

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01590

研究課題名（和文）水硬性を有しない副産粉体を大量利用したコンクリートの強度向上理論

研究課題名（英文）Theory for improving the strength of concrete using a large amount of by-product powder that does not have hydraulic lime

研究代表者

小山 智幸（Koyama, Tomoyuki）

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：50215430

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：硬化コンクリートの細孔構造において、50nm程度以下の小径の空隙は強度に悪影響を及ぼさないこと、したがって反応性のない副産粉体を用いた場合でも、セメントの外割で混合した場合には、粉体混合量の増加に伴い空隙の総量は変わらないものの、小径の空隙が相対的に増加するため強度が向上し、副産物として有効活用可能であることを確認した。

また、硬化後の小径空隙の割合を増やして空隙構造を最適化するためには、混合前における粒子どうしの平均空隙間隔を極小化すればよいことを見出し、強度を向上させるための最適解を示した。シミュレーションの過程で、評価指標として更に適切な粒子の平均空隙厚さを見だし、さらに評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本方法によれば、単独で水と混合してもセメントのように硬化することのできない、反応性を有さない粉体を用いた場合でも、ベースとなるコンクリートの強度を向上させることができるので、例えば砕石を製造する際に副産する石粉や種々のフライアッシュなどの産業廃棄物の有効活用を、コンクリートの重要な要求性能である強度を向上させながら、可能にすることができる。またその際の、粉体構造を最適化する検討を行うことができる。

研究成果の概要（英文）：In the pore structure of hardened concrete, voids with a small diameter of about 50 nm or less do not adversely affect the strength, and therefore even when non-reactive by-product powder is used, when mixed by fixed cement content, Although the total amount of voids did not change as the amount of powder mixed increased, it was confirmed that the voids with small diameters increased relatively, so the strength improved and it could be effectively used as a by-product.

In addition, in order to increase the proportion of small-diameter voids after curing and optimize the void structure, it was found that the average void spacing between particles before mixing should be minimized, and the optimum solution for improving the strength was found. Indicated. In the process of simulation, we found a more suitable average void thickness of particles as an evaluation index and further evaluated it.

研究分野：建築材料学

キーワード：副産粉体 資源循環 コンクリート 細孔構造 強度 粒子の平均間隔 平均空隙厚さ

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする副産粉体の一つであるフライアッシュを例に述べると、発生量は我が国で約 1000 万トンを超え、全世界では確実なデータの得られた 2000 年頃すでに 5 億トンに達している。現在、国内のフライアッシュの大半はセメント原料の一つである粘土の代替として使用されており、その利用率も高い。しかし、セメントの生産量自体が減少傾向にあり、将来的に飛躍的な増大は期待できない。一方、残りはほとんどが埋立処分されているが、灰捨場の確保が年々難しくなりつつある現状を考慮すると、今後は埋め立て以外の方法に移行せざるを得ない。

本来、フライアッシュはポズラン活性など種々の優れた性質を具備しており、埋立てや単なる粘土の代替使用ではなく、より有効な活用が望まれる。このような中で最も注目されているのが、コンクリート混和材としての利用であるが、現状はフライアッシュをセメントの一部として、いわゆる内割使用するか、細骨材の一部として利用することが前提となっている。前者ではフライアッシュの混合量が大きくなるとセメントの使用量が減少するため強度や耐久性が損なわれる。そのため、コンクリート 1m³ 当たりのフライアッシュの使用量に限度があり、現在 100 kg 前後の混合が一般的となっている。後者の場合もフライアッシュの混合による強度向上は考慮されておらず、そのポテンシャルを活かした調合設計とはなっていない。

