

内部構造観察による遅延膨張性骨材を使用したコンクリートの 塩分浸透に及ぼす ASR の影響評価

琉球大学大学院 学生会員 ○屋嘉 俊也 正会員 須田 裕哉 正会員 富山 潤
琉球セメント 正会員 比屋根 方新

1. 背景および目的

現在、沖縄県でコンクリート細骨材として使用されている海砂は遅延膨張性のアルカリシリカ反応（以下、ASR）を引き起こす可能性があるため、過酷な塩害環境である沖縄県では、コンクリート構造物に塩害と ASR の複合劣化が起きる可能性がある。筆者らの検討では、非反応性骨材を使用した供試体と比較して、遅延膨張性の ASR を引き起こす骨材を使用した場合、電気化学測定による結果から塩分浸透により鉄筋が腐食傾向にあることを示した¹⁾。しかしながら、反応性骨材を使用した供試体の腐食傾向が ASR の影響であるかは明確ではなかった。本研究では走査型電子顕微鏡（以下、SEM）を用いて供試体の内部構造の観察により海砂を使用した供試体の鉄筋腐食の傾向が ASR の発生により塩害の進行を加速させた結果であるかを調査した。

2. 実験概要

(1) コンクリートの使用材料および配合¹⁾

使用材料には普通ポルトランドセメント、遅延膨張性の ASR を引き起こす反応性骨材として海砂、非反応性骨材として石灰岩砕砂、粗骨材として石灰岩碎石、フライアッシュ（内割 0.18, アルカリ量 1.84%）を使用した。また、全ての供試体でセメントとフライアッシュに含まれるアルカリ量、添加 NaOH によるアルカリ量の合計が等価アルカリ量で 5.5kg/m^3 となるように調整した。本実験で用いた供試体は 3 ケースの配合で作製した。ケース 1 が非反応性骨材のみを使用した配合で B-P 供試体とした。ケース 2 が反応性骨材を使用した配合で C-P 供試体とした。ケース 3 では、フライアッシュの抑制効果を検証するためケース 2 の配合にフライアッシュを混和した配合で C-P-F 供試体とした。また、3 ケースの供試体にそれぞれ NaCl を 0, 5.0kg/m^3 添加した。供試体名は B-P, C-P, C-P-F とし、供試体名の末尾の数字を添加 NaCl 量とする。

(2) 養生環境¹⁾

ASR 膨張量試験や塩分浸透量から塩化物イオン拡散係数を求めた供試体は打込み後の翌日に脱型を行い、供試体の表面が常に湿潤状態に保たれるよう 1.5mol/L の NaOH 溶液で浸した不織布をあてた状態でラップを巻き 60°C 環境で養生を行った。この養生方法をシリーズ I とする。次に、シリーズ II は、電気化学測定で使った供試体であり、表面に 10wt% の NaCl 溶液で浸したウエスをあてた状態でラップを巻き 4 日間 60°C 環境で養生を行った後、ウエスとラップを取り 3 日間 40°C 環境で乾燥させる塩水乾湿繰返しを行った。

(3) SEM による内部構造観察

SEM による観察によって、反応性骨材に発生したひび割れや ASR ゲルの進展度から、各供試体の損傷状況を比較した。まず、シリーズ I は供試体の中央部を厚さ 1.5cm 程になるように切断し、切断後、5mm 角程度に粗砕して減圧環境下で 40°C -24 時間乾燥させた。シリーズ II の供試体はコンクリートコアを採取し、暴露面から深さ 0cm-1.5cm と 3.5cm-5.0cm の部分を切断して、シリーズ I と同様に 5mm 角の試料を採取し同条件下で乾燥させた。乾燥後の試料はエポキシ樹脂で含浸し、固化後に供試体表面を鏡面研磨した。その後、SEM による反射電子像観察とエネルギー分散型 X 線分光法（EDS）を用いて、元素組成の分析を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 拡散係数による内部ひび割れの違い

塩化物イオンの拡散係数において経時的な増加を示した C-P-0 とフライアッシュ置換により拡散係数の増加

キーワード 遅延膨張性骨材, アルカリシリカ反応, 塩害, フライアッシュ, 複合劣化, SEM

連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町線千原 1 琉球大学 工学部 TEL 098-895-8570

を抑制した C-P-F-0 に対して SEM 観察を行った結果を写真-1 に示す. C-P-0 では, 海砂にひび割れが確認でき, 激しく損傷しており, ASR ゲルと思われる生成物も析出していた. 一方で, C-P-F-0 では, ひび割れはわずかであった. これにより, フライアッシュの混和でポゾラン反応による塩化物イオンの浸透の抑制より拡散係数が小さくなり, ASR の進行自体も抑制したことで経時的な拡散係数の増加がみられなかったと考えられる.

