

[29] 鉄筋腐食における鉄筋軸方向ひびわれが コンクリート部材特性に与える影響

正会員 岡田 清 (京都大学工学部)

正会員 小林 和夫 (京都大学工学部)

正会員 宮川 豊章 (京都大学工学部)

正会員 ○九 富 理 (佐藤工業)

1. はじめに

近年、除塩の不十分な海砂の使用、あるいは海塩粒子の飛来量が多い環境等において、コンクリート中の鉄筋の塩化物腐食損傷例が数多く報告されている。鉄筋母材に対して腐食生成物が2.5倍もの体積に膨張することによる引張力は、腐食量が非常に小さな段階で軸方向ひびわれを発生させることが知られており、かぶりが必要な場合で0.005 mm以下、比較的大きな場合でも0.1 mm程度の腐食量で十分であると推定されている¹⁾。したがって、かぶりコンクリートが大きくはく落しているような塩害を受けた構造物であっても、静的曲げ耐力についてはほとんど低下が見られないことが多い²⁾。

一方、軸方向ひびわれ、あるいはかぶりコンクリートのはく離、はく落が生じた場合には、腐食反応が促進され、鉄筋の断面減少速度が大きくなるとともに、食孔などの局部欠陥が増大し、またコンクリートと鉄筋との界面の付着が損なわれるため、鉄筋コンクリート部材の破壊メカニズムの変化等が生じる可能性が高い。

しかし、このような軸方向ひびわれを腐食劣化損傷における限界状態として注目した研究は極めて少ない。電食による推定などにその例が多少見られるものの、電食生成物と腐食生成物とは組成および構造において若干異なるものと考えられている。本研究は、実際に鉄筋腐食による軸方向ひびわれを生じさせた鉄筋コンクリートはりの腐食特性および力学的挙動を、腐食させない健全はりとの比較の上で把握するとともに、その補修方法を検討し、塩害に関する耐久性設計の基礎資料を得ることを目的とするものである。

2. 実験概要

コンクリート配合としては、比較的短期間に腐食が進行し軸方向ひびわれが生じるように、水セメント比を0.60とし、スランプが 8 ± 2 cmとなるように定めた。供試体としては、全て10×20 cm断面のはり供試体を用い、その4隅にD10, SD35の黒皮付異形丸棒をかぶり2 cmで配置した(図1参照)。また、「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」による最小量(0.3%)の矩形スターラップを全せん断スパン内に一様に配置した。なお、腐食させる供試体については、D13, SD35の黒皮付異形丸棒を対極として断面の中央に配置した。

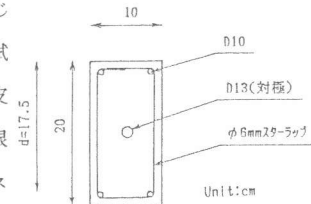


図1 はり供試体

実験は、鉄筋腐食およびそれにとともなう軸方向ひびわれの発生および補修についての腐食特性に関する試験と、それぞれの段階における基本的力学特性に関する試験に分けることができる。供試体の種類を表1に示す。

1) 腐食・補修試験

腐食・補修はりは全て室内に静置し、1日1,2回食塩水(3.13%水溶液)を散水し、鉄筋腐食による軸方向ひびわれが生じるまで、鉄筋位置に沿っての自然電位および分極抵抗測定を行った。軸方向ひびわれの発生後、腐食はりについては2)に述べる載荷試験を行い、補修はりについては、現場における補修では腐食による劣化が顕著な部分のみを補修することが多いことを考慮して、以下に述べるような3レベルの補修を行うこととした。なお、軸方向ひびわれ幅が比較的小さなものであったため、樹脂注入工法は選んでいない。

