

# 膨胀土胀缩变形的有关理论及其评析

郝月清<sup>1</sup>, 朱建强<sup>2</sup>

(1. 西北农业大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100;  
2. 湖北省渍涝地开发工程技术研究中心, 湖北 荆州 434103)

**摘要:** 总结归纳了膨胀土胀缩变形的有关理论, 在论述各理论解释膨胀土胀缩变形机理的基础上对它们进行了简要评析, 指出了有关理论的异同和内在联系。

**关键词:** 膨胀土 变形理论 评析

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(1999)06-0058-04 中图分类号: S155.51

## Theories and Analysis About Expensive Soil Deformation of Swelling and Shrinking

HAO Yue-qing<sup>1</sup>, ZHU Jian-qing<sup>2</sup>

(1. *Water Conservancy and Architectural College of Northwestern Agricultural University, Yangling 712100, Shaanxi Province, PRC*; 2. *Engineering and Technology Research Centre of Exploitation Waterlogged and Watery Land in Hubei Province, Jingzhou 434103, PRC*)

**Abstract:** The relative theories about the swelling and reduction of swelling soil are introduced. The nature of deformation of swelling soil are explained. Finally, the relative theories are assessed and their differences and identities are pointed out.

**Keywords:** expensive soil; deformation theories; analysis

膨胀土是现代工程地质和土力学中出现的专业技术名词, 它是有别于黄土、红土、软土、冻土以及普通粘土的一类特殊粘土<sup>[1]</sup>。由于膨胀土在地貌上和工程地质上的特殊性, 以及它对工程建筑所带来的严重危害而引起世界上很多国家的重视。膨胀土对工程的危害主要是由其不良的工程地质特性引起的, 其中在外界环境因素影响下所发生的胀缩变形是一个重要方面。

## 1 膨胀土胀缩变形的基本理论

膨胀土吸水后体积增大、失水后体积缩小的现象称为膨胀土的胀缩变形。这是膨胀土最本质的特性之一。已有研究表明, 粘性土由于水分增加或减少都会产生一定的胀缩变形, 但没有膨胀土那样强烈, 一般不会给工程带来严重危害。目前有关解释膨胀土膨胀与收缩原因的理论较多, 但还不成熟。较早的理论有从晶格构造提出的晶格扩张理论和以毛细管现象为依据的弹性理论。一般应用较普通的有渗透理论、双电层理论和吸力热理论等, 其次还有热渗理论、表面张力和弹性弯曲理论。

### 1.1 膨胀土膨胀的矿物学理论

该理论从矿物晶格构造出发, 认为膨胀土的膨胀取决于组成膨胀土的矿物成分及其结构<sup>[2-4]</sup>, 以及颗粒表面交换阳离子成分等<sup>[4-5]</sup>。不同的矿物成分具有不同的晶格构造型式, 决定着与极性水分子相结合的难易程度; 交换阳离子成分则决定离子水化作用的强弱以及交换

容量的大小,同样直接影响着膨胀土的胀缩性。

### 1.2 膨胀土膨胀的物理化学理论

在这一理论体系中,以渗透理论、双电层理论应用较普遍。这些理论认为膨胀土膨胀的主要原因是膨胀土—水体系中膨胀土颗粒表面产生了复杂的物理化学作用,膨胀土的膨胀性质取决于膨胀土矿物表面结合水水层与扩散双电层的厚度,同时与溶液浓度、温度等因素密切相关<sup>[1,6]</sup>。

### 1.3 膨胀土膨胀的物理力学理论

这方面的理论包括有效应力理论、毛细管理论和弹性理论等。该理论认为膨胀土的膨胀是在一定的外力作用下由膨胀土与水相互作用产生的物理力学效应引起的。当部分饱和的膨胀土吸水后,土中孔隙水应(压)力与有效应力发生了变化,毛细管势能和表面张力也发生了改变,并引起膨胀土颗粒的弹性效应,从而导致膨胀土体积增大。

