怀阳高速公路深路堑边坡险情原因分析及除险加固措施

马 强[1]，康宝祥[2]，黄河柳[1]，党会茹[3]

（1. 广东省南粤交通投资建设有限公司，广州 510600；2. 西安汽车职业大学轨道交通学院，西安 710600；
3. 西安建筑科大工程技术有限公司，西安 710055）

摘要：以怀阳高速公路K26＋400～K26＋750段左侧路堑边坡滑坡为例，系统开展地质灾害成因分析、稳定性评价与综合治理技术研究。该滑坡属地质构造与地层因素主导的大型牵引式顺层滑坡。基于现场踏勘、补充勘察及运营期监测数据，采用传递系数法反演分析滑面特征与岩土体强度参数，识别出暴雨工况下主控滑面处于极限平衡状态。据此提出“分区、分级、综合治理、治水为先”的处治原则，构建以“反压-减载-结构-排水”为核心的多措施协同加固体系。治理后监测数据表明边坡变形显著收敛，地质灾害险情基本解除。该边坡除险加固综合处治设计方案可为运营期高大路堑土岩混合边坡治理工程提供借鉴。

关键词：深路堑边坡；病害分析；应急抢险；加固方案；滑坡治理

中图分类号：U417 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)03－0067－08

随着中国经济建设的快速发展，以公路与铁路为主的基础交通设施建设正在向山区和丘陵地区快速推进，深路堑、高填方等工程数量显著增加。这类工程大规模开挖与填筑改变了原有地质环境与应力场，易引发边坡失稳，严重威胁公路运营安全。因此，开展复杂地质条件下边坡稳定性与处治技术研究具有重要的现实意义与工程价值。

近年来，国内外学者围绕边坡稳定性评价与灾害防控开展了广泛研究。诸多案例与数值分析表明，边坡及支护结构设计参数[1-2]、不良地质和地层岩性[3-5]与降雨入渗[6-8]是引起边坡失稳的主要因素。由于地层岩性、地质构造与外部环境的差异性，边坡破坏机理不尽相同[9-11]，导致施工期[12]或运营期[13]边坡出现不同程度的失稳现象。其本质可归结为边坡内部抗滑力与下滑力动态平衡的丧失[14-15]。

基于工程边坡岩土体特性与赋存环境差异，采取合理措施快速除险[16]及确保运营期边坡长期稳定的治理方案已成为工程实践的关键。吴旭敏等[17]结合区内实际降雨工况，利用数值模拟方法对某工程边坡进行稳定性分析，发现短时强降雨会造成边坡安全系数快速降低且降雨入渗作用对边坡安全系数的影响有一定的滞后性；白慧林等[18]以新建省道S220震损型公路边坡为例，系统揭示了“震损-降雨”耦合作用导致边坡失稳的累进性破坏机制，提出了“点面结合”的综合处治对策；樊炼等[19]利用强度折减法和刚体极限平衡法对深挖路堑边坡施工过程中的稳定性进行比较分析，阐明了路堑边坡的稳定性和滑移面的演化规律；刘涛等[20]对公路边坡防护设计的思路和方法进行了总结，通过定性分析和定量评价探讨了某公路高边坡综合防护设计方案的合理性；宋朝辉等[21]以高速路堑边坡为例，通过现场调查与数值模拟相结合的方法，系统评价了边坡在不同工况下的稳定性，提出并验证了加固措施的有效性。理论分析与处置措施均可为工程设计与病害处治提供理论依据与施工借鉴[22]。

现以怀阳高速公路K26＋400～K26＋750段运营期高路堑边坡为研究对象，基于现场踏勘、地质补勘、物探测试及运营期监测数据，分析影响该路堑边坡稳定性的主要因素，并针对已发生的失稳现

收稿日期：2025-08-25

作者简介：马强(1991—)，男，河南周口人，硕士，工程师，研究方向为高速公路建设与管理；通信作者康宝祥(1989—)，男，陕西咸阳人，硕士，讲师，工程师，研究方向为建筑工程材料试验检测、隧道与地下工程研究与教学；黄河柳(1991—)，女，陕西安康人，硕士，助理工程师，研究方向为高速公路建设与管理；党会茹(1988—)，女，陕西渭南人，硕士，工程师，研究方向为建筑工程材料试验检测、隧道与地下工程监测。

象提出科学合理的除险加固方案，旨在为类似地质与工程条件下边坡病害防控提供借鉴。

1　工程背景

1.1　工程概况

怀集至阳江港高速公路怀集至郁南段线路设计为双向四车道，路基宽度 26.0 m，于 2020 年底建成通车。怀集至阳江港高速公路边坡地处肇庆市怀集县金装镇，K26＋400～K26＋750 里程段属于挖方特高边坡，边坡最大高度 33 m。该边坡属于丘陵地貌，山体较高大，形态复杂，地形起伏较大，边坡坡脚至堑顶标高 83～120 m，后缘裂缝标高 140 m，分水标高约 230 m，自然坡角25°～30°。山体底部为残坡积阶地沟谷，坡顶两侧地形较陡，中部沟谷为缓坡中部凹槽分割边坡，属“M”形边坡。

