

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.04.001

层状土体变特性及变形计算方法研究进展

李纯, 王煜斌, 王刚

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 由于传统的地基变形计算方法应用于计算大型基础下层状土变形的局限性, 在对国内外非自由场(受载)层状土的变形性能研究现状及其发展趋势进行深入分析的基础上, 总结了非自由场层状土的体变理论在工程应用中尚存在的问题。结果表明, 目前对层状土的静动力体变特性研究还不够深入, 现有方法不能在宏微观两个层面上表征土骨架与孔隙水的相互作用, 无法同时考虑地基中不同类型土的本构关系、物理力学性质及基底有效附加应力的空间传递与叠加过程, 导致计算结果与实际情形相差甚远, 只能靠引入经验系数的做法来解决问题。基于此, 选取适用于描述非自由场层状土体变特性的理论方法, 揭示土-水-力多场耦合作用下复杂地基土的变形演化规律, 构建科学合理的层状土体变预测模型, 是今后需要深入研究的方向。

关键词: 层状土; 多孔介质; 孔隙水压力; 附加应力; 变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0001-09

Progresses in Bulk Variation Behavior and Deformation Computation of Layered Soils

LI Chun, WANG Yubin, WANG Gang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Due to the limitation of traditional methods used for calculating deformation of layered soils under large building foundations, problems in engineering applications are summarized systematically about deformation theory of layered soils on the basis of detailed description of present progresses in domestic and foreign researches on bulk variation behavior and deformation computation of loaded layered soils. The results show that less studies have accomplished the static and dynamic volumetric characteristics of layered soils, existing methods cannot characterize the interaction between soil skeleton and pore water at both macro and micro levels, and the methods are not possible to simultaneously consider the respective constitutive relationship of different types of soils, physical and mechanical properties, and spatial transfer and superposition process of effective additional stress. As a result, a significant discrepancy may generate between the calculated results and the actual situation. Therefore, the problem can only be solved by introducing an empirical coefficient. Based on the above situation, the following aspects should be deeply improved in the future: the theoretical method used to describe the deformation characteristics of loaded layered soils, the deformation evolution law of complex foundation soil under the coupled soil-water-force conditions, and the scientific and reasonable prediction model for layered soils deformation.

Keywords: layered soils; porous medium; pore-water pressure; additional stress; deformation

经典土力学理论和试验方法一般用于解决饱和土问题, 所得出的规律和工程应用方法也主要适用

于饱和土, 如计算边坡、坝体、地基等的变形问题, 先把土体看成是均质的线性变形体, 直接引用弹性力

收稿日期: 2022-10-03

修稿日期: 2023-03-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(90915005; 51878127); 辽宁省自然科学基金计划项目(2013020147)

作者简介: 李纯(1971—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: lichun@mail.neu.edu.cn

学理论计算附加应力,然后利用某些简化和假设来解决土层变形的计算问题。在过去的半个多世纪里,饱和土理论得到了飞速发展,各种本构理论、固结理论等相继被提出,其中部分理论已逐渐发展成熟,并在工程领域中得到了广泛应用,特别是地基变形计算方法的研究与应用等方面。

然而,土可以是饱和的,即孔隙中充满水,也可以是非饱和的,即孔隙中同时充满水和空气^[1]。研究表明,采用有效应力作为描述饱和土性状特征的唯一状态变量时,在解决涉及饱和土的许多岩土工程问题中,已经取得了很大的成功,有效应力概念已被普遍应用于饱和砂土、粉土和黏性土等的研究。实际上,土力学的研究领域应该涵盖各种不同的土类,包括非饱和砂土、膨胀土和湿陷性土等。由于试验条件的限制,非饱和土性状却不为人们所熟悉,其理论研究虽然取得了一定的进展,但远未成熟,这使得非饱和土理论在工程中的应用受到了很大限制^[2-3]。实际上,地球表面广泛分布的天然地表沉积土大多是低含水率的非饱和土。建筑物地基位于地下稳定水位之上的土层、土边坡、土坝、路基填土、机场跑道的压实填土等都处于非饱和状态。即使是同一种土,受环境或人为因素影响,也可能在饱和与非饱和两种状态之间交替出现^[4]。如降水基坑,特别是当渗透系数很大的情况下,土的工程特性变化显著,从而给建筑物、构筑物的安全带来了严重威胁或隐患。近年来,许多学者开始关注和重视对非饱和土的研究,非饱和土力学成为岩土工程领域中一个新的研究方向。目前,非饱和土体积变化理论和模量测量方法均取得了一定的成果^[5-6]。在总应力为常数的情况下,这些成果已被应用于计算非饱和土的体积变化问题,如土的膨胀或收缩等^[7]。研究体积的膨胀主要针对膨胀土,如高塑性黏土等^[8];研究体积的收缩则主要针对湿陷性土,如较松的粉土层等。湿砂土(特别是砾砂和圆砾等)尚未被作为非饱和土的研究对象^[9]。可是,在一些地区,同时对饱和土和非饱和土的力学性状和变形特征的研究已经成为一个不可回避、且亟待解决的问题。

