# 山区机场高填方滑坡特征、成灾机理、防治及启示：以攀枝花机场为例

赖国泉[1*]，焦海平[1,2]，吴红刚[1]，张乾翼[1]，常刚[1]，冯文强[1]，张俊德[1]

1. 中铁西北科学研究院有限公司，兰州 730000；
2. 兰州交通大学土木工程学院，兰州 730070

* 通信作者，E-mail：273085646@qq.com

2024-05-04 收稿；2024-07-06 修回；2024-07-09 接受

基金项目：甘肃省重点研发计划-工业类项目(25YFGA071)；中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2022-重大专项-07)；中铁九局科技开发计划(YGSJSZX202308-01)

中图分类号：TU248.6；X43；P642.22　　文章编号：2096-8523(2026)01-0135-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240216

**摘　要：**由于特殊的工程地质环境条件，山区机场修建产生了大量的高填方边坡工程，其面临的最大问题为运营阶段高填方边坡变形控制与长期稳定。以攀枝花机场为例，在系统回顾建设期及运营期地质灾害史的基础上，详述了运营期 3 处典型高填方滑坡发育特征。采用工程地质勘察结合现场岩土试验分析了高填方滑坡成因及演化机理，提出了控滑关键技术。结果表明，有利于地表水汇集的地形地貌和有利于降雨入渗特殊的上软下硬单向顺坡缓倾坡体结构是其产生的内因。降雨集中且短时暴雨多发，地下水丰富且容易富集于相对隔水层是其产生的诱发因素；攀枝花机场高填方边坡失稳演化机制可以概括为：强降雨长期入渗-地下水升高-基覆界面软弱面土体软化且抗剪强度衰减-推移式蠕滑-支挡结构失效-累进性滑移剪断-整体滑动。研究表明，山区机场高填方边坡修筑应重点解决基覆界面软弱层抗剪强度控制和地下疏排水工程设置问题。该高填方滑坡再整治采取了抗滑桩强支挡结合排水隧洞或集水井疏排地下水，治理工后监测表明排水效果良好。研究结果可为其他高填方工程变形机理研究及工程整治提供借鉴。

**关键词：**高填方边坡；山区机场；滑坡；地下水；成灾机理；变形控制；攀枝花机场

近年来，随着我国交通运输业的发展，山区城市建设了大量支线机场。鉴于特殊的工程地质环境条件，山区机场建设产生了大量高填方边坡工程，如：四川九黄机场高填方边坡高达 104 m[1-2]，贵州六盘水月照机场高填方边坡最高达 85.14 m[3]，重庆巫山神女峰高填方边坡高达 71.37 m[4]，陕西安康机场膨胀土高填方边坡高达 46.86 m[5]。

由于山区机场高填方工程具有地形起伏大且陡坡填筑、地质条件复杂、填方量大、填方边坡高度大、填料的多样性等特点[6-11]，大量高填方边坡工程在建设期受降雨、地下水、开挖等因素影响，产生了失稳变形破坏[12-20]。特别是运营阶段，高填方边坡的长期稳定性关系到机场是否安全运营。目前，对机场高填方边坡的研究在理论和实践上都有了较为丰富的成果[21-33]，但大部分集中在机场高填方建设期，对于高填方机场运营后，填方边坡变形破坏的研究较少。随着西部山区大量高填方机场的建成运营，机场高填方边坡运营期的长期稳定性值得关注。

攀枝花机场位于攀枝花市区东南部保安营，于 2000 年 6 月开始建设，2003 年 12 月 6 日建成通航。攀枝花机场建设具有 4 个特点：①海拔高，跑道海拔达 1976 m，属高原机场；②土石方量巨大，挖方总

**著录信息：**赖国泉，焦海平，吴红刚，等. 山区机场高填方滑坡特征、成灾机理、防治及启示：以攀枝花机场为例 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：135-146.
LAI Guoquan, JIAO Haiping, WU Honggang, et al. Characteristics, disaster mechanism, prevention and treatment and enlightenment of airport high fill landslide in mountainous area: Taking Panzhihua Airport as an example[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 135-146.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

量达 5 800 万 $m^3$，其中石方达 4 000 万 $m^3$，陡坡填筑长度超过 3 600 m；③开挖深度大，最大回填深度达 123 m；④建设期地质灾害频发，建设期间，产生了 7 次滑坡地质病害(图 1a)。受区内地下水及构造控制，滑坡均发育于保安营山脊东侧山坡地带，自北向南分别为 6#、7#、8#、9′#、3#、10#及 11#滑坡。其中 10#、11#滑坡为建设期间堆载、开挖坡脚所致，其余各滑坡系老滑坡，滑面依附于基岩顶面。用于治滑的抗滑桩及抗滑键近 1 000 根，治理费用达 2 亿多元[34-36]。

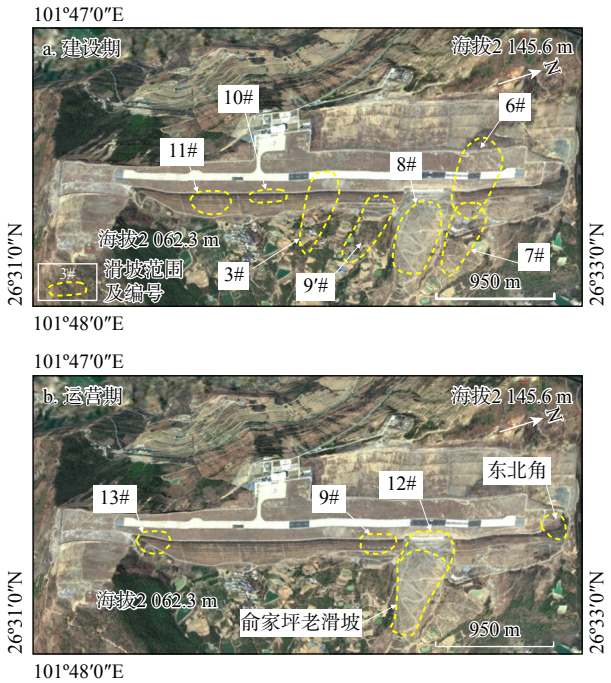



图 1　建设期 (a) 和运营期 (b) 机场滑坡分布

Fig. 1　Distribution of airport landslides during construction (a) and operation (b) periods

机场运营后，又陆续发生了东北角滑坡(2004 年)、污水处理站滑坡(2007 年)、12#滑坡(2009 年)、9#滑坡(2009 年)及 13#滑坡(2016 年)，具体分布见图 1b。特别是 2009 年产生的 12#滑坡曾引起攀枝花机场停航，造成了不可估量的经济损失及社会影响。为治理上述滑坡，也投入了大量的资金、人力及物力。

攀枝花机场高填方边坡建设期间多次发生滑坡并投入巨资治理的深刻教训告诉我们，在山区机场的建设过程中，必须高度重视并充分研究高填方边坡的变形机制及稳定性问题。而运营后又出现多次滑坡病害，值得深刻反思。只有通过深刻分析运营后产生的几次滑坡的变形机理、变形后的治理方案、治理后的效果，才能从根本上积累解决此类工程地质病害的方法。

## 1　典型高填方滑坡发育特征分析

攀枝花市地处横断山系东缘，属青藏高原、云贵高原向四川盆地的过渡带上，区内山高谷深，金沙江自西向东横贯市区，雅砻江由北至南于倮果汇入金沙江。研究区具有山区高山峡谷地貌特点，见图 2a。

