

# 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

## BASIC STUDY ON CRACKING OF CONCRETE DUE TO EXPANSION BY REBAR CORROSION

森川 雅行\*・関 博\*\*・奥村 隆\*\*\*

By Masayuki MORIKAWA, Hiroshi SEKI and Yutaka OKUMURA

To investigate the mechanism of concrete cracking by rebar corrosion, an accelerated test by electrolytic corrosion has been done. Additional chemical analyses were also carried out to confirm corrosion characteristics. During acceleration, free chlorides moved toward the anode and corrosion products did not move away from the steel-mortar interface. X-ray diffraction results indicated that corrosion products consisted mainly of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Not only resistance of concrete against internal pressure but also corrosion rate had influence on weight-loss of steel for cracking. When the corrosion rate was more than 0.5 mpy, 3-9 mg/cm<sup>2</sup> of weight-loss was enough for cracking and an elastic analysis was effective for its presumption.

*Keywords : expansive cracking, chloride, corrosion of bar, corrosion products*

### 1. 序論

鉄筋コンクリート構造物の劣化の主原因の1つは、内部鉄筋の腐食である。鉄筋腐食の原因としては、①海砂や塩化物を含む混和剤の使用、融氷剤の散布、海洋環境中における塩分の浸透、等による塩害、②迷走電流による電食、③コンクリートの中性化、などが挙げられる。鉄筋の腐食により腐食生成物の体積膨張による内圧を受け、やがて鉄筋に沿った縦ひびわれ（膨張ひびわれ）を生ずる。膨張ひびわれは付着を破壊し、また腐食促進の原因となり、最終的にはかぶりコンクリートの剥離・剝落を生じ、構造物の耐力・機能・寿命を著しく低下させる。そこで鉄筋の腐食による劣化において、膨張ひびわれの発生を劣化限界の1つとみなすことができる。膨張ひびわれの発生を予測するには、①腐食開始時期、②腐食速度、③許容腐食量、を知る必要がある。

腐食による膨張ひびわれを検討する実験的な手法としては、①コンクリートに内孔を設け水圧を加える方法、

②電食試験によりコンクリート中の鉄筋を急速に腐食させる方法、③塩水噴霧などの促進試験によりコンクリート中の鉄筋を腐食させる方法、④自然環境中に供試体を暴露してコンクリート中の鉄筋を腐食させる方法、⑤既設構造物を破壊してコンクリート部材内部の鉄筋の腐食状況を検査する方法、などが考えられる。②に関連した研究としては、主として迷走電流による電食を受ける場合を想定した実験研究が発表されている<sup>1),2)</sup>など。最近では電食の実験方法を応用して、RC部材の劣化のパターンへの応用<sup>3),4)</sup>、腐食生成物の力学的特性の解明<sup>5)</sup>、膨張ひびわれの発生条件<sup>6)~9)</sup>などの研究が発表されている。

本研究では膨張ひびわれ発生の基礎的な機構を実験的、解析的に検討した。実験は促進試験とし、既往の研究<sup>10)~12)</sup>を参考として電食の手法を用い、種々の要因によるひびわれ発生条件や腐食量を求めた。本方法は、再現性も高く多くのデータを収集できる利点がある。さらに基礎資料をできるだけ得る目的で電食による腐食特性、腐食生成物、の確認の分析を行った。

### 2. 実験方法

#### (1) 実験概要

鉄筋の腐食による膨張ひびわれの発生を検討するため、本実験においては実際に鉄筋を腐食させて供試体に

\* 正会員 工修 運輸省前第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 (〒220 横浜市西区高島 1-2-10)

\*\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒160 新宿区大久保 3-4-1)

\*\*\* 正会員 工修 清水建設株式会社 (土木本部) (〒104 中央区京橋 2-16-1)

強制ひずみを与えられ、短期間で実験の終了が可能であり、ひびわれ発生とともに腐食を停止できる電食の手法を用いた。

膨張ひびわれの発生機構に影響を及ぼす因子としては、かぶりコンクリートの品質、かぶり厚さ、鉄筋の品質、鉄筋径、コンクリート中の塩分量、腐食速度などが考えられる。本実験においては、水セメント比、かぶり厚、塩分量、印加電流を取り上げた。Table 1 はそれぞれの設定値および実験条件の組合せを示している。なお、Table 1 における NaCl 量 3.530, 1.765, 1.059 kg/m<sup>3</sup> はそれぞれ W/C 55% のときの単位セメント量の 1.0, 0.5, 0.3% に相当する。なお、今回最も実験ケースの多い NaCl 量 1.765 kg/m<sup>3</sup> は、コンクリート重量に対して約 0.08% に相当し、既往の実構造物の測定値などによくみられる値である。また、今回は腐食速度を広い範囲で設定する目的で印加電流を 7 種類に変化させた。

## (2) 供試体の製作

供試体は高さ 25 cm の角柱とし、鉄筋 (SS 41,  $\phi$  25 mm みがき鋼棒) は型枠中央上部で固定し、コンクリートを縦方向に打設した。概略は Fig. 1 に示すとおりである。

鉄筋は長さ 30 cm に切断した後、旋盤、センタレスを用いて端面および表面を仕上げ、アセトンで脱脂した後、長さをハイトゲージ（精度 1/100 mm）、重さを直示天秤（精度 1/100 g）を用いて測定した。腐食設定区間は 20 cm (157 cm<sup>2</sup>) とし、この部分以外は表面にエポキシ樹脂塗装（5 層）を施した。

コンクリートの主な使用材料および配合は Table 2, Table 3 に示す。コンクリートは打設後 2 日で脱型し、

Table 1 Experimental Variables.

