

2020 年度修士論文

水和反応の進行が  
セメント粒子の表面状態と  
フレッシュモルタルの性状に  
及ぼす影響

Effect of Progress of Hydration on Surface Condition of  
Cement Particle and Flowability of Fresh Mortar

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 西内 裕晶

副審査委員 高木 方隆

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻

社会システム工学コース

1235009 和田 晃宜

2021 年 1 月



# 水和反応の進行がセメント粒子の表面状態と フレッシュモルタルの性状に及ぼす影響

和田 晃宜

## 要旨

自己充填コンクリートは打設完了時まで十分な自己充填性能の保持が求められることから、製造時のみならず運搬を経た打設現場においても確実な品質管理および必要に応じて調整を必要とする。これは、自己充填コンクリートの採用を躊躇する要因の一つとなり得る。フレッシュコンクリートの自己充填性能低下の主要因は水和反応の進行である。水和反応進行の抑制方法の一つとして、有機系凝結遅延剤の一種として知られる砂糖の添加がある。水和反応の進行抑制が可能な砂糖の添加は、自己充填性能低下のメカニズムを明らかにし、フレッシュコンクリートの自己充填性能の経時安定化のための技術開発に繋がる可能性がある。

本研究の目的は、時間経過や砂糖添加の有無に応じて変化する水和反応の進行度を定量化し、水和反応の進行がフレッシュモルタルの自己充填性能に及ぼす影響を解明することである。セメント粒子の状態に着目して比表面積と粒度分布の測定により水和反応の進行度の定量化を試みた。自己充填性能の構成要素であるフレッシュモルタルのせん断変形抵抗性と直応力下でのせん断強度を、時間経過や砂糖添加の有無により水和反応の進行度を変化させて測定を行った。

練上がりから 180 分後では、水和反応の進行度に応じて比表面積の測定結果に差が表れた。一方、水和反応初期であるため粒子同士が凝集する段階には至らず、粒度分布の測定結果には明確な差が表れなかった。

せん断変形抵抗性を測定する粘度値は、水和反応の進行に伴い上昇し、比表面積の測定結果と相関があった。同様に比表面積の測定結果と相関があったロート流下速度と粘度値は、練混ぜ方法ごとに相関があった。さらに、比表面積の測定を行った練上がり直後と 180 分後の練混ぜ方法と増粘剤添加の有無ごとのロート流下速度と粘度値は、非常に高い相関を示した。

直応力下でのせん断強度は、砂糖添加の有無による 120 分後までの水和反応の進行度の違いでは大きな差は無かった。粘性付与効果のある増粘剤を添加すると、時間経過後にせん断強度が上昇した。砂糖・増粘剤の両方を添加すると、固体粒子間摩擦の増加によりせん断強度が大きく上昇した。砂糖添加による水和反応進行の抑制効果は、フレッシュモルタルが動き出す瞬間の最大静摩擦力ではなく、流動性の経時安定化による動摩擦力の上昇抑制にあるものと考察した。

# Effect of Progress of Hydration on Surface Condition of Cement Particle and Flowability of Fresh Mortar

Koki WADA

## ABSTRACT

Since self-compacting concrete is required to maintain sufficient self-compacting performance until the completion of casting, reliable quality control and adjustment as necessary are required not only during manufacturing but also at the casting site after transportation. This can be one of the factors that hesitate to adopt self-compacting concrete. The main factor for the deterioration of the self-compacting performance of fresh concrete is the progress of the hydration of cement. One of the methods for mitigating the progress of the hydration is the addition of sugar to the mix, which is known as a kind of organic coagulation retarder. The addition of sugar, which can mitigate the progress of the hydration, may contribute to the mechanism of deterioration of self-compacting performance and lead to the development of technology for stabilizing the self-compacting performance of fresh concrete over time.

The purpose of this study is to quantify the progress of the hydration, which changes with the passage of time and the presence or absence of sugar, and to elucidate the effect of the progress of the hydration on the self-compacting performance of fresh mortar. Focusing on the state of cement particle, the author attempted to quantify the progress of the hydration by measuring the specific surface area and particle size distribution of cement particles. The shear deformation resistance of fresh mortar, which is a component of self-compacting performance, and the shear strength under stress were measured by changing the degree of the hydration depending on the passage of time and the presence or absence of sugar.

At 180 minutes after mixing, there was a difference in the specific surface area depending on the degree of the hydration. On the other hand, since it was in the early stage of the total hydration process for a few days, the particle did not reach the stage of agglutination, and there was no clear difference in the measurement results of the particle size distribution.

The viscosity value for measuring shear deformation resistance increased as the hydration progressed, and was correlated with the specific surface area. Similarly, the funnel discharging rate and viscosity value, which were correlated with the measurement results of specific surface area, were correlated for each kneading method. Furthermore, the funnel discharging rate and viscosity value immediately after mixing and 180 minutes after mixing, for which the specific surface area was measured, showed a very high correlation depending on the mixing method and the presence or absence of viscosity modifying agent (VMA).

The shear strength under normal stress did not differ significantly depending on the progress of the

hydration up to 120 minutes with or without sugar. When a VMA with a viscosity-imparting effect was added, the shear strength increased over time. The addition of both sugar and VMA resulted in the shear strength increased significantly due to the increase in friction between solid particles. It is possible that the effect of suppressing the degree of the hydration by adding sugar was not the maximum static friction force at the moment when the fresh mortar started to move, but mitigating the increase of the dynamic friction force due to the stabilization of fluidity over time.

## 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 自己充填コンクリート用フレッシュモルタルの砂糖添加に関する既往研究	1
1.3 本研究の目的	2
1.4 本論文の構成	3
第2章 試験方法および諸条件	4
2.1 使用材料	4
2.2 示方配合と減水剤添加量	4
2.3 練混ぜ方法	5
2.4 試験および測定方法	7
2.4.1 モルタルフロー試験	7
2.4.2 モルタルロート試験	8
2.4.3 空気量試験	8
2.4.4 比表面積の測定	9
2.4.5 粒度分布の測定	10
2.4.6 フレッシュモルタルの粘度の測定	11
2.4.7 直応力により変化するフレッシュモルタルのせん断強度の測定	13
第3章 セメント粒子の状態による水和反応の進行度の定量化	15
3.1 概要	15
3.2 測定試料の作製方法	16
3.3 測定試料の配合と練混ぜ方法	18
3.4 比表面積の測定	19
3.4.1 比表面積測定のための試料の前処理	19
3.4.2 水和反応の進行による比表面積の増加	20
3.5 粒度分布の測定	23
3.6 まとめ	26
第4章 水和反応の進行がせん断変形抵抗性に及ぼす影響	27
4.1 概要	27
4.2 モルタル試験の配合と練混ぜ方法	27
4.3 水和反応の進行によるせん断変形抵抗力の増加	28
4.4 せん断変形抵抗力和粘性の指標 $R_m$ の相関関係	31
4.5 まとめ	37
第5章 水和反応の進行が直応力下でのせん断強度に及ぼす影響	38
5.1 概要	38

5.2	せん断強度の定義とモルタル試験の配合・練混ぜ方法.....	39
5.3	各配合・練混ぜ方法の直応力下でのせん断強度とばらつき.....	41
5.4	一括練りの各配合での内部摩擦角と粘着力.....	51
5.5	砂糖添加による動摩擦力の低減効果.....	53
5.6	まとめ.....	56
第6章	結論.....	57
参考文献	.....	59
謝辞	.....	60

## 図目次

図-1.1	本論文の構成.....	3
図-2.1	モルタルミキサ.....	5
図-2.2	練混ぜ手順図.....	6
図-2.3	モルタルフロー試験.....	7
図-2.4	モルタルロート試験.....	8
図-2.5	比表面積測定装置.....	9
図-2.6	レーザー回折式粒度分布測定装置.....	10
図-2.7	回転粘度計.....	11
図-2.8	回転粘度計の測定原理.....	12
図-2.9	一面せん断試験機.....	13
図-2.10	一面せん断試験機の測定イメージ.....	14
図-3.1	砂糖の添加による硬化遅延メカニズム.....	15
図-3.2	セメント粒子の粒度分布.....	16
図-3.3	吸引ろ過により固形化した測定試料.....	17
図-3.4	比表面積の測定試料.....	19
図-3.5	一括練り増粘剤無添加の BET 比表面積と Rm の関係.....	20
図-3.6	一括練り増粘剤添加の BET 比表面積と Rm の関係.....	21
図-3.7	分割練り増粘剤無添加の BET 比表面積と Rm の関係.....	21
図-3.8	分割練り増粘剤添加の BET 比表面積と Rm の関係.....	22
図-3.9	一括練り増粘剤添加の粒度分布.....	23
図-3.10	分割練り増粘剤無添加の粒度分布.....	24
図-3.11	分割練り増粘剤添加の粒度分布.....	24
図-3.12	150 $\mu$ m のふるいを用いた一括練り増粘剤無添加の粒度分布.....	25
図-4.1	一括練り増粘剤無添加の BET 比表面積と粘度値の関係.....	28
図-4.2	一括練り増粘剤添加の BET 比表面積と粘度値の関係.....	29
図-4.3	分割練り増粘剤無添加の BET 比表面積と粘度値の関係.....	29
図-4.4	分割練り増粘剤添加の BET 比表面積と粘度値の関係.....	30
図-4.5	全 8 パターンでの 60 分ごとの Rm と粘度値の関係.....	31
図-4.6	一括・分割練り砂糖・増粘剤無添加の Rm と粘度値の関係.....	32
図-4.7	一括・分割練り砂糖添加の Rm と粘度値の関係.....	33
図-4.8	一括・分割練り増粘剤添加の Rm と粘度値の関係.....	33



図-4.9	一括・分割練り砂糖・増粘剤添加の Rm と粘度値の関係	34
図-4.10	モルタルフロー値 254.5mm の一括練り砂糖添加の Rm と粘度値の関係	34
図-4.11	全 8 パターンの練上がり直後と 180 分後の Rm と粘度値の関係	35
図-4.12	一括・分割練り増粘剤無添加の練上がり直後と 180 分後の Rm と粘度値の関係	36
図-4.13	一括・分割練り増粘剤添加の練上がり直後と 180 分後の Rm と粘度値の関係	36
図-5.1	フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ	38
図-5.2	水平方向の変位とせん断力の関係	39
図-5.3	流動性低下時の水平方向の変位とせん断力の関係	39
図-5.4	一括練り砂糖・増粘剤無添加の直応力とせん断強度の関係	42
図-5.5	分割練り砂糖・増粘剤無添加の直応力とせん断強度の関係	42
図-5.6	一括練り砂糖添加の直応力とせん断強度の関係	43
図-5.7	一括練り増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係	43
図-5.8	分割練り増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係	44
図-5.9	一括練り砂糖・増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係	44
図-5.10	一括練り砂糖・増粘剤無添加のせん断強度のばらつき	46
図-5.11	分割練り砂糖・増粘剤無添加のせん断強度のばらつき	47
図-5.12	一括練り砂糖添加のせん断強度のばらつき	48
図-5.13	一括練り増粘剤添加のせん断強度のばらつき	49
図-5.14	一括練り砂糖・増粘剤添加のせん断強度のばらつき	50
図-5.15	内部摩擦角と粘着力の算出方法	51
図-5.16	練上がりから 180 分後までの 60 分ごとの内部摩擦角	52
図-5.17	練上がりから 180 分後までの 60 分ごとの粘着力	52
図-5.18	練上がりから 180 分後の一括練り増粘剤無添加の水平変位とせん断力の関係	54
図-5.19	練上がりから 180 分後の一括練り増粘剤添加の水平変位とせん断力の関係	54
図-5.20	相対フロー面積比の経時変化と水平変位 8mm 時のせん断強度の経時変化の関係	55
図-6.1	全 8 パターンでの時間経過による粘度値とせん断強度の増加量の関係	58

## 表目次

表-2.1	使用材料 .....	4
表-2.2	モルタルの配合条件と示方配合 .....	4
表-3.1	比表面積・粒度分布測定時の配合と練混ぜ方法 .....	18
表-4.1	粘度値測定時の配合と練混ぜ方法, 空気量 .....	27
表-5.1	せん断強度測定時の配合と練混ぜ方法, 空気量 .....	40
表-5.2	一括練りの各配合での練上がり直後と 180 分後のモルタルフロー値 .....	53

# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

フレッシュコンクリートの施工性は時間経過に伴い低下するため、JIS などにより製造から打設完了までの時間が規定されている。フレッシュコンクリートの自己充填性能低下の主要因は水和反応の進行である。なかでも、自己充填コンクリートはワーカビリティの不足を施工により補うことが不可能であり、打設完了時まで十分な自己充填性能の保持が求められることから、製造時のみならず運搬を経た打設現場においても確実な品質管理および必要に応じて調整を必要とする。不測のトラブルに対応するため、時間的に余裕のある施工計画の立案も必要となる。これらは、自己充填コンクリートの採用を躊躇する要因の一つとなり得る。

これまでに、フレッシュコンクリートに砂糖を添加することにはコンクリートの硬化・強度発現を遅延させる問題点が指摘されてきた。著者らは、水和反応進行の抑制方法の一つとして、有機系凝結遅延剤の一種として知られる砂糖の添加の有効性に着目した。水和反応の進行抑制が可能な砂糖の添加は、自己充填性能低下のメカニズムを明らかにし、フレッシュコンクリートの自己充填性能の経時安定化のための技術に繋がる可能性がある。

## 1.2 自己充填コンクリート用フレッシュモルタルの砂糖添加に関する既往研究

砂糖は、セメント質量に対する添加率が 0.05 %程度あれば凝結遅延剤として使用できるが、過剰に添加すると凝結時間が非常に短くなるという問題が指摘されている<sup>1)</sup>。これは、砂糖が C<sub>3</sub>A と反応してアルミナゲルを生じ急結するためであるとされてきた<sup>1)</sup>。そのため、自己充填コンクリートに適した添加量を選定する必要がある。

高知工科大学において、浅野は砂糖添加量ごとのフレッシュモルタルの自己充填性の経時変化を調べ、自己充填コンクリート用モルタルの経時安定化に最適な砂糖添加量がセメント質量に対して 0.10 %であることを明らかにした。また、砂糖添加により練上がり直後から 60 分後までのフロー値が上昇することが明らかとなり、実製造・施工では、これによる打ち込み前の材料分離が生じる恐れがある。

しかし、練混ぜ水を分割する練混ぜ方法を採用し、一次練り時間を長くすることや増粘剤の添加により、砂糖添加時のフロー値上昇を抑制することが出来た。さらに、砂糖添加時の分割練りにおける一次練り時間の長い練混ぜ方法ではロート流下速度の初期値が大きくなるが、増粘剤を併用し添加量を増加することで、ロート流下速度の初期値の上昇を抑制し、経時安定性を向上させた。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、セメントの接水・コンクリートの練混ぜからの時間経過や砂糖添加の有無に応じて変化する水和反応の進行度を定量化し、水和反応の進行がフレッシュモルタルの自己充填性能に及ぼす影響を解明することである。ここでのコンクリート及びモルタルの水和反応の進行度とは、水と反応したセメントの粒子表面の水和物の生成量や、これによる粒子同士の凝集度を指す。JISにより定められた練上がりから2時間後までの反応初期では、セメント粒子表面に繊維状のC-H-S層(ケイ酸カルシウム水和物)と針状結晶のエトリンガイトが生成する<sup>2)</sup>。これらの生成がセメントペーストの流動性を低下させ、コンクリート及びモルタルの流動性低下を引き起こす。そのため、水和反応の進行は自己充填性能と密接な関係がある。

水和反応の進行度の定量化のため、セメント粒子の状態に着目した。粒子表面の水和物の生成量を比表面積の測定により、粒子同士の凝集度を粒度分布の測定により明らかにする。自己充填性能に及ぼす影響を評価するため、フレッシュモルタルのせん断変形抵抗性及び直応力下でのせん断強度(せん断変形の際の抵抗力)を測定する。両者とも自己充填コンクリートの間隙通過性能の構成要素の一つとして想定されるものである。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す(図-1.1)。

第1章は序論であり、本研究の背景及び既往研究、そして目的を述べる。

第2章では、本研究の試験方法及び諸条件について述べる。

第3章では、水和反応の進行抑制効果のある砂糖をフレッシュモルタルに添加することで水和反応の進行速度を変化させ、セメント粒子の状態に着目し水和反応の進行度を比表面積と粒度分布の測定により定量化する。

第4章では、砂糖・増粘剤添加の有無や練混ぜ方法ごとにフレッシュモルタルのせん断変形抵抗性の測定を行い、水和反応の進行度が及ぼす影響を明らかにする。

第5章では、前章と同様、砂糖・増粘剤添加の有無や練混ぜ方法ごとにフレッシュモルタルの直応力下でのせん断強度の測定を行い、水和反応の進行度が及ぼす影響を明らかにする。

第6章は結論であり、各章において得られたまとめを述べて結論とする。

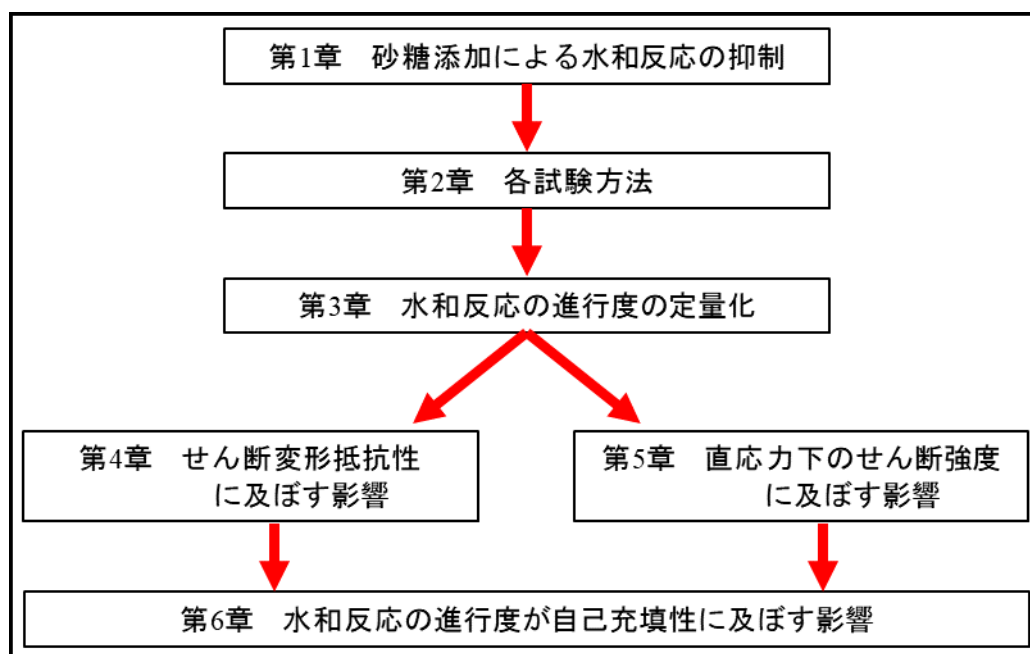


図-1.1 本論文の構成

## 第2章 試験方法および諸条件

### 2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を示す(表-2.1)。セメント(C)は普通ポルトランドセメント, 細骨材(S)は石灰砕砂を使用した。高性能 AE 減水剤(SP)は主成分がポリカルボン酸エーテル系化合物のものを使用した。砂糖(Su)はコーヒーシュガーなどに用いられる, 主成分がスクロースのグラニュー糖を使用した。増粘剤(VMA)は水溶性セルロースエーテル系のものを使用した。消泡剤(D)はポリエーテル系を使用した。

表-2.1 使用材料

種類	記号	概要
水	W	上水道
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.15 g/m <sup>3</sup>
細骨材	S	石灰砕砂 密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.63 粒径判定実積率 55.3 %
減水剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
砂糖	Su	スクロース
増粘剤	VMA	水溶性セルロースエーテル系増粘剤
消泡剤	D	ポリエーテル系

### 2.2 示方配合と減水剤添加量

水セメント比(W/C)を 45 %, モルタル中の空気を除いた細骨材容積比(s/m)を 55 %に設定し, モルタルのフロー値が目標値となるように SP 添加量を調整して練混ぜた(表-2.2)。

表-2.2 モルタルの配合条件と示方配合

W/C (%)	s/m (%)	高性能 AE 減水剤添加量 (C×%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			W	C	S
45	55	0.9~2.3	264	586	1474

※高性能 AE 減水剤(SP) : 各配合の添加量は各章に記載

## 2.3 練混ぜ方法

モルタル材料の練混ぜには、JIS R5201 に規定されたモルタルミキサを用いた(図-2.1)。練混ぜ速度は低速(自転：毎分  $140 \pm 5$  回転，公転：毎分  $62 \pm 5$  回転)で，1 バッチ当たりの練混ぜ量は 1.8 L(空気を除く)で行った。練混ぜ手順を図-2.2 に示す。練混ぜ方法は，「一括練り」または水分割練り(以下「分割練り」)の 2 種類設定した。砂糖は練混ぜ水に溶かしたものを添加した。通常，分割練りにおける SP の添加は二次水と同時に行うことが一般的であるが，本研究では，砂糖がセメントの水和反応の進行を阻害する前に SP を吸着させる必要があるため，一次水と同時に添加した。分割練りでの SP 添加のタイミングを統一するため，砂糖を添加していない配合の際も同様に，SP の添加は一次水で行った。粘度値と直応力下でのせん断強度の測定では巻き込み空気量を低減するため，消泡剤を添加した。試験時以外は静置し，試験開始前に 5 秒間練混ぜをしてから試験を行った。



