

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.052



开放科学(资源服务)标识码OSID:



寒旱区盐渍土路基的水-热-盐分布规律

袁超¹, 张彤炜¹, 刘子健², 颜鲁春², 洪伟², 刘琪², 吴子龙³

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 甘肃恒路交通勘察设计院有限公司, 兰州 730070; 3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘要:中国西北寒旱地区广泛分布的盐渍土易随水-热条件的改变而发生盐胀和溶陷。由于蒸发边界的差异,不同结构路基的水-热-盐分布及分层变形规律尚不明晰,依托柳园至敦煌高速公路项目,对3种路面结构(混凝土护肩+半刚性基层、碎石护肩+半刚性基层、碎石护肩+柔性基层),开展体积含水率、温度、电导率等多物理场监测,每种路面结构安装30个温度传感器和9个土壤水-盐复合传感器。为明晰监测数据的物理意义,进一步开展水-热-力-盐多场耦合数值模拟。监测结果表明,碎石护肩+柔性基层结构具有隔热和阻止水盐迁移的优势,在同样的条件下,碎石护肩+柔性基层结构提升了公路的排水性、蒸发量和隔热性能。盐渍土环境中,碎石护肩+柔性基层的结构有助于减少路基水分和盐分的积聚,从而延长路基的使用寿命。

关键词:盐渍土;公路路基;水-热-盐分布;现场监测;数值模拟

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Hydro-thermal-salinity distribution in subgrade saline soils of cold and arid regions

YUAN Chao¹, ZHANG Tongwei¹, LIU Zijian², YAN Luchun², HONG Wei²,
LIU Qi², WU Zilong³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. Gansu Henglu Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730070, P. R. China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China)

Abstract: Saline soils, which are widely distributed in the cold and arid regions of northwest China, are prone to salt swelling and solution-induced subsidence under changing hydrothermal conditions. Due to variations in evaporation boundaries, the distributions of hydro-thermal-salt fields and the stratified deformation behaviors of

收稿日期:2024-10-23

基金项目:地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLGP2024K027);国家自然科学基金(42377137);中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2022-kb08);甘肃省交通运输厅科技项目(2021-11);陕西省自然科学基金(2022JQ-307)

作者简介:袁超(2000-),男,主要从事黄土有效应力研究,E-mail:yuanch2023@lzu.edu.cn。

张彤炜(通信作者),男,副教授,E-mail:ztw@lzu.edu.cn。

Received: 2024-10-23

Foundation items: State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Open Fund (No. SKLGP2024K027); National Natural Science Foundation of China (No. 42377137); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. lzujbky-2022-kb08); Science and Technology Project of Gansu Provincial Department of Transportation (No. 2021-11); Shaanxi Provincial Natural Science Youth Fund (No. 2022JQ-307)

Author brief: YUAN Chao (2000-), main research interest: effective stress of loess, E-mail: yuanch2023@lzu.edu.cn.

ZHANG Tongwei (corresponding author), associate professor, E-mail: ztw@lzu.edu.cn.

different subgrade structures remain poorly understood. This study, based on the Liuyuan - Dunhuang Expressway project, investigated three types of pavement structures: concrete shoulder with a semi-rigid base, gravel shoulder with a semi-rigid base, and gravel shoulder with a flexible base. Multi-physical field monitoring was carried out, including measurements of volumetric water content, temperature, and electrical conductivity. For each pavement structure, 30 temperature sensors and 9 soil water-salt composite sensors were installed. To better interpret the physical significance of the monitoring data, coupled hydro-thermal-mechanical-salt numerical simulations were subsequently conducted. The monitoring results indicate that the gravel shoulder combined with a flexible base provides advantages in thermal insulation and in inhibiting water and salt migration. Under identical conditions, this structure improves road drainage, enhances evaporation capacity, and strengthens thermal insulation performance. Therefore, in saline soil environments, this structural configuration effectively mitigates the accumulation of water and salt in the subgrade, thereby extending its service life.

Keywords: saline soil; highway subgrade; hydro-thermal-salt distribution; field monitoring; numerical simulation

中国西北部地处干旱-半干旱环境,大量建成与建设中的公路位于盐渍土地区,在水-热-盐的作用下易发生盐胀、冻胀、溶陷等灾害^[1-2]。在兰新铁路、敦煌机场、兰州新区机场、新疆哈密至罗布泊铁路、甘肃国道215线和青海国道315线等工程建设中,水盐迁移导致的地基变形灾害时有发生^[3-4]。

针对水盐迁移导致的土壤和路基变形问题,众多学者开展了理论和试验研究。理论研究方面, Richards^[5]在饱和达西定律的基础上建立了非饱和土中的水分运动方程。Van Genuchten^[6]、Fredlund等^[7]在土水特征曲线基础上建立了多种非饱和土导水系数的预测方法。Callaghan等^[8]关注土壤中水分入渗带来的盐分运移。Lu等^[9-10]针对非饱和土的土水相互作用进行了探究,从微观层面将土壤吸附势定义为:范德华力、电力、渗透压和水合力,并使用此概念从微观层面解释了盐分的加入对土壤的影响。在理论研究的基础上,大量学者针对土壤水-热-盐的分布规律进行了试验研究,肖泽岸等^[11-12]探究了盐分对中国西北地区土壤冻胀与水分迁移的影响,发现盐分的存在会降低土壤冻胀,但对土壤表层的破坏依旧不可忽视。Cui等^[13]发现石羊河流域土壤的水盐分布与土壤颗粒结构的相关。Zhang等^[14]通过室内试验提出了风积沙地区路基盐渍化过程的经验预测方程。然而,西北寒旱区真实路基的分层结构和蒸发边界的作用尚未引起关注,水-热-盐分布和路面变形的相关性研究不足。现场监测研究方面,Shan等^[15]对东北季节性冻土的公路路基结构进行了研究,探讨了块石路基的变形规律。冯瑞玲等^[16]探究了新疆地区的半刚性沥青公路的变形特性,发现高温及水泥中碱含量超标会加剧盐分的侵蚀。Kaushal等^[17]统计了美国东北部长期的盐分

监测数据,探究了盐渍土对道路和其他公共设施的影响。然而目前仍然缺少全面的水-热-盐多物理场监测数据。

笔者研究的路面结构为半刚性和柔性基层,半刚性基层为水泥稳定碎石,柔性基层为级配碎石。半刚性基层本身存在干缩裂缝和温缩裂缝,在高寒地区易出现破坏。已有报道指出^[18],柔性基层能有效缓解变形对路面结构的破坏,进而减少盐胀等带来的西北地区公路病害。另外,柔性基层减少了水泥的使用,且便于回收利用,能减少公路全生命周期的碳排放。笔者着眼于寒旱区盐渍土环境下的公路路基、路面结构优化问题,基于长期观测数据和数值模拟,探究结构类型对路基内部水-热-盐-力分布的影响规律。

