

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 元年 6月 25日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06445

研究課題名(和文) 連行空気泡の微細化によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上

研究課題名(英文) Enhancement in self-compactability of fresh concrete by finer entrained air bubbles

研究代表者

大内 雅博(Ouchi, Masahiro)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：80301125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：連行空気泡の一層の微細化法を、練り混ぜ中のモルタル相の粘性を低くすることにより径の大きな気泡を連行させず、微細な気泡を連行することにより構築した。フレッシュ時の自己充填コンクリート中の連行空気泡の径の大きさによる摩擦緩和効果のおよび浮上の有無を、フライアッシュと比較することにより明らかにした。増粘剤を添加してモルタルの粘着力を向上させることによる、フレッシュコンクリートへの自己充填性付与効果を明らかにした。この増粘剤添加による連行空気泡の特性への影響を空気量の経時安定性と径の分布を測定することにより調べ、微細な気泡の連行に有利であり、空気量の経時変化を抑制する効果のあることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋を有する型枠内に重力の作用だけで充填し、振動締め作業が不要である、施工の省力化および耐久性の向上に有効な自己充填コンクリートの普及・一般化を促進するための技術を開発した。高強度を必要としない一般の構造物用に、セメント量を減らして骨材量を増加させつつも自己充填性を維持することが可能な、経済性向上に有効である。高強度を必要としない場合でも、従来の自己充填コンクリートは普通コンクリートの約2倍の材料単価であったものから、微細気泡の連行とモルタル相への粘着力の付与により、約4割のコスト縮減を可能にする技術である。

研究成果の概要(英文)：An effective method for entraining fine air bubbles into fresh self-compacting concrete was established by lowering the viscosity of mortar phase. The size-effect of entrained air bubbles on mitigation in friction between solid particles of fresh self-compacting concrete during deformation and the floating by comparing with fly ash. Higher adhesion force attached to fresh mortar enhanced resistance to segregation of fresh concrete attained by a new type of viscosity agent and it assured self-compactability of fresh concrete with lower unit cement content. The viscosity agent also enhanced in keeping air content of fresh concrete and lowered the averaged diameter of entrained air bubbles.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：自己充填コンクリート 連行気泡 微細気泡 自己充填性 フレッシュコンクリート 粘着力 増粘剤  
ベアリング効果

### 1. 研究開始当初の背景

自己充填コンクリート(SCC)は鉄筋を有する型枠内に重力の作用だけで充填し、振動締固め作業が不要である。施工技術の良否に依存せず設計通りの性能を付与することが可能で、コンクリート構造の信頼性向上に有効である。ただし、自己充填性を付与するために単価の高いセメントの単位量が大きく、コンクリートの単価が普通コンクリートの約2倍になることから、わが国でのSCCの普及率は1%未満に留まっている。一方、セメント新聞社の調査によれば、わが国における圧縮強度 60 N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートの需要は約 5%である。しかも、フレッシュ時の自己充填性を付与するために必要なセメントの量が、一般的には、硬化後の強度発現に対して必要以上となっている(図-1)。

