

2022 年度修士論文

炭酸水練混ぜによる
フレッシュコンクリートの
粘着力向上

Increase in adhesion force of fresh concrete
mixed with carbonated water

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 佐藤 慎司

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

1255063 向井仁哉

2023 年 3 月

炭酸水練混ぜによる フレッシュコンクリートの粘着力向上

向井 仁哉

要旨

材料コストを削減するために水セメント比を高めたフレッシュコンクリートは、低粘性により間隙通過時にモルタルと粗骨材の分離が生じ、粗骨材どうしの接触摩擦が増加して閉塞が生じやすくなり、所要の自己充填性能が得られない可能性がある。自己充填コンクリートの一般化のためには、自己充填性能を維持しつつ、単位セメント量を削減し水セメント比を高めるための技術が必要である。

本研究の目的は、経済的な自己充填性能付与技術の開発を目標に、炭酸水練り混ぜによる水セメント比を高めたフレッシュコンクリートのモルタル相の粘性を向上させ、従来型の自己充填コンクリートの粘性に到達することである。

フレッシュコンクリートの自己充填性能を支配する粘性の指標として、粘度と、面外および面内粘着力を設定し、自己充填コンクリートを想定した水セメント比 **45%** および細骨材容積比 **55%** のフレッシュモルタルにおける、炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの粘性向上効果への影響を調べた。炭酸水練混ぜにより、セメントの水和反応により生成する水酸化カルシウムから炭酸カルシウムが生成され、これがフレッシュモルタルの性状に影響を与えるものと想定した。

熱分析により、炭酸水練混ぜにより炭酸カルシウムが生成されていることを確認した。

フレッシュモルタルの粘性のうち、増粘剤の添加が特に粘度や面内粘着力を向上させた一方、炭酸水練混ぜは面外粘着力を向上させた。さらに増粘剤添加と炭酸水練混ぜの併用により、増粘剤添加では到達できなかった面外粘着力の値を得ることができた。これは、粉体系自己充填コンクリートの水セメント比 **35%** のモルタル相と同等の値であった。

本研究の成果により、普通コンクリート並みの骨材量にしつつ、粉体量の多い従来型の自己充填コンクリートの自己充填性能を付与できる可能性を得たと言える。今後、本研究で定量化した各要素がフレッシュコンクリートの自己充填性能に及ぼす影響を調べる必要がある。

Increase in adhesion force of fresh concrete mixed with carbonated water

Jinya MUKAI

ABSTRACT

Fresh concrete with a high water to cement ratio for reducing material cost may not have the required level of self-compacting performance because its low viscosity may cause the segregation between mortar and coarse aggregate particles when flowing through obstacle resulting in the contact friction and leading to the blockage. In order to make self-compacting concrete a standard one, technologies are necessary for reducing the unit cement content and increasing the water to cement ratio while maintaining the level of self-compacting performance.

The objective of this study is to increase the viscosity of the mortar phase of fresh concrete with a higher water to cement ratio to reach the level of the higher viscosity of the self-compacting concrete with high powder volume by mixing with carbonated water., The final goal of this research is to develop an economical technology for imparting self-compacting performance.

The viscosity and the out-of-plane and in-plane adhesive forces were set up as the indices for the viscosities that governs the self-compacting performance of fresh concrete. The effect of mixing with carbonated water on the increase in viscosity of fresh mortar was investigated. It was assumed that calcium carbonate was formed from calcium hydroxide generated from the hydration reaction of cement by mixing with carbonated water, and that this affected the properties of the fresh mortar. Thermal analysis confirmed that calcium carbonate was formed by mixing with carbonated water.

Among the viscosities of fresh mortar, the dose of the thickener improved the viscosity and in-plane adhesion in particular, while mixing with carbonated water improved the out-of-plane adhesion. Furthermore, the combination of the dose of thickener and carbonated water increased to the level of out-of-plane adhesion values that could not be achieved with the dose of the thickener. This value was equivalent to that of the mortar phase of powdered self-compacting concrete with the water to cement ratio of 35%. This means that the level of self-compacting performance with high powder content can be achieved while keeping the same level of aggregate content as that of the ordinary concrete.

In the next step to this study, the effect of each of the factors in this study may be unified for the self-compacting performance of fresh concrete.

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 自己充填コンクリートの材料コスト縮減のための微細気泡連行と増粘剤添加	2
1.3 フレッシュコンクリートの粘性、特に粘着力測定に関する既往研究	5
1.3 対象とする粘性	9
1.4 本論文の構成	11
第2章 材料と配合と練混ぜ手順	12
2.1 使用材料	12
2.2 配合及び練混ぜ手順	13
第3章 試験および測定方法	15
3.1 概要	15
3.1 モルタルフロー試験	15
3.2 モルタルロート試験	16
3.3 粘度の測定	16
3.4 面内粘着力の測定	19
3.5 面外粘着力の測定	21
第4章 熱分析による炭酸カルシウム量の測定	24
4.1 概要	24
4.2 熱分析の測定原理	24
4.3 炭酸水練混ぜによる炭酸カルシウム量の増加	26
第5章 炭酸水練混ぜによる粘性の付与	27
5.1 炭酸水練混ぜによる粘性の増加	27
5.2 炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘性に及ぼす影響	30
第6章 結論	31
付録	32
付録1 増粘剤の種類と添加量選定の経緯	32
付録2 フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較	38
付録3 炭酸水練混ぜが直応力下でのせん断強度に及ぼす影響	42
付録3.1 概要	42
付録3.2 せん断強度の測定	43
付録3.3 せん断強度の定義	45
付録3.4 炭酸水練混ぜによるせん断強度の増加	46
参考文献	48
謝辞	49

図目次

図-1.1	増粘剤を添加した W/C45%のフレッシュモルタルと従来型 SCC の配合である粉体量の多い W/C35%のフレッシュモルタルとのロート流下時間の比較.....	1
図-1.2	本研究で粘性を増加させるメカニズムについての仮説.....	1
図-1.3	フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術.....	3
図-1.4	開発中の自己充填コンクリートの位置づけ.....	3
図-1.5	増粘剤によるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与.....	4
図-1.6	モルタルロート試験.....	6
図-1.7	水平摩擦試験機による摩擦力の測定.....	6
図-1.8	水平摩擦試験による粘着力の測定.....	7
図-1.9	回転粘度計による摩擦力の測定.....	7
図-1.10	回転粘度計による粘着力の測定.....	8
図-1.11	フレッシュコンクリートの間隙通過性能を支配する粘性の役割.....	9
図-1.12	フレッシュモルタルの 2 種類の粘着力.....	10
図-1.13	本論文の構成.....	11
図-2.1	モルタルミキサ.....	13
図-3.1	モルタルフロー試験.....	15
図-3.2	モルタルロート試験.....	16
図-3.3	回転粘度計による粘度測定.....	17
図-3.4	TVB25 形粘度計（東機産業製）.....	17
図-3.5	W/C 35%の粘度の測定結果.....	18
図-3.6	回転速度と粘度の関係.....	18
図-3.7	W/C 35%の面内粘着力の測定結果.....	20
図-3.8	回転速度と面内粘着力の関係.....	20
図-3.9	TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）.....	21
図-3.10	試料に粘着・剥離させる治具.....	22
図-3.11	テクスチャーアナライザーによる面外粘着力測定.....	22
図-3.12	測定中のモルタルの様子.....	22
図-3.13	W/C 35%の面外粘着力の測定結果.....	23
図-3.14	引上げ速度と面外粘着力の関係.....	23
図-4.1	粘性を増加させるメカニズムについての仮説.....	24

図-4.2	W/C 45%の炭酸水練混ぜの試料のTG 曲線.....	25
図-4.3	1 mg あたりの炭酸カルシウム量.....	26
図-5.1	ロート流下時間の比較.....	27
図-5.2	粘度の比較（回転速度 100 rpm）.....	28
図-5.3	面内粘着力の比較（回転速度 100 rpm）.....	28
図-5.4	面外粘着力の比較（引上げ速度 40 mm/s）.....	29
図-5.5	炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘度，面内粘着力に及ぼす影響.....	30
図-5.6	炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘度，面外粘着力に及ぼす影響.....	30
付図-1.1	ロート流下時間の比較.....	32
付図-1.2	粘度の比較（回転速度 100 rpm）.....	33
付図-1.3	面内粘着力の比較（回転速度 100 rpm）.....	33
付図-1.4	面外粘着力の比較（引上げ速度 40 mm/s）.....	34
付図-1.5	直応力 200 kPa 時のせん断強度の比較（水平速度 0.03 mm/s）.....	34
付図-1.6	直応力 300 kPa 時のせん断強度の比較（水平速度 0.03 mm/s）.....	35
付図-1.7	粘度と面内粘着力の関係.....	35
付図-1.8	粘度と面外粘着力の関係.....	36
付図-1.9	面外粘着力と直応力 200 kPa 時のせん断強度の関係.....	36
付図-1.10	面外粘着力と直応力 300 kPa 時のせん断強度の関係.....	37
付図-2.1	ロート流下時間と粘度の関係.....	38
付図-2.2	ロート流下時間と面内粘着力の関係.....	39
付図-2.3	ロート流下時間と面外粘着力の関係.....	39
付図-2.4	粘度と面内粘着力の関係.....	40
付図-2.5	粘度と面外粘着力の関係.....	40
付図-2.6	面内粘着力と面外粘着力の関係.....	41
付図-3.1	フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ.....	42
付図-3.2	一面せん断試験機.....	43
付図-3.3	一面せん断試験機の測定イメージ.....	44
付図-3.4	方向の変位とせん断力の関係.....	45
付図-3.5	直応力 200 kPa 時のせん断強度（水平速度 0.03 mm/s）.....	46
付図-3.6	直応力 300 kPa 時のせん断強度（水平速度 0.03 mm/s）.....	47
付図-3.7	直応力 200kPa 時のせん断強度と直応力 300kPa 時と直応力 200kPa 時のせん断強度の差の関係（水平速度 0.03 mm/s）.....	47

表目次

表-2.1	使用材料.....	12
表-2.2	モルタル配合	14
表-3.1	W/C 35%の粘度の測定結果の平均値と標準偏差	18
表-3.2	W/C 35%の面内粘着力の測定結果の平均値と標準偏差	20
表-3.3	W/C 35%の面外粘着力の測定結果の平均値と標準偏差	23

1.2 自己充填コンクリートの材料コスト縮減のための微細気泡連行と増粘剤添加

主要な建設材料のひとつであるコンクリートは水、セメント、骨材といった天然に比較的近い加工度の低い材料を使用しており、安価で供給しやすいためもっとも一般的な建設材料として幅広く使用されている。しかし、コンクリート材料の信頼性や耐久性はフレッシュコンクリートの取り扱い方法や施工時の締固め作業等、施工過程における人為的要因に大きく影響される。適切に施工されない場合、ジャンカが生じ、構造や安全上の問題が生じてしまう。この問題を解決するために開発されたのが自己充填コンクリートである。1986（昭和 61）年に岡村により施工時に振動締固めを必要としないコンクリートが提唱され、1988（昭和 63）年に前川と小澤によって自己充填コンクリート（Self-Compacting Concrete : SCC）のプロトタイプが世界に先駆けて開発された。

しかし、2023 年現在、自己充填コンクリートが開発されてから 30 年以上が経過したが、普及しているとは言い難い。原因として、普通コンクリートに比べ高強度かつ高単価であることが挙げられる。プロトタイプから現在まで続く自己充填コンクリートは、材料分離の抑制による間隙通過性能付与のために、骨材量を小さくし、単位水量は変えずにセメントを増やして粘性を高めるとともに、比較的多量の高性能 AE 減水剤を添加して軟度を高めることにより自己充填性能を付与している（図-1.3）。そのため、粉体量（セメント等）の単位量が普通コンクリートの約 2 倍となるため、必然的に高強度となるために高単価となっているからである（図-1.4）。

自己充填コンクリートを一般的に使用される汎用コンクリートとするため、自己充填性能レベルを維持しつつ、強度と価格を抑えることが有効な手段の一つである。高知工科大学ではこの課題を解決するために、コンクリート中のセメントの一部を空気泡に置き換えてセメント量の低減を図った“気泡潤滑型自己充填コンクリート（Air-enhanced Self-Compacting Concrete : air-SCC）”を開発し、実用化に向けた技術開発を行ってきた²⁾。このコンクリートは微細な連行空気がフレッシュコンクリート中の固体粒子間摩擦を緩和し、骨材量を増加させることを可能にして、単価を普通コンクリート並みにするものである。

そして、単位セメント量を削減しつつ材料分離抵抗性を付与するため、セルロースを原料とした低分子量の新型増粘剤が開発された³⁾。この増粘剤を添加することで水セメント比 45%に高めたフレッシュコンクリートの粘性を増加させ、ボックス試験において、モルタルと粗骨材が分離せず一体となって流動したことが確認されている⁴⁾（図-1.5）。

