論文　高炉スラグ微粉末を多量に含むモルタルのダイラタンシー性状および改善方法に関する検討

細貝　朱里[*1]・藤原　浩巳[*2]・丸岡　正知[*3]・藤原　了[*4]

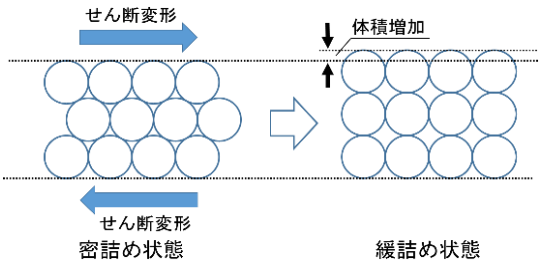
要旨：極めて低い水分量のコンクリートやモルタルでは，使用材料や配合によっては練混ぜ不良や施工不良が発生することがある。この一因としてダイラタンシーが挙げられるが，その発生メカニズムや性状についてはあまり研究がなされていない。そこで，本研究では高炉スラグ微粉末を用いて，モルタルで実験を行った。また，ダイラタンシー性状の簡易的な測定方法として貫入抵抗値試験を行った。その結果，高炉スラグ微粉末のブレーン値 20000 シリーズを除く 4 シリーズでダイラタンシー性状が確認された。また，ダイラタンシー性状が確認された配合にシリカフュームを添加したところ，ダイラタンシー性状が緩和された。

キーワード：ダイラタンシー，貫入抵抗値試験，モルタル，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートの性状改善などに寄与する混和材料は，技術の進歩や社会的ニーズ，時代背景によって新たなものが次々と開発・実用化されてきた[1)]。しかしながら，極めて低い水分量と高粉体となる超高強度コンクリートの配合では，使用する材料や配合によっては練混ぜ不良やポンプ等による施工が困難となる場合がある。これは，ダイラタンシー性状に起因するものと考えられるケースが多々見受けられる。

ここでダイラタンシーとは，単一粒度の砂のような粒状体と液体との混相流体に特有の現象で，せん断変形により体積変化が生じる現象である。粒子が密に詰まり，間隙を液体で埋めた混相流体の状態では急速なせん断変形を与えると，粒子は隣り合う粒子同士の間隙が広くならなければ移動することができない。このとき，みかけの体積は膨張しようとするため，せん断抵抗は大きくなる（**図－1**）。つまり外力（せん断力）と拮抗する内部抵抗力（体積膨張に伴う力=ダイラタンシー）が生じると，全体としてせん断応力に対してまるで固体のような抵抗を示す状態に移行する。しかし外力を加えるのを止めると，粒子が密状態に再整列しせん断力と抵抗する力が働かなくなり元の状態に戻る。間隙が水と種々の粒度分布を有する粒子等で満たされているモルタルやコンクリートにおいて，その挙動はさらに複雑なものとなるものの，性状についてはあまり研究はなされていない。



図－1　ダイラタンシーの概念図

本研究では，高粉体量・低水粉体比のコンクリートに多用される混和材料の一つである高炉スラグ微粉末をとりあげ，ダイラタンシー性状についてモルタルで検討した。また，ダイラタンシー性状が確認された配合で，ダイラタンシー性状の改善方法について検討した。

2. 高炉スラグ微粉末を多量に含むモルタルのダイラタンシー性状の検討

2.1 使用材料および配合，練混ぜ方法

本研究における使用材料を**表－1** に示す。粉体には粒度の異なる 5 種類の高炉スラグ微粉末（ブレーン値 4000 レベル：BS4，6000 レベル：BS6，8000 レベル：BS8，12000 レベル：BS12 および 20000 レベル：BS20）と普通ポルトランドセメント（OPC）を用いた。また，細骨材として珪砂 4 号（S）を用いた。これは予備的な実験により，本研究の範囲でより広範な水準でモルタルが練混ぜ可能となる細骨材として選択されたものである。**図－2** に珪砂 4 号の粒度分布を示す。