レベル1: 供試体全面に「道路橋の塩害対策指針(案)」におけるC種(長期防せい型)相当のライニングを行う。

レベル2: 軸方向ひびわれ発生部および自然電位が -300 mV vs Ag/AgClより卑となる部分のかぶりコンクリー

トを全てはつり取り、鉄筋のサンドブラスト処理、エポキシ樹脂防せい塗装を行った後に、エポキシレジンコンクリートによりパッチングを行う。

レベル3：レベル2のパッチングを行った上に、レベル1のライニングを行う。

これらの補修を行った後、はりにウエスを巻いた上で再び食塩水の散水を行い、レベル2の補修を行ったはりの自然電位が補修前とほぼ同程度になった時点で2)に述べる載荷試験を行った。なお、健全はりについては、室内に散水を行わずに静置し、他のはりとは材令を合わせて載荷試験を行った。

2) 載荷試験

腐食損傷を受けた鉄筋コンクリート部材の静的曲げ耐力が健全なものに比べてほとんど低下しないこと、付着強度の低下にともなう力学的挙動の変化、および高応力あるいは繰返し荷重下における局部欠陥の影響の増大等の可能性を考慮して、載荷方法としては、表1に示すようにせん断スパン・有効高さ比(a/b)を要因とするとともに、以下に示す3種類を行った。

1 方向繰返し載荷： P_d まで載荷した後、 δ_y の1, 2, 3...倍で完全除荷しながら、変位を順次増加させる単調繰返し漸増載荷を行う。

交番載荷タイプ1：まず $\pm P_d$ まで載荷した後、 δ_y の $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 倍と変位を順次増加させて正負両方向に1回ずつ静的な交番載荷を行う。

交番載荷タイプ2： δ_y の $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 倍と変位を順次増加させて、30回ずつの正負等変位の交番繰返しを行う。各変位での繰返し載荷速度は6回/分とし、入力波はsin波とした。

ここに、 P_d =鉄筋の引張応力度の計算値が「コンクリート標準示方書」による許容引張応力度に達する荷重
 δ_y =鉄筋の引張応力度の計算値が鉄筋の降伏点に達する荷重時の変位

3. 実験結果および考察

軸方向ひびわれは散水開始後13週でその発生が確認され、20週後には腐食・補修はりの大部分に発生した。補修直前および載荷試験直前におけるはりの軸方向ひびわれ発生状況を最卑自然電位および平均腐食速度指標とともに表2に示す。軸方向ひびわれは主鉄筋方向のものが多

いものの、スターラップとの接触部から発生しているものが多い。これは、その部分でかぶりが薄くなることに加えて、主鉄筋とスターラップとの接触部に腐食上の欠陥が生じ易いためであろう。

1) 腐食・補修試験

腐食および補修はりの自然電位および腐食速度指標(分極抵抗の逆数)の経時変化例を図2, 3に示す。また、載荷直前における自然電位分布、破壊状況、補修部分の例を図4, 5に示す。

電位は散水期間とともに卑に移行しており、特に軸方向ひびわれの発見直前における変化は著しい。また、自然電位分布からもひびわれ発生位置は-350 mV vs Ag/AgClより卑となる卑変部にほぼ対応している。したがって、自然電位から軸方向ひびわれ発生の推定がほぼ可能であった。腐食速度指標については、その経時変化は少なく、

表1 供試体一覧

供試体名	供試体長(cm)	a/d	補修方法	載荷方法
健全供試体	H-1	160	3.43	一方繰返し
	H-2	160	3.43	一方繰返し
	H-3	160	3.43	交番載荷タイプ1
	H-4	160	3.43	交番載荷タイプ1
	H-5	160	3.43	交番載荷タイプ2
	H-6	140	2.86	一方繰返し
	H-7	140	2.86	一方繰返し
	H-8	120	2.29	一方繰返し
	H-9	120	2.29	一方繰返し
	H-10	120	2.29	一方繰返し
腐食供試体	C-1	160	3.43	交番載荷タイプ2
	C-2	160	3.43	交番載荷タイプ2
	C-3	160	3.43	一方繰返し
	C-4	160	3.43	一方繰返し
	C-5	160	3.43	交番載荷タイプ1
	C-6	160	3.43	一方繰返し
	C-7	140	2.86	交番載荷タイプ2
	C-8	140	2.86	一方繰返し
	C-9	120	2.29	一方繰返し
	C-10	120	2.29	一方繰返し
補修供試体	R-1	160	3.43	ライニングのみ
	R-2	160	3.43	ライニングのみ
	R-3	160	3.43	パッチングのみ
	R-4	160	3.43	パッチングのみ
	R-5	160	3.43	パッチングのみ
	R-6	160	3.43	パッチングのみ
	R-7	140	2.86	パッチングのみ
	R-8	140	2.86	パッチングのみ
	R-9	120	2.29	パッチングのみ
	R-10	120	2.29	パッチングのみ

