
投稿論文

Paper

電気分解による鉄筋コンクリートの劣化に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON DETERIORATION OF REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO ELECTROLYSIS

黒井登起雄*

By Tokio KUROI

It has been pointed out that when reinforced concrete are subjected to electrolysis from stray electric currents reduction in bond between reinforcement and concrete due to softening of cement paste and cracking of concrete due to electrolytic corrosion.

This paper describes regarding the ascertainment of the rate of rusting at parts of reinforcing bars acting as anodes, and the investigation of softening phenomena of cement paste around parts of reinforcing bars acting as cathodes through experiments with model specimens for a fundamental study of deterioration of reinforced concrete due to electrolysis.

Keywords: reinforced concrete, electrolytic corrosion, softening

1. 緒 言

直流電気鉄道や電解工場などからの迷走電流が鉄筋コンクリート中を流れると、場所によって異なる2つの現象が生ずるとされている。1つは、電流が外部に流出する部分、すなわち鉄筋からコンクリートに電流が流れる部分で、ここでは鉄筋が陽極となり、鉄筋の電解腐食(以下電食とよぶ)によるコンクリートのひびわれ発生、または鉄筋の断面減少が生ずる現象である。もう1つは、電流が外部から流入する部分、すなわちコンクリートから鉄筋に電流が流れる部分で、ここではコンクリートが陽極、鉄筋が陰極となり、コンクリートと鉄筋との付着力がセメントペーストの軟化により低下する現象である。これら異なる2つの現象のうち鉄筋コンクリートの電食に関する研究は今までにいくつか報告されているが、セメント、および塩化物、または塩化物を含む混和剤などの違いによるコンクリートの電気抵抗の変化、鉄筋の発錆状況、ひびわれ発生時間、および引き抜き試験による付着強度の変化などを検討したものが大部分であり^{1)~4)}、電食による鉄筋のさび速度を定量的に解明したものがない。また、鉄筋が陰極となる部分における電解

に関する研究もきわめて少なく、付着力の変化を検討したものだけであり^{3),4)}、未解明の部分が非常に多い。

本研究は、電流作用による鉄筋コンクリートの劣化の原因となる現象を定量的に解明するとともに、その防止対策の資料を得る目的で、埋設鉄筋の電食現象、つまりひびわれ発生までの鉄筋のさび速度、およびその影響要因、および陰極となる部分における軟化現象とその機構、および鉄筋との付着力を実験的に解明した。実験では、それぞれの現象の主要因子を明確に把握するため、鉄筋はみがき棒鋼を、また供試体は主にモルタル、およびセメントペーストとした。なお、実験に際して電流は、直流電気鉄道の場合のレール対地電圧に相当する50V以下を設定し、平均的な電圧範囲を選んだ⁵⁾。電流値はコンクリートの電気抵抗を考慮して100mA以下の範囲とした。

実験は次に示すような4つのシリーズに分けてそれぞれ実施した。

シリーズⅠ 鉄筋、およびモルタル中の鉄筋の電食に対する電気化学的検討に関する実験

シリーズⅡ モルタル、およびコンクリート中の鉄筋の電食によるさび速度に影響する各種要因を解明するための実験

シリーズⅢ 鉄筋を陰極にしたときのセメントペース

* 正会員 工修 足利工業大学助教授 土木工学科
(〒326 栃木県足利市大前町 268-1)

トの軟化機構を解明するための実験

シリーズIV 軟化したコンクリートと鉄筋との結合力 に関する実験

2. 使用材料および配合

セメントは、主に普通ポルトランドセメント（比重3.17）を用いた。シリーズⅡでは一部の実験で早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種、シリカセメントA種、およびフライアッシュセメントB種も用いた。細骨材は渡良瀬川産、および鬼怒川産の通常の品質の川砂（比重2.58～2.61、吸水率2.21～3.97%）を用いた。シリーズⅡ、およびシリーズⅣでは、粗骨材として渡良瀬川産、および鬼怒川産の良質の川砂利（最大寸法15、25mm、比重2.60～2.66、吸水率1.07～2.60%）も用いた。

鉄筋は、シリーズI、およびシリーズIIでは、主に ϕ 19 mm のみがき丸棒鋼 (JIS G 3108) を用いた。一部の実験で ϕ 32 mm のみがき丸棒鋼も用いた。またシリーズIII、およびシリーズIVでは、鉄筋は JIS G 3112 に準じて加工した 16 mm のみがき異形棒鋼を用いた。一部の実験では、さらに 16 mm, 19 mm, および 25 mm の異形棒鋼も用いた。

各シリーズで使用した配合は、主にセメントペーストとモルタルで、表-1に示すようなものである。シリーズII、およびシリーズIVの一部の実験にはコンクリートも用いた。

3. 電食を受ける鉄筋の電気化学的検討

鉄筋の直流電流による電食現象を電気化学的に検討するためシリーズⅠで鉄筋のみの場合と、モルタル中に埋設した場合について実験を行った。電解供試体は鉄筋コンクリートの一部を円筒形に、また空中で電解する場合には、角柱形にモデル化した形状のものを用いた。

(1) 実験方法

a) 供試体の作成

モルタルに鉄筋を埋設した電解供試体は、図-1に示すように、直徑 7.5, 10, および 15 cm で、高さが 10

表-1 使用した主な配合

シリーズ	配合条件
I	モルタル : $W/C=0.45, 0.60, 0.75$, $NaCl=C \times 0 \sim 1.0\%$, フロー値 = $210 \pm 10 mm$
II	モルタル : シリーズ I と同一配合 コンクリート : 最大寸法 = $20 mm$, $W/C=0.60$, $NaCl=C \times 0 \sim 0.5\%$ スランプ = $8 \pm 1 cm$
III	セメントベースト : $W/C=0.40, 0.45, 0.50$
IV	セメントベースト : $W/C=0.40, 0.45, 0.50$ コンクリート : 最大寸法 = $25 mm$, $C=300 kg/m^3$, スランプ = $8 \pm 1 cm$

