

表面被覆およびフライアッシュによるアルカリシリカ反応抑制効果の検討

Mitigation effects of surface protection and fly ash mixing on alkali silica reaction of concrete

北海道大学工学院
北海道大学工学研究院○学生員 白井礼陽 (Noriaki Shirai)
フェロー 横田弘 (Hiroshi Yokota)

1. はじめに

コンクリート構造物の性能に悪影響を及ぼす要因の一つにアルカリシリカ反応（以下、ASR）がある。ASRとは、骨材中の反応性珪物とコンクリート中のアルカリが反応して生じた生成物が吸水膨張してコンクリートにひび割れを発生させ、性能の低下をもたらすものである。ASRの多くは1970年代後半から1980年代に建設された構造物で発生している。これを受けて、日本では、コンクリート中のアルカリ総量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑制する、高炉スラグセメント、フライアッシュセメントなど抑制効果のある混合セメントを使用する、試験により無害と判定された骨材を用いる、といった抑制対策が、国土交通省のアルカリ骨材反応抑制対策¹⁾で規定されている。しかしながら、近年では抑制対策を行った構造物に関してもASRが発生した事例が報告されており、さらなるメカニズムの解明やより確実な対策方法の確立が求められている。

ASRを抑制するのに効果的な手法としては、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェームといった珪物質微粉末の使用が挙げられる。また、施工後は水分を遮断するための表面被覆工法の採用も考えられる。しかしながら、施工前の抑制対策である混和材の添加と施工後の表面被覆工法の効果を比較・検討した事例は少ない。そこで本研究では、表面被覆とフライアッシュの混入によるASR膨張抑制効果の比較を行った。また、表面被覆材の種類によるASRの抑制効果も検討した。さらにASRの各進行段階に対して表面被覆を行うことで、予防保全と事後保全によるASR抑制効果の違いについての考察を行った。

2. 実験概要

表—1に示す配合のコンクリートを用いて、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を各種3本ずつ、合計18本作製した。W/Cは0.50、S/Cは2.71とし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として川砂、粗骨材は反応性骨材である川砂利と非反応性骨材である砕石を混合して用いた。フライアッシュはセメント質量の16%内割で混入した。表面被覆材として、シラン系表面含浸材(AS)、ウレタン系表面被覆材(UR)を表—2の仕様で用いた。供試体は打設後1日で脱型し、2週間湿布養生を行った。その後、表面被覆を行う供試体の一面のみに表面被覆処理を行い、ひずみ測定用に基長100mmでコンタクトチップを埋め込んだ。続いて、24時間、 80°C の熱水に浸漬した後、常温に戻った時点で初期長さを計測した。本研究では、ASRを促進させるた

めに各種供試体を、3本ずつ、初期長さ測定後に 80°C NaOH水溶液（濃度： $1\text{mol}/\text{L}$ ）に浸漬し、所定日数経過毎の長さを測定した。また、浸漬開始前と浸漬開始2週間後の時点でそれぞれの供試体に表面被覆を行った。浸漬開始前に表面被覆を行ったものをそれぞれAS-1とUR-1、浸漬開始2週間後に表面被覆を行ったものをAS-2とUR-2とした。供試体の長さ方向に埋め込んだチップの間隔を計測し、その経時的な変化量を膨張量とし、次の式を用いて膨張率 β を算出した。

$$\beta = \frac{(\Delta l_1/l_1) + (\Delta l_2/l_2)}{2}$$

$$\Delta l_1 = l_1 - l_1', \Delta l_2 = l_2 - l_2'$$

l_1, l_2 :初期長さ、 l_1', l_2' :所定日数経過毎の長さ

また、JIS A 1106に基づいて曲げ試験を行い、そこから得られた曲げ強度より、抑制対策や補修の有効性を検討した。ASR劣化による強度の比較のため、AS-1、UR-1と同様のタイミングで表面被覆を行い、静置したものをAS-0、UR-0とした。

表—1 コンクリートの配合

	単位量(kg/m^3)					
	水	セメント	細骨材	反応性粗骨材	非反応性粗骨材	フライアッシュ
PC	150	300	813	641	421	0
FA	150	252	813	641	421	48

表—2 表面被覆材の仕様

シリーズ	プロセス	主成分	回数	kg/m^2
シラン系 (AS)	塗布	シラン・シロキサン	1	0.35
ウレタン系(UR)	プライマー	エポキシ樹脂	1	0.10
	バテ	エポキシ樹脂	1	0.30
	中塗り	エポキシ樹脂	2	0.32
	上塗り	ポリウレタン樹脂	1	0.12

3. 実験結果と考察

NaOH溶液浸漬開始から32日後までの膨張率の推移を図—1に示す。本研究では浸漬期間が短かったこともあり、ASR膨張の特徴である亀甲上のひび割れやポップアウトといった変状は見られなかった。また、PCよりもFAの膨張率が大きくなり、この浸漬期間ではフライアッシュの混入で期待した膨張抑制効果が見られなかった。井上らの研究²⁾によると、細骨材に対する反応性骨材の混合率が低い場合、骨材によるアルカリ固定分が小さくなるため、空隙水のアルカリ濃度が大きくなり、ASRを抑制するにはフライアッシュがより多くのアルカリを固定する必要がある。したがって、ペシマム混合

率付近ではフライアッシュによる抑制効果が低下することが明らかになっている。本研究では、フライアッシュの混合率がセメント内割で 16%であり、通常であれば十分な膨張抑制効果を発揮するとされているが、ペシマム混合率付近でかつ外部からアルカリが供給されている環境下であったことから、期待される抑制効果を発揮しなかったものと考えられる。

