

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.22

库水位变化对库岸路基沉降的影响

刘文月¹,张林洪¹,陈加洪²,段翔²,戴学宇³

(1. 昆明理工大学电力工程学院,云南昆明 650500;2. 云南交通咨询有限公司,云南昆明 650031;
3. 中国水利水电建设工程咨询昆明有限公司,云南昆明 650051)

摘要:以某库区路基边坡为研究对象,建立库区边坡二维饱和-非饱和渗流模型,模拟水库不同工况下边坡渗流场演变规律并进行库岸路基的非饱和沉降计算,分析库水位变化对路基沉降或隆起的影响。分析表明,库岸路基边坡变形与库水位升降及其速率有关。当库水位上升时,库岸路基和边坡发生了隆起变形;当库水位下降时,库岸路基和边坡发生了沉降变形。且近库岸边坡和路基的沉降或隆起受库水位升降影响较大,远离库岸的边坡和路基的沉降或隆起受库水位升降影响较小,库岸路基沉降与库水位下降速率快慢成正相关关系。

关键词:库岸;非饱和分析;路基沉降;渗流

中图分类号:U213.1+57

文献标识码:A

文章编号:1000-3665(2016)03-0141-07

Influence of reservoir water level changes on the subgrade settlement of reservoir banks

LIU Wenyue¹, ZHANG Linhong¹, CHEN Jiahong², DUAN Xiang², DAI Xueyu³

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Yunnan Transportation Consulting Co., Ltd, Kunming, Yunnan 650031, China; 3. China Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: In this paper, a two-dimensional saturated-unsaturated seepage model of slope in reservoir is built, which is used to simulate the evolution course of the seepage, calculate the unsaturated settlement of reservoir bank roadbed and analyze the influence of reservoir water level changes on the subgrade settlement or uplift caused by the water level fluctuation. The results show that the subgrade deformation is related to the reservoir level fluctuation and its increasing or decreasing rate. When the reservoir water level rises, the reservoir bank subgrade and the slope has the uplift deformation. When the reservoir water level falls, the reservoir bank subgrade and the slope has the subsidence deformation. The subsidence or uplift of slope and subgrade close to the reservoir bank is greatly influenced by the reservoir water level fluctuation, and the subsidence or uplift of slope and subgrade which is far away from the reservoir bank is less influenced by the reservoir water level fluctuation. There is a positive correlation between the settlement of subgrade of the reservoir bank and the decreasing velocity of the reservoir water levels.

Keywords: reservoir bank; unsaturated analysis; subgrade settlement; seepage

目前工程中遇到的岩土问题大多情况下处于非饱和 和状态,饱和土固结理论中假设的渗流条件、连续性条

收稿日期:2015-07-23; 修订日期:2015-10-22

基金项目:云南省交通运输厅科技专项资金项目(云交科2014(A)16)

第一作者:刘文月(1991-),女,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:281248821@qq.com

通讯作者:张林洪(1962-),男,教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:zlh621112@126.com

件以及应力应变关系已不能完全适用于非饱和土。关于非饱和沉降计算,国内外学者开展了很多相应的研究,一些研究者认为在总沉降量中非饱和土区域的沉降量是不可忽略的^[1-2]。

国外从20世纪60年代开始研究非饱和土固结问题,应用最为普遍的是Fredlund固结理论。国内非饱和土的固结理论研究是20世纪90年代的热点,缪林昌等^[2]提出了非饱和土简化固结理论和耦合水力特性的非饱和土应力应变本构模型;刘俊新等^[3]以单轴压缩红层蠕变试验为基础,提出了非饱和单变量理论、路堤沉降计算理论;杨明辉等^[4]等引进统计损伤理论,建立了非饱和土统计损伤本构模型。在数值和解析计算方面,张崇磊等^[5]结合现场监测及室内固结试验,采用数值分析的方法研究了非饱和中等压缩性土地基的沉降变形规律;李纪伟^[6]等考虑非饱和土渗流场与应力场的耦合效应运用同伦分析法求解出了非线性耦合场的一个关于基质吸力的解析解。

