

聚丙烯酰胺对毛细阻滞覆盖层的 阻渗性能影响研究

于 溟

成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年1月31日; 录用日期: 2024年2月23日; 发布日期: 2024年4月12日

摘 要

采用在粗粒土体表面喷洒聚丙烯酰胺溶液的方式构建阻渗层, 来对毛细阻滞覆盖层结构进行改进, 并通过室内土柱入渗试验对改进后毛细阻滞覆盖层土体的水分入渗规律阻渗性能进行分析, 发现改进后覆盖层土体的储水能力提高, 击穿时间得到延长, 并有效减少了水分击穿后, 细粒层土体的水分漏失速率, 土体的防渗性能显著提高。

关键词

毛细阻滞覆盖层, 水分击穿, 聚丙烯酰胺

Study on the Influence of Polyacrylamide on the Permeability of Capillary Blocking Coating

Hao Yu

College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 31st, 2024; accepted: Feb. 23rd, 2024; published: Apr. 12th, 2024

Abstract

The structure of capillary blocking mulch is improved by spraying polyamide solution on the surface of coarse soil. Then the water infiltration law and barrier performance of the improved capillary blocking mulch are analyzed by indoor soil column infiltration test. It is found that the water storage capacity of the improved mulch is improved, the breakdown time is prolonged, and the

water loss rate of the fine soil is effectively reduced after the water breakdown.

Keywords

Capillary Retarding Coating, Water Breakdown, Polyacrylamide

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

毛细阻滞层本质上是通过构建粗-细两层覆盖层,利用非饱和条件下,土层之间的水力特性的不同,使得水分在土层交界面处由于基质吸力大于粗粒土层的进水压力,因而所产生的毛细阻滞效应导致水分汇集在细粒土层中难以继续下渗,从而阻止水分的渗漏[1] [2] [3]。毛细阻滞层因其优秀的抗渗能力以及良好的耐久性能,近年来在边坡防渗,尤其是在碎石土边坡中得到了广泛的应用[4]。

如何提高毛细阻滞层的阻渗性能一直是国内外学者的研究重点,研究人员发现通过土工材料或对细/粗粒层材料进行改进,在毛细阻滞层下方构建渗透系数更小的下伏防护层,当入渗水分击穿覆盖层时,防护层能够有效组织水分的进一步渗漏,使覆盖层在连续降雨条件下依然保持良好的阻渗效果[5] [6] [7] [8]。由于砂土不同于粉土的水力特征,Stormont 等[9]提出在粗-细粒土之间增设非饱和导排砂层(Unsaturated Drained Layer, UDL),使水分在击穿细粒层之前,通过 UDL 侧排至坡脚,增强了覆盖层的阻渗效果。焦卫国等[10]对 UDL 在我国东部地区的长期监测,对 UDL 的长期服役性能进行了验证分析。李晓康等人[11]进一步对 UDL 在强降雨条件下进行了模拟实验,以 UDL 的水分运移过程和水分再分配规律,揭示了 UDL 的阻渗机理。

综上所述,针对如何改良毛细阻滞层的研究主要集中在采用已有的传统材料使其在不同工况条件下达到阻渗效果,本文通过室内土柱降雨入渗试验,研究连续降雨条件下,采用聚丙烯酰胺构建的阻渗层对毛细阻滞层进行改进,并通过入渗过程中土体的含水率和基质吸力变化,探究阻渗层对毛细阻滞覆盖层土体的储水能力、水分击穿时间影响,分析改进后毛细阻滞层的阻渗性能,为新型阻渗层在雨季集中的湿润气候地区边坡阻渗应用提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

本次试验所用细颗粒土取自康定地区的粉质粘土,土壤粗颗粒土同样取自康定地区某弃渣场隧道钻进所产生的花岗岩弃渣,粒径大小集中在 5~10 cm,根据土工试验标准[12]对试验所用进行土性试验,弃渣土的颗粒级配曲线如图 1 所示。本次试验中,粉质黏土的压实度控制为 80%,粗粒土的干密度控制位 1.5 g/cm^3 。

2.2. 试验装置

如图 2 所示,本文所采用试验装置包括降雨装置、土柱模型箱、数据测定及采集装置构成。

(1) 降雨装置

本次试验所采用降雨器为可拆卸针管式,针管呈同心圆布局,由蠕动泵定流量法控制降雨强度。

(2) 土柱模型箱

土柱模型箱为亚克力透明圆管，直径 20 cm，壁厚 1 cm；模型箱分三段组成，每节 20 cm，各层间采用法兰盘连接，圆管两侧开孔，分别布设含水率采集孔和整理采集孔。

