

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.002>



地震作用下软硬互层顺层岩质边坡动力响应研究

李师毓¹, 吴琼^{1*}, 王亮清¹, 罗红明², 秦越¹, 刘智琪¹

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071

摘要: 软硬互层顺层岩质边坡在我国强震区广泛存在, 地震极易诱发该类边坡产生地质灾害. 针对地震作用下软硬互层顺层岩质边坡动力响应关键科学问题开展研究, 基于离散元数值模拟法, 揭示了软硬互层顺层岩质边坡动力响应规律, 分析了不同边坡特征因素对其动力响应的影响. 结果表明: 地震作用下软硬互层边坡变形破坏主要受软硬岩间层面控制, 坡表剪切口和软岩位移增量明显; 地震波在传播过程中, 软硬岩层对地震加速度具有放大作用, 其中软岩的放大作用更明显; 地震波频谱特征显示: 当地震波从硬岩传播至软岩时, 多个固定频段被显著放大, 当从软岩传播至硬岩时, 频谱有所降低; 坡表位移和加速度放大系数随软岩和层面强度的增加而减小, 随层厚比的增加而增大; 软岩强度和层厚比会改变地震波中显著放大频段的位置, 二者增大时, 放大频段的数量不变, 频率减小; 岩层面强度降低时, 放大频段的数量和频率不变, 放大程度增大.

关键词: 软硬互层岩质边坡; 地震; 动力响应; 数值模拟; 离散元.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2023)08-3127-10

收稿日期: 2023-01-02

Study of Dynamic Response of Soft and Hard Interbedded Rock Slopes under Earthquakes

Li Shiyu¹, Wu Qiong^{1*}, Wang Liangqing¹, Luo Hongming², Qin Yue¹, Liu Zhiqi¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China

Abstract: Soft and hard interbedded rock slopes are widely distributed in meizoseismal areas of China and geological disasters are prone to be induced on such slopes due to earthquakes. In this paper, the key scientific issues of the dynamic response of soft and hard interbedded rock slopes under earthquakes were studied. The discrete element numerical simulation method was used to reveal the dynamic response of soft and hard interbedded rock slopes and influences of different slope factors on the dynamic response. The results show that bedding planes between soft and hard rocks play a main control role in the deformation and failure of the slope. Displacements obviously increase on the shear outlets and soft rock of the slope surface. Accelerations of seismic waves are amplified by soft and hard strata during the propagation of seismic wave and soft rocks have a significant amplification effect on the accelerations. The seismic wave spectra show that multiple fixed frequency bands are obviously amplified when the seismic wave propagates from hard rocks to soft rocks; the spectra decrease when the seismic wave propagates from soft rocks to

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2019YFC1509705); 国家重点研发计划项目(No.2022YFC3080200); 国家自然科学基金面上项目(No.41877259).

作者简介: 李师毓(1998-), 男, 硕士研究生, 从事地质灾害与岩土工程专业研究. ORCID:0000-0003-2612-344X. E-mail:269952725@qq.com

* **通讯作者:** 吴琼, ORCID:0000-0001-5029-5925. E-mail:wuqiong@cug.edu.cn

引用格式: 李师毓, 吴琼, 王亮清, 罗红明, 秦越, 刘智琪, 2023. 地震作用下软硬互层顺层岩质边坡动力响应研究. 地球科学, 48(8):3127-3136.

Citation: Li Shiyu, Wu Qiong, Wang Liangqing, Luo Hongming, Qin Yue, Liu Zhiqi, 2023. Study of Dynamic Response of Soft and Hard Interbedded Rock Slopes under Earthquakes. *Earth Science*, 48(8):3127-3136.

hard rocks. The displacements and the amplification coefficients of acceleration decrease with the increase of the strength of soft rocks and bedding planes, while increase with the increase of thickness ratio. The locations of obviously amplified frequency bands are influenced by the strength of soft rocks and bedding planes. When the strength of soft rocks and bedding planes increase, the number of amplified bands remains the same and frequencies decrease. The reduction of the strength of bedding planes will not change the number and frequency of the amplified bands, but increase the degree of amplification.

Key words: soft and hard interbedded rock slope; earthquake; dynamic response; numerical simulation; discrete element.

0 引言

地震作用下顺层岩质边坡的动力响应问题一直是岩土工程和地震工程领域重点研究的课题之一。我国西部地区受板块碰撞挤压以及地壳升降运动的影响,强震频发且地层沉积相特征明显(刘春玲等, 2010), 因此在该地区, 不同岩性地层构成的软硬互层顺层岩质边坡分布广泛。这类边坡由于软岩夹层的存在使得边坡的稳定性下降且破坏机制更为复杂, 在地震荷载下极易引发滑坡等地质灾害, 造成大量的人员伤亡和经济损失(Qi *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2021; 吴善百等, 2022; 赵飞等, 2022; Zou *et al.*, 2022), 因此针对软硬互层顺层岩质边坡的动力响应开展研究工作具有重要意义。

目前对岩质边坡地震动力响应的分析手段主要为: 现场调查, 物理模型试验和数值模拟。随着计算机技术的发展, 数值模拟方法因其操作简便, 可控性强以及精确度高等优点开始广泛应用于边坡工程中, 例如有限元法(李玉江等, 2013), 有限差分法(罗登贵等, 2017), 不连续变形分析法(Zhang *et al.*, 2015)和离散单元法(Pal *et al.*, 2012)等。其中离散单元法将岩体视为非连续块体, 用户可以实现岩石与结构面的接触以解决岩土体的大变形等问题, 对于含复杂节理的岩质边坡研究, 离散单元法有显著优势(Gao *et al.*, 2021)。基于三维空间分析的离散元软件 3DEC 采用显式求解法, 能快速求解岩土体的各种非线性力学行为问题, 节省大量计算时间(Wu *et al.*, 2012)。近年来, 3DEC 被越来越多地应用到边坡动力分析中, Dong *et al.* (2020) 采用相似试验研究了软硬互层反倾边坡的变形、发展和破坏过程, 并通过 3DEC 分析了不同软硬岩性对倾倒变形过程的影响以及破坏规律。Luo *et al.* (2020) 将现场监测数据与三维离散元数值模拟相结合, 研究了地形结构和地质构造对四川省龙门山地区软硬互层边坡场地放大效应的影响。Liu *et al.* (2021) 通过 3DEC 模拟了考虑离散裂隙网络(DFN)与渗

