

論文 消泡剤と増粘剤の併用による自己充填コンクリートへの安定した微細気泡連行法の開発

古竹 莉久*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の向上には連行気泡の径を小さくすることが有効である。本研究では、自己充填性能向上に有効な径が 500 μm 以下の小径気泡のみを連行する練混ぜ方法の構築を目指し、消泡剤と増粘剤を併用して大径気泡を除去し、さらに時間経過に対する気泡の安定性を向上させる方法について、フレッシュモルタル試験により検証した。消泡剤と増粘剤の併用により、練混ぜ直後の大径気泡の比率が低下し小径気泡連行比率の向上効果を確認した。さらに、空気連行剤の添加量を増し、練混ぜ水を分割投入することにより、練上りから2時間後も気泡間の合体を抑制し微細気泡を安定させることができた。

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, 増粘剤, 消泡剤

1. はじめに

施工の良否に左右されずに鉄筋を有する型枠内に確実に充填される自己充填コンクリートのコスト削減には、高いセメント量に依存せずに変形の際の固体粒子間摩擦を緩和する技術が必要である。筆者らは連行した径が 500 μm 以下の微細な空気泡がフレッシュコンクリート中の固体粒子間の摩擦緩和に有効であることを示し¹⁾、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を開発した。

フレッシュコンクリートへの連行気泡中の微細気泡の比率を高める方法として、消泡剤の添加がある。亀島は、自己充填コンクリート中のモルタルについて、材料を一括投入して練混ぜた（以下、本稿では「一括練り」と称する）後に消泡剤を添加し、再練混ぜを行うことで、大径気泡が減少し小径気泡の比率が高まる効果を、硬化後の気泡径分布測定から明らかにした²⁾。

フレッシュコンクリートへの連行気泡については、時間経過に対する安定性の付与も課題になっている。微細気泡は浮力に対して気泡膜面の摩擦力が卓越するために浮上・抜けが生じにくい点で有利である。しかし、気泡は本来、隣接するものどうしが合体（合一）することにより径が大きくなり浮上・抜けが生じ得るものである。特に自己充填コンクリートはモルタル相の軟度が高いために、気泡の移動が生じやすく、フレッシュ時の気泡の経時安定性に対する懸念があった。

近年、特にペーストまたはモルタル層の粘着力を向上させて骨材と材料分離を抑制するのに有効なセルロース系の増粘剤が開発され、自己充填性能を維持しつつ単位セメント量削減に対する有効性が示されている。そして、この増粘剤を添加したモルタルは、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明らかになった³⁾。気泡膜中に存在する、増粘剤の主成分である多糖類

（セルロース）が気泡同士の合一を防ぎ、それが径の増大を抑制して浮力による気泡の抜けを防ぐためであると考察した（図-1）。

本研究の目的は、消泡剤と増粘剤の併用により、微細な気泡をコンクリート中に効率よく連行すると共に、連行気泡の時間経過に対する安定性を向上させる練混ぜ手順を構築することである。そのために、練混ぜ直後および2時間後までのフレッシュ状態のモルタルの気泡径分布を測定し、気泡径の分布およびその時間経過に対する安定性を測定し、構築した手法の効果を検証した。

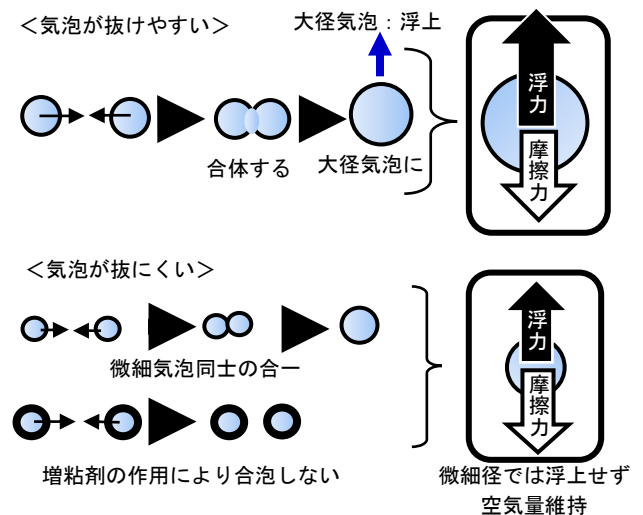


図-1 気泡浮上のメカニズムと本研究での抑制方法

2. 材料・配合および試験方法

2.1 使用材料と配合

本研究で用いた使用材料と配合を示す（表-1, 2）。モルタル中の空気を除いた細骨材容積比(s/m)は 55%、水セメント比(W/C)は 45%に設定した。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、細骨材(S)は石灰岩砕砂を使用した。

