

2022 年度修士論文

自己充填コンクリートに微細気泡を
連行する練混ぜ手順の確立

Mixing procedure for entraining fine air bubbles into
self-compacting concrete

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 佐藤 慎司

副査審査員 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

1255065 森崎 弘汰朗

2023 年 3 月

自己充填コンクリートに微細気泡を連行する 練混ぜ手順の確立

森崎 弘汰朗

要旨

施工時に振動締固め作業を必要としない自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete: SCC)が 1988 年に開発された。しかしながら、30 年以上が経過しても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セメント量を増やして粘性を高め、間隙通過性能を高めるとともに、高性能 AE 減水剤を添加し、セメントを分散させて軟度高めることにより自己充填性を得ている。そのため、粉体(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、高価格なコンクリートとなっている。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微細な気泡に置き換えることで、自己充填性を維持しつつ、単位セメント量を削減した気泡潤滑型自己充填コンクリート(air-SCC)が開発され、実用化に向けて技術開発が行われている。その中で、500 μm 以下の微細気泡が自己充填性向上に有効であることが分かっている。

本研究の目的は、微細気泡の連行と気泡の経時安定性向上に有効であることが分かっている増粘剤を添加し、練混ぜ手順の調整のみにより 500 μm 以下の微細な気泡をモルタル中に連行する方法を確立することである。そのため、練混ぜ直後および 2 時間後のフレッシュ状態のモルタルの気泡径分布を測定し、練混ぜ手順の違いが与える影響を比較し、適切な練混ぜ手順を構築した。

微細気泡比率の高い空気を連行する効果のある分割練りを採用した。練り混ぜ水を半分に分け、減水剤と空気連行剤は 2 次水に混ぜて投入した。1 次練りと 2 次練りのそれぞれの時間がモルタルの気泡径分布に与える影響を調べた。2 次練り時間を長くすることで微細気泡の比率が高まり空気量が増加すること、一方、1 次練り時間を長くすることで微細気泡の比率が低下し空気量は減少することが分かった。さらに、1 次練り時間の違いによるモルタルの粘度の違いを水セメント比の調整により生じさせたモルタル同士の気泡径分布を比較した結果から、1 次練り時間により決まるモルタルの粘度が微細気泡の比率や空気量に影響を与えている可能性を得た。

2 次練り時間を長くすると微細気泡の割合が高まるが、それに伴って空気量が大きくなってしまったことが分かったため、1 次練りの時間を調整することで微細気泡量を維持しつつ、目標とする空気量を得る方法を考案した。

本研究の成果により、練混ぜ手順決定の合理化が図れるようになった。これが気泡潤滑型自己充填コンクリートの製造可能工場の増加、ひいては同コンクリートの普及を促進すると確信している。

Mixing procedure for entraining fine air bubbles Into self-compacting concrete

Kotaro Morisaki

ABSTRACT

Self-compacting concrete has not been widely used. One of the reasons is that it is more expensive than ordinary concrete. Conventional self-compacting concrete has self-compacting performance by increasing the amount of cement for increasing viscosity resulting in flowability through obstacle, and by dosing a high-range AE water reducing agent for high dispersion of cement particles resulting in lower consistency. The amount of powder (cement, etc.) of twice as that of the ordinary concrete results in an expensive concrete. To solve this problem, a bubble-lubricated self-compacting concrete (air-SCC) has been developed by replacing a portion of the cement in the concrete with fine air bubbles to reduce the unit cement content while keeping the level of self-compacting performance. It was found that microbubbles with the diameter of less than 500 μm or less were effective in enhancing the self-compacting property.

The objective of this study is to establish a method for entraining fine air bubbles with the diameter of 500 μm or less into mortar with viscosity agent by simply adjusting the mixing procedure, by which the effect of entraining fine air bubbles and enhancing the stability of the bubbles over time has been verified. For this purpose, the bubble size distribution of fresh mortar was measured immediately after mixing and after 2 hours respectively, and the effect by different mixing procedures were compared. The dividing mixing procedure was employed. The total water was divided into 50 to 50. Water reducing admixture and air-entraining agent was poured at the second mixing.

The longer duration of first mixing resulted in the lower share of fine bubbles and the smaller air content. The longer duration of the second mixing resulted in the higher share of fine bubbles and the larger air content. The mechanism of the effect by the longer duration of the first mixing of lower viscosity of mortar was verified with the experiment of mortars with the variety of viscosity subject to the variety of water to cement ratio.

A rational method with which the target air content can be obtained with high share of fine bubbles was proposed by using the results of this study. It may contribute to increase the number of ready-mixed concrete plants which can mix air-enhanced self-compacting concrete resulting in making self-compacting concrete a standard concrete.

目次

第1章 はじめに	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 既往研究	3
(1) 自己充填性向上に有効な気泡径	3
(2) 増粘剤添加による微細気泡の連行と経時安定性向上	5
1.3 本研究の目的	6
1.4 本論文の構成	6
第2章 材料・配合および試験方法	7
2.1 使用材料	7
2.2 配合	7
2.3 練混ぜ方法	8
2.4 フレッシュモルタルの試験方法	9
(1) モルタルフロー試験	9
(2) 空気量試験	9
(3) ロート試験	10
(4) フレッシュモルタル中の気泡径分布の測定	11
(5) セメント粒子の粒度分布測定	12
第3章 練混ぜ手順の選定	14
第4章 練混ぜがモルタルの空気・性状に与える影響	16
4.1 2次練り時間が気泡径分布と空気量に及ぼす影響	16
4.2 1次練り時間が気泡径分布と空気量に及ぼす影響	18
4.3 1次練り時間がモルタルの性状に与える影響	20
第5章 モルタルの粘度が微細気泡度、空気量の主要因であることの検証	22
第6章 最適な練混ぜ手順の提案	25
第7章 結論	27
参考文献	28
付録 A	29
謝辞	31

図・表目次

図-1.1	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.....	1
図-1.2	開発中の自己充填コンクリートの位置づけ.....	2
図-1.3	模擬粗骨材（ガラスビーズ）によるロート流下速度低下率を指標としたフレッシュモルタルの固体粒子間摩擦の定量化方法.....	3
図-1.4	フレッシュモルタル中の気泡径 450 μ m 以下（左）または 450 μ m 以上（右）の空気量と模擬粗骨材添加によるロート流下速度低下率の関係.....	3
図-1.5	フレッシュモルタル中の気泡径 500 μ m 未満の空気量とせん断強度の関係.....	4
図-1.6	微細気泡によるフレッシュコンクリートの変形に際しての固体粒子間緩和効	4
図-1.7	VMA の有無による練り上がり 10 分後の気泡径分布の違い.....	5
図-1.8	練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量.....	5
図-1.9	本論文の構成.....	6
表-2.1	使用材料.....	7
表-2.2	気泡潤滑型自己充填コンクリート用モルタルの基本配合(空気を除いたもの)..	7
図-2.1	モルタルフロー試験.....	9
図-2.2	モルタル用ロート試験.....	10
図-2.3	自動気泡解析装置(Air Void Analyzer : AVA).....	11
図-2.4	レーザー回折式粒度分布測定装置の測定原理.....	12
図-2.5	試料作成手順.....	13
図-2.6	アセトンと混合中の試料.....	13
図-3.1	練混ぜ手順.....	14
表-3.1	混和剤添加量と空気量（質量法）.....	15
図-3.2	各気泡径の比率.....	15
図-4.1	練り混ぜ手順（1 次練り時間は全て 60 秒）.....	16
表-4.1	混和剤添加量と空気量（質量法）（1 次練り時間は全て 60 秒）.....	16
図-4.2	2 次練り時間の違いにより生じる練り混ぜ直後の気泡径分布の違い（1 次練り時間は全て 60 秒）.....	17
図-4.3	各気泡径の比率（1 次練り時間は全て 60 秒）.....	17
図-4.4	練り混ぜ手順（2 次練り時間は全て 60 秒）.....	18
表-4.2	混和剤添加量と空気量（質量法）（2 次練り時間は全て 60 秒）.....	18
図-4.5	1 次練り時間の違いにより生じる練り混ぜ直後の気泡径分布の違い（2 次練り時間は全て 60 秒）.....	19
図-4.6	各気泡径の比率（2 次練り時間は全て 60 秒）.....	19
図-4.7	1 次練り時間とセメント粒子平均径の関係（2 次練り時間は全て 60 秒）...20	20

図-4.8	1次練り時間の違いによる空気量と平均粒子径の関係（2次練り時間は全て60秒）	21
図-5.1	1次練り時間と相対ロート速度比の関係（2次練り時間は全て60秒）	22
表-5.1	混和剤添加量とロート流下時間、空気量(質量法)	23
図-5.2	1次練り時間の違いによるモルタルの粘度の違いを水セメント比の調整により生じさせて再現した気泡径分布の違い（練上がり10分後）	23
図-5.3	1次練り時間の違いによるモルタルの粘度の違いを水セメント比の調整により生じさせて再現した気泡径分布の違い（練上がり2時間後）	24
図-6.1	練混ぜ手順	25
表-6.1	混和剤添加量と空気量（質量法）（2次練り時間は全て180秒）	25
図-6.2	練混ぜ直後の各気泡径の比率と空気量（2次練り時間は全て180秒）	26
表-6.2	練り混ぜ直後と2時間後の空気量と空気減少量（質量法）（2次練り時間は全て180秒）	26
図-6.3	練混ぜ直後から2時間後の各気泡径の空気変化量（2次練り時間は全て180秒）	26
表-A.1	各練り混ぜ手順のデータ	29
図-A.1	2次練り時間の違いによるフロー減少量と空気量減少率の関係	30
図-A.2	1次練り時間の違いによるフロー減少量と空気量減少率の関係	30

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景

主要な建設材料のひとつであるコンクリートは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施工過程における締固め作業等、人的要因に大きく影響を受ける。この課題を解決するため、施工時に振動締固め作業を必要としない自己充填コンクリート(Self-Compacting Concrete : SCC)が1988年に開発された。しかしながら、30年以上が経過しても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材料分離抑制のために骨材量を小さくし、セメント量を増やして粘性を高め、間隙通過性能を高めるとともに、高性能 AE 減水剤を添加し、セメントを分散させて軟度高めることにより自己充填性を得ている。そのため、粉体(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、高価格なコンクリートとなっている(図-1.1)。

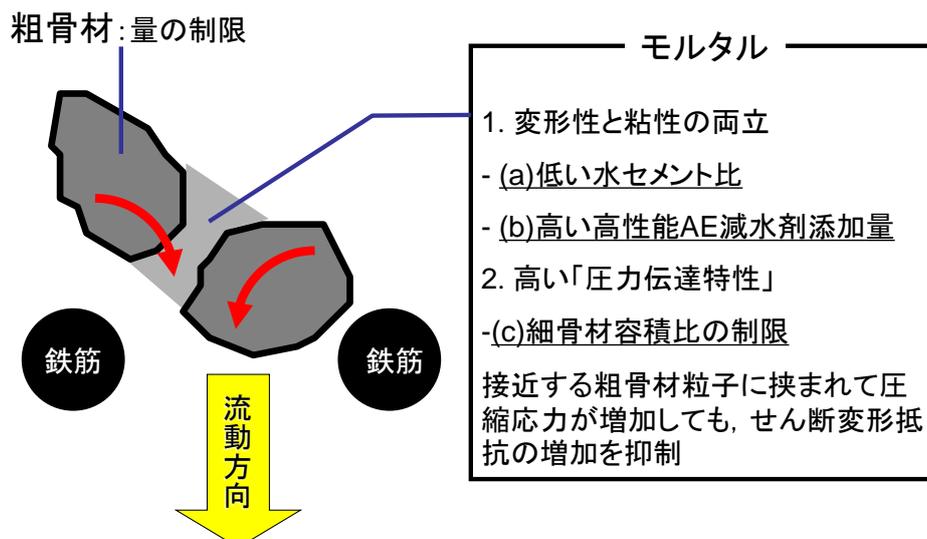


図-1.1 フレッシュコンクリートに間隙通過性能を付与する従来の技術

この課題を解決し、自己充填コンクリートを一般的に使用されるコンクリートとするには、自己充填性能を維持しつつ、価格を抑えることが有効な手段である。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微細な気泡に置き換えることで、自己充填性を維持しつつ、単位セメント量を削減した気泡潤滑型自己充填コンクリート(air-SCC)を開発し、実用化に向けて技術開発を行ってきた(図-1.2)。このコンクリートは、微細な気泡がフレッシュコンクリート中の個体粒子間摩擦を緩和し、骨材量を増加させ、単位セメント量を削減して普通コンクリート並みの単価にするものである。しかしながら、現

