

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.037

非饱和-非稳定渗流条件下的边坡临界滑动场

蒋泽锋^{1,2}, 朱大勇^{1,2}, 沈银斌³, 王宝存¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 安徽省土木工程与材料省级实验室, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学 建筑设计研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 受季节性降雨或水库运行的影响, 岸坡外水位及坡内孔隙水压力场的变化较大, 不利于岸坡的稳定性。在水位变化过程中, 利用非饱和-非稳定渗流有限元计算得到孔隙水压力场, 基于非饱和土的渗流和抗剪强度理论, 对水位变化过程中的边坡临界滑动场法进行改进, 提出可考虑水位变化与岸坡非饱和-非稳定渗流过程的边坡临界滑动场数值模拟方法。将改进后的水位变化过程中的边坡临界滑动场法分别应用于黏土、粉土岸坡在水位升降过程中的稳定性分析, 研究了水位升降速率及基质吸力对岸坡稳定性的影响, 并揭示了边坡在水位变化过程中的稳定性变化历程。研究表明, 该方法计算结果合理、可靠, 更适用于涉水边坡的稳定性计算, 且岸坡稳定性变化历程受水位升降速率、基质吸力等多种因素共同影响, 只有在考虑非稳定渗流的基础上同时考虑基质吸力的作用才能正确得出水位变化过程中岸坡稳定性变化规律和实质。

关 键 词: 边坡稳定; 水位变化; 非饱和-非稳定渗流; 孔隙水压力; 边坡临界滑动场

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 06-1815-09

Critical slip field of slope under the condition of transient unsaturated seepage

JIANG Ze-feng^{1,2}, ZHU Da-yong^{1,2}, SHEN Yin-bin³, WANG Bao-cun¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering and Materials, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 3. Architecture Design Institute, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Seasonal rainfall and reservoir operation can cause the fluctuation of reservoir water level and the change of pore water pressure distribution in the slope body, which is detrimental to slope stability. Based on the theory of shear strength of unsaturated soils and pore water pressure field obtained with finite element method for the transient unsaturated seepage, an improved numerical procedure for critical slip field of slope is proposed. In this procedure, the combined effect of water level fluctuation and transient unsaturated seepage on the behaviors of slopes can be taken into account. First, the transient unsaturated seepage fields of a clay/ silt slope are calculated using SEEP/W module in Geostudio to obtain pore-water pressure fields, which are imported into the improved procedure of critical slip field of slope method to evaluate changes in the factor of safety with changing water level. In addition, the influence of fluctuation velocity of water level and matric suction on the slope stability are also analyzed emphatically; and the slope stability changing course with water level fluctuation is revealed, so as to show the feasibility and reliability of the improved procedure. Moreover, the results not only show that the slope stability changing course is affected by fluctuation velocity of water level, matric suction, and so on, but also reveal that the more reasonable slope stability changing rules and essences are obtained by considering matric suction.

Keywords: slope stability; water level fluctuation; transient unsaturated seepage; pore water pressure; critical slip field of slope

1 引 言

由于季节性降雨或水库调度运营, 岸坡外水位常处于变化之中, 岸坡内外的水位差及岸坡内渗流场的不断变化, 是触发岸坡失稳的主要诱导因素。

针对水位升降触发边坡失稳的问题, 国内外相

关学者已开展了大量、持续的研究工作, 目前采取的研究手段主要包括数值模拟、模型试验等。廖红建^[1]、刘新喜^[2]、张文杰^[3]、宋琨^[4]等利用 Geostudio 软件中 SEEP 模块计算非饱和-非稳定渗流场, 再结合极限平衡法探讨了水位升降条件下土-水特征曲线、水位升降速率等水力参数对岸坡稳定性的影响

收稿日期: 2014-01-09

基金项目: 教育部优先发展课题 (No.2013JYF0661); 水利部公益项目 (No.201401063); 国家自然科学基金项目 (No.51179043)。

第一作者简介: 蒋泽锋, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性及河流动力学方面的研究工作。E-mail: zfjiang_hfut@163.com

程度。Lane 等^[5]假定岸坡内浸润线为直线, 并利用强度折减有限元法研究了库水位骤降与缓降条件下岸坡的稳定性变化。贾苍琴^[6]、年廷凯^[7]等利用强度折减有限元法探讨了水位下降过程中均质岸坡的稳定性变化, 并与极限平衡方法计算结果进行比较, 验证了其方法的合理性。沈银斌等^[8]发展了可以考虑水位变化的边坡临界滑动场数值模拟方法, 研究了水位升降作用下临水边坡的安全系数变化趋势, 并与圆弧滑面对应的 Morgenster-Price 法进行比较, 显示了水位变化过程中边坡临界滑动场法的优势。贾官伟等^[9]通过模型试验再现水位骤降条件下临水边坡的失稳过程, 研究表明, 坡内水位下降滞后于坡外水位, 指向坡外的渗流是滑坡产生的重要原因, 且松散填土边坡的失稳模式为有多重滑面的牵引破坏模式。李邵军^[10]、杨春宝^[11]等通过离心模型试验分别模拟了三峡库区典型边坡及粉土边坡在水位变化下的失稳过程, 表明边坡的变形为典型的牵引破坏模式, 由前缘向后缘逐级发展。目前, 采用常规极限平衡法及强度折减有限元法等数值模拟方法和模型试验来研究水位升降下诱发库岸边坡失稳的研究已日趋成熟, 而沈银斌等^[8]首先将边坡临界滑动场法引入水位升降条件下库岸边坡稳定性方面的研究, 提出水位变化过程中的边坡临界滑动场, 但他对坡外水压力的处理方法采用了置换法, 且并未考虑基质吸力对非饱和土及库岸边坡稳定性的贡献, 仍需进一步探讨和完善。

本文在朱大勇^[12-13]、沈银斌^[8]等研究的基础上, 进一步完善临界滑动场理论, 将水位变化及岸坡非饱和-非稳定渗流分析与岸坡稳定性有机结合, 并考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度的贡献, 提出可考虑水位变化与岸坡非饱和-非稳定渗流过程的边坡临界滑动场, 并研究了边坡物理力学参数、土层结构、土-水特征曲线、水位升降速率等参数对水位变化时岸坡稳定性的影响。

