

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10103

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656318

研究課題名(和文) コンクリートの高性能化を目的とした非空気連行性・内部疎水多孔質粉体の開発

研究課題名(英文) Development of non-air entrainment and internal hydrophobic porous powder for high performance of concrete

研究代表者

濱 幸雄 (HAMA, YUKIO)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70238054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、通常のAEコンクリートで生じる連行気泡による強度低下を低減し、耐凍害性向上に寄与できる新技術の確立のために、非空気連行性の内部疎水多孔質粉体の開発を目的とした。その結果、多孔質粉体の基材としてALCを用いた場合には、シリコーンオイルの種類や添加率、紫外線処理、粉体表面への親水剤の吸着により、水蒸気の吸着性状および撥水性を制御することはできたが、表面親水性/内部疎水性のハイブリッド化は困難であった。一方、水セメント比の小さな硬化セメントペーストを基材として用いた場合に、撥水性を付与しなくても、空気連行がなく、強度低下を生じない、耐凍害性に優れたモルタルの作製が可能であった。

研究成果の概要(英文)：In this study, the aim is to develop a non-air entrainment and internal hydrophobic porous powder in order to establish a new technique which can contribute to improve the frost resistance and reduce the strength reduction due to entrained air bubbles caused in AE concrete. As a result, when ALC was used for the material of the porous powder, it was possible to control the water repellency and the adsorption properties of water vapor by changing the addition rate and type of silicone oil, ultraviolet treatment and adsorption of hydrophilic agent to the powder surface. But it was difficult to make a porous powder having hybrid properties of the hydrophilic surface and internal hydrophobic capillary. On the other hand, when the hardened cement paste with low W/C was used for the material of the porous powder, even without water repellency, there was no air-entraining and it was possible to reduce the strength reduction and improve the frost resistance of mortar.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：コンクリート モルタル 高性能化 多孔質粉体 空気連行 耐凍害性 強度低下

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートの耐凍害性に関する研究は古くから多くの研究が国内外で実施されており、コンクリートのゲル空隙、毛細管空隙、気泡を含む空隙構造が耐凍害性の支配的要因であることが知られている。すなわち、低W/C化などによってコンクリート組織を緻密にして凍結水量を低減させること、AE剤による連行空気により凍結時に発生する水圧を緩和することが極めて有効な耐凍害性向上策として実用化されている。また、軽微な乾燥は毛細管中に水分を含まない空隙を増加させ、凍結水量の減少と気泡と同様な水圧緩和の効果があり、耐凍害性を向上させることが指摘されている。一方で、近年のコンクリートの高強度化に伴い、耐凍害性向上を目的として連行した空気による強度低下の問題が顕在化しており、寒冷地においても空気連行をできるだけ抑えたいとの要望が高まっている。しかし、高強度コンクリートでは経年による乾湿繰り返しの影響によるマイクロクラックおよび空隙構造の粗大化のために、ポテンシャルの耐凍害性が低下することが明らかとなっており、耐凍害性確保のためには空気の連行は必要不可欠とされている。このような状況を踏まえて、これまでのコンクリートの凍害劣化機構に関する知見を総合して考察すると、コンクリートの耐凍害性はその空隙構造に依存し、細孔径分布および空隙の連続性、水蒸気の吸着特性、透気・透水性状が大きな影響要因であることは明らかである。また、耐凍害性向上のために必ずしも従来からのAE剤による空気連行が必要なわけではなく、コンクリート中に凍結時に発生する水圧を緩和できる水分を含まない細孔空隙が十分に存在していれば、凍害劣化を免れることになるといえる。筆者らは、これまでに撥水性を有するオートクレーブ養生した高強度のケイ酸カルシウム水和物により上記効果の検証実験を行ってきた。その結果、表面が疎水性である粉体はAE剤と同様の空気連行性を有し、耐凍害性を向上させることは可能であるものの、連行空気によるコンクリートの強度低下を防ぐことは不可能であり、その解決のためには、コンクリートと類似な細孔構造を有し、高強度でかつ表面が親水性であり空気連行性がなく、内部空隙が疎水性である多孔質な粉体の開発が不可欠であることが明らかとなった。

### 2. 研究の目的

本研究では、通常のAEコンクリートで生じる連行気泡による強度低下を低減し、耐凍害性向上に寄与できる新しい技術確立することを目的としている。

コンクリートと類似な細孔構造を有し、高強度でかつ表面が親水性で非空気連行性であり内部空隙が疎水性をもつ多孔質な粉体を開発しコンクリートに混入することで、水を含まない細孔空隙(疎水空隙)を保持して

