

# 論文 増粘剤を添加した自己充填コンクリート用モルタルに微細気泡を連行する練混ぜ手順の確立

森崎 弘汰朗\*1・大内 雅博\*2

**要旨:** フレッシュコンクリートの自己充填性能向上には微細な気泡を連行することが有効である。本研究では、コンクリートが鉄筋間通過の際の摩擦を緩和する効果を期待できる 500 $\mu$ m 以下の径の気泡を連行する練混ぜ手順の確立を目的とし、増粘剤を添加した自己充填コンクリートを想定したフレッシュモルタル中への微細気泡の連行比率を高め、2 時間後まで微細気泡を維持する練混ぜ手順を確立した。微細気泡の連行比率を高めるために練混ぜ水を分ける分割練りを採用し、2 次練り時間を長くすることで微細気泡の比率を高めた。1 次練りの時間を調整することにより、練上がり時の空気量の調整を可能にした。

**キーワード:** 自己充填コンクリート, フレッシュモルタル, 微細気泡, 分割練り, 増粘剤

## 1. はじめに

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の際の締固め作業等、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・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を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、高価格で高強度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、水セメント比を粉体系のものよりも高めの 45% に設定して単位セメント量を削減しても自己充填性を維持可能な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。既往研究により、空気泡の中でも直径 500 $\mu$ m 以下の微細な気泡 (以下、微細気泡と呼称) が固体粒子間の摩擦緩和に有効であることが分かっている<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup>を添加し、練混ぜ手順の調整のみにより 500 $\mu$ m 以下の微細な気泡をモルタル中に適量 (粗骨材容積比が 3 割のコンクリート中で約 4~6%, モルタル中では約 6~8%) 連行する方

法を確立することである。そのために、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。

## 2. 使用材料・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-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 $\pm$ 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/m<sup>3</sup> となる量を添加した。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% とした。

表-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 <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

\*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)

## 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 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(表-2)。

表-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 <sup>3</sup> )		
W	C	S
264	586	1,474

## 2.3 モルタルのフレッシュ性状の試験方法

モルタル練上がり終了から 10 分後と練混ぜから打設までの時間の限度である 2 時間後にそれぞれにモルタルフロー試験(図-1)、ロート試験(図-2)、空気量試験(質量法)によりフレッシュ性状の確認を行った。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。モルタルフロー試験において、フロー値  $d = 250\text{mm} \pm 10\text{mm}$  となるよう減水剤の添加量を調整した。

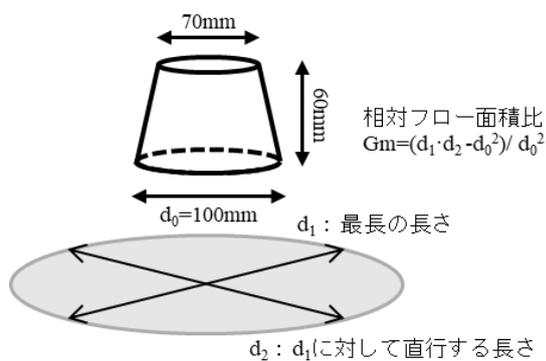


図-1 モルタルフロー試験

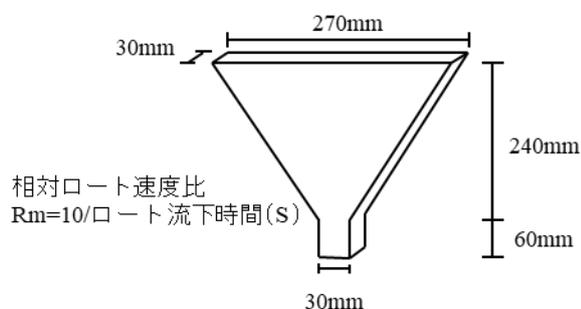


図-2 モルタル用ロート試験

## 2.4 気泡径分布の測定方法

フレッシュモルタルに連行された気泡径分布の測定のために、自動気泡解析装置(Air Void Analyzer: AVA)

(写真-1)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気泡を浮上させ、その径の大きさによる浮上速度の差を利用してモルタル中に連行された気泡径分布を測定するものである。試験に必要なモルタル試料は 20 mL である。

モルタルの練上がりから 10 分後と 2 時間後に試験を行った。



写真-1 自動気泡径測定装置(Air Void Analyzer)

## 2.5 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)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。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 レーザー回折式粒度分布測定装置

## 3. 練混ぜ手順の決定

練混ぜ手順には、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。本研究で構築する練混ぜ手順を決定するために、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でどうして比較した(図-3)。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 秒間行った。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)。

