

# 公路横穿诱发古滑坡局部复活的变形特征及治理

张乐<sup>1</sup>, 赵海松<sup>1\*</sup>, 向波<sup>1</sup>, 邬凯<sup>1</sup>, 康宇<sup>1</sup>, 田宁<sup>2</sup>

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041; 2. 四川建筑职业技术学院, 成都 610399)

**摘要:** 公路建设横穿古滑坡时, 多注重古滑面处的滑移防治。然而, 坡体浅表覆盖层在一定组合下, 受开挖扰动易诱发局部复活, 造成较大危害。以四川红层区某高速公路横穿诱发古滑坡局部复活的工程案例为依托, 总结其复活特征及成因; 利用传递系数法计算局部复活区滑坡推力后, 提出治理方案, 并对复活区进行长期监测。结果表明, 加固空白区的开挖及降雨是古滑坡局部复活的诱因; 浅表覆盖层中含碎石粉质粘土与含砾粉质粘土的透水性差异是滑面形成的地质条件; 长期监测表明“清方+钢管桩+截排水”能够对局部复活区进行有效治理。

**关键词:** 地质灾害; 古滑坡; 公路; 局部复活; 变形特征; 灾害治理

**中图分类号:** P642 **文献标识码:** A

## DEFORMATION CHARACTERISTICS AND TREATMENT OF LOCAL RESURRECTION OF ANCIENT LANDSLIDE INDUCED BY HIGHWAY CROSSING

ZHANG Le<sup>1</sup>, ZHAO Hai-song<sup>1\*</sup>, XIANG Bo<sup>1</sup>, WU Kai<sup>1</sup>, KANG Yu<sup>1</sup>, TIAN Ning<sup>2</sup>

(1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute LTD, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu 610399, China)

**Abstract:** During highway construction across ancient landslides, the primary focus tends to be on slip prevention at the ancient sliding surface. However, under specific conditions, the shallow overburden layer of the slope can be locally resurrected due to excavation disturbances, resulting in significant hazards. This study leverages an engineering case from the red-bed regions of Sichuan, where a highway crossing induced local resurrection of an ancient landslide, to summarize the characteristics and causes of this resurrection. Employing the transfer coefficient method, the landslide thrust in the locally resurrected zone was calculated. Subsequently, a remedial strategy was developed, followed by long-term monitoring of the affected area. Results indicate that excavation in the reinforced blank zones combined with rainfall events are catalysts for the local resurrection of ancient landslides. Disparities in permeability between gravel-bearing silty clay and gravel-bearing silty clay in the shallow overburden set the geological conditions conducive for the creation of slip surfaces. Long-term observations reveal that “clearing earthwork+ steel pipe piling+ drainage interception” serves as an effective remedy for these resurrected zones.

**Key words:** geological hazards; ancient landslide; highway; local resurrection; deformation characteristics; hazards treatment

古滑坡在历史变形过程中内部形成滑移界面,降雨等外在营力扰动下更易发生失稳变形<sup>[1]</sup>。我国西部以高原山地地貌为主,复杂地质条件下古滑坡发育较多,地表土体及植被覆盖后难以快速有效识别。根据《四川省高速公路网规划(2019~2035年)》和《重庆市高速公路网规划(2019~2050年)》,川渝还将分别新建4 100 km和2 111 km的高速公路<sup>[2]</sup>。山区公路建设时,选线需考虑建设成本、纵坡平顺及沿线重要建筑物等,常不可避免的需穿越古滑坡<sup>[3-4]</sup>。

开挖扰动会导致滑体的应力重分布,利于古滑坡的复活失稳且难以治理<sup>[5]</sup>。降雨和河流冲刷坡脚也是诱发古滑坡复活的外在诱因,常导致坡体上的建筑物出现“坐船”现象<sup>[6]</sup>。工程建设中,常采用大断面深长抗滑桩、锚索桩等措施以防古滑坡的复活,但成本较高,且施工困难<sup>[7]</sup>。陈伟志等<sup>[5]</sup>结合林织铁路横穿巨型古滑坡的挖方工程,提出框架式抗滑支挡工程技术。唐勇<sup>[8]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>模拟分析验证了抗滑桩、钢管桩等措施对滑动面的治理加固效果。此外,锚索抗滑桩<sup>[9]</sup>、微型桩<sup>[10]</sup>等也是坡体加固的常用手段。