凍結水量を低下させ、AE剤で連行される気泡と同様に凍結時に生じる水圧を緩和する機能を持たせて高強度化と高耐久化を実現させようとするものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、コンクリートと類似な細孔構造を有し、高強度な多孔質粉体としてオートクレーブ処理ケイ酸カルシウム水和物(基材)およびセメントペーストを基材として、表面が親水性で非空気連行性であり、かつ内部空隙が疎水性であるハイブリッドな機能を持つ粉体に加工するための処理方法を検討した。水セメント比、撥水剤(シリコンオイル)の種類や添加量を変化させて空隙構造と撥水性を変化させた基材を作製し、それを粉砕して粒径、粒度分布の異なる粉体とした後、紫外線処理、表面への親水剤の吸着を試みた。粉体の評価は、水蒸気吸着性能の変化で評価するとともに、試作した各種粉体を用いてモルタル試験体を作製し、フレッシュ性状(フロー値および空気量)、圧縮強度、凍結融解抵抗性および硬化したモルタル中の気泡組織を評価した。

さらに、撥水性多孔質粉体のもつ特徴としての空気連行性を有効に活用する方法として、通常のAE剤では空気連行性に課題のあるフライアッシュおよび収縮低減剤を用いたモルタルに対する撥水性多孔質粉体による空気連行とその効果の検証も行った。

### 4. 研究成果

#### (1) オートクレーブ処理ケイ酸カルシウム水和物(ALC)を基材とした撥水性多孔質粉体の表面親水化

撥水性を変えたALC基材(AP-B, AP-C)とAP-Cを紫外線処理した粉体の水蒸気吸着等温線を図1に示す。

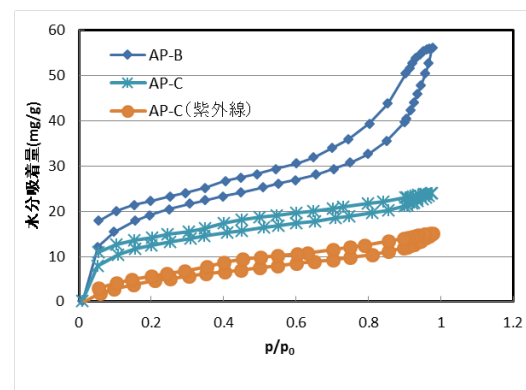


図1 撥水性の異なる粉体および紫外線処理した粉体の水蒸気吸着等温線

同じ空隙構造を持つ粉体であっても、シリコンオイルの添加量の変化や紫外線処理、表面への親水剤の吸着により水蒸気の吸着性状は大きく変化し、撥水性を制御することはできた。しかしながら、これらの粉体を用いて作製したモルタルの空気量は、図2に示すように粉体無混入のモルタルよりも増加

し、圧縮強度が低下する結果となった。また、凍結融解抵抗性については、粉体無混入のモルタルよりも向上する傾向が見られたが、粉体の持つ疎水空隙による効果と連行空気による効果の複合効果であると考えられ、両者を分離して評価することはできない。

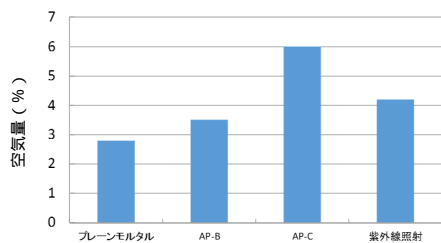


図2 撥水性を制御した粉体を用いたモルタルの空気量

撥水性多孔質粉体の基材として、オートクレーブ処理ケイ酸カルシウム水和物 (ALC) を用いた場合には、撥水性を制御するシリコンオイルの種類や添加率、紫外線処理、粉体表面への親水剤の吸着により、水蒸気の吸着性状および撥水性を制御することはできたが、モルタルへ混合した場合に非空気連行性の実現は困難であった。

(2) 撥水性多孔質粉体による空気連行性の有効利用方法

通常の AE 剤の場合には未燃炭素が AE 剤を吸着するために空気連行が困難となるフライアッシュモルタルや AE 剤による連行空気の消泡作用のある収縮低減剤モルタルに対しても、図 3 に示すように、撥水性多孔質粉体を混入することにより混入率が大きくなるほど空気量が増加しており、フライアッシュモルタルや収縮低減剤モルタルに対しても撥水性多孔質粉体による空気連行性は有効であること、撥水性が高いほど空気連行性も高いことがわかった。また、撥水性多孔質粉体で空気を連行した場合においても、空気量が増加するほど気泡間隔係数は小さくなっており、一般的な AE 剤と同様に耐凍害性確保に有効とされる気泡間隔係数 250 $\mu\text{m}$  以下とすることもできた。写真 1 に撥水性多孔質粉体による連行空気の状態を示す。非常に微細な気泡が数多く連行されていることがわかる。