为分析与治理方便，将该边坡划分为两个区域，如图 1 所示。Ⅰ区、Ⅱ区边坡对应的里程桩号分别为 K26＋400～K26＋525、K26＋525～K26＋750。以Ⅰ区作为主要研究对象，该段为 4 级坡，最大坡高 33 m，分级坡高 8 m。第 1 级：坡率 1∶1.00，采用锚杆格梁＋锚索纵梁防护；第 2 级：坡率 1∶1.00，采用锚索框梁防护；第 3 级：坡率 1∶1.25，采用锚索框梁防护；第 4 级：坡率 1∶1.25，采用植草防护。各级边坡平台宽度均为 2 m。Ⅰ区滑坡体监测点布置与典型断面如图 2 所示，其中 CX 为建设期埋设监测点，BK 为本次边坡勘察期埋设监测点。

1.2　工程地质条件

据区域地质资料和现场勘探成果，该深挖方路段地层主要为第四系素填土（Q^{ml}）、全新统坡积（Q^{dl}）、泥盆系中统郁江阶（D_{2y}）的石英砂岩、页岩、泥质粉砂岩及其风化层，泥质粉砂岩中有非常发育

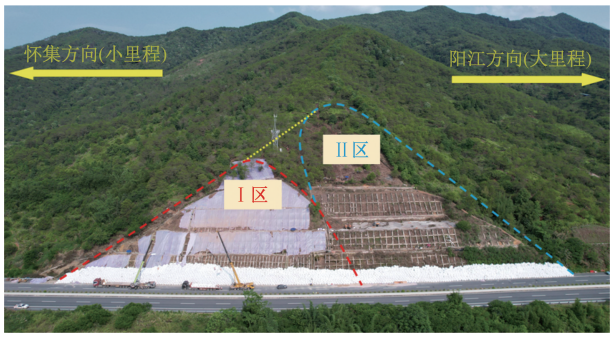


图 1　边坡全貌及分区

的片理、页理、糜棱岩化构造，存在隐伏断裂带影响。

选线区域范围上的褶皱构造较发育，路线夹持于区域上的郴州-怀集断裂带中。滑坡区位于金装-都平断裂和渔捞-莲都断裂之间，滑坡体主要受到金装-都平断裂和渔捞-莲都断裂等北东-北北东向断裂构造及东西向褶曲影响。区域内气候温和，雨量充沛，地表径流对坡面坡脚的冲刷较大，大气降水为地下水主要补给来源，地下水主要类型为孔隙水及基岩裂隙水，孔隙含水量随季节发生变化。受区域内地层岩性、构造、地形、气象和水文等多种条件的共同作用，路线范围内发育的不良地质类型主要有滑坡、特殊性岩土为高液限土和膨胀土等。该滑坡地质属于不良地质体，滑坡坡脚调查点揭露的泥质粉砂岩，产状多为308°～351°∠26°～44°，左侧边坡倾向约 300°，为顺层滑坡，研究区地质平面图如图 3 所示。

1.3　边坡病害成因分析

现场钻孔芯样揭露地层岩性，如图 4 所示。BK7 钻孔（对应 CX1 一级平台）在 5～6 m 处主要为断层破碎带；BK20 钻孔揭示 20 m 以上岩芯较 20 m

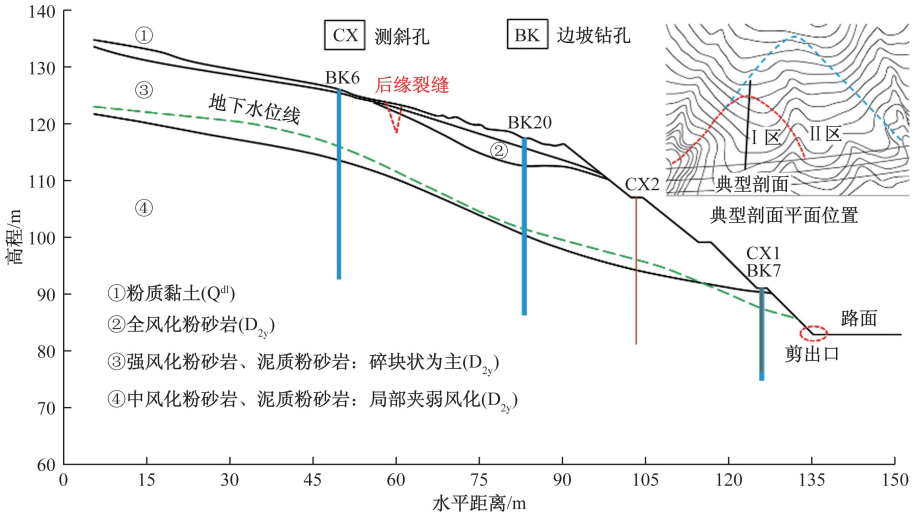
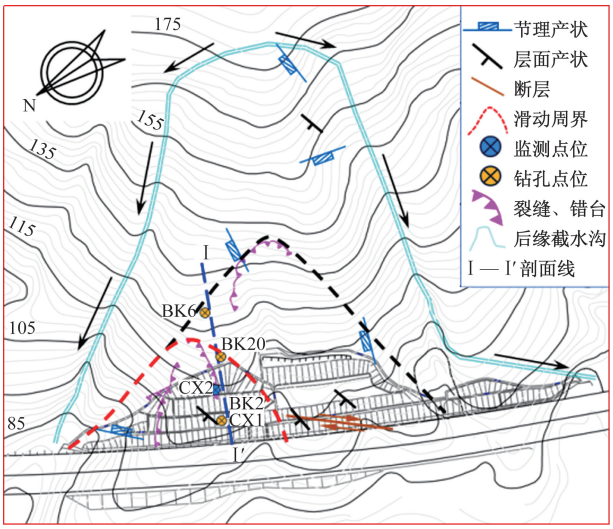


