

[16] コンクリート中の鉄筋の腐食機構に関する基礎的研究

正会員○片脇清士(建設省土木研究所)

片脇田実(建設省土木研究所)

1 まえがき

海洋環境のなかでも飛沫帶部のようにとりわけ腐食性の厳しい場所でのコンクリート構造物の劣化が最近注目されている。この種の劣化の特徴は当初コンクリートにはひびわれが見当たらなかったにもかかわらず、を経てはじめてひびわれが観察され、コンクリート内部の鉄筋が著しく腐食している点にある。このひびわれは鉄筋の腐食によって生じたと想像されるが、中性化調査結果ではひびわれ面は中性化しているがその他の部分は高アルカリ性を保持したままであることが確かめられており、このような条件でなぜ鉄筋が腐食するのかとの疑問が生じた。実際に海岸に構築されたコンクリート構造物中の塩分が高濃度であるとの調査結果(含有塩分量10~30 kg/m³の場合もある)も報告されている。そこで鉄筋コンクリートを溶液モデルに置き換えこれらの条件を再現して腐食機構を明確化にするための実験を行った。

以下に実験結果を紹介する。

2 実験

2.1 実験内容

鉄筋の腐食実験および腐食抑制実験を行った。

(1) 腐食実験；表-1の試験要因を組み合わせ、試験溶液のpHや酸素濃度の大小、塩分含有量を組み合わせた条件下での鉄筋の腐食挙動を測定した。

(2) 腐食抑制実験；溶存酸素量を人为的にコントロールした場合の溶液中の鉄筋の腐食抑制効果を測定した。

2.2 試験条件の設定

(1) 鋼材；構造用棒鋼(SR-24規格品)を切断加工し、切断面を精密研磨して供試面とした。

(2) 試験溶液(溶液)；特級塩化ナトリウムを純水に所定の濃度で溶かした溶液(中性溶液)とそれに特級水酸化カルシウムを溶かしてpH 12.5に調整した溶液(高アルカリ性溶液)の2種類を用いた。

なお溶液に通気して空気をたえず溶かしこむ場合(高酸素濃度)と高純度窒素をたえず送りこみ脱気する場合(低酸素濃度)の2通りの場合がある。なお酸素濃度は溶存酸素計を用いて所定濃度範囲にあることを確かめている。

2.3 測定と解析

鉄筋の腐食挙動の測定には電気化学的手法を用いた。測定項目および解析のフローチャートを図-1に示した。鉄筋の腐食性状(特に不動態の有無)を知るために鉄筋の分極特性を求め、鉄筋の腐食速度を知るためにターフェルプロットから腐食電流を算出した。

表-1 試験要因

| 溶液のpH | 高アルカリ性溶液 | | 中性溶液(中性化した) | | |
|-------------------------|-----------------|-----|--------------------|------|------|
| 溶液中の酸素濃度 | 低酸素濃度 1.0 ppm以下 | | 高酸素濃度 1.0~10.4 ppm | | |
| 塩分含有量 kg/m ³ | 0 | 0.7 | 2.0 | 10.0 | 30.0 |

| | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|-------|
| コンクリート中濃度換算 kg/m ³ | 0.7 | 2.0 | 10.0 | 30.0 |
| 換算表 砂換算濃度 % | 0.12 | 0.35 | 1.77 | 5.31 |
| 溶液中重量濃度 % | 0.44 | 1.26 | 6.33 | 18.99 |

W 158 C 351 S 565 G 1052 kg/m³として換算

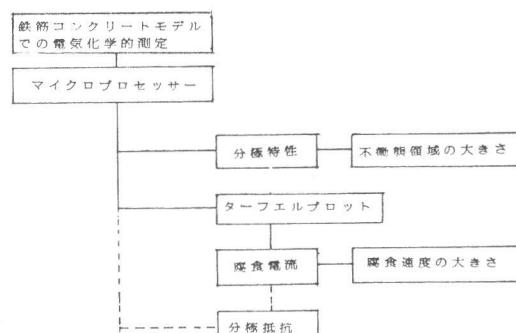


図-1 測定および解析のフローチャート

3. 実験結果

3.1 鉄筋の分極特性測定結果

本実験で得た分極特性の一部を図-2および図-3に示した。図-2は不動態領域が明りょうに存在する場合であり、図-3は不動態領域が消滅している場合である。いずれも高アルカリ性溶液中ではあるが、図-2に較べて図-3(a)では溶存酸素濃度が高くなっている点、図-3(b)では塩分濃度が高くなっている点が異なっている。