行の技術では、自己充填性能に有効でない径の大きな気泡が連行されてしまうことや、必要以上の空気量になってしまうことなどの問題が残った。

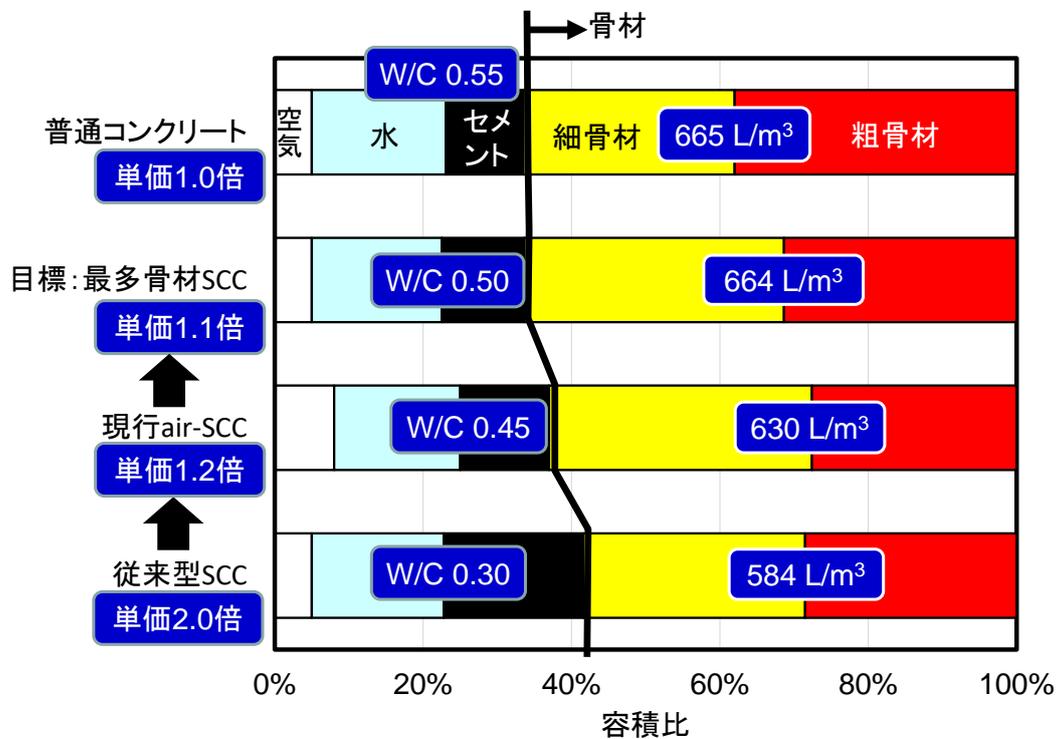


図-1.2 開発中の自己充填コンクリートの位置づけ

1.2 既往研究

(1) 自己充填性向上に有効な気泡径

大内らは、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により、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間接的に定量化する方法を開発した。(図-1.3)

Puthipasd らの研究¹⁾では、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 μ 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(図-1.4)。

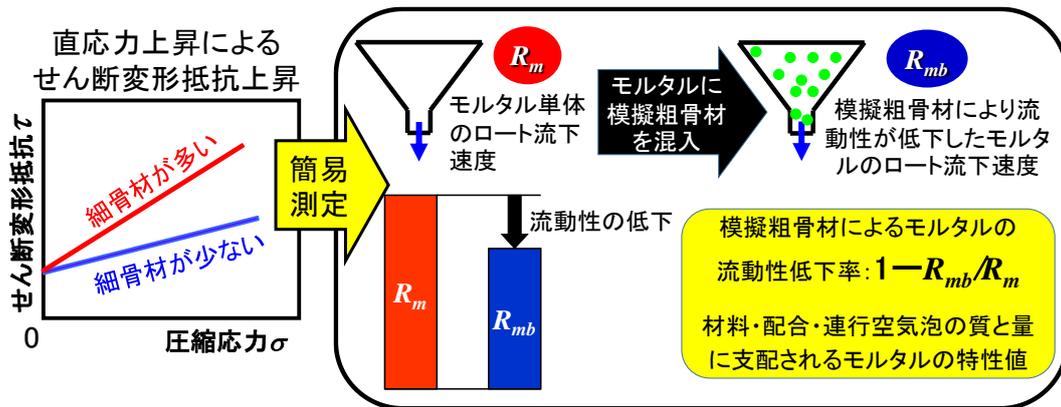


図-1.3 模擬粗骨材（ガラスビーズ）によるロート流下速度低下率を指標としたフレッシュモルタルの固体粒子間摩擦の定量化方法

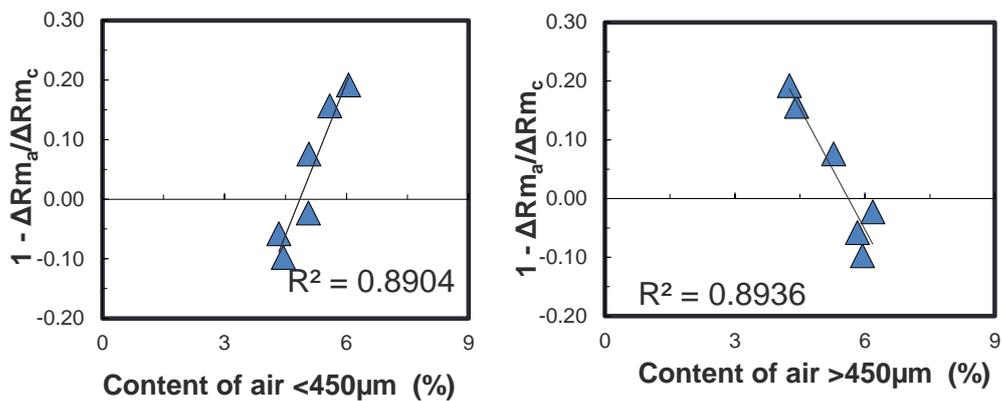


図-1.4 フレッシュモルタル中の気泡径 450 μ m 以下（左）または 450 μ m 以上（右）の空気量と模擬粗骨材添加によるロート流下速度低下率の関係

大西・大内の研究²⁾では、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直接求めることで微細気泡によるベアリング効果の直接検証を行った。フレッシュコンクリートの鉄筋間隙通過の際にモルタル相に生じる圧縮応力(直応力)として推定した 0.20 MPa 下での気泡径 500 μm 以下の空気量が大きくなるほど、せん断変形抵抗性の指標であるせん断強度との間に高い相関が得られた(図-1.2)。微細気泡によるベアリング効果を検証したといえる(図-1.3)。

以上の既往研究から、500μm 以下の微細気泡をフレッシュコンクリート中に連行することが自己充填性向上に有効であることを示したと言える。

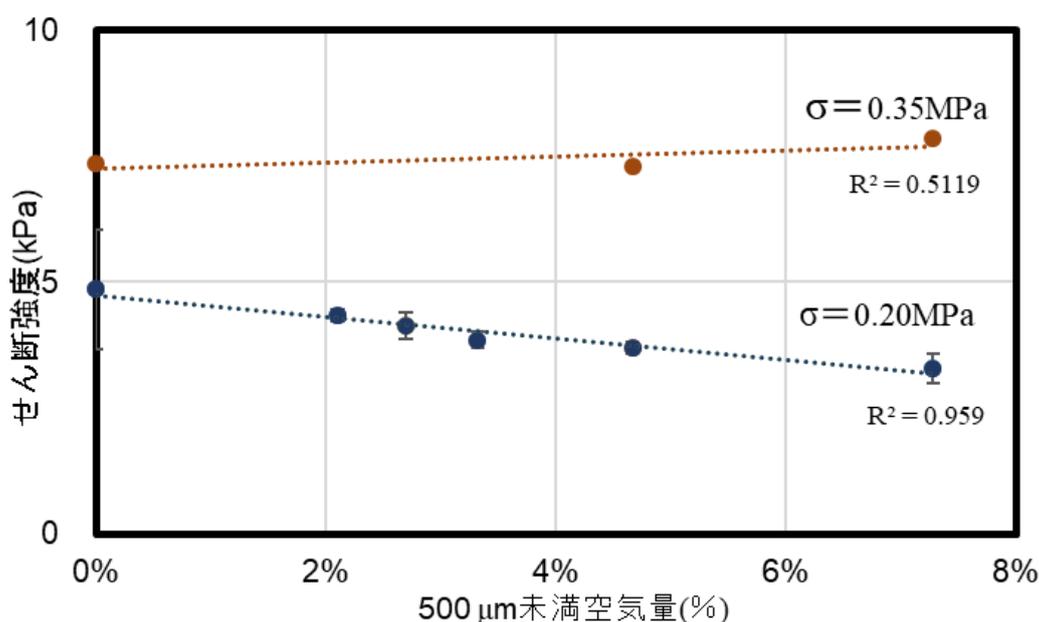


図-1.5 フレッシュモルタル中の気泡径 500μm 未満の空気量とせん断強度の関係

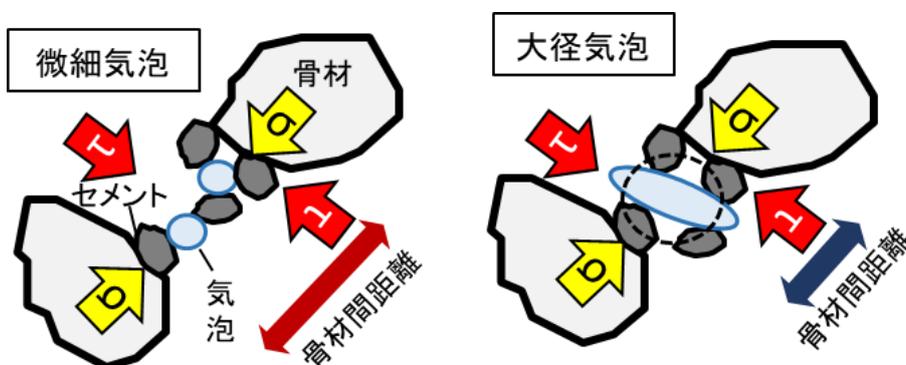


図-1.6 微細気泡によるフレッシュコンクリートの変形に際しての固体粒子間緩和効

(2) 増粘剤添加による微細気泡の連行と経時安定性向上

北中・大内らの研究³⁾では、低分子量のセルロースエーテル系増粘剤（以下、VMA と称する）を 200g/m^3 （コンクリート単位体積当たりに換算した値）添加したモルタルを無添加のモルタルと比較すると、練り上がりの空気量が同等であっても気泡径分布が異なっていた。VMA を添加したモルタルは小径気泡が多く、大径気泡が少なくなった(図-1.2)。また、VMA を添加したモルタルでは練り上がりから 1 時間後までの空気減少量が小さく、安定して微細な気泡を維持できることが分かった(図-1.3)。増粘剤の添加により、安定した微細気泡の連行が可能になったといえる。