2 边坡临界滑动场

2.1 临界滑动场基本理论

边坡临界滑动场(GCSF)方法是将极限平衡条分法与动态规划法的最优性原理相结合, 通过数值方法计算出任意状态点的最大剩余推力及最危险滑动方向, 按照最大剩余推力为 0 的原则, 最终逼近出一簇任意形状临界滑动面的计算方法, 是近年来发展的一种新的边坡稳定性计算方法^[12-13]。限于篇幅, 边坡临界滑动场理论详见文献^[12-13]。条块的应力图如图 1 所示, 任意状态点剩余推力 p_k 计算公式如下:

$$p_k = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \varphi_k^m)} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \varphi_k^m) p_{k-1} + \sin(\alpha_k - \varphi_k^m) W_k + \cos(\alpha_k - \varphi_k^m) K_c W_k + \sin(\alpha_k - w_k - \varphi_k^m) Q_k + \sin \varphi_k^m U_k - c_k^m l_k \cos \varphi_k^m] \quad (1)$$

式中: p_k 、 p_{k-1} 为第 k 、 $k-1$ 条块间最大剩余推力; k 为条块编号; θ_k 、 θ_{k-1} 为最大剩余推力与水平方向倾角; Z_k 、 Z_{k-1} 为条块间最大剩余推力作用点高度; W_k 为条块重量; $K_c W_k$ 为地震力; K_c 为地震影响系数; φ_k^m 和 c_k^m 分别为极限平衡状态时调用的内摩擦角和黏聚力; Q_k 为坡面外力; w_k 为外力 Q_k 与竖直方向的夹角 (图中所示为正); U_k 为条底水压力合力; N_k' 为条底有效正应力合力; l_k 为条块底边长度; α_k 为条块底面倾角; h_k 为条块高度; b_k 为条宽。

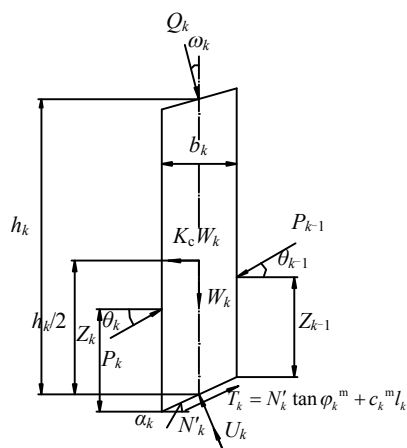


图 1 条块受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of forces on slices

2.2 非饱和土抗剪强度理论

进行非饱和岸坡稳定性分析时, Mohr-Coulomb 准则已不再适用, 所以首先必须建立起非饱和土的抗剪强度理论。本文采用 Fredlund 等^[14]提出的非饱和土抗剪强度理论。Fredlund 等认为, 非饱和土的抗剪强度由有效黏聚力 c' 和净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 引起的强度以及基质吸力 $(u_a - u_w)$ 引起的强度所组成, $(\sigma - u_a)$ 引起的强度与有效内摩擦角 φ' 有关, $(u_a - u_w)$ 引起的抗剪强度则与吸力内摩擦角 φ^b 有关。本文方法采用 Fredlund 提出的以有效应力分量为基础的双应力状态变量公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: τ_f 为抗剪强度; σ 为底部正应力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; φ^b 为基质吸力内摩擦角。

通常孔隙气压力等于大气压力, 则有 $u_a = 0$, 从而基质吸力简化为负孔隙水压力。当土体饱和时, $u_a - u_w = 0$, $c' = c$, 此时传统的 Mohr-Coulomb 强

度准则适用; 当土体非饱和时, $u_a - u_w > 0$, 此时总的有效黏聚力 c' 取值为

$$c' = c + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

大量研究表明, 当基质吸力超过进气值后, φ^b 随着基质吸力的增加而逐渐减小, 为了便于计算, 本文假定吸力内摩擦角 φ^b 为常数。

2.3 边界条件的处理

对于坡外水体的处理, 文献[8]采用的是土石坝设计规范规定的置换法, 但对坡外水压力采用置换的方法只适用于饱和土渗流岸坡稳定分析, 并未考虑基质吸力对岸坡稳定性的影响, 因此, 置换法并不适用于非饱和临水边坡。而本文将岸坡外水体以水压力的形式直接加在坡面上, 其大小为 $\gamma_w h$ (γ_w 为水的重度, h 为水深), 如图2所示。

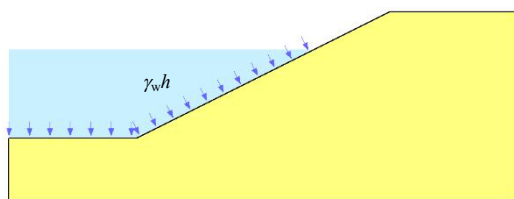


图2 坡外静水压力示意图

Fig.2 Schematic diagram of hydrostatic confining pressure

2.4 改进后水位变化过程中边坡临界滑动场计算步骤

与常规边坡临界滑动场法不同, 本文首先采用加拿大商业软件 Geostudio 的 SEEP/W 模块进行非饱和-非稳定渗流有限元计算岸坡外水位变化过程中坡内的孔隙水压力场, 然后在本文方法计算程序中编写孔隙水压力提取模块, 把孔隙水压力计算结果导入本文方法计算程序。当条块底部位于非饱和区域时, 采用 Fredlund 提出的非饱和土抗剪强度理论, 把基质吸力引起的抗剪强度作为黏聚力的一部分。改进后水位变化过程中边坡临界滑动场法具体计算步骤如下:

(1) 对不同时刻的江河水位, 进行非饱和-非稳定渗流有限元计算, 将计算结果导入本文方法计算程序。

(2) 圈定计算范围, 划分垂直条块并设定离散点。

(3) 初设安全系数 F_{s0} 及条间力函数形状系数和 λ_0 , 取 $F_{s0}=1$, $\lambda_0=0$ 。提取每一个状态点试算滑面底部的孔隙水压力, 判断试算滑面是否位于非饱和区。若在非饱和区, 则用式(3)计算总的有效黏聚力; 若在饱和区, 适用传统的 Mohr-Coulomb 强度准则。计算所有状态点的最危险滑动方向和最大剩余推力值, 追踪出相应出口的最危险滑面。

(4) 采用步骤(3)中处理饱和土与非饱和土抗剪强度的方法, 用 Morgenster-Price 法计算上一步最

危险滑面的安全系数 F_{s1} 和条间力函数形状系数 λ_1 。

(5) 将步骤(4)求出的 F_{s1} 、 λ_1 取代步骤(3)中的 F_{s0} 和 λ_0 , 重新计算所有状态点的最危险滑动方向和最大剩余推力值, 追踪出相应出口的最危险滑面。重复步骤(4)、(5), 直至相邻两次计算的安全系数 F_s 值小于给定的精度。

(6) 选定下一出口, 初始的 F_{s0} 和 λ_0 值可选择上一出口所对应的计算值, 以减少迭代次数, 重复步骤(3)~(6), 计算出对应的局部临界滑动面。所有出口计算完毕时得到岸坡全局临界滑动场。

