

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S2.003

强降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场

蒋泽锋^{1,2}, 朱大勇^{1,2}

(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重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 降雨持时较长且雨强较大时, 雨水的入渗不仅会增大孔隙水压力, 且易使张裂缝充水形成静水压力, 对边坡稳定不利。结合降雨条件下饱和-非饱和渗流分析, 考虑降雨过程中的瞬态孔隙水压力场与瞬态强度场, 并同时考虑张裂缝充水时的静水压力, 对边坡临界滑动场法进行改进, 提出降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场数值模拟方法, 且对其进行了验证。将该方法用于一个典型均质黏土边坡算例, 结果表明, (1) 文中方法可考虑张裂缝具体位置、深度及其充水状态下对边坡稳定性的影响, 并能搜索出任意形状危险滑面, 计算结果合理可靠; (2) 降雨条件下张裂缝中静水压力对边坡稳定性及滑面形状有较大影响; (3) 降雨条件下张裂缝位置对边坡稳定有较大影响, 距坡肩越近, 张裂缝对边坡稳定性影响越大; (4) 张裂缝处在最不利位置且充水时存在一个最不利深度。

关 键 词: 边坡临界滑动场; 边坡稳定性; 张裂缝; 强降雨; 非饱和渗流分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 2 - 0025 - 10

Critical slip field of slope with tension crack under intensive rainfall

JIANG Ze-feng^{1,2}, ZHU Da-yong^{1,2}

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

Abstract: Pore water pressure and water table in the tension crack will increase gradually under the long duration rainfall with high intensity and it will be adverse to the slope stability. In combination with transient unsaturated seepage calculation, an improved numerical procedure for critical slip field of slope with tension crack under intensive rainfall is proposed. In this procedure, transient pore water pressure field, the location of crack and hydrostatic pressure in crack can be taken into account, put forward under the condition of rainfall has a crack slope critical sliding field numerical simulation method, and its are verified. This procedure has been applied to the stability analysis of a typical clay slope. The results show that: (1) The method can search for any shape of the dangerous slip surfaces under the condition of considering the location of tension crack and hydrostatic pressure in crack; and the safety factor is reliable. (2) Hydrostatic pressure in crack has great influence on slope stability and searching for the sliding surface. (3) Crack location has great influence on slope stability under rainfall; and the closer to the slope shoulder the location of tension crack is, the more unstable the slope is. (4) There is a most disadvantageous depth of tension crack when tension crack is located at the most disadvantageous position.

Keywords: critical slip field; slope stability; tension crack; intensive rainfall; unsaturated seepage analysis

1 引 言

降雨条件下的边坡稳定性分析是近些年来国内外岩土工程界的研究热点, 但一些学者在考虑降雨过程时并没有考虑张裂缝的影响。在地震、开挖、干湿循环等因素的作用下坡面及坡体后缘会产生一

系列的张裂缝, 这些张裂缝在降雨入渗条件下会加速坡体的变形, 最后导致坡体整体失稳。除此之外, 在极端久雨或强降雨条件下张裂缝充水达到一定高度时产生较大的静水压力, 导致坡体滑动力增大, 最终造成坡体的整体失稳。因此, 在降雨条件下对具有张裂缝边坡稳定性分析方法的研究具有实际工

收稿日期: 2016-03-17

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 (No.51179043)。

This work was supported by priority development project of Ministry of Education(2013JYF0661), Ministry of Water Resources Public Welfare Profession Special Scientific Research Foundation of China(201401063), and the National Natural Science Foundation of China(51179043).

第一作者简介: 蒋泽锋, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: zfjiang_hfut@163.com

程意义。

不少学者已开展了具有张裂缝边坡稳定性评价方面的工作。陈铁林等^[1]认为降雨往往导致含裂隙土坡的失稳,考虑了边坡中不存在裂隙以及存在裂隙的情况,并对计算结果进行了对比分析,但其只提供了边坡变形的位移矢量图,不能准确计算出评价边坡稳定性的安全系数。徐学军等^[2]针对边坡失稳破坏时坡顶出现竖向裂缝的工程实际情况,推导了裂缝开展深度的弹性解,并提出坡顶存在竖向裂缝时边坡的稳定分析方法。殷宗泽等^[3]提出了一种以条分法为基础的近似反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,且其对浸润线进行了假设,并不能考虑具有瞬态效应的孔隙水压力场及张裂缝中的静水压力对边坡整体稳定性的影响。邓东平等^[4-5]基于直线滑动面方法、圆弧滑动面方法和滑动面搜索新方法对渗流及水力条件下具有张裂缝的边坡进行稳定性分析,并研究了张裂缝位置与张裂缝水位对边坡稳定性的影响,然而其对流网简化,考虑孔隙水压力时并未进行饱和-非饱和渗流有限元计算,不能考虑降雨等引起的瞬态孔隙水压力场及基质吸力对边坡稳定性的贡献。

虽然对于具有张裂缝边坡在降雨及渗流条件下的稳定性开展了深入研究,但现有方法并不能同时考虑张裂缝的具体位置、降雨条件下的瞬态孔隙水压力场及张裂缝充水时对边坡的不利作用。本文在朱大勇等^[6-8]、蒋泽锋等^[9-10]研究的基础上,将边坡临界滑动场法与降雨入渗条件下饱和-非饱和渗流分析相结合,考虑张裂缝在降雨入渗及充水状态下对边坡稳定性的影响,进一步完善边坡临界滑动场法。根据三峡库区实测降雨资料求解给定降雨条件下的瞬态孔隙水压力分布,按非饱和土抗剪强度理论所获得的瞬态强度场来模拟具有张裂缝的边坡瞬态临界滑动场,通过算例比较了降雨入渗条件下考虑和不考虑张裂缝两种情况的边坡稳定性计算结果,同时还研究了降雨条件下张裂缝中水位变化及张裂缝不同位置对边坡稳定性的影响。

2 降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场基本理论

2.1 降雨入渗过程中具有张裂缝边坡边界条件

本文首先采用加拿大商业软件 Geostudio 的 SEEP/W 模块进行降雨条件下饱和-非饱和渗流有限元计算,获得不同降雨时刻的瞬态孔隙水压力场,而后将孔隙水压力值导入具有张裂缝边坡临界滑动场法计算程序。

