

“表-浅-深”一体化膨胀土边坡生态防治方案在淠史杭灌区刘岗滑坡治理中的应用

刘庆彪

省淠史杭灌区管理总局

摘要: 淠史杭灌区内广泛分布着膨胀土这一特殊土体, 造成滑坡与工程边坡灾害问题频发。“表-浅-深”一体化膨胀土边坡生态防治方案在刘岗浅层牵引式滑坡治理实践中应用, 取得了显著效果, 这一经验可供后期类似工程参考。

关键词: 膨胀土; 边坡生态防治; 浅层滑坡治理

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.036

一、引言

淠史杭灌区横跨长江、淮河两大流域, 设计灌溉面积1198万亩, 是中华人民共和国成立后在党的领导下兴建的全国最大灌区。灌区内分布着最为广泛的特殊土体—膨胀土, 由于其富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物, 具有显著的胀缩性、裂隙性和超固结性, 对气候变化、人类活动等外部因素极为敏感, 发灾频率高; 尤其是近年来, 灌区内城镇化、交通及水利等工程建设的不断深入, 膨胀土滑坡与工程边坡灾害问题日益凸显, 严重威胁人民生命财产安全和经济社会可持续发展。

随着对膨胀土工程特性认识的加深, “宜挡不宜清, 宜排不宜堵”的整治原则已成为共识, 且“保湿防渗、以柔治胀、生态护坡”等柔性防治理念正逐渐成为主要趋势。近年来, 由于人们环保意识和可持续发展观念的增强, 生态护坡已成为灌区边坡防护工程的一种重要方式。但用于抑制膨胀土水敏性和裂隙性、增强坡体疏排水功能的新型防治技术鲜有报道, 针对膨胀土边坡的生态防护机制研究也有待深入。基于膨胀土边坡失稳

机制, 研发经济、快速、长效、环保型膨胀土边坡防治新技术是亟待解决的“卡脖子”科学与技术难题。针对这一问题, 本项方案将采用理论分析、数值模拟方法, 基于毛细水运移机理, 设计出兼具毛细阻滞与根系固土功能的膨胀土边坡坡面韧性生态防护体系, 以及结合锚固型排水土工格构, 形成“表-浅-深”一体化膨胀土边坡生态防治技术方案。

二、“表-浅-深”一体化膨胀土边坡生态防治方案

膨胀土边坡失稳破坏在于降雨、蒸发过程中坡体水分变化而引发的胀缩变形及裂隙发育程度。尤其是长期的干湿循环作用下, 裂隙的持续、大规模发育, 将形成新的水分入渗通道, 加剧坡体的失稳破坏。因此, 膨胀土边坡的有效防治取决于浅-表层坡体水分的有效调控, 通过设计新型防治方案实现强降雨、蒸发条件下浅-表层坡体中水分的阻水、储水和排水作用, 构建韧性生态防护体系, 具有十分重要的意义。该防护体系由细粒层(粉土或黏土)、粗粒层(砂、砾石)和生态层构成。

(一) 坡面韧性生态防护毛细阻滞机理分析

膨胀土边坡坡面韧性生态防护体系利用细粒层阻隔水分入渗; 借助细粒和粗粒层形成的毛细阻滞作用, 使水分滞留在细粒层中; 若水分击穿细粒层, 则粗粒层会将水分侧向导排至排水渠或坡脚。同时, 坡体表面的生态层将实现根系固土、强化坡体稳定性的目的。降雨、蒸发条件下双层结构的毛细阻滞机理如下。

