

フライアッシュ混合高炉セメントコンクリートのフレッシュ性状に関する基礎的検討

岩田 亮祐*・平古場 洸佑**・井川 幹太***・佐々木 謙二****・原田 哲夫****

Study on fresh properties of portland blast-furnace cement mixed fly ash

by

Ryosuke IWATA*, Kosuke HIRAKOBA**, Kanta IGAWA***, Kenji SASAKI****
and Tetsuo HARADA****

Recently, the protection of the natural environment is required. Therefore, we evaluated fresh properties of the portland blast-furnace cement mixed fly ash with the aim of effectively using industrial wastes and restraining applying loading to the environment. This evaluation can be used the blending design of portland blast-furnace cement mixed fly ash. The results of this study showed that as the rate of the crushed sand increases in the portland blast-furnace cement mixed fly ash, the setting time is getting shorter and the quantity of bleeding water is decreasing. Altogether, using the crushing sand in the portland blast-furnace cement mixed fly ash improves workability.

Key words : *Portland blast-furnace cement, Fly ash, Fresh properties, Crushed sand*

1. はじめに

長崎県では、2001 年度から水産資源や自然環境の保護・保全のため、海砂の採取量を削減してきた。それに伴い、産業副産物の有効利用や環境負荷抑制の観点から、製鉄所で発生する高炉スラグ微粉末や石炭火力発電所から排出されるフライアッシュなどの産業副産物の利用拡大が期待されている。長崎県内においては、地産地消の観点からフライアッシュの活用が望ましいと判断され、高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートを標準的に使用できるシステム作りのための諸検討が行われ、2015 年 1 月に長崎県における指針案が示された¹⁾。

また、海砂に代わる骨材として、岩石を粉砕機等で人工的に細かく砕いたものである砕砂を細骨材として用いることがある。長崎県ではアルカリシリカ反応性骨材が広く分布しているが、環境保全や地産地消の観

点により、砕砂をコンクリートの品質を損なうことなく利用することが必要とされている。そこで砕砂を用いたコンクリートにフライアッシュを混合することでアルカリシリカ反応が抑制され、施工性も改善されると期待されており、長崎県では海砂に代わる骨材として砕砂が有望なものであると考えられている。しかし、砕砂は海砂と比較して、角ばった形状のものが多く、微粒分也多いため流動性等が悪くなり、ワーカビリティというコンクリートのフレッシュ性状が悪くなってしまうなどの課題が残されている。

よって、本研究では砕砂と海砂を用いたフライアッシュ混合高炉セメントコンクリートの多面的なフレッシュ性状評価を行うとともに、構成材料全体系の粒度最適化を指向した材料・配合設計手法を模索した。

令和元年 7 月 12 日受理

* 総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

** 工学科

*** 北九州市役所

**** システム科学部門 (Division of System Science)

Table 1 実験に供したコンクリートの配合

記号	水結合材比	細骨材種類	セメント種類	FA置換率	細骨材率	単位量							フレッシュ性状		
						水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤	コンクリート温度	スランブ	空気量
	(%)			(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(g/m ³)	(g/m ³)	(°C)	(cm)	(%)
N55 SS10	55	海砂	N	0	47.0	158	287	0	853	1017	1436	2.9	21.0	9.0	4.4
NF5520 SS100				20	46.0	150	218	55	842	1046	1364	10.9	22.0	12.0	5.9
BB55 SS100				0	46.0	155	282	0	836	1039	1409	4.2	21.8	11.5	4.0
BBF5510 SS100			BB	10	45.5	152	249	28	830	1052	1382	8.3	20.0	10.0	4.7
BBF5520 SS100				20	45.0	148	215	54	825	1067	1345	13.5	20.0	11.0	5.6
BB55 CS100		砕砂	BB	0	45.0	170	309	0	815	1022	1545	18.5	21.0	8.5	4.3
BBF5510 CS100				10	44.5	170	278	31	802	1027	1545	30.9	19.0	10.0	3.9
BBF5520 CS100				20	44.0	165	240	60	799	1044	1500	42.0	22.5	8.5	3.9
BB55 SS40CS60		海砂・砕砂	BB	0	45.5	165	300	0	824	1025	1500	15.0	22.3	9.0	4.3
BBF5510 SS40CS60				10	45.0	163	267	30	815	1035	1482	23.7	23.0	12.0	4.9
BBF5520 SS40CS60				20	44.5	160	233	58	809	1047	1455	34.9	23.0	11.5	4.8

