

論文

[1094] 鉄筋腐食によるひびわれが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響

正会員○中田泰広（北海道開発コンサルタント(株)）

正会員 丸山久一（長岡技術科学大学建設系）

正会員 橋本親典（長岡技術科学大学建設系）

清水敬二（長岡技術科学大学建設系）

1. はじめに

近年、海砂を用いたことに起因するコンクリート構造物の劣化現象が散見されるようになり、原因の解明がなされるとともにさまざまな対策が講じられてきている。問題の顕在化とともに、発錆メカニズム的なことから補修工法に至るまで広範囲にわたり研究が為されているが、ひびわれ性状および耐荷性状について調べた研究は数少なく、いまだ補修基準あるいは構造物の耐久性に関する統一の評価方法は確立されていないのが現状である。そのため、補修や補強による構造物の維持管理の点に着目して、鉄筋の発錆量によるひびわれ幅等が構造物の性状に対しどれほどの影響を与えているかを知り、健全度の評価判定基準を設立する必要がある。

既往の研究¹⁾²⁾において、一辺が30cmの立方体供試体を用い、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手法が実験的に検討されている。

そこで本研究では、梁供試体を用い、表面ひびわれより内部鉄筋の発錆量を、より正確に推定するモデルを提案するとともに、鉄筋の発錆状況および表面ひびわれが、構造物の耐荷性状に、どのような影響を与えているかについても検討し、劣化度診断法確立のためのステップとするものである。

2. 使用材料および供試体

コンクリート中に、鉄筋の腐食作用の促進のため練り混ぜ水として海水相当 (NaCl 3.13%水溶液) の食塩水を用いた。水セメント比 (w/c) は63%、細骨材率 (s/a) を43%とし、粗骨材最大寸法は15mmとした。供試体は、断面10*15cm、スパン100cm、単鉄筋 (D13;p=1%) とし、また、鉄筋腐食によるかぶりコンクリート表面の縦ひびわれを拘束する目的で、せん断区間にはスターラップを10cm間隔で配置した。コンクリートの配合表を表-1に、供試体寸法を図-1に示す。尚、鉄筋の腐食を促進させる方法として電食試験を行った。^{1),2)}

表-1 示方配合

単 位 量 (kg/m ³)					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	食塩 NaCl
165	260	799	1102	0.650	5.33

3. 鉄筋腐食とひびわれ幅

既往の研究¹⁾²⁾によれば、鉄筋腐食による内部ひびわれは、かぶり厚によってひびわれ進展長さh、ひびわれが水平軸となす角度αが定まり、鉄筋の腐食量とかぶり表面ひびわれ幅の関係が求まるとき

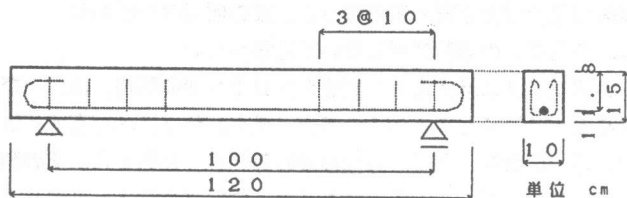


図-1 供試体寸法

れている。しかし、このモデルでは、初期ひびわれ発生時の鉄筋の腐食量を特に考慮していない。そこで、既往のモデルに初期ひびわれ発生時の腐食量 (w_{r0}) を考慮し、次式によりかぶり厚が2.5cmの本梁供試体について、ひびわれ幅と鉄筋腐食量を検討した。その結果を図-2に示す。

$$u = \frac{-\phi + (\phi^2 + 4 \times \phi \times w_r / \rho)}{2} \quad (1)$$

$$w = 2 \times (u - u_0) \left[\cos \beta + a \times \left\{ \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{(h - u_0) + (u - u_0)(\sin \alpha - \sin \beta)} - \frac{u_0 \times \pi}{a \times (u - u_0)} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 w : ひびわれ幅(cm) u : 腐食膨張変位(cm)

u_0 : W_{r0} / ρ (cm)

w_r : 単位表面積当り腐食量(g/cm^2)

h : ひびわれ進展長さ(cm) ϕ : 鉄筋径(cm)

