

# コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究

## CHLORIDE CORROSION OF REINFORCING STEEL IN CRACKED CONCRETE

岡田清\*・小柳洽\*\*・宮川豊章\*\*\*

By Kiyoshi OKADA, Wataru KOYANAGI and Toyoaki MIYAGAWA

## 1. まえがき

土木構造物に対する評価は、従来から種々の観点に立ってなされてきた。その中心は構造的に十分な耐荷力をもつか否かという強度的側面が特に重視されてきているが、本来構造設計には、強度、耐久性、経済性の三者が含まれている。

このため、設計対象期間は、構造物が施工され供用されている期間、すなわち設計から施工、保守、補修あるいは最終的な解体までの範囲を考えるものであり、したがって、構造物の経時的評価、すなわち耐久性に対する検討も強度面におとらず重要である。

塩分霧囲気中における鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考えるうえでは、(1) コンクリートの変質、劣化、(2) 鉄筋の腐食、の 2 点を把握することが必要である。これら 2 点は互いに独立ではなく、相互に影響しあうものである。

特に鉄筋は、腐食物の生成により体積膨張を生じ、これがひびわれの発生、かぶりコンクリートのはく離を招き、それに伴ってさらに腐食が促進される可能性を有するため、耐久性の検討の上で重視される。

鉄筋コンクリートは、適切に設計、施工された場合には、海洋環境中のような塩分雰囲気中においても幅広く用いることのできる材料であり、将来にわたって用いられると考えられる。

本論文においては、鉄筋コンクリート構造物に設計上発生するひびわれが鉄筋の腐食速度に与える影響を、モデル供試体を用いることによって明確にし、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価の電気化学的基礎体系を明らかにすることとした。

## 2. コンクリート中における鉄筋腐食

### (1) 鉄筋の腐食反応

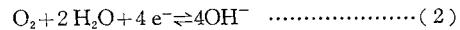
鉄鋼などの金属が腐食する場合、その反応に水が関与しているか否かによって腐食機構は異なる。湿った大気中における腐食も含めて、水が関与する腐食を湿食とよび、水が関与しない腐食を乾食とよぶ。いま、コンクリート中の鉄筋腐食を考えれば、大気中、特に海洋環境においては、コンクリートが完全に乾燥してしまうということは通常考えられない。このため、コンクリート中の鉄筋の腐食においては湿食のみを対象とすることにする。

水が関与する腐食、一般には電導性のある水溶液、すなわち電解液が関与する金属の腐食反応は、乾燥気体などの非電解質が関与する腐食反応とは根本的に異なる電気化学反応である。電気化学反応においてはアノード反応とカソード反応の2種の独立な反応が異なった領域において生じる。鉄筋腐食においては、アノード反応は鉄イオンが2個の電子を鉄筋中に残して水和イオンの形で溶け出す反応であり、この2個の電子は金属中をカソード部まで移動し、カソード反応として消化される。この2種の反応は反応系全体として互いに補償しあいながら同時に進行し、これら全体を腐食反応とよぶ。ここでアノード反応は酸化反応となり、カソード反応は還元反応となる。

いま、アノード反応として式(1)を考える。



また、カソード反応として、アルカリ溶液中における金属腐食の相手反応として重要であり、典型的な拡散律速反応である酸素還元反応を考える。



これらの反応が平衡状態となるような電位、すなわち平衡電位は熱力学的に Nernst 式によって求めることができる。しかし、実際に腐食を生じている時には電位のず

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

れ（分極）を生じており、電流が流れている。ここで、鉄筋が腐食する場合には、アノード反応とカソード反応とが一組となって同じ速度で進行しなければ腐食系のつりあいがとれない。

鉄筋表面は、一見均一にみえても局部的には不均一である。このようなミクロ的な不均一性によって前述のアノード反応とカソード反応が成立し、鉄筋の全表面にわたって局部電池が生じているものをミクロセルと呼ぶ。腐食液の電導度が十分に大きな場合、分極によってアノードとカソードとは等電位となる。ミクロセル腐食を生じている場合の自然電極電位とは、この電位を意味する（図-1）。

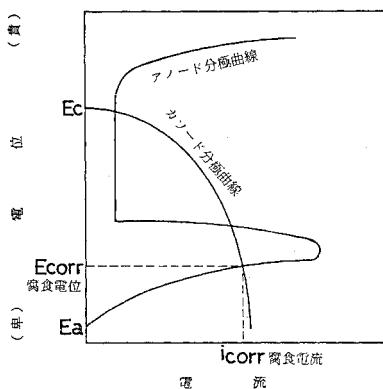


図-1 分 極 特 性

しかし、鉄筋表面のすべての部分において、アノード反応とカソード反応とが補償しあっているとは限らない。アノード反応が優先的に生じる部分（アノード部）と、カソード反応が優先的に生じる部分（カソード部）とがある距離をもって離れている場合がある。これをマクロセルとよぶ。

マクロセルにおいては、アノードとカソードとの電位差はミクロセルよりはるかに大きく、腐食反応速度も大となる。また、ミクロセルでは、電位としてアノードとカソードとの混成電位しか測定することができないのに対し、マクロセルにおいては、アノード部およびカソード部での電位をそれぞれ測定することができ、方法によっては腐食電流の測定も可能である。

このため、マクロセルにおける電位については、腐食反応の平衡状態からの分極という点からは電位そのものについての検討が必要であり、さらに腐食速度という点からは腐食起電力と考えられるアノード部電位とカソード部電位との電位差、つまりは電位のばらつきについての検討が必要であると考えられる。

## (2) マクロセル腐食機構

すでに述べたように、コンクリート中の腐食は湿食と

考えられ、アノード反応とカソード反応に分けることができる。アノード反応は鉄イオンの溶け出し、すなわち鉄筋の腐る反応そのものであり、カソード反応は酸素の還元反応であると考えられる。このようなアノード、カソード両反応は、コンクリート中の鉄筋腐食においてはある距離をもって進行することが多い<sup>1)</sup>。

Browne ら<sup>2),3)</sup>は、海洋環境の中でも特に腐食の激しい感潮域における鉄筋の腐食過程について、次のように述べている。コンクリートはマクロな不均質性をもっており、酸素あるいは塩素の濃度差を生じ、マクロセルを生じる。これは、塩素イオンが鉄筋の不働態被膜を破り、酸素あるいは塩素のコンクリート中への浸透差によって成立する濃淡セルが生じるためとしている。

Stratfull<sup>4)</sup>は、凍結防止剤によって腐食劣化した床版の電位分布を測定し、等電位線図を描くことによって床版の腐食による劣化程度を観察し、-0.35 Vvs Cu-CuSO<sub>4</sub> (硫酸銅電極基準) より卑であればコンクリート中の鉄筋は塩分の浸透によって腐食域にあり、-0.30~-0.35 Vvs Cu-CuSO<sub>4</sub> が遷移領域であり、-0.30 Vvs Cu-CuSO<sub>4</sub> よりも貴であれば不働態あるいは化学的に防食された状態にあると推定している。また、一定間隔で電位を測定し、その電位頻度曲線を、鉄筋が腐食しコンクリートのはく離はく落を生じている床版、床版のコンクリートがはく離している部分にエポキシモルタルを充てんし、面積の2%について補修を施した床版、新しい床版の三者について比較している（図-2）<sup>4)</sup>。この図から、劣化の激しい床版であればあるほど電位が卑であり、しかも、最大電位と最小電位の差、電位差が大きなことがわかる。

また、片脇ら<sup>5)</sup>は中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート中に丸鋼（SR 24）を埋め込み、3年間海洋環境中に暴露し、電位を測定し、表-1に示す結果を得ている。この結果も Stratfull の報告と同様の傾向がある。

