

論文 結合材の比表面積が超高強度コンクリートのワーカビリティに及ぼす影響に関する基礎検討

高橋 祐一^{*1}・松沢 友弘^{*2}・鶴見 淳也^{*3}・猪瀬 亮^{*4}

要旨：設計基準強度 200N/mm² のコンクリートの結合材として、シリカフェーム混合セメントと混和材としてシリカフェームが使用されている。超高強度コンクリートの物性は、材料中に占める割合の大きい結合材の品質の影響を大きく受けると考えられる。そこで、結合材の BET 法により測定した比表面積に着目し、複数のシリカフェーム混合セメントおよびシリカフェームをそれぞれ組み合わせた超高強度コンクリートのスランプフローとの関係について検討した。また、シリカフェーム混合セメントのシリカフェームの混合率の影響を確認した。その結果、スランプフローは結合材の比表面積の影響を大きく受けることを確認した。

キーワード：超高強度コンクリート, 結合材, 比表面積, BET 法, スランプフロー

1. はじめに

近年、コンクリートの超高強度化が進んでおり、地上 50 階を超えるような超高層鉄筋コンクリート造建物の下層部の柱には、設計基準強度（以下、 F_c とする）200N/mm² の超高強度コンクリートが使用されるケースがみられる。 F_c 200N/mm² 級の超高強度コンクリートの結合材には、ベースとなるポルトランドセメントにシリカフェームをプレミックスしたシリカフェーム混合セメントが用いられており、さらには適切なワーカビリティを確保することを目的に、セメントにプレミックスされているシリカフェームよりも粒径の粗いシリカフェームを混和材として結合材の一部に使用している^{1), 2)}。このような超高強度コンクリートは水結合材比が非常に小さく、材料中に占める結合材の量が多いことから、その物性は結合材の影響を大きく受けると考えられる。

渡邊らの研究³⁾では、水結合材比 20% の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象に、11 種のシリカフェームを使用して検討を行い、かさ密度や強熱減量が大きいとコンクリートの流動性が低下すると報告されている。また、松井らの研究⁴⁾では、低熱ポルトランドセメントと比表面積が異なる 4 種類のシリカフェームを用いた W/B=16% のモルタルによる検討を行っており、シリカフェームの BET 法による比表面積がモルタルの各物性に及ぼす影響が大きいと報告されている。しかし、 F_c 200N/mm² 級の超高強度コンクリートを対象とし、また、シリカフェームの他、シリカフェーム混合セメントの物性を加えて検討した事例は少ない。

そこで、本研究では、結合材の物性のうち、比表面積に着目し、複数のシリカフェーム混合セメントおよびシ

リカフェームを組み合わせた W/B=12.5% の超高強度コンクリートを対象として、結合材の BET 法による比表面積とモルタルおよびコンクリートのスランプフローとの関係について検討を行った。また、シリカフェーム混合セメント中のシリカフェームの混合率の影響を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料を表-1 に示す。使用したシリカフェーム混合セメント（記号：C1）は 13 種類、シリカフェーム（記号：SF1）は 11 種類で、いずれも市販品で同一銘柄のものであるが、それぞれ製造ロット（製造

表-1 使用材料

名称	記号	銘柄/産地	物性
セメント	C1	シリカフェーム混合セメント	BET 比表面積： 2.65m ² /g~3.25m ² /g
	C2	低熱ポルトランドセメント	BET 比表面積： 1.52m ² /g
混和材	SF1	電融ジルコニア系シリカフェーム	BET 比表面積： 6.10m ² /g~11.09m ² /g
	SF2	フェロシリコン系シリカフェーム	BET 比表面積： 15.89m ² /g
細骨材	S	砕砂/茨城県桜川市産	表乾密度：2.58g/cm ³ 吸水率：1.66%
粗骨材	G	砕石/茨城県桜川市産	絶乾密度：2.65g/cm ³ 吸水率：0.61%
化学混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸系
	—	消泡剤	ポリオキシアルキレンアルキルエーテル
	SR	収縮低減剤	グリコールエーテル系誘導体