α : ひびわれが水平軸となす角度

ρ : 錆の密度= $3.14(g/cm^3)$ $\beta = 45 - \alpha / 2$

a : 鉄筋中心からコンクリート表面までの
最小距離= $3.15(cm)$

以上より、梁供試体における実験値と計算値は、比較的よく一致している ($\gamma = 0.947$)。とはいえ、丸鋼と異形とでは初期ひびわれ発生時の鉄筋発錆量(かぶり厚= $2.5cm$)に大きな違いがある。両者の発錆量を既往の研究結果¹⁾²⁾と比較してみると、丸鋼が $1 \sim 3 mg/cm^2$ に対し異形では $12 \sim 20 mg/cm^2$ となっている。

図-3に、スターラップによるひびわれ拘束効果を示す。特に、初期ひびわれ発生時において、その効果を認めることができる。ただし、今回の実験で、スターラップを用いた場合の傾きが大きくなったのは、防食のためスターラップ全長をビニールテープで被覆したことに原因があるものと考えられる。

4. 耐荷性状

(1) 静的耐荷性状

表-2に示す13体について静的載荷試験を行った。載荷に関しては、2点集中荷重により載荷し、曲げ引張破壊となるよう $a/d = 4.0$ とした。

載荷方法は、荷重をまず200kgf加え、続いて除荷し、あとは200kgfずつ荷重を増加しては除荷する方法で、供試体の最大耐力を得るまで行った。梁の側面のひびわれは、それぞれの載荷状態において追跡した。

各梁供試体の最大耐力と破壊形式および初期剛性、曲げひびわれ発生荷重、たわみ急増荷重の結果を表-3にまとめて示す。また、スターラップの存在する供試体について、鉄筋腐食によるひびわれ幅の影響を、荷重～変位曲線の包絡線で比較した。その結果を図-4に示す。

表-3および図-4をみると、鉄筋腐食によって生じる縦ひびわれ幅が大きくなると、最大耐力は低下していく傾向がある。しかし、耐力比で表示してみると、縦ひびわれ幅が $1.0mm$ の時さえ、1割程度の耐力減少率でしかない。縦ひびわれ幅と最大耐力比との関係を示したものが、

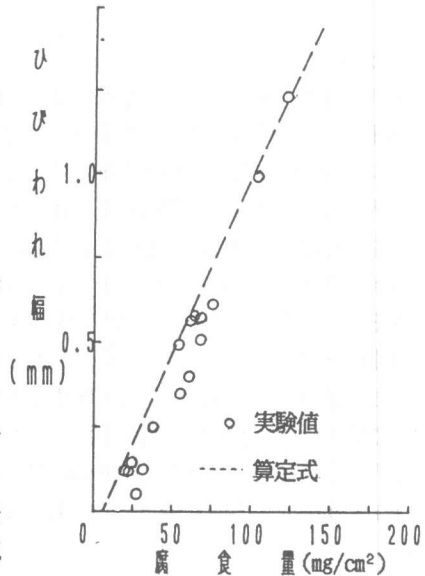


図-2 ひびわれ幅と腐食量の関係

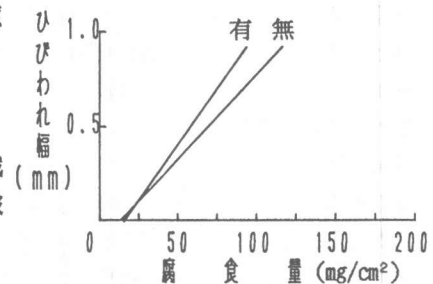


図-3 スターラップによるひびわれ拘束効果

図-5である。この最大耐力と同様の傾向が、たわみ急増時の荷重についても認められる。

表-2 供試体タイプ

specimen	スタールップの有無	ひびわれ幅(mm)	内容
BS-N	有	なし	腐食なし
BS-Nu	無		
BS1-C05	有	0.05	全スパン 一様腐食
BS2-C30	有	0.30	
BS3-C30u	無		
BS4-C50	有	0.50	
BS5-C50u	無		
BS6-C50u	無		
BS7-C100	有	1.00	中央20cm のみ腐食
BS8-C100u	無		
BS9-CM50	有	0.50	
BS10-CM50u	無		
BS11-CM55	有	0.55	

