

降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析

朱文彬

刘宝琛

(福建省厦门市公路局 厦门 361009) (中南大学铁道校区 长沙 410075)

摘要 将Duncan-Chang模型引入饱和-非饱和土的本构关系模型,建立了饱和-非饱和土的统一非线性弹性模型,并应用于降雨滑坡的机理分析。由实例分析得知,利用饱和-非饱和土的统一非线性弹性模型来分析由于大气降雨而引起的土体滑坡的形成与发展过程是可行的,也是一种有益的探索。

关键词 饱和-非饱和土, 非线性弹性模型, Duncan-Chang模型, 滑坡

分类号 TD 824.7

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)04-0509-04

1 前言

根据国内外的滑坡记载,许多滑坡都是发生在雨季或暴雨期间^[1~3]。据统计,大气降雨是大多数滑坡的主要诱发原因。1982年7月中下旬,四川的万县、云阳等地普降大雨,降雨量为600~700mm,且集中在7月15~17日、19~23日、26~30日3个降雨过程,结果诱发了全地区大小数万处滑坡^[4]。江油县武都滑坡的变形与降雨关系分析表明:月降雨量小于100mm时,边坡基本上无变形;月降雨量为100~300mm时,变形为5~20mm;当月降雨量大于400mm时,变形可达50~100mm,充分显示边坡变形与降雨量之间的关系。1991年6~7月,江苏镇江因大量降雨而诱发了罕见的滑坡地质灾害,滑坡达190多处,且均发生在连续大量降雨之后,据调查分析,滑坡变形特征、位移速度与降雨量成正比关系^[5]。在我国西南地区,经常由于降雨而引起滑坡。因此,降雨量、地下水与边坡的位移量、边坡的稳定性之间都存在着密切的关系。

本文利用饱和-非饱和土的渗流理论与非线性弹性模型来分析土坡在降雨期间的渗流、位移与稳定性的发生发展过程。

2 饱和-非饱和土的非线性弹性模型及其有限元分析

对于饱和土,可以建立弹性模型、非线性模型、弹塑性本构模型和塑性模型。同样,对于非饱和土也有必要建立非饱和土的本构模型。

2.1 饱和-非饱和土的应力-应变关系^[6]

为了建立饱和-非饱和土的应力-应变关系,特作以下假设:

- (1) 正应力不产生剪应变。
- (2) 剪应力不产生正应变。
- (3) 一个剪应力分量 τ 仅产生一个剪应变分量。
- (4) 变形为小应变情形,叠加原理适用。
- (5) 土体为各向同性体。

则非饱和土的应力-应变关系为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x - u_a \\ \sigma_y - u_a \\ \sigma_z - u_a \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} + \frac{1}{H} \begin{Bmatrix} u_a - u_w \\ u_a - u_w \\ u_a - u_w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

2000年3月25日收到初稿,2000年9月15日收到修改稿。

作者 朱文彬 简介:男,34岁,1998年于长沙铁道学院土木工程系获博士学位,现在厦门市公路局从事公路、隧道和桥梁等的建设管理和监理方面的工作。

简写为

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\sigma - u_a\} + \frac{1}{H}\{u_a - u_w\} \quad (2)$$

式中: $[D]$ 为非饱和土的有效应力的弹性刚度矩阵, H 为非饱和土的基质吸力的弹性模量, $\{u_a - u_w\}$ 为基质吸力列阵。

式(2)的增量形式为

$$\{d\varepsilon\} = [D]\{d(\sigma - u_a)\} + \frac{1}{H}\{d(u_a - u_w)\} \quad (3)$$

对于饱和土, 其孔隙水压力 $u_w = u_a$, 基质吸力不存在, 即 $u_a - u_w = 0$ 。此时, 式(4), (5)就是饱和土的本构关系。因此, 对饱和区和非饱和区均可以用统一的本构关系式:

$$\begin{cases} \{\varepsilon\} = [D]\{\sigma - u_a\} + \frac{1}{H}\{u_a - u_w\} \\ u_a - u_w = 0 \quad \text{饱和区} \\ u_a - u_w \neq 0 \quad \text{非饱和区} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 饱和-非饱和土的非线性弹性模型^[7]

在经典饱和土力学中, Duncan-Chang 模型被工程界广泛使用。非饱和土由于基质吸力的存在, 使其抗剪强度比饱和土的抗剪强度要高。因此, 在 Duncan-Chang 模型中, 破坏时的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与饱和土的就不同。非饱和土的抗剪强度为^[8]

