

[45] コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響

正会員 ○武若耕司 (鹿兒島大学工学部)

正会員 松本 進 (鹿兒島大学工学部)

1. まえがき

塩分環境下のコンクリート構造物では、内部鉄筋の腐食による急速な劣化進行の可能性が非常に高い。従ってこの様な構造物の設計、施工では、所定の供用期間中にこの劣化による機能損傷が起こらないように配慮しなければならず、このためには、鉄筋腐食に伴うコンクリート部材の劣化進行過程および、劣化の程度と構造物の使用性能との関係などについて具体的に検討しておく必要がある。また、既設構造物における劣化の補修、補強に際しても、その構造物の現状での安全性を確認するために、その判断材料として上記の検討が必要であることは明らかである。そこで本研究では、簡単な腐食促進試験装置を用いた室内実験から、鉄筋腐食によって生じる RC 部材の劣化過程の概略を把握する一方、特に鉄筋腐食が、鉄筋とコンクリートの付着性状あるいは、RC 部材の変形性状、破壊性状などの力学的特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験の概要

1) 円柱供試体を用いた実験： ここでは、特に鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに発生するひびわれの進行過程に影響を及ぼす諸要因について検討し、合せて、鉄筋とコンクリートの付着性に及ぼす鉄筋腐食の影響についても明確にすることを実験の目的としている。本実験の主な要因と水準を表-1に示す。

実験に使用した供試体は高さ10cmのコンクリート円柱体の中央に鉄筋を垂直に埋込んだものである。鉄筋の腐食促進には電食方法を適用することにし、図-2(a)に示す装置で腐食実験を行った。なお、この電食実験では、供試体の種類にかかわらず鉄筋の腐食速度がほぼ一定となるように、腐食部の電流密度を一定(1.0±0.1mA/cm²)とした定電流を通電させた。さらに、コンクリート中には、鉄筋腐食をより促進させるために約2.17kg分の塩化ナトリウムを混入した。この量は、水セメント比50%の場合にセメント量の0.5%に相当するものである。

所定の通電を終了した供試体は、鉄筋とコンクリートの付着性状を検討するために引抜き試験を実施し、1/1000mmダイヤルゲージを用いて鉄筋自由端におけるすべり量を測定するとともに、最大付着強度を検討した。なお、引抜き試験終了後には、鉄筋をコンクリートからは取り出し除錆して、鉄筋腐食量の測定もあわせて行った。

2) 梁供試体を用いた実験： この実験では、鉄筋腐食が梁部材の、
 ①鉄筋付着性状に及ぼす影響、②せん断特性に及ぼす影響、および③曲げ特性に及ぼす影響等について検討を行った。使用した供試体の形状および実験の条件を図-1および表-2に示す。また、この場合の電食実験の概略を図-2(b)に示す。この電食実験では、同一の荷重条件の供試体を2本1組として端部をPC鋼棒で締め、通電

表-1 円柱供試体を用いた実験の要因と水準

実験の要因	水	準
鉄筋の種類	みがき丸鋼(SGD-3),異形鉄筋(SD35)	
鉄筋径(mm)	10, 13, 16, 19, 22	
供試体直径(mm)	50, 75, 100, 150	
水セメント比(%)	40, 50, 60, 70	

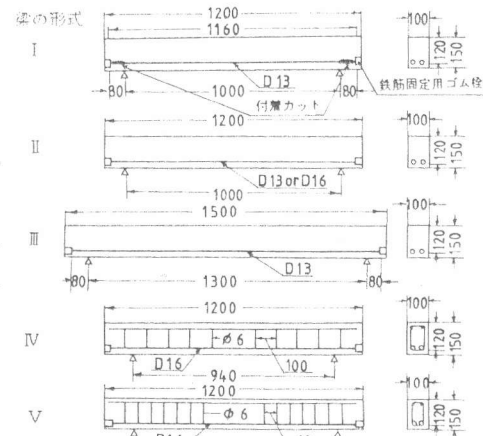


図-1 梁供試体の形状および寸法(単位mm)

