=796\text{MPa}$ である。鉄筋の黒皮はクエン酸2アンモニウム10%水溶液を用いて除去して用いた。

コンクリートは、一般土木構造物を対象として、その配合を表-2に示すように、目標強度を25MPa、水セメント比を60%、骨材最大寸法を25mmとした。

## 3.3 実験方法

### (1) 供試体の作製

実験に使用した鉄筋の断面を図-2に示す。ひずみゲージを貼付するために、鉄筋のリブのない両側に幅7mm、深さ3mmの溝を切削した。したがって、切削によるリブ欠損はない。腐食

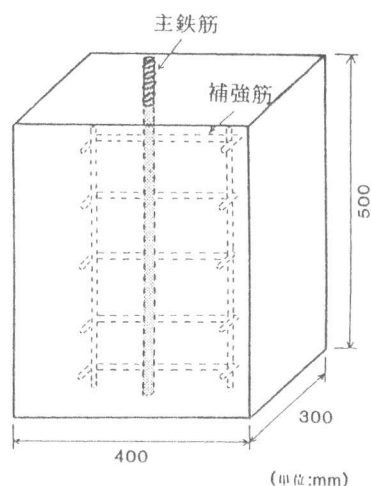


図-1 供試体

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			混和剤	
						5-10 mm	10-20 mm	20-25 mm	減水剤	A E 剤
25	60	40	170	283	728	323	538	251	0.70	0.17

量を電食前後の重量差によって求めるために、各鉄筋の重量を測定後、片側4.5D間隔(Dは鉄筋径)で4箇所、非定着部1箇所の両側合計10箇所にひずみゲージを貼付した。そしてVMテープを接着した後、シリコン系のコーティング材を用いて水分の進入がないよう十分にコーティングを施した。スペーサによる腐食への弱点をなくすために、スペーサを用いずに鉄筋を固定した。補強筋の配置は、鉄筋に対してかぶりと反対面に鉄筋から約5cmの位置にD10を10cm間隔で配置した。

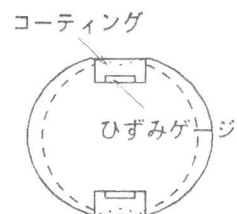


図-2 鉄筋断面

### (2) 電食

電食方法を図-3に示す。供試体を人工食塩水(濃度:3.3重量%)に浸漬し、電流密度を約 $2.8\text{mA/cm}^2$ とした一定電流を供給することによって電食を行った。電流が3次元方向ではなくかぶり方向だけに流れるように、かぶり面以外にビニールシートを接着した。また、圧縮試験用シリンダを供試体と同じ条件下で養生し、引き抜き試験時に圧縮強度試験を行った。各供試体の圧縮強度は表-1に示すものである。

### (3) 引抜き試験

引抜き試験装置を図-4に示す。供試体上部には上端部のひびわれを拘束しないようにH鋼をひびわれから充分に離して配置した。荷重速度は、 $50\text{kN/min}$ とし、自由端すべりを精度1/1000の変位計を用いて測定した。

