



基于综合物探的喀斯特市政边坡失稳机理与综合治理研究

钟帅^{1*}, 于璟晗²

1. 贵州省产业基础设施投资有限公司, 贵阳 550001;

2. 贵州水投宣威工程有限公司, 黔东南州 557604

摘要: 喀斯特地区溶洞、溶蚀裂隙广泛发育, 岩体完整性差, 叠加降雨软化、周边建筑附加荷载作用, 市政运营岩质边坡极易发生滑塌灾害, 现有研究缺乏竣工运营道路边坡滑塌一体化勘察与定量支护设计体系。以贵州喀斯特市政道路滑塌边坡为工程实例, 采用地质雷达联合孔壁电视开展综合精细勘察, 精准确定滑塌深度 6.8~7.2 m, 识别 3.2~3.6 m 泥质充填软弱夹层为滑移控制面; 结合极射赤平投影、极限平衡法、FLAC3D 模型开展边坡稳定性定性分析与定量分析, 剖析岩体破碎、外部超载、降雨入渗耦合致滑机理。结果表明: 降雨使软弱夹层黏聚力下降 40%, 地下水作用下边坡稳定性系数不满足规范要求, 处于欠稳定状态; 构建基于岩体饱和单轴抗压强度 FRK 的锚杆间距计算模型, 提出“清滑体+长锚杆锚固+C30 混凝土面板+立体排水”综合治理方案。治理后边坡整体达到稳定状态, 立体排水系统可降低坡体孔隙水压力 35%。研究形成喀斯特岩质边坡参数化勘察支护成套技术范式, 可为岩溶区同类市政边坡滑塌处置提供标准化技术参考。

关键词: 喀斯特地貌; 市政岩质边坡; 边坡滑塌; 综合物探勘察; 边坡稳定性; 锚杆支护; 排水治理

中图分类号: TU457; P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-13

引言

喀斯特地貌区^[1]地质条件独具特殊性与复杂性。该地区岩体发育有 15% 的溶孔, 且存在 4 组优势结构面 (如产状为 45°/79°的结构面), 致使岩体被切割

为碎块状; 同时, 裂隙水渗透系数较非喀斯特地区高出 3 倍以上, 降雨易引发岩体溶蚀软化。此外, 溶洞广泛分布, 削弱了地层承载能力与结构完整性; 岩石裂隙纵横交错, 影响岩土体自身的稳定性, 加之岩层分布不均、不同岩性岩石的力学性质差异显著, 进一

收稿日期: 2025-03-17; **修回日期:** 2025-04-07

作者简介: *钟帅 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为喀斯特地区工程勘察设计及建设管理。E-mail: 516041965@qq.com (通讯作者)

于璟晗 (1994—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为喀斯特地区工程建设管理。E-mail: 690803073@qq.com

引用格式: 钟帅, 于璟晗. 基于综合物探的喀斯特市政边坡失稳机理与综合治理研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250012.

ZHONG Shuai, YU Jinghan. Research on the Stability Mechanisms and Comprehensive Management Strategies of Karst Municipal Slopes Based on Integrated Geophysical Exploration[J]. Journal of Engineering Studies, DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250012.

步对道路安全构成严重威胁。具体到喀斯特地区市政道路边坡^[2],其稳定性受雨水侵蚀和复杂地质条件的双重影响尤为突出。强降雨对边坡的冲刷会直接降低土体抗剪强度;而溶洞坍塌^[3]、软弱岩层蠕变等则会改变边坡应力状态,导致边坡失稳。与此同时,岩土性质、岩石产状和软弱结构面也会影响边坡稳定性,易引发地质灾害^[4]。近年来,国内外针对喀斯特地区边坡稳定性的研究多聚焦于溶洞探测与边坡监测领域。例如,梁雄竣^[5]提出坡率优化与排水系统协同设计的重要性;王倩等^[6]分析了边坡在多因素耦合作用下的失稳特征,并提出以溶洞溶隙处理、锚杆锚索加固及抗滑桩挡护为主的防护措施体系;孙振伟等^[7]提出基于极限平衡理论的稳定性评估模型与时序位移预测算法,并依托某高速公路路基边坡工程开展现场应用测试。现有研究大多针对未完工或在建边坡,目前缺乏对已竣工市政道路边坡滑塌的系统性分析成果,尤其在运营期边坡稳定性演化规律及滑塌机理方面,仍需进一步深化研究。鉴于此,本文以已竣工GYBEH市政道路边坡滑塌案例^①为研究对象,以下简称GYBEH边坡,针对现有研究的薄弱环节,重点开展滑塌原因分析和支护方案设计工作。通过勘察精准揭示边坡存在的地质缺陷,量化评估滑坡风险,提出针对性治理措施,以期为地区同类工程的设计、施工与运维提供参考。

1 工程概况

GYBEH边坡为市政一类工程,涉及的城市主干道路段路基标准横断面宽度为32 m,采用双向六车道设计;桥梁结构设计荷载等级为城-A级,设计洪水频率按百年一遇标准设计,抗震设防烈度确定为Ⅵ度。

已建道路K11+535~K11+600^②段右边坡是岩石边坡,高度区间为7.9~25.9 m,岩层产状呈切向分布。该边坡于2011年8月按1:0.3的坡率放坡并采用锚喷支护工艺完成初期加固。然而2022年8月,K11+577~K11+590附近出现局部垮塌现象,现需对

