

降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析

徐 全, 谭晓慧*, 沈梦芬

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 降雨对边坡的稳定性具有重要影响。在降雨作用下, 土坡中的饱和度及含水率增加, 基质吸力减小, 而水、气压力的变化又影响着土体骨架的变形。文章基于饱和–非饱和渗流分析及强度折减法, 对降雨作用下的土质边坡进行了固体和流体的耦合分析及不耦合分析, 研究了饱和渗透系数及降雨强度对边坡安全系数及滑面位置的影响, 并分析了安全系数及滑面位置与时间的关系。研究表明: 土体的饱和渗透系数对边坡的稳定性影响很大; 对于渗透性较好的土体, 降雨强度越大, 在降雨作用下边坡的安全系数变化程度也越大, 安全系数降低及恢复的速度也越快; 对于渗透性较差的土体, 降雨强度对边坡稳定性的影响有限; 在相同的计算条件下, 不耦合分析对应的安全系数小于耦合分析的相应值; 在不同强度的降雨作用下, 滑面位置变化的范围有所不同, 不耦合分析的滑面位置变化范围主要出现在坡肩, 而耦合分析的滑面位置变化范围主要出现在坡脚。

关键词: 边坡; 稳定性; 降雨; 耦合分析; 渗流; 土水特征曲线

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0254-06

作者简介: 徐 全(1990-), 男, 安徽芜湖人, 本科生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: tantan9666@126.com。

Stability analysis of soil slopes under rainfall infiltration

XU Quan, TAN Xiao-hui, SHEN Meng-fen

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Rainfall has a large effect on the stability of soil slopes. Under rainfall infiltration, the degree of saturation and water content of soil slope increase, and the matrix suction decreases. On the other hand, change of fluid pressure affects the deformation of soil skeleton. Based on the saturated-unsaturated seepage analysis and the strength reduction method, the coupled and uncoupled analysis of a soil slope under rainfall infiltration is analyzed. The influence of the coefficient of saturated hydraulic conductivity and the rainfall intensity on the slope stability is studied, and the relationship between the factor of safety and the position of sliding surface is obtained. This study illustrates that the saturated hydraulic conductivity has a large effect on slope stability. If the permeability of soils is relatively large, the changing range and velocity of the factor of safety increase with the rainfall intensity; and if it is relatively small, the influence of the rainfall intensity on the slope stability is also small. Under the same conditions, the factor of safety of uncoupled analysis is less than that of the coupled analysis. The position of the potential sliding surface varies with different rainfall intensities, e.g., the variation region of the sliding surface of uncoupled analysis occurs at the shoulder of the slope, while that of coupled analysis appears at the toe of the slope.

Key words: slope; stability; rainfall; coupled analysis; seepage; soil-water characteristic curve

0 引言

土质边坡的稳定性分析是岩土工程中十分重要的研究课题。非饱和土质边坡在天然状态下常常具有较高的稳定性, 但在降雨的作用下, 由于基质吸力的减少, 边坡的稳定性将大大降低^[1]。降雨将使边坡表层土体的饱和度增加, 同时边坡内部的孔隙水压力将增大, 而基质吸力则有所减小。降雨强度与历时、土体的力学性质、水力性质等多种因素都对边坡的稳定性产生影响。研究降雨对非饱和土质边坡稳定性的影响

具有重要的理论意义及应用价值。

文献[2]分析了饱和渗透系数及不同的降雨方式对边坡稳定性的影响, 指出先期降雨对边坡稳定性影响很大。文献[3]进行了降雨入渗分析中水力学参数的敏感性分析, 指出土水特征曲线的拟合参数对渗透性

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972194); 中国博士后科学基金项目(2011M501039); 合肥工业大学博士后流动站资助项目

收稿日期: 2012-08-24

*通讯作者

差的土影响程度大于对渗透性好的土的影响。文献[4]分析了降雨对击实土坡稳定性的影响, 分析时考虑了坡表积水、短期稳定性、长期稳定性等计算工况。文献[5]进行了土质边坡的瞬态稳定性分析, 研究了单峰降雨和双峰降雨对边坡稳定性的影响。文献[6]采用强度折减法分析了降雨对边坡稳定性的影响。

