

温度勾配下における水蒸気凝縮による水分供給能力の検証

北海学園大学大学院 学生会員 ○川岸 淳司

北海学園大学 正会員 所 哲也

1. はじめに

寒冷地の冬季の道路において、路盤を非凍上性材料に置き換え、また、地下水が低く路盤内が不飽和であることから凍上に必要とされる水分供給が十分に得られないような、凍上要素のない状況にもかかわらず、凍上が発生する事例がある。冬季は、舗装面が冷却される一方で、深さ 1m 程度の路床では、通年において 10℃ 前後の比較的暖かい温度であることから、路盤内では温度勾配が生じることになる。さらに、路床付近が高湿度環境下であれば、水蒸気が発生し上昇することで舗装下の路盤は、水蒸気が凝縮(液化)し路盤に結露することが想定される。このことから、非凍上性路盤において、路盤周辺で凍上に必要な水分が十分に得られない環境下においても水蒸気の凝縮により水分供給が可能であると考えた。そこで、本研究では、冬季の道路路盤や路床をモデリングして、非凍上性材料の砂試料を供試体に用い、温度勾配を変化させて水蒸気を土中に取り込み、測定した温度、相対湿度やそれらに依存する水蒸気圧を用いて、凝縮水分の供給能力について考察する。

2. 試験装置

試験装置の概略図を図-1 に示す。砂供試体 ($V=769\text{cm}^3$) 土中の上下 2 箇所に温度・相対湿度センサーを設置する。凝縮水分の質量を測定する電子天秤に、供試体吊り下げ用のスタンドを載せる。水槽の質量が加算されないように、水槽を両端の台の上に載せスタンド柱の間に通し、スタンドに供試体を吊り下げて凝縮水分の質量を測定する。また、舗装面として供試体上部に蓋をする。

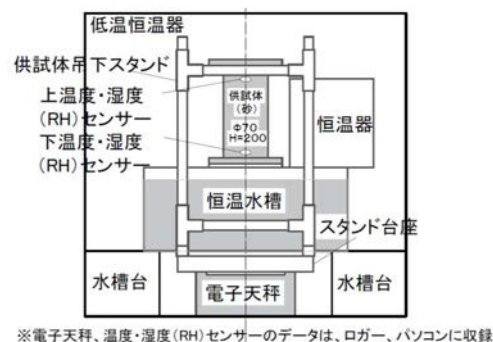


図-1 試験装置概略図

3. 試験方法

本研究では、乾燥した豊浦砂を用いた。砂の質量に関しては、乾燥密度 $\rho_d=1.45\text{g/cm}^3$ となるように供試体を作製している。試験装置を収納した低温恒温器と恒温水槽で温度調整することにより、供試体の上下に 12℃、22℃と 25℃の温度差を設けて試験をする。水槽の温水から水蒸気を供試体下部フィルターに通し土中に継続して取り込む。土中内での経過時間(60sec 間隔測定)における凝縮した水分の質量を電子天秤で測定するとともに、水蒸気の状態を土中の上下 2 箇所の温度・相対湿度センサーで測定する。

4. 試験結果および考察

経過時間における凝縮水分量と相対湿度の関係を、温度差 25℃の場合について図-2 に示す。土中下部で、すぐに相対湿度 100%RH の水蒸気の飽和に達した。その後、飽和水蒸気圧を超え凝縮して、土中の部分的な水蒸気の飽和にも影響されず、経過時間に対しほぼ直線的な勾配で水分を増加させて水蒸気の飽和が上部に達していた。これは、土中の一部が水蒸気の飽和になっても、上昇する水蒸気の圧力が勝ることで、土中への水蒸気を取り込みや凝縮水分の増加に影響されなかったと考えられる。

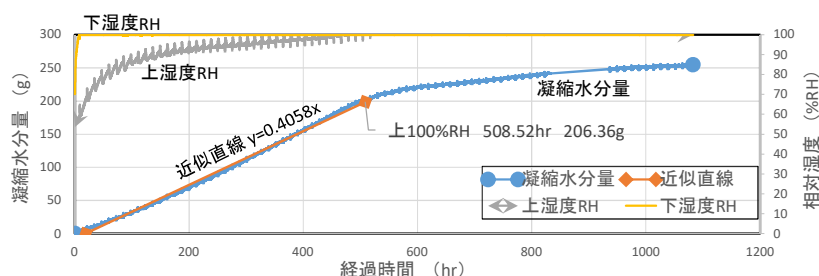


図-2 凝縮水分量と相対湿度 (9-34℃ 温度差25℃)

キーワード 道路の凍上, 水蒸気, 凝縮, 温度, 相対湿度, 水蒸気圧

連絡先 〒164-0926 北海道札幌市中央区南26条西11丁目1番1号 北海学園大学工学部 TEL011-841-1161

また、土中上部が相対湿度 100%RH に達した時点と、凝縮水分の増加量が鈍化した変化点が一致していた。このことは、土中上部が相対湿度 100%RH に達して容器内の土中全体が水蒸気の飽和になり、土中への水蒸気の取り込みが困難になったことで、増加量に変化点をもたらした。その後も土中の下端で凝縮が継続し、弱い毛管力により水分を上昇させることで、ある程度の水分増加が継続したと考えられる。

