

論文 ペーストへの高粘着力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

毛利 匡志*1・大内 雅博*2

要旨： 新型増粘剤によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上のメカニズムを、ペーストの粘着力向上による骨材からの剥離抑制によるものと仮定した。ペースト表面と固体表面との最大静摩擦力を、ペーストの粘着力が支配する剥離荷重と定義し、単位接触面積あたりの剥離荷重を剥離強度と定量化した。ペーストの剥離強度は新型増粘剤の添加量増加とともに大きくなった。ペーストの剥離強度を高めることが、フレッシュモルタル中の細骨材の沈降抑制、すなわち細骨材分布の均等化に効果があることを確認した。

キーワード： 自己充填コンクリート, 増粘剤, 粘着力, 剥離強度, 細骨材沈降抑制効果

1. はじめに

コンクリートは施工過程において人的要因によって信頼性・耐久性が大きく影響されてしまう。その問題を解決するため、1988年に振動締固め作業が不要な自己充填コンクリート (Self-Compacting Concrete : SCC) が開発されたが、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よりも高単価であることが挙げられる。そもそも、わが国で圧縮強度 60 N/mm² の高強度コンクリートの需要は生コンの 5%程度である。必要強度とは関係なく必然的に高強度となる自己充填コンクリートを普及させるには、高強度が必要の無い構造物に対して、価格とトレードオフの関係にある強度を抑える必要がある。すなわち、自己充填性レベルを維持しつつ、単位セメント量の削減や水セメント比を高める必要がある。

そこで近年、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り。水セメント比を 45%に高めたフレッシュコンクリートにこの新型増粘剤を添加したところ、単位セメント量 400 kg 未満であっても最高レベルの自己充填性が得られた²⁾。著者らは、その流動の様子から、モルタルと粗骨材の変形の一体性が高いと観察した。そのメカニズムは、粗骨材表面へのモルタルの付着度合いが高く、剥離が抑制されていることによるものと想定した (図-1)。本研究では、自己充填性向上メカニズムを構成する要素としてペーストの粘着力をとりあげ、測定試験によりその定量化を行う。そして、ペースト粘着力が支配していると想定したフレッシュモルタル中の細骨材分布への影響、すなわち軟度の高いフレッシュペースト中の細骨材の沈降の抑制効果を調べた。

2. 使用材料

本研究で用いた使用材料を示す (表-1)。セメント (C)

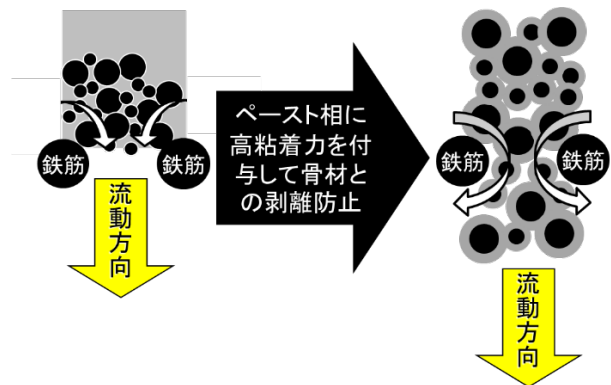


図-1 高粘着力ペーストが骨材表面にまとわりつくことにより骨材間の直接衝突を抑制することを想定 (骨材を示す黒丸の数は左右で同じ)

表-1 使用材料

| 種類 | 記号 | 銘柄, 物理的特性 |
|------|-----|---------------------------------------------------------------|
| 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/m ³ |
| 細骨材 | S | 石灰砕砂 密度 2.68 g/cm 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 |

は普通ポルトランドセメント、細骨材 (S) は石灰石砕砂を使用した。高性能 AE 減水剤 (SP) は主成分がポリカル

*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)

