

# 天津某公路复杂岩质滑坡勘察及治理对策

杨建伟<sup>1</sup>, 殷明文<sup>2</sup>, 肖飞<sup>1</sup>, 李辉<sup>3</sup>, 谷丛楠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津市地质研究和海洋地质中心, 天津

<sup>2</sup>天津市公路处, 天津

<sup>3</sup>天津华北工程勘察设计有限公司, 天津

Email: 526199648@qq.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年7月26日; 发布日期: 2021年8月11日

## 摘要

本文以天津某公路K4滑坡为例总结了复杂岩质滑坡勘察方法。采用工程地质测绘、钻探、岩土试验等多种手段的勘察方法, 查明滑坡要素和工程地质条件, 还原滑坡地貌, 利用岩土试验和参数的反分析方法确定滑面的C、 $\varphi$ 值。最终查明该滑坡位于断层破碎带部位, 由2个次级滑坡组成, 岩性复杂。本文对滑坡进行稳定性评价, 最后提出削方减载、锚索格构梁、排水系统及长期观测的治理对策, 竣工后运行良好。结论可为同类滑坡治理提供借鉴。

## 关键词

滑坡, 反分析, 稳定性, 传递系数法

# Investigation and Treatment of Complex Rock Landslide on a Highway in Tianjin

Jianwei Yang<sup>1</sup>, Mingwen Yin<sup>2</sup>, Fei Xiao<sup>1</sup>, Hui Li<sup>3</sup>, Congnan Gu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tianjin Geological Research and Marine Geology Center, Tianjin

<sup>2</sup>Tianjin Highway Department, Tianjin

<sup>3</sup>Tianjin North China Engineering Survey and Design Co., Ltd., Tianjin

Email: 526199648@qq.com

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 26<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

This paper takes K4 landslide of a highway in Tianjin as an example to summarize the survey me-

thods of complex rock landslide. The investigation methods of engineering geological mapping, drilling, geotechnical test and other means are adopted to find out the landslide elements and engineering geological conditions, restore the landslide landform, and determine parameters  $C$  and  $\varphi$  of the sliding surface by geotechnical test and back analysis methods. Finally, it is found that the landslide is located in the fault fracture zone, which is composed of two secondary landslides with complex lithology. This paper evaluates the stability of the landslide, and finally puts forward the treatment countermeasures of cutting and load reduction, anchor cable lattice beam, drainage system and long-term observation. It runs well after completion. The conclusion can provide reference for the treatment of similar landslides.

## Keywords

Landslide, Back Analysis, Stability, Transfer Coefficient Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 滑坡形成概况

津围北二线地处天津市蓟州区北部山区,地形复杂,沿途穿山越岭,土质多变,2018年竣工。2018年夏季蓟州区普降大暴雨,诱发多起地质灾害,从7月中旬到8月15日,累计降水量已达525.9 mm,是近四十年最大年降水量。8月12日施工单位通过巡查发现K4+350-K4+460段(以下简称K4段)路面沥青层有隆起的现象,施工方检查三级平台挡墙和截排水沟均发现有纵向开裂的现象,经地质人员现场调查,边坡已形成滑坡雏形并有进一步发展的趋势。8月16日,滑坡体蠕动基本停止,滑坡体前缘已超出道路边坡落石槽挡墙约3 m,后缘拉断裂宽约1.5 m,落差约2 m,滑坡体南北长80 m,东西向长120 m,呈倾斜的簸箕形,滑坡体约10.2万方,为中型滑坡。由于发现早,预警及时,未造成人员伤亡,但是滑坡造成半幅交通中断,道路毁坏,直接经济损失达220万元。8月18日,天津市公路处组织有关专家对K4段滑坡地质灾害进行现场调查,经分析滑坡地质灾害已形成,确定为地灾应急抢险工程。

本文通过详细的勘察查明滑坡的形态、构成和形成原因,并用岩土试验加反分析方法确定滑坡面的抗剪强度指标,并对滑坡进行稳定性评价,提出合理的治理对策,为同类滑坡治理提供借鉴。

