

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06319

研究課題名(和文) 過冷却現象解消温度の確率分布に基づく熱力学的非平衡凍結水量予測モデルの確立

研究課題名(英文) Establishment of Thermodynamic Non-Equilibrium Prediction Model for Frozen Water Volume Based on Probability Distribution of Supercooling

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、実構造物における凍害発生確率を予測するために、凍害発生の主要因となる過冷却現象を考慮した熱力学的非平衡凍結水量予測モデルの構築を目的とし、微小要素の過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量の発生確率密度分布の算出、微小要素連続体を対象とした過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量の発生確率密度分布の算出、微小要素の過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量の発生確率密度関数を用いた微小要素連続体に対する熱力学的非平衡凍結水量予測モデルの妥当性の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to predict the probability of frost damage at actual structure, this study aims to establish a thermodynamic non-equilibrium prediction model for frozen water volume taking supercooling phenomenon into account. First, the measurement to obtain the probability distributions of the freezing point and the instantaneous increment of ice content in the small element was carried out. Next, the investigation object was shifted to the small element continuum, the similar experiment to obtain the probability distributions was carried out. Finally, it had been verified that the proposed prediction model based on the probability distribution in the small element can be applied for the small element continuum from viewpoint of durability prediction.

研究分野：建築環境工学

キーワード：過冷却現象 耐久性予測 凍害 確率分布 熱力学的非平衡

1. 研究開始当初の背景

一般に、セメント硬化体に生じる凍害の発生メカニズムは、Powers<sup>1)</sup>の水圧説に基づき、過冷却水の過冷却解消に伴い生じる未凍結水の動圧が主要因と考えられている<sup>2)</sup>。

任意の温湿度条件下における多孔質材料内の含水率・含氷率分布の経時変化を予測する解析モデルとして、熱力学的平衡理論に基づく三相系熱水分同時移動モデルが確立されている<sup>3)</sup>。このモデルは細孔径が求まれば凍結温度が一意に定まる熱力学的平衡理論に基づいており、熱力学的非平衡現象、すなわち、ランダム現象である過冷却水の凍結を予測することができない。

つまり、建築壁体に生じる凍害劣化を予測するためには、確率的現象である過冷却現象の考慮が不可避であり、劣化の発生の有無を画一的な現象として検討するのではなく、劣化の発生およびその程度を確率的に予測・評価する手法が必要である。促進試験の結果を多様な実環境条件下の結果に変換するためには、熱水分同時移動解析の適用が必須であり、解析モデルを熱力学的非平衡モデルとして拡張することが重要課題と考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、建築壁体に生じる凍害劣化の主要因と考えられている過冷却現象を確率的に考慮した耐久性予測モデルの開発の一環として、まずは対象材料をモルタルに限定し、凍結温度（過冷却解消温度）の確率分布に基づき、任意の最低到達温度において過冷却解消によって生じる瞬間的な凍結水量（含水率増加量）を確率的に予測する解析モデルの確立を目的とする。

すなわち、対象とする地域の外界気象条件を与条件とすれば、過冷却解消により任意の凍結水量以上になる確率の予測を目指す。実際に破壊が生じる過冷却度の決定については本研究の検討内容には含まないが、将来的に破壊が生じる過冷却度が明らかになった場合には即時に対応可能なモデルである。

3. 研究の方法

(1) 提案する解析モデルに適用可能な微小要素試験体サイズおよび測定点数の最適化

本研究課題においては、図1に示すように、微小要素の凍結温度の確率分布が要素毎に独立であると想定し、微小要素連続体へと拡張した場合の適用性について検討を進めることを想定している。

解析モデルにおいて想定する微小要素は、要素内において一様な温度を示す必要がある。実際には表面や内部において温度分布を有するが、これを無視できる程度に収まる試験体サイズについて、まずは検討を行う。

ここでは、冷却速度・含水率を本実験と同条件に設定し、異なる試験体サイズ（20[mm]角、10[mm]角、5[mm]角程度を想定）による凍結実験を行い、試験体内の温度分布の変化が

