

【論文・報告】

腐食床版の自然電位法による非破壊検査と耐荷力の評価法に関する研究

Corrosion Potential Monitoring and Evaluation of Loading Capacity for Damaged Reinforced Concrete Deck

前 田 研 一*
Ken-ichi MAEDA

作 田 孝 行**
Takayuki SAKUTA

橘 吉 宏**
Yoshihiro TACHIBANA

富 澤 光 一 郎***
Kouichirou TOMIZAWA

1. ま え が き

メンテナンスフリーと言われたコンクリート構造物も最近ではアルカリ骨材反応や鉄筋腐食などの被害例が数多く報告され^{1),2)},それが時にはマスコミをも賑わすほどの社会問題として取扱われる³⁾ようになってきている。このような、コンクリート構造物の耐久性に対する認識の高まりとともに、それらを配慮した設計施工指針⁴⁾の規定および維持管理法⁵⁾の確立が早急に望まれている。橋梁構造物においても例外ではなく、特に最も過酷な荷重作用を受けるRC床版がこのような問題に直面していると言えよう。本論は、このRC床版の耐久性に大きな影響を及ぼす要因の1つである鉄筋腐食をとり上げ、その探査法と腐食劣化床版の評価法について、メンテナンスの観点に立った報告を行なうものである。

まず、コンクリート中の腐食の有無を判定することが、鉄筋腐食によるコンクリート構造物の耐久性を評価する上での第一歩である。腐食鉄筋の調査に関しては、従来より目視により判定される場合が多いが、外観だけでその範囲と進行状況とを把握することは容易ではない。このような問題に対し、非破壊的に腐食鉄筋を探査する方法の開発が進められており、代表的なものの一つにASTMにも規定されている自然電位法⁶⁾がある。この自然電位法は、鉄筋の腐食電位をコンクリート表面より測定する方法で、わが国においては単鉄筋供試体レベルではかなりのデータの蓄積がなされているものの、実構造物における適用については未だ試験段階にあると言える⁷⁾。そこで今回、実床版に自然電位法を適用することを想定した模型実験を実施し、その使用性に対する基礎的

な検討を行なうこととした。

さて、このような非破壊検査法により腐食が認められたRC床版に対しては、その耐久性、安全性の評価が必然的に問題となる。しかしながら、床版を含めたRC部材の劣化機構についてはいまだに未解明な点が多く、安全性を評価する上での定量的な評価法が必ずしも確立されていないのが現状である。そこで安全性の指標の1つとしてそれらの耐荷力を考え、実験および解析的手法により腐食RC部材の劣化機構を推定するとともに、耐荷力算定式の導出を試みた。

なお、本文の一部は既に報告済みである^{8),9)}。

2. 自然電位法のRC床版への適応性

ASTMでは、1977年に“Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete”という題目で腐食鉄筋の自然電位の測定法を規定している。本章では、この自然電位法を鋼橋のRC床版に適用することを想定して、次に示す項目に着目した基礎実験を、外部電流の印加により腐食¹⁰⁾(以下電食と称す)させた鉄筋を有するRC床版模型を用いて実施し、検討を加えた。

- a) 鉄筋腐食程度と電位
- b) 電位とコンクリート含水比(便宜的に含水比という語句を使用, 以下同様)
- c) 電位とかぶり
- d) アスファルト上からの電位の測定

なお、電食と自然腐食と全く同一の反応を示すとは必ずしも言えないが、a)～d)の項目に関する手法論的な基礎資料を得る範囲であれば、合理的な結果が得られると思われる。

* 川田工業㈱技術本部中央研究室室長 ** 川田工業㈱技術本部中央研究室 *** ㈱総合メンテナンス技術部技術課

(1) 鋼材の腐食機構と自然電位法

コンクリート中における鋼材の腐食は通常電気化学反応であり、図-1のように鉄がイオン化する反応（アノード反応）と電子を受けとる反応（カソード反応）とが同時に起こる電池反応と言える。この腐食電池反応によって生じた Fe^{2+} と OH^- とが反応し水酸化第一鉄が生じ、さらに H_2O と O_2 とが反応しいわゆる赤さびが生成される。健全なコンクリート中の鉄筋は、コンクリートのもつアルカリ性のためにその表面に不動態膜が形成され鋼材腐食は生じないが、コンクリートに塩分が侵入したり中性化されたりすると不動態膜が破壊され腐食電池を形成するようになる。このように腐食は電池反応の一種であるから、鋼材の腐食状況に対応する電位分布を示す。自然電位法は、図-2に示すようにコンクリート中の鋼材とコンクリート表面上の照合電極（たとえば銅-硫酸銅電極）との電位差を測定し、非破壊的に鋼材の腐食状態を検討しようとするものである。ASTMによれば、銅-硫酸銅電極を用いた場合、自然電位 E (mV) が測定された箇所における自然腐食状態は以下の状態にあるとして基準値を設定している。

$-200 < E$	90%以上の確率で腐食は生じていない。
$-350 \leq E \leq -200$	不確定
$E < -350$	90%以上の確率で腐食は生じている。

今回、腐食促進法として用いた図-3に示す電食法では、鉄筋部がアノード域、銅板部がカソード域となり腐食が進行するので、電食中の電位分布は自然腐食の場合とは異なる。しかしながら通電終了後は、腐食環境の差により鉄筋中の電位の低い部分（陽極）から高い部分（陰極）へ金属体中を電子が移動し、鉄筋内部でアノード域とカソード域とが現れるようになり自然腐食に近い状況

