

2020 年度修士論文

フレッシュコンクリートの自己充填性の  
評価のためのフレッシュモルタルの  
粘着力の定量化

Measurement of adhesion force of fresh mortar for  
self-compacting performance of fresh concrete

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 佐藤 慎司

副審査委員 赤塚 慎

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

1235005 佐藤 奨

2021 年 1 月

# フレッシュコンクリートの自己充填性の評価のためのフレッシュモルタルの粘着力の定量化

佐藤 奨

## 要旨

経済性を高めた高い水セメント比のフレッシュコンクリートは低粘性のため、モルタルと粗骨材の分離により、粗骨材同士の接触摩擦が増加し自己充填性が低下する。特に、間隙通過時にはモルタルのみが先行して流動することにより、粗骨材による閉塞が生じる。フレッシュモルタルから粗骨材が分離する要因として、モルタルの変形によるものと、モルタルと粗骨材の間の滑りによるものが複合的に生じているため、フレッシュモルタルと粗骨材の分離抵抗性を評価する上で、フレッシュモルタルと粗骨材の相対運動方向に対して変形を伴う粘着剤としての剥離抵抗性である粘着力による評価が適切である。

本研究では、フレッシュモルタルの粘性を、モルタル中の流動抵抗性である粘度と粗骨材とモルタルの固液界面を安定させ剥離を抑制することで変形の一体性を付与する粘着力の二種類の要素から構成されるものとした。粘着力は流動性を低下させず粗骨材の分離抵抗性を向上させる可能性があり、フレッシュモルタルの粘着力を定量化することで、自己充填性に有利なモルタル配合を評価できる。そのため、粘性を簡易的に定量化できる回転粘度計を応用し、ローターとモルタルが剥離する際の抵抗力を測定することによりフレッシュモルタルの粘着力の定量化法を構築した。

回転粘度計による剥離試験は、ローターへの付着度の影響を大きく受けることがわかったため、**1.0 rpm** で **300** 秒間回転させることで付着度を確保し、その後回転速度を上昇させることで剥離を生じさせる試験法をフレッシュモルタルの粘着力の定量化法とした。剥離強度は剥離速度に依存し、**10 rpm** 以上の回転速度で新型増粘剤による剥離強度の向上を確認し、回転速度 **100 rpm** 時において新型増粘剤によるフレッシュモルタルの粘着力の向上を確認した。そして、高粘着力による粗骨材の分離抑制効果は高流動速度の際により有効である可能性を得た。回転速度をさらに高速にできれば、粘着力が支配要因である剥離強度を測定できる可能性がある。また、漏斗流下速度比 **Rm** は高回転速度の時の剥離強度及び粘度との相関が高いことを示した。

フレッシュコンクリートの間隙通過試験により、新型増粘剤による剥離強度と粘度の向上により自己充填性が向上した。また、剥離強度と粘度が同程度であるが自己充填性に大きな差が生じた配合では、間隙通過試験後のコンクリート表面の比較により、フレッシュモルタルと粗骨材の一体流動性に差が生じていることを確認した。

# Measurement of adhesion force of fresh mortar for self-compacting performance of fresh concrete

Sho Sato

## ABSTRACT

Fresh concrete with a high water-cement ratio that enhances economic efficiency has low viscosity. Therefore, the separation of the mortar and the coarse aggregate increases the contact friction between the coarse aggregates and has lower self-compacting performance. In particular, when passing through the obstacles, only the mortar flows first. The factors that separate the coarse aggregate from the fresh mortar are a combination of deformation of the mortar and slippage between the mortar and the coarse aggregate. Therefore, in order to evaluate the separation resistance of the fresh mortar and the coarse aggregate, it is appropriate to measure the adhesive force, which is the peel resistance of the adhesive that is deformed with respect to the phase-relative movement direction of the fresh mortar and the coarse aggregate.

In this study, the viscosity of fresh mortar was used as two components, degree of viscosity and adhesive force. Degree of viscosity is the flow resistance in mortar, and adhesive force stabilizes the solid-liquid interface and mitigates the peeling of coarse aggregate and mortar, thereby imparting deformation integrity. The adhesive force can improve the separation resistance of the coarse aggregate without lowering the fluidity. And mortar of composition that is advantageous for self-compacting performance can be designed by measuring the adhesive force of the fresh mortar. Therefore adhesive force of fresh mortar was measured by measuring the resistance when the rotor and mortar peeled off by applying rotational viscometer that can easily quantify the viscosity.

In the peeling test by rotational viscometer, it was found that the degree of adhesion to the rotor was greatly affected. Therefore, the degree of adhesion was secured by rotating at 1.0 rpm for 300 seconds. After that, the adhesive force of the fresh mortar was measured by causing peeling by increasing the rotation speed. Then, the peeling strength depends on the peeling speed, and the effect of applying the adhesive force by viscosity modify agent was confirmed at a rotation speed of 10 rpm or more. It was also confirmed that VMA improved the adhesive force of fresh mortar at the peel strength at a rotation speed of 100 rpm. And it was obtained that the effect of mitigating the separation of the coarse aggregate due to the high adhesive force may be highly effective at a high flow speed. If higher rotation speeds can be measured, it can be to measure peel strength, which is dominated by adhesive force. It was also shown that

the funnel flow rate ratio  $R_m$  obtained by the mortar funnel test has a high correlation with the adhesive force and degree of viscosity at high rotation speed.

In the gap passage test of fresh concrete, the high peel strength and degree of viscosity by VMA improved the self-compacting performance. On the other hand, there were similar formulations in which the peel strength and degree of viscosity, but the self-compacting performance was significantly different. However, when comparing the concrete surfaces after the gap passage test, it was confirmed that there was a difference in the integrated fluidity of the fresh mortar and the coarse aggregate.

# 目次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 フレッシュコンクリートの材料分離抑制に関する既往研究と課題 .....	4
1.3 フレッシュモルタルの粘着力の定量化の必要性 .....	6
1.4 本研究の目的 .....	8
第 2 章 フレッシュモルタルの粘着力の定量化法の構築 .....	10
2.1 使用材料 .....	10
2.2 配合及び練り混ぜ方法 .....	11
2.3 回転粘度計による粘度の測定方法 .....	13
2.4 粘着力の定量化への回転粘度計の活用法 .....	14
2.5 回転粘度計を活用した粘着力の定量化法 .....	16
第 3 章 フレッシュモルタルの剥離強度の測定 .....	20
3.1 剥離強度の速度依存性 .....	20
第 4 章 フレッシュモルタルの粘性の評価試験結果の比較 .....	23
4.1 回転粘度計による粘着力の定量化法の独立性 .....	23
4.2 従来の粘性の評価試験との比較 .....	26
第 5 章 粘着力によるフレッシュコンクリートの自己充填性の向上効果の検証 .....	31
5.1 VMA による自己充填性の向上 .....	31
5.2 粘性による自己充填性への向上 .....	32
第 6 章 結論 .....	35
付録 .....	36
付録 1 VMA によるチクソトロピー性への影響 .....	36
付録 2 フレッシュモルタルの粘性と固体粒子間摩擦 .....	41
参考文献 .....	51
謝辞 .....	52

## 目次

図-1.1	間隙通過時に生じる閉塞	2
図-1.2	VMAによる自己充填性の向上	2
図-1.3	VMAによるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与	3
図-1.4	モルタルの変形と滑りによる粗骨材の分離	5
図-1.5	粘着力によるモルタルと粗骨材の分離抑制	5
図-1.6	水平摩擦試験機による摩擦力の測定	7
図-1.7	水平摩擦試験による粘着力の測定	7
図-1.8	回転粘度計による摩擦力の測定	9
図-1.9	粗骨材の分離抑制効果の観点より定義した粘性の構成要素	9
図-2.1	モルタルミキサ	11
図-2.2	コンクリートミキサ	11
図-2.3	回転粘度計の粘度測定の原理	13
図-2.4	粘度測定における剥離現象	15
図-2.5	せん断流における再循環領域	15
図-2.6	ローターにモルタルを十分に付着させることにより剥離点を明瞭にする	16
図-2.7	W/C=45%におけるせん断変形の安定	17
図-2.8	W/C=35%におけるせん断変形の安定	18
図-2.9	回転粘度計による剥離試験法	19
図-3.1	TVB-15形粘度計による剥離強度測定結果	21
図-3.2	TVB-15形粘度計による回転速度100rpm時の剥離強度測定結果	21
図-3.3	TVB-25形粘度計による剥離強度測定結果	22
図-4.1	回転速度20rpm時の粘度と剥離強度の関係	24
図-4.2	回転速度50rpm時の粘度と剥離強度の関係	24
図-4.3	回転速度100rpm時の粘度と剥離強度の関係	25
図-4.4	各速度における粘度と剥離強度の相関	25
図-4.5	Rmと回転速度20rpm時の剥離強度の関係	27
図-4.6	Rmと回転速度50rpm時の剥離強度の関係	27
図-4.7	Rmと回転速度100rpm時の剥離強度の関係	28
図-4.8	Rmと回転速度20rpm時の粘度の関係	28
図-4.9	Rmと回転速度50rpm時の粘度の関係	29
図-4.10	Rmと回転速度100rpm時の粘度の関係	29
図-4.11	各速度におけるRmと剥離強度の相関	30
図-4.12	各速度におけるRmと粘度の相関	30
図-5.1	新型増粘剤による自己充填性の向上	31

図-5.2	回転速度 100rpm 時の剥離強度と自己充填性の関係	32
図-5.3	回転速度 100rpm 時の粘度と自己充填性の関係	33
図-5.4	Rm と自己充填性の関係	33
図-5.5	高粘性を付与する VMA による粗骨材とモルタルの一体流動の観測	34
図-5.6	回転速度と剥離強度の関係	34
図-付録 1.1	チクソトロピー性の測定結果	37
図-付録 1.2	TI 値と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係	37
図-付録 1.3	TI 値と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係	38
図-付録 1.4	TI 値と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係	38
図-付録 1.5	TI 値と回転速度 20rpm 時の粘度の関係	39
図-付録 1.6	TI 値と回転速度 50rpm 時の粘度の関係	39
図-付録 1.7	TI 値と回転速度 100rpm 時の粘度の関係	40
図-付録 1.8	TI 値と Rm の関係	40
図-付録 2.1	粘性と固体粒子間摩擦の関係	42
図-付録 2.2	一面せん断試験機	42
図-付録 2.3	一面せん断試験のイメージ	43
図-付録 2.4	一面せん断試験によるせん断強度の測定結果	43
図-付録 2.5	直応力 200kPa と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係	44
図-付録 2.6	直応力 200kPa と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係	44
図-付録 2.7	直応力 200kPa と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係	45
図-付録 2.8	直応力 200kPa と回転速度 20rpm 時の粘度の関係	45
図-付録 2.9	直応力 200kPa と回転速度 50rpm 時の粘度の関係	46
図-付録 2.10	直応力 200kPa と回転速度 100rpm 時の粘度の関係	46
図-付録 2.11	直応力 200kPa と Rm の関係	47
図-付録 2.12	直応力 300kPa と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係	47
図-付録 2.13	直応力 300kPa と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係	48
図-付録 2.14	直応力 300kPa と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係	48
図-付録 2.15	直応力 300kPa と回転速度 20rpm 時の粘度の関係	49
図-付録 2.16	直応力 300kPa と回転速度 50rpm 時の粘度の関係	49
図-付録 2.17	直応力 300kPa と回転速度 100rpm 時の粘度の関係	50
図-付録 2.18	直応力 300kPa と Rm の関係	50

## 表目次

表-2.1	使用材料 .....	10
表-2.2	モルタル配合 .....	12
表-2.3	コンクリート配合 .....	12



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

コンクリート構造物は施工過程において人為的要因により耐久性・信頼性に大きく影響される。そのため振動締固めが不要な自己充填コンクリート（**Self-Compacting concrete** : 以下 **SCC**）が開発された。

フレッシュコンクリートの自己充填性は主に間隙通過性として評価される。間隙通過性が低い **SCC** では間隙で閉塞が生じ充填不良となる。この時生じる閉塞には、主にモルタルによる閉塞と粗骨材による閉塞の二種類がある（図-1.1）。間隙通過時に流動するフレッシュモルタルはせん断変形するが、これに対する抵抗性が過剰に高いと閉塞が生じる。この問題は軟度不足によるものであり、単位水量の増加や減水剤の添加により十分な軟度を確保することで解決できる。一方で、単に軟度を高めることは低粘性となりモルタルと粗骨材の分離が生じ、粗骨材同士の接触摩擦が増加し流動性が低下する。特に、間隙通過時にはモルタルのみが先行して流動することにより、粗骨材による閉塞が生じる。よって、**SCC** では粗骨材間の衝突を回避し十分な自己充填性を得るために、適度な軟度と粘性の両方を持つ低い水セメント比のモルタルの設計が必要とされてきた<sup>1)</sup>。

しかし、高強度を必要としない一般的な構造物に対しては、自己充填性と材料分離抵抗性を付与する為に高い単位セメント量を必要とする **SCC** は過剰な強度と高価である点から普及が妨げられている。そのためトレードオフの関係にある強度と価格の関係を一定水準まで抑える必要がある。すなわち、自己充填性を維持しつつ、単位セメント量を削減し水セメント比を高める必要がある。

近年、セルロースを原料とした低分子量の新型増粘剤（以下 **VMA**）が開発された<sup>2)</sup>。この **VMA** を添加すると水セメント比 **45%** に高めたフレッシュコンクリートにおいて、最高レベルの自己充填性を得ることができた（図-1.2）<sup>3)</sup>。また、**VMA** を添加した場合、ボックス試験後に上昇したコンクリート表面を観測すると、モルタルと粗骨材が分離せずに一体となって流動したことが確認されている（図-1.3）。しかし、そのメカニズムは定量的には説明されていない。

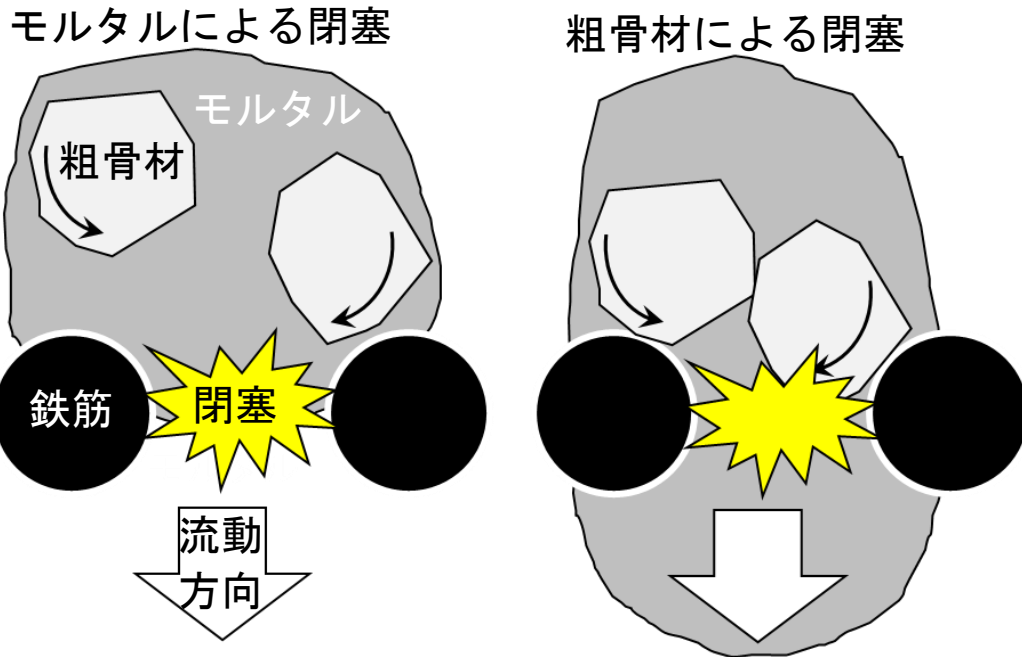


図-1.1 間隙通過時に生じる閉塞

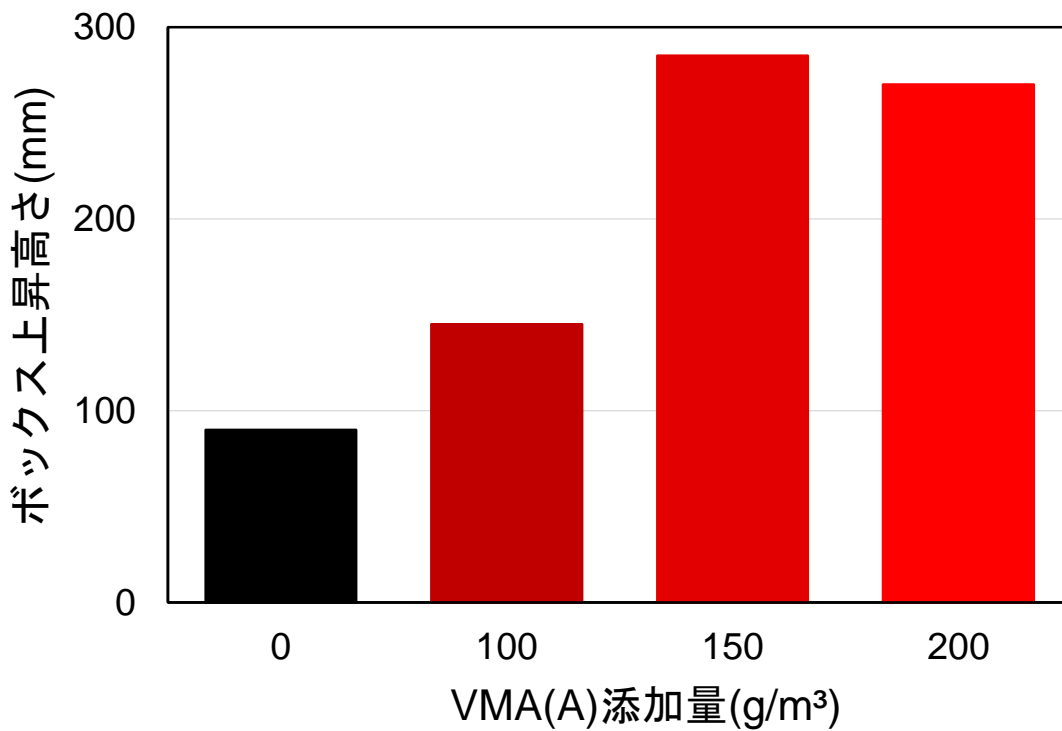


図-1.2 VMAによる自己充填性の向上

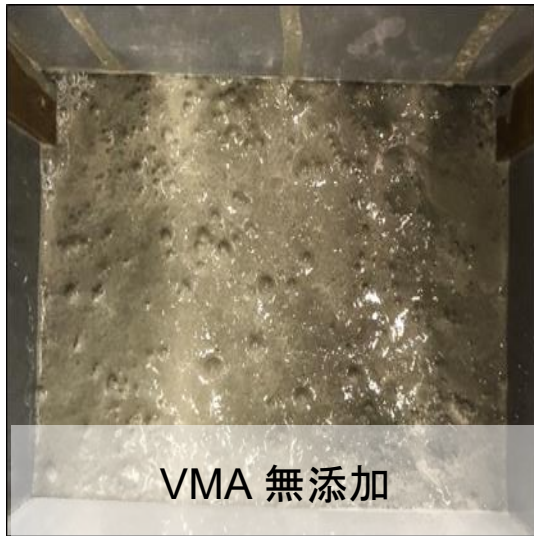


図-1.3 VMAによるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与

## 1.2 フレッシュコンクリートの材料分離抑制に関する既往研究と課題

高流動コンクリートにおける材料分離抑制に関して、モルタル漏斗試験や粘度計を用いた粘性による評価の研究が数多くされてきている。モルタルと粗骨材の分離抵抗性の定量化に関しては、変形性や変形速度などモルタルの変形抵抗性が重要な要素とされてきた。井上は、鉄板を鉛直方向に引き上げた際のフレッシュモルタルの引張り強さを付着力として測定し、モルタルの粘性と付着性は独立したものであり、高流動コンクリートが鉄筋間を通過する際のモルタルと粗骨材の分離抵抗性は、レオロジー定数だけでなく粗骨材との付着性を考慮する必要があると、粘性と付着性の双方を考慮することで間隙通過性を良好に評価できる可能性があることを報告している<sup>4)</sup>。

文献<sup>5)</sup>によると、モルタルから粗骨材が分離する要因として、モルタルの変形によるものと、モルタルと粗骨材の間の滑りによるものがあり、実際のほとんどはこれらが複合的に生じている(図-1.4)。一般的に、前者はモルタルの変形抵抗性、後者はモルタルの滑り抵抗性が有効であり、変形抵抗性は粘性、滑り抵抗性は付着性が支配的要因とされている。

コンクリート中のモルタルと粗骨材の分離は相対運動であり、モルタル中を移動する粗骨材の流動抵抗性と粗骨材表面を移動するモルタルの流動抵抗性の双方を定量化することで分離抵抗性により自己充填性を良好に評価できると考えられる。付着力の測定に関しては、面外の剥離試験法でありフレッシュモルタルと粗骨材の相対運動方向に対し変形を伴わない剥離抵抗性を定量化しているため、相対運動方向に対して変形を伴う剥離抵抗性である粘着力を評価することが望ましい(図-1.5)。つまりモルタルの剥離抵抗性を定量化するためには面内方向の剥離試験法が適切と言える。

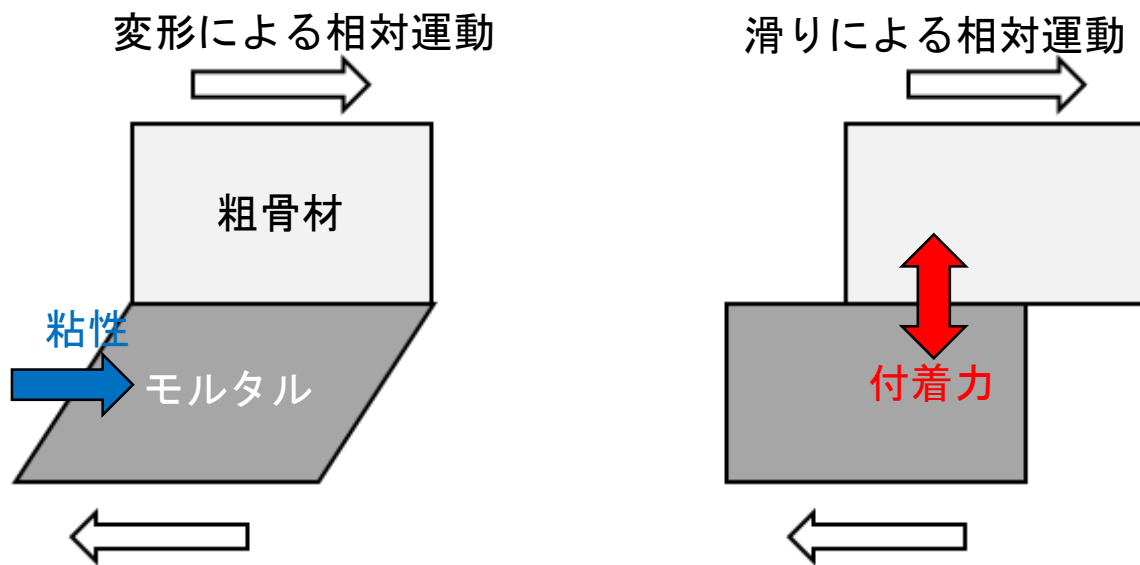


図-1.4 モルタルの変形と滑りによる粗骨材の分離

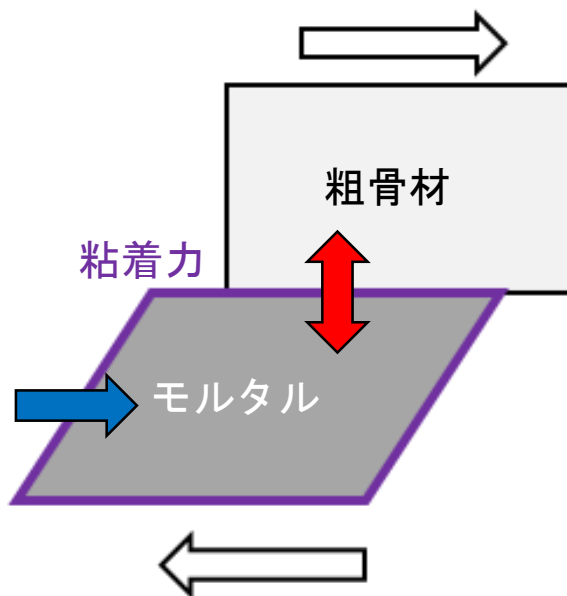


図-1.5 粘着力によるモルタルと粗骨材の分離抑制

### 1.3 フレッシュモルタルの粘着力の定量化の必要性

毛利は、円柱容器に充填した試料を固定面上で水平移動させる時の摩擦力を計測する水平摩擦試験機により、水平摩擦試験によるペーストの粘着力の定量化法を開発した(図-1.6)<sup>6)</sup>。粘着力は「固定台に粘着した試料が水平荷重を載荷した際に剥離するために必要な力」と定義されており、最大静摩擦力を接触面積で除した値を剥離強度として粘着力の指標としている。また、同研究において、VMAによるペースト相への粘着力付与効果とともに高粘着力により自己充填性が向上したことを報告している。しかし、セメントペーストはコンクリートからの直接測定することが困難であり、細骨材拘束水比を考慮したそれ相応の水セメント比を持つと考えられるペースト配合を用いるため、粘着力の評価にかなりの労力を要する。また、別途練り混ぜたペーストは実際のコンクリートの評価とは言い難く、コンクリート中から直接測定したモルタルの粘着力を評価することが適切である。しかし、水平摩擦試験機を用いたフレッシュモルタルの粘着力の測定では、モルタル中の材料分布の影響を受け、固定面とモルタルの接触面に存在する細骨材の摩擦を計測してしまうため、フレッシュモルタルの最大静摩擦力を確認することができない(図-1.7)。