1 研究方法

1.1 现场监测与传感器布置

研究依托“西北寒旱区公路基础设施长期性能交通运输行业野外观测研究基地”,场地位于G215线柳园至敦煌高速公路项目YK61+000(东经95°3′,北纬40°36′)。公路的路面结构分为混凝土护肩+半刚性基层(结构1,图1(a))、碎石护肩+半刚性基层(结构2,图1(b))、碎石护肩+柔性基层(结构3,图1(c))。

传感器布置如图2所示,以下路床底面中心处为原点(0, 0),沿 $x=6、0、-6$ m三个断面在地下布置温度传感器共30组,水-盐传感器共9组,3种路面结构的传感器安装位置相同。其中,结构1和结构2测量了自2021年10月至2023年2月共450 d的水-热-盐分布数据。由于传感器数据传输问题,结构3仅记录了从2022年6月至2023年2月共220 d

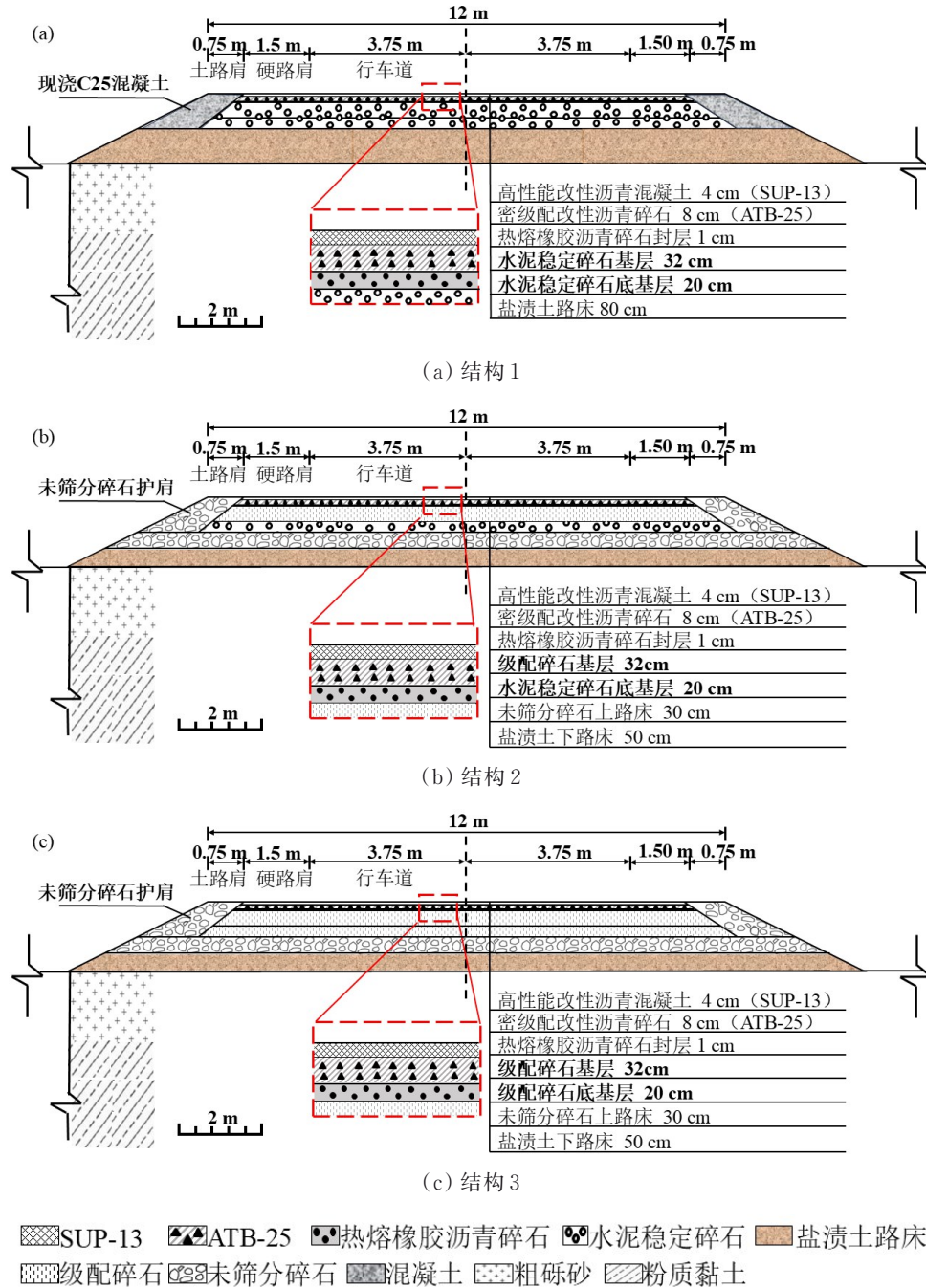


Fig.1 Profile of pavement structure

数据。结构 3 的数据涵盖了 6 月至次年 1 月期间的温度、湿度和降雨差异最大的夏季与冬季,可基于数据开展气候影响下路基内部水-热-盐运移规律分析。水-盐传感器采用 Hydra Probe II (美国 Stevens 公司),温度精度为 $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,体积含水量精度为 ± 0.003 ,电导率精度为 $\pm 0.0014\text{ S/m}$ 。

1.2 土的基本性质与地质条件

场地的特殊岩土主要为盐渍土,属于中、弱氯盐渍土,盐分以氯盐为主,深度 1~3 m。土的基本物理性质如表 1 所示,属粉质黏土。图 3 为地基土的盐分分布,路床以下是较致密的粗砾砂,下伏粉

质黏土,可塑状态,夹细砂薄层(图 1)。

1.3 数值计算原理

采用 SEEP/W 进行非饱和土的稳态和瞬态渗流分析,基于 Richard 非饱和土渗流理论,计算孔隙水压力的变化(式(1)),使用对流-弥散原理(式(2))^[19],计算盐分运移。

$$(\Delta t K + M) \cdot \vec{H}_t = \Delta t \vec{Q}_t + M \vec{H}_{t-\Delta t} \quad (1)$$

式中: Δt 为时间增量; K 为元素特征矩阵,包含了与元素相关的材料特性和体积; M 为质量矩阵,其中包含了元素的存储属性(Storage properties); $\vec{H}_t$ 为时间步 t 处的节点未知数(水总水头)的向量, $\vec{Q}_t$ 为

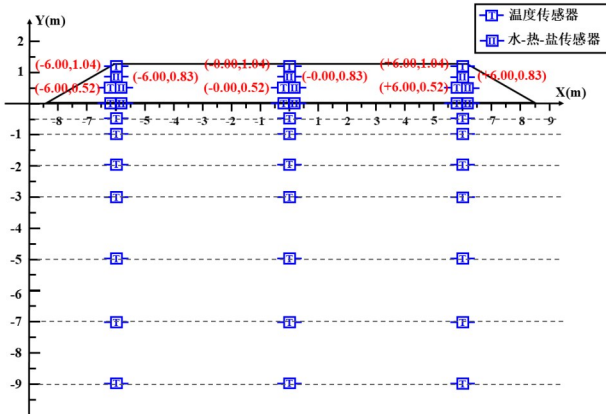


图2 传感器埋放示意图

Fig.2 Profile of sensor arrangement

时间步 t 处的节点强迫向量(流速)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{1+\beta}{2} \right) \frac{\partial^{\alpha-1} C}{\partial x^{\alpha-1}} + \left(\frac{1-\beta}{2} \right) \frac{\partial^{\alpha-1} C}{\partial (-x)^{\alpha-1}} \right) \quad (2)$$