公路横穿古滑坡时建设人员多注重滑坡古滑面的加固,对局部复活的防范意识偏弱。本文依托某高速公路横穿古滑坡诱发局部失稳的工程案例,对古滑坡的工程地质背景进行整理,总结局部复活区的特征及成因,通过传递系数法计算复活区的滑坡推力,据之提出“清方+钢管桩+截排水”的治理措施,并进行了长期监测。期望为道路工程穿越古滑坡时的加固设计提供参照。

## 1 古滑坡工程地质条件

### 1.1 场区地质背景

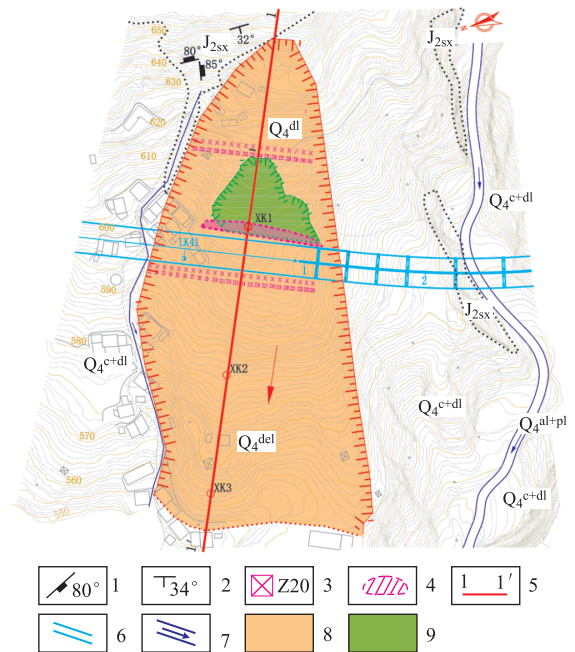
场区位于四川盆地西南部,构造抬升段,受构造影响强烈,岩体结构面结合差。岩层优势产状为 $271^{\circ}/32^{\circ}$ ,岩层倾向与坡向相当。岩体中明显发育2组大角度交节理,切穿砂岩层且面不平,闭合一般,在平行节理面的临空面附近微张~张开,充填有少量粉质粘土。其中,L1产状 $158^{\circ}/55^{\circ}$ ,延伸2~8 m,条间距0.4~1.0 m;L2产状 $52^{\circ}/63^{\circ}$ ,延伸3~10 m,条间距0.3~1.2 m。

斜坡地下水主要为松散层孔隙水及基岩裂隙水。其中,松散层孔隙水主要分布于缓坡地带,赋存于 $Q_4^{del}$ 地层碎块石空隙及土体孔隙中,受大气降水、地表水及地下水渗流补给,顺坡向通过土体孔隙渗流。由于坡表覆盖层的物质组成差异较大,造成

坡体内富水性存在较大差异,具体为:相对隔水的层间结合处含水量较高;在透水性较好的含碎石粉质粘土、块石土中,强降雨后富水性较好,土体呈湿润~饱和状;在透水性较差的含砾粉质粘土层中,强降雨后富水性较差,土体呈干燥~湿润状。

基岩裂隙水赋存于 $J_{2sx}$ 的砂岩裂隙中,主要受大气降水补给,部分地段受松散层孔隙水和地表水补给,地下水向溪沟方向运移排泄,在局部地形低洼处以泉的形式排泄。岩体富水性受岩性及构造控制,粉砂质泥岩形成相对隔水层,总体富水性一般,且分布不均,局部存在承压水。

