第 41 卷 第 1 期
2025 年 3 月

华 南 地 质
South China Geology

Vol.41, No.1, 38−50
Mar., 2025

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.003

溃屈型滑坡失稳机制及稳定性评价方法研究进展

施佳乐[1,3,4], 张彦君[1,2*], 范　宁[3,4], 谭建民[1,2], 裴来政[1,2], 叶润青[1,2], 刘　磊[1,2]

SHI Jia-Le[1,3,4], ZHANG Yan-Jun[1,2*], FAN Ning[3,4], TAN Jian-Min[1,2],
PEI Lai-Zheng[1,2], YE Run-Qing[1,2], LIU Lei[1,2]

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心（中南地质科技创新中心）, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质学会中南地区地质安全风险监测预警与防控技术创新基地, 湖北 武汉 430205; 3. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 4. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江 温州 325035

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Innovation Base for Geo-safety Risk Forecasting and Prevention Technology in Central South China, Geological Society of China, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

摘要: 溃屈型滑坡作为常见的山地灾害, 其动力演化过程较为复杂, 涉及主动区顺层滑移和被动区弯曲隆起的变形协同, 以及主动区和被动区范围的动态变化; 开展相关研究通常需要对上述复杂过程进行简化处理, 导致现有的溃屈型滑坡研究方法种类繁多但普适性有限。基于文献计量分析方法, 本文对溃屈型滑坡相关文献的数量、期刊和关键词进行梳理, 系统分析溃屈型滑坡领域的研究现状及发展趋势。在此基础上, 首先分类探讨了理论解析、模型试验和数值模拟等溃屈型滑坡失稳机制及稳定性分析方法; 随后, 系统探讨了溃屈型滑坡稳定性的影响因素, 包括岩层倾角、岩层厚度、岩性、滑移面黏聚力和内摩擦角等内在因素, 以及水和地震等触发因素。最后, 本文对溃屈型滑坡领域未来的研究和实践方向进行了展望。

关键词: 溃屈型滑坡; 文献计量分析; 研究方法; 影响因素

中图分类号: P642.22　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 2097-0013(2025)-01-0038-13

Shi J L, Zhang Y J, Fan N, Tan J M, Pei L Z, Ye R Q and Liu L. 2025. Research Progress on the Instability Mechanisms and Stability Evaluation Method of Buckling Landslides. *South China Geology,* 41(1): 38−50.

Abstract: As the common mountainous hazard, the buckling landslide is characterized by complicated dynamic evolution process, which involves the synergistic deformation of the sliding of active zone and the bending-bulging of passive zone, and the dynamic alteration of the ranges of active and passive zones. The simplification of aforementioned evolution process is usually necessary for relevant research on buckling landslides, resulting in a variety of research methods with limited applicability. By using the bibliometric analysis, this paper summarizes the numbers, journals and key words of related literature on the buckling

收稿日期: 2024-10-31; **修回日期:** 2024-12-12
基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2021CFB280); 中国地质调查局武汉地质调查中心“潜龙计划”青年人才项目 (QL2022-10); 三峡后续工作地质灾害防治项目 (000121 2024C C60 002); 中国地质调查局项目 (DD20221740)
第一作者: 施佳乐(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害物理模拟方面的研究工作, E-mail: 1065814774@qq.com
通讯作者: 张彦君(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害机理和演化过程方面的研究工作, E-mail: yjzhang_cgs@163.com

landslides, and systematically reviews the situation and development trend of this research topic. On that basis, the mainstream methods for the bucking mechanism and stability analysis, including the analytical solution, model experiment and numerical simulation, are summarized and discussed; Then, the summary on the influencing factors, including the intrinsic factors such as the dip and thickness of rock layer, the lithology, the cohesion and internal friction angle of basal sliding surface, and the triggering factors such as the water and the earthquake, is performed. Finally, some prospects for the future study and practice in the research field of buckling landslides are provided.

Key words: buckling landslide; bibliometric analysis; analysis method; influencing factor

顺层岩质边坡在自然界普遍存在，受结构面控制，层状岩体极易在内外动力耦合作用下沿软弱层面滑移失稳形成滑坡，其典型破坏模式主要包括顺层滑移、切层滑移和滑移–弯曲（即溃屈）（孙广忠和张文彬, 1985; 孙广忠, 1988; 冯君等, 2005; 黄润秋, 2007, 2009; 汤明高等, 2016）。其中，溃屈破坏是指顺层岩质边坡在长期自重作用和各种环境荷载影响下，边坡中上部层状岩体沿滑移面滑动，下部岩体受边坡前缘岩体的阻抗作用隆起（图 1），岩体隆起加剧导致其被折断或剪断，最终形成滑坡的现象，例如中国四川二滩水电站霸王山滑坡（Qin S et al., 2001; Zhang Y J et al., 2019）、中国四川茂县新磨滑坡（Zhao S Y et al., 2018）、新西兰内陆坎特博雷 Malvern Hills 矿山边坡溃屈破坏（Seale, 2007）、意大利特伦托 Lavini di Marco 边坡溃屈破坏（Tommasi et al., 2008, 2009）、加拿大滕布勒岭 Quintette 煤矿边坡溃屈破坏（Wang B et al. 2004）。顺层岩质边坡的溃屈变形破坏机制较为复杂，涉及主动区岩体顺层滑移和被动区岩体弯曲隆起的协同过程，以及主动区和被动区范围的动态调整，层状岩体从变形到失稳形成滑坡通常要经历较长时间的时效变形过程；其成灾规模则受地层岩性、滑动面位置和交错节理发育情况等因素的综合影响。

国内专家开展南水北调选线阶段工程地质调查时，注意到西南地区自然岩质斜坡存在大量“重力褶皱”变形破坏现象，即岩层未达到溃屈破坏前的弯曲变形现象（孙广忠和张文彬, 1985; 孙广忠, 1988）。Nemcok et al.（1972）将溃屈变形破坏现象归因于岩石“蠕变”。Kuttèr（1972）在分析英国矿山边坡的破坏案例时，也提出这一破坏模式。随后，Hoek and Bray（1977）指出，当层面内摩擦角较小时，顺层岩质边坡便可能出现溃屈现象。在前述研究基础上，Cavers（1981）通过概化层状岩质边坡溃屈破坏的三种力学模型，即平面坡的板状挠曲模型、平面坡的三铰梁模型和曲面坡的

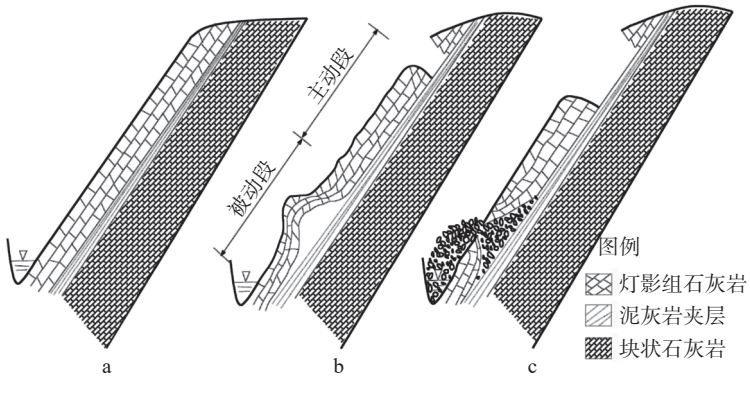

图 1　顺层岩质边坡溃屈变形破坏示意图

Fig. 1　Schematic diagram for buckling failure

a. 溃屈变形前; b. 溃屈变形中; c. 溃屈破坏形成滑坡

修改自 Qin S et al.（2001）

三铰梁模型，提出相应的溃屈稳定性定量评价方法。张倬元等(2016)则将顺层岩质边坡的溃屈破坏模式分为平面型和椅状型，指出其变形演化过程主要经历三个阶段，即轻微弯曲阶段、强烈弯曲-隆起阶段和切出面贯通阶段。通常情况下，溃屈型滑坡可以通过野外地质调查和高精度测量技术来识别(Fan X M et al., 2017; Zhang S C et al., 2020)。针对工程建设区或人类聚居区内所识别出的溃屈型滑坡，定量化的风险预测和评价非常重要。因此，溃屈型滑坡在内外动力耦合作用下的变形失稳破坏机制，以及相应的溃屈型滑坡稳定性评价方法，一直受到工程界和学术界的关注。

