

冷清公路水库库岸桩锚加固后的渗流变化规律

朱江林¹, 张林洪¹, 彭邵勇², 李冰¹, 胡乐文¹

(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)

摘要: 以云南冷清公路岸坡为研究对象, 建立库区边坡二维饱和-非饱和渗流模型, 模拟锚杆(索)和桩加固后不同工况下岸坡渗流场演变规律, 分析岸坡加固后浸润线及孔隙水压力变化规律。结果表明: 相对未加固岸坡而言, 由于加固区的渗流阻力增大及其导致的渗流路径改变, 加固后岸坡内浸润线形状、位置分布和孔隙水压力分布发生了变化。从桩加固与锚加固的情况对比看, 桩加固的阻渗作用较锚加固的阻渗效果差些。岸坡内孔隙水压力受库水位的升降、分析位置到库水或浸润线的距离、加固区渗透系数的降低及其渗透系数降低区的面积和形状等的影响, 加固后岸坡滞后效应更明显。离库水面较远处, 其孔隙水压力几乎不受库水位变化和加固措施的影响。

关键词: 水库岸坡; 锚加固; 桩加固; 渗流变化; 浸润线; 孔隙水压力

中图分类号: TV697.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0205-07

Seepage change pattern of Lengqing Highway Reservoir bank after pile and anchor reinforcement

ZHU Jianglin¹, ZHANG Linhong¹, PENG Shaoyong², LI Bing¹, HU Lewen¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Transportation Consulting Company, Kunming 650031, China)

Abstract: Taking the bank slope of the Lengqing Highway in Yunnan as the research object, a two-dimensional saturated-unsaturated seepage model of slope in reservoir is built, and is used to simulate the seepage regular pattern of shore slope under different conditions after anchor and pile reinforcement. The changing rule of the infiltration line and pore water pressure after the reinforcement of the bank slope is analyzed. Results show that the shape and location of infiltration line and the distribution of pore water pressure in the reinforced reservoir slope have changed compared with no reinforcement slope, as the seepage resistance increases and the seepage path changes in the reinforcement area. Compared with the case of anchor reinforcement, the seepage resistance effect of the pile is less than that of the anchor reinforcement. The pore water pressure in the bank slope is controlled by the water level fluctuation, the distance from analyzed location to the reservoir or the infiltration line, the decrease degree and area and shape of osmotic coefficient, and the lag effect of the reinforced bank slope is more obvious. In the position far away from reservoir surface, the pore water pressure is almost not affected by the water level and reinforcement measures.

Key words: reservoir bank slope; anchor reinforcement; pile reinforcement; seepage variation; saturation line; porewater pressure

1 研究背景

水库岸坡是常见的非饱和边坡, 库水位的升降

和降雨改变岸坡土体饱和度, 改变岸坡内浸润线和孔压场, 从而影响岸坡的稳定^[1-2]。Richards^[3]把达西定律引入非稳定渗流中, 使浸水边坡的非稳定渗流研究更进一步, 也使渗流问题的研究更加完善。

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 云南省交通运输厅科技项目(云交科2014(A)16)

作者简介: 朱江林(1992-), 男, 云南红河人, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程及岩土工程。

通讯作者: 张林洪(1962-), 男, 云南昆明人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水利水电工程、岩土工程和公路工程。