研究代表者らは、フライアッシュをはじめとする副産物のコンクリートへの大量混合を目的として研究を行い、単位体積当たりの混合量を大きくするためには、従来の内割混合ではなく、セメント量を一定として粉体を混合する外割混合の方が適していることを見出した。図 1-1 に概念図を示すように、内割混合では粉体量が多くなると無混合の場合に比してセメント量が減るため、とくに初期材齢における強度低下が問題となる。一方、外割混合の場合は必要なセメント量を確保しながら粉体を混合するため強度低下がないと考えた。しかも実際には、図 1-2 に示すように外割混合したコンクリートは、無混合の場合よりも強度が高くなること明らかになった。後述するように、反応性を有さない砕石粉や石灰石粉を用いた場合でも若材齢時からこの強度性能向上は生じるので、この現象は、フライアッシュのポズラン反応によるものではなく、別の物理的作用によるものであると判断された。これを応用すると、フライアッシュのみならず反応性を有しない他の副産粉体、例えば砕石を製造する際に副産する際石粉などの産業廃棄物の有効活用を、コンクリートの重要な要求性能である強度を向上させながら、可能にすることができると考えこの研究を行った。

2. 研究の目的

一般に、ある副産物を別の製品の原材料として使用する場合には、図 2-1 の概念図のように、新材を用いる場合と比較して、①のように性能が新材と同じで製造コストが上がる場合や、⑥のように性能が向上しコストも下がる場合などが想定される。資源循環においては後者が望ましいのは自明であり、前者は古紙

