

云南省德钦县住建局滑坡的成因机制及稳定性研究

解道举, 陈战旗, 王松, 汝鑫

(云南地质工程第二勘察院有限公司, 昆明 650217)

摘要: 本文以德钦县住建局滑坡为研究对象, 通过现场勘查和室内分析边坡岩土特征, 重点针对德钦县住建局滑坡地质灾害产生的具体原因进行深入分析。利用极限平衡法, 对边坡进行定性和定量的分析, 结果表明: 住建局滑坡成因主要为地形较陡、地层岩性较破碎、河流侵蚀切割和修路切坡; 滑坡为中型浅层混合式土质滑坡, 目前滑坡处于基本稳定状态, 不利工况下滑坡可能发生整体滑移。

关键词: 滑坡; 稳定性分析; 极限平衡法; 定量分析; 河流侵蚀

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

RESEARCH ON THE GENESIS MECHANISM AND STABILITY OF LANDSLIDES IN DEQIN COUNTY HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT BUREAU, YUNNAN PROVINCE

XIE Dao-ju, CHEN Zhan-qi, WANG Song, RU Xin

(Yunnan Geological Engineering Second Prospecting Institute Co., Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: This paper takes the landslide of Deqin County Housing and Urban-rural Development Bureau as the research object, through on-site investigation and indoor analysis of the rock and soil characteristics of the slope, focusing on in-depth analysis of the specific causes of landslide geological disasters in Deqin County Housing and Urban-rural Development Bureau, using the limit equilibrium method, Qualitative and quantitative analysis of the side slopes were carried out, and the results showed that the main causes of the landslide in the Housing and Urban-Rural Development Bureau were steep terrain, fragmented stratum and lithology, river erosion and cutting, and road construction and cutting slope; the landslide was a medium-sized shallow mixed soil landslide. It is in a basically stable state, and the overall slip may occur on the downslope under unfavorable working conditions.

Key words: landslide; stability analysis; limit equilibrium method; quantitative analysis; river erosion

1 工程概况

住建局滑坡位于德钦县县城西侧 214 国道县城至飞来寺段斜坡下部, 直溪河沿斜坡坡脚流过, 县住建局东北侧, 住建局滑坡平面形态呈不规则形, 主滑方向 110°。滑坡后缘高程 3 147 m, 前缘剪出口高

程 3 089 m, 前后缘相对高差 58 m。滑坡斜长约 70 m, 宽约 120 m, 滑坡区面积约 10 200 m²。滑体物质组份主要为第四系残破积碎石, 根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016) 规定, 按滑坡物质组份、滑面最大埋深和力学性质划分, 滑坡规模属中型浅层混合式土质滑坡。

2 地质环境条件

2.1 气象水文条件

属于寒温带高原气候,多年平均降雨量为645.9 mm,多年平均蒸发量1 002.5 mm。5~10月为雨季,降雨占全年的76.3%,其中集中在6~8月的多年平均降雨量为312.8 mm,降雨占全年的48.4%。多年平均气温6.4℃,极端最低温度-14.7℃,极端最高温度27.3℃,气温随海拔的增加而降低,降雨则与海拔成正比。年平均气温6.4℃。勘查区内有3条常流水系分布,其中直溪河和水磨房河与县城烈士陵园附近交汇后称为芝曲河,均为常年性河流。现场调查及勘探未见地表水出露。

2.2 地形地貌

项目区位于德钦县县城区域,属构造侵蚀-剥蚀斜坡地貌,山体呈北东-南西向延伸,高程一般介于3 000~3 500 m。坡面沟谷发育以线状侵蚀为主,切割深500~1 000 m,沟谷横断面呈“V”字型,谷坡30°~40°。住建局滑坡位于直溪河右岸斜坡下部,整个斜坡呈上缓下陡状。斜坡上部地形坡度一般25°~35°,滑坡范围地形相对陡峻,坡度40°~50°。因滑坡滑动,后缘形成高度2~3 m弧形陡坎,滑坡前缘因市政道路修建开挖,形成高度3~5 m陡坎,滑坡中部形成较多小台坎,一般坎高0.5~1.0 m。