ボン酸エーテル系化合物のものを使用した。増粘剤は新型の水溶性セルロースエーテル系のものを使用した¹⁾。

3. 水平摩擦試験によるペーストの粘着力の定量化

ペーストまたはモルタルの粘着力の測定のため、水平摩擦試験機を導入した(写真-1)。この試験機は、上面も底面も空いた円筒容器に入れたペーストまたはモルタルの表面(本形式では底面)を固定台に接触させながら一定速度(可変)にて水平移動させながら、水平移動させることによりペースト(モルタル)と固体表面との間に生じる摩擦力をロードセルにより測定するものである(図-2)。「固体表面」は、コンクリート中の、ペーストと接する骨材表面、または、モルタルと接する粗骨材を模擬したものである。フレッシュコンクリートの流動、間隙通過の際に生じるペーストと骨材(またはモルタルと粗骨材)の相対変位の際の、骨材に対するペーストの粘着力(または、粗骨材に対するモルタルの粘着力)を定量化することを意図したものである。試料として必要なモルタルまたはセメントペーストの量は 50 ml、容器内側の直径は 60 mm である。

本試験器により測定した水平方向の変位と摩擦力との関係の一例を示す(図-3)。水平荷重を加え始めると急激に摩擦力が大きくなり、そしてある点をピークとして摩擦力が急激に低下する様子が観察できる。この現象について、荷重を加え始めた直後はペーストが骨材表面に粘着して剥離に対し抵抗しているが、ある瞬間に剥離することにより摩擦力(荷重)が急激に低下したと解釈した。本研究の目的が、相対変位によるペーストの骨材からの(または、モルタルの粗骨材からの)剥離の防止による自己充填性向上であることに鑑みると、対象とすべきは、ペーストまたはモルタルの固体面からの剥離の際の力の大きさである。これは測定機における摩擦力のピーク値、すなわち最大静摩擦力であり、モルタルまたはセメントペーストが粗骨材から剥離するのに必要な力の大きさを粘着力と定義した(図-4)。

4. ペーストの粘着力測定のための水セメント比の決定

ペーストの粘着力測定のために、モルタル中の細骨材に拘束される水の量を考慮して、ペーストの水セメント比は、コンクリートまたはモルタルでの水セメント比よりも適切な小さな値とする必要がある。本研究では、枝松らによる、細骨材が拘束する水量を求める手法を用いてペーストの水セメント比を設定した³⁾⁴⁾。すなわち、フレッシュモルタルにおいて、水セメント容積比と相対フロー面積比との間に直線関係が成立することをもとにして、本研究で使用する細骨材(石灰石砕砂)、高性能 AE 減水剤と新型増粘剤(VMA)を用いて

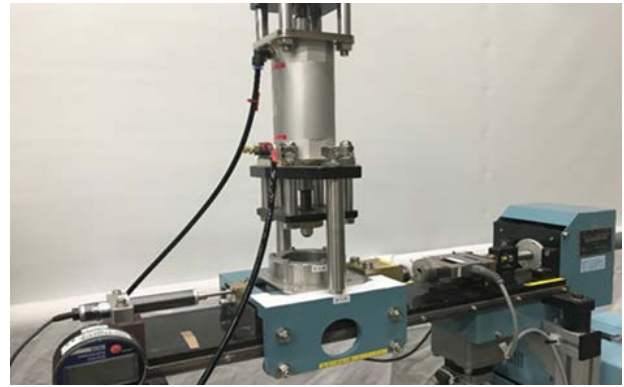


写真-1 モルタルまたはペースト表面の水平摩擦試験

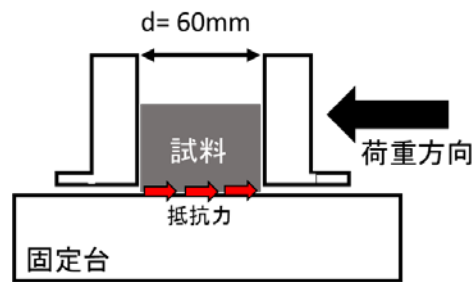


図-2 水平摩擦試験のイメージ

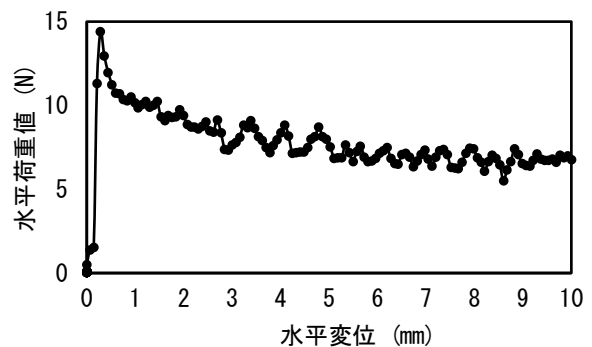


図-3 水平方向の変位と摩擦力の関係
(「水平荷重値」が摩擦力である)