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (5)$$

将 Duncan-Chang 模型引入到非饱和土的本构关系, 得饱和-非饱和土的切线弹性模量为

$$\begin{aligned} E_t = & \left\{ 1 - R_f (1 - \sin \phi') (\sigma_1 - \sigma_3) / [2c' \cos \phi' + \right. \\ & \left. 2(u_a - u_w)_f \tan \phi_b \cos \phi' + 2(\sigma_3 - u_a) \sin \phi']^2 \cdot \right. \\ & \left. KP_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{P_a} \right)^n \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

饱和-非饱和土的切线泊松比为

$$\begin{aligned} \mu_t = & \left[G - F \lg \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{P_a} \right) \right] / \left\{ 1 - D(\sigma_1 - \sigma_3) / \right. \\ & \left. \left[KP_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{P_a} \right)^n E_t \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

式(6), (7)中: c' , ϕ' , R_f , K , n , D , G , 和 F 为 Duncan-Chang 模型的 8 大参数; ϕ_b 为由于基质吸力 $(u_a - u_w)$ 引起的内摩擦角; u_a , u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力; P_a 为大气压力。

3 饱和-非饱和土的非线性有限元分析^[7]

根据饱和-非饱和土的非线性弹性模型和虚功原理, 推导得到饱和-非饱和土的统一未知结点位移列阵 $\{u\}$ 的整体结点平衡方程^[4]:

$$[K]\{u\} - [\psi]\{u_a - u_w\} = \{R\} \quad (8)$$

对于饱和区 $u_a - u_w = 0$, $u_w = u_a$ 。则式(8)成为

$$[K]\{u\} = \{R\} \quad (9)$$

式中: $[K] = \sum_{e=1}^{NE} [K]^e$ 为饱和-非饱和土的整体刚度矩阵;

$[\psi] = \sum_{e=1}^{NE} [\psi]^e$, 为基质吸力整体劲度矩阵;

$\{R\} = \sum_{e=1}^{NE} \{R\}^e$, 为载荷列阵。

在以下假设基础上, 编制了饱和-非饱和土的非线性弹性的二维有限元程序。

(1) 饱和-非饱和土为均质各向同性体。

(2) 在非饱和土区内净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 作用下的压缩系数 a_t 与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 作用下的压缩系数 a_m 相等。

(3) 非饱和区的土体中的气相与大气相通。

4 实例分析

4.1 土坡网格划分与边界条件

为了便于考虑孔隙水压力的影响, 采用与渗流分析一样的有限元网格。离散的网格如图 1 所示。

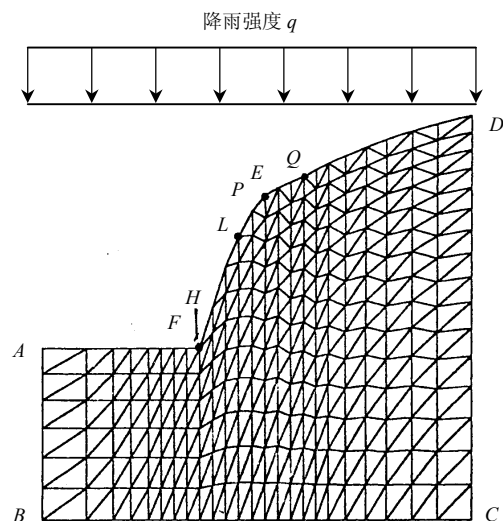


图 1 土坡截面的有限元网格及初始边界条件

Fig.1 Finite element mesh of soil slopes and initial boundary condition

$$c' = 39 \text{ kPa} \quad \phi' = 19.8^\circ$$

$$R_f = 0.84 \quad K = 183$$

$$n = 0.4 \quad D = 2.44$$

$$G = 0.33 \quad F = 0.15$$

该土体的饱和容重、干容重和抗拉强度为

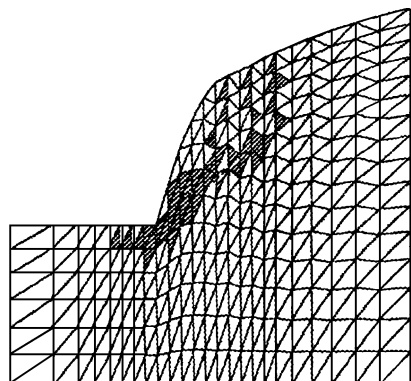
$$\gamma_s = 20.7 \text{ kN/m}^3 \quad \gamma_d = 17.1 \text{ kN/m}^3 \quad \sigma_t = -15 \text{ kPa}$$

