

渗漏情况下非饱和膨胀土地基变形的探讨

翟聚云, 张国强

(平顶山工学院, 平顶山 467000)

[摘要]非饱和土是三相复合介质,与饱和土相比,相的增加导致了其物理性质、应力应变关系、变形特性等方面较饱和土复杂得多。渗漏情况下非饱和膨胀土地基的增湿膨胀量,受土层很多因素影响,本文讨论了初始干密度已知的条件下,不同的渗水时间含水量变化、上覆压力的耦合变化,由此探索了满足较高工程精确度要求的变形量的计算方法,并对该计算模式进行了验证。

[关键词]非饱和膨胀土 上覆压力 地基变形 膨胀率

[中图分类号]TU433;TU443 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)06-0116-04

膨胀土分布比较广泛,非饱和膨胀土大多分布在地表,由于膨胀土具有较强的水敏感性^[1],给工程建设带来了极大的危害,据统计,全世界每年由于膨胀土的这种危害造成的损失可达近百亿元。水利灌溉系统、水管线路、下水道等工程渗漏非常常见,会使建筑物、道路及其他结构物造成严重破坏^[2]。膨胀土的膨胀量与土的矿务成分、结构、初始含水量、初始干重度、上覆压力等多个因素有关,对于特定的土体而言,这些因素对膨胀量的影响是耦合的。研究膨胀土膨胀变形规律及其计算的模式,对于认识膨胀土的性质、优化工程设计,从而进一步提出工程处理措施,具有十分重要的经济意义和工程实践价值。

1 膨胀量计算模式

膨胀土的膨胀量受多方面影响,其中主要的是上覆压力、含水量的变化及土体干密度等,其计算模式分别讨论如下。

1.1 只考虑初始含水量的膨胀量计算

相同压力作用下,膨胀土的单向膨胀变形大小用膨胀量 δ_h 表示如下:

$$\delta_h = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_0 为土样原始高度, ΔH 为饱和后膨胀后土样高度的变化。

文献3、4给出,相同压力作用下,膨胀率与吸水

量表现出较好的线性关系,两者呈正比,若初始含水量一定时,则:

$$\delta_H = a\omega + b$$

式中: a 、 b 为反映膨胀土膨胀变形特征的物性参数; ω 为膨胀吸水后的稳定含水量。

高度为 H_0 的土层试样浸水的膨胀量大小为: ω_2 对应的膨胀量 ΔH_2 与 ω_1 对应的膨胀量 ΔH_1 的差,即:

$$\Delta H = a\omega(\gamma, t_f)H_0 \quad (2)$$

文献5给出,无荷载膨胀量与含水量、初始干密度的关系可以用如下统一的公式来表示:

$$\delta_h = \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_m} + d \right) \omega_r \quad (\gamma_d \leq \gamma_m) \quad (3)$$

$$\delta_h = \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_m} + d \right) \omega_r + e \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + f \quad (\gamma_d > \gamma_m) \quad (4)$$

式中: γ_m 、 c 、 d 、 e 、 f 为需要试验得到的参数; γ_m 为界限干密度;含水比为饱和含水量与初始含水量差与饱和含水量之比,即 $\omega_r = \frac{\omega_m - \omega_0}{\omega_m}$ 。

1.2 考虑初始含水量和上覆荷载耦合的膨胀量计算

关于上覆压力与膨胀量的关系,目前可采用的经验公式有多种。

文献5给出,考虑初始含水量、初始干密度和上覆应力耦合作用的膨胀量计算模式如下:

$$\delta_h = \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_m} + d \right) \omega_r \left(\frac{\sigma_z + P_a}{P_a} \right)^{-B} \quad (\gamma_d \leq \gamma_m) \quad (5)$$

[收稿日期]2007-05-11; [修订日期]2007-10-16。

[基金项目]河南省科技发展计划项目(项目编号:624250023)。

[第一作者简介]翟聚云(1968年—),女,2006年毕业于华中科技大学,获硕士学位,副教授,现主要从事岩土工程教学与研究工作。

$$\delta_h = \left[\left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_m} + d \right) \omega_r + e \frac{\gamma_d}{\gamma_m} + f \right] \left(\frac{\sigma_z + p_a}{p_a} \right)^{-B} \quad (\gamma_d > \gamma_m) \quad (6)$$

式中: c, d, e, f, B 为试验参数。

文献6的一维膨胀理论认为, 弹性范围内, 垂直膨胀量可以用以下公式计算:

$$\delta_{hp} = \delta_h \left(1 - \frac{\ln \sigma_z}{\ln \sigma_{\max}} \right) \quad (7)$$

式中: σ_{\max} 为膨胀变形为0时的最大膨胀压力。

文献7认为, 压力作用下膨胀变形可按照以下经验公式计算:

$$\delta_{hp} = A \ln \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_z} \quad (8)$$