*1 五洋建設（株）技術研究所 建築技術開発部 担当部長 博士（工学）（正会員）

*2 （株）フローリック 海外事業本部 海外事業部 主任 兼 技術本部 コンクリート研究所 主査（正会員）

*3 五洋建設（株）技術研究所 建築技術開発部

*4 （株）フローリック 技術本部 コンクリート研究所（正会員）

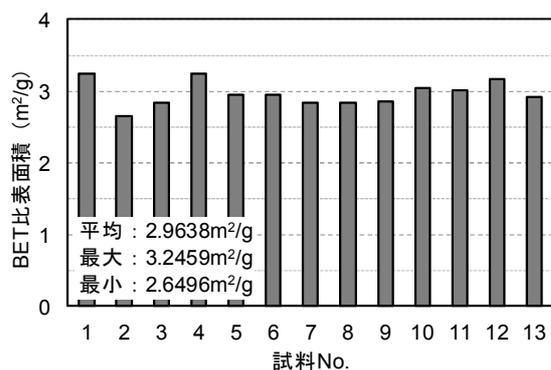


図-1 シリカフューム混合セメント (C1) の BET 比表面積測定結果

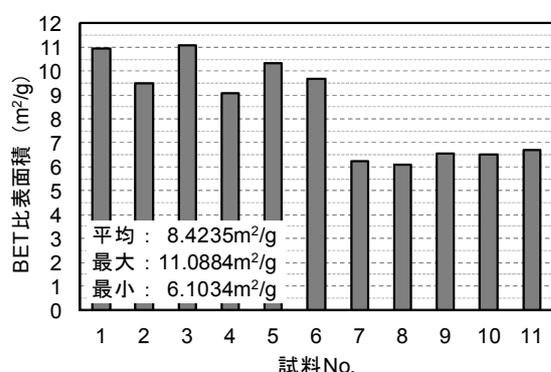


図-2 シリカフューム (SF1) の BET 比表面積測定結果

時期) が異なっている。窒素ガス吸着による BET 法により測定した値 (以下, BET 比表面積) を示している (図-1 および図-2)。シリカフューム混合セメントの BET 比表面積は, $2.65\text{m}^2/\text{g} \sim 3.25\text{m}^2/\text{g}$ の範囲で, 変動係数は 5.9%であった。一方, シリカフューム (SF1) の BET 比表面積は, $6.10\text{m}^2/\text{g} \sim 11.09\text{m}^2/\text{g}$ となり, 最大と最小の差が約 $5\text{m}^2/\text{g}$ で, 変動係数も 22.8%とばらつきが大きかった。これは, 製造年が試料 No.1~No.6 と試料 No.7~No.11 で異なる影響と考えられるが, 詳細は不明である。しかし, 試料 No.7~No.11 をみると, 大きな変動もなく安定していた。また, SF1 の品質の一例を表-2 に示す。本実験で使用した SF1 は, BET 比表面積が JIS A 6207 に規定されている値 ($15\text{m}^2/\text{g}$ 以上) を満足していないが, 他の項目については規定値を満足していた。シリカフューム混合セメント中のシリカフュームの混合率の影響を確認する実験では, ベースのポルトランドセメントとして低熱ポルトランドセメント (記号: C2) を使用し, 混合されているシリカフュームには SF1 よりも BET 比表面積の大きいシリカフューム (記号: SF2) を使用して模擬的にシリカフューム混合セメントを再現 (以下, 模擬シリカフューム混合セメントとする) した。

表-2 シリカフューム (SF1) の品質の一例

項目	測定値	JIS A 6207 規定値
二酸化けい素 (%)	96.0	85.0 以上
酸化マグネシウム (%)	—*1	5.0 以下
三酸化硫黄 (%)	0.08	3.0 以下
遊離酸化カルシウム (%)	0.21	1.0 以下
遊離けい素 (%)	0.06	0.4 以下
塩化物イオン (%)	—*1	0.10 以下
強熱減量 (%)	0.7	4.0 以下
湿分 (%)	0.63	3.0 以下