本文旨在通过梳理溃屈型滑坡研究相关的文献资料，分析该领域的研究现状、主要进展及发展趋势；系统归纳和总结溃屈型滑坡的主流研究方法和影响因素，探讨现有研究中存在的问题和挑战，为对该领域感兴趣的研究者提供综合性的知识内容。

1 文献计量分析

文献计量分析是利用计量学和统计学方法对文献信息进行系统化的量化分析，进而揭示文献的产出、合作关系和主题演化等规律。与传统分析方法相比，文献计量分析有助于学者充分了解目标研究领域的发展动态，科学合理选择研究方向，以及客观可靠地评估文献中研究成果的影响力。

1.1 数据来源

本文采用可视化分析工具 citespace 6.1.R6 总结和分析溃屈型滑坡相关的文献数据，数据来源为 Web of Science（WoS）核心文献数据库。以“buckling failure(溃屈破坏)或 buckling(溃屈)”和“slope(斜坡)或 landslide(滑坡)”作为主题词进行文献检索，收集汇总标题、摘要或关键词中包含上述主题词的文献，总共获取 100 篇有效文献记录。

1.2 文献趋势分析

图 2 所示为 2005 年至 2022 年 WoS 核心数据库收录的溃屈型滑坡相关文献的数量变化趋势；由图中可以看出，该研究领域近十年内的年发文量大致呈现递增趋势。根据年发文量变化趋势可将该研究领域的发展大致分为两个阶段：阶段Ⅰ(2005~2014 年)为稳定发展阶段，阶段Ⅱ(2015~2022 年)为快速增长阶段。阶段Ⅰ中，年发文量呈现相对平缓状态，说明溃屈型滑坡在这一时期内并未引起学界的广泛关注，亦或是溃屈型滑坡失稳破坏实例较少。阶段Ⅱ中，对溃屈型滑坡缺乏重视这一情况得到较大改善。与阶段Ⅰ相比较，阶段Ⅱ的发文数量接近增长 3 倍左右。尤其值得注意的是，2019 年以来该领域的年发文量呈现明显上升趋势，预示溃屈性滑坡在未来可能逐渐成为较为热点的研究课题。

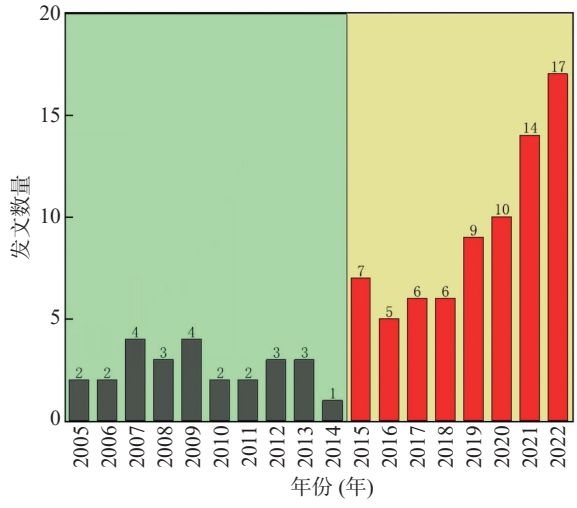

图 2 2005 年至 2022 年 WoS 数据库中溃屈型滑坡相关研究的文章数量

Fig. 2 Number of articles related to buckling landslides from the year 2005 to 2022 in the WoS database

1.3 关键词分析

关键词分析可以系统了解某一领域研究的主题和趋势。关键词的出现频率和变化趋势能够反映研究热点和发展方向，帮助研究者把握学术前沿和选择研究方向。本节首先开展关键词共现和聚类分析，揭示关键词之间的关联和探索热门研究主题。此外，本节还通过关键词凸显分析对溃屈性滑坡领域的研究趋势进行预测。

图 3 为关键词共现分析的可视化结果。由图 3 可知，起到最主要桥梁连接作用的前五个关键词分别是“deformations(变形)”、“failure(破坏)”、“behavior(特性)”、“gravitational slope deformation(斜坡重力变形)”、“landslide”(节点的

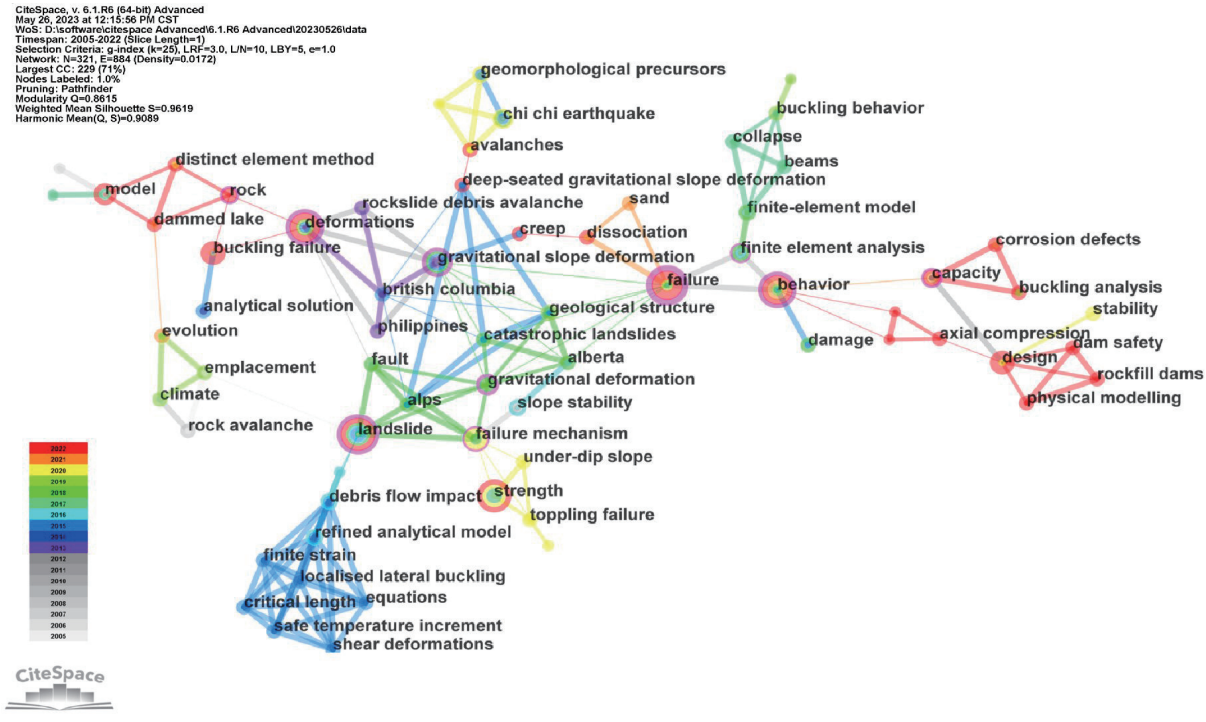

图 3　关键词共现分析

Fig. 3　Key words co-occurrence analysis

尺寸越大，表示该关键词在不同文献中的出现频率越高；节点的连接线表示不同关键词在同一文献中同时出现的关联关系，连接线的颜色则代表这种关联关系的时间相关性）。此外，从节点的连接线中可以发现某些关键词经常被同时提及，如“deformations”和“buckling failure”、“landslide”和“failure mechanism（破坏机制）”、“slope stability（斜坡稳定性）”和“failure mechanism”、“failure”和“behavior”等。

