文章编号:1674-2974(2025)07-0152-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025075

基质势芯吸驱动下的粉质黏土路基水分迁移控制效果研究

蒋红光[1],冯豪杰[1],马川义[2],张圣涛[2],张宁[2],刘侠[3],姚占勇[1†]
(1. 山东大学 齐鲁交通学院,山东 济南 250002;
2. 山东高速集团有限公司,山东 济南 250014;
3. 济宁市鸿翔公路勘察设计研究院有限公司, 山东 济宁 272000)

摘 要:道路结构的长期服役性能与路基湿化状态密切相关.本文针对降雨入渗下的细粒土路基水分迁移控制效果,选取我国黄河中下游流域典型粉质黏土路基填料,基于压力板仪试验获得了粉质黏土和芯吸土工布的水力学特性,构建了芯吸土工布加筋粉质黏土物理模型,开展了不同降雨强度下粉质黏土填料的水分迁移试验研究,探究了有无芯吸土工布作用下的粉质黏土路基含水率和基质吸力的演化规律.结果表明:芯吸土工布具有较高的水平渗透系数(2.2 cm/s)、较低的持水性和进气值(2.8 kPa),可在较低的基质吸力作用下实现水分的横向导排;降雨入渗下的土体内部水分迁移受重力势和基质势的共同作用,芯吸土工布的存在可使土层的基质吸力提高5.1~34 kPa,土工布上方土体受重力势和基质势共同驱动,水分由上向下迁移,但土工布下方的土体,基质势需要克服重力势作用,驱动水分从下向上迁移;芯吸土工布加筋土体的含水率由对照组的13.8%(小雨)~17.2%(大雨)降低至12.6%(小雨)~14.0%(大雨),可有效控制土体含水率在$\omega_{opt}+2\%$以内,这对于保障路基路面的长期服役寿命具有重要的实践价值.

关键词:粉质黏土路基;降雨入渗;湿度控制;芯吸土工布;基质势
中图分类号:U416.1 **文献标志码**:A

Research on the Control Effect of Water Migration in Silty Clay Subgrade Driven by the Matric Suction of Wicking Geotextile

JIANG Hongguang[1], FENG Haojie[1], MA Chuanyi[2], ZHANG Shengtao[2], ZHANG Ning[2], LIU Xia[3], YAO Zhanyong[1†]
(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China;
2. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;
3. Jining Hongxiang Highway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Jining 272000, China)

Abstract: The long-term service performance of road structures is closely related to the subgrade

* **收稿日期**:2024-05-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378353), National Natural Science Foundation of China (52378353);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME103), Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME103);山东高速集团有限公司咨询课题(2020-sdhs-gsjt-020), Project of Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd. (2020-sdhs-gsjt-020);山东省工业和信息化厅企业技术创新项目(202060804178), Shandong Province Department of Industry and Information Technology(202060804178)
作者简介:蒋红光(1985—),男,山东临沂人,山东大学教授,工学博士.
† 通信联系人,E-mail: zhanyong-y@sdu.edu.cn

humidification state. To study the moisture-controlling effect of fine-grained soil subgrade under rainfall infiltration, the typical silty clay subgrade fills in the middle and lower reaches of the Yellow River basin in China were selected in this paper. The hydrodynamic properties of silty clay and wicking geotextile were obtained based on the test of the pressure plate instrument, and the physical model of wicking geotextile-reinforced silty clay was constructed to investigate the migration of the water in the silty clay fill under different rainfall intensities. The development of soil moisture content and matric suction was obtained with or without the wicking geotextile. Results indicate that the wicking geotextile has a higher lateral permeability coefficient (2.2 cm/s), lower water-holding capacity, and air entry value (2.8 kPa), which can realize the lateral drainage of water under low matric suction. The migration of water inside the soil under rainfall infiltration is subjected to the combined effect of gravity potential and matric potential, and the existence of the wicking geotextile can increase the matric suction of the soil layer by 5.1~34 kPa. The soil above the geotextile is driven by gravity potential and matric potential together, and the moisture migrates from up to down. However, for the soil below the geotextile, the matric potential needs to overcome the effect of gravity potential, and drive the moisture to migrate from down to up. The moisture content of the wicking geotextile-reinforced soil is reduced from 13.8% (light rain)~17.2% (heavy rain) in the control group to 12.6% (light rain) ~ 14.0% (heavy rain), which can be effectively controlled within ω_{opt}+2%, which is of great practical value for guaranteeing the long-term service life of the roadbed pavement.

Key words: silty clay; rainfall infiltration; moisture control; wicking geotextile; matric suction

---

我国现行技术下的道路设计寿命和实际服役寿命均明显低于国外发达国家,通常 5~10 年就开始出现道路结构性损坏,60% 高速公路在使用 10~12 年需要进行大中修[1-2].路面结构的服役寿命与下部路基支撑条件密切相关,大量现场调研表明约有 75% 的路面破损与路基湿化后的承载力降低和局部沉降等有关[3].在自然环境和地下水影响下,路基服役期间的湿度状态会逐渐趋于与周围环境相适应,称之为路基平衡湿度[4-5].美国自 1988 年开展战略公路研究计划,构建了 1 140 个长期路面性能(Long-Term Pavement Performance,LTPP)观测路段,发现路基平衡湿度较初始的最优含水率增加 0~7%.我国也发现了类似的规律,大部分地区的路基服役期含水率比施工最优含水率增加 2%~10%[6].针对路基湿化问题,国内外学者开展了路基湿度控制方法的相关研究.靳青[7]研究了碎石垫层对路基内部水分的隔断效果,结果表明传统碎石垫层可对毛细水上升起到抑制作用.李嘉蕙等[8]基于室内试验对土工合成排水管-塑料盲沟开展了研究,结果表明传统土工排水材料主要利用路基土中的水头差进行重力排水.张栋等[9]针对毛细排水管的排水效果进行了室内模拟试验,结果表明排水效果受排水管设计限制,且长期作用下排水通道易淤堵.上述研究表明传统排水措施仅适合在高饱和土壤中依靠重力势进行排水,然而服役期路基大多数处于非饱和状态[10],易使得传统排水方式失效.此外,毛细隔断层也会导致水分在毛细屏障附近大量积聚,进一步软化附近土体.