滑塌区及受其影响的周边潜在风险区域开展加固处理,具体见图1所示。

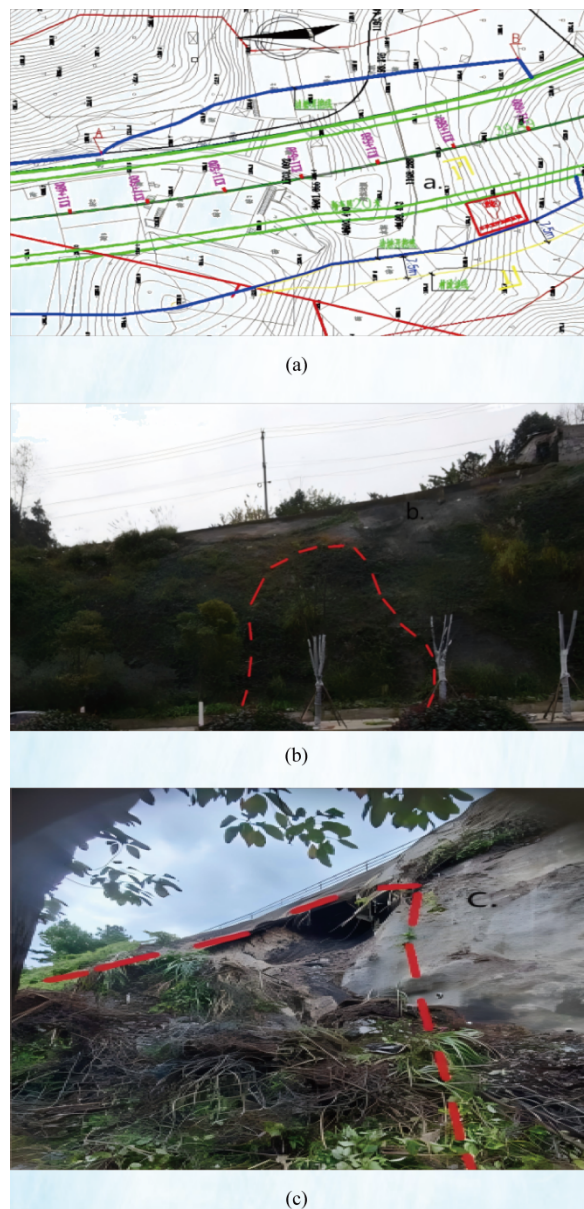


图1 GYBEH边坡垮塌区域平面图(a)、现场全景图(b)和现场局部图(c)

Figure 1 Plan view of the GYBEH slope failure area (a), panoramic site view (b) and partial site view (c)

① 基于遵循学术规范和伦理准则的要求,本文将所涉及的案例名称符号化。

② 在道路工程中,“K11+535~K11+600”是公路桩号的表示方式,K代表“千米”,用于标识公路的里程;11表示距离公路起点11 km的位置;+535表示在11 km的基础上,再向前535 m;+600表示在11公里的基础上,再向前600 m。

2 勘察结果与要点分析

本次滑塌区勘察工作通过充分搜集既有资料、制订勘察方案、编写勘察报告等环节完成，具体勘察要点总结如下。

2.1 边坡滑塌区勘察范围确定

滑塌区范围垂直高约 7.8 m，水平方向最大宽度处约 4.6 m。基于“全面覆盖，精准聚焦”原则勘察范围确定为：以滑塌区最大宽度处为基准，向周边外延 10~20 m 区域，同时，在 K11+400~K11+600 滑坡影响区周边布置补充勘察工作，确保对潜在风险区域的全覆盖。

2.2 工程地质测绘与调查

对边坡滑塌区的工程测绘与调查，重点围绕以下 4 项内容展开。①地形地貌测绘：测量滑塌区及周边区域的地形起伏，绘制等高线地形图，并明确标注坡顶、坡脚、坡面形态变化等关键特征点的位置和高程数据。②地层岩性^[8]调查：按地层沉积顺序对滑塌区地层岩性进行调查，对出露岩石进行取样并开展室内力学试验，重点测定岩石的抗压强度、抗拉强度、弹性模量等力学参数^[9]。③地质构造调查：全面排查滑塌区内及周边区域的褶皱、断层、节理裂隙等构造迹象，分析构造发育特征对边坡稳定性的影响。④水文地质调查，查明滑塌区地下水类型（包括孔隙水、裂隙水或岩溶水等^[10]），确定地下水位埋深和动态变化幅度，为分析地下水对边坡稳定性的作用提供依据。

基于勘察阶段对工程边坡滑塌区开展的针对性测绘与调查工作，绘制了结构面玫瑰花图（图 2）。结构面玫瑰花图的绘制方法如下：对野外测量获取的结构面产状数据进行系统整理与统计分析，再依据标准化规则完成绘制。根据图 2 所示结果可知，滑塌区岩体被多组节理切割，呈现出显著的碎块状结构。为了量化这些结构面的空间分布与结合状态，我们统计了主要结构面的产状数据，具体指标详见表 1。可以看出，该区域主要发育 4 组优势结构面，其中第 1 组结构面（产状 45°∠79°）倾角较陡，极易成为岩体滑移的潜在滑动面，这为后续分析边坡的楔形体破坏模式

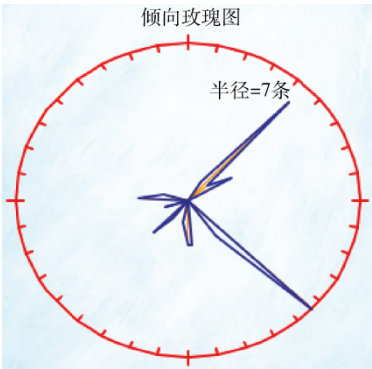


图2 GYBEH 边坡项目的垮塌面结构面玫瑰花图
Figure 2 GYBEH slope Rose diagram of structural planes

表1 GYBEH 边坡硬度结构面产状及结合度
Table 1 GYBEH slope Attitude and bonding degree of hard structural planes

分组	倾向	倾角	优势产状	发育程度	结合度
1	N40-50°E	63°~80°	45°∠79°	较发育	一般
2	S130-140°E	49°~59°	137°∠59°	较发育	一般
3	S181-200°W	39°~72°	185°∠74°	较发育	一般
4	N272-290°	55°~68°	274°∠55°	较发育	一般

注：倾向为岩层等面状构造在空间中向下倾斜的方位；倾角为岩层等面状构造与水平面之间的倾斜夹角；优势产状为区域内出现频率最高、最具代表性的构造产状。发育程度描述地质构造的规模、密度和完整性；结合度表示地质体内部各部分间的连接紧密程度。

提供了地质依据。

2.3 合理布置勘探线

边坡工程勘察规划阶段以边坡岩土性质和滑塌范围为依据确定关键参数^[11]。GYBEH 边坡勘察等级确定为二级，勘探线间距在 20~30 m，勘探点间距为 15~20 m，控制性勘探点占总勘察点数量的 1/3，控制性勘探点进入滑面以下地层的深度不小于 5.0 m，一般性勘探点则不小于 3.0 m。