2.3 地层岩性

2.3.1 泥盆系地层

项目区及周边的前泥盆系地层岩性较单一,出露地层为前泥盆系中段全-强片岩(AnD^2),岩性为云母石英片岩为主,夹石英片岩,总体上呈片状构造,岩石较软。钻孔揭露的岩体以全-强风化为主,岩体较破碎,呈散体状及碎裂状。

2.3.2 第四系地层

勘查区内第四系松散堆积物主要为滑坡堆积层(Q_4^{del})、泥石流堆积层(Q_4^{sef})和残坡积层(Q_4^{el+dl})。

滑坡堆积层(Q_4^{del}):岩性为碎石土,主要分布于滑坡区。

泥石流堆积层(Q_4^{sef}):岩性为卵石、碎石、含砾粘土,主要分布于斜坡前缘,河道附近。

残坡积层(Q_4^{el+dl}):岩性为碎石土,主要分布于斜坡表层。

2.4 地质构造

项目区构造位于青藏高原东南部横断山区中段的下弧顶,地质构造受急剧挤压变窄的部位,构造大区属于昌都-兰坪-思茅褶皱系之中段,夹持于冈底

斯-念青唐古拉褶皱系和松潘-甘孜褶皱系之间,以断裂运动为主的地质构造强烈发育,多期断裂的复合和交接,石英岩和花岗岩等侵入岩体发育较广,变质作用和变质时期复杂,地层出露连续性和完整性差,各级构造强烈发育,岩层破碎松散,节理裂隙强烈发育。项目区紧邻德钦-中甸大断裂北段,受区域性断裂构造控制及不同时期的构造活动的影响,岩体松散破碎,变质作用强烈。

调查区地震活动极少,地震基本烈度为Ⅷ度,属于区域地壳不稳定区。

2.5 水文地质条件

勘查区内地貌为构造侵蚀-剥蚀斜坡地貌,水文地质条件较简单,均属近源补给,就近排泄,地下水类型主要有两类:松散岩类孔隙水和变质岩裂隙水。

2.5.1 松散岩类孔隙水

主要分布于山体表浅部。其含水量动态随季节变化较大,残坡积层(Q_4^{el+dl})、滑坡堆积层(Q_4^{del})富水性弱,无统一水位,地下水主要接受大气降水补给,雨季时多以上层滞水形式存在,旱季时土层基本不含水。泥石流堆积层(Q_4^{sef})富水性较强,主要位于滑坡区外围。

2.5.2 变质岩裂隙水

主要储存在强风化岩层的风化裂隙和构造裂隙中,由于强风化岩层内上述各裂隙发育密集、通过层间裂隙或软弱带贯通性好,因而也基本具有统一水位。勘查区基岩为前泥盆系中段云母石英片岩,裂隙发育,裂隙率达2.5%~6.0%,因而赋水性也较好。

3 岩土体工程特性

项目区依据各地层时代岩性的差异,结合不同岩土体结构特征及主要物理力学性质指标,可将岩土体划分为土体及岩体两大类,各类岩土体工程地质特征描述如下。由新到老分别为:碎石土单层土体、卵砾石单层土体、软弱层状碎裂状片岩岩组。碎石土单层土体主要为第四系全新统残坡积层(Q_4^{el+dl})和第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del});卵砾石单层土体主要为泥石流堆积层(Q_4^{sef});片岩岩组主要为全-强风化片岩,受构造运动挤压强烈,节理裂隙发育,岩层极其破碎,结合力差。项目区地形整体破碎,起伏大,微地貌多变;基岩露头较差,不连续、分散广。基岩风化强烈,节理裂隙发育、结合差,风化厚度差异明显,全风化岩体为极软岩,工程地质条件较差。其参数取值如表1。

