

岩层倾角对顺倾向边坡地震效应的影响^①

丁梓涵¹, 赵其华¹, 彭社琴², 陈继彬², 喻豪俊²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:利用 FLAC^{3D} 软件模拟地震作用下不同岩层倾角的顺倾向边坡, 对比坡面峰值加速度放大系数、峰值位移、地震作用结束后坡体剪应变增量的变化规律, 探讨岩层倾角对顺倾边坡地震效应的影响。研究表明: (1) 在水平地震波作用下, 坡面水平峰值加速度放大作用随岩层倾角增大而线性减小; (2) 当岩层倾角小于软弱岩层内摩擦角时, 坡面峰值位移较小且变化规律受岩层倾角影响不明显, 当岩层倾角大于软弱岩层内摩擦角且小于 30° 时坡面峰值位移增大, 大于 60° 时减小; (3) 岩层倾角小于坡角时, 残余剪应变增量最大值集中在坡面中下部软弱岩层处, 反之, 剪应变增量最大值出现在整个坡面并呈弧形区。

关键词: 岩层倾角; 数值模拟; 顺倾向层状岩质边坡; 地震效应

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-0956-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0956

Impact of Dip Angle of Rock Stratum on Seismic Response of Consequent Slope

DING Zi-han¹, ZHAO Qi-hua¹, PENG She-qin², CHEN Ji-bin², YU Hao-jun²

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The southwest of China is located in a seismically active area, and in recent years earthquakes exceeding 7.0 magnitude have occurred in many locations in Yunnan and Sichuan provinces. In addition, the consequent stratified rock slope is developed well in the southwest of China, and this means that the strike and inclination direction of the slope is same as that of the rock stratum. Instability and failure of the consequent stratified rock slope is common during the construction of railways, highways, and water conservancy and hydropower engineering projects in the southwest of China. This is an urgent engineering construction problem which must be recognized and solved as soon as possible. Currently, there are certain researches being conducted on the seismic effects of this kind of slope, and the methods being used focus on the analysis of mechanical systems and model experiments. In these studies, the range of the rock stratum's dip angle is not sufficiently comprehensive and do not fully represent the seismic effects of dip angle of the rock stratum on the slope. Nor is the thickness of the rock layer in numerical simulations sufficiently precise, which affects the accuracy of the numerical simulation results. Using FLAC^{3D} software, in this study we simulated the consequent stratified rock slope for different dip angles of rock stratum (0°~90°) and detailed the thickness of the stratum (sandstone is 1 m thick, weak

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB013501); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0812)

作者简介: 丁梓涵(1990—), 女, 甘肃兰州人, 在读硕士, 主要从事地质工程方面的研究。E-mail: 1325670994@qq.com。

通信作者: 赵其华(1965—), 男, 教授、博导, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究。E-mail: zhqh310@qq.com。

mudstone is 0.1 m thick) under seismic action. We then contrasted the regulation of the peak acceleration amplification factor, peak displacement, and shear strain increment after seismic action, and explored the impact of the rock stratum's dip angle on the seismic effect of the consequent stratified rock slope. This analysis will help to explain the instability mechanisms and slope failure modes, and lay the groundwork for disaster prevention in consequent stratified rock slopes. The study results are as follows: First, the peak horizontal acceleration amplification factor, which is relative to the slope toe, increases with increase in slope height, with the maximum occurring at the slope shoulder. This rule conforms to existing experimental conclusions. Then, under the effect of horizontal seismic action, slope horizontal peak acceleration amplification, which is relative to the initial seismic waves, decreases linearly with increase in the dip angle of the rock stratum. Second, when the dip angle of the rock stratum is less than the internal friction angle of weak rock stratum, the slope peak displacement is small and the influence of the dip angle is not obvious. When the dip angle of the rock stratum is larger than internal frictional angle of weak rock stratum, the slope peak displacement will increase at first and then decrease with increases in the dip angle. This displacement increases when the dip angle of the rock stratum is less than 30° , and decreases when the dip angle of the rock stratum is larger than 60° . Third, when the dip angle of the rock stratum is less than the slope angle, the maximum value of the slope residual shear strain increment after seismic action is concentrated in the soft rock in the middle and lower segments of the slope. When the dip angle of the rock stratum is larger than the slope angle, the maximum value of the residual shear strain increment after seismic action will be in the whole slope, thus forming an arc zone.