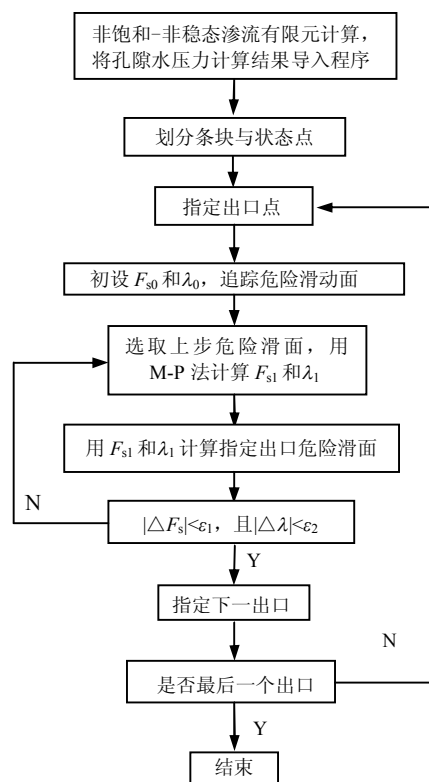


Fig.3 Flow chart of calculation

3 非饱和-非稳定渗流岸坡稳定分析

非饱和-非稳定渗流过程实际上是由岸坡土体的非饱和和渗流过程与水位变化引起的非稳定渗流过程相结合, 其物理本质是岸坡外静水压力与孔隙水压力交替变化和相互作用的过程。非饱和-非稳定渗流过程与岸坡土体的土-水特征曲线、水渗透性函数、水位高程及水位下降速率等参数有关。本文首先以典型均质黏土岸坡及软弱夹层的非均质黏土岸坡为例, 将本文方法计算结果与加拿大商业软件 Geostudio 的 SLOPE/W 模块计算结果进行对比分析, 来验证本文方法的合理性, 然后运用本文方法讨论黏土、粉土岸坡在不同水位升降速率下岸坡稳定性变化趋势及基质吸力对岸坡稳定性的影响。

本文岸坡几何尺寸如图4所示,相关土性参数见表1。由SEEP/W模块给出的典型粉土、黏土、均质砂的体积含水率与孔隙压力关系如图5(a)所示,并根据Fredlund提出的计算方法^[16-17],结合表1饱和和渗透系数可得水渗透性函数,如图5(b)所示。

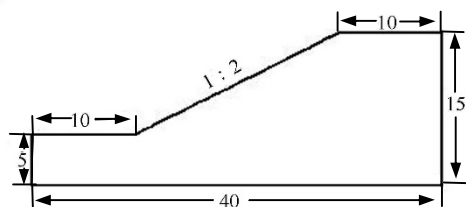
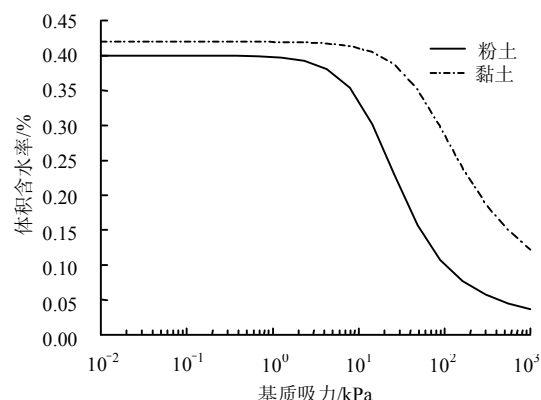


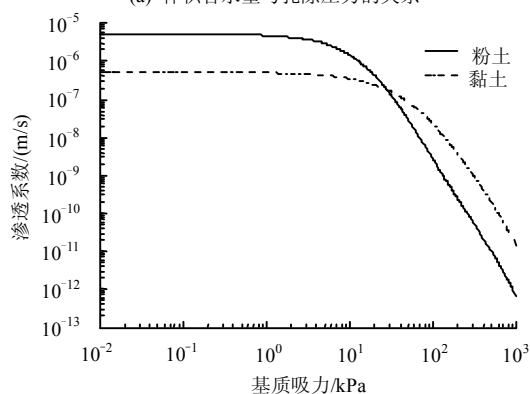
图4 边坡剖面图(单位: m)
Fig.4 Sectional view of slope (unit: m)

表1 算例1岸坡物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of slope					
土类	重度 (kN/m ³)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	饱和渗透系数 (m/s)	吸力内摩擦角 (°)
黏土	20.2	10	20	5.4×10^{-7}	20
粉土	20.2	5	30	5.4×10^{-6}	20



(a) 体积含水量与孔隙压力的关系



(b) 渗透系数与孔隙水压力的关系

图5 黏土、粉土的土-水特征曲线

Fig.5 Soil-water characteristic curves for clay and silt

3.1 水位变化过程中坡内浸润线的确定

水位上升过程中岸坡外初始水位为5 m,坡内浸润线与坡外水位齐平,水位以0.1 m/d速度上升至

12 m高程,至坡内外水位齐平后,水位又以0.1 m/d速度下降至5 m高程,水位变化每阶段初始时刻黏土、粉土岸坡内浸润线位置如图6所示。图7给出了水位变化速率为1 m/d时,水位变化每阶段初始时刻黏土、粉土岸坡内浸润线位置。

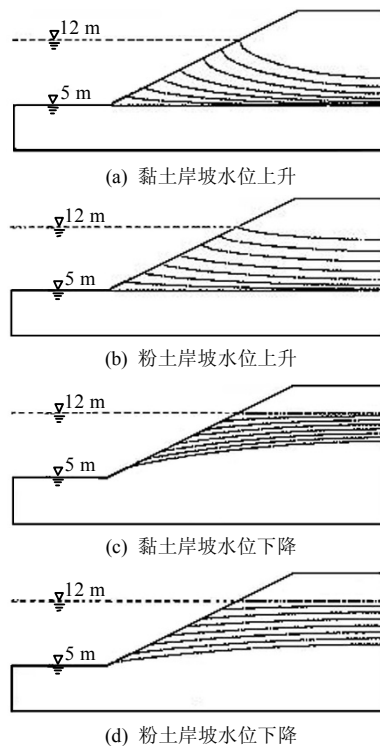


图6 坡外水位变化速率为0.1 m/d时坡内浸润线的变化
Fig.6 Phreatic line corresponding to reservoir water level fluctuation at $R=0.1$ m/d