## 2. 还原滑坡地形地貌

2018年9月我单位进驻现场并进行了现场踏勘,收集资料,根据施工单位在滑坡形成初期的地形测量和巡查资料,确定滑坡的形态。津围公路北二线K4边坡位于抱水峪隧道以南235 m。东侧形成人工高切边坡,走向 $181^\circ$ ,高约42 m。边坡坡率1:1.4,边坡削坡10 m分一级,最高4级,边坡采用挂网喷播绿化(图1),该段边坡原始地貌为一冲沟,在中部分叉为一大(南侧)一小(中部)两条冲沟,属于双沟同源,汇水面积约 $70,000\text{ m}^2$ 。

根据调查,8月12日K4边坡产生滑坡地质灾害,蠕动直至8月16日基本结束,滑坡开始前先是路面沥青层有隆起的现象,三级平台挡墙和截排水沟有纵向开裂的现象。截止到8月16日,滑坡体整体移动距离约4 m前缘已超出道路边坡挡墙约3 m,后缘拉断裂宽约1.5 m,落差约2 m,滑坡体南北向宽约80 m,东西向长约110 m。根据测量滑动方向 $255^\circ$ ,基本与路线方向夹角 $76^\circ$ 。

根据现场调查、裂缝测量,K4滑坡由2个次级滑坡组成,见滑坡形态和勘探点平面位置图(图2),

其中 1 号滑坡为主滑坡，滑坡主滑面高 54 m，长度 118 m，主滑坡是 2 个小型断层之间的全~强风化破碎岩体形成的浅层滑坡，其北侧边界位于 F2 断层带边缘；2 号滑坡是在主滑坡的推动下产生的土石分界面滑动，最大高差 40 m，主滑面长度 82 m。滑坡体体积约  $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，滑坡面最大埋深 8.6 m，判断滑坡类型为中型滑坡、破碎岩体滑坡和浅层滑坡。



Figure 1. Remote sensing image after landslide  
图 1. 滑坡后遥感影像

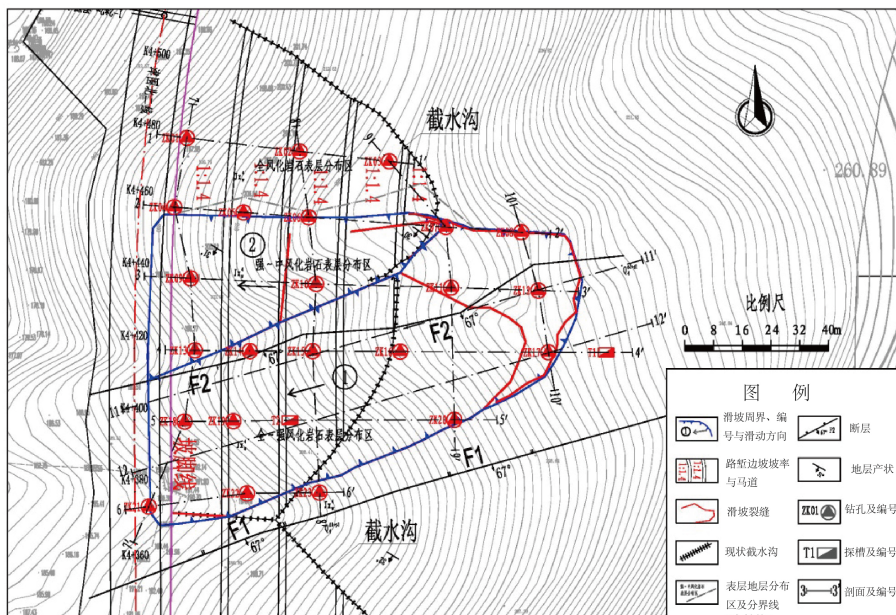


Figure 2. Landslide form and plan location of exploration points  
图 2. 滑坡形态和勘探点平面位置图

### 3. 勘察工作量布置

本次勘察在充分分析已有资料的基础上，通过合理的勘察手段和足量的工作量，进一步查明滑坡类型、规模、分布、主要诱发因素、稳定性及发展变化趋势等，对拟选用的治理工程轴线和重点部位进行针对性的工程地质调绘、工程地质勘探和岩土测试(重型动力触探、岩石回弹试验)，并辅以取样、土工试