cm の円柱モルタルの中心高さ方向に鉄筋を埋め込む形状とした。供試体は同一バッチから同一寸法の供試体 3 個を作成し一組とした。供試体作成に先立ち、鉄筋は、インヒビターとして 150 ppm のメルカプトベンゾチアゾールを溶解したクエン酸 2 アンモニウム 10 % に 60 分間浸漬したのち、直示天秤（感量 10 mg）で鉄筋の質量を計るとともに、鉄筋下端からの電流の流出を防止するために、鉄筋の端部約 1 cm に無溶剤型エポキシ樹脂ライニング剤を塗布した。さらに、供試体底部、および側面下端約 1 cm にもエポキシ樹脂ライニング剤を塗布した。なお、供試体は材令 28 日まで、標準養生した電食試験に供した。

b) 電食試驗

電食試験は図-1に示したように、鉄筋、および電解供試体を電解液として水道水を用いた電解槽中に約8cmおよび9.5cmの深さまで浸漬し、鉄筋を陽極に、円筒形の銅板を対極に接続して行った。実験は、直流電流による電食試験のとき、3~15個程度を直列に接続し、直流電圧によるときは、並列に接続して行った。

電流は主に 20, 40, および 80 mA のそれぞれ一定にした直流電流としたが、一部 15 V, および 20 V のそれぞれ一定にした直流電流も用いた。

電源は、直流安定化電源（北斗電工（株）、出力電流0~250 mA、出力電圧0~800 V）と一定電圧を供給することができる可変直流安定化電源（メトロニクス（株）、出力電圧0~35 V、出力電流2 A）を用いた。電解供試体の电解はモルタルにひびわれが肉眼で確認されるまでの任意の時間連続的に行った。ひびわれ発生が確認された一部の供試体でも、測定した平均ひびわれ幅は0.05~0.15 mmの範囲で、大部分が0.1 mm以下であった。

c) 鉄筋のさび量の測定

鉄筋のさび量は電食試験後に電解供試体を壊して鉄筋を取り出し、a) で記した酸洗い処理によって、鉄筋のさびを除去したのち質量を計り、電解前の質量との差から求めた。

(2) 実験結果および考察

鉄が直流電流によって電食を受ける場合、鉄の電解量と電気量との間には定量的な関係が成立する（ファラデーの法則）。すなわち、一定電流 i (A) によって t 時間電解したとき、鉄の電解量（さび量）を W_0 (g) とすれば、式 (1) が成り立つ⁵⁾。

ここで、 K は 1 クーロンの電気量で電解する鉄の質量で、鉄の電気化学当量 (g/Ah) に相当する。

図-2は $\phi 19\text{ mm}$ みがき丸棒鋼を水道水中で電解したときの鉄筋のさび量と積算電流量の関係を調べた結果を示した。図より、電食による鉄筋のさび量は積算電流量

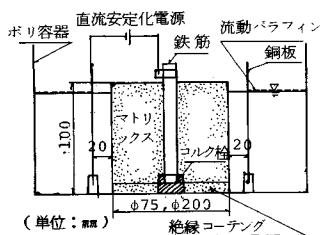


図-1 電解供試体および電食試験方法

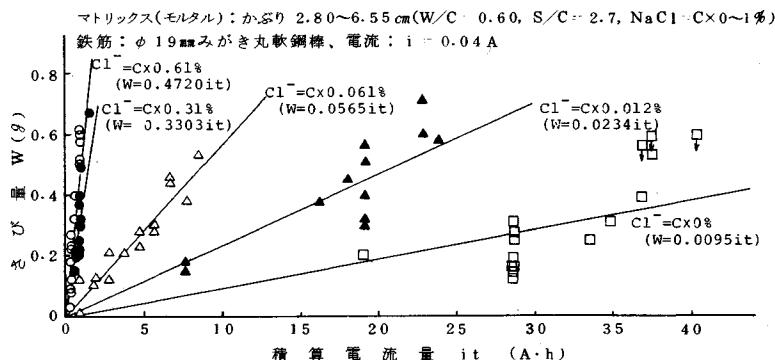


図-3 積算電流量と埋設鉄筋のさび量の関係（定電流）

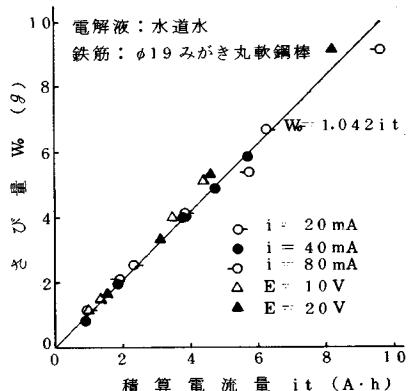


図-2 積算電流量とさび量の関係

から式(1)によって算出した鉄のさび量とよく一致し、鉄筋のさび量と積算電流量は良好な直線性が認められる。また、ひびわれまでのモルタル中の鉄筋の電食試験結果をそれぞれ図-3、および図-4に示した。図より、モルタル中に埋設した鉄筋のさび量も積算電流量に比例することが認められた。これはモルタル中に埋設した鉄筋の電食においても、ファラデーの法則が適用できることを示し、埋設鉄筋のさび量 W (g) は次式で示すことができる。

ここで、 η は電食係数で、モルタル中に埋設された鉄筋のさびの進行率を示す係数である。

しかし、埋設鉄筋のさび速度は鉄の電食によるさび速度より著しく低下し、また後述するように、モルタル中の塩化物イオン濃度等の影響によって著しく異なることも確認された。

4. 電食を受けるコンクリート中の鉄筋のさび速度に及ぼす各種要因

電食によるひびわれまでのモルタル、およびコンクリート中の鉄筋のさびの発生現象を把握するため、鉄筋

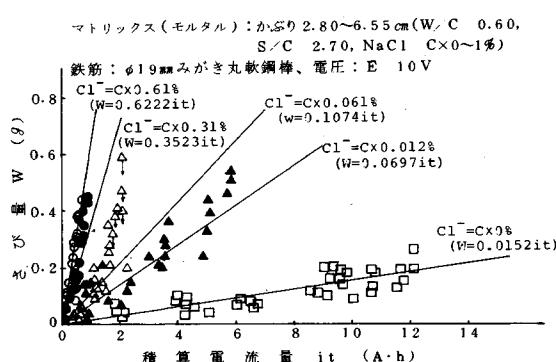


図-4 積算電流量と埋設鉄筋のさび量の関係（定電圧）

のさび速度に影響すると考えられるセメントの種類と鉛柄、混和剤の種類、セメント量、水セメント比、塩化物量などの配合、モルタルの含水分、かぶり、および電流強さの各種要因についてシリーズⅡで実験的に検討した。鉄筋のさび速度は電食試験後の鉄筋の質量測定から求めたさび量と、各供試体を流れた積算電流量からファラデーの法則によって算出した電食係数で評価した。

