論文　外界気象条件による空隙構造変化が凍結融解性状に及ぼす影響

岸本　嘉彦[*1]・濱　幸雄[*2]・中村　暢[*3]・Mohamed Zakaria[*4]

要旨：コンクリート構造物の周辺温度が高いほど，直径 40～2000[nm]の空隙量が増加することが知られている。しかし，実環境下においてコンクリート構造物内の温度分布は一様ではないと考えられる。さらには，一般に，構造体の壁厚は，建築物では 15[cm]程度，土木構造物では 100[cm]以上となり，種別により材料厚が異なる。すなわち．温度が空隙構造変化に及ぼす影響は材料厚によって異なる可能性が高い。そこで，本研究は周辺温度が空隙構造変化に及ぼす影響を考慮した凍害進行予測モデルの開発の一環として，材料厚による温度分布の差異が凍結融解性状に及ぼす影響について，三相系熱水分同時移動モデルに基づく解析により検討した。

キーワード：壁厚，外界気象条件，空隙構造変化，含水率分布，温度分布，三相系熱水分同時移動モデル

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性には，直径 40～2000[nm]の空隙量の影響が大きいことが知られている [1)]。既報 [2)]においては，初期養生後（20[℃]の水中養生を 4 週間）の W/C35%および 55%の non-AE モルタル試験体（寸法 40×40×160）を室蘭，東京，沖縄にそれぞれ 1 年半にわたり暴露する実験を行ない，結果として，環境温度が高いほど直径 40～2000[nm]の空隙量が増加することを明らかにした。これは，6[nm]以下の細孔を持つゲル状水和物に化学的な構造変化が生じ，粗大化した結果である [3)]。

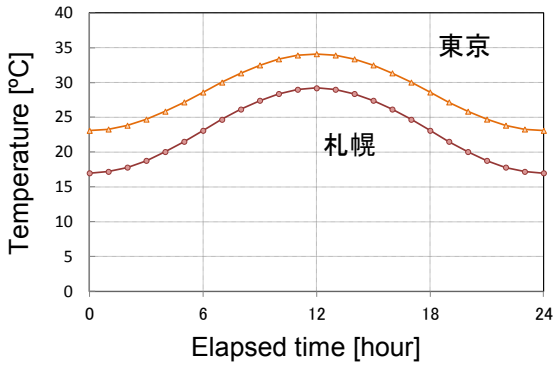
コンクリート構造物が実環境に曝される場合には，内部の温度分布は一様ではないと考えられる。さらには，コンクリート構造物の壁厚は，建築物や土木構造物などの種別に依存する。一般的に，建築物の壁厚は 15[cm]程度，土木構造物は 100[cm]以上である。すなわち，同じ暴露環境下であっても空隙構造に及ぼす温度の影響は，構造物の厚みによって異なる可能性がある。

したがって，本研究では，外界気象条件による空隙構造変化を考慮した凍害進行予測モデルの開発を目的として，壁厚による温度分布の差異を熱伝導解析により検討し，温度分布から空隙構造変化を推定する解析モデルを提案する。次に，空隙構造変化後の壁体について，三相系熱水分同時移動方程式を用いた解析により，空隙構造変化による凍結融解挙動の差異を検討する。

2.壁厚による温度分布の差異

2.1 計算条件および解析対象

解析に用いた環境温度を**図－１**に示す。**図－１**に示すように，環境温度条件として「札幌」と「東京」の 2 水準を用意した。これらの温度変化は，拡張アメダス気象データに掲載されている札幌および東京の 7 月と 8 月のデータに基づき作製した 2 ヶ月間の時刻別平均値である。「札幌」の平均値と最大値は，それぞれ 22.9[℃], 29.2[℃]，「東京」の平均値と最大値は，それぞれ 28.4[℃], 34.1[℃]である。



図－１　暴露環境温度

解析対象のコンクリート壁体の壁厚は，建築物と土木構造物をそれぞれ想定し，それぞれ，15[cm]と 100[cm]にそれぞれ設定した。この解析においては，単純な熱伝導のみを想定し，基礎式として式(1)を用いた。

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot\left(\lambda\nabla T\right) \tag{1}$$

ここで，c は比熱[J/kgK]，λ は熱伝導率[W/mK]，ρ は密度[kg/m^3]，t は時間[s]，∇ は divergence(gradient)である。

