

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.005

北京门头沟清水镇达洪路 K4+400 m 崩塌 灾害成因及破坏机理

周亮

ZHOU Liang

北京市地质灾害防治研究所, 北京 100120

Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing 100120, China

摘要: 2024年7月25日,北京市门头沟区清水镇达洪路突发道路崩塌灾害,崩塌堆积体总量约180 m³,造成达洪路断路。崩塌是北京市最为典型的突发地质灾害,研究其形成原因及破坏机理具有重要意义。本文在充分收集已有资料的基础上,查明了崩塌灾害及其隐患的发育特征、分布规律及地质环境条件,分析了崩塌灾害的形成原因及变形失稳过程。结果表明:本次崩塌形成的机理为滑移式崩塌,降雨是直接诱发崩塌灾害的主要因素。该崩塌变形失稳过程主要分为4个阶段:(1)岩体内部的节理、层理等结构面在构造作用下的初始变形阶段;(2)在降雨、地震、风化、人类工程活动等外部因素作用下的时效变形初步破坏阶段;(3)局部崩塌导致应力重分布,邻近区域应力集中,强度进一步降低,加速破坏扩展的累进变形破坏发展阶段;(4)当崩塌体贯通形成连续滑动面,剩余抗滑力不足以抵抗下滑力时,达到临界状态,微小扰动即可触发整体滑移的整体破坏失稳阶段。最终提出设置警示牌和警戒线、加强巡排查、增设专业监测设备、清理危岩体、开展工程治理等切实可行的防控建议。

关键词: 北京门头沟区;崩塌灾害;发育特征;成因分析;变形失稳;破坏机理;防控建议

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0295-09

Zhou L. 2025. Cause Analysis and Failure Mechanism of the Collapse Disaster at K4+400 of Dahong Road, Qingshui Town, Mentougou District, Beijing. *South China Geology*, 41(2): 295-303.

Abstract: On July 25, 2024, a sudden road collapse disaster occurred at Dahong Road in Qingshui Town, Mentougou District, Beijing, with approximately 180 m³ of collapsed accumulation causing road closure. As the most typical sudden geological hazard in Beijing, studying the causes and failure mechanisms of collapses holds significant importance. Based on comprehensive data collection, this paper investigates the developmental characteristics, distribution patterns, and geological environmental conditions of the collapse hazard and its potential risks, analyzing its formation causes and deformation-instability process. The results indicate that this collapse was a slide-type collapse mechanism, with rainfall being the primary direct triggering factor. The deformation-instability process comprises four stages: (1) Initial deformation stage of internal rock mass structural planes (joints and bedding) under tectonic forces; (2) Time-dependent

收稿日期: 2025-01-05; 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 北京市突发地质灾害监测预警系统工程运行(11000023T000002124048)、北京市突发地质灾害应急调查技术服务(11000022T000000439462)、北京山区道路典型崩塌“五度”专项研究(11000023T000002119382)

作者简介: 周亮(1981—),男,硕士,高级工程师,从事地质灾害防治与监测预警技术研究, E-mail: zlpages@163.com

deformation and initial failure stage under external factors including rainfall, earthquakes, weathering, and human engineering activities; (3) Progressive deformation-failure development stage where local collapses induce stress redistribution, adjacent stress concentration, and accelerated strength reduction; (4) Critical instability stage where continuous sliding surfaces form and residual anti-sliding forces become insufficient to resist sliding forces, making the slope prone to overall sliding under minor disturbances. Practical prevention measures are proposed, including installing warning signs and caution tape, enhancing patrols and inspections, deploying specialized monitoring equipment, clearing dangerous rock masses, and implementing engineering remediation.

Key words: Mentougou district, Beijing; collapse disaster; developmental characteristics; genetic analysis; deformation-instability process; failure mechanism; prevention and control recommendations

北京是地质灾害较为频发的城市之一,特别是崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等与自然地质作用有关的突发性地质灾害尤为突出(南贇等, 2024),其中崩塌灾害是北京地区数量最多、分布最广的地质灾害(夏相骅等, 2021)。一般坡度大于 50° 、高度大于30 m的高陡边坡易发生崩塌灾害,崩塌体以垂直或弹跳运动为主,多为坚硬、性脆、构造节理发育的基岩块体(许强, 2020)。因为灾害本身的突发性、隐蔽性、滞后性,崩塌危岩体分布的广泛性,以及灾害演变过程和破坏方式的复杂性,所以导致崩塌灾害前期预警、预报、防控难度极大,严重影响了北京地区的城市安全运行,成为首都地质灾害风险防控的重点和难点(李岩等, 2022)。由于崩塌多发生于道路沿线坡度较大的陡坡或陡崖之上,造成山区道路及交通设施损毁,并使交通受阻(王海芝等, 2022)。近年来,由于极端天气事件频发,北京周边山区突发地质灾害监测与防控形势日趋严峻。北京市相关部门高度重视,先后部署了地质灾害调查与区划(1:100 000)、地质灾害隐患点核查评估、主干公路崩塌地质灾害勘查、突发地质灾害详细调查(1:50 000)等工作,取得显著成效。基本查明了北京地区各类突发地质灾害的时空分布规律和发育特征(李岩等, 2023),并建立了北京市突发地质灾害隐患台账(以下简称“台账”)。截至2024年5月,“台账”包括各类突发性地质灾害隐患共计9 147处,其中崩塌隐患7 937处,威胁道路的崩塌隐患5 400处,占总隐患数量超过60%,主要分布在房山、门头

