

降雨耦合作用下含断层破碎带的边坡失稳机制及稳定性分析

文 / 于 洋 广东省地质局珠海地质调查中心

江 慧 广东省地质局珠海地质调查中心

摘要：降雨是诱发边坡失稳最主要的因素，而断层破碎带组成物质成分复杂，结构面发育，物理力学性质特殊，具有较高的渗透性，在降雨的影响下，更易引起坡体形变，本文以含有断层破碎带的中山市三角中学西侧边坡为例，分析降雨耦合作用下含断层破碎带的失稳机制，采用极限平衡法，通过折线形滑裂面假设计算降雨作用下的边坡抗滑安全系数，从而划分边坡稳定状态，研究结果结果表明降雨耦合作用下含断层破碎带的边坡坡段较不含断层破碎带的边坡坡段抗滑安全系数显著降低，并据此制定不同的防治措施。

关键词：断层破碎带；降雨；耦合作用；破坏机制；稳定性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.032

引言

边坡的稳定性受其特定的地质环境条件决定的，通常引起边坡失稳起主导作用的因素是工程力学性质较差的岩土体、不良的地形地貌、不利结构面、软弱夹层，而气象水文则是激发因素，人类工程活动则是强化因素。目前研究者们多采用将数学和力学方法运用到边坡的破坏机理、运动分析以及稳定性分析中，以此来计算不同工况下的“安全系数”，模拟的数值也越来越接近边坡失稳的实际情况。陈佳等在充分考虑了自重、地震和动静水压力等外力的干扰下，通过极限分析上限法得到了大渡河某水电站岸坡的稳定性系数；李同录等运用块体理论，在黑河库区108国道沿线变质片岩边坡中寻找可动、关键块体，并算其剩余下滑力，证实了边坡的破坏与结构面、坡面的组合息息相关；常思源等为研究北京门头沟山区某滑移式崩塌软弱夹层对其稳定性的影响，采用有限元数值方法进行分析；对于边坡失稳的防治，国内也有较成熟的技术，但往往为保证边坡的安全，防治手段一般较保守，因而造价较高，本文以含有断层破碎带的中山市三角中学西侧边坡为例，采用极限平衡法，对降雨耦合作用下含断层破碎的边坡进行抗滑性分析，计算其抗滑安全系数，并与同边坡不含断层破碎带的边坡对比，进而分别制定因地制宜工程防治措施决策，为最大限度减少生命财产损失提供科学依据，合理降低边坡防治成本，也可以为类似的边坡的失稳防治工作提供一定的参考及借鉴价值。

一、边坡基本地质概况

(一) 边坡概况

边坡属于人工岩土质边坡，坡面呈线状、局部阶状，属高陡岩土质边坡。最大坡高约12.63m，坡宽约86m，坡向50~90°，整体坡度约70~80°。坡脚排水沟宽约0.5m，沟肩宽0.3m。坡体岩性以石英片岩为主，片理、节理裂隙很发育，岩石很破碎，时有破碎小岩块及土体崩落等现象。（图1）