これらの報告はすべて、コンクリート中の鉄筋がマクロセル腐食を生じている可能性を示している。ここで、

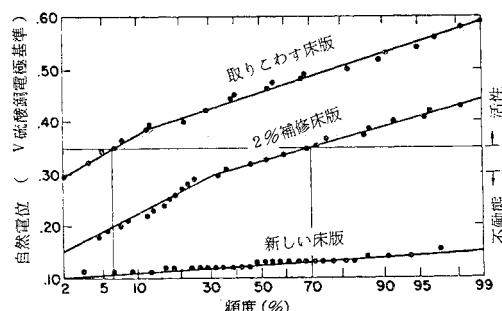
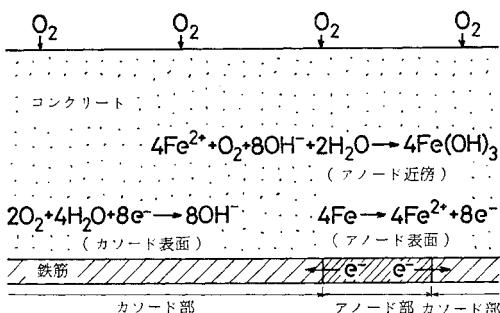
図-2 種々の床版における自然電位分布<sup>4)</sup>

表-1 大気中-海中暴露供試体における自然電位分布の分類

	(a)	(b)	(c)	(d)
自然電位, V	0	-0.3	-0.3	-0.3
腐食性状	非腐食	自然電位低下部は局部腐食	自然電位低下部に腐食	全面的な腐食
腐食程度		激しい	電位勾配によって異なる	比較的軽度
例	十分なかぶり厚きの鉄筋	ひびわれ部分	海面部	海中部

図-3 コンクリート中の鉄筋のマクロセル腐食<sup>1)</sup>

マクロセル腐食の例を 図-3<sup>1)</sup> に示す。

このような、腐食に及ぼす空気、塩分などの因子を、絶対値としてのみではなく、濃度差などのばらつきとしてとらえる考え方とは、土壤腐食などにおいて従来からよく用いられてきた手法であり<sup>6)</sup>、コンクリートにおいてもこの手法は注目されつつある<sup>7)</sup>。

Lewis ら<sup>8)</sup>は、コンクリート中の鉄筋腐食においてマクロセルが成立する要因として、コンクリートの品質、ち密さ、環境などをあげ、セルのモデルとして五種検討した結果、生じる可能性が高くかつ腐食電流の大きな下記のモデルを提案している。

鉄筋透水性コンクリート (アノード)	低 pH 値、高 Cl <sup>-</sup> 濃度
非透水性コンクリート 高 pH 值、低 Cl <sup>-</sup> 濃度 (カソード)	

ここで、Lewis らは、コンクリートそのもののばらつきを重視しているが、Finley はさらに、このセルの加速要因として、コンクリート構造物の環境差、たとえば塩分の濃縮される感潮域と空中、海中などの多相に連続して存在することなどの環境要因を重視している。

なお、このようなマクロセルのアノードとカソードは、腐食期間を通じて一定場所に存在するとは限らない。水分、塩分量、腐食生成物の堆積などにより電位が変化し、アノード部カソード部が変化する場合が多い。腐食の初期段階においては鉄筋のごく一部がアノードとなり、他の部分はカソードとなるが、次第に他の部分もアノードとなり、最終的には大部分の鉄筋が腐食するに至る<sup>10)</sup>。さらに、腐食劣化を生じた部分のみを補修する

場合、アノード部であった補修部が逆にカソードとなり、補修以前健全であった部分の鉄筋が腐食する、アノード部とカソード部との交代現象も知られている<sup>10), 11)</sup>。

### (3) ひびわれと鉄筋腐食

ひびわれは、空気、塩分等を直接鉄筋近傍まで近づけるのみならず、著しい不均質をもたらしマクロセル成立の原因ともなり得る。ひびわれ部は、Lewis らの提案したモデルのアノード側コンクリートのもっとも極端な場合の一つとも考えられる。

このようなひびわれが鉄筋腐食に与える悪影響を考慮して、対象構造物の環境によって、構造物に許容されるひびわれ幅が規定されている場合が多い(表-2)。

同じ表面ひびわれ幅であっても、かぶりコンクリートが厚いほど鉄筋位置でのひびわれ幅、つまり鉄筋の露出長さは小さなものとなり、また、コンクリートを通しての酸素の供給も少くなり、防食機能は増大すると考えられる。

Abeles ら<sup>12)</sup>は、持続曲げ荷重の載荷によりひびわれを生じたプレストレストコンクリートはり、および鉄筋コンクリートはりについての工業地帯の汚染された空気による腐食実験例を報告している。これによれば、微小ひびわれの入ったプレストレストコンクリートはりでは腐食はまったくみられず、ひびわれ幅 0.1 mm 程度の鉄筋コンクリートはりの場合かぶり厚 2.54 cm では発錆がまったくみられず 1.27 cm ではわずかにみられたとしている。

さらに Attimay<sup>13)</sup> らは、水セメント比 0.49 の鉄筋

表-2 限界ひびわれ幅

規格	限界ひびわれ幅 (mm)	適用
ACI 318	0.40	屋内
	0.33	屋外
ACI 224	0.40	乾燥した大気中、あるいは保護層のある部材
	0.30	湿った空気中、土中にある部材
BS CP 110	0.175	凍結防止用の薬品に接する部材
	0.15	海水、海水飛沫により乾湿の繰り返しがかかる部材
CEB	0.10	水密構造部材
	0.30	一般
SNiP II-B-1-62	0.30	普通通
	0.20	有害
	0.10	有害、および遮水
	0.30	非腐食性
	0.20	弱、中腐食性
	0.10	強腐食性

コンクリートはりに 3% NaCl 水溶液を吹き付け、その結果、かぶり厚さと鉄筋の直径との比が 2.5~3.0 以上であれば防食に十分であるとしている。また、微小ひびわれや鉄筋応力などはあまり関係なかったとしている。この報告例からは、錆しろとしてある腐食減量を想定し単純に鉄筋直径を大きくするという腐食対応策は、かえって危険をはらむ可能性があることがわかる。

また、Duffaut ら<sup>14)</sup>は、1958~1971 年にかけてランス河口でコンクリート中の棒鋼の腐食を観察し、かぶり厚さが 3 cm を越える場合には腐食の拡大はほとんど生じないが、ひびわれは鉄筋の腐食の根本的な原因であり、0.5~0.15 mm の幅では致命的であったとしている。

しかし、これらの例には、鉄筋のマクロセル腐食という観点からのアプローチはみられない。

Stratfull<sup>15)</sup>は、SanMateo-Hayward 橋の調査を行い鉄筋の腐食とそれまでにコンクリートに生じていたひびわれとの相関が小さいと報告している。これは善<sup>15)</sup>が行った、モルタル中鋼材と海水中鋼材で形成されるマクロセル電流の測定値が小さかったこととも一致している。

しかし、Stratfullにおいては、ひびわれが最初にどのような形でどの程度発生していたかが明白ではなく、また善においては、モルタルという単位セメント量の大きな配合であり、かつ乾湿繰返しあるいは腐食生成物を洗い流す潮流などがない実験である。

これに対し片脇ら<sup>5)</sup>は、ひびわれ部分において鉄筋の電位が卑となり激しい腐食を生じていることを報告しており、さらに Spellman<sup>16)</sup>らは、局部的に露出している部分の鉄筋の電位が非常に低いことを示している。これらはマクロセル腐食を生じている可能性が高い。

