

山区强降雨条件下建筑地基与路桥边坡协同抗滑稳定性研究

尹实之

襄阳路桥建设集团有限公司, 湖北 襄阳 441002

[摘要]山区地形地质条件复杂,强降雨作为诱发建筑地基失稳与路桥边坡滑动的主要自然因素,二者的协同作用会加剧灾害风险,对山区工程安全造成严重威胁。文中基于岩土力学、水文地质学及工程稳定性理论,系统分析强降雨对建筑地基与路桥边坡物理力学性质的影响机制,探究二者协同抗滑的内在关联与作用路径,梳理稳定性评价的核心方法,提出针对性的协同防控技术措施。研究表明,强降雨通过水分入渗改变岩土体含水率、孔隙水压力及抗剪强度,引发地基沉降、不均匀变形与边坡滑动机理的耦合效应;建筑地基与路桥边坡的协同抗滑稳定性取决于岩土体力学参数、渗流场分布及工程结构相互作用关系;合理的排水系统设计、岩土体加固处理及动态监测预警,可有效提升二者协同抗滑能力。

[关键词]山区强降雨;建筑地基;路桥边坡协同;抗滑稳定性

DOI: 10.33142/aem.v8i3.19451

中图分类号: U414.18

文献标识码: A

Research on the Coordinated Anti Sliding Stability of Building Foundations and Road Bridge Slopes under Heavy Rainfall Conditions in Mountainous Areas

YIN Shizhi

Xiangyang Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Xiangyang, Hubei, 441002, China

Abstract: The terrain and geological conditions in mountainous areas are complex, and heavy rainfall is the main natural factor that induces instability of building foundations and sliding of road and bridge slopes. The synergistic effect of the two will exacerbate disaster risks and pose a serious threat to the safety of mountainous engineering. Based on the theories of geotechnical mechanics, hydrogeology, and engineering stability, this article systematically analyzes the impact mechanism of heavy rainfall on the physical and mechanical properties of building foundations and road and bridge slopes, explores the inherent correlation and action path of their collaborative anti sliding, sorts out the core methods of stability evaluation, and proposes targeted collaborative prevention and control technical measures. Research has shown that heavy rainfall changes the moisture content, pore water pressure, and shear strength of rock and soil through water infiltration, leading to coupling effects of foundation settlement, uneven deformation, and slope sliding mechanisms; The synergistic anti sliding stability of building foundations and road and bridge slopes depends on the mechanical parameters of the rock and soil mass, the distribution of seepage fields, and the interaction between engineering structures; Reasonable drainage system design, rock and soil reinforcement treatment, and dynamic monitoring and early warning can effectively enhance the collaborative anti sliding ability of them.

Keywords: heavy rainfall in mountainous areas; building foundation; road bridge slope coordination; anti sliding stability

会改变周边岩土体的应力分布,可能加剧路桥边坡的应力集中;而路桥边坡的滑动变形又会反向作用于建筑地基,导致地基附加应力增加、稳定性下降。这种协同作用在强降雨条件下会被显著放大,形成“地基失稳-边坡滑动”的连锁反应,造成工程结构损毁、交通中断等严重后果,甚至威胁人员生命财产安全。近年来,我国山区因强降雨引发的建筑地基与路桥边坡协同灾害频发,凸显了开展二者协同抗滑稳定性研究的紧迫性与必要性。

1 强降雨对建筑地基与路桥边坡岩土体性质的影响机制

1.1 降雨入渗过程与岩土体水分运移规律

强降雨条件下,雨水在岩土体表面的入渗过程受地形坡度、岩土体渗透性、地表覆盖物等因素影响,主要分为表面径流与内部入渗两个阶段。当降雨强度小于岩土体入渗能力时,雨水主要通过孔隙、裂隙等通道渗入岩土体内部,发生水分运移;当降雨强度超过入渗能力时,多余雨

水形成表面径流，同时可能加剧岩土体表面冲刷。

岩土体内部的水分运移遵循达西定律，水分在孔隙水压力差的作用下从高势能区向低势能区迁移。对于黏性土，由于孔隙细小，水分运移速度较慢，易形成暂态饱和区；对于砂性土、碎石土等渗透性较强的岩土体，水分入渗速度快，饱和区扩展迅速。强降雨持续作用下，岩土体含水率逐渐升高，饱和深度不断增加，进而引发一系列物理力学性质的变化。