しかしながら、増粘剤添加では、従来型 SCC の粘性そして従来型 SCC の自己充填性能のレベルにはまだ到達できていない（図-1.1）。

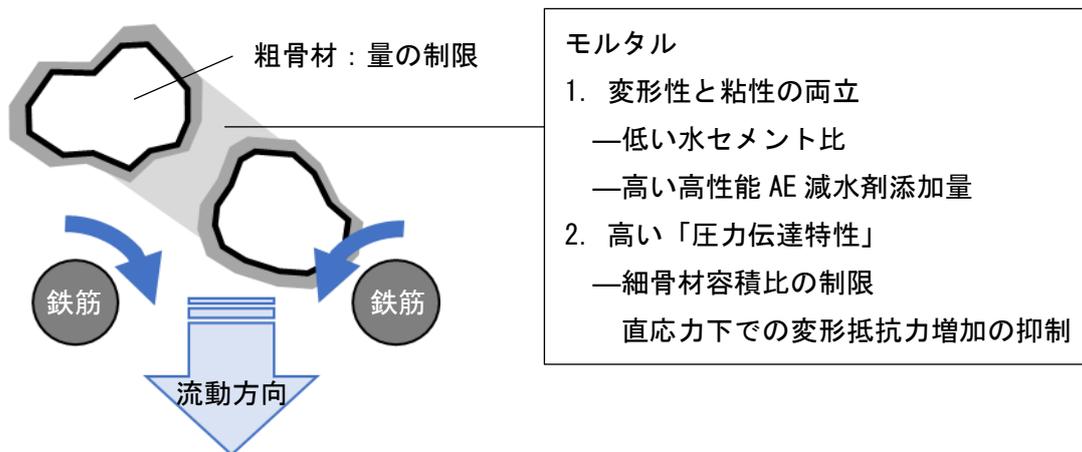


図-1.3 フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術

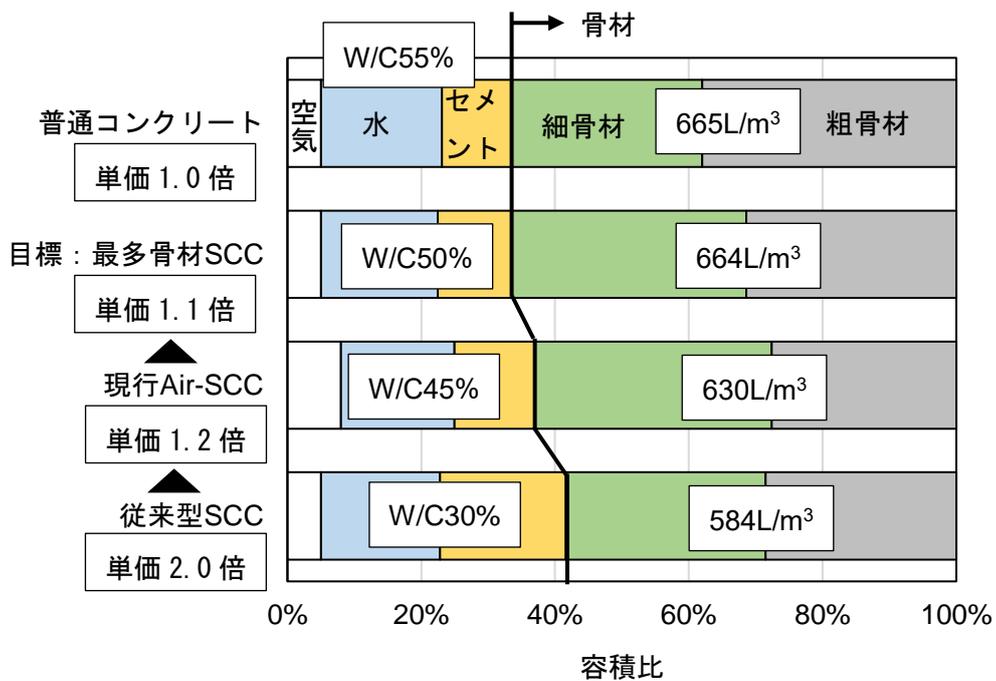


図-1.4 開発中の自己充填コンクリートの位置づけ

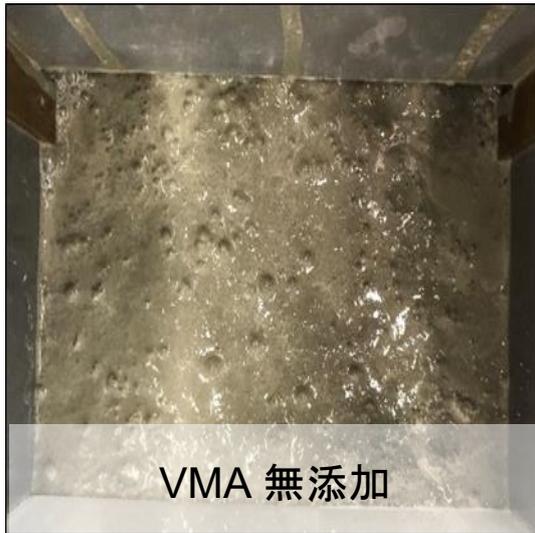


図-1.5 増粘剤によるモルタルと粗骨材の一体流動性の付与

1.3 フレッシュコンクリートの粘性、特に粘着力測定に関する既往研究

自己充填コンクリートの一般化のための技術開発に際して、粗骨材との材料分離を防止するためのフレッシュモルタルの「粘性」の簡易な測定方法が必要であった。そのために開発されたのが、最大粒子径 5 mm のフレッシュモルタルが通過し得るモルタル用のロートであった (図-1.6)。フル充填した試料の重力の作用のみによる流下時間の逆数を 10 倍した値を「相対ロート流下速度比 (Rm)」と定義した。フレッシュコンクリートの自己充填性を付与するために適切な Rm の範囲を実験により求め、これを配合設計に活用してきた。

一方、「粘性」の指標として従来から用いられてきたのが回転粘度計により測定した粘度である。この値がロート流下時間や速度とある程度の相関関係にあるが、必ずしも一致しているとは言い難い。ロート流下速度は複数の要因から成っているからである。モルタルの変形速度が支配的であるとはいえ、ロート壁面との摩擦力 (粘着力) の影響も無視できない。新たな材料開発や配合選定に際して、「粘性」を構成する要素に着目する必要がある。

高知工科大学では、フレッシュモルタルの粘着力の測定方法を考案してきた。以下、その概を述べる。

(1) 一面せん断試験機の応用による粘着力の測定

毛利らは、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⁵⁾ (図-1.7)。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」と定義し、最大静止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た。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測定では、モルタル構成材料の材料分離 (高さ方向のペースト/細骨材濃度の差) の影響を大きく受ける可能性がある (図-1.8)。

そこで、佐藤らは、測定面が鉛直面で比較的高さ方向のセメントペースト/細骨材密度の分布の影響を受けにくいと考えられる、鉛直方向の回転子を有する回転粘度計により、フレッシュモルタルの粘着力の定量化法を開発した⁶⁾ (図-1.9)。粘着力を「モルタルが粗骨材表面を動き始めるために必要な力」と定義し、低回転速度でモルタルがローターに十分付着させ、その後回転速度を上昇させることで剥離を生じさせることにより、明瞭な剥離点を剥離強度として粘着力の指標としている (図-1.10)。

以上は、回転子を粗骨材と見立て、その表面内方向でのモルタルの粘着力を測定するものである。しかしながら、フレッシュコンクリートの粗骨材とモルタル間の材料分離には、粗骨材表面から離れる方向 (垂直方向) のものもあり得る。それを定量化する方法も必要である。

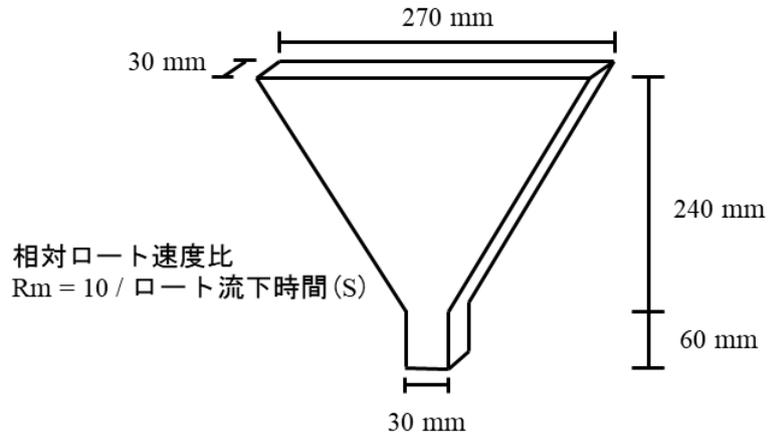


図-1.6 モルタルロート試験

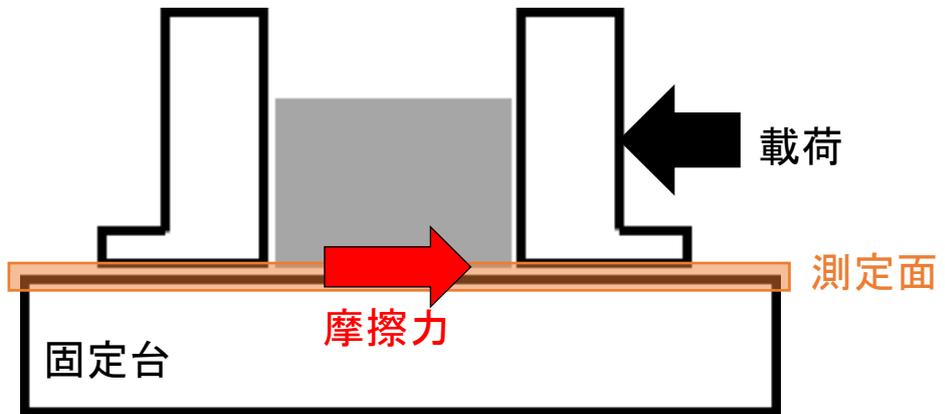


図-1.7 水平摩擦試験機による摩擦力の測定

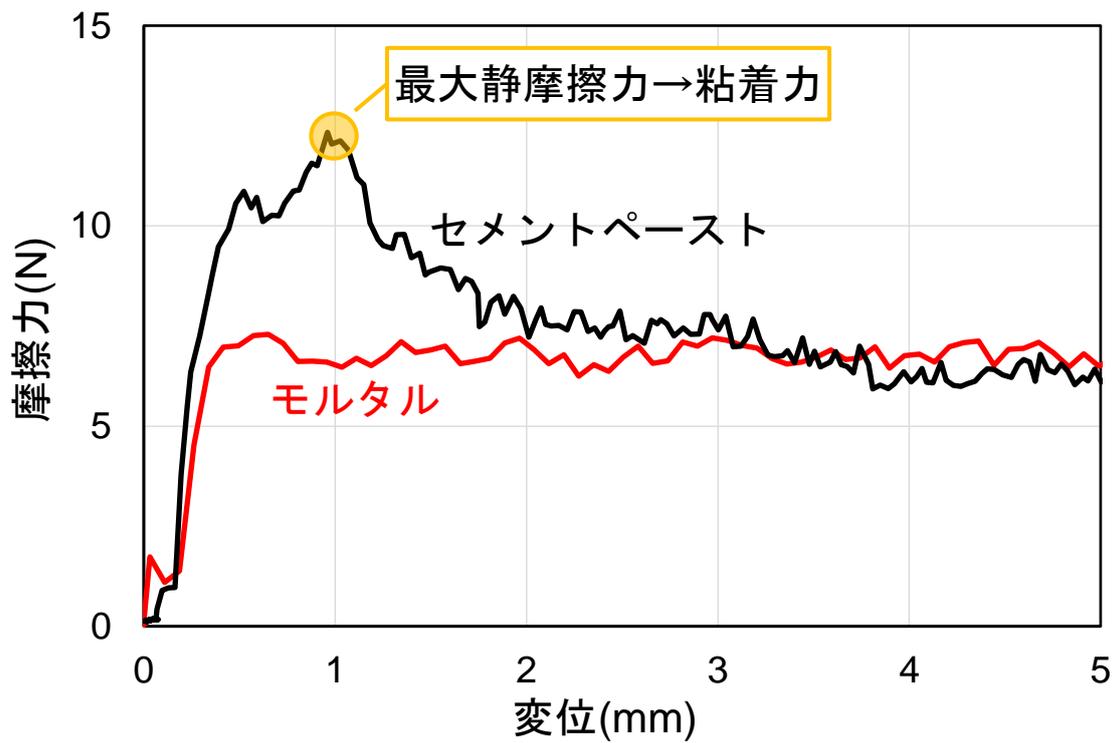


図-1.8 水平摩擦試験による粘着力の測定

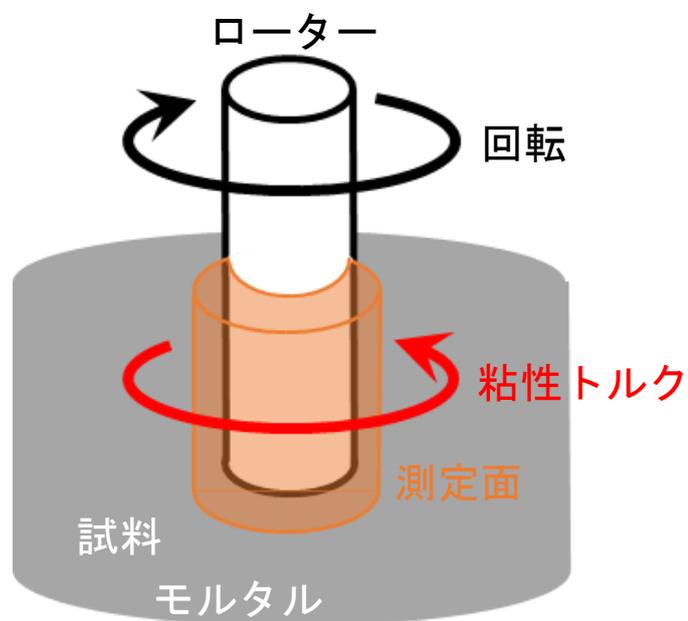


図-1.9 回転粘度計による摩擦力の測定

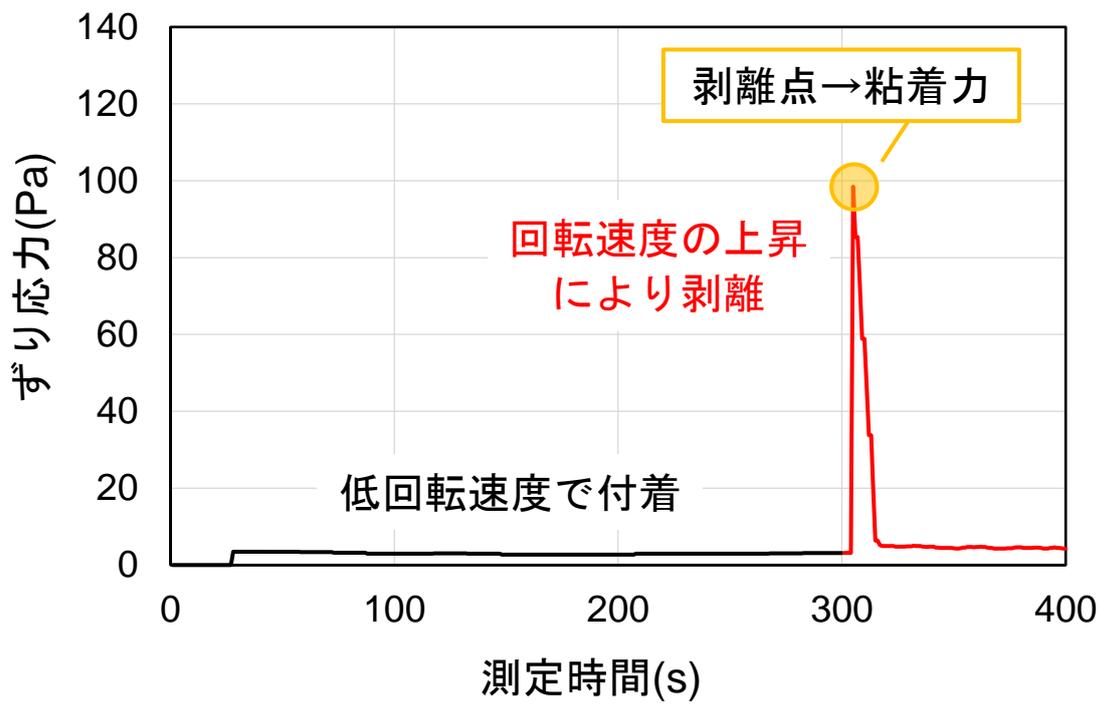


図-1.10 回転粘度計による粘着力の測定

1.3 対象とする粘性

粘性とは一般的に、流体の内部に働く抵抗、または、流体の速度が流れの中の各点で異なるとき、速度をならして一様にしようとする性質である。

重力の作用のみによるフレッシュコンクリートの自己充填性能、特に間隙通過性能付与のメカニズムを示す（図-1.11）。本研究では粘性の役割を、間隙手前での粗骨材粒子どうしの衝突摩擦の緩和に加え、新たに山川ら³⁾により提唱された粗骨材表面からのモルタルの剥離防止の2つからなるものを設定した。

フレッシュモルタルの粘性には複数の要素があるものと想定した本研究においては、モルタル相の粘性の測定方法であるロート試験に加え、回転粘度計により粘度を測定する。さらに、粘着力は2種類を設定した（図-1.12）。両者ともフレッシュコンクリートが変形する際、モルタルから粗骨材が剥離する瞬間に生じる応力である。粗骨材粒子表面に水平な方向の粘着力として定義したのが「面内粘着力」である。