自己充填性を支配するフレッシュモルタルの性能を正しく評価することは、SCCの配合設計において必要不可欠である。せん断変形により流動するフレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を評価する上で、フレッシュモルタルの変形抵抗性と滑り抵抗性を考慮した分離抵抗性である粘着力を定量化することで、自己充填性に有利なモルタル配合を設計することができる。よって、材料分布の影響を受けにくいフレッシュモルタルの粘着力の定量化法が別途必要である。

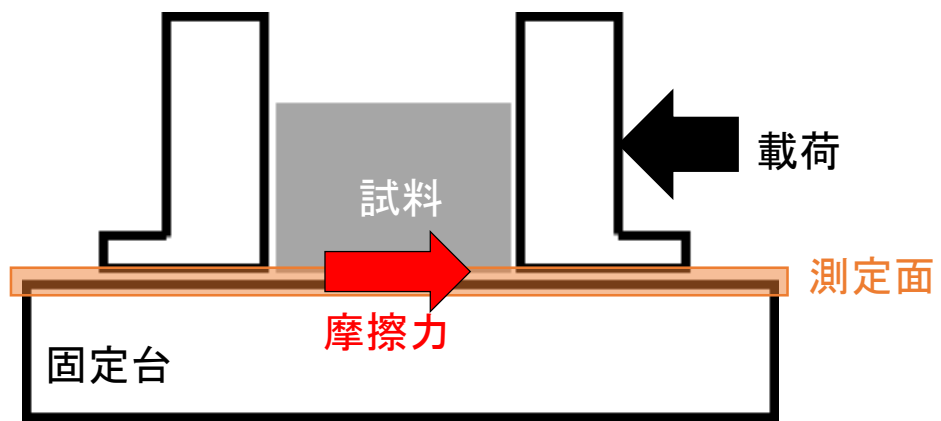


図-1.6 水平摩擦試験機による摩擦力の測定

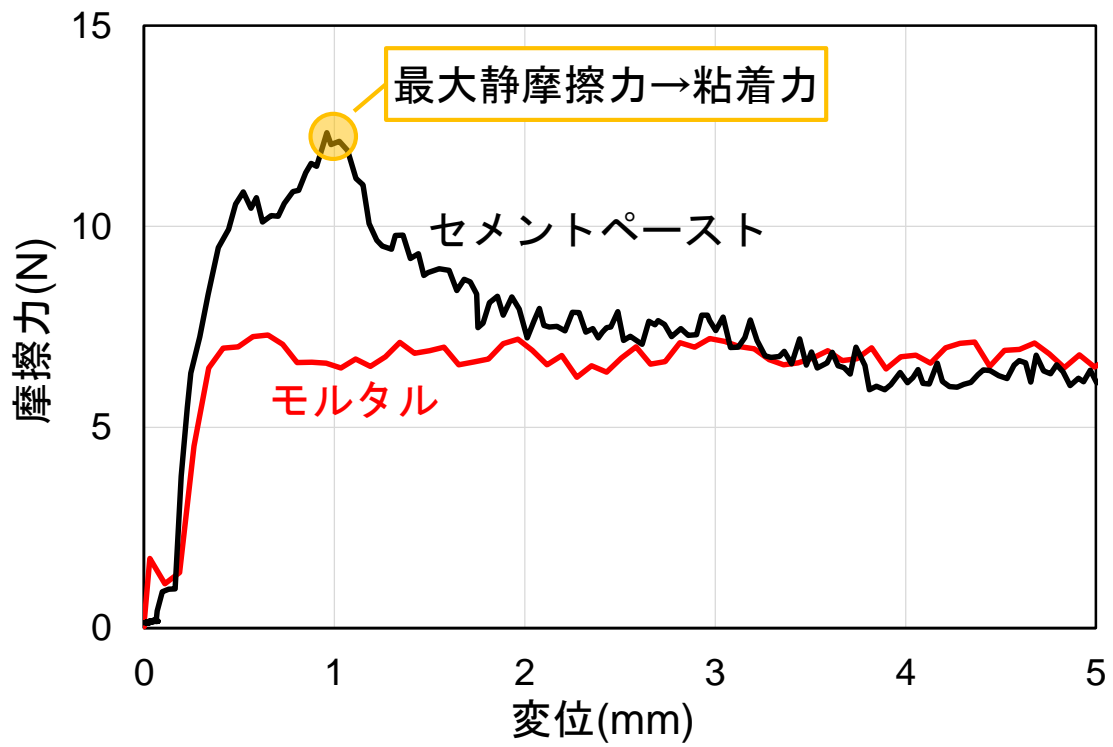


図-1.7 水平摩擦試験による粘着力の測定

#### 1.4 本研究の目的

本研究では、フレッシュモルタルの粘着力の定量化のために、図-1.8のように測定面が鉛直面で比較的材料分布の影響を受けにくいと考えられる回転粘度計の応用を検討した。文献では、回転粘度計によるモルタルの粘度測定において、一般に用いられる金属製のローターでは表面でモルタルが滑ることを報告しており<sup>7)</sup>、このことを活用しローターとモルタルが剥離する際の抵抗力を測定することによるフレッシュモルタルの粘着力の定量化法を構築した。そして、高粘着力付与が期待できる複数種類の VMA による自己充填性への影響を調べた。

そして、モルタルと粗骨材の分離現象をそれぞれの流動挙動の観点から、分離抵抗性を付与するフレッシュモルタルの粘性を、モルタル中の流動抵抗性である粘度と粗骨材とモルタルの固液界面を安定させ分離を抑制することで変形の一体性を付与する粘着力の二種類の要素から構成されるものとした(図-1.9)。過度な粘度は流動性を低下させるが、粘着力は粗骨材とモルタル間の境界面の分離抵抗力であるため流動性に影響せず粗骨材の分離抵抗性を向上できる可能性がある。

以上より、本研究の目的をフレッシュモルタルの粘着力の定量化法を構築することと、その粘着力が粘度と独立であることを明らかにすることとした。



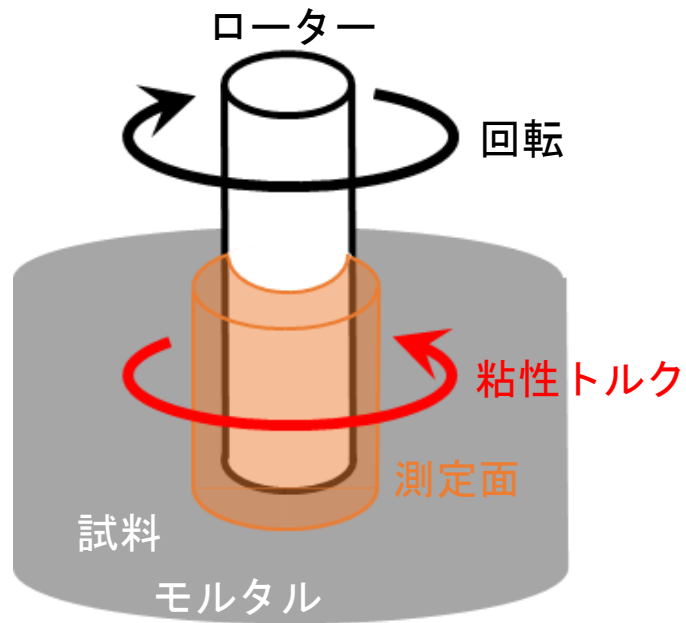


図-1.8 回転粘度計による摩擦力の測定

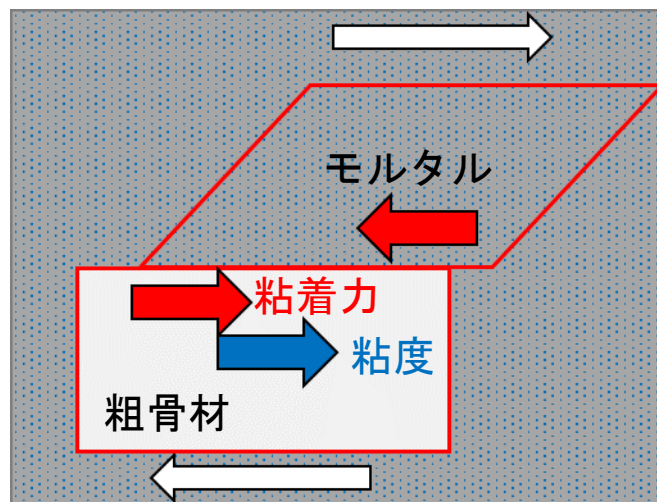


図-1.9 粗骨材の分離抑制効果の観点より定義した粘性の構成要素

## 第2章 フレッシュモルタルの粘着力の定量化法の構築

### 2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-2.1 に示す。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。VMA は水溶性セルロースエーテル系のものを使用した。

表-2.1 使用材料

種類	記号	銘柄, 物理特性
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/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	石灰砕砂 密度:2.68 g/m <sup>3</sup> , 粗粒率:2.63 粒径判定実積率 55.3 %
粗骨材	G	石灰碎石 表乾密度:2.70 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.25 % 実積率:60.1 %
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)
増粘剤	VMA	低分子量セルロースエーテル系増粘剤
消泡剤	D	ポリエーテル系
AE 剤	AE	変形ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤

## 2.2 配合及び練り混ぜ方法

本研究の配合を表-2.2, 表-2.3 に示す。モルタル試験では, VMA による連行空気の影響を小さくするために消泡剤を添加した(添加量は VMA 添加量×25%)。モルタル及びコンクリートの練り混ぜ方法は, 粉体材料の偏りを無くすために 30 秒間空練りをした後, 水 (SP, AE 含む) を加え 60 秒間練り混ぜをした。そして, 練り混ぜから 10 分間静置後, 切り返し作業を行ってから各試験を行った。VMA の基本添加量はコンクリート配合で  $200 \text{ g/m}^3$  とし, 基本モルタルフロー値は  $270 \pm 10 \text{ mm}$  になるように減水剤の添加量を調整した。

モルタルの練り混ぜには図-2.1 のモルタルミキサ(練混ぜ速度: 低速, 自動速度: 毎分  $140 \pm 5$  回転, 公転速度: 毎分  $62 \pm 5$  回転)を使用し, コンクリートの練り混ぜには図-2.2 の二軸強制練りミキサを使用した。練り混ぜ量は, モルタルは 1.6 L, コンクリートは 30 L とした。



図-2.1 モルタルミキサ



図-2.2 コンクリートミキサ

表-2.2 モルタル配合

W/C (%)	s/m (%)	減水剤 (C×%)	増粘剤		消泡剤 (g/m³)	単位量(kg/m³)		
			種類	添加量(g/m³)		W	C	S
45	55	1.0~1.4			71	264	586	1474
		1.4~1.5	A	143				
		1.6~1.9		286				
		1.6~1.9	B					
		1.8~2.2	C					
35		2.2~2.6				236	674	1474

表-2.3 コンクリート配合

W/C (%)	s/m (%)	減水剤 (C×%)	増粘剤		AE 剤 (C×%)	単位量(kg/m³)			
			種類	添加量(g/m³)		W	C	S	G
45	55	1.3~1.5			0.005	185	410	1032	810
		1.5~1.8	A	200					
		1.6~2.6	B						
		1.8~3.0	C						

### 2.3 回転粘度計による粘度の測定方法

回転粘度計は流体の粘度を簡易的に定量化することができる。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。本研究では 10 rpm 以下の測定では TVB-15, 20 rpm 以上の測定では TVB-25 形粘度計 (いずれも東機産業製) を使用した。これらの回転粘度計は, ローターの回転により発生する粘性トルクによるトーションワイヤの捩れ角を測定することにより指度値又は粘度値を算出する (図-2.3)。また, ローターの種類と回転速度によりずり速度が決定され, 粘度値とずり速度により, ずり応力値が自動計算される。

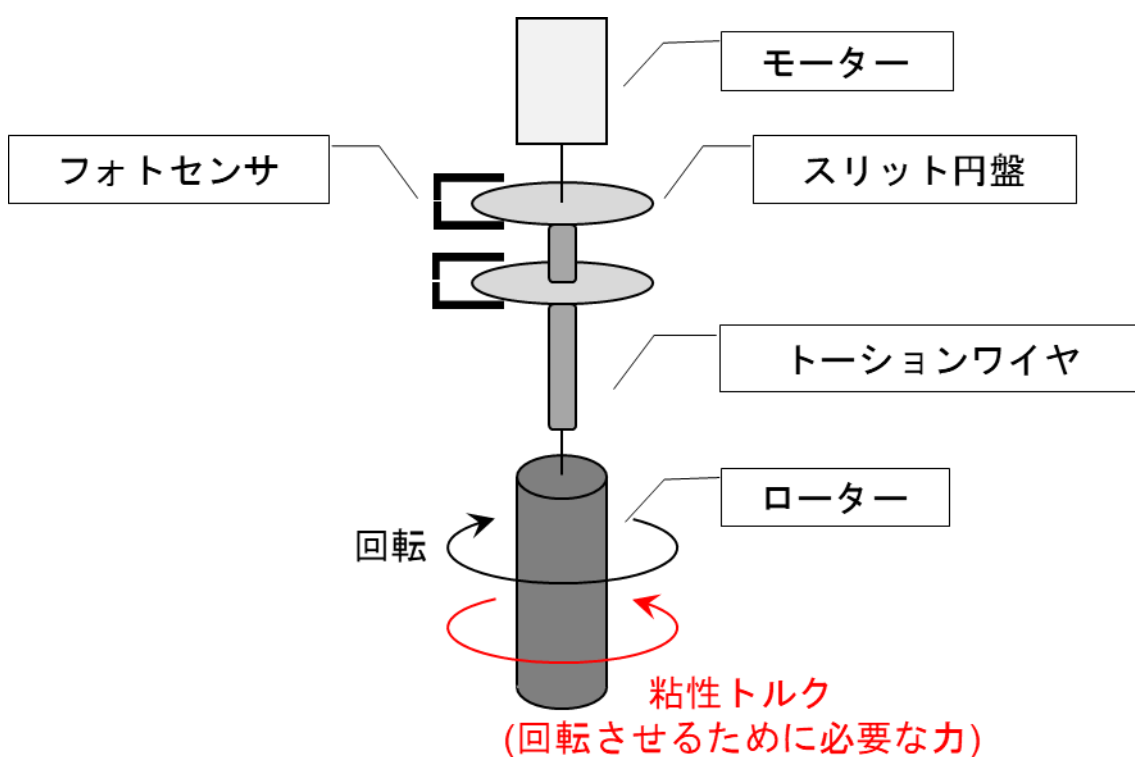


図-2.3 回転粘度計の粘度測定の方法

## 2.4 粘着力の定量化への回転粘度計の活用法

回転粘度計は、ニュートン流体と非ニュートン流体とで測定時間に対する粘度の挙動が異なる。一例として、ニュートン流体である蜂蜜と非ニュートン流体であるフレッシュモルタルの測定時間とずり応力の測定結果を示す（図-2.4）。蜂蜜は測定開始後に一定の値に収束したが、モルタルは最大ずり応力値から減少し一定の値に収束した。これはローターに付着したモルタルが最大ずり応力点で剥離し、剥離の進行と共に抵抗値が減少したものと想定した。そして、ずり応力が一定値となる領域は回転するローターがモルタル中を滑っており、モルタルの剥離と再付着の進行が同程度である再循環領域であると判断した（図-2.5）。ローターの回転を分離した粗骨材の滑りと見立てた場合、ここで得られる最大ずり応力点が粗骨材がモルタル表面を滑り始める瞬間であり、モルタルが粗骨材表面を動き始めるために必要な力、つまり粘着力であり、剥離強度と定義して定量化した。

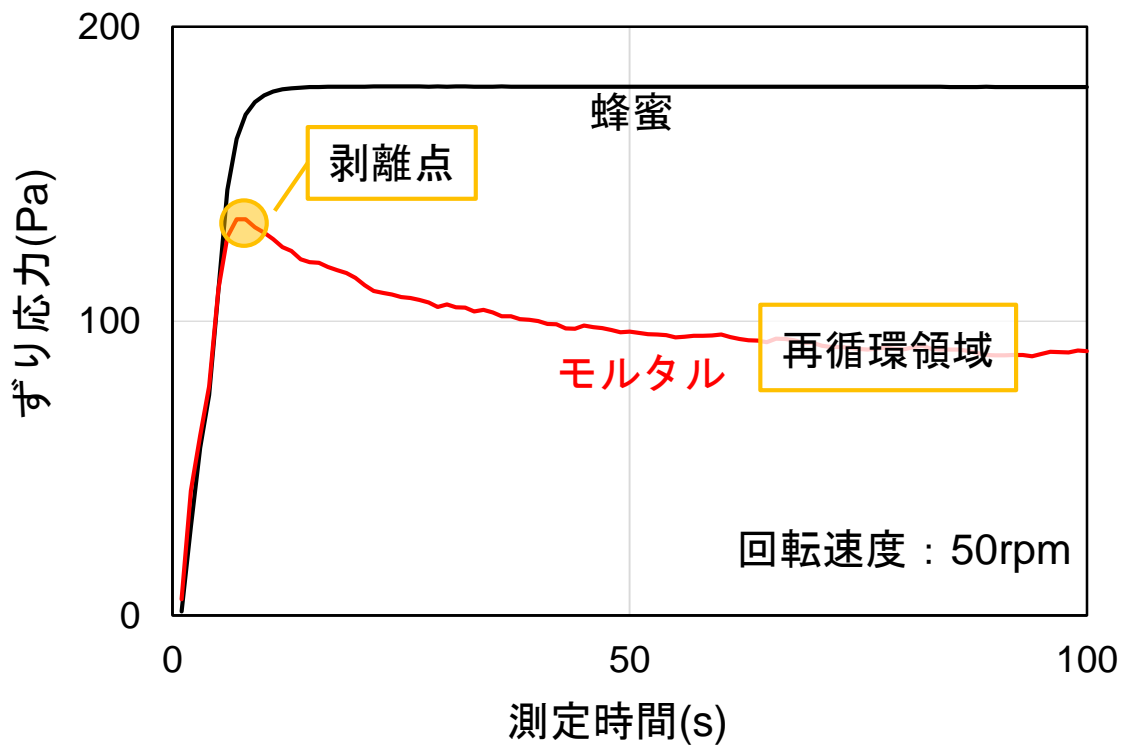


図-2.4 粘度測定における剥離現象

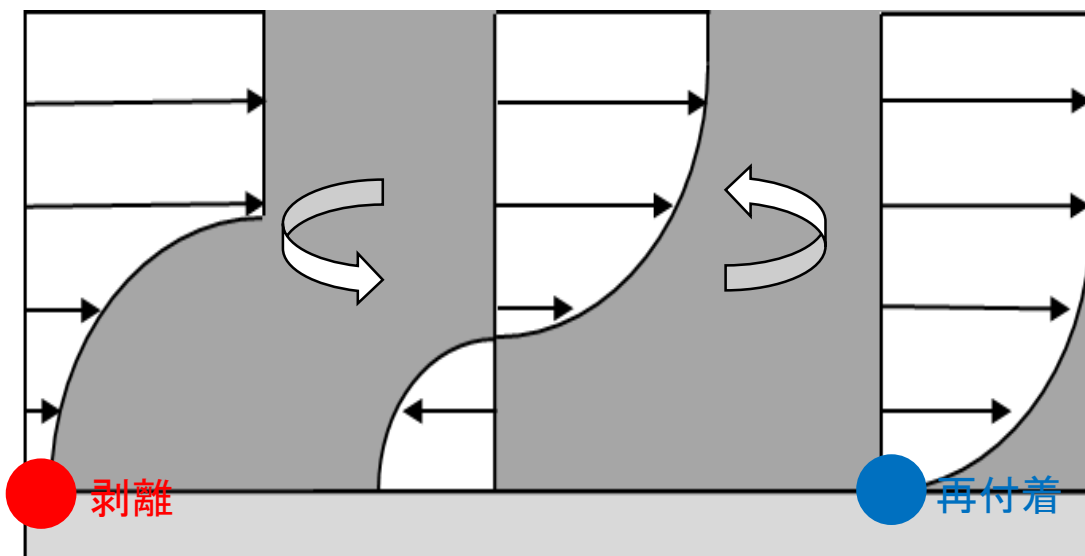


図-2.5 せん断流における再循環領域

## 2.5 回転粘度計を活用した粘着力の定量化法

粘着力の測定に際して、ローターとモルタルの付着が不十分な場合、明瞭な剥離点を得られないため、剥離試験の際はローターとモルタルを十分に付着させる必要性が分かった(図-2.6)。これはローターを試料に挿入した際にローター表面とモルタル間に一時的に空隙が生じるためであると考察した。この空隙にモルタルが流動することで付着はするが、剥離試験のためには試料によらない一定の付着度が必要である。つまり、粘度の影響を考慮した付着度の確保が必要である。そこで、粘性の異なる  $W/C=45\%$  及び  $35\%$  のモルタルで再循環領域におけるせん断変形の安定のばらつきの大きさより付着度の確保に適した回転速度を選定した。 $W/C=45\%$  では、 $3\text{ rpm}$  の時は値のばらつきが大きく、 $1.5\text{ rpm}$  及び  $1.0\text{ rpm}$  では  $150$  秒以降値が安定した。しかし、 $1.5\text{ rpm}$  の時は  $200$  秒を超えると値のばらつきが大きくなった(図-2.7)。これらは、低粘度によるローター付近での乱流の発生や粘着力によるワイセンベルク効果によるものと考察した。一方、 $W/C=35\%$  では、 $1.0\text{ rpm}$  の時  $200$  秒以降で値が安定した(図-2.8)。よって、モルタルの粘性によらず十分かつ安定した付着度の確保のための回転条件は回転速度  $1.0\text{ rpm}$  で  $300$  秒間回転とした。そして、その後で回転速度を上昇させることで、剥離を進行させることにより明瞭な剥離点を得る方法を剥離試験法とし構築した(図-2.9)。なお、試料の量は粘度測定値へ影響するため、 $450\text{ mL}$  に統一した。

