

令和元年6月9日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04444

研究課題名(和文)低炭素型寒中コンクリート技術の実証的研究

研究課題名(英文)Empirical study on low carbon type cold weather concreting

研究代表者

濱 幸雄 (HAMA, YUKIO)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70238054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、汎用型早強高炉セメントとして、早強ポルトランドセメントをベースセメントとし、高炉スラグ微粉末を35%、無水石膏を2%、石灰石微粉末を4%混合した高炉B種相当のセメントが、初期強度発現、長期強度増進にも優れ、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、乾燥収縮の耐久性上の問題もなく、環境負荷を低減できるとして適していることを明らかにした。また、初期材齢の凍結による透気性状、強度、耐久性の変化に関しては、圧縮強度比、トレント透気係数、反発度比が初期材齢の凍結による被害程度を定量的に評価可能な指標であることを確認するとともに、硬化後の耐久性を評価可能な初期凍害の劣化指標を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、CO<sub>2</sub>排出量削減のために利用拡大が求められているにもかかわらず、初期強度発現性に劣り、温度依存性が大きいために寒冷期の施工に適用されていない混合セメントを対象に、混和剤混合率、鉱物組成、少量混合成分を調整することで低温での早強性をめ、-5℃程度までの環境で無採暖での施工が可能な混合セメントの材料設計と管理方法を提案するもので、セメント・コンクリートの水和反応の温度依存性、初期材齢の凍結による物性への影響を材料科学的に解明する独創的かつ学術的にも意義のある研究である。また、本研究の成果は「低炭素型寒中コンクリート技術」として実務に反映されるものであり、低炭素化社会の実現に寄与する。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was found that the cement equivalent to blast furnace Portland cement type B, based on early-strength Portland cement incorporated with 35% blast-furnace slag fine powder, 2% anhydrous gypsum and 4% limestone fine powder, is suitable as a general-purpose early-strength blast furnace cement to reduce the environmental load. The cement have excellent properties on initial strength development, long-term strength enhancement and durability such as carbonation resistance, freeze-thaw resistance and drying shrinkage. In addition, with regard to changes in air permeability properties, strength, and durability due to freezing of initial age, it was confirmed that we can quantitatively evaluate the degree of damage caused by freezing of initial age by compressive strength ratio, Trent air permeability coefficient and restitution ratio. Furthermore, the initial frost damage index evaluating the durability after hardening was proposed.

研究分野：建築材料学

キーワード：建築構造・材料 土木材料 二酸化炭素排出削減 寒中コンクリート 混合セメント

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の 2020 年の温室効果ガス削減目標に対応した対策として、混合セメントの利用拡大が織り込まれており、高炉セメントを広範な建設工事に適用可能とする技術開発と普及は目標達成のための基盤となる。そのため、近年、高炉スラグ混入率をより高めた低発熱・収縮抑制型高炉セメントの研究や、C 種領域のスラグ混入率を目指した ECM (エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム) セメントの開発研究がなされているが、その用途は限定的なものとならざるを得ない。また、高炉スラグ混合率 5~30% の高炉セメント A 種は JIS 規格があるものの、その生産は行われておらず、基礎的な物性についても明確になっていないのが現状である。高炉セメントの普及や流通には、法整備を含めた政策的な変革が必要であるが、既に欧州や中国等では混合セメントを汎用セメントとして利用する方向に舵を切っており、我が国においても普通ポルトランドセメントの代替として、本研究で対象とする混和材低混合率の混合セメントを汎用化させることは必然的な潮流であり、建設産業からの CO<sub>2</sub> 排出量の大幅な削減を可能とする技術となる。混合セメントは、低発熱、長期強度増大、遮塩性大、アルカリシリカ反応の抑制等の優れた長所を持つ半面、初期強度発現が遅く、温度依存性が大きいことから、寒冷地では初期凍害を受けやすいという問題があり、現状での利用拡大は容易ではないが、混和材の分量を減じた高炉セメント A 種の範疇であれば、石灰石微粉末や無水石膏などの高度利用や適切な早強性混和剤や耐寒促進剤を混入することで初期強度増進性状を改善できる可能性があり、寒冷地での混合セメントの利用拡大は CO<sub>2</sub> 排出量削減に大きく寄与する。

