

张家口市草原天路刘家房村段某崩塌发育特征及稳定性*

唐虎¹ 向长峰^{2*} 刘峰旭² 秦明辉²

1. 有色金属矿产地质调查中心新疆地质调查所; 2. 河北省煤田地质局第四地质队

摘要: 张家口草原天路是京津冀地区旅游“打卡”热点, 其沿线发育的崩塌等地质灾害严重威胁游客安全。本次研究以草原天路哈巴气—刘家房村段BT01崩塌为对象, 对其发育特征、形成机制、落石运动和稳定性进行研究。研究认为: BT01崩塌为中型倾倒式岩质崩塌, 在降水和地震等外力下, 岩体重心外移下落; 落石试验揭示, 落石呈块状时运动状态以跳跃+滚动为主, 距离最远, 动能最大; BT01崩塌在暴雨+地震状态下稳定性系数为1.15, 处于欠稳定状态, 建议采取“危岩清理+挂网喷锚支护”进行治理。研究结果可为张北县草原天路沿线地质灾害治理提供参考。

关键词: 草原天路; 崩塌; 成因机制; 运动模式; 稳定性

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2022.10.033

引言

张北县位于冀西北张家口市西北部, 与张家口康保县、尚义县和沽源县并称为坝上四县。区域上张北县西临蒙古高原, 东衔燕山山脉, 从坝下到坝上随着海拔梯度递增, 呈现出不同自然地理环境, 张北县具有典型坝上地理环境特征(宫凤梧, 2016)。2019年, 张家口与北京联合申办冬奥会, 使得张家口地区声名远扬, 坝上文化更是张家口文旅特色重点, 因此, 张北县近年来游客络绎不绝。草原天路在张北县贯穿而过, 沿途“空中草原”风景别致, 成为游客打卡圣地, 但是草原天路沿线, 由于人工切坡等, 以崩塌和滑坡为主的地质灾害也是时有发生, 这无疑为游客和行人的生命财产安全造成了严重威胁(李改梅等, 2016), 因此, 对张家口市张北县草原天路局部路段崩塌地质灾害展开研究, 分析其发育特征、成灾机制、运动模式及稳定性, 可为张北县草原天路沿线地质灾害防治提供参考, 对于张北县经济社会可持续发展意义重大。

一、区域地质背景

将本次研究的崩塌命名为BT01崩塌, 其位于冀西北张北县台路沟乡刘家房村西南1.1km处。BT01崩塌区域地貌类型为波状高原, 海拔高度在1145~1570m之间, 地形北高南低, 山前冲沟发育。该地区气候类型属于温带大陆性干旱季风气候, 降水主要集中在每年夏季, 多年平均降雨量在400~402mm之间, 四季温差较大, 冻融侵蚀使岩体结构破坏加剧。区内工程岩组以块状坚硬岩浆岩岩体、软弱层状碎屑岩岩体以及第四系松散沉积物土体为主, 岩体风化剥蚀较强, 碎裂岩化发育, 土体结构疏松。区内未见有断裂等构造分布, 距离最近的尚义—赤城断裂约8km。人类活动以修路切坡和农田灌溉为主。BT01崩塌所处的环境地质条件复杂程度, 综合判定为中等等级, 为崩塌发育创造了一定条件。

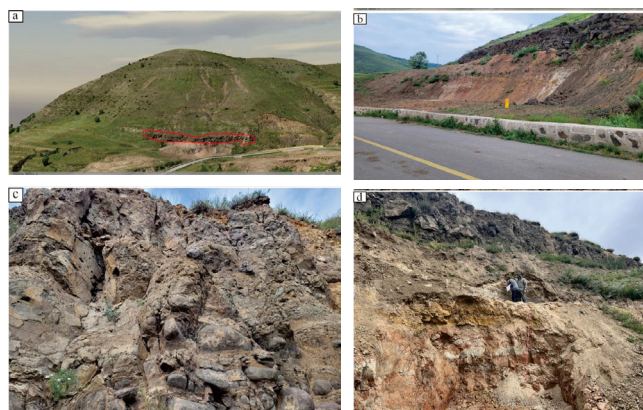
二、崩塌基本特征

(一) 崩塌形态特征

BT01崩塌发育在草原天路右侧缓坡山体的坡脚处。该缓坡山体成凸形, 上陡下缓, 坡度在25~40°, 山顶

高程1568.73m, 山低高程1498.22m, 相对高差70.51m。坡体被第四系残坡积物覆盖, 植被覆盖率约60%, 地形切割较强烈(图1a)。

缓坡山体的坡低由于修建公路时切坡不合理, 形成一处高陡边坡, BT01崩塌发育在此坡上(图1b)。经实地测绘, 该边坡坡向160°, 坡顶高程1507.47~1512.53m, 坡底高程1498.51~1504.08m, 相对高差10.38~14.37m, 坡角35°~90°。该边坡上部为坚硬玄武岩岩质边坡, 下部为软弱黏土岩和松散土体组成的岩土混合边坡。