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すると共に、径が500 $\mu\text{m}$ 以下の気泡の比率が高くなった(図-4)。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。

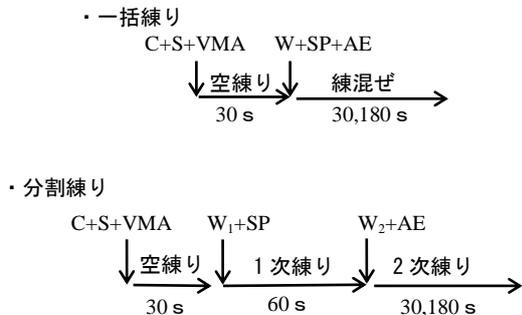


図-3 練混ぜ手順

表-3 混和剤添加量と空気量

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

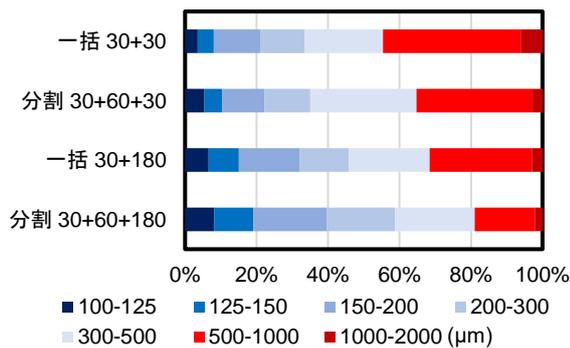


図-4 10分後の各気泡径の比率

#### 4. 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-5)、(表-4)。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-6, 7)。

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。

##### ・分割練り(2次練りの時間を変更)

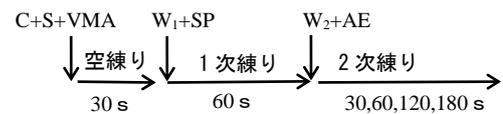


図-5 練混ぜ手順(1次練り時間は全て60秒)

表-4 混和剤添加量と空気量

(1次練り時間は全て60秒)

2次練り 時間	SP (C×%)	AE (C×%)	VMA (g/m <sup>3</sup> )	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

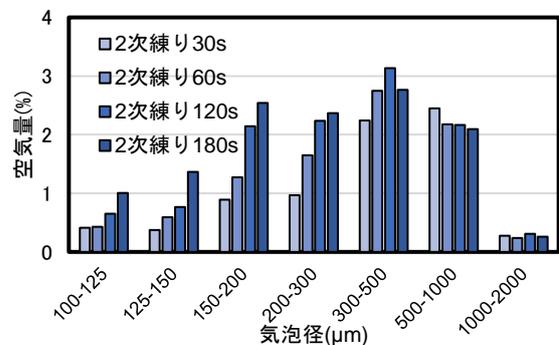


図-6 2次練り時間の違いにより生じる10分後の気泡径分布の違い(1次練り時間は全て60秒)

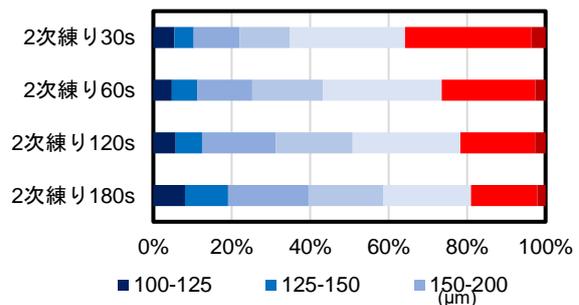


図-7 10分後の各気泡径の比率

(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-8)、(表-5)。それぞれの気泡径分布を測定して比較した(図-9, 10)。

その結果、1次練り時間が長くなるにしたがって微細気泡の空気量の絶対量が小さくなった。1次練りが180秒間のモルタルの125~150 $\mu\text{m}$ の気泡の空気量の絶対量は少し大きくなったが、その大きくなり方は極めて小さかった。

・分割練り(1次練りの時間を変更)



図-8 練混ぜ手順(2次練り時間は全て60秒)

表-5 混和剤添加量と空気量  
(2次練り時間は全て60秒)

1次練り時間	SP (C×%)	AE (C×%)	VMA (g/m <sup>3</sup> )	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

