

論文 アルカリ環境レベルと骨材反応性に応じたフライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制対策の実験的検討

速水 悠二*1・田中 泰司*2

要旨: アルカリ総量による抑制対策を図ることが困難な高強度コンクリートや再生コンクリートに対して、フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制対策の確立が期待されている。そこで本研究では、フライアッシュ置換率とアルカリ総量を制御因子とした促進試験を行った。その結果、アルカリ骨材反応を基準値以下とするために必要なフライアッシュの添加量は、骨材の反応性やアルカリ環境レベルに影響されることが示された。また、フライアッシュの抑制効果はセメントの種類の影響を受けることも示された。これらの実験結果は、Chatterji が主張する膨張圧説によっておおむね説明可能である。

キーワード: アルカリ骨材反応, フライアッシュ, 骨材反応性

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。

現在、新設される構造物のアルカリ骨材反応抑制対策は、1. アルカリ総量の規制, 2. 抑制効果をもつ混合セメントの使用, 3. 無害な骨材の使用により行われている。最も確実な抑制対策は無害な骨材を使用することであるが、資源減少や地域の骨材事情を考慮すると、この抑制対策だけで解決をはかることは難しい。一方、セメントを多く含む高強度コンクリートや元々アルカリを多量に含む再生コンクリートではアルカリ総量規制を図ることが困難である場合がある。そのうえ、骨材の反応性、外部からのアルカリ流入、骨材からのアルカリ流出が無視できない場合には別途対策が必要となる。そのため、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が期待されている。中でもフライアッシュのアルカリ骨材反応抑制効果は多くの研究者により実証されているが、未だ明確な適用基準が確立されていないため、フライアッシュによる抑制対策が進んでいないのが現状である。

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フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制対策の確立に向けて、種々の反応性骨材、フライアッシュ、セメントを組み合わせ、フライアッシュ置換率とアルカリ総量を制御因子とした促進試験を行った。

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。アルカリ量はNa₂O等価量で6~22kg/m³とし、所定のアルカリ量となるようにセメントの含有アルカリ量を差し引いたアルカリ量をNaOH溶液を用いて添加した。また混和材で置換する場合は、粉体が全てセメントであると仮定してアルカリ量の計算を行った。普通ポルトランドセメントはアルカリ量0.49%のものを使用した。フライアッシュ（0~

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 2種	50%
FA1	普通	北海道	H産FA 4種	50%
AG1	普通	新潟	H産FA 2種	50%
AG2	普通	富山	H産FA 2種	50%
FA2	普通	富山	N産FA 2種	50%
LC	低熱	北海道	H産FA 2種	50%
HC	早強	北海道	H産FA 2種	50%
WB30	普通	北海道	H産FA 2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%

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 助教 博(工) (正会員)

50%)，シリカ質微粉末 (0~30%)，シリカヒューム (0~30%)，高炉スラグ微粉末 (0~50%) の置換率はセメントに対する質量置換率とした。WB30 シリーズでは高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を用い、SF1, SF2 シリーズはAE減水剤(リグニンスルホン酸系)を用い、打設が可能な流動性に調節した。

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11シリーズの試験を行った。反応性骨材は、クリストバライトを有する北海道産、隠微晶質石英を有する新潟産、そして富山産の3種類を用いた。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に関して考察を行った。

3. 試験結果

3.1 フライアッシュの抑制効果

図-1 にSシリーズの13週目の長さ変化を示す。長さ変化は正を膨張とした。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/m³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。このことから、フライアッシュのアルカリ骨材反応抑制機構は、単位セメント量の減少に伴うアルカリ量の減少のみならず、他の抑制機構が支配的であることが理解できる。その機構としてはChatterji¹⁾が主張する膨張圧説が有力である。Chatterjiはアルカリ骨材反応によって体積膨張が生じる際、Ca(OH)₂の存在が重要な役割を果たすことを証明した。この説によれば、フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制機構は、ポゾラン反応によってCa(OH)₂が消費され、膨張性ゲルの生成が阻止されるためだと説明される。また、フライアッシュ量によりポゾラン反応によるCa(OH)₂の消費量が異なるため、フライアッシュ置換率の増加に伴い膨張量が減少したと考えられる。しかし、フライアッシュ置換率15, 20%の場合は抑制効果は僅かであり、フライアッシュ置換率10%ではフライアッシュ置換率0%より大きい膨張を示した。既往の研究よりフライアッシュ置換率が小さい場合かえって膨張量