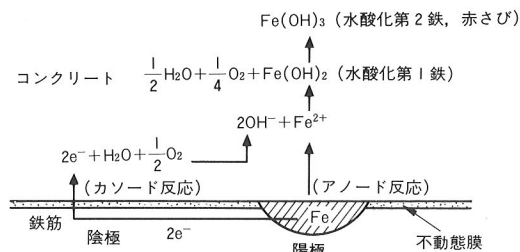


図-1 鋼材の腐食機構

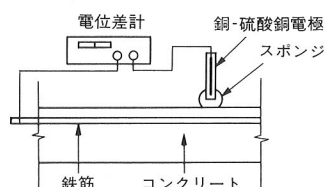


図-2 電位測定法

となる。したがって、自然腐食と全く同一の反応を示すとは限らないが、電食の場合も通電後は腐食状況に対応した電位が測定できるものと考えられる。

(2) 電位測定実験の概要

a) 供試体 電位測定実験に用いる供試体は図-4に示したRC床版模型、および直方体模型の2種類とし、コンクリートの配合は表-1に示す配合によった。RC床版模型は、鉄筋腐食程度と電位の関係、床版アスファルト上からの測定の可否を調べるための、また直方体模型は、電位とコンクリート含水比の関係、電位とかぶりの関係を調べるためのものである。

b) 腐食方法 前述のように鉄筋の腐食モデルとしては電食を用いた。図-3に示すように定電流電源により鉄筋を強制アノード溶解させる方法であり、鉄筋の腐食程度は積算電流、すなわち電食日数を変化させることにより調整することができる。ただし、RC床版模型は、中央部のみに食塩水がしみ込むようにする一方、下筋のみに電流を流して下筋中央部のみが錆びるようにし、鉄筋に電食部と非電食部、およびそれらの遷移域が現われるようにした。

c) 照合電極 図-2に示したように照合電極としては、銅-硫酸銅電極を用い、コンクリート面との接触は水を含ませたスポンジを介して行った。

d) 電位測定要領 各供試体は電食終了後に、含水比を共通にするために24時間水道水に水没させてから

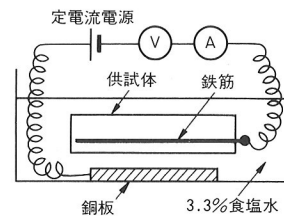


図-3 電食法

表-1 配合表

呼び強度 (kg/cm^2)	スランブ (cm)	粗骨材 最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水・セメント比 (%)	細骨材率 (%)
210	8	25	4.0	59.0	42.4

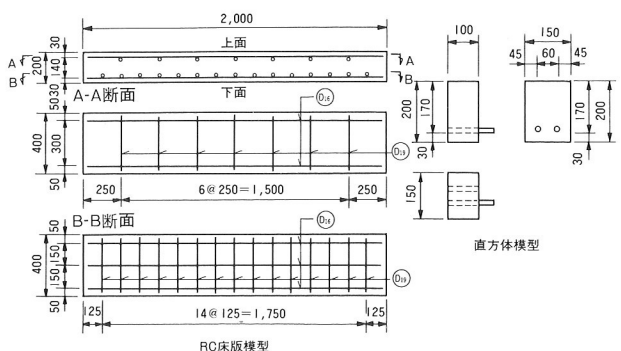


図-4 電位測定供試体

表-2 電位測定供試体内訳

供 試 体		電食日数	ひびわれの有無
床版模型	S－1	3	無
直方体 模型	H－1	1.5	無
	H－2	3	無
	H－3	3	無
	H－4	3	無
	H－5	6	有
	H－6	10	有

(電流密度 0.5mA/cm²)

(電流密度 0.5mA/cm²)

測定対象とした。

RC床版模型の測点は上面において20cm間隔としたが、測定電位が急変する測定点には新たに測点を設けるものとした。また、アスファルト上からの電位測定は、RC床版模型上面半分に厚さ60mmのアスファルトを打設して測点にドリルでコンクリートに達するまでの穴(φ7mm)をあけ、水道水を満たして行った。

直方体模型のH-1～H-4は、含水比測定用のダミーと共に水没解除後24時間自然乾燥させた後、乾燥炉に入れて取り出し室温に戻るのを待って測定を実施する作業を、繰り返して行った。さらに、最終的にダミーを重量変化がなくなるまで乾燥させ、各測定時の重量と合わせて各測定時の含水比を算出した。ただし、H-5、H-6は自然乾燥のまま測定を続けた。

(3) 測定結果とその考察

a) 鉄筋腐食程度と電位 水没解除後48時間後のRC床版模型における測定結果を図-5に示す。全測定終了後ののはつりにより鉄筋の電食が確認された範囲において、電位は-450mVよりも卑な値を示している。また、電位が-300mV程度より卑となる状態で傾きが急勾配となっており、この範囲の鉄筋で不動態膜が破壊されている可能性が高い。今回の測定結果からは、前述したようにASTMの基準値と直接的な比較はできないものの、若干卑な電位であるが腐食傾向によく対応していることがわかる。