塩分濃度やpH、溶存酸素濃度をさまざまに組み合わせた溶液中での鉄筋について分極を測定した結果を表-2に示す。これによれば、鉄筋が不動態領域をもつのは、①高アルカリ性溶液で、②低酸素濃度しかも③塩分濃度が小さい場合に限られる。逆にいえば①②③の各条件のひとつもしくはふたつしか満たさない条件下では、鉄筋の腐食が生じることが裏付けられた。

塩分を含まないコンクリートでは高アルカリ性でしかもコンクリート中の通気量が小さいために（良質のコンクリートは空気遮断性にすぐれている）鉄筋に不動態皮膜を生じ、鉄筋は腐食から保護されている。しかし含有塩分量が増大すると保護作用が失なわれ鉄筋が腐食する。この保護作用が失なわれるコンクリート中塩分濃度の境界は、 $0.7 \text{ kg/m}^3 \sim 2 \text{ kg/m}^3$ の間にある。

表-2 鉄筋の分極特性

| 塩分濃度 kg/m^3 | 鉄筋の分極特性 | | |
|-------------------------|---------------------|---------------|---------------|
| | 高アルカリ性溶液 (低酸素濃度) | 中性 (低酸素濃度) | 溶液 (高酸素濃度) |
| 0.7 | ○ | × | × |
| 2.0 | △～× | × | × |
| 10.0 | × | × | × |
| 30.0 | × | × | × |

○ 不動態領域が明りょうに存在
△ " の存在は疑わしい
× " は消滅

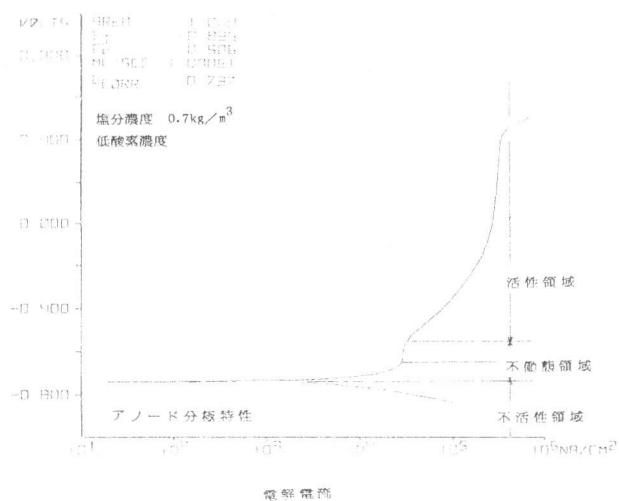


図-2 高アルカリ性溶液中での分極特性(不動態が存在)

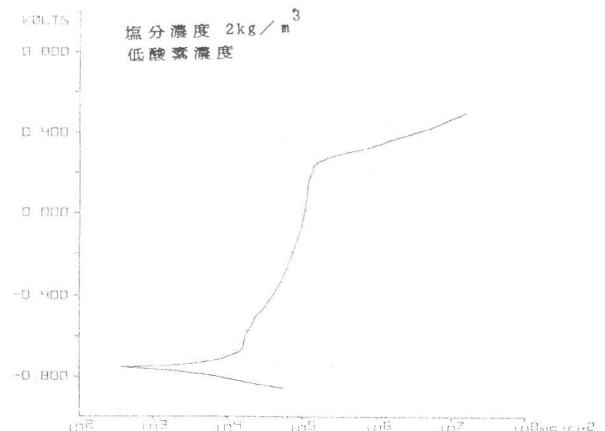
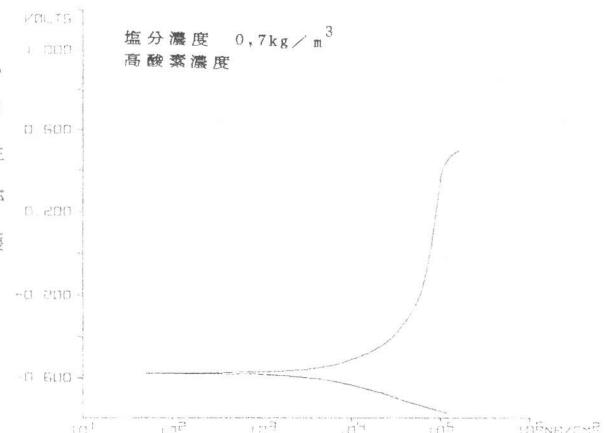


