

# 我国黄土边坡稳定性分析研究进展

石子立, 黄河

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年8月30日; 录用日期: 2023年9月30日; 发布日期: 2023年10月7日

## 摘要

本文通过查阅大量相关文献, 对我国黄土边坡稳定性分析的研究进展进行了总结, 得到以下认识: 黄土边坡因其特殊的土体结构、形态特征及所处气候特征等, 黄土边坡失稳破坏形式多样, 危害性较大; 影响黄土边坡稳定性的因素主要有内外因素, 如黄土体物理力学性质、降水、风化作用、地震活动、人类活动等; 黄土边坡稳定性分析常采用极限平衡法、裂隙法、圆弧法、数值模拟法等; 防治黄土边坡失稳的主要措施包括排水、支挡以及坡面防护措施等。

## 关键词

黄土边坡, 稳定性分析, 影响因素, 防治措施

# Research Progress of Loess Slope Stability Analysis in China

Zili Shi, He Huang

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Aug. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 7<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Through consulting a large number of relevant literature, this paper summarizes the research progress of loess slope stability analysis in China, and gets the following understanding: loess slope has various forms of instability and damage due to its special soil structure, morphological characteristics and climate characteristics, which is harmful. The main factors affecting the stability of loess slope are internal and external factors, such as physical and mechanical properties of loess, precipitation, weathering, seismic activity, human activities, etc. Limit equilibrium method, fracture method, arc method and numerical simulation method are often used to analyze the stability of loess slope. The main measures to prevent loess slope instability include drainage, retaining and slope

protection measures.

## Keywords

Loess Slope, Stability Analysis, Influencing Factors, Prevention and Control Measures

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国幅员辽阔, 黄土分布面积广, 其中仅黄土高原面积占国土总面积的 6.6%。在黄土地区开展工程建设, 不可避免地遇到黄土边坡的稳定性问题。陕西省延安市属于典型的黄土地区, 仅 2013 年强降雨导致延安发生了 5765 次山崩, 9976 座建筑物倒塌, 5.73 万座建筑物被破坏, 主干道被冲毁 51.5 km, 县乡道路被冲毁 170.98 km, 造成 121 人受伤, 26 人死亡, 直接经济损失 21.28 亿元, 给当地老百姓造成了极大的伤害[1]-[6]。甘肃陇东地区正宁县黄土结构疏松, 黄土边坡稳定性较差, 水土流失严重, 加之地震、强降雨等事件频发, 极易产生崩塌、滑坡等地质灾害[7]。黄土边坡稳定性问题已成为影响人民生活工程建设中不可回避的问题之一。

## 2. 黄土边坡的特点

黄土边坡的特点有如下几个方面:

### 2.1. 形态特征

#### 2.1.1. 坡度陡峭

黄土边坡通常具有较大的坡度, 一般在 30 度以上, 甚至可达 60 度以上。这是由于黄土的物理性质和力学特性决定的。据统计, 在陇东地区, 坡度在 20°~60°的黄土边坡最易发生滑坡灾害[8]。