*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)

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。JIS R5201 に規定されたモルタルフロー試験によるフロー値 $d=250\pm 10$ mm となるように、減水剤の添加量を調整した。空気連行剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。増粘剤は粉体状の水溶性セルロース系のものを使用し、粗骨材容積比 0.3 のコンクリート中に $200\text{g}/\text{m}^3$ となるようなモルタル中の添加量とした。



写真-1 自動空気泡解析装置 (Air Void Analyzer)

表-1 使用材料

材料	概要	記号
水	上下水道水	W
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 $3.15\text{g}/\text{m}^3$)	C
細骨材	石灰岩砕砂 (表乾密度 $2.68\text{g}/\text{m}^3$, 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	変性ロジン酸化合物系 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
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	DF

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^3)		
W	C	S
264	586	1,474

2.2 気泡径分布と空気量の測定方法

フレッシュモルタル中に連行された気泡径分布の測定には自動空気泡解析装置 (Air Void Analyzer :AVA) (写真-1) を使用した。高粘度液中でモルタルを攪拌し空気泡を浮上させ、そ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径分布を直接測定する装置である。モルタル試料の必要量は 20 mL である。練上り後 10 分間静置し、5 秒再練混ぜを行い、空気量試験 (質量法)、自動空気泡解析装置の順に測定した。空気量試験は JIS A1171 に規定された空気室圧力方法に使用する真鍮製円筒容器 (容量 1000mL) を使用した。その後、練上りから 1 時間後および 2 時間後にも同様に試験を行った。

なお、AVA により求めた各気泡径の値を合計したものを各図の凡例中に示した。

3. 消泡剤の添加タイミングの調整による効率的な大径気泡の除去

消泡剤の添加タイミングが、増粘剤無添加のフレッシュモルタル中の気泡径分布に与える影響を調べた。比較的手間を要しない、消泡剤を水と同時に添加する一括練りと、一括練りの後に消泡剤を添加し練混ぜることで浮上しやすい大径気泡を優先的に破壊することを想定した消泡剤後添加の練混ぜを行い (図-2)、消泡剤無添加のモルタルと気泡径分布を比較した。空気連行剤添加量は、「消泡剤添加+一括練り」において練上り時の空気量が 10%程度となるように、セメント質量に対して 0.005% 添加を基本とした (表-3)。

その結果、消泡剤の添加により、添加タイミングに関係なく気泡径 $500\mu\text{m}$ 以上の気泡を大幅に除去することができた (図-3)。消泡剤の添加により自己充填性に有効な気泡径 $500\mu\text{m}$ 以下の微細気泡の量も減少したが、微細気泡の比率は向上した (図-4)。特に消泡剤後添加のものは大きく減少した。消泡剤の後添加は練混ぜに手間を要することから、以降、本研究では、消泡剤は空気連行剤と同時に、一括練りにおける、主たる練混ぜの際に添加することとした。

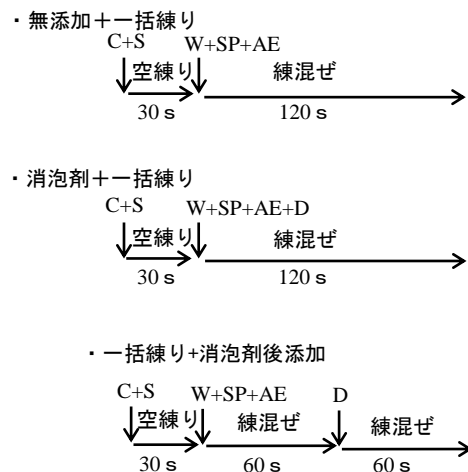


図-2 各練混ぜ手順

表-3 各練混ぜ方法の混和剤添加量と空気量(質量法)

