

論文 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

亀島 健太*1・Anuwat ATTACHAIYAWUTH*2・大内 雅博*3

要旨：フレッシュコンクリートの自己充填性に有効であると想定した小径空気泡の比率を向上させるために、練混ぜ時に消泡剤を添加し大径空気泡を除去する二種類の手順の有効性を検証した。水分割練りで小径空気泡を多く連行させてから消泡剤で除去する方法では、一次水と同時に消泡剤添加、二次水と同時に消泡剤添加、最後に消泡剤添加の全てのケースで、大径空気泡の除去はできずにむしろ増加した。一方、一括練りで気泡を大量に連行させてから最後に消泡剤を添加し除去する方法では、空気連行剤の添加量を多くすれば、小径空気泡の比率を増加させ、大径空気泡の比率を減少させることができた。

キーワード：気泡潤滑型自己充填コンクリート、消泡剤、空気泡径分布、練混ぜ手順

1. はじめに

自己充填コンクリートが開発されて約 30 年近く経ったが、普及は進んでいない。筆者らはコンクリート中の粉体の一部を空気泡に置き換えてセメント量の低減を図りコストを低減した、従来の自己充填コンクリートと同程度の自己充填性を有する、気泡潤滑型自己充填コンクリートの実用化に取り組んでいる¹⁾。筆者らは微細な気泡が自己充填性向上に有効である可能性を得た²⁾。

本研究の目的は、微細な気泡をコンクリート中に多く連行し、少ない空気量 5%程度でも十分な自己充填性を達成出来るように、小径空気泡(直径:0.4mm未満の径)を効率良く連行させることである。そのために、自己充填性に有効でない大径空気泡(直径:0.4mm以上の径)を消泡剤の活用により除去し、コンクリート中の小径空気泡の比率を増加する。消泡剤については、気泡分布等に悪影響を及ぼす。又は、耐凍害性に寄与しない粗大径の気泡を消失させるよりも、AE剤で連行されるような微細な気泡を抑える抑泡効果の方が卓越しているという報告³⁾⁴⁾⁵⁾がある。

筆者らは、練混ぜ手順を工夫することで同空気量において、コンクリート中の気泡分布を細くすることを確認した⁶⁾。これは、空気連行剤添加後の練混ぜ時間調整による連行空気泡への影響や、空気連行剤添加前のスラリーの粘度を変更させることによって起泡性が変化すること⁷⁾に着目し、空気泡の径や表面張力等が変化したと考えている。このことから、消泡剤の添加のタイミング等を工夫することで、自己充填性に有効でない大径空気泡を消泡剤の活用により除去し、コンクリート中の小径空気泡の比率を増加する事が可能であると考え、本研究を着想した。

2. 試験方法及び諸条件

2.1 試験方法

「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」⁸⁾により、フレッシュコンクリートが変形する際の相互作用を、モルタル試験から定量化する。図-1にモルタルV漏斗試験を示す。この試験では、モルタルの漏斗速度比(R_m)と模擬粗骨材としてガラスビーズ混入したモルタルの漏斗速度比(R_{mb})を測定し、コンクリート変形時のモルタル相の変形性の低下度合い($1-R_{mb}/R_m$)を定量化した。試験項目は、モルタルフロー試験、空気量試験(質量法)、モルタルV漏斗試験によりフレッシュ性状の試験を行った。また、硬化後の供試体の空気泡とその気泡分布を測定した。硬化後の試験は、ASTM規格C457-71に準じたリニアトラバース法により行い空気泡の気泡径分布を求めた。また、供試体は直径100mm高さ200mmの円柱供試体を使用した。上面と底面の約10mm内側から厚さ約50mm切り取ったものと中心部から厚さ50mm分を切り取ったものを順に上、中、下段とし、それぞれの裏表の2面を平均し1ケース分として計測を行った。

