

V-210 コンクリート中における腐食物質の移動に関する研究

広島大学工学部 正会員 河合研至

1. はじめに

コンクリート構造物が早期劣化を起こす主要な要因として、アルカリ骨材反応ならびに鉄筋腐食を挙げることができる。アルカリ骨材反応は、細孔溶液中のアルカリと骨材中の反応性鉱物との化学反応によって進行するが、反応が進行するためには細孔溶液の移動によって骨材粒子にアルカリが供給される必要がある。また、鉄筋腐食は、塩化物イオンの拡散・浸透や二酸化炭素の拡散・浸透による炭酸化などによって、鉄筋表面に形成されている不動態皮膜が破壊されることにより進行していく。このように、コンクリートの細孔溶液の組成とその移動は、コンクリート構造物の劣化機構と密接に関連している現象である。

本論文は、炭酸化に伴って、コンクリートの内部に存在するアルカリ化合物、塩化物ならびに硫黄化合物が移動・濃縮することを明らかにするとともに、そのメカニズムならびにこれらの現象とコンクリートの劣化との関係について検討したものである。

2. 実験方法

本実験においては、 $\Phi 5 \times 10 \text{ cm}$ の円柱モルタル供試体を使用した。配合は、 $W:C:S=0.5:1:1.75$ とし、セメント重量の0.36%の塩化物イオンを CaCl_2 として練り混ぜ時に添加している。また、セメントは $R_{20}=0.57\%$ の普通ポルトランドセメントを使用しているが、セメント中の R_{20} 量を NaOH 添加により1.5%となるように調整した。なお、細骨材としては豊浦標準砂、練り混ぜ水としては脱イオン水を使用した。

供試体は24時間で脱型後、材令28日まで 20°C の噴霧養生室内にて湿潤養生を行なった後、 CO_2 濃度10%、 20°C 、60%RHの条件下で促進炭酸化を行なった。

供試体は、円筒軸に直角に厚さ7~8mmの円盤状に切断し、一方の面をダイヤモンドスラリーを用いて研磨した後、炭素蒸着を行ない、EPMAによる面分析に供した。なお、促進炭酸化8週のEPMAによる面分析結果に関しては、X線カウント数を画像解析装置に取り込み、画像処理により、断面内における塩化物イオンの量的比較を行なった。また、促進炭酸化16週を経た試料については、EPMAによる面分析を行なった後、分析面を再度研磨して炭素蒸着を剥ぎ取り、炭酸化の程度をフェノールフタレイン1%エタノール溶液を吹き付けた発色状況により観察した。

3. 実験結果および考察

促進炭酸化16週におけるナトリウムならびに塩素のEPMAによる面分析結果を図-1~2に示す。なお、カリウムはナトリウムの結果と、硫黄は塩素の結果とほぼ同様の傾向であった。ここで、同一断面のフェノールフタレインによる呈色反応の結果を写真-1に示すが、この写真とEPMAによる面分析結果との比較により、塩素濃度の高い領域が非炭酸化部に対応し、ナトリウム濃度の高い領域が炭酸化部に対応していることがわかる。

すなわち、コンクリートの炭酸化により、アルカリは炭酸化部に塩化物イオンならびに硫酸イオンは非炭酸化部に移動

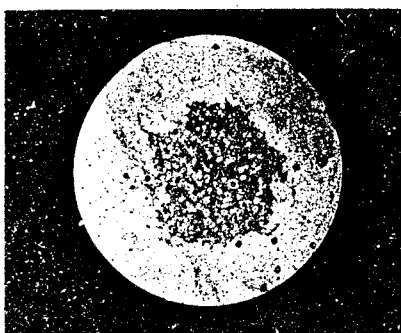


写真-1 フェノールフタレインによる呈色状況

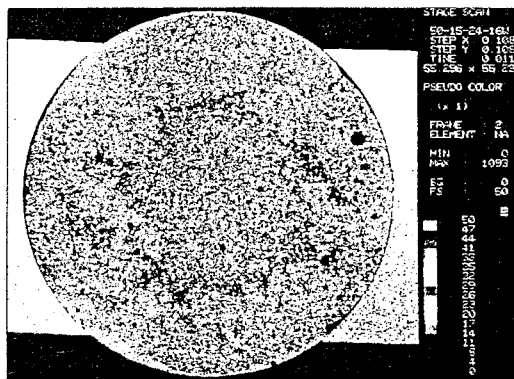


図-1 EPMAによる面分析結果(Na)

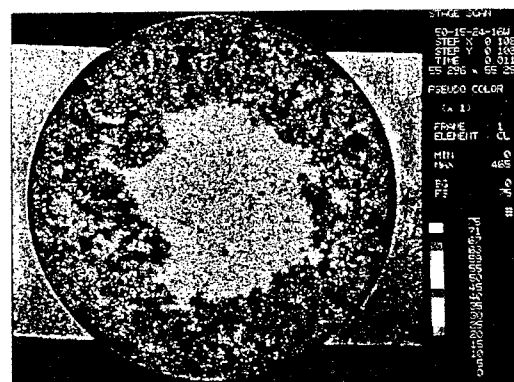


図-2 EPMAによる面分析結果(Cl)

