

文章编号:1672-3961(2024)04-0141-09 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.056

吸水土工布对路基湿度控制效果的数值模拟

马川义¹,冯豪杰²,蒋红光^{2*},侯天新^{2,3},姚占勇²,杨为民²

(1.山东高速集团有限公司,山东 济南 250014; 2.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 3.同济大学交通运输工程学院,上海 201804)

摘要:针对我国典型的粉质黏土填料路基,提出采用新型吸水土工布来控制细粒土路基内部湿度,通过对比铺设吸水土工布前后路基内部体积含水率和基质吸力的空间分布,评价吸水土工布对路基湿度的控制效果。基于压力板仪等室内试验获得吸水土工布水力参数,通过 COMSOL 有限元软件建立路基水汽迁移分析模型,获得不同水位条件下(2、4、6、8 m)路基内部体积含水率和基质吸力的空间分布特征,分析路基内部水分迁移模式和吸水土工布的吸排水机理。结果表明:新型吸水土工布具有较强的亲水性、较低的持水性和较高的水平渗透性;吸水土工布对路基湿度具有较好的控制效果,土工布界面上下的含水率和基质吸力发生明显突变;相比于无土工布路基,4~8 m 处地下水位吸水土工布上方土体体积含水率显著降低 7.6%~9.6%,基质吸力增加 2~2.3 倍,路基动态回弹模量提高 23.2%~43.6%;吸水土工布凭借形成的基质吸力差和自身的水平导水能力,可快速吸排出非饱和土中的弱结合水。土工布可有效控制毛细水上升导致的路基湿化,并能提高路基的支撑能力。

关键词:道路工程;吸水土工布;数值模拟;湿度控制;细粒土;基质吸力**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A**引用格式:**马川义,冯豪杰,蒋红光,等. 吸水土工布对路基湿度控制效果的数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2024,54(4):141-149.

MA Chuanyi, FENG Haojie, JIANG Hongguang, et al. Numerical simulation study on the effect of wicking-geotextile on humidity control of subgrade[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(4):141-149.

Numerical simulation study on the effect of wicking-geotextile on humidity control of subgrade

MA Chuanyi¹, FENG Haojie², JIANG Hongguang^{2*}, HOU Tianxin^{2,3}, YAO Zhanyong², YANG Weimin²

(1. Shandong High-Speed Co. Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 3. School of Transportation engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For typical silty clay filler subgrade in China, a new type of wicking geotextile was proposed to control the humidity of fine-grained soil subgrade. And the control effect of wicking geotextile on the humidity of subgrade under different water tables was evaluated by comparing the spatial distribution of internal volume moisture content and matrix suction before and after laying wicking geotextiles. Hydraulic parameters of wicking geotextile were obtained based on pressure plate test. The finite element software COMSOL was used to establish the water vapor migration analysis model, obtaining the spatial distribution characteristics of internal volume moisture content and matrix suction of subgrade under different water level conditions (2, 4, 6, 8 m), analyzing the internal water migration pattern of the subgrade and the suction and drainage mechanism of the wicking geotextile. The results showed that the wicking geotextile had strong hydrophilicity, low water holding capacity and high-level permeability, the wicking geotextile had a good control effect on the subgrade humidity, and the water content and matric suction of the geotextile interface

收稿日期:2023-03-17**基金项目:**山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME103);山东省工业和信息化厅企业技术创新项目(202060804178);山东高速集团有限公司((2020)-sdhs-gsjt-020)**第一作者简介:**马川义(1987—),男,山东莱州人,工程师,硕士,主要研究方向为道路病害机理分析与防治技术。E-mail:machuanyi2006@163.com***通信作者简介:**蒋红光(1985—),男,山东临沂人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向为路基路面结构设计和耐久性。

E-mail:hongguang_jiang@sdu.edu.cn

had obvious changes. Compared with the non-geotextile subgrade, the water content of the soil above the geotextile was significantly reduced by 7.6%-9.6%, the matric suction was increased by 2-2.3 times, and the dynamic resilience modulus of the subgrade was increased by 24.4%-43.9%. The wicking geotextile could quickly absorb and discharge weakly bound water in unsaturated soil by virtue of the poor matric suction formed and its own horizontal water conductivity. The wicking geotextile could effectively control the wetting of the subgrade caused by the rise of Subgrade humidification, and could improve the bearing capacity of the subgrade.

Keywords: road engineering; wicking geotextile; numerical simulation; humidity control; fine-grained soil; matric suction

0 引言

我国已建成世界上规模最大的高速公路网,总里程突破 16 万 km。调查显示,我国高速公路中 60% 在使用 10~12 a、17% 在使用 6~8 a 后需进行大中修,高速公路的实际使用年限普遍偏短^[1],因此学者们对路基湿化进行研究^[2-6]。路基通常在最优体积含水率状态下对填料进行压实,获得最优性能。然而,在降水下渗、毛细水上升作用下,路基中含水率可能会达到高于最优体积含水率的平衡湿度,导致路基支撑性能退化,路面使用寿命衰退。

有效控制路基内部湿度是保障路基支撑性能的关键。现行的路基内部湿度控制方法主要是设置排水砂石垫层结构,依靠重力排出道路结构内的水。然而,路基在其寿命期的大部分时间内处于非饱和状态,土体骨架对水产生毛细吸力,例如道路建设中常用的粉质黏土,体积含水率为 12% 时土体可形成高达 100 kPa 以上的吸力,导致常规的排水方式失去作用。如美国 Dalton 高速公路翻浆现象最严重的一段 18.3 m 长的道路结构中铺设了两层新型吸水土工布,Zhang 等^[7]发现吸水土工布可有效消除道路翻浆现象。Lin 等^[8]根据 Dalton 高速公路试验段连续 5 a 的温湿度数据,分析了新型吸水土工布的长期性能,发现吸水土工布经过 5 a 仍发挥有效作用。Zornberg 等^[9]结合现场和室内试验,总结了新型吸水土工布在吸排水方面的多种益处。Lin 等^[10]通过室外模型试验,进一步发现结合植物系统(即在吸水土工末端裸露段种植物)的新型吸水土工布吸排水效果更好,回弹模量是初始设计状态的 2 倍。Guo 等^[11]在土柱试验中发现,吸水土工布在粒料基层中的有效排水范围(深度)达 180~250 mm,可将粒料体积含水率降至最优体积含水率以下 0.6%。Lin 等^[12]通过数值模拟,增设吸水土工布道路使道路基层结构体积含水率降低了 2.2%。贺克飞^[13]研

