

doi:10.3799/dqkx.2014.152

# 三峡库区马家沟滑坡模型形态概化

吴丹丹, 胡新丽\*, 雍睿, 祝廷尉, 李蕊

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 以三峡库区秭归县马家沟滑坡 I 号滑体为例, 为研究其在库水位升降和降雨条件下的变形破坏及稳定性, 对其采用框架式模型试验, 参照 1:40 相似比进行了缩放。以模型概化前后滑坡稳定性系数相一致为目的, 在 2.0 m×1.0 m×1.5 m 的试验框架内, 通过改变抗滑桩前的滑体、滑带的几何形态, 建立了与研究对象应力边界条件一致的地质力学模型。概化后对滑坡桩前边界推力和研究区后边界推力进行拟合, 得出相应于实际滑坡在不同水位时边界推力的折减系数。通过调节水位的升降速率来保证在水位变化时滑坡概化前后稳定性系数等效, 数值模拟结果显示滑坡模型的水位变化速率为 0.7 m/d、水位在 183~204 m 范围内升降满足模拟实际滑坡水位在 145~175 m 间变动的情况, 从而也验证了滑坡概化后模型的合理性。

**关键词:** 滑坡; 模型形态; 概化方法; 稳定性系数; 地质灾害。

中图分类号: P554

文章编号: 1000-2383(2014)11-1593-06

收稿日期: 2014-04-02

## Generalizability Method of Physical Model Shape for Majiagou Landslide in Three Gorges Reservoir Area

Wu Dandan, Hu Xinli\*, Yong Rui, Zhu Tingwei, Li Rui

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

**Abstract:** To study the deformation and stability in the condition of water level fluctuation and rainfall, the frame type model test was taken on the sliding body I of Majiagou landslide with a ratio of 1:40. The shapes of sliding body and sliding zone in the front of the anti-slide pile were changed in the 2.0 m×1.0 m×1.5 m frame to make sure that the stability coefficients were the same before and after being generalized. The reduction factors of the boundary thrust in the different water levels corresponding natural conditions were put forward. The rate of water level rise and fall was changed in order to guarantee equal stability coefficients, and the numerical simulation results show that the rate of 0.7 m/d ranging from 183 to 204 m is in accordance with the actual landslide, and the rationality of the model is verified.

**Key words:** landslide; shape of model; generalizability method; stability coefficients; geologic hazard.

滑坡的物理模型试验与理论研究对于研究滑坡的形成机制与机理具有重要的价值与意义(肖先焯等, 2013)。国内外的众多学者对于滑坡模型试验展开了大量的研究。胡修文等(2005)采用 3 个小比例尺二维物理模型试验研究赵树岭滑坡的整体稳定性及其可能变形、破坏机理; 罗先启等(2005, 2009)、刘波等(2007)以石榴树滑坡与千将坪滑坡为依托, 开展了一系列模型试验研究并取得一定的成果; 肖诗荣等(2010)通过地质力学模型试验, 对千将坪滑坡进行滑坡机制研究; 刘洪佳等(2011)利用滑坡模

型试验研究了不同材料模拟滑带土对模型稳定性的影响; 吴剑等(2012)通过倾斜模型获得滑坡的变形破坏过程; 殷坤龙等(2012)采用室内大型物理模拟实验手段对三峡库区滑坡涌浪开展了深入研究, 并提出了三峡库区滑坡涌浪计算公式; Bhardwaj and Mandal (2008)为得知边坡中加筋土的作用对土质边坡进行了室内模型试验; Sawwaf(2010)对于垂直加压直至破坏的稳定沙坡进行了模型试验研究; Keskin and Laman(2013)在一定尺寸的试验箱里对砂质边坡条形基础的极限承载力进行了研究;

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划“973”计划项目(No. 2011CB710604)。

**作者简介:** 吴丹丹(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性评价及数值模拟方面研究。E-mail: WuddCUG@163.com

\* 通讯作者: 胡新丽, E-mail: huxinli2000@163.com

Mikuni *et al.* (2013)利用物理模型试验研究了由地震和余震导致的滑坡的破坏特征. 此外 Qin *et al.* (2001)、Zhang *et al.* (2010)、Zhao and Wang(2013)等学者也都通过一定的试验手段获得了滑坡在一定条件下的性质.