a-缓坡山体; b-倾陡边坡; c-上部玄武岩; d-下部黏土岩

图1 BT01崩塌特征

上部岩体呈长条状, 沿东西向展布, 长度91.45m, 走向280°, 高度2.2~6.6m, 坡度70°~85°, 局部近乎直立。岩体岩性为新近系汉诺坝组玄武岩(图1c), 灰黑色, 粒状结构, 块状构造(少量气孔), 矿物主要由辉石、石英、云母等组成, 少量暗色矿物。岩体风化程度中等, 风化层厚度约0.5m, 主要为球形风化。岩体节理裂隙发育, 主要发育横、纵向2组裂隙, 横向裂隙产状为260°∠14°、255°∠16°、240°∠35°, 裂隙密度为3条/m, 开度在1~2cm, 充填物主要为灰色泥质充填; 纵向裂隙产状为270°∠58°、245°∠64°、85°∠88°, 裂隙密度为2条/m, 开度在1~3cm, 充填物主要为灰色泥质充填。

下部岩土体主要为砂砾石层及黏土岩，局部堆积人工填土（图1d）。砂砾石层为第四系全新统洪冲积物，主要为细砾和粗砂，呈灰黄、灰白色，主要矿物为石英、长石和云母，砂砾石层疏松且较湿润，层厚1.60~3.00m。黏土岩为白垩系南天门组河湖相沉积物固结成岩，呈红褐色与灰白色互层，泥质结构，层状构造，与上部砂砾石层接触面风化严重。

整体来看，该陡坡植被覆盖率低，受风化剥蚀和降水侵蚀影响，节理裂隙发育程度高，岩石较破碎，完整性较差，形成危岩带，并且部分岩块体已有脱离母岩趋势，在受降雨、地震等外动力作用下，极易失稳，产生崩塌。

(二) 崩塌运动特征

崩塌落石在下落过程中，岩体和坡体的相互碰撞导致岩体的速度、加速度及方向等具有不规则性，不规则运动轨迹很难通过理论计算来拟合，因此，本次研究通过现场落石试验（尹彦迪等，2022；范希飞等，2023），来对岩体运动轨迹进行分析。

在崩塌陡坡上选取一处经典剖面（图2），来进行落石试验。选取的试验剖面长45.38m，垂直高度13.61m，根据坡面的不同特征，将试验坡面分为5段，自上而下各段特征如为：

BC段：坡度84°，长度3.53m，为陡崖，坡面陡峭，风化中等，无植被覆盖。

CD段：坡度20°，长度5.38m，为倾斜小平台，土质松软，少量植被覆盖。

DE段：坡度45°，长度12.53m，为人工填土斜坡，土质松软，无植被覆盖。

EF段：坡度4°，长度18.74m，为人工平台，土质较密，无植被覆盖。

FG段：坡度1°，长度8.47m，为柏油公路。

落石试验工选用12块块石，岩性为玄武岩，质量6.5~54kg，形状主要有长条状、方块状和片状等。通过观察不同岩块下落时通过试验剖面上各节点的时间、岩块在坡面运动状态、运动状态发生改变时的位置、岩块跳跃的高度等，来分析崩塌落石运动特征。落石试验结果表明：

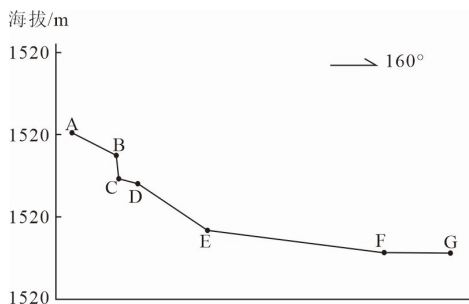


图2 落石试验剖面示意图

(1) 块石与坡面碰撞、覆盖层缓冲、阻滑、杂草拦挡和缓坡平台的减速作用，部分块石停留在坡面上，部分滚落到边坡底部。落下的块石多停留在E~F之间，一般未越过F点，块石坠落后距离坡脚E点的最大水平距