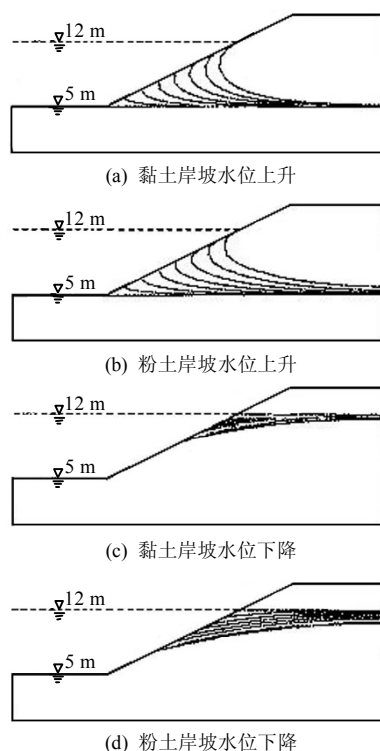


图7 坡外水位变化速率为1 m/d时坡内浸润线的变化

Fig.7 Phreatic line corresponding to reservoir water level fluctuation at $R=1$ m/d

如图6、7所示, 通过对比坡外水位升降过程中不同土质岸坡内的浸润线变化可以看出, 水位上升与下降时, 同一时刻不同土质岸坡浸润线位置差别较大。总体来看, 坡外水位变化过程中坡内水位变化滞后于坡外水位, 且当渗透系数相同时, 坡外水位变化越快, 滞后现象越明显。而当渗透系数不同时, 由于黏土岸坡饱和渗透系数较粉土岸坡小, 因此, 在坡外水位变化速率相同时, 黏土岸坡坡内水位下降较粉土岸坡更滞后于坡外水位。

3.2 均质黏土岸坡水位变化过程中稳定性计算结果对比分析及验证

为考察非饱和-非稳定渗流过程中边坡临界滑动场程序的可靠性, 运用本文方法、改进前方法及加拿大商业软件Geostudio的SLOPE/W模块分别进行计算, 得到最小安全系数随水位升降的关系, 如图8所示。

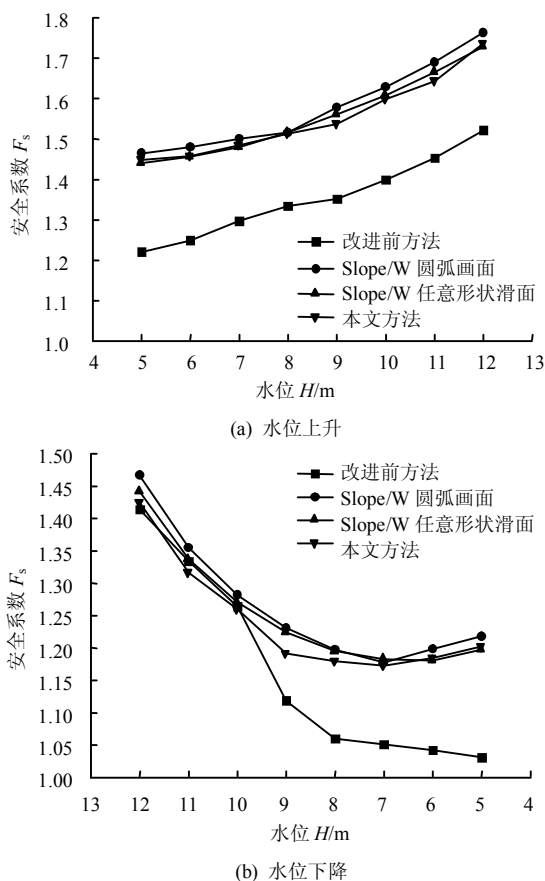


图8 水位升降过程中岸坡稳定性变化曲线
Fig.8 Curves of stability changing with water level

从图8中可以看出, SLOPE/W (采用Morgenster-Price法条间力假设) 自动搜索任意形状滑面计算得到的安全系数与本文方法计算的安全系数甚为接

近, 误差控制在1%左右, 由此说明本文方法进行水位变化过程中非饱和-非稳定渗流岸坡稳定分析是可行的, 且由图可知, SLOPE/W (采用Morgenster-Price法条间力假设) 自动搜索圆弧滑面计算得到的安全系数稍稍偏大, 表明软件自动搜索的圆弧滑面并非最危险滑面。相关研究也表明^[9-10], 若仅考虑水位升降作用影响, 库区土质边坡呈典型渐进牵引破坏模式, 该失稳模式下的滑面呈折线形态, 并非单一的圆弧滑面。本文方法的特点即是不必提前假设滑面形状, 能搜索任意形状的最危险滑面, 并可将潜在破坏范围同时显示出来。图9分别为库水位上升、下降至8 m高程时的边坡全局临界滑动场。

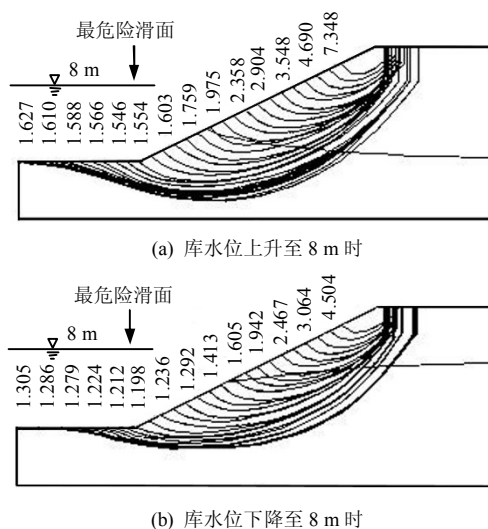


图9 库水位上升、下降至 8 m 时
边坡全局临界滑动场(单位: m)
Fig.9 GCSF of slope when water level is 8 m (unit: m)

除此之外, 坡外水位上升时改进前水位变化过程中边坡临界滑动场法计算的安全系数较小, 与本文方法及 SLOPE/W 计算结果相差 1%~20%左右。由此表明, 水位变化过程中基质吸力对岸坡稳定性影响较大。由图 8(b)可见, 在坡内水位较低时基质吸力影响尤为突出。

3.3 非均质黏土岸坡水位变化过程中稳定性计算结果对比分析及验证

在上述黏土岸坡的基础上, 距坡顶 12~13 m 处存在一层厚度为 1 m 的软弱夹层, 如图 10 所示。软弱夹层力学指标重复 $\gamma=20.2$ kN/m³, 黏聚力 $c=0$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=10^\circ$ 。因软弱夹层土在坡内外最低水位以下, 处于饱和区域, 无需考虑软弱层土的吸力内摩擦角大小, 软弱夹层土-水特性亦不影响本算例渗流分析。因此, 本算例渗流分析参见 3.2 节黏土岸坡渗流分析。

