

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.978 Dec. 2000

内部鉄筋が腐食したRCはりの力学性能評価のための非破壊調査手法の適用性

岩 波 光 保
横 田 弘
秋 本 孝

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 実験概要	4
2.1 試験体概要	4
2.2 曲げ載荷試験	6
2.3 コンクリートの劣化性状評価のための実験	7
2.4 鉄筋の腐食性状評価のための実験	8
3. RCはり試験体の劣化性状に関する検討	10
3.1 電食試験結果とはり外観の目視観察結果	10
3.2 コンクリートの材料劣化性状	12
3.3 内部鉄筋の腐食性状	13
4. 材料劣化とはりの力学性能の関係	14
4.1 耐荷性能	15
4.2 変形性能	16
4.3 ひび割れ性能	16
5. 鉄筋腐食が生じたRCはりのAE発生特性	18
5.1 計測結果	18
5.2 AE発生特性に基づいた部材内部の劣化評価	18
6. 鉄筋腐食の非破壊推定	19
6.1 計測結果	19
6.2 電気化学的特性値に基づいた鉄筋腐食推定	20
7. 結論	20
8. あとがき	21
参考文献	21

Application of Nondestructive Testing Methods for Structural Performance Assessment of Reinforced Concrete Beams Subject to Steel Bar Corrosion

Mitsuyasu IWANAMI*
Hiroshi YOKOTA**
Takashi AKIMOTO***

Synopsis

Port and harbour facilities are exposed to severe environment so that deterioration and damages would be observed during in-service period. Corrosion of steel bars in concrete structures has a great influence on their structural performance and durability. Therefore, it is essential to evaluate the mechanical performance of those structures appropriately for the purpose of rational and efficient maintenance and repair work. At present, the degree of deterioration of concrete structures is judged based on visual observation to the surface appearance. In this case, the judgement is qualitative and subjective so that it is impossible to evaluate the structural performance accurately. Hence, in this study, the applicability of nondestructive testing methods to structural performance assessment evaluation was investigated in order to obtain quantitative and objective information regarding the deterioration in concrete structures. Reinforced concrete beam specimens subject to electrolytic corrosion were prepared, and the material deterioration of the specimens was analyzed and quantified. Through bending tests on the specimens, the relationship between material deterioration and structural performance was examined, and the nondestructive testing methods were applied to the deteriorated specimens. As a result, it was possible to evaluate the deterioration state inside the specimens by acoustic emission measurement. Furthermore, the degree of corrosion of steel bars in concrete could be estimated quantitatively by measuring the half cell potential and the polarization resistance based on electrochemistry.

Key Words: Nondestructive testing, Steel bar corrosion, Structural performance assessment, Acoustic emission, Half cell potential, Polarization resistance

* Research Engineer of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

** Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

*** Ex-Trainee of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division (Wakachiku Construction Co., Ltd.)
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826, Japan

Phone : +81-(0)468-44-5031 Fax : +81-(0)468-44-0255 E-mail : iwanami@cc.phri.go.jp

内部鉄筋が腐食したRCはりの力学性能評価のための 非破壊調査手法の適用性

岩波 光保 *
横田 弘 **
秋本 孝 ***

要 旨

港湾施設は、材料劣化の激しい環境下に置かれており、その供用期間中に劣化や損傷が生じることが多い。特に鉄筋コンクリート構造物において生じる内部鉄筋の腐食は、その力学性能や耐久性能に極めて重大な影響を及ぼす。したがって、港湾コンクリート構造物の維持・補修を効率的に、かつ効果的に実施していくためには、内部鉄筋が腐食した構造物の力学性能を的確に評価しておくことが重要である。現状では、外観の目視観察結果に基づいて構造物の劣化度が判定されているが、この場合、定性的で主観的な情報しか得ることができないため、的確な力学性能評価を行うことは困難である。そこで本研究では、目視調査では得ることのできない、劣化・変状に関する定量的かつ客観的な情報を収集することを目的として、各種非破壊調査手法を適用するための基礎的な検討を行った。実験においては、電食作用を施したRCはり試験体を対象として、その材料劣化をあらかじめ評価した上で、材料劣化がはりの力学性能に及ぼす影響を調べ、非破壊調査手法による力学性能評価の高度化についての検討を行った。その結果、アコースティック・エミッション計測によりはり部材内部の損傷程度に関する情報を、また電気化学に基づく自然電位・分極抵抗計測により内部鉄筋の腐食性状に関する定量的な情報を得ることができた。

キーワード：非破壊調査、鉄筋腐食、力学性能評価、アコースティック・エミッション、自然電位、分極抵抗

* 構造部構造強度研究室
** 構造部構造強度研究室長
*** 前構造部構造強度研究室受託研修生（若築建設（株））
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
Phone：0468-44-5031 Fax：0468-44-0255 E-mail：iwanami@cc.phri.go.jp

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国にとって、港湾施設は物流・人流の要であり、安定的な社会経済活動を営む上で欠かすことのできない存在である。しかしながら、高度成長期に大量に建造された鉄筋コンクリート（RC）構造物の中には、多年にわたる供用による経年劣化で老朽化が著しく進行したものも報告されている。このような港湾基盤施設の安全性を確保し、その諸機能を要求レベル以上に保持しておくためには、適切な維持・補修の実施が不可欠である。現状でも、劣化の顕在化した構造物・部材に対して種々の補修・補強対策工が実施されているが、対策工法や対策時期の選定が不的確なことに起因する補修箇所の再劣化などが認められることもあり、必ずしも適切な維持・補修が行われているとはいえない。

この要因として、現状における劣化度判定が主に外観の目視観察結果に基づいて行われており、判定基準も定性的かつ主観的なものにとどまっていることがあげられる。このことは、港湾施設に限らず、あらゆる土木構造物において当てはまることである。このような客観性に欠ける定性的な劣化度からでは、構造物・部材の力学性能や耐久性能を的確に評価することができないため、劣化度判定の高度化、すなわち、判定結果の高精度化、定量化、ならびに客観化を図る必要がある。劣化度判定を最も高度化できる手法に、コア採取やはつり調査等の局部破壊試験がある。これによれば、コンクリートの材料劣化や鉄筋腐食の定量的な情報を直接的に得ることができる。しかしながら、局部破壊試験は、①データ数を多く取ることができない、②構造物自体に多少なりともダメージを与える、③破壊箇所の補修が必要となるためコスト・労力が高い、④補修箇所に美観上の問題が発生する、等の問題点を抱えている。このような問題がなく、劣化度判定を高

度化するための代替手段として、非破壊調査手法の適用があげられる。コンクリート分野における非破壊調査技術は各方面で研究・開発が進められ、その有効性は示されつつあるが（例えば、大津，1993）、調査手法としての完成にまでは至っていないのが現状である。さらに、非破壊調査手法を力学性能評価や耐久性能評価にどのように適用していくかについての検討はほとんど行われていない。本研究では、塩害を受けたRC部材の力学性能評価を高度化することを目的に、各種の非破壊調査手法を適用するための基礎的な検討を行うこととした。

実験においては、まずコンクリート内部の鉄筋腐食を促進させるため、RCはり試験体に電食作用を施した。この際、電食期間を変化させることにより、内部鉄筋の腐食程度を変化させた試験体を作製し、鉄筋の腐食程度がはりの力学性能に及ぼす影響について検討を行った。鉄筋の腐食程度については、腐食面積率や断面欠損率を用いて定量化を行い、はりの力学性能としては耐荷性能（鉄筋降伏荷重、終局破壊荷重）、変形性能、ひび割れ性能を取り上げた。さらにいくつかの非破壊調査手法を適用し、目視調査だけでは得ることのできない劣化性状に関する情報を収集することを試みた。非破壊調査手法として本研究では、アコースティック・エミッション（AE）計測（例えば、大津，1988）、ならびに電気化学にもとづく自然電位・分極抵抗計測（例えば、土木学会，1997）を取り上げ、それぞれ、はり内部における微小破壊の蓄積・進行、内部鉄筋の腐食性状の推定に用いることとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験においては、電食作用を施したRCはり試験体を用いて、はりの力学性能や各種非破壊調査手法の

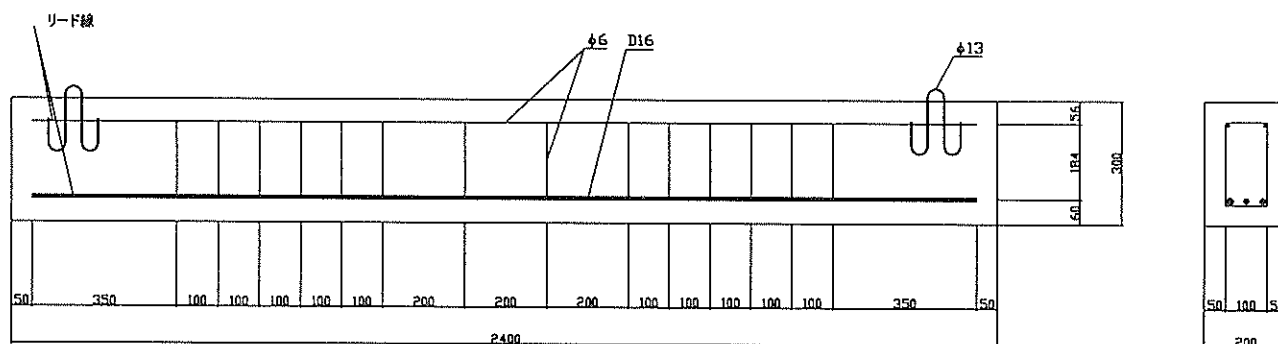


図-1 RCはり試験体の概要

力学性能評価への適用性について、はり外観の目視観察結果より判定されるはり部材としての劣化度を考慮しながら検討を行った。

(1) 試験体の寸法および使用材料

用いた試験体は、200×300 mm の長方形断面を有するRCはりで、長さは2400mmである。図-1に、試験体の形状・寸法および配筋を示す。主鉄筋には、SD345のD16を3本配置し、その端部に電食時の通電用および自然電位・分極抵抗計測用にリード線を接続した。主鉄筋のかぶり厚は42mmとした。なお、はり端部における鉄筋の折り曲げ処理は施していない。またせん断補強筋として、スターラップ(SR295のφ6)を100mmピッチで10本配置した。表-1に、用いた鉄筋の降伏強度および引張強さを示す。

表-1 使用鉄筋の力学的性質

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SD345 D16	382	560
SR295 φ6	306	444

用いたコンクリートの配合を表-2に示す。配合条件については、粗骨材の最大寸法を20mm、目標スランプを12±2 cm、目標空気量を4±1%とした。練混ぜにあたっては、セメントに普通ポルトランドセメント(比重:3.16)を、細骨材に砕砂(茨城県笠間市産、表乾比重:2.65、粗粒率:3.03)と山砂(茨城県麻生町産、表乾比重:2.61、粗粒率:2.87)を1:1で混合したものを、粗骨材に砕石(茨城県岩間町産、表乾比重:2.75、粗粒率:6.66)を用いた。また混和剤としてAE剤を用いた。材齢28日における標準養生供試体の圧縮強度は、27.1N/mm²であった。

表-2 コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
180	265	1015	860	3.33

(2) 事前載荷

コンクリートのひび割れが鉄筋腐食による力学性能変化に及ぼす影響について調べるため、一部の試験体に対して、電食作用を施す前に曲げ載荷を行うことにより曲げひび割れを導入した。その幅については、実際のRC構造物で存在しうる程度とするため、コンク