*1 0.01%未満を示す。

表-3 調合

調合記号	W/B (%)	単位量(kg/m^3)							SP (B×%)	
		W	C1	C2	SF1	SF2	S	G		SR
A	12.5	204	1576	—	176	—	463	—	15	1.90
B		—	1080	—	—	—	317	—	—	
C		140	—	972	120	108	—	824	10	
D		—	—	983	—	97	323	—	—	
E		—	—	961	—	119	315	—	—	

また, 化学混和剤には $\text{Fc}100\text{N}/\text{mm}^2$ 超の超高強度コンクリート向けの高性能減水剤を用い, さらに自己収縮ひずみ抑制のため, 収縮低減剤を併用した。

2.2 調合

本実験におけるモルタルおよびコンクリートの調合を表-3 に示す。本実験では, 結合材の BET 比表面積とフレッシュ性状との関係を確認することを目的としているため, 高性能減水剤および消泡剤の添加率は全ての調合でそれぞれ $\text{B} \times 1.9\%$, $\text{B} \times 0.01\%$ で一定とした。

モルタルを用いた検討では, 調合 B に示すコンクリートの調合から粗骨材を除いた調合 A を対象とした。結合材としては, シリカフューム混合セメント (C1) およびシリカフューム (SF1) をそれぞれ 4 種類ずつ使用し, 4 種類のモルタルを練り混ぜた。結合材は, シリカフューム混合セメント:シリカフュームを 9:1 (質量比) の割合で使用した。一方, コンクリートに及ぼす結合材の BET 比表面積の影響を確認する実験では, 調合を表-3 に示す調合 B とし, シリカフューム混合セメント (C1) とシリカフューム (SF1) の組合せを変えて, 全 28 種類のコンクリートを練り混ぜた。なお, 一部の調合では, 2 種類のシリカフューム (SF1) を同時に使用し, BET 比表面積を調整した。結合材の BET 比表面積は, シリカフューム混合セメントの BET 比表面積 $\times 0.9$ + シリカフュームの BET 比表面積 $\times 0.1$ として求めた計算値とした。実施した調合の結合材 BET 比表面積は, $3.0059\text{m}^2/\text{g} \sim 4.0272\text{m}^2/\text{g}$ の範囲で, 平均がモルタルで $3.6125\text{m}^2/\text{g}$, コ

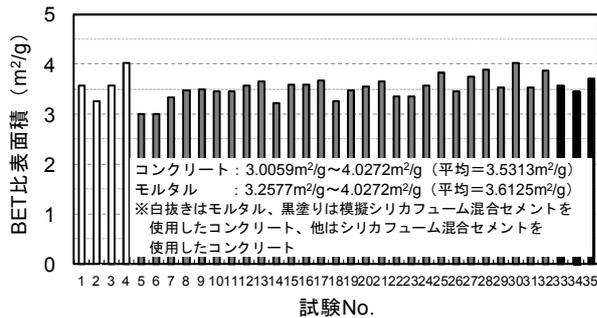


図-3 結合材の BET 比表面積 (計算値)

表-4 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ モルタル	モルタル スランブフロー	JIS A 1171 準拠*1	25cm 到達時間
	空気量	JIS A 1116 準拠	—
	モルタル温度	JIS A 1156	—
フレッシュ コンクリート	スランブフロー	JIS A 1150	50cm 到達時間
	空気量	JIS A 1128	—
	コンクリート 温度	JIS A 1156	—

*1 JIS A 1171 に規定されているスランブ試験と同様の方法にて実施し、そのフローを測定値とした。

ンクリートで 3.5265m²/g であった (図-3)。

シリカフェーム混合セメント中のシリカフェームの混合率は、目標値に対して±1.0%や±2.0%の許容差が設定されている。本検討では、シリカフェーム混合セメント中のシリカフェームの混合率の影響を確認するため、模擬シリカフェーム混合セメント中に対するシリカフェームの割合を 10.0% (標準), 9.0%, 11.0%とし、調合を表-3 に示す調合 C~E とした。結合材は、模擬シリカフェーム混合セメント (C2+SF2) : シリカフェーム (SF1) を 9 : 1 (質量比) の割合で使用した。