表1 滑坡岩土体物理参数表

岩土体类别	容重 /kN·m ⁻³ 天然/饱和	天然反复直剪		天然饱和直剪		基底摩擦 系数 μ	地基系数 m /kPa·m ⁻²	承载力标准值 R/kPa
		内聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°	内聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°			
Q_4^{el+dl}	20.2/21.5	31.55	33.99	29.40	32.00	0.40	5 000	240
全风化片岩	—	—	—	—	—	0.45	10 000	300
强风化片岩	—	—	—	—	—	0.50	16 000	—

4 滑坡现状特征

4.1 滑坡工程地质特性

住建局滑坡位于德钦县县城西侧 214 国道县城至飞来寺段斜坡下部,直溪河沿斜坡坡脚流过,县住建局东北侧。214 国道以下斜坡总体呈上缓下陡之势,上部地形坡度一般 25°~35°,滑坡范围地形相对陡峻,坡度 40°~50°。滑坡右侧为一“V”型冲沟,住建局位于冲沟沟口位置,左侧紧邻直溪河。滑坡前缘经修路等形成陡坎,高 4.0~5.0 m,详见图 1 滑坡全景图。坡面植被以灌木、杂草为主,人工造林次之,覆盖率 < 30%。表层第四系松散层厚度 5.0~14.0 m 不等,为碎石土。下伏前泥盆系中段云母石英片岩夹石英岩,绢云母片岩及少量绿片岩,全-强风化,全风化为土。



图1 滑坡全景图

滑体主要由第四系滑坡堆积层(Q_4^{del})碎石土松散堆积层组成。滑体下部厚度 5~8 m,滑体中部厚度 8~14 m,滑体后部厚度 6~10 m,平均厚 9.0 m。主要为灰黄、灰白色碎石土,松散。碎石含量不均,一般 30%~60%。角砾含量 10%~30%,母岩成分以片岩为主,呈棱角-次棱角状。

根据钻孔资料显示,滑带位于土岩界面。滑动面呈近折线型分布,总体上后陡前缓,后缘软弱面倾角 40°~80°,中部软弱面倾角 35°~45°,前缘软弱面倾角一般 15°~30°,推测滑面为折线形。滑动带为灰黄、灰色含碎石粉质粘土,稍湿,软塑-可塑,厚 10~30 cm。碎石粒径 2~15 cm,含量 30%~45%。

滑带土松软,黏粒含量高,与上部土体和下部全风化片岩粘性差别大,所含碎石多呈次棱角状。

滑床为全-强风化片岩。全风化片岩,灰黄色、灰白色,钻孔岩芯多呈散体状、碎石土状,岩石完整程度为极破碎,棱角状,极软岩。强风化片岩,灰色、灰黄色,岩芯呈碎裂状,岩质软弱,完整程度总体为较破碎,可见层面及节理面,软岩。

4.2 变形破坏特征

经实地调查,该滑坡变形主要集中在滑坡中上部。滑坡后缘错动形成多处台坎(图 2,图 3),滑坡左侧后缘台坎高 1~3 m,滑坡中部后缘台坎高 2~3 m,滑坡右侧后缘台坎高 3~5 m;滑坡中部局部发生小规模坍塌掩埋已有水沟(图 4,图 5),方量 3~30 m³;滑坡前缘修路切坡形成高 4~5 m 的陡坎,坡度 70°~80°;滑坡左侧直溪河右岸发生小规模坍塌,导致直溪河护岸墙破损;滑坡右侧为一冲沟;滑坡两侧以山脊为界,地形起伏较大;滑坡受地形条件及人类工程活动等影响,变形活动已久。



图2 滑坡后缘台坎



图3 滑坡后缘台坎



图4 滑坡中部小规模坍塌



图5 滑坡中部坍塌掩埋水沟

据现场调查和访问得知,住建局滑坡后缘变形活动已久,附近单位建设之前便已形成变形,具体变形时间不确切。滑坡体局部仍在发生蠕动变形,滑坡中部已建水沟上方发生多处小规模坍塌,掩埋已建水沟。小规模坍塌在降雨、风化等多重作用下数量、规模都在增加,灾害体在暴雨、地震等工况下极有可能发生整体滑动,严重威胁滑坡下方住建局、税务局、环卫中转站共 385 人和市政道路过往人员的生命及财产安全。

