

文章编号:1674-2869(2019)02-0155-07

地质背景对倾倒变形体发育的贡献率

张明¹,王章琼^{*1},范尧²

1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;

2. 山东省水利勘测设计院,山东 济南 250013

摘要: 倾倒变形体是我国西部山区常见的不良地质体,地质背景是影响其发育的重要内因,而目前对地质背景因子与倾倒变形体发育关系的定量研究较少。统计了47处大型倾倒变形体,选取岩层倾角、坡角、坡高、地貌类型、边坡地质结构、岩层厚度、地震峰值加速度等7个影响因子,将各因子划分为不同区间(类),采用贡献率方法计算出各区间(类)对倾倒变形体发育的贡献率,并将其贡献率划分为高、中、低3个等级。结果表明:岩层倾角为 $[70^{\circ}\sim 90^{\circ}]$ 、坡角为 $[40^{\circ}\sim 50^{\circ}]$ 、坡高为 $[100\sim 200\text{ m}]$ 或 $\geq 400\text{ m}$ 、地貌类型为高原或山地、地质结构为软硬互层、层厚为薄层、地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 的一类地质条件,对倾倒变形体发育的贡献率最高,该类边坡应作为防治的重点。

关键词: 倾倒变形体;地质背景;影响因子;贡献率

中图分类号: TU57 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2019.02.011

Contribution Rate of Geological Background on Developing Toppling Deformation of Rock Mass

ZHANG Ming¹, WANG Zhangqiong^{*1}, FAN Yao²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China

Abstract: Toppling deformation of rock mass is a common adverse geological body in the western mountainous region of China, and the geological background is one of important internal factors affecting its development. However, there are few quantitative researches on the relationship between geological background factors and development of toppling deformation of rock mass. We selected 47 large-scale toppling deformation rock mass, and adopted dip angle of rock stratum, slope angle, slope height, geomorphic type, geological structure of slope, thickness of rock stratum and peak seismic acceleration as the influential factors. Then, they were divided into several intervals (classes), and the contribution rates of each interval (class) on developing toppling deformation of rock mass were calculated by the contribution rate method. Finally, the contribution rates of each interval (class) were divided into high, medium and low degrees. The results show that geological background conditions have the highest contribution rate to the development of toppling deformation of rock mass, with rock stratum dip angle of $[70^{\circ}\sim 90^{\circ}]$, slope angle of $[40^{\circ}\sim 50^{\circ}]$, slope height of $[100\sim 200\text{ m}]$ or more than 400 m, in plateau or mountain with soft-hard alternant, thin strata, and peak seismic acceleration more than 0.15g. The slopes with such geological conditions should be the focal point of preventing toppling deformation.

Keywords: toppling deformation rock mass; geological background; influential factor; contribution rate

收稿日期: 2018-07-19

基金项目: 湖北省教育厅科技计划项目(B2017058)

作者简介: 张明, 本科生。E-mail: 3296534072@qq.com

*通讯作者: 王章琼, 博士, 副教授。E-mail: wzqcug@163.com

引文格式: 张明, 王章琼, 范尧. 地质背景对倾倒变形体发育的贡献率[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(2): 155-161.

倾倒变形体一般是反倾边坡岩体在自重弯矩及外力共同作用下向坡面方向发生弯曲-拉裂破坏而形成的不稳定岩体^[1-3]。据统计,我国倾倒变形体主要分布于西南及西部地区,具有规模大、数量多且分布集中、易发性高等特点,尤其在西南流域水利水电工程中倾倒变形体发育最丰富^[4-6]。倾倒变形体发育与多种因素有关,其中地质背景是重要内因,对其形成演化起控制性作用。目前,对倾倒变形体的研究主要集中在变形机理、稳定性分析和发育特征等方面^[7-12]。在地质背景对倾倒变形体发育影响方面,也有学者开展过研究,并取得了一些成果。如陆文博等^[13]采用层次分析法和信息量研究了我国西部倾倒变形体的区域地质与地理位置易发性,发现西南各流域倾倒变形体易发性较高;邱俊等^[14]根据所统计反倾边坡倾倒变形体案例,得出倾倒变形体的分布面积和倾倒深度与坡高正相关的规律;程东幸等^[15]通过对反倾边坡的结构因素、岩体和层面参数因素以及地应力等进行正交数值模拟,得到了优势岩层倾角的范围。上述研究分析了区域地质、地理位置、坡高、边坡地质结构、岩体和层面参数等因素对倾倒变形体发育的影响。由于影响倾倒变形体发育的地质背景因素多而复杂,综合考虑多种影响因素,显然更有利于揭示倾倒变形体发育规律与地质背景条件的内在联系。