	SP (C×%)	AE (C×%)	D (C×%)	空気量 (%)
無添加 +一括練	0.8	0.005	0	17.3
消泡剤 +一括練	0.8	0.005	0.01	10.9
一括練+消泡 剤後添加	0.8	0.005	0.01	5.5

増粘剤と消泡剤を併用することで、微細気泡の連行性が向上し、その比率が最も高くなった。

・増粘剤+消泡剤+一括練り

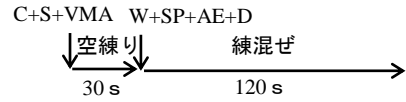


図-5 練混ぜ手順

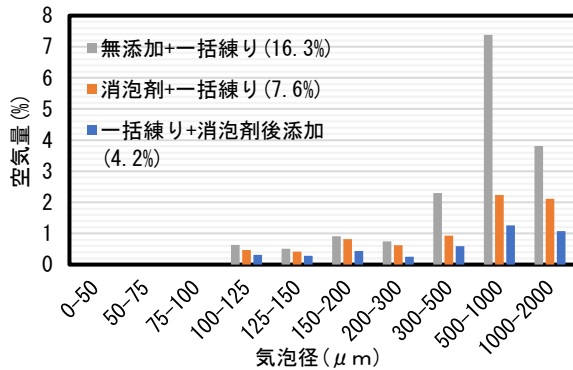


図-3 消泡剤添加のタイミングの違いにより生じる練混ぜ10分後の気泡径分布の差

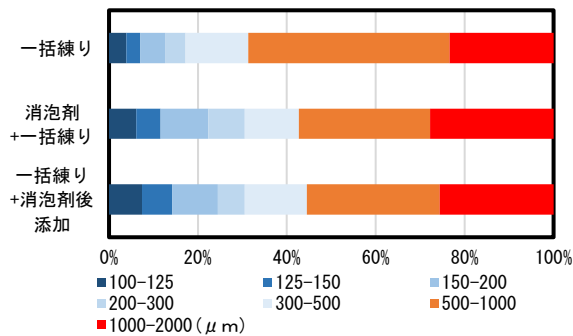


図-4 練混ぜ10分後の各気泡径の比率

4. 消泡剤と増粘剤の併用による微細気泡の連行性向上

既往研究で示された増粘剤添加による微細気泡連行性向上³⁾に加えて、前章で明らかにした消泡剤による大径気泡除去の併用による効果を調べた(表-4)。増粘剤は練混ぜ前にセメントに混ぜておき、空練りを30秒間行った。その後、消泡剤を添加して一括練りを行った(図-5)。そして、気泡径分布を、両者とも無添加(「無添加」と略)、および消泡剤のみ添加したものと比較した。

その結果、増粘剤と消泡剤の併用により、気泡径150~500μmの微細な気泡の量が増加し、三者の中で最も微細気泡の比率が高くなった。一方で気泡径500μm以上の気泡は無添加のものよりも減少し、気泡径1000μm以上の気泡は消泡剤のみ添加のものより減少した(図-6, 7)。

表-4 混和剤添加量と空気量(質量法)

	SP (C×%)	AE (C×%)	VMA (g/m ³)	D (C×%)	空気量 (%)
増粘剤 +消泡剤 +一括練	1.3	0.005	200	0.01	13.3