上述这些研究为深入了解土质边坡在降雨作用下的稳定性具有重要意义。但是, 这些研究中没有考虑降雨作用下土体中吸力变化与土体变形间的耦合作用, 也没有考虑边坡潜在滑面位置随降雨的变化规律, 而这些问题在工程实践中具有重要意义。因此, 本文拟对降雨作用下土质边坡的稳定性进行耦合及不耦合分析, 并分析滑面位置的变化规律。

1 饱和-非饱和渗流分析

1.1 不耦合分析

设土体中的空隙完全被液相及气相流体填充, 则液相的饱和度 S_w 和气相的饱和度 S_g 满足

$$S_w + S_g = 1, \quad (1)$$

液相、气相的流动可由达西定律表示:

$$q_i^w = -k_{sij}^w k_r^w \frac{\partial}{\partial x_j} (P_w - \rho_w g_k x_k), \quad (2)$$

$$q_i^g = -k_{sij}^g \frac{\mu_w}{\mu_g} k_r^g \frac{\partial}{\partial x_j} (P_g - \rho_w g_k x_k). \quad (3)$$

液相、气相的本构关系如下:

$$S_w \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{K_w}{n_p} \left[\frac{\partial \zeta_w}{\partial t} - n_p \frac{\partial S_w}{\partial t} - S_w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \right], \quad (4)$$

$$S_g \frac{\partial P_g}{\partial t} = \frac{K_g}{n_p} \left[\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} - n_p \frac{\partial S_g}{\partial t} - S_g \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \right]. \quad (5)$$

液相、气相的流动平衡定律可表示为

$$\frac{\partial \zeta_w}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} + q_v^w, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^g}{\partial x_i} + q_v^g. \quad (7)$$

式中 上/下标 w 及 g 分别代表液相及气相; q , μ , P , ρ , K 分别为流体的渗流速度、动力黏滞度、压力、密度及体积模量; ζ 为流体容量的变化; n_p 为土体的孔隙度; ε_v 为体积应变; t 为时间; k_s 及 k_r 分别为饱和及相对渗透系数, 渗透系数 k 的单位是 $m^2 \cdot Pa/s$, 它与用水头表示的渗透系数 K (单位为 cm/s) 的关系是: $k = K \times 1.02 \times 10^{-6}$ ^[7]。

气相压力(P_g)和液相压力(P_w)间的差值(吸力) $\psi = P_g - P_w$ 是液相的饱和度 S_w 的函数。表示吸力和饱和度的关系曲线即为土水特征曲线。当采用 van Geneutchen - Mualem 模型^[8]来表示时, 其表达式如下:

$$S_e = \frac{S_w - S_r^w}{1 - S_r^w} = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \quad (8)$$

式中, $m=1-1/n$, S_r^w 为液相的残余饱和度; a , n , m 为拟合参数。

根据 van Geneutchen 的相对渗透性经验公式, 可以得到液相及气相的相对渗透系数 (k_r^w , k_r^g) 分别为

$$k_r^w = S_e^b [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (9)$$

$$k_r^g = (1 - S_e)^c (1 - S_e^{1/m})^{2m}, \quad (10)$$

式中, b 和 c 为拟合系数, 一般取 $b=c=0.5$ 。将式(8)代入式(9)~(10), 即可得到相对渗透系数与吸力的关系, 其对应的曲线即为渗透系数曲线。

对于不耦合计算, 式(4)、(5) 中 $\partial \varepsilon_v / \partial t$ 可以忽略。此时, 由式(1)~(10) 即可求得液相压力 P_w 、气相压力 P_g 、液相饱和度 S_w 及气相饱和度 S_g 这 4 个未知量。

1.2 耦合分析

当考虑固相和液、气相之间的耦合作用时, 有效应力的变化会导致体积应变的产生, 即此时 $\partial \varepsilon_v / \partial t$ 不可忽略; 而体积的变形又反过来造成流体压力的变化。此时, 需要引入固相的平衡方程、物理方程(本构关系)及几何方程。

平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{d u_i}{dt}, \quad (11)$$

本构关系:

$$\Delta \sigma'_{ij} = H(\sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}, \kappa), \quad (12)$$