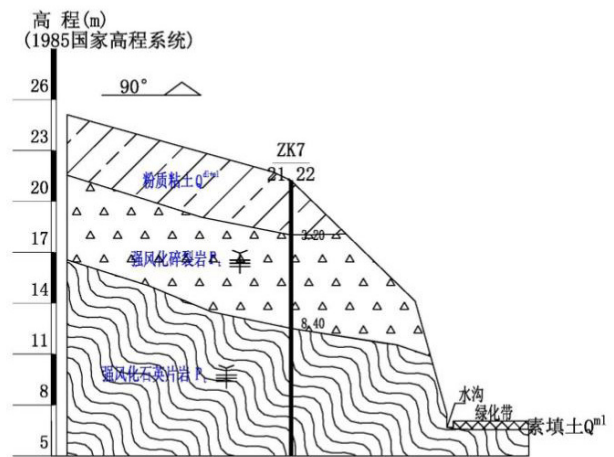


图1 边坡典型剖面图

(二) 边坡地质概况

边坡属珠江三角洲剥蚀残丘地貌，地层岩性简单，主要为第四系及中元古代长安岩组（Pt_{2c}），坡体主要由残坡积粉质粘土、强风化碎裂岩及强风化岩石英片岩组成。片理、节理裂隙发育，泥质胶结差，岩石被切割成碎块状。边坡南段有钻孔揭到断层构造迹象，揭露碎裂岩厚度1.2-5.2m，综合岩芯裂面轴夹角在30-35°，结合地面调查，推测南段坡体发育IV级小规模断层构造，大致近南北走向，倾角55-60°；下部岩质坡体见多组节理裂隙发育，岩层破碎呈碎石、碎块状。边坡及影响范围地表水体不发育，雨季地表径流较强，易形成片流冲刷裸露坡面，地下水类型为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两类。边坡及附近山体地貌改造强烈，坡上墓穴分布密集，地表支离零乱，对原始岩土体及地形地貌造成了强烈扰动和破坏。根据钻探、物探及调查访问：20世纪六七十年代，北段坡体曾筑有防空洞，埋深大致在近坡顶以下12-13m处，洞宽约60cm，洞高约2m。

二、降雨耦合作用下的边坡失稳机制

(一) 影响边坡稳定性的因素

边坡的失稳主要与地质因素和自然因素(内外营力)等有关。诱发边坡失稳的主要因素一是地质环境条件,二是内外营力和人为作用的影响。结合边坡调查结果,分析影响边坡稳定性的因素如下:

地形地貌:坡体整体坡度呈70-80°,局部分为二级。受建墓、降水冲蚀等影响,地形变得支离破碎,完整程度差不利于边坡稳定。

岩土结构及类型:坡体岩土体主要由残坡积粉质粘土及强风化石英片岩组成。粉质粘土风化岩水理性能差,遇水时易软化、崩解不利于边坡稳定;强风化石英片岩中片理、裂隙发育,岩层很破碎,对边坡稳定不利。

地质构造:钻孔揭到断层构造迹象,破坏了岩体的连续性,显著降低岩体的整体强度及抗形变能力,提供软弱滑动面及改变岩体物理力学性质,对边坡稳定不利。

气象因素:当地雨量充沛,降水集中,雨水进入土层增加了土体自重,软弱土层在水的浸润下抗剪强度降低,重度增大,在雨水渗流及软化作用下,易产生渗流荷载,更易使软硬相间岩土体力学性质差异增大,两者的共同作用对坡体稳定不利。

人类因素的影响:人工削坡活动改变了山体自然平衡状态,大量墓穴挖建,也使坡体植被和地形完整程度遭受严重破坏,一定程度加速了雨水下渗冲蚀和边坡岩体的风化剥蚀,为崩塌、滑坡地质灾害的孕育发生提供了有利条件,对边坡稳定不利。

(二) 边坡失稳机制

边坡为高陡人工岩土质边坡,主要是由残坡积粉质粘土、强风化碎裂岩及强风化石英片岩组成,上部山体坡表墓穴挖建,坡脚人工开挖,形成临空面,地形支离破碎,完整程度差,为降水入渗提供了有利条件,使得地下水更易在岩土体中渗流、富集,使其重度提高,剪应力增大,当坡体出现剪应力大于土层抗剪强度时,其抗滑力不足以支撑下滑力,从岩土体局部的坍塌,最终演变为边坡失稳,而断层破碎带组成物质成分复杂,结构面发育,物理力学特性特殊,断层泥遇水易膨胀,更易引起坡体形变;在无降雨时,坡体处于基本稳定状态。但中山市三角镇雨量充沛,为地下水提供了丰富的来源,使得地下水渗流长期作用在含断层破碎带的边坡中,同时产生渗流荷载,使软硬相间岩土体力学性质差异增大,边坡的抗滑安全系数显著降低,从而引起边坡失稳(图2)。

