

膨胀土自然边坡吸力和饱和度量测

Measurement of suction and saturation of natural expansive soil slope

吴礼舟^{1,2}, 黄润秋¹, 胡瑞林², 李志清², 熊野生³

(1. 成都理工大学 地质灾害防治国家专业实验室, 四川 成都 610059; 2. 中科院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 湖北省孝襄高速公路指挥部, 湖北 随州 441300)

摘 要: 为查明非饱和膨胀土边坡中吸力和饱和度(体积含水量)的变化和规律, 以及降雨对吸力和饱和度的影响。在湖北襄樊某高速公路旁的天然边坡设立观测井, 并埋设热传导探头和含水量探头, 进行了为期 2 个月的观测。通过精度较高的多项式的拟合获得的土-水特征曲线, 得出进气值和残余饱和度对应的基质吸力。根据土-水特征曲线, 获得非饱和土的渗透系数, 为工程设计提供了必要的参数, 同时解释了非饱和膨胀土的吸力随深度变化的规律和原因。

关键词: 非饱和膨胀土; 基质吸力; 饱和度; 土-水特征曲线

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)03-0343-04

作者简介: 吴礼舟(1975-), 男, 博士, 主要从事地质工程方面的研究工作。

WU Li-zhou^{1,2}, HUANG Run-qiu¹, HU Rui-lin², LI Zhi-qing², XIONG Ye-sheng³

(1. National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection Chengdu University of Technology, Chengdu 610069, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Headquarters of Xiaoxiang Freeway in Hubei Province, Suizhou 441300, China)

Abstract: In order to study the variation of suction and saturation in natural slopes of unsaturated expansive soil and the rules of rainfall influencing suction and saturation, matrix suction and saturation in situ near a highway at Xiangfan in Hubei province were measured with thermal conductivity sensors and moisture probes for two months. Soil-water characteristic curve (SWCC) is obtained from the data measured in situ, from which we can acquire air entry value (AEV) and residual saturation (RS). Permeability coefficient is derived from SWCC. At the same time, reasons and rules of suction variation with depth are explained.

Key words: unsaturated expansive soil; matrix suction; saturation; natural slope; soil-water characteristic curve (SWCC)

0 引 言

膨胀土以“膨胀性、裂隙性、超固结性”给工程造成巨大的危害。膨胀土的工程性质也难以用现有的饱和土理论进行解释, 在膨胀土中引入了非饱和土理论取得很大的成功^[1~3]。吸力是研究非饱和土的一个重要的参数, 其现场的测量及其在降雨过程中吸力对边坡的影响, 引起众多学者的兴趣^[1~4]。吸力观测的深度根据边坡体的类型和研究的需要, 多集中在 0.3 m 到 3.5 m^[3,4], 也有达到 20 m 深^[2]。

土体含水率的野外测量及其相应的土-水特征曲线起源于土壤科学, 土-水特征曲线是非饱和土中体积含水量(饱和度)和吸力之间的关系曲线, 基本参数有空气进气值和残余饱和度, 非饱和土的行为特征与土-水特征曲线有密切关系^[5], 从土-水特征曲线能获得渗透函数、剪切强度等有关参数。因此, 土-水特征曲线对于研究非饱和土的边坡稳定和相关的工程性质具有重要意义。

土-水特征曲线分为室内土-水特征曲线和野外土-水特征曲线两种。室内的土-水特征曲线又可分

为干燥过程和浸湿过程曲线, 且两者不重合, 其滞后性得到认可^[6~7]。野外边坡的土-水特征曲线不存在非常明显的干燥和浸湿过程, 同时受到矿物成分、土粒的结构、渗透等因素的影响; 野外土-水特征曲线更为真实, 研究的价值更大。基质吸力的变化与降雨具有对应关系, 且存在滞后时间^[2]。文献[2]的监测结果表明, 古滑坡体的吸力具有滞后的特点, 滞后的时间应与土的类型、结构等有关。对于膨胀土边坡, 吸力监测表明^[3~4], 由于膨胀土地区的吸力较高(最大有 200 kPa 多), 一般不采用张力计测量吸力, 热传导探头和滤纸较为合适。但这些研究也仅限于探讨膨胀土边坡吸力监测方法和吸力在不同边坡(挖方和填方等)的变化规律^[3~4], 未涉及到土-水特征曲线的研究。