5 滑坡成因机制

5.1 形成条件

5.1.1 地形条件

H27 滑坡位于凸形斜坡上,总体上缓下陡。后缘地形坡度 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$,中部地形坡度 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$,滑坡下部地形变陡,地形坡度 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。前后高差 50~60 m。地形陡峻,高差较大,为滑坡的形成提供了地形条件。

5.1.2 地质条件

滑坡区上部第四系松散覆盖层差异较大,一般厚度在 5.0~16.0 m,结构松散,透水性较好。地表水极易下渗,土体抗剪强度受地表水影响较大。下

伏基岩为前泥盆系中段云母石英片岩夹石英岩,绢云母片岩及少量绿片岩,岩体风化强烈,节理裂隙发育,呈全-强风化状。存在岩土分界面这不利结构面,在降雨作用下,雨水下渗,容易在岩土界面滞留,软化岩土体,易在岩土界面形成软弱带,为滑坡的形成提供了基础条件。

5.1.3 水文地质条件

当地降雨主要集中在 5~10 月,降雨集中,一次性连续降雨时间长。降水丰富而地表水排水不通,使得大量地表水渗入坡体,易使岩土体饱水,土体重度增加,滑带土抗剪强度降低,下滑力增大,易引起失稳滑坡。

5.1.4 气候条件-冻融作用强烈

项目区属寒温带高原气候区。由于受东亚大气环流和地形条件的制约,金沙江和澜沧江成为调节气候的两大通道;加之受高寒气候的影响,具冬寒夏凉、干湿季分明和垂直分带明显的气候特征。项目区昼夜温差大,降雨呈垂直分布,冬季持续时间长,积雪覆盖时间久,岩土体长期反复处于降雪-融化-入渗过程,冻融作用对岩土体的整体性破坏影响大,土体抗剪强度衰减较快。

5.1.5 河流侵蚀

滑坡区前缘为直溪河,滑坡区位于直溪河右岸,直溪河侵蚀坡脚基准面,导致前缘形成有效临空面,破坏了坡体平衡条件,为滑坡的形成提供了地形条件。

5.2 激发条件

5.2.1 降雨

当地降雨主要集中在 5~10 月,在连续高强度降雨下,降水通过坡面汇集,并随着地表径流冲刷,沿滑坡体表面入渗形成孔隙水压力,同时坡体加大了荷载、减弱了强度,大量地表水渗入坡体,使土体逐渐浸水饱和,其抗剪强度降低,从而降低滑体与滑床之间的摩擦力,对滑坡形成有利。

5.2.2 地震

滑坡地处德钦-中甸活动断裂活动带北侧,附近地壳间歇强烈抬升明显,区域地壳稳定性属次稳定区。在地震力影响下,会加快滑坡变形及临空方向塑性挤压的过程,受到震动作用,使斜坡体内的土体结构发生变化,使其更趋松散化,抗剪强度降低、整体性削弱,并产生水平地震力,使斜坡下滑力增大,不利于坡体稳定,易诱发滑坡。

5.2.3 人类工程活动

修路切坡:由于修路切坡,前缘形成 4~5 m 高的陡坎,且只对住建局建筑区进行支挡,前缘道路内

测陡坎未采取任何有效支护措施,破坏了坡体平衡条件。

修建引水渠:滑坡中部修建有一条引水渠,从直溪河引水至下游巨水村附近灌溉田地,目前已废弃。在水渠使用时存在水渠渗漏、漫溢等情况,导致地表水下渗增加,对坡体稳定性造成不利影响。