式中: C 为盐分浓度; V 为平均地下水速度; D 为扩散系数; x 为空间坐标; α 为分数阶导数的阶数; β

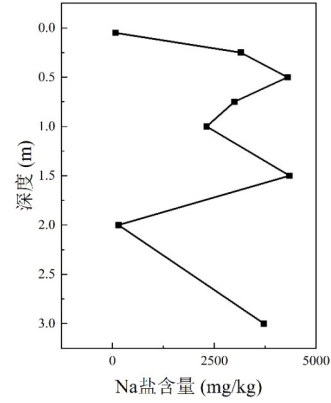


图3 研究区含盐量随深度变化图

Fig.3 In-site salinity varied with depth

($-1 \leq \beta \leq 1$) 是运移过程中的偏度(skewness)。

采用 TEMP/W 模块计算土体内部的热量变化, 基于能量守恒定律, 考虑水分在相态变化中的潜热、传导过程中的能量变化率(傅里叶定律)最终可以得到式(3)。在忽略强迫对流传热和汽化潜热后, 式(3)可以简化为式(4), 式(4)中表面容积热容量(the apparent volumetric heat capacity) C_{ap} 的计算方法如式(5)所示。

表1 粉质黏土属性

Table 1 Physical properties of silty clay

土壤类型	质量含水率/%	干密度/(g/cm ³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
粉质黏土	20.9	1.7	0.6	25.1	16.3	34.3	22.7

$$\left(c_p + \rho_w h_{sf} \frac{\partial \theta_{wvc}}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + h_{fg} \frac{\partial M_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - c_w \frac{\partial (\dot{m}_w'' T)}{\partial y} - c_v \frac{\partial (\dot{m}_v'' T)}{\partial y} - c_a \frac{\partial (\dot{m}_a'' T)}{\partial y} - h_{fg} \frac{\partial \dot{m}_v''}{\partial y} \quad (3)$$

$$C_{ap} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$C_{ap} = C_p + \rho_w h_{sf} \frac{\partial \theta_{wvc}}{\partial T} \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容; ρ_w 为水分密度; h_{sf} 和 h_{fg} 分别为熔化潜热和汽化潜热; θ_{wvc} 为未冻水的体积含水率; T 为温度; t 为时间; M_v 为控制体积中蒸汽的质量; k 为导热系数; $\dot{m}$ 为进入控制体积的水分、蒸气或空气的质量流量(Mass flux rate), 下标 w 、 v 、 a 、分别表示水、蒸气和空气, $\dot{m}''$ 为质量通量(mass flow); C_{ap} 为

表面容积热容量(the apparent volumetric heat capacity); C_p 为控制体积的容积热容量(the volumetric heat capacity)。

通过 SIGMA/W 模块进行水-热-力耦合分析。其中, 混凝土、沥青路面和水泥稳定碎石的本构关系采用线弹性模型(式(6)), 碎石和粉质黏土采用摩尔-库伦弹塑性模型, 式(7)为摩尔库伦模型的主应力表达式, 式(8)为用于剪切破坏的非相关流动法则(Non-associated flow rule)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$f_s(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi' - 2c' \cos \phi' \quad (7)$$

$$g_s(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \psi \quad (8)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; ϕ' 为有效内摩擦角; c' 为有效内黏聚力; ψ 为剪胀角; σ 与 τ 为不同方

向应力。

1.4 模拟参数设定

对路面的右侧进行模拟, 现场的地下水位为 -6 m, 表2为材料的导热系数 k 与容积热容量 C_p 。

表 3 为材料的水力特性参数(VG 模型), α 与 n 为拟合参数, θ_s 为饱和含水率, θ_r 为残余含水率。表 4 为材料的力学参数。

模拟采用的降雨、相对湿度等边界条件如图 4 所示。依据 Penman-Wilson 蒸发蒸腾方程(式 8)计算可以得到该地的蒸发量^[20]。

$$E_T=\frac{\Gamma R_n+\eta E_a}{\Gamma+\eta A}\tag{8}$$

式中: E_T 为自由水面蒸发量; Γ 为饱和蒸汽压和温度关系曲线的斜率; R_n 为土表面净辐射量; η 为湿度常数; $E_a=f(u)P_a(B-A)$; A 为土表面相对湿度的倒数; B 为空气相对湿度的倒数; $f(u)$ 为风函数; u

为风速, $f(u)=0.35(1+0.15u)$ 。

表 2 材料的热传递模拟参数

Table 2 Thermal conductivity and volumetric heat capacity of materials

材料名称	导热系数 $k/$ ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	容积热容量 $C_p/$ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
SUP-13	1.25	0.96
ATB-25	1.25	0.96
热熔橡胶沥青碎石	1.25	0.96
水泥稳定碎石	1.52	0.83
C25 混凝土	1.28×10^{-3}	0.97
级配碎石	5.79×10^{-4}	0.002
盐渍土	0.71	1.1

表 3 材料的水力特征参数

Table 3 Hydraulic properties of materials

材料名称	α	n	θ_s	θ_r	压缩系数/ kPa^{-1}	饱和渗透系数/(m/s)
SUP-13	1.00	1.21	0.15	0.06	0	1×10^{-9}
ATB-25						1×10^{-9}
热熔橡胶沥青碎石						1×10^{-9}
水泥稳定碎石						1.22×10^{-6}
C25 混凝土	7.26	1.5	0.45	0.05	1×10^{-5}	1×10^{-10}
级配碎石						9.26×10^{-4}
盐渍土						2.5×10^{-6}

表 4 材料的力学参数

Table 4 Mechanical properties of materials

材料名称	初始孔隙率	单位重量/(kN/m^3)	有效弹性模量/MPa	有效泊松比	有效黏聚力/ kPa	有效摩擦角/($^{\circ}$)
SUP-13	0.059	25.48	1 200	0.334	8.33	33
ATB-25	0.029	24.11	1 300	0.4		
热熔橡胶沥青碎石	0.045	24	1 300	0.4		
水泥稳定碎石	0.2	22	2000	0.2		
C25 混凝土	0.15	24	25 500	0.2	34.3	22.7
级配碎石	0.35	22.71	800	0.25		
盐渍土	0.37	20	10.5	0.4		