2.4 创新勘察手段综合应用

2.4.1 地质雷达探测技术 在 GYBEH 边坡滑塌区域勘察工作中，采用了物探领域的电法勘探技术^[12]，沿边坡走向开展连续扫描作业。扫描范围不仅包含滑塌区主体，还向其两侧外延 33 m，总扫描长度达 70 m。电法勘探成果（图 3）直观展示了利用地质雷达

技术探测到的地下介质电性差异。在雷达剖面中,滑塌松散体通常表现为杂乱、不连续的波形反射特征。从图3(a)和(b)中可以清晰地识别出,在测线35~41 m区间,雷达波同相轴发生严重扭曲并伴有高频衰减,这正是地下存在大规模破碎带和溶蚀空洞的典型响应,该异常区即为滑塌的主体范围,其垂直深度经解译确定为6.8~7.2 m,这一数据直接修正了初期勘察对地下溶蚀发育程度的低估。

2.4.2 孔壁电视 在钻孔施工完成后,将孔内电视探测设备通过电缆缓慢下放至孔内,自孔底位置开始向上进行连续拍摄。如图4所示,在钻孔深度3.2~3.6 m区间,孔壁影像呈现出明显的颜色和纹理变化(通常表现为深色、泥质充填的裂隙带)。这一视觉证据直接证实了表2中提到的碳质泥岩软弱夹层的存在。该夹层的存在是导致岩体抗剪强度骤降的关键因素,也是后续支护设计中必须重点锚固的对象。

2.4.3 结合地质雷达探测、孔壁电视观测与钻探取样的综合勘察 鉴于单一勘察手段存在技术局限性,为提升滑塌区勘察工作的准确性与可靠性,实际工作中采用综合勘察方法,将地质雷达探测、孔壁电视观测与钻探取样手段相结合。具体实施流程如下:首先通过地质雷达探测技术确定滑塌区的分布范围与位置;随后针对雷达圈定的重点区域开展物探工作;再选取具有代表性的位置进行钻探作业,同步采用孔壁电视进行验证;钻探过程中同步采集岩芯样本,通过观察

滑塌区地质情况、测试岩芯物理力学性质以获取岩土参数。勘察后期通过对比钻探实测数据与物探结果,对物探结果进行修正与完善,建立更贴合实际地质条件的滑塌区模型。针对喀斯特地貌区特有的隐蔽溶蚀缺陷勘察,该综合方法具有显著优势:采用地质雷达探测6.8~7.2 m深度溶蚀带,结合孔壁电视识别3.2~3.6 m泥质充填软弱夹层,相较于普通岩质边坡的均质岩体勘察模式,更能大幅提升勘察成果的针对性与可靠性。

2.5 地层结构

滑塌区地层为下统大冶组(T1d)灰岩,呈灰色,以薄中厚层为主,构造类型为隐晶质细粒结构。该地层节理裂隙发育程度较高,岩质较硬,局部可见少量风解石脉和方解石脉。溶孔数量较少,孔径区间为0.2~3 cm,内有少量方解石晶体,经统计,溶孔在岩体中占比约15%。从风化程度来看,岩体普遍呈中等强风化状态,多表现为碎块状、块状;岩体完整性多呈较完整破碎状态,仅局部区域较好。试验测得该灰岩饱和单轴抗压强度标准值 $FRK=40.7\text{ MPa}$,属较硬岩范畴。结合岩体完整性、风化程度及强度特征综合判定,勘察线路区段内岩体基本质量等级主要为Ⅲ、Ⅳ级,具体分布情况详见图5。该图直观展示了单纯依靠表层锚喷支护难以维持长期稳定的原因,需采用深入稳定岩体的锚杆进行加固。

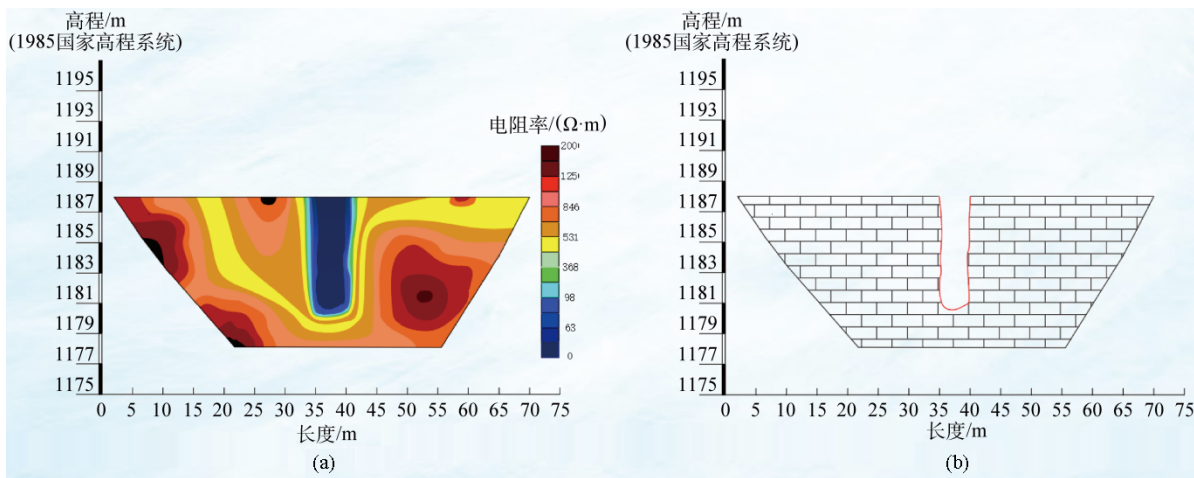


图3 GYBEH边坡电法勘探成果的电法实测图(a)和溶洞推测图(b)

Figure 3 Electrical survey results of the GYBEH slope, showing (a) actual electrical measurement maps and (b) proposed cave distribution maps

