

库水与地震力共同作用下金沙江特大桥 桥址边坡动力响应研究

陈 铸¹, 车爱兰¹, 严 飞², 文 海², 葛修润¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650041)

摘要: 针对复杂地质构造的岩质边坡稳定性问题, 进行含有不连续节理岩质边坡的大型振动台模型试验, 研究库水与地震力共同作用下岩质边坡的动力响应规律及其破坏机制。通过向模型箱中注水和抽水来实现库水位升降的模拟, 运用消波装置削弱箱壁引起的库水波浪反射波。研究发现, 随着地震波的输入, 库水面以下的边坡裂缝扩展较快; 在相同地震波输入条件下, 由于库水压力的存在, 高水位工况边坡的加速度放大效应比低水位工况小。模型在库水与地震力共同作用下的破裂观测结果表明: 库水入渗加剧了边坡裂缝扩展, 库水骤降使边坡表层的加速度放大效应更加明显, 不利于边坡稳定。边坡的破坏模式为: 地震诱发上层坡体出现沿节理的裂缝, 地震力增加及库水入渗加剧裂缝扩展, 出现沿节理的贯通性裂缝; 在地震力、库水入渗及库水骤降共同作用下, 坡体沿上层结构面发生倾覆滑动破坏。

关键词: 边坡工程; 振动台试验; 库水; 地震力; 共同作用

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)01 - 0148 - 08

Dynamic response of the slope by the site of Jinsha River Bridge under the action of reservoir water and seismic force

CHEN Zhu¹, CHE Ailan¹, YAN Fei², WEN Hai², GE Xiurun¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: A large-scale model of shaking table test on the rocky slope with discontinuous rock joints is carried out to investigate the stability of rocky slope with complex geological structures. The dynamic response and failure mechanism of the rocky slope with discontinuous joints under the combined effects of reservoir water and seismic force were studied. The experiment simulates the rise and fall of the reservoir water by injecting water into and pumping water out the model box. The wave reflection created by the box wall is reduced by the wave absorbing device. The result shows that with the input of seismic wave, the cracks in slope under the reservoir water level expands quickly. Under the same seismic wave input, the acceleration amplification effect of the slope for the high water level case is less obvious compared to the low water level case due to the presence of the water pressure. The infiltration of reservoir water aggravates the development of the slope cracks. The sudden drop of reservoir water level brings a greater amplification effect to the acceleration of slope surface, which is not positive to the stability of slope. The earthquake induces the cracks along the joints on the upper layer of the slope. The

收稿日期: 2017 - 04 - 05; **修回日期:** 2017 - 08 - 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372180); 云南省交通科技项目(云交科 2014(A)01); NSFC - 云南联合基金重点支持项目(01402231)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 11372180 and 01402231) and Yunnan Traffic Science and Technology Project(Grant No. 2014(A)01)

作者简介: 陈 铸(1993 -), 男, 2015 年毕业于南通大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩质边坡动力稳定性方面的研究工作。E-mail: 1114012025@sjtu.edu.cn。通讯作者: 车爱兰(1969 -), 女, 现任教授。E-mail: alche@sjtu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0354

increase of the seismic force and the infiltration of reservoir water aggravate the development of the cracks and finally result in the appearance of the penetrating cracks. The interaction of the seismic force, infiltration of reservoir water and its sudden drop together lead to the overturn and sliding failure of the slope along its upper discontinuity.

Key words: slope engineering; shaking table test; reservoir water; seismic force; combined effects

1 引言

改革开放以来,我国大力发展西部地区,水利水电等基础设施建设是西部大开发战略的重中之重。建设大型水电站势必涉及蓄水以及大型水库建设,而我国西部很多区域属于强震地区,地震频发^[1-2]。库岸边坡一旦发生破坏,对人民生命财产将造成重大损失。因此,研究库水与地震力共同作用下的边坡稳定性问题显得尤为重要。

国内外学者对库水作用下边坡稳定性问题做了大量研究,主要侧重于在库水位变化的条件下,边坡稳定性的变化情况以及对其破坏形式的研究。赵代鹏等^[3]针对浮托减重型滑坡这一实际工程进行了模型试验,通过向试验箱中进行输水或排水来实现库水位升降的模拟。M. M. Berilgen^[4]研究了库水位下降速度。下降比率对边坡稳定性的影响,结果表明库水骤降会使边坡的稳定性降低。