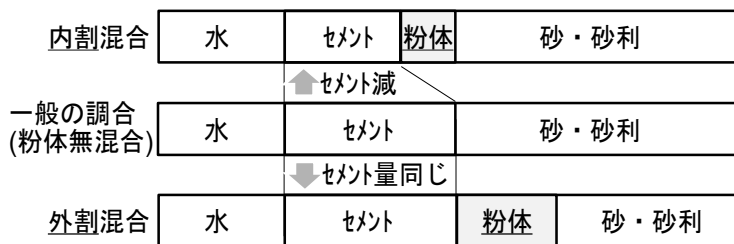


図 1-1 粉体の内割混合と外割混合

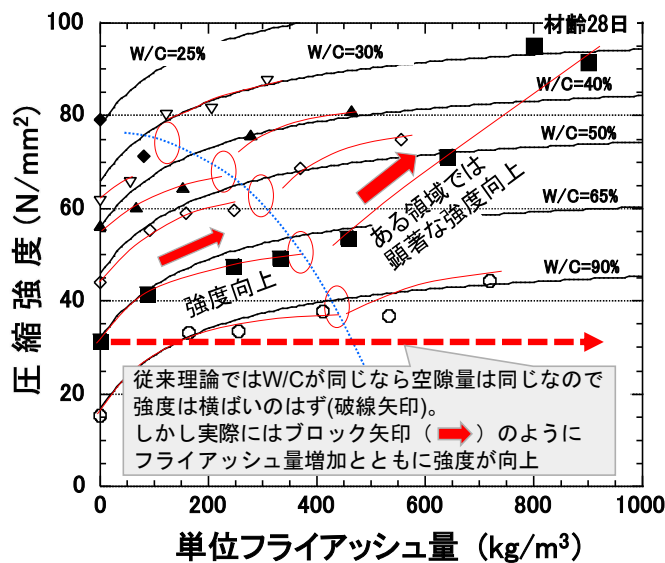


図 1-2 粉体混合量とコンクリートの圧縮強度

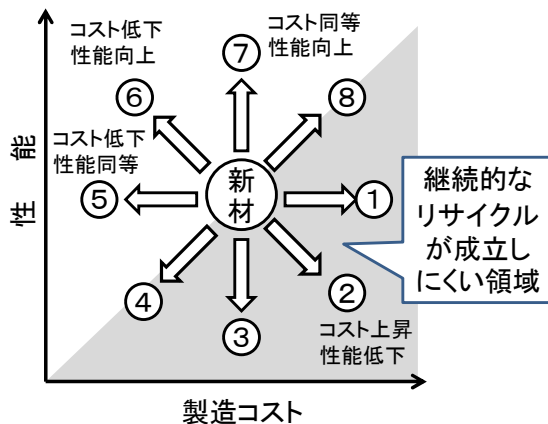


図 2-1 リサイクルにおける性能と製造コストの関係

の場合のようにグリーン購入法などの政策的、経済的な補助がなければ継続的なリサイクルとして成立しにくい。

コンクリートの製造量は年間1億 m³ 近くあり、副産物を混和材料として受け入れるのに十分なキャパシティを有している。ただし、コンクリートは都市における重要なインフラ材料であり、その性能を損なうことは将来にわたって負の財産を遺すこととなる。フライアッシュは、コンクリートに一般に用いられるポルトランドセメントのような水硬性、すなわち水と化学反応を生じて硬化する性質を有していない。そのため通常は図 2-1 の③～④のパターンにおいて、混合による性能（具体的には強度や耐久性など）の低下が許容できる範囲でのみ使用され、現状ではごく一部がコンクリート用混和材として使用されているに過ぎない。本研究は、フライアッシュをはじめとする種々の非水硬性副産粉体を、コンクリートの性能を損なうことなく、むしろ向上させながら大量に有効利用するために不可欠な強度理論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

図 3-1 に示すように、ある物質の強度はその内部に存在する空隙（=欠陥）の量が多いほど低下する。空隙の量が多いと外力に耐える固体部分の体積が相対的に減少することのほかに、強度に悪影響を及ぼす致命的な欠陥の存在確率が高くなるためである。この原理はコンクリートにおいても同様であり、実用上は、調合時の水とセメントの質量比、すなわち「水セメント比」によって圧縮強度はコントロールされる。コンクリートの結合材として一般的な普通ポルトランドセメント（以下 NPC）のみを用いる場合にはこの理論で支障ないが、NPC とは異なり反応性を有しない種々の副産粉体を混合する場合には、別の要因が加わる。例えばコンクリート内部の空隙の総量が同じであっても、使用する副産粉体の混合方法によっては空隙のサイズが細くなり、圧縮強度も向上することが代表者らによって確認されている。図 3-1 に代表される従来の強度理論によれば、強度への影響は空隙のサイズとは無関係で空隙の量のみで支配されることになり、空隙構造の微細化による強度向上現象は従来の理論によっては説明できない（図 3-2）。

先の図 1-2 に示したように外割混合したコンクリートは、無混合の場合よりも強度が高くなる。図 3-3 に例を示すように、反応性を有さない砕石粉や石灰石粉を用いた場合でも若材齢時から性能向上は生じており、粉体の化学反応によるものではなく、物理的作用によるものであると判断される。これらに関して代表者らは以下のような考察を行った：一般に、ある物質の強度はその内部に存在する欠陥の量が少ないほど大きくなる。コンクリートにおいては、セメントが水と反応して反応前の約 2 倍（厳密には条件により異なり、1.6～2.2 倍）の体積の硬化体