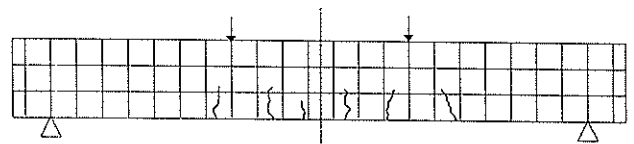


図-2 事前載荷による初期ひび割れ発生状況

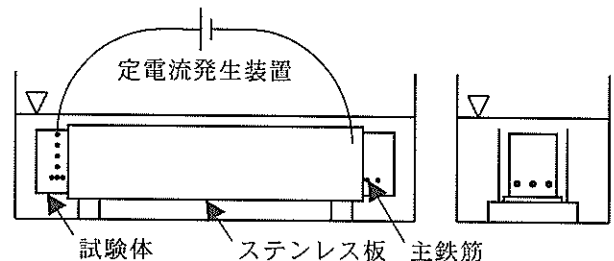


図-3 電食試験の概要

リート標準示方書における許容ひび割れ幅(土木学会, 1996)を参考にすることとした。これによれば、腐食性環境下における許容ひび割れ幅は0.004c(c:かぶり)である。したがって、本研究で用いた試験体の場合には、おおよそ0.17mmのひび割れ幅となるため、導入ひび割れ幅は0.15~0.20 mmとした。この事前載荷における支点および載荷点の位置は、後述の曲げ載荷試験と同一とした。事前載荷によるひび割れの発生状況の1例を図-2に示す。

(3) 電食方法

コンクリート内部の鉄筋を腐食させるため、主鉄筋に電食を施した。電食は、鉄筋に直流電流を印加することにより強制的に鉄筋を腐食させるもので、実環境下における鉄筋腐食よりも大きい腐食速度が得られるため、鉄筋腐食の促進試験としてしばしば用いられる手法である。図-3に示すように、海水を浸した水槽

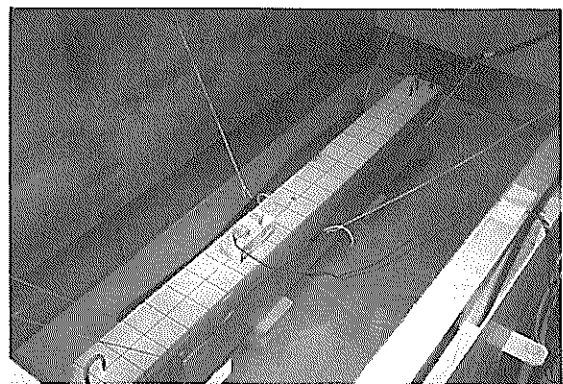


写真-1 電食試験の状況

内にはり試験体を置き、それを取り囲むように厚さ 0.3mm のステンレス板を設置した。そして、ステンレス板と定電流発生装置の陰極をリード線で接続し、はり試験体内部の主鉄筋 3 本から出ているリード線と同装置の陽極に接続し、2.95A の直流電流を印加した。これは、既往の実験（濱田他, 1997）に基づいて、主鉄筋表面当たり $0.85\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流密度となるように算定したものである。なお、通電を開始する前には 24 時間以上試験体を海水中に浸漬することで、コンクリートを十分湿潤な状態とした。写真-1 に、電食状況を示す。

通電期間は、事前荷重を行っていない試験体において鉄筋腐食による縦ひび割れが発生するまでの通電時間を Q として、 $0.5Q$, $1Q$, $2Q$, $4Q$ および $8Q$ とした。また $0.5Q$ のケースについては、事前荷重を行ったシリーズにおいてのみ設定した。

内部鉄筋の腐食により、はり軸方向に鉄筋に沿って連続的にコンクリートひび割れ（縦ひび割れ）が発生するが、これについては、以下の 2 とおりの方法で検知した。1 つは、印加電圧の降下によるもので、コンクリートに縦ひび割れが発生すると、鉄筋とステンレス板の間の電気的な抵抗が小さくなるため、両者間にかかる電圧が小さくなることを利用したものである。もう 1 つは、A E の急激な発生によるものである。電食試験中のはり試験体に A E センサを貼付し（写真-1 中央）、通電中にコンクリート内部で発生する A E の計測を行った。A E 計測については後に詳述するが、A E とは「固体材料内部の微小破壊によって発生する弾性波動現象」のことで、この場合、コンクリート内部で発生するひび割れにともなう微小な破壊音のことである。

2.2 曲げ荷重試験

内部鉄筋が腐食したはり試験体の力学性能を調べる

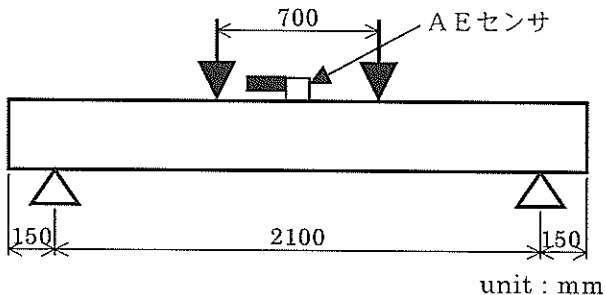


図-4 曲げ荷重試験の概要

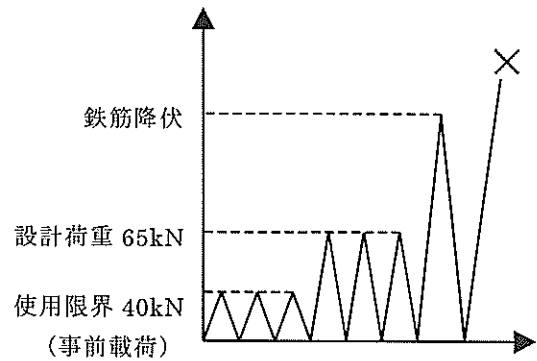


図-5 荷重ステップ

ため、曲げ荷重試験を行った。あわせて A E 計測も行い、はり部材の劣化程度と A E 発生特性の関連を調べた。

(1) 荷重方法と測定項目

本研究で実施した曲げ荷重試験における支点および荷重点の位置を図-4 に示す。前述の事前荷重も、これと同一の条件で実施した。このように、曲げスパンおよびせん断スパンともに 700mm の 3 等分 2 点荷重とし、せん断スパン有効高さ比は 2.92 とした。荷重のステップとしては、図-5 に示すように、まず許容ひび割れ幅到達荷重の計算値 (40kN) までの 3 回の繰返し荷重を行い、続いて許容応力度法に基づく設計荷重 (鉄筋に許容応力度が発生する荷重 = 65kN) までの 3 回の繰返し荷重を行い、その後、鉄筋降伏、終局破壊と荷重を行った。本実験で用いた試験体内部の鉄筋にはひずみゲージを取り付けていないため、荷重-変位関係をリアルタイムでモニタリングすることで、鉄筋の降伏を判断した。

荷重試験における測定項目については、荷重荷重、

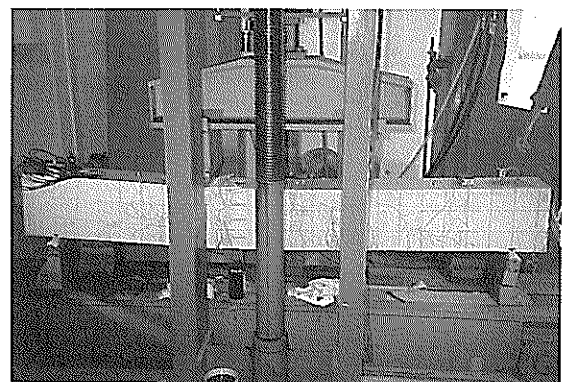


写真-2 曲げ荷重試験の状況

支点およびスパン中央点における鉛直方向変位、圧縮縁におけるコンクリートひずみ、曲げスパン内で発生したひび割れ（初期ひび割れを含む）の幅とした。これらについて、載荷荷重 5kN ごとにデータロガーを用いて測定を行った。載荷試験の状況を写真-2 に示す。

(2) A E計測

a) A E計測による劣化評価

A E（アコースティック・エミッション）は、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」（大津，1988）と定義される。RCの場合、コンクリートひび割れの発生・進展、既存のひび割れ面の摩擦、鉄筋とコンクリートの付着破壊・すべりなどがA Eの発生要因としてあげることができる。したがって、A Eの発生が多いほど、このような潜在的なA E発生源がRC構造体内部に多く存在していることが示唆される。すなわち、所定の外力が加わった場合のA E発生数の多寡によって、構造体全体の劣化程度・損傷程度が推測できる可能性がある。例えば、凍結融解作用等を受けたコンクリートの劣化程度をA E発生数のレートプロセス解析を行うことにより推定した事例（油野他，1995）や鉄筋が腐食したRCはりの劣化程度をA Eの発生特性から評価した事例（秋山他，1999）などが報告されているが、これらはいずれも材料や部材の破壊近傍まで外力を加えてA Eを発生させており、実構造物の劣化評価に適用することは非現実的である。実際には、より低い荷重レベルで発生するA Eを対象にしなければ、実用上、A E計測をRC部材の劣化評価に応用することはできないと考えられる。1つの試みとして、A E計測を実際の栈橋上部工の劣化評価に用いた事例（岩波他，1998）があるが、調査データ数が少なくこれだけで適用可能性を議論することはできない。そこで本研究では、低荷重レベルにおいて発生するA Eを対象として、これによるRC部材の劣化評価の可能性について基礎的な検討を行った。

b) 計測概要

本研究においては、はり試験体の曲げ載荷試験時に発生するA Eの計測を行った。図-4 に示すように、はり試験体上面の曲げスパン中央にA Eセンサを貼付し、曲げスパン内で発生するA Eを重点的に計測した。用いたセンサは、60kHz共振型で、比較的大きい寸法のコンクリートのA E計測を行うのに適したタイプの

ものである。A Eセンサで検出されたA E信号は、プリアンプにて40dB増幅された後、メインアンプにてさらに40dBの増幅処理が施され、パソコン内のメモリに記録された。しきい値は50dBとした。

計測されたA Eの波形特性値から破壊源の諸特性を推定しようとする試みも行われている（岩波他，1998）。しかしながら、検出されるA Eの波形は、コンクリート中の減衰効果、センサを含む計測系のフィルター特性などの影響を大きく受けており、普遍的な評価法として確立するためには今後さらなる検討が必要である。そこで本研究では、上記のような要因の影響をあまり受けにくいA E発生数を評価パラメータとして用いることとした。

2.3 コンクリートの劣化性状評価のための実験

電食作用を受けたRCはり試験体のコンクリート部分の劣化や変状について調べるため、コンクリートの細孔量測定を行った。また、電食作用により鉄筋が腐食する場合、コンクリート中における塩化物イオンの存在は問題とならないが、腐食促進試験方法としての電食試験の有効性を調べるためには、コンクリート中の塩化物量を把握しておく必要があるため、塩化物イオン含有量測定をあわせて行った。

(1) 細孔量測定試験

細孔量は、コンクリート中に含まれる微細な空隙の量を表すもので、コンクリートの密実性や緻密性を示す指標となるものである。したがって、コンクリートが何らかの要因によって劣化すると、細孔量は増加することとなる。