几何方程:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]. \quad (13)$$

式中 σ 及 σ' 分别为总应力及有效应力; u 为速度; κ 为历史参数; H 为本构定律的函数型式。本文设土体是理想弹塑性模型, 其屈服条件满足摩尔-库仑屈服准则^[9-10]。

对于两相流问题, 有效应力可以定义为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \bar{P} \delta_{ij} = \sigma_{ij} + (S_w P_w + S_g P_g) \delta_{ij}, \quad (14)$$

式中, δ_{ij} 克罗内克尔符号($i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$)。本文采用有限差分软件 FLAC 的两相流模块来进行饱和-非饱和渗流分析^[7]。

2 非饱和土边坡的稳定性分析

2.1 非饱和土的强度理论

非饱和土强度理论以 Mohr-Coulumb 准则为基础, 目前有两类强度公式被岩土工程界广泛认可^[11-12]。

一类是 Bishop 公式, 它是将非饱和土的有效应力代替饱和土的有效应力而得到的, 其表达式为

$$\tau_f = c' + [(\sigma - P_g) + \chi(P_g - P_w)] \tan \varphi'。 \quad (15)$$

另一类是 Fredlund 的双应力变量公式, 通过净法向应力和基质吸力这两个状态变量来定义非饱和土的抗剪强度, 其表达式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - P_g) \tan \varphi' + (P_g - P_w) \tan \varphi_b, \quad (16)$$

式中, τ_f 为抗剪强度; c' 和 φ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角; σ 为正应力; P_g 和 P_w 分别为孔隙气压和孔隙水压力; χ 为有效应力系数, 主要取决于饱和度; φ_b 为基质吸力引起的抗剪强度增量的摩擦角。

文献[12]中分析了这两种抗剪强度间的关系, 指出当 $\chi = \tan \varphi^b / \tan \varphi'$ 时, 二者对应的抗剪强度相同。本文进行边坡稳定性分析时采用 Bishop 抗剪强度公式。

2.2 边坡稳定性分析的强度折减法

对于非饱和土边坡, 当考虑降雨入渗时, 需要先进行非饱和土体的饱和-非饱和渗流分析, 以便得到各单元或结点的应力及应变分布。在此基础上, 可以采用滑面应力分析法或强度折减法来求解边坡的安全系数^[13]。由于强度折减法不需要事先假定潜在滑动面的形状及位置, 本文采用强度折减法来进行边坡的稳定性分析。强度折减法的基本原理是将土体参数 c 和 φ 的值同时除以一个折减系数 F_s , 得到一组新的值 c_{new} 和 φ_{new} , 然后以新的值作为材料参数再进行试算, 直至计算到刚好不收敛时, 对应折减系数 F_s 即为边坡的安全系数, 此时边坡中出现的贯通滑动面即为边坡的潜在滑动面。强度参数的具体折减公式为

$$c_{\text{new}} = c / F_s, \quad (17)$$

$$\varphi_{\text{new}} = \arctan(\tan \varphi / F_s), \quad (18)$$

3 实例分析

3.1 计算条件

某一均质土坡高 10 m, 坡角 27°; 初始水位面经过坡脚, 与水平面的倾角为 8°。土体的有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、重度 γ 、弹性模量 E 、泊松比 μ 及 van Geneutchen 模型参数见表 1, 土水特征曲线、液相和气相的相对渗透系数曲线分别见图 1 及图 2。

表 1 计算参数

Table 1 Computation parameters

c'/kPa	$\varphi'/(^\circ)$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/kPa	μ	a/kPa	n
10	26	19.9	9720	0.23	132.3	1.64

为研究降雨强度及渗透系数对边坡稳定性的影响, 本次计算设降雨强度 I_r 分别为 15 mm/d (中雨)、30 mm/d (大雨) 及 60 mm/d (暴雨), 每种降雨的历时均为 3 d; 土体的饱和渗透系数 K_s^w 分别取 85 mm/d 和 0.85 mm/d, 它们分别代表渗透系数较大及较小的

