

文章编号: 10014632 (2023) 06-0001-12

引用格式: 张玉芳, 宋国壮, 袁坤, 等. 反倾层状软岩切层滑坡空间形态与演化机制研究 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (6): 1-12.

Citation: ZHANG Yufang, SONG Guozhuang, YUAN Kun, et al. Research on Spatial Morphology and Evolution Mechanism of Cutting-Layer Landslide in Anti-Dip Stratified Soft Rock [J]. China Railway Science, 2023, 44 (6): 1-12.

反倾层状软岩切层滑坡空间形态与演化机制研究

张玉芳^{1,2}, 宋国壮^{1,2}, 袁坤^{1,2}, 邓胜¹, 范家玮^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为查明滑坡空间形态对于开展滑坡科学整治的重要性, 以兰新客专沿线某反倾层状软岩切层滑坡为研究对象, 基于滑坡地貌和地表标志性地物精细化追踪调查, 结合地质力学分析方法, 对滑坡周界、滑面倾角等空间形态特征开展研究; 运用局部强度折减法进行有限元数值模拟, 还原滑坡演化过程并分析预测其发展趋势。结果表明: 滑坡区 NE80°∠20°构造主应力单向挤压作用下可形成 12 组构造裂面, 滑坡折线型后界、多段式左右侧界依附于多组剪性和拉张节理构造结构面形成; 倾角 46°牵引段滑面、20°主滑段滑面依附于沿倾角 70°~76°弯张面重力错动产生的 1, 2 级剪切滑移面形成; 滑坡具备易滑软岩地层、顺坡向软弱结构面(带)以及地下水赋存等形成条件, 力学演化机制可概括为强度软化、重力错动、剪切滑移; 滑坡沿第 1 道剪出口大动时稳定性系数为 0.80~0.90, 反算主滑段滑面内摩擦角为 9.7°~12.9°, 计算沿第 2 道剪出口滑动后稳定性系数约为 1.15, 处于相对稳定状态。

关键词: 切层滑坡; 空间形态; 地质力学; 演化机制; 数值模拟

中图分类号: U216.419.1 文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.10014632.2023.06.01

滑坡是我国地质灾害中占比最大的灾害类型之一。据不完全统计, 1949 年到 2020 年我国由滑坡灾害导致的死亡人数超过 2.5 万, 年均超过 400 人, 年均经济损失达 1 000 亿元以上^[1]。其中, 西北地区构造运动剧烈、气候条件恶劣, 仅西宁-民和盆地发育巨大型滑坡 64 处, 中型滑坡 234 处^[2]。2022 年 9 月 15 日, 青海省西宁市城北区九家湾村发生的滑坡灾害导致 1 111 名村民紧急撤离, 兰新客专某特大桥部分桥墩及梁体不同程度受损, 西宁-大通段列车中断。经研判该滑坡为典型的地表水下渗透发的反倾层状软岩切层滑坡, 长期林地灌溉和 2022 年 8 月到 9 月的多次强降雨是诱发滑坡的直接原因。如何采用有效方法和手段查明滑坡周界、滑面倾角等空间形态, 及早开展滑坡科学整治、恢复高铁正常运营和人民正常生活迫在眉睫。

查明滑坡滑面倾角等空间形态是制定滑坡整治

方案、开展滑坡科学整治的前提。薛海斌等^[3]、董彤等^[4]在考虑岩土材料软化特性和砂土各向异性强度准则的基础上, 借助 FLAC3D 和 Matlab 软件建立了滑坡多级滑动面分析方法; 赵四汉等^[5]、杨奎斌等^[6]开发了相关程序, 开展了临界滑动面形式及搜索方面的研究。上述研究借助于试验数据和模拟软件, 对滑坡滑动面分析确定提供了参考, 但相对缺少地质力学理论方面的验证。

