

V-142 アルカリ・シリカ反応の進行におよぼす温度の影響に対する速度論的評価

鹿島技術研究所 正会員 古澤靖彦
 東京大学生産技術研究所 正会員 魚本健人

1. はじめに

アルカリ・シリカ反応は化学反応の一種であり、ASRの進行が環境温度に大きく影響を受けることは明かである。筆者は、ASRの進行を拡散律速理論に基づいてモデル化し、温度を変化させた経時的な溶出試験を通じて、アルカリの拡散係数が化学法の結果から求められること、および拡散係数の温度依存性がアレニウスの式に従って変化することを明らかにした¹⁾。一方、わが国は地域毎の温度変化に富む国であり、地域の相違によってASRの進行速度も大きく異なるものと思われる。本研究では、定量化された温度の影響から化学法の判定基準を検証すると共に、日本各地におけるASRの進行をシミュレートすることを試みたものである。

2. ASRの進行を予測するモデルと温度の影響の定量化

筆者らの提案したモデルは、コンクリート中における骨材とペーストの界面におけるASRの進行を下式のようなフィックの拡散則を簡略化した式で表現するものである。

$$dx/dt = kC/x \quad (1)$$

ここで、 x 、 t 、 k 、 C はそれぞれ、骨材界面からの反応層の厚さ(cm)、時間(hr)、アルカリの拡散係数(cm^2/hr)、細孔溶液のアルカリ濃度(mol/l)を示す。(1)式の両辺の変数を分離して積分すると下式が得られる。

$$x = \sqrt{2kCt} \quad (2)$$

筆者らは、火成岩系の骨材に対してASTM C 289およびJIS A 5308に規定される化学法に準拠した経時的な溶出試験を実施し、試験結果が(2)式を満たすような勾配 $\sqrt{2k}$ の直線関係で表されることを明らかにした(図-1)。これより、化学法の結果1点のみからでも、温度80°Cにおけるアルカリの拡散係数 k が求められる。また、各温度におけるアルカリの拡散係数が、図-2に示すようにアレニウスの関係を満たすことも明らかにした。図-2の直線の勾配が、アルカリの拡散係数におよぼす温度の影響を定量的に示すことのできる活性化エネルギーである。本研究では、ここで得られた活性化エネルギーの値を用いて、化学法の結果から得られる温度80°Cにおける拡散係数から、モルタルバー試験温度40°Cおよび、図-2に示した日本各地の平均温度をほぼ網羅する温度での拡散係数を推定した。

3. 化学法の判定基準におよぼす温度の影響

化学法ではSc(溶解シリカ量)とRc(消費アルカリ量)の関係を示す曲線によって骨材の反応性が判定される。また、化学法の判定結果とモルタルバー法の判定結果には高い相関が認められることから、この判定曲線とモルタルバー中の反応生成物量の間には何らかの相関があるものと考えた。そこで第一に、モルタルバー条件における反応生成物量の計算結果と判定曲線を比較することを試みた。反応生成物量は、(2)式で求められる反応層の厚さ x とモルタルバーの配合要因の関数として求められる¹⁾。計算の手順は、まず化学法の判定図の範囲