沟等十个区的浅山区道路,这些崩塌隐患具有点多、面广、规模小等特点,因此监测与防控难度很大。

本文以2024年7月25日发生在北京市门头沟区清水镇达洪路K4+400 m处的崩塌为研究对象,在灾后应急调查的基础上,全面系统阐述了该崩塌灾害的地质环境条件及特征,从地形地貌条件、地质构造发育条件、岩体结构特征等内在因素,以及人类工程活动、降水时空分布、震动条件、风化程度等外在因素,分析了该崩塌灾害的形成机理,并推演了崩塌的变形失稳演变过程(郭英和张国华, 2022)。通过研究崩塌灾害的成因机理和变形失稳演变过程,不仅提升了北京山区道路沿线崩塌灾害的防灾减灾能力,还对编制突发地质灾害防灾预案和防治规划具有重要指导意义。

1 研究区地质环境条件

研究区位于北京市门头沟区清水镇洪水峪村正北方向,清水河右岸,达洪路K4+400 m处的西北侧坡体(图1),地理坐标为:东经 $115^\circ38'40.7''$ 、北纬 $39^\circ54'53.2''$ 。

1.1 气象水文

研究区位于门头沟区西南部,属中纬度大陆性季风气候。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥。多年平均气温 10.2°C ,最高气温 37.9°C ,最低气温 -22.6°C 。年平均风速为 2.7 m/s ,最大风速 20 m/s 。

根据门头沟区气象局降水情况统计结果(截

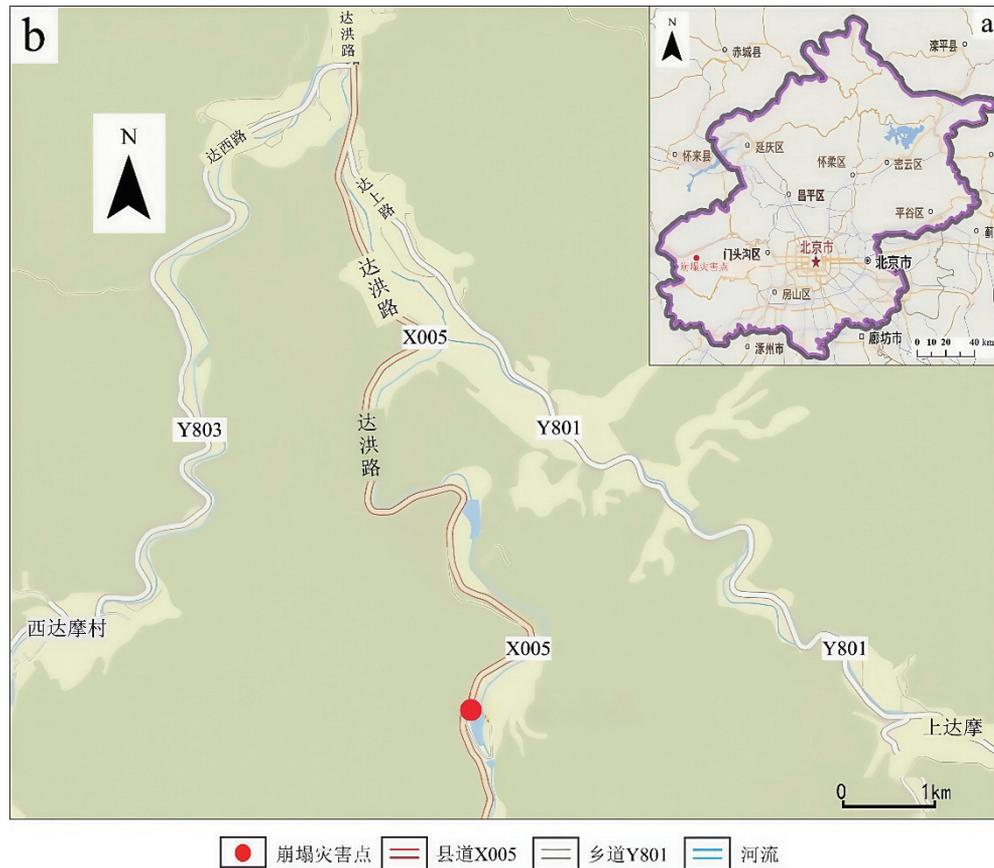


图 1 崩塌灾害点交通位置示意图

Fig. 1 Location and access map of the collapse site

至 2022 年底), 全区年平均降水量约 600 mm。年内降水量变化较大, 汛期年均降雨量 489 mm, 占全年降水量的 80%, 其中 7、8 月的降水量可占全年降水量的 60%。尤其强降雨呈时间短、降雨集中, 雨量大等特点, 由于降雨是引发崩塌灾害发生的主要因素, 因此短时间强降雨或长时间降雨浸润随时有引发崩塌的可能(顾福计等, 2024; 吴俊等, 2024)。

2023 年 7 月 29 日 20 时至 8 月 2 日 7 时, 受第 5 号强台风“杜苏芮”残余环流及副热带高压影响, 地处海河流域的京津冀地区遭遇历史罕见特大暴雨, 发生流域性严重洪涝灾害。从气象监测数据上看, 北京市单站降水量突破历史极值。根据北京市突发地质灾害监测预警系统监测数据, 本次降水呈现总量大、雨强大、历时长、范围广的特点。全市的平均降水量达 331 mm, 门头沟区的平均降水量达 538.1 mm、最大降水量达 1053 mm。