现有研究认为反倾边坡是沿某一软弱结构面发生翻折或滑动破坏。陶志刚等^[7]、姚晔等^[8]、吴昊等^[9]和黄达等^[10]采用模型试验对层状反倾岩质边坡破坏机制和变形演化模式开展了不同程度的研究。Lin 等^[11]、Matsushi 等^[12]建立了反倾岩质边坡多级破坏折断面分布深度的计算模型, 模拟了反倾岩坡在自重条件下的折断面演化特征。殷坤龙等^[13]基于悬臂梁模型, 揭示了反倾岩石边坡的破

收稿日期: 2023-03-07; 修订日期: 2023-09-10

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目(2022-SF-158); 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2023YJ219)

第一作者: 张玉芳(1965—), 男, 河北石家庄人, 研究员。Email: zyf16898@126.com

坏机制并提出应力判据。Alzoubi等^[14]、Jiang等^[15]通过DDA, UDEC和PFC等数值仿真软件对反倾层状岩质边坡破坏机制进行了研究。赵建军等^[16]建立了平缓反倾采动滑坡变形破坏的地质力学模型。上述研究对象和成果大多集中于近直立反倾斜坡沿某一折断面(带)发生的翻折倾倒式破坏, 鲜见针对平缓反倾层状滑坡沿顺坡向软弱破裂面发生剪切滑移式破坏的研究。

本文以兰新客专沿线某特大桥反倾层状软岩切层滑坡为研究对象, 基于地表精细化追踪调查, 结合地质力学分析、局部强度折减法、有限元数值模拟等理论方法和研究手段, 研究滑坡空间形态和演化机制, 以期对相关类型滑坡空间形态和演化机制研究提供借鉴。

1 滑坡区概况

1.1 地质环境条件

1) 地形地貌

滑坡地理位置及滑动前地貌影像图如图1所示。滑坡区隶属西宁市二十里铺镇九家湾村, 位于北川河东岸, 属黄土阶地地貌单元。自然斜坡由东向西倾斜, 平均坡度 35° , 海拔高程2 265~2 480 m, 相对高差215 m, 斜坡发育东西向4条自然沟。坡脚为北川河河谷及I, II, III级河流阶地, 兰新客专坐落在III级阶地, 九家湾村坐落在II级阶地。



图1 滑坡地理位置及滑动前地貌影像图(2018年11月)

2) 地层岩性

通过地表调查揭露滑坡区出露古近系棕红色泥岩与灰白色石膏互层, 厚度约50 m。上覆第四系堆积层, 主要分布如下。

(1) 砂质黄土(Q_h^1): 分布于滑坡后缘山顶, 为北川河V级河流阶地。

(2) 卵砾石(Q_h^{pl}): 分布于II—V级阶地, 主

要由砂砾石、砾石、泥沙、砂土组成。

(3) 粉质黏土(Q_p^{3al}): 分布在滑坡体坡脚边缘II, III级阶地, 建设期钻探揭露厚约10 m。

3) 地质构造

区域构造以强烈的力偶作用为主, 发育NNW向左旋走滑断裂为主的构造体系。地表调查揭露岩层产状 $70^\circ\sim 85^\circ\angle 14^\circ\sim 20^\circ$, 向东倾斜, 为层状软岩反倾坡体结构。岩层中普遍发育水平层理、垂直节理和剪节理, 沿节理及层面石膏脉体充填明显。

4) 水文地质条件

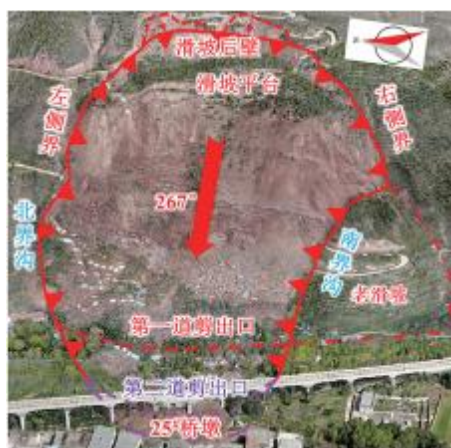
地下水类型主要为松散岩类孔隙潜水和风化带裂隙孔隙潜水, 主要依靠大气降水和人工灌溉地表水补给后, 经泥岩夹石膏层中构造裂隙下渗, 沿内部孔隙径流后沿石膏层与泥岩界面以泉水形式排泄。