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)	45μふるい残分 (%)
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	-

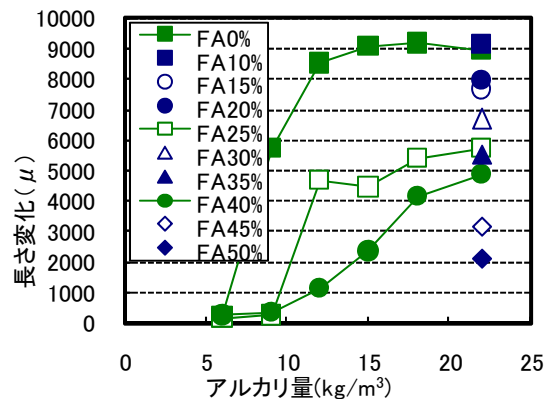


図-1 Sシリーズの13週目の長さ変化

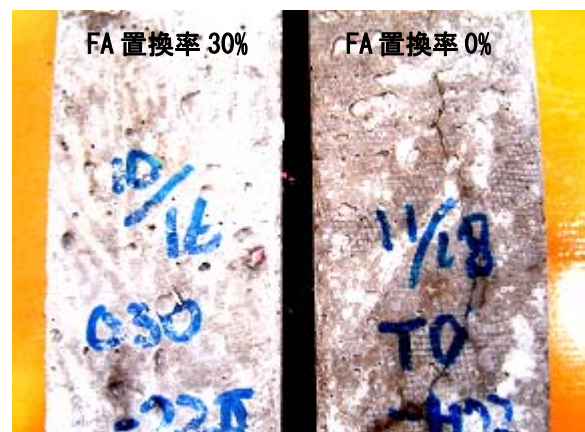


写真-1 膨張量約6000μの試験体のひび割れ状況

が増大してしまうことが知られており、本研究でも同様の結果となった。本研究では、膨張抑制効果の目標値を1000 μ 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、養生13週間時点でのアルカリ量の限界値が6kg/m³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/m³、置換率40%の場合には11kg/m³程度と限界値の増加が見られた。しかし、22kg/m³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1000 μ 以下に抑制することができなかった。

写真-1に膨張量約6000 μ の試験体のひび割れ状況を示す。左がフライアッシュ置換率30%の試験体、右がフライアッシュ置換率0%の試験体である。同程度の膨張量にも関わらずフライアッシュ置換率0%の試験体は表面に大きなひび割れが生じているのに対し、30%の試験体には同様なひび割れは確認されなかった。このことからフライアッシュはアルカリ骨材反応を抑制するだけでなく、ひび割れ幅に対しても抑制効果があるといえる。これは、アルカリ骨材反応による体積膨張に対し、フライアッシュのポゾラン反応が自己治癒効果として働いたためだと考えられる。

3.2 フライアッシュの品質規格の影響

図-2に4種フライアッシュを使用したFA1シリーズの13週目の長さ変化を示す。FA1シリーズでは前節のSシリーズと同様にフライアッシュ置換率の増加に伴い膨張量は減少する結果となったが、フライアッシュ置換率20%の場合には抑制効果が僅かであり、フライアッシュ置換率10%ではフライアッシュ置換率0%より大きい膨張を示した。図-3にアルカリ量22kg/m³におけるS、FA1シリーズの13週目の長さ変化を示す。4種フライアッシュに比べ2種フライアッシュの方が若干抑制効果が大きかった。2種品と4種品では粉末度(比表面積、45 μ ふるい残分)の品質規格が異なっており、既往の研究結果²⁾において粉末度が高い2種品の方が高い抑制効果を示すといわれている。本研究では品質規格の影響は顕著には示されなかったが、同発電所産のフライアッシュの場合2種品を使用することが好ましいと考えられる。

