

混和材を用いた ASR 抑制対策の実験的検討と膨張挙動予測モデルの構築

コンクリート研究室 速水悠二

1. はじめに

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張は、ひび割れによる鋼材腐食の発生、景観・美観の損失を招くだけでなく、コンクリートの強度低下、鉄筋とかぶりの付着力低下、曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断などの損傷の要因になることが知られている。アルカリ骨材反応はコンクリート中のアルカリと反応性骨材との化学反応であるので、抑制するにはアルカリ量と骨材品質を制御することが肝要である。実際に新設される構造物のアルカリ骨材反応抑制対策にはアルカリ総量の規制、無害な骨材の使用が含まれている。しかし、近年、骨材品質の低下から、これらの対策で抑制することが難しくなっており、高炉スラグやフライアッシュ等の混和材を用いた抑制対策を有効に活用することが期待されている。混和材の ASR 抑制効果は多くの研究者により実証されているが、未だ実用的な適用基準が確立されていないのが現状である。

混和材による抑制対策を実用的にするためには、添加する混和材の量から得られる抑制効果を知る必要がある。そこで本研究では、アルカリ環境レベルと骨材反応性に応じた混和材の抑制効果を実験的に確認した。また、抑制効果を実験的に確認するには長時間を要するため、事前に短時間で混和材の抑制効果を予測できるモデルが必要と考え、膨張挙動予測モデルの構築も行った。

2. 試験概要

2. 1. 試験方法

配合以外の試験方法は、JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）に準じた。試験体のサイズは 40×40×160mm のモルタルバーとした。試験体両端には長さ変化測定

のためゲージプラグを埋め込んだ。打設したモルタルバーは 24 時間後に脱型を行い、基長を測定した。その後、試験体を濡れウエスで包み、1 体ずつ密封式のビニール袋に入れ、水温 40℃ の恒温水槽の中で促進養生を行った。材齢 2, 4, 8, 13, 26 週目に長さ変化の測定を行った。

2. 2. 配合

反応性骨材は JIS A 1146 に準じて粒度調整を行った。砂はモルタルの体積の 40% だけ混入した。



写真-1 モルタルバーの長さ変化の測定

表-1 試験体水準一覧

シリーズ	セメント	骨材	混和材	W/B
S	普通	北海道	H産FA II種	50%
FA1	普通	北海道	H産FA IV種	50%
AG1	普通	新潟	H産FA II種	50%
AG2	普通	富山	H産FA II種	50%
FA2	普通	富山	H産FA II種	50%
LC	低熱	北海道	H産FA II種	50%
HC	早強	北海道	H産FA II種	50%
WB30	普通	北海道	H産FA II種	30%
SW	普通	北海道	シリカ質微粉末	50%
SF	普通	北海道	シリカヒューム	50%
BB	普通	北海道	高炉スラグ	50%
FA+BB	普通	北海道	H産FA II種 高炉スラグ	50%
SF+BB	普通	北海道	シリカヒューム 高炉スラグ	50%

アルカリ量は Na_2O 等価量で $6\sim 22\text{kg/m}^3$ とし、所定のアルカリ量となるように NaOH 溶液でアルカリ量の調整を行った。混和材の置換率はセメントに対する体積置換率とした。

2. 3. 試験体水準

表-1 に試験体水準一覧を示す。セメント 3 種類、反応性骨材 3 種類、混和材 6 種類（うちフライアッシュ 3 種類）を使用し、水粉体比は 2 水準とし、計 13 シリーズの試験を行った。表-2 に反応性骨材の材料物性、表-3 に使用した混和材の材料物性を示す。S シリーズでフライアッシュのアルカリ骨材反応抑制効果、S, FA1 シリーズでフライアッシュの品質規格の影響、S, AG1, AG2 シリーズで骨材の反応性の影響、AG2, FA2 シリーズでフライアッシュの産地の影響、S, LC, HC シリーズでセメントの種類の影響、S, WB30 シリーズで水粉体比の影響、SW, SF, BB シリーズで他の混和材の抑制効果、FA+BB, SF+BB シリーズで混和材の組合せ効果に関して考察を行った。