2 水-热-盐监测结果与讨论

图 5 为 $x=0\text{ m}$ 、 6.0 m 、 -6.0 m 剖面的土体温度随时间变化的情况,数据记录频率为 1 d。结果显示,3 种结构在 $1.04\sim-1.0\text{ m}$ 均表现出明显的季节性波动,最低气温出现在 1 月,最高温度出现在 7 月。底基层上表面(0, 1.04)的季节性温度变化幅度较大,路床以下(0, -1.0)的变化幅度较小。同一监测位置,结构 3 季节性温度变化最小,例如,0.52 m 深度结构 3 的季节性最大温差为 $26.20\text{ }^{\circ}\text{C}$,而结构 1 为 $31.96\text{ }^{\circ}\text{C}$,结构 2 为 $35.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以上结果说明,基层与底基层交界位置的季节性温度差异明显,采用级配碎石底基层结合未筛分碎石上路床,可减少路基内部温度的季节性波动。结构 3 内部温度场随时间和空间的变化最稳定,一方面是因为碎石护肩和

基层具有较高的孔隙率,导热系数较低,起到了隔热的作用;另一方面,碎石的热容量较低,意味着碎石护肩和基层能够更快地散热;另外,碎石护肩和基层的透气性较好,空气可以在碎石间自由流动,增强了散热效果,避免热量集中在某一位置。

图 6 为 $x=0\text{ m}$ 、 6.0 m 、 -6.0 m 剖面的路基体积分含水率随时间的变化,数据记录频率均为 1 d。结果显示,3 种结构的体积分含水率都具有明显的季节性波动,1 月份体积分含水率处于较低水平,而在 7 月份体积分含水率达到峰值,这与温度的季节性变化相一致。处于下路床底面中心位置的含水率较稳定,且不同路面结构之间差异较小。结构 2 下路床顶面(0, 0.52 m)点的含水率季节波动最为明显,夏季时含水率上升至 75%,冬季则降至 25%,说明该路面

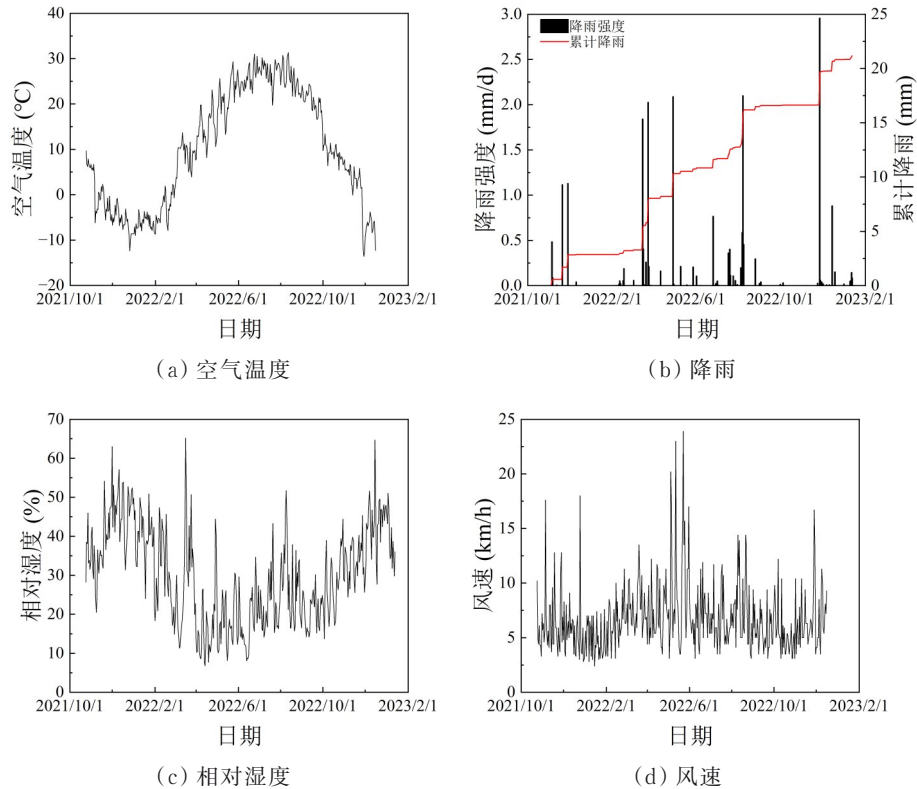


图4 外部边界条件

Fig.4 External boundary condition

结构容易在路床内产生水分滞留。如图 $x=6\text{ m}$ 与 $x=-6\text{ m}$ 的含水率曲线可以看出,结构3路肩处的含水率季节波动最明显,夏季最高含水率均超过75%,说明降雨从路肩进入路基内部,而结构3路面中心较低的含水率说明了水分的快速排出。结构1的护肩为混凝土材料,基层和底基层为水泥稳定碎石,渗透性较低,阻止了水分的进入,因此其体积含水率始终较低。结构2的水分不均匀聚集,可能是水分容易通过碎石护肩进入公路,但基层排水性差,导致夏季水分容易聚集,使盐分大量溶解,大大降低盐渍土路床的强度。结构3的透气性强,有较强的排水性能,水分会在渗透和蒸发的作用下快速消散,降低水分聚集对结构的影响。因此,半刚性基层更适合采用不透水的混凝土护肩,而渗透系数较高的柔性基层应匹配透水性强的碎石路肩,否则容易带来局部水分的聚集。

图7为2021-10-01至2023-01-01期间3种路面结构的电导率和含盐量随时间的变化。总体而言,电导率并未出现明显的季节性波动。结构2的路面中心($x=0\text{ m}$)的电导率在整个观测期间内平均电导率维持在较高水平(0.3 S/m),这表明该结构内离子浓度较高。相比之下,结构1和结构3的平均电导率保持在0.25 S/m左右,离子浓度相对较低。结构2和结构3路肩处($x=-6\text{ m}$ 、 6 m)电导率随着

深度增加从0.4 S/m降低至0.1~0.2 S/m,而结构1电导率最高值则出现在 $y=0.52\sim 0.83\text{ m}$ 位置,且同一时间对应的电导率低于结构2和结构3。上述结果说明,路肩处盐分变化可能受降雨淋滤的影响,而路基中心位置的盐分主要汇集于下路床顶面。结构1在路基中心和路肩处的盐分含量均随着深度增加而增加。结构2的下路床顶面中心点(0, 0.52 m)含盐量最高,路面中心含盐量高于路肩。结构3路肩和路基中心的盐分浓度整体随着深度的增加而减小且路面中心含盐量低于路肩处。这是由于结构1的不透气不透水结构隔断了路床以上受外界环境的影响,但未换填的路床仍出现盐分自下而上的迁移。结构3的碎石路肩与碎石基层、碎石路床连通,排水性较好,内部的含盐量相对较低。而结构2的盐分主要汇集于下路床顶面,说明水泥稳定碎石底基层不利于水分的迁移扩散,这将带来盐分的积聚,容易造成盐胀现象。