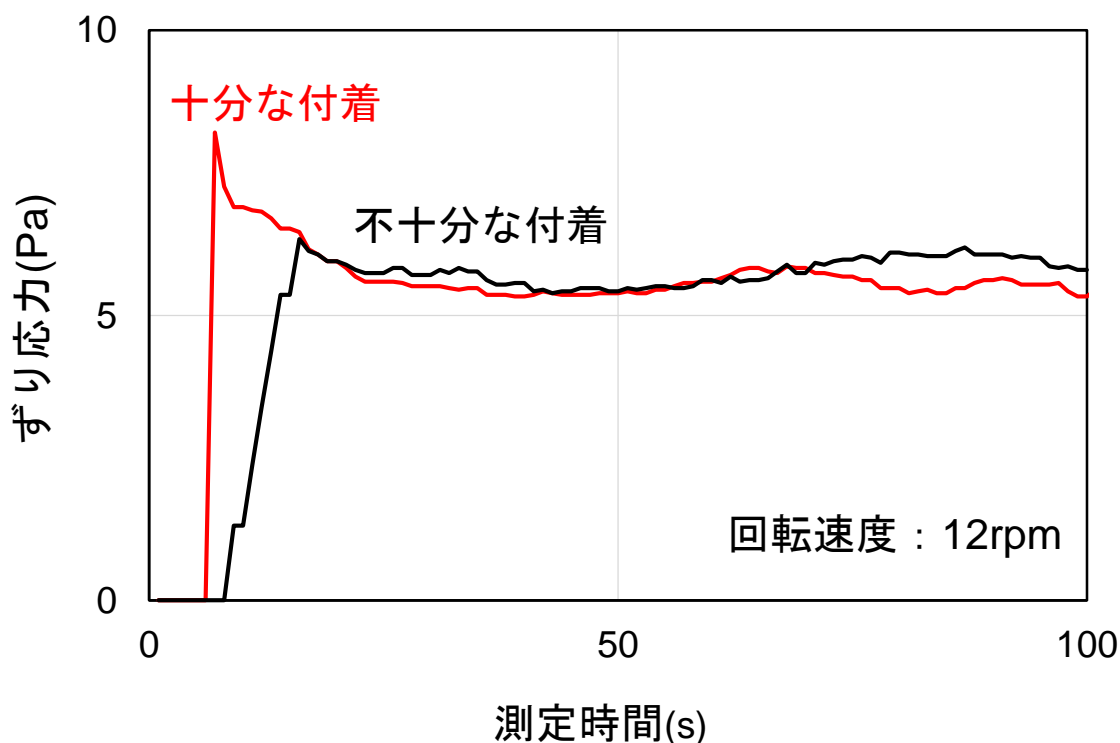


図-2.6 ローターにモルタルを十分に付着させることにより剥離点を明瞭にする



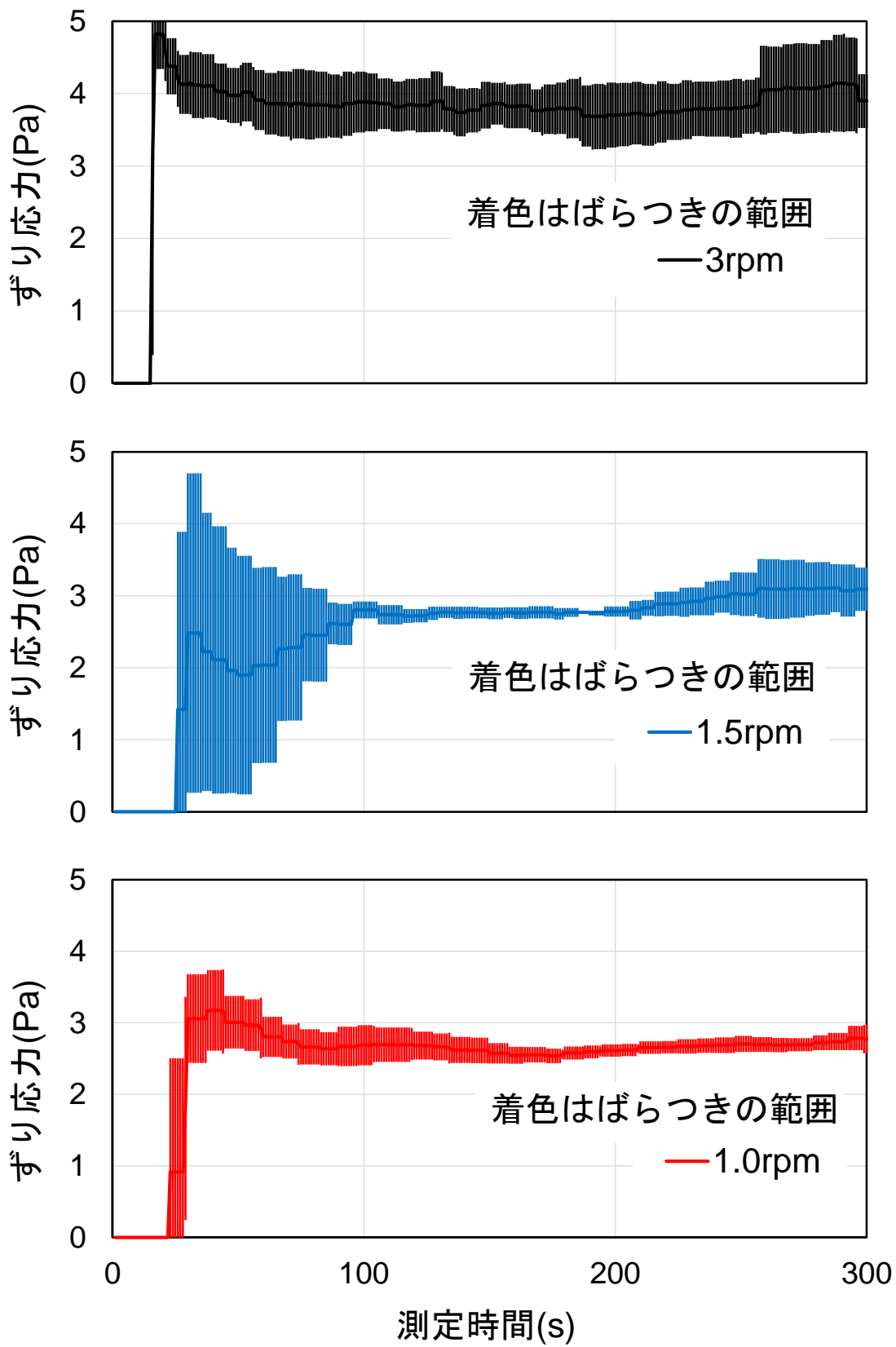


図-2.7 W/C=45%におけるせん断変形の安定

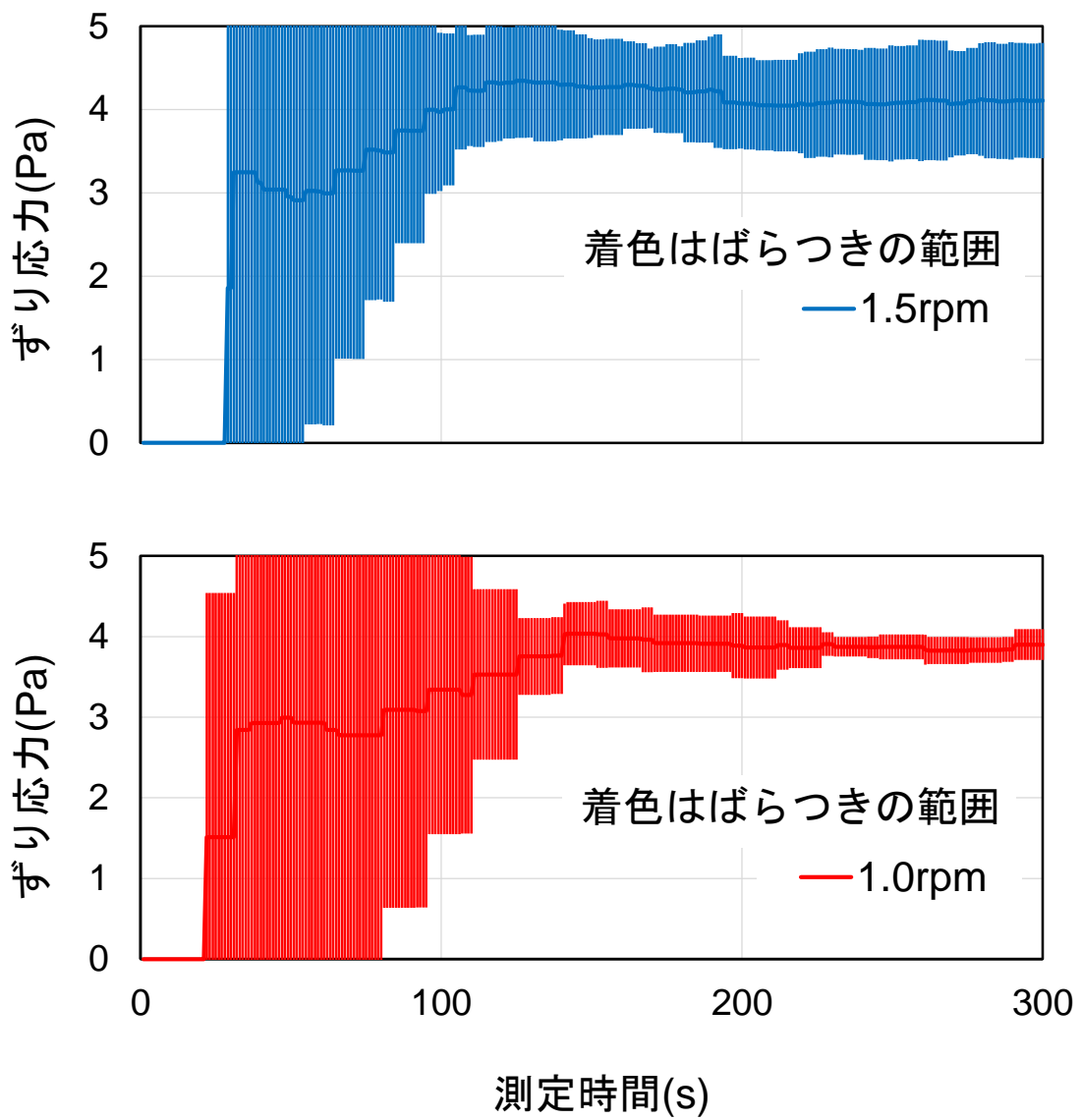


図-2.8 W/C=35%におけるせん断変形の安定

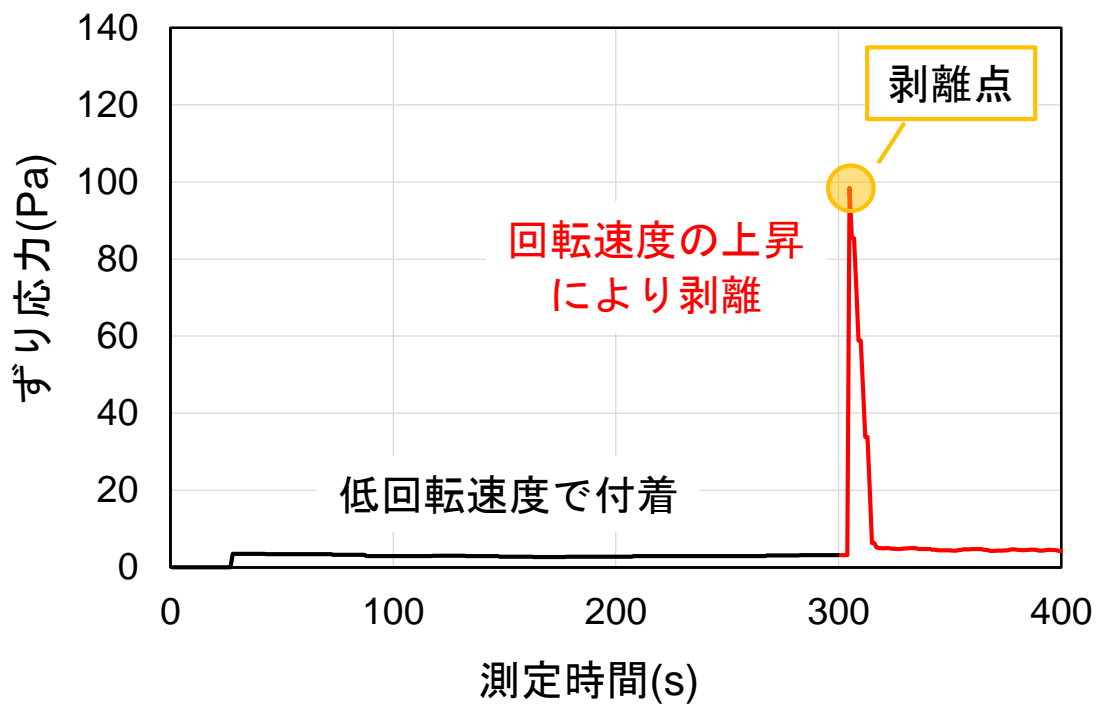


図-2.9 回転粘度計による剥離試験法

## 第3章 フレッシュモルタルの剥離強度の測定

### 3.1 剥離強度の速度依存性

TVB-15 形粘度計を用いて、回転速度 1.5 rpm (0.25 mm/s)、3 rpm (0.50 mm/s)、6 rpm (0.99 mm/s)、10 rpm (1.65 mm/s) における剥離強度を測定した。VMA の添加に関わらず高回転速度ほど剥離強度は増加し、VMA による剥離強度の向上効果は 10 rpm で確認することができた (図-3.1)。しかし、試料によってはオーバースケールにより正確なずり応力を計測できず、この剥離強度の差から自己充填性への影響は考察することは不適切であると判断した (図-3.2)。

よって、高回転速度での測定が可能な TVB-25 形粘度計を用いて、回転速度 20 rpm (3.30 mm/s)、50 rpm (8.25 mm/s)、100 rpm (16.5 mm/s) の剥離強度を測定した結果を図-3.3 に示す。VMA の添加に関わらず高回転速度ほど剥離強度は増加し、すべての回転速度において、VMA を添加することにより剥離強度は大幅に向上し、B は W/C=35% と同等、C はそれ以上の剥離強度であることを確認した。粗骨材の分離の生じにくい低フロー値 (230 mm) のモルタルでは高フロー値 (無添加) のものと比較すると剥離強度に大きな差はなかった。

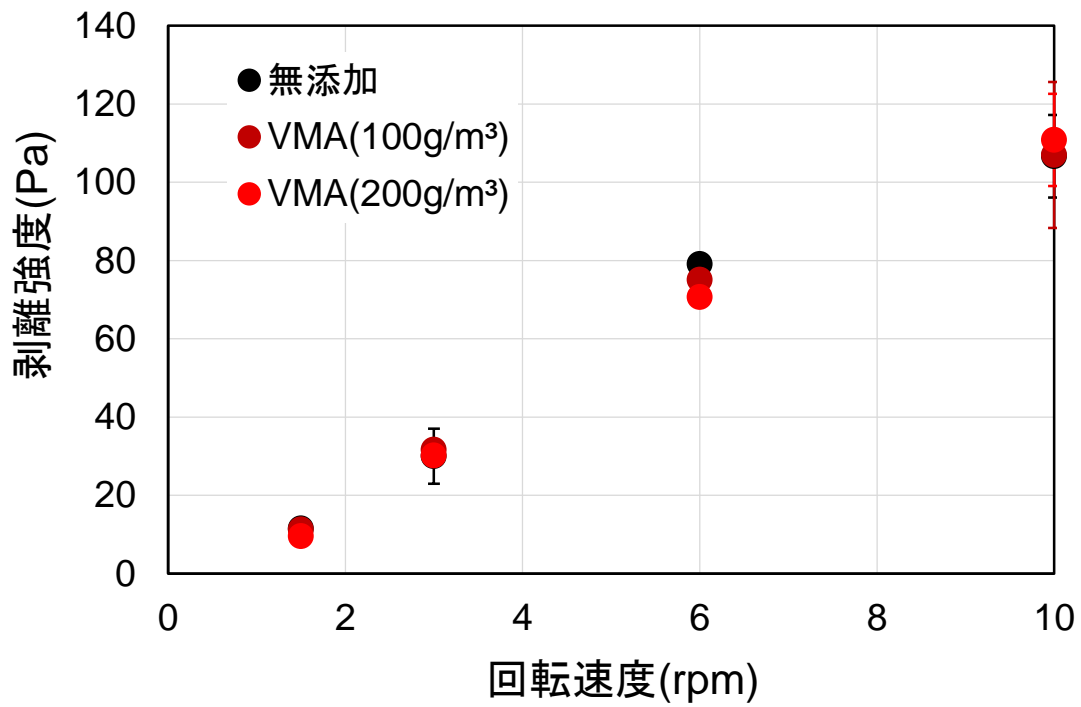


図-3.1 TVB-15 形粘度計による剥離強度測定結果

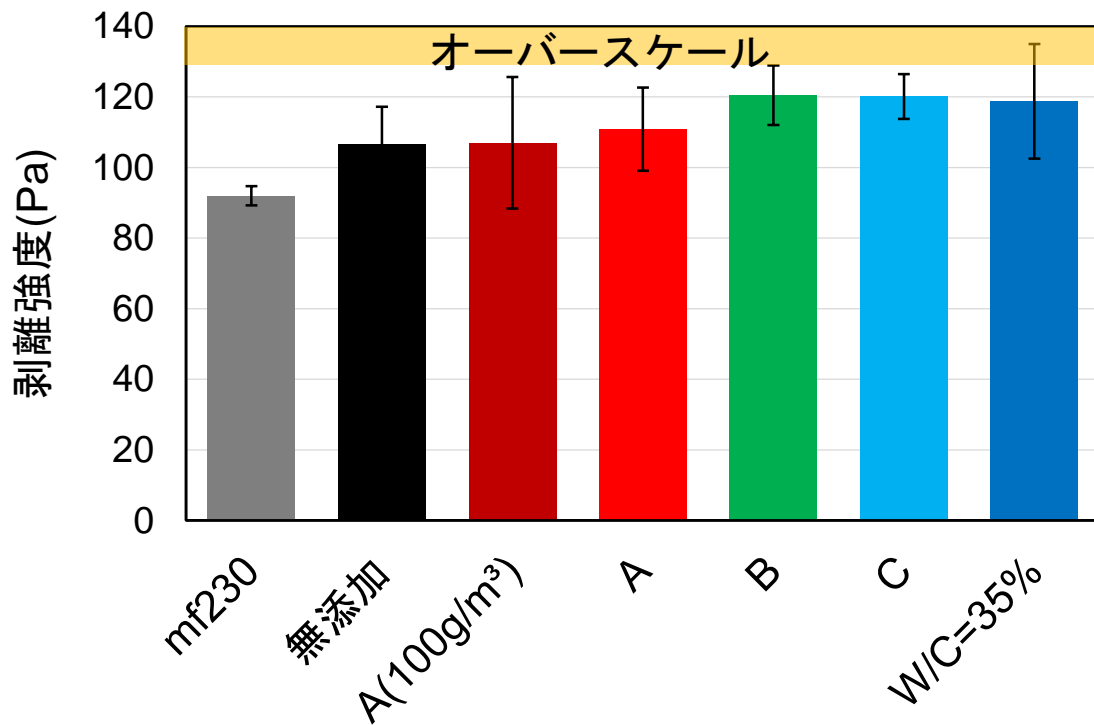


図-3.2 TVB-15 形粘度計による回転速度 100rpm 時の剥離強度測定結果

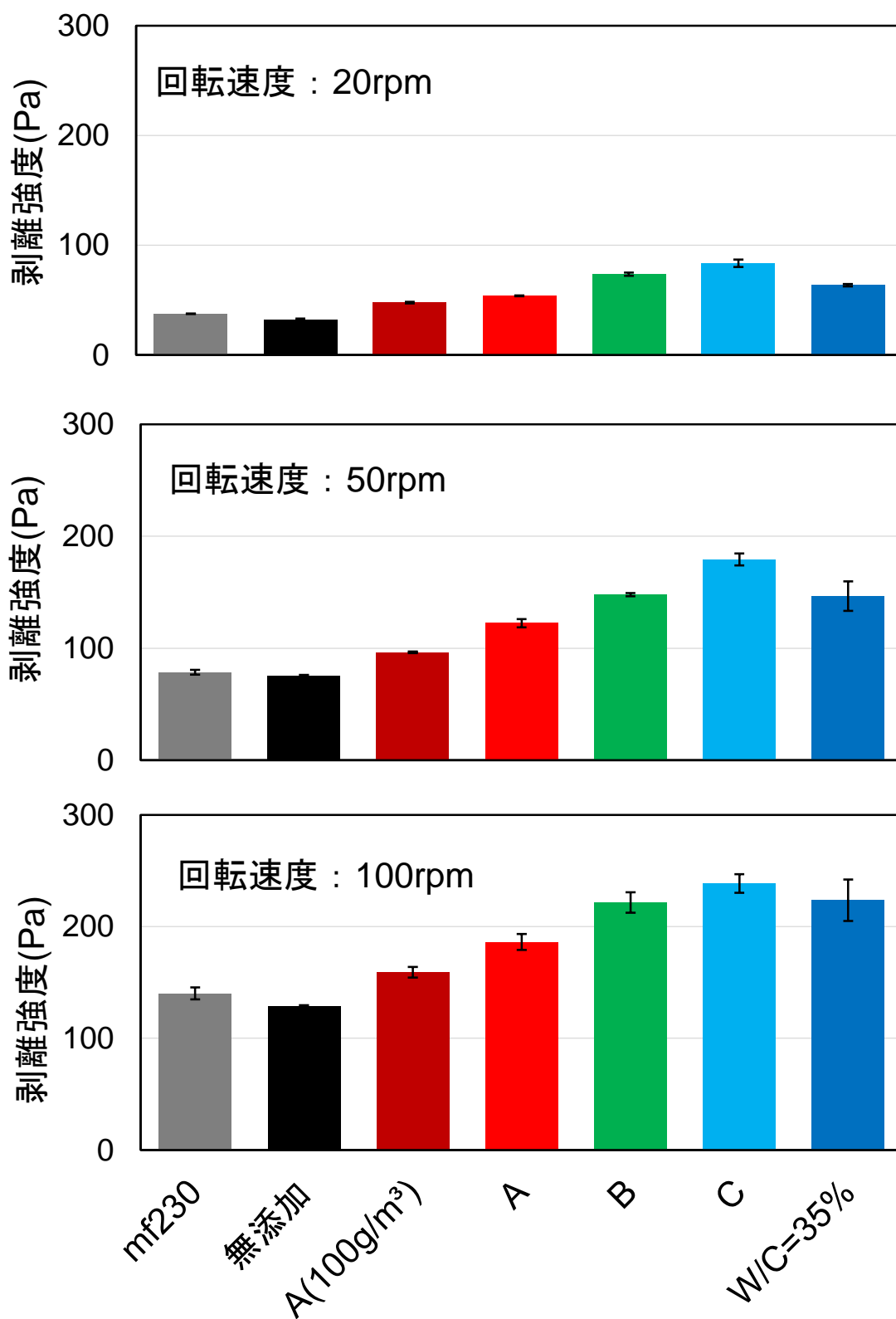


図-3.3 TVB-25 形粘度計による剥離強度測定結果

## 第4章 フレッシュモルタルの粘性の評価試験結果の比較

### 4.1 回転粘度計による粘着力の定量化法の独立性

TVB-25 形粘度計により測定した粘度と剥離強度の関係を図-4.1, 図-4.2, 図-4.3 に示す。回転粘度計により測定した粘度と剥離強度は相関が高く, A は各速度における粘度が同程度でありながら低フロー値 (230 mm) より剥離強度が高かった。これは VMA による粘性の付与は粘度より粘着力の付与が卓越していることを示唆している。特に, 回転速度 100 rpm 時には A と低フロー値 (230 mm) の粘度はほぼ同値でありながら剥離強度が大きく異なった。さらに, 図-4.4 に示した各速度における粘度と剥離強度の関係より, 高回転速度ほど粘度と剥離強度の相関は低くなることから, VMA により特に粘着力が向上していることを確認することができたと言える。回転速度をさらに高速にできれば, 粘着力が支配要因である剥離強度を測定できる可能性がある。これらの比較結果より, 低流動速度の際の粗骨材の剥離抑制は粘度が有効であり, 高粘着力による粗骨材の分離抑制効果は高流動速度の際により有効である可能性を得たと言える。