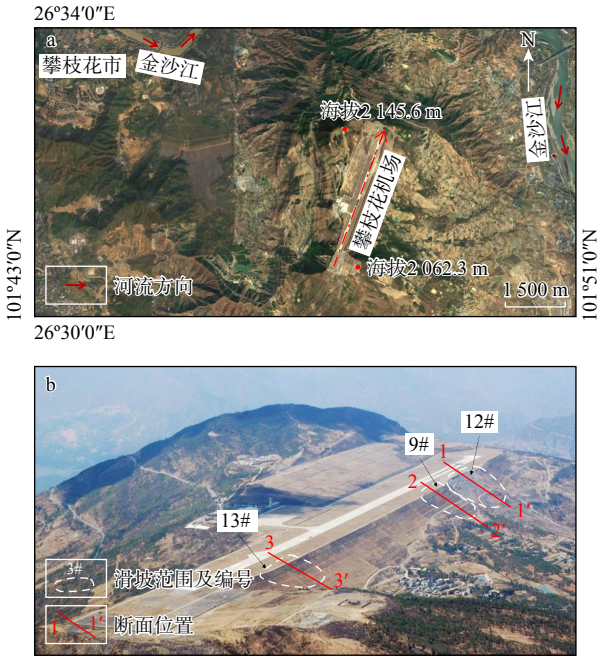



图 2　机场区域地形地貌 (a) 及全貌 (b) 示意图

Fig. 2　Topography (a) and lanscape (b) of the airport area

攀枝花机场位于 NS 向条形山脊脊部，地形起伏大，场区南北两端为 2 个凸起的山头，中部呈凹型，东西两侧为斜坡，整体地形呈鞍状。场区在地貌单元上属中山区构造剥蚀地貌，场地地形条件复杂。

机场建设以后，条形山脊受机场建设填挖改造，于山脊顶部形成平坦的飞行区，南北长约 3.5 km，东西宽约 0.7 km，高程 1 975.00 ~ 1 976.00 m，东侧边坡为填土边坡，填土最高 128 m，坡度 25° ~ 26°，机场全貌见图 2b。本节以攀枝花机场运营后产生的 12#滑坡、9#滑坡及 13#滑坡为例，详述其发育特征。

### 1.1　12#高填方滑坡

12#滑坡位于攀枝花机场东北侧填方区域，纵向最长约 540 m，宽约 350 m，前后缘高差约 163 m，滑动带埋深最大约 35 m，滑坡总体积达 $320\times10^4$ $m^3$，属巨型深层填筑体滑坡，见图 3a，典型工程断面(1-1 断面)见图 4a。

未施作机场填方工程前，12#滑坡地带为一沟谷，前方分布有俞家坪老滑坡(体积达 $250\times10^4$ $m^3$)。2000 年机场施工时，曾导致俞家坪老滑坡复活，建设单位采取坡脚设置抗滑桩，坡体中部设置抗滑键等

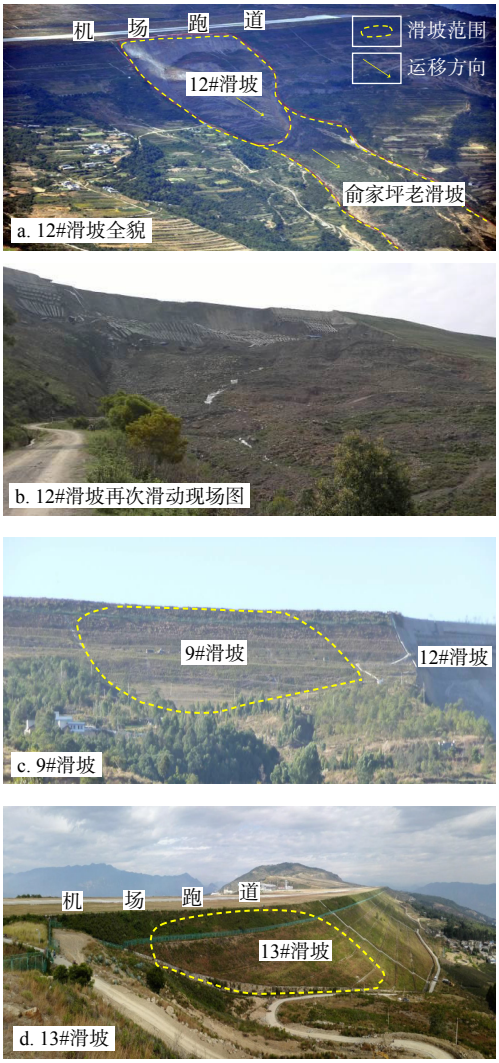



图 3　研究区典型滑坡全貌示意图

Fig. 3　Typical landslides landscapes in the study area

抗滑工程后完成了填方边坡工程。2009 年 10 月 3 日，12#滑坡产生整体滑动，大约 $260\times10^4$ $m^3$ 填筑体滑动后，压覆于俞家坪老滑坡之上并导致其再次复活，滑动距离最远达 300 m(图 3a)。

滑坡发生后，为保证机场运营安全，开始实施滑坡后壁高边坡治理工程。受雨季强降雨影响，2011 年 7 月 15 日，在工程实施过程中，12#滑坡再次产生整体大滑动，见图 3b。滑动范围与 2009 年 10 月大滑动基本一致，但滑坡后缘约 $30\times10^4$ $m^3$ 场坪填筑体产生了滑动，滑坡后缘陡壁距跑道中线 40 ~ 60 m，已不符合民航的最低通航条件，导致机场停航。本次滑动滑坡后缘最大下错约 40 m，滑坡平台最大水平滑动距离达 45 m。

### 1.2　9#高填方滑坡

9#滑坡位于攀枝花机场东侧填方区域，平面呈簸箕状，最长约 290 m，宽约 250 m，前后缘高差约 95 m，滑动带埋深最大约 40 m，滑坡总体积达 $110\times10^4$ $m^3$，属巨型深层填筑体滑坡，见图 3c，典型工程断面(2-2 断面)见图 4b。

2009 年 6 月后，滑坡后缘围场路出现一道下错裂缝，至 2013 年 3 月裂缝已下错 1 m，且连续贯通，宽约 2 ~ 5 cm，长约 190 m。滑坡体长期处于蠕动变形。滑坡后缘场坪整体下沉明显，最大下沉量达 45 cm。根据钻探、物探揭示和后期深孔位移监测表明，主滑带为全风化砂泥岩残坡积层，滑床为基岩顶面，滑体主要物质为工程填筑土。

### 1.3　13#高填方滑坡

13#滑坡位于攀枝花机场东南角填方区域，平面呈前缘不对称的簸箕状，最长约 162 m，宽约 246 m，前后缘高差约 68 m，滑动带埋深最大约 32 m，滑坡总体积达 $50\times10^4$ $m^3$，属大型深层填筑体滑坡，见图 3d，典型工程断面(3-3 断面)见图 4c。

2016 年 10 月下旬现场巡检时，发现该段高填方边坡有明显的变形迹象，后缘土面区发育有平行于围场路的拉张裂缝，最大长度 62 m，张开度最大约 17 cm，下错约 15 cm；左右侧界均发现剪切裂缝，左侧界羽状裂缝，最大延伸 52 m，张开约 11 cm；下坡脚 5 级马道水沟挤扁错断，坡脚既有挡墙开裂变形，挡墙前部路面鼓胀变形，延伸长度约 17 m 最大张开度约 8 cm。通过以上滑坡体不同部位变形演化特性综合判断该滑坡处于挤压变形状态。通过地表变形监测可知[37]，13#滑坡体在经历 2 个月的等速变形阶段后，进入了加速变形阶段，水平位移变形速率由 2.9 ~ 6.25 mm/d 增加为 14.74 ~ 39.38 mm/d。