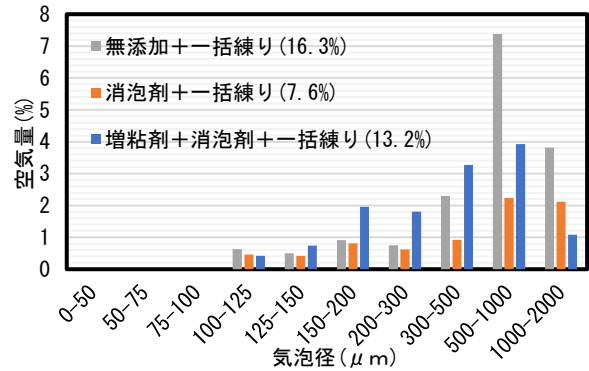


図-6 増粘剤や消泡剤の添加による練混ぜ10分後の気泡径分布の差

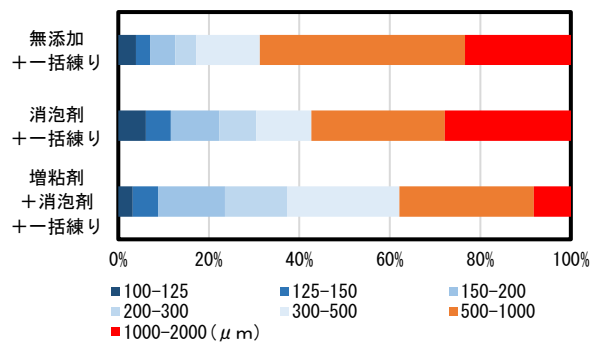


図-7 練混ぜ10分後の各気泡径の比率

5. 空気連行剤添加量増加による微細気泡比率の向上と気泡の経時安定性向上

増粘剤と消泡剤を併用する練混ぜ手順において、空気連行剤を増やして微細気泡のみの空気量を増加することによる、微細気泡の比率を更に高める効果を検証した。

空気連行剤を、セメント質量に対し前章の3倍の0.015%添加し、増粘剤と消泡剤を併用したモルタルの気泡径分布を測定した(表-5, 図-8)。練混ぜ手順は前章と同様である。その結果、空気量は約1%(モルタル中の単位容積比(以下同様))増加したが、その内訳は、気泡径500 μm 以下の各気泡径が増加した一方で、気泡径500 μm 以上の大径気泡の減少によるものであった(図-9)。

さらに、連行気泡の時間経過に対する安定性を調べるため、練上がりから1時間後と2時間後の気泡径分布を測定し、消泡剤も増粘剤も無添加のものと比較した。無添加のモルタルは2時間で空気量が約8%減少した一方、増粘剤と消泡剤を併用したものは約3%の減少に留まった(表-6)。増粘剤と消泡剤を併用したモルタルは、微細気泡の比率が高いことと、増粘剤により練混ぜ時の微細気泡の合体が抑制されたためと考察した。

両者における練上りから1時間ごとの気泡径分布を示す(図-10, 11)。試料採取に際しては練返しは行わなかったが、練りさじで全体を軽くかき混ぜて均一にしてから中心部を採取した。消泡剤と増粘剤を併用して微細気泡を多く連行しても、練上がり1時間後には減少した。気泡径300 μm 以上の気泡が増加した理由は、微細な気泡が合体し径の大きな気泡となったものと考察した。無添加のモルタルでも微細気泡が合体していると想定したが、微細気泡が少なく大径気泡が多かったため、大径気泡の減少の方が大きかったと考察した。消泡剤と増粘剤の併用により、練上り直後の微細気泡の比率は向上したが、微細気泡を安定させることはできなかった。

表-5 混和剤添加量と空気量(質量法)

	SP (C%)	AE (C%)	VMA (g/m ³)	D (C%)	空気量 (%)
増粘剤 +消泡剤 +一括練	1.3	0.015	200	0.01	14.6

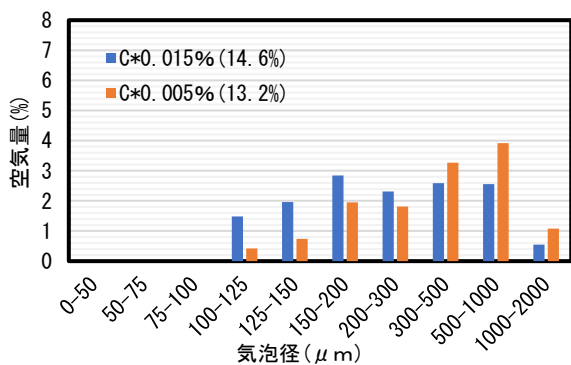


図-8 練混ぜ10分後の空気連行剤添加量の増加による微細気泡比率の向上(増粘剤と消泡剤添加)

