

敦煌莫高窟内の壁画の劣化に及ぼす塩の影響に関する研究 —上下層窟を考慮した窟内温湿度環境の解析—

正会員 ○長谷 隆秀*¹ 同 銚井 修一*² 同 岡田 健*³
同 小椋 大輔*⁴ 同 宇野 朋子*⁵

環境工学 4—湿気 9

敦煌莫高窟 温湿度 塩類 熱水分同時移動

1. 序論

1.1 研究の背景 敦煌莫高窟は中国甘肅省北西部敦煌市の東南 18km に位置する。莫高窟は、大泉河と呼ばれる河が浸食して出来た鳴沙山の東側断崖に、南北に掘りこまれた仏教石窟群である¹⁾。また、莫高窟は上位、中位、下位の3層より成る。

本研究の対象である敦煌莫高窟第285窟は、中位の層に区分され、上位や下位の石窟と比較すると、洪水・地下水・雨水による影響が少なく、壁画の保存状態は比較的良好とされている²⁾。しかし、窟内の西・南・北壁面では、塩によるものと考えられる壁画の一部剥離がみられる。原因は、地盤から窟内壁体表面に流入する水分が壁体表面で蒸発する際に、水分に含まれていた塩が析出するためと一般的には推定されている。また、壁画表面の一部にはカビと推定される黒く変色している箇所が見られ、壁体表面における水分移動が壁画の劣化に影響を与えていると考えられる。

1.2 研究の目的 本研究では、中位の層に位置する第285窟を対象として、窟を囲む周囲地盤内での熱と水分の移動を、壁体、窟内空間での熱水分収支を考慮して解析する。その結果に基づき、地盤での水分移動、壁体表面での水分蒸発量を求め、壁体表面への塩の析出量を見積もることを目的とする。前報³⁾では、第285窟内壁体表面に析出する塩の量の概算を行った。本報告では、窟内壁体表面での水分蒸発量を左右する窟内温湿度の解析を行い、上下層窟が第285窟内温湿度に与える影響を評価する。

2. 莫高窟第285窟の概要と莫高窟周辺の気候条件

2.1 莫高窟第285窟の概要 第285窟は前室と主室から成り、主室は幅 6.3～6.6m、奥行き 6.3m の方形に近い平面構成である(図1)。窟頂は方形の天井を持ち、最頂部までの高さは 5.0m である(図2)。

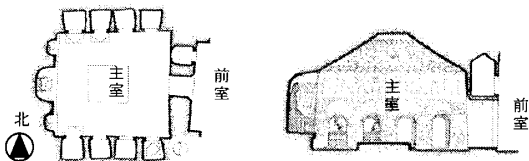


図1 第285窟平面図^{a)} 図2 第285窟東西断面図^{a)}

2.2 莫高窟周辺の気候条件

莫高窟の崖上に設置

された気象ステーションで2002年に測定された月別の気象データを以下の図3,4に示す。年平均気温は11.3℃、年平均相対湿度は33.7%である。

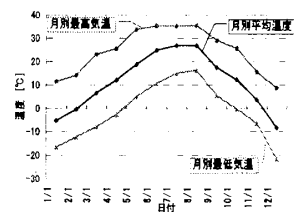


図3 月別気温

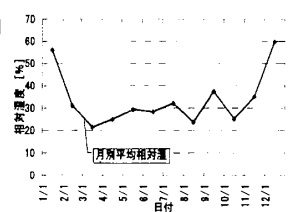


図4 月別相対湿度

3. 地盤における熱と水分の移動に関する基礎理論

解析には以下の多孔質材料中の熱水分同時移動方程式⁶⁾を用いた。水分収支式、熱収支式を以下に示す。本報告では、液相水分の移動は考えないものとする。

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda_\mu \nabla \mu + \nabla \lambda_T \nabla T \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda + r\lambda_{Tg}) \nabla T + \nabla \lambda_\mu \nabla \mu \quad (2)$$

4. 上下層窟が第285窟内温湿度に与える影響の解析

4.1 解析対象モデルと解析条件

(1)解析対象 図5に示す上中下の各位の層にそれぞれ窟を有する2次元の系としてモデル化した。中位の層の窟内空間は前室と主室の2室で構成され、各室を1質点として取扱う。また、上・下位の層窟は1室で構成され、各窟を1質点として扱う。2室間および前室と外気、上位の層の窟と外気、下位の層の窟と外気との間には換気があるとする。