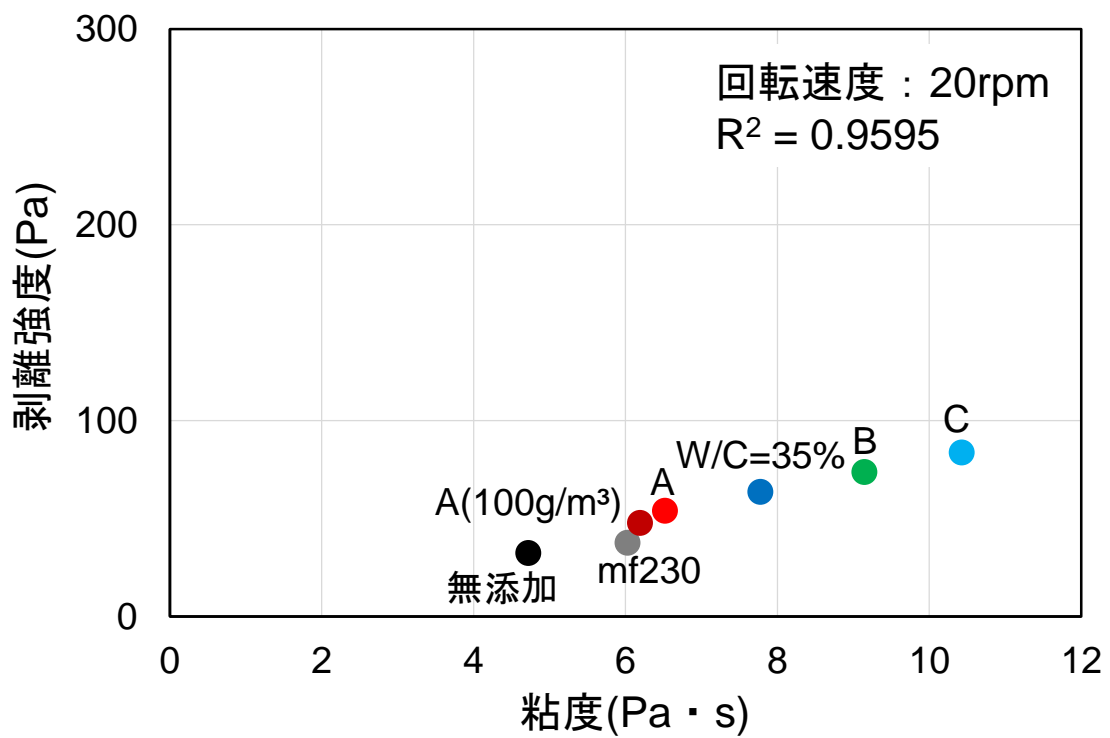


図-4.1 回転速度 20rpm 時の粘度と剥離強度の関係

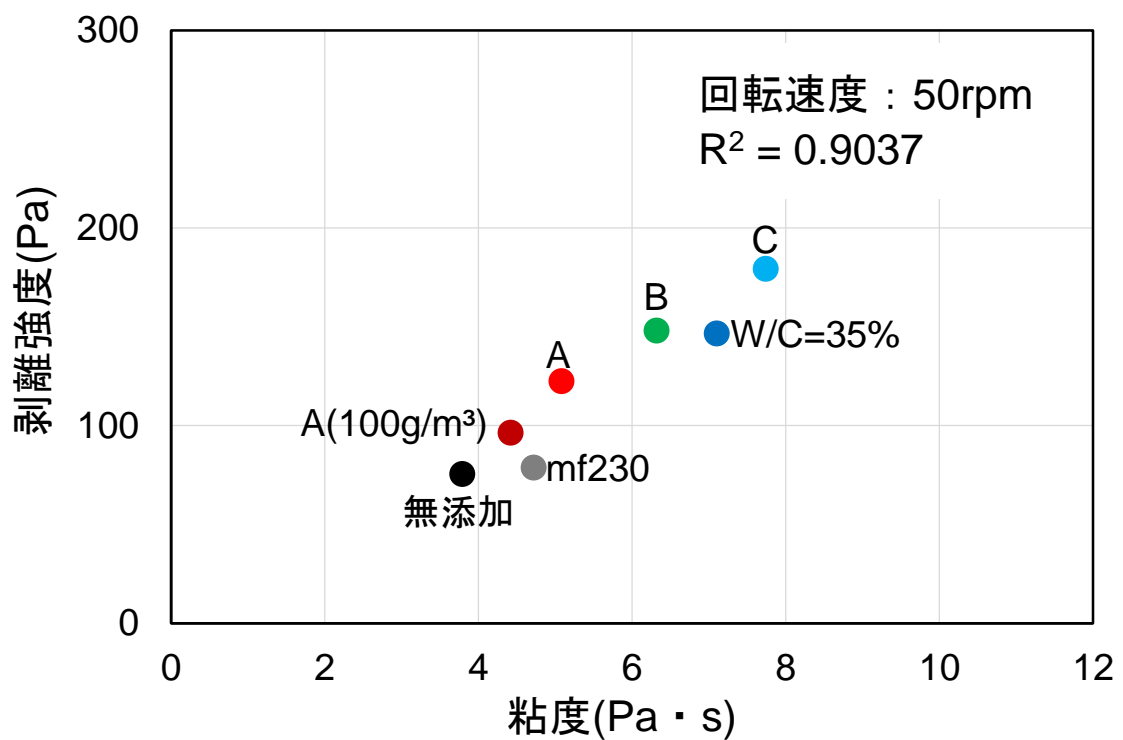


図-4.2 回転速度 50rpm 時の粘度と剥離強度の関係



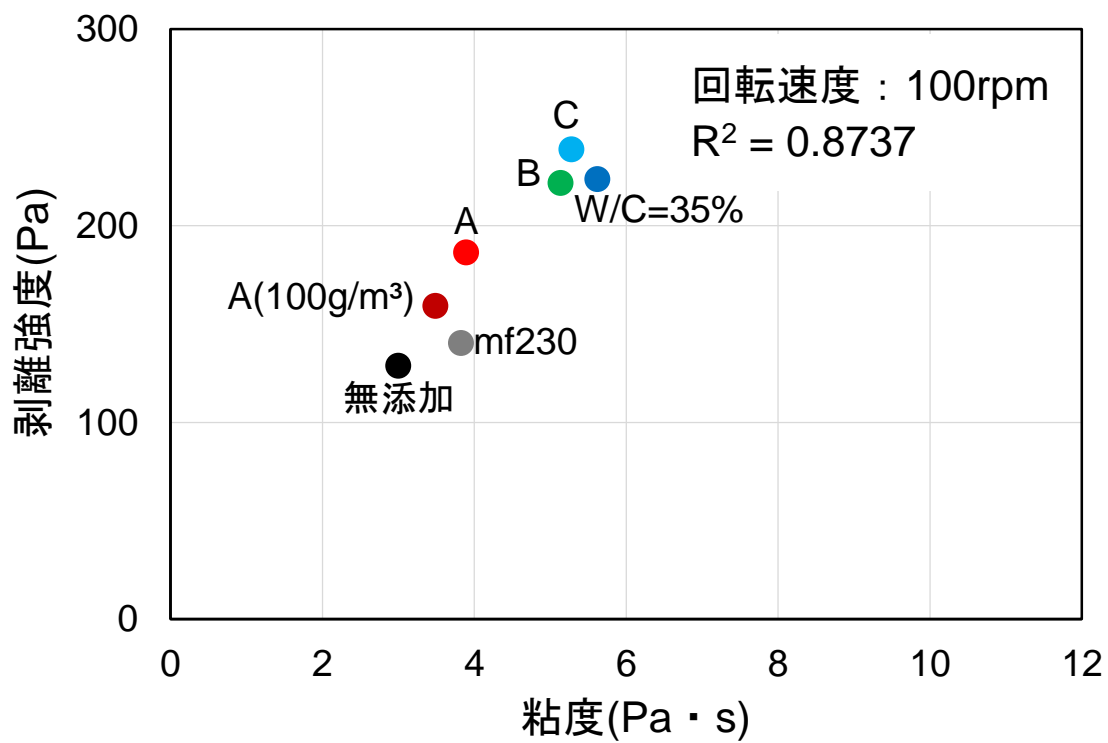


図-4.3 回転速度 100rpm 時の粘度と剥離強度の関係

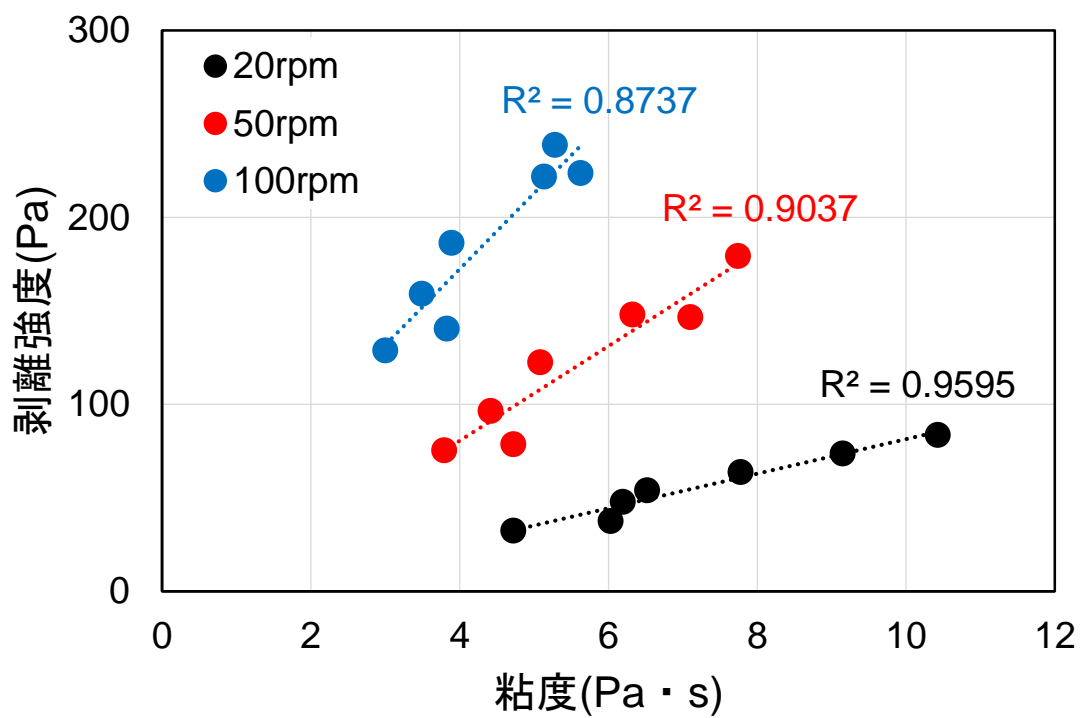


図-4.4 各速度における粘度と剥離強度の相関

## 4.2 従来の粘性の評価試験との比較

SCC において、フレッシュモルタルの粘性試験として一般的に用いられてきたモルタル漏斗試験により得られる相対漏斗流下速度比  $Rm^8$  と剥離強度との関係を図-4.5, 図-4.6, 図-4.7 に、粘度との関係を図-4.8, 図-4.9, 図-4.10 に示す。低水セメント比のものは B 及び C は剥離強度と粘度が同程度であったが、漏斗流下速度比  $Rm$  は小さかった。これは固体粒子が多く漏斗試験機の出口でペースト中に細骨材により直応力が生じることでせん断抵抗性が増加したためと考察した。また、 $Rm$  は剥離強度及び粘度と高い相関があり、回転速度が速いほどこの相関は高くなった (図-4.11, 図-4.12)。つまり、漏斗流加速度比  $Rm$  は、特に高流動速度の粗骨材からのフレッシュモルタルの分離抵抗性を評価している可能性があり、固体粒子量が同じ配合のフレッシュモルタルの分離抵抗性の簡易評価試験として適切であると言える。