1.2 地形地貌

研究区内以构造作用和长期强烈的剥蚀切割

作用形成的中低山谷地貌为主, 最高处约 680 m, 最低处约 630 m, 相对高差约 50 m, 地形起伏较大, 常见陡坡高峰。

1.3 区域地层

研究区及周边区域主要出露的地层有第四系崩积、残坡积堆积体(Qh^{col} 、 Qh^{dl+el})、侏罗系髫髻山组一段(J_1^1)、九龙山组(J_2)、龙门组(J_1)、窑坡组二段(J_2^2)、窑坡组一段(J_1^1)(申健等, 2023), 由新到老分述如下:

第四系崩积、残坡积堆积层(Qh^{col} 、 Qh^{dl+el}): 主要分布于研究区内缓坡及坡脚处, 主要物质组成为碎石土夹块石, 黄褐色, 块石粒径一般 5 cm ~ 30 cm, 含量约 30% ~ 50%, 呈棱角状, 结构较为松散。

髫髻山组一段(J_1^1): 暗紫色、灰绿色杏仁状玄武岩、灰紫色熔结角砾凝灰岩, 凝灰质粉砂岩。

九龙山组(J_2): 灰绿、灰白色凝灰质砾岩、砂岩、页岩, 紫色凝灰质页岩、粉砂岩、夹有砾岩层, 含泥灰岩结核, 底部为砾岩。

龙门组(J₁):灰色细砂岩、粉砂岩、页岩,夹煤线,底部砾岩,局部砾岩为主。

窑坡组二段(J₂²):灰色粉砂岩与页岩互层,夹薄煤层,底部厚层长石石英砂岩。

窑坡组一段(J₂¹):灰色、灰黑色砂岩、粉砂岩与砂质页岩互层,含煤7—11层。

1.4 区域地质构造

研究区位于中朝准地台燕山台褶带西南部的西山迭拗褶中的门头沟迭陷褶(北京市地质研究所, 2013)。地处西山迭拗褶之腹地,与北部青白口中穹窿和南部十渡—房山中穹窿呈构造过渡关系,东北与昌怀穹断和北京迭断陷相邻,自中元古代至古生代一直为下陷沉积单元。中生代中期有厚度较大的玄武岩、安山岩喷溢及大量火山碎屑岩堆积。中生代晚期在市区西南边界附近有酸性火山岩喷发及火山碎屑岩沉积。该区域褶皱构造发育,是北京地区中生代向斜构造规模较大且分布相对集中的地区。褶皱核部一般较宽阔、平缓,两翼较陡,形似箱状。其中以北东向褶皱规模较大,东西向和北北东向次之,近南北向的规模最小,且不发育(韩帅, 2013)。

1.5 工程地质条件

根据附近相关工程资料,研究区内地层按岩性及工程特性划分为上覆第四系崩积、残坡积土层,下伏侏罗系砂岩。

1.6 水文地质条件

研究区内地下水类型为碎屑岩类裂隙水(董殿伟等, 2021),其补给、径流、排泄受地形地貌、大气降水、地层岩性及地质构造的影响。地下水补给主要来源于大气降水直接渗入,排泄方式包括自然蒸发、泉、地下径流及人工开采(李海军等, 2021)。

1.7 人类工程活动影响

研究区内的人类工程活动主要为切坡修路,达洪路施工过程中进行土石方开挖,形成陡坡。岩石覆盖层被剥蚀后风化加速,岩体卸荷松动后形成危岩体。在震动、降雨及风化等外部诱发因素影响下,危岩体可能滑落坠落导致崩塌灾害的发生(李玲, 2024)。

2 崩塌灾害基本特征

2.1 崩塌堆积体特征

达洪路 K4+400 m处崩塌发生于2024年7月25日,崩塌堆积体堆积于达洪路路面(图2),侵占整个路面,堆积体长约20 m,宽约4.5 m,平均厚约2 m,方量约180 m³,最大单块堆积体块径为0.5 m×0.5 m×0.3 m,崩塌灾害规模为小型。



图2 达洪路 K4+400 m处崩塌发生后全貌

Fig. 2 Panoramic view and geomorphic features of the collapse site at K4+400 of Dahong road

2.2 崩塌危岩体特征

崩塌体所在区域(以下简称“危岩带”)位于清水河右岸斜坡单元地带,以坡顶为危岩带后缘边界,坡脚为危岩带前缘边界,总面积约100 m²,厚度约1 m,体积约100 m³。崩塌段边坡坡宽约30 m,高约20 m,整体坡向130°,坡度约75°,坡面形态近似为直线型。斜坡基岩出露较完整,岩层的层面产状为165°∠25°。岩层主要发育有两组节理裂隙:①260°∠60°,长约1~1.5 m,发育密度为2条/m;②100°∠30°,长约0.5~1 m,发育密度为3条/m(图3)。受层面及节理面切割影响,危岩体裂隙极发育,结构很破碎,呈块状~碎块状结构,局部存在凹腔。坡体表面局部层面与节理面呈张开状态(刘洪博等, 2020),张开宽度约1~5 cm,部分裂隙内充填砂土。灌木、杂草等植物的根系生长于裂隙内,坡体植被覆盖率约90%。