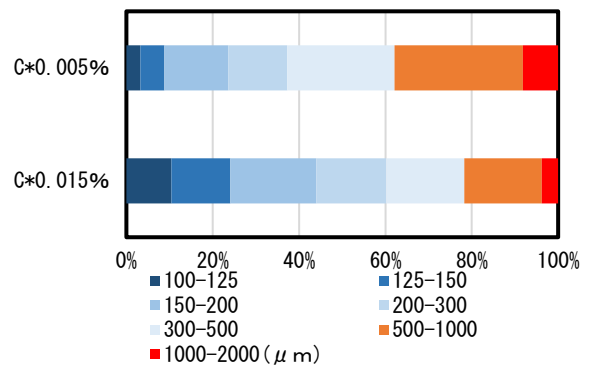


図-9 練混ぜ10分後の配合ごとの各気泡径の比率(両者とも増粘剤と消泡剤を添加)

表-6 モルタル中の2時間後までの空気量(質量法)

	10分後	1時間後	2時間後
無添加 +一括練	17.3%	13.5%	8.9%
増粘剤+消泡剤 +一括練	14.6%	13.9%	11.7%

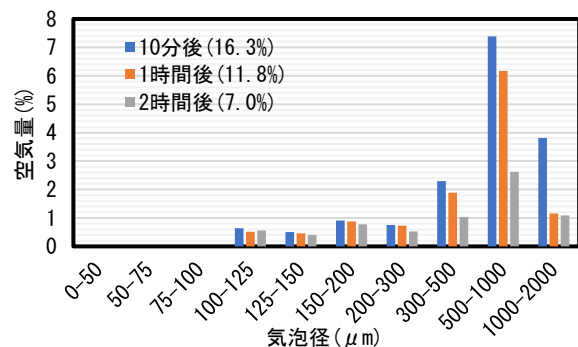


図-10 練混ぜ10分後から2時間後の気泡径分布(無添加+一括練)

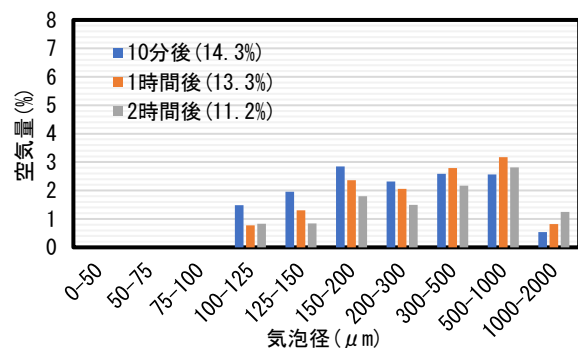


図-11 練混ぜ10分後から2時間後の気泡径分布(増粘剤+消泡剤+一括練)

6. 分割練りによる気泡の経時安定性向上

施工現場における品質管理や調整の手間を考慮すると、練上りから打込みまでの間の空気量の変化は無いのが望ましい。そこで、材料を一括して投入して練り混ぜる一括練りではなく、既往研究において効果のあった、水を分けて投入する「分割練り」⁹⁾を行い、その効果を検証した。空気連行剤は、前章同様、セメント質量に対して0.015%添加した(表-8)。分割練りにおいては、水を均等に2分割して2回に分けて投入した。1次水に高性能AE減水剤、空気連行剤および消泡剤を加えて60秒間練混ぜ、2次練りには残りの水のみを投入し60秒間練混ぜた(図-12)。練上りに気泡径分布を測定し、前章の空気連行剤を増加した一括練りのものと空気変化量を比較した。分割練りにより練上り直後の空気量は一括練りに比べて約3%減少した。200 μm 以下のものの比率は若干低かったが、気泡径500 μm 以下の気泡の合計の比率は一括練りのものと大差なかった(図-13,14)。

両者における、練上りから1時間ごとの空気量を示す(表-9)。分割練りのものは練上り直後の空気量が小さめであり、2時間後の減少量が1%未満に留まった。2時間後の空気量は、比較的大きく減少した一括練りのものとはほぼ等しくなった。分割練りのものは気泡の安定性が高まったため、2時間後に約1%の減少に留まったと言える(図-15, 16)。