1.2 对岩土体物理性质的影响

强降雨入渗使岩土体含水率显著升高，黏性土的含水率可接近或达到饱和状态。岩土体含水率增加后，颗粒间的结合水膜增厚，颗粒间距增大，导致岩土体天然密度降低、孔隙比增大。对于膨胀土，含水率的变化还会引发显著的胀缩变形，进一步破坏岩土体结构完整性。

雨水入渗过程中，岩土体中的可溶性矿物质被溶解，颗粒间的胶结作用减弱；同时，水分的渗透力会冲刷细小颗粒，导致岩土体孔隙结构改变，出现孔隙扩大、裂隙发育等现象。对于风化岩、破碎岩土体，雨水入渗会加剧裂隙扩展，使岩土体从整体结构逐渐转变为松散结构，物理力学性质急剧恶化。

1.3 对岩土体力学性质的影响

抗剪强度是决定岩土体稳定性的核心力学参数，主要由内摩擦角与黏聚力组成。强降雨下，岩土体含水率升高，颗粒间结合水膜增厚，内摩擦力减小；同时，胶结物质的溶解与结构完整性的破坏，导致黏聚力显著下降。对于饱和黏性土，内摩擦角可降低 10%~30%，黏聚力可下降 20%~50%，极大削弱了岩土体的抗滑能力。

建筑地基的承载力与岩土体的抗剪强度、密实度密切相关。强降雨导致岩土体抗剪强度降低、孔隙比增大，地基土的承载力随之下降。当地基承载力低于上部结构荷载时，会引发地基沉降、不均匀变形甚至失稳破坏。此外，孔隙水压力升高会产生浮托力，进一步降低地基土的有效承载力。

岩土体的变形模量反映其抵抗变形的能力，强降雨入渗使岩土体软化，变形模量显著减小，塑性变形能力增强。建筑地基与路桥边坡岩土体变形模量降低后，在荷载作用下易产生过大变形，引发结构开裂、滑移等问题，进而影响二者的协同稳定性。

2 强降雨条件下建筑地基与路桥边坡协同抗滑稳定性评价方法

2.1 评价指标体系构建

岩土体性质指标。包括内摩擦角、黏聚力、含水率、

孔隙比、密实度。内摩擦角与黏聚力反映岩土体的抗剪能力，指标值越高，抗滑稳定性越强；含水率与孔隙比反映岩土体的饱和软化程度，指标值越高，稳定性越差；密实度反映岩土体的结构完整性，密实度越高，稳定性越强。渗流场指标。包括孔隙水压力、渗透系数、饱和深度、排水效率。孔隙水压力越高，有效应力越低，稳定性越差；渗透系数反映岩土体的透水性，渗透系数过大或过小均不利于渗流稳定；饱和深度越深，岩土体软化范围越广，稳定性越差；排水效率反映排水系统的工作效果，效率越高，越能降低孔隙水压力，提升稳定性。应力变形指标。包括地基附加应力、边坡坡脚应力、地基沉降量、边坡水平位移量、不均匀变形系数。地基附加应力与边坡坡脚应力超过岩土体承载力时，易引发局部破坏；地基沉降量与边坡水平位移量越大，变形耦合效应越显著；不均匀变形系数反映变形的均匀性，系数越大，结构开裂与失稳风险越高。工程结构指标。包括地基埋深、边坡坡度、支护结构强度、排水系统完善度。地基埋深不足会降低地基稳定性；边坡坡度过陡会增加滑动力；支护结构强度越高，抗滑能力越强；排水系统完善度越高，越能有效排出雨水，降低孔隙水压力。

2.2 常用稳定性评价方法

极限平衡法。极限平衡法是评价岩土体稳定性的经典方法，核心思路是将岩土体视为刚体，通过分析滑动面的受力平衡，计算稳定性安全系数。对于建筑地基与路桥边坡的协同抗滑稳定性评价，可选取潜在滑动面（如地基与边坡的交界区域、岩土体软弱夹层），计算滑动面上的抗滑力与滑动力，安全系数大于 1 时，认为二者协同抗滑稳定；小于 1 时，认为存在失稳风险。极限平衡法计算简便、适用性强，但未考虑岩土体的变形特性与渗流场的动态变化，精度相对较低。