图 2　Ⅰ区典型地质剖面图



数字为高程，单位：m

图 3　研究区域地质平面图



图 4　CX1 对应钻孔 5～6 m 处断层破碎带

以下岩芯破碎。现场踏勘发现Ⅰ区后缘明显形成贯通错台裂缝(约 1 m)，距坡口线约 30 m，距离坡脚约 75 m；Ⅰ区侧壁新裂缝有向Ⅰ区发展的趋势，因此Ⅰ区需考虑在设计处治过程中，后缘有继续向上发展的可能。结合病害情况，推测潜在牵引范围为 30 m；结合坡面整体变形情况，主要表现为 1～3 级坡脚剪出；结合地形及结构物变形情况，小里程方向侧界位于侧坡位置，大里程方向位于Ⅰ、Ⅱ区交界位置，侧界已基本形成。

下面从地貌特征、地层岩性、地质构造等方面对病害成因进行分析。

1.3.1　地形地貌

山体地形起伏较大，边坡地处山体中部位置，自然坡度角为 20°～30°，边坡路段在微地貌上属于近似鸡爪状的山脊地貌，地形情况利于基岩风化剥落。本次钻孔施工坡面护坡处多孔揭露到断层及较厚的全强风化层。

1.3.2　地层岩性

该边坡为土岩混合边坡，构成坡体的岩土层上部为残坡积粉质黏土和全/强风化泥质粉砂岩，风化强烈呈半岩半土状，强度极低，下部为中风化泥质粉砂岩、碎裂泥质粉砂岩，但受到区域构造的影响，泥质粉砂岩中页理、挤压非常发育，在节理的切割下岩体局部夹软夹层，极其破碎，对边坡稳定性不利。

1.3.3　地质构造

滑坡体主要受到金装-都平断裂和渔捞-莲都断裂等北东-北北东向断裂构造及东西向褶曲影响，部分断层形迹在本滑坡部分出露。例如，调绘点 DH87，设计里程 K26＋540 急流槽处，一级坡平台下格梁可见明显的断层形迹，可见阶步、擦痕，倾向 130°，倾角 65°～85°；调绘点 DH61 为正断层，倾向 310°，倾角 80°；调绘点 DH85、DH86 受构造影响糜棱岩化、劈理化现象明显，产状 10°∠85°，290°∠35°。部分钻孔资料揭露有断层破碎带，泥质粉砂岩中有非常发育的片理、页理、糜棱岩化构造，存在隐伏断裂带影响。根据滑坡坡脚调查点揭露的泥质粉砂岩，受区域影响倾向多为北西，产状多为308°～351°∠26°～44°，左侧边坡倾向约 300°，为顺层滑坡。

1.3.4　水的作用

特大暴雨期雨水透过较厚的残积层及全风化层下渗，软化滑带土，增加潜在滑面的超孔隙水压力，降低滑带土的抗剪强度和阻滑力，且滑体饱水后重力和下滑力增大，坡体范围内的断层、节理裂隙发育，潜在的破碎带可形成一条导水通道，冲刷坡体，降低其抗剪强度。且坡面未设置排水孔，致使地下水集聚在坡体内无法流出，导致坡体内重力和下滑力增大。

2　边坡失稳滑面特征与稳定性分析

2.1　边坡失稳滑面特征

2024 年 4 月，受广东地区持续性超历史暴雨影响，怀阳高速公路 K26＋400～K26＋750 左侧路堑边坡含水量快速增加，边坡监测信息显示深层水平位移超过预警值，边坡出现较为明显的滑动破坏。Ⅰ区监测断面 CX1 测斜孔 6 m 位置位移增加；CX2 测斜孔 15 m 位置出现位移拐点；最大累计位移变形均超过 20 mm，深层水平位移超过预警值，边坡出现明显深层滑动。