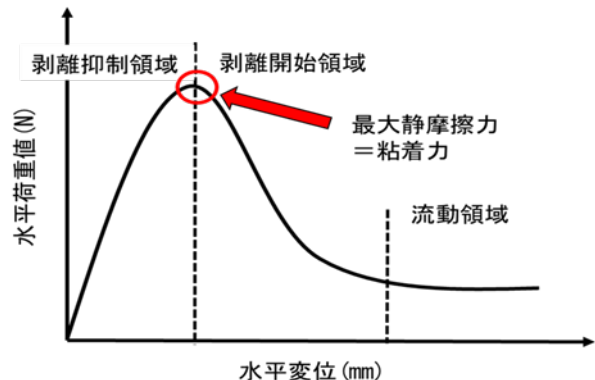


図-4 測定データの解釈図(粘着力の定義)

拘束水比を算出した。相対フロー面積比 G_m とはモルタルフロー試験において得られるフロー値を用いて算出する変形性の指標のことを指す(図-5)。モルタル中の自由水量(フロー値に影響する水量)をペースト中の自由水量と同様と定義すると自由水量は全水量から粉体と細骨材に拘束される水量を差し引いた量になる。すなわちモルタルの相対フロー面積比が0とは全水量が拘束水量であることを意味する。

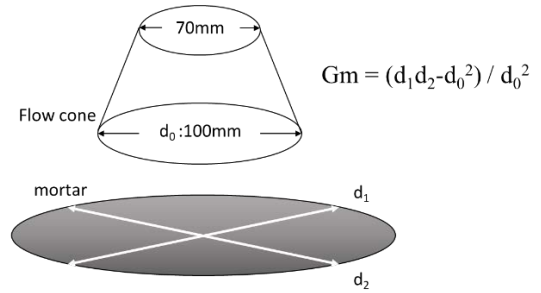


図-5 相対フロー面積比

図-6 にモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を、図-7 に相対フロー面積比が0となる配合における細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係を示す。ここに、 V_w はモルタル中に占める水容積比、 V_p はモルタル中に占めるセメント容積比、 V_s はモルタル中に占める細骨材容積比、 β_s は細骨材の拘束水比を表す。水セメント容積比は V_w/V_p 、水固体粒子容積比は $V_w/(V_s + V_p)$ 、細骨材固体粒子容積比は $V_s/(V_s + V_p)$ と表す。図-6において、細骨材容積比が0% ~ 30%の範囲で相対フロー面積比を求め、そこから直線を相対フロー面積比が0になる点まで外挿した時の水セメント容積比を算出し、各細骨材容積比における相対フロー面積比0の配合を決定した。前提条件を、ペーストとモルタルのそれぞれの相対フロー面積比と水粉体容積比の関係は直線関係であることとした。この時の前提条件はモルタルの細骨材容積比が0.3以下において成り立つことが既往研究³⁾で確認されている。これは0.3以上になると細骨材同士の噛み合いが生じるためである。図-7において細骨材固体粒子容積比が0となる点はペーストを意味し、その値が1となる点は細骨材のみを意味している。文献³⁾より、一定値となる細骨材の拘束水比 β_s は、この直線を細骨材固体粒子容積比が1となる点まで外挿した時の水固体粒子容積比である。本研究では0.1272と求められた。よってW/C 45%のモルタルに相当するセメントペーストのW/Cは33%と求められ、この値を本研究でのペーストの水セメント比とした。

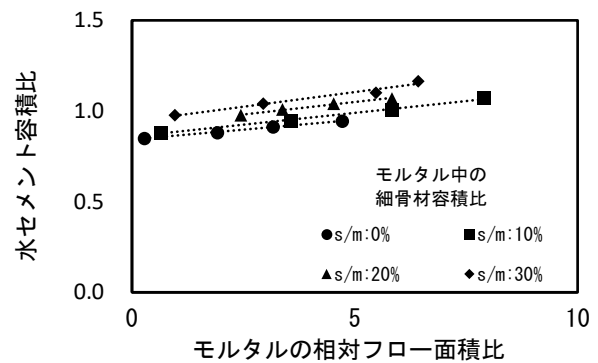


図-6 モルタルの相対フロー面積比と水セメント容積比との関係(普通セメントを使用)

