

膨胀土边坡的变形特性研究

韩晓伟¹, 张玲玲²

(1. 广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004;

2. 柳州维兴建筑工程有限公司, 广西 柳州 545004)

摘要 关于膨胀土边坡的研究虽然已取得显著进展, 但该问题仍被视为工程地质领域的核心挑战。膨胀土因其独特的吸水膨胀-失水收缩特性, 成为导致边坡失稳的关键因素。然而, 现有研究对膨胀土胀缩特性与边坡稳定性之间的定量关系尚缺乏系统性阐释。本研究通过工程监测与现场勘察相结合的方法, 系统分析不同压力条件及水文环境下膨胀土对边坡的破坏机制, 揭示边坡破坏层的分布规律, 并量化研究膨胀土边坡的变形特性。针对复杂地形条件下的膨胀土边坡, 本研究采用反演分析法对复活边坡进行二次治理, 为膨胀土边坡破坏机理研究提供理论参考。

关键词 膨胀土; 复活边坡; 反演法

基金项目: 2022年度广西生态工程职业技术学院校级课题“西南地区巨型滑坡治理过程中相关参数选择机制研究”(项目编号: 2022ZRKX07); 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“基于FLAC3D的膨胀岩土复合边坡稳定性分析及支护参数研究”(项目编号: 2023KY1261)。

中图分类号: TU443

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.036

0 引言

膨胀土因为其显著的胀缩性和裂隙性等特点, 在含水量变化的时候会产生变形, 对于边坡工程极易引发破坏造成失稳, 因此研究膨胀土的胀缩性机理一直是岩土工程领域的重要课题。普遍认为水的渗透不会降低土的吸力和抗剪强度, 而是会引发裂隙在岩土体中产生扩散, 进而降低整体的强度。在微观层面上, 膨胀土变形机理的研究有很多。例如: 李国维^[1]等结合宏观和微观试验揭示了红层泥岩填料在膨胀过程中的颗粒重排列和裂隙的发展规律。胡江^[2]等(2024)通过多源监测数据融合, 揭示了深挖方膨胀土边坡在空间上的差异性变形以及时间上的“阶梯式”累积变形规律。变形预测是边坡治理的重要课题之一, 各界对于多场的耦合数字模拟分析也日趋成熟。本文从实际工程出发, 结合监测数据, 从宏观上研究膨胀土边坡二次复活的原因以及参数取值的变化。

1 研究区域地质条件及滑坡原因分析

研究坡体全长900 m东向西倾斜, 坡面轴向长度约30~76 m, 面积约4 000 m², 潜在滑体约40万m³, 变形体主滑方向298°。该边坡上出现多道大至平行的横向拉裂缝并有错落, 坡脚前缘一带地面鼓胀隆起并

有剪出现象, 坡面上的格构大部分剪断破坏。该滑坡是多种因素共同作用的结果, 与地层岩性、地形地貌、人类工程活动、降雨等因素有密切的联系。(1) 滑体的主要成分为泥岩, 由于泥岩具有膨胀性, 遇水膨胀软化, 强度急剧降低, 加之其岩层内存在软弱结构面, 为滑坡的形成提供了物质基础。(2) 人类工程活动是滑坡形成的另一个主要因素, 在修建建筑及道路时, 需进行削坡平整场地, 改变了原有的地形地貌, 使坡高增加, 坡度变陡, 使泥岩暴露于坡上, 减小了坡体下部支撑力, 为滑坡的形成创造了条件。(3) 水是诱发滑坡发生的关键因素之一。根据地质详勘报告及现场实地调查, 该坡体的水来源有以下两个方面: 一是坡面水, 主要补给来源为雨水及坡面植被日常养护水; 二是坡体内地下水, 根据场地勘查资料, 坡体上部含有一层砂卵石层, 该层为透水层, 受地表水补给作用, 该层底部含有少量地下水。此外, 根据勘查资料, 场地南侧部分地段泥岩中含有砂质夹层, 不连续, 以透镜体形式揭露, 为相对含水层。以上两层为坡面渗水的补给源。膨胀土在含水量变化的时候会产生变形, 对于边坡工程极易引发破坏造成失稳^[3]。综上所述多重原因共同引起了边坡的滑坡, 主要是三个因素: 膨胀土、地下水、人类活动。

