

鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/24218

鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する考察

THE BEHAVIOUR OF RC BEAMS DAMAGED BY CORROSION OF REINFORCEMENT

橋 吉宏*・梶川康男**・川村満紀***

By Yoshihiro TACHIBANA, Yasuo KAJIKAWA and Mitsunori KAWAMURA

The mechanical behaviour of RC beams damaged by corrosion of reinforcement is not only experimentally but also theoretically studied using an elasto-plastic finite element method. In the experiments, loading and bond tests are conducted for RC specimens damaged with an accelerated galvanostatic corrosion method. It is found that the reduction in stiffness and load carrying capacity occurred in the damaged beams. Theoretical studies are made to investigate the cause of the action of these damaged beams. From those experimental and theoretical considerations, it could be indicated that the mechanical behaviour of damaged beams is affected by inadequate transmission of stresses between reinforcement and concrete, which results from internal stresses and growth of cracks due to the formation of corrosion products.

Keywords: mechanical behaviour, RC beam, corrosion of reinforcement, FEM

1. ま え が き

鉄筋腐食による RC 構造物の被害が各地で報告されるようになってきている¹⁾。これらの構造物中における鉄筋の腐食は、飛来塩分の浸透や中性化域の進行、また、海砂使用や混和剤などによる打設時の塩分混入が主な原因であるとされている²⁾。そしてその被害形態として、鉄筋の一部に断面欠損を生ずる例や、鉄筋が全体的に腐食し鉄筋軸に沿ったひびわれや剝離が生ずる例が典型的な被害例として報告されている。

このような腐食を受けた RC 構造物の安全性の評価法として曲げ部材である RC ばりを例にとると、断面欠損が耐力に及ぼす影響が支配的な場合においては、その断面欠損量をもとにして計算された曲げ耐力により安全性を評価する方法が有効であると考えられる。他方、鉄筋が全体的に腐食した RC 部材においては、鉄筋のさびによる断面欠損量が耐力に影響を及ぼさないような程度の量であっても、腐食膨張力によりコンクリートに

鉄筋軸方向のひびわれの発生や鉄筋の付着劣化が生じ、これらに伴った耐力の低下や破壊形式の変化の生ずる可能性のあることが実験的に示されている^{3)~7)}。しかしながら、さびの程度と劣化挙動や耐力との関係はいまだに不明な点が多く、安全性の検討を行ううえでの判断材料として、それらの解明が必要であろうと考えられる。

本研究はこのような観点から、RC 部材として曲げを受ける単鉄筋単純ばりを考え、実験的な手法に加えて解析的な手法により、鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばり（以下「腐食 RC ばり」と称す）の劣化機構の推定を行い、それらの関係の解明を試みたものである。実験的手法としては、鉄筋が全体的に腐食した RC ばりのモデル化として、外部電流の印加により腐食させた（以下「電食」と称す）RC ばりを用いて、載荷試験および鉄筋の付着試験を実施し、その劣化挙動に対する検討を行った。その結果、腐食 RC ばりが劣化挙動を示す要因として、鉄筋の最大付着力の低下、さびによる膨張圧で生ずる内部応力の発生や鉄筋軸方向のひびわれ、およびそれに伴う鉄筋への応力伝達の欠如のあることを示した。しかし、実験で示された各要因が、腐食 RC ばりの挙動に大きな影響を及ぼしているのか、それとも二次的なものであるのかを実験結果だけから判断するのは容易ではない。そこで解析的手法として、有限要素弾塑性

* 正会員 工修 川田工業(株)技術本部中央研究室
(〒114 北区滝野川 1-3-11)

** 正会員 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)

*** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(同上)

解析を用いて各要因に対する検討を行い、腐食 RC ばりの解析モデルと劣化機構について、力学的な視点に立った考察を行った。

本文は、これらの検討結果を報告し、腐食 RC ばりの安全性の検討を行ううえでの一判断資料を与えるものである。

2. 腐食 RC ばりの劣化挙動試験

鉄筋が全体的に腐食した RC ばりを対象に、4. で行われる解析的な検討結果と対比させることを目的として、電食により劣化させた RC ばり供試体について載荷試験と鉄筋の付着強度試験を行い、その劣化挙動について検討を行った。

(1) 供試体

載荷試験に用いた RC ばり供試体は、構造的に最も単純なスターラップを有しない単鉄筋単純ばりとし、鉄筋の定着については鉄筋の付着力によって定着するものとした。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 Fig. 1 に示す。せん断スパン比 (a/d) は曲げ破壊を呈するように 4.2 を設定し、使用した鉄筋は黒皮付異形棒鋼 D16 (SD 30) で鉄筋比は 1.3 % である。また、コンクリートの配合は Table 1 に示す。コンクリートは試験時において材令は約 2 か月であり、圧縮強度は 35.6 MPa (363 kgf/cm²)、引張強度は 3.2 MPa (33 kgf/cm²)、ポアソン比 0.18、初期弾性係数は 2.65×10^4 MPa (2.70×10^6 kgf/cm²) であった。鉄筋については、降伏強度が 353 MPa (3600 kgf/cm²)、ヤング率は 2.06×10^5 MPa (2.10×10^6 kgf/cm²) であった。引き抜きによる付着強度試験において使用した供試体の概要を Fig. 2 に示す。ここで供試体の断面は、RC ばり供試体の腐食状態と同じ条件となるように、RC ばり供試体と同一のものとした。

(2) 電食試験

腐食促進法としては、文献 3) を参考として定電流電源による電食法を用いた。この方法は、Fig. 3 に示すよ

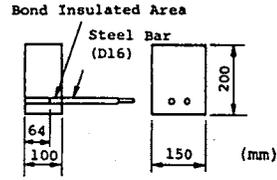


Fig. 2 Pull-Out Test Specimen.