3 崩塌成因分析

崩塌灾害的形成和发生是由多种因素综合作

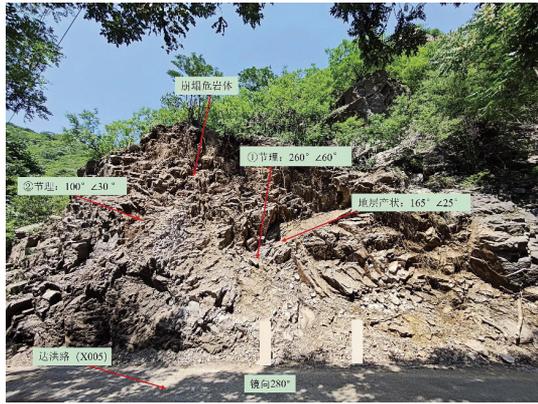


图 3 崩塌危岩带全貌

Fig. 3 Comprehensive characterization of the rockfall-prone hazard zone

用的结果(刘传正和陈春利, 2020), 主要包括地质构造发育情况、地形地貌条件、地层岩性分布条件、岩体结构特征等内在因素和人文气象、人类工程活动、地震作用、风化等外在因素, 这些因素结合在一起就会引发崩塌灾害(于森等, 2022)。

3.1 地形地貌条件

研究区内崩塌灾害大多发生于坡度大于 50° 河流深切形成的峡谷区或者陡坡地带(刘文等, 2023)。该崩塌体发育于清水河右岸的山体中下部, 山体地形陡峭, 局部坡体存在临空面、坡面发育凹腔, 提供了有利于崩塌灾害形成和发生的地形条件。

3.2 地质构造条件

研究区附近主要发育百花山向斜、髻髻山向斜和马栏断裂束, 形成时期大致为燕山中晚期。其中位于研究区西南约 10 km 的百花山向斜呈略向南西缓倾伏, 轴面向南东陡倾的斜歪箱状向斜, 北东端于斋堂西南略翘起, 西南倾伏端被燕山晚期镇厂向斜截切掩覆, 东翼伴有马兰倒转脊状背斜及逆冲断层, 产状稍陡, 西北翼及向斜核部岩层产状较缓; 位于研究区东北约 20 km 的髻髻山向斜呈北东走向, 轴面向南东陡倾, 为一斜歪箱状向斜, 西北翼产状较缓, 核部开阔平坦, 东南翼伴有斜歪并倒转的脊状背斜及逆冲断层, 受早期构造限制和晚期构造改造, 东北和西南端褶皱轴方位略有偏转, 总体上呈现“S”型; 位于研究区西南端的北北东向马栏断裂束, 走向一般为北东 $20^\circ \sim 30^\circ$, 倾向东南或西北, 倾角 $30^\circ \sim 60^\circ$, 延伸较稳

定, 规模多在 20 km 以上, 形态舒缓波状, 呈雁行斜列, 具明显的压剪性特征。新生代以来, 断裂性质由压剪性向张剪性转化, 空间上呈带状分布(毛率全等, 2020)。研究区内复杂的地质构造条件和强烈的地质作用使岩体结构破碎, 提供了有利于崩塌灾害形成和发生的地质构造条件。

3.3 坡体结构条件

研究区内褶皱和断裂等地质构造发育较复杂, 岩石节理裂隙发育, 基岩风化剥蚀强烈。崩塌控制面为节理面和岩层层面(陈晓刚等, 2024), 髻髻山组一段岩层层面产状为 $165^\circ \angle 25^\circ$, 崩塌体所在边坡坡向 130° , 岩层倾向与临空面坡向基本一致。

通过赤平投影分析(校小娥, 2015), 岩层产状和①节理、岩层产状和②节理、①节理和②节理均斜交倾向坡外, 其交线倾角小于坡角(图 4), 形成楔状体, 属于不稳定结构。由于岩体被节理裂隙切割成块体状, 结构破碎, 坡面岩体又受到倾覆力矩的作用沿裂隙面滑移(程什等, 2023), 这些为崩塌体的形成提供了有利的坡体结构条件。

3.4 降雨条件

大部分边坡失稳都与降雨有着密切关系(谢洪波等, 2021; 丘嘉荣等, 2024)。自 2024 年 7 月以来, 北京地区降雨频繁, 尤其是大到暴雨级别的降雨。根据北京市突发地质灾害监测预警系统中清水镇洪水峪村监测点位采集的降雨数据, 崩塌所在区域 7 月 12 日—7 月 13 日累计降雨量达 220.5 mm, 7 月 24 日 14 时—7 月 25 日 6 时累计降雨量达 122.0 mm(图 5)。第一次连续两天的强降雨增加了地表岩体含水率, 使其饱和度接近或达到饱和状态。崩塌发生前的 7 月 24 日、25 日, 受副热带高压外围偏南暖湿气流、高空槽和台风“格美”残涡的共同影响, 北京市大部分地区出现暴雨, 山区一带出现大暴雨。

由于砂岩岩体发育高密度、高连通节理裂隙, 其结构面倾向与坡面呈顺向坡结构, 大量雨水入渗后使孔隙水压力骤升, 沿结构面形成滑动带; 高孔隙率的岩体能储存大量雨水, 增加自重荷载, 同时孔隙水压力降低有效应力, 削弱岩体抗剪强度; 结构面充填的砂土, 遇水后泥化, 降低抗滑阻力。

