

岩质边坡倾倒变形的地质特征、灾变机制与稳定性分析方法

刘才华^{1,2*}, 范凯^{1,2}, 孙朝焱^{1,2}, 张伟^{1,2}, 袁家好^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 岩质边坡倾倒破坏是典型的边坡灾害类型之一, 受复杂地质赋存环境和外部营力的影响, 边坡倾倒变形及灾变演化机制异常复杂。系统开展边坡倾倒变形地质特征、破坏类型与灾变机制研究, 进而建立相应的倾倒稳定性评价方法是当前边坡工程亟待解决的课题。通过收集我国近 220 余例岩质边坡倾倒破坏典型案例, 分析倾倒变形体在我国的区域分布规律, 探讨边坡高度、坡角、岩层倾角及岩性等关键要素与倾倒破坏的成因关系, 揭示倾倒变形体孕育的地质赋存特征。在总结现有岩质边坡倾倒分类方法的基础上, 以主控结构面与边坡产状关系、倾倒变形的主导或从属地位、岩体变形运动特征以及倾倒变形岩层组合特征为依据, 提出倾倒变形大类、子类、亚类和小类全面系统的倾倒破坏四层次分类法。分析块体、弯曲、复合等典型倾倒破坏变形特征, 结合物理模型试验及数值模拟揭示块体倾倒、弯曲倾倒、复合倾倒类型的灾变机制。在此基础上, 系统介绍 G&B 法、拟连续介质法、传递系数法、悬臂梁法及复合分析法的基本原理, 剖析这些评价倾倒变形的理论模型的局限性及其演进趋势。研究成果对边坡工程理论和实践具有重要支撑意义。

关键词: 边坡工程; 岩质边坡; 倾倒破坏; 地质特征; 倾倒分类; 破坏机制; 稳定性分析

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)03-0639-29

***通信作者:** 刘才华 (1974-), 现任研究员, 主要从事边坡工程、岩体水力学及地质灾害防治方面的研究工作。

E-mail: chliu@whrsm.ac.cn

Geological characteristics, disaster mechanisms and stability analysis methods of rock slope toppling

LIU Caihua^{1,2*}, FAN Kai^{1,2}, SUN Chaoyi^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, YUAN Jiahao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Toppling failure is a typical type of disaster associated with rock slopes. The deformation behaviors and mechanisms underlying the evolution of rock slope toppling are complex, influenced by adverse geological conditions and external loads. Investigating the deformation characteristics, failure modes, and disaster mechanisms of rock slope toppling, as well as proposing methods for stability evolution, are urgent issues in slope engineering. Approximately 220 cases of toppling slopes in China have been collected, and the regional distribution of these cases is presented. The relationships between toppling failure and several key factors, such as slope height, slope angle, terrain obliquity, and lithology, are thoroughly analyzed. Building on existing

收稿日期: 2025-06-03; **修回日期:** 2025-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42277168); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (12102443)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42277168) and Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12102443)

classification methods for rock slope toppling, a four-level classification method is proposed based on the tendency relationship between the dominant discontinuity and the slope, the dominant or subordinate status of toppling deformation, the deformation characteristics of the toppling body, and the combination of toppling strata. The deformation behaviors and failure mechanisms of typical toppling types, including block toppling, flexural toppling, and composite toppling, are revealed through a combination of physical model tests and numerical simulations. Systematic presentations of stability analysis approaches, including the G&B method, equivalent continuum method, Liu method, cantilever beam method, and composite analysis method, are provided, along with discussions on their limitations and evolving trends. This research is expected to serve as an important reference for theoretical studies and engineering practices related to rock slope toppling.

Key words: slope engineering; rock slopes; toppling failure; geological characteristics; toppling classification; failure mechanism; stability analysis

***Corresponding author:** LIU Caihua (1974 -), research fellow, is engaged in slope engineering, rock hydraulics, and prevention and control of geological disaster. E-mail: chliu@whrsm.ac.cn

1 引 言

中国幅员辽阔,地质构造复杂,受多样的地形地貌与气候条件影响,地质灾害呈现出分布广、数量多、发生频繁、损失严重等特征^[1-4]。据国家统计局数据显示,2005~2023 年全国发生地质灾害 32.8 万处,累计造成 1.4 万人次伤亡及 720.19 亿元直接经济损失^[5],其中滑坡类灾害年平均占比达 71%。值得注意的是,在岩质边坡失稳中,倾倒破坏占比高达 30%~40%^[6-7]。作为滑坡灾害的一种典型模式,岩质边坡倾倒破坏往往发生于具有较高稳定性的反倾边坡中,而顺倾边坡则因滑移破坏特征显著而较少关注其倾倒变形风险^[8-10]。

我国最早记录的倾倒变形破坏现象始于金川露天矿边坡,该边坡在 1973~1977 年间发生 15 m 的累进性山体变形,并于 1990 年引发近 30 万 m³ 的岩体坍塌,对露天矿开采形成严重威胁^[11-13]。随着国家“西部大开发”与“一带一路”倡议的深入实施,水利水电、交通基建及矿山开采等领域的工程活动日益频繁,大规模的倾倒破坏案例不断被发现和揭露。2017 年,云南省云龙县澜沧江功果桥水电站上游右岸边坡在蓄水后产生倾倒变形,随后在连日暴雨下发生整体坍塌,滑坡总量高达 150 万 m³^[14-15];四川雅砻江锦屏一三滩河段发育的河谷倾倒变形带,延展长度达 10 km,最大水平影响深度达 300 m^[16]。此外,四川旭龙、甘肃碧口镇及白龙江水泊峡等水电站库区,均发现规模达数千万立方米的特大型倾倒岩质滑坡群^[17-19]。

倾倒岩质边坡变形演化的多阶段性、灾变过程

的强隐蔽性及突发性等特点,其破坏机制及稳定性评价等与其他类型滑坡存在显著差异。许多学者采用工程地质分析、理论计算、物理试验及数值模拟等手段,对岩质边坡倾倒变形特征与分类、倾倒破坏机制、稳定性分析方法等方面展开研究。R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]根据反倾边坡变形特征,提出块体、弯曲、复合与次生倾倒概念;D. M. Cruden 和 X. Q. Hu^[21]则针对顺倾边坡划分出块体弯曲、多重块体和人字型倾倒 3 种类型,并指出倾倒类型受块体形状、节理面产状、岩石强度、外力及地形等因素影响。在破坏机制方面,鉴于外部环境因素及边坡不同倾倒类型变形演化规律的显著差异,D. P. Adhikary 等^[22-26]开展了倾斜台试验、底摩擦试验、振动台试验及离心机试验,探究不同工况条件下块体、弯曲、复合及其他倾倒模式的致灾机制及其变形演化特征。通过构建连续与非连续介质模型,结合数值流形法、有限元法、离散元法及颗粒流法等计算手段,对边坡倾倒破坏机制进行数值模拟分析也取得了一些进展^[27-33]。理论研究方面,R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]基于极限平衡首次提出块体倾倒 G&B 法并得到了广泛应用与推广。陈祖煜等^[34-36]指出,G&B 模型中 2 组正交的贯通主控结构面与工程实际存在一定差异,导致计算结果存在误差,并在此基础上对 G&B 模型进行了改进。C. H. Liu 等^[37]将倾倒变形体视为拟连续介质,提出了快速识别块体倾倒破坏的拟连续介质分析方法,并给出了微元体倾倒破坏链式传递过程中倾倒与滑动模式转变临界点的判别准则。考虑到 G&B 法的繁琐性及拟连续介质法的近似性,C. H. Liu 等^[38-39]定义并引入传递系数和等效倾倒质量 2

个参数,提出了边坡倾倒破坏分析的 Liu 模型,该模型将复杂的转动平衡力学问题从形式上简化为块体间力传递的平动平衡问题,因计算简便、实用性强等优点得到了广泛应用与发展。Ö. Aydan 等^[40-41]针对柔性弯曲倾倒提出了基于极限平衡的悬臂梁理论模型。卢海峰等^[42-45]从层面作用集中力位置、弯曲破坏基准面、岩层临界失稳高度值等方面对模型进行了修正完善。对于复合倾倒、次生倾倒及顺倾边坡的破坏模式,近年来也建立了相应理论分析方法^[46-51]。

以上研究成果为岩质边坡倾倒破坏理论体系构建与工程应用实践奠定了重要基础,推动了对不同类型倾倒破坏机制的深入认识。但现有研究多聚焦于单一倾倒类型,对不同类型倾倒破坏的特点、机制及理论方法缺乏系统性总结与分析。本文收集整理了我 220 余例岩质边坡倾倒变形破坏案例,系统分析了倾倒变形体的区域分布规律,以及边坡坡高、坡角、岩层倾角、岩性等关键要素与倾倒破坏的成生发育关系,揭示了倾倒变形体孕育发展的地质赋存环境,总结了岩质边坡倾倒分类方法,并在 G&B 分类法基础上,基于不同的分类原则提出边坡倾倒破坏四层次分类方法。进一步,构建边坡倾倒的地质模型,通过理论解析、物理模型试验及数值模拟等方法,阐述岩质边坡倾倒变形演化特征及破坏机制。最后,探讨了岩质边坡倾倒变形研究面临的难点与理论瓶颈,旨在为我国岩质边坡倾倒灾害研究及工程建设提供科学依据与实践参考。

2 岩质边坡倾倒案例统计与分析

边坡倾倒变形破坏主要发生在反倾岩质边坡,相关研究也主要聚焦于反倾岩质边坡,顺倾岩质边坡的倾倒案例与研究成果则相对较少。本文在系统收集国内 170 余例反倾岩质边坡倾倒案例的基础上(见表 1^[7, 52-62]),进一步整理近 50 例顺倾边坡倾倒案例(见表 2^[62-67]),详细统计分析了与这些倾倒变形体相关的区域分布、岩性、边坡高度、坡角与岩层倾角等工程地质特征,为岩质边坡倾倒灾变机制与控稳研究提供充分的数据基础与地质依据。

2.1 倾倒变形体区域分布

我国岩质边坡倾倒变形具有显著的区域集中特征。从表 1, 2 中案例可以发现,岩质边坡倾倒变形主要分布在四川、云南、青海、西藏等西南地区。

新疆、甘肃等西北地区及其他地区有少量分布,主要集中在我国地势的第一、二级阶梯过渡带,呈现出明显的高程梯度效应特征。

在流域分布上,近 70% 的倾倒变形体发育在长江、黄河、澜沧江主要流域及其所属的金沙江、雅砻江、大渡河等干支流附近,形成典型的“河谷线性分布带”,其余倾倒变形则发生在无水源性地区,具体流域分布见图 1。

可以发现,倾倒变形体的空间区域分布特征主要表现为沿河流与大陆地形坡度陡降带分布,说明在新构造运动下,强烈的差异升降运动形成高陡的临空面,为岩质边坡倾倒变形提供了必要的边界条件,同时改变了坡体应力分布状态,加速边坡倾倒变形的孕育与发展。

2.2 倾倒变形体几何参数统计

倾倒变形体的几何参数体系包括边坡高度、坡角、岩层倾角、层厚、倾倒发育宽度及深度等关键指标。其中,岩层厚度受沉积环境与后期构造改造的双重控制,具有显著的空间变异性;倾倒发育宽度与深度常需通过平硐勘探或物探技术获取,但受限于成本与精度,工程中仅能获取局部数据。在本文整理的倾倒变形体案例中,岩层厚度与倾倒发育宽度及深度的资料非常不充分。鉴于此,下文聚焦较容易获取且与边坡倾倒稳定性高度相关的边坡坡高、坡角及岩层倾角 3 个参数进行量化统计分析。

坡高是影响岩质边坡倾倒稳定性的重要因素,坡高越大,坡体自重对边坡稳定性影响就越大,岩体更容易出现拉裂、剪切等破坏现象。图 2 统计了本文收集的倾倒变形体的坡高分布及其占比,发现倾倒变形体在空间分布上呈现显著的离散特性,倾倒变形破坏现象的坡高分布范围从数十米到近千米,但绝大部分为百米级以上的高边坡。

其中,反倾边坡坡高主要集中在 100~400 m 范围,占统计案例的 70%;顺倾边坡坡高主要集中在 200~500 m 范围,占统计案例的 72%。可以看出,顺倾边坡集中区段的坡高总体大于反倾边坡,二者的坡高平均值分别为 367 和 332 m。说明边坡在抵抗重力作用下发生倾倒变形时,顺倾边坡因结构面与坡面倾向一致而具备更强的抗倾倒能力,而反倾边坡则因结构面与坡面倾向相反,更易在重力作用下发生转动或挠曲变形,导致倾倒失稳。

表 1 我国反倾边坡倾倒变形体不完全统计^[7, 52-62]

Table 1 Incomplete statistics of toppling deformation bodies of anti-dip slopes in China^[7, 52-62]

序号 (serial No.)	省份 (pro- vince)	流域 (river basin)	案例名称 (case name)	坡高 (slope height)/ m	坡角 (slope angle)/ (°)	岩层倾角 (rock dip angle)/ (°)	序号 (serial No.)	省份 (pro- vince)	流域 (river basin)	案例名称 (case name)	坡高 (slope height)/ m	坡角 (slope angle)/ (°)	岩层倾角 (rock dip angle)/ (°)
1	安徽	长江	皖南山区 III-2 号 倾倒体	60	45	-	44	安徽	长江	皖南山区 III-7 号 倾倒体	29	40	-
2	安徽	长江	皖南山区 III-9 号 倾倒体	35	44	-	45	安徽	长江	水电站马河段滑坡	-	45	-
3	安徽	长江	皖南山区 III-11 号 倾倒体	47	37	-	46	甘肃	洮河	多松多厂房边坡	85	40	58
4	甘肃	疏勒河	昌马水库右岸山体	150	50	77	47	甘肃	白龙江	麒麟寺倾倒体	300	45	79
5	甘肃	白龙江	碧口水电站倾倒体	75	34	75	48	甘肃	白龙江	碧口泄洪洞倾倒体	180	34	75
6	甘肃	-	金川露天矿边坡	264	39	70	49	广西	南盘江	天生桥厂房南侧坡	70	65	65
7	广西	红水河	龙滩左岸边坡	400	30	60	50	广西	红水河	龙滩左岸倾倒体	330	36	60
8	广西	红水河	龙滩厂房进水口边坡	330	39	58	51	广西	防城河	白石牙厂房边坡体	120	41	55
9	贵州	乌江	渡水电站黄崖边坡	300	50	52	52	贵州	石鼓	虎跳峡龙蟠右岸 斜坡	300	40	55
10	河南	黄河	小浪底电站倾倒体	180	35	16	53	河南	黄河	小浪底库区岸边坡	-	23	-
11	湖北	长江	黄腊石边坡	760	33	30	54	湖北	盐池河	磷矿山体崩塌	350	85	15
12	湖北	清江	隔河岩厂房边坡	185	51	29	55	湖北	-	兴山县档案馆变 形体	60	35	-
13	湖南	资江	浪石滩边坡	170	43	27	56	湖南	资江	敷溪口右岸边坡	270	38	40
14	湖南	沅水	五强溪左岸边坡	150	30	60	57	辽宁	-	抚顺西露天矿边坡	400	28	-
15	青海	黄河	龙羊峡水电站边坡	302	38	65	58	青海	黄河	阳台滑坡	250	25	-
16	青海	黄河	拉西瓦水电站	500	45	77	59	青海	黄河	茨哈峡电站倾倒体	340	44	-
17	青海	黄河	茨哈峡电站库区坡	260	37	67	60	青海	黄河	龙羊峡大型滑坡群	400	40	45
18	青海	黄河	茨哈峡 1 号倾倒体	200	40	-	61	青海	黄河	茨哈峡 4 号倾倒体	284	43	-
19	青海	黄河	茨哈峡 2 号倾倒体	210	43	80	62	青海	黄河	茨哈峡 3 号倾倒体	162	42	76
20	青海	黄河	茨哈峡 5 号倾倒体	213	44	75	63	青海	黄河	茨哈峡 6 号倾倒体	137	45	76
21	青海	黄河	公伯峡古什倾倒体	200	55	60	64	青海	黄河	羊曲水电站倾倒体	200	40	-
22	青海	黄河	拉西瓦水电站倾倒体	400	42	70	65	青海	黄河	拉西瓦果卜 2 号变 形体	700	50	-
23	青海	黄河	班多电站 1 号倾倒体	360	42	70	66	青海	黄河	茨哈峡进水口倾 倒体	160	50	55
24	青海	黄河	茨哈峡 10 号倾倒体	170	50	60	67	青海	黄河	拉西瓦 II 号变形体	150	53	-
25	青海	黄河	茨哈峡电站 4 号变 形体	360	43	70	68	青海	黄河	茨哈峡电站 6 号变 形体	410	52	70
26	青海	黄河	拉西瓦果卜岸坡倾 倒体	700	43	65	69	青海	黄河	龙洼沟右岸 3 号倾 倒体	260	54	73
27	青海	黄河	龙洼沟左岸 2 号倾 倒体	200	53	80	70	青海	黄河	龙洼沟 5 号、6 号 倾倒体	210	55	76
28	陕西	渭河	石家磨左岸倾倒体	150	52	75	71	陕西	汉江	高速公路反倾斜坡	40	40	70
29	陕西	汉江	沥水沟渡槽倾倒体	60	37	77	72	四川	长江	黑水河右岸边坡	550	43	53
30	四川	杂谷脑	二古溪边坡	400	35	55	73	四川	杂谷脑	西山村滑坡群	500	27	70
31	四川	雅砻江	格尼 1 号倾倒体	348	50	75	74	四川	雅砻江	锦屏水文站滑坡	300	25	45
32	四川	雅砻江	解放沟左岸边坡	-	43	37	75	四川	雅砻江	锦屏四家人滑坡	320	42	85
33	四川	雅砻江	锦屏水电站倾倒体	180	35	-	76	四川	雅砻江	格尼 2 号变形体	332	52	75
34	四川	雅砻江	新龙坝前倾倒体	300	50	80	77	四川	雅砻江	三滩坝址左岸边坡	600	50	45
35	四川	雅砻江	格尼协比夏变形体	420	47	75	78	四川	雅砻江	锦屏右岸倾倒体	240	45	80
36	四川	雅砻江	锦屏电站河谷滑坡	230	45	60	79	四川	雅砻江	左岸加多沟倾倒体	142	43	65
37	四川	雅砻江	锦屏水文站坝址边坡	460	38	75	80	四川	雅砻江	锦屏水电站呷巴 滑坡	450	25	65
38	四川	雅砻江	锦屏解放沟坝址变 形体	500	45	55	81	四川	雅砻江	共科水电站麻日 滑坡	950	40	70
39	四川	雅砻江	乐安水电站林达滑坡	680	40	80	82	四川	雅砻江	锦屏水电站高位 边坡	600	50	35
40	四川	雅砻江	锦屏杨房沟滑坡	240	45	86	83	四川	雅砻江	锦屏水文站矮子 沟滑坡	450	45	86
41	四川	雅砻江	共科库区堤坝变形体	269	41	87	84	四川	雅砻江	新龙近坝右岸倾 倒体	300	42	80
42	四川	雅砻江	格尼电站 1 号变形体	348	50	-	85	四川	雅砻江	格尼电站 2 号变 形体	332	52	-
43	四川	雅砻江	水电站进水口边坡	220	45	-	86	四川	雅砻江	锦屏三滩坝址左 岸边坡	150	50	45