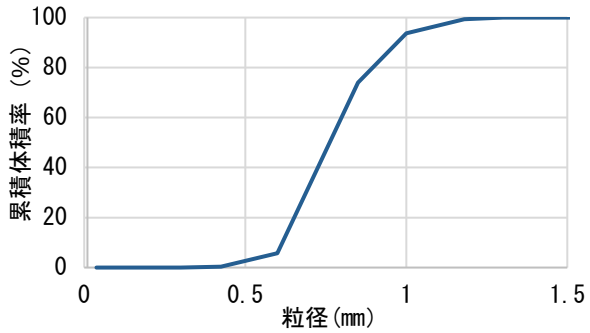
配合条件は水粉体質量比＝18%（以下 W/P），SP 添加率＝2.0%，細骨材粉体体積比＝1.0（以下 s/p）とした。配合条件を統一し，粒度の異なる 5 種類の高炉スラグ微粉末をセメントに対して 0，10，30，50，70，90，100%質量置換した 7 水準について各実験を行うこととした。

練混ぜには公称容量 10L のモルタルミキサーを使用した。練混ぜ手順は各種粉体および細骨材を投入した後，空練りを 1 分間行い，あらかじめ SP を混和した練混ぜ

*1 宇都宮大学　工学研究科　（学生会員）
*2 宇都宮大学　地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科教授　工博　（正会員）
*3 宇都宮大学　地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科准教授　工博　（正会員）
*4 株式会社　デイ・シイ　技術センター　技術開発課　サブリーダー　修士（工学）　（正会員）

表－1　使用材料

材料名	記号	密度(g/cm³)	ブレーン比表面積(cm²/g)
硅砂4号	S	2.62	
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3340
高炉スラグ微粉末(ブレーン値4000レベル)	BS4	2.90	4440
(ブレーン値6000レベル)	BS6	2.91	6540
(ブレーン値8000レベル)	BS8		9180
(ブレーン値12000レベル)	BS12		11380
(ブレーン値20000レベル)	BS20		21600
ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	SP	1.10	
上水道水	W	1.00	



図－2　硅砂 4 号の粒度分布

水を投入し，5 分間練り混ぜた後に排出した。

2.2 試験項目

(1) 0 打モルタルフロー試験

「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に準拠し，0 打での試料の広がりを測定した。

(2) 200mm 到達時間試験

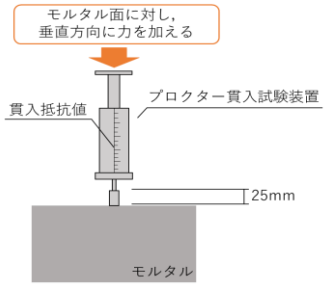
モルタルフロー試験を行なう際に，モルタルコーンを上に持ち上げてからモルタルフロー値が 200mm に達するまでの時間を測定し，モルタルの粘性の評価指標とした。

(3) 貫入抵抗値試験

ダイラタンシー性状の簡易的な評価方法として，「JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法」に示されるプロクター貫入試験装置を使用し，貫入抵抗値試験を行った。貫入抵抗値試験は，練混ぜ直後に型枠に詰めたモルタルの上面を十分に均し，約 1 秒の短時間で先端断面積 100mm² の貫入針を深さ 25mm まで貫入させる試験である。ダイラタンシーは大きなせん断速度の領域では固体のような性状を示す性状であるが，岩田らにより，貫入針を 25mm/sec・cm² で貫入することによって，ダイラタンシー性状を抵抗値として測定できることが確認されている [2)]。この試験によって得られる抵抗値により，ダイラタンシーに類似する性状を定量的に判断した。また，貫入抵抗値試験の概要図を**図－3** に示す。