为了将已入渗至路基内部的水分主动导排至路侧,部分学者基于芯吸土工布开展了路基水分侧向导排的研究.Lin 等[11]通过数值模拟量化分析了芯吸土工布对粗粒土的湿度控制效果,芯吸土工布可使粗粒土含水率降低 2.2%,弹性模量提高 2 ~ 3 倍.Guo 等[12]基于土柱试验,提出了芯吸土工布在基层粒料中的有效排水范围为 180~250 mm.Han 等[13]指出芯吸土工布对于水分迁移机制主要分为重力排水和吸力排水.Guo 等[14]通过室内试验研究了不同温湿度工况下芯吸土工布的排水效果,并基于等效水面蒸发长度量化了芯吸土工布的排水速率.为了克服特殊土因含水率增加导致的性能急剧退化问题,Zhang 等[15]和 Lin 等[16]根据 Dalton 高速公路试验段湿度监测数据,发现芯吸土工布可有效阻止基层下部毛细水迁移,进而有效避免道路冻胀变形等病害.Biswas 等[17]通过现场试验,得出了芯吸土工布可有效排出膨胀土路基中水分,提升道路服役性能.Bai 等[18]在吉双高速进行了芯吸土工布缓解季冻区路基冻害的

现场试验,结果表明试验段路基土含水率一年内降低约5%且毛细导水通道纤维排水通道未见明显堵塞.杨若辰等[19]通过改变涤纶纤维截面结构,进一步提升了涤纶纤维的水分移除效率,同时不易被盐分堵塞.郭一鹏等[20]研究了毛细水上升和降雨入渗作用下芯吸土工布的排水效果,发现在膨胀土中铺设芯吸土工布可延缓水分迁移速率并抑制膨胀变形.可见,当前研究大多集中在粗粒土和特殊土路基中的土工布芯吸导排作用,对于芯吸土工布在细粒土路基中的排水效果研究相对较少.

考虑到细粒土路基性能对于含水率的增幅十分敏感,本文结合山东省黄河中下游流域粉质黏土路基填料,开展了不同降雨强度入渗下的细粒土路基芯吸土工布水分迁移控制效果对比研究,分析了土层内部含水率和基质吸力的时空演化规律,为粉质黏土路基湿度的长期芯吸控制提供数据和理论支撑.

1 试验材料

1.1 路基填料

选取济南-青岛高速公路K9+800路段典型路基填料,按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)[21],获得试验用土的粒径分布如图1所示.该类土小于0.075 mm的细颗粒含量占97%;土体液限w_L和塑限w_P分别为31.2%和19.9%,塑性指数I_P=11.3,属于低液限粉质黏土;根据重型击实试验,得到土体的最大干密度ρ_{dmax}=1.91 g/cm^3,最优含水率w_{opt}=12.0%.

路基在填筑压实过程中的含水率一般严格控制在w_{opt}±2%.但是,运营期路基湿度受大气降水和蒸发、地下水升降的影响,会逐渐达到平衡湿度状态.姚占勇等[22]基于山东省粉质黏土路基的现场实测发现,运营25年的低液限黏土路基含水率达到16%~18.9%,高于最优含水率12%.路基土体的湿度状态除了与所处的区域环境有关外,也与其自身的持水特性密切相关.本文基于室内压力板试验(如图2所示),开展了路基填料含水率与基质吸力的关系研究,吸力路径如图3(a)所示.选取Van Genuchten(VG)模型[23]进行土水特征曲线拟合,如式(1)所示:

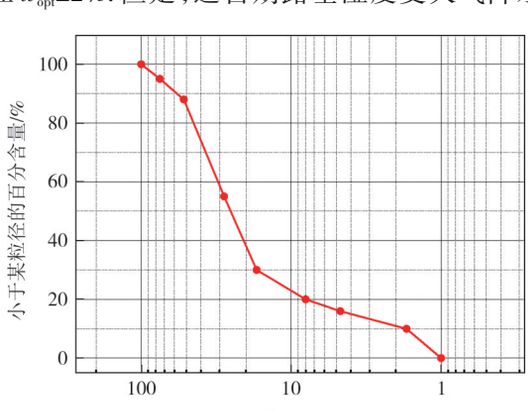


图1 颗粒粒径分布曲线

Fig.1 Particle distribution curve

$$w = w_s / \left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m \tag{1}$$

式中:w为吸力ψ对应的质量含水率;w_s为饱和质量含水率;a、n、m为模型拟合参数,其中a为土体的进气值.



图2 FSTY-1型压力板仪

Fig.2 Pressure plate instrument

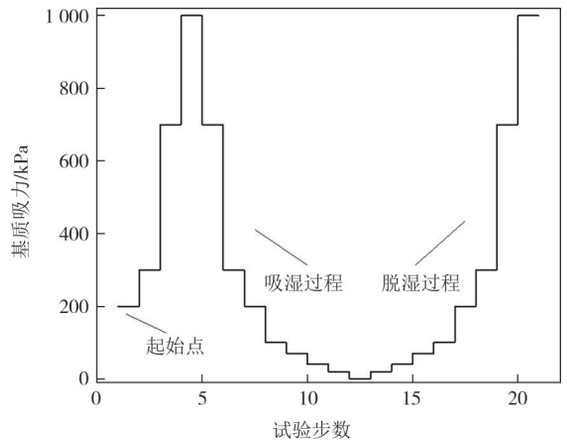
粉质黏土吸湿-脱湿土水特征曲线拟合结果如表1和图3(b)所示,拟合度R^2均大于0.98.脱湿过程各吸力下土体含水率明显低于吸湿过程,存在明显的滞回圈,进气值约为52.1 kPa.