本文在湖北某公路膨胀土边坡中开挖了吸力观测井, 沿井不同深度埋设热传导探头和含水量探头, 以观察开挖边坡吸力的变化及其规律, 同时观测吸力是

基金项目: 国家自然科学基金“西部生态与环境”重大研究计划(90102002); 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-134); 973 专题资助项目(2002CB412702)

收稿日期: 2004-05-23

表 1 钻孔膨胀土的物理参数

Table 1 Physical parameter of expansive soil obtained from drill

深度 /m	天然含水率 / %	比重 / G _s	密度 ρ/(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	饱和度 S _r / %	液限 W _L / %	塑限 W _p / %	塑性指数 I _p
2.8	34.2	2.74	1.87	0.966	97.0	49.0	21.3	27.7
4.5	32.8	2.74	1.86	0.956	94.0	51.0	23.4	27.6
5.7	26.4	2.74	1.86	0.862	83.9	54.8	24.5	30.3

否具有滞后性。根据野外监测数据拟合出分段的野外土—水特征曲线方程。拟合采用多项式，多项式的项次可根据精度需要来选择；拟合出的多项式比指数函数精度更高^[8]。根据野外土—水特征曲线探讨了非饱和土的渗透系数，为工程设计提供了必要的参数。

1 观测井的布设

观测井的位置位于襄樊某高速公路的高路堑边坡附近，这一膨胀土路段属于南襄断拗南部的襄枣断陷。膨胀土主要由第四系中上更新统、全新统地层构成。该场地地表水较丰富，膨胀土的成因类型主要为残坡积型（Q₂₋₃^{edl}），主要由棕褐色、黄色低液限粘土及亚粘土组成，呈硬塑状态；土中含有少量铁锰结核，为垄岗地貌。钻孔取得的膨胀土物理性质见表 1；其自由膨胀率为 40%~51%，为弱膨胀土。

观测井的主要任务是测量边坡不同深度处土的饱和度（含水率）和吸力，揭示其随深度的变化规律。采用从美国购进（AQUA-TEL-TDR）便携式土壤水分仪量测饱和度，将探头放入探测孔，读数稳定后（一般需 2 h）便得到饱和度值，其误差为 3%。吸力观测采用的清华大学生产的 TS-I 型吸力热传导探头。

观测井选在路堑边坡附近的自然边坡上，坡角为 35°，坡体有植被覆盖。该处膨胀土边坡开挖最大深度约 12 m，在连续降雨之后出现局部浅层的滑塌，影响了施工进度。所设观测井直径为 1.2 m，深度 3.5 m。井开挖完后立即用砖砌进行壁护，沿井不同深度 0.5，1，1.5，2，2.5 m 处埋设含水量和吸力探头，加上井盖，以防止水汽蒸发，并设置观测房。

2 监测数据分析

图 1 为观测井监测的吸力数据，这一段时间都是晴天（在一段降雨之后），从图可以看出，井下 0.5 m~1.0 m 之间的吸力基本有增大的趋势，而 1.5 m 和 2.0 m 之间的吸力却减小，虽然幅度不大，这点不同于风化花岗岩地区的吸力变化规律，没有出现典型的“干燥前锋”的移动^[6]，“干燥前锋”仅在 1.5 m 以上移动，下面的则呈现“浸湿前锋”的移动趋势，这与渗透缓慢有关。9 月 17 日的微弱减小表明吸力的时间后滞，0.5 m 处的吸力变化不大，没有受天气影响，主要原因是观测井的监测房使地面浅层不受天气的影响，含