2.3 試験結果

SP の添加率を粉体質量に対して 2.0%で一定として練混ぜを行ったところ，BS8，BS12 および BS20 の置換率



図－3　貫入抵抗値試験概要図

90 および 100%の配合はフレッシュ性状試験を行うために必要な流動性を得ることができなかった。そこで，置換率の水準を若干落とした配合を，公称容量 10L のモルタルミキサーで練混ぜた後に練混ぜ能力の高い大型モルタルミキサーで 5 分間練混ぜた。その結果，BS8 の置換率 85%の配合において充分な流動性を得ることができたため，試験結果に加えた。また，BS20 は公称容量 10L のモルタルミキサーのみの使用で置換率 75%の配合を練混ぜることができたため，試験結果に加えた。BS12 は，BS8 および BS20 と同様に水準を変え，大型モルタルミキサーで練混ぜを試みたがいずれも試験に必要な流動性を得ることができなかったため，置換率 70%までとした。

(1) 0 打モルタルフロー試験

0 打モルタルフロー試験の結果を**図－4** に示す。図より，いずれの粉末度の高炉スラグ微粉末で置換しても無混和のモルタルと比べフロー値が大きくなった。したがって，いずれの高炉スラグ微粉末で置換したモルタルにおいても降伏値が低下することが分かった。

この原因として，ガラス質で平滑な粒子表面を有する高炉スラグ微粉末を加えたことによって粒子間の摩擦が低減されたことが考えられる。

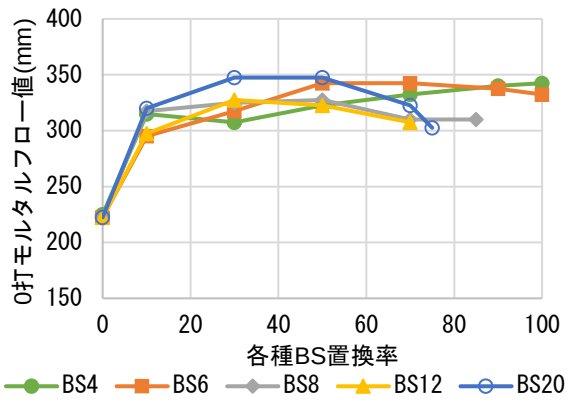
(2) 200mm 到達時間試験

200mm 到達時間試験の結果を**図－5** に示す。図より，0 打モルタルフロー値同様にいずれの粉末度の高炉スラグ微粉末で置換しても無混和のモルタルと比べ粘度が大きく低下した。これも 0 打モルタルフロー値と同様の原因によるものと考えられる。

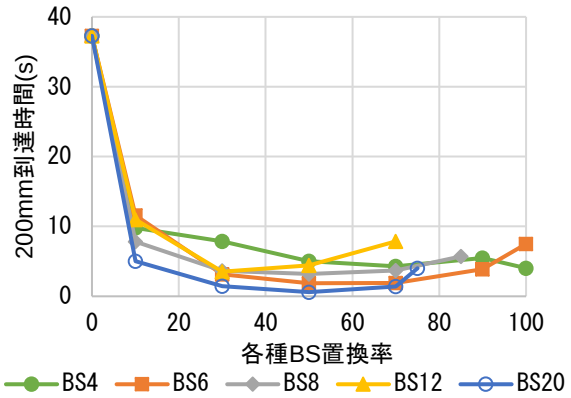
(3) 貫入抵抗値試験

貫入抵抗値試験の結果を**図－6** に示す。BS4 では置換率 50%までは抵抗値が低下する傾向を示したが，さらに置換率が増すと抵抗値は増加する傾向を示した。BS6，BS8，BS12 では，粉末度が大きいものほど低い置換率で 300N/cm² 以上の大きな抵抗値を示した。一方，BS20 で置換した場合，貫入抵抗値は大きく低下した。

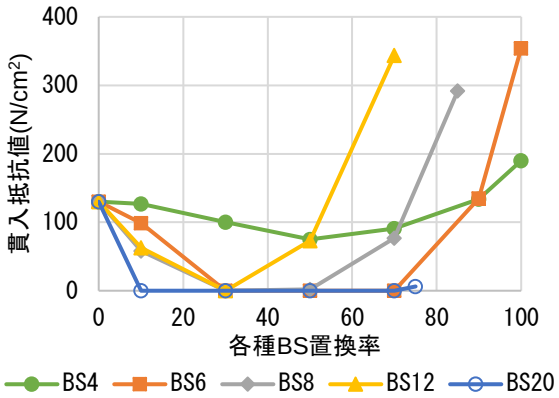
それぞれの粒度レベルの高炉スラグ微粉末における貫入抵抗値とフロー値および 200mm 到達時間の関係を**図－7～図－11** に示す。ここで，BS20 シリーズを除く 4