综上所述,结构2在寒旱地区环境出现水分和盐分的富集,不利于公路长期使用。结构1具有不透水不透气的边界条件,路床底面处盐分浓度最高,温度的季节性差异最大。

结构1与结构2均具有水泥稳定碎石底基层,根据以往研究,不透气的蒸发边界,导致气态水无法排出,在不透气层底面聚集,产生“锅盖效应”^[21]。

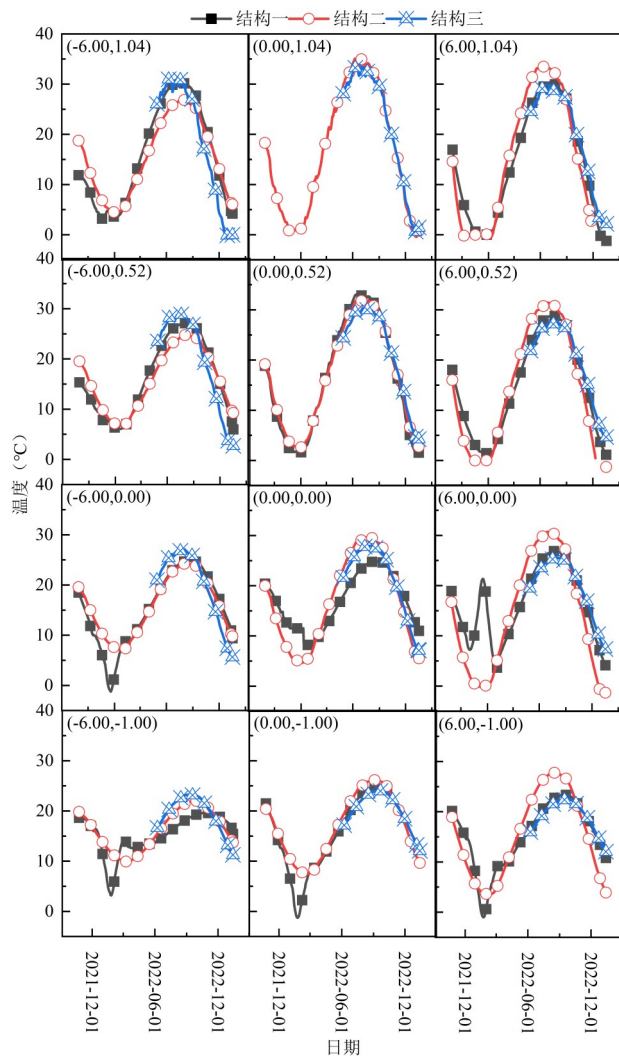


图5 路基内部温度随时间变化曲线

Fig.5 Temperature variation of subgrade with elapsed time

另外,由于较高的热传导系数,在冬季降温过程中可能出现结冰膨胀,在夏季高温影响下可能发生拱胀现象。相较而言,结构3在稳定路基内部温度的同时,连通的透水透气结构使含水率和含盐量的季节性差异较小。路基内部水-热-盐的演化机理通过数值模拟进一步分析验证。

3 水-热-盐演化模拟与讨论

3.1 温度场的变化

图8为3种结构中心位置温度变化的模拟结果。结果显示,路基范围内3种结构的温度变化均呈现出典型的季节性波动。路床以下的土体由于有路基的保温作用,温度变化更小。3幅图显示了不同结构温度模拟与实测数据具有良好一致性,说明模型在预测不同结构的温度变化时具有较高的可靠性,证明了碎石护肩和碎石基层的导热系数对路基的保温性能起到控制作用。