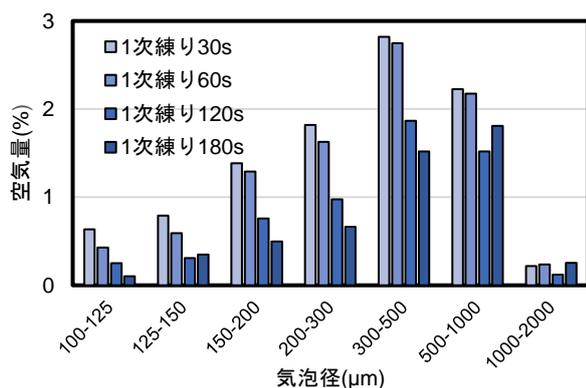


図-9 1次練り時間の違いにより生じる10分後の気泡径分布の違い(2次練り時間は全て60秒)

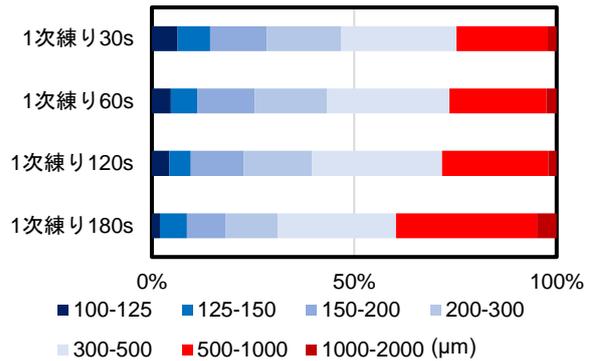


図-10 10分後の各気泡径の比率  
(2次練り時間は全て60秒)

#### 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、それが連行空気中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から、寸法が150 $\mu\text{m}$ のふるいを使用してほとんどの細骨材を取り除いたものの粒度分布をレーザー一回折により測定した。主にセメント粒子の粒度分布を測定していると見なした。平均径を示す(図-11)。1次練り時間を長くするとセメント粒子平均径がわずかに小さくなっていった。

空気量と平均粒子径の関係を示す(図-12)。1次練り時間が長いものは空気量が小さくなった。しかし、1次練り時間が長くなることによる空気量の減少と平均粒子径との間には、相関があるようには見えなかった。空気量が小さくなったのはセメント粒子径の変化とは別の原因があると推定した。

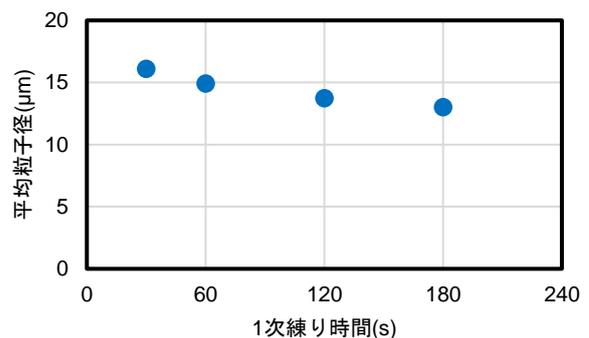


図-11 1次練り時間とセメント粒子平均径の関係  
(2次練り時間は全て60秒)

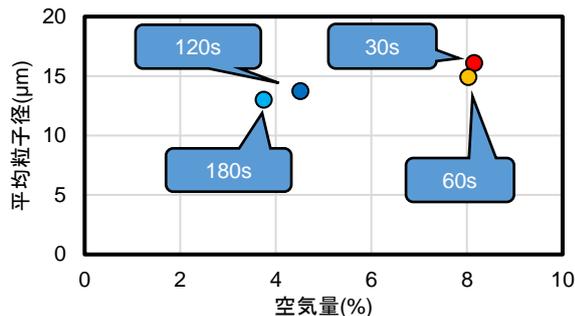


図-12 1次練り時間の違いによる空気量と平均粒子径の関係(2次練り時間は全て60秒)

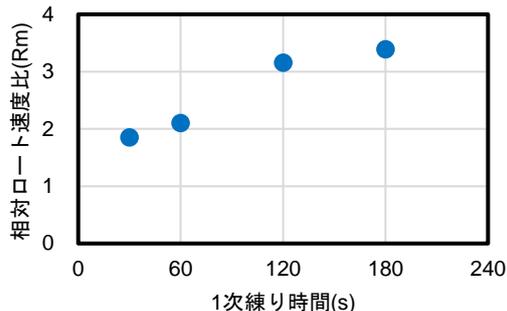


図-13 1次練り時間と相対ロータ速度比の関係(2次練り時間は全て60秒)

### 5. 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タ速度比の関係を示す(図-13)。1次練り時間を長くしていくと相対ロータ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。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。

これを検証するため、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。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、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タ流下時間である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-6)。

