

论膨胀土的工程特性及工程措施

缪林昌, 刘松玉

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:回顾膨胀土的工程特性的研究现状, 重点介绍膨胀土的结构特性、渗透性、变形、强度及边坡稳定性的研究方法和研究成果, 分析了现有研究中存在的问题, 对膨胀土从膨胀土的微观结构着手, 深入研究微结构与有关力学参数的内在联系, 微观模型与宏观模型相结合, 从而揭示膨胀土的工程特性, 达到防治的目的。

关键词:膨胀土; 结构特性; 变形; 强度; 边坡稳定

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2001)02-0037-04

膨胀土是一种特殊土, 具有吸水膨胀软化和失水收缩干裂的特性, 同时具有超固结性和多裂隙性, 其矿物成分以强亲水的蒙脱石和伊利石为主, 它所处的地理位置都是干旱和半干旱地区, 我国是膨胀土分布最广的国家之一, 先后已在 20 多个省发现有膨胀土, 由于它具有显著胀缩特性, 使膨胀土地区的房屋建筑、铁路、公路、机场、水利工程等经常遭受严重的破坏, 对人民的财产造成巨大的损失, 同时这种危害随着工程建设事业的迅速发展而更加严重, 引起了岩土工程界科技人员的极大关注。自 60 年代以来, 膨胀土研究受到生产实践的广泛重视而迅速发展, 而且从一个国家或地区的研究, 逐渐发展成为世界性的共同课题。到目前为止已先后召开过七届国际膨胀土研究与工程会议, 其间有关科研人员在膨胀土的结构特征、力学特性、变形特点等方面取得了很有价值的研究成果。

1 膨胀土的结构特性

1.1 膨胀土的微结构

膨胀土的微结构是指膨胀土在一定的地质环境和条件下, 由土粒孔隙和胶结结构等所组成的整体结构。过去建立的微观结构概念, 主要是以光学显微镜研究为标准的。随着 α 射线衍射扫描电子显微镜等测试技术的发展, 以及数字化图像处理技术的应用, 使得土的微观结构的观念将有新的内涵。

廖世文^[1]、李生林^[2]、施斌^[3]、高国瑞^[4]等对膨胀土微观结构研究发现, 膨胀土的物理化学性质与水理性质主要受组成膨胀土的物理组成控制, 而膨

胀土的胀缩性、强度特性以及变形性质, 则在很大程度上取决于膨胀土的结构特征。现有的研究结果表明: ①组成膨胀土微结构主要是细小的蒙脱石、伊利石和高岭石粘土矿物颗粒; ②膨胀土粘土颗粒的形状, 大多为片状或扁平状, 并形成以微集集体; ③膨胀土中颗粒相互之间排列的形式, 有的呈微集集体中片状颗粒成平行排列, 微集集体与微集集体彼此呈平行排列, 具有高度的定向性, 呈平行层状排列结构; ④微集集体与微集集体之间, 呈现出有面-面接触、面-边接触和面-边-角接触多种形式的组合、形成各种结构类型; ⑤普遍发育有微孔隙和微裂隙的多孔隙裂隙粘性土, 孔隙裂隙的大小、形状各异, 膨胀土的微裂隙是构成膨胀土特有的微结构特征的重要组成部分, 不仅决定了膨胀土裂隙介质不连续的特点, 而且直接影响着膨胀土的重要工程特性。

膨胀土的微结构实际上是其粘土颗粒组合排列而形成的结构特征。膨胀土的粘土颗粒组合排列方式或构成凝聚状结构, 或构成叠聚状结构, 或呈花瓣状等, 这都与膨胀土的含水量大小、组成的矿物成分及所处的地理环境有关, 其中影响最大的是膨胀土的含水量, 含水量变化不仅会引起膨胀土体中的矿物发生物理-化学作用, 使矿物元素之间的结合力发生变化, 从而引起土体结构的变化, 同时由于含水量的变化导致土体的结构产生变化。