当降雨强度小于土壤表面入渗能力时(第二类边界条件),降雨直接入渗土体中,入渗速率为降雨强度,土体裂隙中不存在积水,可直接采用无张裂缝的边坡非饱和入渗模型。当降雨强度大于土壤表面入渗能力时(第一类边界条件),多余的水在地表形成积水,此时认为雨水充满竖向张裂缝,渗流场由地表与张裂缝的两个侧面共同入渗。由于入渗边界的显著改变,相应非饱和渗流场也发生明显的变化,所以在研究第一类边界条件下的降雨入渗问题时必须考虑竖向张裂缝的影响。

在降雨入渗分析中对张裂缝有两种处理方式:一是将张裂缝两侧视为边界,数值计算时重新调整网格的局部范围,把张裂缝从所研究的空间去除,引入边界条件,就可以考虑张裂缝对入渗过程的影响。二是采用等效渗透系数法,按不考虑裂缝进行整个区域的离散化划分,裂缝单独视为一薄层单元,裂缝的渗透性等效为薄层的渗透性,在计算中给其很大的渗透系数。因有限元方法能够考虑复杂边界条件,本文采用方法1的处理方式求解。

2.2 非饱和抗剪强度理论

进行稳定性计算时非饱和抗剪强度按 Fredlund 等^[11]提出的以有效应力分量为基础的双应力状态变量公式计算:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

式中: c' 为总有效黏聚力; σ 为应力; u_a 为孔隙气压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; c 为黏聚力; ϕ^b 为相对于基质吸力的剪切摩擦角。

当土体饱和时, $(u_a - u_w) = 0$, $c' = c$, 此时适用 M-C 强度准则; 当土体非饱和时, $(u_a - u_w) > 0$, 此时 c' 取值为

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

随基质吸力而变化, ϕ^b 一般在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 范围变化, 为方便计算, 本文假定其为 20° 。

2.3 边坡临界滑动场法基本理论

边坡临界滑动场法将极限平衡条分法与最优性原理相结合, 能够快速、准确地得到边坡任意形状危险滑动面和其对应的安全系数, 限于篇幅, 相关理论见文献[6-8]。这种方法已得到众多国内外知名学者的高度评价与一致认可, 是一种具有广阔工程应用前景的边坡稳定分析方法。

2.4 张裂缝的处理

一般情况下, 对于具有张裂缝的边坡, 根据以往的研究^[4-5, 12-13], 通常假定张裂缝是直立的, 计算模型如图1所示。图中, z 为张裂缝深度; P_w 为

张裂缝充水状态下静水压力。

本文在搜索具有张裂缝边坡危险滑动面时按边坡临界滑动场基本方法圈定计算范围，划分垂直条块并设定离散点。对于张裂缝的处理，将计算范围平均划分条块线后在张裂缝所在位置增加条块线，如图 2 所示。原第 $i+1$ 条条块线在张裂缝所在位置强制增加一条条块线后，张裂缝所在处的条块线变为第 $i+1$ 条条块线，而原第 $i+1$ 条条块线自动变为第 $i+2$ 条条块线。

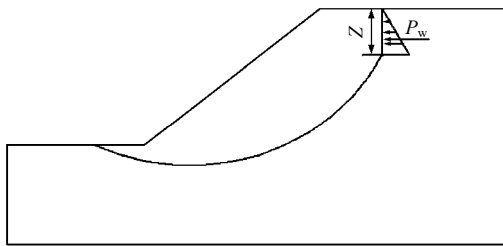


图 1 具有张裂缝边坡的示意图
Fig.1 Sketch of slope with crack

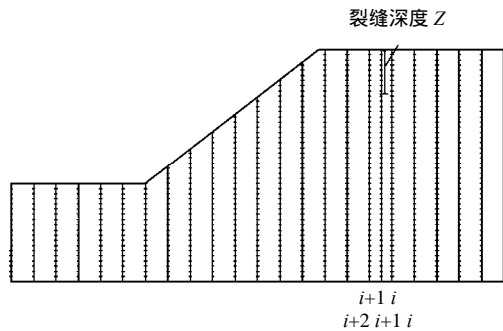


图 2 边坡体的离散
Fig.2 Discretization of slope with crack

2.5 张裂缝充水时静水压力的处理

将边坡体离散后给定的安全系数下条块线上任意状态点都存在最危险滑动方向 α 和最不利推力 P (见图 2)。根据条块受力平衡 (见图 3)，任意状态点剩余推力 P_k 计算公式为

$$P_k = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \phi_k^m)} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \phi_k^m) P_{k-1} + \sin(\alpha_k - \phi_k^m) W_k + \cos(\alpha_k - \phi_k^m) K_c W_k + \sin(\alpha_k - \theta_k - \phi_k^m) Q_k + \sin \phi_k^m U_k - c_k^m l_k \cos \phi_k^m] \quad (3)$$

式中： P_k 、 P_{k-1} 为条块间最大剩余推力； 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 、 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； 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。

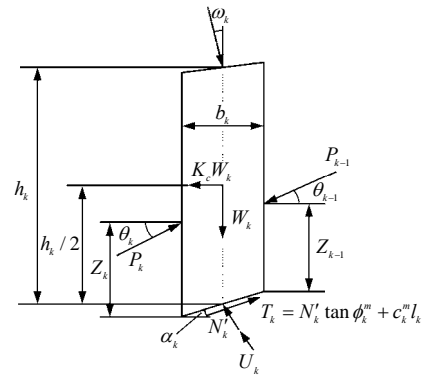


图 3 条块受力示意图
Fig.3 Sketch of forces on slices

当张裂缝充水 (见图 2) 时，张裂缝所在第 $i+1$ 条条块线及第 $i+2$ 条条块线上的状态点在计算最不利推力时会受到静水压力的作用，受力示意图如图 4 所示，第 $i+1$ 、 $i+2$ 条条块线上状态点剩余推力 P_k^{i+1} 、 P_k^{i+2} 分别为

$$P_k^{i+1} = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \phi_k')} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \phi_k') P_{k-1} + \sin(\alpha_k - \phi_k') W_k + \cos(\alpha_k - \phi_k') K_c W_k - \cos(\alpha_k - \phi_k') P_w + \sin \phi_k' U_k - \cos \phi_k' c_k' l_k] \quad (4)$$

$$P_k^{i+2} = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \phi_k')} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \phi_k') P_{k-1} + \sin(\alpha_k - \phi_k') W_k + \cos(\alpha_k - \phi_k') K_c W_k + \cos(\alpha_k - \phi_k') P_w + \sin \phi_k' U_k - \cos \phi_k' c_k' l_k] \quad (5)$$