Topp 等^[4]在 Richards 方程基础上提出非饱和渗透系数是压力水头或含水量的函数,为达西定律应用到饱和-非饱和渗流分析提供了理论依据。

Neuman^[5]提出的有限元数值解法把饱和区土体和非饱和区土体作为一个整体求解,为饱和-非饱和渗流数值分析研究奠定了基础。对库岸路基边坡进行稳定性研究时,探索水在边坡内的渗流效应,分析渗流作用下岩土体内的浸润线及孔隙水压力变化规律十分重要。Schnellmann 等^[6]建立边坡物理方程模拟水位上升时边坡的渗流与破坏,发现坡内浸润线上升因为非饱和土低渗透率的影响被延迟,不同的边坡几何外形、土体类型和边界条件,浸润线上升延迟效果不同。Yan Zongling 等^[7]研究水位变化对坡内浸润线变化的影响,发现坡内浸润线的变化与测压点距离坡面与水面交点的距离、土体的饱和状态和水位变化速率等有关。刘博等^[8]建立库水位下降时库岸路基的数值模型,变化非饱和土体中 3 个待定参数 a, m 和 n , 分析土体不同的非饱和渗流特性对边坡内浸润线位置和安全系数的影响。谢新宇等^[9]基于 Boussinesq 方程确定边坡浸润线,研究了带挡墙路基的稳定性,发现库岸公路边坡的稳定性与库水位变化幅度及变化速率有关;库水位变化对挡土墙的稳定性存在影响。张文杰等^[10]分析饱和渗透系数、土水特征曲线斜率对水位升降过程中边坡安全系数的影响,得到渗透系数较小和较大时安全系数变化规律不同。何忠泽等^[11]研究库水位变化时滑床砂卵石层渗透性对滑坡稳定性的影响,发现库水位上升阶段、高水位运行阶段和下降初期,老滑坡各级滑坡的稳定性系数随砂卵石层渗透系数的增大而减小;库水位稳定在一定值时,老滑坡整体稳定性随渗透系数的增大而增大,渗透系数的变化对次级滑体和三级滑体的稳定性影响不明显。

掌握岸坡加固后的渗流变化规律,能够更好地研究岸坡加固方法与措施的加固机理,从而采取科学合理的加固措施,对保障岸坡安全非常重要。目前对岸坡内渗流所进行的研究大多为岸坡未加固或者是挡墙加固时库水位变化及渗透系数对岸坡浸润线和稳定性的影响,而对岸坡桩加固和锚加固后,加固措施对岸坡渗透规律影响的研究较少。为此,本文以冷清公路岸坡为研究对象,采用有限元软件 GEO-Studio 中的 SEEP/W 模块进行库区边坡二维饱和-非饱和渗流计算,分析岸坡锚杆(索)和桩加固后浸润线及孔隙水压力变化规律。

2 研究方法

2.1 SEEP/W 计算原理

SEEP/W 的理论公式是基于饱和与非饱和土体渗流的达西定律。达西定律最初是基于饱和土,但研究表明达西定律也可用于非饱和土渗流,区别之处在于非饱和渗流的渗透系数不再是常数,而是随着含水量的变化而变化,孔隙水压力在非饱和土中表现为负值^[12]。饱和-非饱和渗流控制方程就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,在饱和区只存在水的运动,在非饱和区同时存在空气和水两种流体的运动,二维渗流的一般控制微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: θ 为单位体积含水量, m^3/m^3 ; t 为时间, s ; H 为总水头, m ; Q 为施加的边界流量, m^3/s ; k_x, k_y 分别为 x, y 向的渗透系数, m/s 。

若土体为饱和渗流,土体含水率是饱和含水率,渗透系数是饱和渗透系数,假设水没有压缩性,则 $\partial \theta / \partial t = 0$ 。体积含水量的改变依赖于应力状态的改变和土的性质,饱和与非饱和情况下的应力状态都可用两个应力状态变量 $\sigma - u_a$ 和 $u_a - u_w$ 来表达,其中 σ 是总应力, u_a 是孔隙气压力, u_w 是孔隙水压力。在总应力不变(即土体未受到外荷载作用)的条件下,且假定瞬态问题孔隙气压为恒定的大气压,则单位体积含水量的改变只取决于 $u_a - u_w$ 的改变。在 u_a 恒定时,单位体积含水量的变化仅是孔隙水压力变化量的函数^[13]。饱和-非饱和渗流控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

在控制方程的基础上采用加权余量的伽辽金方法,得到二维渗流的有限元方程式^[14]:

$$\begin{aligned} & \tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \\ & \tau \int_A (\lambda < N >^T < N >) dA \{H\}, t \\ & = q \tau \int_L (< N >^T) dL \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $[B]$ 为梯度矩阵; $[C]$ 为单元渗透系数矩阵; $\{H\}$ 为节点水头向量; $< N >$ 为插值函数向量; q 为穿过单元边界的单位流量; τ 为单元厚度, m ; t 为时间, s ; λ 为存储项,瞬态渗流时为 $m_w \gamma_w$, m_w 为储水曲线的斜率, γ_w 为水的重度, kN/m^3 ; A 为在单元面积上的求和符号; L 为在单元边界长度上的求和符号。