1.2 膨胀土的裂隙性

膨胀土的多裂隙性是其又一重要特性。膨胀土中普遍发育的各种形态裂隙, 按其成因可分为两类, 即原生裂隙和次生裂隙, 而次生裂隙可分为: 风化裂

隙、减荷裂隙、斜坡裂隙和滑坡裂隙等。原生裂隙具有隐蔽特征,多为闭合状的显微裂隙,需要借助光学显微镜或电子显微镜观察。次生裂隙则具有张开状特征,多为宏观裂隙,肉眼即可辨认。次生裂隙一般又多由原生裂隙发育发展而成,所以次生裂隙常具有继承性质。

笔者认为产生裂隙的原因主要是由于膨胀土的胀缩特性,即吸水膨胀失水干缩,往复周期变化,导致膨胀土土体结构松散,形成许多不规则的裂隙。裂隙的发育又为膨胀土表层的进一步风化创造条件,同时裂隙又成为雨水进入土体的通道,含水量的波动变化反复胀缩,从而又导致裂隙的扩展。另外,卸荷(或开挖)土体中的应力状态发生变化也产生裂隙,或促进裂隙的张开和发展。

1.3 膨胀土的超固结性

超固结性是膨胀土的重要特性之一。膨胀土在沉积过程中,在重力的作用下逐渐堆积,土体将随着堆积物的加厚产生固结压密。由于自然环境的变化和地质作用的复杂性,土在自然界的沉积作用并不一定都处于持续的堆积加载过程,而是常常因地质作用而发生卸载作用,于是土体由于先期固结所形成的部分结构强度,阻止了卸载可能产生的膨胀而处于超固结状态。引起膨胀土的超固结性原因有风化、冲刷、剥蚀地质作用,冰川消融,地下水位长期下降,物理化学作用,土覆压力卸除等,形成了土层的超固结。

关于膨胀土的结构特性,应从微观结构着手,深入分析微结构特性与宏观力学特性的内在联系,找到其客观规律,这样才能有利于问题的深入研究,达到防治工程灾变的目的。

2 膨胀土的渗透性

膨胀土由于其特有的土体结构,其渗透性在很大程度上取决于孔隙中的连通性。这与土体中的气相形态直接相关,同时与土体孔隙中水蒸气、空气与热运动也是相当密切的^[5-7]。对常温条件可以忽略热效应和孔隙的蒸气的冷聚和运动效应。因此简单的用通水或通气的方法测量土的渗透性将改变土的结构和饱和度,从而使渗透性有所变化,而应当分别控制孔隙水压力 u_w 和孔隙气压力 u_a ,建立水和气的单独循环,保持土的结构和饱和度不变,才能较正确的测定 k_a 和 k_w 值。Barden^[8]认为要系统研究 k_a 和 k_w ,必须控制 u_a 和 u_w ,以控制土中的有效应力: $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$,并认为 $\sigma - u_a$ 主要控制土的结构,而 $u_a - u_w$ 主要控制土的饱和度。对孔隙中的气体、液体渗流运动,可用达西定律近似描述每一种流体的运动。

$$v_a = k_a i_a \quad (1)$$

$$v_w = k_w i_w \quad (2)$$

式中: k_a 为孔隙气体渗透系数; i_a 为气压梯度; k_w 为孔隙水渗透系数; i_w 为水头梯度。 k_a 和 k_w 还是土的孔隙率 n 、结构性因素和饱和度的函数。

对膨胀土的渗透性,必须从气相、液相的流动性相互影响,加之有效的测量装置等几方面深入研究,达到较精确地测量其渗透系数。

3 膨胀土的变形特性

膨胀土的变形特征与一般粘土的变形有其本质区别,由于膨胀土是由一些强亲水矿物(如蒙脱石、伊利石等)组成,它表现为吸水膨胀软化,失水干缩,即产生强烈的胀缩变形,这是膨胀土最本质的特性之一。对于膨胀土的变形可分为两大类:①外加荷载作用下的压缩变形;②外加荷载和入渗或浸水共同作用下的湿胀、湿化变形,或外加荷载与蒸发、风干和水位下降而发生的干缩变形。