图 4 所示为关键词聚类分析的结果（此处仅展示较大节点并隐藏连接线）。为提高分析结果的准确性，对同主题词相关的某些词汇进行合并和移除，如“landslide”、“buckling failure”和“slope”等。由图 4 可以发现，该领域的研究主要围绕“Study methods（研究方法）”和“Influencing factors（影响因素）”两个主题展开，其他主题如“Evolutionary characters（演化特征）”和“Evaluation models（评价模型）”则主要为前两个主题服务。

图 5 所示为关键词凸显分析的结果。根据前文，溃屈型滑坡领域的研究趋势可分为阶段Ⅰ（2005—2014 年）的稳定发展阶段和阶段Ⅱ（2015—2022 年）的快速增长阶段。从图 5 可以看出，阶段Ⅰ除“slope”以外没有明显的热门关键词，阶段Ⅱ则呈现更多的热门关键词，如“strength（强度）”、“refined analysis model（精细分析模型）”和“finite-element model（有限元模型）”等，表明溃屈型滑坡研究领域未来的研究重点将会聚焦于更为精细化的数值分析模型和方法。

2 研究方法

2.1 理论解析

溃屈型滑坡的稳定性判别是该研究领域的主要内容，也是工程界关注的核心问题。目前，溃屈型滑坡的稳定性判别主要依据临溃状态时的荷载条件或边界条件，采用的评判指标多为临界荷载（P_{cr}）和临界坡长（L_{cr}），即边坡坡顶所受荷载大于临界荷载（P_{cr}）或边坡坡长大于临界坡长（L_{cr}）时，边坡可能出现溃屈变形破坏。鉴于溃屈型滑坡的失稳破坏过程类似于杆件或梁板结构的失稳，因此，溃屈型滑坡在自重、静水压力、坡顶超载和地震荷载等作用下的稳定性分析主要采用压杆模型（图 6）和弹（塑）性梁板模型（图 7）等简化力学模型。

基于压杆失稳理论，Goodman（1980）对顺层

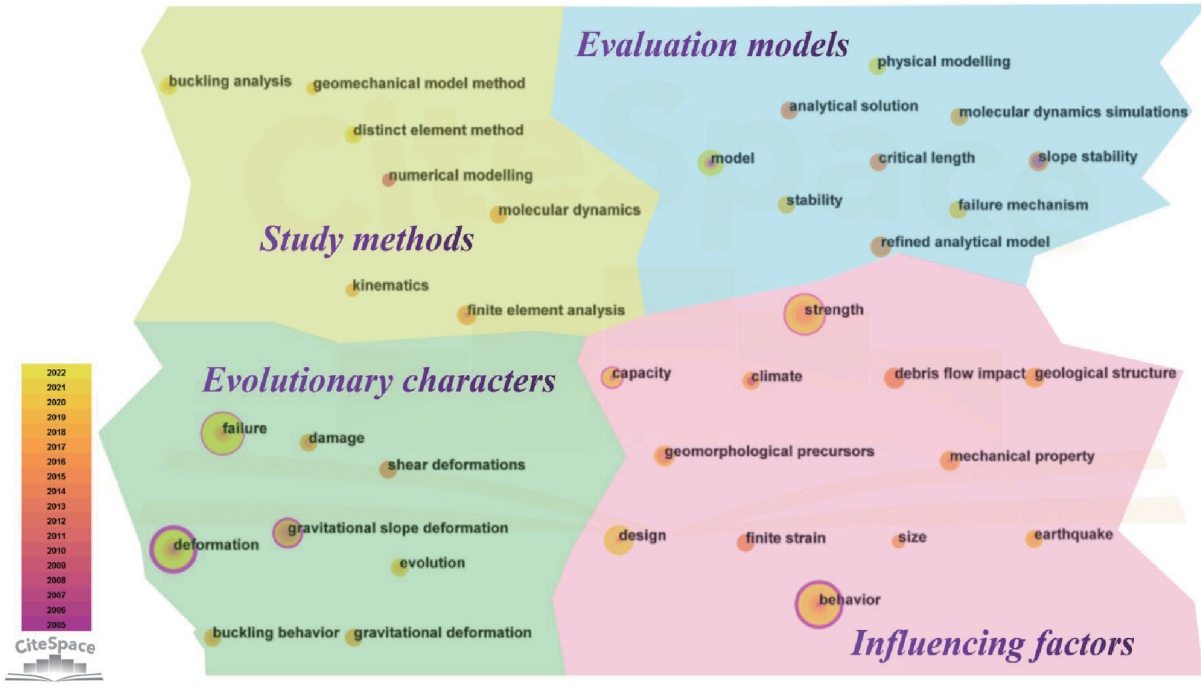

图 4 关键词聚类分析

Fig. 4 Key words clustering analysis

Top 10 keywords with the strongest citation bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2005—2022
slopes	2009	1.34	2009	2013	Stage I / Stage II
debris flow impact	2015	1.65	2015	2016	
refined analytical model	2015	1.65	2015	2016	
landslide	2005	1.34	2015	2016	
strength	2015	1.82	2016	2017	
finite-element model	2017	1.73	2017	2018	
collapse	2017	1.29	2017	2017	
beams	2017	1.29	2017	2017	
gravitational deformation	2018	1.62	2018	2019	
buckling failure	2015	1.64	2021	2022	

图 5 关键词凸显分析

Fig. 5 Key words emphasis analysis

岩质边坡的溃屈破坏模式进行了深入分析；随后，Cavers（1981）结合欧拉公式对其所提出的三种不同溃屈破坏模型进行分析，推导得出不同破坏模式对应的临界坡长，为该领域后续的理论研究提供了重要的参考依据。基于 Cavers（1981）提出的溃屈破坏力学模型，Shou K J and Wang C F（2003）考虑地震荷载的影响，提出地震作用下顺层岩质边坡溃屈破坏的临界坡长公式，以评估地震作用诱发溃屈破坏的可能性。结合叠加原理，Liu H Y et al.（2016）首次提出坡顶超载作用下顺层岩质边坡溃屈稳定性评价的显式解析方法。在此基础上，张勃成等（2020）将岩石视作损伤材料，建立了考虑水力作用与岩石损伤的顺层岩质边坡临界失稳高度的计算模型。

基于梁板结构失稳模型的溃屈型滑坡稳定性评价解析方法研究方面，孙广忠和张文彬（1985）采用完整梁弯曲模型分析层状岩体的溃屈变形破坏，为层状岩体溃屈破坏问题的研究提供了结构