综上,斜坡区为滑坡堆积层,坡体岩土结构差,坡面地形陡峻,植被稀疏。在降雨入渗、河流侵蚀切割的影响下,斜坡变形形成滑坡,修路切坡导致滑坡前缘临空,破坏了坡体平衡条件,加之受区域性断裂构造控制及不同时期的构造活动的影响,岩体松散破碎,变质作用强烈。在降雨、地震的影响下可能产生进一步滑动。

6 滑坡稳定性分析

6.1 滑坡安全等级确定

住建局滑坡地质灾害直接威胁下方住建局、环卫中转站、税务局共 385 人及下方过路行人车辆的生命和财产安全,威胁固定资产约 1 200 万元。险情等级为中型。施工难度一般,工程投资 > 500 万元。住建局滑坡为中型滑坡,灾害点所处位置为城镇居民聚集、单位办公区,重要性为较重要,灾害点威胁人数 ≥ 100 人且 < 500 人,依照《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020),结合灾害点规模大小及威胁人口、威胁资产,综合确定滑坡防治工程等级为 II 级。

6.2 滑坡定性分析

根据野外调查及地质测绘,住建局滑坡后部变形特征明显,后缘下错形成台坎,周界较为清晰。滑坡前缘局部为高陡临空面,滑坡沿软弱带发生滑动的可能性较大,调查表明,滑坡体现状处于整体基本稳定状态。若遇地震、降雨等不利工况,滑坡失稳整

体下滑的可能性将加大。

6.3 计算模型及方法

(1) 计算工况

工况 I:基本组合,考虑基本荷载。

工况 II:特殊组合,考虑基本荷载+降雨荷载。

工况 III:特殊组合,考虑基本荷载+地震荷载。

工况 IV:特殊组合,考虑基本荷载+降雨荷载+地震荷载。

(2) 荷载组合

滑体自重:按不同工况组合,不同深度的土体分别采用天然、饱和和分块计算。

(3) 地震:项目区抗震设防烈度为 VIII 度,设计基本地震加速度值为 0.20 g,综合水平地震系数为 0.05,动态分布系数取值 1.1。

(4) 降雨:降雨入渗深度取值 3 m。

(5) 计算模型

根据滑坡所处的地形条件、平面形态及滑动面形状特征,共设计 3 条纵向勘探线剖面作为计算断面模型,滑面形态为折线型。

(6) 计算方法

滑动面近似折线形,依据《滑坡防治工程勘查规范》及《滑坡防治设计规范》的有关要求,采用规范中滑动面为折线形的计算公式,用不平衡推力传递法计算稳定性,滑坡岩土体力学性质指标参数详见表 2。

6.4 稳定性计算结果

6.4.1 计算模型

选取 1-1'剖面、2-2'剖面、3-3'剖面进行稳定性分析,计算模型如图 6、图 7、图 8 所示。

6.4.2 稳定性系数计算结果

利用上述计算模型、计算参数和计算工况,滑坡稳定性系数计算结果如表 3。

表 2 滑坡岩土力学性质指标参数表

岩土体类别	容重 /kN·m ⁻³ 天然/饱和	天然反复直剪		天然残余剪		天然饱和直剪		天然饱和和残余剪		备注
		内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	
滑体	22.5/23.2	31.55	33.99	22.55	28.67	29.40	32.00	14.25	21.88	平均值
滑带	21.7/22.4	30.15	33.10	20.8	28.08	29.1	31.20	12.9	21.76	平均值
滑床	22.7/23.5	32.25	34.40	24.00	29.46	29.85	33.23	16.05	22.00	平均值

表 3 稳定性计算结果表

剖面及滑面编号	工况	稳定性系数			
		天然工况	天然+暴雨工况	天然+地震工况	天然+暴雨+地震工况
1-1'剖面		1.102	1.030	1.004	0.934
2-2'剖面		1.102	1.029	1.001	0.931
3-3'剖面		1.103	1.031	1.002	0.934