(2) 曝露面からの深さ方向の違いによる内部損傷比較

シリーズIIで電気化学測定の結果が腐食の値を示した C-P-5.0 の供試体の表層部と深部の内部構造を SEM で観察した結果を写真-2 に示す. 双方で海砂内部にひび割れが確認でき, 深部では ASR ゲルと思われる領域も観察された.

(3) シリーズIとシリーズIIの元素分析比較

養生条件が異なるシリーズIとシリーズIIの ASR ゲルやゲルが滲出したと思われる領域を EDS の元素分析より Ca/Si と $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ のモル比の関係を評価した結果を図-1 に示す. 図より, 両者の関係は比例関係を示し, Katayama et al. が示した結果²⁾ とほぼ同様の結果を示したため, いずれの供試体も ASR ゲルが発生していたと判断できる.

(4) シリーズIIの外部から浸透してきた塩分の分布

シリーズIIで NaCl を添加していない C-P-0 の塩分浸透の有無を元素マッピングにより評価した結果を図-2 に示す. なお C-P-0 においても, 表層部と深部で C-P-5.0 と同様の損傷を確認している. 図より (a) では深部に Cl (図中緑) が分布しているため鉄筋近傍に塩分が浸透しているものと考えられる. また, (b) に表層部と深部でのセメントペースト部における Cl/Ca モル比を示す. 表層部に Cl が多く分布し, 深部においては表層部の 1/3 程度の Cl が検出された.

4. まとめ

フライアッシュを混和することで ASR 膨張を抑制するとともに, ポゾラン反応が進行しコンクリートが緻密化することで水分や酸素, 塩分の浸透を抑制し, 鉄筋への防食効果が期待できる. また ASR によるひび割れの発生により, 外部から Cl が浸透しやすくなることが確認された. 塩水乾湿繰返しに曝された鉄筋を埋設した供試体では, 表層部と内部で損傷度が異なった.

参考文献

- 坪井星那, 須田裕哉, 富山潤, 比屋根方新: 遅延膨張性骨材を用いた ASR 発生コンクリートの塩分浸透・鉄筋腐食性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.634-639, 2022
- Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K. and Yamato, T.: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, PP.862-873, 2008

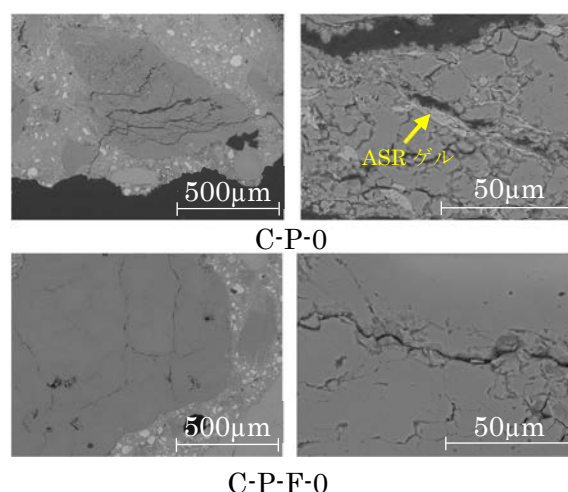


写真-1 C-P-0 と C-P-F-0 の内部の様子

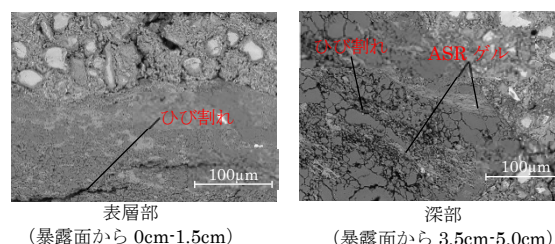


写真-2 表面深さによる骨材内部の損傷状況

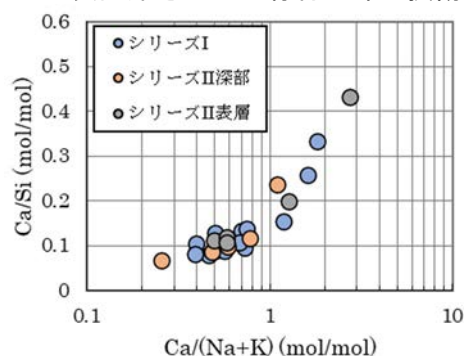


図-1 シリーズ I, II の ASR ゲルの化学組成

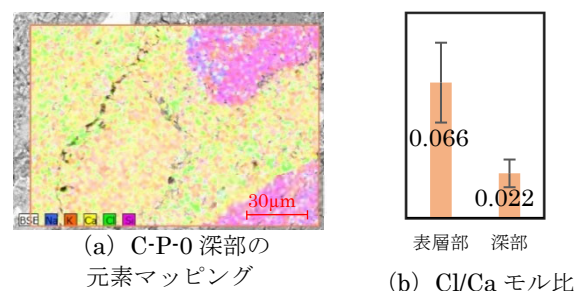


図-2 C-P-0 の元素マッピングと Cl の分布