

環境負荷低減型コンクリートの ASR 抑制効果

Repressing Effects of Environmental Impact-Reduction Concrete on Alkali-Silica Reaction

佐々木 亘 WATARU SASAKI
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

混和材または混合セメントとしてシリカフュームおよび高炉セメント B 種に着目し、セメントの種類やシリカフューム置換率、水結合材比の異なる種々のモルタルバーを製作し、促進試験によりアルカリシリカ反応性について確認を行った。その結果、1)水結合材比によらず、セメントの 5-15%をシリカフュームで置換することによりアルカリシリカ反応(ASR)による膨張を抑制できること、2)高炉セメント B 種を用いることで ASR 膨張を抑制できること、3)水セメント比を減じることで外部からのアルカリ供給による ASR 膨張は抑制できるが、内部からアルカリが過剰に供給された場合は ASR 膨張が生じやすくなることなどがわかった。

キーワード：アルカリシリカ反応，促進養生，モルタルバー法，高炉セメント，シリカフューム

Focusing on silica fume and blast-furnace slag cement type b, this paper describes the examination results of accelerated curing test of alkali-silica reaction by mortar bar method, factored by type of cement, replacement ratio of silica fume and water-binder ratio. The followings were obtained; 1) In replacement ratio of silica fume of 5 to 15%, ASR expansion strains decreases regardless of water-binder ratio, 2) Blast-furnace slag cement type b decreases the strains, 3) Decrease of water-cement ratio makes the strains repressed by the added alkali from outside, but internally existing alkali leads to the expansion.

Key Words: Alkali-Silica Reaction, Accelerated Curing, Mortar Bar Method, Blast-Furnace Slag Cement, Silica Fume

1. はじめに

昨今の社会的要請により、コンクリート工事においても環境負荷低減は 1 つの大きなテーマとなりつつある。コンクリート工事のなかでも、コンクリートの材料となるポルトランドセメントが、その製造過程で化石燃料や石灰石を使用するために、発生する CO₂ 量が多いことから環境負荷が高いとされる。これに対し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった産業副産物由来の混和材をセメントに置換して使用することが以前にも増して注目を集めており、その置換率を大きくしたコンクリートに関する研究開発が盛んに行われている。

一方で、これらの混和材がアルカリシリカ反応の抑制に効果があることはすでに知られているところであり、コンクリート標準示方書¹⁾ではアルカリシリカ反応対策として、アルカリ総量の抑制、混合セメント B 種などの使用、アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定され

る骨材の使用のうちいずれかを採ることと定めている。設計基準強度 60-100N/mm² の高強度コンクリートについては「無害」と判定される骨材を使用しなければならないことになっているが、これは、高強度コンクリートでは単位セメント量の増加によりアルカリ総量の抑制が困難になること、高強度コンクリートにおける混合セメント（混和材）の効果が明らかになっていないことなどを考慮²⁾したことによるものである。

このような状況に対し、筆者らはこれまでに高強度コンクリートやそれに近い強度域のコンクリートを対象としたアルカリシリカ反応性について検討^{3), 4)}を行ってきた。本稿では混和材または混合セメントとして、高強度コンクリートで多く用いられるシリカフューム⁵⁾および RC 構造物では一般的な高炉セメント B 種に着目し、水結合材比（水セメント比）と併せて、モルタルバーを用いた ASR 促進試験によりその影響について確認を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。骨材は、筆者らがこれまでに ASR 促進膨張試験に使用し大きな膨張を生じることを確認している^{4),5)}、安山岩系の砕砂を使用した。

セメントは、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を使用した。普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントに対しては、シリカフェームの使用についても検討し、シリカフェームの置換率(SF/B)は、5%、10%、15%の3水準とした。これにより、セメントの種類および混和材の使用が、ASR 膨張へ及ぼす影響を確認することとした。

(2) モルタルの配合

水結合材比(W/B)は 50%、40%、30%の3水準とした。50%は JIS A 1146 モルタルバー法 (以下、JIS 法と称す)と同様であり、一般的な強度域を想定したものである。40%および 30%は PC 上部工で多く使用される高い強度域を想定したものである。

モルタルの配合は JIS 法に準じた配合を基準とし、結合材や水結合材比が異なる場合には、各配合において共通の材料である骨材の単位量が一定となるよう、ペーストの容積を一定とした。

