

論文 炭酸水練混ぜによるフレッシュモルタルの粘性向上

向井 仁哉*1・佐藤 奨*1・大内 雅博*2

要旨: 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調べた。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。増粘剤は特に粘度や面内粘着力を増加させる一方、炭酸水練混ぜは特に面外粘着力を増加させた。両者の併用により粉体系自己充填コンクリートと同程度の水セメント比 35%のフレッシュモルタルと同等に近い粘性を得ることができた。

キーワード: 自己充填コンクリート, フレッシュモルタル, 増粘剤, 炭酸水, 粘着力, 粘度

1. はじめに

自己充填コンクリートは、自己充填性能を付与するために低水セメント比となるため、高い単位セメント量による高材料単価が普及を妨げている。低水セメント比によらずに自己充填性能を付与するためには、増粘剤の添加によるモルタル相の粘性を高めることが有効である。しかし、増粘剤の添加では粉体量の多い従来型の自己充填コンクリートの粘性(のうちの、後述する面外粘着力)のレベルには到達していないことが分かった。増粘剤が粉体量の不足を十分に補っているとは言い難く、それを可能にする技術が必要である。

本研究では、練混ぜ水を炭酸水にすることで、水和生成物である水酸化カルシウムと二酸化炭素が反応し、セメント粒子よりも一桁細かい微粒子として析出される炭酸カルシウムを生成し、これが粉体量を補う手段となると想定した。水セメント比を高めたフレッシュモルタルの練混ぜ水を炭酸水にすることで、フレッシュモルタルの粘性を高め、粉体量の多い従来型自己充填コンクリートの粘性に到達することを目的とする。

本研究では、増粘剤添加に加えて、炭酸水練混ぜにより水セメント比 45%および細骨材容積比 55%のフレッシュモルタルの粘性を高める効果を調べた。

2. 対象とする粘性

軟らかさ(軟度)と共に間隙通過性能を支配するモルタル相の適度な粘性は、間隙手前の粗骨材との変形の一体性を付与し、粗骨材からの分離を防止するのに有効であるとされてきた。本研究では、その具体的な役割を、間隙手前で粗骨材粒子どうしの接近速度の抑制による衝突摩擦の緩和に加え、新たに山川ら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¹⁾の2つから成るものと設定した。

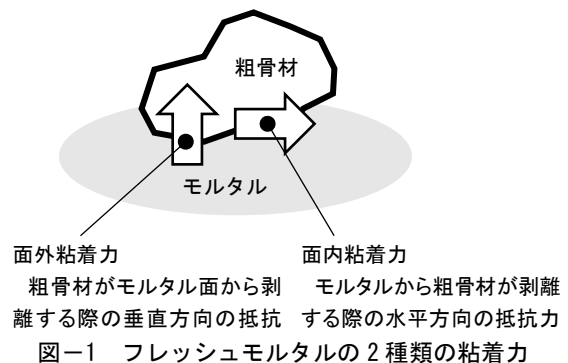
これまで、自己充填コンクリートの簡易配合設計法²⁾においては、モルタル相の粘性の測定のために寸法を定めたロート流下時間またはそれから求めた相対ロート流下速度比を指標としてきた。

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、本研究では、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。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を防止する力を「面外粘着力」と定義した。面内粘着力は、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力とした。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評価試験機「テクスチャ・アナライザー」を使用し、モルタル表面から垂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)。

3. 材料と配合と練混ぜ手順

3.1 使用材料と配合

本研究で用いた使用材料を表-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)は石灰岩砕砂、



*1 高知工科大学大学院修士課程 工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース (学生会員)

*2 高知工科大学 システム工学群 教授 (正会員)

表-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 3.15 g/m ³ |
| 細骨材 | S | 石灰岩砕砂：密度 2.68 g/cm ³ ，粗粒率 2.63， 粒径判定実積率 55.3 % |
| 混和剤 (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 (粉体) |
| 炭酸水 | CW | 市販炭酸水 |