### 3. 研究目的

すでに述べたように、ひびわれを生じている鉄筋コンクリート構造物中では鉄筋にマクロセル腐食を生じている可能性が大きい。

そこで、マクロセルによる腐食速度を測定し、ミクロセルによる腐食速度と比較し、その存在を確認する必要がある。

マクロセル腐食による、カソードからアノードへの腐食電流は、鉄筋の腐食減量と対応している。

ここから、電位分布、腐食電流測定などの電気化学的測定法の有用性を確認するとともに、ひびわれの腐食機構、腐食速度に与える影響を明確にすることを本研究の目的とした。

### 4. 実験概要

#### (1) 実験計画

すでに 2. で述べたように、コンクリート中の鉄筋の腐食においては、電位は腐食反応が生じているか否かのめやすとなり、電位のばらつきがマクロセルによる腐食起電力のめやすとなる。さらに腐食速度は電流密度、腐食量はクーロン量によって示すことができる。

以上のような性質を利用して、腐食速度等の測定困難な化学量を、より簡単な電気量に直接変換して高感度での測定を行うことが電気化学的測定法である。しかし、測定の結果得られる情報が電位と電流に限られているため、想定している反応が実際に生じているかどうかを、目視観察、鉄筋の腐食減量などの測定を行うことによって確認しなければならない。したがって、実験においては、すべて電気化学的測定の後コンクリートをはり取り、鉄筋の目視観察を行った。

今回報告する実験は 3 シリーズに分けることができる。

シリーズ 1 は、ひびわれの存在が電位および電位分布に与える影響を明らかにすることを目的とする。シリーズ 2 は、ひびわれモデル供試体を用いることによって、電位、電位分布とマクロセル腐食電流との関係を明らかにする。さらにシリーズ 3 では、モデルひびわれ部鉄筋をアノードそれ以外のコンクリート中にある鉄筋をカソードと考え、アノード・カソード面積比を腐食要因として扱うことにより、ひびわれ幅の腐食速度に与える意味を明らかにするものである。以下、シリーズ 1, 2, 3 について順に述べる。

#### (2) ひびわれが電位に与える影響に関する実験（シリーズ 1）

##### a) 計画

コンクリートにひびわれが発生した場合には、ひびわれ幅に応じて、水、空気、塩分などが侵入し鉄筋に作用して腐食させるに至る。ここではひびわれ部をアノードとするマクロセルの成立が推定でき、マクロセルの強さはひびわれ幅に影響されるものと考えられる。しかし、ひびわれ部鉄筋が腐食すれば、当然腐食生成物が沈着することが考えられ、この腐食生成物が水流、流砂、振動、他物質の物理的化学的侵食によって取り除かれない限り、腐食速度は急激に減少し、アノードは他の部位に移動するか、あるいはミクロセル腐食へと変化していくことが考えられる。

以上の観点から、次の計画を立案した。まず、鉄筋コ

ンクリートはりに載荷を行いつつ、所定ひびわれ幅となった時点でひびわれから食塩水 ( $\text{NaCl} 3.13\%$  水溶液、海水相当濃度) を注入し、同時に電位を測定する。所定ひびわれ幅における電位測定終了後、載荷をさらに荷重が最大となるまで続けた。載荷の終了したはりを食塩水 ( $\text{NaCl} 3.13\%$ 、海水相当濃度) に浸漬したのち、電位を経時的に測定し、浸漬試験後はつり出した鉄筋の腐食状況と電位分布との関係を得ることにした。

要因としては、ひびわれ幅、練り混ぜ水中的塩分、鉄筋表面状態の三者を選んだ。ひびわれ幅は表-2を参考として、 $0.1\text{ mm}$ ,  $0.3\text{ mm}$ ,  $0.5\text{ mm}$  および  $1.0\text{ mm}$  の4種類とした。練り混ぜ水としては水道水と食塩水 ( $\text{NaCl} 3.13\%$ 、海水相当濃度) の2種類とした。また、鉄筋表面状態としては、黒皮の影響をみるために、黒皮付の異形丸鋼と、塩酸( $10\text{ N}$ )に2時間浸漬した後振動研磨とバフ研磨を行い黒皮を取り除いた異形丸鋼の2種類を選んだ。

#### b) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材として鞍馬産碎石(比重=2.61, 吸水量=0.57%, M.S.=13mm), 細骨材として野州川産川砂(比重2.58, 吸水量=1.28%, F.M.=2.97)を用いた。さらに練り混ぜ水、浸漬液を海水相当濃度とするために、食塩 ( $\text{NaCl} 99\%$ 以上)を用いた。また、異形丸鋼としては、D 10, SD 35を用いた。

#### c) コンクリート配合

コンクリート配合は、土木学会コンクリート標準示方書(昭和50年度版)の海洋コンクリートの項を参考として、水セメント比を65%とし、単位セメント量を $300\text{ kg/m}^3$ 、目標スランプを $10 \pm 2\text{ cm}$ とした。示方配合を表-3に示す。

#### d) 供試体

供試体は、 $10 \times 15 \times 100\text{ cm}$  角柱とし、木製スペーサーによって異形鉄筋をかぶり $1.5\text{ cm}$ に保って配置した(図-4)。供試体の種類と略称を表-4に示す。コンクリート打設後1日で脱型、6~7週間湿布養生を行った後実験に供した。材令・28日におけるコンクリートの諸強度を表-5に示す。

#### e) 試験方法

供試体の載荷は、アムスラー型耐圧試験機を用いて2点載荷を行い、漸増載荷とした(図-4)。電位計測には内部抵抗の大きな( $10^{11}\Omega$ )電位差計を用い、鉄筋と、

表-3 コンクリート示方配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント化 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
10±2	2	65	40	195	300	718	1097

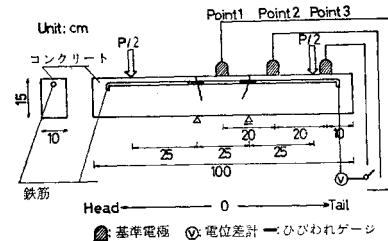


図-4 供試体および測定概要(シリーズ1)

表-4 供試体一覧表(シリーズ1)

略称	本数	練り混ぜ水	鉄筋表面状態
黒- $\frac{1}{2}$	2	水道水	黒皮付
塩黒- $\frac{1}{2}$	2	食塩水	黒皮付
研- $\frac{1}{2}$	2	水道水	研磨

#### コンクリート表面の

測定位置において、

水溶液を含ませたス

ポンジでコンクリー

トとの接触を保った

基準電極(塩化銀電

極)との電位差を測定した。

表-5 コンクリート諸強度

塩分	圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	引張強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	曲げ強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )
無	314	28.3	44.2
有	292	27.8	47.3

供試体3本平均

供試体は載荷前に $5\text{ cm}$  間隔で電位を測定した後載荷試験に供した。載荷中の測定の概要を図-4に示す。測定点としては、予備載荷試験からひびわれ発生位置が支点上部付近であることが明らかであったため、ひびわれ近傍としてPoint 1, 2、ひびわれが生じない部位としてPoint 3をそれぞれ選んだ。さらに載荷試験終了30分後再び $5\text{ cm}$  間隔で電位を測定した後、かぶり $1.5\text{ cm}$ を上面として食塩水中(温度 $25^\circ\text{C}$ 一定)に鉄筋位置まで浸漬した。浸漬後は、電位がほぼ一定となった43日後まで1~7日間隔で電位を測定した。その後コンクリートをはり取り腐食状態を観察した。腐食状態の評価は次の3レベルに分類することにより行った。

レベル H; 赤さびの盛りあがったもの

M; HとLとの中間

L; わざかに腐食が認められるもの

#### f) 実験結果および考察

載荷試験時においてはひびわれ幅 $0.1\text{ mm}$ 未満では電位の変化はほとんどなく、ひびわれ幅 $0.1\text{ mm}$ 以上で、すべてPoint 1の電位がもっとも卑であり、Point 3の電位がもっとも貴であり、Point 2はその間に位置していた。ここから、Point 1近傍がアノード、Point 3近傍がカソードであることが推定できる。