図-2.1 モルタルミキサ

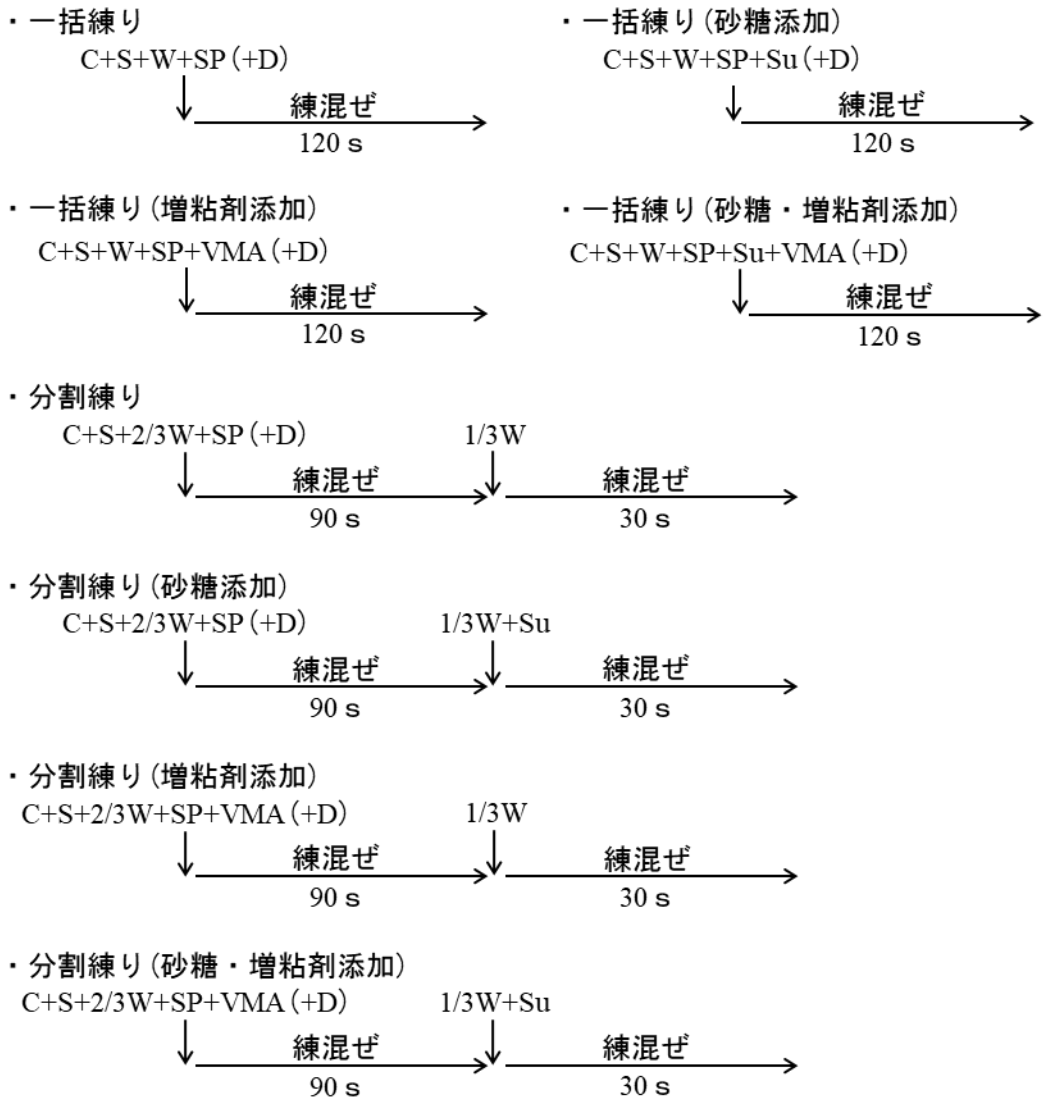


図-2.2 練混ぜ手順図



## 2.4 試験および測定方法

### 2.4.1 モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は、モルタルの軟度を定量化する試験である。この試験結果はフレッシュコンクリートの軟度を定量化するスランプフロー試験の結果と高い相関がある<sup>3)</sup>。そのため、自己充填コンクリートの性能を簡易に予測する方法として用いられている。モルタルの軟度は、モルタル用フロー試験で得られたモルタルフロー値を用いて算出される相対フロー面積比  $G_m$  の指標により表される(図-2.3)。

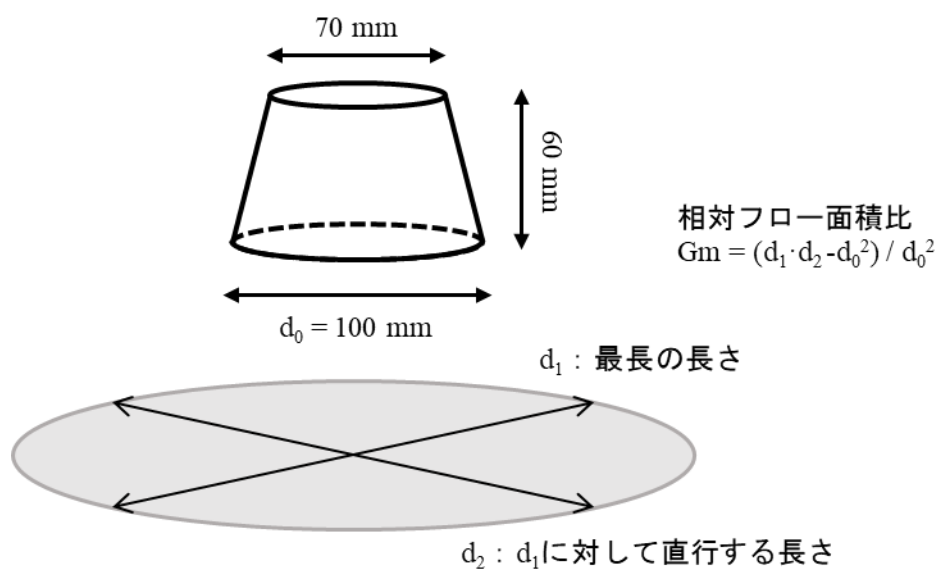


図-2.3 モルタルフロー試験

## 2.4.2 モルタルロート試験

モルタルロート試験は、粉体や細骨材粒子どうしの接触摩擦の程度や壁面との摩擦の程度により影響を受けるモルタルの流動性(粘性)を定量化する試験である<sup>4)</sup>。モルタルの粘性の指標として、モルタルロート試験の流下時間から算出される相対ロート速度比  $R_m$  が用いられる(図-2.4)。

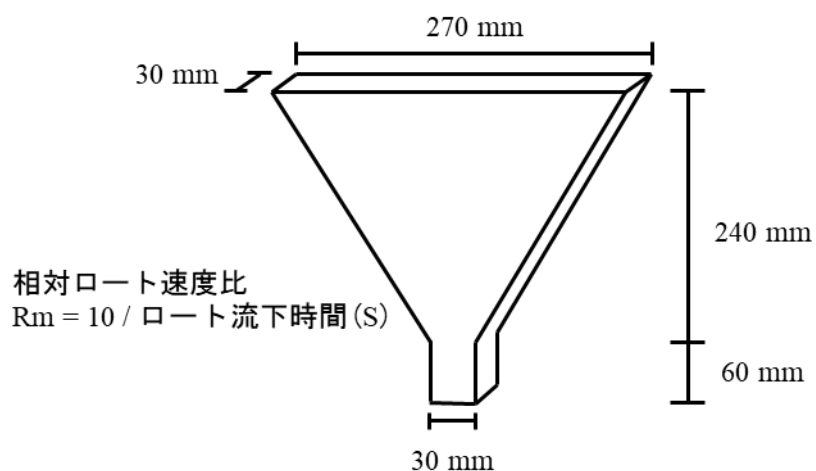


図-2.4 モルタルロート試験

## 2.4.3 空気量試験

フレッシュモルタル中の空気量は JIS A1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量法)」に準じて測定した。

$$\text{空気量(\%)} = ((T - M) / T) \times 100$$

T : 空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg/m}^3$ )

M : コンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg/m}^3$ )

#### 2.4.4 比表面積の測定

セメントは水和反応により粒子表面に水和物が生成し，反応の進行に伴い生成物量が増加することから，水和反応の進行度の定量化を目的として比表面積の測定を行った。

本研究で用いた比表面積測定装置を図-2.5に示す。測定方法はガス吸着法で，試料表面に占有面積の分かったガス分子(窒素)を吸着させ，その吸着量から比表面積を求める方法である。試料を投入したセルにガスを吹き込むことで，試料表面にガス分子が吸着する。吹き込むガスの量を増やすことにより試料表面がガス分子で覆われ，最終的にガス分子が多層吸着した状態となる。比表面積の算出には，試料表面の単分子層吸着量を求める必要があり，BET式を用いて単分子層吸着量を算出し，比表面積を求めた。そのため，以降の比表面積の測定結果をBET比表面積と記述する。BET式が成立しやすい条件は，相対圧  $P/P_0$  ( $P$  : 吸着平衡圧， $P_0$  : 飽和蒸気圧)が  $0.05\sim 0.35$  の範囲であると言われている。そのため，本研究の測定では  $P/P_0$  を  $0.15$ ， $0.22$ ， $0.30$  の3段階に設定した。



図-2.5 比表面積測定装置

#### 2.4.5 粒度分布の測定

モルタル中のセメント粒子は、水和反応進行に伴う表面の水和生成物の成長により粒子同士が凝集することで粒度が大きくなる。そのため、比表面積と同様、水和反応の進行度の定量化を目的として粒度分布の測定を行った。

粒度分布の測定にはレーザー回折式粒度分布測定装置を用いた(図-2.6)。測定方法として乾式測定と湿式測定があるが、セメント試料は水を分散媒として用いた際、水和反応する恐れがあるため、乾式測定を採用しサイクロン噴射型方式で行った。粒子にレーザービームを照射することで、その粒子から前後・上下・左右の様々な方向に「回折・散乱光」と呼ばれる光が発せられる。「回折・散乱光」は粒子の大きさに従い様々な形に変化するため、「回折・散乱光」を解析することにより、粒度の測定が可能となる。噴射型乾式測定は圧搾空気を用いてノズルから測定対象の粒子群を噴射し、レーザービームを通過するように空气中に強制的に分散させて測定する方式である。



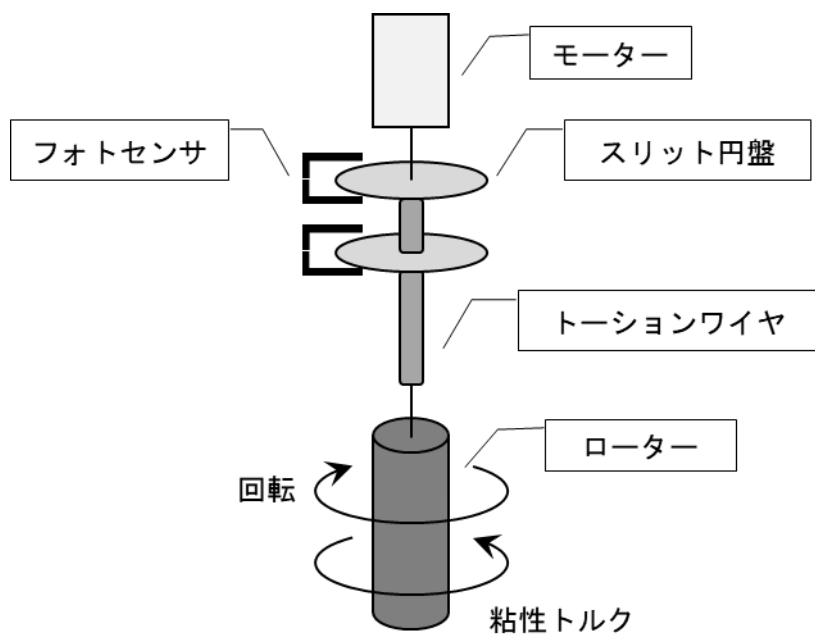
図-2.6 レーザー回折式粒度分布測定装置

#### 2.4.6 フレッシュモルタルの粘度の測定

フレッシュモルタルの粘度の測定には回転粘度計(TVB-15 形粘度計, 東機産業(株))を用いた(図-2.7)。測定原理を図-2.8 に示す。モーターの回転がトーションワイヤ(懸張線)を介してローターに伝達され, 試料中で回転するローターに粘性トルクが作用する。トーションワイヤはこの粘性トルクの大きさに比例した角度だけ捩れた状態で回転し, トーションワイヤの捩れ角はトーションワイヤの両端に連結されているスリット円板 A と B 相互の捩れ角と等しくなる。スリット円板それぞれに対応して設けられたフォトセンサでこの捩れ角を読み取り粘度に換算している。測定誤差を減らすため, 容量 500 ml のガラスビーカーを用いて測定試料のモルタル投入量を 450 ml に固定した。トルクの回転速度を 3 rpm とし, 回転開始から 150 秒後の測定値を粘度値とした。



図-2.7 回転粘度計



(トルク：回転軸にかかる力，回転させるために必要な力)

図-2.8 回転粘度計の測定原理

#### 2.4.7 直応力により変化するフレッシュモルタルのせん断強度の測定

自己充填コンクリート打設の際、コンクリートの鉄筋間通過時に粗骨材同士が接近することで間に存在するモルタル中に直応力が生じ、それによりモルタルの変形の際に生じる摩擦力(せん断応力)が上昇する。そのせん断応力の測定のため、一面せん断試験機を使用した<sup>5)</sup>(図-2.9)。

直径 60 mm, 高さ 30 mm, 容積約 158 mL の上下に分かれ, 上面をくり抜いた円筒容器内にフレッシュモルタル試料を投入した(投入量: 約 85 mL)。鉛直荷重を載荷した状態で上部のみを水平荷重速度 0.03 mm/sec で水平移動させることで, 試料内部に生じたせん断応力を測定する(図-2.10)。土質力学における一面せん断試験では, せん断力のピークが現れない場合水平変位 8 mm まで試験を行う<sup>6)</sup>。本試験機は土質材料用の試験機を応用したものであるため, その基準と同様に水平変位 8 mm まで載荷した。本研究では, 非排水条件で試験を行った。また, 直応力(鉛直荷重)の設定値は 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa とした。重力のみで充填する自己充填コンクリートの性質上, 鉛直外力が無い場合(直応力 0 kPa)ではせん断強度がほとんどゼロに近い値であった<sup>5)</sup>こと, フレッシュモルタル中に生じる直応力は 300 kPa 程度以下と推定される<sup>5)</sup>ことから, これら 3 つを設定した。

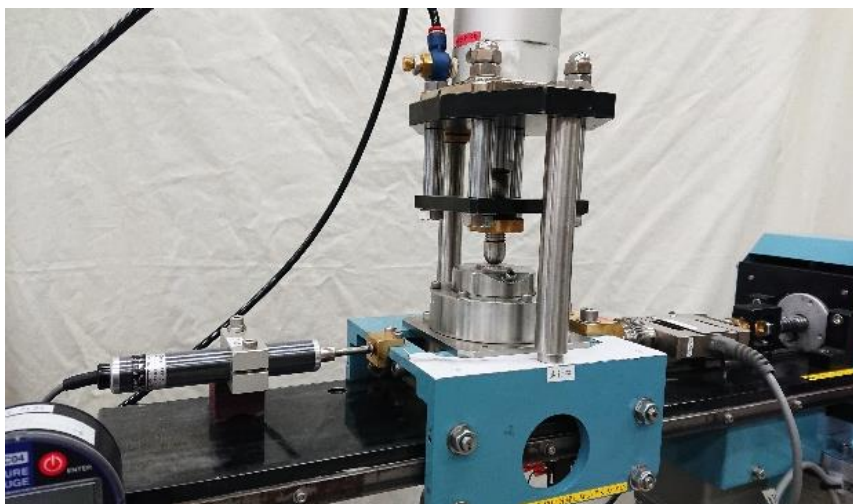


図-2.9 一面せん断試験機

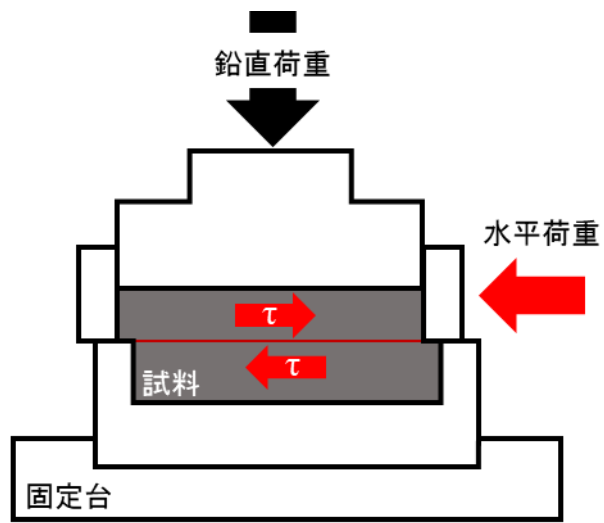


図-2.10 一面せん断試験機の測定イメージ



### 第3章 セメント粒子の状態による水和反応の進行度の定量化

#### 3.1 概要

セメントは水和反応により粒子表面に水和物を生成し、その進行に従い生成量が増加し粒子同士が凝集することにより硬化し強度が発現する。しかし、砂糖を添加することで、砂糖と反応し水和物の生成を抑制されたセメント粒子が凝集を阻害するため硬化が遅延する(図-3.1)。この特性を活かし砂糖添加の有無や時間経過後のセメント粒子の状態を調べることで水和反応の進行度の定量化を試みた。

粒子表面の水和生成物量の増加と粒子同士の凝集は、それぞれ比表面積と粒度分布の測定により調べた。水和生成物量の増加に応じて、セメント粒子の表面積も増加することから、比表面積の測定を行った。また、粒子同士の凝集により粒度が大きくなるため、粒度分布の測定を行った。

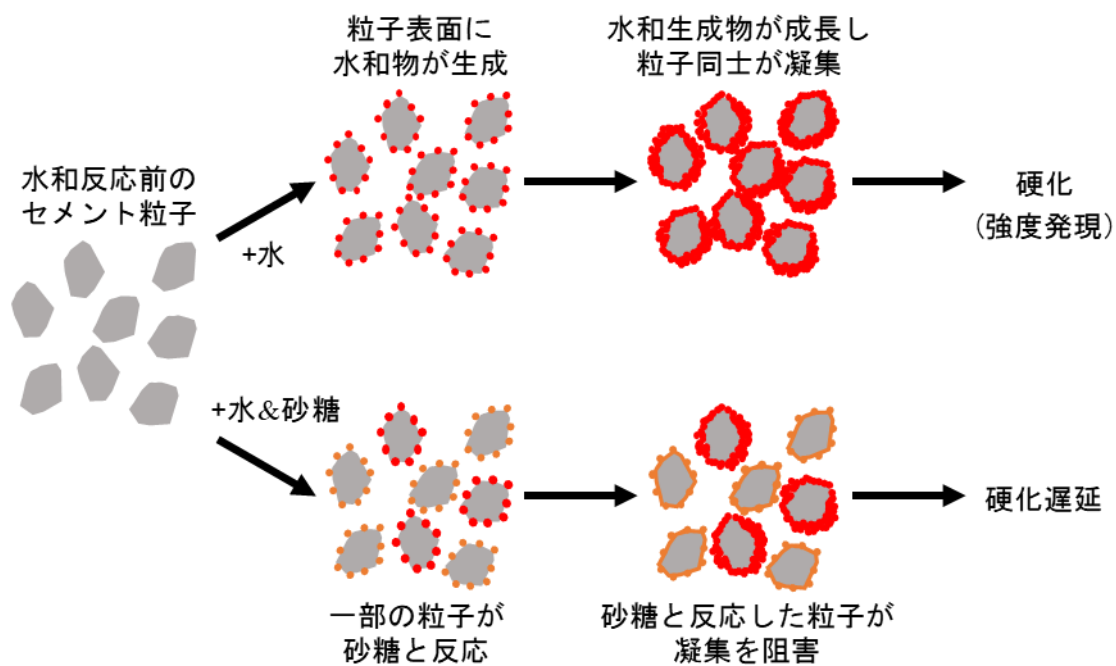


図-3.1 砂糖の添加による硬化遅延メカニズム

### 3.2 測定試料の作製方法

比表面積と粒度分布の測定を行うため、フレッシュ状態のモルタルから硬化させた測定試料を作製した。フレッシュモルタルからセメント粒子を抽出するため、 $600\ \mu\text{m}$ の径のふるいにかけた。本研究で用いたセメントの粒度分布を、レーザー回折式粒度分布測定装置を用いてサイクロン噴射型乾式測定で測定したところ、最大粒径が約 $200\ \mu\text{m}$ であった(図-3.2)。比表面積と粒度分布の測定は、練上がりから180分後のものについても行うため、水和反応の進行によるセメント粒子の体積増加や、粒子同士の凝集が生じていることが考えられる。また、ふるいにかける際の作業性の面も考慮し、 $600\ \mu\text{m}$ のふるいを選定した。ふるいを通過した試料から約 $10\ \text{mL}$ をスプーンでねじ口角瓶(容量： $100\ \text{mL}$ )に投入し、 $100\ \text{mL}$ の線までアセトンを加えて混合した。手でよく振とうさせ、水和反応を停止させた。その後、アスピレーターを用いて保留粒子径 $1\ \mu\text{m}$ のろ紙で吸引ろ過し、測定試料を作製した。脱水後、 $40\ ^\circ\text{C}$ の定温乾燥機で一晩乾燥させた。その後、チャック付きのビニールに入れ密閉し、底に乾燥剤を敷き真空にしたデシケーター内で、 $20\ ^\circ\text{C}$ の恒温室で保管した。吸引ろ過の際、試料が固形化してしまうが、多数の粒子の合体物であり、ガス分子である窒素が正常に吸着すれば、比表面積の測定に問題は無いと考えた(図-3.3)。

