

# 水库初次蓄水中均质库岸塌岸现象试验研究

王俊杰<sup>1</sup>, 张 梁<sup>2</sup>, 阎宗岭<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044;  
3. 国家山区公路工程技术研究中心, 重庆 400067)

**摘要:** 为了研究水库初次蓄水过程中均质岸坡的塌岸现象, 在室内建设了4类9个物理模型进行试验。试验结果表明, 岸坡坡角越大、岸坡土体颗粒粒径越小, 塌岸现象越易发生; 凸形坡面岸坡比凹形坡面岸坡更易发生塌岸现象; 覆盖层下伏基岩界线倾角越陡, 越易发生塌岸现象。试验测得浸润线与理论计算结果的比较分析表明, 浸润线的理论计算方法由于没有考虑岸坡土体的非饱和状态, 可能过高地估计浸润线的位置。

**关键词:** 水库; 初次蓄水; 均质岸坡; 塌岸; 浸润线

中图分类号: TV16 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)08-1284-06

作者简介: 王俊杰(1973-), 男, 甘肃陇西人, 博士后, 教授, 从事岩土工程、地质工程试验研究。E-mail: wangjunjie@cqjtu.edu.cn。

## Experiment study on homogeneous bank caving of reservoirs during the first impounding

WANG Jun-jie<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, YAN Zong-ling<sup>3</sup>

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering,

Chongqing 400044, China; 3. National Research Center on Mountain Highway Engineering and Technology, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** In order to investigate the homogeneous bank caving of reservoirs during the first impounding, 9 bank slope models divided into 4 types are made in the laboratory. The model test results indicate that the larger the angle of the bank slope, or the smaller the particle size in the bank slope, the more possible the bank caving. The collapse of the convex bank is easier than that of the concave bank. The larger the angle of the underlying bedrock, the more possible the bank caving. The typical phreatic lines in the model slope obtained from the experiments are compared with those obtained from a published analytic solution. The comparison indicates that the published analytic solution may over-estimate the elevation of the phreatic lines. The over-estimation may result from the neglecting of the unsaturated state of the bank soil mass in the analytic solution.

**Key words:** reservoir; first impounding; homogeneous bank; bank caving; phreatic line

## 0 引言

在水库蓄水过程中及蓄水后, 各类松散堆积层和软岩组成的库岸, 受库水浸泡、风浪及船行波浪冲击, 水流侵蚀以及干湿交替等影响, 使库岸岩土体风化加剧, 抗剪强度降低, 以及库水位涨落引起库岸地下水动水压力变化而形成库岸侵蚀的再造变形, 使库岸不断后移, 即水库塌岸。水库塌岸具有巨大的危害性, 能影响沿岸人民群众的正常生活, 给国家和人民带来直接和间接的经济损失。因此, 水库塌岸一直是人们关心的课题, 相关的研究工作较多<sup>[1-4]</sup>。

以往的研究中, 人们主要着眼于塌岸预测和岸坡稳定两个方面。塌岸预测方面的研究, 主要集中在对预测方法的研究<sup>[5-6]</sup>、预测方法中各特征参数的取值方

法研究<sup>[7]</sup>等方面; 岸坡稳定方面的研究, 主要集中在岸坡失稳机理<sup>[8-9]</sup>、稳定分析方法<sup>[10-11]</sup>、浸润线的计算<sup>[12-14]</sup>等方面。

众所周知, 在水库初次蓄水过程中, 塌岸现象最易发生, 但人们对水库初次蓄水过程中塌岸现象的研究并不多。本文通过室内物理模拟试验, 研究土质岸坡在水库初次蓄水过程中的塌岸现象及浸润线变化, 以期获得对塌岸研究有益的认识。

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200831674006); 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC, 2009BA6001); 中国博士后科学基金特别资助项目(200902284)

收稿日期: 2010-05-31

## 1 试验模型建设及试验方案

### 1.1 试验设备

#### (1) 试验模型槽改造

模型槽是进行水库塌岸物理模型试验的关键设备, 试验采用重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室的宽 2 m、长 28 m 玻璃水槽为试验模型槽。

