 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i1.8963

Analysis of the Impact of Confined Water Bodies on Slope Stability at Soil-Rock Junctions in Mountainous Area Engineering

Min Yu[1] Zhen Liu[1] Yan Cao[1] Mingyue Cai[1] Yaqin Liu[2]

1. China Machinery Engineering Consulting Group No.3 Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China
2. China Power Engineering Consulting Group Central South Electric Power Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430024, China

Abstract

In mountainous area engineering construction, the presence of confined water bodies at the soil-rock interface can easily alter the mechanical properties of rock and soil, inducing safety accidents such as slope collapse and sliding. However, the influence mechanism and quantitative laws on slope stability remain unclear. This paper takes the slope project of a mountainous area highway as the research object. Through geological investigation, the distribution characteristics of the soil-rock interface and the parameters of the confined water body are clarified. By using FLAC3D numerical simulation software, the displacement field, stress field and safety factor variation laws of the slope under different water pressures are compared and analyzed. Based on the simulation results, a comprehensive prevention and control measure of "pressure reduction and drainage of confined water + anti-seepage reinforcement + dynamic monitoring" is proposed, aiming to effectively ensure the stability of the slope and provide quantitative basis and practical path for the prevention and control of confined water bodies at the soill-rock interface in mountainous area engineering.

Keywords

Mountainous Area Engineering Soil-rock interface Confined water body Slope stability

山区工程土岩结合面承压水体对边坡稳定性影响分析

余敏[1] 刘震[1] 曹岩[1] 蔡明月[1] 刘亚钦[2]

1. 中机三勘岩土工程有限公司，中国·湖北 武汉 430024
2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司，中国·湖北 武汉 430024

摘　要

山区工程建设中，土岩结合面承压水体的存在易改变岩土体力学特性，诱发边坡坍塌、滑移等安全事故，但其对边坡稳定性的影响机制与量化规律尚未明确。本文以某山区公路边坡工程为研究对象，通过地质勘察明确土岩结合面分布特征与承压水体参数，运用FLAC3D数值模拟软件，对比分析不同水压下边坡的位移、应力及安全系数变化规律。基于模拟结果，提出“承压水降压引流+防渗加固+动态监测”的综合防控措施，旨在有效保障边坡稳定，为山区工程土岩结合面承压水体防控提供量化依据与实践路径。

关键词

山区工程；土岩结合面；承压水体；边坡稳定性

1 引言

我国山区面积占国土总面积的 69%，随着山区公路、铁路、水利等工程建设推进，土岩结合面承压水体引发的边坡安全问题日益突出。土岩结合面作为土体与岩体的过渡区域，本身具有力学性质不均、结构松散的特点，而承压水体的渗透作用会进一步降低岩土体黏聚力与内摩擦角，增大坡体孔隙水压力，打破边坡原有受力平衡。当前对山区工程边坡稳定性的研究多聚焦于岩土体自身参数，忽视承压水体的动态影响，部分工程虽采取排水措施，但因未量化水压与边坡稳定性的关联，导致措施针对性不足。FLAC3D 数值模拟软件可精准模拟流体 - 固体耦合作用，量化分析承压水体对边坡稳定性的影响，为防控措施制定提供技术支撑。

2 研究区域地质条件与承压水体特征

2.1 地质条件

研究区域位于我国西南山区，为典型的侵蚀构造地貌，边坡高度 32m，坡度 1:0.7。通过钻孔勘察与地质雷达探测，明确边坡自上而下分为三层：表层为粉质黏土，黏聚力

【作者简介】余敏（1983–），男，中国湖北武汉人，硕士，高级工程师，从事岩土工程研究。

28kPa，内摩擦角 26°，弹性模量 1.8GPa；中层为土岩结合面，由风化岩屑与黏土混合组成，结构松散，黏聚力 15kPa，内摩擦角 18°，弹性模量 1.2GPa；下层为中风化灰岩，黏聚力 45kPa，内摩擦角 35°，弹性模量 3.5GPa。土岩结合面呈倾斜分布，倾角 25°，与边坡坡面夹角 30°，为承压水体主要赋存区域。