測定にあたっては、載荷試験が終了した試験体から取り出したモルタル塊を採取し、これをアセトンに浸漬し、1週間程度真空乾燥させた後、水銀圧入式ポロシメータを用いて行った。測定範囲は、3~30,000 nmとした。測定を行った試験体は、事前載荷を行っていない初期ひび割れを有しないシリーズのうちで、電食期間が1Qおよび8Qのものである。またモルタル塊採取位置は、試験体中央付近の断面内の引張縁近傍、主鉄筋近傍、断面中央部の3ヶ所とした。

(2) 塩化物イオン含有量測定試験

コンクリート内部に浸透した塩化物イオンの量を、「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」（日本コンクリート工学協会，1987）にしたがって測定した。

載荷試験が終了した試験体からモルタル塊を試料として採取した。一般的には、コンクリート塊を鉄乳鉢で粉碎した後、めのう乳鉢で微粉碎し、0.15mm を全通させ一昼夜風乾してから分析試料とするが、本測定では試料が小さいために粗骨材の含有量が分析値に大きく影響することが予測されたため、粗骨材を取り除いたモルタル部分を分析試料とした。分析の方法は、試料 0.1g をビーカに量り取り、2 規定の硝酸 10ml を加え pH を 3 以下とした後、砂浴上で加熱した。この加熱した溶液を電位差滴定装置を用いて、0.005 規定の硝酸銀水溶液で滴定して塩化物量を求めた。

測定値は、表-2 の配合を参考に、コンクリート質量に対する塩化物イオン含有率、モルタル質量に対する塩化物イオン含有率、セメント質量に対する塩化物イオン含有率として求めた。換算にあたっては、①分析試料内のコンクリート材料の質量比率は試験体のそれと同一である、および②塩化物イオンはセメント硬化体のみ存在し骨材には存在していない、ものと仮定した。

本測定は、事前載荷を行っていない、すなわち、初期ひび割れを有しないシリーズの全試験体に対して行った。モルタル塊採取位置は、各試験体とも、試験体中央付近の断面内の引張縁近傍、主鉄筋近傍、断面中央部の 3ヶ所とした。

2.4 鉄筋の腐食性状評価のための実験

電食作用を受けた鉄筋の腐食性状を調べるため、載荷試験終了後に主鉄筋をはつりだし、その腐食面積率および断面欠損率を算出した。また載荷試験実施前に、内部鉄筋の腐食程度を非破壊的に推定するため、電気化学に基づく自然電位および分極抵抗の計測を行った。

(1) 腐食面積率

載荷試験終了後のはり試験体のコンクリート部分をブレーカにて破碎し、3 本の主鉄筋を取り出した。その後、鉄筋表面に付着したコンクリート片を除去し、表-3 に示す鉄筋腐食グレードに基づいて、各腐食グレードごとの鉄筋表面積を求めた。この際、リード線が接続されていた鉄筋端部については、リード線接続用のエポキシ樹脂等が付着していたため、評価の対象から除いた。評価指標として、各腐食グレード別の表面積の全評価対象面積に対する百分率として定義される腐食面積率を用いた。

本測定は、事前載荷を行っていないシリーズの全試験体を対象に行った。

表-3 鉄筋腐食のグレード

腐食グレード	鉄筋の状態
O	腐食が認められない健全な状態
I	明るい茶色をした軽微な腐食
II	赤茶色をした表面的な腐食
III	黒茶色をした腐食
IV	断面欠損をとまなう激しい腐食

(2) 断面欠損率

腐食面積率測定と同様に、はり試験体から取り出した主鉄筋を対象として、その腐食減量から断面欠損率を算出した。コンクリート内部からはつりだした主鉄筋にサンドブラスト処理を施すことにより、鉄筋表面に付着したコンクリート片や腐食生成物を除去した。その後、サンドブラスト処理では除去しきれない腐食生成物を取り除くため、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に鉄筋を浸漬した。このようにして腐食生成物を完全に除去した鉄筋の質量および長さを測定し、腐食していない鉄筋の単位長さあたりの質量をもとに、腐食減量および断面欠損率を算出した。

本測定は、事前載荷を行い初期ひび割れを有するシリーズの全試験体を対象に行った。測定にあたっては、主鉄筋をおおよそ 8 等分して行い、鉄筋長手方向の腐食性状変化も検討できるようにした。なお、鉄筋端部については腐食面積率と同様の理由で評価の対象に入れなかった。

また、鉄筋腐食による縦ひび割れ発生限界の断面欠損率を調べるために、事前載荷を行っていない初期ひび割れを有しないシリーズのうち、電食期間が 1Q の試験体についても同様の計測を行い、断面欠損率を算出した。

(3) 電気化学的手法による鉄筋腐食の非破壊推定

内部鉄筋が腐食した RC 部材の力学性能および耐久性性能を評価する上で、コンクリート中における鉄筋の腐食性状を把握しておくことは不可欠である。しかしながら、鉄筋の腐食状態を外観の目視観察結果から判断することは、鉄筋腐食による縦ひび割れ幅や錆汁の有無からある程度可能であるものの、正確に腐食性状を評価することはできない。したがって、非破壊的に鉄筋の腐食性状を推定する手法を確立しておく必要がある。鉄の腐食反応は電気化学に基づく理論により説明することができるため、電気化学的手法により自然電位や分極抵抗を計測することにより、鉄筋の腐食性

状を推定できることが知られている（土木学会，1997）．そこで本研究においても，電気化学的手法による計測を行い，実際の腐食状態との対応関係を調べた．鉄筋腐食推定を行う際は，単一のパラメータではなく，複数の評価パラメータを用いることが有効であることが知られている（例えば，宮川他，1988）．しかしながら，その評価基準および適用範囲・限界については不明確な点が多く残されているため，本研究ではその基礎資料を得ることを目的に自然電位および分極抵抗の計測を行った．

a) 自然電位

健全なコンクリート中においては，鉄筋は不動態皮膜により保護されているため，その電位は飽和硫酸銅電極基準で-100mV程度を示すが，塩化物イオンの存在などにより不動態皮膜が破壊され鉄筋表面が活性化すると，その電位は卑な方向へシフトする．したがって，コンクリート表面から鉄筋の電位を計測することにより，鉄筋が腐食している環境にあるかどうかを示す腐食可能性を評価することができる．この自然電位計測に基づく鉄筋の腐食推定は古くから検討が行われており，規格化もされている（例えば，ASTM，1977）．参考までに，ASTMの判定基準を表-4に示す．このように本規格は，自然電位の計測値と腐食確率の関係から鉄筋の腐食状況を推定しようとするものである．自然電位計測に基づく鉄筋腐食推定は，計測時点における腐食の有無や腐食可能性については評価できるが，実際の腐食反応に関する定量的な情報を得ることはできない．

表-4 自然電位による鉄筋腐食推定規準（ASTM）

自然電位 E (mV vs CSE)	鉄筋腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

b) 分極抵抗

自然電位は鉄筋の腐食可能性を評価するためのものであり，実際の腐食反応に関する情報を得ることはできない．そこで，鉄筋の腐食状態をより直接的に評価することを目的として，鉄筋表面の分極抵抗を計測することが試みられている．鉄の腐食反応は，アノード部分とカソード部分の間に腐食電流が流れることにより進行する．この腐食電流は腐食速度に相当するものであり，分極抵抗という腐食反応に対する抵抗と反比例の関係にあることが知られている．これを利用して，コンクリート表面に設置した電極から内部鉄筋に微弱な電流を印加したときの抵抗（分極抵抗）を計測し，鉄筋の腐食速度を推定することができる．本手法は比較的新しいものであり，計測方法や判定基準など不明確な点も多く残されているが，一部で規格化も試みられている（CEB，1997）．

表-5 分極抵抗による鉄筋腐食推定規準（CEB）

腐食電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度	分極抵抗 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
$< 0.1 \sim 0.2$	不活性	$130 \sim 260 <$
$0.2 \sim 0.5$	低～中速	$52 \sim 130$
$0.5 \sim 1.0$	中～高速	$26 \sim 52$
$1.0 <$	高速	< 26

表-5に，CEBが提案している判定基準を示す．表中，分極抵抗の範囲は $K = 0.026\text{V}$ として（Andrade et al., 1978），著者が加筆したものである．ここに， K は分極抵抗と腐食電流の比例定数である．以上より，RC部材において鉄筋の分極抵抗を計測することは，自然電位計測では得られない腐食反応に関する情報を収集できることから，その将来性は極めて高いといえる．

c) 計測方法

コンクリート内部の鉄筋腐食性状を非破壊的に推定する手法を確立するための基礎的検討として，電食を

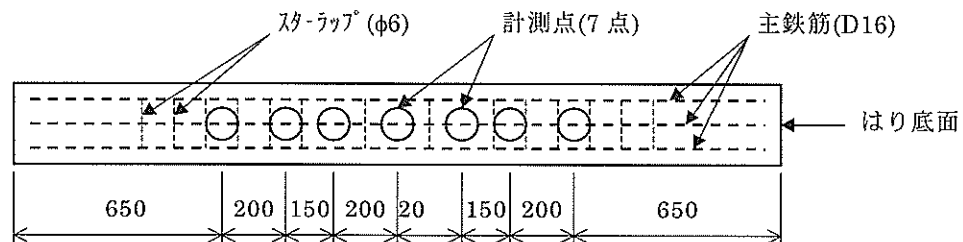


図-6 自然電位および分極抵抗の計測位置

施したRCはり試験体において自然電位および分極抵抗の計測を行った。自然電位は、飽和塩化銀電極を用いて計測を行い、分極抵抗は交流インピーダンス法に基づいて、高低2周波数による計測を行った。用いた周波数は10Hzおよび20mHz、印加電圧は10mVとした。分極抵抗を計測する場合、印加した電流が内部鉄筋のどの範囲に流れているかを的確に把握しておかなければならない（この範囲を分極範囲と呼ぶ）。本研究で用いた計測システムにおいては、センサとしてガード対極を有する二重対極タイプ（横田，1995）のものを用いているため、自動的に分極範囲を得ることができる。

また、コンクリートの含水状態が電気化学的特性値に多大な影響を及ぼすため、計測するコンクリート表面を水で十分に湿らせたウェスで24時間程度覆うことにより、コンクリートの含水状態をほぼ一定にした。計測点については、図-6に示すように、はり試験体底面における7ヶ所とし、すべての試験体において計測を行った。なお、計測時の気温についても計測結果に影響を及ぼすが、本実験においてはいずれの計測もほぼ同時期に行ったため、これについては考慮していなかった。

3. RCはり試験体の劣化性状に関する検討

3.1 電食試験結果とはり外観の目視観察結果

(1) 電食試験結果

図-7に、事前載荷を行っていないはり試験体に対して、通電期間4Qで電食作用を施した場合の印加電圧とAE発生数の経時変化を示す。これによれば、通電開始32時間後に印加電圧の降下が始まっていることがわかる。また、それに先立って多くのAEが発生していたことから、この時点で鉄筋腐食による縦ひび割れが発生したことが推測される。事前載荷を行っていない試験体においては、いずれも通電開始32時間前後で同様の現象が確認されたことから、本実験条件の下ではQを32時間とすることとした。

一方、事前載荷を行って、ひび割れが既に存在している試験体においては、印加電圧の降下やAEの急激な発生が、事前載荷を行っていないシリーズよりも若干遅れる傾向にあった。これは、鉄筋腐食によりコンクリートに発生する膨張圧が既に存在していたひび割れにより緩和されたことによるものと考えられる。なお本実験では、通電開始後40時間程度で縦ひび割れの発生が推定された。