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合

本研究に用いたコンクリートの配合を Table 1 に示す。配合名の記号は、N は普通セメントを、BB は高炉セメント B 種を、NF, BBF は普通セメントまたは高炉セメント B 種の 10% または 20% をフライアッシュで置換したものを表す。SS100 は細骨材が海砂 100%, SS40CS60 は細骨材が海砂 40% と砕砂 60% の混合系、CS100 は細骨材が砕砂 100% を示す。目標スランブは、 $10 \pm 1.5 \text{ cm}$ 、目標空気量は、 $4.5 \pm 1.5 \%$ とした。

2.2 試験方法

60 リットルの二軸強制練りミキサーを使用し、練り混ぜを行った後、以下に示す試験を行った。

(1) スランブ試験及び平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験

練り上がり直後に試料をスランブコーン上面まで「コンクリートのスランブ試験 (JIS A 1101)」に従い充填し、上面をならした後、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、着色面の全てを呈色させた。その後、スランブコーンを 2, 3 秒かけて引き上げ、スランブを測定した。次に、木棒を用いて平板の四隅を均等かつ順番に叩き続け、試料の広がり直径 250mm の円に最初に達するまでコンクリートを変形させ、タンピング回数、スランブ、円形縁の有無を記録した。平板叩きを再開し、試料の広がり直径 350mm の円到達時に直径 250mm 到達時と同様の記録を行った。その後、さらに平板叩きを行い直径 450mm の円到達時、直径 550mm の円到達時の試料の直径、円形縁の有無と直径、試料の外観を観察し、記録した。

(2) 空気量試験

練り上がり直後に、空気量を空気量試験 (JIS A

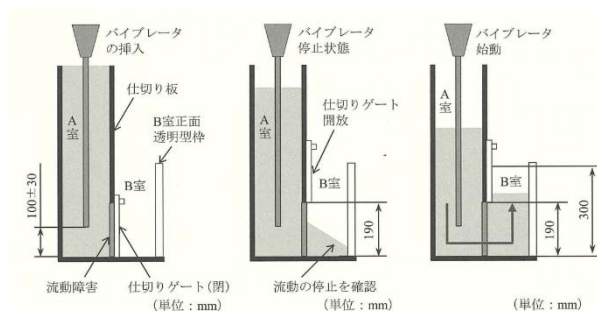


Photo 1 間隙通過性試験の概要

1128) に準じて測定した。

(3) ボックス型容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験

ボックス型容器を防振マットの上に設置し、コンクリートをボックス型容器の A 室の 1 層目 (高さの 1/3, 230mm) まで入れ、容器をゆっくり 3 回揺らした。これを 3 層目まで行い上面を軽くならした。パイプレータを A 室中央にゆっくり 580mm 挿入し、仕切りゲートを開き、パイプレータを始動させた。B 室正面において試料高さが 190mm, 300mm に達するまでの時間を 0.1 秒単位で測定し、間隙通過速度 $V_{pass}(\text{mm/s})$ を算出した。B 室上部 100mm の範囲の試料を採取し、良く混ぜ、単位容積質量を測定した。試料全てを 5mm ふるいに取出し、水でモルタル分を洗い流し、表乾状態の粗骨材質量を測定した。A 室底部 100mm の範囲の試料についても同様に、単位容積質量と粗骨材質量を測定した。それぞれの採取位置における単位粗骨材量を求め、その量により粗骨材量比率を算出した。概要を Photo 1 に示す。間隙通過速度 $V_{pass}(\text{mm/s})$ および粗骨材量比率の算出式を示す。

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad (1)$$

ここに、 V_{pass} : 間隙通過速度 (mm/s)

t_{300} : 試料の高さが 300mm に達するまでの時間 (s)

t_{190} : 試料の高さが 190mm に達するまでの時間(s)

$$\delta_A = \frac{G_A}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\delta_B = \frac{G_B}{G_0} \times 100 \quad (3)$$

δ_A : A 室から採取した試料の粗骨材量比率(%)

δ_B : B 室から採取した試料の粗骨材量比率 (%)

