

2018 年度修士論文

ペーストへの骨材との  
高粘着力付与による  
フレッシュコンクリートの  
自己充填性向上

Enhancement of self-compactability of fresh concrete  
by higher adhesion of paste to aggregate

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 田島 昌樹

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

1215061 毛利 匡志

2019 年 3 月

## ペーストへの骨材との高粘着力付与によるフレッシュコンクリートの自己充填性の向上

毛利 匡志

### 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、モルタルの粘着力向上による粗骨材からの剥離抑制、または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。水平移動するモルタルまたはペースト表面を固体表面に接触させることにより生じる最大静摩擦力を、モルタルまたはペーストの粘着力と定義して定量化した。最大静摩擦力が生じた際にモルタルまたはペーストが粗骨材からの剥離が生じたと想定した。

粘着力付与に効果のあると想定した新型増粘剤の添加量が大きくなるほど、ペースト表面の水平接触摩擦試験により測定した最大静摩擦力も大きな値を示した。粘着力の増加を示すものと考察した。

モルタル中の細骨材の沈降抑制効果に着目し、粘着力による自己充填性向上効果を検証した。水平接触摩擦試験により得られた最大静摩擦力が大きいペーストほど、細骨材の沈降抑制効果が高かった。すなわち、高さ方向の細骨材分布が均等であった。

新型増粘剤添加量を大きくするに従い、粘着力だけでなく、回転粘度計により測定される塑性粘度も高くなった。新型増粘剤添加量の増加に伴い高くなるフレッシュコンクリートの自己充填性レベルは、粘着力のみならず粘度の向上にもよるところが大きい可能性を得た。

# Enhancement of self-compactability of fresh concrete by higher adhesion of paste to aggregate

Tadashi Mori

## ABSTRACT

A new type of viscosity agent enhanced the level of self-compactability of fresh concrete. The authors assumed that the mitigation of the separation of paste from the surface of aggregate enabled it and that the viscosity agent promoted the peel strength of the paste.

The maximum static friction of paste to the solid surface was measured by horizontal friction test. The peel strength of paste was defined as the maximum static strength per unit area. The larger dosage of the viscosity agent resulted in the higher peel strength of the paste.

The higher peel strength resulted in uniform distribution of fine aggregate in the mortar of self-compacting concrete at fresh stage. It can show the effect of adhesion of paste in self-compactability of fresh concrete.

The new type of viscosity agent promoted viscosity of fresh paste as well as the peel strength. It is possible that both peel strength and viscosity enhanced the level of self-compactability of fresh concrete.

# 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の経済性向上の為の既往研究	1
1.3	気泡潤滑型自己充填コンクリートの開発と課題	1
1.4	新型増粘剤による粘着力付与の自己充填性と安定性の向上効果	2
1.5	本研究の目的	2
第2章	水平摩擦力試験によるセメントペーストの粘着力の定量化	4
2.1	水平摩擦力試験と粘着力の定義	4
2.2	ペーストの粘着力測定の為の水セメント比決定	7
2.2.1	細骨材の拘束水比	7
2.2.2	拘束水比の決定	7
2.3	適切な水平移動速度の選定	9
2.3.1	各増粘剤添加量における水平移動速度の比較	9
2.3.2	新型増粘剤による粘着力の付与効果	12
第3章	ペーストの剥離強度増進による細骨材沈降抑制効果	14
3.1	概要	14
3.2	試験方法	14
3.3	試験結果	15
3.4	考察	16
第4章	セメントペーストの粘着力による自己充填性向上効果	18
4.1	自己充填性向上効果における粘着力と粘性の位置付け	18
第5章	結論	21
参考文献		22
謝辞		23
付録		24
①	使用材料	24
②	練混ぜ方法	25
③	モルタルフロー試験	26
④	空気量試験	26
⑤	コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)	26
⑥	モルタルからセメントペーストに対象を移した経緯	27
⑦	今後の課題	29



## 図目次

図- 1.1	コンクリートの構成材料容積比 .....	2
図- 2.1	モルタルまたはセメントペースト表面の水平摩擦試験機.....	4
図- 2.2	モルタルまたはペースト表面の水平摩擦試験機概念 .....	5
図- 2.3	水平摩擦試験機により測定した水平方向の変位と摩擦力の関係.....	6
図- 2.4	水平摩擦試験機により測定されたデータの解釈：最大静摩擦力を剥離が生じた瞬間と見なし、モルタルまたはペーストの粘着力と定義 .....	6
図- 2.5	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 .....	8
図- 2.6	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（普通セメントを使用） .....	8
図- 2.7	移動速度が水平荷重に及ぼす影響（VMA:0 g/m <sup>3</sup> ）：水平移動速度に関わらず最大静摩擦力が観察できた .....	9
図- 2.8	移動速度が水平荷重に及ぼす影響（VMA:100 g/m <sup>3</sup> ）：水平移動速度が大きくなると最大静摩擦も大きくなったが、ピークがやや不明瞭となった.....	10
図- 2.9	移動速度が水平荷重に及ぼす影響（VMA:150 g/m <sup>3</sup> ）：水平移動速度が大きくなると水平摩擦力のピーク値が不明瞭となり、最大値自体も小さくなった .....	10
図- 2.10	移動速度が水平荷重に及ぼす影響（VMA:200 g/m <sup>3</sup> ）：水平移動速度が大きくなると水平摩擦力が定速移動のものよりも小さくなり、ピーク値が不明瞭になった.....	11
図- 2.12	剥離強度（N/mm <sup>2</sup> ）算出方法の概念 .....	12
図- 2.13	ペーストの塑性粘度と剥離強度との関係 .....	13
図- 3.1	4 層円筒容器 .....	14
図- 3.2	各層の絶対乾燥状態の細骨材 .....	15
図- 3.3	各層における細骨材沈降量の違い（各配合とも左側棒から上層，中上層，中下層，下層の細骨材容積密度の値） .....	16
図- 3.4	各モルタルにおけるペーストの剥離強度と細骨材分布値との関係 .....	17
図- 4.1	ペーストの剥離強度とコンクリートの自己充填性指標との関係.....	19
図- 4.2	ペーストの塑性粘度とコンクリートの自己充填性指標との関係.....	19
図- 4.3	ペーストの塑性粘度と剥離強度との関係にコンクリートの自己充填性指標値を示した：同程度の剥離強度で塑性粘度の上昇が自己充填性向上をもたらしたと推定した .....	20

## 表目次

表- 1.1 コンクリートの配合 .....	3
表- 2.1 ペーストの配合 .....	12
表- 3.1 モルタルの配合 .....	15
表- 3.2 各配合のモルタルにおける各層での細骨材量の分布 .....	16

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

コンクリートは建設材料の中で安価で供給しやすいため、社会基盤施設を建設するのに欠かせない重要な役割を担っている。

しかし、コンクリートは他の建設材料と違い施工過程において人的要因によって信頼性や耐久性に大きく影響されてしまう。施工時の振動締固め作業が十分でないと、隅々までコンクリートが充填されずジャンカ等の様々な問題が生じてしまう。この問題を解決するために、単位骨材量を減らし単位粉体（セメント）量を多くすることで、鉄筋を有する型枠内に自重のみで充填される自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete: SCC)が1986年に岡村 甫により提唱され<sup>1)</sup>、1988年に前川宏一と小澤一雅がプロトタイプを完成させた<sup>2)</sup>。しかしながら、自己充填コンクリートが開発されて約30年が経過したが、自己充填コンクリートの普及は進んでいない。その原因として普通コンクリートに比べて単位セメント量が多く単価が約2倍であることが挙げられる。本来、高強度コンクリートが必要な案件はコンクリート需要の5%程度で一般的に普及させるには価格とトレードオフの関係にある強度を抑え、かつ自己充填性はこれまで通りの水準を維持する必要がある。

## 1.2 自己充填コンクリートの経済性向上の為に既往研究

自己充填コンクリートは施工性や強度は高いものの、材料コストが高い為に一般の部位・部材等にはあまり適用されていなかった。そこで自己充填性は持たないもののスランプフロー450 mmの、若干の締固めにより良好な施工性を有する経済的な中流動コンクリートが開発された<sup>3)</sup>。普通コンクリートよりも施工性を向上させるために分離低減剤を添加させモルタルやペースト相の塑性粘度を上昇させたものであるが、自己充填コンクリートよりも自己充填性ランクは低い。その為、自己充填性は従来と同等かつ経済性を向上させた新たに改良した新型自己充填コンクリートの開発が望まれている。

## 1.3 気泡潤滑型自己充填コンクリートの開発と課題

現在、単位セメント量を削減しつつ強度が従来型の自己充填コンクリートよりも低めの気泡潤滑型自己充填コンクリート(Air-enhance Self-Compacting Concrete : air-SCC)の開発が進んでいる<sup>4)</sup>。air-SCCは微細な空気泡を連行して固体粒子間の接触摩擦を低減する効果(ベアリング効果)により単位セメント量を抑制し、骨材量を増加させても従来のSCCと同等の自己充填性を維持している。現在は実用化に向けた技術開発が行われている。

図-1.1に各コンクリート中の材料容積比を示す。気泡潤滑型自己充填コンクリートの空気量は約10%程度連行することで従来型自己充填コンクリートと同等の自己充填性を維持している。それにより骨材量を増やして単位セメント量を削減することが可能となった。圧縮強度は水セメント比55%の普通コンクリートと同程度の強度を確保している。また現在、