3. 試験結果

3. 1. 混和材の抑制効果

図-1 に北海道産骨材を用いたシリーズの 26 週目の長さ変化を示す。フライアッシュ置換率 0% の試験体に比べセメントの一部をフライアッシュで置換した試験体の膨張量は小さく、フライアッシュのアルカリ骨材反応抑制効果が顕著に示された。アルカリ量が 22kg/m^3 と大きな値であっても、フライアッシュ置換率の増加に伴い膨張量が減少する傾向が見られた。また本研究では、膨張抑制効果の目標値を 1000μ とした。この基準に従うと、フライアッシュを使用しない場合には、アルカリ量の限界値が 6kg/m^3 であったのに対しフライアッシュ置換率 25% の場合には 9kg/m^3 程度と限界値の増加が見られた。しかし、 22kg/m^3 と極端にアルカリ量が多い場合にはフライアッシュ置換率が 50% の場合であっても膨張量を

表-2 反応性骨材の材料物性

No.	産地	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	化学法	モルタルバー法 (6ヶ月後)
1	北海道 (安山岩)	2.69	1.88	無害でない	49μ
2	新潟 (川砂)	2.58	2.31	無害でない	—
3	富山 (川砂)	2.58	2.73	無害でない	125μ

表-3 混和材の材料物性

	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	45 μ ふるい残分 (%)	
フライアッシュ	H産 2種	2.29	2820	7.7
	H産 4種	2.17	2290	21.1
	N産 2種	2.31	3710	14.3
シリカ質微粉末	2.50	14000	—	
シリカヒューム	2.70	159000	—	
高炉スラグ微粉末	2.91	4010	—	

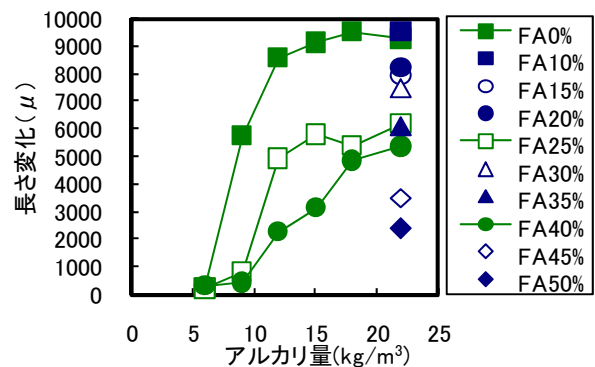


図-1 北海道産骨材を用いたシリーズの 26 週目の長さ変化

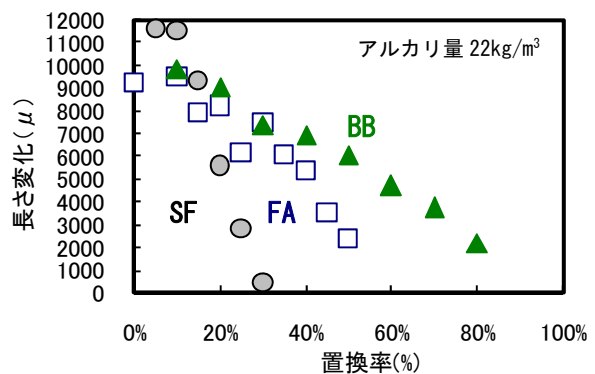


図-2 各混和材を置換したシリーズの 26 週目の長さ変化

1000 μ 以下に抑制することができなかった。

図-2 にアルカリ量 22kg/m³における各混和材を置換したシリーズの26週目の長さ変化を示す。SF(シリカヒューム), FA(フライアッシュ), BB(高炉スラグ微粉末)の順にグラフの傾きが大きい結果となり, 混和材によって抑制効果が異なることが示された。図-3 に細孔溶液中の OH イオン濃度の経時変化を示す。混和材の抑制機構の一つに, 混和材がアルカリ分を吸着・消費するという機構があり, その吸着・消費量は混和材の種類によって異なることが示された。しかし, 抑制機構がアルカリ濃度の減少のみでは説明しきれない報告もあることから, 他の抑制機構の是非や影響度についても検討が必要である。

3. 2. 骨材の反応性の影響

図-4 にアルカリ量 22kg/m³における異なる骨材を用いたシリーズの26週目の長さ変化を示す。フライアッシュ置換率 0%では骨材によって膨張量が異なり, 膨張量を 1000 μ に抑制するために必要なフライアッシュ添加量も骨材の反応性に支配されるのがわかる。しかし, 現在の骨材評価法では本研究で使用した骨材はいずれも同一の結果となることから, 今後骨材の反応性をよりの確に評価できる試験方法を確立する必要がある。