(3) 数据测定及采集

数据测定仪器包括 RS485 型水分传感器和 RS485 型土壤张力传感器对土壤体积含水率、土壤基质吸力进行测定，并通过网络数采仪对数据进行采集记录。

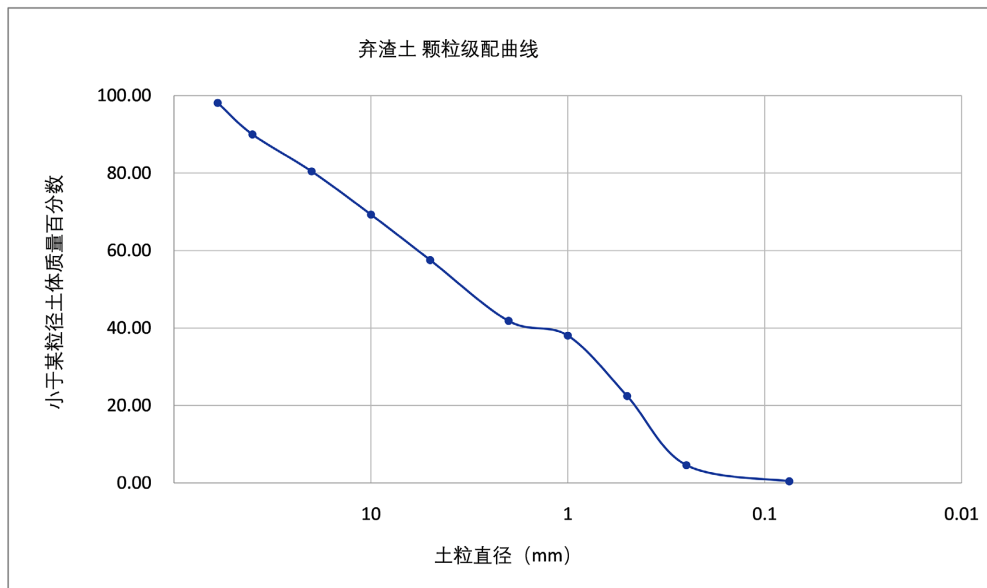


Figure 1. Particle grading curve of test waste soil

图 1. 试验弃渣土颗粒级配曲线

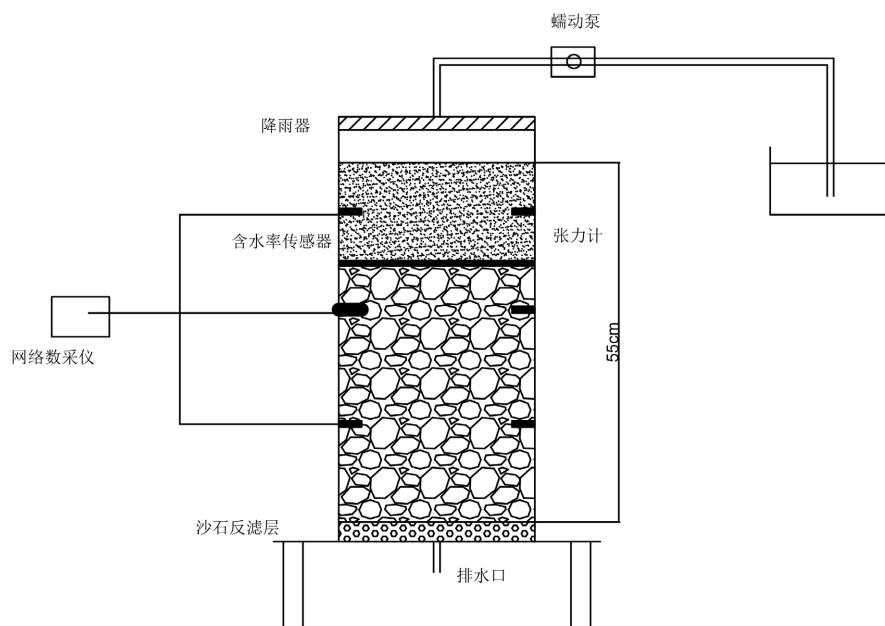


Figure 2. Soil column test device

图 2. 土柱试验装置

2.3. 试验设计

本次试验研究共设置 2 个试验组，每组重复两次，开展 4 次降雨入渗试验。试验方案如表 1 所示。通过土体不同深度含水率变化、基质吸力变化以及水分漏失速率对土体阻渗性能进行测试。

Table 1. Test plan and grouping
表 1. 试验方案及分组

编号	聚丙烯酰胺掺量	降雨强度
	($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	mm/h
A1	20	60
CK	无	60