ここでは材料の厚み方向を X 方向と定義した。熱と水

*1 室蘭工業大学　大学院工学研究科くらし環境系領域　助教　博士（工学）　(正会員)
*2 室蘭工業大学　大学院工学研究科くらし環境系領域　教授　博士（工学）　(正会員)
*3 室蘭工業大学　大学院工学研究科建築社会基盤系専攻　博士前期課程　(学生会員)
*4 室蘭工業大学　大学院工学研究科くらし環境系領域　博士研究員　博士（工学）　(正会員)
Assistant Professor, Aswan Faculty of Engineering, South Valley University, Aswan, Egypt

分の移動はX方向においてのみ生じると仮定し，解析は一次元モデルを用いて行った。数値計算は有限差分法を用いた。

X＝0[mm]の材料表面においては**図－１**に示した温度変化をする周辺空気に接している。この表面での熱伝達率は 9.6 [W/m^{2}K]に設定した。 材料深部境界においては断熱条件を想定し，熱伝達率は 0.0 [W/m^{2}K]に設定した。

2.2 解析結果

「東京」における壁厚 15[cm]と 100[cm]の場合の温度分布変化を**図－２**および**図－３**に，「札幌」における壁厚 15[cm]と 100[cm]の場合の温度分布変化を**図－４**および**図－５**に，それぞれ示す。これらの温度分布は周期的定常状態における 1 時間ごとの分布を示している。

まず，壁厚の影響について，**図－２**，**図－３**を比較すると，壁体表面から深さ 6[cm]程度までは，壁厚による温度変化の差異は 0.2℃程度しかないが，深さ 6[cm] 以深の範囲においては最大で 1.5[℃]程度の明確な差異が見られる。つまり，壁厚が 15[cm]の場合には，材料表面からの深さが 6[cm] 以深となる範囲において，空隙構造がより粗大化する可能性が高いと考えられる。

さらに暴露環境温度の影響について，**図－４**および**図－５**を，それぞれ**図－２**および**図－３**と比較すると，周辺温度の平均温度が低下しているため，当然のことながら，壁体内の平均温度も低下している。しかし，傾向は東京の場合と同様に，壁厚が薄いほど，壁体表面からの深さが 6[cm] 以深となる範囲の最高到達温度が高い。

3. 温度分布に基づく空隙構造変化のモデル化

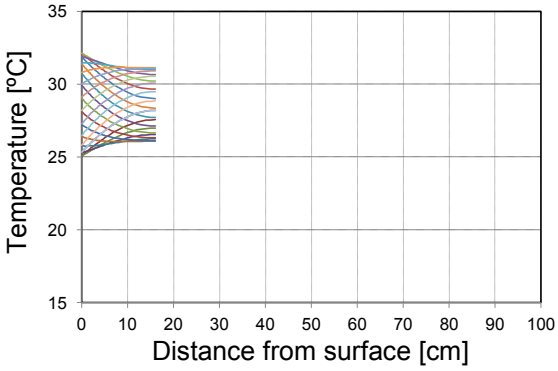
本解析においては，耐凍害性に及ぼす影響が大きい直径 40-2000[nm]の空隙量に主として着目し，40-2000[nm]の範囲の空隙構造の変化率(=PV_d/PV_i)は，その点における最大温度に依存すると仮定した。したがって，空隙構造変化率は 2.2 節において求めた温度分布に基づき，式(2)より求まる [4)]。

$$\frac{PV_d}{PV_i} = 0.092\theta - 0.069W/B + 3.232 \qquad (2)$$

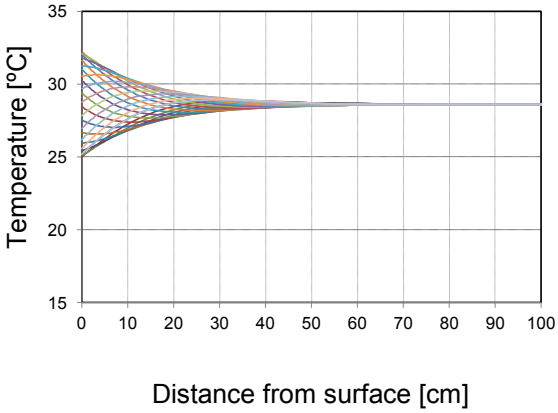
ここで，PV_d は乾燥後の直径 40-2000[nm]の範囲の空隙容積[cc]，PV_i は初期条件としての直径 40-2000[nm]の範囲の空隙容積 (基準として 20 [°C]水中養生 4 週間後)[cc]，θ は乾燥期間中の最大温度[°C]，W/B は水結合材比[%]である。また，式(2)を導出した実験条件より，適用温度範囲の上限は 50[℃]である。

