

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02217

研究課題名(和文)粘着力を高めたペーストの骨材からの剥離防止による最多骨材自己充填コンクリート

研究課題名(英文)Uniform deformation of aggregate and paste with higher adhesive force for maximizing aggregate content in fresh concrete maintaining the level of self-compacting performance

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) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：フレッシュコンクリートの自己充填性能の要因と仮定したフレッシュモルタルの骨材との間の相対変位の向きにより、面内と面外の2つを粘着力を定義した。面内粘着力は、回転粘度計によるローターとモルタルとの間で剥離を開始する際のずり応力とする方法を構築した。面外粘着力は、モルタル試料に対して鉛直方向の剥離を生じさせる、万能物性測定装置による剥離応力として求めた。自己充填性能が高める水溶性セルロースエーテル系増粘剤の粘着力を剥離速度を変えて測定した。高めの相対速度下での粘着力は、増粘剤添加の有無による差が顕著であり、高い粘着力を得た材料・配合のフレッシュコンクリートの自己充填性能が高いことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会インフラの大規模更新時代と国土強靱化推進のため、高い信頼性と経済性を両立させたコンクリートが必要である。そのためには、ペースト相に高い粘着力を付与することによってフレッシュコンクリートの自己充填性を維持しつつ、セメント量の低減と骨材量の増加を図る必要がある。本研究成果は、任意の材料および配合からそれを具体化する「最多骨材自己充填コンクリート」成立のために必要な、フレッシュコンクリート中のペーストまたはモルタル相の粘着力定量化のための技術となる。

研究成果の概要(英文)：Two types of adhesion strength of fresh mortar or paste to the surface of aggregate in self-compacting concrete were measured: in-plane and outside adhesion strengths. A method for measuring in-plane adhesion strength was newly defined as the peel strength between the surface of fresh mortar or paste and the rotor of the rotating viscometer. The outside adhesion strength was measured by the conventional texture analyzer. Higher relative velocity of the measurement resulted in the higher adhesion strength, and the effect of the new type of cellulose ether viscosity agent on the promotion of adhesion strength was prominent. The measured higher adhesion strength corresponded to the higher level of self-compacting performance of fresh concrete that was achieved by the new type of cellulose ether viscosity agent.

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 高流動コンクリート 自己充填性能 フレッシュコンクリート 粘着力 剥離  
回転粘度計 粘度

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

フレッシュコンクリートの自己充填性は間隙通過性に象徴される。この自己充填性付与に必要なモルタル相の性質は、高い変形性（重力による大きな広がり）、適度な粘性（粗骨材粒子間の衝突を緩和するための緩やかな変形速度）、高い圧力伝達特性（圧縮応力下でも増加が緩やかな摩擦力）、の3要素であるとされてきた。これをもとに、汎用型の自己充填コンクリート(SCC)の配合設計法においては、粗骨材量を制限した上で、モルタル相について、低い水セメント比(質量比で30%程度)と高い高性能 AE 減水剤添加量と細骨材容積比の制限により自己充填性を付与する方法が採用された。結果として、SCCの単位セメント量は500~600 kg/m<sup>3</sup>、従来のコンクリートの約2倍、材料単価も約2倍となっている。

この方法においては、本来コンクリートの強度を左右する水セメント比が強度とは無関係の自己充填性付与の観点から定められることになる。SCCは必然的に圧縮強度60 N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートとなってしまふ。ところが地震等の災害が多く構造物への要求性能が高い我が国においても高強度コンクリートの需要は全コンクリートに対してわずか5%に過ぎない。従って、プロトタイプ在完成以来30年が経過したにもかかわらず、SCCの普及率は1%にも満たない状況にある。

SCCの経済性向上には、不要な強度を付与しないことが最も効果的である。このため、コンクリートの容積を構成する材料の中で最も高価なセメントの使用量を削減する方向で、SCCに関わる技術開発が進められてきた。例えば、高強度を必要としない構造物のために、水セメント比を普通コンクリート並み(45~55%程度)に高めた経済的なSCCの開発が積極的に行われてきた。増粘剤の添加、そして、申請者自身による微細空気泡の連行によって、セメント量を小さくし細骨材容積比を高めた配合であっても、モルタルへ上記3要素を付与することが可能となってきた。