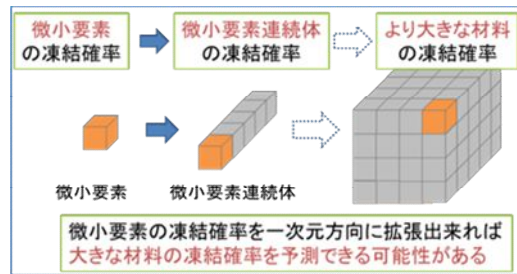


図1 凍結確率分布の適用範囲の拡張

表1 調合表

水セメント比 [%]	単位水量 [kg/m <sup>3</sup> ]	単位質量 [kg/m <sup>3</sup> ]	
		セメント	細骨材
55	277	503	1509

ほぼ一様と見なせるサイズを明らかにする。

(2) 凍結実験による微小要素の凍結温度（過冷却解消温度）確率分布の取得

凍結温度の測定値から微小要素の凍結確率分布を得るための実験を行う。得られた凍結確率分布から累積凍結確率分布関数を導出する。ここで、過冷却水の凍結に伴うパラメータとしては、冷却速度、含水率、細孔構造が予想される。冷却速度は、冬期の日変動温度勾配を想定し、実測結果から -1.5[ °C/h] に設定する。細孔構造はパラメータとして扱いが困難なため、試験体は W/C55[%]のモルタルのみを用い、細孔構造の影響は固定する。含水率は凍結水量が最大となる 100[%RH]平衡（飽水）についてまずは検討する。冷却速度と含水率の条件数については経過をみて追加する。しかし、本研究は提案する確立モデルの妥当性を明らかにすることを最優先目的としているため、試験体数の調整を最優先とする。

試験体

実験に用いるモルタルサンプルの調合表を表1に示す。使用するモルタルは W/C を 55[%]とし、これを 100[mm]×100[mm]×25[mm]のプラスチック製容器に打設した。打設から1日間は封緘養生を行い、脱型後28日間は 20[ °C] の水中に静置した。その後、室内空気を 20[ °C]、80[%RH]に制御した恒温恒湿室に約1年間静置した。この平板モルタルから 10[mm]角のサンプルを切り出し、これらを“微小要素”として実験に用いた。

実験装置

微小要素を用いた実験における実験装置の模式図を図2に示す。本実験においては冷却速度が一定となる気流対流式の冷凍庫を用いた。庫内温度分布を均一にすること、および冷風が試験体に直接当たらないことを目的に、50[mm]厚の発泡系断熱材（λ=0.034[W/mK]）により作製した断熱箱の中にサンプルを入れ、密閉した断熱箱を冷凍庫内に設置した。

### 測定条件

冷却速度は実環境を考慮した  $-1.5[^\circ\text{C}/\text{h}]$  とした。試験体の設置後、断熱箱底面を循環する冷媒の温度を  $20.0[^\circ\text{C}]$  から  $5.0[^\circ\text{C}]$  に変更し、2 時間静置後、冷媒の設定温度を  $-30.0[^\circ\text{C}]$  に変更し、冷却開始から 20 時間測定を行った。結果として試験体の最低到達温度は  $-20[^\circ\text{C}]$  であった。

試験体の温度測定は熱電対により、測定サンプルの表面温度の経時変化を  $1[\text{s}]$  間隔、分解能  $0.1[^\circ\text{C}]$  の精度で測定した。

### (3) 三相系熱水分同時移動モデルと提案する凍結確率予測解析モデルのカップリングによる解析プログラムの構築

(2) に示した実験と並行して、FORTRAN による解析プログラムの準備に取りかかる。実際には実験より得られた確率分布の関数化の作業が必要になるため、実験終了後に作業可能となる工程が多い。

### (4) 微小要素連続体を想定した試験体の凍結実験より得られた凍結温度(過冷却解消温度)確率分布と解析プログラムによる結果の比較

微小要素連続体を想定した、微小要素と同調合のモルタル試験体を用いて、凍結実験を行う。ここでは実験条件を模擬した解析により、試験体内の最低到達温度を算出し、各要素内における過冷却解消に起因する凍結水量の確率を算出する。さらに解析モデルと比較することにより、各要素の凍結を独立と想定した仮定の検証を行う。必要となれば相互作用係数として、相互の影響を加味する係数を導入する。