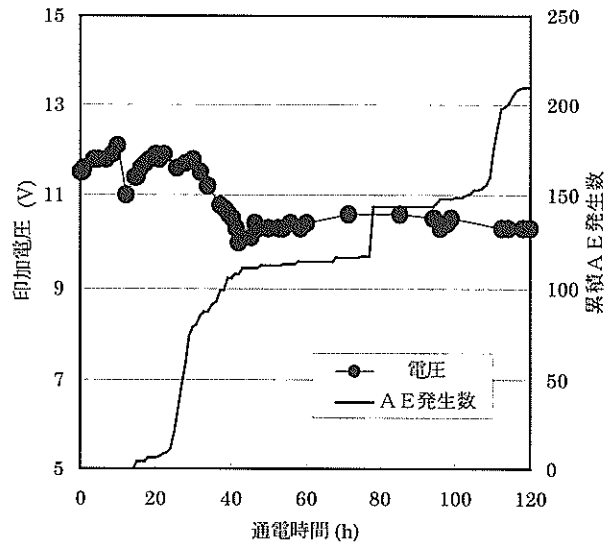


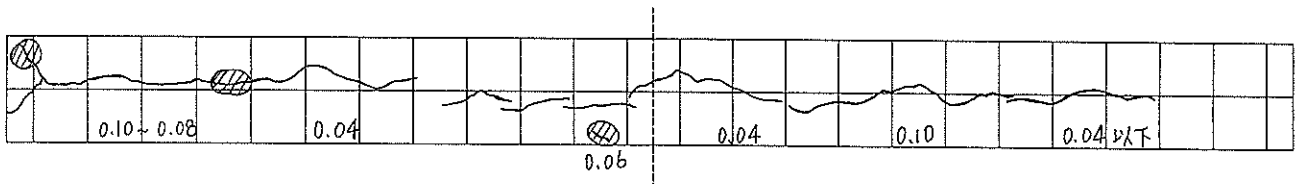
図-7 印加電圧とAE発生数の経時変化

(2) はり外観の目視観察結果

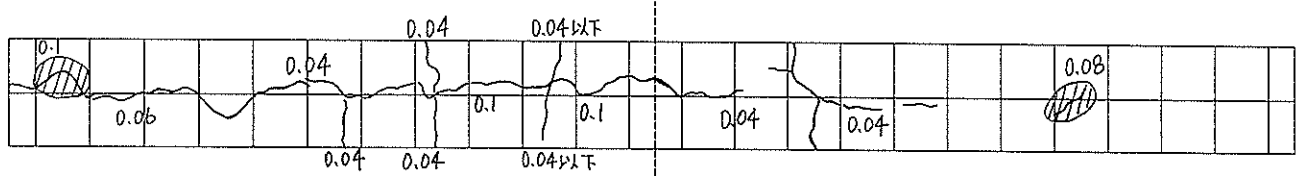
所定の期間、電食を施したはり試験体の外観を目視観察した。はり試験体底面における縦ひび割れおよび錆汁の発生状況を図-8に示す。図中、数値はひび割れ幅を、また斜線部は錆汁の検出範囲を示す。

表-7 外観の目視観察結果と劣化度判定

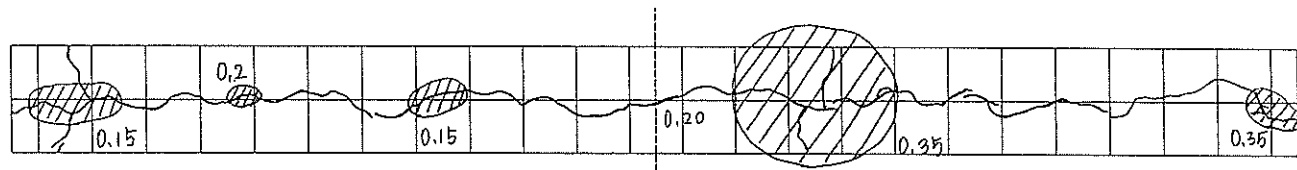
初期ひび割れ：なし					
電食期間	0.5Q	1Q	2Q	4Q	8Q
縦ひび割れ	—	あり	あり	あり	あり
上記幅 (mm)	—	0-0.04	0.04-0.1	0.15-0.35	0.3-0.9
錆汁	—	なし	点状	やや多	多し
浮き・剥離	—	なし	なし	なし	なし
劣化度	—	I	II	III	III
初期ひび割れ：あり					
電食期間	0.5Q	1Q	2Q	4Q	8Q
縦ひび割れ	なし	なし	あり	あり	あり
上記幅 (mm)	—	—	0.04-0.1	0.1-0.2	0.3-0.7
錆汁	なし	なし	点状	やや多	多し
浮き・剥離	なし	なし	なし	なし	なし
劣化度	0	I	II	III	III



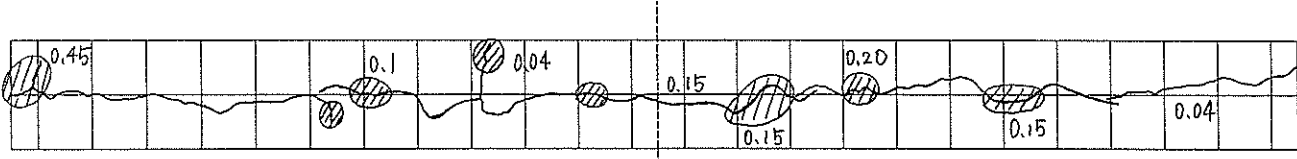
a) 初期ひび割れなし，電食期間：2Q



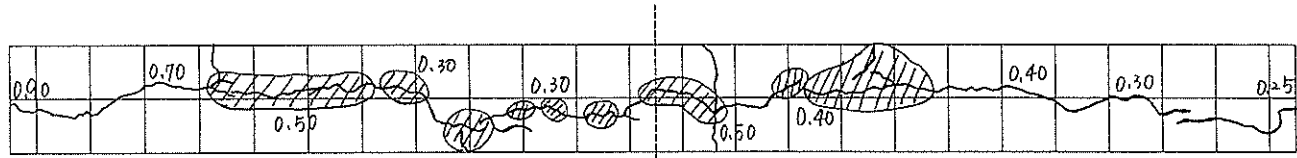
b) 初期ひび割れあり，電食期間：2Q



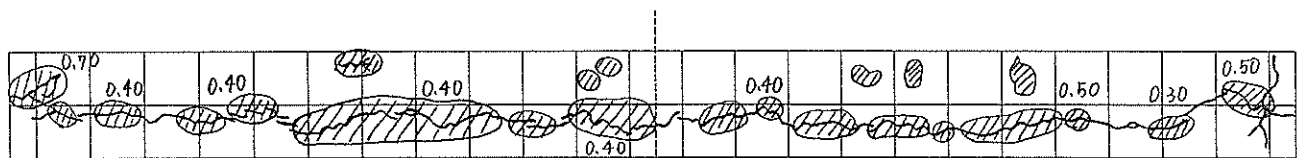
c) 初期ひび割れなし，電食期間：4Q



d) 初期ひび割れあり，電食期間：4Q



e) 初期ひび割れなし，電食期間：8Q



f) 初期ひび割れあり，電食期間：8Q

図-8 はり試験体外観の目視観察

表-6 劣化度判定の標準

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮きさび多し	浮きさび著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れがみられる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し（ひび割れ幅数 mm 以上のひび割れ含む）	ひび割れ幅数 mm 以上のひび割れ多数	
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい

点検による調査要否の判定	調査の必要なし（点検継続）	必要に応じて調査	要補修
--------------	---------------	----------	-----

「港湾構造物の維持・補修マニュアル」（運輸省港湾技術研究所，1999）に示されている劣化度判定の標準（表-6）によれば，はり試験体の劣化度は，表-7に示すように判定された。このように，本実験の条件下では，劣化度が 0～III の試験体を製作することができた。また，事前載荷による初期ひび割れの存在は劣化度には反映されなかった。

3.2 コンクリートの材料劣化性状

(1) コンクリートの細孔量

表-8 に，コンクリートの細孔量測定結果を示す。これによれば，電食期間および試料採取位置の影響はほとんど認められなかった。したがって，本実験の条件下では，コンクリート部分の密実性は電食作用を受けても変化しなかったものと考えられる。

表-8 細孔量測定結果

電食期間	試料採取位置	総細孔量 (ml/g)
1Q	引張縁近傍	0.0731
	主鉄筋近傍	0.0767
	断面中央	0.0856
8Q	引張縁近傍	0.0756
	主鉄筋近傍	0.0712
	断面中央	0.0722

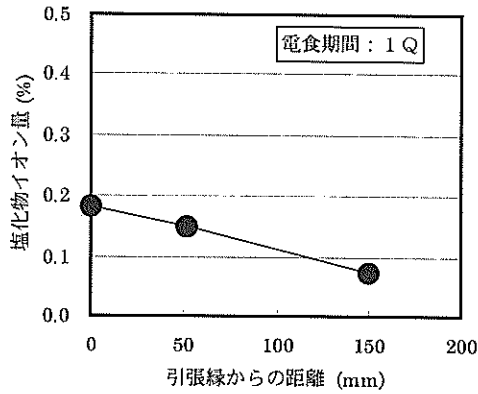
(2) コンクリートの塩化物イオン含有量

表-9 に，①コンクリート質量，②モルタル質量，

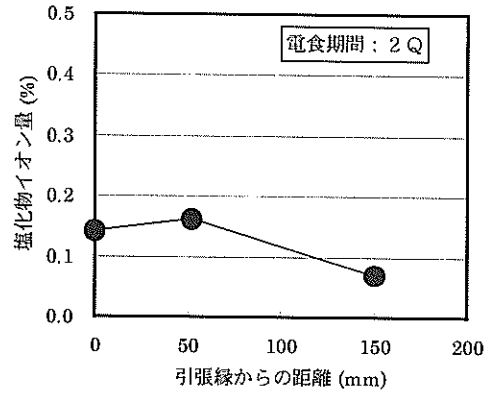
表-9 塩化物イオン含有量測定

電食期間	採取位置	全塩化物イオン量 (%)		
		①	②	③
1Q	引張縁	0.182	0.324	1.598
	鉄筋近傍	0.149	0.264	1.300
	断面中央	0.073	0.129	0.635
2Q	引張縁	0.144	0.256	1.261
	鉄筋近傍	0.164	0.292	1.438
	断面中央	0.070	0.125	0.616
4Q	引張縁	0.254	0.451	2.221
	鉄筋近傍	0.274	0.487	2.398
	断面中央	0.090	0.160	0.788
8Q	引張縁	0.240	0.426	2.098
	鉄筋近傍	0.275	0.488	2.403
	断面中央	0.107	0.191	0.941

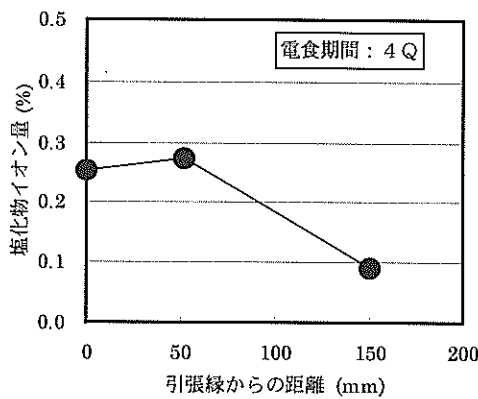
ならびに③セメント質量に対する塩化物イオン量の含有率を示す。また各試験体ごとの，コンクリート質量に対する塩化物イオン含有率の試験体内分布を図-9に示す。これによれば，電食期間の増加にともない塩化物イオン含有率が増加し，電食期間 8Q の試験体の主鉄筋近傍では，コンクリート質量に対して 0.3%近い塩化物イオンが存在していたことがわかる。実際の海洋環境下に 20 年以上暴露した同一形状・同一寸法の RC はりの試験結果（横田他，1999）と比較しても，相当量の塩化物イオンがコンクリート内部に含まれているといえる。本実験で用いた試験体内部に存在した塩化物イオンは，電食期間が数十～百数十時間であることを考慮すると，コンクリート内部に拡散浸透した