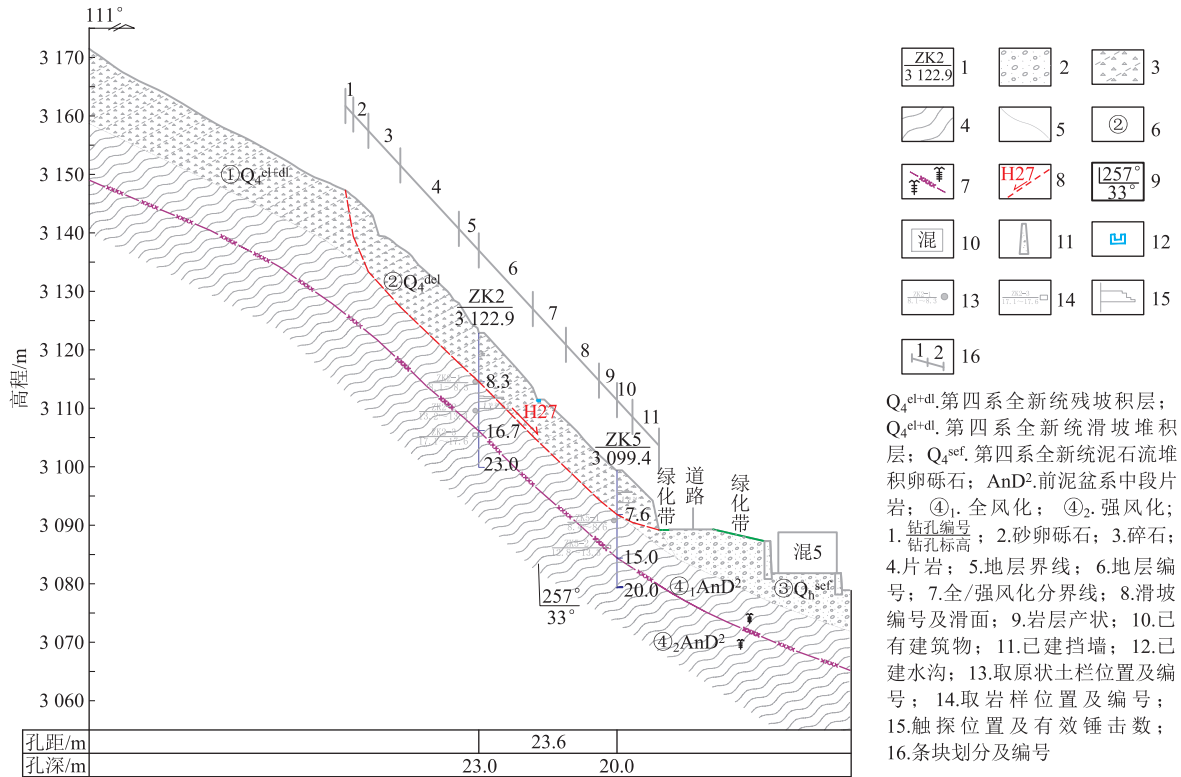


图6 1-1'剖面滑面计算模型

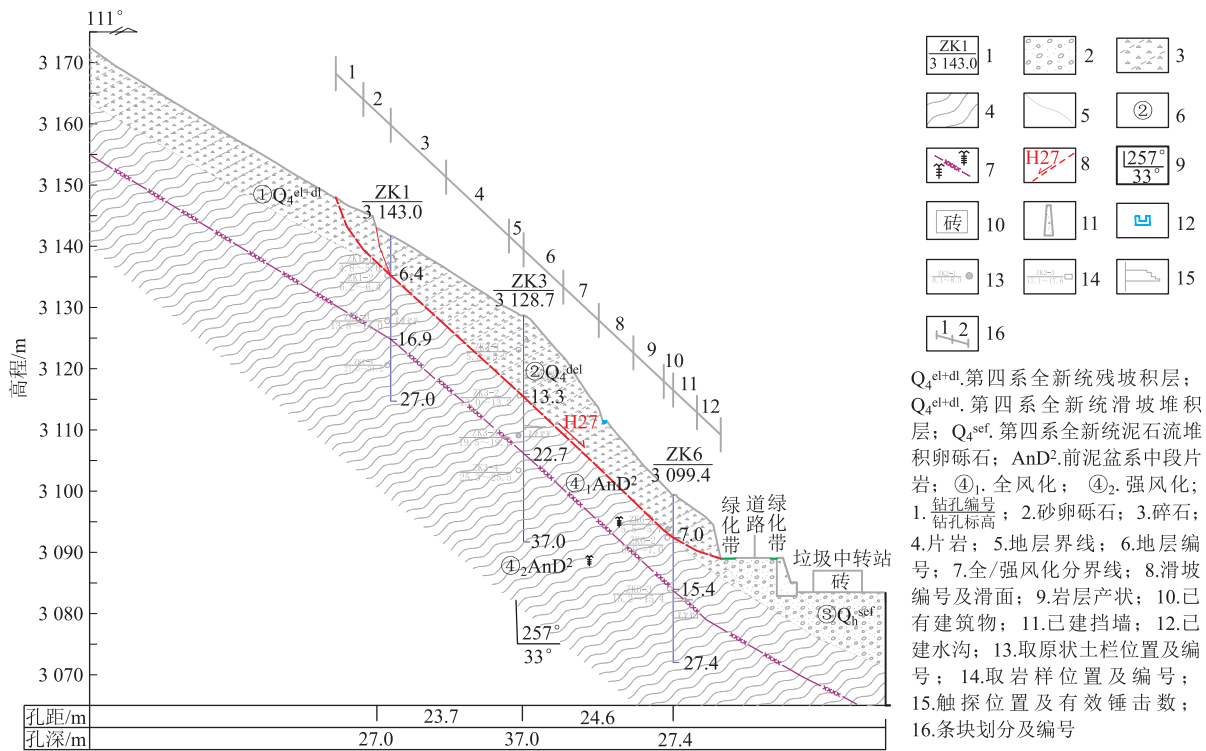


图7 2-2'剖面滑面计算模型

6.5 稳定性综合评价

通过计算, H27 滑坡在工况 I (自重) 时, 滑坡稳定系数 $F_s = 1.104 \sim 1.103$, 处于基本稳定状态;

工况 II (自重+降雨) 时, 滑坡稳定系数 $F_s = 1.029 \sim 1.031$, 处于欠稳定状态; 工况 III (自重+地震) 时, 滑坡稳定系数 $F_s = 1.001 \sim 1.004$, 处于欠稳定状态;