目前对库水位以不同速率升降而引起的非饱和土库岸边坡路基的沉降特性研究比较少,而了解库水位变化对路基沉降的影响及破坏规律从而采取必要的工程措施,对保障库岸路基安全具有十分重要的意义。所以本文以库区路基边坡为研究对象,采用有限元软件GEO-Studio中的SEEP/W及SIGMA/W模块对依托工程进行非饱和和有限元仿真计算,研究库水位在不同工况下升降对边坡路基变形的影响。

1 原理

1.1 二维饱和和非饱和渗流控制方程

饱和土是由两相组成,即固相及液相,而非饱和土是指在土骨架形成的孔隙中含有水和空气的土,所以通常情况下定义非饱和土由三相组成,即固相、液相、气相,但目前认为非饱和土中还有第四相的存在,即收缩膜。浸润线将渗流区域分为饱和区和非饱和区,在浸润线以上为非饱和区,孔隙水压力为负;在浸润线以下为饱和区,孔隙水压力为正。非饱和土中渗流也服从达西定律,但与饱和土中渗流不同的是非饱和土的渗透系数不是常量,非饱和土中水只能在水所占有的空间中流动,而不能在空气所占有的空间流动。可见,含水量越大,水的流动空间越大,渗透系数越大,所以渗透系数是含水量或饱和度的函数,或是基质吸力的函数,该函数常被称为渗透性函数^[7]。

饱和-非饱和渗流是指将饱和区地下水运动与非饱和区土壤水运动用统一的控制方程来描述。对于瞬

态渗流问题,当假定单元体没有受到外荷载作用且非饱和和气相连续不变时,单位体含水量的改变仅仅是孔隙水压力变化量的函数,对于各向异性的二维饱和-非饱和渗流控制方程为^[8-9]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = m_2^w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_x, k_y ——水平和垂直方向渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

ρ_w ——水的密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

m_2^w ——与基质吸力变化有关的水的体积变化系数。

1.2 非饱和土变形的机理与本构关系

对于饱和土可利用饱和土的有效应力原理来计算土体有效应力增大引起的压缩变形量,见式(2)。对于非饱和土,很多学者提出了相应的有效应力公式,其中Bishop提出的非饱和土有效应力公式最为流行,见式(3)。

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

式中: u_a ——孔隙气应力/kPa;

u_w ——孔隙水应力/kPa;

χ ——有效应力参数。

由于非饱和土有效应力原理还存在一些缺陷,所以目前对于非饱和区多采用非饱和土的体变本构模型分别计算土体由于基质吸力增大而引起的收缩或膨胀变形量和净平均应力减小而引起的回弹变形量。1977年,Fredlund等提出了非饱和土半经验的本构关系,用三个独立变量中的任意两个进行描述。假定土为各向同性,线弹性材料,其应力状态变量 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 表示的本构关系见式(4)、(5)^[10]。

弹性形式:

$$d\varepsilon_v = 3\left(\frac{1-2\mu}{E}\right)d(\sigma_{\text{mean}} - u_a) + \frac{3}{H}d(u_a - u_w) \quad (4)$$

式中: H ——与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 变化有关的土结构弹性模量;

σ_{mean} ——平均总法向应力, $(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ 。

压缩形式:

$$d\varepsilon_v = m_1^s d(\sigma_{\text{mean}} - u_a) + m_2^s d(u_a - u_w) \quad (5)$$

式中: m_1^s ——与净正应力有关的体积变化系数, $m_1^s = 3(1-2\mu)/E$;

m_2^s ——与基质吸力有关的体积变化系数, $m_2^s = 3/H$ 。

饱和区的变形主要是受孔隙水压力的影响,孔隙水压力(u_w)增大,土体骨架受到的有效应力减小,土体发生膨胀变形;反之,土体发生收缩变形。饱和土变形与非饱和土变形的区别为,基质吸力的变化会引起非饱和土的变形。基质吸力为孔隙气压力与孔隙水压力之差,处于自然环境中的非饱和土,普遍认为土中的孔隙与大气相连,则孔隙气压力等于大气压,所以基质吸力是由孔隙水压力决定的,也就是与含水量或饱和度相关。含水量或饱和度降低,基质吸力增大使得土体发生收缩变形;反之土体将发生回弹变形。对于库岸边坡来说,当库水位下降时部分饱和土区域转变为非饱和区域及原非饱和区土体饱和度减小,使饱和区有效应力增大,非饱和区基质吸力增大,从而导致沉降变形。当库水位上升时,部分非饱和土区域转变为饱和区域及原非饱和区土体饱和度增加导致饱和区的有效应力降低,非饱和区基质吸力减小,从而导致隆起变形。