一方、寒冷地に施工されるモルタル・コンクリートの技術的課題は、初期凍害の防止に集約される。すなわち、十分な強度 (一般には 5.0N/mm<sup>2</sup>) が得られるまでは絶対に凍結させないことが重要であり、養生上屋で囲って採暖する方法が採用されている。しかし、養生上屋は極めて熱効率が悪い空間で、採暖による CO<sub>2</sub> 排出の問題もある。また、実務においては、厳冬期には万全な凍結対策が施されるが、向寒期や軽微な構造物、仕上げモルタルの施工時等には予期せぬ寒波や養生管理の不備などにより、部材表面を凍結させてしまうという不具合が少なからず発生しているのも現実であるが、初期材齢の凍結による被害の程度を定量的に評価する品質管理手法が存在していないという問題がある。

本研究に関連して、これまでに亜硝酸カルシウムを主成分とした耐寒促進剤の凍結点降下による初期凍害防止の作用機構、耐寒促進剤の性能標準および施工技術に関する研究、氷点下を含む温度領域でのコンクリートの強度増進に関する研究や寒中コンクリート施工の実態調査などの研究が行われており、それらの成果は日本建築学会・寒中コンクリート施工指針に反映されている。本研究はその成果を踏まえた上で、混合セメントに適用できるように発展を目指すものである。近年では、混合セメントを含めたセメントの水和解析、セメント中の鉱物組成 (C3S, C2S, C3A, C4AF) の反応速度を制御した材料設計が可能となっており、セメント中の石膏量や石灰石微粉末等の少量混合成分が初期強度発現性状に影響することやカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) のナノ粒子を主成分とする新しいタイプの早強性混和剤が硬化促進に有効であることが明らかになっており、これらの成果をベースとすることで低温環境下での水和反応性と強度増進性に優れた混合セメントが開発可能であると認識した。また、従来の初期凍害に関する研究では、試験体レベルの実験によって初期凍害に耐えるとされる圧縮強度 5N/mm<sup>2</sup> が得られるまでの条件をかなり限定された条件で評価することが多かった。しかし、最近の研究で、5.0N/mm<sup>2</sup> が確保された後の凍結融解後の養生で強度回復はするものの耐久性が低下することが明らかになり、初期材齢の凍結の被害を強度回復のみで評価するのは不十分であることを認識するに至った。さらに、これまでは実務では温度測定、研究では凍結融解後の養生による強度回復の有無で初期凍害を判定するのが一般的であったが、強度回復レベルと被害の程度との対応が明らかではなく、特に耐寒促進剤を用いた場合や -5 程度までの軽微な凍結期には、初期養生中の温度のみで初期凍害を判断するのは不適當である。ここで、初期凍害を受けたコンクリートの強度回復が見込めない、耐久性が低下するという障害は、コンクリート組織の観点からは微細ひび割れも含む組織の緩み、粗大化に起因するものであり、物性としては透気係数の顕著な増大を引き起こしているものと考えられる。そこで、初期材齢時の凍結が硬化後のコンクリートに及ぼす影響を材料科学的に改めて見直し、「初期凍害」という被害の再定義と実務的な管理方法の高度化が必要と考えるに至った。

### 2. 研究の目的

混合セメントを用いて無採暖で施工する寒中コンクリート技術を「低炭素型寒中コンクリート技術」と定義して、-5 程度までの低温環境での水和反応と強度増進が可能な汎用型混合セメントの材料設計と初期材齢時の凍結による被害の程度を定量的に評価できる品質管理手法を提案し、冬期の実環境での施工実験を通して低炭素型寒中コンクリート技術による初期凍害防止と品質向上の効果を実証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

- 1) 高炉セメントの初期強度増進性状の改善と汎用化を目指したセメント組成、混和材料が強度増進性状に及ぼす影響の把握と初期材齢の凍結による被害レベルの定量的管理手法の開発のために初期材齢の凍結による透気性状、強度、耐久性の変化に関する検討を行った。
- 2) 汎用型早強混合セメントの最適条件の検討し、そのセメントを用いたコンクリートの各種性

状試験を実施した。また、各種セメントを用いて凍結開始材齢、凍結温度、凍結時間、凍結深さを変えて初期凍害を与えたコンクリートについて、透気性状からダメージレベルを評価した上で、それとコンクリートの各種物性試験結果の関係を整理した。

3) これまで得られた知見を検証することを主たる目的として、上富良野町において実構造物を想定した住宅基礎模型試験体を用いた屋外実環境試験を行い、無採暖施工とトレント法および反発度法による品質管理手法の適用性を実証検討した。