* 曲げスパン：20 cm

表2 はり供試体ひびわれ発生状況 (最終結果)

供試体 No.	散水日数(週)	最卑自然電位(mV)	平均腐食速度指標($\times 10^{-2} / \Omega$)	主鉄筋方向ひびわれ					スターラップ方向ひびわれ				補修後			
				ひびわれ本数			最大ひびわれ長さ(mm)	総ひびわれ長さ(cm)	本数	最大ひびわれ長さ(mm)	総ひびわれ長さ(cm)	最卑自然電位(mV)	平均腐食速度指標($\times 10^{-2} / \Omega$)			
				上	下	合計										
C-1	24	-421	13.1	0	1	1	1.5	0.02	1.5	3	2.5	0.02	6.0			
	22	-441	21.1	7	2	1	8	11.5	0.10							40.7
	20	-399	15.8	4	4	1	8	14.5	0.10							37.1
	22	-398	15.6	2	3	0	5	16.0	0.08							47.0
	22	-427	15.8	4	4	2	8	11.0	0.04							43.5
	22	-417	18.5	6	1	3	7	16.0	0.15							66.5
	24	-364	13.7	1	1	1	2	7.5	0.02							11.0
	22	-417	13.7	0	6	1	6	11.0	0.10							43.0
	22	-407	9.4	0	3	0	3	9.5	0.04							19.0
	24	-391	12.9	1	0	1	1	1.0	0.04							1.0
R-1	20	-369	15.5	0	3	0	3	5.0	0.08	10.0	1	2.5	0.01	2.5		
	20	-365	16.6	0	4	0	4	10.5	0.15	22.0						
	20	-410	12.4	1	0	0	1	4.0	0.04	4.0						
	20	-401	18.6	1	1	0	2	4.0	0.10	7.0						
	20	-420	21.6	2	0	0	2	8.5	0.10	16.5						
	20	-403	25.4	0	1	0	1	9.7	0.10	8.7						
	20	-423	12.9	2	1	1	3	9.0	0.10	17.5						
	20	-325	13.8	0	0	0	0	---	---	---						
	20	-384	11.3	0	0	0	0	---	---	---						
	20	-351	11.1	1	0	0	1	10.0	0.15	10.0						

* 上とは散水上面、下とは散水下面

むしろ若干減少した後一定値に収束する傾向にある。なお、軸方向ひびわれの幅および長さについては、ばらつきはあるものの自然電位が卑で腐食速度指標が大きな程大きな値を示している。

補修効果については、パッチングのみを行ったはりでは、散水再開後3日ですでに自然電位、腐食速度指標ともに補修直前の値と比べて同等以上に卑あるいは大となる傾向にあり、補修効果は小さいものと考えられる。また、ライニングのみのはりについては、補修前にすでにコンクリート中に塩化物が蓄積されていることを考慮すれば、やはり補修効果はあまり期待できないものと考えられる。表2よりパッチングとライニングの両者を行ったレベル3のはりについては、ばらつきはあるものの効果のみられるものもあるようである。今回の実験において、レベル3においても補修効果があまり大きくなかった原因としては、ライニング膜厚が補修用としては若干薄めであること、また補修後は供試体にウエスを巻いていたため補修前よりも湿润雰囲気であったこと、さらにパッチングしていない箇所についてもその電位は比較的卑であり塩化物も相当含まれていると推定されることなどをあげることができる。また、今回のパッチング補修用基準としては、実験の性格上-300 mV vs Ag/AgClとしたが、すでに筆者らが報告しているように³⁾-200 ~ -250 mV vs Ag/AgCl 程度とした方が確実な防食補修効果が期待できるものと考えられる。