Key words: dip angle of rock stratum; numerical simulation; consequent stratified rock slope; seismic effect

0 引言

我国西南地区位于青藏高原东南隅,是印度和欧亚两大板块汇聚、挤压、相互作用的边缘地带,也是我国大陆内部地震活动最强烈的地区之一^[1]。近年来云南通海、昭通,四川叠溪、炉霍、松潘、平武、汶川以及芦山等地都发生过 7.0 级以上地震。除了地震能量、持时等原因,地形、地层岩性及地质结构等对地震波放大效应的综合作用,也易引发滑坡、崩塌等地质灾害^[2-5]。

层状岩体在我国陆地面积中占到 77.3%^[6]。顺倾向坡或顺层坡是指坡面走向和倾向与岩层走向和倾向一致或接近一致的层状结构岩体斜坡。顺倾向坡的失稳破坏在广大碳酸盐岩分布区,特别是在我国西南地区的铁路、公路、水利水电工程建设中广泛分布^[7],如湖南拓溪水库塘岩光滑坡、三峡鸡扒子滑坡、成昆铁路铁西滑坡都是顺层斜坡失稳发生滑坡并带来灾难性后果的显著范例。因此顺倾向岩质边坡在地震作用下的稳定性问题^[8]是我国西南地区铁路、公路、输电工程等工程建设必须面对和亟待解决的问题之一。

目前国内外对顺倾向岩质边坡地震效应的研究取得了一定成果。罗刚等^[9]认为地震作用下顺倾向层状边坡沿结构面失稳破坏,主要取决于结构面倾角、内摩擦角、两侧岩体的波阻抗及地震波入射角。董金玉等^[10]通过模拟顺层与均质边坡,得出岩层结构面对地震波的反射和折射作用会加大坡体加速度的放大效应。刘汉香^[11]通过大型振动台试验得出,当地震荷载加载方向与水平层面平行时,含水平层面的斜坡比均质斜坡产生更强的高程放大效应。许强等^[12]用物理模拟方法研究了水平层状岩质边坡的加速度动力响应,在水平地震波作用下,斜坡的显著动力响应主要出现在斜坡的中上段,上硬下软组合斜坡比上软下硬组合斜坡对加速度的放大程度大。李果^[13]利用数值模拟方法得出顺层斜坡的显著地震效应区域位于坡脚,反倾斜坡位于坡体中部。李海波等^[14]用离散元程序 UDEC 模拟了岩层倾角为 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的顺倾向岩质边坡,得出倾角越大,安全系数越小的结论。滕光亮等^[15]采用离散单元法模拟地震作用下含不同组合的两组节理的岩质边坡,得出其稳定性变化较为复杂,受节理倾角与坡角的

关系、节理的倾向、两组节理之间夹角等因素的影响。

顺倾向层状岩质边坡的研究方法多以基于力学体系的分析推导和模型实验为主。由于耗时长、费用大,现有物理模拟研究中岩层倾角范围较小,不能全面了解岩层倾角对边坡地震效应的影响。同时在一些数值模拟中,考虑岩层会增加模型建立及空间单元划分的复杂性,因此多采用简化的做法如放大层面厚度,这在一定程度上会影响数值模拟的效果。

本文利用 FLAC^{3D} 数值分析软件^[16-17],精细模拟岩层厚度,全面设计岩层倾角(0°~90°),建立地震作用下不同岩层倾角的边坡模型,探讨岩层倾角对顺倾向层状边坡地震效应的影响。这有助于解释边坡失稳机制和破坏模式,为顺倾向层状岩质边坡的防灾减灾工作做基础。

