

2019 年度修士論文

# フレッシュコンクリートに連行した 空気泡によるベアリング効果の解明

Mechanism of Bearing Effect  
by Entrained Air Bubbles in Fresh Concrete

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

1225070 大西 悠

2020 年 1 月



# フレッシュコンクリートに連行した空気泡によるベアリング効果の解明

大西 悠

## 要旨

自己充填コンクリートが普及しがたい原因として、普通コンクリートの約 2 倍の単位セメント量による必要以上の高強度とそれに伴う高価格が挙げられる。セメントと高性能 AE 減水剤の添加によって高流動性の付与と材料分離抑制を両立させていたためである。2013 年以降、コンクリート中に微細な気泡を連行することによって高流動性を得る“気泡潤滑型自己充填コンクリート(air-SCC)”の開発が行われてきた。これは、微細な連行空気泡はベアリング効果を持っているため、コンクリート中の個体粒子間摩擦を低減し、高流動性が得られるものと考えられている。しかしながら、微細気泡によるベアリング効果は間接的な検証にとどまってきた。

本研究の目的は、フレッシュコンクリートの自己充填性における、微細気泡によるベアリング効果の直接測定による検証である。微細な連行空気泡は外力によって圧縮されても体積が潰れにくいことによってベアリング効果が発揮されるものと仮定した。フレッシュモルタルの圧縮試験により変形量を求め、そして一面せん断試験により摩擦力を求めることにより、微細気泡の効果を検証した。

試験の結果、小径気泡がより多く連行されているフレッシュモルタルのせん断強度が低かった。特に、1000  $\mu\text{m}$  未満の空気量とせん断強度に高い相関が得られた。加えて、大径気泡のみを連行したフレッシュモルタルのせん断強度は、空気連行していないモルタルと同等のせん断強度であった。

また、フレッシュモルタルを圧縮して除荷した際にひずみが残っていることが確認できた。このことから、連行気泡は潰れても復元することが明らかになった。圧縮力による最大ひずみと、除荷後の残留ひずみとの差を残留した空気量で除した値の逆数を、モルタル中の連行気泡の復元性の指標として剛性比と定義した。剛性比と最大直応力 0.20MPa 下での連行気泡の細かさとの間には高い相関が得られた。微細気泡によるベアリング効果を検証できたと考察した。

一方、最大直応力を 0.35MPa と大きくすると、剛性比は気泡の細かさに関わらず同等となった。直応力 0.35MPa 下では、モルタル中の連行気泡は径の大きさに関わらず潰れている可能性を得た。

さらに、増粘剤を添加しているフレッシュモルタルは気泡の抜けが小さかった。モルタルから微細気泡、大径気泡が抜ける条件で増粘剤を添加したところ、微細気泡の抜けはほとんどなくなった。

# Mechanism of Bearing Effect by Entrained Air Bubbles in Fresh Concrete

Haruka ONISHI

## ABSTRACT

One of the reasons for making self-compacting concrete (SCC) difficult may be higher cost approximately twice as the ordinary concrete. Currently, self-compacting performance and segregation of fresh concrete are prevented by high unit cement content and dosage water-reducing agent. "Air-enhanced Self-compacting Concrete (air-SCC)" has been developed by making use of bearing effect of fine entrained air bubbles in fresh concrete in order to make SCC a standard concrete. However, bearing effect of fine air bubbles has been verified indirectly.

The purpose of this study is to verify the bearing effect by fine air bubbles on self-compacting performance of fresh concrete by measuring it directly. It is assumed that a fine air bubble may maintain its volume even subject to compressive stress and it may work as a bearing effect. The shear-test of fresh mortar was carried out and the shear strength at which the specimen started deforming was obtained.

As a result of the test, the shear strength of fresh mortar with higher amount of finer air-bubbles with the diameter of less than 1000  $\mu\text{m}$  was lower. The shear strength of fresh mortar with no finer air bubbles was similar to that without entrained air. In addition, the strain of fresh mortar subject to compressive stress remained partially after re-loading. It is possible that the entrained air bubbles can survive even subject to compression.

The author defined the relative stiffness of entrained air bubbles as the ratio of the residual air volume to the residual strain of the mortar after re-loading. There was a high correlation between the relative average surface area of entrained air bubbles and the relative stiffness of the air bubbles at the maximum compressive stress of the mortar of 0.20 MPa. It is possible that finer entrained may have higher stiffness subject to compression and the bearing effect may be verified..

On the other hand, there was no correlation at the maximum compressive of 0.35 MPa. It is possible that all the air bubbles shrunk and did not work as a bearing due to such high pressure.

Also, the effect of cellulose ether-type of viscosity modifying agent (VMA) on maintaining the volume of entrained air subject to compression. It was especially verified with the mortar with no-fine entrained air bubbles.

## 目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	先行・既往研究	3
1.3.1	自己充填性に有効な連行空気径	3
1.3.2	自己充填性向上に有効な空気泡の連行方法	3
1.3.3	増粘剤の添加による微細な空気の連行	4
1.4	本研究の構成	5
第2章	試験方法及び諸条件	6
2.1	使用材料	6
2.2	配合	7
2.3	練混ぜ方法	8
2.4	試験方法	10
2.4.1	モルタルフロー試験	10
2.4.2	空気量試験	10
2.4.3	フレッシュモルタル中の気泡径分布の測定	10
2.4.4	フレッシュモルタルの圧縮試験	12
2.4.5	フレッシュモルタル内に生じるせん断応力の測定	13
第3章	連行空気泡が及ぼすモルタル中のせん断応力の測定	16
3.1	概要	16
3.2	連行された空気の量とモルタル中に生じるせん断力との関係エラー! ブックマークが定義されていません。	
3.3	気泡径分布の変化によるモルタル中のせん断力の関係	19
3.4	まとめ	22
第4章	フレッシュモルタルの圧縮による連行空気の挙動	24
4.1	概要	24
4.2	フレッシュモルタルの圧縮によるひずみと応力の関係	25
4.3	増粘剤の添加による連行空気泡の抜けの防止	29
4.4	まとめ	30
第5章	結論	31
	今後の課題	33
	参考文献	34
	謝辞	35

## 図目次

図-1.1	練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量 .....	4
図-1.2	増粘剤の有無による空気径分布の違い(練上がり 10 分後).....	4
図-1.3	研究の構成 .....	5
図-2.1	モルタルミキサ .....	8
図-2.2	練混ぜ手順 .....	9
図-2.3	モルタルフロー試験 .....	10
図-2.4	自動空気泡解析装置(Air Void Analyzer : AVA).....	11
図-2.5	AVA によって測定されたモルタル中の空気径分布の一例.....	11
図-2.6	一軸圧縮試験機 .....	12
図-2.7	圧縮試験によるフレッシュモルタルの応力ひずみ線図の一例.....	13
図-2.8	フレッシュコンクリート中でせん断応力が発生するイメージ図.....	14
図-2.9	一面せん断試験機 .....	14
図-2.10	水平方向の変位とモルタルに生じるせん断力との関係.....	15
図-2.11	測定データの解釈図 .....	15
図-3.1	骨材の接近による直応力・せん断応力の発生を模擬した一面せん断試験.....	16
図-3.2	直応力が生じた際のモルタル中のせん断力(直応力 0.1MPa) .....	17
図-3.3	直応力が生じた際のモルタル中のせん断力(直応力 0.3MPa) .....	18
図-3.4	空気量 5%のモルタルの空気径分布(赤枠 : 摩擦低減に効果がないと見られる大径空気泡, $\alpha$ : 連行空気の比表面積( $2\text{mm}^2/\text{mm}^3$ 未満)).....	18
図-3.5	フレッシュモルタル中に連行された空気泡の径分布.....	20
図-3.6	気泡径の細かさの違いとせん断力の関係 .....	21
図-3.7	空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係 .....	22
図-3.8	空気径 1000 $\mu\text{m}$ 未満空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係.....	23
図-3.9	空気径 500 $\mu\text{m}$ 未満空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係.....	23
図-4.1	連行気泡の大きさの違いによる骨材間距離の違いのイメージ.....	24
図-4.2	圧縮試験によるモルタルの応力ひずみ線図 .....	26
図-4.3	最大直応力 0.35MPa のときの各モルタルに連行された空気泡の径分布(左 : 圧縮前, 右 : 圧縮後) .....	27
図-4.4	最大直応力 0.20MPa のときの各モルタルに連行された空気泡の径分布(左 : 圧縮前, 右 : 圧縮後) .....	27

縮前, 右 : 圧縮後).....	28
図-4.5 モルタルから抜ける直前の大径気泡に膜ができている様子(増粘剤添加).....	29
図-4.6 モルタルから抜けている大径空気泡の様子(増粘剤無添加).....	29
図-4.7 気泡の剛性比と空気の比表面積との関係 .....	30

## 表目次

表-2.1	使用材料 .....	6
表-2.2	気泡潤滑型自己充填モルタルの配合条件 .....	7
表-2.3	気泡潤滑型自己充填モルタルの示方配合(空気を除く).....	7
表-3.1	使用材料 .....	17
表-3.2	使用材料 .....	19
表-4.1	使用材料 .....	25



# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

コンクリートは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近い材料を使用しており、価格が安価で供給しやすいため幅広い構造物に使用されている。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的要因に大きく影響しており、適切に施工されない場合ジャンカやコールドジョイント等ができ、構造や安全上の問題が生じてしまう。この課題を解決するため、施工時に振動締固めを必要としない“自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete : SCC)”が開発された。

1986年に岡村 甫により自己充填コンクリートが提唱され、1988年に前川 宏一と小澤 一雅によってプロトタイプが完成した<sup>1)</sup>。しかしながら、日本で自己充填コンクリートが開発されてから30年が経過したが、自己充填コンクリート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・高強度であることが挙げられる。従来の自己充填コンクリートは自己充填性を付与するために高性能 AE 減水剤を添加し、セメントを分散させて自己充填性を得ている。そのため、材料分離の防止と個体間摩擦低減の観点から粉体量(セメント等)の使用量が普通コンクリートの約2倍となり、それに付随して強度も単価も増加しており、高価格で高強度なコンクリートとなっている。一般的に普及するためには普通コンクリートと同様の用途で使うことが条件となるため、価格と強度を抑えた、従来通りの自己充填性をもつ自己充填コンクリートの開発が必要である。

高知工科大学ではこれら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。このコンクリートは、コンクリート中に連行した空気泡のベアリング効果により固体粒子間摩擦を低減し、骨材量を増加させて単価を普通コンクリートに近づけることを目標としている。

しかしながら、実際にコンクリート中に連行した空気泡がボールベアリング効果を持っているかどうかは明らかになっていない。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、微細な気泡にはベアリング効果があることを証明することを目的とする。これまで、フレッシュコンクリート中に連行された小径気泡が固体粒子間摩擦を低減しているという研究結果が得られてきたが、小径気泡が固体粒子間摩擦を低減していたメカニズムは明らかになっていないため、これを解明する。同時に、フレッシュモルタル中に生じるせん断応力を直接測定することにより定量化する。

また、北中らによって新型増粘剤の添加が微細な気泡の連行に有利であると報告されている。新型増粘剤の添加によって、フレッシュモルタル中に連行した空気にどのような現象が起こっているかを解明し、摩擦緩和や流動性の向上に対する効果を測定する。