1.2 芯吸土工布

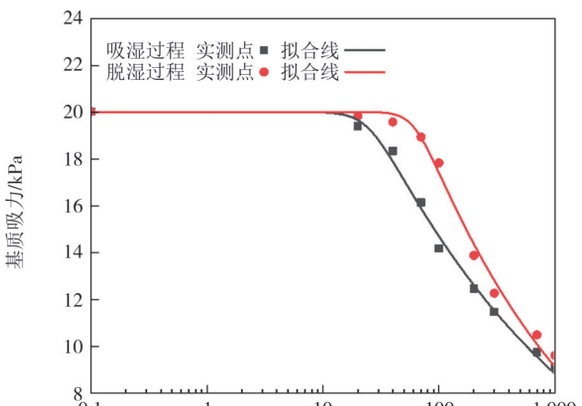
试验所采用的芯吸土工布类型为编织土工布,由纬向的聚酯类材料、经向的吸排水纱线复合聚酯类材料交叉编织而成,其中纬向纱线起加固稳定作用,经向纱线起吸排水作用,如图4(a)所示.根据姚穆等[24-25]提出的纱线中纤维间孔洞的当量直径公式,可得到吸排水纱线纤维间孔隙当量半径r:

$$r = \frac{1}{2} d_{eyf} = d_f[\varepsilon_{yf}/(1 - \varepsilon_{yf})] \tag{2}$$

式中:d_{eyf}为纤维间孔隙当量直径;d_f为纤维直径;ε_{yf}为纤维间孔隙率.



(a)吸力路径



(b)土水特征曲线

图 3　粉质黏土持水特性

Fig.3　Water-holding properties of silty clay

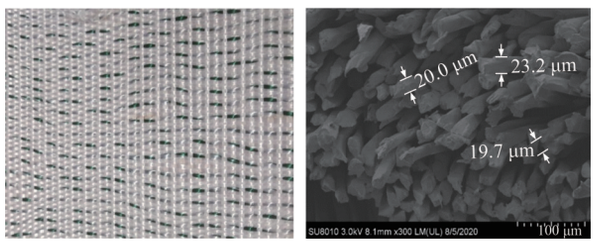
表 1　土水特征曲线拟合参数

Tab.1　Soil-water characteristic curve fitting parameters

试验工况	拟合参数				拟合度 R^2
	a/kPa	n	m	w_s	
脱湿过程	52.1	0.061 4	4.040	20.11	0.997
吸湿过程	20.3	0.040 3	5.511	20.11	0.987

为避免孔隙结构发生变形,对芯吸土工布切片液氮冷冻处理并进行电镜扫描测试,得到吸排水纱线纤维直径及纤维间孔隙率,测试结果如图 4(b)所示.基于 Image Pro Plus 软件,对吸排水纤维横截面微观结构图进行量化分析,获取截面面积、纤维面积、孔隙面积,得到吸排水纤维的平均半径为 14.39 μm,孔隙率为 0.24;根据式(2)进一步得到孔隙平均当量半径为 4.44 μm,吸排水纱线的微米级孔隙结构可大幅提高芯吸土工布的毛细吸水能力[26].

根据《土工合成材料测试规程》(SL 235—2012)测试获得芯吸土工布的垂直、水平渗透系数分别为



(a)经纬向编织外观　　(b)孔隙微观结构

图 4　芯吸土工布形貌图

Fig.4　Topography of wicking geotextile

0.013 cm/s、2.2 cm/s,可见芯吸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芯吸土工布质量含水率,并采用 VG 模型进行拟合,芯吸土工布土水特征曲线如图 5 所示.其中,进气值 a=2.8 kPa,n=0.09,m=2.88.与粉质黏土土水特征曲线相比,芯吸土工布的进气值更低、持水能力更差,当基质吸力大于 2.8 kPa 时,芯吸土工布可通过纤维间微米级孔隙通道进行水分的持续导排,最终水分传导至土工布裸露端,在环境场高吸力条件下进行蒸发[27].

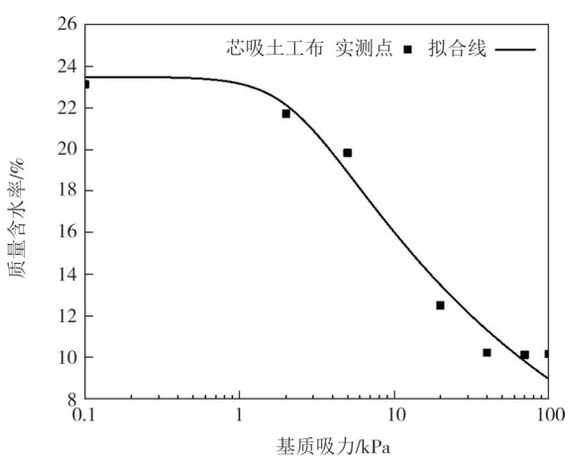


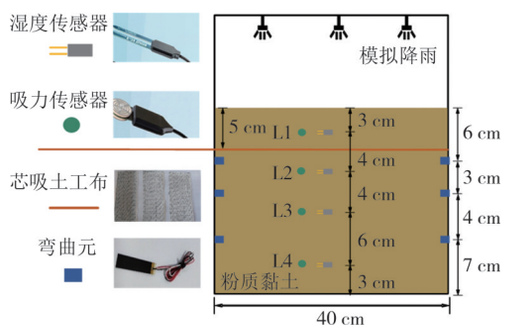
图 5　芯吸土工布土水特征曲线

Fig.5　Soil-water characteristic curve of wicking geotextile

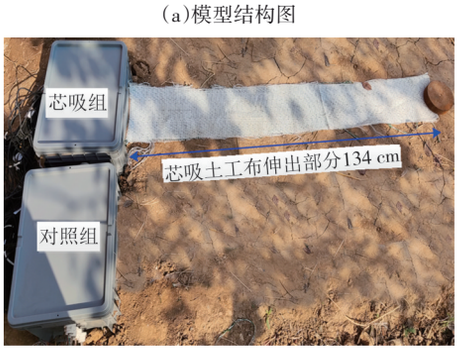
2　物理模型试验

为研究芯吸土工布对粉质黏土路基湿度的控制效果,设计了芯吸土工布室内模型箱试验,如图 6(a)所示.其中,模型箱长、宽、高分别为 40 cm、30 cm、30 cm.模型箱内的土层厚度为 20 cm,采用最优含水率进行分层压实,压实度为 96%;为减小土体与侧壁产生的摩擦作用,在试验箱侧壁涂抹适量凡士林;模

型箱底部为不排水边界.在距土层表面5 cm左侧壁处,预设芯吸土工布伸出缝,土工布伸出长度为134 cm;距土层表面3、7、11、17 cm右侧壁处,预设4层湿度和基质吸力传感器导线孔.如图6(b)所示,芯吸组和对照组模型箱除有无布设芯吸土工布外,其他设置均相同,排水缝均位于模型箱左侧距模型箱底部15 cm处,以此保证试验过程中多余水分能够从测试系统中流出.