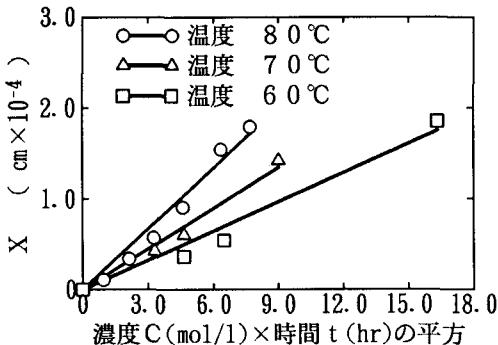


図-1 溶出試験結果

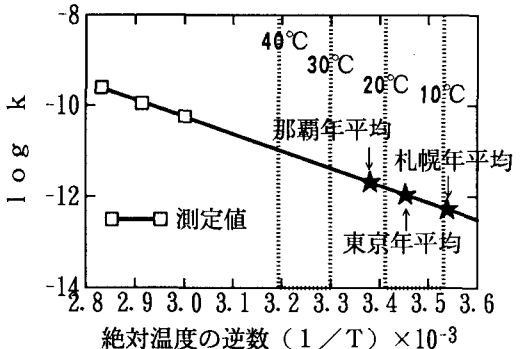


図-2 アレニウスプロット

での S_c と R_c の組み合わせから温度 80°C におけるアルカリの拡散係数を網羅的に求め、これを前述の方法で 40°C での拡散係数に換算し、次にこの拡散係数を用いてモルタルバーの判定材令6カ月における反応生成物量を求めた。結果を等高線図として図-3に示す。これよりわかるように、化学法の判定曲線は、 40°C 、6カ月で反応生成物量 0.1 (mol/l -モルタル) となる S_c 、 R_c の組み合わせ曲線とほぼ一致する。また、反応生成物総量の計算値が増加するにしたがって、 S_c 、 R_c の組み合わせ曲線は図の右側に移行することがわかる。化学法の判定図を検証すると、図の右上の領域は短期間で多くのシリカが溶解するが同時に多くのアルカリを消費する領域、図の右下はアルカリ消費量が少ないにもかかわらず多くのシリカが溶解する領域となる。本計算ではモルタル中のアルカリを有限としているため材令6カ月ではほぼすべての計算がアルカリの消失によって終了する結果となった。したがって、材令6カ月程度の比較的短期間で大きな反応生成物量となる有害領域は、 S_c が大きく R_c が小さい図の右下の領域に移行するものと解釈される。次に、各温度において材令6カ月における反応生成物量が 0.1 (mol/l -モルタル) となる S_c と R_c の組み合わせを同様に計算した結果を図-4に示す。この結果は、モルタルバーを 10°C から 30°C で養生した場合の判定曲線と同義であると考えて良い。ここで得られた判定曲線は、従来の判定曲線と同じく右側に有害領域を示すものである。これより、温度の低下に伴い、有害領域は右側へ移行することがわかる。したがって、モルタルバー法の判定基準が実構造物の被害の有無を忠実に反映するものと仮定すれば、骨材の適用地域の温度によって化学法の判定基準を変化させるフレキシブルな判定を行う必要があるものと考えられる。

4. 日本各地におけるASR進行のシミュレーション

図-5に、図-4で☆で示した化学法の結果となる骨材を用いたモルタルバー中のASRの進行を、日本各地の温度条件下で計算した結果を示す。計算対象とした S_c と R_c の組み合わせでは、最終的な反応生成物量は 0.3 (mol/l -モルタル) となる。なお、温度条件は年平均温度ではなく、月別の平均温度を忠実に入力し²⁾、打設時期は4月とした。図-5より、平均温度の高い那覇では打設後3年程度で最終的な反応生成物量に到達するのに対し、温度の低い札幌では反応の終了までに約8年を要することがわかる。また、夏期において反応速度が大きく、冬季に速度が低下する様子もよく示される。この結果からも、骨材の反応性の判定は地域別温度を考慮して行うことが望ましいことがわかる。

5. まとめ

本研究によって、化学法の判定基準が温度によって大きく変化すること、およびシミュレーションの結果から温度条件の異なる日本各地域でASRの進行速度が大きく異なることが予測された。本研究では、ASRの進行におよぼす温度の影響のみを対象に反応量を計算したが、この他、湿度、降水量の相違などが反応の進行におよぼす影響も大きいと考えられる。今後は、これらの影響についても試験的・解析的に検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 古澤, 魚本; アルカリ・シリカ反応の進行を定量的に予測する新しい判定システム, コンクリート工学論文集 Vol. 3. 2, 1992. 7 (投稿中)
- 2) 気象庁; 気象要覧, 1073号-1084号, 1989. 1-1989. 12

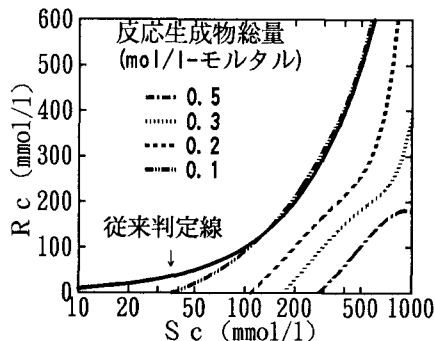


図-3 生成物計算値と判定曲線の関係

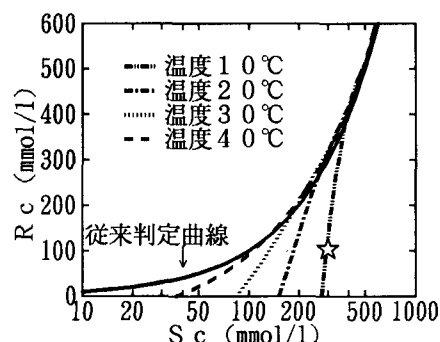


図-4 温度による判定曲線の変化

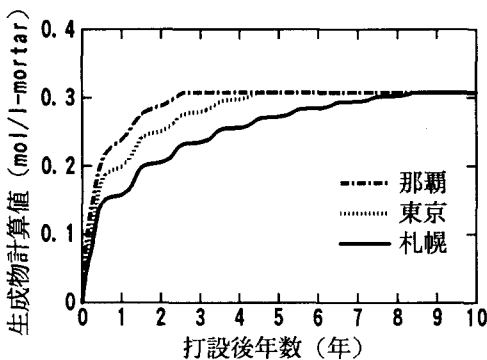


図-5 日本各地における反応の進行