天然状态下膨胀土是由于无数微观团粒或片状集结而形成的,团粒体或片状之间存在一定的宏观孔隙。微观团粒或片状体则是由很多活性矿物颗粒集结而成的,并具有超紧密结构,颗粒间的孔隙尺寸小。外力通常只引起宏观孔隙变形,而对微观孔隙影响不大。一般情况下,微观团粒或片状体是饱和的,因此有效应力原理在这里适用。根据 Gouy-Chapman 双层理论,膨胀土微观结构的体应变(微观体变) ϵ_{em} 是有效应力 $(s + p)$ 的函数,即

$$\epsilon_{em} = f(s + p, z) \quad (3)$$

式中: s 是总吸力; p 为平均应力; z 为其它因素。膨胀土微观变形一般是可逆的,表现为湿胀则,干则缩,而且与宏观开放结构的变形(宏观变形)基本无关。但是微观变形会反过来影响宏观变形,会改变宏观孔隙尺寸。可见两者之间只存在单向作用,且不可逆,这一点可以从膨胀土变形经过一个干湿循环后会产生累加的事实中得到佐证。当宏观结构比较开放时,试验结果表明膨胀土在高压作用下也会产生湿缩变形。膨胀土变形还强烈地依赖于压力和吸力路径。因此,非饱和膨胀土的本构模型应该考虑发展能同时反应湿胀、湿陷和干缩的本构模型。

膨胀土的变形特性研究是膨胀土的重要研究内容之一,也是相关工程防治的关键。笔者认为必须依据大量的室内试验和工程特例,总结并建立反应湿胀、湿陷、干缩特性的非饱和膨胀土的新型本构模型,来较准确地描述膨胀土的变形特性。

4 膨胀土的强度特性

实践证明,膨胀土的强度特性较之普通的粘性

土要复杂得多,通常膨胀土的峰值抗剪强度是相当的,但从失稳的膨胀土坡反算出的抗剪强度却往往远低于其峰值。这一现象,早就引起了土力学专家们的注意,不少学者在各自研究的基础上提出了不同的理论和选取强度的方法。

4.1 渐进性破坏理论

Bjerrun^[9]认为超固结膨胀土边坡的破坏是渐进的,强度不一,其抗剪强度并非在滑动面上同时发挥。Skempton^[10]认为渐进性破坏,强度并不一定降低到残余强度,并且初次滑动的强度明显低于峰值强度。廖济川^[11]利用现场滑动面推求现场平均强度,其值介于峰值强度与残余强度之间。

4.2 滞后破坏理论

膨胀土边坡破坏往往是在开挖后几个月或若干年后才发生。Bishop, Bjerrun^[12]的研究结果认为由于裂隙性引起的应力集中和吸力下降等原因造成土层软化,因此使凝聚力 c' 随时间减小,引起滞后破坏。Skempton 认为滞后破坏的根本原因除了存在裂隙的关系,使 c' 随时间降低外,更主要的是由于孔隙水压力达到平衡的速度非常缓慢所致。

4.3 胀缩效应理论

自然状态下的膨胀土强度较高,但是一旦浸水后体积增大,土体结构遭到破坏,强度降低,其降低强度与初始含水量有关。廖世文^[1]等认为膨胀土边坡的变形演化实际上是土体在内营力作用下,经往复胀缩(干湿循环),其抗剪强度逐渐衰减的过程。孔官瑞^[13]、廖济川^[14]的研究也证实了这一点。孔官瑞认为胀缩变形和干湿循环次数只影响有效凝聚力,而对内摩擦角影响不大。

4.4 气候作用层理论

潘君牧^①认为边坡土体在气候作用下,作用层的强度会随时间衰减引起边界的破坏。

4.5 分期分带理论

廖济川^[14]认为膨胀土的抗剪强度应考虑以下三个方面:①强度分带的界限;②强度使用期限;③膨胀土的工程特性。

4.6 非饱和土强度理论

工程中所遇到的膨胀土绝大多数处于非饱和状态,因而采用非饱和土强度理论研究膨胀土问题,对非饱和土强度理论的研究,主要有以下几种典型的强度理论。

4.6.1 Bishop 理论^[15]

Bishop 将有效应力公式 $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$ 代入 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi' \quad (4)$$