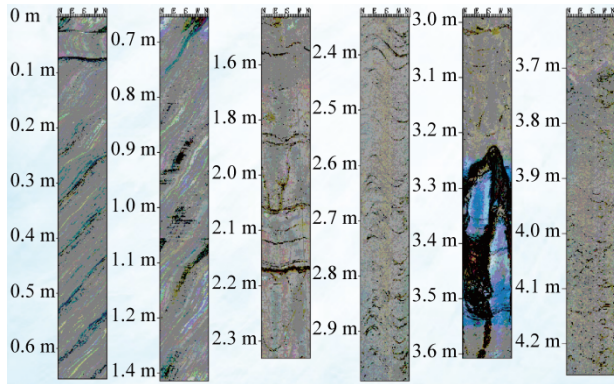


图4 GYBEH边坡钻孔电视成果图
Figure 4 GYBEH slope Result map of borehole television

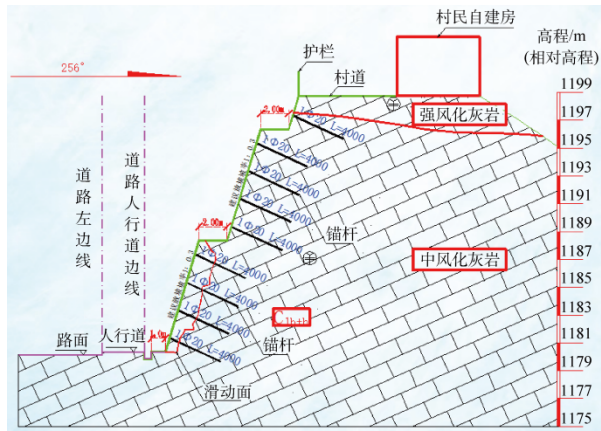


图5 原支护边坡地层图
Figure 5 Rock stratum diagram of the original slope

2.6 岩土力学参数取值

根据GYBEH边坡滑塌区工程地质调绘、工程地质勘察、室内试验结果及相关工程经验,经综合分析,确定GYBEH边坡工程各层岩土物理力学参数,详见表2。

3 边坡稳定性分析评价

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[13]的相关规定, GYBEH边坡类型属土岩组合边坡。结合边坡勘察成果,通过系统梳理边坡各岩土层的物理力学参数^[14],对边坡展开稳定性分析与评价。岩土组合边坡潜在的破坏模式可分为沿结构面发生直线破坏^[15]和楔形体破坏^[16]两种。现对这两种模式进行定性及定量分析。

表2 GYBEH边坡工程岩土层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the geotechnical layers for the GYBEH slope engineering project

岩土层	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	FRK/MPa
强风化灰岩	26.3	50.0	18	—
中风化灰岩	27.7	90.0	27	500
碳质泥岩	21.0	23.0	12	—
岩体层面	—	90.0	27	—

3.1 定性分析

目前边坡稳定性分析中常用的方法主要有4种^[17]: ①工程地质类比法是将已有的边坡研究与设计经验,合理应用于条件相似的新边坡研究设计中。②变形迹象判断法基于边坡已显现的变形迹象,如裂缝、位移、沉降等,判断分析边坡的稳定状态。③坡率允许法依据边坡所处区域的岩土性质、地质条件等因素,确定允许的坡率区间。④极射赤平投影法借助赤平投影的几何原理,通过作图的方式直观地反映出边坡破坏的边界条件,确定可能失稳的岩土体的规模、形态及可能发生变形滑动的方向。

《工程地质手册(第五版)》^[18]推荐在边坡稳定性分析中采用极射赤平投影法。因此,本文根据边坡的坡面、坡顶面、结构面及其他相关要素,绘制完成了极射赤平投影图,见图6。如图6所示,将实测的边坡坡面产状与四组优势结构面产状(特别是倾向NE、倾角陡立的第1组结构面)投射至同一半球。从图中可以直观地看出,结构面的交线(或赤平投影的交点)位于坡面大圆的内部,且其投影走向与边坡走向近似平行。这一几何关系明确揭示了边坡的失稳机理:被多组节理裂隙切割的岩体,在遭遇降雨软化后,其抗剪强度骤降。此时,结构面与坡面共同构成了一个“滑动楔形体”。图6清晰地显示了该楔形体的滑动方向指向临空的坡脚,这与现场勘察发现的滑塌痕迹(图1)完全吻合。因此,判定该边坡的破坏模式属于典型的平面滑动与楔形体破坏的复合模式。

GYBEH边坡的潜在破坏模式主要表现为沿该组节理裂隙面发生剪切滑动破坏或整体滑塌。当遭遇大暴雨等不利水文条件时,其可能的破坏趋势为:沿该组节理裂隙面,向坡脚临空面发生剪切滑移破坏或局

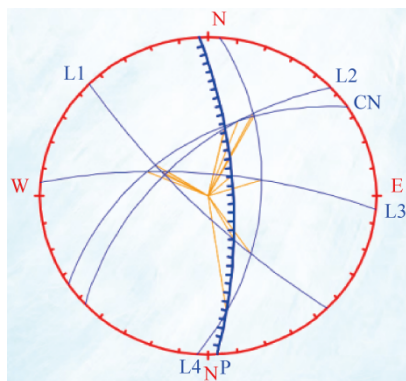


图6 GYBEH边坡极射赤平投影图

Figure 6 GYBEH slope Stereographic projection diagram

部崩落；局部形成楔形体，在楔形体遭破坏后，易发生滑移破坏或局部崩落。

3.2 定量分析法

为更精准地评估边坡稳定状态，采用直线滑动法^[19]、楔形体破坏法^[20]、FLAC3D遍布节理模型^[21]3种经典计算模型开展稳定性计算；相关详细数据及分析结论详见边坡稳定性分析评价表（表3）。对比分析表中数据可以发现一个显著规律：在有地下水的工况下（模拟暴雨情景），无论是采用直线滑动法还是楔形体破坏法，计算出的稳定性系数均低于安全阈值，处于“欠稳定”状态；而“无地下水”工况下则表现为稳定。这一数据对比强有力地证明了水是诱发本次滑塌的决定性外在因素，这也解释了为何滑塌发生在2022年8月的雨季。

之后，按照不同参数范围与对应分析方法的匹配关系，对边坡稳定性分析的核心要素进行归纳总结，具体见表4所示。

3.3 滑塌成因分析

（1）地质因素。滑塌区为下统大冶组灰岩，岩体存在多组节理裂隙，有溶孔和方解石脉，岩体风化程度介于中等至强风化之间，岩体完整性差异较大，多呈较完整~破碎状分布。同时，区域内存在4组较发育的结构面，破坏了岩体的整体性。