险情出现后，现场及时采取坡脚临时堆载反压和各级坡面施作排水孔等应急措施，确保线路行车安全与坡体稳定，同时开展现场勘察工作。2024 年

5 月 7 日对该段路堑边坡进行现场踏勘，对Ⅰ区边坡开裂、结构物变形情况汇总如下：Ⅰ区坡面至堑顶形成贯通裂缝，第 3 级坡面、堑顶后 30 m 范围，形成错台(1.5 m)，缝宽约 10 cm，深 1 m；1～3 级坡面锚索框梁整体下错，框架梁横梁开裂，其中第 1、第 2 级坡面框梁最大下错距离约 1.5 m；锚索锚头 2 处损坏；小里程端侧坡坡面各处可见明显的挤压滑塌，截水沟挤压破损；大里程端堑顶截水沟开裂 5～10 cm。Ⅰ区滑坡体破坏失稳特征如图 5 所示。

2.2　边坡深层位移

Ⅰ区滑坡体监测点布置如图 3 所示。以 K26＋500 位置(通过边坡开挖最高点处，与病害发育情况基本对应)作为特征断面进行滑面分析，根据滑坡体特征断面附近水平位移监测曲线可知，一级平台测斜孔(CX1)在 6 m 处出现明显拐点，孔口最大位移约 50 mm，如图 6(a)所示；三级平台测斜孔(CX2)在 15 m 处出现明显拐点，孔口最大位移约 60 mm，如图 6(b)所示，2024 年 5 月 2 日该孔已在 15 m 位置剪断。综上分析，深孔监测滑面与各钻孔揭露软弱带位置基本一致，推断Ⅰ区滑坡体滑动面如图 7 所示。

2.3　稳定性计算

Ⅰ区坡面已发生滑动，后缘已形成，剪出口位于一级坡脚，侧界基本贯通，由于Ⅱ区后缘较Ⅰ区远，侧壁有向Ⅰ区发展的趋势，因此Ⅰ区需考虑在设计处治过程中，后缘继续向上发展的可能。根据以上条件及深层位移监测情况，以 K26＋500 位置作为特征断面进行滑坡稳定性分析，确定主控滑面反算的稳定系数为 0.98，取潜在深层滑面反算的稳定系数为 1.08，对潜在深层滑面进行计算，取暴雨工况作用为最危险工况，结合勘察阶段岩土体强度取值。根据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334—2018)[23]相关规定，选用传递系数法反算主滑段滑动面的抗剪强度值。主控滑面及潜在深层滑面反算参数见表 1。

经计算可得，K26＋500 特征断面位置主控滑面计算总体剩余下滑力为 2 140 kN/m，大于潜在深层滑面计算总体剩余下滑力 1 338 kN/m。因此后期加固设计主要依据主控滑面进行，潜在深层滑面则用于控制锚固措施长度。