2) 載荷試験

はり供試体の載荷試験結果を表

3に示す。本実験では、腐食はり、補修はりとは健全はりとは鉄筋量が異なるため、降伏荷重および最大荷重の実験値と計算値の比にも

とづいて各々の耐力を比較することとし、それらを表4に、実験によって得られたじん性率とともに示す。さらに、代表的な荷重～たわみ履歴曲線の例を図6に示す。

腐食はりでは、鉄筋の付着強度の低下により曲げひびわれが最大曲げモーメント区間に集中し、鉄筋の曲げ付着応力に起因する斜めひびわれが発生しにくくなっている。ライニングのみによる補修はりでは、腐食はりと同様に破壊性状に著しい差異はみられないが、多量のパッチングを併用するとひびわれの分散性が悪くなり、コンクリートの圧潰前に鉄筋が破断する可能性が高くなり、脆性的な破壊が生じ易くなる傾向にあった。

耐力を実験値と計算値との比で検討した場合、腐食はりでは降伏耐力は低下しないが、最大曲げ耐力は若干低下する。これに対して、パッチングによって補修した場合、降伏耐力は若干増大するが、最大耐力はほとんど増大せず、さらにライニングをも併用したレベル3では、降伏耐力はさらに著しく増大するものの、やはり最大耐力は増大しない。また、腐食はりに高応力の正負交番繰返し荷重が作用すると、健全はりに比べて繰返しにとも

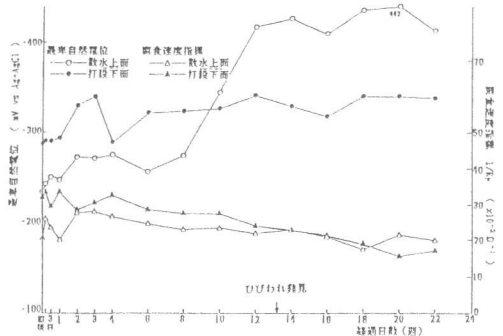


図2 自然電位と腐食速度指標の経日変化 (C-6)

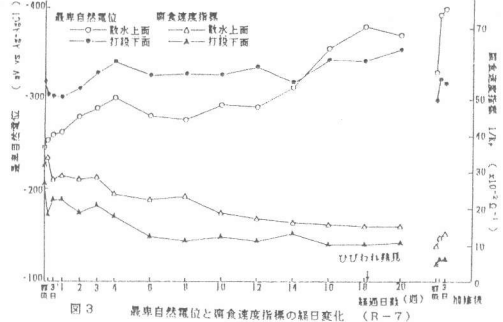


図3 自然電位と腐食速度指標の経日変化 (R-7)

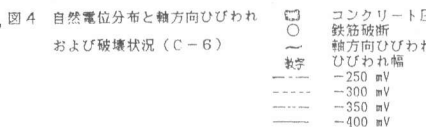
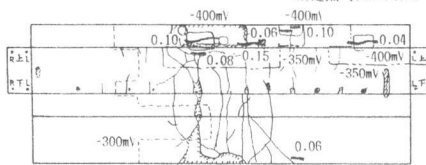
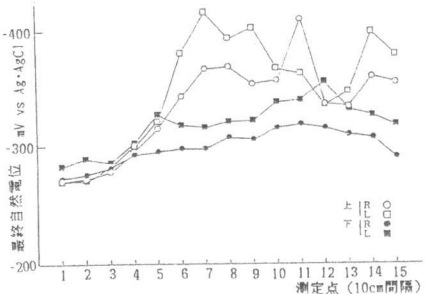


図5 自然電位分布と軸方向ひびわれおよび破壊状況 (R-7)