ここで、各ひびわれ幅におけるもっとも卑な電位

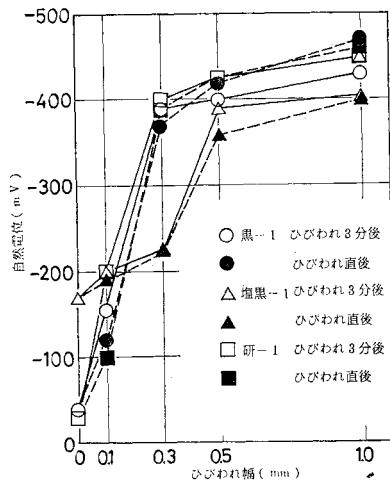


図-5 載荷中における最大電位

の例を、ひびわれ幅との関係で 図-5 に示す。

これより、ひびわれ幅が増大するに従って電位が卑に移行する様子が知れる。しかし、練り混ぜ水に水道水を用いた黒および研においては 0.3 mm まで急激に電位が移行するのに対して、練り混ぜ水に食塩水を用いた塩黒では、0.3 mm までこの移行が比較的 ゆるやかである。これは、塩黒においてはコンクリート中にすでに塩分が入っているため、初期の段階での電位がすでに黒および研と比較して卑であるためと考えられる。0.5 mm 以上は三者ともほぼ同様の傾向を示している。

電位は Point 1, 2, 3 ともに卑に移行した。この原因としては、ひびわれ部より注入した食塩水の浸透、電極とコンクリートを接触させている水溶液の浸透、およびコンクリート内部構造の変化が考えられる。そこで、もっとも卑な電位 (Point 1) ともっとも貴な電位 (Point 3) との差 (以後電位差とよぶ) をひびわれ幅との関係で 図-6~8 に示す。

これより、ひびわれ幅が増大するに従って電位差が増大することがわかる。塩黒がひびわれ幅 0.3 mm まで比較的 ゆるやかであるのは、前記と同様の原因と考えられる。また、ひびわれ幅 1.0 mm における電位差は、黒がもっとも大きく、研、塩黒と次第に小さくなる。塩黒が小さいのは、カソード部においてもコンクリート中に塩分が含まれているため、アノード部のみに塩分が多量に侵入すると考えられる黒と比較して小さくなると説明できる。また研では、黒と比較して初期段階の増大が大きく、ひびわれ幅 1 mm においては電位差はわずかに小さい。これは、研が表面研磨してあるために表面がち密になり、また、腐食生成物沈着の効果が表われやすいためと考えられる。黒のばらつきが大きいのは、黒皮の不均質に起因するものと考えられ、塩黒のばらつきが黒に比して小さいのは、塩分の存在によって黒皮の破れ

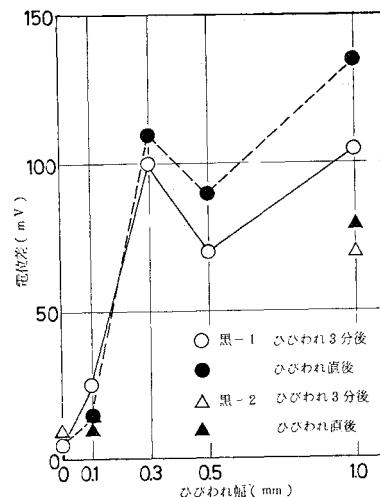


図-6 載荷中における電位差—黒皮鉄筋—

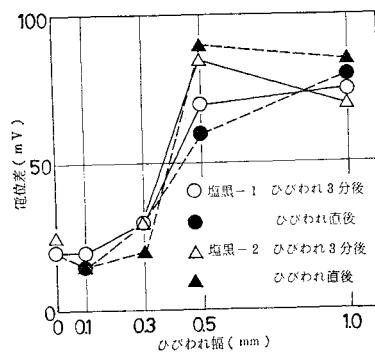


図-7 載荷中における電位差—塩分存在下における黒皮鉄筋—

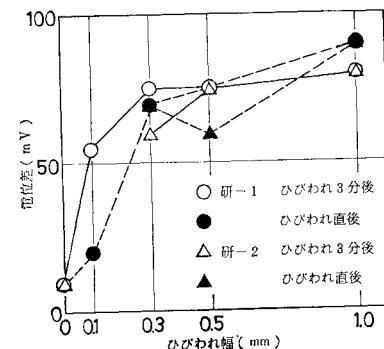


図-8 載荷中における電位差—研磨鉄筋—

目などに腐食生成物が生じ沈着し、不均質さが小さくなつたためと考えられる。

これらの電位、電位差は、あくまで過渡的な値であり最終的に落ちつく定常的な値ではない。しかし、電位は腐食段階によって変化して行くものであり、コンクリートにひびわれが生じ、鉄筋が腐食し始める時の電位とし

て、これらの値は意味をもつものと考えられる。

ここで、載荷前後、浸漬 1 日および電位がほぼ一定となった 43 日の電位分布の様子の代表的例を、ひびわれ箇所、鉄筋の腐食程度とともに、図-9~11 に示す。

図より、載荷後 30 分の電位分布がもっとも電位のばらつきが大きく、電位差が大であることがわかる。食塩水への浸漬後は全体に電位が卑に移行し、電位のばらつきは小さくなつた。

載荷後の電位分布をみると明らかなように、ひびわれ箇所は電位が卑となり上方に凸となる箇所に相当し、腐食を生じている。これから、ひびわれ部近傍がアノードとなり、それ以外の部分がカソードとなるマクロセルの形成が推定できる。

食塩水への浸漬後の、電位の一様化の原因としては次のような理由を考えることができる。腐食の進行に伴いアノードに腐食生成物が沈着し、アノード反応が抑制される反面、カソードに塩分が浸透し不動態被膜を破り、カソードがアノード化され、また、同時にカソード反応に必要な酸素が消費されることによって、全体としてマクロセル起電力が小さくなり、マクロセル腐食挙動が強くなつた。

また、浸漬 43 日後における電位はすべてのはりのすべての測定点で  $-300 \text{ mV}$  vs  $\text{Ag}\cdot\text{AgCl}$  (塩化銀電極基準) より卑になっており、これは、Stratfull の  $-0.35 \text{ V}$  vs  $\text{Cu}\cdot\text{CuSO}_4 = -0.24 \text{ V}$  vs  $\text{Ag}\cdot\text{AgCl}$  を参照すれば、すべて腐食領域に入っている。これは、コンクリートのかぶり厚が薄く水セメント比が高いコンクリートを用いたため、短期間で腐食領域に入ったものと考えられる。

### (3) 電位とマクロセル電流との関係に関する実験 (シリーズ 2)

#### a) 計画

シリーズ 1においては、電位および電位差とひびわれの関係について述べ、その結果、ひびわれの存在が局部的な電位の低下をもたらし、マクロセル形成の可能性が生じることが明らかとなつた。

しかし、電位および電位差は鉄筋が腐食する可能性および腐食起電力を表わすにすぎない。腐食問題を検討する場合には、さらに腐食速度が問題となり、現実にマクロセルが形成され、どの程度のマクロセル電流が流れているかどうかが明らかにされねばならない。

マクロセル腐食の場合、アノードとカソードとがマクロに離れているため、アノード部とカソード部を実験的に分離することが可能である。そこで、ひびわれモデル供試体を用い電位を測定すると同時に、コンクリート中に完全に埋めこまれた鉄筋からひびわれ部鉄筋に流入す

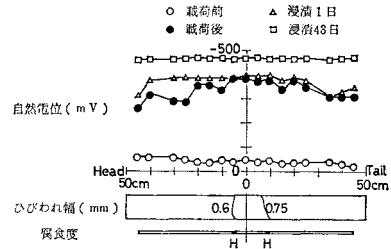


図-9 電位分布およびひびわれ幅と腐食度の関係(黒-1)

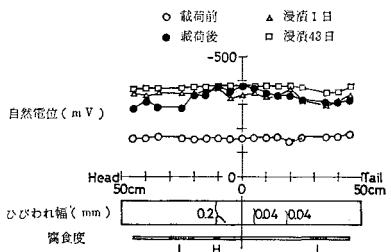


図-10 電位分布およびひびわれ幅と腐食度の関係(塗黒-1)