表-2 梁供試体の実験条件

供試体 No.	梁の形式	n/l	拘束条件		通電時間 (h)	腐食状況		
			拘束荷重 (t)	最大曲げひびわれ幅 (mm)		養生時	最大ひびわれ幅 (mm)	
I-1	I	2	4.5	0.14	95	38	0.45	
I-2								0.1
I-3								※ 0.25 (観察)
II-2-1	II	2	4.5	0.12	108	4.2	0.65	
II-2-2								0.1
II-3-1								3
II-3-2	0.125							
III-1	III	3	4.0	0.1	88	2.4	0.5	
III-2								0.075
IV-1	IV	4.17	2.0	0.075	88	3.6	0.45	
IV-2								0.1
V-1	V	3	5.0	0.09	93	3.2	0.35	
V-2								0.15
V-1	V	3	5.0	0.15	93	4.0	0.45	
V-2								0.15

※ 5t 荷重後除荷した状態で通電

中スパン内のコンクリートの曲げひびわれ幅がほぼ一定となる様に拘束して、片側の梁のみに通電を行った。ただし、図-3の梁については同一種類の梁の拘束荷重まで一度載荷させた後、除荷してから通電を行った。供給する電流量は、前述の円柱供試体の場合と同様に鉄筋の電流密度が約 1 mA/cm^2 となるように設定し、通電は、鉄筋腐食によって生じるコンクリートの縦ひびわれ幅の最大値が $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 程度となるまで継続した。なおこの場合には、曲げひびわれによって鉄筋腐食が促進されることを考慮し、コンクリート中には塩分を混入していない。

通電終了後は、各梁ごとにあらためて静的載荷試験を実施して、鉄筋腐食の有無による梁のたわみ性状、破壊性状および破壊耐力の違いを検討した。

3. 鉄筋腐食によって生じるコンクリートの劣化過程に関する検討結果

1) 円柱供試体における実験結果： 図-3は、みがき丸鋼の腐食によって円柱供試体中にひびわれが発生するまでの積算電流量と、コンクリート

のかぶり厚、圧縮強度および鉄筋径の関係を総括して示したものである。今回の電食実験が腐食電流密度を常時一定としたものでコンクリートにひびわれが生じるまでの鉄筋腐食速度がほぼ一定であることを考慮すると、この図は、コンクリートのひびわれに対する力学的な抵抗性を表わすものである。この結果によると、劣化に対するコンクリートの抵抗力は、コンクリートのかぶりおよび強度にほぼ比例し、また鉄筋径に反比例することが明らかである。また図-4は、同じく円柱供試体を用いた実験から、みがき丸鋼および異形鉄筋の腐食量とこの腐食によってコンクリートに生じるひびわれ幅の関係を示したものである。この結果からも、劣化の進行に対する拘束効果が、かぶりの増加によって増大し、鉄筋径の増加に伴って減少することが明確に表われている。なお、今回の実験によると、丸鋼よりも異形鉄筋を使用した場合の方がコンクリートの劣化に対する抵抗性が高くなるという結果も得られ、例えば、かぶり 4 cm 程度で鉄筋径が 13 mm の場合に、コンクリートに縦にひびわれを発生させるために必要な腐食量は、みがき丸鋼で $5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ であるのに対して、異形鉄筋では約 $2 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$ 程度となった。

2) 梁供試体における劣化性状の概略： 図-5には、鉄筋腐食によって梁供試体に生じた縦ひびわれの発生状況について、また図-6には縦ひびわれ幅と鉄筋腐食量との関係について、それぞれ代表的な例を示した。この内、縦ひびわれの拡大の傾向は、前述の円柱供試体の場合に類似の結果が得られ、鉄筋の腐食量が $2 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$ 程度でひびわれが発生すると、その後は腐食量の増加に伴って直線的に縦ひびわれ幅は拡大するようである。また、図-7は、縦ひびわれ幅の拡大に及

ぼスターラップの影響を検討するため、スターラップを有するせん断区間の縦ひびわれ幅とスターラップの存在しない等曲げモーメント区間のひびわれ幅とを比較したものである。この結果から、スターラップの存在が、縦ひびわれの拡大