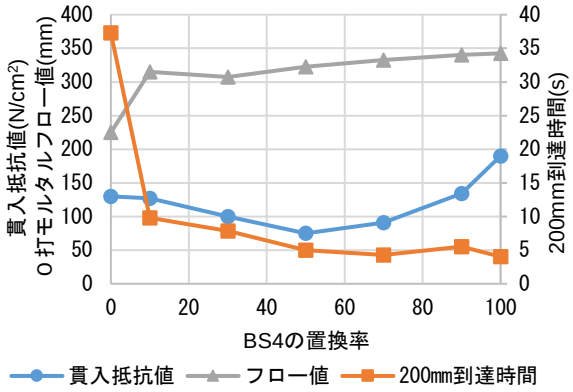
図－4　0 打モルタルフロー試験結果



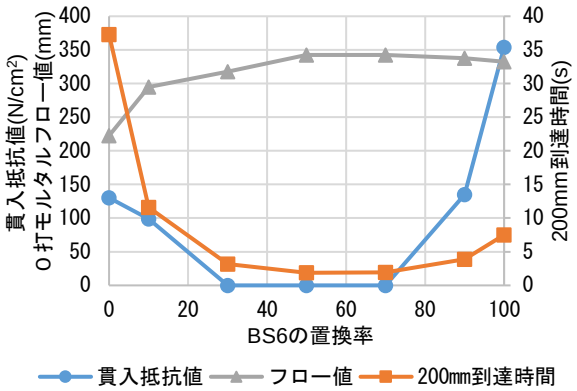
図－5　200mm 到達時間試験結果



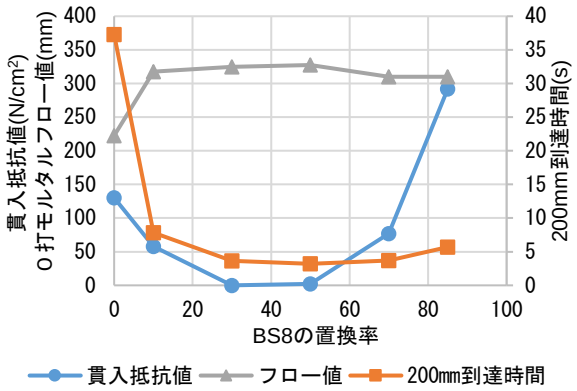
図－6　貫入抵抗値試験結果



図－7　BS4 フレッシュ試験結果



図－8　BS6 フレッシュ試験結果



図－9　BS8 フレッシュ試験結果

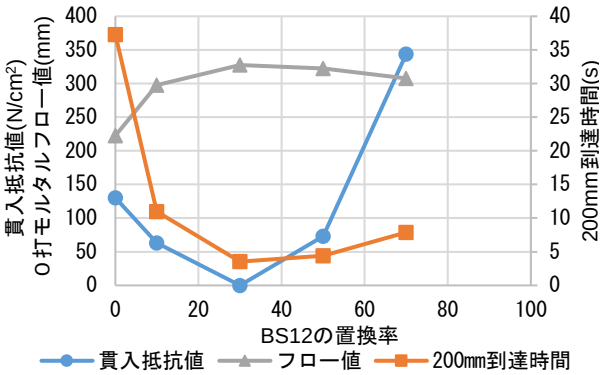
シリーズで貫入抵抗値が 100N/cm^2 を超える大きな値が測定された配合があったが，その一方で 0 打モルタルフロー値および 200mm 到達時間には大幅な変化は見られなかった。これらは外力に対し固体のような性状を示すダイラタンシー性状の特徴と類似していることから，ダイラタンシー性状が現れたと判断した。