可见,斜坡基岩顺层、覆盖层土体渗透性存在差异,具体表现为上部土体渗透性较好、下部渗透性较差的地层组合。在上部土体饱水时,易于发生顺层滑坡灾害。



$J_{2sx}$ , 侏罗系沙溪庙组;  $Q_4^{c+dl}$ , 第四系崩坡积层;  $Q_4^{al+pl}$ , 第四系冲洪积层;  $Q_4^{del}$ , 第四系滑坡堆积层; ZK01, 勘探点编号; 1. 节理产状; 2. 岩层产状; 3. 抗滑桩; 4. 开挖边坡; 5. 断面; 6. 高速公路; 7. 冲沟; 8. 古滑坡区; 9. 复活区

图1 古滑坡平面图

### 1.2 古滑坡边界特征

公路建设横穿某西东向斜坡,其坡向约 $290^{\circ}$ ,坡度 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,中后部发育多处缓坡平台,总体较顺直。坡上以旱地为主,种植玉米。斜坡平面形态如图1,其中间略凸,两侧略低,后缘以基岩光板为界,左侧以地形变化的冲沟为界,右侧以地形凸起的陡缓交界处为界,前缘XK3钻孔揭示卵石层高程为界。此外,XK1、XK2与XK3揭露斜坡沿岩土界面

发生滑坡坡体前后缘高程分别为 556 m 和 644 m, 相对高差 88 m, 前部宽于后部, 呈不规则长舌状, 纵向长约 410 m, 坡体侧壁之间平均宽度约 140 m, 滑体平均厚度约 19 m, 总体方量约  $1.09 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 主滑方向  $294^\circ$ , 属巨型中层古滑坡。

考虑某高速公路建设横穿该滑坡中部, 设计 2 排抗滑桩分级支挡防护, 道路中心线左侧 90 m 处设置 17 根, 右侧 17 m 处设置 37 根。

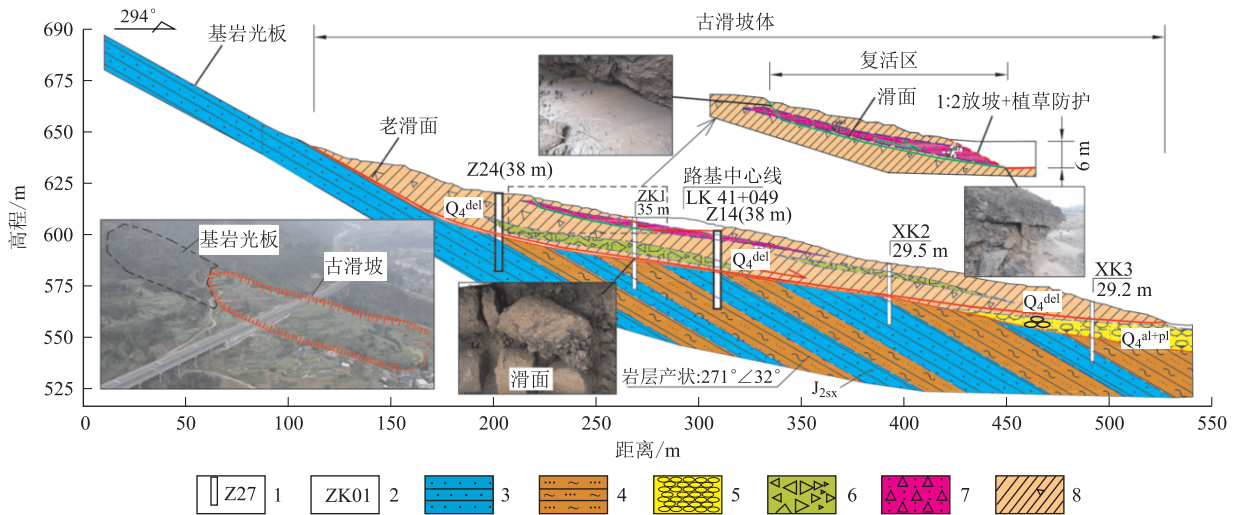
### 1.3 古滑坡物质组成

据现场踏勘及钻孔揭露, 进行地质调绘得古滑坡工程地质剖面如图 2。可见, 滑体主要为含砾粉质粘土, 次为含碎石粉质粘土、块石。含砾粉质粘土呈褐红色, 可塑状, 厚度 1.0~21.5 m, 角砾含量 20%~40%, 透水性较差, 分布于整个滑坡体上; 含碎石粉质粘土呈褐红色, 可塑状, 分布于坡体中部表