一方、載荷初期段階の梁の剛性については、他の文献³⁾でも報告されているように鉄筋が腐食し縦ひびわれが発生している梁の方が、縦ひびわれ幅にかかわらず初期剛性は大きくなっている。ただし、曲げひびわれ発生後は、腐食していない梁の方が腐食している場合の剛性よりも高い。

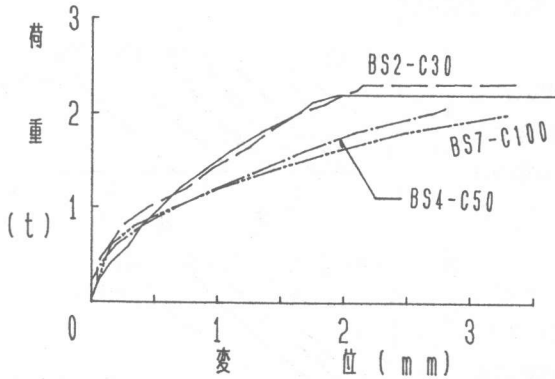


図-4 包絡線

図-6に、主鉄筋を全スパン一様に腐食させた場合とスパン中央20cm区間のみ腐食させ縦ひびわれ幅を0.50mmとした場合の梁についての荷重～変位曲線を比較した。後者では、残留変位が大きく、結果として極めて大きな変位が生じている。これは、主鉄筋の腐食を抑制する部分にテープを被覆したため、付着性状が損なわれ、すべり量が増加したものと考えられる。

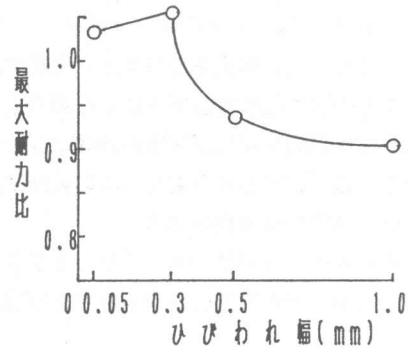


図-5 ひびわれ幅と最大耐力比

静的載荷においては、縦ひびわれ幅が大きくなるにつれ最大耐力は低下するが、それはわずかであり、鉄筋腐食が耐荷性状に大きな影響を与えているとは必ずしもいえない。

表-3 静的載荷試験結果

specimen	concrete 圧縮強度 (kg/cm ²)	初期剛 性比(P =0.6t)	曲げひび われ荷重 (t)	たわみ急増荷重		最大耐力		破壊形式
				(t)	比	(t)	比	
BS-N	317	1	0.95	2.195	1	2.205	1	曲げ引張
BS1-C05	317	0.83	1.00	2.215	1.01	2.277	1.03	曲げ引張
BS2-C30	317	0.21	1.20	2.310	1.05	2.325	1.05	曲げ引張
BS4-C50	358	0.19	0.80	2.004	0.91	2.064	0.94	曲げ引張
BS7-C100	373	0.44	0.80	1.962	0.89	2.001	0.91	曲げ引張
BS9-CM50	317	0.25	0.80	2.202	1.00	2.232	1.01	曲げ引張
BS11-CM55	317	0.18	0.80	2.102	0.96	2.185	0.99	曲げ引張
BS-Nu	317	1	0.90	2.020	1	2.107	1	曲げ引張
BS3-C30u	378	0.50	1.00	2.106	1.04	2.127	1.01	曲げ引張
BS5-C50u	358	0.10	0.60	1.894	0.94	1.944	0.92	曲げ引張
BS6-C50u	350	0.67	1.20	1.803	0.89	1.896	0.90	斜め引張
BS8-C100u	373	0.39	0.80	1.698	0.84	1.800	0.85	斜め引張
BS10-CM50u	378	0.11	1.00	2.010	1.00	2.103	1.00	斜め引張