図-3 高アルカリ性溶液中での分極特性
(不動態が消滅)

3.2 鉄筋の腐食速度測定結果

溶液中での鉄筋の腐食電流値（腐食速度）を図-4に示す。

中性溶液（高酸素濃度）の腐食電流値が、いずれの塩分濃度においてももっとも大きい。中性溶液（低酸素濃度）の場合の腐食電流はこれに次ぐが、とくに高塩分濃度の場合に腐食電流が著しく大きくなる傾向にある。

高アルカリ性溶液（低酸素濃度）で低塩分濃度の場合には腐食電流は小さく腐食速度としては無視しうる程の小ささである。塩分濃度が増加するとともに腐食電流も次第に増大する。高塩分濃度での腐食電流は、 $600 \sim 900 \text{ nA/cm}^2$ （塩分濃度 $10 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ ）にも達し、この値は塩分濃度 0.7 kg/m^3 の中性溶液（高酸素濃度）にも相当するほどである。このように大きな電流量は、鉄筋にかなりの量のさびを生じさせるに十分であると思われる。

3.3 鉄筋の腐食抑制実験結果

実際の構造物では劣化が進行するとコンクリートにひびわれが生じる場合が多い。コンクリートのひびわれ面は中性化しており、これにともない、ひびわれ部の鉄筋の接する環境はアルカリ性から中性環境と変っている。同時にひびわれがあるために、通気性も著しく増している。

ひびわれ発生前後のコンクリートをモデル化した場合の、2種類の塩分濃度溶液での腐食電流の測定結果を図-5(a)に示した。

ひびわれ発生直後、溶液が中性化すると共に腐食電流は急激に増加する。（通気状態ではいっそう腐食電流が増加する。）

さて、鉄筋の三大腐食要因は、水、塩分、酸素であるが、水と塩分をコンクリートより取り除くことは実際上難しいが、通気を遮断することは、たとえば、コンクリート表面に樹脂塗料を塗布するなどによって可能である。

通気を遮断する前後のコンクリートをモデル化した場合の腐食電流の測定結果を図-5(b)に示した。塩分の多い場合(10 kg/m^3)も少ない場合(0.7 kg/m^3)もいずれも通気遮断直後(脱気開始直後)より腐食電流は減少している。鉄筋の腐食は抑制されたよう見えるが、この場合でも腐食電流値は中性化以前の高アルカリ性(低酸素濃度)時の腐食電流値までに減少するわけではない。