在每组试验中，降雨持续进行，记录土柱底部出水时间，每隔 30 min 记录一次出水量，直至排水稳定时即停止降雨。

2.4. 试验步骤

参考《土工试验方法标准》，土柱采用分层压实法制样。先将现场所取碎石土风干后，过 60 mm 筛，按设计压实度分层装样，每层间刮毛，同时安装水分传感器和张计，粗粒土层装填完毕后，在其表面喷洒聚丙烯酰胺溶液并静置 24 h，带阻渗层土体成型后再装填细粒土层。最后，在细粒土层表面铺设 1 cm 粗石英，土样装样前，需在土柱模型箱内壁涂抹凡士林，以防止优先流产生。

土柱制样完毕后，安装降雨装置，根据降雨强度标定结果，调节蠕动泵流速以控制降雨强度，开始降雨入渗试验，试验过程中，利用张计和水分传感器监测土柱内水分入渗情况，并实时记录土柱湿润锋位置和入渗总水量。

3. 试验结果与分析

3.1. 毛细阻滞覆盖层土体含水率变化规律

土体入渗过程中，含水率变化情况如图 3、图 4 所示，降雨入渗初期，土壤初始含水率从大到小依次为 ck-22.5、ck-7.5、ck-40，此时含水率整体表现为稳定状态，表明初期阶段湿润峰未达到传感器处，此时细粒层土体呈非饱和入渗，当 7.5 cm 处含水率传感器读数开始变化，标志着土壤水分入渗至细粒层土体底部。相较于 ZS 组，ck 组 7.5 cm 传感器变化时间更快，时间为 58 min，zs 组比 ck 组慢 31 min，这是由于阻渗层的存在使土壤水中空气流动较慢，土壤空气阻碍水分的持续下渗。随着入渗的持续进行，ck 组和 zs 组土体表层分别于 39 min 和 55 min 时出现积水，表明此时细粒层表层土体开始由非饱和入渗逐渐转入饱和入渗，细粒层底部土体含水率持续增高。根据 7.5 cm 处含水率变化斜率可发现，ZS 组细粒层土体含水率增速明显小于 CK 组，这代表在相同降雨量情况下，增设阻渗层的毛细阻滞覆盖层的细粒层土体有着更长的饱和时间。

随着降雨入渗，细粒层土体含水量逐渐增大，ck 组和 zs 组中 22.5 cm 处含水率传感器分别于 87 min、183 min 开始响应，此时细粒层土体含水率分别为 33.9% 和 32.8%，此时便视为细粒土层发生水分击穿，水分穿过粗细层交界面，入渗至粗粒土层，相较于 ck 组，zs 组水分击穿时间显著增大，土壤水分在阻渗层的存在下显著降低，阻渗效果明显。

在水分击穿后，交界面处下方粗粒层土体开始发生非饱和入渗，土壤水分快速入渗，此时两组土柱含水率皆呈现快速上升阶段，击穿后含水率变化速率 ck 组显著大于 zs 组，且而与 CK 组不同的是，ZS

组在 22.5 处含水率在上升至 16.3% 后便不再继续增长, *zs* 组击穿后含水率变化较 *ck* 组缓慢上升, 这是由于阻渗层较低的渗透系数, 有效减少了细粒层水分漏失速率, 从而使交界面下方粗粒层土体保持非饱和和入渗状态, 且水分入渗速率受阻渗层渗透系数控制。7.5 mm 处含水率逐渐趋于平稳, 此时细粒层土体水分入渗量与漏失量达到动态平衡, 此时细粒层土体含水率可视为其最大含水率。CK 组和 ZS 组最大含水率分别为 38.3% 和 40.6%。同时, 对比土壤水分击穿后 40 cm 含水率变化时间, *zs* 组 40 cm 水分变化时间明显长于 *ck* 组, 表明击穿后土壤水分入渗速率 *zs* 组小于 *ck* 组, 在没有阻渗层的状态下, 粗粒层土体逐渐接近饱和状态, 土体导水性能增加, 整个粗粒层土体由非饱和入渗转变为饱和入渗, 导水性能增加, 当 40 cm 处含水率增速逐渐放缓, 区域平稳后, 此时土壤水分整体呈现稳定状态。此时 CK 组和 ZS 组底部水分漏失速率分别为 14 ml/min 和 9 ml/min。