流作用下 Xiaogangjian 岩质边坡的动力特性和失稳机理。Wu and Hsieh (2021) 运用 3DEC 软件模拟了台湾集集地震中九份二山滑坡的碎屑运动和沉积过程, 较好的实现了震后实际边坡的破坏形态。Mreyen *et al.* (2022) 为研究同震引发的古代滑坡问题, 通过 3DEC 对 Balta 滑坡震前和震后的边坡特征进行数值重建, 并分析了滑坡在地震作用下的失稳滑移过程。鉴于离散单元法的独特优势, 3DEC 已经成为研究岩质边坡地震问题的重要工具。

针对地震作用下软硬互层顺层岩质边坡的动力问题, 国内外大量文献从多角度进行了研究。Wu and Chen (2011) 利用不连续变形分析法模拟了地震作用下 Tsaoiling 滑坡中岩块的运动特性以及震后的场景。崔芳鹏等 (2018) 使用数值模拟手段再现了汶川地震大光包滑坡在带状震源影响下的变形失稳过程, 指出其失稳机制是由于逆冲震源和少量走滑震源所产生的水平地震力导致的。刘新荣等 (2019) 结合振动台试验和数值模拟法, 对微震作用下三峡库区顺层边坡的变形失稳机制和稳定性进行了分析。李龙起等 (2020) 采用离心机试验和离散元数值模拟, 从裂隙发育扩展的角度研究了陡倾软硬互层岩质边坡在强震下的损伤发育过程。Luo *et al.* (2021) 以汶川地震龙门山地区的一软硬互层滑坡为对象, 通过现场调查和数值分析研究了边坡地层岩性差异导致的分阶段滑移堆积过程。Feng *et al.* (2022) 通过设计一系列低角度软硬互层顺层边坡的振动台试验, 研究了不同岩性结构的边坡地震响应与失稳破坏机制。Xu *et al.* (2022) 通过离散元数值分析法, 对 2014 年鲁甸地震中一处大规模滑坡的形成过程进行研究, 指出坡体内部的软岩层是导致边坡失稳破坏的重要原因。已有的研究多聚焦在软硬互层边坡的变形特征和失稳机制等方面, 对边坡动力响应的规律性研究鲜有报道。然而, 此类边坡中由于软硬岩之间的性质差异使得其动力学行为具有特殊性, 开展动力响应研究能够对软硬互层边坡在动力特性等方面有更加全面和清晰的认识。

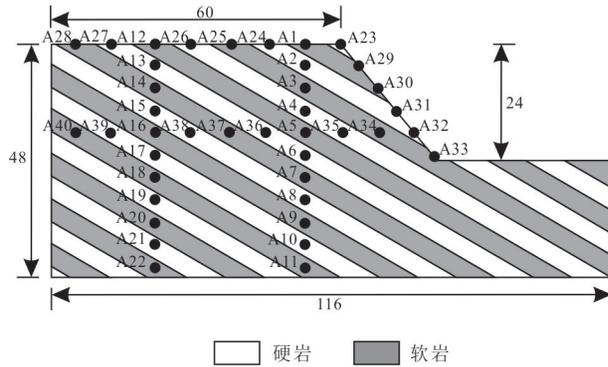


图1 软硬互层顺层岩质边坡数值模型(单位:m)

Fig.1 Numerical model of soft and hard interbedded rock slope (unit: m)

本文以我国西部地区某典型软硬互层边坡为研究对象,基于离散元数值模拟方法,建立概化数值模型,探究在地震作用下软硬互层顺层岩质边坡的动力响应规律,并研究了软岩强度、岩层层面强度、层厚比对边坡动力响应的影响.研究成果为进一步分析软硬互层顺层岩质边坡在地震下的动力行为特征提供了一定的理论基础.

1 边坡动力数值实验

1.1 模型建立与监测点设置

本文以我国西部山区某典型软硬互层顺层岩质边坡为地质背景,经过适当概化后建立如图1所示的数值模型.模型尺寸为116 m×48 m×10 m(长×高×宽),其中坡高24 m,边坡后缘长度为60 m,坡脚为50°,岩层倾角为30°.本次算例边界范围设置:坡高为模型高度的0.5倍,坡脚到右端边界的距离为坡高的1.5倍,坡顶到左端边界的距离为坡高的2.5倍,满足模型在静力和动力条件下的计算精度要求(郑颖人等,2002).

为研究地震波在传播时边坡动力响应在垂直和水平两个方向上的变化规律,分别在图1数值模型的两个方向上各布置两条测线,竖向的测线分别为A1-A2-A3-A4-A5-A6-A7-A8-A9-A10-A11(测线1),A12-A13-A14-A15-A16-A17-A18-A19-A20-A21-A22(测线2),水平向的测线分别为A23-A1-A24-A25-A26-A12-A27-A28(测线3),A32-A34-A35-A5-A36-A37-A38-A16-A39-A40(测线4),这些编号即代表监测点,在临空面布置6个监测点(A23-A29-A30-A31-A32-A33)研究坡表位移在地震下的变化规律,最终模型共设置40个监测点.