温度分布の解析結果を式(2)に代入し求めた空隙構造変化率を**図－６**に示す。W/B は 50%とした。

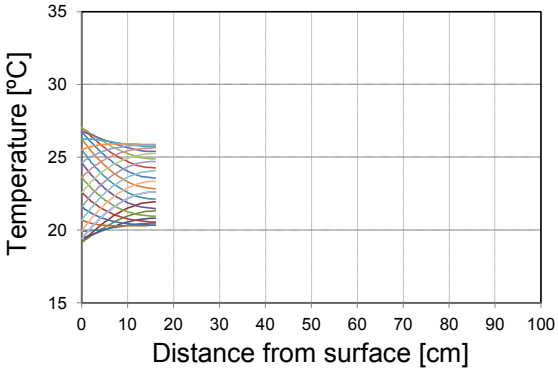
図－６より，先述の温度分布変化からもわかるように，材料厚による空隙構造変化率の差異は，材料表面から深さ 6[cm]まででではほぼ見られず，6[cm]よりも深い位置ほ



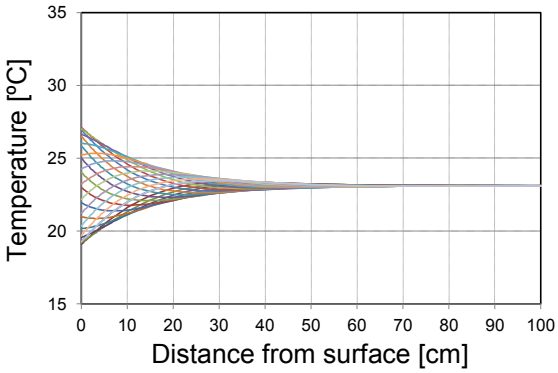
図－２　温度分布の時間変化
（東京：壁厚 15[cm]）



図－３　温度分布の時間変化
（東京：壁厚 100[cm]）



図－４　温度分布の時間変化
（札幌：壁厚 15[cm]）



図－５　温度分布の時間変化
（札幌：壁厚 100[cm]）

ど増加する傾向にある。また地域ごとの最大値を比較すると，東京では 2.74，札幌 2.27 となり，東京では札幌よりも直径 40-2000[nm]の範囲の空隙が 1.2 倍ほど粗大化すると言える。

コンクリートの平衡含水率曲線は，Hedenblad による測定値を用いた[5]。ここで，直径 40[nm](=94.8 [%RH])以上に相当する領域においては，空隙構造変化率を乗じて容積を変化させた。また，変化させた平衡含水率曲線は 55 [%RH]の点に収束すると仮定した。20 [°C]における平衡含水率曲線を**図－7** に示す。解析においては，この平衡含水率曲線を水分化学ポテンシャル μ [J/kg]との関係に変換し用いた。ここで，水分化学ポテンシャルと平衡含水率曲線の関係は 0[°C]以下においても，0[°C]以上の場合と同様の関係が成り立つとした。

4. 凍結融解挙動の差異についての検討

4.1 三相系熱水分同時移動方程式

ここでは次に示す仮定をおいた。材料は等方性と一様性を有し，気相，液相，固相の三相により構成されるものとする。各相の水分には局所平衡が成立し，吸放湿および結氷による履歴現象，過冷却現象，含水率および含氷率変化による材料の空隙構造変化は考慮しない。

これらの仮定に基づき導出される水分および熱の収支式を式(3)，式(4)にそれぞれ示す[6]。

$$\frac{\partial \rho_w \psi_w}{\partial \mu}\frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\lambda'_{Tg} \nabla T\right) + \nabla \cdot \left\{\left(\lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}\right)\nabla \mu\right\} \tag{3}$$