本研究では増粘剤を添加したモルタルに、より多くの微細気泡を連行できる練混ぜ手順の確立を行う。

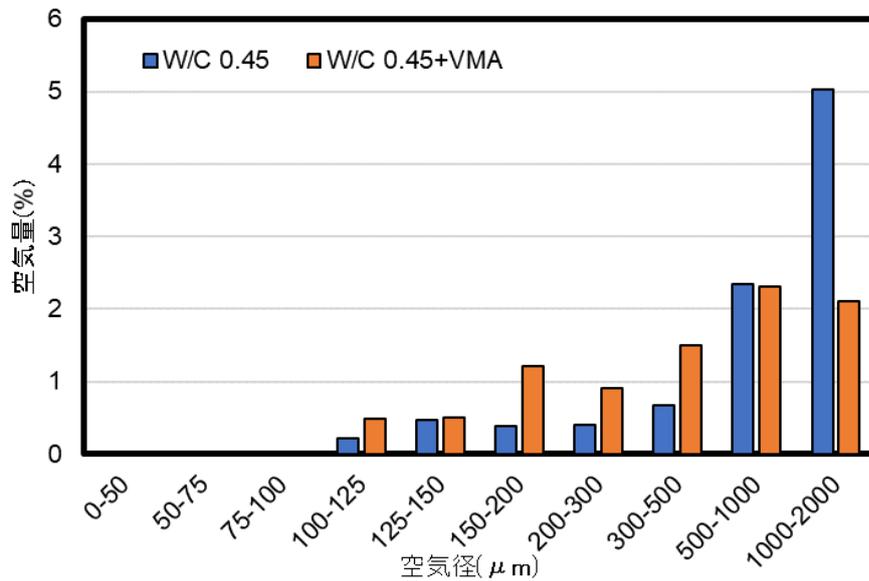


図-1.7 VMA の有無による練り上がり 10 分後の気泡径分布の違い

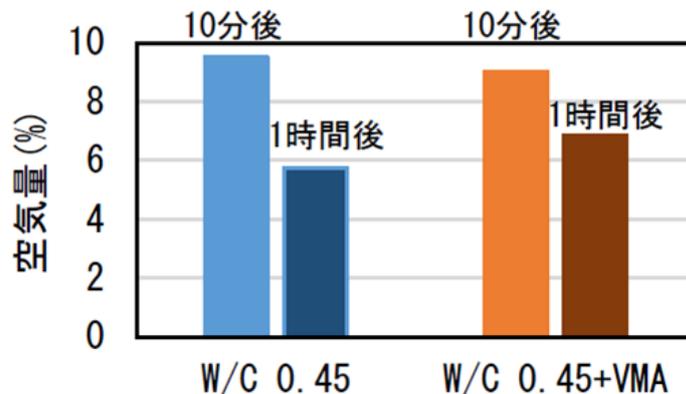


図-1.8 練り上がり 10 分後と 1 時間後の空気量

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、微細気泡の連行と経時安定性向上に有効であることが分かっている増粘剤を添加し、微細気泡を連行する練混ぜ手順を確立することである。これまで練混ぜ手順のみに着目した研究は行われていない。練混ぜ手順の違いがモルタルの連行気泡に与える影響を明らかにし、練混ぜ手順の工夫のみによって微細気泡を連行する方法を確立する。

1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と目的、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について述べた。

本研究の構成を示す(図-1.4)。

第2章では、本研究の使用材料・配合および試験方法について述べる。

第3章では、本研究で検討する練混ぜ手順を決定する。

第4章と第5章では、第3章で決定した分割練りを構成する1次練りと2次練りのそれぞれの時間がモルタル中の気泡径分布と空気量及び性状にどのような影響を与えているのかを調べる。

第6章では、以上の成果を用いて微細気泡を連行する練混ぜ手順を提案する。

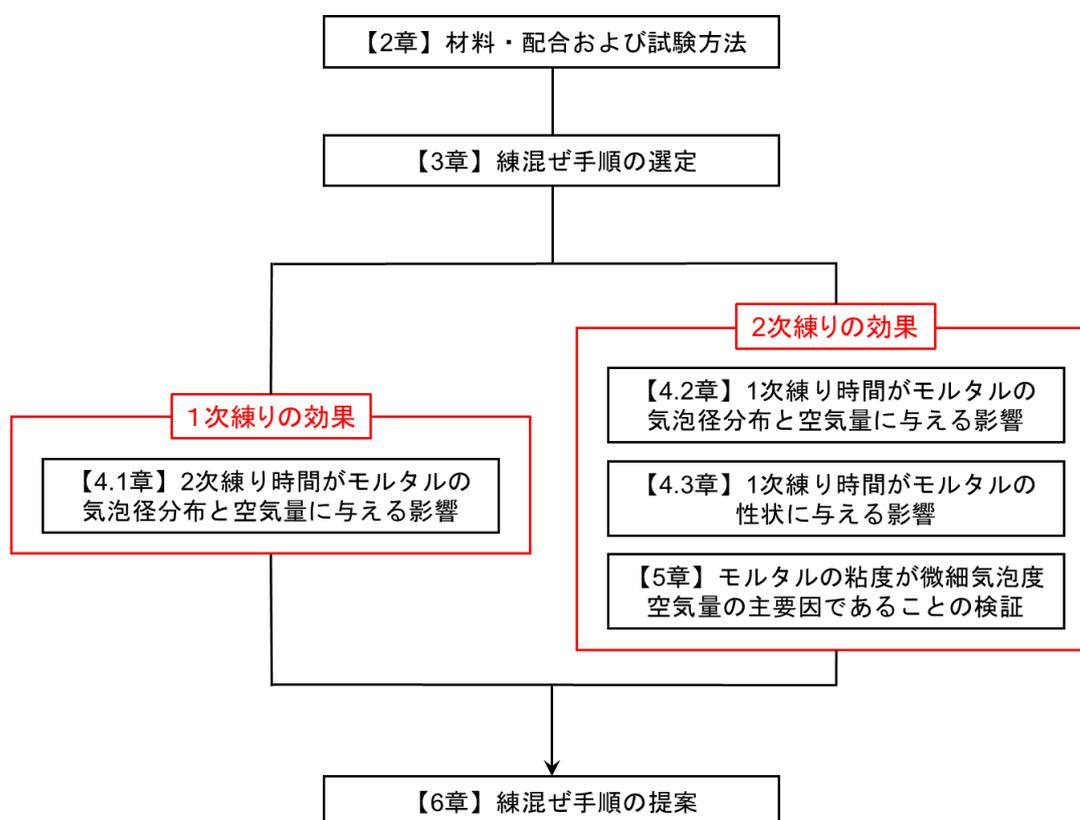


図-1.9 本論文の構成

第2章 材料・配合および試験方法

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)はポリカルボン酸エーテル系化合物が主成分のものを使用した。減水剤の添加量は，練上がり 10 分後のフロー値が 250mm±10mm となるように調整した。増粘剤は水溶性セルロースエーテル系のものを使用し，粗骨材容積比 0.3 のコンクリート中に 200g/m³ となるように添加した。空気連行剤は変形ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。添加量はセメントの質量に対して 0.005%を基本として添加した。高性能 AE 減水剤，増粘剤，空気連行剤は，現時点で最も使用実績の多いものを使用した。

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 密度 3.15g/m ³	C
細骨材	石灰砕砂 密度 2.68g/m ³ ，粗粒率 2.63 粒径判定実積率 55.3%	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	VME

2.2 配合

空気を除いたモルタル中の細骨材容積比(s/m)は 55%，水セメント比(W/C)は基本 45%に固定し，後述のモルタルフロー試験に応じて高性能 AE 減水剤(SP)添加量を変えて実験を行った。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)。

表-2.2 気泡潤滑型自己充填コンクリート用モルタルの基本配合(空気を除いたもの)

単位量(kg/m ³)		
W	C	S
264	586	1474

※各ケースにおける減水剤をはじめとする混和剤添加量は各章に記載

2.3 練混ぜ方法

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ーを用いた（写真-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 バッチあたりの練混ぜ量は 1.8L（空気を除く）とした。

練混ぜ手順は以降の各章各節に示す。



写真-2.1 使用したモルタルミキサー

2.4 フレッシュモルタルの試験方法

(1) モルタルフロー試験

モルタルの軟度の測定は、JIS R 5201 に基づきモルタルフロー試験により無振動で行った(図-2.1)。この試験結果はフレッシュコンクリートのスランプフロー値と高い相関がある。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。

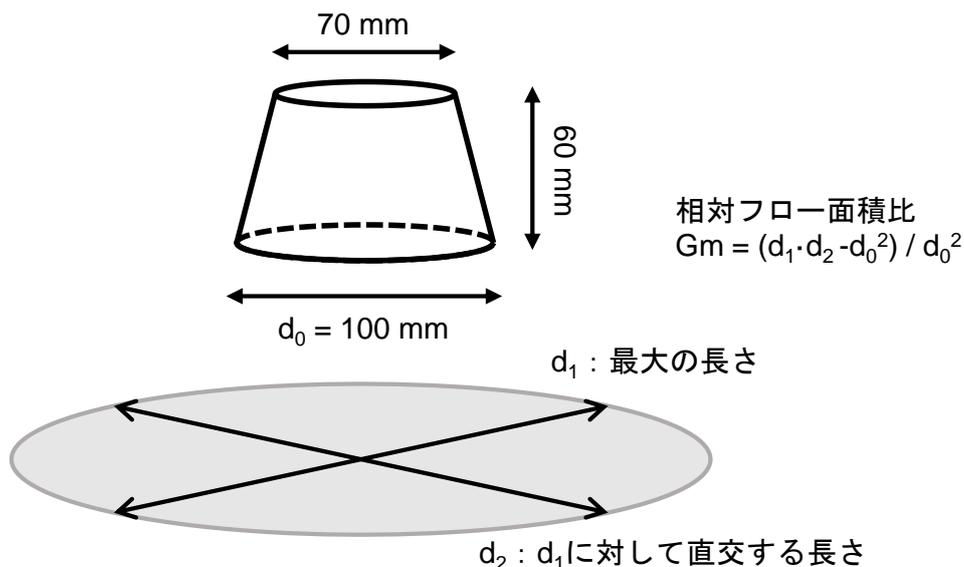


図-2.1 モルタルフロー試験

(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)」 に準じて測定した。

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

ただし、

T : 空気を全く含まない場合のコンクリートまたはモルタルの単位容積質量(kg/m³)

M : コンクリートの単位容積質量(kg/m³)

(3) 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。モルタルの粘性の指標として、モルタルロート試験の流下時間から算出される相対ロート速度比 R_m が用いられる (図-2.2)。

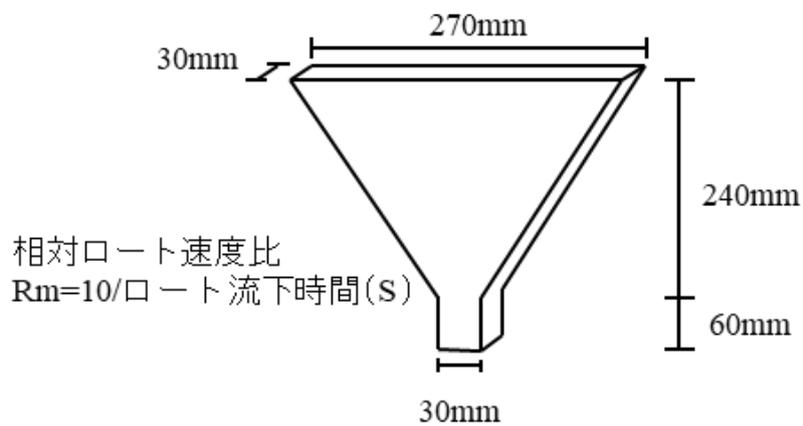


図-2.2 モルタル用ロート試験

(4) 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に連行された気泡の気泡径分布の測定のために、自動空気泡解析装置(Air Void Analyzer : AVA) (図-2.3) を使用した。この測定装置は高粘度液(グリセリン)に投入したモルタル試料を攪拌して連行空気泡を浮上させ、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。気泡は液体中では径の大きさによって浮上速度が異なる。グリセリンは水よりも粘度が高いため、その速度差が顕著になる。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気泡の径を測定することができる試験機である。試験に必要なモルタル試料は 20 mL である。