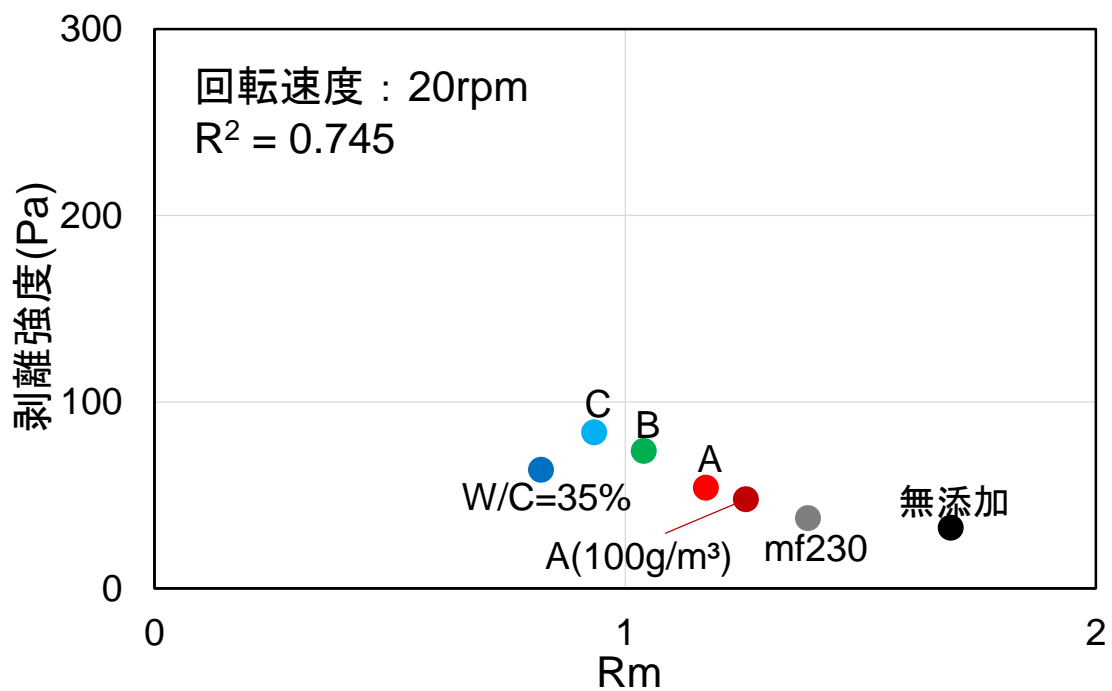


図-4.5 Rm と回轉速度 20rpm 時の剥離強度の関係

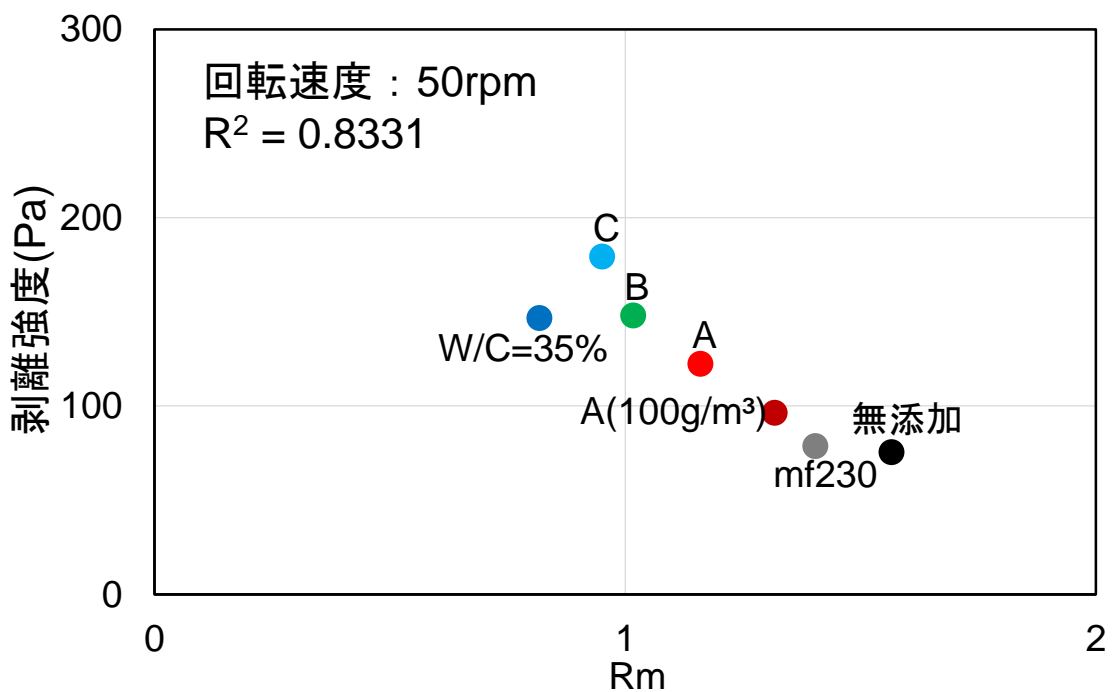


図-4.6 Rm と回轉速度 50rpm 時の剥離強度の関係

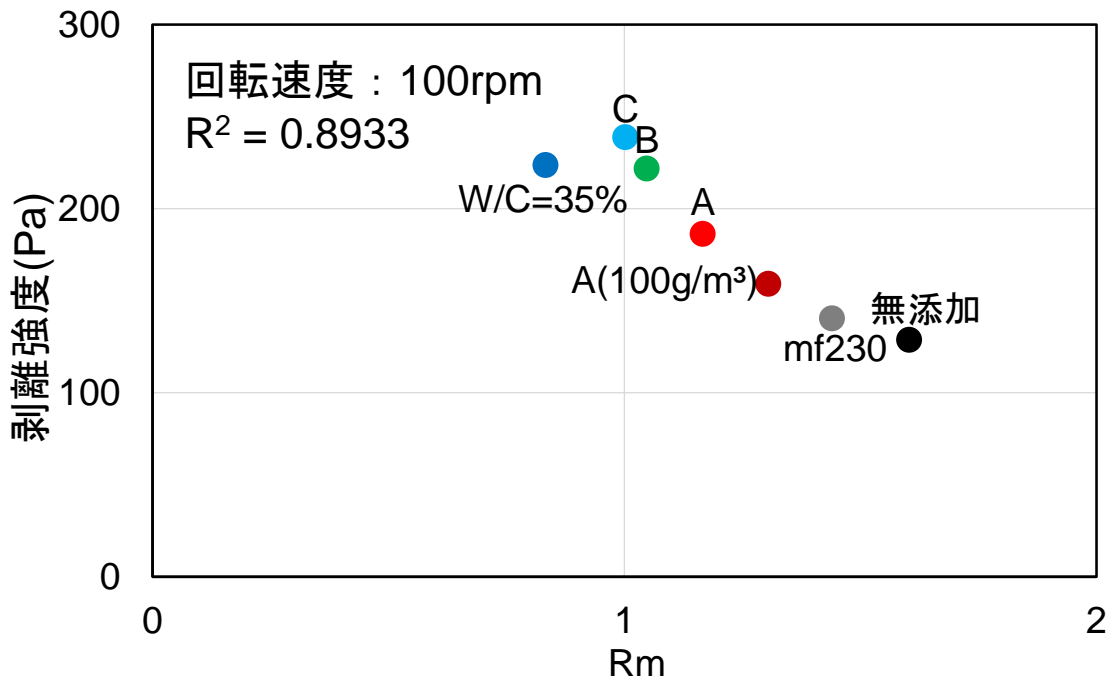


図-4.7 Rm と回轉速度 100rpm 時の剥離強度の関係

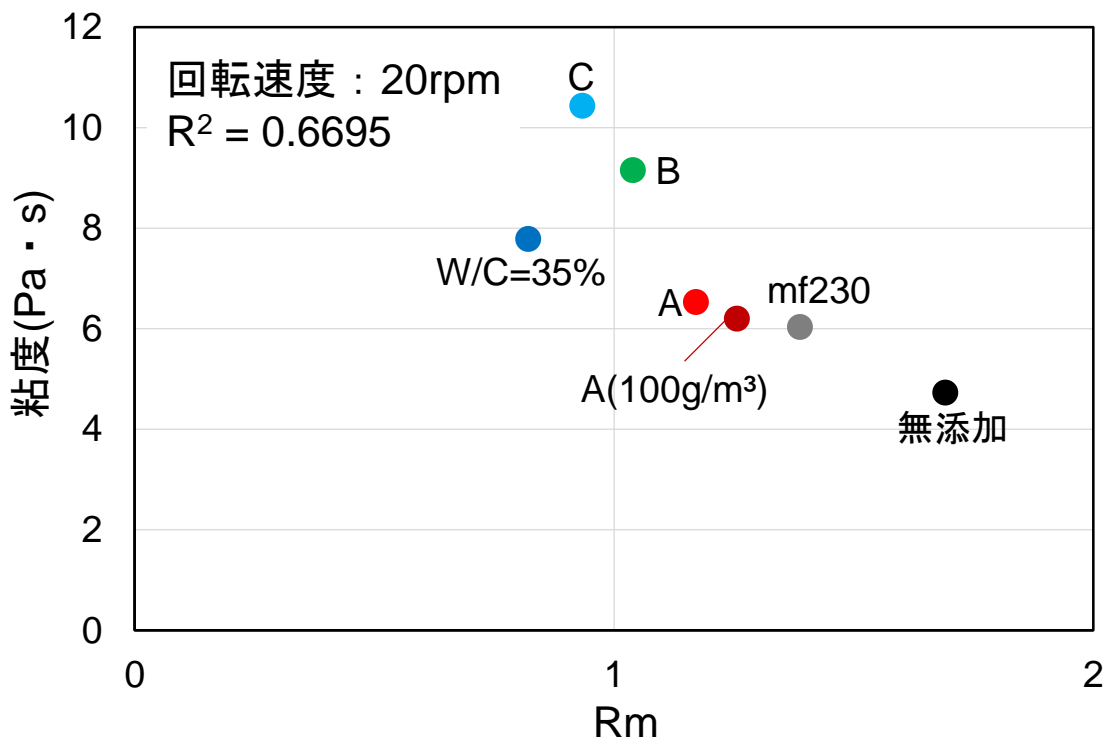


図-4.8 Rm と回轉速度 20rpm 時の粘度の関係

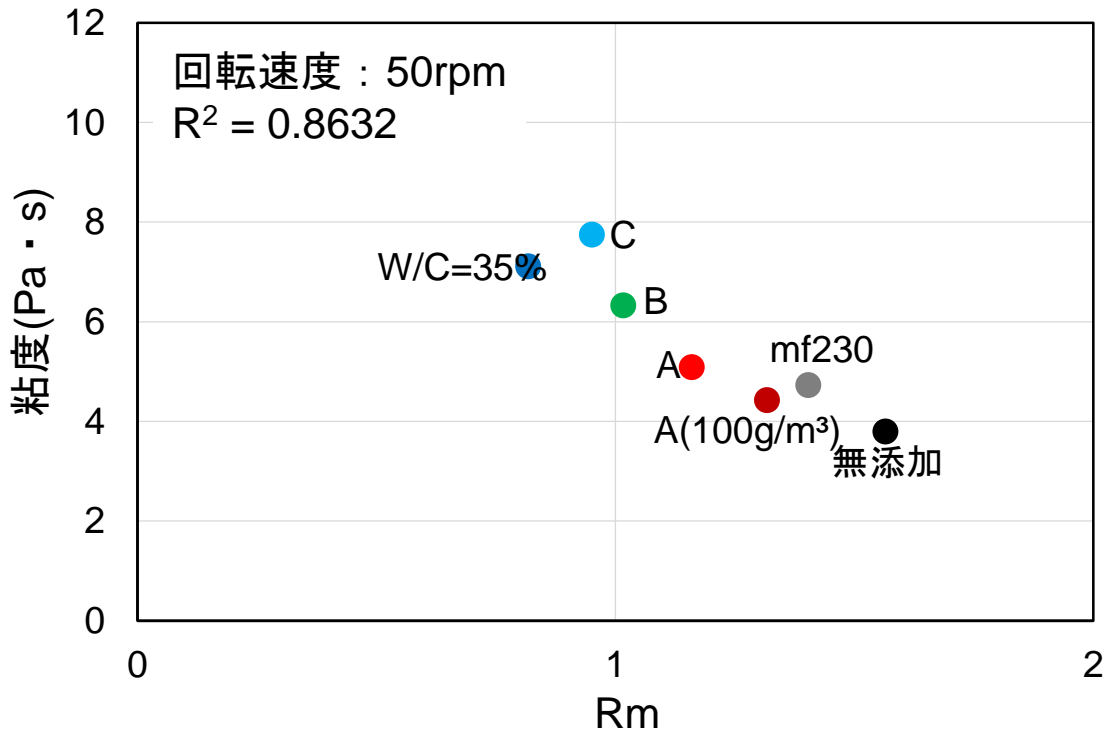


図-4.9 Rm と回転速度 50rpm 時の粘度の関係

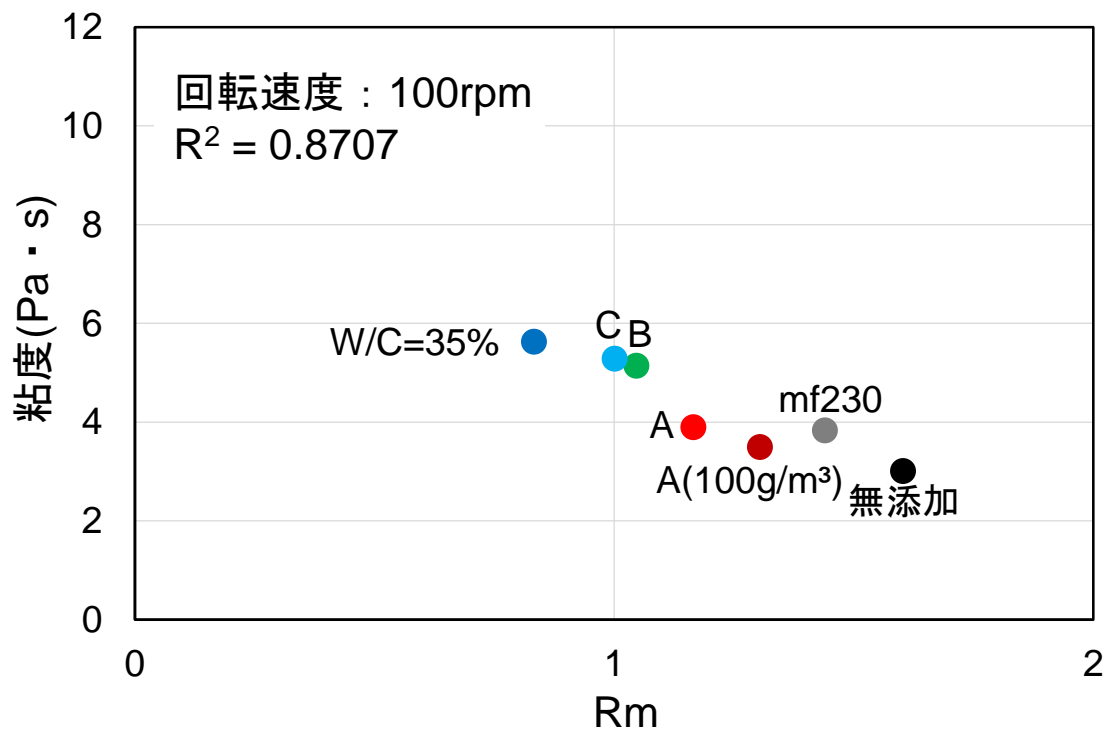


図-4.10 Rm と回転速度 100rpm 時の粘度の関係

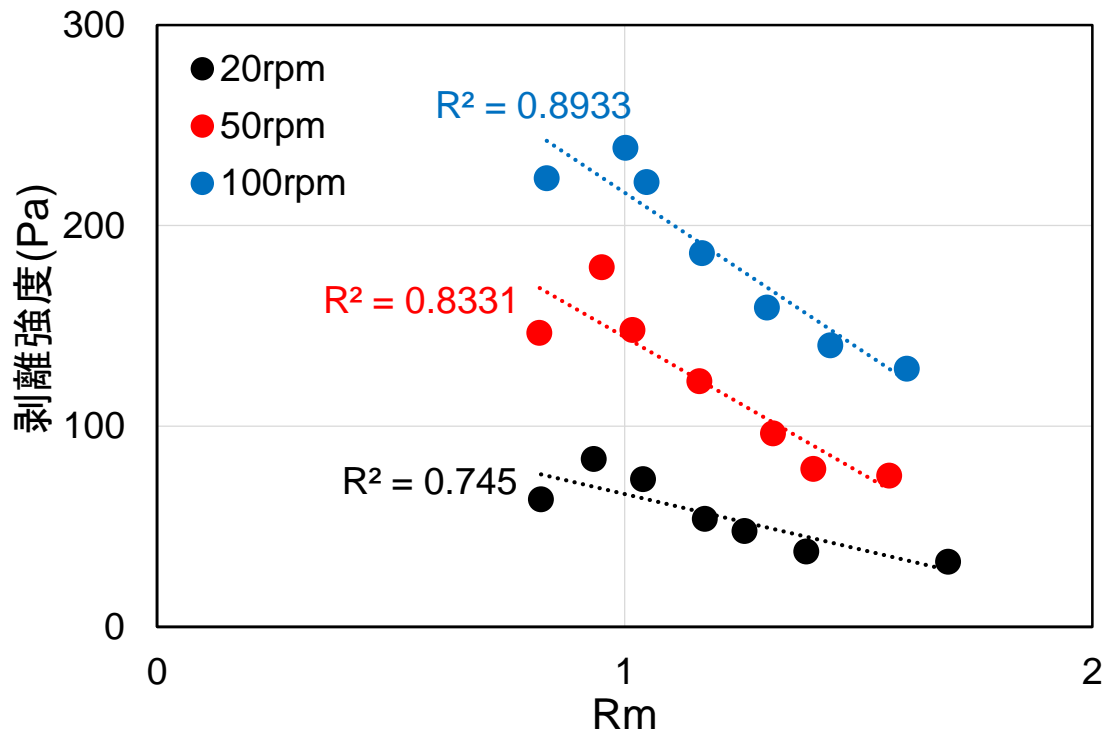


図-4.11 各速度における  $R_m$  と剥離強度の相関

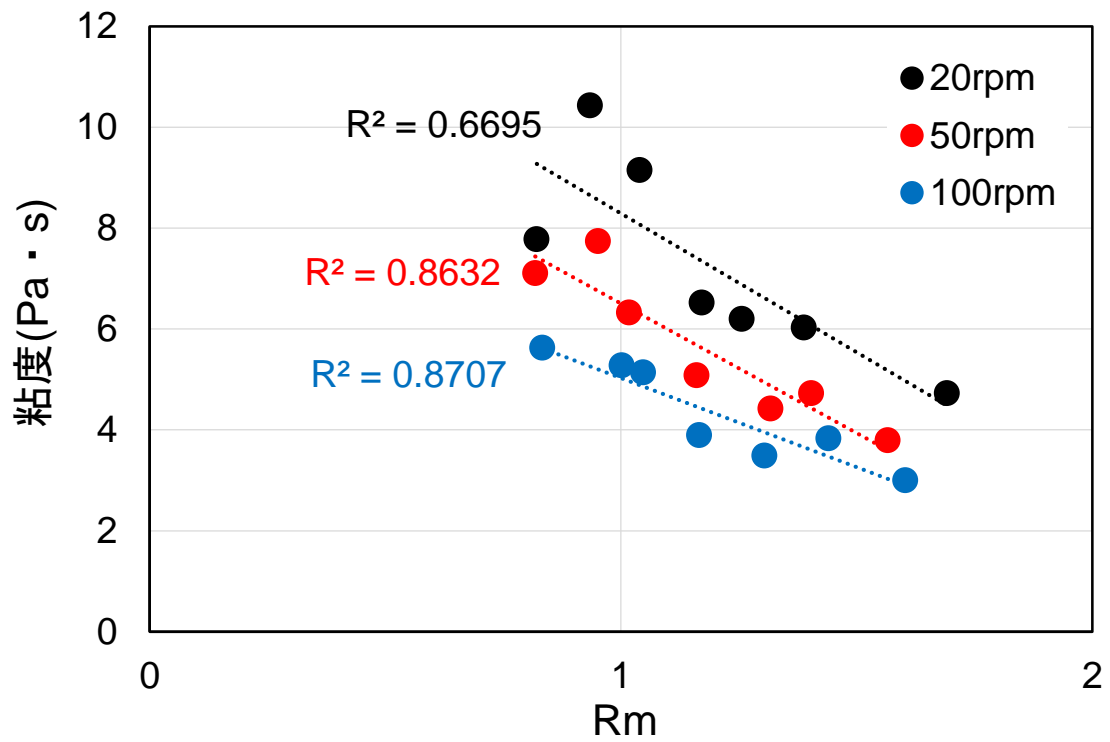


図-4.12 各速度における  $R_m$  と粘度の相関

## 第5章 粘着力によるフレッシュコンクリートの自己充填性の向上 効果の検証

### 5.1 VMAによる自己充填性の向上

フレッシュコンクリートの間隙通過性は間隙通過性試験（R1 障害のボックス試験）で評価し、JSCE F 511「高流動コンクリートの充填試験法」に準じて試験を行った。VMAを添加したコンクリートはスランプフロー値 630 mm 程度で最高レベルの自己充填性を確認した（図-5.1）。また最も粘着力が高い C はスランプフロー値 670 mm 程度でも最高の自己充填性レベルを維持することができた。

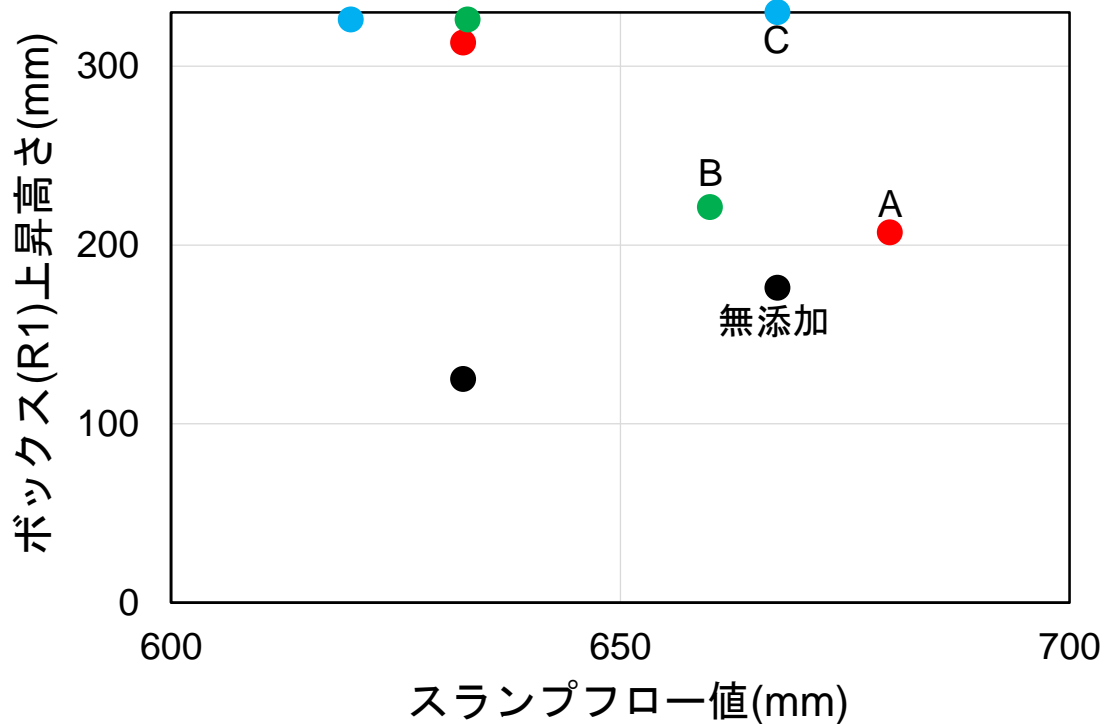


図-5.1 新型増粘剤による自己充填性の向上

## 5.2 粘性による自己充填性への向上

剥離強度及び粘度，漏斗流下速度比  $R_m$  が自己充填性へ及ぼす影響を，VMA の種類によりボックス上昇高さに差が生じたスランプフロー値  $670 \pm 10 \text{ mm}$  の範囲で比較した（図-5.2，図-5.3，図-5.4）。回転速度は粘度とは独立して粘着力の測定ができた可能性が最も高かった  $100 \text{ rpm}$  とした。剥離強度及び粘度， $R_m$  が高いものほど自己充填性は高かったが，B と C では剥離強度・粘度・ $R_m$  が同程度であるが自己充填性に大きな差があった。一方で，ボックス試験後のコンクリート表面を観測すると，C はスランプフローが大きい場合でも，粗骨材がモルタルと一体となって流動したことがわかり，B よりも高粘着力である可能性を得た（図-5.5）。ボックス上昇に必要な時間は，上昇高さ  $300 \text{ mm}$  でおおよそ  $5 \sim 15$  秒であり，実際に生じている粗骨材とモルタルの剥離速度は，回転速度  $100 \text{ rpm}$  ( $16.5 \text{ mm/s}$ ) よりさらに高速であると推測できる。高回転速度程剥離強度に大きな差が生じ粘着力の効果が卓越する可能性があるため，間隙通過速度を考慮した剥離速度による剥離試験法の検討が今後の課題である（図-5.6）。

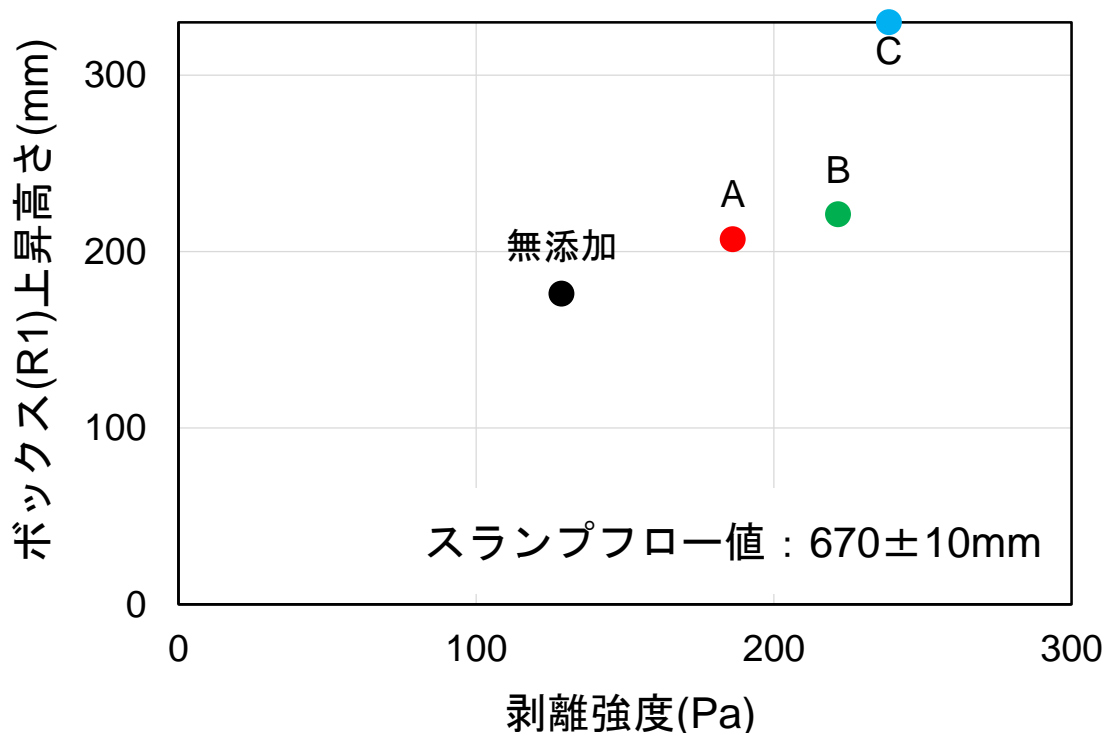


図-5.2 回転速度 100rpm 時の剥離強度と自己充填性の関係



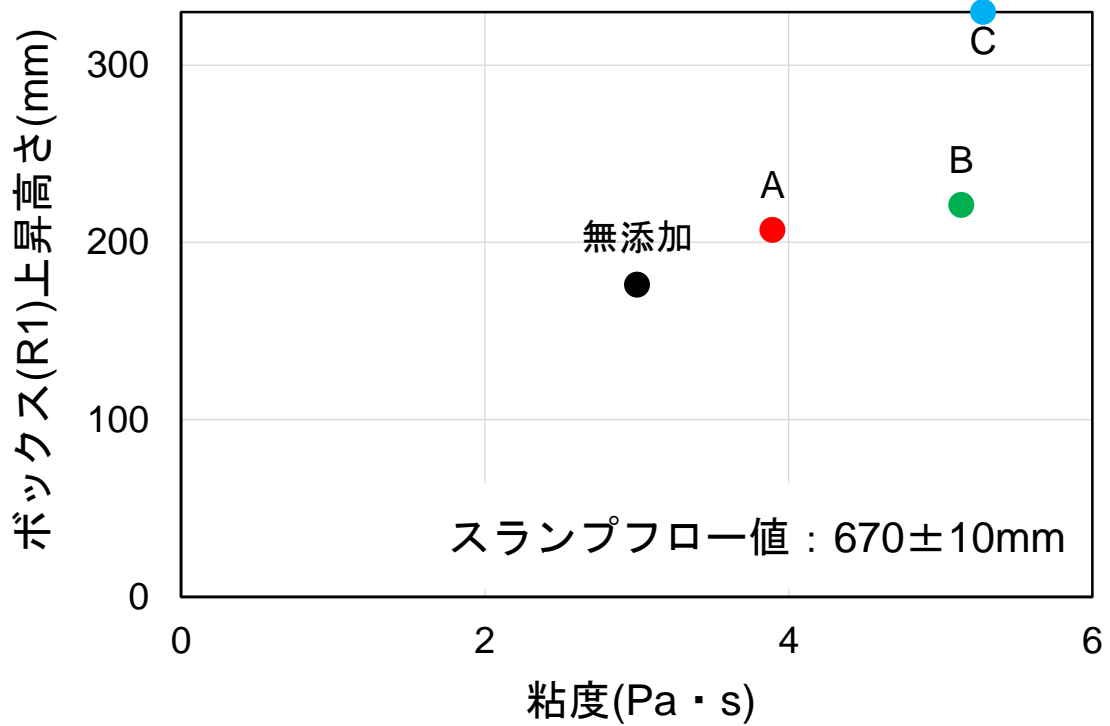


図-5.3 回転速度 100rpm 時の粘度と自己充填性の関係

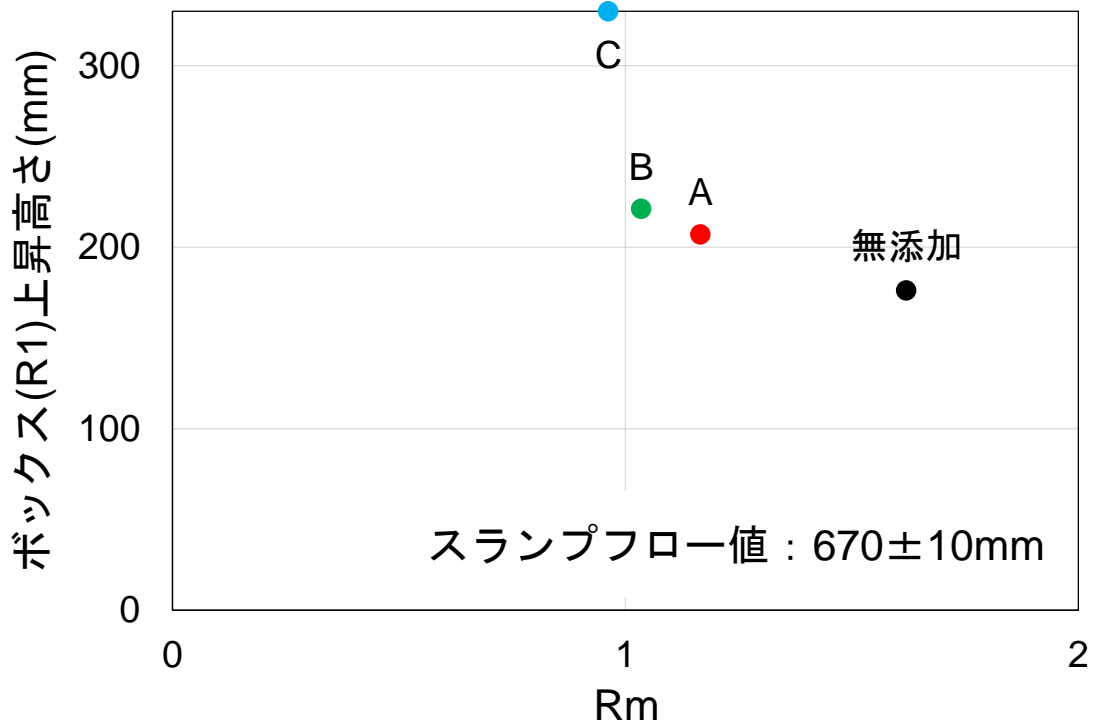


図-5.4 Rm と自己充填性の関係

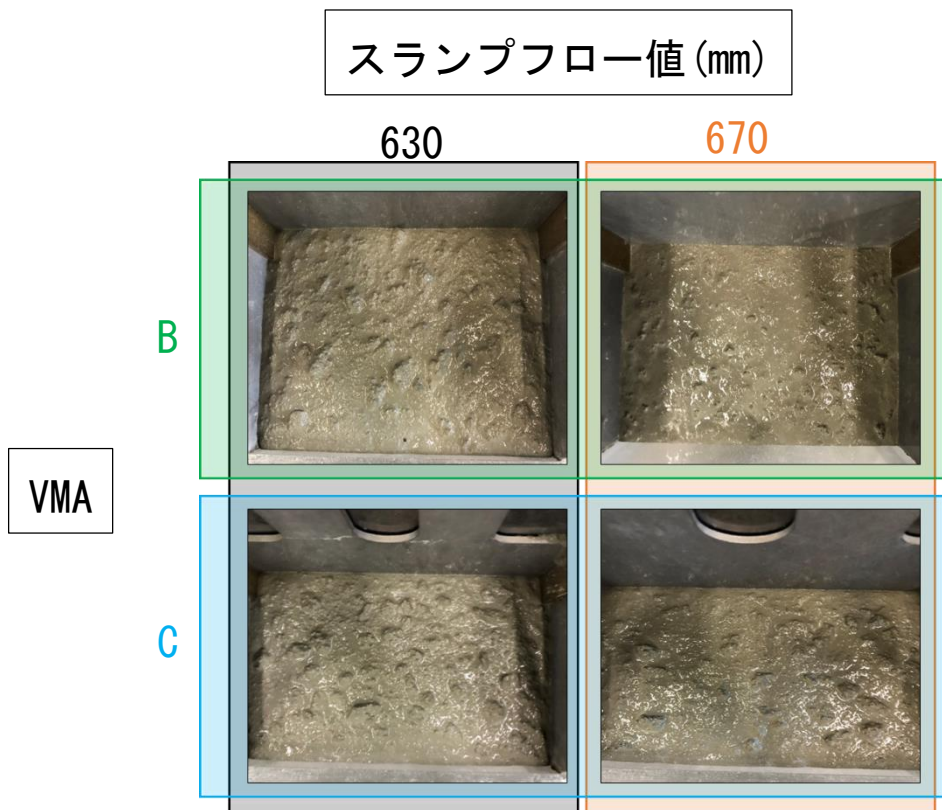


図-5.5 高粘性を付与する VMA による粗骨材とモルタルの一体流動の観測

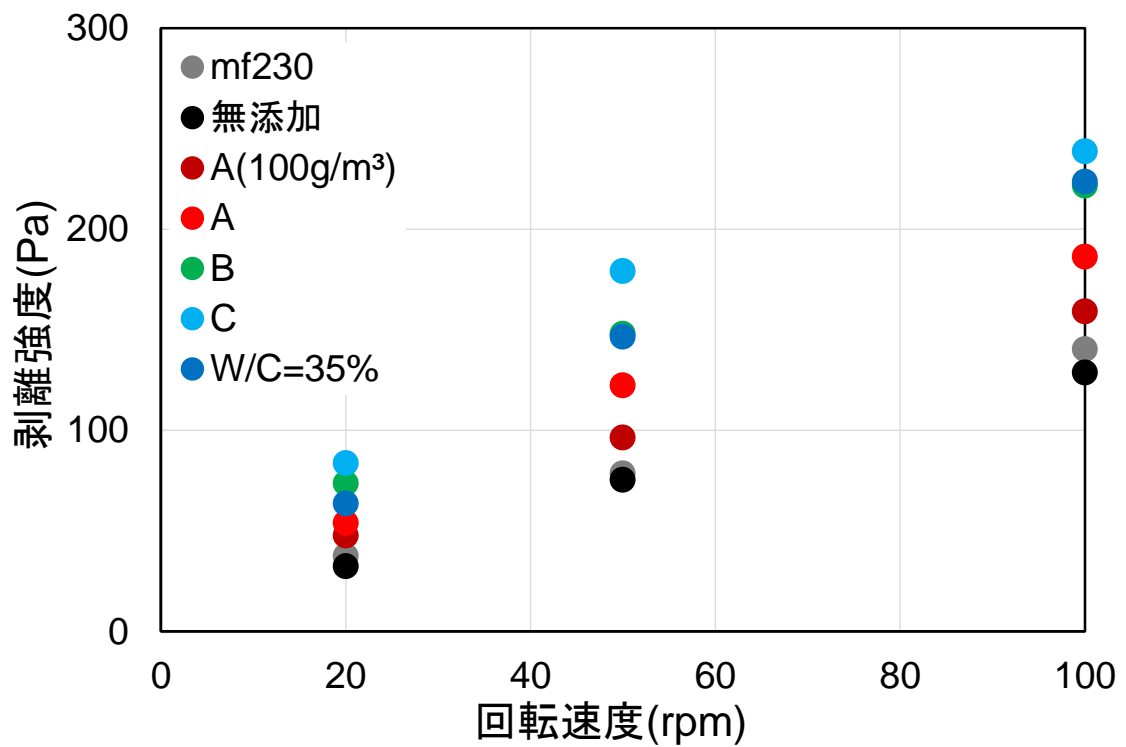


図-5.6 回転速度と剥離強度の関係

## 第6章 結論

回転粘度計により計測した最大ずり応力を剥離強度とし、1.0 rpm で 300 秒間回転させた後に、回転速度を上昇させる剥離試験法をフレッシュモルタルの粘着力の定量化法とし構築した。