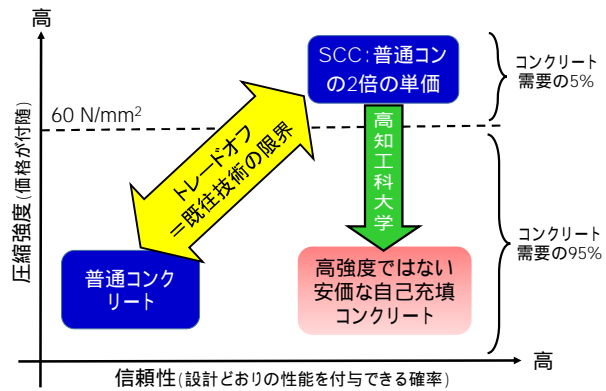


図-1 本研究の着想：強度発現には不要なセメント量を削減しつつ自己充填性を維持

研究代表者は、2013年、従来から凍結融解抵抗性付与のために連行されている空気泡がフレッシュ時の変形の際の摩擦を低減する効果を持つ可能性に着目し、単位セメント量を低減、すなわち、単位骨材量を増加した「気泡潤滑型自己充填コンクリート (Air-enhanced SCC; air-SCC)」を開発した。従来型の空気連行法(材料のミキサへの一括投入によるコンクリートの「一括練混ぜ」)では十分な自己充填性が得られなかったが、材料を分割して投入する「分割練り」では空気量 10%で十分な自己充填性が得られた。また、このコンクリートの 28 日圧縮強度は、標準的なコンクリートである水セメント比 55%、空気量 5%の普通コンクリートと同等であることを確認した。

しかし、実施工で起こる材料の品質変動を考慮すると、空気泡の質を高めておく必要があり、空気量も現在の普通コンクリートの標準量と同等の 5%であることが望ましい。すなわち、自己充填性付与のための空気量を 10%よりも低減させる必要がある。

さらに、同じ空気量でも自己充填性に差が生じた理由を知るため、硬化後のコンクリートの気泡径の分布を調べた。径の大きさの指標として、空気泡単位体積当たりの表面積 (= 比表面積) を求めた。空気量 10%程度であった 3 つのケースについて、比表面積と自己充填性との関係性を求めた。自己充填性 (ボックス試験上昇高さ) の高いものほど気泡の比表面積が大きい、すなわち、より微細であったといえる。気泡を一層微細化することにより、より少ない空気量で自己充填性を付与する可能性があることを示すものである。

この気泡径の微細化による自己充填性向上の可能性、および、そのための実用的な微細気泡連行技術の必要性を認識したことにより、本研究を着想した。

### 2. 研究の目的

これまでの予備的研究で air-SCC に空気量 10%で従来と同様の自己充填性を付与することができた。また、練混ぜ手順を変えることにより、連行された微細な空気泡が自己充填性を向上させることも確認した。本研究では、連行空気泡の微細化を図り、空気量 5%で同等の自己充填性を付与する air-SCC を開発する。このため、本研究では以下を実施する。

- ) 微細空気泡の効果的な連行の条件・手順を明らかにする。
- ) コンクリートへの自己充填性付与に適した気泡径を調べる。
- ) 空気連行のメカニズムを仮定し、連行空気泡の径の大きさと分布を能動的に調整することにより、自己充填性との関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

実験は高知工科大学にて行った。

空気量の増加に依存せずに自己充填性を付与するため、連行空気泡の一層の微細化を図った。その成果を基に自己充填性付与のための所要空気量の低減を図った。なお、air-SCC では個体粒子間摩擦低減のために水セメント比を 45%に高めている。一方、従来型 SCC の低水セメント比は約 30%である。また、多めの空気量によってブリージングを抑制している。本研究では気泡を微細化して大きい表面積により自由水を多く拘束し、ブリージングを抑制した。

最初に、連行空気泡の一層の微細化を図った。予備研究から自己充填性向上に有効であった直径約 300 μm 以下の気泡を主体として連行、または、それ以上の径の気泡を連行させないことを目指した。これに関しては以下の仮説を設定した：

- 仮説 : 空気連行剤添加量が気泡総表面積を決定
- 仮説 : 空気連行時 (練混ぜ時) の粘性が低いほど気泡径が小さくなる
- 仮説 : 練混ぜ時間を長くすると大気泡の分割により気泡径が小さくなるのと同時に空気量も

大きくなるが、空気連行剤添加量によって決定される空気泡総表面積を超えると、空気量のみが大きくなり気泡径が大きくなる

これらの仮説を、以下の方法により微細な空気泡を連行することの成否により検証した：

( ) コンクリートの練混ぜの際、空気連行剤 (AE 剤) 投入時点でのペースト相の粘性をなるべく低くする

( ) 材料が均質化する十分な練混ぜ時間と、巻き込み空気 (径が大きい) が混入しないような最小限の練混ぜ時間のバランスの決定

気泡径は、フレッシュコンクリートまたはモルタルの状態測定可能な唯一の装置 “Air Void Analyzer” (浮力法による空気泡解析機) を用いて測定した。ペースト相の粘性は、モルタル用ロートまたは回転粘度計を用いて測定した。

