

# 成都龙泉山某岩质滑坡变形特征及影响因素分析

高胜军

中节能建设工程设计院有限公司

**摘要:** 龙泉山一处挖方岩质边坡发生滑坡, 利用地质调查、测绘、钻探等手段, 分析了滑坡发生的原因, 该区域地质构造复杂, 岩体破碎, 在长期卸荷作用和降雨影响下, 形成了沿破碎岩体内部圆弧形滑动的滑坡。为类似岩质滑坡研究提供参考。

**关键词:** 地质灾害; 岩质滑坡; 圆弧形滑动; 降雨

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.06.063

## 一、引言

滑坡是我国最主要的地质灾害之一, 随着近年来我国经济发展的快速发展, 高速公路、铁路、工业和民用建筑也快速向山区发展, 部分项目建设场平过程中形成高陡边坡, 偶有项目在切坡脚时即诱发工程滑坡。这不仅严重影响了工程建设的进度, 耗费大量人力、物力, 也对工程建设项目成员的人身财产安全造成严重威胁。

对于山区工程建设项目, 我们工程技术人员多会注意到覆盖层滑坡、顺层岩质滑坡等问题, 在项目建设前期可以采取工程措施对可能发生的滑坡进行防治。但对无外倾不利结构面的岩质斜坡往往重视程度不够, 对岩体破碎程度不够敏感, 对破碎岩体可能沿岩体内软弱面发生的圆弧形滑动预判不足, 常常造成对滑坡灾害治理不彻底、不合理, 为项目后期运行留下安全隐患。本文以龙泉山一处岩质滑坡为研究基础, 通过对滑坡区地形地貌、地层岩性和滑坡变形失稳的过程, 对滑坡的成因机制和影响因素进行了定性分析。

## 二、地质环境条件

### (一) 地形地貌

滑坡区位于龙泉山脉西侧, 地貌单元属成都东部台地向龙泉山过渡浅丘地带。原始地貌为一斜坡, 东高西低, 坡向约 $290^\circ$ , 坡顶最高点高程635.5m。坡脚场平标高550.0~551.5m, 挖方边坡坡口最高处高程595.1~610.5m, 挖方边坡最大高差约59m, 分级放坡(6级), 每级高度8~10m, 马道宽度1.3~2.0m不等, 总体坡度约 $51^\circ$ 。斜坡上部未开挖区域自然斜坡总体坡度约 $24^\circ$ 。

### (二) 地质构造

#### (1) 地质构造

成都地区大地构造单元是扬子准地台的一部分。西侧龙门山区是台缘褶断带, 东侧龙泉山是四川台坳川西台陷区的龙泉山褶断带, 中间是川西台陷区的成都坳陷, 它们具有和地貌一致的分布特征, 呈北东~南西向分带展布。受区域构造应力场作用, 东西两侧构造带对冲上升, 而位于中部的成都坳陷地块相对下降, 并在区内沉积了厚层第四系冲洪积物, 形成成都冲洪积平原。

#### (2) 地震

成都平原地震效应主要属外围强震活动波及区, 特别是受成都坳陷盆地边缘的龙门山震源带及龙泉山震源

带的影响。龙门山断裂带与龙泉山断裂既是构造的分区界线, 又是盆地刚性块体的边界, 有利于应力集中, 容易发生中、强地震。据地震活动记载, 龙门山震源带及龙泉山震源带地震烈度大, 频度高。2008年5月12日汶川8.0级地震是对成都市影响最大, 根据国家地震局发布的汶川8.0级地震烈度分布图, 此次波及成都市的地震烈度为7度。成都断陷盆地内的基底断裂在早中更新世构造活动较强烈, 但自第四纪晚更新世、尤其是全新世以来, 成都断陷盆地构造活动呈减弱趋势, 蒲江一新津等断裂即或存在发震可能, 也不会超过5.5级, 其基本烈度不会超过7度。