续表 1

序号 (serial No.)	省份 (pro- vince)	流域 (river basin)	案例名称 (case name)	坡高 (slope height)/ m	坡角 (slope angle)/ (°)	岩层倾角(rock dip angle)/ (°)	序号 (serial No.)	省份 (pro- vince)	流域 (river basin)	案例名称 (case name)	坡高 (slope height)/ m	坡角 (slope angle)/ (°)	岩层倾角 (rock dip angle)/ (°)
87	四川	雅砻江	锦屏解放沟段左岸边坡	550	45	50	131	四川	雅砻江	锦屏普斯罗沟坝址边坡	650	55	42
88	四川	雅砻江	乐安库区林达滑坡	500	40	65	132	四川	雅砻江	两河口庆大河口变形体	300	45	57
89	四川	岷江	狮子坪二古溪边坡	750	35	77	133	四川	梁家河	赵子秀山变形体	150	60	-
90	四川	金沙江	巴塘左坝肩倾倒体	265	40	81	134	四川	金沙江	向家坝马步坎边坡	600	55	25
91	四川	黑水河	毛儿盖电站滑坡	65	50	-	135	四川	涪江	水牛家右坝倾倒体	150	42	82
92	四川	大渡河	阿觉利倾倒体	320	30	77	136	四川	大渡河	瀑布沟水电站边坡	300	40	70
93	四川	大渡河	瀑布沟右岸变形体	457	45	62	137	四川	大渡河	新扎沟左侧变形体	340	43	70
94	四川	大渡河	金川水电站变形体	400	50	55	138	四川	大渡河	瀑布沟 1 号倾倒体	150	43	-
95	四川	大渡河	瀑布沟 2 号倾倒体	240	40	-	139	四川	大渡河	金川左岸进水口边坡	160	45	57
96	四川	大渡河	金川公路隧道进口边坡	-	38	-	140	四川	-	华市溪口滑坡	350	35	41
97	四川	-	安县白什乡滑坡	400	45	55	141	四川	-	川藏公路茶树山滑坡	300	47	66
98	四川	-	二古溪公路隧道边坡	750	45	-	142	西藏	雅砻江	林达倾倒体	680	50	80
99	西藏	雅砻江	新龙倾倒体	310	48	80	143	西藏	雅江	加查滑坡	150	45	45
100	西藏	雅江	老虎嘴洞口倾倒体	160	42	77	144	西藏	雅江	老虎嘴水电站 1 号倾倒体	150	43	83
101	西藏	雅江	老虎嘴水电站 2 号倾倒体	240	40	82	145	西藏	怒江	俄米 1 倾倒变形体	546	50	77
102	西藏	怒江	俄米坝前 2 号倾倒体	550	60	70	146	西藏	怒江	俄米右岸 2 号倾倒体	400	55	77
103	西藏	澜沧江	如美水电站倾倒体	350	40	-	147	西藏	澜沧江	如美电站坝址边坡	300	35	75
104	西藏	澜沧江	如美电站中坝址区倾 倒体	385	40	72	148	西藏	金沙江	甲西倾倒体	420	60	73
105	西藏	金沙江	右岸贡扎滑坡	720	58	63	149	新疆	渭干河	克孜尔右坝肩边坡	350	44	80
106	新疆	渭干河	克孜尔河克孜尔倾倒体	110	50	80	150	新疆	开都河	哈尔嘎廷郭勒倾倒体	150	41	70
107	新疆	-	公路右岸倾倒体	250	50	-	151	云南	雅砻江	新龙近坝右岸边坡	310	50	79
108	云南	雅砻江	新龙坝前倾倒变形体	300	50	-	152	云南	雅砻江	新龙右岸坝肩倾倒体	240	45	-
109	云南	怒江	怒江桥坝前左岸倾倒体	680	50	76	153	云南	澜沧江	里底水电站滑坡	145	39	73
110	云南	澜沧江	争岗滑坡堆积体	1 040	35	82	154	云南	澜沧江	苗尾电站坝区边坡	300	38	55
111	云南	澜沧江	小湾饮水沟堆积体	200	35	75	155	云南	澜沧江	里底坝址右岸边坡	150	39	73
112	云南	澜沧江	根达坎滑坡堆积体	750	40	86	156	云南	澜沧江	小湾水电站 6 号变形体	200	37	75
113	云南	澜沧江	黄登 1 号倾倒变形体	540	40	75	157	云南	澜沧江	苗尾水电站右岸变形体	250	37	82
114	云南	澜沧江	古水电站坝前倾倒体	400	40	82	158	云南	澜沧江	苗尾右岸坝肩倾倒体	320	60	81
115	云南	澜沧江	苗尾水电站坝肩倾倒体	250	40	85	159	云南	澜沧江	黄登水电站坝址区边坡	250	50	55
116	云南	澜沧江	小湾水电站倾倒体边坡	280	35	75	160	云南	澜沧江	黄登水电站右岸 1 号边坡	350	38	75
117	云南	澜沧江	黄登水电站右岸 7 号边坡	350	37	75	161	云南	澜沧江	古水水电站边坡倾倒体	300	32	80
118	云南	澜沧江	古水水电站堆积体岸坡	900	32	33	162	云南	澜沧江	古水电站右岸争岗滑坡	800	40	72
119	云南	澜沧江	黄登近坝库 2 号倾倒体	350	40	82	163	云南	澜沧江	黄登右坝肩 1 号倾倒体	270	53	82
120	云南	澜沧江	苗尾三颗石河左岸边坡	468	30	71	164	云南	澜沧江	糯扎渡导流洞进口滑坡	190	36	63
121	云南	澜沧江	乌弄龙坝址右岸倾倒体	330	60	70	165	云南	澜沧江	小湾电站饮水沟倾倒体	160	42	85
122	云南	澜沧江	苗尾电站右岸坡倾倒体	410	38	55	166	云南	澜沧江	乌弄龙水电站巴东岸坡	350	43	-
123	云南	澜沧江	小湾水电站左岸倾倒体	200	43	85	167	云南	澜沧江	小湾水电站右岸坝前 边坡	375	58	55
124	云南	澜沧江	小湾饮水沟 2 号山梁边坡	-	-	83	168	云南	金沙江	龙头水库倾倒体	160	43	83
125	云南	金沙江	溪洛渡星光 3 组变形体	-	35	80	169	云南	金沙江	溪洛渡星光三组变形体	480	35	80
126	云南	金沙江	溪洛渡星光三组倾倒体	950	37	80	170	云南	金沙江	溪洛渡星光 4 组变形体	250	50	-
127	重庆	长江	三峡库区杨家水井滑坡	150	42	60	171	重庆	长江	中梁硝洞槽郑家沟岸坡	60	53	82
128	重庆	长江	三峡库区龚家方 2 号斜坡	323	52	58	172	重庆	长江	三峡库区龚家方 4 号斜坡	410	50	50
129	重庆	长江	三峡库区茅草坡反倾斜坡	284	49	55	173	重庆	长江	三峡左岸岸坡 I 号倾倒体	400	42	-
130	重庆	乌江	鸡冠岭岩质斜坡	400	37	70	174	重庆	大宁河	郑家大沟岸坡体	657	47	52

注：若案例中坡角、岩层倾角在范围值内则取其平均值进行统计。

表 2 我国顺倾边坡倾倒变形体不完全统计^[62-67]

Table 2 Incomplete statistics of toppling deformation bodies of layered slopes in China^[62-67]

序号 (serial No.)	省份 (province)	流域 (river basin)	名称(case name)	岩性(lithology)	坡高(slope height)/m	坡角(slope angle)/(°)	岩层倾角 (rock dip angle)/(°)
1	云南	金沙江	龙头水库电站 1#倾倒变形体	砂岩、板岩	160	42.5	77.5
2	云南	澜沧江	沧江桥滑坡体	板岩、砂岩	300	35	77.5
3	云南	澜沧江	大华桥下坝址左岸堆积体	板岩	300	45	77.5
4	云南	澜沧江	大华桥上坝线左岸边坡	板岩、石英砂岩	400	55	82.5
5	云南	澜沧江	大华桥中坝线左岸边坡	板岩、石英砂岩	300	52	82.5
6	云南	澜沧江	沧江桥地面厂房后边坡	绢云母板岩	460	38~45	82.5
7	云南	澜沧江	尾水隧洞出口边坡	板岩、石英砂岩	275	40	80
8	云南	金沙江	溪洛渡水库星光三组变形体	泥灰岩、砂质页岩、砂岩、粉砂岩、白云岩	790	37.5	79.5
9	云南	澜沧江	乌弄龙水电站倾倒变形体	砂板岩互层	290	66	75.5
10	云南	怒江	嘎达滑坡	石英砂岩夹粉砂质、含炭泥质板岩	650	35	68.5
11	云南	怒江	拥忠卡滑坡	粉砂质、砂质板岩, 石英砂岩	421	37.5	69
12	云南	怒江	前进滑坡	砂质板岩、石英砂岩	649	30	77.5
13	西藏	怒江	俄米水电站坝前 1#变形体	变质粉细砂岩	446	42.5	77.5
14	西藏	金沙江	金沙江特米滑坡	黑云母石英片岩	500	35.5	65.5
15	西藏	怒江	俄米水电站格日变形体	变质粉细砂岩、千枚状板岩	490	52.5	77
16	西藏	雅砻江	中下游水电站进水口边坡	变质粉砂岩	220	50	79.5
17	台湾	-	中央山区深层重力边坡变形体	砂岩、页岩	500	33.5	55
18	四川	长江	毛尔盖电站右坝肩变形体	千枚岩、炭质千枚岩、变质砂岩	160	55	79.5
19	四川	雅砻江	两河口水电站 3#公路隧道出口	绢云母板岩	300	50	75
20	四川	-	青川县城桅杆梁北侧坡	千枚岩、变质粉砂岩	100	37.5	82.5
21	四川	岷江	狮子坪水库库区右岸坡	变质砂岩、千枚状板岩	320	40	86
22	四川	雅砻江	锦屏一级水电站水文站滑坡	大理岩及片岩、钙质绿片岩、绿片岩	480	40	57.5
23	四川	雅砻江	水文站滑坡	粉砂质板岩、细砂岩、片岩、大理片岩	540	37.5	86
24	四川	雅砻江	两河口库区索依村滑坡	板岩夹千枚岩	360	75	88
25	四川	雅砻江	雅砻江右岸某边坡	砂质及炭质板岩、变质砂岩、大理岩	800	37.5	62.5
26	四川	冷水河	刘家拱桥水库引水渠沿线滑坡	灰岩、白云岩	160	31	71.5
27	四川	大渡河	金川水电站新扎沟倾倒体	变质砂岩与板岩、千枚岩	350	39	55
28	四川	雅砻江	卡拉水电站库区八通滑坡	大理岩、变质砂岩	550	42.5	69.5
29	四川	-	青川县城桅杆梁不稳定斜坡	千枚岩, 夹变质粉砂岩	338	39	56
30	四川	-	汶川县水磨沟滑坡	板岩同炭质、硅质页岩互层	340	50	67.5
31	四川	涪江	水牛家水电站右坝肩变形体	变质砂岩与板岩、千枚岩	250	47.5	79.5
32	四川	雅砻江	两河口水电站倾倒变形体	变质粉砂岩夹板岩	210	45	69.5
33	青海	黄河	茨哈多宗龙洼沟左岸 4#倾倒体	砂岩、板岩	200	40	80
34	青海	黄河	茨哈多宗龙洼沟左岸 1#倾倒体	砂岩、板岩	284	43	73.5
35	青海	黄河	羊曲水电站近坝区边坡	千枚状板岩、千枚岩	330	40	72
36	青海	-	西北一水电站坝址区变形体	板岩、砂岩	350	42.5	72.5
37	青海	黄河	拉西瓦水电站坝肩II号变形体	花岗岩	250	60	88
38	青海	黄河	黄河李家峡II#滑坡	混合岩	310	45.5	46.5
39	青海	黄河	羊曲水电站倾倒变形体	变质长石砂岩、粉砂岩	350	45.5	72
40	湖南	-	黎家洞滑坡	砂质板岩	300	37.5	70
41	广东	-	蕉叶坪公路边坡	板岩	350	45	75
42	甘肃	嘉陵江	青崖岭滑坡	绢英千枚岩、变质凝灰岩	480	61	83
43	甘肃	嘉陵江	孟家干沟滑坡	绢英千枚岩、变质凝灰岩	160	42.5	76
44	甘肃	嘉陵江	水泊峡电站大坝 VII#滑坡	绢英千枚岩、板岩	425	50	77.5
45	甘肃	嘉陵江	白龙江苗家坝水电站何家滑坡	变质凝灰岩、板岩	510	47.5	49
46	-	雅砻江	雅砻江某滑坡	白云岩	320	40	49.5

注: 若案例中坡角、岩层倾角是范围值则取其平均值进行统计。

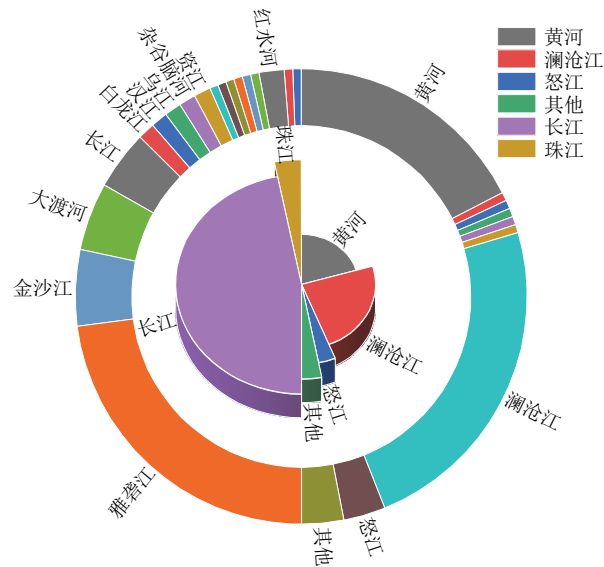


图 1 我国岩质边坡倾倒变形体流域分布(不完全统计)

Fig.1 Watershed distribution of toppling deformation bodies of rock slopes in China(incomplete data)

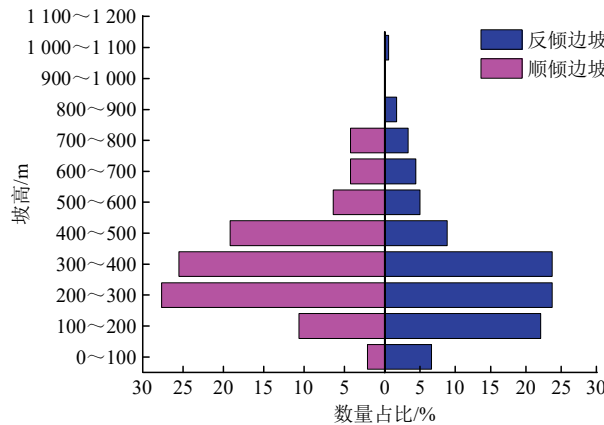
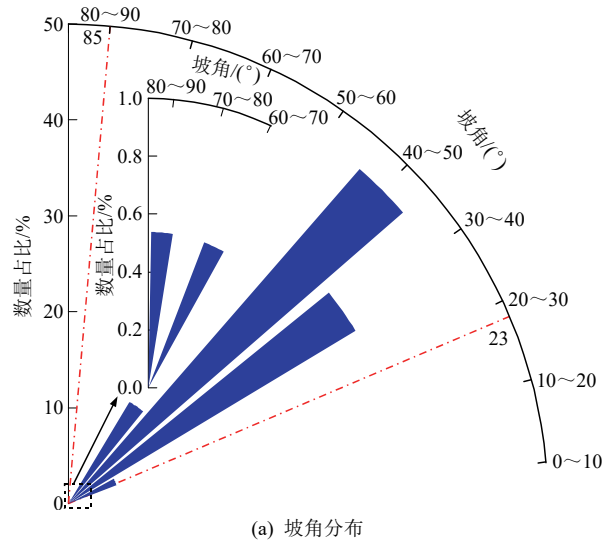


图 2 岩质边坡倾倒变形体坡高分布

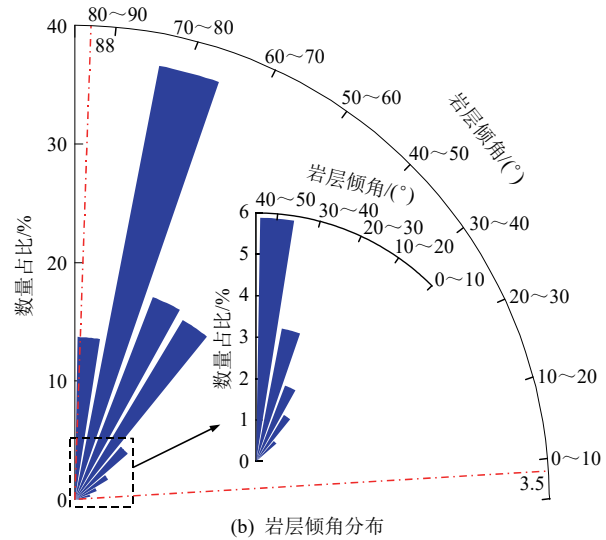
Fig.2 Slope height distribution of rock slope toppling deformation bodies

坡角、岩层倾角作为边坡控稳的关键要素，对岩质边坡倾倒稳定性有着显著影响，不利的坡角与岩层倾角组合会改变岩体内部剪应力和拉应力分布，使得岩体更容易发生倾倒变形。为直观说明坡角、岩层倾角及其组合与倾倒变形的关系，绘制反倾及顺倾边坡统计案例的岩层倾角与坡角分布，如图 3，4 所示。