图9为夏季和冬季3种路面结构的温度分布等值线图。相比其他结构,结构3的内部温度分布相

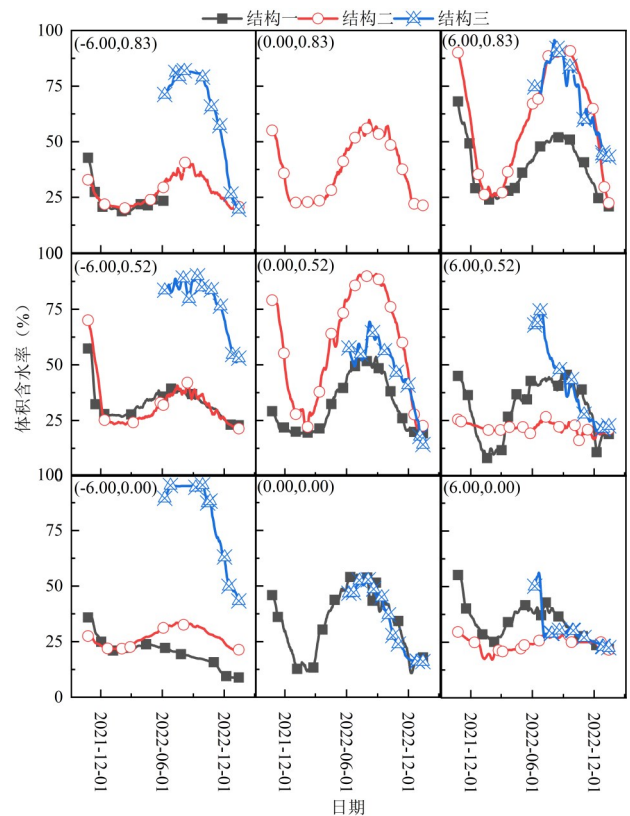


图6 路基内部体积含水率随时间变化曲线

Fig.6 Volumetric moisture content variation of subgrade with elapsed time

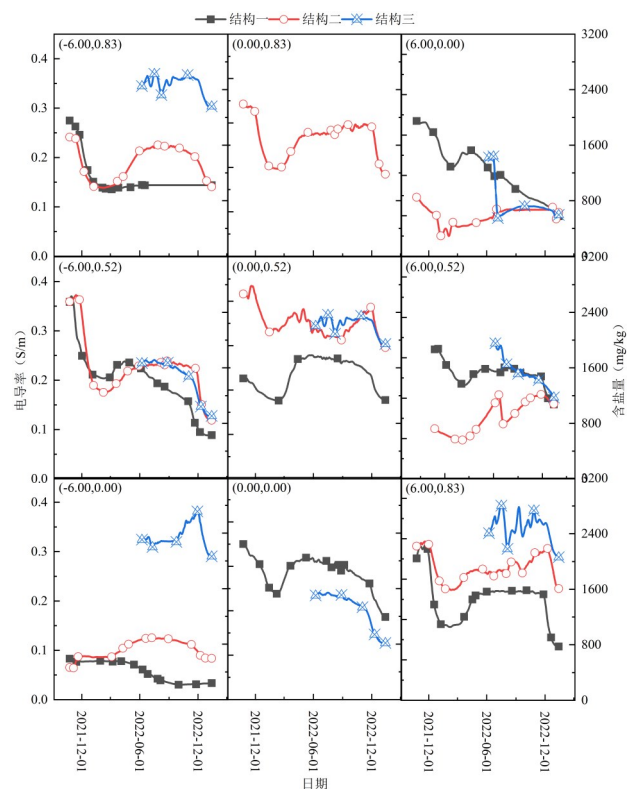


图7 路基内部电导率随时间变化曲线

Fig.7 Electrical conductivity of subgrade varied with elapsed time

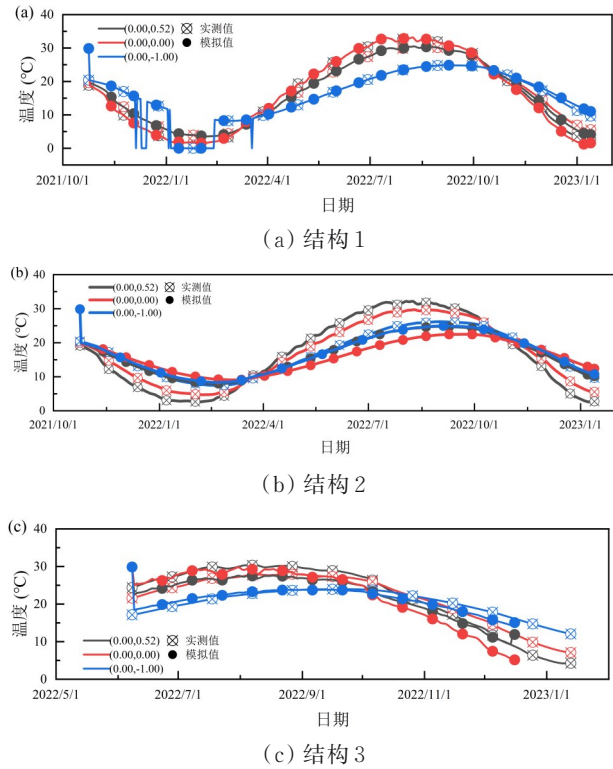


图 8 温度模拟数据与监测数据对比

Fig.8 Comparison between simulated and monitoring temperature

对均匀。表明多孔的柔性碎石基层有较好的热传导特性,能够有效地将热量散发,减少路面的拱胀、开裂等病害^[22]。

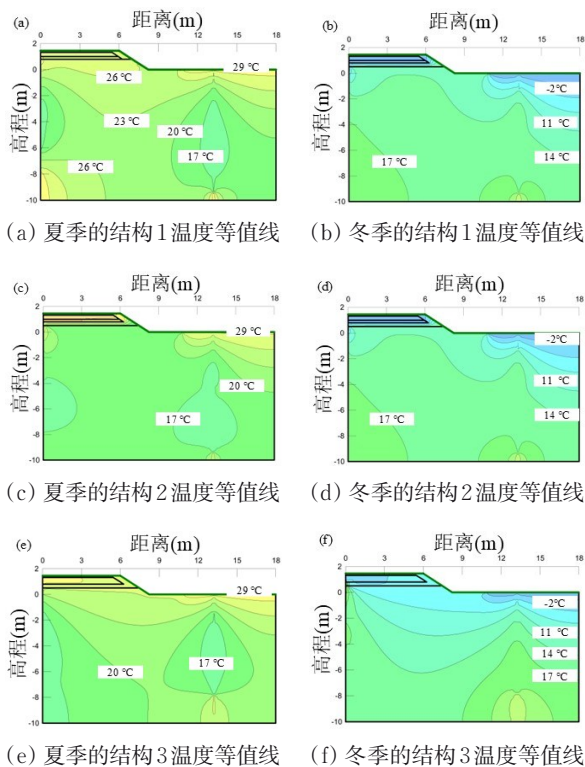


图 9 温度分布的数值模拟结果

Fig.9 Temperature distributions in three embankments

3.2 水分场的变化

根据地质勘查结果,以地下水深度 6.00 m 为下边界,并对其边界条件和初始含水率进行约束,通过数值模拟得到在 3 种结构的体积含水率分布。图 10 为体积含水率的模拟数据与实际数据对比。结果显示,结构 1(图 10(a))的模拟结果与监测数据接近,且水泥稳定碎石的不透水性,导致随着深度的变化,结构内部体积含水率并未出现明显改变。结构 2(图 10(b))体积含水率随着深度增加而逐渐增大,说明透水、透气边界带来上部含水率的降低。图 10(c)所示的结构 3 模拟结果同样显示随着深度

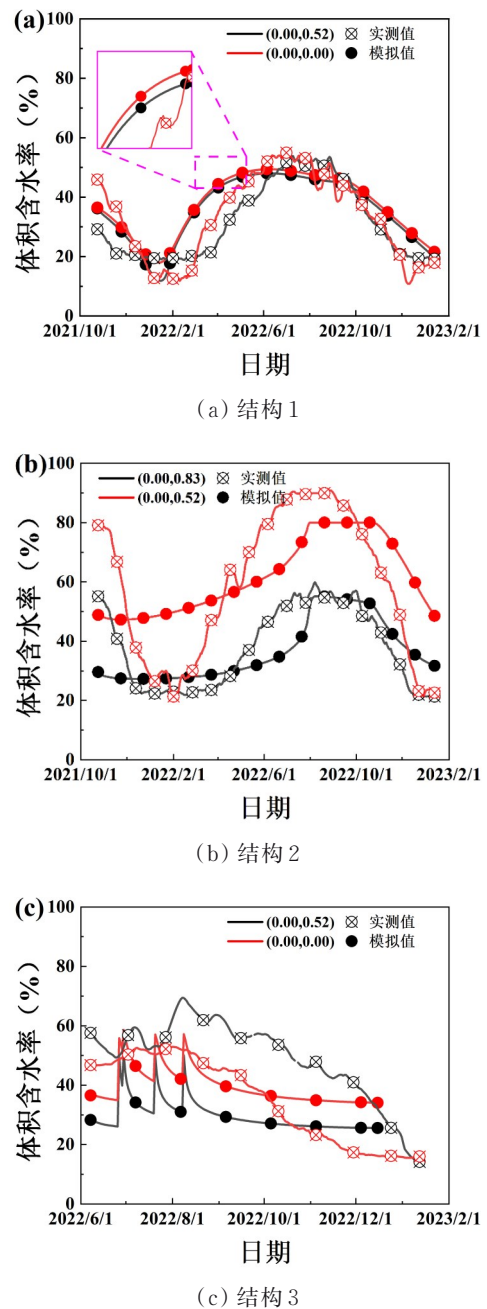


图 10 体积含水率模拟数据与实际数据对比:

Fig.10 Comparison between simulated and monitoring volumetric water contents

的增加体积含水率增加。但是,实测数据与模拟结果相悖,这是因为埋放传感器过程产生的初始水分聚集。随着时间的推移,0.52 m 与 0.00 m 深度的体积含水率趋于一致。从图 11 可以看出,结构 3 在路肩处的单位液体流量大于其他两种结构,表明结构 3 具有较好的排水性能,可排出局部积聚的水分。