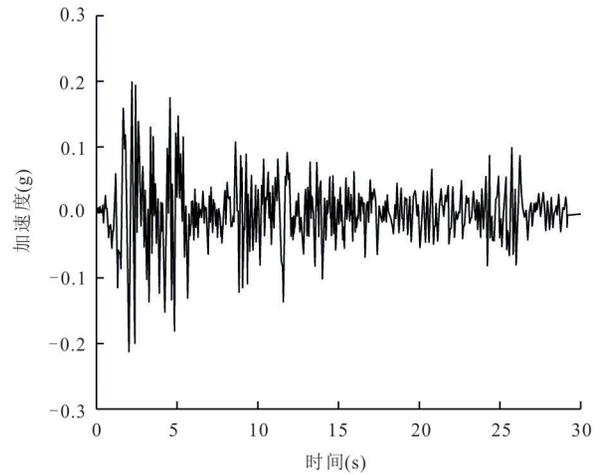


图2 El Centro地震波加速度时程曲线

Fig.2 Time-history curve of acceleration of El Centro seismic wave

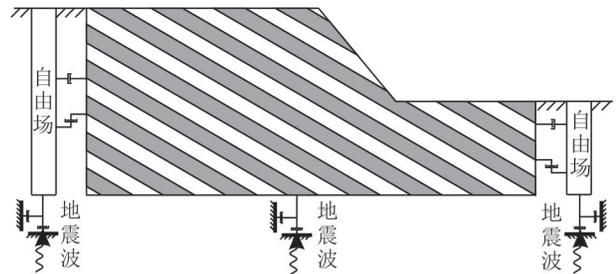


图3 数值模型边界条件

Fig.3 Boundary condition of numerical model

1.2 边界条件及模拟加载方案

本次动力分析的地震波选用El Centro波,并根据需要截取主要能量段0~30 s作为输入波.对输入波进行基线校正和滤波,再根据加载需要将幅值调整为0.2 g,最后从模型底部垂直输入,输入波如图2所示.计算时采用3DEC的动力分析模块,如图3所示,通过对模型四周施加自由场边界以消除平面地震波向上传播受边界条件带来的失真影响.动力计算中阻尼选用局部阻尼来消除振动时产生的动能,最终设置阻尼系数为0.125.

为对比研究在不同边坡结构特征下,地震作用对软、硬岩层动力响应的影响,在保持监测点和岩层的数量、相对位置不变的条件下,从边坡特征因素中选取软岩强度,岩层层面强度和层厚比进行分析,保持其它参数不变.参考《GBT50218-2014工程岩体分级标准》和前人经验,岩石和层面的物理力学指标如表1,2所示.将岩石强度由低到高分1、2、3、4四个水平,认为前3种水平表示软岩,第四种

表 1 岩石物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indices of rock

序号	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
1	2 000	0.30	30	0.17	0.11	0.10
2	2 150	0.45	35	0.83	0.48	0.22
3	2 350	0.60	40	3.48	1.38	0.60
4	2 650	1.50	50	10.00	5.40	0.80

表 2 岩层层面物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indices of bedding plane

序号	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	法向刚度 ($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度 ($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	0.1	20	12	6
2	0.1	30	12	6
3	0.1	40	12	6

表 3 数值模拟加载方案

Table 3 Loading schemes of numerical simulation

工况	软岩强度	岩层层面强度	层厚比
1	1	B	1.0
2	2	B	1.0
3	3	B	1.0
4	3	A	1.0
5	3	C	1.0
6	3	B	0.5
7	3	B	1.5

表示硬岩. 通过改变内摩擦角将层面强度由低到高分为 A、B、C 三个水平. 将层厚比定义为软岩与硬岩层厚之比, 保持相邻每组软硬岩层总厚度不变, 同时改变软岩和硬岩厚度并将其设置为 0.5:1.0、1.0:1.0、1.5:1.0, 具体工况参数见表 3. 数值模型中岩体采用弹塑性材料, 并遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则, 岩层层面采用 Coulomb 滑动模型.

2 边坡动力响应分析

2.1 位移响应分析

以工况 3 为例对地震作用下边坡动力响应进行分析描述, 从图 4 中坡表监测点沿层面的位移时程曲线可以看出, 不同位置监测点的位移存在差异, 位于坡脚的 A33 监测点位移几乎没有变化, 而软硬岩间层面上方的 A23, A29~A32 监测点位移明显增加, 软岩层中 A29 和 A30 监测点的位移高于相邻的硬岩层, 达到了最大值. 结合图 5 可知坡体沿层面下滑导致边坡整体失稳, 说明在地震作用下软硬岩间层面对软硬互层边坡的位移起控制作用, 且软岩变

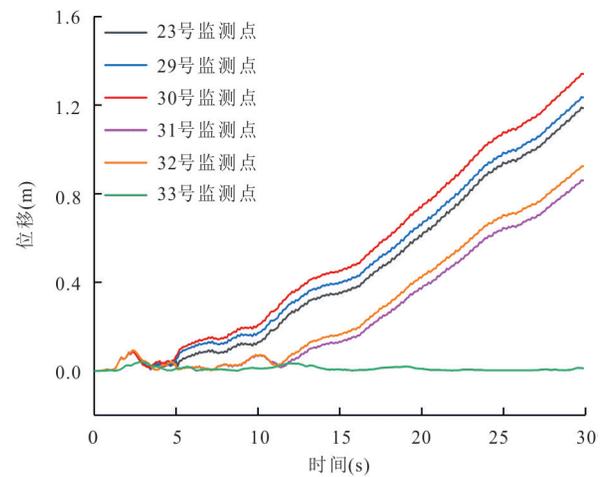


图 4 坡表位移时程曲线

Fig.4 Time history curves of displacement on the slope surface

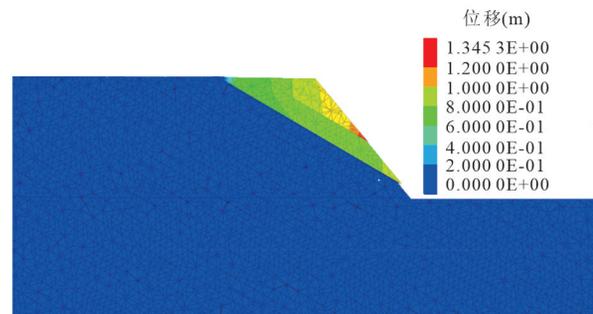


图 5 计算终态坡体位移云图

Fig.5 Displacement contour of the slope in terminal state

形破坏程度高于硬岩. 与土质边坡不同 (Lin and Wang, 2006), 软硬互层顺层岩质边坡在地震荷载下位移增加明显的部位不是在坡脚, 而是层面剪切口和软岩处.