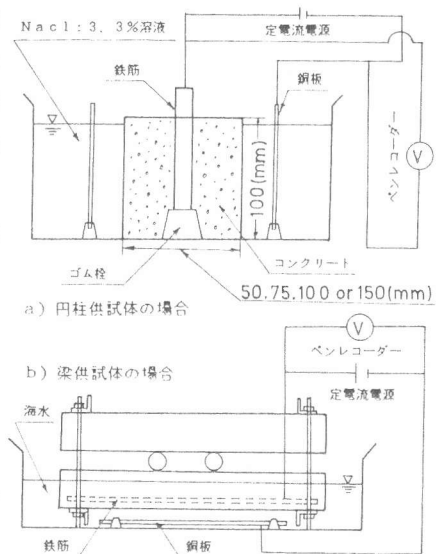


図-2 電食実験の概略

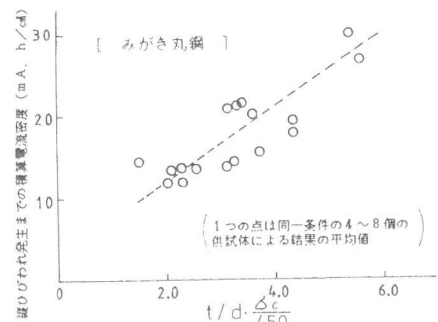


図-3 縦ひびわれの発生に及ぼすコンクリートのかぶり(t)、圧縮強度(f_c)および鉄筋径(d)の影響

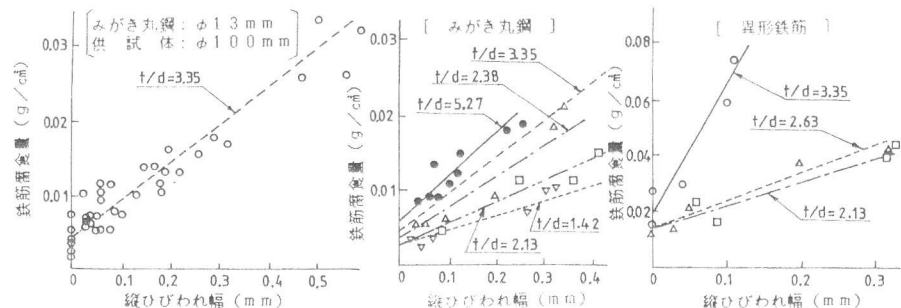


図-4 円柱供試体において得られた鉄筋腐食量と縦ひびわれ幅の関係

をかなり拘束することが明確に示されている。

4. 鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす腐食の影響

図-8は、引抜き試験の結果から、鉄筋自由端のすべり量と平均付着強度の関係について一例を示したものである。また図-9には、腐食のない鉄筋に対する腐食鉄筋の最大付着強度の比を通電量との関係で示した。これらの結果、みがき丸鋼では、腐食によるひびわれ発生までの間、腐食の存在によって鉄筋の付着性は改善され、腐食生成物がすべりに対する摩擦抵抗力を増大させることがわかる。一方異形鉄筋の場合には、鉄筋腐食初期の段階においてみがき丸鋼に見られる付着強度の増加は認められず、この段階から最大付着強度がわずかながら低下する傾向も確認できる。ただし、図

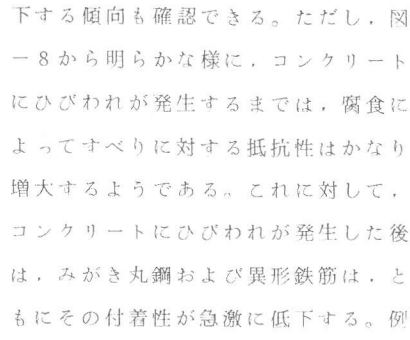


図-5 通电後の梁供試体の縦ひびわれ発生状況

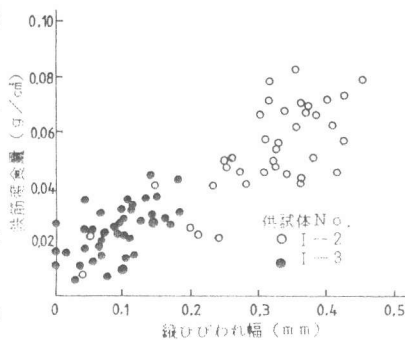


図-6 梁供試体において得られた鉄筋腐食量と縦ひびわれ幅の関係

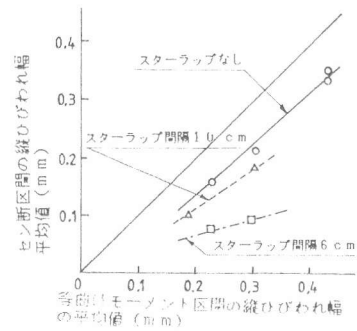


図-7 スターラップによる縦ひびわれ拘束効果

図-8から明らかな様に、コンクリートにひびわれが発生するまでは、腐食によってすべりに対する抵抗性はかなり増大するようである。これに対して、コンクリートにひびわれが発生した後は、みがき丸鋼および異形鉄筋は、ともにその付着性が急激に低下する。例えば、図-10は、異形鉄筋の最大付着強度比を鉄筋腐食によって発生したひびわれ幅との関係で示したものである。鉄筋径の違いによってその傾向にばらつきがあるが、この図から、コンクリート表面に0.2および0.4mm程度のひびわれが生じた場合には、鉄筋の最大付着強度が、腐食していない場合のそれぞれ50%および30%程度にまで減少することがわかる。