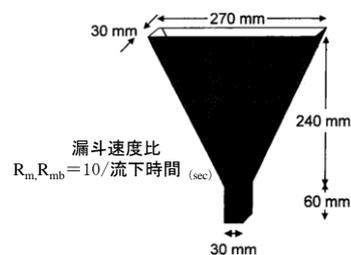


図-1 モルタルのV漏斗試験

*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 助教 (正会員)

*3 高知工科大学 教授 システム工学群 (正会員)

表-1 実験ケース

シリーズ	検討事項		練混ぜ手順 添加のタイミング	セメント	細骨材	高性能AE減水剤	空気連行剤	消泡剤			
1	水分割練りの 検討	消泡剤の 添加タイミングの影響	水分割練り+消泡剤無添加	OPC	S1	SP1	AE1	D			
			水分割練り+消泡剤先添加								
			水分割練り+消泡剤中添加								
			水分割練り+消泡剤後添加								
2	AE剤の添加量の影響	一括練り+消泡剤後添加	S1,S2								
		3							一括練りの 検討	練混ぜ手順の比較	一括練り+消泡剤後添加
											水分割練り+消泡剤無添加
											一括練り+消泡剤無添加
4	練混ぜ手順の比較	一括練り+消泡剤後添加	S2								
		水分割練り+消泡剤無添加									
		一括練り+消泡剤無添加									

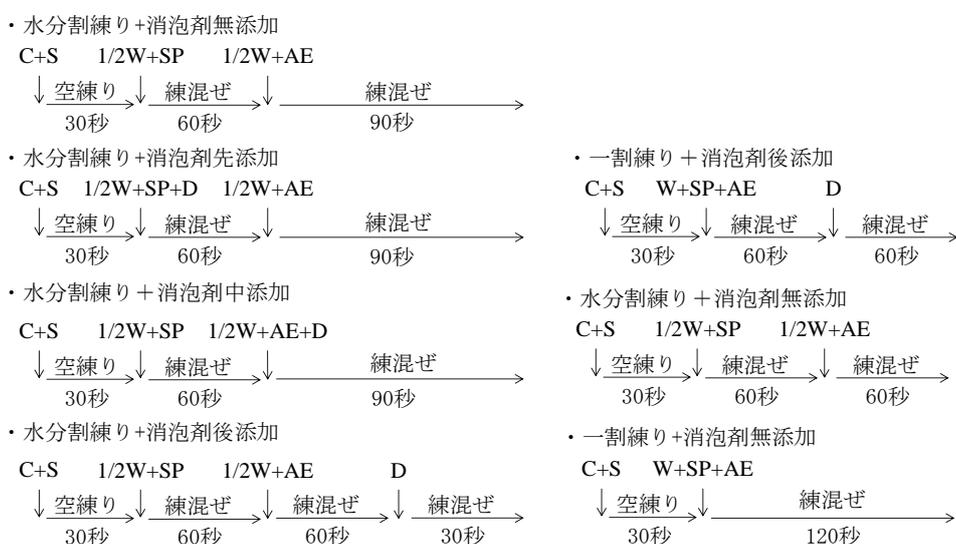


図-2 練混ぜ手順 (左側：シリーズ1 右側：シリーズ2~4)

2.2 実験概要

表-1に実験ケースの一覧を示す。水分割練りと一括練りの両方で消泡剤を試した。図-2に練混ぜ手順を示す。水分割練りで小径空気泡の比率を増やしてから、消泡剤で気泡の除去を行った実験(シリーズ1)と、一括練りで気泡を大量に連行してから、消泡剤で除去を行った実験(シリーズ2~4)を行った。

2.3 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(OPC, 密度: 3.15g/cm³)を、細骨材は高知県佐之國産硬質砂岩(表乾密度: 2.695g/cm³, S1: FM2.58, S2: FM2.53)を用いた。高性能AE減水剤は1種類(ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマー複合体のSP)を用いた。空気連行剤は2種類(天然樹脂酸塩のAE1とアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤のAE2)を用いた。消泡剤は1種類(ポリアルキレングリコール誘導体のD)を用いた。