## 1.3 先行・既往研究

### 1.3.1 自己充填性に有効な連行空気径

既往研究では、空気を連行させることによって模擬粗骨材とモルタルの相互作用の影響が小さくなったことが示されている。すなわち、モルタル中の固体粒子間摩擦が小さくなっている。

田中の研究では、自己充填性が高いコンクリートは硬化後 100～250  $\mu\text{m}$  程度の微細な空気泡が多く残っており、自己充填コンクリートの自己充填性を表す指標であるボックス上昇高さと微細な空気量に高い相関が得られている。**【田中 一徳：気泡潤滑型自己充填コンクリートの自己充填性向上と空気量安定のための材料配合と製造法<sup>2)</sup>】**

また、PUTHIPAD Nipat の研究では、模擬粗骨材(ガラスビーズ)を混入させたモルタルの漏斗流下試験より、模擬粗骨材としてのガラスビーズの混入による流下速度低下率を指標としてモルタル中の固体粒子間摩擦を定量化している。この指標を用いることにより、フライアッシュを混入したモルタルでは 450 $\mu\text{m}$  未満の連行空気が自己充填性を向上させることを示した。**【PUTHIPAD Nipat, Effect of Entrained-air Size Distribution and Fly Ash on Self-compactability and Air Volumetric-stability of Fresh Concrete<sup>3)</sup>】**

### 1.3.2 自己充填性向上に有効な空気泡の連行方法

フレッシュコンクリートに有効である小径空気泡の比率を向上させるためには練混ぜ方法を工夫する必要がある。

亀島の研究では、モルタルの練混ぜにおいては空気連行剤と消泡剤を同時に添加する練混ぜでは空気量は小さめではあるものの、小径気泡が少なく大径気泡が多くなるという結果が得られている。一方、モルタルの練混ぜの後に消泡剤のみを添加する方法では、大径気泡の比率は低下するという結果が得られている。

また、亀島は、水、高性能 AE 減水剤および空気連行剤を同時に添加する一般的な「一括練り」ではなく、水を一次水と二次水に分けた上で、一次水に高性能 AE 減水剤を混ぜ、二次水に空気連行剤混ぜる「水分割練り」の効果を検討した。この「水分割練り」において消泡剤を最後に添加したモルタルは、一括練りによるものと同様に大径気泡の比率を下げることができることを確認した。さらに、「水分割練り」のモルタルの方が、「一括練り」のモルタルよりも細かい気泡がより多く連行されることを確認した。**【亀島 健太：消泡剤を用いた大径空気泡の除去によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上<sup>4)</sup>】**

### 1.3.3 増粘剤の添加による微細な空気の連行

低分子量のセルロースエーテル系の増粘剤を  $200\text{g/m}^3$ (コンクリート単位体積あたりに換算した値)添加したモルタルを無添加のモルタルと比較をすると、練り上がりの空気量が同等であっても空気径分布が異なっており、増粘剤を添加したモルタルは小径気泡が多く、大径気泡が少ないという結果が得られていた(図-1.1, 1.2)。また、連行空気の経時変化についても異なっており、増粘剤を添加したモルタルでは空気減少量が小さく、安定して微細な気泡が維持できることがわかった。【大内 雅博, 北中 康太, Anuwat Attachaiyawuth : 増粘剤添加によるフレッシュモルタルへの連行空気泡の安定化<sup>5)</sup>】

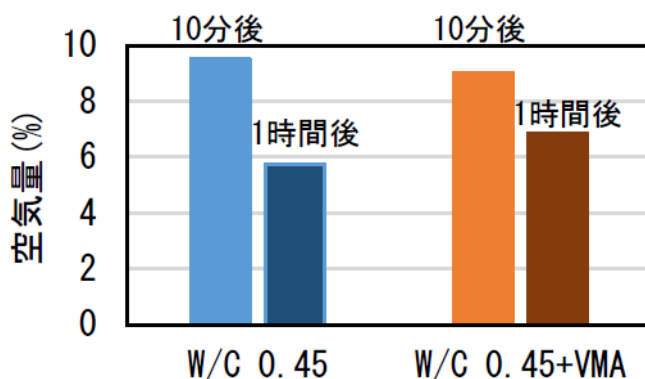


図-1.1 練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量

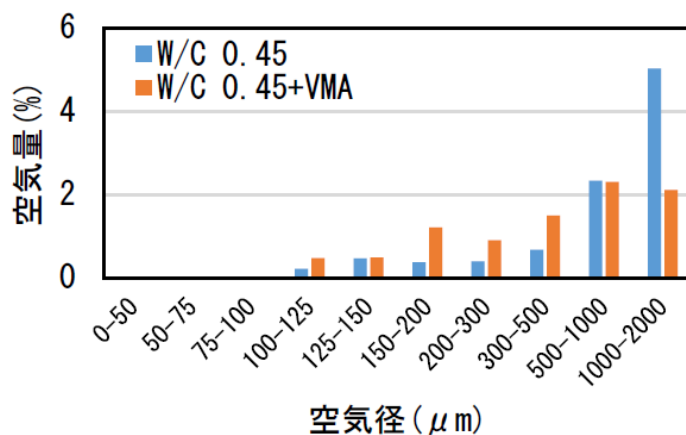


図-1.2 増粘剤の有無による空気径分布の違い(練上がり 10 分後)

## 1.4 本論文の構成

第1章では、気泡潤滑型自己充填コンクリートが開発された背景と現在の課題、本研究の目的を述べた。本研究の基礎となった自己充填コンクリートの既往研究を踏まえ、本研究の構成について述べた(図-1.3)。

第2章では、本研究の試験方法及び諸条件について述べる。

第3章では、空気連行の有無および連行空気の質と量がフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響を、フレッシュモルタルを試料とした間隙通過の際のせん断抵抗を測定することにより定量化する。

第4章では、フレッシュコンクリートが間隙通過の際に生じるモルタル中の圧縮応力およびせん断変形による連行空気泡について調べる。

第5章では、本研究の結論と今後の課題を述べる。

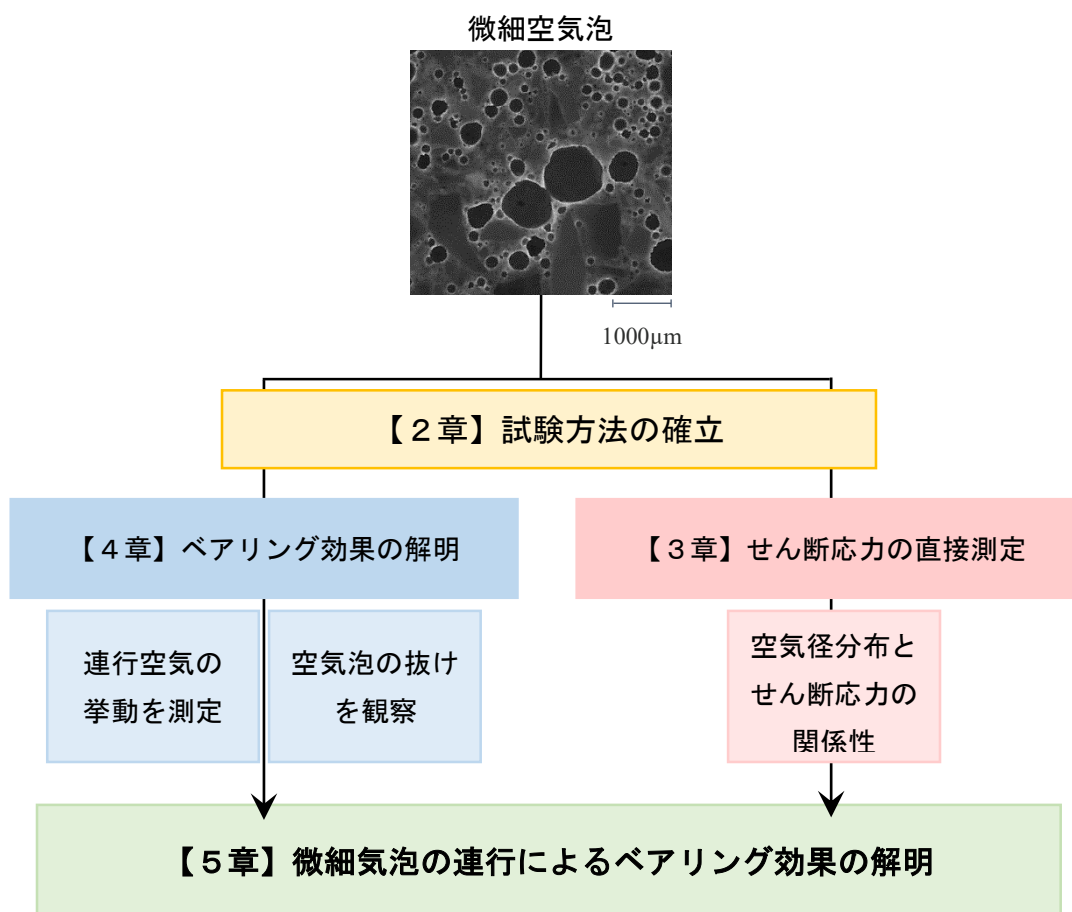


図-1.3 本論文の構成

## 第2章 試験方法及び諸条件

### 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のものを使用した。使用の際は水で 100 倍希釈して使用した。増粘剤は水溶性セルロースエーテル系のものを使用し、200g/m<sup>3</sup>(コンクリート体積あたりに換算)添加した。消泡剤は添加方法に応じて2種類使用しており、ポリアルキレングリコール誘導体(D1)、またはポリエーテル系の粉体(D2)(添加量：VMA 添加量×25%)を使用した。消泡剤 D1 は、使用の際に水で 100 倍希釈して使用した。

表-2.1 使用材料

材料	概要	記号
水	上水道水	W
セメント	普通ポルトランドセメント(太平洋セメント) 密度 3.15g/m <sup>3</sup>	C
細骨材	石灰砕砂 密度 2.68g/m <sup>3</sup> , 粗粒率 2.63 粒径判定実積率 55.3%, 吸水率 0.81	S
減水剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
空気連行剤	変形ロジン性酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE
増粘剤	水溶性セルロースエーテル系増粘剤	VMA
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	D1
	ポリエーテル系(粉体)	D2

## 2.2 配合

モルタル中の、空気を除いた細骨材容積比(s/m)を 55%とし、水セメント比(W/C)を 45%に設定した。

高性能 AE 減水剤の添加量は、モルタルフロー値が 240±10mm となるよう調整し、空気連行剤、消泡剤によって連行空気量を調整した。

気泡潤滑型自己充填モルタルの配合条件、気泡潤滑型自己充填モルタルの示方配合を示す(表-2.2, 2.3)。

表-2.2 気泡潤滑型自己充填モルタルの配合条件

s/m	55%
W/C	45%
高性能 AE 減水剤	モルタルフローが 240±10mm となるよう調整
空気連行剤 消泡剤	空気量・空気径分布に応じて調整

表-2.3 気泡潤滑型自己充填モルタルの示方配合(空気を除く)

単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
W	C	S
264	586	1474

※実際の材料：材料×(1-空気量(%))/100)

## 2.3 練混ぜ方法

モルタル材料の練混ぜには、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  $140 \pm 5$  回転，公転：毎分  $62 \pm 5$  回転)で，練混ぜ量は 1.6L(空気を除く)とした。1 バッチあたりの練混ぜ量は 1.6L(空気を除く)として行った。