(1) セメントの種類の影響

a) 電解供試体

セメントは市販のポルトランドセメント5銘柄、3種類（普通、早強、中庸熟）と混合セメント1銘柄、3種類（高炉B種、シリカA種、フライアッシュB種）を用いた。

電解供試体は、図-5に示すように、一辺が10cm, あるいは15cmで、高さが10cmの角柱モルタル、およびコンクリート中に、直径が一辺に相当する亜鉛引き鉄板の円筒(高さ7cm)と、その高さ方向の中心に鉄筋を埋設する形状とした。供試体は同一セメント、同一配合ごとに8個を一組とし、材令28日まで、標準養生したのち、4個は電食試験に供し、残り4個はさらに14日間恒温室($20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、50%RH)で空中養生後電食

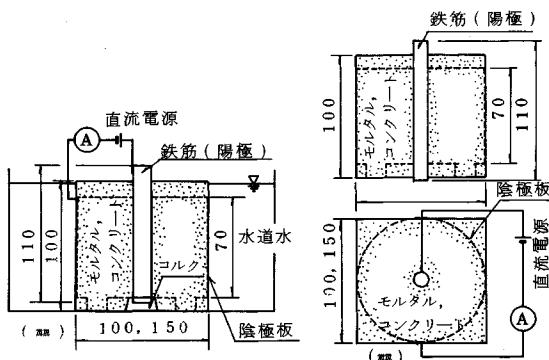


図-5 電解供試体および電食試験方法

試験に供した。なお、供試体作成に先立ち、鉄筋は3.(1)a)で記した酸洗い処理を施し、鉄筋の端部にはエポキシ樹脂ライニング剤を塗布するとともに、作成後に、水中電解供試体だけにはライニング剤を塗布した。

b) 電食試験

電食試験は、所定期間養生後20°Cの水道水中、および恒温室内の空中で、鉄筋を陽極に、亜鉛引き鉄板を陰極に接続して、10Vの一定電圧の直流電流により、モルタルにひびわれが肉眼で確認されるまでの任意の時間連続的に行った。

c) 実験結果および考察

図-6はポルトランドセメントと、混合セメントを用いたモルタル中の鉄筋の電食係数と、平均電流密度を調べた結果の一例を示した。鉄筋の電食係数は、モルタルの場合、0.015~0.080(水中電解)、および0.010~0.020(空中電解)、またコンクリートの場合、0.010~0.075(水中電解)、および0.005~0.040(空中電解)の範囲であり、セメントの種類、含水分の変動により多少の電食係数の差異は認められるが、0.10以下であり、非常に小さいことが確認された。

(2) 混合剤の影響

a) 実験方法

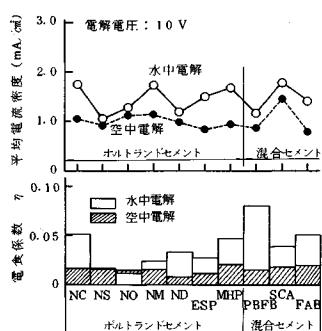


図-6 各種セメントの影響(モルタル)

混合剤は市販の混合剤の中からAE剤(記号AE)3種類、減水剤(記号WR, SP)12種類、促進剤(記号AC, ANF)10種類、および防錆剤(記号RP)2種類を選定し、さらに比較のために塩化カルシウム(記号CL)、および亜硝酸ナトリウム(記号HN)を加え、合計29種類を使用した。混合剤の使用量はメーカー標準使用量とした。

電解供試体は、図-5に示したように、一辺が10cmの立方体モルタルに、直径が一辺に相当する円筒形の亜鉛引き鉄板と、その中心高さ方向に鉄筋を埋設する形状とし、供試体は4.(1)a)と同様に作成した。

電食試験も、4.(1)b)で記したように、10Vの一定電圧の直流電流によって行った。

b) 実験結果および考察

各種混合剤を添加したモルタル、およびプレーンモルタル中の鉄筋の電食係数、および平均電流密度を調べた結果の一例を図-7に示した。図より、AE剤、減水剤、および防錆剤を添加した場合、鉄筋の電食係数はプレーンモルタル中の電食係数0.003~0.030の範囲と同等か多少大きくなるが、水セメント比、および含水分にかかわらず0.01~0.08の範囲で非常に小さい。また、無塩化物タイプの促進剤、および寒冷地用特殊混合剤を添加したモルタルの電食係数も0.012~0.110であり、プレーンモルタルの場合に比べてわずかに大きくなる程度である。しかし、セメント量に対して0.5%添加した塩化カルシウムの場合の電食係数、および塩化物を主成分とする促進剤の場合の電食係数は、大部分の促進剤が0.20~0.50であるが、範囲が0.10~0.69で、プレーンモルタルの場合に比べて著しく大きくなる。