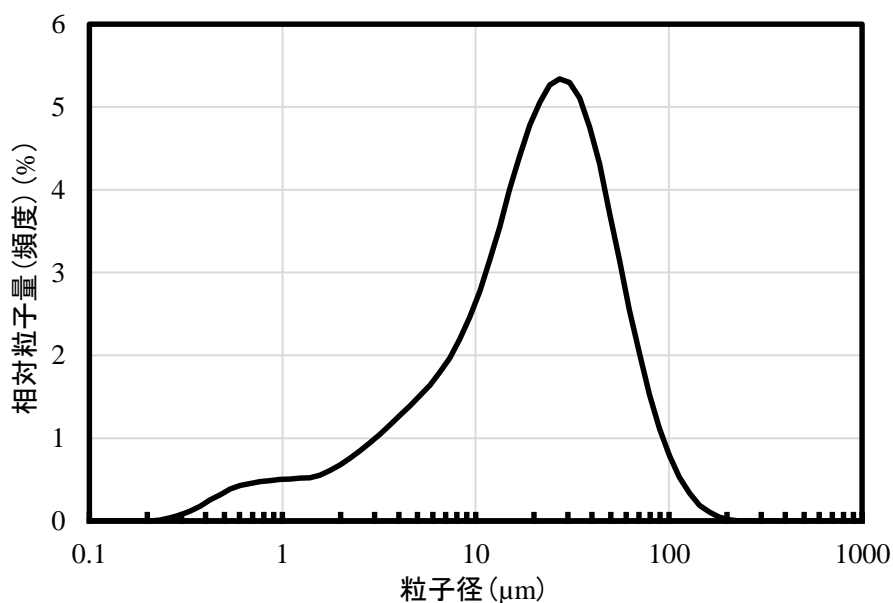


図-3.2 セメント粒子の粒度分布



図-3.3 吸引ろ過により固形化した測定試料

### 3.3 測定試料の配合と練混ぜ方法

比表面積と粒度分布を測定したモルタルの配合と練混ぜ方法を表-3.1に示す。砂糖・増粘剤添加の有無や練混ぜ方法の違いによる影響を調べるため、これら8パターンとした。浅野の研究から、砂糖を添加したものの添加量は、フロー値の経時変化が最も小さかったセメント質量に対して0.10%とし、増粘剤を添加したものの添加量は286 g/m<sup>3</sup>(コンクリート1 m<sup>3</sup>当たりの添加量200 g/m<sup>3</sup>から粗骨材量を除いた0.7で除した値)とした。また、分割練りでの練混ぜ時間は、最もフロー値の経時変化が小さかった90+30秒とした。練上がり直後(10分後)のモルタルフロー値が250±10 mmとなるようSP添加量を調節して試験を行った。

表-3.1 比表面積・粒度分布測定時の配合と練混ぜ方法

	砂糖添加量 (C×%)	増粘剤添加量 (g/m <sup>3</sup> )	練混ぜ 方法	高性能 AE 減水剤 添加量(C×%)
砂糖・増粘剤無添加(一括)	-	-	一括	0.90
砂糖のみ添加(一括)	0.1	-	一括	1.00
増粘剤のみ添加(一括)	-	286	一括	1.25
砂糖・増粘剤添加(一括)	0.1	286	一括	1.50
砂糖・増粘剤無添加(分割)	-	-	分割	1.40
砂糖のみ添加(分割)	0.1	-	分割	1.40
増粘剤のみ添加(分割)	-	286	分割	1.60
砂糖・増粘剤添加(分割)	0.1	286	分割	2.30

### 3.4 比表面積の測定

#### 3.4.1 比表面積測定のための試料の前処理

比表面積の測定では、試料表面にガスを吸着させるため、表面の水分やガス等の不純物を取り除く前処理を行う必要がある。そのため、測定前日の夕方から 60 °C のオイルポンプの真空乾燥機で一晩乾燥させた。通常、温度の制約を受けない試料の比表面積測定の前処理では、約 600 °C の高温で加熱するが、セメント試料では前処理の予備加熱温度が 40 ~ 60 °C までは比表面積が一定であるが、80 °C になるとエトリンガイトの脱水により、3 倍程度に増加する <sup>7)</sup> という報告があるため、60 °C に設定した。そして、測定前に 0.8 MPa まで減圧した真空デシケーターに移動させ常温に戻した。比表面積測定装置のセルの管の径が 5 mm であるため、測定前に試料をスパチュラの平たい部分で割り (図-3.4)、2 mm 程度で重さが 2 g 前後となるようにピンセットで測り取り、測定を行った。測定は大気中で行うため、大気中の水分が付着しないよう短時間かつ除湿器を作動させながら行った。



図-3.4 比表面積の測定試料

### 3.4.2 水和反応の進行による比表面積の増加

比表面積測定装置により前節の方法で作製した試料の比表面積の測定を行った。測定は8パターンの練上がり直後(10分後)と180分後で行った。一括練りの増粘剤無添加時、添加時の BET 比表面積と  $R_m$  の関係を図-3.5, 図-3.6 に示す。分割練りの増粘剤無添加時、添加時の BET 比表面積と  $R_m$  の関係を図-3.7, 図-3.8 に示す。

増粘剤添加の有無に関わらず、砂糖添加により水和反応を抑制することで、直後から180分後の BET 比表面積の増加量が小さくなることが分かった。分割練りでも同様に、砂糖添加時は無添加時に比べて小さくなることが確認できた。分割練りのものが一括練りのものと比較して BET 比表面積が大きかった要因は、分割練りではセメント粒子がより分散され、細くなるためであると考察した。砂糖無添加・増粘剤無添加の分割練りモルタルの時間経過による BET 比表面積の増加量が最も大きくなった。これもセメント粒子の分散によりセメント粒子が水と接する面積、すなわち水和反応面積が大きくなり、水和生成物量が多くなったためであると考察した。

また、砂糖添加・増粘剤無添加の分割練りモルタルの BET 比表面積が大きく増加している要因として、分割練りでは一次水に SP を、二次水に砂糖を入れて練混ぜを行うため、砂糖が水和反応を阻害する前にセメント粒子に SP が吸着したため、水和反応進行の抑制効果が小さかったからであると考察した。時間経過や砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いに応じて変化する BET 比表面積が、 $R_m$  と高い相関を示した。

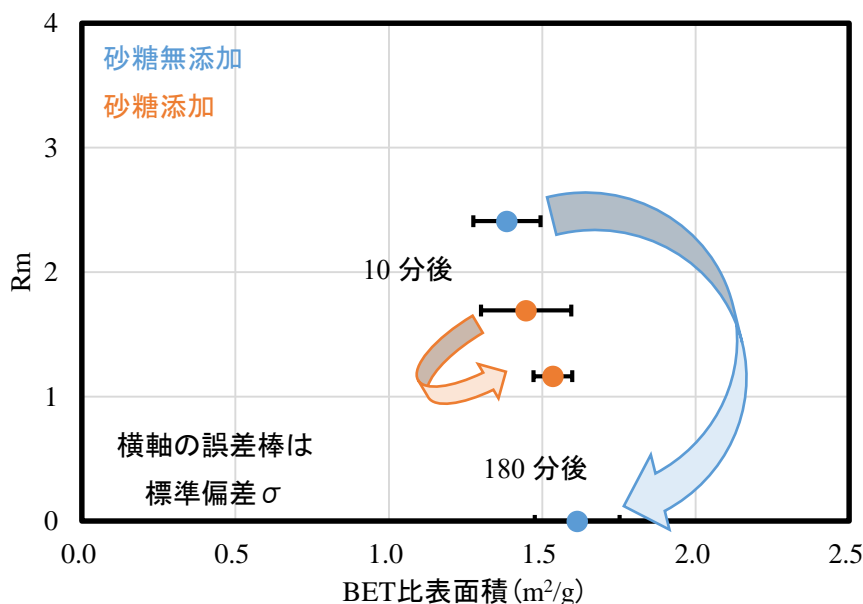


図-3.5 一括練り増粘剤無添加の BET 比表面積と  $R_m$  の関係

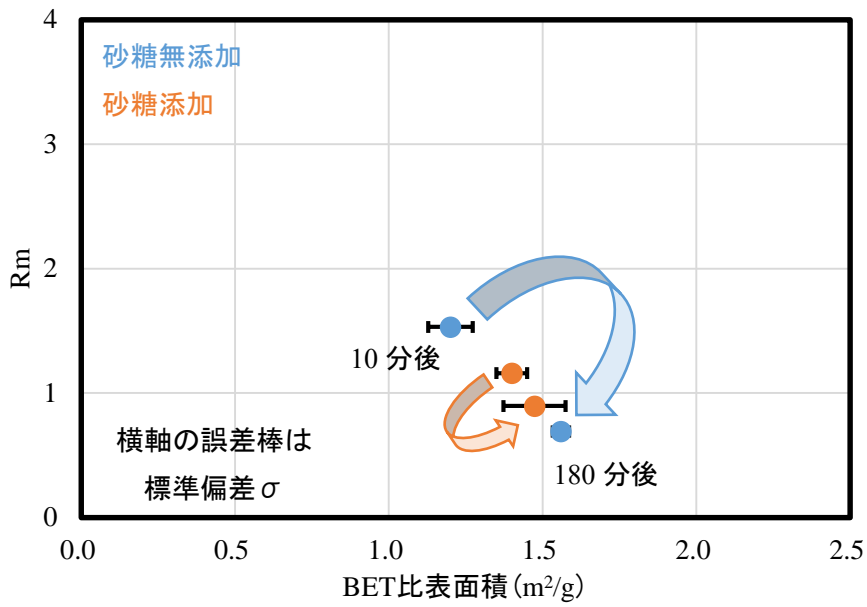


図-3.6 一括練り増粘剤添加の BET 比表面積と Rm の関係

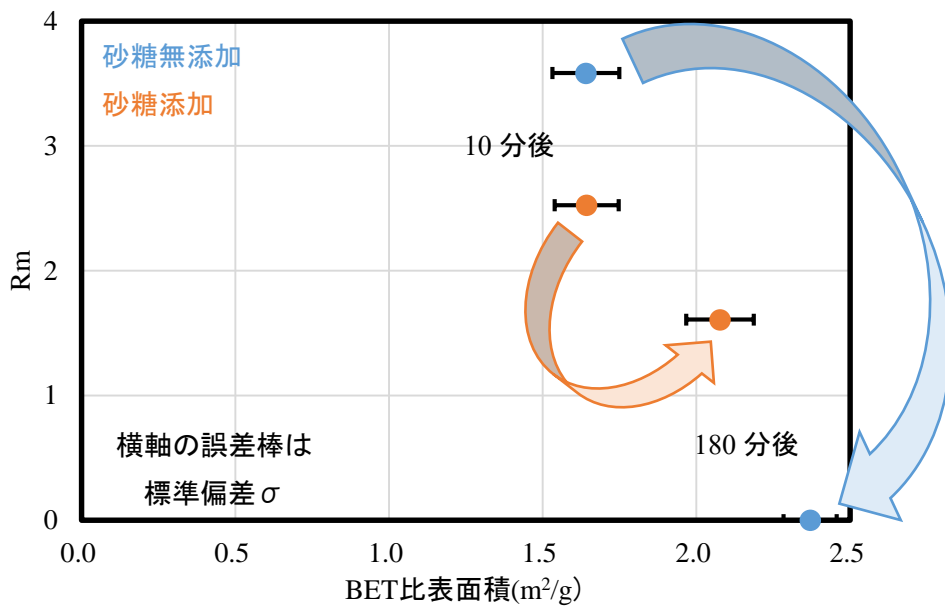


図-3.7 分割練り増粘剤無添加の BET 比表面積と Rm の関係

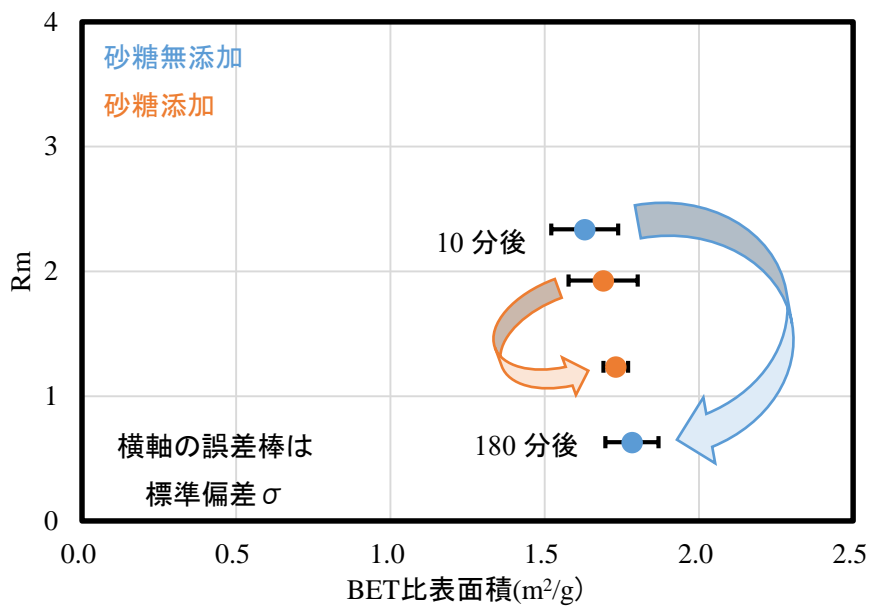


図-3.8 分割練り増粘剤添加のBET比表面積とRmの関係



### 3.5 粒度分布の測定

作製した固形の測定試料の状態ではセメント粒子の粒度分布の測定が行えないため、メノウ乳鉢で粉状になるまで粉砕し、均一になるようシャーレで攪拌したものから約1 mL採取し粒度分布の測定を行った。一括練りの増粘剤添加時、分割練りの増粘剤無添加時、分割練りの増粘剤添加時の、砂糖添加の有無両方の練上がり直後(10分後)と180分後の測定試料の粒度分布を図-3.9、図-3.10、図-3.11に示す。

分割練りの砂糖・増粘剤無添加時では180分後と比較して直後の方が粒度が大きくなっており、分割練りの増粘剤添加時では砂糖無添加時に比べて添加時の方が直後から180分後の粒度の上昇量が大きくなっていった。よって、水和反応の進行度を測定結果から比較することはできなかった。