由于该玻璃水槽的通常用途并不是进行与本模型试验类似的实验, 水槽玻璃侧墙的强度和变形均可能不能满足本试验要求, 因此, 需要对该玻璃水槽进行改造, 以满足本物理模型试验需要。

改造的方法是: ①依据本模型试验的需要, 将水槽内分成不同的区域(建设模型区域和试验观测区域), 各区域相间分布, 同时在水槽内侧加固水槽侧墙(参见图 1, 2)。水槽的改造用砌筑砖墙的形式完成; ②在模型槽两端分别增加水位、水量控制系统; ③在改造后的模型槽内增加水位调节系统等。

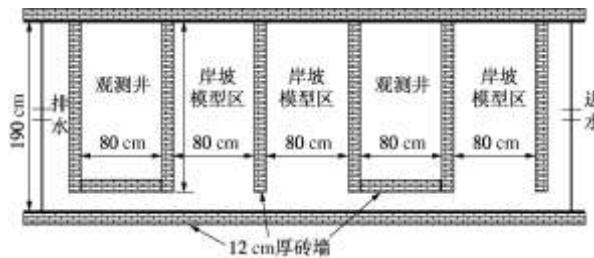


图 1 模型槽改造示意图

Fig. 1 Schematic plan for rebuilding model channel



图 2 改造的模型试验槽

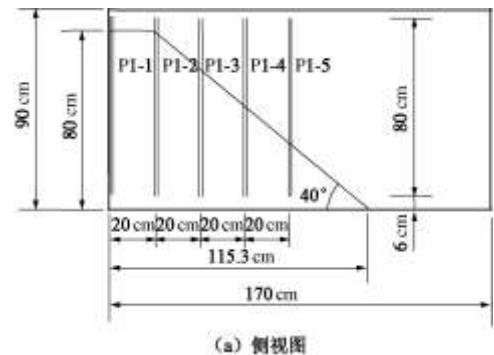
Fig. 2 Rebuilt model channel

#### (2) 浸润线观测方法

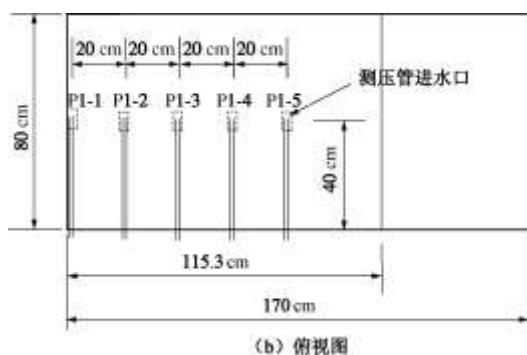
为了便于研究岸坡浸润线随库水位上升的变化情况, 采用测压管法在观测井(参见图 1, 2)中观测模型坡体内的浸润线。由于模型的长、宽、高等尺寸相差不大, 用于浸润线观测的测压管布置应该考虑模型边界的影响。为了消除模型边界的影响, 所有测压管进水口均布置于模型的纵向对称面上, 且距离模型底面 6.0 cm, 水平间距 20 cm(如图 3 所示, 图中“P1-n”( $n=1, 2, \dots, 5$ )为测压管编号)。测压管采用内径 3 mm、外径 4 mm 的 PVC 管制作。

### 1.2 试验土料

实际的水库岸坡的土体种类很多, 很难在室内条件下对其进行全面、真实的模拟。依据模型试验的目的, 以取自三峡库区的含黏粒粉砂为主要试验土料。其颗粒级配曲线如图 4 所示。



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图 3 测压管布置设计图(以坡角 40° 模型为例)

Fig. 3 Layout of piezometer tubes in slope model

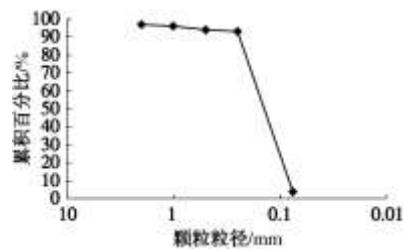


图 4 试验用粉砂的颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curve of silty soil