次に、微細な空気泡による、自己充填性付与のための空気量を低減した。当初に構築した方法を用いて連行した微細空気泡の、フレッシュコンクリートへの自己充填性付与への役割を定量的に明らかにした。以下に仮説を設定した：

仮説 ) 気泡は微細であればあるほど自己充填性は向上するのか、あるいは、その効果には限度が存在するのか

仮説 ) 気泡の粒度分布が自己充填性向上に影響するのか

仮説 ) 使用材料、特に細骨材の特性は空気泡による自己充填性向上効果に影響するのか

気泡の微細化によるフレッシュコンクリートの変形の際の固体粒子間摩擦低減の向上効果のメカニズムとして、気泡個数増加によるベアリング接点増加の効果、または、気泡径が小さいことによる表面張力増加に伴う気泡内圧上昇によるペースト相の剛性増加の効果、の2種類を仮定した。一方、気泡の微細化により同体積でも気泡総表面積の増加に伴い拘束される自由水量の増加により、変形の際の固体粒子間摩擦の増加の可能性がある。そして、これらの差し引きにより、自己充填性向上効果の大小 (自己充填性低下もあり得る) との仮説を立てた。

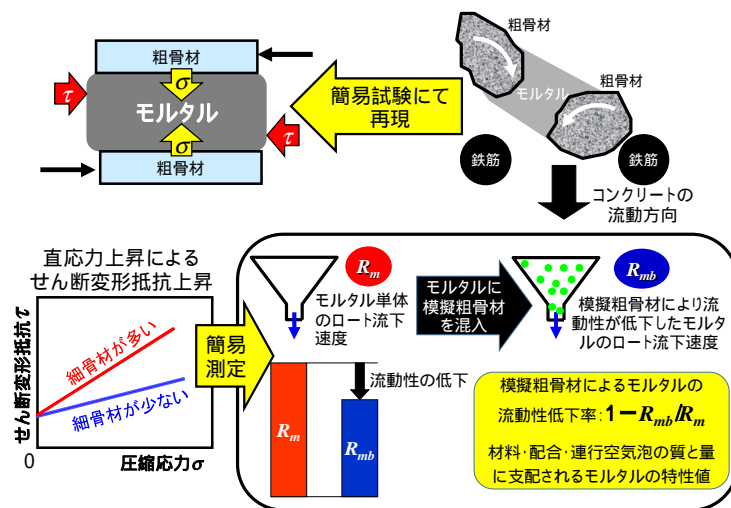


図-2 粗骨材の存在によるフレッシュモルタル中の固体粒子間摩擦の増加を定量化する方法

上記の仮説の検証のため、最初に、様々な径の空気泡を連行したフレッシュモルタルによる実験を行った。固体粒子間摩擦は、研究代表者が開発した、模擬粗骨材により低下するモルタルのロート流下速度試験により定量化した。モルタルのロート流下速度の測定後、粒径 10 mm の模擬粗骨材としてのガラスビーズを混入してロート試験を行い、流下速度の低下率を求める試験である (図-2)。

#### 4. 研究成果

連行空気泡の一層の微細化法を、練り混ぜ手順の調整または化学混和剤の添加による、二種類について構築し、その理由を明らかにした。練り混ぜ手順の調整によるものは、練り混ぜ中のモルタル相の粘性を低くすることにより径の大きな気泡を連行させず、微細な気泡を連行することが分かった。また、練り混ぜ時間の増加にともない粗粒巻き込み空気泡の微細化の進行、そしてそれが飽和すると再び粗大空気泡が連行され始めることが分かった。一方、化学混和剤としては、消泡剤を添加することにより大きな気泡の除去、ひいては微細気泡を残す方法を構築した。一度空気連行した後で消泡剤を添加して練り混ぜることが効果的であることが分かった。