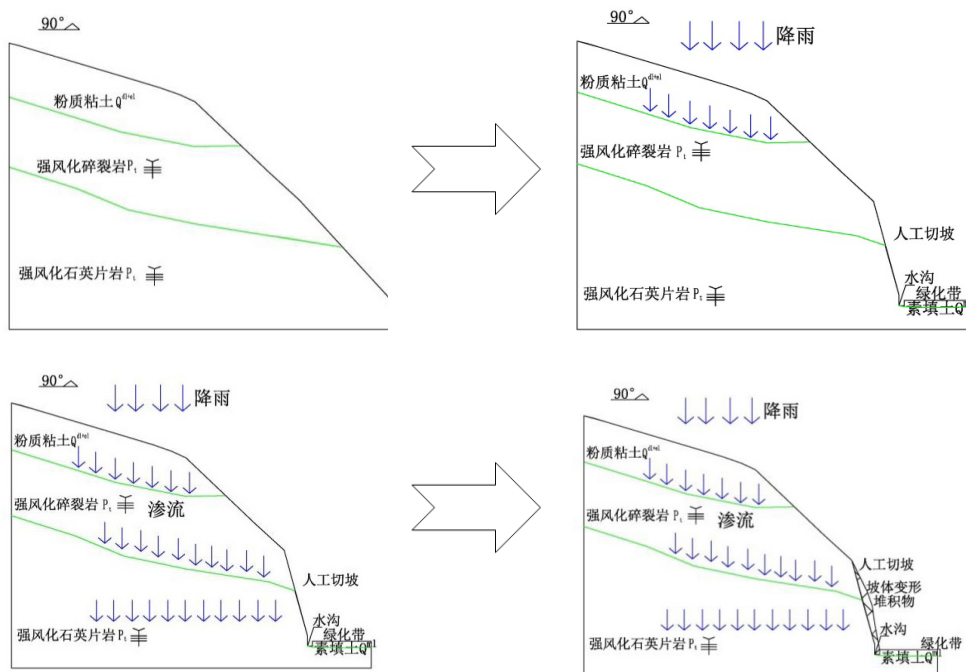


图2 边坡失稳示意图

三、稳定性计算分析

(一) 计算参数

根据试验数据并参考《工程岩体分级标准》(GBT

50218-2014)中附录D以及结合地区经验获取基本参数计算取值:

岩土名称	天然状态			饱和状态		
	重度	黏聚力	内摩擦角	重度	黏聚力	内摩擦角
	kN/m ³	kPa	度	kN/m ³	kPa	度
粉质粘土	19.20	20.80	17.98	19.4	16.35	14.12
强风化碎裂岩	19.0	27.90	26.70	19.30	24.60	21.8

岩土名称	天然状态			饱和状态		
	重度	黏聚力	内摩擦角	重度	黏聚力	内摩擦角
	kN/m ³	kPa	度	kN/m ³	kPa	度
强风化石英片岩	20.00*	30.00*	28.00*	20.8*	24.5*	22.4*

(二) 计算方法

极限平衡法是经典的确定性分析方法，是目前边坡失稳工程应用最广的方法，原理是基于静力平衡条件和摩尔-库伦破坏准则，一般根据作用于岩土体中潜在破坏面上块体沿破坏面的抗剪力与该块体沿破坏面的剪切力之比，求该块体的抗滑安全系数，从而判断边坡稳定性。

坡体主要以强风化岩为主，产生失稳滑面呈折线形，因此计算模型采用规范中采用折线形滑动，选用简化摩根斯坦-普莱斯法进行稳定性分析计算，该方法假设较多，满足力和力矩的平衡条件，具有较强的可靠性。抗滑安全系数划分标准如下：

抗滑安全系数 K	K < 1.00	1.00 ≤ K < 1.05	1.05 ≤ K < 1.3	K ≥ 1.3
边坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