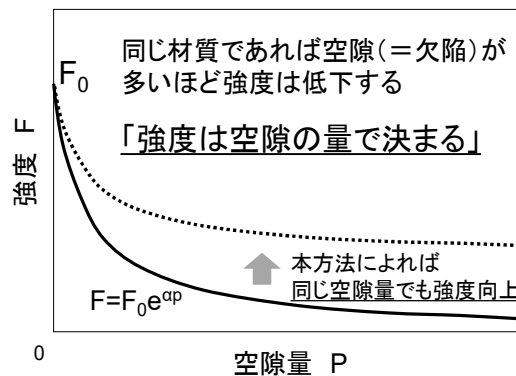


図 3-1 物質の空隙量と強度の関係

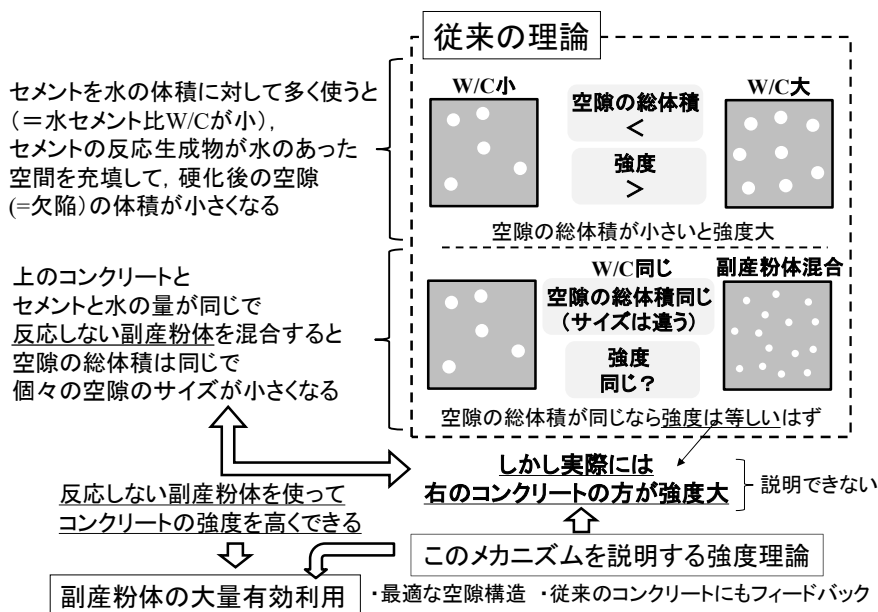


図 3-2 本研究の着目点と目的

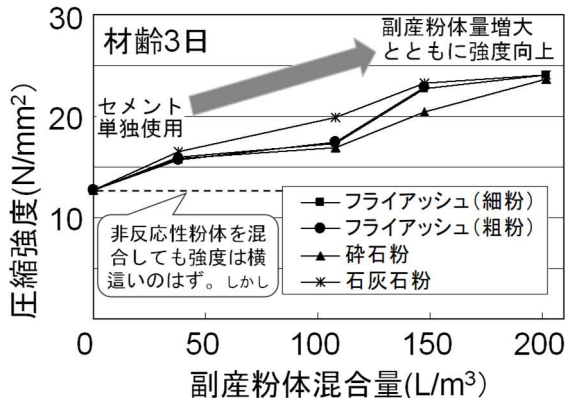
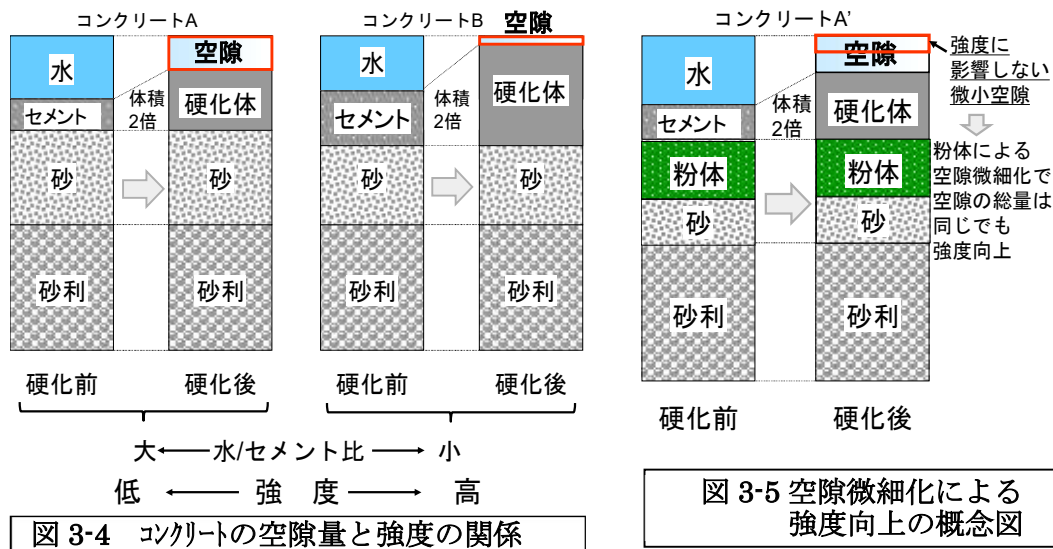