由于含黏粒粉砂是最主要的试验土料, 对其进行室内试验测得, 土粒比重为 2.69, 最大干密度和最优含水率分别为  $1.54 \text{ g/cm}^3$  和 16.8%, 渗透系数介于  $1.08 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  和  $2.90 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , 平均为  $1.99 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。

### 1.3 试验模型

大量研究表明, 影响塌岸的因素繁多。在室内条件下研究每种影响因素是不现实的, 也是没有必要的。依据试验目的, 物理模型试验着重研究岩土体成分、岸坡结构、地形坡度、地层透水性质等对水库塌岸的影响。

在试验模型中, 共设计如下 4 类 9 个物理模型。

各类模型的试验目的及结构特点分别简述如下：

#### (1) 第一类模型

第一类模型主要考虑岸坡坡角因素，用于研究坡角变化对塌岸的影响。该类模型共 3 个，均采用含黏粒粉砂制备，各模型的高度均为 80 cm，顶宽均为 20 cm，厚度均为 80 cm。模型<sup>#1</sup>的坡角为 40°，底宽为 115.3 cm；模型<sup>#2</sup>的坡角为 35°，底宽为 134.3 cm；模型<sup>#3</sup>的坡角为 30°，底宽为 158.6 cm。模型结构设计如图 5 所示。以图中坡角 30° 的模型（即模型<sup>#3</sup>）作为基本模型，其它类型的模型设计以此为参考。

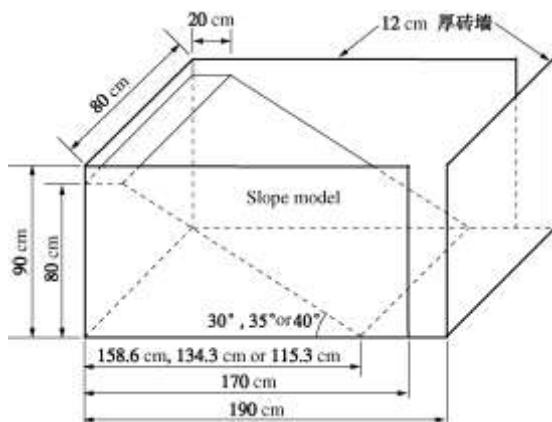


图 5 第一类模型结构设计图

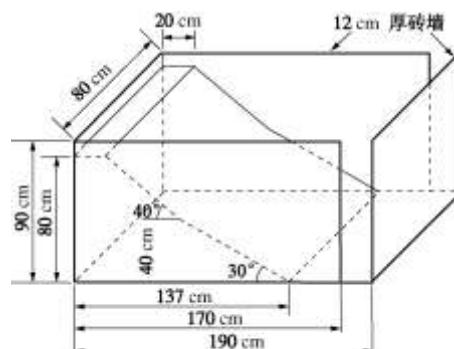
Fig. 5 Structural design drawing of model type 1

#### (2) 第二类模型

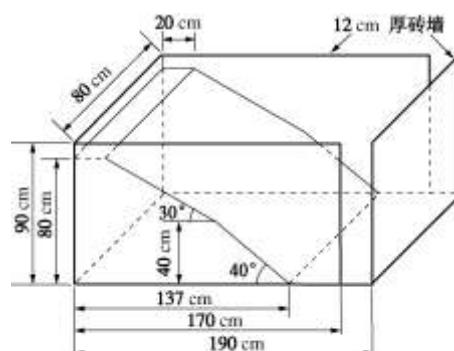
第二类模型主要研究库岸土体渗透性变化对塌岸的影响。该类模型共 3 个，其中一个就是前述的基本模型，即第一类模型中的模型<sup>#3</sup>，另外两个的模型尺寸与基本模型完全相同，即模型高度为 80 cm，顶宽为 20 cm，厚度为 80 cm，坡角为 30°，底宽为 158.6 cm。但各模型所用的试验土料不同，一个是在前述含黏粒粉砂中拌合 30% 的黏土，另一个是在前述含黏粒粉砂中拌合 30% 的碎石制备。