(2)境界条件 外気と接する境界では第3種境界条件とし、外気と接しない地盤鉛直面は断熱・断湿とした。また、地盤底部には外気の温度、相対湿度の年平均値を与えた。ただし、下位の層の窟下部の地盤底部は断熱・断湿条件とした。また、計算に用いた外気の温度・相対湿度を、図6,7に示す。

(3)諸物性値 窟周囲地盤は砂質地盤と想定し、熱水分物性値にはJuryにより測定されたPlainfield Sandの熱伝導率⁷⁾⁸⁾を用いる。

換気回数(前室の体積を基準とする)は、外気—前室間は3回/h、前室—主室間は1回/hとする。また、上下層窟—外気間では、3回/hとする。

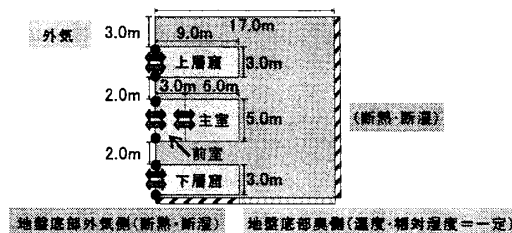


図5 上下層室を考慮したモデルと境界条件

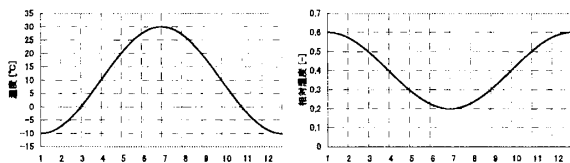


図6 気象条件(温度)

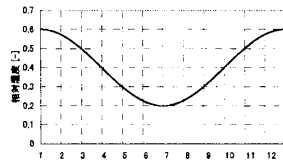


図7 気象条件(相対湿度)

4.2 解析結果と考察 4.1節の条件で20年間計算し、周期的定常解を得た。この結果と上下層に窟が無いモデルでの結果の比較を図8～13に示す。

(1)温度 上下層窟を考慮した場合、前室・主室ともに温度の年変動の振幅が大きくなった。これは、上下が地盤の場合に比べ、年変動の振幅の大きい上下層窟内空気と第285窟の間で熱の移動が生じるためである。また、前室と比較すると主室の振幅の増加率が大きい。これは、前室は上下層窟を考慮する以前から振幅の大きい外気に近かったが、主室は上下層窟を考慮することによって、地盤よりも振幅の大きい上下層窟内空気との距離が小さくなったことが原因である。

(2)水蒸気圧 温度と同様に、前室・主室ともに水蒸気圧の年変動の振幅が大きくなり、前室よりも主室の振幅の増加率が大きい。しかし、温度と比較すると振幅増加率は小さい。これは、主室内への水蒸気流の大部分が換気によるためと考えられる。

(3)相対湿度 温度・水蒸気圧と同様に、前室・主室ともに相対湿度の年変動の振幅が大きくなった。前室・主室の相対湿度環境が変動しやすくなることにより、より窟内壁表面での壁画の乾燥収縮、剥落等の劣化が生じやすくなると考えられる。

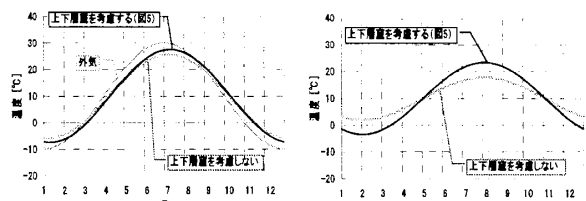


図8 前室(温度)

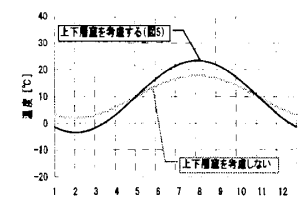


図9 主室(温度)

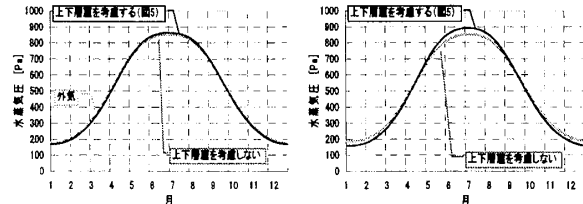


図10 前室(水蒸気圧)