2.2 承压水体特征

通过压水试验与水位监测，获取承压水体关键参数：承压水层厚度 2.5m，分布范围为边坡坡脚至坡顶 15m 处；初始水压 0.35MPa，渗透系数 1.2×10^{-4}cm/s；水体主要补给来源为大气降水与周边地下水，雨季水压会升至 0.5MPa 以上，旱季降至 0.2MPa 左右。承压水通过土岩结合面的裂隙渗透，易导致结合面处岩土体软化，降低其抗剪强度，成为边坡失稳的潜在隐患（图 1）。

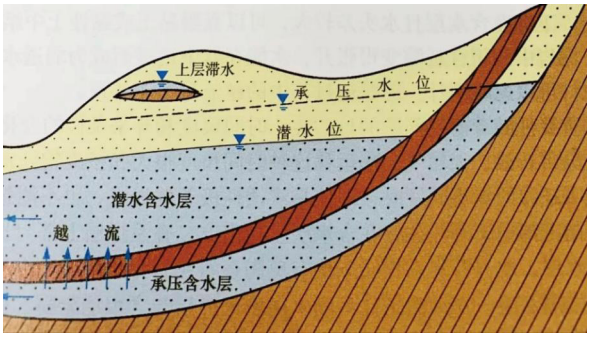


图 1 承压水体

3 FLAC3D 模拟模型构建与参数设置

3.1 模型构建

基于研究区域地质条件，在 FLAC3D 中建立三维边坡模型，模型范围：沿边坡走向长 50m，垂直走向宽 30m，竖直方向高 50m。采用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟岩土体力学行为，承压水体采用 Darcy 定律模拟渗流场，土岩结合面设置为接触面单元，考虑其剪切变形特性 [1]。

3.2 参数设置

根据地质勘察数据，设定模型参数（见表 1）：

在制定模拟方案时，设置 4 组不同承压水压力工况，模拟各工况下边坡的最大水平位移、坡体最大剪应力、土岩结合面剪应力及边坡安全系数，分析水压变化对边坡稳定性的影响规律。

4 模拟结果分析：承压水体对边坡稳定性的影响规律

4.1 对边坡位移的影响

承压水压力变化对边坡位移具有显著调控作用，随水压升高，边坡整体位移呈阶梯式增大趋势且位移集中区域逐渐明确。当水压为 0.2MPa 时，边坡最大水平位移仅 12.3mm，位移主要集中在土岩结合面中上部区域，该区域因岩土体结构松散，在低水压渗透作用下已出现轻微变形，但整体未突破稳定临界状态；随着水压升至 0.4MPa，最大水平位移增至 19.8mm，较 0.2MPa 工况增大 61%，位移范围从结合面中上部向坡顶扩展，坡顶边缘出现微小位移迹象，表明水压升高已导致边坡变形范围扩大；当水压达到 0.6MPa 时，最大水平位移进一步增至 29.5mm，土岩结合面处出现明显位移突变，相邻监测点位移差值达 8.2mm，结合面与上下层岩土体的变形协调性显著下降，边坡局部稳定性开始弱化 [2]；而当水压升至 0.8MPa 时，最大水平位移激增至 38.6mm，较 0.2MPa 工况增大 214%，坡顶区域出现明显拉裂迹象，部分表层粉质黏土因位移过大发生剥落，充分说明高水压已严重破坏边坡岩土体的整体性，边坡濒临失稳。深入分析可知，土岩结合面本身黏聚力与内摩擦角较低、渗透系数远高于上下层岩土体，成为天然的位移薄弱区域，而承压水的渗透作用会持续软化结合面岩土体，进一步降低其抗剪能力，导致该区域位移随水压升高不断累积，最终成为引发边坡整体变形的核心诱因。