2 计算模型

用有限元软件进行非耦合分析来模拟库水位变化时路基的沉降变形。非耦合分析中,先使用SEEP/W求解瞬态渗流方程,得到孔隙水压力,然后将孔隙水压力的计算结果作为水力边界条件赋予到SIGMA/W中,求解平衡方程计算得到每一时段土体应力应变的变化。按如下步骤进行路基沉降数值模拟:(1)进行原河床水位分析,将其作为之后分析的初始条件;(2)在SEEP/W模块模拟库水位变化时渗流场的变化;(3)将渗流分析结果作为已知的水力边界条件,分析库岸路基沉降变形规律。

本文以某电站水库库岸路基为例进行非饱和和沉降分析。电站位于云南省境内金沙江中游段,库岸为典型高山峡谷“V”字形的河谷阶地地形。2012年1月1日电站正式关闸蓄水,蓄水6个月,库水位由原河道水位1353.5 m上升至正常蓄水位1418 m。在常水位1418 m下运行一段时间后又泄水至死水位1398 m,库岸岩层碎石1和碎石2颗粒分布规律见表1。由于库水位的升降,库岸边坡渗流场发生变化,库岸路基发生了沉降变形,对公路的稳定性造成了影响。以库区公路第五勘探断面为计算剖面,模型尺寸高为188 m,宽为240 m,坐标原点为河床中心点, x 方向为水平指向山体, y 方向为垂直向上。结合实际工程采用三角形和四边形单元,将网格划分为9740个节点,9643个单

元,模型如图1所示。

表1 碎石土粒径组成

颗粒级配/mm	$200 \geq d > 20$	$20 \geq d > 2$	$2 \geq d > 0.5$	$0.5 \geq d > 0.075$	$d \leq 0.075$
碎石1	81.5	5.9	0.8	1	10.8
碎石2	80.4	6.5	0.9	1.2	11

在SEEP/W模块中通过改变边界条件来反应库水的升降情况,库水位以上为零流量边界,库水位以下为定水头边界,右侧边界(山体侧)及底部边界为不透水边界。根据电站的运行情况,拟定了2种工况(表2)。在SIGMA/W模块中边界的约束条件,主要是位移边界条件,指定模拟区底部边界 x 和 y 方向位移为0,右侧边界(山体侧) x 方向位移为0,其余边界为自由边界。

模型共划分了3个材料分区,本文采用反演法,结合工程勘察和钻孔资料,并与钻孔勘探得到的地下水位高程相互验证,获得饱和渗透系数,其它土力学参数由工程勘察土工试验及相关文献获得,边坡材料参数取值见表3。通过土体的粒径分布曲线确定体积含水量函数,碎石1与碎石2的土水特征曲线见图2(a);通过Van Genuchten模型预测非饱和渗透系数函数,其渗透系数曲线见图2(b)。