2.4 ダイラタンシー性状に関する考察

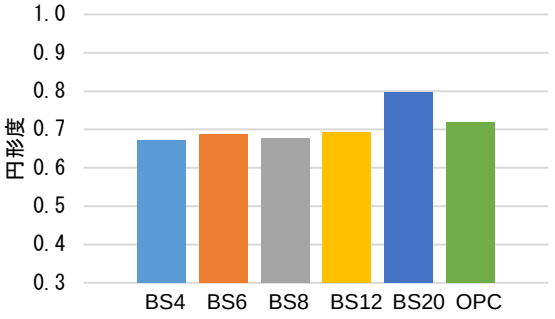
(1) 粒子形状による影響

BS6，BS8，BS12 において，粉末度が大きいものほど低い置換率で抵抗値が増加し，強いダイラタンシー性状が現れた。この原因の一つとして，粒子間の摩擦が関係していると考えられる。

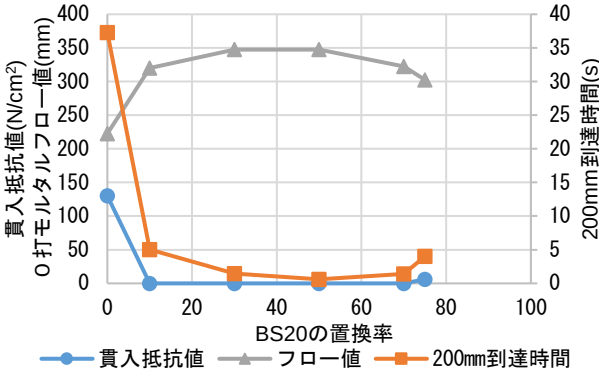
一般に高炉スラグ微粉末はガラス状のスラグを粉砕したものであるため，粒子表面は平滑であるが粒子形状は角張が多く扁平なものが多いとされている。このことから，一般のコンクリートにおいて通常のレベルでセメントに対して置換利用するとスラグ粒子表面の平滑性の影響が卓越して現れ，粒子間摩擦を低減しモルタル・コンクリートの流動性を高めると考えられる。しかし，水粉体比が著しく低くペースト中の粒子同士の距離が近い場合では粒子形状の影響が大きくなり，抵抗値が大きくなると推測した。



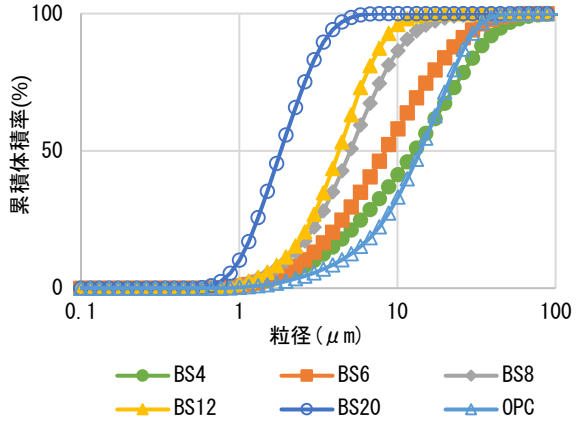
図－10　BS12 フレッシュ試験結果



図－12　各種粉体の円形度



図－11　BS20 フレッシュ試験結果



図－13　通過分積算による粒度分布

粒子形状は円形度を用いて評価した。各種高炉スラグ微粉末およびセメントの粒子の円形度を**図－12** に示す。円形度 r は，各粉体の SEM 画像から画像処理により，粒子の投影面積 S および粒子の周囲長 L を求め，以下の式(1)より求めたものであり，この値が 1 に近づくほど球に近い形状となる。

$$r = 4\pi S/L^2 \qquad (1)$$

BS4～BS12 においては OPC よりも円形度が低いが，BS20 は円形度が大きいことがわかる。これは BS20 が他の粉体に比べ，より長時間の粉砕工程を経たためと考えられる。