2.3 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、モルタル先行練りとし、60L 強制二軸練りミキサを使用して行った。C1, SF1 および細骨材を投入して 10 秒間空練り後、練混ぜ水と化学混和剤を加えて 420 秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を投入して 180 秒間練り混ぜた後、5 分間静置してさらに 30 秒攪拌して排出し、試験に供した。

モルタルの練混ぜにはハイパワータイプのモルタルミキサを使用し、粗骨材の投入はないが、低速にてコンクリートと同様に 420 秒間の練混ぜ後、さらに 180 秒間練り混ぜた。

2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4 に示す。本実験では、

表-5 フレッシュモルタル試験結果

試験 No.	結合材 BET 比表面積 (m ² /g)	スランブフロー (cm×cm)		フロータイム (秒)		空気量 (%)	モルタル 温度 (°C)
		平均	25cm	停止*1			
1	3.5839	39.7×39.0	39.4	7.9	300	1.5	25
2	3.2577	46.1×45.4	45.8	3.6	300	0.3	23
3	3.5811*2	32.5×32.4	32.5	17.7	300	2.1	26
4	4.0272	14.4×13.9	14.2	—	28.3	1.5	28

*1 300 秒経過した場合は、停止したものと判断して測定した。

*2 2 種類のシリカフェームを併せて使用した。

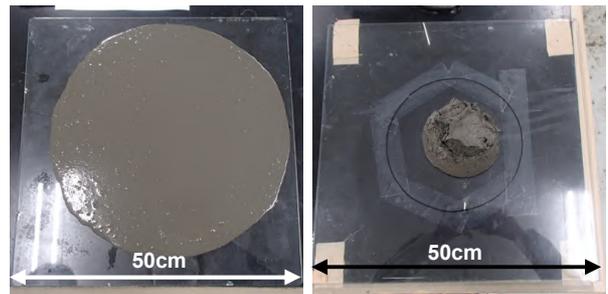


写真-1 スランブフロー 写真-2 スランブフロー
試験 (試験 No.2) 試験 (試験 No.4)

フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートのみを試験対象とした。

3. モルタル試験結果

フレッシュモルタルの試験結果を表-5 に、スランブフロー試験の一例を写真-1 および写真-2 に示す。モルタルのスランブフローは 14.2cm~45.8cm と大きな差がみられた。結合材の BET 比表面積の影響をみると、BET 比表面積が大きいほどスランブフローは小さくなる傾向にあった。モルタルを対象とした検討では、シリカフェーム混合セメントおよびシリカフェームの種類が少ないため、それぞれの種類を増やし、コンクリートを対象として、さらに検討を行った。

4. 結合材の BET 比表面積の影響

4.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリート試験結果を表-6 に、スランブフロー試験の一例を写真-3 および写真-4 に示す。ここで、試験 No.5~No.32 はシリカフェームセメントを用いた調合の試験結果、試験 No.33~No.35 は模擬シリカフェーム混合セメントを用いた試験結果である。スランブフローは 46.8cm~84.0cm で、最大値と最小値の差は 37.2cm となった。50cm 到達時間は 4.6 秒~18.7 秒の範囲であった。一方、空気量は概ね 2.0%以下であったが、スランブフローの小さい試験 No.30 では 2.5%と他と比較して大きくなった。