各章に AVA により測定した気泡径分布を示した。



図-2.3 自動空気泡解析装置(Air Void Analyzer : AVA)

(5) セメント粒子の粒度分布測定

練混ぜ手順によるモルタル中のセメント粒子の分散や凝集状態の違いを調べるために、レーザー回折式粒度分布測定装置（写真-2.2）を使用した。測定方法には乾式測定と湿式測定の種類があるが、練上がり直後のセメント粒子を測定するため、湿式測定を採用した。粒子にレーザービームを照射することで、その粒子から前後・上下・左右の様々な方向に「回折・散乱光」と呼ばれる光が発せられる。その光は粒子の大きさに従い様々な形に変化するため、これを解析することで粒度の測定が可能となる（図-2.4）。媒液はセメントの水和反応の進行を防ぐために無水エタノールを使用した。

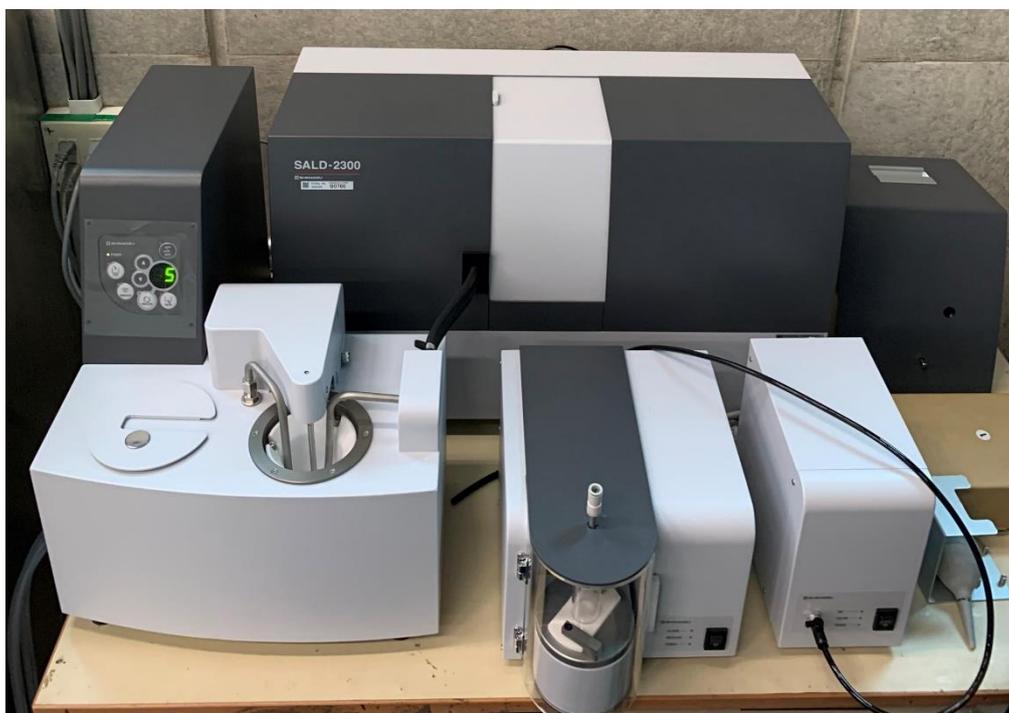


写真-2.2 レーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製 SALD-2300）

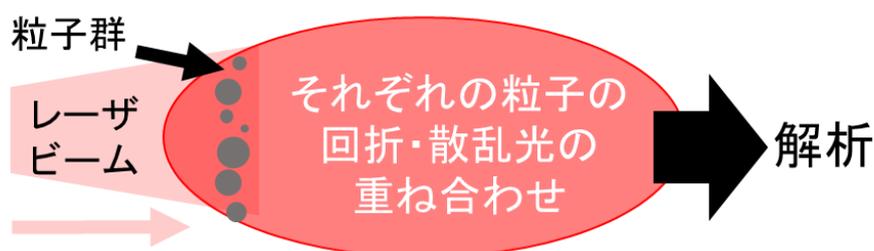


図-2.4 レーザー回折式粒度分布測定装置の測定原理

セメント粒子の粒度分布測定を行うための試料作成方法を示す（図-2.5）。試料は練り上がり直後のフレッシュモルタルとした。径が 150 μm のふるいを使用して、フレッシュモルタルから細骨材を取り除き、セメント粒子のみの試料を抽出した。抽出した試料から約 10mL をスプーンで容量 100mL のねじ口角瓶に投入し、100mL の線までアセトンを加えた。手で十分に振とうして水和反応を停止させた（図-2.6）。試験開始時にもう一度振とうし、ねじ口角瓶の中央からスポイトで試料を吸引し、試験装置の分散槽に投入した。その後、試験装置により粒度分布を測定した。

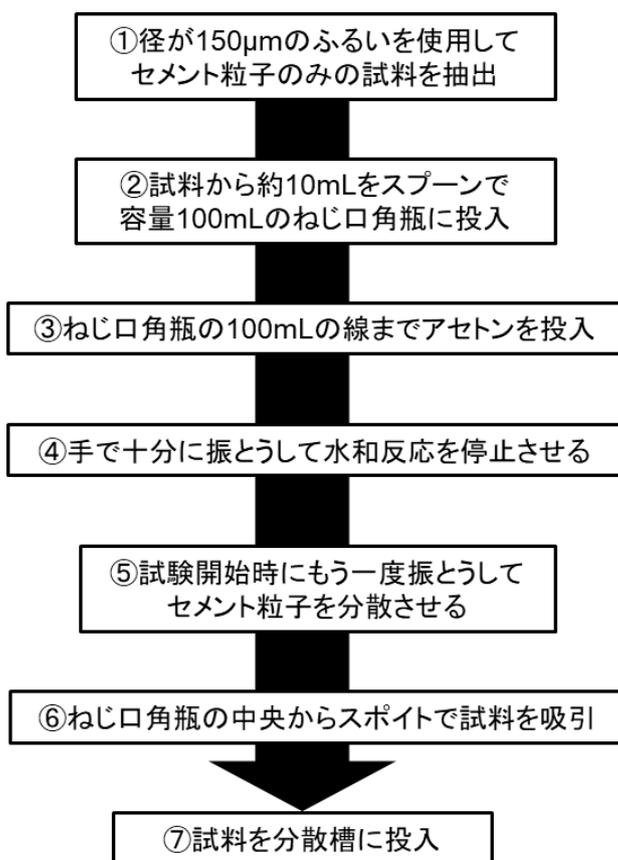


図-2.5 試料作成手順



図-2.6 アセトンと混合中の試料

第3章 練混ぜ手順の選定

練混ぜ手順は、水を一度に投入する一括練りと、二度に分けて投入する分割練りに大別される。分割練りは、材料分離を抑制し、コンクリートのブリーディングを低減する⁴⁾など、コンクリートの硬化後の品質を改良するために考案された練混ぜ手順である。水量が少ない一次練りによる強力な練混ぜ負荷がセメント粒子の分散度を高めることができる。それにより、練上がり直後のフレッシュ性状も影響されることが分かっている。本研究で構築する練混ぜ手順を構築するために、一括練りと分割練りとでモルタルに連行される気泡の質に違いがあるのかを調べた。空気連行剤を添加してからの練混ぜ時間を統一したものどうしで比較した(図-3.1)。分割練りに際しては、水を均等に2分割してそれぞれを投入した。増粘剤は練混ぜ前にセメントに混ぜておき、細骨材を含めて空練りを30秒行った。全てについて空気連行剤をセメントの質量に対して0.005%添加した(表-3.1)。

その結果、分割練りをしたものの方が一括練りのものよりも空気量が小さくなると共に、500 μm 以下の気泡の比率が高くなった(図-3.2)。分割練りの方が微細気泡の割合が高く、浮力による浮上も抑制されることで摩擦緩和に有利な質の良い空気が連行されることが分かった。以降、本研究では、分割練りを採用することとした。

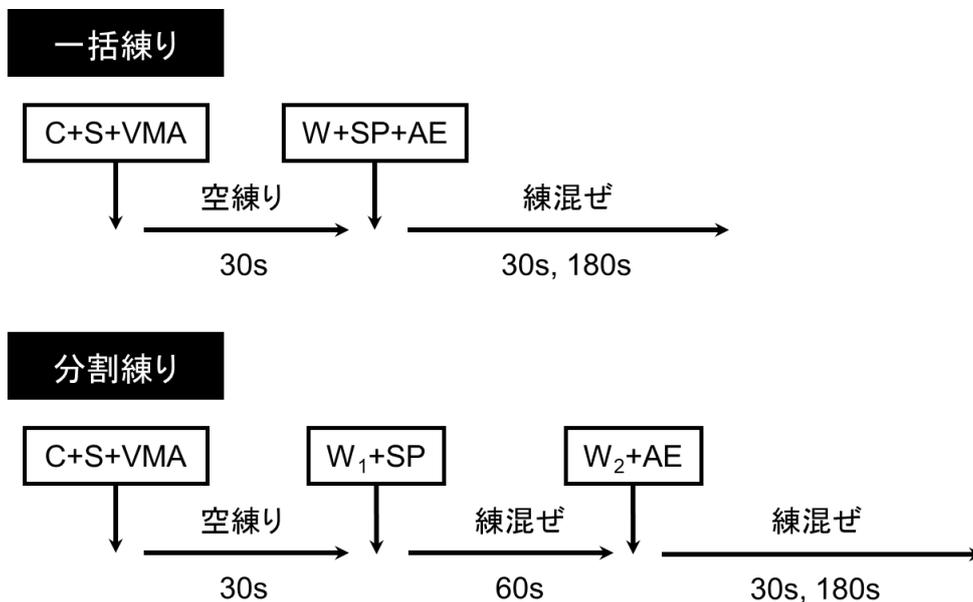


図-3.1 練混ぜ手順

表-3.1 混和剤添加量と空気量（質量法）

	SP(C×%)	AE(C×%)	VMA(g/m ³)	空気量(%)
一括練 (30+30)	2.2	0.005	200	9.05
分割練 (30+60+30)	1.8	0.005	200	6.84
一括練 (30+180)	1.3	0.005	200	14.7
分割練 (30+60+180)	2.0	0.005	200	11.61