为了进一步说明本文方法的有效性,运用本文方法和 SLOPE/W 法,计算了水位升降速率为 0.1 m/d 条件下具有软弱夹层的黏性岸坡安全系数,得到最小安全系数随水位升降的关系,如图 11 所示。

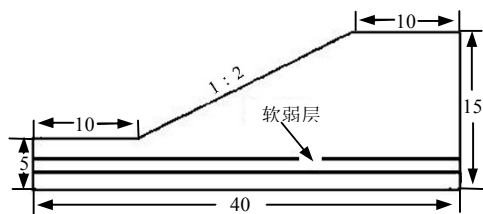


图 10 边坡剖面图(单位: m)
Fig.10 Sectional view of slope (unit: m)

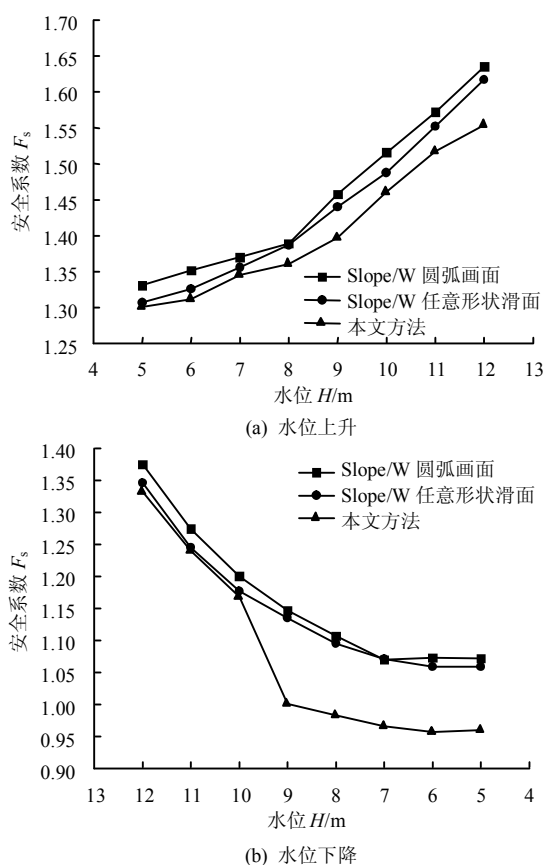


图 11 水位升降过程中非均质岸坡稳定性变化曲线
Fig.11 Curves of stability changing with water level

由图 8、11 比较可得出: ①存在软弱夹层的黏性岸坡在水位升降过程中安全系数仍然随水位上升而增大, 随水位下降而减小, 但当水位下降到坡脚附近时又有略微的增大, 呈现出一个最危险水位, SLOPE/W 自动搜索圆弧滑面计算的最危险水位仍在 7 m 处, 而本文方法及 SLOPE/W 自动搜索任意形状滑面计算的最危险水位在 6 m 处, 因软弱夹层的存在而发生了变化; ②在水位变化过程中, 有软弱夹层的非均质黏性岸坡安全系数明显小于相同水

位的均质黏性岸坡; ③存在软弱夹层的黏性岸坡在水位下降过程中不同方法计算结果差异更为明显, 这是由于本文方法搜索的滑面沿软弱夹层滑出, 在软弱夹层中滑面长度较长, 滑面底部所受总的孔隙水压力较大, 更不利于岸坡的稳定。

图 12(a)、12(b)分别为水位上升、下降至 10 m 高程时的边坡临界滑动场, 最危险滑面光滑连续, 但非圆弧滑面。由图可知, 临界滑动场中危险滑面分布是不均匀的, 岸坡上部土体不受软弱层的影响, 滑面分布如在均质黏性岸坡中, 而岸坡下部滑面急剧偏向软弱夹层, 这预示了坐落在软弱层上的边坡, 在水位变化的过程中滑体存在着潜在整体滑动机制。

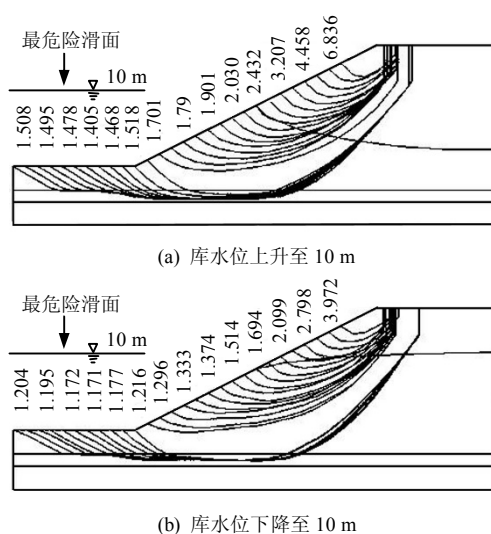


图 12 水位上升、下降至 10 m 时
边坡全局临界滑动场(GCSF)(单位: m)
Fig.12 GCSF of slope when water level is 10 m(unit: m)

图 13(a)、13(b)分别为库水位上升、下降至 10 m 高程时 SLOPE/W (采用 Morgenster-Price 法条间力假设) 自动搜索任意形状滑面得到的计算结果。从图中可看出, 滑体也将呈整体坐落在软弱层上, 但该软件自动搜索功能搜索出的任意形状滑面并不能像本文方法一样明显反映出软弱层对滑面的影响, 且无法显示出岸坡真实的临界滑动面位置及潜在破坏范围。由此可知, 本文方法在水位变化过程中非饱和-非稳定渗流条件下进行非均质岸坡稳定性计算时, 在搜索滑面方面更有优势, 计算结果也更可靠。

3.4 参数敏感性分析

3.4.1 水位升降速率对不同土质岸坡稳定性的影响

岸坡稳定性受多种因素共同影响, 在水位变化过程中岸坡安全系数变化规律极其复杂。为了考察水位升降速率对黏土、粉土岸坡稳定性的影响, 运

用本文方法计算了黏土、粉土岸坡在水位升降速率 R 分别为 0.1、1.0 m/d 条件下边坡的安全系数随水位升降的变化关系, 如图 14 所示。

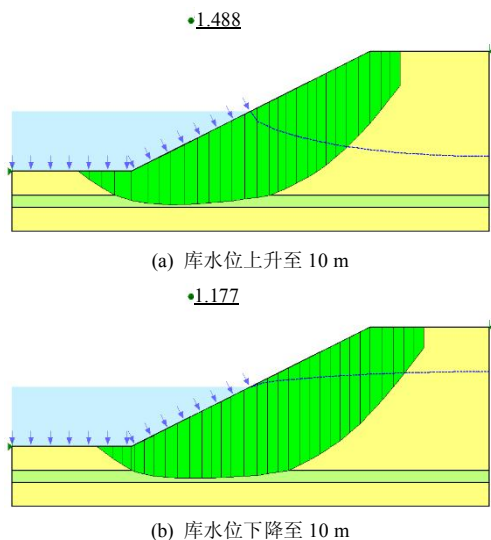


图 13 水位上升、下降至 10 m 时 SLOPE/W 计算结果(单位: m)