验和地形、勘探点测量等多种工作方法，正确提出治理滑坡所需的有关物理力学参数指标，进行滑坡稳定性计算，为治理工程设计提供所需的工程地质资料。勘察工作量包括地形测量 0.02 km<sup>2</sup>、定点测量 3 个组日、工程地质测绘 25 个、钻探 14 孔 300 m、槽探 2 个 8 m。钻探沿滑坡方向设置 6 排，横向 5 排，并控制整个滑坡范围，钻孔深度以穿过滑体进入中风化基岩 5 m 为准。探槽布置在滑带土较厚、较完整、埋深较浅的部位，以便于取滑带土样。

## 4. 滑坡勘察结果和分析

### 4.1. 地层岩性

工作区第四系地层主要为人工填土层粉质黏土、滑坡堆积层碎石土、坡洪积层碎石土混粉质粘土、残坡积层粉质粘土夹碎石，人工填土层为喷播植草的基质层，厚度 0.3 m 左右。基岩为蓟县系雾迷山组地层四段(Jxw<sup>4</sup>)灰白色薄层状砂屑白云岩夹页岩，自上而下共揭露 4 个亚层：

全风化白云岩：灰白，极软，全风化，岩芯风化呈砂土状，遇水泥化为膏状。层厚 1.2~5.0 m，该地层主要在南侧滑坡体内，F1、F2 断层之间区域揭露。

强风化白云岩：灰黄色，较软，强风化，岩芯呈粗棱角形碎块状，节理裂隙发育。北部层厚 0.4~1.8 m，在滑坡体南边缘分布较厚，为 6.9~12.1 m。

中风化白云岩：黄灰色，较坚硬，岩芯呈短柱状，泥粉晶结构，节理裂隙发育。层厚 3.6~8.2 m。

微风化白云岩：灰白色，坚硬，岩芯呈短柱状，泥粉晶结构，节理裂隙较发育，短柱状，未揭穿，该层在工作区内北侧区域揭露。基岩产状一般为 212°∠31°。岩层分布见 12-12' 主滑面剖面图(图 3)。