2.2 计算模型

冷清公路为云南省红河州冷墩至清水河二级公路,起点至 K42 + 000 范围的路基均在马堵山水库库区范围,形成库岸路基。水库蓄水后, K0 + 000 ~ K42 + 000 段水位变化对公路工程造成了影响,导致局部路基出现开裂,下边坡失稳、坍塌。另在水库蓄水后天然地层的地下水位升高、岸坡坡体含水量增大和变化,导致公路所在坡体岩土体产生膨胀或收缩,使得路基出现沉陷和向下滑移、路面开裂破坏等公路病害。根据冷清公路的具体情况,选择具有代表性的岸坡概化成计算边坡剖面,如图 1 所示。公

路路面高程为 110 m,公路宽度为 7 m。公路下部库岸边坡高 65 m,坡度 45°,为 10 m 厚碎石土 1 覆盖层 + 10 m 碎石土 2 覆盖层 + 基岩;公路上部库岸边坡高 40 m,坡度 45°,为 5 m 厚碎石土 1 覆盖层 + 10 m 碎石土 2 覆盖层 + 基岩。加固方式选取常用的锚加固和桩加固。加固位置设定在公路下方岸坡水位变化区域内,如图 1(a)、(b) 所示。锚杆铺设参数为:从上到下铺设 9 排锚杆,锚固角为 15°,锚间距 4 m,自由段长度 15 m,锚固段长度为 10 m。桩铺设参数为:铺设 2 排抗滑桩,排间距为 5 m,桩长为 35 m。

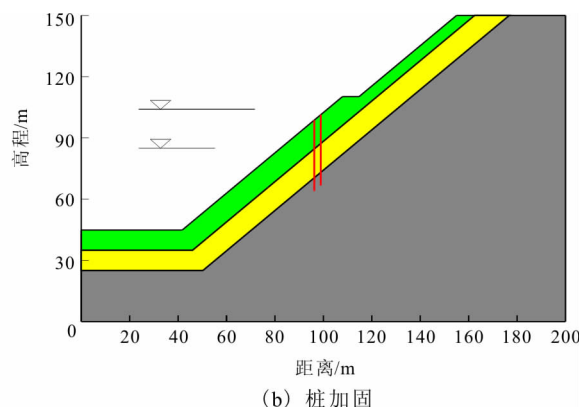
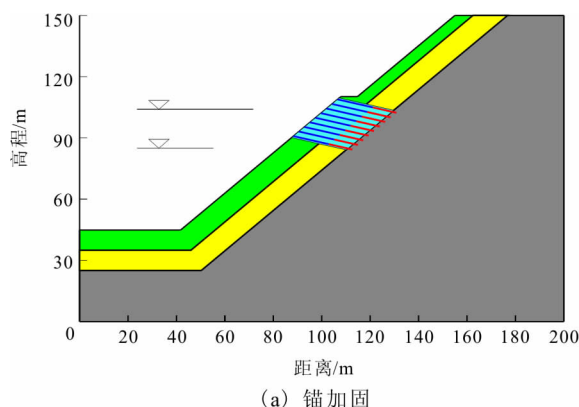


图1 冷清公路库岸边坡概化模型

考虑岸坡库水位变化设置 2 种工况,工况 1(蓄水期): 0 ~ 60 d 库水位从初始死水位 85 m 上升到 104 m, 60 ~ 180 d 库水位高程保持 104 m; 工况 2(泄水期): 180 ~ 240 d 库水位从 104 m 下降到 85 m, 240 ~ 300 d 库水位高程保持 85 m。初始库水位为死水位,库水位以上为零流量边界,库水位以下为定水头边界,两侧边界及底部边界为不透水边界,边界条件采用总水头-时间函数反映库水升降变化。结合工程勘察和钻孔资料,采用反演方法,并与钻孔勘探所得到的地下水位高程相互验证,获得天然边坡材料的饱和渗透系数。在锚加固区其纵向是连续的,其渗透系数为水泥土和土的渗透系数的综合反映,由于工程没有进行相关试验,只能参考相关文献选取;对于桩加固区其纵向是不连续的,但因为是平面计算,这里只能考虑有桩的断面部分,有桩部分的渗透系数取混凝土桩的渗透系数并考虑有绕流作用进行适当折减取值;无桩部位的坡面与天然边坡相同。边坡饱和渗透系数取值如表 1。通过土体的粒径分布曲线确定体积含水量函数,通过 Van Genuchten 模型预测非饱和渗透系数函数,如图 2 所示。选取公路库岸边坡特征点分布如图 3 所示,在高程

