



论 文

强震作用下青藏高原地区断裂控制型边坡动力响应规律与变形破坏机制研究

黄雨^{1,2,5}, 张云秋¹, 邱振东^{3,4}, 李瀛巍¹, 郭长宝^{3,5,6*}, 朱崇强^{1,2,5*}

1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092
2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
4. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074
5. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081
6. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

* E-mail: guochangbao@163.com; cqzhu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2024-12-17; 接受日期: 2025-03-03; 网络版发表日期: 2025-04-18

中国地质调查局项目(编号: DD20221816)资助

摘要 青藏高原东缘高山峡谷区, 其地形地貌和地质条件复杂, 构造运动活跃, 构造断裂带发育, 断裂控制型高位滑坡频发, 严重影响了此区域重大工程的规划建设与人民的生命财产安全. 然而, 目前对于断裂控制型滑坡的动力响应规律与变形破坏机制大多停留在地质调查与数值模拟研究上, 缺乏基于真实案例的大型物理模型试验研究. 本文以摩岗岭滑坡为原型, 选取相似比为50, 开展振动台物理模拟试验. 结果表明, 坡表与坡内的加速度动力响应表现出明显的非线性高程放大效应, 沿断裂带水平方向上, 断裂带对水平向加速度具有明显的放大作用, 水平向加速度峰值(PHA)放大系数在断裂带处出现峰值, 而对竖向加速度的影响并不明显; 在激振强度0.3g时, 断裂带上盘和下盘的动应力峰值迅速增加, 且上盘大于下盘; 同一高程下, 左坡(含断裂带)的位移动力响应要明显大于右坡(不含断裂带), 且水平向的位移动力响应显示出高程放大效应; 随着加载工况的进行, 左右边坡的固有频率随工况增加逐渐降低, 且左坡(含断裂带)的固有频率始终小于右坡(不含断裂带), 下降速度更快. 通过高速相机分析断裂控制型边坡的变形破坏机制发现, 坡体破坏主要集中在断裂带上盘, 以张拉破坏为主, 滑坡后缘的较浅处形成了一条与坡表贯通的裂缝, 上盘坡体大量滚落至中下部, 下盘并未出现明显变形, 破坏程度上具有明显的上下盘效应. 在逐级加载的过程中, 断裂控制型边坡逐渐形成了一条由上而下从坡顶后方到断裂带前端的贯通滑动面. 本试验从青藏高原地区真实案例出发, 揭示了断裂控制型高位滑坡地震作用下的边坡动力响应与变形破坏机制, 对于铁路的规划建设与邻近地区的防灾减灾提供理论支撑.

关键词 川藏交通廊道, 断裂控制型边坡, 振动台试验, 动力响应特性, 变形破坏机制

引用格式: 黄雨, 张云秋, 邱振东, 等. 强震作用下青藏高原地区断裂控制型边坡动力响应规律与变形破坏机制研究. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 927–942
Huang Y, Zhang Y Q, Qiu Z D, et al. Dynamic response and deformation failure mechanism of fault-controlled slope in Qinghai-Xizang Plateau under strong earthquake action (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 927–942, doi: 10.1360/SST-2024-0326

1 引言

川藏交通廊道位于青藏高原东缘高山峡谷区, 其沿线地形地貌复杂, 构造活动显著, 地质灾害尤为突出。其中, 大型至巨型高位滑坡频繁发生, 包括新磨村滑坡^[1]、白格滑坡^[2]、易贡滑坡^[3]、乱石包滑坡^[4]、摩岗岭滑坡^[5~7]、特米滑坡^[8,9]等。这些滑坡灾害不仅对区域生态系统造成严重破坏, 还对沿线居民的生命财产安全以及基础工程的规划、建设和运行构成重大威胁。

近年来, 国内外学者主要针对上述典型突发高位滑坡案例, 从形成条件、变形特征、稳定性分析和监测预警方法等方面进行了研究, 普遍认为川藏交通廊道区域的高位滑坡在内外动力耦合作用下的长期地质演化过程中形成^[10]。除了降雨、人类工程活动等外力因素外, 越来越多的学者开始关注造成滑坡发育形成的内动力影响因素, 如断裂带和地震作用。部分学者将由断裂带与地震力作用形成的高位滑坡称为断裂控制型滑坡^[10,11], 其机理为活动断裂穿越斜坡体时的多次构造运动造成岩体破碎, 节理裂隙发育, 强度低, 形成坡内软弱带, 在地震力作用下坡体会沿软弱面滑动, 导致断裂带的强度进一步降低, 最终诱发滑坡。

目前对于断裂控制型高位滑坡的研究, 主要基于地质调查与数值模拟两种方式开展, 如杨志华等^[12]在野外调查研究的基础上, 剖析了巴塘断裂带的典型滑坡发育特征, 并探讨了巴塘断裂带的地质灾害效应。张佳佳等^[11]通过前期InSAR遥感解译与现场野外调查, 详细分析了澜沧江昌都段的滑坡发育特征与形成机制, 发现卡贡-盐井活动断裂对滑坡灾害空间分布具有明显的控制作用。王志民等^[13]利用3DEC离散元软件对不同断层破碎带宽度、倾角、位置情况下的斜坡动力响应进行模拟。惠红军等^[14]以FEPG为有限元平台, 构建含边坡结构的二维动态铲形断层模型, 通过加载脉冲震源, 探究不同断层距下的边坡地震响应。由此可见, 现场调查主要分析了断裂控制型滑坡的最终堆积构型及地质条件, 对于认识大型滑坡的形成具有重要作用, 但是该手段难以确定强震作用下断裂控制型边坡的动力响应与变形破坏机制; 数值模拟虽然能够揭示断裂带形态对于边坡动力响应的影响, 但数值模拟建模往往需要大量地质力学参数, 此类参数的

标定具有很大的难度, 导致模拟结果难以反映现场的真实情况。因此, 为了更全面地理解断裂控制型滑坡的动力特性和变形破坏过程, 亟需通过物理模拟试验加强研究力度。

振动台模型试验作为目前模拟地震荷载的最有效手段之一, 其被广泛应用于不同类型的地震滑坡的动力响应与破坏机制研究。然而, 目前针对断裂控制型边坡的振动台试验研究相对较少, 为全面深入探究断裂带对于边坡动力响应规律与变形破坏模式的影响, 有必要加强振动台试验的研究力度。周泽华等^[15]以翠华山水湫池崩塌为研究对象, 开展振动台试验, 研究地震作用下受断层控制的岩质边坡动力响应及破坏机制; 黄强兵等^[16,17]分别对含下伏反倾断裂带、顺倾断裂带的黄土-泥岩边坡开展室内振动台试验研究, 探究其动力响应规律和破坏模式。漆苒见等^[18]设计了逆冲断层模型箱, 对断层存在与断层错动下的边坡动力响应与破坏模式开展了振动台试验。然而当前振动台试验研究主要集中在均质边坡的动力响应与破坏模式研究, 难以体现自然边坡的复杂性, 同时对于青藏高原地区的振动台试验研究开展较少。因此, 亟待开展青藏高原地区断裂控制型边坡振动台试验研究, 阐明此类边坡的动力响应和变形特性, 从而为本地区的防灾减灾提供理论支撑。

为此, 本文以摩岗岭滑坡为原型, 根据真实坡型与现场岩土体力学参数设计了缩尺振动台试验, 并设计了普通均质边坡作为对照。揭示了断裂带在复杂地形下的加速度放大效应与上下盘效应, 通过对高速相机图像的分析, 探讨了断裂控制型高位边坡的变形破坏机制, 可为川藏交通廊道区域的重大基础设施建设与防灾减灾提供科学依据。

2 区域地质条件

摩岗岭位于四川省泸定县, 夹在大渡河与磨西河之间, 整体为近南北向的单薄山梁, 大渡河右岸, 紧靠磨西河河口^[5~7]。摩岗岭滑坡位于摩岗岭东坡, 整体地形地貌呈圈椅状, 主滑方向 $S75^{\circ}E$, 坡体长约350~500 m, 沿大渡河宽约900~950 m, 平面面积约为 0.41 km^2 。周洪福等^[6]通过建立三维实体模型计算得到摩岗岭滑坡大渡河右岸主堆积体的体积约为 $21\times 10^6\text{ m}^3$, 滑坡所在坡顶高程约为1900 m, 坡脚海拔

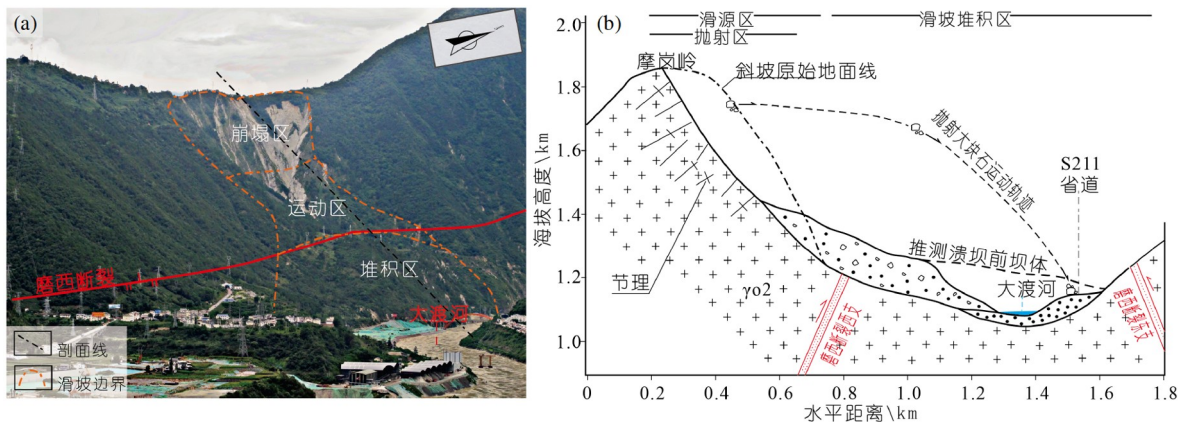


图 1 (网络版彩图)(a)摩岗岭滑坡全貌图与(b)工程地质剖面图^[19]

Figure 1 (Color online) Overall view (a) and engineering geological section (b) of the Mogangling landslide [19]. Copyright © 2022, 地质通报编辑部.