一方、粗骨材粒子表面から垂直方向の剥離もあり得る。これを防止する力を「面外粘着力」と定義した。面内粘着力を、回転粘度計による粘度測定の際に回転子から剥離する際のフレッシュモルタルの単位面積当たりのせん断変形抵抗とした⁶⁾。面外粘着力は、食品の舌触りの定量化等に使用される万能物性試験機「テクスチャーアナライザー」を使用し、モルタル表面から鉛直方向に剥離する際の、単位面積当たりの抵抗力として求めた。

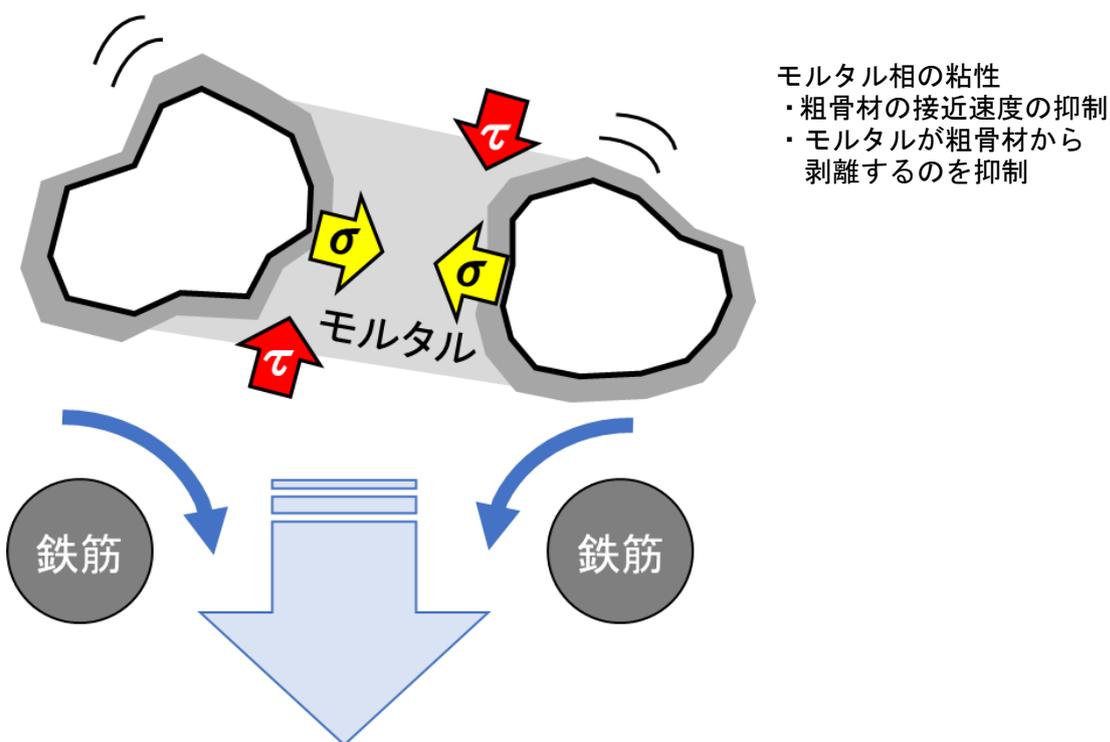
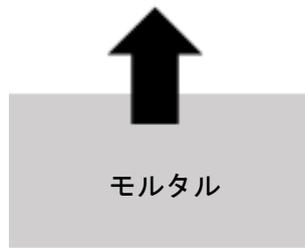


図-1.11 フレッシュコンクリートの間隙通過性能を支配する粘性の役割



面外粘着力
粗骨材がモルタル面から剥離
する際の垂直方向の抵抗力



面内粘着力
モルタルから粗骨材が剥離
する際の水平方向の抵抗力

図-1.12 フレッシュモルタルの2種類の粘着力

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す（図-1.13）。

第1章では、本研究の目的、自己充填コンクリートが開発された背景と現在の課題、対象とする粘性について述べる。

第2章では、材料と配合と練混ぜ手順について述べる。

第3章では、本研究の試験方法及び諸条件について述べる。

第4章では、炭酸カルシウムがフレッシュモルタルの性状に影響を与えると考え、熱分析により炭酸カルシウム量の測定を行い、炭酸水練混ぜが炭酸カルシウム生成量に及ぼす影響を調べる。

第5章では、第3章で述べた試験方法によりフレッシュモルタルの粘性の測定を行い、炭酸水練混ぜがフレッシュモルタルの粘性に及ぼす影響について述べる。

第6章は結論である。

さらに、本研究で使用した増粘剤の選定の経緯や、明らかになった粘性の各指標間の相関、炭酸水がせん断強度に及ぼす影響について、付録1「増粘剤の種類と添加量選定の経緯」、付録2「フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較」、および付録3「炭酸水練混ぜが直応力下でのせん断強度に及ぼす影響」として掲載した。

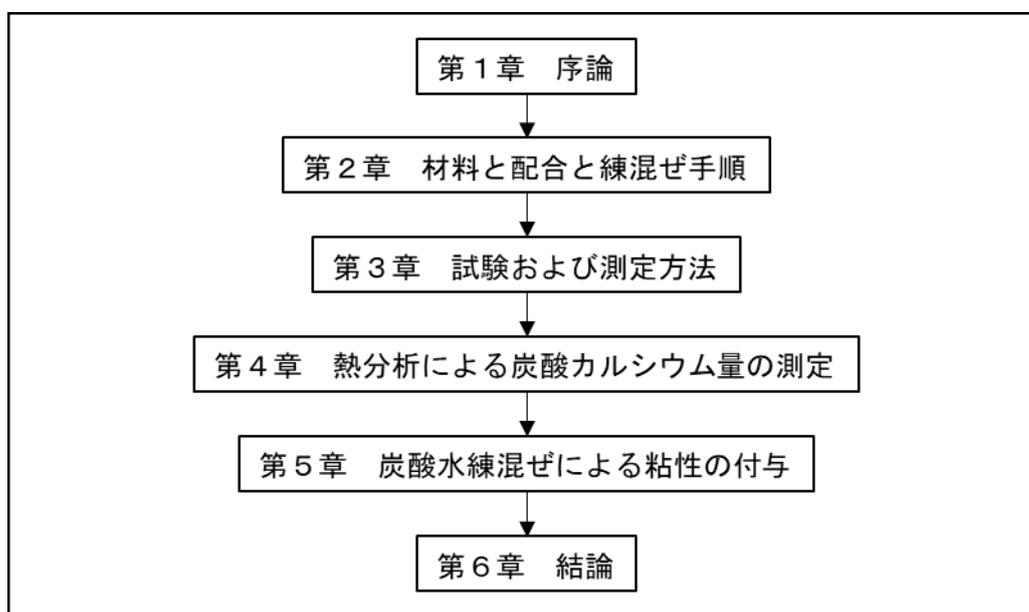


図-1.13 本論文の構成

第2章 材料と配合と練混ぜ手順

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)は石灰岩砕砂を使用した。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。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。炭酸水(CW)は市販の飲料用炭酸水を用いた。ボトルを開封直後の二酸化炭素濃度計による測定濃度は 1.6×10^3 ppm であった。

表-2.1 使用材料

種類	記号	概要
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 3.15g/m^3
細骨材	S	石灰岩砕砂：密度 2.68g/m^3 , 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)
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
炭酸水	CW	「ウィルキンソンタンサン」(アサヒ飲料)

2.2 配合及び練混ぜ手順

本研究の配合を示す(表-2.2)。自己充填性能を確保しつつ高強度ではない汎用の自己充填コンクリートを目指した、水セメント比 45%の配合である。空気の影響をなくすことを目的に消泡剤を添加した。減水剤の添加量は、練上がり 10 分後のモルタルフロー値が 250 ± 10 mm となるように調整した。増粘剤は、粗骨材容積比 0.3 のコンクリート中に 100 g/m^3 となる添加量とした。添加量をそれ以上大きくしても面外粘着力が大きくならなかったのが 100 g/m^3 であった。

モルタルの材料の練混ぜには、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 ± 5 回転, 公転:毎分 62 ± 5 回転)で、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 1.8L (空気を除く)で行った。モルタルの練混ぜ手順は、粉体材料の偏りを無くすために 30 秒間空練りをした後、水または炭酸水(SP 含む)を加え 60 秒間練混ぜをした。そして、練混ぜから 10 分間静置後、5 秒間練混ぜをしてから各試験を行った。



図-2.1 モルタルミキサ

表-2.2 モルタル配合

W/C (%)	s/m (%)	減水剤 (C×%)	増粘剤		消泡剤 (g/m ³)	単位量 (kg/m ³)			練混ぜ水
			種類	添加量 (g/m ³)		W	C	S	
55	55	0.8			71	285	519	1474	水道水
45		1.0~1.2				264	586	1474	炭酸水
		1.2~1.4							水道水
		1.5~1.6	A	286					水道水
		1.4	C	143					炭酸水
		1.6~1.8	C	143					水道水
		1.7~1.9	C	286					水道水
35		2.1~2.5				236	674	1474	水道水

第3章 試験および測定方法

3.1 概要

佐藤ら⁶⁾は増粘剤を添加したフレッシュモルタルの相対ロート速度比と粘度および面内粘着力の関係を調べたが、垂直方向の剥離抵抗力である面外粘着力は測定していない。本研究では、フレッシュコンクリートが間隙を通過する際に必要なフレッシュモルタルの粘性には複数の要素があるものと想定し、これまでにフレッシュコンクリートの簡易的な粘性試験方法として用いられてきたロート試験に加え、粗骨材の接近速度の抑制の働きがある粘度、フレッシュコンクリートの間隙通過時のフレッシュモルタルの変形に伴う水平方向の剥離抵抗力である面内粘着力および垂直方向の剥離抵抗力である面外粘着力をそれぞれ測定する。これらにより、炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの粘性への影響を評価する。

フレッシュコンクリートの自己充填性を支配する粘性の指標として、ロート試験によるロート流下時間、回転粘度計による粘度、面内粘着力およびテクスチャーアナライザーにより得ることのできる面外粘着力は、それぞれ独立性があると想定して測定を行った。

3.1 モルタルフロー試験

モルタルの軟度の測定は、JIS R5201に基づきモルタルフロー試験により無振動で行った(図-3.1)。モルタルフロー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。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。

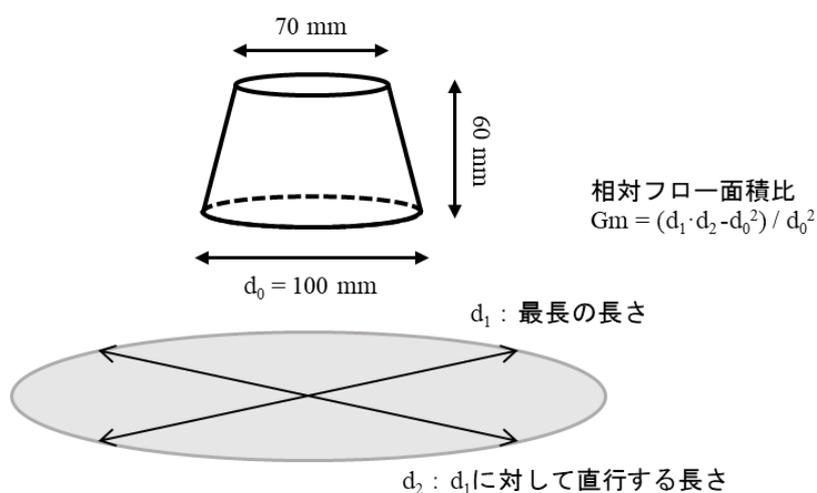


図-3.1 モルタルフロー試験

3.2 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（図-3.2）。自己充填コンクリートの簡易配合設計法において、モルタル相の粘性の測定のために寸法を定めたロート流下時間またはそれらから求めた相対ロート速度比を指標としてきた。

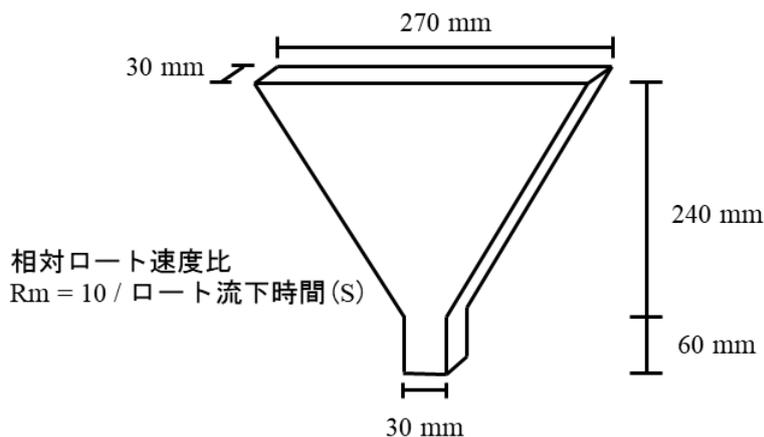


図-3.2 モルタルロート試験

3.3 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を使用した。回転粘度計は、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、液体の粘性を簡易的に評価することができる（図-3.3）。本研究では、TVB25 形粘度計（東機産業製）を使用した（図-3.4）。低回転速度でローターとモルタルを十分に密着させてから、高回転速度に上昇させ、安定した 100 秒後の粘度値を粘度とした（図-3.5）。本研究ではローターは H4 を使用し、測定レンジは U とし、マニュアルモードで測定を行った。回転粘度計を用いて、低回転速度 1.0 rpm で 300 秒間ローターにモルタルを付着した後、高回転速度 20 rpm, 50 rpm または 100 rpm（最高速度）に上昇させ、100 秒間測定したときの回転速度と粘度との関係を示す（図-3.6）。本研究では、回転速度を、3.4 と同様の 100 rpm（138.6 mm/s）に統一した。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。W/C 35%の粘度の測定結果の平均値と標準偏差を表-3.1 に示す。