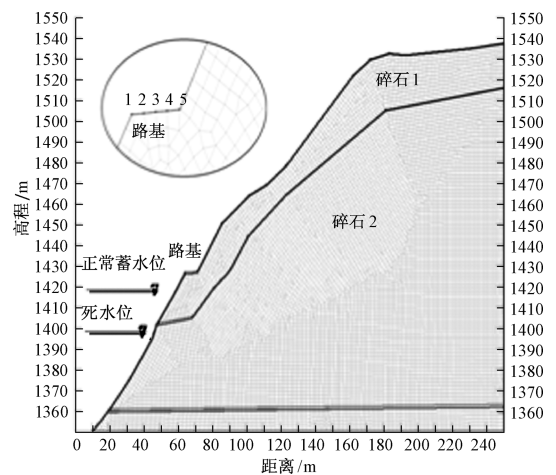


图1 库区边坡模型

Fig. 1 Model of the slope in the reservoir

3 数值模拟与分析

3.1 库区边坡渗流场

模拟工况1与工况2两种情况下边坡的渗流演变规律,得到了蓄水期和恒定水位运行期(图3),以及泄

水期水位下降速率分别为 4 m/d 和 2 m/d 的边坡体浸润线随时间变化。

表 2 计算工况

Table 2 Calculation conditions

工况	工况时期	工况条件
1	蓄水期	库水位上升并稳定运行一段时间,0~180 d 水位从 1353.5 m 上升到 1418 m,180~700 d 水位高程保持为 1418 m
2	泄水期	库水位以不同速率下降,下降速率分别为 4 m/d、2 m/d,降幅为 20 m,库水位降到死水位后稳定运行至 850 d

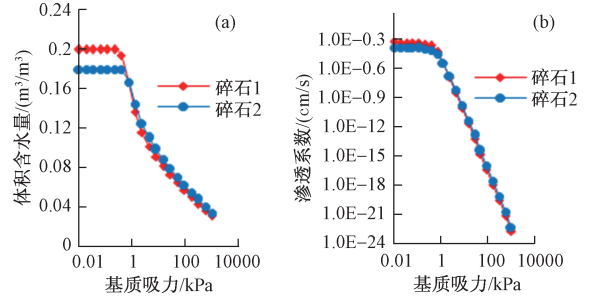


图 2 碎石 1 及碎石 2 土-水特征曲线和渗透函数曲线
Fig. 2 Soil-water characteristic curve and permeability function curve of gravel 1 and gravel 2

表 3 边坡材料参数取值

Table 3 Material parameters of the slope

材料	天然容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和容重 $\gamma_{\text{sat}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	有效黏聚力 c' / kPa	有效内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$	饱和渗透系数 $k_s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	有效弹性模量 $E' / (\text{kPa})$	泊松比
碎石 1	19.8	20.4	13.3	30.7	9.26×10^{-4}	48000	0.27
碎石 2	21.4	21.9	15.3	30.7	2.32×10^{-4}	62000	0.27
玄武岩	26.7	27.1	1420	45.3	9.26×10^{-5}	4.8×10^7	0.2

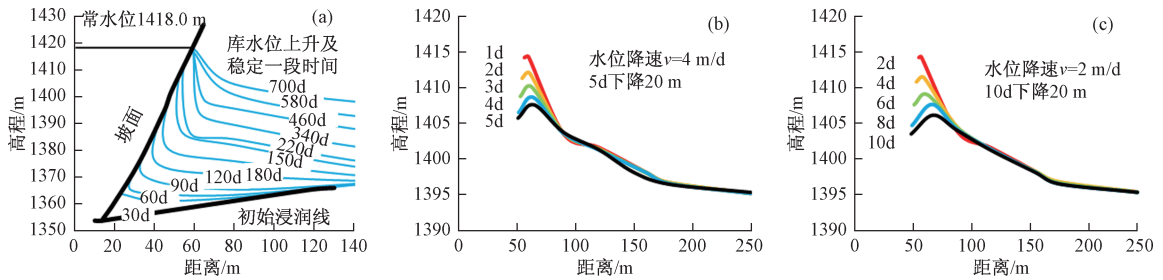


图 3 库区边坡浸润线变化图

Fig. 3 Change in the saturation line of the slope in the reservoir

3.2 库水位变化对边坡竖向变形的影响规律

本文主要研究不同工况下,库岸路基及边坡竖向位移变化规律。竖向位移以竖直向上(隆起)为正,竖直向下(沉降)为负。

从图 4 的库水位随时间变化及 $y = 1438 \text{ m}$ 处横剖面竖向位移全过程曲线可以看出,随着库水位上升,库岸坡体发生相对的隆起变形;随着库水位下降,库岸坡体发生相对的沉降变形。靠近库岸的坡体相对隆起或沉降值较大,而远离库岸的坡体相对隆起或沉降值较小,在同一高程上,会产生不均匀的相对隆起或沉降差值。