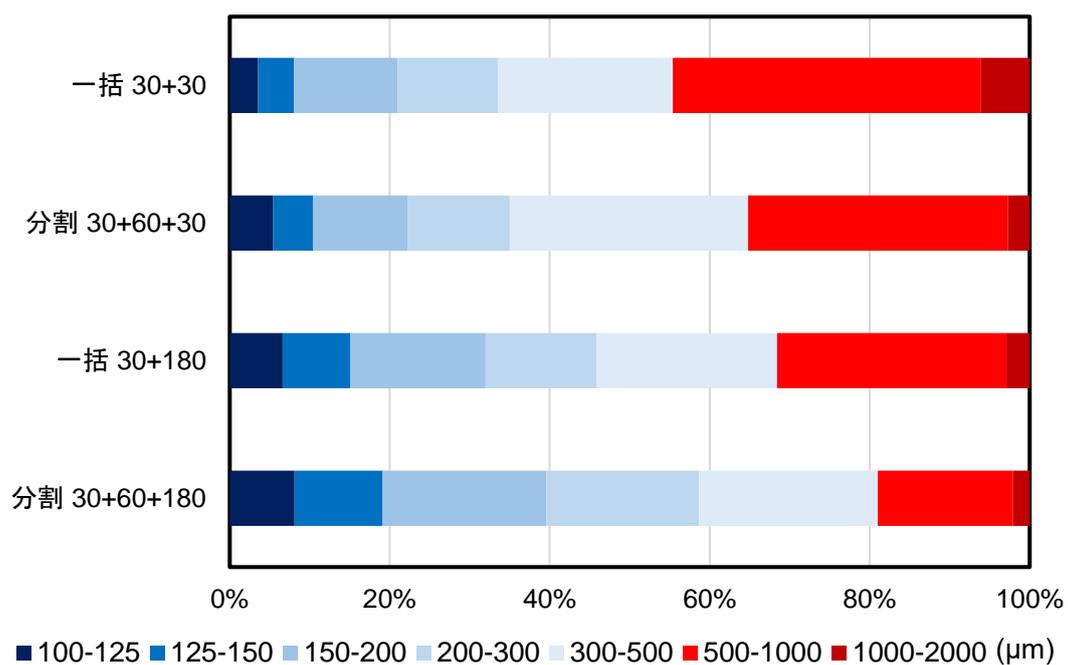


図-3.2 各気泡径の比率

第4章 練混ぜがモルタルの空気・性状に与える影響

微細気泡をモルタル中に多く連行する練混ぜ手順を探るために、分割練りを構成する1次練りと2次練りのそれぞれの時間がモルタル中の気泡径分布とモルタルの性状にどのような影響を与えているのかを調べた。

4.1 2次練り時間が気泡径分布と空気量に及ぼす影響

2次練りの時間がモルタル中に連行される気泡にどのような影響があるのかを調べた。空練りと1次練りの時間はそれぞれ30秒および60秒に統一し、2次練りの時間を30秒、60秒、120秒、または180秒と変えて分割練りを行った(図-4.1)、(表-4.1)。それぞれについて練上がり10分後に気泡径分布を測定し比較した(図-4.2, 3)。

その結果、2次練り時間を長くすると微細気泡の比率が高くなることが分かった。空気量は大きくなった。2次練りには、連行気泡を分断して細かくする効果と、空気を取り込み空気量を大きくする2つの効果があるものと考察した。

一方、増粘剤を添加しないフレッシュモルタルについての Rath Sovann Sathya⁵⁾の研究⁵⁾では、練混ぜ時間の増加に対しては、径が0.8mm未満の比較的微細な気泡が先に増加し、空気量がある上限に達すると、径の大きさが0.8mm以上の大きな気泡が増加し始めることを明らかにした。今回、2次練り時間の増加により微細気泡比率と空気量の両方の単調増加が可能になったのは、増粘剤の添加によるものであると考察した。

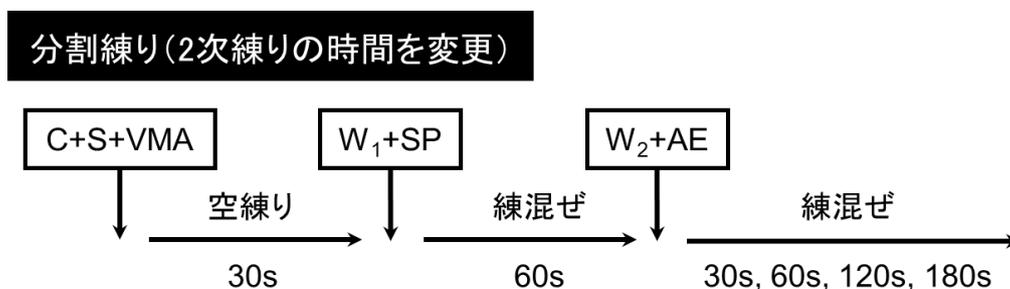


図-4.1 練り混ぜ手順 (1次練り時間は全て60秒)

表-4.1 混和剤添加量と空気量 (質量法) (1次練り時間は全て60秒)

2次練り時間	SP(C×%)	AE(C×%)	VMA(g/m ³)	空気量(%)
30秒	1.8	0.005	200	6.84
60秒	1.8	0.005	200	8.03
120秒	1.9	0.005	200	9.87
180秒	2.0	0.005	200	11.61

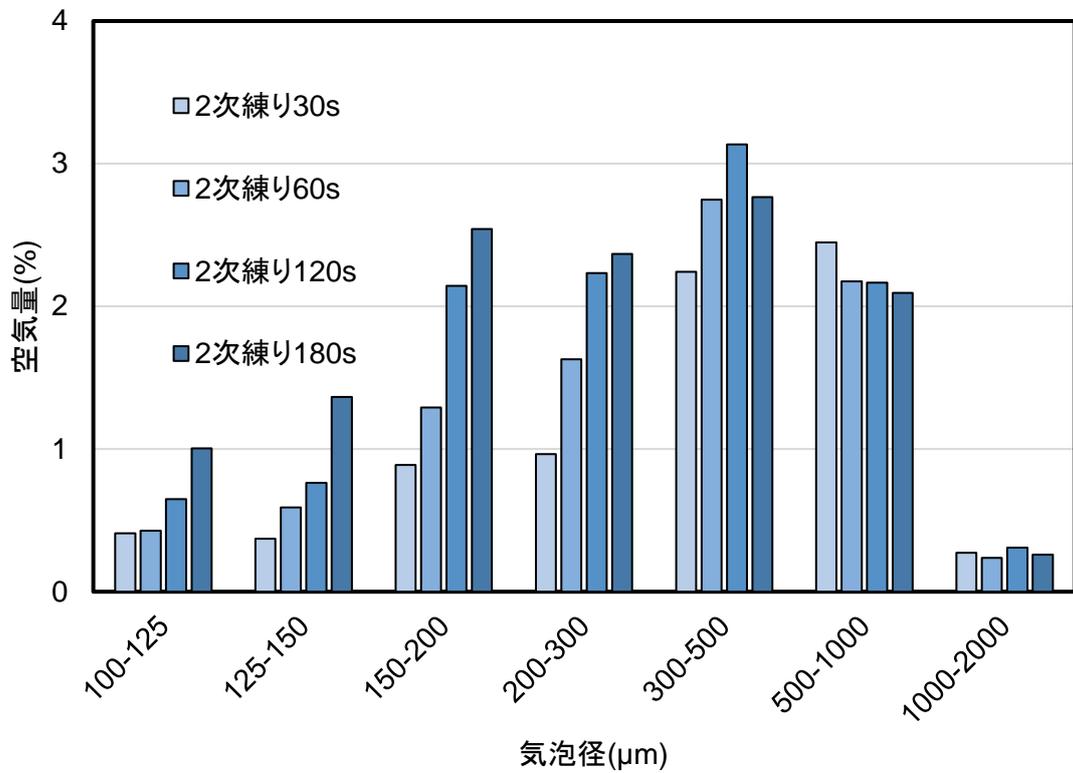


図-4.2 2次練り時間の違いにより生じる練り混ぜ直後の気泡径分布の違い
(1次練り時間は全て60秒)

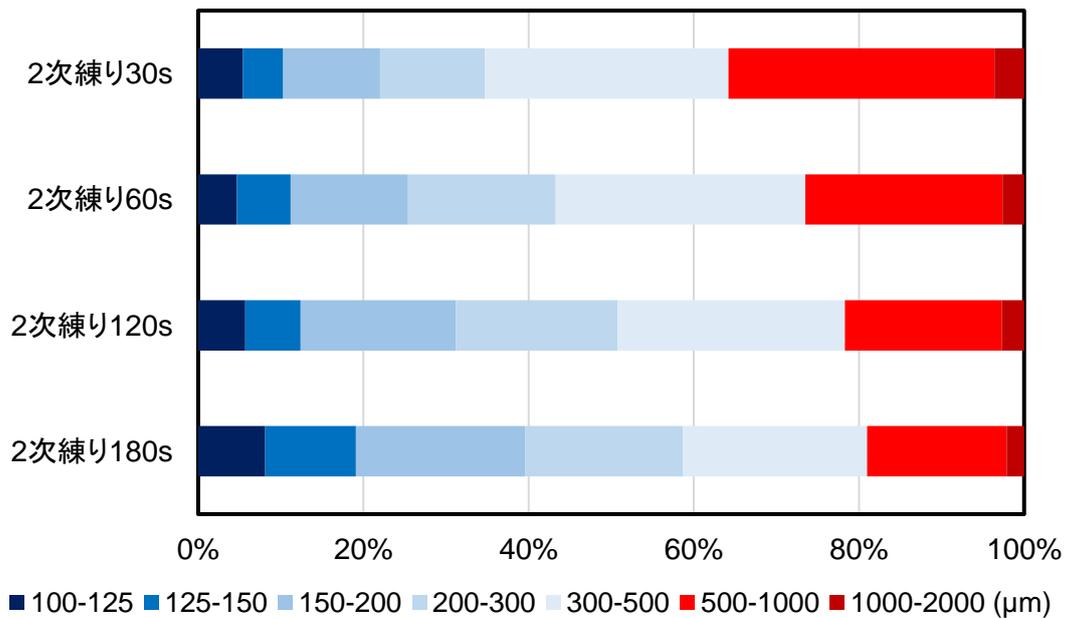


図-4.3 各気泡径の比率 (1次練り時間は全て60秒)

4.2 1次練り時間が気泡径分布と空気量に及ぼす影響

1次練りの時間がモルタル中に連行される気泡やモルタルの性状に及ぼす影響を調べた。空練りと2次練りの時間はそれぞれ30秒および60秒に固定し、1次練りの時間を30秒、60秒、120秒、または180秒と変えて分割練りを行った(図-4.4)、(表-4.2)。それぞれの気泡径分布を測定して比較した(図-4.5, 6)。

その結果、1次練り時間が長くなるにしたがって各径の空気量が小さくなっていくことが分かった。その中でも、特に径が500 μm 以下の微細な気泡の比率が低下していった。その原因として、1次練り時間が長いとセメント粒子間の分散度が高くなり、凝集粒子間に存在する拘束水が解放されることにより2次練り時のモルタルの粘度が低下し、どの大きさの径の気泡も動きやすくなる。小さい径のものは合体して大きくなるが、大きい径のものは抜けてしまう。これにより、結果として、気泡径分布が大きいほうに移動し、空気量が減少すると考察した。なお、モルタルの粘度とモルタル中の空気量・微細気泡比率についての検証は第5章で行った。

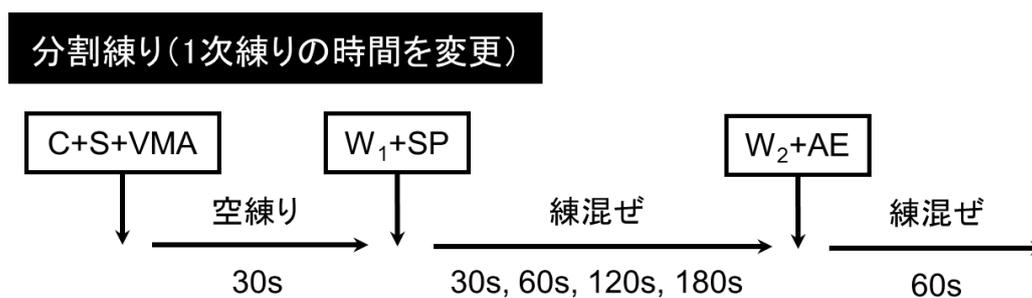


図-4.4 練り混ぜ手順 (2次練り時間は全て60秒)

表-4.2 混和剤添加量と空気量 (質量法) (2次練り時間は全て60秒)

1次練り時間	SP(C×%)	AE(C×%)	VMA(g/m ³)	空気量(%)
30秒	1.8	0.005	200	8.15
60秒	1.8	0.005	200	8.03
120秒	2.2	0.005	200	4.52
180秒	2.4	0.005	200	3.75