その結果、ロータ流下時間が短いものは空気量、微細気泡の比率が共に低くなった。一方、ロータ流下時間が長いものは空気量、微細気泡の比率が共に高くなった(表-6, 図-14, 15)。空気量と微細気泡比率の関係を比較すると、水セメント比の調整によってロータ流下時間を合わせたものは、練混ぜ直後(10分後)および2時間後共に、特に練混ぜ直後(10分後)において、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値となった(図-14, 15)。モルタルに連行される空気微細気泡比率や空気量が、練混ぜ時間の調整により変化する粘度に支配される可能性を得たと言える。

表-6 混和剤添加量とロータ流下時間、空気量

水セメント比 (%)	SP (C×%)	ロータ流下時間(s)	空気量 (%)
43	2.0	5.60	9.04
45	1.8	4.76	8.03
50	1.5	3.00	4.84

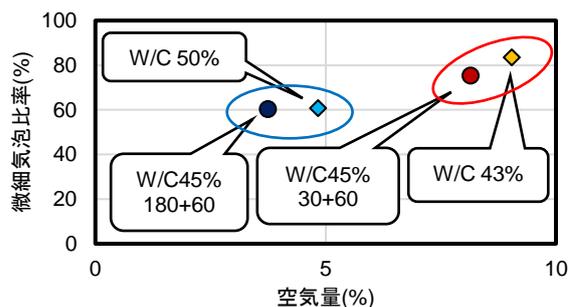


図-14 10分後の空気量と微細気泡比率の関係

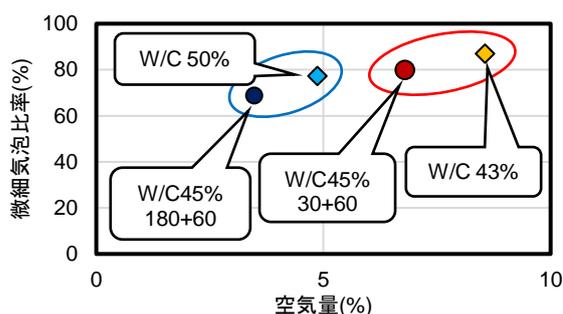


図-15 2時間後の空気量と微細気泡比率の関係

### 6. 提案する練混ぜ手順

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ふことが分かった。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-16)練り混ぜた。それぞれについて

練混ぜ直後(図-17)および2時間後に空気量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秒のものと同等の微細気泡比率のまま、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で約4~6%,モルタル中では約6~8%)に収めることができた(表-7,図-17)。

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-8,図-18)。空気減少量はどちらも0.5%以内に収まっており、径が500 $\mu\text{m}$ 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。

・分割練り



図-16 練混ぜ手順

表-7 混和剤添加量と空気量  
(2次練り時間は全て180秒)

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

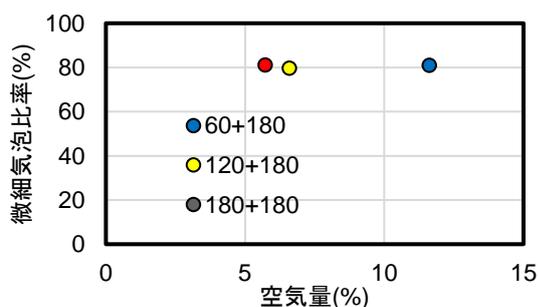


図-17 練混ぜ直後の空気量と微細気泡比率の関係  
(2次練り時間は全て180秒)

表-8 練り混ぜ直後と2時間後の空気量と  
空気減少量 (2次練り時間は全て180秒)

練混ぜ時間	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

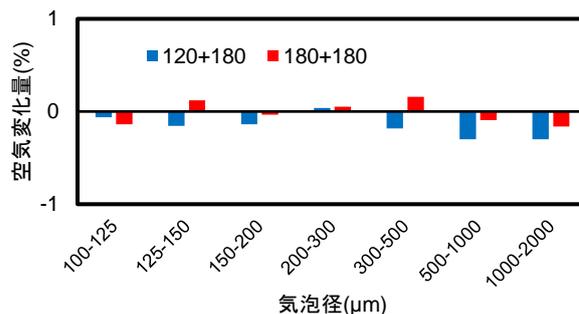


図-18 練り混ぜ直後から2時間後の各気泡径の  
空気変化量(2次練り時間は全て180秒)

## 7. 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、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、分割練りを採用し、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。
- 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。

## 謝辞

本研究に際して、高知工科大学技術指導員 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ご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。本研究の一部は科学研究費助成金 基盤(B)(課題番号19H02217)によるものです。

## 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