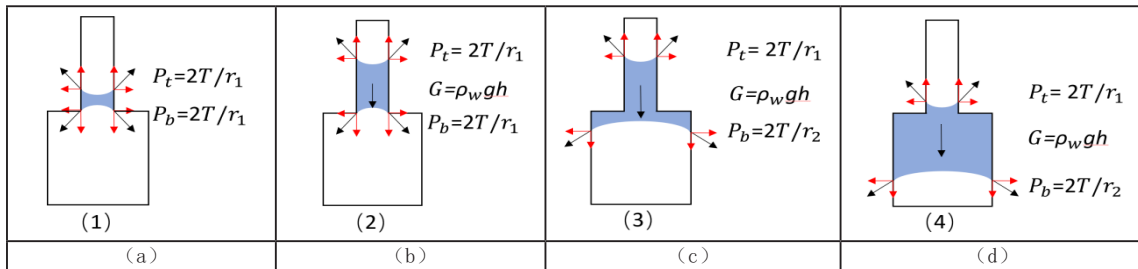


图1 降雨、蒸发条件下双层结构的毛细阻滞机理

如图1, 细粒层中孔隙尺寸极小, 薄层水(忽略重力)受表面张力垂直分量作用。表面张力与孔径有关, 该处孔径相等, 因此薄层水处于力学平衡状态。

$$P_t = 2T/r_1 = P_b \quad (1)$$

随着降雨进行, 细粒层水分增加, 重力不可忽略, 孔隙中水柱力学平衡被打破, 将在重力作用下向下部粗粒层中迁移。

$$P_t < P_b + G \quad (2)$$

当水柱到达粗细粒层界面时, 渗流通道孔径发生变化, 水柱顶部毛细压力将高于底部毛细压力, 该毛细压力差值将用于平衡土柱重力, 实现水分的阻滞。

$$P_t = P_b + G = P_b + \rho_w g h_t \quad (3)$$

同样地, 当细粒层中水分蒸发后, 由于毛细上升的作用, 粗粒层中的水分将通过毛细上升作用向上运移, 毛细压力差平衡了层间水分的重力, 加速了蒸发过程。此时有:

$$P_i = P_b + G = P_b + \rho_w g h_i \quad (4)$$

基于上述条件，水柱达到力学平衡，粗细粒韧性生态防护层毛细阻滞效应充分发挥，处于毛细突破临界状态时所对应的极限储水量 h_i 为：

$$h_i = (P_i - P_b) / \rho_w g \quad (5)$$

由式（5）可以看出，土壤的储水量受到粗细粒层的吸力影响，由于吸力和渗透系数之间存在对应关系，因此可以通过控制压实度和孔隙大小来控制渗透系数，从而提升韧性生态防护的储水量。在连续降雨的条件下，可能存在水分连续运移且总长超过 h_i 时仍未到达粗细粒层交界面处的情况出现，此情况下的储水量应按照细粒层的厚度进行计算。这也表明，在工程实际中，细粒层的厚度应当在满足工程要求的情况下尽可能地大于 h_i ，从而可以获得更好的储水效果。

当储水量达到极限时即产生毛细突破，此时刻即为毛细阻滞层的突破时间。当降雨强度小于土壤的渗流速度时，突破时间主要受到降雨强度的影响：

$$t_b = \frac{d}{S \cos \theta} \quad (6)$$

其中， d 为细粒层的厚度， θ 为边坡的坡角， S 为降雨强度。

当降雨强度大于土壤的渗流速度时，水分会在表面发生径流，此时的突破时间主要受到土壤的渗流性质影

响：

$$t_b = \frac{d}{Q \cos \theta} = \frac{d \delta L}{k_{sw} k_{rw} \cos \theta \delta P} \quad (7)$$

其中， Q 为流量， k_{sw} 为饱和渗透系数， k_{rw} 为相对渗透系数。 P 为土壤渗流的驱动力， L 为水分入渗土壤的深度。

由上式可以看出，韧性生态防护的突破时间受到细粒层层厚、坡度、降雨强度和土体的渗透系数影响，在工程上可以在满足设计要求时通过控制细粒层层厚和坡度来延缓坡面韧性生态防护层的突破时间。

（二）坡面韧性生态防护数值模拟

根据边坡施工当中的边坡设计尺寸建立长宽高为12m×1m×6m，坡度为1：3的边坡模型进行数值模拟，由上至下分别为：大气接触层、植被壤土层、覆盖层和底部的膨胀土边坡。根据设计要求选取相关的材料参数，如表1。

选取20mm/d（中雨）的降雨强度进行不同工况的模拟，模拟过程当中不考虑植被对水分运移的影响，针对覆盖层类型进行模拟研究。工况1为顶部单独覆盖6cm的植被壤土，工况2为6cm的植被壤土和0.95压实度的厚度为30cm的粉土组合覆盖层，工况3为6cm的壤土和30cm厚的毛细阻滞覆盖层。具体参数如表2所示。