（2）周边规划影响。道路周边规划建设农家乐和民房，其产生的建筑自重、人员和车辆荷载，会改变边坡

表3 GYBEH边坡稳定性分析评价表

Table 3 GYBEH slope evaluation table for slope stability analysis

工况	计算方法	稳定性系数	安全系数	稳定状态
有地下水	直线滑动法	1.3	1.23	欠稳定
无地下水		1.3	2.11	稳定
有地下水	FLAC3D遍布节理模型	1.3	1.14	欠稳定
无地下水		1.3	2.33	稳定
有地下水	楔形体破坏法	1.3	0.93	欠稳定
无地下水		1.3	1.41	稳定

注：破坏模式为结构面滑动，接触面为边坡结构面。

表4 地质参数与分析方法对应表

Table 4 Corresponding table of geological parameters and analysis methods

参数类型	临界值	适用分析方法	依据
岩体单轴抗压强度（FRK）	<30 MPa	楔形体破坏法与直线滑动法	中风化灰岩 FRK=40.7 MPa
结构面倾角	>45°	赤平投影重点分析滑移	第1组结构面 79°倾角
内摩擦角	<20°	FLAC3D遍布节理模型	碳质泥岩内摩擦角 12°

受力平衡状态，超出原有支护结构的承载极限，引发滑塌。

（3）勘察局限。勘察工作虽按规范执行，但受限于勘探点间距，难以全面揭示复杂的地质条件，如影响边坡稳定性的因素被遗漏，前期设计与施工未能充分考虑隐患，将为滑塌埋下风险。

（4）降雨因素。边坡的节理裂隙和软弱夹层区域排水条件较差，降雨后雨水冲刷、浸泡，会降低岩土体抗剪强度，增加下滑力，打破边坡力学平衡，直接导致滑塌。经检测，3.2~3.6 m深处的泥质夹层的黏聚力，因降雨影响降低40%，即从23 kPa降至13.8 kPa。

基于上述滑塌成因分析，可以建立“参数-方法”对应逻辑，详见表5。

4 滑塌区支护方案的选择与设计

4.1 滑塌区支护方案选择

4.1.1 方案选择 K11+535~K11+600段右侧坡体为岩质边坡，其特点为岩层切向分布、节理裂隙密集且含有软弱夹层。先前因降雨导致排水不畅，已发生局

表5 GYBEH边坡滑塌成因分析表
Table 5 GYBEH slope Analysis table of slope collapse causes

参数类型	临界值	适用分析方法/支护参数	工程实例依据
岩体单轴抗压强度 (FRK)	<30 MPa	楔形体破坏法优先, 锚杆间距≤1.5 m	FRK=40.7 MPa 采用直线滑动法
滑塌深度	>5 m	锚杆长度=深度×(1.3~1.5) (如6.8 m→10.2 m)	设计锚杆长 10~12 m, 深入稳定岩体 5 m
内摩擦角 φ	<20°	FLAC3D 遍布节理模型, 加密锚杆间距至 1.2 m	碳质泥岩 φ=12° 时采用该模型
裂隙水压力	>50 kPa	泄水孔间距 2 m+反滤层 (防溶蚀堵塞)	实测孔压 65 kPa 时布置间距 2 m 泄水孔

部垮塌。为应对此情况, 决定首先清除滑块及松散层。锚杆选用φ25螺纹钢, 长度9~12 m (基于滑塌深度1.5倍计算), 间距为2.0 m (通过公式 $S=1.2\times FRK^{1/2}$ 计算得出, 当FRK=40.7 MPa时, 计算值为7.6 m), 并依据工程经验进行适当调整。C30混凝土板厚度设为200 mm, 原槽浇筑以适应中风化灰岩 (FRK=40.7 MPa) 的支护强度。锚杆深入岩体, 利用锚固力将不稳定表层与下部稳定岩体连接起来; 混凝土防护板则直接覆盖坡面, 以抵抗岩体的变形破坏。

4.1.2 排水系统设计 水是导致边坡失稳的关键因素, 因此在支护范围内设置泄水孔, 用于排出坡体内部积水, 以降低孔隙水压力, 进而提升岩土体的抗剪强度。坡顶设置截水挡板与排水沟, 通过挡水与排水措施, 减少水体对边坡的不利影响。

4.1.3 材料与施工要求 防护板采用C30混凝土原槽浇筑, 该材料强度高、耐久性优良。原槽浇筑工艺可使混凝土与坡面结合更为紧密, 从而提升支护结构的整体性与稳定性。考虑到喀斯特地区裂隙水渗透能力较强, 将泄水孔间距调整为2 m; 同时在坡顶截水沟内增设反滤层, 以防止溶蚀物造成沟体堵塞, 具体布置详见支护图7。图7详细展示了“清方+锚杆+混凝土板+排水”的综合治理方案。图中可见, 锚杆 (φ25螺纹钢) 呈梅花状布置, 其长度 (9~12 m) 和间

距 (2.0 m) 的设计依据是表5中基于岩体强度FRK=40.7 MPa计算出的参数。特别值得注意的是, 图7中密集分布的间距2 m的泄水孔和坡顶截水沟构成了“立体排水系统”, 这正是针对地下水及软弱夹层问题 (图3、图4) 所采取的针对性措施, 可从根本上降低孔隙水压力, 防止类似滑塌再次发生。

4.2 治理成果

(1) 边坡稳定性显著提升: 清除坡体滑块和松散岩层, 直接减小下滑荷载, 锚杆深入岩体、混凝土防护板加固及排水系统完善, 可增强抗滑力和整体稳定性。经直线滑动法等计算验证, 支护完成后不同工况下的稳定性系数和安全系数均满足规范要求, 边坡状态从欠稳定变为稳定, 从理论上证明支护方案有效。

(2) 实际效果显著: 短期内, 实施支护方案后滑塌区没再出现新的垮塌迹象, 道路恢复正常通行, 说明方案有一定成效。但长期效果还需监测边坡位移、地下水位变化等进一步评估。治理成果见图8所示。

5 总结与建议

(1) 喀斯特地区地质复杂, 雨水侵蚀作用强, 市政道路边坡^[22]的稳定性与防护工作极为关键。本次GYBEH边坡事件, 虽无人员伤亡, 但导致交通拥堵与直接经济损失。涉事滑塌区高约7.8 m、宽约4.6 m。勘察范围为滑塌区最大宽度外延10~20 m, 结合专业设备及综合勘察手段, 在K11+400~K11+600路段记录岩石产状、观察软弱结构面, 为滑塌区的范围确定积累了宝贵经验^[23]。