1 顺倾层状边坡数值模型

数值模拟的地层原型为四川省峨眉山白垩系下统夹关组地层,厚约 453 m,具大型交错层理、平行层理、波痕、干裂及冲刷面构造,以砖红色厚-巨厚层状砂岩为主,夹紫红色薄层泥岩。砂岩厚 50~120 cm,为粉砂-中砂结构;泥岩厚 3~10 cm。图 1 所示为夹关组出露砂岩泥岩互层。

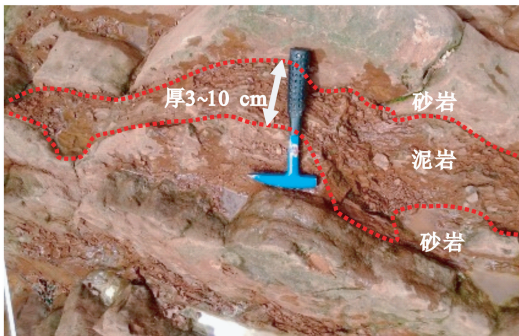


图 1 砂岩泥岩互层
Fig.1 Sandstone and mudstone layer

本文模拟砂岩夹薄层软弱泥岩的顺倾向边坡。考虑到理论模型的计算精确度与计算用时,同时为了减少边界效应的影响,按文献^[16]的建议设计模型,沿 x 、 y 、 z 方向 30°边坡尺寸为 48 m×10 m×20 m,50°边坡尺寸为 57 m×10 m×20 m。计算模型取砂岩厚为 1 m,泥岩厚为 10 cm。

根据炉霍地震、昭通地震、松潘平武地震的现场调查和遥感解译,诱发滑坡的优势坡度范围为 30°~50°^[18-19]。“5·12”汶川大地震灾后地质灾害调查及研究也得出绝大部分岩坡震害都集中在坡度 20°

~50°范围内^[20]。因此本文取边坡坡度为 30°和 50°两种,取岩层倾角为 0°、15°、20°、30°、40°、50°、60°、75°、90°共九种,改变岩层倾角和边坡坡度进行模拟。在模型中间纵剖面的坡面上,从坡脚起,顺坡面而上每隔坡高 2 m 设置一个监测点。图 2 所示为边坡坡度 30°,岩层倾角 50°的三维数值模型。

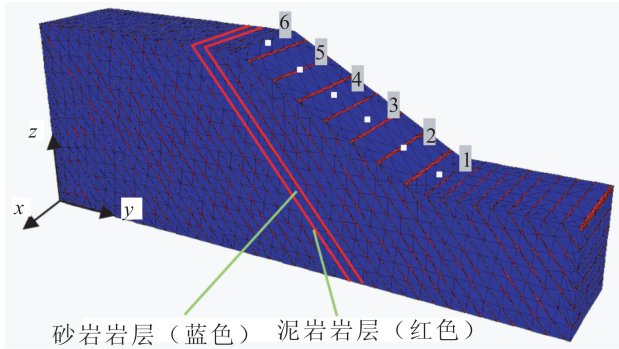


图 2 计算模型及监测点
Fig.2 Computational model and monitoring sites

数值模拟中,岩体材料采用理想弹塑性模型,破坏准则采用 Mohr-Coulomb 准则。不同岩层按照连续介质处理,赋予不同的物理力学参数^[15](表 1)。边界条件和阻尼按文献^[16]设定。静力边界条件为底部边界设定水平和竖直方向位移约束,侧向边界设定水平位移约束,顶部为自由边界;在动力计算时,模型周围边界条件选取自由场边界,主体网格的侧边界通过阻尼器与自由场网格进行耦合,自由场边界提供了与无限场地相同的效果,模型材料阻尼取 0.05。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock material						
岩体类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/ $(^\circ)$	抗拉强度/MPa
砂岩	2 400	10.3	0.25	500	35	1.41
软弱泥岩	2 300	1.7	0.32	80	18	0.1