100mA=6.37A/m<sup>2</sup>

シリーズ	W/C (%)	かぶり (cm)	NaCl (kg/m <sup>3</sup> )	電流 (mA)
I	45	7	1.765	400 200 100 50 20 10 * 5 *
	55			
	65			
II	55	3 5 7	3.530 1.765 1.059 0	100

注：1) \* は W/C 55% のみ

2) 供試体数は、各組合せに対し 4 個

その後は気中養生とし、その間に供試体底面からの水の浸透や電流の流出を防止するためにエポキシ樹脂塗装（5 層）を施し、また多くの供試体の上側面にひずみゲージを貼付した。

## (3) 電食試験

実験装置は、Fig. 1 に示すとおりであり、ポリエチレン製容器に電解液として水道水を張り、供試体を浸漬した後、鉄筋をアノード、円筒状に加工した銅板（厚さ 1 mm）をカソードとし直流電源により定電流を負荷した。通電開始は材令 28 日以降とした。通電は供試体側面にひびわれが確認されるまで、また一部はひびわれ発生前後の電解効率の相違を調べるためにある一定時間の通電を行った。通電中は、電流、両極間の電圧、ひずみを測定した。ひびわれの確認は、ひびわれ発生に伴うひずみの急増と同時に自動的に通電を停止させるひずみ制御装置によって行った。ただし、一部の長期試験については、両極間の電圧低下、目視観察によりひびわれの確認を行った。

## (4) 腐食量の測定

通電終了後、供試体を割裂して鉄筋を取り出し、腐食生成物を除去するために常温（約 15°C）の 10% クエン

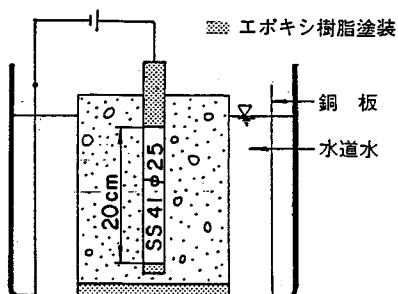


Fig. 1 Experimental Apparatus.

Table 3 Mix Proportions of Concrete.

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
45	194	431	800	914
55	194	353	831	949
65	194	298	852	973

注：1) 粗骨材最大寸法 20mm, スランプ 12 ± 2 cm 空気量 2%

2) 実験条件にしたがい、上記の配合に NaCl を所定量混入する

Table 2 Materials Used for Concrete.

セメントの種類	細骨材				粗骨材			
	種類	比重	吸水率 (%)	粗粒率	種類	比重	吸水率 (%)	粗粒率
早強ポルトランド	川砂	2.60	2.09	3.16	碎石	2.67	0.61	6.67

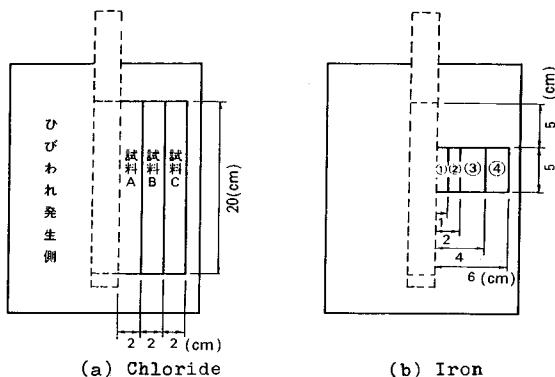


Fig. 2 Sampling Positions for Chloride and Iron Analysis.

酸2アンモニウム溶液に24時間浸漬した。そして腐食設定区間部を切り出し端面を旋盤で仕上げ、アセトンで脱脂した後に試験前と同様の方法で長さ、重量を測定し、腐食による重量減少量を求めた。

#### (5) 電解液、塩分分布および腐食生成物の分析

電解液中のpH、Cl<sup>-</sup>濃度、溶存酸素濃度の経時変化を、pH電極と電位差計、AgNO<sub>3</sub>電位差滴定、溶存酸素計を用いて測定した。

割裂した供試体から、Fig. 2(a)に示す位置よりコンクリート試料を採取し、JCI「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」<sup>[13]</sup>に従って塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法(滴定液:N/200 AgNO<sub>3</sub>)を用い、コンクリート中の全塩分の分布を調べた。また、鉄筋の入っていないダミー供試体についても同様の分析を行い、Fig. 2(a)における試料A、B、Cの平均を分析値とした。

一部の鉄筋からは腐食部の小片を切り出し、SEM(走査電顕)により錆層を観察し、EPMA(X線マイクロアナライザ)により腐食生成物中のFe、O、Cl等の面分析を行った。また、鉄筋側、コンクリート側に付着している腐食生成物を採取し、X線回折装置(X線:Co K $\alpha$ 、30 kV・10 mA)より得られた回折線を用いて腐食生成物の同定を行った。

#### (6) 供試体中のFe量分析

空隙中への腐食生成物の浸透の有無の確認のために、モルタル供試体を用い、電食後の供試体中のFe量の分析を行った。配合はW/C 55%，C:S=1:2とし、NaClを1.765 kg/m<sup>3</sup>混入し、また練り水に純水を使用した。セメントは早強ポルトランドセメントおよび白色ポルトランドセメントを用いた。後者のセメントを用いた理由は、モルタル中のFe量を少なくするためである。かぶりは7 cm、電流は400 mAおよび20 mAの2通りとし、電解液には純水を用いた。通電後はFig. 2(b)に示す4か所から試料を採取して調整した後、原子吸光法

によるFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の分析<sup>[14]</sup>、およびモルタルの配合推定<sup>[15]</sup>を行った。さらに、電食試験を行わないダミー供試体に関しても上記と同様の方法でFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の分析を行い、腐食前のFeの初期値とした。

#### (7) 裸鉄筋の電食試験

コンクリート中に埋設されていない裸鉄筋の電解効率を調べるために、一部の鉄筋について、上・下端にエポキシ樹脂塗装を施した後、水道水を電解液として、100 mAの定電流を一定時間だけ印加した。