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

試験 No.	結合材 BET 比表面積 (m ² /g)	スランブフロー (cm×cm)		フロータイム (秒)		空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
		平均	50cm	停止 ^{*1}			
5	3.0059	83.0×81.5	82.3	4.6	300	1.9	24
6		84.5×83.5	84.0	5.2	300	1.4	24
7	3.3328	78.8×78.6	78.7	7.5	300	1.9	24
8	3.4786	77.3×77.3	77.3	8.4	300	2.1	25
9	3.4935	77.7×75.6	76.7	8.8	300	2.1	25
10	3.4586	79.2×78.5	78.9	9.5	300	1.9	23
11		78.0×75.6	76.8	7.6	300	1.6	23
12	3.5839	77.4×76.5	77.0	9.0	270	1.8	23
13	3.6607	74.5×73.9	74.2	10.2	300	2.0	25
14	3.2235	83.0×82.4	82.7	6.0	390	1.5	23
15	3.5910	76.4×76.0	76.2	8.4	300	1.9	23
16		74.0×73.5	73.8	11.0	300	1.6	22
17	3.6819	75.2×72.5	73.9	11.3	240	1.7	22
18	3.2637	82.9×80.4	81.7	7.6	300	1.5	22
19	3.4730 ^{*2}	80.5×80.1	80.3	8.7	300	1.8	23
20	3.5627	77.4×75.6	76.5	10.0	300	1.7	21
21	3.6624 ^{*2}	76.0×75.4	75.7	11.6	300	1.8	23
22	3.3659	74.2×73.8	74.0	9.8	260	1.8	23
23		74.2×73.5	73.9	9.1	250	1.5	22
24	3.5811 ^{*2}	69.9×69.5	69.7	11.7	300	1.8	23
25	3.8364	65.8×64.8	65.3	16.2	300	1.6	23
26	3.4576	76.3×74.4	75.4	8.8	300	1.7	23
27	3.7565	70.9×69.8	70.4	12.7	300	1.8	22
28	3.8818	67.6×65.1	66.4	14.8	210	1.9	23
29	3.5396	66.5×65.7	66.1	15.1	300	2.0	25
30	4.0272	47.0×46.5	46.8	—	—	2.5	26
31	3.5317	73.3×71.2	72.3	10.1	240	1.6	22
32	3.8695	64.7×63.5	64.1	18.7	180	2.1	23
33	3.5760	69.7×69.0	69.4	14.3	300	2.0	22
34	3.4466	71.1×69.5	70.3	14.3	300	1.9	23
35	3.7054	66.5×66.4	66.5	13.5	300	2.1	23

*1 300 秒経過した場合は、停止したものとしてその時点で測定した。

*2 2 種類のシリカフェームを併せて使用した。

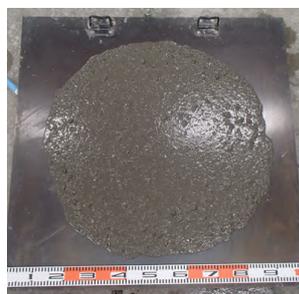


写真-3 スランブフロー試験 (試験 No.14)

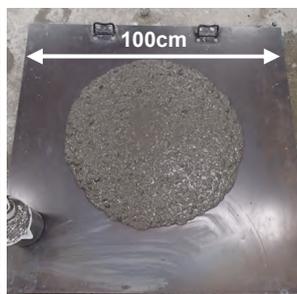


写真-4 スランブフロー試験 (試験 No.29)