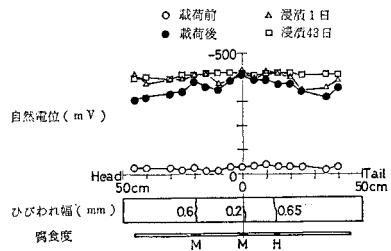


図-11 電位分布およびひびわれ幅と腐食度の関係(研-1)

るマクロセル電流を測定し、電位、電位分布とマクロセル電流=マクロセル腐食速度との関係を明らかにすることとした。

要因としては、モデルひびわれの幅、練り混ぜ水中の塩分、鉄筋の表面状態の三者を選んだ。

コンクリートに生じるひびわれは、曲げひびわれ、せん断ひびわれ、乾燥収縮ひびわれなど多種多様である。しかも、表面ひびわれ幅と鉄筋位置におけるひびわれ幅とは異なっていると考えられ、物理的にも化学的にも多種多様であると考えられる。そこで、ひびわれとしては均一性を考慮して人工的なモデルひびわれとすることにした。

モデルひびわれ幅としては、実験的に容易にその幅を確保することができたモデルひびわれ内鉄筋表面のペーストを簡単に除くことのできる最小幅が 5 mm 程度であるため、最小モデルひびわれ幅を 5 mm とし、ひびわれ幅の影響をみるために 10 mm, 25 mm と変化させ、さらに比較用としてひびわれを入れない 0 mm のもの

を選び計4種とした。現実のひびわれ幅と比較してこれらは非常に大きなものではあるが、水分、空気、塩分の侵入経路としてのひびわれのモデルとしては十分意味を有するものであると考えられる。練りませ水中の塩分、および鉄筋の表面状態としてはシリーズ1と同様とした。

#### b) 使用材料およびコンクリート配合

シリーズ1と同様である。

#### c) 供試体

供試体は、 $10 \times 15 \times 100\text{ cm}$  角柱とし、木製スペーサーによって異形鉄筋をかぶり  $1.5\text{ cm}$  に保って配置した(図-12)。供試体の種類および略称を表-6に示す。コンクリート打設後1日で脱型、6~7週間温湿布養生を行った後、マクロセルを形成させ実験に供した。

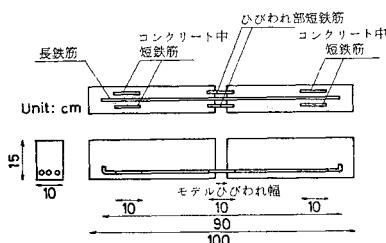


図-12 供試体（シリーズ2）

表-6 供試体一覧表（シリーズ2）

供試体略称	本数	モデルひびわれ幅 (mm)	練混ぜ水	鉄筋表面状態
黒-0-1 <sub>2</sub>	2	0	水道水	黒皮
黒-5-1 <sub>2</sub>	2	5	水道水	黒皮
黒-10-1 <sub>2</sub>	2	10	水道水	黒皮
黒-25-1 <sub>2</sub>	2	25	水道水	黒皮
塩黒-0-1 <sub>2</sub>	2	0	食塩水	黒皮
塩黒-25-1 <sub>2</sub>	2	25	食塩水	黒皮
研-25-1 <sub>2</sub>	2	25	水道水	研摩

#### d) 試験方法

供試体はすべて食塩水中(温度 $25^{\circ}\text{C}$ 一定)にかぶり  $1.5\text{ cm}$  を上面として、鉄筋位置まで浸漬した。

マクロセル電流は、図-13の長鉄筋の両側に配置した短鉄筋の片側を用いて、コンクリート中短鉄筋2本からひびわれ部鉄筋に流入する電流を内部抵抗の小さな( $5 \times 10^{-2}\Omega$ )電流計を用いて測定した。電位としては、長鉄筋の電位および、電流を測定していない3本の短鉄筋の電位をシリーズ1と同様に測定した(図-13)。

供試体浸漬後24時間は、コンクリート内部の水分の

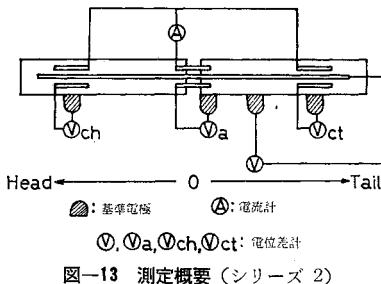


図-13 測定概要（シリーズ2）

変化が大きいと考え、浸漬24時間後に短鉄筋を短絡させ電流の測定を開始した。電流は、短絡直後、およびその後5分、30分、60分、3時間、1日、7日、21日、42日に測定し、さらに42日において食塩水を取り除いた直後、除水後5日の計11回測定を行った。

電位は、浸漬直前、浸漬後1日、27時間、2日、8日、22日、43日および除水後5日の計8回測定を行った。

電位および電流測定の終わった供試体は、コンクリートをはつり取り腐食状態を観察したが、モデルひびわれ部以外ではほとんど腐食は認められず、スペーサー部でわずかに腐食の痕跡がみられたのみであった。これは、スペーサーと鉄筋との間に空隙が生じたためと考えられる。

#### e) 実験結果および考察

電位の経時変化の例として黒-25-1を図-14に示す。

長鉄筋の電位は、短鉄筋の電位と異なりほぼ $V_a$ と $V_c$ との間の値をとっている。鉄筋がひびわれ部にある場合あるいはコンクリート中にある場合には、それぞれ電位として $V_a$ あるいは $V_c$ を示すはずであるが、ひびわれ部とコンクリート中に連続して鉄筋がある場合には、単一環境中にある場合とは腐食機構が変化して電流が生ずることにより電位が変わるために、 $V_a$ 、 $V_c$ とは異

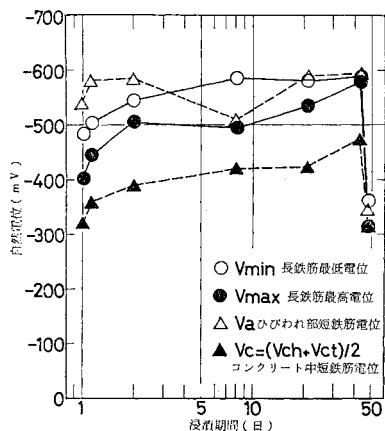


図-14 電位の経時変化（黒-25-1）

なった電位を示すものと考えられる。以後、長鉄筋の電位について述べる。

電位はすべて浸漬期間とともに卑に移行し、もっとも貴な電位と卑な電位との電位差は、ばらつきはあるが浸漬期間とともに小さくなる傾向がみられた。しかし、モデルひびわれがある場合とない場合とでは電位にはっきりと差があらわれており、ひびわれの存在により腐食機構の変化が生じていることがわかる。

もっとも卑な電位はモデルひびわれ近傍に存在することが多い、もっとも貴な電位はそれ以外の部分に存在することが多い。ここで、モデルひびわれ部近傍（区間長10 cm）でもっとも卑な電位とそれ以外の部分においてもっとも貴な電位との電位差は、いま測定している電流の起電力に近い値と考えられる。この電位差を浸漬期間との関係で、モデルひびわれ幅の影響をみると図-15に、塩分および黒皮の影響をみると図-16に示す。

モデルひびわれ幅の影響はあまり明確ではない。また、全体にばらつきはあるものの電位差は浸漬期間とともに減少する傾向があるが、練り混ぜ水に食塩水を用いた場合は異なる傾向をみせ初期値は小さく浸漬期間と