本研究の結論を以下に述べる。

- 1) 剥離強度は回転速度に依存し、TVB-15 形粘度計では 10 rpm 以上の回転速度で VMA により剥離強度が向上したことを確認した。また、TVB-25 形粘度計では回転速度 100 rpm 時に、VMA により特にフレッシュモルタルの粘着力が向上することを確認することができた。また、回転速度をさらに高速にできれば、粘着力が支配要因である剥離強度を測定できる可能性がある。
- 2) 回転粘度計により測定した回転速度の異なる粘度と剥離強度の比較により、高粘着力による粗骨材の分離抑制効果は高流動速度の際により有効である可能性を得た。また、モルタル漏斗試験により得られる漏斗流下速度比  $R_m$  は高流動速度の時の剥離強度及び粘度との相関が高いことを示し、固体粒子量が同じ配合のフレッシュモルタルの分離抵抗性の簡易評価試験として適切であることを確認した。
- 3) フレッシュコンクリートの間隙通過試験により、VMA の添加により自己充填性が向上することを確認した。剥離強度及び粘度が高いものほど自己充填性は高かったが、剥離強度・粘度共に同程度であるが自己充填性に大きな差が生じている配合があることを確認した。一方で、これらの試験後のコンクリート表面を比較すると、フレッシュモルタルと粗骨材の一体流動性に差が生じていることを確認した。高回転速度程剥離強度に大きな差が生じ粘着力の効果が卓越する可能性があるため、間隙通過速度を考慮した剥離速度による剥離試験法の検討が今後の課題である。

## 付録

### 付録 1 VMA によるチクソトロピー性への影響

ポンプ圧送時や打設時などコンクリートの施工過程では、各場面での分離抵抗性を考慮することは重要である。一般的にフレッシュコンクリートはビンガム流体として扱われおり、せん断力が生じることにより粘性が低下することがわかっている。そのためせん断力が生じた際の粘性の低下しやすさを表すチクソトロピー性へ VMA が及ぼす影響について比較した (図-付録 1.1)。チクソトロピー性は回転粘度計により測定した 1 : 10 の速度の粘度比により求めた (本研究では 3 rpm と 30rpm の粘度比とした) TI 値で評価した。TI 値が大きいほどチクソトロピー性が高いことを示す。VMA の添加によりチクソトロピー性が低下することを確認し、C が最も低かった。

チクソトロピー性と各試験により測定した粘性との関係を以下に示す。剥離強度は回転速度によらず若干の相関があった (図-付録 1.2, 図-付録 1.3, 図-付録 1.4)。しかし、粘度は相関が低く、高回転速度ほどこの相関はさらに小さくなった (図-付録 1.5, 図-付録 1.6, 図-付録 1.7)。また、Rm も相関が低いことがわかった (図-付録 1.8)。

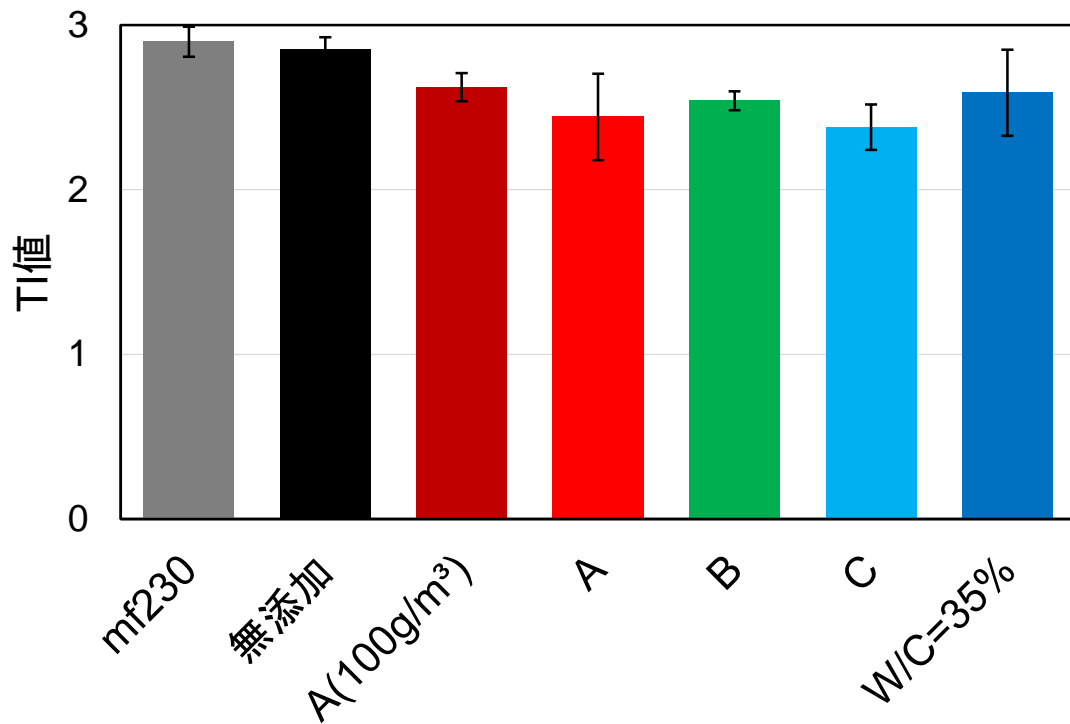


図-付録 1.1 チクソトロピー性の測定結果

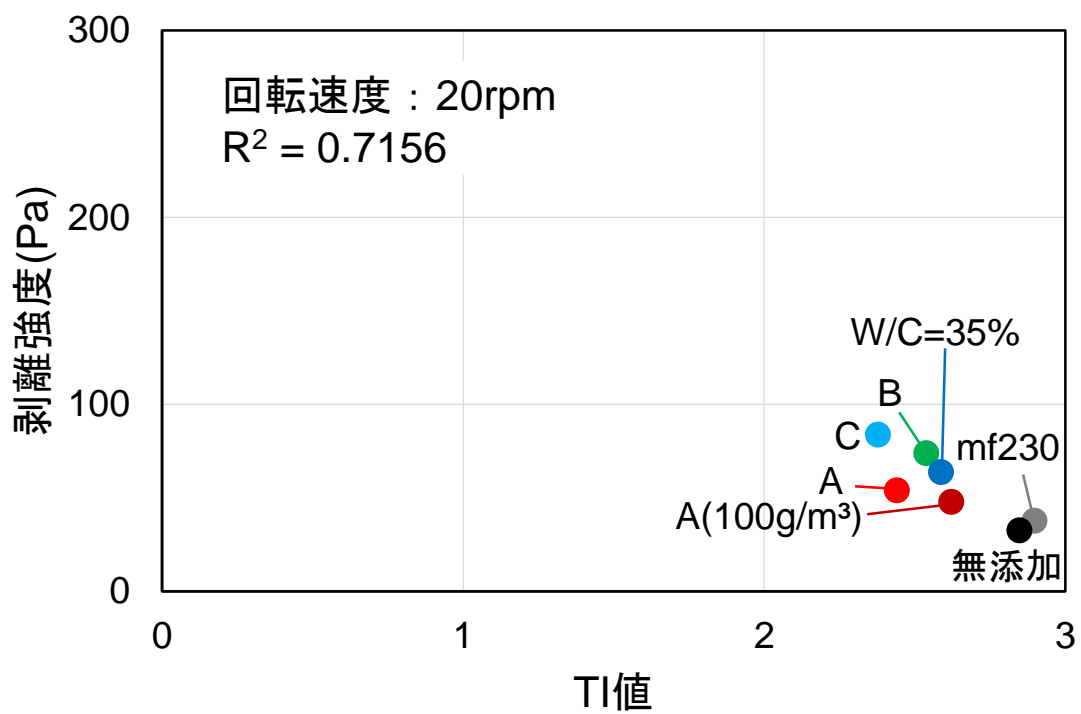
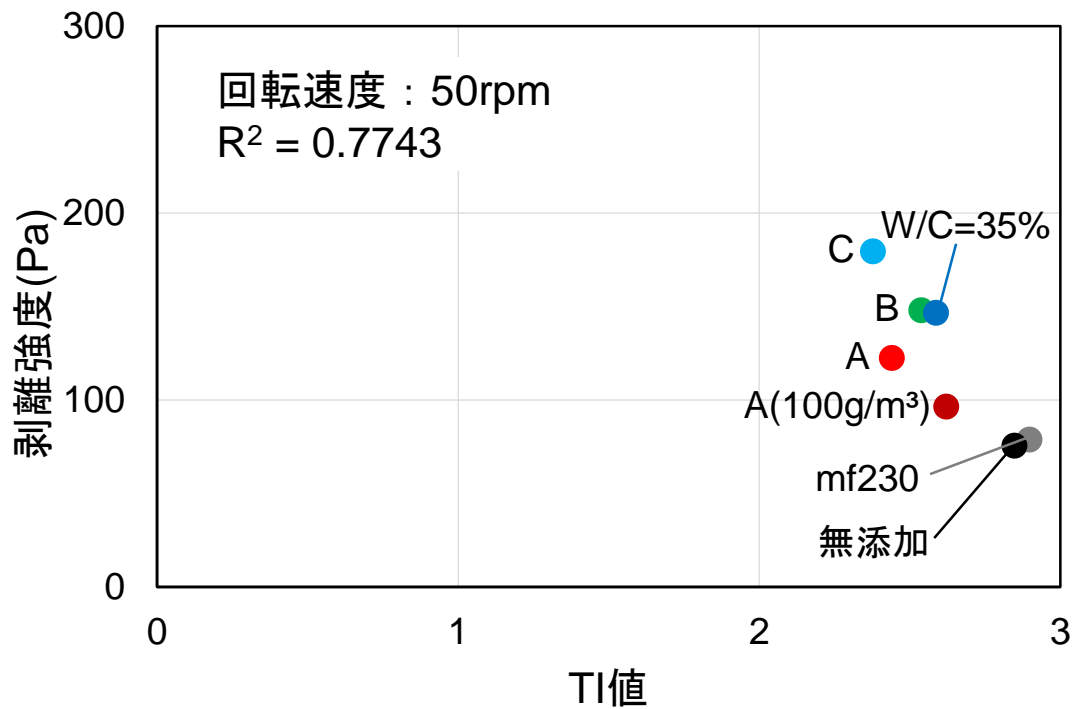
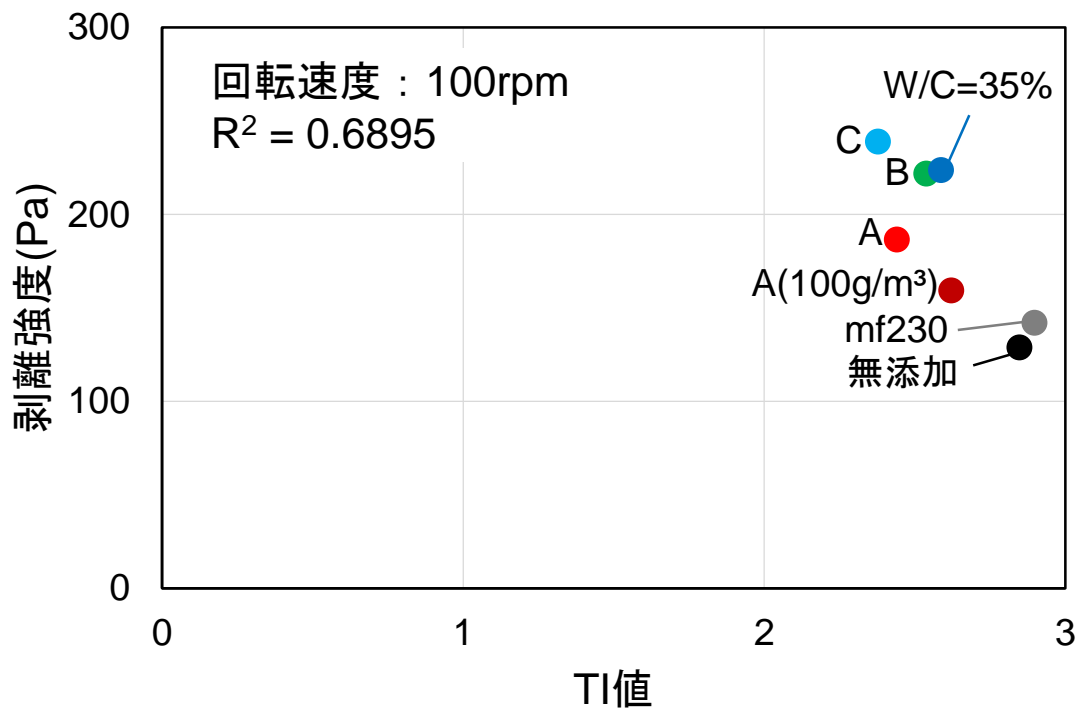


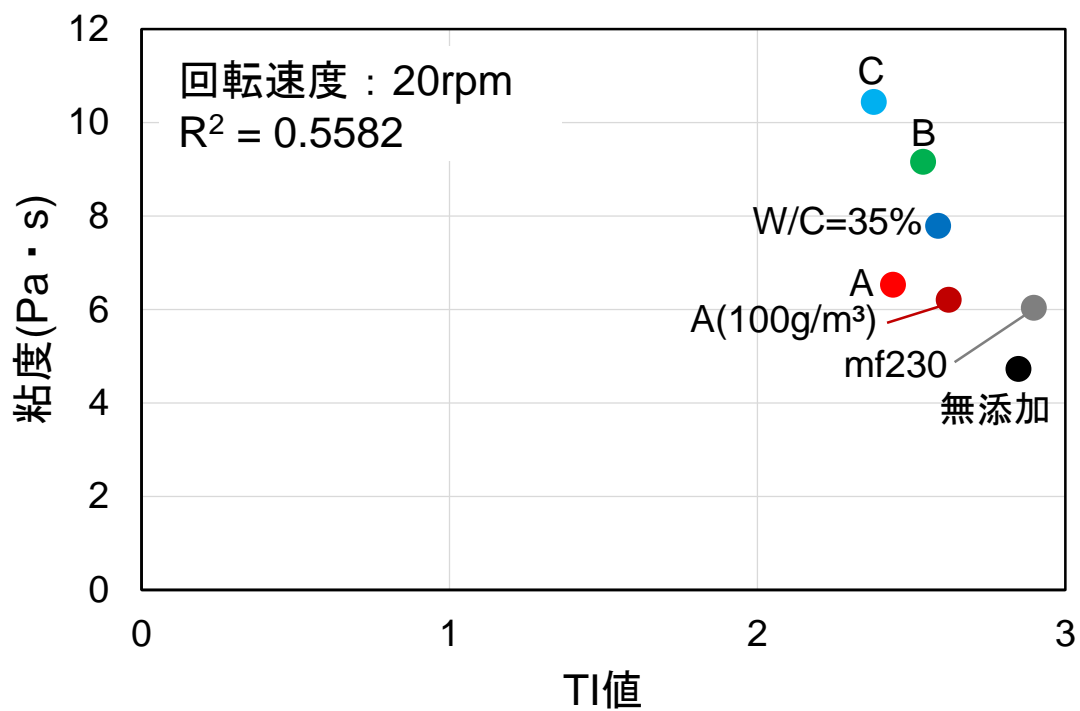
図-付録 1.2 TI 値と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係



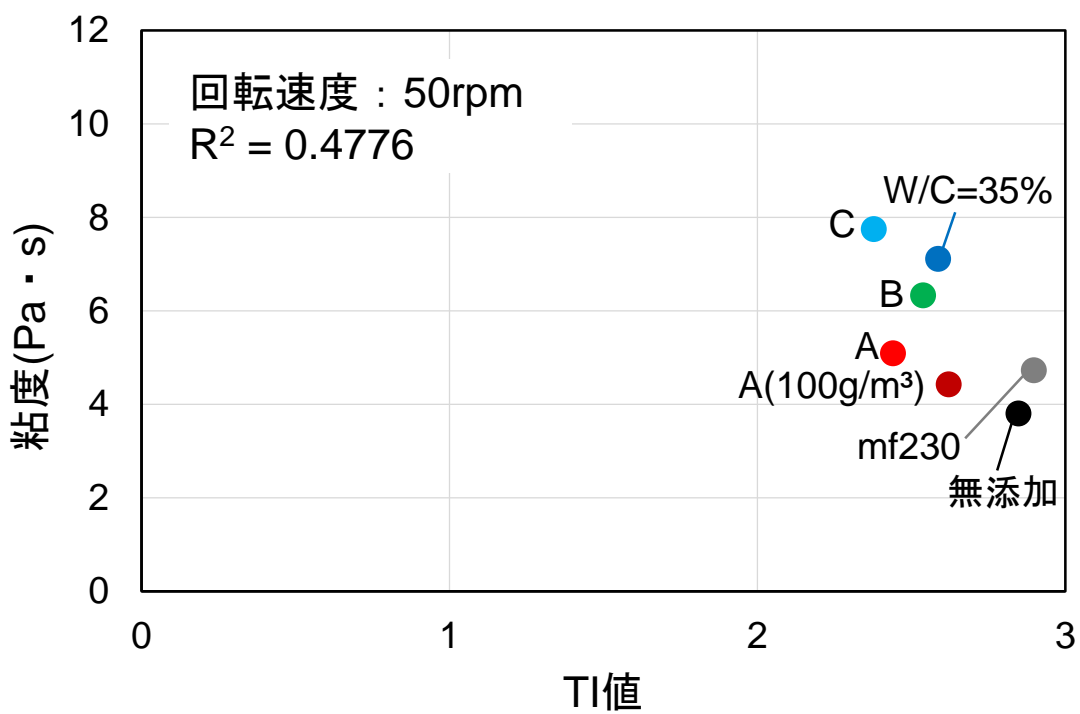
図一付録 1.3 TI 値と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係



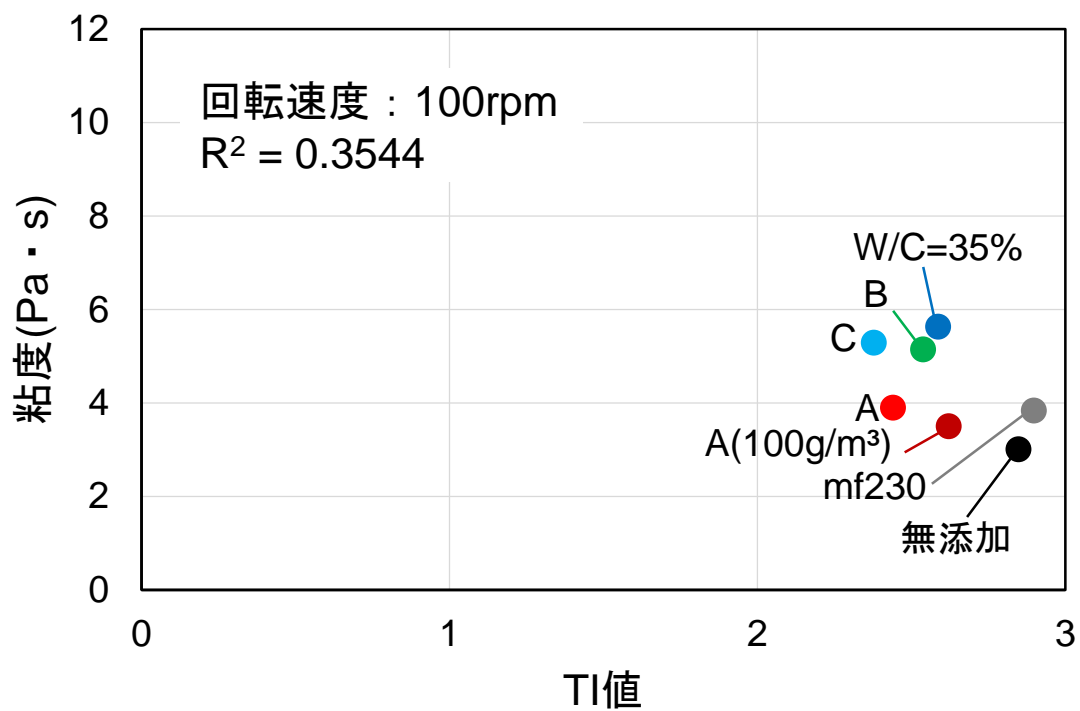
図一付録 1.4 TI 値と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係