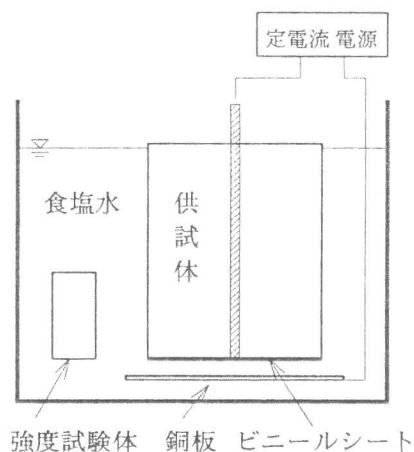


図-3 電食方法

(4) 腐食鉄筋の引張試験

引抜き試験後に鉄筋を供試体からはつり出し、引張試験を行った。測定項目は、引張荷重と引抜き試験でひずみを測定した10箇所のひずみである。

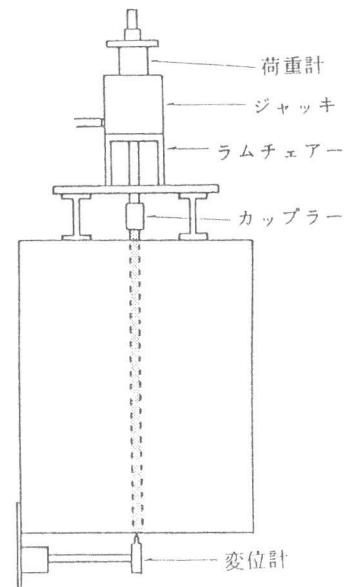


図-4 引抜き試験

4. 実験結果および考察

4.1 ひびわれと腐食量

図-5 に腐食率とひびわれ幅との関係を、図-6 に腐食率約5%でのひびわれ状況を示す。かぶり厚さ4.0cmのシリーズ I, II では腐食の増加と共にひびわれ幅も大きく増加しているが、かぶり厚さが小さくなるにつれてその増加割合は小さくなる。これは、鉄筋位置で同じひびわれ幅であってもコンクリート表面ではかぶりによって異なってくることを、および図-6 に示すように、かぶりによってひびわれ発生パターンが異なり、かぶりが小さい場合にはかぶりコンクリートが剥離するように三角形ポップアウトが起こったためである。

4.2 引き抜き試験による破壊状況

かぶり厚さが4cmのシリーズ I, II においては、最大荷重の後に鉄筋が徐々に引き抜けて荷重が低下したが、シリーズ III, IV では最大荷重の後、かぶりコンクリートが三角形に押し出されて脆性的に破壊した。

4.3 ひずみ分布および付着応力、すべりの決定方法

鉄筋に沿った各位置でのひずみ分布は、もよりの3点を結ぶ2次放物線をつなげること

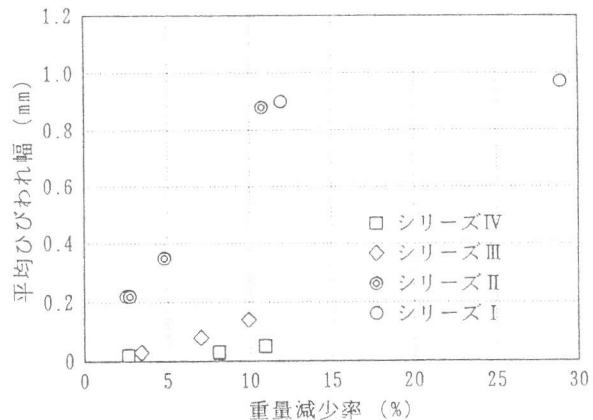


図-5 腐食率とひびわれ幅との関係

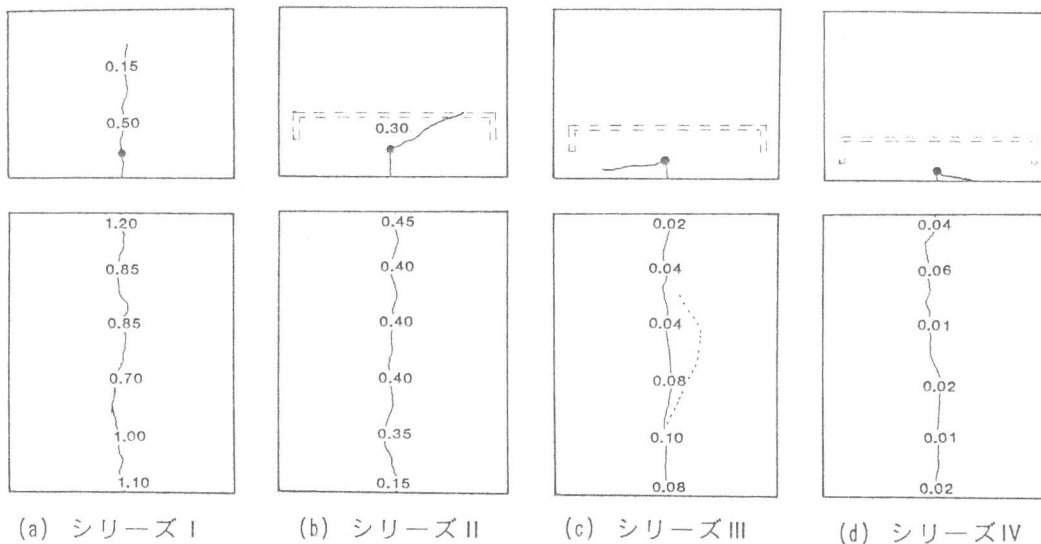


図-6 ひびわれ状況 (図中の数値はひびわれ幅, mm)

により求めた。図-7に供試体No.9のひずみ分布を示す。任意の点のすべり量は自由端から考えている点までのひずみを積分したものに自由端すべりを加えたもので求まる。任意の点の付着応力は鉄筋が健全な場合は次式で表せる。

$$\tau = \frac{1}{u} A_s \cdot E_s \frac{d\varepsilon}{d\chi} \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ ：付着応力， $A_s$ ：鉄筋の断面積， $E_s$ ：ヤング係数， $d\varepsilon/d\chi$ ：ひずみ分布の傾き， $u$ ：周長である。

