

コンクリートの炭酸化による鉄筋腐食に及ぼす細孔溶液の移動の影響

Effect of Pore Solution Migration on Corrosion of Reinforcing Steel in Carbonated Concrete

小 林 一 輔*・宇 野 祐 一*

Kazusuke KOBAYASHI and Yuichi UNO

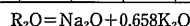
1. は し が き

鉄筋の腐食はコンクリートの細孔溶液のpHによって左右される¹⁾²⁾。コンクリートの細孔溶液は、一般にpH=12以上という強いアルカリ性を持っているが、このような環境では鉄筋の表面に不動態と呼ばれる薄い酸化皮膜が形成されており、このために鉄筋は腐食作用から保護されている。ところが、細孔溶液のpHが11以下に低下したり、塩化物イオンなどのハロゲンイオンが存在すると、この不動態皮膜が破壊され、鉄筋は腐食物質から無防備状態となる。この時点で、酸素が侵入すると鉄筋は腐食を開始すると言われている。これらのうち、細孔溶液のpHを低下させる原因の主なものとしてコンクリートの炭酸化がある。炭酸化が鉄筋の腐食に関係して論じられる場合、セメントの水和反応の主生成物である水酸化カルシウムが大気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムに変化する現象として取り扱われる。ここで、飽和水酸化カルシウムのpHが12.6の強いアルカリ性を示すのに対して炭酸化によって炭酸カルシウムとなった部分のpHは8.5程度になるので、この部分に鉄筋が存在すると、表面の不動態皮膜が破壊され鉄筋が腐食しやすくなると

表-1 セメントの化学組成

単位%

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
1.1	22.1	4.8	2.9	64.9	1.4	1.9	0.24	0.50	0.57



いうのが一般的な考え方である。要するにコンクリート表面からの炭酸化深さと鉄筋の腐食とは密接に関連しているということである。このことは従来、図-1のような模式図³⁾で表されている。この図は、炭酸化部と未炭酸化部の間にpHの勾配が存在し、フェノールフタレインの呈色界面よりも鉄筋の腐食開始位置が若干深部にあることを示した図である。これは、コンクリート中における細孔溶液または細孔溶液中のイオンの移動がほとんど行われていない場合には適用できる考え方であるが、実際のコンクリート構造物では程度の差こそあれ上記のような物質移動が行われていると考えるのが妥当である。たとえば、炭酸化が生じている領域であっても、その部分の細孔溶液の水酸基イオン濃度が十分に高ければ鉄筋の腐食は生じないことになる。本文は、これをシミュレーション実験を通じて検証したものである。検証は以下のようにして行った。すなわち、中央部に円柱状の空孔を有するモルタル円柱体に磨き棒鋼を埋め込み、その空孔部から水を供給して鉄筋の近傍に常にpHの高い溶液が供給されるようにしながら促進炭酸化試験を行って、炭酸化が鉄筋部分にまで到達した時点で鉄筋に腐食が生じているか否かを調べた。

2. 実 験 概 要

実験に使用したセメントは $R_2O=0.57\%$ の普通ポルトランドセメントである。その化学組成を表-1に示す。骨材は豊浦産の標準砂を用い、水はイオン交換水を使用した。さらに、鉄筋腐食に及ぼすセメント中のアルカリ分ならびに塩化物イオンの影響を調べるために水酸化ナトリウムをセメントの等価 Na_2O 量が0.9、1.5%になるように、また、塩化カルシウムをJIS A 5308「レデミック