日本フライアッシュ協会の試験結果³⁾によると、湿潤養生下においてフライアッシュ無混和のものが膨張を示さないのに対し、フライアッシュを混和したものは $10 \sim 50 \times 10^{-6}$ の膨張を示している。本研究では水中養生下ではあるが同様の挙動を示したため、FA が PC よりも膨張したと考えられる。表面被覆を行った供試体は、FA や PC と比較して一定の膨張抑制効果が見られた。また、表面被覆による膨張抑制は、AS と UR とともに、表面被覆を行った後に一定の膨張抑制効果が見られた。よって、表面被覆は短期間での ASR 膨張に対して抑制効果が得られると考えられる。また、表面被覆による膨張抑制効果は、劣化の状態がほとんど変わらなければ表面被覆を行った時期によらず、同様の効果が得られると考えられる。中長期における膨張抑制効果に関しては今後検討を行っていく予定である。

一方、AS と UR ではわずかであるが UR の方が小さい膨張率を示した。UR は水分の浸透を防止することにより、AS は吸水防止層の形成と水蒸気を排出することにより膨張抑制効果が得られると考えられている。しかし今回の実験では、UR の方が遮水性が高く、AS による水分の排出が望めない条件であったため、このような挙動を示したと考えられる。

各供試体の曲げ強度を図-2 に示す。三田らの研究⁴⁾によると、フライアッシュと同様にポゾラン反応性が高いシリカフュームを添加して温水養生を行ったモルタルにおいて、セメント中のアルカリ成分が多いものの方が高い曲げ強度を示している。また、コンクリートを材齢 3 日まで 40℃の温水中で養生し、さらに 60℃の温水中で材齢 7 日まで養生した場合に高い曲げ強度が得られている。これと同様に、80℃の NaOH 水溶液に浸漬していない AS-0、UR-0 よりも AS-1、AS-2、UR-1、UR-2 の曲げ強度が高くなったと考えられる。また、PC と FA の曲げ強度が大きくなった要因として AS-0 や UR-0 が水分の浸透を抑制したのに対し、PC と FA ではそのような抑制効果が十分でなく、浸入した水分によるセメントの水和反応が進んだことが考えられる。一方 ASR による劣化は、コンクリートにひび割れが見られなかったことから、強度にはほとんど影響を与えなかったと考えられる。

4. まとめ

本研究において、以下のような主要な結論を得た。

- 1) 80℃、濃度 1mol/L の NaOH 水溶液中という極めて厳しい ASR 促進環境下においても、表面被覆は ASR 膨張抑制効果を発揮する。
- 2) 表面被覆による膨張抑制は、劣化の状態がほとんど変わらなければ表面被覆を行った時期によらず、同様

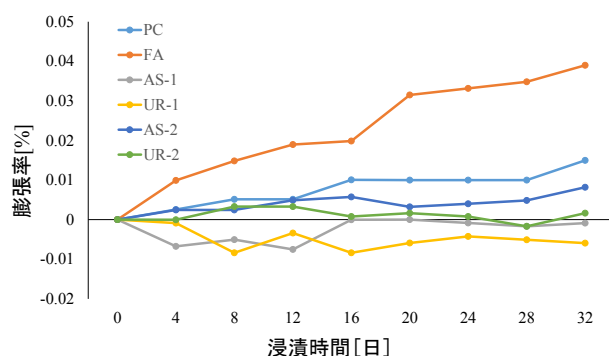


図-1 膨張率の推移

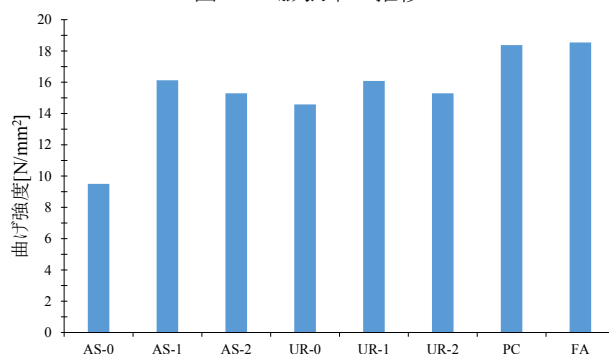


図-2 曲げ強度

の効果が得られる。

- 3) フライアッシュのポゾラン反応開始時期は、環境条件により大きく異なる。よって、フライアッシュを混和した場合にはより長期的に膨張挙動を評価する必要がある。
- 4) 表面被覆による ASR 対策を行った場合、外部からの水分の供給が止まるため、未水和セメントが多く残り、コンクリートの曲げ強度が増加しないことがあると考えられる。

謝辞

港湾空港技術研究所の川端雄一郎博士には、ASR についてご教示いただきました。また、ライフタイム工学研究室の品川幸次氏から多くのご助言とご協力を頂きました。ここに記して、感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策について、2002 年 8 月。
- 2) 井上祐一郎、濱田秀則、佐川康貴、川端雄一郎、山田一夫：高反応性骨材を用いたモルタルのペシマム現象とフライアッシュによる ASR 抑制効果、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集、E 部門、2009。
- 3) 日本フライアッシュ協会：フライアッシュを利用したコンクリートの乾燥収縮試験例、2010。
- 4) 三田紀行・山本康弘・田近洋子・花崎広隆：コンクリートの曲げ強度および収縮率に及ぼす養生方法と調査要因の効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集第 522 号、1-6、1999。