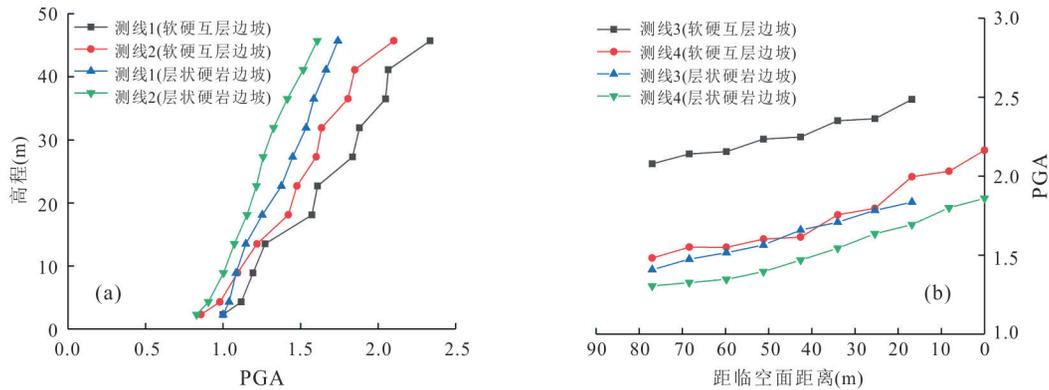


图 6 竖直和水平方向监测点 PGA

Fig.6 PGA of monitoring sites in vertical and horizontal directions

a. 垂直方向各点 PGA; b. 水平方向各点 PGA

2.2 加速度响应分析

为研究软硬互层顺层岩质边坡在地震下的加速度响应特征,建立与图 1 模型相同的层状硬岩边坡与工况 3 进行对比分析,岩体参数取表 1 中序号 4 和表 2 中序号 3 的参数.定义坡内任意一点峰值加速度与模型底部 A11 监测点峰值加速度的比值为加速度放大系数,并用 PGA 表示.软硬互层边坡和层状硬岩边坡在垂直和水平方向上 PGA 的变化规律如图 6 所示.在垂直方向上,4 条测线的 PGA 随高程增加总体均呈增大的趋势,并在坡顶达到最大值,表现出“高程效应”.软硬互层边坡中,软岩层的加速度有明显增大的现象,PGA 随高程的增加呈非线性增长,表明软岩对地震波的传播具有显著的放大作用,而层状硬岩边坡中 PGA 的变化基本呈线性增加,加速度没有在某个岩层中突然增大,因此其 PGA 总体低于软硬互层边坡.水平方向上,两种边坡的 PGA 从坡体内部到临空面呈递增趋势,表现出“趋表效应”,由于软硬互层边坡中软岩对加速度显著的放大作用使其 PGA 高于层状硬岩边坡.

根据弹性波散射理论,从坡底垂直向上传播的 SV 波经过岩体界面时会发生地震波场的分裂现象,从而产生同类型的 SV 波和新类型的 P 波(转换波).软岩在地震荷载下内部出现较多裂隙,当各类地震波经过这些裂隙时会产生复杂的折射和反射现象使得波场相互叠加,导致其加速度不断被放大.另外,不同的传播介质对波的折射和反射能力有所差异,波阻抗被用来表征这一能力的强弱,强度越高的介质波阻抗越高,对波的折、反射能力也更强.因此被硬岩折、反射的地震波进入软岩后再次被放大.

2.3 地震波频谱响应分析

对于含多种频率的复杂天然地震波,时域分析只能体现地震波信号的幅值随时间的变化规律,无法直观反映信号中的各段频率组成及其分量大小,而频域分析法能很好解决此问题.

通过对工况 3 中坡体不同位置监测点的加速度时程曲线进行快速傅里叶变换,探究软硬互层顺层岩质边坡对地震波传播的影响,结果如图 7 所示.可以看出地震波在软硬互层岩体中传播后,5、10、15、20、25 Hz 等 5 个固定频段被显著放大,整段频谱的谱值随高程的增加而增大.当地震波从硬岩传播到软岩时,固定频段的放大程度明显增大,而当地震波从软岩传播到硬岩时,频谱有所下降.这是由于软硬互层边坡自身的结构特性对地震波中的某些频段较为敏感(郭明珠等,2022),软岩相较于硬岩对这些频段的敏感程度更高使得放大作用更显著,说明软岩层更易发生剧烈震动,导致边坡发生严重的变形破坏.

3 边坡特征因素对动力响应影响分析

3.1 软岩强度的影响

为研究软岩强度对边坡动力响应的影响,分别取工况 1、2、3 时坡表监测点最大位移和测线 1 的 PGA 变化规律进行分析.从图 8a 可以看出,在软硬岩间层面下方的坡脚处几乎没有出现位移,层面上方的监测点位移明显增加,并呈现先减小后增大再减小的趋势,位移最大值出现在软岩层.随着软岩强度的降低,坡表位移整体呈现递增的趋势.从图 8b 可知,相同软岩强度的 PGA 随高程的增加而增