式中: A 为参数, 与土的含水量有关。

文献4提出的拟和函数为:

$$\delta_{hp} = 10^{A+B\sigma_e} \quad (9)$$

式中: A, B 为试验参数。

这些公式能较好地表征膨胀量随压力减小的规律。

1.3 考虑侧向变形的膨胀量计算

按分层总和法计算膨胀土的膨胀变形量时, 膨胀率 δ_H 为实验室完全侧限条件下得出的, 考虑到地基土实际情况, 侧向变形对地基膨胀量的影响, 需要乘以与地区经验有关的系数, 则地基土的膨胀变形量:

$$S_e = \psi_e \sum_{i=1}^n \delta_{Hi} h_i \quad (10)$$

式中 ψ_e 为计算膨胀变形量的经验系数, 宜根据当地经验确定。《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112-87) 建议: 若无经验资料时, 3层及3层以下建筑物, 可采用0.6。

2 渗漏情况下不同深度的土层含水量与浸水时间的关系

2.1 浸水锋面

根据参考文献资料8, 假设土体沿深度具有不变的初始含水量, 水源为点源入渗的二维入渗, 湿润体形状可近似为半椭圆体, 湿润体满足边界条件:

地面处: $y=0, w=w_2-w_0$;

浸水锋面处: $y(0, t)=y_0(t), w=0$

式中: w 为地基中某点的含水量变化; w_2 为地基的平均饱和含水量; w_0 为地基的平均天然含水量。

湿润锋与时间及土性参数之间的函数关系为:

$$y_0(t_j) = a_1 t_j^{\frac{1}{2}} + a_2 t_j + a_3 t_j^{\frac{3}{2}} + \dots + a_n t_j^{\frac{n}{2}} + \dots \quad (11)$$

式中 a_1, a_2, a_3, \dots 为待定的不变参数, 其取值很关键, 而且该级数的收敛也是很快的。

浸水锋面函数收敛较快, 级数的第三项对结果影响很小, 可取式的前三项来确定试验区的浸水规律。所以,

$$y_0(t) = a_1 t_j^{\frac{1}{2}} + a_2 t_j + a_3 t_j^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

2.2 含水量变化

以入渗点为始点, 取向下的竖直距离为计算距离 y , 并以此变形量为研究对象, 作为地基的增湿变形。

含水量的变化值对时间和深度的函数为^[8]:

$$w(y, t_j) = (w_2 - w_0) - (w_2 - w_0) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{i}{(i+1)!} \left(\frac{y}{y_0} \right)^i \quad (13)$$

由此可求出, 不同时间内不同深度土层的含水量, 含水量不是固定不变的, 是随深度和时间而变化。土的含水量和饱和度沿渗流运动方向减小。由此含水量变化, 就可以求出其变形量。

3 算例分析

3.1 浸水锋面及含水量的求得

某均质膨胀土地基^[9], 实测得到了渗水情况下不同时间地基变形值, 为验证本文方程的有效性, 以此工程为例进行计算分析。

取浸水峰面函数为^[7]:

$$y_0(t) = 0.408t^{1/2} + 0.049t - 0.0013t^{3/2} \quad (14)$$

可求出浸水锋面随时间的变化如表1:

表1 浸水锋面随时间的变化

时间/d	8	16	20	22	28
$y_0(t)/m$	1.52	2.33	2.67	2.86	3.34

根据下式就可以求得不同时间含水量增量随深度的变化如表2。

$$w(y, t_j) = 14.13 \left[1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{i}{(i+1)!} \left(\frac{y}{0.408t^{1/2} + 0.049t - 0.0013t^{3/2}} \right)^i \right] \quad (15)$$

按平均容重为 18.2 kN/m^3 , 将不同深度下的压力列如表3。

表2 不同时间不同深度处含水量的变化情况/%

深度/m	0	0.4	0.8	1.0	1.4	1.8	2.0	深度/m	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
16天	14.13	12.78	11.18	10.30	8.20	5.86	4.52	20天	14.13	12.61	10.74	8.38	6.19	3.97	
								22天	14.13	12.75	11.0	8.86	6.26	3.14	
								28天	14.13	12.36	11.54	9.84	7.82	5.517	2.67

表3 上覆压力为0不同深度处的应力值/kPa

深度/m	应力值
0	0
0.2	3.64
0.4	7.28
0.6	10.92
0.8	14.56
1.0	18.20
1.3	23.66
1.52	27.66

3.2 膨胀变形量的计算模式

本文讨论的地基土密度采用平均密度,膨胀量与含水量变化、上覆压力的耦合方程采用式(5)、(6)计算,求得不同时间的膨胀变形量。该方程可写成:

$$\delta_h = \delta_{hp} \left(\frac{\sigma_z + p_a}{p_a} \right)^{-B} \quad (16)$$

因为上覆压力为0情况下,假设含水量的变化为 $\Delta\omega$,土层厚度为 H 的膨胀量,由文献8: $\delta_{hp} = 0.27 \times \omega - 0.46$,则耦合方程为:

$$\delta_h = 0.27 \times (\omega_m - \omega_0) \times \left(\frac{\sigma_z + 103.36}{103.36} \right)^{-B}$$