しかし、本研究では腐食による断面欠損があり、測定ひずみからその点における鉄筋の引張力を求めることはできず、(1)式をそのまま適用することはできない。そこで、一例として図-8に供試体No.9の腐食した鉄筋の引張力と各ひずみ測定点でのひずみの関係を示す。この関係を

$$P = k \cdot \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 $P$ ：引張荷重， $k$ ：断面欠損を考慮した各ゲージ貼付点における剛性とし、最小自乗法によって各点での $k$ を求める。そして(2)式を(1)式に代入することによって

$$\tau = \frac{1}{u} k \frac{d\varepsilon}{d\chi} \quad (3)$$

として付着応力を算定した。ここで、 $u$ は応用性から公称周長とした。周長に腐食による断面減少を考慮してもよいが、本実験の腐食程度ならば鉄筋の剛性変化から求める断面減少は後の表-3に示すように小さく、それが周長に及ぼす影響はさらに小さくなり、考慮しても結果はほとんど変わらないことを確認している。

#### 4.4 かぶりと局所付着応力-局所すべり関係

腐食率が3%程度である供試体No.2(かぶり4cm, 補強筋無), No.6(かぶり4cm, 補強筋有), No.10(かぶり2.5cm), No.14(かぶり1cm)の付着応力-すべり関係を図-9に示す。コンクリート強度および鉄筋径の影響を除くために、縦軸は付着応力をコンクリート圧縮強度の2/3乗で、横軸はすべりを鉄筋径で除したもので表した[4]。自由端すべりが生じると付着応力には自由端すべりの大きさの影響が出るため[4]、本研究では対象を自由端すべりが発生するまでとした。図中に島ら[4]の付着割裂ひびわれが生じないマッシュなコンクリートの中心に埋め込まれた鉄筋に対する付着応力-すべり関係式を破線で示す。本実験ではひびわれが生じているので、ひびわれのない島らの場合に比べて付着応力は半分程度に小さくなっている。

それぞれの図において、コンクリート端から4.5Dの位置の付着応力が小さくなっているのは、コンクリート端部の影響である。コンクリート端部から5D程度以上の深さにおいては、付着応力-すべり関係は位置によらず同じとなるとされているが、本実験では、端部より5D以上の位

