

3

10-14

膨胀土性质研究综述

孙长龙 殷宗泽

王福升[✓] 刘汉忠

(河海大学地质及岩土工程系 南京 210098) (盐环定工程指挥部 宁夏 761406)

TU443

摘要 本文回顾了膨胀土性质的研究情况,重点介绍了膨胀土性质研究在微观结构、渗透性、强度、变形等方面的研究方法、研究成果,分析了研究中存在的问题。文章认为,当前膨胀土研究的主要课题是膨胀土的微观结构研究,非饱和土理论中关于荷载-含水量-吸力之间的关系研究,通过现场试验发展新的应用性的数值分析理论和方法,膨胀土工程处理技术研究。

关键词 膨胀土 非饱和土 微观结构 渗透性 强度 变形

膨胀土主要是由强亲水性粘土矿物蒙脱石和伊利石组成的,是具有膨胀结构、多裂隙性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性粘土。

膨胀土在天然状态下常处于较坚硬状态,对气候和水文因素有较强的敏感性,这种敏感性对工程建筑物会产生严重的危害。膨胀土胀缩引起建筑物的破坏常常具有多次反复性和长期潜在的危险性,给人类造成灾害。美国工程界称膨胀土为“隐藏的危害”^[1]。

膨胀土问题直到30年代后期才被土力学工程师们所认识,工程界逐渐领悟到结构物的破坏,除了沉降原因外,有时还有膨胀土胀缩原因。随着经济建设的迅速发展,膨胀性粘土研究越来越引起人们的注意,如今已有40多个国家和地区报导了有关膨胀土问题造成的危害,其分布极广,尤其是中国、美国、印度、南非、以色列、澳大利亚和加拿大。

1 简要回顾

在美国,首次膨胀性粘土全国性学术会议于1959年在科罗拉多州召开。国际膨胀土

科研与工程会议每四年召开一次,现在已召开了七次(1992年)。各国工程人员都对膨胀土问题高度重视,自1959年至1977年,英国、美国、罗马尼亚、前苏联和日本都相继在正式颁布的土工规范与铁路规范等文件中,增列了有关膨胀土的条文内容。

50年代初,我国在修建成渝铁路工程中,首次遇到成都粘土膨胀危害问题。70年代中期,我国开展了大规模的膨胀土普查工作,建立了科学研究试验基地,开展了卓有成效的研究^[2],取得了一定的科研成果和工程经验。80年代,我国制定了膨胀土地区建筑技术规范^[3]。1994年在武汉召开的“中加非饱和土学术研讨会”,标志着我国非饱和土理论研究已达到了一个新的高度。

2 研究现状

膨胀土性质研究主要是从微观结构、渗透性、强度和变形四个方面来进行的。

2.1 微观结构

土质学的研究自60年代以来,已跨入第三个发展阶段,其研究特点是将土的微观结构研究放在重要位置。土粒的大小、形状、联

结及其相互排列的形式以及孔隙的大小、形状等都是膨胀土胀缩性能的重要决定因素。通过运用光片、薄片及扫描电镜等研究发现,泥岩残积膨胀土在结构上的特点是层面裂隙较为发育,它们是促使土体吸水、失水的良好通道,是使其具有强烈胀缩性能的重要因素^[4]。近期,扫描电镜观察发现:非饱和土体中的孔隙可分为团粒间的孔隙和粒间空隙。膨胀发生在粒土团粒内和胶结物中,也可发生在粘土基质中。孔隙大小分布规律一般与观察到的结果一致,某些残积土和低于最优含水量的击实土呈现双峰孔隙分布规律,这两种状态分别与团粒间的孔隙和粒间空隙对应,这一规律为研究非饱和土的宏观性状提供了依据。文献[5]运用综合鉴定方法,即运用X线折射法、差热分析法、染料吸附法、化学分析法、电子显微镜法,分析膨胀土的微观结构组成,收到了较好效果。

2.2 渗透性

膨胀土具有特殊的组织结构,土体中存在着孔隙流体。孔隙流体的渗透特性研究分孔隙流体运动规律的描述和渗透系数的测定。

孔隙水运动规律的描述常用达西定律^[6,7],因此有:

$$v = -k_w k_{wr} \nabla \left(z + \frac{u_w}{\rho_w g} \right) \quad (1)$$

式中 v 为流速向量; z 为位置高度; u_w 孔隙水压力; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; k_w 为饱和土的渗透系数,主要与土体的孔隙比 e 有关; k_{wr} 为孔隙水的相对渗透系数,主要与土体的孔隙比 e 、土的结构性和饱和度 S 或吸力 $(u_a - u_w)$ 有关。