水率和吸力均没变化。观测井 2.5 m 深的位置吸力为 0，饱和度为 100%，表明已处于饱和状态，天气对此深度的膨胀土没什么影响。图 1 中表明受大气影响最强烈的是 1.5 m 以上的，在 2.5 m 的位置膨胀土已处于饱和状态。

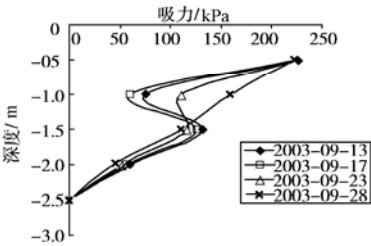


图 1 旱季的吸力随深度的变化

Fig. 1 Variation of suction with depth during the dry season

图 2 为这两个月观测的吸力和饱和度，观测期间 9 月初和 10 月 2 日左右出现两次较强的降雨。第一次降雨中 #3 的含水率增加较快，#5 吸力的减小较快，而 #4 吸力值在第一次降雨几天之后才降低，从 157 kPa 降到 75 kPa，表明膨胀土的吸力的滞后性，这点不同于香港风化花岗岩[7]。降雨对不同深度的含水量的影响也不一样，井下 1.0，1.5 m 和 2.0 m 处的含水量随天气变化较大，井下 0.5 m 和 2.5 m 处的饱和度和吸力变化均不大，主要因为 0.5 m 处受到上面的观测屋的影响，井上的房子影响到浅层（包括 0.5 m）的水气的蒸发和渗透及其运移，2.5 m 深的位置接近浸润线，基本处于饱和状态，干湿循环对此位置的吸力和含水量（饱和度）没什么影响。另外，吸力的数据有一定的分散性，这与率定的点太少有关。

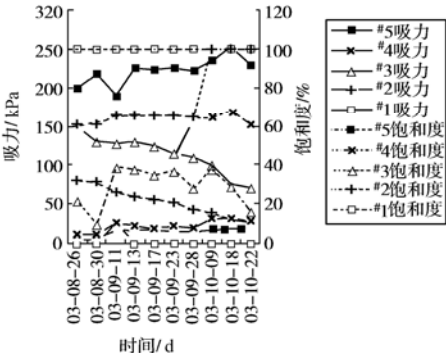


图 2 吸力和饱和度的比较

Fig. 2 Comparison between suction and saturation

图 3 为在不同深度吸力随观测时间的变化。1.5 m、2.0 m 处的吸力均在减小（对应的饱和度在增大），

减小的幅度和降雨有关, 降雨加速吸力的降低, 尤其在 2.0 m 深的位置很明显。2.5 m 处的吸力一直为 0; 1.0 m 以上的膨胀土吸力变化没有明显的规律可循。吸力对非饱和膨胀土的强度有重要的影响, 其值的反复变化势必对非饱和膨胀土的强度产生不利的影响, 加速裂隙的产生, 反过来裂隙和水气的蒸发和渗透对吸力反复的变化产生影响。

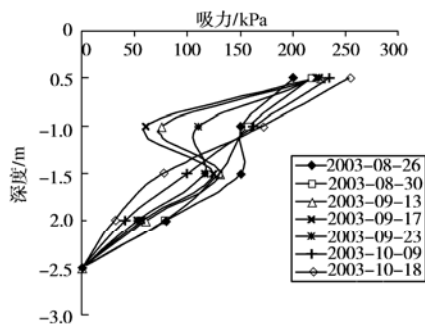


图3 观测井不同深度的吸力变化

Fig. 3 Variation of suction with depth in observation station

从图4已知, 大气影响深度为 2.5 m。在 2 m 深的饱和度未受第一次降雨的影响, 10 月初的强降雨对 2 m 深处的饱和度影响较大, 这与渗透有关。渗透快慢与膨胀土的饱和度有关, 1.5 m 处的饱和度对应的吸力一致, 都不随天气变化, 没有明显的规律性, 在这种膨胀土边坡 1.5 m 深处具有不确定性, 而实际滑坡出现在浅层, 深度多为 1~2 m, 应值得重视。