以上をもとに、実施工においてフレッシュコンクリートの自己充填性を維持するために課題となっている空気量の経時変化 (減少) について、そのメカニズムを解明し解決策を構築した。コンクリート中の空気量の減少は、境界となる径以上の空気泡の浮上により生じていた。このことを、フレッシュコンクリート中の気泡径測定装置により、フレッシュ時の気泡径分布測定結果と経時による空気減少量との関係から明らかにした。今回、境界となる径の弦長は 1mm であった。また、境界となる径以下であっても、時間の経過に伴う気泡どうしの合体により径の大きさが境界値以上となり浮上、ひいては空量減少に結びつくと仮定すると、現象を説明可能であることが分かった。

次に、フレッシュ時の自己充填コンクリート中の連行空気泡の径の大きさによる摩擦緩和効果のおよび浮上の有無を、フライアッシュと比較しながらその添加の影響を考慮して明らかにした。連行空気泡による固体粒子間摩擦低減、いわゆるベアリング効果については、今回、それが生じる径の大きさは0.45mm以下であった。弦長がこれよりも大きい空気泡の量が増えると摩擦低減効果が低減した。球形であることは共通している連行空気泡とフライアッシュについて、単独または併用した際のフレッシュコンクリートの変形摩

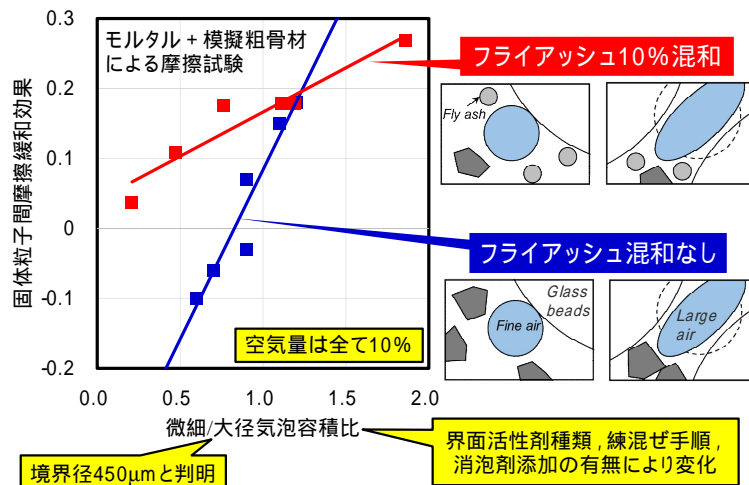


図-3 フライアッシュの混和（低摩擦条件下）により，固体粒子間摩擦緩和効果に対する気泡径分布の影響は鈍くなる

擦低減，ひいては自己充填性効果を明らかにした。自己充填コンクリートのモルタル相を対象に，模擬粗骨材としてのガラスビーズの混入によるロート流下速度低下度を指標とした。鉄筋を有する型枠内に重力の作用のみで充填される自己充填コンクリートの経済性向上のために開発された，微細気泡を連行して単位セメント量削減を図った気泡潤滑型自己充填コンクリートに球形粒子の粉体であるフライアッシュを併用して，一層の経済性向上を図ることを目標とした。比較的小さい径の連行空気が摩擦緩和に有効である一方，大きな径のものでは摩擦が増大することを示した。その境界となる直径は，本研究の範囲では約450μmであることを示した。共に球形材料であるフライアッシュと微細空気泡は共に摩擦緩和効果があるが，その大きさは微細空気泡の方が大きかった。フライアッシュと微細空気を併用した場合，その摩擦緩和効果は両者の合計よりも小さいことが分かった（図-3）。