4) 要素実験として、初期凍害に及ぼす水セメント、養生条件の影響を定量的に評価し、初期凍害判定手法としてのトレント透気試験、反発度法に加えて骨材界面観察およびファイバースコープによる目視判定法を考案し、その適用性を検討した。

#### 4. 研究成果

1) 高炉セメントモルタルの強度発現と水和反応に及ぼす少量混合成分の影響について、ポルトランドセメントの混合材量を一定として BFS および LSP 量を変化させた際の圧縮強度は、BFS や LSP を単独で使用するよりも両者を併用した方が高強度を示し、普通ポルトランドセメントをベースセメントとした場合には、BFS 混合率が 10~25 % の範囲で混合率が高いほど圧縮強度は低下する傾向にあった。また、CS の混和により材齢 1 日での圧縮強度は増大し OPC 以上の強度を示し、その理由を CS の混和により材齢 1 日での C3S およびスラグの水和反応の促進、エトリンサイト生成量の増大によることを明らかにした。

2) 汎用型早強高炉セメントとして、早強ポルトランドセメントをベースセメントとし、高炉スラグ微粉末を 35%、無水石こうを 2%、石灰石微粉末を 4% 混合した高炉 B 種相当のセメントが、初期強度発現、長期強度増進にも優れ、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、乾燥収縮の耐久性上の問題もなく、環境負荷を低減できるとして適していることを明らかにした。

3) 初期材齢の凍結による透気性状、強度、耐久性の変化に関しては、圧縮強度比、トレント透気係数、反発度比が初期材齢の凍結による被害程度を定量的に評価可能な指標であることを確認するとともに、初期凍害レベルの各指標とスケール量および中性化速度係数は直線関係にあることから初期凍害の劣化指標から硬化後の耐久性が評価できる可能性があることが示唆された。

4) 初期材齢の凍結前後でセメントの水和反応性は変化しないことを確認した。また、凍結によるセメントマトリクスの被害程度および回復程度は水セメント比の影響を大きく受け、水セメント比が大きい場合には初期材齢時の凍結によってセメントペーストと骨材界面に剥離を生じ、その後の養生で界面の剥離は回復しないことを確認した。

5) コンクリートの初期凍害機構は、セメントペーストマトリクスに生じるひび割れと骨材界面の遷移帯の剥離が被害レベルに大きく影響していることが考えられる。

6) 初期凍害を受けた範囲を明らかにするための診断手法として反発度法の適用可能性を実証した。ただし、本手法では面的な範囲の同定は可能であるが、深さ方向の診断については別途検討する必要がある。

7) ファイバースコープを用いることで深さ方向の目視診断は可能であるが、ぬれ色で初期凍害を判定するには孔内部では乾燥速度の制御が必要である。

8) W/C と養生方法の違いは水和率や細孔径分布、全空隙率には影響を与えるが、強度増進停滞には影響を与えていないことを確認した。また、強度増進停滞は凝結前後の凍結による影響を受ける可能性を示した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

- 1) Junho Kim, Seunghyun Na, Wenyan Zhang, Takahiro Sagawa, Yukio Hama: Effect of Limestone Powder and Gypsum on the Compressive Strength Mixture Design of Blast Furnace Slag Blended Cement Mortar Journal of Advanced Concrete Technology, 15, pp.67-80, 2017, <https://doi.org/10.3151/jact.15.67>
- 2) Choi Hyeonggil, Zhang Wenyan, Hama Yukio: Method for determining early-age frost damage of concrete by using air-permeability index and influence of early-age frost damage on concrete durability, Construction and Building Materials, 153, pp.630-639, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.140>
- 3) 島影亮司, 濱幸雄, 崔亨吉: コンクリートの初期凍害レベルを表す指標と耐久性の関係, コンクリート工学年次論文集, 39, pp.589-595, 2017
- 4) 深瀬孝之, 谷口円, 開洋介, 濱幸雄: せき板の取り外しに係わる強度推定方法の検討, 日本建築学会技術報告集, 24, pp.497-450, 2018, <https://doi.org/10.3130/aijt.24.497>
- 5) 古館菜由子, 島影亮司, 山下紘太郎, 濱幸雄: コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞機構に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 18, pp.443-448, 2018
- 6) 古館菜由子, 山下紘太郎, 金志訓, 濱幸雄: 凝結始発前後の凍結によるセメントペーストの強度増進停滞に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 41, 2019
- 7) 山下紘太郎, 古館菜由子, 金志訓, 濱幸雄: コンクリートおよびモルタルの硬化性状に及ぼす初期材齢時の凍結の影響, コンクリート工学年次論文集, 41, 2019