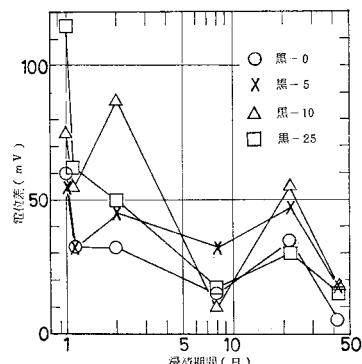


図-15 電位差の経時変化—モデルひびわれ幅の影響—

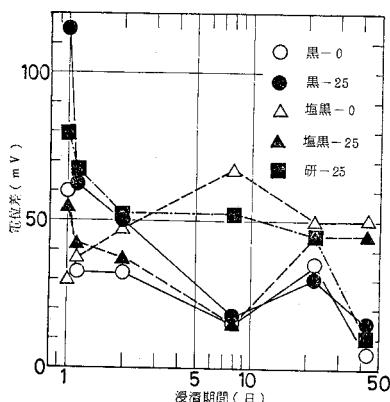


図-16 電位差の経時変化—鉄筋表面および塩分の影響—

ともに50 mV付近に収束する傾向がある。また、黒皮の防錆効果は初期においてのみ表わされている。

すでに述べたように、この電位差は測定された電流の起電力になっていると考えられる。そこで、電位差と電流の経時変化の例を同時に、おのおの2本のはりの平均値で図-17～21に示す。

電位差と電流とは、両者ともに浸漬期間とともに減少する傾向を示すものが多い。これは、電位差がマクロセル起電力であり、それに対応したマクロセル電流が流れると考えれば理解することができる。また、モデルひびわれがない場合、電位差に比して電流が極度に小さいのは、モデルひびわれが存在しないためアノード反応が抑制されたためであろうと考えられる。

さらに電位差と電流が完全には比例していないのは、ひびわれが存在しない場合のような物理的、化学的な要因に加えて、腐食反応における電位—電流関係が本来線型ではない<sup>17)</sup>ことにも起因していると考えられる。

ここで、電流をモデルひびわれ内の鉄筋の表面積（ただし異型鉄筋の周長を30 mmとした）で除して電流密度を求め、浸漬期間との関係でモデルひびわれ幅の影響を明確にするために図-22に、塩分と黒皮の影響を明確にするために図-23にそれぞれ示す。

これらにより、モデルひびわれ幅が小さなほど電流密度が大きくなることがわかる。また、黒皮による電流の抑制は初期においてのみ有効であり、研磨鉄筋と黒皮鉄

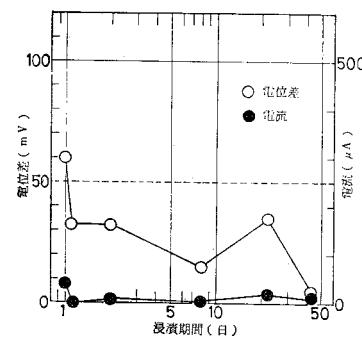


図-17 電位差およびマクロセル電流の経時変化（黒-0）

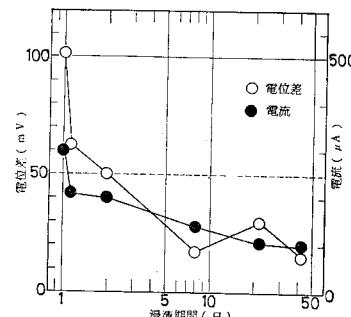


図-18 電位差およびマクロセル電流の経時変化（黒-25）

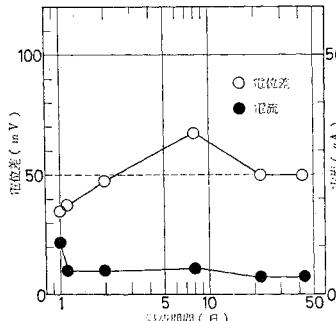


図-19 電位差およびマクロセル電流の経時変化（塩黒-0）

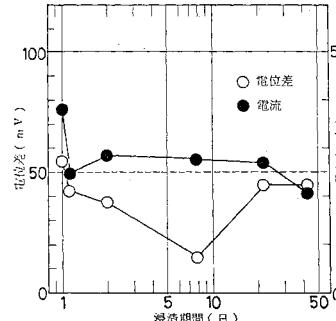


図-20 電位差およびマクロセル電流の経時変化（塩黒-25）

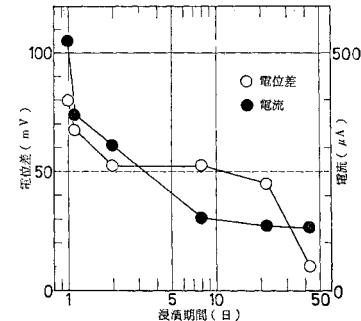


図-21 電位差およびマクロセル電流の経時変化（研-25）

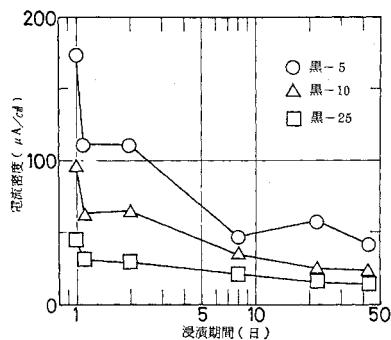


図-22 電流密度の経時変化—モデルひびわれ幅の影響

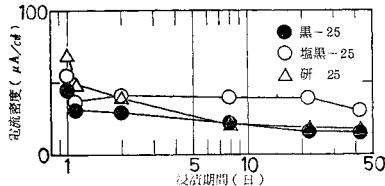


図-23 電流密度の経時変化—塩分、鉄筋表面の影響

筋とは浸漬期間について次第に同程度の電流密度を示すようになる。これは、初期においては黒皮がないためアノード反応が盛んであった研摩鉄筋が、腐生成物の沈着に伴って、沈着した腐生成物が黒皮と同様の働きをし、また黒皮鉄筋も、黒皮が腐食されて腐生成物が沈着し、両者の表面状態が同一になるためと考えられる。さらに、練り混ぜ水として食塩水を用いた場合は、長期においては電位差そのものが水道水に比して大きく、また塩分によってコンクリート中の電導率が高まったため電流密度が大きいものと考えられる。

ここで、電流密度に与えるモデルひびわれ幅の影響を明らかにするため、短絡直後、1日後、43日後における電流密度をモデルひびわれ幅との関係で図-24に示す。

ここでは明らかにモデルひびわれ幅の増大に伴う電流密度の減少を示している。この電流密度の減少は、次のように説明することができる：すなわち、モデルひびわ

れ幅が大きな場合には腐食するアノード面積は大きくなり、モデルひびわれ幅が小さな場合にはアノード面積は小さくなると考えられる。これに対してカソード面積は、前者の場合小さく後者の場合大きい。アノード反応とカソード反応は互いに補償しあって進行するため、アノード面積に比してカソード面積の

大きな方が単位面積あたりのアノード反応は大きくなり、電流密度は大きくなる。このため、モデルひびわれ幅の小さな方が電流密度が大きくなるものと考えられる。

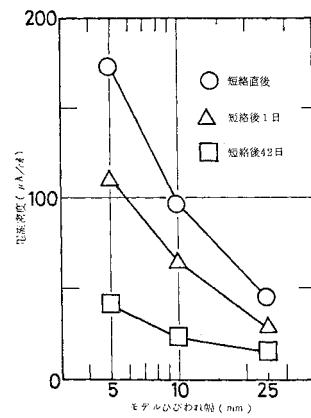


図-24 モデルひびわれ幅が電流密度に与える影響

#### (4) ひびわれがマクロセル電流に与える影響に関する実験（シリーズ3）

##### a) 計画

シリーズ2により、電位差と電流が密接に関係し、ひびわれ幅はアノード面積とカソード面積との比としてとらえうることが明らかとなった。

塩分をコンクリート中に含まない場合、浸漬期間に伴って電位差および電流は小さなものとなる。ここで腐生成物を取り除くような水流、流砂、振動、化学物質などの物理的化学的作用が存在し、カソード反応によって消費された酸素を補給できるような作用が存在すれば、電流の変化は異なったものとなるであろう。