することが明らかとなったが、これらの移動のメカニズムは次のよう(a)
うにして説明できるのではないかと考えられる。

コンクリート表面から侵入した二酸化炭素は、細孔溶液中に溶け込み、その一部は解離して炭酸イオンまたは重炭酸イオンとなる。細孔溶液中の炭酸イオンは固相から溶出している水酸化カルシウムと反応し、炭酸カルシウムを生成する。固相の水酸化カルシウムが存在する限りこの反応が進行するが、水酸化カルシウムがなくなると、細孔溶液中の水酸イオンと反応し、pHを低下させる。すなわち、コンクリートの炭酸化によって、細孔溶液中の主要なイオンは、アルカリイオンならびに水酸イオンから、アルカリイオンならびに炭酸イオンに変化する。すなわち、炭酸化部・非炭酸化部の間で、水酸イオンおよび炭酸イオンの濃度勾配が生じ、炭酸イオンは炭酸化部から非炭酸化部へ、逆に水酸イオンは非炭酸化部から炭酸化部へ移動を起こすことになる。しかし、これらのイオンはいずれも陰イオンであり、溶液の電荷のバランスを保つために陽イオンが伴って移動しなければならない。この陽イオンとして溶液中に卓越するアルカリイオンが最も考えやすい。水酸イオンの移動速度は炭酸イオンの移動速度に比べて極めて大きいことが知られている。このため、両方向の拡散を考えたとき、非炭酸化部から炭酸化部へ移動するアルカリイオンの方が多くなり、炭酸化部におけるアルカリイオン濃度が高くなるものと考えられる。

一方、セメント硬化体に固定されているフリーデル氏塩ならびにエトリンガイトは、炭酸化によって分解することが知られており、それぞれ塩化物イオンならびに硫酸イオンが細孔溶液中に溶出する。炭酸化を生ずるまでは、固定されている塩素量ならびに細孔溶液中に溶出している塩化物イオン量は断面内においてほぼ一様と考えられるが(図-3(a))、炭酸化によりフリーデル氏塩が分解し塩化物イオンが細孔溶液中に溶出すると、炭酸化部と非炭酸化部の間で細孔溶液中の塩化物イオン濃度に勾配が生ずる(図-3(b))。したがって、濃度拡散により炭酸化部の細孔溶液中の塩化物イオンは非炭酸化部へ移動する(図-3(c))。さらに、非炭酸化部へ達した塩化物イオンはそこで再びフリーデル氏塩として固定される(図-3(d))。そして、この固定は細孔溶液中の塩化物イオン濃度が一様となるまで進行するが、塩化物イオンが非炭酸化部へ達するや否や固定は生じるため、炭酸化部との境界付近で最も活発となり、固定されるフリーデル氏塩量は、その部分で最も多くなるものと考えられる(図-3(e))。ここでは、塩素の場合について考察したが、硫酸に関して全く同様のメカニズムにより、エトリンガイトの分解・生成、硫酸イオンの移動・濃縮を生じているものと思われる。

促進炭酸化8週の供試体において、塩素濃度の最も高い部分は、断面平均の約2.5倍程度にまで達していることを画像処理により確認している。塩化物イオンの挙動が問題となるのは、海砂等の使用により内部に塩化物を含んでいる鉄筋コンクリート構造物であるが、コンクリート内部の塩素含有量が規定値以下であっても、炭酸化の進行により塩化物が内部へ移動、濃縮し、鉄筋腐食を発生させる恐れがある。

硫酸塩を多く含む土壌に建設されたコンクリート構造物において、硫酸イオンがコンクリート内部に侵入し硫酸塩膨張を起こした事例は、これまでも数多く報告されているが、外部からの硫酸イオンの侵入がなくとも、炭酸化によりセメントに含まれている硫酸イオンが濃縮すれば、 C_3A との反応により生成されたエトリンガイトによって、局部的に膨張が生じ、ひびわれを生じる可能性のあることをここでは示した。

4. おわりに

本研究は東京大学大学院在学中に実施したもので、本研究に対して昭和63年度吉田研究奨励金を受けた。ここに付記してお礼申し上げます。

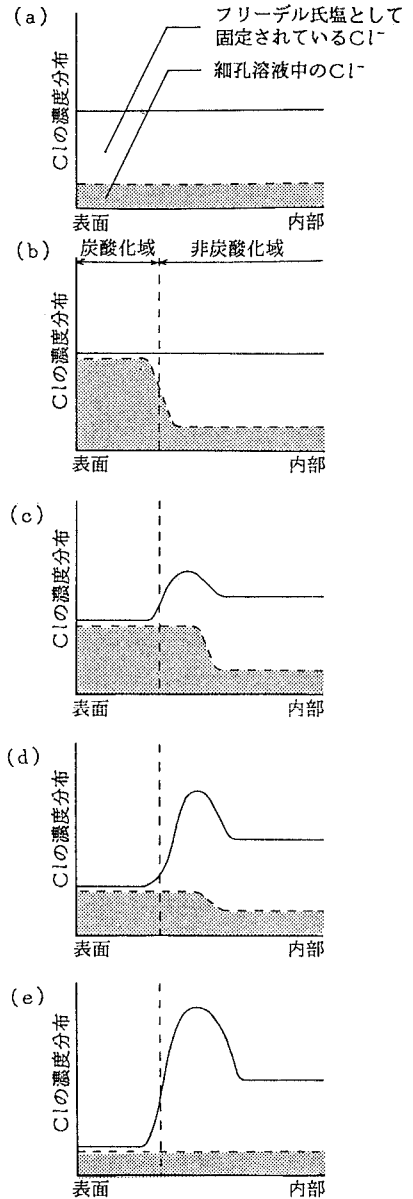


図-3 塩素の濃縮現象の概念図