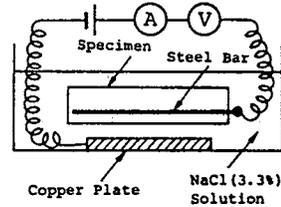


Fig. 3 Galvanostatic Corrosion System.

うに鉄筋を強制アノード溶解させる方法であり、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。しかし、本研究で対象とした全体的に鉄筋が腐食した RC ばり供試体の力学的挙動に対する基礎的な検討を行う範囲であれば、電食法による腐食のモデル化でも適用が可能であると思われる。この電食法による腐食程度は、積算電流量すなわち通電日数を変化させることにより調整ができる。本研究においては、電流密度 0.5 mA/cm² とし、通電日数を 0 日間 (非腐食)、3 日間 (36 mA·hr/cm²)、6 日間 (72 mA·hr/cm²)、10 日間 (120 mA·hr/cm²)、15 日間 (180 mA·hr/cm²) で鉄筋を電食させた RC ばり供試体を利用した。なお、15 日間通電の鉄筋の断面欠損率は、10 % クエン酸 2 アンモニウム溶液を用いたさびの除去前と後の重量変化から測定した結果、約 5 % であった。

ここで、通電に伴う RC ばり供試体の劣化状況として、15 日間通電後の状況を Fig. 4 ~ Fig. 6 に示す。Fig. 4 は、鉄筋の腐食膨張圧によって RC ばり下面に発生した鉄筋軸方向の縦ひびわれであり、最大ひびわれ幅は 0.75 mm であった。Fig. 5 は、載荷試験後のはつり

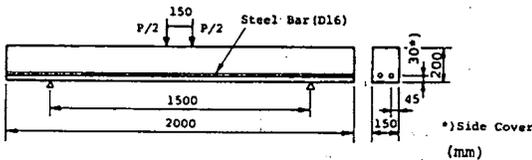


Fig. 1 RC Beam Specimen.

Table 1 Mix Proportion of Concrete.

Nominal Strength (MPa)	Slump (cm)	Maximum Size of Coarse Aggregate (mm)	Air Content (%)	Water Cement Ratio (%)	Sand Percentage (%)
20.6	8.0	25	4.0	59.0	42.4

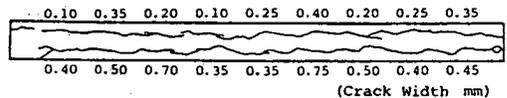
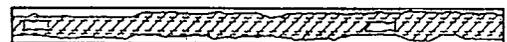


Fig. 4 Growth of Cracks after 15-days Current Period.



Rust Sludge Area

Fig. 5 Rust Sludge Area after 15-days Current Period.

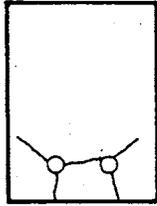


Fig. 6 Growth of Cracks after 15-days Current Period.

調査により確認されたさび汁の滲出域であり、Fig. 6は、さび汁の滲出から判断された断面方向のひびわれの進展である。また電食終了後の側面の一部にさび汁の滲出がみられたことから、膨張圧によって生ずる縦ひびわれはRCばりの下面ばかりでなく側面へ連なるようにも進展していることがわかる。

一方、引き抜き試験供試体についてもRCばり供試体と同様の腐食条件となるようにした。すなわち、境界条件を同一とするために、電食中は端面のコーティングを行い、また電流密度および通電日数も同一として電食を行った。

(3) 載荷試験

電食により劣化させたRCばり供試体について載荷試験を実施した。その概要をFig. 7に示す。図中に示した荷重分配横ばり (Load distribution beam) は文献8)を参考にして荷重-たわみ関係において耐力点以降の挙動も追跡できるように設置したものである。なお、載荷試験は供試体を電食終了後3日間室内で乾燥させた後に行った。

載荷試験結果として、ひびわれ形状をFig. 8に、荷重-スパン中央たわみ関係をFig. 9に、また耐力をTable 2に示す。

Fig. 8に示すひびわれ形状をみてもわかるように、明

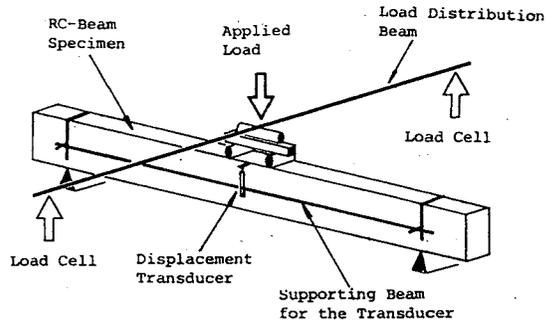


Fig. 7 Loading Test.

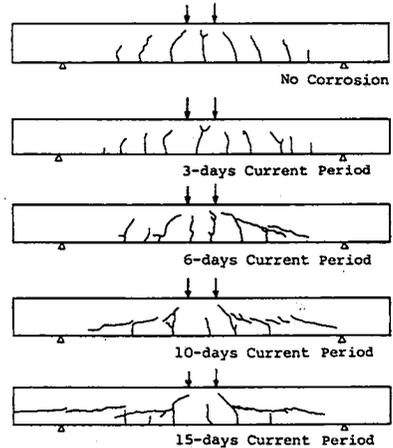


Fig. 8 Crack Pattern at Failure.

