

文章编号: 1000-7598 (2012) 10-2917-06

# 水位波动下路基湿度动态响应及地下防排水模型试验研究

刘杰, 姚海林, 胡梦玲, 卢正, 余东明, 陈风光

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 设计加工了室内路基防排水模型试验系统, 进行了地下水位波动影响下的路基水分迁移及地下防排水的室内试验研究。通过改变地下水位高度, 研究了无任何防水措施、加入普通砂垫层及新型防排水材料作为地下防排水基层工况下路基湿度的动态响应, 评价了公路路基地下防排水基层的防排水效果。试验结果表明, 在地下水位的波动影响下, 近地下水位的路基湿度不仅随着地下水位的变化作相应的变化, 上部土体湿度因毛细作用的存在也有较大幅度的增加, 当地下水位较低时, 砂垫层起到了较好的防排水效果; 而当地下水位较高时, 砂垫层内部的毛细水上升高度大于砂垫层的高度, 路基湿度产生较大变化; 新型的防排水材料能有效阻止毛细水进入路基内部, 具有较好的防排水效果。

**关键词:** 模型试验; 地下水位波动; 水分迁移; 地下防排水; 防排水基层; 毛细水

**中图分类号:** U 416.1

**文献标识码:** A

## Study of moisture dynamic response and underground drainage test of subgrade model under water level fluctuation

LIU Jie, YAO Hai-lin, HU Meng-ling, LU Zheng, YU Dong-ming, CHEN Feng-guang

(State key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** A laboratory model experiment system for subgrade drainage is designed and processed (declared a national invention patent); and the study of the subgrade moisture migration and laboratory underground drainage experiment under the influence of groundwater level fluctuation is conducted. By changing the height of the groundwater level, the dynamic response of subgrade humidity is studied in the case of without any waterproof measures, adding ordinary sand cushion, new drain material as underground waterproof and drainage base; and its effect of subgrade is evaluated. The results show that under the influence of the groundwater level fluctuation, the moisture of subgrade near the groundwater changes with the water table accordingly, the upper soil moisture has a relatively substantial increase because of the capillary action; when the water table is low, sand cushion plays a good waterproof and drainage effect; when the water table is high, the rise height of capillary water within the sand cushion is higher than the height of the sand cushion; and the subgrade moisture has a greater changes; new drainage materials can prevent the capillary water entering into the subgrade effectively; and it has good waterproof and drainage effects.

**Key words:** model test; groundwater level fluctuation; moisture migration; underground waterproof and drainage; waterproof and drainage base; capillary water

## 1 引言

地下水位的波动直接影响到路基土体的强度与稳定。当地下水位距离路面结构较近时, 地下水可通过毛细作用等方式<sup>[1-2]</sup>侵入路基, 导致路基湿软, 一方面使路基强度降低; 另一方面, 饱和路基土由

于残余孔隙水压力消散产生的固结变形, 使路基残余变形增大, 从而加速路面结构的损坏。由于地下水对路基性能具有较大的影响, 因此, 在实际工程设计中必须设置合理的地下防排水设施, 降低地下水位, 减小地下水对公路路基的影响。

近年来, 很多学者对地下水位波动影响下的路

收稿日期: 2011-06-09

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(No. 2011318493720, No. 20113184931700, No. 2011318775680); 湖北省自然科学基金(No. Y024041F01); 武汉市青年科技晨光计划项目(No. 201150431070)。

第一作者简介: 刘杰, 女, 1983年生, 博士, 助理研究员, 主要从事非饱和土水分迁移规律的研究工作。E-mail: chouchou0205@sohu.com

基湿度状态进行了分析, Drumm 等<sup>[3]</sup>通过分析长期性能项目的数据, 指出地下水水位和路基的含水率之间的关系不显著, 但他们没有考虑沿深度含水率变化的差异性, 主要集中考虑每一深度处含水率总的变化。孙冬梅<sup>[4]</sup>、徐杨军<sup>[5]</sup>等采用饱和与非饱和渗流模型, 模拟了库水位波动情况下浸润线的变化情况。郑颖人等<sup>[6]</sup>、冯文凯等<sup>[7]</sup>、张友谊等<sup>[8]</sup>, 吴琼等<sup>[9-10]</sup>研究了库水位升降情况下土体浸润线的解析解, 然而均由于仅仅基于渗流分析软件进行计算推导, 因而也存在一些不足。

