

工程地质条件对崩塌稳定性的影响研究

● 贾 博



[摘要] 基于对某地区典型崩塌灾害的实地调查与室内试验,本文系统分析了工程地质条件对崩塌稳定性的影响机制。研究表明,岩体结构面的产状与密度是控制崩塌发生的关键因素;地下水活动加剧了岩体风化程度,降低了岩体强度;陡峭地形条件下崩塌危险性显著增加。接着,通过定量分析,揭示了结构面特征、岩体强度、地形条件与地下水等工程地质要素对崩塌稳定性的影响规律。最后,基于研究成果,建立了崩塌灾害工程地质条件评价体系,为崩塌灾害防治提供科学依据。

[关键词] 崩塌灾害;工程地质条件;危岩体;稳定性分析;防治对策

崩塌灾害是一种突发性强,破坏力大的地质灾害,严重威胁人们的生命财产安全与工程建设。工程地质条件是影响崩塌发生与发展的重要因素,深入研究二者关系对指导崩塌灾害防治具有重要意义。近年来,随着城市化进程加快,崩塌灾害频发,造成重大损失。通过系统研究工程地质条件与崩塌稳定性的关系,建立科学的评价体系,对提高崩塌灾害预测预报能力与防治水平具有重要的理论与实践意义。

研究区工程地质条件特征

(一)地形地貌特征

研究区位于川西山区,属典型的高山峡谷地貌(图1),地形起伏剧烈,相对高差达800m~1200m。区域地貌整体呈现为“两山夹一谷”的地形特征,山体陡峭,沟谷发育,山体坡度普遍在35°~60°之间,局部陡崖地段坡度可达70°以上。

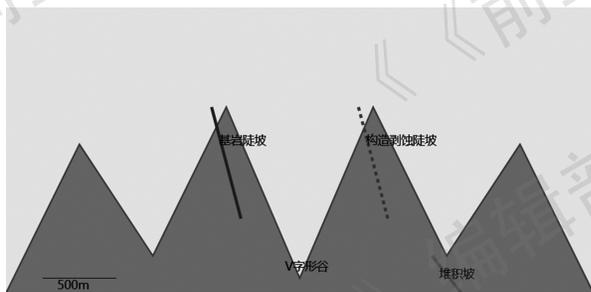


图1 地形剖面图

(二)地层岩性特征

斜坡类型主要为基岩陡坡、构造剥蚀陡坡与堆积坡三种。基岩陡坡多呈带状分布于山体中上部,坡面较陡,岩

石裸露;构造剥蚀陡坡主要分布于断层发育带附近,受构造活动影响强烈,岩体破碎。堆积坡多分布于山体坡脚及沟谷地带,坡度相对较缓,表层覆盖层厚度变化较大,区内沟谷呈V字形,切割深度大,谷坡陡峻,多见悬崖地貌。

(三)地质构造特征

研究区位于某山构造带西缘,构造活动强烈,断裂发育,区内发育三组主要断层,走向分别为北东向、北西向与近东西向。北东向断层规模最大,延伸长度达15km,断层带宽度5~20m,断层面倾角60°~75°,断层泥发育,岩体破碎。北西向断层次之,呈雁列状展布,长度3~8km,断层带宽度2~10m,断层面倾角70°~85°。近东西向断层规模较小,呈串珠状分布,断层交会部位岩体破碎程度高。节理裂隙密集发育,节理主要发育三组:近直立陡倾组、缓倾组与高角度斜交组。陡倾组节理倾角75°~88°,延伸长度大;缓倾组倾角20°~35°,延伸较短;斜交组倾角45°~65°,延伸一般。节理间距0.3~2m,节理面多张开,部分充填方解石与泥质。

(四)水文地质条件

研究区地下水类型包括基岩裂隙水与第四系孔隙水。基岩裂隙水主要赋存于砂岩裂隙与断层破碎带中,含水层厚度20~50m,单井出水量0.5~2L/s,水位动态变化明显,受季节性降雨影响大。第四系孔隙水主要分布于沟谷低洼地带与堆积坡地带,含水层厚度5~15m,富水性差异较大。地下水补给主要来自大气降水入渗与地表水体,径流方向受地形控制,由高处向低洼地带运移。区内发育多条地表溪沟,呈树枝状分布,具有季节性,丰水期流量显著增大,地下水对岩体强度影响显著。在岩层接触带与断层破

