

膨胀土路基变形的数值模拟

陈铁林, 米占宽, 陈生水

(南京水利科学研究院, 南京 210024)

摘 要: 在非饱和土固结理论的基础上, 分析了降雨入渗条件下全填筑和全开挖膨胀土路基变形的特征, 获取了浸水后膨胀土路基内塑性区的发展过程, 得出了膨胀土路基一般发生浅层滑动的结论, 这种滑动与通常饱和土的边坡失稳的原因是不同的。

关 键 词: 膨胀土; 路基; 浅层滑动

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Numerical simulation of deformation of expansive soil roadbed

CHEN Tie-lin, MI Zhan-kuan, CHEN Shen-shui

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the consolidation theory of unsaturated soils, the numerical simulation of deformation of expansive soil roadbed under the condition of rain infiltration is made. The development of plastic zone is studied. The results show that the shallow slide of expansive roadbed generally happens; and its instability cause is different from ones of common saturated soils.

Key words: expansive soil; roadbed; shallow slide

1 前 言

非饱和土是由固相、液相和气相组成的三相复合介质, 特别是气相的存在导致非饱和土的物理性态、有效应力原理、渗透性、应力-应变关系、变形与固结、抗剪强度、孔隙压力及其它方面都较饱和土复杂的多。

膨胀土是一种非饱和土, 分布范围广泛, 遍及 6 大洲 40 多个国家。中国也是膨胀土分布范围广泛的国家之一。在华北、华中、华东及西南地区分布较为广泛, 给这些地区的工程建设带来很大的危害性及造成大量的经济损失。

膨胀土是由强亲水性粘土矿物组成并具有裂隙性、超固结性和强烈胀缩性的高塑性粘土^[1]。工程中遇到的膨胀土常处于非饱和状态, 对水分状态的变化十分敏感。这种敏感性会引起膨胀土强度和体积的变化, 往往造成工程建筑物的破坏。

边坡失稳是膨胀土地区一种最常见的斜坡变形现象, 无论是膨胀土自然斜坡还是人工开挖的边坡, 失稳现象都十分普遍, 常常形成区域性灾害。因此, 膨胀土边坡的稳定问题是岩土工程中迫切需要解决的难题之一。

20 世纪 70 年代中后期, 随着国际非饱和土特性研究热潮的兴起^[2, 3], 膨胀土中吸力的大小及其变化和对力学性质的影响成为膨胀土研究的重点, 人们将膨胀土作为一种特殊的非饱和土开始以更理性的方式进行研究。非饱和土理论应用于膨胀土的理论研究与工程实践, 从力学机理上更深刻地揭示了膨胀土的变形特性^[4, 5]。

本文在非饱和土固结理论的基础上, 对 2 个典型的膨胀土路基断面的变形进行了模拟。

2 非饱和土固结基本理论^[6]

2.1 基本假设

138(1) 土体为均质各向同性材料；

(2) 土骨架只有微小应变；

(3) 土颗粒和孔隙水不可压缩；

(4) 孔隙水和气各自连通，可在各自的压力梯度下和温度下运动，且服从 Darcy 定律；

(5) 孔隙气体的压缩和溶解分别服从 Boyle 定律和 Henry 定律。

2.2 土骨架的本构关系

本研究采用非线性弹性模型^[7]。具体的表达式如下：

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xz} \end{Bmatrix} + (d_4\tilde{I} + d_7\tilde{J})\Delta u_w + (d_5\tilde{I} - d_7\tilde{J})\Delta u_a + d_6\tilde{I}\Delta q \quad (1)$$

式中

$$\tilde{I} = [1, 1, 1, 0]^T; \tilde{J} = [\sigma_x - \sigma_m, \sigma_y - \sigma_m, \sigma_z - \sigma_m, \tau_{xz}]^T / \tau_\sigma;$$

$$\tau_\sigma = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6\tau_{xz}^2]} \text{ 是 } \pi\text{-}$$