选择汶川卧龙台监测到的地震波作为本次计算的基准波,对其进行人工滤波、截取及缩小幅值,将地震加速度调整至Ⅷ烈度区。处理后的基准波地震作用历时 25 s,单位时间步长 0.02 s,历时 10~22 s 左右为振动峰值区,最大峰值加速度为 2.033 m/s^2 ,加速度时程曲线如图 3 所示。本次计算考虑水平地震波和竖向地震波耦合作用情况,计算时首先施加重力,然后清除自重作用形成的位移场和速度场,再在模型底面水平输入加速度时程,进行地震作用

下的边坡动力响应分析。

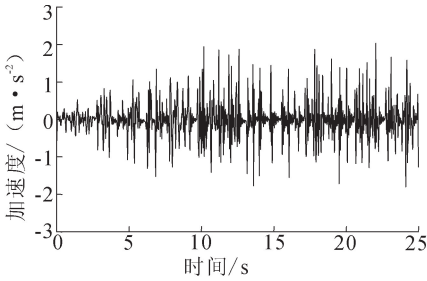


图 3 地震波加速度时程曲线

Fig.3 Time-history curve of seismic wave acceleration

2 边坡地震效应分析

收集边坡坡面地震峰值加速度及峰值位移,用以表征边坡地震效应,同时收集地震作用结束后的残余剪应变增量。

引入无量纲加速度放大系数 η_1 和 η_2 。 η_1 为边坡地震动力响应加速度波动峰值与坡脚加速度波动峰值的比值,用以对比坡面加速度的高程放大效应; η_2 为边坡地震动力响应峰值加速度与原始地震波峰值加速度 2.033 m/s^2 的比值,用以分析岩层倾角对坡面加速度的放大作用。

2.1 峰值加速度放大系数 η_1

研究发现无论岩层倾角为多少,坡面的加速度放大系数 η_1 变化规律相似,此处以岩层倾角 20° 为例。图 4 为边坡坡度为 30° 和 50° 时,坡面相对坡脚的水平和竖向峰值加速度放大系数变化。由图 4 可见,从坡脚顺坡而上加速度呈单调增大趋势,在坡肩达到最大值, 30° 边坡坡肩处加速度放大 1.68 倍, 50° 边坡放大 1.88 倍,且水平加速度均大于竖向加速度。

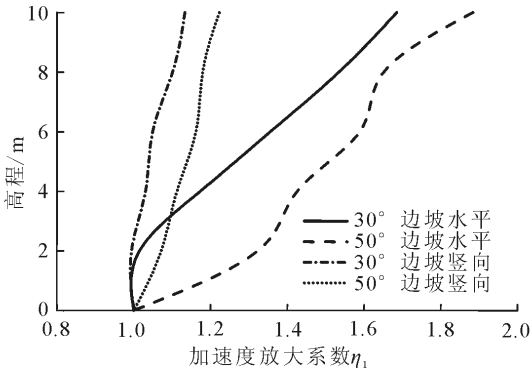


图 4 30° 与 50° 边坡峰值加速度放大系数 η_1

Fig.4 Peak acceleration amplification factor η_1 of the 30° slope and the 50° slope

表 2 为不同岩层倾角的边坡坡肩处 η_1 值。如

表所示, 50° 边坡加速度随高程放大作用整体强于 30° 边坡; 50° 边坡坡肩水平加速度相对于坡脚平均放大 1.65 倍, 30° 边坡平均放大 1.51 倍; 50° 边坡坡肩竖向加速度相对坡脚平均放大 1.26 倍, 30° 边坡平均放大 1.18 倍。

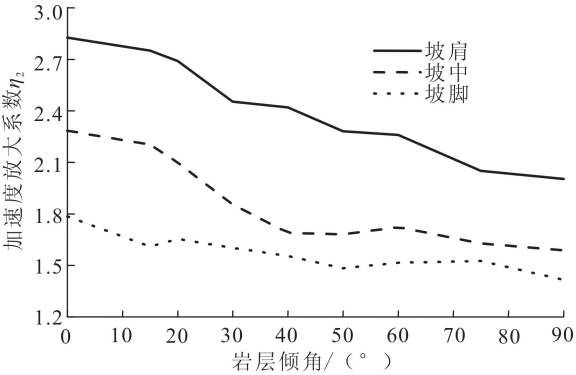
表 2 不同岩层倾角边坡坡肩峰值加速度放大系数 η_1

Table 2 Peak acceleration amplification factor η_1 of slope shoulder with different dip angle of rock stratum