高度为1120~1130 m. 如图1所示, 为摩岗岭滑坡全貌图与工程地质剖面图^[19].

滑坡区岩性主要为元古代晋宁-澄江期花岗岩与闪长岩, 同时分布第四纪崩坡积物、冲洪积物与滑坡堆积体等物质. 断裂带主要由碎斑岩、断层角砾岩、碎粉岩等组成, 工程性质差, 断层宽度在3~5 m.

摩岗岭附近发育磨西断裂与得妥断裂. 磨西断裂为鲜水河断裂带南东段的主干断裂, 是一条单一的断裂, 仅局部存在一些分叉现象. 断裂北起康定团结乡, 向南经磨西、田湾至新民一带活动形迹减弱, 总体走向N20°W~N30°W, 全长约90 km. 全新世以来的平均水平滑动速率为 (9.9 ± 0.6) mm/a. 得妥断裂即大渡河断裂南段, 在滑坡区出现两个分支, 东支从滑坡对岸通过, 西支从滑体下方通过, 断裂面呈向西倾, 倾角大约为60°^[20].

1786年6月1日, 泸定-康定-磨西地区发生7.75级超大地震, 震中认为在康定地区, 震中烈度达到X度. 这次地震直接诱发了位于震中东南的摩岗岭滑坡, 滑坡发生后, 坡体滚落堵塞大渡河, 其中形成高约167 m的堰塞坝, 蓄水量约 13×10^8 m³的堰塞湖, 十天后突然溃决, 造成下游数万人死亡^[21].

先前研究表明^[11-13], 断裂带由于其力学性质较差, 在岩体自重应力的影响下极易发生剪胀作用, 从而导致断裂带附近岩体破碎, 降低坡体整体的抗剪强度. 最后在地震作用下多组结构面贯通, 连接形成滑面. 由此可见, 断裂带对摩岗岭滑坡的形成具有重要的控制作用, 但是地震与断裂带耦合作用下的边坡动力响

应规律与变形破坏机制并不明确. 为此, 本文以摩岗岭滑坡为原型制作对应的缩尺模型, 开展振动台试验研究.

3 大型振动台试验设计

3.1 试验设备概况

大型振动台模型试验在同济大学振动台实验室模拟地震振动台上进行, 其台面尺寸4 m×4 m, 最大驱动加速度 $\pm 4.0g$, X, Y, Z方向最大驱动位移分别为 ± 100 mm, ± 75 mm, ± 50 mm, 最大载重25 t, 频率范围0.1~100 Hz, 实验数据采用256通道动态信号采集系统, 自动采集、记录和存储传感器的响应数据.

结合振动台尺寸及其承载能力, 本试验设计模型箱一个. 如图2所示, 模型箱整体采用高强度槽钢及角钢焊接制作, 为方便采用高速摄像机监测斜坡在地震作用下的变形特性, 模型箱侧面拟采用钢化玻璃制作. 模型箱内部尺寸完成时为3.4 m×0.9 m×1.5 m (长×宽×高). 箱底面、两端面和一个侧面采用厚钢板制成维护, 另一个侧面采用厚有机玻璃制成, 以便于监测坡体的变形和动力响应特征. 模型箱底部槽钢在对应的位置设螺栓孔, 可以与振动台相连接固定. 水平振动方向两侧内壁增加一层20 cm厚的聚苯乙烯泡沫板吸收地震波. 为增大箱底的摩擦, 在箱子底部焊上几个钢条将其处理成摩擦边界, 减小和限制箱底与土体之间的相对位移. 试验时模型箱两侧均涂抹凡士林, 以消除箱壁对坡体的摩擦约束.

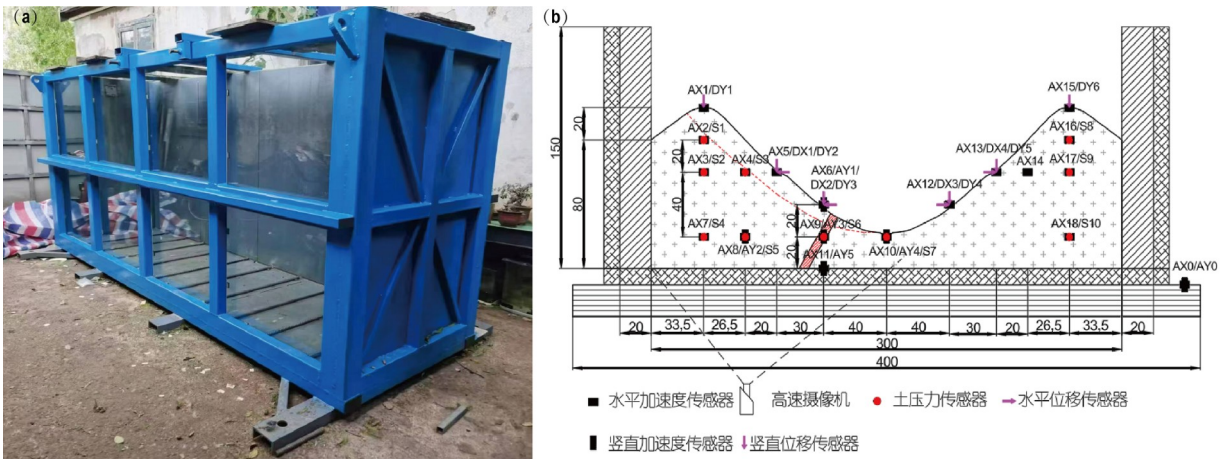


图 2 (网络版彩图)(a)模型箱与(b)斜坡模型布置图
Figure 2 (Color online) Layout of the model box (a) and slope model (b).

3.2 相似关系

本次试验以摩岗岭滑坡为背景, 选取模型试验的滑坡构型与物理力学参数, 同时兼顾振动台性能指标与模型箱尺寸, 基于Buckingham- π 定理开展相似设计, 取密度相似比 $C_\rho=1$, 弹性模量相似比 $C_E=50$, 推导出的物理量纲相似常数如表1所示。

3.3 正交试验设计与材料配备选取

当前, 大量振动台模型边坡的设计材料多采用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油、水配置(如图3所示), 其中重晶石粉、石英砂分别作粗、细骨料调节材料的级配, 石膏与水作用产生胶结性, 甘油起保水作用, 该方法可以实现软岩、硬岩的材料要求, 且试验主要控制三个参数(砂胶比、水膏比、重晶石含量), 所得到的材料密度、刚度可控。因此, 本次试验采用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油、水配置。通过室内反复的力学特性试验(无侧限抗压强度试验获得弹性模量和泊松比, 直剪试验获得内聚力和内摩擦角), 在尽可能满足本试验各物理量相似关系的前提下, 以确定模型材料的物理力学参数。

为获取与原型最相近的相似材料配比, 本次试验设计方法采用正交试验设计法。其中因素为试验研究过程中的自变量, 水平为试验中因素的具体状态或情况。根据正交试验理论, 考虑了4因素4水平设计, 确定了16组材料配比。表2为两种不同制样方法的正交设计水平表。表3为本次试验三种不同相似材料的正交试验

最佳配比结果。其中骨料代表重晶石粉与石英砂的总质量, A因素表示重晶石粉占骨料质量的百分比, B因素表示石膏质量占相似材料总质量的百分比, C因素表示甘油质量占相似材料总质量的百分比, D因素代表水的质量占相似材料总质量的百分比。