図 4 に空気量と耐久性指数の関係を、図 5 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。粉体無混入モルタル (N) およびフライアッシュモルタル (F) では、撥水性多孔質粉体

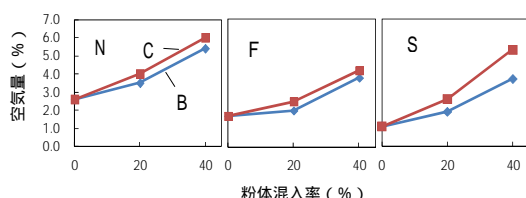
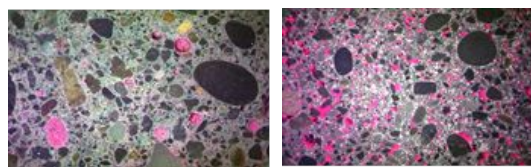


図3 粉体混入量と空気量の関係



粉体無混入 (F-0) 粉体混入 (F-C40)

写真 1 撥水性多孔質粉体による連行空気の状態

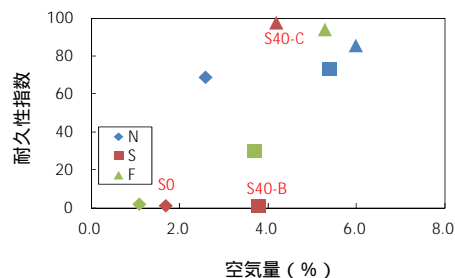


図4 空気量と耐久性指数の関係

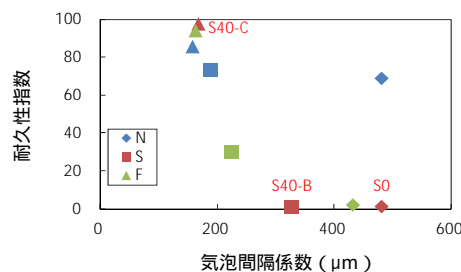


図5 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

の混入により空気量が増加し、気泡間隔係数が小さくなったことで耐久性指数が大きくなっている。一方、収縮低減剤モルタル (S) では、撥水性の低い粉体 (B) を混入した場合には空気量が増加しているにもかかわらず耐久性指数の増加はみられなかったが、撥水性を高めた粉体 (C) を混入した場合に、空気量がほとんど同じであるものの気泡間隔係数が小さくなり、耐久性指数が大きくなった。このことは、粉体のもつ疎水空隙も凍結水圧の緩和に寄与していることを示唆しているもので、粉体の撥水性と混入率の組み合わせが適切であれば、撥水性多孔質粉体の混入が収縮低減剤を用いた場合においても耐凍害性向上に有効であるといえる。しかしながら、撥水性多孔質粉体による空気連行により圧縮強度は低下し、その低下率が一般的な傾向よりもやや大きかった。

以上より、通常の AE 剤では空気連行性に課題のあるフライアッシュおよび収縮低減剤を用いたモルタルに対しても、撥水性多孔質粉体の空気連行性が損なわれることなく耐凍害性向上に有効な気泡の導入が可能であることと、粉体の撥水性の程度と混合率を適切に制御することで耐凍害性向上に寄与する気泡の連行が可能であることを確認した。

(3) セメントペーストを基材とした撥水性多孔質粉体の空気連行性と耐凍害性

非空気連行性・内部疎水粉体の基材として、水セメント比 20%のセメントペースト硬化体を作製し、十分硬化した後に粒径 600 ~ 1200 $\mu\text{m}$  に粉砕した粉体を細骨材の一部として用いたモルタルの空気量、圧縮強度、耐凍害性の変化を検討した。なお、基材のセメントペーストはシリコンオイルの添加の有無により、撥水性を付与したものと撥水性を付与していないものの2種類を作製している。なお、セメントペーストは粉砕後 40 乾燥を行い、セメントペースト中の毛細管の水分を除去した状態とした。これは、通常のもルタル、コンクリートの凍結融解試験において、軽微な乾燥は毛細管中に水分を含まない空隙を増加させ、凍結水量の減少と気泡と同様な水圧緩和の効果があり、耐凍害性を向上させることが指摘されているからである。