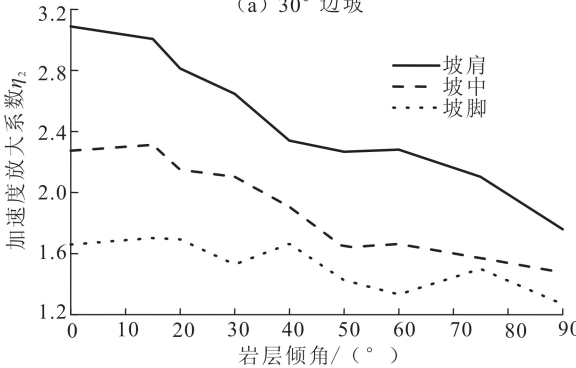
坡度		倾角								
		0°	15°	20°	30°	40°	50°	60°	75°	90°
30°	水平	1.58	1.63	1.69	1.53	1.36	1.38	1.59	1.44	1.39
	竖向	1.27	1.24	1.13	1.10	1.17	1.12	1.24	1.18	1.19
50°	水平	1.86	1.81	1.88	1.73	1.37	1.48	1.76	1.52	1.41
	竖向	1.35	1.24	1.22	1.20	1.19	1.12	1.32	1.48	1.22

2.2 峰值加速度放大系数 η_2

图 5 为不同岩层倾角时,边坡不同部位相对原始地震波的水平峰值加速度放大系数变化。



(a) 30° 边坡



(b) 50° 边坡

图 5 边坡水平峰值加速度放大系数 η_2 与岩层倾角的关系

Fig.5 Relationship between peak acceleration amplification factor η_2 and dip angle of rock stratum

由图 5 可知,在水平地震波作用下,岩层倾角从 0° 增大到 90° ,边坡同一位置处 η_2 线性减小。 30° 边坡水平岩层边坡坡肩的水平加速度相对原始地震波放大 2.83 倍,此后岩层倾角每增加 10° ,加速度放大系数减小约 3.2%,竖直岩层边坡放大 2 倍。 50° 边

坡水平岩层边坡坡肩的水平加速度相对原始地震波放大 3.09 倍,此后岩层倾角每增加 10°,加速度放大系数减小约 4.8%,竖直岩层边坡放大 1.76 倍。坡中和坡脚的变化趋势与坡肩相似,由于高程效应其变化幅度较小。

分析认为,当岩层与地震波输入方向平行,在地震波传播过程中经反射、折射后到达坡面的加速度动力响应最大,即放大作用最明显。当岩层与地震波输入方向有一定夹角时,地震波产生的放大作用会被削减。