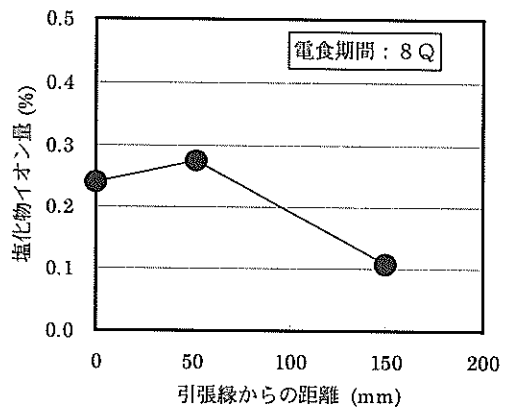
a) 電食期間：1Q



b) 電食期間：2Q



c) 電食期間：4Q



d) 電食期間：8Q

図-9 コンクリート内部における塩化物イオン量の分布

というよりは、電食時に陽極として作用した鉄筋に向かって電気泳動したものであると考えられる。本実験における鉄筋腐食は鉄筋に印加した直流電流によるものであり、塩化物腐食ではないが、ちなみに一般的な鉄筋の発錆限界塩化物イオン量は、コンクリート質量に対して、おおよそ 0.05~0.1%とされている（大即他, 1986）。

3.3 内部鉄筋の腐食性状

(1) 腐食面積率

図-10 に、電食期間の進行にともなう主鉄筋の腐食面積率の変化を示す。これによれば、電食期間が 1Q の場合、主鉄筋表面のうち 60%程度が腐食していない、健全な状態（グレード 0）に保たれているものの、電食期間が長くなるにつれて健全な領域は減少し、電食期間 8Q の場合に至っては、ほぼ全表面にわたって腐食が発生していることがわかる。また、電食期間が 1Q よりも長くなると、断面欠損をともなうような激しい腐食（グレード IV）が認められるようになり、電食期間が 8Q の場合、グレード IV の腐食が全表面

のうち 10%以上にも達した。グレード IV の腐食が生じていた領域では、異形鉄筋の節が消失している箇所も確認できた。

(2) 断面欠損率

図-11 に、主鉄筋の断面欠損率と電食期間の関係を示す。図中の平均値とは、2.4 (2)で示したように分

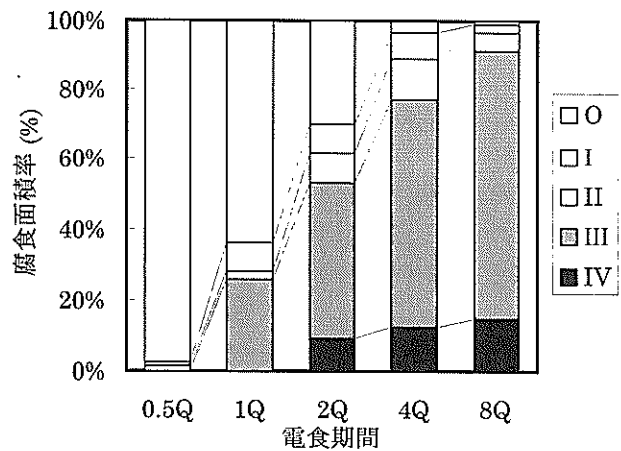


図-10 鉄筋腐食面積率の測定結果

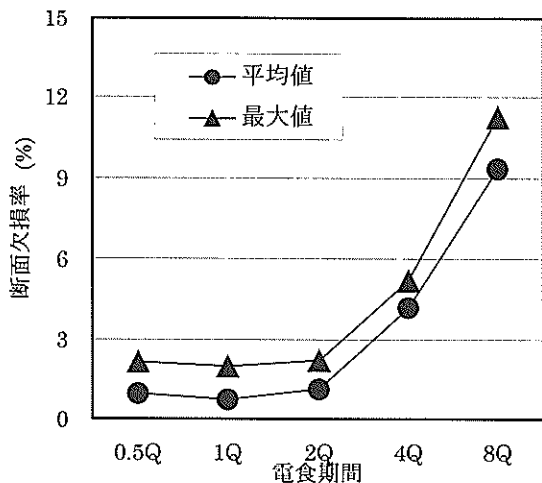


図-11 断面欠損率の測定結果

割したそれぞれの鉄筋ごとの断面欠損率の全平均値であり、最大値はその中の最大の断面欠損率を示す。これらの事前荷重を行い初期ひび割れを有するシリーズにおいては、電食期間 2Q 前後で鉄筋腐食による縦ひび割れが発生したため、電食期間が 2Q と 4Q の間で断面欠損率に急激な変化が見られた。このことは、(1) 腐食面積率において、電食期間が 2Q 以上でグレード IV の腐食が認められたこととも一致している。

電食期間が 1Q および 8Q の場合について、断面欠損率の鉄筋長手方向分布を図-12 に示す。このように、電食期間が短く縦ひび割れが発生していない段階では鉄筋の腐食は局所的に生じていた。この局所的に断面欠損率が大きく、周囲よりも腐食が進行している箇所は、事前荷重による初期ひび割れの発生位置と対応していることから、ひび割れの存在箇所から鉄筋の腐食が進行することが裏付けられた。一方、電食期間が長く縦ひび割れが発生した後では、長手方向に一樣に腐食が進行していることがわかる。これは、縦ひび割れの発生により、かぶりコンクリートの鉄筋被覆効果が失われたことによるものと考えられる。

初期ひび割れの無いシリーズの電食期間 1Q の試験体における断面欠損率は、平均値が 1.2%、最大値が 2.1%であった。本研究の範囲内では、これらが鉄筋腐食による縦ひび割れ発生限界であると考えられる。

4. 材料劣化とはりの力学性能の関係

3. で述べたように、電食作用を施した RC はり試験体においては、コンクリート部分は損傷を受けていな

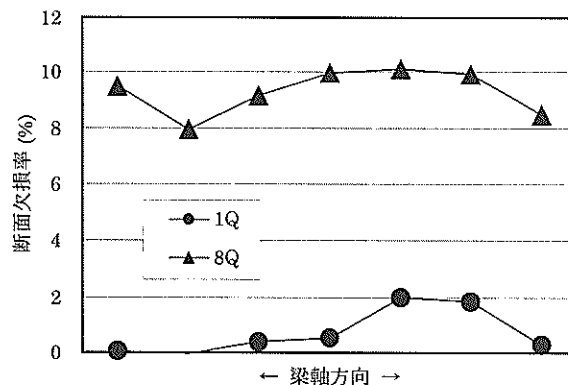


図-12 断面欠損率のはり軸方向分布

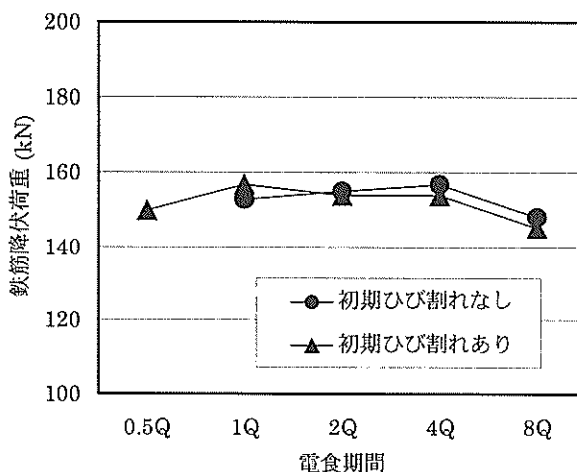


図-13 電食期間の進行にともなう鉄筋降伏荷重の変化

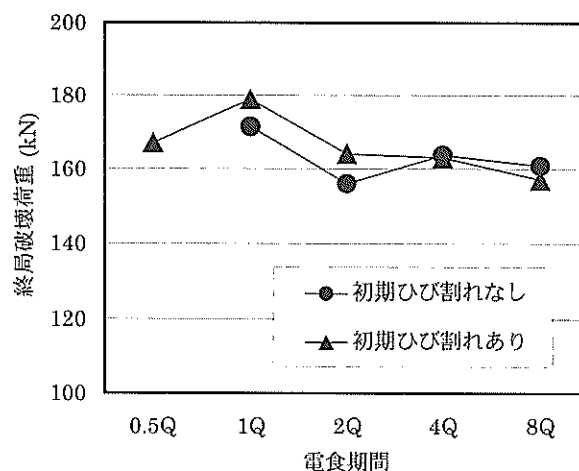
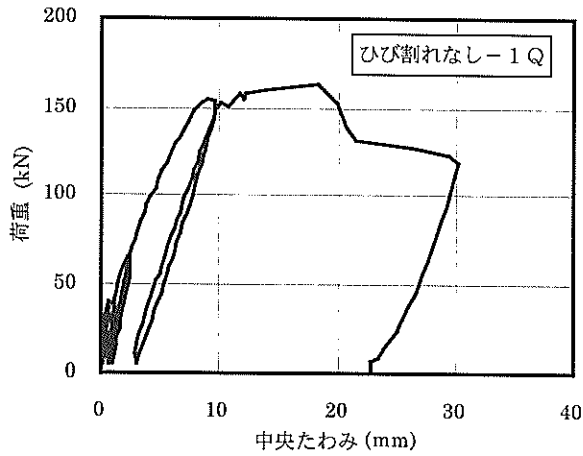
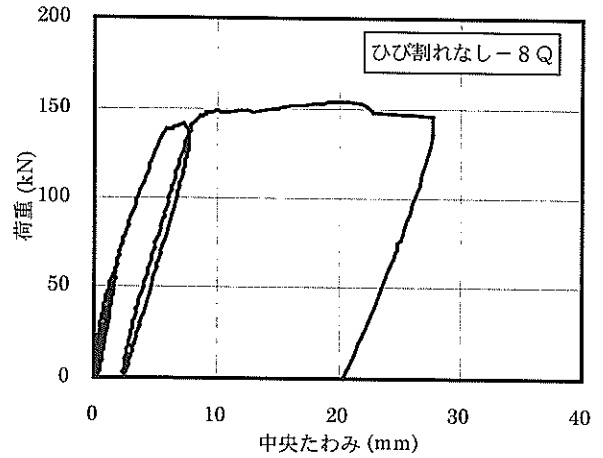