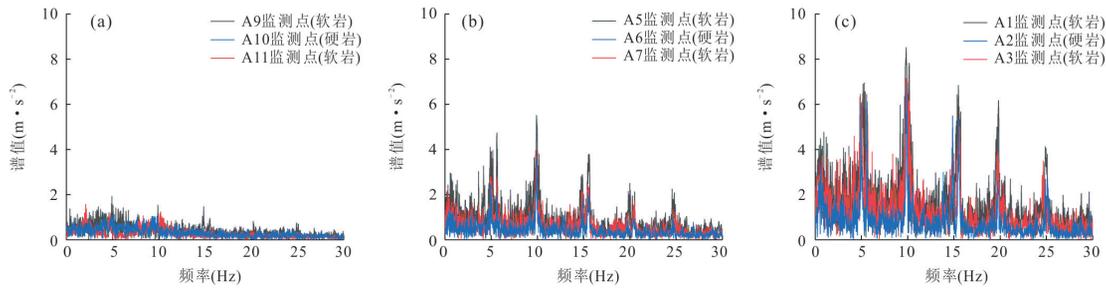


图7 不同位置监测点加速度的傅氏谱

Fig.7 Fourier spectra of acceleration of monitoring sites at different locations

a. 模型底部; b. 模型中部; c. 模型顶部

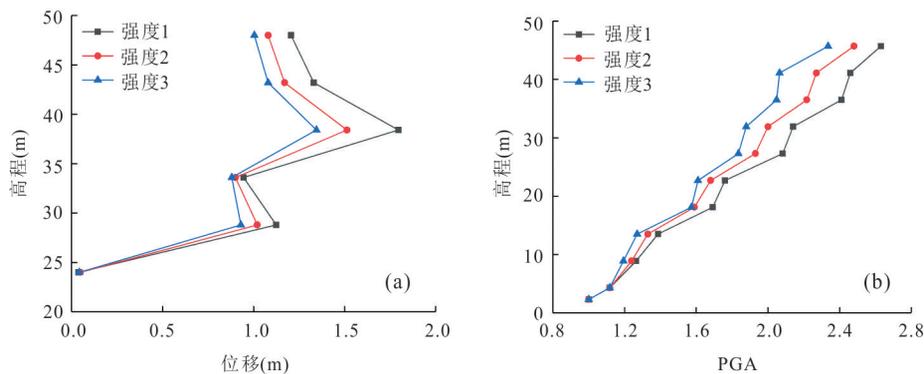


图8 不同软岩强度下坡表各点最大位移和测线1上各点PGA

Fig.8 Maximum displacements of monitoring sites on slope surface and PGA at test line 1 under different strength of soft rock

a. 坡表监测点最大位移; b. 测线1上监测点PGA

大,但由于软岩对地震波的显著放大作用导致其增长趋势具有非线性特征.相同高度下,PGA随着软岩强度的降低而增大.软岩强度越低,在地震作用下内部会产生更多的新生裂隙,导致地震波在传播时波场的叠加作用增大使得加速度被进一步放大.

计算坡顶A1监测点的傅里叶频谱曲线分析不同软岩强度下地震波加速度的变化,从图9可以看出在不同软岩强度下显著放大的频段位置发生了变化,图9a中放大的频段主要集中在6~7、11~12、17~18、21~22、27~28 Hz;图9b中放大的频段主要集中在5~6、10.5~11.5、15.5~17.0、20.5~22.0、26~27 Hz;图9c中放大的频段主要集中在4.5~5.5、9.5~10.5、15~16、19~20、24.5~25.0 Hz.软岩强度越高,显著放大的频段就会整体“左移”,即放大频段的数量不变,频率总体减小,说明软岩强度会对地震波频率产生一种选择放大效应(言志信等,2011).分析其原因可能是边坡中岩性的改变相当于使自身的结构特性发生变化,对不同地震波频率的敏感性也相应的出现差异,因此显著放大的频段会有所不同.

3.2 岩层层面强度的影响

为研究岩层层面强度对边坡动力响应的影响,分别取工况3、4、5时坡表监测点最大位移和测线1的PGA变化规律进行分析.图10a中,位移主要出现在层面上方的坡体中,并随高程的增加呈先减小、后增加、再减小的趋势,软岩层中位移达到最大值.图10b中由于软岩的显著放大作用使得不同层面强度的PGA随高程增加总体呈非线性增长趋势.在相同的坡体位置中,坡表位移和竖向PGA均随着层面强度的降低而增加.岩层层面的存在使得地震波的叠加作用加大,其参数会影响到地震波的折射与反射能力(杜晓丽等,2009),使边坡的动力响应特征发生变化.层面强度越低,边坡整体稳定性越差,波的折射、反射能力也越强,导致边坡的动力响应程度增大.

对不同岩层层面强度下A1监测点的加速度时程曲线进行快速傅里叶变换,结果如图11所示,可以看出整个频段的谱值随着层面强度的降低而升高,3种层面强度下被显著放大的频段基本保持一致,均为4.5~5.5、9.5~10.5、15~16、19~20、24.5~

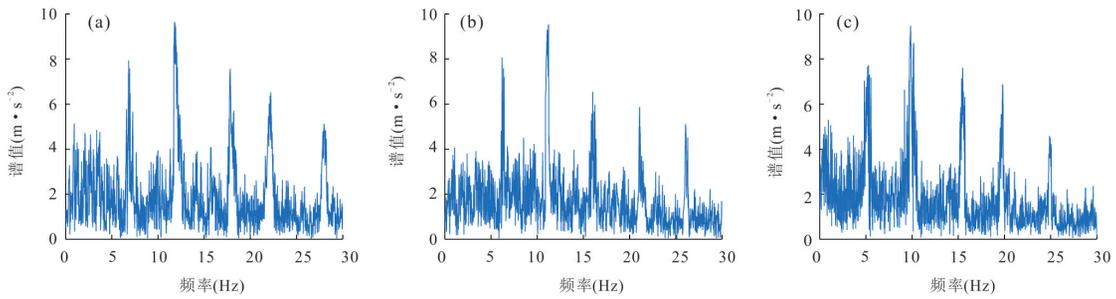


图 9 不同软岩强度下 A1 监测点加速度傅式谱

Fig.9 Fourier spectra of acceleration of A1 monitoring site under different strength of soft rock
a. 强度 1; b. 强度 2; c. 强度 3