表 1 试验物理量纲相似常数

Table 1 Dimensional similarity constants of experimental physical quantities

符号	项目	相似率	相似常数	备注
L	几何尺寸	C_l	50	控制量
ρ	密度	C_ρ	1	控制量
a	加速度	C_a	1	控制量
E	弹性模量	C_E	50	控制量
μ	泊松比	C_μ	1	
u	位移	C_l	50	
c	内聚力	C_c	50	
φ	内摩擦角	C_φ	1	
v	速度	$C_v = \sqrt{C_l}$	7.07	
t	时间	$C_t = \sqrt{C_l}$	7.07	
f	频率	$C_f = \frac{1}{\sqrt{C_l}}$	0.141	
S	面积	$C_s = C_l^2$	2500	
V	体积	$C_v = C_l^3$	125000	

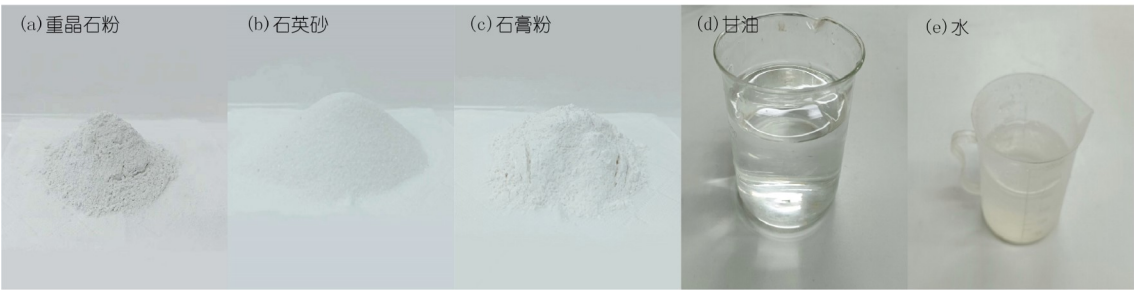


图 3 (网络版彩图)相似配比材料. (a) 重晶石粉; (b) 石英砂; (c) 石膏粉; (d) 甘油; (e) 水
Figure 3 (Color online) Similar proportional materials. (a) Barite powder; (b) quartz sand; (c) gypsum powder; (d) glycerin; (e) water.

表 2 相似材料正交设计水平

Table 2 Orthogonal design level of similar materials

水平	重晶石/骨料 (%) [A]	石膏含量 (%) [B]	甘油含量 (%) [C]	水含量 (%) [D]
1	20	1	0	2
2	40	4	2	4
3	60	7	4	6
4	80	10	6	8

表 3 相似材料正交试验最优配比结果

Table 3 Optimal ratio results of orthogonal test of similar materials

相似材料	重晶石/骨料 (%) [A]	石膏含量 (%) [B]	甘油含量 (%) [C]	水含量 (%) [D]
强风化花岗岩	40	4	0	8
中风化花岗岩	40	10	4	4
断裂带	40	1	2	6

3.4 模型制备

本次试验的斜坡模型为现场建造，从下到上逐层砌筑。按照表4所示的每一类相似材料配比，制作相应的实验材料，材料均使用实验室的小型搅拌机拌制。为确保制作模型的岩体密度与相似材料一致，严格采用体积控制原则逐层堆砌压实，并采用先堆后削的方法制作断层面、层面和坡面，避免传统使用模板制作边坡易导致压实不均匀的缺陷。

滑坡模型使用的三种相似材料的分布以及模型的尺寸如图2(b)所示。其中虚线为模型滑动面，其上为强风化花岗岩，其下为中风化花岗岩，红色部分为模型中所模拟的断裂带。将配置好的三种相似材料逐层加入模型箱内，每层用夯锤手动夯击。

为保证模型土样的准确度，斜坡模型制备时，首先

填充坡体底部中风化花岗岩与断裂带部分，每层夯土厚度控制在5~10 cm。填充时，在断裂带与花岗岩分界面处，首先堆积下盘花岗岩材料，平整分界面后，再堆积断裂带与上盘花岗岩部分。重复上述操作直至堆积至设计谷底，再堆积斜坡部分。堆积斜坡时首先堆积右坡，依照图2(b)中坡体参考线分层堆积成阶梯状，每层5~10 cm，堆积至设计坡顶后，切除多余部分，修整坡面。左坡堆积方法同右坡，直至堆积至设定虚线处滑动面。滑动面以上坡体部分手动堆积强风化花岗岩与断裂带模型材料，完成模型制作，最终模型如图4所示。

3.5 监测系统布设

本次振动台试验采用的传感器主要有加速度传感器、压力传感器、拉线式位移计等，同时设有高速摄

表 4 滑坡模型相似材料与原型强度参数对比

Table 4 Comparison of strength parameters between similar materials and the prototype of landslide model

材料类型	模型材料配比(质量比)	密度(kg/m ³)	无侧限抗压强度 (MPa)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
强风化花岗岩	原型	2300	1.4352	65	35
	重晶石: 石英砂: 石膏: 甘油: 水= 35.2: 52.8: 4: 0: 8	2300	0.761	65.4	33
中风化花岗岩	原型	2300	3.1408	107	50
	重晶石: 石英砂: 石膏: 甘油: 水= 32.8: 49.2: 10: 4: 4	2300	3.666	100.7	55
断裂带	原型	2100	0.1976	2	45
	重晶石: 石英砂: 石膏: 甘油: 水= 36.4: 54.6: 1: 2: 6	2100	0.160	1.77	49.1

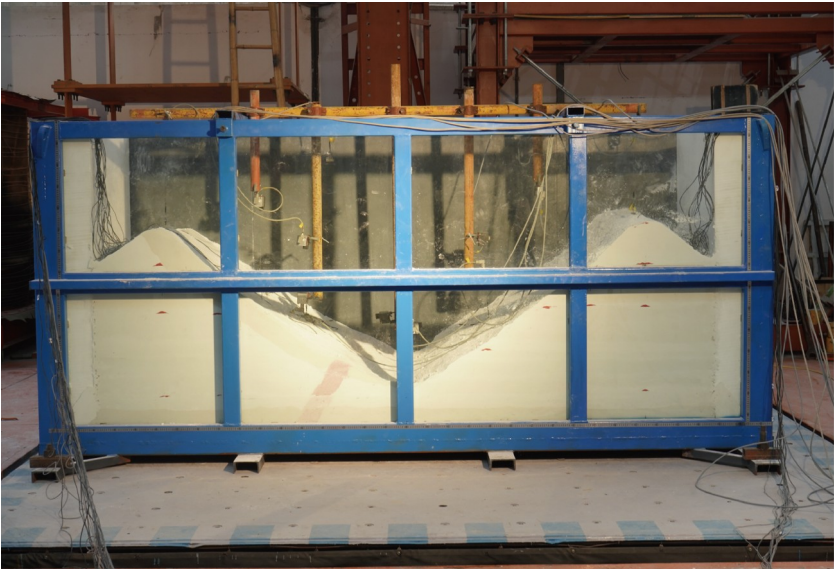


图 4 (网络版彩图)试验模型

Figure 4 (Color online) Test model.

像机进行拍摄分析。其中上述三类传感器事先完成标定，在模型制作阶段即按照图4所示位置同步埋设入坡体中。其布设方案如下所述。

加速度传感器。固定在边长为10 cm左右的铁丝网上以防止倾斜。在模型堆积到传感器的设计埋深时，埋入传感器。加速度传感器主要布设在斜坡模型内部、坡顶、坡脚及斜坡表面附近，获取地震作用下斜坡不同位置的水平向及竖向加速度时程数据。

压力传感器。布设时，将其固定在硬纸板上，水平放置于目标位置。压力传感器分布埋设在坡体内部及

坡脚等位置，测量振动过程坡体不同位置、不同深度的动应力变化趋势。

拉线式位移传感器。在箱顶采取横梁固定竖向拉线位移计，通过拉线连接于埋置在坡体内的砖块。监测坡顶竖直、水平方向的位移变化，结合加速度响应，分析模型斜坡的动力变形破坏过程。

高速摄像机。为进一步捕捉地震作用下斜坡的宏观和微观破坏特征，本次试验拟采用i-SPEED 716高速摄像机及专业光源设备组建非接触测量系统，准确记录地震作用下斜坡变形破坏全过程行为。

3.6 输入地震动与加载工况设计

地震动的时频特征对于坡体的地震响应非常关键, 选取合适的地震动是获得理想实验结果的前提. 通常地震动的选取有三种, 天然地震动、人工地震动和简单正弦波.

因此在本研究中将选取天然地震动进行试验, 在输入地震动之前, 需要对原型波进行两个步骤的处理. (1)首先需要将原型波按照时间相似比 C_t 进行时间压缩, 同时根据傅里叶变换的性质, 将原型波的频率成分扩大 C_t 倍. (2)其次, 对原型波的幅值沿整个时间轴进行标量缩放, 以获得试验所需的不同幅值的地震波. 本次试验选取汶川康定波和汶川卧龙波作为断层控制型滑坡的输入地震动. 两种地震波的加速度时程曲线与傅里叶频谱曲线如图5和6所示.