しかし、水セメント比が30%を大きく超えると、上記の3要素を付与しても最高ランクの自己充填性能(土木学会基準のR<sub>1</sub>)を得ることが困難である。申請者はその原因を、フレッシュコンクリートの自己充填性を成立させる要素に未だ認識に欠けているもの存在によると考えた。単位セメント量の小さい(=水セメント比の高い)フレッシュコンクリートにおいて顕在化する性状であることから、申請者は、ペースト相における骨材との粘着力不足によるとの仮説を立てるに達した。

本研究の核心をなす「問い」は、「フレッシュコンクリート中のペースト相の高い粘着力が骨材からの剥離を抑制し、変形の一体性を高める」という仮説(図-1)は妥当か、である。

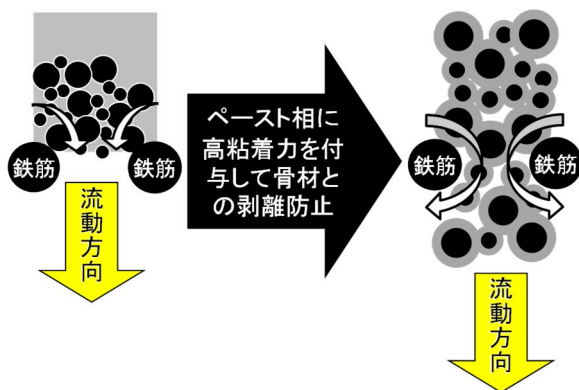


図-1 高粘着力ペーストが骨材表面にまとわりつくことにより骨材間の直接衝突を抑制 自己充填性向上 (骨材を示す黒丸の数は左右で同じ)

### 2. 研究の目的

社会インフラの大規模更新時代を控え、さらに、大震災を想定した国土強靱化を推進するには、適正な強度と信頼性および経済性を持つコンクリートが必要である。そのためには、ペースト相に高い粘着力を付与することによってフレッシュコンクリートの自己充填性を維持しつつセメント量の低減と骨材量の増加を図る。即ち、高い自己充填性を維持しつつ、普通コンクリートと同等の骨材量にまで高めた「最多骨材自己充填コンクリート」を目指す(図-2)。

防災の観点から、整備、更新が必要な構造物について全国規模で見ると、コンクリートが非常に高強度である必要は殆ど無い。しかし、耐震性の確保・安心感という点から鉄筋量は大きくならざるを得ない。このため、設計通りの性

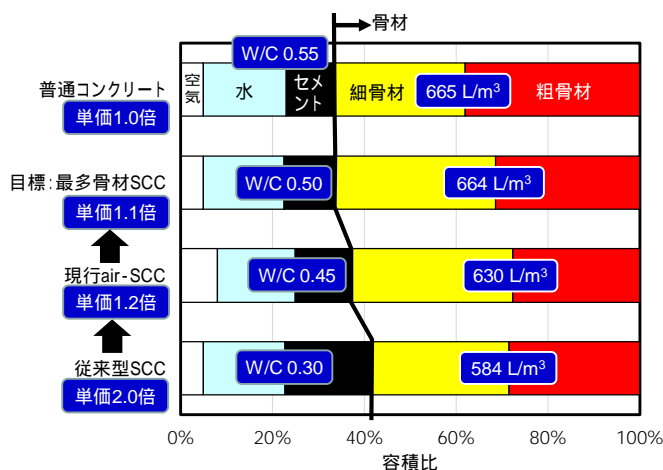


図-2 最多骨材 SCC: 開発目標は普通コンの骨材量と材料単価に近づくこと; 材料単価1割増は総工費の1%増にすぎない

能を担保し、かつ、迅速に施工できるためにはコンクリートに自己充填性能が必要となる。本研究は、申請者が開発した微細気泡の連行により経済性を向上させた気泡潤滑型自己充填コンクリート(air-SCC)に、これまで着目されてこなかったペースト相に粘着力を独立に付与して骨材・ペースト間の剥離を防止して自己充填性を向上させるという新しいアプローチを加えた、申請者独自の研究である。