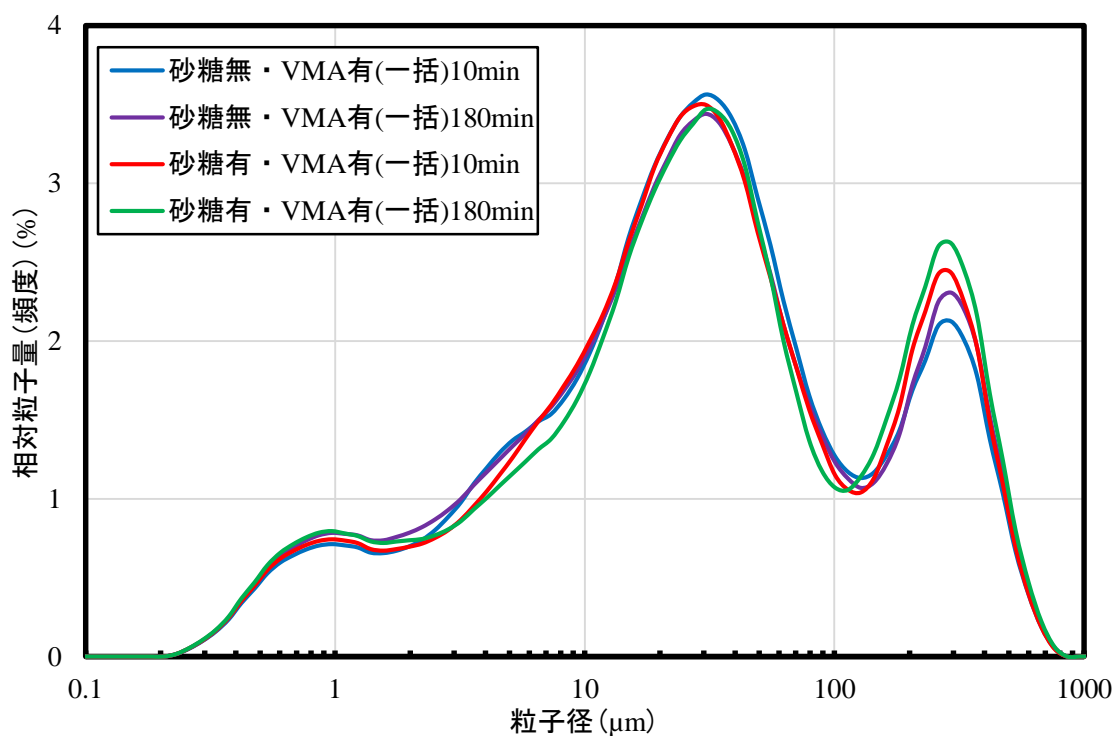


図-3.9 一括練り増粘剤添加の粒度分布

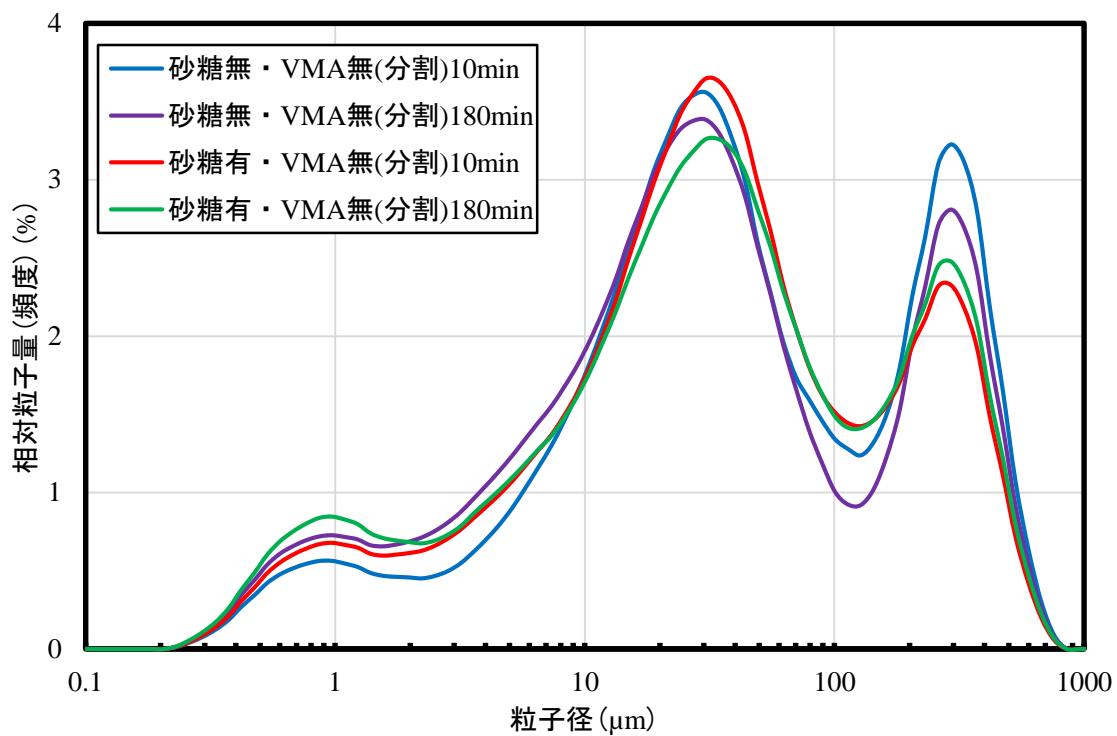


図-3.10 分割練り増粘剤無添加の粒度分布

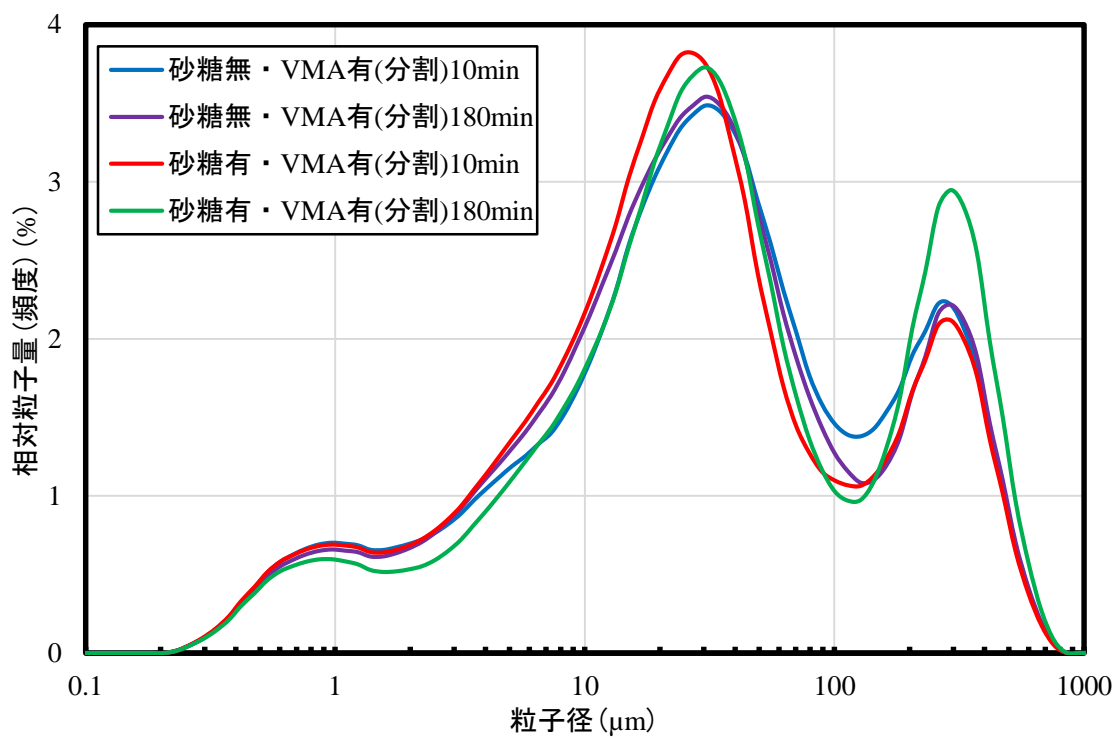
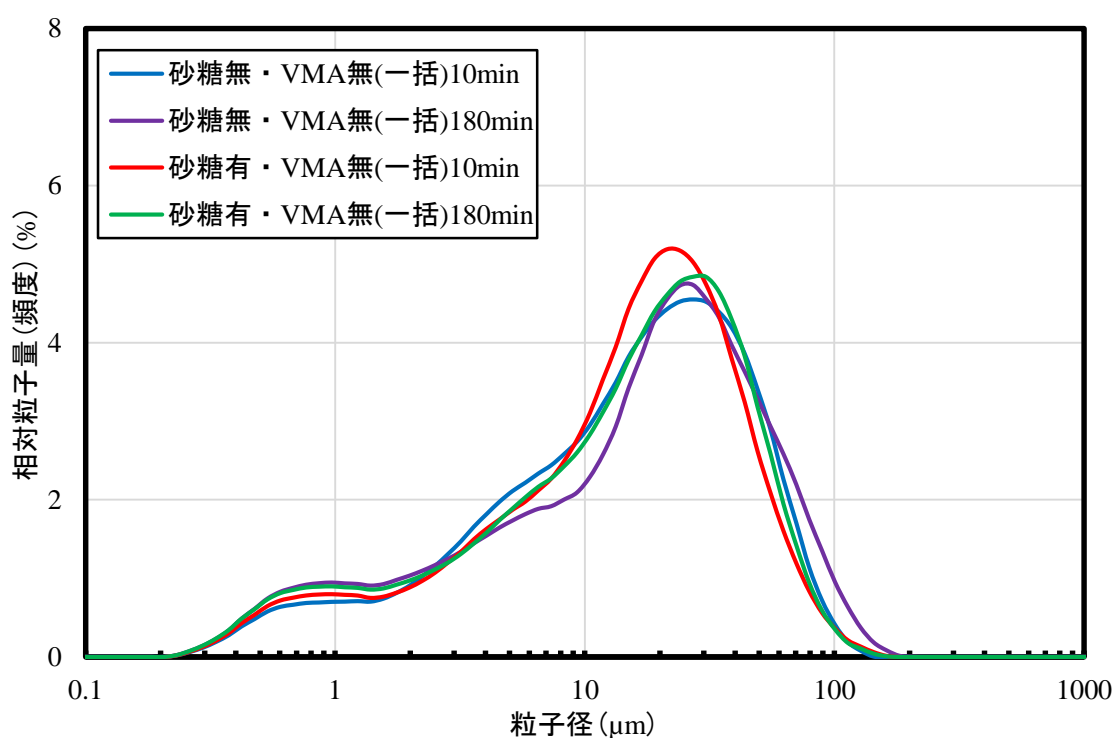


図-3.11 分割練り増粘剤添加の粒度分布

測定結果の粒度分布では、**図-3.2**に示したセメントの粒度分布と同様  $30\ \mu\text{m}$  付近にピーク値が見られたが、 $300\ \mu\text{m}$  付近にも別のピーク値が見られた。これは、測定試料作製の際に  $600\ \mu\text{m}$  のふるいを通過した微細な細骨材であると推測し、ふるいの径を  $150\ \mu\text{m}$  とし試料を作製し粒度分布の測定を行った。

$150\ \mu\text{m}$  のふるいを用いた一括練りの増粘剤無添加時の練上がり直後と 180 分後の測定試料の粒度分布を**図-3.12**に示す。微細な細骨材と推測した  $300\ \mu\text{m}$  付近のピーク値は無くなったが、時間経過後の砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いを粒度分布から得ることはできなかった。



**図-3.12**  $150\ \mu\text{m}$  のふるいを用いた一括練り増粘剤無添加の粒度分布

### 3.6 まとめ

コンクリート及びモルタルの水和反応の進行はセメントの性状の変化によるものであるため、セメント粒子の状態に着目して水和反応の進行度の定量化を行った。セメント粒子の状態を調べた練上がりから 180 分後までは水和反応の初期段階であり、粒子表面に C-H-S 層(ケイ酸カルシウム水和物)と針状結晶のエトリンガイトが生成しているため<sup>2)</sup>、比表面積の測定結果から水和反応の進行度を定量化することは可能であった。一方、粒子同士の凝集はほとんど生じておらず粒度に明確な変化がないため、粒度分布の測定では水和反応の進行度を定量化することはできなかった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 水和反応の進行を停止させるために混合したアセトンを吸引ろ過する際、測定試料が固形化したが生じたが比表面積の測定結果は水和反応の進行度に応じて差が出た。
- (2) 比表面積の測定結果である BET 比表面積は、練混ぜ方法や増粘剤添加の有無ごとに、時間経過や砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いに応じて変化し、相対ロータ速度比と高い相関を示した。
- (3) 粒度分布の測定では 600  $\mu\text{m}$  のふるいを採用した場合、測定試料に微細な細骨材が混入するため粒度分布にセメント粒子のピーク値とは別のピーク値が表れた。ふるいの径を 150  $\mu\text{m}$  とすることで、セメント粒子の粒度分布を測定することが可能であった。

## 第4章 水和反応の進行がせん断変形抵抗性に及ぼす影響

### 4.1 概要

セメントの水和反応の進行は、コンクリートおよびモルタルの流動性低下の主要因となる。これは、水和反応進行に伴う粒子表面の水和物の生成や粒子同士の凝集により、モルタルのせん断変形抵抗性(流動の抵抗性)が増加するためである。モルタルにおけるせん断変形抵抗性とは、流体としての粘性抵抗と粒状体としての粒子接触による抵抗(固体粒子間摩擦)がある。

本研究では、砂糖添加による水和反応の進行抑制がせん断変形抵抗性に及ぼす影響を調べる。回転するローターに対する試料のせん断変形抵抗性を測定することで、粘度値を算出する回転粘度計を用いて、時間経過によるフレッシュモルタルのせん断変形抵抗性を測定する。

### 4.2 モルタル試験の配合と練混ぜ方法

本試験で用いたモルタルの配合と練混ぜ方法、練上がり直後(10分後)の空気量を表-4.1に示す。前章で比表面積の測定を行った8パターンとした。巻き込み空気による測定値への影響を排除するため消泡剤を添加した。モルタル中の空気量を低減させたため、空気泡に拘束される水が減少したことで、前章と同様のモルタルフロー値  $250 \pm 10$  mm に設定すると、材料分離低減効果のある増粘無添加時に材料分離が発生していることを確認した。そのため、増粘剤無添加では練上がり直後のモルタルフロー値が  $237.5 \pm 12.5$  mm、増粘剤添加時はモルタルフロー値  $255 \pm 10$  mm となるように SP 添加量を調節して試験を行った。

表-4.1 粘度値測定時の配合と練混ぜ方法, 空気量

砂糖添加量 (C×%)	増粘剤添加量 (g/m <sup>3</sup> )	練混ぜ 方法	消泡剤添加量 (g/m <sup>3</sup> )	高性能 AE 減水剤添加量 (C×%)	空気量 (%)
-	-	一括	71	0.95	0.64
0.1	-	一括	71	0.90	1.06
-	286	一括	71	1.25	0.47
0.1	286	一括	71	1.40	0.88
-	-	分割	71	1.25	0.00
0.1	-	分割	71	1.30	0.59
-	286	分割	71	1.50	0.00
0.1	286	分割	71	2.10	0.37

### 4.3 水和反応の進行によるせん断変形抵抗力の増加

前章で比表面積の測定を行った 8 パターンの練上がり直後(10 分後)と 180 分後の粘度値を測定した。一括練りの増粘剤無添加時, 添加時の BET 比表面積と粘度値の関係を図-4.1, 図-4.2 に示す。分割練りの増粘剤無添加時, 添加時の BET 比表面積と粘度値の関係を図-4.3, 図-4.4 に示す。

増粘剤の有無に関わらず, 砂糖添加により水和反応の進行を抑制することで, 直後から 180 分後の粘度値の増加量が小さくなることが分かった。分割練りでも同様に, 砂糖添加時は無添加時に比べて小さくなることが確認できた。分割練りが一括練りと比較して粘度値が大きかった要因は BET 比表面積の測定結果と同様, 分割練りの粒子分散効果によるものと考察した。粒子が分散されることにより拘束水量が増加し, モルタル中の自由水が減少することでモルタル内部の個体粒子間摩擦が増加したと推測した。粘性の付与効果がある増粘剤を添加すると, 無添加時と比較して直後の粘度値が僅かではあるが高くなった。180 分後では, 砂糖を添加している場合で増粘剤添加時の方が粘度値の上昇量が大きくなった。しかし, 一括練りの砂糖無添加の場合では, 増粘剤無添加時の方が粘度値の上昇量が大きくなっていた。砂糖無添加の場合では時間経過による水和反応進行でフレッシュモルタルの流動性が低下し, モルタル中の固体粒子間摩擦が増加する。そのため, 増粘剤の粘性付与効果による粘度値の上昇より大きい固体粒子間摩擦が働き, 砂糖・増粘剤無添加の 180 分後で粘度値が大きく上昇したと推測した。また, モルタル中のせん断変形抵抗性の測定により算出される粘度値が, 時間経過や砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いに応じて変化する BET 比表面積と高い相関を示した。

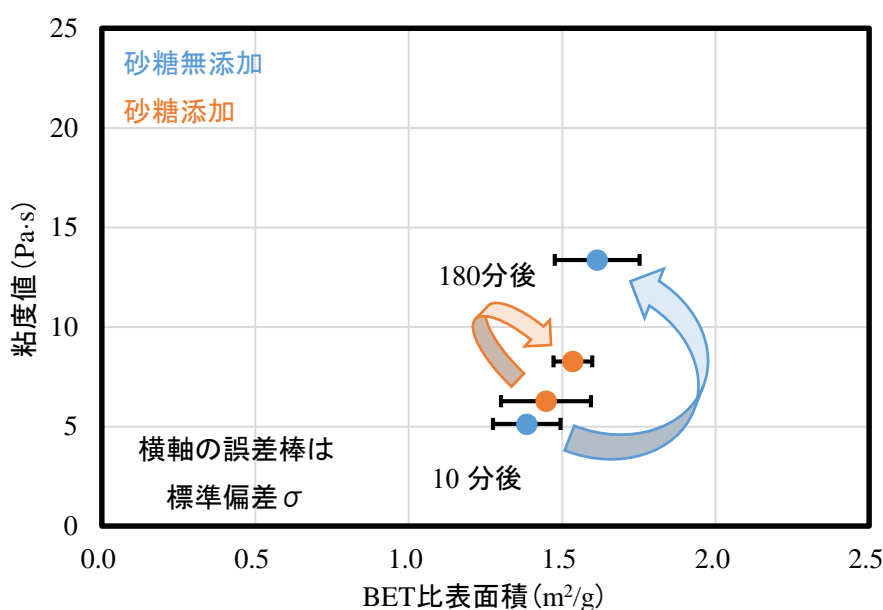


図-4.1 一括練り増粘剤無添加の BET 比表面積と粘度値の関係

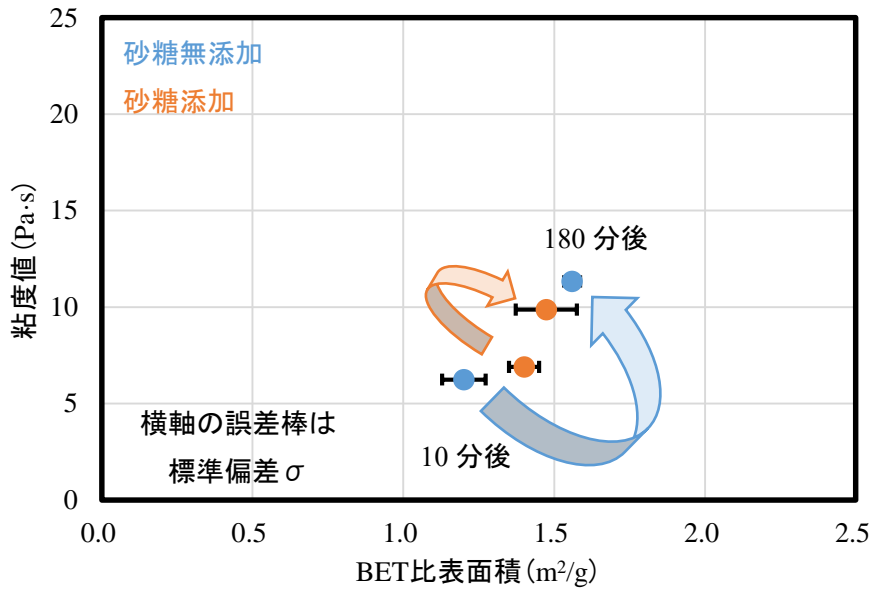


図-4.2 一括練り増粘剤添加の BET 比表面積と粘度値の関係

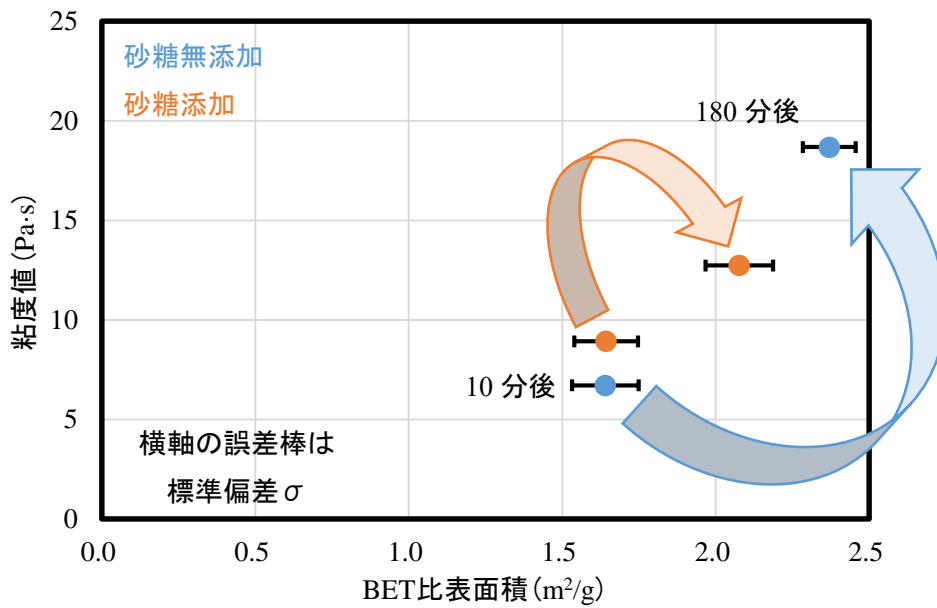


図-4.3 分割練り増粘剤無添加の BET 比表面積と粘度値の関係

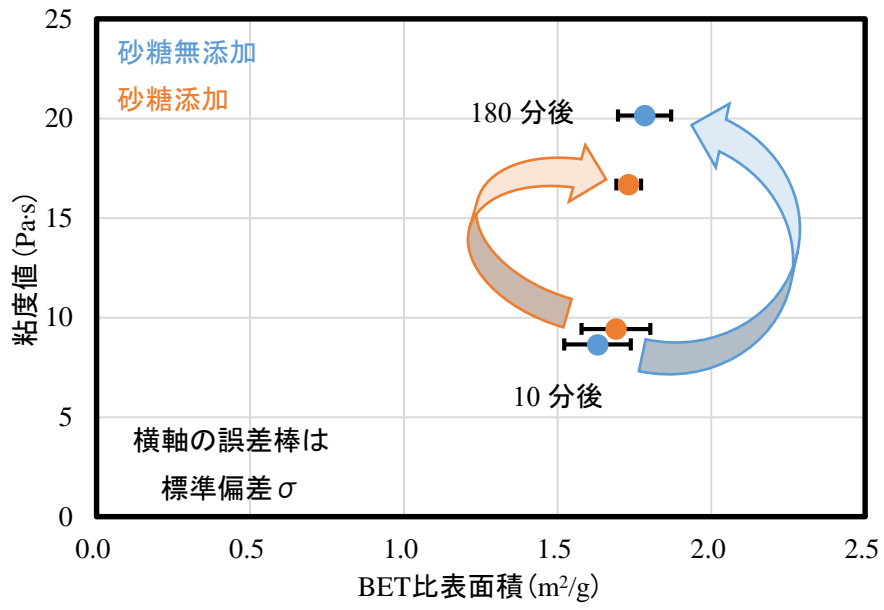


図-4.4 分割練り増粘剤添加の BET 比表面積と粘度値の関係



#### 4.4 せん断変形抵抗と粘性の指標 Rm の相関関係

前章では、水和反応の進行度の違いに応じて変化する BET 比表面積と Rm に高い相関があることが明らかとなった。また、前節では BET 比表面積と粘度値に高い相関があることが明らかとなった。以上を踏まえて、Rm と粘度値の関係を調べた。Rm は粘性の指標として用いられるものであり、粘度値はせん断変形抵抗性の測定により算出されるものである。そのため、両者の関係は非常に近いと考えられる。

前節の測定と同じく表-4.1 の 8 パターンで練上がり直後(10 分後)から 180 分後まで 60 分ごとに測定した Rm と粘度値の全測定結果を示す(図-4.5)。一括練りと分割練りのそれぞれの練混ぜ方法ごとに相関関係があることが分かった。

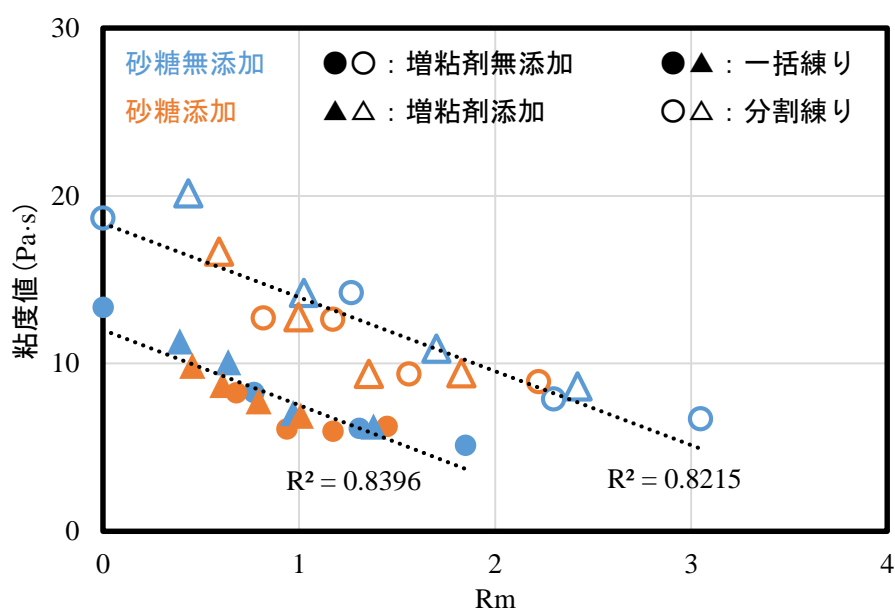


図-4.5 全 8 パターンでの 60 分ごとの Rm と粘度値の関係  
(練上がり直後から 180 分後までの全測定結果)

全8パターンにおいて、各パターンで練上がり直後(10分後)から180分後まで60分ごとに測定した Rm と粘度値の関係を示す。一括及び分割練りの砂糖・増粘剤無添加時を図-4.6、砂糖添加時を図-4.7、増粘剤添加時を図-4.8、砂糖・増粘剤添加時を図-4.9 に示す。