### (三) 地层岩性

斜坡区地层主要为第四系残坡积粉质黏土( $Q_4^{el+dl}$ )、下伏基岩为白垩系灌口组泥岩层、泥质砂岩层( $K_2g$ )。

第四系残坡积粉质黏土为灰褐色~黄褐色, 呈可塑状态, 稍湿~湿。韧性及干强度中等, 摇震反应中等, 主要分布在原始斜坡表层。

下伏基岩为白垩系灌口组泥岩、砂质泥岩层。泥岩根据风化程度可分为强风化和中等风化, 褐红、紫红色, 湿, 矿物成分主要由泥质、黏土矿物等组成, 泥质结构, 层状构造, 上部强风化层已风化为土状, 中下部多呈碎块状, 局部地段夹中等风化泥岩、砂岩薄层。部分区域受石方开挖爆破影响严重, 基本为岩块状。中风化层节理裂隙一般发育, 岩体破碎, 岩质较软, 遇水易软化, 为极软岩。泥质砂岩呈褐红色, 泥质结构, 层状构造, 岩体较破碎, 原岩结构较清晰, 裂隙很发育, 该层上部强风化呈砂状。隙间充填褐色氧化铁薄膜等, 局部包含中风化硬块, 下部砂岩风化程度有所减弱, 多呈碎块状、短柱状, 长度5~15cm, 局部夹有中等风化硬块, 岩性软硬不均。钻探取芯多呈碎块或短柱状, 局部岩体含石膏, 具溶孔、溶隙等。

## 三、滑坡体形态特征

### (一) 滑坡变形历史

斜坡区因工程建设开挖形成最大高差约59m的挖方边坡, 分6级放坡, 坡比约1:0.4~1:0.75不等, 总体下陡上缓, 每级高度8~10m, 马道宽度1.3~2.0m不等(马道上做了绿化花槽, 高度约30cm), 总体坡度约 $51^\circ$ 。坡面上做网喷护面层、泄水孔。资料显示网喷厚度8cm, 配筋为8mm直径三级钢, 间距 $200 \times 200$ mm。最下一级采用排桩+冠梁的支挡措施, 桩长16m(悬臂约5~7m), 桩径1.5m, 桩芯距3.0m, 旋挖灌注C30钢筋混凝土现浇工艺。冠梁截面 $1.5 \times 1.5$ , C30钢筋混凝土现浇工艺。

9月初, 成都地区连续降雨, 坡面网喷局部破坏, 基岩外露。根据现场巡查, 发现支护桩位置出现较大的位移, 桩身、冠梁均出现贯通裂缝, 桩间岩体出露点

可以看见明显的剪出口，岩体表面光滑，擦痕明显。网喷坡面存在大量拉张裂缝，面层混凝土破裂，局部位置面层钢筋出现大幅度的弯曲等情况，坡面整体存在鼓胀和下座的现象。坡顶出现大面积拉张裂缝和串珠式土洞，裂缝局部张开超过1.0m，深度超过2.0m，两处土洞深度大于2.5m。在滑坡前、后缘裂缝，错台都较发育，错台最大沉降差达80cm，裂缝宽18cm，可见深度0.5m。次日坡面靠近坡顶的位置出现大面积滑移和垮塌，现场滑动和垮塌的范围不断扩大，斜坡原始地貌大面积暴露。至变形的第三日，坡体全面失稳。根据现场测绘和地质钻探，滑坡对堆积体平均厚15m，滑坡方量约 $12.5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，为中型岩质滑坡。



图1 坡顶串珠式土洞 图2 岩体破碎 图3 前缘剪出口处滑面光滑



图4 滑坡整体失稳后正立面

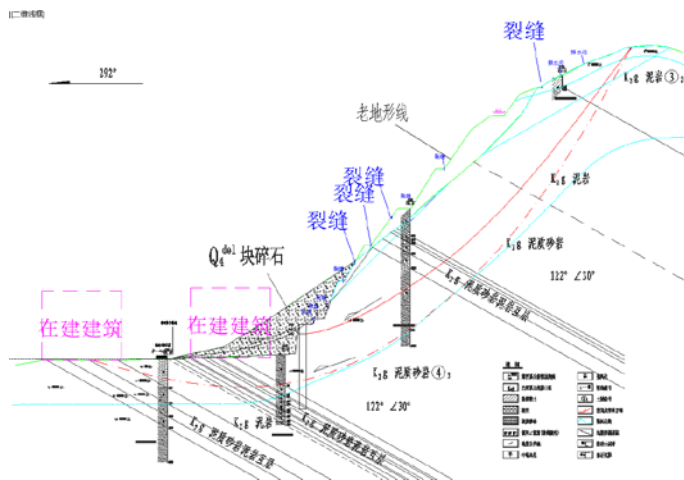


图5 典型断面

土，强风化~中等风化基岩主要为白垩系灌口组泥质砂岩、泥岩。坡脚滑坡对堆积体主要为块碎石土，粒径0.2~100cm不等，块碎石含量超过60%，结构松散，空隙极发育，填充物为全风化砂岩、泥岩和残坡积粉质黏土。