4.2 各結合材 BET 比表面積とスランブフローの関係とその評価

シリカフェーム混合セメント (C1) の BET 比表面積

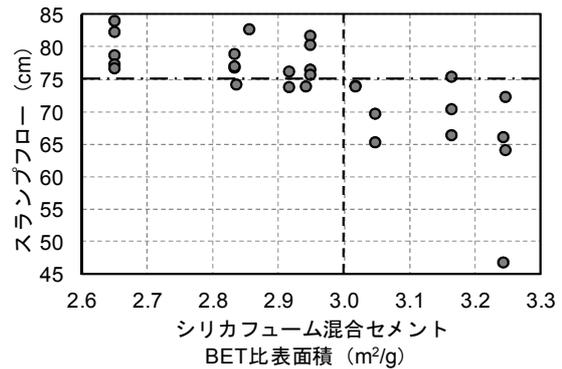


図-4 シリカフェーム混合セメント (C1) の BET 比表面積とスランブフローの関係

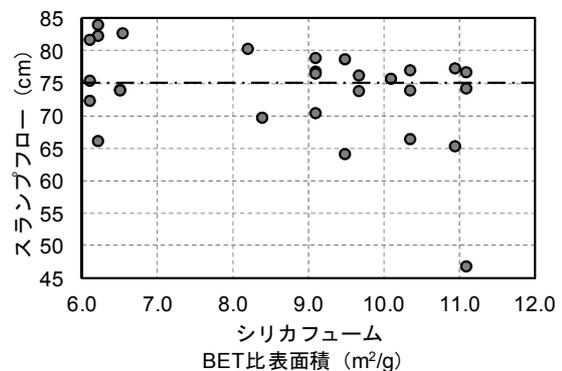


図-5 シリカフェーム (SF1) の BET 比表面積とスランブフローの関係

とスランブフローの関係を図-4 に、シリカフェーム (SF1) とスランブフローの関係を図-5 に示す。それぞれの関係を見ると、シリカフェーム混合セメントでは、BET 比表面積の増加に伴って、スランブフローが低下する傾向にあった。一方、シリカフェームの BET 比表面積との関係は、全体的に BET 比表面積が大きいほどスランブフローが小さくなる傾向にあるものの、ばらつきが大きく明確ではなかった。これは、結合材中に占める割合が、シリカフェーム混合セメントが大きく、シリカフェームが小さいため、相対的にシリカフェーム混合セメントの影響が顕著になったためと考えられる。

本実験で対象としている Fc200N/mm² の超高強度コンクリートには、鋼繊維が用いられている^{1), 2)}。そこで、本研究で対象とした調合の範囲内に限定されるが、鋼繊維を使用することでスランブフローが 5cm~10cm 程度低下することを想定し、ベースコンクリートのスランブフローの目標値を 75cm 以上と仮定して、これを確保するための各結合材の BET 比表面積の目安について検討を試みた。シリカフェーム混合セメントでは、BET 比表面積が概ね 3.0m²/g 以下であればスランブフロー75cm 以上を満足している。一方、シリカフェームでは、BET 比

