

R C 部材の鉄筋腐食による損傷時の挙動 に関する実験的研究

THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF RC MEMBERS DAMAGED BY CORROSION OF REINFORCEMENT

前田研一*・橋 吉宏**・梶川康男***・角本 周****

By Ken-ichi MAEDA, Yoshihiro TACHIBANA, Yasuo KAJIKAWA and Meguru TSUNOMOTO

The mechanical behaviour of RC beams and slabs damaged by corrosion of reinforcement is experimentally studied. In the experiments, loading test are conducted for RC specimens damaged with an accelerated galvanostatic corrosion method. It is found that the reduction in load carrying capacity occurred in the both damaged RC beams and slabs. From consideration to investigate the cause of the action of damaged RC specimens, it could be indicated that the mechanical behaviour of damaged beams and slabs is affected by the growth of cracks due to the formation of corrosion products.

1. まえがき

近年、鉄筋コンクリート構造物においては、海砂の使用、海水から飛来付着する塩化物や、凍結防止剤に使用される塩化物の浸透などによる塩害が各地で報告されるようになってきている¹⁾。道路橋においても例外ではなく、損傷を受けた構造物に対し、その耐用年数を確保するために補修や補強が実施されている。現在、このような腐食損傷に対する使用性や安全性の検討、すなわち補修や補強に対する検討を行う上で大きな要因となっているのは、鉄筋の断面欠損量である。この断面欠損は鉄筋腐食の典型的な損傷ではあるが、その他に鉄筋が全体的に腐食し、鉄筋軸に沿ったひびわれやはく離を生ずる例も報告されている。

このようなひびわれやはく離は、鉄筋の腐食生成物の膨張により生ずるものであり、RCばかりについては鉄筋軸方向に発生し、これらにともなった耐力低下や破壊形式の変化の生ずることが実験的に示されている^{2)~5)}。したがって、上述の補修や補強に対する検討は、断面欠損量だけでは不十分であると考えられる。しかし、この耐力低下機構については、解明されるには至っていないのが現状であり、上記の補修・補強の検討材料として、腐食による損傷の状況と構造物の耐力低下機構との関係を明らかにする必要があるものと考えられる。

* 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室長 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)

** 工修 川田工業(株)技術本部中央研究室 (同 上)

*** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

**** 工修 オリエンタルコンクリート(株)技術部 (〒102 東京都千代田区五番町 5)

著者らは、このような観点から、RCばりについて腐食による損傷状況と耐力低下機構との関連について解析的な検討を行ってきた⁶⁾。本研究は腐食損傷を受けたRC部材の総合的な判断を行うために、上述のRCばりに加えて、道路橋の構成部材のうちで最も破損が多いと言われているRC床版を対象に、腐食による損傷状況と耐力低下との関係を系統的にまとめることを目的としたものである。具体的には、鉄筋の腐食促進法として外部電流の印加により鉄筋を腐食させる（以下「電食」と称す）方法を用い、RCばりおよびRC床版供試体の電食にともなう損傷の過程を観察し、その後載荷試験を実施して腐食損傷を受けたRC供試体の力学的挙動を調べ考察を行った。本文は、これらの実験結果を報告し、腐食による損傷を受けたRC構造物の安全性ならびに補修・補強工法の選定を検討する上での一判断資料を提供するものである。

2. 供試体および腐食促進法

(1) RCばり供試体

実験に利用したRCばり供試体は、力学的挙動に対する不確定な要因を少なくするために、RCばりでも最も単純な構造であるスターラップを有しない単鉄筋単純ばりとし、鉄筋の定着は付着力によって定着する構造とした。また破壊時には曲げ破壊を呈するようせん断スパン比 (a/d) は 4.2を設定した。このRCばり供試体の概要を支点位置および載荷位置とともに図-1に示す。ここで供試体に使用した鉄筋は黒皮付異形棒鋼D16 (SD30) であり、降伏強度は 3600kgf/cm^2 (353MPa) であった。またコンクリートは試験時において、圧縮強度は 363kgf/cm^2 (35.6MPa)、割裂試験による引張強度は 33kgf/cm^2 (3.2MPa)、割線弾性係数は $2.60 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ ($2.55 \times 10^4\text{MPa}$) であった。

また、鉄筋腐食にともなう損傷の1つとして、鉄筋の付着強度の低下が予測されるので、付着強度試験を実施した。この試験において使用した供試体の概要を図-2に示す。ここで供試体の断面は、RCばり供試体の腐食状況と同一条件となるように、RCばり供試体と同一のものとした。

(2) RC床版供試体

RC床版供試体は、道路橋RC床版を対象としたものであり、図-3にその概要を示す。床版厚は18cmであり、複鉄筋で実際の道路橋RC床版と同様な配筋としたものである。また鋼桁との結合はスラブアンカー

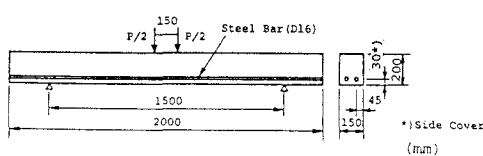


図-1 RCばり供試体

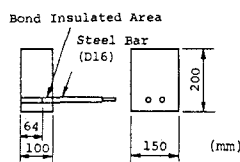


図-2 付着強度試験供試体

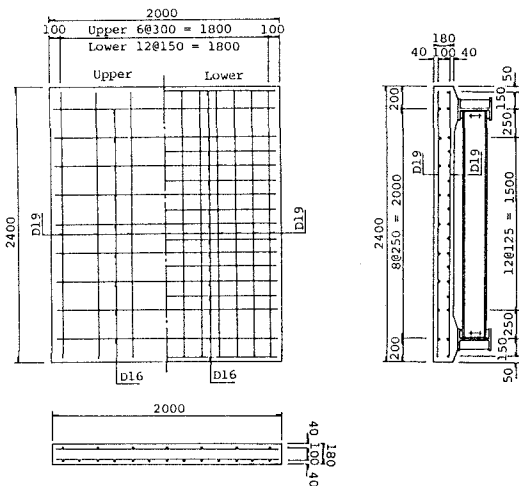


図-3 RC床版供試体

により行い 3cmのハンチを設けた。ここで供試体に使用した鉄筋は、上述のRCばり供試体同様に黒皮付異形棒鋼D16およびD19(SD30)であり、降伏強度は 3680kgf/cm^2 (361MPa)であった。またコンクリートは試験時において、圧縮強度は 245kgf/cm^2 (24.0MPa)、引張強度は 36.5kgf/cm^2 (3.58MPa)、割線弾性係数は $2.75 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ($2.70 \times 10^4 \text{ MPa}$)であった。