3.3 骨材の反応性の影響

図-4に新潟産反応性骨材を使用したAG1シリーズの13週目の長さ変化を示す。フライアッシュ置換率0%であっても、アルカリ量10kg/m³程度までは膨張量が1000 μ 以下であり、10kg/m³以上のアルカリ量でも膨張量は3000 μ 程度であるので、骨材の反応性が比較的低いことが分かる。そのため、アルカリ量が22kg/m³と多い場合でもフライアッシュ置換率30%で膨張量を1000 μ に抑制することが可能であった。図-5に富山産反応性骨材を使用したAG2シリーズの13週目の長さ変化を示す。フ

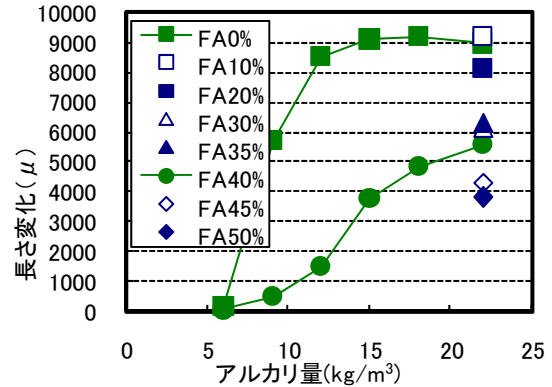


図-2 FA1シリーズの13週目の長さ変化

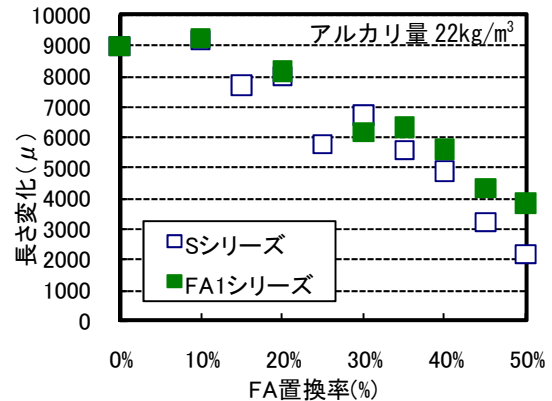


図-3 S, FA1シリーズの13週目の長さ変化

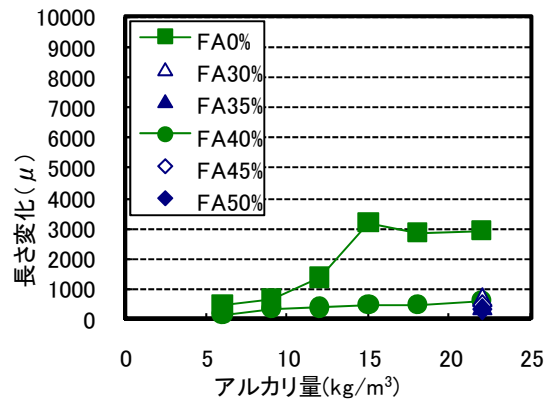


図-4 AG1シリーズの13週目の長さ変化

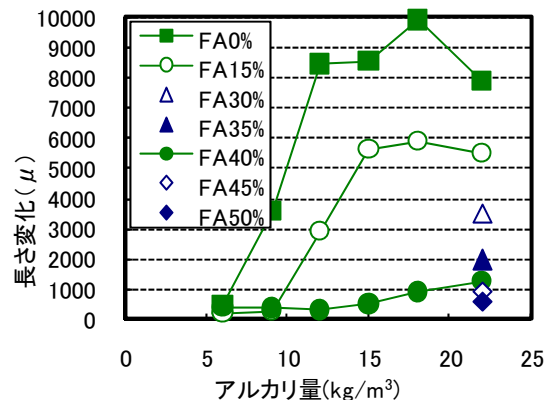


図-5 AG2シリーズの13週目の長さ変化

ライアッシュ置換率 0%の推移に着目すると、アルカリ量 6kg/m^3 以上になると急激な膨張を示し、アルカリ量 12kg/m^3 で約 8500μ の膨張が生じた。しかし、フライアッシュ置換率を 45%とすることでアルカリ量 22kg/m^3 の場合でも膨張量を 1000μ に抑制することが可能であった。

図-6 にアルカリ量 22kg/m^3 におけるS, AG1, AG2 シリーズの 13 週目の長さ変化を示す。フライアッシュ置換率 0%では当然ながら骨材によって膨張量が異なる。また、膨張量を 1000μ 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。骨材の反応性とアルカリ量がともに高い場合にはフライアッシュのみによりアルカリ骨材反応を食い止めることは困難であるので、適切なフライアッシュ置換量を定めるためには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。