G_0 : 配合における単位粗骨材量 (kg/m^3)

G_A : A 室から採取した試料の単位粗骨材量 (kg/m^3)

G_B : B 室から採取した試料の単位粗骨材量 (kg/m^3)

(4) ブリーディング試験

φ150×300mm サミットモールドを測定容器とし、容器ホルダーにセットして、容器 1 層目 (高さ 85mm) までコンクリートを入れ、突棒で 18 回突き、側面を木槌で 10~15 回たたいた。これを 2 層目 (高さ 85mm), 3 層目 (試料高さ 255mm) と同様に行った。その後、こてを使い、表面を平滑になるまでならし、恒温室 (20℃ 環境) に静置し、容器にガラス板を蓋として載せた。供試体の上面をならした直後から 30 分おきに、ピペットを用いてコンクリート上面のブリーディング水を吸い取り、ブリーディング水が 2 回認められなくなるまで継続し、ブリーディング量を測定した。

(5) 凝結時間試験

コンクリート練り混ぜ時に注水した時刻の 2 時間後より 30 分ごとに、貫入抵抗値 $28.0\text{N}/\text{mm}^2$ (貫入に要した力(N)を用いた貫入針の断面積で除した値)を超えるまで貫入試験を行った。容器から水分が蒸発しないよう貫入試験中以外は適切なふたをした。貫入針については試料の硬化状態に応じて適切な断面積(100mm^2 , 50mm^2 , 25mm^2 , 12.5mm^2 のうちいずれか)をもつ貫入針を選び、貫入抵抗試験装置に取り付け、試料中に注意深く鉛直下方に 25mm 貫入させた。貫入の深さは、貫入針につけた刻印で確かめ、貫入に要する時間は約 10 秒とする。貫入に要した力(N)は、貫入に要した約 10 秒間での最大貫入力(N)とする。また、貫入抵抗値が $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ になるまでの時間(始発時間), $28.0\text{N}/\text{mm}^2$ になるまでの時間を(終結時間)を算出した。また、凝結試験の様子を Photo 2 に示す。

3. 試験結果及び考察

3.1 スランブ試験及び平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験

各配合におけるスランブを Table 1 と Fig. 1 に示す。スランブが概ね $10 \pm 1.5\text{cm}$ のコンクリートとなった。タンピング数は多くなることが分かった。これは、砕



Photo 2 凝結時間試験の様子

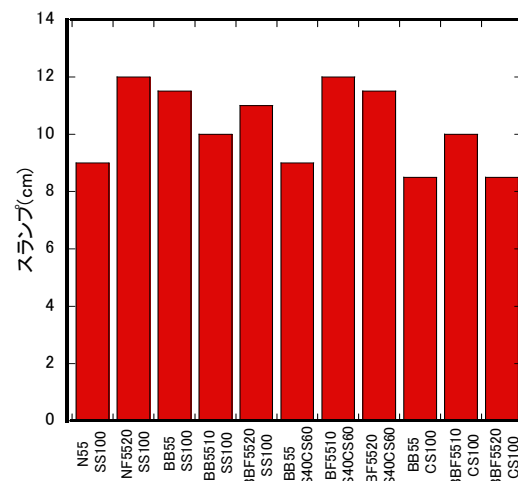


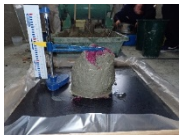
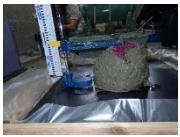

















































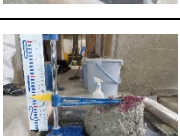
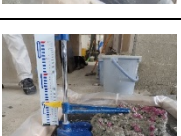


Fig. 1 各配合とスランブ

平板叩きによるコンクリートの変形の様子を Table 2 に示す。BB5520 SS40CS60 と BBF5520 SS40CS60 はスランブフロー450mm 到達時の様子から、良好でないコンクリートと目視で判断できる。フライアッシュ置換率 20% の場合は、セメントとの置換だけでなく、細骨材との置換も今後、考慮する必要があると考察できる。