〔学会発表〕(計 16 件)

- 1) 長谷川諒, 塚本康誉, 崔亨吉, 濱幸雄: 早強セメントをベースセメントとした高炉セメント A 種相当コンクリートの耐久性, 日本建築学会大会学術講演会, 2016
- 2) 島影亮司, 国崎翠, 崔亨吉, 濱幸雄: 初期材齢時の凍結がコンクリートの初期凍害レベルと耐久性に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2016
- 3) Ryoji SHIMAKAGE, Midori KUNISAKI, Wenyan Zhang, Hyeonggil CHOI, Yukio HAMA: INFLUENCE OF EARLY AGE FROST DAMAGE ON THE DAMAGE LEVEL AND DURABILITY OF CONCRETE, 10th International Symposium between Korea, Japan and China on Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会), 2016
- 4) 安田僚介, 国崎翠, 崔亨吉, 濱幸雄: C-S-H 系早強剤を用いた環境負荷低減型寒中コンクリート技術に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2017
- 5) 島影亮司, 崔亨吉, 濱幸雄: セメントの水和反応に及ぼす初期材齢時の凍結の影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2017
- 6) 佐藤亮太, 崔亨吉, 濱幸雄, 谷口円: 耐寒促進剤を用いたモルタルの氷点下における強度増進と温度時間関数, The 13th Korea/Japan Joint Symposium on Building Materials & Construction (国際学会), 2017
- 7) 野口巧巳, 崔亨吉, 濱幸雄: 高炉セメントおよび耐寒促進剤を用いたコンクリートの収縮特性に関する研究, The 13th Korea/Japan Joint Symposium on Building Materials & Construction (国際学会), 2017
- 8) Ryoji SHIMAKAGE, Hyeonggil CHOI, Yukio HAMA: Influence of Early Age Frost Damage on Hydration Reaction of Cement Paste, The 11th International Symposium between Japan, China and Korea on Performance Improvement of Concrete for Long life span Structure, 2017
- 9) 野口巧巳, 崔亨吉, 濱幸雄: 耐寒促進剤を用いた高炉セメントモルタルの収縮性状に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2018
- 10) Mayuko FURUDATE, Ryoji SHIMAKAGE, Yukio HAMA: Influence of Early-Age Frost Damage on Bond Strength between Cement Paste and Aggregate of Concrete, The 12th International Symposium between China, Korea and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long life span Structure (国際学会), 2018
- 11) 古館菜由子, 濱幸雄: 初期材齢時の凍結がセメントペーストと骨材の付着性に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2018
- 12) Mayuko FURUDATE, Yukio HAMA: Influence of early frost damage on bond strength between cement paste and aggregate of concrete, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2019 (国際学会), 2019
- 13) Jiahui CUI, Yukio HAMA: Study on Correspondence Between Early Age Frost Damage Diagnosis Methods And Mortar of Wet Color by Water, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2019 (国際学会), 2019
- 14) 谷口円, 佐川貴康, 濱幸雄, 高橋光一: 住宅基礎を対象とした寒中コンクリート工事の合理化 その 2. 初期凍害の診断, 日本建築学会大会学術講演会, 2019
- 15) 古館菜由子, 濱幸雄: 凝結始発前後の凍結によるセメントペーストの強度増進停滞に関する研究, 日本建築学会大会学術講演会, 2019
- 16) 崔家琿, 濱幸雄: ファイバースコープを用いたコンクリートの初期凍害診断方法の検討, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2019

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 崔 亨吉

ローマ字氏名: Choi Hyeonggil

所属研究機関名: 室蘭工業大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 20726806

### (2)研究分担者

研究分担者氏名: 谷口 円

ローマ字氏名: Taniguchi Madoka

所属研究機関名: 地方独立行政法人北海道立総合研究機構

部局名: 北方建築総合研究所

職名: 主査

研究者番号(8桁): 20462351

(3)研究分担者

研究分担者氏名: 佐川 孝広

ローマ字氏名: Sagawa Takahiro

所属研究機関名: 前橋工科大学

部局名: 工学部

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 90621045

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 深瀬 孝之

ローマ字氏名: Fukase Takayuki

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。