平面上的剪切应力。其中， $d_1 = E_t(1 - \nu_t) / [(1 + \nu_t)(1 - 2\nu_t)]$ ； $d_2 = E_t\nu_t / [(1 + \nu_t)(1 - 2\nu_t)]$ ； $d_3 = E_t / 2(1 + \nu_t)$ ； $d_4 = E_t\rho_t^d / 3(1 - 2\nu_t)$ ， $d_5 = 1 - d_4$ ； $d_6 = -E_t\rho_t^d / 3(1 - 2\nu_t)$ ； $d_7 = E_t\rho_{s,t}^r / 2(1 + \nu_t)$ ； E_t ， ν_t ， ρ_t^d ， ρ_t^s ， $\rho_{s,t}^r$ 分别为杨氏模量，泊松比，剪胀系数，湿胀引起的体积变形系数，湿胀引起的剪切变形系数。

2.3 控制方程

$$\begin{aligned} & d_1 \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial x^2} + d_3 \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial z^2} + (d_2 + d_3) \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial x \partial z} - \\ & \left[d_4 + \frac{d_7}{\tau_\sigma} (\sigma_x - \sigma_m) \right] \frac{\partial \Delta u_w}{\partial x} - \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_w}{\partial z} - \\ & [d_5 - \frac{d_7}{\tau_\sigma} (\sigma_x - \sigma_m)] \frac{\partial \Delta u_a}{\partial x} + \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_a}{\partial z} - \Delta b_x = \\ & \frac{\partial \sigma_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^k}{\partial z} + b_x^k + d_6 \frac{\partial \Delta q}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & d_3 \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x^2} + d_1 \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + (d_2 + d_3) \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x \partial z} - \\ & \left[d_4 + \frac{d_7}{\tau_\sigma} (\sigma_x - \sigma_m) \right] \frac{\partial \Delta u_w}{\partial z} - \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_w}{\partial x} - \\ & [d_5 - \frac{d_7}{\tau_\sigma} (\sigma_x - \sigma_m)] \frac{\partial \Delta u_a}{\partial z} + \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_a}{\partial x} - \\ & \Delta b_z = \frac{\partial \sigma_z^k}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}^k}{\partial x} + b_z^k + d_6 \frac{\partial \Delta q}{\partial z} \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 孔隙水和孔隙气的质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(sn) = \text{div}(\frac{k_w}{\rho_w g} \nabla u_w) + \frac{\partial}{\partial z} k_w \quad (4)$$

和

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}[(1 - s + Hs)n\rho_a] = \text{div}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_a \nabla u_a\right) + \\ & H \text{div}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_w \nabla u_w\right) + \frac{\partial}{\partial z}(Hk_w \rho_a) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 H 为亨利系数。

2.5 吸力状态方程

吸力状态方程可以写为

$$u_a - u_w = P_c(s, n; s_0, n_0) \quad (6)$$

式中 s_0 ， n_0 分别为初始饱和度和初始孔隙比； s ， n 分别为饱和度和孔隙比， $n = n_0 - \varepsilon_v = n_0 + \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$ 。

函数 P_c 的表达式可以通过常规的试验测定，一般可采用如下表达式：

$$P_c = A_0(s^{-B_0} - 1) \quad (7)$$

式中 A_0 和 B_0 为经验系数。

3 路基变形过程的有限元分析

本文对 2 个典型的膨胀土路基断面进行了模拟。首先模拟路基的填筑或开挖过程，然后模拟降雨过程中路基的膨胀变形。参数的取值如下 $k_{ws}=6.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ， $k_{as}=3.0 \times 10^{-5}$ ， $n=0.4$ ， $U_{w0}=312 \text{ kPa}$ ， $U_{a0}=0 \text{ kPa}$ ， $s=0.72$ 。

图 1 为全填筑断面有限元计算网格。图 2 为降雨结束后路基的网格变形图。路肩部位的膨胀量最大，达到 6 cm。图 3 为垂直位移等值线，从图中可以看出，发生膨胀的部位处在路基表面，而路