## 2 几种解释膨胀土胀缩变形机理的主要理论及其评析

膨胀土是一类特殊粘土,其胀缩机制可以用前已述及的有关变形理论来解释。其中比较符合实际的有晶格扩张理论和双电层理论。

### 2.1 晶格扩张理论

晶格扩张理论认为,膨胀土晶格构造中存在膨胀晶格构造,水易渗入晶层之间形成水膜夹层,从而引起晶格扩张,使得土体体积增大。粘土矿物学研究表明,在粘土矿物的原子晶格构造中有一种构造型式,其各层之间由弱化学键连接,彼此结合很不牢固,如蛭石和蒙脱石的晶格构造就是如此。由于晶层之间联结力弱,使得晶体格架具有异常大的活动性,遇水很不稳定,表现为水分子可无定量地进入晶格之间而产生膨胀,这种构造称为膨胀晶体构造。凡是具有膨胀晶格构造的矿物都具有膨胀性。

从晶格扩张膨胀理论出发,研究膨胀土产生胀缩的原因,首先必须充分考虑到组成膨胀土的粘土矿物的晶格构造特性。由同种矿物组成的膨胀土,其胀缩大小取决于交换性阳离子成分。有资料证明<sup>[2,7]</sup>,交换阳离子价愈高、水化膜越薄,膨胀倍数越低;反之,交换阳离子价愈低、水化膜越厚,膨胀倍数就越高。此外,胀缩量与起始温度也密切相关。运用晶格扩张理论,对于认识膨胀土的胀缩变形,特别是解释含不同粘土矿物成分的膨胀土在不同起始温度下的胀缩程度有一定意义。但是,晶格扩张膨胀理论仅仅局限于晶层间吸附结合水膜的楔入作用,而没有考虑粘土颗粒及聚集体吸附结合水的作用。事实上,粘土膨胀不仅发生在晶格构造内部晶层之间,同时也发生在颗粒与颗粒之间以及聚集体与聚集体之间。过去一直认为只有蒙脱石类具有膨胀晶格构造,而伊利石和高岭石则不具备晶格构造,因而也不产生膨胀<sup>[2]</sup>。我国许多研究者的研究证明,以伊利石矿物为主组成的粘土同样显示出较大的胀缩性而划为膨胀土<sup>[1,3-11]</sup>。这说明粘土晶格扩张膨胀理论并不能完全解释膨胀土产生胀缩变形的原因。

### 2.2 双电层理论

根据现代胶体化学的原理,粘土矿物颗粒由于晶格置换产生电荷,在颗粒周围形成静电场,在静电引力作用下颗粒表面必须吸附带有相反电荷的离子(即交换性阳离子),这些离子以水化离子形式存在。带有负荷的粘土矿物颗粒吸附水化阳离子,形成扩散形式的离子分布,从而组成所谓的双电层(水化膜)。双电层内的离子对水分子具有吸附能力。被吸附的水分子在电场力作用下按一定取向排列,在粘土矿物颗粒的周围形成表面结合水(水化膜)。由于结合膜增厚“楔开”土颗粒,从而使固体颗粒之间的距离增大,导致土体膨胀。当介质条件改变时,

土中的结合水膜将变薄或消失,此时“楔力”解除,粒间距离缩小,从而使土体体积缩小,即产生了收缩变形。显而易见,双电层理论是基于粘土颗粒表面双电层中的结合水膜厚度变化来解释粘土有胀缩现象的。