らかに非腐食の場合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。このようなRC部材の耐力は破壊形式により大きく異なり、一般に、せん断破壊の場合は曲げ破壊に比べ、十分な靱性を確保できないばかりか耐力も低下するといわれている。今回の載荷試験

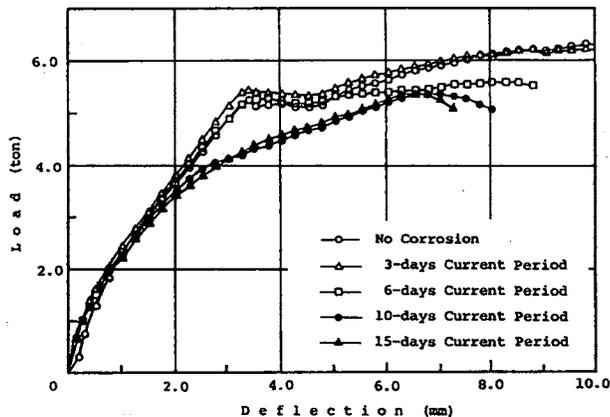


Fig. 9 Load-Deflection Relation.

Table 2 Summary of Results for Loading Test.

Specimen	Current Period (0.5mA/cm ²)	Crack Width (mm)	Steel Yield Load (ton)	Load Carrying Capacity (ton)		Failure Type
				Average ()-Rate		
0-A	No Corrosion	--	5.04	6.00	6.29 (1.00)	Flexure
0-B		--	5.38	6.52		
0-C		--	5.19	6.33		
3-A	3-days	--	5.36	6.18	6.26 (1.00)	Flexure
3-B		--	5.24	6.16		
3-C		--	5.92	6.45		
6-A	6-days	0.10	5.09	5.65	5.64 (0.90)	Shear - Compression
6-B		0.10	5.40	5.53		
6-C		0.10	5.32	5.73		
10-A	10-days	0.45	5.16	5.71	5.35 (0.85)	Bond - Shear
10-B		0.45	--	5.37 (0.85)		
10-C		0.45	--	4.96		
15-A	15-days	0.75	--	5.60	5.55 (0.88)	Bond - Shear
15-B		0.50	--	5.45		

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日間電食ばりは付着せん断破壊であった。ひびわれ形状だけを見ても、鉄筋腐食によりRCばり供試体が劣化していることが推測される。

腐食程度によりどのように挙動が変化してゆくかを Fig. 8, 9, Table 2 の結果から考察を行えば、まず非腐食および3日間電食ばり供試体はほぼ同様の挙動を示し、鉄筋降伏による曲げ破壊を生じているが、Fig. 9 からわかるように、3日間電食ばり供試体の方が非腐食ばり供試体に比べて初期の曲げ剛性は若干高いようである。また、6日間電食ばり供試体は、鉄筋が降伏するまでは3日間電食ばり供試体と同様の挙動を示すが、鉄筋降伏後にせん断ひびわれが発生している。さらに、10日間電食と15日間電食ばり供試体はほぼ同様の挙動を示しており、荷重の増加に伴い曲げ剛性が大きく減少し、鉄筋に沿って10°~20°の傾きをなすひびわれが発生して付着せん断破壊を生じている。また、最大耐力も非腐食ばり供試体に比べて10~15%低くなった。このような耐力の低下は、曲げ破壊との破壊形式の相違から、断面欠損量では説明できないことがわかる。

魚本ら³⁾、武若ら⁴⁾、Mirsaら⁹⁾が行った種々の形式の電食RCばり供試体における既往の実験結果のうちから、本研究で対象とした非腐食時には曲げ破壊を呈する単鉄筋単純ばりだけについて着目し比較を行うと、いずれの場合についても共通して電食による耐力の低下が報告されており、本実験における結果と一致しているといえよう。しかし、非腐食時には曲げ破壊を呈する単純ばりでも複鉄筋でスターラップを有するものについては、耐力低下が必ずしも認められないことが報告されており^{4), 9)}、これらの挙動を含めて検討を行う必要がある。

(4) 付着強度試験

鉄筋の付着強度試験として用いた引き抜き試験は、鉄筋とコンクリートの摩擦、粘着および機械的な噛み合いの劣化を調べるためのものであり、Fig. 10 にその概要を示す。一般に引き抜き時の付着破壊は瞬時に生ずるために、鉄筋自由端変位と荷重の計測は、Fig. 10 に示す

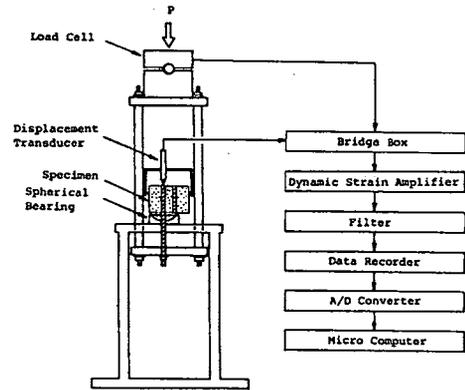


Fig. 10 Pull-Out Test.