(3) 腐食促進法

自然腐食では、腐食の現象自体が確率的なものであり、局部的な腐食や不均一性をともなう。しかし、力学的挙動に対する基礎的な検討を行うには、これらの不確定な要因を逆にできるだけ少なくする必要があると考えられる。そこで必ずしも自然腐食と同一の腐食状況に対応するとは限らないが、腐食促進法として、図-4に示す定電流電源による電食法を用いた。この方法は鉄筋を強制アノード溶解させる方法であり、全鉄筋にわたり一様な腐食を生じさせることができ、積算電流量すなわち通電日数を変化させることにより腐食程度を調整できる。

RCばり供試体の電食については、電流密度を 0.5mA/cm^2 とし、通電日数を3日間 ($36\text{mA} \cdot \text{hr/cm}^2$)、6日間 ($72\text{mA} \cdot \text{hr/cm}^2$)、10日間 ($120\text{mA} \cdot \text{hr/cm}^2$)、15日間 ($180\text{mA} \cdot \text{hr/cm}^2$)で鉄筋を電食させた供試体を利用した。なお、電食は載荷試験と支点間距離を同一スパンとして支持した状態で行った。

付着強度試験供試体の電食については、電流の流れがRCばり供試体と同様になるように電食中は端面のコーティングを行った。また、電流密度および通電日数も同一として電食を実施した。

RC床版供試体については、上筋および下筋ともに通電させ全鉄筋を腐食させた。電流密度は、定電流電源の容量の関係上 0.4mA/cm^2 とし、電食日数を19日間 ($182\text{mA} \cdot \text{hr/cm}^2$)で電食させた供試体を利用した。なお、この積算電流量、すなわち腐食量は、15日間電食RCばり供試体の腐食量にほぼ相当する。

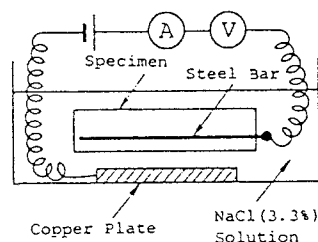


図-4 電食法

3. RCばり供試体の腐食劣化挙動

RCばりは、曲げによって設計されるRC部材のうちで最も基本的な構造部材であり、その腐食劣化挙動を把握することは、後述するRC床版の腐食劣化挙動を推測するうえで、重要な情報を与えてくれるものと考えられる。ここではRCばり供試体について実施した一連の実験結果について述べる。

(1) 通電にともなう損傷状況

鉄筋が腐食すると、断面欠損を生じさせたり、付着強度の低下や、また腐食生成物の膨張によりコンクリートに内部応力が導入されその結果鉄筋軸に沿ったひびわれを生じさせるなどの損傷を生じる。このような損傷を受けた構造物の力学的挙動は、その損傷状況と関係づけられるものと考えられ、この損傷の進展の度合いを定量的に把握することがその挙動を推定するうえで重要な意味をもつことと考えられる。このような視点に立ち、ここでは通電にともなう損傷状況を示す。損傷状況としては、目視検査によるひびわれ状況、鉄筋の付着強度試験による付着の劣化、ひずみゲージを用いた供試体のひずみの経時変化、はつり調査による鉄筋の腐食状況および錆汁の滲出状況、ならびに鉄筋の断面欠損量について計測を行った結果を報告する。

a) 縦ひびわれの発生状況

鉄筋軸に沿った縦ひびわれは、腐食生成物の膨張によって生ずるものである。このひびわれ状況やひびわれ幅などがRCばり内部の腐食状況や膨張圧と関係することが報告されており^{7)・8)}、これらは目視調査から確認できる唯一の損傷である。この縦ひびわれの進展は、通電時の観察結果から通電5～6日目でRCば

り底面に生ずることが確認され、6日間通電ばり供試体の最大ひびわれ幅は0.1mmであった。この時点では、鑄汁の側面方向への進展は一部でみられる程度であった。10日間通電ばり供試体は、縦ひびわれは顕著となり、また鑄汁の側面方向への進展も全体的に生ずるようになった。15日間通電ばり供試体ではさらに顕著となり、ひびわれ幅は最大0.7mmにまで達した。

b) 断面欠損量

断面欠損量は、後述の載荷試験後に行ない、10%クエン酸2アンモニウム溶液を用いた鑄の除去前と除去後の鉄筋の重量変化量から求めた。その結果、断面欠損率で10日間通電で約3%、15日間通電で約5%であった。

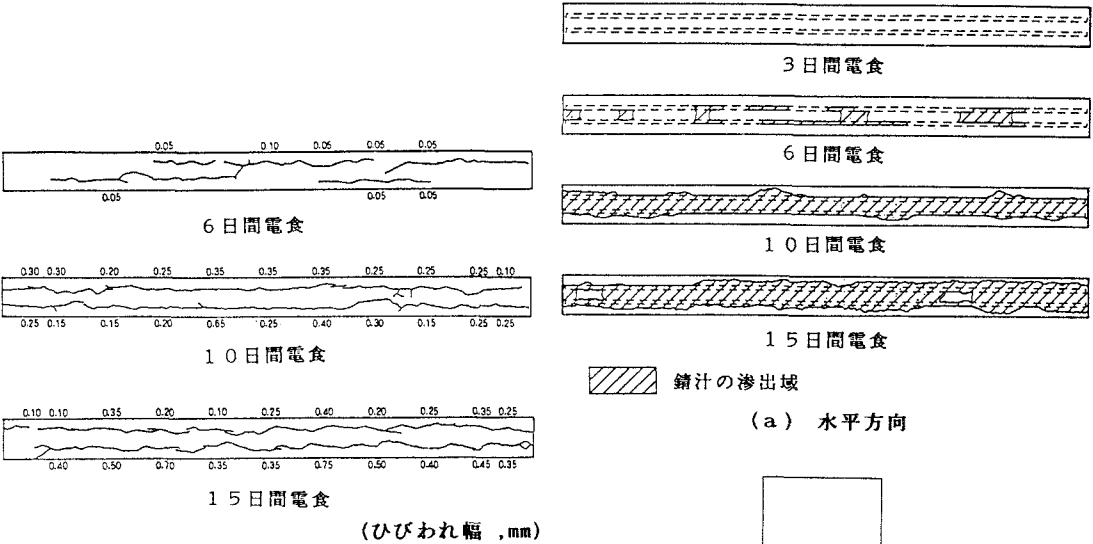


図-5 腐食ひびわれ状況(底面)