已有研究表明,粘土中结合水的厚度,特别是弱结合水膜的厚度主要取决于双电层中扩散层的厚度,而扩散层的厚度则直接受电动电位所控制,其数值可通过电动电位定量表示,即

$$d = d \cdot \zeta / 4\pi\sigma$$

式中:  $d$  —— 扩散层厚度;  $C$  —— 电介电质常数;  $\sigma$  —— 表面电荷密度;  $\zeta$  —— 电动电位。

电动电位指固定层与扩散层之间存在的电位差,属于热力电位  $\varepsilon$  (固体与液体界面上的电位差) 的一部分,是产生电动现象的原因。电动电位受下列因素控制: (1) 矿物成分及颗粒的分散性。土粒愈分散,比表面积愈大,扩散层也愈厚; (2) 电介质浓度。电介质浓度高则电动电位低,从而使  $d$  变小。因为电介质浓度愈高,则反离子浓度也越高,从而可有效地补偿胶体表面的负电荷,使  $\zeta$  降低; (3) 扩散层中吸附离子的化学价。离子化学价越高,  $\zeta$  电位越低,扩散层厚度  $d$  越薄; (4) 电介质溶液的 pH 值。粘性土除含永久性负电荷(不受 pH 值影响)外,还含有随 pH 值的降低而增加。又如氧化铁、氧化铝等两性物质,在酸性条件下带正电荷,其数值随 pH 值的降低而增加。因此,有机质含量高的土  $\zeta$  电位亦高,相应的扩散厚度也大,而含铁铝氧化物的土在酸性条件下其  $\zeta$  电位及扩散层均可能变小。总的趋势是  $\zeta$  电位随 pH 值的升高而增大。

扩散层对土的工程性质的形成意义最大。粘土与水相关的一系列水物理性质都与扩散层的厚度有关。扩散层厚度的变化是引起粘性土物理力学性质变化的主要原因<sup>[6]</sup>,粘土的塑性、膨胀、崩解、收缩、渗透等特性的发展均直接取决于扩散层中水化膜的厚度。

按照双电层理论,当粘土与水相互作用时,双电层并不局限于仅在单一矿物颗粒表面存在,同时也存在于聚集体表面或其之间,还存在于晶格构造内部。因此,双电层理论首先弥补了晶格扩张理论在解释粘性土胀缩原因方面的不足,而且进一步发展了结合水膜在膨胀理论中的应用,这就使得膨胀机理的理论更加全面和充实。

运用双电层理论解释膨胀土的胀缩变形,可获得比较满意的效果。就膨胀土而言,首先是由于在组成膨胀土的矿物中普遍含有较多的蒙脱石(有的膨胀土几乎全由蒙脱石矿物组成)。带负电荷的蒙脱石颗粒吸附水化阳离子后在水介质中的电动电位比其它矿物都高,特别是钠蒙脱石的电动电位更高,并且电动电位随离开颗粒表面距离的增大而缓慢下降,以至延伸至较远的距离。也就是说,蒙脱石矿物颗粒表面双电层扩散的厚度较大,因而结合水膜厚度也较大,这样水膜“楔开”颗粒间的距离就大。这就是膨胀土为什么具有强烈胀缩性的内在机理。同样,运用双电层理论也可以较好地解释以高岭石、伊利石组成的膨胀土的胀缩性。

从土质的工程改良来看,双电层理论使我们有可能通过电化学方法和离子交换作用来改变粘土颗粒表面双电层中反离子的成分和浓度。使粘土矿物的电化学性状发生改变,从而缩小扩散层的厚度、减少结合水的数量,以降低膨胀土的膨胀变形和收缩变形。

### 2.3 渗透理论及其与双电层理论的统一

这里所谓渗透是指溶剂从浓度低的溶液通过一种透水膜渗向浓度较高溶液的过程。渗透理论认为在土—水体系中存在着渗透压力,而且是膨胀机理的根据。早在 1956 年 Bolt 就得出结论,认为伊利石粘土和蒙脱石粘土的膨胀都是由于被吸附离子层有过量的渗透压所产生的。Bolt 声称这种体系的渗透压力可能高达  $538645 \text{ t/m}^2$ 。