作者简介: 韩晓伟(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

2 岩土参数取值

从勘察结果来看该边坡地层分为四层，从上到下依次是杂填土、粉质粘土、圆砾、全风化强风化粉砂质泥岩。边坡在经过第一次开挖后进行了支护，经历一场暴雨后滑坡复活，最大滑移距离 2 m，认为滑坡原因是活动开挖边坡，第一次支护计算不准确，造成了第二次的边坡滑坡。根据钻孔发现，滑坡滑动带主要分布于第三层全风化粉砂质泥岩层，有中等膨胀性。

2.1 室内直剪试验

本次详细勘查在探井及钻孔内取粉质粘土原状土样 2 组（6 件）、全风化泥岩原状土样 2 组（6 件）、全风化粉砂质泥岩原状土样 2 组（6 件）、强风化泥岩原状土样 2 组（6 件）、强风化粉砂质泥岩原状土样 2 组（6 件）、中风化泥岩原状土样 2 组（6 件），进行室内饱和直剪试验，本次膨胀性泥岩的室内饱和直剪试验是在土体饱和、体积完全膨胀的状态下进行的，是模拟该边坡的最不利工况下的强度指标（见表 1）。

表 1 室内饱和直剪试验抗剪强度成果表

土层	C (kPa)	Φ (°)
填土	20.2	13.6
粉质粘土	18.2	13.1
全风化泥岩	10.9	4.1
强风化泥岩	13.6	4.7
中风化泥岩	15.7	5.7

2.2 现场大剪试验

本次勘查在不同土层内进行了 10 组现场大剪试验，均在饱和状态下进行。其中粉质粘土与圆砾层的现场大剪试验值与实际可能到达的最不利状态较为接近。膨胀性泥岩的现场大剪试验虽然亦在饱和状态下进行，但试件的体积并没有得到完全的膨胀，与实际可能到达的最不利状态较有所偏差，即还未达到该边坡可能出现的最大不利工况（见表 2）。

表 2 现场大剪试验抗剪强度成果表

土层	C (kPa)	Φ (°)
填土	22.0	14.1
粉质粘土	18.8	13.6
圆砾	13.6	22.8
全风化泥岩	18.4	16.7
强风化泥岩	20.6	17.2
中风化泥岩	23.8	18.4

2.3 反演计算

为了了解边坡浅层稳定性与滑带土的抗剪强度的关系，本次计算根据已发生的 4# 滑坡情况，进行反演分析。

对 C、 ϕ 值进行反演计算，反演公式为：

$$C = \frac{K_s \sum W_i \sin \alpha_i - \tan \phi \sum W_i \cos \alpha_i}{L} \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{K_s \sum W_i \sin \alpha_i - CL}{\sum W_i \cos \alpha_i}\right) \quad (2)$$

根据现场的情况看，由于边坡已经发生了大规模的滑移现象，边坡已经处于不稳定状态，滑坡的稳定系数取 0.95。对滑坡滑带土抗剪强度 C、 ϕ 值进行反算，求得滑带土的饱和状态下 C 值为 12.6 kPa， ϕ 值为 9.7°。

3 边坡发展趋势及危险性分析

通过实验室直剪试验、现场大剪试验以及反演法推算的岩土体参数，对边坡的稳定性分析进行计算发现边坡的破坏与地下水的活动成正相关性。滑坡形成过程是岩土体在膨胀性、软弱结构面软化作用、人类工程活动和地表水入渗等共同作用下使土体结构发生变化及强度降低结果，在集中持续降雨等外部因素的诱发下，边坡土体沿软弱结构面处产生滑移。裂隙的存在极大地改变了土体的渗透性和应力分布特征^[4]。对边坡的稳定性分析采用不平衡推力法进行计算。

滑坡剩余下滑推力按《滑坡防治工程勘查规范》（DB/T 0218-2006）附录 E 中的公式 E.10 计算。计算公式为：

$$P_i = P_{i-1} \times \psi + K_s \times T_i - R_i \quad (3)$$

式（3）中： P_i 、 P_{i-1} 分别为第 i 块、第 i+1 块滑坡的剩余下滑力（kN/m）； K_s 为滑坡推力计算的安全系数，工况 I 取 1.30，工况 III 取 1.10； T_i 为作用于第 i 块滑动面上的下滑力（kN/m）； R_i 为作用于第 i 块滑动面上的抗滑力（kN/m）。