連行する空気泡の質および量に応じて，モルタルの練り混ぜ方法を変えて試験を行った(図-2.2)。水と混和剤を一度に投入する「一括練り」で粗い径分布の空気を連行し，練り混ぜ水と混和剤を2度に分けて投入する「水分割練り」で細かい径分布の空気を連行したモルタルを作成した。さらに，消泡剤を先に添加する方法では連行空気泡を径によらずまんべんなく除去したモルタル，消泡剤を後から添加する方法では大径気泡を除去したモルタル試料を作成した。



図-2.1 モルタルミキサ



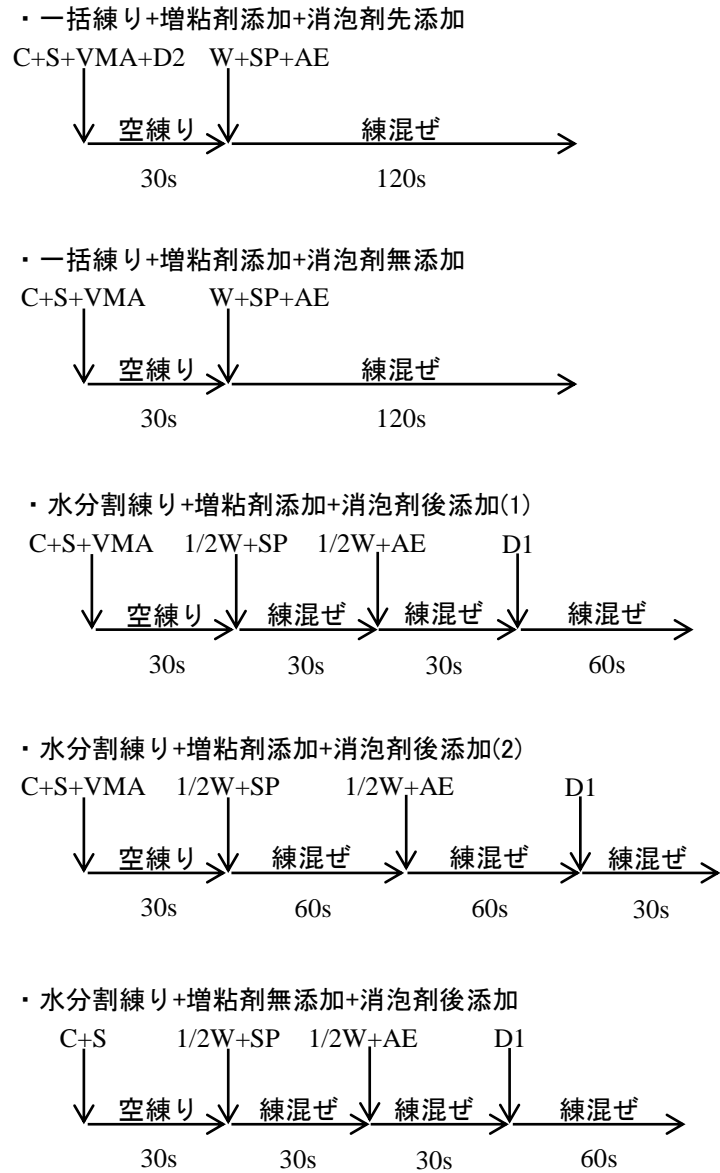


図-2.2 気泡径分布と空気量を調整するために本研究で選択した練混ぜ手順

## 2.4 試験方法

### 2.4.1 モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は、モルタルの流動性を定量化する試験である。この試験結果はフレッシュコンクリートの流動性を評価するスランプフロー試験の結果と高い相関がある。自己充填コンクリートの性能を簡略化して評価することが可能である(図-2.3)。

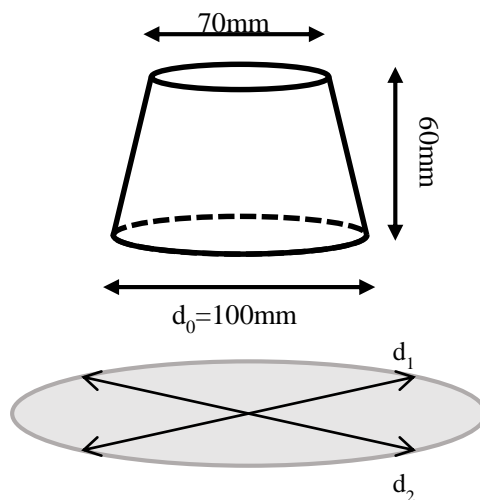


図-2.3 モルタルフロー試験

### 2.4.2 空気量試験

フレッシュモルタル中の空気量は JIS A1116「フレッシュコンクリートの単位体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)」に準じて測定した。

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

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体積質量(kg/m<sup>3</sup>)

M : コンクリートの単位体積質量(kg/m<sup>3</sup>)

### 2.4.3 フレッシュモルタル中の気泡径分布の測定

フレッシュモルタル中の空気泡の径およびその量の測定には、自動空気泡解析機(Air Void Analyzer : AVA)を用いた(図-2.4)。この試験機はグリセリン液中でモルタルを攪拌し連行空気を浮上させ、浮上した空気泡を試験機上部に設置したペトリ皿で受けて重量変化を測定するものである。気泡は液中では気泡の大きさによって浮上速度が異なり、グリセリン液は水よりも粘度が高いため、その速度差を顕著に表す。気泡の浮上速度の差を利用して、モルタル中に連行された空気の径を測定することができる試験機である。フレッシュモルタル

での測定が可能となす、施工性に影響する空気泡を直接測定することが可能な試験方法である。試験に必要なモルタル量は 20ml である。試験の特性結果の一例を示す。(図-2.5)



図-2.4 自動空気泡解析装置(Air Void Analyzer : AVA)

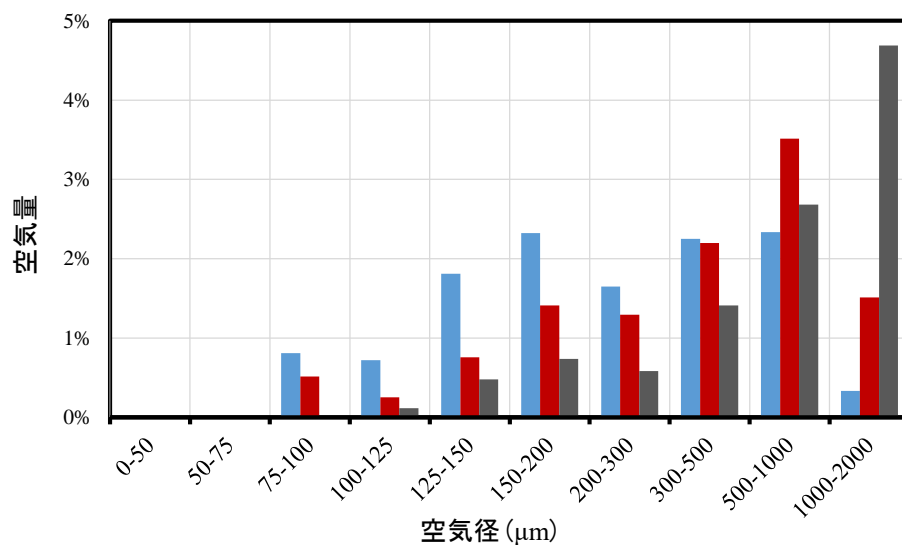


図-2.5 AVA によって測定されたモルタル中の空気径分布の一例

- ・ 青 微細気泡が多い, 増粘剤を添加したモルタル
- ・ 赤 大径気泡が多い, 増粘剤を添加したモルタル
- ・ 灰 大径気泡が多い, 増粘剤無添加のモルタル

#### 2.4.4 フレッシュモルタルの圧縮試験

ベアリング効果を発揮する空気は潰れにくいという仮説を立て、フレッシュモルタルを圧縮することにより、空気の潰れやすさや復元の程度を定量化することを目的として圧縮試験を行った。

モルタルの圧縮は、土質工学における「一軸圧縮試験<sup>6)</sup>」をベースとした圧縮試験機を用いた(図-2.6)。直径 60mm、高さ 75.5mm の円筒形の容器にフレッシュモルタル試料を入れ、鉛直方向に荷重をかけて直応力とひずみの関係を測定した(図-2.7)。試料として必要なモルタル量は 214ml である。本試験はひずみ速度 1.2~1.3%/min、最大の直応力が 0.35MPa となるように载荷した。フレッシュモルタル中の空気径分布は前章と同様に AVA を用い、圧縮試験前と圧縮試験後の空気径分布を測定した(図-3.7)。



図-2.6 一軸圧縮試験機

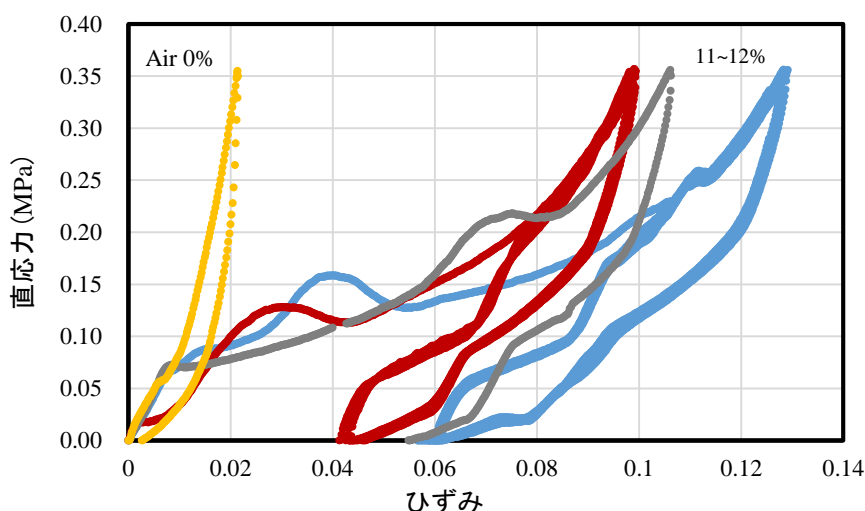


図-2.7 圧縮試験によるフレッシュモルタルの応力ひずみ線図の一例

#### 2.4.5 フレッシュモルタル内に生じるせん断応力の測定

コンクリートは型枠に充填される際、鉄筋を通過するときに骨材同士が接近することで間に存在するモルタル中に直応力が生じ、それによってモルタルの変形の際に生じる摩擦力(せん断応力)が高まる(図-2.8)。そのせん断応力を模式的に測定することが可能な、一面せん断試験機を使用した(図-2.9)。土質力学における一面せん断試験装置<sup>6)</sup>を応用したものである。

上面のみが空いている固定された容器(下部)と底面・上面共に空いている容器(上部)にモルタル試料を入れ、直応力をかけた状態で上部のみを荷重により水平移動させる。その際の、下部の容器に存在するモルタルと上部の容器に存在するモルタルとの間に生じるせん断力を測定する(図-3.9)。試料として必要なモルタル量は50ml、容器内側の直径は60mmである。

本試験機で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(図-2.10)。一面せん断試験によって測定したデータにおける、動き始めて最初に得られたせん断力のピークをモルタルが動き始めたときのせん断力(せん断強度)と定義した(図-2.11)。一面せん断試験は速度 0.06mm/sec , 直応力 0.2MPa で試験を行った。