#### 2.1.2. 层状结构

黄土边坡通常呈现明显的层状结构, 有多个水平层面。这是因为黄土是由一层一层沉积形成的, 每一层之间有一定的接触面。

#### 2.1.3. 松散性和可塑性

黄土边坡的黄土常处于松散状态, 容易受到水分或外力的影响而发生塌方、滑坡等地质灾害。黄土边坡的可塑性较高, 容易形成滑动面。

#### 2.1.4. 表面多状性

黄土边坡表面通常会出现许多不同形态的地形特征, 如沟渠、沉降坑、裂缝等。这些地形特征是由于黄土边坡的物理性质和水分运动引起的。

### 2.2. 分布特点

#### 2.2.1. 区域广泛

黄土边坡广泛分布于我国的黄土高原地区, 其中包括陕西、甘肃、宁夏、青海、河南、山西、内蒙

古等省份。这些黄土边坡不仅分布在农田和丘陵地区, 还存在于公路、铁路、水库、市区等工程用地周边。

### 2.2.2. 多样性

我国黄土边坡的形态特征和地质背景各异, 呈现出多样性。根据地形、地貌和地质条件的不同, 黄土边坡有着不同的土体性质、坡度、坡高、坡长等特点。

### 2.3. 危害性

黄土高原为典型的干旱区, 降雨稀少但较集中, 同时人工开挖的黄土边坡坡度大, 因为地面和坡面的植被覆盖率低, 所以经常会受到雨水的猛烈冲刷, 坡肩受到雨水的入渗作用明显[9]。由于黄土边坡的松散性和可塑性较强, 容易受到水分和外力的影响, 引发地质灾害。常见的地质灾害包括塌方、滑坡和泥石流等。特别是在公路、铁路、水库和市区等人口密集区域, 这些地质灾害不仅对土地和农田造成破坏, 给工程安全带来潜在隐患, 还会威胁到人民的生命财产安全。同时, 黄土边坡一旦发生地质灾害, 土壤和水源会被冲刷和侵蚀, 导致水土流失加剧, 生态环境破坏。

## 3. 影响边坡稳定性的因素

### 3.1. 内部因素

黄土体工程地质特性主要受黄土的物理力学性质、黄土的湿陷性和黄土的压缩性三个方面控制。

#### 3.1.1. 黄土的物理力学性质

黄土的自然含水量、自然密度和干密度是其物理力学特性的重要参数。黄土的天然含水量随埋深的变化幅度比较大, 明显受到降水、地形地貌和水文地质条件的影响, 具体表现为: 近地表的含水量会随着埋深的增加而不断上升, 同时还会受到降水及其他入渗水的补给。到了一定深度, 因为降水及其他入渗水的减少, 会随着埋深的增加, 含水量会逐步下降, 黄土的干密度也会随之不断增大[10]。

#### 3.1.2. 黄土的湿陷性

湿陷土是一种不稳定的、不饱和的、受某种荷载影响而产生明显沉降的土体。土壤类型以沙土、次生黄土、冲积土和残积土为主。黄河中游地区湿陷性黄土的分布主要在甘肃、陕西、山西等地区, 湿陷面积达 430,000 km<sup>2</sup>。黄土的湿陷, 是由土粒间填充的可溶性物质被水溶解损失, 颗粒之间的粘性减弱, 土粒之间的相互位移和相互间的紧密接触所致[11]。

#### 3.1.3. 黄土的压缩性

自然条件下, 由于粘土的水分含量很少, 其力学性能通常很好, 沉降量也很少。黄土的压缩性与一般的低压缩性粘土差别不大, 但它的抗水性较弱, 并且在受力、受热时, 其膨胀性与湿陷性之间存在着相互转换的关系。部分浅表自重湿陷黄土在新近灌溉作用下, 其水分含量不断增加, 导致其湿陷能力降低, 可压缩能力增强, 接近失稳的极限, 此时, 少量加湿或少量加压均会引起明显的变形[12]。

### 3.2. 外部因素

#### 3.2.1. 降水

我国黄土高原地处青藏高原东北部, 青藏高原对西风气流的动力和热力作用, 使黄土高原区易形成气旋性涡旋, 造成该地区多暴雨。如陕北黄土高原属干旱、半干旱区, 年平均降水量从东南到西北逐渐递减, 定边年降水量小于 350 mm, 长城沿线年平均降水量为 360~396 mm, 延安以北年降水量在 400~500

mm, 延安南部年平均降水量在 500~600 mm [13] [14] [15] [16]。集中降水和特有的地质地貌使黄土高原成为我国地质灾害的多发区域, 常常造成人民生命财产和社会经济严重损失。

### 3.2.2. 风化作用

风化作用常使坡面土体干缩、破裂, 易剥落掉块; 卸荷作用则形成次生节理、并使原生节理、构造节理等张开, 使土体分离成不连续块体; 另外张开裂隙又为地表水渗入坡体提供了良好通道, 加剧边坡土体的破坏。