孔隙水渗透系数的测定,在饱和土渗透系数和常体积非饱和土渗透系数的基础上, Lloret 和 Alonso^[8], Huang^[9]等通过理论分析和试验,系统地研究了体积可变和饱和度影响的渗透系数的关系,比较有代表性的是

建立在 Brooks 和 Corey 经验公式之上的关系式:

$$k_{wr}(S) = 1 \quad (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b$$

$$k_{wr} = \left[\frac{(u_a - u_w)_b \cdot 10^{\alpha(e - e_0)}}{(u_a - u_w)} \right]^{\eta_0 + \alpha(e - e_0)}$$

$$(u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b \quad (2)$$

式中 α 为试验参数 $\Delta \log (u_a - u_w)_b / \Delta e$; η_0 为孔隙比等于 e_0 时的孔隙尺寸系数; $(u_a - u_w)_b$ 为孔隙比等于 e_0 时的进气压力。

孔隙气渗透性通常也用达西定律来描述:

$$v = \frac{k_a k_{ar}}{\rho_a g} \nabla u_a \quad (3)$$

式中 v 为孔隙气体流速; k_a 为干土孔隙气体体积,与土体孔隙比 e 有关。孔隙气体渗透系数同样与土体的结构性、孔隙比 e 和饱和度 S 有关,其测试较易实现^[10]。文献[9]表明,饱和度 S 增大,孔隙水渗透系数 k_w 增大,孔隙气渗透系数 k_a 减小,且在含水量小于最优含水量时, k_a 的减小很缓慢。而在接近最优含水量时,含水量的微小增加将引起 k_a 的迅速减小。当含水量等于或超过最优含水量时, k_a 基本为零,只有渗水。

2.3 强度

膨胀土抗剪强度的研究分饱和土抗剪强度理论和非饱和土抗剪强度理论。

2.3.1 饱和土抗剪强度理论

膨胀土的峰值强度是相当高的,但是从失稳的膨胀土土坡反算出的抗剪强度却往往低于其峰值,这一现象早就引起土力学专家的注意^[11]。人们经过几十年的研究后普遍认为,膨胀土强度衰减主要原因有三:膨胀性、裂隙性、超固结性。

a. 胀缩性。天然状态下膨胀土的强度较高,但是经浸水后体积增大,强度降低,其降低的程度与初始含水量有关。Gibbs、廖济川、孔官瑞认为干湿循环强度降低,其中 Gibbs 和孔官瑞认为胀缩变形和干湿循环次

数只影响有效凝聚力 c' ，而对内摩擦角 φ 影响不大。

b. 裂隙性。Lo^[12]报道了随机试样面积的增大而使不排水强度下降的关系为

$$c_u = c_m + (c_0 - c_m)e^{-\alpha(\epsilon - \epsilon_0)^{\beta}} \quad (\alpha > \alpha_0) \quad (4)$$

式中 α 及 c_m 分别为试样破坏面积及不排水强度。李妥德用不同裂缝频度求出无侧限抗剪强度与试样直径的关系，裂隙对强度的影响主要表现在应力-应变关系曲线形式及强度随试样尺寸的变化而不同，由于裂隙分布无规律性，因而裂隙对强度的影响显得更为复杂。

c. 超固结性。Bjerrum^[13]认为，超固结膨胀土边坡的破坏是逐渐的，其抗剪强度并非在整个滑动面上同时发挥。Skempton^[14]认为，膨胀土边坡滑动时，整个滑动面上的抗剪强度差不多降低到完全软化强度，破坏的特点是渐进性的，特别是膨胀土地区的开挖问题。在超固结土的研究中，残余强度被广泛重视，Skempton^[15]认为，在逐渐性破坏中，强度不一定要降到残余强度，且初次滑动的强度略低于峰值强度。Skempton^[16]、廖济川^[17]利用现场滑动面推现场平均强度、现场试验强度和反算现场得到的平均强度多介于峰值强度与残余强度之间。

2.3.2 非饱和土抗剪强度理论

Fredlund^[18]认为，在过去几十年里，许多学者试图应用饱和土力学的基本理论和原理去解决非饱和土的工程问题。但事实证明，没有一种是非常成功的。膨胀土为典型的非饱和土，因此，人们改用非饱和土理论来研究膨胀土的工程特性。