贡献率^[16]是分析经济效益的一种指标。近年来,学者开始采用贡献率法来研究不同影响因素与不良地质体发育的相关性。如王章琼等^[17]采用贡献率法分析了滑坡地形坡度,得出了不同地形坡度对滑坡的贡献程度;乔建平等^[18]采用贡献率法分析了滑坡与环境本底因子的区域相关关系,得到岩性、坡度、坡形、高差、坡向 5 个主要因子的贡献量,并评价了各个因子对滑坡发育的贡献程度;刘杰等^[19]对不同岩层的变形模量、黏聚力和内摩擦角进行整体和局部折减计算其安全系数,得出不同参数在不同位置下对特定边坡稳定性的贡献率;成永刚等^[20]利用贡献率法研究了我国各省滑坡贡献率,得出了各省滑坡贡献率并按贡献率大小对各省份进行分类。基于此,本文采用贡献率法研究地质背景条件对倾倒变形体发育的影响程度。研究结果可为倾倒变形体安全性评估及防护设计提供参考。

1 倾倒变形体数据库资料

本文以 47 处大型倾倒变形体案例^[3-4, 14, 21-50]建

立数据库,如表 1 所示。地质背景影响因子在倾倒变形体发育的过程中起至关重要作用,其中常见地质背景影响因子有岩层倾角、坡角、坡高、地貌类型、边坡地质结构、岩层厚度、地震峰值加速度、岩性、岩层面与坡面夹角等。根据目前所掌握的相关资料,本文选取地貌类型、边坡地质结构、岩层倾角、坡角、坡高、岩层厚度及地震峰值加速度等 7 个影响因子,将各因子划分为不同区间(类),划分情况如表 2~表 6 所示。

2 地质背景影响因子数量贡献率

2.1 贡献率

通过贡献率可计算出倾倒变形体地质背景影响因子的数量贡献率,进而可得出各地质背景影响因子与其数量贡献率之间的关系曲线。各地质背景影响因子区间(类)的数量贡献率计算公式为:

$$Q_i(m) = O_i(m) / N_k \tag{1}$$

式(1)中 m 为地质背景影响因子集, $m \in (a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j, g_j)$, a_j 为不同岩层倾角区间, b_j 为不同坡角区间, c_j 为不同坡高区间, d_j 为不同地貌类型, e_j 为不同边坡地质结构, f_j 为不同岩层厚度, g_j 为不同地震峰值加速度; $O_i(m)$ 为各地质背景影响因子区间(类)的倾倒变形体数量, $Q_i(m)$ 为各地质背景影响因子区间(类)的倾倒变形体数量贡献率; N_k 为倾倒变形体总数。利用式(1)可得各地质背景影响因子与其数量贡献率之间的关系曲线,如图 1 所示。

2.2 地质背景影响因子数量贡献率分析

由图 1(a)可知,岩层倾角为[70~90°]时,岩层倾角的倾倒变形体数量贡献率最大;岩层倾角为[50~70°]时,岩层倾角的倾倒变形体数量贡献率中等;岩层倾角 < 50°时,岩层倾角的倾倒变形体数量贡献率最小。本文所选取倾倒变形体均由反倾边坡发育而来,斜坡坡肩处岩层在重力作用下呈现拉裂状态,岩层易沿节理面开裂,同时地表水沿裂隙进入岩层形成静水压力。在这两种地质作用下,岩层弯曲折断,岩层倾角为[70~90°]的斜坡由于早期破坏已趋于稳定,而目前岩层倾角为[50~70°]斜坡更容易发生倾倒变形。

由图 1(b)可知,当坡角为[40°~50°]时,坡角的倾倒变形体数量贡献率最大;当坡角为[50~60°]或 < 40°时,坡角的倾倒变形体数量贡献率偏低;当坡角 ≥ 70°时,坡角的倾倒变形体数量贡献率最低。坡角的大小可以改变斜坡内的应力分