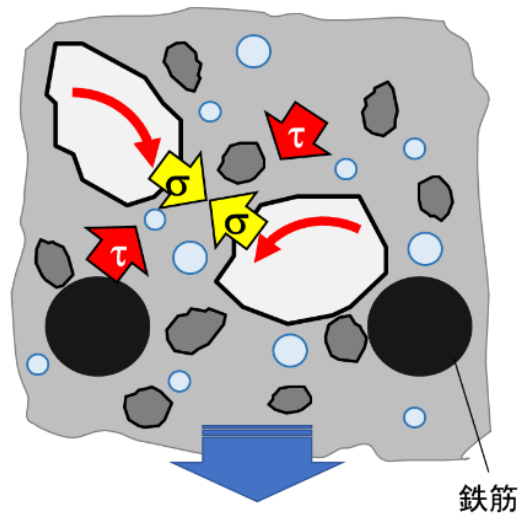


図-2.8 フレッシュコンクリートの変形の際に生じたモルタル中のせん断応力が高まるイメージ図

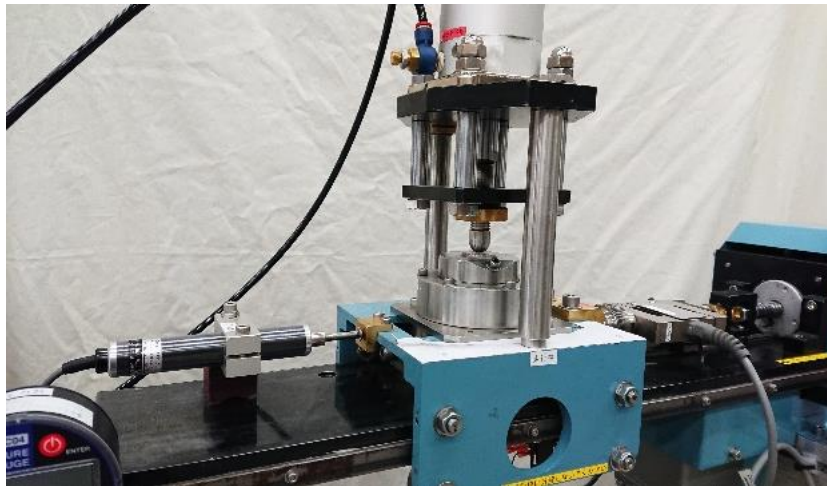


図-2.9 一面せん断試験機

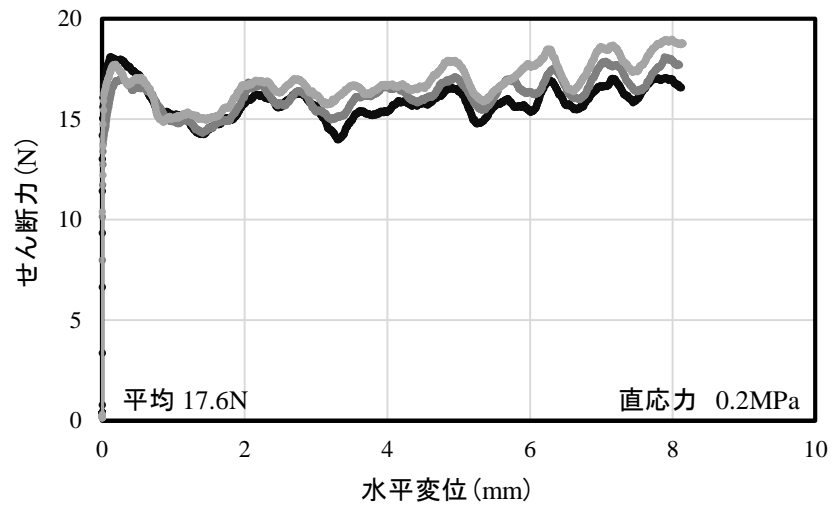


図-2.10 モルタルの上下間の水平方向の変位と生じるせん断力との関係

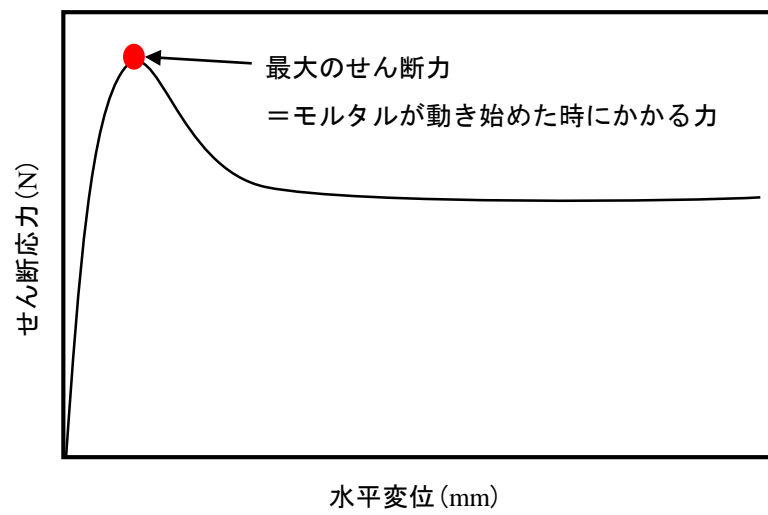


図-2.11 測定データの解釈

### 第3章 連行空気泡が及ぼすモルタル中のせん断力の測定

#### 3.1 概要

コンクリートを型枠に充填する際、コンクリートに含まれる材料はすべて鉄筋と鉄筋の間を通過しなければならない。鉄筋を通過する際に骨材同士が接近するため、骨材が鉄筋にぶつかったり、骨材同士がかみ合ったりすると十分に充填されず、期待する性能を発揮できない恐れがある。骨材同士が接近するとき、骨材間のモルタルに直応力が生じるため、これによってモルタル中のせん断応力が高まる。このせん断応力が小さいとき、すなわちモルタル中の固体粒子間摩擦が小さいと、骨材間のかみ合わせ等が抑えられてフレッシュコンクリートの間隙通過が可能となる。

本研究では、モルタルのせん断変形を模擬した一面せん断試験機(図-3.1)でせん断力を測定し、モルタル中への連行空気の有無や質と量による、生じるせん断応力への影響を定量化する。

まず、空気量とモルタル中のせん断応力との関係を比較し、次に微細な空気量とモルタル中のせん断応力との関係を比較した。これにより、モルタル中の固体粒子間摩擦の低減が、連行空気の量または質のどちらに関係しているかを比較・検討した。なお、一面せん断試験の際の排水または非排水の条件の違いによってモルタル中からの空気の抜けも影響されると想定したが、本研究では単純な条件として、一面せん断試験は非排水試験で行った。

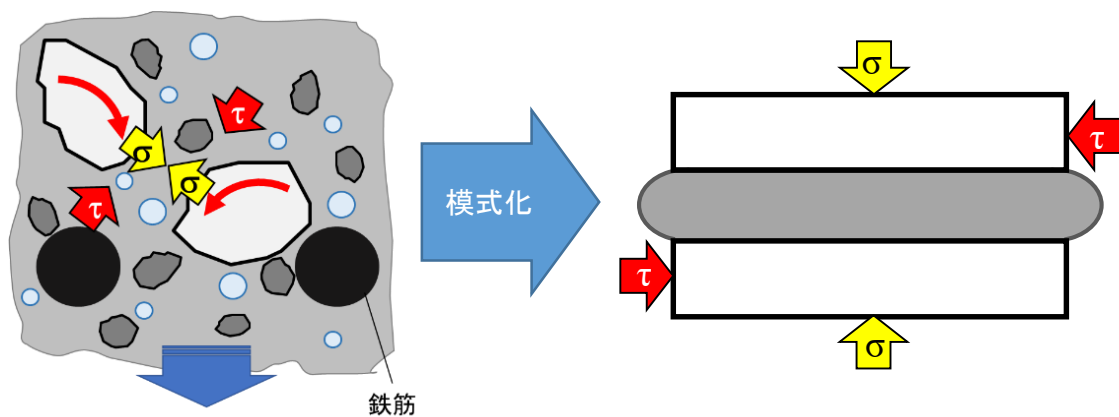


図-3.1 骨材の接近による直応力・せん断応力の発生を模擬した一面せん断試験



### 3.2 自己充填性の向上に寄与しない大径気泡

試験で使用した材料を示す(表-3.1)。空気量以外の条件をできるだけ同等にするため、比較するモルタルにはどちらも消泡剤を添加した上で、空気連行剤を用いてモルタル中に空気を連行した。

本研究内では動き始めて最初に得られたせん断力のピークをモルタルが動き始めた時のせん断力と定義した。直応力 0.1MPa でせん断応力を生じさせたとき、空気量に関わらずせん断力の大きさは同様の結果となった。また、モルタルが変形している最中のせん断力の変移も同様の結果となった(図-3.2)。

そこで、直応力を 0.3MPa に高めて同様の試験を行った。通常、一面せん断試験の直応力を変化させると、せん断力は直応力に比例して大きくなる。しかし、直応力を大きくした際のせん断力も、直応力 0.1MPa のときと同様に空気量に関わらない結果となった(図-3.3)。

空気量 5%のモルタルの連行空気泡の径分布を測定したところ、自己充填性に効果がないとされる大径気泡が多く、微細な気泡が少ないモルタルであった。空気連行によるモルタル中の摩擦緩和のためには、摩擦緩和の効果がある空気泡が連行されている必要があり、大径気泡の連行では摩擦は緩和されなかったものとして考察した。

表-3.1 使用材料

空気量	高性能 AE 減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	増粘剤 添加量 (g/m <sup>3</sup> ) ※コンクリート 1m <sup>3</sup> のとき	消泡剤	消泡剤 添加量 (VMA×%)
0%	1.10	-	200	D2	25
5%	1.05	0.015			

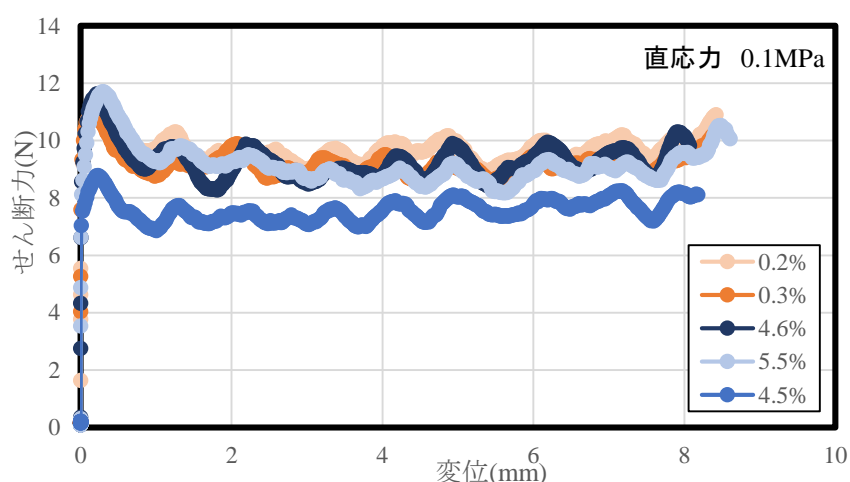


図-3.2 直応力が生じた際のモルタル中のせん断力(直応力 0.1MPa)