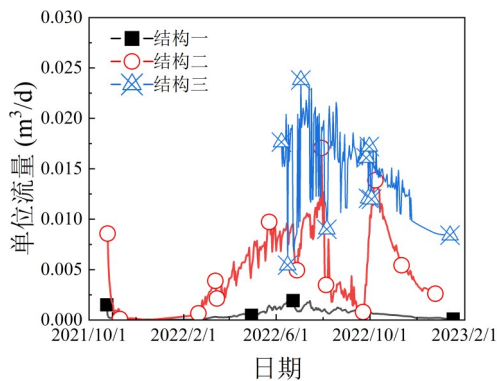


图 11 路肩处单位流量

Fig.11 Discharge volume per day from shoulder

图 12 为 3 种结构夏季和冬季的体积含水率等值线云图。结果显示,3 种结构的含水率差异主要

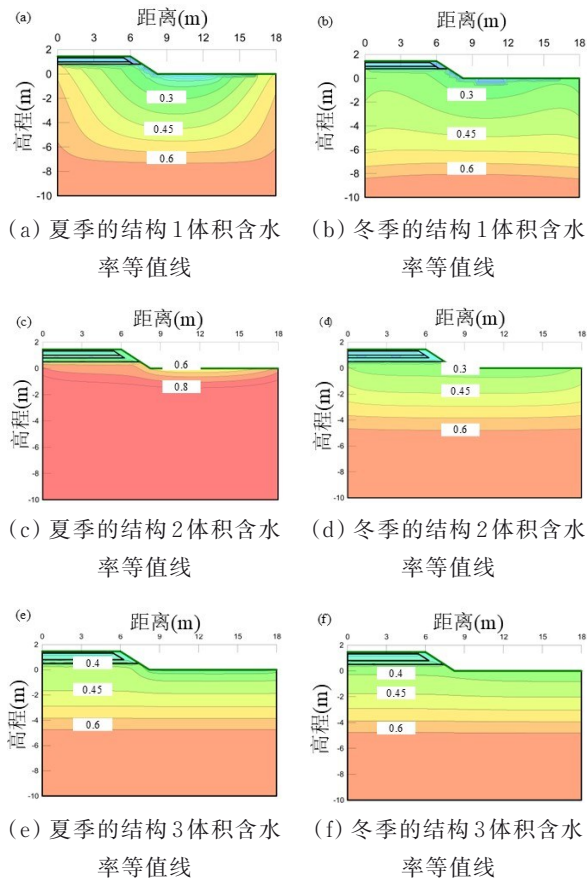


图 12 体积含水率的数值模拟结果

Fig.12 Volumetric content distribution in three embankments

表现在夏季。结构 1 的浅层含水率较低,约在 5%~30% 之间;在 -2 m 以下,含水率显著增加,表明结构 1 的不透水边界使上部水分难以排出(图 12(a))。结构 2 的水分聚集在 0 m 以下的土壤中,含水率达到 45%~55%,湿润区域的上升明显(图 12(c))。结构 3 路基范围($y > 0$ m)的体积含水率在 5%~40% 之间,水分主要集中在 -3 m 以下的区域,达到 40%~60%,该类型路基具有较好的水分扩散能力(图 12(e))。

3.3 盐分场的变化

3 种结构中心位置的盐分含量变化计算结果如图 13 所示。通过与图 10 的体积含水率模拟数据对比,发现盐分含量的变化趋势与降雨的变化趋势相

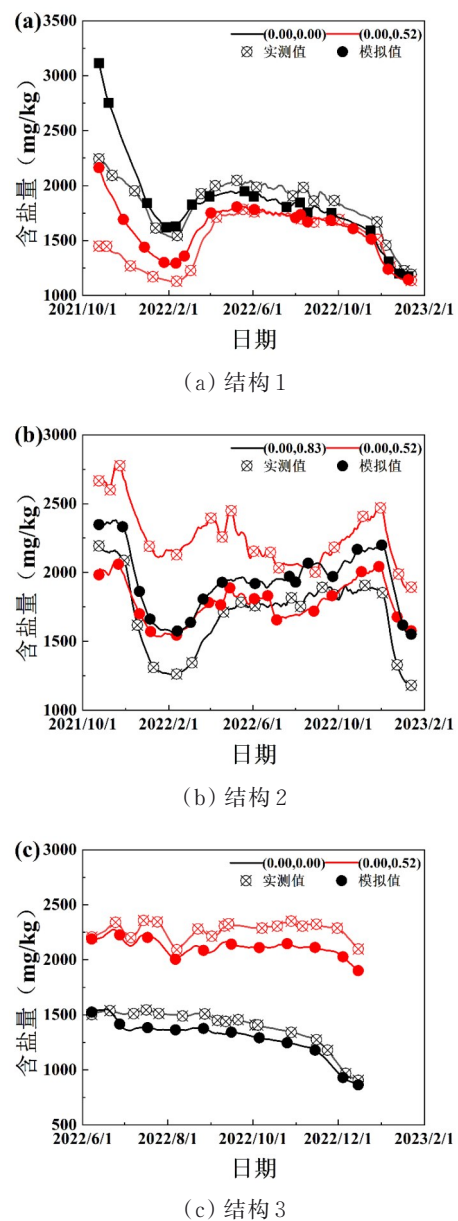


图 13 盐分含量模拟数据与实际数据对比

Fig.13 Comparison between simulated and monitoring porewater salinities

近。雨季结构含水率较高,盐分浓度也较高。这是由于随着水位上升,地下水中的盐分被带入路基结构。结构1(图13(a))隔断了上边界的水分运动,0.52 m处含盐量最低且与结构3含盐量近似,差异在12%左右。结构2(图13(b))盐分含量最高,这是由于结构缺少合理的盐分和水分排出系统,盐分与水分的聚集。图14显示了路肩处溶质质量流量曲线。结果显示,结构3的溶质通量最大。同时,结构3(图13(c))的盐分随时间缓慢降低,说明其较高的排水体积使得盐分更容易排出结构,降低盐分的聚集现象。

3.4 位移场的变化

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定轮胎接地压强为0.7 MPa。模拟过程中,在路面施加300~700 kPa的均布应力。均布应力分布在路面 $x=-6$ m与 $x=6$ m之间。不同结构在施加应力1 a后的变形模拟结果如图15所示。

结果显示,700 kPa压力下(图15(a)),路基中心处变形较大,路肩处变形较小,且路床部分位移较大。此外,由于采用碎石底基层,结构3应变最

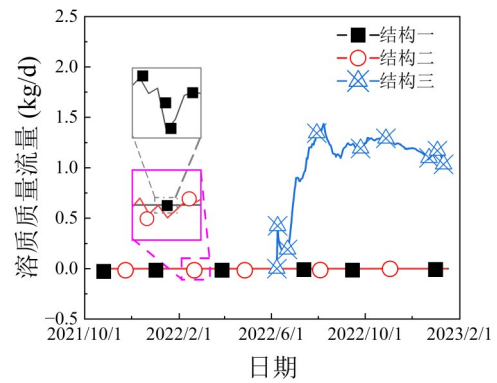


图14 路肩处排出的溶质质量

Fig.14 Discharged solute mass per day from shoulder

大,与结构1相比,在(1.00, 0.52)到(5.00, 0.52)之间的平均应变差达到了25.1%,其他深度处与结构1、结构2的应变差异为1.8%。300 kPa压力下(图15(b)),在(1.00, 0.52)到(5.00, 0.52)之间的平均应变差达到了29.8%,其他深度处的差异为2.6%。总体而言,结构3的长期加载变形与其他结构的差异小于3%。上述结果说明,随着路面压力的增加,柔性基层与半刚性基层的变形差异减小。