### 3.2.3. 地震作用

地震是诱发黄土边坡不稳定的重要因素。1920 年 12 月 16 日在宁夏海原地区爆发的 8.5 级大地震, 是中国有史以来最强的一次大地震, 导致了大量的黄土山体崩塌, 造成了巨大的破坏。该区域的地质灾害主要集中在三处: 一处位于海原南部, 地震强度在十级以上。一处位于西吉南部、会宁东部、静宁北部, 是一片广阔的区域。另外一处位于通渭县, 尽管比极震区的强度小, 但是该地区的区域滑坡面积超过 4000 km<sup>2</sup>, 光是西吉县就有超过 650 个。该地区山体滑坡面积较大, 分布较为集中, 共产生 41 个堰塞湖, 其成因与该地区 20~50 m 高的黄土高原低山地貌有关[17]。

黄土地区的地震滑坡是由于土层松软, 边坡高陡、临空面大, 受地震惯性力作用, 土体结构遭到破坏, 从而丧失抗剪强度所致。

## 3.3. 人为因素

人为因素指工程施工、维修不当或加载、灌溉等原因造成的不利影响。大规模的土地开发和工程建设对黄土边坡产生了直接的影响。例如, 开挖坡脚、改变坡面坡度、挖掘沟渠等人类活动可能破坏黄土边坡的稳定性, 导致坡体失稳和地质灾害的发生。人类的砍伐森林、过度放牧以及违法采矿等活动都会破坏植被覆盖, 削弱黄土边坡的稳定性。建设过密的居民区、工业园区和交通设施等, 也会增加黄土边坡发生滑坡、塌方等灾害的可能性。

## 4. 黄土边坡稳定性的研究方法

### 4.1. 极限平衡法

李瑞研究了黄土地区土质边坡在降雨条件下的稳定性, 从某建筑场地边坡勘查工程出发, 介绍了黄土地区土质边坡的基本特性, 同时分析建设工程活动对边坡稳定性的影响, 通过采用简化毕肖普法, 较为准确的分析和评价边坡的稳定性、安全性, 并提出了防护和治理建议[18]。裴萃通过极限平衡法中的简布法对吕梁市三个地区黄土边坡的安全系数进行了计算, 并对计算结果进行了研究与分析, 为黄土边坡的治理提供了依据[19]。李奇则通过对搜集的 400 余个黄土边坡建立灾害数据库并进行统计分析, 利用数值模拟软件、极限平衡法、灰色关联度法和模糊综合评判等分析方法, 确定了每个影响因素的权重, 基于最大隶属度原则对黄土边坡稳定性进行分级评价与验算, 并对依托工程黄延高速公路沿线黄土边坡进行稳定性分级评价[20]。

### 4.2. 圆弧法

郭晓亮和王伟刚从工程类比和理论计算两方面完善边坡的稳定性评价方法。他们以甘肃华池县新南公路某路段路堑边坡为例, 利用土质土力学的瑞典圆弧条分法及简化毕肖普法对黄土边坡稳定性进行分析, 对比下来两种方法得出的稳定系数差别很小, 说明两种方法在计算时都具有可靠性[21]。祝珣以陕北某黄土沟谷中的黄土高边坡项目为例, 查明了该边坡的地质结构与力学特性, 采用瑞典圆弧法得到了边

坡稳定性验算的结果, 并提出了相应的治理措施, 如设置竖向渗井、挡土墙等[22]。

### 4.3. 裂隙法

杨刚、唐道琼等人以三门峡至淅川高速公路黄土边坡为例, 根据裂隙法计算得出边坡的综合坡率, 并拟定该黄土边坡坡型, 得出该边坡的平均坡比满足裂隙法的要求[23]。朱德开以陕北某黄土填方高边坡为例, 对此类型的黄土边坡的稳定性问题进行分析研究。采用传统的边坡稳定性分析方法: 裂隙圆弧法以及改进裂隙法分别对案例边坡进行分析, 最后对各种方法所得的结果进行了总结[24]。