一括練りの砂糖添加時以外では、全測定結果と同等か、それ以上の高い相関を示した。一括練りの砂糖添加時に相関係数が低くなった要因は、最も水和反応の進行が遅いと想定されるパターンであり、時間経過による粘度値の増加量が僅かであるため、測定誤差の影響を大きく受けたと推測した。Rm と粘度値の測定結果には大きな誤差が無いと判断したため、測定は多くの配合で1回のみしか行っていない。今回の測定で設定した増粘剤無添加時の10分後のモルタルフロー値  $237.5 \pm 12.5$  mm より僅かに大きい、フロー値 254.5 mm の際の一括練り砂糖添加時の練上がり直後(10分後)から180分後まで60分ごとに測定した Rm と粘度値の関係を示す(図-4.10)。この測定では Rm と粘度値に大変高い相関があることから、一括練り砂糖のみ添加時にも Rm と粘度値に相関関係があると言える。

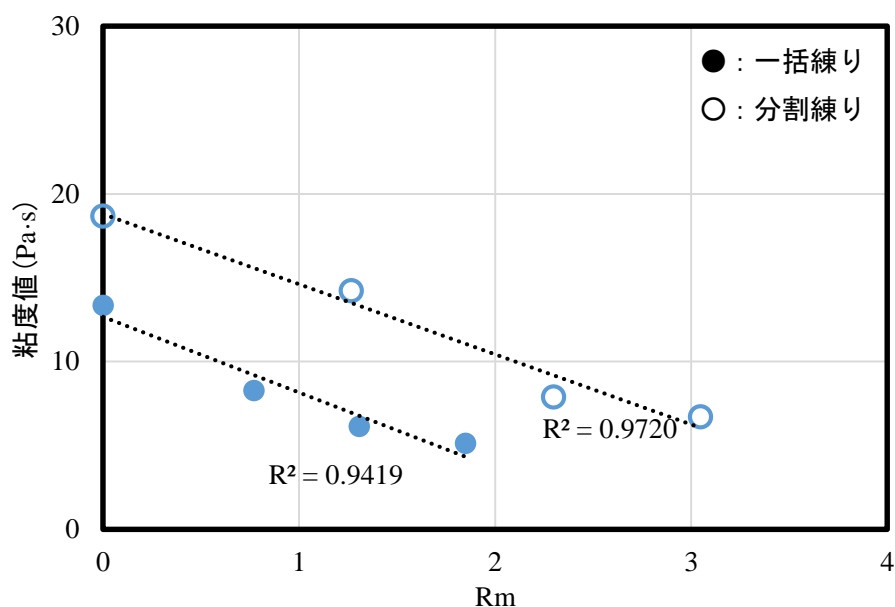


図-4.6 一括・分割練り砂糖・増粘剤無添加の Rm と粘度値の関係

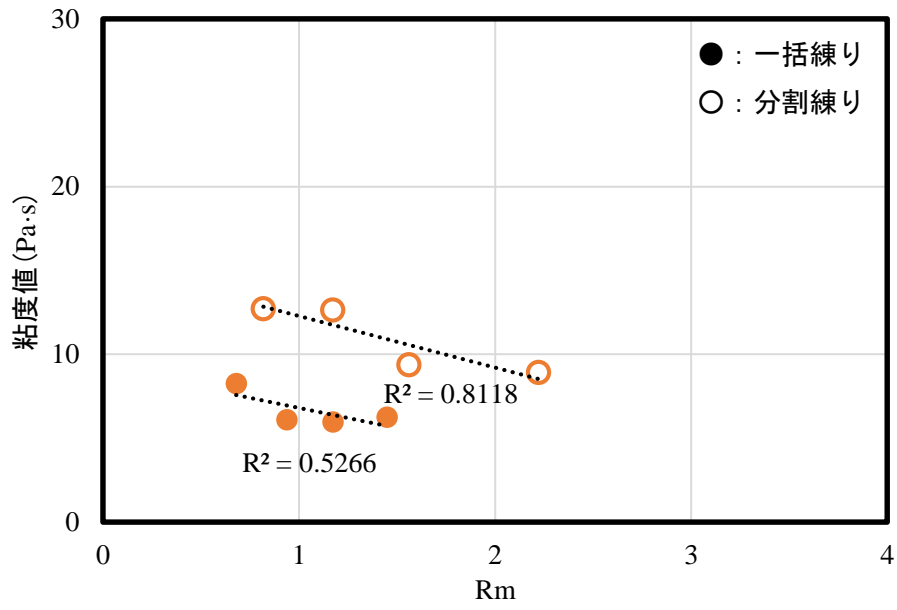


図-4.7 一括・分割練り砂糖添加の Rm と粘度値の関係

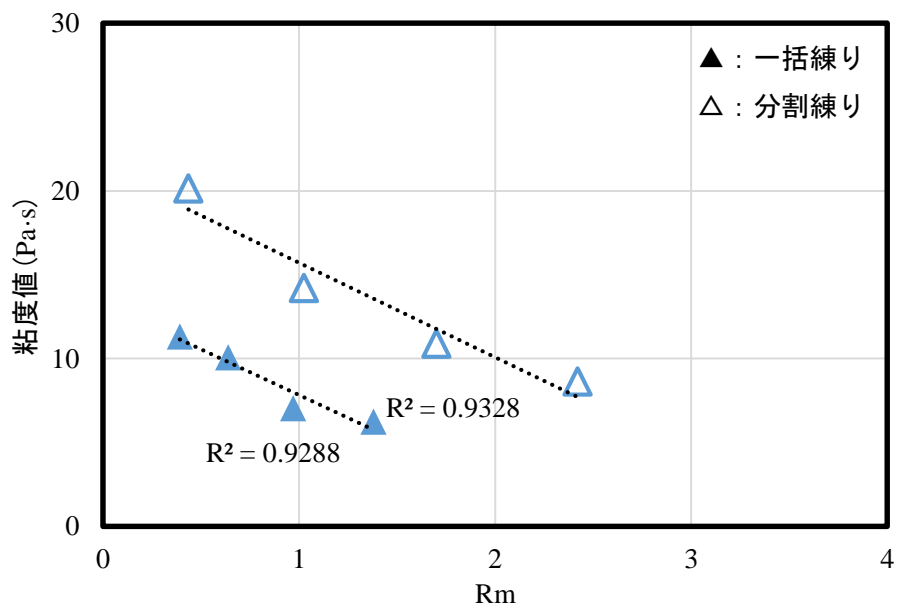


図-4.8 一括・分割練り増粘剤添加の Rm と粘度値の関係

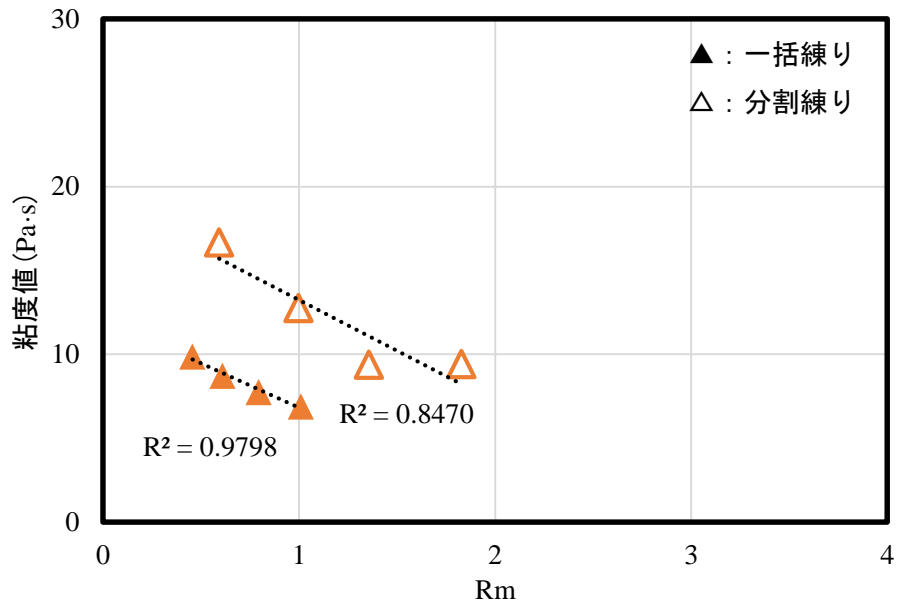


図-4.9 一括・分割練り砂糖・増粘剤添加の Rm と粘度値の関係

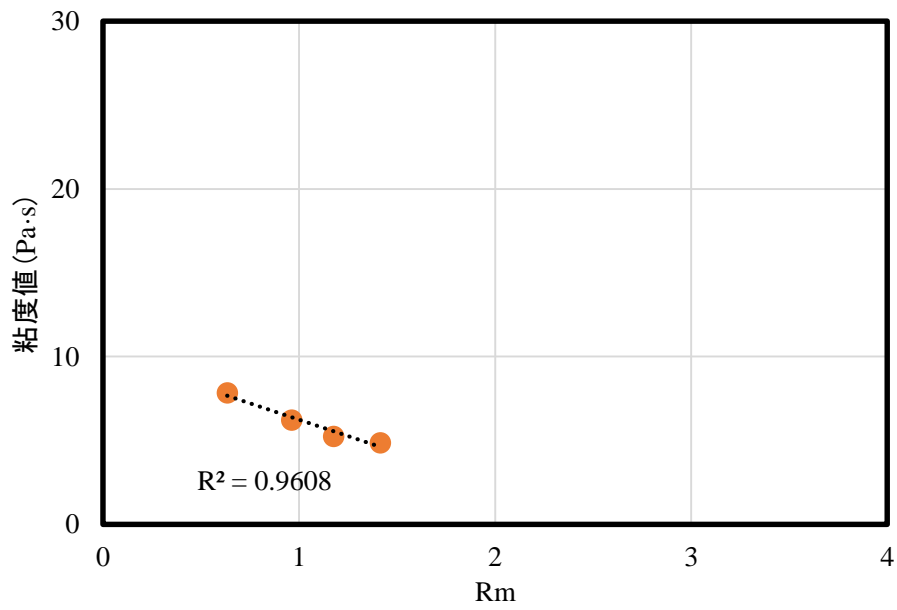


図-4.10 モルタルフロー値 254.5mm の一括練り砂糖添加の Rm と粘度値の関係

次に、BET 比表面積と高い相関を示した練上がり直後と 180 分後の全 8 パターンでの Rm と粘度値の関係を示す(図-4.11)。一括練りと分割練りの両方で全測定結果より高い相関が得られた。

粘性付与効果のある増粘剤の有無は粘度値の測定結果に影響を及ぼす可能性があるため、練混ぜ方法と増粘剤の有無ごとに Rm と粘度値の関係をまとめた。一括及び分割練りの増粘剤無添加時、添加時の Rm と粘度値の関係を図-4.12, 図-4.13 に示す。練混ぜ方法と増粘剤添加の有無ごとの Rm と粘度値では、全てで相関係数  $R^2$  が 0.92 以上となり、非常に高い相関を示した。

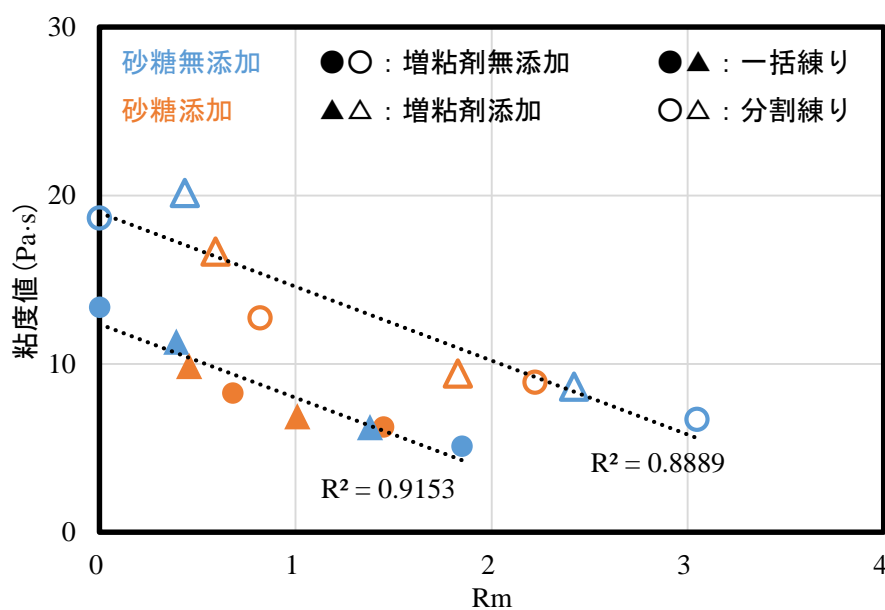


図-4.11 全 8 パターンの練上がり直後と 180 分後の Rm と粘度値の関係

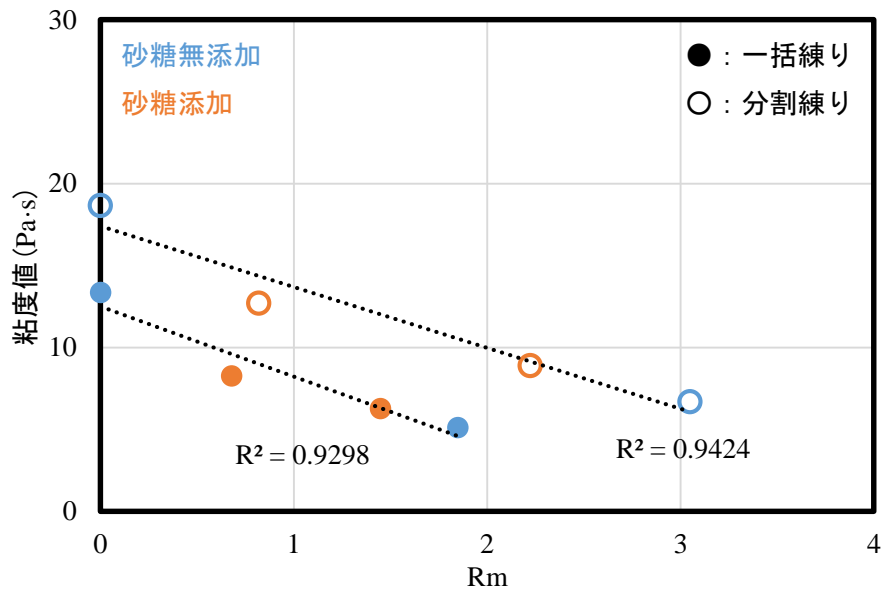


図-4.12 一括・分割練り増粘剤無添加の練上がり直後と180分後のRmと粘度値の関係

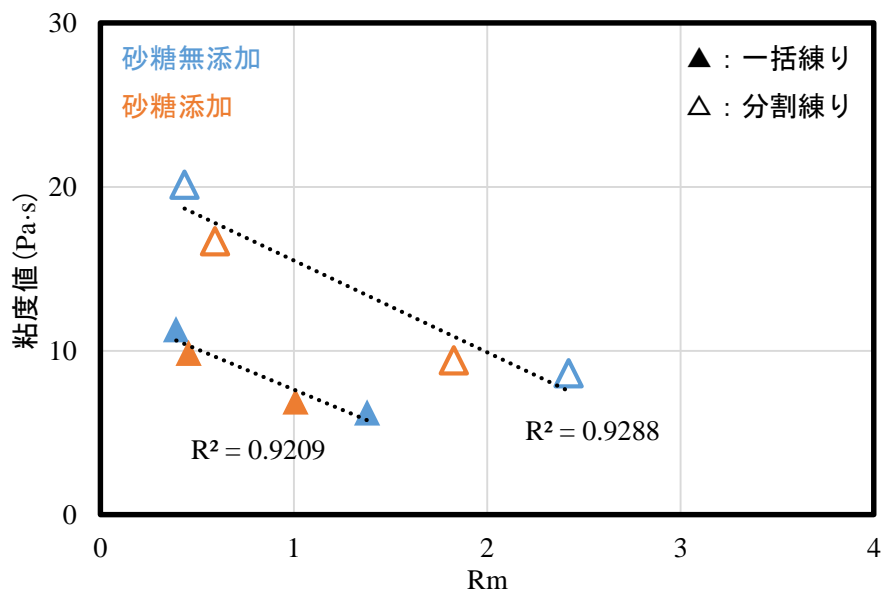


図-4.13 一括・分割練り増粘剤添加の練上がり直後と180分後のRmと粘度値の関係

#### 4.5 まとめ

水和反応の進行度を定量的に測定した BET 比表面積とせん断変形抵抗性を測定する粘度値に相関があることが明らかとなった。また、相対ロート速度比  $R_m$  と粘度値にも相関があることが分かった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 一括練りと比較して、分割練りでは粒子分散効果により固体粒子間摩擦が増加するため粘度値も増加した。
- (2) 粘性付与効果のある増粘剤を添加すると粘度値が上昇するが、砂糖無添加のものは時間の経過により水和反応の進行で流動性が低下し、増粘剤の粘性付与効果以上の固体粒子間摩擦の増加による粘度値の上昇が見られた。
- (3) 各練混ぜ方法で練上がり直後から 180 分後までの 60 分ごとの  $R_m$  と粘度値が相関を示した。また、練混ぜ方法と砂糖・増粘剤添加の有無別に分けると、各練混ぜ方法ごとと比較して同等かそれ以上の高い相関を示した。
- (4) BET 比表面積を測定した練上がり直後と 180 分後とでは、練混ぜ方法と増粘剤添加の有無ごとの  $R_m$  と粘度値の相関係数  $R^2$  が 0.92 以上となり非常に高い相関を示した。

## 第5章 水和反応の進行が直応力下でのせん断強度に及ぼす影響

### 5.1 概要

フレッシュコンクリートの自己充填性能、特に鉄筋間に代表される間隙通過性能は、直応力下でのモルタル相のせん断強度(せん断変形の際の抵抗力)が支配している。フレッシュコンクリートが流動し、間隙手前でフレッシュコンクリートが変形するにはフレッシュモルタル相の変形が必要であるが、同時に粗骨材粒子どうしの接近を伴う。その際に、フレッシュモルタル中に発生する直応力がせん断応力を高める(図-5.1)。これが、液相だけではなく固体粒子が含まれているモルタル相のせん断強度を高め、間隙手前でコンクリートが閉塞する原因となる。直応力下でのモルタルのせん断応力の測定方法として、ガラスビーズを模擬粗骨材として用いた試験があるが、これはガラスビーズの有無によるモルタルのフロー流下速度を比較する方法であり、間接測定にとどまっている。ガラスビーズではかみ合わせの程度にばらつきが生じるため、試験の精度が低くなる可能性がある。そこで、一面せん断試験を用いて一定の直応力によってフレッシュモルタルのせん断強度を直接測定する手法が考案された。福田らは、この手法により間隙通過性能を支配する個体粒子間摩擦の定量化を行った<sup>5)</sup>。

本研究では、この手法を用いて砂糖添加の有無に応じて変化する時間経過後の水和反応の進行度が直応力下でのモルタル中のせん断強度に及ぼす影響を調べる。

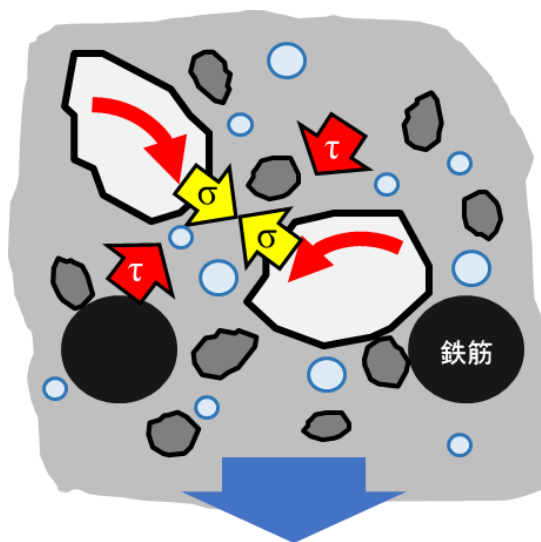


図-5.1 フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ



## 5.2 せん断強度の定義とモルタル試験の配合・練混ぜ方法

一面せん断試験機を用いて測定した水平方向の変位とモルタル中のせん断力との関係の一例を示す(図-5.2)。本研究では、一面せん断試験での測定データにおいて、動き始めて最初に得られたせん断力のピーク値(最大静摩擦力)から容器自体の摩擦力(試料無しでの測定値)を引き、試料のせん断面積で除した値を「せん断強度」と定義した<sup>5)</sup>。

測定試料であるフレッシュモルタルの流動性が低下していない場合では、本研究で行った全測定結果でせん断力のピーク値があることを確認した。しかし、砂糖・増粘剤無添加時の時間経過後は水和反応の進行により流動性が低下することで、明瞭なピークが得られなかった(図-5.3)。これは、流動性の低下によりモルタル中の固体粒子間摩擦が増加し、モルタルが動き出す瞬間の最大静摩擦力より動摩擦の方が大きくなったためであると考察した。