层, 角砾含量 25%~40%, 该层透水性相对好; 块石, 呈灰黄色, 主要成分为粉砂质泥岩, 棱角状, 整体中密状为主, 局部大粒径块石间有架空, 该层透水性较好。

滑带主要为含砾粉质粘土, 呈红褐色, 可塑状为主, 厚约 0.2~0.8 m, 角砾含量 10%~25%, 以次棱角~亚圆状为主, 钻孔内结合该层内光滑面清晰可见, 倾角约  $15^\circ \sim 25^\circ$ , 位于岩土界面附近, 如图 2。此外根据 XK1 钻孔揭示, 在坡体中部浅层含碎石粉质粘土与下部含砾粉质粘土接触带附近, 粉粘粒富集, 土体被压密, 孔深 5.5 m 处发育光滑面, 为古滑坡浅层滑带土。

滑床主要为侏罗系沙溪庙组砂岩与粉砂质泥岩互层, 薄层状~中厚层状或透镜状构造, 岩层倾向坡外。



J<sub>2sx</sub>. 侏罗系沙溪庙组; Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>. 第四系冲洪积层; Q<sub>4</sub><sup>del</sup>. 第四系滑坡堆积层; 1. 抗滑桩及编号; 2. 勘探点编号; 3. 砂岩; 4. 粉砂质泥岩; 5. 卵石; 6. 块石; 7. 含碎石粉质粘土; 8. 含砾粉质粘土

图 2 古滑坡工程地质剖面

### 1.4 古滑坡形成演化

依据场区工程地质条件, 从坡体的地形地貌、物质组成入手, 结合临近地区滑坡工程类比等综合分析古滑坡形成演化过程, 具体如下:

(1) 从斜坡地形地貌看, 纵向上坡体中后部发育多处缓坡平台, 横向上坡体中间凸出, 两侧略低, 滑坡堆积特征明显, 如图 2。

(2) 从坡体物质组成看, 钻孔揭露岩土界面附近明显发育一层滑带土, 光滑面明显可见; 滑体总体以含碎石粉质粘土为主, 碎石物质成分以砂泥岩为主; 前缘堆积于灰黄色第四系上更新统卵石层上, 堆积长度约 100 m。

(3) 从地质构造特征看, 场区基岩顺层, 滑坡体

后部发育大面积基岩光板, 而下部为堆积体, 可见其顺层失稳堆积可能性大。

(4) 从临近滑坡类比分析看, 在该滑坡体四周约 4 km 范围内, 发育横山滑坡、先锋 1 号滑坡、网龙山 1 号滑坡、网龙山 2 号滑坡、张油房滑坡等大型顺层滑坡, 如图 3。上述滑坡后缘均有基岩顺层光板出露, 前缘覆盖于河床卵石层上, 特征一致, 表明该区域顺层斜坡具有群发性失稳的特征。

综上判定, 场区斜坡因岩体层间结合差, 且受马边河下切等影响, 前缘逐渐临空。在外营力作用下, 发生了基岩顺层滑动, 且滑速快, 滑距远, 前缘堆积于马边河阶地卵石层上, 后缘形成基岩光板, 为古滑坡体。此外, 滑坡堆积体形成过程中, 伴随滑体基岩