経時に対する空気量の安定は施工性の担保に必要な不可欠である。フライアッシュ添加の有無，空気連行剤の種類，そして消泡剤添加の有無により連行気泡径分布を変化させたフレッシュモルタルについて，時間経過による合体による大径化とそれによる浮上による空気減少量を，練り上がり時の空気径分布より定量的に説明することができた。本研究の範囲内では，直径1,500μm以上の気泡が浮上して抜けることが分かった（図-4）。

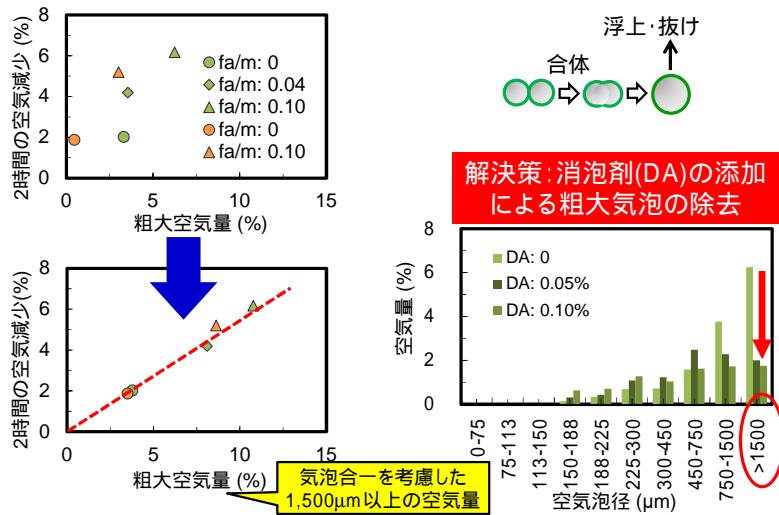


図-4 フライアッシュによる低摩擦がもたらす気泡合体と浮上による空気減少の促進とその解決策

さて，高強度を必要としない自己充填コンクリートの経済性向上の

ためには水セメント比を高くする必要がある。気泡潤滑型自己充填コンクリートで採用した配合である。一方，水セメント比が高くなるとペーストと骨材との間の粘着力が低下して剥離が生じ，所要の自己充填性が得られなくなる可能性がある。以上が本研究着手時点では不明であった点である。そこで，増粘剤を添加してモルタルの粘着力を向上させることによる，フレッシュコンクリートへの自己充填性付与効果について調べた。モルタル中への粗骨材沈降の抑制，および，モルタルと粗骨材の変形の一体化を対象とした。その結果，以下の3点が明らかになった：(1)増粘剤の添加により粗骨材とモルタル間の粘着力を向上させて材料分離抵抗性を向上させることにより，水セメント比45%のフレッシュコンクリートに自己充填性を付与した。(2)厚さの異なるロート流下速度の比を指標として，モルタルの粘着力を定量化した。(3)増粘剤の添加量を変化させたコンクリートの自己充填性と，そのモルタル相の粘着力の指標とが高い相関を示した（図-5）。

そして、この増粘剤添加による連行空気泡の特性への影響を、空気量の経時安定性と径の分布を測定することにより調べ、以下の3点を明らかにした：(1)新型増粘剤をモルタルに添加することにより微細な気泡の連行を有利にし、空気量の経時変化を抑えることが出来た。(2)同じ空気連行剤添加量での連行可能な空気量は、新型増粘剤添加の有無にかかわらず、主に水セメント比に支配されていた。水セメント比が低いほど連行空気量が小さくなった。(3)練上り直後の気泡の比表面積は、主に粘度の高低に左右されていた。増粘剤添加のものに比べ、低水セメント比による高粘性のモルタルの方が微細気泡の割合が高かったが、経時による空気量減少が大きかった。すなわち、増粘剤による効果には空気の微細化以外の要因も存在する可能性を得た。