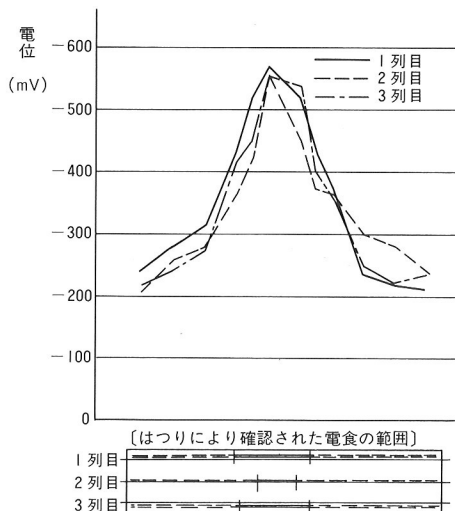


図-5 RC床版模型下面からの電位測定結果

b) 電位とコンクリート含水比 直方体模型のうち3日間電食のH-2の測定結果を図-6に示す。含水比が4.5%程度を越える範囲においては、電位が-500mV～-600mVで安定している傾向が見られる。しかし、含水比が4.5%を下回るに従って、電位も急激に貴な方向へ向かっている。ゆえに、コンクリート中の水分量が電

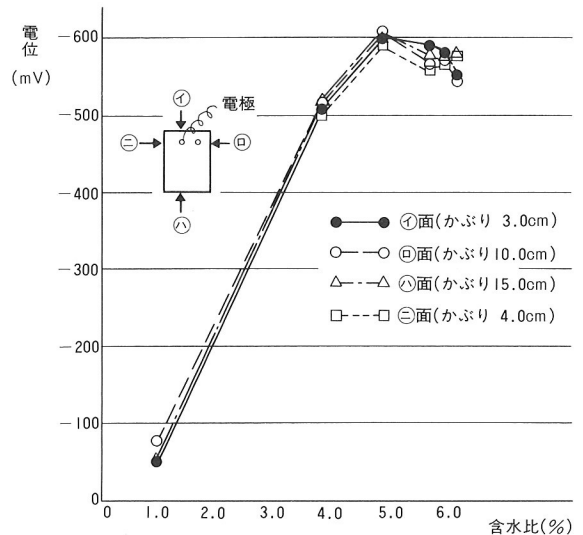


図-6 腐食電位と含水比 (H-2)

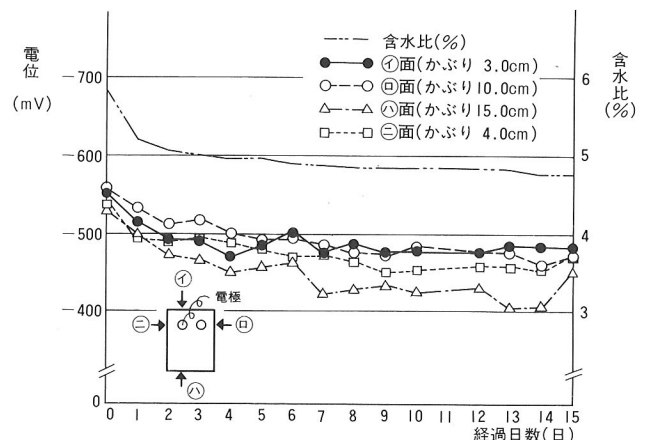


図-7 電位とかぶり (H-6)

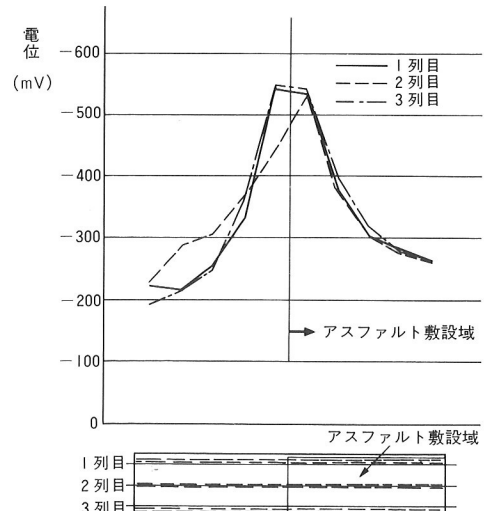


図-8 アスファルト上からの電位測定結果

位に与える影響は小さくないことが推定され、適切な配慮が必要であると思われる。

c) 電位とかぶり 図-6に併記した3日間電食のH-2の測定結果ではかぶりによる影響はみられなかったが、図-7に示した10日間電食の直方体模型H-6では、かぶりが最大の④面における電位が他の測定面の電位よりも貴となる傾向がある。したがって、④面と⑤面のようにかぶりの差が大きくなる場合には、無視できない場合も予想される。

d) アスファルト上からの電位の測定 アスファルト上からの電位の測定結果を図-8に示す。測定時の供試体含水比、温度(温度係数 $-0.7\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)は図-5の測定時とほぼ同条件である。図-5と比較すると、アスファルト上からの測定値は、アスファルト厚の水の層を介しての測定のため全体的にわずかに単な方向に向かっている傾向はあるが安定しており、電位分布にも大きな変化はない。したがって、本手法によるアスファルト上からの測定でも、適用の可能性は十分にあるものと思われる。

(4) 腐食床版への自然電位法の適用について

電食により腐食させたRC床版模型および直方体模型の電位を測定した結果、ASTMに規定されているこの自然電位法が腐食鉄筋の探査法として有効であることがわかった。また、今後調査を続けてゆく必要はあるが、今回の基礎実験から、床版下面のみならず床版上面アスファルト上からでも探査でき、実床版への適応性もかなり高いことがわかった。