式中： P_w 为张裂缝充水状态下静水压力。

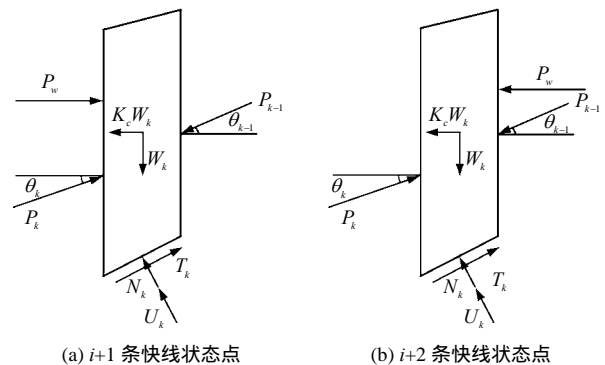


图 4 条块受力示意图
Fig.4 Sketch of forces on slices

研究表明，对于任意形状滑面，只有采用严格条分法才能给出最合理的安全系数。本文首先采用 CSF 法确定基于力平衡条分法 (简化 Janbu 法) 的临界滑动面位置，然后按严格法 (朱大勇改进的

Morgenster-Price 法^[14])重新计算安全系数,再按新得到的安全系数重新确定基于力平衡条分法的临界滑动面位置,而后继续用严格法计算新的安全系数,直至力平衡与严格法所得的安全系数几乎一致。

同样的,张裂缝充水状态下在用非严格法搜索出滑动面位置后,若张裂缝处于滑动体外部(见图5滑动面a),既有张裂缝中静水压力则不予考虑,此时滑面a的张裂缝是计算过程中用于消除负推力所设的张裂缝;若搜索出的滑动面上缘正好在既有张裂缝所在位置(见图5滑动面b),则需考虑张裂缝中静水压力的作用;若既有张裂缝在搜索出的滑动面内部(见图5滑动面c),则需考虑张裂缝中静水压力的作用,但此时滑面c的张裂缝是计算过程中用于消除负推力所设的张裂缝。

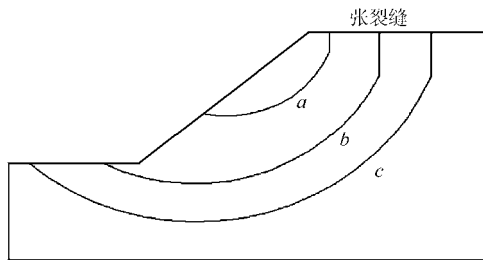


图5 滑动面示意图

Fig.5 Sketch of forces on slices

计算固定滑面安全系数时,若张裂缝在滑动体内(见图5滑面b),为了考虑张裂缝中静水压力,本文在朱大勇的研究基础上作出了进一步改进。分别将力沿平行及垂直滑面方向进行分解,可得

$$\left. \begin{aligned} (N'_k \tan \phi'_k + c'_k b_k \sec \alpha_k) / F_s = \\ (W_k + \lambda f_{k-1} E_{k-1} - \lambda f_k E_k) \sin \alpha_k - \\ (-K_c W_k + E_k - E_{k-1} - P_w) \cos \alpha_k \\ (N'_k = (W_k + \lambda f_{k-1} E_{k-1} - \lambda f_k E_k) \cos \alpha_k + \\ (-K_c W_k + E_k - E_{k-1} - P_w) \sin \alpha_k - U_k) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(6)中第二式代入式(6)中第一式可得

$$E_k \Phi_k = \psi_{k-1} E_{k-1} \Phi_{k-1} + F_s T_k - R_k \quad (7)$$

式中: E_k 为第 k 个条块左端的条间法向力;

$$\left. \begin{aligned} \Phi_k = (\sin \alpha_k - \lambda f_k \cos \alpha_k) \tan \phi'_k + \\ (\cos \alpha_k + \lambda f_k \sin \alpha_k) F_s \\ \Phi_{k-1} = (\sin \alpha_{k-1} - \lambda f_{k-1} \cos \alpha_{k-1}) \tan \phi'_{k-1} + \\ (\cos \alpha_{k-1} + \lambda f_{k-1} \sin \alpha_{k-1}) F_s \\ \psi_{k-1} = \\ \frac{(\sin \alpha_k - \lambda f_{k-1} \cos \alpha_k) \tan \phi'_k + (\cos \alpha_k + \lambda f_{k-1} \sin \alpha_k) F_s}{\Phi_{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

文献[14]中除条间力之外条块上所有力所提供的抗剪力之和 R_k 及下滑力之和 T_k 计算公式变为如下形式:

$$R_k = [W_k \cos \alpha_k - K_c W_k \sin \alpha_k - P_w \sin \alpha_k - U_k] \tan \phi'_k + c'_k l_k \quad (9)$$

$$T_k = W_k \sin \alpha_k + K_c W_k \cos \alpha_k + P_w \cos \alpha_k \quad (10)$$

当条块底面在非饱和区域时, R_k 为

$$R_k = [W_k \cos \alpha_k - K_c W_k \sin \alpha_k - P_w \sin \alpha_k] \tan \phi'_k + c'_k l_k \quad (11)$$

式中: c'_k 按式(2)计算。

当滑动面上缘在张裂缝位置时,端部条件为 $E_0 = P_w$, $E_n = 0$,其他情况端部条件为 $E_0 = P_w$, $E_n = 0$,其中 E_0 为第一个条块右端的条间法向力; E_n 为最后一个条块左端的条间法向力。再由式(7)推导安全系数 F_s :

$$F_s = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \left(R_k \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j \right) + R_n + \psi_0 \Phi_0 E_0 \prod_{k=1}^{n-1} \psi_j}{\sum_{k=1}^{n-1} \left(T_k \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \quad (12)$$

式中: $\psi_0 \Phi_0 = \sin \alpha_1 \tan \phi'_1 + \cos \alpha_1 F_s$ 。

如图3、4所示,对条块基底中心取力矩,且设条间力矩 $M_k = E_k z_k$,可得

$$M_k = M_{k-1} - \lambda \frac{b_k}{2} (f_{k-1} E_{k-1} - f_k E_k) + \frac{b_k}{2} (E_k + E_{k-1}) \tan \alpha_k + K_c W_k \frac{h_k}{2} - P_{wk} h'_k \quad (13)$$