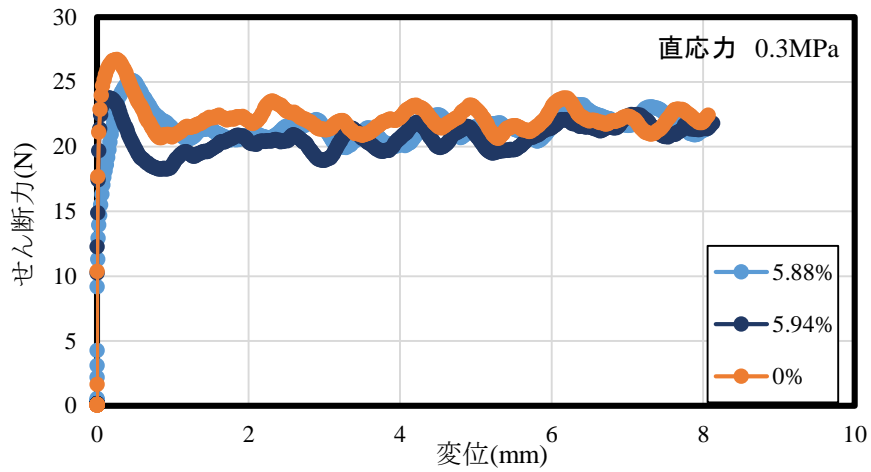


図-3.3 直応力が生じた際のモルタル中のせん断力(直応力 0.3MPa)

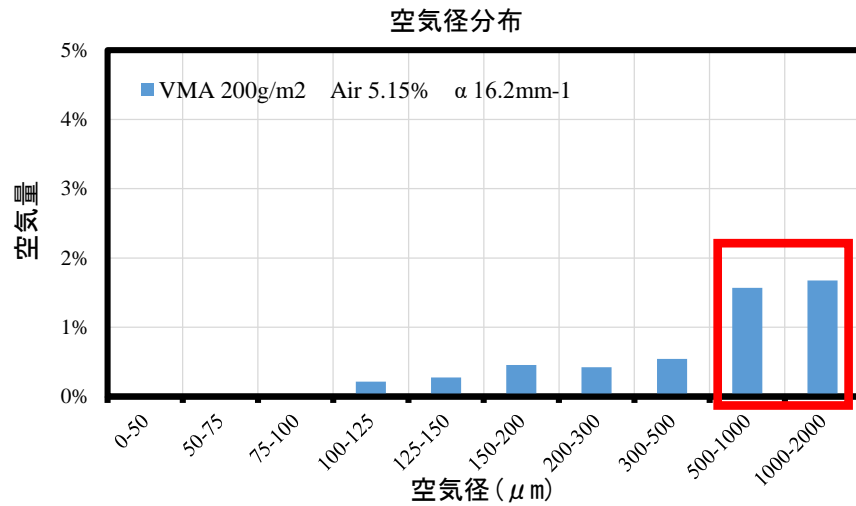


図-3.4 空気量 5%のモルタルの空気径分布(赤枠：摩擦低減に効果がないと見られる大径空気泡,  $\alpha$  : 連行空気の比表面積( $2\text{mm}^2/\text{mm}^3$  未満))

### 3.3 気泡径分布の変化によるモルタル中のせん断力の関係

モルタルに連行する空気の質を変化させ連行気泡の径分布を測定することで、モルタル中のせん断力と連行空気泡の質との関係を測定した。試験で使用した試料を下表に示す(表-3.2)。直応力を 0.2MPa に固定し、空気の有無及および空気径分布を変化させたモルタル中のせん断応力を測定した。

連行空気なし、粗い気泡径分布(VMA 有無)、細かい気泡径分布のモルタルを比較すると、わずかではあるが、気泡径分布が細かいモルタルの方がはせん断力は小さい結果となった。

また、同等の空気量が連行されたモルタルで比較すると、ピークを過ぎた後のせん断力の最大値は細かい気泡径分布では平均 15.3N ，粗い気泡径分布では 17.0N で、細かい径分布の気泡を連行したモルタルの方が小さかった。したがって、モルタルが変形している際にモルタル中に生じている摩擦は、小径気泡が多い方が緩和されていた(図-3.5, 3.6)。

表-3.2 使用材料

	高性能 AE 減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	増粘剤 添加量 (g/m <sup>3</sup> ) ※コンクリート 1m <sup>3</sup>	消 泡 剤	消泡剤 添加量	練混ぜ方法	空 気 量	径 500μm 未満の 空気量	せん断力 (N)
1	0.8	-	200	D2	VMA ×25%	一括練り 消泡剤先添加	0%	0%	21.0
									16.1
									24.2
2	1.1	0.01	200	D1	0.04 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(2)	6%	2.10%	18.9
									19.4
									18.6
3	1.1	0.01	200	D1	0.04 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	8%	2.69%	19.2
									18.6
									17.4
4	0.9	0.005	0	-	-	一括練り	11%	3.32%	18.1
									17.0
									17.7
5	1.2*	0.01	200	D1	0.01 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	13%	4.67%	17.5
									16.7
									17.2
6	1.0	0.005	200	D1	0.01 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	13%	7.28%	15.3
									15.6
									17.1

※5 は消泡成分を含む高性能 AE 減水剤を使用した。

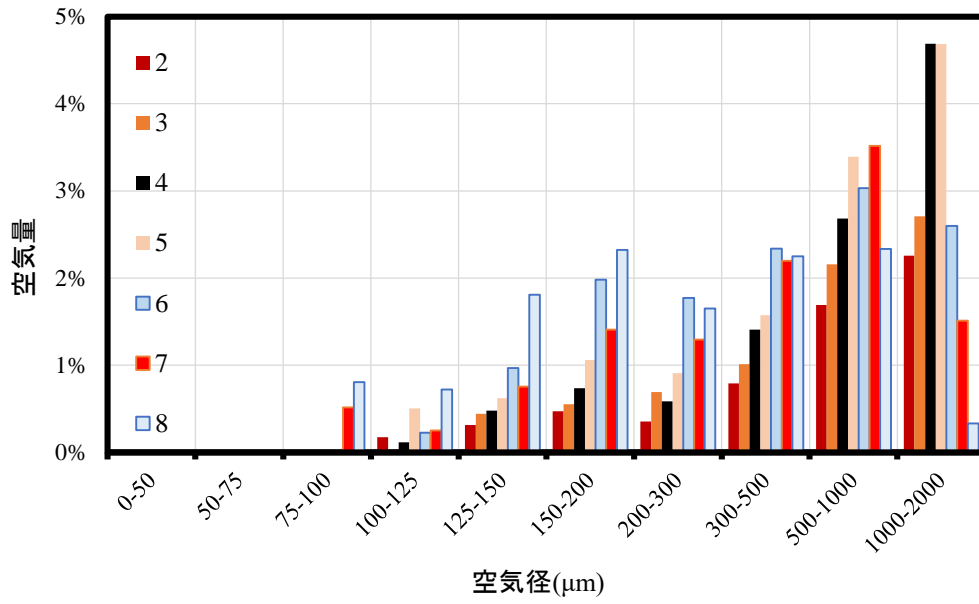


図-3.5 フレッシュモルタル中に連行された空気泡の径分布  
 (赤：粗い径分布，青：細かい径分布，黒：VMA 無添加の粗い径分布)

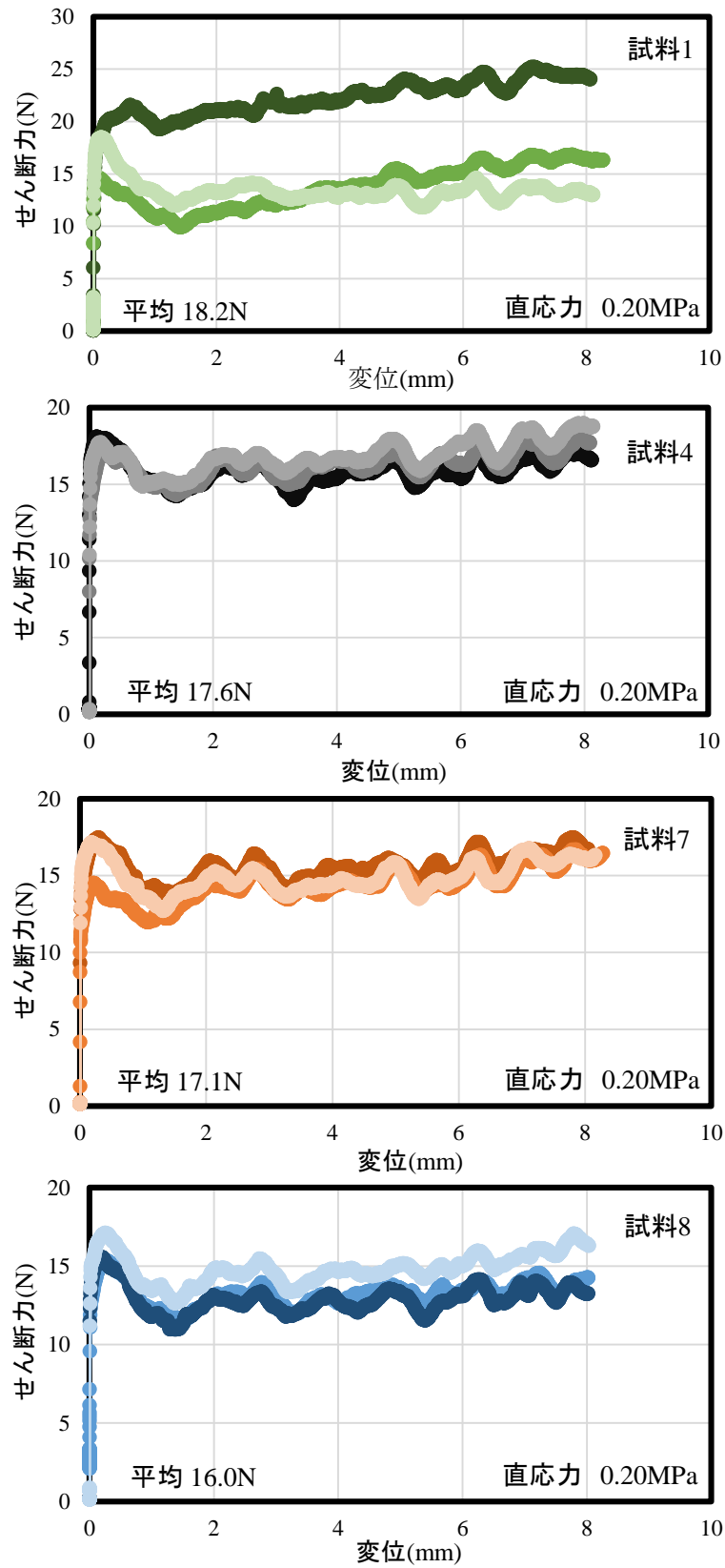


図-3.6 気泡径の細かさの違いとせん断力の関係

### 3.4 まとめ

大径気泡を連行し、空気量の違いのみでモルタル中の摩擦への影響を検討したが、直応力  $\sigma=0.10\text{MPa}$  ではモルタル中に連行された空気量のみでは影響が見られなかった。直応力  $\sigma=0.20\text{MPa}$  では空気量が多いほど摩擦が低減されていた。直応力  $\sigma=0.35\text{MPa}$  では空気量によるモルタル中の摩擦の影響は見られなかった(図-3.7)。これらのことから、自己充填性を測定する間隙通過試験の際のコンクリート中のモルタルに生じる直応力は  $0.10\text{MPa}$  超～ $0.35\text{MPa}$  未満であると考察した。