図 6 に粉体の混入率と空気量の関係を示す。セメントペーストを粉体の基材とした場合には、ALC を基材とした粉体の場合と異なり、撥水性があってもプレーンモルタルと同程度の空気量であり空気連行性が認められない。また、撥水性のない場合にはプレーンモルタルよりも空気量が 1%程度減少しており、混入率による空気量の変化はなかった。また、粉体の混入による空気量の増加がないため、図 7 に示すように、プレーンモルタルと同等以上の圧縮強度を示した。

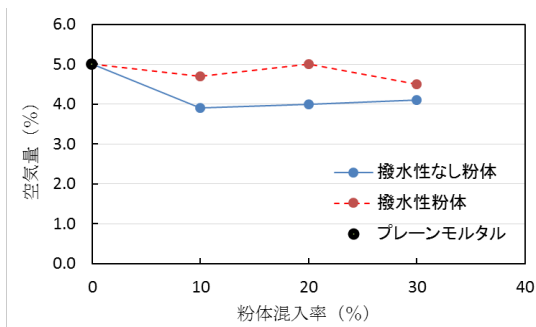


図 6 セメントペースト粉体混入率と空気量の関係

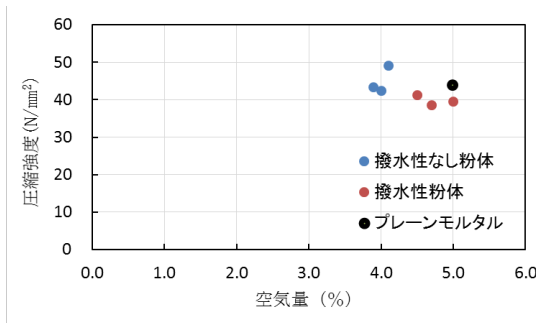


図 7 セメントペースト粉体を混入したモルタルの空気量と圧縮強度の関係

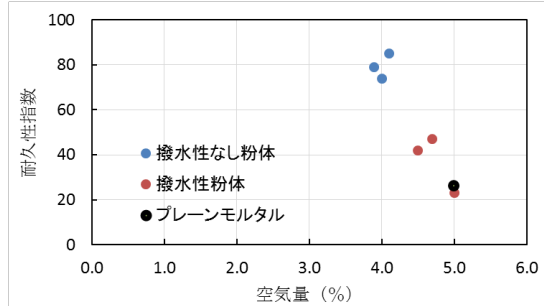


図 8 セメントペースト粉体を混入したモルタルの空気量と耐久性指数の関係

耐凍害性については、図 8 に示すように、粉体の混入により空気量が少なくなっているにもかかわらず耐久性指数が向上しており、粉体中の疎水空隙が凍結水圧を緩和する効果が得られていることと考えられる。なお、その効果は撥水性粉体よりも撥水性のない粉体の方が大きくなっている。

以上より、非空気連行性・内部疎水性を持つ粉体の基材として、水セメント比の小さなセメントペースト硬化体を微粉砕した粉体を用いた場合、シリコンオイルによる撥水性を付与せずに、乾燥させることで内部に水の侵入しにくい空隙を保持させた場合に、空気連行がなく強度低下を生じず、耐凍害性に優れたモルタルを作製できることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

Daichi Wakamatsu, Yukio Hama, Mohamed Zakaria, Reiko Narumi, Tohru Nakamura, Applicability of water-repellent porous powder as air-entraining material in mortar containing fly ash or shrinkage reducing admixture, 2014 Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research, Muroran(Japan), 2014.3.7

若松大地, 鳴海玲子, 濱幸雄, 空気連行を目的とした撥水性多孔質粉体のフライアッシュ・収縮低減剤混入モルタルへの適用性, 日本建築学会大会学術講演会, 札幌, 2013.8.31

Daichi Wakamatsu, Reiko Narumi, Yoshihiko Kishimoto, Yukio Hama, Effect of water-repellent powder as air entraining agent on the frost resistance of mortar incorporating fly ash and shrinkage reducing admixture, 7<sup>th</sup> International Symposium between Korea, China and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure,

Yanji(China), 2013.8.20

6 . 研究組織

(1)研究代表者

濱 幸雄 (HAMA, Yukio)  
室蘭工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号：70238054

(2)研究分担者

岸本嘉彦 (KISHIMOTO, Yoshihiko)  
室蘭工業大学・工学研究科・助教  
研究者番号：30435987

新 大軌 (ATARASHI, Daiki)  
東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：70431393