针对地震荷载作用下边坡动力响应研究已取得了较多的研究成果^[5]。董金玉等^[6-7]采用室内大型振动台模型试验,研究了顺层岩质边坡在地震作用下的动力响应特性及边坡的破坏模式,结果表明坡体高程和坡体结构对加速度放大系数具有影响。K. L. Wang 和 M. L. Lin^[8]基于极限平衡分析,粒子图像测速技术(PIV)分析和加速时间历史记录,采用边坡振动台模型试验研究了边坡破坏的启动及破坏过程。A. R. Ghaemmaghami 和 M. Ghaemian^[9]采用振动台模型试验研究了 Manjil 地震破坏的边坡,结果表明后张机制导致了边坡模型动态应变峰值显著降低。

单独针对库水作用或地震力作用下岩质边坡稳定性问题的研究较多,但是结合库水与地震力这两大因素的研究较少,且多是把重点放在水库大坝在库水和地震共同作用下的动力响应问题上,对库区岩质边坡动力响应问题研究尚且不足。本文针对库水和地震力共同作用下岩质边坡动力响应问题进行研究,以香丽(香格里拉—丽江)高速公路金沙江特大桥桥址岩质边坡为研究对象,采用室内大型振动台模型试验,研究库水与地震力共同作用下含不连

续面岩质边坡动力响应规律与破坏机制,以及库水骤降对边坡稳定性的影响。

2 大型振动台试验

本文以香丽高速公路金沙江特大桥桥址岩质边坡为研究对象。根据《中国地震区划图(2001)》,桥址边坡处于中甸—大理控震构造带。该控震构造带的地震活动强度大、频度高,有记录以来共发生 4 次七级及以上地震,边坡坡址地震动峰值加速度为 $0.15\text{ g}\sim 0.30\text{ g}$,地震动反应谱特征周期为 $0.40\sim 0.45\text{ s}$ 。

2.1 振动台设备及模型箱

本次振动台试验在甘肃省兰州市进行,采用的是日本 kokusai 生产的大型电伺服式振动台(见图 1)。台面尺寸 $4\text{ m}\times 6\text{ m}$,由 28 台伺服电机驱动,其中,垂直向由 16 台 22 kW 的 AC 伺服电机驱动,水平向由 12 台 37 kW 水冷式伺服电机驱动。采集精度为:加速度 $\pm 5\text{ mm/s}^2$,速度 $\pm 5\text{ mm/s}$,位移 $\pm 2\text{ mm}$ 。



图 1 大型电伺服式振动台

Fig.1 Large electric servo shaking table

本试验采用刚性密封模型箱。模型箱内箱尺寸为 $2.8\text{ m}\times 1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$ 。为了在地震力加载过程中记录边坡模型的失稳与破坏过程,将模型箱长边方向设计成 30 mm 厚的透明有机玻璃板,同时通过布置格行钢板来加强强度。在模型箱短轴方向为 20 mm 厚普通碳钢板,如图 2 所示。



图 2 模型箱
Fig.2 Model box

2.2 相似关系设计与材料配比

模型试验要求保持模型和实物原型之间的相似性，振动台模型试验要求模型保证静力相似的同时，还需要满足动力问题相关的物理力学参数的相似性^[6]。根据相似理论^[10-11]，及香丽高速公路金沙江特大桥桥址岩质边坡尺寸与模型箱内径，确定本次试验基本量纲的相似常数：尺寸相似常数 $C_L = 400$ ，密度相似常数 $C_\rho = 1$ ，振动加速度相似常数 $C_a = 1$ ，根据量纲分析法和 Buckingham π 定量计算出其他物理量的相似常数，如表 1 所示。

表 1 相似常数计算表
Table 1 Similarity constants

物理量	相似关系	相似常数	备注
几何尺寸 L	$C_L = 100$	400	控制量
密度 ρ	C_ρ	1	控制量
振动加速度 a	$C_a = 1$	1	控制量
容重 γ	$C_\gamma = C_\rho$	1	
弹性模量 E	$C_E = C_\rho C_L$	400	
泊松比 μ	$C_\mu = 1$	1	
黏聚力 c	$C_c = C_\rho C_L C_a$	400	
内摩擦角 φ	$C_\varphi = 1$	1	

根据相似常数表以及现场采集岩样的物理力学参数，以钢渣、砂、水、石膏、添加剂作为试验材料。为了确定模型材料配比，做了大量的材料配比试验^[12]。确定采用的配比为钢渣：砂：石膏：水 = 5：4：1.3：2.2，模拟材料的物理力学参数为：密度 27 kN/m³，弹性模量 100 MPa，黏聚力 30 kPa，内摩擦角 40°。原材料物理参数和相似材料物理参数如表 2 所示。经过相似计算后，节理面厚度不足 2 mm，因此在模拟材料时主要考虑其摩擦角相似性，