すなわち、コンクリートにひびわれが入った条件下では単なる空気遮断による対策のみでは完全な腐食抑制効果は期待できないようである。

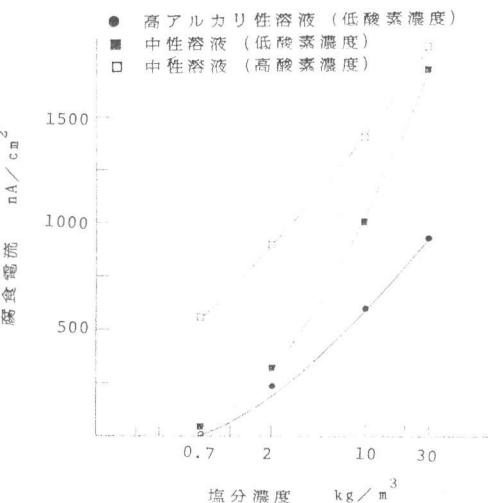


図-4 溶液中鉄筋の腐食電流（腐食速度）

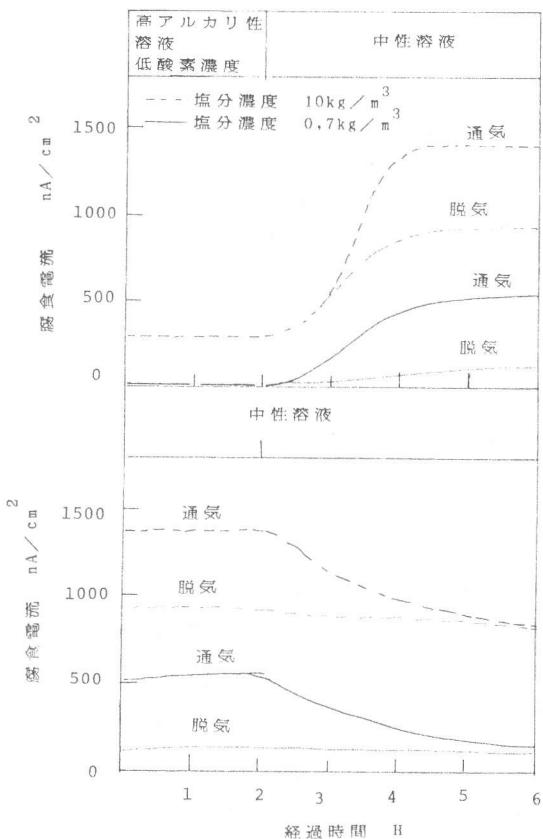


図-5 鉄筋の腐食速度の経時変化

4 鉄筋の腐食機構に関する考察

飛沫帯ではコンクリートが直接海水にさらされ表面より塩分が浸透すること、この浸透した塩分がコンクリート内部で蓄積されたことは既に報告した。^{(1),(2)}

腐食によって生じたさびの体積増加によって、コンクリートがひびわれるという実験結果もしばしば報告されている。

以上につけ加えて本実験によって中性化していないコンクリート中であっても含有塩分量が大きい場合には、鉄筋は腐食することが実験的に確かめられまたその腐食速度はけっして小さいものではないことも明きらかとなった。

またひびわれ後の腐食の急速の増大も、通気量の変化と部分的な中性化とでもって実験的に説明できた。

これで、塩分の浸透—蓄積—鉄筋の腐食—ひびわれの発生—目に見えるほどの腐食の進展という一構造物の設置から劣化に到るまでの一連の関係を合理的に説明できたように思う。

飛沫帯でのコンクリート中の鉄筋の腐食機構と腐食速度について図-6のように提案したい。

5.まとめ

飛沫帯での鉄筋コンクリートをモデル化した溶液実験によって次の点が明きらかとなった。

- (1) 高アルカリ性でしかも低酸素濃度条件（コンクリート内部はこのように考えられている）下でも含有塩分量が多い場合には鉄筋は腐食する。これは鉄筋保護作用を有する不動態皮膜が消滅するためである。
- (2) 上記条件下での鉄筋の腐食速度は含有塩分が増大するとともに増大する。
- (3) ひびわれを生じたコンクリート中の鉄筋腐食が加速される原因として、通気量の変化や中性化を含めて実験的に検討した。
- (4) 通気を遮断するのは鉄筋の腐食速度抑制に効果があるが、既にひびわれたコンクリートの場合には抑制効果は小さい。

参考文献

- (1) 片脇 清、森 芳徳、蒔田 実、古賀康之、小林茂敏“東京湾での鉄筋コンクリートの長期暴露試験”コンクリートの劣化に関する資料集(1), コンクリートの劣化に関する委員会、日本コンクリート工学協会 (1981)
- (2) Makita, Mori, Katawaki “Marine corrosion behavior of reinforced concrete exposed at Tokyo Bay” International Conference on performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65 (1980)

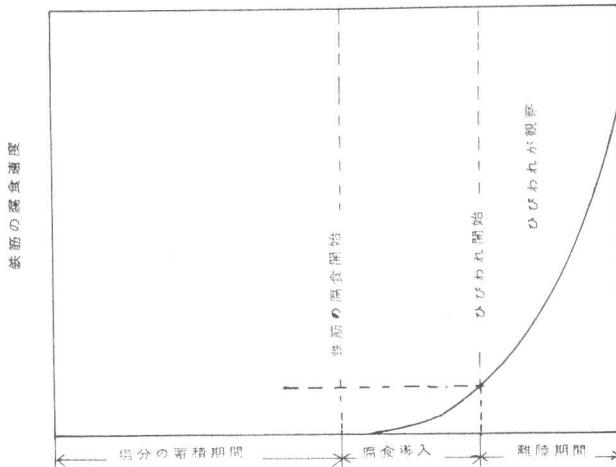
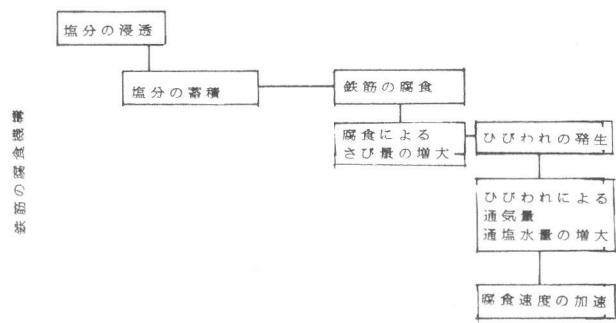


図-6 飛沫帯でのコンクリート中の鉄筋の腐食機構