各条件におけるタンピング数と FA 置換率の関係を Fig. 2~4 に示す。砕砂 100% の場合、他の細骨材配合と比べタンピング数は多くなった。砕砂 100% において、フライアッシュ置換率 10% 時に最も少ないタンピング数で 250mm~350mm に到達した。このことから、砕砂 100% では、フライアッシュ置換率 10% がコンクリートの変形性を向上させるために適当な配合であると考察する。

タンピング数と砕砂置換率の関係を Fig. 5~7 に示す。海砂 100% と砕砂 100% では砕砂 100% の方が海砂 100

Table 2 スランプ試験及び平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験の結果

	(a)引き抜き後	(b)250mm 到達時	(c)350mm 到達時	(d)450 mm到達時	(e)550 mm到達時
BB55 SS100					
BB5510 SS100					
BB5520 SS100					
N55 SS100					
NF5520 SS100					
BB55 CS100					
BBF5510 CS100					
BBF5520 CS100					
BB55 SS40CS60					
BBF5510 SS40CS60					
BBF5520 SS40CS60					

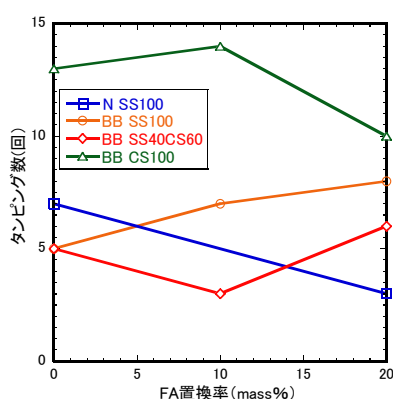


Fig. 2 250mm 到達時のタンピング数と FA 置換率

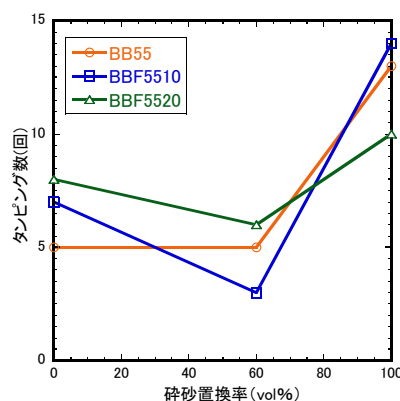


Fig. 5 250mm 到達時のタンピング数と 砕砂置換率

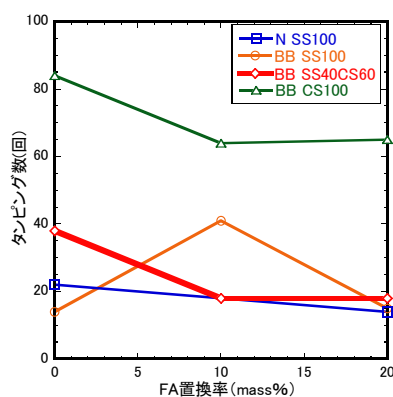


Fig. 3 350mm 到達時のタンピング数と FA 置換率

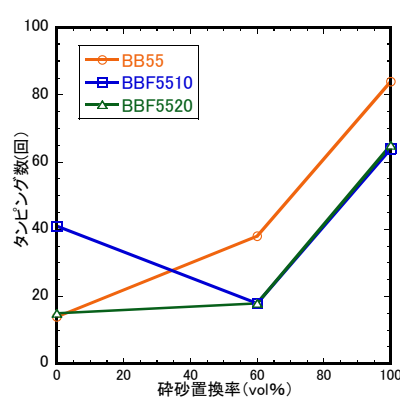


Fig. 6 350mm 到達時のタンピング数と 砕砂置換率

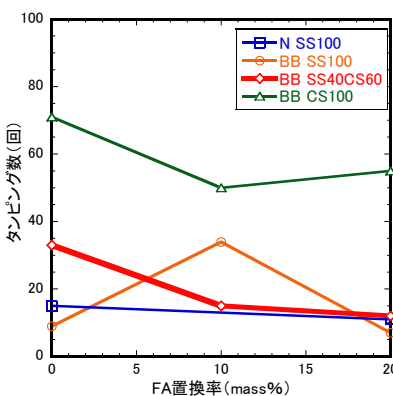


Fig. 4 250mm~350mm タンピング数と FA 置換率

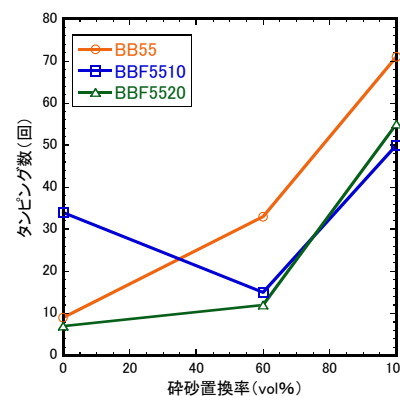


Fig. 7 250mm~350mm タンピング数と 砕砂置換率

100%の場合よりも、砕砂の微粒分により粘性が増加したことからタンピング数が多くなったと考えられる。海砂 100%と海砂 40%砕砂 60%では、タンピング数に大きな差は見られなかったため性状は大きく変化しないと考えられる。フライアッシュ同置換率における砕砂置換率による影響の比較において、砕砂置換率 60%から 100%にかけてタンピング数が大きく増加した。これは、砕砂の微粒分により粘性が増加したことが原因と考えられる。

3.2 ボックス型容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験