表 1FLAC3D 模拟模型参数表

岩土体类型	黏聚力（kPa）	内摩擦角（°）	弹性模量（GPa）	泊松比	渗透系数（cm/s）	密度（kg/m³）
粉质黏土	28	26	1.8	0.30	5.0×10^{-6}	1950
土岩结合面	15	18	1.2	0.35	1.2×10^{-4}	1800
中风化灰岩	45	35	3.5	0.25	8.0×10^{-7}	2200
承压水体（参考）	-	-	-	-	1.2×10^{-4}	1000

4.2 对边坡应力的影响

承压水压力变化对边坡应力分布的影响具有显著规律性，随水压升高，坡体整体剪应力水平持续上升且剪应力集中现象愈发明显。当水压为 0.2MPa 时，坡体最大剪应力为 115kPa，土岩结合面剪应力仅 48kPa，此时应力分布相对均匀，结合面未出现明显应力集中，边坡处于稳定应力状态；随着水压升至 0.4MPa，坡体最大剪应力增至 138kPa，较 0.2MPa 工况升高 20%，土岩结合面剪应力同步升至 62kPa，结合面与上下层岩土体的应力差值开始扩大，应力集中趋势初步显现；当水压达到 0.6MPa 时，坡体最大剪应力进一步升至 165kPa，土岩结合面剪应力达 78kPa，结合面处应力占坡体最大剪应力的比例升至 47%，应力集中效应显著增强，边坡局部应力已接近岩土体抗剪极限；而当水压升至 0.8MPa 时，坡体最大剪应力达到 182kPa，土岩结合面剪应力高达 95kPa，接近结合面 102kPa 的抗剪强度，此时结合面已处于临界剪切破坏状态 [3]。深入分析可知，承压水

压力增大时，坡体孔隙水压力随之升高，根据有效应力原理，岩土体有效应力相应降低，导致坡体内部应力重新分布，而土岩结合面因力学强度低、结构松散，成为应力传递的薄弱环节，剪应力不断向该区域集中；当结合面剪应力超过其抗剪强度时，易引发结合面剪切破坏，进而打破边坡整体应力平衡，诱发边坡滑移失稳。

4.3 对边坡安全系数的影响

承压水压力变化与边坡安全系数呈显著线性负相关关系，随水压持续升高，安全系数稳步下降，边坡稳定状态逐步从安全过渡至濒临失稳。当水压为 0.2MPa 时，边坡安全系数达 1.32，高于 1.25 的工程安全阈值，此时边坡整体处于稳定状态，土岩结合面剪应力未超过抗剪强度，无明显失稳风险；随着水压升至 0.4MPa，安全系数降至 1.23，首次跌破安全阈值，表明边坡稳定储备不足，土岩结合面已出现轻微应力集中，需警惕局部变形加剧；当水压达到 0.6MPa 时，安全系数进一步降至 1.15，边坡进入临界稳定状态，此时土岩结合面剪应力接近抗剪强度，坡体微小扰动（如施工振动、短时暴雨）即可能引发剪切破坏；而当水压升至 0.8MPa 时，安全系数仅为 1.05，边坡已濒临失稳，土岩结合面剪应力大概率超过抗剪强度，坡体易出现整体性滑移 [4]。结合研究区域工程实际，该区域雨季受大气降水补给影响，承压水压力常升至 0.5MPa，通过线性插值计算可知，此时边坡安全系数约为 1.19，虽高于 0.8MPa 工况下的 1.05，但仍低于安全阈值，且雨季雨水渗透会进一步软化土岩结合面岩土体，导致其抗剪强度下降，实际安全系数可能更低，存在较大失稳风险，因此必须针对雨季水压升高的特点，制定针对性防控措施以提升边坡安全系数，保障工程施工安全 [5]。