式中: h'_k 为张裂缝充水状态下静水压力合力中心到条块底面中心点的竖直距离。

当滑动面上缘在张裂缝所在位置时,有端部条件 $M_0 = P_{wk} h'_k$ 及 $M_n = 0$,而在不在张裂缝所在位置时端部条件 $M_0 = 0$ 及 $M_n = 0$,根据力矩平衡方程可以解出比例系数 λ :

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^n [b_k (E_k + E_{k-1}) \tan \alpha_k + K_c W_k h_k + 2 P_{wk} h'_k]}{\sum_{k=1}^n [b_k (f_k E_k + f_{k-1} E_{k-1})]} \quad (14)$$

2.6 降雨条件下具有张裂缝的边坡临界滑动场计算步骤

降雨条件下具有张裂缝的边坡的全局临界滑动场具体计算步骤:

确定计算范围,平均划分条块并设置状态点,在张裂缝所在位置增加条快线,并设置状态点,且在张裂缝下端点强制设置状态点。

将具有张裂缝边坡在不同降雨时刻饱和-非饱和渗流有限元计算结果导入本文方法所编制的降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场计算程序。

给定初始值 $F_{s0} = 1$, $\lambda_0 = 0$ 。提取所有状态点试算滑面底部中点处的孔隙水压力值，并计算其合力值，判断试算滑面是否位于饱和区，若位于非饱和区，则用式 (2) 计算有效黏聚力。计算出所有状态点的危险滑动方向和最不利推力，当计算裂缝所在条块线的状态点时，需考虑裂缝中静水压力的作用，追踪出坡面预定出口的危险滑面。

采用步骤 中处理非饱和土抗剪强度的原理，用 Morgenster-Price 法计算上一步最危险滑面的安全系数 F_{s1} 和条间力函数的形状系数 λ_1 ，若张裂缝在滑动体内，需考虑充水时静水压力的作用。

以步骤 求出的 F_{s1} , λ_1 计算出所有状态点的危险滑动方向和最不利推力，追踪出预定出口的危险滑面。重复步骤、，直到相邻两次安全系数 F_s 差值小于给定的精度值。

选定下一个出口，初始的 F_{s0} 和 λ_0 值可以选择上一出口的局部临界滑动面对应的值，以减少迭代次数，重复步骤 ~，计算出对应的局部临界滑动面。

3 算例分析

3.1 计算模型及边界条件

本文参照文献[15]，以典型均质黏土边坡为例，几何尺寸如图 6 所示，土体重度 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ ， $c' = 25 \text{ kPa}$ ， $\phi' = 15^\circ$ ，剪切摩擦角 $\phi^b = 20^\circ$ ，渗透系数 $k_s = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (即 86.4 mm/d)，Geostudio 软件 SEEP/W 模块给出的典型黏土的土-水特征曲线及渗透性函数曲线分别如图 7 所示。关于张裂缝深度，参照文献[3]的统计资料，取近似值 $h_c = 4 \text{ m}$ 。

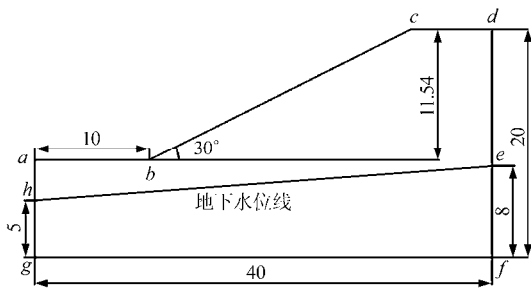
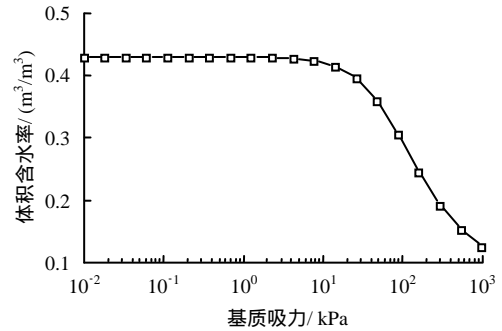


图 6 计算模型与边界条件示意图(单位: m)

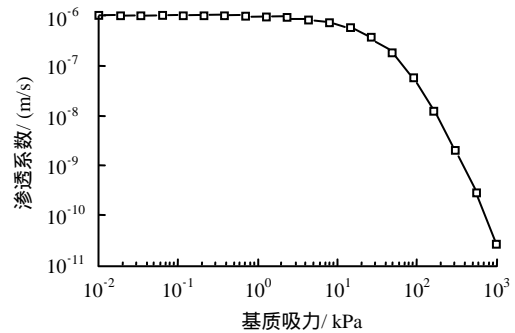
Fig.6 Sketch of computation model and boundary conditions(unit: m)

降雨条件下进行渗流分析时，边界条件如下：
 ab 、 bc 、 cd 为降雨入渗边界，当降雨强度小于土壤

表面入渗能力时，按流量边界处理，入渗速率取为降雨强度，边界条件为第二类边界条件；当降雨强度大于土壤表面入渗能力时，入渗的速率就等于土壤的入渗能力，边界条件转换为第一类边界条件； ef 、 gh 为水头边界； ah 、 de 、 fg 为不透水边界。



(a) 体积含水率与孔隙压力的关系



(b) 渗透系数与孔隙水压力的关系

图 7 土体的土-水特征曲线

Fig.7 Soil-water characteristic curve of soils

3.2 计算方案

为使分析结果更具工程实用价值，本文根据三峡库区实测降雨资料[16]进行降雨条件下具有张裂缝边坡稳定性分析。根据文献[17]可知，三峡库区降雨在 6~8 月份最为集中，且最大月平均降雨量约为 173 mm/d。计算时根据三峡库区实测资料模拟一场大规模降雨，降雨持时为 16 d，其中 1~10 d 为中雨，11~13 d 为暴雨，13~16 d 为大暴雨，且中雨、暴雨、大暴雨的降雨强度分别为 25、60、172 mm/d。