経済性の視点で見ると、本研究によって従来型 SCC の約半分のコストの「最多骨材 SCC」が実用化される(図-2)。現在、一般の鉄筋コンクリート構造物の総工費の1割がコンクリート材料費である。最多骨材 SCC のコストは普通コンクリートの約1割増しであるから、総工費も約1%増しに過ぎない。このコスト内でコンクリートが型枠内に確実に充填されると、構造物を迅速に建設することができ、工期の短縮が可能になる。また、構造物に設計通りの性能を付与できる信頼性が格段に向上する。コンクリート構造物の長期耐久性を損ねるのは内部の鉄筋腐食であり、それを防ぐのは、新規建設の際の鉄筋かぶり厚さの確保や鉄筋周囲の保護のためのコンクリートの確実な充填である。本研究の自己充填性付与のための技術は、従来型 SCC の不必要な使用を抑える(単価を下げ、施工を迅速化)ことを通して国家規模での財政的な貢献につながる。

上記の目標実現のため、本研究では、以下の3つの目的を設定した。

- (1)フレッシュモルタルの粘着力の定量化法の構築
- (2)高い粘着力が高い自己充填性能を付与可能であること示す
- (3)高粘着力付与が連行気泡の独立性維持にも有利であることを示す

### 3. 研究の方法

本研究成立のためには、フレッシュコンクリート中のモルタルまたはペースト相に高い粘着力を付与する化学混和剤である増粘剤の存在が前提となる。信越化学工業(株)の協力により調製した分子構造が異なるセルロースエーテル系増粘剤の3種類を比較使用した。以下、添加する増粘剤の種類または添加の有無がフレッシュモルタルまたはコンクリートの性状に及ぼす影響が、本研究の眼目となる。以下、設定した3つの目的ごとに研究方法を示す。

- (1)フレッシュモルタルの粘着力の定量化法の構築

フレッシュコンクリートの自己充填性を支配する要因としてフレッシュモルタルの粗骨材との粘着力に着目し、その測定法を構築した。粘着力には、対象とする面に対して鉛直方向の「面外粘着力」と、水平方向の「面内粘着力」の2種類を定義した。面内粘着力の測定には汎用品の万能物性測定装置である「テクスチャ・アナライザー」を用いることが可能である。

本研究で新たに構築したのは面外粘着力の測定方法である。原理的には一面せん断試験を応用したものがあり得るが、測定に手間を要することから実用的ではないと判断した。そこで、汎用の回転粘度計を応用した方法を新たに構築した。汎用の回転粘度計におけるローターの回転速度では、フレッシュモルタルとの間に剥離が生じていることが通常であり、むしろ粘着力の定量化にとっては有利であると着想に至った。

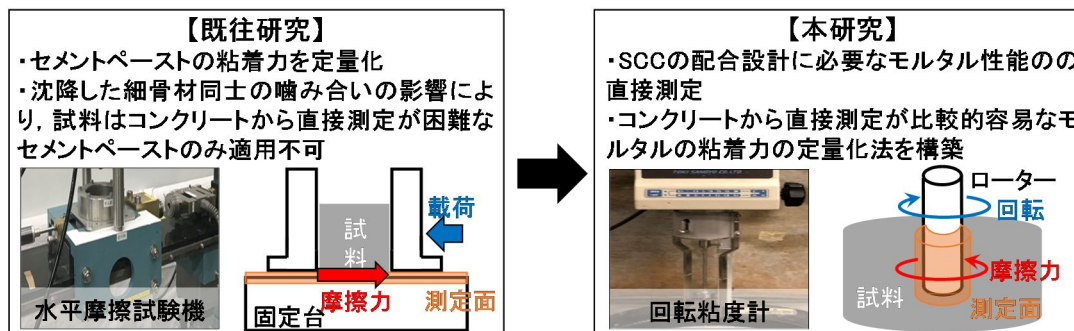


図-3 本研究で構築する回転粘度計による粘着力測定法

さらに、生コンクリート製造工場での使用を想定した簡便な粘着力測定法を考案する。重力の作用によるフレッシュモルタルのロート流下に際して影響を及ぼす可能性の高い内側壁面との摩擦力はフレッシュモルタルの粘着力によるものだからである。

- (2)高い粘着力が高い自己充填性能を付与可能であること示す

(1)で構築した方法により、試作した各種増粘剤を添加したフレッシュモルタルの粘着力を測定する。そして、増粘剤の種類または添加の有無によるフレッシュコンクリートの自己充填性能を調べて粘着力の効果を検証する。