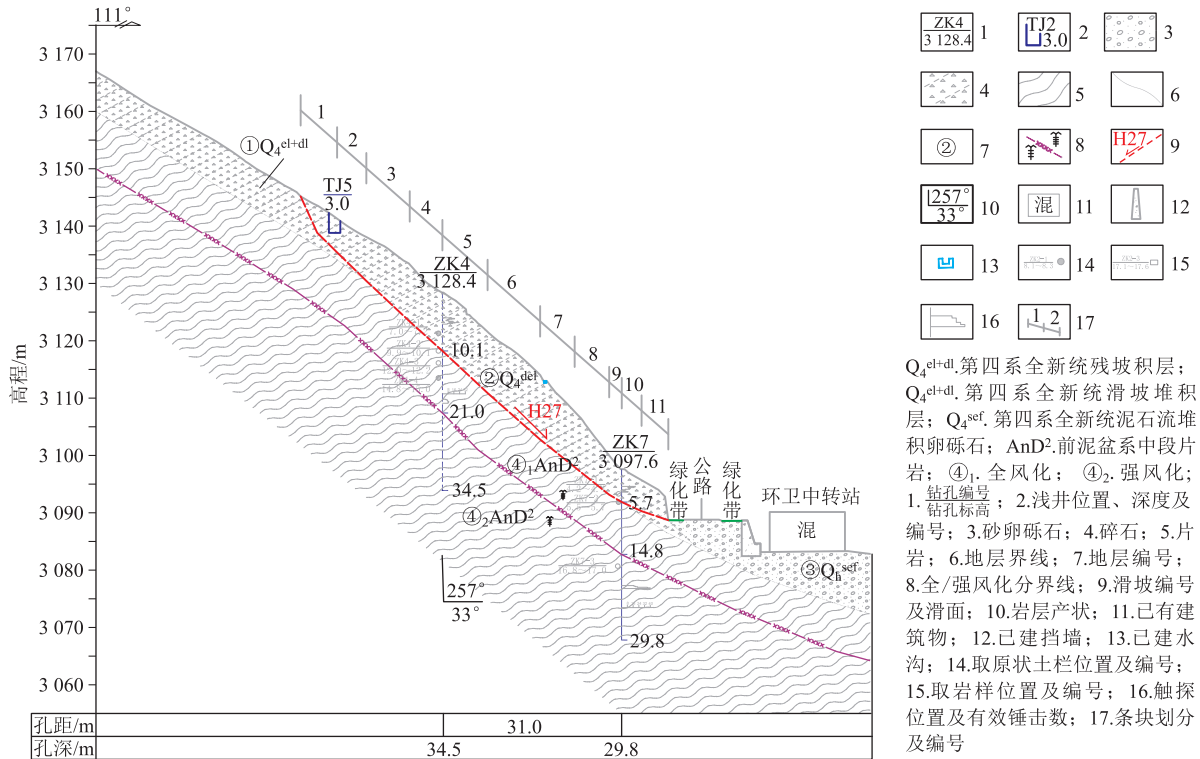


图 8 3-3'剖面滑面计算模型

工况Ⅳ(自重+降雨+地震)时,滑坡稳定系数 $F_s = 0.931 \sim 0.934$,处于不稳定状态。

通过对滑坡进行定量分析计算,其结果与实际吻合:滑坡在现状条件下整体处于基本稳定状态,在降雨工况和地震工况下处于欠稳定状态,降雨与地震组合工况时处于不稳定状态。

7 结论

根据现场调查、测绘及室内试验分析住建局滑坡成因机制,采用极限平衡法对住建局滑坡进行定量分析,得出以下结论:

(1) 住建局滑坡属于中型浅层混合式土质滑坡,滑坡后缘变形活动已久,局部仍在发生蠕动变形,在暴雨、地震等工况下极有可能发生整体滑动,严重威胁滑坡下方单位及道路过往人员的生命及财产安全。

(2) 住建局滑坡在现状工况下处于基本稳定状态,在降雨或地震工况下处于欠稳定状态,在降雨和地震组合工况下处于不稳定状态。

(3) 住建局滑坡坡面地形陡峻,植被稀疏。在降雨入渗、河流侵蚀切割的影响下,斜坡变形形成滑

坡,修路切坡导致滑坡前缘临空,破坏了坡体平衡条件,加之受区域性断裂构造控制及不同时期的构造活动的影响,岩体松散破碎,变质作用强烈。在降雨、地震的影响下可能产生进一步滑动。

参考文献

- [1] 王海芝,刘海洋,韩振华. 四川罗家青杠岭滑坡成因机制及稳定性分析[J]. 防灾减灾学报,2021,37(4):9-15.
- [2] 黎彦廷. 屏边县湾塘乡政府后山滑坡成因机制及稳定性分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [3] 孙红月. 含碎石粘性土滑坡的成因机理与防治对策[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [4] 任佩. 滑坡成因机制分析及稳定性研究[J]. 福建建设科技,2018,162(5):33-34+40.
- [5] 许建聪,尚岳全. 碎石土古滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,(1):57-65.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范(GB/T 32864-2016)[S]. 2016.
- [7] Viktor Janták. Stability Analysis of Landslide on the R1 Expressway by Limit Equilibrium and Finite Element Methods [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017,95(2):1088-1315.