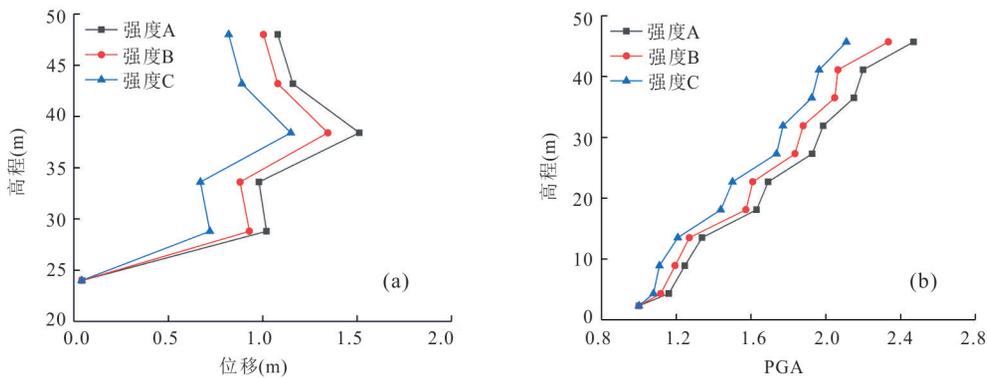


图 10 不同岩层层面强度下坡表各点最大位移和测线 1 上各点 PGA

Fig.10 Maximum displacements of monitoring sites on slope surface and PGA at test line 1 under different strength of bedding plane
a. 坡表监测点最大位移; b. 测线 1 上监测点 PGA

25.0 Hz. 不同的层面强度没有对原本显著放大频段
的数量和位置发生变化,只是改变了整个傅里叶频
谱的放大程度.岩层层面强度越低,地震波频谱
越大.

3.3 层厚比的影响

为研究层厚比对边坡动力响应的影响,分别取
工况 3、6、7 时坡表监测点最大位移和测线 1 的
PGA 变化规律进行分析.结果如图 12 所示,位移
出现在软硬岩间层面上方,并随着高程增加呈先
减小、后增加、再减小的变化规律,坡脚处无明
显位移发生.相同层厚比的 PGA 随高程增加总体
呈非线性增加趋势.在相同边坡位置中,坡表位
移和竖直向 PGA 均随着层厚比的增加而增大.软
岩层厚越大,边坡整体强度越低,坡体在 seismic
作用下的变形破坏和动力响应程度越大.

计算坡顶 A1 监测点的傅里叶频谱曲线分析不
同层厚比下地震波加速度的变化,从图 13 可以
看出不同层厚比影响了地震波中显著放大频段
的位置,也具有选择放大效应,图 13a 中放大的
频段主要集

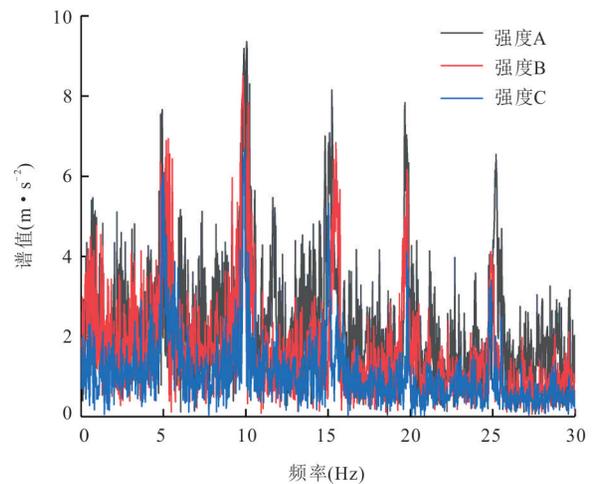


图 11 不同岩层层面强度下 A1 监测点加速度傅式谱
Fig.11 Fourier spectra of acceleration of A1 monitoring site
under different strength of bedding plane

中在 5.5~6.5、11~12、15.5~16.5、21~22、26~27
Hz;图 13b 中放大的频段主要集中在 4.5~5.5、9.5~
10.5、15~16、19~20、24.5~25 Hz;图 13c 中放大的

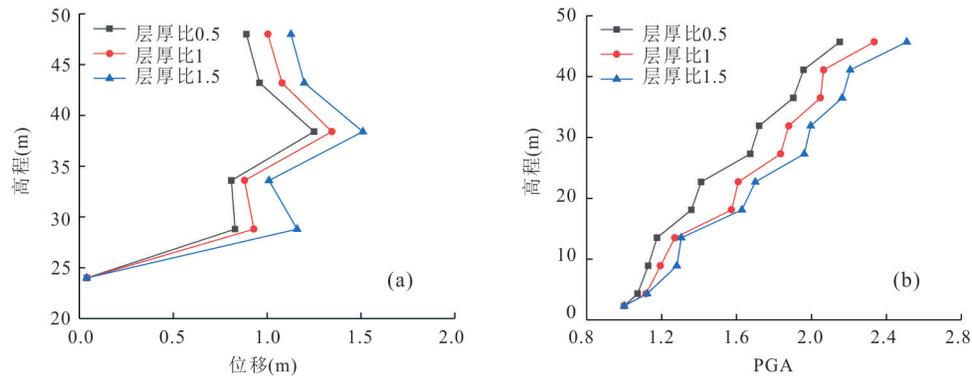


图 12 不同层厚比下坡表各点最大位移和测线 1 上各点 PGA

Fig.12 Maximum displacements of monitoring sites on slope surface and PGA of monitoring sites at test line 1 under different thickness ratio
a. 坡表监测点最大位移; b. 测线 1 上监测点 PGA

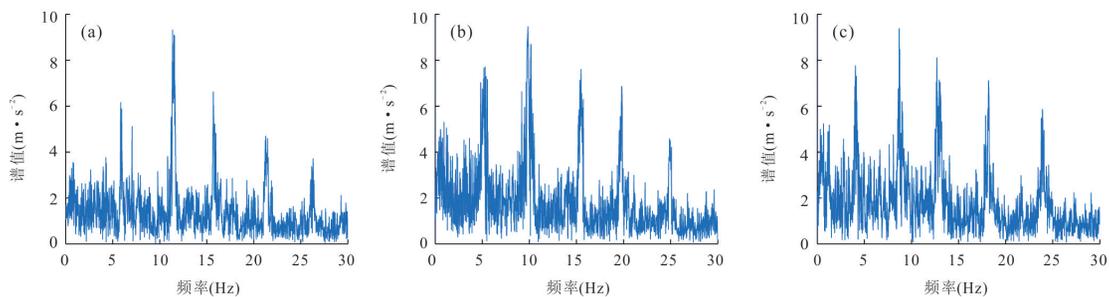


图 13 不同层厚比下 A1 监测点加速度傅式谱

Fig.13 Fourier spectra of acceleration of A1 monitoring site under different thickness ratio
a. 层厚比 0.5; b. 层厚比 1; c. 层厚比 1.5