また、シリーズ2においては、電位は長鉄筋について測定し、電流は短鉄筋間に流れる電流を測定しており、厳密にはこの両者は同一セルにおける値ではない。そこで、短鉄筋の長さを長くし、長鉄筋と同時に短鉄筋の電

位をも測定し、その両電位の関係を得ることにより、短鉄筋間に流れる電流が長鉄筋の中を流れている電流の推定値として意味をもつことを確認する必要がある。

さらに、電流によるクーロン量と腐食減量との関係も明確にされねばならない。

そこで、アノードとカソードとの面積比によって電流密度の変化をとらえるとともに、上記三点を明らかにするためにシリーズ3の実験を行った。

シリーズ3においては、シリーズ2で明らかとなった鉄筋のアノード面積 ( $A_a$ ) とカソード面積 ( $A_c$ ) との比を要因とし、乾湿繰返し作用、および腐食生成物のはく離などの作用している環境中における、マクロセル電流の変化を明らかにし、鉄筋アノード部における腐食減量を測定することによってマクロセル電流と腐食量との関係を明確にしようとするものである。

要因としては、鉄筋の  $A_c/A_a$  とひびわれモデルの種類の2種を選んだ。

モデルとしては、次の三者を選んだ(図-25)。(1)シリーズ2と同様のひびわれモデル、および、(2)ひびわれモデルを電気的に対称と考えて半分に切断した形の半分モデル。しかし、これら二者は、アノードと考えられるひびわれ部鉄筋の一部がコンクリート中にあり、ひびわれ部短鉄筋そのもの上で小さなマクロセルを生じカソード部をもっている可能性が大きく、 $A_c/A_a$  を正確には定めがたく、マクロセル電流もすべてを測定することはできない。そこで、(3)アノード部とカソード部を完全に分離した分離モデルを選んだ。

$A_c/A_a$  としては、モデルひびわれ内のみをアノードと考え、シリーズ2における  $A_c/A_a$  の値が 10~60 程度であるため、その中間の 30 をすべてのモデルにおいて選んだ。さらにひびわれモデル、半分モデルにおいては 19 を選び計 2 種とし、分離モデルにおいては  $A_c/A_a$  の変化の幅を大きくし、300, 100, および 10 を選び計 4 種とした。

#### b) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材として鞍馬産碎石(比重=2.66、吸水量=0.60%)、M.S.=13 mm、細骨材としては愛知川産川砂(比重=2.59、吸水量=2.60%、F.M.=3.00)を用いた。さらに浸漬液を海水相当濃度とするために、食塩(NaCl、99%以上)を用いた。また、異形丸鋼としては D 10, SD 35 を用いた。

#### c) コンクリート配合

コンクリート配合は、シリーズ1, 2 より腐食作用を促進させるため水セメント比を高めることとし、70%とした。さらに単位セメント量を 300 kg/m<sup>3</sup>、目標スランプを 15±2 cm とした。示方配合を表-7 に示す。

#### d) 供試体

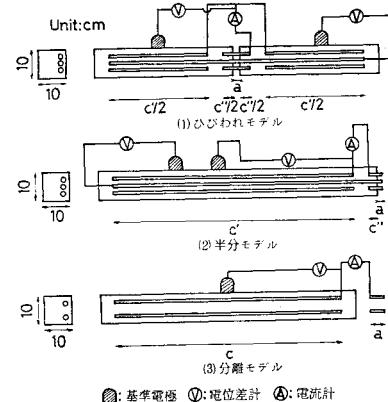


図-25 供試体および測定概要(シリーズ3)

供試体は、断面 10×10 cm の角柱とし、プラスチックスペーサーによって、黒皮付異形鉄筋をかぶり 2 cm に保って配置した(図-25)。供試体の種類および略称を表-8 に示す。コンクリート打設後 1 日で脱型、4 週間の湿布養生を行った後実験に供した。材令 28 日におけるコンクリートの諸強度を表-9 に示す。

#### e) 試験方法

乾湿繰返しの影響を確認するため、まず供試体をかぶり 2 cm を上面として鉄筋位置まで食塩水中(温度 25°C 一定)に 4 週間浸漬し、ついで食塩水を除去しコンクリート下面から 1 cm 程度になるまで水位を低下させ鉄筋を空中に 2 週間露出させる。この計 6 週間を 1 サイクルとし、3 サイクルにおいて最大電流を得るまで実験を行った。

電位測定は、2 サイクルの除水時から 3 サイクルの 9 日まで、鉄筋軸方向に約 15 cm ごとに 3 時間~1 週間間隔で行った。

電流測定には連続測定を行った。ただし、計測器の容量から、ひびわれ-19, 半分-19, 分離-10 について 1 セルを 1 時間~1 週間の間隔で測定した。

さらに供試後、コンクリートをはつり取り、鉄筋の腐食状態を観察した。

#### f) 実験結果および考察

電位分布については、シリーズ2と同様な結果が得られたため省略する。

各セルにおける電流密度の経時変化を、それぞれ平均値で示す(図-26, 27)。

浸漬期間に伴って低下した電流密度が、乾燥の後浸漬した時再び増大することがわかる。これは、電位差の増減とも対応しており、酸素の補給によるものと考えられる。

第1サイクルにおける乾燥期間の2日において、布で腐食生成物をこすり取り、第2サイクルにおいては除去

表-7 コンクリート示方配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
15±2	2	70	50	210	300	900	924

表-8 供試体一覧表 (シリーズ 3)

略称	型	腐食セル数	アノード長 $a$ (cm)	カソード長 $\Sigma C$ (cm)	カソードアノード比 $A_c/A_a$
ひびわれ-30	ひびわれ モデル	2	3	90	30
ひびわれ-19		2	3	56	19
半-30	半分 モデル	2	1.5	45	30
半-19		2	1.5	28	19
分-300	分離 モデル	1	1	300	300
分-100		2	1	100	100
分-30		2	1	30	30
分-10		2	1	10	10
分-0		2	1	0	0

しなかった。しかし、第2サイクル浸漬時初期および第3サイクル浸漬時初期の両者ともに電流の著しい増大があった。これにより、

単に浸漬された供試体よりも、乾湿繰り返しを行った場合の方が腐食速度が大きくなることがわかる。

供試後の各アノード部鉄筋の腐食減量と、電流密度～供試期間曲線より求めた Coulomb 量から計算した腐食量を表-10 および分離モデルに関しては図-28 に示す。この両者の値はよく近似しており、測定した電流がマクロセル腐食電流であることを確認することができる。さらに、 $A_c/A_a$  が 0 の場合における腐食減量と比較して、マクロセルを形成している場合における腐食速度が大きいことがわかる。

各アノード部は、腐食が進行するに従って腐生成物が沈着し、また、カソード部においては酸素が消費さ

表-9 コンクリート諸強度

圧縮強度 (kg/cm²)	引張強度 (kg/cm²)	曲げ強度 (kg/cm²)
285	29.7	43.9

供試体 3 本平均

表-10 測定値と計算値との比較

略称	型	カソードアノード比 $A_c/A_a$	酸洗いによる腐食減量 (mm)	マクロセル腐食による腐食減量 (mm)	クーロン量から計算値 (mm)
ひびわれ-30	ひびわれ モデル	30	0.0766	0.0490	0.0303
ひびわれ-19		19	0.0851	0.0575	0.0305
半分-30	半分 モデル	30	0.1994	0.1718	0.1349
半分-19		19	0.0879	0.0603	0.0323
分離-300	分離 モデル	300	0.8728	0.8452	0.6886
分離-100		100	0.2710	0.2434	0.1988
分離-30		30	0.1848	0.1572	0.1430
分離-10		10	0.1692	0.1416	0.0517
分離-0		0	0.0276	0.0000	0.0000