ように動的な計測によった。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。

引き抜き試験結果として、代表的な付着応力度と自由端すべり量の関係を Fig. 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割った値である。このような引き抜き試験方法では、断面においてせん断力が作用していないためにRCばりの中での付着強度と対応していないことが指摘されているが⁹⁾、上述したような付着の劣化を調べるには有効な試験方法であると思われる。このような腐食鉄筋の最大付着力については、森永¹⁰⁾が押し抜き法で行った試験では低下しないことが報告されているが、本試験結果によると、最大付着力はさびの膨張圧によって生ずる縦ひびわれ発生後はさびの程度により減少した。また、初期の剛性について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、腐食膨張圧による鉄筋の拘束、膨張圧に伴う縦ひびわれの発生、腐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。

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

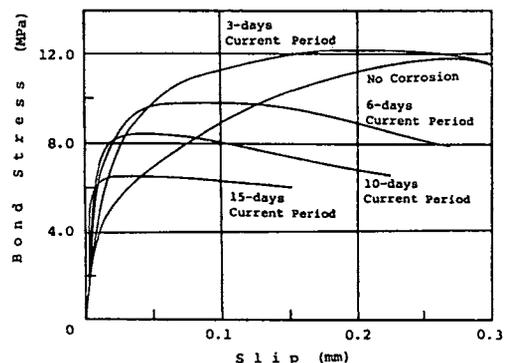


Fig. 11 Bond Stress-Slip Relation.

が鉄筋の付着に及ぼす影響を調べた。すなわち、Fig. 12 に示す供試体 3 体について電食によるひびわれを RC ばり供試体と同様に発生させ、その後 Fig. 13 に示すせん断試験を実施した。このような試験方法は、ひびわれ面のような不連続面を有する場合について有効な方法であると思われる。その結果得られたひびわれ面におけるせん断強度は 0.58 MPa (5.9 kgf/cm²) であり、コンクリートのせん断強度 (一般に圧縮強度の 1/4~1/7) に比べるとかなり小さな値であった。したがって、本試験結果から、この縦ひびわれにより鉄筋とコンクリート間で応力伝達の欠如を生ずることがわかった。

(5) 腐食 RC ばりの性状変化

鉄筋腐食により変化した性状をここでまとめておく。引き抜き試験結果からは、鉄筋腐食により最大付着力は低下しており、腐食 RC ばりの挙動に及ぼす影響が考えられる。またさびの膨張圧に起因する性状の変化として、鉄筋円周方向の内部応力の発生や、縦ひびわれの発生およびそれに伴う鉄筋とコンクリート間の応力伝達の欠如のあることが示され、これらが及ぼす影響も考えられる。しかし、以上に示したような劣化性状が腐食 RC ばりの挙動に大きな影響を及ぼしているのか、それとも二次的なものであるのかを本研究で行った実験結果だけから判断することは困難である。そこで、有限要素弾塑性解析を用いて各要因に対する解析的な検討を行うことにした。

3. 有限要素弾塑性解析法

ここでは、有限要素弾塑性解析法の概要についての説明を述べる。

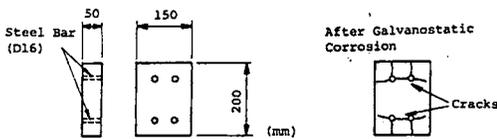


Fig. 12 Punching Shear Test Specimen.

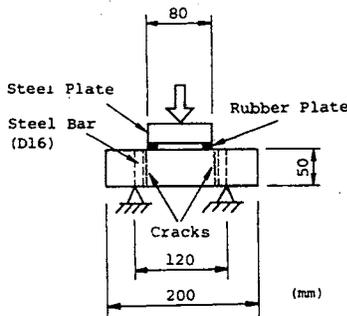


Fig. 13 Punching Shear Test.

(1) コンクリートおよび鉄筋要素

材料のモデル化として、コンクリートの構成式には塑性理論に基づいた Chen らのモデル¹¹⁾を用い、破壊規準もそれに準じさせた。Chen らのモデルは、コンクリートを等方性体であると仮定し、塑性ポテンシャルと降伏関数とが一致する関連流動則によるモデルであり、その特徴は、コンクリートの挙動をより実際に適するように表現するために、降伏関数および破壊基準を圧縮域と引張域とでそれぞれ別々の規準を設けていることである。また、ひびわれに対しては、ひびわれの破壊規準に到達した要素内に引張主応力方向に連続的なひびわれを生じると仮定し、構造物の全体的な挙動傾向を追跡するに適用している Smeared Cracking Model を用いることとした。

他方、鉄筋についても、塑性理論に基づいた関連流動則によるモデルを用い、降伏関数は等方性金属材料の降伏条件として一般的な von Mises の降伏条件¹²⁾とした。

なお、使用した有限要素は定ひずみ三角形要素であり、Fig. 14 に示す要素分割で解析を行った。またコンクリートおよび鉄筋要素の材料諸定数は 2. で示した材料試験で得られた値から決定した。

(2) コンクリートから鉄筋への応力伝達要素

鉄筋の腐食により、コンクリートに縦ひびわれを生じさせたり、また付着強度を低下させるなど、鉄筋周囲部が弱点部となることが実験によって示された。したがって、その近傍におけるコンクリートから鉄筋への応力伝達のモデル化が RC ばりの劣化挙動を追跡するうえで重要な役割を果たすものと考えられる。この劣化部におけるコンクリートから鉄筋への応力伝達を表現する要素として、本解析においては Fig. 15 に示す Goodman らの接合要素¹³⁾ (仮要素厚 $t=0.2\text{cm}$) を適用することとした。このような接合要素を導入することにより、鉄筋の引き抜き試験から得られた付着の劣化特性を RC ばり供試体の載荷試験の数値解析に反映させることができ、また、縦ひびわれによる鉄筋への応力伝達の欠如を表現した解析も可能となる。

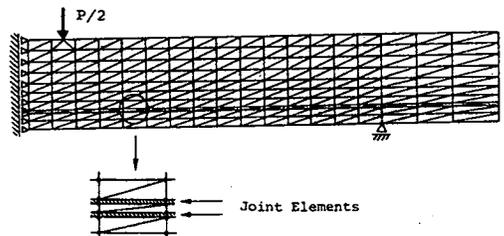


Fig. 14 Finite Elements for the RC Beam Specimen.