分析前人的研究可以看出, 目前关于地下水水位波动对非饱和土路基湿度影响的研究很少, 而且大多都是定性的研究, 由于实际的地下水水位波动情况不易获得, 而通过数值计算方法获得的非饱和土湿度变化也仅仅是个规律性结果, 因而对地下水水位波动下的非饱和土水分迁移规律的理论还有待于进一步深入的研究。同时, 目前的公路路基地下防排水设计往往基于经验方法, 对于地下防排水材料的防排水效果无法进行验证。

基于此, 本文将以武汉市洪山黏土作为研究对象, 通过搭建室内路基模型, 动态分析地下水水位波动影响下的路基水分迁移规律, 同时引入不同的地下防排水基层设计工况, 研究其防排水效果, 为公路路基地下防排水设计提供试验依据。

## 2 室内路基模型试验

室内路基模型试验的主要目的是通过改变地下水水位高度, 研究地下水水位波动影响下路基湿度的动态响应; 其次加入普通防水砂垫层及新型的地下防排水材料作为地下防排水基层, 对比分析地下水水位波动影响下的路基水分迁移规律及不同防排水基层材料的防排水效果。

### 2.1 洪山黏土基本性质的室内试验及土-水特性试验分析

本试验项目所用土样取自武汉市洪山区的黏性土, 取土深度为地下 3~5 m 左右。

对其进行基本的物理特性及土-水特征曲线试验。主要试验内容包含有: 含水率、密度、土粒相对密度、颗粒分析、界限含水率、击实试验以及土-水特性和渗透特性试验。

通过室内试验, 得到, 洪山黏土的基本物理特性见表 1。

由试验结果可知, 洪山黏土的天然含水率较接近于塑限, 土颗粒中小于 0.002 mm 的颗粒占到 25% 左右, 有 50% 的土颗粒小于 0.01 mm, 由液、塑限

试验结果来看, 洪山黏土属于低液限黏土, 根据击实试验结果可以看出, 天然含水率远大于最优含水率, 因此需要进行晒干处理后方可用于填筑。

表 1 洪山黏土基本特性

Table 1 Basic soil properties of Hongshan clay

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	天然含水率 /%	土粒相 对密度	塑限 /%	液限 /%	最大干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率 /%
1.386	21.8	2.76	21.11	43.42	1.88	15.7

### 2.2 土-水特性曲线试验及分析

在进行模型试验之前对洪山黏土进行土-水特征曲线试验, 试验采用中科院武汉岩土力学研究所引进的伺服流速渗透仪(CFM), 该仪器由气源供给系统、渗透仪、控制面板、恒定流速维持系统、称量系统、数据采集系统等主要部分组成。在进行土-水特征曲线(SWCC)试验时主要使用的是气源供给系统、渗透仪、控制面板和称量系统, 具体试验设备见图 1 和图 2。



图 1 出水口及蒸发量矫正瓶

Fig.1 Outlet and evaporation correction bottle



图 2 伺服流速渗透仪

Fig.2 Servo flow permeameter correction bottle

根据击实试验获得的最大干密度及最优含水率对土-水特征曲线的试样进行压实, 由于在模型试验中的现场压实工具无法将土压实到规范路基要求的标准, 因此, 只能将路基模型及土-水特征曲线试验的土体压实度控制在 85% 左右。通过体积含水率与

质量含水率之间的换算关系， $\theta_v = \theta_w \cdot \rho$ ，获得了以体积含水率表征的土-水特征曲线，如图 3 所示。

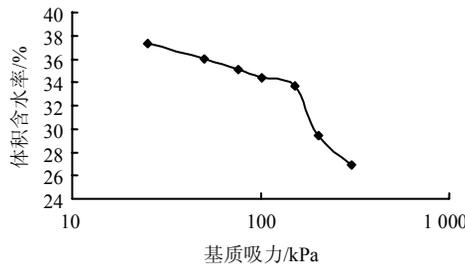


图 3 洪山黏土的土-水特征曲线  
Fig.3 SWCC of Hongshan clay

基于 Van-Genuchten 模型（下简称 V-G 模型）并采用 origin7.5 对土-水特征曲线试验获得的多点数据进行拟合，得到了洪山黏土在 V-G 模型下的基本土水参数为：饱和含水量  $\theta_s = 0.423$ ，残余含水率  $\theta_r = 0.045$ ，其它 V-G 模型计算参数  $a = 0.021 \text{ kPa}^{-1}$ ， $n = 1.27$ ， $m = 0.2126$ ，饱和渗透系数  $k_s = 4.74 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。