3.4 フライアッシュの産地の影響

図-7 に産地の異なるフライアッシュを使用したAG2, FA2 シリーズのアルカリ量 22kg/m^3 における 13 週目の長さ変化を示す。本研究においては、いずれのフライアッシュ置換率においても、あまり差が見られなかった。これらの結果から、異なる発電所産のフライアッシュの場合でもJIS A 6201 で規定される 2 種相当品であれば、同程度の抑制効果が期待できる。

3.5 セメントの種類の影響

図-8 にセメントの種類が異なるS, LC, HCシリーズのアルカリ量 22kg/m^3 における 13 週目の長さ変化を示す。同一のフライアッシュ置換率でも、低熱セメントを用いたLCシリーズは普通ポルトランドセメントを用いたSシリーズより小さい膨張量を示したのに対し、早強セメントを用いたHCシリーズはSシリーズより大きい膨張を示した。これは、セメントの鉱物組成の差異が原因だと考えられる。一般的に、普通セメントの C_3S 含有量が 50%程度なのに対し、早強セメントの C_3S 含有量は 65%程度である³⁾。また、低熱セメントでは C_2S は 40%以上と規定されており⁴⁾、普通セメントより C_2S の含有量が高められている。 C_3S は水和過程において C_2S に比べ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を多く生成するため³⁾、Chatterjiの膨張圧説とあわせれば、早強セメントを使用することにより膨張が助長されることが理解できる。この結果、アルカリ骨材反応抑制対策として骨材やアルカリ総量に注意しても、早強セメントを使用するとアルカリ骨材反応を助長してしまう可能性がある。セメントの種類がアルカリ量の限界値に及ぼす影響については今後の検討課題である。

3.6 水粉体比の影響

図-9 に水粉体比が異なるS, WB30 シリーズの 13 週目の長さ変化を示す。フライアッシュ置換率 0%では、アルカリ量 6kg/m^3 においてSシリーズは膨張量が 1000μ