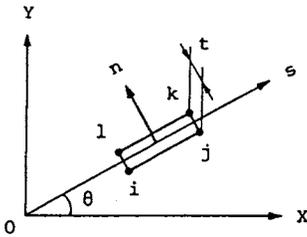


Fig. 15 Joint Element⁽¹³⁾.

ここに適用した Goodman らの接合要素は、要素剛性が応力-ひずみ関係で取り扱われているのでその構成関係を論ずることができるという利点をもっており、著者らは前にこの要素を骨材とモルタルとの接合要素に適用して、コンクリート構造モデルを解析し実験結果と対比させて良好な結果を得ている⁽¹⁴⁾。この接合要素は、コンクリートや鉄筋に用いた定ひずみ三角形要素に適合するものであり、応力成分としてせん断応力成分、直応力成分およびモーメント成分を取り扱っているが、ここでは前2者のみを取り扱うこととした。すなわち、接合要素における剛性は次式で具体的に表わされることになる。

$$\begin{bmatrix} \tau \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \varepsilon \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

したがって式(1)から、直応力成分である σ - ε 関係における剛性 K_n に関しては完全付着に相当するばね剛性の値が用いられ、一方せん断応力成分である τ - γ 関係における剛性 K_s については、上述に示したおののの付着劣化要因と電食日数に応じた関係が決定される必要があることは明らかである。

なお、接合要素は、Fig. 14 に示すようにコンクリートと鉄筋との間に挿入した。

(3) 解析法

弾塑性解析は、荷重増分解析により行った。それぞれの荷重増加ステップにおいて各要素の状態を調べ、もし破壊規準に達した要素があれば応力の解放を行い、解放力による他の要素の破壊がなくなるまでこれを繰り返した。なお、連立一次方程式の解法として共役傾斜法を用いた。

また、解析では、スパン中央変位が約 6 mm となるまでの増分解析を行い、実験結果との比較を行うこととした。

4. 解析による劣化要因の推定

前章で示した有限要素解析法を用いて、2. で示された鉄筋腐食により変化した性状が、腐食 RC ばりの挙動に及ぼす影響について検討した。これらの性状の変化は鉄筋の引き抜き試験に基づいた付着劣化、さびの膨張圧によって生ずる内部応力および縦ひびわれによる応力

伝達の欠如である。以下に、解析における劣化性状の取り扱いについて説明し、非腐食 RC ばり供試体と 15 日間電食 RC ばり供試体の載荷試験を対象として検討を行った結果について述べる。

(1) 解析における劣化性状の取り扱い

解析では、引き抜き試験で評価される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は、接合要素の特性を変化させることにより表現でき、さびの膨張圧によって生ずる内部応力は初期応力により、また縦ひびわれによる応力伝達の欠如は同様に接合要素の特性を変化させることにより表現できる。ここでは、実験によって示されたおののの付着劣化性状と接合要素の特性との対応および内部応力状態と初期応力の取り扱い法について説明する。

a) 接合要素の特性との対応 引き抜き試験に基づく付着劣化は、式(1)における τ - γ 関係を鉄筋の付着応力とひずみの関係とみなすことにより表現ができる。この場合、奥行き方向の接合要素の厚さは鉄筋周長に相当する値で決定される。付着要素の剛性 K_s の評価法については、従来は引き抜き試験の結果得られるマクロ的な付着力-すべり量関係から算定するのが一般的である。しかし、引き抜き試験から得られる付着力-すべり量関係がそのまま接合要素の付着応力-ひずみ関係を評価しているとは必ずしもいえない。そこで、本研究では、引き抜き試験結果の有限要素法による逆解析からその関係を決定する手法を考え、電食日数に対応する剛性を決定することとした。逆解析は Fig. 16 に示す要素分割で行い、接合要素における τ - γ 関係を次式による指数型の曲線 (Fig. 17 参照) で仮定した。

$$\tau = \tau_{max} \left(1 - \exp \left(-\frac{G}{\tau_{max}} \gamma \right) \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに τ_{max} は付着強度であり、 G は Fig. 17 に示す $\gamma = 0$ における接線剛性である。したがってこの曲線の傾きにより付着剛性 K_s が決定され、ひずみ γ によって変化する値となる。このような手法により決定した定数は、非腐食に対して $G = 490 \text{ MPa}$ (5000 kgf/cm^2)、 $\tau_{max} = 11.8 \text{ MPa}$ (120 kgf/cm^2) であり、15 日間電食に対して $G = 980 \text{ MPa}$ (10000 kgf/cm^2)、 $\tau_{max} = 6.4 \text{ MPa}$ (65

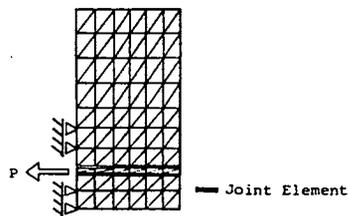


Fig. 16 Finite Elements for the Pull-Out Test Specimen.