図 3-3 種々の非水硬性粉体を用いた場合のコンクリートの圧縮強度

を形成し、もともとセメントと水が占めていた部分を充填するが、**図 3-4**のように、使用する水に対するセメントの体積が多いほど、つまり水セメント比が小さいほど（**図 3-4**では左のコンクリート A よりも右のコンクリート B の方が硬化前の水/セメントの値が小さい）充填後に残る空隙の量が少なくなるため、言い換えると空隙セメント比が小さくなるため（**図 3-2** 参照）強度が高くなる。申請者らは、空隙の総量が同じでも、空隙のサイズを小さくする（**図 3-2**）ことにより強度が高くなることを見出し、またこの理由として、**図 3-5**のように、あるサイズ以下の空隙は、存在しても強度に影響を及ぼさないためであると考察した。ここでこのような効果を得るために使用する粉体は水硬性を有する必要がないため、種々の非反応性粉体に適用することが可能である。申請者らはこの方法による空隙構造の微細化に起因する性能向上効果において、空隙構造の最適状態が存在すると考えた。また、先の**図 1-2**の中に示したように、ある領域で空隙の微細化が進むと強度向上効果が顕著に表れることを見いだした。本申請課題では、これらの最適状態を実験および解析の両面から明らかにすることを企図した。



4. 研究成果

本研究では硬化後の細孔構造を設計段階で予測する手法を確立することを研究の核心部分として実験、解析シミュレーションの双方から検討を行った。本稿ではそれに関する概要を示す。

4.1 粒子の平均間隔による検討

50nm 以上の細孔量を減少させる概念として、まず、粒子の平均間隔（各粒子間の間隔の平均値）を小さくすることが有効であると仮定し検討を行った。粒子の平均間隔は、詳細は割愛するが粉体工学分野で用いられる式を参考に算定し、種々の条件でシミュレーションを行った。設定した各調合における粒子の平均間隔と材齢 28 日における 50nm 以上の細孔量および圧縮強度の関係をそれぞれ**図 4-1-1** および**図 4-1-2** に示す。粒子の平均間隔の算定値と実測した 50nm 以上の細孔量には正の相関関係が認められ、粒子の平均間隔が小さくなることによって、細孔構造が細分化され 50nm 以上の細孔量が減少した。また、粒子の平均間隔と材齢 28 日における圧縮強度の実測値には強い負の相関関係が認められた。次に、粒子の平均間隔と圧縮強度の関係をを用いて最適粉体構成について検討した。混合する粉体の粒子の平均径と算定した水粉体比ごとの粒子の平均間隔の関係を**図 4-1-3** に示す。粉体の混合量の増加に伴い粒子の平均間隔が小さくなることや、同じ粉体量であっても粒子の平均間隔が極小値となる平均粒子径が存在することが確認できた。また、**図 4-1-4** に平均粒子径と材齢 28 日における圧縮強度の推定値の関係を示す。粒子の平均間隔が極小値となる粉体構成に対応して、圧縮強度も極大値となることわかる。