総アルカリ量を調整する場合についても JIS 法を基本とし、JIS 法と同じ配合 N50 (普通ポルトランドセメント使用、水結合材比 50%、以下、配合名はセメントの種類と水結合材比の数値で表現する。シリカフェームを用いたものは、SF+置換率の数値を付記する。)の場合にセメント量の 1.2%となるよう 1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液により調整した。他の配合はアルカリの Na₂O 当量による添加量が N50 と等しくなるようにした。なお、水結合材比が 40%および 30%の配合では、供試体製作に必要な流動性を確保する目的で高性能 AE 減水剤を使用した。W/B=40%の場合には SP1、W/B=30%の場合には SP2 を使用した。高性能 AE 減水剤由来のアルカリについては、添加するアルカリ量に含めることとした。

(3) 養生および測定方法

供試体の寸法は 40×40×160mm とし、材齢 1 日で脱型した後、促進養生下における膨張ひずみ(長さ変化率)を測定した。膨張ひずみの測定は JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法により実施した。

養生方法は、材齢 28 日まで 40℃湿度 95%以上、材齢 28 日以降 50℃飽和 NaCl 水溶液浸せき (以下、養生 D)、材齢 2 日まで 80℃水中、材齢 2 日以降 80℃1mol/L の

表-1 使用材料

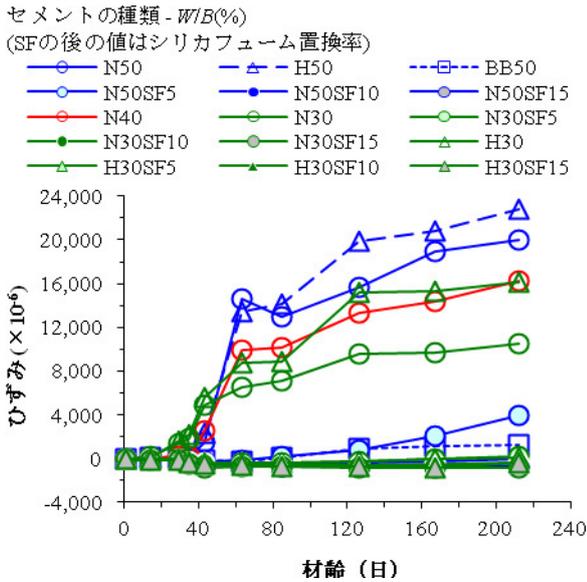
材料	種類, 物性等	密度 (g/cm ³)	記号
水	上水道水	1	W
セメント	普通ポルトランドセメント, 比表面積 3350cm ² /g, 全アルカリ 0.53%	3.15	N
	早強ポルトランドセメント, 比表面積 4750cm ² /g, 全アルカリ 0.45%	3.13	H
	高炉セメント B 種, 比表面積 3980cm ² /g, ベースセメントの全アルカリ 0.52%, 高炉スラグの分量 40~45%	3.04	BB
混和材	シリカフェーム, エジプト産, BET 比表面積 16m ² /g, 全アルカリ 0.56%	2.25	SF
細骨材	北海道産砕砂 (安山岩系), 吸水率 2.84%, 化学法「無害でない」Rc=98mmol/L, Sc=427mmol/L	2.64	S
混和剤	高性能 AE 減水剤, 低空気連行タイプ, ポリカルボン酸系, 全アルカリ 1.4%	-	SP1
	高性能 AE 減水剤, 低空気連行タイプ, ポリカルボン酸系, 全アルカリ 1.0%	-	SP2

NaOH 水溶液浸せき (以下、養生 A) の 2 方法とした。養生 D では総アルカリ量を調整したものと調整しないものの、養生 A では総アルカリ量を調整しないもののみを試験に供した。また、基長の測定は、養生 D の場合は脱型時、養生 A の場合は材齢 2 日の溶液浸せき開始時に行った。