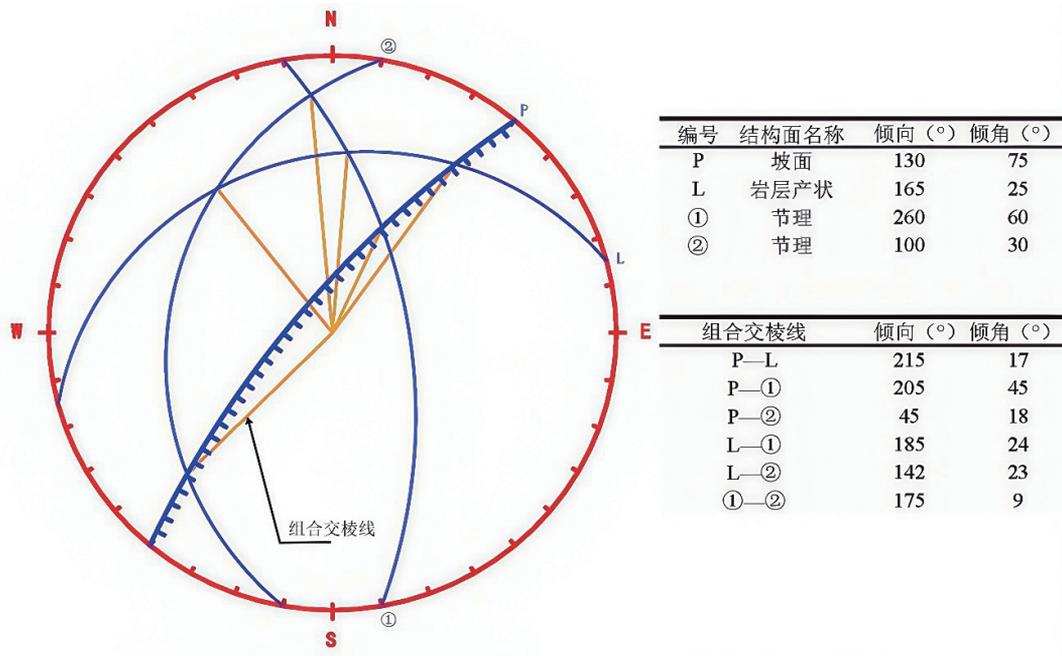


图4 崩塌体结构面赤平极射投影图

Fig. 4 Equal-angle stereographic projection of discontinuities in the rockfall mass