渗流场计算时考虑以下两种工况：(1) 无张裂缝边坡；(2) 具有张裂缝边坡。为计算方便，张裂缝位置设在距离坡肩 2.5 m 处。图 8 为两种工况下渗流计算的有限元网格剖分图，所有计算单元都取三角形单元。

3.3 降雨条件下有无张裂缝边坡稳定性计算结果分析与讨论

经过渗流计算，两种工况在 16 d 持续降雨条件

下浸润线变化如图 9 所示。从图中可知，随着降雨的持续进行，浸润线上升，坡体渐渐趋于饱和。但当边坡具有张裂缝时，在强降雨过程中，雨水首先沿张裂缝进入坡体，在相同的降雨时间内，浸润线变化明显快于无张裂缝边坡，坡体更快趋于饱和。

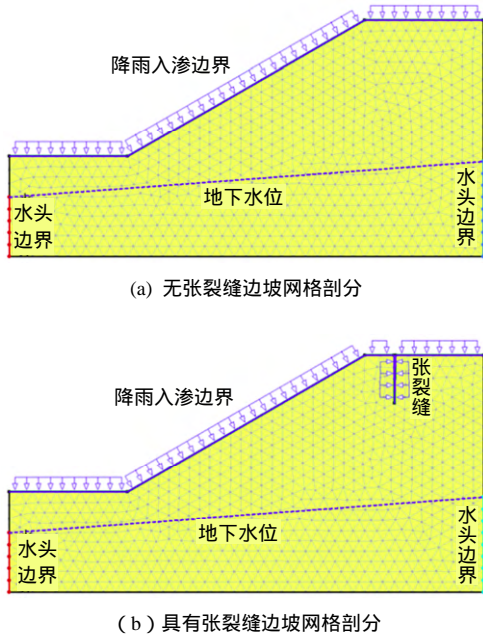


图 8 渗流计算模型网格剖分
Fig.8 Model of finite element mesh used for seepage computation

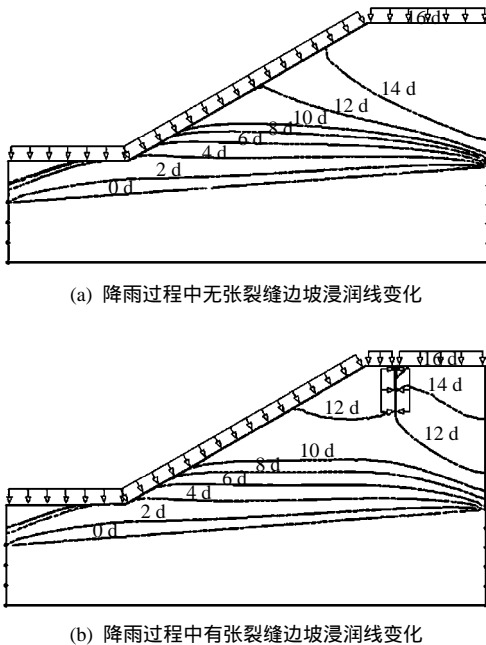


图 9 降雨过程中浸润线变化
Fig.9 Phreatic line corresponding to rainfall at different times

笔者以往研究已对考虑地下水位及降雨入渗条件下边坡临界滑动场计算方法进行过对比验证^[9-10],

但以往降雨过程中边坡临界滑动场法计算结果是跟 SLOPE/W 软件的圆弧滑动面相比较的，而本文方法搜索的是任意形状滑动面，为了进一步验证本文方法的合理性，在工况一下将本文方法计算结果与 SLOPE/W 软件利用 M-P 法搜索任意形状滑面计算结果进行比较，比较结果如图 10 所示。从图中可以看出，SLOPE/W 软件搜索任意形状滑面与本文方法搜索的任意形状滑面所计算的安全系数甚为接近，误差控制在 1% 以内。

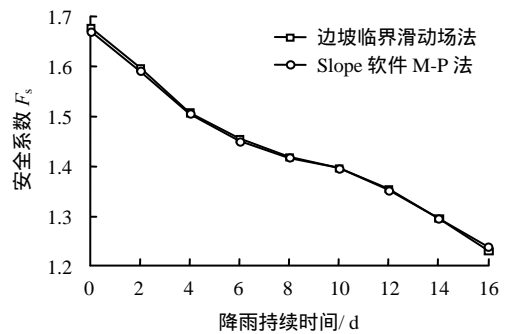


图 10 降雨过程中边坡稳定性变化曲线
Fig.10 Curves of slope stability changing under rainfall

为研究具有张裂缝边坡与无张裂缝边坡在强降雨条件下的稳定性变化情况，对两种边坡瞬态稳定性进行了计算，计算时暂不考虑张裂缝中静水压力的作用，安全系数随时间变化曲线如图 11 所示。

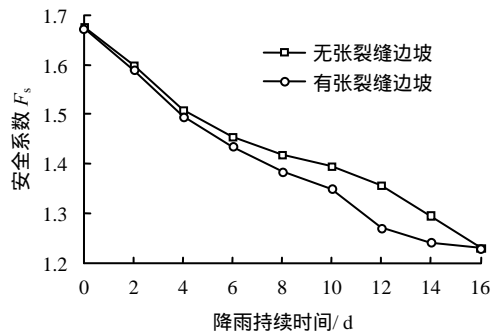


图 11 安全系数与降雨持久的关系
Fig.11 Relationships between safety factor and duration of rainfall

从图 11 中可以看出，降雨过程中，随着雨水入渗，边坡内部基质吸力降低，强度减小，且条块底部孔隙水压力合力增大，从而导致边坡稳定安全系数逐渐下降。由图 11 还可以看出，在降雨入渗过程中具有张裂缝边坡安全系数较无张裂缝边坡下降得更快。这是由于雨水沿张裂缝垂直入渗，具有张裂缝边坡入渗量更大，饱和区域增加得更快，尤其是在刚经过 2 d 暴雨后(降雨持续进行 12 d 末)，入渗