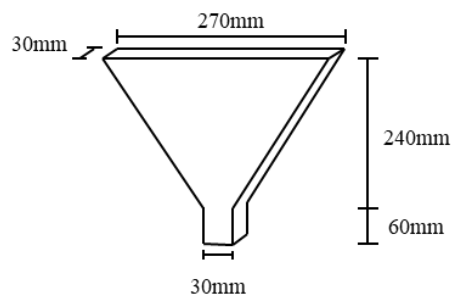


図-2 モルタルロート試験

表-2 モルタル配合

| W/C (%) | s/m (%) | 減水剤 (C×%) | 増粘剤 (g/m ³) | 消泡剤 (g/m ³) | 単位量(kg/m ³) | | | 練混ぜ水 |
|---------|---------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----|------|------|
| | | | | | 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 |
| | | 1.4 | 143 | | | | | 炭酸水 |
| 1.6~1.8 | | 143 | | | 水道水 | | | |
| 35 | 2.1~2.5 | | 236 | 674 | 1474 | 水道水 | | |

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。モルタルの配合を表-2 に示す。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。炭酸水は市販の飲料用炭酸水を用いた。炭酸水中の二酸化炭素濃度が高めであることを示すため、参考までに、隔膜式ガラス電極法によるポータブル炭酸ガス濃度計(東亜 DKK 製)を用いて測定したボトル開封直後の濃度は 1.6×10^3 ppm であった。炭酸水中の二酸化炭素が練混ぜに際してどの程度取り込まれているかは調べなかった。なお、封を切った直後からの炭酸水の pH の測定により、練上がり 30 分間で pH 測定値が 4.4 から 4.6 と 0.2 にしか低下しなかったことから、練混ぜ時に炭酸ガス濃度が大幅に低下したとは見なさなかった。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。モルタルフロー試験は JIS R5201 に基づき無振動で行った。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。

3.2 練混ぜ手順

モルタルの練混ぜには JIS R5201 に規定されたモルタ

ルミキサを用いた。モルタルの練混ぜは、30 秒間空練りをした後に、減水剤を添加した水道水または炭酸水を加えて 120 秒間練り混ぜる手順とした。練上がりから 10 分間静置後、練返し作業を行ってから各試験を行った。

4. 試験方法

4.1 ロート試験

モルタルのフレッシュ性状を、モルタルフロー試験と、自己充填性能のための簡易な粘性試験方法として用いられてきたモルタルロート試験を行った(図-2)。試験は練上がりから 10 分後に行った。

4.2 粘度

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より試料のせん断変形抵抗性を測定することで、流体の粘性を簡易に評価することができる(図-3)。本研究では、TVB25 形(東機産業製)を使用した。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-4)。本研究では、回転速度を、既往研究より、フレッシュコンクリートの自己充填性試験にて 1 秒間に最大 175 mm で水平流動した実績³⁾に鑑み、回転粘度計で測定可能な最大の速度である 100 rpm (138.6 mm/s) に統一した。試料の量は 450mL とした。

4.3 面内粘着力

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も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。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。このときの最大のずり応力を面内粘着力とした(図-5)。試料の量は450 mLとした。本研究では、回転速度を、既往研究より、フレッシュコンクリートの自己充填性試験にて1秒間に最大175 mmで水平流動した実績³⁾に鑑み、回転粘度計で測定可能な最大の速度である100 rpm(138.6 mm/s)に統一した。

4.4 面外粘着力

フレッシュモルタルの面外粘着力の測定にはTA.XTplusC テクスチャーアナライザー(英弘精機製)を使用した。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)に治具を取り付け、その治具が試料に押しこまれたり、試料から引き抜かれたりする際の荷重を測定することで、その物性を定量化するものである(図-6)。本研究では、治具をフレッシュモルタルに押し付け、治具とモルタルを付着させ、治具を引き上げ、モルタルと治具の間を剥離させることで、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-7)。試料の量は450 mLとした。

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-8)。引上げ速度が高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、引き上げ速度を、粘着力の差が顕著に表れる40 mm/sに統一した。