式中: χ 是与饱和度有关的参数。Jennings, Burland^[16]通过压缩试验指出:对粘土当饱和度高于 85% 时,式(4)适用。包承钢^[7]对式(4)持怀疑态度,其原因是 χ 难以确定。

4.6.2 Fredlund 双变量理论^[17]

Fredlund 等人利用双变量即 $(\sigma - u_w)$ 和 $(u_a - u_w)$, 强度表达式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (5)$$

式中: c' , φ' 为饱和土抗剪强度有效应力指标; φ^b 为 $\tau - (u_a - u_w)$ 平面内强度包线的坡角,即为吸力内摩擦角,但参数 φ^b 的测量比较困难。

4.6.3 卢肇钧的吸附强度理论

卢肇钧^[18]将膨胀力引起的强度称为吸附强度 τ_s , 且两者的关系为

$$\tau_s = m P_s \tan \varphi' \quad (6)$$

式中: m 为膨胀力的有效系数; P_s 为膨胀压力,是非饱和土试样在侧向受约束的条件下浸水时,为维持其体积不变所需要施加的竖向压力。然而其适用性还有待进行验证。

4.6.4 吸力强度的双曲模型

笔者在控制吸力的非饱和三轴试验的基础上提出的吸力强度的双曲模型^[19]:

$$\tau_s = \frac{u_s}{a + \frac{a-1}{P_a} u_s} \quad (7)$$

式中: u_s 为吸力; a 为试验参数; P_a 为大气压力。公式(7)曾对国内外多组非饱和土试验数据进行预测分析,预测结果与实测结果基本一致,而且参数确定简便,具有较好的实用价值。

关于膨胀土的强度特性,关键在于研究膨胀土中的吸力变化规律,再依据笔者的吸力强度的双曲模型建立其强度特性。在此方面笔者曾尝试利用人工神经网络技术来研究膨胀吸力参数并取得了成效,认为人工神经网络不失为一种良策,可进行深入研究。

5 膨胀土的边坡稳定性

5.1 膨胀土边坡失稳的原因

膨胀土边坡的破坏有两大类:一是边坡滑动;另一是边坡的衬砌因膨胀土的膨胀上抬而被顶破。膨胀土的稳定问题主要与膨胀土在不同条件下、强度发生剧烈变化有关,其主要原因是抗剪强度随时间

①潘君牧,由重钢体求算膨胀土抗剪强度,铁道部第四勘测设计院,1980。

而衰减.引起这种衰减的原因,主要是膨胀土内在的因素在某些外部条件的诱发下发生作用的.这里所指的内在因素主要是膨胀土的胀缩特性.反复地胀与缩,导致了膨胀土体的松散,并在其中形成许多不规则的裂隙,从而为膨胀土表层的进一步风化创造了条件.所以说膨胀土体的裂隙性是由于膨胀土胀缩性造成的,而膨胀土强度衰减则主要由于裂隙性的作用.

5.2 边坡破坏的特点

膨胀土的滑动都具有共同的特点,即浅层型、平缓型和渐进型.

膨胀土滑坡发生和发展的过程大致有四个阶段:①风化和裂隙进一步发育阶段;②局部破坏阶段;③大变形和滑动发展阶段;④连续滑动与牵引式滑坡阶段.

5.3 稳定分析方法

膨胀土坡稳定分析方法大致有三类,即静力平衡分析法、统计比较判别法或者工程地质对比法和有限元分析法.

此外,陈守义等^①建议考虑水分入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法,该分析方法的有效性取决于采用的土性参数和初值条件是否符合实际.