なう耐荷力の低下が大きい
いが、補修はりでも同様の傾向が見られ、パッチングを多量に施すとその傾向は特に顕著となった。

図6より明らかな様に、腐食はりやライニングのみの補修はりでは、健全はりに比べて、交番荷重下でのピンチ効果が顕著となり、多量のパッチングを施した補修はりでは

きわめて剛性の高い特異な紡錘型ループ形状を示した。また、降伏荷重以下の荷重レベルでは、部材剛性に対する軸方向ひびわれの影響は認められず、パッチングあるいはライニングのどちらか一方のみを用いた場合には、剛性は増大しないが、両者を併用すると著しく増大した。腐食はり、補修はりのどちらにおいても、一方向繰返し荷重および交番荷重タイプ1の静的荷重作用下では部材じん性は低下していないが、交番荷重タイプ2の荷重作用下ではじん性の低下が顕著であった。

4. 結論

本研究の範囲で得られた主要な結論を以下に示す。

①鉄筋腐食による軸方向ひびわれの発生は自然電位測定によってほぼ推定が可能であり、その程度は自然電位が卑で分極抵抗が小さな程大きい。②スターラップと主鉄筋との接触部は、かぶりの減少および腐食上の欠陥の生じ易さのため、軸方向ひびわれの原因となりやすい。③パッチング補修にあたっては、-200~250mV vs Ag/AgClより卑な部分について行うのがよい。④本実験でH-6で得られた程度の軸方向ひびわれを有するはりにおいては、健全なものに比べて降伏耐力は低下しないが、最大曲げ耐力は若干低下し、パッチングとライニングを併用して補修した場合、降伏耐力は増大するものの最大耐力は増大しない。⑤腐食はりに交番荷重タイプ2の繰返し荷重が作用すると、健全なものに比べて繰返しにともなう耐荷力の低下が大きく、じん性の低下が顕著であり、これは補修したはりについても同様である。

＜参考文献＞

- 岡田, 鴨打, 津田, 他, 昭和60年度土木学会関西支部学術講演会講演概要, 昭和60年5月
- 大城, 浜田, 他, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.393~396, 昭和56年4月
- 岡田, 小林, 宮川, 九富, 能井, セメント・コンクリート, No.444, pp.20~27, 昭和59年2月。

表 3 はり供試体の載荷試験結果

供試体名	降伏荷重 (t) (計算値)	降伏荷重 (t) (実験値)	最大荷重 (t) (計算値)	最大荷重 (t) (実験値)	曲げひびわれ発生荷重 (t)	斜めひびわれ発生荷重 (t)	破 壊 状 況	
							上鉄筋とは敷水上面側	下鉄筋とは敷水下面側
健全	H-1	2.54	3.20	2.86	3.81	2.25		曲げスパン圧潰
	H-2	2.54	3.45	2.86	3.87	1.26		曲げスパン圧潰
	H-3	2.54	3.40	2.86	3.75	3.50	1.50	曲げスパン圧潰
	H-4	2.54	3.25	2.86	3.70	3.55	1.50	曲げスパン圧潰
	H-5	2.54	3.60	2.86	3.85	3.17	1.25	下部コンクリート曲げスパン外割れ
	H-6	2.54	3.20	2.86	3.70	3.45	1.00	曲げスパン圧潰
	H-7	3.04	4.00	3.55	4.95	1.84		曲げスパン圧潰
	H-8	3.04	4.10	3.55	4.75	1.50		曲げスパン圧潰
	H-9	3.80	5.15	4.44	6.25	1.50		曲げスパン圧潰
	H-10	3.80	5.15	4.44	6.05	1.50		曲げスパン圧潰
腐食	C-1	3.16	4.65	4.22	4.80	4.40	2.00	正負曲げスパン割れ 下1本上2本いずれも曲げスパン外で破断
	C-2	3.16	4.50	4.22	5.00	4.60	1.30	正負曲げスパン割れ 上鉄筋1本破断
	C-3	3.16	4.50	4.22	5.15	4.22	2.25	正曲げスパン圧潰
	C-4	3.16	4.45	4.22	5.05	4.10	2.00	正負曲げスパン割れ
	C-5	3.16	4.70	4.22	5.15	1.50		正曲げスパン圧潰
	C-6	3.16	4.75	4.22	5.10	4.10	2.00	正負曲げスパン割れ
	C-7	3.80	5.35	5.07	6.25	2.25		正曲げスパン圧潰
	C-8	3.80	5.80	5.07	6.15	2.50		曲げスパン圧潰
	C-9	4.75	7.45	6.34	8.05	2.27		曲げスパン圧潰
	C-10	4.75	7.35	6.34	7.85	1.84		曲げスパン圧潰
補修	R-1	3.16	4.80	4.22	4.90	4.40	4.71	正負曲げスパン割れ 上鉄筋1本破断
	R-2	3.16	4.85	4.22	5.10	4.70	3.16	負曲げスパン圧潰
	R-3	3.16	4.75	4.22	5.50	4.73		正曲げスパン圧潰
	R-4	3.16	4.75	4.22	7.25	4.22		上鉄筋1本破断
	R-5	3.16	4.70	4.22	5.10	4.70	4.00	上鉄筋1本破断
	R-6	3.16	4.55	4.22	4.00	4.75	3.16	上下鉄筋4本破断
	R-7	3.80	5.40	5.07	6.70	3.00		上下鉄筋4本破断
	R-8	3.80	5.30	5.07	6.45	3.00		曲げスパン圧潰
	R-9	4.75	7.20	6.34	8.25	7.40		曲げスパン圧潰
	R-10	4.75	7.20	6.34	8.15	6.75		曲げスパン圧潰