#### (3) 第三类模型

第三类模型主要研究库岸边坡坡面形态对塌岸的影响。该类模型共 3 个，其中一个就是前述的基本模型，即第一类模型中的模型<sup>#3</sup>，其坡面形态为平面；另外两个的坡面形态为折线型，一是库岸内凹型，一是外凸型。如图 6 所示。



(a) 坡面为凹形折线模型



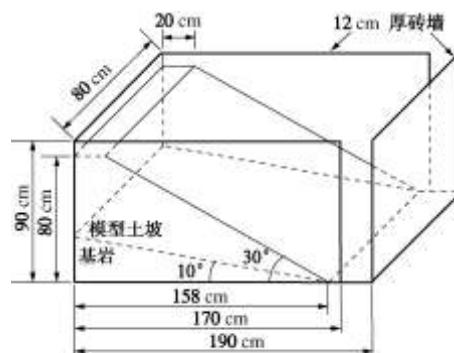
(b) 坡面为凸形折线模型

图 6 第三类模型结构设计图

Fig. 6 Structural design drawing of model type 3

#### (4) 第四类模型

第四类模型主要是研究岸坡覆盖层下伏基岩界线为倾斜情况的塌岸问题。该类模型共 3 个，其中一个就是前述的基本模型，即第一类模型中的模型<sup>#3</sup>，覆盖层下伏基岩界线为水平；另外 2 个模型的覆盖层下伏基岩界线倾角分别为 10° 和 15°，如图 7 所示。



(a) 基岩倾角10°

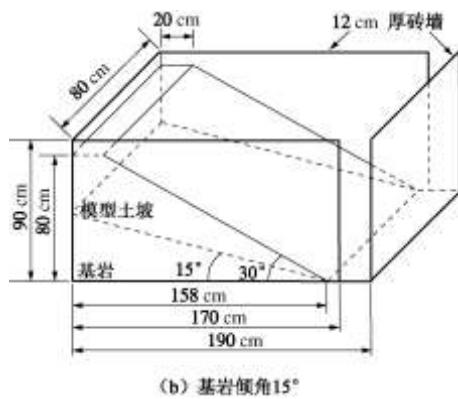


图 7 第四类模型结构设计图

Fig. 7 Structural design drawing of model type 4

模型土体填筑控制指标为压实度, 考虑到天然水库岸坡土体的密实度通常小于其最大密实度, 试验中压实度按 0.8 控制。采用分层填筑, 分层压实的方法制备模型。

#### 1.4 试验方案

试验模型建成后, 在库水位上升过程中可能会发生一些塌岸现象, 为了便于观测塌岸现象, 试验选取的试验水位上升速率为 1.0 cm/h。试验水位从 6.0 cm (以模型底面为高程零点)起开始上升, 每天上升 10.0 cm, 然后保持水位不变 14 h, 直至试验水位达到 76.0 cm。试验水位 - 历时曲线如图 8 所示。

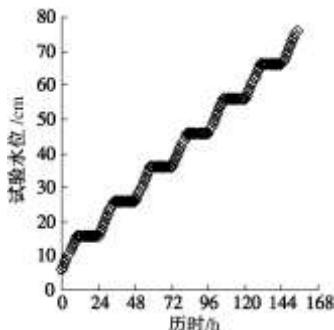


图 8 试验水位 - 历时曲线

Fig. 8 Relationship between water level and elapsed time

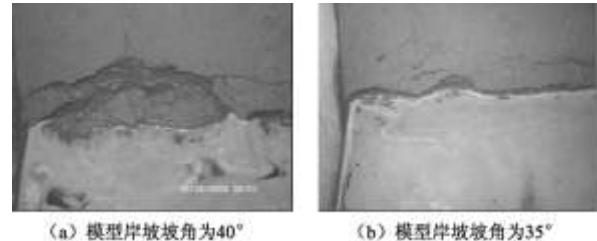
## 2 试验中观测到的塌岸现象

通常认为, 水库在初次蓄水过程中, 岸坡塌岸现象频发。试验中, 也观察到了模型边坡在初次库水位上升试验过程中容易发生塌岸现象。各类模型在初次蓄水试验中的塌岸现象及其特点简述如下。