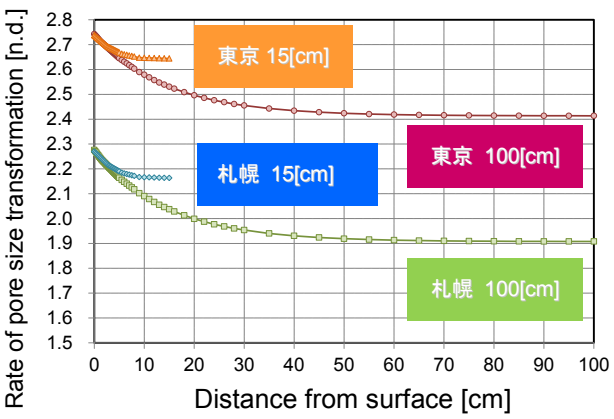
$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\lambda \nabla T\right) + H_{gl}\nabla\left(\lambda'_{Tg}\nabla T + \lambda'_{\mu g}\nabla \mu\right) + H_{ls}\frac{\partial \rho_i \psi_i}{\partial t} \tag{4}$$

ここで，ρ_w は水分の密度[kg/m^3]，Ψ_w は水分の容積含水率[m^3/m^3]，t は時間[s]，T は温度[K]，λ'_{tg} は温度勾配による気相水分伝導率[kg/msK]，$\lambda'_{\mu g}$ は水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率[kg/ms(J/kg)]，$\lambda'_{\mu l}$ は水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率[kg/ms(J/kg)]，μ は水分化学ポテンシャル(自由水基準)[J/kg]，c は比熱[J/kgK]，ρ は密度[kg/m^3]，λ は熱伝導率[W/mK]，H_{gl} は気相と液相間の水分相変化熱[J/kg]，H_{ls} は液相と固相間の水分相変化熱[J/kg]，∇ は divergent(gradient)である。

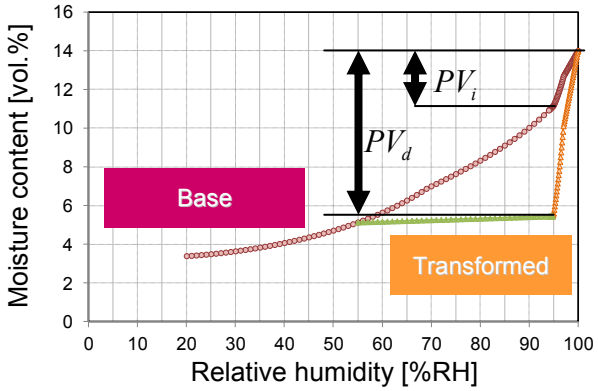
また水分総量$\rho_w \Psi_w$ [kg/m^3]は以下の式(5)により定義される。

$$\rho_w \psi_w = \rho_g \psi_g + \rho_l \psi_l + \rho_i \psi_i \tag{5}$$

ここで，ρ_g，ρ_l，ρ_I は，それぞれ気相，液相，固相の水分の密度[kg/m^3]，Ψ_g，Ψ_l，Ψ_I は，それぞれ気相，液相，固相の水分の容積含水率[m^3/m^3]である。また本論文においては，材料の単位容積あたりに存在する氷の容積比率を含氷率[vol.%]（＝Ψ_I×100）と定義する。



図－6 温度分布に基づく空隙構造変化率（W/B＝50%）



図－7 平衡含水率曲線

表－1 材料物性値

w/c [%]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
50	2300	934	1.62

多孔質材料内の水分化学ポテンシャル μ [J/kg]と結氷温度 T [K]の平衡関係式は以下の式(6)を用いた。

$$\mu = H_{ls}\log_e\left(\frac{T}{T_o}\right) \tag{6}$$

ここで，T_0 は自由水の結氷温度（＝273.16[K]）であり，$T_0 - T$ が結氷点低下量となる。

4.2 移動係数と平衡含水率曲線

解析に用いた物性値を**表－1** に示す。

本解析モデルにおいては，水分化学ポテンシャル勾配による水分移動係数と温度勾配による水分移動係数を含水率の関数として作成し，解析に用いた。

コンクリートの水分移動係数は，基本的には小椋[7]により報告されているものを用いた。すなわち，不飽和時

においては Hedenblad[5]によって測定された湿気伝導率（1.02×10^{-12}[kg/msPa]）を，飽和時（水分移動係数の最大値）は透水係数の文献値 [8]（3×10^{-10}[cm/s]）を用いた。相対湿度 98[RH%]から飽和にかけての含水状態における湿気伝導率については，測定値が無いため内挿により与えた。解析に用いた水分移動係数を Hedenblad による測定値とともに図－８に示す。