可以看出，反倾边坡统计案例中坡角与岩层倾角界值范围分别为 $23^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 和 $3.5^{\circ} \sim 88^{\circ}$ ，离散程度较高；边坡破坏时，坡角与岩层倾角的高频范围分别为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，分别占统计数量的 91% 和 89%，该范围可作为反倾边坡破坏的优势坡角和优势岩层倾角区间。



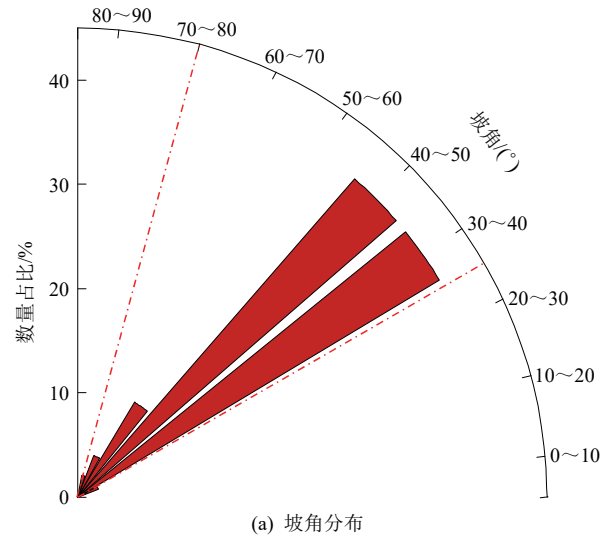
(a) Slope angle distribution



(b) Rock dip angle distribution

图 3 反倾边坡坡角与岩层倾角统计

Fig.3 Statistics of slope angle and rock dip angle of anti-dip slopes



(a) Slope angle distribution

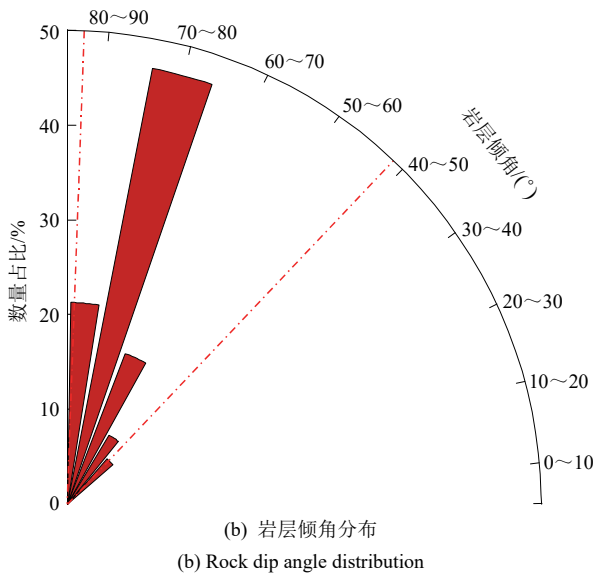


图4 顺倾边坡坡角与岩层倾角统计分布

Fig.4 Statistical distribution of slope angle and rock dip angle of layered slopes

相比之下,顺倾边坡坡角与岩层倾角范围离散程度较低,集中在 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 和 $46.5^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 范围,其中坡角分布在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 与岩层倾角分布在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围的顺倾边坡分别占统计数量的92%和85%,该范围可作为顺倾边坡破坏的优势坡角和优势岩层倾角区间。

安晓凡等^[68]曾将岩层倾角与坡角之和定义为边坡特征角,并指出反倾边坡特征角基本大于 100° 且平均值为 118° ;汪鸣飞等^[65]则得出顺倾边坡特征角均值为 120° 。按表1,2案例中数据,统计坡角、岩层倾角及特征角范围值的25%与75%作为四分位数绘制箱型图(见图5)。

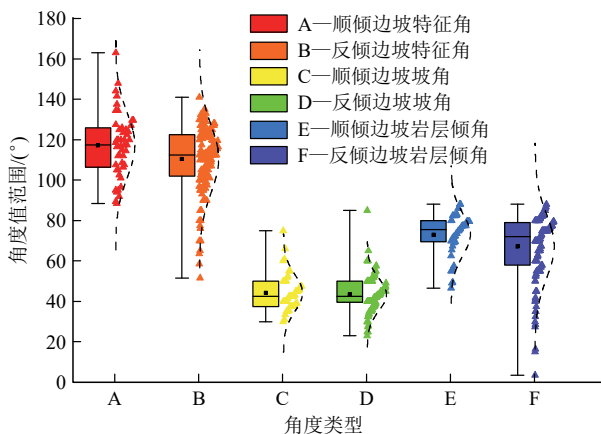


图5 边坡倾倒特征角、坡角与岩层倾角分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of characteristic angle, slope angle and rock dip angle of toppling slopes

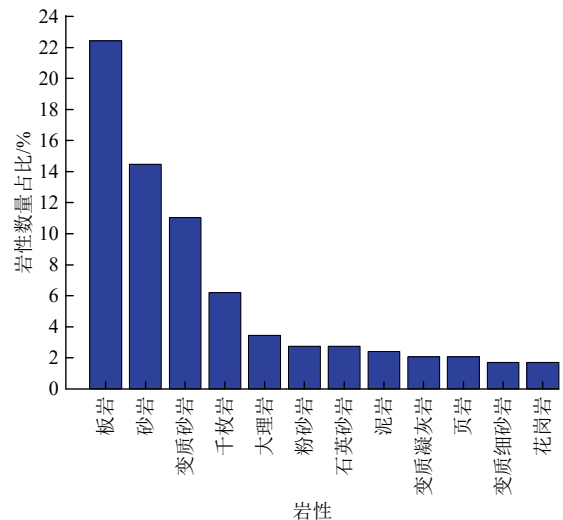
可以看出,反倾边坡特征角平均值为 110° ,顺倾边坡特征角平均值为 117° ;顺倾、反倾边坡平均

坡角相近,分别为 44° , 43° ,两者分布方差较小;顺倾边坡平均岩层倾角大于反倾边坡,分别为 73° 和 67° ,且反倾边坡分布方差大,数据离散程度较高,顺倾边坡则相对集中。同时,根据中位数线在箱体中的位置可以判断,顺向与反倾边坡的坡角、岩层倾角分布呈偏态,相较而言,边坡特征角的中位线值与平均值相近。

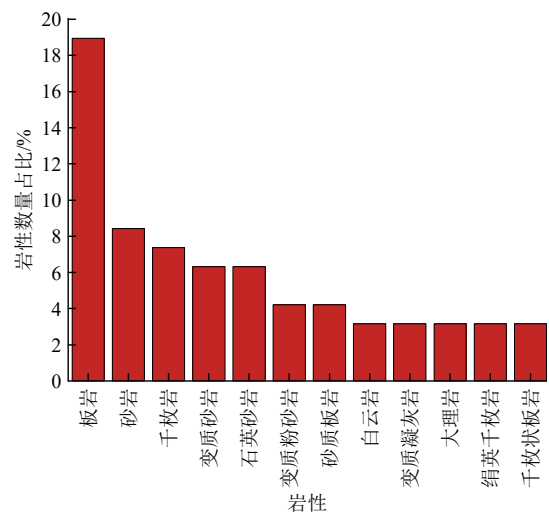
2.3 倾侧变形体岩性特征

岩性特征对岩质边坡倾倒稳定性具有重要影响,其通过力学性质差异、结构面发育特征及变形响应模式等多维度控制边坡的变形破坏过程。

图6为倾侧变形体岩性的统计占比,反倾边坡出现高频岩性排序为:板岩、砂岩、变质砂岩、千枚岩与大理岩;顺倾边坡出现高频岩性排序为:板



(a) 反倾边坡
(a) Anti-dip slopes



(b) 顺倾边坡
(b) Layered slopes

图6 岩质边坡倾侧变形体岩性统计

Fig.6 Lithology statistics of rock slope toppling deformation bodies

岩、砂岩、千枚岩、变质砂岩与石英砂岩。以上统计明确了边坡倾倒易发的岩性类型。

黄润秋等^[7]对西南区域易发生倾倒变形的岩性分布进行汇编, 并将倾倒变形的岩性如变质砂岩、板岩、千枚岩及花岗片麻岩等及其组合分为软质岩为主与硬质岩为主两类。本文根据统计案例的岩性分布, 将其划分为硬质岩、软质岩、软硬岩互层 3 类岩性组合, 其中板岩、绢云母板岩、砂质板岩等为软岩; 大理岩、千枚岩、花岗岩、砂岩、白云岩、灰岩等为硬质岩; 绢英千枚岩-变质凝灰岩、砂岩-板岩、砂岩-页岩、灰岩-泥岩等则为软硬互层型。

通过对表 1, 2 案例的聚类分析(见图 7), 揭示岩质边坡倾倒变形在岩性分布上存在明显倾向性, 以软硬互层型为主, 其次为硬质岩, 最后为软岩。反倾与顺倾边坡软硬岩互层型分别占 76.4%、63.8%, 凸显了力学不均质性的软硬岩互层对引发岩质边坡倾倒变形的重要影响。

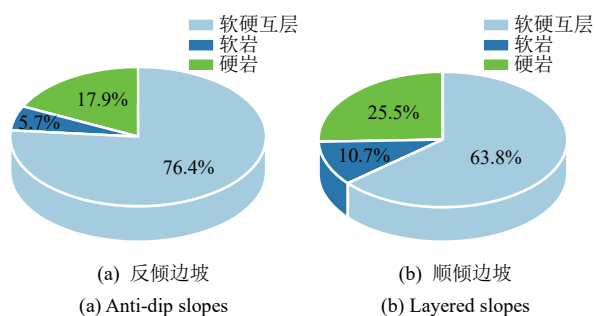


图 7 岩质边坡倾倒变形体岩性分类
Fig.7 Lithology classification of rock slope toppling deformation bodies

3 岩质边坡倾倒破坏分类

岩质边坡倾倒变形诱发因素多、破坏模式多并且灾变机制复杂, 而倾倒破坏分类是理解其力学机制与构建防控策略的重要基础。在早期研究与工程实践中, 国内外学者采用“头部摆动”、“点头哈腰”、“山腰迁移”、“地表膝状褶皱”等对边坡倾倒变形现象进行描述^[69-70], 但并未对边坡倾倒进行系统分类。随着工程地质调研的深入, 许多学者开始从边坡特征、地质环境、变形机制和运动学特征等方面, 考虑坡体结构、倾倒规模、地质与动力成因、变形模式等因素将边坡倾倒破坏划分为不同类型, 分类方法也逐渐从单因素向多因素耦合发展^[71]。

根据岩层倾向与坡向的空间关系, 岩质边坡倾倒可划分为顺倾倾倒和反倾倾倒两类(见图 8)。在反

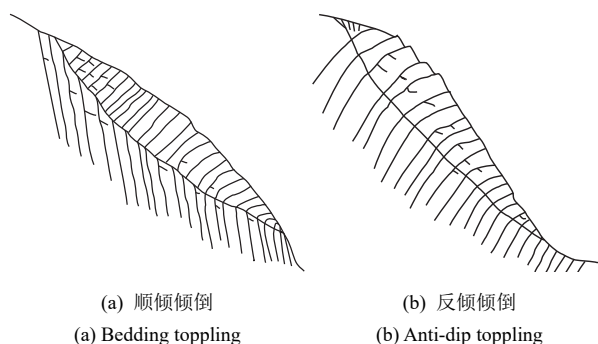


图 8 按岩层倾向与坡向关系划分的倾倒类型

Fig.8 Toppling types divided by the tendency relationship between the rock strata and the slope

倾倾倒分类方面, 1976 年, R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]开创性地提出了块体倾倒、弯曲倾倒、复合倾倒 3 种原生类型以及多种变形模式共同作用的次生倾倒概念(简称 G&B 分类法)。后续 L. R. Alejano 等^[72-76]也对复合式倾倒破坏模式开展了相关研究, 并探讨倾倒与滑动、崩塌等破坏模式的耦合机制。E. Hoek 等^[77-78]在 G&B 分类基础上对次生倾倒进一步衍生, 形成滑移-坡顶倾倒、滑移-基底倾倒、滑移-坡脚倾倒、张拉-倾倒、塑流-倾倒、软弱基座倾倒和顶部圆弧滑坡推移倾倒 7 种次生倾倒类型。S. L. Nichol 等^[79-80]则根据岩性破坏特征将倾倒划分为延性弯曲倾倒与脆性块体倾倒, 认为前者多见于软弱岩体且变形缓慢, 后者则发育于坚硬岩层且变形迅速。

考虑坡体结构和规模特征, D. M. Cruden 和 D. J. Varnes^[81]将倾倒变形与节理、断层等岩体结构关联, 划分层状、块状与破碎结构倾倒; 黄润秋等^[7, 82]将边坡倾倒划分为浅层倾倒、深层倾倒与复合型倾倒变形 3 类, 并根据深层倾倒体的赋存环境与岩体特征, 将深层倾倒模式进一步划分成互层、软基倾倒以及倾倒滑动 3 个亚类。除此之外, D. J. Varnes 等^[83-89]也围绕边坡倾倒的力学机制、折断位置、变形程度与冰川强推覆作用等不同特点对边坡倾倒进行相应分类。

顺倾倾倒分类方面, D. M. Cruden 和 X. Q. Hu^[21]根据块体形状、结构面产状、岩石强度、外力及地形等多种因素将顺层边坡倾倒破坏划分为块状弯曲倾倒、多重块体倾倒和人字型倾倒 3 种基本类型。这是为数不多的顺倾倾倒分类方法, 但该分类考虑的因素较多, 分类针对性不强、特征不鲜明。

总体而言, 以上分类方法主要针对反倾边坡,

且分类依据和偏重点各有差异,呈现分类不完备及分类依据不明晰的问题,如混淆边坡倾倒与危岩体倾倒式崩塌、复合倾倒与次生倾倒的概念等。G&B 分类法将倾倒变形与岩体结构特征关联,通过分析不连续面的几何形态与力学属性揭示不同破坏模式的应力演化路径,为后续研究提供了开放框架。与其他分类法相比,G&B 分类法分类依据清晰、地质模型明确,具有较强的工程适用性和研究扩展性。因此,本文在 G&B 分类法基础上,基于不同的分类原则提出边坡倾倒破坏四层次分类体系。

(1) 基于边坡主控结构面如层理/片理的倾向与坡向关系将倾倒变形划分为顺倾倾倒和反倾倾倒 2 个大类。鉴于顺倾倾倒的相关研究极不充分,且其倾倒变形多因其他类型的原生破坏所驱动,因此对其不作进一步的细分,仅将次生倾倒同时归类于顺倾和反倾 2 个大类下。

(2) 鉴于边坡破坏一般兼具张拉、剪切、蠕变、转动、挠曲等多种变形特征,基于边坡倾倒变形的主导或从属地位将反倾倾倒划分为原生倾倒和次生倾倒 2 个子类,其中次生倾倒定义为边坡受风化、冲刷等自然营力或人类工程活动引发的边坡局部岩体蠕变、滑移以及卸荷变形等原生破坏,进而诱发的倾倒变形破坏。

(3) 基于边坡倾倒体的变形运动特征,将原生倾倒分为块体倾倒、弯曲倾倒以及复合倾倒 3 个亚类;在次生倾倒分类上,基于关联破坏特点与倾倒变形体所在的位置,将次生倾倒分为滑移驱动-坡顶倾倒、滑移驱动-坡脚倾倒、滑移驱动-坡基倾倒、卸荷驱动-坡体倾倒 4 个亚类。需要指出的是,卸荷驱动-坡体倾倒这一亚类相对复杂,区别于由坚硬完整性岩体局部失稳的危岩体倾倒坍塌,其倾倒变形原因可以是下卧软弱基岩的蠕变挤出作用、软弱基岩水致劣化作用、基岩冲蚀作用以及采矿等一种或多种因素所导致,本质上都产生边坡岩体卸荷效应,因此其触发机制统一为卸荷驱动。

(4) 基于倾倒变形岩层组合特征,将复合倾倒亚类分为组合式复合倾倒和互层式复合倾倒 2 个小类。前者为 G&B 分类法中由刚体转动运动的岩块组合成的岩层似弯曲倾倒变形,后者则为软硬岩互层构成的兼有块体转动和软岩挠曲的倾倒变形。

四层次分类体系下的岩质边坡倾倒变形各类型地质特征与变形特点见表 3。

4 边坡倾倒变形特征与破坏机制

岩质边坡倾倒破坏的发生是边坡岩体自身地质力学性质与外界因素共同作用的结果。从本文提出的岩质边坡倾倒变形四层次分类方法可以看出,不同类型倾倒地质条件差异明显,其变形特征各不相同,导致边坡倾倒破坏机制迥异。自然界岩质边坡倾倒破坏历时较长,边坡倾倒破坏机制研究主要通过物理模拟试验开展,主要包括倾斜台试验^[90-91]、底摩擦试验^[92-93]、离心机试验^[94-95]及振动台试验^[24, 96]等,以模拟重力及动荷载作用下边坡的变形响应特征及演化过程。本节结合边坡岩体地质结构特征及其变形运动特点,通过构建地质力学模型,结合物理模拟试验,从变形特征、应力分布及位移场演化等角度揭示块体倾倒、弯曲倾倒、复合倾倒三类典型倾倒类型的破坏力学机制。

4.1 块体倾倒

块体倾倒一般发生在砂岩、大理岩等硬岩类反倾边坡中,其典型的地质结构特征是具有两组纵横切割的主控结构面,一组结构面如层面或页理面陡倾于坡内,另一组结构面缓倾坡外,2 组结构面大角度相交将边坡岩体切割成由多个岩块组成的集合体,如图 9(a)^[97]所示。

R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]在建立块体倾倒 G&B 模型时,将边坡岩体中 2 组主控结构面简化为相互正交的贯通结构面,见图 9(b)。陈祖煜等^[34-36]认为,该地质模型忽略了结构面中岩桥的存在,使得计算结果偏保守,同时指出 G&B 模型没有反映工程实践中主控结构面非正交的情况。工程条件下,岩桥的存在改变了岩体的力学与破坏特征。但鉴于目前没有行之有效的岩桥识别与测量技术,以及缺乏对岩桥破坏机制的清晰认知,岩桥作为一种岩体结构特征在边坡倾倒破坏分析中当作安全储备而忽略,相对而言,2 组主控结构面非正交的地质特征在后续研究中受到较多关注。

对于块体倾倒,不考虑岩体变形而只考虑岩块的刚体运动时,在重力作用下,边坡发生倾倒破坏需要满足 2 个基本条件:一是边坡潜在倾倒破坏面的倾角小于其摩擦角,否则按滑动破坏分析;二是构成边坡的岩块中存在潜在不稳定的倾倒块体,即边坡中存在重力矢量落在底面外因而具备绕底角发生转动势能的岩块。