4. 膨張挙動予測モデルの構築

本研究では既存の U.F.O.モデルを改良・拡張し, 混和材効果が評価可能なモデルの構築を行った。U.F.O.モデルは膨張量が過大となると実験値と乖離することが示されたため, 本研究では物理現象を反映したモデルを取り込みこの問題を解決した。図-5 に各骨材の反応生成物総量と膨張量の関係を示す。反応生成物総量は U.F.O.モデルで算出し, 膨張量には実験値を用いた。全骨材においてアルカリ量や時間に依らず反応生成物総量と膨張量の間に一意な関係があることが示された。この関係を U.F.O.モデル内に取り込むため, 膨張量を反応生成物総量の関数として, 式(1)のよ

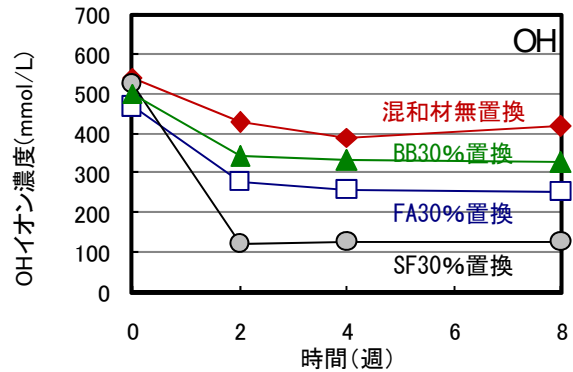


図-3 細孔溶液中の OH イオン濃度の経時変化

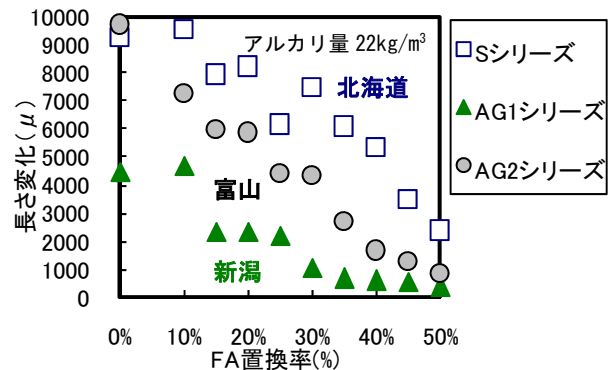


図-4 異なる骨材を用いたシリーズの26週目の長さ変化

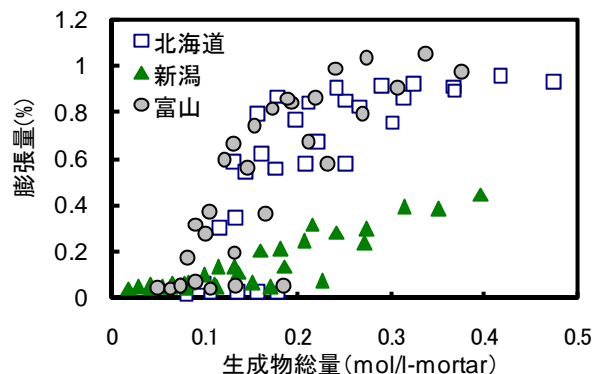


図-5 反応生成物総量と膨張量の関係

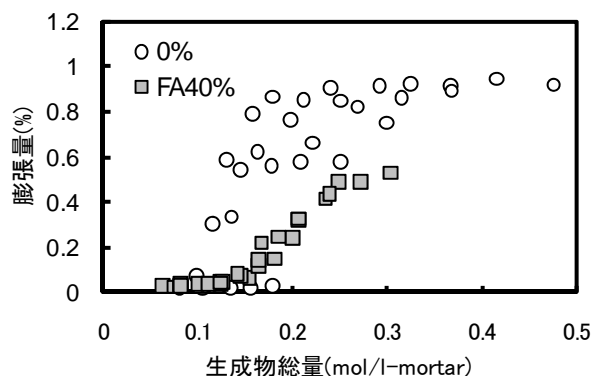


図-6 FA置換したモルタルの反応生成物総量と膨張量の関係

うに表すこととした。ここで、 T_{pr} は反応生成物総量(mol/l-mortar), T_{er} は吸収領域に流出する生成物量 (mol/l-mortar), 係数 α , β は骨材や使用材料に依存する係数である。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \{1 - \exp[-\beta \cdot (T_{pr} - T_{er})]\} \quad (1)$$