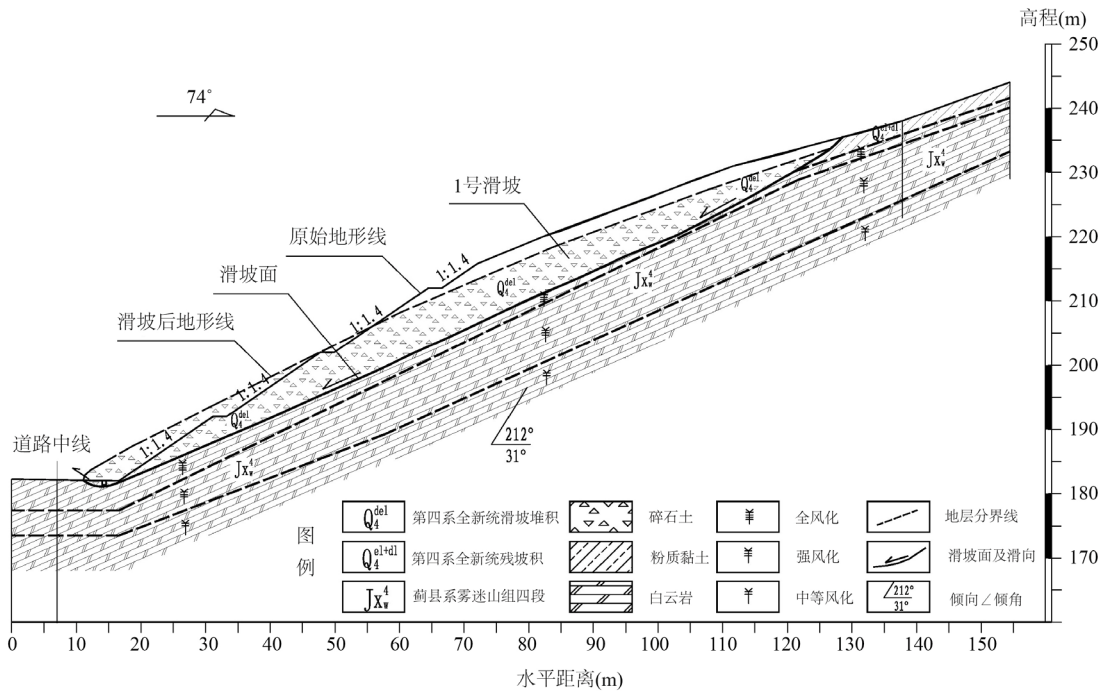


Figure 3. 12-12' section of main sliding surface

图 3. 12-12' 主滑面剖面图

### 4.2. 地质构造

工作区分布 2 条小型断层 F1、F2，属于抱水峪断层分支，两断层之间为南侧滑坡体，其产状 185°∠67°，

断层之间形成断堑式的特殊地质构造，断层之间岩层节理发育，并含少量的辉绿岩岩脉，脉状、囊状风化强烈，局部风化成土，遇水泥化为膏状。这就成为滑坡体形成的主要诱因。由于断层分布将工作区由南到北分为三个分区：北部全风化岩表层分布区、中部强~中风化表层分布区和南部全~强风化表层分布区(见图 2)。

### 4.3. 水文地质条件

滑坡区坡洪积层在雨季时为主要含水层，强风化白云岩裂隙中赋存少量裂隙水，中风化白云岩为相对隔水层，岩溶裂隙水属深层地下水但分布较稳定。勘察期间钻孔中未发现地下水，但是根据调查和访问，在大雨和暴雨时，边坡有地下水渗出，滑坡发生期间有全风化白云岩形成的白色泥浆流出。因此，在雨水达到大雨或长时间降雨时，由于滑坡区位于冲沟的下游，降水入渗和上游的地下水流入边坡，形成动水压力，在冲淘填充物的同时增大岩体重量。

### 4.4. 滑带土特征

根据测绘和勘探分析，滑带土主要为雾迷山组四段内的全风化白云岩，该类岩石风化程度高，饱和抗压强度低，为软弱夹层。该层遇水可软化，根据本次所取试样的自由膨胀率试验结果分析，该层具有一定的膨胀性(膨胀趋势为弱~中)，该层分布于地表松散层和较硬的强风化白云岩之间，进水后软化膨胀，极易形成滑坡的滑动面。取试样进行了物性试验和动态环剪试验。常规的三轴仪和直剪仪受应变范围所限通常用于测定峰值强度，动态环剪试验在试验过程中可以保持剪切面积不变，可在连续的位移条件下进行剪切测定，测试残余强度更具有优势。本次取了 6 组试样做了动态环剪试验，根据样顶深度，确定为四级压力，分别为 100、200、300 和 400 kPa，以测得试样在峰值下的抗剪强度及应变软化后的残余强度，并分别绘制试样的包络线图，以求得其峰值和残余抗剪强度指标，为工程实际提供更好的参考。

滑带土的内聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  试验结果见表 1。

**Table 1.** Physical and mechanical indexes of sliding zone soil

**表 1.** 滑带土物理力学指标表

指标	物理指标			抗剪强度			
	天然重度 $\gamma$	饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}$	自由膨胀率 $\delta_{\text{ef}}$	天然状态		饱和状态	
				$C$	$\varphi$	$C_{\text{sat}}$	$\varphi_{\text{sat}}$
单位	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	%	kPa	°	kPa	°
建议值	20.7	21.5	45	38	20	25.5	10.5

### 4.5. 滑形成机理分析

根据以上分析，该滑坡是位于两个平行断层之间破碎岩体，地貌上位于山坡冲沟下游，破碎岩体风化强烈，在岩体表层形成一层具有弱~中等膨胀性的全风化白云岩，雨水极易软化，由于修建公路人工切坡，在雨季长时间降水，地表径流大多入渗进入松散破碎的岩体，潜在滑坡体逐渐饱和，破碎岩体及全风化白云岩软化，抗剪强度降低，短时间的暴雨使地下水加速加快，形成动水压力，诱发破碎岩体沿较完整岩体产状面和全~强风化破碎岩体内部滑动，1 号滑坡最先滑动并挤压 2 号滑坡产生滑动，下滑在路基基岩面受阻后向外剪出，挤压排水沟造成路面沥青层隆起和路边挡墙破坏。