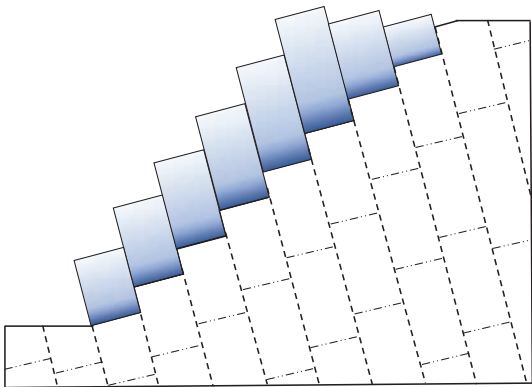
表 3 岩质边坡倾倒变形分类
Table 3 Classification of rock slope toppling deformation

大类 (class)	子类 (subclass)	亚类 (subcategory)	小类 (subdivision)	地质特征与变形特点 (geological and deformation characteristics)	示意图 (schematic diagram)
反倾倾倒	原生倾倒	块体倾倒		坚硬岩或较硬岩，岩层为 2 组纵横主控结构面切割为独立岩块集合体，岩块在重力作用下绕底部角点向坡体临空面作刚体转动	
		弯曲倾倒		软岩或较软岩，受一组由层理或页理构成的倾向坡内的优势结构面控制，岩层在重力作用下向临空面发生弯曲变形	
	复合倾倒	组合式复合倾倒		坚硬岩或较硬岩，岩层受交叉节理切割，节理间微小位移形成块体倾倒，岩层整体则表现为弯曲状态，表现为伪连续性弯曲变形	
		互层式复合倾倒		软硬岩互层，由一组倾向坡内优势结构面控制，硬岩层发育一组缓倾坡外的断续结构面，形成硬岩以岩块刚体转动、软岩弯曲变形为特征的岩层变形	
顺倾倾倒	次生倾倒	滑移驱动 - 坡顶倾倒		边坡坡脚岩土体发生滑动失稳，上部岩体失去支撑向临空面发生倾倒变形	
	滑移驱动 - 坡脚倾倒	滑移驱动 - 坡基倾倒		边坡上部岩土体发生沿滑动面下滑失稳，对边坡下部岩体施加滑坡推力，下部岩层在滑体推力作用下发生倾倒破坏	
				坡顶岩土体发生剪切滑移，对下卧坚硬或较硬基岩施加剪切荷载，导致下卧基岩发生倾倒破坏	
顺倾倾倒	卸荷驱动 - 坡体倾倒	卸荷驱动 - 坡体倾倒		下卧软弱基岩因蠕变挤出、水致劣化、冲蚀及采矿等一种或多种因素作用下，上覆岩体产生卸荷松弛并在重力作用下发生倾倒破坏	

注：表中块体倾倒、弯曲倾倒及组合式复合倾倒示意图引用自 D. C. Wyllie 和 C. Mah^[78]。



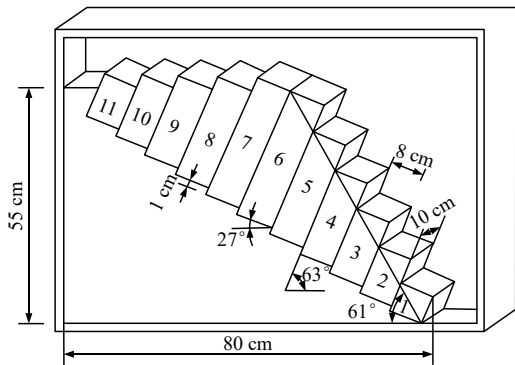
(a) 如美水电站柱状英安岩块体倾倒变形^[97]
(a) Block toppling deformation of columnar dacite in Rumei Hydropower Station^[97]



(b) 边坡块体倾倒地质模型
(b) Geological model of block toppling for slopes
图 9 边坡块体倾倒实例与概化地质模型

Fig.9 An example and the corresponding geological model of block toppling slopes

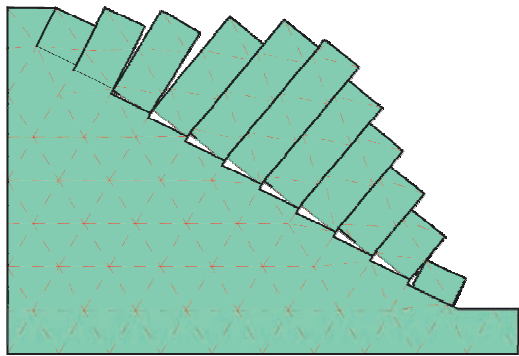
汪小刚等^[25, 98]采用石膏材料制作的块体开展了反倾边坡的离心机试验, 见图 10(a)^[98]和(b)^[25]。发现边坡存在变形分区: 坡脚处块体发生滑动, 中间相邻石膏块发生相对错动和倾倒现象, 而坡顶的块体则保持稳定, 在倾倒区岩块间接触由面接触变为顶点接触。张国新等^[99]采用数值流形法对上述离心机试验进行模拟, 揭示模型最上部两块稳定, 最下部块体滑动, 中间发生块体倾倒, 计算结果与模型试验结果基本吻合, 如图 10(c)^[99]所示。



(a) 模型试验参数^[98]
(a) Model test parameters^[98]



(b) 模型试验结果^[25]
(b) Model test results^[25]



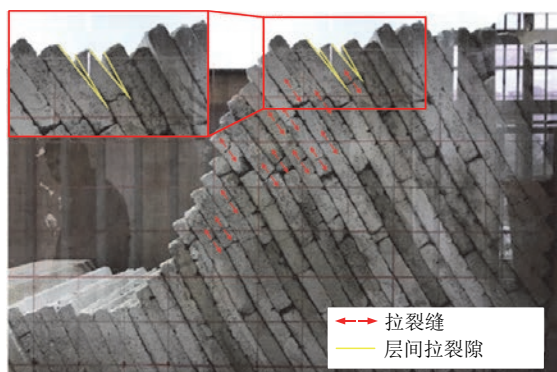
(c) 数值流形法结果^[99]
(c) Numerical manifold method results^[99]

图 10 块体倾倒模型试验及数值模拟对比

Fig.10 Model test and numerical simulation results of block toppling slopes

在地震作用下的边坡块体倾倒动力响应方面, C. Chen 等^[100]通过小型振动台试验发现块体长厚比越大, 边坡越早发生倾倒变形。龚逸非等^[101]通过大型振动台试验研究反倾薄层硬岩边坡的破坏机制, 发现坡顶和坡中产生张拉裂缝, 坡脚产生压剪裂缝, 并逐渐发展形成滑动面, 最终导致块体倾倒破坏, 地震作用使得坡体表面块体碎裂化程度增强。Y. B. Ning 等^[102]通过振动台试验模拟由垂直交叉节理控制的砂岩边坡倾倒破坏过程, 每个岩层在 2 个连续的交叉节理间包含一个非贯通节理, 相较于静力条件, 反倾边坡顶部岩层裂纹扩展较快, 张裂隙与交叉节理结合形成倾倒区, 受地震作用向下加速传递荷载, 最终与坡脚裂纹贯通发生倾倒, 破坏过程如图 11^[102]所示。

可以看出, 岩质边坡块体倾倒的破坏机制本质上是构成边坡的离散岩块集合体在自重及其他荷载下刚体转动失稳的链式传递过程。当硬质岩构成的边坡被层理、页理或构造结构面等陡倾坡内及缓倾坡外的主控结构面所切割, 此时形成的刚性岩块集合体, 在岩块自身重力和外部驱动荷载作用下, 打



(a) 边坡顶部拉裂缝形成

(a) Tensile fracture formation at the slope crest



(b) 边坡倾倒破坏阶段

(b) Stage of slope toppling failure

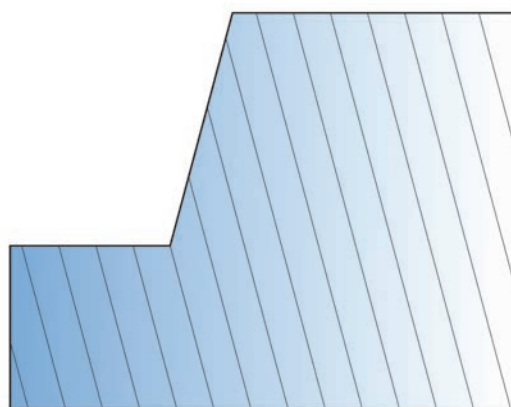
图 11 边坡块体倾倒振动台模型试验^[102]Fig.11 Shaking table model test of slope block toppling^[102]

破坏边坡平衡条件后沿潜在折断面发生倾倒失稳。根据边坡岩块的变形特征可将其分为上部稳定区、中部倾倒变形区和下部滑动变形区。

4.2 弯曲倾倒

弯曲倾倒多发生在薄层状的板岩、变质砂岩以及千枚岩等地层边坡中，边坡岩性相对软弱。不同于受 2 组主控结构面切割的块体倾倒，弯曲倾倒一般受一组由层理或页理构成的倾向坡内的优势结构面控制，如图 12(a)^[103]，(b)所示。岩层在自重及外力作用下，类似于悬臂梁向临空面发生挠曲变形。在岩层弯曲过程中，相邻岩层间会发生层间错动，坡体出现拉裂缝并在上部形成反坡台坎及沟槽；坡体内部弯曲变形最终发展为拉弯折断破坏，其破坏存在明显的延性特征。

张雨林等^[104]以澜沧江古水水电站坝前倾倒变形体为原型开展底摩擦试验，揭示在 2 次开挖条件下，边坡前缘向临空面发生弯曲变形，坡体出现拉裂缝并逐渐张开，岩体内部出现微裂隙并发展为贯通破坏面。郑达等^[105-106]则采用离心机试验模拟该倾倒变形体在河谷下切作用下的变形演化规律，试验揭示边坡在经历多次河谷下切作用后，内部会形

(a) 黄海边反倾岩质边坡弯曲倾倒现象^[103](a) Flexure toppling phenomenon of anti-dip rock slope in Yellow Sea^[103]

(b) 边坡弯曲倾倒地质模型

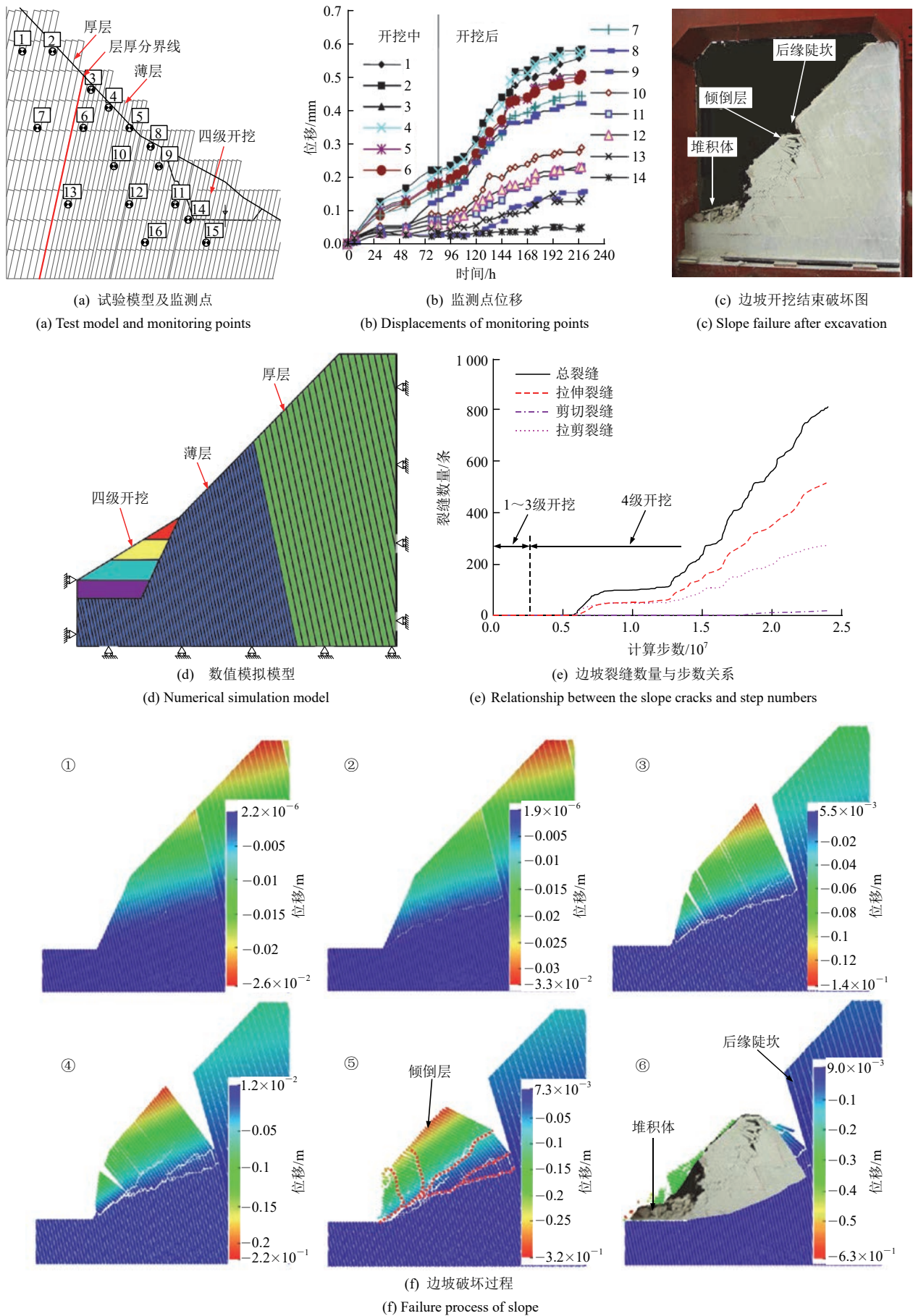
(b) Geological model of flexure toppling slopes

图 12 边坡弯曲倾倒实例与概化地质模型

Fig.12 An example and the corresponding geological model of flexure toppling slopes

成多处深度不一的弯折带，并将边坡弯曲倾倒的成灾模式概化为岩层倾倒弯曲、多级弯折带形成、岩体沿某级弯折带剪切失稳。赵华等^[107]通过开挖模拟薄层状反倾边坡在自重作用下的变形过程，发现卸荷作用和临空条件是边坡弯曲倾倒的启动因素，并指出在弯曲倾倒过程中，坡体原生裂隙、断层等软弱部位发育会形成多级弯折带。

左保成等^[108-109]采用倾斜台模拟 4 级工程开挖下反倾岩质边坡的变形响应，如图 13 所示，试验揭示边坡弯曲变形有一个发生到加速的过程，坡脚处岩层最先发生破坏，后缘形成陡坎，倾倒岩体根部有明显的破坏面并向临空面发生倾倒破坏。Y. Zheng 等^[110]采用有限离散元法(FDEM)以该倾斜台试验为原型进行计算，发现在开挖前 3 级时边坡未出现明显变形，直至第 4 级开挖结束后，边坡逐渐经历了裂纹生成、扩展、贯通及破坏的全过程，如图 13(f)所示。根据裂缝统计得出边坡岩层以拉伸破坏为主，其次为拉剪破坏，剪切破坏则较少，属于典型弯曲倾倒破坏特征，与模型试验结果吻合。

图 13 模型试验与数值模拟结果(修改自左保成^[108]、Y. Zheng^[110])Fig.13 Model test and numerical simulation results(Modified from B. C. Zuo^[108] and Y. Zheng^[110])

除此之外，苗朝等^[111]通过底摩擦试验发现河流下切引发的卸荷回弹会触发层间错动与拉裂面贯通。龚逸非等^[23]考虑降雨和河谷下切多因素耦合试验，证实了降雨入渗叠加河谷下切将加速坡脚岩体断裂，促使整体向临空面发生弯曲倾倒。

可以发现，较大的边坡坡角、岩层倾角及较薄的岩层厚度条件下，反倾边坡更容易发生弯曲倾倒破坏。破坏通常从坡脚开始，逐渐向坡顶发展，在层间错动及岩层张拉裂缝影响下，坡体逐渐形成多个弯折带和倾倒折断面，其破坏需要较长一段时间的变形累积过程。

以上研究结果表明，受河谷下切、开挖等因素影响，边坡岩体发生应力重分布，岩层在自重及外力作用下向临空面逐渐形成悬臂梁式弯曲变形。岩质边坡倾倒过程中，随着岩层弯曲处拉应力不断积累引发拉裂折断，在层间承受力较弱处形成贯通面并最终发生弯曲倾倒破坏。

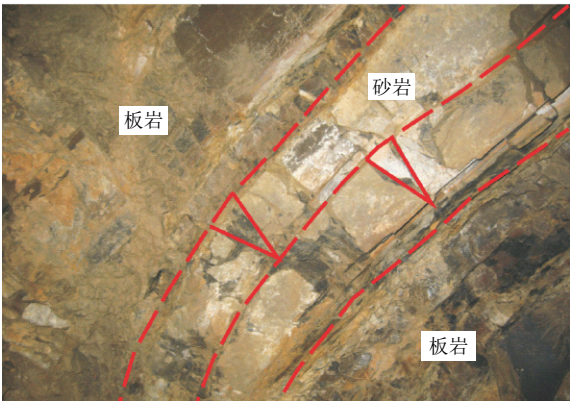
4.3 复合倾倒

如前所述，复合倾倒包括组合式复合倾倒和互层式复合倾倒 2 个子类。组合式复合倾倒其结构特征上类似于块体倾倒，边坡体由 2 组主控结构面所切割形成岩块集合体，单一岩块微小的刚体转动运动累积形成岩层似连续弯曲变形，多形成在节理切割严重的硬岩边坡中，如图 14(a)^[112]所示。互层式复合倾倒边坡岩体由软硬岩互层构成，边坡由一组倾向坡内的层理或页理的优势结构面控制，同时硬岩岩层发育一组缓倾坡外的断续结构面，形成以岩块刚体转动为特征的硬岩岩层和以弯曲变形为特征的软岩岩层协同构成的互层式边坡结构，见图 14(b)^[113]。互层式复合倾倒多发生在灰岩-泥岩、砂岩-泥岩、砂岩-板岩以及砂岩-页岩等软硬互层型、节理裂隙发育的层状结构边坡中。



(a) 具有交叉节理的沉积岩组合式倾倒^[112]

(a) Combined toppling of sedimentary rock with intersecting joints^[112]