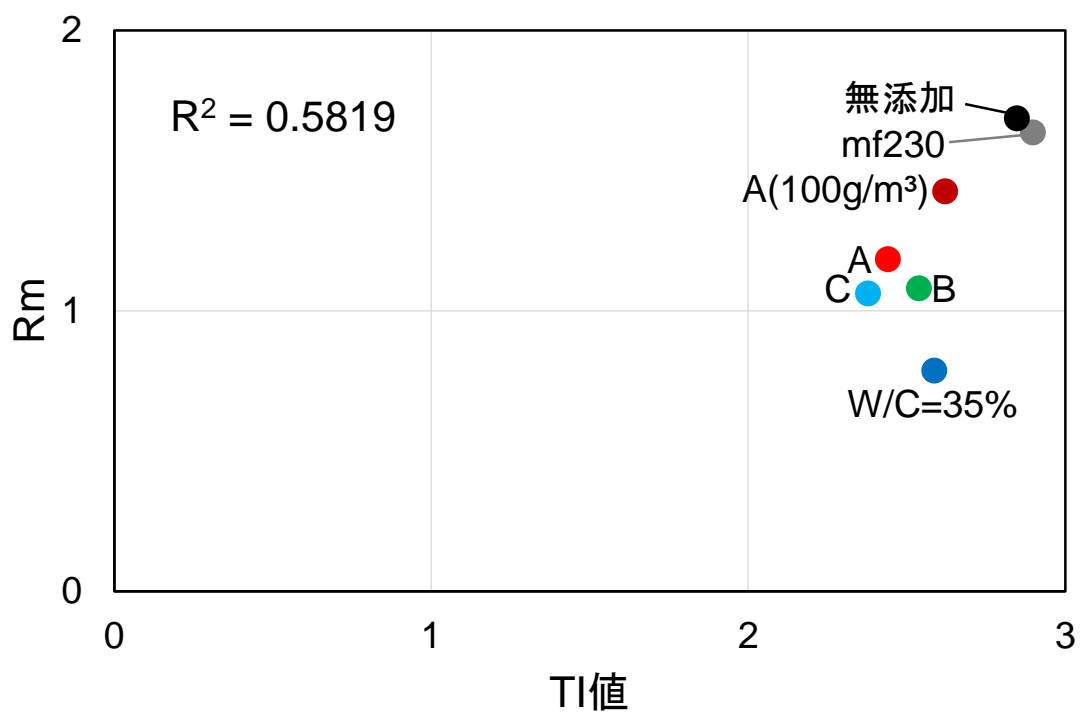
図一付録 1.5 TI 値と回転速度 20rpm 時の粘度の関係



図一付録 1.6 TI 値と回転速度 50rpm 時の粘度の関係



図一付録 1.7 TI 値と回転速度 100rpm 時の粘度の関係



図一付録 1.8 TI 値と Rm の関係

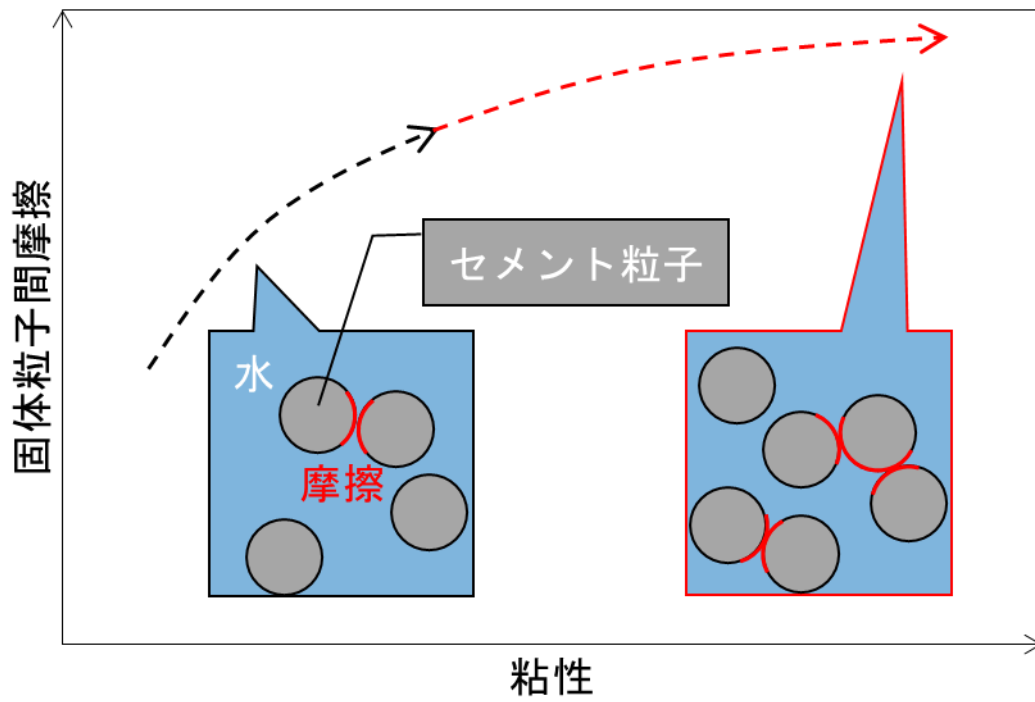


## 付録 2 フレッシュモルタルの粘性と固体粒子間摩擦

一般的にモルタルの粘性と固体粒子間摩擦は相関が高いと言われおり、高い固体粒子間摩擦は、モルタルのせん断強度を増加させ流動性を低下させる（図－付録 2.1）。そのため粘性を付与する VMA がせん断強度へ及ぼす影響について、図－付録 2.2 の一面せん断試験機を用いて直応力化でのせん断強度を比較した。この試験機は、鉛直荷重を試料に作用させてその内部に圧縮応力を生じさせ、上層と下層の二層に分かれた容器内のフレッシュモルタルを一定速度でせん断変形させることにより、その上下面の間に生じる摩擦力を測定するものであり（図－付録 2.3）、フレッシュコンクリートの間隙通過時に接近する粗骨材粒子間に生じる直応力下でのフレッシュモルタルせん断変形を模擬したものである。

福田は本試験機とフレッシュコンクリートの間隙通過性試験（R1 障害のボックス試験）の関係からフレッシュモルタル中に生じる直応力は 300 kPa 程度以下と結論づけた<sup>9)</sup>。そこで本研究では、直応力 200 及び 300 kPa にてせん断強度を測定した（図－付録 2.4）。直応力 200 kPa では、A を添加したものはせん断強度が大きく増加したが、高粘性である B と C を添加したものはせん断強度の増加は A より小さかった。しかし、直応力 300 kPa では、A を添加したものはせん断強度の増加が小さく、B と C を添加したものは A よりもせん断強度が大きく増加した。

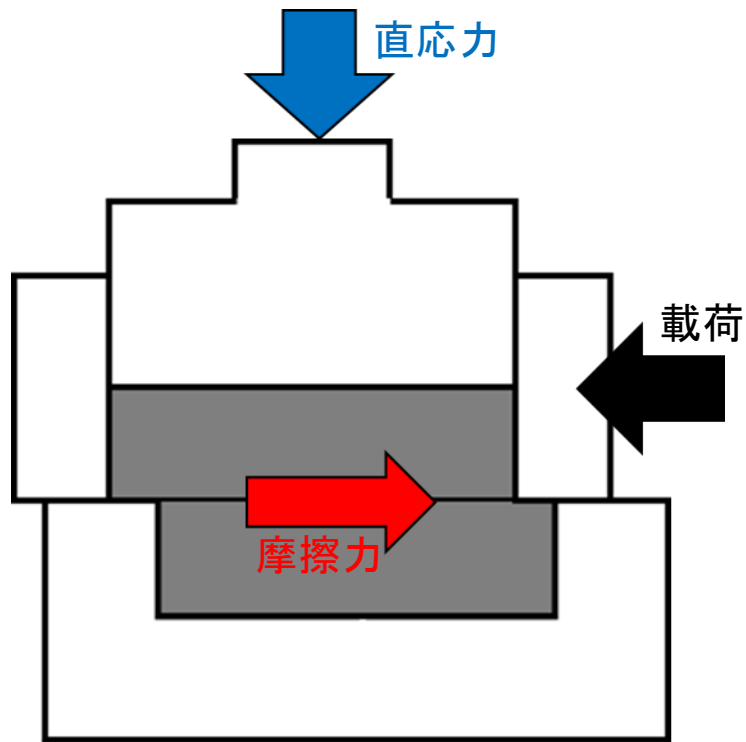
各直応力下のせん断強度と各試験により測定した粘性との関係を以下に示す。直応力 200 kPa 時は、剥離強度は回転速度によらず相関が無かった（図－付録 2.5, 図－付録 2.6, 図－付録 2.7）。また、粘度も相関がなく（図－付録 2.8, 図－付録 2.9, 図－付録 2.10）、Rm は相関が低いことがわかった（図－付録 2.11）。直応力 300 kPa 時は、剥離強度は若干の相関があり、高回転速度ほど相関は低くなった（図－付録 2.12, 図－付録 2.13, 図－付録 2.14）。また、粘度は 20 rpm 時は相関が高く、高回転速度ほど相関が低くなった（図－付録 2.15, 図－付録 2.16, 図－付録 2.17）。しかし、Rm は相関が低いことがわかった（図－付録 2.18）。



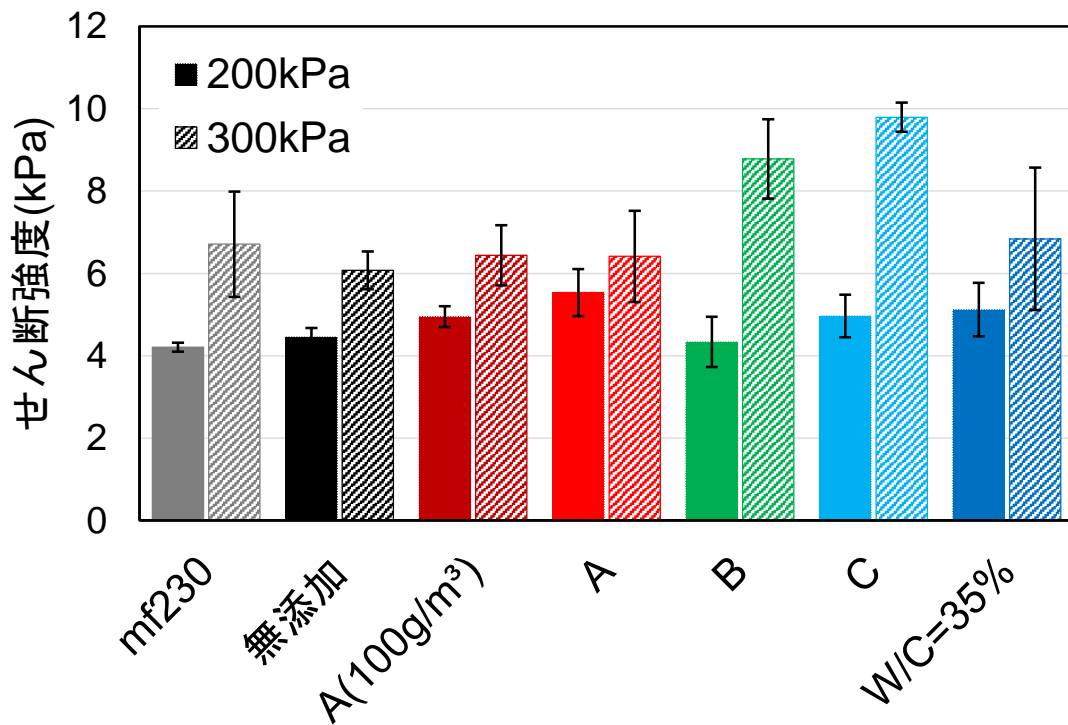
図一付録 2.1 粘性と固体粒子間摩擦の関係



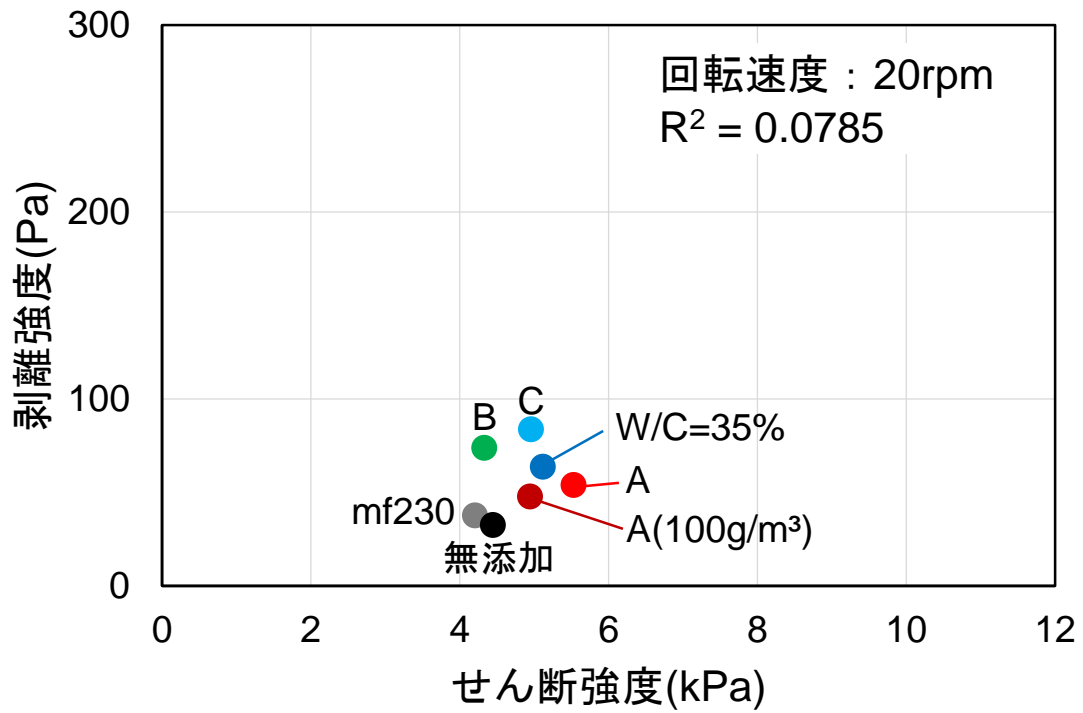
図一付録 2.2 一面せん断試験機



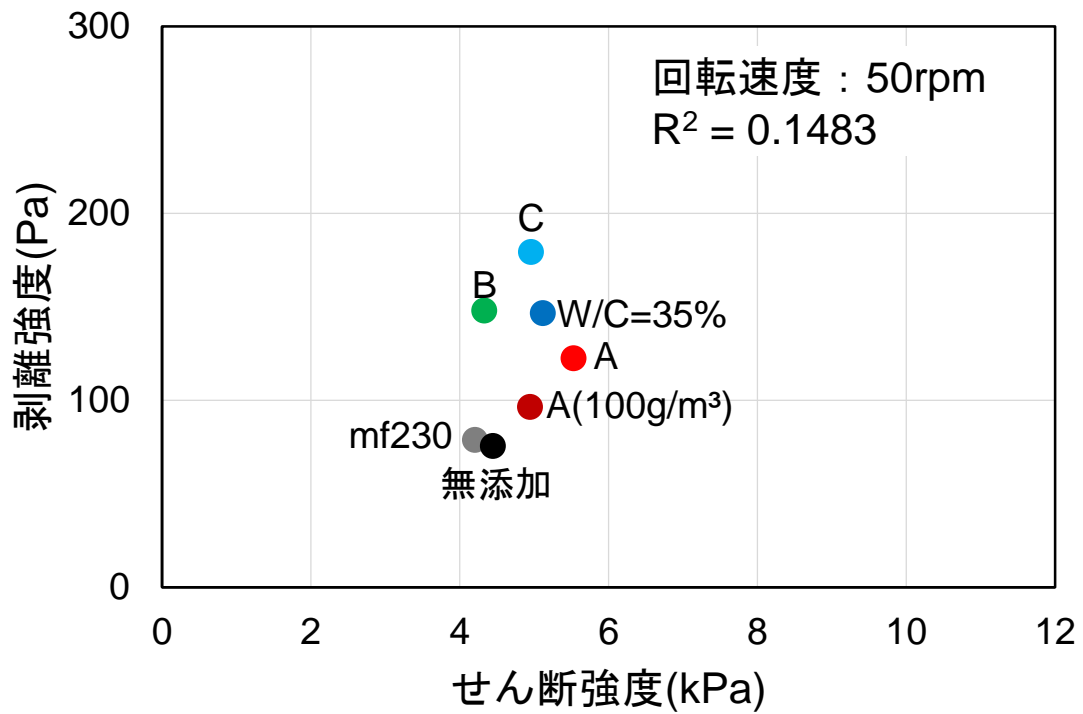
図一付録 2.3 一面せん断試験のイメージ



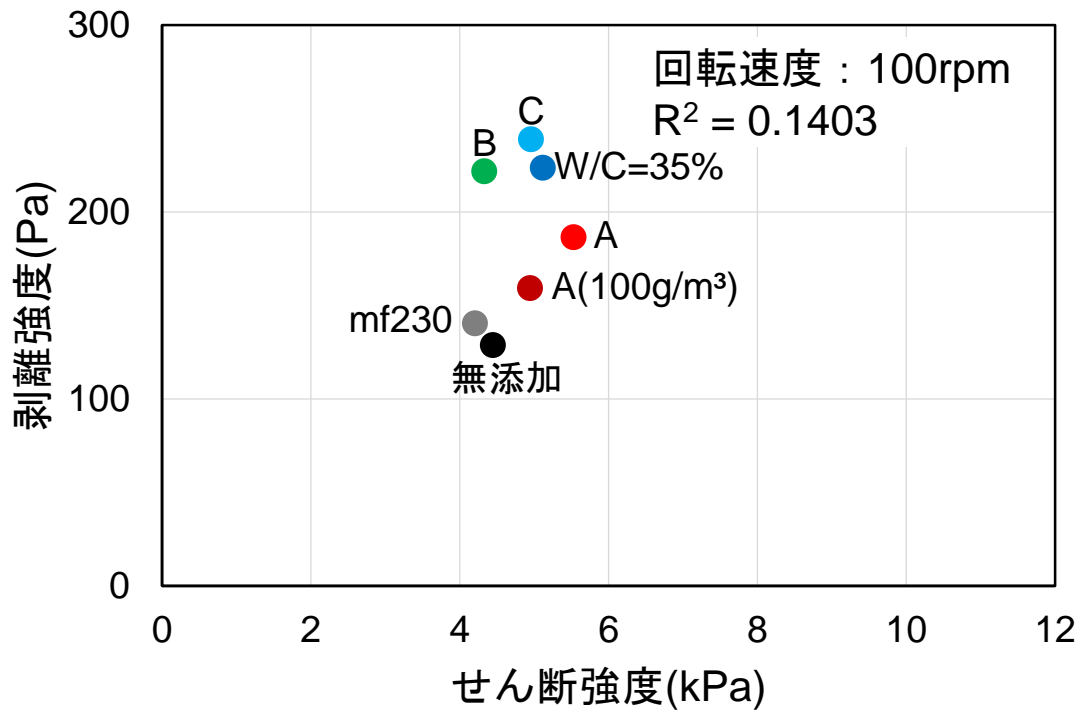
図一付録 2.4 一面せん断試験によるせん断強度の測定結果



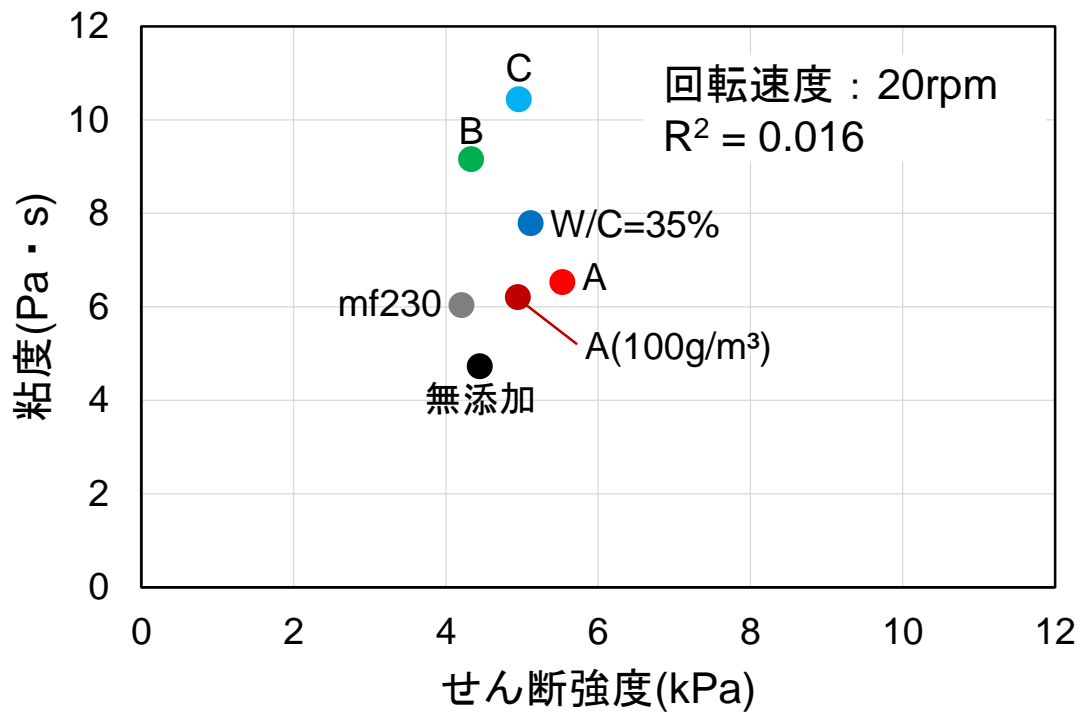
図一付録 2.5 直応力 200kPa と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係



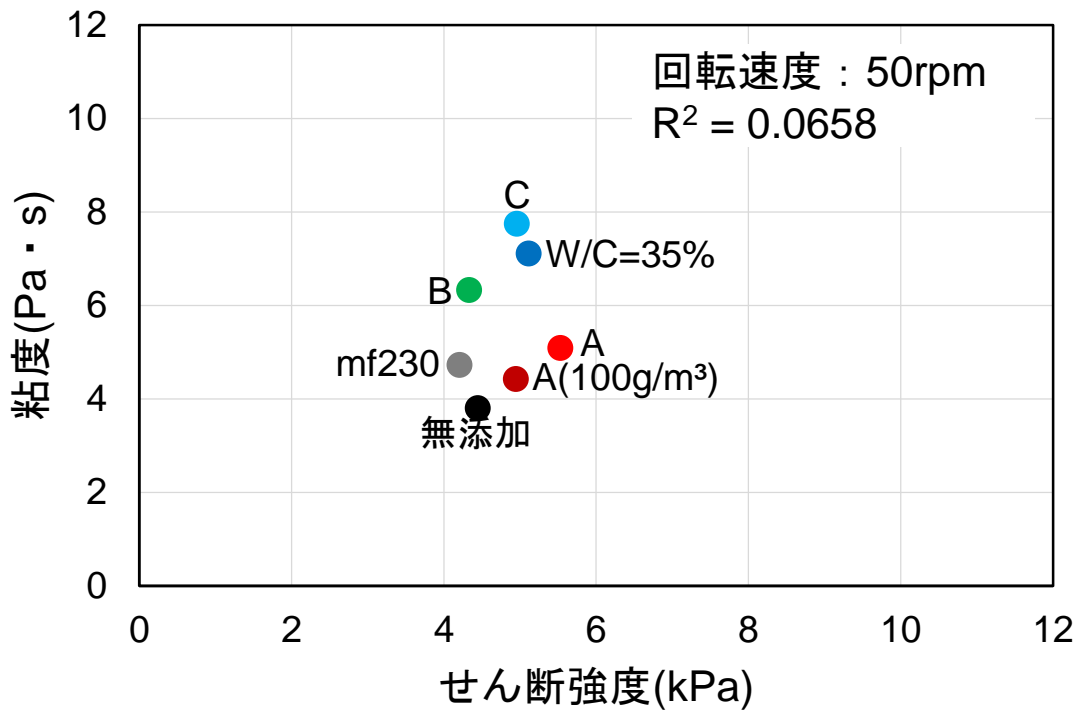
図一付録 2.6 直応力 200kPa と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係



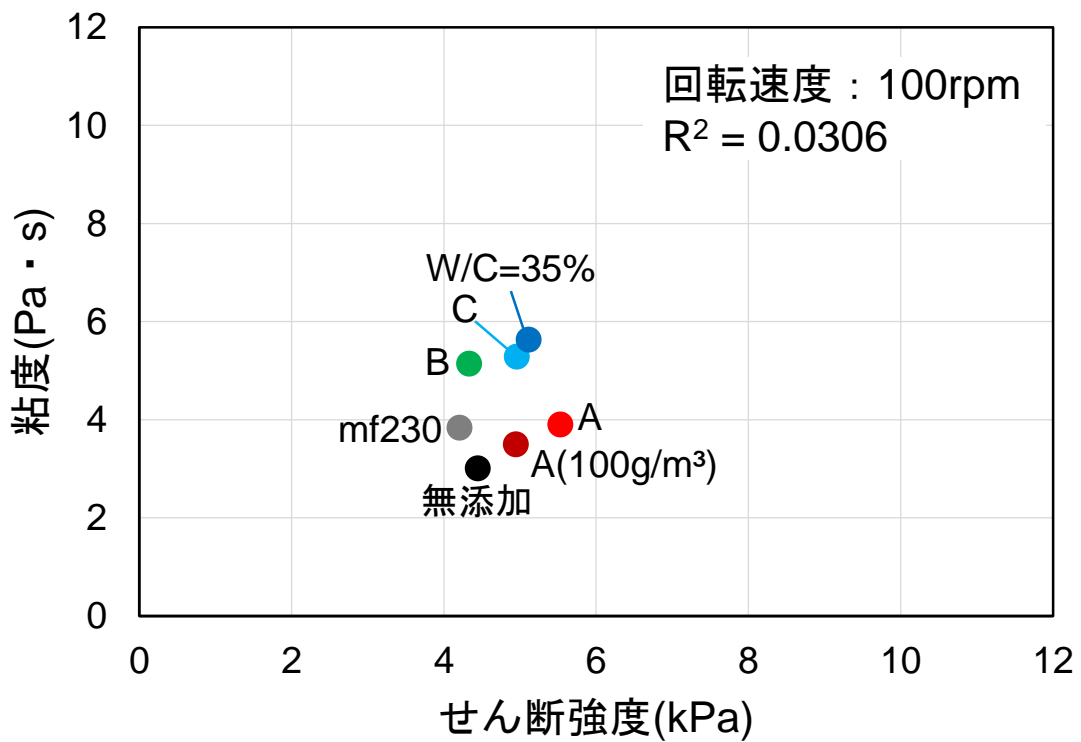
図一付録 2.7 直応力 200kPa と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係