## 5. 滑坡面抗剪强度参数反分析

目前确定滑坡岩土体抗剪强度的方法有 4 种：室内剪切试验、现场直剪试验、工程类比法及极限平

衡状态下的反演分析法。根据勘察,滑坡地层岩性以全风化白云岩为主,该类土只有土工试验结果,无法进行现场直剪试验,可以通过极限平衡理论的反分析方法近似求得,与土工试验结果综合确定。

反分析法的基本原理,是恢复滑坡前的滑坡断面,视滑坡处于要滑动而未滑动的极限平衡状态,即稳定系数  $F_S$  取 0.95~1.10,根据极限平衡方程求解  $C$ 、 $\varphi$  值[1] [2]。本次采用传递系数法对滑坡面抗剪强度进行反分析,对于正在滑动的滑坡,稳定系数  $F_S$  取 0.95~1.00 [3] [4]。取平行于主滑方向的 2 个实测剖面,运用传递系数法反算出 2 条  $C$ - $\varphi$  曲线,若两条曲线相交于一点,则该交点的坐标即为所求的  $C$ 、 $\varphi$  值。

以 1 号滑坡主滑方向的 11-11' 剖面 and 12-12' 剖面作为反分析计算剖面(图 3),考虑滑坡发生时的暴雨工况,考虑滑坡正在滑动状态,  $F_S$  取 0.98,地下水位取高水位(相当于 60% 充水指数),反演分析结果见图 4,两条  $C$ - $\varphi$  曲线交汇点坐标即为反算值,其中  $C = 16$  kPa,  $\varphi = 22.6^\circ$ 。该值与室内试验饱和状态的  $C$  和  $\varphi$  值相近,说明反分析的结果是较符合实际的[5]。综合土工试验结果饱和状态抗剪强度取:  $C_{\text{sat}} = 20$  kPa,  $\varphi_{\text{sat}} = 16.5$  kPa。

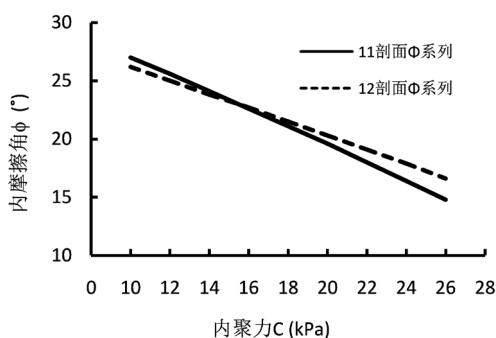


Figure 4.  $C$ - $\varphi$  relationship graph  
图 4.  $C$ - $\varphi$  关系曲线图

## 6. 滑坡防治对策和稳定性评价

滑坡防治对策在保证安全的前提下,应急抢险方案要经济合理、技术可行、施工方便。因此方案确定为清除滑坡体,加固边坡使边坡达到稳定,完善截、排水措施,降低坡面入渗,达到边坡安全的目的。设计方案总体为削方减载 + 格构梁锚固 + 喷锚护坡 + 被动防护网 + 排水措施 + 监测措施。

- 1) 削方减载: 从上至下清除滑坡体,根据“宽平台缓边坡”的设计原则,对边坡进行 1:1.5~1:2 放坡,每 10 m 高修筑 1 条 2~10 m 宽的平台,包括 6 级边坡和 5 个平台;
- 2) 格构梁锚固: 在边坡南侧 K4+372-K4+418 第 1、2 级边坡断层破碎带采用预应力锚索进行加固,坡面铺设钢筋混凝土格构梁;
- 3) 喷锚护坡: 在边坡北侧 K4+419.7-K4+472.6 第 1、2 级岩质边坡用喷锚护坡进行加固;
- 4) 被动防护网: 在第 2、3 平台做 2 道高度 4 m 的 RXI-200 型被动防护网,拦截上部的危岩落石;
- 5) 排水措施: 对坡顶、两侧和平台截水沟进行优化,边坡中部设置急流槽,确保坡面收水效果,北侧截水沟排到滑坡北侧山脊的阴坡;
- 6) 监测措施: 包括施工安全监测、防治效果监测和动态长期监测,动态长期监测在滑坡治理后不少于 2 年。