振动台试验加载的基本原则是, 在坡体出现大变形之前, 尽可能地输入加载工况, 从而获得足够多的数据分析坡体滑动前的动力响应规律. 本次试验加载地震波为三向激振同时加载, 以 X 向加速度幅值为基准逐级加载, 每级强度间隔 $0.1g$, Y 向与 Z 向的加速度幅值与 X 向对应成比例增加. 其中KDT波的XYZ三向峰值比值为 $34.2: 21.7: 16.4$, WCW波的XYZ

三向峰值比值为 $957.7: 652.9: 948.1$. 本次试验的加载工况如表5所示. 具体加载地震波三向激振幅值如表6所示.

4 结果分析

4.1 边坡动力响应分析

本次试验共埋设了加速度计、压力计、拉线式位移计三种传感器, 用于探究断裂控制型边坡的加速度、动应力与位移响应规律. 根据加速度传感器的埋设位置, 我们分别探究了坡内与坡表的高程放大效应、趋表效应、断裂带水平向的动力响应特性与断裂带竖直向的动力响应特性. 为了更加直观地反映加速度响应的变化趋势, 选取加速度放大系数这一无量纲参数进行绘图, 其定义为坡体内任一点的响应加速度与台面加速度的比值. 本次试验主要分析了沿断裂带水平向的动应力峰值响应规律, 目的是除去初始动应力异常对整体动态响应规律的影响. 由于本次拉线式位移传感器在试验过程中被大量拉出, 因此仅采集到DY2, DY5, DX1, DX2, DX3, DX4的数据对边坡的位移响应进行了简要分析.

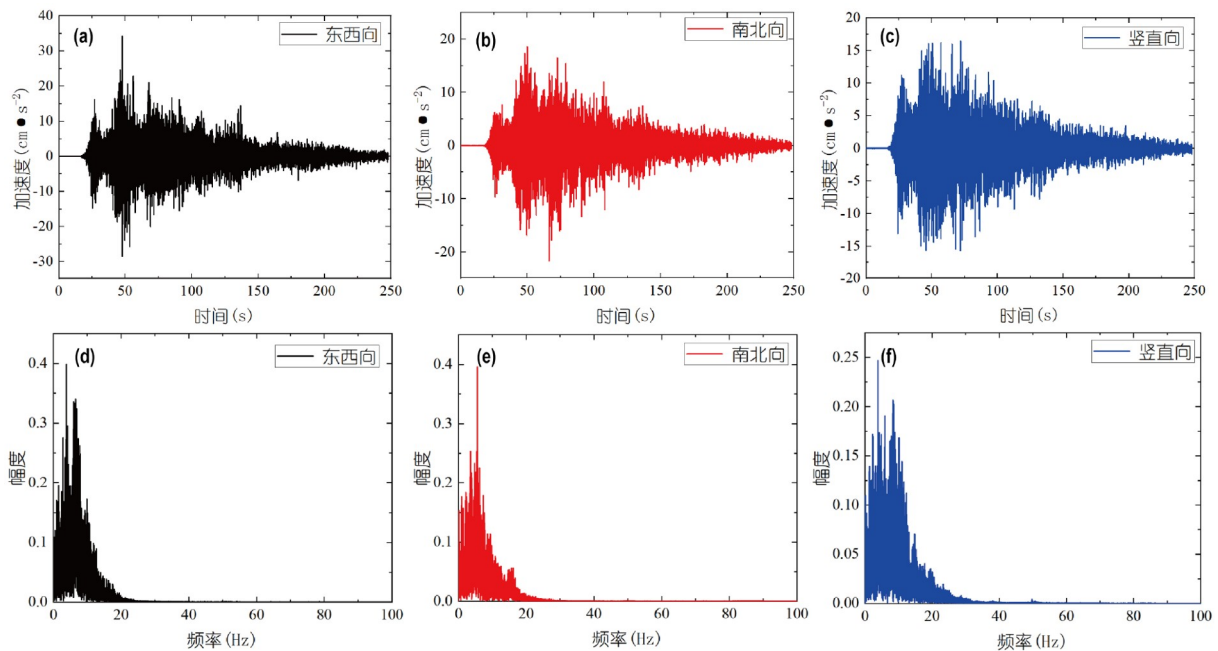


图5 (网络版彩图)康定地震波加速度时程曲线与傅里叶频谱曲线. (a) 东西向分量; (b) 南北向分量; (c) 竖直向分量; (d) 东西向傅里叶频谱; (e) 南北向傅里叶频谱; (f) 竖直向傅里叶频谱

Figure 5 (Color online) Acceleration time history curve and Fourier spectrum curve of Kangding earthquake wave. (a) East-west component; (b) north-south component; (c) vertical component; (d) east-west Fourier spectrum; (e) north-south Fourier spectrum; (f) vertical Fourier spectrum.

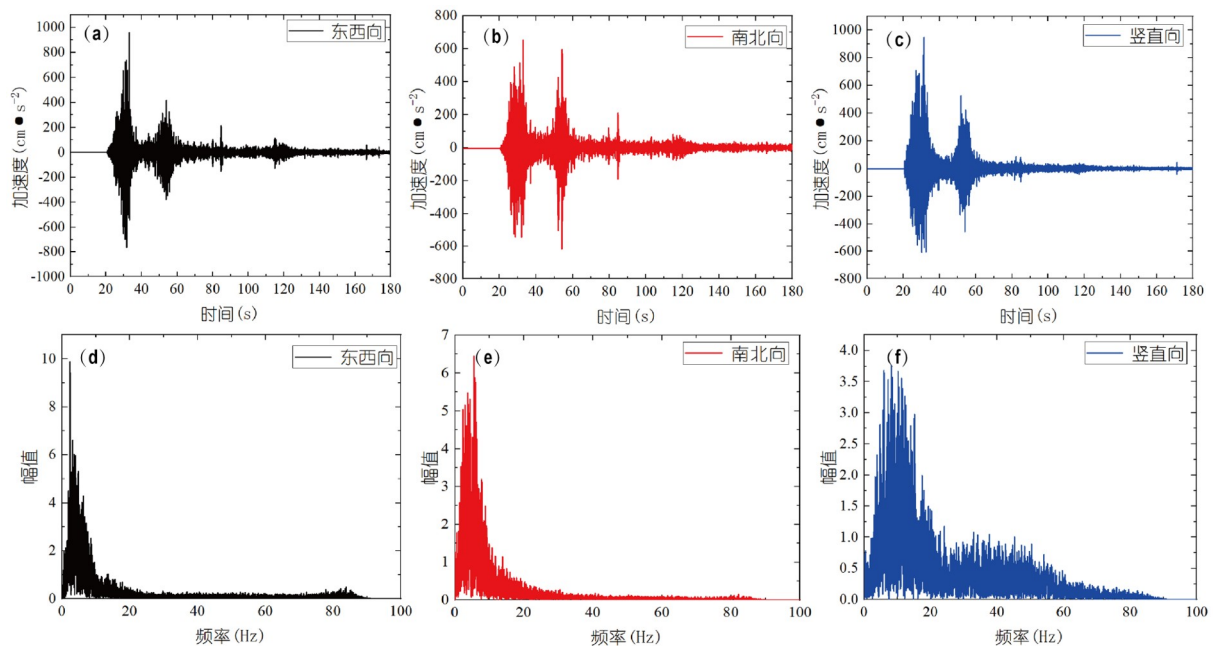


图 6 (网络版彩图)卧龙地震波加速度时程曲线与傅里叶频谱曲线. (a) 东西向分量; (b) 南北向分量; (c) 竖直向分量; (d) 东西向傅里叶频谱; (e) 南北向傅里叶频谱; (f) 竖直向傅里叶频谱

Figure 6 (Color online) Acceleration time history curve and Fourier spectrum curve of Wolong earthquake wave. (a) East-west component; (b) north-south component; (c) vertical component; (d) east-west Fourier spectrum; (e) north-south Fourier spectrum; (f) vertical Fourier spectrum.