(a)模型结构图



(b)模型实物图

图6 物理模型试验装置

Fig.6 Physical model test equipment

试验过程中,采用花洒模拟了3种降雨强度下的土体水分迁移规律,分别为小雨(9.8 mm/d)、中雨(20 mm/d)和大雨(45 mm/d),降水时间为3 h,各降雨强度下3 h所需降水量分别为147 mL、300 mL和675 mL,通过花洒在3 h内将每种降雨强度所需降水量均匀地施加于模型箱表面,然后持续跟踪监测土体的含水率、基质吸力至稳定状态,每级降雨结束后的持续监测时长分别为12~594 h、606~1 465 h和1 477~2 370 h.其中,基质吸力测试采用TEROS 21型传感器,量程为-10^5 ~ 5 kPa,精度为2 kPa;土体含水率测试采用EC-5水分传感器,量程为0 ~ 100%,精度为0.1%.由于土体类型对传感器的测试结果有很大影响[28],本文在试验前对压实度为96%的粉质黏土填料进行了含水率标定,标定结果如图7所示.为了更准确地表征粉质黏土的湿度状态,本文通过土体最大干密度将EC-5传感器监测的体积含水率转化为质量含水率进行后续的讨论分析.

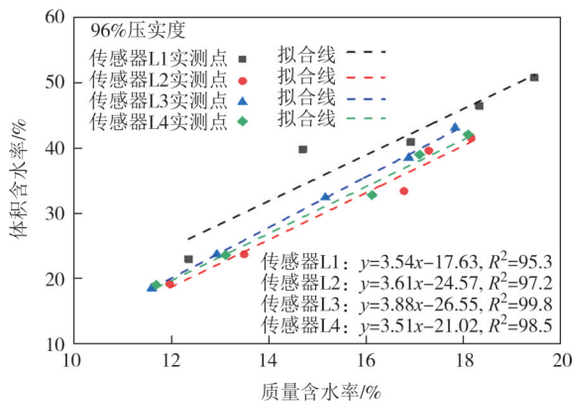


图7 EC-5水分传感器标定曲线

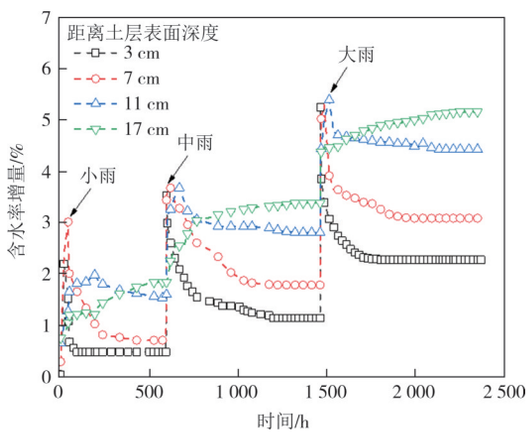
Fig.7 EC-5 moisture sensor calibration curve

3 试验结果

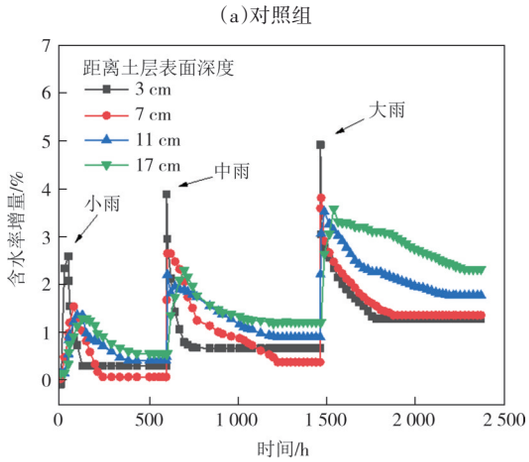
3.1 降雨入渗下的路基湿度时空演化规律

不同降雨强度下土层各深度处含水率随时间的变化规律如图8所示.总体而言,降雨入渗首先导致浅层土体(距土层表面3 cm的L1层和7 cm处的L2层)含水率快速增大至峰值,然后衰减并稳定至高于初始含水率的湿度状态;土层深度越大,降雨入渗稳定后的含水率值越高,这与重力势驱动下的渗流作用有关.具体而言,对于未铺设芯吸土工布的压实素土工况,小雨入渗下浅层土体(L1、L2层)含水率增量快速达到3%左右,而后经历90~420 h稳定到0.5%~0.7%,如图8(a)所示;距土层表面11 cm处的L3层土体含水率增量逐渐达到约2%,而后伴随水分下渗稳定至1.6%;底层土体L4层含水率受排水边界的约束,则始终缓慢增长了约1.8%.当降雨强度提高至中雨、大雨时,各深度处土体含水率的变化规律与小雨工况近似一致,但渗流稳定后的含水率增量进一步增大,分别达到1.1%~3.4%、2.3%~5.2%.这表明在3种降雨工况下,细粒土始终具有进一步持水的能力.铺设芯吸土工布的土体含水率变化如图8(b)所示,可以发现降雨入渗下各深度处土体的含水率最大增量均低于对照组,且芯吸土工布下方L2层的土体含水率增量明显低于L1层,表明在降雨入渗过程中,芯吸土工布已开始发挥其竖向截水、水平向导排水作用;更值得注意的是,降雨结束后的各深度处土体始终处于持续排水状态,小雨、中雨和大雨工况下排水稳定后的含水率增量分别为0.1%~0.6%、0.4%~1.2%、1.3%~2.3%,

远低于对照组的土体含水率增量.尤其是L4底层土体含水率并未出现重力势作用下的持续增长趋势,反而是逆重力作用向上迁移至芯吸土工布并沿侧向排出,表明芯吸土工布可将土层一定范围内的水分主动抽吸至路基外部,这对于易持水、难排水的细粒土路基长期湿度控制至关重要.