由于上部斜坡较高以及两侧坡形的限制,削方减载不能彻底挖除滑坡体,尚残存一部分滑坡体,根据分析,边坡有从全风化白云岩和强风化白云岩界面滑动的趋势。因此,需要计算削方后滑坡的稳定性

和滑坡推力。根据规范规定，该滑坡防治工程安全等级为一级。采用传递系数法计算削方后滑坡的稳定性，用 12-12' 剖面进行计算得到：天然工况安全系数  $F_S = 2.13 > 1.30$ ，稳定；暴雨工况， $1.05 < F_S = 1.11 < 1.15$ ，基本稳定；地震工况安全系数  $F_S = 1.44 > 1.15$ ，稳定。因此，需要进行边坡加固。

K4+372-K4+418 段属于 1 号滑坡范围，削坡后残留部分滑体和全风化白云岩，采用预应力锚索加固，滑坡推力(剩余下滑力)计算工况采用暴雨工况，剩余下滑力计算安全系数  $F_{st}$  取 1.15，结构重要性系数  $\gamma_0 = 1.1$ 。经计算，滑坡前缘土带剩余下滑力  $F = 233.07 \text{ kN}$ ，下滑力角度  $\theta = 21.66^\circ$ 。预应力锚索设计锚固力 109.02 kN，锚固段主要位于强风化白云岩，锚孔直径为 110 mm，倾角  $20^\circ$ ，锚固段长 6 m，采用 3 根  $1 \times 7$  (七股)  $\varphi^S 12.7 \text{ mm}$  钢绞线，浆液采用 M30 水泥砂浆，预应力锚索的张拉锁定值为锚索轴向拉力设计值的 1.0 倍。布置在项目区南侧一级、二级边坡，纵向间距 4 m，共 9 排，长度 12~15.3 m，见 12-12' 治理工程剖面图(图 5)。格构梁型式为方型，纵梁和横梁间距为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ，截面尺寸高  $\times$  宽 =  $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ，混凝土强等级采用 C30，钢筋保护层厚度 50 mm。靠地侧采用 2 根直径为 14 mm 的 HRB400 型号钢筋，离地侧架立钢筋采用 2 根直径 14 mm 的 HRB335 型普通钢筋，箍筋用  $\Phi 8 @ 250$  的 HPB300 型普通钢筋。