自己充填性付与による所要空気量 5 %を目標に気泡の一層の微細化をする研究が行われている。

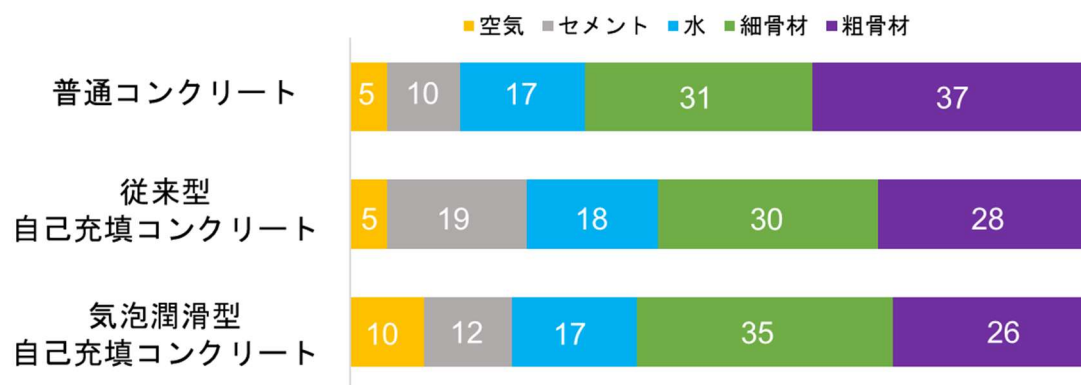


図- 1.1 コンクリートの構成材料容積比

#### 1.4 新型増粘剤による粘着力付与の自己充填性と安定性の向上効果

本研究で用いた新型増粘剤 (VMA) は、白色粉末のセルロースエーテル系増粘剤である。また加藤<sup>5)</sup>の研究によるとセルロースエーテルはセメントペースト中に溶解して粘性を高め、材料分離抵抗性の改善やブリーディングの低減に寄与すると言われている。また文献<sup>6)</sup>によると従来のセルロースエーテル系増粘剤は、粘性は高まるが流動性は低下する傾向にあった為、材料分離抵抗性と流動性の確保が両立できるように組成等を調整した新規の増粘剤が開発されたとされている。

桜井ら<sup>6)</sup>によると、新型増粘剤を用いることでセメント量を増大することなく材料分離抵抗性を確保できることが可能になったとの報告がある。しかし新型増粘剤効果の詳細なメカニズムは未解明のままである。

一方、大西らは、新型増粘剤を用いることで細骨材とセメントペーストとの材料分離を抑制し、モルタル中の細骨材の沈降抑制効果があると報告されている<sup>7)</sup>。

#### 1.5 本研究の目的

本研究の目的は、新型増粘剤が air-SCC の自己充填性を向上させるメカニズムを解明することである。この新型増粘剤を添加したコンクリート (表-1) は、モルタルと粗骨材が一体となって流動しているように観察した。これは、モルタルが粗骨材表面に付着して剥離が抑制されていることによるもの想定した。このモルタルが粗骨材表面から剥離するのを抑制する力を粘着力と定義した。本研究では、この力を定量化することと、その効果を検証する。

表- 1.1 コンクリートの配合

W/C(%)	s/m(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤(C×%)		VMA(g/m <sup>3</sup> )	消泡剤(g/m <sup>3</sup> )	品質試験結果			
		W	C	S	G	SP	AE			スランプフロー (mm)	空気量(%)	ロート速度 (s)	ボックス上昇高さ (mm)
45	55	185	410	1032	810	1.0	0	-	-	580	3.9	8.63	90
						1.2	0	100	25	685	1.5	7.84	140
						1.0	0	100	25	605	2.2	8.71	145
						1.0	-	150	37.5	605	1.8	7.65	285
						1.0	-	200	50	595	2.4	10.01	270
						1.0	1.0	150	37.5	620	3.4	6.83	315

## 第2章 水平摩擦力試験によるセメントペーストの粘着力の定量化

### 2.1 水平摩擦力試験と粘着力の定義

モルタルまたはペーストの粘着力の測定のため、水平摩擦試験機を導入した（図-2.1）。この装置は、直径 60 mm の円筒形容器に入れたモルタルまたはペースト表面（本形式では底面）を固定台に一定速度で接触させながら水平移動させることにより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-2.2）。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 である。

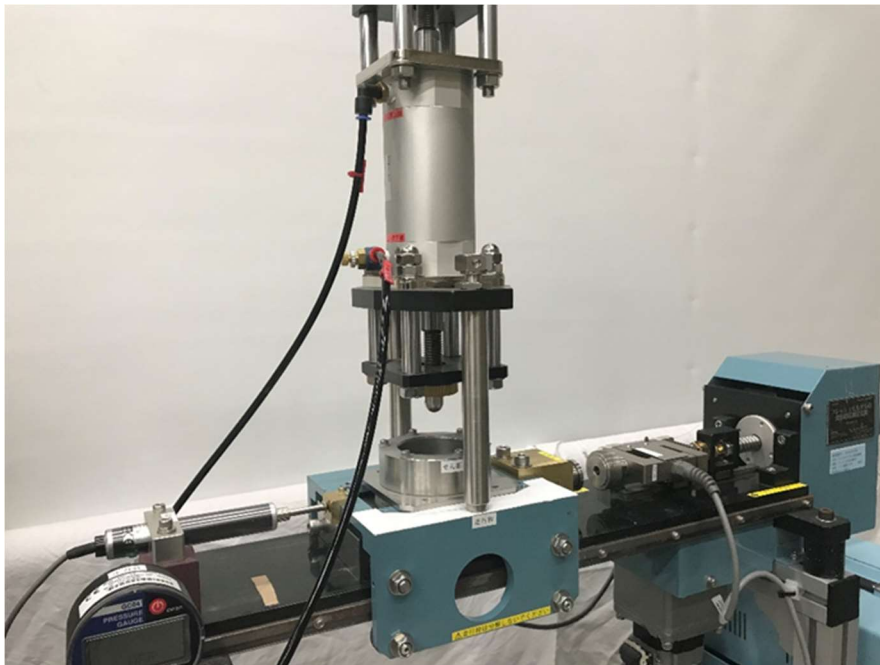


図- 2.1 モルタルまたはセメントペースト表面の水平摩擦試験機

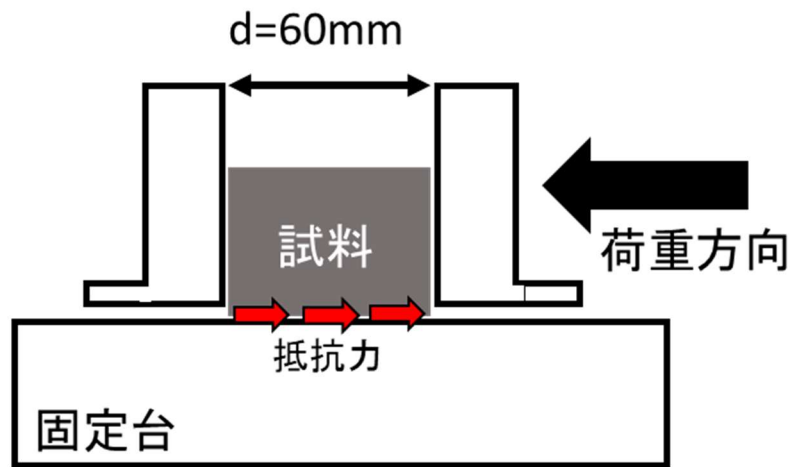


図- 2.2 モルタルまたはペースト表面の水平摩擦試験機概念

この試験機は、モルタルまたはペーストと接する「固体表面」が粗骨材または骨材表面を模擬したものである。モルタルまたはペーストの粗骨材または骨材に対する粘着力を定量化することを意図したものである。

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-2.3）。水平荷重を加え始めると急激に摩擦力が大きくなり、そしてある点を境として摩擦力が急激に低下する様子を観察した。この現象は、荷重を加え始めた直後はモルタルまたはペーストが粗骨材または粗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。そして、ここで得られる摩擦力のピーク値は最大静摩擦力であり、モルタルまたはペーストが粗骨材または骨材から剥離するのに必要な力の大きさ、すなわち粘着力と定義した（図-2.4）。