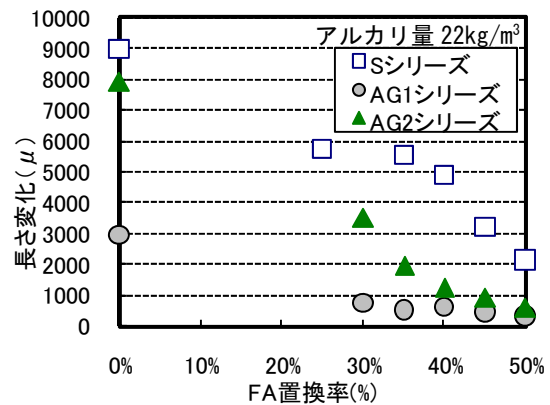


図-6 S, AG1, AG2 シリーズの 13 週目の長さ変化

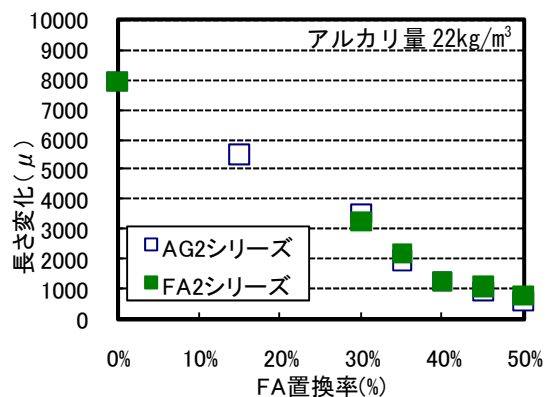


図-7 AG2, FA2 シリーズの 13 週目の長さ変化

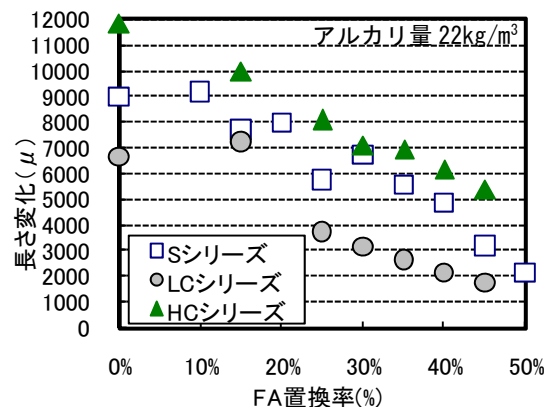


図-8 S, LC, HC シリーズの 13 週目の長さ変化

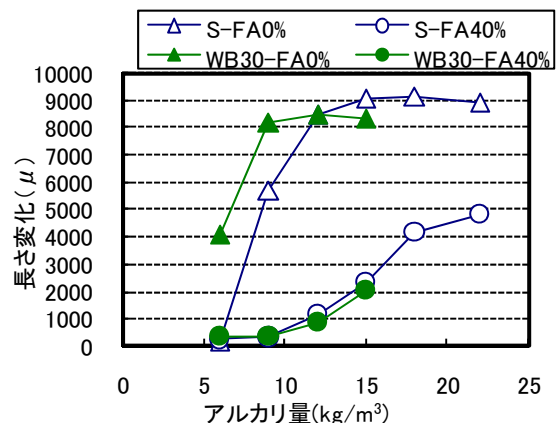


図-9 S, WB30 シリーズの 13 週目の長さ変化

以下であったのに対しWB30 シリーズは膨張量が約4000 μ であり、アルカリ量が少ない場合でも水粉体比の小さいWB30 シリーズは大きい膨張を示した。これは、水粉体比が減少し毛細管空隙が減少したことで、アルカリシリカゲルの膨張圧が効率的に負荷されたためと考えられる。水セメント比が100%程度と極端に大きい場合にはアルカリシリカゲルが毛細管空隙を通過してコンクリートから溶出し、その結果、膨張が生じなくなることが知られている⁷⁾。これとは逆に水セメント比が小さい場合には、毛細管空隙量が減少するため、アルカリシリカゲルによる膨張圧は大きくなると考えられる。一方で、水セメント比が小さくなるとコンクリートの剛性や強度は増大するが、これは膨張量が小さくなるように働く。みかけの膨張量の増減は両者の大小関係によるが、微細なひびわれが発生する以前の段階では前者の機構が卓越すると判断される。そのため、アルカリ量が少ない場合でもWB30 シリーズは膨張量が大きくなったと考えられる。またアルカリ量が大きくなり、ひび割れが発生すると前者の影響が小さくなるので、膨張量にあまり差が見られなくなったと考えられる。フライアッシュ置換率40%の場合には水セメント比に依らず同程度の膨張量が生じ、水セメント比が小さい場合でもフライアッシュの抑制効果は確認された。

3.7 他の混和材の抑制効果

図-10, 11 にシリカ質微粉末、シリカヒュームを混和材として用いたSW, SFシリーズの13週目の長さ変化を示す。SWシリーズではアルカリ量22kg/m³において置換率30%であっても膨張量を1000 μ 以下に抑制できなかった。SFシリーズでは置換率20%でアルカリ量12kg/m³程度まで膨張量を1000 μ 以下に抑制することができ、置換率30%でアルカリ量22kg/m³においてもほぼ膨張を示さなかった。しかし、SW, SFシリーズともに置換率5~10%ではアルカリ骨材反応抑制効果は確認されず、少量の置換では効果を得られないことが本実験においても示された⁵⁾。図-12 にS, FA1, SW, SFシリーズで使用した混和材の比表面積とアルカリ量22kg/m³における13週目の長さ変化の関係を示す。横軸は対数表記とした。本研究結果では、比表面積と膨張量に明らかな相関性が示された。このことから、フライアッシュやシリカヒュームなどのシリカを主体とする粉末によるアルカリ骨材反応抑制対策では、比表面積の影響度は比較的緩慢ではあるものの無視できないことが分かる。

図-13 に高炉スラグ微粉末を混和材に使用したBBシリーズの13週目の長さ変化を示す。置換率30%以上で抑制効果が確認されたが、フライアッシュに比べて抑制効果は緩慢であった。置換率40%の場合の膨張量の推移に着目すると、アルカリ量が6kg/m³以上で膨張量は