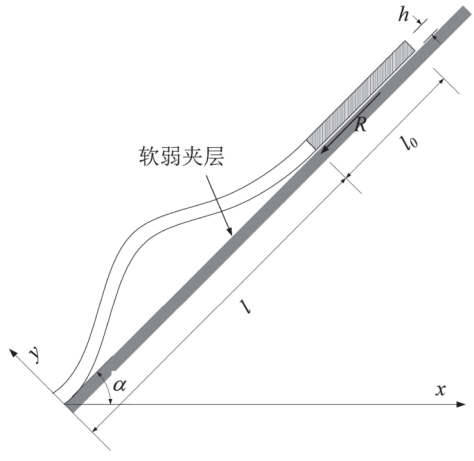

图 6　压杆模型

Fig. 6　Compressive column model

修改自 Cavers (1981)

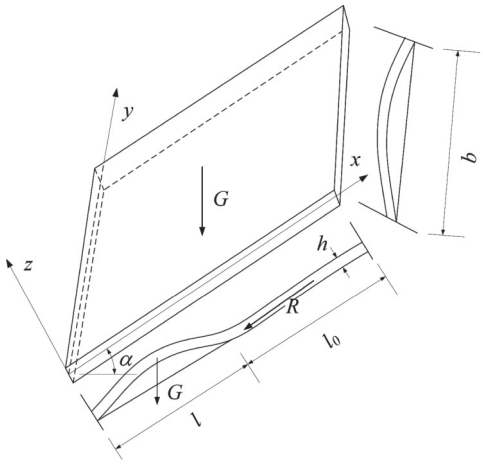

图 7　弹（塑）性梁板模型

Fig. 7　Elastic （plastic） beam （slab） model

修改自冯君等(2010)

力学思路。随后，李树森等(1995)将岩层视作多层梁板结构，结合弹性梁理论和能量平衡原理，推导得出临界溃屈坡长的解析解，并提出溃屈深度的概念。将层状岩体视作二维受压板，刘小丽和周德培(2002)采用弹性板理论，系统分析了平行层面方向的岩体自重分量、层间摩擦力和黏聚力对顺层岩质边坡溃屈稳定性的影响；在其工作的基础上，冯君等(2010)采用弹塑性板考虑顺层岩质边坡中的层状岩体，使得计算结果更加符合实际情况。此外，其他学者还采用弹(塑)性梁板理论分析了不同荷载作用下溃屈型滑坡的稳定性问题。例如，基于单层梁模型，Garzon (2016)采用切线模态理论评估顺层岩质边坡的溃屈稳定性，并将溃屈破坏模式分为三种：脆性破坏、弹性破坏和非弹性破坏。王佳运等(2019)考虑斜坡自重、静水压力、侧向摩阻力和岩层厚度的变化，构建岩质斜坡视向滑移–溃屈破坏的简化模型，并通过力学分析推导得出临界溃屈坡长的隐式解。针对地震诱发的溃屈型滑坡，Qi S W et al. (2015)基于能量平衡理论，提出考虑地震和孔隙水压力的溃屈稳定性评价方法，并应用于汶川地震唐家山滑坡所涉及岩体溃屈过程的案例分析。朱晗迓等(2004)对静水压力和地震作用进行简化，采用多层梁模型分析各层岩体的理论溃屈曲线，进而对顺层岩质边坡的溃屈破坏特征进行探讨。基于多层梁失稳模型的理论框架，Zhang Y J et al. (2019)采用能量平衡原理得出顺层岩质边坡临界溃屈坡长和临界溃屈深度的解析解，并引入广义 Hoek-Brown 破坏准则，考虑边坡尺寸效应对溃屈稳定性的影响。这里，尺寸效应特指边坡尺寸影响其变形和破坏过程的现象(Goodman et al., 1968; Bandis et al., 1983)。王秋生等(2022)结合多层梁模型和能量平衡原理，推导得出多层岩体溃屈破坏临界长度和稳定系数的计算公式，采用该解析方法确定的 Malvern Hills 边坡临界溃屈长度和稳定系数，与数值模拟结果和现场监测数据较为吻合。

2.2 模型试验

物理模型试验除了在还原复杂地质条件、模拟外部荷载作用和考量时间效应等方面具有显著优势，还有助于真实重现溃屈型滑坡渐进变形至失稳破坏的全过程，所得到的试验结果亦可用于验证理论分析和数值模拟的结果。

目前，溃屈型滑坡物理模型试验常用的技术手段包括常规室内模型试验、底摩擦模型试验及离心模型试验。室内常规模型试验方面，Khosravi et al. (2012)利用砂质材料模拟岩质边坡，观察发现模型边坡倾角达到 40°时出现溃屈变形和破坏现象。Weng M C et al. (2015)和 Lo C M and Weng M C (2017)采用树脂粘结球状人造岩石颗粒制作岩板和顺层岩质边坡的室内小比例尺模型，系统研究了坡角和岩层倾角、降雨引起的模型材料弱化对模型边坡溃屈变形破坏的长期影响。最近，为了研究 Cavers (1981)提出的顺层岩质边

坡三铰链溃屈(THB)破坏模式,Ghasemi and Corkum(2020, 2022)研发了一种全新的试验装置和方法,通过直接控制整个实验过程中层状岩体所受的轴向载荷,深入研究不同轴向应力条件下层状岩体的 THB 破坏机制,为顺层岩质边坡溃屈稳定性分析方法的发展提供参考。底摩擦试验技术的应用方面,杜应琼等(2014)试验再现了顺层岩质边坡溃屈破坏的全过程,探讨分析了溃屈型滑坡临界坡长与弯曲隆起高度的主要影响因素;随后,汤明高等(2016)也采用底摩擦试验探讨了顺层斜坡溃屈机制与控制因子之间的关系。相较于室内常规模型试验和底摩擦试验技术,离心模型试验技术在还原滑坡原型的真实应力场方面具有无可比拟的优势,通过向 1∶N 缩尺的模型施加 N 倍重力加速度的离心力,使得缩尺模型具有同原型近似相同的应力水平,可以确保缩尺模型在试验过程中表现出更为合理的力学和变形响应。基于离心模型试验技术,Weng M C et al.(2017)揭示了斜坡尺寸效应对顺层岩质边坡溃屈失稳破坏机制的影响。此外,Zhang Q et al.(2021)通过简化实验研究抗滑桩加固溃屈型滑坡的效果,试验成果可为溃屈型滑坡加固和变形监测的工程实践提供有益参考。

溃屈型滑坡物理模型试验中,地质体相似材料的制备和缩尺模型的制作是一项成本昂贵且复杂的工作任务(张彦君等, 2019);加之溃屈型滑坡变形失稳破坏演化过程的时间跨度一般较长,导致模型试验资源投入较高、时间消耗较长和参数获取有限,现有的关于溃屈型滑坡物理模型试验研究的数量仍相对较少。未来需要聚焦于溃屈型滑坡物理模型试验理论和技术方面的研究,研发更为合理可靠的内外动力作用模拟设备,以及更为精细的应力、应变、速度、加速度和地下水等场量的监测仪器,推动内外动力耦合作用下溃屈型滑坡失稳破坏机制的研究。

2.3 数值模拟

数值模拟的优势在于其能够提供丰富有效的滑坡动力学和运动学参数,计算成本相对较低且可重复性较好,并且可以通过改进算法大幅提升计算效率。因此,数值模拟已经逐渐成为溃屈型滑坡研究的主流方法。