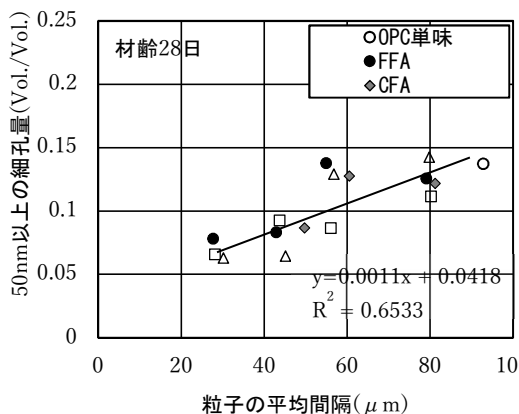


図 4-1-1 粒子の平均間隔と 50nm 以上の細孔量

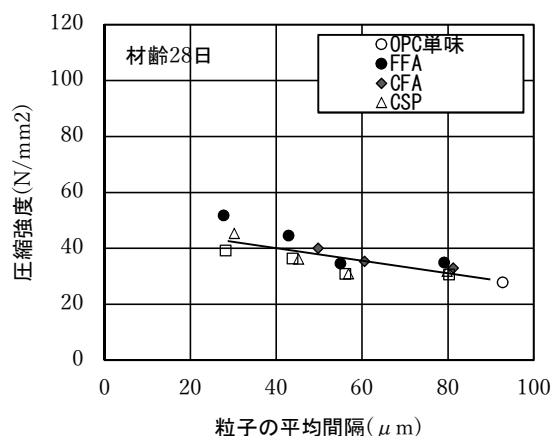


図 4-1-2 粒子の平均間隔と圧縮強度

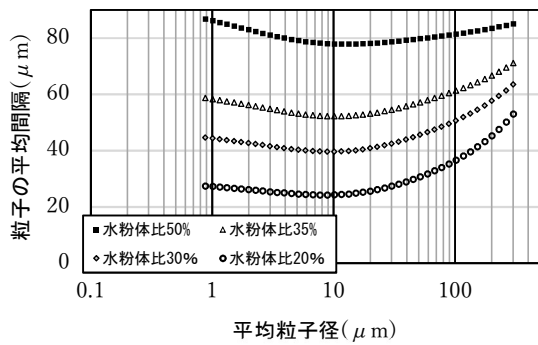


図 4-1-3 平均粒子径と粒子の平均間隔

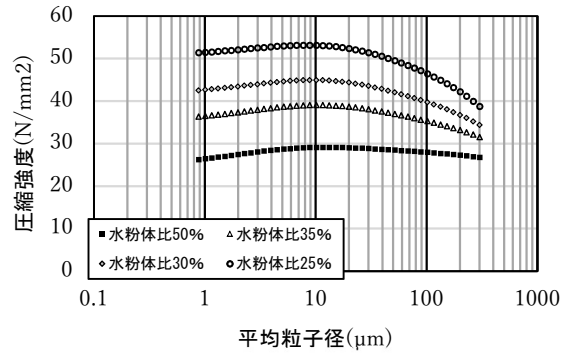


図 4-1-4 平均粒子径と圧縮強度

4.2 粒子の平均空隙厚さによる検討

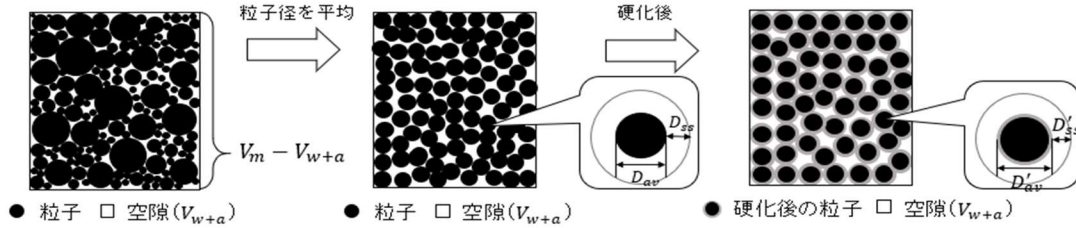


図 4-2-1 粒子の平均空隙厚さ算定時におけるモルタル中の粒子の状態

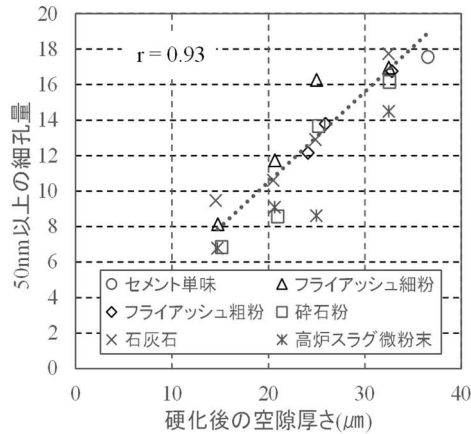


図 4-2-2 硬化後の空隙厚さと 50nm 以上の細孔量

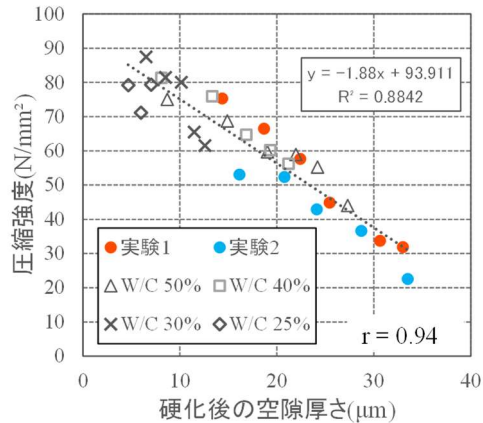


図 4-2-3 硬化後の空隙厚さと圧縮強度の関係

次いで、水和生成物が空隙を充填する前の平均空隙厚さが小さくなれば、硬化コンクリート中の 50nm 以上の粗大な細孔量も減少するとの仮定により検討を行った。平均空隙厚さの概念図を図 4-2-1 に示す。種々の無機粉体を混合したときの硬化後の粒子の平均空隙厚さと材齢 7 日における 50nm 以上の細孔量との関係を図 4-2-2 に示す。同図より硬化後の粒子の平均空隙厚さと 50nm 以上の細孔量には正の相関が認められた。さらにフライアッシュコンクリートにおける既往の実験と今回の実験での硬化後の粒子の平均空隙厚さと圧縮強度との関係を図 4-2-3 に示す。硬化後の粒子の平均空隙厚さと 50nm 以上の細孔量との間に相関があることから硬化後の粒子の平均空隙厚さと圧縮強度との間にも相関が認められた。したがって硬化後の粒子の平均空隙厚さを算定することにより、図 4-2-3 で線形近似した直線から圧縮強度を予測し、強度設計を行うことが可能となった。

図 4-2-4 に硬化前の粒子の平均空隙厚さと流動特性を示す指標の 1 つである相対フロー面積比の関係を示す。多少のばらつきはあるものの硬化前の粒子の平均空隙厚さと相対フロー面積比との間に負の相関が確認された。これらの調合はいずれも AE 減水剤を添加しているため、粒子の分散性が高い状態と考えられ、硬化前の粒子の平均空隙厚さと流動性には関係性があることがわかる。これらより硬化前の粒子の平均空隙厚さはフレッシュコンクリートの流動性を示す指標としても有効であることが確認された。

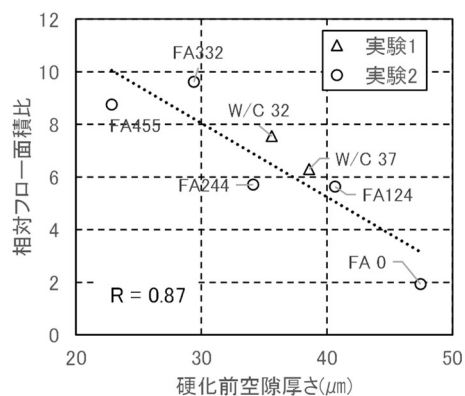


図 4-2-4 硬化後の空隙厚さと 相対フロー面積比