(3) 配合要因および電流強さの影響

a) 実験方法

i) 電解供試体

電解供試体は、直径7.5, 10, および15cmで、高さが10cmの円筒形モルタルに、鉄筋を円筒の中心高さ

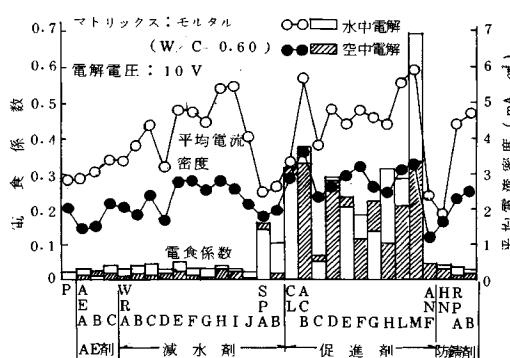


図-7 混合剤の種類の影響

方向に埋設した図-1に示した形状のものと、図-5に示した一辺の長さが10 cmの角柱状のものの2種類を用いた。供試体は同一パッチから同一寸法のものを、3個、または8個とした。なお、8個のうちの4個は空中での電食試験に用いた。

ii) 電食試験

電食試験は、3.(1)b)、および4.(1)b)で記したと同様に行った。電解電流は、電流をそれぞれ20, 40, および80 mAに一定、あるいは電圧を10 Vの一定にした直流電流とした。

b) 実験結果および考察

i) 塩化物量の影響

図-8は、塩化ナトリウムをセメント量に対して0, 0.02, 0.1, 0.5, および1.0%添加したモルタル中に鉄筋を埋設して、水中における電解で調べたときの塩化物イオン濃度と鉄筋の電食係数との関係の一例を示した。モルタルの塩化物イオン濃度は0~0.6%の範囲である。図より、鉄筋の電食係数はモルタル中の塩化物イオン濃度の増加に伴い著しく増大する。たとえば、塩化物イオンを含まない場合の電食係数が0.025以下であるのに対して、塩化物イオンを0.3% (NaCl換算0.5%) 含有するモルタル中の鉄筋の電食係数は0.25~0.45の範囲であり、10~20倍にも増大する。特に、 $W/C=75\%$ 、セメント量408 kg/m³のセメント量が少ないモルタル中の鉄筋の場合には、塩化物イオンの含有量の増加による電食係数の増大が著しいようである。

図-9は、塩化ナトリウム、および塩化カルシウムをセメント量の0~0.5%の範囲で添加したコンクリートに埋設したときの塩化物イオン濃度と鉄筋の電食係数との関係を示した。図より、コンクリート中に埋設した鉄筋の電食係数も、モルタル中の場合と同様、塩化物イオン濃度の増加に伴って著しく大きくなることが認められた。塩化物イオンを含むモルタル、およびコンクリートの電気抵抗は、材令28日間湿潤状態のとき1900~3000 Ωcmの範囲で、塩化物イオンを含まないものとほぼ同程度である⁶⁾。したがって、塩化物イオンを含有するモルタル、およびコンクリート中の鉄筋の電食係数が著しく大きくなるのは、電流による陽極鉄筋周辺への塩化物イオンの集中によって電流のイオン移動が活発になり、電解効率の増大をもたらしているためと考えられる⁷⁾。

ii) 単位セメント量および水セメント比の影響

図-10は、モルタルの砂セメント比と鉄筋の電食係数との関係を示した。図より、砂セメント比が3.7から2.2に小さくなる（逆に単位セメント量は増加する）と鉄筋の電食係数は、たとえば、かぶり4.05 cmの場合、約0.17から約0.06にほぼ比例的に低下する傾向がみら

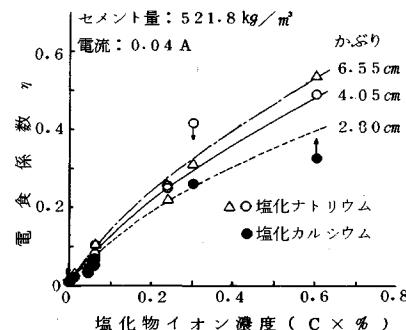


図-8 塩化物量の影響（モルタル）

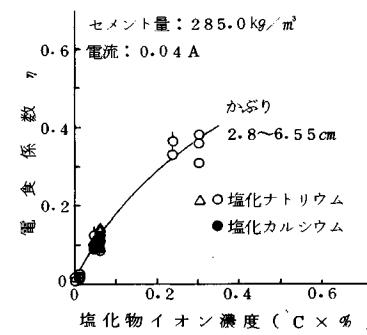


図-9 塩化物量の影響（コンクリート）

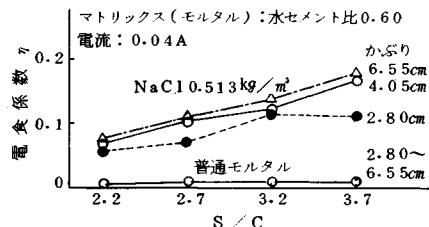


図-10 セメント量の影響

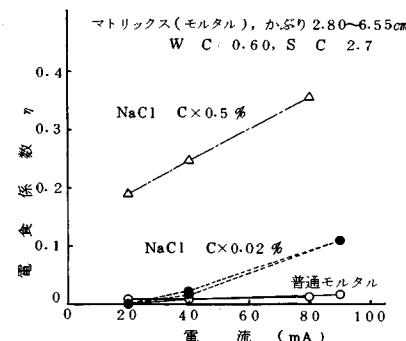


図-11 電流強さの影響

れる。これは塩化物イオンがセメントと結合して、イオン化しない安定な Friedel 氏塩に変化するため、単位セメント量の増加に伴って、電食に対する塩化物イオンの影響が少なくなることを示すものと考えられる。

また、単位セメント量を 513 kg/m^3 とし、モルタルの水セメント比を $0.45 \sim 0.75$ に変えたときの鉄筋の電食係数は 0.1 以下であり、水セメント比によってほとんど差異は認められなかった。このように、電食によるモルタル中の鉄筋の電食係数は塩化物イオンの影響が最も著しく、単位セメント量、および水セメント比の影響は少ないことが確認された。

iii) 電流強さの影響

図-11 は、電流強さを $20, 40$, および 80 mA に変えて試験したときの埋設鉄筋の電食係数を示した。図より、塩化物を含まないモルタル中の鉄筋の電食係数は $0.01 \sim 0.02$ で、ほとんど変わらないが、モルタル中に塩化物が存在すると電流の強さが大きくなるとともに電食係数は増大する。たとえば、塩化ナトリウムがセメント量の 0.5% 含むとき、 20 mA の電流のとき 0.20 であった電食係数が、 80 mA のとき約 0.35 に増大する。