溃屈型滑坡数值模拟主要采用非连续介质方法,能够更加真实地还原节理岩体的非线性变形和破坏特征,以及滑动、转动和碰撞等复杂运动过程。目前,常用的软件包括通用的离散单元方法(UDEC)、颗粒流方法(PFC)、非连续变形分析(DDA)。例如,Stead and Eberhardt(1997)和 Eberhardt and Stead(1998)采用 UDEC 对 Westfield 露天煤矿边坡的溃屈变形破坏过程进行了详尽分析。汤明高等(2016)运用 UDEC 软件成功模拟层状边坡的溃屈失稳过程,针对顺层岩质边坡溃屈失稳的地质力学条件、临界失稳状态判定以及早期失稳标志等提出一些重要见解。基于离散元方法(DEM),Li Y Y et al.(2022)成功模拟了青藏高原东南地区金沙江上游下贵洼滑坡溃屈变形破坏至形成滑坡坝的全过程。针对意大利特伦托 Lavini di Marco 地区的岩体溃屈现象,Tommasi et al.(2008, 2009)采用 DEM 和 DDA 进行反演分析,以探讨岩体特性、边坡几何形状以及水文条件对层状岩体溃屈变形行为的影响。张彦君(2019)提出顺层岩质边坡溃屈稳定性评价的刚度折减方法,并采用 DDA 方法对单层岩体的溃屈变形失稳破坏全过程进行了初步模拟。

此外,亦有学者采用连续介质方法对溃屈性滑坡的失稳机制和稳定性进行分析。例如,结合有限差分显式模型和隐式的 Cosserat 连续体模型,Pant and Adhikary(1999)深入研究了顺层岩质边坡的溃屈破坏机制。随后,Adhikary et al.(2001)通过将大变形 Cosserat 连续体模型引入 AFENA,实现对顺层岩质边坡的溃屈稳定性评价。Pereira and Lana(2013)和 Silva and Lana(2014)采用有限元软件 Phase2 模拟千枚岩岩层的溃屈破坏过程,着重研究了结构面刚度、黏聚力和地应力对层状边坡溃屈破坏机制的影响。然而,连续介质方法难以有效模拟层状岩体变形失稳后的破裂和复杂运动过程。近期,Ridl et al.(2021)通过将岩体结构固有的各向异性特征视为离散的裂缝网络,在连续介质有限元法中实现了层状岩体溃屈稳定性的数值分析;但这种处理方法在位移分析上存在一些局限性,原因在于该方法所采用的微小应变

理论可能导致位移计算的精确性难以达到预期。

鉴于溃屈型滑坡变形失稳破坏的全过程涉及层状岩体的局部小变形和滑移、弯曲、隆起、碎裂等大变形运动过程，兼具连续介质和非连续介质模拟能力的数值流形方法(NMM)亦被用于研究溃屈型滑坡的失稳机制和演化过程。例如，王秋生等(2022)和 Wang Q S et al. (2023)采用 NMM 重现了新西兰 Malvern Hills 从溃屈变形到失稳破坏的渐进演化过程，并探究了交错节理对层状边坡溃屈变形和破坏过程的影响。

3 影响因素

溃屈型滑坡的孕育通常需要具备两个关键条件：首先，岩层倾角等于或略大于坡角，层面内摩擦角明显小于层面倾角，层状岩体具备沿层面下滑的潜力(李安洪等, 2009)；其次，主动区岩体在内外动力作用下滑动，因潜在滑移面未在边坡临空面出露，被动区岩体受到阻碍，出现弯曲隆起变形(黄润秋, 2007)。随着时间推移，被动区岩层所受的挤压作用将不断增强，被动区岩层隆起程度达到临界值后出现溃屈破坏。

顺层斜坡在具备溃屈变形破坏的基本前提条件下，其溃屈破坏的难易程度受多种因素影响，可分为内在因素和触发因素。内在因素主要包括岩层倾角、岩层厚度、地层岩性、层面黏聚力和内摩擦角等。触发因素主要包括地下水、降雨、库水位波动和地震作用等。上述因素共同影响溃屈型滑坡变形失稳破坏过程的多方面特征，如溃屈稳定性、溃屈深度、剪切口位置和破坏后的解体程度等。

3.1 内在因素

3.1.1 岩层倾角

通常情况下，溃屈型滑坡的稳定性随着岩层倾角的增加而逐渐降低(成永刚和王玉峰, 2011; 杜应琼等, 2014; 汤明高等, 2016; Li B et al., 2022)。主要原因在于更陡的岩层倾角会导致层状岩体承受更大的弯矩和剪力，同时增加被动区岩层所承受的平行层面向下的自重分量，进一步增加了溃屈型滑坡失稳的风险。结合模型试验和数值模拟，汤明高等(2016)对上述规律进行了系统深入的研究；通过分析边坡模型的变形监测数据，发现岩层倾角为 20°时，斜坡仅产生轻微变形；但随着岩层倾角的增加，斜坡岩层出现蠕动变形，下部岩层出现弯曲现象；而当岩层倾角小于或等于 20°时，斜坡前缘通常相对稳定，并未出现隆起变形；基于上述现象，认为岩层倾角大于 20°是溃屈型滑坡失稳的重要地质条件。随后，Lo C M and Weng M C (2017)采用模型试验进一步深入研究岩层倾角对溃屈稳定性的影响，发现当岩层倾角从 30°增加到 45°时，顺层岩质边坡模型溃屈变形破坏过程经历的时间缩短整整 7 倍，这一结果充分凸显岩层倾角对顺层岩质边坡溃屈稳定性的显著影响。最近，陈达等(2021)统计分析溃屈型滑坡失稳变形与层面倾角之间的关系，指出具有溃屈变形的岩层倾角多分布在 20°~50°之间；主要原因在于缓倾岩层一般出现顺层滑移–拉裂破坏，陡倾岩层多以倾倒变形为主。

表 1 列出 8 起典型溃屈破坏事件中的岩层倾角信息。由表 1 可知，以泥岩、页岩、粉砂岩和板

表 1　溃屈破坏典型事件及其相关信息

Table 1　Buckling failure events and associated information

事件名称	坡长(m)	坡高(m)	岩层倾角(°)	岩层厚度	岩性组合	文献来源
Malvern Hills边坡溃屈	22.5	15	45	薄层	互层泥岩、板岩	Seale, 2007
Quinette矿山溃屈	173	120	44~50	薄–中层	互层砂岩、页岩	Wang B et al., 2004
Westfield矿山溃屈	160	95	34~40	薄层	互层泥岩	Scoble, 1981
Lavini di Marco斜坡溃屈	454	200	25~29	薄–中层	石灰岩、泥岩	Tommasi et al., 2009
新磨滑坡	1 170	400	43~53	中厚层	石英砂岩、千枚岩	Zhao S Y et al., 2018
大奔流滑坡	1 462	265	25~40	薄–中层	大理岩、泥岩	丁戈媛和胡新丽, 2020
藕塘滑坡	1 800	610	24~29	中厚层	砂岩粉砂岩互层	肖捷夫, 2021
木鱼包滑坡	1 500	420	27	中–厚层	砂岩、炭质页岩	Zhou C et al., 2020

岩等软岩为主的顺层斜坡中，出现溃屈变形破坏的岩层倾角多介于 20°~50°之间，也佐证了汤明高等(2016)和陈达等(2021)的研究结论。

3.1.2 岩层厚度

从材料力学视角分析，厚层岩体具有更大的截面抗弯刚度，因而厚层岩体溃屈变形破坏的风险更低。此外，厚岩层体通常更为均匀，岩层出现溃屈变形破坏所需的长度更大，相应的层间滑移面更长，更容易分散和平衡外界荷载作用，对维持顺层边坡的溃屈稳定性具有积极作用。