(a)对照组



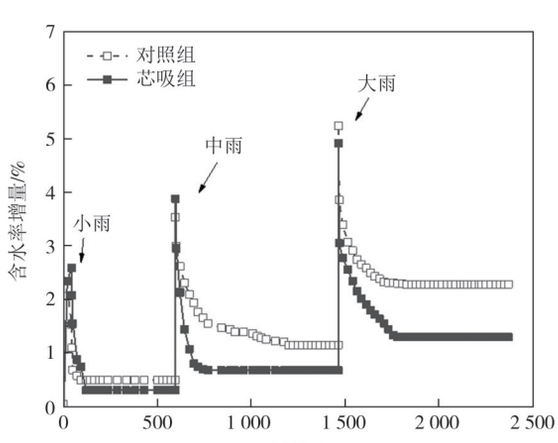
(b)芯吸组

图 8　降雨入渗下土层含水率增量时空演化

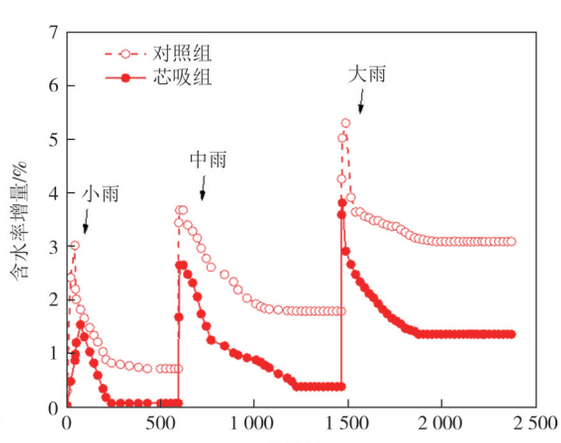
Fig. 8　Spatial and temporal evolution of soil water content increment under rainfall infiltration

为进一步揭示芯吸土工布对土体内部水分迁移的影响,绘制不同降雨强度下的各土层含水率增量变化时程曲线,如图9所示.对于L1浅层土体(位于芯吸土工布上方2 cm处),小雨入渗后的对照组和芯吸组土体含水率最大增量分别为2.3%和2.5%,如图9(a)所示;随后,随着水分不断下渗含水率逐渐降低并趋于稳定,芯吸土工布布设前后的含水率增量分别为0.5%和0.3%,两种工况相差不大.但是,当降雨强度增加至中雨时,芯吸组的土体含水率衰减速率明显快于对照组,在150 h内含水率增量衰减稳定至0.7%,而对照组则需要580 h才能稳定至1.2%.当降雨强度进一步提升为大雨时,对照组在315 h后含水率在重力下渗作用下衰减稳定至2.3%后不再变化,表明重力势驱动下的水分下渗基本结束;而芯吸组的土体含水率仍在持续降低,并稳定至更低的含水率增量1.3%.这主要是由于芯吸土工布的存在增大了土体内部的基质吸力水平,由对照组的33 kPa提高到49 kPa,如图9(e)所示,表明芯吸土工布上方土体的排水机理来自重力势和基质势的共同作用.

对于L2层土体(位于芯吸土工布下方2 cm处),小雨工况下芯吸组土体含水率增量达到峰值的时间较对照组滞后2.5 h,且含水率最大增量由对照组的3.0%降低至1.5%,如图9(b)所示.产生这个现象的原因是高吸力下芯吸土工布与粉质黏土界面处存在毛细屏障,水分很难产生竖向入渗[29];随着土工布上方土体水分不断积累,界面处吸力逐渐减小,此时芯吸土工布的竖向渗透系数也逐渐增大,累积在界面处的水分逐渐击穿芯吸土工布的阻隔而入渗到下方土层中.此后,芯吸组土层中的基质吸力逐渐增加,并超过对照组10.2~13.3 kPa,如图9(f)所示.小雨、