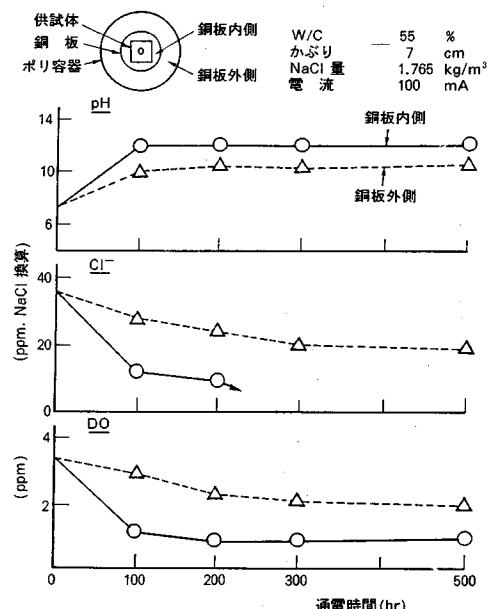
### 3. 分析結果

#### (1) 電解液中のpH、Cl<sup>-</sup>濃度、溶存酸素濃度の経時変化

500時間通電した場合の電解液の分析結果をFig. 3に示す。Fig. 3によると、電解液は水道水を使用したため、通電開始時のpHは約7であるが、通電中は銅板内側で約12、外側で約10まで上昇した。これは銅板内側表面上でカソード反応が進行してOH<sup>-</sup>が生成したことなどが原因と考えられる。

次にCl<sup>-</sup>濃度に関しては、通電に伴い低下する傾向が認められ、銅板内側では検出できないまでに減少した。これはアニオンであるCl<sup>-</sup>がアノード側へ移動し、コンクリートの空隙水中に浸透するためであると考えられる。

溶存酸素濃度は通電中は特に銅板内側で低くなっている。本実験中には常に酸素拡散限界電流密度を超える電

Fig. 3 Time Dependent Changes of pH, Cl<sup>-</sup>, DO in Electrolyte.

流密度が印加されているものと思われ、カソード反応における酸素消費により溶存酸素は常に低くなつたと考えられる。

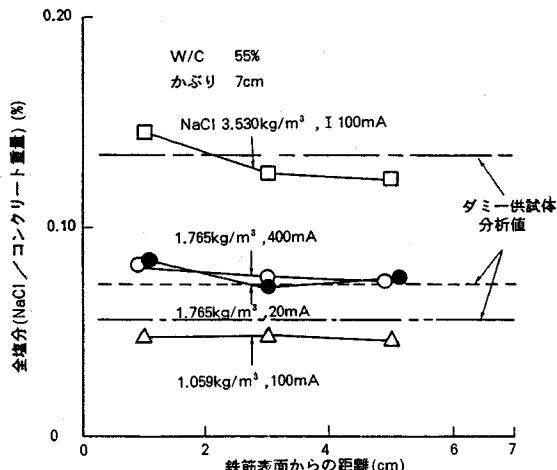


Fig. 4 Total Chloride Distribution in Concrete.

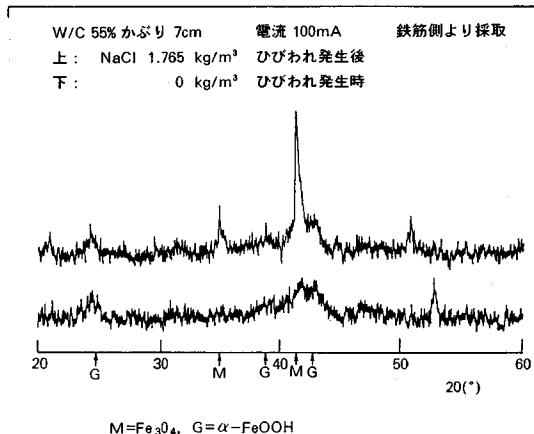
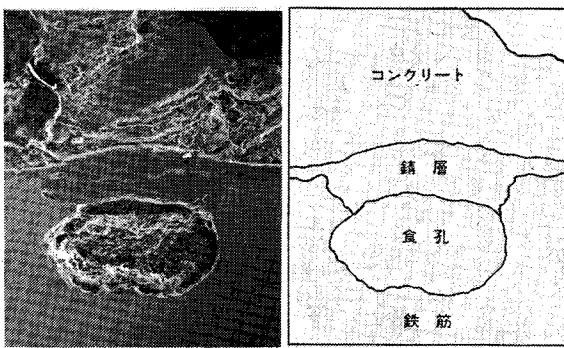
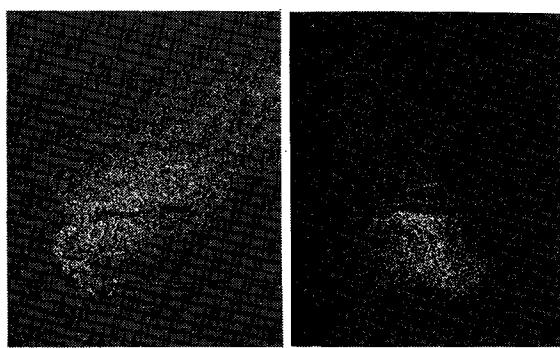


Fig. 5 X-ray Diffraction Results of Corrosion Products.



Secondary Electron Image (×400)



EPMA (Oxygen)

EPMA (Chloride)

Fig. 6 SEI and EPMA Area Analysis Results of Corrosion Products.