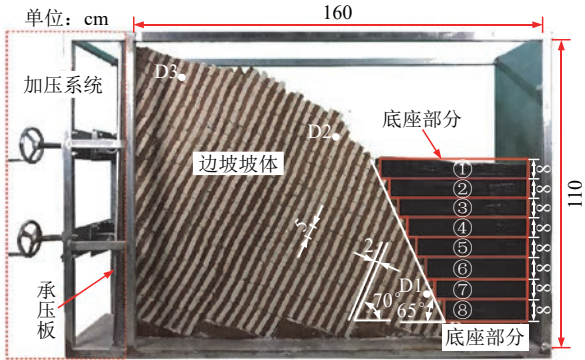
(b) 砂岩-板岩互层式复合倾倒^[113]

(b) Sandstone-slate interbedded composite toppling^[113]

图 14 边坡复合倾倒实例

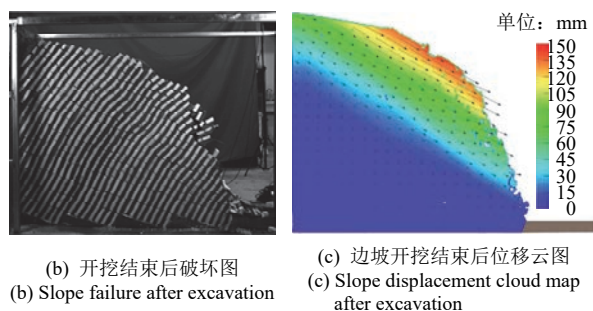
Fig.14 Examples of composite toppling slopes

由于开展组合式复合倾倒模型试验的难度较大，目前对复合倾倒的机制研究主要针对互层式复合倾倒。龚柏城等^[114]通过底摩擦试验研究了软岩、硬岩及软硬岩互层边坡的倾倒变形机制，发现软岩边坡以弯曲倾倒为主，硬岩边坡以块体倾倒为主，而软硬岩互层边坡则在弯曲倾倒后发生倾覆破坏。李彦奇等^[115]通过开展离心机试验研究软硬互层反倾边坡的变形破坏机制，发现边坡首先出现层间错动，随后坡体后部出现拉张裂缝，边坡整体发生弯曲倾倒变形，最终形成多个破坏面。B. C. Zhang 等^[116]通过模型试验对砂岩-板岩互层边坡破坏机制展开研究(见图 15)，发现模拟开挖过程中，边坡先在软硬层间出现剪切错位变形，同时向临空面发生弯曲变形；随着开挖深度加大，坡顶出现拉裂缝并产生沉降变形，倾倒变形影响深度不断扩大，形成了较深的弯曲变形面，最终发生倾倒破坏，并将复合倾倒变形划分为初始层间错位、变形开始、裂缝延展、裂缝贯穿和破坏 5 个阶段。



(a) 边坡开挖模型图

(a) Slope excavation model

图 15 互层式复合倾倒模型试验^[116]Fig.15 Interlayer composite toppling model test^[116]

在复合倾倒边坡动力响应规律方面, 巨能攀等^[96]以汶川县水磨沟陡倾软硬互层边坡为地质模型, 通过振动台试验研究边坡在强震作用下的变形机制与动力响应特性。研究表明, 地震作用下坡顶出现下座陡坎和纵向张拉裂缝, 硬岩表现为震裂和剪切破坏, 软岩则表现为塑性变形和累进式剪切破坏。坡体下部因下滑受阻导致在坡脚位置出现弯曲隆起现象, 并在强震荷载反复作用下发生折断, 坡顶岩层向临空面作悬臂梁弯曲倾倒, 整个斜坡发生拉裂滑移-下部弯曲-上部倾倒式失稳破坏。

可以看出, 岩质边坡复合倾倒机制是多种破坏模式相互耦合作用的复杂过程, 其本质是在地质构造与外部荷载作用下, 边坡岩体呈现出多种破坏机制共存的失稳特征。复合倾倒多发生在结构面发育不均的边坡及岩性差异显著的软硬岩互层边坡, 岩体可能同时存在块体倾倒的突发性变形与弯曲倾倒的渐进性挠曲变形现象。

综上所述, 岩质边坡的块体、弯曲与复合倾倒机制本质上是岩体在地质构造与环境条件共同作用下, 具有明显结构特征的变形破坏过程。块体倾倒是受 2 组主控结构面切割的离散岩体在倾覆力矩大于抗倾覆力矩时的转动失稳; 弯曲倾倒表现为薄层状岩体在重力及外力作用下的挠曲变形, 岩层内部弯曲变形不断积累, 在岩层薄弱处形成贯通面并最终发生弯曲倾倒破坏; 复合倾倒则为岩块转动变形与岩层弯曲变形的协同作用。上述破坏模式在地质特征、变形演化过程上各有差异, 但总体遵循内外因素作用下的应力重分布、局部变形累积扩展及最终边坡整体失稳的演化过程。

5 边坡倾倒破坏分析理论

自 R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]提出基于块体倾倒理论的 G&B 模型以来, 岩质边坡倾倒破坏分

析方法得到了长足的发展, 逐渐形成了以极限平衡为核心、针对不同倾倒类型的理论体系。以块体极限力矩平衡作为稳定性判据的 G&B 法奠定了块体倾倒破坏力学分析的基础, 悬臂梁法构成了弯曲倾倒破坏分析方法理论核心, 复合倾倒分析法则结合块体与弯曲倾倒分析方法, 考虑层间相互作用特征给出的力学解析模型。上述方法构成了边坡倾倒破坏分析的主要理论体系。近年来, 岩体损伤、变形协调、能量演化、突变理论以及智能分析等方法陆续被引进到边坡倾倒破坏分析中来, 推动并完善了边坡倾倒破坏分析理论。本节围绕块体倾倒的 G&B 法及改进模型、拟连续介质法和传递系数法, 以及弯曲倾倒的悬臂梁法等经典或主流的倾倒稳定性分析方法展开系统阐述。

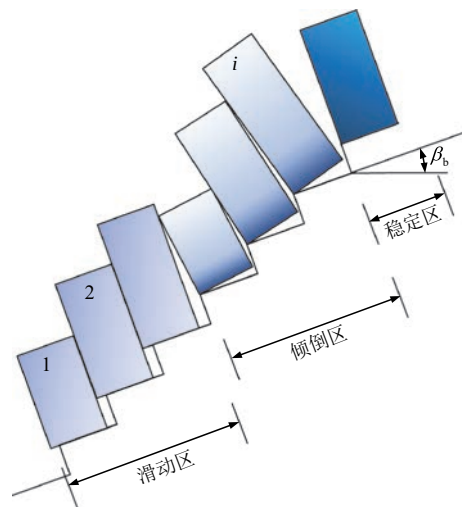
5.1 G&B 法及改进模型

R. E. Goodman 和 J. W. Bray^[20]基于极限平衡理论提出了适用于块体倾倒稳定性的 step-by-step 分析法(简称 G&B 法)。模型中岩体被 2 组正交节理切割为等厚度的刚性岩块, 根据岩块变形情况将边坡分为稳定区、倾倒区和滑动区。岩块倾倒变形时满足 2 条基本假设: 一是相邻倾倒岩块接触面满足极限摩擦平衡; 二是相邻岩块间法向作用力作用在接触面的顶点。其地质力学模型如图 16 所示。

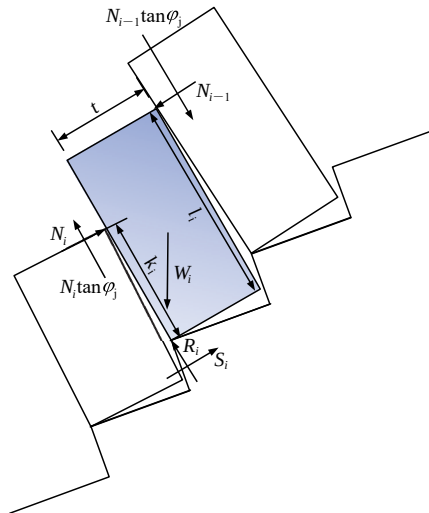
建立潜在倾倒岩块的极限转动平衡方程与极限摩擦平衡方程, 则维持岩块极限倾倒平衡的力 N_{it} 和极限摩擦平衡的力 N_{is} 分别为

$$N_{it} = \frac{N_{i-1}(l_i - t \tan \varphi_j) + \frac{W_i(h_i \sin \beta_b - t \cos \beta_b)}{2}}{k_i} \quad (1)$$

$$N_{is} = N_{i-1} - \frac{\sin \beta_b - \cos \beta_b \tan \varphi_b}{1 - \tan \varphi_j \tan \varphi_b} W_i \quad (2)$$



(a) 块体倾倒边坡的地质模型
(a) Geological model of block toppling



(b) 块体倾倒地力学模型

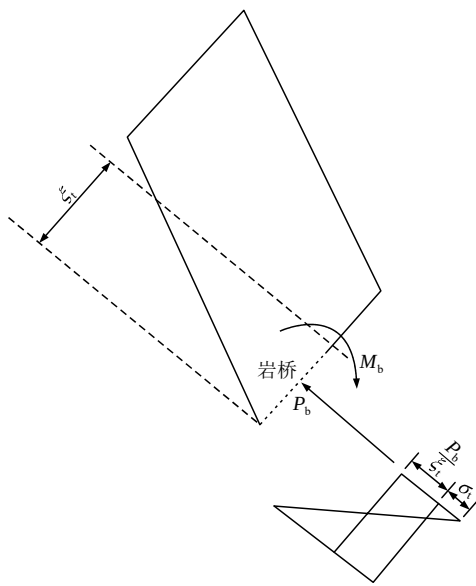
(b) Mechanical model of block toppling

图 16 块体倾倒地地质力学模型

Fig.16 Geomechanical model of block toppling

式中: N_i , N_{i-1} 分别为上下相邻块体作用在岩块 i 上的法向力; k_i , l_i 分别为 N_i 和 N_{i-1} 的作用力臂; W_i 为岩块 i 的重力; t 为岩块厚度; h_i 为岩块 i 的高度; ϕ_j 为岩块侧面内摩擦角; ϕ_b 为岩块底面内摩擦角; β_b 为正交节理切割岩块的节理倾角。

G&B 法物理意义明确、力学原理清晰, 便于广大技术人员理解接受, 但存在一定局限性, 如 2 组主控结构面相互正交、结构面贯通等。陈祖煜等^[34-36]在 G&B 模型基础上, 考虑岩桥与结构面非正交情况(见图 17^[36]), 采用稳定系数衡量边坡稳定性, 建立块体倾倒地平衡方程:

图 17 岩块底面岩桥受力分析^[36]Fig.17 Force analysis of rock bridge at the bottom of a rock block^[36]

$$\sigma_t = \frac{M_b}{\frac{1}{6}\xi^2 t^2} - \frac{P_b}{\xi t} \quad (3)$$

$$M_b = \frac{\xi t}{6}(\sigma_t \xi t + P_b) \quad (4)$$

式中: σ_t 为“岩桥”抗拉强度; M_b 为合力点弯矩; ξ , P_b 分别为岩块底面连通率和承受的法向荷载。

陈祖煜等^[34-36]提出的改进模型通过修正假设条件、引入新参数等方式, 使 G&B 模型更准确地反映边坡实际力学行为。D. C. WYLLIE 等^[117-120]在此基础上考虑地下水、地震与外荷载作用, 进一步拓展了 G&B 模型的适用范围, 使其更具有普适性与发展性。但应该指出的是, 虽然 G&B 法构建了边坡倾倒地破坏理论的力学基础, 但 G&B 法及其后续的改进模型在算法上摆脱不了“step-by-step”的印记, 导致其计算过于繁琐, 不利于工程应用推广。

5.2 拟连续介质法

A. Bobet^[121]将边坡中离散岩块视为微元体处理, 提出了岩质边坡倾地的拟连续介质分析方法。C. Sagaseta 等^[122]对模型进行拓展, 使其能够适用于更复杂的几何边界条件。C. H. Liu^[37]研究发现, A. Bobet 等^[121-122]提出以微元体底部法向应力为 0 作为倾倒地破坏链式传递模式转换判别准则是错误的, 基于图 18^[37]所示的地质力学模型建立微元体倾倒地力学表达式如下:

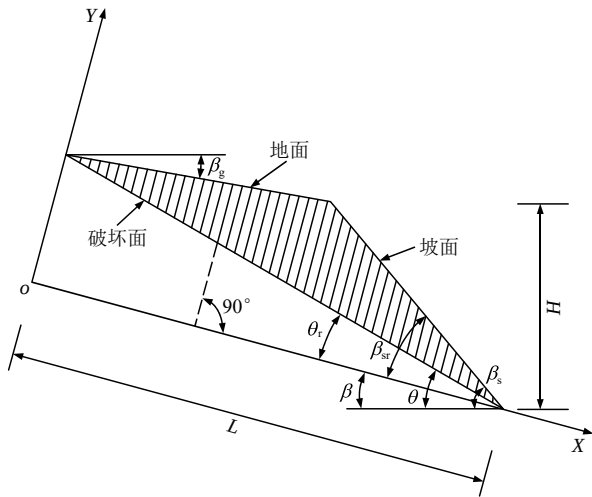
$$N = \frac{1}{2}\gamma(\sin \beta_b - \cos \beta_b \sin \beta_{br}) \frac{A_s^2}{A_j - 3A_s}(L - x_c)^2 \cdot \left[\left(\frac{L-x}{L-x_c} \right) - 3 \frac{A_s - A_g}{A_j - 3A_g} \left(\frac{L-x}{L-x_c} \right)^{\frac{A_j}{A_s}-1} \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \gamma \cos \beta_b A_s (L-x) - \frac{dN}{dx} (\cos \beta_{br} \tan \phi_j - \sin \beta_{br}) \quad (6)$$

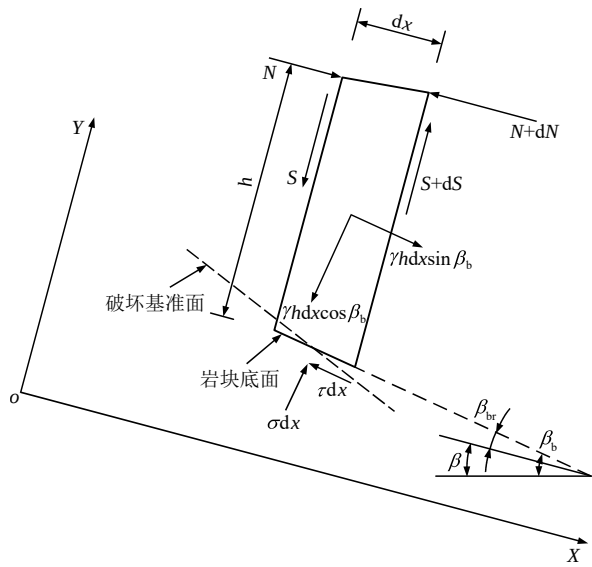
$$\tau = \gamma \sin \beta_b A_s (L-x) - \frac{dN}{dx} (\cos \beta_{br} + \sin \beta_{br} \tan \phi_j) \quad (7)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \tan \beta_{sr} - \tan \theta_r \\ A_g &= \tan \beta_{gr} - \tan \theta_r \\ A_j &= \tan \phi_j - \tan \theta_r \\ \beta_{sr} &= \beta_s - \beta \\ \beta_{gr} &= \beta_g - \beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



(a) 地质模型
(a) Geological model



(b) 力学模型
(b) Mechanical model

图 18 拟连续介质法地质力学模型^[37]

Fig.18 Geomechanical model of quasi-continuum method^[37]

式中: N 为相邻岩块间的法向作用力; σ , τ 分别为岩块底面的法向应力和剪切应力; β_{br} 为岩块底面与陡倾结构面法线夹角; β 为陡倾结构面法线视倾角; β_g 为边坡地面与水平面夹角; β_s 为边坡坡面与水平面夹角; L 为边坡沿陡倾结构面法向长度; x_c 为边坡坡顶横坐标; γ 为岩体重度; A_s , A_g , A_j , β_{sr} , β_{gr} 均为引入的简化参数。

由此给出边坡倾倒过程中微元体底面应力分布曲线如图 19^[37]所示。可以看出, 在倾倒变形由坡顶向下链式传导过程中, 微元体底面极限摩擦平衡点先于零法向应力点, 即极限摩擦平衡点下的坡脚岩体已不再满足倾倒变形条件。

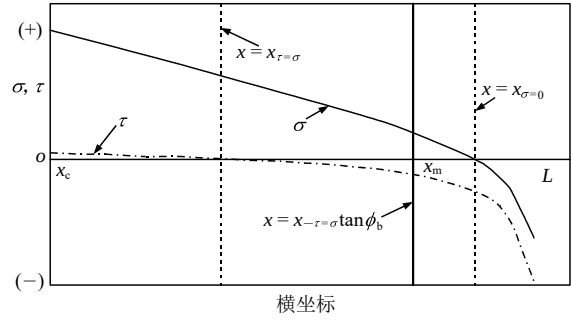


图 19 微元体底面应力曲线^[37]

Fig.19 Stress curves of slope block bottom surface^[37]

据此, 以极限摩擦平衡而非法向应力为 0 作为破坏模式判别准则, 并给出了该判别点横坐标计算公式:

$$\left(\frac{L - x_m}{L - x_c} \right)^{\frac{A_j - 3}{A_s}} = \frac{2(A_j - 3A_g)A_s}{3(A_s - A_g)(A_j - A_s)} \left[1 + \frac{(\cos \beta_b \tan \phi_b + \sin \beta_b)(A_j - 3A_s)}{\cos \beta_{br} (1 + \tan \phi_j \tan \phi_b) + \sin \beta_{br} (\tan \phi_j - \tan \phi_b)} \cdot \frac{1}{(\sin \beta_b - \cos \beta_b \sin \beta_{br})A_s} \right] \quad (9)$$

式中: x_m 为倾倒向滑动转变临界点横坐标。

拟连续介质法不仅提供了一套不同于 G&B 法的边坡块体倾倒稳定性分析框架, 而且从应力分析的角度论证了边坡岩块从上至下链式倾倒过程中由倾倒转变为滑动的判别准则, 即倾倒岩块底部达到摩擦极限平衡。虽然拟连续介质法方便开展程序化计算, 但由于其将边坡岩体进行了连续介质化处理, 计算结果具有天然的近似性, 边坡岩块长细比(岩块高度与厚度之比)越大, 拟连续介质法计算结果越准确。因此, 拟连续介质法适合对边坡的倾倒变形进行快速判断与稳定性初步评价。