表 2 边坡材料及模型材料物理力学参数

Table 2 Ideal physico-mechanical parameters of simulation material

参数参数	材料种类	容重 γ (kN·m ⁻³)	弹性模量 E /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
岩石物理参数	板岩	28.5	10 000	1 920	49.00
	节理	-	-	-	36.10
相似计算结果	板岩	28.5	25	4.8	49.00
	节理	-	-	-	36.10
模拟材料物理参数	板岩	27.0	100	30	40.00
	节理	-	-	-	40.08

通过直剪试验确定了节理的模拟材料为灰纸板，其物理力学参数为：内摩擦角 40.08°。

2.3 边坡模型设计

金沙江右岸丽江岸山体长期受构造剥蚀作用的影响，山势陡缓相间，平均自然坡度约 40°，隧道锚附近坡面约 42°，主墩附近坡面约 30° (见图 3)。中风化砂质板岩层中节理、裂隙发育，山体卸荷作用强烈，3 条缓倾结构面贯通其中，间距 30 m 左右；逆向陡倾结构面间距 30~50 m。影响边坡动力稳定性的因素很多，主要包括地震动特征、地形地貌、坡体结构及岩性特征等^[12]。明确岩体结构的特征及不连续面的分布规律，合理确定桥基岩体节理的连通率是简化模型的基本原则。桥梁墩台及锚碇均作用在板岩中，因此模型试验设计时仅考虑了板岩材料。因为试验模型箱尺寸有限，所以在地质模型简化的过程中，边坡模型材料岩体部分只考虑了板岩、结构面。断层破碎带物理力学参数与中风化板岩差别不大，经相似计算后，参数的差距更小，因此从模型制作的可操作性上考虑，忽略了破碎带。试验为了突出主要影响因素，设计了如图 4 所示的边坡模型。边坡模型缩尺 400 倍，设计为折线坡，通过坡度的

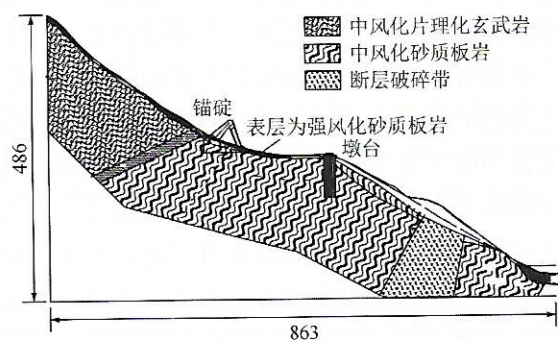


图 3 桥址边坡地质剖面图(单位: m)

Fig.3 The sectional view of bridge site of Jinsha River highway(unit: m)

变化来模拟陡缓相间的山势。在模型内设置贯通结构面层(倾角 15°)和逆向软弱夹层(倾角 75°), 以此来模拟裂隙发育的岩体。

2.4 库水设置

香丽高速公路金沙江特大桥桥址处河谷发育, 河谷形态以“V”型谷为主。库区蓄水后, 水位在大桥锚碇位置, 因此将边坡模型锚碇高度位置设置为试验高水位线。为了模拟库水水位骤降 100 m 时的情况, 将高水位线以下 250 mm(相似常数 400)设置为试验低水位线(见图 4)。

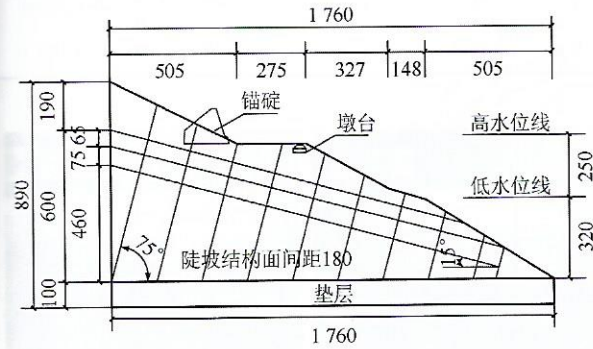
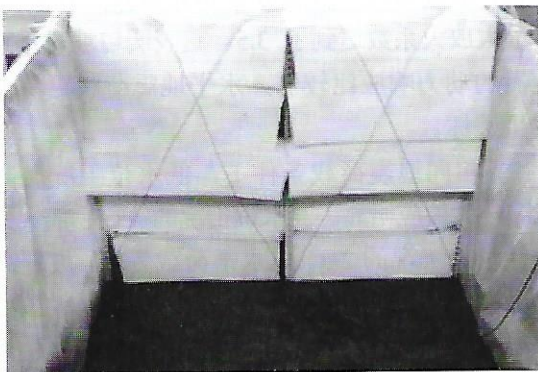