5. RC梁の変形性状および破壊性状に及ぼす鉄筋腐食の影響

図-11には、RC梁のモーメント-たわみ関係に及ぼす鉄筋腐食の影響について示した。また図-12および表-3には、供試体破壊時のひびわれ状態の一例および破壊耐力、破壊形式について示した。この内、梁の変形性状に及ぼす鉄筋腐食の影響では、図-11から明らかな様に、いずれの梁においても、鉄筋腐食によってかえって梁の剛性が高まる傾向が見られた。これについて前述の引抜き試験結果を考慮すると、荷重の初期段階において、鉄筋のすべりに対する抵抗性が腐食によっていくぶん増加し、これが剛性増加の原因となっているものと考えられる。

図-9 最大付着強度と通电時間の関係

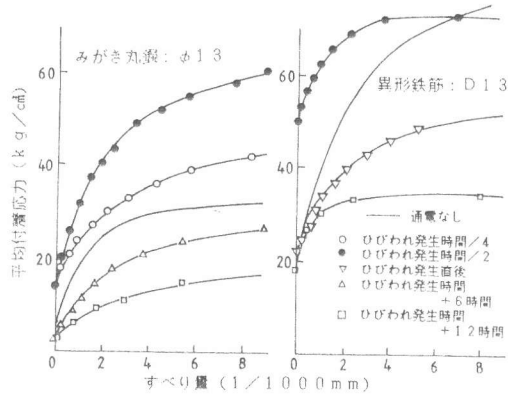


図-8 鉄筋のすべり量と平均付着強度の関係

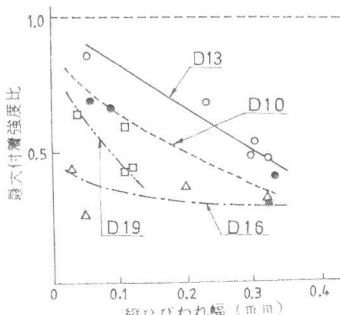
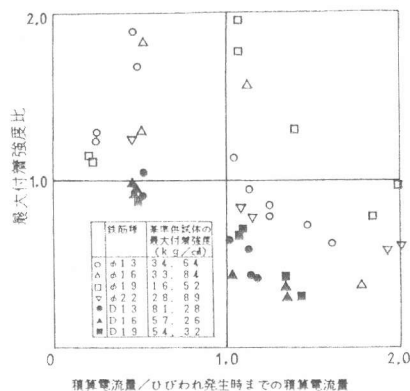


図-10 最大付着強度比と縦ひびわれ幅の関係

また、梁の破壊耐力について見ると、まず、Iタイプの梁の場合には、鉄筋腐食による劣化の進行に伴って明らかに梁の耐力が低下する傾向が認められた。ところで、このタイプの梁はスパン外の鉄筋定着部で鉄筋とコンクリートの付着を断っており、この場合の破壊耐力は、そのまま、せん断スパン内のコンクリートと鉄筋の最大付着強度を表わすものである。従って、この結果から、腐食によって生じる縦ひびわれ幅の最大値が、0.2mmおよび0.4mm程度の梁部材では鉄筋の付着強度が、腐食していない場合の80%および65%程度に減少することになる。

しかし、また、定着余長を8cm確保した梁についてみると、腐食の無い場合にせん断破壊を示すすべての梁において、鉄筋腐食とこれに伴うコンクリートの劣化によってかえって破壊耐力が増加する結果となった。またその破壊形式にも変化が生じ、鉄筋の腐食によって斜張力破壊形式はせん断破壊形式へ、またせん断破壊形式は曲げ破壊形式へと移行するようである。この原因については、スパン外の鉄筋定着部におけるコンクリートの劣化がそれほど進行していなかったことを考えると、スパン内の鉄筋とコンクリートの付着が破壊された後、スパン外の定着部と圧縮部コンクリートの間により強固なアーチリブが形成され、これによって耐力が保持されるためであると思われる。