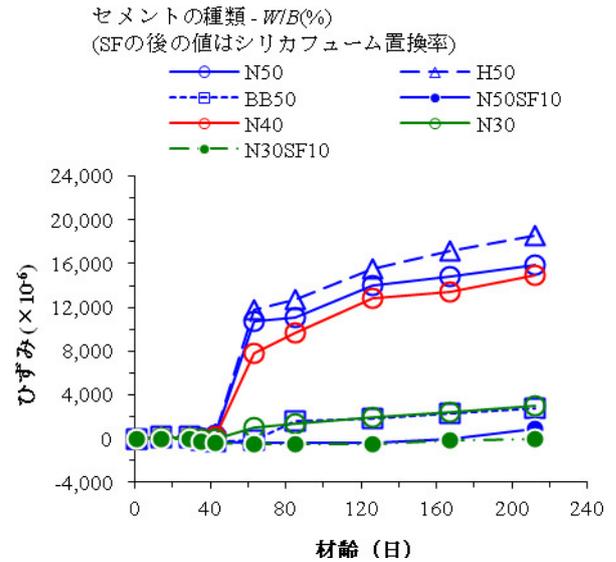
3. 実験結果および考察

(1) 膨張ひずみの経時変化

図-1 および図-2 にそれぞれの促進養生における膨張ひずみの経時変化を示す。いずれの養生方法であっても、セメントの一部をシリカフェームで置換した場合、および高炉セメント B 種を用いた配合では、膨張を大幅に低減できていることが分かる。シリカフェームを少量使用した場合、ASR 膨張を促進するとした報告⁶⁾があるが、本実験では置換率 5%であっても、ASR 膨張の促進は特に認められなかった。ただし、図-1(a) の N50SF5 では、材齢 120 日以降に膨張を生じていることが確認できる。



(a) 練混ぜ時にアルカリ添加



(b) アルカリ添加なし

図-1 膨張ひずみの経時変化 (材齢 28 日以降 50°C 飽和 NaCl 水溶液へ浸せき(養生 D))

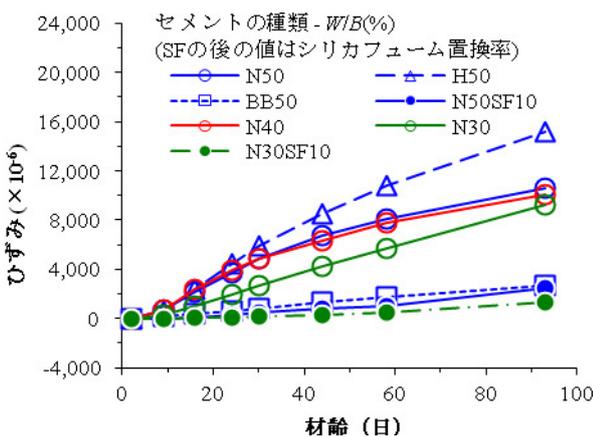


図-2 膨張ひずみの経時変化 (80°C 1mol/L NaOH 水溶液へ浸せき(養生 A))

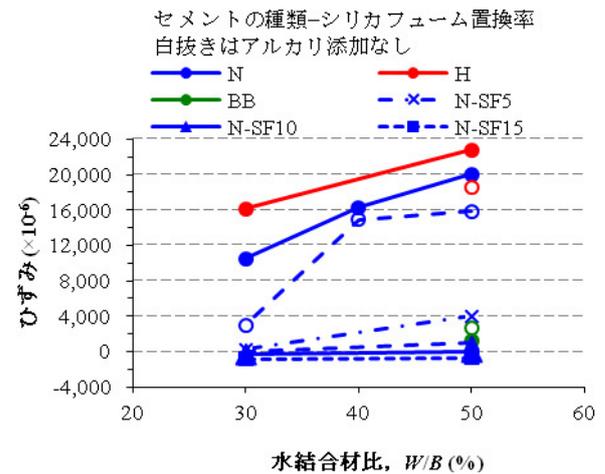


図-3 膨張ひずみと水結合材比の関係 (養生 D, 水溶液浸せきから 182 日)

(2) 水結合材比の影響

普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを単体で用いた場合 (シリカフェームで置換しない場合), 図-1(a)に示すように, アルカリを添加した養生 D では, 50°C 飽和 NaCl 水溶液へ浸せきした後, 材齢 40 日付近で膨張ひずみが急激に増加している。その後の膨張ひずみの経時変化は, 水結合材比によらず, セメントの種類ごとに同様な挙動を示している。一方, アルカリを添加しない場合は, 図-1(b)に示すように, N50, H50, N40 はアルカリを添加した場合と同様の挙動であるが, N30 では材齢 40 日付近の急激な膨張は見られず, その後も膨張ひずみは漸増するものの, BB50 と同程度であり, 膨張を抑制できているといえる。図-3 に水溶液