1.2 滑坡周界形态特征

图2为滑坡周界地形和无人机影像图。滑坡周



(a) 滑坡周界地形



(b) 无人机影像图

图2 滑坡周界地形和无人机影像图

界形态呈不规则“倒梨状”，经量测东西向纵长约 427 m，南北向横宽约 280 m，面积约 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。综合考虑滑坡后壁出露擦痕指向、地表裂缝展布走向、滑坡舌分布最远端以及桥梁偏移变形最严重部位（25#桥墩）等因素，确定主滑方向为 267° 。

滑坡后壁整体呈“折线型”，横宽约 220 m，后壁高约 23~28 m，现场量测中段主后壁擦痕产状 $267^\circ \angle 46^\circ \sim 48^\circ$ 。滑坡平台宽约 40 m，左、右侧界纵长分别约为 220 和 260 m，沿北、南界沟分布。滑坡前缘存在 2 道剪出口，可见反翘隆起现象。滑坡舌呈不规则“垄状”形态，前部坍塌严重。

2 地质力学分析

2.1 构造主应力单向挤压作用下的构造

地质力学理论揭示，岩体在构造主应力单向挤压作用下可产生不同方向和力学性质的早期破裂构造面（挤压阶段）。随着应力调整，四周岩体要恢复原始状态的形变回弹力使变形岩体产生一系列破裂构造面，并对早期破裂构造面形成松弛改造（松弛阶段）。

经调查，滑坡区出露岩层产状为 $N5^\circ W \sim N20^\circ W \angle 14^\circ E \sim 20^\circ E$ ，结合区域构造应力场分布，判断滑坡区构造主应力指向为 $NE80^\circ \angle 20^\circ$ 。在该应力作用下可生成的构造裂面产状分布如图 3 所示。

1) 挤压阶段构造裂面分布

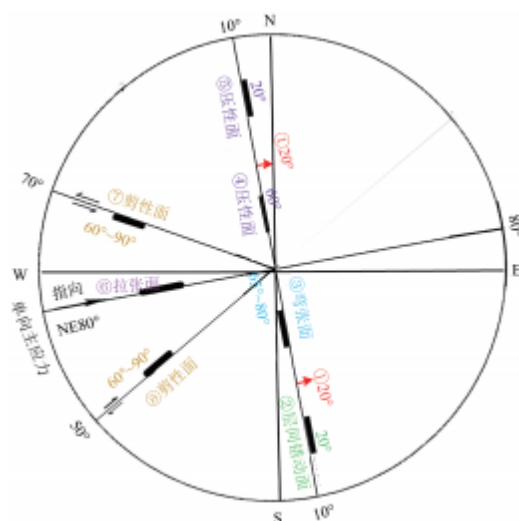
①层面： $N10^\circ W \angle 20^\circ E$ 。②层间错动面（带）： $N10^\circ W \angle 20^\circ E$ ，一般具擦痕。③弯张面： $N10^\circ W \angle 65^\circ W \sim 80^\circ W$ ，较发育。④压性面： $N10^\circ W \angle 60^\circ W$ ，较发育。⑤压性面： $N10^\circ W \angle 20^\circ E$ ，不发育。⑥拉张面： $N80^\circ E \angle 80^\circ S \sim 80^\circ N$ ，发育。⑦剪性面和⑧剪性面： $N70^\circ W \angle 60^\circ S \sim 90^\circ S$ （逆时针）， $S50^\circ W \angle 60^\circ N \sim 90^\circ N$ ，1组发育，1组不发育。