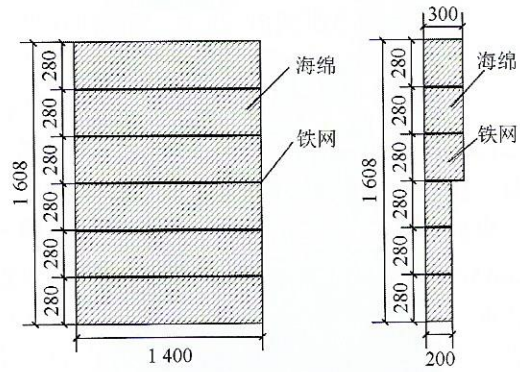
图 4 边坡模型设计图(单位: mm)

Fig.4 The design of slope model(unit: mm)

振动台试验设置了不同水位的试验工况, 所以需要考虑波浪力对边坡模型的作用。试验过程中, 模型箱中的波浪传播到模型箱箱壁时产生的反射波往往会对模型的实际工作环境产生一定的影响, 所以在模型箱箱壁设置消波装置减弱反射波的影响是必须的。在海洋工程中一般认为孔隙结构具有较好的消波效果。本试验的消波装置依据能量守恒定理设计, 通过多空网架和海绵来吸收入射波的能量。多孔网架结构的作用是碎波, 水波流过填充的海绵时, 因为水有黏滞性, 所以在固壁上形成一个边界层, 使水波衰减, 起到削波的作用。消波装置如图 5 所示。



(a) 实物图



(b) 设计图(单位: mm)

图 5 消波装置

Fig.5 Wave reduction device

2.5 边坡模型建造与传感器布置

考虑到边坡模型因体积大而导致制作不便、养护困难等问题, 采用砌块堆积的方式制作边坡模型。首先根据图 4 设计砌块, 制定不同砌块的尺寸及堆积方式, 然后制作模板、浇筑砌块。试验采用灰纸板模拟结构面, 在砌块浇筑的过程中与传感器一同放置在指定砌块的指定位置, 不规则砌块则采取削块的方法制作(见图 6)。所有砌块制作完成后, 进行边坡模型的砌筑操作。边坡模型砌筑采取分层砌筑的方式, 即分层砌筑制作完成砌块。砌筑时为了避免通缝影响试验结果, 采取错缝砌筑的方式。边坡层与层之间、砌块与砌块之间, 采用与砌块相同的材料填充砌缝。建造完成的边坡模型如图 7 所示, 图中两道红线分别标注高水位线和低水位线。



(a)

(b)

图 6 砌块制作

Fig.6 Block manufacturing

试验采用东华测试 DH301 系列三向电容式加速度传感器, 量程(峰值) $\pm 20 \text{ m/s}^2$, 灵敏度: X轴: $0 \sim 66 \text{ mV/m/s}^2$; Y轴: $0 \sim 66 \text{ mV/m/s}^2$; Z轴: $0 \sim 66 \text{ mV/m/s}^2$ 。加速度计在振动台台面, 边坡表面, 边坡内部皆有分布(见图 8)。



图7 边坡模型
Fig.7 Slope model

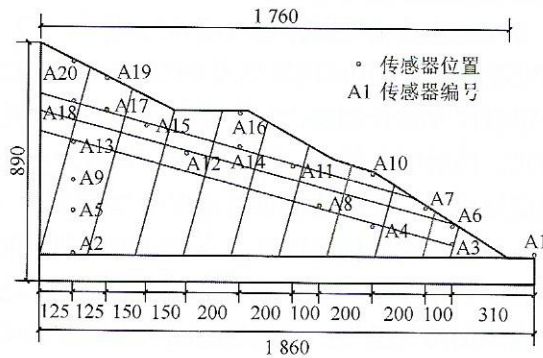


图8 加速度传感器布置图(单位: mm)
Fig.8 Layout of acceleration sensors(unit: mm)

2.6 输入波形及试验工况设计

本次振动台试验通过输入不同大小、方向的加速度时程的方式来模拟地震动,输入地震波选用的是甘肃武都台记录的2008年汶川地震波,其主频为7.74 Hz。为了研究边坡模型在不同地震波输入条件下的动力响应规律,设计地震荷载激振方向分水平和垂直2个方向加载,并且按照6,7,8,9度烈度递增的方式加载。

为了研究库水骤降对模型动力响应的影响,相同烈度先进行高水位试验,再进行低水位试验,试验方案如表3所示,高、低水位工况如图9所示。

3 边坡模型动力响应分析

为研究库水及地震共同作用下岩质边坡的动力特性,以下对岩质边坡的地震动峰值加速度PGA放大系数进行分析。PGA为边坡模型各测点记录的加速度峰值。定义 M_{PGA} 为PGA放大系数,其为边坡上各测点在同一工况下测得的加速度响应峰值与振动台台面测点测得的加速度响应峰值的比值^[13-14]。