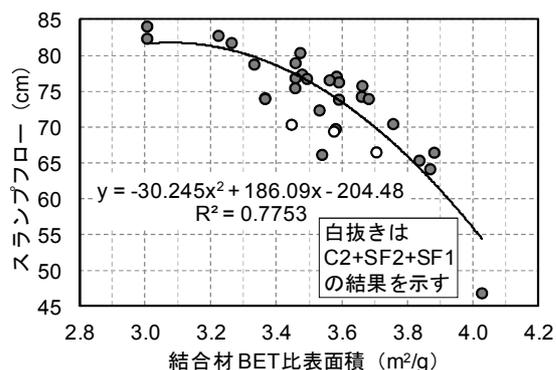


図-6 結合材 BET 比表面積（計算値）とスランプフローの関係

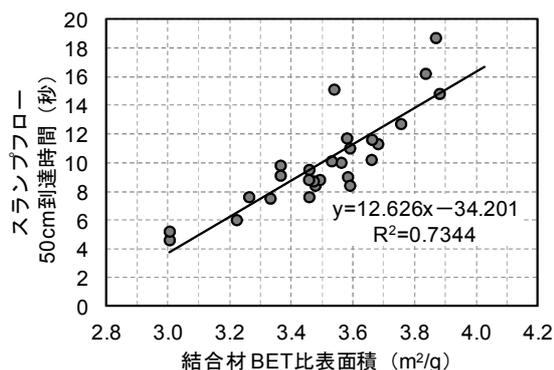


図-8 各結合材の BET 比表面積（計算値）とスランプフロー50cm 到達時間の関係

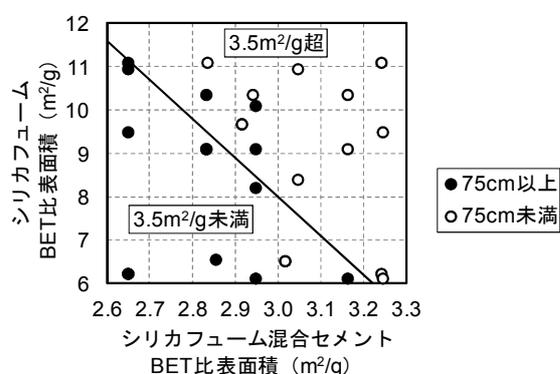


図-7 各結合材の BET 比表面積の組合せとスランプフローの関係

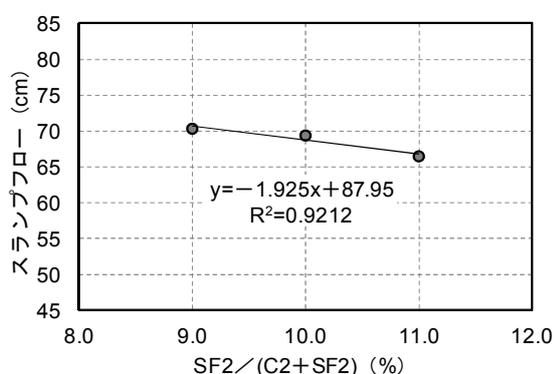


図-9 結合材 (C2+SF2) に対するシリカフェーム (SF2) の混合率とスランプフローの関係

表面積の小さい $6.1 \text{ m}^2/\text{g} \sim 6.5 \text{ m}^2/\text{g}$ のシリカフェームを用いても 75cm を下回るケースや、反対に $11.0 \text{ m}^2/\text{g}$ を超えるようなものを用いたケースでも 75cm 以上の結果が得られていた。このことから、シリカフェームに対しては、シリカフェーム混合セメントと同様の方法で BET 比表面積の目安を確認することは困難であった。

4.3 結合材の BET 比表面積とスランプフローの関係とその評価

結合材の BET 比表面積（計算値）とスランプフローの関係を図-6 に示す。なお、図中の式は、最小二乗法により求めた近似式（二次関数）である。両者の関係をみると、多少ばらつきがあるものの、決定係数が 0.775 と比較的高い相関関係が示されており、モルタルでの試験結果と同様に結合材の BET 比表面積が大きくなるほどスランプフローが低下する傾向がみられた。その傾向は、BET 比表面積が大きくなるほど顕著であり、少しの変動でスランプフローに影響を及ぼすことが確認された。また、4.2 節と同様に本研究における調査を対象とした場合、スランプフローの目標を 75cm とすると、図-6 より結合材の BET 比表面積は $3.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下が望ましいといえる。

各結合材の BET 比表面積（計算値）の組合せとスランプフローの関係を図-7 に示す。なお、図中には結合材比表面積が $3.5 \text{ m}^2/\text{g}$ となる直線を示している。これより、結合材 BET 比表面積が $3.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下となる組合せであれば、各結合材の BET 比表面積の大小に拘わらず、概ね 75cm 以上のスランプフローが得られた。図-8 には結合材 BET 比表面積とスランプフロー50cm 到達時間の関係を示している。BET 比表面積が $3.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下の場合、スランプフロー50cm 到達時間は 10 秒以下となっている。これは、既往の研究^{1), 5)}を参考にした場合、鋼繊維を混入する前のベースコンクリートの 50cm フロー到達時間に近い値となっており、適切な粘性が確保され施工性も良好であると判断できる目安として用いることも可能と考えられる。

一方、結合材として模擬シリカフェーム混合セメント (C2+SF2) を使用した調査では、シリカフェーム混合セメント (C1) を使用した調査と比較して、同程度の BET 比表面積であってもスランプフローが小さくなる傾向がみられた。これは、ミキサに投入するだけで混合したため、プレミックス品と比較してシリカフェーム (C2) の混合が不十分で、均一性が不足していた影響と推察され

