

膨润土水化膨胀行为简化计算

何 俊

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 在已有膨润土微观结构研究的基础上,假设其中蒙脱石的膨胀完全填充土中孔隙,得到蒙脱石膨胀体积应变 ϵ_{sv} 的表达式. 根据 ϵ_{sv} 计算出水化后蒙脱石矿物层距离的一半和基于 Gouy-Chapman 理论的扩散双电层的厚度,并对二者进行了比较. 在给定的计算参数下,当饱和含水量为 80% ~ 90% 时,膨润土的孔隙完全由结合水填充.

关键词 膨润土 膨胀 蒙脱石膨胀体积应变 扩散双电层

中图分类号 :TU443 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)03-0299-03

膨润土在环境岩土工程中有着广泛的应用. 在核废料处理领域,膨润土是非常重要的防渗材料. 在现代填埋场的建造中,膨润土也是常用的材料^[1],例如在垂直防渗中作为防渗材料. 在水平防渗中常常与普通黏土或砂土混合使用,达到防渗的目的. 目前国内外都趋向于用工厂制作的土工合成材料黏土垫层(Geosynthetic Clay Liner,GCL)代替压实黏土垫层(Compacted Clay Liner,CCL),而 GCL 中起到防渗作用的一般是钠膨润土.

膨润土的防渗性能与其矿物成分和土中的水密切相关. 非饱和膨润土中存在吸力,蒙脱石吸水发生层间膨胀,形成渗透系数很小的材料,可以有效地防止渗滤液向周围环境的迁移. 对膨润土中水的状态和行为进行研究有助于更好地认识膨润土的防渗、防污性能. 本文在已有膨润土微观结构研究的基础上,对膨润土水化后的膨胀行为进行了简化计算.

膨润土遇水膨胀是由于主要黏土矿物蒙脱石与孔隙液之间的物理化学作用的结果. 2:1 型矿物结构的蒙脱石层间作用力弱,水分子容易进入,形成厚的结合水膜. 这种作用很复杂,可能是由于扩散双电层现象产生的排斥力与范德华吸力引起的^[2],在外界力的作用下,膨胀直到新的力学平衡才停止. 研究表明,与高岭石和伊利石不同,蒙脱石用扩散双电层理论描述是适合的^[3].

Lloret 等^[4]总结了压汞法、扫描电子显微镜观察以及宏观力学试验方法,认为膨润土中存在双重结构:在微观层次为团聚体内部的土颗粒与团聚体内部的微观孔隙;在宏观层次为团聚体与团聚体之间的宏观孔隙. Yong^[5]认为膨润土中存在多重结构层次,如图 1 所示. Pusch^[6]采用透射电镜对钠膨润土的微观结构进行研究,指出吸水后随着颗粒的膨胀和剥离,形成黏土胶体填充于孔隙中. Komine 等^[7]采用环境扫描电子显微镜观察了砂-膨润土及膨润土的水化过程,发现随着水化过程的发展,吸附水使得膨润土的体积增加,宏观孔隙被膨润土填充. 因此,膨润土水化时,由于土颗粒之间的物理化学作用,微观层次发生膨胀变形,引起细、宏观层次团聚体和孔隙的变化.