发出一种新的排水装置——毛细管束排水装置,探究了毛细管束的水力特征,用于解决挡墙墙背排水问题。熊一帆^[14]通过室内试验,探讨了松木杆结合土工布对软土的排水效应。张佩浩^[15]提出了一种高吸力土工布,并进行了降雨入渗条件下的路基内部排水试验研究,结果表明高吸力土工布比传统排水材料的排水效果更好,试验中粉质黏土体积含水率由 44% 降到 29.6%。

考虑到我国的路基填料较多采用细粒土,本文针对典型的粉质黏土填料,探究了一种新型吸水土工布在细粒土路基中的湿度控制效果,基于理论与试验研究,量化吸水土工布水力特性指标,揭示吸水土工布的吸排水机理,建立考虑吸水土工布的路基水分迁移模型,获得铺设吸水土工布前后路基湿度的空间分布,对比吸水土工布改善前后的路基支撑状态。

1 材料基本性能

1.1 土体基本特性

土样取自济南—青岛高速公路 K9+800 路段,是山东省典型粉质黏土路基填料,塑性指数为 11.21,土样属于低液限黏土,最优体积含水率和最大干密度分别为 12% 和 1.915 g/cm³。

土水特征曲线可有效表征土体持水能力。基于压力板仪试验,设定基质吸力为 0~1 000 kPa,得到路床区压实土体(压实度 96%)体积含水率与基质吸力的相关关系。基于 Van Genuchten 模型,得到体积含水率

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\varphi)^n]^m}, \quad (1)$$

式中: θ_r 为残余体积含水率, $\theta_r = 17.2\%$; θ_s 为饱和体积含水率, $\theta_s = 33.4\%$; φ 为基质吸力, a 、 m 、 n 为拟合参数, $a = 0.012$, $m = 0.546$, $n = 2.202$,且 $m = 1 - 1/n$,建立粉质黏土土水特征拟合曲线如图 1 所示。

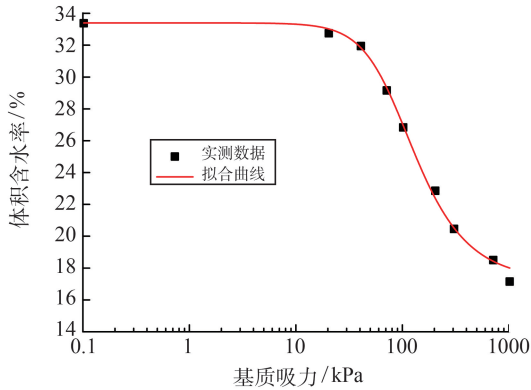


图1 粉质黏土土水特征曲线

Fig.1 Soil and water characteristic curve of silty clay

1.2 吸水土工布的性能指标

新型吸水土工布由纬向聚酯类材料和径向绿色吸排水纱线交叉编织而成。杨若辰等^[16]研究发现,芯吸纤维为水分排出提供了毛细通道,并通过毛细通道改变了土体中的基质势,土体内外吸力差为水分的排出提供了动力。对新型吸水土工布经向吸排水纱线进行液氮冷冻处理,通过扫描电镜,发现其由一束束截面近似圆形的纤维构成,见图2。织物纱线内纤维间孔隙当量直径^[17-18]

$$d_{eyf} = d_f [\varepsilon_{yf} / (1 - \varepsilon_{yf})], \quad (2)$$

式中: d_f 为纤维直径, $d_f = 28.775 \mu\text{m}$; ε_{yf} 为纤维间孔隙孔隙率, $\varepsilon_{yf} = 0.236$ 。

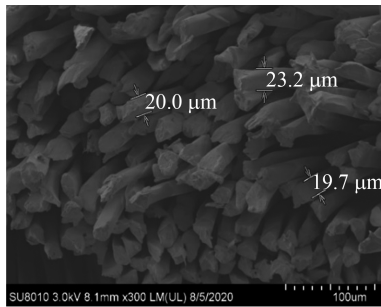


图2 吸排水纱线微观结构图

Fig.2 Microstructure diagram of drainage yarn

得到纱线内纤维间孔隙当量直径为 $8.88 \mu\text{m}$ 。通过接触角试验,得到吸排水纱线纤维的接触角为 62.04° ,属于亲水性材料,表明吸水土工布具有很强的吸水能力。

根据文献^[19],获得了吸水土工布的垂直渗透系数为 0.13 mm/s ,水平渗透系数为 2.2 cm/s ,可见吸水土工布的水平渗透能力远超过垂直渗透能力,以水平向排水为主。基于压力板仪试验,得到不同基质吸力水平下的吸水土工布的体积含水率,如图3所示。基于 Van Genuchten 模型,得到体积含水率为吸水土工布的持水特征方程:

$$\theta = 0.194 + \frac{0.246}{[1 + (0.17h)^{4.013}]^{0.751}} \quad (3)$$

式中 h 为基质吸力, kPa。

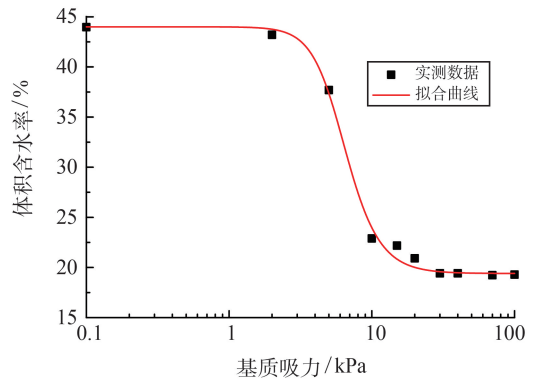


图3 吸水土工布土水特征曲线

Fig.3 Soil and water characteristic curve of wicking geotextile

与粉质黏土土水特征曲线相比,吸水土工布的进气值更低、持水能力更差,两者的进气值分别是 20 kPa 和 3 kPa 。吸水土工布基质吸力的线性段为 $3 \sim 15 \text{ kPa}$,当基质吸力达到 15 kPa 时,体积含水率迅速降低到 22.9% ,此时对应的粉质黏土体积含水率是 32.8% ,体积含水率的差异性可保证吸水土工布持续地将土体中的水分排出。