13#滑坡在进入加速变形阶段后，坡体随时有可能整体垮塌，立即实施了后缘刷方减载、坡脚填土反压等应急治理措施。实施后坡体变形速率迅速减小并趋于稳定，在实施了永久治理工程后，滑坡体整体处于稳定状态。

## 2　高填方滑坡成因及演化机理

攀枝花机场高填方边坡在安全运营 6 年后，产生滑坡变形。如何在运营期保证此类高填方边坡工程的长期稳定性仍是一个亟待解决的课题。解决此难题，首先要深入分析此类高填方边坡变形原因及成灾机理，然后提出针对性治理方案。通过工程地质调查综合分析后，可将滑坡成因总结为内部控制因素及外部诱发因素。

### 2.1　内部控制因素

(1)特殊的地形地貌

研究区域属山区峡谷地貌，机场修建于攀枝花

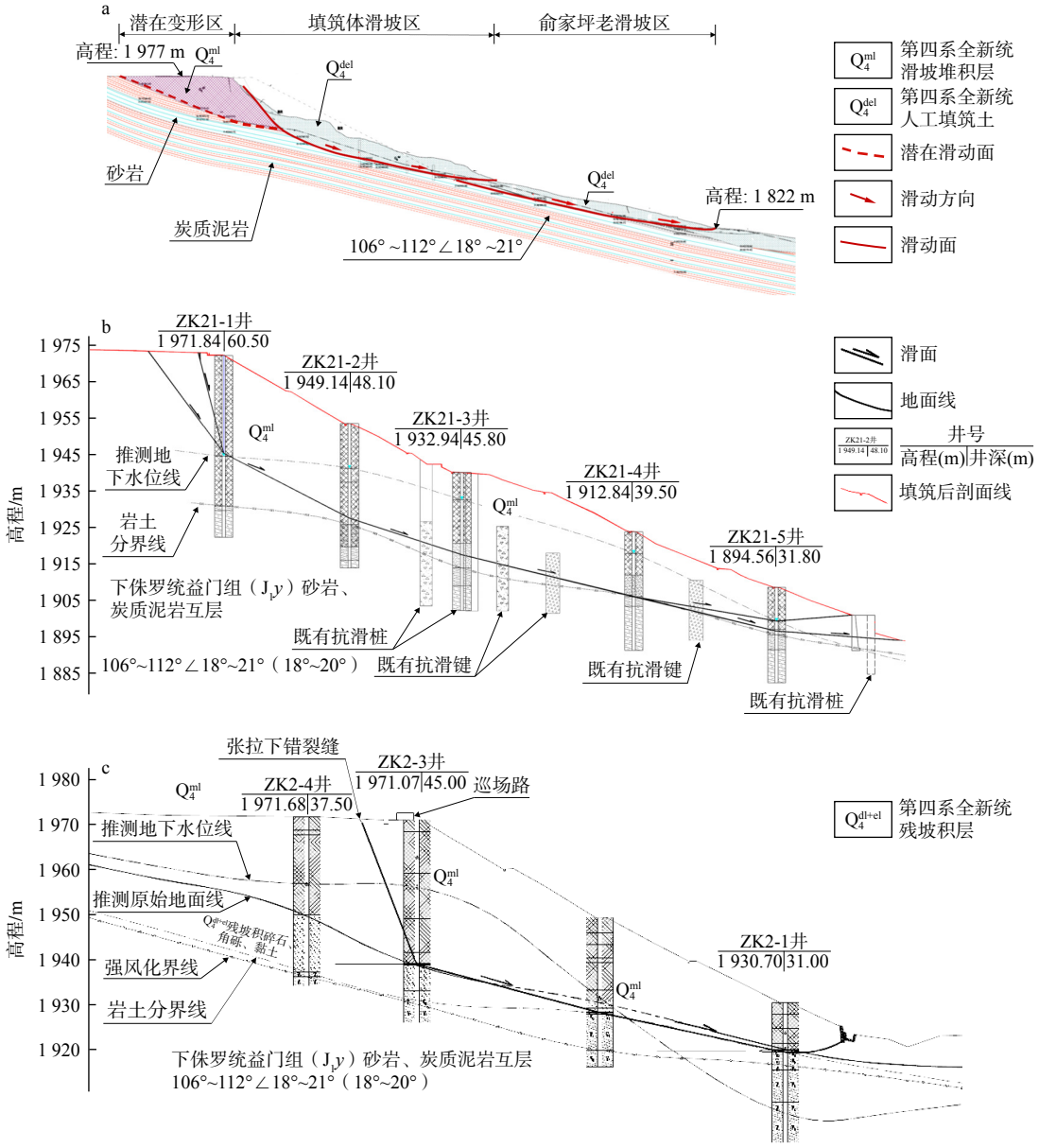



图 4　12#(a)、9#(b)、13#(c) 滑坡工程地质剖面简图

Fig. 4　Schematic engineering geological profiles of landslides 12#(a), 9#(b), 13#(c)

市东南部保安营条形山脊部，整体地形呈鞍状。机场建设以后，经填挖改造，于山脊顶部形成平坦的飞行区，南北长约 3.5 km，东西宽约 0.7 km，高程 1 975.00 ~ 1 976.00 m，东侧边坡为高填方边坡，填筑最高 128 m，坡度 25° ~ 26°。由于建设期间对地形改造，高填方边坡后部形成了宽缓平台，且原始边坡坡面径流路径及地下水排泄通道被填筑体改造，形成了地表水及地下水向滑坡区汇集的有利条件，见图 5。



图 5　降雨后土面区积水情况

Fig. 5　Water accumulation on ground surface after rainfall

(2)易滑地层及顺倾坡体结构

研究区出露地层上部为第四系地层，以人工填筑土（$Q_4^{ml}$）、残坡积层（$Q_4^{dl+el}$）、滑坡堆积层（$Q_4^{del}$）为主，下覆基岩为侏罗系下统益门组($J_1y$)地层，以炭质泥岩、泥岩及砂岩为主，呈互层状或透镜体状产出。岩层倾向与坡体倾向相近，产状为 106° ~ 112°∠18° ~ 21°，岩层走向与边坡走向小角度相交，形成特

殊的上软下硬单向顺坡缓倾坡体结构，见图 4。此坡体结构上部为软弱破碎砂泥岩填筑体，下部为硬质厚层砂泥岩互层块状岩体，且单斜顺倾，发育有 2 组张节理：① J1，产状为 65° ~ 87°∠85° ~ 87°，陡倾结构面；② J2，产状 264° ~ 280°∠82° ~ 86°，陡倾结构面。2 组张节理，均张开，使得在强降雨和地下水联合作用下，上覆软弱土体沿下伏基岩顶面极易滑动。

### 2.2 外部诱发因素

(1)降雨

研究区属于南亚热带为基调的干热河谷气候，年平均降雨量 764.8 mm，年最大降雨量 1 025.2 mm，见图 6a。由图 6b 可知，降雨主要集中在 6–9 月，占全年累计降雨量的 69%，具有降雨集中且短时强降雨多发的特点。高填方边坡后缘为机场跑道区域及宽缓的基岩裸露地段，汇水面积达 2.09 km$^2$，为滑坡区域提供了有利的汇水条件。由于研究区为特殊的上软下硬顺倾坡体结构，且上部填筑体为破碎岩石填料，降雨极易下渗，一方面导致滑坡体含水率增大，重量增加；另一方面降雨下渗至相对隔水的基岩顶面汇集，不仅软化了基岩顶面岩体抗剪强度，形成滑动面，而且形成了一定的静水压力增大了下滑力。