5.3 传递系数法——Liu 模型

为克服 G&B 法计算繁琐性与拟连续介质法计算的近似性, C. H. Liu^[38]首次引入传递系数和等效倾倒重力 2 个参数, 创建了用于分析边坡块体倾倒破坏的传递系数法——Liu 模型, 其力学模型如图 20 所示。

通过建立图中岩块绕下角点的转动平衡方程并定义传递系数和等效倾倒重力 2 个物理量, 给出了边坡块体倾倒传递系数法的基本方程:

$$\left. \begin{aligned} N_n &= W'_n + \sum_{i=1}^{n-1} \left(W'_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) \\ \psi_i &= \frac{l_{i+1} - t \tan \phi_j}{k_{i+1}} \\ W'_i &= \frac{h_i \sin \beta - t(\cos \beta - \sin \beta \tan \beta_{br})}{2k_i} W_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

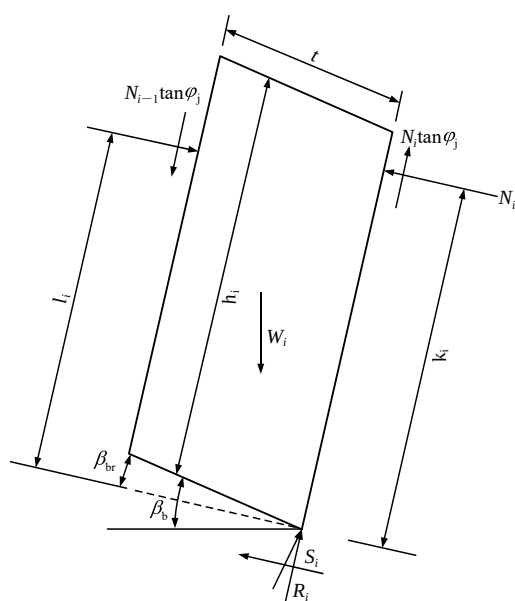


图 20 传递系数法力学模型

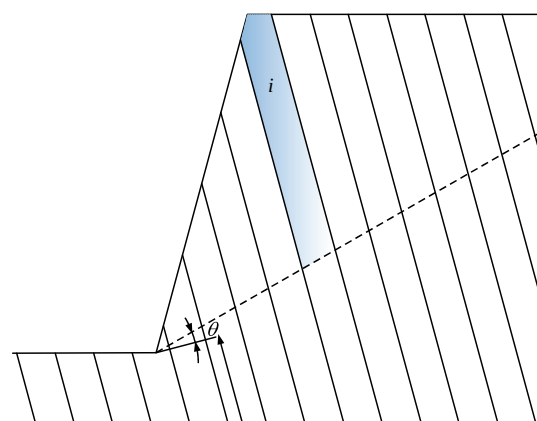
Fig.20 Mechanical model of transfer coefficient method

块体倾倒 Liu 模型将相邻倾倒块体之间的相互作用表述为具有统一形式的边坡几何力学参数的函数式，通过引入“传递系数”和“等效倾倒重力”2 个概念，将岩块倾倒转动平衡问题转化为平动平衡问题。该方法计算过程简便、实用性强，兼具 G&B 法的准确性和拟连续介质法的便捷性特点，有较好的适用性。

基于此，刘才华等^[39, 123]考虑地震与坡顶荷载作用，拓展了传递系数法的适用范围，使其能适配更复杂的荷载条件；杨保军等^[76]则将其引入滑移驱动 - 坡脚倾倒的次生倾倒模式边坡稳定性计算。同时作为露天矿山岩质边坡倾倒破坏分析的重要手段^[124]，被广泛应用于露天开采边坡倾倒、急倾斜煤层顶板倾倒 - 滑塌等工程的稳定性计算分析^[125-126]，有较强的工程应用价值。

5.4 悬臂梁法及改进模型

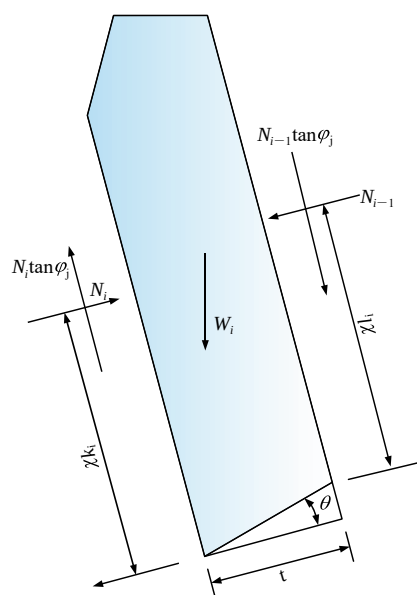
对于岩性相对软弱的薄层状弯曲倾倒类边坡，在重力或外荷载作用下，岩层具有明显的挠曲变形响应特征，不能应用以 G&B 法、拟连续介质法和 Liu 模型为代表的刚体极限平衡分析方法。Ö. Aydan 和 T. Kawamoto^[41]将悬臂梁理论应用到弯曲倾倒变形分析，建立了如图 21 所示模型，假定边坡潜在破坏基准面是一条从坡脚延伸至坡顶的直线并与岩层面垂直；相邻块体的层间作用力为集中力；极限状态时岩层沿潜在破裂面处的拉应力为岩体的抗拉强度。



破坏基准面与层面法线夹角

(a) 地质模型

(a) Geological model



(b) 力学模型

(b) Mechanical model

图 21 悬臂梁法地质力学模型

Fig.21 Geomechanical model of cantilever beam method

将岩层视为悬臂梁，通过迭代求解得到坡脚剩余不平衡力来衡量边坡稳定性：

$$N_i = \left\{ \left[\max(N_{i-1}, 0) \left(\chi k_i - \frac{1}{2} \tan \phi_j t \right) + \frac{1}{2} W_i \cos \beta h_i - \frac{2 I_i}{t} \left(\sigma_t + \frac{W_i \sin \beta}{t} \right) \right] \right\} / \left(\chi l_i + \frac{1}{2} \tan \phi_j t \right) \quad (11)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} I_i &= \frac{t^3}{12} \\ W_i &= \frac{1}{2} \gamma t (l_i + k_i) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中：\$\chi k_i\$，\$\chi l_i\$ 分别为简化集中力作用于岩层 \$i\$ 左

右两侧的作用点位置, $\chi \in (0, 1)$ 。

其中, 作用点系数 χ 的取值受到广泛关注, D. P. Adhikary 等^[22, 32, 41, 127]的研究表明, χ 为一个变量, 其大小受岩层长细比、破坏基准面与层面法线夹角以及层间作用力影响。

悬臂梁法可以简洁直观地对弯曲倾倒类型边坡做出稳定性评价, 但结合边坡实际破坏过程, 有学者认为该模型与实际破坏模式有一定的出入, 如破坏基准面并不是一条理想的直线, 也不完全垂直于岩层面, 且未考虑黏聚力等物理参数。在破坏基准面修正方面, D. P. Adhikary 等^[22]通过物理模型试验揭示破坏基准面与层面法线约成 10° 的夹角。卢海峰等^[42]以单一岩层在自重作用下弯曲的临界失稳长度作为破坏起始岩层, 结合 Adhikary 基准面得到了改进的折裂面。郑允等^[44]对悬臂梁模型进行完善, 给出了自动搜索破坏基准面的计算方法。

岩层临界失稳高度值作为弯曲破坏基准面修正的重要依据, 陈红旗和黄润秋^[128]利用应力分析得出弯曲折断的最大拉应力判据, 提出了相应的弯曲折断挠度判据。贺琮栖等^[129]针对多处折断面倾倒变形边坡, 在弯曲倾倒变形阶段建立悬臂梁模型, 利用最大拉应力破坏准则推导岩体折断长度; 在弯曲折断阶段, 采用简支梁模型推导折断长度。陈从新等^[45, 130]将破坏区域划分为剪切滑移、叠合倾倒、悬臂倾倒及稳定区, 提出了基于极限平衡分析方法的叠合倾倒区潜在折断深度计算模型。赵维等^[131]通过岩层临界失稳高度将边坡分区, 建立弯曲倾倒分析模型并根据力矩平衡提出稳定性计算方法。

目前, 悬臂梁法及其假设已成为边坡弯曲倾倒破坏的理论基础, 尽管存在一些争议, 其破坏基准面形态、层间作用力分布特征以及破坏分区已基本形成统一认知。遗憾的是, 以悬臂梁法为代表的弯曲倾倒稳定性分析方法在工程实践中尚未得到较好应用, 其在理论完备性和评价方法简化方面还需开展大量工作。

5.5 复合分析法及改进

相较于块体倾倒和弯曲倾倒, 复合倾倒岩层变形响应更为复杂。目前, 复合倾倒稳定性分析方法研究主要针对互层式倾倒类型。M. Amini 等^[47]建立了互层式复合倾倒破坏的理论模型, 该模型假定倾倒破坏发生时, 岩层弯曲和岩块倾覆依次发生, 即相邻岩层潜在破坏模式不同, 同时假定相邻岩层界

面满足极限摩擦平衡条件。如图 22 所示, 当块体 i 发生块体倾倒、相邻岩柱发生弯曲倾倒时, 建立块体 i 在倾倒、滑移、稳定 3 种可能破坏状态下的力与力矩平衡方程, 以维持极限平衡所需的最大下侧面法向力确定块体破坏状态; 相应地, 当岩柱 i 发生弯曲破坏、相邻岩体发生块体倾倒时, 则计算判断岩柱 i 属于弯曲折断、剪切滑移或稳定状态。

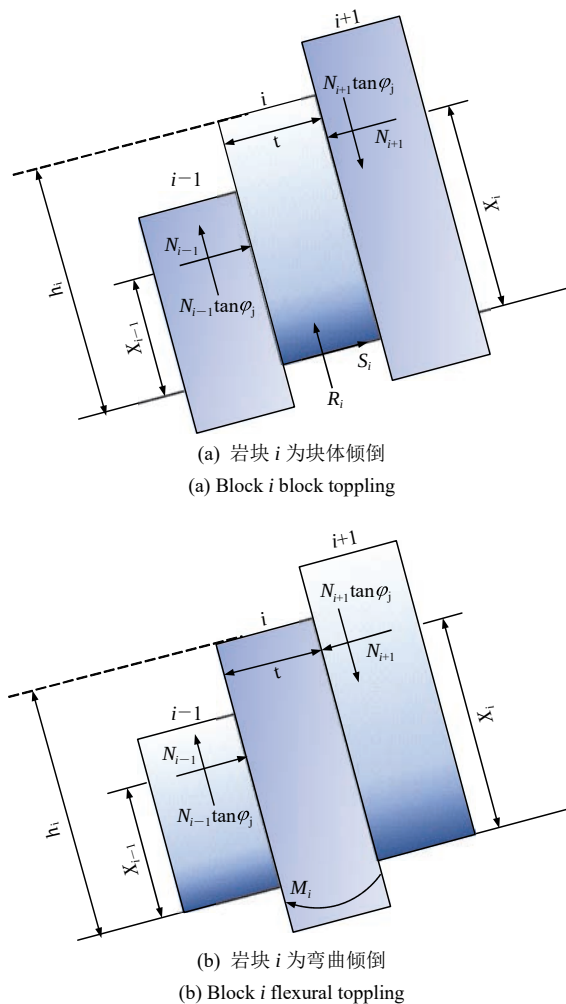


图 22 复合倾倒力学模型

Fig.22 Composite toppling mechanical model

张海娜等^[48]在 Amini 研究基础上考虑水平地震荷载, 结合离心模型试验, 将复合倾倒破坏划分为倾倒、裂缝、变形及无影响 4 个区, 给出了复合倾倒破坏理论分析方法。Y. Zheng 等^[132]采用极限平衡和强度折减数值方法, 对块体倾倒进行逐步分析, 弯曲倾倒岩层进行整体分析, 结合 UDEC 开发的 FISH 函数验证其准确性。孙朝燊等^[46]则以滑动、块体倾倒、弯曲倾倒 3 类边坡破坏分区定义复合倾倒破坏, 提出了基于极限平衡理论与悬臂梁模型的边坡稳定性的自下而上逐步分析法, 并指出复合倾倒破坏的稳定性主控区为滑动-块体倾倒区。

互层式复合倾倒稳定性分析方法糅合了块体倾倒的刚体极限平衡和弯曲倾倒的悬臂梁法理论，在 3 种原生倾倒类型中，复合倾倒的研究深度和广度最不充分。然而，从图 7 可以看出，在本文统计的倾倒变形体案例中，软硬岩互层型边坡占比达到 60%~70%，表明当前边坡倾倒破坏理论研究和工程实际需求契合度不高。

5.6 案例分析

在上述边坡倾倒稳定性分析方法中，以 G&B 法、拟连续介质法及 Liu 模型为代表的块体倾倒稳定性分析方法，在工程实践中应用广泛。其中，Liu 模型有效克服了 G&B 法计算的繁琐性，且计算结果具有一致性。因此，本文以 Liu 模型和修正前后的拟连续介质法，选取 Paracuellos 隧道入口与 Sil 河高架桥处边坡 2 个典型案例例^[122]进行倾倒稳定性计算分析，边坡物理力学参数如表 4 所示。

图 23 给出了 3 种方法的计算结果。可以看出，C. Sagaseta 拟连续介质法给出的 2 个案例计算结果明显大于 Liu 模型修正后的拟连续介质法的计算结果，造成该差异的核心原因在于修正前后的拟连续

介质法由倾倒向滑动转变的判别准则上的差异性，岩块底部应力分析(见图 19)表明，在边坡下部出现拉应力之前，上部某些岩块底部已经达到极限摩擦平衡，表明以极限摩擦平衡为判别准则的修正后的拟连续介质法的倾倒变形范围较小，因而维持其倾倒极限平衡所需的支护力较小。图 23 同时给出了边坡岩块长细比变化(通过改变岩层厚度)时传递系数法——Liu 模型的计算结果，可以看出，随着岩块长细比的增加，传递系数法——Liu 模型给出的维持边坡极限平衡所需支护力呈现快速增大并逼近修正后的拟连续介质法的计算结果，这进一步证明了 C. H. Liu 修正的拟连续介质法判别准则的正确性，同时也说明，拟连续介质法在实际应用时，其计算结果具有一定的近似性，但边坡长细比越大，拟连续介质法的计算结果越准确。

极限平衡法在 3 种原生倾倒类型和实际工程中得到广泛应用，但其对边坡的几何力学边界条件进行了简化处理。近年来，变形协调理论^[133-136]、能量守恒原理^[137-138]、运动学解析法^[139-141]等逐渐引入到边坡倾倒稳定性研究。这些理论的引入突破了传

表 4 边坡案例计算参数
Table 4 Calculation parameters of toppling cases

案例名称 (case name)	岩层厚度 (strata thickness)/m	边坡高度 (slope height)/m	重度 (gravity)/ (kN · m ⁻³)	坡面倾角 (dip angle of cut slope surface)/ (°)	坡顶地面倾角 (dip angle of natural ground surface)/(°)	陡倾结构面倾角 (dip angle of dominant discontinuities)/ (°)	破坏面视倾角 (apparent dip angle of failure surface)/(°)	岩块侧面摩擦角 (friction angle of side of block)/ (°)	岩块底面摩擦角 (friction angle of block base)/(°)
Paracuellos 隧道	0.2	13	25	45	15	76	30	25	35
Sil 河高架桥	1	25	26	72	30	70	47	35	35

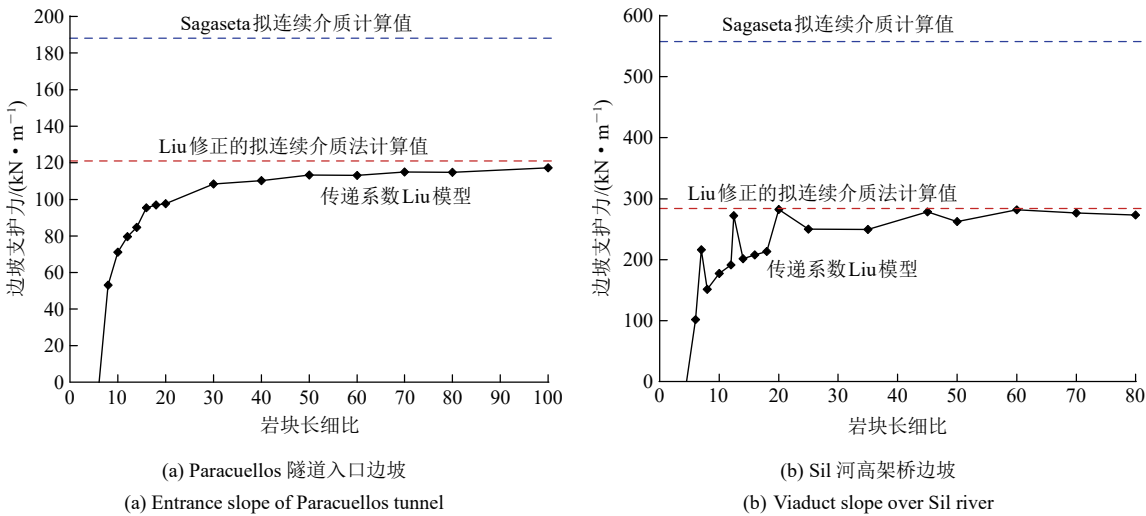


图 23 拟连续介质法和传递系数法计算结果的比较

Fig.23 Comparisons between calculation results by quasi-continuous medium method and transfer coefficient method

统极限平衡法的“刚体假设”，通过考虑岩层的变形协调、能量耗散及流变特性，能更细致地刻画边坡倾倒时岩体的渐进破坏过程，但存在一定的假设局限，且能量耗散系数、流变本构模型的选择与参数确定存在偏差，难以满足工程应用的快速评估要求。同时，相对于 G&B 法、拟连续介质法、Liu 模型和悬臂梁法，基本上处于探索研究阶段。即便对于 G&B 法、拟连续介质法、Liu 模型和悬臂梁法，由于其理论模型过于理想化，是否能够准确刻画边坡倾倒破坏的变形响应并给出合理的评价结果有待进一步研究。

综上所述，岩质边坡倾倒破坏分析方法已形成以极限平衡为核心、多元方法协同的理论体系，但其在复杂地质条件适配性与工程实用性上仍有较大改进空间，主要体现在 3 个方面：一是理论模型适配性不足，如块体倾倒中的“刚性块体”以及弯曲倾倒中的“直线破坏面”等理想化假设与边坡的非均质性、离散性特征存在偏差，复合分析法中对块体弯曲交互破坏模式的合理性论证不充分；二是现有理论研究主要集中于重力作用下的静力分析，多场耦合作用下边坡倾倒稳定性的动态演化机制研究不足；三是次生倾倒灾变机制和理论分析研究缺失。