蓄水期(0~180 d)结束后库岸边坡的最大竖向位移为 19.10 cm,为正值。正常运行期(180~700 d)结束后库岸边坡的最大竖向位移为 37.78 cm,为正值,相比蓄水期结束增加了 18.68 cm,可见,库岸边坡发生了隆起变形。结合区域历史调查及区域地形图发现,研究区域边坡正位于古滑坡、古地震遗址,由古滑

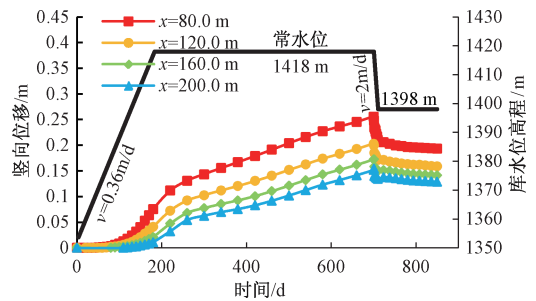


图 4 库水位随时间变化及 $y = 1438 \text{ m}$ 处横剖面竖向位移全过程曲线

Fig. 4 Change in the reservoir water levels and the whole process of the vertical displacement in cross section of $y = 1438 \text{ m}$

坡层堆积而形成现在的边坡是不稳定的,本文的计算结果符合实际。由图 5 可知,隆起值随着时间的延长而增加,库水位上升及稳定一段时间期间,库岸隆起速率由大逐渐减小。在相同的时刻靠近边坡坡面点的隆

起位移大于靠近边坡后缘的点,且越靠近边坡坡面的点隆起曲线斜率越大,达到稳定所需的时间越短,隆起变形由坡前逐渐向坡后发展,与渗流场的发展一致。比较水位上升区域(图5),可以发现计算点所在高程越高,竖向位移越大,即表层土竖向位移大于深层土竖向位移,符合一般规律。结合图2(a)分析其原因,随着库水位的上升,坡内的地下水头低于近坡面的坡外水头,形成水头差,产生渗流力,由坡外向坡内渗流,坡体内浸润线逐渐抬升,饱和区范围增大,非饱和区范围缩小,且饱和区有效应力减小,非饱和区的含水量增加,孔隙水压力逐渐增大,基质吸力减小,坡体产生膨胀变形;但在坡体吸水产生膨胀的同时,由于土体渗流

的滞后效应,加之土体受到上覆土重力压力的影响,所以边坡膨胀变形存在以下规律:靠近水库的坡体地下水上升快且水位高,饱和区有效应力及非饱和区基质吸力减小较快且减小值较大,并且受到的上覆土压力较小,所以膨胀值增加较大较快;而同一高程坡体内部的土体,由于所在位置的地下水头较低且上升较慢,饱和区有效应力及非饱和区基质吸力减小较小且减小较慢,并且上覆土体较厚,受到的上覆土压力较大,因而其膨胀值较小且膨胀增加速率较小。对于同一高程的路面而言,靠近库岸的位置的隆起值较大,靠近山体的位置的隆起位移较小,这样就产生了不均匀隆起变形,且存在隆起位移差,可能会导致路面开裂。

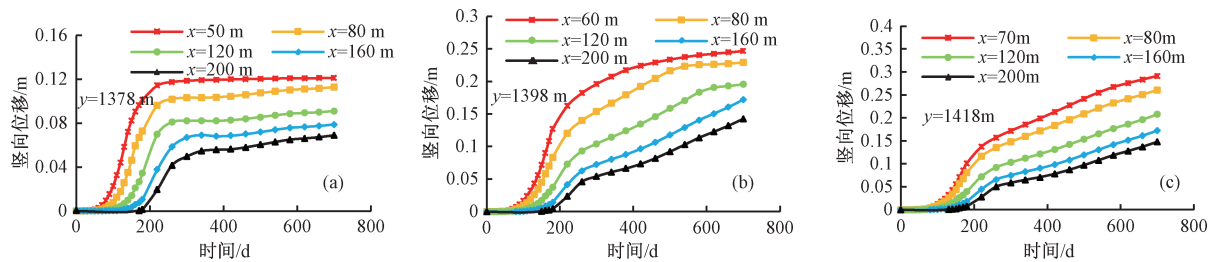


图5 库水位上升及稳定一段时间期间边坡各位置点竖向位移随时间变化图

Fig. 5 Change in the vertical displacement of the slope during the period of reservoir water rise and stable operation