(2) GYBEH道路是连通两大行政区域的交通要道, 日常车流量大。周边后续规划有农家乐和民房建设, 这会明显改变边坡受力情况。边坡支护设计^[24]时, 要充分预估道路红线内外合理延伸范围内的潜在荷载增量, 包括建筑自重、人员聚集、车辆停放产生的静/动态荷载, 精确量化荷载数值, 确保边坡支护方案适配且稳定, 更能应对周边环境变化带来的力学挑战。

(3) 坡顶增建建筑、填堵截水沟等行为, 易破坏既有边坡支护体系的稳定性。若相关单位有坡顶及周

本文依托实际滑塌工程, 揭示岩溶边坡失稳机理, 建立精准勘察与定量支护设计方法, 为同类边坡防灾治理提供工程参考。相关结论如下。

(1) 针对喀斯特地区运营期市政灰岩质边坡滑塌地质隐蔽、多因素耦合失稳的工程难题, 构建了地质雷达全域扫描定位溶蚀破碎带+孔壁电视精细化识别泥质软弱夹层+钻探取样获取岩体力学参数+极射赤平投影判定破坏模式的一体化综合勘察技术体系。依托该体系探明边坡滑塌主体深度 6.8~7.2 m, 锁定 3.2~3.6 m 深度泥质充填软弱夹层为关键滑移控制界面, 识别出 4 组陡倾优势节理切割形成的楔形体复合滑动破坏模式, 弥补了传统单一钻探手段难以揭示喀斯特地下隐蔽溶蚀缺陷的勘察短板, 可为同类岩溶边坡灾源精准探测提供成套技术路径。

(2) 厘清喀斯特市政边坡滑塌多诱因耦合作用机理: 岩体溶蚀碎裂、多组陡倾结构面发育为内在地质基础; 坡顶周边民房、农家乐新增建筑荷载形成附加应力超载, 突破原有锚喷支护承载阈值; 雨季降雨入渗浸润泥质软弱夹层, 使夹层黏聚力衰减 40%、孔隙水压力显著抬升, 大幅降低岩体抗剪强度, 是触发边坡局部滑塌的核心外部诱因。多工况稳定性定量计算证实, 无地下水条件下边坡整体稳定, 暴雨充水工况下稳定性系数低于规范安全阈值, 呈现欠稳定状态, 明确水致弱化是岩溶岩质边坡失稳的主控因素。

(2) 建立以岩体饱和单轴抗压强度为核心控制指标的锚杆间距量化设计模型, 实现岩溶边坡支护由传统经验取值向地质参数定量驱动设计转变。结合本工

程灰岩计算得到理论锚杆间距 7.6 m, 综合岩溶裂隙发育、软弱夹层分布特征优化调整为 2.0 m 梅花形布设; 配套形成“清挖滑塌松散体+ $\phi 25$ 螺纹钢锚杆(总长 9~12 m, 锚固段深入稳定中风化灰岩不少于 5 m)+200 mm 厚 C30 混凝土面板坡面封闭+坡顶截水沟+坡面 2 m 间距带反滤层泄水孔”综合治理方案。工程应用表明, 立体排水系统可有效降低坡体孔隙水压力 35%, 治理后边坡各工况稳定性系数均满足规范要求, 边坡由欠稳定状态转变为稳定状态, 现场无新增变形垮塌病害, 道路通行安全得到长效保障。

(3) 本文形成的喀斯特地质参数主导支护设计范式具备较强工程普适性, 可推广至岩体单轴抗压强度 $FRK < 30$ m 或优势结构面倾角大于 45° 的非喀斯特破碎岩质边坡, 仅需依据岩体力学指标适度加密锚杆间距至 1.5~2.0 m 即可完成技术适配, 为全国岩溶及破碎岩质市政边坡滑塌治理提供可复制、量化的成套工程参考方案。

本研究仍存在一定局限性: 仅完成滑塌治理短期稳定效果验证, 缺少边坡长期风化、交通循环动荷载、逐年极端降雨工况下的连续监测数据支撑; 针对喀斯特溶洞、多层软弱夹层交叉发育场景的精细化稳定性预测模型精度仍有待提升。后续应搭建边坡自动化长期监测体系, 融合位移、地下水位、孔隙水压力多源监测大数据, 构建岩溶边坡实时风险预警与动态评估模型, 进一步完善喀斯特地区市政边坡全生命周期安全防控技术体系。

参考文献

- [1] 李新明, 张春龙, 桂磊. 喀斯特地貌岩溶发育区隧道施工安全技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(S2): 74-79.
Li X M, Zhang C L, Gui L. Study on safety technology of tunnel construction in karst landform and karst development area[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(S2): 74-79.
- [2] 牟云贞, 张勇, 仇文岗, 等. 复杂岩溶区桩基钻探的溶洞梯度角判别与可靠性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2026, 48(4): 80-88.
Mou Y Z, Zhang Y, Zhang W G, et al. Gradient angle discrimination of karst cave and reliability analysis of pile foundation drilling in complex karst areas[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2026, 48(4): 80-88.
- [3] 吴明明. 水利工程中岩土工程勘察技术应用研究[J]. 工程机械与维修, 2024(5): 88-90.
Wu M M. Study on application of geotechnical engineering survey technology in water conservancy project[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2024(5): 88-90.
- [4] 林明清, 王石腾. 高边坡发生滑塌的灾害分析及治理[J]. 企业技术开发, 2014, 33(24): 81-82.