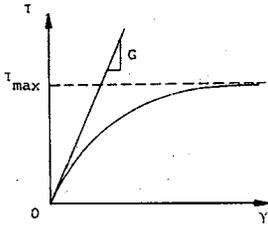


Fig. 17 Proposed Relation Between τ and γ .

kgf/cm²)である。ここで、その逆解析結果を Fig. 18 に示す。なお、直応力成分である σ - ϵ 関係において K_n は完全付着に相当する値として 4 900 MPa (50 000 kgf/cm²) を用いた。このように決定された接合要素の特性を用いることにより、引き抜き試験で示された劣化特性を解析に反映できる。

一方、縦ひびわれによる付着の劣化は、 τ - γ 関係をひびわれ面で伝達されるせん断応力とひずみの関係とみなすことにより表現ができる。この場合、奥行き方向の接合要素の厚さは、RC ばり供試体の厚さとみなされる。ここで、縦ひびわれによる付着劣化に対応した接合要素の特性も上述に示したような方法で決定するのが望ましいが、2. で示した付着試験結果だけからではその決定は困難である。そこで τ - γ 関係については式 (2) に準ずると仮定し、 τ_{max} としては、実験で得られたひびわれ面におけるせん断強度 $\tau_{max}=0.58$ MPa (5.9 kgf/cm²) を用いることとした。なお、定数 G についてもせん断強度と同様にひびわれ面では健全なコンクリートに比べて低下していることが推定され、解析では上述の逆解析結果を参考に $G=78.4$ MPa (800 kgf/cm²) を用いることとした。このようにして、実験で示されたひびわれ面における応力伝達の欠如を接合要素を用いて表現できる。

b) 初期応力の導入 Fig. 19 は、鉄筋さびの膨張により生ずるひびわれの状況と、図中に示した X 軸上

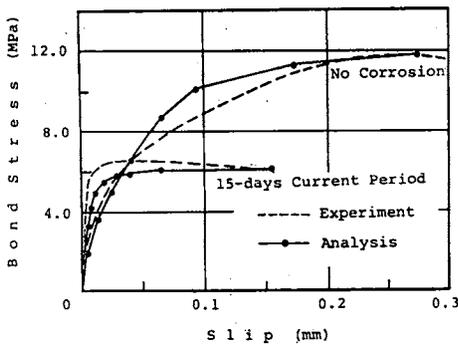


Fig. 18 Comparison Between Experiment and Analysis for the Pull-Out Test.

における引張応力の分布を模式的に示した図である^{15)~17)}。この図から、鉄筋さびの膨張の程度が大きくなると最終的には RC ばりの底面や側面に縦ひびわれが連なる (Fig. 19(c)) が、その途中段階においてはコンクリートに内部応力が導入され、ひびわれ先端部では引張応力に近い応力が導入されることがわかる (Fig. 19 (a), (b))。この高い引張応力域は弱点部となることが容易に推定される。このような内部応力は初期応力により表現できる。

上述の RC ばり中に発生する内部応力すなわち鉄筋円周方向の引張応力の影響を解析で検討するには、図に示したような断面における応力分布も考慮した三次元的な解析が望ましいが、本解析で適用している二次元解析では、鉄筋ばりの奥行き方向に特性が同じとみなされるので、断面内の応力分布は解析には反映できない。しかし、内部応力が腐食 RC ばりの挙動に及ぼす影響についての定性的な検討を行ううえでは、二次元解析でも適用が可能であると考えられる。本解析ではこのような内部応力は、奥行き方向に均一な鉄筋軸直角方向に導入される引張応力として表現し、初期応力として取り扱った。

Fig. 19(b) の状態を想定した場合に、角本ら¹⁶⁾および小西ら¹⁷⁾の研究を参考にすると、このような初期応力 σ_i は、断面内の応力分布を RC ばりの奥行き方向に平均化して評価すると $\sigma_i=0.59$ MPa (6 kgf/cm²) 程度である。しかし、このような評価法では、上述した弱点部となることが推定された高い引張応力域の存在を解析で適切に表現しているとは思えない。そこで、解析における初期応力の導入量として、上述の $\sigma_i=0.59$ MPa (6 kgf/cm²) に加えて、それよりも高い応力である $\sigma_i=1.18$ MPa (12 kgf/cm²) の場合を考えることとした。なお、導入要素は、実験において腐食膨張ひびわれが鉄筋軸より上側に進展していることが確認されている (Fig. 6 参照) ので、Fig. 20 に示す鉄筋より上側の斜線部の要素とし、また、接合要素の特性は、前述の引き抜

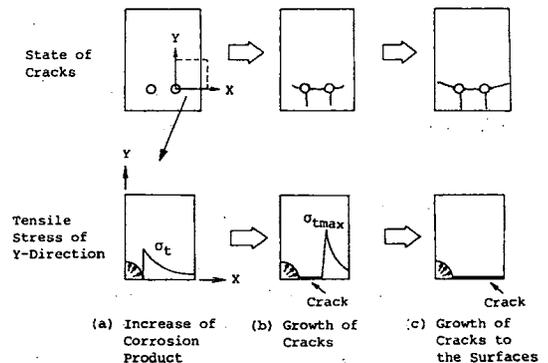


Fig. 19 The State of Tensile Stress and Cracks.