5.4 工程措施

膨胀土素有“逢堑必滑、无堤不塌”之说,故研究其工程措施或对策至关重要.膨胀土边坡问题中的工程措施,多是结合实际工程的特点和室内常规试验等资料进行.

a. 土质改造与置换.膨胀土的改造可采用石灰浆灌注、粉煤灰矿渣灌注水泥浆、掺合料等以改变膨胀土的化学成分和力学性能,改善膨胀土的胀缩性能.对膨胀土层厚度较薄,可采用换填非膨胀土材,采取换填一般粘性土或砂垫层.

b. 表面防护.一般渠坡、路堤易受冲蚀,都需表面防护措施.其防护措施有植草皮、干砌块石浆砌块石及混凝土预制块等护砌.另外是进行排水防渗,设置纵向排水沟,以排除地表水,设置竖向排水井,排除地面渗水,保持膨胀土体内水量稳定,避免土体膨胀.

c. 变形防护.在渠坡、路堤的一些关键部位设置适当的加固结构物,以阻止土体沿坡面的膨胀位移及蠕变位移,从而减小由于应变软化引起的强度降低.可采用坡脚挡土墙、锚杆挡土墙和抗滑桩等结构物.

有关边坡稳定性,笔者认为水分入渗模型的研究是非常有益的,再备之相应的工程措施,对边坡失

稳的防治应该是有效的.

6 结 语

膨胀土的工程特性的影响因素很多,从现有的研究成果来看,非饱和土力学理论是最有潜力的途径.由于非饱和土本身固有的复杂性,目前非饱和土力学理论的研究还处在探索阶段,距离工程实用还有一段距离,因此要深入认识膨胀土的工程特性,正确处理膨胀土的工程问题就需要作进一步地努力.应加强以下研究工作:

a. 进一步加强膨胀土微结构特点与膨胀土力学特性联系方面的研究,有利于进一步认识膨胀土胀缩变形和破坏的机理.

b. 加强膨胀土弹塑性本构模型的研究.目前已有的弹塑性本构模型,大多只适用于非膨胀土或弱膨胀土的情况,应研究考虑虚胀、干缩的高膨胀土弹塑性,用于膨胀土变形特性的预测研究.

c. 加强非饱和土强度理论的研究,应考虑荷载、应力路径、吸力、饱和度和(含水量)等因素对非饱和土强度的影响.

d. 加强测试技术与设备方面的研究,使之测试更简便,并便于现场测试.

e. 加强膨胀土工程措施的应用研究,解决工程中的实际问题.

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.
- [2] 李生林,施斌.中国膨胀土工程地质研究[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.
- [3] 施斌.粘性土微观结构的定量技术与微观力学模型[D].南京:南京大学,1995.
- [4] 高国瑞.膨胀土微结构特征的研究[J].工程勘察,1991(3):12~18.
- [5] 俞樟基,陈愈炯.非饱和土的水、气形态及其力学性质的关系[J].水利学报,1965(1):1~8.
- [6] Yoshimi Y, Osterberg J O. Compression partially saturated cohesive soils[J]. Proc ASCE, 1974, 89(4): 278~290.
- [7] 包承纲.非饱和压实土的气相形态及孔隙压力消除问题[A].第三届全国土力学和基础工程会议论文集[C].北京:建筑工业出版社,1979.
- [8] Barden L, Pavlakis G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soils[J]. Journal of Soil Science, 1971, 22(3): 312~323.

(下转第48页)

①陈守义,陈善雄.模拟瞬态非饱和和渗流的积分有限差分法.南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集.武汉:长江科学院,1998.263~269.