- (3)高粘着力付与が連行気泡の独立性維持にも有利であることを示す

単位セメント量低減型自己充填コンクリート成立の鍵となる、フレッシュコンクリートの変形の際の固体粒子間摩擦緩和のために連行する微細空気泡の径分布の経時およびポンプ圧送の際の加圧安定性の、添加する増粘剤による影響を調べた。気泡径分布の測定には浮力法による自動測定装置(AVA: Air Void Analyzer)を用い、時間の経過による径分布の変化を調べた。



#### 4. 研究成果

##### (1) フレッシュモルタルの粘着力の定量化法を構築した

回転粘度計ではローターを試料に挿入した際にローター表面とモルタル間に一時的に空隙が生じる。この空隙はいずれもモルタルの変形により消滅して付着するが、特に測定直後のずり応力にばらつきが生じることを確認した。よって、剥離試験のためには試料によらない一定の付着度が必要である。つまり、粘度の影響を考慮した付着度の確保が必要である。そこで、粘性の異なる W/C=0.45 および 0.35 のフレッシュモルタルを用いて、再循環領域におけるずり応力のばらつきを最小化する付着度の確保に適した回転速度を選定した。

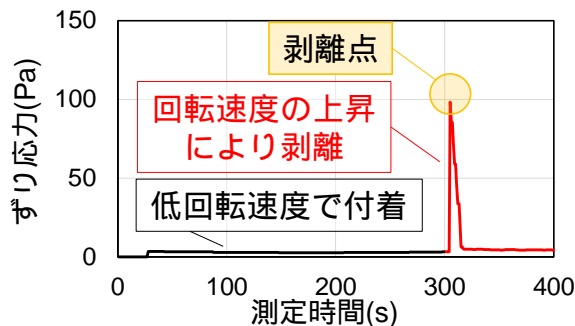


図-4 回転粘度計による剥離強度測定の手順

モルタルの粘性によらず十分かつ安定した付着度の確保のためには回転速度 1.0 rpm で 300 秒間回転が適していた。そして、その後で回転速度を上昇させることで、剥離の進行により明瞭な剥離点を得る方法を、剥離試験法として構築した(図-4)。

回転粘度計 (TVB-15 形) を用いて、低回転速度における剥離強度を測定した。VMA の添加の有無に拘わらず高回転速度ほど剥離強度が増加し、VMA による剥離強度の向上効果を回転速度 10 rpm で確認することができた。次に、より高性能な粘度計 (TVB-25 形) により高回転速度における粘度と剥離強度を測定した。増粘剤 A を添加すると回転速度 100 rpm 時には、粘度が同程度でありながら低フロー値 (230 mm) より剥離強度が高く、VMA は粘度より粘着力の付与が卓越していることを示唆した (図-5)。さらに、各速度における粘度と剥離強度の関係より、高回転速度ほど粘度と剥離強度の相関は低くなった。回転速度をさらに高速にできれば、粘着力が支配要因である剥離強度を測定できる可能性を得たと言える。

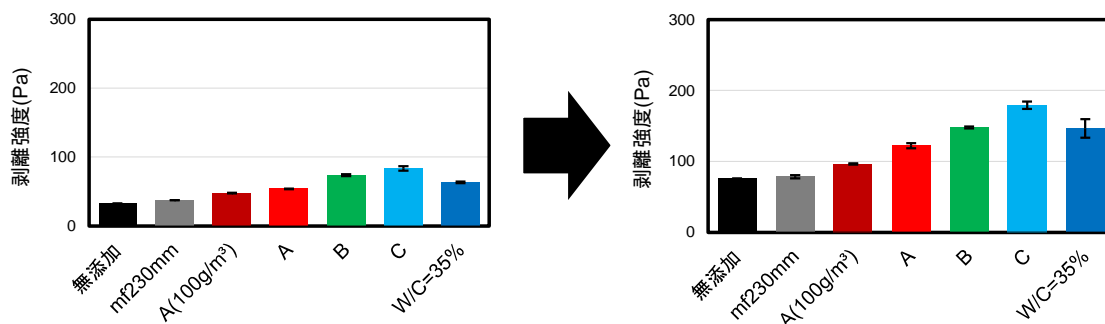


図-5 高回転数粘度計により増粘剤によるフレッシュモルタルへの高粘着力付与効果を定量化可能に (左:ローター速度 3.3mm/sec ; 右:8.5mm/sec ; A,B,C が各増粘剤)