图6所示库水位以2 m/d的速率下降了20 m, 710 ~ 850 d库水位保持恒定,图中竖向位移值并未考虑0 ~ 700 d的位移累积值。710 d结束后库岸边坡的最大沉降值为8.25 cm, 850 d结束后库岸边坡的最大沉降值为10.1 cm。由图可以看出,库水位下降及稳定一段时间,沉降值随着时间的延长而增加,库岸沉降速率逐渐减小;在相同的时刻靠近坡面点的沉降位移大于靠近边坡后缘的点,且越靠近边坡坡面的点沉降曲线斜率越大,达到稳定所需的时间越短,沉降变形由坡前逐渐向坡后发展,与渗流场的发展一致。结合图3(c),路基及坡体在库水位下降时,坡内靠近边坡处的地下水头高于坡外及坡体深处的水头,形成了向坡外及坡体深处渗流的渗流场。随着渗流场的发展,部分饱和区变为非饱和区,非饱和区增大,饱和区减小,孔隙水压力逐渐减小,饱和区有效应力减小,非饱和区域基质吸力增大,使坡体产生收缩变形,从而导致沉降。但在坡体沉降的同时,由于土体渗流的滞后效应,库水位下降时沉降变形存在以下规律:靠近水库的坡面地下水水位下降值较大较快,基质吸力增大较快且增大值较大,所以沉降值增加较大较快;而同一高程坡体内部的土体,受库水位变化影响较小,由于所在位置的孔隙水压力下降值较小且下降较慢,基质吸力增大值较小

且增大较慢,因而其沉降值较小且沉降增加速率较小。对于同一高程的路面而言,靠近库岸位置的沉降值较大,靠近山体位置的沉降值较小,这样就产生了不均匀沉降,从而导致路面开裂。

可以推论,在库水位不断的上升和下降作用下,靠近水库的坡体的升、降值较大较快;而靠近山体的坡体其升、降值较小较慢。这样持续循环,可能导致坡体和路面开裂,降雨或库水更容易通过裂缝向坡体内部渗流,导致坡体的软化,加之当库水位降低时可能产生水压推力的作用,导致坡体产生变形破坏。这就从非饱和和沉降或隆起分析解释了为什么库岸的坡体容易产生变形和破坏。

3.3 库水位变化对路基沉降变形的影响规律

通过GEO-studio的SIGMA/W对各工况进行位场模拟,以图2路基左侧为起点,在路基上选取5个计算点,得到工况1及工况2下各计算点的沉降曲线(图7~9)。

由图7可知,工况1时路面上各点都为隆起,且随着时间的增加而增加,在相同的时刻,离库岸近的点隆起值大于远离斜坡表面的点。

由图8可知,工况2时路面上各点均为沉降,并随着时间的增加而增加,在相同的时刻,离库岸表面近的

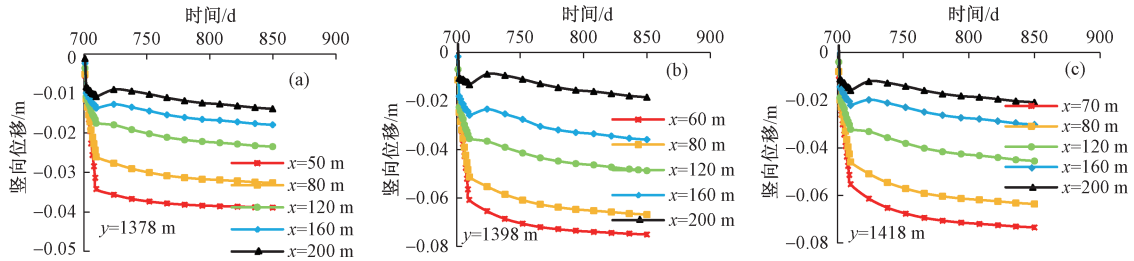


图 6 库水位下降及稳定一段时间期间边坡各位置点竖向位移随时间变化图

Fig. 6 Change in the vertical displacement of the slope during the period of drawdown of reservoir water levels and stable operation