表 1 倾倒变形体数据库

Tab. 1 Database of toppling deformation of rock mass

编号	位置	名称	编号	位置	名称
1	四川省凉山州盐源县与木里县交界处	锦屏—三滩河段水文站坝址右岸倾倒变形体	25	青海省共和县与贵德县交界处	茨哈峡电站 I 号倾倒体
2	青海省兴海县与同德县交界处	班多水电站 I 号倾倒体	26	青海省循化撒拉族自治县	公伯峡水库岸近坝岸库古什群倾倒变形体
3	青海省海南州	西北某电站坝址 1#倾倒变形体	27	四川省青川县	青川 1#变形体
4	川藏交界的金沙江上游河段	西南某水电站倾倒变形体	28	四川省甘孜州新龙县	甲西倾倒体
5	青海省兴海县	黄河茨哈水电站引水发电进山口倾倒体边坡	29	西藏东南林芝地区	老虎嘴水电站交通洞出口边坡倾倒变形体
6	青海省共和县	黄河上游茨哈峡水电站倾倒边坡	30	云南省丽江市玉龙县	某水电站右坝肩 I 号倾倒变形体
7	吉林省吉林市	吉林市绕城高速公路 K36+200 处倾倒边坡	31	云南省丽江市玉龙县	某水电站右坝肩 II 号倾倒变形体
8	广西河池市	龙滩水电站左岸倾倒体	32	四川省阿坝州金川县	金川隧道进口边坡倾倒体 QD1
9	湖北省宜昌市	广家崖倾倒变形体	33	云南省云龙县	小浪底工程库区岸坡倾倒变形
10	四川省江油市	QD8 倾倒体	34	广西河池市	龙滩工程左岸高边坡
11	青海南部	黄河上游某倾倒体	35	云南省云龙县	澜沧江右岸直立岩体
12	云南省迪庆州	里底水电站坝址右岸倾倒变形体	36	云南省迪庆州	澜沧江巴东岸坡倾倒岩体
13	青海省兴海县与同德县交界	班多水电站 4#倾倒体	37	云南省迪庆州	乌弄龙水电站大型倾倒变形
14	云南省大理白族自治州	澜沧江苗尾水电站右坝肩倾倒体	38	湖南省冷水市	资江浪石滩边坡
15	甘肃文县	麒麟寺水电站坝前左岸	39	湖南省中部	资江敷溪口右岸边坡
16	新疆阿克苏地区	黑孜水库坝址右岸坝肩倾倒变形体	40	四川省盐源县与木里县交界处	雅砻江锦屏水电站三滩坝址右岸坡
17	甘肃省文县	碧口水电站右岸(导流洞出口)倾倒体	41	四川省阿坝州	岷江支流黑水河右岸某边坡
18	辽宁省抚顺市	露天矿北帮西区边坡	42	云南省兰坪县	黄登水电站近坝库岸边坡
19	澜沧江上游河段	澜沧江上游某水电站坝肩岩体	43	江西省赣州市	新龙水电站近坝右岸边坡
20	横断山脉澜沧江纵谷地区	澜沧江某水电站右坝肩岩体	44	江西省丰城市	龙头水库电站 2#倾倒变形体
21	云南省云龙县	苗尾水电站右岸倾倒变形体	45	西藏怒江上游	怒江俄米水电站坝前 2#倾倒变形体
22	甘肃省玉门市	昌马水库倾倒变形边坡	46	广西隆林自治县与贵州省安龙县接壤处	天生桥二级水电站厂房区南坡
23	甘肃省文县	碧口水电站库区 1#倾倒体边坡	47	金沙江右岸支流巴曲左岸	川藏公路茶树山滑坡
24	云南迪庆藏族自治州	某水电站边坡倾倒变形体			

表 2 岩层倾角、坡角区间划分
Tab. 2 Classification of dip angle of
rock stratum and slope angle

岩层倾角区间	倾角范围	坡角区间	倾角范围
a_1	$[0 \sim 40^\circ)$	b_1	$[0 \sim 40^\circ)$
a_2	$[40 \sim 50^\circ)$	b_2	$[40 \sim 50^\circ)$
a_3	$[50 \sim 60^\circ)$	b_3	$[50 \sim 60^\circ)$
a_4	$[60 \sim 70^\circ)$	b_4	$[60 \sim 70^\circ)$
a_5	$[70 \sim 90^\circ]$	b_5	$[70 \sim 90^\circ]$