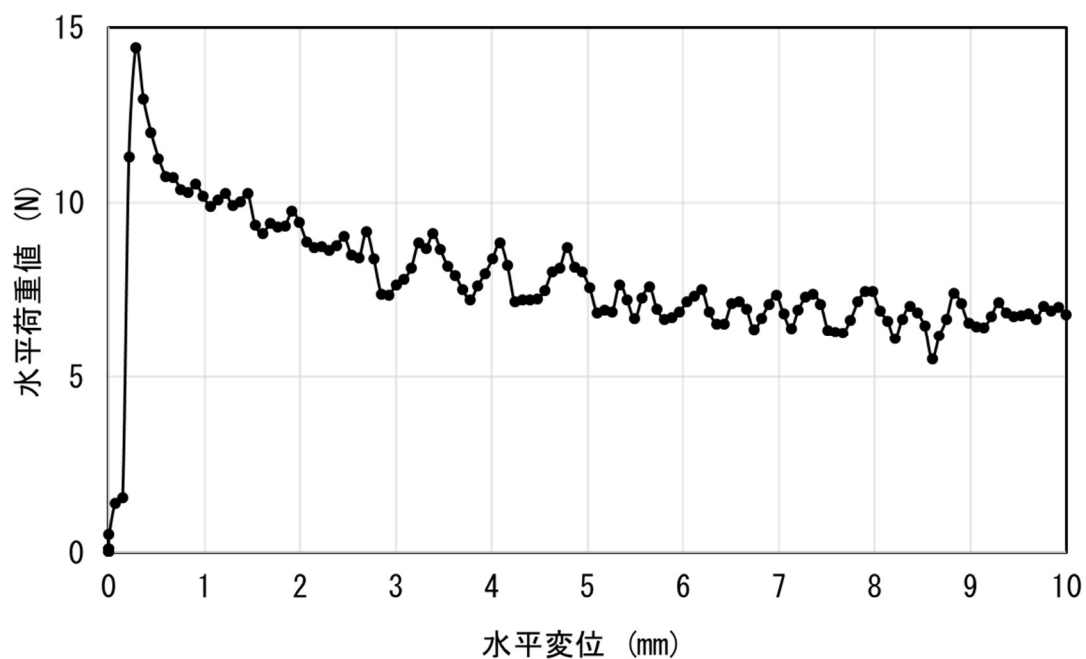


図- 2.3 水平摩擦試験機により測定した水平方向の変位と摩擦力の関係

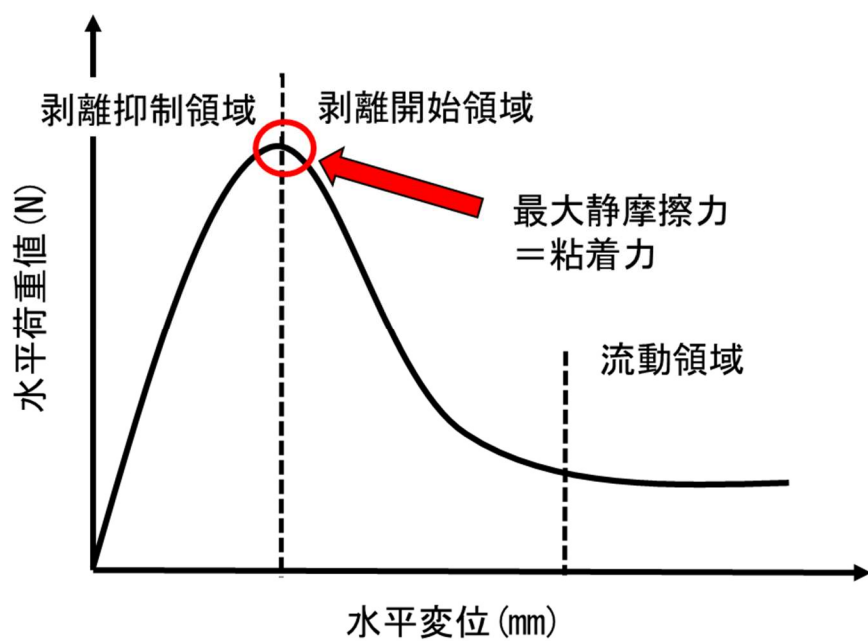


図- 2.4 水平摩擦試験機により測定されたデータの解釈：最大静摩擦力を剥離が生じた瞬間と見なし、モルタルまたはペーストの粘着力と定義

## 2.2 ペーストの粘着力測定のための水セメント比決定

### 2.2.1 細骨材の拘束水比

粘着力の測定のために水平変形抵抗性試験の測定対象をモルタルからセメントペーストに変更した。

そこで考慮しなければならないのが、細骨材の拘束水である。フレッシュコンクリート中の水は自由水と拘束水に分類される<sup>8)</sup>。文献<sup>8)</sup>によると自由水とは、フレッシュコンクリート中において自由に移動できる水のことである。拘束水とはフレッシュコンクリート中における自由水以外の水で、セメントや骨材などの固体粒子表面に吸着した水や粒子径の小さい粉体粒子間に拘束された水などのことである。と報告されている。今回セメントペーストでの測定であるため、セメントの拘束水は考慮しないものとする。

既往の研究では、細骨材が拘束する水量を求める手法として次のような提案がなされている。枝松ら<sup>9)10)</sup>は、セメントペーストおよび細骨材の容積比を一定としたモルタルにおいて、水粉体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明らかにしている。しかし、ここで報告されている細骨材の種類と産地は本研究で使用されているものと違うため、同じ細骨材拘束水比を使用することができない。

そこで使用する細骨材（石灰石砕砂）と高性能 AE 減水剤、新型増粘剤（VMA）を考慮した場合の拘束水比を算出する。算出方法は文献<sup>9)</sup>において提案されている手法を用いるものとする。またペーストとモルタル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ペーストとモルタルの変形係数はおおよそ等しいこととし、また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確認されている<sup>9)</sup>。細骨材容積比が 0.3 以上になると細骨材同士の噛み合いが生じ、それが見かけ上の拘束水比として上増しされる為である<sup>9)</sup>。

### 2.2.2 拘束水比の決定

図-2.7 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、図-2.8 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。 $V_w$  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、 $\beta_s$  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-2.7 より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。図-2.8 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、1 となる点は細骨材だけを意味している。文献<sup>9)</sup>より一定値となる細骨材の拘束水比  $\beta_s$  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り、この場合は 0.1272 であった。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 % とした。

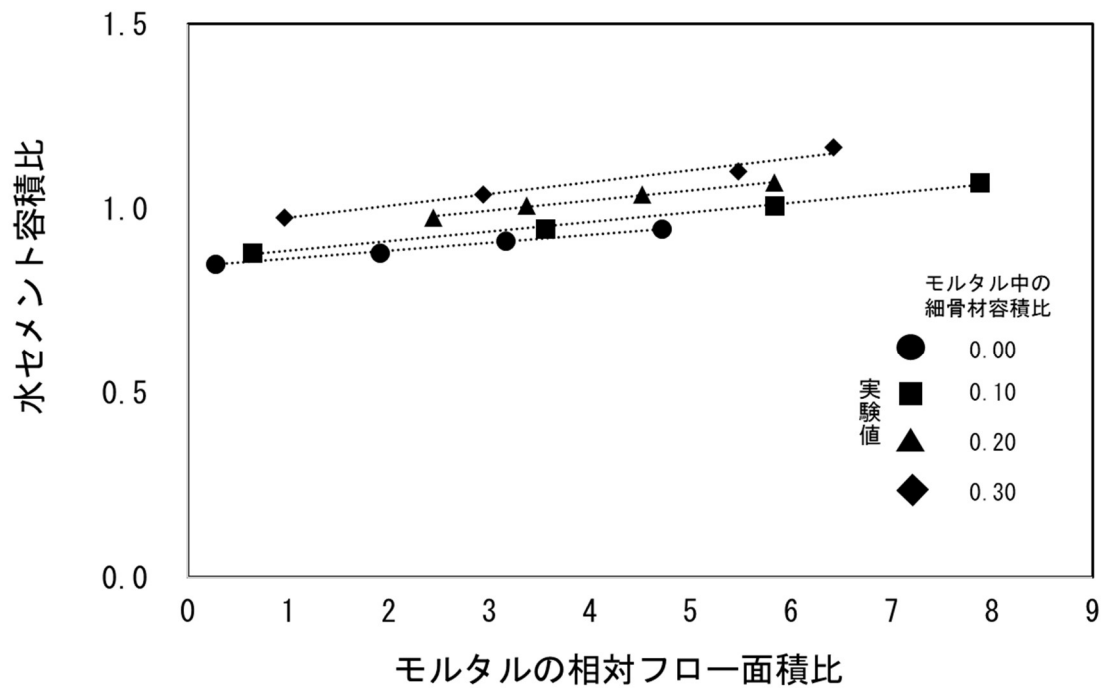


図- 2.5 モルタルの相対フロー面積比と水セメント容積比との関係  
(普通セメントを使用)

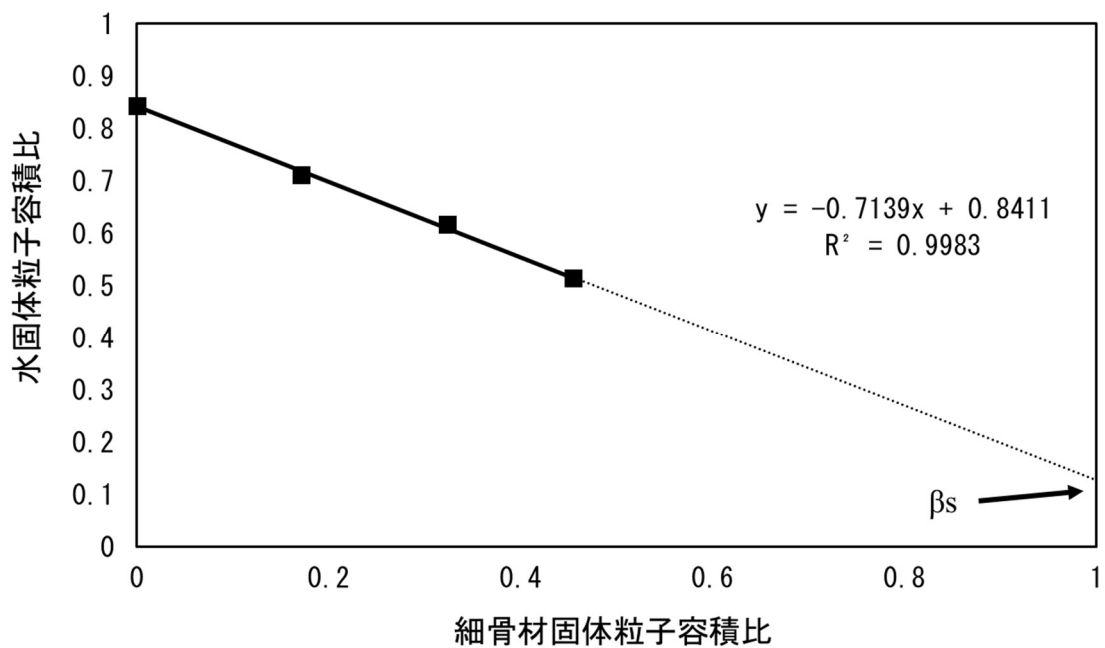


図- 2.6 相対フロー面積比が0となる配合における細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係 (普通セメントを使用)