碎带形成软弱夹层，成为潜在的滑动面。水文地质条件的季节性变化是引发崩塌的重要诱因。

Q 崩塌灾害特征分析

(一) 崩塌类型及分布特征

研究区崩塌灾害按成因可分为重力型崩塌、结构型崩塌与混合型崩塌三种类型，重力型崩塌主要发生在陡崖地段，由岩体自重引起局部应力集中造成。结构型崩塌分布于断层破碎带附近，受岩体结构面组合控制，多发育在节理裂隙密集带。混合型崩塌则同时受重力与结构面影响，规模相对较大。从空间分布来看，崩塌点主要沿断层破碎带与陡崖带呈带状分布；高程分布上，崩塌多发生在海拔1200~2000m之间的中上山段；坡向分布上，西向与西北向边坡崩塌发育程度高于其他坡向，与区域构造应力场与岩层产状特征相吻合；地层分布上，砂泥岩互层地段崩塌密度明显高于单一岩性地段。

(二) 崩塌规模及形态特征

研究区崩塌按规模可分为小型(<1000m³)、中型(1000~10000m³)与大型(>10000m³)三类。小型崩塌数量最多，占总数的65%，多呈浅层化发育；中型崩塌占比25%，具有明显的台阶状滑动面；大型崩塌占比10%，常形成复合型滑动面。崩塌形态呈现出明显的岩性控制特征，砂岩段多呈块状崩落，泥岩段易产生碎屑流状崩塌，砂泥岩互层段则常见台阶状崩塌。崩塌剖面形态以凹形为主，源区陡直，堆积区平缓，崩塌壁高度一般为10~50m，坡度70°~90°，堆积体呈舌状或扇状展布，堆积坡度15°~35°。垂直分带现象显著，由上至下依次为碎块带、混合带与细粒带。

(三) 崩塌发育规律

研究区崩塌灾害发育具有明显的时空分布规律。空间上，崩塌密度与地形坡度呈正相关，35°~60°区间崩塌发育最为密集；构造部位控制显著，断层破碎带崩塌密度是其他地段的2~3倍；岩性控制方面，软硬相间地层崩塌发育程度高于单一岩性地层。时间上，崩塌灾害呈现季节性特征，降雨季节崩塌频发，地下水位升高是重要诱发因素；地震活动加剧了崩塌发育，强震后崩塌数量明显增加。长期演化过程表明，崩塌发育受地质构造运动与气候变化共同影响，构造抬升加剧了地形切割，气候变化影响了岩体风化速率与地下水活动强度，崩塌发育存在明显的继承性与渐进性特征。

Q 工程地质条件对崩塌稳定性的影响机制

(一) 岩体结构面特征的影响

结构面是岩体稳定性控制的关键因素，其产状，密度与

充填特征直接影响崩塌的发生机制。产状方面，当结构面倾向与坡面倾向相同时，形成顺向坡结构，岩体易沿结构面滑移失稳；结构面倾角大于岩体内摩擦角而小于坡面倾角时，最易发生滑移型崩塌。结构面密度影响岩体的整体性，密集发育的结构面将岩体切割成许多小块体，降低了岩体的抗剪强度。结构面表面粗糙度对稳定性具有双重影响，粗糙度大时增加了剪切强度，但同时易形成应力集中。结构面充填物性质显著影响结构面的摩擦特性，软弱充填物会降低结构面的抗剪强度，对崩塌稳定性产生不利影响。