针对3个工况进行了数值模拟，并根据坡脚处膨胀

表1 模拟参数表

材料参数	密度 (Kg/m ³)	孔隙率	渗透率 (m/s)	饱和体积含水率 θ_s	残余体积含水率 θ_r
大气	1.293	0.99	1.00E-13	0	0
植被壤土	1400	0.55	2.34E-13	0.33	0.04
粉土 0.9 压实度	1778	0.432	8.16E-15	0.5843	0.0747
碎石	1600	0.421	4.48E-09	0.4200	0.0050
膨胀土	1832	0.353	4.75E-14	0.4800	0.1320

表2 工况参数表

工况	条件	类型	降雨强度	坡度	突破时间
1	6cm 植被壤土	植被层	20mm/d	1: 3	2.04h
2	6cm 植被壤土 /30cm 粉土	植被层 + 单层覆盖层	20mm/d	1: 3	10.39h
3	6cm 植被壤土 /25cm 粉土 /5cm 碎石	植被层 + 毛细阻滞覆盖层	20mm/d	1: 3	21.04

土水分发生变化判断覆盖层突破，由模拟结果可知，由粗粒与细粒材料所组成的毛细阻滞覆盖层相比单层的覆盖层效果防渗能力效果更好，能够满足在中雨的降雨条件21小时不发生突破。并且在持续降雨的情况下，毛细阻滞覆盖层能将水分储存于细粒层中，在水分侵入下部膨胀土边坡之前能够延缓水分的入渗。

（三）锚固型排水土工格构

为实现膨胀土边坡“浅-深”层防护，本方案构建锚固型排水土工格构，具体措施包括具有排水和稳固作用的U型排水格构和具有浅层滑坡抗滑支护功能的微

型锚桩。U型排水格构于坡面处呈菱形布设，U型格构侧板下部配筋，预留管道协调前述韧性生态防护层侧面排水。此外，滑面平缓段布置微型锚桩，锚桩为预制PHC管桩，桩底伸入滑面以下，桩头与U型排水格构菱形边交点处一体浇筑。

三、刘岗滑坡生态防治治理方案应用

刘岗滑坡位于淠史杭灌区瓦东干渠寿县炎刘镇境内，由于瓦东干渠全线处于江淮分水岭北侧的丘陵地带，地形为岗冲起伏垄畝相间的波状平原，地形起伏较大，渠道线路长、切岭多，两岸切岭经常性发生滑

坡。根据现场查看、勘探及测绘结果，刘岗滑坡长度约90m，位于一级平台以上，一级平台以下坡面较为稳定。沿滑坡周界形成一条大裂隙，滑坡体内发育有垂直于滑坡方向的裂缝。滑坡体形成后整体形态基本清晰，滑坡轮廓可辨，滑坡体主要由重粉质壤土、粉质黏土组成，从滑坡变形特征和运动性质分析，滑坡属浅层牵引式滑坡。根据滑坡治理方案的比选结果，最终刘岗滑坡采用削坡减载、微型锚桩支挡、U型格构+韧性生态防护为主，结合砼预制块护坡、设置纵向排水沟等为辅的方案进行综合治理，该方案简介如下：

(一) 削坡减载及坡面布置

首先削坡减载将滑体清除，然后从下至上按1:3削坡并做四级平台，设计水位以上1m设置5m宽的一级平台，一级平台以上每隔4.0m高差设置一道平台，平台宽度为3m，四级平台以上削坡至现状断面，最上坡面较缓部分维持现状，只对坑洼不平或有裂缝的地方进行修整。

(二) 坡面韧性生态防护

一级至四级平台间坡面布设韧性生态防护层，借助水分迁移过程中的毛细阻滞机理实现降雨及蒸发过程中膨胀土边坡浅-表层水分韧性调控。韧性生态防护层结构包括由细粒土组成的储水层和由粗粒土组成的毛细突破层。水分在入渗进覆盖层后，由于毛细阻滞的作用会滞留在细粒的储水层中，从而保障下覆边坡不受水分入渗。膨胀土边坡破坏主要是由于膨胀土吸水导致的强度降低和失水导致的裂缝发育，因此利用毛细阻滞覆盖层隔绝水分进入膨胀土边坡土体可以有效防止膨胀土边坡的失稳破坏。