(a)L1层含水率



(b)L2层含水率

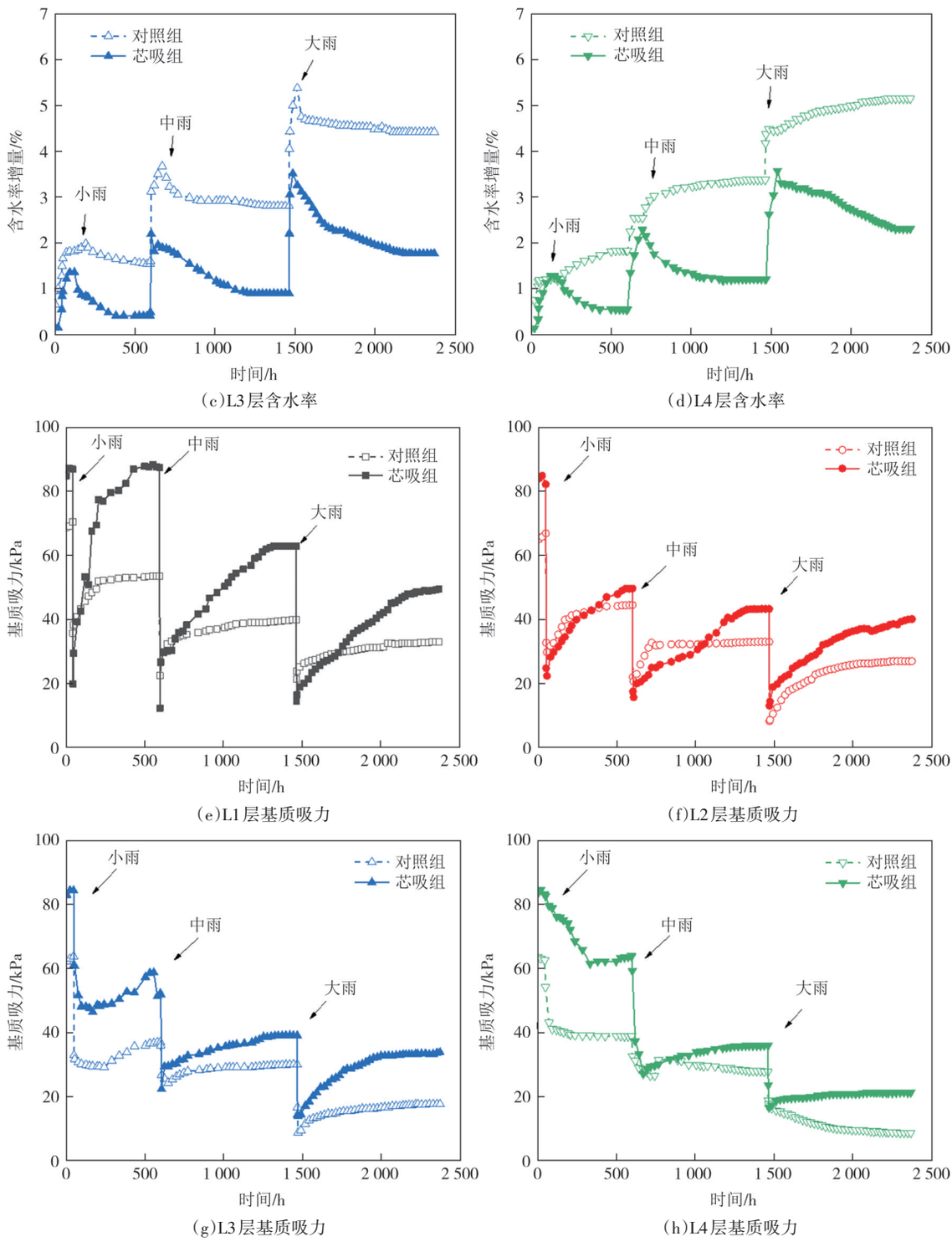


图9 不同降雨强度下各土层含水率与基质吸力演化规律

Fig.9 Evolution of water content and matric suction in various soil layers under different rainfall intensities

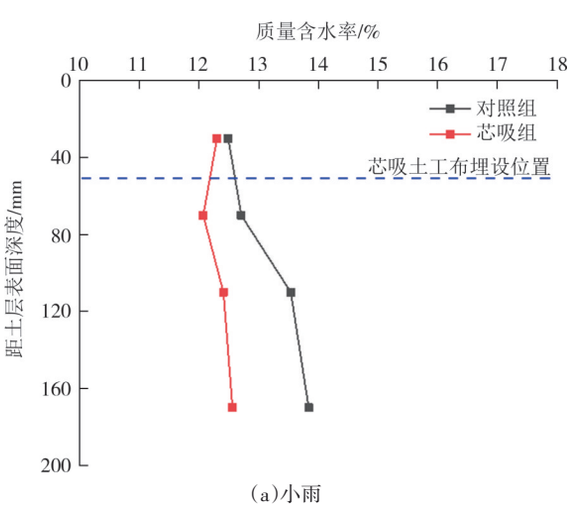
中雨和大雨工况下,芯吸组排水稳定后的含水率增量较对照组分别降低了0.7%、1.4%和1.7%,表明芯吸土工布下方土体的排水机理来自高吸力下的毛细屏障阻隔和基质势的共同作用.

对于L3~L4层土体,芯吸组的含水率增量峰值和排水稳定值均低于对照组,如图9(c)(d)所示.对照组中水分下渗没有受到任何阻隔,水分持续下渗并最终在土体底部进行积聚,含水率增量最终稳定为5.2%;而芯吸组中由于有芯吸土工布的存在,在土层中产生了更高的基质吸力24.3~64.1 kPa,如图9(g)(h)所示,在基质势负压驱动下土体水分可以逆重力势方向进行迁移进入芯吸土工布并进一步水平

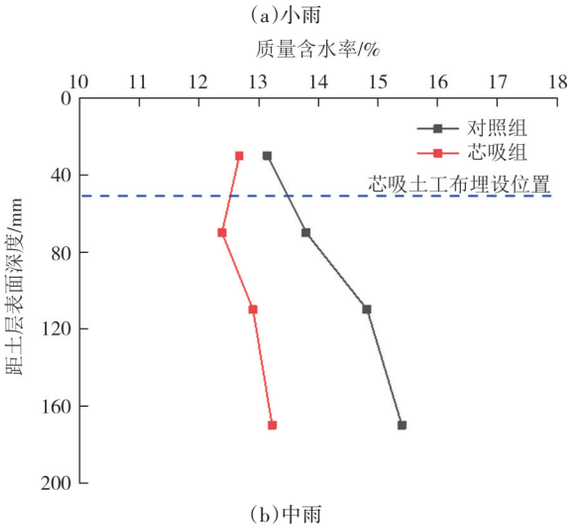
导排,含水率增量逐渐下降并趋于稳定至2%.可见,芯吸土工布在细粒土中所产生的基质势可克服重力势作用,驱动水分由下向上进行迁移和排出.

3.2　芯吸土工布湿度控制效果

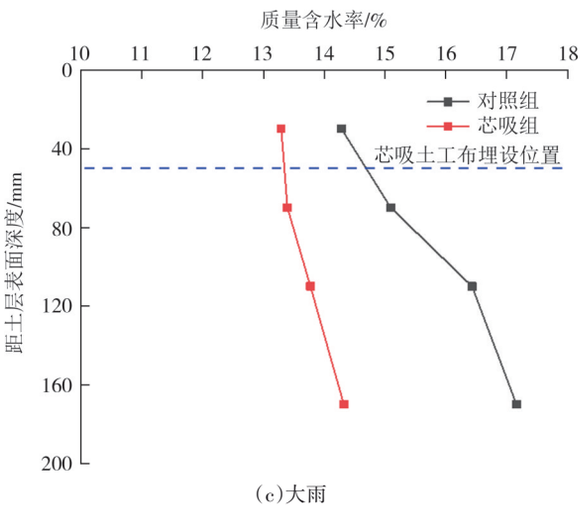
降雨入渗和水分迁移稳定后土体含水率沿深度的分布如图10所示.各降雨强度下,对照组的土体含水率较初始状态(12%)发生了较大程度的增加,表现出降雨强度越高、深度越大,土体含水率的增幅越显著的典型特征[30-31].布设芯吸土工布后,土层全深度范围内的含水率均显著降低,并有效控制在w_{opt}+2%以内.而且,与对照组显著不同的是,芯吸土工布下方的土体含水率并未因重力下渗作用而出现明显增长,反而由对照组的13.8%(小雨)~17.2%(大雨)降低至12.6%(小雨)~14.0%(大雨),如图10(a)~(c)所示,表明芯吸土工布产生的基质势可有效克服其下方12 cm范围内的水分重力势,改变了土体内部水分的迁移方向,从而实现路基内部水分主动向外导排的目标.