2.3 峰值位移

图 6 为不同岩层倾角时,边坡坡肩、坡中、坡脚三处的峰值位移变化。

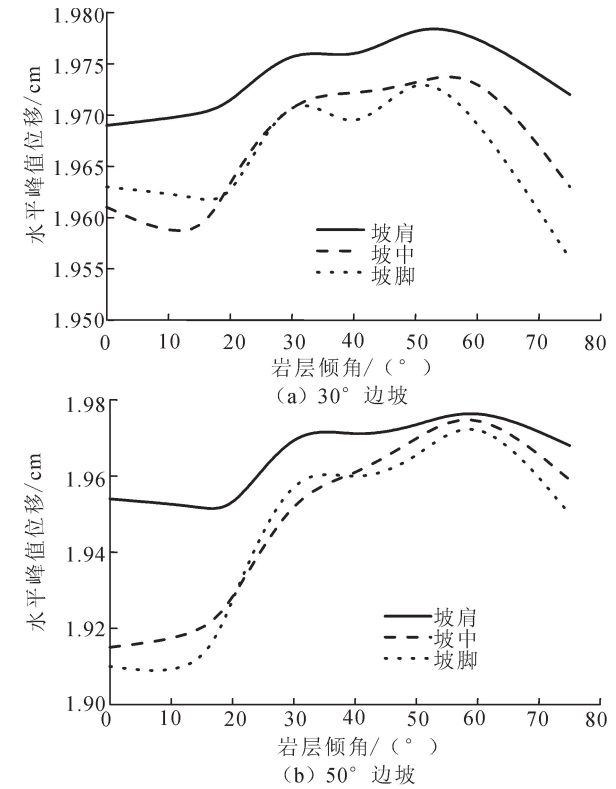


图 6 边坡峰值位移与岩层倾角的关系

Fig.6 Relationship between peak displacement and dip angle of rock stratum

由图 6 可见,30°边坡和 50°边坡,其坡脚处的位移均为最大。

岩层倾角在 0°~15°范围时,水平峰值位移相差不大且幅值均较小;岩层倾角在 20°~30°范围时,其呈单调增加趋势;30°~60°时则保持在较大幅值且变化较小;岩层倾角大于 60°后,其位移减小。即当岩层倾角小于软弱层面内摩擦角(18°)时,位移受岩层倾角的影响不大,当岩层倾角大于软弱层面内摩擦角时,位移呈先增大后减小的趋势。

分析认为,在地震作用下,岩层倾角小于软弱层面内摩擦角的顺倾向边坡的稳定性相对较好,岩层倾角在 30°~60°范围内时,边坡发生顺层滑动的可能性较大,这与文献[21]、[22]研究结果相似。对坡度较缓的顺倾向边坡而言,岩层倾角大于 60°后,边坡发生顺层滑动的可能性较小,可能会出现其他破坏模式。