量突然增大，两者安全系数差距也突然增大，差距接近 0.1，但随着降雨持续进行，边坡体渐渐饱和，安全系数又逐渐趋于相同。

3.4 降雨条件下张裂缝饱水时静水压力对边坡稳定性影响

3.4.1 对比验证

由于目前市场上的软件，如 SLOPE/W、Geo5v19 等软件都认为土质边坡的张裂缝分布非常广泛，其在搜索过的每个滑动面后缘都考虑作用有一深度为 h_c 的张裂缝^[17]，但软件中并不能给出张裂缝的具体位置，从而并不能进行对具有张裂缝边坡在降雨条件下张裂缝饱水时的稳定性分析。进行降雨条件下具有张裂缝边坡的稳定性分析前，对本文方法进行合理性验证。因章节 3.3 已将降雨条件下边坡临界滑动场法计算结果与 SLOPE/W 软件计算结果进行了对比验证，本节只需在张裂缝充满水时对边坡稳定性计算结果进行对比验证即可。

由于 SLOPE/W 等软件无法在给定张裂缝位置的情况下进行土质边坡稳定性分析，本文首先用 SLOPE/W 软件 M-P 法(自动搜索任意形状滑面)计算出张裂缝具体位置，计算结果如图 12 所示。软件结果信息显示，张裂缝位置距离坡肩 2.436 m。本文方法在计算时平均划分条块线 通过对 SLOPE/W 软件计算的张裂缝具体位置强制增加条块线来考虑张裂缝中静水压力的作用，计算所得的边坡最危险滑动面及全局临界滑动场分别如图 13、14 所示。

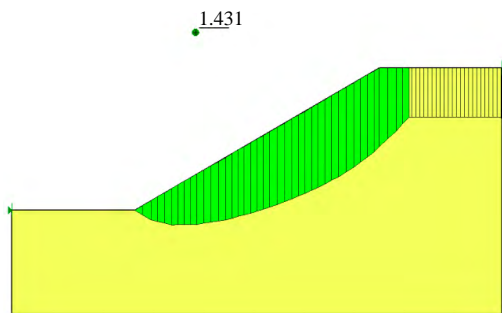


图 12 SLOPE/W 软件计算结果
Fig.12 Calculation result of SLOPE/W

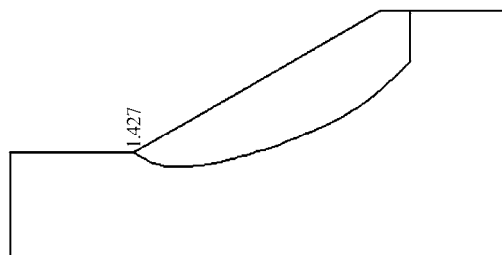


图 13 具有张裂缝边坡的最危险滑面
Fig.13 Most dangerous sliding surface of slope with crack

由图 12、13 可知，SLOPE/W 软件 (M-P 法) 自动搜索出的任意形状滑面及计算所得的安全系数与本文方法得到的滑面及安全系数都甚为接近，且安全系数误差在 0.3%左右，由此本文方法计算结果是合理的。由图 14 可知，在假定不考虑入渗的情况下，张裂缝充满水时静水压力对滑动面搜索结果有较大影响，所有局部临界滑动面的上滑点都在张裂缝所在位置。

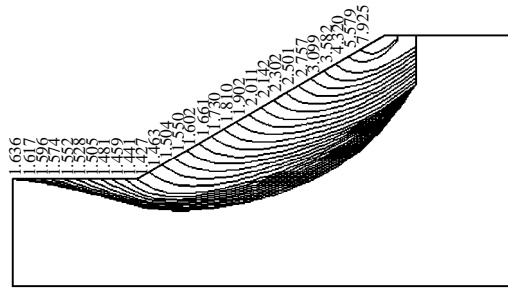


图 14 具有张裂缝边坡的全局临界滑动场
Fig.14 GCSF of slope with crack

3.4.2 降雨过程中张裂缝中静水压力对边坡稳定性影响

本文计算方案中前 13 d 的降雨强度分别为 25.00、60.48 mm/d，都小于边坡土体的渗透系数，此时理论上降雨全部入渗，张裂缝中无积水，而当第 14 d 开始，降雨强度达到 172.80 mm/d，远远大于边坡土体入渗速率，此时可认为第 14 天未起张裂缝即处于饱水状态。为了研究张裂缝中静水压力对边坡稳定性的影响程度，本文假定从降雨第 1 天未起张裂缝就已处于饱水状态。降雨过程中考虑与不考虑张裂缝饱水状态时静水压力两种工况下的边坡安全系数见图 15，第 16 天末两种工况下的边坡全局临界滑动场分别如图 16 所示。

由图 15 可知，在同一降雨持时考虑张裂缝中静水压力时的边坡安全系数小于不考虑张裂缝中静水压力时的边坡安全系数，说明张裂缝中静水压力对边坡稳定性不利；降雨 10 d 以内张裂缝中静水压力对边坡稳定性的影响要小于 10 d 以后，这是由于坡体内基质吸力提供了一定的抗剪强度，一定程度上抵消了张裂缝中静水压力对边坡稳定的不利作用，而当降雨 10 d 后，随着降雨继续进行，边坡体内基质吸力继续减小，坡体慢慢趋于饱和，基质吸力对抗剪强度的贡献逐渐消失，以至于静水压力对边坡的不利作用显现的更加明显，尤其在降雨持续到 16 d 时坡体饱和，如图 16 所示。静水压力的不利作用对安全系数的影响达到 12.3%。因此，研究降雨条件下具有张裂缝边坡稳定性时，当张裂缝中存在

积水时，考虑张裂缝中静水压力对边坡稳定的不利作用具有一定的工程价值。

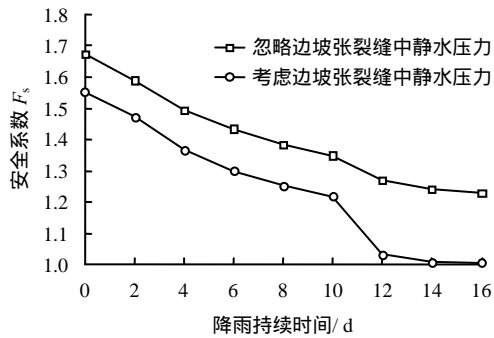


图 15 安全系数与降雨持时的关系
Fig.15 Relationships between safety factor and duration of rainfall