図-6 鑄汁の滲出域

c) 軸直角方向ひずみの経時変化

鉄筋鑄の膨張にともないRCばりの断面方向に内部応力が導入される。この断面方向の内部応力により鉄筋が拘束されたり、また縦ひびわれの発生を生じさせるなどの現象をもたらす。したがって、この内部応力の把握も縦ひびわれと同様に、引張応力に敏感なRC構造物の損傷状態を推定する1つのパラメーターとなるものと考えられる。図-7では、RCばり下面の軸直角方向における電食中のひずみの経時変化を示した図であり、この図から、約80時間(約3.3日間)通電でクラックが発生しはじめることがわかる。この発生時期は、前述の目視による観察結果である5~6日目よりもはやく、マイクロクラックの発生時期であると考えられる。図-8はRCばり側面における軸直角方向のひずみである。この図によると、マイクロクラックが生じ始める80時間までは引張応力が増加するが、それ以降は逆に減少に転じる傾向がみられる。これは、ひびわれの発生により引張応力が解放され、供試体側面の表面では曲げによる圧縮が生ずるためである⁹⁾と考えられる。このようにクラック発生後は複雑な応力状態となることが推測される断面内の応力分布に対して、著者らは有限要素弾性解析を用いて断面内部のひびわれ状況や応力状態を把握することを試み、ひびわれ発生と膨張量の関係やそのときの応力状態を解明し別に報告した⁷⁾。

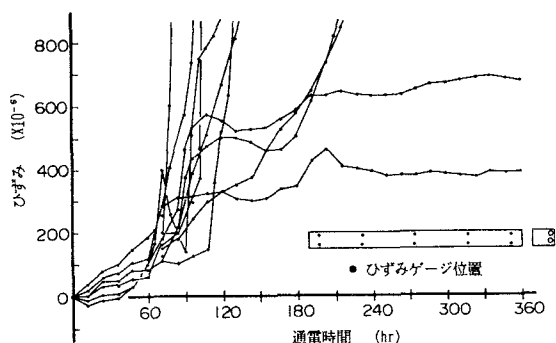


図-7 軸直角方向ひずみの経時変化(底面)

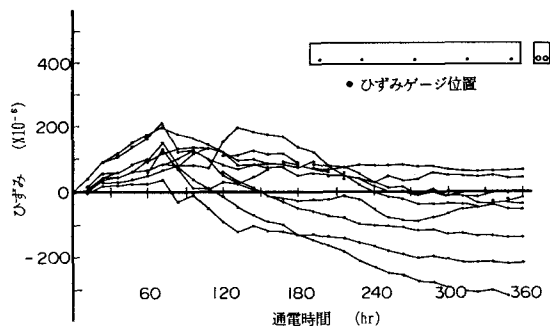


図-8 軸直角方向ひずみの経時変化(側面)

d) 軸方向ひずみの経時変化

腐食生成物の膨張は静水圧的な挙動を示す。したがって膨張挙動は断面方向ばかりではなく軸方向にも生じ、RCばり供試体には膨張による軸方向の引張力と、図心軸と鉄筋軸との偏心による曲げが同時に働く。図-9はRCばり供試体中央部の軸方向ひずみの経時変化を示した図であり、この図から上述の挙動を説明できることがわかる。しかし、このような力により生ずる供試体内のひずみは無限大に大きくなることはなく、目視により縦ひびわれが確認された120時間程度以降からは、徐々にひずみの増加は小さくなり、ある限度以上にはならないものと考えられる。このようなひずみの変化をまとめると表-1になる。なお、上面ひずみについては192時間以降は徐々に減少傾向にあるが、その原因はひずみ値自体が小さいこともあり、わからなかった。

表-1 残留ひずみ

通電日数	ひずみ ($\times 10^{-6}$)			
	上面	側面	底面	鉄筋
3	-15	25	75	65
6	-20	55	—	130
10	-15	80	—	200
15	5	100	—	220

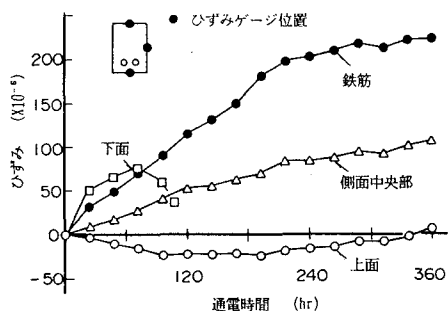


図-9 軸方向ひずみの経時変化(スパン中央)

e) 付着強度試験

鉄筋が腐食すると付着強度が低下することが予測される。そこで鉄筋の付着強度試験として引き抜き試験を実施した。この引き抜き試験は、鉄筋とコンクリートの摩擦・粘着および機械的なかみ合いの劣化を調べるためのものであり、その概要を図-10に示す。なお供試体数は各通電日数ごとに5体作成し試験を実施した。その試験結果として、代表的な付着応力度と自由端すべり量の関係を図-11に示す。ここで付着応力度とは、引き抜き力を鉄筋の付着周面積でわった値である。本試験結果によると、最大付着力は錆の膨張圧によって生ずる縦ひびわれ発生後は錆の程度により減少した。また、初期剛性は縦ひびわれの有無にかかわらず上昇している。このような付着の劣化挙動に及ぼす要因として、腐食膨張による鉄筋の拘束、縦ひびわれの発生、電食による異形鉄筋の断面形状変化などによる影響が考えられる。

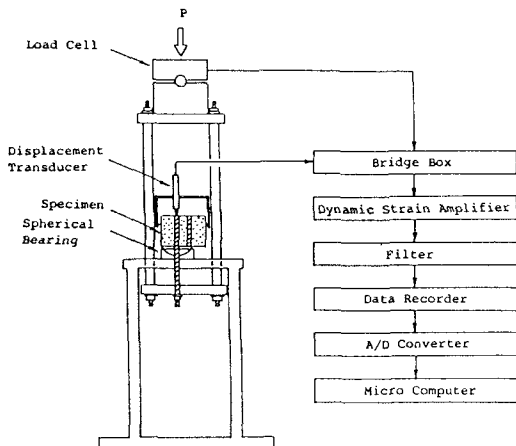


図-10 引き抜き試験

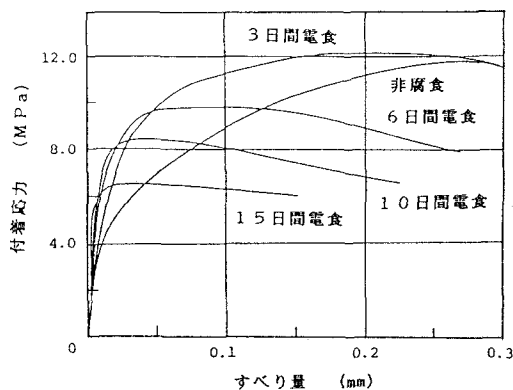


図-11 付着応力-すべり関係

また、電食により側面に連なる縦ひびわれが発生したことから、上述した引き抜き試験とは別に、縦ひびわれが鉄筋の付着に及ぼす影響を調べた。すなわち、図-12に示す供試体3体について電食によるひびわれをRCばり供試体同様に発生させ、その後に図-13に示すせん断試験を実施した。その結果得られたひびわれ面におけるせん断強度は 5.9kgf/cm^2 (0.58MPa) であり、コンクリートのせん断強度（一般に圧縮強度の $1/4 \sim 1/7$ ）に比べるとかなり小さな値であった。