情况。在各种情况下, 分别对边坡进行降雨作用下的耦合和不耦合计算, 并对二者的安全系数值及滑面位置等计算结果进行分析。渗流计算时, 设坡表为入渗边界, 边坡的左右边界为定水头边界, 底边界为不透水边界。力学计算时, 对左右边界约束水平位移, 对底边界约束水平及竖直位移。各种条件下的计算结果见图 3~11。

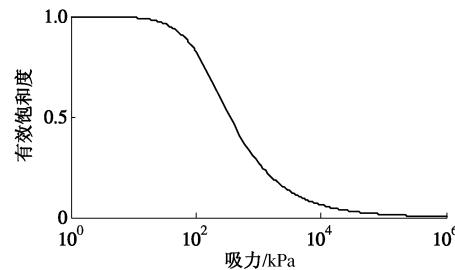


图 1 土水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curve

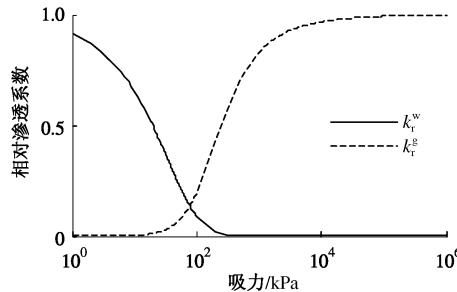


图 2 相对渗透系数曲线

Fig. 2 Relative permeability curve

3.2 计算结果

(1) 安全系数

图 3 表示饱和渗透系数 $K_s^w=85 \text{ mm/d}$ 时安全系数 F_s 与时间 t 的关系, 图中横坐标 t 表示从降雨开始时刻起算的时间; 纵坐标代表边坡的相对安全系数 (安全系数 F_s 和 $t=0$ 时的安全系数 F_{s0} 的比值); UC 及 C 分别代表不耦合计算及耦合计算。由图 3 可见: 在 3 d 的降雨过程中, 无论是耦合计算还是不耦合计算, 边坡的安全系数都随着降雨强度的增加而减小; 降雨强度越大, 安全系数越低; 在相同的降雨强度下, 不耦合计算对应的安全系数小于耦合计算的相应值。降雨停止后, 对于不耦合计算, 安全系数随着模拟时间的增加而逐渐增加, 即边坡的稳定性随着土坡中孔隙水压及气压的重新分布而逐渐恢复; 对于耦合分析, 在降雨强度较大时 ($I_r = 30 \text{ mm/d}$ 及 60 mm/d), 安全系数也随着时间的增加而逐渐增加; 但是, 在降雨强度较小时 ($I_r = 15 \text{ mm/d}$), 安全系数却随着模拟时间的增加而继续缓慢减小, 这是因为对于耦合分析, 当降雨强度较小时, 土体中的渗流相对较慢, 使得安全系

数的变化具有较大的滞后性。

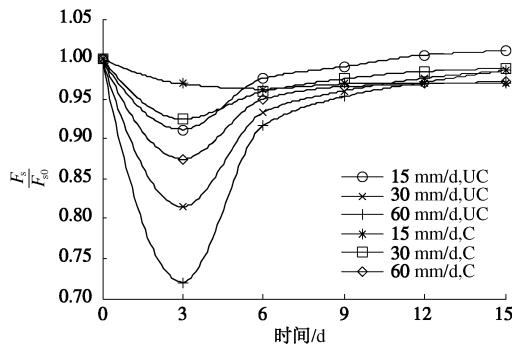


图 3 安全系数与时间的关系($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$)

Fig. 3 Relationship between F_s and t ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$)

图 4 表示饱和渗透系数 $K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$ 时安全系数与时间的关系。与图 3 相比, 此时的饱和渗透系数较小。由图 4 可见: 在较小的饱和渗透系数情况下, 无论是对于耦合分析还是不耦合分析, 降雨强度对非饱和土边坡的稳定性影响都非常小, 各种降雨强度下的安全系数-时间 ($F_s - t$) 关系曲线几乎重合, 这是因为土体的饱和渗透系数远小于降雨强度, 多余的雨水在短时间内无法渗入土体, 只能顺着边坡表面流走, 故各种降雨强度下的安全系数几乎相同。由图 4 还可以看出: 不耦合分析对应的安全系数仍小于耦合分析的相应值; 对于不耦合分析, 安全系数的最小值出现在降雨停止时刻, 此后, 安全系数随着时间的增加而逐渐回升; 对于耦合分析, 安全系数则随着时间的增加而始缓慢下降, 并逐渐趋于稳定。即对于耦合分析, 安全系数的变化速度远小于不耦合分析的情况。