有限元法。有限元法基于连续介质力学理论，将岩土体划分为有限个单元，通过求解控制方程，模拟岩土体的应力、应变及渗流场分布。该方法可考虑强降雨下岩土体力学参数的动态变化、渗流与应力的耦合效应，准确反映建筑地基与路桥边坡的协同受力与变形特征，计算得到的稳定性安全系数更贴合实际情况。有限元法适用于复杂地形地质条件，但对计算参数的选取要求较高，计算量较大。

层次分析法。层次分析法是一种多指标综合评价方法，通过构建层次结构模型，确定各指标的权重，再结合指标评分，计算综合评价指数，进而判断协同抗滑稳定性等级。该方法可整合定性定量指标，全面考虑各因素对协同稳定性的影响，但指标权重的确定受主观因素影响较大，需

结合专家意见与实际工程经验进行修正。

模糊综合评价法。模糊综合评价法基于模糊数学理论,将评价指标的模糊性转化为定量评价结果。通过建立模糊评价矩阵,结合指标权重,计算综合隶属度,确定协同抗滑稳定性等级。该方法适用于评价指标具有模糊性的场景,可有效处理多因素、多级别评价问题,但评价结果的准确性依赖于模糊矩阵的构建与指标权重的合理性。

2.3 评价方法的选择与应用要点

实际工程中,应根据地形地质条件、工程结构特点及计算精度要求,选择合适的评价方法。对于简单地形、地质条件单一的工程,可采用极限平衡法进行初步评价;对于复杂地形、需考虑渗流与应力耦合效应的工程,建议采用有限元法进行精准计算;对于多因素影响下的综合稳定性评价,可结合层次分析法与模糊综合评价法,提升评价结果的全面性与可靠性。

应用评价方法时,需注意以下要点:一是合理选取计算参数,结合室内试验与现场勘察数据,确定岩土体的物理力学参数、渗流参数,考虑强降雨下参数的动态变化;二是明确潜在滑动面的位置,结合岩土体软弱夹层、结构面分布,确定最危险滑动面;三是考虑工程结构的相互影响,在模型构建中准确模拟建筑地基与路桥边坡的空间布局、荷载传递及渗流连通关系;四是结合降雨强度与持续时间,分阶段评价协同抗滑稳定性,预测不同降雨工况下的失稳风险。

3 建筑地基与路桥边坡协同抗滑稳定性的防控措施

3.1 渗流控制措施

构建“截水沟-排水沟-集水井”的地表排水体系。在路桥边坡顶部、建筑地基周边设置截水沟,拦截地表径流,防止雨水直接冲刷边坡与地基;在边坡坡面、地基周边设置排水沟,将雨水快速疏导至集水井;集水井应定期清理,确保排水通畅。同时,可在地表铺设防渗膜、植被覆盖层,减少雨水入渗量。

对于渗透性较强的岩土体,在建筑地基底部、路桥边坡内部设置排水盲沟、排水渗管,加速地下水分排出。排水盲沟采用碎石、卵石等透水性材料填充,设置坡度以保证排水坡度;排水渗管可采用穿孔塑料管,外包土工布,防止泥沙堵塞。此外,可在边坡坡脚、地基周边设置降水井,通过抽水降低地下水位,减少孔隙水压力。

对于膨胀土、软土等易软化岩土体,在建筑地基与路桥边坡的交界区域设置防渗墙、隔水帷幕,阻隔水相互渗透。防渗墙可采用混凝土防渗墙、高压喷射注浆防渗墙,

隔水帷幕可采用水泥土搅拌桩、钢板桩,确保阻隔效果,防止一侧岩土体饱和后影响另一侧的稳定性。

3.2 岩土体加固措施

针对软弱地基,采用换填法、夯实法、复合地基法等进行加固。换填法将地基表层软弱土替换为级配砂石、灰土等强度较高的材料,提升地基承载力;夯实法通过机械夯实,提高地基土的密实度,减少孔隙比;复合地基法采用 CFG 桩、水泥土搅拌桩等,形成复合地基,增强地基的抗变形与抗滑能力。对于膨胀土地基,还需采取防水、保湿措施,减少含水率变化引发的胀缩变形。