き試験の逆解析で得られた非腐食の特性を用いることとした。

このようにしてさびの膨張圧によって生ずる内部応力を解析で表現することができる。

(2) 解析結果

以上のように、引き抜き試験に基づいた鉄筋の付着劣化、さびの膨張圧による内部応力、および縦ひびわれによる鉄筋への応力伝達の欠如を表現し、それらが腐食 RC ばりの挙動に及ぼす影響について調べた。

a) 鉄筋の付着劣化の影響 (Case-1) 引き抜き試験に基づいた付着劣化は前節に示したような接合要素の特性で表現できる。その解析結果として、荷重-スパン中央変位関係を載荷試験の結果とともに Fig. 21 に示す。解析結果によると、非腐食の付着特性を用いた解析結果は実験結果に比べると若干剛性は高いが両者はほぼ一致しているといえよう。しかし、15日間電食の付着特性を用いた解析では、実験でみられた腐食 RC ばり供試体の挙動の変化は表現することはできなかった。

したがって本解析によれば、引き抜き試験によって得られた付着の劣化特性では腐食 RC ばり供試体の挙動が説明できず、鉄筋の摩擦、粘着および機械的なかみ合いの劣化は、直接にその挙動に及ぼす影響が少ないものと考えられた。

b) 内部応力の影響 (Case-2) さびの膨張により、コンクリートに内部応力が導入される。内部応力は、前節で示したように初期応力 σ_i で表わされる。その解析

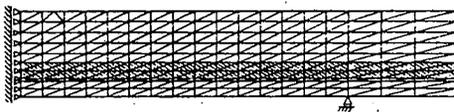


Fig. 20 Elements Introduced Initial Stress.

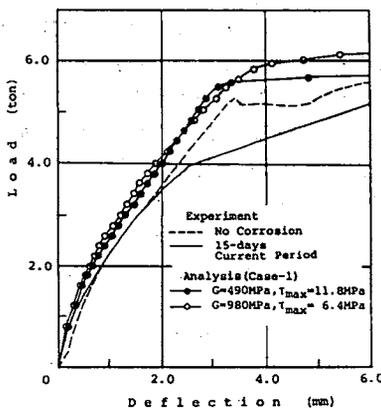


Fig. 21 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-1).

結果を Fig. 22 に示す。Fig. 22 によると、 $\sigma_i = 0.59$ MPa (6 kgf/cm²) とした場合にはその影響はほとんどみられないが、 $\sigma_i = 1.18$ MPa (12 kgf/cm²) とした場合には実験でみられた腐食 RC ばりの剛性の低下が表現できたといえる。このように劣化挙動が表現できたのは、解析で初期応力を導入した要素の一部に Fig. 23(b) に示すような鉄筋軸に沿ったひびわれが生じ、そのひびわれによりコンクリートと鉄筋間のせん断伝達が阻害されるためであると考えられる。実際の挙動では、 $\sigma_i = 1.18$ MPa (12 kgf/cm²) の場合にその劣化挙動が表現できたことから、Fig. 19(b) に示した高い引張応力域に上述の鉄筋軸に沿ったひびわれが生じ、さびの膨張によって生じているひびわれと連なった状態で挙動するものと考えられる。このような、ひびわれが連なり弱いせん断

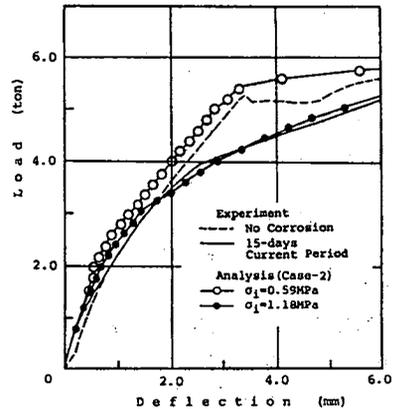


Fig. 22 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-2).

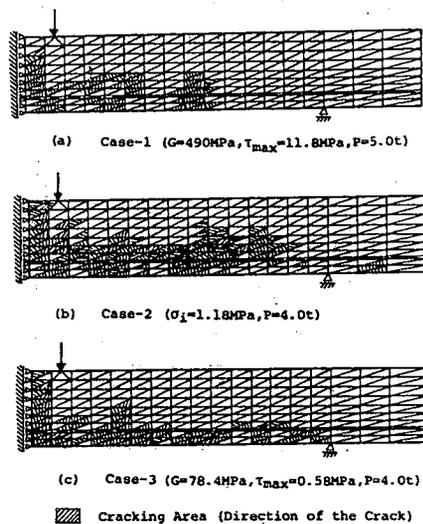


Fig. 23 Failure Pattern.

伝達面が形成された状態は、Fig. 19(c) に示したと同様の状態であり、次に解析結果を示す縦ひびわれによる応力伝達の欠如によっても、腐食 RC ばりの挙動が説明できることが推測される。

このような考察により、さびの膨張による内部応力によって導入される縦ひびわれが弱点部となり、鉄筋への付着せん断応力の伝達を欠如させる可能性のあることが示され、それが腐食 RC ばり供試体の挙動に影響を及ぼす要因の1つであることを推定できた。

c) 縦ひびわれによる影響 (Case-3) さびの程度がさらに大きくなると、Fig. 19(c) に示すようにひびわれは RC ばり側面に達する。このような縦ひびわれによる鉄筋への応力伝達の欠如は、前節で示したような接合要素の特性で表現ができる。その解析結果を Fig. 24 に示す。解析値は実験でみられた荷重の増加に伴うゆるやかな剛性の低下を追跡しており、腐食 RC ばりの劣化挙動が表現できることがわかる。また、Fig. 23(c) に示したひびわれ形状についても、10日間および15日間電食 RC ばり供試体の特徴である曲げひびわれの進展が鉄筋軸付近で止まる傾向も表現できた。