非饱和土强度理论的研究仍采用 Mohr-Coulomb 准则。

2.3.2.1 Bishop 理论

Bishop^[19]在他的非饱和土有效应力理论的基础上，针对强度问题提出：

$$\tau_f = c' + [\sigma - \mu_a + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi \quad (5)$$

式中 χ 为经验参数，物理意义是单位面积上水压力作用的面积，其数值决定于土的类别、饱和度、干湿循环以及加载和吸力的路径，对饱和土 $\chi=1$ ，对干土 $\chi=0$ ，一般土为 $0 < \chi < 1$ ，其理论已被许多学者所接受，但是 χ 参数值不易确定。

2.3.2.2 Fredlund 理论

Fredlund^[20]把非饱和土视为四相（固相、液相、气相和收缩膜）。当土粒视为不可压缩时， u_a 可以不考虑，从而只用 $(\sigma_{ij} - u_a\delta_{ij})$ 和 $(u_a - u_w)\delta_{ij}$ 来描述非饱和土的应力状态，并把它们称为应力状态变量，其抗剪强度的表达式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi + (u_a - \mu_w)\tan\phi^b \quad (6)$$

式中 c' 、 ϕ 为饱和土抗剪强度的有效应力指标， ϕ^b 为 $\tau_f \sim (u_a - u_w)$ 平面内强度包线的坡角，即吸力内摩擦角。Ho 和 Fredlund 等证实所有数据基本上落在一个以 τ ， $(\sigma - u_a)$ ， $(u_a - u_w)$ 为坐标轴的三维空间中的平面上，相关性较好。这已得到国际公认。但是，现场吸力 $(u_a - u_w)$ 测试较为困难，同时，它假设孔隙气 u_a 为零，这种简化对有热源的核反应堆一类工程处理不大妥当。

2.3.2.3 卢肇钧理论^①

继 Bishop 和 Fredlund 理论之后，卢肇钧等系统地研究了非饱和土的抗剪强度，对粘聚力、摩阻力和吸附强度三个组成部分进行了分析、研究，对膨胀压力与吸附强度相互关系进行了探讨，提出了用膨胀压力来估算非饱和土吸附强度的关系式

$$\tau_s = P_s \tan\varphi \quad (7)$$

式中 τ_s 为吸附强度，即吸力所产生的附加

① 卢肇钧等，非饱和土的抗剪强度与膨胀压力，非饱和土理论与实践学术研讨会论文集，1992，90～101。

强度; P 为膨胀压力; φ 为内摩擦角。

对于式(7),目前尚没有充分的研究资料与结论,但是已有一些迹象表明,这种推测可能是接近实际的。膨胀压力的测定方法比较简单易行,它应是一种值得进一步研究的简易方法。

2.4 变形

膨胀土的变形研究可分为饱和土理论和非饱和理论。

2.4.1 膨胀变形的饱和土理论

陈孚华、索洛昌做过大量室内外试验,表明在复杂应力状态下,膨胀土地基的膨胀变形出现在垂直方向,而水平变形实际上不大。Westen 做了大量研究,并给出测量膨胀率和膨胀力的经验公式。但是 Zein 通过印度黑棉土对它们进行了比较,除 Westen 的膨胀率能接受外,其它都不能接受^[21]。这也说明了利用饱和土理论研究膨胀土问题较为困难。

我国学者在这方面也做了大量工作,轻工业部二院、中科院西北所、黄熙龄、孔官瑞分别由常规试验,或研制专门的仪器,或进行现场观测,开展二向、三向胀缩特性的研究,试图分析解释建筑物地基的膨胀性和变形规律,取得了一定的成果。

2.4.2 膨胀土固结变形的非饱和土理论

在固结变形方面,我国学者已取得了可喜的成果。陈正汉^[22]认为, Fredlund 等人描述的应力状态方法是不充分的,于是,他导出了单应力变量普遍公式,并基此把非饱和土看作固体颗粒、孔隙水和孔隙气三种物质所组成的混合物,用演绎法推导了控制方程,建立了非饱和土固结的混合物理论。陈正汉的公式没有考虑土的非线性、土的剪胀性及孔隙中水的存在对土压缩的影响。杨代泉把饱和土的比奥固结理论外推到非饱和土中,建立了非饱和土的广义固结理论^[23]。该理论同时考虑水、汽、气运动,热运动与土骨架变形的耦合作用,然而,其外推方法易犯以