浸せきから 182 日後 (材齢 210 日) の膨張ひずみと水結合材比の関係を示す。この図からもわかるように, 水結合材比が小さくなるに従って, 膨張ひずみも小さくなることわかる。特に $W/B=30\%$ とすることで, 練り混ぜ時にアルカリを添加しない場合はアルカリを添加した場合と比べて, 膨張ひずみが大きく抑制されている。これは, W/B が小さいほどセメントペーストの組織が緻密となり, 外部からの供給されるアルカリや水が少なくなるためであると考えられる。また, このように, 練り混ぜ時にアルカリを添加しなかった場合に膨張が抑えられていたことから, 富配合とした場合に増加する, セメント由来のアルカリの影響は小さいようである。

なお, 図-1(a)に示す N30, H30 については, 急激に膨

張ひずみが増加する材齢が、先述の材齢40日付近よりもやや早い材齢で生じていることが確認できる。これについては別途検討を行ったので、その結果については後述することとする。

(3) セメントの種類・混和材の影響

図-1, 図-2 および図-3 から普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントについて比較すると、早強ポルトランドセメントのほうが膨張ひずみがやや大きい。しかし、一部をシリカフェームで置換した場合はその差がほとんどなくなり、同様に ASR 膨張が抑制されていること、また、本実験は反応性の大きい骨材を用いた促進試験であるという条件も考慮すると、早強ポルトランドセメントのために特別な対策を検討しなければならないというものではないと考える。

シリカフェームを使用した場合、ほとんどの配合において膨張を生じていない。図-4 はシリカフェームの置換率と膨張ひずみの関係をプロットしたものである。アルカリを添加した養生 D における配合 N50SF5 でのみ若干の膨張を生じているが、シリカフェームで置換しない N50 の膨張歪みに比べて 1/5 程度まで低減できている。また、50℃飽和 NaCl 水溶液に浸せきする方法として一般的なものはデンマーク法と呼ばれる方法であるが⁷⁾、デンマーク法では試験期間 91 日の膨張ひずみで判定を行う。このことも考慮すると、図-1(a)より、N50SF5 は水溶液浸せき 91 日程度まではほとんど膨張を生じていないことから、実環境で膨張を生じる可能性は低いと考えられる。したがって、ASR 抑制効果は十分にあると判断される。

高炉セメント B 種を使用した場合は、いずれの促進養生であっても大きな膨張は生じず、ASR 抑制に非常に有効であることが確認された。

(4) 低水結合材比（水セメント比）における添加アルカリの影響

先述のとおり、図-1(a)において、低水結合材比（この節では混和材を使用しないため、以下、水セメント比と表記する）の配合(N30, H30)で早期に膨張が生じる現象が確認された。この膨張は飽和 NaCl 水溶液に浸せきする前、すなわち、40℃湿度 95%以上での養生中に生じていた。そこで、普通ポルトランドセメントを用い、アルカリ添加を行った水セメント比 50%, 40%, 30%の3配合について、40℃湿度 95%以上の条件で養生を行い、膨張ひずみを測定した。水セメント比 50%の配合では、JIS 法と同条件となる。