李树森等(1995)通过构建顺层岩质边坡溃屈破坏临界坡长与岩层厚度之间的量化关系，发现临界坡长随岩层厚度增加而增加，表明岩层越厚，顺层岩质边坡的溃屈稳定性越高。Pant and Adhikary (1999)通过数值模拟发现单层岩体厚度越小，顺层岩质边坡的层面曲率越高，岩层越容易发生溃屈变形破坏。另一方面，Lo C M and Weng M C(2017)从模型试验角度出发探讨了岩层厚度对顺层岩质边坡溃屈稳定性的影响，发现岩层越厚，其到达溃屈破坏状态所需的时间越长，侧面说明厚层岩质边坡具有更高的溃屈稳定性。李安洪等(2009)和汤明高等(2016)指出，单层岩体的厚度对顺层岩质边坡整体抗弯性能的影响较为有限，其对顺层岩质边坡溃屈稳定性的作用主要体现为影响溃屈深度(溃屈深度等于岩体弯曲层数乘以岩体层厚)，即单层岩体的厚度越大，顺层岩质边坡的溃屈深度越深。

表 1 同样列出 8 起典型溃屈破坏事件中的岩层厚度信息。由表 1 可知，薄层岩体中出现溃屈破坏的数量最多，且其坡长或坡高一般较小；中厚层岩体中出现的溃屈破坏，其斜坡坡长或坡高一般较大。上述发现也能很好地验证前述研究结论。

3.1.3 地层岩性及其组合特征

不同的地层岩性通常具有不同的变形和破坏特征，因此，分析顺层岩质边坡溃屈变形破坏过程时必须合理考虑地层岩性及其组合方式(龚涛, 2009)。一般来说，较坚硬的岩石具有较大的变形模量和抗剪强度参数，因而不太容易出现溃屈变形破坏；软岩因其抗弯和抗剪性能较差而相对容易出现溃屈变形破坏。

张倬元等(2016)指出，顺层岩质边坡溃屈变形破坏多见于薄层状岩体和延性较强的碳酸盐岩类层状岩体。例如，表 1 所列出的典型溃屈破坏实例多出现于薄层的泥岩、板岩、页岩、砂岩、粉砂岩、石灰岩等岩层之中。此外，溃屈变形破坏现象多形成于具备软硬相间结构和软弱夹层的顺层斜坡中，主要原因在于软弱岩层容易出现压缩变形，透水能力变差而起到隔水层的作用，致使层间积聚较大的静水压力，对上覆硬质岩层起到“浮脱减重”作用，进而导致上覆岩层下滑力增加，稳定性降低；而硬质岩层在外部环境因素作用下，裂隙通常较为发育，受上部岩体持续挤压容易出现弯曲变形和折断现象(陈达等, 2021)。

3.1.4 滑移面黏聚力和内摩擦角

对于顺层岩质边坡的滑移失稳破坏模式而言，潜在滑移面的抗剪强度参数起着至关重要的作用。至于顺层岩质边坡的溃屈破坏过程，不仅涉及岩体的顺层滑移，还涉及层状岩体的弯曲变形，因此，潜在滑移面的黏聚力和内摩擦角通过控制层状岩体的滑移过程来影响顺层岩质边坡的溃屈稳定性也值得研究。

现有研究多采用解析方法探究滑动面力学性质对顺层岩质边坡溃屈稳定性的影响，所获取的溃屈稳定性评价指标同滑移面抗剪强度参数之间的关系曲线多具有相同变化规律(朱晗迓等, 2004; Jin L L et al., 2024)。由图 8 可知，随着滑移面黏聚力或内摩擦角的增加，溃屈破坏临界坡长呈线性平缓增长；但当滑移面黏聚力或内摩擦角超过某一临界值后，溃屈破坏临界坡长突变式急剧增加。主要原因在于顺层岩质边坡内部滑移面的黏聚力和内摩擦角增加到一定程度以后，边坡中上部层状岩体因其所受到的抗滑力大于下滑力而不会出现顺层滑移，更不会挤压下部层状岩体使其弯曲变形，因而溃屈破坏临界坡长会急剧增加。

基于上述分析，理论上可以通过提高滑移面的抗剪强度参数来增加顺层岩质边坡的溃屈稳定性。工程实践中，则可以根据具体情况选用锚杆支护、微型抗滑桩支护(Zhang Q et al., 2021; Pei Z W et al., 2023a, b)，以及预防地表水侵入滑移面等措施。

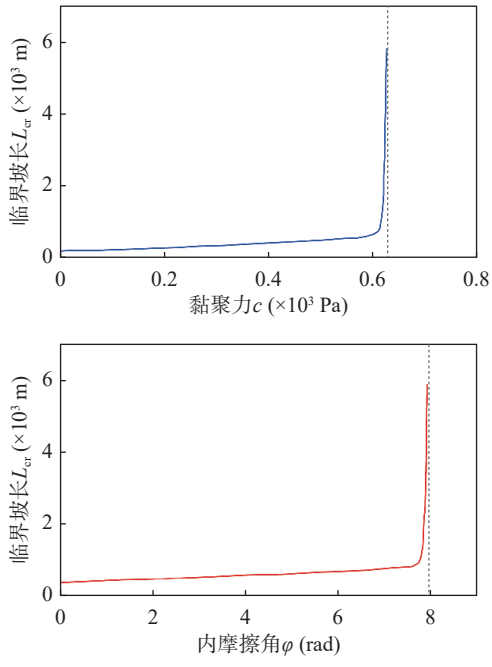

图 8　临界坡长同滑移面抗剪强度参数之间的关系

Fig. 8　Relationship between shear strength parameters of basal sliding surface and critical slope length

修改自朱晗迓等(2004)

3.2 触发因素

坡体结构、岩层厚度、岩性组合条件及潜在滑移面抗剪强度参数等内在因素决定顺层岩质边坡的初始状态和变形特性，但通常还需某种特定类型的因素才能触发顺层岩质边坡的溃屈变形破坏，这些触发因素可能包括水(地下水、降雨和库水位波动)的作用和地震作用等。

3.2.1 水的作用

降雨作用，尤其是持续强降雨，多为顺层岩质边坡溃屈变形破坏的主要触发因素。例如，2017 年四川新磨地区长达两个月持续降雨导致新磨地区旧滑坡复活，层状岩体出现溃屈破坏(Zhao S Y et al., 2018)。降雨对于溃屈型滑坡稳定性的影响主要表现为以下几个方面：首先，降雨的软化作用会削弱潜在滑移面的抗剪强度，对溃屈稳定性造成显著不利影响；其次，降雨入渗坡体形成的渗流场在滑移面上形成静水压力，对滑移面上覆层状岩体产生浮托作用，降低上覆层状岩体所受的抗滑力，从而降低溃屈稳定性；最后，降雨入渗作用可能导致非饱和的类土质裂隙充填物或夹层的基质吸力逐渐减小，进而导致顺层岩质边坡溃屈稳定性降低。