各配合の 190mm, 300mm 到達時間を Fig. 8, V_{pass} を Fig. 9 に示す。同じ砕砂置換率におけるフライアッシュ置換率による影響の比較において、砕砂 100%では、フライアッシュ 10%置換の場合、間隙通過速度が速くなった。これは、フライアッシュ無置換の場合は置換したものより粘性が大きいことが原因と考えられる。海砂 100%では、フライアッシュ 20%置換の場合、間

隙通過速度が最も遅くなった。これは、無置換とは対照的に粘性が小さくなったことから振動により材料が分離し、モルタル分のみが先行したためと考えられる。海砂 40% 砕砂 60% では、フライアッシュ 10% 置換の場合が最も隙通過速度が遅くなった。これは練り混ぜから本試験を行うまでに時間が空きすぎたことが原因として考えられる。

各配合における粗骨材比率を Fig. 10 に示す。BBF5510 SS100 のコンクリートが最も A 室と B 室の粗骨材比率の差が小さく、隙通過性は良い。砕砂 100% のコンクリートはフライアッシュ置換率が大きくなるにつれ、A 室と B 室の粗骨材比率の差が大きくなっており、隙通過性が悪いといえる。これは、砕砂が角ばった形状の粒形であることやフライアッシュによりコンクリートの粘性が上がり、流動性が悪化したことが考えられる。

3.3 ブリーディング試験

砕砂置換率 100% でフライアッシュ置換率別の経過時間とブリーディング量の関係を Fig. 11 に示す。砕砂 100% の試料では、フライアッシュ置換率が最も大きい 20% 置換の場合、ブリーディング量が少なくなることがわかった。これは、フライアッシュの密度がセメントより小さいため、フライアッシュを置換することで結合材の容積が大きくなり、拘束される自由水が多くなるからと考えられる。BBF5510 で砕砂置換率別の経過時間とブリーディング量の関係を Fig. 12 に示す。同じフライアッシュ置換率における砕砂混合率による影響の比較について、海砂を砕砂に置換することでブリーディング量が低下することが分かった。これは、砕砂を混合することで試料の微粒分量が増加し、モルタル中の自由水が拘束され、ブリーディング量が低下したと考えられる。細骨材種類別のフライアッシュ置換率と最終ブリーディング水量の関係を Fig. 13 に示す。フライアッシュ置換率 10% 時に SS100, SS40CS60, CS100 のすべての配合において、最終ブリーディング水量が FA 置換率 0% または 60% 時と比べて多くなるとわかった。FA 置換率 10% 時は材料分離が起りやすいので、単位水量を減らす等、配合設計時の配慮が必要である。砕砂置換率と最終ブリーディング量の関係を Fig. 14 に示す。まず砕砂を混合すると無置換と比べてブリーディング量が減少することが分かった。これは、砕砂の微粒分がモルタルの自由水を拘束したことが原因と考えられる。砕砂混合率 60% と 100% ではブリーディング量の差が無置換と 60% に比べて小さくなっている。このことから、ブリーディング量に