## 2.3 適切な水平移動速度の選定

### 2.3.1 各増粘剤添加量における水平移動速度の比較

新型増粘剤添加量を変えて粘着力測定を行った。配合は W/C:33 %, SP/C:0.8 %, VMA 添加量 : 0, 100, 150, 200 g/m<sup>3</sup>とした。図-2.7~2.10 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)の場合の水平変位と摩擦力のとの関係を示す。明快な最大静摩擦力が見られたもの、すなわち、摩擦力のピークから急激な低下が見られたのは、水平動速度 0.06 mm/sec および 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。

明快なピーク値が見られたものは、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。そのようなものは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なものであったと解釈した。明快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前に試料ペーストが高速水平移動または高い粘着力により変形して一度に剥離せずに部分的に剥離したものと解釈した。

以降、本研究では水平摩擦試験機における水平移動速度を 0.06 mm/sec としして粘着力の測定を行った。

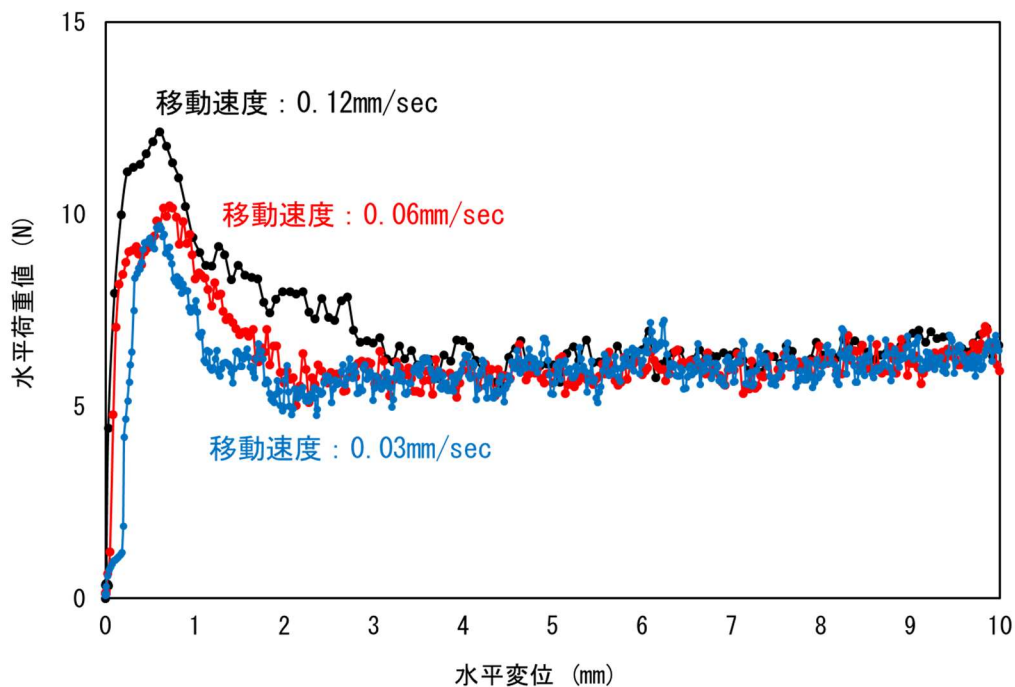


図- 2.7 移動速度が水平荷重に及ぼす影響 (VMA:0 g/m<sup>3</sup>) : 水平移動速度に関わらず最大静摩擦力が観察できた



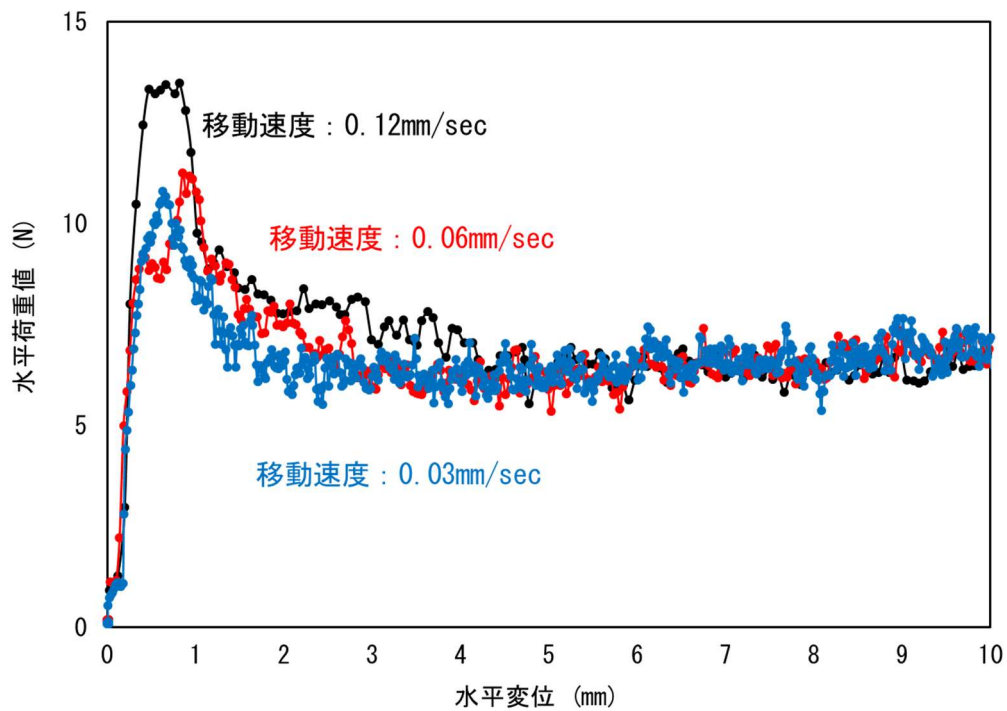


図- 2.8 移動速度が水平荷重に及ぼす影響 (VMA:100 g/m<sup>3</sup>) : 水平移動速度が大きくなると最大静摩擦も大きくなったが、ピークがやや不明瞭となった

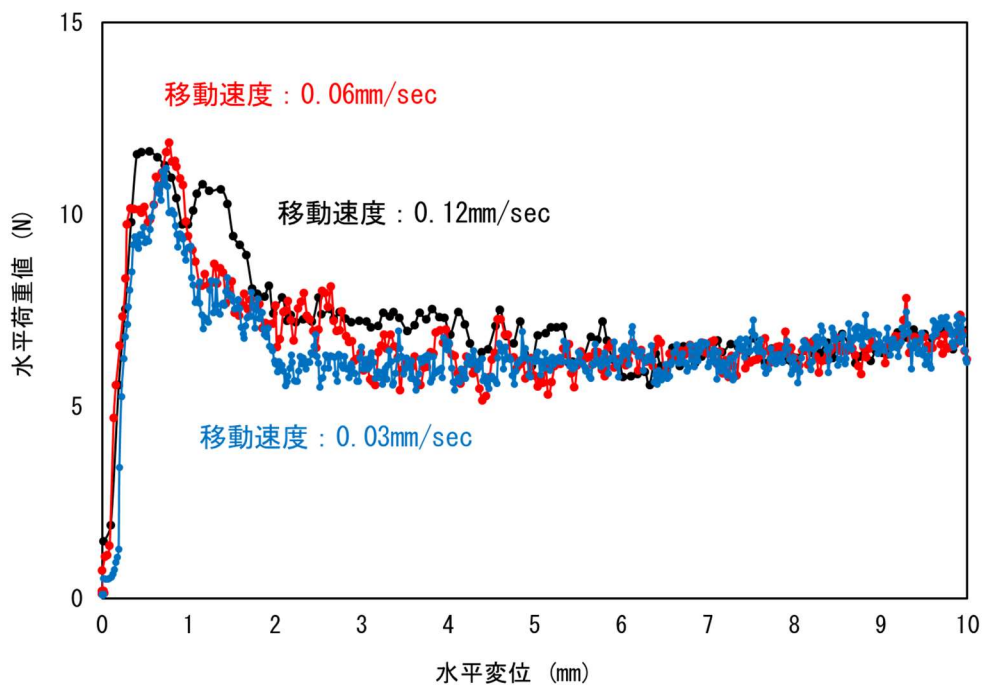


図- 2.9 移動速度が水平荷重に及ぼす影響 (VMA:150 g/m<sup>3</sup>) : 水平移動速度が大きくなると水平摩擦力のピーク値が不明瞭となり、最大値自体も小さくなった