2) 松弛阶段构造裂面分布

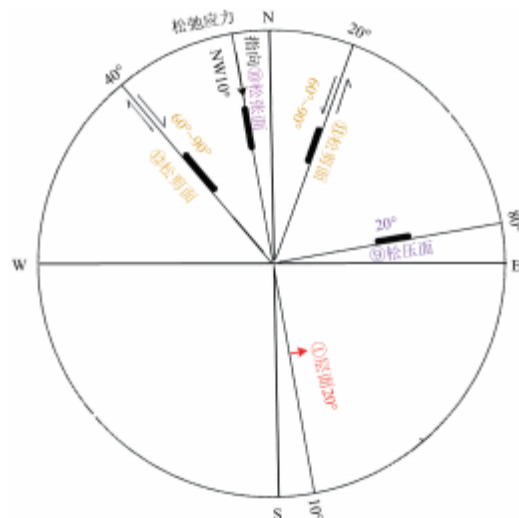
⑨松压面： $N80^\circ E \angle 20^\circ N$ 。⑩松张面： $N10^\circ W \angle 80^\circ W \sim 80^\circ E$ ，较发育。⑪松剪面和⑫松剪面： $N20^\circ E \angle 60^\circ W \sim 90^\circ W$ ， $N40^\circ W \angle 60^\circ E \sim 90^\circ E$ ，均不发育。

3) 滑坡区构造结构面调查对比

（1）滑坡后缘重力错动构造。重力错动构造是指岩土体受重力作用在软弱部位形成的剪切错动面。现场调查揭露滑坡后缘滑床存在多处错动后壁如图 4 所示，见明显错动痕、泥膜现象。现场量测



(a) 挤压阶段



(b) 松弛阶段

图3 $NE80^\circ \angle 20^\circ$ 主应力挤压作用下构造裂面产状分布

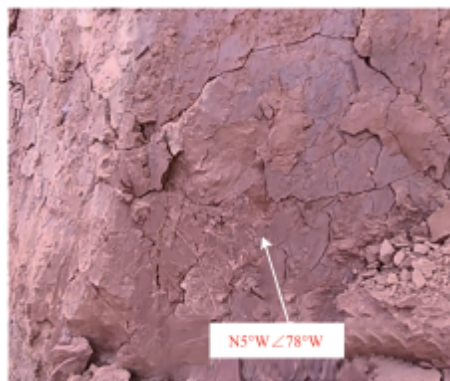


图4 滑坡后缘重力错动构造

错动面产状 $N5^\circ W \angle 70^\circ W \sim 76^\circ W$ ，与构造主应力单向挤压作用下生成的③弯张面产状基本一致，表明该重力错动构造系依附弯张面形成。

（2）滑坡右侧界外构造结构面。滑坡右侧界

外泥岩夹膏岩互层处露出见多组构造结构面如图5所示,与单向挤压力作用下生成的对应构造裂面产状基本一致。①膏岩层面: $N5^{\circ}W\angle20^{\circ}E$ 。③弯张面: $N5^{\circ}W\angle76^{\circ}W$ 。⑦X型剪性节理和⑧X型剪性节理: $N65^{\circ}W\angle60^{\circ}W$, $S50^{\circ}W\angle64^{\circ}W$, 节理面平直、贯穿性好,延伸2~5 m, 每米2—5条, 局部见岩层10~20 cm剪切错移。⑨拉张面: $N80^{\circ}E\angle80^{\circ}N$, 贯穿, 延伸深, 宽度2~5 cm, 每米2—4条, 节理面粗糙不平整, 石膏脉体充填。⑩松张面: $N10^{\circ}W\angle80^{\circ}W$, 贯穿, 宽度2~5 cm, 每米2—4条。