根据现场调查，滑坡提中部岩层风化强烈，岩体破碎，沿岩体中破碎岩体发育多级滑面，典型的为强风化带中的次级滑面和强风化~中等风化的主滑面。

次级滑面为存在于强风化带内，此滑面及基本完全贯通，滑带土为强风化白垩系灌口组泥质砂岩、泥岩。根据现场钻探及地质调查，强风化带裂隙很发育，由于砂岩、泥岩的差异风化，在强风化带中存在多处软弱和破碎带。次级滑面即为强风化带的泥质砂岩、泥岩软弱带。

## (二) 滑坡体形态特征

现场调查显示，滑坡平面形态呈圈椅状，坡向 $290^\circ$ ，主滑方向约 $292^\circ$ ，滑坡主轴长约90m，横宽约120m。滑动前约 $51^\circ$ ，滑动后坡度 $34^\circ \sim 43^\circ$ 。滑坡后壁光滑，呈明显圆弧形。坡体岩层层面产状为 $120^\circ \sim 125^\circ \angle 28^\circ \sim 32^\circ$ ，实测层面间距2~30cm不等，裂隙并未张开；发育两组节理裂隙产状分别是 $195 \sim 210^\circ \angle 66 \sim 72^\circ$ ， $330 \sim 340^\circ \angle 70 \sim 75^\circ$ 。两组裂隙面间距5~50cm，受挖方卸荷作用影响，裂隙张开宽度差异较大，但总体平直光滑，裂隙宽度介于0.5~2mm不等，无填充，局部为泥化夹层。

斜坡区岩体受层面和两组裂隙的共同作用，被切割成碎块状和块状。加之在构造作用和开挖卸荷作用下，岩体呈极破碎~破碎状态。坡体虽然为挖方岩质边坡，但更多的呈现出粗粒土的变形破坏模式。

滑坡发生后，坡脚有大量的滑坡堆积物，滑坡堆积体呈上陡下缓形态。该滑坡的边界特征明显，前缘为房屋修建平场形成的陡坎。左右两侧为斜坡变形的边界裂缝。后缘边界坡顶变形垮塌开裂的裂缝处（至山顶台阶位置），坡顶再往东南方向未发生整体变形滑动。

据现场调查及探坑探槽揭露，滑坡主要为上部覆盖层土体和强风化~中等风化岩层，覆盖层土体为块碎石

主滑面存在于强风化带与中风化分界线的位置，此滑面并未完全贯通，滑带土主要为强风化白垩系灌口组砂岩、泥岩。根据现场钻探及地质调查，强风化带裂隙很发育，由于泥质砂岩、泥岩的差异风化，在强风化带中存在多处软弱和破碎带。本工程主滑面即为强风化带与中风化分界面的砂岩、泥岩软弱带。

## (三) 滑坡稳定性评价

滑坡变形主要受降雨影响。以滑坡主滑面（如图10）为反演计算剖面（采用主滑面滑动变形前自然坡型进行反演算），本滑坡岩体破碎程度为破碎~极破碎，选择圆弧形滑动破坏模式。给定暴雨工况稳定系数为0.95，滑带主要为强风化泥质砂岩和泥岩。计算出各滑坡滑带土的抗剪强度值，各滑坡滑带土的抗剪强度反算值详见下表。

表1 滑带土抗剪参数反算值统计表

土层名称	天然抗剪强度		饱和抗剪强度	
	凝聚力C (kPa)	内摩擦角Φ (度)	凝聚力C (kPa)	内摩擦角Φ (度)
滑带土(破碎带)	22	15	18	12

考虑自重、自重+暴雨和自重+地震三种工况，对滑坡进行稳定性评价，采用传递系数法计算其稳定性系

数。计算滑坡中部两条典型剖面。计算软件采用理正岩土7.0，反复迭代，计算结果如下：

表2 滑坡中部两条典型剖面稳定性计算结果

剖面	滑面	稳定系数					
		工况一	稳定状态	工况二	稳定状态	工况三	稳定状态
主剖面	主滑面	1.112	基本稳定	1.04	欠稳定	1.065	基本稳定
	次级滑面	1.009	欠稳定	0.949	不稳定	0.967	不稳定