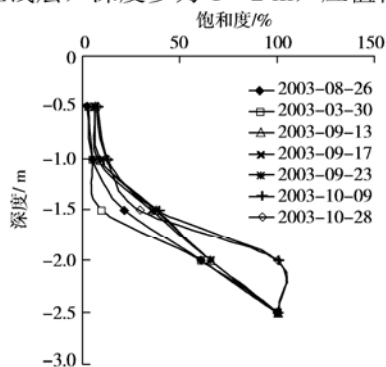


图4 观测井不同深度的饱和度变化

Fig. 4 Variation of saturation with depth in observation station

3 土-水特征曲线方程的分析

非饱和膨胀土的土-水特征曲线主要受土粒的矿物成分、孔隙的大小及分布、孔隙的结构、土体的收缩性、土的应力历史和温度等因素的影响。不同类型的土, 所得出的土-水特征曲线数学模型也有所不同。对于非饱和膨胀土的土-水特征曲线的数学模型的数学表达式形式可采用指数函数或多项式函数^[8]。本文改进了拟合的土-水特征曲线方程

$$S(u) = \begin{cases} 0, & u > u_r, \\ a + bu + cu^2, & u_b \leq u \leq u_r, \\ 1, & u < u_b. \end{cases} \quad (1)$$

$S(u)$ 是饱和度的函数, $u = u_a - u_w$ 为基质吸力, $u_b = (u_a - u_w)_b$ 是土-水特征曲线方程在饱和时的吸力值, $u_r = (u_a - u_w)_r$ 为残余含水率对应的基质吸力, a 、 b 和 c 为参数, 由所有数据 (现场所测的吸力和饱和度) 根据最小二乘法拟合而得出。拟合得 $a = 1.2228$, $b = -0.0101$, $c = 0.00002$ 。进气值和残余饱和度对应的吸力值估算为 23 kPa 和 201 kPa。文献[8]认为多项式函数比指数函数更为合理。为了比较拟合的精度, 本文对 Fredlund 提出的下列公式也进行计算^[1]:

$$(u_a - u_w) = \frac{(u_a - u_w)_r}{\left[\frac{(u_a - u_w)_r}{(u_a - u_w)_b} \right]^{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}}}, \quad (2)$$

式中 $(u_a - u_w)_r$ 为残余含水率 θ_r 所对应的基质吸力; $(u_a - u_w)_b$ 为土的进气值; $(u_a - u_w)$ 为非饱和土基质吸力; θ 为体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率。公式(2)显示: 当非饱和土体含水率由残余含水率 θ_r 增加到饱和含水率 θ_s 时, 基质吸力 $(u_a - u_w)$ 便由 $(u_a - u_w)_r$ 降低到 $(u_a - u_w)_b$ 。也就是说, 非饱和土体中含水率增加, 基质吸力将降低。图5中实线为本文提出的土-水特征曲线, 虚线为 Fredlund 提出的特征曲线计算结果, 两者的差异与非饱和膨胀土的孔隙有关, 土-水特征曲线本来就受土粒的孔隙大小及分布、孔隙结构因素的影响。由于边坡孔隙比分布具有不确定性, 严格的说, 不同深度的孔隙比不同, 同一深度不同位置的孔隙比不完全相同, 本文基于孔隙比均为一致的假设得出的土-水特征曲线, 这种假设应能满足工程的要求。

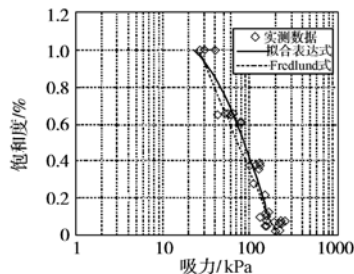


图5 野外土-水特征曲线

Fig. 5 Field measured soil-water characteristic curve

4 非饱和土膨胀土渗透系数的求解

非饱和膨胀土的渗流分析、抗剪强度及其渗透系数都和土-水特征曲线方程有关。水渗透系数是一个

重要的参数,其值的变化范围大,不易测量,本文通过土—水特征曲线和渗透函数之间的关系来探索非饱和和膨胀土的渗透系数^[9],采用 Burdine^[9]的公式

$$k_r(\theta) = k(\theta)/k_s = \Theta^q \frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{u^2(\theta)}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{u^2(\theta)}}, \quad (3)$$