85、95、104、110、115 m 各取 5 个点,按离坡面由近到远编号,路面 5 个点编号分别为 1、2、3、4、5。

3 数值模拟与分析

3.1 浸润线和速度矢量图分析

通过模拟计算工况 1 与工况 2 情况下库岸边坡的渗流演变情况,得到水位变化过程中未加固、锚加固、桩加固情况下的孔隙水压力等值线分布图和速度矢量图,如图 4 所示。0 d 时为初始死水位稳态渗流,浸润线与初始死水位持平,孔隙水压力等值线为水平直线。0 ~ 300 d,整个水位变化过程中渗流为瞬态场。

由不同时刻渗流计算结果分析可得:锚杆加固后,同一时刻浸润线形状发生了变化,同一横坐标对应浸润线位置也发生了变化。当水位上升到锚固区域后(如图 4(a₂)),锚加固区域内注浆土体渗透系数较小,对坡内的渗流形成阻碍作用,使渗流入射方向发生了偏转,向未加固区(没有受到注浆影响的区域)渗流,渗流路径有绕开锚加固区域的趋势。锚固区域内渗流路径主要呈两种方式:靠近坡面侧锚固区域,由坡外指向锚固区;坡体内锚固区域,由

锚固区下侧指向锚固区域。锚固区域内浸润线位置逐渐抬升,靠近坡面锚固区域内浸润线位置上升速率滞后于未加固时的浸润线位置上升速率。远离坡面的锚固区域外,由于渗流路径的改变,开始一段时间内,注浆区域的浸润线位置高于未加固,随时间延长一部分锚固区浸润线会低于未加固区域。水位开始下降的一段时间内,靠近坡面处锚固区域内的渗流矢量由坡内指向坡外,稍远侧指向锚固区域外的未注浆区域,最终绕过锚固区流向坡体外。锚固体外的坡体渗流路径呈绕开锚固区向坡体外渗流,浸润线逐渐降低;较远侧渗流路径仍由坡体外指向坡体内,浸润线位置较未加固情况的高,并出现注浆区和未注浆区的 2 个浸润线,锚加固的锚固区浸润线位置相对未加固坡体的浸润线高,而锚加固的未锚固区的浸润线相对未加固坡体的浸润线低(如图 4

(b₂));随着时间延长,锚固区域外浸润线位置全部呈下降趋势。水位下降到死水位之后,由于锚固区内水流逸出较慢,浸润线出现了不连续现象(如图 4(c₂))。相比未加固时,靠近坡面锚固区域内的浸润线位置较高,说明锚固区内浸润线变化更滞后;而锚固区域外远离坡面处和下侧靠近坡面未注浆区的浸润线位置在死水位稳定运行初期均比未加固时低,这是由于渗流路径的改变和渗流量及渗流的分流作用等原因所致,相对未加固坡体,锚加固后水库渗入坡体的水量小,需渗出的水量也相对较小,而且锚固区的渗流阻力较大,锚固区滞留了一部分水量,从而未锚固区的浸润线下降加快,位置相对更低。随着时间延长,锚固区域外远离坡面处和下侧靠近坡面未锚固区的浸润线位置和未加固时的浸润位置相近。

表 1 边坡饱和和渗透系数取值表

材料	碎石土 1	碎石土 2	玄武岩	锚固区	桩体
饱和渗透系数 $k_s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	9.26×10^{-4}	2.32×10^{-4}	9.26×10^{-5}	4.63×10^{-5}	2.31×10^{-5}