### 2.3 路基模型尺寸及工况设计

#### 2.3.1 路基模型的搭建

为防止路基模型在压实过程中在侧土压力的作用下无法填筑成型，选择在模型箱内填筑路基模型，模型箱的尺寸为：长 2.4 m，宽 0.8 m；高为 1.6 m，将其沿长度方向分隔为 3 个等大的箱子，每个箱子的横断面尺寸为 0.8 m×0.8 m，每个模型箱内的填土高度为 0.8 m。对路基进行分层填筑，在分层填筑时，严格控制每层的松铺厚度，填筑厚度采用侧壁画线的方法控制，利用击锤进行夯实，夯实后填土厚度为 10~15 cm，在路基模型下部设置一层由直径在 1~3 cm 之间的碎石或卵石均匀铺设而成的碎石持水层，厚度为 10 cm，用于加快地下水在路基模型中的渗流速度，并在碎石层的上、下方均铺设一层透水土工布，防止地基中的细粒土落入碎石孔隙中影响水的渗流，同时防止碎石在击实的过程中划破模型箱。

模型试验的主要监测仪器选用的是江苏海安县新晨机电厂生产的 MP-406FDR 土壤水分传感器，测量精度： $\pm 2\%$ ，量程： $0 \sim 100\% (\text{m}^3/\text{m}^3)$ 。含水率探头设置在 0.3、0.5、0.7 m 高度的位置，依次的编号从模型箱 1 到模型箱 3 自下向上为：1-1<sup>#</sup>、1-2<sup>#</sup>、1-3<sup>#</sup>、2-1<sup>#</sup>、2-2<sup>#</sup>、2-3<sup>#</sup>、3-1<sup>#</sup>、3-2<sup>#</sup>、3-3<sup>#</sup>，观测频率为 1 次/h，其中含水率，探头质量含水率与体积含水率之间的标定关系见图 4。填筑后的路基模型及各组元器件布置如图 5。

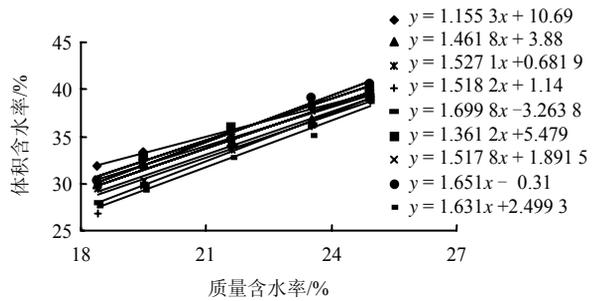


图 4 质量含水率与体积含水率的标定  
Fig.4 Calibration of weight water content and volumetric water content



图 5 路基模型实物图  
Fig.5 Physical figure of subgrade model

#### 2.3.2 路基模型试验设计

基于不同的路基设计工况搭建 3 种不同的路基模型，3 种工况分别为：

##### (1) 路基模型 1

地基+碎石层高度为 0.6 m，路基高度为 0.3 m，直接填筑地基和路基，不设防排水设施。

##### (2) 路基模型 2

地基+碎石层高度为 0.6 m，路基高度为 0.3 m，在地基和路基之间设置 0.1 m 的砂垫防水层，砂垫防水层从上到下由透水土工布、中粗砂砾、透水土工布铺设而成。

##### (3) 路基模型 3

地基+碎石层高度为 0.6 m，路基高度为 0.3 m，在地基和路基之间设置一层新型防排水材料，新型防排水材料由塑料排水板+塑料薄膜，用于阻隔毛细水的上升，并排除由于毛细水上升而进入排水板中的水。

#### 2.3.3 路基模型试验设计

通过调节水箱内的水位高度来控制路基模型内的地下水位高度，设计地下水位波动过程为：高度 0.1 m→高度 0.3 m→高度 0.5 m，

路基模型填筑的初始含水率为 21.5%，压实度为 85%，为了消除温度对试验结果的影响，试验要求在  $(25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$  的恒温试验室中进行。