2 非饱和土路基渗流模拟方法

2.1 非饱和土路基渗流分析模型

选取典型的双向四车道高速公路结构,路基宽度 28 m ,高度 4 m ,边坡坡度 $1:1.5$ 。土工布铺设一层,位于路床底面。道路结构对称,取右侧部分建模,建立 COMSOL 数值分析模型如图4所示。土工布采用自由四边形网格划分,其余部分采用映射网格划分,单元总数 $1\,246\,752$ 个。选取4个特征断面进行分析(x 为距路基中线的距离),即 $x_1 = 0 \text{ m}$ (路基中线), $x_2 = 6 \text{ m}$ (内侧行车道外边缘), $x_3 = 9.75 \text{ m}$ (外侧行车道外边缘), $x_4 = 13.25 \text{ m}$ (硬路肩外边缘)。

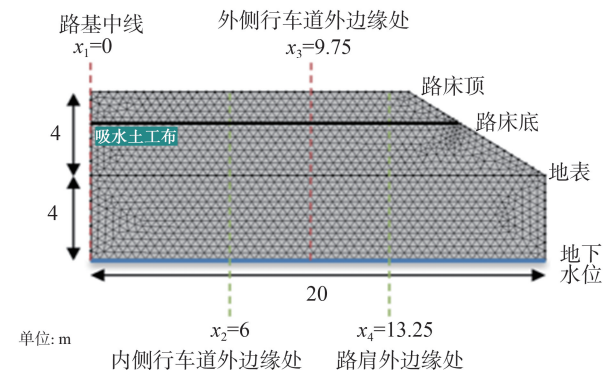


图4 路基渗流场数值分析模型

Fig.4 Numerical analysis model of subgrade seepage field
路基初始质量含水率 12% ,换算至体积含水率

为22%,由式(1)得初始吸力为220 kPa。Van Genuchten模型能够表征整个压力水头范围内水分特征数据和通过孔径分布模型估计水力传导率等优势,因此本研究基于非饱和和三轴试验采用Van Genuchten模型拟合得到了土体和吸水土工布相关参数。土体参数包括:饱和体积含水率 $\theta_s = 33.4\%$,残余体积含水率 $\theta_r = 17.2\%$,Van Genuchten模型拟合参数 $\alpha = 0.012$, $m = 0.546$, $n = 2.202$,渗透系数 $560 \mu\text{m/s}$ 。吸水土工布参数包括:饱和体积含水率 $\theta_s = 44\%$,残余体积含水率 $\theta_r = 19.4\%$,Van Genuchten模型参数 $\alpha = 0.170$, $m = 0.751$, $n = 4.013$,垂直渗透系数 0.13 mm/s ,水平渗透系数 2.2 cm/s 。

边界条件及初始条件:模型左侧边界设置为对称边界,右侧边界吸水土工布暴露段设置为蒸发边界,底部地下水水位边界设置为饱和边界,其余边界均认为不与外界发生水分交换,设置为无流动边界条件。黄泛区地下水位较高,通常距离地表 $2\sim 10 \text{ m}$,计算中选取4种典型工况:即地下水位位于路基底面以下 $2, 4, 6, 8 \text{ m}$,全面分析不同地下水位高度吸水土工布作用下细粒土路基的水分迁移规律。

2.2 基本方程

质量守恒定律:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right)\rho_l = \frac{\partial \rho\theta}{\partial t}, \quad (4)$$

式中: q_x 为 x 方向的水分通量, q_y 为 y 方向的水分通量, q_z 为 z 方向的水分通量, ρ_l 为液态水密度, θ 为体积含水率。

广义达西定律:

$$\begin{cases} q_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ q_y = -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ q_z = -k_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: k_x 为 x 方向的渗透系数, k_y 为 y 方向的渗透系数, k_z 为 z 方向的渗透系数, H 为总水头。

将式(5)带入式(4)中得到Richard方程

$$\rho_l \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial (\rho\theta)}{\partial t}. \quad (6)$$

储水率 S 定义为孔隙水头上升(下降)一个单位时,土体从单位体积的多孔介质中储存(释放)的体积水量,即

$$S = \rho g [(1-n)\lambda + n\beta], \quad (7)$$

式中, λ 为土骨架可压缩系数, β 为流体可压缩系数, n 为孔隙率。

将式(7)代入式(6),Richard方程扩展为变量

为孔隙水压 p 的饱和-非饱和渗流方程:

$$\rho_l \left(\frac{C}{\rho g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla p \left[\frac{K_s k_r}{\rho g} (\nabla p + \rho g \nabla H) \right] = 0, \quad (8)$$

式中: ∇ 为梯度算子; C 为比容水度; K_s 为饱和渗透系数; k_r 为残余渗透系数; S_e 为饱和度,当 $S_e = 1$ 时, $C = 0$,此时方程变为饱和渗流微分方程。

根据式(4)~(5),可得到土中液态水渗流的Richard方程(6)。将(7)带入(6)中得饱和-非饱和渗流方程,该方程可用于研究土中液态水受重力势、压力势以及基质势共同影响下的水分迁移规律。