表 3 坡高区间、地貌类型划分
Tab. 3 Classification of slope height and geomorphic type

坡高区间	坡高范围	地貌类型 符号表示	地貌类型
a_1	$[0 \sim 100 \text{ m})$	b_1	平原
a_2	$[100 \sim 200 \text{ m})$	b_2	丘陵
a_3	$[200 \sim 300 \text{ m})$	b_3	盆地
a_4	$[300 \sim 400 \text{ m})$	b_4	山地
a_5	$\geq 400 \text{ m}$	b_5	高原

表 4 倾倒变形体地质结构分类
Tab. 4 Classification of geological structure of slope

边坡地质结构符号表示	边坡地质结构类型
e_1	结构均一
e_2	上软下硬
e_3	上硬下软
e_4	软硬互层

表 5 边坡岩层厚度分类
Tab. 5 Classification of thickness of rock stratum

岩层厚度符号表示	岩层厚度类型
f_1	极薄-薄
f_2	薄
f_3	薄~中厚
f_4	薄~厚
f_5	中厚
f_6	中厚~厚
f_7	厚

表 6 倾倒变形体地震峰值加速度分类
Tab. 6 Classification of peak seismic acceleration

地震峰值加速度符号表示	地震峰值加速度
g_1	$< 0.05g$
g_2	$0.05g$
g_3	$0.10g$
g_4	$0.15g$
g_5	$0.20g$
g_6	$\geq 0.30g$

注： $g=9.806\ 65\text{ m/s}^2$

布,坡角处的剪力集中带和坡肩附近的张力带的大小及范围均会随着坡角的增大而增大。现阶段,由于坡角 $\geq 70^\circ$ 和 $[50^\circ\sim60^\circ)$ 的斜坡经过多次

地质作用已经趋于稳定,坡角 $< 40^\circ$ 的斜坡由于较缓而不易发生破坏,坡角处于 $[40^\circ\sim50^\circ)$ 的斜坡经过长期地质作用,岩质松散,节理发育丰富,在降雨或地震等条件下极易发生破坏。

由图 1(c)可知,当坡高为 $[100\sim200\text{ m})$ 或 $\geq 400\text{ m}$ 时,坡高的倾倒变形体数量贡献率最高;当坡高 $< 100\text{ m}$ 时,坡高的倾倒变形体数量贡献率中等;当坡高为 $[200\sim400\text{ m})$ 时,坡高的倾倒变形体数量贡献率最低。随着坡高的增大,应力值随之增大,当应力值超过坡体介质极限强度时,坡体发生破坏。坡高为 $[100\sim200\text{ m})$ 的斜坡多为受人类工程活动影响而发生倾倒破坏,而坡高 $\geq 400\text{ m}$ 的斜坡由于其应力值过大容易发生变形破坏。

由图 1(d)可知,地貌类型为高原和山地的倾倒变形体数量贡献率最高,地貌类型为盆地的倾倒变形体数量贡献率偏低,地貌类型为丘陵和平原的倾倒变形体数量贡献率最低。我国的高原和山地地区普遍分布于西南及西部山区,该地区较其他地区有以下几个特点:风化作用较其他地区强烈;斜坡陡倾;是我国地震带主要的分布地区。综合以上因素可知,高原与山区容易发生斜坡的倾倒变形破坏。

由图 1(e)可知,边坡地质结构为软硬互层时,反倾边坡发生倾倒变形的概率最大;边坡地质结构为结构均一时,对反倾边坡发生倾倒变形的概率中等;边坡地质结构为上硬下软和上软下硬时,反倾边坡发生倾倒变形的概率最低,边坡地质结构为软硬互层的斜坡:由于软岩与硬岩之间存在节理面而未能形成高度统一的整体,因此整个斜坡的稳定性较弱。

由图 1(f)可知,当岩层厚度组合为薄、薄~极薄、薄~中厚时,岩层厚度的倾倒变形体数量贡献率最高;当岩层厚度为中厚时,岩层厚度的倾倒变形体数量贡献率中等;当岩层厚度组合为厚、薄~厚、中厚~厚时,岩层厚度的倾倒变形体数量贡献率最低。薄岩层在重力作用下压碎形成软弱夹层,故岩层组合为薄、薄~极薄、薄~中厚的斜坡岩质松散,裂隙高度发育,斜坡稳定性低,易在降雨地震等条件下发生变形破坏。