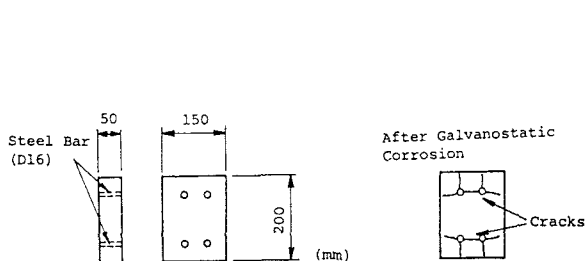


図-12 せん断試験供試体

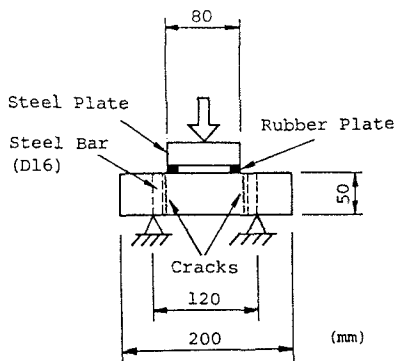


図-13 せん断試験

(2) 載荷試験

以上に示した腐食損傷を受けたRCばり供試体について載荷試験を実施した。載荷試験は図-1に示した2点載荷で、変位制御による静的載荷で行った。載荷試験の結果の一部として、荷重-スパン中央変位関係を図-14に、荷重-鉄筋ひずみ関係を図-15に、載荷後のひびわれ形状を図-16に、また耐力を表-2に示す。

a) ひびわれ形状

図-16を見てわかるように、非腐食と電食ばり供試体の場合とでは破壊形式が異なることがわかる。今回の載荷試験では非腐食ばりは曲げ破壊であるのに対し、10日間および15日間電食ばりは鉄筋の付着破壊により耐力を失う付着せん断破壊であった。また、せん断スパンにおいて曲げひびわれの進展は鉄筋軸付近で止まる傾向にあり、この区間における有効断面や応力分布状態が非腐食ばりと異なることが推定される。このようなRCばりの破壊形式はその耐力に大きく影響し、一般に付着せん断破壊を含むせん断破壊を呈す

る場合は、曲げ破壊に比べて十分なじん性を確保できないばかりか耐力も低下すると言われている。したがって破壊形式だけをみても腐食損傷によりRC供試体が劣化していることが推測される。

b) 腐食程度による挙動の変化

非腐食ばり——典型的な曲げ破壊を呈し、荷重が1.5ton程度より約10cm間隔で曲げひびわれが発生し、たわみが3.3mm程度で鉄筋は降伏した。その後、鉄筋が加工硬化域にはいり剛性が再び上がるが、たわみが8.0mmを越えるとコンクリート上縁ひずみが -3000μ に至り、最大耐力点に達した。

3日間電食ばり——非腐食ばりと同様の挙動を示すが、初期剛性および鉄筋降伏時荷重は若干高い。

6日間電食ばり——鉄筋が降伏するまでは非腐食ばりと同様の挙動を示すが、たわみが2.5mm程度をこえると若干のせん断ひびわれを生じる。鉄筋降伏後せん断ひびわれが進展し、たわみが5.0mmを超えると鉄筋は加工硬化域にはいるが、剛性は上がらず、最終的にはせん断圧縮破壊を示した。

10日間および15日間電食ばり——10日間電食ばりと15日間電食ばりはほぼ同様の挙動を示し、付着せん断破壊であった。載荷初期に15~20cm間隔の曲げひびわれを生ずるが、曲げひびわれの進展は非腐食ばりと比べると少ない。たわみが1.0mm程度から剛性は低下しはじめ、3.0mm程度に達すると、RCばりの