## (2) コンクリート中の全塩分分布

Fig. 4 はコンクリート中の全塩分分布を示している。混入された NaCl 量が多い場合に、鉄筋に近いほど全塩分量は多くなる傾向を示している。一般にコンクリート中に電位勾配が存在する場合、さまざまなイオンの移動が空隙水中で行われることが知られており、本実験ではアノード付近へ Cl<sup>-</sup> が集中してきたと考えられる。また、NaCl 量が多い場合にこの傾向が顕著となる理由としては、セメント中の C<sub>3</sub>A による Cl<sup>-</sup> の固定の影響が考えられる。もし Cl<sup>-</sup> のうちセメント重量に対し 0.4% がフリーデル氏塩の形で固定されるとすれば<sup>16)</sup>など、本実験の配合で換算するとコンクリート重量に対して 0.10% (NaCl 換算) 固定される計算になる。NaCl 量の多い場合ほど移動可能な可溶性塩分を多く含んでいるため、アノードである鉄筋に集中する傾向が強くなつたと考えられる。

## (3) モルタル中への Fe の浸透

通電後のモルタル中のセメント成分に含まれる Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 総量の増加、すなわち腐食生成物の浸透による Fe の移動は、本実験でのセメントの種類、電流、の範囲では全く認められなかった。アノード反応により生成する Fe<sup>2+</sup> は空隙水中の OH<sup>-</sup> とただちに鉄筋表面で結合すると思われ、また本実験中のような腐食促進試験では空隙水中への腐食生成物の大規模な溶解・浸透現象はないと思われる。

## (4) 腐食生成物の分析

Fig. 5 は X 線回折結果の例である。ひびわれ発生時に通電を停止した場合の腐食生成物は明確なピークを得にくく、これは非晶質な腐食生成物が多く含まれているためと思われる。ただし全般的に Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (マグネタイト) の回折線が認められ、さらに磁性も認められた。また、錆層の内側と外側とでは腐食生成物の回折線が異なることが多い。これは錆層の外側にゆるく付着しているものと、内側で鉄筋に強く密着しているものとの違いを示し

ているものと思われる。

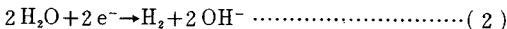
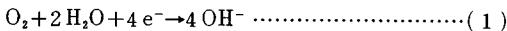
ひびわれ発生後も通電した場合は明確なピークが現われ、多量の  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の存在が認められた。また一部の腐食生成物については  $\alpha\text{-FeOOH}$  (ゲータイト) も少量ながら認められた。しかし、 $\text{Cl}^-$  の存在下で生成するとされる  $\beta\text{-FeOOH}$  (マキナビット)<sup>19)</sup> は今回の実験では捕束できなかった。

EPMA 分析結果の一例を Fig. 6 に示す。本図は食孔の横断面を含んでいる。Ox 面分析では錆層中とコンクリートに近い食孔部での酸化が進んでいるのが認められた。また、Cl 面分析では食孔中に多量の Cl が存在しているのが認められ、Cl の集中により孔食が進んでいることを示している。その他の試料においても、SEI (2 次電子像) より錆層は複数層より成っており、さらに EPMA 面分析より錆層中には Fe と Oxygen が存在し、局部的に Cl を含んでいるのが認められた。

#### 4. 電食試験における腐食特性

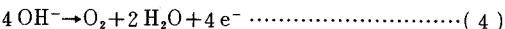
##### (1) 電食中の腐食反応

電解液中では  $\text{pH} > 5$  であるため、カソード反応として次の 2 通りの反応が考えられる<sup>17)</sup>。



電食中は、①溶存酸素の消費が酸素の拡散より早い、②  $\text{CaCO}_3$  の白い沈殿膜が電解液表面を覆い、また銅板内側表面に密着するためにカソード表面への酸素の供給が妨げられる、などの理由が考えられ式 (2) の水素発生反応が起きることが予想される。電流が大きい場合には銅板内側表面からの気泡の発生が認められた。

アノード反応としては主として次の 2 通りの反応が考えられる<sup>18)</sup>。



式 (4) は酸素発生反応であり、鉄のアノード分極が大きい電食試験では式 (3) の鉄の腐食反応とともに式 (4) の反応が主となる場合が多く、その場合の腐食量は積算電流量より計算される腐食量より小さくなるといわれている<sup>20)</sup>。しかし鉄筋付近に  $\text{Cl}^-$  が存在すると鉄のアノード分極曲線は孔食電位が現われ、鉄の腐食反応が起こりやすくなる。すなわち  $\text{Cl}^-$  を多く含むほど式 (3) の反応の割合が大きくなると考えられる。

溶出した  $\text{Fe}^{2+}$  は空隙水中の  $\text{OH}^-$  と結合して  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  となり、green rust (みどりさび) や green complex (緑色錯体,  $[\text{Fea}^{3+} \cdot \text{Feb}^{2+} \cdot \text{Ox} \cdot (\text{OH})_y]$ ) を経て、最終的に酸化が容易な場合には  $\text{FeOOH}$  が生成し、酸素が少ない場合は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  で酸化が止まる、というのが多くの研究の一貫するところである<sup>19)</sup>など。本電食試験

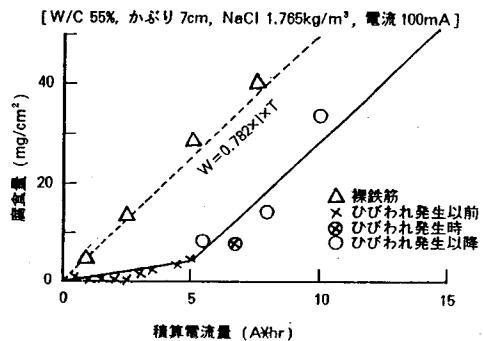


Fig. 7 Quantity of Electricity vs. Weight-loss of Steel.