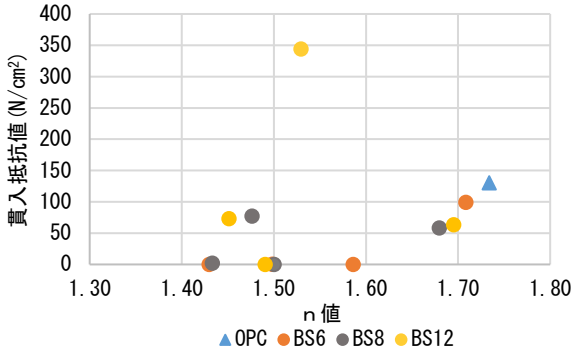
(2) 粉体の粒度分布による影響

ダイラタンシー性状は粒子が密に詰まった状態から粗の状態に移行する際に見られる現象であり，粉体の粒度分布による影響も考えられる。そこで粉体の粒度分布についての考察を行った。

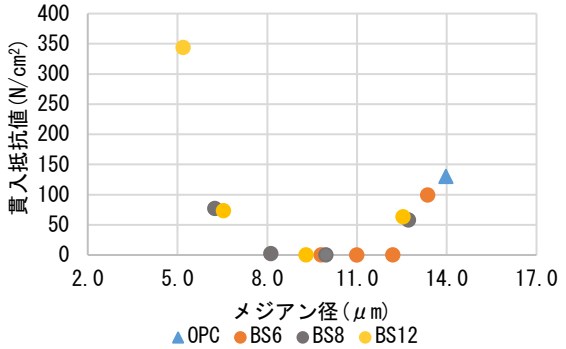
セメントおよび各種高炉スラグ微粉末の通過分積算による粒度分布を**図－13** に示す。BS12 および BS20 の粒度曲線が他の高炉スラグ微粉末のものと比べ，比較的傾きが急であることが分かる。このことから，粒子の大きさが比較的揃っていることが推察できる。また，BS20 はセメント粒子と比較して粒径が小さく，円形度が 1 に近い。そのため，BS20 で置換すると，セメント粒子間を密充填化するとともに，ボールベアリング効果が現れたため，ダイラタンシー性状が現れなかったと推察される。

また，BS4 は OPC と粒度分布が近いことから，置換率を変化させても粒度への影響は少ないものの，置換率が大きくなるに従い置換率ゼロと比較し，やや貫入抵抗値が大きくなる傾向が認められた。これは，高炉スラグ微粉末の粒子の角張った形状の影響が現れたものであると考えられる。BS6，BS8，BS12 は OPC に比べ粒度が細かく、置換率の増加に伴い同体積中に存在する粒子の数が増えることから，粒子形状の影響が大きくなり，粒子の数が多いほどダイラタンシー性状が現れたと考えられる。

次に **2.3 節**で実験を行った配合のうち，ダイラタンシー性状が強く現れた BS6，BS8，BS12 の 3 シリーズの，置換率 10～70%の合成粒度分布およびセメント単体の粒度分布における Rosin-Rammler 分布式における n 値と抵抗値との関係を**図－14**，メジアン径と貫入抵抗値との関係を**図－15** に示す。Rosin-Rammler 分布式における n 値が大きくなるとともに粒度分布は狭くシャープになるとされている[3)]。**図－14** より，明確な傾向は認められないものの，n 値 1.60 以下の範囲で貫入抵抗値 0 となる条件が存在している。また，特異点があるものの n 値が大きくなるほど貫入抵抗値も増加する傾向が見られることから，粉体の粒度分布が狭くシャープになるほど貫入抵



図－14　粉体の合成粒度分布におけるｎ値と貫入抵抗値との関係



図－15　粉体の合成粒度分布におけるメジアン径と貫入抵抗値との関係

表－2　使用材料

材料名	記号	密度(g/cm³)	ブレーン比表面積(cm²/g)
硅砂4号	S	2.62	
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3340
高炉スラグ微粉末(ブレーン値6000レベル)	BS6	2.91	6540
(ブレーン値12000レベル)	BS12		11380
シリカフューム		2.25	150000
ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	SP	1.10	
上水道水	W	1.00	