4.3 解析対象と計算条件

ここでは前章と同様に，建築壁体を想定した壁厚 15[cm]と土木構造物を想定した壁厚 100[cm]の 2 種類の壁厚のコンクリート壁体を解析対象とした。また暴露した環境温度の条件も同様に，「東京」と「札幌」を用いた。

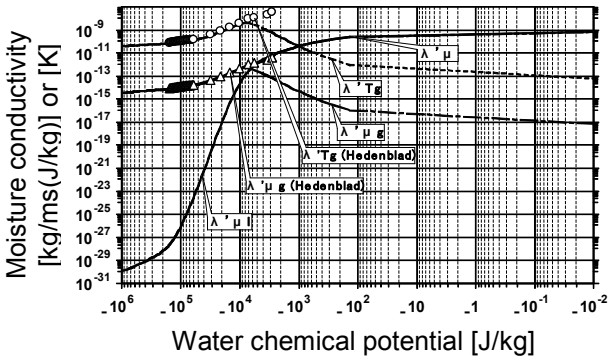
本解析においては，促進凍結融解試験(RILEM CIF/CDF 試験)を模擬した。また壁体の壁厚方向を X 方向と定義した。ここでは，熱と水分の移動は X 方向においてのみ生じると仮定し，解析は 1 次元モデルとして扱った。

促進凍結融解試験(RILEM CIF/CDF 試験)と同様に試験槽底面外側温度（ブライン温度）を制御し，試験体下面との熱伝達については流水を想定した第 3 種境界条件（α＝930[W/m^{2}K]）を与えた。湿度については，材料下面が液水に接していることから飽和状態を想定し，試験体下面の相対湿度を 100[%RH]とした。試験水と試験槽内空気，試験槽空気と試験体上面の熱伝達をそれぞれ考慮し，共に第 3 種境界条件（α＝9.3[W/m^{2}K]）を与えた。このとき，試験槽内の空気温度は一様に変化すると仮定し，試験体上面に接する空気の温度を算出した。

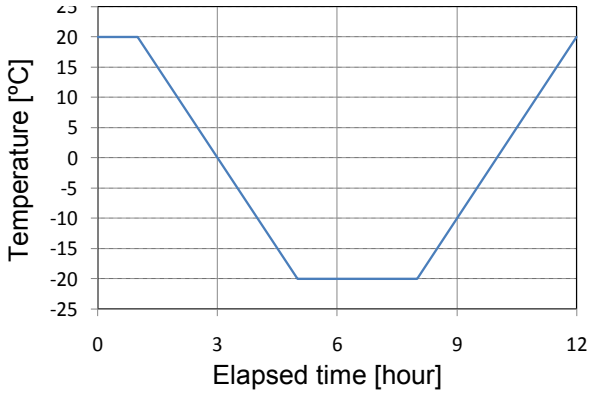
RILEM CIF/CDF 試験においては，試験体に 7 日間の下面吸水プロセスを与えた後に凍結融解試験を行うように規定されている。そのため，初期条件は 7 日間の下面吸水直後を想定した。ここでは，下面吸水後の気泡中に液水は存在しないと想定し，飽水含水率 14[vol.%]より 2[vol.%]低い 12[vol.%]を初期含水率とした。相対湿度はこれに平衡する 98[%RH]を与えた。すなわち，材料内の全領域の初期値を 20[℃], 98[%RH]とした。

ブラインの温度制御のサイクルを図－９に示す。図－９に示すように，ブライン温度は，まず 20[℃]保持を 1 時間行い，次に－10[℃/h]の冷却速度で－20[℃]まで低下させる。そして，－20[℃]の状態を 3 時間保持した後，＋10[℃/h]の加熱速度で 20[℃]まで上昇させる。すなわち，1 サイクルの周期は 12 時間である。