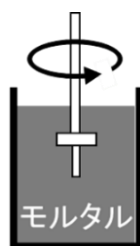


図-3 回転粘度計による粘度測定

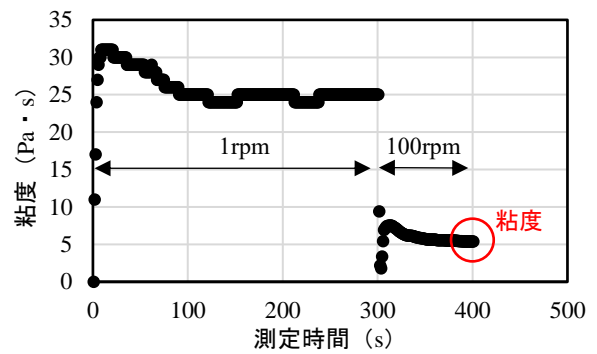


図-4 W/C35%の粘度の測定結果

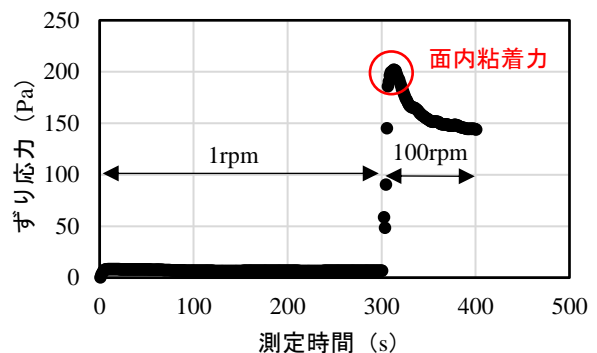


図-5 W/C35%の面内粘着力の測定結果

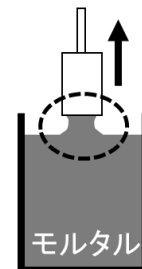


図-6 テクスチャーアナライザーによる粘着力測定

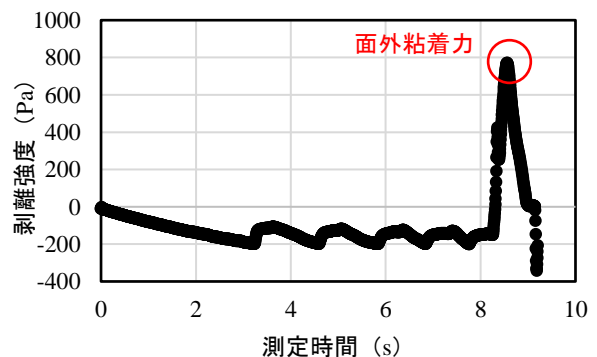


図-7 W/C35%の面外粘着力の測定結果

5. 炭酸水練混ぜによる粘性の付与

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-9~12)。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-9)。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/C35%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-10, 11)。面外粘着力は、炭酸水練混ぜにより明らかに増加した(図-12)。増粘剤添加と炭酸水練混ぜを併用したものは、増粘剤添加のみでは到達できなかった、粉体系自己充填コンクリートのW/C35%のモルタル相の面外粘着力に近い値を得ることができたと言える。

6. 熱分析による炭酸カルシウム量の測定

本研究では、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。そのことを確認するため、熱分析により炭酸カルシウム量の測定を行った。

測定方法は熱重量測定により行った。試料を一定の速度で加熱・冷却したとき、あるいは一定の温度で保持したときの重量変化を測定する手法である。天秤ビームの一端から加熱炉内に吊り下げられた試料が、制御プログラムに従って加熱され重量変化が生じると天秤ビームが傾く。これを光電変換素子が検出、フィードバックコイルに電流が流れ電磁力を発生させることにより天秤ビームを水平に戻す。このときの電流値を質量変化として記録する。試料温度としては試料近傍に設定された熱電対の信号が記録される。この測定方法により、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炭酸カルシウム量に与える影響を調べた(図-13)。なお、「無添加」は増粘剤(VMA)を添加していないことを示す。

測定の結果、増粘剤無添加の場合、炭酸水練混ぜにより炭酸カルシウム量が6%増加することを確認した。炭酸水練混ぜにより新たに炭酸カルシウムが生成される可能性を示唆するものであると言える。一方、増粘剤を添加したものは炭酸水練混ぜによっても炭酸カルシウム量が増加しなかった。炭酸カルシウム生成量の大小と、フレッシュモルタルの粘性との相関は見られなかった。炭酸水練混ぜによる粘性の増加は、単なる炭酸カルシウム量の増加によるものではないことを示唆している。