基的内部只产生较小的膨胀。

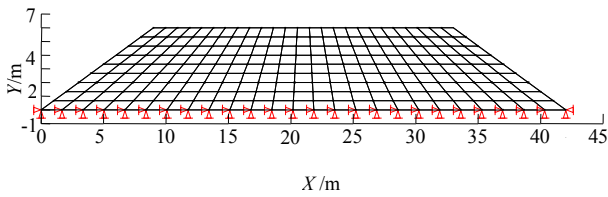


图 1 全填筑断面有限元计算网格
Fig.1 Mesh of fill type cross-section

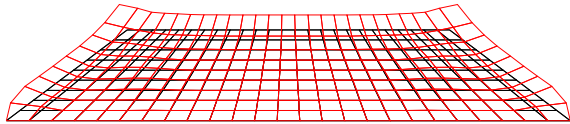


图 2 网格变形图
Fig.2 Deformation plot of mesh

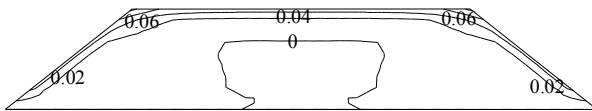


图 3 垂直位移等值线/m
Fig.3 Contours of vertical displacements

图 4 为屈服区域的发展过程。首先，在路肩部位产生屈服，接着路坡上出现不连续的屈服区域，然后这些区域相互贯通并延伸至路脚。与此同时路面也发生屈服。从图中可以看出，屈服的部位只发生在路基的表面，因而降雨造成的滑坡一般是浅层的滑动。

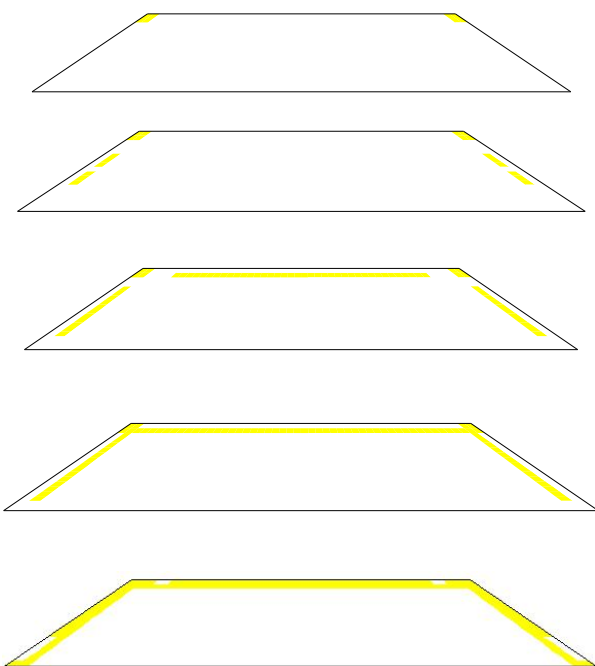


图 4 屈服区域的发展过程

Fig.4 Developing process of yield region

图 5 为全开挖断面的有限元计算网格。图 6 为网格变形图。图 7 为垂直位移等值线。图 8 为屈服区域的发展过程。首先，在路脚和路堑的底部产生屈服，接着在路堑边坡的顶部产生不连续的屈服区域。然后这些区域连通后，沿着路堑边坡向下发展。这些屈服的部位只发生在浅部，由此造成的滑坡也是浅层滑动。

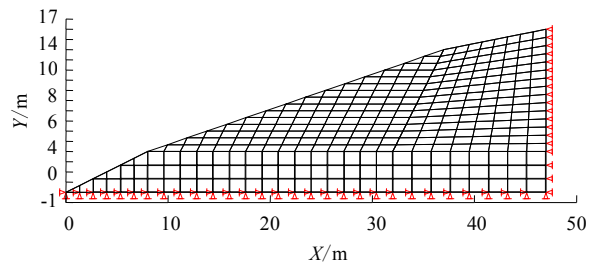


图 5 全开挖断面有限元计算网格
Fig.5 Mesh of excavated cross-section

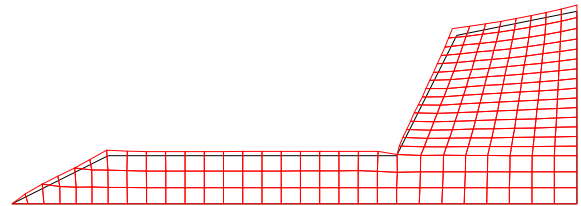
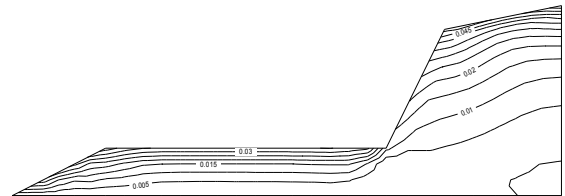
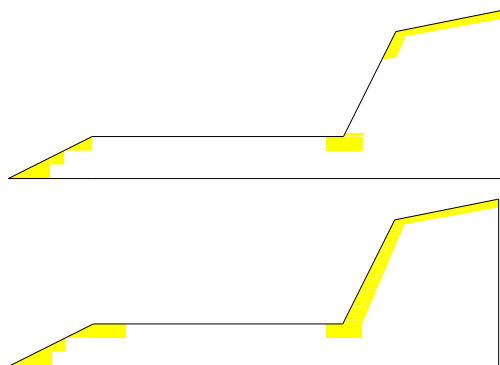