### 試験体

調合は表 1 と同一とした。モルタルサンプルを  $160[\text{mm}] \times 160[\text{mm}] \times 38[\text{mm}]$  のプラスチック製容器に打設した。打設から 24 時間は封緘養生し、脱型せずに  $20[^\circ\text{C}]$  に調整した水中に 28 日間静置した。その後、室内温湿度を  $20[^\circ\text{C}]$ 、 $80[\%RH]$  に調整した恒温恒湿室に約 11 ヶ月間静置した。材齢 1 年の時点で脱型を行い、脱型後のモルタルプレートから  $10[\text{mm}] \times 10[\text{mm}] \times 150[\text{mm}]$  の直方体を切り出し、これを“ $10[\text{mm}]$ 角微小要素の連続体”と想定した。切り出した連続体は再度恒温恒湿室において実験の直前まで静置した。全試験体の測定終了まで半年近く要するため若材齢での測定を避けた。実験中の材齢は結果として 14~19 ヶ月となった。

### 実験装置

微小要素連続体を用いた実験装置の模式図を図 3 に示す。断熱箱内の温度および冷却速度は断熱箱内の底面を流れる冷媒温度により制御する。断熱箱底面に銅製容器を設置し、試験体表面と冷却面の隙間の結露防止のために高さ  $0.5[\text{mm}]$  に調整した不凍液層を容器底面に設けた。この不凍液に試験体表面が含浸した状態で銅製容器底面に接するよう

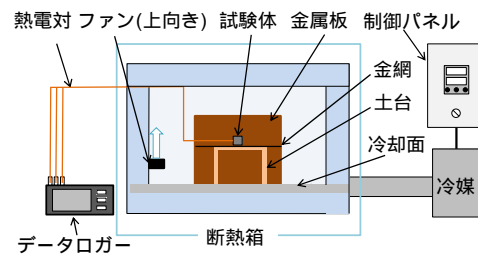


図 2 実験装置模式図(微小要素)

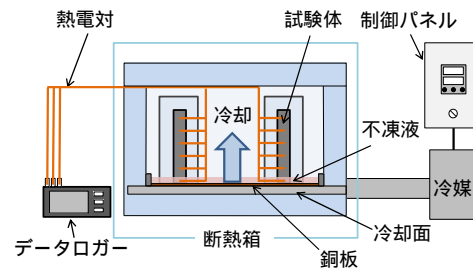


図 3 実験装置模式図(微小要素連続体)

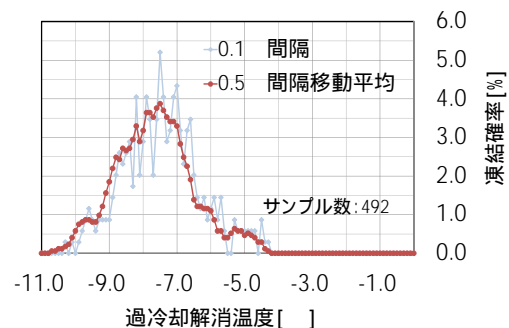


図 4 過冷却解消温度の確率分布

に試験体を設置した。

### 測定条件

微小要素の実験条件に準じた。

## 4. 研究成果

(1) 提案する解析モデルに適用可能な微小要素試験体サイズおよび測定点数の最適化

試験体各面の温度および同一面内の温度分布を測定により確認したところ、測定結果に影響する差異がない試験体サイズとしては  $10[\text{mm}]$  角が最大であることを確認した。今後の実験においては  $10[\text{mm}]$  角試験体を標準として用いる。

(2) 凍結実験による微小要素の凍結温度(過冷却解消温度)確率分布の取得

ここでは飽水試験体の結果について示す。全測定サンプルにおいて、過冷却解消による明確な温度上昇は、測定中に 1 回しか見られなかった。すなわち、ここでの過冷却解消温度は全て 1 回目の過冷却解消温度である。過冷却解消温度の出現確率密度分布について  $0.1[^\circ\text{C}]$  ごとの測定結果と  $0.5[^\circ\text{C}]$  間隔の移



