

表面改質コンクリートの凍結融解による表層剥離促進メカニズム

正会員 ○鈴木 好幸\* 同 濱 幸雄\*\*\*  
同 岸本 嘉彦\*\* 同 新 大軌\*\*\*\*

表面改質材 熱水分同時移動方程式 表層剥離  
凍結融解

1. はじめに

近年、既設構造物への適用が可能で、施工が容易かつ比較的安価である表面改質材がコンクリート構造物の塩害防止、凍害防止、中性化抑制など総合的な劣化対策を行える材料として期待されており、多くの研究がなされている<sup>1)2)</sup>。著者らの既往の研究では、表面改質材の塗布により吸水は抑制されるものの、凍結融解の繰り返しによる剥離が促進するという結果が得られている<sup>3)4)</sup>。しかし、その剥離促進のメカニズムについては明らかになっていない。

そこで本研究では、表面改質材を塗布したコンクリートでの凍結融解による剥離促進のメカニズムについて、三相系熱水分同時移動方程式を用いたシミュレーション解析により検討した。

2. 実験計画および方法

(1) 基礎理論<sup>5)</sup>

ここでは材料を気相、液相、固相の三相で構成されるものとした。各相の水分には局所平衡が成立し、材料の空隙構造変化、履歴現象および過冷却現象は考慮しない。これらの仮定に基づき以下の支配方程式が導出される。

水分収支式：

$$\frac{\partial \rho_w \psi_w}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda'_{fg} \nabla T) + \nabla \cdot \{ (\lambda'_{fg} + \lambda'_{gl}) \nabla \mu \} \quad (1)$$

エネルギー収支式：

$$c \rho \psi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + H_{gl} \{ \nabla \cdot (\lambda'_{fg} \nabla T) + \nabla \cdot (\lambda'_{gl} \nabla \mu) \} + H_{li} \frac{\partial \rho \psi_i}{\partial t} \quad (2)$$

結氷条件式：

$$\mu = H_i \log_e \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

ここで、

$$\rho_w \psi_w = \rho_g \psi_g + \rho_l \psi_l + \rho_i \psi_i \quad (4)$$

$$c \rho \psi = c_g \rho_g \psi_g + c_l \rho_l \psi_l + c_i \rho_i \psi_i \quad (5)$$

また、水分化学ポテンシャル・含水率関係は、0℃以上と結氷条件下で同じであるものとして扱う。

(2) 移動係数

解析に用いた水分伝導率曲線を図1に示す。本解析モデルにおいては、各水分伝導率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伝導率は、不飽和時においては

Göran<sup>6)</sup>によって測定された湿気伝導率 (1.02 × 10<sup>-12</sup> (kg/msPa)) を、飽和時 (水分移動係数の最大値) には透水係数の文献値<sup>7)</sup> (3 × 10<sup>-10</sup> (cm/s)) を用いた。

なお、本解析では表層部が緻密化されるといわれているケイ酸系表面改質材を想定し、図2に示す平衡含水率曲線を用いた。表面改質材による改質部については測定を行っていないが、空隙組織が緻密化されることを考慮して、飽水含水率が非改質部の60%程度になるように作成した。また、既往の文献による透気係数の測定結果に基づき改質部の水分伝導率を気相、液相ともに非改質部の1/2とした。非改質部の平衡含水率についてはGöran<sup>6)</sup>によって測定されたデータを用いた。

(3) 解析対象と計算条件

解析に用いたコンクリート試験体の断面を要素分割とともに図3に、物性値を表1に示す。

表1 各種物性値

W/C [%]	比重 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [J/kgK]	熱伝導率 [W/mK]
50	2300	933.5	1.62

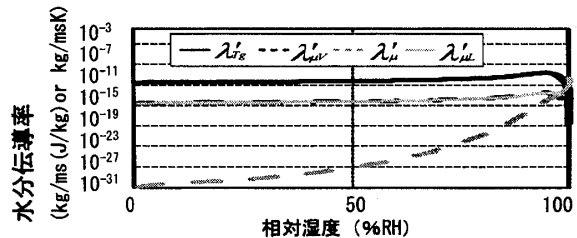


図1 水分伝導率曲線

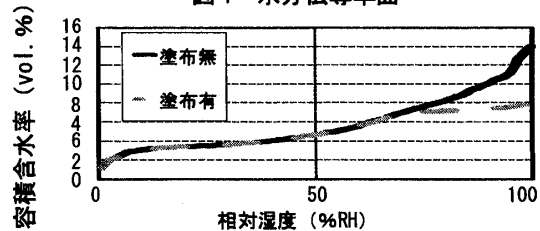


図2 平衡含水率曲線

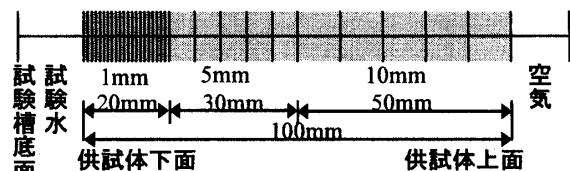


図3 解析対象

初期条件は、7日間の下面吸水直後を想定し、材料内の全領域を20°C96%RHとした。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(14vol.%)より2vol.%低い12vol.%を初期含水率とした。相対湿度はこれに平衡する96%RHを与えた。

ここでは、実験と同様に試験槽底面の温度を制御し、試験体下面との熱伝達については流水を想定した第3境界条件( $\alpha=930[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ )を与えた。湿度については、材料表面が飽和状態になると想定し、試験体下面の相対湿度を100%とした。試験水と上面空気、上面空気と試験体上面の熱伝達をそれぞれ考慮し、共に第3境界条件( $\alpha=9.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ )を与えた。