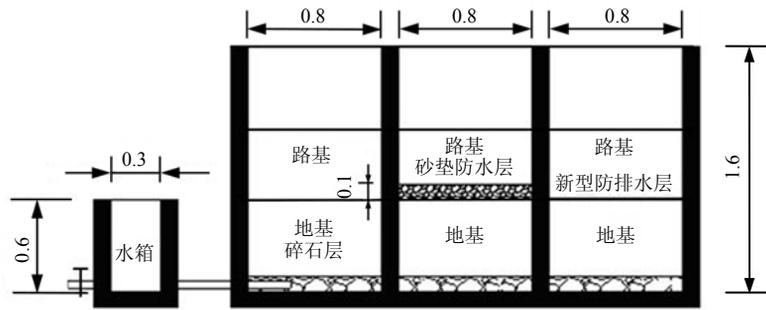


图6 路基模型断面示意图(单位: m)

Fig.6 Sketch of cross-section of subgrade model(unit: m)

### 3 路基模型试验结果分析

#### 3.1 试验第1阶段

路基模型填土含水率的监测工作从2010年7月7日开始进行,在模型试验的第1阶段,地下水位维持在0.1 m高度位置处,该阶段从7月7日持续到9月5日,持续时间为60 d,不同高度处的路基湿度变化如图7~9所示。

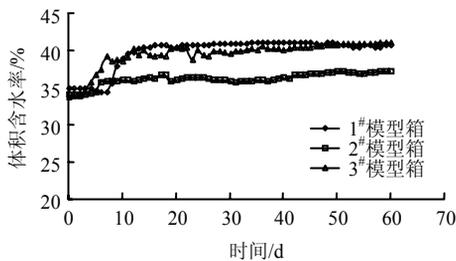


图7 0.3 m 高度处的土体湿度变化

Fig.7 Changes of soil moisture at the height of 0.3 m

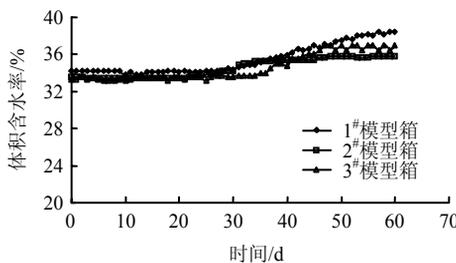


图8 0.5 m 高度处的土体湿度变化

Fig.8 Changes of soil moisture at the height of 0.5 m

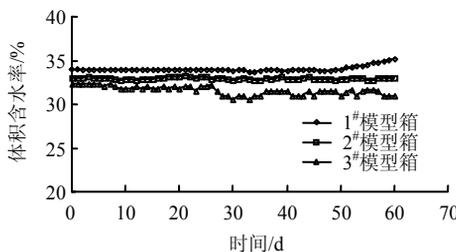


图9 0.7 m 高度处的土体湿度变化

Fig.9 Changes of soil moisture at the height of 0.7 m

图7~9给出了第1阶段不同路基高度处的湿度变化情况,分析可以看出:第1阶段,地下水位在0.1 m高度,在3个模型箱中的0.3 m高度处,路基湿度的变化趋势较为一致,在试验初期湿度均有所增加,随后湿度变化趋于平缓,变化量逐渐变小。这是由于路基填筑的初始含水率较大,因而在较短时间内路基湿度即达到了平衡,同时由于含水率探头的各异性,因而不同探头测得的监测数据有所不同,但同样高度位置处的路基湿度变化趋势较为一致。在0.5 m高度处,由于距离水位相对较远,因而不同模型箱内的土体湿度在初期未发生明显变化,随着时间的延长,毛细水上升进入了路基内部,路基湿度开始有所增加,并处于持续上升状态。在0.7 m高度处,3个模型箱内的土体湿度基本未发生变化,仅仅是1#模型箱内部由于未加入任何防排水材料,后期地下水在毛细作用下上升到该高度,土体湿度有少量的增加。2#、3#模型箱由于设置了砂垫层及新型防排水材料作为防排水基层,阻止了毛细水的上升,路基湿度未发生变化。可知在地下水位较低时,防水砂垫层及新型防排水材料起到了较好的防排水作用。

#### 3.2 试验第2阶段

进入试验的第2阶段,地下水位从0.1 m上升到0.3 m高度,该阶段从9月6日持续到12月14日,持续时间为100 d。

图10~12给出了第2阶段不同工况下的路基湿度变化情况,在该阶段,地下水位上升到了0.3 m高度位置处,因而在3个模型箱中,0.3 m高度处的土体在较短时间内即达到了饱和,并维持饱和状态不再变化;在0.5 m高度处,由于地下水位的上升,毛细水到达该高度的路径缩短,因而3个模型箱中的土体湿度不断增加,且增加幅度较为一致;在0.7 m高度处,1#路基模型内部土体湿度在100 d内从35.02%增加到了40.85%,在2#路基模型内部,