動平均値と共に図4に示す。

図4より、過冷却解消は $-4.5[ ]$ 程度から生じ始めており、分布形状は $-7.5[ ]$ をピークとするおよそ左右対称な形状を示していることがわかる。 $-10[ ]$ 以下では過冷却解消はほとんど見られなかった。つまり、材料中の過冷却解消は $-4.5 \sim -11.0[ ]$ 程度の範囲において生じていることがわかる。

田畑らの実験結果<sup>4)</sup>において、最低到達温度が $-2[ ]$ の場合にはコンクリートの劣化が軽微であるが、 $-5[ ]$ を下回る温度においては、温度低下に比例して試験体の劣化が激しくなることが報告されている。過冷却解消発生確率が被害の程度に対して線形関係を有するかは不明であるが、過冷却解消が凍害発生の要因であることを勘案すると、図4の結果において過冷却解消が現れ始める温度は田畑らの結果と概ね整合している。

次に測定結果の一例として、過冷却解消温度が $-6.5, -7.5[ ]$ の場合の瞬時的含水率増加量の出現確率密度分布を図5, 6にそれぞれ示す。図中には $0.1[\text{vol.}\%]$ ごとの結果と $0.5[\text{vol.}\%]$ 間隔の移動平均値と共に示す。

図5, 6より、瞬時的含水率増加量の出現確率密度分布は、過冷却解消温度によらずピークをひとつ有するほぼ左右対称の形状を示した。また過冷却解消温度の低下に伴い、ピーク値を示す瞬時的含水率増加量は増加し、発生確率のピーク値は増加していることがわかる。過冷却解消温度が低下するほど、過冷却度が増加することになるため、瞬時的含水率増加量が増加したと考えられる。

次に確率密度分布の標準偏差に着目すると、過冷却解消温度が低下すると、僅かに分布が広がっている傾向が見受けられるが、概ね過冷却解消温度によらず標準偏差は $0.6[\text{vol.}\%]$ 程度となった。

そこで、実験結果より得られた過冷却解消温度ごとの平均含水率増加量と桂の過冷却凍結量曲線(細孔径分布より算出した熱力学的平衡含水率 $\times 40[\%]$ )を図7に示す。

図7より、細孔径分布の測定結果より求めた熱力学的平衡含水率に対して、測定結果の平均値は $42[\%]$ となった。いずれの過冷却解消温度においても、両者は良い一致を示していることがわかる。

また瞬時的含水率増加量の標準偏差に着目すると、 $-6[ ]$ 程度までは少しばらつきが見られるが、過冷却解消温度によらず $0.6[\text{vol.}\%]$ 程度とほぼ一様であった。

細孔径分布より求めた熱力学的平衡含水率の $40[\%]$ を平均値、過冷却解消温度によらず一定の $0.6[\text{vol.}\%]$ を標準偏差として作成した最低到達温度に対する含水率増加量の累積出現確率分布を図8に示す。

つまり、細孔径分布が既知であれば、瞬時的含水率増加量の確率密度分布を測定することなく任意の最低到達温度に対する含水率増加量の累積出現確率分布関数を導出することが可能といえる。

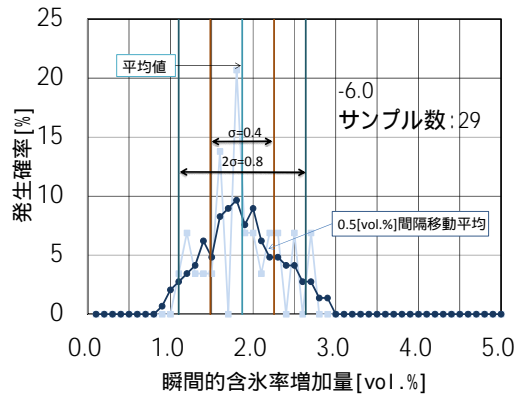


図5 含水率増加量の出現確率密度分 (過冷却解消温度 $-6.0$ )