表 5 边坡振动台加载工况

Table 5 Slope shaking table loading conditions

工况	输入地震波与幅值	工况	输入地震波与幅值
1-1	白噪声0.05g	1-17	KDT-XYZ 0.6g
1-2	KDT-XYZ 0.1g	1-18	WCW-XYZ 0.6g
1-3	WCW-XYZ 0.1g	1-19	白噪声0.05g
1-4	白噪声0.05g	1-20	KDT-XYZ 0.7g
1-5	KDT-XYZ 0.2g	1-21	WCW-XYZ 0.7g
1-6	WCW-XYZ 0.2g	1-22	白噪声0.05g
1-7	白噪声0.05g	1-23	KDT-XYZ 0.8g
1-8	KDT-XYZ 0.3g	1-24	WCW-XYZ 0.8g
1-9	WCW-XYZ 0.3g	1-25	白噪声0.05g
1-10	白噪声0.05g	1-26	KDT-XYZ 0.9g
1-11	KDT-XYZ 0.4g	1-27	WCW-XYZ 0.9g
1-12	WCW-XYZ 0.4g	1-28	白噪声0.05g
1-13	白噪声0.05g	1-29	KDT-XYZ 1.0g
1-14	KDT-XYZ 0.5g	1-30	WCW-XYZ 1.0g
1-15	WCW-XYZ 0.5g	1-31	白噪声0.05g
1-16	白噪声0.05g		

表 6 边坡三向激振幅值
Table 6 Slope three-way excitation amplitude

工况	输入地震波X向峰值 (g)	输入地震波Y向峰值 (g)	输入地震波Z向峰值 (g)
1-2	0.1	0.054	0.048
1-3	0.1	0.068	0.099
1-5	0.2	0.108	0.096
1-6	0.2	0.136	0.198
1-8	0.3	0.162	0.144
1-9	0.3	0.204	0.297
1-11	0.4	0.216	0.192
1-12	0.4	0.272	0.396
1-14	0.5	0.27	0.24
1-15	0.5	0.34	0.495
1-17	0.6	0.324	0.288
1-18	0.6	0.408	0.594
1-20	0.7	0.378	0.336
1-21	0.7	0.476	0.693
1-23	0.8	0.432	0.384
1-24	0.8	0.544	0.792
1-26	0.9	0.486	0.432
1-27	0.9	0.612	0.891
1-29	1.0	0.54	0.48
1-30	1.0	0.68	0.99

4.1.1 加速度动力响应分析

地震波在坡体内造成的惯性力是边坡变形失稳的主要原因，而加速度响应时程中的峰值就代表着坡体在某个方向上受到的最大惯性力。对加速度时程曲线，统一取绝对值的最大值作为峰值，反映斜坡内的最大地震惯性力，水平向加速度峰值和竖直向加速度峰值分别采用PHA和PVA表示。为了更直观地反映斜坡在地震作用下相对于输入波的响应程度，采用加速度放大系数来衡量动力响应，定义为斜坡内任一点的响应峰值加速度与振动台台面的响应峰值加速度的比值。采用相对高程来描述垂向距离的变化情况，所谓相对高程即坡体任意一点高程与坡体高度的比值。

图7和8分别给出了模型左右坡在三向康定地震波不同激振强度下，坡内和坡表的PHA放大系数随着高程增加的变化特征。值得注意的是，AX6在试验过程中损坏，因此在相对高程0.4的位置，坡表没有相应的

X向加速度响应数据。总体来说，坡内与坡表的PHA放大系数随高程增加总体呈现增加的趋势。同时左坡的动力响应比右坡的动力响应更显著(如图9所示)。这是由于强风化花岗岩与断裂带的强度较低，相较于中风化花岗岩其刚度更低，组成的斜坡固有频率较右坡更小，更可能接近水平分量地震波的卓越频率，从而产生共振，使响应增强，同时，层面结构的斜坡动力响应相较于均质边坡更大，由于层面的反射与折射作用，反射波与折射波在层面中叠加，相较于均质斜坡，加速度放大系数会增大。

为探究断裂带对于边坡动力响应的影响，沿断裂带水平向布置了水平向加速度传感器与竖直向加速度传感器，监测沿断裂带水平向的加速度分布规律，如图10所示。结果表明，沿断裂带水平向水平动力响应在断裂带处响应最大，随着与断裂带距离的增加响应逐渐减小，说明断裂带对地震波的放大效应有相当大

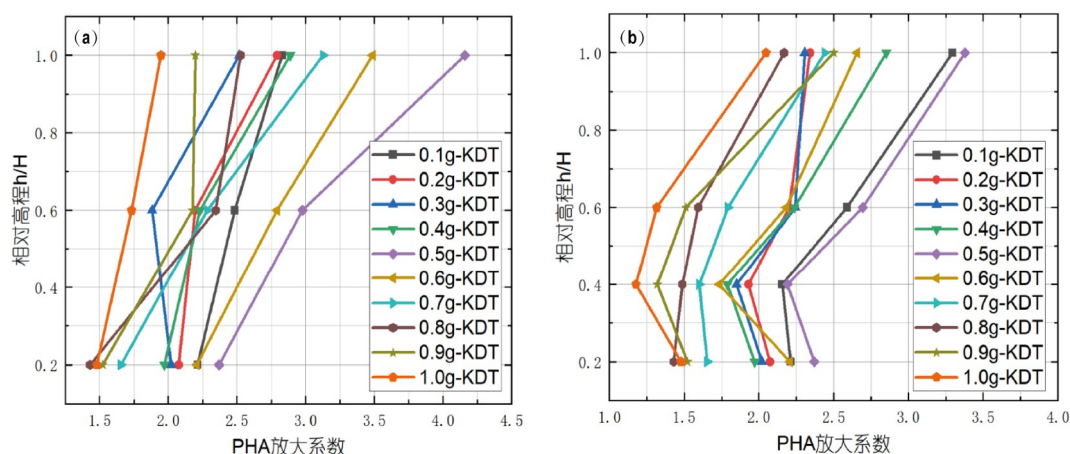


图 7 (网络版彩图)不同激振强度下左坡与右坡坡表PHA放大系数随高程的变化规律. (a)左坡(含断裂带); (b)右坡(不含断裂带)

Figure 7 (Color online) Variation of PHA amplification coefficients of the left and right slopes with elevation under different excitation intensities. (a) Left slope (including fault zone); (b) right slope (excluding fault zone).

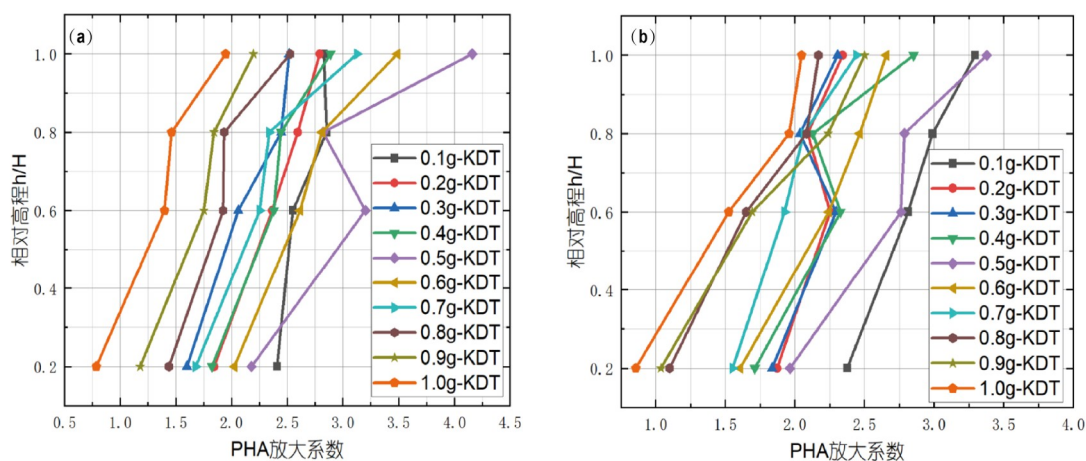


图 8 (网络版彩图)不同激振强度下左坡与右坡坡内PHA放大系数随高程的变化规律. (a)左坡(含断裂带); (b)右坡(不含断裂带)

Figure 8 (Color online) Variation of PHA amplification coefficients with elevation on the left and right slopes under different excitation intensities. (a) Left slope (including fault zone); (b) right slope (excluding fault zone).

的影响, 断裂带为软弱带, 材料强度低, 在地震波的作用下受到很大扰动, 因此断裂带的振动明显强于其他部位; 断裂带对竖直向动力响应影响较小, 整体呈现趋表放大效应, 说明断裂带对于竖直地震动的传播影响较小。

4.1.2 动应力峰值响应分析

由于本次地震动加载为XYZ三向加载, 水平向动应力更容易受到地震波XY分量方向性的影响, 测量结

果变异性大, 而垂直动应力仅受Z向单向振动加载的影响, 数据更稳定, 便于分析, 因此本次试验通过监测边坡垂直动应力来反映边坡的破坏过程。图11给出了沿断裂带水平向垂直动应力峰值的变化情况, 从图中可知, 垂直动应力峰值整体随激振强度的增加而增加, 当激振强度 $<0.3g$ 时, 沿断裂带水平向上的动应力峰值差别不大; 当激振强度 $>0.3g$ 时, 位于断裂带两侧的动应力峰值迅速增大, 且上盘动应力峰值大于下盘动应力峰值, 展现出明显的上下盘效应。其原因可

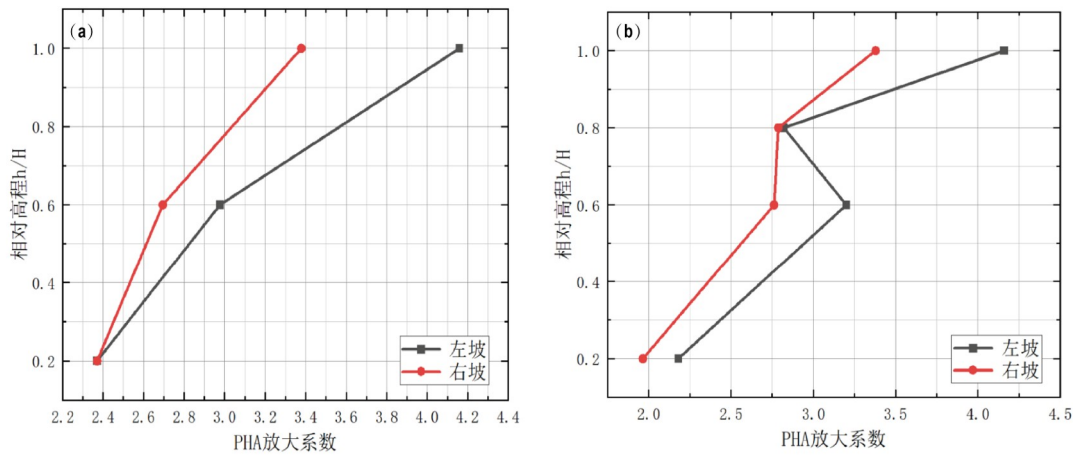


图 9 (网络版彩图)0.5g KDT激振作用下左坡与右坡不同高程下的PHA放大系数比较. (a)坡表; (b)坡内

Figure 9 (Color online) Comparison of PHA amplification factors at different elevations on the left and right slopes under 0.5g KDT excitation. (a) Slope surface; (b) slope interior.