中においては、コンクリート中でかつ水中での促進試験のため、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の生成しやすい環境であると思われる。

##### (2) 裸鉄筋の電食試験結果

鉄筋を裸のまま水中で電食させた際の積算電流量と腐食量の関係を Fig. 7 に示す。通電中はアノードにおける酸素発生は認められず、また腐食生成物は黒色を示し電解液中に溶解した。図中の点線は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の生成を想定した電解式である。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  は、 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}) = 2/3$  であり 3 Fe で 8 倍とみなせる。1 つの鉄イオンを 8/3 倍と考えると、電解式は以下となる。

$$W = K \cdot I \cdot t = 0.782 \cdot I \cdot t \quad \dots \dots \dots (5)$$

$W$  : 腐食量 (g)

$K$  : 電気化学当量 (g/A · h)

$I$  : 電流 (A),  $t$  : 時間 (h)

式 (5) は実験値とよく一致している。実験値がやや上側へ寄っているのは  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $K = 0.782$ ) に酸化される以前の  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ( $K = 1.042$ ) 等、 $\text{Fe}^{2+}$  の比率が高い生成物の存在によるものと考えられる。

##### (3) 積算電流量と腐食量

Fig. 7 にはひびわれ発生前後の積算電流量と腐食量の関係も示してある。ひびわれ発生後は電解効率が上昇し、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  を想定した電解式 (式 (5)) に近くなる。これはひびわれ発生により、1) アノード周辺の電解液量が多くなり裸鉄筋の状態に近づいた、2) アノード周辺の pH が低下し、また  $\text{Cl}^-$  の集中が容易になりアノード分極曲線において不動態域が減少し孔食電位も下がった、などが理由として考えられる。

##### (4) 電食による鉄筋の腐食状態

腐食生成物の色は黒色、ないし褐色、を呈していた。ひびわれ発生時に通電を停止した場合の腐食面積率は、50~100% の範囲内にあり、ひびわれ発生時間の長いものほど腐食面積率が高く、また孔食が激しくなっていた。一般に電食による腐食は孔食を発生することが多いとされており<sup>20)</sup>、腐食量が大きくなるにつれて孔食が目立つ結果となっている。

## 5. ひびわれ発生時間とひびわれ発生時の腐食量

### (1) ひびわれ発生時間

#### a) 通電時間とひびわれ発生時間

ひずみ制御装置を用いた場合のひずみと電圧の経時変化の一例を Fig. 8 に示す。通電開始後、供試体への電解液の浸透による抵抗変化のために電圧は一時的に下降し、その後、電圧は腐食生成物の生成などが原因と思われ徐々に上昇する。そしてひびわれ発生とともに電圧は急激に下降し、同時にひずみも急上昇する。通電終了後は供試体側面に鉄筋に沿ったひびわれが確認された。ひずみ測定間隔を十分に短くすれば、ほぼひびわれ発生と同時に通電を停止することが可能であるため、本実験においては通電時間をひびわれ発生時間と考え、そのときの腐食量をひびわれ発生時の腐食量とした。

#### b) 種々の実験要因の影響

かぶりコンクリートが内圧を受ける場合、より大きな

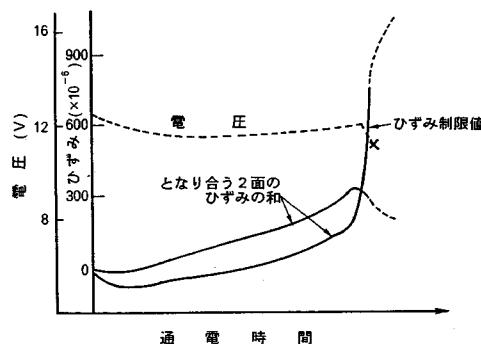


Fig. 8 Time Dependent Changes of Voltage and Strain.

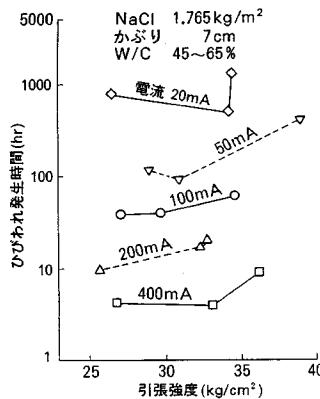


Fig. 9 Tensile Strength vs. Time-to-cracking.

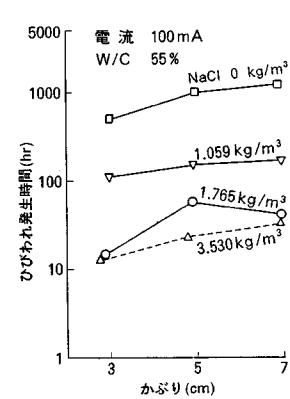


Fig. 10 Cover vs. Time-to-cracking.

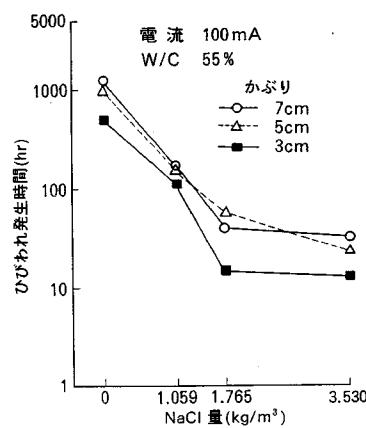


Fig. 11 Chloride Quantity vs. Time-to-cracking.

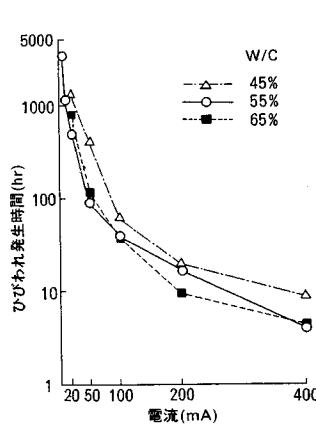


Fig. 12 Impressed Current vs. Time-to-cracking.