3. 腐食RC部材の劣化挙動試験

前述のように床版を含めた腐食RC部材の力学的な劣化機構については、鉄筋腐食による耐力低下の原因や腐食程度との相関関係などいまだ未解明な点が多い。そこで、次章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、本章では、電食により腐食させたRCばりの載荷試験と鉄筋の引き抜き試験を行ない¹¹⁾、その劣化挙動について検討した。

(1) 腐食RCばり載荷試験の概要

a) 供試体 載荷試験に用いた供試体は、図-9に示す単鉄筋単純ばりである。使用した鉄筋は黒皮付異形鉄筋D16(SD30)であり、コンクリートの配合は表-1に示す配合によった。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 $363\text{kg}/\text{cm}^2$ 、割裂引張強度は $33\text{kg}/\text{cm}^2$ 、初期弾性係数は $2.6 \times 10^5 \text{kg}/\text{cm}^2$ であった。鉄筋については、降伏強度が $3600\text{kg}/\text{cm}^2$ 、ヤング率は $2.1 \times 10^6 \text{kg}/\text{cm}^2$ であった。

また、鉄筋腐食による付着の劣化を調べるために、図-10に示す供試体を作成し引き抜き試験を行った。

b) 腐食方法 鉄筋の腐食促進法としては、電位測定実験の場合と同様に、図-3に示した電食法を用いた。通電は $0.50\text{mA}/\text{cm}^2$ の定電流で行ない、通電時間が0日間(非腐食)、3日間、6日間、10日間、15日間の供試体を作成して、引き抜き試験および載荷試験に使用した。

c) 載荷試験 はり供試体は、電食終了後3日間乾燥させ載荷試験を行った。はり供試体の載荷条件を図-9に付記する。

d) 引き抜き試験 図-10に引き抜き試験の概要を示す。ここで引き抜き試験供試体に用いた断面は、はり供試体の断面と同一のものとした。

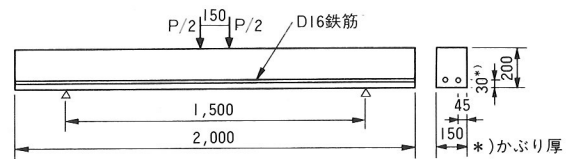


図-9 はり供試体および載荷試験概要

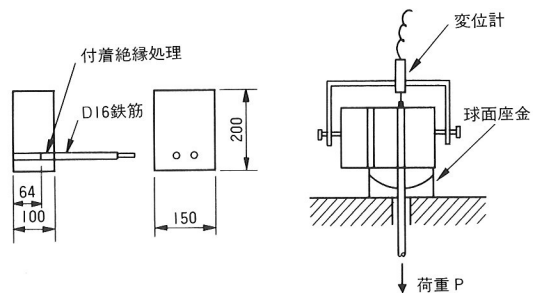


図-10 引き抜き試験供試体および試験概要

(2) 試験結果とその考察

a) 載荷試験 載荷試験の結果の一部として、ひびわれ形状、耐荷力、荷重-スパン中央たわみ関係を、図-11、表-3、図-12に示す。

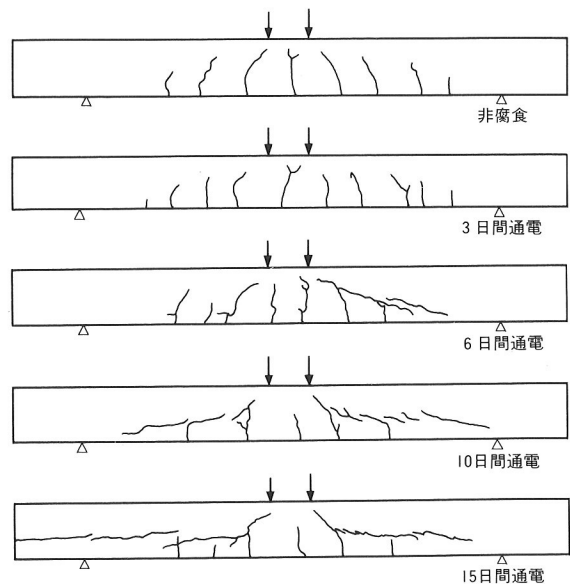


図-11 ひびわれ形状

図-11のひびわれ形状図を見てもわかるように、明らかに非腐食の場合と電食ばりの場合とでは挙動が異なることがわかる。このようなRC部材の耐荷力は破壊形状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の場合に比べ、十分なじん性を確保できないばかりか耐荷力も低下することが言われている。コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)¹²⁾では、安全性の検討において、せん断に対する安全性が曲げによる安全性よりも大きくなるよう定めている。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日および15日間電食ばりは付着せん断破壊であった。破壊形状だけを見ても、鉄筋腐食によりRCばりが劣化していることが推測される。

表-3 載荷試験の結果

模型番号	通電時間	縦ひびわれの最大幅(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日腐食 (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日腐食 (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日腐食 (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日腐食 (360hr)	0.75	—	5.60	5.55 (0.88)	付着せん断 (付着割裂)
15-B		0.50	—	5.45		