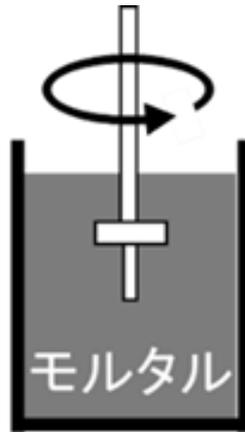


図-3.3 回転粘度計による粘度測定



図-3.4 TVB25 形粘度計（東機産業製）

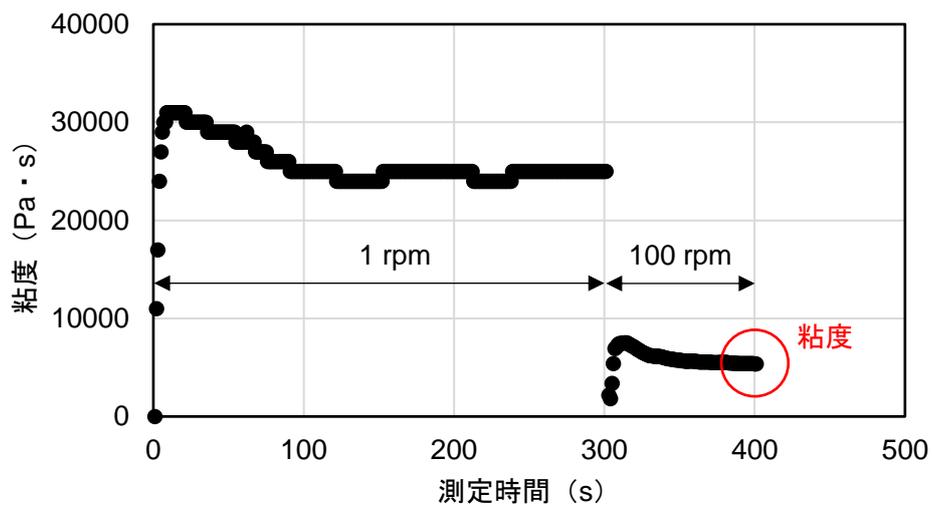


図-3.5 W/C 35%の粘度の測定結果

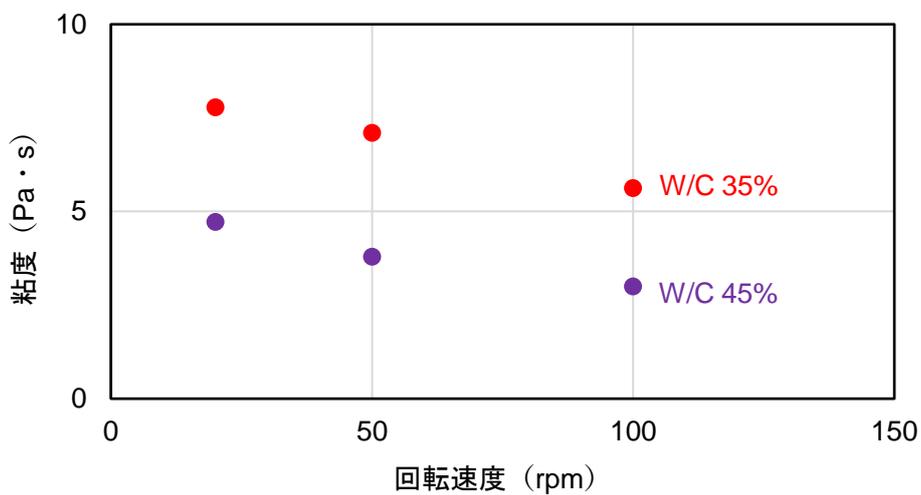


図-3.6 回転速度と粘度の関係

表-3.1 W/C 35%の粘度の測定結果の平均値と標準偏差

粘度 (Pa·s)			平均値 (Pa·s)	標準偏差 (Pa·s)
5.37	5.81	6.16	5.78	0.32

3.4 面内粘着力の測定

フレッシュモルタルの面内粘着力の測定には、粘度の測定に用いたのと同じ回転粘度計を使用した。回転粘度計は、粘度値にずり速度を乗ずることですり応力を算出する。佐藤はこの仕組みを利用し、粘度の測定と同様に、低回転速度でローターとモルタルを十分に密着させたうえで、高回転速度に上昇させることで、モルタルとローターを剥離させる剥離試験法を構築した⁴⁾。このときの最大のずり応力を面内粘着力とした(図-3.7)。粘度の測定と同様に、測定試料の量は450 mLとし、ローターはH4を使用し、測定レンジはUとし、マニュアルモードで測定を行った。回転粘度計を用いて、低回転速度1.0 rpmで300秒間ローターにモルタルを付着した後、高回転速度20 rpm, 50 rpmまたは100 rpm(最高速度)に上昇させ、100秒間測定したときの回転速度と面内粘着力の関係を示す(図-3.8)。回転速度による、面内粘着力の逆転は無いものと判断した。本研究では、回転速度を、粘着力の差が顕著に表れる100 rpm(138.6 mm/s)に統一した。W/C 35%の面内粘着力の測定結果の平均値と標準偏差を表-3.2に示す。

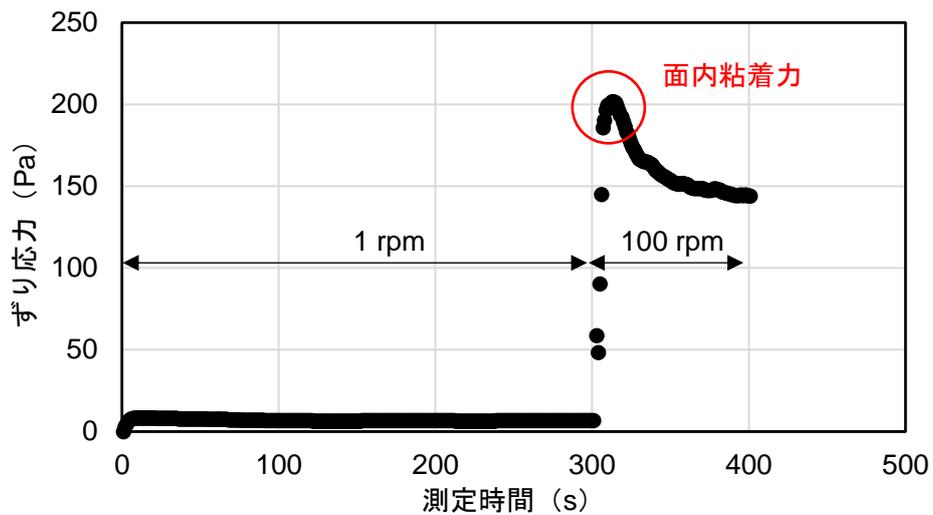


図-3.7 W/C 35%の面内粘着力の測定結果

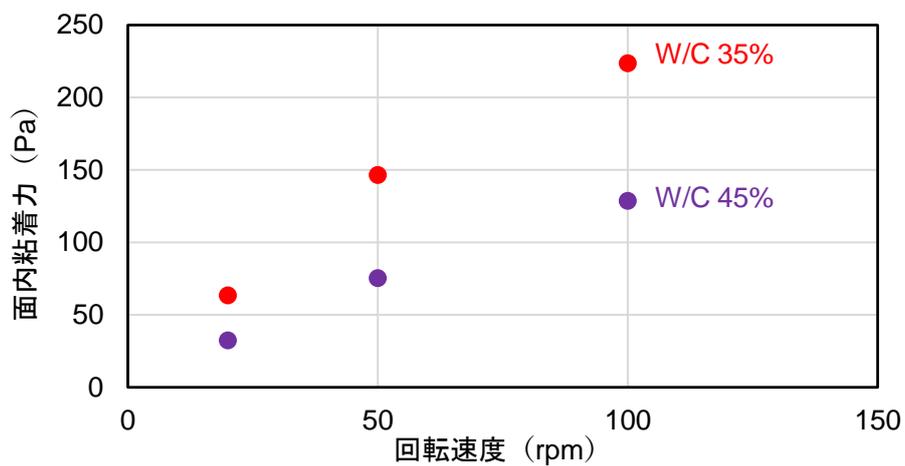


図-3.8 回転速度と面内粘着力の関係

表-3.2 W/C 35%の面内粘着力の測定結果の平均値と標準偏差

面内粘着力 (Pa)			平均値 (Pa)	標準偏差 (Pa)
201.80	224.85	231.02	219.22	12.58

3.5 面外粘着力の測定

これまで手段の無かったフレッシュモルタルの面外粘着力の測定には、TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）を使用した（図-3.9）。テクスチャーアナライザーは、荷重を測定するセンサー（ロードセル）に治具（図-3.10）を取り付け、その治具が試料に押し込まれたり、試料から引き抜かれたりする際の荷重を測定することにより、その物性を定量化するものである（図-3.11）。

本研究では、治具をフレッシュモルタルに押し付けることで治具とモルタルを付着させたうえで、治具を引き上げることでモルタルと治具の間を剥離させ（図-3.12）、面外方向の剥離強度を測定し、最大の剥離強度を面外粘着力とした（図-3.13）。粘度、面内粘着力の測定と同様に、測定試料の量は450 mLとした。また、キャリブレーション（分銅2 kgを乗せ、荷重のチェックを行った後、測定位置のキャリブレーションを行う）を行い、測定にうつった。測定前には念入りに治具の水分を十分に拭き取った。テクスチャーアナライザーを用いて引上げ速度5 mm/s、10 mm/s、20 mm/s または40 mm/s（最高速度）における水セメント比35%または45%のフレッシュモルタルの面外粘着力を測定した（図-3.14）。引上げ速度が速いほど剥離強度は増加することを確認した。引上げ速度による面外粘着力の逆転は無いものと判断した。本研究では、引上げ速度を、粘着力の差が顕著に表れる40 mm/sに統一した。W/C 35%の測定結果の平均値と標準偏差を表-3.3に示す。



図-3.9 TA.XT plus C テクスチャーアナライザー（英弘精機製）



図-3.10 試料に粘着・剥離させる治具

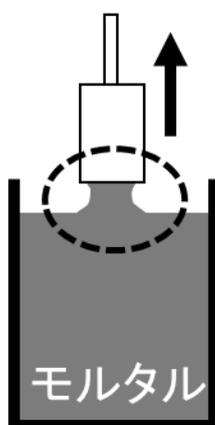


図-3.11 テクチャーアナライザーによる面外粘着力測定



図-3.12 測定中のモルタルの様子
(モルタル試料から抜け出た治具とモルタルが剥離する瞬間)

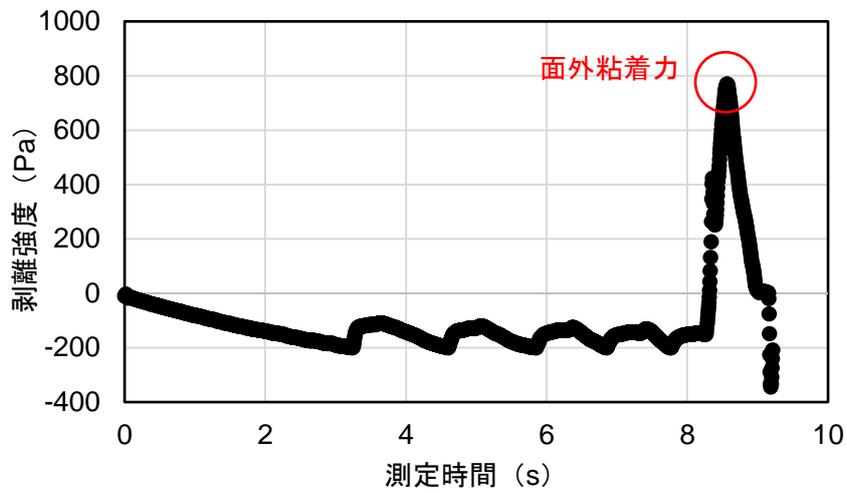


図-3.13 W/C 35%の面外粘着力の測定結果

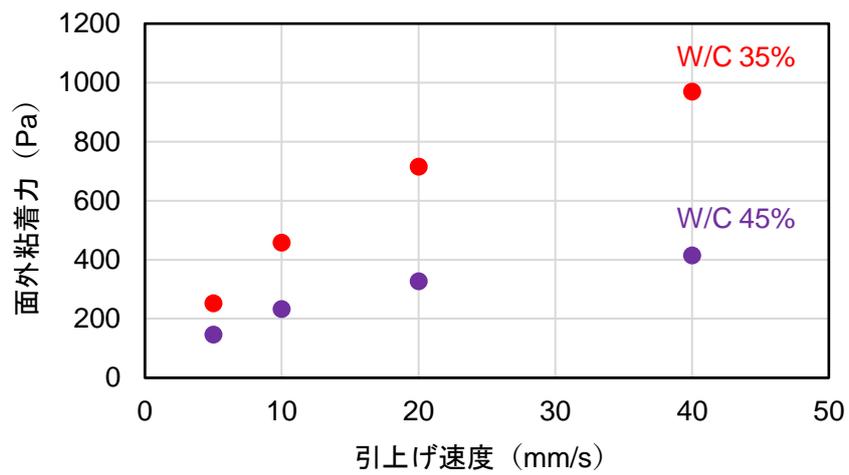


図-3.14 引上げ速度と面外粘着力の関係

表-3.3 W/C 35%の面外粘着力の測定結果の平均値と標準偏差

面外粘着力 (Pa)			平均値 (Pa)	標準偏差 (Pa)
769.69	798.09	970.17	845.98	88.57

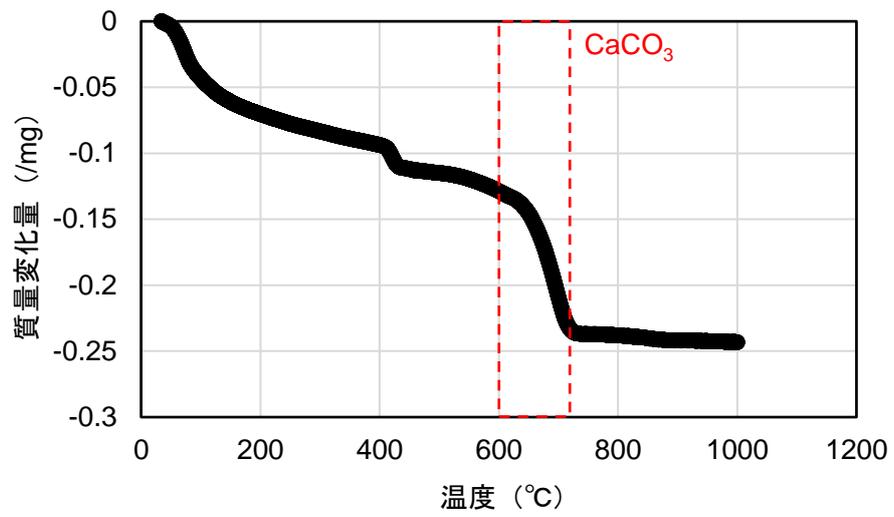


図-4.2 W/C 45%の炭酸水練混ぜの試料の TG 曲線
(600°C~730°Cの質量変化を計算)

4.3 炭酸水練混ぜによる炭酸カルシウム量の増加

炭酸水による練混ぜがモルタルの炭酸カルシウム量に与える影響を調べた(図-4.3)。なお、「無添加」は増粘剤(VMA)を添加していないことを示す。

炭酸水で練混ぜることにより炭酸カルシウム量が増加することを確認した。無添加の炭酸水練混ぜモルタルでは大幅に炭酸カルシウム量が増加した一方、増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用したものの炭酸カルシウム増加量は比較的小さかった。増粘剤添加の際の炭酸水練混ぜは炭酸カルシウム生成に抑制的に作用する。

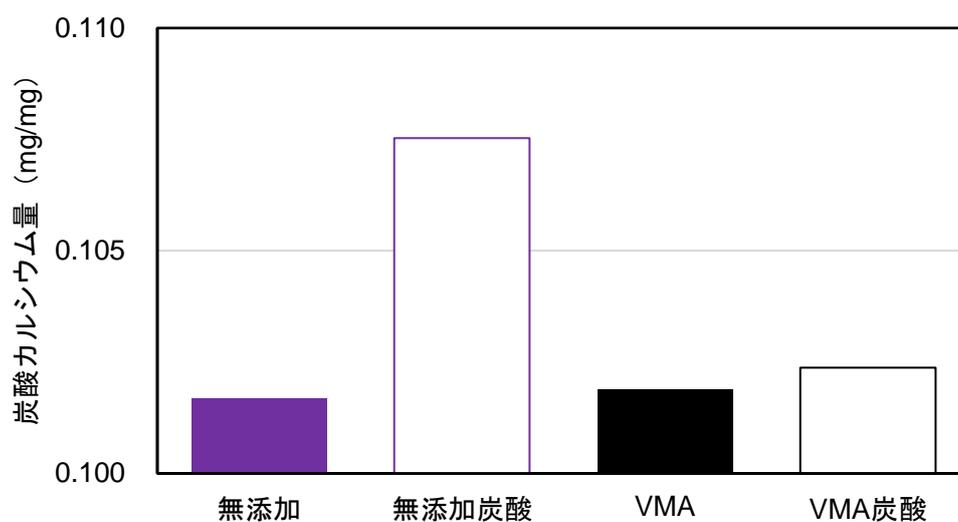


図-4.3 1 mg あたりの炭酸カルシウム量

第5章 炭酸水練混ぜによる粘性の付与

5.1 炭酸水練混ぜによる粘性の増加

炭酸水による練混ぜが、練混ぜ直後のフレッシュモルタルの粘性に与える影響を調べた(図-5.1~5.4)。ロート試験以外は各測定とも3回行い、グラフには平均値と誤差棒を記した。なお、「無添加」は増粘剤(VMA)を添加していないことを示す。