容易看出,目前进行的滑坡模型试验研究,大都基于滑坡整体模型已建好的情况下开展的,对于模型的建立过程并没有进行详细介绍. 而对于大型滑坡,仅通过简单的比例缩放后的模型是否合理,能否真正代表实际的滑坡并没有给出论证. 本研究基于三峡库区马家沟滑坡 I 号滑体拟采用框架式模型试验(石崇喜等, 2011)进行研究,对滑坡进行比例缩放后,模型不能满足实际情况. 基于此,文章从滑坡形态的概化方法出发,对于其物理模型形态的建立过程进行了详细的论述,并验证了模型的合理性.

### 1 滑坡框架式模型研究范围

为研究滑坡-防治结构体系相互作用机理模型必须将滑坡中已有抗滑桩纳入研究区内. 综合各方面因素考虑最终确定模型的相似比为 1 : 40,由于试验条件、制作工艺等的限制,拟定模型框架的尺寸:长×宽×高=2.0 m×1.0 m×1.5 m. 马家沟滑坡 I 号滑体基准剖面进行缩放得到模型尺寸:长度为 13.24 m,后缘高度为 3.61 m. 参照框架尺寸,模型试验所能研究的实际滑坡区域长为 80 m,宽为 40 m,考虑抗滑桩必须处在研究区域内,可在 I 号滑体的纵剖面上确定出研究区(图 1).

以上所述滑坡缩放概化后,由于受模型框架尺寸限制,参照相似比仅研究了抗滑桩位附近 70 m 的区域,对于滑坡前缘的阻滑段未进行严格概化. 滑坡前缘滑体堆积层厚度较平均滑体厚度大,且阻滑段较长,提供了滑坡主要的抗滑力. 库水位在 145~175 m 间波动时,水位升降对滑坡前缘的作用明显.

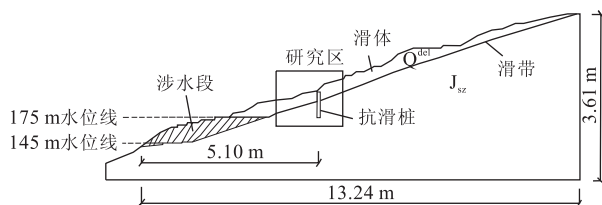


图 1 马家沟滑坡 I 号滑体模型基准剖面及研究区

Fig. 1 The profile and the study area of the I slip mass of Majiagou landslide model

故研究区内此坡形仅按缩放比进行缩放不能满足概化要求.

## 2 滑坡物理模型形态概化

### 2.1 模型概化目的与技术路线

在保证相似比的情况下为了使模型坡形于已有的框架中完成降雨和库水位升降对滑坡稳定性影响的研究,必须对试验坡形进行新的概化,以将抗滑桩前的阻滑段纳入研究区. 为了达到以上目的,抗滑桩后的滑体、滑带不纳入改变的范围,主要是针对模型研究区抗滑桩前的滑体、滑带形态进行改变. 在概化的过程中,以滑坡稳定性系数作为模型概化是否成功的判据. 具体概化思路见图 2.

### 2.2 模型概化具体步骤

滑坡稳定性系数作为模型概化成功与否的判据,采用刚体极限平衡法进行计算得到. 在计算过程中,需要将滑坡进行条分,根据概化的最终要求,抗滑桩后的滑体条分状态在概化前后不需要改变,仅改变桩前滑体的条分.

(1)桩前条分改变方式. 滑坡稳定性计算过程中,桩前条块数的增加与减少,会直接影响稳定性计算的难易. 假设条块数为  $n$ ,则计算过程的变量为:  $2+3(n-1)$ .

考虑减少变量,利于计算,针对桩前滑体部分仅划分成 2 个条块(图 3).

鉴于 1、2、3 号点位置,则可以确定 1、2、3 号点的横坐标;在模型概化过程中,仅需改变 1、2、3 号点的纵坐标.