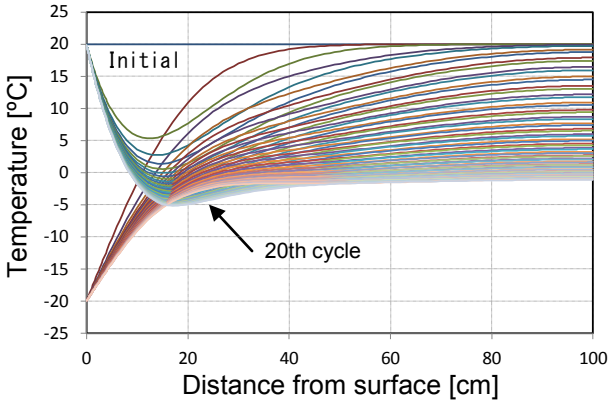
数値計算は，前進型有限差分法によって行う。計算期間は 20 サイクル，すなわち計 240 時間（10 日間）の計算を行った。



図－８　水分化学ポテンシャルと水分伝導率の関係



図－９ ブライン温度の周期的変動



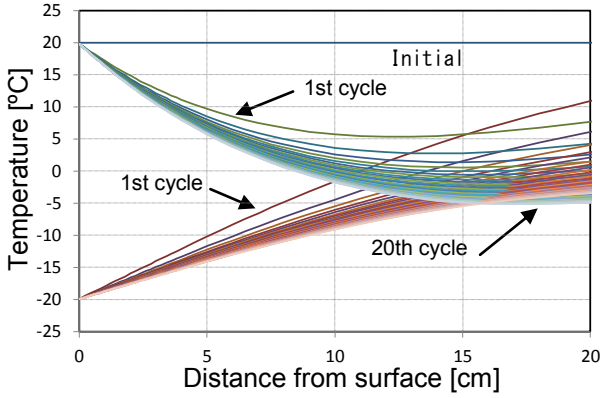
図－１０　凍結融解過程における温度分布変化（壁厚 100[cm]）

4.4 解析結果

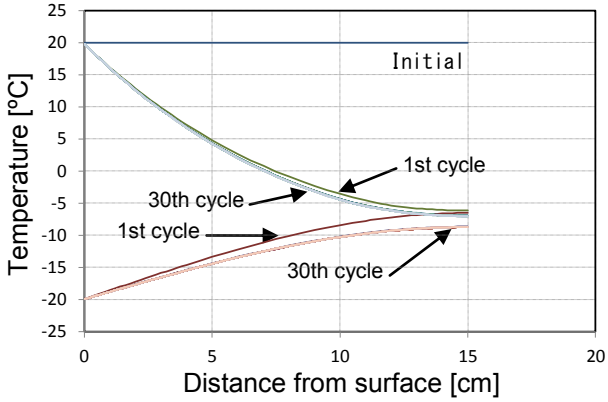
(1)温度分布

壁厚 100[cm]の場合の各サイクルにおける最高および最低温度の分布を図－１０に示す。図－１０より，周期的定常状態においては，材料表面より深さ 20[cm]の点において収束しており，より深部については温度変化が生じないことがわかる。また，深さ 20[cm]よりも深部側の温度変化は，表面側に比して極めて緩慢である。

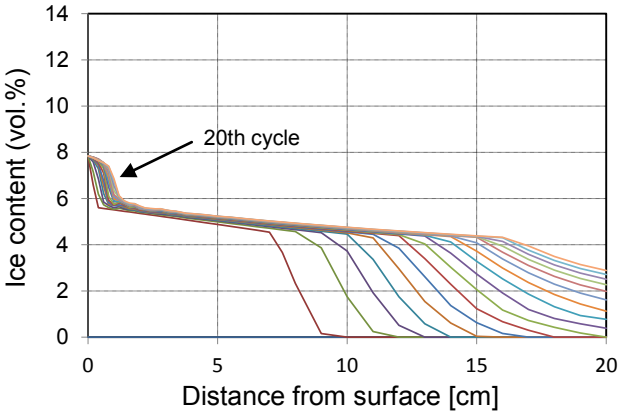
ここで，壁厚 15[cm]の場合と温度分布を比較するために，壁厚 100[cm]の場合の壁表面から深さ 20[cm]までの