由图 1(g)可知,地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 时,地震峰值加速度的倾倒变形体数量贡献率最大;地震峰值加速度 $< 0.05g$ 时,地震峰值加速度的倾倒变形体数量贡献率中等;地震峰值加速度为 $0.10g$ 和 $0.05g$ 时,地震峰值加速度的倾倒变形体数量贡献率最低。地震峰值加速度越大,表明该

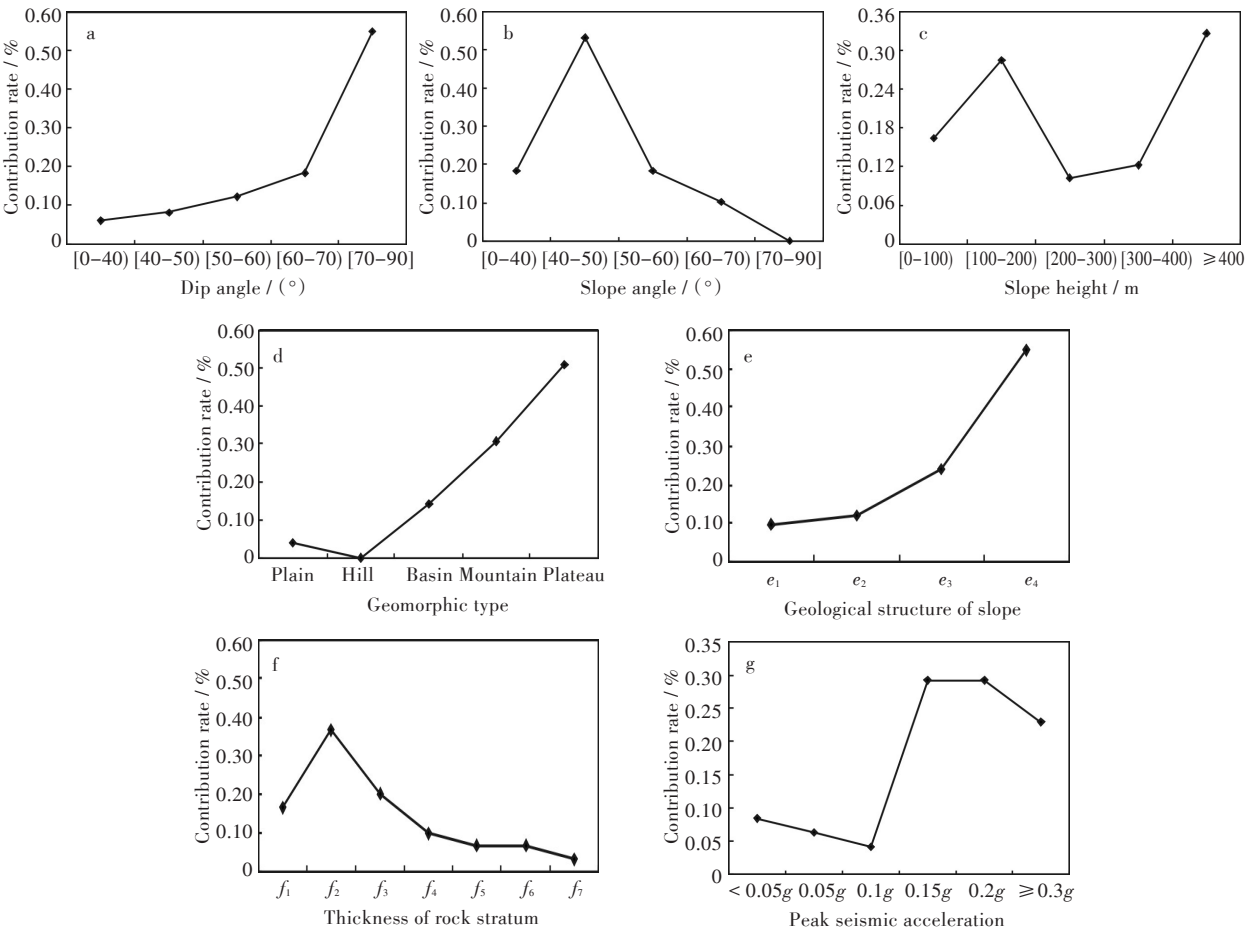


图1 地质背景影响因子与其数量贡献率之间的关系曲线：

(a)倾角,(b)坡角,(c)坡高,(d)地貌类型,(e)边坡地质结构,(f)岩层厚度,(g)地震峰值加速度

Fig. 1 Relationships between geological background factors and their quantitative contribution rates:

(a)dip angle of rock stratum,(b)slope angle,(c)slope height,(d)geomorphic type,(e)geological structure of slope,
(f)thickness of rock stratum,(g)peak seismic acceleration

地区地质活动越强裂。在长期的地质演化过程中,地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 的地区,大多数不稳定斜坡受地震作用早已发生破坏,而地震峰值加速度为 $0.10g$ 和 $0.05g$ 的地区经过长期地质营力作用,坡体遭到严重侵蚀,现阶段在作用影响下极易发生变形破坏。

3 倾倒变形体影响因子贡献程度评价

由式(1)计算各影响因子不同区间(类)的贡献率,然后根据贡献率大小将不同影响因子按区间(类)划分为高、中、低3个等级(见表7)。本文通过研究倾倒变形体发育影响因子贡献率,得出

表7 地质背景因子的贡献率分类

Tab. 7 Classification of contribution rates for geological background factors

贡献率分区	坡角 / °	岩层倾角 / °	坡高 / m	地貌类型	岩层厚度	边坡地质结构	地震峰值加速度
高	[40 ~ 50]	[70 ~ 90]	[100 ~ 200]	高原	薄		$\geq 0.3g$
			≥ 400	山地	薄+极薄	软硬互层	$0.2g$
					薄+中厚		$0.15g$
中	[0 ~ 40]	[50 ~ 60]	[0 ~ 100]	盆地	中厚	结构均一	$< 0.05g$
	[50 ~ 60]	[60 ~ 70]					
低	[60 ~ 70]	[0 ~ 40]	[200 ~ 300]	平原	中厚+厚	上软下硬	$0.1g$
	[70 ~ 90]	[40 ~ 50]	[300 ~ 400]	丘陵	薄+厚	上硬下软	$0.05g$
					厚		

注： $g=9.806\ 65\ m/s^2$

了影响因子各区间对倾倒变形体发育的贡献程度大小。结果表明:

1)地貌类型为高原或山地、边坡地质结构类型为软硬互层、岩层倾角为 $[70^{\circ}\sim 90^{\circ}]$ 、坡角为 $[40^{\circ}\sim 50^{\circ}]$ 、坡高为 $[100\sim 200\text{ m}]$ 或 $\geq 400\text{ m}$ 、岩层厚度以薄层为主、地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 的一类地质背景条件,对倾倒变形体发育的贡献率最高。

2)地貌类型为盆地、边坡地质结构类型为结构均一、岩层倾角为 $[50^{\circ}\sim 70^{\circ}]$ 、坡角为 $[50^{\circ}\sim 60^{\circ}]$ 或 $< 40^{\circ}$ 、坡高 $< 100\text{ m}$ 、岩层厚度以中厚层为主、地震峰值加速度 $< 0.05g$ 的一类地质背景,对倾倒变形体发育的贡献率中等。

3)地貌类型为平原或丘陵、边坡地质结构类型为上硬下软或上软下硬、岩层倾角 $< 50^{\circ}$ 、坡角为 $[60^{\circ}\sim 90^{\circ}]$ 、坡高为 $[200\sim 400\text{ m}]$ 、岩层厚度以厚层为主、地震峰值加速度 $< 0.05g$ 的一类地质背景,对倾倒变形体发育的贡献率最低。贡献率法分析倾倒变形体发育影响因子的贡献程度可为我国反倾边坡安全性评估和工程防护提供参考。

4 结 语

本文通过统计国内倾倒变形体案例,并采用贡献率分析法对倾倒变形体地质背景影响因子进行贡献率研究,得出结论如下:

1)地貌类型为高原或山地、边坡地质结构类型为软硬互层、岩层倾角为 $[70^{\circ}\sim 90^{\circ}]$ 、坡角为 $[40^{\circ}\sim 50^{\circ}]$ 、坡高为 $[100\sim 200\text{ m}]$ 或 $\geq 400\text{ m}$ 、岩层厚度以薄层为主、地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 的一类地质背景条件,对倾倒变形体发育的贡献率最高。

2)本文通过贡献率法分别得出了岩层倾角、坡角、坡高、地貌类型、边坡地质结构、岩层厚度、地震峰值加速度的贡献率曲线,可知地质背景影响因子不同区间(类)对倾倒变形发育的贡献程度有着明显差异。

3)分析结果表明我国倾倒变形体主要发育于地震峰值加速度 $\geq 0.15g$ 的高原地区。该区域位于地中海-喜马拉雅地震带,地壳运动活跃,因此在该区域地震峰值加速度对倾倒变形体的发育起着极其重要的作用。

参考文献

[1] 李玉倩,李渝生,杨晓芳. 某水电站边坡倾倒变形破坏模式及形成机制探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2008,6(3):39-40,46.

[2] 屈新,苏立君,张崇磊,等. 基于潘家铮原理的反倾向

层状边坡弯曲倾倒破坏基准面搜索算法[J]. 工程科学与技术,2017,49(5):42-49.

- [3] 张以晨,何磊,沈世佳,等. 反倾层状岩质边坡倾倒破坏力学模型[J]. 吉林大学学报,2011,41(1):207-213.
- [4] 张泽林,吴树仁,唐辉明,等. 反倾岩质边坡的时效变形破坏研究[J]. 地质科技情报,2014,33(5):181-187.
- [5] 张浴阳,巨能攀,周新. 倾倒变形体边坡层间破碎带土体三轴蠕变试验研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(1):232-236.
- [6] 张发明,张万奎,王文远,等. 倾倒变形岩体发育强度与极限深度的确定方法[J]. 工程地质学报,2015,23(6):1109-1116.
- [7] 庞波,郑达,黄鹏. 基于流变模型的反倾层状岩体倾倒变形发育深度的力学的分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(18):129-134.
- [8] 王章琼,晏鄂川,谢良甫,等. 基于变形分区确定反倾岩质岸坡变形锁固段[J]. 工程地质学报,2015,23(3):394-400.
- [9] 王林峰,陈洪凯,唐红梅. 复杂反倾岩质边坡的稳定性分析方法研究[J]. 岩土力学,2014,35(1):181-188.
- [10] 韦明华. 反倾层状边坡倾倒变形破坏模式的岩层等厚度特性研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(31):141-146.
- [11] 张亮华,谢良甫,李兴明. 反倾层状岩质边坡倾倒变形时空演化特征研究[J]. 长江科学院报,2017,34(11):112-120.
- [12] 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(2):4252-4261.
- [13] 陆文博,晏鄂川,邹浩,等. 我国倾倒变形体发育规律研究[J]. 长江科学院报,2014,22(6):1204-1210.
- [14] 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(2):513-532.
- [15] 程东幸,刘大安,丁恩保,等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J]. 岩土工程学报,2005,27(11):1362-1366.
- [16] 成永刚,王玉峰. 层面倾角对顺层岩质滑坡贡献率研究[J]. 岩土力学,2011,32(12):3708-3712.
- [17] 王章琼,晏鄂川,王鲁南,等. 地形坡度对鄂渝地区水库型堆积滑坡贡献率研究[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1204-1210.
- [18] 乔建平,杨宗佑. 贡献率法确定三峡库区滑坡发育环境本底因子[J]. 自然灾害学报,2008,17(5):47-51.
- [19] 刘杰,李建林,宛良朋,等. 基于岩层参数贡献率分析的大岗山坝肩边坡模糊评判方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):2836-2843.
- [20] 成永刚,王玉峰. 我国各省滑坡贡献率研究[J]. 铁

道工程学报,2012,29(11):5-10.

[21] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩土力学与工程学报,2007,26(3):433-454.

[22] 宋彦辉,黄民奇,陈新建. 班多水电站左岸 I 号倾倒体破坏机制分析[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):50-52.

[23] 朱林,林锋. 龙滩电站左岸倾倒体演化机理离散元分析[J]. 甘肃水利水电技术,2016,52(1):20-26.