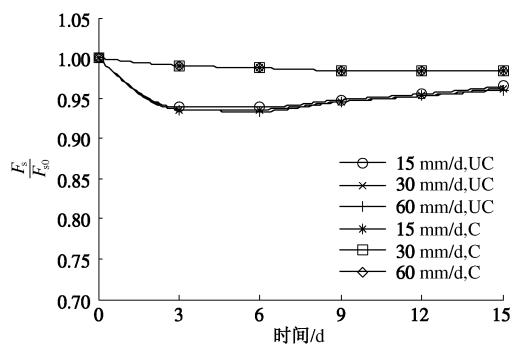


图 4 安全系数与时间的关系($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$)

Fig. 4 Relationship between F_s and t ($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$)

对于边坡稳定性分析而言, 降雨后边坡的最小安全系数尤为重要。为此, 图 5 给出了最小安全系数与降雨强度及分析方法的关系。由图 5 可见: 当土体的渗透性较好时, 降雨强度越大, 边坡的安全系数越低; 而当土体的渗透性较差时, 降雨强度对边坡的稳定性影响相对较小, 因为多余的雨水无法在短时间内渗入土坡, 雨水的浸润深度有限, 因此降雨强度对坡体的稳定性影响也有限。从图 5 中还可以看出: 耦合分析

对应的相对安全系数大于不耦合分析时的相应值。主要原因在于耦合分析时考虑了土体的变形对流体压力的影响, 流体压力的改变对雨水的渗入、土体单元有效应力的改变都造成影响。降雨后, 单元应力发生变化, 内部气压上升, 雨水渗入比在不耦合分析状态下要难, 基质吸力的减小比不耦合分析的要小, 因此, 耦合分析时的安全系数降低程度较小。

综合图 3~5 可见: 土坡安全系数的计算值不仅与土体的渗透系数及降雨等因素有关, 还与计算方法有关。耦合分析由于能考虑固相、液相及气相的相互作用, 它在理论上更科学。但是, 本文算例表明耦合分析的安全系数大于不耦合分析的相应值, 即耦合分析的结果偏于危险。无论是耦合分析还是不耦合分析, 它们在计算过程中均包含了很多假定, 而有关土体的本构模型、土水特征曲线模型、渗透系数模型等仍需进一步研究。因此, 在进行降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析时, 可同时进行耦合分析及不耦合分析, 再进行综合分析比较。

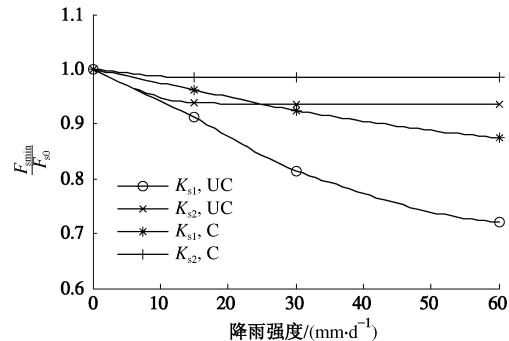


图 5 最小安全系数与降雨强度的关系($K_{s1}^w = 85 \text{ mm/d}$, $K_{s2}^w = 0.85 \text{ mm/d}$)

Fig. 5 Relationship between minimum factor of safety and rainfall intensity ($K_{s1}^w = 85 \text{ mm/d}$, $K_{s2}^w = 0.85 \text{ mm/d}$)

(2) 滑面位置

对于边坡稳定性分析而言, 不仅要求解安全系数的大小, 还要求解滑面的具体位置。为了分析边坡的滑面位置与时间、降雨强度、分析方法(耦合或不耦合分析)等因素的关系, 有必要将各种情况下边坡潜在滑面的位置绘在同一图形中, 以便分析、比较。由于强度折减法只能通过塑性图观察到边坡潜在滑面的大致范围, 而无法给出滑面的准确位置, 因此, 本文采用文献[14]的方法, 基于强度折减得到的等效塑性应变场进行边坡临界滑裂面的搜索, 从而得到每一种计算条件下滑面的具体位置。