(2)地下水

工程地质勘察表明，研究区存在 2 种类型的地下水，即赋存于松散堆积层中的孔隙水和基岩中的裂隙水。松散堆积层孔隙水主要赋存于人工填筑土及第四系残坡积层、滑坡堆积层中。由物探成果(图 7)分析可知，电性结构分 2 层，顶部为相对低阻体，为坡体上部填土层的电性反映，底部为相对高阻区，为下部滑床基岩的电性反映。物探揭示填土区上层滞水较发育。钻探过程中填土内亦可见多处渗水层位。土工试验表明，填土中黏土含量较高，且含水率高，测得含水率平均值为 17% ~ 20%，局部呈饱和状态(图 8)。第四系残坡积、滑坡堆积层分布于填筑体底部，由于高填方压缩了残坡积层，减小了其渗流通道，造成填筑体中水位升高，形成的静水压力，对坡体产生强大的侧向压力，增大了下滑的风险。基岩裂隙水赋存于侏罗系砂岩、炭质泥岩互层中，由于研究区为单斜顺倾构造，砂岩、炭质泥岩完整性相对较好，地下水在该处以层间裂隙水赋存，砂岩坚硬，裂隙较发育，为相对含水层，炭质泥岩质软易发生塑性变形，为相对隔水层。降雨长期入渗后，转化为基岩裂隙水，在相对隔水层富集，并导致软弱带软化，增大了下滑力。

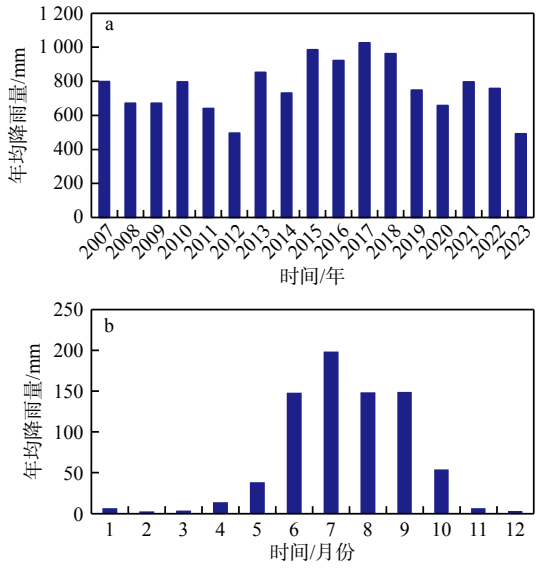



图 6　研究区降雨量分布

Fig. 6　Rainfall distribution in the study area

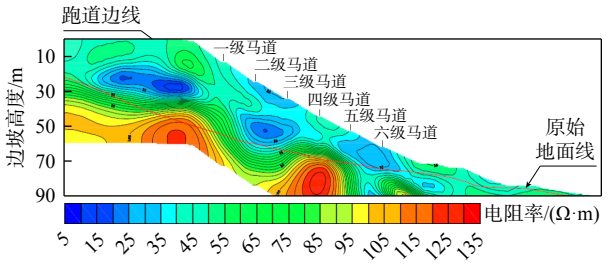



图 7　典型物探成果

Fig. 7　Typical geophysical exploration results

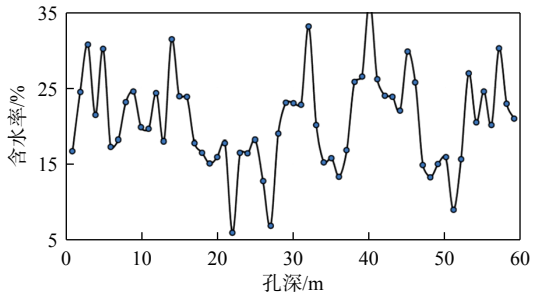



图 8　钻孔不同深度土体含水率

Fig. 8　Soil moisture content at different borehole depths

由以上成因分析可知，攀枝花机场高填方滑坡是在内外因综合作用下形成的。有利于地表水汇集的地形地貌和有利于降雨入渗特殊的上软下硬单向顺坡缓倾坡体结构是其产生的内因。降雨集中且短时暴雨多发，地下水丰富且容易富集于相对隔水层是其产生的外部诱发因素。

### 2.3 滑坡成灾演化机理

根据上述成因分析可知，该滑坡成灾离不开降雨及地下水的影响[38]。推断该滑坡演化成灾机理，应首先分析强降雨入渗条件下高填方滑坡渗流影响

模式。

（1）地下水渗流补径排特征

根据地下水类型、埋深、坡体结构及对填方边坡影响程度，研究区地下水自上而下分为上层滞水、基岩−堆积层接触带水及深层地下水，具体见图 9。

上层滞水赋存于地下水位线以上填筑土层中，机场东侧填筑体坡顶土面区宽阔且地势平坦，坡面植被茂密，有利于地下水的汇集。地下水沿碎、块石填料压实度相对较低区域汇集下渗至压实度相对较高区域时，径流受阻形成上层滞水。其排泄方式为：一方面沿由高黏粒含量、压实度较高区域组成的相对隔水底板边缘缓慢下渗补给潜水含水层；另一方面在雨季持续降雨导致含水层土体达到饱和后沿坡面渗出排泄。基岩−堆积层接触带水赋存于第四系堆积层底部至基岩面以下一定范围内。机场填筑前，地表第四系松散层较薄，地下水为松散层孔隙水和浅表层基岩裂隙水共同组成的潜水含水系统，且坡面连续分布多个鱼塘，为地下水露头。鱼塘多位于堆积层内部，系该层水排泄形成，其补给来源是大气降水直接入渗。鱼塘的分布反映了该层水径流和以“径流−排泄−入渗−径流−排泄−入渗”方式向坡外排泄的规律。机场填筑后，填土覆盖于坡面上部，减少了大气降水的直接入渗面，且导致残坡积层压缩，减小甚至堵塞了基岩裂隙水的原有排泄通道，导致填筑体坡脚地段地下水位升高。深层基岩裂隙水埋深较大，受其互层状的岩层组合关系影响，其主要在含水层在地表出露处接受大气降水的补给，沿层面、层间裂隙向岩层倾伏方向径流，至低地势含水层出露处排泄。

（2）降雨环境下动态水位对填方边坡的影响

为评价降雨对地下水补给、径流及排泄的影响，设置地下水监测孔（ZK2-2），对地下水位进行了长期监测，结果见图 10。由图 10 可以看出，地下水位在汛期相对较高，雨后地下水位有一定的抬升，随着旱季的到来，地下水位呈下降趋势，并呈持续降低之势，说明降雨对地下水的变化起控制作用，高填方边坡地下水受降雨及季节变化影响较明显。雨季地下水在填筑体边坡内明显升高，对坡体形成静水压力和

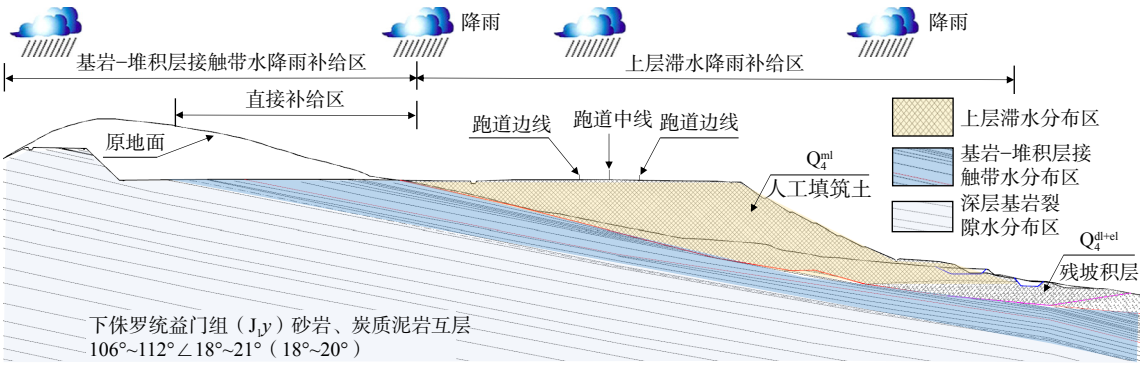



图 9　降雨−地下水补径排示意

Fig. 9　Schematic diagram of the rainfall and groundwater recharge, flow and discharge