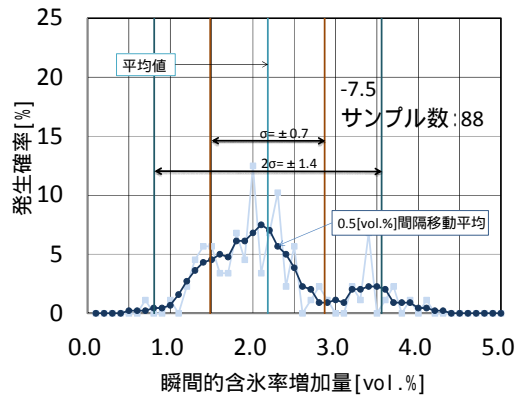


図6 含水率増加量の出現確率密度分 (過冷却解消温度 $-7.5$ )

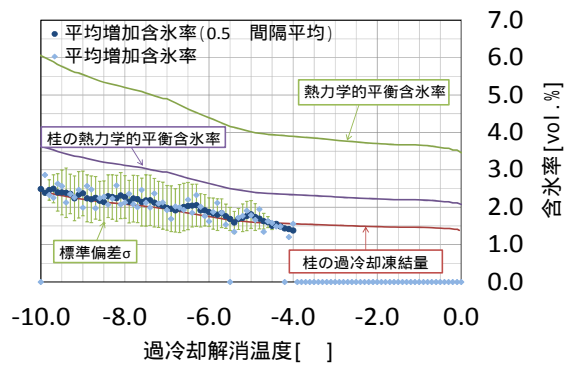


図7 平均含水率増加量分布

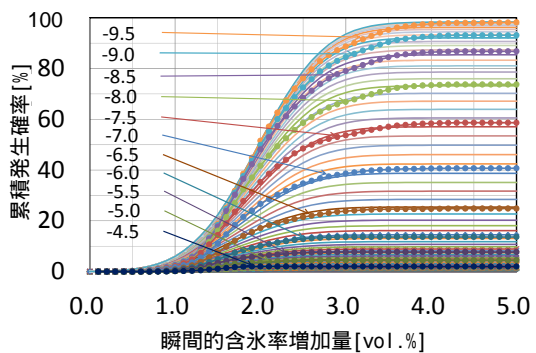


図8 最低到達温度の含水率増加量の累積出現確率分布

(3) 三相系熱水分同時移動モデルと提案する凍結確率予測解析モデルのカップリングによる解析プログラムの構築

ここで、過冷却解消温度  $\theta$  の出現確率密度関数を  $P(\theta)$ 、過冷却解消温度毎の瞬間的含水率増加量  $\psi_i$  の出現確率密度関数を  $G(\theta, \psi_i)$  とすると、最低到達温度に対する瞬間的含水率増加量の累積出現確率分布関数  $K(\theta_L, \psi_{i,set})$  は次式となる。

$$K(\theta_L, \psi_{i,set}) = \int_{\theta_L}^0 P(\theta) \int_0^{\psi_{i,set}} G(\theta, \psi_i) d\theta d\psi_i \quad (1)$$

さらに、破壊を引き起こす瞬間的含水率増加量を  $\psi_{i,dam}$  とすると、数値解析結果として微小要素連続体の最低到達温度分布が得られれば、 $\psi_{i,dam}$  以上の瞬間的含水率増加量が生じる確率  $F_{dam}(\psi_i)|_x$  は次のように記述できる。

$$F_{dam}(\psi_i) = K(\theta_L, \psi_{i,con}) - K(\theta_L, \psi_{i,dam}) \quad (2)$$

ここで、 $\psi_{i,con}$  および  $\psi_{i,dam}$  は任意に設定可能な含水率の上端値、下端値である。

また、過冷却解消温度の出現確率密度関数  $P(\theta)$ 、瞬間的含水率増加量の出現確率密度関数  $G(\theta, \psi_i)$  は、含水率  $\psi_i$ 、冷却速度  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ 、試験体サイズ  $l$ 、細孔構造特性  $S$  の影響を受けると考えられるため、これらを独立変数とする関数  $f, g$  により、それぞれ次式のように表されると仮定した。

$$P(\theta) = f\left(S, \frac{\partial \theta}{\partial t}, l, \psi_w\right) \quad (3)$$

$$G(\theta, \psi_i) = f\left(S, \frac{\partial \theta}{\partial t}, l, \psi_w\right) \quad (4)$$