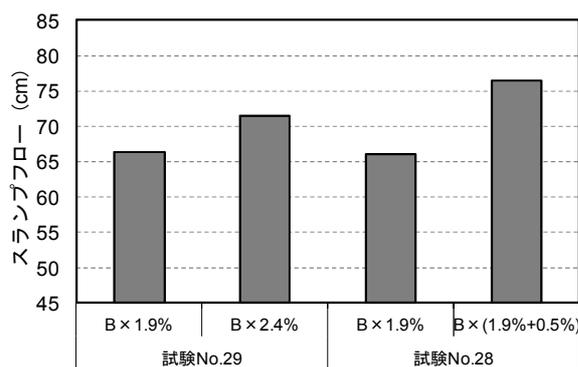


図-10 高性能減水剤の添加率を増加した場合のスランプフローの改善効果

る。

4.4 シリカフェーム混合セメント中のシリカフェームの混合率の影響

低熱ポルトランドセメント (C2) + シリカフェーム (SF2) に対するシリカフェーム (SF2) の混合率とスランプフローの関係を図-9 に示す。シリカフェーム (SF2) の割合が大きくなるほどスランプフローが小さくなる傾向にあった。しかし、2.0%異なってもスランプフローの差は約 4cm であり、混合率が目標値に対して $\pm 1.0\%$ の範囲にあれば、スランプフローに対して及ぼす影響はそれほど大きくないものと考えられる。

5. 高性能減水剤の添加率増加によるスランプフローの回復傾向

これまでの検討で、超高強度コンクリートのスランプフローは、結合材の BET 比表面積の影響を受けていることを確認した。ここでは、スランプフローが目標値に達しない場合の改善対策として、高性能減水剤の添加率を増やすことを検討した。本実験で対象とした調査は、練混ぜ時に高性能減水剤を増加したケース (表-6 中の試験 No.29 と同一の結合材を使用) および表-6 中の試験 No.28 の試験後に後添加したケースの 2 ケースとし、高性能減水剤の増加量は、いずれも $B \times 0.5\%$ とした。結果を図-10 に示す。練混ぜ時に増加したケースで 5.1cm、後添加したケースで 10.4cm の改善効果がみられた。両ケースにおいて差がみられた原因としては、添加方法の違いによる影響が考えられる。その一方で、既往の研究⁴⁾では、シリカフェームの BET 比表面積が大きいほど、高性能減水剤の吸着量が大きいため、コンクリートの流動性に影響があるとしている。本検討では、後添加したケースよりも練混ぜ時に高性能減水剤を増加したケースに使用したシリカフェーム (SF1) の BET 比表面積の方が大きい (後添加: $6.2122\text{m}^2/\text{g}$, 練混ぜ時: $10.3457\text{m}^2/\text{g}$) ことから、高性能減水剤の吸着量の差が改善効果に影響

を及ぼした可能性も考えられる。

6. まとめ

本研究では、複数のシリカフェーム混合セメントおよびシリカフェームを組み合わせた $W/B=12.5\%$ の超高強度コンクリートを対象として、結合材の BET 法による比表面積とモルタルおよびコンクリートのスランプフローとの関係について検討を行った。その結果、本研究の範囲内にて、以下の内容について確認した。

- 1) 同一銘柄で製造ロットが異なるシリカフェーム混合セメントおよびシリカフェームを用いて、水結合材比、単位水量および高性能減水剤の添加率を一定とした条件における超高強度コンクリートのスランプフローは、結合材の組合せにより大きく異なる。
- 2) 超高強度コンクリートのスランプフローは、結合材の BET 比表面積の影響を大きく受けており、それが大きくなるほどスランプフローは小さくなる傾向にある。
- 3) シリカフェーム混合セメント中のシリカフェームの混合率の影響は、結合材の BET 比表面積の影響と比較して小さい。

今後は、各結合材の BET 比表面積とスランプフローの関係について詳細に評価するとともに、コンクリートのワーカビリティを改善する対策について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 井戸康浩, 梅本宗宏, 右田周平, 諏訪一広: $F_c200\text{N}/\text{mm}^2$ 超高強度コンクリートの製造品質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.1456~1461, 2014.7
- 2) 宮野一樹, 梶田秀幸, 太田健司: 設計基準強度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 級の超高強度コンクリートの実用化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, pp.1309~1314, 2017.7
- 3) 渡邊悟士, 保利彰宏, 鳴瀬浩康, 長瀧重義: シリカフェームが高強度コンクリートの物性に及ぼす影響の評価に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.419~425, 2009.2
- 4) 松井淳, 中村秀三: シリカフェームの BET 比表面積が超高強度コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.489~450, 2004.8
- 5) 井戸康浩, 梅本宗宏, 端直人: $F_c200\text{N}/\text{mm}^2$ 超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp.1249~1254, 2013.7