由于在第 1 阶段的防水砂垫层阻止了部分的毛细水进入路基内部，而由于防水砂垫层厚度小于毛细水在其中的上升高度，因而到了第 2 阶段，地下水位升高，砂垫层无法阻止毛细水进入上部土体，因而在后期从第 60 d 到 100 d 的时间内土体湿度变化较快，从 32.85%变化到 34.72%，而在 3<sup>#</sup>路基模型内部，由于设置了新型防排水材料作为防排水基层，阻止了毛细水进入上部土体，路基湿度基本未发生变化。

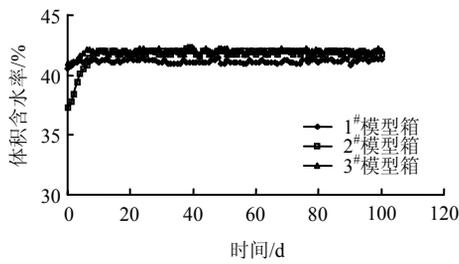


图 10 0.3 m 高度处的土体湿度变化

Fig.10 Changes of soil moisture at the height of 0.3 m

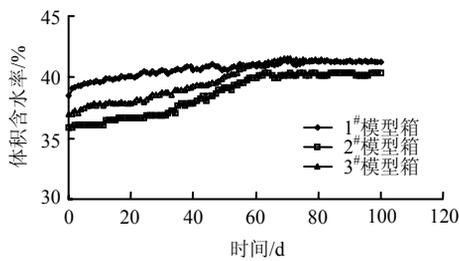


图 11 0.5 m 高度处的土体湿度变化

Fig.11 Changes of soil moisture at the height of 0.5 m

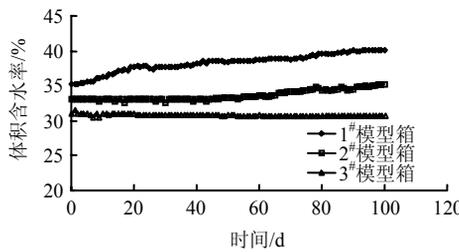


图 12 0.7 m 高度处的土体湿度变化

Fig.12 Changes of soil moisture at the height of 0.7 m

### 3.3 试验第 3 阶段

进入试验的第 3 阶段，地下水位从 0.3 m 上升到 0.5 m 高度位置，该阶段从 12 月 15 日持续到 3 月 24 日，持续时间为 100 d。

图 13~15 给出了第 3 阶段不同工况下的路基湿度变化情况，在该阶段，地下水位上升到了 0.5 m 高度位置处，3 个模型箱在 0.3、0.5 m 高度位置处的土体均达到了饱和并不再变化。在 1<sup>#</sup>模型箱中，由于毛细水在前 2 个阶段已经上升到了 0.5 m 高度位置处，同时因 0.7 m 高度位置处的土体湿度在初

始阶段有所增加，湿度已经变化到位，因而在该阶段路基湿度变化较小。在 2<sup>#</sup>模型箱中，虽然加入了防水砂垫层，但由于层厚设置较小，防水砂垫层未起到很好的防水效果，无法阻止毛细水上升进入路基内部，0.7 m 高度处的湿度产生了较大的变化，在 3<sup>#</sup>模型箱中，上部路基土体湿度基本未发生变化，反而由于环境蒸发作用，路基湿度有些微降低，说明新型防排水基层起到了较好的防排水效果。