滑坡稳定性表明，前缘次级滑面稳定性明显低于主滑滑面，滑坡中部稳定性整体较差，在暴雨工况下绝大部分处于不稳定~欠稳定状态；在地震工况下大部分处于欠稳定~基本稳定状态，可说明滑坡灾害点的稳定性受降雨影响非常明显，其次为地震。

四、成因机制和影响因素分析

(一) 滑坡的成因机制

根据现场调查和室内研究分析，本滑坡灾害属于基岩滑坡，其失稳原因主要是勘查区内由于建筑场平，在斜坡前缘上形成了高陡临空面，加之斜坡区岩体在层面和节理裂隙切割下，岩体破碎~级破碎状态，更呈现处散体状地质体的特点。在暴雨浸入作用下，造成潜在滑移面（岩体破碎带）抗剪强度减低，当滑体滑面剩余下滑力超过抗滑力后，引发滑移失稳现象。

既有治理工程按照岩质挖方边坡的治理思路，采用分级放坡+网喷的方案，坡脚设置抗滑桩，认为桩顶以上岩体放坡后是稳定的。

滑坡上部岩体表现出粗颗粒土质滑坡的破坏模式，分级放坡坡度就过陡了，而网喷面层并不能对滑坡起到治理效果；坡脚抗滑桩虽然被剪断，但未沿断口倾倒，滑坡在桩顶以上已经越顶剪出。

(二) 滑坡的影响因素

影响滑坡稳定性的因素主要有地层岩性、地形地貌条件、气候条件等。

(1) 地层岩性对滑坡的影响

斜坡区地层主要为白垩系灌口组泥质砂岩和泥岩层，均为泥质结构层状构造，自身强度低，岩层层面虽然呈反倾状态，但在受层面和两组裂隙的共同作用，被切割成碎块状和块状。在构造作用和开挖卸荷作用影响下，岩体呈极破碎~破碎状态。坡体虽然为挖方岩质边坡，但更多的呈现出粗粒土的变形破坏模式。

坡体表面岩层风化强烈，结构松散，粒间空隙大，有利于地表水的下渗；物理力学性质差，为易饱水、易软化。坡体内破碎带饱水时极有可能发展成滑坡的滑动带，从而诱发坡体变形失稳。强风化基岩厚度较大，风化程度高，砂泥岩互层，风化差异大，节理裂缝很发育，勘察阶段揭露多层软弱和破碎带发育，为滑坡的发

育提供了地层条件。

(2) 地形地貌条件对滑坡的影响

灾害区位于斜坡地带，地形地貌上属于成都平原到龙泉山过渡的山地地形。虽然斜坡区坡脚人工场平后进行了分级放坡，设置了马道和抗滑桩，但总体坡度仍然较陡，前缘高陡临空面为滑坡的孕育、发生提供了空间条件。

(3) 气候条件对滑坡的影响

成都地区雨量相对较大，降雨对坡体稳定性影响较大，雨水入渗不但增加土体重量，同时降低岩土体抗剪强度指标。同时，降雨入渗进入岩体裂隙将会增大静水压力，对滑坡整体的稳定都是不利的。二大量工程经验表面，降雨是滑坡发生的主要诱因。

结语

龙泉山区地质构造复杂，地层岩性差异大，滑坡、崩塌和不稳定斜坡灾害分布范围广，而各灾点呈现出不同的破坏模式，诱因也各不相同。本滑坡所在区域因坡体破碎，呈典型的圆弧形滑动破坏模式，类似于粗粒土的滑坡破坏模式。本文对该滑坡变形特性和成因机制和影响因素进行了详尽分析，为以后类似地质环境的灾害体研究和治理提供参考。

参考文献

[1] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996.  
 [2] 中华人民共和国标准. 岩土工程勘察规范: GB 500021-2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
 [3] 中华人民共和国行业标准. 铁路工程不良地质勘察规程: TB 10027-2012 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.  
 [4] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学, 2003, 24 (4): 528-532.  
 [5] 中华人民共和国行业标准. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509-2020 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.  
 作者简介: 高胜军(1988-), 男, 地质工程专业, 工程师, 主要从事地质灾害防治、地质勘察、岩土设计工作。