试验平均含水量为26.67%,饱和含水量为40.80%;上覆压力200kPa时,平均膨胀率为1.81进行计算

$$1.81 = 0.27 \times 14.13 \times \left(\frac{200 + 103.36}{103.36} \right)^{-B}$$

$$= 6.74 \times 2.93^{-B}$$

得 $B=0.69$ 。所以含水量、压力的耦合方程为:

$$\delta_h = 0.27 \times (\omega_m - \omega_0) \times \left(\frac{\sigma_z + 103.36}{103.36} \right)^{-0.69}$$

当上覆压力相同时的膨胀率变化量为:

$$\Delta\delta_h = 0.27 \times \Delta\omega \times \left(\frac{\sigma_z + 103.36}{103.36} \right)^{-0.69}$$

上覆压力为零浸水 t 天时地基中某深度处的增湿变形量为:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i \times 0.27 \times H_i \times \left(\frac{\sigma_{z_i} + 103.36}{103.36} \right)^{-0.69}$$

式中: n 为计算分层数; $\Delta\omega_i$ 为第 i 层含水量增量的平均值; H_i 为计算为分层数的厚度; σ_{z_i} 为计算分层数的平均垂直应力。

膨胀土浸水时间比较短时,水分的运动基本上是由吸附力控制的,随着时间的增加,膨胀土的膨胀性能才逐渐显现出来,假设以8天时间作为临界时间,实测8天膨胀地基的膨胀量为6.244mm,计算地基的膨胀变形量可用以下公式

$$\Delta H = 0.6 \times \sum_n \Delta\omega_i \times 0.27 \times H_i \times \left(\frac{\sigma_{z_i} + 103.36}{103.36} \right)^{-0.69} + 6.244$$

式中前一项的分层计算为 $\gamma_0(t-8)$ 厚度的土层,如计算22天的变形量时,式中前一项为浸水16天,厚度为 $\gamma_0(22-8) = \gamma_0(16) = 2.33m$ 内的膨胀变形量,而后8天的变形近似取6.244mm。

3.3 计算结果与实测的对比

由此可以计算不同时间的地基膨胀变形量,计算结果与实测的比较如表4。

表4 增湿变形计算值和实测的比较

类别	16天增湿 变形/mm	20天增湿 变形/mm	22天增湿 变形/mm	28天增湿 变形/mm	饱和膨胀 变形/mm
实测	25.81	36.71	41.60	51.29	52.12
计算	30.04	35.76	39.69	44.52	57.60
误差%	16.38%	2.59%	4.62%	13.20%	10.51%

从表4可以看出,计算结果与实测结果比较接近;相对于饱和膨胀变形量,计算得到的增湿变形量更接近实测值。参考此方法,可计算不同压力情况下的沉降量。

4 结 语

本文讨论了相同干密度情况下,含水量变化、上覆压力对非饱和膨胀土地基变形量的耦合计算,求得含水量沿深度和时间的变化量后,进一步采用分层总和法计算增湿后的沉降量,从而得到渗漏情况下不同时间的地基变形量,揭示出膨胀土地基非饱和和增湿过程。通过实例计算验证了本文积水增湿变形计算方法的合理性和可行性。

[参考文献]

- [1] Fredlund G, Rahadjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2] Delwyn G Fredlund Unsaturated soil mechanics in Engineering Practice[J], Journal of geotechnical and geoenvironmental Engi-

- neering, 2006 :285 - 320.
- [3] 徐永福. 膨胀土的击实条件与膨胀变形的相关性研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 57 - 60.
- [4] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 826 - 830.
- [5] 张爱军, 哈岸英, 骆亚生. 压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1236 - 1241.
- [6] Gysel M. Design methods for structure in swelling rock[J]. ISRM, 1975, 18: 377 - 381.
- [7] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] 翟聚云, 郑俊杰. 渗漏对非饱和膨胀土地基变形的影响[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2007, 24(1): 51 - 54.
- [9] 贾永刚, 刘红军, 单红仙. 苏丹膨胀土工程地质性质[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(51): 70 - 73.

A STUDY OF THE DEFORMATION ON SEEPAGE IN UNSATURATED EXPANSIVE SOIL FOUNDATION

ZHAI Ju - yun, ZHANG Guo - qiang

(Pingdingshan Institute of Technology, Pingdingshan 467000)

Abstract: Unsaturated expansive soil is compound medium of three - phase. AS it has much more phases than saturated soils. It is of more complex on physical property, stress and strain relation and of distortory characteristion. The deformation of unsaturated expansive soil foundation for seepage is influenced by many factor. This paper discussed the coupling effects between pressure, moisture content at different period of time. When initial dry density is known. The calculation methods which fulfil the accuraly requirements of engineering is researched. The correctness of the pattern has been confirmed. This method has importand application value in engineering.

Key words: unsaturated expansive soil; pressure; deformation; expansion rate