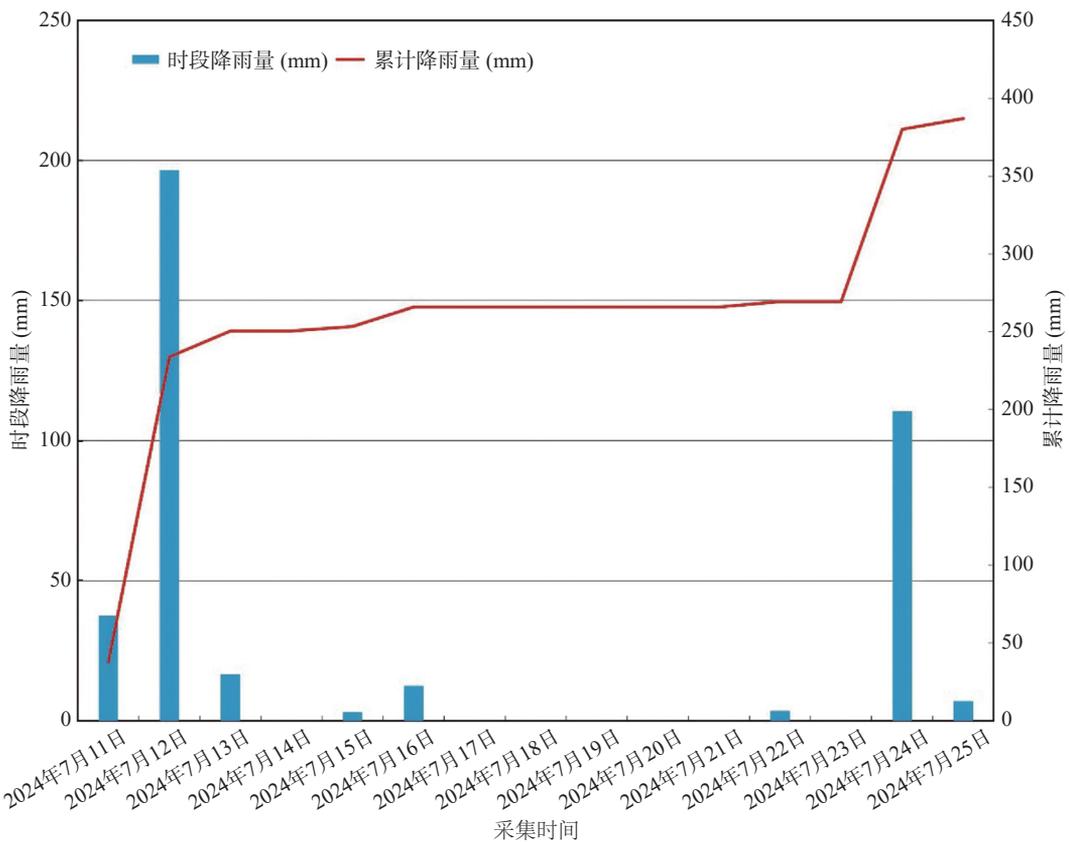


图5 研究区时段及累计雨量曲线

Fig. 5 Temporal rainfall distribution and cumulative curve

以上因素最终导致了崩塌灾害的发生。因此,强降雨直接诱发了本次崩塌灾害。

3.5 人类工程活动

崩塌所在边坡坡脚紧邻达洪路路肩,由于修

路时对坡脚及坡体前缘进行土石方开挖和切削坡施工形成了陡坡,破坏了原始地形、地貌及植被,使岩体裸露,风化加速,节理裂隙进一步发育,岩体破碎程度越发严重,而且切削坡施工完成后未对坡面进行防护,因此边坡处于欠稳定状态。卸荷松动效应破坏了原始应力平衡状态,应力需要在坡体内进行重新分布。加之坡脚处剪应力快速集中,形成剪出口,边坡中上部因受到倾覆力矩作用而产生拉应力,拉应力使岩体裂隙持续增大,加剧了坡体变形,同时卸荷回弹导致岩石层理面之间的胶结作用降低(贺凯等,2016),上述人类工程活动提供了有利于崩塌体的滑移坠落的条件。

4 崩塌变形失稳过程

崩塌灾害往往形成和发生在发育多组结构面的坡体中(曾芮等,2018)。该边坡多组结构面将岩体切割呈块状,在坡脚切坡后,坡面前缘呈临空状态。随着雨水入渗等诱发因素影响,岩体自重

应力增大,陡立岩层逐渐向临空方向倾斜移动,滑移变形逐步扩大,最终导致崩塌的发生(程鹏翔和李宗发,2019;常宏,2024)。根据崩塌灾害的发育特征、运动模式、破坏方式(郑光等,2018),结合研究区内边坡岩体结构类型,综合判定清水镇达洪路 K4+400 m 崩塌变形破坏模式属于滑移式崩塌。

参考前人对崩塌灾害机理的研究成果(张蕴灵等,2021;吕艳等,2022),基于对北京市门头沟区道路沿线崩塌成因机理的认识,结合滑移式崩塌发生的运动过程,本文分析了达洪路 K4+400 m 崩塌变形破坏机理,将其变形失稳过程分为 4 个阶段。

4.1 初始稳定阶段

在初始稳定阶段,坚硬的砂岩在构造作用、长期强烈剥蚀切割作用和河流侵蚀切割作用下形成高陡边坡,同时在髫髻山向斜等褶皱、断层错动挤压作用下形成原生节理裂隙,在差异风化作用和重力卸荷作用下产生表层卸荷节理裂隙,节理裂隙呈“十”字型,并将岩体切割成块体状(图 6a)。