Fig.13 Results calculated using SLOPE/W when water level is 10 m (unit: m)

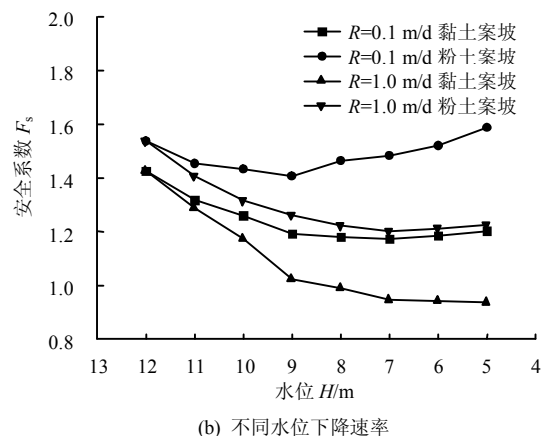
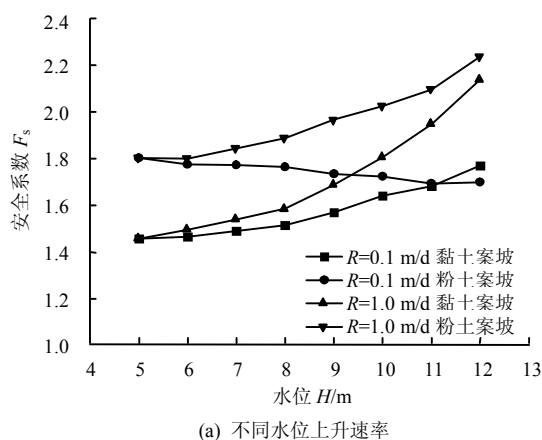


图 14 不同水位上升、下降速率对不同土质岸坡安全系数的影响

Fig.14 Variation of F_s with rising rates of water level R for different soil slopes

坡外水位上升过程中, 坡内水位随坡外水位上升, 非饱和区域逐渐减小, 基质吸力减小, 条块底部水压力合力增大, 对岸坡稳定不利, 但坡内水位滞后于坡外水位, 产生指向坡内的渗流, 同时静水压力随坡外水位上升而增大, 这些作用对岸坡稳定有利。不同土质、不同渗透特性的岸坡, 上述各影响因素作用规律不同。由图 14(a)可看出, 库水位上升速率较小 ($R=0.1$ m/d) 时, 随水位升高, 黏土岸坡的安全系数增大, 而粉土岸坡的安全系数反而减小。这是因为黏土岸坡的渗透系数较粉土岸坡的渗透系数小, 坡内水位的上升较粉土岸坡更滞后于坡外水位(如图 6 所示), 指向坡内的渗透压力也越大, 同时黏土岸坡坡内水位上升较慢, 非饱和区域减小得较少, 基质吸力降低得较慢, 条块底部水压力合力增大得也越慢, 条块底部水压力合力对岸坡的不利作用不及静水压力和基质吸力对岸坡的稳定作用, 故黏土岸坡安全系数随水位上升而增大。而粉土岸坡渗透系数较大, 坡内浸润线较缓, 浸润线高度与坡外水位差别较小, 滑面底部水压力合力增大较快, 注意到边坡临界滑动场(GCSF)方法是将极限平衡条分法与动态规划法的最优性原理相结合, 极限平衡条分法考虑的是条块底部基质吸力的大小, 由于水位较低时浸润线附近滑面较平缓, 基质吸力对岸坡稳定的贡献较大, 但随水位上升, 非饱和区域减小, 基质吸力减小, 条底水压力合力增大, 静水压力及基质吸力对岸坡的稳定作用不及条底水压力合力对岸坡的不利作用, 故粉土岸坡安全系数随水位上升而减小。当水位上升速率较大 ($R=1.0$ m/d) 时, 随水位升高, 黏土、粉土岸坡安全系数均增大。这是由于水位骤升, 静水压力突增, 且地下水位响应滞后于坡外水位, 浸润线与坡外水位高差较大, 条块底部水压力合力的增大与基质吸力的减小都较慢, 这些作用对岸坡稳定有利, 从而岸坡安全系数随水位骤升而增大。

坡外水位下降过程中, 坡内水位随之下降, 饱和区域逐渐减小, 基质吸力增加, 条块底部水压力合力减小, 对岸坡稳定有利, 但坡内水位滞后于坡外水位, 产生指向坡外的渗流, 且静水压力随坡外水位下降而减小, 对岸坡稳定不利。分析图 14(b)可得, 水位下降速率较小 ($R=0.1$ m/d) 时, 随水位下降, 黏土、粉土岸坡的安全系数均先减小后增大, 在水位下降过程中存在一个最危险水位。这是由于水位下降, 非饱和区域变大, 基质吸力增加, 条块底部水压力合力减小, 但坡外静水压力减小, 水位

开始下降时,静水压力的减小作用占主导地位,岸坡安全系数先减小,随水位继续下降,直至坡内浸润线降低到滑面较缓处,基质吸力增大和条块底部水压力合力的减小对岸坡稳定的贡献超过静水压力减小对岸坡的不利作用,此时岸坡安全系数又开始增大。当水位下降速率较大($R=1\text{ m/d}$)时,随水位下降,黏土、粉土岸坡的安全系数均减小。这是因为水位骤降,坡外静水压力骤减,临空面排水时间又太短,导致孔隙水压力来不及消散,从而安全系数随水位的骤降而减小。

3.4.2 基质吸力对岸坡稳定性的影响

为研究基质吸力对岸坡稳定性的影响程度,运用本文方法计算了坡外水位上升速率为 0.1 m/d 、渗透系数 $k_{\text{sat}}=5.4\times 10^{-7}\text{ m/s}$ 条件下黏土岸坡在非饱和土抗剪强度参数 ϕ^b 分别取 0° 、 10° 、 20° 时的安全系数,如图15所示。从图中可以看出:①安全系数随水位上升总体呈上升趋势;②在水位上升过程中,考虑基质吸力的岸坡安全系数明显大于不考虑基质吸力的安全系数,且随水位上升,两者的差值在减小,这主要是由于坡外水位上升,坡内水位随之上升,非饱和区域减小,从而导致基质吸力影响减弱;③水位上升过程中, ϕ^b 取值越大,岸坡安全系数越高,由式(3)可知, ϕ^b 越大,总的有效黏聚力 c' 越大。从以上分析可见,基质吸力的作用对岸坡稳定性影响较大,从而应正确考虑基质吸力的变化及作用,才能得出岸坡在水位变化过程中的稳定性变化规律和实质。