2.4 应变增量

图 7 为四种岩层倾角的 30°边坡在地震作用结束后的应变增量云图。

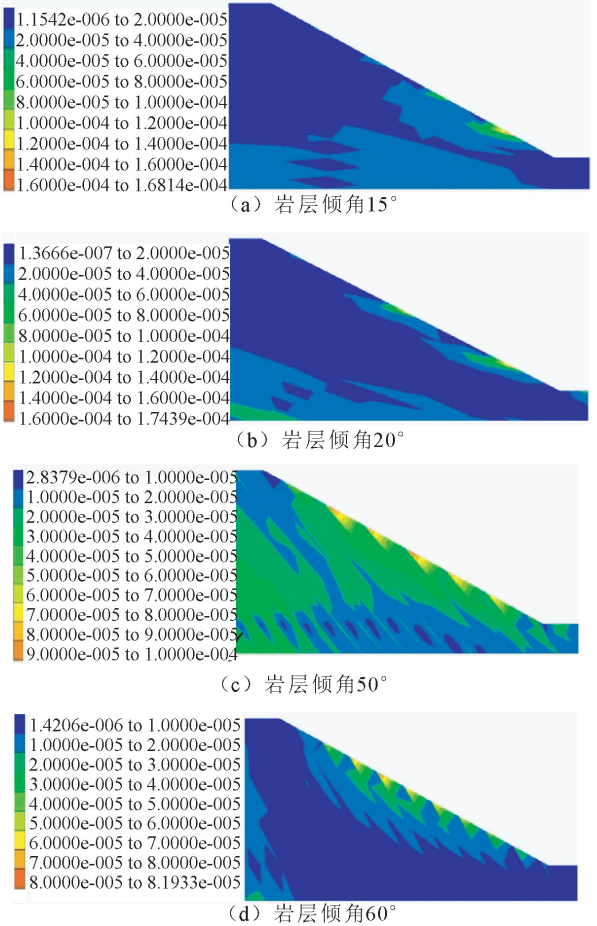


图 7 30°边坡残余剪应变增量云图

Fig.7 The residual shear strain increment clouds of the 30° slope

由图 7 可见,地震作用后坡面附近均出现了较大的剪切应变。岩层倾角 15°和 20°时,坡面中下部软弱岩层出露处剪应变集中,且剪应变区沿层面向坡内延伸。由于岩层倾角小于坡脚,岩层面临空,易在软弱层面处形成剪出口,边坡可能发生顺层滑动。岩层倾角 50°和 60°时,最大剪应变区出现在整个坡面,呈弧形区。由于岩层倾角大于坡脚,岩层面未临空,上部沿层面下滑,挤压下部岩层使之挠曲,可能

形成一弧形的潜在滑移面,推测可能发生圈椅状滑坡。

3 结论

利用 FLAC^{3D} 数值分析软件,模拟地震作用下岩层倾角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、边坡坡度 30° 和 50° 的顺倾向层状岩质边坡,分析坡面加速度放大系数、位移、残余剪应变的分布规律,探讨岩层倾角对顺倾向层状边坡地震效应的影响,得出以下结论:

(1) 顺倾向层状边坡坡面加速度放大作用与岩层倾角有关。在水平地震波作用下,坡面水平峰值加速度放大作用随岩层倾角增大而线性减小,水平岩层边坡最大,直立岩层边坡最小。

(2) 岩层倾角小于软弱层面内摩擦角时,边坡位移均较小且变化不大。即岩层倾角小于软弱层面内摩擦角的顺倾向边坡在地震作用下的稳定性相对较好。

(3) 当岩层倾角大于内摩擦角时,边坡位移呈先增大后减小。岩层倾角在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围时,峰值位移较大, 60° 以上位移减小。即陡倾层状边坡水平位移小于中度倾角边坡,边坡发生顺层滑动的可能性较小,可能会出现其他破坏模式。

(4) 岩层倾角和边坡坡度的组合方式对坡体残余剪应变增量分布的影响较大。当岩层倾角小于坡角,最大剪应变集中在坡面中下部位软弱岩层处,边坡可能易发生顺层滑动;当岩层倾角大于坡角,最大剪应变区出现在整个坡面,且形成弧形区,边坡可能易沿潜在弧形滑移面发生滑动。

参考文献(References)

- [1] 谢富仁, 祝富忠, 梁海庆, 等. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, 1993, 15(4): 407-417.
XIE Fu-ren, ZHU Jing-zhong, LIANG Hai-qing, et al. The Basic Characteristics of the Modern Tectonic Stress Field in Southwest China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 15(4): 407-417. (in Chinese)
- [2] 李树德, 任秀生, 岳升阳, 等. 地震滑坡研究[J]. 水土保持研究, 2002, 8(2): 24-25.
LI Shu-de, REN Xiu-sheng, YUE Sheng-yang, et al. Research on Earthquake Landslide[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 8(2): 24-25. (in Chinese)
- [3] 黄伟, 江娃利. 四川龙泉山断裂带及其活动性与潜在地震危险性讨论[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 50-56.
HUANG Wei, JIANG Wa-li. Discussion on the Late Quaternary Activity and Earthquake Risk Potential of Longquanshan Fault in Sichuan[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 50-56. (in Chinese)