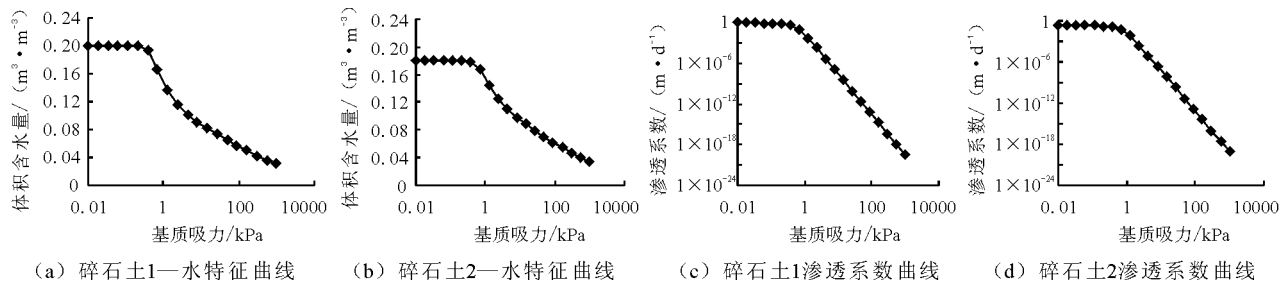


图 2 碎石土 1 及碎石土 2—水特征曲线和渗透系数函数曲线

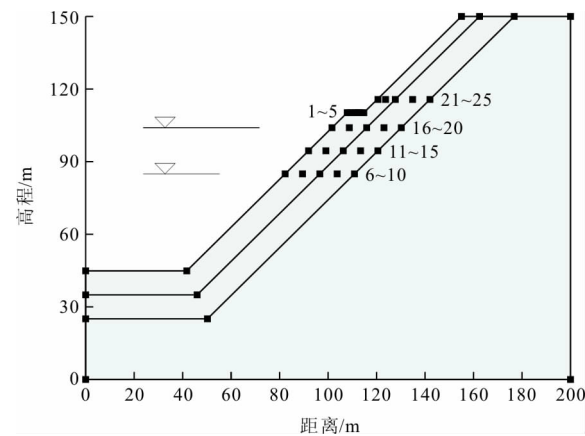


图 3 公路库岸边坡特征点分布

桩加固后,在整个库水位变化过程中,相对未加固的岸坡而言,由于桩体的渗透系数较碎石土体的渗透系数低,加固桩体对渗流有一定的阻碍作用。

在水库水位上升和下降过程中(如图 4(a₃)、4(b₃)、4(c₃)),在桩体位置存在一定的绕渗现象,在桩体之间存在垂直向下的渗流现象,浸润线在桩体两侧存在落差,在水库水位上升时浸润线在桩外侧(靠水库一侧)的位置明显高于桩内侧(靠山一侧)的位置,在水库水位下降时浸润线在桩内侧(靠山一侧)的位置明显高于桩外侧(靠水库一侧)的位置。从桩加固与锚固的情况对比看,桩加固的阻渗作用较锚加固的阻渗效果差些。

3.2 孔隙水压力变化曲线图分析

计算得到的相应特征点的孔隙水压力随时间的变化曲线见图 5~7。由 $y = 85 \text{ m}$ 、 $y = 95 \text{ m}$ 各点孔隙水压力变化曲线可以看出:无论加固与否,正常蓄水位以下各点孔隙水压力均随库水位变化而变化。同一高程坡体内的点孔隙水压力都是从初始值开始

上升,变化趋势大体一致。在库水位上升(下降)时,孔隙水压力随着库水位增大(减小);在库水位上升或下降稳定后,坡体内的孔隙水压力的变化也逐渐减小并趋于稳定。由于同一高程坡体内的点对库水位变化响应的滞后效应从边坡前缘(水库侧)至边坡后缘(山体侧)逐渐增大,因此,坡体内的点到库岸坡面的距离对孔隙水压力变化的滞后时长影响较大。

锚杆和桩加固后改变了坡体内的渗流路径和渗流阻力,影响了坡体内各点的孔隙水压力值。 $y = 85$ m, 61 d 和 180 d 时锚加固后各点孔隙水压力值小于未加固对应点的孔隙水压力值。桩加固后位于桩后的 8、9、10 三点孔隙水压力小于未加固对应点的孔隙水压力值。300 d 时,锚加固后各点孔隙水压力值大于未加固对应点的孔隙水压力值,桩加固后位于桩后的 8、9、10 三点的孔隙水压力大于未加固对