表3 试验工况
Table 3 Test conditions

编号	烈度/度	激振方向	振幅/gal	库水位状态
1	6	垂直	84	高水位(H)
2	6	水平	84	低水位(L)
3	7	垂直	168	高水位(H)
4	7	水平	168	低水位(L)
5	8	垂直	336	高水位(H)
6	8	水平	336	低水位(L)
7	9	垂直	504	高水位(H)
8	9	水平	504	低水位(L)



(a) 高水位 (b) 低水位

图9 高、低水位工况图

Fig.9 High and low water levels

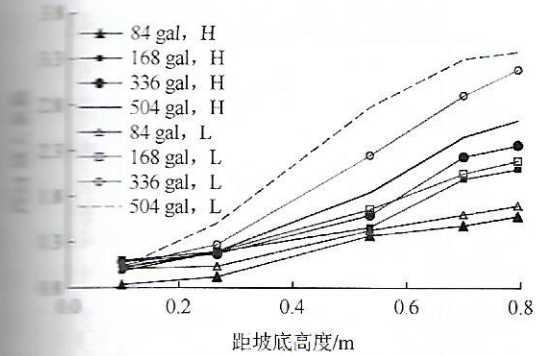
3.1 加速度动力响应特征

通过对边坡模型中布设好的加速度传感器的分析,可以分别得到沿边坡内垂向序列和沿边坡坡面序列的PGA放大系数变化。图10为模型边坡PGA放大系数变化折线图,分析对图10可知:

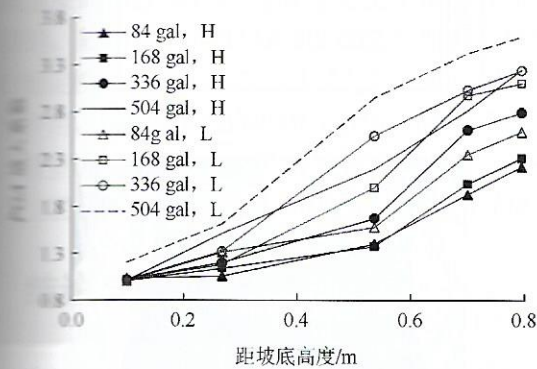
(1) 随着地震荷载的增加,不论是水平荷载还是垂直荷载, M_{PGA} 的分布均表现为放大特性,在边坡内部及坡面均随高程增加而增大。

(2) 相同地震荷载条件下,输入水平方向地震波比垂直方向地震波放大效应明显。垂直加载的PGA放大系数约为水平向加载的2/3。以高水位工况为例,垂直加载时最大放大系数达到2.4,水平加载时最大放大系数达到了3.5。这表明边坡对垂直向的地震的动力响应比较弱,水平地震荷载更易使边坡发生破坏。

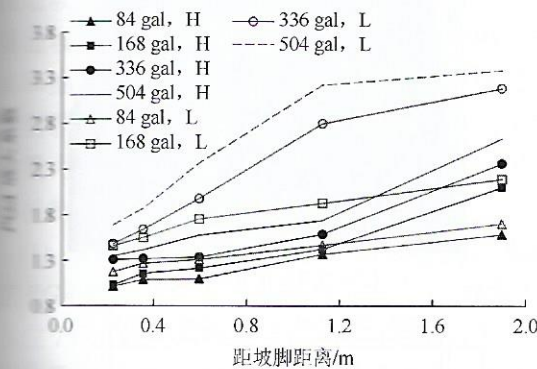
(3) 相同地震荷载条件下,低水位工况比高水位工况放大效应明显。高水位工况的PGA放大系数约为低水位工况的2/3。以水平荷载为例,坡顶高水位工况最大放大系数为2.5,低水位工况最大放大系数为3.6。这表明库水骤降使边坡的加速度放大效应更加明显,不利于边坡稳定。



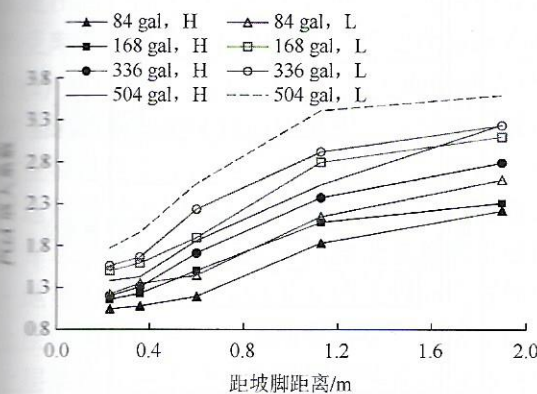
(a) 垂直荷载作用下边坡内垂向序列(工况 1, 3, 5, 7)



(b) 水平荷载作用下边坡内垂向序列(工况 2, 4, 6, 8)