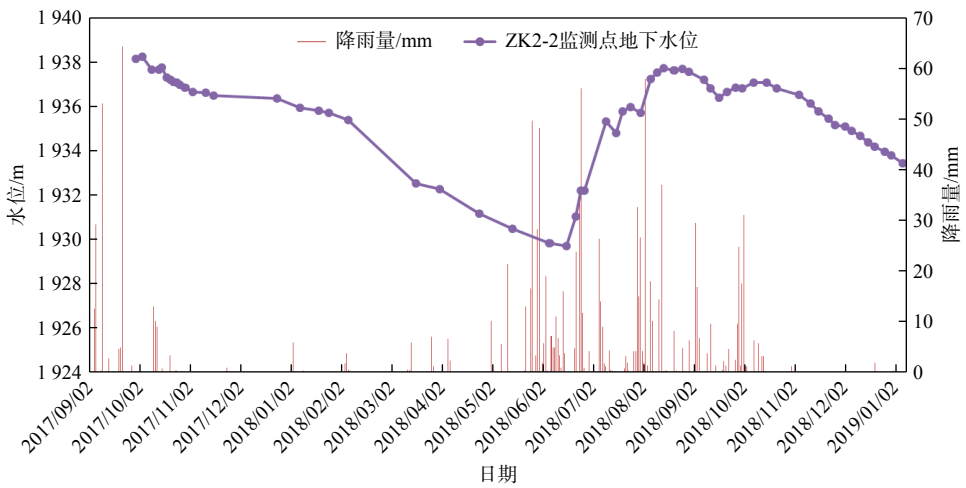



图 10　典型钻孔水位−降雨量动态变化历时曲线

Fig. 10　Hydrograph of groundwater level and rainfall variation in typical borehole

动水压力，由此产生强大的侧向压力，又由于填方边坡巨大的临空面，因此增大填筑体高边坡向下滑动的动力。

(3)演化成灾机理

研究区每年雨季集中且暴雨频发，强降雨入渗后，填料中细粒土在渗透力的拖拽作用下，向下部相对隔水炭质砂泥岩互层基岩顶面富集，渗流通道在其顶部被阻，在漫长时间效应下，细粒土在此富集，形成了一层灰白色泥膜，即为滑面。每年雨季受地下水升高影响，基覆界面附近软弱面长期浸水处于饱和状态，土体软化，抗剪强度衰减，整体形成滑动带。

该高填方边坡每年雨季强降雨入渗后，自重应力增大，且产生累进性加载。又由于坡体中孔隙水压力和动静水压力的联合作用，填筑体沿基覆界面附近软弱面蠕动变形逐渐增大。随着时间累计，在坡体已有的支挡结构附近形成应力集中，抗滑支挡结构逐渐被剪断，产生了累进性的破坏，滑面逐渐贯通。

总之，该高填方边坡失稳演化机制可以概括为：强降雨长期入渗–地下水升高–基覆界面软弱面土体软化且抗剪强度衰减–推移式蠕滑–支挡结构失效–累进性滑移剪断–整体滑动。

## 3 控滑关键技术

攀枝花机场高填方施工前清除了原地面覆盖层，对基覆界面也进行了处理，并实施了大量抗滑支挡工程进行预加固。但由于未认识到基岩顶面炭质泥岩在有利于降雨入渗特殊的单向顺层缓倾斜坡地带，在地下水作用下其长期抗剪强度衰减很快，未能彻底将其清除。高填方坡脚及填方体内排水工程也较少。最终，该高填方边坡沿基覆界面软弱层产生了滑动变形。

基于以上分析可知，该高填方滑坡产生的最直接因素为填方体地下水丰富，且均为厚层大型填方滑坡，滑坡推力巨大，因此，整治工程应采取抗滑强支挡结合疏排地下水并重的治理理念。抗滑支挡工程采取大截面矩形抗滑桩–预应力锚索组合支挡，地下排水工程采取排水隧洞或集水井疏排地下水。例如：攀枝花机场 13#滑坡治理采用坡脚设锚索抗滑桩支挡，在滑坡体后部设置自流式集水井结合仰斜孔疏排地下水，工程布置平面图见图 11，工程治理断面见图 12b。攀枝花机场 12#滑坡治理采用坡脚设 2 排锚索抗滑桩支挡，在滑坡体后部设置排水隧洞疏排地下水，工程治理断面见图 12a。

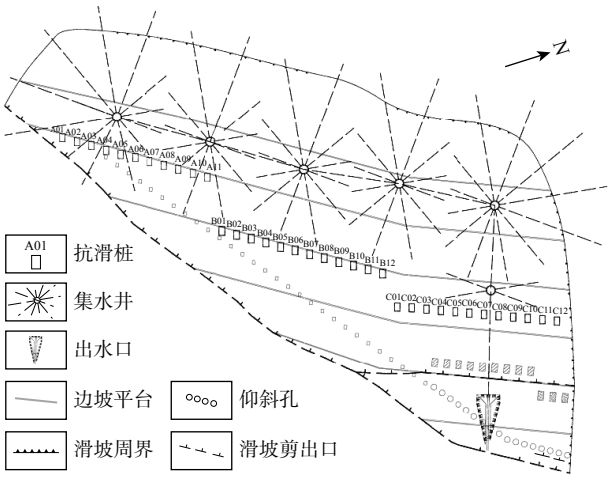



图 11 13#滑坡治理平面简图

Fig. 11 13# landslide treatment schematic

治理工程竣工后，对地下排水工程效果进行了长期监测。12#滑坡排水隧洞降雨量–流量–时程曲线见图 13，13#滑坡集水井降雨量–流量–时程曲线见图 14。由图 13，14 可知，12#滑坡截水隧洞、13#滑坡集水井涌水均具有季节性变化的特点，且受降雨变化显著，雨后涌水量变化与降水量呈正相关。2 处地下排水结构排水效果良好，及时排走了坡体后部下渗的地下水。

需要指出的是，集水井和排水隧洞中设置的仰斜排水孔投入使用较长时间后，由于含水层中细颗粒流失，容易导致仰斜孔淤塞。排水工程实施若干年后，在评估其排水效果后，应重新打孔，修复仰斜孔排水能力。

## 4 讨 论

攀枝花机场高填方边坡在建设期投入大量资金预加固的情况下，在运营多年后仍然产生多处特大型滑坡灾害，迫使投入巨资进行整治，经验教训深刻，值得深思。

(1)基覆界面软弱层抗剪强度控制问题。攀枝花机场高填方工程勘察设计阶段，由于没有充分重视基覆界面软弱层岩土体在地下水等不利因素下物理力学性质的衰减问题，滑带土在滑坡蠕变滑动过程中，存在着在复杂的物理力学条件，滑动带土力学特性的时间效应和强度损伤导致 6 年后产生多处滑坡灾害。图 15 给出了滑带土直剪和长期的剪切试验抗剪强度 $\tau_f$ –正应力 $\sigma$ 曲线，测量时间段分别为 10 h，1，3，5 d。由图 15 可知，滑带土长期强度比天