微細な気泡を連行した際はモルタル中の摩擦への影響が見られた。特に、 $1000\mu\text{m}$  未満の連行空気量とせん断強度との間には高い相関が得られた(図-3.8, 3.9)。さらに、変形し始めた際の摩擦だけではなく、モルタルが変形している最中の瞬間的な摩擦も小さくなっていることがわかった。

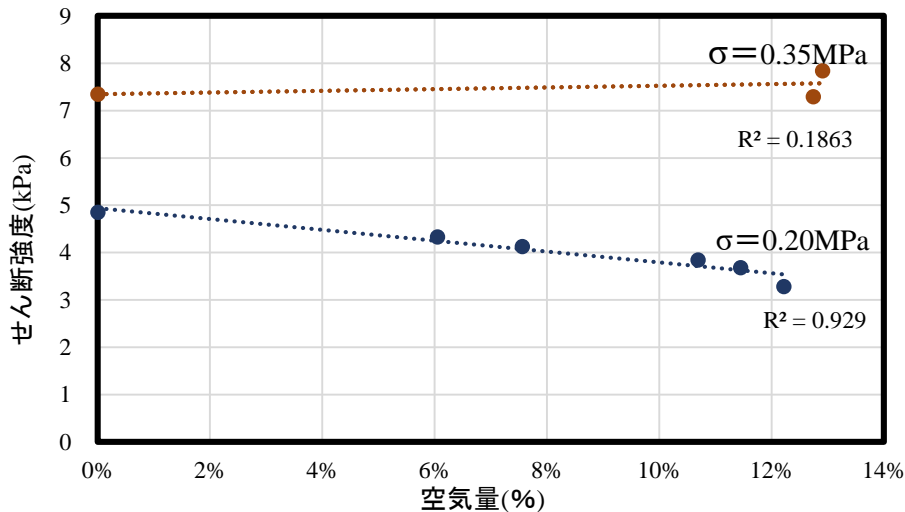


図-3.7 空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係

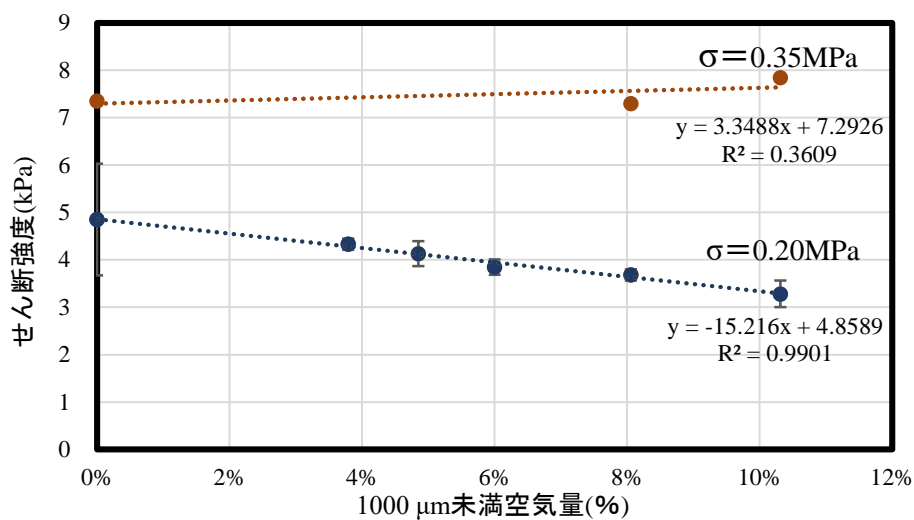


図-3.8 空気径 1000 μm 未満空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係

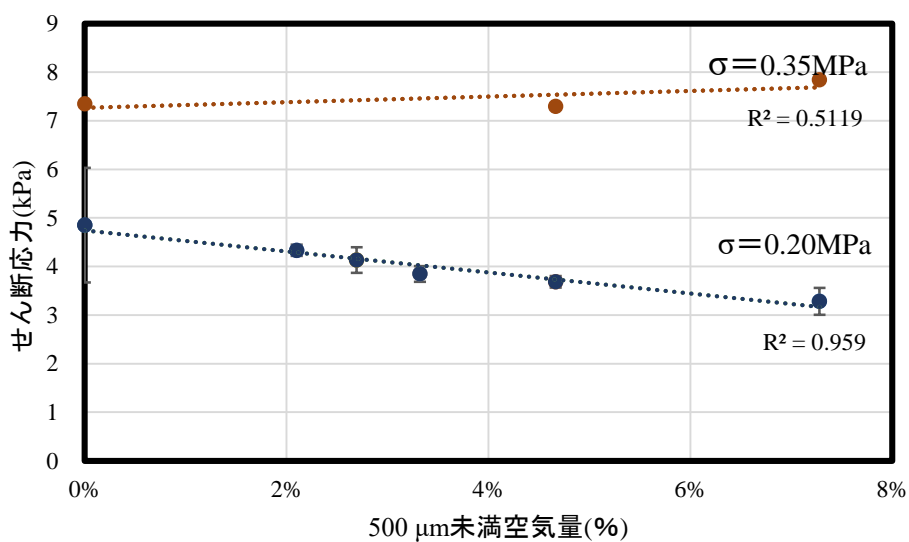


図-3.9 空気径 500 μm 未満空気量とモルタル中のせん断強度(摩擦)との関係

## 第4章 フレッシュモルタルの圧縮による連行空気の挙動

### 4.1 概要

フレッシュコンクリートが重力の作用のみで鉄筋の間を通過することが困難となるのは粗骨材の存在による。その粒子同士の接近によりモルタル中のせん断変形の強度が高くなるだけでなく、物理的に距離が近くなるため、いかに骨材間にモルタルなどの緩衝材となるものを存在させて物理的距離を取るかも重要となる(図-4.1)。

ベアリング効果がある微細な空気は大径気泡に比べて気泡内圧が大きいいため潰れにくく、骨材間に物理的距離をとることができると言われている。そこで、微細な気泡は外力によって潰れにくく、微細気泡が潰れるほどの外力がかかったとしても外力がなくなった場合気泡は抜けることなく元に戻ることができるかと仮説を立てた。そして、フレッシュモルタルを圧縮することで、モルタル中に連行された空気の潰れやすさや応力ひずみ関係を測定した。

また、フレッシュモルタルの圧縮によって、連行気泡同士が接近するため、合泡も起こり得ると想定し、微細気泡と大径気泡の増減も観察した。

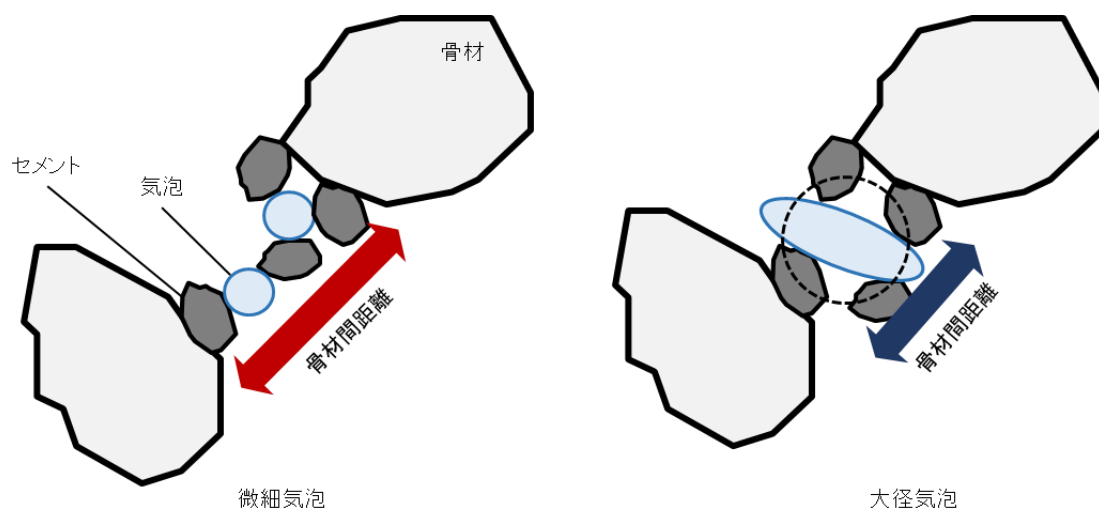


図-4.1 連行気泡の大きさの違いによる骨材間距離の違いのイメージ



#### 4.2 フレッシュモルタルの圧縮によるひずみと応力の関係

最大の直応力を 0.20MPa, 0.35MPa の二通り設定し、フレッシュモルタルを圧縮して応力ひずみ関係を調べた。試験で使用した試料を下表に示す(表-4.1)。直応力 0.35MPa の際のひずみを最大ひずみ( $\mu_{max}$ )、除荷後 0MPa の際のひずみを残留ひずみ( $\mu_{re}$ )とした。空気量 0% のモルタルでもひずみは生じているため、空気を除いたモルタル材料自体の圧縮を考慮し、空気量 0% のモルタルのひずみを減じた値で検討した。圧縮試験に際しては、載荷・除荷を交互に 10 回繰り返す、1 回目の載荷以降最大ひずみと残留ひずみに変化がないことを確認した。

最大直応力 0.20MPa, 0.35MPa での応力ひずみ関係と空気径分布は下図の通りとなった(図-4.2, 4.3, 4.4)。微細な気泡は外圧によって潰れても元に戻ることがわかった。これは、大径気泡は気泡内圧が小さいため、一度高い外力によって圧縮すると、元に戻らないためであると考察した。また、前章の直応力 0.20MPa でのせん断応力では、モルタル中に多くの空気が残り、摩擦の緩和に繋がっていたといえる。

表-4.1 使用材料

	高性能 AE 減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	増粘剤 添加量 (g/m <sup>3</sup> ) ※コンクリート 1m <sup>3</sup>	消泡剤	消泡剤 添加量	練混ぜ方法	空気量	径 500 $\mu$ m 未満の 空気量	$\mu_{max}-\mu_{re}$
1	0.8	-	200	D2	VMA ×25%	一括練り 消泡剤先添加	0%	0%	-
2	1.1	0.010		D1	0.04 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(2)	6%	2.10%	1.89%
3	1.1	0.010				分割練り 消泡剤後添加(1)	8%	2.69%	2.20%
4	0.9	0.005	0	-	-	一括練り	11%	3.32%	3.26%
5	1.2*	0.010	200	D1	0.01 (C×%)	分割練り 消泡剤後添加(1)	13%	4.67%	3.01%
6	1.0	0.005					13%	7.28%	3.46%
7	1.6*	0.010					12%	6.42%	3.63%
8	1.2	0.005					12%	9.56%	4.68%