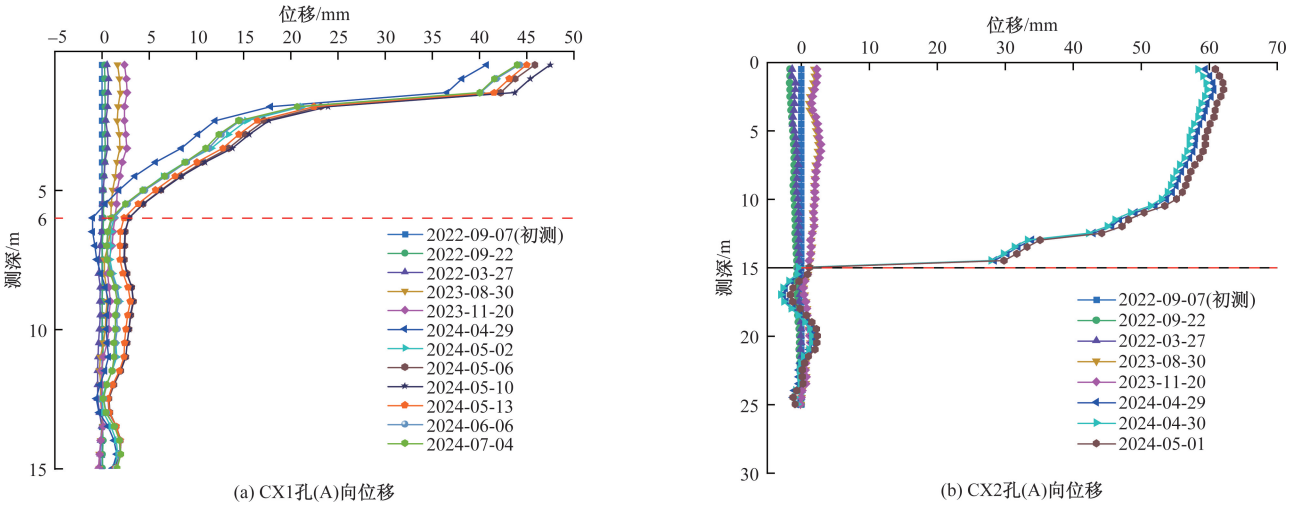


(a) 坡面至堑顶处贯通裂缝　(b) 坡面至堑顶处错台



(c) 框架梁断裂破坏　(d) 堑顶截水沟开裂

图 5　Ⅰ区滑坡体破坏失稳特征



(a) CX1孔(A)向位移　　(b) CX2孔(A)向位移

图 6　侧斜管位移监测曲线

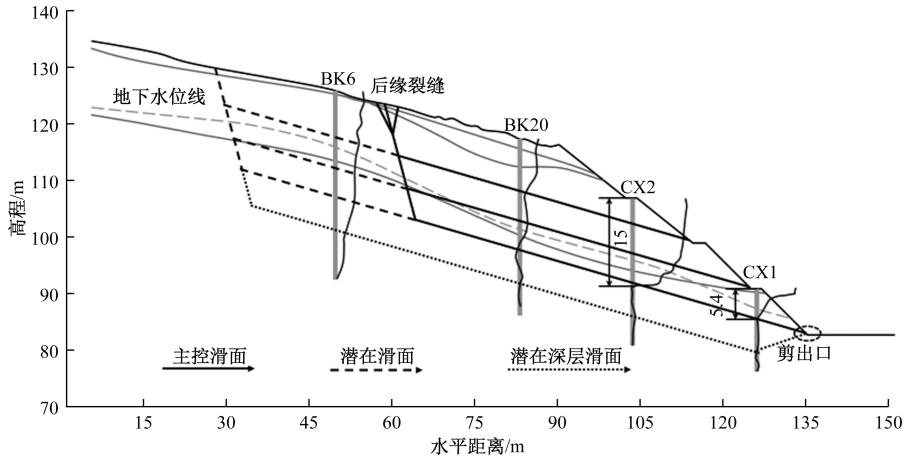


图 7　Ⅰ区滑坡体滑动面分析

表 1　Ⅰ区主控滑面及潜在深层滑面反算参数

滑面	稳定系数	主滑段		牵引段稳定系数 1.05		重度/(kN•m^{-3})	
		黏聚力 c	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c	内摩擦角 φ/(°)	自然	暴雨
1 级坡脚主控滑面	0.98	11.5	14.5	14.5	15.7	22	22.5
2 级坡脚	1.00	11.5	14.1	14.5	14.7		
3 级坡脚	1.00	11.5	12.6	14.5	12.6		
4 级坡脚	1.00	11.5	9.6	—	—		
潜在深层滑面	1.08	11.5	16.0	—	—		

3　处治方案与处置效果

3.1　处治方案

通过计算分析边坡滑动面的特征与稳定性发现:该段滑坡不具备古滑坡特征,其形成是地层岩性、地质构造、降雨入渗及地下水活动共同作用的结果;总体属于构造与地层因素主导的滑坡类型;滑体结构松散,坡体内节理裂隙与断层发育为降雨入渗和赋存提供了条件;地形上有利于地表雨水汇集与下渗;持续强降雨入渗导致滑带土软化、抗剪强度下降,进而诱发滑坡。基于现场踏勘与补充勘察结果,通过对Ⅰ区病害成因的系统分析及滑坡稳定性计算,判定坡体以岩质为主,险情出现后,变形发生较急促,存在冲击路面的重大风险。同时,Ⅱ区新裂缝有向Ⅰ区发展的趋势,牵引变形范围具有一定不确定性,表明整个路堑高边坡处于极不稳定状态。因此,必须及时采取临时反压与应急加固措施,以确保行车安全。

综合边坡病害现状,采取“分区、分级、综合治理”与“治水为先”的处治理念,对Ⅰ区与Ⅱ区分别设计治理方案。加固方案在原施工基础上进行优

化，以削坡卸载为主，同时增加抗滑桩、锚杆格梁或锚索框梁对滑坡体及坡面进行防护，在坡底堆载反压的基础上对Ⅰ区边坡进行卸载与加固。Ⅰ区边坡处治设计方案见表 2。

对坡形坡率设计优化后，将Ⅰ区边坡安全稳定系数提高至 1.25，根据表 1 不同滑面的反算参数，计算滑坡体不同破坏条件下的剩余下滑力，见表 3。由表 3 可知，坡形坡率优化后主控滑面上剩余下滑力为 1 662 kN/m，比优化前减少了 22.3%，但剩余下滑力仍然较大，存在潜在滑塌风险。考虑应急抢险的工程性质及经济合理的原则，增设抗滑桩及锚索对主控滑面与潜在深层滑面进行治理，通过在第 2 级平台、第 4 级平台施作 1.8 m×2.6 m 的长方形抗滑桩，以滑坡体后缘裂缝为界线对Ⅰ区主控滑面剩余下滑力进行计算，结果见表 4。由表 4 可知，施作抗滑桩后Ⅰ区主控滑面前级滑体剩余下滑力为 854 kN/m，比优化前减少了 60.1%，小于坡形坡率