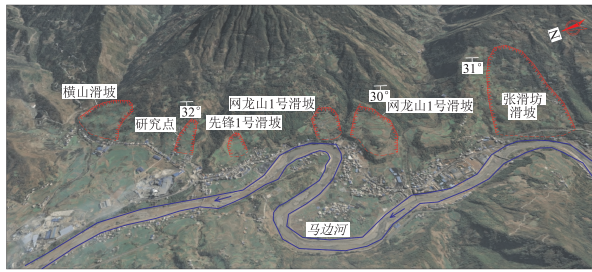


图3 场区顺层滑坡分布

的解体、风化,并形成含砾粉质粘土。地下水长期入渗作用下,坡体内岩土界面附近及粉粘粒集中区域相对隔水,导致地下水富集,抗剪强度受到劣化,并在滑动带内形成光滑面,而后滑坡有局部复活迹象,沿光滑面发生滑动变形。

## 2 局部复活特征及滑坡推力

### 2.1 局部复活特征

高速公路建设时横穿该古滑坡,于2018年2月4日对滑坡体进行1:2放坡开挖,开挖坡高6.0 m左右时,恰逢区域性降雨,临时排水系统此时尚未成型,坡体在降雨冲刷与开挖卸荷耦合作用下开裂变形,后缘有拉裂缝形成,于2月7日封闭成环,最远处距道路中线约77 m,裂缝宽0.1~1.5 m,如图4。至2018年12月局部复活区坡体累计位移达3.0 m。

结合图1和图4可见,复活区位于古滑坡体中上部,处于坡体中部已施作的2排抗滑桩之间,边界特征明显,裂缝已封闭成环,纵向长约60 m,平均宽度约80 m,滑体平均厚度5.0 m,总滑移方量约 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主滑方向与古滑坡一致,即 $294^\circ$ 。

复活区的滑面上部为含碎石粉质粘土,其渗透性较好,利于地表水入渗;下部为含砾粉质粘土,其渗透性较差,为相对隔水层。根据现场调查可知,复活区坡体前缘土体潮湿-饱和,呈软塑-流塑状,未复活坡体较干燥,如图4。因此,该古滑坡局部复活的地质条件是渗透性较好含碎石粉质粘土地下水入渗后,在渗透性较差的含砾粉质粘土接触面附近造成地下水富集,致土体软化且抗剪强度降低,不足以承受复活区的坡体下滑推力,最终产生滑动变形。图4中给出的裸露滑移面光滑且较为湿润,可佐证该分析。

综上,该工点为高速公路横穿古滑坡,在已施作的2排抗滑桩间因开挖临空卸荷及降雨诱发局部复活。因此,公路建设横穿古滑坡时,除针对老滑面进行支挡防护设计外,还应充分考虑地层中的潜在薄弱面,以避免局部复活的安全隐患。

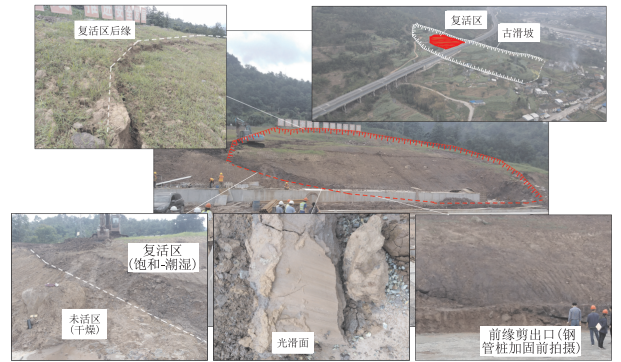
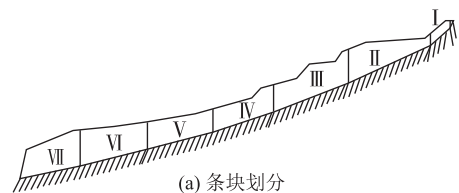


图4 古滑坡变形区后缘拉裂缝

### 2.2 滑坡推力计算

为解决该古滑坡局部复活的工程问题,在原设计2排抗滑桩支挡的基础上,需进一步加固坡体。复活区滑坡推力的确定是支挡结构合理设计的前提,取局部复活区断面通过传递系数法计算滑坡推力,典型断面条块划分如图5(a)。传递系数法将滑坡推力计算简化为平面应变问题,条块间作用力考虑为与底滑面方向一致的剩余下滑力,并假定滑体为刚体,且滑面处静力平衡服从Mohr-Coulomb强度准则,自坡顶向下,可用于量化局部复活区的滑坡推力<sup>[11-13]</sup>。其中,第1条块剩余下滑力计算如式(1):