图 6~9 分别是 $K_s^w = 85 \text{ mm/d}$ 及 $K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$ 时不耦合及耦合分析的 $F_s - t$ 曲线中最小安全系数对应的边坡潜在滑动面位置。可见: 渗透系数越大, 滑面的变化范围也越大; 对于不耦合分析, 滑面位置的

变化主要体现在坡肩, 而在坡脚处变化很小; 相反, 对于耦合分析, 滑面位置的变化主要体现在坡脚, 而在坡肩处却变化很小。

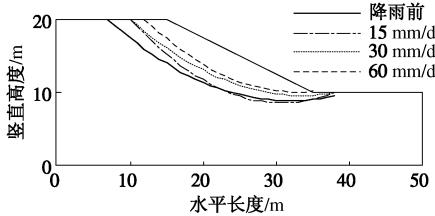


图 6 边坡潜在滑动面的位置 ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, 不耦合分析)

Fig. 6 Position of potential sliding surface ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, uncoupled analysis)

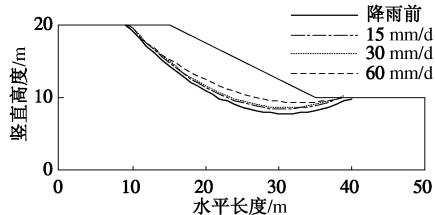


图 7 边坡潜在滑动面的位置 ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, 耦合分析)

Fig. 7 Position of potential sliding surface ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, coupled analysis)

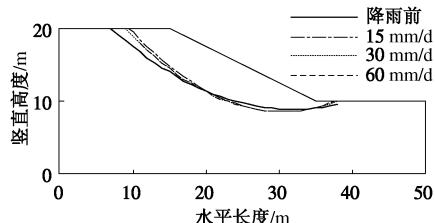


图 8 边坡潜在滑动面的位置 ($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$, 不耦合分析)

Fig. 8 Position of potential sliding surface ($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$, uncoupled analysis)

土体变形和流体压力等因素导致上述现象。本文以 $K_s^w = 85 \text{ mm/d}$ 及 $I_r = 30 \text{ mm/d}$ 这一种情况进行分析, 图 10~11 分别为不耦合和耦合分析在降雨 3 d 时相对于降雨前坡体折减破坏时的流体压力增量等值线图(等值线上的数值单位为 Pa)。流体压力的变化既反应了有效应力的变化, 又反映了坡体变形的信息。由图 10~11 可见, 在坡体同一处, 不耦合分析的流体压力增量比耦合分析的大, 而且不耦合分析的流体压力增量等值线的凹处较深, 反映了在不耦合分析时土坡中流体的压力随着坡体逐渐失稳的一个变化趋势。耦合分析相对于不耦合分析来说, 其等值线形状的凹处比较浅, 而且压力增量值比不耦合分析的要小, 这反映了耦合分析时坡体流体压力随着坡体逐渐失稳的

一个变化趋势。在这两种差异中, 不同的水力学状态变化导致了潜在滑动面的不同。

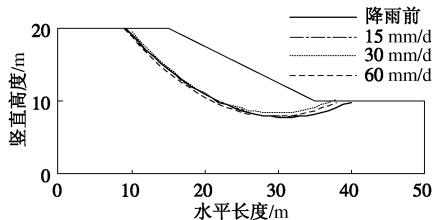


图 9 边坡潜在滑动面的位置 ($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$, 耦合分析)

Fig. 9 Position of potential sliding surface ($K_s^w = 0.85 \text{ mm/d}$, coupled analysis)

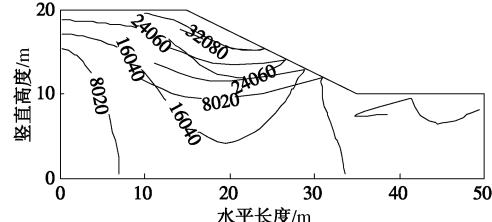


图 10 降雨 3 d 时液体压力增量等值线图 ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, $I_r = 30 \text{ mm/d}$, 不耦合分析)