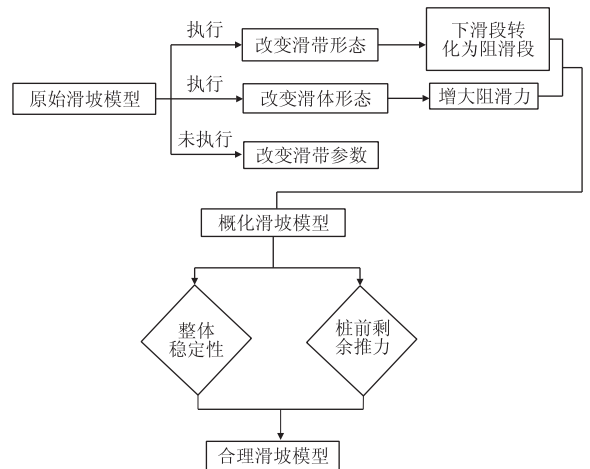


图 2 滑坡模型概化技术路线

Fig. 2 Technical route of landslide model generalization

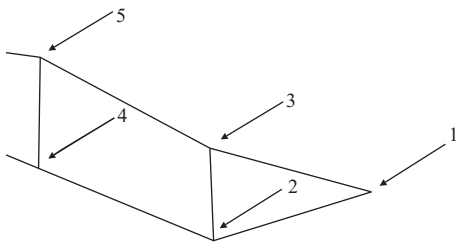


图 3 桩前滑体概化条分图

Fig. 3 Slices of slip mass in front of piles

1. 滑坡前端端点, 剪出口位置; 2, 3. 桩距滑坡前缘端点水平距离的中轴线上的点

表 1 静水位条件下实际滑坡稳定性系数

Table 1 Stability coefficients of the landslide under static water level

水位高程(m)	稳定性系数
无水	1. 213 7
145	1. 190 9
150	1. 195 9
155	1. 221 3
160	1. 250 7
165	1. 304 0
170	1. 383 4
175	1. 503 7

概化过程中, 必须保证以下几点要求: ① 2 号点纵坐标不得高于 4 号点, 保证桩前滑面形态不出现上凸状态; ② 3 号点纵坐标不得高于 5 号点, 保证桩前滑体形态不出现大角度的变化; ③ 1 号点纵坐标不得高于 5 号点, 保证剪出口位置低于桩顶, 水位变动影响模型桩前土体; ④ 1 号点纵坐标, 控制剪出口高程, 但不宜高于 185 m。

(2) 桩前条分概化步骤: ① 固定剪出口位置, 即确定 1 号点的坐标; ② 根据 1 号点的横坐标和抗滑桩的位置确定出 2, 3 号点的横坐标; ③ 根据条分法稳定性的计算方法, 不断改变桩前滑体形态(即改变 2, 3 号点纵坐标)试算出天然工况下实际滑坡稳定性系数 1. 213 7, 以此确定得到 2, 3 号点的纵坐标; ④ 库水位在 145~175 m 之间变动时, 滑坡体中的浸润线按照 3° 起伏以水位与滑坡体交点为基准直线向滑坡体内延伸, 按照 5 m 一个节点进行静水位条件下稳定性计算, 得到不同水位下的稳定性系数(表 1)。

⑤ 参考天然状况稳定性计算过程, 同时考虑滑坡体前缘库水的压脚作用, 不断改变 1, 2, 3 号点的纵坐标, 以稳定性系数保持相同为依据, 试算出模型

表 2 静水位条件下概化模型的稳定性系数

Table 2 Stability coefficients of the generalized model under static water level

剪出口 高程(m)	不同水位高程(m)下稳定性系数				
	无水	185	190	195	200
180	1. 213 7	1. 179	1. 187	1. 219	1. 279
181	1. 213 7	1. 201	1. 238	1. 133	1. 120
182	1. 213 7	1. 196	1. 198	1. 224	1. 286
183	1. 213 7	1. 197	1. 267	1. 374	1. 511
184	1. 213 7	1. 192	1. 236	1. 324	1. 445
185	1. 213 7	0. 920	0. 817	0. 737	0. 676