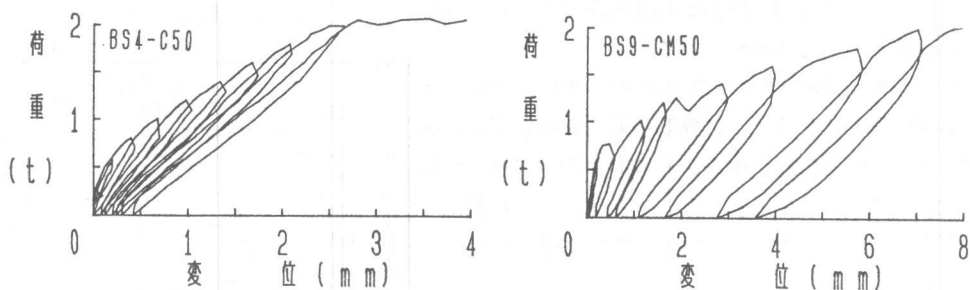


図-6 荷重～変位曲線

(2) 疲労耐荷性状

供試体は、静的耐荷性状を調べることに用いたものと同じものとした。鉄筋腐食のない梁、腐食により縦ひびわれ幅が0.125mm, 0.50mm生じている梁の3ケースについて曲げ疲労耐力を比較検討することとした。

実験方法として、まず、ある荷重レベル ($P_{min} = 100\text{kgf} \sim P_{max}$) を設定し、油圧サーボバルサーにより繰り返し荷重を負荷する。供試体が破壊に至るまでの途中段階で以下のことを繰り返す。すなわち、荷重の繰り返しが所定の回数になった時、振動機を止め、設定した荷重レベルの範囲で静的載荷を行い、荷重変位曲線を求める。

表-4に、供試体のタイプとコンクリート圧縮強度、破壊に至るまでの載荷回数および破壊形式を示す。

図-7は、最大レベルが $1.2t (P/P_u=0.55)$ の場合における荷重～変位曲線である。

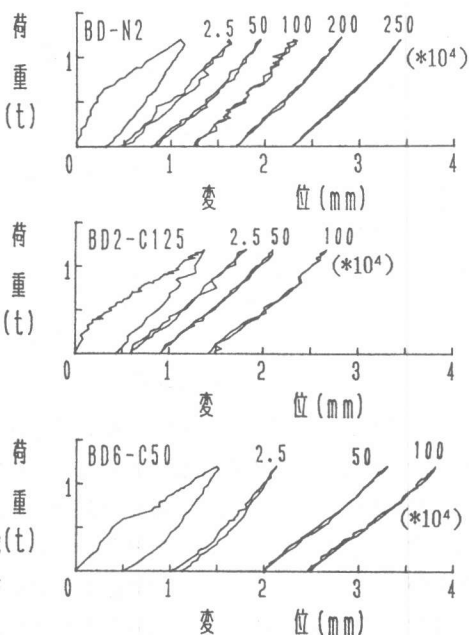


図-7 所定の繰り返し回数毎の荷重変位曲線

鉄筋降伏応力以上の範囲で繰り返し載荷を受けた場合、腐食している梁の疲労耐力は幾分減少するが、負荷レベルが低ければ付着に関係なく、縦ひびわれ幅が部材剛度に与える影響はほとんど

表-4 供試体タイプおよび繰り返し載荷試験結果

specimen	ひびわれ幅	concrete 圧縮強度 (kg/cm^2)	最大負荷レベル		繰り返し 載荷回数 ($\times 10^4$)	疲労破壊形式
			(t)	P/P_u		
BD-N1	腐食なし	426	1.5	0.68	71.3	曲げ(鉄筋破断)
BD-N2		425	1.2	0.55	291.0	曲げ(鉄筋破断)
BD1-C125	0.125mm	425	1.5	0.68	52.4	曲げ(鉄筋破断)
BD2-C125		426	1.2	0.55	133.0	曲げ(鉄筋破断)
BD3-C125		426	1.0	0.45	228.2	曲げ(鉄筋破断)
BD4-C125		375	0.8	0.36	>604.6	破壊せず
BD5-C50	0.50mm	396	1.5	0.68	41.2	曲げ(鉄筋破断)
BD6-C50		426	1.2	0.55	105.5	曲げ(鉄筋破断)
BD7-C50		396	1.0	0.45	176.0	曲げ(鉄筋破断)
BD8-C50		375	0.8	0.36	361.9	曲げ(鉄筋破断)