[24] 刘应龙,任光明,陈强,等. 反倾层状岩体倾倒变形强烈程度研究[J]. 中国水运,2008,12(8):185-186.

[25] 李高勇,刘高,谢裕江. 黄河上游某倾倒体的时效变形研究[J]. 工程地质学报,2013,21(6):835-841.

[26] 李树武,杨健,杨永明,等. 里底水电站坝址右岸倾倒变形岩体成因机制和变形程度[J]. 水力发电,2011,37(8):21-23,48.

[27] 李刚,赵其华,陈强,等. 某水电站大型倾倒体变形破坏特征及稳定性分析[J]. 人民长江,2014,45(5):53-56.

[28] 苟富民. 麒麟寺水电站坝前左岸倾倒体稳定性分析研究[J]. 西北水电,2008,27(8):8-14.

[29] 洪玉辉. 碧口水电站右岸倾倒体高边坡稳定性分析与评价[J]. 西北水电,1994,13(1):10-14.

[30] 洪玉辉. 倾倒体边坡的稳定性分析及其工程处理措施[J]. 西北水电,1988,7(4):1-8.

[31] 马新民,霍起元,芮勇勤. 露天煤矿倾倒滑移体的稳定分析方法[J]. 露天采煤技术,1994(1):29-36.

[32] 王洁,李渝生,鲍杰,等. 澜沧江上游某水电站坝肩岩体倾倒变形的成因控制条件研究[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(4):45-48.

[33] 谢莉,李渝生,曹建军,等. 澜沧江某水电站右坝肩岩体倾倒变形体的数值模拟[J]. 中国地质,2009,36(4):907-914.

[34] 张传信,李云春,姚亚军. 苗尾水电站右岸倾倒变形边坡加固设计[J]. 人民长江,2016,47(11):82-85.

[35] 齐典涛. 昌马水库倾倒变形边坡特征形成机制及发育深度[J]. 西部探矿工程,2001,10(6):47-49.

[36] 张克新,任光明,刘金阳. 某电站库区 1#倾倒体边坡稳定性评价[J]. 水土保持研究,2007,14(1):313-314,317.

[37] 李玉倩,李渝生,杨晓芳. 某水电站边坡倾倒变形破坏模式及形成机制探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(3):39-40,46.

[38] 宋彦辉,黄民奇,孙苗. 节理网络有限元在倾倒斜坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学,2011,32(4):1205-1210.

[39] 马福祥,王林维,陈奇珠. 倾倒变形体底滑面综合强度参数的选取[J]. 西北水电,2002(2):22-24.

[40] 郑海泽,刘毅. 倾倒稳定性分析及稳定性计算中的一些问题探讨[J]. 岩土工程界,2009,12(12):13-15,17.

[41] 王飞,唐辉明. 雅砻江上游互层斜坡倾倒变形破坏机制与演化[J]. 工程地质学报,2017,25(6):1501-1508.

[42] 周言,王启鸿,符文熹. 一大型倾倒边坡非线性强度折减稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(3):108-112.

[43] 施裕兵,李崇标,周波. 西南某水电站右坝肩倾倒变形体发育特征及处理[J]. 四川水力发电,2006,25(6):77-79.

[44] 黄志煌,李天斌. 反倾层状岩质边坡内开挖隧道引发边坡失稳与隧道塌方的机制和治理研究[J]. 地质灾害与环境保护,2009,20(4):76-80.

[45] 陈志坚. 黄河小浪底坝段倾倒滑移体变形破坏特征及其形成机制探讨[J]. 水利水电技术,1991,21(9):44-50.

[46] 张靖峰. 龙滩工程左岸高边坡倾倒蠕变岩体综合治理[J]. 水利水电施工,2004,11(4):10-13.

[47] 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,2008,15(2):300-304.

[48] 张军新,魏伟,刘彬. 澜沧江巴东岸坡倾倒岩体特征及成因机制分析[J]. 山西建筑,2010,36(26):88-89.

[49] 周洪福,聂德新,李树武. 澜沧江某水电工程大型倾倒变形体边坡成因机制[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):48-52.

[50] 庞声宽. 水电站厂房南坡的倾倒破坏及整治措施[J]. 水利水电技术,1990,20(3):9,20-23.

本文编辑:苗 变