(4) 含水分およびかぶりの影響

a) 実験方法

i) 電解供試体

電解供試体は、4.(1)a) で記したように、高さが 10 cm の角柱モルタルの中心高さ方向に鉄筋を埋設する形状とした。鉄筋のかぶりは、一辺を、 $7.5, 10$, および 15 cm とし、それぞれ $2.80, 4.05$, および 6.55 cm になるようにした。供試体は各水準ごとに 6 個を一組として作成した。

電食試験時のモルタルの含水率は $6 \sim 12\%$ の範囲とした。含水率の調整は、電解供試体を 7 日間標準養生したのちに、 $20^\circ\text{C}, 50\% \text{ RH}$ の恒温室内における放置乾燥と、真空ポンプによる常温減圧乾燥を併用して行った。それぞれの乾燥はあらかじめ予備実験で乾燥期間を決定したが、実際に要した期間は $3 \sim 30$ 日程度であった。なお、含水率は含水率調整後、および 110°C で絶対乾燥状態にした後にそれぞれ供試体の質量測定を行い、その差から算定した。

ii) 電食試験

電食試験は、4.(1)a) で記した方法と同様に行った。電解電流は $5, 10$, および 15 V の一定電圧の直流電流とした。

b) 実験結果および考察

i) 含水分の影響

各種電圧、および配合で試験したときのモルタルの含水分と平均電流密度との関係を図-12 に示した。水セメント比、塩化物量、および電圧が変わったときでも、同一乾燥状態における平均電流密度は多少異なるが、平均電流密度は乾燥の進行とともに小さくなり、含水率約 6% でモルタルは絶縁状態に近づくことが認められた。

図-12 の各含水分のときの鉄筋の電食係数の変化を

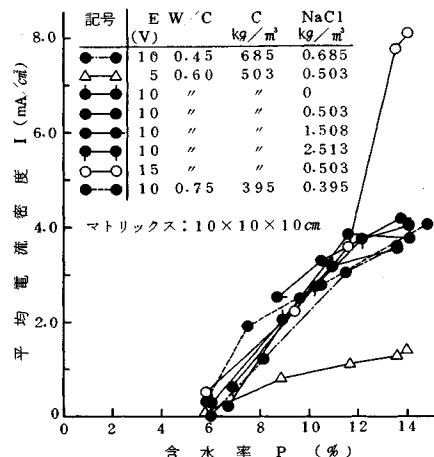


図-12 含水率と平均電流密度の関係

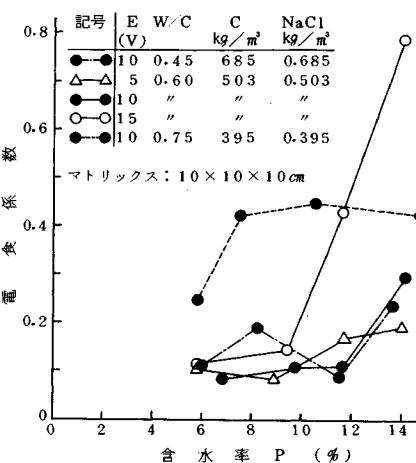


図-13 含水率と電食係数の関係

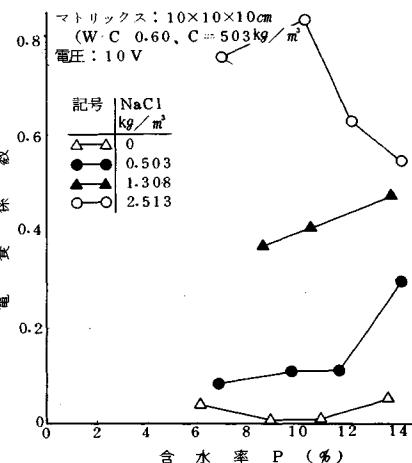


図-14 含水率と電食係数の関係

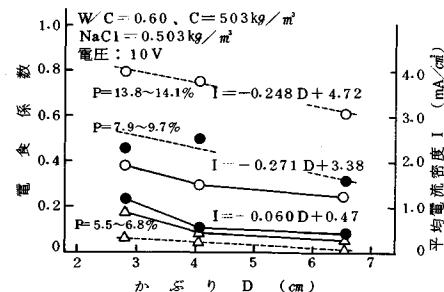


図-15 かぶりの影響

図-13、および図-14に示した。モルタル中の塩化ナトリウム量が 0.503 kg/m^3 で、電圧が 10 V 以下のとき、電食係数は含水率の低下に伴い多少小さくなるが、12%以下では、 $0.09\sim0.20$ の範囲ではほとんど変化がみられない。また、水セメント比 0.75 のモルタル中の鉄筋の電食係数はモルタルが絶縁状態に近づくまで、含水率が変わっても $0.42\sim0.45$ で変化がみられない。しかし、多量の塩化物が含まれると電食係数は含水率の低下に伴い、逆に大きくなる。これはモルタル中の塩化物の濃度が乾燥に伴って高くなることにより、電解効率がよくなつたことが原因と推察される。

ii) かぶりの影響

鉄筋のかぶりを $2.80\sim6.55\text{ cm}$ の範囲に変えたときのかぶりと電食係数、および平均電流密度との関係を図-15に示した。電圧 10 V で電解したとき、かぶり D と平均電流密度 I との間にはオームの法則が適用でき、電食係数もかぶりにほぼ反比例することが認められた。たとえば、含水率 $13\sim14\%$ 程度のとき、 $I = -0.248D + 4.72$ という一次式が成立する。しかし、モルタルの乾燥が進むと、平均電流密度が非常に小さくなり、それに伴って電食係数もかぶりによる差異が認められなくなる。

5. 電気分解によるセメントペーストの軟化

鉄筋コンクリートが電解作用を受けて、鉄筋が陰極となる部分のセメントペーストの軟化現象と軟化機構を解明するため、シリーズIII、およびIVの電解供試体で電解試験を行い、鉄筋周辺ペースト中へのアルカリイオンの集積、軟化状況、およびアルカリイオンの集積速度等から軟化機構の推測を試みるとともに、鉄筋とペーストとの付着強度を検証した。