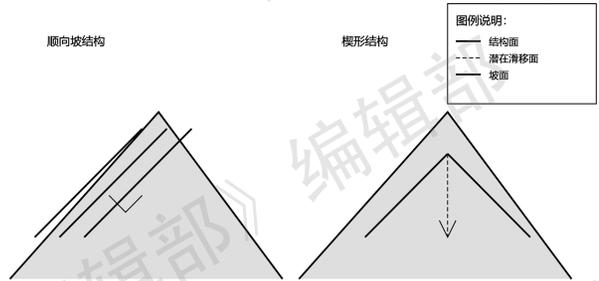


图2 岩体结构面与崩塌关系示意图

(二) 岩体强度参数的影响

岩体强度参数包括抗压强度、抗拉强度、抗剪强度与弹性模量等，它是评价崩塌稳定性的重要指标。抗压强度反映岩体承受压应力的能力，强度越低，岩体越易产生压溃破坏。抗拉强度控制岩体张拉破坏模式，在陡崖顶部易形成张拉裂缝。抗剪强度由内聚力与内摩擦角组成，内聚力反映岩体颗粒间胶结程度，内摩擦角表征岩体颗粒间的相互嵌挡作用。弹性模量表征岩体变形特性，模量低的岩体在应力作用下易产生较大变形。岩体强度参数的各向异性与尺寸效应对崩塌稳定性评价具有重要影响。

(三) 地形地貌条件的影响

地形地貌条件是崩塌灾害发生的重要外部因素。坡度是影响崩塌稳定性的关键参数，陡峭地形加大了岩体重力分量，增加了下滑力，当坡度超过35°时，崩塌发生频率显著提高。地形切割强度直接影响边坡稳定性，深切割区域应力释放剧烈，易形成高陡边坡，为崩塌提供了有利地形条件，相对高差越大，重力势能越高，崩塌运动过程中释放的能量越大，破坏力越强。坡向通过控制日照与风化程度影响边坡稳定性，迎风坡风化程度较背阳坡更为强烈。地貌类型决定了边坡结构特征，V型峡谷区域因河流下切作用强烈，谷坡陡峻，易发生崩塌。基岩陡坡段因风化作用与重力作用形成悬空结构，在重力荷载与外部扰动下易失稳破坏；堆积坡受覆盖层厚度与组成影响，当覆盖层厚度大且含水量高时，易形成浅层崩塌。

(四) 地下水作用的影响

地下水通过物理化学作用显著影响崩塌体稳定性。地下水渗流作用改变了岩土体的应力状态，增加了孔隙水压

力,降低了有效应力,削弱了岩土体的抗剪强度。水位升降过程中,反复的浸润软化与干湿循环加速了岩体风化,降低了岩体的工程性质。地下水对软弱夹层与结构面充填物的溶蚀作用降低了结构面的摩擦系数与粘聚力,形成潜在的滑动面。强降雨条件下,地下水位快速上升导致岩体重量增加,同时水压力增大,加剧了崩塌体的失稳趋势。在岩层接触带与断层破碎带,地下水活动加剧了软弱夹层的发育,形成优势渗流通道,成为崩塌的软弱结构面。水文地质条件的季节性变化是崩塌灾害的重要诱发因素。

Q 工程地质条件对崩塌稳定性影响的定量分析

(一)岩体结构面对稳定性的定量评价

岩体结构面的稳定性评价主要通过构造岩体分类法(RMR)与Q系统进行量化分析。结构面倾向性分析表明,当结构面倾向与坡面倾向夹角小于 20° 时,崩塌危险性显著提高;结构面倾角对稳定性的影响呈非线性关系,倾角在 $35^\circ\sim 65^\circ$ 区间内,安全系数随倾角增大而减小。结构面密度通过RQD指标进行定量表征,岩体整体强度随RQD值降低而减弱。结构面组合分析显示,三组以上结构面交切时,岩体破碎度显著增加。块度指标 J_v 值较高时,岩块极易脱落,结构面充填情况通过 J_r/J_a 比值评价。充填物软化后导致结构面剪切强度降低,进而影响边坡整体稳定性。