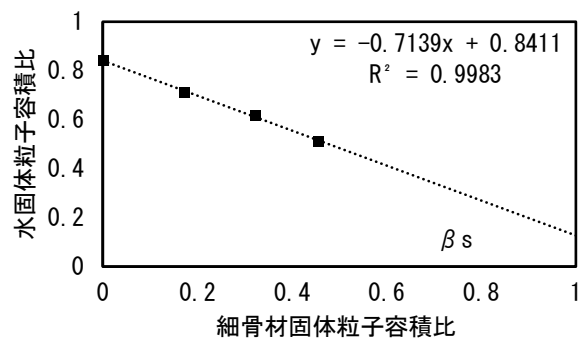


図-7 相対フロー面積比が0となる配合における細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係

5. 摩擦試験における適切な水平移動速度の選定

新型増粘剤の添加量を変化させ、ペーストの粘着力を測定した。配合は前章で設定したW/C 33%、SP/C 0.8%、VMA添加量は0, 100, 150, 200 g/m³とした(表-2)。なお、ここでの新型増粘剤(VMA)の添加量の値はコンクリート中に換算したものである。本研究のコンクリートの配合比率はモルタル:粗骨材=0.7:0.3、モルタルの配合比率はペースト:細骨材=0.45:0.55と設定した。すなわち実際のペースト中の添加量は、コンクリート換算値のVMA添加量を0.315で除したものとなる。図-8の4枚のグラフに、各VMA添加量における、水平移動速度0.12 mm/sec(黒色)、0.06 mm/sec(赤色)、および0.03

mm/sec(青色)の3種類の速度によって求めた、水平変位と摩擦力との関係を示す。明瞭な最大静摩擦力、すなわち摩擦力が最大値となった直後の急落が見られたものと、見られなかったものの両方があった。

摩擦力の明瞭なピークが見られたのは、水平移動速度0.06 mm/secまたは0.03 mm/secの場合、または、新型増粘剤無添加のもののみであった。これらは、水平移動に伴い、ペーストが固定台から一度に剥離したものであると推定した。水平移動速度が比較的小さいもの、または、ペーストの粘着力が比較的小さいことがその理由であっ

たと解釈した。一方、明瞭なピーク値が見られなかったものは、ペーストの固定台からの剥離が生じる際、高い粘着力または高速水平移動によるペーストの変形のために一度に剥離せず部分的に剥離したものと解釈した。

以降、本研究の材料と配合の範囲内では、容器内のペーストが水平移動して固体表面から一度に剥離するための水平移動速度は0.06 mm/sec または 0.03 mm/sec として検討を行った。

6. 新型増粘剤によるペーストへの粘着力の付与効果

前章にて決定した測定方法によるペーストの剥離強度の値を示す(表-2)。また、剥離強度は最大静摩擦力の値から、試料無しで測定した最大静摩擦力の値を差し引いたものを、試料の断面積(接触面積)で割った値である(図-9)。さらにペーストの各VMA添加量における剥離強度と塑性粘度の関係を示す(図-10)。塑性粘度は回転粘度計を用いて回転数0.6rpmで測定した。VMA添加量100g/m³までは塑性粘度は添加量に比例して増加しなかった一方、剥離強度は添加量200g/m³まで比例関係にあった。VMA添加量増加により塑性粘度とは独立した粘着力を付与した可能性がある。

7. ペーストの剥離強度増進による細骨材沈降抑制効果

ペーストの剥離強度を高めることによるモルタル中の細骨材の沈降を抑制する効果を調べた。細骨材表面にペーストが強くまとわり付くことにより、ペーストと細骨材の分布に偏りがなくなる効果を想定した。新型増粘剤の添加量、ひいてはペーストの剥離強度と細骨材分布の関係を調べた。試験を行ったモルタルの配合を示す(表-3)。なおここでのVMA添加量はコンクリート換算値を表記するが、実際のモルタルの添加量はコンクリート換算値に0.7で除したものである。JISのモルタルフロー試験により測定したペーストのフロー値は、標準とされている値よりも大きめの、細骨材が分離気味と想定した275±5 mmで統一した。なお、使用する細骨材の密度は2.68 g/cm³、一方ペースト相の密度は1.89 g/cm³であったので、ペースト相の軟度が十分に大きいと必然的に細骨材が沈降する。