其他水体活动亦有可能显著影响溃屈型滑坡的稳定性。例如，地下水作用可能导致边坡内部结构面的含矿物质填充物软化，细颗粒成分随地下水运动而流失，结构面抗剪强度参数降低，进而降低溃屈型滑坡的稳定性。库水位波动的影响则主要体现为两个方面：首先，库水位长期周期性波动直接导致消落带岩体持续劣化(Dai Z W et al., 2024)，破坏被动区层状岩体前缘所受的阻挡作用，降低溃屈型滑坡的稳定性；其次，库水位波动导致坡体所受静水压力、浮托力和渗透压力出现变化(Dai Z W et al., 2022)，进而影响溃屈型滑坡的稳定性。

3.2.2 地震作用

目前，地震作用下溃屈型滑坡的稳定性分析仍然具有较大的挑战，相关研究文献较为有限，且主要侧重于理论解析。廖丽萍等(2016)采用拟静力法将地震作用简化为水平或垂直方向的加速度，考虑其对岩质边坡的惯性力，得到地震作用下顺层岩质边坡溃屈稳定性评价的解析公式，并指出边坡的溃屈失稳同水平地震力的作用方向密切相关。基于能量平衡理论，Qi S W et al. (2015)提出一种考虑地震和孔隙水压力作用的溃屈型滑坡稳定性评价解析方法，并结合唐家山滑坡实例对本解析方法的有效性进行了验证。理论层面上，地震对溃屈型滑坡稳定性的影响主要体现为累积效应和触发效应(黄润秋等, 2009)，累积效应主要表现为地震作用导致坡体结构松动，岩体内部破裂面错位，坡体内部孔隙水压力急剧上升，为层状岩体溃屈变形失稳创造有利条件；触发效应则可能表现为处于临界状态的层状岩体在地震纵横波作用下瞬间溃屈失稳破坏。

4 结论与展望

通过对溃屈型滑坡相关的资料进行文献计量分析，梳理溃屈型滑坡领域的研究现状、主要进展和发展趋势，系统阐述溃屈型滑坡的研究方法和主要影响因素，本文得出以下结论和展望。

(1)基于溃屈型滑坡影响因素的梳理分析，此

类滑坡多形成于软硬互层和含软弱夹层的顺层岩质边坡中，岩性多为泥岩、页岩、粉砂岩和板岩等软岩，岩层倾角多在 20°~50°之间，单层厚度多为薄层。

（2）现阶段内，溃屈型滑坡变形失稳机制研究及稳定性分析多采用数值模拟和理论解析方法；物理模型试验技术，尤其是能够还原滑坡原型真实应力状态和考虑时间效应的离心模型实验技术应用略显不足。未来需要关注内外动力耦合作用下溃屈型滑坡物理模型试验及配套量测技术设备的研发工作。

（3）现有研究中，溃屈型滑坡的失稳机制研究和稳定性评价主要侧重于探讨内在因素或单一触发因素的影响，较少考虑多因素之间的耦合或联动作用。未来需要结合精细化的数值仿真和新型物理模型试验技术，系统深入探讨多因素耦合作用对溃屈型滑坡的影响机制。

（4）现有溃屈型滑坡稳定性评价解析方法所采用的指标主要为临界坡长或临界荷载，临界滑动位移等其他指标的研究相对较少。此外，理论解析中假定的临界状态多为层状岩体由稳定阶段过渡至轻微弯曲阶段的中间状态，而非层状岩体强烈弯曲隆起阶段过渡至切出面贯通阶段的中间状态，导致溃屈稳定性的评价结果相对保守。未来开展溃屈型滑坡稳定性评价方法研究时，应当充分考虑层状岩体的弯曲变形性能。

参考文献：

陈 达,许 强,郑 光,王 卓,蒋金晶,刘建强.2021.顺层边坡溃曲变形形成条件及其与层面倾角的关系 [J]. 科学技术与工程,21(7):2616-2625.

成永刚,王玉峰.2011.层面倾角对顺层岩质滑坡贡献率研究 [J]. 岩土力学,32(12):3708-3712.

丁戈媛,胡新丽.2020.大奔流顺层岩质滑坡溃屈型破坏力学机制研究 [J]. 地质科技通报,39(2):186-190.

杜应琼,任光明,杜 飞,朱少帅,余天彬.2014.顺层斜坡溃屈变形物理模拟及影响因素敏感性分析 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版),27(6):68-71.

冯 君,周德培,李安洪.2005.顺层岩质边坡开挖稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报,24(9):1474-1478.

冯 君,周德培,杨 涛.2010.用弹塑性板理论分析顺层边坡的弯曲失稳 [J]. 岩土工程学报,32(8):1184-1188.

龚 涛. 2009. 顺层岩质边坡稳定性研究 [D]. 西安理工大学硕士学位论文.

黄润秋.2007.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报,26(3):433-454.

黄润秋. 2009. 汶川 8. 0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式 [J]. 岩石力学与工程学报,28(6):1239-1249.

李安洪,周德培,冯 君.2009.顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策 [J]. 岩石力学与工程学报,28(S1):2915-2921.

李树森,任光明,左三胜.1995.层状结构岩体顺层斜坡失稳机理的力学分析 [J]. 地质灾害与环境保护,6(2):24-29.

廖丽萍,朱颖彦,杨志全,邹代华,Muhammad Waseem. 2016.中巴喀喇昆仑公路顺层岩质边坡受力分析 [J]. 地下空间与工程学报,12(1):243-249.

刘小丽,周德培.2002.用弹性板理论分析顺层岩质边坡的失稳 [J]. 岩土力学,23(2):162-165.

孙广忠. 1988. 岩体结构力学 [M]. 北京:科学出版社.

孙广忠,张文彬.1985.一种常见的岩体结构——板裂结构及其力学模型 [J]. 地质科学,20(3):275-282.

汤明高,马 旭,张婷婷,黄润秋,李九乾.2016.顺层斜坡溃屈机制与早期识别研究 [J]. 工程地质学报,24(3):442-450.

王佳运,王根龙,石小亚.2019.陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析 [J]. 中国地质,46(2):381-388.

王秋生,张瑞涛,郑 宏.2022.Malvern Hills 边坡溃曲破坏分析及数值流形法模拟 [J]. 岩土力学,43(7):1951-1960.

肖捷夫. 2021. 库水涨落和降雨条件下藕塘滑坡变形演化机制及其预测模型研究 [D]. 中国地质大学 (武汉) 博士学位论文.

张勃成,唐辉明,申培武,宁奕冰,夏 丁.2020.基于岩石损伤与水力作用的顺层岩质边坡临界失稳高度研究 [J]. 安全与环境工程,27(2):42-49.

张彦君. 2019. 顺层岩质边坡地震稳定性及滑坡运移过程 DDA 模拟方法 [D]. 大连理工大学博士学位论文.

张彦君,年廷凯,王 亮,唐 军.2019.岩质边坡物理模型试验相似材料研究 [J]. 西南交通大学学报,54(1):55-60+72.

张倬元,王士天,王兰生,黄润秋,许 强,陶连金. 2016. 工程地质分析原理 (第 4 版)[M]. 北京:地质出版社.

朱晗迓,马美玲,尚岳全.2004.顺倾向层状岩质边坡溃屈破坏分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版),38(9):1144-1149.

Adhikary D P, Mühlhaus H B, Dyskin A V. 2001. A numerical study of flexural buckling of foliated rock slopes[J].

International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25(9): 871-884.

Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. 1983. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 20: 249-268.

Cavers D S. 1981. Simple methods to analyze buckling of rock slopes[J]. Rock Mechanics, 14: 87-104.

Dai Z W, Zhang Y J, Zhang C Y, Luo J H, Yao W. 2022. Interpreting the Influence of Reservoir Water Level Fluctuation on the Seepage and Stability of an Ancient Landslide in the Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of the Outang Landslide[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 40(9): 4551-4561.