(c) 垂直荷载作用下边坡坡面序列(工况 1, 3, 5, 7)

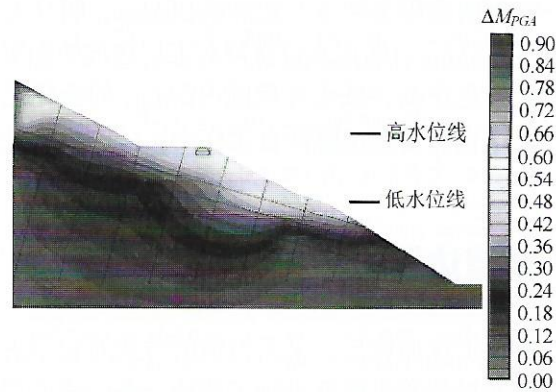


(d) 水平荷载作用下边坡坡面序列(工况 2, 4, 6, 8)

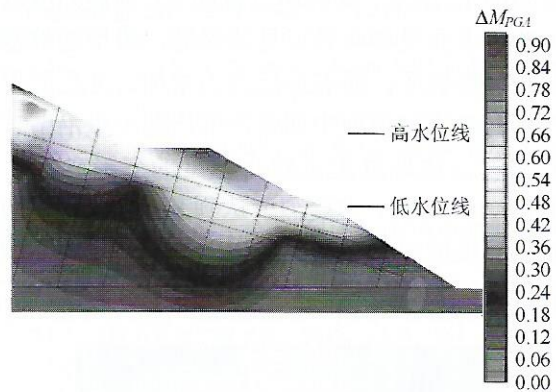
图 10 加速度放大系数折线图
Fig.10 PGA distribution lines

大系数增量(ΔM_{PGA})为: 相同地震荷载条件下, 低水位工况 M_{PGA} 与高水位工况 M_{PGA} 的差值, 即 $\Delta M_{PGA} = M_{PGA}(\text{低水位}) - M_{PGA}(\text{高水位})$ 。

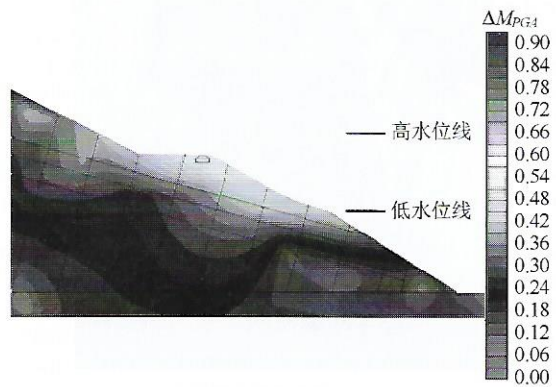
加速度放大系数增量 ΔM_{PGA} 分布云图如图 11 所示, 由图 11 可知, 边坡的 ΔM_{PGA} 均为正值, 这说明库水骤降对边坡加速度具有明显的放大效应, 不利于边坡稳定。84, 168, 336 和 504 gal 时 ΔM_{PGA} 分别约为 0.56, 0.90, 0.56 和 0.33。这说明, 随着输入地震荷载的增大, 库水骤降的影响有一个由强变弱的过程。在低烈度条件下, 随着地震力的增加, 边坡裂缝扩张, 库水入渗从而影响边坡稳定性, ΔM_{PGA} 在 168 gal 时达到峰值。但是, 当地震力增大到一定程度时, 地震力变成影响边坡动力稳定的主要因素, 所以库水骤降的影响逐渐降低。此外, 由图 11 可知, 库水骤降对边坡不同区域的加速度放大效应的影响



(a) 84 gal(工况 1, 2)



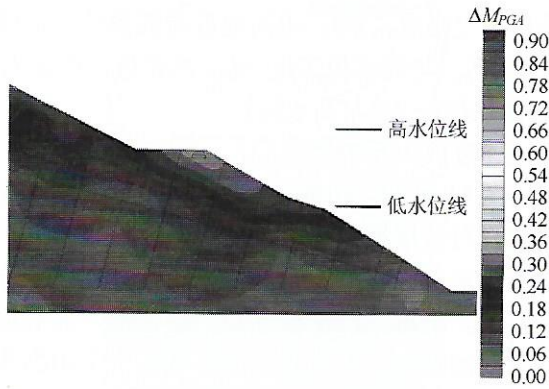
(b) 168 gal(工况 3, 4)



(c) 336 gal(工况 5, 6)

库水骤降对边坡动力响应的影响

库水骤降与边坡动力响应具有密切关系。为研究库水骤降对边坡加速度响应规律, 定义加速度放



(d) 504 gal(工况 7, 8)