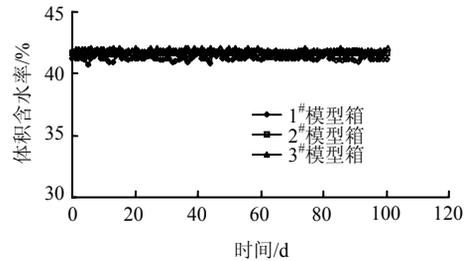


图 13 0.3 m 高度处的土体湿度变化

Fig.13 Changes of soil moisture at the height of 0.3 m

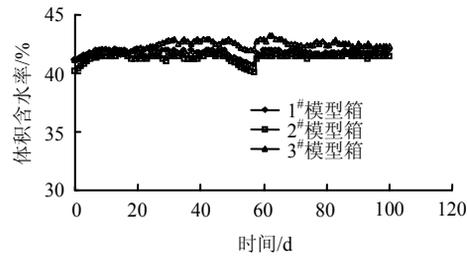


图 14 0.5 m 高度处的土体湿度变化

Fig.14 Changes of soil moisture at the height of 0.5 m

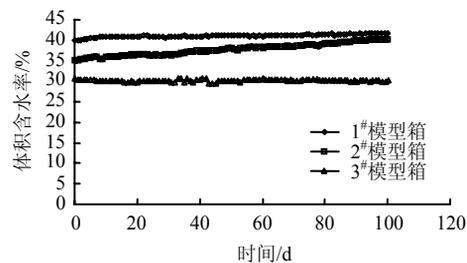


图 15 0.7 m 高度处的土体湿度变化

Fig.15 Changes of soil moisture at the height of 0.7 m

## 4 结 论

(1) 洪山黏土属于低液限黏土，其天然含水率远大于最优含水率。

(2) 随着地下水位的逐级升高，地下水位以上的土体含水率随时间呈现缓慢增加的趋势，距离地下水位较近的位置处路基湿度的增加幅度较大。

(3) 地下水位较低时，由于防水砂垫层内的初始吸力较小，当毛细水上升到砂垫层底部时，基质势与重力势已经达到平衡，此时，毛细水不再上升，

路基上部土体湿度未发生变化,当地下水位升高时,砂垫层厚度小于在其内部的毛细水上升高度,因而上部土体湿度有较大的增加。

(4) 加入了新型防排水材料后,路基模型的上部土体湿度没有明显的增加,反而在环境蒸发的影响下有所减小,说明了新型防排水材料有较好的防排水效果,能有效地阻止毛细水进入路基内部。

(5) 需要说明的是,由于含水率探头的各异性,路基的含水率变化情况及变化幅度有所不同,但试验获得的路基湿度的总体变化趋势较好,并且符合非饱和土毛细水上升的一般规律,说明试验是成功的,试验结果是合理可靠的。

### 参考文献

- [1] 李锐, 赵文光, 陈善雄. 基于 GEO-SLOPE 的膨胀土路基毛细水上升分析[J]. 华中科技大学学报, 2006, 23(增刊 1): 36—39  
LI Rui, ZHAO Wen-guang, CHEN Shan-xiong. Capillary water upward movement analysis of expansive soil roadbed based on GEO-SLOPE[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology**. 2006, 23(Supp. 1): 36—39.
- [2] 赵明华, 刘小平, 陈安. 非饱和土路基毛细作用分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 26—30  
ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ping, CHEN An. Analysis of capillary effect in unsaturated roadbed[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2008, 25(8): 26—30.
- [3] DRUMM E, MEIER R. Daily and seasonal variations in in-situ material properties[R]. [S.l.]: National Cooperative Highway Research Program, 2003.
- [4] 孙冬梅, 朱房明, 张明进. 库水位下降时的岸坡非稳定渗流问题研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1807—1812.  
SUN Dong-mei, ZHU Fang-ming, ZHANG Ming-jin. Research on unsteady seepage problem of bank slope due to drawdown of reservoir water level[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1807—1812.
- [5] 徐杨军, 张国民, 刘笑合, 等. 库水位下降的饱和-非饱和土坝渗流数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(3): 93—97.  
XU Yang-jun, ZHANG Guo-ming, LIU Xiao-he, et al. Numerical modeling of saturated-unsaturated earth dam during descent of reservoir water level[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2011, 33(3): 93—97.
- [6] 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 Yin-ren, SHI Wei-ming, 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.
- [7] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 降雨及库水升降作用下地下水浸润线简化求解[J]. 成都理工大学学报(自然科学报), 2006, 33(1): 90—94.  
FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, CHAI He-jun, et al. The simplified solution of phreatic saturation line under the actions of rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. **Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)**, 2006, 33(1): 90—94.
- [8] 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 and Engineering Geology**, 2007, (5): 46—49.
- [9] 吴琼, 林志红. 库水位下降时隔水底板倾斜的层状岸坡中浸润线的解析解[J]. 地质科技情报, 2007, 26(2): 91—92.  
WU Qiong, LING Zhi-hong. Analytic solutions for shallow water table in inclined and layered slope under drawdown condition[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2007, 26(2): 91—92.
- [10] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3025—3031.  
Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3025—3031.
- [11] 柳群义, 朱自强, 何现启, 等. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和和渗流分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 85—89.  
LIU Qun-yi, ZHU Zi-qiang, HE Xian-qi, et al. Unsaturated seepage analysis of the influence of water level fluctuation on pore water pressure of landslide in reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 85—89.