鉛直方向に4層円筒容器(写真-2 左)にフレッシュモルタル試料を投入し、時間経過後に各層のモルタル中の細骨材量を求めた。試験器上から上層、中上層、中下層、下層とし、容器寸法は内径99.5mm、深さ220.0mmのものを使用した。モルタルを投入後10分静置し、上層から順番に、各層にあるモルタルを静かに「横移動」により取り出し、水で十分にセメントペースト分を洗い落とした。その際、砂粒を流さないために径300μmのふるいを

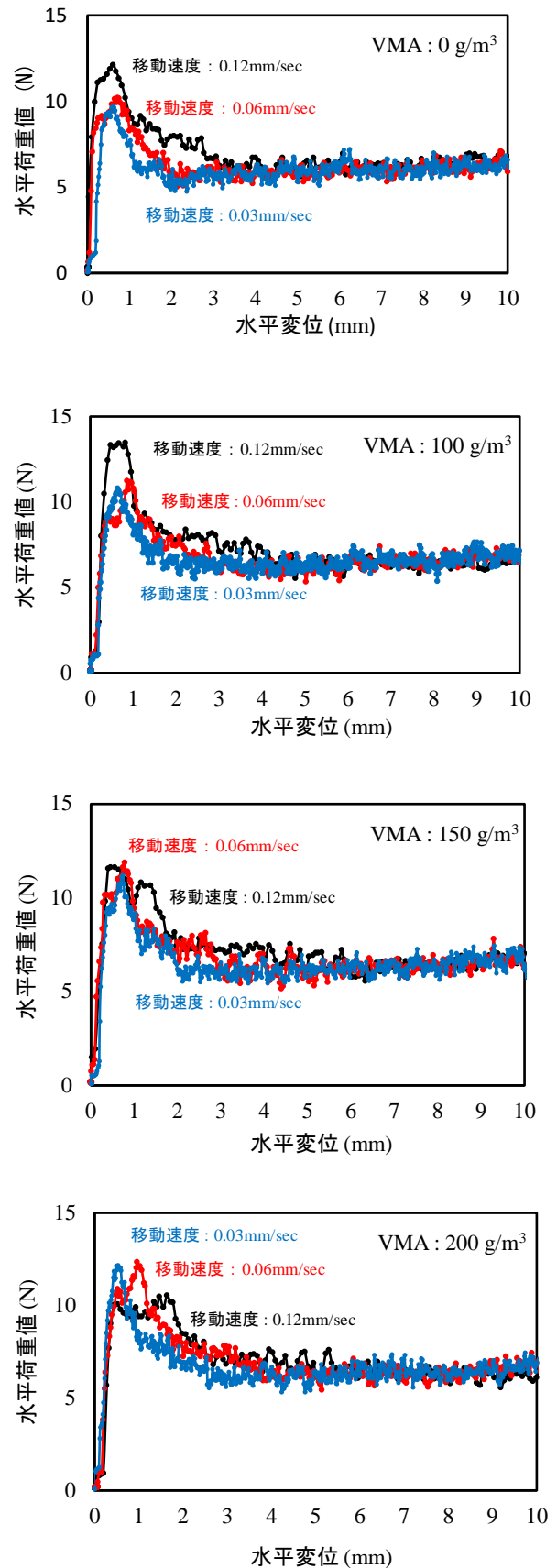


図-8 各増粘剤添加量における水平変位と水平荷重(摩擦力)との関係(VMA添加量(コンクリート中の値への換算値)は順に0, 100, 150, 200 g/m³)

表-2 ペーストの配合と剥離強度
(VMA 添加量はコンクリート中の値への換算値：
ペースト中の値は÷0.315)

| 単位量(kg/m ³) | | 減水剤 (C×%) | VMA (g/m ³) | 品質試験結果 | | |
|-------------------------|------|--------------|----------------------------|---------------------|----------------|------------------------------------------------|
| W | C | | | モルタル フロー (mm) | 塑性粘度 (Pa・s) | 剥離強度 (×10 ⁻³ N/mm ²) |
| 510 | 1546 | 0.8 | 0 | 325 | 10.82 | 1.90 |
| | | | 100 | 310 | 8.81 | 2.27 |
| | | | 150 | 305 | 18.94 | 2.48 |
| | | | 200 | 305 | 22.53 | 2.65 |

