

膨張試験および数値解析によるペシマム混合率の経時的変化に関する一考察

九州大学大学院 学生会員 ○俵積田新也, 港湾空港技術研究所 正会員 川端雄一郎
 (国研) 国立環境研究所 正会員 山田一夫
 九州大学大学院 正会員 佐川康貴, 学生会員 村上光樹
 九州電力株式会社 (元 九州大学大学院) 正会員 上野貴行

1. はじめに

実際のコンクリート構造物の施工現場では、骨材が混合使用される場合も多く、アルカリシリカ反応(ASR)に関する組成ペシマム現象が引き起こされることが懸念される。ASR 膨張を評価する手法として魚本ら¹⁾により ASR 膨張の経時変化に関するシミュレーションモデル(魚本・古澤・大賀法(U.F.O.モデル))が提案されているが、上野ら²⁾はこの U.F.O.モデルを用い、オパールを含み急速膨張性を有する安山岩骨材 N について、材齢とともにペシマム混合率が低い混合率へと変化するペシマム混合率の材齢依存性を再現した。本研究では、国内で ASR のもう一つの代表的骨材であるチャートを用いて、ペシマム混合率の材齢依存性を検証した。

2. モルタルバー法による検討

2.1 使用骨材および配合

アルカリ反応性の骨材として少量のカルセドニーを含み、主に隠微晶質および微晶質石英からなるチャートである中部地方産の骨材 T を使用した。JIS A 1146 に従い、モルタルバー法によるペシマム混合率の検討を行った。反応性骨材の混合率は 5~100%とし、反応性骨材に骨材 T を粉砕したものを、非反応性骨材に石灰石を使用した。

2.2 試験結果

図-1 に材齢 80 週までの膨張率の経時変化を示す。反応性骨材の混合率が 30~100%では材齢 10~20 週で急速に膨張したが、混合率の高い順に膨張は早期に収束した。混合率 10%では材齢 20 週を過ぎて膨張を開始し、膨張率の増加速度は低いが 80 週まで収束傾向は認められなかった。ペシマム混合率は材齢 26 週まで 50%, それ以降は 30%となったが、10%は膨張を継続しており今後ペシマム混合率は低下する可能性がある。骨材 T は骨材 N よりも反応性は低いが、組成ペシマム現象を示す急速膨張性³⁾に分類される。

3. U.F.O. モデルによるペシマム混合率の検討

骨材 T に対して U.F.O.モデル¹⁾を適用する。反応性骨材表面の反応層厚さ x (cm) が骨材内部方向へ一次元的に増加し、その速度 dx/dt がアルカリ濃度に比例するものとする、 dx/dt は式 (1) で表される。

$$dx/dt = C \cdot k/x \quad (1)$$

ここで、 t : 時間 (hr), C : ペースト部のアルカリ濃度 (mol/L), k : 反応速度定数 (cm^2/hr), である。

以下のア)~ウ)の仮定のもと、式 (2) により、

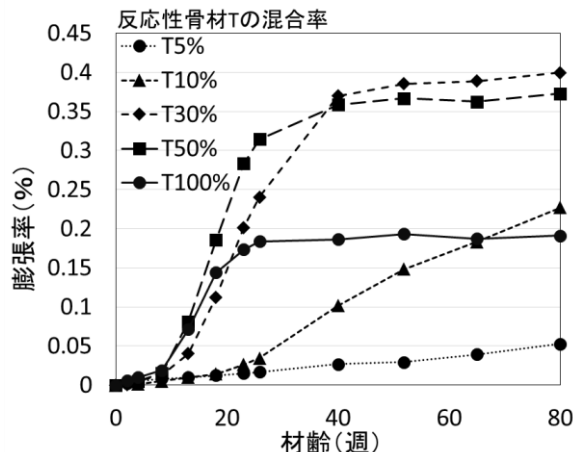
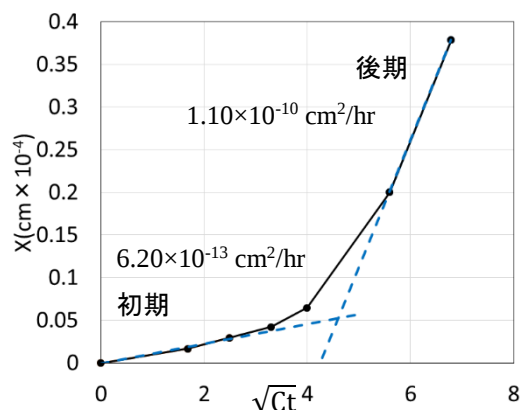


図-1 膨張率の経時変化(モルタルバー法)

図-2 反応速度定数 k の求め方 (80°C)

反応層 x を、球とみなした骨材の半径 R (cm) と反応率 α と関係付ける。

- ア) アルカリと骨材は完全に接触
- イ) 骨材は球体であり反応は表面から進行
- ウ) 反応層 x は骨材の半径 R に比較して十分小さい

$$\alpha = 1 - (1 - x/R)^3 \quad (2)$$

ここで、 α : 半径 R の骨材の体積反応率である。反応速度定数 k は、化学法による溶解シリカ量から計算した反応層厚さ x と、液相のアルカリ濃度 C と浸漬時間 t との積の平方根 $\sqrt{Ct}$ を図-2 のように示し、その傾きから算出した。反応速度定数はアレニウスの関係に従うことが確認されており¹⁾、本研究でもこの関係から 40°C における反応速度定数を算出した。後期の反応速度定数は初期に比べ急激に大きくなった。このような挙動は微晶質石英を有する遅延膨張