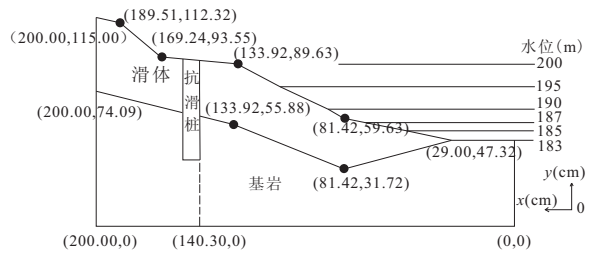


图 4 桩前滑体概化条分图

Fig. 4 Profile of the generalized model

试验对应 145~175 m 的水位变动范围。

### 2.3 滑坡模型概化最终结果

通过以上的模型概化步骤计算, 最终得到表 2 结果。

将表 2 与表 1 进行对比, 经过试算最终确定出, 概化后滑坡模型的前缘剪出口高程为 183 m, 实际库水位 145~175 m 变动区间对应的滑坡模型水位变动区间是 183~200 m(图 4)。

## 3 模型合理性验证

### 3.1 概化前后滑坡推力比较

通过对比滑坡概化前后桩前剩余推力和研究区后边界推力(表 3), 来进一步说明概化的合理性。

抗滑桩出露基岩的高程为 187 m, 试验过程中, 伴随水位的上升, 模型的前缘不断浸没于水中, 各项物理力学参数随之发生改变, 模型抗滑桩桩前剩余推力随浸润线是否超过 187 m 而改变。

当浸润线低于或等于 187 m 时, 模型抗滑桩及其后部的土体基本不受影响, 桩前边界推力不改变, 等同于天然状况下的桩前边界推力; 当浸润线超过 187 m 时, 模型抗滑桩淹没于水中, 其后部土体将随着水位上升逐渐浸没在水中, 桩前边界推力随之改

表 3 概化前后滑坡剩余推力对比

Table 3 Correlation table of residual thrust of the landslide and the generalized model

状态	水位高程 (m)	桩前剩余推力 (kN/m)	研究区后边界推力 (kN/m)
概化前滑坡	无水	1 586.40	1 915.34
	145.0	1 586.40	1 915.34
	150.0	1 586.40	1 915.34
	155.0	1 586.40	1 915.34
	160.0	1 586.40	1 915.34
	165.0	1 586.40	1 915.34
	170.0	1 586.40	1 915.34
	175.0	1 586.40	1 915.34
概化后滑坡	无水	1 586.40	1 915.34
	183.0	1 586.40	1 915.34
	185.0	1 586.40	1 915.34
	187.0	1 586.40	1 915.34
	190.0	1 626.36	1 915.34
	193.4	1 750.81	1 915.34
	195.0	1 877.87	2 173.29
	200.0	2 197.57	2 439.16

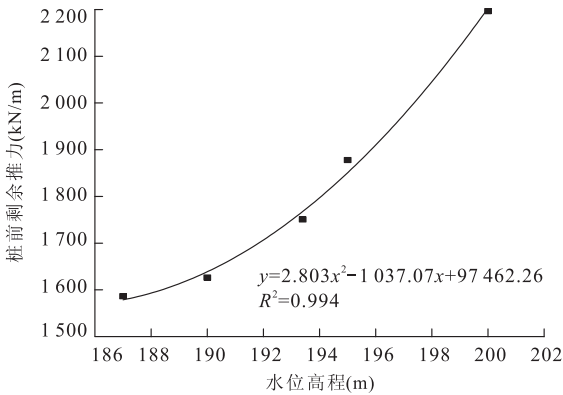


图 5 概化后滑坡桩前边界推力(水位高程>187 m)拟合  
Fig. 5 Profile of the generalized model

变,相应于天然状况下的桩前边界推力,需采用修正系数  $k_1$  进行修正. 通过图 5 曲线拟合可以得到  $k_1$  的取值如公式 (1). 实际桩前剩余推力可按  $1 586.40 + \text{概化后滑坡桩前剩余推力} \times k_1$  来计算.

$$k_1 = \frac{1}{2.803x^2 - 1037x + 97462}, \quad (1)$$

$x$  表示水位高程,且  $x > 187 \text{ m}$ .

概化后,模型后边界施加推力位置的高程为 193.4 m,模型施加的后边界推力随浸润线水位是否超过 193.4 m 而改变.