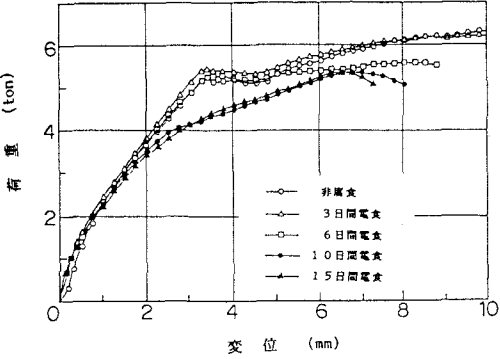


図-14 荷重—スパン中央変位関係

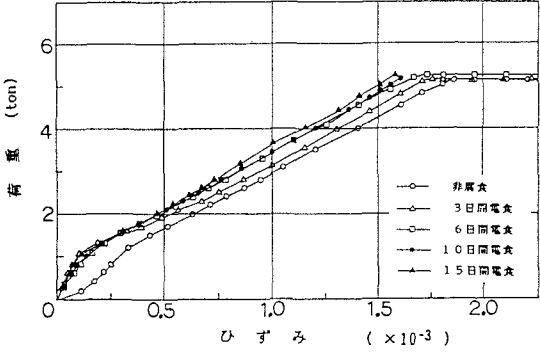


図-15 荷重—鉄筋ひずみ関係

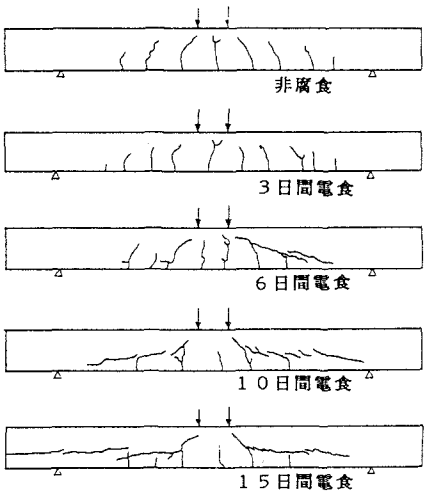


図-16 破壊形状

表-2 RCばり供試体載荷試験結果

供試体番号	通電時間	ひびわれの最大幅 (mm)	鉄筋降伏時の荷重 (ton)	最大耐力 (ton)	平均	破壊形状
0-A	非腐食 (0 hr)	—	5.04	6.00	6.29 (1.00)	曲げ
0-B		—	5.38	6.52		
0-C		—	5.19	6.33		
3-A	3日間電食 (72hr)	—	5.36	6.18	6.26 (1.00)	曲げ
3-B		—	5.24	6.16		
3-C		—	5.92	6.45		
6-A	6日間電食 (144hr)	0.10	5.09	5.65	5.64 (0.90)	せん断圧縮
6-B		0.10	5.40	5.53		
6-C		0.10	5.32	5.73		
10-A	10日間電食 (240hr)	0.45	5.16	5.71	5.35 (0.85)	付着せん断 (付着割裂)
10-B		0.65	—	5.37		
10-C		0.45	—	4.96		
15-A	15日間電食 (360hr)	0.75	—	5.60	5.55 (0.88)	付着せん断 (付着割裂)
15-B		0.50	—	5.45		

軸方向にはり端部に向かって付着せん断ひびわれが進展し剛性はさらに低下する。この付着せん断ひびわれは軸方向に対して約 10° ～ 20° の傾きで多数生じ、最終的にこれらが連なり耐力を失う。この耐力については、非腐食ばりに比べると10～15%低下した。

このように鉄筋腐食の増加にともなって耐力が減少するとともに、破壊形式も曲げ破壊から付着せん断破壊へと変化してゆくことが示された。

(3) 損傷状況と耐力との関係

1節において種々の損傷状況を示したが、これらの損傷状況と耐力との関係について考察を行い、本研究で対象とした供試体と実構造物との対応について述べる。

a) 断面欠損量が耐力に及ぼす影響

前節で示した電食RCばりの耐力低下は、曲げ破壊との破壊形式の相違や鉄筋が降伏しないことから、鉄筋の断面欠損では説明ができず、本研究で対象とした全体的に鉄筋が腐食したRCばりについては、断面欠損量が耐力に及ぼす影響は小さいものと考えられた。しかしながら、実際の構造物で典型的な腐食損傷例の1つとして報告されている局部的に大きな断面欠損を生ずる場合については、断面欠損量が耐力に影響を及ぼすものと考えられる。

b) 残留ひずみが耐力に及ぼす影響

1節において、電食による損傷を受けたRCばりには表-1に示すような残留ひずみを生じていることが示された。これらの影響については、図-15に示した荷重-鉄筋ひずみ関係において、降伏するひずみ値が非腐食と3日間および6日間電食ばりとは異なることから、載荷前にRCばりに生じているひずみ（以下「初期ひずみ」と称す）として取扱うことができることがわかる。図-17は、別に行った繰り返し載荷時の荷重-たわみ関係を示した図であり、非腐食ばりの再負荷時の挙動と6日間電食ばりの負荷初期の挙動は類似の挙動を示すことがわかる。初期ひずみに対応する初期たわみが電食ばりに生じていると考えれば、両者の荷重-たわみ曲線は一致する。このような初期ひずみや初期たわみを有する電食RCばりが再負荷時の非腐食RCばりと類似な挙動を示すとすれば、これらが耐力に及ぼす影響は小さいものと考えられた。

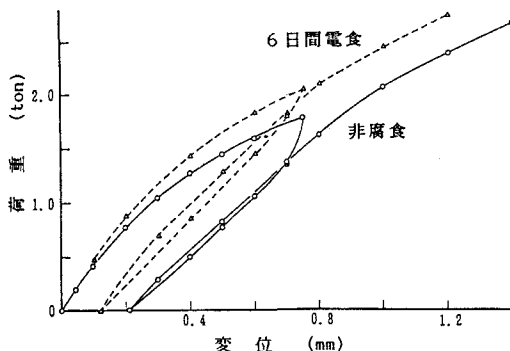


図-17 繰り返し載荷時の荷重-スパン中央変位関係

c) 付着の劣化が耐力に及ぼす影響

前節で示した載荷試験の結果から、10日間および15日間電食ばりは付着せん断破壊を生じ耐力を失うことから、鉄筋腐食による付着の劣化が耐力に影響を及ぼしていることが推測される。付着の劣化は定性的には、載荷試験時の曲げひびわれ間隔の相違からも推定できる。定量的には、鉄筋の摩擦、粘着、機械的なかみ合いの劣化を評価する引き抜き試験によると、付着強度は 120 kgf/cm^2 (11.8MPa)から 65 kgf/cm^2 (6.4 MPa)まで低下することが示され、また腐食によって側面方向に進展する縦ひびわれ面におけるせん断応力の伝達の欠如を評価する試験では、ひびわれ面におけるせん断強度が 5.9 kgf/cm^2 (0.58MPa)とコンクリートのせん断強度よりかなり低い値であることが示された。本研究における実験結果だけからは、上述に示した2つの付着劣化要因のうちのどちらかが耐力に影響を及ぼすのかを判断するのは容易ではない。著者らはこのような問題に対して文献6)において有限要素弾塑性解析を用いた解析的な検討を行ない、上述の2つの劣化要因のうち、せん断応力の伝達の欠如が耐力に影響を及ぼす要因であることを明らかにしている。また、さらにこの縦ひびわれ面がRCばり側面にまで達していない状態でも、ひびわれ先端に生じている内部応力の働きにより付着せん断破壊の生ずる可能性のあることも明らかにしている。

d) 実構造物との対応

本研究で対象としたRCばりは、スターラップを有しない単鉄筋単純ばりであるが、実構造物については複鉄筋でスターラップを有する構造が一般的である。このような構造に対して文献3)で行われた実験結果によると、電食により必ずしも耐力低下が認められないことが報告されている。この原因を上述の考察から推定すると、主鉄筋の付着性状が劣化してもスターラップにより付着せん断応力の伝達が確保されるためであると考えられる。したがって実構造物におけるRCばりでもスターラップが有効に効いていれば、静的な耐力は低下しないものと考えられた。またスターラップに加えて実構造物では多くの場合フックを有する定着構造が用いられる。この鉄筋の定着は、鉄筋の付着性状と相互に関係するものであり、上述のスターラップが有効に効いている場合にはこのフックが耐力低下に及ぼす影響は小さいものと思われる。しかしながら、本研究で対象としたようなスターラップがない構造については、鉄筋の付着力により定着する構造と、付着とフックの複合効果として定着する構造とでは、腐食による鉄筋の付着性状の変化により耐力機構が異なってくる可能性のあることも考えられる。