下部の相対湿度 100%RH の飽和が上部に達するまでの経過時間における凝縮水分量の近似直線を温度差 12℃、22℃と 25℃で対比した。また、その凝縮水分量を経過日数で割った日凝縮水分量で表した。それらを図-3 に示す。温度差が大きいほど、日凝縮水分量が増加し、飽和に達する時間が短縮されていた。

測定した温度を用いて Tetens¹⁾の式で飽和水蒸気圧を導き、その値に相対湿度を掛けた水蒸気圧を用い、基準とした水面上(29℃, 71.44%RH)と、温度差 12℃、22℃と 25℃の土中中間点での水蒸気圧を算出した。水面上と各温度差の土中中間点との圧力差において、試験で得た日凝縮水分量の変化を、図-4 に示す。また、フィックの拡散の法則²⁾に自然対流(空気に浮力発生)の影響を加味し導かれた実験式から、水平上向き蒸発面(半径 100cm 以上)での蒸発速度が次式で表されている³⁾。この式を用いて計算した結果を図-4 に示し、試験の日凝縮水分量と対比した。

$$W = 0.43 \times S \times (e_s - e) \times 10^{-3} \times 24 \quad (1)$$

ここで、W：蒸発速度 (g/日)、S：円形蒸発面の面積(cm²)、 e_s ：蒸発面(水面 100%RH)における水蒸気圧、 e ：空気中の水蒸気圧である。水蒸気を受ける供試体面積(φ7cm)を式の円形蒸発面と見なし、水面(34℃)と各土中下部(空気中と見なす)の温度を相対湿度 100%RH として水蒸気圧差で求め、(1)に代入して、日当たりの蒸発速度を算出した。

試験と計算のグラフは平行を示したものの試験による日凝縮水分量は計算より若干少ない値になった。これは、試験で水面を蒸発した水蒸気が周囲の空気と混合することで水蒸気量が減少したものであり、水蒸気圧から日凝縮水分量の推定には有効と考える。

4. まとめ

試験では、乾燥した豊浦砂に、温度勾配や水蒸気を与えることで、非凍上性土で土中が不飽和な環境においても水蒸気の凝縮により水分供給が可能であることが確認された。また、測定した温度、相対湿度やそれらに依存する水蒸気圧を用いることで、土中の水蒸気の状態や凝縮水分量を把握することができた。

今後においては、実際の道路路盤・路床の温度や相対湿度の測定から、凝縮水分量を推測することも可能であると考える。蒸発速度の実験式の精査や、土中内での水蒸気の透湿性及び圧力についても検証を進める。

参考文献

- 1) Tetens, O. (1930): Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys., 6, pp. 297–309.
- 2) Fick, A. (1855): Ueber Diffusion, Ann. Physik. 94, pp. 59–86
- 3) 上田政文, 湿度と蒸発-基礎から計測技術まで-, コロナ社, 2014.

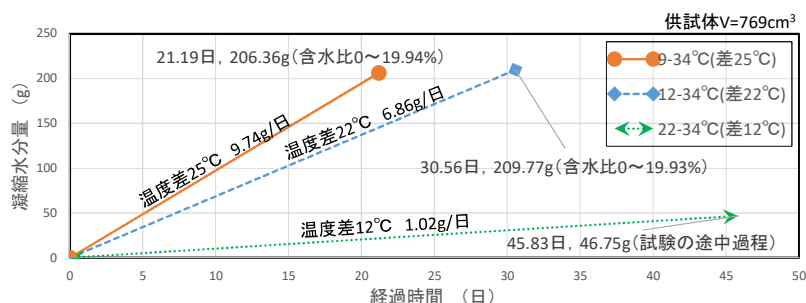


図-3 凝縮水分量の近似直線 (下部100%RH~上部100%RH間)

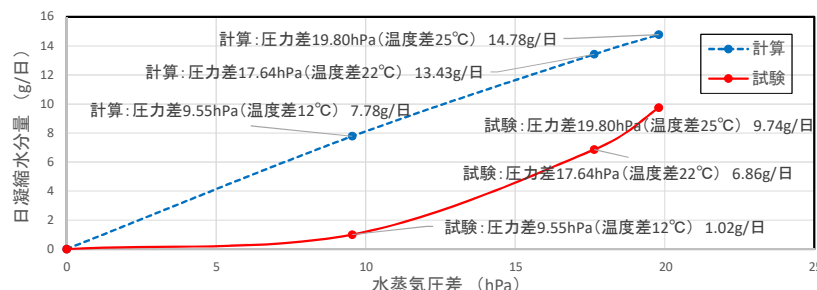


図-4 水蒸気圧と日凝縮水分量 (試験・計算)