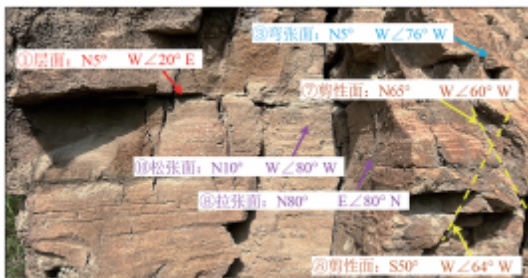


图5 泥岩夹膏岩互层处构造结构面分布

2.2 重力错动剪切滑移面

反倾层状软岩地层在构造期可沿弯张断裂的重力作用形成顺坡剪切裂缝。结合库仑破坏准则, 构建沿重力构造发生错动生成的新生剪切滑移面地质力学模型, 如图6所示。反倾层状缓倾岩体沿重力构造(倾角 α 为 $70^{\circ}\sim76^{\circ}$ 弯张面AB)发生错动时, 可形成与其夹角 α_1 为 $45^{\circ}-P/2$ (大主应力 σ_1 方向)的一级剪切滑移面BC, P 为基岩内摩擦角; 沿一级剪切滑移面BC继续发展, 可形成与其夹角 α_2 为 $45^{\circ}-P/2$ 的二级剪切滑移面CD。

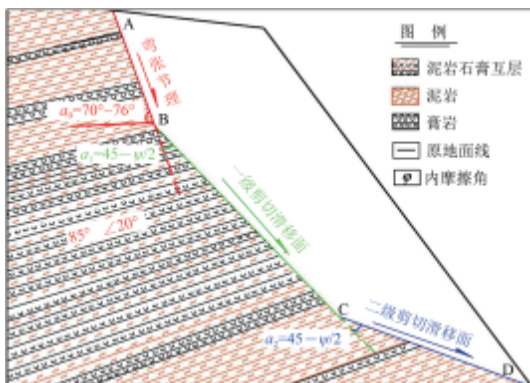


图6 剪切滑移面地质力学模型

参考沿线某隧道下穿巨型滑坡工程天然状态下泥岩抗剪强度试验指标(表1), 取泥岩平均内摩擦角 $P=35^{\circ}$, 结合地质力学模型计算得出一级剪

表1 天然状态下泥岩抗剪强度试验指标

试验指标	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
最大值	39.9	37.4
最小值	30.1	10.0
平均值	35.0	27.8
样本个数	29	29

切滑移面倾角为 $42.5^{\circ}\sim48.5^{\circ}$; 二级剪切滑移面倾角为 $15^{\circ}\sim21^{\circ}$ 。综合判断擦痕产状为 $267^{\circ}\angle46^{\circ}\sim48^{\circ}$ 的滑坡中段主后壁系依附于一级剪切滑移面形成。

3 滑坡空间形态

3.1 滑坡周界控制性结构面依附特征

图7为滑坡周界走向分布图。通过滑坡周界走向与地质力学生成的构造结构面、剪切滑移面产状对比分析, 判断滑坡周界受结构面控制形成的依附特征如下所述。

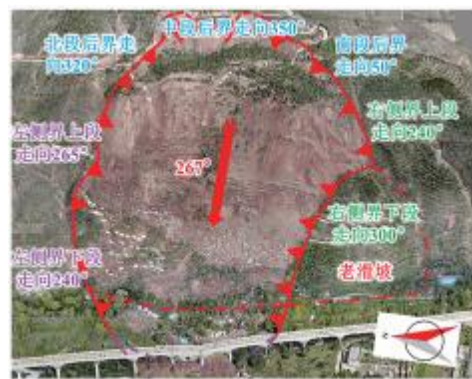


图7 滑坡周界走向分布

1) 滑坡后界

①北段走向 320° , 依附于 $N65^{\circ}W\angle60^{\circ}W$ 剪性节理构造结构面形成。②中段走向 350° , 依附于 $N5^{\circ}W\angle46^{\circ}W$ 一级剪切滑移面形成。③南段走向 50° , 依附于 $S50^{\circ}W\angle64^{\circ}W$ 剪性节理构造结构面形成。

2) 滑坡左侧界

①上段走向 265° , 依附于 $N80^{\circ}E\angle80^{\circ}N$ 拉张构造结构面形成。②下段走向 240° , 依附于 $N65^{\circ}W\angle60^{\circ}W$ 剪性节理构造结构面形成。