4. RC床版供試体の腐食劣化挙動

前章で、腐食損傷を受けたRCばりの劣化挙動についての考察を行った結果、観察された損傷のうち腐食によって生ずるひびわれ面における応力伝達の欠如が破壊形状や耐力に影響を及ぼす要因であることが推定されることを報告した。RC床版については、スターラップのようなせん断補強筋が用いられない場合が一般的であり、腐食によって生ずるひびわれ面の発生が力学的な挙動に大きく影響するものと推測される。ここではRC床版供試体について実施した一連の実験結果について述べる。

(1) 通電による損傷状況

RCばり供試体の通電による種々の損傷のうちで耐力に影響を及ぼすのは、側面方向に進展するひびわれの発生であることが推定されたので、RC床版供試体の通電による損傷状況として、ここでは目視検査によるひびわれ状況とはつり調査による錆汁滲出状況について観察を行った結果について報告する。

図-18にRC床版通電後のひびわれ状況を示す。電食による腐食量は積算電流量に比例することが知られており、耐力低下が認められた15日間電食ばり供試体と同程度の腐食量である。このRC床版供試体の場合、RCばり供試体でみられたような鉄筋軸に沿ったひびわれは床版底面には顕著に現れないことがわかる。

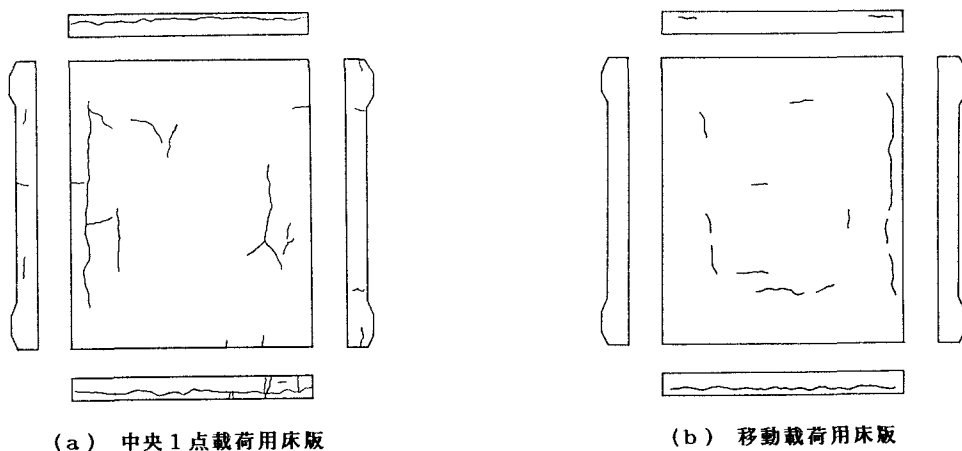


図-18 腐食ひびわれ状況(底面,側面)

しかし、後述する載荷試験後に実施したはつり調査の結果では、鉄筋が全体的に腐食しており、網目状に密な状態で配筋されている主鉄筋と配力鉄筋を含む水平面全体に錆汁が拡がっていることが確認された。したがって、RCばりの場合と同様にこの水平面における力の伝達機構が耐力に影響を及ぼすものと考えられる。

一方、床版上面については、上筋の影響によりひびわれが生じ、上筋は下筋に比べると粗な配筋である。ここには示していないが床版上面では、一部に鉄筋軸に沿ったひびわれが生じたが、主鉄筋と配力鉄筋を含む水平面状のひびわれはほとんどみられなかった。

RCばり供試体とRC床版供試体の腐食ひびわれの発生状況から、腐食ひびわれは鉄筋の配置や膨張に対する拘束条件により影響されることがわかった。とくにRC床版では、実橋においても腐食によるひびわれは表面には出にくい場合もあることが考えられ、鉄筋腐食の検査には著者らが文献10)、11)で報告している自然電位法やあるいは分極抵抗法などの非破壊検査法が必要となるものといえる。

(2) 載荷試験

RC床版供試体に対する載荷試験は、図-19に示す中央1点載荷と中央点を含む3点移動載荷の2種類とし、それぞれ非腐食と電食床版供試体に対して行った。中央1点載荷では、図-19に示すB点で60tonまでの静的載荷を行った。移動載荷では疲労劣化を想定して繰り返しおよび静的載荷を表-3の要領で行った。その後、B点で中央1点載荷同様に60tonまでの静的載荷を行った。なお、載荷板にはゴム板を用い寸法は道路橋示方書の輪荷重を想定して20×50cmとし、静的載荷は変位制御により行った。

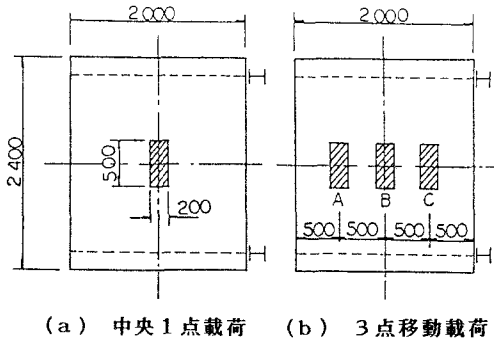


図-19 載荷位置

表-3 載荷方法(移動載荷)

疲労段階	繰り返し載荷	静的載荷
1	-----	B点 0-24-0 t
2	-----	C点 0-24-0 t
3	-----	A点 0-24-0 t
4	-----	B点 0-24-0 t
5	-----	C点 0-24-0 t
6	-----	A点 0-24-0 t
7	-----	B点 0-24-0 t
8	B点 1~12t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
9	C点 1~12t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
10	A点 1~12t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
11	B点 1~16t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
12	B点 1~24t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
13	C点 1~24t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
14	A点 1~24t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
15	-----	B点 0-36-0 t
16	B点 1~36t 1万回載荷	B点 0-36-0 t

a) 3点移動載荷

3点移動載荷は、輪荷重による疲労を想定したものであり、疲労の進行にともない床版の剛性が低下することが報告されている¹²⁾。本載荷試験は、非腐食と電食RC床版におけるこの剛性低下の度合いの相違を調べるためのものである。試験結果の一部として、表-3に示した第1、7、14段階における静的載荷時の荷重-床版中央たわみ関係を図-20~22に、また第16段階終了時における床版底面ひびわれ状況を図-23に示す。

これらに示した結果から、非腐食と電食RC床版ともに、疲労の進行にともない剛性が低下するが、すべての場合について電食RC床版の剛性は若干高い傾向を示すことがわかる。ひびわれ形状は、網目状となる非腐食床版に対し、電食床版では主鉄筋直角方向のひびわれが卓越した。また、電食床版では第9段階で一部に貫通ひびわれを生じた。このような挙動を示す原因の1つとして、腐食により発生する水平面状のひびわれによるモーメント分配の変化などが考えられるが、その機構を解明するには至っていない。