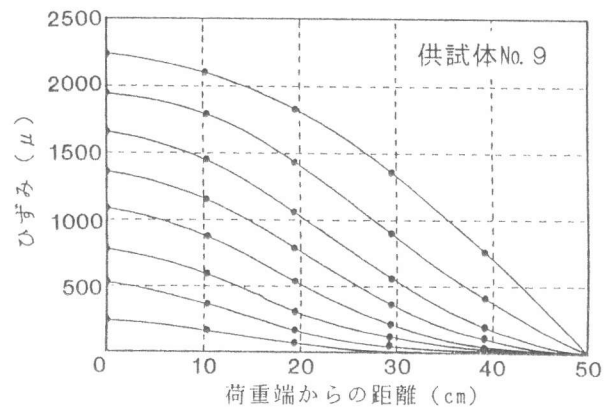


図-7 引抜き試験におけるひずみ分布

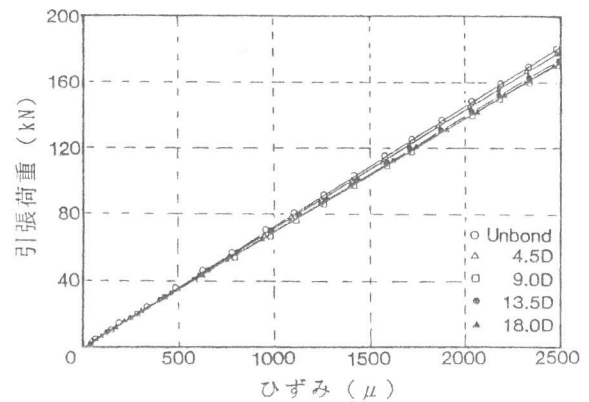


図-8 鉄筋各点の引張荷重とひずみとの関係

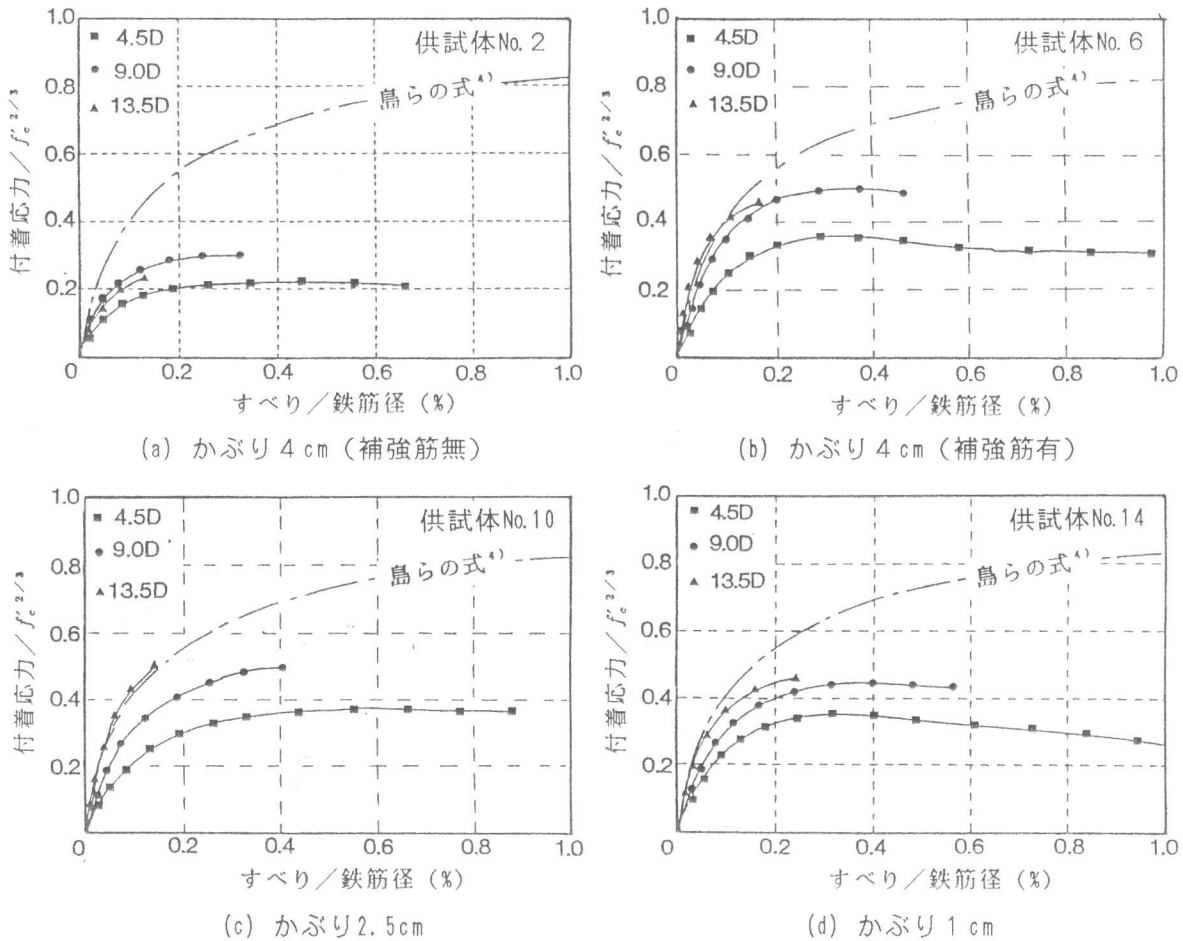


図-9 局所付着応力-すべり関係

置で付着応力-すべり関係が異なるものが現れた。これは、特にかぶりが小さい場合には場所によってひびわれの開き具合が異なり、その影響が現れた可能性が考えられる。

#### 4.5 腐食率と最大局所付着応力との関係

表-3 に最大局所付着応力  $\tau_{max}$ 、平均付着強度  $f_b$ 、鉄筋の断面欠損を考慮した剛性  $k$  の低下割合 (腐食部 4ヶ所の  $k$  の平均/非腐食部の  $k$ ) の値を示す。最大局所付着応力は、荷重端から 9.0D および 13.5D における点での自由端すべりが発生するまでの最大の付着応力、平均付着強度は最大引抜き荷重を定着表面積で除しものである。 $\tau_{max}$ 、 $f_b$ ともコンクリート強度の  $2/3$  乗で割ることによってコンクリート強度の影響を取り除いた。最大局所付着応力と平均付着強度は大差