炭酸水による練混ぜは、ロート流下時間を増加させた(図-5.1)。増粘剤無添加の炭酸水練混ぜのモルタルは、増粘剤添加の水道水練混ぜのものと同程度のロート流下時間となった。増粘剤添加の炭酸水練混ぜのものは無添加・水道水練混ぜのW/C 35%のものと同程度のロート流下時間となった。一方、粘度、面内粘着力は、炭酸水練混ぜではなく、増粘剤の添加の有無が主たる支配要因となった(図-5.2, 5.3)。面外粘着力は、炭酸水練混ぜにより明らかに増加した(図-5.4)。そして、増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用することで、増粘剤添加のみでは到達できなかったW/C 35%のものに近い値をえることができた。

以上から、増粘剤は、粘性のうちの特に粘度や面内粘着力を向上させた。一方、炭酸水練混ぜは、面外粘着力を向上させた。そして、増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用したものはW/C 35%の粘性に近い値を得ることができたと言える。

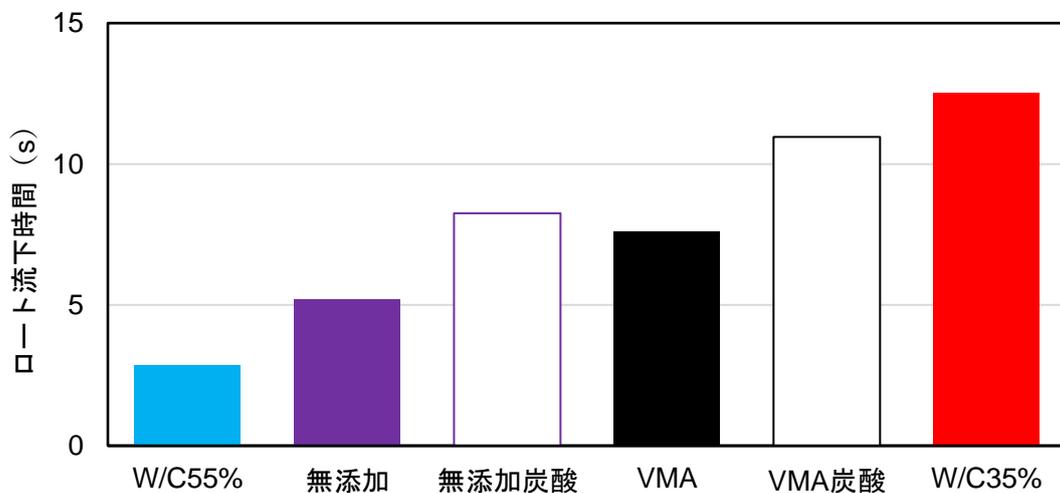


図-5.1 ロート流下時間の比較
(特記以外 W/C 45%)

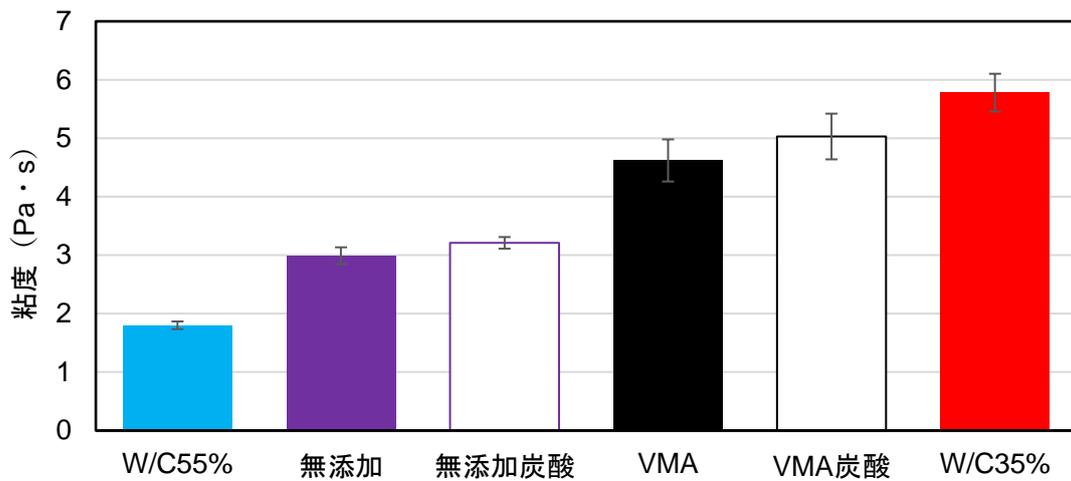


図-5.2 粘度の比較 (回転速度 100 rpm)
(特記以外 W/C 45%)

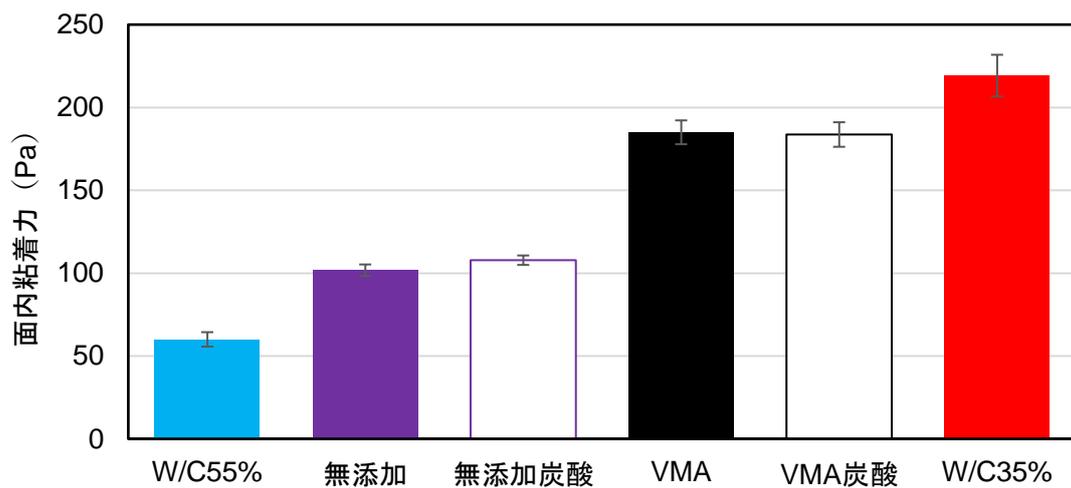


図-5.3 面内粘着力の比較 (回転速度 100 rpm)
(特記以外 W/C 45%)

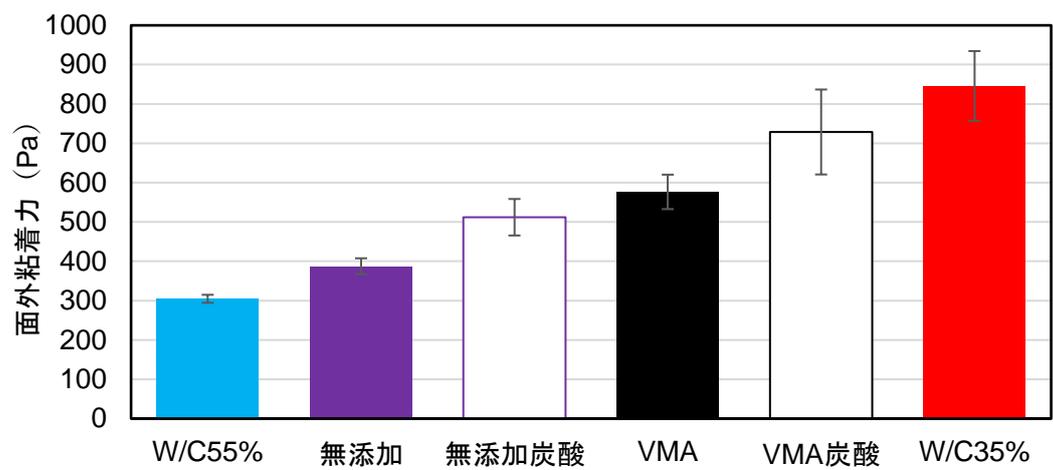


図-5.4 面外粘着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)
 (特記以外 W/C 45%)

5.2 炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘性に及ぼす影響

炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加による W/C 45% のフレッシュモルタルの粘性のうち、粘度と面内粘着力、面外粘着力への影響を示す（図-5.5, 5.6）。両者とも粘性を増加させる点では共通しているが、増粘剤添加が比較的粘度、面内粘着力を大きく高めるのに対して、炭酸水練混ぜは粘度、面内粘着力よりはむしろ面外粘着力を大きく増加させる効果があった。

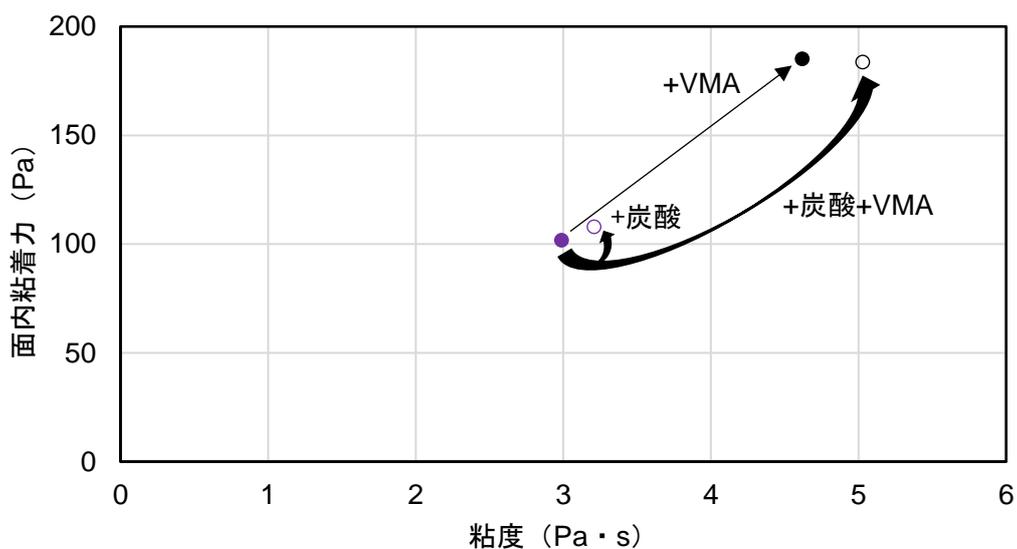


図-5.5 炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘度、面内粘着力に及ぼす影響

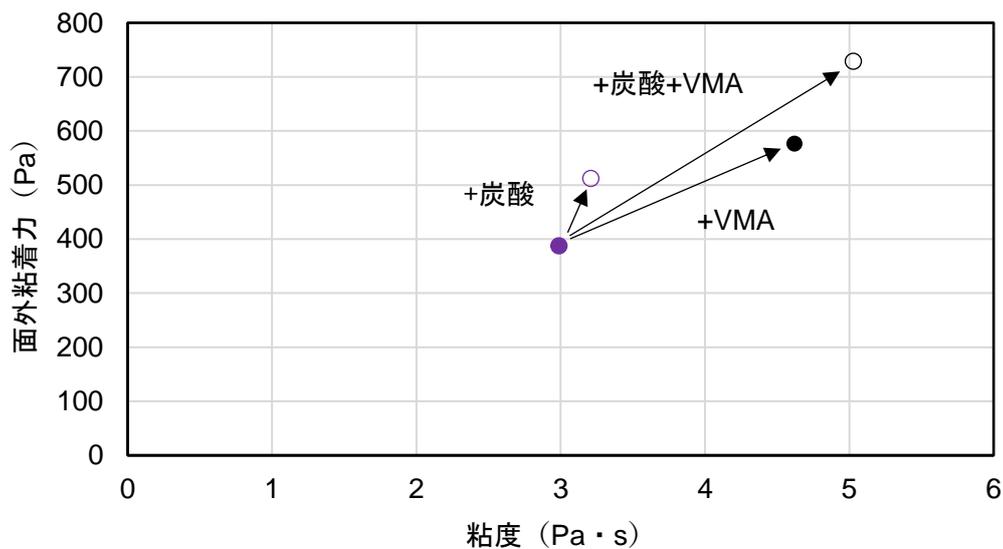


図-5.6 炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘度、面外粘着力に及ぼす影響

第6章 結論

本研究では、フレッシュコンクリートの自己充填性を支配する粘性の指標として粘度と面外および面内粘着力を設定し、自己充填コンクリートを想定した水セメント比 45%および細骨材容積比 55%のフレッシュモルタルにおける、炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの粘性向上効果を調べた。

本試験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 増粘剤添加は粘性のうち、粘度や面内粘着力を向上させた一方、炭酸水練混ぜは面外粘着力を向上させた。
- 2) 増粘剤添加と炭酸水練混ぜの併用により、増粘剤添加のみでは到達できなかった粘性を得ることができた。粉体系自己充填コンクリートの水セメント比 35%のモルタル相と同等の粘性に到達し、目的を達成することができた。
- 3) 以上により、従来できなかった普通コンクリート並みの単位骨材量にしつつ、粉体量の多い従来型自己充填コンクリートの自己充填性を得ることができる見通しを得た。