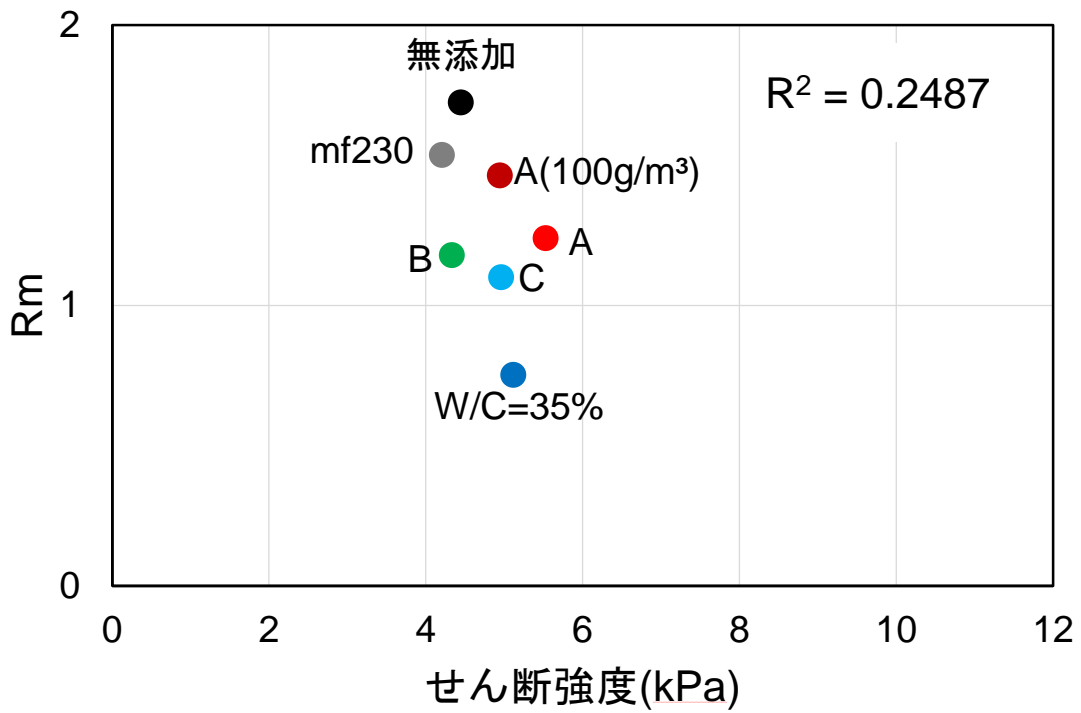
図一付録 2.8 直応力 200kPa と回転速度 20rpm 時の粘度の関係



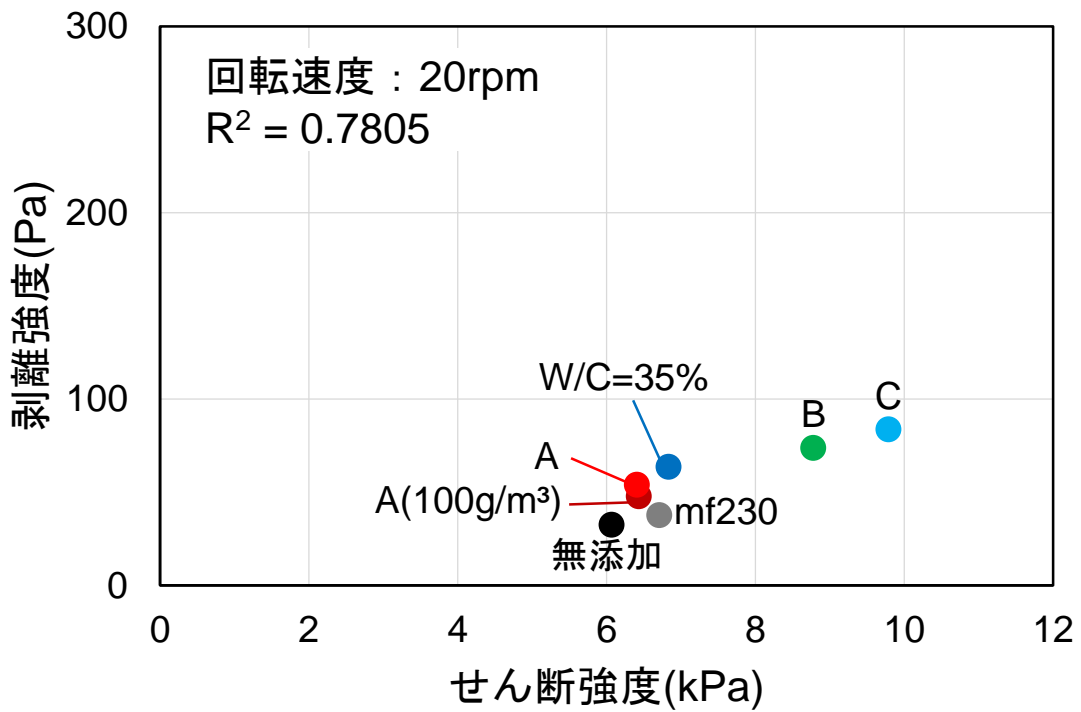
図一付録 2. 9 直応力 200kPa と回転速度 50rpm 時の粘度の関係



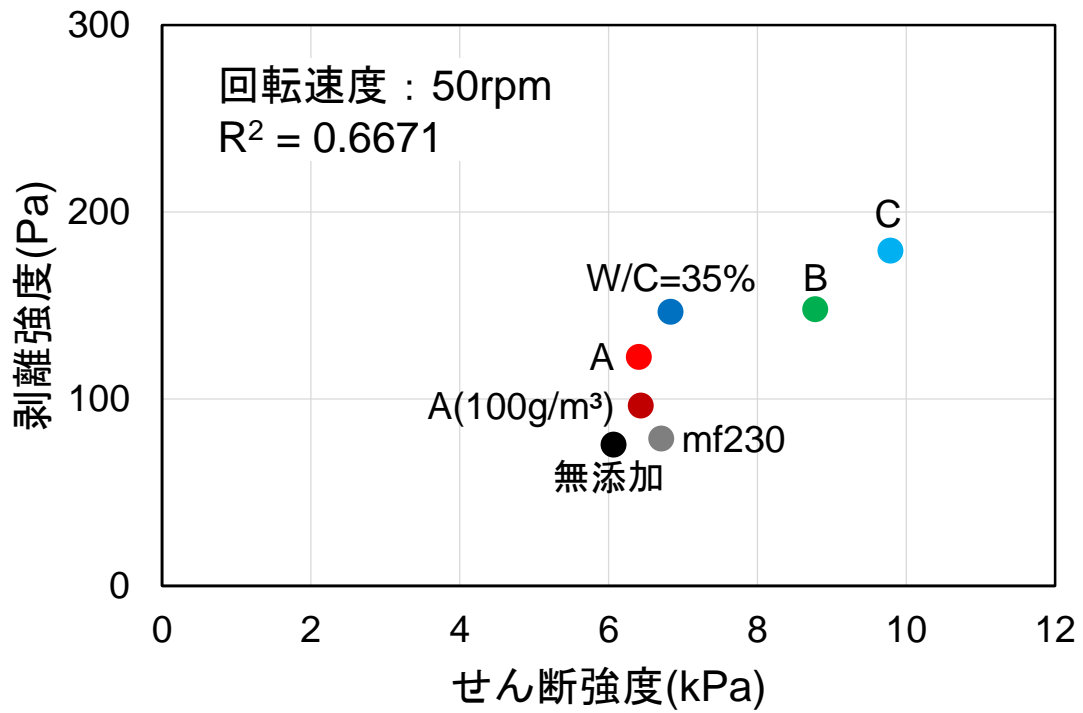
図一付録 2. 10 直応力 200kPa と回転速度 100rpm 時の粘度の関係



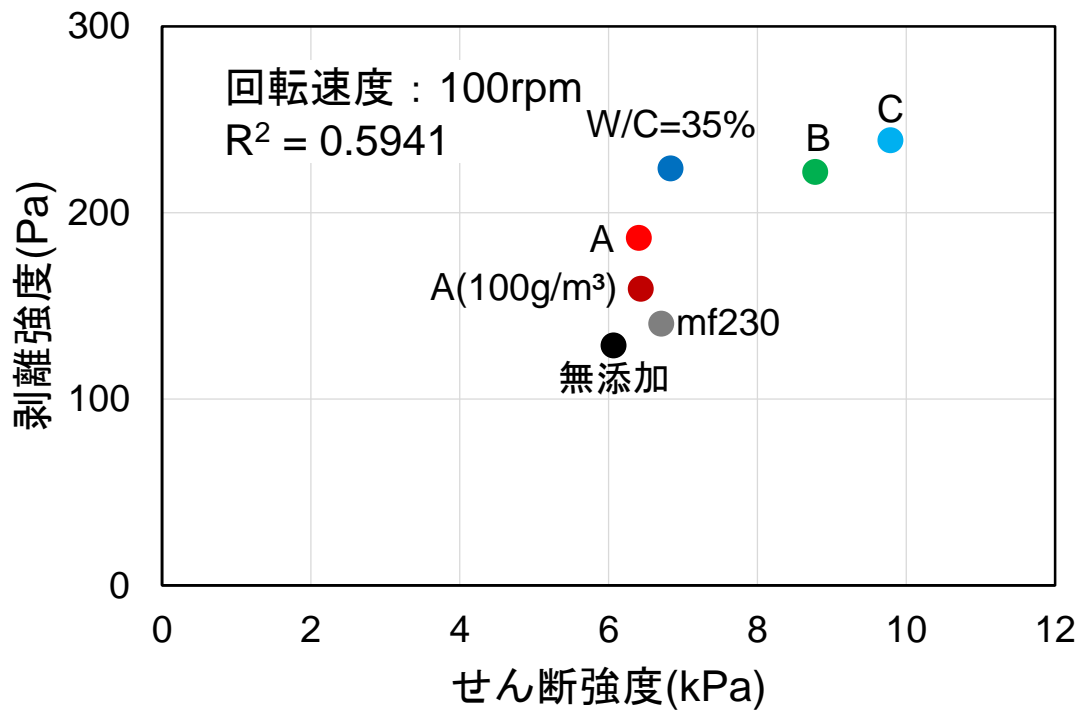
図一付録 2. 11 直応力 200kPa と Rm の関係



図一付録 2. 12 直応力 300kPa と回転速度 20rpm 時の剥離強度の関係

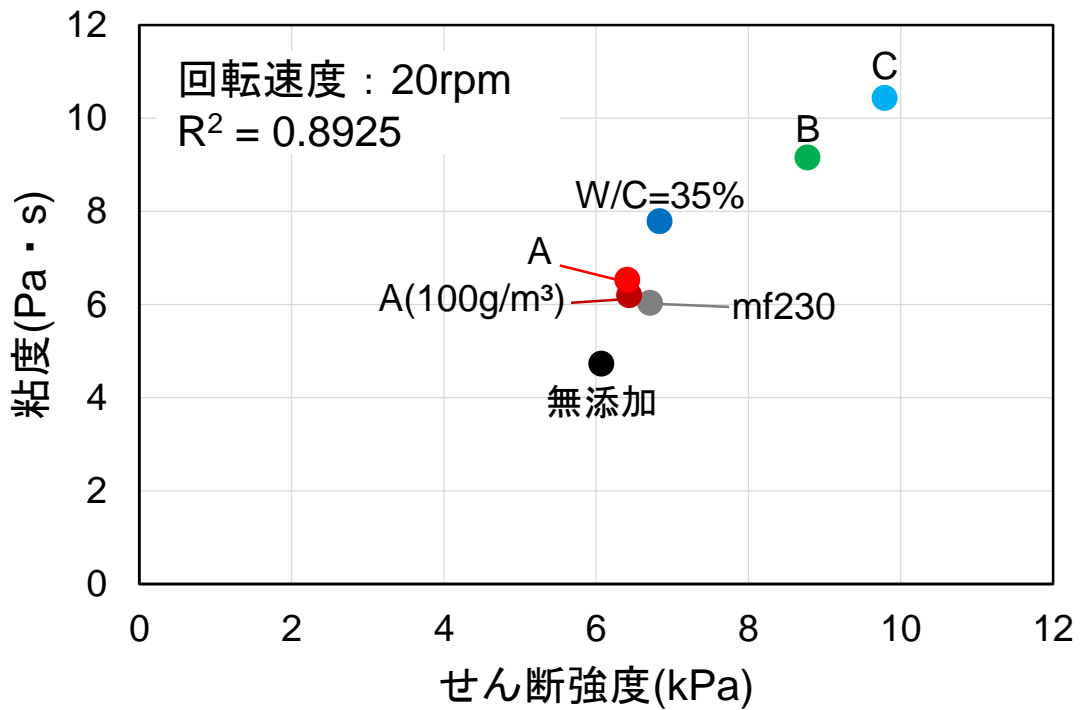


図一付録 2. 13 直応力 300kPa と回転速度 50rpm 時の剥離強度の関係

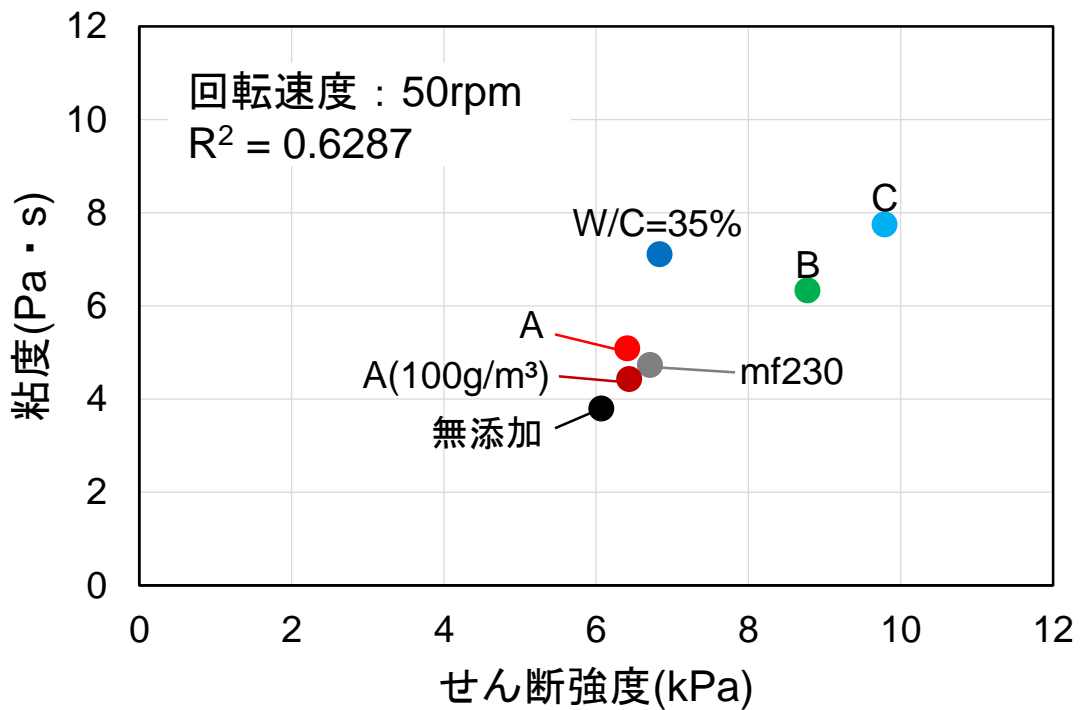


図一付録 2. 14 直応力 300kPa と回転速度 100rpm 時の剥離強度の関係

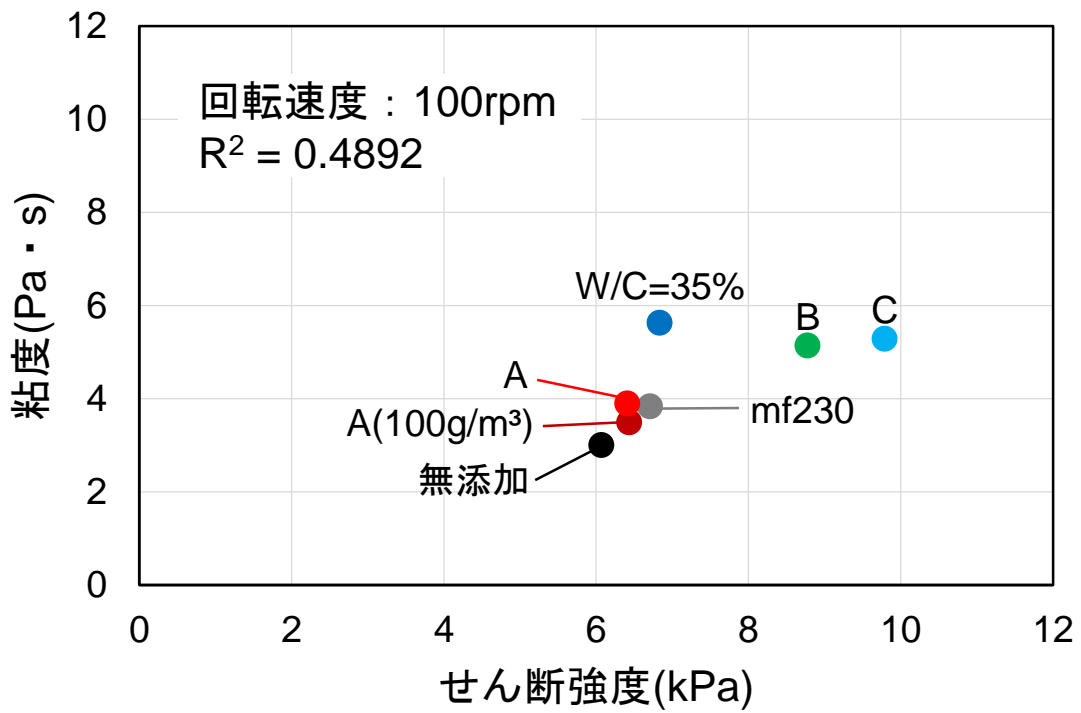




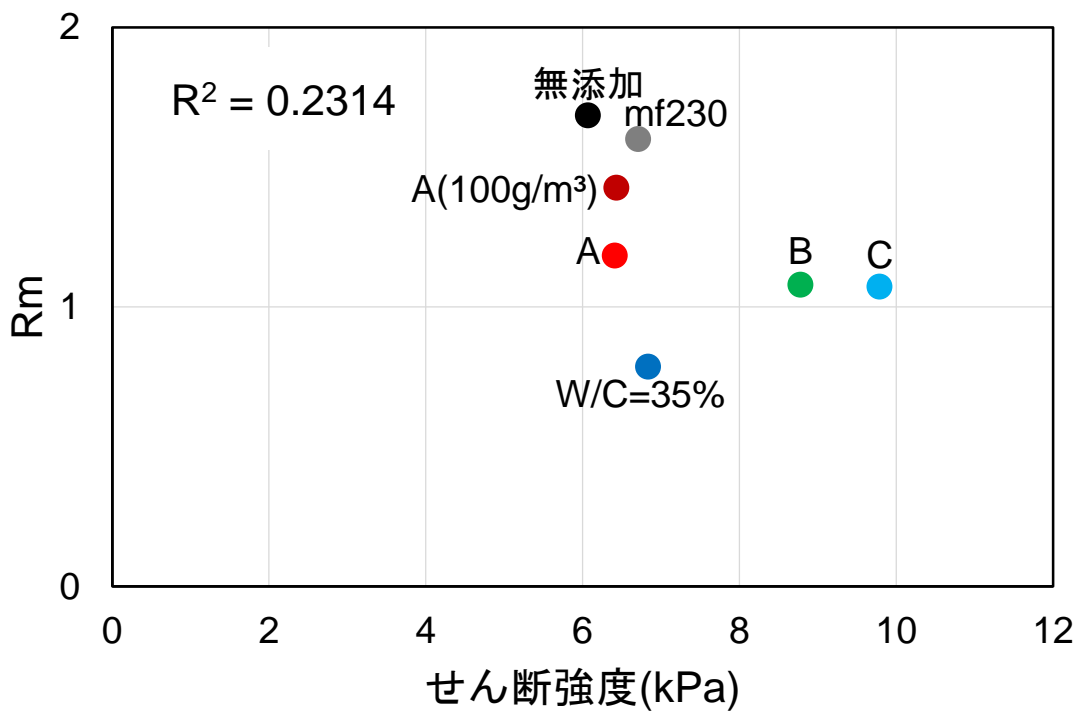
図一付録 2. 15 直応力 300kPa と回転速度 20rpm 時の粘度の関係



図一付録 2. 16 直応力 300kPa と回転速度 50rpm 時の粘度の関係



図一付録 2. 17 直応力 300kPa と回転速度 100rpm 時の粘度の関係



図一付録 2. 18 直応力 300kPa と Rm の関係

## 参考文献

- 1) 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年9月
- 2) 小西秀和, 山川 勉: 可塑性付与型セルローズエーテル添加コンクリートに関する基礎的研究, 第72回土木学会年次学術講演会, 第V部門, 2017年
- 3) 大西 悠: 粗骨材・モルタル間の粘着力向上によるフレッシュコンクリートへの自己充填性付与, 第73回土木学会年次学術講演会, 第V部門, 2018年
- 4) 井上和政, 和泉意登志, 瀬古繁喜, 阿部靖弘: 高流動コンクリート中のフレッシュモルタルの粘性と粗骨材への付着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994年
- 5) 谷川恭雄: フレッシュコンクリートの流動特性とその予測, セメントジャーナル社
- 6) 毛利匡志, 大内雅博: ペーストの高粘着付与による自己充填コンクリートのモルタル中の細骨材分布の均等化, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019年
- 7) 三島直生, 畑中重光, 大村修太郎: 試料の変形状態が回転粘度計の測定結果に及ぼす影響に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, 2007年
- 8) 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.22, 1999年
- 9) 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個体粒子間摩擦の定量化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.42, No.1, 2020年

## 謝辞

本研究を進めていくに当たり、多くの方々の多大なる御指導・御協力を頂きました。

本論文の作成にあたり、大内雅博先生（高知工科大学教授）、佐藤慎司先生（高知工科大学教授）、曾我部敏郎先生（現高知工科大学技術指導員）、山川勉氏（鉄建建設㈱）、小西秀和氏（信越化学工業㈱合成技術研究所）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、研究活動だけでなく進路相談や学会発表の機会を与えて頂きました。大変お世話になりました。研究活動においては、従来の考え方だけに捉われずフレッシュコンクリートの性質をレオロジーや土質力学などの分野から考える機会を頂き、他分野から物事を考えることの重要性を学ぶことができました。心より御礼申し上げます。

佐藤先生には、修士論文の副指導教員として、特にレオロジーの分野の見地からの御意見や的確な御指摘を頂きました。佐藤先生の御指導は自身の研究において刺激になり、自身の研究を見直すことができました。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基礎知識や実験全般について御指導と御協力頂きました。心より御礼申し上げます。

山川勉氏と小西秀和氏には、新型増粘剤を御提供頂きました。そして、新型増粘剤によるフレッシュモルタルへの粘性の付与効果についての御指導賜りました。心より御礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、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、普段の実験の手伝いや相談にのって頂きました。心より感謝申し上げます。

最後に、大学・大学院と6年間にわたり多方面で支えて下さった家族に対し、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 佐藤 奨