当浸润线水位低于或等于 193.4 m 时,模型施加的后边界推力基本不受影响,等同于天然状况下施加的后边界推力;当浸润线水位超过 193.4 m 时,模型施加的后边界推力随之改变,相应于天然状况下施加的后边界推力,需采用修正系数  $k_2$  进行修

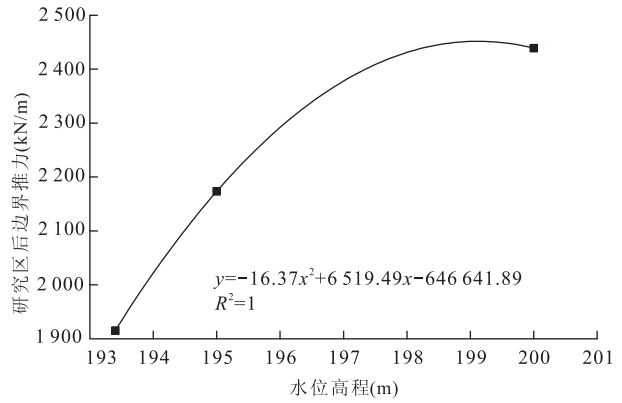


图 6 概化后研究区后边界推力(水位高程>193.4 m)  
Fig. 6 The fitting curve of residual thrust of the back boundary of the research area for the generalized model

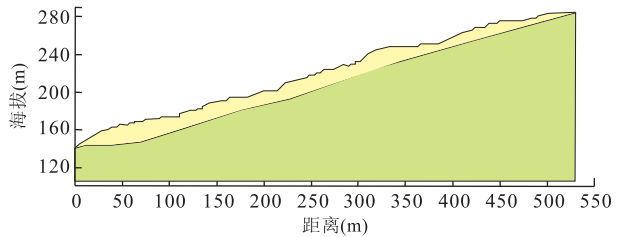


图 7 实际滑坡剖面  
Fig. 7 The profile of the actual landslide

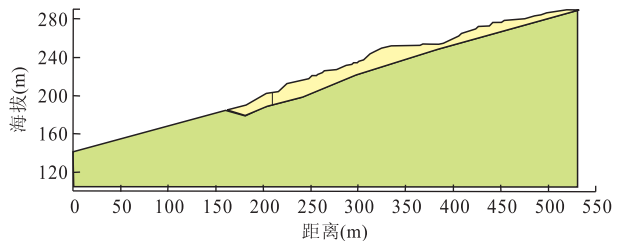


图 8 概化后的滑坡模型剖面  
Fig. 8 The profile of the generalized model

正. 通过图 6 曲线拟合可以得到  $k_2$  的取值如下公式 (2). 实际研究区后边界推力可按  $1915.34 + \text{概化后研究区后边界推力} \times k_2$  来计算.

$$k_2 = \frac{1}{-16.37x^2 + 6519x - 64664}, \quad (2)$$

$x$  表示水位高程,且  $x > 193.4 \text{ m}$ .

由以上可得,当应用此概化后的模型时,通过一定的修正后桩前剩余推力和后边界推力与实际滑坡是相吻合的,证明了此概化方案是合理的.