表-3 モルタルの配合
(VMA 添加量はコンクリート中の値への換算値：
モルタル中の値は÷0.700)

| 単位水量(kg/m ³) | | | 減水剤 (C×%) | VMA (g/m ³) | 品質試験結果 | |
|--------------------------|-----|------|--------------|----------------------------|---------------------|----------------|
| W | C | S | | | モルタル フロー (mm) | 塑性粘度 (Pa・s) |
| 264 | 586 | 1474 | 0.9 | 0 | 280 | 15.37 |
| | | | 1.1 | 100 | 276 | 12.55 |
| | | | 1.2 | 150 | 274 | 22.30 |
| | | | 1.3 | 200 | 275 | 24.40 |

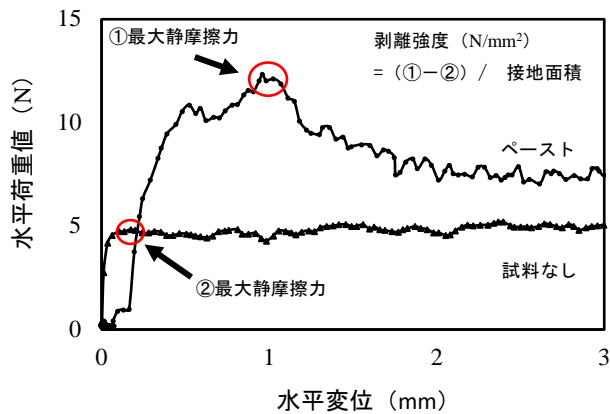


図-9 ペーストの剥離強度の算出方法

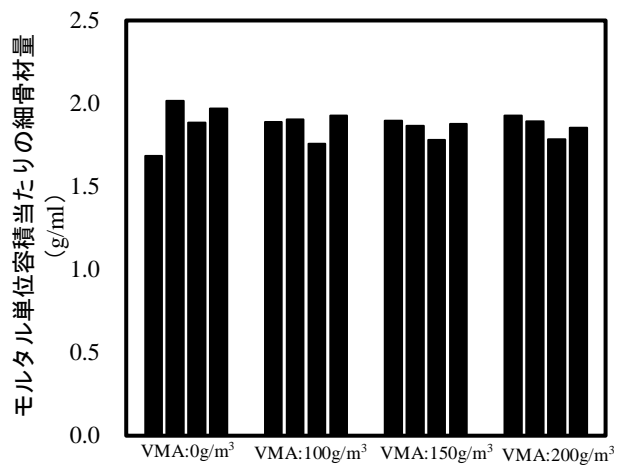


図-11 各層における細骨材沈降量の違い
(左側棒から順に上層, 中上層, 中下層, 下層の値)

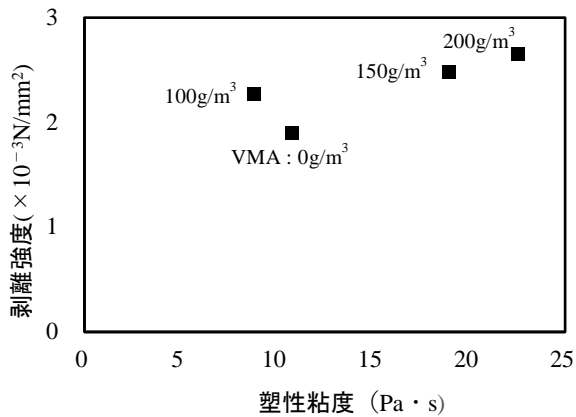


図-10 VMA 添加量 (コンクリート中の値への換算値)
とペーストの剥離強度との関係

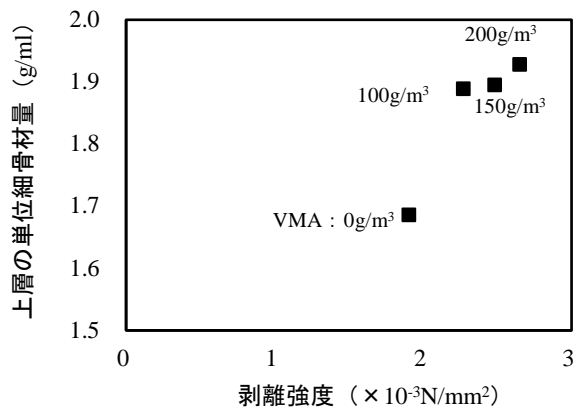


図-12 上層の単位細骨材量と剥離強度の関係 (水平移動
速度: 0.06mm/sec)