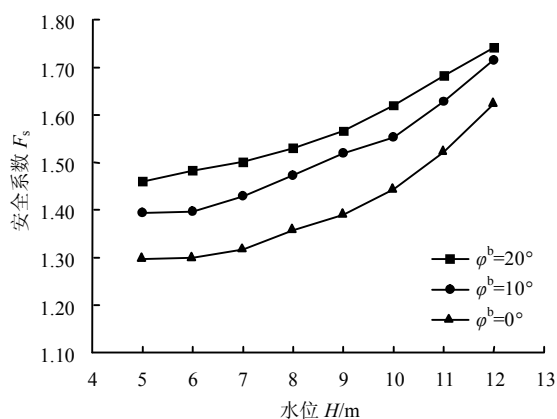


图15 不同抗剪强度参数 ϕ^b 水位上升过程中安全系数变化
Fig.15 Variation of F_s with dropping rates of water level R for different soil slopes

4 结 论

(1)在非饱和-非稳定渗流条件下边坡临界滑动场方法继承了常规边坡临界滑动场法的突出优点,

不但能准确、快速计算岸坡最小安全系数及任意形状危险滑动面的位置,而且适用于土性复杂的非均质涉水边坡,计算结果也更可靠、更合理。

(2)对坡外水压力采用置换的方法只适用于饱和土渗流岸坡稳定分析,本文将岸坡外水体以水压力的形式直接加在坡面上,适用于非饱和临水岸坡稳定性分析,得出的水位变化过程中岸坡安全系数变化趋势更为合理。

(3)岸坡稳定性受多种因素共同影响,在水位变化时岸坡安全系数变化规律极其复杂。水位骤升时,黏土、粉土岸坡安全系数都随水位上升而增大;水位上升速率较小时,黏土岸坡安全系数随水位上升而增大,而本文粉土岸坡算例安全系数随水位上升而减小;水位骤降时,黏土、粉土岸坡安全系数都随水位下降而减小;水位下降速率较小时,两类典型岸坡安全系数都随水位下降而先减小后增大,均存在最危险水位。

(4)本文方法可考虑水位变化过程中基质吸力对岸坡稳定性的影响,只有考虑基质吸力的变化及作用,才能正确得出水位变化过程中岸坡稳定性变化规律和实质。

参 考 文 献

- [1] 廖红建, 盛谦, 高石夯, 等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3454—3458.
LIAO Hong-jian, SHENG Qian, GAO Shi-hang, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3454—3458.
- [2] 刘新喜, 夏元友, 张显书, 等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1427—1431.
LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, ZHANG Xian-shu, et al. Effects of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1427—1431.
- [3] 张文杰, 陈云敏, 凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1510—1516.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, LING Dao-sheng. Seepage and stability analysis of bank slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1510—1516.
- [4] 宋琨, 晏鄂川, 朱大鹏, 等. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 1510—1516.

- SONG Kun, YAN E-Chuan, ZHU Da-Peng, et al. Base on permeability of landslide and reservoir water change to research variational regularity of landslide stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 1510—1516.
- [5] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(5): 443—450.
- [6] 贾苍琴, 黄茂松, 王贵和. 非饱和-非稳定渗流作用下土坡稳定分析的强度折减有限元方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1290—1296.
- JIA Cang-qin, HUANG Mao-song, WANG Gui-he. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1290—1296.
- [7] 年廷凯, 万少石, 蒋景彩, 等. 库水位下降过程中土坡稳定强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2264—2269.
- NIAN Ting-kai, WAN Shao-shi, JIANG Jing-cai, et al. Finite element analysis(FEA) of slope stability by strength reduction technique under drawdown conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2264—2269.
- [8] 沈银斌, 朱大勇, 姚华彦. 水位变化过程中边坡临界滑动场[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 179—183.
- SHEN Yin-bin, ZHU Da-yong, YAO Hua-yan. Critical slip field of slope in process of reservoir water level fluctuations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 179—183.
- [9] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798—1803.
- JIA Guan-wei, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1798—1803.
- [10] 李邵军, KNAPPETTJA, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586—1593.
- LI Shao-jun, KNAPPETT J A, FENG Xia-ting. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1586—1593.
- [11] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261—1271.
- YANG Chun-bao, ZHU Bin, KONG Ling-gang, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(7): 1261—1271.
- [12] 朱大勇. 边坡临界滑动场及其数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1997, 9(1): 63—69.
- ZHU Da-yong. Critical slip field of slope and its numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 9(1): 63—69.
- [13] 朱大勇, 周早生. 边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 66—72.
- ZHU Da-yong, ZHOU Zao-sheng. Theory of globally critical slip field of slopes and its application to practical engineering[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(3): 66—72.
- [14] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley, 1993.
- [15] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理, 方法, 程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [16] FREDLUND D G, XING An-qing. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(3): 521—532.
- [17] FREDLUND D G, XING An-qing, HUANG Shang-yan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(3): 533—546.

《岩土力学》2014 年增刊 1 被 EI 收录论文 (64 篇, 收录率 100 %)