### 4.4. 数值模拟方法

马蓓青, 杜玉鹏等人研究持续降雨条件下黄土边坡的稳定性, 采用人工降雨装置进行室外现场试验, 测量土体含水率、密度、滑坡剪切带位置以及裂缝的发育等情况, 并使用 FLAC3D 软件计算模拟持续降雨条件下裂缝发育对边坡稳定性的影响, 为降雨条件下的黄土边坡稳定分析研究和地质灾害防治提供方法和技术支撑[25]。张立荣采用基础理论、现场试验以及数值模拟相结合的思路, 探讨了地震诱发黄土滑坡的动力学机理。首先进行了地震现场的调查取样工作, 然后通过试验获得不同含水量和不同振动方式下黄土的动强度与动变形特性以及其对黄土边坡稳定性的影响, 接着进行了黄土高边坡的爆破模拟地震动试验并记录边坡内部对地震动的响应, 通过记录的应力应变分析了地震动对边坡稳定性的影响, 最后利用 FLAC3D 和 ANSYS 有限元软件, 对四种类型不同的黄土边坡进行了建模和计算, 对比分析了不同类型黄土边坡的稳定性[26]。

## 5. 治理黄土边坡失稳的措施

正是因为黄土边坡稳定性差, 影响因素复杂, 危害性大, 所以开展黄土边坡防治技术的研究对于防灾减灾具有重要的意义。根据以往学者的研究和黄土边坡失稳的机理, 主要从以下几个方面采取防治措施:

### 5.1. 排水措施

因为黄土具有特殊的多孔骨架结构, 对于水的侵蚀及其敏感, 尤其是在暴雨之后, 发生灾害的概率更高。因此, 在黄土边坡做好排水措施是最直接、最有效预防边坡失稳的办法。在西安地区某边坡加固工程中, 张振海建立了边坡外排水和内排水体系, 从外部杜绝或减少雨水渗入的同时也可以将坡体深层内的水排出, 防止坡体破坏[27]。

### 5.2. 锚杆、挡土墙支护

框架式预应力锚杆是近年来新兴的支撑体系, 它通过钢筋混凝土框架、锚杆、土壤三者之间的相互作用, 改善了边坡土体受力特性, 增强了边坡的稳定, 同时还可以与植被相配合, 对保障公路、铁路的正常运营、防治滑坡及周围生态环境等都有着重要的作用。巨龙、王瑞科等人以陕西省渭北旱塬三原县清河湿地公园黄土边坡为研究对象, 利用数值模拟计算对黄土边坡在天然、分级开挖和锚杆 + 梁格支护等多种条件下的坡体变形及塑性区范围进行分析, 并通过强度折减法计算各条件下的安全系数, 对边坡稳定做出评价, 用于指导项目设计及施工建设。结果表明: 天然边坡整体处于稳定状态; 上部坡体开挖具有卸荷效应, 安全系数增大; 下部坡体开挖, 导致阻滑力减小, 安全系数降低; 持续降雨会导致坡体强度降低, 安全系数减小; 采用锚杆 + 格梁加固方式可较大提高坡体稳定性[28]。

### 5.3. 坡面防护

为了防止黄土边坡面受到雨水等外来因素的侵蚀和破坏, 应结合护坡工程进行坡面的防护。坡面防



护技术有工程防护技术、生物防护技术、工程技术和生物技术相结合和加强边坡土壤的改良技术。王伟指出工程防护技术主要是在坡面喷射混凝土, 生物护坡技术主要是靠绿化防护, 土壤改良技术是通过新型化学材料改变土壤的性能, 从而达到保护边坡的效果[29]。

## 6. 结论

目前我国对于黄土边坡稳定性的研究已经取得了显著的成果, 主要采用极限平衡法和数值模拟方法等开展定量评价。但地区不同, 所处的地质地貌和气候等自然条件不同, 很难用一种统一的分析方法来系统地解决各种黄土边坡稳定性问题; 同时, 对于黄土边坡的治理措施也应因地制宜, 不能盲目选用, 需要根据当地的地理条件选取适当的方法, 才能对黄土边坡进行有效的治理。