表-3 最大局所付着応力、平均付着強度および鉄筋の剛性低下率

シリーズ	供試体番号	$\frac{f_b}{f_c^{2/3}}$	$\frac{\tau_{max}}{f_c^{2/3}}$	断面欠損による剛性低下率
I	1	0.62	0.77	1.00
	2	0.31	0.31	0.96
	3	0.13	0.27	0.91
	4	0.17	0.28	0.86
II	5	0.73	0.79	1.00
	6	0.46	0.50	0.97
	7	0.36	0.35	0.96
	8	0.20	0.28	0.88
III	9	0.56	0.60	1.00
	10	0.48	0.48	0.99
	11	0.38	0.34	0.96
	12	0.32	0.28	0.95
IV	13	0.39	0.44	1.00
	14	0.41	0.41	0.98
	15	0.36	0.38	0.91
	16	0.40	0.36	0.90

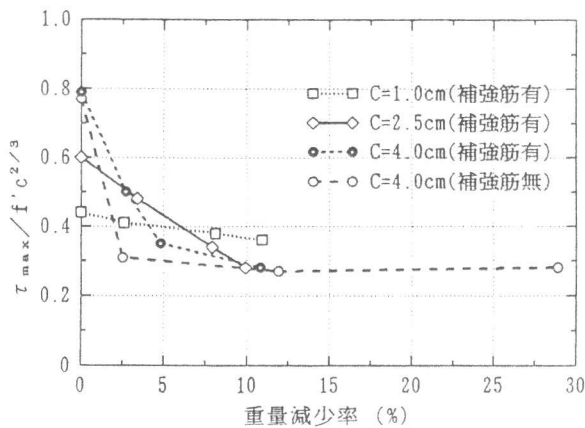


図-10 腐食率と最大局所付着応力との関係

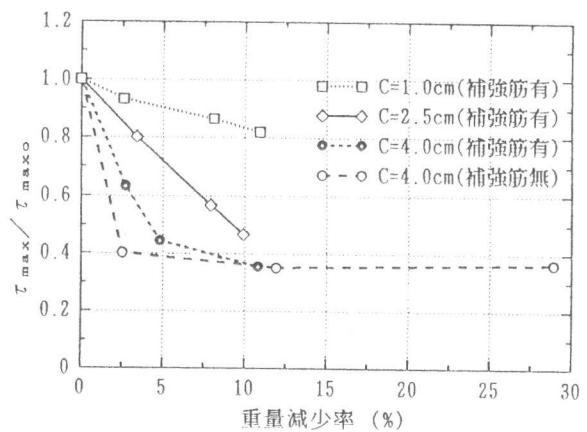


図-11 腐食率と付着応力低下度との関係

ない結果となっている。

各供試体における重量減少率で表した腐食率と最大局所付着応力の関係を図-10に示す。腐食がないときの最大付着応力は、かぶりが小さいほど小さくなっており、腐食が進むとそれよりさらに最大付着応力が小さくなっている。また、最大付着応力の絶対値としては、腐食率が大きくなると、かぶりの大きさにかわらず、同程度のものとなる結果となった。

各かぶり厚さにおける腐食による最大付着応力の低下率をみるために、腐食のないときの最大付着応力 ( $\tau_{max0}$ ) に対する腐食したときの最大付着応力の低下率と腐食率との関係を図-11に示す。最大付着応力は腐食率に対してほぼ直線的に低下しており、かぶりが小さいときには腐食による付着応力の低下の割合は小さく、かぶりが大きくなるほど腐食初期の最大付着応力の低下割合が大きくなっている。かぶりが4 cmのものでは、当然ながら補強筋を有する方が有しないものよりも低下の割合が小さくなった。ただし、かぶりが4 cmのものでは、腐食率が大きくなると最大付着応力の低下率が0.4程度で一定となっている。これらの現象は、図-5に示す腐食率とひびわれ幅との関係と一致している。

## 5. まとめ

- 1) 腐食の増大に伴うひびわれ幅の増大は、かぶり大きい場合が最も大きく、かぶり小さい場合にはかぶり面が三角形に剥離した。
- 2) 腐食の進行によって最大付着応力はほぼ直線的に低下し、その低下割合はかぶり厚さによって異なり、かぶり大きいほど低下割合は大となった。
- 3) 最大付着応力の絶対値としては、腐食率が大きくなると、かぶりの大きさにかわらず、縦ひびわれの発生しないものの約半分の同程度のものとなった。

## 参考文献

- 1) 島ら：鉄筋が腐食した一方向RCスラブの曲げ耐力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 2, No. 1, pp. 563-568, 1990
- 2) 武若ら：コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状におよぼす影響, コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 177-180, 1984
- 3) 丸山ら：鉄筋腐食を伴うRC供試体の付着性状と耐荷性状, 土木学会第45回年次学術講演会, 第5部門, pp. 542-543, 1990
- 4) 島ら：マッシュなコンクリートの埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378/V-6, pp. 165-174, 1987.2