(1) 実験方法

a) 電解供試体

電解供試体は、図-16、および図-17に示したように、シリーズIII-1では、直径 5 cm 、高さ $2, 4$ 、および 8 cm の円柱ペーストの一端面に鉄板を接着したもの用い

た。このとき、ペーストの円周は内径 5 cm の塩化ビニール管で絶縁し、電解時に電流が等密度になるようにした。またシリーズIV-1、およびシリーズIV-3では、内径 10.53 cm 、高さ 12 cm の構造用炭素鋼钢管にペーストを打ち込み、その中心高さ方向に鉄筋を埋設した電解供試体、および内径 15 cm 、高さ 17 cm の钢管にコンクリートを打ち込み、同様に鉄筋を埋設した供試体を用いた。なお、シリーズIV-2では、直径 15 cm 、高さ 20 cm の円柱に、同様に鉄筋を埋設しただけの無拘束電解供試体も作成した。

b) 電解試験

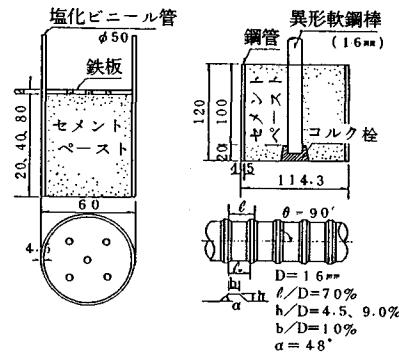
電解試験は電解供試体に接着した鉄板、または埋設した鉄筋を陰極に、銅板、または钢管を陽極に接続して、水道水中、または気乾状態の砂中で、直流一定電流によって行った。電解電流は $0\sim80\text{ mA}$ の範囲とした。なお、一部の実験で、交流一定電流（横河電機製作所（株）、交流標準電圧発生器）を用いた試験も行った。電解供試体は材令28日まで標準養生したものを用い、電解中も 20°C の温度に管理した。

電解期間は42日間までの範囲で任意に決めた。

c) 電解試験後の試験

電解終了後に、次に示す試験を実施した。

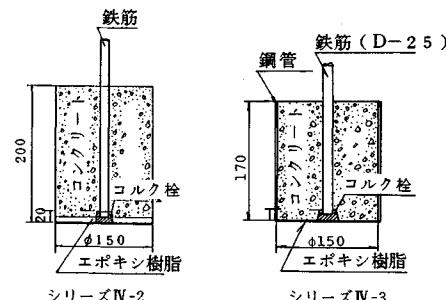
i) 軟化深さの測定



シリーズIII-1

シリーズIV-1

図-16 電解供試体の形状および寸法



シリーズIV-2

シリーズIV-3

図-17 電解供試体の形状および寸法

ペーストの軟化状況は目視で観察するとともに、状態を金属片等で調べた。また、その深さはノギスで 10 か所程度鉄筋表面から測定し、平均値（平均軟化深さ）で示した。

ii) ペースト中のアルカリイオン (Na^+ , および K^+) の定量分析

試験は電解供試体の鉄筋周辺 2 mm の範囲、および 1, 3, 5, 10, 20 mm の所定の位置からペースト試料をカッター、またはドリルで採取し、原子吸光分析装置による炎光分析を行った。

iii) 付着強度試験

試験は日本コンクリート工学協会の試験方法（案）に従って、引き抜きによる付着強度試験を行い、引張荷重と供試体の自由端すべり量の測定を行った。自由端すべり量は 1/1 000 mm の精度のダイヤルゲージによった。結果は付着応力-すべり曲線を描いて整理した。

(2) 電解によるセメントペーストの軟化機構

a) アルカリイオンの集積範囲および軟化状況

図-18、および図-19 は円柱ペーストの軸方向に電解試験を行ったときの所定位置のペーストの分析で得られたアルカリイオンの集積分布の一例を示した。電解前の健全なペースト 1 g 中の Na^+ イオン、および K^+ イオンは、実測した結果によるとそれぞれ約 2.8 mg、および 3.6 mg である。これに対して、電解後のペースト 1 g 中の Na^+ イオン、および K^+ イオンは陰極鉄板付近ほど多くなり、鉄板から 2~3 mm の範囲に著しく集積することが明らかである。また、図-20 はシリーズIV-1 の供試体で電解したときの積算電流量と目視で判定した平均軟化深さの関係を示した。図からも軟化深さは積算電流量が 13.44 A·h 程度から明確に判定でき、積算電流量の増大とともに 1.7 mm 程度からしだいに広がって約 3 mm に達する。このときの軟化したペーストは非常に湿って、金属片で簡単に削れるほどもろい状態であり、健全な部分のペーストと性質は完全に異なることが観察された。このように、電解によるペーストの軟化は、鉄筋周辺のペースト中にアルカリイオンが著しく集積することが原因で、アルカリイオンが多くなると 100 \AA 以下のゲル細孔と考えられている領域の細孔が減少し、これ以上の孔径の細孔が増大するといわれ⁸⁾ ペーストの細孔構造の変化がアルカリイオンの集積で引き起こされているためと考えられる。

b) アルカリイオンの集積速度

図-20 のペーストの軟化深さから、アルカリイオンは積算電流量とともにその集積範囲を広げながら、鉄筋周辺のペースト中に集積すると考え、鉄筋周辺のペースト中への集積速度を電気化学的に検討した。