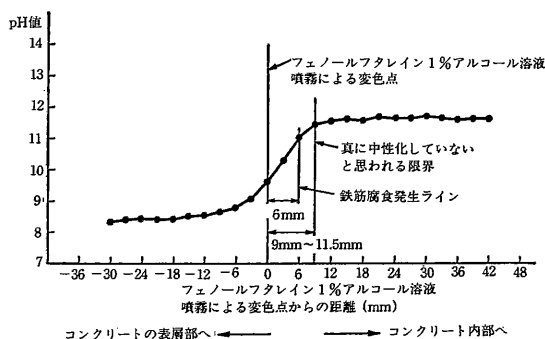


図-1 従来の中性化深さと鉄筋腐食発生位置の関係の概念図

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

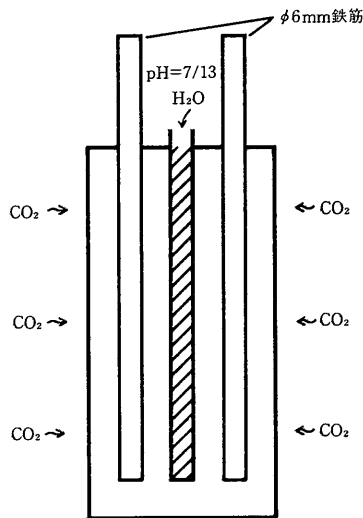


図-2 供試体 (モデル供試体)

ストコンクリート」に定める塩化物の許容量である 0.3kg/m^3 をモルタルに換算した 1.2kg/m^3 を最低量として 2.4, 3.6kg/m^3 になるように練り混ぜ水に溶解して添加した。

モルタルの水セメント比は 50% とし、フロー値が 180 になるように単位水量を定めた。

供試体は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱体とし、図-2 に示すように $\phi 6\text{mm}$ のみがき丸鋼 (SS-41) をかぶり 8mm で 2 本埋

め込んだ。図-2 は、さらに供試体中央部に $\phi 8\text{mm}$ の空孔部を設けたモデル供試体のものであるが、そのほかに空孔部を持たない普通供試体も作製している。

これらの供試体は打ち込み後 24 時間で脱型して外部に露出している鉄筋を下塗り材にエポキシ樹脂を、上塗り材にアクリルウレタン樹脂を使用してコーティングした後、温度 20°C の噴霧室内で 28 日間の湿潤養生を行った。

養生が終了した供試体は、まず、鉄筋近傍まで炭酸化を起こさせる目的で温度 20°C 相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 10% の条件で 10 週間の促進炭酸化を行った。その後、温度 20°C 、二酸化炭素濃度 10% の条件は変化させずに、相対湿度 96%、60% をおのおの 1 週間ずつ、都合 2 週間を 1 サイクルとして乾湿繰り返し返しを行い、鉄筋腐食を促進した。なお、モデル供試体については、中央部に設けた空孔部分から pH=7 ならびに pH=13 の溶液を促進炭酸化期間、乾湿繰り返し期間を通じて連続的に供給した。

所定のサイクル数を経過した供試体は、鉄筋埋設面が破断面となるように割裂し、直ちにフェノールフタレイン 1% エタノール溶液を吹き付けて、非発色部を炭酸化域として画像解析装置を用いて中央部 6cm の部分の炭酸化面積を測定し、その値から平均炭酸化深さを算出した。その後、鉄筋を取り出して腐食部分をトレースし、埋設部分の中央部 5cm の腐食面積率を画像解析装置を使用して求めた。以後に使用する炭酸化深さという用語は、フェノールフタレインによって求めた炭酸化深さのことである。