其中 $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, 称为相对饱和度, θ 为体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, θ_s 为饱和体积含水率。 u 为变量, 通常 $q = 2$ 。 Θ^q 项反映了孔隙水水流线弯曲的影响。

文献^[10]假设 $\theta_r = 0$, 基于上式得出

$$k_r(u) = k(u)/k_s = S^q(u) \frac{\int_{u_r}^u \frac{S'(u)}{u^2} du}{\int_{u_r}^{u_b} \frac{S'(u)}{u^2} du}, \quad (4)$$

式中 $S = S(u)$ 是以吸力和饱和度为变量的土—水特征曲线方程, $u_b = (u_a - u_w)_b$, 为进气值, $u_r = (u_a - u_w)_r$, 为残余饱和度对应的基质吸力, 即是干燥时的吸力。

综合式(1)和式(4)就能求出非饱和和膨胀土的渗透系数, 非饱和和膨胀土的渗透系数与饱和度有关, 是吸力的函数, 如图 6, 相对渗透系数随吸力增大而剧减。边坡的吸力小于或等于进气值时, 非饱和和膨胀土的渗透系数为饱和和膨胀土的渗透系数。

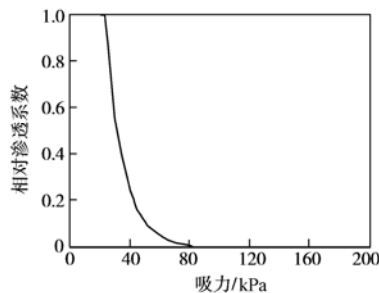


图 6 相对渗透系数与吸力的关系

Fig. 6 The relationship between relative permeability coefficient and suction

5 结 论

根据对膨胀土自然边坡的吸力和饱和度的观测, 以及对野外土—水特征曲线的系统研究, 本文得到的主要结论如下:

(1) 吸力一般情况下随深度而减小, 含水率随深

度而增大, 在 2.5 m 处的吸力和含水量均不变。而吸力在 1~1.5 m 处的变化不具有明显的规律, 实际的滑坡深度多为 1~2 m, 应值得重视。

(2) 非饱和膨胀土的水—土特征曲线可以用改进后的拟合式(1)加以描述, 比 Fredlund 的计算式更为方便简单, 还便于求解非饱和和膨胀土的渗透系数。

(3) 根据观测井吸力和饱和度的监测结果表明, 本地区膨胀土的大气影响深度大致为 2.5 m; 大气进气值约为 23 kPa, 残余饱和度对应的基质吸力约为 201 kPa。

(4) 本文取得了由土—水特征曲线获取非饱和和膨胀土渗透系数的计算公式, 对工程实践有一定的意义。

参考文献:

- [1] 弗雷德隆德 DG, 拉哈尔佐 H. 陈仲颐, 等译. 非饱和土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1997.
- [2] 黄润秋, 戚国庆. 滑坡基质吸力观测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 216-219.
- [3] 王 钊, 龚壁卫, 包承纲. 鄂北膨胀土坡基质吸力的量测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 64-67.
- [4] 龚壁卫, 包承纲, 刘艳华, 王 钊. 膨胀土边坡的现场吸力量测[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1): 9-13.
- [5] 黄 义, 张引科. 非饱和土的土—水特征曲线方程和结构强度理论[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 268-271.
- [6] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 278-282.
- [7] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 野外土—水特征及其工程意义[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(6): 969-973.
- [8] 戚国庆, 黄润秋. 土—水特征曲线的通用数学模型研究 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 182-186.
- [9] Burdine N T. Relative permeability calculation size distribution data [J]. Transaction of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineer, 1953, 198: 71-78.
- [10] 张引科, 咎会萍, 黄 义. 非饱和土的渗透函数方程[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(2): 174-177.