(a) 条块划分

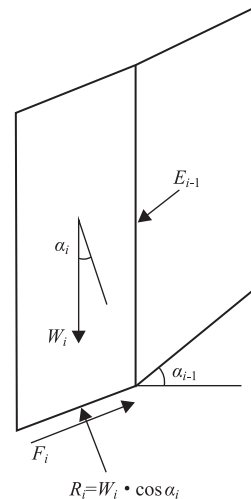
(b) 第*i*条块剩余下滑力计算

图5 局部复活区计算断面

$$E_1 = W_1 \sin \alpha_1 - \frac{c_1 l_1 + W_1 \cos \alpha_1 \tan \varphi_1}{K} \quad (1)$$

式中,  $E$  为剩余下滑力;  $\alpha$  为底滑面倾角;  $c$ 、 $l$ 、 $\varphi$  分别为底滑面的粘聚力、长度和内摩擦角;  $W$  为条块的每延米重力;  $K$  为安全系数。如图 5(b), 对第  $i$  条块, 由传递系数法可计算其剩余下滑力  $E_i$  为:

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \psi_{i-1} - \frac{c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i}{K} \quad (2)$$

式中,  $F_i$  为第  $i$  条块的抗滑力, 可计算为  $F_i = c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i$ ;  $E_{i-1} \psi_{i-1}$  为第  $i-1$  条块的剩余下滑力,  $\psi_{i-1}$  为第  $i-1$  条块的剩余下滑力传递系数, 计算如式(3)。

表 1 滑坡局部复活区的剩余下滑力计算

条块	$W/kN \cdot m^{-1}$	$\alpha/^\circ$	$c/kPa$	$\varphi/^\circ$	$l/m$	$\psi_i$	$E/kN \cdot m^{-1}$
I	58.38	58.85	6.5	5.38	3.83		25.84
II	480.06	30.93	6.5	5.38	11.31	0.85	170.96
III	551.04	17.82	6.5	5.38	10.11	0.96	231.88
IV	366.24	15.01	6.5	5.38	8.25	0.99	249.94
V	405.30	13.02	6.5	5.38	7.70	1.00	258.89
VI	533.82	10.39	6.5	5.38	9.02	1.00	259.96
VII	462.00	9.54	6.5	5.38	7.95	1.00	253.96

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \cdot \tan \varphi_i}{K} \quad (3)$$

根据式(1)~式(3), 计算天然工况下局部复活区的滑坡推力, 各条块计算参数及结果如表 1。其中, 土体重度  $\gamma = 21 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016), 安全系数  $K$  取 1.15。

综上, 局部复活区的剩余下滑力为  $253.96 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ , 方向与第 VII 条块底滑面一致, 即与水平面成  $9.54^\circ$ , 向坡下。

### 3 古滑坡局部复活的治理设计探讨

#### 3.1 方案设计

鉴于该古滑坡的局部复活变形特征, 提出应急抢险措施如下: 在边坡坡脚回填反压, 以增强坡体稳定性; 地表布置临时截排水设施, 保证排水通畅; 地表裂缝用粘土夯填, 避免地表水入渗进一步加大变形; 于坡体裂缝周界及抗滑桩顶增设监测点, 监测地表位移、深部位移及地下水动态。

依据 2.2 节计算的滑坡推力, 遵从“经济合理, 技术可行”的治理理念, 设计采用“清方+钢管桩+截排水”进行处治, 如图 6。具体措施如下:

(1) 路堑边坡进行清方处治, 依据现场土体变形情况, 路堑边坡坡比由 1:2 放缓至 1:3~1:5。一级边坡坡度 1:4~1:5, 二级边坡坡度 1:3~1:3.25, 边沟平台宽 3 m, 一级平台 5 m。坡面采