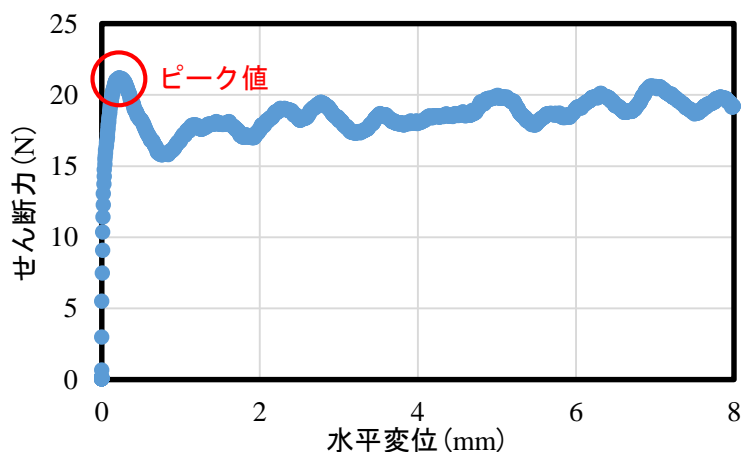


図-5.2 水平方向の変位とせん断力の関係

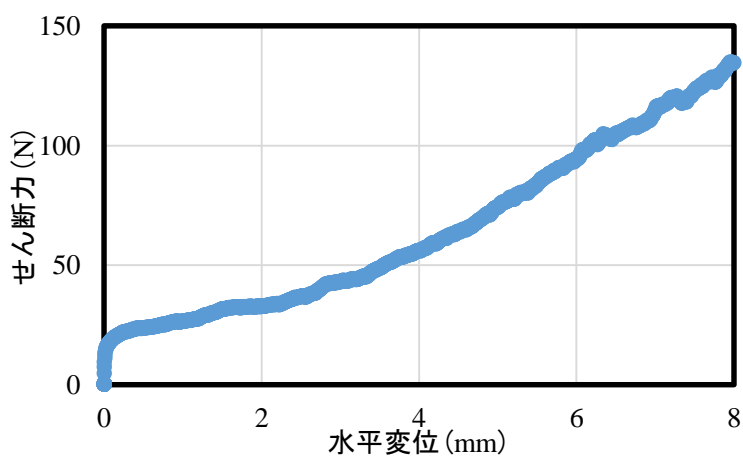


図-5.3 流動性低下時の水平方向の変位とせん断力の関係

直応力下でのフレッシュモルタルのせん断強度を測定する配合と練混ぜ方法、練上がり直後(10分後)の空気量を表-5.1に示す。セメント粒子の比表面積を測定した8パターンから分割練りの砂糖添加時を除いた6パターンで行った。本試験は、粘度値の測定と同時に行ったため空気量は前章と同一となっている。前章と同様、増粘剤無添加では練上がり直後のモルタルフロー値が $237.5 \pm 12.5$  mm, 増粘剤添加時はモルタルフロー値 $255 \pm 10$  mmとなるようSP添加量を調整して試験を行った。

表-5.1 せん断強度測定時の配合と練混ぜ方法, 空気量

砂糖添加量 (C×%)	増粘剤添加量 (g/m <sup>3</sup> )	練混ぜ 方法	消泡剤添加量 (g/m <sup>3</sup> )	高性能 AE 減水剤添加量 (C×%)	空気量 (%)
-	-	一括	71	0.95	0.64
0.1	-	一括	71	0.90	1.06
-	286	一括	71	1.25~1.45	0.47
0.1	286	一括	71	1.40~1.60	0.88
-	-	分割	71	1.20~1.45	0.00
-	286	分割	71	1.50~1.60	0.00

### 5.3 各配合・練混ぜ方法の直応力下でのせん断強度とばらつき

直応力(鉛直荷重)の設定値 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa で, 各配合・練混ぜ方法の練上がり直後(10分後)から180分後まで60分ごとのせん断力を測定してせん断強度を求めた。一括練り, 分割練りの砂糖・増粘剤無添加時を図-5.4, 図-5.5に, 一括練りの砂糖添加時を図-5.6に示す。また, 一括練り, 分割練りの増粘剤添加時を図-5.7, 図-5.8に, 一括練りの砂糖・増粘剤添加時を図-5.9に示す。

一括及び分割練りの砂糖・増粘剤無添加時の練上がりから180分後では, 図-5.3のようにせん断力のピーク値が得られなかったため, せん断強度を算出することができなかった。一方, 図-5.9に示した一括練りの砂糖・増粘剤添加時以外の5パターンでは, 直後から180分後(砂糖・増粘剤添加時では120分後)までの60分ごとのせん断強度は直応力の増加に応じて増加した。測定を行った全パターンで, 練上がり後の時間経過に伴いせん断強度が増加していることを確認した。

一括練りの砂糖・増粘剤無添加時と砂糖添加時の図-5.4と図-5.6を比較すると, 練上がりから120分後で僅かなせん断強度の増加が見られる程度であった。一方, 図-5.7に示した増粘剤添加時は砂糖・増粘剤無添加時及び砂糖添加時の図-5.4と図-5.6と比較して, 練上がりから120分後のせん断強度の増加量が大きく, 180分後ではさらに大きな上昇が見られた。このことから, フレッシュモルタルに十分な軟度がある場合, せん断強度の増加は水和反応の進行ではなく増粘剤添加の有無による影響が大きいことが明らかとなった。図-5.9に示した一括練りの砂糖・増粘剤添加時では, 練上がり直後と60分後の100 kPaと200 kPaの間で直応力の増加に応じたせん断強度の増加が見られなかったが, 全体的なせん断強度は他の5パターンより格段に大きかった。これは, 砂糖・増粘剤の両方に保水性があり, モルタル中の自由水量が減少したことで固体粒子間摩擦が増加したためであると推測した。

分割練りは, 図-5.5と図-5.8に示した砂糖・増粘剤無添加時と増粘剤添加時で行ったが, 練混ぜ方法の違いによるせん断強度の差は見られなかった。砂糖添加時の分割練りでは, 砂糖がセメントと反応する前にセメント粒子にSPを吸着させることで, 水和反応の進行抑制を緩和する効果があるが, 水和反応の進行はせん断強度の測定結果に大きな影響を与えていないと判断したため, 砂糖添加時の分割練りのせん断強度の測定は行わなかった。

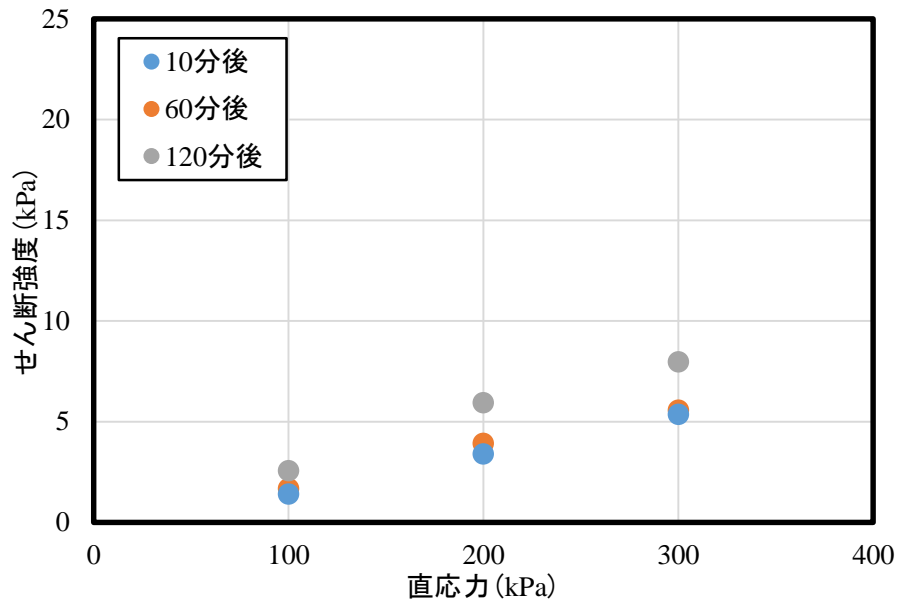


図-5.4 一括練り砂糖・増粘剤無添加の直応力とせん断強度の関係

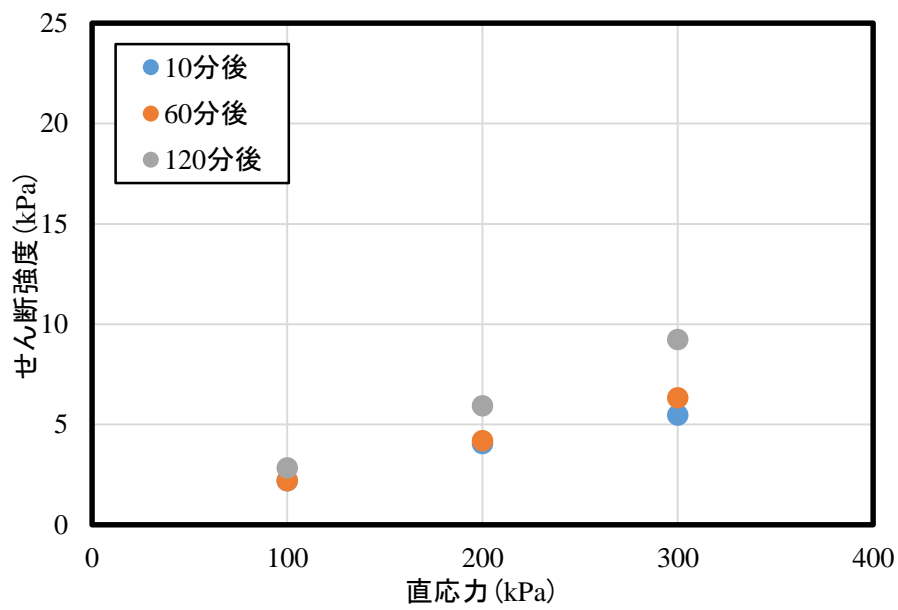


図-5.5 分割練り砂糖・増粘剤無添加の直応力とせん断強度の関係

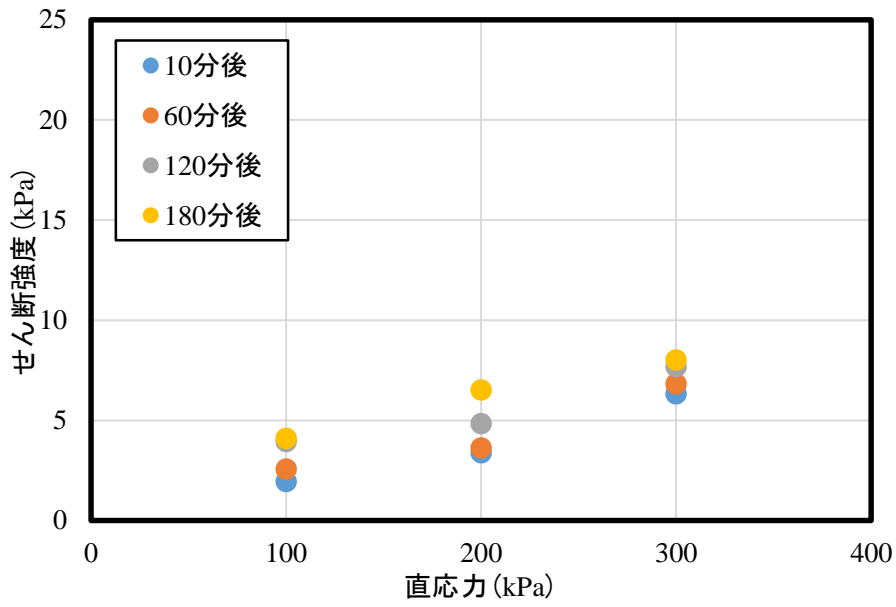


図-5.6 一括練り砂糖添加の直応力とせん断強度の関係

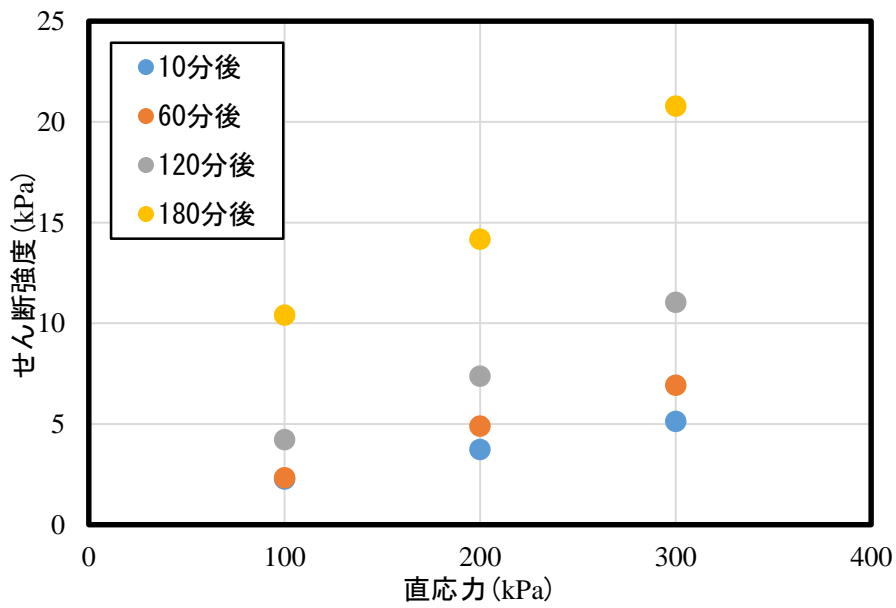


図-5.7 一括練り増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係

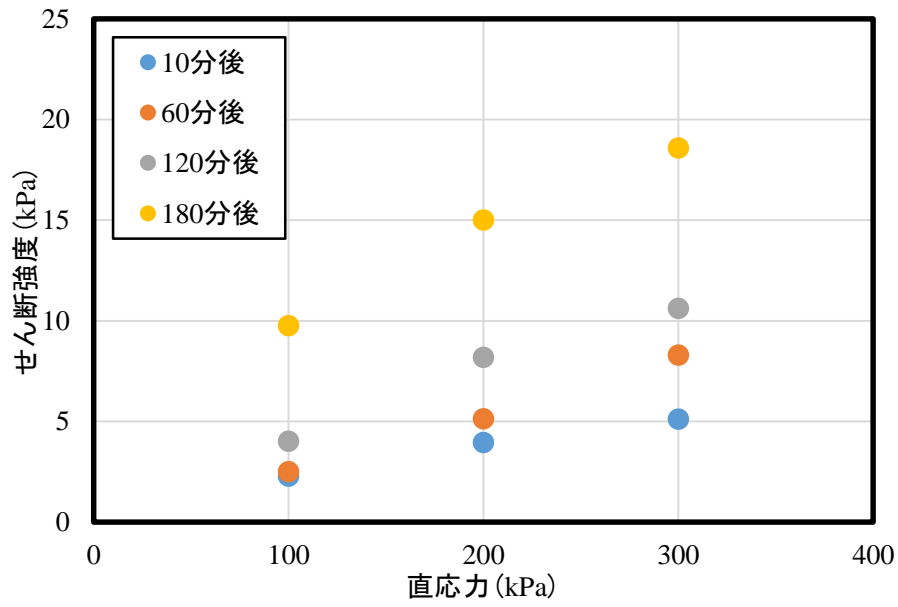


図-5.8 分割練り増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係

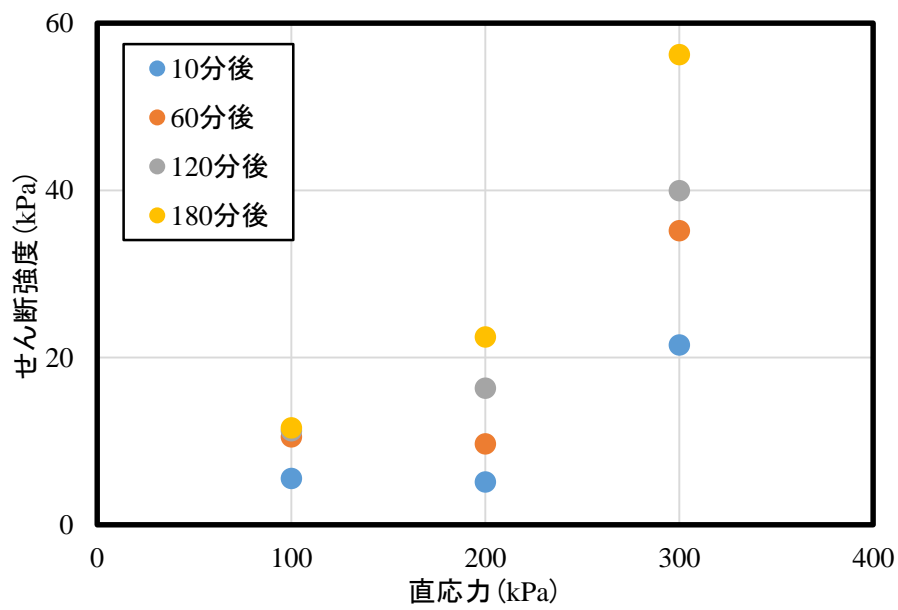


図-5.9 一括練り砂糖・増粘剤添加の直応力とせん断強度の関係

分割練りの増粘剤添加時以外では、直応力 200 kPa での測定を 3 回行いせん断強度のばらつき(標準偏差)を求めた。一括練りの砂糖・増粘剤添加時の練上がり直後と 60 分後では、100 kPa と 200 kPa の間で直応力の増加に伴うせん断強度の増加が見られなかったため、100 kPa, 300 kPa でも同様にばらつきを調べた。経過時間ごとのせん断強度とそのばらつきを各配合・練混ぜ方法別にまとめた。一括練り、分割練りの砂糖・増粘剤無添加時を図-5.10, 図-5.11 に、一括練りの砂糖添加時を図-5.12 に示す。また、一括練りの増粘剤添加時、砂糖・増粘剤添加時を図-5.13, 図-5.14 に示す。

時間経過による水和反応の進行やフレッシュ性状の変化は一様でないため、経過時間の長さに伴いせん断強度のばらつきは大きくなった。また、せん断強度の値が大きいほど測定結果のばらつきも大きくなった。図-5.14 に示した一括練りの砂糖・増粘剤添加時で直応力の増加に伴うせん断強度の増加が見られない部分があった要因として、せん断強度の値が大きかったことによるばらつきの可能性だけでなく、100 kPa と 300 kPa の測定を 200 kPa や他の配合・練混ぜ方法の測定時よりも寒い時期に行ったことが推測される。モルタルの練混ぜや一面せん断試験以外の測定は約 20 °C の恒温室内で行うが、本試験は温度設定がされていない室内で測定を行っているため、冬季では試験機の温度の低下がモルタルに影響を及ぼす可能性がある。さらに、モルタルを投入する容器自体の摩擦力を低減するため、せん断面にグリースを塗布しており、温度低下によるグリースの摩擦力増加の可能性も推測される。