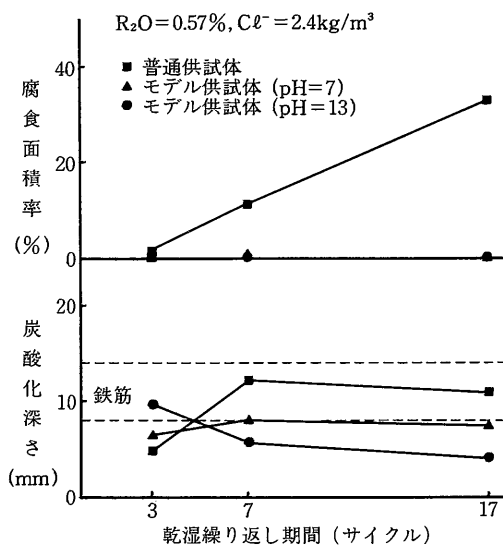


図-3 乾湿繰り返しサイクルと炭酸化深さおよび腐食面積率の関係

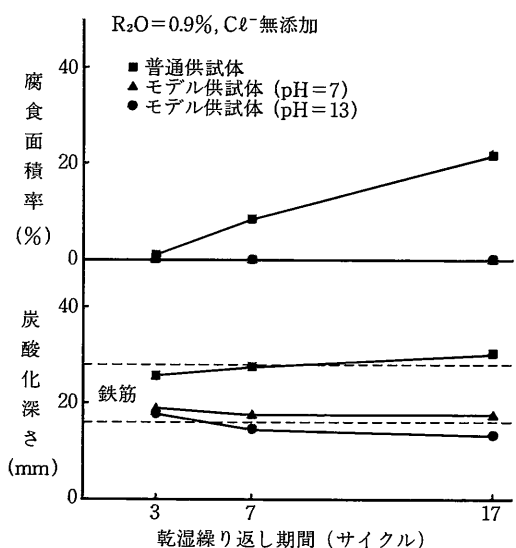
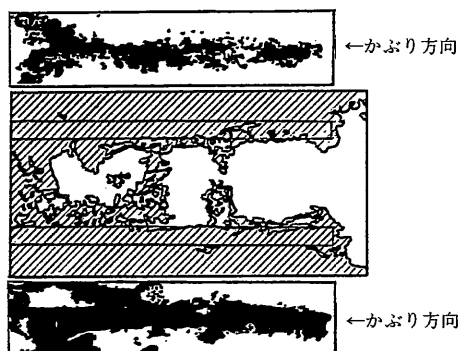
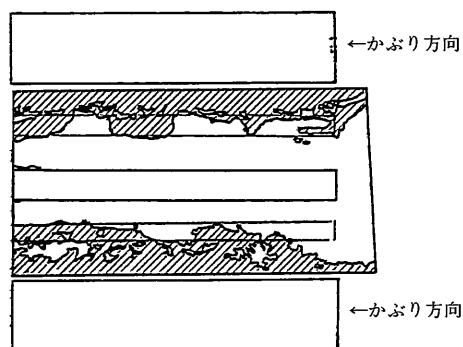


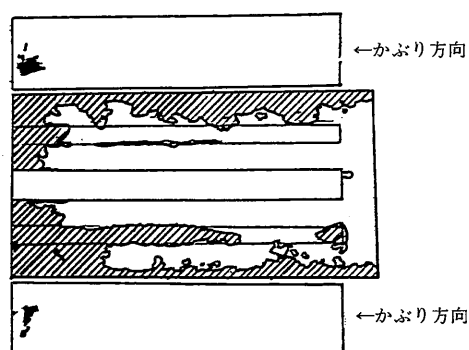
図-4 乾湿繰り返しサイクルと炭酸化深さおよび腐食面積率の関係



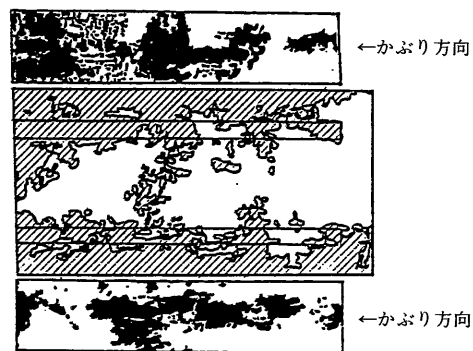
(a) 普通供試体



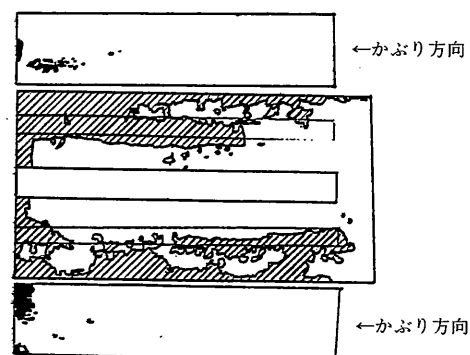
(b) モデル供試体 (pH=7)