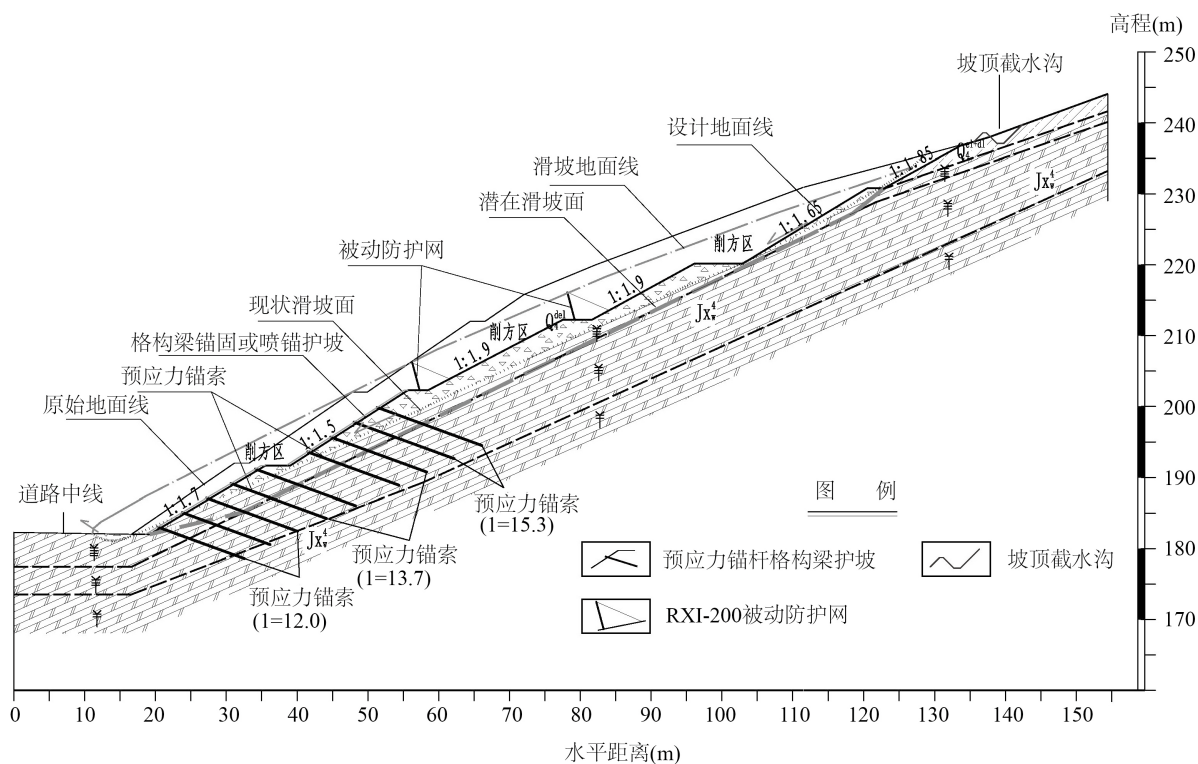


Figure 5. 12-12' profile of treatment works  
图 5. 12-12' 治理工程剖面图

K4+419.7-K4+472.6 属于 2 号滑坡范围，滑体基本清除，为顺层岩质边坡，岩性为中风化薄层状白云岩，根据稳定性分析，边坡欠稳定，采用喷锚护坡形式护坡，面板用厚度 150 mm C25 混凝土，一层钢筋网，锚杆采用主副锚杆锚固，主锚杆主要起加固岩质边坡、固定钢筋网的作用，采用  $\Phi 16 \text{ mm}$  HRB335 钢筋，主锚杆长 3.3~8.7 m，锚孔直径为 70 mm，入射角  $20^\circ$ ，锚固段长 3 m，间距  $3 \times 3 \text{ m}$  网格状分布。辅锚杆起加固岩质边坡表层、固定钢筋网的作用，采用  $\Phi 16 \text{ mm}$  HRB335 钢筋，长 1 m，锚杆间距 3.0 m，与主锚杆交错布置，锚孔直径为 50 mm，入射角垂直于坡面。浆液用 M25 水泥砂浆。

该滑坡治理工程 2019 年 7 月治竣工,工程造价 1108.13 万元,目前运营 2 年,边坡稳定,状态良好。

## 7. 结语

1) K4 滑坡属于顺层的由断层控制的中型复杂岩质滑坡,可以分为 2 个次级滑坡。主体滑坡岩性为岩土混合的断层破碎带,全风化白云岩形成滑动面。该滑坡地貌上位于双沟同源的冲沟的下游,地表水的冲刷和地下水的渗透加剧了滑坡的形成。2018 年的大量降雨则成为滑坡发生的诱因。

2) 滑坡应采用多种手段勘察,在充分调查的基础上,测量裂缝分布,还原滑坡地形地貌是重要的工作。

3) 利用试验和参数反分析方法可以较准确地确定滑面的  $C$ 、 $\varphi$  值,为滑坡稳定性评价提供合理的数据。

4) 滑坡的应急治理可以采用“宽平台缓边坡”的原则进行削方减载;永久加固边坡必须结合完善的截、排水措施,并且进行长期变形监测。

## 基金项目

天津市规划和自然资源局基金项目(ML2019-HP-F162(2))。

## 参考文献

- [1] 张翔,张伟. 贵阳黔灵湖大桥滑坡勘察方法及稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017(S2): 931-935.
- [2] 唐辉明. 用反算法确定岩体抗剪强度参数[C]//第四届全国工程地质大会论文集(三). 北京: 海洋出版社, 1992: 1486-1489.
- [3] 张智超. 某顺层滑坡勘察分析与治理对策研究[J]. 福建建设科技, 2019(5): 44-47.
- [4] 李小豹. 基于滑坡地形反演拟合的抗剪指标反分析研究[J]. 甘肃科技, 2019(8): 112-115.
- [5] 富凤丽, 仝磊, 李广杰, 赵淑云. 中里滑坡反分析及强度参数取值研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 165-169.