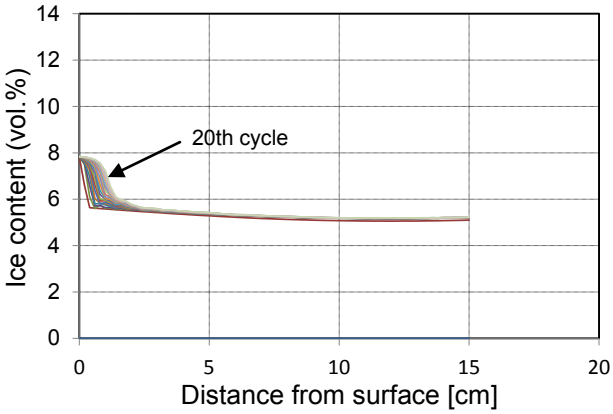
図－１１　凍結融解過程における深さ 20[cm]までの温度分布変化（壁厚 100[cm]）



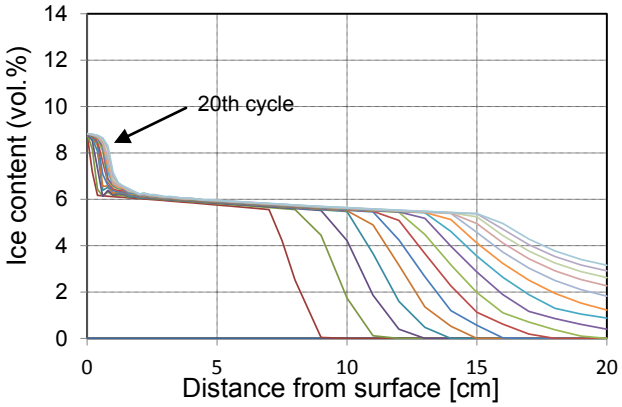
図－１２　凍結融解過程における温度分布変化（壁厚 15[cm]）



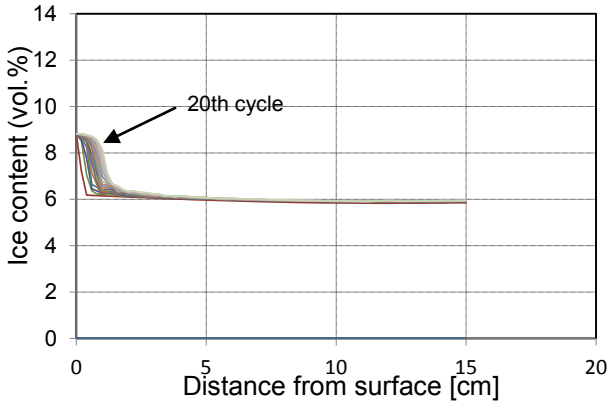
図－１３　含氷率分布の時間変化（札幌：壁厚 100[cm]）



図－１４　含氷率分布の時間変化（札幌：壁厚 15[cm]）



図－１５　含氷率分布の時間変化（東京：壁厚 100[cm]）



図－１６　含氷率分布の時間変化（東京：壁厚 15[cm]）

温度分布を図－１１に示す。また，壁厚 15[cm]の場合の温度分布を図－１２に示す。図－１１と図－１２を比較すると，壁厚 15[cm]の場合の温度分布変化に比して，壁厚 100[cm]の場合は壁体表面からの深さが 15[cm]までの範囲でさえ，温度変化が遅い。両者の差異は壁体表面から深い位置ほど増加する。

(2)含氷率分布

暴露温度条件を「札幌」とした壁厚 15[cm]と 100[cm]の場合の含氷率分布を，図－１３，図－１４にそれぞれ示す。同様に暴露温度条件を「東京」とした壁厚 15[cm]と 100[cm]の場合を，それぞれ図－１５，図－１６に示す。これらの含氷率分布は各凍結融解サイクルにおける 8 時間経過時，すなわち材料が最も冷却された時点の分

布である。

図－１３から図－１６までを見ると，全ての条件において，凍結は材料表面から始まり，凍結融解サイクル数が増加するにつれ，より内部に進行していることがわかる。これは材料下面（図中左側）から徐々に吸水をしている影響と考えられる。また，概ね深さ 2[cm]までの含氷率が高く，各サイクルにおける最大含氷率は表面において見られる。