在不同时刻, 非饱和区由于每一单元内的基质吸力不同, 计算时程序 PFEM 将自动根据其值进行修正。

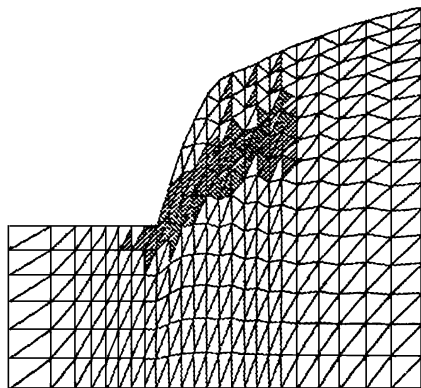
4.2 土坡非线性有限元分析结果^[7]

为了考察土坡在降雨开始后各个不同时刻的应力状态、塑性区的分布情况以及位移发展情况, 分别对零时刻、延续 20, 60, 120, 180, 240, 360, 440, 540, 640, 960 和 1 370 min 等各个不同时刻、不同渗流状态下的土坡进行了非线性有限元分析。限于篇幅, 在此只列出延续 120 和 440 min(雨停)两个时刻的分析图。

为便于比较, 图 2 表示不同时刻的塑性区分布。图 3 表示不同时刻的稳定系数等值线图。从图 2 中各个不同时刻的塑性区分布可知, 降雨前, 其塑性



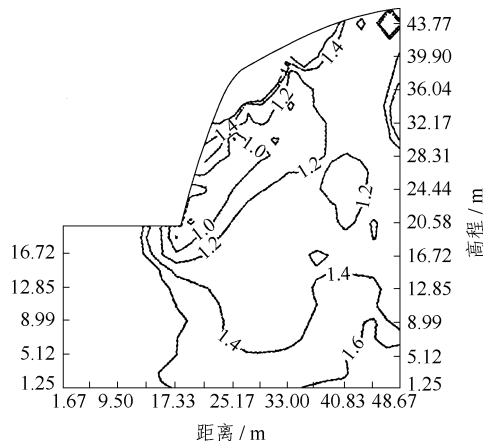
(a) 延续 120 min 的塑性区



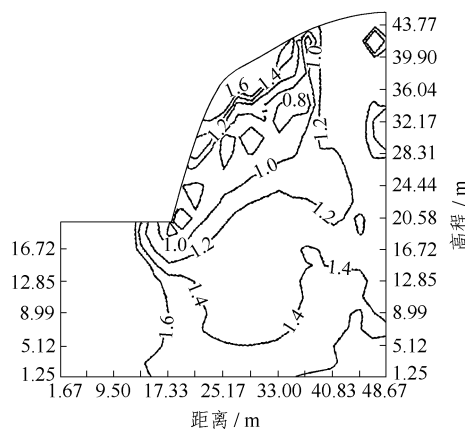
(b) 延续 440 min(雨停)的塑性区

图 2 不同时刻的塑性区分布图

Fig.2 Distribution of failure zone at different moments



(a) 延续 120 min 的土坡稳定系数



(b) 延续 440 min 的土坡稳定系数

图 3 不同时刻的土坡稳定系数等值线图

Fig.3 Distribution of stability factors of soil slopes at different moments

区只是在坡脚处的一小部分区间, 在土坡上部没有塑性区。随着时间的延长, 塑性区慢慢向内扩大, 在土坡上部的山坡处也出现塑性区。同样, 从图 3 中可以看出, 降雨前, 稳定系数 $k_s \leq 1$ 的区域很小, 降雨后随着时间的延长, 稳定系数 $k_s \leq 1$ 的区域慢慢从坡脚处向土坡内部扩大, 稳定系数 $k_s \leq 1$ 的等值线被认为是临界滑动面。临界滑动面随着饱和和前沿下移, 而更深地进入坡内, 最后形成整个滑动面, 见图 4 所示。而且从图中得出结论, 随着降雨时间的延长, 饱和前沿向下、向里移动, 塑性区的范围也慢慢地向内扩大, 其滑动面处于稳定系数等值线 $k_s = 1$ 所包围的范围之内。从单元形心主应力矢量图可以看出, 在土坡坡脚形成某种程度的应力集中。主应力的的大小随着降雨时间的延续, 其值有所增加。因为除了土的重力作用之外, 还有渗流渗透力的作用, 另外, 基质吸力的存在也有一定的影响。