今後、本研究で定量化した各要素がフレッシュコンクリートの自己充填性能に及ぼす影響を調べる必要がある。

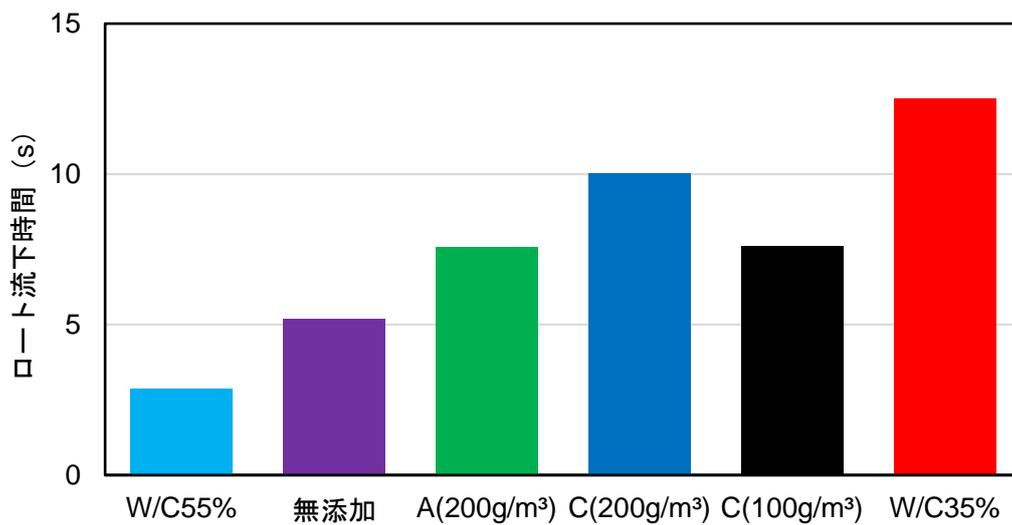
付録

付録 1 増粘剤の種類と添加量選定の経緯

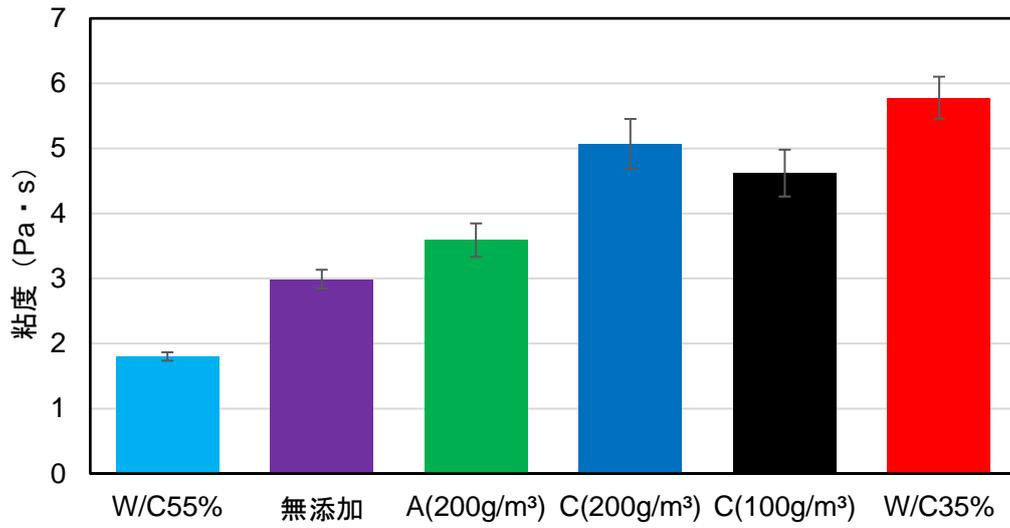
増粘剤を添加したフレッシュモルタルの粘性の測定結果を図に示す(図-付録 1.1~1.4)。

どの増粘剤を添加しても粘性が増加することを確認した。増粘剤 A に比べ C は、粘性がより増加した。しかし、増粘剤 C は粘性をより増加させる分、せん断強度も高めてしまった(図-付録 1.5, 1.6)。そこで、増粘剤 C の添加量を 200 g/m^3 (コンクリート配合) の半分の 100 g/m^3 の粘性を測定した結果、添加量 200 g/m^3 と比べ、面内粘着力はやや低いが(図-付録 1.7)、粘度、面外粘着力は同程度の値となり(図-付録 1.8)、せん断強度においても他配合と同程度の値となった(図-付録 1.8, 1.9)。

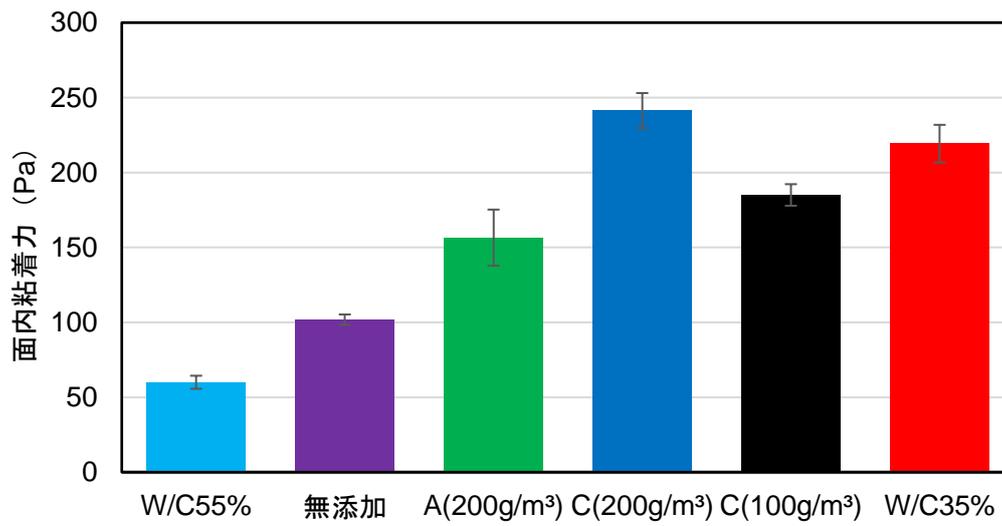
以上から、増粘剤は C の添加量が 100 g/m^3 が適切であると判断し、本研究で採用した。



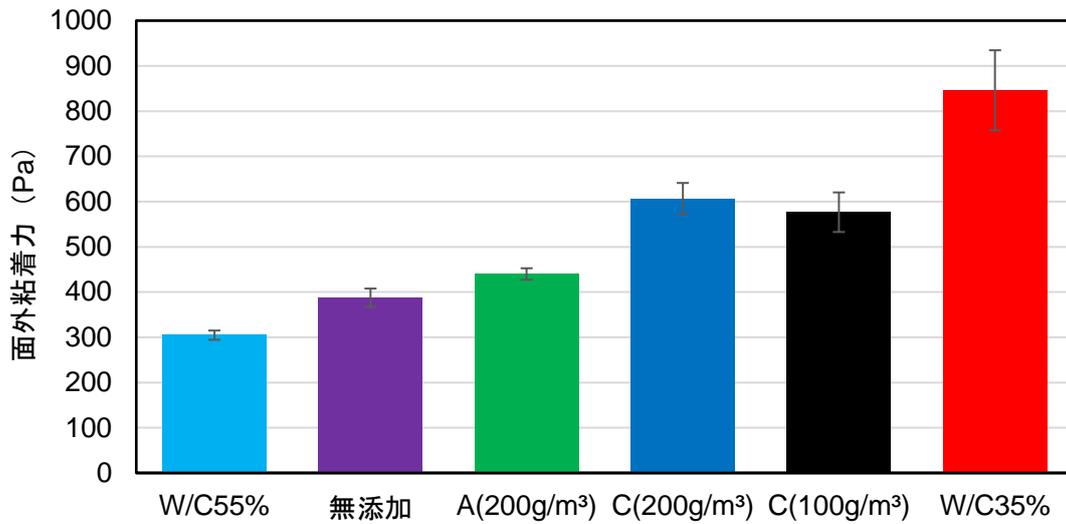
付図-1.1 ロート流下時間の比較
(特記以外 W/C 45%)



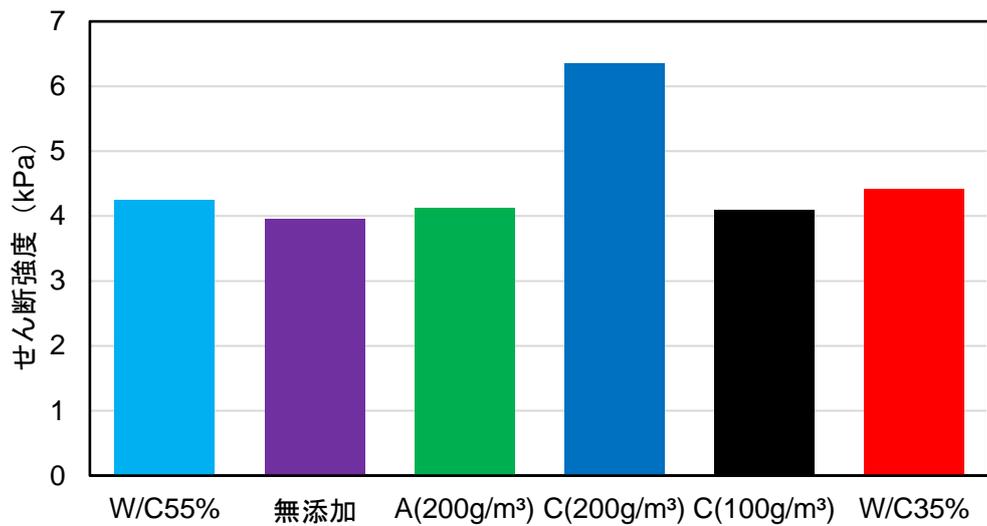
付図-1.2 粘度の比較 (回転速度 100 rpm)
(特記以外 W/C 45%)



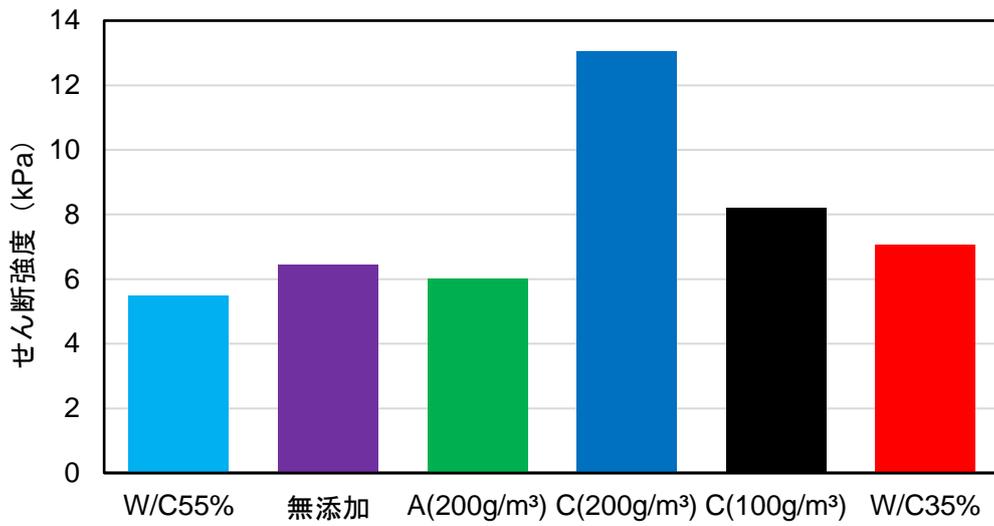
付図-1.3 面内粘着力の比較 (回転速度 100 rpm)
(特記以外 W/C 45%)



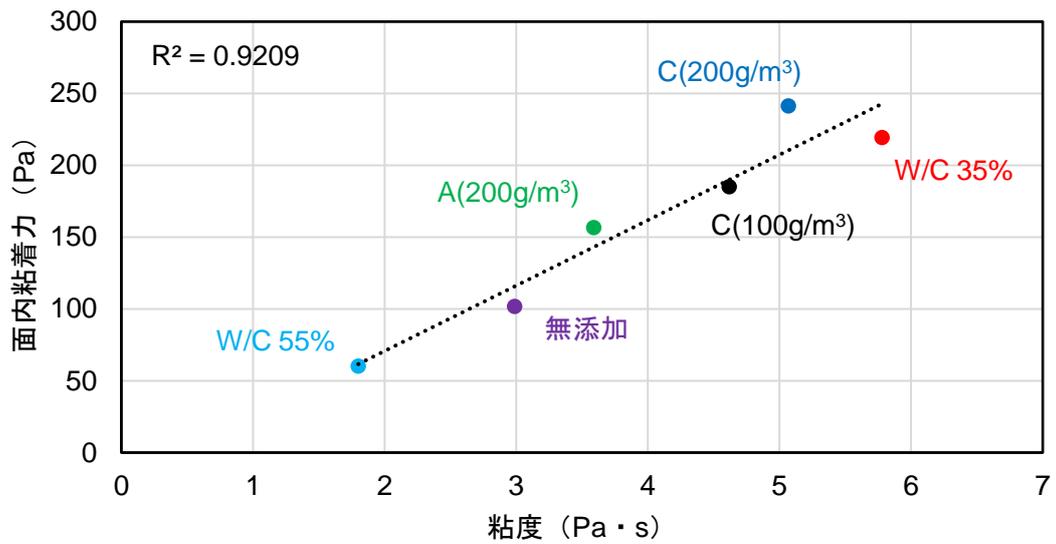
付図-1.4 面外粘着力の比較 (引上げ速度 40 mm/s)
(特記以外 W/C 45%)



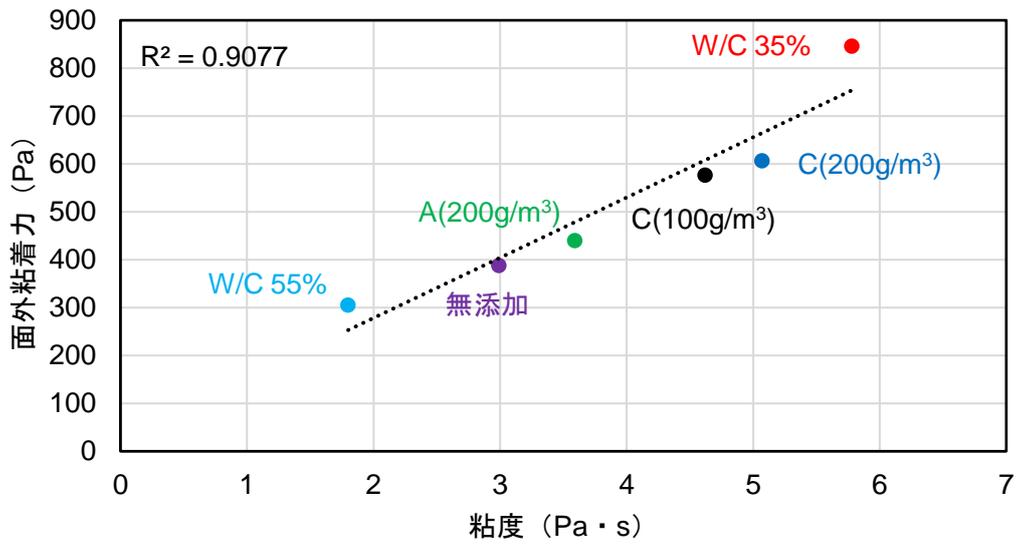
付図-1.5 直応力 200 kPa 時のせん断強度の比較 (水平速度 0.03 mm/s)
(特記以外 W/C 45%)



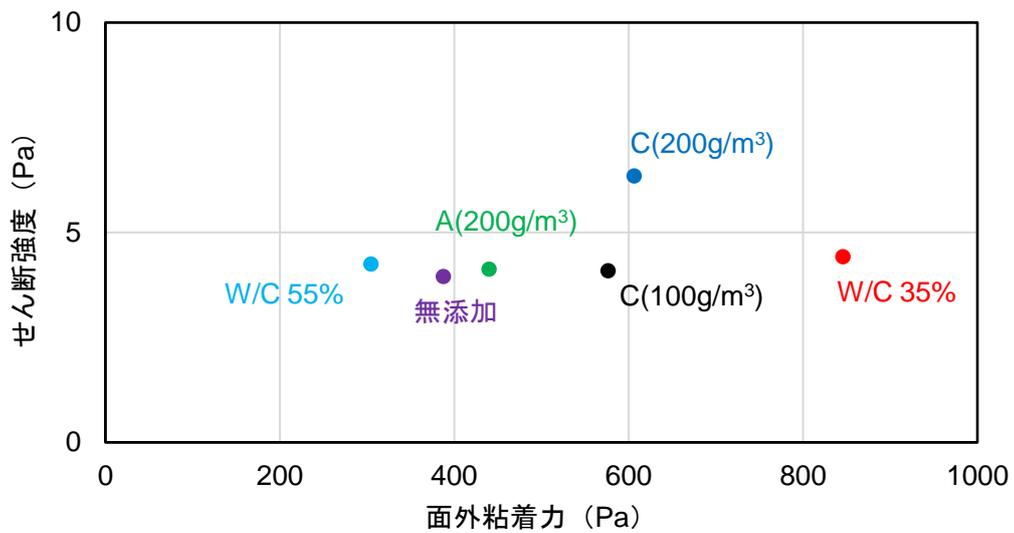
付図-1.6 直応力 300 kPa 時のせん断強度の比較 (水平速度 0.03 mm/s)
(特記以外 W/C 45%)