采用锚杆支护、锚索支护、抗滑桩、格构梁等措施加固边坡。锚杆、锚索通过张拉作用,将边坡岩土体与稳定地层连接,提供抗滑拉力;抗滑桩设置在边坡坡脚或滑动面下方,阻挡边坡滑动,承受侧向推力;格构梁与边坡岩土体结合,形成整体结构,分散坡体应力,防止边坡浅层滑动。此外,可对边坡坡面进行喷锚支护、挂网喷射混凝土,增强坡面稳定性,防止雨水冲刷。

针对建筑地基与路桥边坡的交界区域,采取协同加固措施,强化二者的连接与受力协同。例如,在交界区域设置联合抗滑桩,同时承担地基加固与边坡支护的作用;采用土工格栅、土工布等土工合成材料,将地基土与边坡岩土体连接为整体,提升协同抗滑能力;对交界区域的岩土体进行注浆加固,填充孔隙与裂隙,增强岩土体的胶结作用与强度。

3.3 工程结构优化措施

合理确定地基埋深,根据岩土体性质与降雨条件,将地基埋置在稳定地层或地下水位以上,避免强降雨导致地基土软化;优化基础形式,采用条形基础、筏板基础等,增强地基的整体性与抗不均匀变形能力;控制上部结构荷载分布,避免荷载集中引发地基应力叠加,影响边坡稳定性。

合理确定边坡坡度,根据岩土体抗剪强度与降雨条件,调整边坡坡度,减少滑动力;采用分级放坡形式,在分级平台设置排水设施,降低边坡高度与应力集中;优化边坡轮廓线,使边坡受力均匀,避免局部应力过大引发破坏。

建筑地基与路桥边坡的布置应保持合理距离,避免相互影响;对于相邻工程,合理规划施工顺序,先加固稳定区域,再施工受影响区域,减少施工过程中对岩土体稳定性的破坏;优化排水系统、加固结构的空间布局,确保其同时发挥对地基与边坡的防护作用。

3.4 动态监测与预警措施

监测指标包括岩土体含水率、孔隙水压力、应力、变形,以及降雨量、地下水位等。选用合适的监测设备,如

含水率传感器、孔隙水压力计、应力计、位移计、雨量计、水位计等，实现数据的实时采集。

构建“点-线-面”结合的监测网络，在建筑地基与路桥边坡的关键区域（如交界区域、潜在滑动面、加固结构部位）设置监测点，沿边坡坡面、地基周边设置监测线，覆盖整个工程区域形成监测面，确保监测数据的全面性与准确性。

基于监测数据，建立预警阈值体系，分为蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警四个等级。通过数据传输与分析平台，实时处理监测数据，当数据超过预警阈值时，及时发出预警信息，通知相关人员采取应急措施（如停止施工、疏散人员、加固处理等）。同时，建立应急响应机制，确保预警信息能够快速传达、应急措施能够高效实施。

4 结论

本文研究表明，强降雨通过水分入渗加剧岩土体软化，致使孔隙水压力升高、抗剪强度与承载力下降，为建筑地基与路桥边坡协同失稳提供了前提，孔隙水压力升高是核

心影响因素。本文构建的多维度评价指标体系与四类评价方法可精准评估稳定性，而渗流控制、岩土体加固等四大协同防控措施，能有效提升抗滑能力，为山区强降雨区工程安全设计提供理论支撑。

【参考文献】

- [1]张祎.强降雨条件下城市道路网络系统韧性研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2024.
- [2]付鹏,石希,沈杰超,等.强降雨对粉质黏土地区基坑围护结构变形影响的研究[J].建筑结构,2023,53(1):2898-2901.
- [3]殷诚志.房屋建筑地基基础工程施工技术研究[J].地产,2019(24):167-168.
- [4]宋晓光.我国道路桥梁建筑施工中软弱地基的处理方法研究[J].四川水泥,2019(11):77.
- [5]王成.道路桥梁建筑施工中软弱地基的处理方法[J].四川建材,2019,45(9):110-111.

作者简介：尹实之（1985.6—），男，武汉理工大学，土木工程，襄阳路桥建设集团有限公司，项目经理，高级工程师。