表－3　粉体配合

シリーズ名	OPC	各種BS	SF
BS6-100		100.0	0.0
		97.5	2.5
		95.0	5.0
		92.5	7.5
		90.0	10.0
BS12-70	30.0	70	0.0
	27.5		2.5
	25.0		5.0
	22.5		7.5
	20.0		10.0

抗値が増加すると推察される。これは前述のように粒度が単一に近くなるほどダイラタンシー性状が出やすいとされることに一致する。

また，**図－15** から，粉体のメジアン径が約 8.0～12.0μm の範囲では貫入抵抗値が 0 となり，その範囲外で大きな貫入抵抗値が測定された。貫入抵抗値が測定されなくなるメジアン径の範囲があった原因として，BS6，BS8 および BS12 は OPC に比べ粒度が細かいため密充填される最適粒子径の存在が考えられる。本実験においては細骨材に珪砂 4 号を用いたため，粒子の密充填を考える場合，細骨材の影響も大きいと思われる。本実験の範囲内ではあるが，粉体のメジアン径が約 8.0μm～12.0μm の範囲で充填が全体系として高くなり，自由水量が増えて粒子間隔が広がることにより粒子間の摩擦が低減され，ダイラタンシー性状が現れなかったものと考えられる。

3. ダイラタンシー性状の改善方法の検討

2 章の結果から，粉体の形状および粒度分布がダイラタンシー的性状に大きく関わっていると推察した。

そこで，2 章において 300N/cm² を超える貫入抵抗値が測定され，強いダイラタンシー性状が現れたと判断される BS6 シリーズにおける 100%置換配合および BS12 シリーズにおける 70%置換の 2 配合に対し，球形の微粒子であるシリカフュームを添加し，ダイラタンシー性状の改善を試みた。

3.1 使用材料および配合，練混ぜ方法

使用材料を**表－2** に示す。配合条件および練混ぜ方法は 2.1 節と同様とした。また，粉体構成を**表－3** に示す。シリカフュームは BS6 配合においては BS6 に対し，BS12 配合においては OPC に対して 0，2.5，5.0，7.5 および 10.0%の体積置換とし，それぞれを BS6-100 シリーズおよび BS12-70 シリーズとした。

3.2 試験項目

(1) 0 打モルタルフロー試験

2.2 節と同様とした。

(2) 200mm 到達時間試験

2.2 節と同様とした。

(3) 貫入抵抗値試験

2.2 節と同様とした。

3.3 試験結果および考察

(1) 0 打モルタルフロー試験

0 打モルタルフロー試験の結果を**図－16** に示す。BS6-100 シリーズ，BS12-70 シリーズともに，シリカフュームを混和したことによる変化を見ることはできなかった。

(2) 200mm 到達時間試験

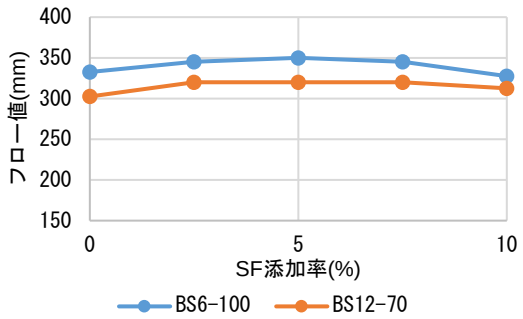
200mm 到達時間試験の結果を**図－17** に示す。BS6-100 シリーズ，BS12-70 シリーズともにシリカフューム無混和のモルタルと比べ，200mm 到達時間は減少した。