一方、曲げ破壊を生じる梁の場合には、腐食による鉄筋の断面欠損およびスパン内の付着劣化による破壊耐力の低下傾向が認められる。

6. 結論

本研究で得られた結果をまとめると次の様になる。

1)鉄筋の腐食膨脹によるコンクリートの縦ひびわれ発生を拘束させるためにも、塩分環境下では十分なかぶりの設定と、高品質のコンクリートの打設が望まれる。また、鉄筋径が大きくなるほど縦ひびわれ発生の危険性が高まるため、より十分な注意が必要である。

2)コンクリートに縦ひびわれが発生した後は、鉄筋とコンクリートの付着性は急減に低下し、これは部材の破壊性状にも多大な影響を及ぼす。

7. あとがき

本研究は、昭和58年度科学研究費(奨励研究(A)、課題番号:58750390)の補助を受けて実施したものである。

[参考文献]

- 1) 武岩, 松本: 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), (その2), 土木学会年次学術講演会講演概要集, 1983. 9
- 2) 武岩, 松本, 平: 鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 1984. 2
- 3) 池田豊: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集, 1980. 1

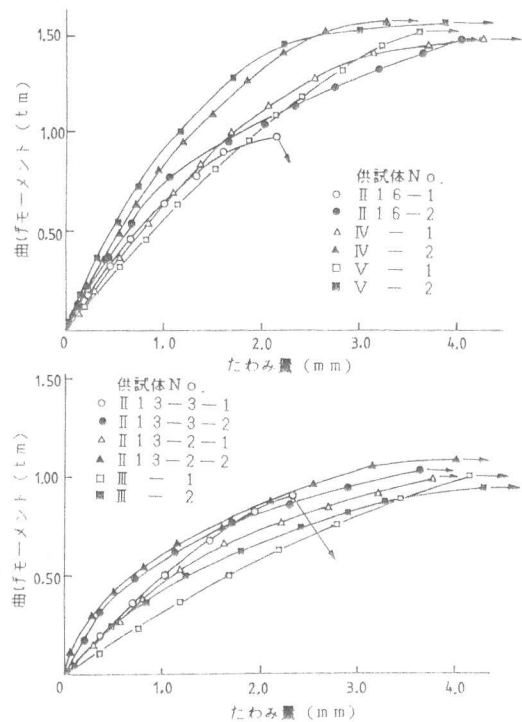


図-11 RC梁の曲げモーメントとたわみ量の関係

表-3 破壊耐力および破壊形式

供試体 No.	鉄筋腐食の有無 平均腐食量 (g/cm ²)	破壊 荷重 (t)	破壊 モーメント (t·m)	M _m /M _u ※	破壊形式
I-1	無	7.00	0.84	0.82	せん断付着
I-2	有(0.048)	4.70	0.56	0.55	"
I-3	有(0.024)	5.45	0.65	0.64	"
II 13-2-1	無	8.40	1.01	0.98	せん断付着
II 13-2-2	有(0.079)	9.90	1.12	1.09	せん断圧縮
II 13-3-1	無	5.20	0.94	0.91	斜引張り
II 13-3-2	有	6.40	1.15	1.13	せん断付着
II 16-1	無	5.75	1.04	0.69	斜引張り
II 16-2	有(0.053)	8.15	1.43	0.95	せん断付着
III-1	無	5.30	1.33	1.30	曲げ
III-2	有	4.70	1.18	1.15	"
IV-1	無	8.25	1.49	0.97	せん断圧縮
IV-2	有	9.50	1.71	1.12	曲げ
V-1	無	9.25	1.67	1.09	曲げ
V-2	有	9.10	1.64	1.07	"

※Mu = A_s · σ_{sy} · (d - $\frac{A_s \cdot \sigma_{sy}}{0.85 \cdot \sigma_{cu} \cdot b} \times \frac{1}{2}$) として求めた。

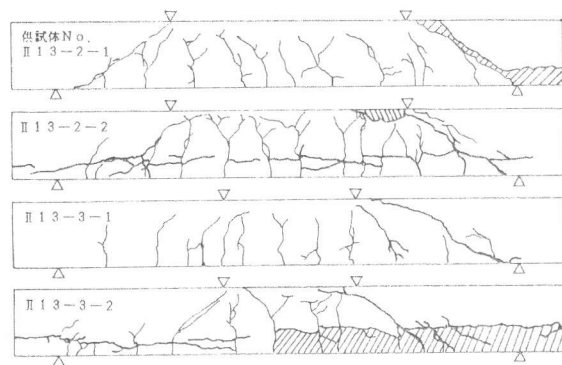


図-12 梁破壊時のひびわれ状況