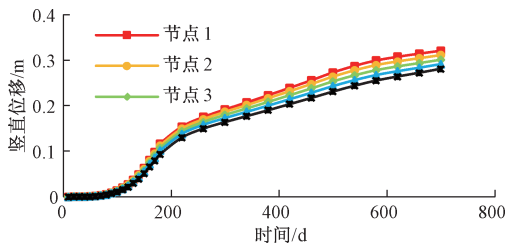


图 7 工况 1 时的路基各点隆起曲线

Fig. 7 Uplift curve of each point of subgrade under the condition 1

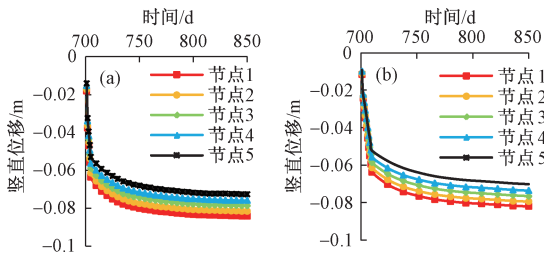


图 8 工况 2 库水位以 4 m/d (a) 及 2 m/d (b) 速率下降时路基各点沉降曲线

Fig. 8 Settlement curve of each point of subgrade at the decreasing rate of the reservoir water levels of (a) 4 m/d and (b) 2 m/d under condition 2

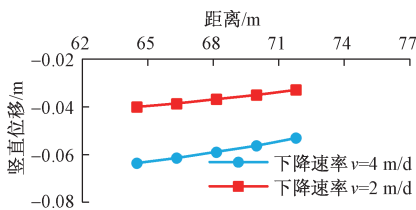


图 9 第五天路基各点沉降变形

Fig. 9 Settlement deformation of each point of subgrade in the fifth day

点沉降值大于远离斜坡表面的点。在库水位下降期间,曲线斜率较大,沉降位移增长较快。当库水位保持为死水位不变时,曲线斜率逐渐减小,沉降位移增长逐渐减慢并趋于一个稳定值。

由图 9 可知,在相同的时间段,库水下降速率越大,路基发生的沉降变形值越大。路基发生了不均匀沉降,近似呈线性变化,从靠山一侧至边坡表面路基沉降逐渐增大,主要是由于靠近边坡前缘的点受库水位变化影响较大,由于边坡土体渗透的滞后效应,越靠近边坡后缘沉降(隆起)滞后效应越明显,受库水位的影响越小,相应的沉降值越小。可见,库岸路基路面沉降与库水位下降速率快慢成正相关关系。

4 结论

(1)库岸路基及坡体地下水位升高,饱和区范围增大,非饱和区范围缩小,孔隙水压力增大,饱和区有效应力减小及非饱和区基质吸力减小,从而引起路基及坡体产生膨胀变形,地面隆起。越靠近水库,隆起变形值越大,反之越小,产生不均匀隆起变形,可能导致库岸或路基开裂。

(2)库水位降低,原来的路基及坡体地下水位降低,饱和区范围减小,非饱和区范围增大,孔隙水压力减小,饱和区有效应力增大及非饱和区基质吸力增大,沉降变形增加。越靠近库岸沉降变形增加得越大较快,反之越小较慢,产生不均匀沉降变形,可能导致库岸或路基开裂。

(3)库岸路基沉降与库水位下降速率快慢成正相关关系。库水位下降期间,库水下降速率越大,在相同的时间,路基及坡体发生的沉降变形值越大,路基发生了近似线性变化的不均匀沉降,且越靠近库岸路基及坡体沉降越大。

参考文献:

[1] 蓝晓峰,张焕晓. 地下水位下降饱和 - 非饱和土沉降简化计算[J]. 广东公路勘察设计, 2013(4): 30 - 32. [LAN X F, ZHANG H X. Simplified calculation of saturated- unsaturated soil settlement during water level fall [J]. Guangdong Highway Survey and