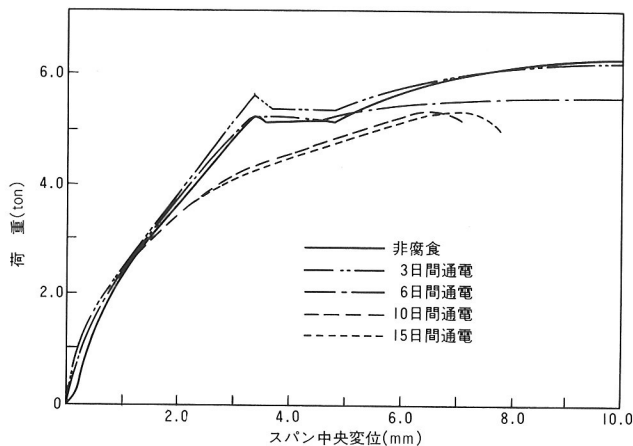


図-12 荷重-スパン中央変位関係

腐食程度によりどのように劣化挙動が変化してゆくかを図-11、表-3、図-12より考察を行えば、まず非腐食および3日間電食ばりはほぼ同一の挙動を示し、鉄筋降伏による曲げ破壊を生じているが、図-12からわかるように、3日間電食ばりの方が非腐食ばりに比べて初期の曲げ剛性は若干高いようである。また、6日間電食ばりは鉄筋が降伏するまでは3日間電食ばりと同一の挙動を示すが、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日間電食ばりはほぼ同一の挙動を示しており、荷重の増加にともな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。そして、最大耐力も非腐食ばりに比べて10~15%低くなっている。このように、鉄筋の腐食の増加に伴って耐荷力が減少するとともに、破壊形状も曲げ破壊からせん断破壊へと変化してゆくことがわかる。

b) 引き抜き試験 図-13に引き抜き試験結果として、付着応力度と自由端すべり量の関係を示す。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。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はりの中での付着強度よりも大きいことが指摘されている¹³⁾が、腐食の程度による付着劣化挙動を調べるには大きな問題はないものと思われる。試験結果によると、最大付着強度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ているが、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。初期剛性の上昇は、腐食膨張圧による拘束のためであると考えられるが、最大付着力の低下に関しては、膨張圧に伴う縦ひびわれの発生や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。

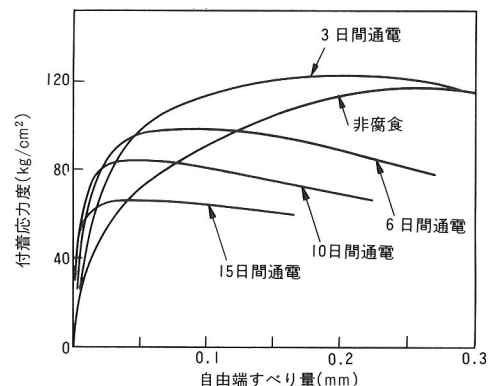


図-13 付着応力度-すべり量関係

(3) 腐食RCばりの劣化要因について

鉄筋腐食により変化した特性をここでもう一度まとめておく。まず、錆の膨張圧によるコンクリート内部応力が挙げられる。膨張圧ははり下面に鉄筋軸に沿った縦ひびわれを発生させたり、また、鉄筋の引き抜き試験時に鉄筋を拘束するなどの現象をもたらすなど、膨張圧が部材の特性に与える影響は大きいものと考えられる。他方、挙げられるのは鉄筋の付着特性の変化である。引き抜き試験の結果からは、鉄筋腐食により最大付着力は低下しており、部材の挙動に及ぼす影響も考えられる。これらのような劣化特性が部材の挙動に大きな影響を及ぼしているのか、あるいは2次的なものであるのかを、試験結果だけから判断することは困難である。そこで次章にお

いて、各要因の影響に関する解析的な検討を行なうこととした。

4. 有限要素弾塑性解析による推定

前章の荷重試験で示された鉄筋腐食による耐荷力低下の原因とその機構について明らかにすることを目的とし、有限要素弾塑性解析を行った。解析を行ったのは非腐食鉄筋ばりとは10日間電食ばりの荷重試験に関してであり、錆の膨張圧と鉄筋の付着劣化に着目して腐食による劣化挙動の要因を数値解析により検討した。

(1) 材料のモデル化および解析法

a) コンクリートおよび鉄筋のモデル化 材料のモデル化として、コンクリートの構成式には塑性ポテンシャルを降伏関数とみなしたAssociate Flow Ruleの仮定によるChenらのモデル¹⁴⁾を用いることとし、破壊規準もそれに準じさせた。また、クラックに対しては、クラック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クラックを生じると仮定し、構造物の全体的な挙動傾向を追跡するのに適しているSmeared Cracking Modelを用いることとした。他方、鉄筋はVon Mises材料とした。なお、使用した有限要素は、定ひずみ三角形要素である。

b) 鉄筋とコンクリートの界面のモデル化 錆による付着劣化を表現するには、コンクリートと鉄筋との付着モデルが重要な役割を果たす。ここでは図-14に示すGoodmanらの付着要素¹⁵⁾ (仮要素厚 $t = 0.2\text{cm}$) を適用することとした。ここに適用したGoodmanらの付着要素は、要素剛性が応力-ひずみ関係で取り扱われ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付着要素に適用して、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¹⁶⁾。この付着要素は、コンクリート、鉄筋に用いる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、付着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。

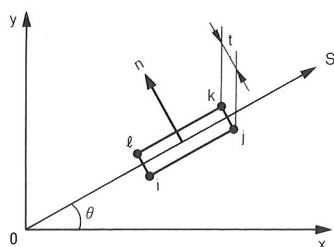


図-14 付着要素(Goodmanらの要素)