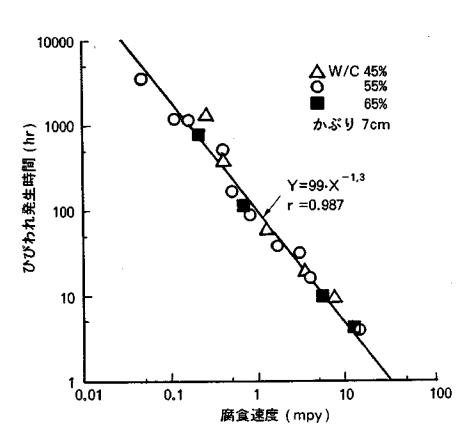


Fig. 13 Corrosion Rate vs. Time-to-cracking.

内圧に耐えられるコンクリートほど、ひびわれ発生に必要な腐食量が大きくなると考えられ、もし腐食速度が一定ならばひびわれ発生時間も長くなると予想される。

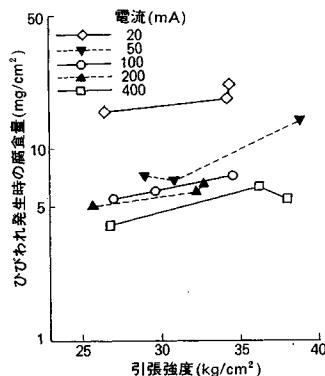
Fig. 9 および Fig. 10 はそれぞれ引張強度、かぶり、とひびわれ発生時間の関係であり、例外はあるものの、引張強度が高く、またかぶりの大きいものほどひびわれ発生時間が長い、という結果になった。

Fig. 11 および Fig. 12 はそれぞれ NaCl 量、電流、とひびわれ発生時間の関係であり、NaCl 量や印加電流が引張強度やかぶりよりもひびわれ発生時間に大きな影響を与えることを示している。そこで測定された腐食量と通電時間より腐食速度を計算して、ひびわれ発生時間との関係を示したもののが Fig. 13 である。同一かぶりにおいては W/C の影響は小さく、腐食速度とひびわれ発生時間による相関性が認められる。

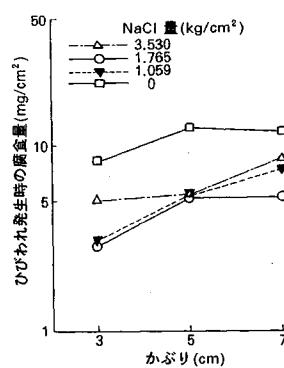
### (2) ひびわれ発生時の腐食量

#### a) 種々の実験要因の影響

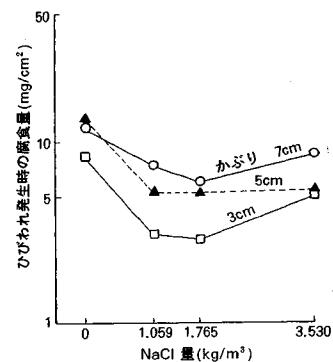
前述のように、引張強度の高いもの、かぶりの大きい



**Fig. 14** Tensile Strength vs. Weight-loss for Cracking



**Fig. 15** Cover vs. Weight-loss for Cracking.



**Fig. 16** Chloride Content vs. Weight-loss for Cracking.

ものほど、ひびわれ発生時の腐食量は大きくなると考えられる。Fig. 14 および Fig. 15 はそれぞれ引張強度、かぶりとひびわれ発生時の腐食量の関係であり、両図とも予想された傾向を示している。

Fig. 16 および Fig. 17 はそれぞれ NaCl 量、電流、とひびわれ発生時の腐食量の関係を示している。両図より NaCl 量の少ない場合、また電流の小さい場合、すなわち腐食速度の遅い場合はひびわれ発生に大きな腐食量を必要とする、という傾向が認められる。

電流, NaCl 量といった腐食速度を決定する因子がひびわれ発生時の腐食量に影響を及ぼす原因としては、①コンクリートのクリープ変形による膨張圧の低減、②腐食生成物のコンクリート空隙中の溶解、浸透による膨張圧の低減、③腐食生成物の相違、④孔食、全面腐食など腐食状態による膨張圧発生状態の相違、などが考えられる。本実験において、②と③に関しては分析結果より重大な因子とはなっていないものと思われる。ただし

Fig. 16において一部 NaCl 量が大きい場合も腐食量が大きくなっており、NaCl 量の違いによる腐食生成物の

力学的特性の相違がある可能性を示している。また④に関しては孔食が激しい場合があるものの、腐食生成物は鉄筋表面を全体的に覆っており、均等な膨張圧を与えているものと考えられる。したがって本実験では主として①を考慮する必要があろう。腐食がさらに長期にわたってゆっくりと進行するような場合は、以上の要因によりひびわれ発生時の腐食量はさらに大きくなるものと思われる。

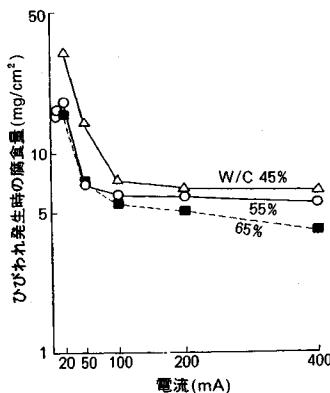
b) 電食係數

ファラデーの法則によれば、アノードの電解量は積算電流量に比例する。

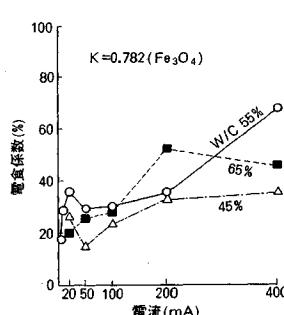
しかし電食においては、アノードの電解反応以外の種々の反応が起こるために、実際の腐食量は上式による理論値と異なることが多く、次式により表わされる。