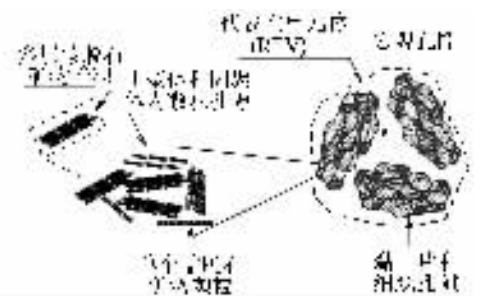


图 1 结构单元体和孔隙的层次性
Fig.1 Hierarchy of fabric units and pore spaces

1 水化膨润土蒙脱石膨胀体积应变计算

蒙脱石膨胀体积应变计算简图如图 2 所示. 蒙脱石膨胀体积应变 ϵ_{sv} 可以表示为

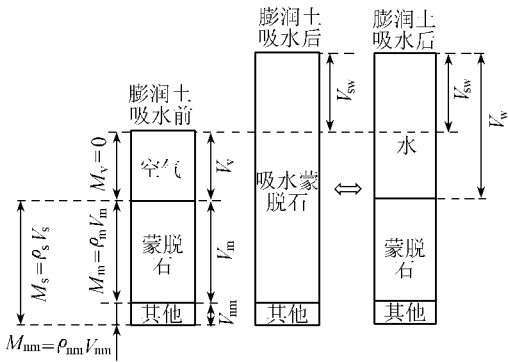


图2 蒙脱石膨胀体积应变计算简图
Fig.2 Schematic diagram of calculation of swelling volumetric strain

V_{sw} ——吸水前空气的体积和吸水后总体积膨胀增加的体积。

从式(6)可以看出, ϵ_{sv} 与饱和含水量 w 和膨润土中蒙脱石的含量有关(蒙脱石和水的密度为定值); ϵ_{sv} 与 w 成正比, 与 C_m 成反比。

从蒙脱石矿物变形的角度考虑水化过程, 假设完全干燥的蒙脱石层间没有水存在, 蒙脱石层间为一层阳离子所填充, 两层蒙脱石之间的距离为没有水化阳离子的直径。水化过程蒙脱石水化膨胀后的结构如图3所示。

从图3可以得到:

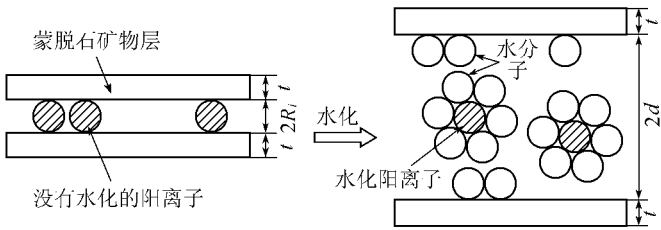


图3 水化过程蒙脱石膨胀体积应变
Fig.3 Swelling volumetric strain of montmorillonite in process of hydration

$$\epsilon_{sv} = \frac{2d + 2t - (2R_i + 2t)}{2R_i + 2t} = \frac{d - R_i}{R_i + t} \tag{7}$$

$$d = \epsilon_{sv}(t + R_i) + R_i \tag{8}$$

式中: d ——水化后蒙脱石矿物层距离的一半; t ——蒙脱石矿物层的厚度; R_i ——未水化阳离子的半径。从式(8)可以看出, 在本文的简化条件下, 当 R_i 很小时, d 随 ϵ_{sv} 线性增加。

2 扩散双电层厚度估算

采用 Gouy-Chapman 扩散双电层理论估算蒙脱石扩散双电层的厚度^[8]。

$$h = \left(\frac{\epsilon k T}{2 n v^2 e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中: h ——扩散双电层的厚度, m; ϵ ——孔隙液的介电常数, $\epsilon = 7.083 \times 10^{-10}$ F/m; k ——Boltzmann 常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T ——绝对温度, $T = 295$ K; v ——离子化合价; e ——单位电荷, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C; n ——孔隙液中离子浓度, mol/m³。

考虑水化过程中孔隙溶液中离子浓度的变化, 则有

$$n = n_0 N_A / (1 + \epsilon_{sv}) \tag{10}$$

式中: n_0 ——距离土颗粒表面较远处孔隙水中离子浓度, mol/m³; N_A ——Avogadro 常数, $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ 。 $n_0 N_A$ 表示没有考虑膨润土体积膨胀时的孔隙液浓度。

测量出孔隙溶液中离子类型和浓度之后, 根据蒙脱石膨胀体积应变值, 则可以求出扩散双电层的厚度 h 。将 h 与前面得到的 d 进行比较, 则可以大致知道土中水的状态: 当 $d > h$ 时, 蒙脱石矿物层之间的距离大于扩散双电层占据的范围, 孔隙中除了结合水以外还存在自由水; 当 $d < h$ 时孔隙空间完全由结合水填充。

3 d 与 h 的比较及讨论

在环境岩土工程中常常使用钠膨润土, 因此假设土中交换性阳离子全为 Na^+ , 其非水化离子半径为

0.098 nm^[4], 浓度 n_0 为 40 mol/m³. 设 $C_m = 90\%$, $\rho_m = 2.77 \text{ kg/cm}^3$, $t = 0.96 \text{ nm}^{[4]}$. 已知各个常数的值, 则可以由式(6)计算得到 ε_{sv} 随含水量 w 的变化情况. 将 ε_{sv} 代入式(8), 可以求得 d 的大小. 由式(10)和式(9), 则可以求出扩散双电层的厚度 h . 图 4 是 d 和 h 随含水量 w 的变化曲线.