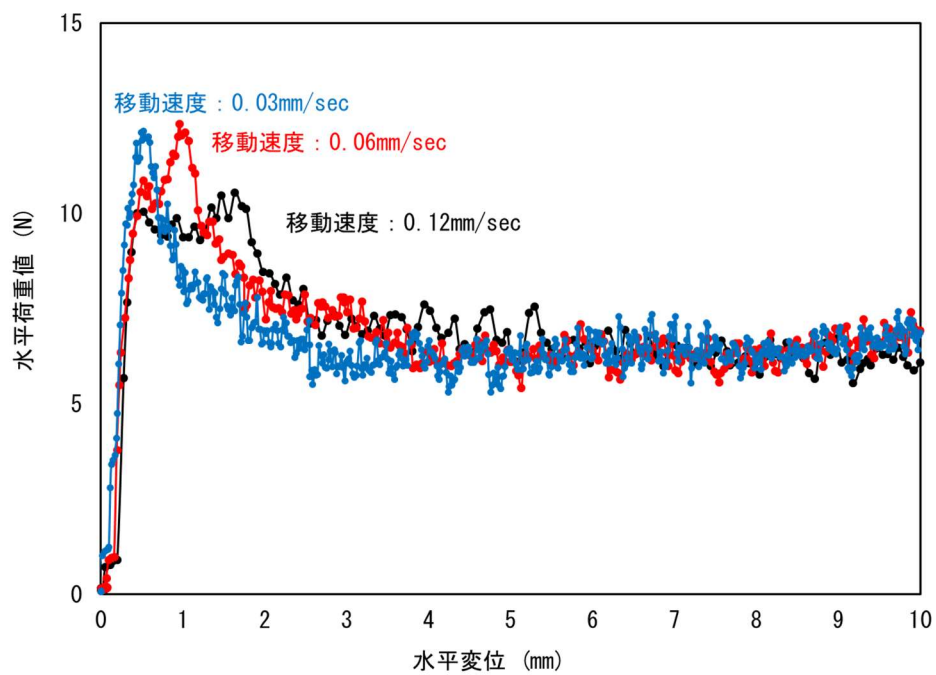


図- 2.10 移動速度が水平荷重に及ぼす影響 (VMA:200 g/m<sup>3</sup>) : 水平移動速度が大きくなると水平摩擦力が定速移動のものよりも小さくなり, ピーク値が不明瞭になった

### 2.3.2 新型増粘剤による粘着力の付与効果

前節まで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。なお、ここでの剥離強度は、最大静摩擦力の値から試料無しで測定した水平摩擦力の値を差し引いたものを、試料の断面積で割った値である（図-2.12）。新型増粘剤の添加量の増加に応じて粘着力が増加する様子が観察できた。試験を行ったペーストの配合を示す（表-2.1）。

本研究で採用した水平摩擦試験は粘度に依存しておらず、かつ接地面に対する剥離抵抗の度合いである粘着力を測定している可能性を見出した。

表- 2.1 ペーストの配合

単位量(kg/m <sup>3</sup> )		混和剤		品質試験結果		
W	C	SP (C×%)	VMA (g/m <sup>3</sup> )	モルタルフロー (mm)	塑性粘度 (Pa・s)	剥離強度 (×10 <sup>-3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
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

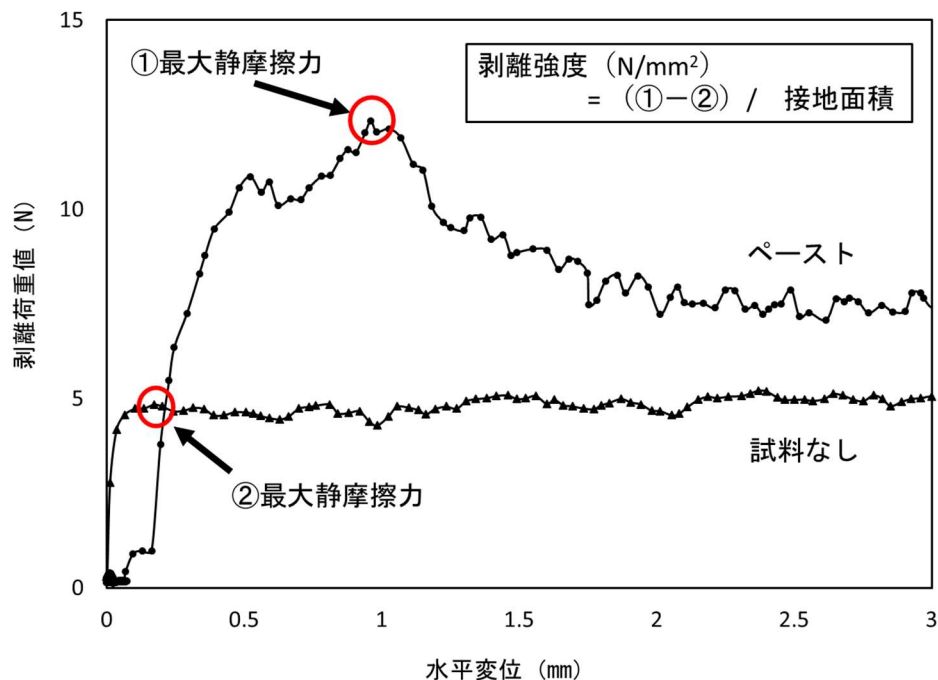


図- 2.11 剥離強度 (N/mm<sup>2</sup>) 算出方法の概念

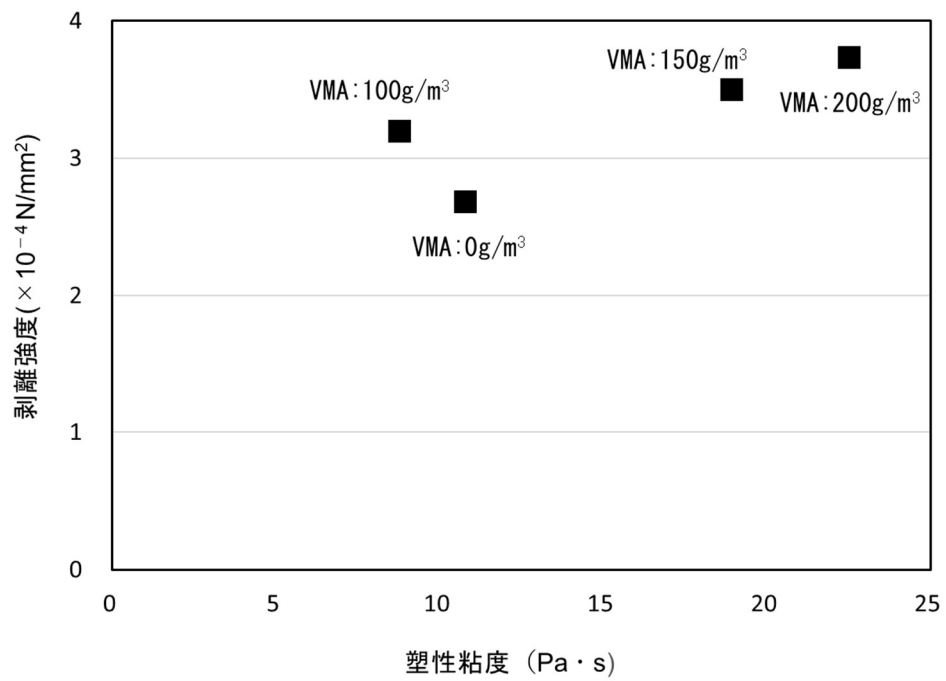


図- 2.12 ペーストの塑性粘度と剥離強度との関係  
(粘度測定 : 0.6 rpm, 粘着強度 : 0.06 mm/sec にて測定)

## 第3章 ペーストの剥離強度増進による細骨材沈降抑制効果

### 3.1 概要

剥離強度が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。

なお、使用する細骨材の密度は  $2.68 \text{ g/cm}^3$ 、一方ペースト相の密度は  $1.89 \text{ g/cm}^3$  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。

### 3.2 試験方法

鉛直方向に 4 層円筒容器にフレッシュモルタル試料を投入し、十分な時間経過後に各層のモルタル中の細骨材量を求めた (図-3.1)。試験器上から上層、中上層、中下層、下層とした。

試験を行ったモルタルの配合を示す (表-3.1)。モルタルフロー値は、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  $275 \pm 5 \text{ mm}$  で統一した。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、砂を流さない為に径  $300 \mu\text{m}$  のふるいを使用した。

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、絶乾状態とし、その後乾燥機から取り出し空気中で約  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  まで冷ました後、細骨材重量を求めた (図-3.2)。



図- 3.1 4 層円筒容器



図- 3.2 各層の絶対乾燥状態の細骨材

表- 3.1 モルタルの配合

単位量(kg/m <sup>3</sup> )			混和剤 (C×%)	VMA (g/m <sup>3</sup> )	品質試験結果	
W	C	S	SP		モルタルフロー (mm)	塑性粘度 (Pa・s)
263.9	586.3	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

### 3.3 試験結果

混和剤別の細骨材の容積密度を示す（表-3.2）。細骨材の容積密度は各層にあった細骨材の量を粒径判定実積率で乗じた容積で割ったものを表す。

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った（図-3.3）。

表- 3.2 各配合のモルタルにおける各層での細骨材量の分布

項目	容積(ml)	混和剤別各層の細骨材の容積密度			
		VMA:0 g/m <sup>3</sup>	VMA:100 g/m <sup>3</sup>	VMA:150 g/m <sup>3</sup>	VMA:200 g/m <sup>3</sup>
上層	419	1.69	1.89	1.90	1.93
中上層	448	2.01	1.90	1.87	1.89
中下層	455	1.89	1.76	1.78	1.79
下層	451	1.97	1.93	1.88	1.85