5 综合防控措施与工程实践验证

5.1 综合防控措施

基于 FLAC3D 模拟揭示的承压水压力与边坡稳定性关联规律，针对土岩结合面易受渗透软化、成为边坡失稳薄弱环节的问题，提出“降压 - 防渗 - 监测”三位一体的综合防控措施。在承压水降压引流方面，核心是通过主动排水控制水压：在土岩结合面沿边坡走向间隔 15m 钻孔设置降压井，井深穿透结合面至中风化灰岩含水层，采用功率 7.5kW 的深井泵持续抽排，将承压水压力稳定控制在 0.3MPa 以内（对应模拟中安全系数 1.28 的安全状态）；同时在坡脚开挖深度 1.2m、宽度 0.8m 的截水沟，配合间距 5m 布设的盲沟（内置透水土工布与碎石），收集坡面雨水与浅层渗水，减少大气降水对承压水层的补给，避免雨季水压异常升高。土岩结合面防渗加固聚焦降低渗透系数、增强力学强度：对结合面表层采用压力 0.8MPa 的水泥浆喷射施工，形成厚度 80mm 的防渗层，封堵表层裂隙；沿结合面走向采用直径 600mm 的高压旋喷桩（水泥浆水灰比 1:1.5，喷射压力 20MPa），按间距 1.5m 布设形成连续防渗帷幕，将结合面渗透系数降低至 5.0×10^{-6}cm/s 以下，大幅减少承压水渗透量，避免结合面岩土体因长期渗水导致黏聚力与内摩擦角进一步下降。动态监测预警旨在实时把控边坡状态：在土岩结合面中上部、坡顶等位移高风险区域，布设 8 个 GNSS 位移监测点与 4 个水压传感器，监测频率根据季节调整。旱季每 24 小时采集 1 次数据，雨季因水压易波动加密至每 6 小时 1 次；设定分级预警阈值：当监测水压≥ 0.4MPa 或单日位移≥ 20mm 时，启动二级响应，加大降压井抽排频率；当单日位移≥ 30mm 时，触发一级响应，立即暂停所有施工，组织人员沿预设横向逃生路线撤离至安全区域，同时关闭降压井周边阀门防止水体倒灌，形成“主动防控 + 实时监测 + 应急响应”的闭环管理，确保边坡长期稳定。

5.2 工程实践验证

将上述措施应用于研究区域边坡工程，实践周期 6 个月：在水压控制效果方面，降压井与防渗帷幕协同作用，雨季承压水压力最高升至 0.32MPa，稳定控制在 0.3MPa 以内，未超过预警阈值；在边坡稳定性方面，边坡最大水平位移稳定在 15mm 以内，坡体最大剪应力 125kPa，土岩结合面剪应力 65kPa，边坡安全系数维持在 1.30 左右，满足安全要求；在事故防控方面，实践期间未发生任何边坡位移超标或渗水异常情况，工程按期完工，验证了防控措施的有效性。

6 结论

本文通过地质勘察与 FLAC3D 模拟，揭示了山区工程土岩结合面承压水体对边坡稳定性的影响规律：随承压水压力从 0.2MPa 升至 0.8MPa，边坡最大水平位移增大 214%，坡体最大剪应力增大 58%，安全系数降低 20%，土岩结合面因力学强度低、易受渗透软化，成为边坡失稳的薄弱环节。提出的“降压 - 防渗 - 监测”综合防控措施，可将承压水压力控制在 0.3MPa 以内，使边坡安全系数提升至 1.30 以上，有效保障边坡稳定。未来研究可进一步考虑承压水体长期渗透对岩土体力学参数的衰减影响，探索智能化监测技术与自动降压系统的联动，实现承压水压力与边坡稳定性的实时智能管控，为山区工程安全建设提供更先进的技术支撑。

参考文献

[1] 袁慕和. X工作面承压水体下开采水害防控安全性评价[J]. 能源与节能,2025(8):129-131.

[2] 张东. 承压水体上采煤综合物探技术及应用[J]. 煤炭与化工,2024,47(11):87-90.

[3] 张玉军,张志巍,肖杰,等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(2):283-291.

[4] 孙厚伟,江军. 矿山井下高承压含水体疏放水钻孔孔壁防护材料研究[J]. 建井技术,2025,46(1):80-84.

[5] 孙双篪. N-JET隔断风井基坑深层承压水的应用[J]. 城市道桥与防洪,2025(5):353-356.