※ P_u は静的載荷試験での供試体BS-Nにおける最大耐力とした

どないと報告されている⁴⁾。しかし、図-7をみてみると、縦ひびわれ幅の増大が部材剛度に著しく影響を与えていることが認められる。

梁の曲げ疲労について、弾性計算により引張鉄筋の疲労破断による断面の設計疲労耐力を推定し、実験値と比較した。その結果を図-8に示す。鉄筋腐食のない梁では、推定値が安全側の値を与えるのに対し、縦ひびわれが0.125, 0.5mmの梁では、推定値よりも少ない疲労回数で破壊に至っている。

図-9は、縦ひびわれ幅と繰返し回数が200万回に達する時の応力レベルとの関係を示したものである。鉄筋腐食のない梁において、応力レベルが0.55以下では疲労曲げ破壊は生じないことが認められている⁵⁾が、腐食している場合、特に縦ひびわれ幅が0.50mmでは、応力レベルで約0.45まで低下している。

図-10および図-11は、縦ひびわれ幅が0.125mm, 0.50mmの梁供試体における疲労回数と剛性比率および残留変位の関係を示す。ここでいう剛性とは、荷重変位曲線において、最小負荷レベルと最大負荷レベルとを結び平均化したものである。図-10の剛性比率の変化については、縦ひびわれ幅に関係なく疲労破壊回数付近で急激に剛性が低下する傾向がみられる。また、最大負荷レベルが大きいほど剛性の低下も著しい。縦ひびわれ幅の影響については0.125mmの場合、剛性低下率は疲労回数の増加にともない比較的小さく現れているのに対し、ひびわれ幅が0.50mmの場合では、繰返し回数の増加に伴う剛性低下率も大きくなっている。図-11の残留変位についても繰返し回数の増加にともない剛性低下率と同様の傾向が認められる。