国第一,可开发利用的水能资源为全国第二。由于受地形和水文因素的影响,修建中小型电站是必然趋势。西藏河流的水流侵蚀作用较强,如雅鲁藏布江干流上的羊村以上的曲水—泽当宽谷中每年至少有18.3万t以上的泥沙淤积下来,这还不包括推移质和较小支流的悬移质泥沙汇入在内。而西藏水利事业的建设,就必然首先解决淤沙、冲沙问题。设置冲沙漏斗、排沙管道是解决西藏水利工程中淤沙的一项有效的工程措施,其意义主要表现在:①该排沙设施一般只要在已建工程上稍加修改即可,工程量少,投资省,有利于推广应用;②该排沙设施发挥了节水排沙的工程经济效益;③冲沙漏斗的实施延

长了工程的使用寿命,扩大再增值;④不但对引水发电工程适用,而且对于工农业引水、灌溉工程的排沙也有借鉴作用。

参考文献:

- [1] 吴持恭.水力学[M].第二版.北京:高等教育出版社,1989.
- [2] 周著,等.强螺旋流排沙漏斗的模型试验和原型观测[J].水利水电技术,1991,21(7):44~48.
- [3] 谭冬初,周著,侯杰,等.乌斯图河渠首的排沙漏斗设计[J].水利水电科技进展,1998,18(6):50~53.

(收稿日期:1999-11-09 编辑:傅水斌)

(上接第42页)

b. NMR找水方法的工作结果,可以给出探查范围和深度内是否赋存地下水的肯定结论;若有地下水存在,则可给出地下含水层的深度、厚度及含水量的大小(体积百分比),得出各含水层的孔隙度大小的概念。NMR方法所提供的丰富信息是其它物探找水方法难以比拟的。

c. 作为一种直接找水的方法,NMR方法可以用来进行区域水文地质调查,确定找水远景区,圈定各种类型地下水在三维空间的分布,选定水井位置。这种方法投资小、见效快,可以减少钻探工作量,同时也可以降低勘探风险。

d. 实践证明,引进的 NUMIS 系统采用直径为100m的圆回线激发时,其勘探深度可达120~130m。

e. 由于仪器灵敏度高(可测量出几个nV的信号,1nV=10⁻⁹V),测量的NMR信号容易受到电磁干扰的影响,抗干扰能力弱是本方法的缺点,在城市内及火成岩分布区应用往往难以取得好的地质效果。

参考文献:

- [1] 陈文升.磁共振地球物理仪器原理[M].北京:地质出版社,1992.
- [2] 潘玉玲,张昌达,刘天佑.一种新的找水方法——磁共振找水[J].物探化探译丛,1995,18(5):592~595.
- [3] 董浩斌,袁照令,李振宇等.磁共振找水方法在河南某地的试验结果[J].物探与化探,1998,22(5):343~347.
- [4] 万乐,袁照令,潘玉玲.地面磁共振感应系统(NUMIS)及其在找水中的应用[A].地球物理协会勘探专业委员会.全国第三届水文物探学术研讨会论文集[C].北京:地质出版社,1998.49~51.

(收稿日期:1999-09-01 编辑:张志琴)

(上接第40页)

- [9] Bjernum L. Progressive failure in slopes of over consolidated plastic clay soil[J]. J. Mechanics and Found Div, ASCE, 1967, 93(5):3~50.
- [10] Skempton A W. Fourth rankine lecture long term stability of clay slopes[J]. Geotechnique, 1964, 14(2):231~242.
- [11] 廖济川.裂隙粘土现场抗剪强度的确定[J].岩土工程学报,1986,8(3):44~54.
- [12] Bishop A W, Bjernum L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems[J]. Research Conf on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 1960, 75(3):437~501.
- [13] 孔官瑞.膨胀土边坡稳定性试验及数值分析[D].武汉:武汉水利电力大学,1993.
- [14] 廖济川.膨胀土抗剪强度的研究概况[A].全国首届膨胀土科学研讨会论文集[C].成都:西南交通大学出版社,1990.273~280.
- [15] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1963, 13(3):177~196.
- [16] Jennings J E B, Burland J B. Limitation to the use of effective stresses in partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1962, 12(2):125~144.
- [17] Fredlund D G, Rahadjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [18] 卢肇钧,吴肖苒,孙玉珍,等.膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J].岩土工程学报,1997,19(5):20~27.
- [19] 廖林昌,殷宗泽.非饱和土的剪切强度[J].岩土力学,1999,21(3):1~6.

(收稿日期:1999-08-21 编辑:张志琴)