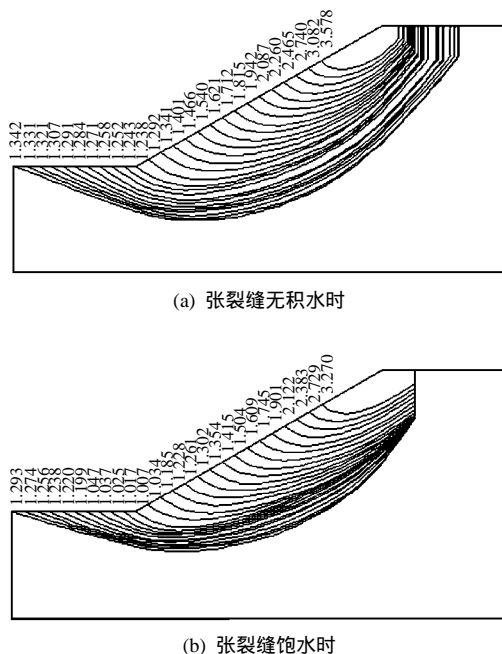


图 16 张裂缝无积水和饱水时边坡全局临界滑动场
Fig.16 Global critical slip field of slope without and considering hydrostatic pressure in tension crack

从图 16 中可以看出，当降雨强度较大，边坡张裂缝中充满水时，张裂缝中静水压力对搜索滑动面也有一定的影响。由图 16(b)的边坡全局临界滑动场可看出，当考虑张裂缝中静水压力时，所有局部临界滑动面的上滑点都在张裂缝所在位置，这是因为如图 2 在计算 $i+2$ 条快线上张裂缝所在范围状态点最不利推力时，张裂缝中静水压力不但增大了张裂缝所在范围状态点的最不利推力，还增大了这些状态点最危险滑动方向的角度，而在计算 $i+1$ (见图 2) 条快线上张裂缝所在范围状态点最不利推力时，张裂缝中静水压力不但减小了张裂缝所在范围状态点

的最不利推力，还减小了这些状态点最危险滑动方向的角度，所以只要张裂缝位置在影响边坡稳定范围内，自动搜索滑动面时，危险滑动面的上缘都会自动搜索到最不利滑动方向所在位置。

3.5 张裂缝中水位对边坡稳定性影响

为研究强降雨条件下边坡在饱和及非饱和状态下张裂缝水位对边坡稳定性的影响，分别采用降雨 10 d 及 16 d 时的孔隙水压力场，计算得到的最小安全系数如图 17 所示。从图中可以看出，随着张裂缝水位的上升，无论边坡是否处于饱和状态计算得到的最小安全系数都逐渐减小，说明张裂缝水位的上升对边坡的稳定性影响较大；当边坡处于非饱和状态时，安全系数变化曲线相对较光滑，当边坡处于饱和状态时，当张裂缝水位从 2.5 m 上升到 3 m 时，安全系数会急剧变小，且当边坡处于饱和状态时，张裂缝中水压力对边坡稳定性影响更大，安全系数变化范围也较非饱和时更大。这是由于在张裂缝水位上升时，对边坡稳定的不利作用加大，而对于降雨 10 d 时的非饱和边坡，基质吸力对抗剪强度做出了一定的贡献，在一定程度上抵消了张裂缝中静水压力对边坡稳定的不利作用。

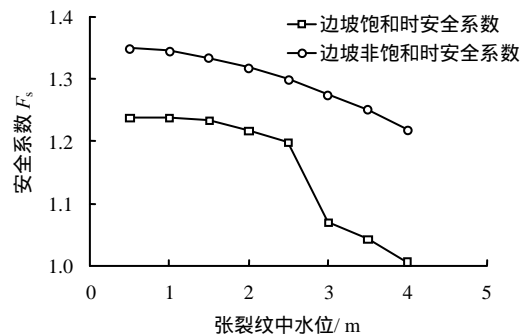


图 17 张裂缝水位变化时的安全系数
Fig.17 Safety factor with change of crack's water table

3.6 张裂缝位置对边坡稳定性影响

由章节 3.5 可知，在强降雨条件下具有张裂缝边坡在张裂缝处于饱水状态时对边坡稳定性影响较大，为研究张裂缝最不利位置及其不同位置对边坡稳定性的影响，本节同样根据降雨 16 天后的孔隙水压力场(坡体已达饱和状态)，计算得到的安全系数见图 18。图中，张裂缝位置 0 m 处表示坡肩位置，即图 6 中的 c 点，c 点右边距 c 点的水平距离为正，反之为负。从图中可以看出，当降雨条件下边坡体饱和时，张裂缝最不利位置在坡顶距坡肩 2 m 处，此时边坡稳定安全系数最小，边坡全局临界滑动场如图 19 所示。

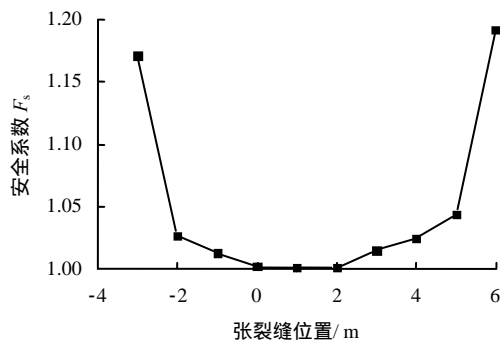


图 18 张裂缝位置变化时的安全系数
Fig.18 Safety factor with change of crack's location

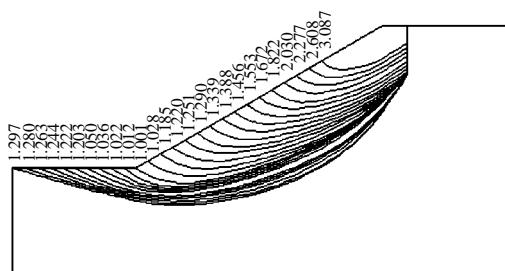


图 19 张裂缝在最不利位置时的边坡全局临界滑动场
Fig.19 Global critical slip field of slope when crack's location is most disadvantageous

除此之外,由图 17 可得,无论张裂缝在坡面或是坡顶位置,距坡肩越近,张裂缝对边坡稳定性影响越大,当张裂缝在坡面上距坡肩水平距离为 1 m 时的边坡全局临界滑动场如图 20 所示。

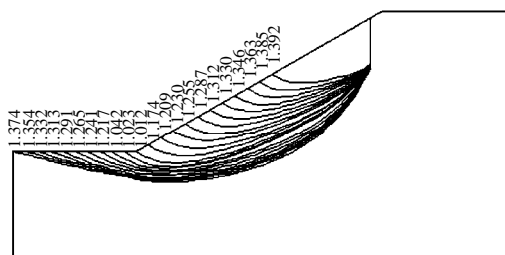


图 20 张裂缝在坡面上时的边坡全局临界滑动场
Fig.20 Global critical slip field of slope when crack's location is at slope surface