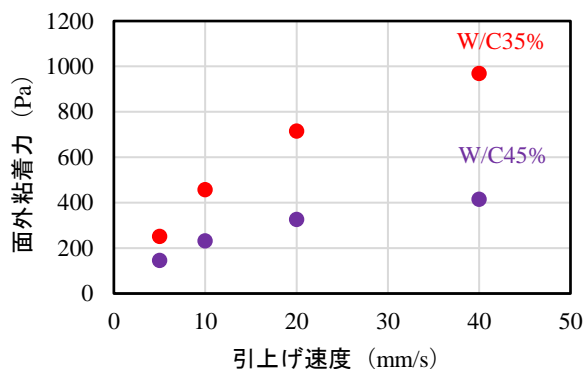


図-8 引上げ速度と面外粘着力の関係

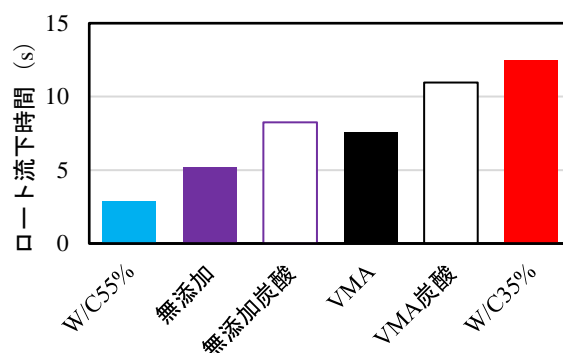


図-9 ロート流下時間の比較
(特記以外 W/C45% ; 以下同様)

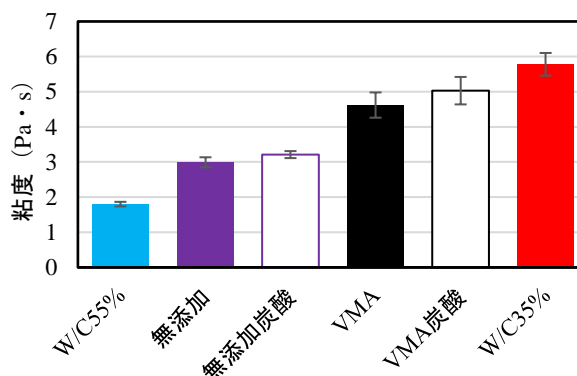


図-10 粘度の比較

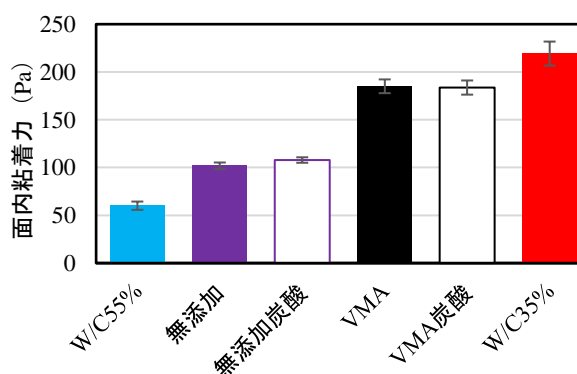


図-11 面内粘着力の比較

7. フレッシュモルタルの粘性の各指標間の比較

炭酸水練混ぜが、粘性のうち、既存の増粘剤よりも特に面外粘着力を大きくする効果のあることが分かった。フレッシュモルタルにおける粘性は1種類ではなく複数の要素から成っていると想定したが、増粘剤の添加よりも特に面外粘着力を大きくする炭酸水練混ぜが、これらの相互関係に関する従来からの認識に変化を生じさせるのかを調べる必要がある。

そこで、ロート流下時間、粘度、面内粘着力、および面外粘着力それぞれの試験結果の相互の関係を調べた。

最初に、従来から用いられている粘性の簡易指標である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(図-14, 15, 16)。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(図-16)。炭酸水練混ぜによるものを加えると、比較的高かったと言えるロート流下時間と粘度との相関が、低くなった(図-14)。

次に、ロート流下時間を除く3者のうち2者間の関係を調べた。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(図-17, 18, 19)。粘度と最も相関が高かったのは、回転粘度計により測定した面内粘着力であった(図-17)。粘度と面外粘着力の相関も比較的高かった(図-18)。しかしながら、ロート流下時間と面外粘着力との相関ほど高くは無かった。一方、面内粘着力と面外粘着力の相関は最も低かった(図-19)。

炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加によるフレッシュモルタルの粘性のうち、粘度と面外粘着力への影響をまとめて図に示す(図-20)。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高い粘度を大きく高めるのに対して、炭酸水練混ぜは粘度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と言える。

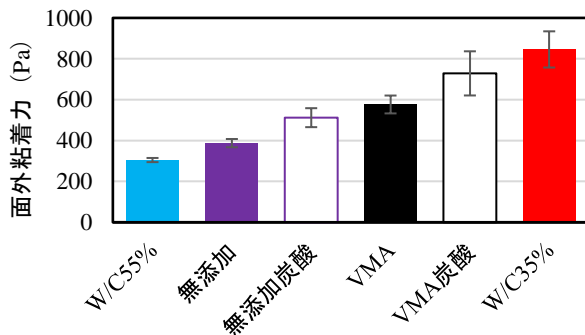


図-12 面外粘着力の比較

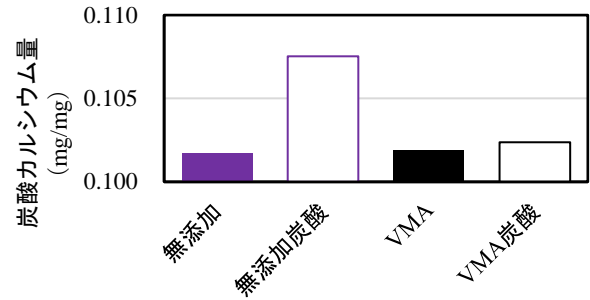


図-13 1mgあたりの炭酸カルシウム量

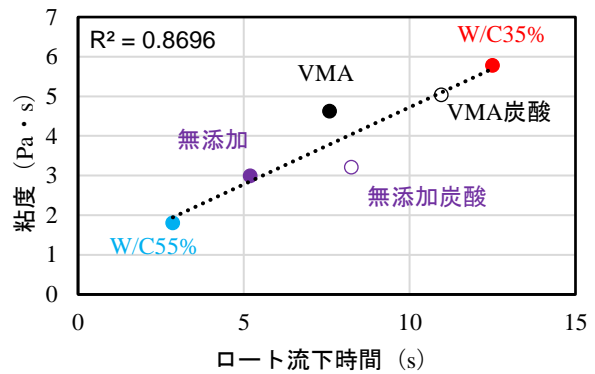


図-14 ロート流下時間と粘度の関係

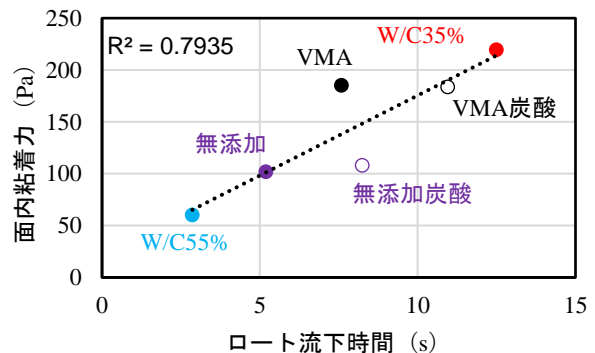


図-15 ロート流下時間と面内粘着力の関係

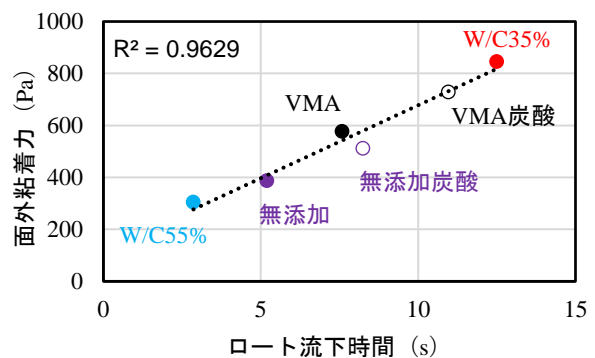


図-16 ロート流下時間と面外粘着力の関係

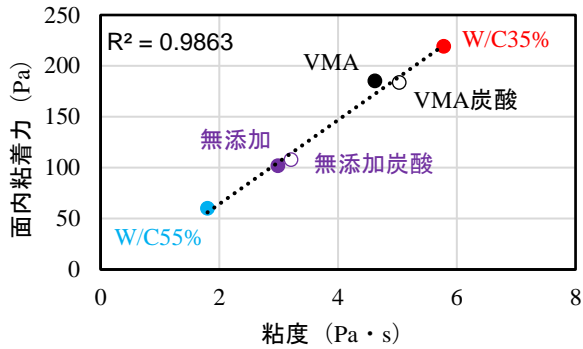


図-17 粘度と面内粘着力の関係

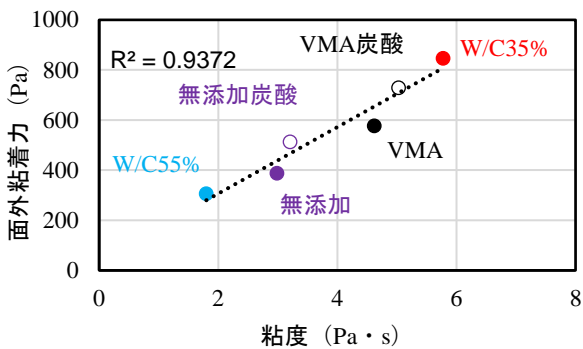


図-18 粘度と面外粘着力の関係

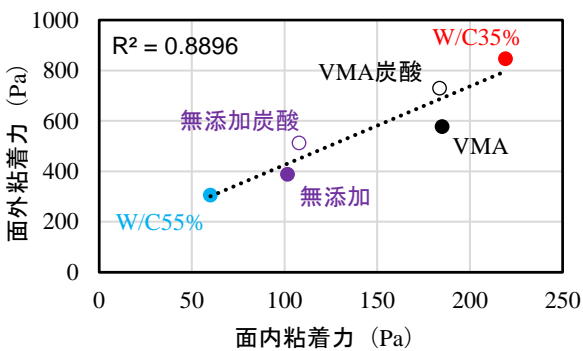


図-19 面内粘着力と面外粘着力の関係

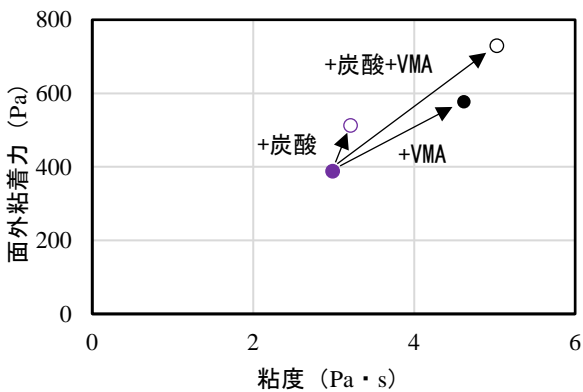


図-20 炭酸水練混ぜまたは増粘剤添加が粘性に及ぼす影響

8. 結論

本研究では、炭酸水練混ぜにより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、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。
- 2) 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出来た。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。
- 3) フレッシュモルタルの簡易な粘性試験方法として用いられてきたロート試験により得られるロート流下時間は、粘性のうち面外粘着力と最も相関が高かった。
- 4) 熱分析による炭酸カルシウム量の測定により、炭酸水による練混ぜが、炭酸カルシウム量を増加させることを確認した。しかし、増粘剤添加と併用したものは、炭酸カルシウムの増加量は少なかった。炭酸水練混ぜによる粘性の増加は、単なる炭酸カルシウム量の増加に伴う粉体量の増加によるものではないことを示唆していると言える。

謝辞 高知工科大学技術指導員の曾我部敏郎氏((株)CDR コンサルタンツ専務取締役)には実験全般について御指導頂きました。心より御礼申し上げます。熱分析は高知県工業技術センターに委託しました。本研究の一部は科学研究費補助金基盤(B)(課題番号19H02217)によるものです。

参考文献

- 1) 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 9 月
- 2) 岡村 甫ら: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993 年 9 月
- 3) 超流動コンクリート研究委員会: 「試験結果一覧」, 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), p. 107, 日本コンクリート工学会, 1994 年 5 月
- 4) 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, 2020 年