2.3 模型验证

为验证非饱和土路基渗流分析模型,本研究设计了粉质黏土-吸水土工布模型箱室内试验,模型箱长、宽、高为 $30, 30, 30 \text{ cm}$ 。其中,正面距土体表面 10 cm 处设置长方形吸水土工布预留缝,背面距土体表面 $3, 8, 12$ 和 17 cm 处设置传感器预留圆孔,分别对应温度传感器MS1、MS2、MS3和MS4,吸水土工布和湿度传感器具体位置如图5所示。采用最优体积含水率进行分层压实,填料压实度为96%。待整个模型箱制作完成后加水至试样饱和,密封模型箱,将吸水土工布水平展开,并同步记录模型箱内各湿度传感器数值。

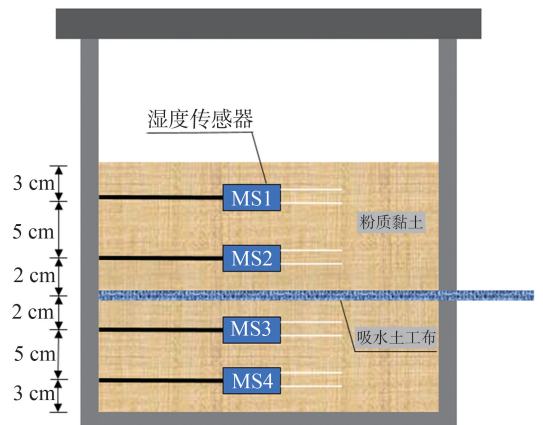


图5 水分迁移模型箱

Fig.5 Moisture migration model box

整个室内模型试验耗时51 d,土体上部加水后距土体表面 $3, 8 \text{ cm}$ 处很快达到饱和状态,体积含水率分别升高 12.52% 、 12.2% ;而距土体表面 $12, 17 \text{ cm}$ 处土体达到饱和稍有滞后,饱和时体积含水率分别升高 11.6% 和 8.8% 。这是由于吸水土工布拦截了部分上方渗水,降低了水分的入渗速率。距土体表面 $3, 12 \text{ cm}$ 处体积含水率明显降低,而距土体表面 $8, 12 \text{ cm}$ 处体积含水率基本不变或略有波动,如图6所示。试验结束时距土体表面 $3, 8, 12$ 和 17 cm 处体积含水率较饱和状态分别降低了 3.62% 、 2.54% 、 1.64% 和 2.80% ,距土体表面 $3, 17 \text{ cm}$ 处体积含水率降幅明显大于吸水土工布附近位置,这表明吸

水土工布在将附近土体的水分源源不断地排到外界环境同时,附近土体又会受到上部重力水下渗和下部毛细水上升的影响。

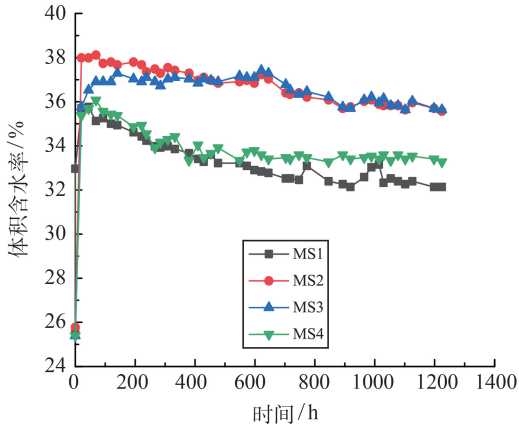


图6 体积含水率随时间变化曲线

Fig.6 Curve of volumetric moisture content over time

在 COMSOL 中建立同等尺寸的土柱二维模型,模型参数与 2.1 节中相同,采用自由三角形网格对模型划分并进行稳态求解,求解结果如图 7 所示。

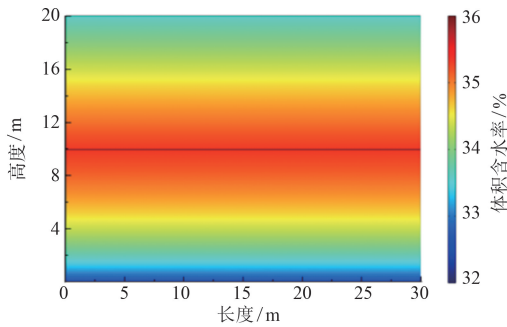


图7 模型体积含水率分布云图

Fig.7 Distribution cloud map of model volumetric moisture content

当土体内部湿度场达到平衡时,随高度增加呈现出土柱的体积含水率先增大后减小,距土体表面 3、8、12 和 17 cm 处体积含水率分别为 33.43%、35.13%、35.01%和 33.12%。数值模拟结果与室内试验实测值对比如图 8 所示。

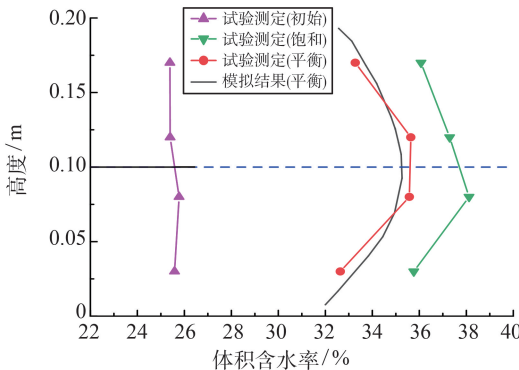


图8 模型箱模拟结果与试验值对比

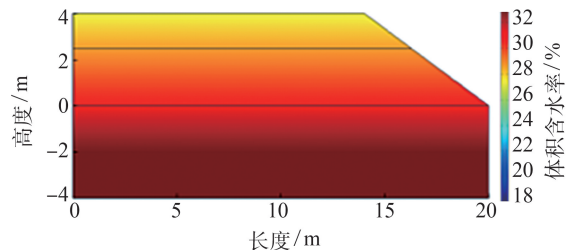
Fig.8 Comparison of model box simulation results and experimental values