滑坡剩余下滑推力计算，在土自重、土自重 + 暴雨工况进行。刘伟等^[5]的研究在强震区的胀缩劣化效应，这预示着将更多灾害因素纳入数值模型的耦合分析中将是未来的重要方向。

边坡圆砾层以下部分大气急剧影响深度内潜在滑动面稳定性计算采用折线动法；边坡圆砾层以上部分粉质粘土层采用圆弧滑动法自动搜索最不利破裂面，应用理正岩土计算软件该层在工况 III 下计算稳定系数、推力计算成果见表 3。

通过对整个边坡的不平衡推力的对比计算，发现

表3 边坡稳定性计算成果

计算剖面	工况III 圆砾层以下大气急剧影响深度内			工况III 圆砾层以上的粉质粘土层		
	稳定系数 F	稳定性评价	滑坡推力	稳定系数 F	稳定性评价	滑坡推力
1	0.841	不稳定	241.14	—	—	—
2	1.012	欠稳定	57.63	—	—	—
3	0.907	不稳定	183.66	—	—	—
4	0.839	不稳定	309.81	—	—	—
5	0.926	不稳定	196.75	1.485	稳定	—
6	0.890	不稳定	231.38	1.735	稳定	—
7	0.851	不稳定	258.89	—	—	—
8	1.021	欠稳定	44.26	—	—	—
9	0.919	不稳定	172.45	—	—	—
10	0.971	不稳定	96.93	1.887	稳定	—
11	1.000	欠稳定	72.04	—	—	—
12	1.147	基本稳定	-20.38	—	—	—
13	1.018	欠稳定	36.30	—	—	—
14	1.562	稳定	-74.78	—	—	—
15	1.164	稳定	-21.15	—	—	—
16	1.193	稳定	-30.71	—	—	—
17	3.470	稳定	-84.14	—	—	—

该边坡破坏的两点规律：（1）我们考虑在暴雨工况下的计算边坡破坏与实际情况以及监测数据完全吻合，侧面印证了我们边坡参数取值的准确性；（2）边坡的稳定性与第三层圆砾层的透水性息息相关，为下层膨胀性泥岩提供了诱发因素水的便利条件。

4 结论

膨胀土边坡的稳定性基本上都发生在膨胀土岩层，膨胀土层在吸水膨胀后，其强度急剧降低。膨胀土边坡的治理主要在于水的治理，治理地下水以堵和截为主，堵一般采用注浆的方式，但注浆存在使膨胀土再次膨胀的风险。经过试验发现，超过一定的压力后膨胀土的膨胀性就会大大削弱，因此保证覆盖层的厚度可以有效减小膨胀土对于边坡稳定性的影响。因此，对于膨胀土边坡的治理建议：（1）根据膨胀土边坡的变形特性和大量的数据显示，边坡的滑动土层一般为膨胀土层，膨胀土吸收后膨胀，强度急剧降低约 50%，膨胀土层作为重点治理土层；（2）膨胀土的治理首先要避免

扰动，研究表明，在覆盖层厚度足够的情况下膨胀土膨胀性消失，因此保证膨胀土层的上覆土压力至关重要。

参考文献：

- [1] 李国维, 巩齐齐, 李涛, 等. 崩解性砂软岩改良弱膨胀土性状实验研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(01): 34-43.
- [2] 胡江, 李星. 深挖方膨胀土边坡时空变形特征分析 [J]. 岩土力学, 2024, 45(10): 3071-3080.
- [3] 赵勇, 张锐, 邢学敏, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的膨胀土边坡变形失稳特征 [J]. 公路交通科技, 2024, 41(08): 22-30.
- [4] 张妤涵, 胡江, 李星. 多源数据驱动的膨胀土渠道边坡变形及影响因素分析方法 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-16 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250428.1107.003>.
- [5] 刘伟, 孙欣然, 何乃武. 强震区胀缩劣化效应致膨胀土边坡失稳力学特性分析 [J]. 工程地质学报, 2025, 33(03): 1058-1070.