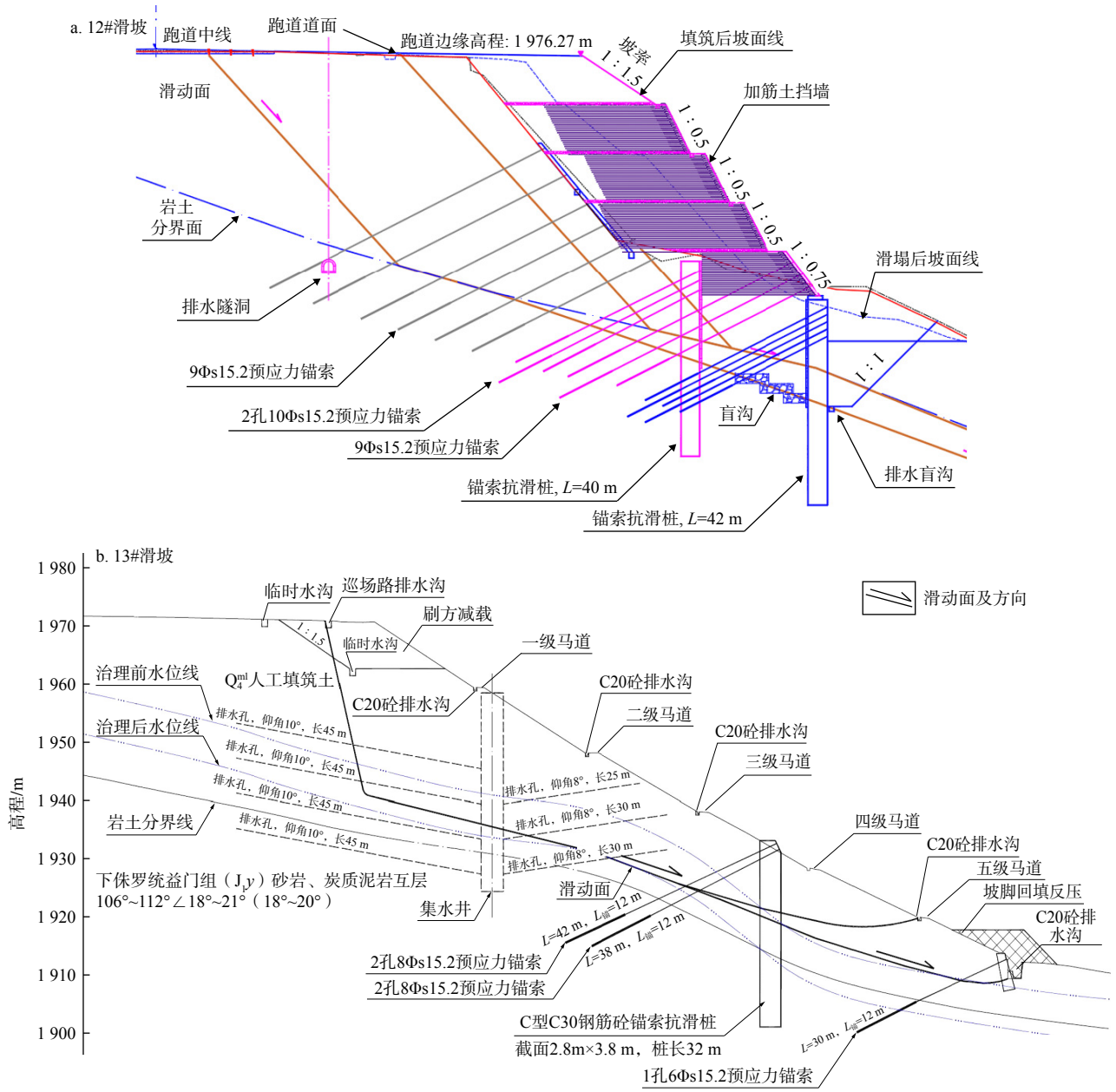



图 12　滑坡治理工程断面（*L*. 锚索总长度；$L_{锚}$. 锚固段长度）

Fig. 12　Section of landslide treatment engineering

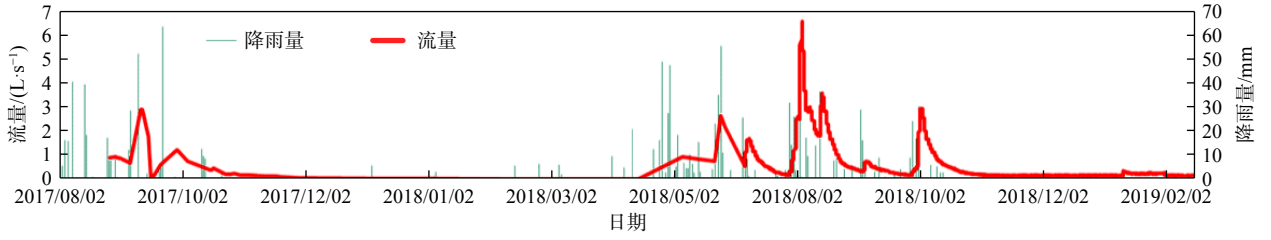



图 13　12#滑坡排水隧洞流量−降雨量−时程曲线

Fig. 13　Rainfall-discharge-time relationship for 12# landslide drainage tunnel

然直剪强度降低很多。因此，山区斜坡地带填筑的高填方边坡工程应重视工后基覆界面软弱层抗剪强度稳定控制问题。

（2）地下疏排水工程设置问题。攀枝花机场高填方边坡由于在勘察设计阶段没有充分认识到特殊的有利于地表水汇集的地形地貌和有利于降雨入渗特殊的上软下硬单向顺坡缓倾坡体结构，地下水渗流补径排特征，地下排水措施简单，仅设置简单渗水