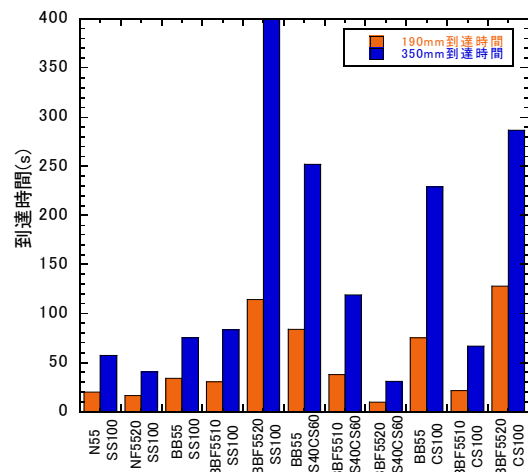


Fig. 8 各配合と到達時間

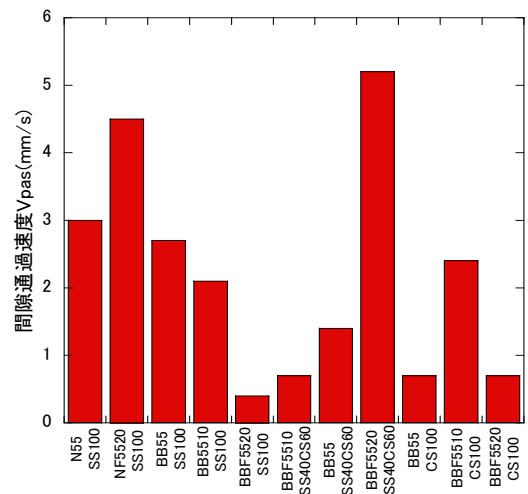


Fig. 9 各配合と Vpass

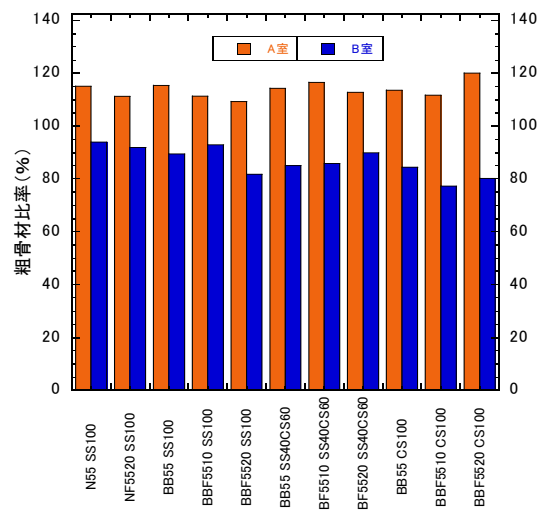


Fig. 10 各配合と粗骨材比率

関しては砕砂混合率 60% と 100% の性状は大きく変化しないと考えられる。

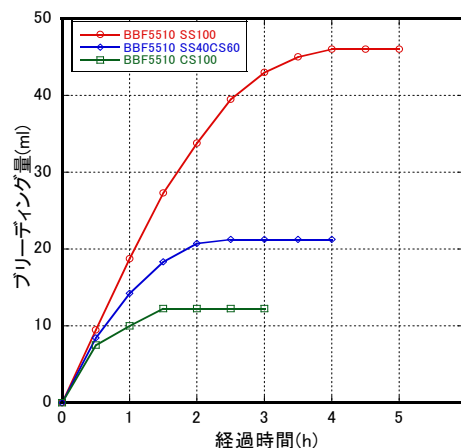
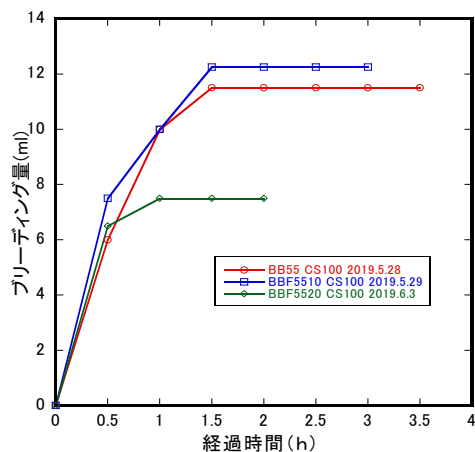