图 11 库水骤降 PGA 放大系数增量图

Fig.11 Variation of PGA coefficient under reservoir water drop

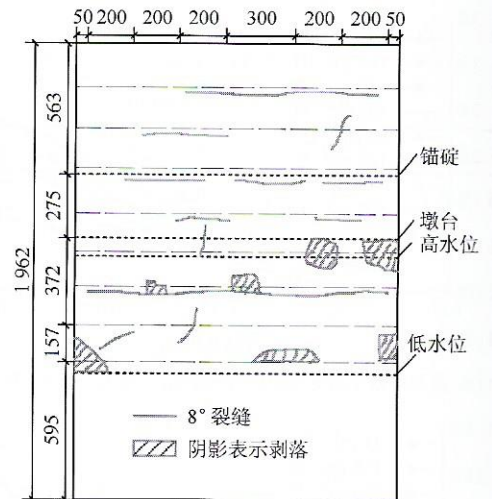
不同。以 168 gal 工况为例，沿边坡内垂直向 ΔM_{PGA} 呈现放大趋势，沿边坡坡面方向 ΔM_{PGA} 先增大后减小。在相同高程条件下，边坡表层 ΔM_{PGA} 明显大于坡体内部 ΔM_{PGA} ，即库水位骤降对表层边坡的影响较大，尤其是在高、低水位范围内 ΔM_{PGA} 的变化尤为明显。这说明受库水骤降直接作用区域的稳定性是最差的。

4 模型边坡的破坏模式分析

每个工况加载后，采用目测的方式对模型表面的裂缝开展及变形情况进行了描绘，各阶段的描绘状态如图 12 所示。其破坏过程如下：地震烈度较小时，边坡表面没有明显可见的裂缝，模型边坡基本未发生变形破坏；随着地震力的增加，地震烈度达到 7 度时，模型边坡中部及后部出现少量沿节理方向的裂缝，边坡发生了较小程度的变形破坏。由图 12(a), (b)可知，地震烈度达到 8 度时，模型边坡表面裂缝扩展加深，在模型边坡中部出现沿节理方向的贯通性裂缝，并在表层坡体的中下部出现了局



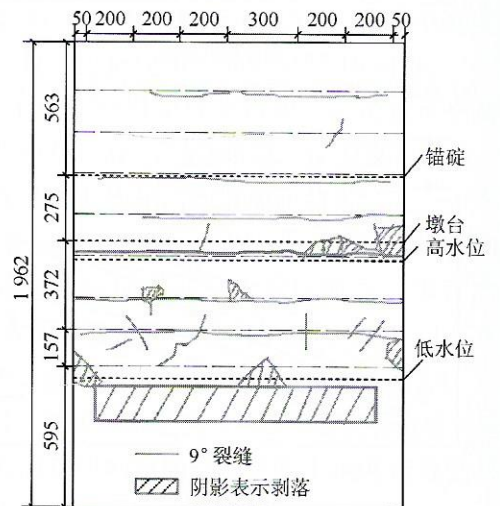
(a) 8 度震后模型破坏情况



(b) 8 度震后模型破坏描述(单位: mm)



(c) 9 度震后模型破坏情况



(d) 9 度震后模型破坏描述(单位: mm)

图 12 边坡震后破坏情况及描述

Fig.12 Post earthquake damage and description

部剥落现象。由图 12(c), (d)可知，地震烈度达到 9 度时，模型边坡表面裂缝进一步扩展、贯通，在模型表面出现大量贯通性裂缝，贯通性裂缝分布广泛，

模型在坡脚处倾覆滑出, 坡脚完全破坏。

结合对 *PGA* 放大系数的分析以及观察得到的边坡破坏现象, 模型边坡的滑动诱发因素及破坏机制可概括如下: (1) 地震荷载使坡体出现裂缝, 为边坡滑动变形提供有利条件。(2) 库水入渗进入裂缝, 加剧裂缝扩展、贯通, 库水使滑坡体内岩体的物理力学性质发生不利变化。(3) 库水骤降进一步削弱了模型边坡的稳定性, 加速了表层坡体滑动。地震作用是模型边坡变形破坏的直接诱发因素, 也是最重要的诱发因素, 地震作用使完整边坡模型出现裂缝, 随地震力增加模型边坡变形加剧, 模型边坡的稳定性逐渐减弱; 库水骤降起到了加剧模型边坡变形作用, 这使模型边坡的稳定性进一步被削弱。因此, 模型边坡是在地震作用及库水骤降两者共同作用下, 上层坡体出现了沿上层结构面的倾覆滑动破坏。

5 结论与建议

本试验以香丽高速公路金沙江特大桥桥址大型岩质边坡为研究对象, 设计并开展了含有不连续面岩质边坡的大型振动台模型试验。通过向模型箱中注水和抽水来实现库水位升、降的模拟; 通过消波装置削弱箱壁引起的库水波浪反射波。揭示了库水与地震力共同作用下岩质边坡的动力响应规律及其破坏机制。主要得到以下结论:

(1) 从最大加速度分布状况可以看到, 水平加载的 *PGA* 放大系数大于垂直加载的 *PGA* 放大系数, 低水位 *PGA* 放大系数大于高水位 *PGA* 放大系数。库水位骤降对表层边坡的 *PGA* 放大系数影响较大, 尤其是在高、低水位线范围内的变化尤为明显, 这说明受库水骤降直接作用区域的稳定性是最差的。

(2) 通过输入不同烈度、不同方向的地震荷载, 描述了边坡模型的破坏演化过程。诱发边坡破坏的因素主要包括 2 个: 地震荷载及库水。其滑动模式为: 地震诱发上层坡体出现沿节理裂缝 - 地震力增加及库水入渗加剧裂缝扩展出现沿节理的贯通性裂缝 - 地震力增加、库水浸泡及库水骤降使坡体出现沿上层结构面的滑带 - 在地震荷载、库水作用下, 沿上层结构面, 表层坡体后部块体推动前部块体发生倾覆滑动破坏。因为未考虑断层破碎带, 边坡模型的坡脚附近材料强度是要大于实际情况的。在库水与地震力共同作用下, 试验数据结果是偏于安全的。

(3) 对模型在库水骤降和强震共同作用下的破坏观测表明: 库水荷载作用在边坡上, 在一定程度上削弱了地震波对边坡的不利影响, 但是库水入渗无疑使岩石、节理的各项参数降低, 不利于边坡稳

定。同时, 边坡结构面仍然是边坡滑动破坏的主控因素, 在库水入渗的条件下尤为明显。

参考文献(References):

- [1] 朱守彪, 张培震. 2008 年汶川 *M_s* 8.0 地震发生过程的动力学机制研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 418 - 427.(ZHU Shoubiao, ZHANG Peizhen. A study on the dynamical mechanisms of the Wenchuan *M_s* 8.0 earthquake, 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 418 - 427.(in Chinese))
- [2] 王晓山, 吕 坚, 谢祖军, 等. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4 149 - 4 162.(WANG Xiaoshan, LU Jian, XIE Zujun, et al. Focal mechanisms and tectonic stress field in the North-South Seismic Belt of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 4 149 - 4 162.(in Chinese))
- [3] 赵代鹏, 王世梅, 谈云志, 等. 库水升降作用下浮托减重型滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1 017 - 1 025.(ZHAO Daipeng, WANG Shimei, TAN Yunzhi, et al. Stability studies of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1 017 - 1 025.(in Chinese))
- [4] BERILGEN M M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(2): 81 - 91.
- [5] 许 强, 陈建君, 冯文凯. 斜坡地震响应的物理模拟试验研究[J]. 四川大学学报: 工学版, 2009, 41(3): 266 - 272.(XU Qiang, CHEN Jianjun, FENG Wenkai. Study of the seismic response of slopes by physical modeling[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science, 2009, 41(3): 266 - 272.(in Chinese))
- [6] 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): 2 977 - 2 982.(DONG Jinyu, YANG Guoxiang, WU Faquan, 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): 2 977 - 2 982.(in Chinese))
- [7] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696 - 702.(YANG Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 696 - 702.(in Chinese))
- [8] WANG K L, LIN M L. Initiation and displacement of landslide induced by earthquake—a study of shaking table model slope test[J]. Engineering Geology, 2011, 122(1/2): 106 - 114.
- [9] GHAEMMAGHAMI A R, GHAEMIAN M. Shaking table test on small-scale retrofitted model of Sefid-rud concrete buttress dam[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 39(1): 109 - 118.
- [10] LU P, WU H, QIAO G, et al. Model test study on monitoring dynamic process of slope failure through spatial sensor network[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(4): 3 315 - 3 332.
- [11] 黄润秋, 李 果, 巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 865 - 875.(HUANG Runqiu, LI Guo, JU Nengpan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 865 - 875.(in Chinese))
- [12] 王 斌, 车爱兰, 葛修润. 岩质高陡边坡动力响应及失稳机制大型振动台模型试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 951 - 956.(WANG Bin, CHE Ailan, GE Xiurun. Shaking table test on earthquake response of discontinuous medium high and steep rock slope[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 951 - 956.(in Chinese))
- [13] CHE A, YANG H, WANG B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. Engineering Geology, 2015, 201: 45 - 56.
- [14] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 242 - 248.(LI Zhensheng, JU Nengpan, HOU Weilong et al. Large-scale shaking table model tests for dynamic response of steep stratified rock slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 242 - 248.(in Chinese))