図-21 はシリーズIV-1 の供試体半径方向に電解した

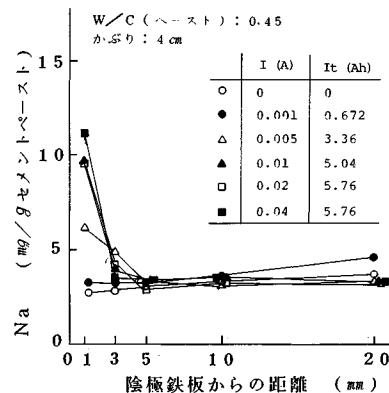


図-18 Na^+ イオンの集積分布

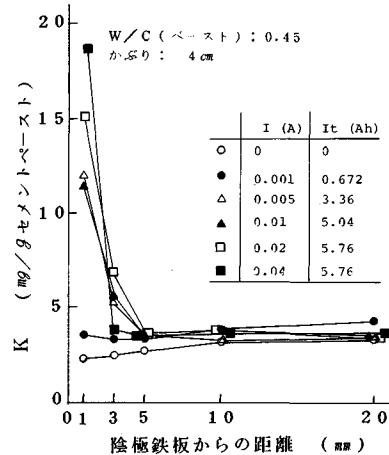


図-19 K^+ イオンの集積分布

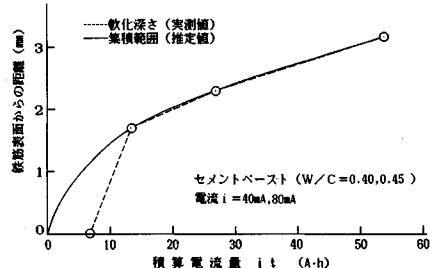


図-20 軟化深さと積算電流量の関係

ときの積算電流量と軟化範囲のペースト中に集積するアルカリイオン量との関係を示した。図より、アルカリイオンの集積量は積算電流量の増大とともにほぼ比例的に増加する傾向がみられる。しかし、積算電流量 10 A·h 程度で、積算電流量と集積量の間に不連続な関係がみられる。これはイオン集積範囲が明確でないこと、および電流が小さい領域であることなどの影響によるものと考えられ、今後集積範囲を明確にして検討する必要がある。

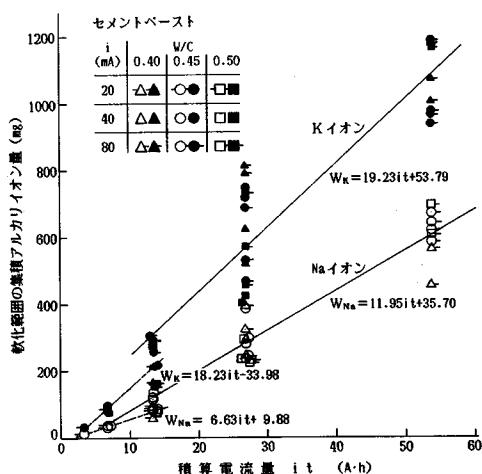


図-21 集積イオン量と積算電流量の関係

と考えている。図-21 から、それぞれの実験式を求めるところ次のようである。

積算電流量 10 A·h 以下のとき

$$\left. \begin{array}{l} W_{Na}=6.63 it + 9.88 \\ W_K=18.23 it - 33.98 \end{array} \right\} \dots \quad (3)$$

積算電流量 $10 \text{ A} \cdot \text{h}$ 以上のとき

ここで、 W_{Na} 、および W_{K} は軟化範囲のペースト中に集積したNaイオン、およびKイオンの量である。

また、ペースト中のNaイオン、およびKイオンの陰極から2mm程度の範囲に集積する理論量(ファラデーの法則を適用して算出した値)は次式に示すようである。

$$\left. \begin{array}{l} W_{\text{Na}} = 857.9 \text{ it} \\ W_{\kappa} = 1885 \text{ it} \end{array} \right\} \dots \quad (5)$$

ここで、乗数は Na イオン、および K イオンの電気化学当量 (mg/A·h) である。

式(3), (4), および(5)より, ペースト中のアルカリイオンの集積速度は, 積算電流量が $10 \text{ A}\cdot\text{h}$ 程度以下で, 電流密度の比較的低い ($0.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$) 電解の場合, 理論的に求めた集積速度の $1/70 \sim 1/100$ であり, また, $10 \text{ A}\cdot\text{h}$ 以上で, 電流密度が高い場合には $1/100 \sim 1/130$ であった. これはペースト中には Na イオン, および K イオン以外にも多くの陽イオンが含まれており, Na イオン, および K イオンの集積に寄与した電流が $1/100$ 前後であると考えることができる.

(3) 軟化したコンクリートと鉄筋の付着特性

鉄筋の陰極電解によるペーストの軟化に起因するペースト、およびコンクリートと鉄筋との付着強度変化を調べるため、シリーズⅣで、次の3種類の供試体で付着強度試験を実施した。

- i) シリーズIV-1：加工した16 mm のみがき異形棒鋼を鋼管で拘束したペースト ($W/C=0.4\sim0.5$) 中に埋設した電解供試体。
 - ii) シリーズIV-2：16, および 19 mm の異形棒鋼をコンクリート(無拘束, $C=300 \text{ kg/m}^3$)に埋設した電解供試体。
 - iii) シリーズIV-3：25 mm の異形棒鋼を鋼管で拘束したコンクリート ($C=300 \text{ kg/m}^3$), および無拘束のコンクリートに埋設した電解供試体。

図-22 はシリーズIV-1 で付着強度を調べたときの積算電流量と自由端すべり量 0.005 mm における付着強度比（健全なペーストのときの付着強度を 1.00 とした）との関係を示した。また、図-23 は積算電流量と最大付着強度比との関係を示した。軟化したペーストの付着強度は積算電流量の増大に伴い低下し、すべり量 0.005 mm のとき 50 %、および最大付着強度のとき 60 % の最大低下率を示した。薄井ら⁵⁾の実験でも、鉄筋のすべり始めの付着強度の減少率が最大で 47.6 ~ 62.8 % であり、本実験の結果とよく符合している。