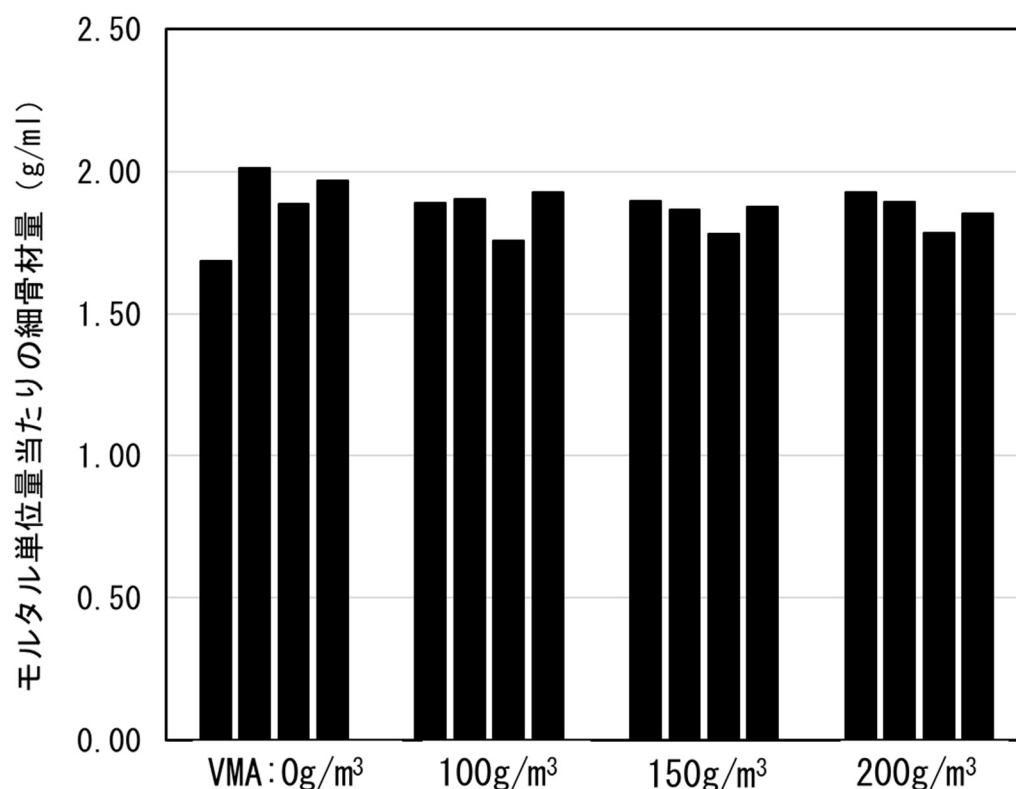


図- 3.3 各層における細骨材沈降量の違い（各配合とも左側棒から上層，中上層，中下層，下層の細骨材容積密度の値）

### 3.4 考察

各配合におけるペーストの剥離強度と細骨材分布の指標との関係を示すと粘着力との関係を示す（図-3.4）。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。「細骨材分布値」は、4層円筒試験により得られた各層の細骨材量の内、上層の値から下層の値を引いた値である。仮に細骨材の分布がすべての層で

均一であるならば値は0となる。値が負であれば下層密度が大きく、その負の値が大きくなる場合、細骨材が下に沈み分離している可能性がある。

新型増粘剤添加量  $0 \text{ g/m}^3$  において分離気味のモルタルフロー値での測定であったため細骨材下層密度の値が大きく、細骨材分布値が $-0.3$ 付近となった。新型増粘剤添加量を増加させていくと細骨材分布値も増加（上層密度の増加を表している）した。このことから、細骨材の沈みを抑えていると分かる。

新型増粘剤の付与効果とした粘着力は細骨材沈降抑制にも効果的であり、定量的に示すことができたと言える。

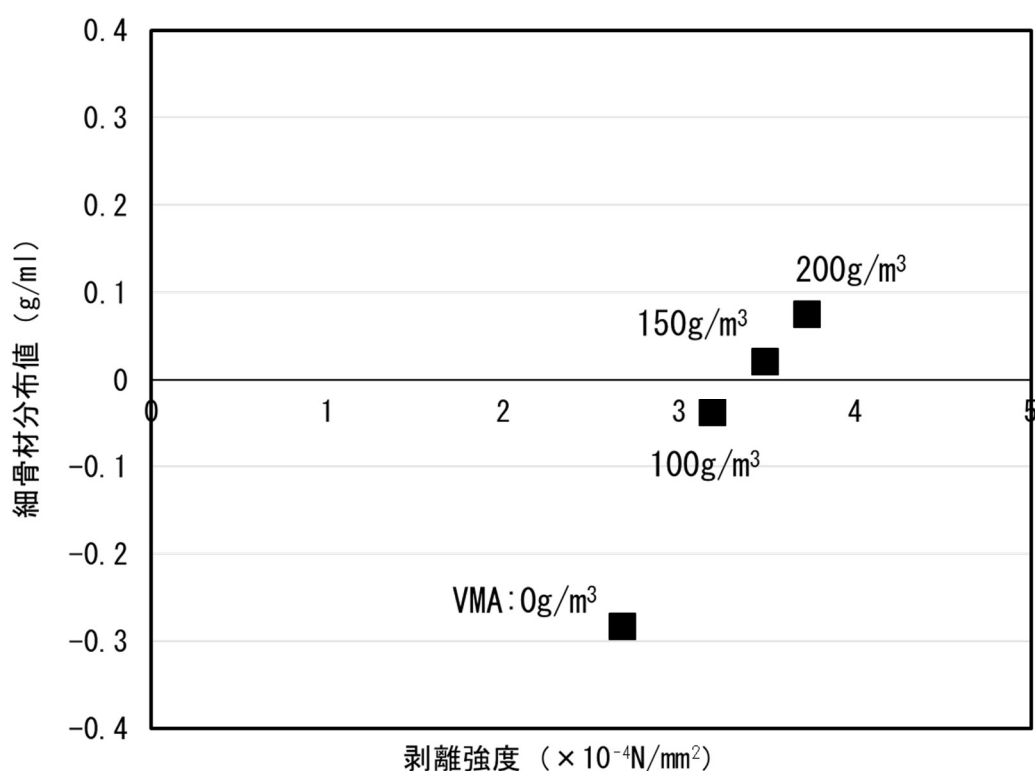


図- 3.4 各モルタルにおけるペーストの剥離強度と細骨材分布値との関係



## 第4章 セメントペーストの粘着力による自己充填性向上効果

### 4.1 自己充填性向上効果における粘着力と粘性の位置付け

新型増粘剤添加量を変えたフレッシュコンクリートの自己充填性試験結果（ボックス試験上昇高さ）と、それに対応するペーストの水平摩擦試験により求めた剥離強度との関係を示す（図-4.1）。なお、ここでのペーストは、コンクリートから取り出したものではなく、第2章にて示した方法により細骨材の拘束水比を考慮して求めた水セメント比により別個に練り混ぜたものである。

図-4.1 より VMA 添加量が  $150 \text{ g/m}^3$  以上でボックス充填高さが基準の  $250 \text{ mm}$  を越えており、十分な自己充填性を確保することが出来た。一方、VMA 添加量が  $100 \text{ g/m}^3$  ではボックス充填高さが  $145 \text{ mm}$  と自己充填性が不十分な結果となった。この VMA 添加量の差が自己充填性を変える大きな境界であるが、ペーストの剥離強度は添加量  $100 \text{ g/m}^3$  では  $2.27 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ 、添加量  $150 \text{ g/m}^3$  では  $2.48 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$  と、差はあるものの決定的とは言い難かった。

そこで、塑性粘度とボックス充填高さとの関係も示した（図-4.2）。VMA 添加量  $100 \text{ g/m}^3$  と  $150 \text{ g/m}^3$  とで塑性粘度に2倍程度の大きな差があった。粘度を高めるとフレッシュコンクリートの流動速度も低くなり、それが骨材表面からのペーストまたはモルタルの剥離速度も遅くなることとなると想定した。同じ剥離強度であっても、粘度の高い方が剥離抑制に有利であることになる。図-4.3 には粘着力と粘性の関係をボックス充填高さの値を挿入して示した。