微小要素連続体において過冷却解消が生じる箇所を  $m$  とすると、位置  $x$  の要素が誘発により凍結する確率  $P_{mi}[\theta(x, t)]$  は最終的に以下の式となる。

$$P_{mi}[\theta(x, t)] = \sum_{i=1}^m \left\{ P_{com}[\theta(x, t)] P_{mi}[\theta(x, t)] \prod_{h=i+1}^{m-1} P_{mi}[\theta(x_h, t)] \right\} + \sum_{i=m}^n \left\{ P_{com}[\theta(x, t)] P_{mi}[\theta(x, t)] \prod_{h=m+1}^{i-1} P_{mi}[\theta(x_h, t)] \right\} \quad (5)$$

(4) 微小要素連続体を想定した試験体の凍結実験より得られた凍結温度（過冷却解消温度）確率分布と解析プログラムによる結果の比較

欠測の発生や、結果として採用できたサンプル数は 162 体であった。記載する確率分布は 162 体に対する確率である。

深さごとの過冷却解消温度の発生確率密度分布を解析結果とともに図 9 に示す。過冷

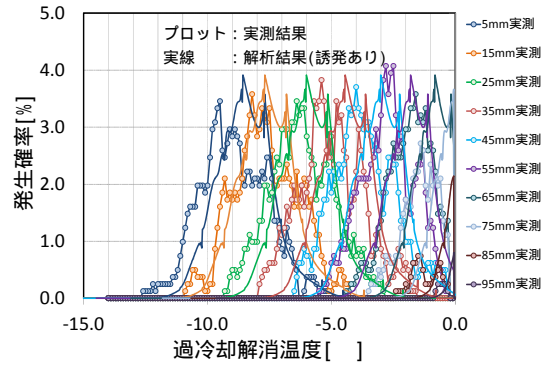


図 9 深さごとの過冷却解消温度発生確率

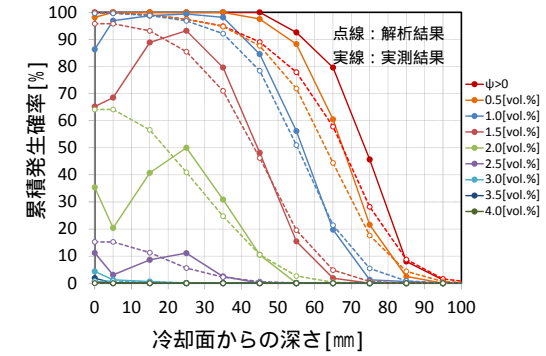


図 10 深さごとの瞬間的含水率増加量

発生確率

却解消は深さ 95[mm]まで生じており、最初の過冷却解消の発生範囲が深さ 5 ~ 45[mm]だったことから、深さ 55 ~ 95[mm]の過冷却解消は誘発によってのみ生じていることがわかる。また、深さごとの確率分布の形状が似ている傾向や、冷却面から深くなるほど分布が高温側にシフトする傾向が見られた。実測結果と比較すると、分布は高温側に現れたものの、分布形状は良い一致を示した。つまり、実測においては過冷却解消時に必ず誘発による過冷却解消が生じていたものと考えられる。

冷却面からの深さに対する瞬間的含水率増加量の累積発生確率を後述の解析結果とともに図 10 に示す。

瞬間的含水率増加量の発生確率密度分布を用いた解析結果は、全体的な形状を再現することはできたものの、深さ 5[mm]における累積確率の減少および深さ 25[mm]に生じる累積確率のピークは再現できなかった。この理由としては、瞬間的含水率増加量の関数近似には熱力学的平衡凍結量を用いているため、微小要素連続体の実測結果に見られた温度が低下するほど平均値が減少する傾向を再現できていないことによる。定量的な精度を求める場合であれば、温度低下に伴う瞬間的含水率増加量の減少を考慮すべきではあるが、現時点では安全側の評価であるため、無視できるものと判断した。解析結果と実測結果の絶対誤差を見ると、深さ 25[mm]、深さ 35[mm]において、解析結果が実測結果を下回るものの、誤差としては 10[%]以内であ