写真-2 (左) 4層円筒容器; (右) 絶乾状態の細骨材

使用した。その後、各層の細骨材を送風乾燥機に入れ 24 時間以上乾燥させ、絶乾状態(写真-2 右)とし、乾燥機から取り出し空気中で約 20℃まで冷ました後、細骨材重量を求めた。新型増粘剤添加量別の、モルタルの単位容

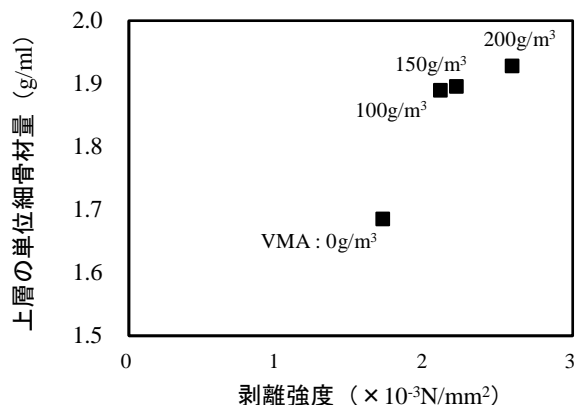


図-13 上層の細骨材容積密度と剥離強度の関係（水平移動速度：0.03mm/sec）

積中の細骨材質量の分布を示す（図-11）。新型増粘剤添加量が大きくなるほど鉛直方向の分布が均等になっていき、VMA 添加量 150g/m³ 以上では高い均一性を確保していた。さらに、各配合におけるペーストの剥離強度と、沈降の影響を最も受ける上層の細骨材量との関係を、水平摩擦試験における水平移動速度毎に示す（図-12, 13）。なお、ここでの剥離強度は細骨材の拘束水比を考慮して別個に練ったペーストから求めた値である。

以上から、新型増粘剤の添加は、その付与する粘着力がフレッシュモルタル中の細骨材の沈降を抑制する効果を発揮した可能性を得たと言える。

8. まとめ

新型増粘剤が付与するフレッシュコンクリートの自己充填性向上効果を、コンクリート中のモルタルが粗骨材表面から剥離する抵抗力、または、モルタルのペーストが骨材表面から剥離する抵抗力であると仮定し、水平摩擦試験を用いて定量化した。単位面積当たりの剥離に対する最大の抵抗力を剥離強度と定義した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 容器に入れた、水平移動するモルタルまたはペースト表面と固体表面との間の最大静摩擦力を用いて

剥離強度を求めるためには、セメントペーストまたはモルタルの水平移動速度を高くし過ぎないようにする必要がある。本研究の範囲では、0.06 mm/sec 程度以下の水平移動速度であれば、接触面とお最大静摩擦力が明瞭に表れ剥離強度を求めることが可能であった。

- 2) 新型増粘剤により、ペーストに剥離強度を付与し得ることを示した。
- 3) モルタル中の細骨材の沈降量測定試験により、新型増粘剤が付与するペースト相の高い剥離強度が細骨材の沈降を抑制する効果を確認した。剥離強度が高いほど、均等な細骨材分布を得る可能性を得たと言える。

謝辞

本研究に際して、信越化学工業(株) 合成技術研究所には新型増粘剤の提供の御協力を賜りました。(株)ニュージェック 技術開発グループ 枝松良展氏には細骨材の拘束水比の求め方について御指導と御協力を賜りました。高知工科大学技術指導員の宮地日出夫氏と曾我部敏郎氏（(株)CDR コンサルタント専務取締役）には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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 枝松良展, 山口昇三, 岡村 甫: モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化, 土木学会論文集, No.538, Vol.31, pp.37-46, 1996 年
- 4) 枝松良展, 山口昇三, 岡村 甫: モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界, 土木学会論文集, No.571, Vol.36, pp.131-147, 1997 年