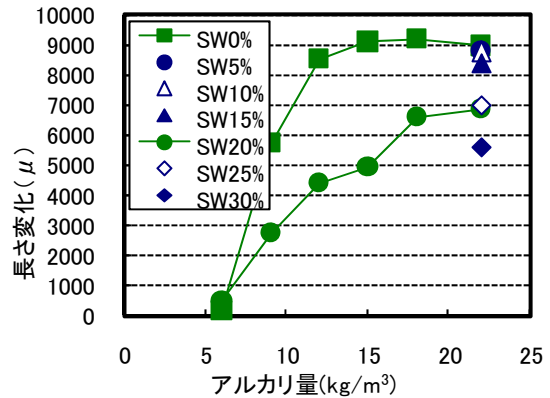


図-10 SWシリーズの13週目の長さ変化

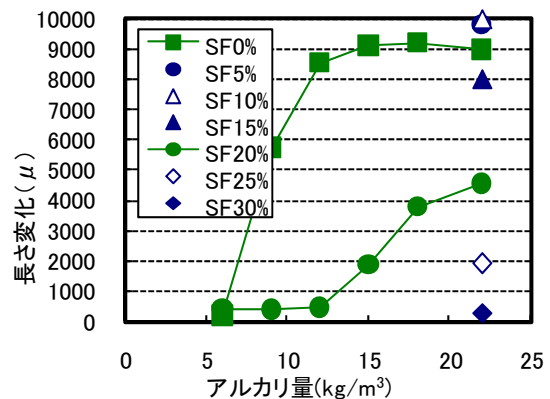


図-11 SFシリーズの13週目の長さ変化

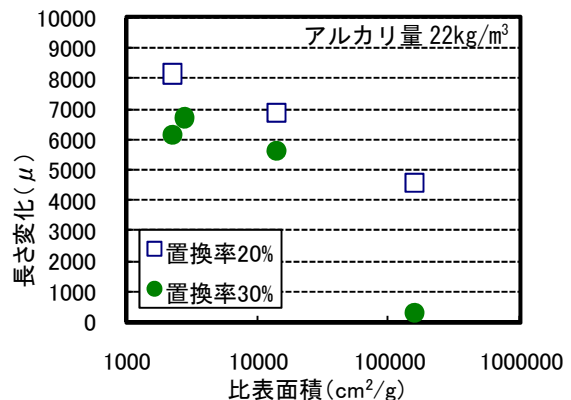


図-12 S, FA1, SW, SFシリーズの13週目の長さ変化

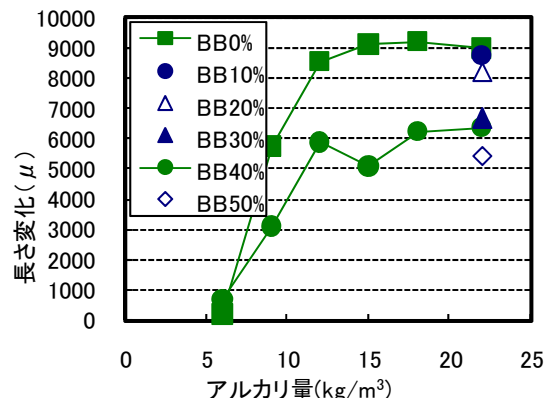


図-13 BBシリーズの13週目の長さ変化

1000 μ を超え大きく膨張側に推移した。今回の実験で、高炉スラグ微粉末なしに比べて、アルカリ量の限界値の増加は僅かであるが確認された。

図-14 にアルカリ量 22kg/m³におけるS, SF, BBシリーズの13週目の長さ変化を示す。3シリーズとも置換率の増加に伴い膨張量が減少する傾向となったが、それぞれのグラフの傾きが異なっているのが分かる。SF（シリカヒューム）、S（フライアッシュ）、BB（高炉スラグ微粉末）シリーズの順に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。