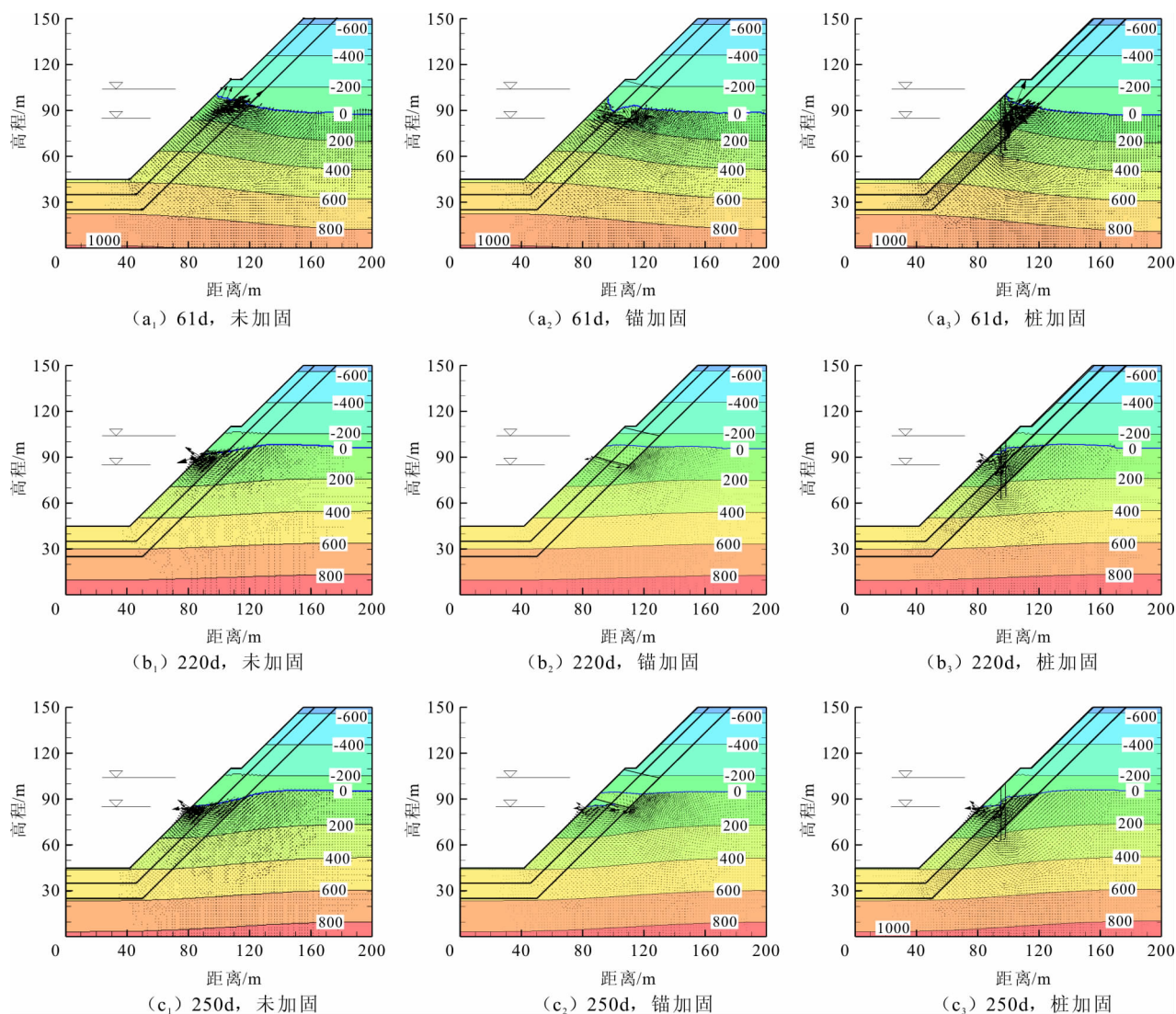


图4 不同时刻不同加固情况渗流分析图

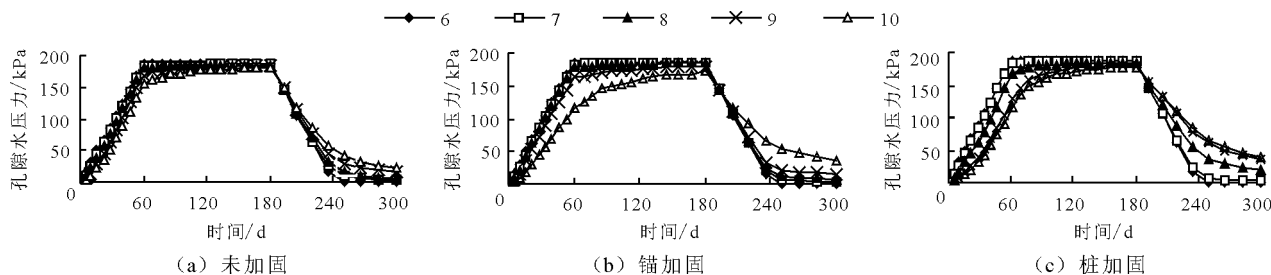
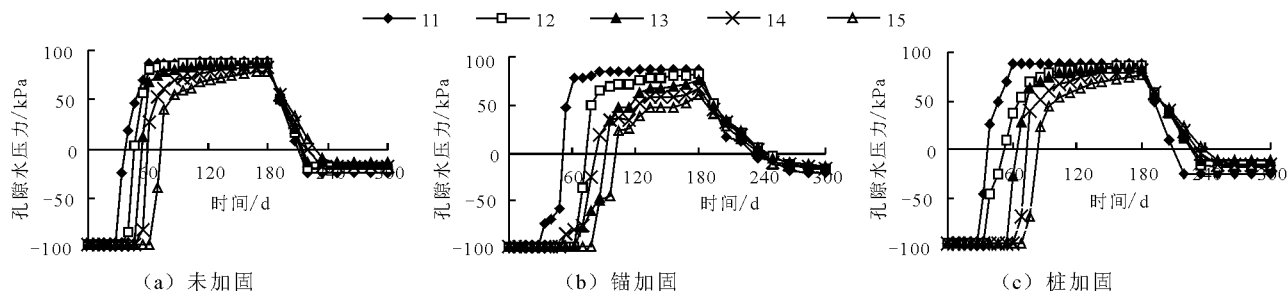
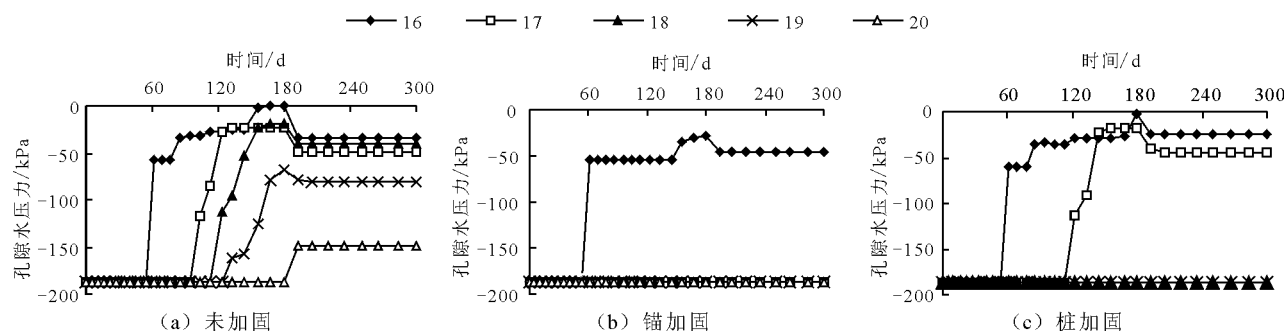


图5 $y = 85$ m 各点孔隙水压力变化曲线

图6 $y = 95$ m 各点孔隙水压力变化曲线图7 $y = 104$ m 各点的孔隙水压力变化曲线

应点的孔隙水压力值。 $y = 95$ m, 未加固时各点孔隙水压力分别从 28、34、47、54、67 d 开始发生变化, 锚加固后各点孔隙水压力分别从 34、61、64、70、77 d 开始发生变化, 桩加固后各点孔隙水压力分别从 34、40、54、61、69 天开始发生变化。180 d 时锚加固后各点孔隙水压力值比未加固各对应点的孔隙水压力值小, 桩加固后位于桩后的 12、13、14、15 四点孔隙水压力比未加固各对应点的孔隙水压力值小。300 d 时锚加固后各点孔隙水压力值比未加固各对应点孔隙水压力值大, 桩加固后位于桩后的 12、13、14、15 四点的孔隙水压力比未加固各对应点的孔隙水压力值大。

$y = 104$ m 时, 正常蓄水位附近的土体孔隙水压力值在水位变化过程中全为负, 孔隙水压力随水位的变化发生了一定改变, 这是由于毛细水的作用, 孔隙水压力大小由毛细水上升的高度确定。离坡面距离越远, 负孔隙水压力的变化也越滞后。加固后滞后效应更明显, 锚加固后比桩加固的滞后效应相对更大。 $y = 110$ m, $y = 115$ m 时, 离库水面较远, 其孔隙水压力几乎不受库水位变化的影响, 加固后对各点孔隙水压力也几乎没影响。

综上所述, 可知岸坡孔隙水压力变化滞后于库水位变化, 其滞后性不仅与离水库的水平距离和垂直距离有关, 还与加固与否、加固方式有关, 以及是否在加固影响区及其附近有关。锚杆和桩加固后改变坡体内的渗流阻力和路径, 影响坡体内的渗流流