表 2　Ⅰ区边坡处治设计方案

部位		处治方案
坡形坡率		第 1、2 级维持原设计；第 2 级平台加宽至 10 m；第 3、4 级：坡率 1∶1.25，分级坡高 8 m；第 4 级平台加宽至 12 m；第 5 级：坡率 1∶1.25，最大坡高约 8 m
破面防护	第 1 级	拆除破损段锚杆格梁/锚索框梁，采用注浆钢锚管格梁加固；既有格梁上设注浆钢锚管，长12 m；坡面设 C20 混凝土面板封闭
	第 2 级	拆除破损段锚索框梁，设 2 排锚索（6 束）框梁加固，锚索长分别为 32、32 m，间距 3 m；既有锚索框梁上设 2 排锚索十字梁，锚索（6 束）长分别为 32、32 m，间距 6 m；平台设 1.8 m×2.6 m 方形抗滑桩，桩长 27 m，间距 6 m；冠梁设 3 根锚索（8 束）长分别为 32、32、34 m
	第 3 级	设 3 排注浆钢锚管格梁＋8 cm 客土喷播防护，长 12 m，横向间距 3 m
	第 4 级	坡段设 3 排锚索框梁＋8 cm 客土喷播防护锚索（6 束），长分别为 40、42、44 m，横向间距 6 m；平台设 1.8 m×2.6 m 方形抗滑桩，桩长 30 m，间距 6 m；桩顶冠梁设 3 根锚索（8 束），长分别为 42、42、46 m
	第 5 级	设 3 排注浆钢锚管格梁＋8 cm 客土喷播防护，长 12 m，横向间距 3 m

表 3　坡形坡率优化后不同破坏位置处剩余下滑力

设防安全系数	边坡破坏位置	剩余下滑力/(kN·m^{-1})
1.25	1 级坡脚剪出	1 662
	2 级坡脚剪出	637
	3 级坡脚剪出	249
	4 级坡脚剪出	—

表 4　施作抗滑桩后Ⅰ区主控滑面剩余下滑力

设防安全系数	位置	剩余下滑力/(kN·m^{-1})
1.25	后级滑体	909
	前级滑体（不考虑后级）	854

优化后主控滑面上剩余下滑力 1 662 kN/m，说明施作抗滑桩能够有效降低前级滑体剩余下滑力，显著提升边坡稳定性。

3.2　综合防水与排水措施

3.2.1　地表防排水

Ⅰ区、Ⅱ区后缘自然山体裂缝采用黏土回填夯实，然后注水泥浆，确保裂缝封闭；坡口线范围增设截水沟，边坡中部坡面增设急流槽，防止后期降雨导致地表水沿裂缝下渗，降低土体强度参数。

3.2.2　地下降排水

结合物探成果、补勘及地下水监测情况，该边坡上部自然山体较高，汇水面积较大，坡体地下水位较高。为消除地下水对加固工程的影响，同时提高坡体自身稳定性，采用坡体设置仰斜式排水孔、集水井的措施，排除地下水对坡体稳定性的影响。为有效截排上游地下水，集水井主要布设于靠坡口线附近，同时，避开堑顶既有设施，集水井井深段设置 3 层长 30 m，层间距 1 m、倾角 6°的仰斜式集水孔，井底深度低于主控滑面 5 m，集水井之间采用两孔 250 mm 导流管连接（导流管材料选用 250 mm 不锈钢钢管，壁厚 5 mm），实现高效导排地下水，增强坡体自稳能力。

3.3　处置效果

2024 年 5—6 月，现场采取清表、裂缝封闭、坡面彩条布覆盖、坡脚反压、排水与降水应急处治措施，坡脚堆载反压完成后地表位移总体较平稳，堑顶拉线式位移监测曲线如图 8 所示，累计位移约为 2.65 mm。2024 年 7—9 月，随着削坡卸载、坡

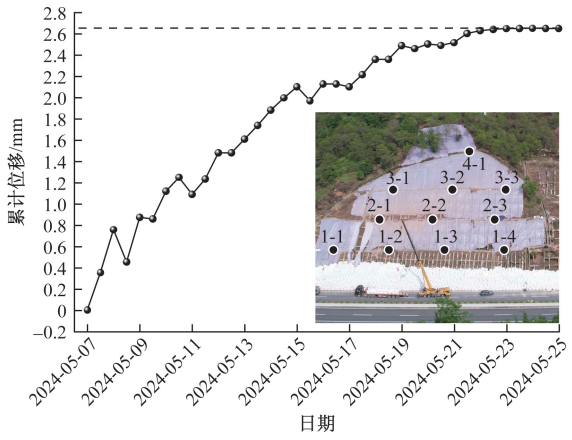


图 8　堑顶拉线式累积位移曲线

面防护及防水措施等应急抢险主要治理措施的完成,通过对Ⅰ区滑坡体特征断面上地表位移、堑顶裂缝(拉线式、自动化)、深部位移、地下水位等指标的监测数据整理分析,监测点 1-3 处地表总水平位移监测曲线及位移变化速率如图 9 所示。可以看出,采用应急处治措施后特征断面地表总水平位移逐渐趋于稳定,其变化范围为 7.9～8.6 mm。受后期锚杆格梁/锚索框梁的拆除、加固及抗滑桩的施作等处治方案实施的影响,特征断面地表总水平位移变化波动明显,其变化范围为 10.6～12.3 mm,位移速率为 0.22～0.82 mm/d,小于 1 mm/d。加固处治措施完成后,特征断面地表总水平位移再次趋于稳定,其变化范围为 7.10～8.43 mm,位移速率为 0.06～0.18 mm/d,变形速率明显减小。