(a)小雨



(b)中雨



(c)大雨

图10　不同降雨作用下土体含水率沿深度分布规律

Fig.10　Distribution of subgrade humidity along depth under different rainfall

可见,从压实素土对照组和芯吸组的含水率演化结果看,路基内部含水率的增长和消散是重力势和基质势共同作用的结果.为了表征两种作用下土体含水率的变化情况,定义各层土体含水率消散值为降雨结束时含水率峰值与排水稳定后含水率的差值,如图11(a)~(c)所示.总体而言,对照组和芯吸组的土体含水率消散值均随着土层深度增加逐渐降低,但两者的排水机理和效果并不相同.对于传统压实土层而言(未铺设芯吸土工布),土层中含水率的消散主要受重力势的作用,小雨工况下土体含水率消散值自上而下依次为1.72%、1.16%、0.44%和-1.08%,土层最下方含水率消散值甚至呈现出负值,这是由于底层土体排水边界受限,出现了水分的持续积聚;对于芯吸组,同等降雨工况下的土体含水率消散值依次为2.31%、1.47%、0.95%和0.78%,这是重力势和基质势共同作用的结果.随着降雨强度的增加,芯吸土工布的排水能力进一步提升,中雨和大雨下的含水率消散值达到1.1%~3.2%和1.3%~3.6%.需要注意的是,对于芯吸土工布上方土体含水率的消散,重力势和基质势均驱动水分由上向下迁移,两者联合发挥了积极的排水作用;但对于芯吸土工布下方的土体,基质势需要克服重力势作用,从而驱动水分从下向上迁移,因而土体含水率消散值要低于土工布上方土体.实际工程中,可充分发挥重力势和基质势的联合排水作用,合理布设芯吸土工布的位置.

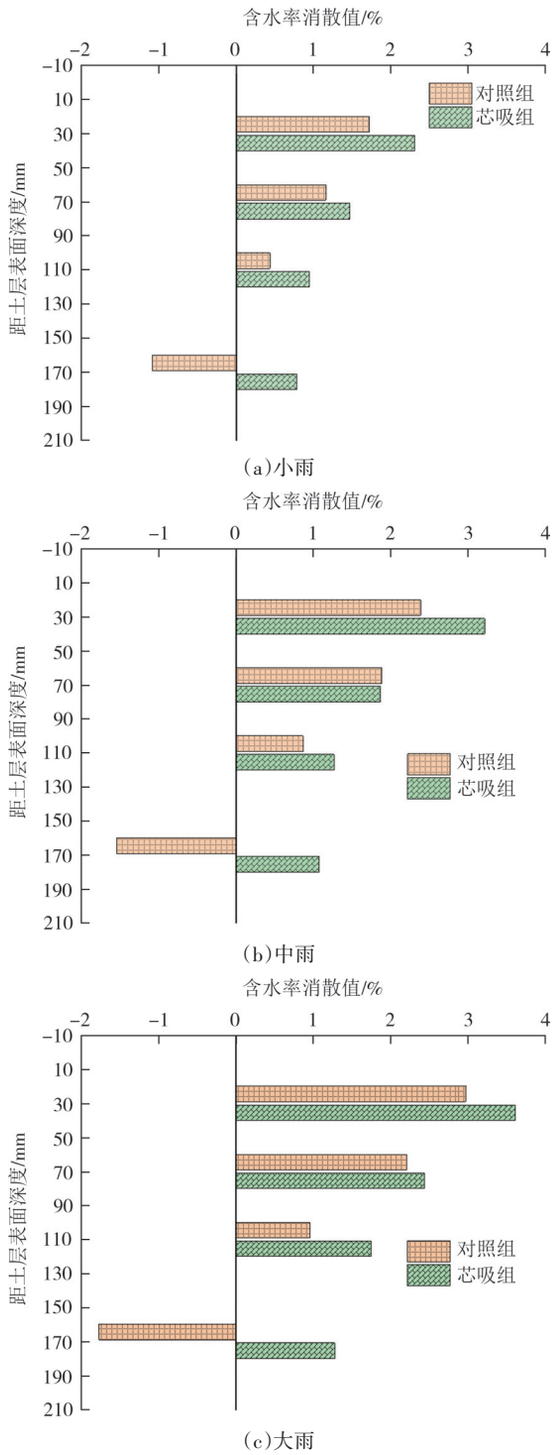


图11 不同降雨强度下含水率消散值沿深度分布规律

Fig.11 Dissipation values of water content under different rainfall intensities

4 结 论

本文基于芯吸土工布加筋土层物理模型试验，开展了不同降雨强度入渗作用下芯吸土工布水分迁移控制效果研究，主要结论如下：

1)具有微米级孔隙结构的芯吸土工布横向渗透能力大、持水能力弱.其垂直、水平方向的渗透系数分别为0.013 cm/s、2.2 cm/s，横向排水速率远高于垂向；芯吸土工布的进气值仅为2.8 kPa，远低于细粒土，在较低的基质吸力作用下可实现水分的横向导排.

2)降雨入渗下的土体内部水分迁移受重力势和基质势的共同作用.未铺设芯吸土工布的压实素土含水率在重力势驱动下沿深度逐渐增大，而且由于细粒土具有较高的持水能力，很难通过重力下渗将含水率降低至初始状态；芯吸土工布的存在可使土层的基质吸力提高5.1~34 kPa，土工布上方土体受重力势和基质势共同驱动，水分由上向下迁移；但土工布下方的土体，基质势需要克服重力势作用，驱动水分从下向上迁移.

3)芯吸土工布可有效缓解降雨入渗作用并对细粒土中的水分进行有效导排.相比于对照组湿度增长结果，芯吸土工布作用土体的含水率由对照组的13.8%(小雨)~17.2%(大雨)降低至12.6%(小雨)~14.0%(大雨)，有效控制在w_{opt}+2%以内.

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 J L，LÜ S T，LIU C C. Technical system，key scientific problems and technical frontier of long-life pavement[J]. Chinese Science Bulletin，2020，65(30)：3219-3227.