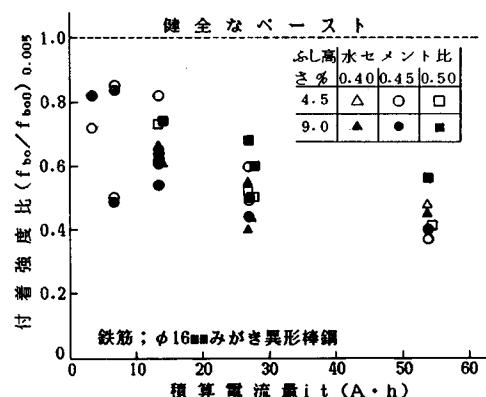


図-22 精算雷流量と付着強度の関係

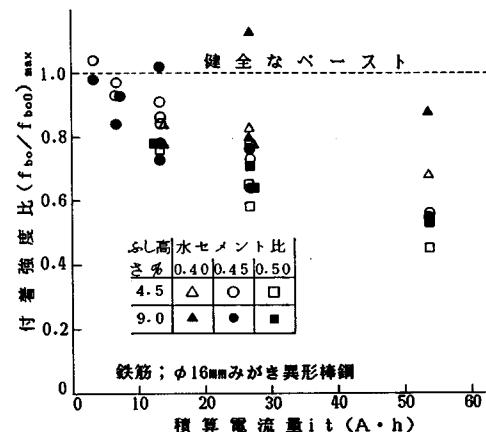


図-23 積算電流量と付着強度の関係

コンクリートの場合も、自由端すべり量 0.005 mm、または 0.05 mm、および最大、または 0.25 mm における付着強度は積算電流量が大きくなると低下する傾向を示した。その低下は大部分 10~30 % であり（最大で 70 % も低下した）、すべり初期（自由端すべり量 0.05 mm、または 0.005 mm）の付着強度の方が大きいようである。また 40 mA, 50 Hz の交流電流で電解した場合には、最大付着強度比が 0.90~1.05 の範囲で、アルカリイオンの集積も認められなかった⁹⁾。したがって、鉄筋コンクリートに交流電流が作用しても劣化は起こらないと考えてよいものと思われる。

6. 結 論

鉄筋コンクリートの電気分解による劣化を基礎的に解明するため、鉄筋のさび速度、軟化の機構、および軟化したコンクリートと鉄筋の付着特性等を実験した結果、本実験の範囲で次のことが明らかになった。

(1) モルタル中の鉄筋の電食によるさび量は水中での鉄筋のさび速度より著しく低下するが、積算電流量に比例する。したがって、モルタル中の鉄筋の電食においても、ファラデーの法則が適用でき、埋設鉄筋のさび速度は電食係数で評価することができる。

(2) モルタル中の鉄筋の電食係数はセメント量、水セメント比、およびセメントの種類、および AE 剤、減水剤、防錆剤などの混和剤の影響をほとんど受けない。しかし、塩化物、および塩化物を含む促進剤はわずかな塩化物イオン濃度でも電食係数を著しく増大させる。また、電流の強さ、セメント量の多少による電食係数は、塩化物を含む場合には、セメント中に固定された塩素のイオン化の影響が著しく現われ、電流が大きいほど、またセメント量が少ないほど大きくなる。

(3) 一定電圧で電解したときの平均電流密度はモルタルの配合に関係なく、乾燥に伴ってほぼ直線的に低下し、含水率約 6 % でモルタルは絶縁状態に近くなる。含水分の違いによる鉄筋の電食係数は塩化物の少ない、良質のモルタル中に鉄筋が埋設されれば、乾燥に伴いわずかに小さくなる。しかし、モルタルの品質がよくなかったり、多量に塩化物を含んでいると含水率 6 % 程度の乾燥モルタルの中でも鉄筋の電食係数は大きくなる。

(4) 一定電圧で電解したとき、かぶりと平均電流密度の間にはオームの法則が適用でき、埋設鉄筋の電食係数もかぶりに反比例する。しかし、塩化物を含まない場合にはかぶりによる電食係数の差はわずかである。

(5) 鉄筋が陰極となるような電解における鉄筋周辺ペーストの軟化はアルカリイオン (Na^+ , および K^+)

の集積が原因と考えられ、アルカリイオンの集積によるペーストの微細構造の変化を引き起こしているものと推察される。軟化深さは 1.7~3.0 mm であり、積算電流量の増大とともに広がる。アルカリイオンは軟化範囲のペースト中に集積し、その集積量は積算電流量に比例して増大し、ファラデーの法則が適用できる。なお、軟化したペーストは非常に湿って、金属片で簡単に削れるほどもろい状態である。

(6) 軟化したペースト、およびコンクリートと鉄筋の付着強度は異形鉄筋でも積算電流量の増加に伴い低下し、健全なコンクリートの強度に比べて 10~30 % も低下する。特にすべり初期の低下が大きい。なお、交流電流による電解では付着強度の低下も、アルカリイオンの集積も認められず、鉄筋コンクリートの劣化は起こらないものと考えてよいようである。

謝 辞：本研究は東京都立大学名誉教授 村田二郎博士のご指導のもとに実施したものであり、また実験の実施にあたっては足利工業大学講師 荻原俊夫氏、実験助手 前山光宏氏（現・足利工业大学付属高校教諭）、教務職員 二ツ森茂樹氏（現・第一建設）、末吉達也氏ほか多くの方々のご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長野蘭蔵・山脇作十郎：鉄筋コンクリートの電食に対する抵抗性、セメント技術年報、12、昭和 33 年。
- 2) 近藤泰夫・武田昭彦・秀島節治：鉄筋コンクリート中の鉄筋の電食現象におよぼすセメント混和材料の影響について、土木学会誌、Vol. 43, No. 2、昭和 33 年。
- 3) 山本信行：鉄筋コンクリートの電気的崩壊（I）、（II）、セメント界彙報、313, 314、昭和 9 年。
- 4) 薄井康介・巽 純一：鉄筋コンクリート構造物の電食問題、セメント界彙報、315、昭和 9 年。
- 5) 電気学会・電気防止委員会：電食土壤腐食ハンドブック、昭和 52 年。
- 6) 黒井登起雄：埋設鉄筋の電食係数とコンクリートの電気抵抗、セメント技術年報、38、昭和 59 年。
- 7) 黒井登起雄・末吉達也：鉄筋コンクリート部材の電食における塩素イオンの影響、セメント技術年報、40、昭和 61 年。
- 8) 森 仁明・峰岸敬一・太田 威・秋葉徳二： C_3S 硬化体の微細構造におよぼすアルカリの影響、セメント技術年報、15、昭和 46 年。
- 9) 黒井登起雄・末吉達也：交流電流の流れた鉄筋およびコンクリートの性状に関する基礎的研究、第 14 回関東支部年次研究発表会講演概要集、1987. 4.

(1987. 10. 28・受付)