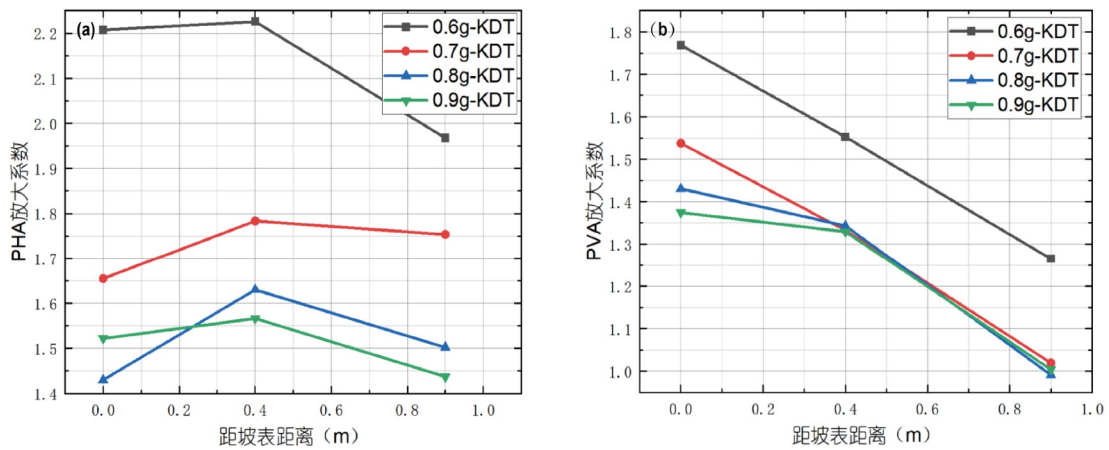


图 10 (网络版彩图)不同激振强度下沿断裂带水平与竖直向加速度动力响应. (a)水平向加速度动力响应; (b)竖直向加速度动力响应

Figure 10 (Color online) Horizontal and vertical acceleration dynamic responses along the fault zone under different excitation intensities. (a) Horizontal acceleration dynamic response; (b) vertical acceleration dynamic response.

能是, 随着激振强度的增加, 滑坡中后缘的土体大量滚落至坡底, 少量堆积于坡脚, 导致压力传感器的正上方土层厚度发生变化, 从而导致动应力峰值的变化。

4.1.3 位移响应分析

图12给出了模型边坡在地震波作用后的坡面位移变化情况。从图中可以发现, 左坡的竖向位移相较于右坡增长速度更快, 说明左坡相较于右坡优先发生剪切位移, 向下滑动; 水平位移随高程增加坡面位移逐渐增大, 显示出明显的高程放大效应。

4.1.4 边坡动力特性分析

模型边坡的动力特性, 主要是指由材料组成的模型作为一个整体所具有的各阶固有频率、阻尼和振型, 它决定了模型斜坡在动力荷载作用下的响应模式。本试验主要是对边坡施加的低幅值白噪声激振数据进行分析, 并基于蒋良淮等^[22]介绍的传递函数计算方法, 计算不同高程测点处的绝对传递系数曲线, 曲线峰值所对应的频率为边坡的第1阶固有频率。图13给出了12个阶段白噪声激振下求取的左坡和右坡在水平向的第一阶共振频率, 通过对比可得出, 左坡各阶段的固有

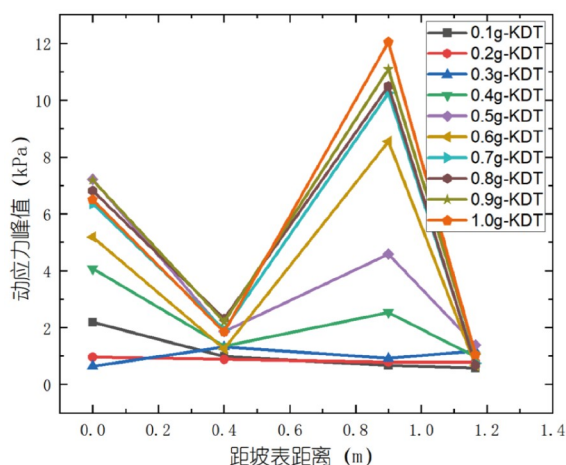


图 11 (网络版彩图)不同激振强度下沿断裂带水平向动应力峰值变化规律

Figure 11 (Color online) Variation of peak dynamic stress along the fault zone under different excitation intensities.

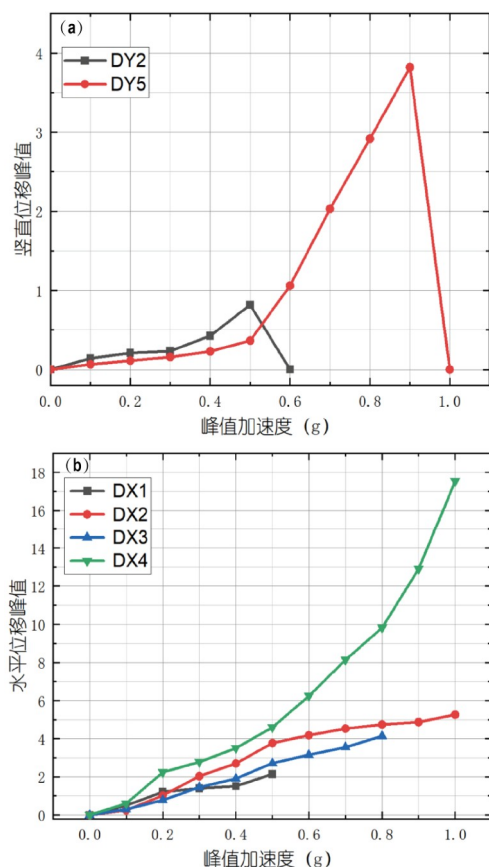


图 12 (网络版彩图)竖向与水平位移响应。(a)竖向位移响应 (b)水平位移响应

Figure 12 (Color online) Vertical and horizontal displacement responses. (a) Vertical displacement response; (b) horizontal displacement response.

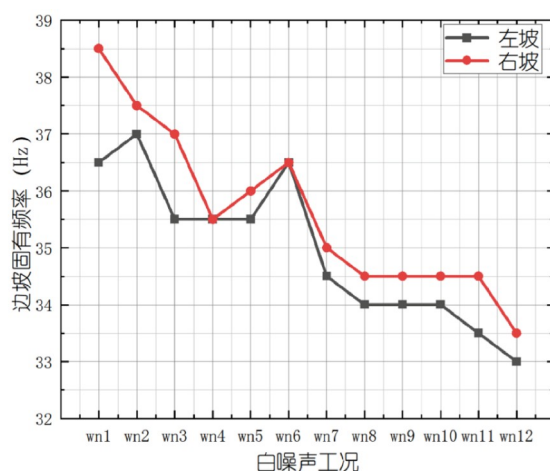


图 13 (网络版彩图)12个阶段白噪声激振下求取的左右坡水平向第一阶共振频率

Figure 13 (Color online) The first-order horizontal resonance frequencies of the left and right slopes obtained under 12 stages of white noise excitation.