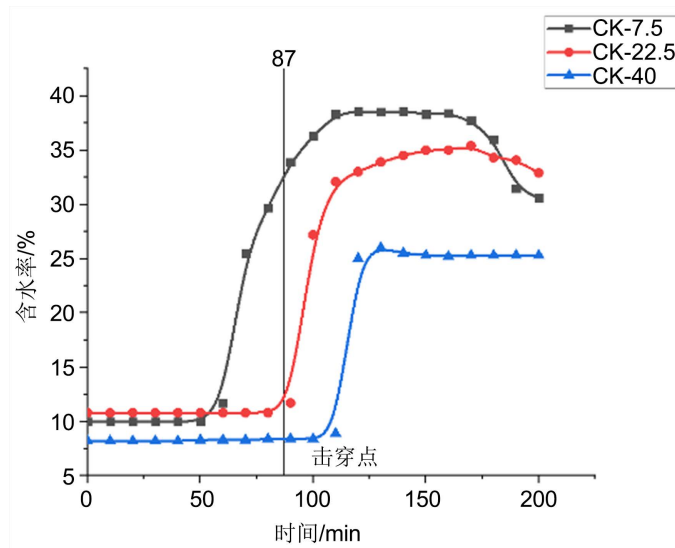


Figure 3. Change of water content of CK group
图 3. CK 组合含水率变化图

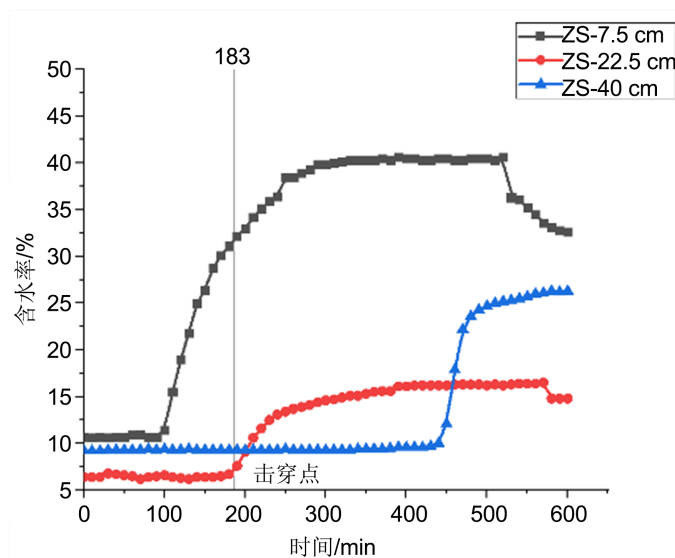


Figure 4. Change of water content of ZS group
图 4. ZS 组合含水率变化图

3.2. 毛细阻滞覆盖层土体基质吸力变化规律

试样土体不同深度基质吸力变化规律如图 5、图 6 所示，随着体积含水率的增加，土体基质吸力逐渐降低，整体呈现三段式变化，水分入渗初期，土体基质吸力整体呈现平稳状态，随着湿润峰的持续下渗，当到达各传感器处，基质吸力呈现快速下降状态，斜率较陡，基质吸力变化时间与含水率变化时间相对应，随着含水率的持续升高，基质吸力逐渐减小直至趋近于为 0。而在阻渗层作用下，细粒层土体基质吸力为零后，粗粒层土体并未收到影响。直至水分击穿阻渗层后，粗粒层土体基质吸力才开始降低。

