

アルカリシリカ反応に伴う膨張メカニズムに関する基礎的研究

Expansion mechanism derived from alkali-silica reaction

ライフサイクル工学研究室 大澤 紀久

Life Cycle Engineering Laboratory Norihisa Osawa

1. 研究の背景と目的

コンクリートに生じるアルカリシリカ反応（以下、ASR）に関する研究は、1980年代後半に大きく進展したものの、ASRによる膨張メカニズムや、ASRに起因するコンクリート構造物の劣化に関する問題は未だ解決していない。重要建築物・コンクリート構造物の継続利用のためには、ASRによるコンクリートの膨張ひび割れメカニズムの理解と、適切な評価・対策が不可欠である¹⁾。

本研究では、骨材単独およびコンクリート全体としてのASRに伴う膨張ひび割れメカニズムを明らかにすることを目的に、実験による検討を行った。なお、紙幅の関係で、ここではコンクリートに関する検討は割愛する。

2. 実験概要

骨材単体のASRによる膨張挙動を確認するために、アルカリ水溶液へ浸漬させた反応性骨材の断面観察を行った。また、骨材周囲のセメントペーストがもたらす拘束度が、膨張および質量変化と、それに伴うアルカリシリカゲル（以下、ASG）の滲出に影響を及ぼすと考えられる。このことを確認するため、水セメント比を実験水準としたNaOH添加セメントペースト試験体に反応性骨材を埋没させての断面観察を行った。加えて、異なる温度条件下でこれらの試験体の長さ変化率および質量変化率を測定し、また、切断面内のASG分布状況および内部ひび割れの観察を行った。

2.1 使用材料および測定の手順

結合材には、普通ポルトランドセメントを使用した。また、粗骨材は急速膨張性の安山岩砕石（以下、R骨材）を使用した。混和剤は、増粘剤としてアルキルアリルスルホン酸塩アルキルアンモニウム塩混合剤を使用した。なお、以下での測定および観察の際は、全ての試験体を20±2°Cの恒温室に静置し、温度を調整してから行った。

2.2 反応性骨材のアルカリ水溶液浸漬試験

R骨材50 gを、1.5 mol/L NaOH水溶液と過飽和Ca(OH)₂水溶液によるアルカリ水溶液50 mlに浸漬させ、100 mlのポリプロピレン容器（以下、PP容器）内に密閉した状態で60°Cまたは20°C環境で静置した。浸漬終了後に切削油を使用して小割切断機で湿式切断し、飽和塩（KNO₃:95%RH）により湿度95%・20°Cに調温調湿したデシケータ内で1週間静置した後に断面観察を行った。

2.3 反応性骨材のセメントペースト埋没試験

R骨材を、NaOHおよび増粘剤を添加した普通セメントペースト（以下、OCP）中に埋没させた試験体を作製した。これらは100 mlのPP容器密閉試験体および40×40×160 mmの角柱試験体とし、20°C 湿潤環境で養生を

行った。得られたPP容器密閉試験体は、材齢1週、2週、4週で容器から取り出して切断し、上述のデシケータ内で1週間静置した後に断面観察を行った。角柱試験体は、脱型直後の長さおよび質量を測定した後、1.5 mol/L NaOH水溶液を、試験体の表面積に応じて添加した不織布で包み、ゴムバンドで密着させてからビニル袋で密封した。その後、60°C、38°C、20°Cの温度環境下で湿潤養生を行い、1週毎に長さ変化率および質量変化率を測定した。併せて、同調合の角柱試験体を湿式切断し、五十嵐らの手法²⁾を参考に切断面における骨材周囲のASG分布状況を観察した。また、ASG観察後の試験体は上述のデシケータ内に1週間静置し、再度切断面の観察を行った。この実験で用いたPP容器密閉試験体の調合を表-1に、角柱試験体の調合を表-2に示す。

表-1 PP容器試験体の調合表

シリーズ	W/B	1 サンプル当たりの質量 (g/100ml)				
		水 (W)	セメント (B)	R 骨材 (G)	NaOH	増粘剤
N-0.5	0.5	51.5	103.0	30.9	0.55	1.0
N-1.0	1.0	63.9	63.9	30.9	0.55	2.0

表-2 角柱試験体の調合表

W/B	単位量 (kg/m ³)				
	水 (W)	セメント (B)	R 骨材 (G)	NaOH	増粘剤
0.5	160	320	309	5.5	5.32

3. 実験結果および考察

3.1 反応性骨材のアルカリ水溶液浸漬試験

NaOH および Ca(OH)₂ の混合アルカリ水溶液に浸漬させ、60°C 環境下で1週間経過後に切断した断面（左側）と、同条件で Ca(OH)₂ 水溶液のみに浸漬・切断した断面（右側）を図-1に示す。図より、ASGはNaOHが存在する環境下で生じる既往の研究結果^{例え(3),4)}と一致し、右側のR骨材ではASGは生じず、左側のR骨材で生じたASGは、骨材内から溶液中への溶脱が確認された。

3.2 反応性骨材のセメントペースト埋没試験

NaOHを添加したOPC中に埋没させ、60°C環境下で1週間経過後に切断したPP容器試験体の断面を図-2に示す。図より、水セメント比が低い試験体の方がR骨材中にASGがより多く蓄積されており、3.1節の結果を併せると、ASGは、骨材単体で蓄積されず、周囲の緻密なセメントペーストマトリックスがあってはじめて骨材内に拘束および蓄積されることが確認された。