次に混和材の抑制効果の導入を行った。本研究ではフライアッシュとシリカヒュームを対象に取り上げた。図-6 に北海道産骨材を使用しフライアッシュ置換したモルタルの反応生成物総量と膨張量の関係を示す。反応生成物量は混和材のアルカリ消費の影響を考慮して計算を行い、膨張量は実験値を用いた。アルカリ消費量を考慮しても、反応生成物総量と膨張量の関係に違いが見られ、この傾向はシリカヒュームにおいても確認された。抑制効果を考慮するために、式(1)に混和材の抑制率を表す係数 C を追加し、抑制効果を表現することとした (式(2))。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \{1 - \exp[-\beta \cdot C \cdot (T_{pr} - T_{er})]\} \quad (2)$$

図-7 にフライアッシュ置換率と係数 C の関係を示す。係数 C は実験結果に沿うように決定した。置換率と係数 C の関係が概ね直線となったが、骨材によってその直線の傾きが異なった。この要因としては骨材の反応速度の違いが考えられる。今後、遅延性骨材の影響も含め骨材の影響をどのようにして的確に係数 C に取り込むか検討が必要である。

図-8 に北海道産骨材の修正 U.F.O.モデルによる予測結果と実験値の比較を示す。実験値には混和材無置換の結果を用いた。アルカリ量 9, 22kg/m³においては膨張挙動や最終膨張量が概ね表現できている。しかし、アルカリ量 6kg/m³では予測結果と実験値の誤差が見られた。ASR の膨張は、アルカリ量が限界値に達すると急激な膨張ひずみを生じるため、膨張が発生するかしないかが微妙な遷移領域では、実験結果と計算結果に差が生じやすい。実験結果の再現性を向上させるた

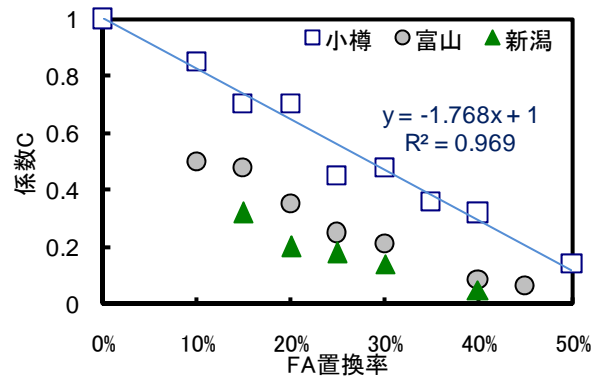


図-7 FA置換率と係数Cの関係

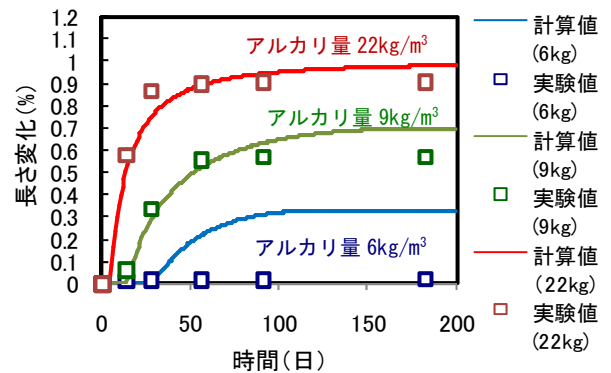


図-8 北海道産骨材の予測結果と実験値の比較

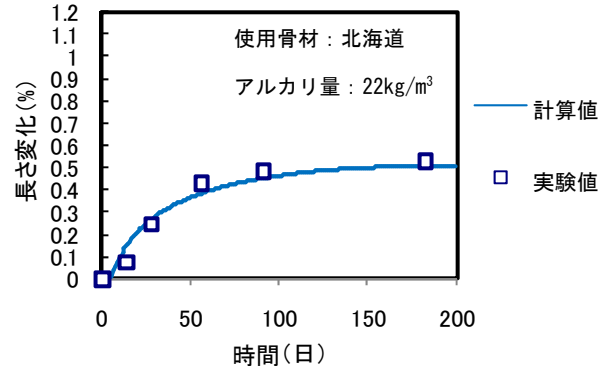


図-9 FA40%置換したモルタルの予測結果と実験値の比較

めに、モデルの改良が必要である。

図-9 に北海道産骨材を使用しフライアッシュ40%置換したモルタルの修正 U.F.O.モデルによる予測結果と実験値の比較を示す。アルカリ量 22kg/m³の結果を用いている。膨張挙動や最終膨張量など概ね表現されている。修正 U.F.O.モデルによって混和材の抑制効果も表現できることが示された。