2.4 配合

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。本研究で対象とする、気泡潤滑型自己充填コンクリートは、十分な変形性を有する必要があるため、モルタルスランプフロー260mm前後となるように高性能AE減水剤の添加量を調整する。消泡剤の添加量は、目標となるモルタルでの空気量7%となるように調整した。示方配合を表-2に示す。

表-2 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 ³)			
W	C	S	SP
264	586	1480	8.2~16.4

※SP: 詳しい添加量は各章に記載

3. 水分割練り

水分割練りで小径空気泡の比率を増やしてから、消泡剤で気泡を除去し、消泡剤の添加のタイミングによる気泡径分布への影響を観察した。表-3に混和剤の添加量を示す。図-3に空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係を示す。空気量10%程度の水分割練り消泡剤無添加のモルタルの固体粒子間摩擦は低い値を示した。しかし、消泡剤を添加させ気泡を除去させると、モルタルの固体粒子間摩擦は消泡剤先添加・消泡剤中添加・消泡剤後添加全てにおいて増加した。

硬化後の供試体の空気泡の気泡分布を調べた。図-4に各空気径ごとの空気容積を示す。消泡剤無添加の時には、小径空気泡が10%程度連行され大径空気泡は1%もなかった。しかし消泡剤を添加すると、小径空気泡は減少した。一方、大径空気泡は増加した。

図-5に消泡剤無添加を基準とした各空気径の空気増減量を示す。消泡剤無添加の時には、大径空気泡は合計で1%もないにも関わらず、消泡剤先添加・消泡剤中添加・消泡剤後添加では、どのケースでも合計で約2%増加するという結果になった。小径空気泡は消泡剤無添加の時は、合計で9%近くあるが、消泡剤先添加・消泡剤中添加・消泡剤後添加だと、どのケースでも合計で約6%減少した。

図-6にそれぞれの比表面積を示す。消泡剤無添加の比表面積の値が最も大きかった。気泡が細かくなると言える。そして、消泡剤を添加すると比表面積の値は消泡剤先添加・消泡剤中添加・消泡剤後添加の全てにおいて減少しており、気泡径は粗くなったといえる。

水分割練りの方法では、消泡剤の効果で、空気量は減少することは確認が出来た。しかし、消泡剤先添加・消泡剤中添加・消泡剤後添加とも、かえってモルタルの固体粒子間摩擦は増加してしまった。大径空気泡の割合が増加してしまい、小径空気泡の割合が減少してしまったことを確認した。

本節の方法では、当初の目的を達することは出来なかったといえる。

表-3 混和剤の添加量 (シリーズ1)

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	消泡剤 添加量 (C×%)
*1	2.6	0.4	-
*2			
*3			
*4			0.02

※C×1.0%につき5.86kg/m³ (以下同様)

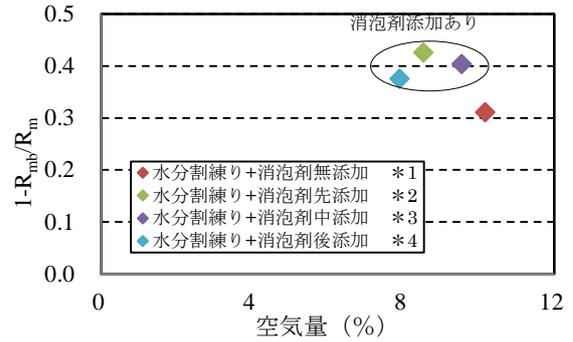


図-3 空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係 (シリーズ1)