### 3.2 水位动态变化条件下概化滑坡物理模型稳定性系数变化规律

为了研究不同水位下滑坡体的稳定性,通过软

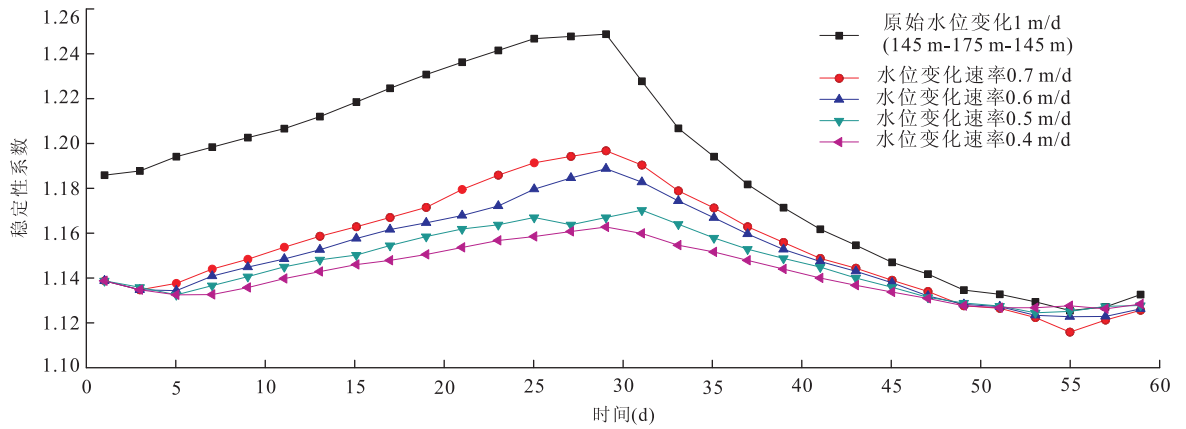


图 9 不同水位变化速率下的滑坡稳定性系数

Fig. 9 Stability coefficients of different change rates of water level

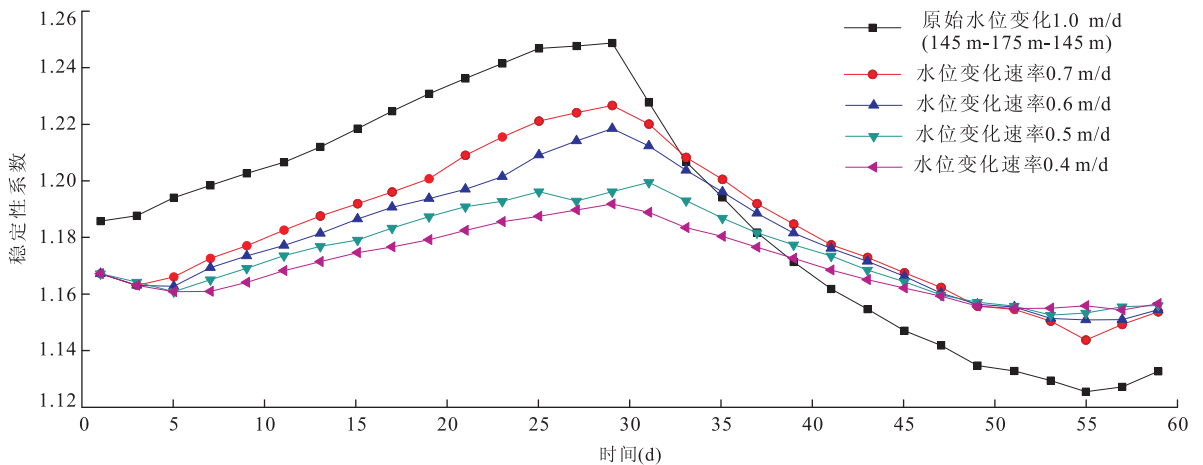


图 10 稳定性系数折减后不同水位变化速率下的滑坡稳定性系数(折减系数为 1.025)

Fig. 10 Stability coefficients after the reduction(the factor is 1.025) of different change rates of water level

件 Geo-slope 计算水位动态变化条件下,滑坡稳定性系数的变化规律,计算剖面见图 7 和 8。

进行数值模拟时滑体的渗透系数  $0.09821 \text{ m/d}$ , 体积含水率  $0.34$ , 图 7 中实际滑坡水位变化速率为  $1 \text{ m/d}$ , 在库水位升降的一个周期内(即  $145 \text{ m}$  升到  $175 \text{ m}$  再降落回  $145 \text{ m}$ ), 稳定性系数变化如图 9 中原始水位变化所示, 其水位上升时间与下降时间均为  $30 \text{ d}$ , 为了使得图 8 剖面中水位变化时稳定性系数与图 7 所示剖面中水位变化时稳定性系数等效, 并综合考虑静态水位的计算结果, 选择调节水位升降速率来达到上述目的。文章计算了图 8 剖面在水位变化速率分别为  $0.4 \text{ m/d}$ 、 $0.5 \text{ m/d}$ 、 $0.6 \text{ m/d}$  和  $0.7 \text{ m/d}$  时的稳定性系数。计算结果如图 9。