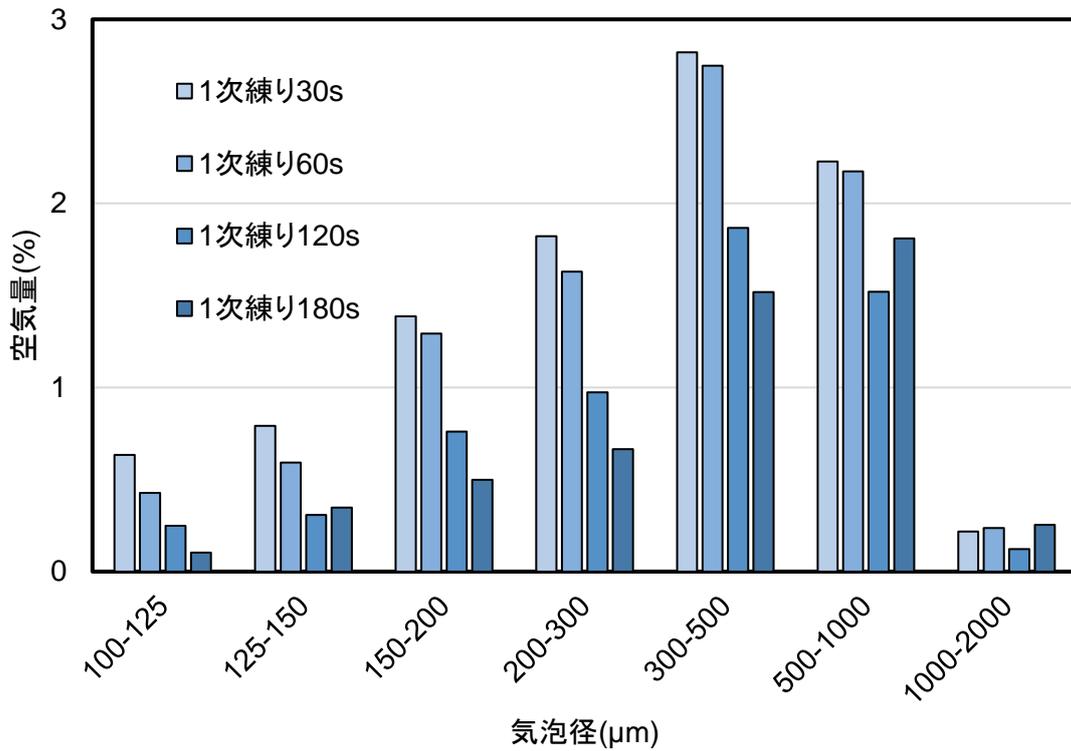


図-4.5 1次練り時間の違いにより生じる練り混ぜ直後の気泡径分布の違い
(2次練り時間は全て60秒)

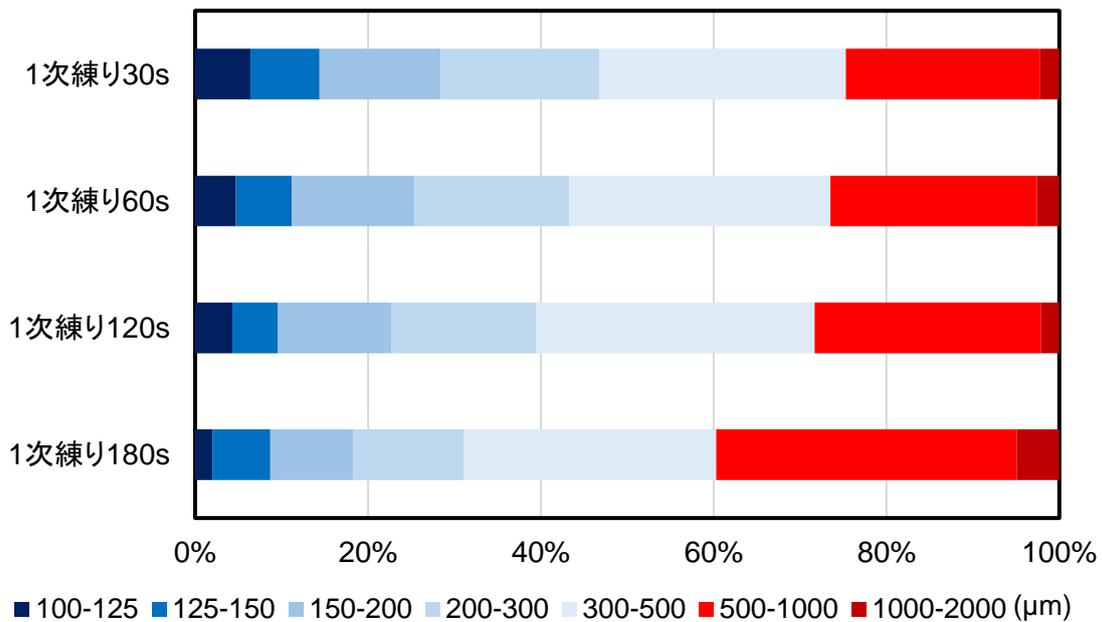


図-4.6 各気泡径の比率 (2次練り時間は全て60秒)

4.3 1次練り時間がモルタルの性状に与える影響

1次練りの時間がモルタルの性状に与える影響と、それが連行空気に及ぼす影響について調べた。1次練りの時間を30秒、60秒、120秒、または180秒とした。それぞれの練上がり時のモルタル試料の、径が150 μm のふるいを通過したものの粒度分布をレーザー回折により測定した。主にセメントの粒子粒度分布を測定していると見なした。平均径を示す(図-4.7)。

その結果、1次練り時間が長いものほど空気量が小さくなったが(図-4.8)、その理由を説明するほどに1次練り時間が長くなることによるセメント粒子の平均粒径は小さくなっておらず、空気量・微細気泡比率が低かったのはセメント粒子径とは別の原因があると推定した。

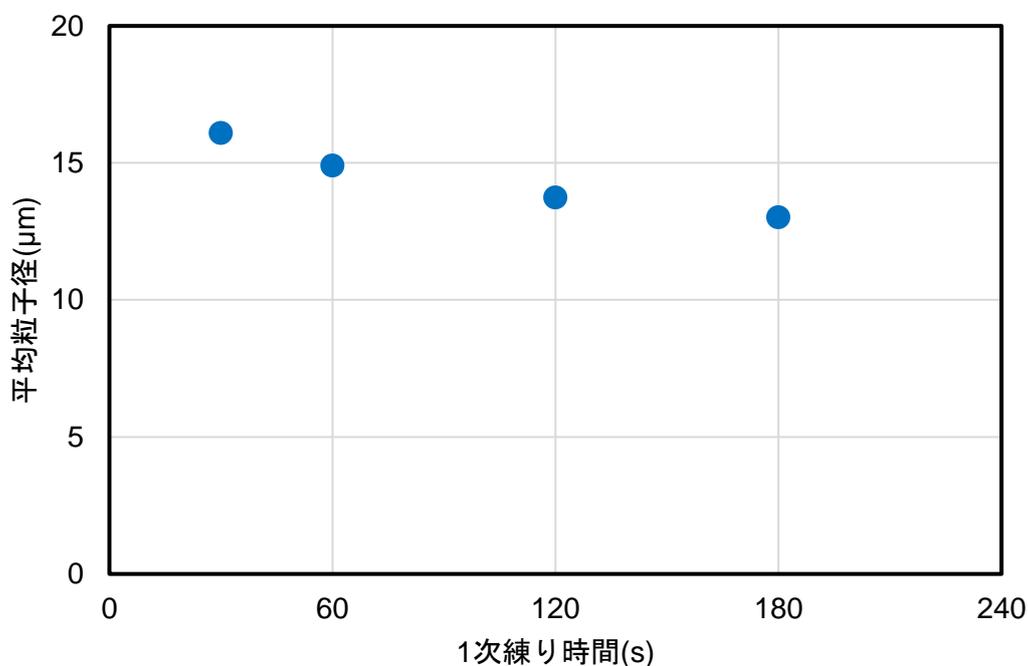


図-4.7 1次練り時間とセメント粒子平均径の関係
(2次練り時間は全て60秒)

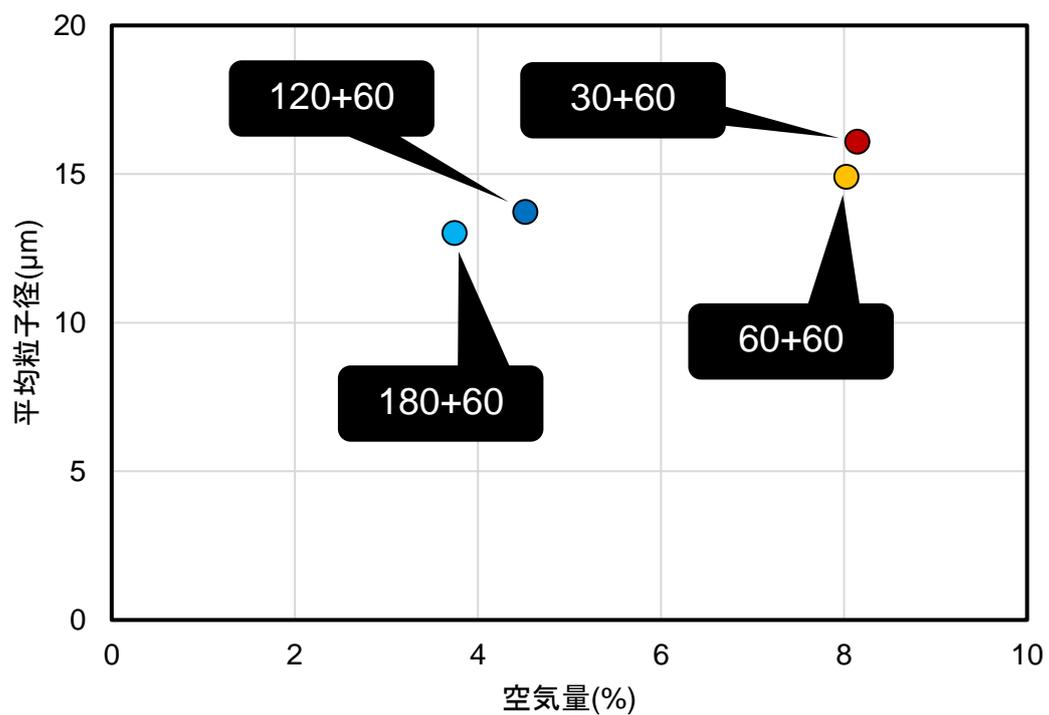


図-4.8 1次練り時間の違いによる空気量と平均粒子径の関係
(2次練り時間は全て60秒)

第5章 モルタルの粘度が微細気泡度，空気量の主要因であることの検証

1次練り時間と相対ロート速度比の関係を示す(図-5.1)。1次練り時間を長くしていくと相対ロート速度比が高くなっていることが分かる。これは，1次練り時間を長くすることでセメント粒子がより分散し，凝集していたセメント粒子間からの拘束水が解放されて自由水の量が増えることによってモルタルの粘度が低下したことによるものと考察した。このモルタルの粘度変化が微細気泡の比率や，空気量を支配する主要因であるものと仮説を立てた。第1章で紹介した北中らの研究³⁾では，モルタルの粘度が高いほど，練混ぜ直後のモルタル中の2mm以下の気泡の比表面積が大きくなっており，モルタルの粘度が微細気泡の比率に関係していることが分かっている。

これが本研究にも当てはまることを検証するため，固定していた水セメント比45%を調整することによってモルタルの粘度を変えてモルタルを練り混ぜ，連行気泡径の分布を測定する実験を行った。4.2にて1次練り時間を30秒または180秒に変えた際に得られたそれぞれのロート流下時間である5.41秒および2.95秒に合うように水セメント比を調整した(表-5.1)。練混ぜ時間は，1次練り60秒および2次練り60秒に統一した。