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \gamma \\ \epsilon \end{Bmatrix} \quad (1)$$

したがって(1)式から、 K_n に関しては完全付着に相当するバネ剛性の値が用いられるが、 K_s に関しては腐食日数に応じた値が決定される必要があることは明らかである。

c) 解析法 弾塑性解析は荷重増分法によった。なお、連立一次方程式の解法として共役傾斜法を用いた。

(2) 鉄筋の付着劣化の影響(解析-I)

錆による付着劣化の影響を検討するために、上述の付着要素の特性すなわち K_s および付着強度を変化させて解析を行った。付着要素の剛性の評価法として、従来は、引き抜き法による付着試験の結果得られるマクロ的な付着応力-すべり量関係から算定するのが一般的である。しかしながら、付着試験から得られる付着応力-すべり量関係がそのまま付着要素の応力-ひずみ関係を評価しているとは必ずしも言えない。そこで、本研究では、引き抜き法による付着試験結果の有限要素法による逆解析から付着剛性を決定する手法を考え、電食日数に対応する剛性を決定した。付着強度については、鉄筋ばり中での強度であることを考慮して、付着試験から得られた強度の $1/2$ の値を用いた。解析に用いた付着要素の特性を図-15に示す。

解析結果として、荷重-スパン中央変位関係を荷重試験の結果とともに図-16に示す。解析結果から判断すると、付着要素の特性を変化させても荷重-変位関係はほとんど変化せず、腐食による付着劣化が異形鉄筋ばりの挙動には大きな影響を及ぼさないことが言えた。

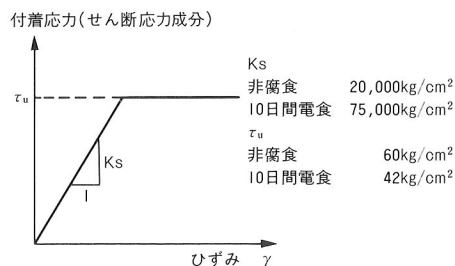


図-15 付着応力-ひずみ関係

(3) 錆の膨張圧の影響(解析-II)

錆の膨張圧の影響を調べるために、コンクリート要素に初期応力を導入した解析を行った。初期応力は鉄筋錆の膨張により鉄筋円周に引張力が発生することと、10日間電食の場合は鉄筋ばりの下面に錆による縦ひびわれを生ずることとを考慮し、図-17に示す斜線部の要素に軸直角方向の引張応力を導入した。導入した初期応力は 15kg/cm^2 とし、付着特性は10日間電食に対応する特性で解析を行った。

解析結果は図-16に同時に示すようになり、コンクリート内部に初期応力を導入した場合に、荷重試験で観察されたような腐食鉄筋ばりの剛性の低下が表現できていることがわかる。また、図-18に示すように、初期応力を導入したコンクリート要素に鉄筋軸に沿ってひびわ

れが生じており、10日間電食鉄筋ばりで見られた破壊形状によく対応していることもわかる。これらの結果から判断すると、錆の膨張圧によって生ずる初期応力が、荷重-変位関係に大きな影響を及ぼすことが言えた。

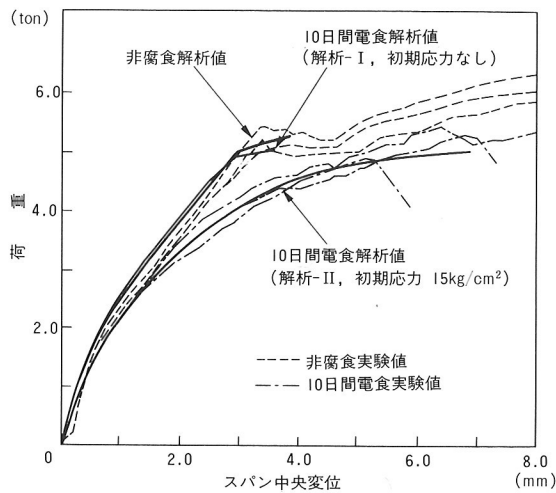


図-16 荷重-スパン中央変位関係

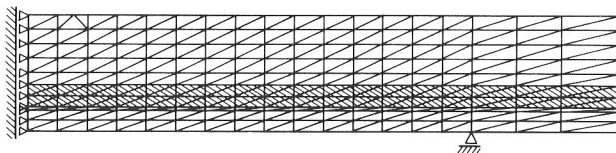


図-17 初期応力の導入要素

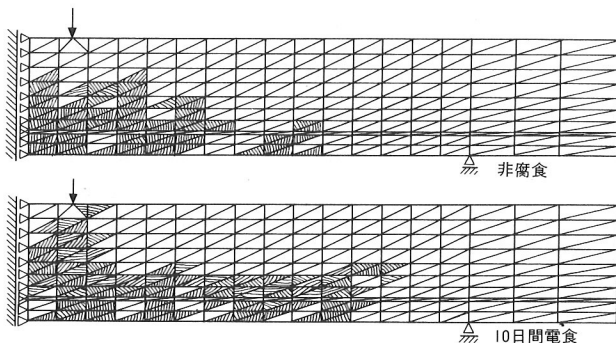


図-18 破壊形状(解析-II)