基于渗透压力是唯一作用于土粒之间的内力的理论, 当土受到外部压力时, 土粒之间的距离将缩小而水被挤出, 结果使土粒之间离子浓度升高, 从而渗透压力也随之增大。当渗透压力与外部压力相等时, 最终达到了平衡。与此相反的过程是外部压力减小, 并借助粒间的渗透压力吸水以稀释离子浓度。这将使土粒间距离增大, 导致体积增大和渗透压力降低, 这个过程持续进行直至建立新的平衡为止。由此可见, 水的渗透是引起膨胀的最重要原因。其实渗透理论与双电层理论是统一的。非常清楚, 由渗透作用导致颗粒表面水膜变化主要是指结合水而言, 它受粘土颗粒表面水化离子扩散层的控制, 实际上也是双电层作用。从这个意义上讲, 二者是统一的。

## 2.4 微结构学说

由上述分析可以看出双电层理论具有普遍的实用性, 但双电层理论却不能解释某些以伊利石为主的膨胀土的膨胀变形反比以蒙脱石为主的膨胀土大。廖世文先生通过对膨胀土进行宏观与微观综合研究指出, 膨胀土产生胀缩变形的原因与机理不完全取决于组成膨胀土的物质成分, 它还取决于这些物质成分在土中的空间微结构特征<sup>[1]</sup>。并认为组成膨胀土的物质成分是产生胀缩变形的物质基础, 微结构特征是形成膨胀与收缩的空间条件。当具备上述内在因素时, 在水的作用下土才有可能产生膨胀, 当失去水时又能产生收缩。微结构学说丰富了膨胀土的变形理论, 对正确解释各地千差万别的膨胀土胀缩现象有重要的理论意义与实际意义。

## 3 结 语

膨胀土产生膨胀与收缩的原因很复杂, 其胀缩特性首先是由其内部固有的因素决定的, 同时受外部条件的控制。其中组成膨胀土的特殊物质成分和结构特征是产生胀缩变形最根本的原因(内因), 而水则是胀缩变形发生的主要诱发因素(外因)。如果只有土的存在而没有水的作用, 则膨胀土固有的胀缩性就表现不出来。此外, 其它环境条件如地形、地貌、水文、气候、植物等都是促使土体结构变化和温度变化的间接外部条件, 对膨胀土的变形也起着重要作用。显然, 膨胀土之所以会产生胀缩变形有 2 个重要方面: (1) 这种土本身具备能胀缩的内因——特殊的物质组成与结构特征; (2) 存在水分变化的外部条件——自然环境因素与人类因素, 二者缺一不可。前人从不同角度提出的有关膨胀土的膨胀理论, 在一定程度上反映了膨胀土与水作用的本质和规律, 有助于对膨胀土胀缩性的认识, 这对工程实践有一定的指导作用。

### 参 考 文 献

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984, 90- 100.
- [2] Grime R E. Clay Mineralogy[M]. McGraw Hill, New York( and Edutuib), 1986.
- [3] Loughnam F C. Chemical Weathering of the Silicate Minerals[M], Elsevier, New York 1969.
- [4] Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behaviour[M], New York, 1976.
- [5] Ingles O G. Soil Chemistry Relevant to Engineering Behaviour of Soils[M], Chapter 1. In: Soil Mechanics- Selected Topics, I. K. Lee(ed), Butterworths, London, 1968, 1- 57.
- [6] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算(上册)[S], 北京: 水利电力出版社, 1982. 7; 15.
- [7] 谭罗荣. 蒙脱土晶格胀缩对其体积变化的影响[J]. 水文地质工程地质, 1981(6). 5- 7; 37.
- [8] 罗鸿禧、周芳琴. 郟县胀缩土的矿物成分及微结构的研究[J]. 工程勘察, 1981(5): 35- 38.
- [9] 高国瑞. 膨胀土微结构特征的研究[J]. 工程勘察, 1981(5). 39- 42.
- [10] 高国瑞. 膨胀土微结构和膨胀势[J]. 岩土工程学报, 1984(2). 40- 48.
- [11] Bolt G H. Physical-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays[J], Geotechnique, 1956. 6(2).