- Lin M Q, Wang S T. Disaster analysis and treatment of high slope collapse[J]. Technological Development of Enterprise, 2014, 33(24): 81-82.
- [5] 梁雄竣. 市政道路路堑边坡设计分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(16): 191-193.
Liang X J. Analysis on the design of municipal road cutting slope[J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(16): 191-193.
- [6] 王倩, 邢闯峰. 岩溶区边坡稳定性多因素作用机理与防护措施[J]. 交通世界, 2026(14): 65-67.
Wang Q, Xing C F. Mechanism of multi-factor action on slope stability in karst areas and protective measures[J]. Transport World, 2026 (14): 65-67.
- [7] 孙振伟, 张磊, 师文斐. 智能边坡监测技术在交通项目路基施工中的应用[J]. 交通科技与管理, 2026, 7(10): 13-15.
Sun Z W, Zhang L, Shi W F. Application of intelligent slope monitoring technology in subgrade construction of transportation projects[J]. Transportation Science, Technology and Management, 2026, 7(10): 13-15.
- [8] 张平松, 刘畅, 姚多喜. 岩石试件受载破裂过程地球物理参数测试研究进展和展望[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 426-446.
Zhang P S, Liu C, Yao D X. Progress and prospects of testing geophysical parameters during loaded rupture of rock specimens[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 426-446.
- [9] 庞皓华. 边坡滑坡工程治理的地质勘查与防治措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(21): 176-178.
Pang H H. Geological exploration and prevention measures of slope landslide engineering treatment[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2024(21): 176-178.
- [10] 易连兴, 李瑜. 岩溶及水动力对鸡尾山滑坡影响作用研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 583-592.
Yi L X, Li Y. Effect analysis of karst and hydrodynamics on Jiweishan landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 583-592.
- [11] 林宜超. 探析边坡工程勘探点布置要点[J]. 福建建材, 2021(8): 65-67.
Lin Y C. Discussion on the key points of exploration point layout in slope engineering[J]. Fujian Building Materials, 2021(8): 65-67.
- [12] 师文豪, 吴伊锋, 张永辉, 等. 基于土石混合体随机重构的路基空洞地质雷达响应特征[J]. 岩土工程学报, 2026, 48(1): 96-104.
Shi W H, Wu Y F, Zhang Y H, et al. Response characteristics of ground-penetrating radar for subgrade void based on random reconstruction of soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2026, 48(1): 96-104.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [14] 孙杰涛, 李海枫. 基于安全稳定性率的岩质边坡稳定问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2): 3872-3884.
Sun J T, Li H F. Study on stability of rock slope based on safety and stability rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S2): 3872-3884.
- [15] 杜毅, 晏鄂川, 蔡静森, 等. 直线型复合式滑坡渐进破坏力学模型及稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 490-502.
Du Y, Yan E C, Cai J S, et al. A mechanical model of progressive failure of linear complex landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 490-502.
- [16] 陈恒宇, 尹永明, 陈钢华, 等. 某石灰岩矿山典型边坡稳定性分析研究[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S1): 205-210.
Chen H Y, Yin Y M, Chen G H, et al. Study on stability analysis of typical slope of a limestone mine[J]. Mineral Exploration, 2024, 15 (S1): 205-210.
- [17] 张华. 工程地质类比法在边坡稳定性评价中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 456-463.
Zhang H. Discussion on the application of the engineering geological analogy method in slope stability evaluation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 456-463.
- [18] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Editorial Board of the Engineering Geology Handbook. Engineering Geology Handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [19] 朱维伟, 李嘉文. 按直线滑动计算边坡稳定系数的合理黏聚力范围[J]. 昆明学院学报, 2014, 36(6): 69-71.
Zhu W W, Li J W. Reasonable cohesion range of slope stability factor calculating using linear sliding method[J]. Journal of Kunming University, 2014, 36(6): 69-71.
- [20] 刘强, 胡斌, 蒋海飞, 等. 改进的边坡楔形体破坏稳定性分析方法[J]. 人民长江, 2013, 44(22): 69-71, 78.
Liu Q, Hu B, Jiang H F, et al. Improved qualitative analysis method on wedge failure of slope[J]. Yangtze River, 2013, 44(22): 69-71, 78.

- [21] 罗福君, 周晓军. 基于遍布节理模型的顺层边坡稳定性影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(7): 141-146.
Luo F J, Zhou X J. Analysis of influence factors on the stability of bedding slope based on joint model[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(7): 141-146.
- [22] 邵承齐. 喀斯特地貌石漠化治理及边坡覆绿的浇灌问题: 大理海东新区中心片区道路绿化及边坡治理工程[J]. 住宅与房地产, 2016(24): 232.
Shao C Q. Treatment of karst landform rocky desertification and irrigation of slope greening: Road greening and slope treatment project in the central area of Haidong new district, Dali[J]. Housing and Real Estate, 2016(24): 232.
- [23] 乔静, 许江杰. 某市政道路边坡支护设计实践及施工监测分析[J]. 中国设备工程, 2020(8): 215-216.
Qiao J, Xu J J. Design practice and construction monitoring analysis of a municipal road slope support[J]. China Plant Engineering, 2020(8): 215-216.
- [24] 张鹏, 王振宇, 时冬冬. 滑坡防治工程中采取针对性措施进行精准治理的实践探索[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(10): 138-140.
Zhang P, Wang Z Y, Shi D D. Practical exploration of taking targeted measures for precise treatment in landslide prevention and control engineering[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(10): 138-140.
- [25] 张云涛. 道路勘察设计质量管理研究[J]. 黑龙江交通科技, 2013, 36(2): 50, 52.
Zhang Y T. Study on quality management of road survey and design[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 36(2): 50, 52.
- [26] 李秉思. 降雨条件下路基边坡稳定性分析[J]. 交通世界, 2024(34): 97-99.
Li B S. Stability analysis of subgrade slope under rainfall conditions[J]. TranspoWorld, 2024(34): 97-99.
- [27] 胡大玲, 龙本力. 贵州喀斯特地区地质灾害防治对策研究[J]. 中小企业管理与科技, 2018(14): 68-69.
Hu D L, Long B L. Research on the prevention and treatment countermeasures of the geologic hazard in Guizhou karst area[J]. Management & Technology of SME, 2018(14): 68-69.
- [28] 吴飞宇, 潘国尧. 责任重于泰山: 交通运输部道路运输司司长李刚谈安全生产[J]. 运输经理世界, 2011(10): 54-55.
Wu F Y, Pan G Y. Responsibility is more important than mount Tai: Li Gang, director of the road transportation department of the ministry of transport, talks about safety in production[J]. Transport Business China, 2011(10): 54-55.
- [29] 刘帅. 岩土工程勘察边坡监测方案设计及其稳定性分析研究[J]. 价值工程, 2025, 44(3): 147-149.
Liu S. Study on monitoring scheme design and stability analysis of geotechnical investigation slope[J]. Value Engineering, 2025, 44(3): 147-149.
- [30] 段荣丰, 毕东河, 高杰, 等. 公路路基边坡稳定性评价及防治研究[C]//2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册). 北京, 2023: 321-324.
Duan R F, Bi D H, Gao J, et al. Stability evaluation and prevention and control of highway subgrade slopes[C]//Proceedings of the 2023 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume II). Beijing, 2023: 321-324.
- [31] 吴若冰, 张腾. 水利工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 治淮, 2025(3): 47-48.
Wu R B, Zhang T. Application of slope excavation and support technology in water conservancy project construction[J]. Zhihuai, 2025(3): 47-48.