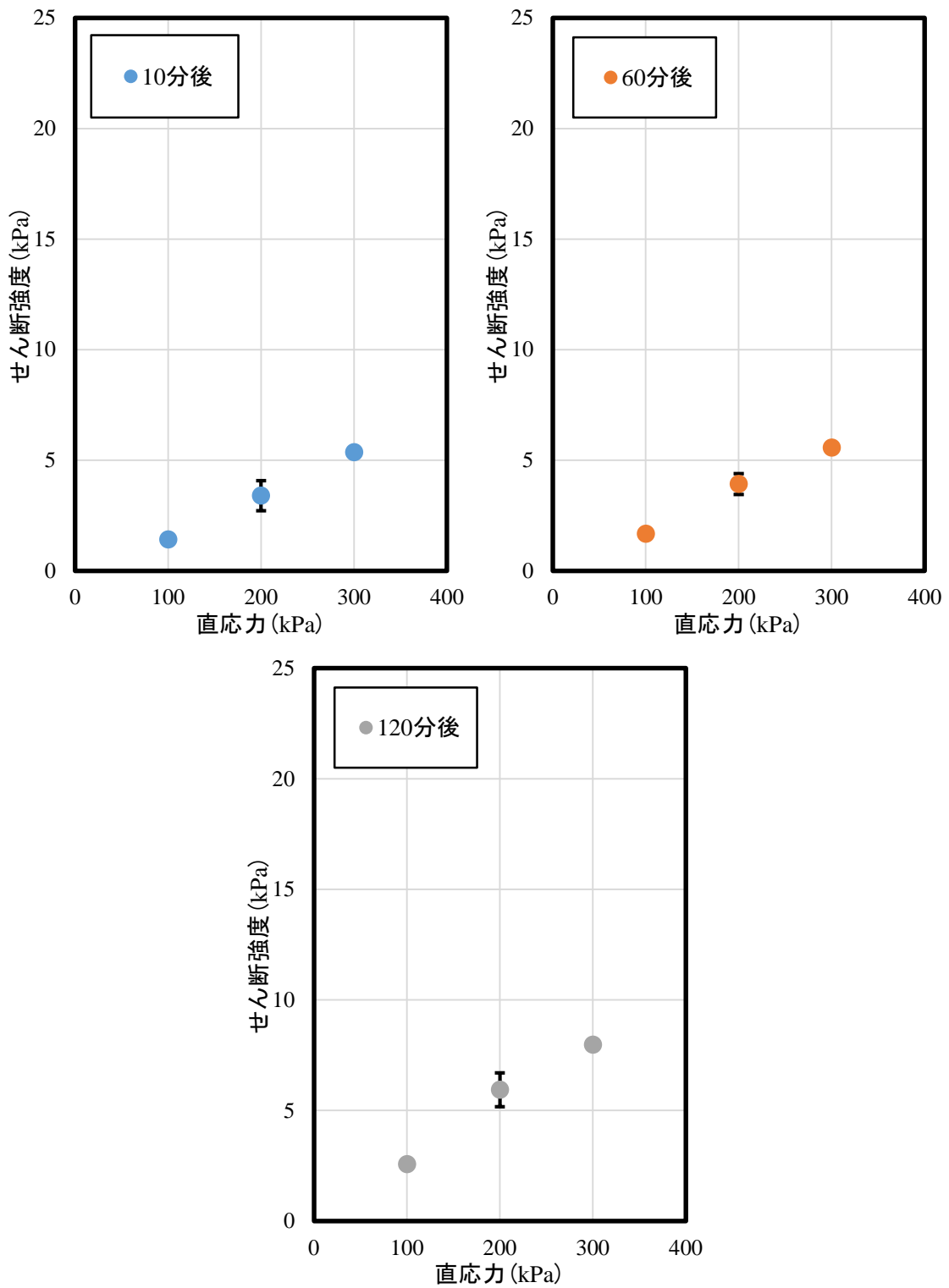


図-5.10 一括練り砂糖・増粘剤無添加のせん断強度のばらつき



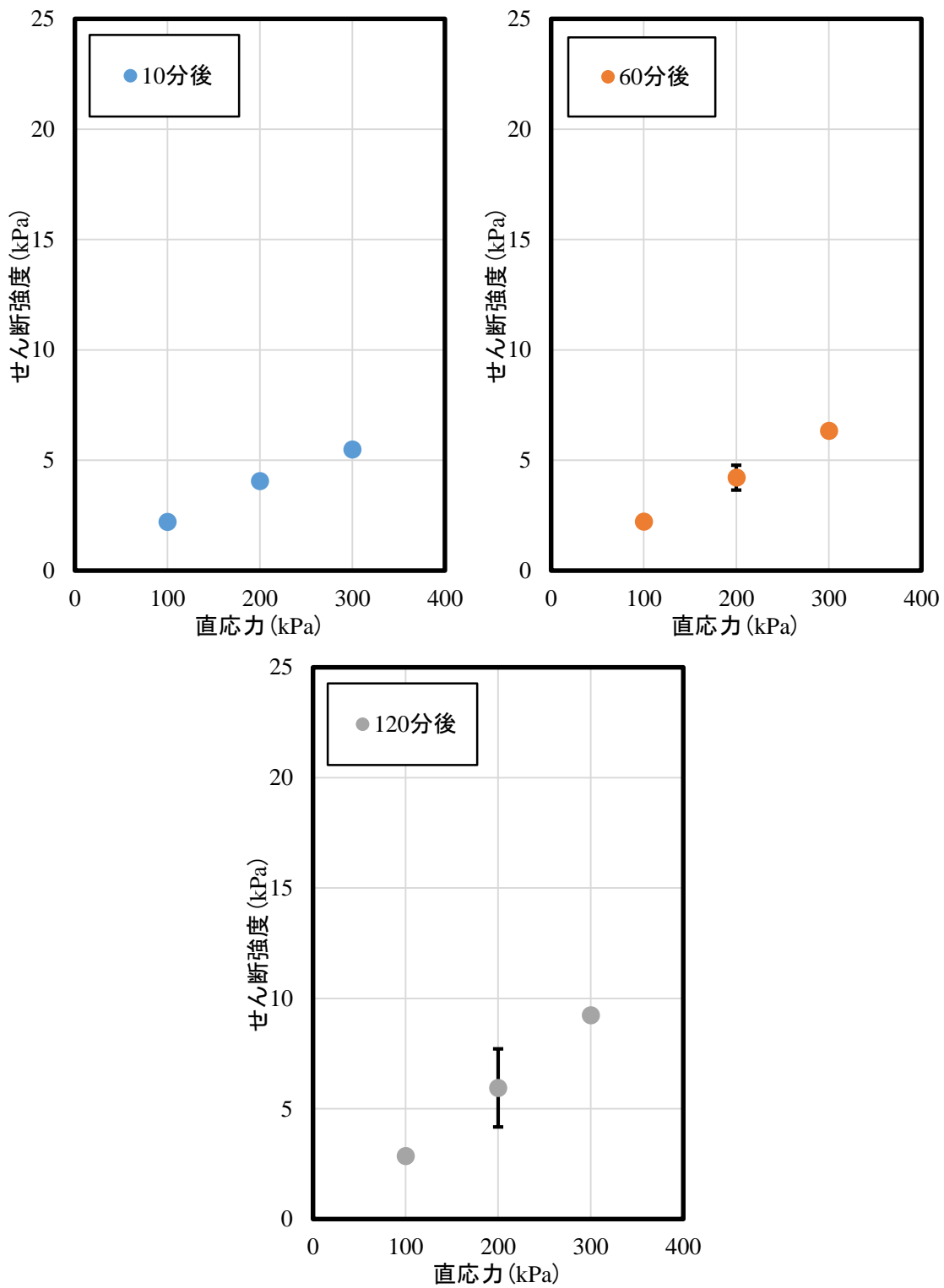


図-5.11 分割練り砂糖・増粘剤無添加のせん断強度のばらつき

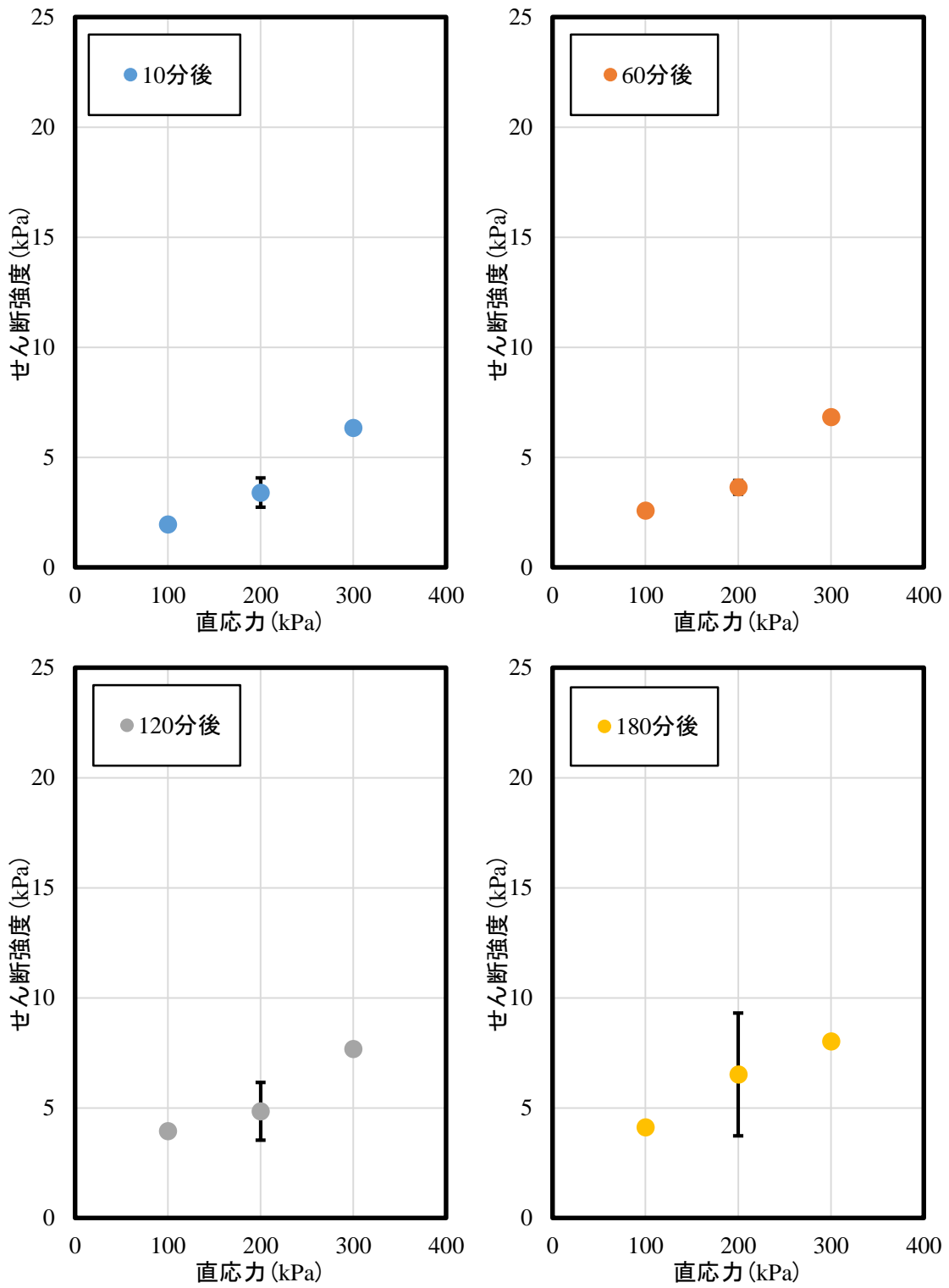


図-5.12 一括練り砂糖添加のせん断強度のばらつき

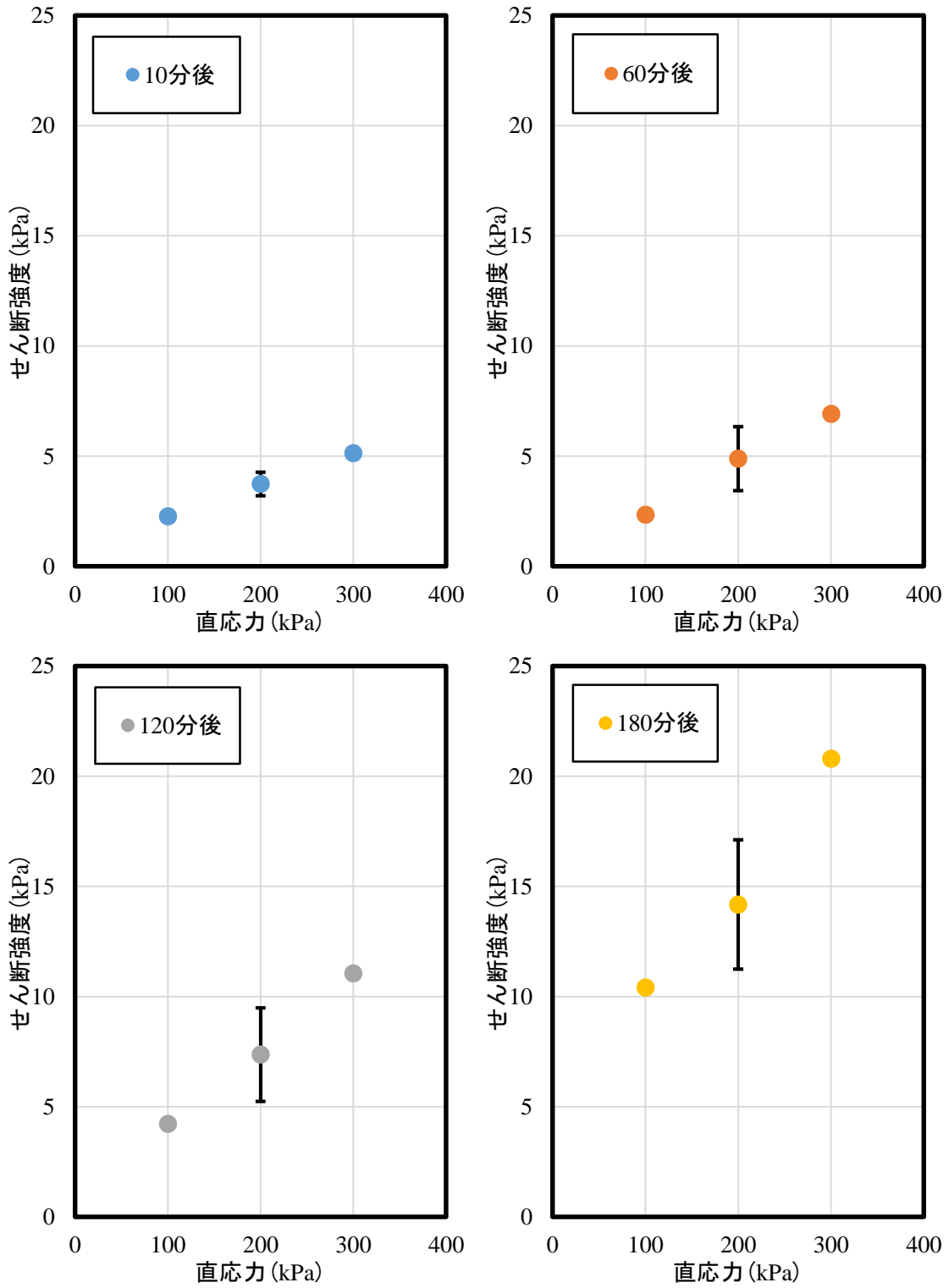


図-5.13 一括練り増粘剤添加のせん断強度のばらつき

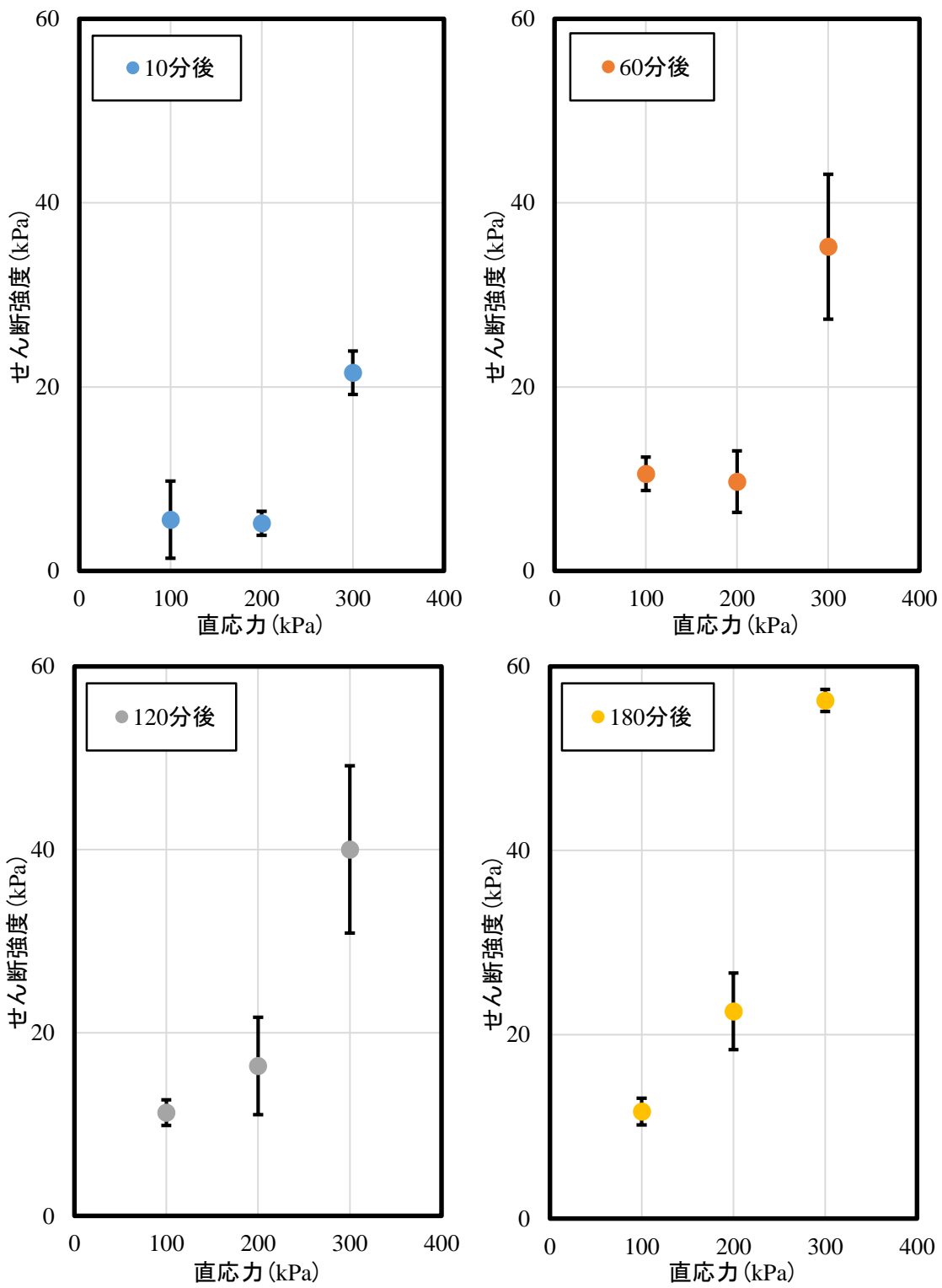


図-5.14 一括練り砂糖・増粘剤添加のせん断強度のばらつき

#### 5.4 一括練りの各配合での内部摩擦角と粘着力

前節の一面せん断試験により測定したせん断強度と直応力の関係から内部摩擦角と粘着力を算出した(図-5.15)。分割練りでは、同配合の一括練りとせん断強度に差が見られなかったため、一括練りの4配合で行った。練上がり直後(10分後)から180分後までの60分ごとの内部摩擦角を図-5.16に、粘着力を図-5.17に示す。粘着力は、ゼロ未満となったものを全てゼロとした。

増粘剤無添加時の内部摩擦角は、砂糖添加時では時間経過後による変化がほとんど無く、砂糖無添加時も測定可能であった120分後まで大きな変化は見られなかった。一方、増粘剤を添加すると時間経過後に内部摩擦角が増加し、砂糖・増粘剤の両方を添加した配合では、練上がり直後から他の配合より内部摩擦角が大きく、時間経過後の増加量も大きくなった。前節の一面せん断試験でのせん断強度の測定結果と同様、砂糖・増粘剤の両方の保水性により、モルタル中の自由水量が減少し固体粒子間摩擦が増加したため、砂糖・増粘剤添加時で内部摩擦角が最も大きくなったと推測した。

また、全ての配合で練上がりから60分後までの粘着力はほとんどゼロであり、本研究では0 kPaの測定を行わなかったが、福田の研究結果と同様、練上がり直後の0 kPaのせん断強度がほとんどゼロに近いことが推測できた。時間経過後では、砂糖添加時に少しの増加が見られたが、増粘剤添加時が他の配合と比較して大きく増加していた。これは、増粘剤の粘性付与効果によるものと推測した。

以上の結果から、砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いではなく、増粘剤の添加が直応力下でのせん断強度に影響を及ぼすことが明らかとなった。