したがって、このような縦ひびわれによる鉄筋への付着せん断応力の伝達の欠如が腐食 RC ばりの挙動に影響を及ぼす要因の1つであることが、前述の Case-2 と同様に推定された。

(3) 腐食 RC ばりの劣化挙動の要因

腐食 RC ばりの劣化挙動に及ぼす要因について、以上に示したような解析的な検討を行った。その結果、引き抜き試験で評価される鉄筋の摩擦、粘着および機械的なかみ合いの劣化では、腐食 RC ばりの劣化挙動は説明できず、さびの膨張による内部応力や縦ひびわれの発生に伴う鉄筋への付着せん断応力の伝達の欠如が、その挙動に大きく影響することを推定できた。

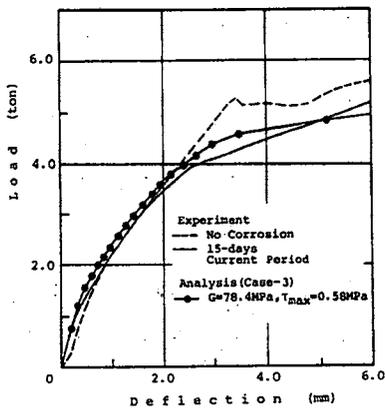


Fig. 24 Comparison Between Experiment and Analysis for the Load-Deflection Relation (Case-3).

5. まとめ

鉄筋が全体的に腐食した RC ばりを対象として、単鉄筋ばり供試体の載荷試験を実施したところ、腐食 RC ばりは非腐食 RC ばりに比べて耐力と剛性の低下が認められた。このような劣化原因の推定を有限要素弾塑性解析により行った結果、鉄筋とコンクリート間の付着せん断応力の伝達の欠如をモデル化した解析で腐食 RC ばりの挙動を表現でき、この応力伝達の欠如が劣化挙動に大きな影響を及ぼす要因の1つであることが推定された。

このような付着せん断応力の伝達の欠如は、鉄筋さびの膨張により RC ばり側面方向に進展した縦ひびわれ面によることを示唆する現象が実験で示され、この縦ひびわれ面の発生が腐食 RC ばりの力学的な問題を論ずるうえでの1つの分岐点となることが示されたといえよう。また、縦ひびわれが RC ばりの側面にまで達していない状態でも、腐食膨張圧により内部応力が導入される縦ひびわれが弱点部となり、鉄筋とコンクリート間の付着せん断応力の伝達を欠如させる可能性のあることが示された。

このような考察は、本研究で対象とした、せん断補強筋であるスターラップを有しない RC ばりに対して適用できるものである。2. でも述べたが、既往の実験結果³⁾⁻⁶⁾でスターラップを配してある RC ばりが腐食を受けても大きな耐力低下が認められないという報告は、主鉄筋の付着性状が劣化してもスターラップにより上述の付着せん断応力の伝達が確保されてい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、静的な耐力については大きな低下はないものと考えられる。

一方、RC 構造物でも版構造については、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、特に最も過酷な荷重条件にある道路橋 RC 床版などが腐食を受けた場合にその挙動が変化することが予測され、今後検討してゆく必要があるものと考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり多大なご協力をいただいた金沢大学 吉田 博教授、川田工業 (株) 技術本部中央研究室 前田研一室長、作田孝行氏、ならびにオリエンタルコンクリート (株) (当時・金沢大学大学院生) 角本 周氏に心から感謝の意を表します。

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) 小林一輔：鋼材腐食によるコンクリート構造物の劣化機

- 構，土木施工，25巻10号，pp.89-94，1984.
- 3) 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.
 - 4) 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.
 - 5) 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.
 - 6) Mirsa, S. and Uomoto, T. : 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.
 - 7) Mirsa, S. and Uomoto, T. : A Study on Structural Implications of Reinforcement corrosion, 土木学会第42回年次学術講演会概要集，第5部，pp.408-409，1987.
 - 8) 小柳 洽・六郷恵哲・内田裕市：コンクリートの破壊現象の安定性とその計測，コンクリート工学，Vol. 20, No. 6, pp. 83-89, 1982.
 - 9) Ferguson, P. M. and Turpin, R. D. and Timpson, J. N. : Minimum Bar Spacing as a Function of Bond and Shear Strength, J. of ACI, pp.869-897, June, 1954.
 - 10) 森永 繁：塩害とひびわれ，セメント・コンクリート，No. 451, pp.110-117, 1984.
 - 11) Chen, A. C. T. and Chen, W. F. : Constitutive Relation for Concrete, Proc. of ASCE, Vol.101, No.EM4, pp. 465-481, 1975.
 - 12) von Mises, R. : Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), Vol. 18, pp. 161-185, 1928.
 - 13) Goodman, R. E. and Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. SM3, pp. 637-659, 1968.
 - 14) 梶川康男・橋 吉宏・吉田 博：骨材-モルタル平面モデルを用いたコンクリートの変形挙動，土木学会論文集，第356号/I-3, pp.369-377, 1985.
 - 15) 森川雅行・関 博・奥村 隆：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，第378号/V-6, pp.97-105, 1987.
 - 16) 角本 周・梶川康男・橋 吉宏：鉄筋の腐食膨張挙動に関する弾塑性解析，土木学会第42回年次学術講演会概要集，第5部，pp.404-405, 1987.
 - 17) 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5部，pp.406-407, 1987.

(1988.5.17・受付)