図-14 電食期間の進行にともなう終局破壊荷重の変化

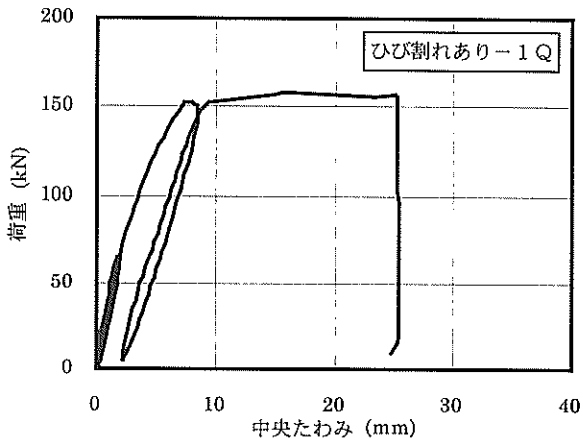
いものの、鉄筋には電食期間に対応した程度の腐食が発生していた。この鉄筋の腐食がはり部材としての力学性能に及ぼす影響について、耐荷性能、変形性能およびひび割れ性能の観点から検討を行った。なお、本



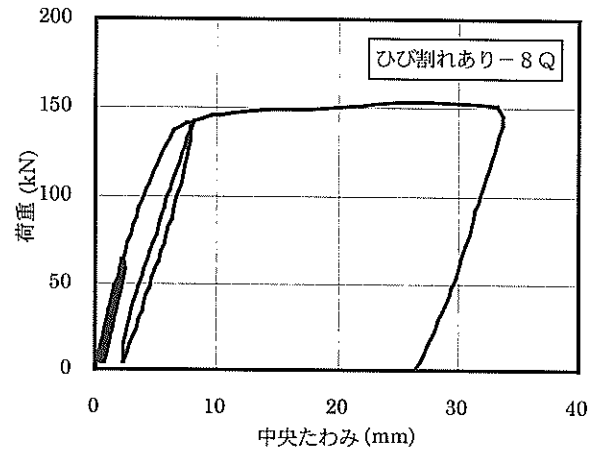
a) 初期ひび割れなし，電食期間：1Q



b) 初期ひび割れなし，電食期間：8Q



c) 初期ひび割れあり，電食期間：1Q



d) 初期ひび割れあり，電食期間：8Q

図-16 荷重-中央たわみ関係

研究で用いたすべての試験体は，曲げ引張型の破壊により終局状態に至った。

4.1 耐荷性能

図-13~14 に，電食期間の進行にともなう鉄筋降伏荷重および終局破壊荷重の変化を示す。これより，本研究の範囲内では，鉄筋の腐食により著しく耐荷性能が低下するようないものはなく，若干低下していく傾向は認められた。特に電食期間が4Qを超えたあたりから，鉄筋降伏荷重に低下傾向が見られるなど，はり部材としての力学性能が変化するようである。これらのことは，初期ひび割れの有無にかかわらず認められることから，許容ひび割れ幅程度のひび割れであれば，鉄筋腐食による力学性能低下にあまり影響しないものと考えられる。したがって，許容ひび割れ幅の設定方法の妥当性が示された。

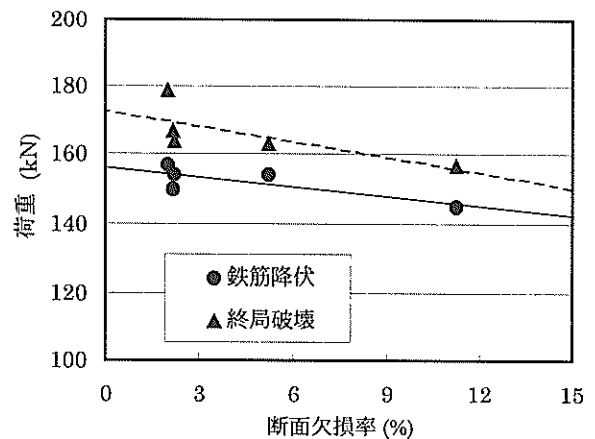


図-15 断面欠損率とはりの耐荷性能の関係

続いて、鉄筋の断面欠損率をパラメータとして、鉄筋腐食によるはり部材の力学性能低下を再整理した。図-15 に、事前載荷を行ったシリーズの試験体について、鉄筋の断面欠損率と鉄筋降伏荷重および終局破壊荷重の関係を示す。図中、断面欠損率には、1本の試験体の中で測定された断面欠損率のうちの最大値を用いている。これは、鉄筋降伏や終局破壊は最もクリティカルな条件下で生起する現象であり、鉄筋の断面積が最も減少している箇所がはり部材全体としての挙動を支配すると考えたためである。これより、データ数が少なくバラツキもあるため、一概に言うことはできないが、断面欠損率がおおよそ5%を超えるとはり部材の力学性能が低下するようである。しかしながら、断面欠損率から主鉄筋の断面積を算出してRCはりの終局耐力を算出すると、実験値よりも小さくなり必ずしも一致しない。したがって、鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響を検討する際には、鉄筋腐食による断面積の減少だけでなく、孔食の発生状況等の腐食パターン鉄筋やコンクリートの付着性状などの影響についても考慮する必要があるといえる。

これらの点を踏まえ、今後はさらにデータの蓄積をはかり、断面欠損率と耐荷性能の関係、いわゆる「劣化曲線」を明確なものにしていかなければならない。

4.2 変形性能

図-16 に、初期ひび割れを有しないシリーズにおける電食期間が1Qおよび8Qの場合と初期ひび割れを有するシリーズにおける電食期間が1Qおよび8Qの場合に得られた荷重-はりスパン中央たわみ関係をそれぞれ示す。これらによれば、初期ひび割れの有無や電食期間によらず、ほぼ同様な荷重-中央たわみ関係が得られた。

続いて、低荷重レベル時における変形性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を調べるため、設計荷重(65kN)載荷時のはり試験体の挙動に着目した。図-17~18 に、はりスパン中央たわみおよび圧縮縁のコンクリートひずみと電食期間の関係を示す。これらは、3回の繰返し載荷時における平均値であり、3個の計測値の変動はほとんどなかった。これらによれば、測定値は電食期間によらずほぼ一定となった。

以上より、本研究の範囲内では、鉄筋腐食ははり部材の変形性能にはあまり影響を及ぼさないといえる。また、このことは事前載荷による初期ひび割れの有無によらず成り立った。

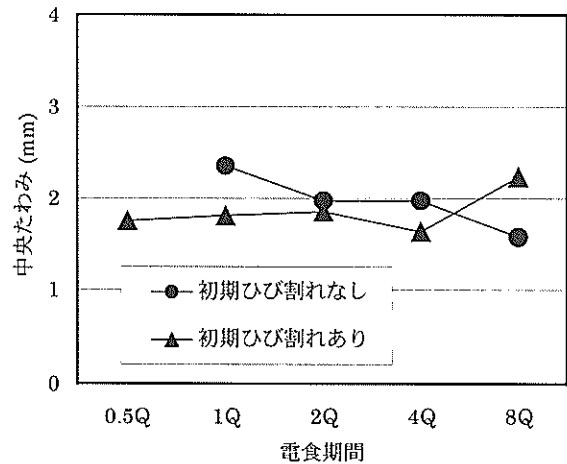


図-17 中央たわみと電食期間の関係

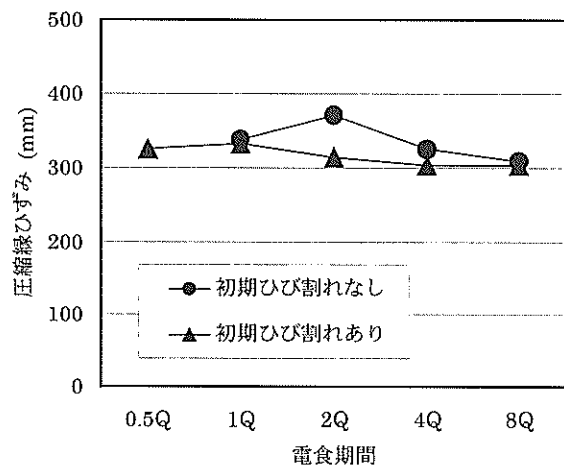


図-18 圧縮縁ひずみと電食期間の関係

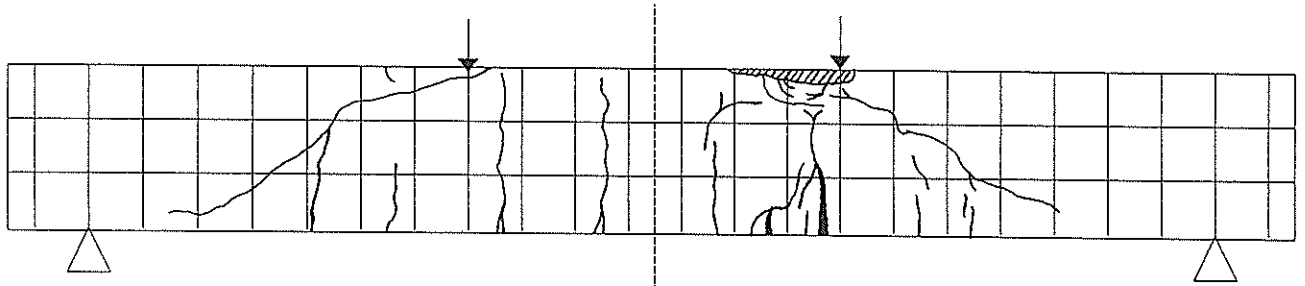
4.3 ひび割れ性能

(1) ひび割れ発生状況

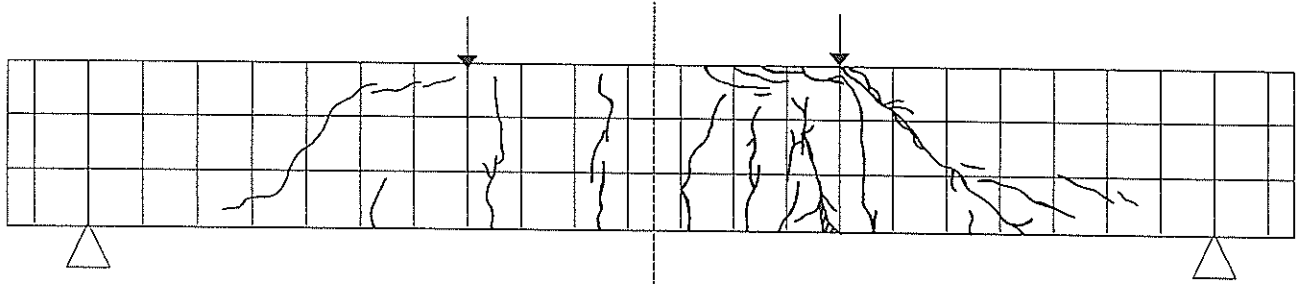
図-19 に、載荷試験終了時におけるひび割れ発生状況の一例を示す。これらは、事前載荷を行っていない曲げひび割れを有しない試験体に対する結果である。いずれの試験体においても、典型的な曲げ引張破壊型のひび割れ発生状況が確認できた。

(2) 鉄筋腐食とひび割れ幅の関係

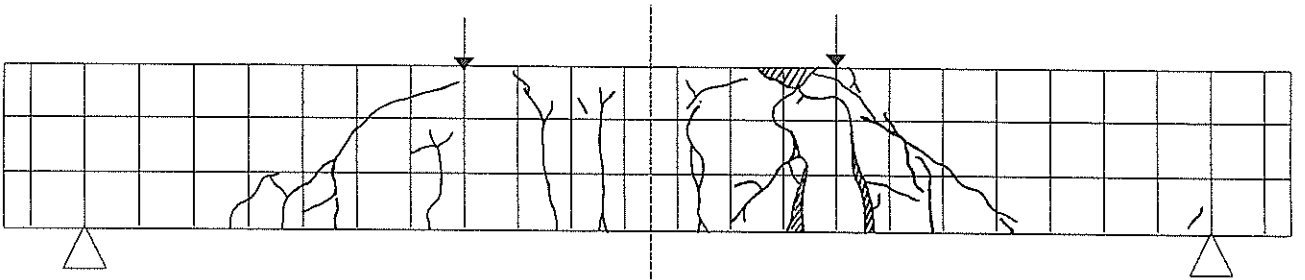
図-20 に、設計荷重(65kN)載荷時に発生した曲げひび割れの平均幅とはりの電食期間の関係を示す。これらは、3回の繰返し載荷時における平均値であり、3個の計測値の変動はほとんどなかった。これによれば、初期ひび割れの有無によらず、電食期間が4Qを超えると、ひび割れ幅が急激に増大することがわかる。すなわち、断面欠損率が5%以上までに腐食が進行す