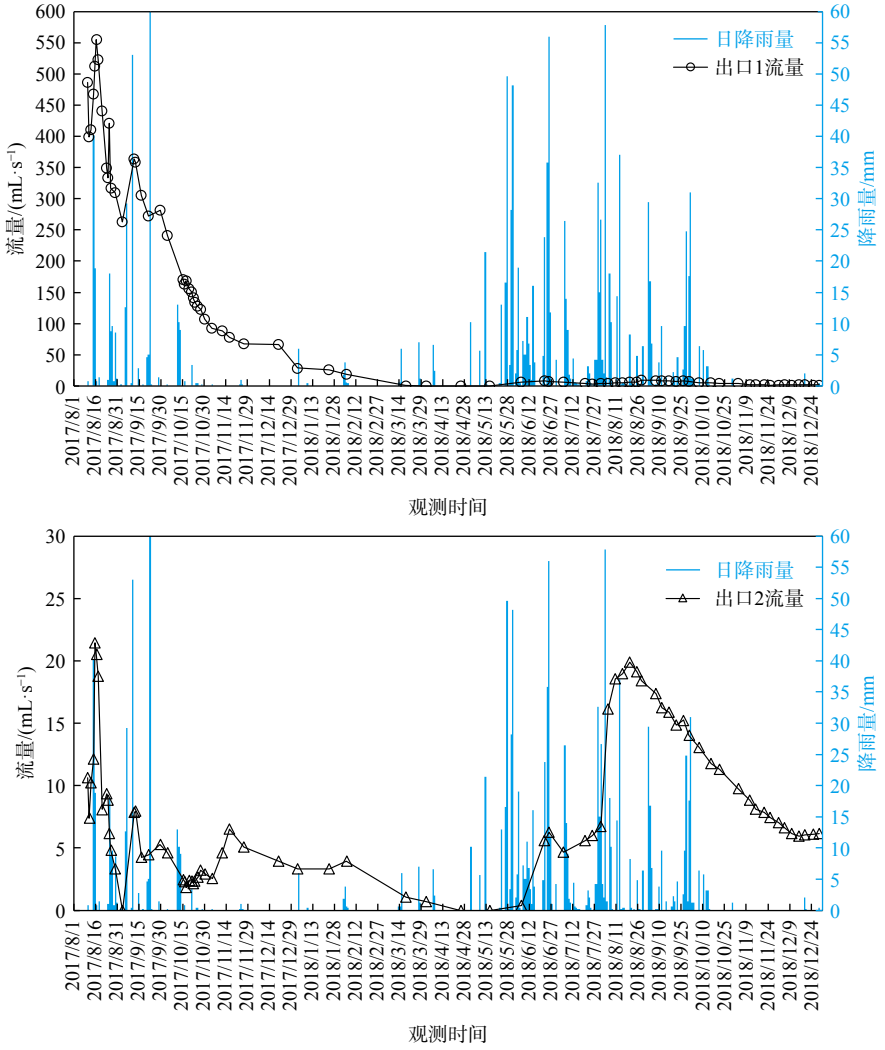



图 14　13#滑坡集水井流量−降雨量−时程曲线

Fig. 14　Rainfall-discharge-time relationship for 13# landslide collecting well

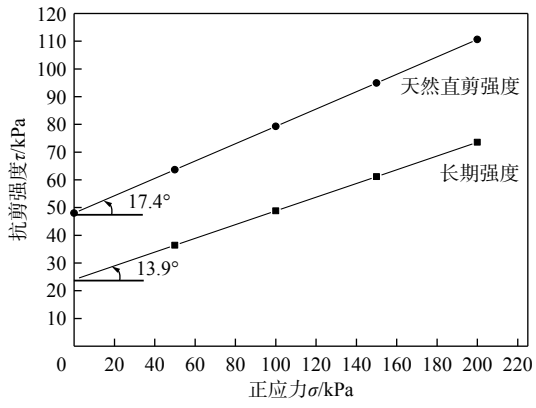



图 15　天然直剪强度与长期强度对比（图中角度均为内摩擦角）

Fig. 15　Comparison between natural direct shear strength and long-term strength

盲沟。没有充分排除坡体基覆界面附近的地下水，一味强调刚性支挡，导致抗滑支挡结构的最终失效。因此山区机场高填方工程应加强坡体及基覆界面软弱层地下排水工程措施的设置。

## 5　结　论

(1)攀枝花机场高填方边坡变形破坏是在内外因综合作用下形成的。有利于地表水汇集的地形地貌和有利于降雨入渗特殊的上软下硬单向顺坡缓倾坡体结构是其产生的内因。降雨集中且短时暴雨多发，地下水丰富且容易富集于相对隔水层是其产生的诱发因素。

(2)攀枝花机场高填方边坡失稳演化机制可以概括为：强降雨长期入渗−地下水升高−基覆界面软弱面土体软化且抗剪强度衰减−推移式蠕滑−支挡结构失效−累进性滑移剪断−整体滑动。

(3)此类高填方滑坡再整治应采取抗滑强支挡结合疏排地下水并重的治理理念。抗滑支挡工程采取大截面矩形抗滑桩−预应力锚索组合支挡，地下排

水工程采取排水隧洞或集水井疏排地下水。再治理工后效果监测表明,排水工程效果良好。

所有作者声明不存在利益冲突。
The authors declare that no competing interests exist.

## 参考文献:

[1] 刘宏, 李攀峰, 张倬元. 九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 90-93.
LIU H, LI P F, ZHANG Z Y. Prediction of the post-construction settlement of the high embankment of Jiuzhai-Huanglong airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 90-93. (in Chinese with English abstract)

[2] 李秀珍, 许强, 孔纪名, 等. 九寨黄龙机场高填方地基沉降的数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2188-2193.
LI X Z, XU Q, KONG J M, et al. Numerical modeling analysis of settlements of high fill foundation for Jiuzai-Huanglong airport[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2188-2193. (in Chinese with English abstract)

[3] 田洪宁. 六盘水月照机场跑道高填方及下伏顺层边坡稳定性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
TIAN H N. Study of the slope stability of Liu Pan Shui Yue Zhao airport runway high embankment and underlying consequent layer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese with English abstract)

[4] 贺林林, 钱进, 赵陈雨, 等. 巫山神女峰机场高填方边坡稳定性分析方法研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 646-651.
HE L L, QIAN J, ZHAO C Y, et al. Study on stability analysis method of high fill slope of Wushan Shennü Peak airport[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(5): 646-651. (in Chinese with English abstract)

[5] 安鹏, 张杰, 倪万魁, 等. 安康机场罗家河膨胀土高填方沉降变形特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 833-839.
AN P, ZHANG J, NI W K, et al. Settlement and deformation characteristics of high fill of Luojiahe expansive soil in Ankang airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 833-839. (in Chinese with English abstract)

[6] YAO Y P, QI S J, CHE L W, et al. Postconstruction settlement prediction of high embankment of silty clay at Chengde airport based on one-dimensional creep analytical method: Case study[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 05018004.

[7] 黄建, 姚仰平. 高填方边坡失稳时间预测的实用模型 [J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4057-4064.
HUANG J, YAO Y P. A practical model for predicting the failure time of high fill slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 4057-4064. (in Chinese with English abstract)

[8] SONG E X, CAO G X. Characteristics and simplified calculation method of creep settlement of high fill foundation in mountain area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1711-1718.

[9] 涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等. 机场高填方边坡填筑过程的变形演化规律分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1442-1450.
TU Y L, LIU X R, ZHONG Z L, et al. Evolution law of deformation of high fill slope of airport during filling process[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1442-1450. (in Chinese with English abstract)

[10] CEN D F, HUANG D, REN F. Shear deformation and strength of the interphase between the soil-rock mixture and the benched bedrock slope surface Geotechnica[J]. Acta. Geotechnica, 2017, 12(2): 391-413.

[11] 曹光栩. 山区机场高填方工后沉降变形研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
CAO G X. Study on post-construction settlement of high fill foundation in mountainous airport[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese with English abstract)

[12] 杨校辉, 朱彦鹏, 周勇, 等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3977-3990.
YANG X H, ZHU Y P, ZHOU Y, et al. Time-space monitoring and stability analysis of high fill slope slip process at a airport in mountain region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3977-3990. (in Chinese with English abstract)

[13] LI P Y, QIAN H, WU J H. Environment: Accelerate research on land creation[J]. Nature, 2014, 510(7503): 29-31.

[14] 丁秀美. 西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
DING X M. A study on the deformation and stability of typical debris & embankment slope with complicated environment in southwestern China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. (in Chinese with English abstract)

[15] 王恭先. 滑坡防治方案的选择与优化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3867-3873.
WANG G X. Selection and optimization of landslide prevention scheme[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3867-3873. (in Chinese)

[16] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3818-3827.
WANG G X. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818-3827. (in Chinese with English abstract)

[17] 吴红刚, 牌立芳, 赖天文, 等. 山区机场高填方边坡桩–锚–加筋土组合结构协同工作性能优化研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1498-1511.
WU H G, PAI L F, LAI T W, et al. Study on cooperative performance of pile-anchor-reinforced soil combined retaining structure of high fill slopes in mountainous airports[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1498-1511. (in Chinese with English abstract)

[18] 徐邦栋. 滑坡分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 544-548.
XU B D. Landslide analysis and prevention[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001: 544-548. (in Chinese)

[19] 吴红刚, 冯文强, 艾挥, 等. 山区机场高填方边坡工程实践与研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 385-400.
WU H G, FENG W Q, AI H, et al. Engineering practice and re-

search on high fill slope of mountainous airport[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 385-400. (in Chinese with English abstract)

[20] 郭剑峰, 陈正汉, 郭楠. 延安新区高填方工程的变形与水分迁移耦合分析 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 143-148.
GUO J F, CHEN Z H, GUO N. Application of incremental nonlinear consolidation theory for unsaturated soil in high fill projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 143-148. (in Chinese with English abstract)

[21] 徐则民, 张倬元, 许强, 等. 九寨黄龙机场填方高边坡动力稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1883-1890.
XU Z M, ZHANG Z Y, XU Q, et al. Dynamic stability analysis of high fill slope of Jiuzhai-Huanglong airfield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1883-1890. (in Chinese with English abstract)

[22] WANG J D, XU Y J, MA Y, et al. Study on the deformation and failure modes of filling slope in loess filling engineering: A case study at a loess mountain airport[J]. Landslides, 2018, 15(12): 2423-2435.