由结果可以看出, 尽管对水位变化速率进行调节, 但是不同剖面对应的稳定性系数还是很难相符合, 所以对于剖面 8 得出的稳定性系数经过试算后乘以折减系数  $1.025$  后, 得出图 10 稳定性系数折减

后不同水位变化速率下的滑坡稳定性系数变化图。由图 10 可以看出经过折减后水位变化速率为  $0.7 \text{ m/d}$  比较符合实际滑坡。

经过分析比对可以看出, 经过折减后, 概化后的模型能够应用于水位动态变化的条件下, 且是合理的、可行的。

## 4 结论

(1) 在已有模型试验框架中对马家沟滑坡 I 号滑体抗滑桩前的滑体、滑带形态进行改变, 得出概化后的模型试验滑坡剖面, 确定滑坡模型前缘剪出口高程为  $183 \text{ m}$ , 实际库水位  $145 \sim 175 \text{ m}$  变动区间对应于室内模型试验的水位波动范围在  $183 \sim 200 \text{ m}$  之间。

(2) 构建了修正系数, 使概化前后滑坡在不同水位的桩前边界推力和研究区后边界推力相拟合。



(3)通过调节水位升降速率来达到概化后滑坡与实际滑坡在水位变化时稳定性系数等效,得到模型在水位变动速率为 0.7 m/d 时的稳定性系数乘以 1.025 的折减系数后比较符合实际滑坡情况的结果。

(4)文中概化方法可对大型堆积层土质滑坡的物理模型概化提供参考。

(5)本文仍存在一些不足,模型形态概化基于滑坡整体稳定性及剩余推力,将滑体视为刚体进行概化,对于滑坡的概化局限于纵深方向,对于横向的概化尚未考虑。

(6)由于理论分析存在适当的条件假设和简化,故而应收集滑坡野外监测资料,且需根据模型试验的结果进一步修正滑坡模型。此后笔者将针对这些不足进行深入的研究。

## References

- Bhardwaj, D. K., Mandal, J. N., 2008. Centrifuge Modeling on Fiber Reinforced Fly Ash Slope. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, 197.
- Hu, X. W., Tang, H. M., Liu, Y. R., 2005. Physical Model Studies on Stability of Zhaoshuling Landslide in Area of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(12): 2089—2095 (in Chinese with English abstract).
- Keskin, M. S., Laman, M., 2013. Model Studies of Bearing Capacity of Strip Footing on Sand Slope. *Korean Society of Civil Engineering*, 17(4): 699—711. doi: 10.1007/s12205-013-0406-x
- Liu, B., Luo, X. Q., Zhang, Z. H., 2007. Model Test Study on Qianjiangping Landslide of Three Gorges Reservoir. *Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences)*, 29(2): 124—128 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. J., Men, Y. M., Li, X. C., et al., 2011. Study on Slip Materials in Landslide Model Tests. *Journal of Catastrophology*, 26(1): 10—13, 35 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. Q., Cheng, S. G., Niu, E. K., 2009. Research on Aberration Correction and Application in Landslide Geomechanical Model Test. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(Suppl. 1): 3082—3088 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. Q., Liu, D. F., Wu, J., et al., 2005. Model Test Study on Landslide under Rainfall and Reservoir Water Fluctuation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(12): 2476—2483 (in Chinese with English abstract).