すなわち、自己充填性を向上させるには剥離強度を高めるだけでなく、粘度を高めることも効果がある可能性を得たことになる。

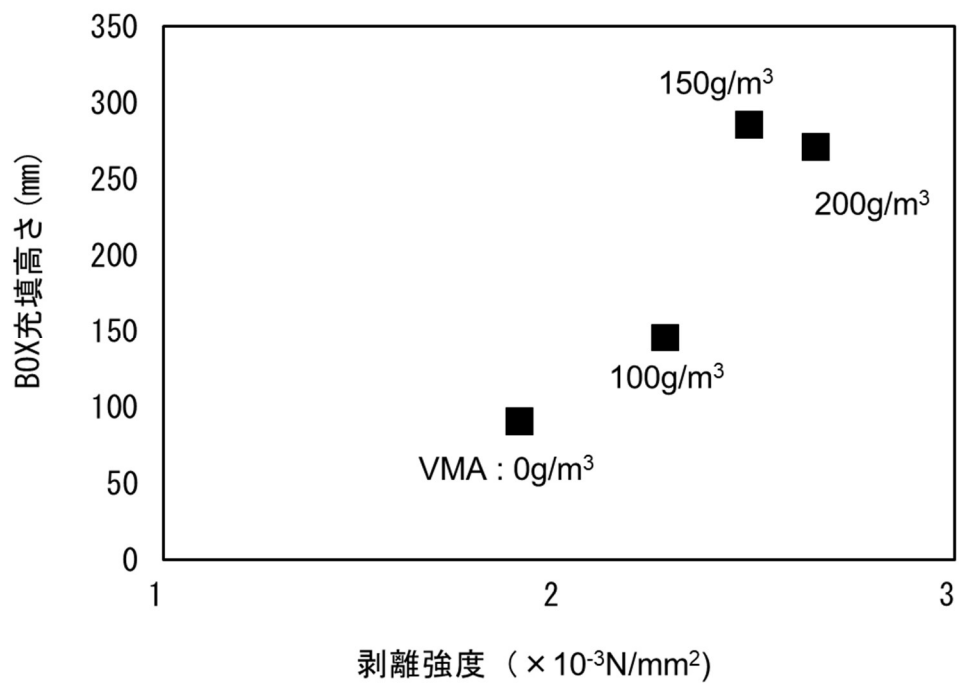


図- 4.1 ペーストの剥離強度とコンクリートの自己充填性指標との関係

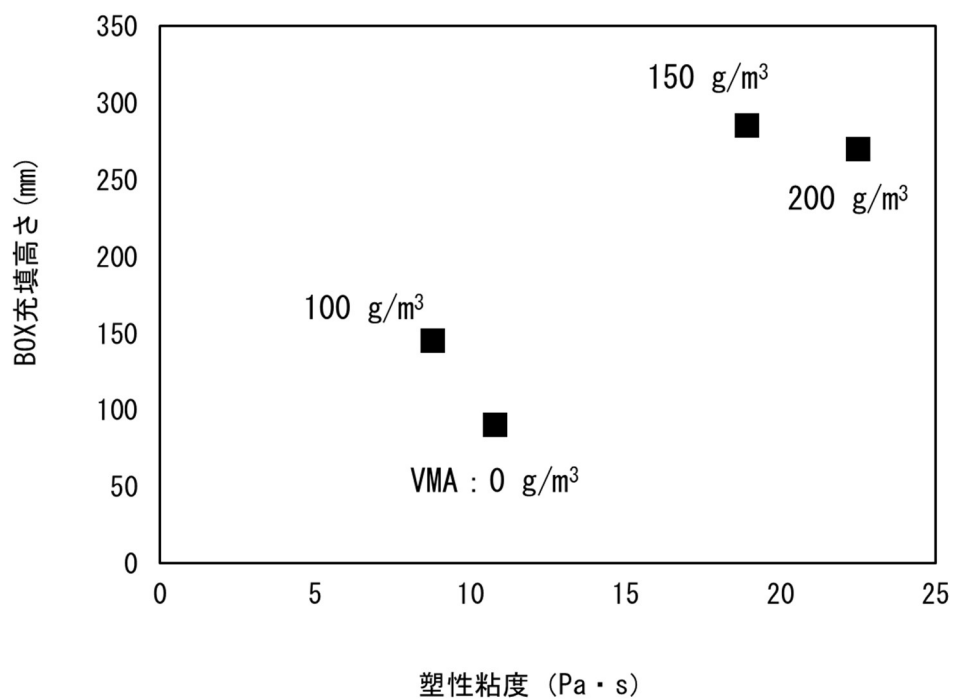


図- 4.2 ペーストの塑性粘度とコンクリートの自己充填性指標との関係

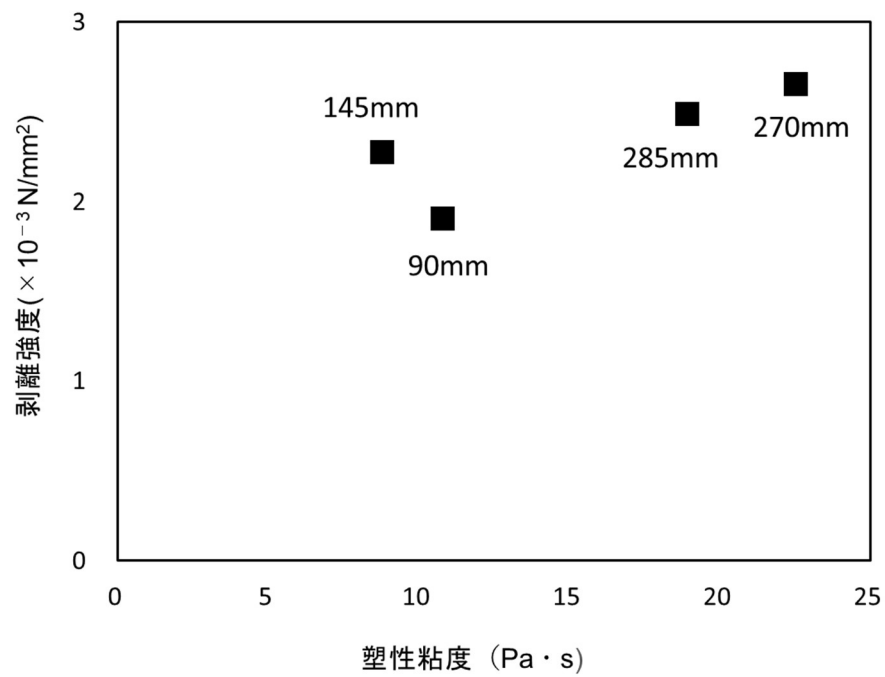


図- 4.3 ペーストの塑性粘度と剥離強度との関係にコンクリートの自己充填性指標値を示した：同程度の剥離強度で塑性粘度の上昇が自己充填性向上をもたらしたと推定した

## 第5章 結論

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細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抵抗力を剥離強度と定義した。

本研究の結論を以下に述べる。

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，接触面との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，粘度とは独立して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，細骨材分布の均一性が確保できたと言える。
4. フレッシュコンクリートの自己充填性向上には，今回定量化した剥離強度だけではなく，モルタルまたはペーストの塑性粘度も大きな役割を果たしている可能性を改めて確認出来た。

## 参考文献

- 1) 岡村 甫編：自己充填ハイパフォーマンスクンクリート-黎明期から実用化に向けた挑戦の記録，社会システム研究所，1999 年
- 2) 岡村 甫，前川宏一，小澤一雅：ハイパフォーマンスクンクリート，技報堂出版，1993 年 9 月
- 3) 三好征夫，増田佳寛，安田正雪，荒金直樹：分離低減剤を用いた準高流動コンクリートの調合と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，1988 年
- 4) 田中一徳，Attachaiyawuth, Rath, 大内雅博：微細な空気泡によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，pp.1105-1110，2015 年
- 5) 加藤忠哉：水溶性・水分散型高分子材料の最新技術動向と工業応用，日本科学情報，pp.841-863，2001 年
- 6) 桜井邦昭，泉水大輔，山川 勉，石田知子：新規の特殊増粘剤を用いた低熱セメント量の高流動コンクリートの開発と実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，2018 年
- 7) 大西 遙：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，高知工科大学学士論文，2018 年
- 8) 日本コンクリート工学会：構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書，pp.5-6，2017.6
- 9) 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.37-46，1996.5
- 10) 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

## 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ご協力を頂きました。

本論文の作成にあたり、大内雅博先生（高知工科大学教授）、田島昌樹先生（高知工科大学准教授）、宮地日出夫先生（前高知工科大学技術指導員）、曾我部敏郎先生（現高知工科大学技術指導員）、山川 勉氏（信越化学工業㈱合成技術研究所）小西秀和氏（信越化学工業㈱合成技術研究所）、枝松良展氏（㈱ニュージェック技術開発グループ コンクリート技術チーム チームマネージャー）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、研究だけでなく進路相談や学会発表の機会を与えて頂くなど、様々な事で大変お世話になりました。研究においては、粘着力の存在を発見するところからその定量化に至るまでの過程に関わるができ非常に光栄に思います。心より御礼申し上げます。

田島先生には、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頂きました。田島先生の違った角度からのご意見や質問は刺激になり、自分の研究を見直すことが出来ました。心より御礼申し上げます。

宮地先生と曾我部先生には、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。

山川 勉氏と小西秀和氏と枝松良展氏には、研究を進めるための重要な決定事項に関する御指導と御協力賜りました。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、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いくことができました。この場をお借りして皆様に感謝の意を表します。

2018 年 1 月 毛利匡志

## 付録

### ① 使用材料

表-付 1 に使用材料を示す。セメント(C)は普通ポルトランドセメント，細骨材(S)は石灰石砕砂，粗骨材(G)は石灰石砕砂を使用した。

高性能 AE 減水剤(SP)は，主成分がポリカルボン酸エーテル系化合物を使用した。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。

表-付 1 使用材料

種類	記号	銘柄，物理的特性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	石灰石砕砂 密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> ；粗粒率 2.63；粒形判定実績率 55.3 %
粗骨材	G	石灰碎石 2005 表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 0.25 %，実積率 60.1 %
混和剤	SP	従来型高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)
	VMA	新型増粘剤(水溶性セルロースエーテル)

## ② 練混ぜ方法

モルタルの材料練混ぜには図-付 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）を使用した。通常のもルタル試験の場合は 1.6 L，細骨材沈降量試験の場合は 1.8 L，セメントペースト試験の場合は 1.0 L とした。モルタル，セメントペースト試験には「一括練り」を採用した。まず前提としてセメントと細骨材，および混和剤（VMA）の粉体を 30 秒「空練り」する。これは粉体材料をあらかじめ練り，容器内で偏りがないようにする為である。その後，上記の練混ぜ方法に移行する。「一括練り」は，空練り後に水，高性能 AE 減水剤を投入して 180 秒練った。

コンクリートの材料練混ぜには二軸強制練りミキサを使用した。練混ぜ量は 35 L とした。練混ぜ方法は「一括練り」でセメント，細骨材，粗骨材を 30 秒空練りした後，水と高性能 AE 減水剤を投入して 180 秒練った。



図-付 1 モルタルミキサ



### ③ モルタルフロー試験

モルタルフロー試験とは、モルタルの流動性を評価する試験で主に変形性に置き換えることとしている。モルタルの変形性は簡単なフロー試験(図-付 2)から得られる相対フロー面積比  $\Gamma_m$  を指標とすることが提案されている<sup>2)</sup>。