[23] WANG H H, TUO X G, ZHANG G Y, et al. Panzhihua airport landslide (Oct. 3rd 2009) and an emergency monitoring and warning system based on the Internet of Things[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(5): 873-884.

[24] 谢春庆, 刘汉超. 西南地区机场建设中的主要工程地质问题 [J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(2): 32-35.
XIE C Q, LIU H C. Important geotechnical engineering problems on airports in Southwest China[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(2): 32-35. (in Chinese with English abstract)

[25] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 黄土贴坡高填方变形破坏机制研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 518-528.
MA Y, WANG J D, PENG S J, et al. Deformation and failure mechanism of high sticking loess slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 518-528. (in Chinese with English abstract)

[26] 谢春庆, 潘凯, 廖崇高, 等. 西南某机场高填方边坡滑塌机制分析与处理措施研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1083-1093.
XIE C Q, PAN K, LIAO C G, et al. Landslide mechanism and treatment measures for high fill slope at airport in southwestern China[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1083-1093. (in Chinese with English abstract)

[27] 谷天峰, 王家鼎, 王念秦. 吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2009-2016.
GU T F, WANG J D, WANG N Q. Geological features of loess landslide at Lyuliang airport and its 3D stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2009-2016. (in Chinese with English abstract)

[28] 朱才辉, 李宁. 基于修正 FDA 方法的黄土高填方地基工后沉降分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3408-3417.
ZHU C H, LI N. Post-construction settlement analysis of loess-high filled foundation based on modified FDA approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3408-3417. (in Chinese with English abstract)

[29] GHIASSIAN H, GHAREH S. Stability of sandy slopes under seepage conditions[J]. Landslides, 2008, 5(4): 397-406.

[30] 王林康, 郑子涵, 章广成, 等. 顺层陡倾岩质边坡倾倒模式试验 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 340-354.
WANG L K, ZHENG Z H, ZHANG G C, et al. Test study on the toppling mode of steep bedding rock slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 340-354. (in Chinese with English abstract)

[31] 卢操, 晏鄂川, 陈侠廷, 等. 区域滑坡灾害降雨预警的 I-D-M 阈值模型研究 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(6): 157-165.
LU C, YAN E C, CHEN X T, et al. Research on the I-D-M threshold model for regional rainfall-induced landslide hazard early warning at a regional scale[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(6): 157-165. (in Chinese with English abstract)

[32] 聂超, 韩文喜, 宋柏冰. 西南某机场高填方边坡于不同降雨条件下的变形影响 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 174-183.
NIE C, HAN W X, SONG B B. Influence of different rainfall conditions on deformation of high fill slope at a airport in the Southwest[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 174-183. (in Chinese with English abstract)

[33] 饶炜博, 陈刚, 邹崇尧, 等. 基于历史样本增强的滑坡智能识别改进算法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 48-61.
RAO W B, CHEN G, ZOU C Y, et al. An improved algorithm for intelligent landslide identification based on historical sample enhancement[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 48-61. (in Chinese with English abstract)

[34] 龚志红, 李天斌, 龚习炜, 等. 攀枝花机场北东角滑坡整治措施研究 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 237-243.
GONG Z H, LI T B, GONG X W, et al. Remediation measures on the landslide in fill slopes in north-east part of Panzhihua airport[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 237-243. (in Chinese with English abstract)

[35] 李天斌, 田晓丽, 韩文喜, 等. 预加固高填方边坡滑动破坏的离心模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3061-3070.
LI T B, TIAN X L, HAN W X, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of a pile-stabilized high fill slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3061-3070. (in Chinese with English abstract)

[36] 李天斌, 刘吉, 任洋, 等. 预加固高填方边坡的滑动机制: 攀枝花机场 12#滑坡 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 723-731.
LI T B, LIU J, REN Y, et al. Sliding mechanism of high-fill slope with pre-reinforced piles at Panzhihua airport[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 723-731. (in Chinese with English abstract)

[37] 马翔, 赖国泉. 某山区机场高填方滑坡变形特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 16-23.
MA X, LAI G Q. Analysis on deformation monitoring of a high fill landslide in a mountain airport[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 16-23. (in Chinese with English abstract)

[38] 赖国泉, 焦海平. 井–孔联合疏排高填方滑坡地下水典型案例分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 106-114.

LAI G Q, JIAO H P. Analysis of typical cases of groundwater in high fill landslide with combined well-hole drainage[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 106-114. (in Chinese with English abstract)

Summary for “山区机场高填方滑坡特征、成灾机理、防治及启示：以攀枝花机场为例”

# Characteristics，disaster mechanism，prevention and treatment and enlightenment of airport high fill landslide in mountainous area：Taking Panzhihua Airport as an example

LAI Guoquan[1*]，JIAO Haiping[1,2]，WU Honggang[1]，ZHANG Qianyi[1]，CHANG Gang[1]，FENG Wenqiang[1]，ZHANG Junde[1]

1. Northwest Research Institute Co., Ltd. of C.R.E.C., Lanzhou 730000, China；
2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

* Corresponding author， E-mail：273085646@qq.com

**Abstract**：[**Objective**] Due to the unique engineering geological conditions associated with the mountainous terrain, the construction of airports in such areas has resulted in numerous high-fill slope projects. The primary challenge lies in controlling deformation and ensuring the long-term stability of these high-fill slopes during operation. Taking Panzhihua Airport as a case study, this paper systematically reviews the history of geological hazard history during both the construction and operational phases, and provides a detailed description of the development characteristics of three typical high-fill landslides that occurred during operation. [**Methods**] Through engineering geological investigations and in-situ geotechnical testing, the causes and evolutionary mechanisms of these high-fill landslides are analyzed, and key technologies for landslide control are proposed. [**Results**] The results indicate that the internal causes including topography conducive to surface water concentration and the specific unidirectional gently inclined slope structure with soft upper and hard lower layers that facilitate rainfall infiltration. The triggering factors are characterized by concentrated rainfall, frequent short-term rainstorms, abundant groundwater, and the tendency to accumulate above relatively impermeable layers. The instability evolution mechanism of the high-fill slope at Panzhihua Airport can be summarized as follows: long-term infiltration of heavy rainfall, rising groundwater level, softening and shear strength degradation of the weak interface at the fill-bedrock contact, push-creep sliding, failure of retaining structures, progressive sliding and shearing, overall slope failure. The construction of high-fill slopes in mountainous airports should focus on controlling the shear strength of weak layers at the fill-bedrock interface and implementing underground drainage systems. [**Conclusion**] For remediation, anti-slide piles combined with drainage tunnels or catchment wells were adopted to provide strong support and groundwater drainage. Post-construction monitoring confirms satisfactory drainage performance. The results offer valuable references for the deformation mechanisms and remediation strategies in other high-fill projects.

**Key words:** high-fill slope； airport in mountainous area； landslides； groundwater； disaster mechanism； deformation control；Panzhihua Airport

Received：2024-05-04；Revised：2024-07-06；Accepted：2024-07-09

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240216