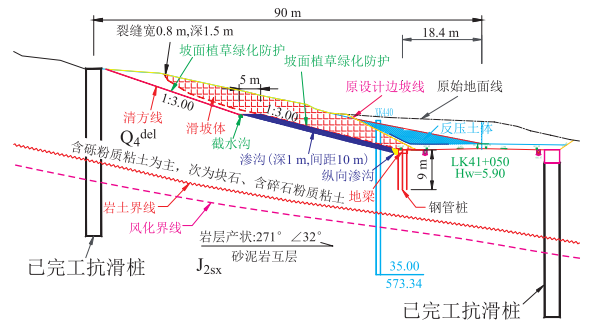


图 6 局部复活区治理设计

用植草绿化防护。

(2) LK 40+000~LK 41+100 段一级边坡坡脚设置钢管桩进行支挡。其中, LK 40+000~LK 41+025 段布设 2 排钢管桩, 地梁宽 3.0 m、高 1.2 m, 钢管桩长 6.0 m, 纵向间距 2.0 m, 横向间距 1.5 m; LK 40+025~LK 41+100 段布设 3 排钢管桩, 地梁宽 2.3 m、高 0.8 m, 钢管桩长 9.0 m, 纵向间距 2.0 m, 横向间距 1.0 m。钢管桩按梅花形布置, 钢管采用直径 140 mm 直缝电焊钢管。

(3) 滑坡周界、第一排桩后及一级平台设置截排水沟。

(4) 一级边坡设横向渗沟, 间距 10 m, 坡脚设纵向渗沟。渗沟底宽 0.6 m, 顶宽 1.6 m, 深度 1 m。出口处开沟引排至排水系统。

#### 3.2 治理效果监测

采用“清方+钢管桩+截排水”治理后, 布设永久固定点位, 对局部复活区治理后的位移、地下水位和降雨量进行监测。监测点布设如图 7, 地表位移通过全球定位系统(GNSS)测量, 于图 1 所示滑坡剖面设置 3 个混凝土观测墩点位; 深部位移通过导轮固定式测斜仪监测, 顺坡向下深度分别为 10 m、8 m 和 6 m; 地下水位通过孔隙水压计监测, 考虑监测成本, 将其布设于深部位移测点底部, 共用测斜管; 降雨量通过雨量计监测, 布设于坡顶位置。监测频率均设置为 2 h/次。

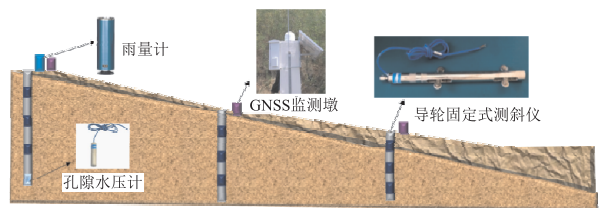


图 7 局部复活区的监测点布设

以地表位移和坡体深部位移监测为例, 复活区治理效果监测如图 8。其中, 地表位移自坡顶向下 3

个测点分别为 WY1、WY2 和 WY3,由图 8(a)可见 2020 年 11 月后基本趋于稳定;坡体深部位移在 2020 年 2 月至 10 月基本无明显变化,波动幅值限