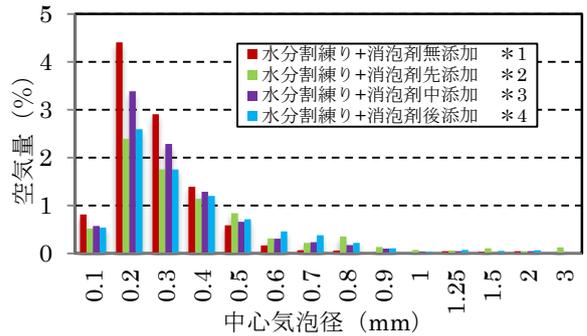


図-4 各空気径ごとの空気容積 (シリーズ1)

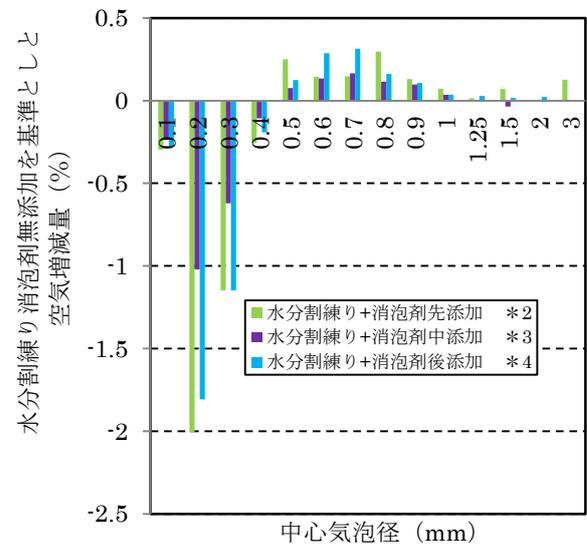


図-5 消泡剤無添加を基準とした各空気径の空気増減量 (シリーズ1)



図-6 消泡剤添加のタイミングが気泡の比表面積に与える影響 (シリーズ1)

4. 一括練り

4.1 空気連行剤添加量増加による効果

一括練りで大量の気泡を連行してから、消泡剤で除去する方法を試した。表-4に混和剤の添加量を示す。図-7に空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係を示す。空気連行剤添加量の最も少ない*5、*6は、消泡剤を添加すると、モルタルの固体粒子間摩擦が急激に増え、閉塞してしまった。*7~*9では、消泡剤を添加すると徐々にではあるがモルタルの固体粒子間摩擦は増加した。空気連行剤添加量の最も大きい*11~*12では、消泡剤を添加すると、モルタルの固体粒子間摩擦は減少した。

4.2 多量空気連行剤の効果と水分割練りの比較

消泡剤を添加せずに練混ぜたものと比較をするために、一括練り消泡剤無添加と水分割練り消泡剤無添加を試した。表-5に混和剤の添加量を示す。図-8に空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係を示す。水分割練り消泡剤無添加と一括練り消泡剤無添加は、空気量増加に従って、モルタルの固体粒子間摩擦を低減している。一括練り消泡剤後添加の空気連行剤の添加量を多くすると、空気量減少に応じて、モルタルの固体粒子間摩擦は低減した。

また、細骨材の粒度を変えて実験を行った。表-6に混和剤の添加量を示す。図-9に空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係を示す。細骨材の粒度をかえると、さらに摩擦低減させることが出来た。0.15~0.6mmの細粒が増えたため、気泡径の小さい気泡が多く連行されたと考える。

表-4 混和剤の添加量 (シリーズ2)

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	消泡剤 添加量 (C×%)
*5	1.9	0.08	0.0004
*6			0.0006
*7	2.2	0.20	0.0150
*8			0.0200
*9			0.0250
*10	2.1	0.60	0.0300
*11	2.6		0.0500
*12	2.6		0.0700
*13			0.0800

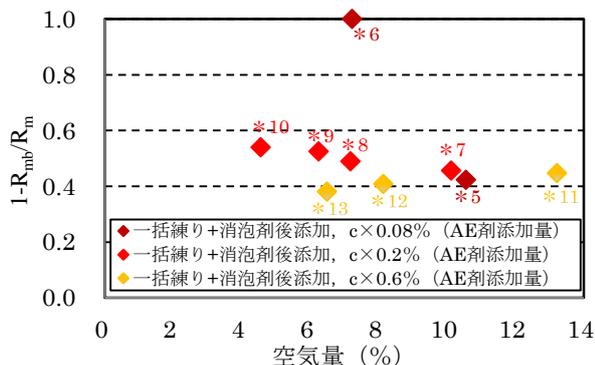


図-7 空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係 (シリーズ2)