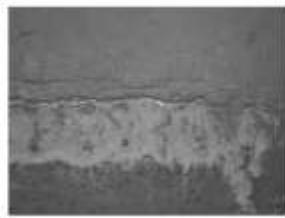
#### 2.1 第一类模型

图 9 给出了第一类模型在初次库水位上升试验中观察到的部分塌岸现象。由图可知, 尽管库水位上升速率仅为 1.0 cm/h, 但是不同坡角的岸坡模型均观察到了不同程度塌岸现象。相比之下, 坡角为 40° 的模型边坡的塌岸现象最为严重, 坡角为 30° 的模型边坡

的塌岸程度最弱。由于各模型的主要区别是岸坡坡角的不同, 因此, 可以认为, 在其它条件相同的情况下, 岸坡坡角越大, 越易发生塌岸现象。



(a) 模型岸坡坡角为40° (b) 模型岸坡坡角为35°



(c) 模型岸坡坡角为30°

图 9 第一类模型的塌岸现象

Fig. 9 Bank collapse of type 1 models

#### 2.2 第二类模型

图 10 显示的第二类模型在初次库水位上升试验中观察到的部分塌岸现象。由图可知, 模型土体为“粉砂+碎石”(图 10 (a)) 的塌岸现象不明显, 而“粉砂+黏土”模型(图 10 (b)) 的塌岸现象明显。由于两模型的主要区别在于模型土体的不同, 因此, 可以认为, 岸坡土体的颗粒粒径增大有利于防止塌岸现象的发生。



(a) 模型土体为粉砂+碎石 (b) 模型土体为粉砂+黏土

图 10 第二类模型的塌岸现象

Fig. 10 Bank collapse of model type 2

#### 2.3 第三类模型

图 11 给出了第三类模型在初次库水位上升试验中观察到的部分塌岸现象。图中显示, 坡面为凹形和凸形的两个模型在初次蓄水过程中均有塌岸现象发生, 相比之下, 坡面为凸形(图 11 (b))时的塌岸现象略明显。

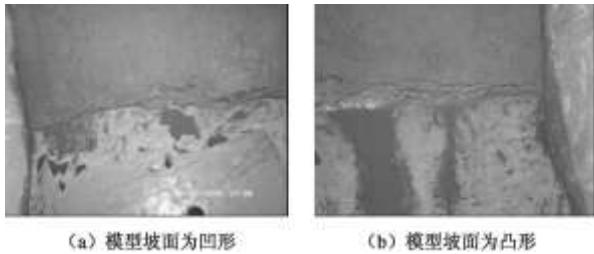


图 11 第三类模型的塌岸现象

Fig. 11 Bank collapse of model type 3

## 2.4 第四类模型

由图 12 给出的第四类模型在初次库水位上升试验中观察到的部分塌岸现象可知, 覆盖层下伏基岩界线倾角分别为  $10^\circ$  (图 12 (a)) 和  $15^\circ$  (图 12 (b)) 的两模型边坡均发生了程度相差不大的塌岸现象。相比之下, 覆盖层下伏基岩界线倾角为  $15^\circ$  的模型边坡出现了明显开裂。可以推知, 在其它条件相同的情况下, 覆盖层下伏基岩界线倾角越大, 越易发生塌岸现象。

## 3 试验中观测到的浸润线变化

由于各均质模型在相同试验方案中的浸润线变化规律基本一致, 本文仅以第一类模型中坡角为  $40^\circ$  的均质岸坡模型为例, 分析初次蓄水试验中岸坡浸润线的变化情况。

### 3.1 试验中观测到的测压管水位变化

由于篇幅的限制, 图 13 中仅给出了试验水位从  $16 \text{ cm}$  (以模型底面为高程零点) 升高到  $26 \text{ cm}$  和从  $56 \text{ cm}$  升高到  $66 \text{ cm}$  过程中各测压管水位的变化, 为便于比较, 图中也给出了试验水位随时间的变化 (图中“WL”线)。