从图 4 可以看出, 由于 R_i 与 t 相比很小, d 基本随含水量的增加呈线性增加. 在含水量较小时 h 随含水量的增大增加较快, 而后增加速度逐渐减慢. 在本文假设的条件下, 当含水量低于 80% ~ 90% 时, $h > d$, 膨润土中主要为结合水填充; 当含水量高于 80% ~ 90% 时, $h < d$, 蒙脱石矿物层之间的距离超过了扩散双电层的发展范围, 土中有结合水也有自由水. 这里含水量指的是饱和含水量.

4 结 论

- a. 蒙脱石膨胀体积应变 ε_{sv} 与饱和含水量 w 和膨润土中蒙脱石含量 C_m 有关, 与 w 成正比, 与 C_m 成反比.
- b. 当假设膨润土完全干燥, 蒙脱石层间为单层非水化阳离子填充时, 水化后蒙脱石矿物层之间距离的一半 d 基本随 ε_{sv} 的增大而线性增大.
- c. 水化过程中孔隙溶液中离子浓度 n 随 ε_{sv} 的增大而减小, 由 Gouy-Chapman 理论得知扩散双电层的厚度 h 随 ε_{sv} 的增大而增大.
- d. 通过比较 d 和 h 的大小得知, 在本文假设条件和给出的计算参数下, 当饱和含水量为 80% ~ 90% 时, 土孔隙中全部由结合水所充满.

参考文献：

[1] 栾智慧,王树国.垃圾卫生填埋实用技术[M].北京:化学工业出版社,2004:50-72.

[2] CHEN J, ANANDARAJAH A, INYANG H. Pore fluid properties and compressibility of kaolinite [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(9):798-807.

[3] KOMINE H, OGATA N. New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials [J]. Can Geotech,2003,40:460-475.

[4] LLORET A, VILLAR M V, SANCHEZ M, et al.. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes [J]. Geotechnique,2003,53(1):27-40.

[5] YONG R N. Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance [J]. Engineering Geology,1999,54:83-91.

[6] PUSCH R. Microstructural evolution of buffers [J]. Engineering Geology,1999,54:33-41.

[7] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal [J]. Soils and Foundations,1999,39(2):83-97.

[8] MITCHELL J K, Fundamentals of soil behavior[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc,1992:100-130.

Simplified calculation of swelling behavior of hydrated bentonite

HE Jun

(Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Under the assumption that pore spaces of bentonite were completely filled by swelling of montmorillonite, an expression of swelling volumetric strain of montmorillonite ε_{sv} was obtained based on the former research of microstructure of bentonite. With ε_{sv} , the half distance between two layers of montmorillonite after hydration and the thickness of diffuse double layer based on Gouy-Chapman theory were calculated and compared. It is concluded that, with the computation parameters given, pore spaces of bentonite are completely filled by bound water when the water content is within the range of 80%-90%.

Key words bentonite; swelling; swelling volumetric strain of montmorillonite; diffuse double layer

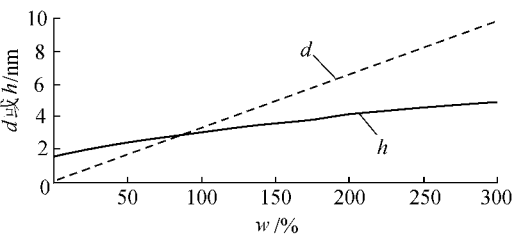


图 4 d 和 h 随含水量 w 的变化
Fig.4 Variation of d and h with water content