3.7 张裂缝深度对边坡稳定性影响

由章节 3.6 可知,边坡体饱和时张裂缝最不利位置在坡顶距坡肩 2 m 处,本节在降雨条件下坡体处于饱和状态时,进一步研究张裂缝处于最不利位置时其深度对边坡稳定性的影响,随裂缝深度变化的安全系数计算结果如图 21 所示。由图可知,当降雨过程中边坡处于饱和状态时,张裂缝在最不利位置情况下,安全系数随深度先减小后增大,增大到一定程度时继而减小,总体而言,张裂缝处在最不利位置时同样存在一个最不利深度,这个深度大约

在坡高的 2/5 处。

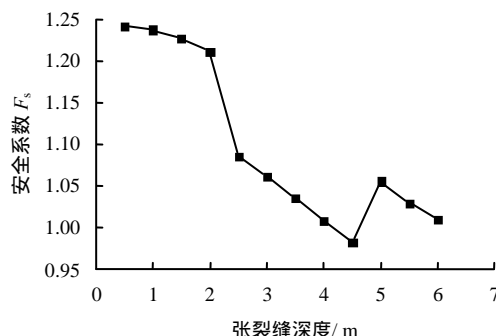


图 21 张裂缝在最不利位置时随深度变化的安全系数
Fig.21 Safety factor with change of crack's depth when crack's location is most disadvantageous

4 结 论

(1) 在强降雨过程中,在相同的降雨时间内具有张裂缝边坡雨水入渗量较无张裂缝边坡更大,基质吸力降低的更多,饱和区域增加的更大,从而导致边坡稳定安全系数下降的更快。

(2) 降雨条件下边坡张裂缝处在饱和状态时,张裂缝中静水压力对边坡稳定的不利作用较大,尤其当边坡体处于饱和状态时对安全系数的影响甚至达到 12.3%,可见降雨条件下边坡稳定性计算中应考虑张裂缝中静水压力的不利影响。且张裂缝中静水压力对滑动面的搜索也具有一定影响,所有局部临界滑动面的上滑点都在张裂缝所在位置。

(3) 随着张裂缝水位的上升,无论边坡是否处于饱和状态计算所得的最小安全系数都逐渐减小,且当边坡处于饱和状态时,安全系数变化范围较非饱和时更大。

(4) 降雨条件下张裂缝位置对边坡稳定有较大影响,无论张裂缝在坡面或是坡顶位置,距坡肩越近,张裂缝对边坡稳定性影响越大。

参 考 文 献

[1] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 210 - 215.
CHEN Tie-lin, DENG Gang, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 210 - 215.

[2] 徐学军, 王罗斌, 何子杰. 坡顶竖向裂缝对边坡稳定性影响的研究[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 46 - 48.
XU Xue-jun, WANG Luo-bin, HE Zi-jie. Study on the influence of slope stability with vertical crack at the top

- of slope[J]. **Yangtze River**, 2009, 40(22): 46 - 48.
- [3] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(3): 454 - 459.
YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 454 - 459.
- [4] 邓东平, 李亮. 水力条件下具有张裂缝临河边坡稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(9): 1835 - 1847.
DENG Dong-ping, LI Liang. Study of stability of slope with tension crack near river under hydraulic situation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1835 - 1847.
- [5] 邓东平, 李亮. 渗流条件下具有张裂缝边坡的稳定性分析[J]. **中南大学学报**, 2013, 44(1): 294 - 302.
DENG Dong-ping, LI Liang. Stability analysis of slope with tensile crack under condition of seepage[J]. **Journal of Central South University**, 2013, 44(1): 294 - 302.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ZHU D Y. A method for locating critical slip surfaces in slope stability analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(2): 328 - 337.
- [9] 蒋泽锋, 朱大勇, 沈银斌, 等. 非饱和-非稳定渗流条件下的边坡临界滑动场[J]. **岩土力学**, 2015, 36(6): 1815 - 1823.
JIANG Ze-feng, ZHU Da-yong, SHEN Yin-bin, et al. Critical slip field of slope under the condition of transient unsaturated seepage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1815 - 1823.
- [10] 沈银斌, 朱大勇, 蒋泽锋, 等. 降雨过程中边坡临界滑动场[J]. **岩土力学**, 2013, 34(增刊 1): 60 - 66.
SHEN Yin-bin, ZHU Da-yong, JIANG Ze-feng, et al. Critical slip field of slope in process of rainfall infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 60 - 66.
- [11] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley, 1993.
- [12] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 水位升降和流水淘蚀对临河路基边坡稳定性的影响[J]. **公路交通科技**, 2010, 27(6): 1 - 8.
ZHAO Lian-heng, LUO Qiang, LI Liang, et al. Study on stability of subgrade slope along river subjected to water level fluctuation and stream erosion[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2010, 27(6): 1 - 8.
- [13] 张永兴, 宋西成, 王桂林. 极端冰雪条件下岩石边坡倾覆稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(6): 1164 - 1171.
ZHANG Yong-xing, SONG Xi-cheng, WANG Gui-li. Overturning stability analysis of rock slope under extreme snow disasters conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1164 - 1171.
- [14] ZHU D Y, LEE C F, QIAN Q H, et al. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42: 272 - 278.
- [15] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. **岩土力学**, 2013, 34(11): 3239 - 3248.
TANG Dong, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bin, et al. Slope stability analysis considering antecedent rainfall process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3239 - 3248.
- [16] 叶殿秀, 陈鲜艳, 张强, 等. 1971 - 2003 年三峡库区诱发滑坡的临界降水阈值初探[J]. **长江流域资源与环境**, 2014, 23(9): 1289 - 1294.
YE Dian-xiu, CHEN Xian-yan, ZHANG Qiang, et al. Thresholds of precipitation for the landslide over the Three Gorges reservoir area during 1971-2003[J]. **Resources and Environment in the Yangtze Basin**, 2014, 23(9): 1289 - 1294.
- [17] Geo-Slope International Ltd. SLOPE/W for slope stability analysis 2007[M]. Calgary, Alberta: Geo-Slope International Ltd., 2010.