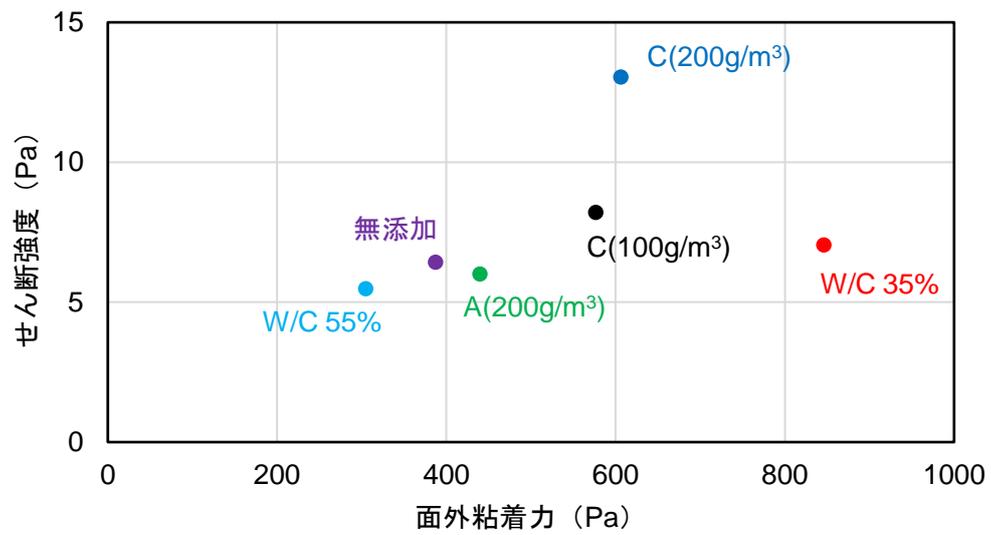
付図-1.7 粘度と面内粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



付図-1.8 粘度と面外粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



付図-1.9 面外粘着力と直応力 200 kPa 時のせん断強度の関係
(特記以外 W/C 45%)



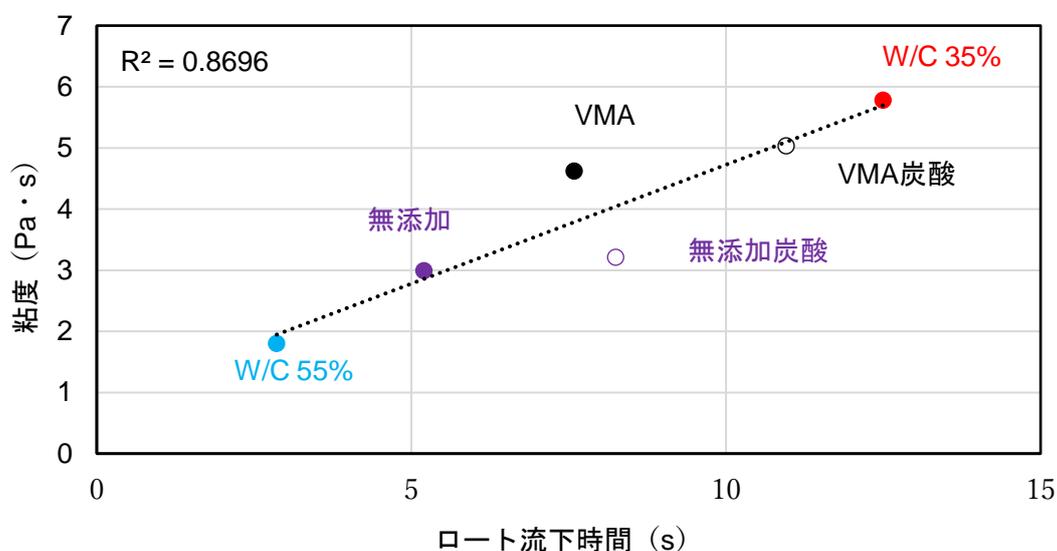
付図-1.10 面外粘着力と直応力 300 kPa 時のせん断強度の関係
(特記以外 W/C 45%)

付録2 フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較

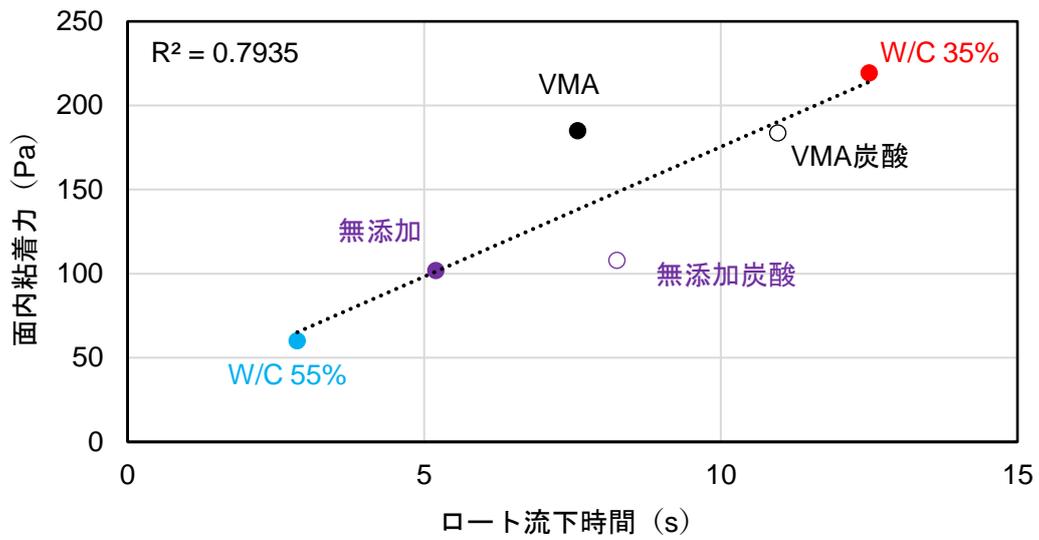
本研究で測定した粘性の指標をそれぞれ比較した。従来の粘性の評価試験との比較として、モルタルロート流下時間を基準とし、面外粘着力、面内粘着力や粘度との関係を示す(付図-2.1~2.3)。面内粘着力、粘度、面外粘着力の順に相関が高くなった。ロート流下時間と最も相関が高かったのは面外粘着力であった(付図-2.3)。つまり、SCCにおいて、フレッシュモルタルの粘性試験として一般的に用いられてきたモルタルロート試験により得られるロート流下時間は、粗骨材表面から直角方向の剥離抵抗性を評価している可能性があり、フレッシュモルタルの分離抵抗性の簡易評価試験として適切であると言える。

また、回転粘度計により測定して求めた粘度と面外粘着力や面内粘着力との関係、さらに面内粘着力と面外粘着力との関係を示す(付図-2.4~2.6)。粘度と面内粘着力、粘度と面外粘着力はどちらも相関が高く、粗骨材の接近速度を抑制する粘度は、せん断変形する際の抵抗力や鉛直面に剥離する際の抵抗力を複合的に評価している可能性がある。

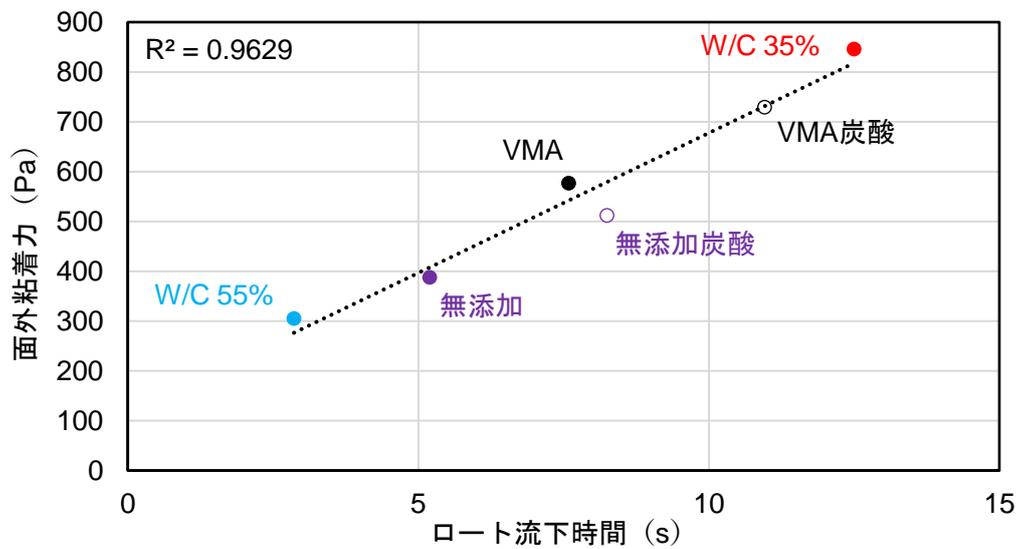
面内粘着力と面外粘着力との関係は、粘度と面内粘着力、面外粘着力との関係と比較すると相関は低い。面内粘着力と面外粘着力は、モルタルが粗骨材から剥離する際の方向が90度違い、材料分布の影響の度合いも違うため、相関が低くなったと考える。



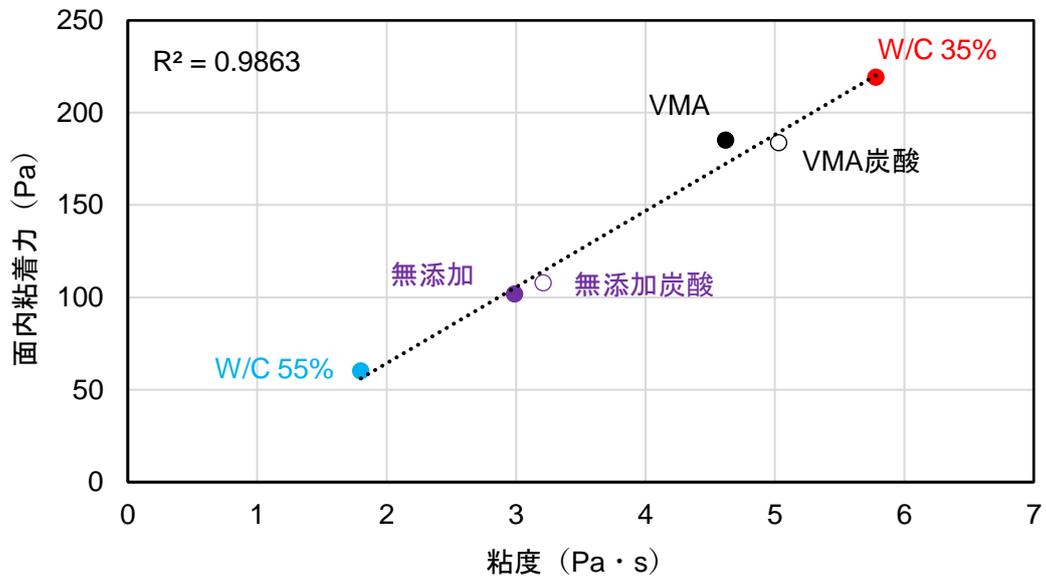
付図-2.1 ロート流下時間と粘度の関係
(特記以外 W/C 45%)



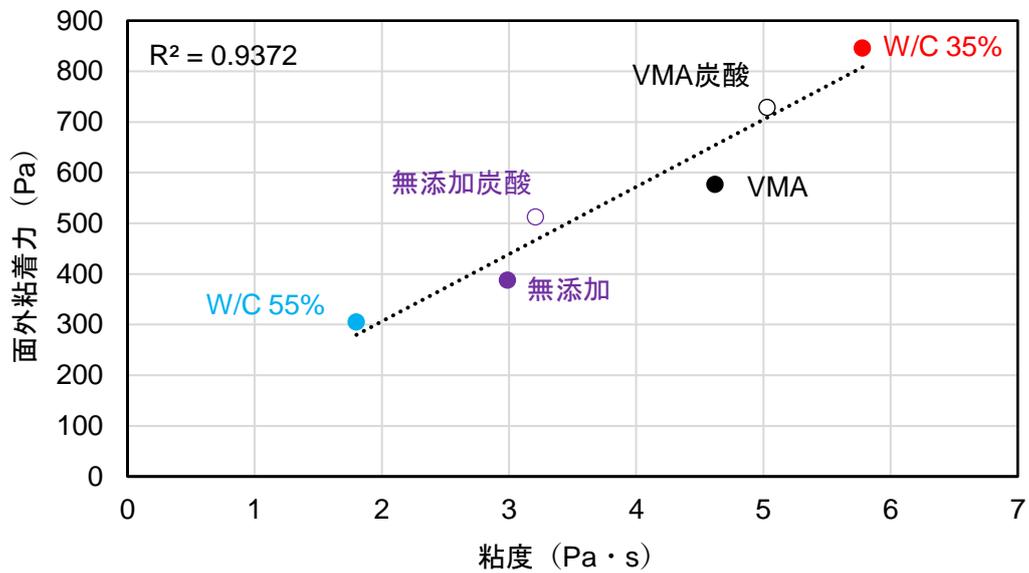
付図-2.2 ロート流下時間と面内粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



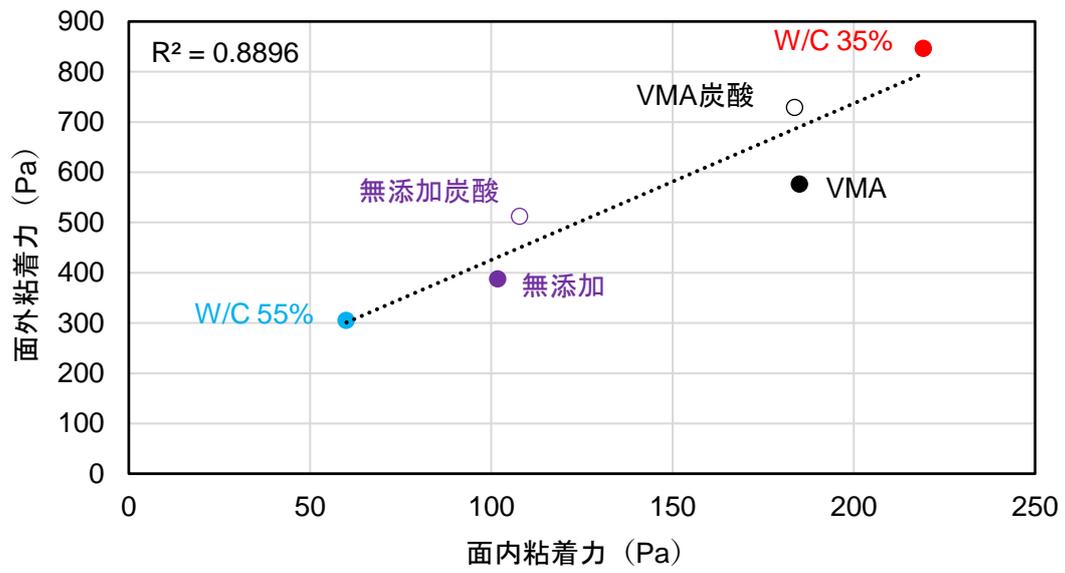
付図-2.3 ロート流下時間と面外粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