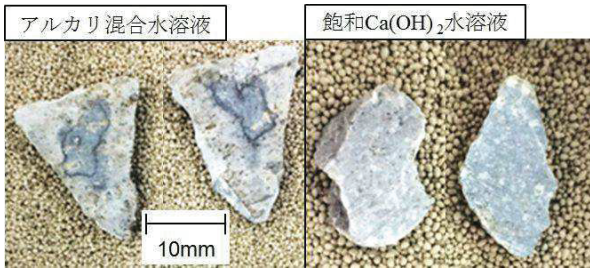


図-1 浸漬後 R 骨材の断面比較

NaOHを添加したOCPにR骨材を浸漬し、異なる温度条件下で養生した角柱試験体の長さおよび質量変化率の経時変化を図-3、図-4に示す。両図より、60°C環境下では、ASRに伴う長さ変化の増大が確認される一方、質量減少が確認された。これは、ASGの生成および水和による膨張によって試験体内部にひび割れが生じる一方で、このひび割れからASGが溶出したものと考えられる。図-5に60°Cおよび20°C環境下の材齢1週試験体の、切断直後と1週静置後のASG分布状況を、図-6に材齢2週試験体の60°Cおよび20°C環境下の内部ひび割れ状況を示す。図-5より、60°C環境下の試験体では、切断直後よりも1週静置後に観察した試験体の方が、R骨材周囲から緑色に光るASGの滲出が多くみられたが、20°C環境下では、切断直後および1週静置後でASGの滲出は確認できなかった。また、図-6より、60°C環境下の試験体では、内部ひび割れが確認された一方で、20°C環境下では、内部ひび割れは観察されなかった。これは、試験体の長さ変化および質量変化から得られた結果とも一致し、試験体内部で生じたASGが、周囲のセメントペースト部分に拘束され膨張した後に、ペースト部分にひび割れが生じ、時間経過と共に外部へ溶出したためであることが示唆された。3.1節、3.2節の結果を併せると、試験体の膨張挙動は、温度環境による促進を受け、R骨材内に生じたASGの滲出量と、周囲の拘束度によることが確認された。

4. まとめ

本検討で得られた、ASRに関する知見を以下に示す。

- (1) ASRによって生じたASGは、反応性骨材単体では蓄積されず、反応性骨材周囲の緻密なセメントペーストマトリクスによって拘束および蓄積される。
- (2) ペースト角柱試験体にみられる膨張挙動は、温度環境による促進を受け、反応性骨材内に生じたASGの滲出量と、周囲のセメントペーストマトリクスの拘束度によって決定される。

[参考文献]

- 1) 山田一夫: アルカリシリカ反応入門①アルカリシリカ反応の基礎-骨材の反応性と試験方法-, コンクリート工学, Vol.52, No.10, pp.912-919, 2014
- 2) 五十嵐豪, 山田一夫, 小川彰一: ゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの観察条件に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1047-1052, 2016
- 3) Fournier, B and Bérubé, M-A.: Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, Can. J. Civ. Eng., Vol.27, No.2, pp. 167-191, 2000
- 4) Ichikawa, T. and Miura, M.: Modified Model of Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.37, No.9, pp. 1291-1297, 2007



図-2 R 骨材 OCP 埋没後の断面

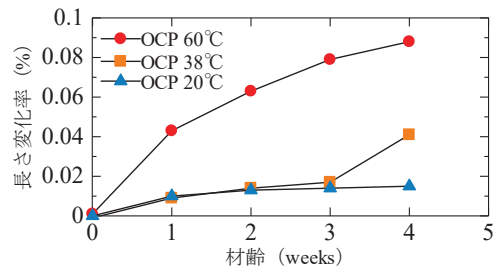


図-3 角柱試験体の長さの経時変化

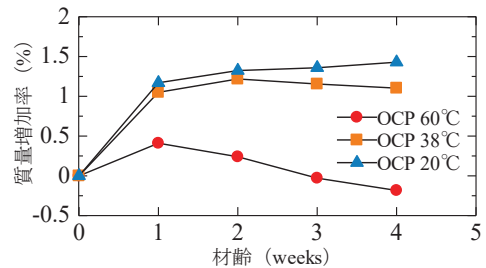


図-4 角柱試験体の質量の経時変化

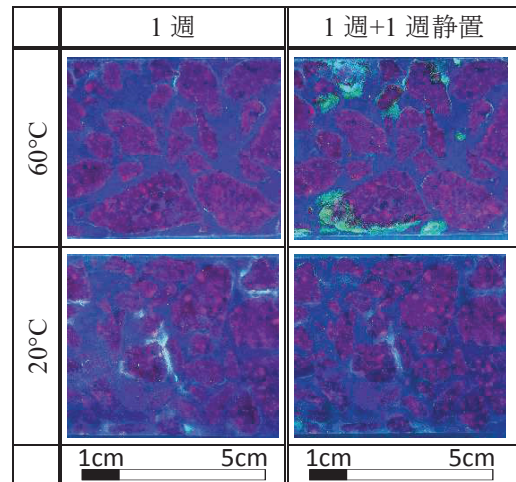


図-5 角柱試験体のASG分布状況の比較

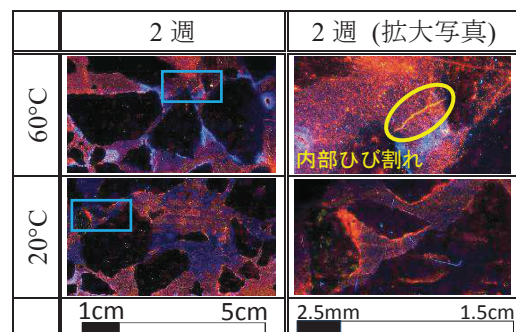


図-6 角柱試験体の内部ひび割れの比較