まず暴露環境温度の影響について，図－１３と図－１５，図－１４と図－１６をそれぞれ比較する。暴露環境温度による最大含氷率の差異は，表面近傍においては約 2 [vol.%]であることがわかる。破壊の発生と具体的な凍結量の関係は不明ではあるが，凍結量が増加するほど劣化が生じ易いと考えられる。今回の解析条件においては，暴露環境温度が異なることにより最大含氷率に 1.3 倍程度の増加を引き起こした。また，より深部においても含氷率分布に差異が見られるが，おそらく凍害を引き起こすほどの凍結量ではないと思われる。

次に壁厚の影響について，図－１３と図－１４，図－１５と図－１６をそれぞれ比較すると，壁厚による含氷率の差異は深さ 7[cm]よりも深部において見られる。これは，前章の解析結果から壁厚による最高到達温度の差異が深さ 6[cm] 以上の範囲において見られたこと，および本章の前述した温度分布変化から壁厚の増加に伴い壁体深部の温度変化が緩慢になることから生じた差異と考えられる。深さ 7[cm]以上の範囲の含水率が平衡相対湿度 98[%RH]になる条件においては，含氷率分布に及ぼす壁厚の影響が，より顕著になる可能性が高いと言える。

深さ 1[cm]までの表面近傍を見ると，壁厚による含氷率分布の差異は顕著ではないが，壁厚 15[cm]の場合には壁厚 100[cm]の場合に比して，表面近傍の最大含氷率が僅かに高い。スケーリングなどの剥離被害の発生確率は，表面近傍の含氷率に依存すると考えられるため，このような僅かな最大含氷率の差異が，被害発生確率を増加させる可能性がある。

5. 結論

本研究では，外界気象条件による空隙構造変化を考慮可能な凍害進行予測モデルの開発を目的として，壁厚による温度分布の差異を熱伝導解析により検討し，温度分布から空隙構造変化を推定する解析モデルを提案した。次に，空隙構造変化後の壁体について，三相系熱水分同時移動方程式を用いた解析により，空隙構造変化による凍結融解挙動の差異を検討した。得られた知見を以下に示す。

同一暴露環境下では，壁表面からの深さが 6[cm]よりも深い範囲において，壁厚が減少するほど最高到達温度が上昇し，その結果，直径 40～2000[nm]の範囲の空隙量がより粗大化する可能性が高いと考えられる。

暴露環境温度による空隙構造変化により，構造体の凍結融解挙動に差異が見られた。今回の解析条件下においては，表面近傍に 1.3 倍程度の含氷率増加が見られた。

壁厚が減少するほど，深さ 7[cm]以上の範囲の含氷率分布が増加する。この影響は平衡相対湿度が 98[%RH]以上となる含水率において，より顕著となると考えられる。また表面近傍の最低到達温度が低下するため，最大含氷率が増加し，剥離被害の発生確率を増加させる可能性がある。

参考文献

1) 鎌田英治，千歩修，田畑雅幸，田中宏和：コンクリートの耐凍害性におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析，日本建築学会構造系論文集，No.487, pp.1-9, 1996.
2) 澁谷将，濱幸雄，新大軌，岸本嘉彦：屋外暴露したモルタルの細孔構造変化と耐凍害性の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，No.1638, pp.1275-1276, 2010.
3) 青野義道，松下文明，柴田純夫，濱幸雄：乾燥による硬化セメントペーストのナノ構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学論文集，Vol.19, No.2, pp.21-34, 2008.
4) 中村暢，濱幸雄，岸本嘉彦：経年モルタルの細孔構造と耐凍害性の変化に及ぼすセメント種別の影響，第 11 回韓國日本建築材料施工 JOINT SYMPOSIUM 論文集, Vol.11, pp.34-39, 2012
5) Hedenblad, G., ”Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Paste,” PhD Thesis, Division of Building Materials Lund Institute of Technology ,1993.
6) Matsumoto, M., “Simultaneous heat and moisture transfer during freezing-melting in building materials,” Minutes and Proceedings of CIB/W40 meeting in Sopron No.3, pp. 1-12, 1993.
7) Ogura, D. et al., “An Analysis of Heat and Moisture Behavior in Underground Space by Qua-silinearized Method,” Proceedings of CIB W40 meeting in Kyoto, pp.313-328, 1997.
8) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧，第２版，技報堂出版，第二刷, 1996.