频段主要集中在 3.5~4、8.5~9.5、12.5~13.5、17.5~18.5、23.5~24.5 Hz. 层厚比越大, 多个显著放大的频段会整体“左移”, 即放大频段的数量不变, 频率有所减小. 改变软硬岩层厚度使得边坡自身结构和地震波频率的敏感性发生了变化, 导致显著放大的频段的位置有所变化.

4 结论与讨论

本文以我国西部地区某典型软硬互层顺层岩质边坡为研究对象, 采用离散元数值模拟方法研究了此类边坡在地震作用下的动力响应规律, 并通过选取软岩强度、岩层层面强度和层厚比 3 个边坡特征因素研究了其对边坡动力响应的影响, 主要得到了以下结论:

(1) 软硬互层顺层岩质边坡在地震作用下的变形失稳主要受软硬岩间层面控制, 软岩变形程度高于硬岩, 坡表位移在剪切口和软岩层处增长明显.

(2) 软硬互层边坡对地震波的传播具有垂直放大和临空面放大作用, 在垂直方向上 PGA 随高程的

增加而增大; 在水平方向上, 从坡体内部到坡面, PGA 也呈增大趋势. 其中, 软岩对加速度的放大作用更加明显, 导致 PGA 的增长具有非线性特征.

(3) 地震波频谱特征显示, 软硬互层岩体对多个固定频段同时具有放大作用, 当地震波从硬岩传播至软岩时, 对固定频段的放大作用更显著, 当从软岩传播至硬岩时, 频谱则有所下降, 说明软岩在地震作用下震动剧烈, 更容易使边坡发生破坏.

(4) 当软岩强度、岩层层面强度增大时, 坡表位移和竖向 PGA 均呈递减趋势; 当层厚比增加时, 坡表位移和竖向 PGA 呈递增趋势. 软岩强度和层厚比对地震波显著放大频段的位置有重要影响, 当二者增加时被放大频段的数量不变, 频率整体减小. 岩层层面强度不会改变放大频段的数量和位置, 只会影响其放大程度, 层面强度越低频段的放大程度越高.

本文从时域分析和频域分析两个角度研究了软硬互层顺层岩质边坡在地震作用下的动力响应特征, 以及软、硬岩层对地震波传播的影响. 在满足

坡内监测点及岩层数量、相对位置等条件不变的前提下,选取软岩强度,层面强度和层厚比三个边坡特征因素,对比分析了其对边坡动力响应的影响. 研究结果对软硬互层顺层岩质边坡的动力响应分析具有一定的理论意义与应用价值. 然而,影响边坡动力稳定性的因素多种多样,例如岩层倾角,边坡形态等条件没有进行探讨. 在后续的研究中,需要进一步考虑包含更多影响因素的试验方案,才能对软硬互层顺层岩质边坡在地震作用下的动力响应研究有更深入和全面的认识.

References

- Cui, F. P., Xu, Q., Yin, Y. P., et al., 2018. Dynamic Response of Slope Based on Fracture Mechanisms of Strip-Shape Hypocenter. *Rock and Soil Mechanics*, 39(1): 320—330 (in Chinese with English abstract).
- Dong, M. L., Zhang, F. M., Lv, J. Q., et al., 2020. Study on Deformation and Failure Law of Soft-Hard Rock Interbedding Toppling Slope Base on Similar Test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(9): 4625—4637. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01845-4>
- Du, X. L., Dai, J., Wei, J. S., et al., 2009. Application of Seismic Wave Theory to Analysis of Rock Slope Stability. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 31(2): 55—58(in Chinese with English abstract).
- Feng, J., Zhang, Y. B., He, J. X., et al., 2022. Dynamic Response and Failure Evolution of Low-Angled Interbedding Soft and Hard Stratum Rock Slope under Earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(10):1—10. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02910-w>
- Gao, G., Meguid, M. A., Chouinard, L. E., et al., 2021. Dynamic Disintegration Processes Accompanying Transport of an Earthquake-Induced Landslide. *Landslides*, 18(3): 909—933. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01508-1>
- Guo, M. Z., Gu, K. S., Zhang, H., et al., 2022. Experimental Study of Dynamic Response Law of Bedding Rock Slope with Weak Interlayer under Strong Earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 43(5): 1306—1316(in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. D., Xu, C., Zhang, X. L., et al., 2021. An Updated Database and Spatial Distribution of Landslides Triggered by the Milin, Tibet Mw 6.4 Earthquake of 18 November 2017. *Journal of Earth Science*, 32(5): 1069—1078. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1433-z>
- Li, L. Q., He, W., Wang, T., et al., 2020. Study on Fracture Development Characteristics and Marginal Spectral Entropy Response of Soft and Hard Interbedded Slope with Steep Inclination Subjected to Strong Earthquakes. *Rock and Soil Mechanics*, 41(10): 3456—3464 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Chen, L. W., Lu, Y. Z., et al., 2013. Numerical Simulation on Influences of Wenchuan Earthquake on the Stability of Faults in the Neighborhood. *Earth Science*, 38(2): 398—410(in Chinese with English abstract).
- Lin, M. L., Wang, K. L., 2006. Seismic Slope Behavior in a Large-Scale Shaking Table Model Test. *Engineering Geology*, 86(2/3): 118—133. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.011>
- Liu, B., He, K., Han, M., et al., 2021. Dynamic Process Simulation of the Xiaogangjian Rockslide Occurred in Shattered Mountain Based on 3DEC and DFN. *Computer and Geotechnics*, 134: 104122. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104122>
- Liu, C. L., Qi, S. W., Tong, L. Q., et al., 2010. Great Landslides in Himalaya Mountain Area and Their Occurrence with Lithology. *Journal of Engineering Geology*, 18(5): 669—676(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. R., He, C. M., Liu, S. L., et al., 2019. Dynamic Stability of Slopes with Interbeddings of Soft and Hard Layers under High-Frequency Microseisms. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(3): 430—438(in Chinese with English abstract).
- Luo, D. G., Liu, J. P., Jin, C., et al., 2017. Instantaneous Seismic Attributes and Response Characteristics of Active Faults. *Earth Science*, 42(3): 462—470(in Chinese with English abstract).
- Luo, Y. H., Fan, X. M., Huang, R. Q., et al., 2020. Topographic and Near-Surface Stratigraphic Amplification of the Seismic Response of a Mountain Slope Revealed by Field Monitoring and Numerical Simulations. *Engineering Geology*, 271: 105607. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105607>
- Luo, Y. H., Zhang, Y., Wang, Y. S., et al., 2021. A Unique Failure Model for a Landslide Induced by the Wenchuan Earthquake in the Liujiawan Area, Qingchuan County, China. *Engineering Geology*, 295: 106412. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106412>
- Mreyen, A., Donati, D., Elmo, D., et al., 2022. Dynamic Numerical Modelling of Co-Seismic Landslides Using the 3D Distinct Element Method: Insights from the Balta Rockslide (Romania) *Engineering Geology*, 307: 106774. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106774>
- Pal, S., Kaynia, A. M., Bhasin, R. K., et al., 2012. Earthquake