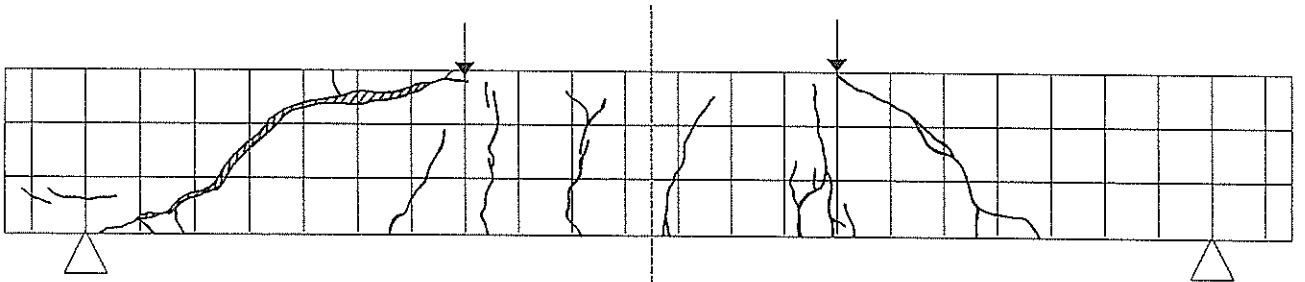
a) 電食期間 : $0.5Q$



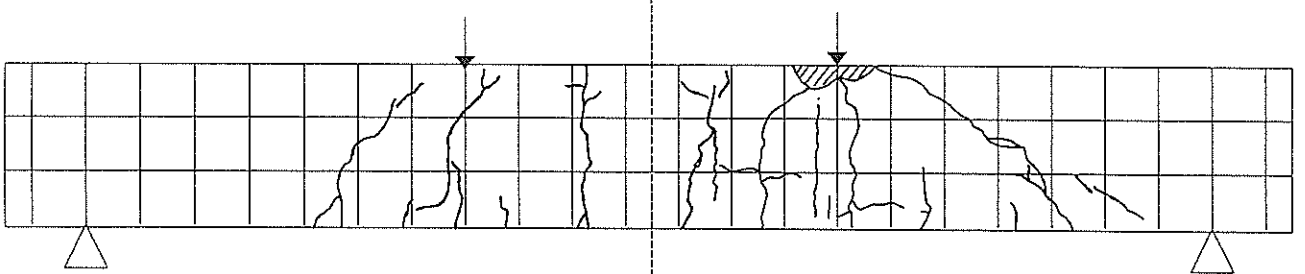
b) 電食期間 : $1Q$



c) 電食期間 : $2Q$



d) 電食期間 : $4Q$



e) 電食期間 : $8Q$

図-19 ひび割れ発生状況

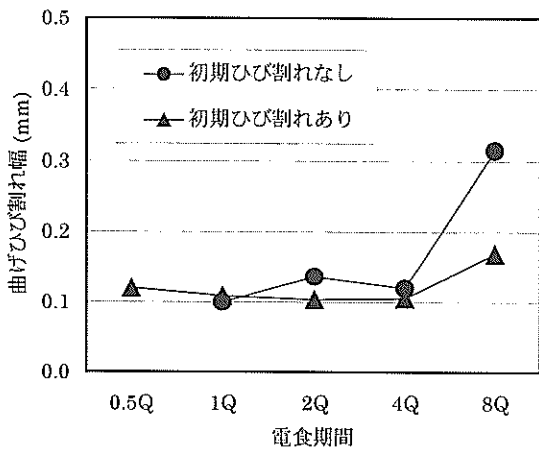


図-20 曲げひび割れ幅と電食期間の関係

ると、はり部材のひび割れ性能に変化が認められ、通常の使用荷重レベルでのひび割れ幅が大きくなるといえる。

5. 鉄筋腐食が生じたRCはりのAE発生特性

5.1 計測結果

(1) 電食期間の違いによるAE発生特性の変化

内部鉄筋が腐食したRCはり部材におけるAE発生特性、特に通常の使用荷重レベルにおけるAE発生特性について調べるため、はり試験体の曲げ試験時にAE計測を行った。図-21に、設計荷重(65kN)載荷時に検出されたAE発生数の電食期間の増加にともなう変化を示す。図中、Nos.1~3は繰返し載荷のサイクル数を示している。これらによれば、初期ひび割れの有無によらず、電食期間が長く鉄筋の腐食が進行すると、検出されるAEの個数が増加することがわかる。これは、鉄筋腐食に進行により、はり試験体内部に微小破壊の潜在的な発生源が蓄積されていたことを示唆するものである。具体的には、鉄筋腐食により鉄筋-コンクリート間の付着ひび割れが誘因されたこと、鉄筋の腐食膨張圧により周囲のコンクリートに引張応力が加わったことなどが潜在的なAEの発生源としてあげられる。

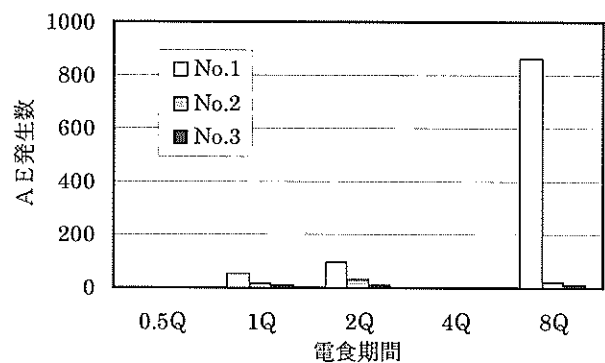
(2) 初期ひび割れがAE発生特性に及ぼす影響

初期ひび割れの存在がAE発生特性に及ぼす影響について調べてみると、同一の電食期間の試験体ごとと比較した場合、8Qの場合を除いて、初期ひび割れを有する試験体の方が低荷重レベルでのAE発生数が多くなっていることがわかる。これは、上述したように、

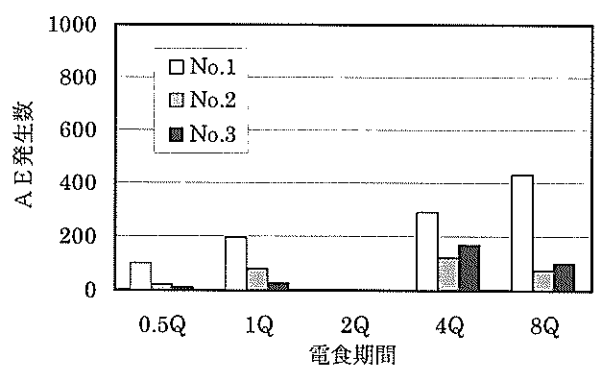
初期ひび割れの存在がはり内部における潜在的な微小破壊源を増加させたためと考えられる。

5.2 AE発生特性に基づいた部材内部の劣化評価

一般に、材料内部が安定で健全な状態に保たれていれば、同一の条件下で繰返し載荷を行った場合、2回目以降の載荷時にはAEが検出されないことが知られている。これをカイザー効果という(Kaiser, 1953)。健全なRCはりの場合、曲げひび割れのようにモードI型のひび割れに対してはカイザー効果が成り立つが、せん断ひび割れや鉄筋-コンクリート間の付着ひび割れのようなモードII型あるいはモードIII型のひび割れに対してはカイザー効果は成り立たない。したがって、RCはりの曲げ載荷中にカイザー効果が認められない場合には、曲げひび割れ以外のひび割れの発生・進展が推測され、はり部材内部の損傷が進行していることを意味している。そこで、2回目以降の載荷時におけるAE発生挙動に着目し、はり内部の安定度や損傷の大きさを推測した。図-21によれば、初期ひび割れを有しないシリーズのすべての試験体および初期ひび割れを有するシリーズの電食期間が1Q以下の試験



a) 初期ひび割れなし



b) 初期ひび割れあり

図-21 AE計測結果

体においては、繰返し载荷のサイクル数の増加とともに、AE発生数が減少していることがわかる。これは、やはり内部の状態が载荷外力に対して比較的安定であることを示している。一方、初期ひび割れを有するシリーズの電食期間が4Q以上の試験体においては、3回目の繰返し载荷時のAE発生数が2回目のそれを上回っていることがわかる。これらの試験体の場合には、著しい鉄筋腐食や初期ひび割れの存在によりやはり部材全体としての安定性が低下しているといえる。

以上より、内部鉄筋が腐食したRCはり部材の曲げ载荷時にAE計測を行い、特に低荷重レベルにおけるAE発生数に着目することにより、やはり部材全体としての劣化程度を推定できる可能性があることが示された。現状では、劣化程度を定量的に評価することは不可能であるが、部材間の相互比較や劣化程度の経時変化を評価することは可能であると考えられる。

6. 鉄筋腐食の非破壊推定

6.1 計測結果

(1) 自然電位

図-22に、各試験体において計測された自然電位を飽和硫酸銅電極基準の値に換算した値を示す。これらは、1つの試験体で得られた7個の計測値の平均値である。換算にあたっては、飽和塩化銀電極を用いた計測値から、飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の電位差120mVを差し引くこととした(伊藤, 1979)。これによれば、電食期間が2Q以下の段階では電食期間の増加とともに自然電位が卑な方向にシフトしており、鉄筋の腐食可能性が高まっていることを示している。このことは、前述の鉄筋腐食の実現象と良く対応している。しかしながら、電食期間が2Q以上になると計測値が頭打ち状態となっている。この範囲では、前述のように、鉄筋のほぼ全面にわたって腐食が発生し、断面欠損をとまなうような激しい腐食が進行していた。したがって、腐食の有無や腐食可能性を評価するための自然電位では、このような激しい腐食を評価することができなかつたためと考えられる。ちなみに、ASTMの基準から判定すると、いずれの試験体においても「90%以上の確率で腐食が発生している」こととなり、実際の腐食状況と良く対応している。