Ⅰ区滑坡治理完成后,尽管经历了Ⅱ区抢险加固对地层的扰动及后续强降雨的影响,通过堑顶累积位移与 1-3 处地表位移监测结果表明,遵循“分区、分级、综合治理、治水为先”的处治原则,所构建的“反压-减载-结构-排水”多措并举的加固体系成效显著,滑坡体已逐步趋于稳定,地质灾害险情已基本解除。

4　结论

(1)该边坡属构造-地层因素主导的大型牵引式顺层滑坡。滑体结构松散,岩性以全-强风化泥质粉砂岩为主,层理及节理裂隙发育,是导致降雨入渗与地下水赋存的先决条件。在暴雨持续作用下,雨水持续入渗导致滑带土软化、抗剪强度急剧下降,坡体下滑力显著增大,降雨是滑坡发生的直接诱因。处治方案需重点关注水岩相互作用机制及顺层结构面对稳定性的控制作用。

(2)基于现场踏勘、地质补勘与监测数据,采用传递系数法对滑坡主控滑面及潜在深层滑面进行反演分析。计算结果表明,暴雨工况下主控滑面处于不稳定状态(稳定系数为 0.98),潜在滑面处于欠稳定状态(稳定系数为 1.08)。反算获得的岩土体强度参数为Ⅰ区滑坡体加固设计提供了可靠依据。

(3)针对该滑坡特点,提出并实施了“分区、分级、综合治理、治水为先”的处治原则。通过以削坡卸载结合抗滑桩与锚索框架结构为核心,结合坡脚反压及完善的地表与地下排水系统,构建了“反压-减载-结构-排水”多措施协同的加固体系。监测数据表明,治理后边坡地表及深部位移显著收敛,变形速率降至 0.18 mm/d 以下,边坡整体趋于稳定,处治效果显著。

该综合处治措施不仅在应急抢险中成效显著,也可为运营期类似地质与气象条件下高大路堑边坡的治理提供一套可借鉴的技术方案。建议在强降雨区域的顺层岩质边坡工程中,进一步重视前期地质精细勘察、动态监测反馈与排水系统设计,以实现边坡长期稳定与安全运营。

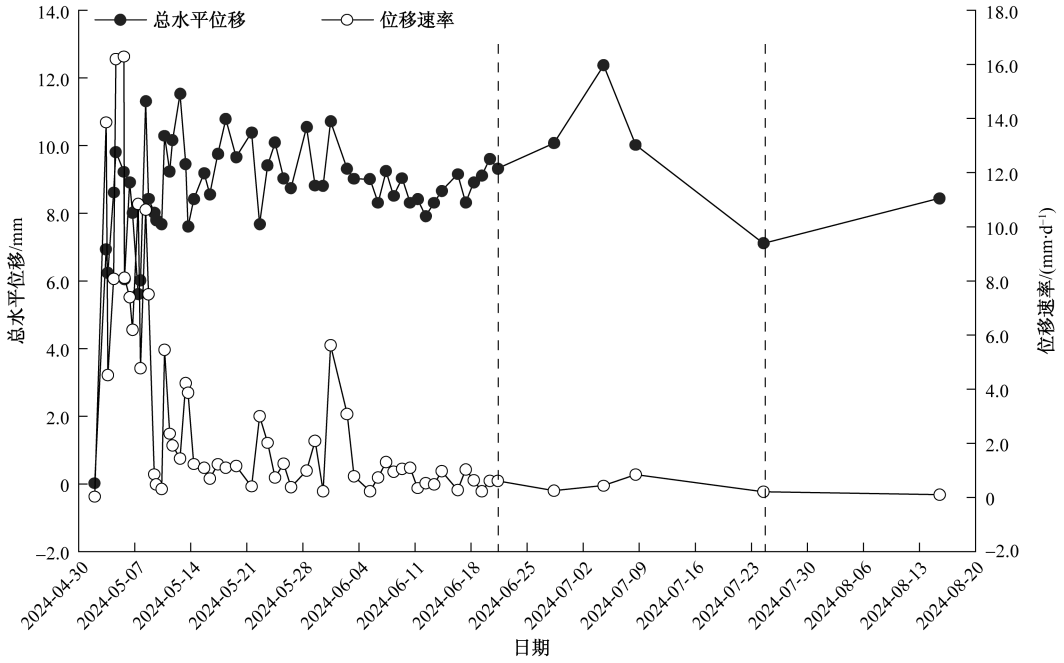


图 9　监测点 1-3 处地表位移-时间曲线

参考文献

[1] 李政韬，罗强，蒋良潍，等. 几何参数对边坡稳定可靠度影响规律分析[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(7)：1748-1755.

[2] 刘兴雷，吴顺川，韩龙强，等. 高速公路边坡预应力锚索桩板墙结构参数优化与受力特征分析[J]. 科学技术与工程，2024，24(15)：6439-6447.