离为9.7m，E点距离B点水平距离为18.35m，故块石坠落的最大水平距离为28.05m。

(2) 条状块石运动状态以滚动为主，片状块石运动状态以为滑动为主，块状块石运动状态以跳跃+滚动为主。块石滚动时，由于覆盖层的作用，速度逐渐衰减。在坡面转折处块石呈跳跃式运动状态，跃起高度最高为0.5m，一般为0.1~0.3m。块石速度越大、碰撞前运动轨迹与撞击面越接近直交、撞击面的刚度越大，碰撞后跃起的高度越大，碰撞过程会损失部分动能。块状和条状块石的跳跃和滚动运动速度较快，运距较远。

(3) 块石在与坡面碰撞过程中，岩质较差的块石破碎，岩质好的则保持完整。试验选取的12块块石中，有9块破碎，占总数的75%。破碎后的块石大多停留在坡面上，少数滚落到坡底，滚落到坡脚的破碎块石由于质量大幅减少，其动能也大为降低。块石破碎情况受块石的风化程度、结构面的发育状况、碰撞前的速度、撞击面的特征和撞击的角度等影响。

三、崩塌稳定性分析

(一) 崩塌成因机制

BT01崩塌所处地区地形陡峻，陡坎发育，坡度大，地形临空条件好。坡体为硬质玄武岩与软质黏土岩的软硬相间结构，且玄武岩多分布于陡坡上部。岩体的差异风化易形成凹槽，下部质软的黏土岩风化剥落后，上覆岩块体崩落形成临空。岩体中构造裂隙和卸荷裂隙发育，各裂隙面与层面组合将岩体切割成梭型体或柱状体。该地区夏季降雨丰沛，气温年较差和日较差大，坡顶植被生长良好，植被根系发达，根劈作用较强。综上所述，边坡地形地貌、地层岩性、岩体结构特征等为危岩的发育提供了基本环境条件，长期的地壳外应力作用使岩体差异风化及岩体的卸荷作用增强，是崩塌诱发的主要因素（姜宁宁等，2023）。

(二) 崩塌稳定性定性分析

前文所述，危岩体坡向160°，坡角84°，岩层产状40°∠20°，玄武岩岩体内发育六组裂隙，产状分别为260°∠14°、255°∠16°、240°∠35°、270°∠58°、245°∠64°、85°∠88°。根据这些结构面产状和边坡产状，通过极射赤平投影方法，来定性分析危岩体稳定性。

表1 危岩体稳定性定性分析结果

结构面	交线点号	倾向关系	倾角关系	稳定性
①和②	A	反倾		稳定
①和③	B	反倾		稳定
①和④	C	反倾		稳定
①和⑤	D	反倾		稳定
②和③	E	顺倾	倾角<坡角	较不稳定
②和④	F	反倾		稳定
②和⑤	G	顺倾	倾角<坡角	较不稳定
③和④	H	反倾		稳定
③和⑤	I	反倾		稳定
④和⑤	J	顺倾	倾角<坡角	较不稳定

结果显示（表1），产状为 $255^{\circ} \angle 16^{\circ}$ 和 $240^{\circ} \angle 35^{\circ}$ 的两组结构面、产状为 $255^{\circ} \angle 16^{\circ}$ 和 $245^{\circ} \angle 64^{\circ}$ 的两组结构面，产状为 $270^{\circ} \angle 58^{\circ}$ 和 $245^{\circ} \angle 64^{\circ}$ 的两组结构面，这3组结构面交线与坡面倾向关系为顺倾，但两组结构面脚线倾角小于坡脚，因此，危岩体在这些结构面影响下，稳定性为较不稳定。

（三）崩塌稳定量计算

鉴于以上情况，经现场调查，选取WY1典型危岩体进行稳定性定量计算（图3）。WY1危岩体高4m，宽1m，厚0.6m其重心位于倾覆点之内，崩塌模式为倾倒式，因此采用倾倒式崩塌稳定系数计算公式进行稳定系数计算（付方华等，2023；彭喜明等，2023），计算参数根据现场调查结合定性分析厘定（表2），设置3种工况进行计算，工况1为天然工况、工况2为暴雨工况、工况3为暴雨+地震工况。