图 6 网格变形图
Fig.6 Deformation plot of mesh





140

图 8 屈服区域发展过程

Fig.8 Developing process of yield region

4 结 语

本文在非饱和土固结理论基础上,针对 2 个典型的膨胀土路基剖面,模拟了降雨入渗条件路基的变形过程。计算结果表明,膨胀土路基的滑坡一般表现为浅层滑动。

参 考 文 献

[1] 陈孚华. 膨胀土上的基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.

- [2] Alonso E, Gens A, Delahaye C. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[J]. **Unsaturated Soils**, 1995, (1): 315 - 320.
- [3] Deng G, Shen Z.J. et al. Numerical simulation of slope failure during/after rainfall[A]. **International Conference on Slope Engineering**[C]. Hong Kong: [s.n.], 2003.
- [4] Richards B G. Finite element analysis of volume change in expansive clays[A]. **The Proceedings of 5th International Conference on Expansive Soils**[C]. [s.l.]: [s.n.], 1984.
- [5] Shen Z J. Reduced suction and simplified consolidation for expansive soils[A]. **Proceedings of First International Conference on Unsaturated soils**[C]. Edited by E.E. Alonso & P. Delage. Paris: Belage A A, Balkema A.A / Rotterdam. 1995. 1 533 - 1 540.
- [6] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 230 - 236.
- [7] 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究[博士论文 D]. 南京: 南京水利科学研究所, 1991.

第 1 届隧道掘进机工程应用分会年会 2005 学术年会征文通知

为了活跃学术气氛,交流隧道掘进机技术在科研、设计、施工等方面的科技成果,促进隧道掘进机工程应用理论和实践的进步与发展,提高隧道掘进机研制、生产的国产率和工程应用的技术,结合已经开工的武汉长江隧道工程、南京越江隧道工程、即将开工的崇明越江通道工程、西气东输隧道工程和全国各地城市地铁隧道工程的建设,中国岩石力学与工程学会隧道掘进机工程应用分会定于 2005 年 10 月在上海举办第 1 届学术年会,特征集论文。

论文主要内容如下: 1. 隧道工程建设与可持续发展战略; 2. 隧道工程的设计、施工技术; 3. 盾构隧道掘进机设计、制造、施工技术; 4. 沉管法隧道工程的设计、施工; 5. 顶管法隧道工程的设计、施工; 6. 地下工程的规划、设计、施工技术; 7. 长距离、大直径隧道设计与施工特点; 8. 典型工程的施工经验介绍; 9. 国内外盾构与隧道工程先进技术介绍; 10. 对隧道工程的技术规范、施工标准、检测手段等新建议; 11. 隧道工程施工质量的控制、管理和检测技术; 12. 与隧道及地下工程同步发展的新设备、新材料、新工艺、新理论。

有关事项如下:

1. 请认真填写论文回执,必须详细填写通讯地址、电话或手机,以便今后联系。回执请于 2005 年 2 月 28 日前寄到会务筹备组。

2. 请将论文全文 2 份并附电子文档于 2005 年 5 月 15 日前寄到会务筹备组。

3. 论文入选后将及时通知作者,论文刊登不收评审费、版面费。

4. 本次论文征集将出版《盾构隧道掘进机工程应用技术文集》专著,由同济大学出版社出版。要求征集的论文内容真实、技术性强、理论研究方法正确、文字简练,突出工程应用技术。

5. 联系地址: 上海市虹漕南路 155 号 邮编: 200233

中国岩石力学与工程学会隧道掘进机工程应用分会年会会务组

联系人： 颜天文 电话：021-64706611×857 傅德明 电话：021-64829380

楼如岳 电话：021-54640607 会议咨询：021-54640607

传 真：021-54640607 电子邮件：info@tunnelling.cn website@tunnelling.cn

摘自 <http://www.geohohai.com>