3) 滑坡右侧界

①上段走向 240° ，依附于 $N65^{\circ}W \angle 60^{\circ}W$ 剪性节理构造结构面形成。②下段走向 300° ，受北侧老滑坡可能存在的阻滑作用影响，沿老滑坡左侧界冲沟形成。

3.2 地貌形态特征

基于滑坡地表地貌精细化追踪调查，揭露滑坡代表性地貌要素，根据滑坡经典

三段式理论将地貌形态划分为牵引段张拉下错区、主滑段滑移鼓胀区和抗滑段反翘隆起区。滑坡地貌形态平面及主轴断面分区如图 8 所示。

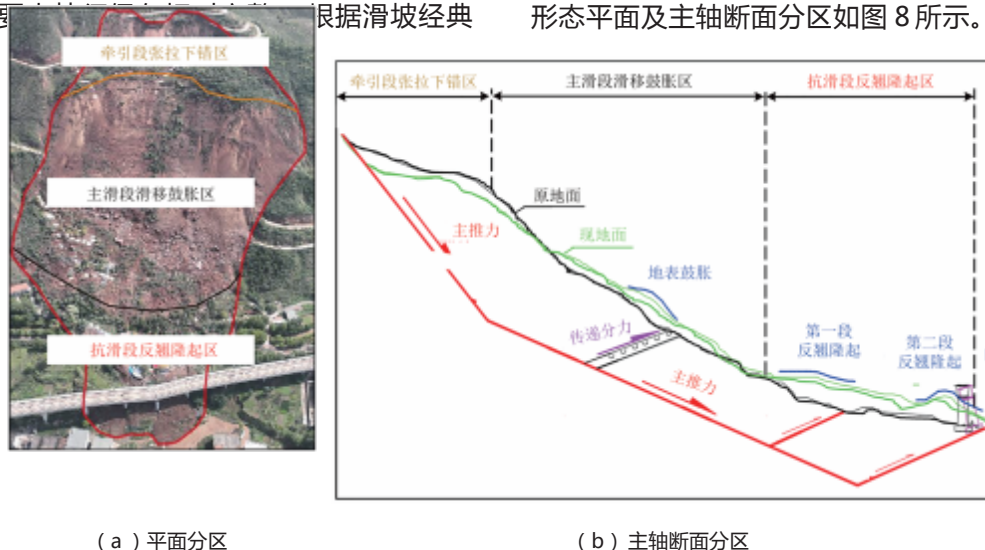


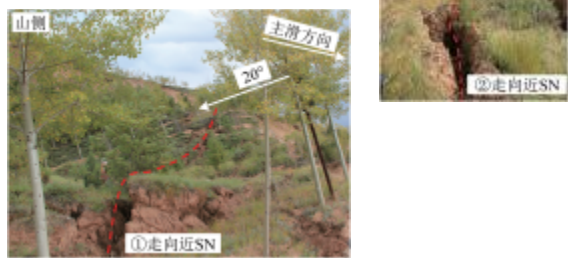
图8 滑坡地貌形态平面及主轴断面分区

代表性地貌要素特征分述如下。

1) 牵引段张拉下错区

牵引段除形成高约 23~28 m 滑坡后壁地貌外，由于滑坡体沿滑壁下错过程中形成拉槽，主滑体沿 20° 反倾层面向山侧临空方向倾斜，反映出明显的反坡平台，平台上树木整体向山侧 20°。另外揭露多条垂直于主滑方向的张性裂缝，宽度 10~50 cm 不等，两侧表现为

主滑段由于滑动过程中滑体坍塌解体严重，代表性地貌要素保存相对不明显。根据收集到的滑坡滑动过程中视频影像资料揭露两种明显地质现象。



(a) 反坡平台

(b) 拉张裂缝

图9 牵引段反坡平台及拉张裂缝

由于滑坡体各段滑动次序和速率存在差异，主滑段率先滑移后牵引段因失去竖向支撑产生主动土压力破坏，水平向小主应力 σ_3 减小，在平台河侧产生了垂直于主滑方向、走向近 SN 的拉张裂缝，两侧表现为山侧高、河侧低。