模拟结果与试验测定的土柱体积含水率变化规律基本一致,在吸水土工布附近体积含水率达到峰值。但室内试验测得吸水土工布附近体积含水率较模拟值偏大,这是由于模型试验中吸水土工布伸出段未充分展开所导致的。从整体来看通过 COMSOL 模拟非饱和土路基渗流分析模型是可行的。

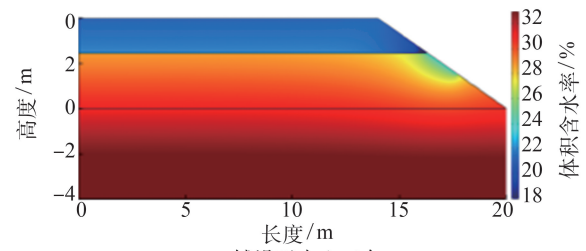
3 结果分析

3.1 路堤体积含水率沿横断面分布

地下水位距离路堤底部 4 m 为例,基于 COMSOL 稳态分析获得了吸水土工布铺设前后路堤内部体积含水率的分布云图,如图 9 所示。由图 9 可知:同一深度的体积含水率沿路堤横断面方向分布不同,远离道路中线位置体积含水率更低,距离地下水位越远,体积含水率越低;铺设吸水土工布之前,路床顶面及路床底面的体积含水率达到 26.9% ~ 29.5%,均远高于最优体积含水率 22%,铺设吸水土工布后,土工布上下方存在明显的体积含水率突变,并且吸水土工布上方的体积含水率降低为 17.9% ~ 21.9%,表明吸水土工布发挥了显著的隔水作用。



(a) 无吸水土工布



(b) 铺设吸水土工布

图9 路基体积含水率分布云图

Fig.9 Distribution cloud map of subgrade volumetric moisture content

铺设土工布前后路堤内部体积含水率分布如图 10 所示。相比于无土工布路基,铺设吸水土工布后的路堤体积含水率明显降低,路堤中线处路床顶面体积含水率由 28.9% 衰减为 21.4%,降幅 7.5%;内侧行车道外边缘处由 28.8% 衰减为 21.2%,降幅 7.6%;外侧行车道外边缘处由 28.6% 衰减为 20.7%,降幅 7.9%;硬路肩外边缘处由 26.9% 衰减为 17.9%,降幅 9.0%。而且,铺

设吸水土工布后的路床区体积含水率沿深度分布更为均匀。

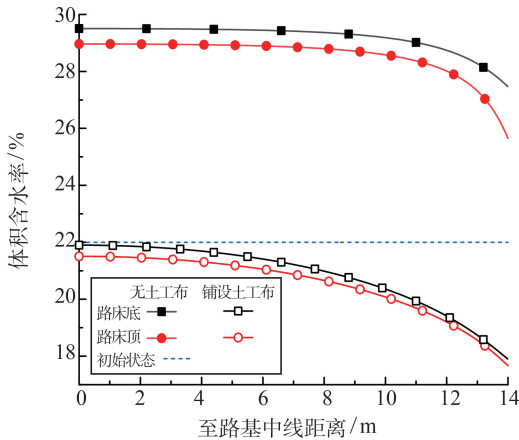
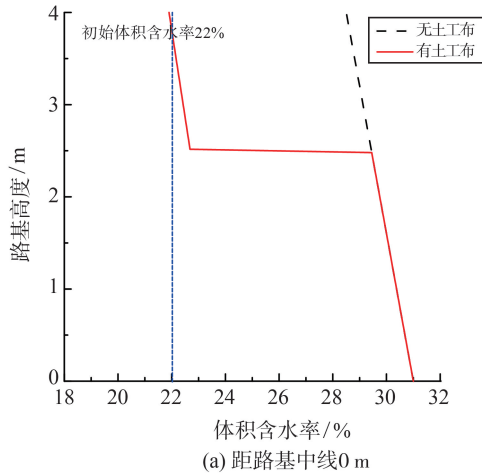


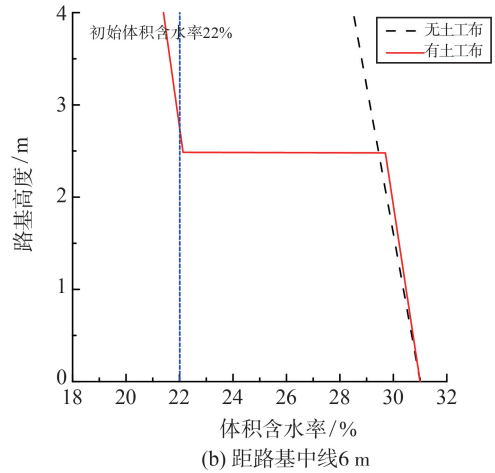
图10 路床顶面及底面体积含水率横向分布
Fig.10 Horizontal distribution of volumetric moisture contents at roadbed

3.2 路堤体积含水率沿深度分布

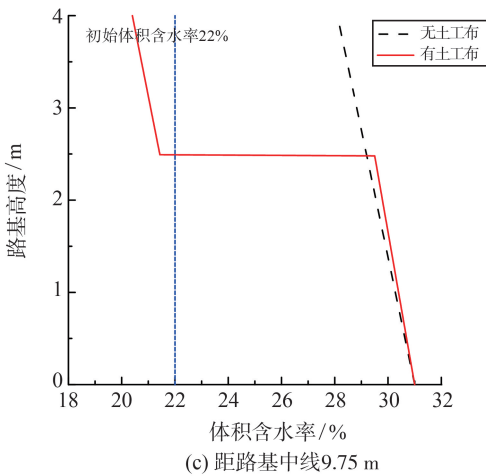
选取4个典型截面,以地下水位4 m为例,绘制路堤体积含水率沿深度的分布如图11所示。未铺设土工布情况下,路堤中线处的体积含水率随着距地下水位深度的增加而减少,由31.0%减少至26.4%,这与路堤内部基质吸力距离地下水位的线性增长密切相关,路堤内部基质吸力由39.7 kPa增加至79.2 kPa,如图12所示。同时,同一深度处路堤横断面方向的体积含水率,随着距离路堤中线的增加而降低,路床顶面由路堤中线处的28.9%减少至路肩处的26.9%,这是由于基质吸力由路堤中线处的71.9 kPa增加至路肩处的94.6 kPa。但是总体而言,未铺设土工布情况下,整个路堤深度内的体积含水率均已超过初始最优体积含水率22%。