付図-2.4 粘度と面内粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



付図-2.5 粘度と面外粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)



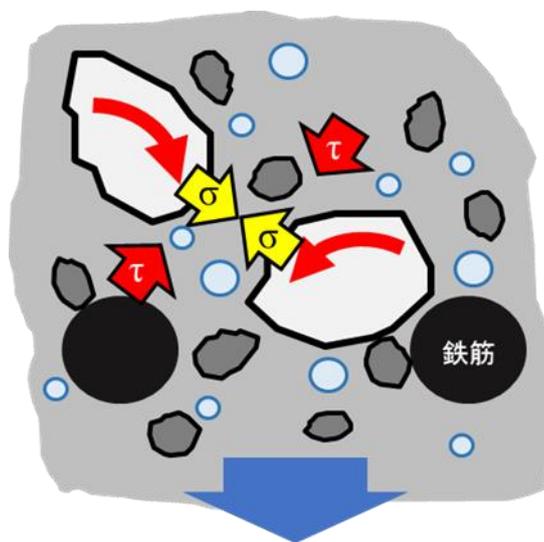
付図-2.6 面内粘着力と面外粘着力の関係
(特記以外 W/C 45%)

付録3 炭酸水練混ぜが直応力下でのせん断強度に及ぼす影響

付録3.1 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（付図-3.1）。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。従来，直応力下でのモルタルのせん断応力は，ガラスビーズを模擬粗骨材として用いた試験により測定していた。これは，ガラスビーズの有無によるモルタルのロータ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。そこで，一面せん断試験機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。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。福田らは，この手法により間隙通過性能を支配する固体粒子間摩擦の定量化を行った⁸⁾。

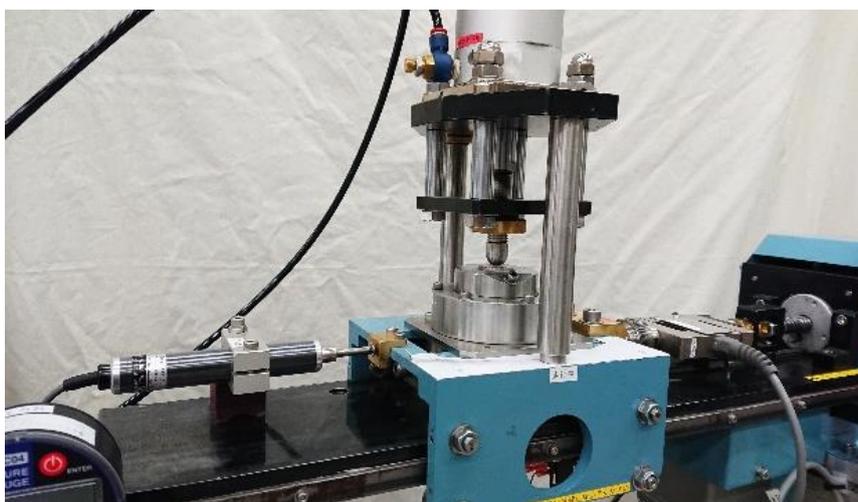
本研究では，この手法を用いて炭酸水練混ぜまたは，増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用したフレッシュモルタルが直応力下でのせん断強度に及ぼす影響を調べ，自己充填性能を評価する。



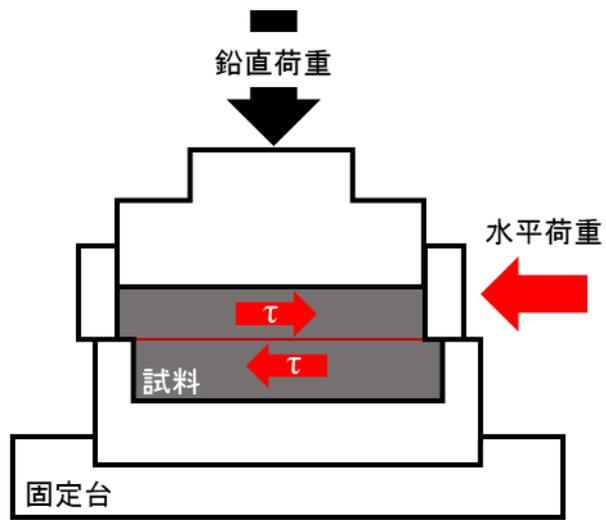
付図-3.1 フレッシュコンクリートの間隙通過イメージ

付録 3.2 せん断強度の測定

せん断応力の測定のため、一面せん断試験機を使用した⁸⁾ (付図-3.2)。
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試料（フレッシュモルタル）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（付図-3.3）。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⁹⁾。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、非排水条件で行った。また、直応力（鉛直荷重）の設定値は 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、鉛直外力がない場合（直応力 0 kPa）ではせん断強度ほとんどゼロに近い値であった⁸⁾こと、既往研究⁸⁾によりフレッシュモルタル中に生じる直応力は 300kPa 程度以下と推定されたことから設定した値である。



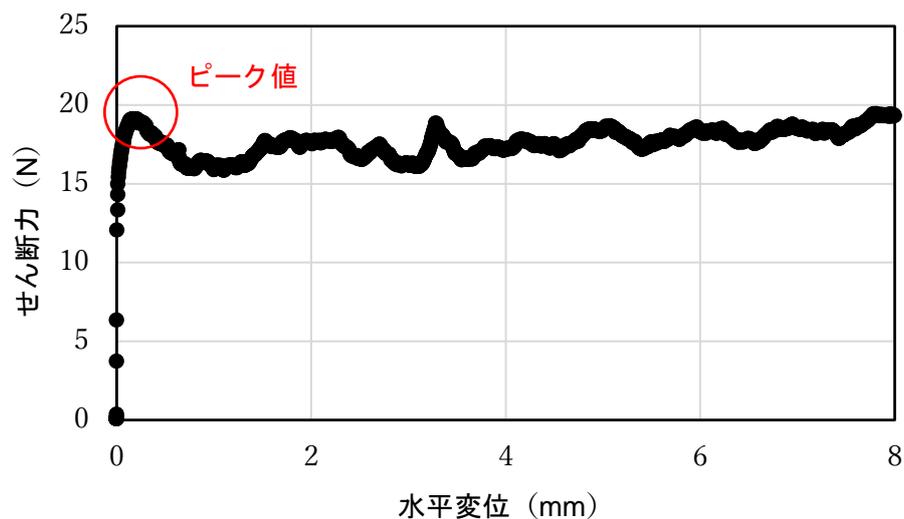
付図-3.2 一面せん断試験機



付図-3.3 一面せん断試験機の測定イメージ

付録 3.3 せん断強度の定義

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(付図-3.4)。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(最大静止摩擦力)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。



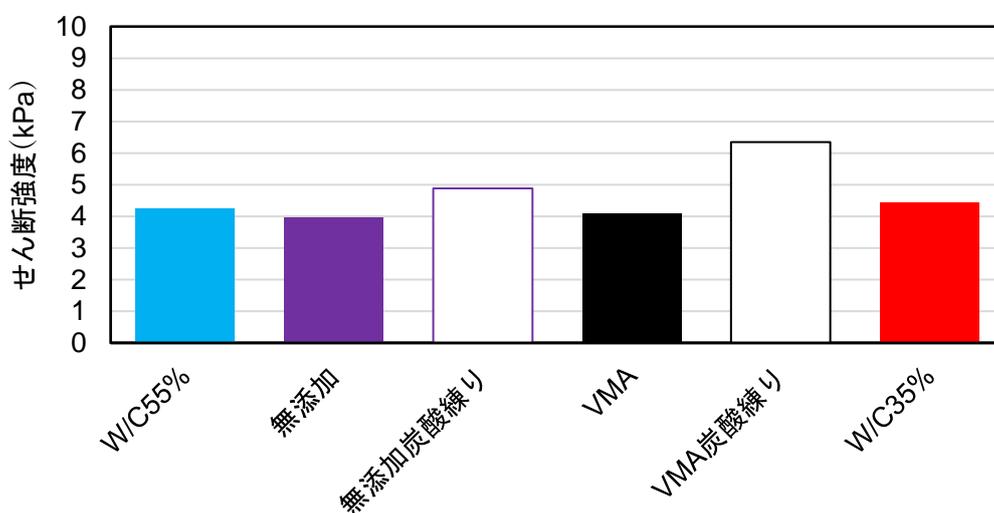
付図-3.4 方向の変位とせん断力の関係

付録 3.4 炭酸水練混ぜによるせん断強度の増加

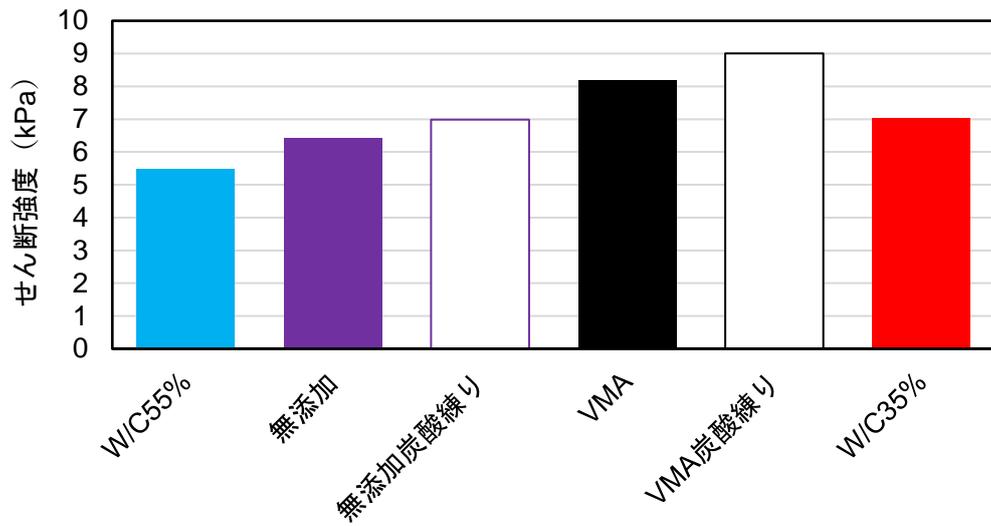
粘性の測定を行った、6 パターンの練上がり直後（10 分後）のせん断強度を測定した（付図－3.5～3.7）。直応力 200 kPa 時において、増粘剤の添加の有無、水セメント比にかかわらず、炭酸水で練混ぜることで、せん断強度が高くなった（付図－3.5）。また、直応力 300 kPa 時においては、水セメント比が低くなるにつれせん断強度は高くなり、増粘剤を添加したものは W/C 35% よりも高くなった（付図－3.6）。直応力 200 kPa 時と同様に、炭酸水による練混ぜによりせん断強度が高くなった。

直応力とせん断強度の関係を示す（付図－3.7）。特に増粘剤添加の水道水練混ぜのものは、直応力 200 kPa 時のせん断強度が高くないにも関わらず、直応力が増加するとせん断強度が大幅に増加する。W/C 55% のものは、直応力 200 kPa 時のせん断強度は低く、直応力が増加しても、せん断強度の増加量は少ない。粉体量が少ないために、固体粒子同士の接触が少ないために、せん断強度が高くならなかったと考える。

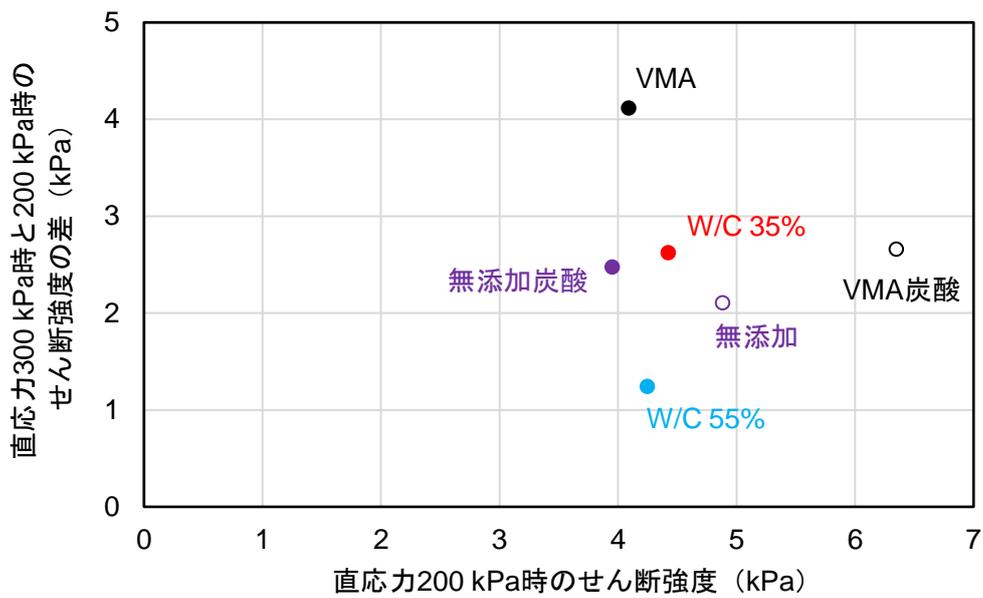
また、炭酸水で練混ぜたものは直応力 200 kPa 時のせん断強度が他配合に比べ高く、特に増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用したものは最も高いせん断強度となったが、直応力が増加しても、せん断強度の増加量は増粘剤添加の水道水練混ぜのものと同程度で、低くなった。直応力が増加しても、せん断強度の増加量が W/C 35% と同程度であるため、炭酸水による練混ぜは粉体量の多い、従来型 SCC の配合である W/C 35% と同等の自己充填性を得られたと言える。



付図－3.5 直応力 200 kPa 時のせん断強度（水平速度 0.03 mm/s）
（特記以外 W/C 45%）



付図-3.6 直応力 300 kPa 時のせん断強度 (水平速度 0.03 mm/s)
(特記以外 W/C 45%)



付図-3.7 直応力 200kPa 時のせん断強度と直応力 300kPa 時と直応力 200kPa 時のせん断強度の差の関係 (水平速度 0.03 mm/s)
(特記以外 W/C 45%)

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) Anuwat Attachaiyawuth, Sovannsathya Rath, Kazunori Tanaka, Masahiro Ouchi: Improvement of self-compactability of air-enhanced self-compacting concrete with fine entrained air, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 14, No. 3, pp.55-69, March, 2016.
- 3) 小西秀和, 山川 勉: 潤滑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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 佐藤 奨, 大内雅博: 自己充填性を支配するフレッシュモルタルの粘着力の回転粘度計による定量化, 第76回土木学会年次学術講演会, 第V部門, 2021年
- 7) 木村彩永佳, 関 健吾, 取違 剛, 横関康祐: 炭酸化養生を行った環境負荷低減型コンクリートの環境影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014年
- 8) 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報集, Vol.42, No.1, 2020年
- 9) 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年

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。

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（(株) CDR コンサルタンツ専務取締役）には、数多くの貴重な御助言、御指導を賜りました。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。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。大変お世話になりました。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広い見地からのご意見や的確な御指導を頂き、自分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。

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。中でも、佐藤さんの面内粘着力の測定方法の構築により本研究を進めることができました。

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。

2022 年 1 月 向井 仁哉