[3] 李良熹，龚臻，杨凯，等. 考虑软弱夹层饱水软化特性的顺层边坡连续-非连续模拟分析：以G5京昆高速某边坡为例[J]. 科技和产业，2025，25(13)：72-78.

[4] 谢永利，刘新荣，晏长根，等. 特殊岩土体工程边坡研究进展[J]. 土木工程学报，2020，53(9)：93-105.

[5] 刘明扬，宋顶峰，付晓东，等. 降雨作用下土石混合体边坡力学参数弱化规律与稳定性分析[J]. 科技和产业，2021，21(8)：313-318.

[6] 罗伟，姜智予，李佳宝，等. 不同雨型循环作用下边坡渗流场及稳定性分析[J]. 科学技术与工程，2023，23(25)：10918-10925.

[7] 夏艺峰，贾泽庆，周春梅. 强降雨作用下风化混合花岗岩边坡稳定性分析[J]. 科技和产业，2024，24(1)：267-272.

[8] 史振宁，戚双星，付宏渊，等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J]. 岩土力学，2020，41(3)：980-988.

[9] DEY N，SENGUPTA A. Stability analyses of non-homogeneous unsaturated slopes subjected to continuous rainwater infiltration[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(10)：414.

[10] YOU M，TONG D，TAN F，et al. Discrete element-based numerical simulation and failure mechanism analysis of anti-dip rock slopes[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(10)：399.

[11] LI Z，YIN Z. Failure pattern of dispersive soil slopes under the action of rainfall conditions[J]. Alexandria Engineering Journal，2024，104：193-210.

[12] 李论基，姚青青，安玉科. 老滑坡路段路堑开挖与超前支护效果[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2018，48(6)：1767-1777.

[13] 黄明奎，马璐. 极端降雨对边坡土体强度的影响及其稳定性分析[J]. 灾害学，2021，36(3)：6-9.

[14] 吴海真，刘颖，王姣，等. 暴雨型滑坡失稳机理及预警预报[M]. 北京：中国水利水电出版社，2019.

[15] 郑颖人，陈祖煜，王恭先，等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2022.

[16] 任佳丽，胡胜刚，程永辉，等. 膨胀土高边坡险情原因分析及除险加固处理措施[J]. 岩土工程学报，2022，44(S1)：138-142.

[17] 吴旭敏，杨溢，叶志程. 岩土体边坡在降雨入渗作用下的稳定性及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报，2022，33(5)：189-199.

[18] 白慧林，范安军，蒋国为. 震损型公路边坡降雨灾变机制与防治技术：以新建省道S220 K39＋280～K39＋390段边坡为例[J]. 科技和产业，2025，25(3)：31-36.

[19] 樊炼，罗红明，张安平，等. 公路深挖路堑边坡稳定性综合研究[J]. 人民长江，2018，49(S2)：255-258.

[20] 刘涛，冯小军，李矗. 某高速公路高边坡防护工程的设计方法及其应用[J]. 灾害学，2018，33(S1)：130-133.

[21] 宋朝辉，李鹏举，张艺漾. 路堑边坡失稳机理及其治理措施：以桂武高速K175＋300～600段为例[J]. 科技和产业，2024，24(6)：258-263.

[22] WU C，XIA H，LI W，et al. Slope failure treatment by anchor rod method at exit of tunnel：case study in Nanxia expressway[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering，2024，61：388-395.

[23] 公路滑坡防治设计规范：JTG/T 3334—2018[S]. 北京：人民交通出版社，2018.

Analysis of Causes and Reinforcement Measures for Deep Cutting Landslide Hazardous Situations of Huaiyang Expressway

MA Qiang[1]，KANG Baoxiang[2]，HUANG Heliu[1]，DANG Huiru[3]

(1. Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co.，Ltd.，Guangzhou 510600，China；
2. School of Rail Transportation，Xi'an Vocational University of Automobile，Xi'an 710600，China；
3. XAUAT Engineering Technology Co.，Ltd.，Xi'an 710055，China)

Abstract：Taking the landslide at the left cutting slope of section K26＋400～K26＋750 on the Huaiyang Expressway as a case study，systematically investigates the causes of the geological disaster，stability evaluation，and comprehensive treatment technologies. The landslide is identified as a large-scale retrogressive bedding landslide primarily controlled by geological structure and stratigraphic factors. Based on field investigations，supplementary surveys，and operational monitoring data，the characteristics of the sliding surface and the strength parameters of the rock and soil mass were back-analyzed using the transfer coefficient method. It is determined that the main sliding surface is in a state of limit equilibrium under heavy rainfall conditions. Accordingly，a treatment principle of "zoning，grading，comprehensive treatment，and drainage first" was proposed，and a multi-measure synergistic reinforcement system centered on "counter-pressure-unloading-structure-drainage" was established. Post-treatment monitoring data indicate significant convergence of slope deformation，and the geological hazard risk has been essentially eliminated. The comprehensive treatment design scheme of slope risk reduction and reinforcement can provide a reference for the treatment project of tall cutting soil-rock mixed slope during the operation period.

Keywords：deep cutting landslide；disease analysis；emergency measures；reinforcement scheme；slide treatment