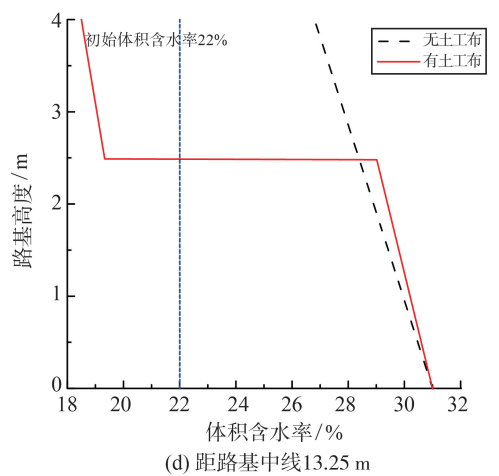
(a) 距路基中线0 m



(b) 距路基中线6 m



(c) 距路基中线9.75 m



(d) 距路基中线13.25 m

图11 路基不同截面体积含水率沿纵向分布

Fig.11 Longitudinal distribution of volumetric moisture contents at different transverse sections

路床底部铺设吸水土工布后,路堤深度方向的体积含水率出现显著突变。吸水土工布上方路床区的体积含水率明显降低,4个截面体积含水率降幅分别为7.6%、8.0%、8.8%和9.6%。这主要是由于吸水土工布的存在,使得路床范围内的基质吸力

明显提高,基质吸力由71.9~94.6 kPa增加至134.3~203.9 kPa,并且4个特征截面位置处基质吸力最大增幅分别可达62.3、69.1、82.5和107.4 kPa,如图12所示。这说明吸水土工布具有极强地阻断下层毛细水向上入侵的能力。而且,距离路堤中线

6~13.25 m 内路床区的体积含水率已低于初始体积含水率 22%,这是由于土工布上方沿路堤横向形成一定的吸力梯度,路堤内部水分可以通过吸水土工

布的芯吸纤维通道迁移至路基表面,最终蒸发到周围大气中,表明吸水土工布具有主动吸排水的能力,可有效地吸排出非饱和土中的弱结合水。

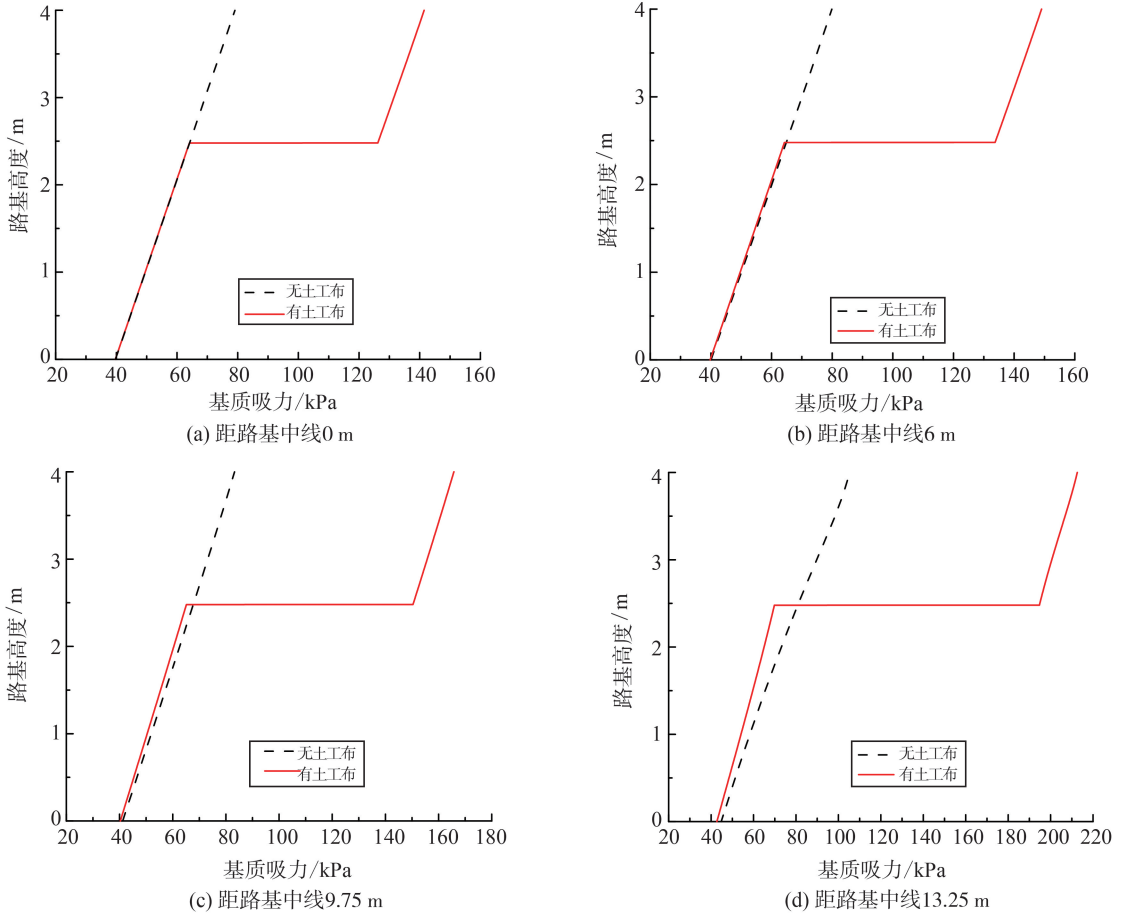


图 12 路基不同截面基质吸力沿纵向分布
Fig.12 Longitudinal distribution of soil suction at different transverse sections