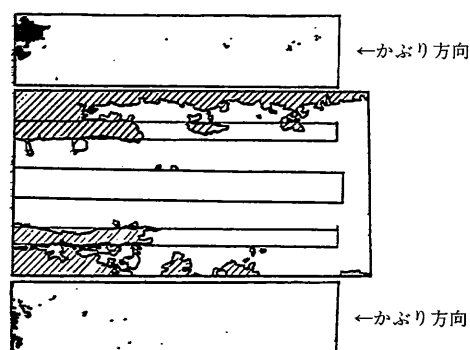
(c) モデル供試体 (pH=13)

図-5 各供試体における炭酸化と鉄筋腐食の関係
($R_2O=0.57\%$, $Cl^-=2.4\text{kg}/\text{m}^3$)

(a) 普通供試体



(b) モデル供試体 (pH=7)



(c) モデル供試体 (pH=13)

図-6 各供試体における炭酸化と鉄筋腐食の関係
($R_2O=0.9\%$, Cl^- 無添加)

研究速報

3. 実験結果と考察

図-3 および図-4 はそれぞれ $R_2O=0.57\%$, $Cl^-=2.4$ kg/m³ ならびに $R_2O=0.9\%$, Cl^- 無添加配合を例に取り, 乾湿繰り返しサイクル数と炭酸化深さ, 腐食面積率の関係を示したものである。この図より, 普通供試体においては, 乾湿繰り返しサイクルの進行にともなって炭酸化が顕著に進んでいないにもかかわらず, 腐食面積率は着実に増大していることがわかる。すなわち, この場合には鉄筋の周りの不動態皮膜がすでに破壊されて鉄筋が活性化状態になっていることが明らかである。また, モデル供試体においては, 炭酸化が鉄筋もしくは鉄筋近傍にまで到達しているにもかかわらず, 腐食の発生が全く見られないことがわかる。また, この現象は塩化物イオンの有無に関係なく見られる。この理由として, 1 つは水の供給によって酸素の拡散が制御されていることが挙げられる。しかし, 酸素の拡散速度と二酸化炭素の拡散速度を比較した場合, 前者のほうが速いことから考えて炭酸化が鉄筋表面まで進行している場合には, 酸素の拡散も当然鉄筋付近においても活発に行われていると考えられる。したがって, 上述の要因は, 本実験の結果を説明するものではないと考えられる。このことから, モデル供試体の鉄筋がほとんど腐食していない理由は, 細孔溶液の移動にともなって鉄筋近傍の pH が高い値に保持されているためと考えるのが妥当である。

図-5 ならび図-6 は, 乾湿繰り返し 17 サイクルにおける炭酸化と鉄筋腐食との関係を実際の供試体から写し

取ったものである。この図より明らかなように, モデル供試体においては, 最大炭酸化深さが鉄筋を越えて内部まで到達している場合でも鉄筋の腐食が発生していないことがわかる。また, 普通供試体の場合には, 炭酸化と鉄筋の腐食の間には一応の相関がありそうである。

以上のことから, 炭酸化が鉄筋位置にまで到達していても, その部分の pH が高い状態に保たれていれば, 鉄筋の腐食が生じないことが明らかとなった。この現象は, 特に孔隙水の移動が活発に行われるような構造物の場合に起こりうるものであり, コンクリート構造物中を細孔溶液が移動するという概念が鉄筋腐食に関して非常に重要な要因であることを示唆するものである。

4. お わ り に

本報告は, 炭酸化と鉄筋腐食の関係について細孔溶液の移動という概念を取り入れて実験を行い, 鉄筋近傍の pH が十分高ければ, 炭酸化が鉄筋にまで到達していても鉄筋が腐食しないことを明らかにしたものである。

(1990年2月26日受理)

参 考 文 献

- 1) Whitman, R., Russel, R. and Altieri, V.: Ind. Eng. Chem., Vol. 16, p. 665 (1924)
- 2) Pourbaix, M.: "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", Pergamon Press, New York (1966)
- 3) 岸谷孝一・榎野紀元: 日本建築学会論文報告集, 第283号, pp. 11-15 (1979)