对图4中3个潜在滑动面在不同时刻的安全系数进行分析(如图5所示),潜在滑动面3的安全系数比潜在滑动面1和2小,当降雨延续320 min时,潜在滑动面3的安全系数为0.99(<1.0),而潜在滑动面1和2的安全系数分别为1.1和1.04。根据分析结果,该土坡沿潜在滑动面3失稳的可能性最大,且在降雨延续320 min后随时会发生。事实上,该滑坡也是沿坡脚滑动的;据附近村民反映,滑坡发生在降雨开始后大约6 h的时候。

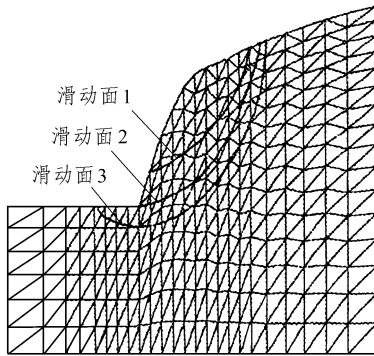


图4 暴雨延续440 min(雨停)的3个临界滑动面

Fig.4 Three critical slip surfaces after 440 min with the rain stopping

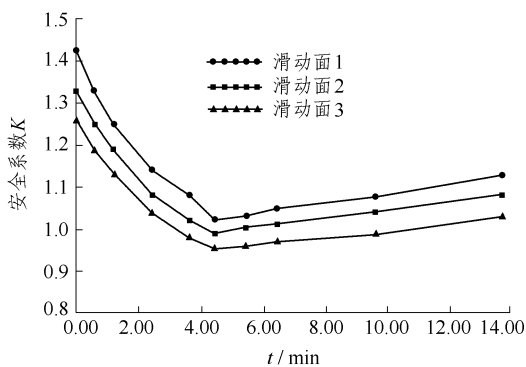


图5 3个潜在滑动面在不同时刻的安全系数

Fig.5 Safty factors of three critical slip surfaces at different moments

5 结 论

(1) 将 Duncan-Chang 模型引入饱和-非饱和土的本构关系模型,建立了饱和-非饱和土统一的非线性弹性模型,并编制了饱和-非饱和土的二维有限元程序。

(2) 分析了土坡在降雨后不同时期的应力分布、塑性区分布和稳定系数,对由于降雨而引起滑坡的机理进行了有益的探索。

(3) 由实例分析得知,土坡在降雨前,塑性区根本不存在或只在坡脚处非常小的范围内存在;随着降雨时间的不断延续,塑性区的范围不断向土坡内部延伸扩大;稳定系数 $k_s = 1$ 的等值线也不断向土坡内部移动, $k_s < 1$ 的范围不断增大,直达土坡上部地表面,最后形成潜在滑裂面和潜在滑坡体。

参 考 文 献

- 姚琦,黄理兴,吴玉山. 福建白琳大嶂山滑坡机制与诱发因素[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增): 952~955
- 金晓媚,刘金韬. 重庆市醴槽坪滑坡群危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 47~49
- 李焯芬,汪敏. 港渝两地滑坡灾害的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 493~497
- 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 莫吉勋,吴丹山. 镇江云台山山西侧滑坡特征及防治措施[A]. 见: 滑坡文集编委会编. 滑坡文集(第11集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1994, 256~259
- Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variable for unsaturated soils[J]. J. Geotech. Engr. Div., Proc. of ASCE, 1977, 103(GT5): 121~139
- 朱文彬. 降雨引起土体滑坡的机理研究[博士学位论文][D]. 长沙: 长沙铁道学院, 1998
- Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 张在明, 陈愈炯, 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997

FORMING AND DEVELOPMENT PROCESS OF SOIL LANDSLIDE DURING RAINFALL

Zhu Wenbin¹, Liu Baochen²

(¹Xiamen Highway Bureau, Xiamen 361009 China) (²Central South University, Changsha 410075 China)

Abstract Duncan-Chang model is introduced into the constitutive relationship of saturated-unsaturated soils, and the nonlinear elastic model for this kind of soils is established, and is used for the analysis on the landslide during rainfall. Example analysis shows that it is feasible and beneficial to use this model for the analysis of soil landslide during rainfall.

Key words saturated-unsaturated soils, nonlinear elastic model, Duncan-Chang model, landslide