その結果，ロート流下時間が短いものは空気量，微細気泡の比率共に低くなった。一方，ロート流下時間が長いものは空気量，微細気泡の比率共に高くなった。気泡径分布を比較すると，水セメント比の調整によってロート流下速度を合わせたものは，練混ぜ直後および2時間後共に，水セメント比45%で1次練り時間を変えたものと同じような分布となった(図-5.2, 3)。モルタルに連行される空気量の微細気泡比率や空気量には，練混ぜ時間の調整により変化する粘度が強く影響していることが確認された。

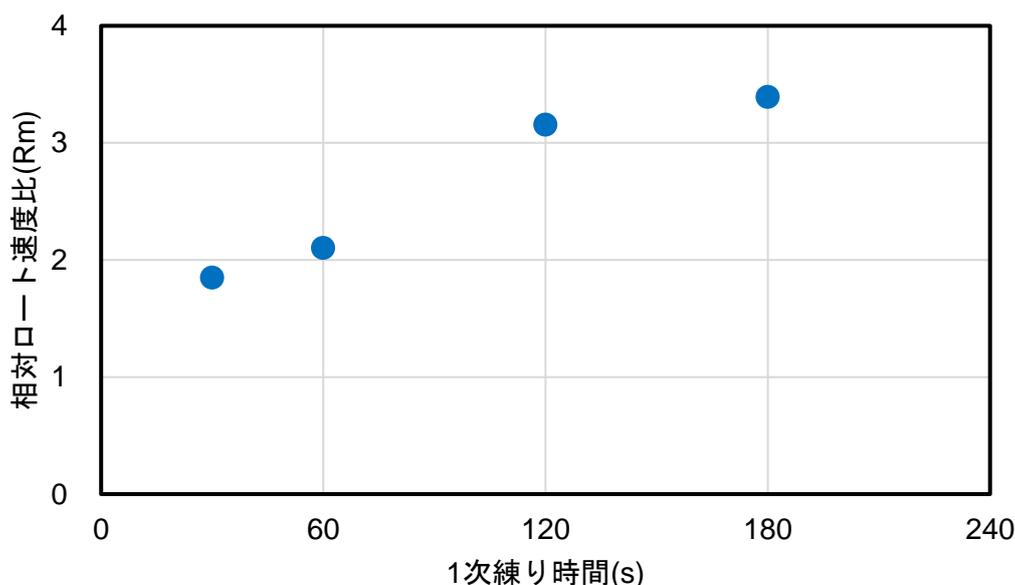


図-5.1 1次練り時間と相対ロート速度比の関係

(2次練り時間は全て60秒)

表-5.1 混和剤添加量とロータ流下時間, 空気量(質量法)

水セメント比 (%)	SP(C×%)	AE(C×%)	VMA(g/m ³)	ロータ流下時間(s)	空気量(%)
43	2.0	0.005	200	5.60	9.04
50	1.5	0.005	200	3.00	4.84

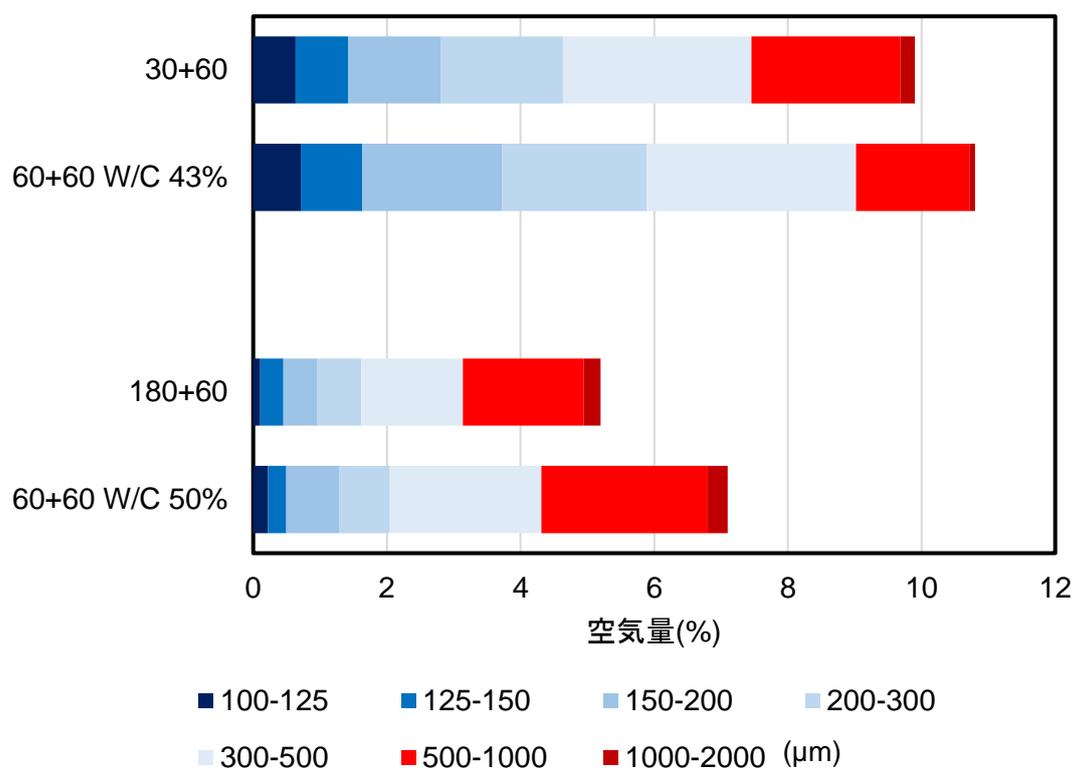


図-5.2 1次練り時間の違いによるモルタルの粘度の違いを水セメント比の調整により生じさせて再現した気泡径分布の違い(練上がり10分後)

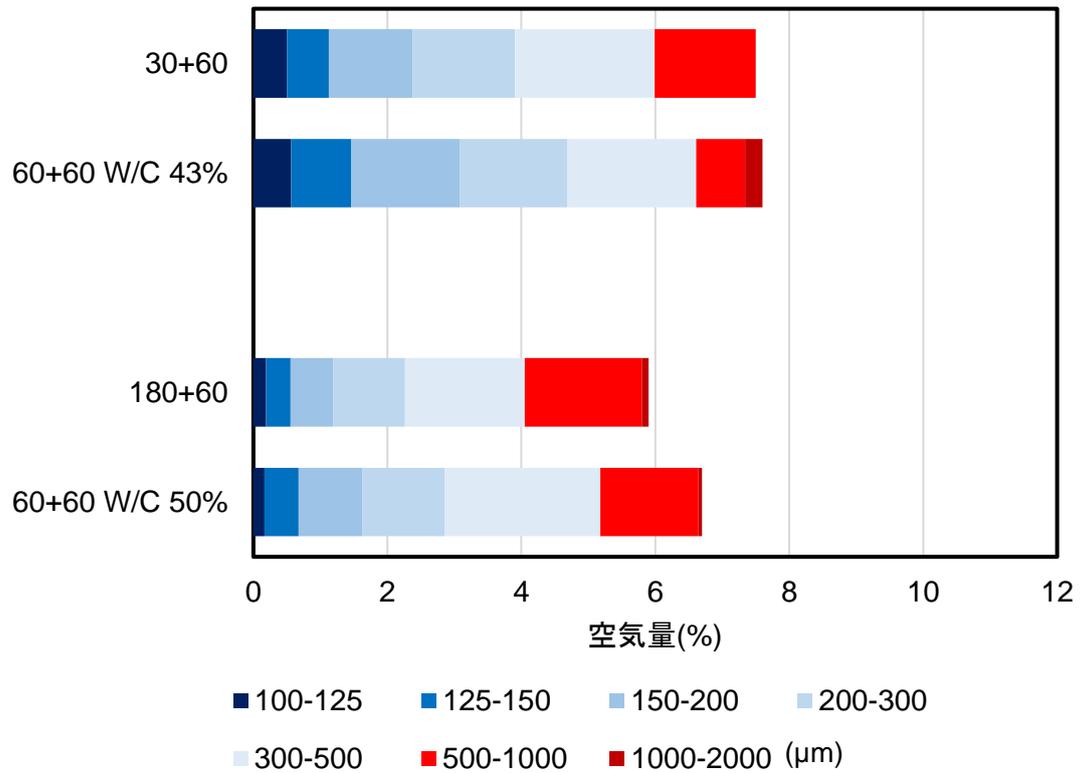


図-5.3 1次練り時間の違いによるモルタルの粘度の違いを水セメント比の調整により生じさせて再現した気泡径分布の違い（練上がり2時間後）

第6章 最適な練混ぜ手順の提案

2次練り時間を長くすると微細気泡の割合が高まるが、それに伴って空気量が大きくなってしまったことが分かった。そこで、1次練りの時間を調整することで所望の空気量を得る方法を考案した。

空練りは30秒、2次練りは微細気泡比率が最も高くなった180秒に固定し、1次練りの時間を120秒、または180秒と変えて(図-6.1)練り混ぜた。それぞれについて練り混ぜ直後(図-6.2)と2時間後に空気量(質量法)と気泡径分布を測定した。その結果、最も微細気泡の比率が高かった4.1での1次練り60秒、2次練り180秒のものと同程度の微細気泡比率で、空気量を適切な範囲内(粗骨材容積比が3割のコンクリート中に4~6%の空気量、モルタル中では約6~8%)に収めることができた(表-6.1)。

練混ぜ直後から2時間後までの空気減少量と、練混ぜ直後から2時間後の各気泡径の空気量変化を示す(表-6.2, 図 6.3)。空気減少量はどちらも0.5%以内に収まっており、500 μ m以下の気泡はほとんど変化していなかった。2時間後まで微細気泡を維持できたことを確認した。微細気泡の比率が高いことと、適切な範囲内に空気量を収められたことで気泡が安定し、合泡や抜けを防ぐことができたと言える。

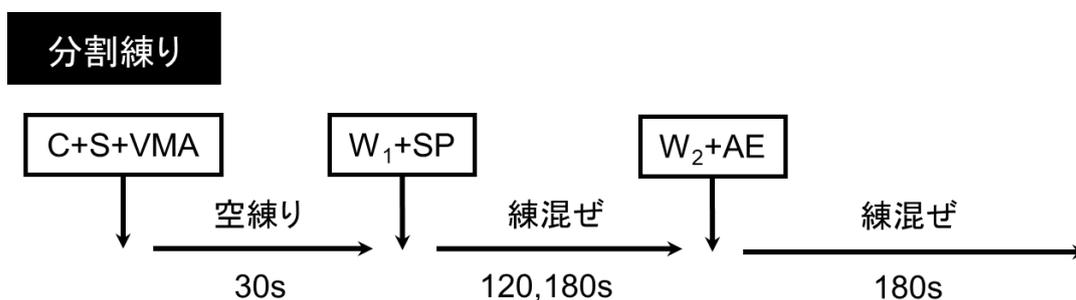


図-6.1 練混ぜ手順

表-6.1 混和剤添加量と空気量(質量法)

(2次練り時間は全て180秒)

1次練り時間	AE(C×%)	AE(C×%)	VMA(g/m ³)	空気量(%)
120秒	2.2	0.005	200	6.59
180秒	2.3	0.005	200	5.73