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoyuki Koyama, Tetsushi Kanda, and Hiroshi Kasai	4. 巻 -
2. 論文標題 STRENGTH ESTIMATION OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH IN SOUTHEAST ASIA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 6th International Conference of Construction Materials	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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 徐 元遇, 小山智幸ほか
2. 発表標題 暑中環境下で施工されるフライアッシュコンクリートの強度および耐久性に関する研究 その1 実験概要, フレッシュ性状および温度性状
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金原卓哉, 小山 智幸ほか
2. 発表標題 暑中環境下で施工されるフライアッシュコンクリートの強度および耐久性に関する研究 その2 圧縮強度と構造体強度補正值に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陶山裕樹, 小山智幸, 高巢幸二, 小山田英弘
2. 発表標題 粒子の平均間隔に基づく高流動コンクリートの調合設計方法
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陶山裕樹, 小山智幸, 高巢幸二, 小山田英弘
2. 発表標題 粒子間隔による高流動コンクリートの塑性粘度の調整方法
3. 学会等名 日本建築学会
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
研究分担者	湯浅 昇 (Yuasa Noboru) (00230607)	日本大学・生産工学部・教授 (32665)	
研究分担者	陶山 裕樹 (Suyama Hiroki) (20507876)	北九州市立大学・国際環境工学部・准教授 (27101)	
研究分担者	伊藤 是清 (Ito Korekiyo) (50380663)	東海大学・基盤工学部・教授 (32644)	
研究分担者	白川 敏夫 (Shirakawa Toshio) (60623387)	九州産業大学・建築都市工学部・教授 (37102)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	関 雅明 (Seki Masaharu)		
研究協力者	田中 陸太 (Tanaka Rikuta)		

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