Dai Z W, Zhang Y J, Zhang C Y, Fu X L, Zhang P, Ye R Q. 2024. A photographic method to identify reservoir geohazards induced by rock mass deterioration of hydro-fluctuation belt[J]. Frontiers in Earth Science, 12: 1365272.

Eberhardt E, Stead D. 1998. Mechanisms of slope instability in thinly bedded surface mine slopes[C]. //Moore D P, Hungr O, Balkema A A, eds. Proceedings, 8th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Vancouver.

Fan X M, Xu Q, Scaringi G, Dai L X, Li W L, Dond X J, Zhu X, Pei X J, Dai K R, Havenith H B. 2017. Failure mechanism and kinematics of the deadly june 24th 2017 Xinmo landslide, maoxian, sichuan, China[J]. Landslides, 14(3): 2129-2146.

Garzon S E R. 2016. Analytical solution for assessing continuum buckling in sedimentary rock slopes based on the tangent-modulus theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 90: 53-61.

Ghasemi M, Corkum A G. 2020. A three hinge buckling laboratory test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 53: 4077-4090.

Ghasemi M, Corkum A G. 2022. Experiment and numerical study on three hinge buckling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56: 2049-2063.

Goodman R E. 1980. Introduction to Rock Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons.

Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. 1968. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,94(3): 637-659.

Hoek E, Bray J. 1977. Rock Slope Engineering. revised second edition[M]. London: Publication of Institution of Mining and Metallurgy.

Jin L L, Ju G H, Chen Z F, Xiao Q F, Fu W X, Ye F, Wei Y F. 2024. An analytical solution to predict slip-buckling failure of bedding rock slopes under the influence of top loading and earthquakes: Case studies of Hejia landslide and Tangjiashan landslide[J]. Landslides, 21: 152-169.

Khosravi M H, Tang L, Pipatpongsa T, Takemura J, Doncommul P. 2012. Performance of counterweight balance on stability of undercut slope evaluated by physical modeling[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 6(2): 193-205.

Kuttėr H K. 1972. Mechanisms of Slope Failure Other Than Pure Sliding[M]. //Müller L, eds. Rock Mechanics. International Centre for Mechanical Sciences. Springer, Vienna.

Li B, Huang D, Zhu Y Z. 2022. A complex slide-buckling-toppling failure of under-dip soft rock slopes[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26(9): 4146-4169.

Li Y Y, Feng X Y, Yao A J, Zhang Z H, Li K, Wang Q S, Song S Y. 2022. Progressive evolution and failure behavior of a Holocene river-damming landslide in the SE Tibetan plateau, China[J]. Landslides, 19(5): 1069-1086.

Liu H Y, Wang G H, Huang F. 2016. Methods to analyze flexural buckling of the consequent slabbed rock slope under top loading[J]. Mathematical Problem in Engineering, 3402547.

Lo C M, Weng M C. 2017. Identification of deformation and failure characteristics in cataclinal slopes using physical modeling[J]. Landslides, 14(2): 499-515.

Nemcok A, Pasek J, Rybar J. 1972. Classification of landslides and other mass movements[J]. Rock Mechanics, 4: 71-78.

Pant S R, Adhikary D P. 1999. Implicit and explicit modelling of flexural buckling of foliated rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 32(2): 157-164.

Pei Z W, Zhang Y J, Nian T K, Song X L, Zhao W. 2023a.

Performance investigation of micropile groups in stabilizing unstable talus slopes via centrifuge model tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 60(3): 351-365.

Pei Z W, Zhang Y J, Nian T K, Xiao S G, Liu H S. 2023b. Cross-Scale Analysis on the Working Performance of Micropile Group and Talus Slope System[J]. Sustainability, 15: 8154.

Pereira L C, Lana M S. 2013. Stress-strain analysis of buckling failure in phyllite slopes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 31(1): 297-314.

Qi S W, Lan H X, Dong J Y. 2015. An analytical solution to slip buckling slope failure triggered by earthquake[J]. Engineering Geology, 194: 4-11.

Qin S, Jiao J J, Wang S. 2001. A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 34(2): 119-134.

Ridl R N, Bell D H, Villenueve M C, Macfarlane D F. 2021. A simple method to model buckling slope instability using continuum numerical models[M]. //The Evolution of Geotech-25 Years of Innovation. CRC Press: 443-449.

Scoble M J. 1981. Studies of Ground Deformation in British Surface Coal Mines [D]. Nottingham: University of Nottingham, Mining Engineering Department.

Seale J. 2007. An Engineering Geological Investigation of Footwall Toe-Buckle Instability at the Malvern Hills Opencast Coal Mine[D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.

Stead D, Eberhardt E. 1997. Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining[J]. Engineering Geology, 46(1): 41-61.

Shou K J, Wang C F. 2003. Analyis of the Chiufengershan landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. Engineering Geology, 68(3-4): 237-250.

Silva C, Lana M S. 2014. Numerical modeling of buckling failure in a mine slope[J]. Revista Escola de Minas, 67(1): 81-86.

Tommasi P, Campedel P, Consorti C, Ribacchi R. 2008. A discontinuous approach to the numerical modelling of rock avalanches[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 41(1): 37-58.

Tommasi P, Verrucci L, Campedel P, Veronese L, Pettinelli E, Ribacchi R. 2009. Buckling of high natural slopes: the case of lavini di marco (trento-Italy)[J]. Engineering Geology, 109: 93-108.

Wang B, Cavers D S, Wong B C. 2004. Surface buckling failure study and support design at the Quintette coal mine, Canada[M]. // Lacerda W, et al. , eds. Landslides: Evaluation and Stabilization. London: CRC Press: 475-480.

Wang Q S, Zhang R T, Zheng H, Zhou P Z. 2023. An analytical solution of critical sliding displacement for the flexural buckling failure of layered rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 169: 105450.

Weng M C, Lo C M, Wu C H, Chuang T F. 2015. Gravitational deformation mechanisms of slate slopes revealed by model tests and discrete element analysis[J]. Engineering Geology, 189: 116-132.

Weng M C, Chen T C, Tsai S J. 2017. Modeling scale effects on consequent slope deformation by centrifuge model tests and the discrete element method[J]. Landslides, 14(3): 981-993.

Zhang Q, Hu J, Du Y L, Gao Y, Li J Z. 2021. A laboratory and field-monitoring experiment on the ability of anti-slide piles to prevent buckling failures in bedding slopes[J]. Environmental Earth Sciences, 80: 44.

Zhang S C, Fan Q Y, Niu Y F, Qiu S C, Si J Z, Feng Y H, Zhang S Q, Song Z W, Li Z H. 2020. Two-dimensional deformation monitoring for spatiotemporal evolution and failure mode of Lashagou landslide group, Northwest China[J]. Landslides, 20: 447-459.

Zhang Y J, Nian T K, Guo X S, Chen G Q, Zheng L. 2019. Modelling the flexural buckling failure of stratified rock slopes based on the multilayer beam model[J]. Journal of Mountain Sciences, 16(5): 1170-1183.

Zhao S Y, Chigira M, Wu X Y. 2018. Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China[J]. Engineering Geology, 246: 187-197.

Zhou C, Cao Y, Yin K L, Wang Y, Shi X G, Catani F, Ahmed B. 2020. Landslide characterization applying Sentinel-1 images and Insar technique: the Muyubao Landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Remote Sensing, 12: 3385.