シリカフュームは球形の形状を有する超微粒子である

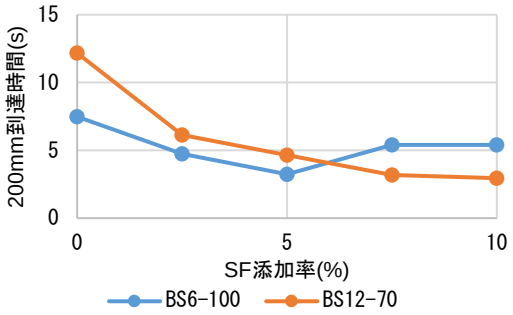
ことから，ボールベアリング効果により粘性を減少させたものと考えられる。

(3) 貫入抵抗値試験

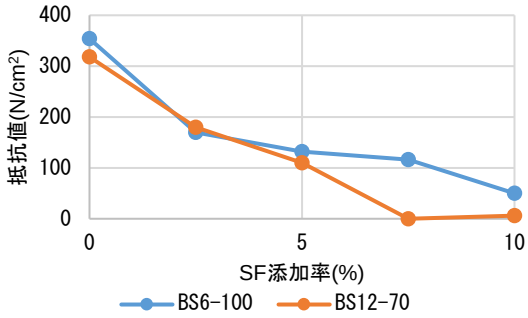
貫入抵抗値試験の結果を**図－18** に示す。シリカフュームを混和していないモルタルでは 300N/cm^2 を超える貫入抵抗値が現れたが，シリカフュームの混和割合の増加に伴い貫入抵抗値は減少した。**2.3 節**より，貫入抵抗値には粒子間の摩擦が関係していると推察したが，シリカフュームを混和することで微細な球形粒子であることによるボールベアリング効果により，粒子間の摩擦が低減されダイラタンシー性状が緩和されたものと考えられる。



図－16　0 打モルタルフロー値試験結果



図－17　200mm 到達時間試験結果



図－18　貫入抵抗値試験結果

4. まとめ

低水セメント比のモルタルにおいて，粒度の異なる 5 種類の高炉スラグ微粉末を高いレベルまで普通ポルトランドセメントに置換し，ダイラタンシー性状の発現について調べると共に，その原因について考察した。

本研究で得た知見を以下に示す。

(1) 各種高炉スラグ微粉末の置換率を大幅に増加させたところ，無混和のモルタルと比べ粘度および降伏値が低下した。また，条件によって貫入抵抗値は増加したことから，ダイラタンシー性状が現れたと考えられた。特に，BS6，BS8 および BS12 を用いたモルタルでの高置換率で 300N/cm^2 以上の大きな貫入抵抗値が認められた。

(2) 粒度が OPC と同程度である BS4 は置換率が大きくなるに従い置換率ゼロと比較し，貫入抵抗値がやや大きくなる傾向が認められた。これは，高炉スラグ微粉末の粒子の角張った形状の影響が現れたものであると考えられる。

(3) 粒度が OPC に比べ細かい BS6，BS8，BS12 では粉末度の大きい高炉スラグ微粉末が同体積中に存在する粒子の数が多いことから，粒子形状の影響が大きくなり，粒子の数が多いほど強くダイラタンシー性状が現れた。しかし、粒度が細かい事で密充填を与える最適置換率の存在が考えられ、その範囲内であればダイラタンシー性状は大きく低減される。

(4) 本実験の範囲内ではあるが，BS6，BS8，BS12 においては合成粉体粒度のメジアン径が約 8.0μm～12.0μm の範囲でダイラタンシー性状が現れなかった。これは充填が全体系として高くなり，自由水量が増えて粒子間隔が広がりダイラタンシー性状が現れなかったものと考えられる。

(5) BS20 は他の高炉スラグ微粉末と比べ円形度が大きく，また粒径が小さい事からボールベアリング効果が現れ，粒子間の摩擦が低減したためダイラタンシー性状が現れなかったと思われる。

(6) 300N/cm^2 近い貫入抵抗値が現れた 2 配合に，シリカフュームを混和し，試験を行った。その結果，シリカフュームの混和量の増加に従って貫入抵抗値が減少した。シリカフュームはダイラタンシー性状の緩和に有効であると考えられる。

参考文献

1) 児島孝之監修，日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス出版，2004

2) 岩田正幸ほか，クリンカーフリーモルタルにおける各種アルカリ刺激材の検討と流動性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010

3) 粉体工学の基礎編集委員会：粉体工学の基礎，日刊工業新聞社，1992