3.3 不同地下水位下的路床区含水率对比

值得注意的是,吸水土工布的高吸力会加速水分向吸水土工布附近进行迁移,由于吸水土工布的吸排水过程并不是瞬时完成的,使得水分在土工布

位置处形成暂时的积聚。由图 13 可知,土工布下方路堤填土体积含水率比无土工布情况最大增加了 0.6%。地下水位 2~8 m 条件下,无土工布的路床区平均湿度如图 13(a) 所示。

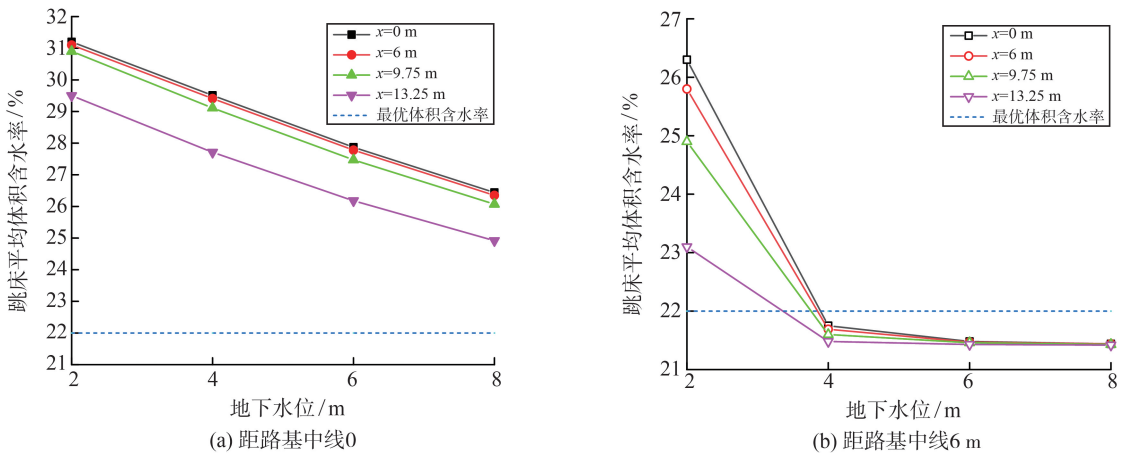


图 13 不同地下水位下的路床湿度
Fig.13 Roadbed humidity at different water tables

随着地下水位降低,路床区平均体积含水率近似线性减小,且始终大于最优体积含水率。例如内侧行车道外边缘在地下水位 2、4、6、8 m 时的体积含水率分别为 30.9%、29.1%、27.5% 和 26.1%,并且提高湿度会导致路床支撑模量降低。有土工布条件下路床区平均湿度如图 13(b) 所示。尽管地下水位 2 m 时的路床平均体积含水率仍高于最优体积含水率,但当地下水位由 2 m 降至 4 m 时,路堤体积含水率迅速下降。地下水位由 4 m 降至 6~8 m 时,体积含水率几乎保持不变。例如外侧行车道外边缘在地下水位 2、4、6、8 m 时,路堤体积含水率分别为 24.9%、21.6%、21.5%、21.4%,表明吸水土工布的排水效果与地下水位的深度有关,高地下水位条件下有可能需要增设多层吸水土工布。

3.4 动态回弹模量分析

路基动态回弹模量是路面结构设计的重要参数。路基动态回弹模量经验方程为:

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} k_3, \quad (9)$$

式中: M_R 为动态回弹模量, p_a 为大气压强, θ 为体应力, τ_{oct} 为八面体剪应力; k_1 、 k_2 、 k_3 为模型参数, 即

$$\begin{cases} k_1 = -0.096\omega + 0.3929\rho_d + 0.0142I_p + 0.0109P_{0.075} + 1.01 \\ k_2 = -0.0005\omega - 0.0069I_p - 0.0026P_{0.075} + 0.6984 \\ k_3 = -0.2180\omega - 3.0253\rho_d - 0.0323I_p + 7.1474 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: ω 为质量含水率; ρ_d 为土体干密度, $\rho_d = 1.84 \text{ g/cm}^3$; I_p 为塑性指数, $I_p = 11.21$; $P_{0.075}$ 为细粒含量, $P_{0.075} = 97\%$ 。

按式(10)计算得最优质量含水率 12% 时的动态回弹模量为 133 MPa。由式(9)可计算得到不同地下水位下的路基动态回弹模量如图 14 所示。

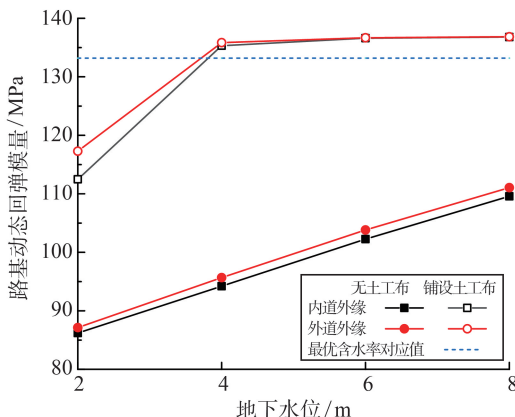


图 14 有无土工布条件下各地下水位对应路基动态回弹模量

Fig.14 Dynamic resilient modulus of subgrade corresponding to each ground water level with or without geotextile conditions

地下水位为 2 m 时,铺设土工布前后内侧行车

道的路基动态回弹模量分别为 112.5 MPa 和 86.2 MPa,回弹模量提高 30.5%;当地下水位降低至 4~8 m 时,铺设土工布前后的路基动态回弹模量分别为 135.3~136.8 MPa 和 94~110 MPa,回弹模量提高 24.4%~43.9%。这表明吸水土工布通过控制路床区的湿度,可有效提高路基的动态回弹模量,提升道路在服役期间的使用寿命。

4 结论

(1) 吸水土工布的纤维间孔隙当量直径为 $8.88 \mu\text{m}$,接触角为 62.04° ,进气为 3 kPa,垂直和水平渗透系数分别为 0.13 mm/s 和 2.2 cm/s ,表明新型吸水土工布具有较强的亲水性、较低的持水性和较高的水平渗透性。