Fig. 11 ブリーディング量に及ぼす FA 置換率の影響 Fig. 12 ブリーディング量に及ぼす砕砂混合率の影響

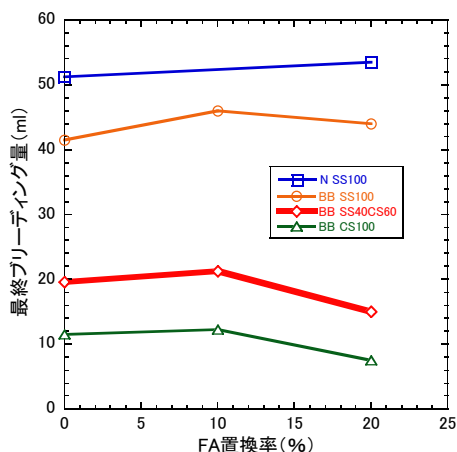


Fig. 13 最終ブリーディング量に及ぼす FA 置換率の影響

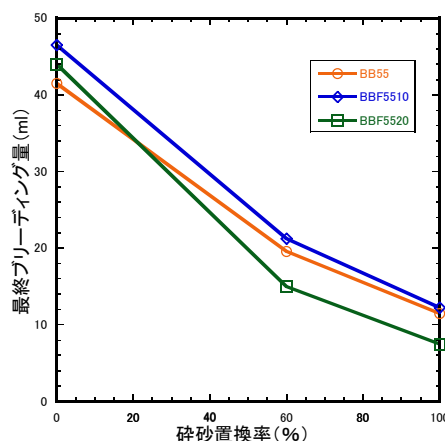


Fig. 14 最終ブリーディング量に及ぼす 砕砂混合率の影響

3.4 凝結時間試験

砕砂 100%でフライアッシュ置換率別の経過時間と貫入抵抗の関係を Fig. 15 に示す。フライアッシュはセメントと比べて反応性が乏しく、フライアッシュ無置換に比べて凝結の進行は遅くなるが、その影響は少ないと考えられる。BBF5510 で砕砂置換率別の経過時間と貫入抵抗の関係を Fig. 16 に示す。フライアッシュ置換率 10%に関しては、砕砂を混合することで砕砂 0%よりも経過時間が早くなることが分かった。これは、砕砂を混合することで試料中の微粒分が多くなったことが起因すると考えられる。FA 置換率と始発時間・終結時間の関係を Fig. 17 に示す。水結合比同条件下におけるフライアッシュ混合高炉セメント(B 種)系コンクリートのフライアッシュ置換率による始発時間・終結時間への影響の比較から、細骨材の種類や混合割合によって影響が異なることがわかった。海砂 100%では、始発時間・終結時間ともに FA 置換率と比例関係にある。このことから、フライアッシュ混合高

炉セメント(B 種)系コンクリートにおいて、海砂 100%の場合は、FA 置換率 20%の場合が望ましい始発時間・終結時間が得られるので作業時間が短縮でき、施工性が良いと考えられるが、FA 置換率 20%以上での挙動も今後、調べる必要がある。砕砂 60%、海砂 40%において、終結時間に関しては FA 置換率が大きくなると、終結時間が短くなることがわかる。始発時間は、FA 置換率 10%時に無置換時よりもやや短くなり、FA 置換率 20%時に無置換時の始発時間よりも長くなるとわかった。このことから、砕砂 60%、海砂 40%の場合は、FA 置換率 10%の場合は、FA 無置換時とほとんど始発時間・終結時間の変化はないが、FA 置換率 20%になると終結時間が短くなり、作業時間を短縮できるので砕砂 60%、海砂 40%のフライアッシュ混合高炉セメント(B 種)では、FA 置換率を 10%以上にするのが望ましい。砕砂 100%では、FA 置換率が 10%の時、FA 無置換の場合と比べて始発時間・終結時間ともに長くなる。しかし、FA 置換率 20%の場合は始発時間が FA