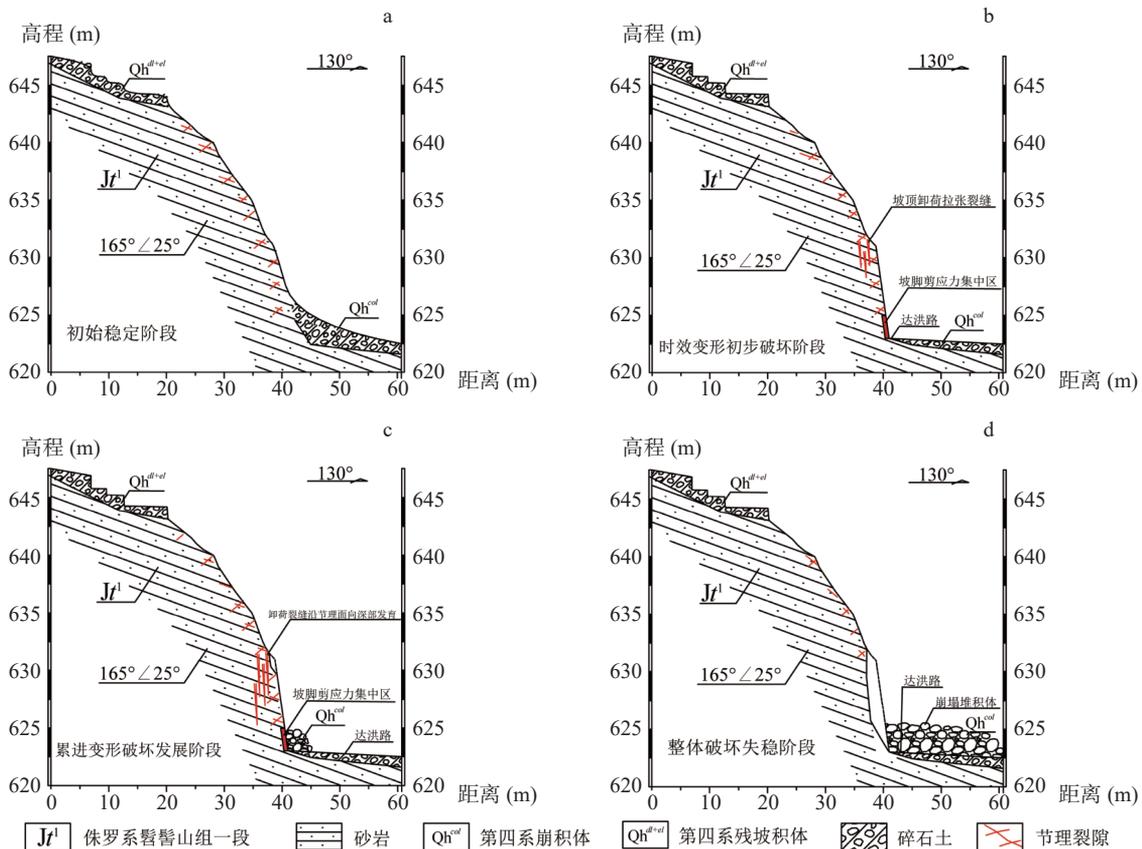


图 6 崩塌变形失稳演变过程图

Fig. 6 Evolution process diagram of collapse deformation and instability

4.2 时效变形初步破坏阶段

在内外地质营力共同作用下,岩层表面卸荷拉张裂隙开始发育,在坡顶处产生了拉张裂缝。在降雨、震动、风化等外力作用下,地表雨水和裂隙水沿着原生节理裂隙向坡体内部入渗,致使岩体自重应力增大,抗剪强度降低,从而导致节理裂隙继续扩大。切坡修路对坡体造成扰动,坡面形成临空面,坡体内应力重新分布,坡脚开挖处因应力集中而产生裂缝(图 6b)。

4.3 累进变形破坏发展阶段

在内外应力共同作用下,拉张裂缝继续在岩体内发育,坡面裂缝张开度也持续扩大,并向两端延伸,部分裂缝贯通,抗剪强度降低,表层部分岩体剥离坠落,边坡局部发生小型崩塌。岩体裂缝在剪应力和弯矩作用下继续向岩体深部发展(图 6c)。

4.4 整体破坏失稳阶段

由于 2024 年 7 月 12 日—7 月 13 日及 7 月 24 日 14 时—25 日 6 时两次集中强降雨导致大量雨水渗入坡体,岩体含水量增加,自重应力增大,孔隙水压力增大,在自重应力和孔隙水压力作用下,结构面的抗剪强度迅速降低,拉张裂缝继续发展并逐步贯通,当崩塌区贯通形成连续滑动面,剩余抗滑力不足以抵抗下滑力时,达到临界状态,微小扰动即可触发崩塌体沿滑动面发生滑移式破坏而整体失稳(图 6d)。

5 结论及防控建议

5.1 结论

(1)达洪路 K4+400 m 处崩塌按形成机理属于滑移式崩塌,陡峭边坡及岩体局部存在的临空面是崩塌灾害孕育形成的地形条件;褶皱、断裂等地质构造及新构造活动是崩塌灾害形成和发生的地质条件;岩层层理面和发育的节理裂隙是崩塌灾害形成和发生的坡体结构条件;切坡修路加剧了达洪路 K4+400 m 处坡体的变形;降雨是直接诱发崩塌灾害的主要因素。

(2)由于边坡崩积、残坡积层土质较松散及强风化砂岩结构破碎,渗透性好,遇水易软化崩解,

因此有利于地表水的入渗;另外组成边坡的岩土体工程力学强度也较差,坡体在自重及饱水状态下易失稳。

(3)本次崩塌是岩土体沿地质结构面发生剪切滑动失稳形成的,破坏面受地质结构控制,与临空面产状密切相关,变形从局部开始到整体滑动,失稳后伴随高速滑动、解体及碎屑流等现象。崩塌变形失稳过程主要分为 4 个阶段:初始稳定阶段、时效变形初步破坏阶段、累进变形破坏发展阶段和整体破坏失稳阶段。由于坡体结构面使原生节理裂隙在内外营力作用下持续扩大,切坡修路又使裂缝扩大加剧,后缘拉裂缝形成,前缘局部剪切变形;降水渗入裂缝,加速了结构面软化。剪应力和弯矩导致岩体裂缝随着时间推移和空间变化不断扩大,未贯通段出现应力集中,发生脆性破裂。渗入岩体的雨水使其自重应力和孔隙水压力增大,破坏面完全贯通,抗滑力骤降,崩塌体沿结构面加速脱离,动能剧增,另外渗流还产生拖曳力,推动崩塌体滑移,最终导致边坡沿结构面发生滑移式破坏而整体失稳。

5.2 防控建议

崩塌所在边坡上方为局部裸露岩体,岩体节理裂隙极发育,结构松散破碎,存在潜在约 100 m³的崩塌危岩体,在降雨、震动等外在因素影响下仍有发生崩塌的可能。建议对达洪路 K4+400 m 处设置警示牌和警戒线,提醒行人及车辆注意安全。加强巡排查,如发现边坡有落石或裂缝变形加剧等情况,立即采取应急处置措施;当该地区发布暴雨或地质灾害气象风险预警时,应加密巡查频次,有险情或落石发生时应及时上报,对该路段进行封控;在该路段安装 GPS、InSAR 等专业监测设备,监测坡体变形速率;清理坡面危岩体,恢复坡面植被减少降水入渗;在地质勘察的基础上,开展工程治理。

参考文献:

- 北京市地质研究所. 2013. 北京市门头沟区突发地质灾害详细调查报告(1:50000)[R].
- 常宏. 2024. 三峡库区今后仍需重点关注的滑坡崩塌成灾模式[J]. 华南地质,40(4):725-736.