表-5 混和剤の添加量 (シリーズ3, S1)

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	消泡剤 添加量 (C×%)
*14	2.50	0.600	0.050
*15			0.065
*16			0.080
*17	2.30	0.440	-
*18	1.50	0.088	
*19	1.40	0.040	
*20	1.65	0.068	
*21	1.60	0.052	
*22	1.55	0.040	

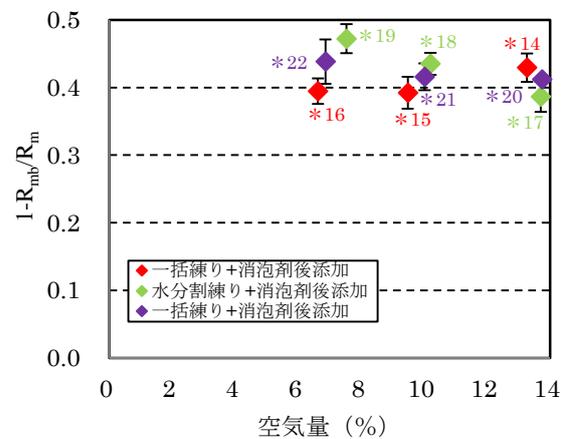


図-8 空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係 (シリーズ3, S1)

表-6 混和剤の添加量 (シリーズ3, S2)

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	消泡剤 添加量 (C×%)
*23	2.8	0.200	0.02
*24	2.6	0.064	-
*25	2.1	0.068	

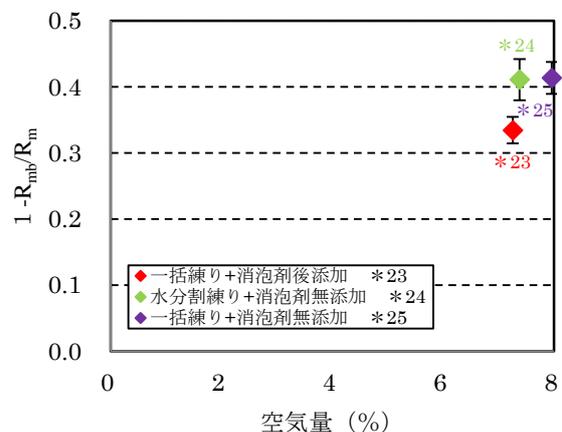


図-9 空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係 (シリーズ3, S2)

4.3 空気連行剤の変更による影響

空気連行剤の種類を変え、先程と同様に実験を行った。表-7に混和剤の添加量を示す。図-10に空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係を示す。こちらも*26, *27, *28の順に最初に添加する空気連行剤の添加量が多くなっている。先程と同様に、一括練り消泡剤後添加は、空気連行剤の添加量を増やすに従って、モルタルの固体粒子間摩擦は減少した。

次に、硬化後の気泡を観察するために、図-11に比表面積のグラフを示す。図-12に気泡径の容積比率を示す。図-13, 14には各気泡径ごとの空気容積を示す。一括練り消泡剤無添加の場合、比表面積の値が小さく、大径空気泡が約3%近く残っており、他のものに比べて気泡径は大きい。一方、一括練り消泡剤後添加の場合、空気連行剤の添加量が多くなるに従って、比表面積は増加した、大径空気泡も約2%に減少した。空気連行剤の添加量が増えるに従って、小径空気泡の容積比率は増加したため、気泡径は小さくなったといえる。