$\eta$ ：電食係数

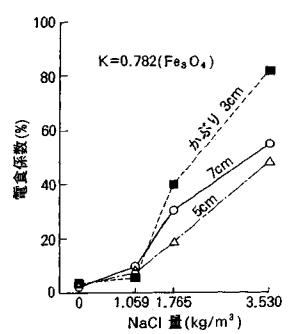
電食係数はその状態における腐食の進行率を表わし、酸素の発生、不動態化などの影響を受ける<sup>20)</sup>。本実験のように電流密度が高い場合は、酸素発生が電食係数に大きく影響するものと思われる。



**Fig. 17** Impressed Current loss for Cracking.



### Impressed Current vs. Corrosion Coefficient.



### Chloride Quantity vs. Electrolytic Corrosion Coefficient.

電流と電食係数の関係を Fig. 18 に示す。電食係数は電流が大きくなると増加する傾向にある。これは電流が大きいほど可溶性塩分が早くアノード付近へ集中する、あるいは電流が大きいほど固定された塩分の放出が活発になる<sup>2)</sup>ことに起因すると考えられる。また W/C 45%においては、電食係数が小さいが、これは単位セメント量が多いために固定される塩分が多いことが一因と思われる。

Fig. 19 は NaCl 量と電食係数の関係であり、NaCl 量は電食係数に大きな影響を与えており、これは、NaCl 量が多いものほど可溶性塩分を多く含み、前述のアノード分極曲線の違いによりアノードにおける酸素発生が少なくなるためであると考えられる。

## 6. ひびわれ発生時の腐食量の解析

### (1) 解析モデル

かぶりコンクリートにひびわれを発生させるのに必要な腐食量を計算するために、二次元平面モデルを用いて弾性解析を行った。供試体は中央に円孔のある正方形断面であるが、これを正方形断面に内接する厚肉円筒とモデル化した。この厚肉円筒が内圧を受けた場合の引張応力分布は厚肉円筒の弾性解式より計算すると Fig. 20 のようになり、これは中心に円孔をもつ正方形断面が内圧を受けた場合の FEM 弾性解析による引張応力分布とほぼ一致することが確かめられた。

コンクリートのひびわれ発生条件は、円孔周辺のコンクリートが拘束力を受けているために、最大引張応力ではなく平均引張応力を用いることにした。平均引張応力を用いた破壊条件にはさまざまな提案がなされているが<sup>21), 22)</sup>、本解析では平均引張応力がコンクリートの引張強度に等しくなったときをひびわれ発生とした。

一方、拘束条件下で生成した腐食生成物は比較的弾性的性質の強い固体であるという研究例<sup>5)</sup>もあり、腐食生成物も弾性厚肉円筒、鉄筋は弾性円柱として腐食量を膨張圧に変換した。

厚肉円筒の平均引張応力とコンクリートの引張強度によりひびわれ発生時の膨張圧を求め、その膨張圧によるコンクリート内周、腐食生成物の外周・内周、鉄筋の外周の変位を計算した。そしてコンクリートのひびわれ時の膨張圧  $P$  により 1) (鉄筋 + 鑄) の半径 =  $1.25 \text{ cm} +$  コンクリートの内周変位、2) 鑄の内周変位 = 鉄筋の外周変位となるような腐食量を繰返し計算により求め、ひびわれ発生時の腐食量とした。ただしコンクリート内周の変位の計算にあたっては、塑性ひずみの進行を考慮して、JSCE の提案式に示されるクリープ係数<sup>23)</sup>により低減されたコンクリートの弾性係数を用いた。

### (2) 解析結果

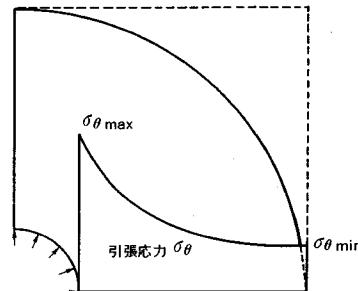


Fig. 20 Elastic Hollow Cylinder Model and Tensile Stress Distribution.

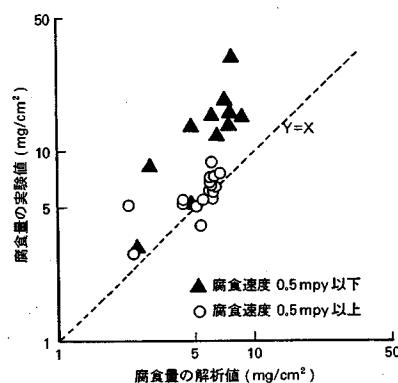


Fig. 21 Analysis Results of Weight-loss for Cracking.

腐食生成物の体積膨張率は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の 2.1 倍に空隙率 20%<sup>24)</sup> を考慮して 2.5 倍とした。弾性係数を他の研究<sup>5)</sup>を参考に  $2500 \text{ kg/cm}^2$  ( $24.5 \text{ kN/cm}^2$ )、またポアソン比を  $1/3$  とした場合の計算結果を Fig. 21 に示す。腐食速度 0.5 mpy 以上の短期電食試験では実験値に近い結果となった。

体積膨張率を  $2.1 \sim 4.0$  倍、弾性係数を  $2000 \sim 3000 \text{ kg/cm}^2$  ( $19.6 \sim 29.4 \text{ kN/cm}^2$ )、クリープ係数を  $0 \sim 2.0$  まで変えてひびわれ発生時の腐食量を計算すると、クリープ係数以外はさほど影響しなかった。

実際の腐食現象など腐食速度の遅い場合のひびわれ発生時の腐食量は、前述の種々の影響を考慮して腐食量の割増しを考える必要があると思われる。

## 7. 結論

鉄筋の腐食による膨張ひびわれ発生機構について、実験手法として電食試験、解析手法として厚肉円筒の弾性解析を用い、基礎的な検討を行った。本研究の範囲では、丸鋼の場合について以下の事項が明らかになったと思われる。