序号	论文题名	作者	页码
1	深部硬煤掘进工作面煤与瓦斯突出机制探讨	李定启	1—7
2	基于广义位势理论的土的非共轴特性研究	温 勇, 杨光华, 钟志辉, 等	8—14
3	反倾层状岩质边坡悬臂梁极限平衡模型研究	蔡静森, 晏鄂川, 王章琼, 等	15—28
4	单一预制节理试件各向异性力学特性试验研究	孙旭曙, 李建林, 王乐华, 等	29—34
5	基于黏弹性本构性能的隧道围岩变形预测研究	俞文生, 平 洋	35—41
6	马蹄形隧洞考虑支护滞后过程的应力分析	吕爱钟, 覃 媛, 陈虹宇	42—48
7	基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用	裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等	49—56
8	不同遗址土的热物理参数研究	张虎元, 张学超, 陈晓宁	57—62
9	三角波卸载段作用下钙质砂毫米量级变形速率预测模型研究	刘 杰, 李建林, 唐 亮, 等	63—70
10	冲击荷载作用下海积软土的动力释水规律研究	刘勇健, 符 纳, 林 辉	71—77
11	高地应力区砂岩在卸荷条件下的变形参数劣化试验研究	胡 政, 刘佑荣, 武 尚, 等	78—84
12	深部泥岩渗透率测试方法及数据适用性分析	刘 伟, 李银平, 杨春和, 等	85—90
13	不同仰坡度的山岭隧道洞口段动力响应振动台试验研究	陶连金, 侯 森, 赵 旭, 等	91—98
14	基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究	张学朋, 王 刚, 蒋宇静, 等	99—105
15	软土抗剪强度指标随固结度变化规律分析	汪洪星, 杨春和, 陈 锋, 等	106—112
16	砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究	王 军, 林 旭, 刘飞禹, 等	113—120
17	粉土持水性能的温度效应研究	谈云志, 胡新江, 喻 波, 等	121—126
18	滑坡—碎屑流物理模型试验及运动机制探讨	郝明辉, 许 强, 杨 磊, 等	127—132
19	库岸滑坡涌浪经验估算方法对比分析	黄锦林, 张 婷, 李嘉琳	133—140
20	持续蒸发作用下膨胀土裂隙和湿热特性室内模型试验	李雄威, 王爱军, 王 勇, 等	141—148
21	门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析	申永江, 邓 飏, 杨 明, 等	149—155
22	均质边坡稳定性极限曲线法	方宏伟, 李长洪, 李 波	156—164
23	嵌岩桩抗滑特性的物理模型试验研究	祝廷尉, 胡新丽, 徐 聪, 等	165—172
24	基于脆剪分析的岩体非线性强度特性在统一强度理论中的实现	李 远, 李 振, 乔 兰, 等	173—180
25	复杂反倾岩质边坡的稳定性分析方法研究	王林峰, 陈洪凯, 唐红梅	181—188
26	裂纹方向对隧道稳定性影响规律的研究	李元鑫, 朱哲明, 刘 凯, 等	189—194
27	基于参数劣化的软硬相间顺层边坡稳定性研究	梁德明, 李长冬, 雍 睿, 等	195—202
28	南海迭层土物理力学特性的研究	李 飒, 徐保照, 刘剑涛, 等	203—208
29	基于岩石颗粒排列方式的低渗透层应力敏感性分析	雷 刚, 董平川, 杨 书, 等	209—214
30	Eu(III)溶液对膨润土-砂混合物渗透性能影响研究	张虎元, 周 浪, 陈 航, 等	215—220
31	考虑加筋与遮帘效应计算群桩沉降的相互作用系数法	林智勇, 戴自航	221—226
32	城市桥梁基桩承载性能时间效应试验研究	徐兆邦, 周 健, 李素华	227—232
33	改进的 Maksimovic 峰值剪切强度准则的试验验证	唐志成, 刘泉声, 黄继辉, 等	233—237
34	圈围工程中高强有纺土工布加筋垫层变形试验研究	曹国福, 徐 兵, 王茂胜, 等	238—244
35	黏性土填料下考虑土拱效应的挡土墙被动土压力计算	周晓龙, 马 亢, 钱 明, 等	245—250
36	我国大陆地下水封洞库址区地应力场分布规律统计分析	王章琼, 晏鄂川, 鲁功达, 等	251—256
37	地质力学磁力模型试验中均匀梯度磁场的构建	毕金锋, 罗先启, 沈 辉	257—263
38	上覆硬厚岩层破断运动及断顶控制	蒋金泉, 代 进, 王 普, 等	264—270
39	矿柱稳定性影响因素敏感性分析及其应用研究	宋卫东, 曹 帅, 付建新, 等	271—277
40	不同地质条件下隧道洞口仰坡地震破坏特性研究	王帅帅, 高 波, 隋传毅, 等	278—284
41	强震作用下冰水桥墩动力响应研究分析	宋 波, 牛立超, 黄 帅, 等	285—291
42	点荷载法测试易风化泥质岩强度的可靠性分析	张国锋, 刘志双, 陈显坤, 等	292—298
43	液化与非液化场地加速度反应谱对比	孙 锐, 赵倩玉, 袁晓铭	299—305
44	上软下硬地层浅埋大跨度车站拆撑安全性分析	刘 涛, 赵松壮, 孙付峰	306—310
45	非均质土中桩端扩散虚土桩法的桩基纵向振动研究	杨冬英, 丁海平	311—318
46	水电站地下厂房结构抗震计算方法探讨	张志国, 杨 阳, 牟春来, 等	319—327
47	复杂地质条件下多结构面对重力坝坝基稳定性的影响及处理	李美蓉, 陈 媛, 牟 林, 等	328—333
48	三亚海岸珊瑚礁地层成因演化与工程地质分区	刘景儒, 王其涵, 王建平, 等	334—340
49	空沟对冲击荷载隔离的现场试验与数值模拟	徐 平, 张天航, 石明生, 等	341—346
50	饱和粉细砂层锚索预应力变化规律监测分析	刘 波, 张 功, 周浩亮, 等	347—352
51	深基坑承压水的风险控制及处理实例	徐长节, 徐礼阁, 孙凤明, 等	353—358
52	不同的层状岩体抗剪强度表达式计算效果的有限元分析	张玉军, 张维庆	359—364
53	连节理岩质边坡稳定性分析	宋玉才, 孙旭曙	365—372
54	基于隧洞衬砌和等效锚杆模拟的密集地下洞室群稳定性分析	刘 杰, 唐 亮, 李建林, 等	373—381
55	岩溶区高速公路路堤及溶洞顶板稳定性数值分析	戴自航, 范夏玲, 卢才金	382—390
56	相遇蚁群算法在边坡非圆弧临界滑动面搜索中的应用研究	高 玮, 张飞君	391—398
57	西藏樟木后山危岩崩塌颗粒离散元数值分析	王忠福, 何思明, 李秀珍	399—406
58	基于软化特性的三维边坡强度折减有限元分析	孙 聪, 李春光, 郑 宏, 等	407—413
59	确定大跨连续刚构桥地震动输入时程方法比较	罗 超, 楼梦麟, 桂国庆	414—422
60	三向土工格栅筋土界面及摩擦特性的离散元模拟	苗晨曦, 郑俊杰, 崔明娟, 等	423—430
61	软土基坑中内插 H 型钢重力式挡土墙支护的变形及稳定性的有限元研究	侯景军, 何 俊, 汤正俊, 等	431—436
62	锚杆支护圆形隧洞的等效强度参数及可靠性分析	孟 强, 赵洪波, 茹忠亮	437—442
63	山区公路拓宽路基与衡重式挡土墙动态相互作用的数值模拟	蒋 鑫, 耿建宇, 曾 诚, 等	443—450
64	探讨变雨强条件下的入渗过程及影响因素	张 杰, 韩同春, 豆红强, 等	451—456