偏概全的错误。陈、杨两种理论的根本区别在于骨架的应力-应变本构方程不同,因此,它们的适用性也不相同。

3 展望

膨胀土的影响因素很多,从目前已有的研究成果来看,非饱和土理论的研究是一条很有潜力的途径。但是现有的一些非饱和土理论,多依据经验或半经验,特别是很难得到工程实例的验证。要全面地认识和把握膨胀土性质的一般规律,正确地处理膨胀土工程问题,尚需进一步努力。笔者认为,应加强以下几个方面的研究。

a. 进一步加强膨胀土微结构方面的研究,认识其胀、缩变形和破坏机理,指导其它方面的研究。

b. 加强非饱和土理论、特别是荷载、含水量、吸力之间关系的研究,从而真正揭示膨胀土的强度和变形特性。

c. 加强现场测试,通过现场试验发展新应用性的数值分析计算理论和方法。

d. 加强膨胀土工程处理方面的研究,解决工程实际问题。

参考文献

- 1 廖世文. 膨胀土与铁路工程. 北京: 中国铁道出版社, 1984
- 2 Huang X L. The identification and classification of expansive soil in China. In: Katti R K ed. Proc of 6th ICES. New Delhi: Rajkamal Electric Press, 1988: 1~5
- 3 城乡建设环境保护部. 膨胀土地区建筑技术规范 (GBJ 112-87). 北京: 中国计划出版社, 1989
- 4 李生林等. 中国膨胀土工程地质研究. 南京: 江苏科技出版社, 1992
- 5 Boti Nicolae, et al. A new method to estimate the behaviour of an expansive clay. In: Katti R K ed. Proc of 6th ICES. New Delhi: Rajkamal Electric Press, 1988: 591~595

- 6 比尔(美). 多孔介质流体动力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 7 Brooks H H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ, Hydrol Paper, 1964 (3): 27~28
- 8 Lloret A, Alonso E E. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. Geotechnique, 1980, 30 (4): 449~477
- 9 Huang S-Y. Evaluation and laboratory measurement of the Coefficient of permeability in deformable; [dissertation]. Saskatoon: Univ of Saskatchewan, 272
- 10 Langfelder L J, Chen C F, Justice J A. Air permeability of compacted cohesive soils. J of Soil Mechanics and Foundation Div, ASCE, 1968, 94 (11): 981~1002
- 11 孔官瑞. 膨胀土边坡稳定性试验及数值分析; [学位论文]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1993
- 12 Lo K Y. The operational strength of fissured clays. Geot, 1970, 20 (1): 57~74
- 13 Bjerrum L. Progressive failure in slopes of over consolidated plastic clay. Journal Soil Mech and Foundation Div, ASCE, 1967, 93 (5): 3~50
- 14 Skempton A W. First-time slides in over consolidated clays. Geotechnique, 1970, 20 (3): 320~324
- 15 Katti J M. General report on shear strength consolidation and earth pressure. In: Katti R K ed. Proc of 6th ICES. New Delhi; Rajkamae Electric Press, 1988, 2: 647
- 16 Skempton A W. Long term stability of clay slope. Geotechnique, 1964, 14 (2): 77~101
- 17 廖济川. 裂隙粘土现场抗剪强度的确定. 岩土工程学报, 1986, 8 (3): 44~54
- 18 Fredlund D G, 杨宁. 非饱和土的力学性能与工程应用. 岩土工程学报, 1991, 13 (5): 24~35
- 19 Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Geotechnique, 1963, 13 (3): 177~196
- 20 Fredlund D G, et al. The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15 (3): 313~321
- 21 Subba K S. General report on swelling potential, swelling pressure and heave. In: Katti R K ed. Proc of 6th ICES, New Delhi; Rajkamal Electric Press, 1988, 2: 662~666
- 22 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论——数学模型、经验研究、边值问题; [学位论文]. 西安: 陕西机械学院, 1991
- 25 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究; [学位论文]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990

(收稿日期: 1995-01-16)

《河海大学学报》征订启事

《河海大学学报》(双月刊)是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究综述、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于1957年,是我国水利水电系统的核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其它有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许。并于1989年分别获得江苏省和全国高等学校自然科学学报优秀编辑质量一等奖。本刊每逢单月出版,公开发行,邮发代号:28-63,每期定价:4.50元,全年订费27.00元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系,联系地址:210098 南京市西康路1号《河海大学学报》编辑部。