(1) 電食試験中にコンクリート中の可溶性塩分は電位勾配の影響でアノード側へ移動する。

(2) 腐食生成物は非晶質鉄物質以外は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  が主であり、一部の場合に  $\alpha\text{-FeOOH}$  も少量認められた。

(3) 裸鉄筋を電食させた場合、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の生成を考慮した電解式が実験値とよく一致した。

(4) 電食後のモルタル中の Fe 量分析結果より Fe の過剰分は認められず、腐食生成物の空隙中への大規模な溶解、浸透は認められなかった。

(5) ひびわれ発生後の電解効率は、ひびわれ発生前の数倍に上昇し、裸鉄筋の電解効率に近くなる。

(6) 腐食速度とひびわれ発生時間には、よい相関性が認められた。

(7) ひびわれ発生時の腐食量は、コンクリートのひびわれに対する抵抗力と腐食速度の影響を受ける。腐食速度が 0.5 mpy 以上の場合には、ひびわれ発生時の腐食量は  $3\sim9 \text{ mg/cm}^2$  となり、コンクリートのひびわれに対する抵抗力に応じた値をとる。

(8) ひびわれ発生を腐食生成物の物理的条件などを加味したモデル化での解析結果では、腐食速度が早い場合については実験値に近い値が得られた。

本研究は電食による結果をまとめたものであるが、腐食がさらに長期に至る自然環境を考えると、促進試験と実際の現象との相違（塩分の浸透、腐食速度、腐食生成物、アノード・カソードの分布など）を検討する必要がある。また FEM 弾塑性解析などのより高度な解析を用いるのも、ひびわれ発生予測に有効であろうと思われる。

本実験に際しては、早稲田大学理工学部金属工学科の大坂敏明教授、運輸省前横浜調査設計事務所長の大堀晃一氏、調査課の畠山和之氏、運輸省港湾技術研究所の大即信明氏、三菱鉱業セメント中央研究所の吉良欣一部长をはじめ研究所の皆様、など多くの方々のご教示ならびにご援助を頂いた。また、実験方法の検討や実験の一部は、伊東 昇氏（首都高速道路公団）、河原忠弘氏（東京電力株式会社）、長沼 清氏（早稲田大学大学院）をはじめ研究室の方々のご助力を頂いた。ここに、本研究にご協力頂いた各位に深謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 長野蘭藏・山脇作十郎：鉄筋コンクリートの電食に対する抵抗性（自動定電流装置を用いセメントを異にした場合），セメント技術年報 12, pp. 463~470, 1958.
- 2) 黒井登起夫：コンクリート中に埋込んだ鉄筋の電食係数，セメント技術年報 33, pp. 502~505, 1979.
- 3) 武若耕司・松本 進：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 177~180, 1984.
- 4) 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.
- 5) 吉岡保彦・米澤敏男：鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討，土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, pp. 271~272, 1982.
- 6) 森永 繁・野萱勝久・近藤照夫・鉄筋のさびの許容量に関する検討，鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム発表論文集, pp. 17~20, 1975.
- 7) 前田孝一：かぶりコンクリートのひび割れに必要な鉄筋の腐食量に関する研究（電食を利用した促進試験による方法），日本建築学会大会学術講演概要集（北陸），pp. 147~148, 1983.
- 8) 前田孝一：電食を用いたかぶりコンクリートのひび割れに関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集（関東），pp. 499~500, 1984.
- 9) 武若耕司・松本 進：鉄筋腐食によって生じる RC 構造物の劣化に関する研究（その 1）——鉄筋の腐食膨張による縦ひびわれ発生性状について——，土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集, pp. 259~260, 1983.
- 10) 関 博・伊東 昇：鉄筋の腐食による軸方向ひびわれの発生機構について，セメント技術年報 36, pp. 428~431, 1982.
- 11) 関 博・河原忠弘：鉄筋の腐食による膨張ひびわれに関する研究，セメント技術年報 38, pp. 341~344, 1984.
- 12) 関 博・奥村 隆：鉄筋の腐食によるひびわれの発生について，土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集, pp. 131~132, 1985.
- 13) 日本コンクリート工学協会 腐食防食研究委員会：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（案），コンクリート工学, Vol. 22, No. 12, pp. 4~9, 1984.
- 14) セメント協会：日本工業規格 JIS セメント解説, pp. 186~191, 1981.
- 15) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, pp. 354~385, 1967.
- 16) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案），pp. 63, 1983.
- 17) 日本学术振興会編：金属防食技術便覧 [新版]，日刊工業新聞社, pp. 10~21, 1972.
- 18) Gau, Y. and Cornet, I. : Penetration of hardened concrete by seawater chlorides with and without impressed current, Corrosion, pp. 93~100, Vol. 41, No. 2, 1985.
- 19) 三沢俊平：鉄さび生成の現状と未解明点，防食技術, Vol. 32, No. 11, pp. 657~667, 1983.
- 20) 電気学会・電食防止委員会編：新版 電食・土壤腐食防止ハンドブック，電気学会, pp. 20~56, 1977.
- 21) 渡辺 明・助清満照・岡田雅文：静的破碎剤によるコンクリートの破壊に関する基礎的研究，土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, pp. 555~556, 1982.
- 22) 草野守夫・小堀光憲・山本 徹：緩性の破碎剤を用いた破碎実験，土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集, pp. 93~94, 1984.
- 23) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針（案），土木学会コンクリートライブラー第 52 号, 1983.
- 24) Tuutti, K. : Corrosion of Steel in Concrete, CBI fors-kning research, fo 4.82, pp. 95~97, 294~297, 1982.

(1986.5.10・受付)