表2 危岩体稳定性计算参数

参数	取值	参数	取值
块体体积 (m^3)	2.4	抗拉强度 (kPa)	600
危岩体容重 (kn/m^3)	28	后缘裂隙深度h (m)	2
底边倾角 θ ($^{\circ}$)	14	垂直距离H (m)	2
后缘裂隙倾角 β ($^{\circ}$)	88	后缘水高 h_w (m)	0.67
底边平距b (m)	0.5	地震力臂 h_0 (m)	1
重心力臂a (m)	0.3		

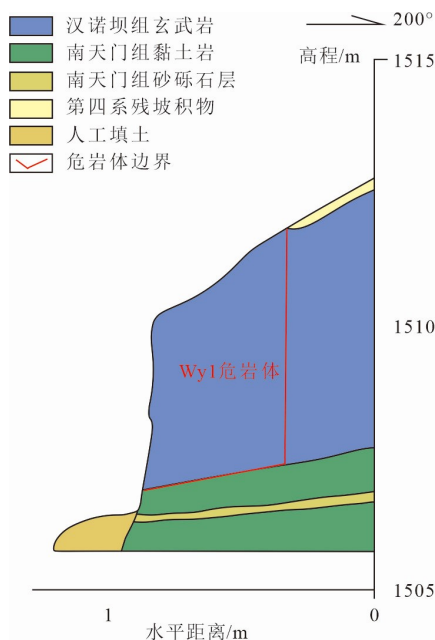


图3 WY1危岩体剖面简图

计算结果显示（表3），WY1危岩体在天然状态下稳定性系数为1.66，在暴雨状态下稳定性系数为1.42，在暴雨+地震状态下稳定性系数为1.15。根据《崩塌防治工程勘查规范》，BT01崩塌防治工程等级为II级，倾倒式危岩稳定安全系数取值为1.5，因此可知BT01崩塌在天然工况下处于稳定状态，在暴雨或暴雨+地震工况下处于欠稳定状态，陡崖坡面上残留的局部小块体在外动

力或自身风化卸荷作用下，易发生倾倒式崩塌，危岩带急需治理。

表3 危岩体稳定性计算结果

工况	稳定系数	稳定性
天然	1.66	稳定
暴雨	1.42	欠稳定
暴雨+地震	1.15	欠稳定

四、结论与建议

（一）结论

BT01崩塌位于张北县台路沟乡刘家房村西南1.1km处，上部为危岩体呈长条状，沿东西向展布，长度91.45m，走向 280° ，高度2.2~6.6m，坡度 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ，局部近乎直立。岩体岩性为新近系汉诺坝组玄武岩。危岩体完整性较差，经稳定性计算，在暴雨+地震状态下稳定性系数最小，为1.15，在降雨、地震等外动力作用下，易产生倾倒式崩塌。落石呈块状时运动状态以跳跃+滚动为主。

（二）建议

BT01崩塌成因机制为倾倒式，孕灾岩质边坡较陡，与草原天路紧邻，对草原天路上来往行人及游客造成严重威胁，建议采取“危岩清理+挂网喷锚支护”综合治理方案BT01崩塌进行治理。

参考文献

[1] 宫凤梧. 张家口市崇礼县小梨沟泥石流地质灾害基本特征及防治措施[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(06): 151-152+156.

[2] 李改梅, 张国新, 冯燕, 等. 张家口市下花园区地质灾害防治与地质环境可持续发展[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(03): 125-126.

[3] 姜宁宁, 魏安辉, 汪传琪. 西南山区公路顺层段某崩塌堆积体的稳定性评价[J]. 工程技术研究, 2023, 8(19): 217-219.

[4] 彭喜明, 刘邦本, 汪涛, 等. 安徽泾县桃花潭村凤形庄组崩塌成因机制分析及稳定性评价[J]. 地下水, 2023, 45(05): 184-186.

[5] 范希飞, 赵叶江, 杨丽君. 桐梓县狮溪镇机股凶崩塌稳定性评价及落石运动轨迹分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(04): 37-39.

[6] 付方华, 陈永生, 张雪峰, 等. 北京怀柔后安岭发电站崩塌特征及稳定性评价[J]. 矿产勘查, 2023, 14(01): 119-127.

[7] 尹彦迪, 徐今星, 胡力, 等. 岩脚村崩塌稳定性分析与运动特征模拟[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(12): 116-118.

作者简介：唐虎（1982-），男，本科，工程师，就职于有色金属矿产地质调查中心新疆地质调查所，主要研究方向为矿产勘查、环境地质和地质灾害。

基金项目：河北省煤田地质局财政专项资金项目（13000024P00B04410073H）

通信作者：向长峰。