(二)岩体强度参数对稳定性的影响分析

岩体强度参数对崩塌稳定性的影响通过Hoek—Brown准则与Mohr—Coulomb强度准则进行定量评价。饱与单轴抗压强度 σ_c 与新鲜岩体相比降低 $40\%\sim 60\%$,导致岩体整体稳定性降低。岩体变形模量与地质强度指数GSI密切相关,GSI每降低10,变形模量降低 $25\%\sim 35\%$ 。内聚力 c 与内摩擦角 ϕ 的敏感性分析表明,内聚力每降低100kPa,安全系数下降 $0.15\sim 0.2$;内摩擦角每降低 5° ,安全系数下降 $0.1\sim 0.15$ 。基于Mohr—Coulomb强度准则,岩体抗剪强度 τ 可表示为:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度(kPa); c 为内聚力(kPa); σ 为法向应力(kPa); ϕ 为内摩擦角($^\circ$)。

岩体强度参数的尺寸效应分析显示,当岩块尺寸超过代表性体积单元(REV)时,强度参数趋于稳定;泊松比与弹性模量的变化影响应力分布状态,泊松比每增加0.1,最大主应力增加 $15\%\sim 20\%$;

强度参数各向异性分析表明,强度比(最大值/最小值)超过2.5时,各向异性对稳定性的影响不容忽视。

(三)地形地貌因素对稳定性的贡献

地形地貌因素对崩塌稳定性的贡献通过地形系数与地貌

单元定量评价。坡度系数随坡度增大呈指数增长,在 $35^\circ\sim 60^\circ$ 区间内,坡度每增加 5° ,失稳概率显著提高;地形切割深度与崩塌稳定性呈负相关,切割系数大于0.6时,边坡应力松弛明显。相对高差对边坡稳定性的影响通过重力势能系数进行评价,高差越大,势能系数越高。坡向因子通过日照系数与风化指数量化,迎风坡的风化指数比背阳坡高。V形谷地系数反映了山谷形态对稳定性的影响,谷坡系数越小,崩塌危险性越大。堆积坡的稳定性与覆盖层厚度系数密切相关,厚度系数超过临界值时,浅层崩塌风险增加。

(四)地下水作用对稳定性的影响程度

地下水作用对崩塌稳定性的影响程度通过渗流力系数与孔隙水压力系数进行定量分析。渗流力作用导致岩体有效应力降低,当渗透压力系数超过临界值时,岩体抗剪强度显著下降。水位变化系数反映了地下水位升降对稳定性的影响,水位系数每增加0.1,安全系数相应降低。岩体饱与度与强度参数呈负相关,饱与度每增加 10% ,抗剪强度下降显著。地下水化学作用通过溶蚀系数表征,溶蚀系数越大,结构面充填物强度越低。水压力对结构面稳定性的影响用水压系数定量表示,水压系数与张开度呈正比。基岩裂隙水系数反映了裂隙水对岩体整体性的影响程度。

Q 结束语

通过系统研究工程地质条件对崩塌稳定性的影响,得出以下主要结论:岩体结构面是控制崩塌发生的决定性因素。当结构面倾向与坡面倾向一致且倾角大于坡面倾角时,最易发生崩塌;地下水作用显著降低岩体强度,加速风化过程,是诱发崩塌的重要因素;地形坡度与崩塌发生频率呈正相关,坡度超过临界值后崩塌危险性急剧增加。研究建立的崩塌灾害工程地质条件评价体系,可为崩塌灾害防治工作提供科学指导。

Q 参考文献

- [1]李洪涛,吴勇,冷洋洋,等.贵州软硬互层地质条件下典型崩塌稳定性分析[J].科学技术与工程,2021,21(02):465-472.
- [2]张棋豪,张桃如.某路堑边坡崩塌地质灾害稳定性评价及防治对策[J].有色金属设计,2023,50(04):112-115.
- [3]郭利召.某隧道工程地质条件特征及稳定性研究[J].有色金属设计,2022,49(04):90-94.
- [4]廖磊.某岩土工程地质条件及边坡稳定性评价[J].世界有色金属,2021(03):231-232.

作者简介:

贾博(1981-),男,汉族,河南南阳人,本科,工程师,河南省第三地质矿产调查院有限公司,研究方向:地质结构。