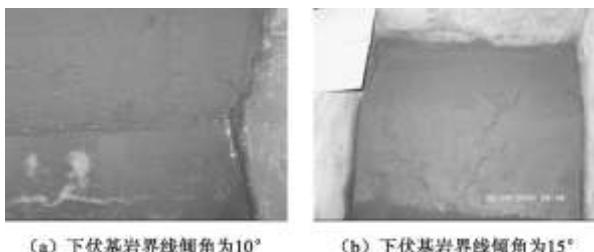


图 12 第四类模型的塌岸现象

Fig. 12 Bank collapse of model type 4

由图可知, 当试验水位以  $1.0 \text{ cm/h}$  的速率等速上升变化时, 各测压管水位也基本呈等速上升变化, 但是, 测压管水位的变化速率总是小于库水位的变化速率; 不同测压管的水位及其上升变化速率也不相同, 测压管距离模型坡体坡面的水平距离越短, 测压管内的水位越高, 且变化速率越大。

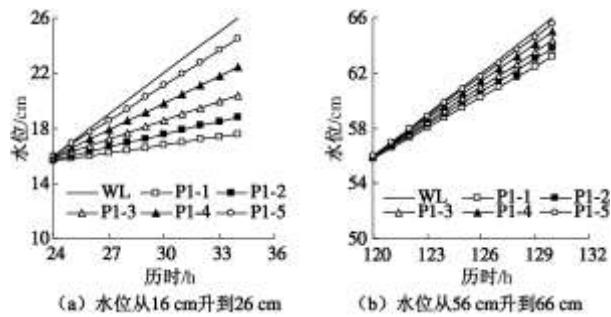


图 13 试验测得的水位 - 历时关系

Fig. 13 Variation of water table with elapsed time

### 3.2 浸润线计算的理论解

依据文献[12, 14], 在假定含水层均质、各向同性、侧向无限延伸且具有水平不透水层, 库水位上升前原始潜水面水平, 潜水流为一维流, 库水位等速上升, 不考虑降雨入渗等条件时, 库水位上升时浸润线计算的简化公式为

$$h(x,t) = \begin{cases} h(0,0) + v_0 t (0.1091\lambda^4 - 0.7501\lambda^3 + \\ 1.9283\lambda^2 - 2.2319\lambda + 1) & (0 \leq \lambda < 2) \\ h(0,0) & (0 \leq \lambda < 2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $h(x,t)$  为  $t$  时刻距离岸坡  $x$  处的地下水位,  $h(0,0)$  为初始时刻岸坡处的地下水位,  $v_0$  为库水位上升速率,

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (2)$$

其中,

$$a = \frac{kh_m}{\mu}, \quad (3)$$

其中,  $k$  为岸坡土体的渗透系数 ( $\text{m/d}$ ),  $\mu$  为岸坡土体的给水度或输水率,  $h_m$  为含水层平均厚度 ( $\text{m}$ )。

### 3.3 试验结果与计算结果的对比分析

由于本试验模型的边界条件和上述理论计算的边界条件基本相同, 对两者进行对比分析, 可以检验库水位上升过程中浸润线理论计算方法的可靠性, 为实际工程中合理计算浸润线提供依据。

图 14 给出了试验测得的不同库水位时的浸润线, 为便于比较, 图中同时给出了模型边坡的边界线和通过上述理论公式计算得到的浸润线。

图中显示, 模型试验测得的浸润线位置明显低于理论计算结果。这表明, 若利用前述理论计算公式或方法计算水库初次蓄水时岸坡的浸润线, 将过高地估计浸润线的位置。其主要原因是前述理论计算方法没有考虑岸坡土体的非饱和状态。