一括練り消泡剤後添加は、空気連行剤の添加量を増やすに従って気泡径は小さかった。しかし、水分割練り消泡剤無添加までは、気泡径を小さくすることはできなかった。水分割練り消泡剤無添加は大径空気泡が約1%ともっと少なく、比表面積比の値も小さいので、他のものに比べて小径空気泡の体積比率が高かったからである。

表-7 混和剤の添加量 (シリーズ 4, S2)

	高性能AE減水剤 添加量 (C×%)	空気連行剤 添加量 (C×%)	消泡剤 添加量 (C×%)
*26	2.3	0.0200	0.065
*27	2.4	0.0400	
*28	2.4	0.0650	
*29	2.7	0.0150	-
*30	2.1	0.0045	

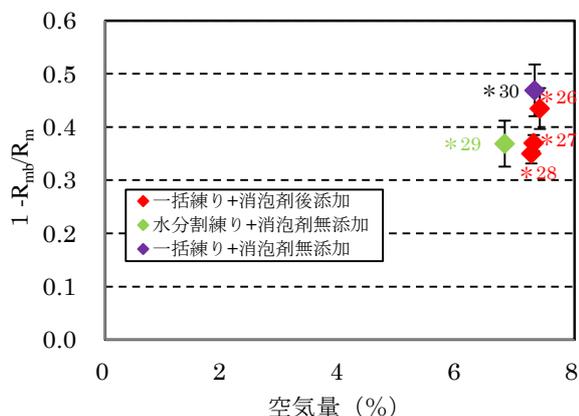


図-10 空気量と $1-R_{mb}/R_m$ の関係 (シリーズ 4)

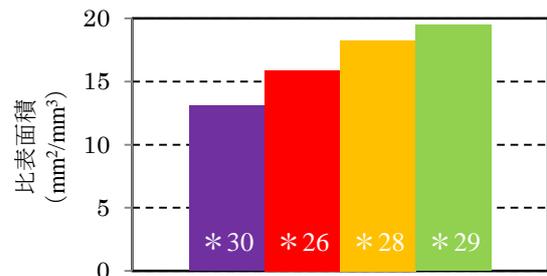


図-11 比表面積 (シリーズ 4)

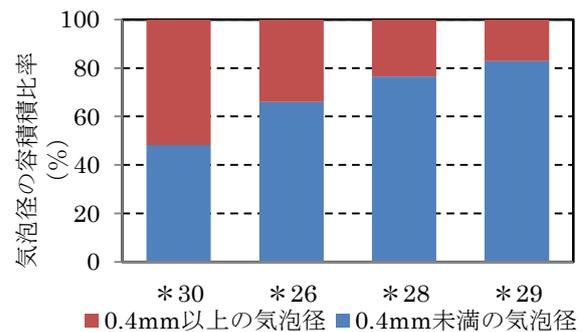


図-12 気泡の容積比率 (シリーズ 4)

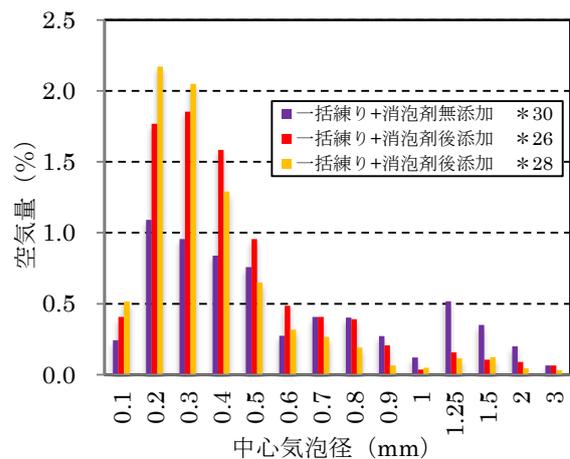


図-13 各空気径ごとの空気容積 (シリーズ 4)