表面改質材の改質深さに関しては明らかになっていないが、ここでは既往の文献の透気試験に用いられた試験体厚10mmを塗布時の改質深さとした。

(4) 解析結果

図4、図5に表面改質材無塗布、塗布時の試験体凍結融解過程での含水率分布をそれぞれ示す。表面改質材無塗布の試験体では、サイクル数が増えても最大含水率は増加しないが、ピーク値が試験体内部へ移動していることがわかる。一方、表面改質材を塗布した試験体は、サイクルの増加とともに含水率の最大値も増加し、あるサイクルで最大値は一定になることがわかった。しかし、無塗布の試験体は表層部の含水率が最大値になっているのに対し、表面改質材を塗布した試験体は改質層と無改質層の境界域である10mm前後で大きく含水率が変化し、境界域付近が最大値となっている。このように、含水率の最大値には大きな差がないにもかかわらず、内部の含水率分布に大きな差が確認された。

解析結果から、表面改質材による剥離促進メカニズムとして、剥離表面改質材を塗布したものは改質層と無改質層の境界域で結氷量の急激な増加が見られ、それが剥離を促進させている原因であることが明らかになった。

本解析はケイ酸質系表面改質材を塗布した場合を想定したものであるが、シラン系表面改質材を塗布した場合は、改質層が撥水作用をもつために改質層内の液水量はさらに少なくなり、凍結融解の繰り返しなどにより試験体内部へ水分が浸透した後は、ケイ酸質系と同じメカニズムが働くことが考えられる。

5. まとめ

本研究の内容を以下に要約する。

- 1) 三相系熱水分同時移動方程式を用いた解析結果から、表面改質材の塗布の有無による試験体内部の最大含水量には大きな差はないことが明らかになった。
- 2) 表面改質材を塗布した場合には、改質層と無改質層の

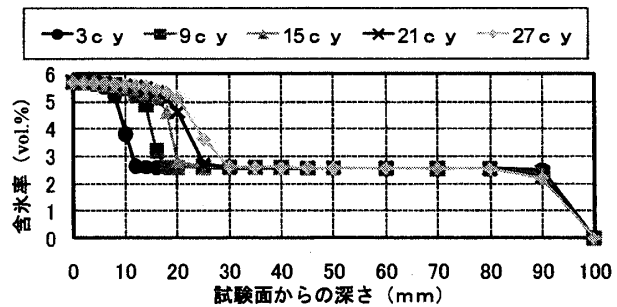


図4 凍結融解過程での含水率分布 (無塗布)

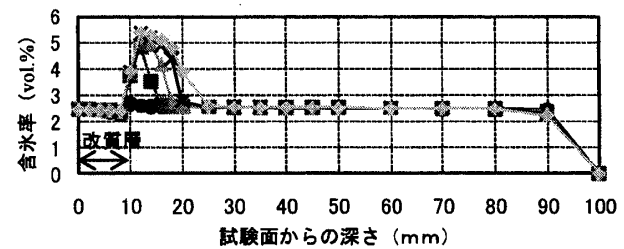


図5 凍結融解過程での含水率分布 (ケイ酸質系表面改質材塗付時)

境界域で結氷量の急激な増加が見られ、それが剥離を促進させている原因であることを明らかにした。

3) シラン系表面改質材を塗布した場合は、改質層が撥水作用をもつために改質層内の液水量はさらに少なくなり、凍結融解の繰り返しなどにより試験体内部へ水分が浸透した後は、ケイ酸質系と同じメカニズムが働くことが考えられる。

【記号】

$\rho$ : 密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c$ : 比熱( $\text{J}/\text{kgK}$ ),  $\lambda$ : 熱伝導率( $\text{W}/\text{mK}$ ),  $t$ : 時間(s),  $\mu$ : 水分化学ポテンシャル(自由水基準)( $\text{J}/\text{kg}$ ),  $\varphi$ : 含水率( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $H$ : 水分の相変化熱( $\text{J}/\text{kg}$ ),  $\lambda\mu$ : 化学ポテンシャル勾配による水分伝導率( $\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})$ ),  $\lambda T$ : 温度勾配による水分伝導率( $\text{kg}/\text{msK}$ ),  $T$ : 絶対温度(K),  $T_0$ : 自由水の結氷温度= $273.16(\text{K})$ ,  $\nabla$ : divergent(gradient), 添字  $w$ : 水分,  $s$ : 固体物質部,  $g$ : 気相,  $l$ : 液相,  $i$ : 氷

【参考文献】

- 1) 審良善和ほか: 表面改質材を用いたコンクリート構造物の劣化抑制に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.26, No.1, pp.1719-1724, 2004.
- 2) 坂ノ上宏ほか: 浸透性防水材の止水性能確認実験, 建築学会学術講演会梗概集, pp.209-210, 1998.
- 3) 鈴木好幸ほか: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす表面改質材および被覆材の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.31, pp.1153-1158, 2009.
- 4) 鈴木好幸ほか: 表面改質材によるコンクリートの透気性状と凍結融解抵抗性の変化, 建築学会学術講演会梗概集, pp.631-632, 2009.
- 5) 松本衛ら: 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462号, pp.25-34, 1996.
- 6) Göran Hedenblad: Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Paste, Ph.Thesis, Division of Building Materials Lund Institute of Technology, 1993
- 7) 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, 1996.7

\*株式会社間組

\*\*室蘭工業大学大学院 助教 博士(工学)

\*\*\*室蘭工業大学大学院 教授 博士(工学)

\*\*\*\*室蘭工業大学大学院 助教 博士(工学)

\*Hazama Co. Ltd.

\*\*Assistant Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

\*\*\*Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

\*\*\*\*Assistant Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.