另外, 图中还显示, 试验观测结果与理论计算结果的差异随距离岸坡坡面的水平距离的增大而增大,

也就是说, 当用前述理论公式计算近岸坡面位置的浸润线时引起的误差相对要较小一些, 而计算远离岸坡面位置的浸润线时引起的误差要较大一些。

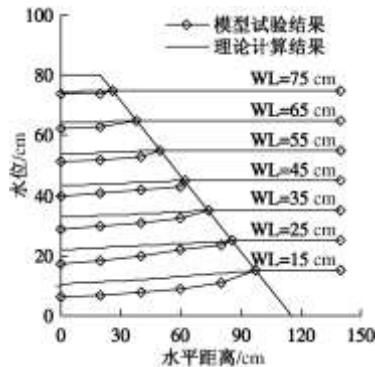


图 14 典型试验结果与理论计算值的对比分析

Fig. 14 Comparison between test and computed results

## 4 结 论

(1) 水库初次蓄水过程中, 塌岸现象容易发生。在其它条件相同的情况下, 岸坡坡角越大, 越易发生塌岸现象; 岸坡土体的颗粒粒径增大有利于防止塌岸现象的发生; 凸形坡面岸坡比凹形坡面岸坡更易发生塌岸现象; 覆盖层下伏基岩界限倾角越陡, 越易发生塌岸现象。

(2) 浸润线的理论计算方法由于没有考虑岸坡土体的非饱和状态, 用于计算水库初次蓄水时的岸坡浸润线时, 将可能过高地估计浸润线的位置。

## 参考文献:

- [1] DAI F C, DENG J H, THAM L G, et al. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area[J]. Can Geotech J, 2004, **41**: 1233 - 1240.
- [2] DENG Q L, ZHU Z Y, CUI Z Q, et al. Mass rock creep and landsliding on the Huangtupo slope in the reservoir area of the Three Gorges Project, Yangtze River, China[J]. Engineering Geology, 2000, **58**(1): 67 - 83.
- [3] JAPPELLI R, MUSSO A. Slope response to reservoir water level fluctuations[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981: 437 - 442.
- [4] LANE K S. Stability of reservoir slopes[C]// Proceedings of the 8th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, 1966: 321 - 336.
- [5] 王跃敏, 唐敬华, 凌建明. 水库塌岸预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 569 - 571. (WANG Yue-min, TANG Jing-hua, LING Jian-ming. Study on prediction method for reservoir bank caving[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 569 - 571. (in Chinese))
- [6] 许 强, 黄润秋, 汤明高, 等. 山区河道型水库塌岸研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Qiang, HUANG Run-qiu, TANG Ming-gao, et al. Study on bank fall of reservoir in mountain[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [7] 汤明高, 许 强, 黄润秋, 等. 三峡库区塌岸预测参数及其影响因素研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, **33**(5): 460 - 464. (TANG Ming-gao, XU Qiang, HUANG Run-qiu, et al. Study on the forecasting parameters of the bank failure and the influence factors in the Yangtze Three Gorges Project Region, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, **33**(5): 460 - 464. (in Chinese))
- [8] JIA G W, ZHAN Tony L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels [J]. Engineering Geology, 2009, **106**: 92-103.
- [9] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, **126**(5): 443 - 450.
- [10] MORGENTERN N R. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. Geotechnique, 1963, **13**(2): 121 - 131.
- [11] ZHAN Tony L T, ZHANG W J, CHEN Y M. Influence of reservoir level change on slope stability of a silty soil bank[C]// The Fourth International Conference on Unsaturated Soils, ASCE, 2006: 463 - 472.
- [12] 张友谊, 胡卸文. 库水位等速上升作用下岸坡地下水浸润线的计算[J]. 水文地质与工程地质, 2007(5): 46 - 49. (ZHANG You-yi, HU Xie-wen. Calculation of saturation line of groundwater under reservoir water table uniform rising[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007(5): 46 - 49. (in Chinese))
- [13] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(18): 3203 - 3210. (ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, KONG Wei-xue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(18): 3203 - 3210. (in Chinese))
- [14] 王俊杰. 土质沿河路基失稳机理及稳定性分析方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (WANG Jun-jie. Failure mechanism

and stability analyzing method on roadbed along river[D].

Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))