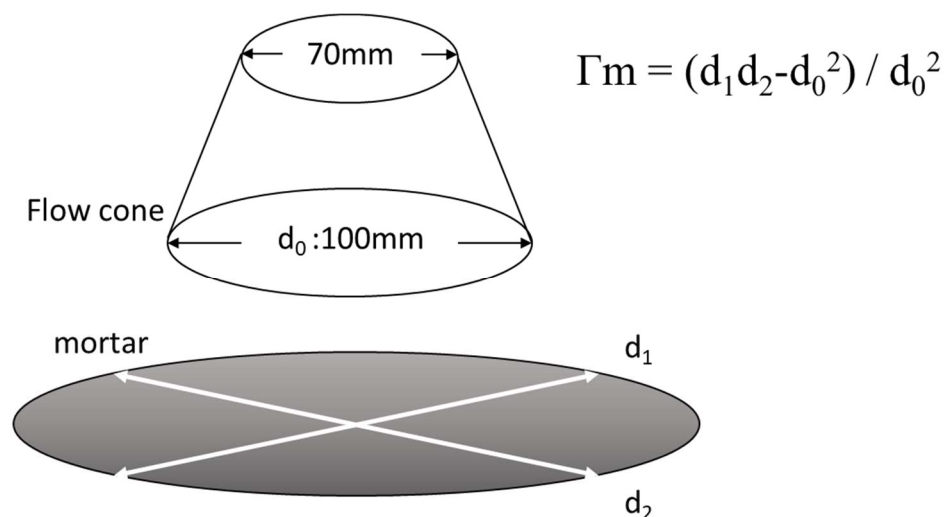


図-付 2 モルタル用フロー試験

### ④ 空気量試験

空気量試験は 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）」に準じて試験を行った。

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

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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

M: コンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### ⑤ コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)

コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)は JSCE F 511 「高流動コンクリートの充填試験方法」に準じて試験を行った(図-付 3)。コンクリートの自重による力で鉄筋の間を通過する能力を定量化するものである。片方に詰められたコンクリートがゲートを開けることで平行な鉄筋で構成された障害物を通過し、反対側に上昇した高さを計測する。鉄筋障害物の手前で粘性の不十分なコンクリートや分離気味のコンクリートは閉塞する。

この試験の流動障害は異形鉄筋 D10 を 5 本使用する厳しい方の、障害 R<sub>1</sub> により行った。これにより 250 mm 以上コンクリートが上昇すると十分な自己充填性があると見なす。

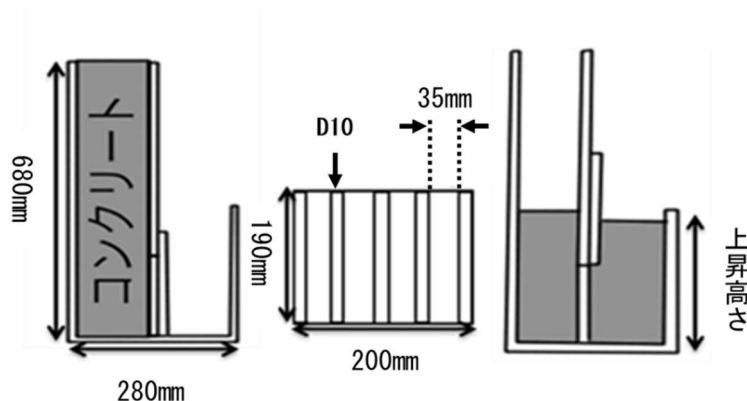


図-付 3 コンクリートの間隙通過性試験(ボックス試験)

#### ⑥ モルタルからセメントペーストに対象を移した経緯

水平摩擦試験において、粘着力はモルタルと粗骨材間における作用と想定していた為、測定対象をモルタルとした。使用した新型増粘剤 (VMA) の効果から、試料と固体面との摩擦は粘着力が大きいほど高くなると考えたが、実測値は VMA の添加量を増加させるごとに摩擦力 (本論第 2 章より剥離強度と定義) は低下する傾向になった (図-付 4)。

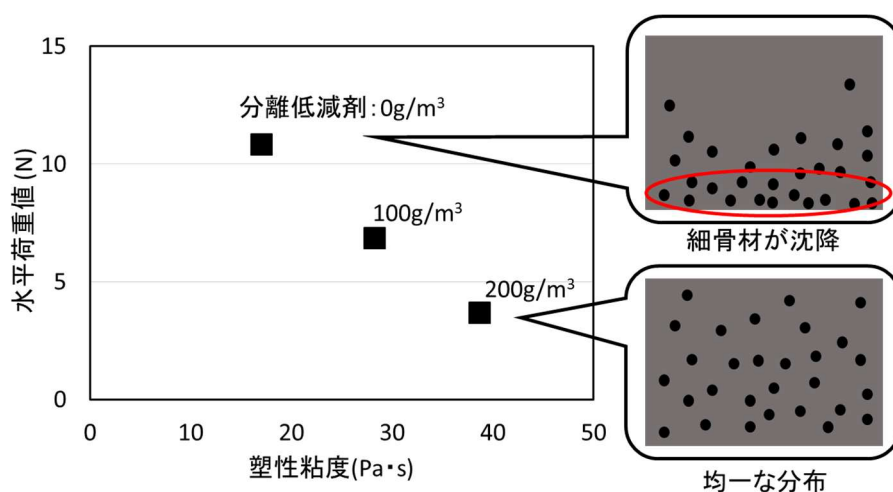


図-付 4 モルタルにおける水平荷重値と塑性粘度の関係

この摩擦力が低下した原因は水平摩擦試験の測定面に、モルタル中の細骨材が沈殿し、その細骨材の噛み合いによる摩擦力が余分に測定されたと考えた。その一方で **VMA** の添加量を増加させると細骨材の沈殿量が減少する、つまり測定面に影響を及ぼす細骨材量が減る為、見かけ上の摩擦力が低下したと推定した。以上の理由から原因である細骨材を省いたセメントペーストを測定対象に決定した。

しかし、本論「第 2 章 3 項適切な水平移動速度の選定」より測定対象をセメントペーストにして水平摩擦試験を行ったが上記と同様に **VMA** の添加量を増やすと摩擦力が低下するという試験結果が得られた。そこで水平移動速度を遅く設定 (**0.06 mm/sec** および **0.03 mm/sec**) し再度試験を行った結果、どちらも **VMA** の添加量を増加させると摩擦力も増加する結果となった。これにより測定対象をモルタルにした際、細骨材が測定面に影響を与えるよりも水平に移動させる速度の方が測定結果に依存している可能性が挙げられる。以上から同様の条件でモルタルを測定対象とし再度試験を行う必要性がある。

## ⑦ 今後の課題

本論において、VMAによる自己充填性向上効果の主要因としてセメントペーストと固体面との剥離抑制効果と仮定し、その効果を粘着力と定義し水平摩擦試験を用いて定量化した。ここで想定される異なる要因としてモルタルおよびセメントペースト自体のせん断応力（ずり応力）が挙げられる。このせん断応力はVMA添加による効果でどのような影響を及ぼされるのかを検証する必要がある。

また本研究において、粘着力の純粋な効果を測定する為に空気を連行せずに全ての試験を行った。そこで気泡潤滑型自己充填コンクリート（air-SCC）にVMAを応用した場合、粘着力の高いセメントペースト中では連行空気の挙動は粘性の高い（水セメント比の低い）セメントペーストとどのような違いが生じるか、さらにその高粘着力を付与した場合の連行空気泡の圧縮剛性およびボールベアリング効果は向上されるかの検証を必要とする（図-付 5）。

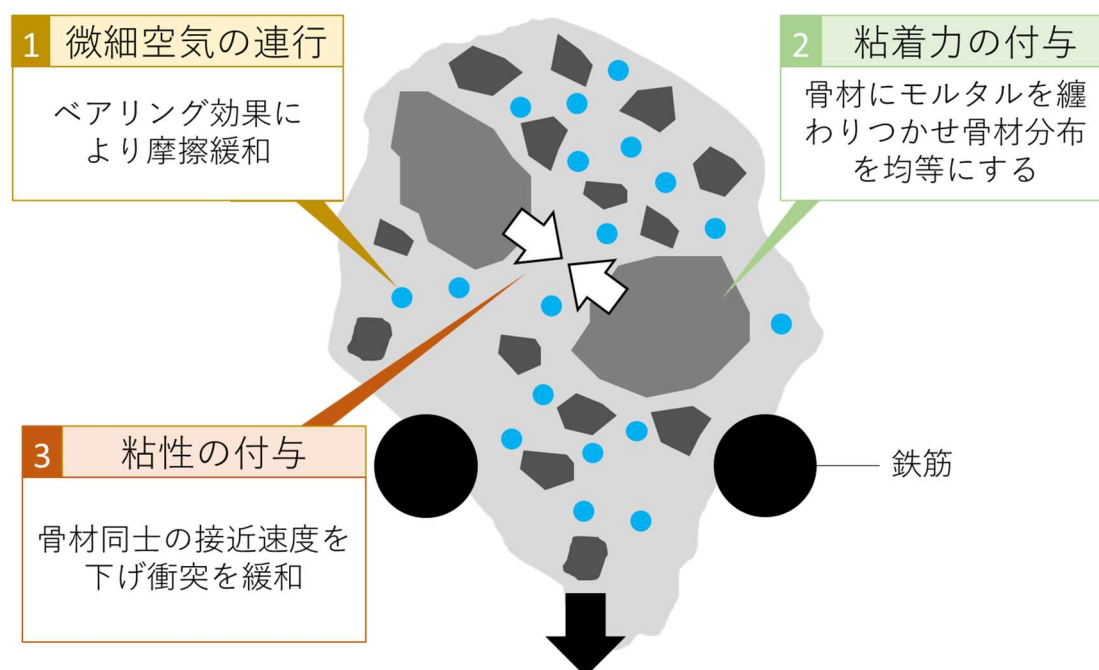


図-付 5 粘着力と微細空気の関係性