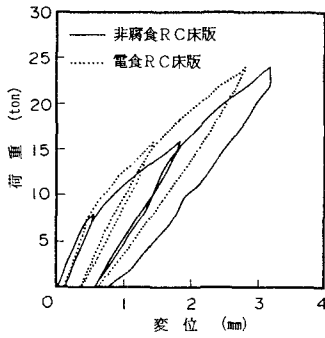


図-20 荷重-床版中央変位関係
(第1段階)

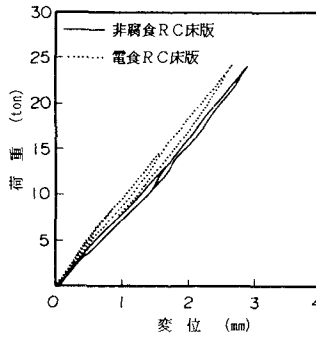


図-21 荷重-床版中央変位関係
(第7段階)

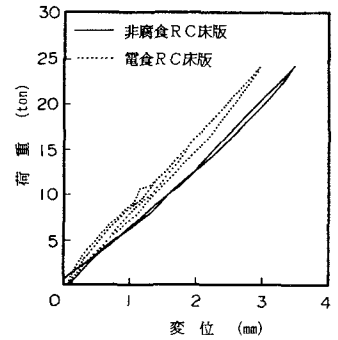
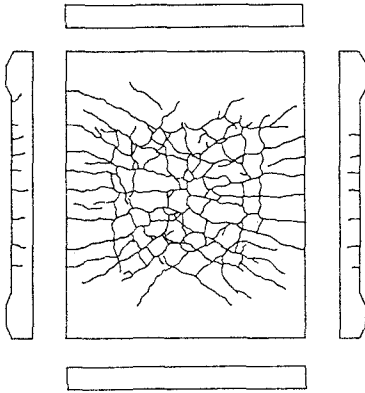
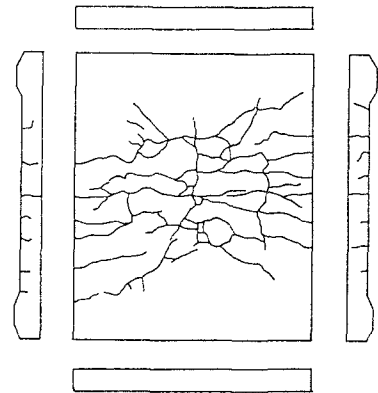


図-22 荷重-床版中央変位関係
(第14段階)



(a) 非腐食



(b) 電食

図-23 ひびわれ状況(移動載荷終了時-底面,側面)

b) 中央1点載荷

上述の移動載荷を実施したRC床版供試体2体と、これとは別に準備した非腐食と電食RC床版供試体について、60ton までの静的載荷試験を実施した。その結果の一部として、荷重-床版中央たわみ関係をそれぞれ図-24、25に、また、床版底面ひびわれ状況を図-26に示す。

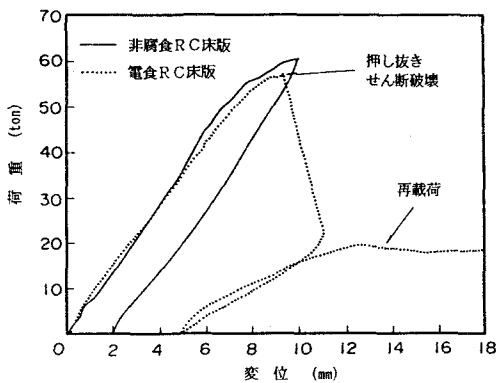


図-24 荷重-床版中央変位関係
(移動載荷終了後静的載荷)

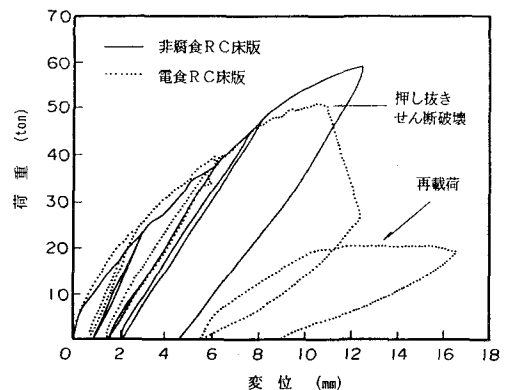


図-25 荷重-床版中央変位関係
(静的載荷)

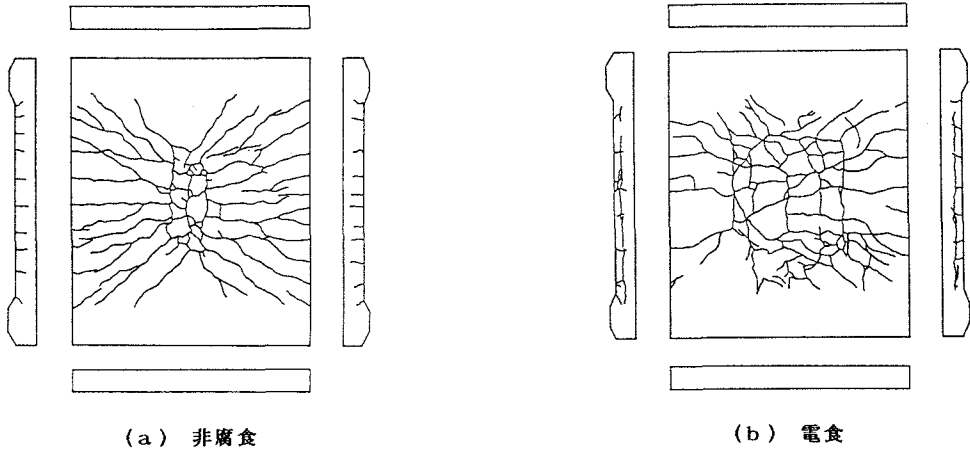


図-26 ひびわれ状況(図-25供試体に対応-底面,側面)

図-24、25に示した荷重-たわみ曲線の結果から、電食RC床版の方が初期の剛性が若干高いことがわかる。これに対して、押し抜きせん断耐力は低下しており、図-25に示した腐食RC床版では56.5ton、また、図-25では51.5tonであった。一方、非腐食RC床版は2体とも60tonまでの荷重では破壊を生じなかった。また、電食RC床版の押し抜きせん断破壊状況は、載荷板直下で陥没したが、一般的なRC床版の押し抜きせん断破壊形状として報告されている陥没と同時に生ずる床版下面の離破壊は確認されなかった。したがって、電食RC床版の耐荷機構は非腐食RC床版と異なり、それが耐力低下と関係づけられるものと考えられた。