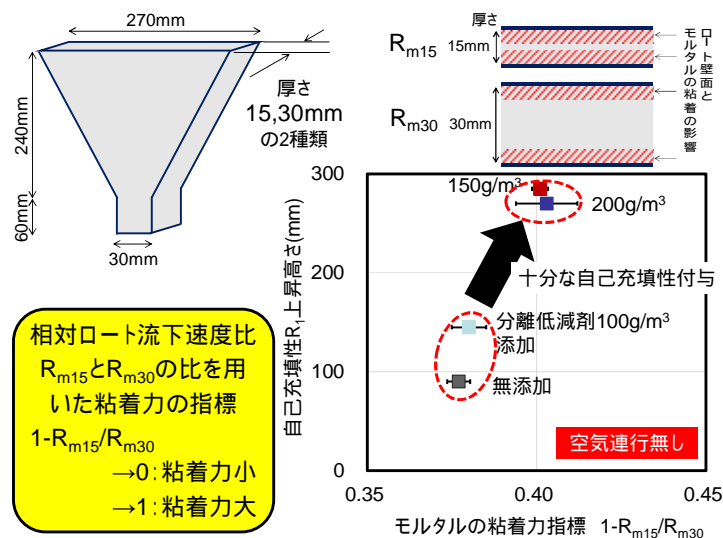


図-5 厚さの異なるロート流下速度の比を用いた粘着力の定量化とその自己充填性向上効果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Puthipad, N., Ouchi, M., Attachaiyawuth, A.: Effects of Fly Ash, Mixing Procedure and Type of Air-entraining Agent on Coalescence of Entrained Air Bubbles in Mortar of Self-compacting Concrete at Fresh State, *Construction and Building Materials*, 査読あり, pp.437-444, August, 2018.  
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.138

Rath, S., Ouchi, M., Puthipad, N., Attachaiyawuth, A.: Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the viscosity and air entraining agent dosage, *Construction and Building Materials*, 査読あり, pp.531-537, September, 2017.  
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.105

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*, 査読あり, Vol.144, pp.1-12, July, 2017.  
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.049

Rath, S., Puthipad, N., Attachaiyawuth, N., 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*, 査読あり, The Japan Concrete Institute, Vol.15, pp.29-37, January, 2017.  
DOI:10.3151/jact.15.29

Ouchi, M., Kameshima, K., Attachaiyawuth, A.: Improvement in self-compacting properties of fresh concrete by eliminating large air bubbles using an antifoaming agent, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 査読あり, The Japan Concrete Institute, Vol.15, pp.10-18, January, 2017.  
DOI:10.3151/jact.15.10

Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S., Attachaiyawuth, A.: Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash, *Construction and Building Materials*, 査読あり, Vol.128, pp.349-360, December, 2016.  
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.087

〔学会発表〕(計 5件)

Onishi, H., Ouchi, M.: Enhancement of self-compactability of fresh concrete by higher adhesion of mortar to coarse aggregate, *CICHE International Forum*, 台湾高雄市, 2018年

大西 悠, 大内雅博: 粗骨材・モルタル間の粘着力向上によるフレッシュコンクリートへの自己充填性付与, 第73回土木学会年次学術講演会, 札幌市, 2018年

Mouri, T., Ouchi, M.: Coalesce and disappearance of entrained air in self-compacting

concrete at fresh stage ,CICHE-JSCE Joint Workshop, 台中市, 2018 年

Puthipad, N. , Ouchi, M.: Use of defoaming agent for elimination in large entrained air bubbles to improve air stability in mortar of self-compacting concrete with high volume fly ash, International Symposium on Social Management Systems , バンコク市, 2017 年

中村巴大, 大内雅博: 空気を連行したフレッシュ時の自己充填コンクリート中の固体粒子間摩擦に及ぼす細骨材の物理的特性の影響, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 福岡市, 2017 年

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

### (2)研究協力者

科研費による研究は,研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため,研究の実施や研究成果の公表等については,国の要請等に基づくものではなく,その研究成果に関する見解や責任は,研究者個人に帰属されます。