※5, 7 は消泡成分を含む高性能 AE 減水剤を使用した。

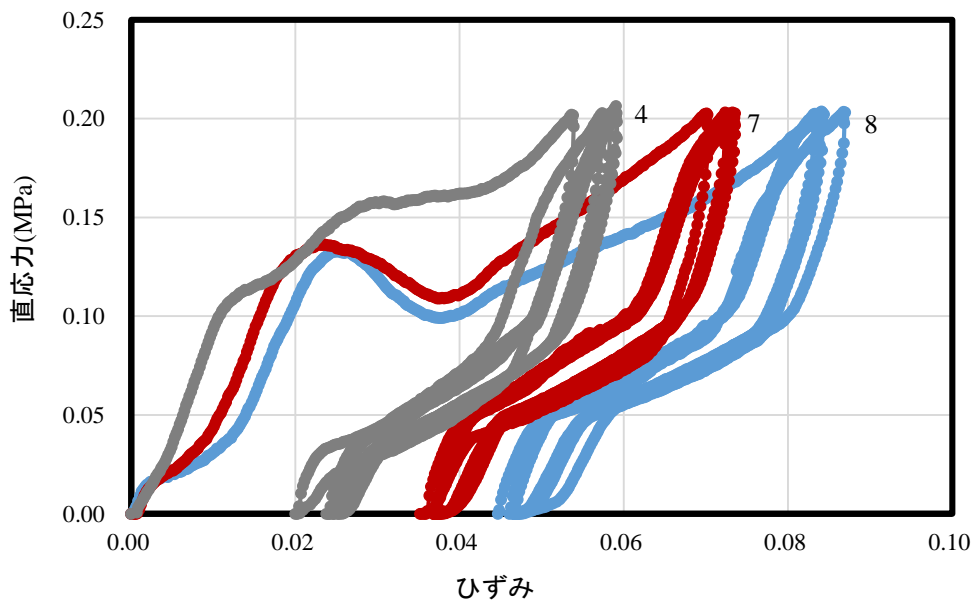
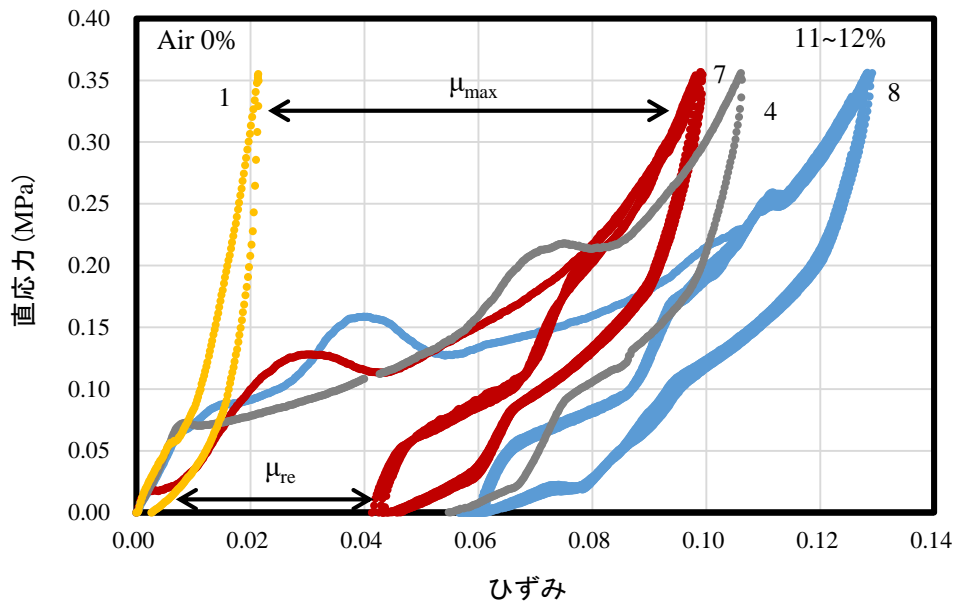


図4.2 圧縮試験によるモルタルの応力ひずみ線図

- ・ 青(8) 微細気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・ 赤(7) 大径気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・ 灰(4) 大径気泡が多い，増粘剤無添加のモルタル
- ・ 黄(1) 空気量 0%，増粘剤を添加したモルタル

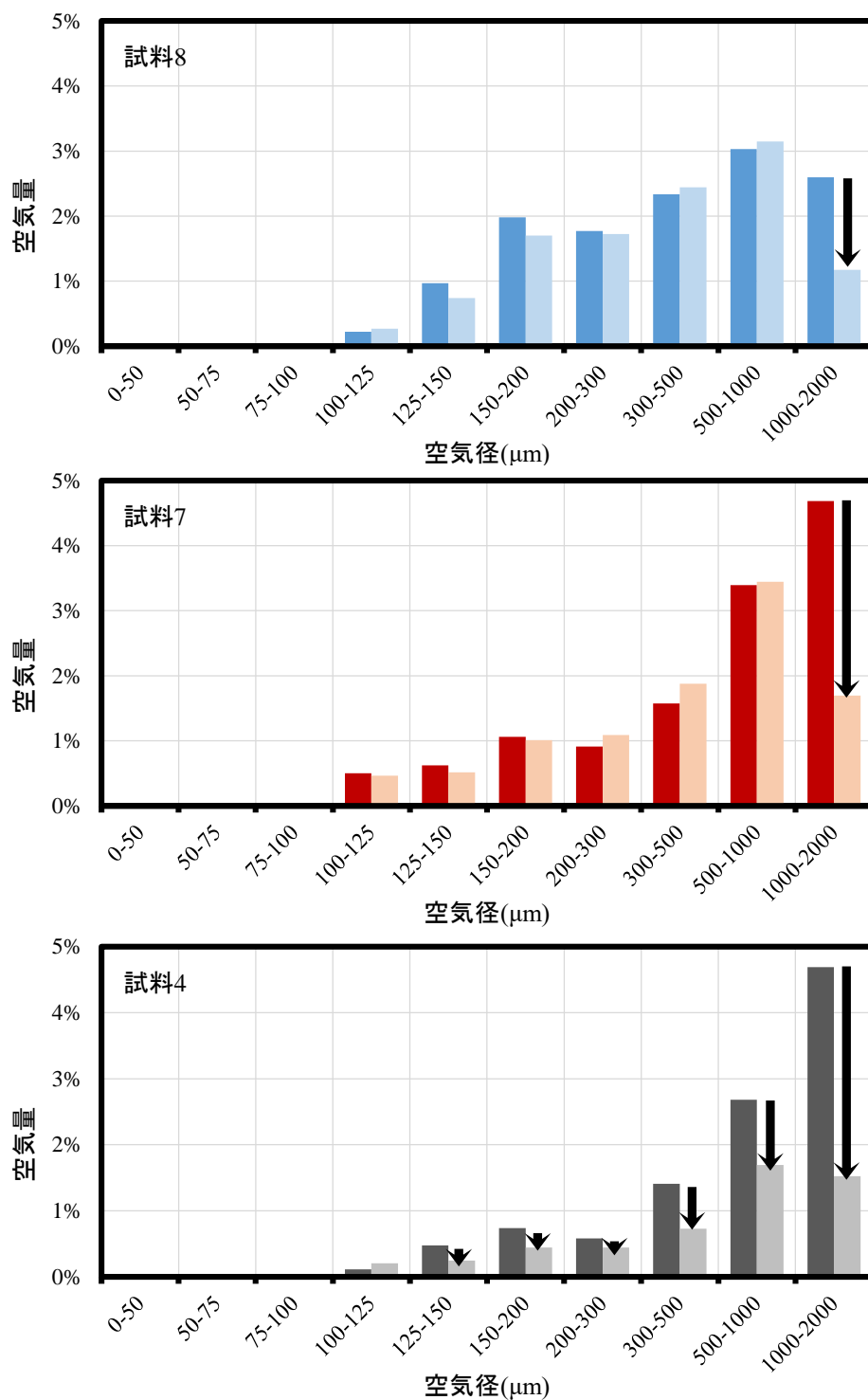


図-4.3 最大直応力 0.35MPa のときの各モルタルに連行された空気泡の径分布(左：圧縮前，右：圧縮後)

- ・青(8) 微細気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・赤(7) 大径気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・灰(4) 大径気泡が多い，増粘剤無添加のモルタル

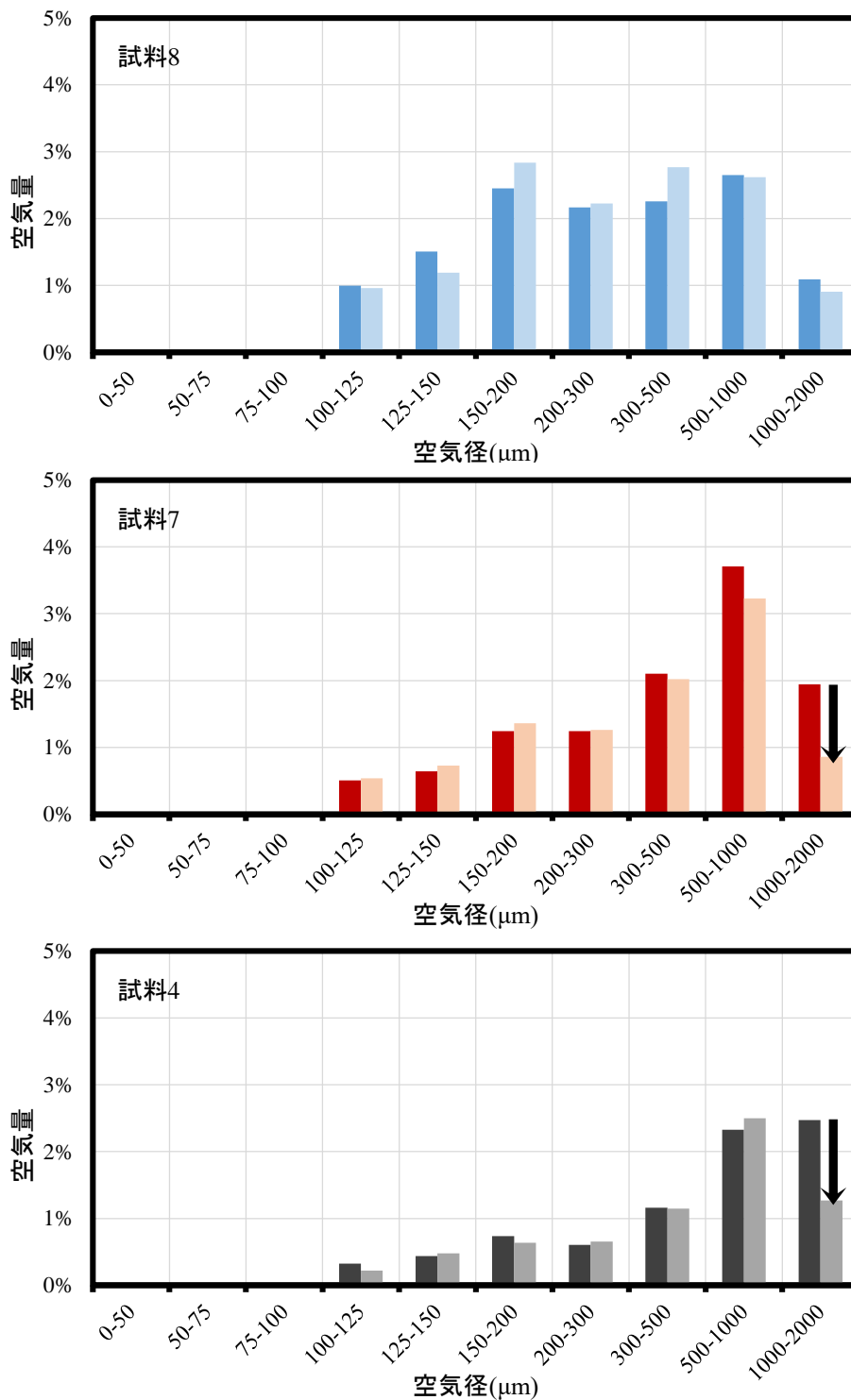


図-4.4 最大直応力 0.20MPa のときの各モルタルに連行された空気泡の径分布(左：圧縮前，右：圧縮後)