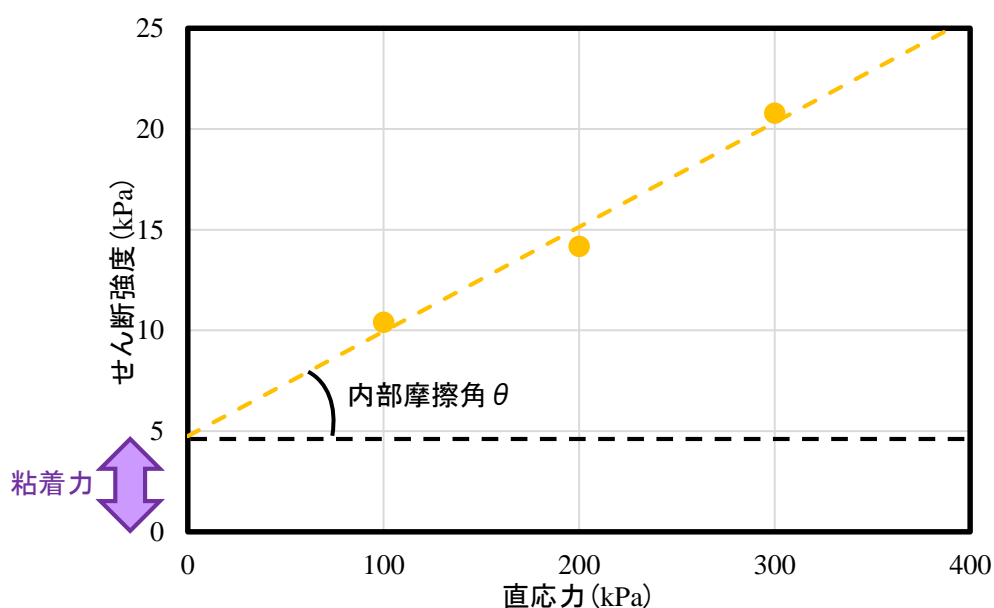


図-5.15 内部摩擦角と粘着力の算出方法

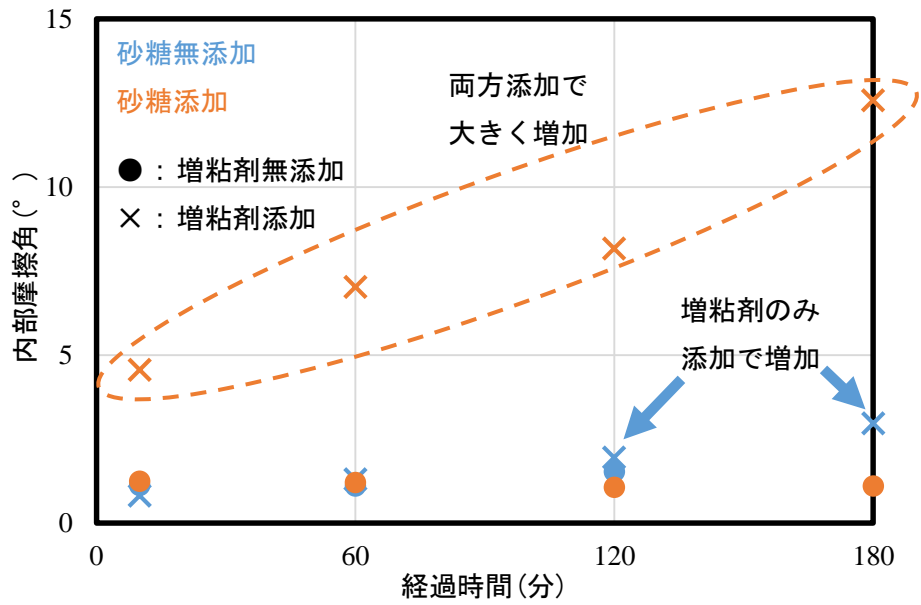


図-5.16 練上がりから180分後までの60分ごとの内部摩擦角

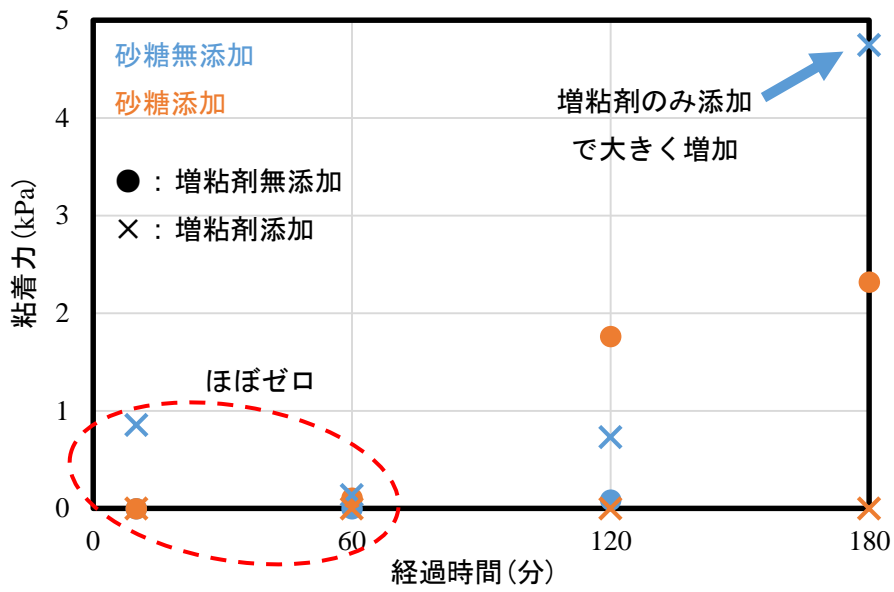


図-5.17 練上がりから180分後までの60分ごとの粘着力

## 5.5 砂糖添加による動摩擦力の低減効果

前節までに、水和反応の進行がフレッシュモルタルの動き出す瞬間の最大静摩擦力に及ぼす影響は小さく、増粘剤添加による粘性付与が大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。本節では、動き出す瞬間ではなく動き出し後の動摩擦力に着目し、砂糖添加による水和反応の進行抑制が自己充填性能に及ぼす影響を調べた。

図-5.3 に示した通り、砂糖・増粘剤無添加時の時間経過後では明瞭なせん断力のピーク値が表れなかった。前述したように、これは水和反応の進行による流動性の低下で固体粒子間摩擦が増加したためであると考察した。一括練りの各配合での練上がり直後(10分後)と180分後のモルタルフロー値を表-5.2 に示す。砂糖添加時が最も変化量が小さく、砂糖・増粘剤無添加時が最も変化量が大きくなっていった。また、直応力 200 kPa での練上がりから180分後の一括練りの砂糖・増粘剤無添加時、砂糖添加時の水平変位 8 mm までのせん断力を図-5.18 に、一括練りの増粘剤添加時、砂糖・増粘剤添加時を図-5.19 に示す。砂糖を添加している配合では水平変位が大きくなってせん断力が一定であるが、砂糖を添加していない配合では、水平変位が大きくなるに従いせん断力も増加している。

水和反応の進行による流動性の低下と動摩擦力の関係を調べるため、各配合でモルタルフロー値から算出した相対フロー面積比  $G_m$  の経時変化と水平変位 8 mm 時のせん断強度の経時変化を図-5.20 に示す。流動性の低下量を示す  $G_m$  の経時変化( $\Delta G_m$ )が大きいほど、直後から 180 分後の水平変位 8 mm 時のせん断強度の増加量( $\Delta$ せん断強度)が大きくなった。砂糖を添加している配合ではフロー値の経時変化が小さく、水平変位 8 mm 時のせん断強度の増加量も小さくなることが明らかとなった。

以上の結果から、砂糖の添加が時間経過後のフレッシュモルタル中の動摩擦力の上昇抑制に効果的であることが明らかとなった。

表-5.2 一括練りの各配合での練上がり直後と 180 分後のモルタルフロー値

	モルタルフロー値 (mm)	
	10 分後	180 分後
砂糖・増粘剤無添加(一括)	239×236	108×108
砂糖添加(一括)	237×234	224×214
増粘剤添加(一括)	257×249	182×179
砂糖・増粘剤添加(一括)	258×256	220×219

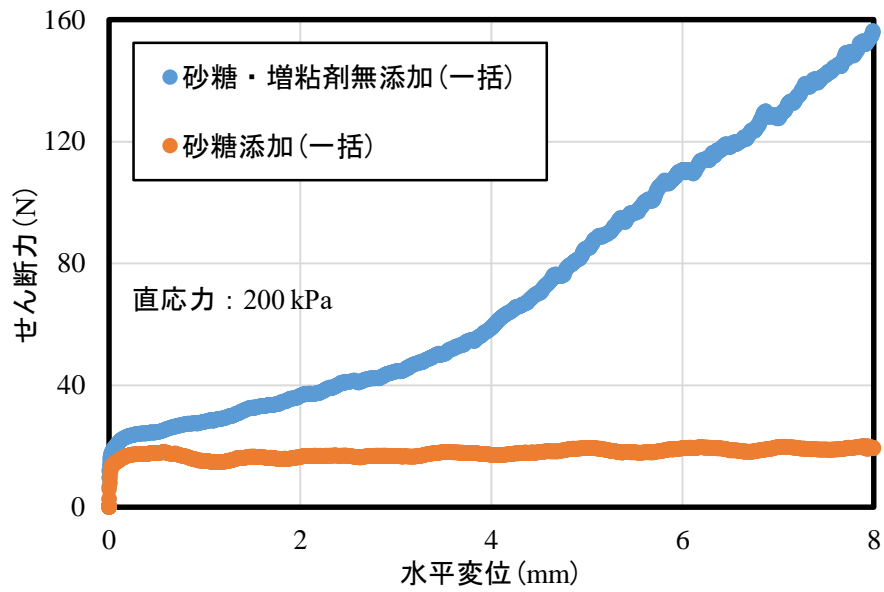


図-5.18 練上がりから 180 分後の一括練り増粘剤無添加の水平変位とせん断力の関係

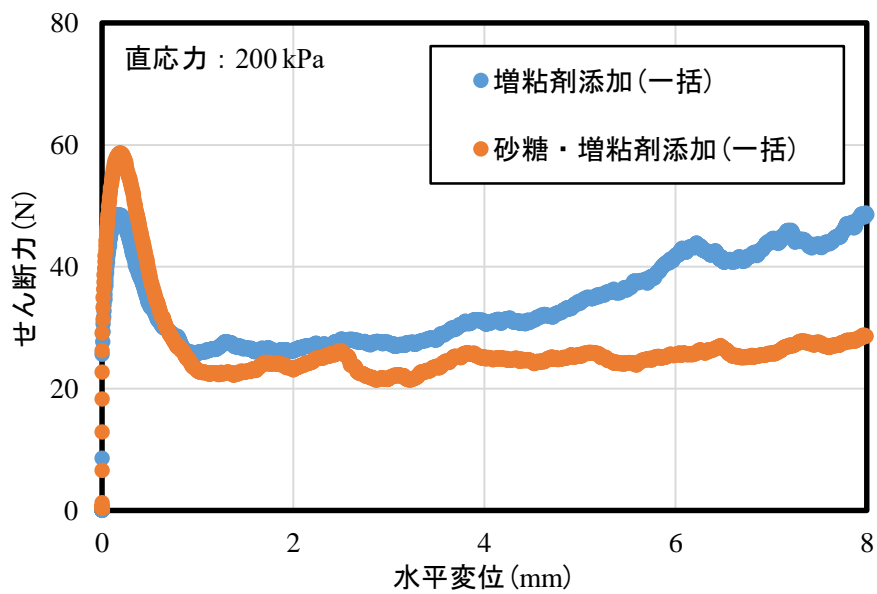


図-5.19 練上がりから 180 分後の一括練り増粘剤添加の水平変位とせん断力の関係



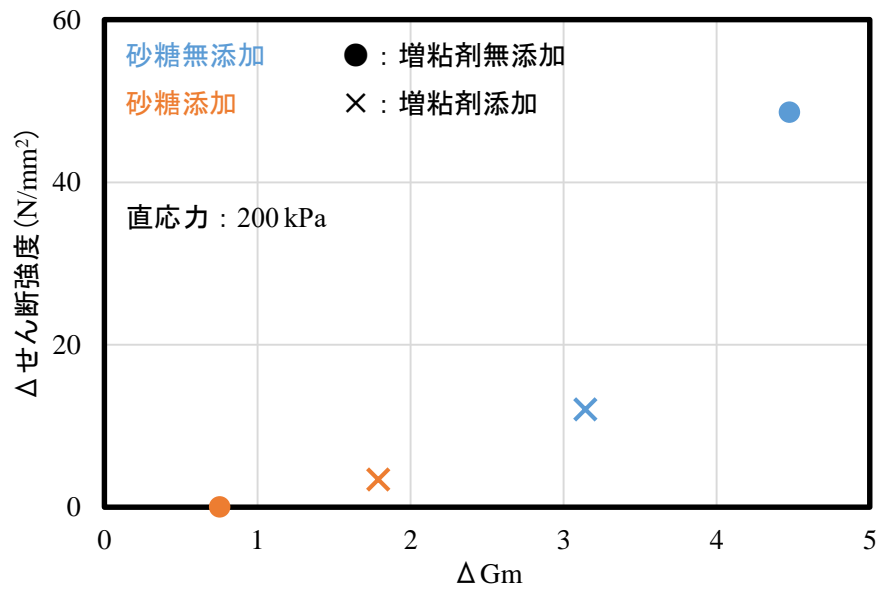


図-5.20 相対フロー面積比の経時変化と水平変位 8mm 時のせん断強度の経時変化の関係

## 5.6 まとめ

福田らにより定量化された，一面せん断試験機を用いた直応力下でのフレッシュモルタルのせん断力の測定により，水和反応の進行がフレッシュモルタルの動き出す瞬間の最大静摩擦力に与える影響は小さく，動き出し後の動摩擦力の低減に効果的であることが明らかとなった。得られた知見を以下に示す。

- (1) フレッシュモルタルが十分な流動性を確保している場合では，動き出す瞬間の最大静摩擦力のピーク値が得られたが，水和反応の進行により流動性の低下したモルタルでは，モルタル内の固体粒子間摩擦の増加により動摩擦力が増加し，明瞭なピーク値が得られなかった。
- (2) 一括練りの砂糖・増粘剤添加時以外では，直応力の増加に応じたせん断強度の増加を確認した。また，時間経過後でも同様に直応力の増加に応じてせん断強度が増加していた。
- (3) 砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いでは，練上がりから 120 分後までのせん断強度に大きな違いは見られなかった。一方，粘性付与効果のある増粘剤を添加すると，時間経過後にせん断強度が増加した。さらに，砂糖・増粘剤の両方を添加することでせん断強度の増加量が最も大きくなった。砂糖・増粘剤添加時では，両方の保水性による自由水の減少で固体粒子間摩擦が増加したため，内部摩擦角が大きくなった。
- (4) 砂糖の添加により水和反応の進行を抑制することで，フレッシュモルタルの流動性低下が抑制でき，モルタルフロー値の経時変化量が直応力設定値 200 kPa の際の，練上がり直後から 180 分後までの水平変位 8 mm 時のせん断強度の増加量と相関を示した。

## 第6章 結論

本研究は、セメントの接水・コンクリートの練混ぜからの時間経過や砂糖添加の有無に応じて変化する水和反応の進行度を定量化し、水和反応の進行がフレッシュモルタルの自己充填性能に及ぼす影響を解明することを目的としたものである。水和反応の進行は、セメント粒子表面の水和生成物量の増加を測定可能な比表面積の測定により定量化することができた。砂糖の添加による水和反応の進行抑制は、自己充填コンクリートの間隙通過性能の構成要素の一つとして想定されるせん断変形抵抗性を測定する粘度値の時間経過後の上昇を抑制した。一方、同じく構成要素として想定される直応力でのせん断強度に大きな影響は与えていないことが明らかとなったが、モルタルの動き出し後の動摩擦力の時間経過後の上昇抑制に効果的であった。得られた知見を以下に示す。

- (1) 練上がりから 180 分後までは水和反応の初期段階であり、セメント粒子表面の水和生成物量の増加を測定する比表面積の測定結果は水和反応の進行度に応じて差が出たが、粒子同士の凝集を測定する粒度分布には明確な差が表れなかった。また、比表面積の測定結果である BET 比表面積が、練混ぜ方法や増粘剤添加の有無ごとに、時間経過や砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いに応じて変化する。また、ロート流下速度と高い相関を示した。
- (2) 水和反応の進行度を定量的に測定した BET 比表面積とせん断変形抵抗性を測定する粘度値に相関が見られ、水和反応の進行抑制によりせん断変形抵抗性の上昇抑制効果があった。粘度値は、各練混ぜ方法で練上がり直後から 180 分後までの 60 分ごとのロート流下速度と相関があり、比表面積を測定した練上がり直後と 180 分後で練混ぜ方法と増粘剤添加の有無ごとに分けた場合、ロート流下速度と非常に高い相関を示した。
- (3) 砂糖添加の有無による水和反応の進行度の違いでは、練上がりから 120 分後までのせん断強度に大きな違いは見られなかった。一方、粘性付与効果のある増粘剤を添加すると、時間経過後にせん断強度が増加した。さらに、砂糖・増粘剤の両方を添加することでせん断強度の増加量が最も大きくなった。また、砂糖の添加による水和反応の進行抑制はフレッシュモルタルの流動性低下を抑制し、時間経過後の直応力設定値 200 kPa の際の動き出し後のせん断強度の増加を抑制した。

本研究で測定を行った全 8 パターンの粘度値と直応力設定値 200 kPa 際のせん断強度の練上がり直後から 180 分後の時間経過による増加量の関係を図-6.1 に示し、本研究の測定結果について述べる。砂糖を添加したものは無添加のものと比較して粘度値の上昇を抑制していた。せん断強度の増加量は、砂糖添加の有無による水和反応の進行ではなく、粘性付与効果のある増粘剤添加の影響が大きかった。練混ぜ方法の違いによる影響は、せん断強度ではほとんど見られなかったが、粘度値は一括練りより分割練りの方が粘度値の上昇量が大きくなった。

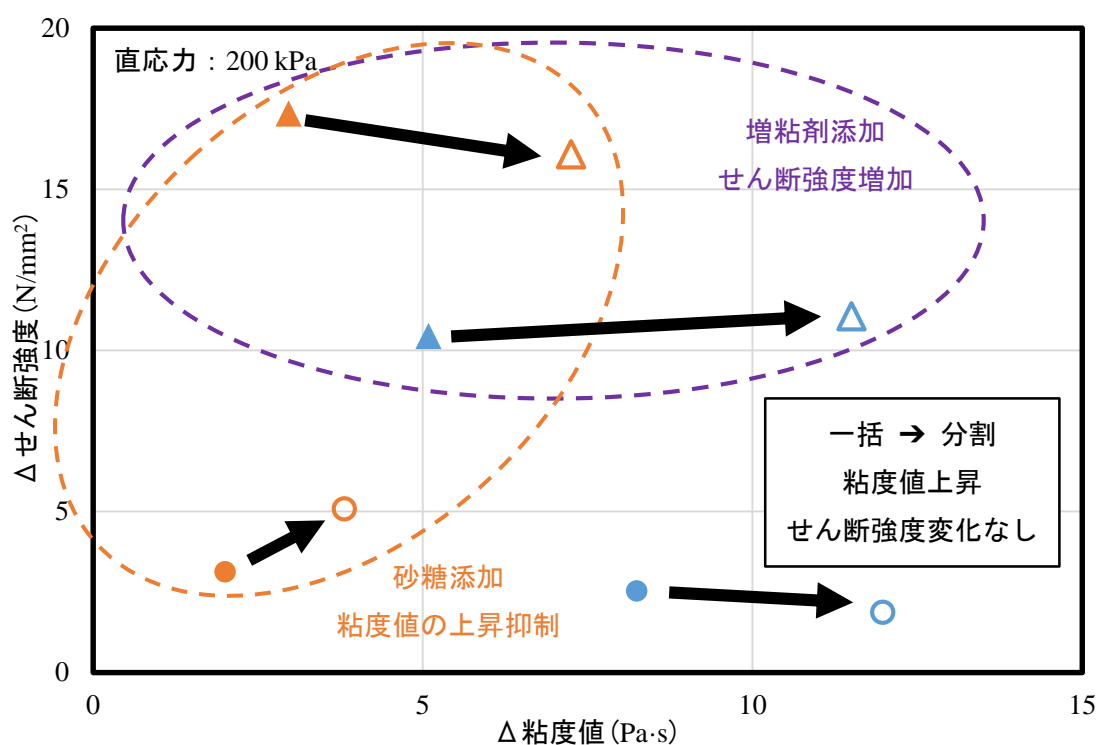


図-6.1 全 8 パターンでの時間経過による粘度値とせん断強度の増加量の関係

今後の課題として以下のことが挙げられる。

本研究では、砂糖添加による水和反応の進行抑制効果が自己充填性能に及ぼす影響について、フレッシュモルタルでの簡易的な試験及び測定方法により評価した。そのため、フレッシュコンクリートで試験を行い、評価する必要がある。また、水和反応の進行抑制方法として主成分がスクロースであるグラニュー糖を添加したが、その他の凝結遅延剤などによる検討を行うことで、添加する遅延剤の種類ごとの自己充填性能への影響を明らかにすることが可能であると予想される。

## 参考文献

- 1) 竹内 徹, 長瀧重義: 超遅延剤を用いたコンクリートの特性, コンクリート工学, Vol.37, No.11, pp.9-19, 1999.11
- 2) Agus Santosa Sudjono : ポルトランドセメントの複合水和反応と組織形成モデルに関する研究, 早稲田大学博士論文, pp.26-53, 2003.2
- 3) 大内雅博・枝松良展・小澤一雅・岡村甫: 自己充填コンクリート中の粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法, コンクリート工学会年次論文報告集, Vol21, No2, 1999.6
- 4) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 5) 福田翔太, 大内雅博: フレッシュコンクリートの間隙通過性を支配するモルタルの固体粒子間摩擦の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
- 6) 土の試験実習書改訂編集委員会: 土の試験実習書, 土質工学会, 1991
- 7) セメント協会セメント化学専門委員会: セメント水和物や硬化体の水和停止方法の検討, (一社)セメント協会研究所, pp.25, 2008.2

## 謝辞

本研究に際して、多くの方々の多大なる御協力を頂きましたことを心より感謝申し上げます。

本論文の作成にあたり、大内 雅博先生(高知工科大学教授)、西内 裕晶先生(高知工科大学准教授)、曾我部 敏郎先生(現高知工科大学技術指導員、(株)CDR コンサルタンツ専務取締役)、矢野 雄也氏(高知県工業技術センター資源環境課)、洲本 高志氏((株)島津製作所分析計測事業部)、小河 美紗都氏((株)島津製作所分析計測事業部)、道下 晃氏((株)島津製作所分析計測事業部)には、数多くの貴重な御助言、御指導を頂きました。ここに謹んで御礼申し上げます。

大内先生には、入学時から気にかけてくださり、コンクリート研究室に配属されて以来、国内外の学会発表の機会を頂き、締切り直前まで徹底的な御指導を賜り、最後まで物事をやり遂げることの大切さを御教示くださいました。また、様々な建設現場や建材の製造施設の見学等、大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

西内先生には、修士論文の副指導教員として広い見地からのご意見や的確なご指摘を頂きました。また、学年担任としても大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

曾我部先生には、コンクリートに関するお話から実験方法の相談等、親身になって教えて頂きました。心より御礼申し上げます。

矢野 雄也氏、洲本 高志氏、小河 美紗都氏、道下 晃氏には、本研究の測定の一部を行って頂き、数多くの御教授も頂戴しました。心より御礼申し上げます。

本論文の研究を行うにあたって、今まで試行錯誤をして研究の形を作ってくださった先輩方、共に研究を行ってきたコンクリート研究室のメンバーには、心より感謝しています。

最後に、大学・大学院と6年間にわたり多方面で支えてくださった家族に対し心より感謝申し上げます。

以上のように、多くの方々の力添えのもと本研究を進めてくることができました。この場をお借りして皆様に感謝の意を表します。

2021年1月 和田 晃宜