## 参考文献

- [1] 滕宏泉, 范立民, 向茂西, 等. 陕北黄土梁峁沟壑区地质灾害与降雨关系浅析——以陕北延安地区 2013 年强降雨引发地质灾害为例[J]. 地下水, 2016, 38(1): 155-157.
- [2] 唐亚明, 薛强, 毕俊攀, 等. 降雨入渗诱发黄土滑塌的模式及临界值初探[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 97-106.
- [3] 庄建琦, 彭建兵, 张利勇. 不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(3): 867-876.
- [4] 李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 599-606.
- [5] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- [6] 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 96-107.
- [7] 张旭光, 姚恩龙, 陈海龙. 陇东黄土高原地质灾害形成条件及影响因素分析——以正宁县山河镇为例[J]. 地下水, 2020, 42(5): 170-171.
- [8] 张俊义, 杨强, 杨秀元, 王爱军, 丁伟翠. 陇东地区黄土滑坡稳定性分析[J]. 中国水土保持, 2012(7): 48-51+75.
- [9] 豆换换, 张彦洪, 田泽润, 等. 降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 水利规划与设计, 2023(4): 95-98.
- [10] 李贤婧, 王起才. 延安宝塔山隧道黄土物理力学性质试验分析[J]. 科协论坛(下半月), 2010(1): 81-82.
- [11] 郭奋恩. 湿陷性黄土边坡失稳及防治措施研究[J]. 工程质量, 2012, 30(2): 13-16.
- [12] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的压缩变形特性分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007(3): 50-55.
- [13] 冯乐涛, 吴玮江, 刘兴荣, 等. 黄土高原降水入渗方式与引发滑坡研究——以甘肃黄土地区为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5937-5945.
- [14] 刘引鸽. 陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2007(1): 49-55.
- [15] 蔡新玲, 乔秋文, 王繁强, 等. 近 45 年来陕西省可利用的降水资源特征及变化[J]. 干旱区研究, 2008(2): 282-287.
- [16] 彭茹燕, 张慧芝, 哈斯, 等. 陕北风沙区景观格局分析[J]. 干旱区研究, 2005(1): 51-56.
- [17] 邓龙胜, 范文. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 30-37.
- [18] 李瑞. 黄土地区土质边坡稳定性的分析及评价[J]. 四川水泥, 2021(7): 328-329.
- [19] 裴萃. 基于极限平衡法的吕梁市黄土边坡稳定性评价[J]. 山西建筑, 2014, 40(36): 68-69.
- [20] 李奇. 黄土边坡稳定性影响因素统计分析与分级评价[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [21] 郭晓亮, 王伟刚. 黄土地区边坡稳定性分析[J]. 陕西地质, 2019, 37(2): 52-57.
- [22] 祝珣. 黄土特高边坡垮塌原因分析及综合整治措施[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(6): 31-35.
- [23] 杨刚, 唐道琼, 夏小兰. 三门峡至浙川高速公路黄土边坡设计[J]. 交通世界(运输·车辆), 2011(5): 174-175.
- [24] 朱德开. 黄土土方高边坡稳定性分析研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(17): 102-103.
- [25] 马蓓青, 杜玉鹏, 王怀星, 等. 持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 50-56.
- [26] 张立荣. 强震作用下黄土边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2011.
- [27] 张振海. 黄土边坡稳定性及治理的规律性研究——以西安地区某项目黄土边坡工程为例[J]. 重庆建筑, 2021,

20(12): 42-45.

- [28] 巨龙, 王瑞科, 马骥. 渭北旱塬黄土边坡稳定性分析及治理措施研究——以三原县清河国家湿地公园为例[J]. 西北水电, 2021(2): 48-54+67.
- [29] 王伟. 浅谈黄土边坡稳定性与防治技术研究进展[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(10): 130-132.