シリカヒュームのアルカリ骨材反応抑制機構はフライアッシュと基本的に同じである。そのため、フライアッシュに比べ比表面積が非常に大きいシリカヒュームはポゾラン反応が生じやすく高い抑制効果を示し、25%の置換率でも高い抑制効果が得られたと考えられる。高炉スラグ微粉末の抑制効果が比較的小さいのは抑制機構の違いが原因として考えられる。高炉スラグ微粉末の抑制機構はCa(OH)₂の消費というよりも主にポゾラン反応生成物によるアルカリイオンの固定化によると考えられている²⁾。この機構ではアルカリ濃度が極端に高い場合には抑制効果があまり期待できない。しかし、実際にはセメントが高炉スラグ微粉末に置き換わることで水和により生成される水酸化カルシウム量は減少する。このような体積希釈効果のために、高炉スラグ微粉末を混入すると膨張量が減少したのだと考えられる。本研究結果においても置換率に比例して膨張量が減少し、置換率 0%の膨張量が 9000 μ 程度であるのに対して置換率 50%の膨張量が 5000 μ 程度と約半分となり、体積希釈効果が大きいことが示された。

図-15 に促進養生における各混和材を用いたモルタルの強度変化を示す。フライアッシュはH産2種を使用した。促進養生2日目では用いた混和材や置換率によって強度に違いが見られた。しかし促進養生14日目では、フライアッシュ置換率50%を除き概ね同程度の強度が得られ、シリカヒュームで置換した場合は置換率 0%より大きな強度を示した。フライアッシュ置換量を大きくすることによりアルカリ骨材反応はより抑制できるが、初期強度の低下に注意しなければならないことが示された。

4. 結論

- (1) 本研究においても、フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制効果が示された。また、フライアッシュによるひび割れ幅抑制効果も確認された。
- (2) アルカリ骨材反応を設定した基準値まで抑制するために要するフライアッシュの添加量は骨材の反応性やアルカリ環境レベルに影響される。また、セメントの種類も抑制効果に影響することが示され

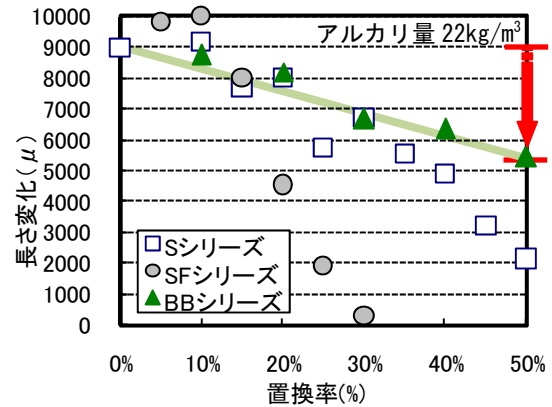


図-14 S, SF, BB シリーズの13週目の長さ変化

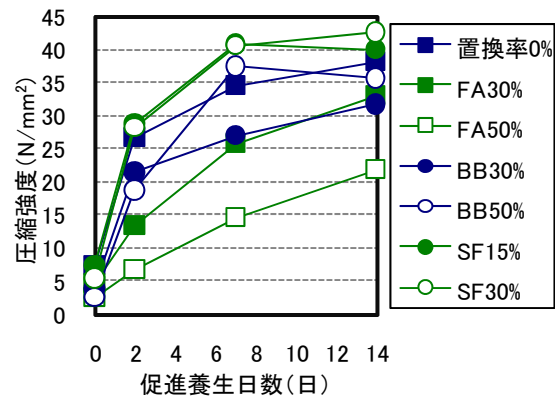


図-15 各混和材を用いたモルタルの強度変化

た。

- (3) 高アルカリ環境・反応性の高い骨材の組み合わせでも、シリカヒュームを30%置換することでアルカリ骨材反応を抑制することが可能であった。
- (4) 高アルカリ下における高炉スラグ微粉末の抑制効果はフライアッシュやシリカヒュームに比べ緩慢であった。このときの抑制効果は体積希釈効果によっておおむね説明可能である。

参考文献

- 1) S.Chatterji : The role of Ca(OH)₂ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, Vol.9, pp.185-188, 1979
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会 報告書, pp.68-81, 2008.9
- 3) 社団法人 セメント協会：C&C エンサイクロペディア, 1996.7
- 4) 日本規格協会：JIS R 5210 ポルトランドセメント, 2003年
- 5) 川村満紀, 竹本邦夫, 柳場重正：シリカヒュームのアルカリ・シリカ膨張に及ぼす影響, セメント・コンクリート, No.469, pp.29-35, 1986.3