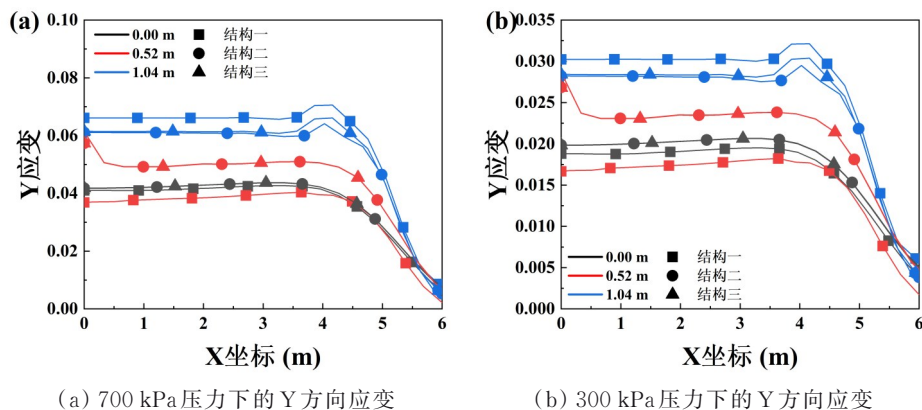


图15 路面应变数值模拟数据

Fig.15 Numerical simulated strain of pavement

4 结论

研究了中国西北寒旱地区公路路面结构对路基内部水-热-盐分布规律的影响,并结合数值模拟分析了底基层和路肩热传导系数、渗透性和力学参数的作用机制。主要结论如下:

1) 碎石护肩与柔性基层的组合结构具有隔热和阻止水盐迁移的优势,降低路基内部季节性温度波动,减少热量的集中,使路基内部的温度分布更加均匀,并有效降低水分和盐分的积聚。路基内部季节性温度差异降低了9℃,体积含水率在25%~50%之间变化,最高电导率为0.2 s/m。

2) 水泥稳定碎石底基层与碎石护肩组合的结

构在寒旱地区表现出明显的水分和盐分积聚现象,路床部位季节性温差达到35.60℃,且水分和盐分在下路床顶面发生积聚,最高电导率达到0.35 S/m,夏季最高体积含水率达到75%。

3) 水-热-盐耦合数值模拟结果与实际监测数据的具有较好的一致性,验证了数值模型在预测路基内部水分、盐分和温度分布方面的可靠性。路面变形的数值模拟结果显示,柔性基层长期变形与其他结构的差异总体小于3%。

碎石基层和碎石护肩的透气结构提升了公路的排水性、蒸发量和隔热性能,在盐渍土环境中,有助于减少水分和盐分的积聚,且柔性基层结构带来的路面变形与半刚性基层结构差异较小。

参考文献

- [1] 慈军, 张远芳, 刘亮, 等. 新疆哈密至罗布泊沿线盐渍土特征及其灾害探析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(3): 120-124.
CI J, ZHANG Y F, LIU L, et al. Characteristics and hazards of saline soil along the road (HaMi to Lop Nur) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(3): 120-124. (in Chinese)
- [2] 邴慧, 何平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1958-1962.
BING H, HE P. Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1958-1962. (in Chinese)
- [3] 张平川, 董兆祥. 敦煌民用机场地基的破坏机制与治理对策[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 78-80.
ZHANG P C, DONG Z X. Failure mechanism and treatment countermeasures of Dunhuang civil airport foundation [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(3): 78-80. (in Chinese)
- [4] 文桃. 西北黄土状硫酸盐渍土工程性质与改良治理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
WEN T. Study of engineering properties and improvement of loessial sulfate saline soil in the northwest area [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [6] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [7] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [8] CALLAGHAN M V, HEAD F A, CEY E E, et al. Salt leaching in fine-grained, macroporous soil: Negative effects of excessive matrix saturation [J]. Agricultural Water Management, 2017, 181: 73-84.
- [9] LU N, ZHANG C. Soil sorptive potential: concept, theory, and verification [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(4): 04019006.
- [10] LU N. Unsaturated soil mechanics: Fundamental challenges, breakthroughs, and opportunities [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(5): 02520001.
- [11] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 单向冻结过程中 NaCl 盐渍土水盐运移及变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1992-2001.
XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloridesoil during unidirectional freezing process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1992-2001. (in Chinese)
- [12] 肖泽岸, 赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3738-3746.
XIAO Z A, LAI Y M. Study on water and salt transfer mechanism in saline soil under freezing-thawing and dry-wet conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup 1): 3738-3746. (in Chinese)
- [13] CUI S J, ZHU P C, LIU P F, et al. Effects of soil particle structure on the distribution and transport of soil water and salt [J]. Water, 2023, 15(15): 2842.
- [14] ZHANG H, YAN X H. Study on the time effect of aeolian sand subgrade salinization in desert areas [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(16): 387.
- [15] SHAN W, MA M, GUO Y, et al. Numerical analysis of the influence of foundation replacement materials on the hydrothermal variation and deformation process of highway subgrades in permafrost regions [J]. Water, 2022, 14(17): 2642.
- [16] 冯瑞玲, 王随柱, 吴立坚, 等. 新疆硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1739-1745.
FENG R L, WANG S Z, WU L J, et al. Bulging deformation mechanism of asphalt pavement in sulfate saline soil areas of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1739-1745. (in Chinese)
- [17] KAUSHAL S S, GROFFMAN P M, LIKENS G E, et al. Increased salinization of fresh water in the northeastern United States [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(38): 13517-13520.
- [18] 王小生, 章洪庆, 薛明, 等. 盐渍土地区道路病害与防治[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(10): 1178-1182.
WANG X S, ZHANG H Q, XUE M, et al. Road disease and treatment in saline soil area [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1178-1182. (in Chinese)
- [19] HUANG Q Z, HUANG G H, ZHAN H B. A finite element solution for the fractional advection-dispersion equation [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(12): 1578-1589.
- [20] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 36-40.
CHEN J B, KONG L W, ZHAO Y L, et al.

- Evaporation effect in unsaturated soil and its influential factors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 36-40. (in Chinese)
- [21] 姚仰平, 王琳. 影响锅盖效应因素的研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8): 1373-1382.
- YAO Y P, WANG L. Influence factors for “pot-cover effect” [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(8): 1373-1382. (in Chinese)
- [22] 袁江, 程怀磊, 孙立军, 等. 基于温度应力分析的半刚性基层沥青路面拱胀病害成因[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(12): 182-196.
- YUAN J, CHENG H L, SUN L J, et al. Causes of arch expansion on semi-rigid base asphalt pavement based on temperature-stress analysis [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(12): 182-196. (in Chinese)
- (编辑 XXX)