(3) 電食RC床版の押し抜きせん断耐力

RC床版に対する押し抜きせん断耐力式は多くの研究者により提案されているが、ここでは、道路橋RC床版に適していると考えられ、押し抜きせん断耐荷機構を基礎として導き出された、式(1)で表わされる前田・松井の式¹³⁾を引用して考察を行うことにした。

$$P_{ult} = \tau_{s, \max} (2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m) + \sigma_{t, \max} (2(a+2d_m)C_d + 2(b+d_d+4C_d)C_m) \quad (1)$$

ここに、 a 、 b は載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長、 X_m 、 X_d は主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸距離、 d_m 、 d_d は主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ、 C_m 、 C_d は引張側主鉄筋、引張側配力鉄筋の中心とコンクリート下表面との距離、 $\tau_{s, \max}$ 、 $\sigma_{t, \max}$ はコンクリートの最大せん断応力度、最大引張応力度である。第1項は載荷板直下のせん断破壊、第2項は鉄筋のダウエル効果によるかぶりのはく離破壊が耐力に寄与する項をそれぞれ表している。本式によると、表-4に示すように非腐食RC床版では78.2tonの耐力を有して、60tonでは破壊を生じないことになり、実験結果を裏付けている。一方電食RC床版の場合は、前述したような水平面方向の腐食ひびわれの存在や破壊形状の相違からは、第2項であるダウエル効果が耐力に寄与する影響が非腐食RC床版に比べて小さいものと推測される。この電食RC床版のダウエル効果について本実験結果のみからその機構を解明することはできないが、図-24に示す押し抜きせん断破壊後に行った再載荷で20.5tonの耐力を有するのは、このダウエル効果の耐力の分担分であろうと考えられる。このように考えると、表-4において $\chi = 20.5\text{ton}$ であり、図-24に示した電食RC床版の推定される耐力は、 $P_{ult} = 56.5\text{ton}$ となる。図-24に示した電食RC床版では、押し抜

きせん断破壊後の耐力は 18.3tonであり、同様な方法で押し抜きせん断耐力の推定を行うと $P_{ult}=54.3\text{ton}$ となる。これらの推定値は上述した実験値 51.5ton、56.5ton とほぼ一致しており、耐力低下がダウエル効果の低減と関係づけられることを推定できる。

表－４ 押し抜きせん断耐力

	第1項 (せん断破壊)	第2項 (ダウエル効果)	押し抜きせん断耐力
非腐食RC床版	36.0 ton	42.2 ton	78.2 ton
腐食RC床版	36.0 ton	χ ton	$(36.0+\chi)$ ton

5. まとめ

電食により腐食させたRCはりおよびRC床版供試体について載荷試験を実施し、鉄筋腐食による損傷の状況と耐力低下機構との関係を調べた結果、次のことがわかった。

(1) 本研究で対象としたRCはりおよびRC床版供試体ともに、腐食損傷により破壊形式の変化と耐力の低下が認められた。この破壊形式の変化は、RCはり供試体では曲げ破壊から付着せん断破壊へと、またRC床版供試体では押し抜き破壊形式に変化がみられた。

(2) 耐力低下に影響を及ぼす損傷がいずれの供試体についても腐食により生ずるひびわれであり、鉄筋の断面欠損に加えてひびわれ発生の有無が、力学的挙動を論ずるうえでの1つの分岐点となるものと考えられた。このひびわれはRCはり供試体では底面ばかりでなく側面へも進展し、RC床版供試体では主鉄筋と配力鉄筋を含む水平面状に進展することが確認された。

(3) この腐食ひびわれと耐力低下機構との関係は、RCはり供試体では付着せん断応力の伝達の欠如であることが推定されたが、実際の構造物では主鉄筋が腐食してもスターラップの働きにより、このような応力伝達の欠如は生じないものと考えられた。またRC床版では腐食ひびわれによりダウエル作用が耐力に寄与する効果を低減させることが推定された。

このように、RCはりとRC床版の腐食劣化挙動は共通するところがあり、RCはりの腐食劣化挙動を把握することによりRC床版の腐食劣化挙動をある程度推測することが可能であることがわかる。

そのほかに次のことがわかった。

(4) 腐食損傷をうけたRCはり供試体の載荷初期の挙動は、非腐食RCはり供試体の再負荷時の挙動と類似の挙動を示した。

(5) 腐食損傷を受けたRC床版供試体は、輪荷重による疲労を想定した場合に、非腐食RC床版供試体と同様に剛性は低下した。

本研究において実施した実験結果から以上のようなことがわかったが、RC床版については水平面状の腐食ひびわれによるモーメント分配の変化や耐力低下の機構などを解明するには至っておらず、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) たとえば、日本コンクリート工学協会；特集・鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化、コンクリート工学 Vol.25, No.11, 1987.
- 2) 魚本健人、辻恒平、柿沢忠弘；鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.173～176, 1984.
- 3) 武若耕司、松本進；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、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.177～180, 1984.

- 4) 岡田清、小林和夫、宮川豊章、九富理；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、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.113～116,1985.
- 5) Mirsa, S and T. Uomoto；鉄筋腐食が鉄筋コンクリートはりの静的耐力に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、pp.675～680,1987.
- 6) 橋吉宏、梶川康男、川村満紀；鉄筋腐食によって損傷を受けたRCはりの挙動に関する考察、土木学会論文集第V部門に掲載予定.
- 7) 角本周、梶川康男、川村満紀；コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性、土木学会論文集第V部門に掲載予定.
- 8) 小西裕一郎、関博、松井邦人、松島学；鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひびわれの有限要素解析、土木学会第42回年次学術講演会概要集第V部門、pp.406～407,1987.
- 9) 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基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集10-2、pp.505～510,1988.
- 10) 梶川康男、前田研一、作田孝行、橋吉宏、富澤光一郎；自然電位法によるRC床版の鉄筋腐食検査、橋梁と基礎、87-11、pp.5～10,1987.
- 11) 橋吉宏、作田孝行、前田研一、富澤光一郎、梶川康男；RC床版の自然電位法による鉄筋腐食検査と適用性に関する考察、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、pp.91～96,1988.
- 12) 岡田清、岡村宏一、園田恵一郎、島田功；道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状、土木学会論文集、第321号、pp.49～61,1982.
- 13) 前田幸雄、松井繁之；鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文集、第348号/V-1、pp.133～141,1984.

(1988年10月12日受付)