以上より、縦ひびわれが付着低下の原因であることは明らかであり、縦ひびわれの増大にとも

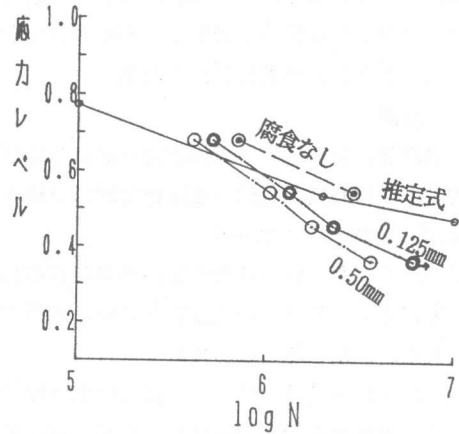


図-8 S-N曲線

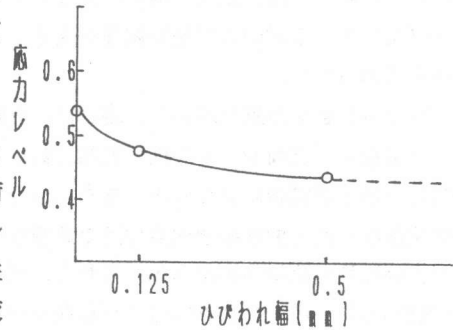


図-9 ひびわれ幅による200万回応力レベル

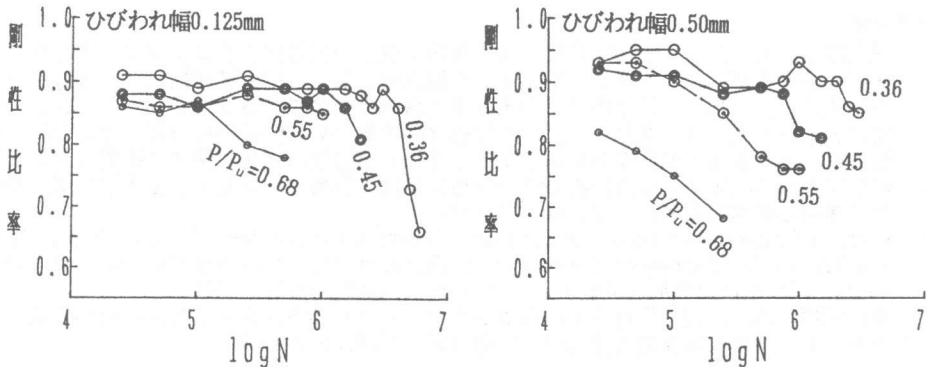


図-10 剛性比率

ない付着力も幾分低下する。また、繰り返し荷重が大きいほど付着劣化は著しく、特に縦ひびわれ幅の増大にともない顕著に認められる。

5. 結論

単鉄筋コンクリート梁供試体におけるひびわれ性状および静的荷重試験、曲げ疲労試験で得られた結論は以下のとおりである。

- ① かぶり面の縦ひびわれ幅から内部鉄筋の腐食量を推定することは、初期ひびわれ時を考慮することにより、より可能となった。
- ② 静的荷重試験において、縦ひびわれ幅の増大により最大耐力の低下が認められたが、縦ひびわれ幅が1.0mmの場合でも1割程度の低下であった。荷重変形性状においては、鉄筋の腐食が生じていない梁より腐食している梁の方が初期剛性が大きいという傾向が認められた。
- ③ 繰り返し荷重試験において、縦ひびわれ幅の増大にともない、負荷レベルの低い範囲において、疲労耐力の低下が顕著にみられた。また、縦ひびわれ幅に関係なく疲労曲げ破壊回数付近で急激な剛性低下および残留変位増加の傾向がみられた。縦ひびわれ幅が耐荷性状に大きな影響を与えていることが認められ、縦ひびわれ幅および負荷レベルが大きいほど顕著である。

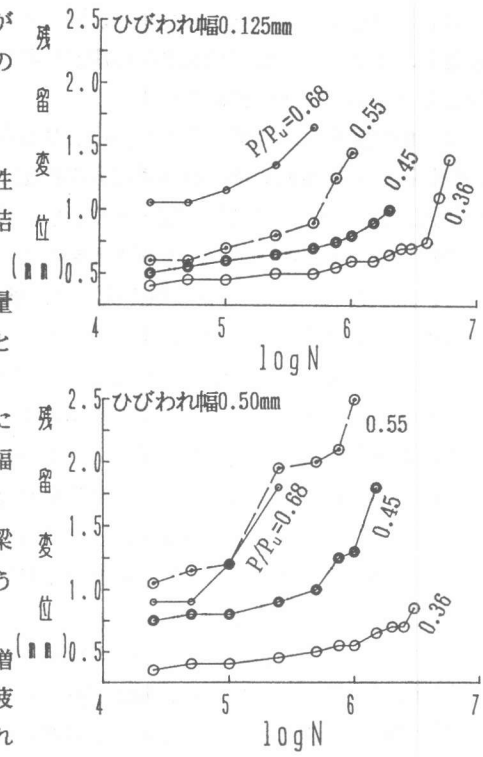


図-11 残留変位

<謝辞>

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（総合研究(A)課題番号63302044，代表 岡村甫）を受けて行ったものである。

[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、中田泰広：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、コンクリート工学年次論文報告集 第11巻 第1号、1989、pp.591~596
- 3) 松本進、武若耕司：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2）－縦ひびわれの発生がRC部材の力学的特性に及ぼす影響について－、土木学会第38回年次学術講演会講演概要集、1983、pp.261~262
- 4) Kiyoshi Okada, Kazuo Kobayashi, Toyooki Miyagawa: Influence of Longitudinal Cracking Due to Reinforcement Corrosion on Characteristics of Reinforced Concrete Members, ACI STRUCTURAL JOURNAL/March-April, 1988, pp.134~140
- 5) 高野昭信、西沢紀昭、堤俊明：鉄筋コンクリートはりの曲げおよびせん断疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集 第11巻 第2号、1989、pp.91~96