6 结论与展望

本文在收集我国近 220 例岩质边坡倾倒破坏典型案例的基础上，结合国内外相关研究，对倾倒变形体孕育的地质赋存特征、岩质边坡倾倒分类方法、演变特征、灾变机制及稳定性评价理论进行了总结研究，具体结论如下：

(1) 我国岩质边坡倾倒体在空间分布上呈现显著的“高程梯度效应”及“河谷线性分布带”特征；边坡倾倒变形破坏大部分发生在百米级以上的高边坡段，且存在明显的优势坡角与优势岩层倾角区间，岩性分布以软硬互层型为主。

(2) 针对现有边坡倾倒破坏分类依据不明晰、概念不统一的问题，以主控结构面倾向与坡向关系、倾倒变形体的主导或从属地位、岩体变形运动特征、关联破坏特点与倾倒变形体所在位置以及倾倒变形岩层组合特征等为依据，提出倾倒变形大类、子类、亚类和小类倾倒破坏四层次分类体系。

(3) 岩质边坡倾倒变形破坏总体遵循内外因素作用下的应力重分布、局部变形累积扩展到最终边

坡失稳的三阶段演化过程。其中，块体倾倒是受 2 组主控结构面切割的离散岩体在倾覆力矩主导下的转动失稳；弯曲倾倒是薄层状岩体在重力及外力作用下发生挠曲变形，并随着岩层内部弯曲变形积累，最终在岩层薄弱处形成贯通破坏面；复合倾倒是岩块转动与岩层弯曲协同作用的变形模式；而次生破坏则是局部岩体关联变形形成的载荷或卸荷作用所诱发的边坡倾倒变形。

(4) 现阶段岩质边坡变形破坏机制研究多聚焦于重力或地震荷载作用下的原生倾倒类型，而对具有显著结构控稳特征的边坡倾倒变形体的水力作用机制以及次生倾倒灾变机制等方面的认知不足。对于大型倾倒边坡研究，模型试验受尺寸、相似材料强度及岩体薄层效应限制，数值模拟面临精度与计算量相矛盾等问题，未来需尝试新的试验与数值方法以揭示大规模倾倒变形的内在规律。

岩质边坡倾倒破坏分析已形成以 G&B 法、传递系数法、拟连续介质法、悬臂梁法等极限平衡经典理论为核心，变形协调、能量演化等多方法融合的理论体系，通过构建地质力学模型与力学平衡条件，揭示了不同倾倒模式的破坏机制。但存在理论模型适配性不足、边坡倾倒稳定性的动态演化机制研究不充分以及次生倾倒灾变机制和理论分析研究缺失等问题。未来需要以倾倒变形分类为框架，考虑多因素耦合效应，提出各分类下基于力学平衡与变形机制的理论体系，为工程边坡提供更坚实的理论与技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1 081 - 1 090.(HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1 081 - 1 090. (in Chinese))
- [2] 《中国减灾》编辑部. 全国灾害实录(2004 年 8, 9 月)[J]. 中国减灾, 2004, (10): 61 - 64.(Editorial Office of Disaster Reduction in China. Record of national disasters(August and September 2004)[J]. Disaster Reduction in China, 2004, (10): 61 - 64.(in Chinese))
- [3] 黄润秋. 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, 2007, 26(3): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454.(in Chinese))
- [4] 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,

- 33(4): 797 - 808.(WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: A case study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 797 - 808.(in Chinese))
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 248.(National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024: 248.(in Chinese))
- [6] HUANG R Q, LI W L. Formation, distribution and risk control of landslides in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(2): 97 - 116.
- [7] 黄润秋, 李渝生, 严明. 斜坡倾倒变形的工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1 165 - 1 181.(HUANG Runqiu, LI Yusheng, YAN Ming. The implication and evaluation of toppling failure in engineering geology practice[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1 165 - 1 181.(in Chinese))
- [8] 刘才华, 陈从新. 层状岩质边坡稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 126.(LIU Caihua, CHEN Congxin. Layered rock slope stability[M]. Beijing: Science Press, 2012: 126.(in Chinese))
- [9] 邱俊, 任光明, 王云南. 层状反倾-顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 513 - 524.(QIU Jun, REN Guangming, WANG Yunnan. Characteristics of forming conditions and development scale of toppling in anti-dip and dip stratified slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp.2): 513 - 524.(in Chinese))
- [10] 任光明, 夏敏, 李果, 等. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3 193 - 3 200.(REN Guangming, XIA Min, LI Guo, et al. Study on toppling deformation and failure characteristics of steep bedding rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 3 193 - 3 200.(in Chinese))
- [11] 王思敬. 金川露天矿边坡变形机制及过程[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 76 - 83.(WANG Sijing. On the mechanism and process of slope deformation in an open pit mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 76 - 83.(in Chinese))
- [12] 安晓凡, 李宁, 孙闻博. 岩质边坡倾倒变形机制及稳定性研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 1 - 11.(AN Xiaofan, LI Ning, SUN Wenbo. Review on the mechanism and stability of toppling deformation of rock slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 1 - 11.(in Chinese))
- [13] 丁小军, 刘卫明, 王佐, 等. 软质岩边坡倾倒变形机制及处治工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 4.(DING Xiaojun, LIU Weiming, WANG Zuo, et al. Mechanism for toppling deformation and treatment engineering examples of soft rock slope[M]. Beijing: People's Communications Press, 2011: 4.(in Chinese))
- [14] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 澜沧江深层倾倒体演化过程及失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 199 - 2 213.(NING Yibing, TANG Huiming, ZHANG Bocheng, et al. Evolution process and failure mechanism of a deep-seated toppling slope in the Lancang River Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 199 - 2 213.(in Chinese))
- [15] NING Y B, TANG H M, ZHANG G C, et al. A complex rockslide developed from a deep-seated toppling failure in the upper Lancang River, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2021, 293: 1 - 15.
- [16] 王士天, 黄润秋, 李渝生. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998: 130 - 140.(WANG Shitian, HUANG Runqiu, LI Yusheng. Key engineering geology problems and research on Jinping Hydropower Station in Yalongjiang River[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1998: 130 - 140.(in Chinese))
- [17] 任光明, 夏敏, 曾强, 等. 白龙江干流典型滑移-倾倒型滑坡的特征及形成机制[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 18 - 25.(REN Guangming, XIA Min, ZENG Qiang, et al. Characteristics and formation mechanism of typical sliding-toppling landslides in Bailong River trunk streams of Gansu, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology, 2015, 42(1): 18 - 25.(in Chinese))
- [18] 常昊, 常祖峰, 刘昌伟. 金沙江断裂带活动与大型滑坡群的关系研究: 以金沙江拿荣一绒学段为例[J]. 地震地质, 2021, 43(6): 1 435 - 1 458.(CHANG Hao, CHANG Zufeng, LIU Changwei. The relationship between activity of Jinsha River Fault Zone and large-scale landslides: A case study of the section between Narong and Rongxue along the Jinsha River[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(6): 1 435 - 1 458.(in Chinese))
- [19] 陈宇. 金沙江旭龙水电站近坝区滑坡变形特征及危险性评价[硕士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2016.(CHEN Yu. Fractal characteristics of landslide and risk assessment in the near dam region of Xulong Hydropower Station in Jinsha River[M. S. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2016.(in Chinese))
- [20] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes[C]// Proceedings of ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. Colorado, USA: [s. n.], 1976: 201 - 234.
- [21] CRUDEN D M, HU X Q. Topples on underdip slopes in the High-wood Pass, Alberta, Canada[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1994, 27(1): 57 - 68.
- [22] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, Jewell R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(2): 75 - 93.
- [23] 龚逸非, 姚爱军, 李彦霖, 等. 反倾层状岩质边坡块状-弯曲倾倒变形演化过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2 497 - 2 510.(GONG Yifei, YAO Aijun, LI Yanlin, et al. Experimental study on block-flexure toppling deformation evolution process of anti-dip layered rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2 497 - 2 510.(in Chinese))
- [24] 郭明珠, 谷坤生, 王天成. 反倾岩质斜坡振动台试验研究综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(6): 157 - 167.(GUO Mingzhu, GU Kunsheng, WANG Tiancheng. Summary of shaking table test research on anti-dip rock slope[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(6): 157 - 167.(in Chinese))
- [25] 汪小刚, 张建红, 赵毓芝, 等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 18 - 25.(WANG Xiaogang, ZHANG Jianhong, ZHAO Yuzhi, et al. Study on the toppling failure of rock slope using centrifugal model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 18 - 25.(in Chinese))
- [26] 陈孝兵, 李渝生, 赵小平. 底摩擦重力试验在倾倒变形岩体稳定性研究中的应用[J]. 地学前缘, 2008, (2): 300 - 304.(CHEN Xiaobing, LI Yusheng, ZHAO Xiaoping. The application of bottom-friction gravity test to the study of the stability of the toppling rock mass[J]. Earth Science Frontiers, 2008, (2): 300 - 304.(in Chinese))
- [27] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J. Numerical modelling of the flexural deformation of foliated rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(6): 595 - 606.
- [28] 黄 达, 马 昊, 孟秋杰, 等. 软硬互层岩质反倾边坡弯曲倾倒离心模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1 286 - 1 295.(HUANG Da, MA Hao, MENG Qiujie, et al. Centrifugal model test and numerical simulation for anaclinal rock slopes with soft-hard interbedded structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1 286 - 1 295.(in Chinese))
- [29] AMINI M, ARDESTANI A. Stability analysis of the North-eastern slope of Daralou copper open pit mine against a secondary toppling failure[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 89 - 101.
- [30] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems[C]// Proceedings of Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: [s.n.], 1971: 2 - 8.
- [31] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4): 349 - 362.
- [32] ZHENG Y, CHEN C, LIU T, et al. Study on the mechanisms of flexural toppling failure in anti-inclined rock slopes using numerical and limit equilibrium models[J]. Engineering Geology, 2018, 237: 116 - 128.
- [33] SCHOLTES L, DONZE F V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52(6): 18 - 30.
- [34] 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 96 - 99.(CHEN Zuyu, ZHANG Jianhong, WANG Xiaogang. Simplified method for stability analysis of rock slope toppling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 96 - 99.(in Chinese))
- [35] 汪小刚, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 岩质边坡倾倒破坏的稳定分析方法[J]. 水利学报, 1996, (3): 7 - 12.(WANG Xiaogang, JIA Zhixin, CHEN Zuyu, et al. The research of stability analysis of toppling failure of jointed rock slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (3): 7 - 12.(in Chinese))
- [36] 陈祖煜, 蔡云鹏, 王玉杰, 等. 边坡倾倒稳定分析 Goodman-Bray 法: 改进、测试与应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 30 - 38.(CHEN Zuyu, CAI Yunpeng, WANG Yujie, et al. Goodman-Bray method for slope toppling stability analysis: improvement, testing and application[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 30 - 38.(in Chinese))
- [37] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. Improved analytical solution for toppling stability analysis of rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1361 - 1 372.
- [38] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. A transfer coefficient method for rock slope toppling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 1 - 9.
- [39] 刘才华, 陈从新. 地震作用下岩质边坡块体倾倒破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3 193 - 3 198.(LIU Caihua, CHEN Congxin. Analysis of toppling failure of rock slopes due to earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.1): 3 193 - 3 198.(in Chinese))
- [40] AYDAN Ö, KAWAMOTO T. Toppling failure of discontinuous rock slopes and their stabilization[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1987, 103(7): 763 - 770.
- [41] AYDAN Ö, KAWAMOTO T. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(3): 143 - 165.
- [42] 卢海峰, 刘泉声, 陈从新. 反倾岩质边坡悬臂梁极限平衡模型的改进[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 577 - 584.(LU Haifeng, LIU Quansheng, CHEN Congxin. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 577 - 584.(in Chinese))
- [43] 蔡静森, 晏鄂川, 王章琼, 等. 反倾层状岩质边坡悬臂梁极限平衡模型研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增 1): 15 - 28.(CAI Jingsen, YAN Echuan, WANG Zhangqiong, et al. Study of cantilever beam limit equilibrium model of anti-dip layered rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.1): 15 - 28.(in Chinese))
- [44] 郑 允, 陈从新, 刘秀敏, 等. 层状反倾边坡弯曲倾倒破坏计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 4 252 - 4 261.(ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Investigation on calculation method of layered counter-tilt slope for flexural toppling failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 4 252 - 4 261.(in Chinese))
- [45] 陈从新, 郑 允, 孙朝隼. 岩质反倾边坡弯曲倾倒破坏分析方法研

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2 174 - 2 187.(CHEN Congxin, ZHENG Yun, SUN Chaoyi. An analytical approach on flexural toppling failure of counter-tilt slopes of layered rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2 174 - 2 187.(in Chinese))
- [46] 孙朝懿, 陈从新, 郑允, 等. 岩质反倾边坡复合倾倒破坏分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(1): 130 - 138.(SUN Chaoyi, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Analysis of composite toppling failure of anti-dip rock slopes[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2020, 47(1): 130 - 138.(in Chinese))
- [47] AMINI M, MAJDI A, VESHADI M A. Stability analysis of rock slopes against block-flexure toppling failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 519 - 532.
- [48] 张海娜, 胡瑞奇, 常锦, 等. 反倾岩质边坡块状-弯曲复合倾倒破坏分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1 482 - 1 496.(ZHANG Haina, HU Ruiqi, CHANG Jin, et al. Analytical analysis of block-flexure toppling failure of anti-dip bedding rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1 482 - 1 496.(in Chinese))
- [49] 王俊杰, 郭建军. 反倾岩质边坡次生倾倒机制及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1 619 - 1 627.(WANG Junjie, GUO Jianjun. Mechanism and stability of secondary toppling of counter-tilt rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1 619 - 1 627.(in Chinese))
- [50] 徐建城. 坡脚劣化条件下三峡库区反倾岩质边坡的破坏模式及稳定性分析[硕士学位论文][D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.(XU Jiancheng. Failure mode and stability analysis of anti-dip rock slope in the Three Gorges Reservoir Area under slope foot degradation[M. S. Thesis][D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.(in Chinese))
- [51] 郭建军. 节理化岩质边坡次生倾倒破坏机制及稳定性分析方法[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.(GUO Jianjun. Analysis method of failure mechanism and stability for the secondary toppling of jointed rock slope[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.(in Chinese))
- [52] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 64 - 73.(CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Rock slope stability analysis—Theory, method and programs[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2005: 64 - 73.(in Chinese))
- [53] 郭明珠, 刘晃, 王欢欢, 等. 金沙江上游贡扎村岩质滑坡发育特征及演化成因分析[J]. 地震研究, 2021, 44(2): 242 - 250.(GUO Mingzhu, LIU Huang, WANG Huanhuan, et al. Analysis of causes and the development characteristics of the rock landslide in Gonza Village, the Upper Jinsha River[J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(2): 242 - 250.(in Chinese))
- [54] 宁奕冰. 澜沧江中上游深层倾倒地体变形失稳过程及稳定性评价研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.(NING Yibing. Study on the deformation and instability process and stability evaluation of deep-seated toppling in the upper-middle Lancang River[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.(in Chinese))
- [55] 王飞. 雅砻江上游互层斜坡深层倾倒地体破坏机制及稳定性评价[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.(WANG Fei. Failure mechanism and stability assessment of deep-seated toppling in interlayered rock slopes at upstream of Yalong River[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.(in Chinese))
- [56] 母剑桥. 反倾边坡倾倒地体优势形态及变形稳定性分析方法研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2017.(MU Jianqiao. Research on the optimized shape of toppling fracture plane in obsequent slope and the deformation stability analysis method[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.(in Chinese))
- [57] 邢一飞, 张诚, 王建辉. 西南地区典型弯曲倾倒地式滑坡变形演化机制及防治研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 156 - 161.(XING Yifei, ZHANG Cheng, WANG Jianhui. Evolution mechanism and prevention of typical bending deformation dump landslide in Southwest China[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 156 - 161.(in Chinese))
- [58] 陆文博, 晏鄂川, 邹浩, 等. 我国倾倒地体发育规律研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(8): 111 - 119.(LU Wenbo, YAN Echuan, ZOU Hao, et al. Development rules of toppling deformation slopes in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8): 111 - 119.(in Chinese))
- [59] 张成强. 倾倒地体边坡库水作用机制及稳定性分析[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2018.(ZHANG Chengqiang. Reservoir water mechanism and stability analysis of toppling slope[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.(in Chinese))
- [60] 张御阳. 陡缓结构面反倾层状岩质斜坡变形破坏演化机制研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2019.(ZHANG Yuyang. Evolution mechanism of deformation and failure of anti-dip stratified rocky slope with steep and gentle structural planes[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.(in Chinese))
- [61] 张泽林. 茨哈峡水电站近坝库岸稳定性研究[硕士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2010.(ZHANG Zelin. Investigation on stability of the bank slope of the dam near Cihaxia Hydropower Station[M. S. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.(in Chinese))
- [62] 邹浩. 西部水电工程倾倒地体岩体质量评价体系与应用研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.(ZOU Hao. Study on rock quality classification system and its application of toppling deformation rock in Western Hydropower Projects[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.(in Chinese))
- [63] 王林康, 郑子涵, 章广成, 等. 顺层陡倾岩质边坡倾倒地模式试验[J].