- [4] 许强, 黄润秋. 5·12 汶川大地震诱发大型崩塌灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721-729.
XU Qiang, HUANG Run-qiu. Kinetics Characteristics of Large Landslides Triggered by May 12th Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721-729. (in Chinese)
- [5] 裴向军, 黄润秋. “4·20” 芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 257-262.
PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Analysis of Characteristics of Geological Hazards by “4·20” Lushan Earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(3): 257-262. (in Chinese)
- [6] 李忠权, 刘顺. 构造地质学[J]. 北京: 地质出版社, 2010.
LI Zhong-quan, LIU Shun. Structural Geology[J]. Beijing: Geological Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 刘铁, 覃冷. 浅层基岩顺层滑坡的形成机制和变形破坏特征[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1052-1055.
LIU Yi, QIN Leng. Analysis on Forming Mechanism and Deformation Characteristics of Shallow Bedded Rock Landslide [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1052-1055. (in Chinese)
- [8] 冯志仁, 刘红帅, 于龙. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡表面放大效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 96-100.
FENG Zhi-yuan, LIU Hong-shuai, YU Long. Surface Amplification Effect of Bedding Rocky Slope with Weak Interlayer under Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 96-100. (in Chinese)
- [9] 罗刚, 胡卸文, 张耀. 平面滑动型岩质边坡地震动力响应[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 521-526.
LUO Gang, HU Xie-wen, ZHANG Yao. Seismic Dynamic Responses of Plane Sliding Rock Slope[J]. Journal of Southwest JiaoTong University, 2010, 45(4): 521-526. (in Chinese)
- [10] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977-2983.
DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, et al. The Large-scale Shaking Table Test Study of Dynamic Response and Failure Mode of Bedding Rock Slope Under Earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2977-2983. (in Chinese)
- [11] 刘汉香, 许强, 侯红娟. 岩性及岩体结构对斜坡地震加速度响应的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2482-2478.
LIU Han-xiang, XU Qiang, HOU Hong-juan. Influence of Lithology and Rock Structure on Slope Seismic Acceleration Responses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2482-2478. (in Chinese)
- [12] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420-2428.
XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, et al. Study on Slope Dynamic Responses of Accelerations by Large-scale Shaking

- Table Test[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420-2428. (in Chineses)
- [13] 李果.强震条件下层状岩体斜坡动力失稳机理研究[D].成都: 成都理工大学, 2012.
- LI Guo. Failure Mechanism of Stratiform Rock Slope under Strong Earthquake [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 李海波, 肖克强, 刘亚群.地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J].岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.
- LI Hai-bo, XIAO Ke-qiang, LIU Ya-qun. Factor of Safety Analysis of Bedding Rock Slope Under Seismic Load [J]. 2007, 26(12): 2385-2394. (in Chineses)
- [15] 滕光亮, 陈永明, 石玉成, 等.高烈度地震区岩土体边坡崩塌动力学特性研究[J].地震工程学报, 2013, 35(1): 119-125.
- TENG Guang-liang, CHEN Yong-ming, SHI Yu-cheng, et al. A Study on the Influencing Factors of Joint Rock Slope Stability Under Earthquake Activity [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 119-125. (in Chineses)
- [16] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- CHEN Yu-min, XU Ding-ping. The Foundation and Engineering Examples of FLAC/FLAC^{3D} [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 刘书伟, 林杭, 任连伟. FLAC^{3D} 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- LIU Shu-wei, LIN Hang, REN Lian-wei. The Application of FLAC^{3D} in Geotechnical Engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 刘岁海, 刘爱平. 四川康定县滑坡灾害发育特征与形成条件 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 27-31.
- LIU Sui-hai, LIU Ai-ping. Characteristics of Landslide Distribution and Formation Conditions in Kangding County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 27-31. (in Chinese)
- [19] 杨涛, 邓荣贵, 刘小丽. 四川地区地震崩塌滑坡的基本特征及危险性分区 [J]. 山地学报, 2002, 20(4): 456-460.
- YANG Tao, DENG Rong-gui, LIU Xiao-li. The Distributing and Subarea Character of the Seismic Landslide in Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(4): 456-460. (in Chinese)
- [20] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards Induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592. (in Chineses)
- [21] 冯春, 李世海, 王杰. 基于 CDEM 的顺层边坡地震稳定性分析方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 717-724.
- FENG Chun, LI Shi-hai, WANG Jie. Stability Analysis Method for Bedding Rock Slopes Under Seismic Load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 717-724. (in Chineses)
- [22] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 层状岩体边坡动态稳定性拟静力上限分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3627-3634.
- ZHAO Lian-heng, LUO Qiang, LI Liang, et al. Upper Bound Quasi-static Analysis of Dynamic Stability of Layered Rock Slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3627-3634. (in Chineses)