(三) 计算结果

边坡最危险断面抗滑安全系数计算结果如下：

剖面编号	工况	抗滑安全系数 (K)	稳定性
含断层破碎带坡段断面	工况 I：天然工况	1.127	基本稳定
	工况 II：暴雨工况	0.896	不稳定
不含断层破碎带坡段断面	工况 I：天然工况	1.215	基本稳定
	工况 II：暴雨工况	1.010	欠稳定

由计算结果可知：

在天然工况下，不管是否含断层破碎带，均处于基本稳定状态，但在降雨的耦合作用下，坡体产生渗流荷载，岩土体被软化，自重及重度增大，物理力学性质改变，从而引起边坡的抗滑安全系数降低；由于断层破碎带组成物质成分复杂，结构面发育，物理力学特性特殊，断层泥遇水易膨胀，边坡含断层破碎带的坡段较不含断层破碎带坡段，抗滑安全系数显著降低。

四、防治方案

综合考虑该边坡的工程地质条件、地形地貌特点、边坡现状稳定性以及建设单位要求等因素，制定因地制宜工程防治措施决策。对含断层破碎带段边坡采用“修坡+钢筋锚杆+格构梁+客土喷播+挡土墙+截排水”的结构进行防护治理，对不含断层破碎带段边坡采用“修坡+客土喷播+挡土墙+截排水”的结构进行防护治理。对经治理后，该边坡为未再次失稳，实践表明，上述治理方案效果明显。

结语

本文以含有断层破碎带的中山市三角中学西侧边坡为例，分析降雨耦合作用下含断层破碎带的边坡失稳机制，采用极限平衡法，计算降雨耦合作用下含断层破碎带边坡坡段与不含断层破碎带边坡坡段的抗滑安全系数，从而划分边坡稳定状态，结果表明降雨耦合作用下含断层破碎带的边坡坡段较不含断层破碎带的边坡坡段抗滑安全系数显著降低。根据以上特征，因地制宜的制定工程防治措施决策，对含断层破碎带边坡坡段与不含断层破碎带边坡坡段分别采用不同的结构进行防护治理，经治理后，该边坡为未再次失稳，保障了坡下师生的安全，合理降低了边坡防治成本，也为类似的边坡失稳防治工

作提供一定的参考及借鉴价值。此外目前边坡的稳定性计算多选用极限平衡折线法计算，数值模拟软件应用较少，随着信息技术的发展，在今后的研究中，可使用 Geoslop、GIS、Ansys Flac3D 等软件，使得边坡稳定性分析更加方便快捷，丰富边坡稳定性计算方法，提高效率，促进边坡稳定性评价及工程设计的进步。

参考文献

[1] 徐军丽, 刘慧敏, 张小东, 等. 降雨和地下水联合作用对边坡稳定性的影响分析 [J]. 公路交通技术, 2025, (03): 54-59.

[2] 周云剑, 龚文庆, 陈旋, 等. 降雨情况下土质高边坡稳定性影响因素敏感性分析 [J]. 山西建筑, 2025, (12): 81-84.

[3] 郭志边, 闫振国, 刘志勇. 基于极限平衡法的黏性土边坡稳定性分析 [J/OL]. 路基工程, 1-4 [2025-07-04]. <https://doi.org/10.13379/j.issn.1003-8825.202502040>.

[4] 许骥. 非饱和土边坡在降雨影响下的稳定性分析 [J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 8 (05): 42-44.

[5] 陈刚, 刘钢一. 微地震荷载作用下含断层破碎带边坡的稳定性分析 [J]. 华南地震, 2024, 44 (01): 133-148.

[6] 陈佳, 彭社琴, 刘根亮. 基于极限分析上限法的危岩体崩塌稳定性分析 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2009, 28 (02): 180-184.

[7] 李同录, 杨德广, 张常亮等. 变质片岩区边坡稳定性的块体理论分析 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (05): 896-902.

[8] 常思源, 陈柘舟, 柴利杰等. 有限元法在岩质边坡稳定性分析中的应用示例 [J]. 城市地质, 2020, 15 (04): 380-387.