表-8 混和剤添加量と空気量(質量法)

SP (C×%)	AE (C×%)	VMA (g/m ³)	D (C×%)	空気量 (%)
1.5	0.015	200	0.01	12.8%

・増粘剤+消泡剤+分割練り

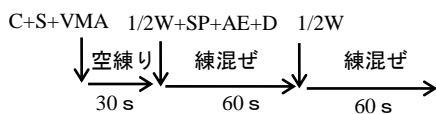


図-12 練混ぜ手順

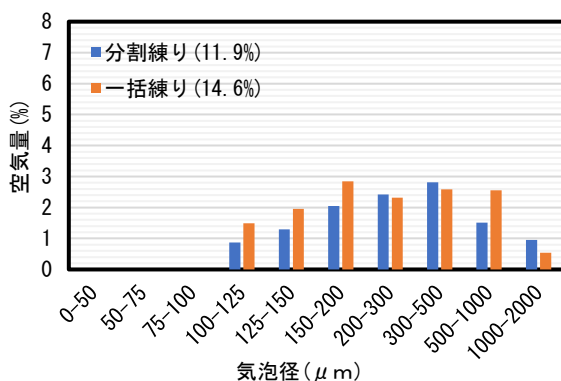


図-13 分練りによる微細気泡の連行効果

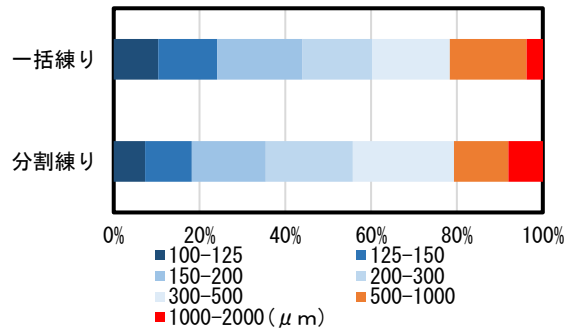


図-14 練混ぜ10分後の各気泡径の比率

表-9 モルタル中の2時間後までの空気量(質量法)

	10分後	1時間後	2時間後
一括練	14.6%	13.9%	11.7%
分割練	12.8%	12.2%	12.0%

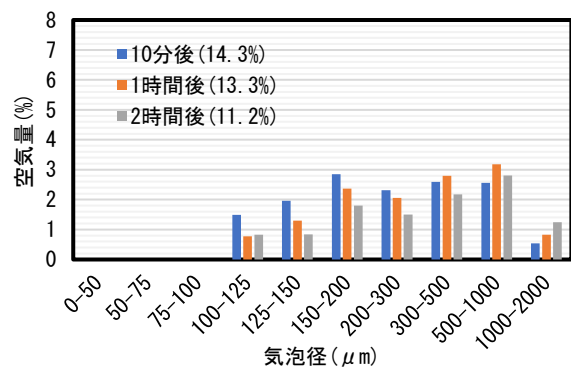


図-15 練混ぜ10分後から2時間後の気泡径分布
(増粘剤+消泡剤+一括練)

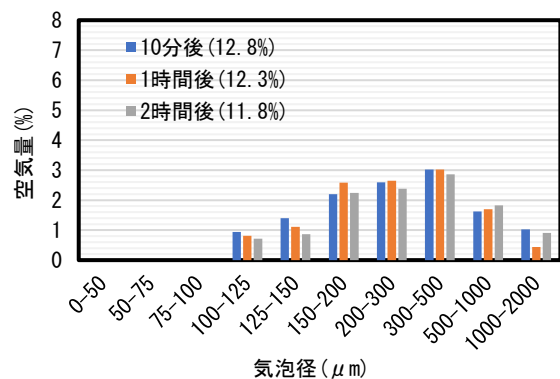


図-16 練混ぜ10分後から2時間後の気泡径分布
(増粘剤+消泡剤+分割練)