- Stability Analysis of Rock Slopes; A Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2): 205–215. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0145-6>
- Qi, S.W., Xu, Q., Lan, H.X., et al., 2010. Spatial Distribution Analysis of Landslides Triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology*, 116(1–2): 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.011>
- Wu, J.H., Chen, C.H., 2011. Application of DDA to Simulate Characteristics of the Tsaoing Landslide. *Computers and Geotechnics*, 38(5): 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.04.003>
- Wu, J.H., Hsieh, P.H., 2021. Simulating the Postfailure Behavior of the Seismically - Triggered Chiu - fen - erh - shan Landslide Using 3DEC. *Engineering Geology*, 287: 106113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106113>
- Wu, Q., Kulatilake, P.H.S.W., 2012. REV and Its Properties on Fracture System and Mechanical Properties, and An Orthotropic Constitutive Model for A Jointed Rock Mass in A Dam Site in China. *Computers and Geotechnics*, 43: 124–142. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.02.010>
- Wu, S.B., Wang, L.Q., Wu, Q., et al., 2022. Advance and Prospect for Seismic Dynamic Response of Anchored Rock Slope. *Earth Science*, 1–13(in Chinese with English abstract).
- Xu, W.J., Wang, L., Cheng, K., 2022. The Failure and River Blocking Mechanism of Large-Scale Anti-dip Rock Landslide Induced by Earthquake. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(8): 4941–4961. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02903-x>
- Yan, Z.X., Zhang, S., Zhang, X.D., et al., 2011. Study of Dynamic Response of Bedding Rock Slope under Earthquake and Influence of Ground Motion Parameters. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(S2): 3522–3528(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.B., Wang, J.M., Xu, Q., et al., 2015. DDA Validation of the Mobility of Earthquake-Induced Landslides. *Engineering Geology*, 194: 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.024>
- Zhao, F., Yu, S.B., Li, B., et al., 2022. Research Advances on Large-Scale Shaking Table Test for Rocky Slopes under Earthquake. *Earth Science*, 1–13(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.R., Zhao, S.Y., Zhang, L.Y., 2002. Slope Stability Analysis by Strength Reduction FEM. *Engineering Science*, (10): 57–61(in Chinese with English abstract).
- Zou, Y., Qi, S.W., Guo, S.F., et al., 2022. Factors Controlling the Spatial Distribution of Coseismic Landslides Triggered by the Mw 6.1 Ludian Earthquake in China. *Engineering Geology*, 296, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106477>

附中文参考文献

- 崔芳鹏, 许强, 殷跃平, 等, 2018. 基于带状震源破裂机制的斜坡动力响应. *岩土力学*, 39(1): 320–330.
- 杜晓丽, 戴俊, 魏京胜, 等, 2009. 岩质边坡稳定性分析中地震波理论的应用研究. *三峡大学学报(自然科学版)*, 31(2): 55–58.
- 郭明珠, 谷坤生, 张合, 等, 2022. 强震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应规律试验研究. *岩土力学*, 43(5): 1306–1316.
- 李龙起, 何川, 王滔, 等, 2020. 陡倾软硬互层顺向坡强震裂隙发育特征及边际谱熵值响应规律. *岩土力学*, 41(10): 3456–3464.
- 李玉江, 陈连旺, 陆远忠, 等, 2013. 汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟. *地球科学*, 38(2): 398–410.
- 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等, 2010. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究. *工程地质学报*, 18(5): 669–676.
- 刘新荣, 何春梅, 刘树林, 等, 2019. 高频次微小地震下顺倾软硬互层边坡动力稳定性研究. *岩土工程学报*, 41(3): 430–438.
- 罗登贵, 刘江平, 金聪, 等, 2017. 活断层的地震响应特征与瞬时地震属性. *地球科学*, 42(3): 462–470.
- 吴善百, 王亮清, 吴琼, 等, 2022. 地震作用下锚固岩质边坡动力响应研究进展与展望. *地球科学*, 1–13.
- 言志信, 张森, 张学东, 等, 2011. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究. *岩石力学与工程学报*, 30(S2): 3522–3528.
- 赵飞, 俞松波, 李博, 等, 2022. 地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展. *地球科学*, 1–13.
- 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝, 2002. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析. *中国工程科学*, (10): 57–61.