- 陈晓刚,李红卫,张乾翼.2024.重庆某高速公路危岩崩塌变形特征及治理措施[J].中国地质灾害与防治学报,35(3):43-51.
- 程鹏翔,李宗发.2019.贵州武陵山区中二叠统崩塌地质灾害形成机理研究[J].中国岩溶,38(4):565-572.
- 程什,代贞伟,付小林,张安乐,王鲁琦,张晨阳,杨龙伟,蒋先念.2023.三峡库区巫溪凤凰山危岩体失稳机理与碎屑流动力学特征[J].华南地质,39(3):470-481.
- 董殿伟,马如林,李玉虎,林佳旭.2021.北京西郊玉泉山泉水复涌条件及方案预测分析[J].城市地质,16(2):139-146.
- 顾福计,钱龙,王梦洁,沈荣辉,李朦,王立峰,闫国芹.2024.太行山河北段“23·7”强降雨引发的地质灾害规律研究[J].中国地质灾害与防治学报,35(2):55-65.
- 郭英,张国华.2022.北京市门头沟区G109国道K40+800m崩塌特征及成因分析[J].城市地质,17(2):158-163.
- 韩帅.2013.北京门头沟地区公路崩塌灾害评价[D].山东科技大学硕士学位论文,14-16.
- 贺凯,陈春利,冯振,李滨,潘利宾.2016.塔柱状岩体崩塌灾害研究现状[J].地质力学学报,22(3):714-724.
- 李海军,崔一娇,任永强,姜媛,崔瑜,吴芮欣,王树芳.2021.永定河2020年春季生态补水对北京地下水涵养效果分析[J].城市地质,16(2):133-138.
- 李玲.2024.广东佛冈县龙山镇鹤田村崩塌体特征及稳定性分析[J].华南地质,40(3):583-591.
- 李岩,南赟,曹颖.2022.北京山区道路沿线崩塌灾害特征分析与防治思路探讨[J].城市地质,17(3):291-298.
- 李岩,张国华,王晟宇.2023.北京地区崩塌隐患特征分析与防治方案[J].城市地质,18(2):123-129.
- 刘传正,陈春利.2020.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,66(5):1334-1348.
- 刘洪博,佟磊,张龙,韩科胤,丛波.2020.S303公路边坡崩塌灾害体发育特征及其危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,31(4):34-38.
- 刘文,余天彬,王猛,宋班,黄细超,董继红,江煜,孙渝江.2023.缓倾红层地区岩质崩塌基本特征及成因机理初步分析—以四川洪雅铁匠湾崩塌为例[J].中国地质灾害与防治学报,34(5):54-63.
- 吕艳,陈天宝,王祚鹏,赵俊彦,占洁伟,刘旋.2022.太行山大峡谷崩塌发育特征及成因模式研究[J].工程地质学报,30(4):1304-1315.
- 毛率全,梁壮,石莹,闫妍,付野,王数.2020.北京市西山地区地质背景对土地资源利用的影响[J].中国农业大学学报,25(10):1-10.
- 南赟,翟淑花,李岩,曹颖,罗守敬,王云涛,郭学飞.2024.北京地区“23·7”特大暴雨型地质灾害特征及预警成效分析[J].中国地质灾害与防治学报,35(2):66-73.
- 丘嘉荣,黄利兵,王金秋.2024.不同降雨工况条件下东江上游城镇崩滑灾害危险性评价—以广东省龙川县四都镇为例[J].华南地质,40(4):773-782.
- 申健,邓岳飞,李晓玮,李海坤,郭英,周亮,张国华,刘晓晓,孙霖,王聪毅,张凯,刘文臣,贲友军,辛肖,赵艳龙,牟宗琪,邓小卫,岳文泽.2023.北京市地质灾害特征及防治措施—以门头沟区为例[M].北京:科学出版社,4-15.
- 王海芝,曾庆利,许冰,胡福根,于森.2022.北京“7·21”特大暴雨诱发的地质灾害类型及其特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,33(2):125-132.
- 吴俊,王晶,陈双喜,吴一笑,卜建军,钱施.2024.洞庭湖东缘两种典型地层控制的边坡地质灾害发育特征及机理分析[J].华南地质,40(4):764-772.
- 夏相骅,刘德成,李玉倩,高雪媛.2021.北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,32(1):28-34.
- 校小娥.2015.北京房山区公路地质灾害危险性评估研究[J].铁道建筑,(6):114-116.
- 谢洪波,刘正疆,文广超,陈红旗,杨运航.2021.四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,32(1):10-17.
- 许强.2020.对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J].武汉大学学报(信息科学版),45(11):1651-1659.
- 于森,南赟,胡福根,王海芝.2022.北京市怀柔区范崎路K29+500m处崩塌成因分析与成功预警处置启示[J].城市地质,17(4):394-399.
- 曾芮,姜明顺,孙琳旭,熊承仁.2018.强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理—以鄂西赵家岩崩塌为例[J].中国地质灾害与防治学报,29(3):12-17.
- 张蕴灵,傅宇浩,李为乐,王栋,潘佩珠.2021.2020年9月20日雅西高速姚河坝崩塌调查[J].山地学报,39(3):450-460.
- 郑光,许强,巨袁臻,李为乐,周小棚,彭双麒.2018.2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J].工程地质学报,26(1):223-240.