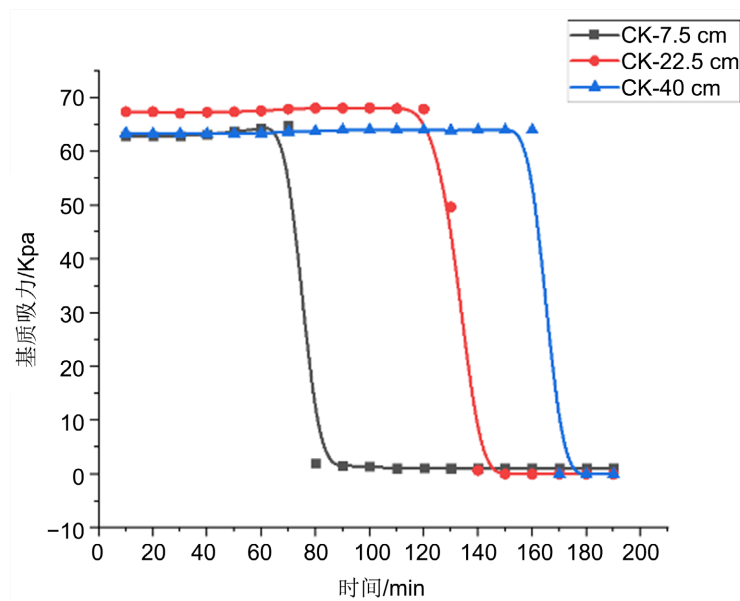


Figure 5. Change of soil moisture content in the open permeability layer

图 5. 无阻渗层土体含水率变化图

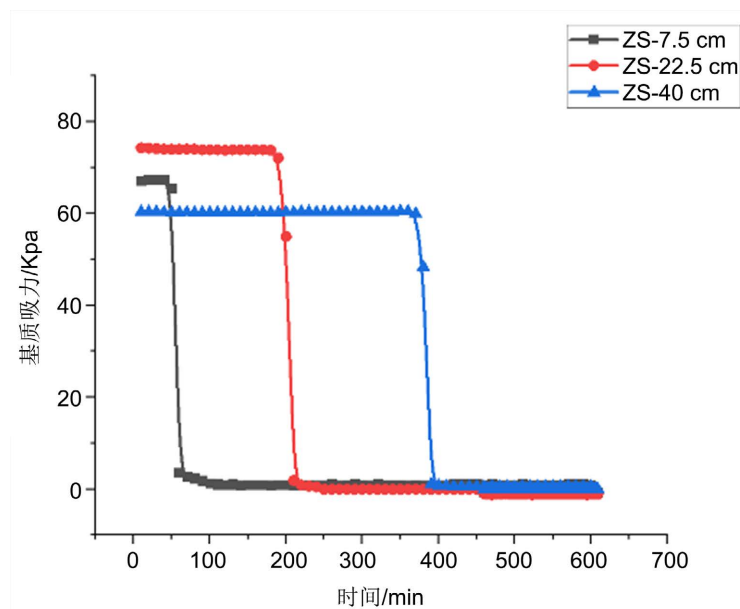


Figure 6. Moisture content change of soil containing impermeable layer

图 6. 含阻渗层土体含水率变化图

4. 结论

本文通过室内土柱入渗试验,开展有无阻渗层的毛细阻滞覆盖层土体入渗试验,分析入渗过程中体积含水率、基质吸力的变化规律,分析增设阻渗层对毛细阻滞覆盖层防渗性能影响,主要得到以下结论:

(1) 土体入渗主要分为四阶段,入渗初期,土体含水率呈现稳定阶段,随着水分入渗至传感器处,含水率迅速上升的同时基质吸力快速降低,水分击穿后,细粒层含水率增速放缓,粗粒层含水率迅速上升,入渗后期,细粒层含水率保持稳定,粗粒层含水率呈先上升后稳定,入渗末期,细粒层含水率降低,粗粒层含水率保持稳定状态。

(2) 试验发现,增设阻渗层土体有效延长水分入渗速率,对比无阻渗层土体,细粒层土体最大含水率提升至 40.6%,水分击穿时间延长至 183 min,土体水分漏失量降低至 9 ml/min,相比无阻渗层土体分别提升 110%和 35.7%,有效提升细粒层土体的储水能力,试验证明含阻渗层土体的防渗性能明显优于无阻渗层土体。

参考文献

- [1] 贾官伟. 固废堆场终场土质覆盖层中水分运移规律及调控方法研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [2] 焦卫国. 西北黄土/碎石覆盖层水分存储-释放机理及防渗设计方法[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [3] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1149-1157.
- [4] 詹良通, 冯嵩, 李光耀, 等. 生态型土质覆盖层工作原理及其在垃圾填埋场封场治理中的应用[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(4): 1-20. <https://doi.org/10.19841/j.cnki.hjwsgc.2022.04.001>
- [5] 王甦宇, 刘爱华, 邹家强, 等. 毛细阻滞覆盖层边坡防护技术研究综述[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 79-85+97. <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.04.013>
- [6] Bouazza, A., Zornberg, J.G., McCartney, J., et al. (2013) Unsaturated Geotechnics Applied to Geoenvironmental Engineering Problems Involving Geosynthetics. *Engineering Geology*, **165**, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.018>
- [7] Mcwatters, R., Wilkins, D., Spedding, T., et al. (2014) Geosynthetics Used in the Barrier Systems for Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soil in Antarctica. *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics (ICEG2014)*, Melbourne, 11-14 November 2014, 456-463.
- [8] 张春强. PAM 与尿素混施对土壤及渭北旱塬苹果生产的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学.
- [9] Stormont, J.C. and Morris, C.E. (1998) Method to Estimate Water Storage Capacity of Capillary Barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 297-302. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:4(297))
- [10] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 含非饱和和导排层的毛细阻滞覆盖层长期性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(6): 1101-1109.
- [11] 李晓康, 李旭, 吴羊, 等. 含非饱和和导排层毛细阻滞覆盖层服役性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 189-194.
- [12] 水利电力部. 土工试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2019.