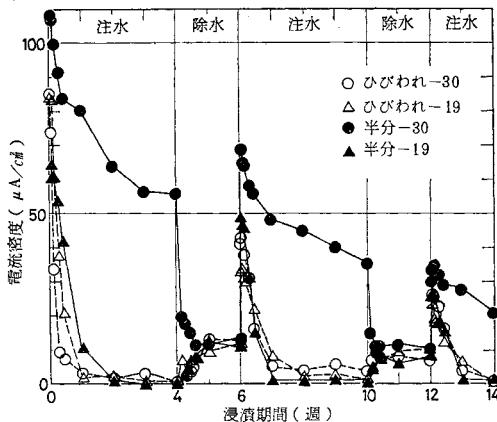


図-26 電流密度の経時変化 (ひびわれモデル, 半分モデル)

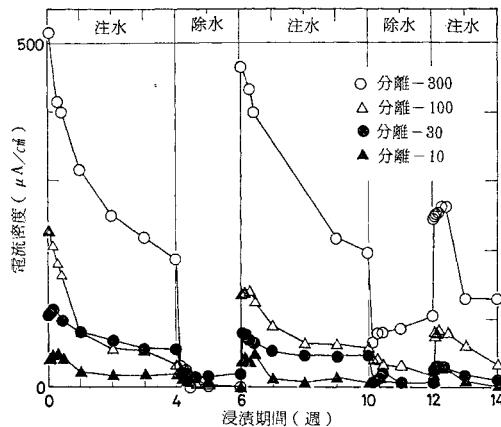


図-27 電流密度の経時変化 (分離モデル)

れ、さらに食塩水の移動によるアノードの拡大も考えられる。そこで、表-8 に示した各カソード・アノード面積比における腐食速度を比較する場合、これらの影響の少ない初期の部分、すなわち最大電流密度によって比較するのが妥当であると考えられる。このため、第2サイクルの最大電流密度を、カソード・アノード面積比との関係で、シリーズ2の結果も含めて図-29 に示す。

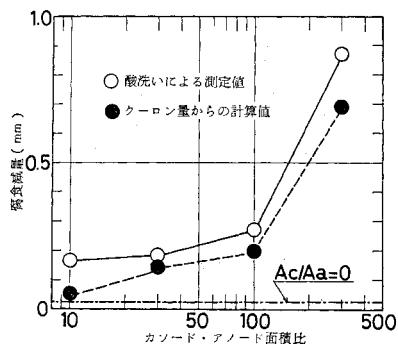
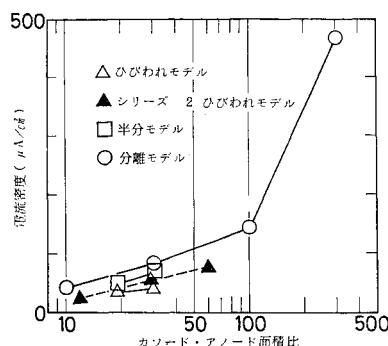


図-28 腐食減量の測定値、計算値比較

図-29 電流密度に与える  $A_c/A_a$  の影響

明らかに、どのモデルにおいても、 $A_c/A_a$  の増大に伴う電流密度の増大がみられる。なお、分離モデル、半分モデル、ひびわれモデルの順に電流密度が小さくなつた理由としては、ひびわれ部鉄筋そのものがアノードとカソードを生じ小さなマクロセルを生じていると考えられることと、アノード部に腐食生成物が沈着しやすいことがあげられる。

## 5. 結論

本研究の範囲で得られた結論を要約すると、次のとおりである。

- (1) 鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートのひびわれは鉄筋のマクロセル腐食の要因となる。
- (2) マクロセルは、簡単な電位計測によって容易にその存在を推定できる。計測法としては種々の方法が考えられるが、腐食速度に関しては、電位そのもののみならず電位のばらつき（電位差）が重要である。
- (3) 電位測定によって得ることのできた電位差はマクロセルの起電力に対応し、電位差が大きくなるとともにマクロセル電流が大きくなる。

(4) マクロセル電流はモデルひびわれ内の鉄筋表面積 ( $A_a$ ) とコンクリート中の鉄筋表面積 ( $A_c$ ) との比に関係があり、 $A_c/A_a$  が大きくなるに従ってマクロセル電流密度は大きくなり、腐食速度は大きくなる。現実におけるひびわれにおいては、ひびわれ幅が限界ひびわれ幅より大きく、鉄筋に腐食を生じる場合、 $A_c/A_a$  が意味をもつと考えられる。

なお、以上のように腐食速度は  $A_c/A_a$  によって影響される。このため、モデル供試体によって得られた腐食速度は、ひびわれ幅、かぶり、塩分などのほかに  $A_c/A_a$  すなわちコンクリート中の鉄筋の長さと、鉄筋位置におけるひびわれ幅との比を考慮したうえでなければ、単純に実在構造物の鉄筋腐食速度とは比較できないと考えられる。モデルと実在構造物との関係の把握が今後さらに

望まれる。

電位分布の測定は実在構造物にも適用できるものと考えられ、実在鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価、補修基準作成などへの応用が今後さらに進められるものと考えられる。

終わりに、本研究を遂行するにあたっては、京都大学の山川宏二講師から多くの有益なご助言を賜わった。また、本研究の一部は大浦道哉君（現在、（株）大林組）の卒業論文の一部として行われた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日根文男ほか：鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に関する試験法の検討、日本材料学会腐食防食部門委員会資料、京都、pp. 1~8, 1976.
- 2) Browne, R.D. : The performance of concrete structures in the marine environment, Proc. Int. Corrosion Conf. Inst. Marine Engrs., pp. 80~87, 1973.
- 3) Browne, R.D. et al. : The long-term performance of concrete in the marine environment, Off-shore structures, Inst. Civ. Engrs., pp. 49~59, London, 1975.
- 4) Stratfull, R.F. : Corrosion autopsy of a structurally unsound bridge deck, HRR, No. 433, pp. 1~11, Dec. 1973.
- 5) 片脇 清、ほか：コンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的計測、土木技術資料、18巻、pp. 503~508、1976年10月。
- 6) Dana, J.S. et al. : Corrosion of highway structures, TRR, No. 539, pp. 27~37, 1975.
- 7) Bridge deck repairs, NCHRP, RRD 85, March 1976.
- 8) Lewis, D.A. et al. : Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmospheres, Corrosion, Vol. 15, pp. 382~388, July 1959.
- 9) Finley, H.F. : Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmosphere, Corrosion, Vol. 17, pp. 104~108, March, 1961.
- 10) Stewart, C.F. : Considerations for repairing salt damaged bridge decks, Jour. of ACI, Vol. 72, pp. 685~713, Dec. 1975.
- 11) 具志幸昌：沖縄県における鉄筋コンクリート構造物の耐久性、セメントコンクリート、No. 363, pp. 5~12, 1977年5月。
- 12) Abeles, P.W. et al. : Corrosion of steel in finely cracked reinforced and prestressed concrete, Jour. of PCI, Vol. 10, pp. 36~41, April 1965.
- 13) Attimay, E. et al. : Early chloride corrosion of reinforced concrete, Jour. of ACI, Vol. 70, pp. 606~611, Sept. 1973.
- 14) Duffaut, P. et al. (菅原訳)：鉄筋コンクリート棒鋼の腐食—電気防食、道路、392号、pp. 99~102, 1973年10月。
- 15) 善一章：セメント硬化体中鋼材の腐食と防食に関する2,3の実験、セメントコンクリート、No. 238, pp. 16~22, 1966年12月。
- 16) Spellman, D.L. et al. : Chlorides and bridge deck deterioration, HRR, No. 328, pp. 38~49, 1970.
- 17) 呂秋成：電気化学測定法の実際、エレクトロニクスによる計測の基礎と最新の応用に関する講習会テキスト、日本材料学会、京都、pp. 55~69, 1976年2月。

(1978.1.17.受付)