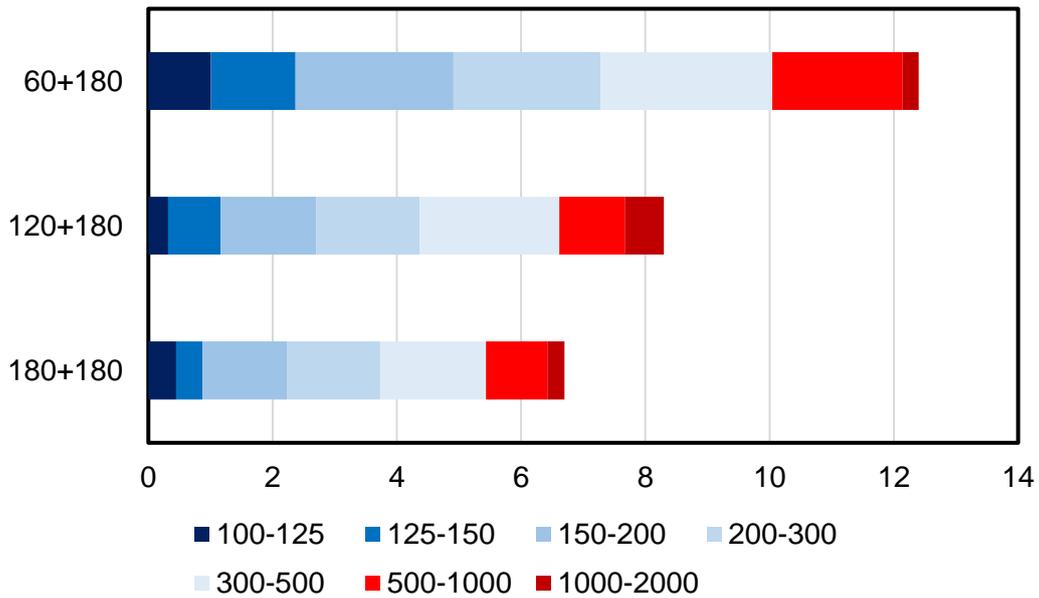


図-6.2 練混ぜ直後の各気泡径の比率と空気量
(2次練り時間は全て180秒)

表-6.2 練り混ぜ直後と2時間後の空気量と空気減少量(質量法)
(2次練り時間は全て180秒)

練混ぜ手順	10分後	2時間後	減少量
30+120+180	6.59	6.18	0.41
30+180+180	5.73	5.24	0.49

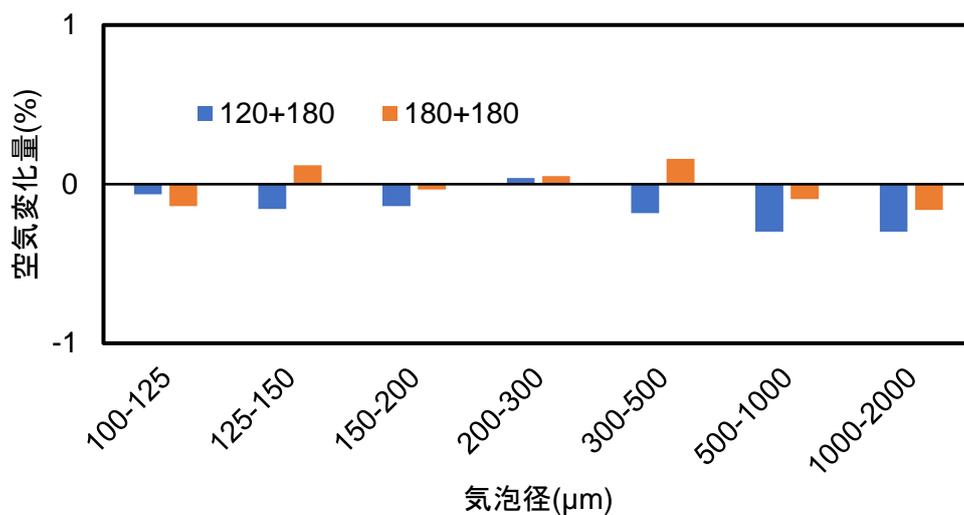


図-6.3 練混ぜ直後から2時間後の各気泡径の空気変化量
(2次練り時間は全て180秒)

第7章 結論

本研究では、増粘剤を添加した自己充填コンクリート用フレッシュモルタルを対象に、径が $500\mu\text{m}$ 以下の気泡の比率の高い空気を連行する技術の確立を目的とした。予備実験により分割練りが有効であることが確認できたため、その練混ぜ時間の調整による有効性を検証した。

本研究で明らかになったことを以下に述べる。

- 1) 2次練り時間を長くすることで微細気泡の比率が高まり空気量が増加した。
- 2) 1次練り時間を長くすることで微細気泡の比率が低下し空気量は減少した。
- 3) 1次練り時間により決まるモルタルの粘度が微細気泡の比率や空気量に影響を与えている可能性を得た。1次練り終了時の自由水の量が2次練り時の微細気泡度、空気量に関係しているものと考察した。
- 4) 2次練り時間を長くし、1次練り時間を調節することで、微細気泡量を維持しつつ目標とする空気量を得る手順を提案した。微細気泡比率を高めることと、空気量の調節を同時に満たす手順を構築したことにより、練混ぜ手順決定の合理化を図ることが可能になった。これが気泡潤滑型自己充填コンクリート製造可能工場の増加、ひいては同コンクリートの普及に寄与すると確信している。

参考文献

- 1) Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S., Attachaiyawuth, A.: Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content, *Construction and Building Materials*, Vol. 144, pp. 1-12, July, 2017.
- 2) 大西 悠, 大内 雅博: フレッシュコンクリートに連行した空気泡による自己充填性のためのベアリング効果の解明, *コンクリート工学年次論文集*, 日本コンクリート工学会, Vol. 42, No. 2, pp.1043-1048, July, 2020.
- 3) 大内 雅博, 北中 康太, Attachaiyawuth, A.: 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第 74 回学術講演会講演概要集*, V-3.9, 2019.9
- 4) 魚本 健人: 分割方式によるコンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究, *コンクリート工学論文集*, No. 82, pp.99-114, 1982 年 9 月.
- 5) Rath Sovann Sathya : Mix-proportion and Mixing Procedure for Stable Entrained Air in Self-Compacting Concrete, 高知工科大学学位論文, 2016 年 9 月

付録 A

各練り混ぜ手順の練混ぜ直後と 2 時間後のフロー値，フロー減少量，空気量，空気減少率を示す(表-A.1)。空練り時間全て 30 秒である。

フロー減少量と空気量減少率にはあまり相関がみられなかった(図-A.1, 2)。空気減少率には練混ぜ直後の空気量や微細気泡率など，様々な要因が関係していることが考えられる。

表-A.1 各練り混ぜ手順のデータ

練混ぜ手順	経時(分)	フロー(mm)	フロー減少量 (mm)	空気量 (%)	空気量減少率 (%)
60+30	10	254×244	66	6.84	23.0
	120	179×178		5.27	
60+60	10	240×240	66	8.03	4.7
	120	175×173		7.65	
60+120	10	253×250	54.4	9.87	12.9
	120	198×196		8.60	
60+180	10	257×259	49	11.61	12.2
	120	208×210		10.19	
30+60	10	246×240	64.5	8.15	16.7
	120	179×178		6.79	
60+60	10	240×240	66	8.03	4.7
	120	175×173		7.65	
120+60	10	252×249	48	4.52	15.7
	120	204×201		3.81	
180+60	10	252×246	39.5	3.75	7.2
	120	210×209		3.48	
120+180	10	248×249	59	6.59	6.2
	120	190×189		6.18	
180+180	10	252×251	48.5	5.73	8.6
	120	206×200		5.24	

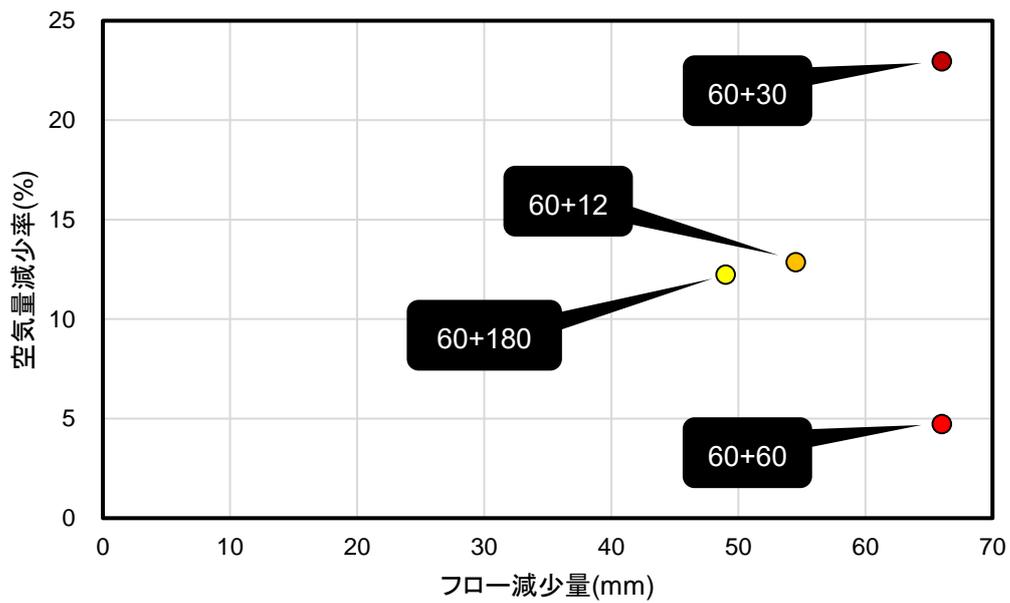


図-A.1 2次練り時間の違いによるフロー減少量と空気量減少率の関係

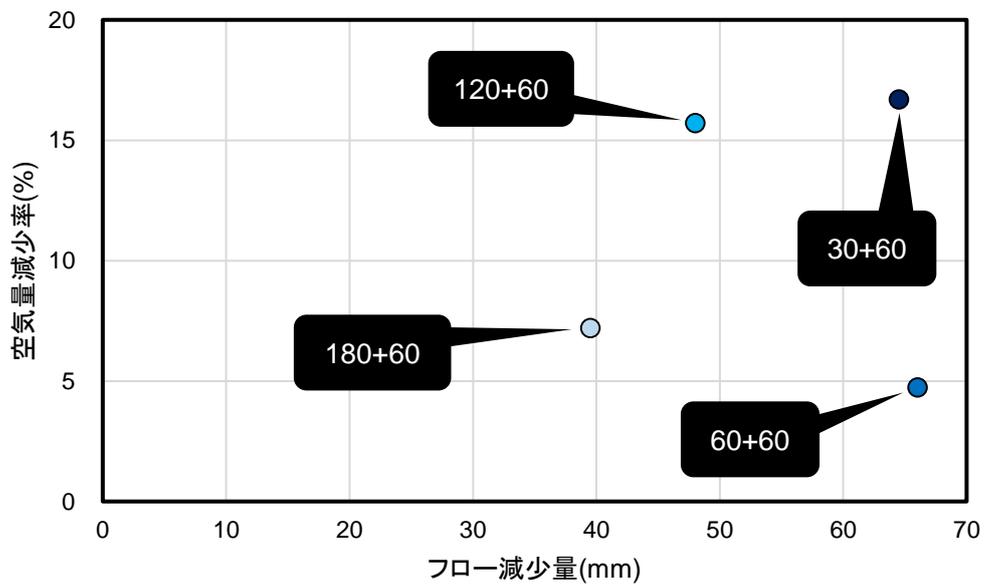


図-A.2 1次練り時間の違いによるフロー減少量と空気量減少率の関係

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）、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、数多くの貴重なご助言、ご指導を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

大内先生には、研究に関することはもちろんのこと、建設に携わる者として知っておくべきことや、進路を決めるうえで大切なことなどたくさんのご教授くださいました。大内先生のご指導により、新しいことを学ぶ面白さ、挑戦することの大切さを学ぶことができました。心より御礼申し上げます。

佐藤先生には、修士論文の服指導教員として広い知見からのご意見や的確なご指導を頂きました。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基礎的な知識から実験の相談等、多くのことをご教授頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、先輩方、とも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、実験の手伝いや相談に乗っていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、大学・大学院と6年間にわたって多方面で支えてくださった家族に対して心より感謝申し上げます。

以上のように、多くの方々のお力添えのもと本研究を進め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。

2023年3月 森崎 弘汰朗