- ・青(8) 微細気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・赤(7) 大径気泡が多い，増粘剤を添加したモルタル
- ・灰(4) 大径気泡が多い，増粘剤無添加のモルタル

### 4.3 増粘剤の添加による連行空気泡の抜けの防止

一軸圧縮試験を行った際、試験後に空気抜き穴を開けると、空気が抜ける音がした。モルタル中の大径気泡や合一してできた気泡が試験機上部に浮上している可能性がある。

圧縮試験後のモルタル中の空気量を測定したところ、増粘剤の添加の有無に関わらず、減少していた。外力がかかるとき、モルタル中の空気は抜けることが実際に測定できた。

増粘剤を添加していないモルタルの場合は空気径によらず全体的に減少しているのに対し、増粘剤を添加したモルタルの場合は大径気泡のみが減少していた。これは、有機物である増粘剤が連行空気泡の膜となり、気泡同士の合一や気泡の抜けを防いだためであると考察した(図-4.5, 4.6)。

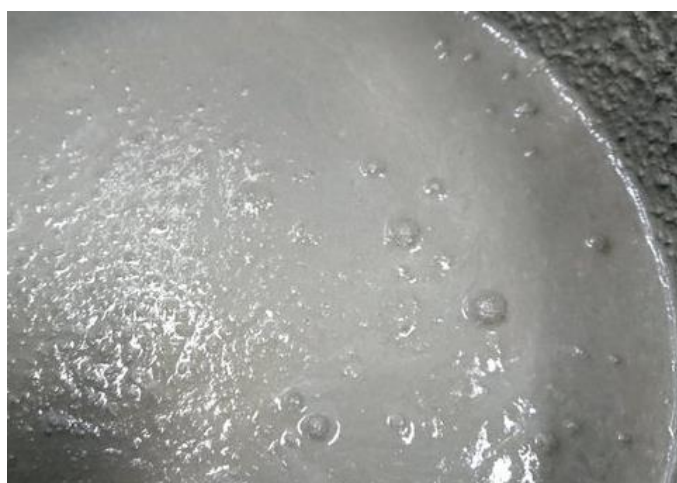


図-4.5 モルタルから抜ける直前の大径気泡に膜ができている様子(増粘剤添加)



図-4.6 モルタルから抜けている大径空気泡の様子(増粘剤無添加)

#### 4.4 まとめ

モルタル中に連行された微細気泡は外力によって潰れても元に戻るということがわかった。モルタル中の空気体積の復元性の指標として、気泡の剛性比を定義した。最大の圧縮応力によるモルタルの体積変化率をモルタル中の空気容積比で割った値を気泡のひずみと見なし、その逆数を気泡の剛性比とした。剛性比が大きいほど、復元性が高い気泡であることを意味する。

$$\text{気泡の剛性比} = \text{圧縮後に残った空気の量}(\%) / \mu_{\max} - \mu_{\text{re}} (= \text{連行空気によるひずみ})$$

最大直応力 0.20MPa のとき、空気の比表面積と剛性比は高い相関を示した(図-4.7)。

一方、最大直応力 0.35MPa のとき、空気の比表面積と剛性比には相関は得られなかった。直応力 0.20MPa では大径気泡のみが減少していること、小径気泡が多く連行されているほど剛性比も大きくなっていることから、直応力 0.20MPa はモルタル中の微細気泡が合泡しない程度の外力であり、直応力 0.35MPa では径の大きさに関わらず気泡が潰れてしまったと考察した。

また、増粘剤を添加していないモルタルでは気泡径に関わらず、全体的に気泡が抜けているのに対し、増粘剤を添加したモルタルでは大径気泡のみ抜ける結果となっていた。外力によってモルタル中の連行空気泡は抜けやすくなるが、増粘剤を添加した場合、微細気泡は抜けにくくなることがわかった。

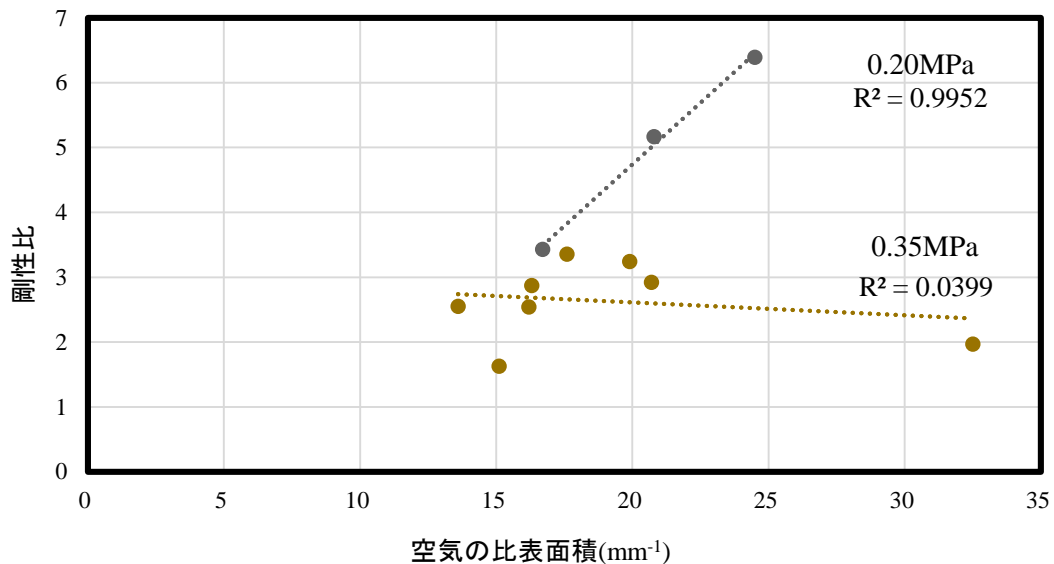


図-4.7 気泡の剛性比と空気の比表面積との関係

## 第5章 結論

本研究ではフレッシュコンクリートのワーカビリティ、自己充填性の向上に効果があるとされる連行空気泡の効果の直接測定を目指した。コンクリートやモルタルに連行された空気泡は外力によって圧縮されるが、ベアリング効果がある微細な空気泡は圧縮されても潰れ切らずに復元されるものと仮定した。それを検証するため、フレッシュモルタルの圧縮試験と一面せん断試験による固体粒子間摩擦の測定、連行空気泡の径分布の測定を行った。

本研究の結論を以下に述べる。

- 1) 比較的小さい気泡が多く連行されているほど、モルタルのせん断強度(モルタル中の摩擦)が低くなった。一方、直応力が高いと連行した空気泡の径と量にかかわらずせん断強度は低くならなかった。連行されている空気量とせん断強度の関係にも同様の結果が得られたが、径が 1000  $\mu\text{m}$  未満の空気量のみに着目した場合の方がより高い相関関係にあった。
- 2) フレッシュモルタルを圧縮し除荷した際にひずみが残りに、モルタルが完全に元の状態には戻らないことを確認した。モルタルの最大ひずみから除荷後の残留ひずみを除いた  $\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{re}}$  の値を、圧縮力によるモルタル中の空気泡のひずみとし、それを圧縮後に残った空気量で割った値の逆数を、剛性比と定義した。直応力 0.20MPa では比表面積を指標とした気泡の細かさと剛性比との間に高い相関が得られた。一方、直応力が 0.35MPa と高くなると相関が得られず、気泡が潰れた可能性を得た。また、最大直応力 0.35MPa 下では微細な気泡はある程度は潰れているものの、完全に潰れてしまっているわけではないと考察した。
- 3) 増粘剤を添加したフレッシュモルタルは連行空気泡の抜けが小さく、1000  $\mu\text{m}$  未満の気泡減少量はほとんどなかった。また、1000  $\mu\text{m}$  以上の連行空気泡についても抜けが小さくなった。これは、増粘剤が有機物であるため、気泡の周囲に膜を作り合泡や浮上による抜けを防止しているためであると考えられる。小径気泡を保持しやすく、気泡がコンクリート中から抜けにくくなるため、この増粘剤の気泡潤滑型自己充填コンクリートへの有効性を確認できたといえる。
- 4) 本研究において、試験の結果と代表的な自己充填性試験結果との相関から、フレッシュコンクリートのモルタル中に生じる圧縮応力の大きさが 0.10MPa 超 0.35MPa 未満であると間接的に推測した。しかし、実際のフレッシュコンクリートで鉄筋の間隙通過の際のせん断応力の大きさは定かではなく、また、これが一定であるとは言い難い。そのため、間隙通過の際にフレッ

シュコンクリート中に発生している直応力の大きさを解明する必要がある。それにより、フレッシュコンクリートの実際の挙動を評価可能となる。



## 今後の課題

本研究ではモルタル中に空気が残っていることを前提として非排水条件での一面せん断試験を行ったが、実際のフレッシュコンクリートでは排水している箇所もあると予想され、その場合にはせん断変形中に空気が抜けているものと想定される。フレッシュコンクリートが実際に間隙通過の際の気泡の抜ける量を考慮することが必要になる。

## 参考文献

- 1) 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，コンクリート工学会年次論文報告集，Vol21，No2，pp451-456，1999年6月
- 2) 田中 一徳：気泡潤滑型自己充填コンクリートの自己充填性向上と空気量安定のための材料配合と製造法，高知工科大学修士論文，2015年1月
- 3) PUTHIPAD Nipat, Effect of Entrained-air Size Distribution and Fly Ash on Self-compactability and Air Volumetric-stability of Fresh Concrete, 高知工科大学博士論文，2018年3月
- 4) 亀島 健太：消泡剤を用いた大径空気泡の除去によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上，高知工科大学修士論文，2016年1月
- 5) 大内 雅博，北中 康太，Anuwat Attachaiyawuth：増粘剤添加によるフレッシュモルタルへの連行空気泡の安定化，令和元年度土木学会全国大会，V-309
- 6) 土質工学会：土の試験実習書-第一回改訂版-，昭和58年
- 7) 安井 久一：ウルトラファインバブル，日本音響学会誌73巻7号，pp424-431，2017年

## 謝辞

本研究に際して、多くの方々の多大なるご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)、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((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、学部3年生でコンクリート研究室に配属されて以来、研究に関することはもちろんのこと、様々な建設現場や建材の製造施設等、建設に関わる者として知っておくべきことを実際に見て触って知るということをご教示くださいました。また、大きなプロジェクトへの参加や国内外の学会発表の機会を頂いたこと、進路の相談に親身になって相談に乗っていただいたこと等、大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

田島先生には、学部2年生の建築系配属以来、学業についてだけではなく、進路の相談に親身になって相談に乗っていただき、大変お世話になりました。研究にあたっては、広い見地からのご意見やご指摘を頂き、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。

宮地先生、曾我部先生には、コンクリートについての基礎的な知識から実験の相談等、多くのことをご教示いただきました。また、高知県だからこそ、若いからこそと色々な楽しみを教えていただいたこともよく覚えています。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。

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。

2020年1月 大西 悠