频率均低于右坡各阶段固有频率, 刘汉香等人的研究表明^[23], 根据弹性波传播理论, 剪切波速 V_s 与覆盖层剪切模量 G 和密度 ρ 的关系如公式(1)所示^[24], 其中, 共振频率 f 、剪切波速 V_s 和覆盖层厚度 H 可通过公式(2)计算^[25], 由此可见, 共振频率 f 与剪切模量 G 之间存在正相关性, 说明左坡整体结构较右坡的剪切模量更低, 坡体更为松散; 且随着试验的进行, 模型斜坡的固有频率总体上在降低, 共振频率降低, 意味着斜坡体剪切模量降低, 斜坡结构发生了变化, 加载过程中逐渐变松散; 在WN6工况之后(即0.5g激振地震波加载之后), 左坡固有频率出现显著下降, 预示着左坡内部结构在该阶段发生显著变化, 与此同时, 左坡后缘出现一条贯通型裂缝, 强风化与中风化花岗岩交界处形成一条未贯通的深部剪切带, 坡顶用于固定拉线式位移传感器的砖块被拉出。

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1)$$

$$V_s = 4f \times H. \quad (2)$$

4.2 边坡变形破坏机制分析

如图14(a)所示, 在施加激振地震动0.1g~0.2g时, 边坡并未出现明显变形; 当施加激振地震动至0.3g时, 坡顶和坡面出现了少量张拉裂缝, 如图14(b)所示; 当

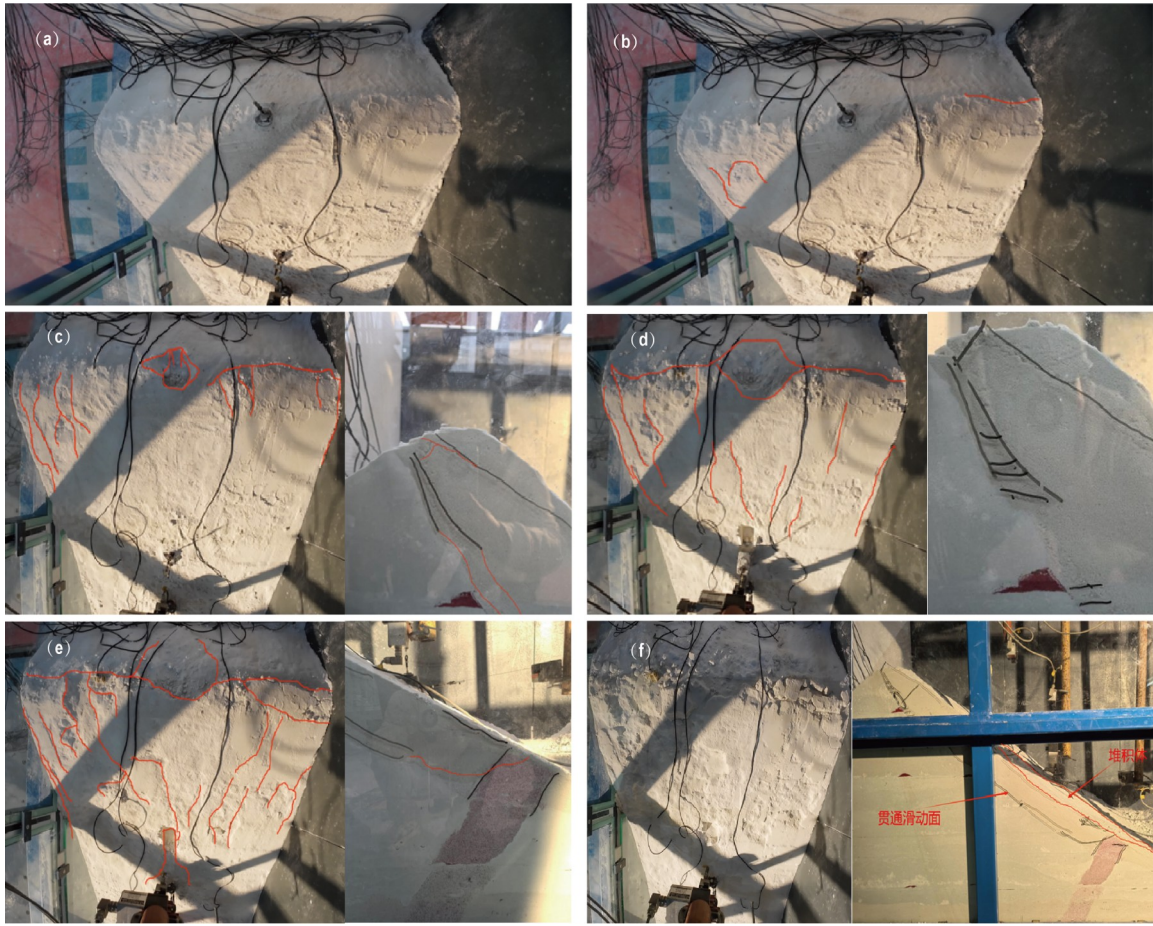


图 14 (网络版彩图)滑坡失稳演化过程图. (a) 0.2g 激振后; (b) 0.3g 激振后; (c) 0.5g 激振后; (d) 0.6g 激振后; (e) 0.7g 激振后; (f) 1.0g 激振后

Figure 14 (Color online) Landslide instability evolution process. (a) After 0.2g vibration; (b) after 0.3g vibration; (c) after 0.5g vibration; (d) after 0.6g vibration; (e) after 0.7g vibration; (f) after 1.0g vibration.

施加至 0.4g~0.5g 时(如图 14(c)所示), 坡顶和坡面裂缝数量进一步增加, 同时裂缝向深处延伸, 滑坡后缘的较浅处形成了一条与坡表贯通的裂缝, 在强风化与中风化岩石交界处形成了一条滑动剪切带, 此时由于上部坡体动力响应较大, 坡体结构发生较大的改变, 使得用于固定拉线式位移传感器的砖块被拉出; 当激振强度到达 0.6g 时(如图 14(d)所示), 坡顶拉裂缝完全贯通, 坡顶大面积溃散, 坡表中部出现大量裂缝, 导致坡表中部结构迅速恶化, 位于坡表中部的位移传感器被拉出, 同时处于强风化与中风化交界处的剪切带形成了一系列水平向雁列式节理, 说明坡体在水平向承受了较大的剪切力, 并逐渐向坡外的方向移动; 当激振强度到达 0.7g 时(如图 14(e)所示), 坡顶坡体进一步崩落, 坡表裂缝进一步向坡底发展, 同时底部剪切滑动

带形成, 并与上部滑动带贯通, 从断裂带上部剪出; 在 0.7g 之后(如图 14(f)所示), 通过逐级向上加载, 坡体后缘最终以崩落的形式破坏, 并大量堆积在坡体中下部. 由于高程效应与层面效应的综合影响, 滑动面从坡顶后方形成并向深处发展, 最终形成一条从坡顶后方延伸至断裂带前端的贯通潜在滑动面.

5 结论与讨论

本文以川藏交通廊道摩岗岭滑坡为原型, 基于大型振动台模型试验和接触式与非接触式相结合的测量手段, 探究了断裂控制型滑坡的地震动力响应规律与变形破坏机制.

(1) 试验结果表明, 随着相对高程的增加, 斜坡坡

表与坡内的加速度动力放大系数呈非线性增大趋势; 而随着激振幅值的增加, 加速度动力响应表现出先增大后减小的趋势; 同时, 边坡的加速度动力响应还受到断裂带与层面效应的控制, 由于地震波在层面与断裂带边界上的反射与折射, 使得左坡(含断裂带边坡)的加速度动力响应要明显强于右坡(均质边坡), 且同一高程下, 断裂带处的加速度放大系数要明显大于两侧。

(2) 在激振强度 $<0.3g$ 时, 沿断裂带水平向的动应力峰值变化不大; 当激振强度 $>0.3g$ 时, 断裂带两侧的动应力峰值迅速增加, 且上盘动应力峰值大于下盘动应力峰值, 展现出明显的上下盘效应。

(3) 通过拉线式位移传感器数据分析表明, 含断裂带边坡(左坡)的位移响应要明显大于不含断裂带边坡的位移响应(右坡), 且水平位移响应显示出明显的高程放大效应。

(4) 通过绘制左右边坡随白噪声加载的传递系数曲线可知, 边坡的固有频率随加载工况的进行逐渐减小, 说明边坡土体的抗剪强度减低, 内部结构逐渐破

坏; 含断裂带边坡(左坡)相较于不含断裂带边坡固有频率更低, 下降速度更快, 且破坏形式更加明显。

(5) 通过对高速相机图像的分析, 坡体破坏主要集中在断裂带上盘, 以张拉破坏为主, 滑坡后缘的较浅处形成了一条与坡表贯通的裂缝, 上盘坡体大量滚落至中下部, 而断裂带下盘并未出现明显变形, 破坏程度上具有明显的上下盘效应, 在逐级加载的过程中, 断裂控制型边坡逐渐形成了一条由上而下从坡顶后方到断裂带前端的贯通潜在滑动面。

(6) 本文通过振动台试验揭示了断裂带对边坡地震动力响应具有更强的高程放大效应、趋表放大效应和上下盘放大效应, 更易产生大规模滑坡, 同时边坡的破坏模式也具有上下盘效应。因此, 在青藏高原地区的重大基础设施建设中, 针对断裂控制型边坡应采取额外的抗震加固措施, 尤其是增加断裂带上盘的坡体支护。同时, 在断裂带区域布设更密集的传感器监测网络, 监测地震引起的坡体加速度、位移等动力参数变化, 从而提高滑坡预警的准确性。