(正) (負) (正) (負) (正) (負)

表 4 降伏荷重、最大荷重 (実験値と計算値の比)、じん性率

供試体名	a/d	降伏荷重		最大荷重		じん性率 μ	
		実験値/計算値	計算値	実験値/計算値	計算値		
方 向	健全	3.43	1.31	1.30	4.89以上		
							H-1
	腐食	2.86	1.46	1.22	10.15		
							C-3
	補修	2.29	1.50	1.51	13.90以上		
							R-3
	健全	3.43	1.34	1.37	7.12以上		
							H-7
	腐食	3.43	1.44	1.22	5.32		
							C-7
補修	3.43	1.41	1.30	12.31			
						R-7	R-8
健全	3.43	1.36	1.39	8.67			
						H-9	H-10
腐食	3.43	1.25	1.26	9.10以上			
						C-9	C-10
補修	3.43	1.89	1.30	11.84			
						R-9	R-10
交 番 荷 重 類 型 2	健全	3.43	1.31	1.28	1.26	1.19	5.62以上
	腐食	3.43	1.41	1.28	1.20	0.91	7.29以上
	健全	3.43	1.36	1.24	1.28	1.12	6.11以上
腐食	3.43	1.46	1.46	1.18	1.03	4.89	
							C-1
補修	3.43	1.54	1.42	1.19	1.08	3.89	
							R-1
健全	3.43	1.47	1.36	1.19	1.12	4.28	
							R-5

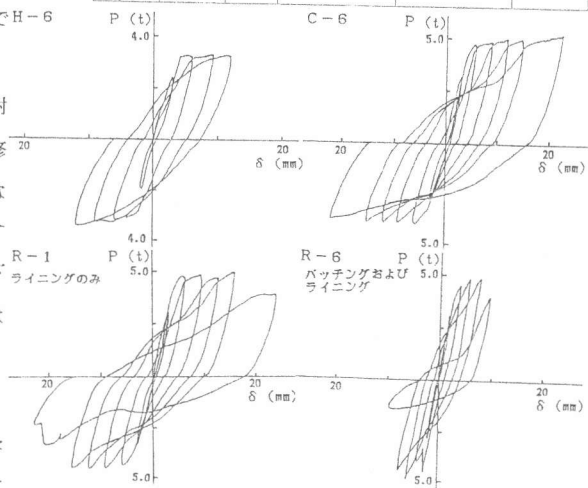


図 6 載荷履歴曲線 交番荷重タイプ2