2) 主滑段滑移鼓胀区

（1）滑坡平台河侧陡坡地段坍塌。由于滑动过程中滑体解体、强度降低，其结合强度小于边坡陡度（综合内摩擦角），导致坍塌发生，如图 10 所示。表现为由外向里逐渐发展，形成贯通性坍塌后壁；塌壁陡坎逐渐明显，多处渗水处出现密集性纵向拉张裂缝。



图 10 陡坡坍塌现象

（2）中下部缓坡地段滑移鼓胀。滑坡过程中揭露中下部缓坡地段逐渐缓慢鼓胀，鼓包前缘坍塌引起植被脱落，如图 11 所示。结合图 8（b）分析其原因，滑动过程中滑坡推力的一部分分力沿局部软弱的反倾泥岩与膏岩层接触面向地表传递，但该分力不足以推挤滑体剪出地面，主推力仍沿主滑面向下向前传递，故出现局部鼓胀隆起张裂现象。



图 11 缓坡鼓胀现象

3) 抗滑段反翘隆起区

根据实地调查,结合滑坡发生时情景访问,判断该滑坡存在两道剪出口,地表对应揭露两段明显反翘隆起地貌,如图12所示。

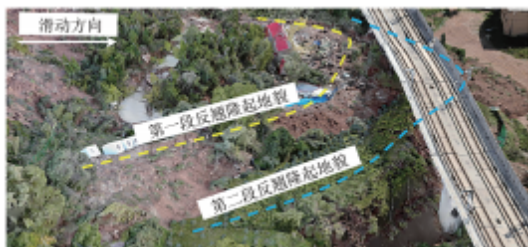


图12 抗滑段反翘隆起地貌

图13为第1道剪出口处裂缝分布及反翘地貌,图14为第2段反翘隆起地貌及裂缝分布。由于抗滑段受压发生被动土压力破坏,平行于滑动方向的大主应力 σ_1 减小,故在第1、2段反翘隆起端均揭露平行于主滑方向的纵向张裂缝(图13(a)和图14(a));另外由于垂直主滑方向土体受压隆起,在



(a) 纵向拉张裂缝



(b) 横向鼓胀裂缝

图13 第1道剪出口处裂缝分布及反翘地貌

第1道剪出口处亦出现横向鼓胀裂缝(图13(b))。

另外,第1道剪出口处形成向山侧反翘面,倾角 20° (图13(a));第2段反翘隆起端坡面及树木向山侧整齐倾斜 $20^\circ \sim 22^\circ$ (图14(b)),均与泥岩层面倾角一致,表明地表水沿石膏透水层下渗软化泥岩,抗滑段滑体具有沿泥岩饱水层面反倾 20° 剪出的条件。



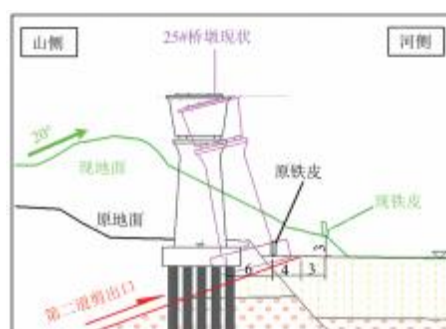
(a) 纵向拉张裂缝



(b) 坡面及树木倾斜 $20^\circ \sim 22^\circ$

图14 第2段反翘隆起地貌及裂缝分布

经调查,原25#桥墩河侧6m处布设有隔离铁皮,沿第2道剪出口滑动过程中被水平推移7m、抬升3m,位移角 21° 。结合反坡坡度 20° ,综合判断滑坡第2道剪出口位于原铁皮河侧4m处,滑体沿反倾 20° 层面剪出,如图15所示。



(a) 断面位置

以上内容仅为本文档的试下载部分，
为可阅读页数的一半内容。如要下载
或阅读全文，请访问：

[https://d.book118.com/1450413300
42011200](https://d.book118.com/145041330042011200)