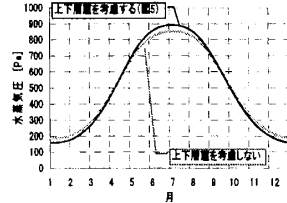


図11 主室(水蒸気圧)

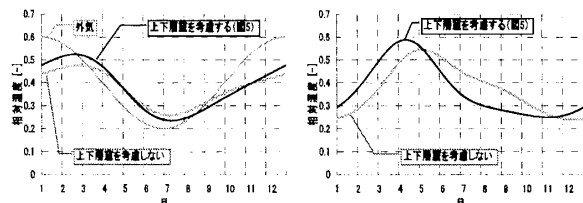


図12 前室(相対湿度)

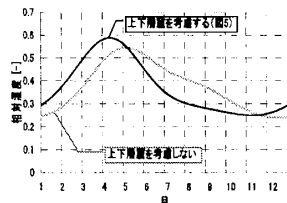


図13 主室(相対湿度)

5. 結論

本報告では、敦煌莫高窟第285窟の温湿度に及ぼす上下層窟の影響を評価することを目的として、熱水分同時移動方程式による数値解析を行った。その結果、上下層窟の存在により第285窟の温湿度変化はより大きくなること、上下層窟の温湿度環境を制御することによって、第285窟とその上下層窟の窟内温湿度環境変動を小さくする必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって、敦煌研究院保護研究所の蘇伯民所長、東京文化財研究所文化遺産国際協力センターの高林弘実客員研究員をはじめとする皆様に多大なるご協力を頂きました。また、気象データは敦煌研究院保護研究所よりご提供いただきました。厚くお礼申し上げます。

記号

ρ_w : 液水の密度 [kg/m³], Ψ : 体積基準の含水率 [m³/m³], μ : 水分化学ポテンシャル [J/kg], P : 水蒸気圧 [Pa], t : 時間 [s], F_w : 水分1kgに作用する重力 [N/kg], λ_p, λ_T : それぞれ、水蒸気圧勾配・温度勾配に関する水分伝導率 [kg/m s K]・[kg/m² s (J/kg)] (ただし、添え字 g : 気相を表す。), T : 絶対温度 [K], c : 比熱 [J/kg K], ρ : 密度 [kg/m³], λ : 熱伝導率 [W/m K], r : 水蒸気から液水への相変化熱 [J/kg]

図表出典

a) 李漢林、長廣敏雄ら: 敦煌莫高窟第1巻、平凡社、1980

参考文献

- 1) 李漢林、長廣敏雄ら: 敦煌莫高窟第1巻、平凡社、1980
- 2) 大場野詩子、大竹秀実ら: 敦煌莫高窟第285窟壁画の保存状態、保存化学、48、pp.99-107、2009
- 3) 谷本親伯、小泉圭吾: 大阪大学敦煌莫高窟学術調査の概要と基礎、53(3)、pp.8-10、2005
- 4) 宇野朋子、森井順之: 敦煌莫高窟第53窟の窟内環境-温湿度実測調査と気流解析-、保存化学、47、pp.103-109、2008
- 5) 長谷隆秀、鉾井修一: 敦煌莫高窟内の壁画の劣化に及ぼす塩の影響に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.239-240、2010
- 6) 松本衛、新建築学大系10、環境物理、第2・3章、彰国社、1984
- 7) 岩前篤: 「表層系地盤の熱水分性状に関する研究」、博士論文、1995
- 8) 小原大輔: 「地下構造物の熱・湿気性状に関する研究」、博士論文、2000
- 9) 鉾井修一、池田哲朗、新田勝通: エース環境工学Ⅱ-熱・湿気・換気-、朝倉書店、2003

¹⁾ 京都大学大学院工学研究科 修士課程

²⁾ 京都大学大学院工学研究科 教授・工博

³⁾ 東京文化財研究所保存修復科学センター 副センター長

⁴⁾ 京都大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

⁵⁾ 電力中央研究所 特別研究員・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University

Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng

Deputy Director, Center for Conservation Science and Restoration Techniques,

National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

Research fellow, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.