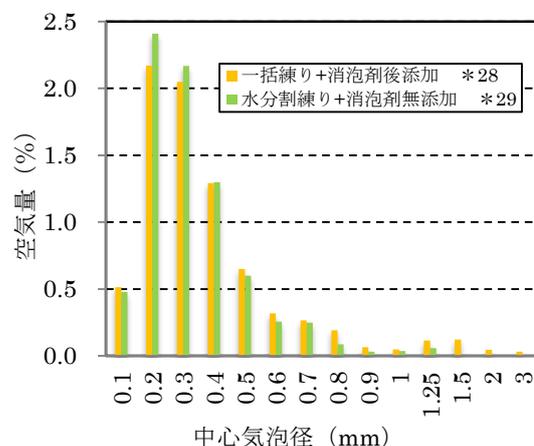


図-14 各空気径ごとの空気容積 (シリーズ 4)

5. 結論

本研究では、自己充填性に比較的可利と想定した小径空気泡の比率を増加させるために、消泡剤を活用して大径空気泡を除去する二種類の方法について検討した。一種類目が、水分割練りにおいて、なるべく細かい気泡を連行してから除去する方法であった。二種類目が一括練りにおいて気泡を大量に連行し除去する方法であった。

本研究で明らかになったことを以下に述べる。

- 1) モルタルの水分割練りで空気量 10%の状態のものに消泡剤を添加して空気量を減少させる方法では、①一次水と同時に消泡剤添加、②二次水と同時に消泡剤添加、③最後に消泡剤添加、3 ケース全てにおいて空気量は減少した。ただし、減少した気泡は小径空気泡であった。一方、大径空気泡は増加する結果になった。消泡剤の添加は、粗大径の気泡を除去させるよりも微細な気泡を除去させてしまったといえる。
- 2) 空気連行剤も同時に添加するモルタルの一括練りの従来型での練混ぜ方法では、小径空気泡の割合が低く、大径空気泡の割合が高かった。本研究で試した、一括練りの後に消泡剤添加する方法では、最初に添加する空気連行剤添加量が小さいと、モルタルの固体粒子間摩擦は空気量減少に応じて増加した。一方、空気連行剤の使用量を増加させるに従って、モルタルの固体粒子間摩擦は徐々に減少傾向を示した。その際、小径空気泡の比率は増加し、大径空気泡の比率は減少することを硬化後の気泡分布から確認した。
- 3) 本研究で試した、モルタルの一括練りで、最後に消泡剤添加する方法にて小径空気泡の比率を増やし大径空気泡の比率を減らすことが出来た。しかし、モルタルの水分割練りの方が気泡分布は細かったことを確認した。

今後の課題として、混和剤の種類の影響も検討する必要がある。

謝辞

本研究の気泡測定には、BASF ジャパン株式会社及び株式会社八洋コンサルタントに大変お世話になりました。また本研究を進めるにあたり、高知工科大学の宮地日出夫先生には数多くの御指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Attachaiyawuth , A., Tanaka , K., Sovannsathya, R. and Ouchi , M.: Air -enhanced self -compactability of fresh concrete with effective mixing method , Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol . 37 , No1, pp.1069-1074, 2015
- 2) 田中一徳 , Attachaiyawuth , A., Sovannsathya, R., 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
- 3) 児島孝之・高木宣章・栗栖一之・抜木幸次: フェロニッケルスラグ細骨材の微粒分がコンクリートの物性に及ぼす影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 第 51 巻, pp.772-777, 1997 年
- 4) 児島孝之・高木宣章・栗栖一之・抜木幸次: フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートの耐凍害性に及ぼす微粒分の影響, セメント・コンクリート論文集, 第 52 巻, pp.468-473, 1998 年
- 5) 濱 幸雄・平野彰彦・田畑雅幸・新 大軌: コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 634 号, pp.2061-2067, 2008 年
- 6) 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 3 月
- 7) 笠井芳夫・坂井悦郎編著: 新セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, pp.169, 2007 年 1 月
- 8) 大内・枝松・小澤・岡村: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No2, pp.451-456 , 1999 年