7. AVA と質量法による空気量の比較

ここまで、フレッシュモルタル中の空気量は、浮力法による自動気泡解析装置(AVA)によるものと質量法によるものを併記してきた。これまで示してきた各練混

ぜ手順によるモルタルの練上がり直後（10分後）における、空気量を比較した（表-10、図-17）。その結果、質量法によるものの空気量がAVAによる値と同等またはそれ以上となった。質量法による空気量を測定した後にAVAにより測定したため、両試験の約10分間に空気量が減少する余地があったためであると考察した。その中で、特に、消泡剤を添加し増粘剤を添加しなかった（*2および*3）ものの差が顕著であった。本研究の目的である、消泡剤と増粘剤の併用による気泡安定性向上効果が示されたと言える。

表-10 練上がり直後の各空気量試験結果の比較

	練混ぜ手順	AVA (%)	質量法 (%)
*1	無添加＋一括練	16.3	17.3
*2	消泡剤＋一括練	7.6	10.9
*3	消泡剤後添加＋一括練	4.2	5.5
*4	増粘剤＋消泡剤＋一括練	13.2	13.3
*5	AE増加＋増粘剤＋消泡剤＋一括練	14.6	14.6
*6	AE増加＋増粘剤＋消泡剤＋分割練	11.9	12.8

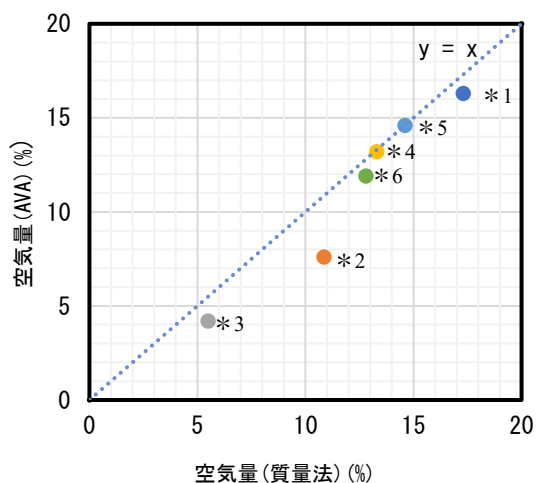


図-17 練上がり直後の各空気量試験結果

8. 結論

本研究では、フレッシュコンクリートの自己充填性に有効な微細気泡の比率向上と時間経過に対する安定性向上を目指し、フレッシュモルタルについて消泡剤と増粘剤を併用した練混ぜ方法の有効性を検証した。本研究で明らかになったことを以下に述べる。

1) 消泡剤と増粘剤を併用して全材料を一括投入する一括練りを行うことにより、微細気泡の量が増加し大径気泡の量は減少した。増粘剤を添加することで消泡剤による微細気泡の減少を抑制し、大径気泡のみを除去できる可能性を得た。

- 2) 増粘剤と消泡剤を併用し、さらに空気連行剤添加量を増やすことにより、微細気泡のみ連行量を大きくし、微細気泡の比率をさらに高めることができた。しかし、微細気泡の安定性が低くなったことから、時間経過に対する空気量の減少は、小さくなったとはいえ残った。
- 3) 練混ぜ水を2分割して投入する分割練りにより、一括練りと比較して、練上がりから2時間後の空気量変化を1%に留め、微細気泡の減少も抑制することができた。
- 4) 浮力法による自動空気泡解析装置により得られたフレッシュモルタル中の空気量を、質量法によるものと比較した結果、消泡剤を添加し増粘剤を添加しなかったものを除いてほぼ同じであった。

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 コンサルタンツ専務取締役）には実験全般について御指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究の一部は日本学術振興会 科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号19H02217）および一般社団法人四国クリエイティブ協会 技術開発助成（助成番号2020-1）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) 亀島健太, Attachaiyawuth, A., 大内雅博: 消泡剤を用いた大径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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.1419-1424, 2016.7
- 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) 田嶋和夫: 消泡剤 理論と種類, *色材協会誌*, Vol. 65, No.11, pp.711-720, 1992
- 5) Rath, S., Puthipad, N., Attachaiyawuth, A., Ouchi, M.: Critical size of entrained air to stability of air volume in mortar of self-compacting concrete at fresh stage, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 29-37, January, 2017.