于 5 mm 区间。由此可见,“清方+钢管桩+截排水”治理后复活区处于稳定状态。

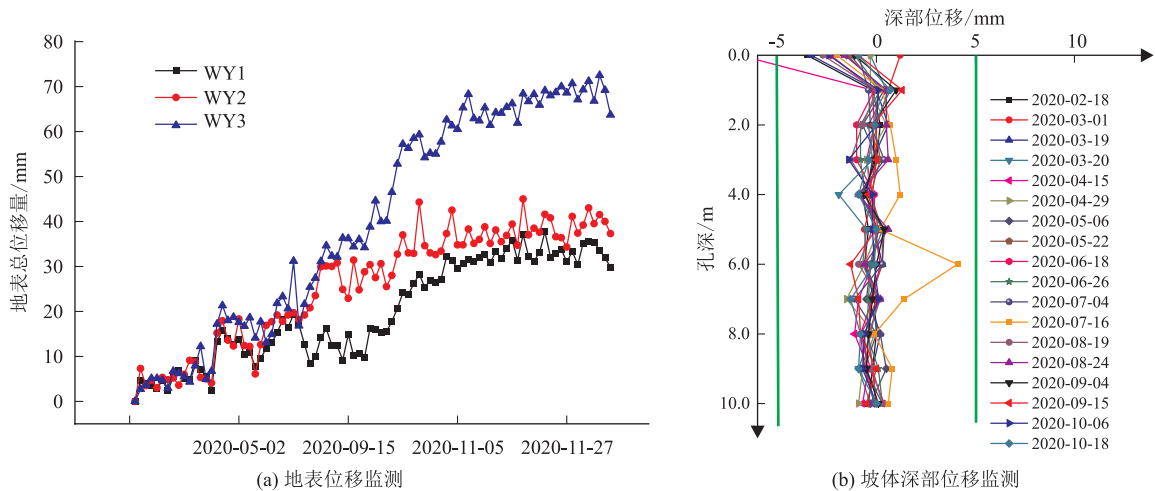


图 8 局部复活区治理效果监测

## 4 结论

(1) 公路横穿古滑坡时,在对古滑面施作支挡加固措施后,还应注意浅表地层中的潜在薄弱面,开挖卸荷及降雨扰动下易于局部复活失稳。

(2) 地表附近含碎石粉质粘土透水性相对较好,含砾粉质粘土则相对隔水,层间界面受地下水渗透力作用,且滑带土饱水软化后强度有所降低,故诱发局部复活。

(3) 采用“清方+钢管桩+截排水”的治理方案能够对局部复活区进行有效治理,监测结果表明坡体治理后处于稳定状态。

### 参考文献

[1] TEMME A, GUZZETTI F, SAMIA J, et al. The future of landslides'past-A framework for assessing consecutive landsliding systems[J]. Landslides, 2020, 17(7): 1519-1528.  
 [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.  
 [3] 尹静, 邓荣贵, 钟志彬, 等. 横穿隧道变形区隧道受力变形规律及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2):

3615-3625.

[4] 孙春平, 范洪海, 李方, 等. 切向摩阻力对横穿滑坡区隧道受力变形的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 92-99, 113.  
 [5] 陈伟志, 李安洪, 胡会星, 等. 横穿古滑坡框架式抗滑支挡结构工程技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2861-2875.  
 [6] 叶龙珍, 黄国平, 柳侃. 福建池头古老滑坡特征及局部复活影响因素[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(2): 19-25.  
 [7] 漆宝瑞. 南昆铁路[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2006: 346-357.  
 [8] 唐勇. 基于 FLAC<sup>3D</sup>的边坡稳定性分析及治理模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(3): 81-85.  
 [9] 张乐, 冯君, 武小菲, 等. 基于变形控制的含软弱夹层顺层边坡治理[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 94-101.  
 [10] 祈亮, 赵成江, 张世径. 预浸工艺微型桩在湿陷性填土区楼房加固中应用研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(3): 52-58.  
 [11] 梁润娥, 欧阳海金, 陈飞, 等. 传递系数法和层次分析法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(3): 93-96.  
 [12] 宫凤梧. 河北省尚义县下马圈乡滑坡基本特征及防治措施[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(2): 1-4.  
 [13] 苏爱军, 冯明权. 滑坡稳定性传递系数计算法的改进[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 27(2): 51-55.

作者简介: 张乐(1996—),男,汉族,河南三门峡人,硕士,助理工程师,主要从事路基工程和边坡治理研究。

E-mail: 13258131501@126.com

通讯作者: 赵海松(1989—),男,汉族,云南宣威人,本科,工程师,主要从事地质灾害治理研究。E-mail: 954649482@qq.com