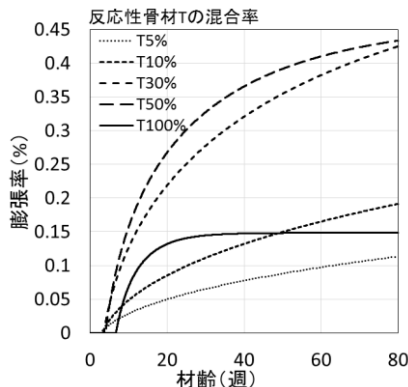


図-3 膨張率の経時変化 (80 週)

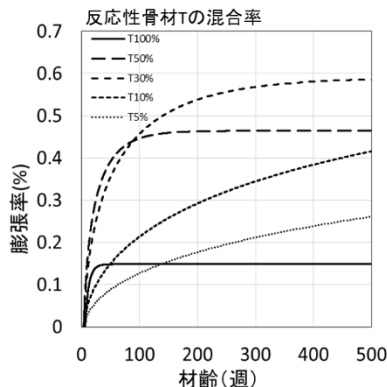


図-4 膨張率の経時変化 (500 週)

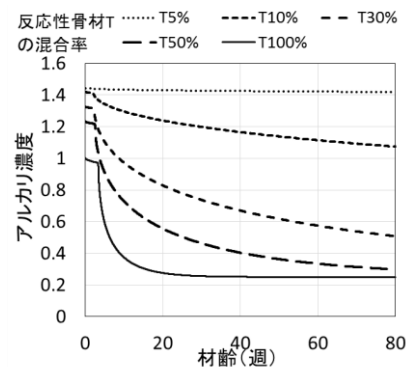


図-5 ペースト部のアルカリ濃度の経時変化

性骨材の場合に生じることが確認されている¹⁾。本研究でも反応速度定数を初期と後期の二段階に分けて考えた。計算の結果、40℃において、初期の反応速度定数を $3.01 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{hr}$ 、後期の反応速度定数を $1.57 \times 10^{-11} \text{cm}^2/\text{hr}$ とし、初期から後期に反応速度係数が変わる反応層の厚さを $5.22 \times 10^{-6} \text{cm}$ とした。これらに基づき反応生成物量、膨張寄与生成物量を算出し、膨張換算係数 E を用いて膨張率に換算した。また、膨張寄与生成物量とモルタルバー法での全水準の膨張率の傾向をフィッティングさせることで膨張低減係数（骨材の単位比表面積から膨張に寄与しない反応生成物量に換算する係数）を $h=4.0 \times 10^{-6} \text{mol} \cdot \text{cm}/\text{g}$ とし、全水準で用いた。膨張換算係数 E についても、実際の膨張率と膨張寄与生成物量の比較より $E=0.7\%/\text{mol}$ とし、全水準で用いた。

反応に伴い変化するアルカリ濃度は、初期のアルカリ濃度、アルカリシリカ比 k_{con} 、骨材により初期に消費されるアルカリ量 C_{agg} 、反応生成物量より算出した。ここで用いる k_{con} と C_{agg} は化学法に準拠した溶出試験の R_c と S_c を最小二乗法で直線近似し、その傾きを k_{con} とし、切片を基に C_{agg} を設定した。

計算条件の設定は、今回は反応性骨材の粒径依存性はないと仮定し、骨材量は骨材の粒形を $225 \mu\text{m}$ とした。間隙水量は、練混ぜに使用した水からセメント質量の 24%に当たる質量の水が水和で消費されたと仮定し算出し、促進期間中は水量一定とした。間隙水中のアルカリ濃度はアルカリ総量を間隙水量で除したものとした。

4. 結果および考察

シミュレーションにより得られた骨材 T における材齢 80 週と 500 週までの膨張率の経時変化をそれぞれ図-3、図-4 に示す。また、液相のアルカリ濃度の経時変化を図-5 に示す。図-1 と図-3 より、混合率 30～100%の水準で、急激に膨張後、特に 100%では膨張が収束し、混合率 5、10%では徐々に膨張する傾向が表現できた。図-3 と図-4、図-5 より、混合率 30～100%の水準において、混合率が高いほど急激にアルカリ濃度が減少しており、それに応じて膨張が収束していることが確認できる。高い混合率の場合、生成

するアルカリシリカゲルによりアルカリが消費され、液相中のアルカリ濃度が低下することで ASR が停滞することが上野ら²⁾と同様に再現できている。一方で、アルカリ濃度の低下が緩やかである混合率 5、10%では、図-4 において、材齢 500 週でも膨張が緩やかに進行しており、今後ペシマム混合率はさらに低下すると考えられる。ただし、混合率 5%のシミュレーションは実験での膨張よりも大きく、また、膨張開始期の膨張特性の再現は行っていない。今後長期実験による検証や、膨張低減係数などの設定方法などを検討し U.F.O.モデルを用いたシミュレーションの精度向上が不可欠である。

本研究により、チャート骨材においてもペシマム混合率の材齢依存性²⁾がある可能性を確認できた。シミュレーションの結果によれば、骨材に含まれる反応性鉱物によらず、ペシマム混合率は低下する可能性があることが分かった。

5. 結論

オパールを含む安山岩の骨材 N において確認されたペシマム混合率の材齢依存性を、チャートである骨材 T において確認することができた。今後、シミュレーションの精度向上のための検討が必要である。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP16H04389 の助成を受けたものである。関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 古澤靖彦，魚本建人：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，No.2，pp.15-25，1992
- 2) 上野貴行，川端雄一郎，山田一夫，佐川康貴：アルカリ反応性を有する急速膨張性骨材のペシマム混合率の経時変化に関する研究，性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理システムに関するシンポジウム論文集，pp.231-238，2017
- 3) T. Katayama: Petrography of alkali-aggregate reactions in concrete-reactive minerals and reaction products. Proc. East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar, Supplementary papers, Tottori, Japan, A45-A58, 1997