Fig. 10 Contour of fluid pressure increment after three days of rainfall ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, uncoupled analysis)

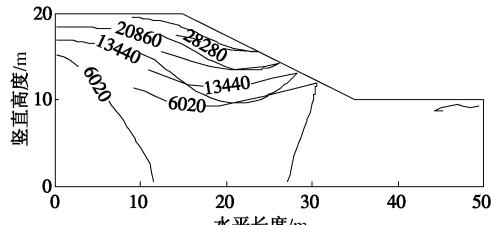


图 11 降雨 3 d 时液体压力增量等值线图 ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, $I_r = 30 \text{ mm/d}$, 耦合分析)

Fig. 11 Contour of fluid pressure increment after three days of rainfall ($K_s^w = 85 \text{ mm/d}$, coupled analysis)

4 结 论

(1) 土体的饱和渗透系数对边坡的稳定性起关键作用。饱和渗透系数越大, 雨水的浸润深度也就越大, 导致大范围土体中基质吸力的减小, 从而使边坡处于不稳定状态。

(2) 降雨对边坡稳定的影响取决于土坡的渗透系数。当土坡的渗透性较好时, 降雨强度越大, 边坡的安全系数越低; 当土坡的渗透性较差时, 降雨对边坡稳定性的影响有限。

(3) 在相同的计算条件下, 不耦合分析对应的安全系数小于耦合分析的相应值; 对于不耦合分析, 滑面位置的变化主要体现在坡肩, 而在坡脚处变化很小; 相反, 对于耦合分析, 滑面位置的变化主要体现在坡

脚,而在坡肩处却变化很小。

本文在计算过程中未考虑剪胀角的影响。剪胀角的变化将会对耦合分析过程中滑动面的位置产生影响,其影响规律有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. Computers and Geotechnics 1998, **22**: 1 - 28.
- [2] TSAPARAS I, RAHARDJO H, TOLL D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides[J]. Computers and Geotechnics 2002, **29**: 1 - 27.
- [3] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure[J]. Engineering Geology 2010, **114**: 135 - 43.
- [4] VANAPALLI S K, FRENGLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal 1996, **33**(3): 379 - 92.
- [5] 吴长富,朱向荣,尹小涛,等.强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J].岩土力学,2008, **29**(2): 386 - 391. (WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of soil slope's transient stability under intensive rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 386 - 391. (in Chinese))
- [6] 荣冠,王思敬,王恩志,等.强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2008, **27**(4): 704 - 711. (RONG Guan, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Stability analysis of yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(4): 704 - 711. (in Chinese))
- [7] 刘波. FLAC原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005. (LIU Bo. FLAC Principle, examples and application guidelines[M]. Beijing: People Transport Press, 2005. (in Chinese))
- [8] FREDLUND D G, HOUSTON S L. Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**: 694 - 707.
- [9] TAN X H, WANG J G. Nonlinear finite element reliability analysis and sensitivity analysis of slope stability[J]. Geotechnical Engineering, 2009, **40**(1): 17 - 23.
- [10] TAN X H, WANG J G . Nonlinear finite element reliability analysis of slope stability[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (GEDMAR08). Beijing: Science Press, New York: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2008: 565 - 571.
- [11] 陈伟,孔令伟,郭爱国,等.吸力对弱膨胀土强度贡献的试验研究与预测分析[J].岩土力学,2008, **29**(7): 1783 - 1787. (CHEN Wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Jian-bin. Experimental study and predictive analysis of contribution of matrix suction to shear strength of weak expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics[J]. 2008, **29**(7): 1783 - 1787. (in Chinese))
- [12] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 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. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, et al. translator. Beijing: China Building Industry, 1997. (in Chinese))
- [13] 谭晓慧,王建国.边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J].岩土工程学报,2007, **29**(1): 44 - 50. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo. Slope reliability analysis using elasto-plastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 44 - 50. (in Chinese))
- [14] 孙冠华,郑宏,李春光.基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J].岩土力学,2008, **29**(5): 1159 - 1163. (SUN Guanhua, ZHENG Hong, LI Chun-guang. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(5): 1159 - 1163. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)