韧性生态防护层由下至上分别为粗粒层、土工织物、细粒层、植被层。粗粒层厚度为50mm，采用碎石作为覆盖层材料，碎石的粒径不大于10-50mm，进气值不大于1.5kPa，其饱和渗透系数不小于 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ ；土工织物使用滤水型土工织物，布设于粗粒层表面，需在重合处进行连接；细粒层厚度为200mm，采用粉质黏土作为覆盖层材料，粉质黏土的粒径不大于2mm，其饱和渗透系数为 $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ；植被层厚度为60mm，采用适合于植被生长的营养土，植物种类选取紫苜蓿、猫尾草或三叶草。

(三) 微锚桩 U 型排水土工格构防护

一级至四级平台间坡面布设微锚桩U型排水格构（图2-1和图2-2）。U型排水格构于坡面处呈菱形布

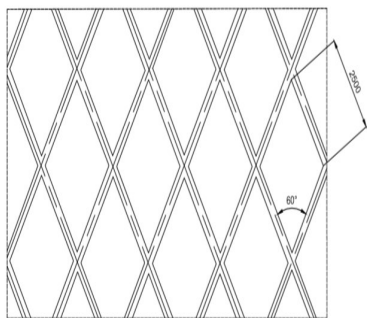


图 2-1 U 型排水格构平面布置示意图

设，格构单边长2.5m，宽度260mm，高度630mm，入土深度300mm。U型格构侧板为现浇砼结构，侧板下部300mm处配筋，上部330mm不配筋，预备留管道协调韧性生态防护层侧面排水，侧面管道采用土工布包裹防止堵塞；底部为现浇砼结构，与锚桩钢筋搭接后浇筑。

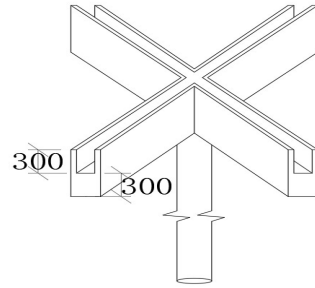


图 2-2 微型锚桩和 U 型排水格构部结构

此外，一级平台以上坡面、滑面平缓段布置一排微型锚桩，锚桩布设于U型排水格构菱形边交点处，隔点布设，间距5m。微型锚桩采用预制PHC管桩，直径300mm，长度5600mm，桩底伸入滑面以下4m。该滑坡段各级平台内侧各设一条纵向排水沟，共设置4条纵向排水沟，纵向排水沟与U型格构的内部排水单元连成一体。

(四) 其他辅助措施

为保护渠道边坡土体不被水流淘空，并做好滑坡段的水土保持工作，从护坡的结构及耐久性出发，渠底至设计水位采用砼预制块护坡，设计水位至一级平台采用砼预制空心锁块护坡，一级平台至渠顶坡面设置草皮护坡。滑坡两侧坡体尚发育有引张裂隙，采取骑缝开挖回填水泥土的方式处理。

四、观测设施设置及运行期观测效果分析

(一) 观测设施设置

为便于滑坡治理后对滑坡段日常观测，了解滑坡发展动态和滑坡治理效果，在格构施工过程中，依据监测仪器布设图布置监测仪器，将弱光栅应变传感光缆浇筑于混凝土当中；微型锚桩施工过程中，在预制微型锚桩表面固定外定点应变传感光缆后贯入土体；在覆盖层设施工过程中，内埋应变片、土压力盒，按照深度分别布设监测单元。

(二) 效果分析

滑坡治理完成后，开展了坡面湿度、位移、压力、应变及U型排水格构、微型锚桩应变实时监测和原状坡面及加固坡面对比监测。通过现有监测资料和数据对比分析成果表明，工程实施后岸坡稳定，未发生明显变化，浅层滑移没有进一步发展。“表-浅-深”一体化膨胀土边坡生态防治方案在溧史杭灌区刘岗浅层牵引式滑坡治理中的应用效果显著。

参考文献

[1] 林思田. 向家坡滑坡稳定性分析探讨[J]. 土工基础, 2017, 31(5): 637-641.
 [2] 张冲. 关于崩塌滑坡的工程治理的探索[J]. 科技研究, 2014(5): 24-24.