速、浸润线位置和各点的孔隙水压力变化。锚杆和桩加固使加固影响区域及其附近的孔隙水压力变化更加滞后。

4 结 论

本文采用 SEEP/W 计算分析了锚和桩加固情况下水库岸坡的渗流状况及其变化规律, 得到如下结论:

(1) 相对未加固措施而言, 由于加固措施的实施, 改变了水库岸坡坡体的渗透性状、面积和位置, 从而导致岸坡的渗流矢量、浸润线的位置和形态、孔隙水压力的分布等发生了改变。

(2) 从桩加固与锚加固的情况对比看, 桩加固的阻渗作用较锚加固的阻渗效果差些。岸坡内孔隙水压力受库水位的升降、分析位置到库水或浸润线的距离、加固区渗透系数的降低及其渗透系数降低区的面积和形状等的影响, 加固后岸坡滞后效应更明显。

(3) 由于加固措施的实施, 导致孔隙水压力等的变化, 岸坡岩土的物理力学性质也会随之发生变化, 进而影响岸坡的稳定性。

(4) 在进行库岸稳定性计算分析时, 有必要先根据加固措施实施后岸坡的渗透性质的变化进行渗流分析, 在渗流分析的基础上再进行稳定性计算分析。

参考文献:

[1] 张国超, 胡新丽, 范付松, 等. 库水上升条件下不同土体

- 类型岸坡渗流场特征[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(5): 56-61+65.
- [2] 陈东辉. 基于渗流场和应力场耦合作用的岸坡稳定性分析[D]. 广州:暨南大学, 2015.
- [3] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931(1): 318-333.
- [4] TOPP G C, MILLER E E. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass bead media[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(2): 156-162.
- [5] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(12): 2233-2250.
- [6] SCHNELLMANN R, BUSSLINGER M, SCHNEIDER H R, et al. Effect of rising water table in an unsaturated slope[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 71-83.
- [7] YAN Zongling, WANG Junjie, CHAI Hejun. Influence of water level fluctuation on phreatic line in silty soil model slope[J]. Engineering Geology, 2010, 113(1-4): 90-98.
- [8] 刘博, 李江腾, 王泽伟, 等. 非饱和土渗流特性对库岸边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 515-520.
- [9] 谢新宇, 杨相如, 刘开富, 等. 水位变化对带挡土墙路基稳定性影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1263-1266+1271.
- [10] 张文杰, 詹良通, 凌道盛, 等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(8): 1365-1370+1328.
- [11] 何忠泽, 曾耀, 吕坤, 等. 滑床渗透性对超覆型库岸老滑坡稳定性的影响[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 112-116.
- [12] 许胜才. 水泥土桩加固边坡变形破坏机理与稳定性研究[D]. 广西:广西大学, 2016.
- [13] 郑晓晶, 殷坤龙. 基于非饱和渗流的水库库岸滑坡稳定性计算[J]. 水文地质工程地质, 2007(2): 29-32.
- [14] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司著. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.

(上接第 204 页)

- [21] 简文星, 许强, 吴韩, 等. 三峡库区黄土坡滑坡非饱和水力参数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3517-3522.
- [22] CHEN Xunhong. Depth-dependent hydraulic conductivity distribution patterns of a streambed[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(2): 278-287.
- [23] STEWART B A. Advances in soil science: Volume 3 [M]//WEBSTER R. Quantitative spatial analysis of soil in the field, New York:Springer, 1985:1-70.
- [24] ROBERTSON G P, CRUM J R, ELLIS B G. The spatial variability of soil resource following long-term disturbance[J]. Oecologia, 1993, 96(4): 451-456.
- [25] 刘蒙蒙. 泾阳县南塬黄土边坡渗透系数变异性分析[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [26] 吕敬, 柯贤敏, 张小筱, 等. 泾阳南塬黄土边坡饱和渗透系数变异性分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 254-257.
- [27] 刘贤赵, 李涛. 渭北旱塬苹果基地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 33-38.
- [28] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, PARKIN T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [29] 曹伟, 魏光辉, 庄亮亮. 基于地统计学的田间尺度下土壤盐分离子空间变异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 148-151.
- [30] 王波, 毛任钊, 曹健, 等. 海河低平原区农田重金属含量的空间变异性——以河北省肥乡县为例[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4082-4090.