- 地质科技通报, 2025, 44(2): 340 - 354.(WANG Linkang, ZHENG Zihan, ZHANG Guangcheng, et al. Test study on the toppling mode of steep bedding rock slope[J]. Geological Science and Technology Information, 2025, 44(2): 340 - 354.(in Chinese))
- [64] 魏恺泓. 大型顺层倾倒边坡变形破坏演化机制与稳定性评价研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2022.(WEI Kaihong. Study on deformation and fracture evolution mechanism and stability evaluation of large bedding toppling slope[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022.(in Chinese))
- [65] 汪鸣飞, 章广成, 包刘磊, 等. 顺层陡倾岩质边坡变形机制探究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 107 - 120.(WANG Mingfei, ZHANG Guangcheng, BAO Liulei, et al. Research on deformation mechanism of steep bedding rock slope[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5): 107 - 120.(in Chinese))
- [66] 薛永强. 陡倾顺层岩质边坡倾倒变形机制研究[硕士学位论文][D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.(XUE Yongqiang. The mechanism of toppling deformation on steep bedding rock slope[M. S. Thesis][D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.(in Chinese))
- [67] 王 楷. 那曲河某水电站库岸大型中陡倾顺层岩质滑坡发育特征及形成机制研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2021.(WANG Kai. Study on the development characteristics and formation mechanism of large intermediate-steep dip bedding rock landslide on the bank of a hydropower station on the Naqu River[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.(in Chinese))
- [68] 安晓凡, 巨广宏, 李 宁. 岩质边坡倾倒破坏模式与机制分析[J]. 西北水电, 2022, (1): 10 - 21.(AN Xiaofan, JU Guanghong, LI Ning. Analysis on mode and mechanism of toppling failure for rock slopes[J]. Northwest Hydropower, 2022, (1): 10 - 21.(in Chinese))
- [69] 陆兆臻. 工程地质原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(LU Zhaozhen. Principles of engineering geology[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2001.(in Chinese))
- [70] 肖 远. 边坡层状岩体弯曲蠕变机制及分析方法[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1989.(XIAO Yuan. Bending creep mechanism and analysis method of slope stratified rock mass [Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1989.(in Chinese))
- [71] 冉从彦, 张世殊, 林 红. 水电工程倾倒变形体分类及其判识初探[C]// 第十一届全国工程地质大会论文集. 成都: 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 2020: 130 - 137.(RAN Congyan, ZHANG Shishu, LIN Hong. Preliminary study on classification and identification of toppling deformation bodies in hydropower projects[C]// Proceedings of the 11th National Engineering Geology Conference. Chengdu: ChinaPower Chengdu Engineering Corporation Limited, 2020: 130 - 137.(in Chinese))
- [72] ALEJANO L R, MARQUEZ I G, ALEGRIA R M. Analysis of a complex toppling circular slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, 114: 93 - 104.
- [73] MOHTARAMI E, JAFARI A, AMINI M. Stability analysis of slopes against combined circular toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 43 - 56.
- [74] AMINI M, AKBAR A, MOHAMMAD H K. Stability analysis of slide-toe-toppling failure[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 82 - 96.
- [75] AMINI M, HASSAN S, KAMRAN E. Stability analysis of slopes with a potential of slide-head toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 108 - 121.
- [76] 杨保军, 何 杰, 吉 刚, 等. 岩质边坡滑动 - 倾倒组合破坏模式稳定性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2 335 - 2 341.(YANG Baojun, HE Jie, JI Gang, et al. Stability analysis of sliding-toppling composite failure of rock slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2 335 - 2 341.(in Chinese))
- [77] HOEK E, BRAY J. Rock slope engineering[M]. London: The Institute of Mining and Metallurgy, 1977: 257 - 270.
- [78] WYLLIE D C, MAH C. Rock slope engineering[M]. London: CRC Press, 2004: 200 - 217.
- [79] NICHOL S L, HUNGR O, EVANS S G. Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(4): 773 - 788.
- [80] 黄润秋, 林 锋, 向喜琼. 贵州省崩滑地质灾害形成机制研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 2013: 742 - 743.(HUANG Runqiu, LIN Feng, XIANG Xiqiong. Research on formation mechanism of rockfall and landslide geological disasters in Guizhou Province[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 2013: 742 - 743.(in Chinese))
- [81] CRUDEN D M, VARNES D J. Landslide types and processes[C]// TURNER A K, SCHUSTER R L, ed. Landslides: Investigation and Mitigation. Washington, DC: Transportation Research Board, US National Research Council, 1996: 36 - 75.
- [82] HUANG R Q. Understanding the mechanism of large-scale landslides[C]// Engineering Geology for Society and Territory. Switzerland: Springer, 2015: 13 - 32.
- [83] VARNES D J. Slope movement types and processes[J]. Special Report, 1978, 176: 11 - 33.
- [84] 刘海军, 赵建军, 巨能攀. 岩质边坡倾倒破坏的力学分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增 1): 289 - 294.(LIU Haijun, ZHAO Jianjun, JU Nengpan. Mechanical analysis of toppling failure of rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp.1): 289 - 294.(in Chinese))
- [85] 霍逸康, 石振明, 郑鸿超, 等. 软硬互层反倾岩质边坡稳定性影响因素分析及破坏模式研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1 680 - 1 688.(HUO Yikang, SHI Zhenming, ZHENG Hongchao, et al. Study on influence factors of stability and failure modes of anti-dip rock slope with soft and hard interbeds[J]. Journal of Engineering Geology,

- 2023, 31(5): 1 680 - 1 688.(in Chinese))
- [86] 史文兵, 续建科, 唐晓玲. 反倾向层状岩质边坡失稳模式及支护对策[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 95 - 97.(SHI Wenbing, XU Jianke, TANG Xiaoling. Failure models and supporting measures of antidip sandwich rock slope[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(1): 95 - 97.(in Chinese))
- [87] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(3): 429 - 439.
- [88] 鲍杰, 李渝生, 曹广鹏, 等. 澜沧江某水电站近坝库岸岩体倾倒变形的成因机制[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(3): 47 - 51.(BAO Jie, LI Yusheng, CAO Guangpeng, et al. Genetic mechanism of the toppling deformation near the dam of a hydropower station on the Lancang River[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(3): 47 - 51.(in Chinese))
- [89] 张丙先. 西藏玉曲河下游岸坡倾倒变形机制及稳定性分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48(5): 1 539 - 1 545.(ZHANG Bingxian. Analysis of toppling deformation mechanism and stability of bank slope in the downstream of Yuqu River, Xizang[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2018, 48(5): 1 539 - 1 545.(in Chinese))
- [90] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳定性因素的模式试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629 - 632.(LU Zengmu, CHEN Congxin, ZUO Baocheng, et al. Experimentation research on factors influencing stability of anti-dip layered slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 629 - 632.(in Chinese))
- [91] ZHAO Q, YANG Z P, ZHANG S B, et al. Exploring the toppling deformation mechanisms and failure modes of anti-dip layered rocky slopes: insights from physical model experiments[J]. Landslides, 2025, 22(6): 895 - 923.
- [92] 孙书伟, 李圆, 杨晓锐, 等. 不同岩层倾角顺层状岩质边坡破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1 607 - 1 620.(SUN Shuwei, LI Yuan, YANG Xiaorui, et al. Study on the failure mechanism of rock slopes with dipped layered structures under various rock dip conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1 607 - 1 620.(in Chinese))
- [93] ZHANG B C, TANG H M, SUMI S, et al. Exploring the deformation and failure characteristics of interbedded anti-inclined rock slopes: Insights from physical modelling tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(5): 1 603 - 1 628.
- [94] 郑达, 张硕, 郑光. 基于坡角变化的反倾层状岩质斜坡倾倒变形离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 439 - 447.(ZHENG Da, ZHANG Shuo, ZHENG Guang. Centrifugal model tests on toppling deformation of counter-tilt layered rock slopes based on change of slope angle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 439 - 447.(in Chinese))
- [95] 杨豪, 魏玉峰, 裴向军, 等. 含陡缓倾结构面反倾岩坡折断面演化特征的离心试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1 215 - 1 225.(YANG Hao, WEI Yufeng, PEI Xiangjun, et al. Centrifugal test study of fracture evolution characteristics of anti-dip rock slope with steep and gently dipping structural planes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1 215 - 1 225.(in Chinese))
- [96] 巨能攀, 邓天鑫, 李龙起, 等. 强震作用下陡倾顺层斜坡倾倒变形机制离心振动台试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 99 - 108.(JU Nengpan, DENG Tianxin, LI Longqi, et al. Centrifugal shaking table test on toppling deformation mechanism of steep bedding slope under strong earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 99 - 108.(in Chinese))
- [97] 黄鹏, 张咪, 乔鹏. 高原寒区碎裂松动物体成因机制研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(12): 44 - 53.(HUANG Peng, ZHANG Mi, QIAO Peng. Study on the genetic mechanism of cataclastic loose rock mass on the Lancang River Basin of the Qinghai—Xizang Plateau[J]. Pearl River, 2018, 39(12): 44 - 53.(in Chinese))
- [98] ZHANG J H, CHEN Z Y, WANG X G. Centrifuge modeling of rock slopes susceptible to block toppling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 40(4): 363 - 382.
- [99] 张国新, 赵妍, 石根华, 等. 模拟岩石边坡倾倒破坏的数值流形法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 800 - 805.(ZHANG Guoxin, ZHAO Yan, SHI Genhua, et al. Toppling failure simulation of rock slopes by numerical manifold method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 800 - 805.(in Chinese))
- [100] CHEN C, LI H, CHIU Y, et al. Dynamic response of a physical anti-dip rock slope model revealed by shaking table tests[J]. Engineering Geology, 2020, 277: 105772.
- [101] 龚逸非, 姚爱军, 谷坤生, 等. 强震作用下反倾薄层岩质斜坡倾倒破坏机制及动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 263 - 274.(GONG Yifei, YAO Aijun, GU Kunsheng, et al. Dynamic response and toppling failure mechanism of anti-dip thin-layered rock slope under strong earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(20): 263 - 274.(in Chinese))
- [102] NING Y B, ZHANG G C, TANG H M, et al. Process analysis of toppling failure on anti-dip rock slopes under seismic load in Southwest China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4 439 - 4 455.
- [103] 王润清. 弯曲倾倒型岩质边坡稳定性分析及离心试验研究[学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2020.(WANG Runqing. Stability analysis and centrifugal modeling tests of rock slopes against flexural toppling failure[M. S. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [104] 张雨林, 涂国祥, 张银, 等. 河流下切对陡倾层状岩体深层倾倒变形的影响[J]. 中国科技论文, 2022, 17(8): 915 - 922.(ZHANG Yulin, TU Guoxiang, ZHANG Yin, et al. Influence of river down-cutting on deep toppling deformation of steep dipping layered rock mass[J]. Science Paper Online, 2022, 17(8): 915 - 922.(in

- Chinese))
- [105] 郑 达, 王沁沅, 毛 峰, 等. 反倾层状岩质边坡深层倾覆变形关键致灾因子及成灾模式的离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 1 954 - 1 963.(ZHENG Da, WANG Qinyuan, MAO Feng, et al. Centrifuge model test study on key hazard-inducing factors of deep toppling deformation and disaster patterns of counter-tilt layered rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 1 954 - 1 963.(in Chinese))
- [106] 王沁沅. 反倾层状岩质边坡深层倾覆变形关键致灾因子及成灾模式研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2020.(WANG Qinyuan. Research on key hazard factors of deep toppling deformation and disaster pattern of anti-dip layered-rock slope[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [107] 赵 华, 李文龙, 卫俊杰, 等. 反倾边坡倾覆变形演化过程的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 749 - 757.(ZHAO Hua, LI Wenlong, WEI Junjie, et al. Model test study on toppling deformation evolution process of counter-tilt slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 749 - 757.(in Chinese))
- [108] 左保成. 反倾岩质边坡破坏机制研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004.(ZUO Baocheng. Study on losing stability mechanism of counter-tilt rock slopes[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [109] 左保成, 陈从新, 刘小巍, 等. 反倾岩质边坡破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 107 - 113.(ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Xiaowei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 107 - 113.(in Chinese))
- [110] ZHENG Y, WU R F, YAN C Z, et al. Numerical study on flexural toppling failure of rock slopes using the finite discrete element method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 111.
- [111] 苗 朝, 沈军辉, 杨佳丽, 等. 雅砻江甲西滑坡倾覆弯曲 - 拉裂形成机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 411 - 417.(MIAO Zhao, SHEN Junhui, YANG Jiali, et al. Study on the formation mechanism of toppling flexure and tensile cracking of the Jiayi landslide on the Yalong River[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 411 - 417.(in Chinese))
- [112] GUI J Y, DING B D, PÉREZ-REY I, et al. Stability against toppling of a single rock block resting on an irregular rough base[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(12): 660.
- [113] 王 飞, 唐辉明, 宁奕冰, 等. 基于演化过程的互层斜坡深层倾覆稳定性评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 186 - 194.(WANG Fei, TANG Huiming, NING Yibing, et al. Stability analysis of deep-seated toppling in interlayered rock slopes based on evolution process[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 186 - 194.(in Chinese))
- [114] 龚柏城, 苑久超, 王 磊, 等. 软硬岩互层反倾高边坡变形破坏过程物理模型试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(1): 87 - 95.(GONG Bocheng, YUAN Jiuchao, WANG Lei, et al. experimental study on physical model of deformation evolution mode of high slope with anti-dip of soft and hard rock[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(1): 87 - 95.(in Chinese))
- [115] 李彦奇, 黄 达, 孟秋杰. 基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 141 - 150.(LI Yanqi, HUANG Da, MENG Qiujie. An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(4): 141 - 150.(in Chinese))
- [116] ZHANG B C, FANG K, TANG H M, et al. Block-flexure toppling in an anacinal rock slope based on multi-field monitoring[J]. Engineering Geology, 2023, 327: 107340.
- [117] WYLLIE D C. Toppling rock slopes failures: Examples of analysis and stabilization[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(8): 1 039 - 1 062.
- [118] 李天扶. 论层状岩石边坡的倾覆破坏[J]. 西北水电, 2006, (3): 4 - 6.(LI Tianfu. On toppling failure of bedded rock slope[J]. Northwest Hydropower, 2006, (3): 4 - 6.(in Chinese))
- [119] 胡惠华, 张奇华, 张 鹏. 基于板梁状陡坡地基倾覆稳定性分析的 G-B 改进模型研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2022, 53(10): 4 123 - 4 131.(HU Huihua, ZHANG Qihua, ZHANG Peng. Research of improved G-B model for toppling stability analysis of plate-shaped steep slope foundation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2022, 53(10): 4 123 - 4 131.(in Chinese))
- [120] 高连通, 晏鄂川, 谢良甫. 考虑地下水作用的 Goodman - Bray 方法改进及应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 78 - 83.(GAO Liantong, YAN Echuan, XIE Liangfu. Improved Goodman-Bray method in consideration of groundwater effect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 78 - 83.(in Chinese))
- [121] BOBET A. Analytical solutions for toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36: 971 - 980.
- [122] SAGASETA C, SANCHEZ J M, CANIZAL J. A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4): 421 - 435.
- [123] 郑 允, 陈从新, 刘婷婷, 等. 坡顶荷载作用下岩质边坡倾覆破坏分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2 639 - 2 647.(ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Tingting, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes under the loads applied on the top[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2 639 - 2 647.(in Chinese))
- [124] 李 泽, 胡 政, 刘文连, 等. 考虑平动 - 转动力学效应的露天矿山节理岩质边坡塑性极限分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,

- 37(增2): 4 056 – 4 068.(LI Ze, HU Zheng, LIU Wenlian, et al. Plastic limit analysis of open-pit mine jointed rock slope considering translation-rotation mechanisms[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.2): 4 056 – 4 068.(in Chinese))
- [125] 王家臣, 杨胜利, 李良晖. 急倾斜煤层水平分段综放顶板“倾倒-滑塌”破坏模式[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1 175 – 1 184. (WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Lianghui. Toppling-slumping failure mode in horizontal sublevel top-coal caving face in steeply-inclined seam[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(6): 1 175 – 1 184.(in Chinese))
- [126] 王伟. 黄山石灰石矿露天高边坡结构面特性及破坏机制研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.(WANG Wei. Study on characteristics of structural plane and failure mechanism of open pit mining high-steep slopes in Huangshan Limestone Mine[M. S. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.(in Chinese))
- [127] 屈新, 苏立君, 徐兴倩, 等. 地震作用下反倾向层状岩质边坡弯曲倾倒稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 105 – 112. (QU Xin, SU Lijun, XU Xingqian, et al. Analysis of flexural toppling stability of anti-dip layered rock slopes under seismic action[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8): 105 – 112.(in Chinese))
- [128] 陈红旗, 黄润秋. 反倾层状边坡弯曲折断的应力及挠度判据[J]. 工程地质学报, 2004, (3): 243 – 246.(CHEN Hongqi, HUANG Rongqiu. Stress and flexibility criteria of bending and breaking in a counter-tendency layered slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, (3): 243 – 246.(in Chinese))
- [129] 贺琮栖, 魏玉峰, 王洋, 等. 层状边坡倾倒变形多级折断面分布深度计算模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2 809 – 2 818.(HE Congqi, WEI Yufeng, WANG Yang, et al. Calculation model of multistage fracture surface distribution depth of layered slope toppling deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2 809 – 2 818.(in Chinese))
- [130] 田钱钱. 弯曲倾倒型岩质边坡稳定性分析方法研究[硕士学位论文][D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2023.(TIAN Qianqian. Study on stability analysis method of flexural toppling rock slope[M. S. Thesis][D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2023.(in Chinese))
- [131] 赵维, 王润清, 年廷凯. 基于弯曲倾倒破坏模式的反倾岩质边坡稳定性解析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增2): 3 287 – 3 295.(ZHAO Wei, WANG Runqing, NIAN Tingkai. Analytical method for stability of anti-dip rock slope based on flexural toppling failure mode[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp.2): 3 287 – 3 295.(in Chinese))
- [132] ZHENG Y, CHEN C X, LIU T T, et al. Theoretical and numerical study on the block-flexure toppling failure of rock slopes[J]. Engineering Geology, 2019, 263: 105309.
- [133] MAJDI A, AMINI M. A new analytical method for analysis of flexural toppling failure in rock slopes[C]// Proceedings of the 42nd U. S. Rock Mechanics Symposium. San Francisco, California, USA: [s. n.], 2008: 10 – 15.
- [134] AMINI M, MAJDI A, AYDAN Ö. Stability analysis and the stabilization of flexural toppling failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(6): 751 – 782.
- [135] MAJDI A, AMINI M. Analysis of geo-structural defects in flexural toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2): 175 – 186.
- [136] 王润清, 陈从新, 郑允, 等. 考虑变形协调的地震作用下反倾岩质边坡弯曲倾倒稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 146 – 156.(WANG Runqing, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Analytical method for flexural toppling failure of anti-dip rock slopes under seismic loads considering deformation coordination[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 146 – 156.(in Chinese))
- [137] JIN L L, FU W X, WANG Y, et al. A novel method for evaluating stability and mechanism of flexural toppling based on energy conservation principle and numerical simulation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 183: 105896.
- [138] 李爱民. 突变理论在反倾岩质边坡稳定性评价中的应用研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2004.(LI Aimin. Application of catastrophe theory to stability evaluation of anti-dip rock slope[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2004.(in Chinese))
- [139] LEUNG C F, KHEOK S C. Computer aided analysis of rock slope stability[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987, 20(2): 111 – 122.
- [140] AKSOY H, ERCANOGLU M. Fuzzified kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities[J]. Engineering Geology, 2007, 89(3/4): 206 – 219.
- [141] SMITH J V. A new approach to kinematic analysis of stress-induced structural slope instability[J]. Engineering Geology, 2015, 187: 56 – 59.