図-5 に膨張ひずみの測定結果を示す。JIS 法の条件と

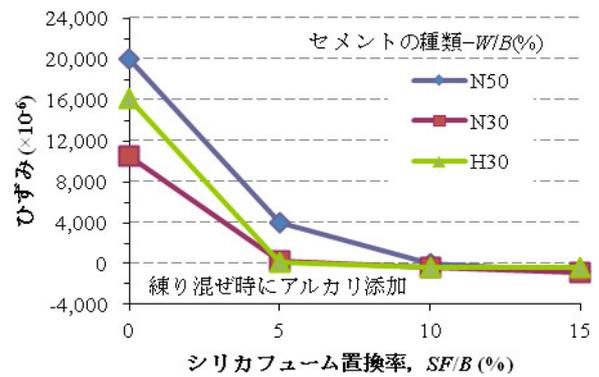


図-4 膨張ひずみとシリカフェーム置換率の関係（養生 D, 水溶液浸せきから 182 日）

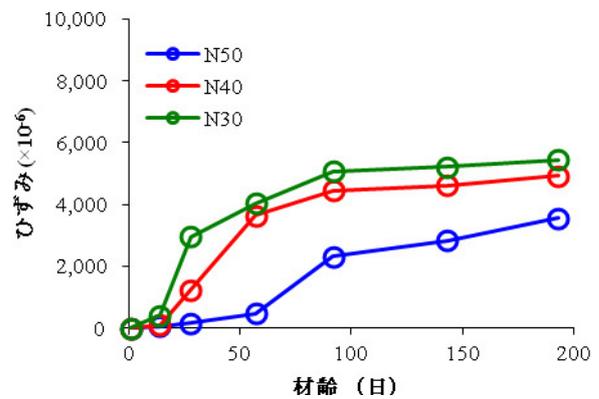


図-5 膨張ひずみの経時変化（40℃湿度 95%以上）

なる N50 においても大きな膨張を示し、JIS 法の判定基準(182 日で $1,000 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみ)で「無害でない」と判定されるが、N40, N30 はより大きな膨張を示し、かつ、より早期に膨張を生じる結果となった。この試験条件では、アルカリシリカ反応に寄与するアルカリが、モルタル内部に多量に存在する。そのため、いずれの配合でも初期材齢からある程度、アルカリシリカゲルの生成が起こるものと考えられる。このアルカリシリカゲルの膨張がモルタルバーの膨張として測定されるが、水セメント比が大きい場合には組織に空隙が多く、ゲルの膨張圧が緩和⁸⁾され、逆に、水セメント比が小さい場合にはゲルの膨張圧が緩和されないために、初期の膨張ひずみが大きくなったものと推察される。

水セメント比が小さいほど大きな膨張を示す結果ではあるが、これは練り混ぜ時から過度にアルカリを添加した場合の結果である。そのようなアルカリ添加が無ければ、図-1(b)の結果から、水セメント比が 30%程度まで小さければ、外部からのアルカリ供給による ASR 膨張の促進はみられない。しかし、PC 上部工でも多用される水セメント比 40%程度では、どちらの条件でも大きな膨張を示している。すなわち、ゲルの膨張圧は緩和されにく

く、外部からのアルカリ供給もある程度受けてしまうことを意味する。このような水セメント比のコンクリートにアルカリシリカ反応性が疑われる骨材を使用しなければならない場合、実際に使用する配合のコンクリートによるアルカリシリカ反応性試験や対策方法等、十分な検討が必要であると言える。

4. まとめ

本実験により以下の知見を得た。

- ① 非常に大きな膨張を生じるモルタルであっても、水結合材比によらず、セメントの 5～15%をシリカフェュームで置換することによりアルカリシリカ反応 (ASR)による膨張を抑制できる。
- ② 高炉セメント B 種を用いた場合も、シリカフェュームで置換した場合と同様に促進養生を行っても膨張を生じず、ASR 対策に有効である。
- ③ 水セメント比を 30%程度まで減じることで、外部からのアルカリ供給による ASR 膨張を抑制することができる。
- ④ コンクリートやモルタルの製造時等に過剰なアルカリが混入した場合においては、水セメント比が小さいほど早期に ASR 膨張を生じる可能性がある。
- ⑤ 水セメント比が 40%付近ではアルカリの内部供給および外部供給双方の影響を受けやすく、ASR 膨張を生じやすい可能性が示唆された。骨材に ASR 反応性が疑われる場合は事前の十分な検討が重要である。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3
- 2) 土木学会：2007年版コンクリート標準示方書改訂資料，2008.3
- 3) 谷口秀明，三上浩，浅井洋，樋口正典，藤田学：高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究，三井住友建設技術研究所報告第6号，pp91-96，2008.11
- 4) 佐々木亘，谷口秀明，斯波明宏，樋口正典：促進試験による骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集第11巻，pp.485-492，2011.10
- 5) 河上浩司，西本好克：Fc100N/mm²級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp369-374，2002

- 6) 川村満紀，竹本邦夫，柳場重正：シリカフェュームのポズラン反応とアルカリシリカ膨張抑制効果，土木学会年次学術講演会概要集第5部，Vol.40，pp.183-184，1985
- 7) 鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性の適合性，土木学会論文集 No.767/V-64，pp.185-197，2004.8
- 8) 黒田保，井上正一，吉野公，西林新蔵：コンクリートの ASR 膨張に与える反応性骨材混入量および促進養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1005-1010，2008.7