- Mikuni, C., Tamate, S., Hori, T., et al., 2013. Centrifuge Model Tests on Seismic Slope Failure. *Earthquake-Induced Landslides*, 53: 501—510. doi: 10.1007/978-3-642-32238-9\_53
- Qin, S., Jiao, J., Wang, S., et al., 2001. A Cusp Catastrophe Model of Instability of Slip-Buckling Slope. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(2): 119—134.
- Sawwaf, M. E., 2010. Experimental and Numerical Study of Strip Footing Supported on Stabilized Sand Slope. *Geotech. Geol. Eng.*, 28: 311—323. doi: 10.1007/s10706-009-9293-9
- Shi, C. X., Huang, Y., Zhen, Z., et al., 2011. The Current Research State of Landslide Model Test. *Yunnan Water Power*, 27(5): 7—10 (in Chinese).
- Wu, J., Zhang, Z. H., Wang, X. L., et al., 2012. Study of Inclined Loading Mode on Slope in Physical Model Test. *Rock and Soil Mechanics*, 33(3): 713—718 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. R., Liu, D. F., Jiang, F. X., et al., 2010. Geomechanical Model Experiment on Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Mechanics and Engineering*, 29(5): 1023—1030 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. X., Xia, K. Q., Xu, M., et al., 2013. Stability of Landslide on Three-Gorges Dam Reservoir with Physical Simulation Model. *Journal of Engineering Geology*, 21(1): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Liu, Y. L., Wang, Y., et al., 2012. Physical Model Experiments of Landslide-Induced Surge in Three Gorges Reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 1067—1074 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Xia, Y. Y., Gu, J. C., et al., 2010. Test Analysis of Stress Characteristics on Reinforcing Rock Slope with Group Anchorage Cable. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 16(1): 23—28. doi: 10.1007/s12404-010-0105-x
- Zhao, Z. M., Wang, X. H., 2013. Evaluation of Potential Failure of Rock Slope at the Left Abutment of Jinsha River Bridge by Model Test and Numerical Method. *Front. Struct. Civ. Eng.*, 7(3): 332—340. doi: 10.1007/s11709-013-0206-x

## 附中文参考文献

- 胡修文,唐辉明,刘佑荣,2005.三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究.岩石力学与工程学报,24(12): 2089—2095.

Tao, G. B., 1987. The Philippine Sea Plate Tectonic Research. *Marine Oil*, 1(1): 1—22 (in Chinese with English abstract). doi:10.1029/96JB01307

Tivery, M. A., 1996. Vertical Magnetic Structure of Ocean Crust Determined from Near-Bottom Magnetic Field Measurements. *J. Geophys. Res.*, 101 (B9): 20275 — 20296.

Wu, S. G., Fan, J. K., Dong, D. D., 2013. Discussion on the Tectonic Division of the Philippine Sea Plate. *Chinese Journal of Geology*, 48(3): 677—692 (in Chinese with English abstract).

Wu, S. G., Liu, W. C., 2004. Tectonics of Subduction Zone in the East Asia Continental Margin. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 15 — 21 (in Chinese with English abstract).

Zang, S. X., Ning, J. Y., 2002. Interaction Between Philip-

pines Sea Plate (pH) and Eurasian Eu Plate and Its Influence on the Movemet Eastern Asia. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2): 188—197 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陶国保, 1987. 菲律宾海板块构造研究述评. *海洋石油*, 1(1): 1—22.

吴时国, 范建柯, 董冬冬, 2013. 论菲律宾海板块大地构造分区. *地质科学*, 48(3): 677—692.

吴时国, 刘文灿, 2004. 东亚大陆边缘的俯冲带构造. *地质前沿*, 11(3): 15—21.

臧绍先, 宁杰远, 2002. 菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用及其对东亚构造运动的影响. *地球物理学报*, 45(2): 188—197.

\*\*\*\*\*

(上接 1598 页)

刘波, 罗先启, 张振华, 2007. 三峡库区千将坪滑坡模型试验研究. *三峡大学学报(自然科学版)*, 29(2): 124—128.

刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等, 2011. 采用不同滑面材料的滑坡模型试验研究. *灾害学*, 26(1): 10—13, 35.

罗先启, 程圣国, 牛恩宽, 2009. 滑坡物理模型试验畸变修正及应用研究. *岩石力学与工程学报*, 28(增刊 1): 3082—3088.

罗先启, 刘德富, 吴剑, 等, 2005. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 24(14): 2476—2483.

石崇喜, 黄英, 甄祯, 等, 2011. 滑坡模型试验研究现状. *云南水利发电*, 27(5): 7—10.

吴剑, 张振华, 王幸林, 等, 2012. 边坡物理模型倾斜加载方式的研究. *岩土力学*, 33(3): 713—718.

肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等, 2010. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 29(5): 1023—1030.

肖先焯, 夏克勤, 许模, 等, 2013. 三峡库区某滑坡稳定性模型试验研究. *工程地质学报*, 21(1): 45—52.

殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等, 2012. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(5): 1067—1074.