Research on the Stability Mechanisms and Comprehensive Management Strategies of Karst Municipal Slopes Based on Integrated Geophysical Exploration

ZHONG Shuai^{1*}, YU Jinghan²

1. Guizhou Industrial Infrastructure Investment Co., Ltd. Guiyang 550001, China;

2. Guizhou Water Investment (Group) Xuanwei Engineering Co., Ltd. Qiandongnan Prefecture 557604, China

Highlights

Revealed complex causes of karst slope collapse: dissolved rock fragmentation, surrounding overload, and rainfall-induced interlayer softening.

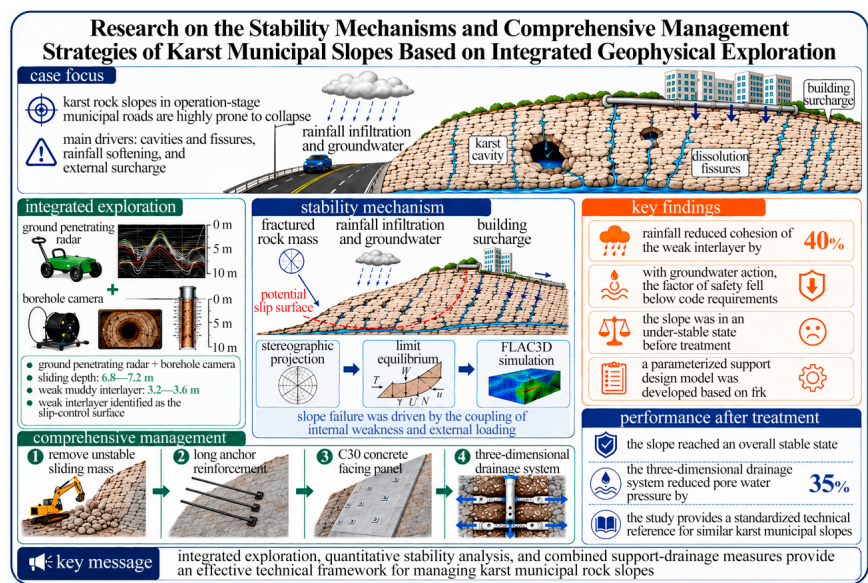
Innovated integrated investigation with GPR and borehole televiewer to locate 6.8~7.2 m collapse depth precisely.

Established anchor spacing model $S = 1.2 (FRK)^{1/2}$ based on $FRK = 40.7 \text{ MPa}$ for parameterized design.

Designed 2 m drainage holes with filter intercepting ditches.

Defined application boundaries for non-karst areas ($FRK < 30 \text{ MPa}$ or structural plane dip $> 45^\circ$) to expand method generality.

Graphical Abstract



Abstract: Municipal slopes in karst areas have become a key bottleneck restricting urban development due to the development of karst caves, dense joints, obvious dissolution and outstanding stability problems. Slope collapse poses a serious threat to municipal facilities and public safety, so it is urgent to find out the causes of the collapse and put forward a scientific treatment plan. This study takes a municipal road slope in karst area as the object, aiming at revealing its instability mechanism and establishing a support design paradigm driven by karst geological parameters.

Ground penetrating radar and borehole panoramic imager are used to carry out fine survey. The detection range extends 10-20 m from the collapse area with a height of 7.8 m and a width of 4.6 m, the distance between survey lines is 20-30 m, and the drilling depth of control points is not less than 5 m below the potential sliding surface. On this basis, the stereographic projection method is used for qualitative evaluation, supplemented by plane sliding method, wedge failure method and FLAC3D joint model for quantitative calculation, and the mechanical parameters of rock mass are comprehensively determined ($FRK = 40.7 \text{ MPa}$). Based on this, the comprehensive treatment scheme of "sliding body removal + $\phi 25$ anchor reinforcement (length 9~12 m, spacing calculated by $S = 1.2 (FRK)^{0.5}$) + C30 concrete panel + stereo drainage system (spacing 2m drainage holes)" is put forward.

The research results show that the causes of collapse can be summarized in three aspects: (1) geological factors-rock mass fragmentation, with four groups of structural planes; (2) External load-the overload of surrounding buildings exceeds the bearing capacity of the original support; (3) Influence of rainfall, the cohesion decreases by 40% (from 23 kPa to 13.8 kPa). In terms of investigation, the ground penetrating radar accurately measured the collapse depth of 6.8~7.2m, and the borehole panoramic imager effectively revealed the spatial distribution of argillaceous interlayer. In terms of design, the calculation model of anchor

spacing optimizes the theoretical spacing from 7.6m to 2.0m actually adopted. After treatment, the stability of the slope is improved from unstable state to stable state.

(1) An integrated investigation system (GPR, borehole televiewer, drilling, and stereographic projection) was established for karst slopes, identifying a 6.8—7.2 m collapse depth, a 3.2—3.6 m weak interlayer as the critical slip surface, and four steep joint sets causing wedge failures. (2) The collapse was triggered by rainfall reducing interlayer cohesion by 40% and increasing pore pressure, compounded by surrounding building loads. Based on rock strength ($FRK=40.7$ MPa), an anchor spacing model was developed (theoretical 7.6 m, optimized to 2.0 m). (3) The implemented treatment measures, including debris removal, $\phi 25$ anchors, a C30 concrete panel and 2 m-spaced drainage holes, reduced pore water pressure by 35% and achieved full slope stability with no further deformation observed. Future work should establish a multi-source automated monitoring system to enable real-time risk warning.

Keywords: Karst geomorphology; municipal rock slope; slope collapse; comprehensive geophysical prospecting investigation; slope stability; bolt support; drainage treatment