5. 腐食RC床版の耐荷力の評価法

本章では、前章までの載荷試験結果と有限要素解析結果に基づいて腐食鉄筋ばりの耐荷力の算定を試み、腐食鉄筋ばりおよび腐食床版の耐荷力の評価法について考察を行った。

(1) 腐食鉄筋ばりの耐荷力の算定式

有限要素解析の結果から、錆の膨張圧により生ずるコンクリートの内部応力がはりの腐食劣化挙動の支配的な要因の1つであることがわかり、また10日間および15日間電食ばりの載荷試験でみられた鉄筋軸に沿って10°~20°の傾きで生ずるひびわれの原因であるとも考えられる。本研究ではこの10°~20°の傾きのひびわれ発生時の荷重をはりの耐力と仮定し、その時のコンクリートの内部応力状態から算定される鉄筋付着応力およびせん断

応力とはりのせん断力との関係式から、腐食異形鉄筋ばりの耐力算定を試みた。具体的には、以下のa)~c)に示すように算定式を導出した。

a) 腐食鉄筋ばりの内部応力状態 いま、腐食鉄筋ばりにおいて鉄筋軸に沿ったコンクリート要素に作用する応力を2次的に考えると、図-19のような状態であるとえられる。すなわち、錆の膨張圧により軸直角方向に作用している引張応力、曲げにより軸方向に作用している引張応力、それに加えてはりにせん断力が作用している区間では鉄筋付着力によるせん断応力が存在し、このような応力状態により、10°~20°の傾きのひびわれが発生するものと考えられる。

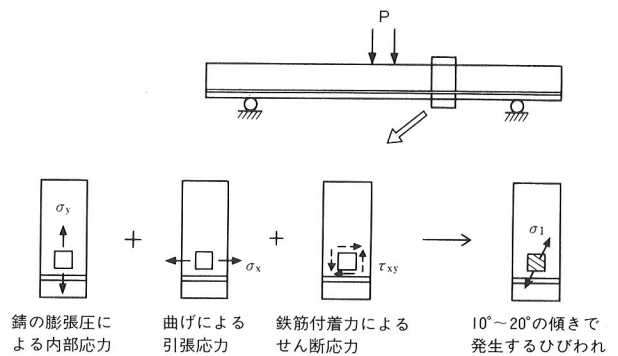


図-19 腐食鉄筋ばりの内部応力状態

一般に、主応力と各応力成分との関係は以下の式のように表わされる。

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \quad (3)$$

ここに、 σ_1 は引張り主応力であり、 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} は、図-19に示した応力である。 ψ は引張り主応力方向である。

コンクリートのひびわれは主応力方向に、かつ引張主応力が引張強度に達した場合に発生すると仮定し、上述の(2)(3)式を変形すると下式のようになり、 σ_x 、 σ_y 、 σ_1 が既知であれば、最大せん断応力 τ_{max} は次式で求まる。

$$\tau_{max} = \sqrt{\frac{a^2}{1+a^2}} \cdot (\sigma_1 - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}) \quad (4)$$

ここに、 $a = \tan 2\psi$ である。

b) せん断応力、付着応力とせん断力との関係 いま、図-20のように Δx の長さのはりを考える。鉄筋の付着応力は、鉄筋の引張力の差 ΔT により生じ、付着応力 τ_u と ΔT との関係は次式であらわされる。

$$\Delta T = \tau_u \cdot U \cdot \Delta x \quad (5)$$

ここにUは鉄筋周長の和である。この鉄筋に生じる力の

差 ΔT は、また図-20(a)に示すように、モーメントのつり合い式からはりに作用するせん断力 S と関係づけられ次式となる。

$$\Delta T = S \frac{\Delta x}{Z} \quad (6)$$

ここで、図-20(b)のように Δx の長さのはりにさらに鉄筋を含む断面で切断してコンクリートに伝達されるせん断応力 τ を考えると、力のつり合い式より ΔT と次式のように関係づけられる。

$$\Delta T = \tau \cdot b \cdot \Delta x \quad (7)$$

(6)、(7)式より、せん断応力とせん断力との関係は次式で表わされることになる。

$$S = \tau \cdot b \cdot Z \quad (8)$$

c) 耐荷力の算定式 はりの耐荷力を、最大せん断力により算定することとする。すなわち、上述の式(8)に式(4)を代入すれば最大せん断力が次式により求められる。

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \tau_{\max} \cdot b \cdot Z \\ &= b \cdot Z \cdot \sqrt{\frac{a^2}{1+a^2} \cdot (\sigma_1 - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2})} \end{aligned} \quad (9)$$

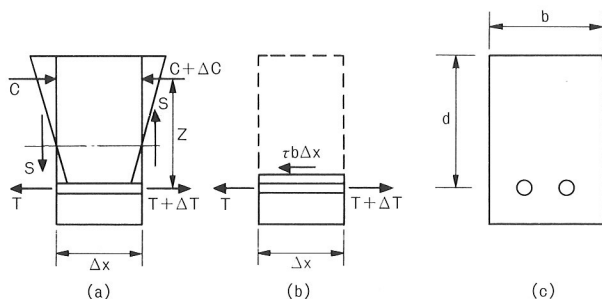


図-20 鉄筋はり中の力のつり合い¹³⁾

(2) 耐荷力の算定結果とその考案

3章で示した腐食鉄筋はりについて、式(9)により求められる耐荷力を図-21に示す。耐荷力の算定において $\psi=110^\circ$ 、すなわち鉄筋軸に沿って 20° の傾きのひびわれが発生するとし、錆の膨張圧によって生ずる応力 σ_y は、 $0 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ を考え、また曲げにより発生する引張応力は $0, 5, 10 \text{ kg/cm}^2$ を考え算定を行った。図-22では同時に、道路橋示方書の規定における曲げ耐力算定法により算出された耐力についても示した。曲げ耐力は鉄筋はり断面により決定され、腐食により鉄筋の断面欠損がある場合には曲げ耐力は低下するが、今回載荷試験を行った腐食鉄筋はりについては、耐荷力に影響を及ぼすほどの断面欠損は生じていなかった。