- Design, 2013, (4): 30 - 32. (in Chinese)]
- [2] 缪林昌, 崔颖. 非饱和土的固结与水力特性研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊): 38 - 42. [MIAO L C, CUI Y. Study on consolidation and hydro-mechanics behaviors of unsaturated soils [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Sup): 38 - 42. (in Chinese)]
- [3] 刘俊新, 杨春和, 谢强, 等. 基于流变和固结理论的非饱和红层路堤沉降机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1 295 - 1 305. [LIU J X, YANG C H, XIE Q, *et al.* Settlement mechanism of unsaturated red layers embankment based on rheology and consolidation theories [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1 295 - 1 305. (in Chinese)]
- [4] 杨明辉, 孙龙, 赵明华, 等. 基于统计损伤理论的非饱和土简易本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 43 - 48. [YANG M H, SUN L, ZHAO M H, *et al.* A simplified unsaturated soil constitutive model based on statistical damage theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 43 - 48. (in Chinese)]
- [5] 张崇磊, 蒋关鲁, 吴丽君, 等. 非饱和中等压缩性土地基沉降预测研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 50 - 56. [ZHANG C L, JIANG G L, WU L J, *et al.* Investigation on unsaturated soil of medium-compression settlement prediction [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 50 - 56. (in Chinese)]
- [6] 李纪伟, 汪华斌, 张玲. 非饱和土应力场与渗流场耦
- 合一维解析求解与参数分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 57 - 61. [LI J W, WANG H B, ZHANG L. One - dimensional analytical solution and parameter analysis of the coupled stress field and seepage field in unsaturated soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 57 - 61. (in Chinese)]
- [7] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1 - 14. [WU H W, CHEN S Y, PANG Y W. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1 - 14. (in Chinese)]
- [8] 卢宁, 力科思. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯龙, 简文星, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012: 269 - 273. [Ning L, Likos W J. Unsaturated soils mechanics [M]. WEI C F, HOU L, JIAN W X, trans. Beijing: Higher Education Press, 2012: 269 - 273. (in Chinese)]
- [9] John Krahn. Seepage modeling with SEEP/W[M]. GEO-SLOPE International Ltd, 2004: 141 - 142.
- [10] 弗雷德隆德 D G. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 415 - 421. [Fredlund D G. Unsaturated soils mechanics [M]. CHEN Z Y, ZHANG Z M, CHEN Y J, *et al.*, trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997: 415 - 421. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华

(上接第 117 页)

- [3] 范秋雁, 杨钦杰, 朱真. 泥质软岩地基水平抗力系数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 137 - 142. [FAN Q Y, YANG Q J, ZHU Z. Study of foundation horizontal resistance coefficient for argillaceous soft rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup2): 137 - 142. (in Chinese)]
- [4] 王庶懋, 徐磊. 某沿海电厂大直径嵌岩灌注桩的 m 值与水平位移关系探讨[J]. 武汉大学学报, 2013, 46(增刊): 256 - 259. [WANG S M, XU L. Discussion on relationship between value of m and horizontal displacement for large - diameter rock-socketed pile in a coastal power plant [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(Sup): 256 - 259. (in Chinese)]
- [5] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 184 - 190. [ZHAO C F, WANG W Z, ZHAO C, *et al.* Lateral bearing capacity of single piles under vertical and moment load in sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 184 - 190. (in Chinese)]
- [6] 张进林, 沈军辉. 单桩水平静载试验及成果参数取值问题初探[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 100 - 103. [ZHANG J L, SHEN J H. Primary study on single-pile horizontal static-load experiment and parameters in result [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(4): 100 - 103. (in Chinese)]
- [7] 董辉, 李智飞, 傅鹤林, 等. 残坡积碎石物理特征与持水性的空间变异性研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 71 - 78. [DONG H, LI Z F, FU H L, *et al.* A Study of the spatial variability of physical characteristics and water-holding characteristics of the residual diluvia gravel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 71 - 78. (in Chinese)]
- [8] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123 土工试验方法标准[S]. [GB/T 50123 The Ministry of Construction of People's Republic of China. Soil Test Method Standard[S]. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华