参考文献

- 1 Fan X, Xu Q, Scaringi G, et al. Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, 2017, 14: 2129–2146
- 2 Zhang S, Yin Y, Hu X, et al. Initiation mechanism of the Baige landslide on the upper reaches of the Jinsha River, China. *Landslides*, 2020, 17: 2865–2877
- 3 Zhou J, Cui P, Hao M. Comprehensive analyses of the initiation and entrainment processes of the 2000 Yigong catastrophic landslide in Xizang, China. *Landslides*, 2016, 13: 39–54
- 4 Guo C, Zhang Y, Montgomery D R, et al. How unusual is the long-runout of the earthquake-triggered giant Luanshibao landslide, Tibetan Plateau, China? *Geomorphology*, 2016, 259: 145–154
- 5 Wu J F, Wang Y S, Dong S M, et al. Genetic mechanism of Mogangling landslide (in Chinese). *J Hunan Univ Sci Technol*, 2012, 27: 52–56 [吴俊峰, 王运生, 董思萌, 等. 摩岗岭滑坡成因机理. 湖南科技大学学报, 2012, 27: 52–56]
- 6 Zhou H F, Wei Y T, Wang Y S, et al. Discussion on the formation evolution and genetic mechanism of Mogangling landslide triggered by Moxi earthquake, Sichuan (in Chinese). *J Chengdu Univ Technol*, 2017, 44: 649–658 [周洪福, 韦玉婷, 王运生, 等. 1786年磨西地震触发的摩岗岭滑坡演化过程与成因机理. 成都理工大学学报, 2017, 44: 649–658]
- 7 Zhang Y Y. The genetic mechanism and Motion characteristics research on Mogangling landslide induced by the violent earthquake (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013 [张御阳. 强震触发摩岗岭滑坡成因机制及运动特性研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2013]
- 8 Wu R A, Zhang Y S, Guo C B, et al. Discussion on formation and outburst time of Temi paleo-landslide dammed lake in the upper Jinsha River (in Chinese). *Geol Rev*, 2022, 68: 586–592 [吴瑞安, 张永双, 郭长宝, 等. 金沙江上游特米古滑坡堰塞湖形成与溃决时间讨论. 地质论评, 2022, 68: 586–592]
- 9 Qiu S. The Stability Studies and calculation of landslide-triggered waves of temi landslide of Batang hydropower station in Jinsha river (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016 [秋实. 金沙江巴塘水电站特米滑坡稳定性分析及涌浪预测. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2016]

- 10 Zhang Y S, Du G L, Guo C B, et al. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Xizang traffic corridor (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2021, 95: 605–617 [张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式. *地质学报*, 2021, 95: 605–617]
- 11 Zhang J J, Tian Y, Chen L. Development and formation mechanism of landslides along Changdu section of Lancang River (in Chinese). *Geol Bull China*, 2021, 40: 2024–2033 [张佳佳, 田尤, 陈龙, 等. 澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制. *地质通报*, 2021, 40: 2024–2033]
- 12 Yang Z H, Wu R A, Guo C B, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan (in Chinese). *China Geol*, 2022, 49: 355–368 [杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征. *中国地质*, 2022, 49: 355–368]
- 13 Wang Z M, Luo G, Wang Y, et al. A study of the influence of the crossing-slope fault geometry on the slope seismic response (in Chinese). *Hydrogeol Eng Geol*, 2023, 50: 147–157 [王志民, 罗刚, 王媛, 等. 切割斜坡断层的几何形态对斜坡地震响应影响研究. *水文地质工程地质*, 2023, 50: 147–157]
- 14 Hui H J, Yang J Y, Zhao Y H, et al. Numerical simulation of seismic dynamic load effect of fault slope (in Chinese). *Acta Seismolog Sin*, 2023, 45: 695–705 [惠红军, 杨家英, 赵永红, 等. 断层边坡地震动载效应的数值模拟. *地震学报*, 2023, 45: 695–705]
- 15 Zhou Z H, Su S, Diao Y, et al. Seismic response and failure characteristics of granite slope using large-scale shaking table test (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2022, 43: 918–931 [周泽华, 吕艳, 苏生瑞, 等. 花岗岩质边坡地震动力响应及破坏特征大型振动台试验研究. *岩土力学*, 2022, 43: 918–931]
- 16 Huang Q, Jia X, Peng J, et al. Seismic response of loess-mudstone slope with bedding fault zone. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2019, 123: 371–380
- 17 Yu T, Huang Q, Kang X, et al. On seismic response of loess-mudstone slope with underlying anti-dip fault zone: Laboratory investigation using shaking table test. *Bull Eng Geol Environ*, 2023, 82: 117
- 18 Qi S J, Fan X M, Xia M Y, et al. Shaking table test of dynamic responses and failure mechanism of hanging wall and footwall on rock slope across reverse faults (in Chinese). *Bull Geol Sci Tech*, 2025, 44: 138–149 [漆芍见, 范宣梅, 夏明焱, 等. 跨逆断层岩质边坡上下盘动力响应和破坏模式振动台试验. *地质科技通报*, 2025, 44: 138–149]
- 19 Li C H, Li X, Guo C B, et al. Seismic landslide hazards assessment along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China (in Chinese). *Geol Bull China*, 2022, 41: 1473–1486 [李彩虹, 李雪, 郭长宝, 等. 青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险性评价. *地质通报*, 2022, 41: 1473–1486]
- 20 He J, Wang Y, Zhao J, et al. Seismic response of an irregular slope containing surficial weak layer and internal fractures in Dadu River, southwest China. *Landslides*, 2024, 21: 621–640
- 21 Guo C B, Du Y B, Zhang Y S, et al. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan (in Chinese). *Geol Bull China*, 2015, 34: 121–134 [郭长宝, 杜宇本, 张永双, 等. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理. *地质通报*, 2015, 34: 121–134]
- 22 Jiang L W, Yao L K, Wu W, et al. Transfer function analysis of earthquake simulation shaking table model test of side slopes (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2010, 31: 1368–1374 [蒋良潍, 姚令侃, 吴伟, 等. 传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨. *岩土力学*, 2010, 31: 1368–1374]
- 23 Liu H X. Seismic responses of rock slopes in a shaking table test (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014 [刘汉香. 基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2014]
- 24 Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology*. Melville: University Science Books, 2002
- 25 Kramer S L, Stewart J P. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2024

Dynamic response and deformation failure mechanism of fault-controlled slope in Qinghai-Xizang Plateau under strong earthquake action

HUANG Yu^{1,2,5}, ZHANG YunQiu¹, QIU ZhenDong^{3,4}, LI YingWei¹,
GUO ChangBao^{3,5,6} & ZHU ChongQiang^{1,2,5}

¹ Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

² State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

³ Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

⁴ Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

⁵ Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China

⁶ Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

In the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, the rugged mountainous terrain and complex geological conditions, coupled with active tectonic movements and well-developed fault zones, lead to frequent fault-controlled high-elevation landslides. These pose severe challenges to major infrastructure planning and construction, as well as threats to human life and property. However, the current understanding of the dynamic response and deformation-failure mechanisms of fault-controlled landslides remains largely confined to geological surveys and numerical simulations. Large-scale physical model tests grounded in real-case scenarios are still lacking. This study takes the Mogangling landslide as a prototype, employing a similarity ratio of 1:50 in a series of shaking table tests. The results reveal a pronounced nonlinear elevation amplification effect in both slope surface and internal slope acceleration responses. Along the horizontal direction of the fault zone, the fault exerts a significant amplifying influence on horizontal acceleration, with the peak horizontal acceleration (PHA) amplification factor reaching its maximum at the fault location, whereas its impact on vertical acceleration is negligible. When the input seismic intensity exceeds 0.3g, dynamic earth pressure peaks on both the hanging wall and footwall of the fault zone increase rapidly, with the hanging wall pressures consistently higher than those on the footwall. At the same elevation, displacement responses on the left slope (which contains the fault zone) are significantly greater than those on the right slope (which lacks a fault zone). The horizontal displacement response also exhibits a clear elevation amplification effect. As loading conditions progress, the fundamental frequencies of both slopes decrease, and the slope containing the fault zone consistently shows lower fundamental frequencies and a faster reduction rate. High-speed camera analyses of deformation-failure mechanisms in the fault-controlled slope under seismic loading indicate that slope failure primarily occurs in the hanging wall of the fault zone, dominated by tensile failure. A superficial, slope-surface-penetrating crack develops at the rear of the sliding mass in the upper portion. The hanging wall slope undergoes substantial downslope collapse, while the footwall remains relatively undeformed, clearly demonstrating the differential deformation on either side of the fault. With incremental loading, the fault-controlled slope gradually forms a continuous potential slip surface extending from the upper slope surface down to the front of the fault zone. Using a real-case scenario from the Sichuan-Xizang region, this experiment elucidates the dynamic slope response and deformation-failure mechanisms of fault-controlled high-elevation landslides under seismic action. The findings offer theoretical support for railway planning, construction, and disaster prevention and mitigation in adjacent areas.

Sichuan-Xizang transportation corridor, fracture controlled slope, shaking table test, dynamic response characteristics, deformation failure mechanism

doi: [10.1360/SST-2024-0326](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0326)