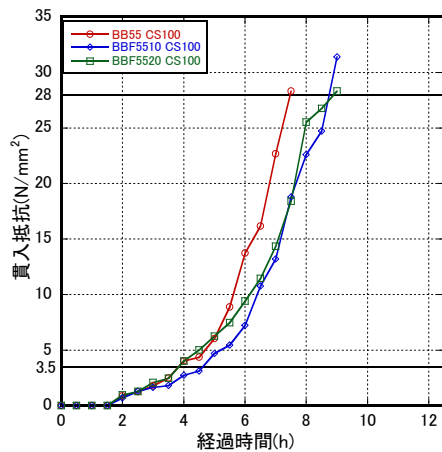


Fig. 15 貫入抵抗に及ぼす FA 置換率の影響

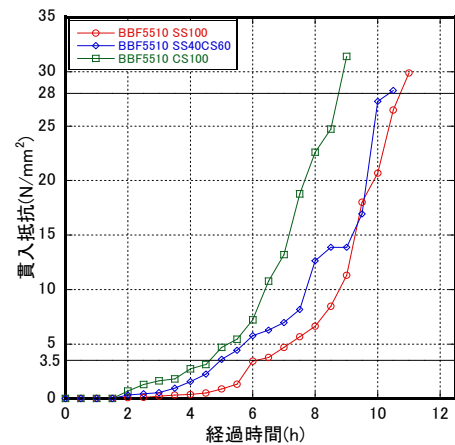


Fig. 16 貫入抵抗に及ぼす砕砂混合率の影響

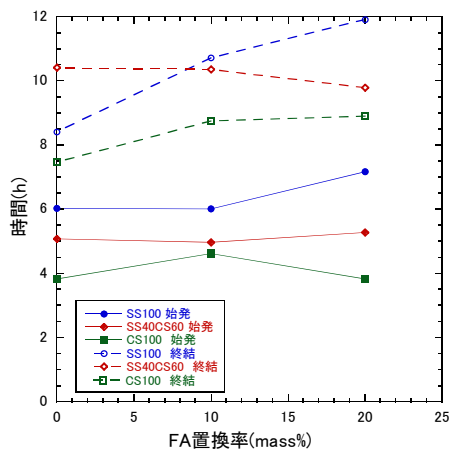


Fig. 17 凝結時間に及ぼす FA 置換率の影響

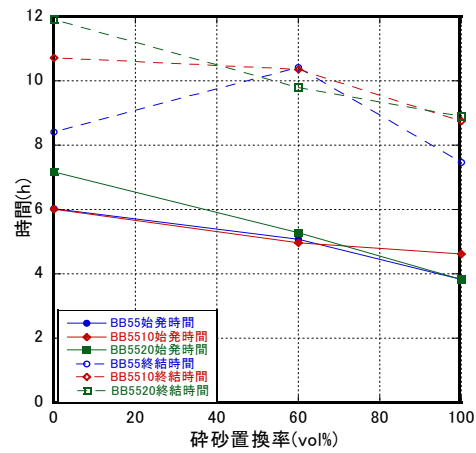


Fig. 18 凝結時間に及ぼす砕砂置換率の影響

置換率 10%時よりも早く、FA 無置換時の始発時間とおおよそ一致した。終結時間に関しては、FA 置換率と比例関係あることがわかった。このことから、砕砂 100%の場合は FA 置換率を小さくすると終結時間は短くなり、作業時間を短縮できると考えられる。砕砂置換率と始発時間・終結時間の関係を Fig. 18 に示す。BB55 系コンクリートの砕砂置換率と始発時間・終結時間の関係から、砕砂置換率を大きくすると、始発時間は短くなる傾向にあるとわかった。終結時間に関しては、砕砂置換率 60%の時に終結時間が長くなった。よって、砕砂置換率 60%の配合では作業時間が長くなり、施工性が悪いので、砕砂置換率 60%の配合は避けた方が良く考えられる。BBF5510 系コンクリートの砕砂置換率と始発時間・終結時間の関係から、砕砂置換率を大きくするほど、始発時間・終結時間ともに短くなった。このことから、BBF5510 系コンクリートは砕砂を積極的に利用することで、作業時間を短縮できると考えられる。BBF5520 系コンクリートも

BBF5510 系コンクリートと同様に考察できる。

4. 結論

本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) 海砂 100%では、フライアッシュ置換率 10%で間隙通過速度が大きくなり、粗骨材率の差が小さくなるので、適度な粘性を得られることが確認された。
- (2) 砕砂置換率を大きくすると、ブリーディング量を低減されることが確認された。
- (3) 砕砂を用いることでブリーディング量の低減や始発時間・終結時間が短くなり、施工性が向上することが確認された。

参考文献

- 1) 長崎県土木部：長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針，2015.1