るため、影響は小さいと考えられる。また、深さ 25[mm]以降および瞬間的含水率増加量が 1.0[vol.%]以下の範囲において、解析結果は実測結果を下回っており、最大で 22[%]の誤差が生じた。

しかし、危険側の誤差の増加は、瞬間的含水率増加量が比較的少量の範囲であることから、耐久性予測の観点からは問題はないと判断できる。

<引用文献>

- 1) T.C. Powers: A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc. American Concrete Institute, Vol.41, pp.245-272, 1945.
- 2) 桂修, 吉野利幸, 鎌田英治:「過冷却の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構」, コンクリート工学論文集, 第 10 巻, 第 2 号, pp.51-63, 1999.
- 3) 松本衛, 馬沙:「地盤の凍結と融解過程の解析に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 482 号, pp.25-34, 1996.
- 4) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治:「コンクリートの凍害の環境要因効果に関する実験的研究-コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響(その 1)」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 367 号, pp.8-15, 1986.

#### 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)

[雑誌論文](計 2 件)

高橋光一, 岸本嘉彦, 濱幸雄, 崔亨吉, “細孔溶液の過冷却解消温度と瞬間的含水率増加量の確率密度関数に及ぼす独立変数の影響に関する研究”, 査読有, コンクリート工学年次論文集, 39 巻, 1 号, 2017 年 07 月, pp.1066-1071.

岸本嘉彦, 高橋光一, 濱幸雄, “過冷却解消温度の確率分布に基づく熱力学的非平衡凍結水量予測モデルの構築”, 査読有, コンクリート工学年次論文集, 38 巻, 1 号, 2016 年 07 月, pp.981-986.

[学会発表](計 9 件)

Yoshihiko Kishimoto, “Thermodynamic Non-Equilibrium Prediction Model for Frozen Water Volume of Small Continuum Based on Probability Distribution of Supercooling”, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2018, pp.1066-1071, 2018 年 3 月, Muroran.

高橋光一, “モルタルの過冷却現象の確率分布に基づく熱力学的非平衡凍結確率予測モデルの構築 その 3 凍結による透水性の変化を考慮した未凍結水圧の発生確率算出モデルの提案”, 日本建築学会大会, 2017 年 8 月, 広島工業大学.

高橋光一, “モルタルの過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量に基づく未凍結水圧の発生確率算出モデルに関する研究”, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2017 年 6 月, 室蘭工業大学.

Kouichi Takahashi, “Investigation Based on Measurement of Probability Distribution of Supercooling Phenomenon to Establish a Prediction Method for Frost Damage of Concrete Structure”, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2017, 2017 年 3 月, Muroran.

Takahashi, K., “Fundamental study on probabilistic prediction method for frost damage of concrete structure”, 7th Forum on Studies of the Environmental and Public Health Issues in the Asian Mega-cities, 2016 年 9 月, Muroran.

Kouichi TAKAHASHI, “Study on influence of independent variables on probability distributions of freezing point and instantaneous increment of ice content due to supercooling in mortar”, Proceedings of 11th International Symposium between Korea, China and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure, 2016 年 8 月, Cheongju.

高橋光一, “モルタルの過冷却現象の確率分布に基づく熱力学的非平衡凍結確率予測モデルの構築 その 2 過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量の確率分布に及ぼす独立変数の影響”, 日本建築学会大会, 2016 年 8 月, 福岡大学.

高橋光一, “モルタルの過冷却解消温度および瞬間的含水率増加量の確率分布に及ぼす独立変数の影響に関する研究”, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2016 年 6 月, 職業能力開発大学校.

岸本嘉彦, “細孔溶液に生じる過冷却解消温度の確率分布に基づく凍結確率予測モデルの構築”, セメント・コンクリート研究討論会, 2015 年 11 月, 日本大学.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

[その他]

該当事項無し

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

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