(2) 分極抵抗

図-23に、各試験体における7ヶ所の計測点で得られた分極抵抗の平均値を示す。これらは、印加した電

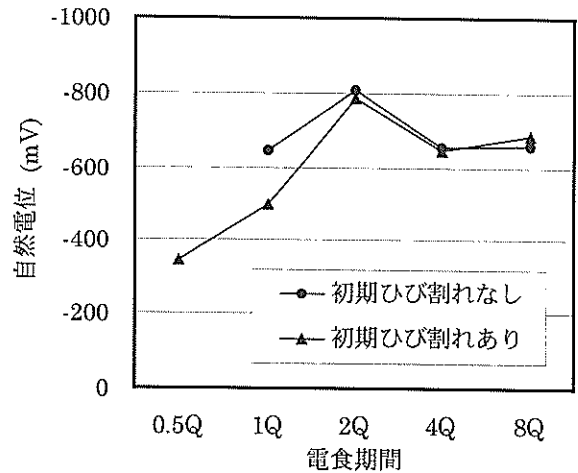


図-22 自然電位計測結果

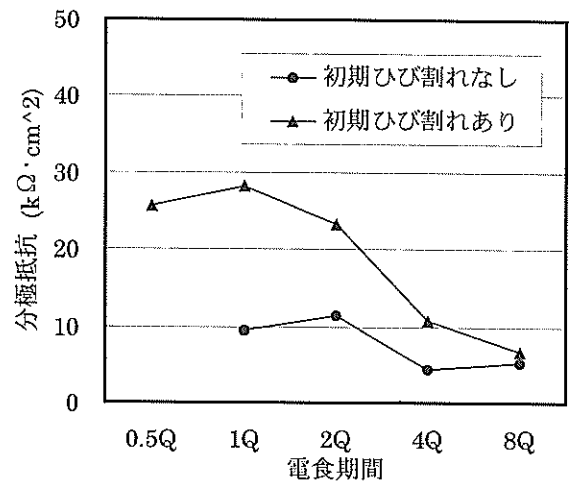


図-23 分極抵抗計測結果

流が流入した鉄筋表面積、すなわち、分極範囲を考慮に入れた値に換算したものである。これによれば、自然電位とは異なり、電食期間の進行とともに分極抵抗は減少し、鉄筋の腐食反応に対する抵抗が小さくなったことがわかる。さらに、断面欠損をとまなうような激しい腐食が見られた電食期間2Q以上の範囲においても、分極抵抗は減少傾向を示しており、このような激しい腐食についても評価可能であることを示唆している。また、初期ひび割れが存在した方が、分極抵抗が大きく腐食速度が小さかった。これは、初期ひび割れの存在により鉄筋腐食が局所的に進行したため、ある大きさを持ったセンサで分極抵抗を計測すると、局所的な腐食箇所以外の部分についても平均化されてしまうためと考えられる。

図-24に、鉄筋の断面欠損率と分極抵抗の相関関係を示す。これらは、分割した鉄筋ごとに算出された断

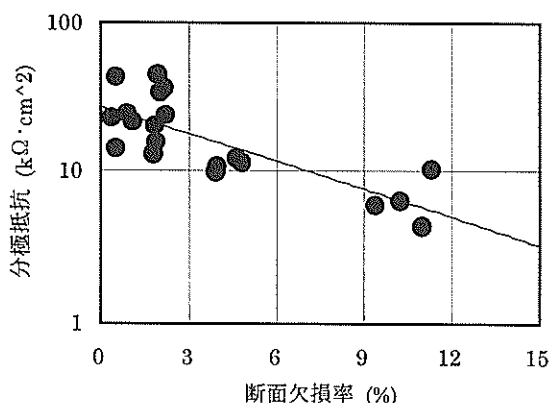


図-24 分極抵抗と断面欠損率の関係

面欠損率と直近の分極抵抗の計測値をプロットしたものである。これによれば、分極抵抗と断面欠損率の間には良好な相関関係が認められる。力学性能への影響が懸念されるような著しい断面欠損をともなう鉄筋腐食が発生している場合には、 $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下の分極抵抗が計測された。このように、分極抵抗は腐食反応の速度を直接的に評価できるため、内部鉄筋の腐食性状を定量的に取り扱う場合には極めて有効な指標となりうるものと考えられる。

6.2 電気化学的特性値に基づいた鉄筋腐食推定

6.1 での検討結果より、電食期間が 2Q 以下の試験体でみられたように、部分的に腐食が進行している場合には、自然電位のみによる鉄筋腐食推定が可能であることがわかった。しかしながら、鉄筋のほぼ全面に腐食が生じたり、断面欠損に至るような激しい腐食が進行している場合には、自然電位だけではなく分極抵抗についても計測することが、よりの確な鉄筋腐食推定には必要であるといえる。

電気化学的特性値による鉄筋腐食推定のための判定規準については、自然電位の場合、おおよそ ASTM の規格が準用できるものと考えられる。一方、分極抵抗による場合には、これまで十分な検討が行われていないため、明確な規準類が存在していないが、本実験の範囲内では、分極抵抗が $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下となった箇所の鉄筋には、断面欠損率が 5% を上回るような極めて激しい腐食が認められた。しかしながら、現在のところデータ数が少ないため、信頼性の高い鉄筋腐食推定を行えるまでには至っていない。今後、実験室レベルだけでなく、実構造物レベルにおいてもデータの蓄積をさらに進め、早急に判定規準を確立する必要がある。

7. 結論

本研究では、電食作用により内部鉄筋を腐食させた RC はり試験体を対象として、その材料劣化程度を定量的に把握した上で、その材料劣化とはり部材の力学性能の関係について調べ、さらに力学性能評価に対する各種非破壊調査手法の適用性について基礎的な検討を行った。本研究では非破壊調査手法として、AE 計測と電気化学に基づく自然電位・分極抵抗計測を取り上げ、それぞれ、はり内部の劣化状態の評価および内部鉄筋の腐食性状の評価に利用した。本研究を通じて得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 電食作用により RC はり試験体を劣化させても、コンクリートの密実性にはほとんど変化は認められなかった。また、通電によるイオンの電気泳動により、コンクリート内部には相当量の塩化物イオンが存在していた。
- (2) 電食作用により、断面欠損率にして最大で約 10% にも相当する鉄筋腐食が生じた。このような場合、異形鉄筋の節が消失している箇所もあった。また、ひとたび腐食膨張圧による縦ひび割れが発生すると、それ以降、鉄筋の腐食が急激に進行した。
- (3) 本実験の範囲内では、鉄筋腐食により破壊形式が変化することはなかった。しかしながら、鉄筋の断面欠損率が 5% を超えると、RC はり試験体の耐荷性能（鉄筋降伏荷重、終局破壊荷重）に低下傾向が認められ、低荷重レベルにおける曲げひび割れ幅が大きくなった。
- (4) 鉄筋腐食が進行したはり試験体ほど、低荷重レベル時に多くの AE が検出された。これは、鉄筋腐食にともなうはり部材内部の損傷が進行したことにより、はり部材内部に潜在的な破壊源が多く形成・蓄積されたためと考えられる。このことを利用すれば、RC 部材内部に潜在的に生じている損傷の程度を、相対的にはあるが評価できる可能性がある。
- (5) 電気化学的手法により鉄筋の腐食程度を非破壊的に推定する場合、例えば、自然電位と分極抵抗のように複数のパラメータに着目することが望ましいことが示された。特に断面欠損をともなうような激しい腐食に対しては、自然電位のみでは腐食程度を的確に評価できなかった。
- (6) 鉄筋の断面欠損率と分極抵抗の間には高い相関関係が存在していた。断面欠損している腐食箇所に

おいては、 $10k\Omega\cdot\text{cm}^2$ を下回る分極抵抗が計測された。

以上より、港湾構造物の維持管理における点検・調査において、従来より実施されている外観の目視観察では得られなかった、部材内部での劣化・変状に関する情報、ならびに鉄筋腐食性状に関する定量的な情報をAE計測や電気化学に基づく自然電位・分極抵抗計測といった非破壊調査手法を適用することで収集できた。今後は、外観の目視調査に加えて適切な非破壊調査手法を併用することにより、港湾構造物の劣化度判定を高度化していく必要がある。

8. あとがき

本研究により、自然電位や分極抵抗といった電気化学的指標に基づいてコンクリート内部の鉄筋腐食推定を精度良く行える可能性が示された。しかしながら、本手法はあくまでも鉄筋腐食の状態に関する情報を収集するためのものであり、RC部材として外力を受けたときにその腐食程度が力学挙動にどのように影響するかについては知ることはできない。このような場合には、実際に外力が加わったときの部材内部の微小破壊を追跡できるAE計測を行えばよいものとする。RC部材の力学性能を高精度で評価するためには、それぞれの目的に適った非破壊調査手法を適切に組み合わせ併用することが望ましい。

また本研究を通じて、各種非破壊調査手法の有効性が示されたものの、信頼性の高い高精度な評価を行うためには、まだ検討の余地が残されている。例えば、実構造物への適用に際しての技術的な課題の解決、さらには、実験室レベルのみならず実構造物レベルにおいても調査データを可能な限り多く収集することで、評価結果の精度・バラツキを把握することなどがあげられる。

また鉄筋腐食がRC部材の力学性能に及ぼす影響についても、今後さらに詳細な検討を続けて、最終的には鉄筋の腐食度と耐荷性能や変形性能との関係を明確にしたいと考えている。

本研究は、特別研究「港湾基盤施設の機能変化とライフエクステンションに関する研究」の一環として実施したものである。また本研究の遂行にあたり、構造部材料研究室 濱田秀則室長に的確なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表す。

(2000年8月31日受付)

参考文献

- 秋山哲治, 三上晃, 横田弘, 濱田秀則 (1999): 海洋環境下において劣化した鉄筋コンクリート梁のAE特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1231-1236.
- 伊藤伍郎 (1979): 改訂 腐食科学と防食技術, 標準金属工学講座, No.16, コロナ社.
- 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義, 大即信明 (1998): 曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのAE発生特性とその劣化評価への適用性に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.89-102.
- 運輸省港湾技術研究所 編著 (1999): 港湾構造物の維持・補修マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー, No.6, 沿岸開発技術研究センター, pp.95-97.
- 大津政康 (1988): アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版.
- 大津政康 (1993): コンクリート工学における非破壊試験法の現状, コンクリート工学, Vol.31, No.12, pp.5-14.
- 大即信明, 檜野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章 (1986): 塩害 (I), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版, pp.31-34.
- 土木学会 (1996): コンクリート標準示方書 設計編, pp.86-90.
- 土木学会 腐食防食委員会 (1997): 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, コンクリート技術シリーズ, No.26, 土木学会.
- 日本コンクリート工学協会 (1987): 硬化コンクリート中に含まれる塩化物の分析方法, コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに標準 (案).
- 濱田秀則, 福手勤, 阿部正美, 堂園昭人 (1997): 劣化した港湾コンクリート構造物の非破壊検査法としてのAE計測の適用性に関する基礎的研究, 港湾技研資料, No.872.
- 宮川豊章, 井上晋, 小林和夫, 藤井学 (1988): コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について, 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, 日本コンクリート工学協会, pp.85-90.
- 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康 (1995): AE発生挙動の確率論解析によるコンクリートの劣化度評価研究, 土木学会論文集, No.52/V-28, pp.13-23.
- 横田弘, 秋山哲治, 濱田秀則, 三上晃, 福手勤 (1999): 海洋環境 (酒田港 20年) に暴露したコ

ンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，Vol.38，No.2，pp.169-222.

横田優（1995）：鉄筋腐食診断器の開発，電力土木，No.257，pp.64-71.

Andrade, C. and Gonzales, J.A. (1978) : Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements, *Werkstoffe und Korrosion*, Vol.29, pp.515-519.

ASTM (1977) : Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *ASTM C876-77*.

CEB Working Party V/4.1 (1997) : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft 4), *BBRI-CSTC-WTCB*.

Kaiser, V.J. (1953) : Knowledge and Research on Noise Measurements during the Tensile Stressing of Metals, *Arkiv fur das Eisenhüttenwesen*, Vol.24, pp.43-44.

港湾技研資料 No.978

2000.12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (2000) by P.H.R.I.

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。