これらの結果より、錆の膨張圧がある限度をこえると破壊形式は曲げ破壊から付着せん断破壊へと移行し耐荷

力も低下することがわかる。このような傾向は、腐食鉄筋はりの載荷試験結果と一致するものである。なお、さらに実用上の定量的な評価を行なうには、 σ_x や σ_y の確定的な値が必要であり、これらの値の妥当な決定法については今後検討が必要である。

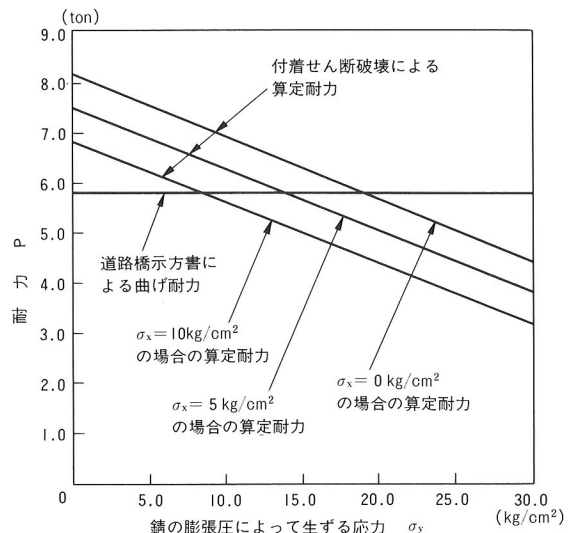


図-21 腐食鉄筋はりの耐力算定

($\psi=110^\circ$, $\sigma_1=33 \text{ kg/cm}^2$)

(3) 腐食床版の耐荷力評価法への適用について

床版に対するモデル化として、単純に単位幅のはりを考えれば、上述した腐食鉄筋はりの耐荷力算定式を腐食床版に対する一評価法として用いることも考えられる。しかしながら、はりとは仮定したモデルでは、版としての挙動や配筋鉄筋の腐食の影響は表現できず、腐食床版の耐荷力を評価する上でそれらの事項についてはさらに今後検討が必要であると思われる。

6. あとがき

本論に示した種々の実験、解析結果から、まず、床版に対する自然電位法の適用について、実際問題における適応性かなり高いことがわかった。なお、今回の実験では電食錆の測定を実施したが、自然錆の場合における確認も必要であり、腐食環境を実験室で再現した腐食促進システムを開発し現在検討中である。他方、今回誘導を試みた耐荷力式は腐食鉄筋はりの耐力算定式として導出したものではあるが、錆の膨張圧によって生ずるコンクリート内部応力が今後明らかにされれば、実用に供するものになり得ることを十分に予測できる。また、腐食床版の耐久性の一指標として使用することも、今後の研究成果の蓄積如何によっては十分可能であると思われる。

最後に、本研究を進めるにあたり常に適切な御指導を賜った金沢大学・梶川康男教授、並びに有益な御助言をいただいた(株)フジエンジニアリング・葛目宏氏、京

都大学・宮川豊章助手，また，実験において多大な協力を頂いた金沢大学大学院生・角本周君に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：コンクリート橋の塩害による損傷状況調査結果，1984.
- 2) 阪神高速道路管理技術センター，日本材料学会：反応性骨材コンクリートの調査研究報告書（その2），1984.
- 3) 例えば，NHK取材班：コンクリートクライシス，1984（NHK放送）.
- 4) 例えば，日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案），同解説，1984.
- 5) 例えば，阪神高速道路公団：骨材反応に対するコンクリート構造物の管理指針（暫定案），1985.
- 6) ASTM C876-77：Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete，1977.
- 7) 葛目・宮川：自然電位測定による鉄筋腐食の調査，非破壊検査，Vol34，No10，1985.
- 8) 富澤・作田・前田・梶川：RC床版模型中の腐食鉄筋の電位の測定法に関する基礎実験，第41回土木学会年次学術講演会概要集（V），1986.
- 9) 橘・前田・梶川：腐食をうけた異形鉄筋ばりの耐力に関する解析的研究，第41回土木学会年次学術講演会概要集（I），1986.
- 10) 武若・松本：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講論文集，1984.
- 11) 角本・梶川・橘：腐食劣化をうける鉄筋コンクリート部材の挙動について，第41回土木学会年次学術講演会概要集（I），1986.
- 12) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針（案），1984.
- 13) Ferguson, P.M., R.D. Turpin, J.N. Timpson : Minimum Bar Spacing as a Function of Bond and Shear Strength, J. of ACI, 1954.
- 14) Chen, W.F. : Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw Hill, 1982.
- 15) Goodman, R.E., R.L. Taylor, T.L. Brekke : A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM3, 1968.
- 16) 梶川・橘・吉田：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について，土木学会論文集，第356号，1985.