[2] 王林，韦金城，张晓萌，等.“四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J].科学通报，2020，65(30)：3238-3246.
WANG L，WEI J C，ZHANG X M，et al.“Four integrations” to solve the technical bottleneck of long-life asphalt pavement[J]. Chinese Science Bulletin，2020，65(30)：3238-3246.(in Chinese)

[3] 傅智，李红.完善我国公路防排水技术[J].公路，2009，54(4)：56-59.
FU Z，LI H. Perfecting highway waterproof and drainage technology in China[J]. Highway，2009，54(4)：56-59.(in Chinese)

[4] NGUYEN Q，FREDLUND D G，SAMARASEKERA L，et al. Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades[J].

Canadian Geotechnical Journal,2010, 47(3): 267-280.

[5] 蒋红光, 曹让, 马晓燕, 等.考虑路基平衡湿度状态的黄泛区中高液限黏土抗剪强度研究[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2819-2828.
JIANG H G, CAO R, MA X Y, et al. Shear strength of the medium-high liquid limit clay in the Yellow River Flooded Areas considering the subgrade equilibrium moisture condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2819-2828.(in Chinese)

[6] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.(in Chinese)

[7] 靳青. 西北地区公路水毁成因及防治措施浅析[J].公路, 2014, 59(12): 222-225.
JIN Q. Analysis on the causes and prevention measures of highway water damage in northwest China[J]. Highway, 2014, 59(12):222-225.(in Chinese)

[8] 李嘉薏,邹静蓉,王刚,等. 路基渗沟排水性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(2):222-228.
LI J Y,ZOU J R, WANG G, et al. Experimental study of drainage properties of subgrade underdrains [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(2): 222-228.(in Chinese)

[9] 张栋,王宁,陈锋,等. 毛细排水管排水性能试验与路基排水应用研究[J]. 铁道建筑,2023,63(1):127-131.
ZHANG D, WANG N, CHEN F, et al. Study on drainage performance test and subgrade drainage application of capillary drainage pipe[J]. Railway Engineering,2023,63(1):127-131.(in Chinese)

[10] 刘杰,陈建斌,卢正,等. 非饱和黏土路基水汽运移与相变机制研究[J]. 土木工程学报,2023,56(增刊1):152-159.
LIU J, CHEN J B, LU Z, et al. Water vapor migration and phase change mechanism of unsaturated cohesive soil subgrade [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(Sup.1): 152-159.(in Chinese)

[11] LIN C, ZHANG X, HAN J. Comprehensive material characterizations of pavement structure installed with wicking fabrics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019,31(2):04018372.

[12] GUO J, HAN J, ZHANG X, et al. Evaluation of moisture reduction in aggregate base by wicking geotextile using soil column tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(3): 306-314.

[13] HAN J, ZHANG X. Recent advances in the use of sustainability of roadways geosynthetics to enhance[C]//Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development. Nakhon Ratchasima Thailand: University Technology Nakhon Ratchasima, 2014.

[14] GUO J, WANG F, ZHANG X, et al. Quantifying water removal rate of a wicking geotextile under controlled temperature and relative humidity[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(1): 04016181.

[15] ZHANG X, PRESLER W, LI L, 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.

[16] LIN C, PRESLER W, ZHANG X, et al. Long-term performance of wicking fabric in Alaskan pavements [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2017,31(2):D4016005.

[17] BISWAS N, PUPPALA A J, KHAN M A, et al. Evaluating the performance of wicking geotextile in providing drainage for flexible pavements built over expansive soils[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(9): 208-221.

[18] BAI M, LIU Z B, ZHANG S J, et al. Experimental study on the effect of fabric parameter on drainage performance of wicking geotextile[J]. Fibers and Polymers,2021,22(7): 2044-2051.

[19] 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 R C, ZHANG W Y, SUN X H, et al. Study on effect of moisture and salt content reduction in saline soil by wicking fiber [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2022,39(2):58-67.(in Chinese)

[20] 郭一鹏,聂如松,张雄,等. 新型土工织物处治膨胀土水分迁移试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(2):568-577.
GUO Y P, NIE R S, ZHANG X, et al. Influence of a new geotextiles on the migration of water content in expansive soil pavements: a experimental study[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(2): 568-577.(in Chinese)

[21] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020.
Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing:China Communications Press, 2020.(in Chinese)

[22] 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 Z Y, JIANG H G, SUN M L, et al. Analysis of equilibrium density state of highway subgrade with fine soils[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(9): 94-103.(in Chinese)

[23] 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.

[24] 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 M,SHI M W,JIANG S C. The research on the theory and practice of wet permeability of fabrics Ⅰ: Research on the wet permeability process and fabric structure[J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology,2001,15(2):1-8.(in Chinese)

[25] 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 M,SHI M W. The research on the theory and practice of wet permeability of fabrics Ⅱ : Theoretical equations of wet permeability of fabrics[J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology,2001,15(2):9-14.(in Chinese)

[26] 包佳佳. 新型吸水土工布细粒土路基中的排水性能研究[D]. 济南:山东大学, 2021.
BAO J J. Study on drainage performance of new wicking geotextile in fine-grained soil subgrade[D]. Jinan: Shandong University, 2021.(in Chinese)

[27] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报,2021,34(3):1-49.
Editorial department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research·2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49.(in Chinese)

[28] 冷伍明,涂仁盼,聂如松,等. 路基土水分传感器室内标定方法与影响因素分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(3):231-239.
LENG W M,TU R P,NIE R S,et al. Method and effect analysis of laboratory calibration test on subgrade soil moisture sensor[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2019,52(3):231-239.(in Chinese)

[29] LIN C,GUO Y P,ZHANG X,et al. Reexamination of traditional testing techniques for determining WRCs of woven geotextiles in full suction range[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, 51(5): 1-16.

[30] 曾铃, 李光裕, 史振宁, 等. 降雨入渗条件下非饱和土渗流特征试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2):191-199.
ZENG L, LI G Y, SHI Z N, et al. Experiment on seepage characteristics of unsaturated soil under rainfall infiltration[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(2):191-199.(in Chinese)

[31] 张硕,裴向军,黄润秋,等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验[J]. 中国公路学报,2019,32(9):32-41.
ZHANG S,PEI X J,HUANG R Q,et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(9):32-41.(in Chinese)