一方、粘着力測定の簡便化を目的として作成したテーパ部傾斜の異なるフレッシュモルタルロート流下速度の比較による粘着力定量化においては、増粘剤添加の有無による顕著な差異が生じなかった。重力の作用のみによるフレッシュモルタルの自由落下速度が、上記試験による相対速度よりも小さいことにより粘着力の影響が顕在化しなかったものと考察した。

##### (2) 高い粘着力が高い自己充填性能を付与可能であることを示した

上記の方法を用いて、添加することにより自己充填性能が高まることが確認されてきた水溶性セルローズエーテル系増粘剤の粘着力を、相対速度に相当する剥離速度を変えて測定した。その結果、粘着力の速度依存性が高く、特に、高めの相対速度 (ローターの回転速度: 10 mm/sec 以上) により測定した面内粘着力において、増粘剤添加の有無による差が顕著であった。これにより高い粘着力を得た材料・配合のフレッシュコンクリートでは高い自己充填性能を得たことを確認した(図-6)。

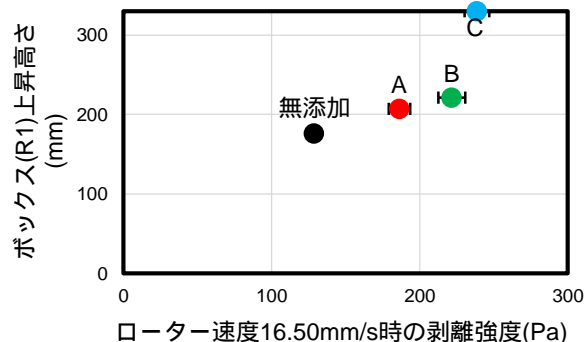


図-6 比較的高速回転により得られたフレッシュモルタルの粘着力とコンクリートの自己充填性能との関係

なお、ボックス上昇に要した時間は、上昇高さ 300 mm でおよそ 5~15 秒であり、実際に生じている粗骨材とモルタルの剥離速度 (相対速度) は、設定可能な回転速度の上限 16.50

rpm である。

mm/sec よりさらに高速である可能性がある。高回転速度程剥離強度に大きな差が生じ粘着力の効果が卓越する可能性があるため、間隙通過速度を考慮した剥離速度による剥離試験法の検討が今後の課題である

(3)高粘着力付与が連行気泡の独立性維持にも有利であることを示した

増粘剤を添加したフレッシュモルタルは連行空気泡の抜けが小さく、1000 $\mu$ m 未満の気泡減少量はほとんどなかった。また、1000 $\mu$ m 以上の連行空気泡についても抜けが小さくなった。これは、増粘剤が有機物であるため、気泡の周囲に膜を作り合泡や浮上による抜けを防止しているためであると考えられる。この増粘剤の気泡潤滑型自己充填コンクリートへの有効性を確認できたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 大西 悠, 大内 雅博	4. 巻 42(1)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1043-1048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福田 翔太, 大内 雅博	4. 巻 42(1)
2. 論文標題 フレッシュコンクリートの間隙通過性を支配するモルタルの固体粒子間摩擦の定量化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1025-1030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 和田 晃宜, 浅野 弘裕, 大内 雅博	4. 巻 43(1)
2. 論文標題 砂糖添加による水和反応進行の抑制が自己充填性能安定化のためのフレッシュモルタルの性状に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 826-831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 古竹 莉久, 大内 雅博	4. 巻 44(1)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古竹 莉久, Anuwat ATTACHAIYAWUTH, 大内 雅博
2. 発表標題 フレッシュ時の空気量減少の抑制による自己充填コンクリートの硬化後表面の残留気泡発生防止
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 奨、大内 雅博
2. 発表標題 自己充填性を支配するフレッシュモルタルの粘着力の回転粘度計による定量化
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井 仁哉、大内 雅博
2. 発表標題 測定条件により変化する自己充填コンクリート用フレッシュモルタルの粘性の指標
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森崎 弘汰朗、大内 雅博
2. 発表標題 砂糖添加がフレッシュモルタルへの連行空気泡の独立性に及ぼす影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------