(2) 吸水土工布对路基湿度具有较好的控制效果。铺设吸水土工布后其上下方存在明显的体积含水率突变,4 m 地下水位时土工布上方的体积含水率显著降低 7.6%~9.6%,基质吸力增加 2~2.3 倍,吸水土工布发挥了显著的隔水作用。

(3) 吸水土工布通过控制路基内部湿度,可有效提高路基的动态回弹模量。当地下水位在 4 m 及以下时,路基动态回弹模量由土工布铺设前的 94.2~111 MPa 提高到铺设后的 135.3~136.8 MPa,提高了 23.2%~43.6%。

(4) 高地下水位较大程度影响了吸水土工布的除湿效果,2 m 地下水位下土工布铺设后内侧行车道路床底体积含水率仅衰减 6%,仍高于最优体积含水率,这表明地下水位较高时其毛细水补给充分,高地下水位条件下需要增设多层吸水土工布来提高降低路基湿度的能力。

参考文献:

- [1] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
ZHENG Jianlong, LÜ Songtao, LIU Chaochao. The technical system and key scientific issues and technological frontiers of long-life pavement[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30):3219-3227.
- [2] 刘维正,万家乐,徐阳,等.反复湿化和动载作用下路基红黏土累积变形特性研究[J].中国公路学报,2022,35(8):129-139.
LIU Weizheng, WAN Jiale, XU Yang, et al. Study on cumulative deformation characteristics of subgrade red clay under repeated humidification and dynamic loading

- [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8):129-139.
- [3] 韦慧,曾胜,赵健,等.路用红砂岩碎石土湿化变形特性试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(6): 2261-2266.
WEI Hui, ZENG Sheng, ZHAO Jian, et al. Test on wet deformation characteristics of road red sandstone gravel soil [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(6):2261-2266.
- [4] 黄俊文,吴跃东,刘坚,等.湿润地区毛细阻滞层路基防渗作用的数值分析[J]. *公路工程*, 2017, 42(1):31-34.
HUANG Junwen, WU Yuedong, LIU Jian, et al. Numerical analysis of anti-seepage effect of subgrade in capillary block layer in humid area [J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(1):31-34.
- [5] 姚占勇,蒋红光,孙梦林,等.细粒土路基平衡密度状态分析[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9):94-103.
YAO Zhanyong, JIANG Hongguang, SUN Menglin, et al. Analysis of equilibrium density state of fine-grained soil subgrade [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9):94-103.
- [6] 陈靖宇,蔡袁强,曹志刚,等.非饱和公路路基填料长期动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10):2406-2414.
CHEN Jingyu, CAI Yuanqiang, CAO Zhigang, et al. Experimental study on long-term dynamic characteristics of unsaturated highway subgrade filler [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2406-2414.
- [7] ZHANG Xiong, PRESLER Wendy, LI Lin, et al. Use of wicking fabric to help prevent frost boils in alaskan pavements[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(4): 728-740.
- [8] LIN Chuang, PRESLER Wendy, ZHANG Xiong, et al. Long-Term Performance of Wicking Fabric in Alaskan Pavements [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 31(2): 1-12.
- [9] ZORNBERG J G, MARCELO Azevedo, MARK Sikkema, et al. Geosynthetics with Enhanced Lateral Drainage Capabilities in Roadway Systems [J]. *Transportation Geotechnics*, 2017, 12(1): 87-99.
- [10] CHUANG Lin, XIONG Zhang. A bio-wicking system to dehydrate road embankment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196(2): 904-914.
- [11] JUN Guo, JIE Han, XIONG Zhang, et al. Evaluation of moisture reduction in aggregate base by wicking geotextile using soil column tests [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(3): 307-313.
- [12] LIN Chuang, ZHANG Xiong, HAN Jie. Comprehensive material characterizations of pavement structure installed with wicking fabrics [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(2): 1-12.
- [13] 贺克飞. 毛细管及其管束的水力特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
HE Kefei. Study on hydraulic characteristics of capillary tube and its bundle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [14] 熊一帆. 柔性排水松木杆加固软土地基室内柱状模型试验[D]. 上海: 东华理工大学, 2017.
XIONG Yifan. Indoor columnar model test of flexible drainage pine rod reinforcement soft soil foundation [D]. Shanghai: East China University of Technology, 2017.
- [15] 张佩浩. 高吸力土工布在路基中的排水试验及仿真模拟研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
ZHANG Peihao. Drainage test and simulation study of high suction geotextile in subgrade [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019.
- [16] 杨若辰,张吾渝,孙晓辉,等. 芯吸纤维作用下盐渍土水盐降低效果研究[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(2): 58-67.
YANG Ruochen, ZHANG Wuyu, SUN Xiaohui, et al. Study on the effect of salt reduction in saline soil under the action of wicking fiber [J]. *Journal of Highway and Transportation Science and Technology*, 2022, 39(2): 58-67.
- [17] 姚穆,施楣梧,蒋素婵. 织物湿传导理论与实际的研究第一报: 织物的湿传导过程与结构的研究[J]. *西北纺织工学院学报*, 2001, 15(2): 1-8.
YAO Mu, SHI Meiwu, JIANG Suchan. Research on the theory and practice of fabric wet conduction first journal: research on the wet conduction process and structure of fabrics [J]. *Journal of Northwest Institute of Textile Technology*, 2001, 15(2): 1-8.
- [18] 姚穆,施楣梧. 织物湿传导理论与实际的研究 第二报: 织物湿传导理论方程的研究[J]. *西北纺织工学院学报*, 2001, 15(2): 9-14.
YAO Mu, SHI Meiwu. Research on the theory and practice of fabric wet conduction second journal: research on the theoretical equation of fabric wet conduction [J]. *Journal of Northwest Institute of Textile Technology*, 2001, 15(2): 9-14.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.