土的饱和与非饱和状态常常交替出现,其物理力学性状也在饱和土与非饱和土之间交替变化^[10]。因此,如何通过有效途径,使饱和土和非饱和土理论合理衔接,用于解决实际问题,这是人们面临的一个新课题。建(构)筑物地基通常是由层状土组成的,土层分布和走向往往呈现交错层理构造,即使是同一类型土层,其物理性质和变形性状也随深度改变

而改变。因此,地基非均质(各向异性)特性很显著。深基坑降水,不仅起到降低基坑内的地下水位、便于基础施工的作用,还影响了基底上覆土层的含水率和饱和程度,使其物理力学参数发生变化,导致该土层产生有效应力增量,有效应力增量与基底附加应力一起作用在拟建建筑物的地基上,造成地基沉降。基坑降水还影响到临近建筑物的稳定,非饱和土层中产生的有效应力增量将使临近建筑物的地基再次产生沉降^[11]。在降水后的基坑中,建筑物荷载通过基础传递给地基,使天然土层原有的应力状态发生变化,在附加的三向应力分量作用下,地基中产生了竖向、侧向和剪切变形,导致各点的竖向和侧向位移^[12-13]。由于建筑物荷载差异和地基不均匀等原因,基础沉降或多或少总是不均匀的,使得上部结构之中相应地产生额外的应力和变形^[14]。当地基不均匀沉降超过一定的限度时,将导致建筑物开裂、歪斜甚至破坏,建筑物附近地面还可能发生塌陷现象。在实际工程中,建(构)物地基一般是由层状土构成的,开展层状土的力学性能研究具有重要理论意义,而非自由场层状土的变形性能研究是其关键问题之一。已有研究表明,层状土的力学性状并非各单一土层力学性状的简单组合。同砂土或碎石土相比较,黏性土等软弱土具有更明显的非线性特性,该类土层的存在使层状土的整体性能变得更加复杂起来。实测结果表明,对于扩展基础、条形基础等小型基础,地基内附加应力的空间叠加效果不明显,但对于大型基础来说,其下层状地基内附加应力的空间叠加过程不能忽略,特别在柱脚存在偏心荷载情况下,基底最大附加应力并不位于柱中心轴线与基底交点处。

基于上述情况,需要一种行之有效的方法,描述大型基础下基底有效附加应力的空间传递过程、计算基底平面上各目标点的沉降量以及找出最大沉降发生点位置等,为工程设计和施工提供可靠的参考数据和理论依据。

1 非饱和土的体变特性

非饱和土的力学理论必须解决两个根本问题,其一,建立场变量之间的关系;其二,建立控制方程。由于控制方程的推导可以从土力学已有的理论和一些相关学科得到借鉴,因而建立场变量之间的关系就成了解决该问题的关键。饱和土的场变量共有五个,即土骨架位移、土骨架应变、孔隙水流速、总应力和孔隙水压力。饱和土力学的成功之处就在于建

立了有效应力与应变的关系;对于非饱和土,除了上述的五个场变量,还要增加三个场变量,即孔隙气流速、孔隙气压力和含水率或饱和度或基质吸力。孔隙水流速和孔隙水压力之间满足 Darcy 定律;孔隙气流速和孔隙气压力之间满足修正的 Fick 定律。这两个控制方程都比较简单,关键是如何建立土的体积变化本构方程,最终达到求解非饱和土变形或稳定问题的目的。目前,对非饱和土的研究非常广泛,研究领域主要集中在强度理论^[15]、渗流理论^[16]、体变理论^[17]以及参变量的试验量测^[18]等方面。为了与本项目的研究内容相一致,这里主要介绍非饱和土的应力状态变量的建立、渗透特性、体变理论以及体变测试技术等研究现状。

1.1 应力状态变量

土的力学性状(即体变和抗剪强度性状)取决于土中的应力状态。土中的应力状态可用若干应力变量的组合来描述,这些应力变量被称之为“应力状态变量”。描述饱和土的应力状态时,只采用了单值有效应力作为其应力状态变量,而且在解决涉及饱和土的许多岩土工程问题中已经取得了很大的成功,有效应力概念已被普遍接受用于研究饱和土。为了能在饱和土力学的基础上分析非饱和土的力学特性,许多学者提出了许多非饱和土“有效应力”公式,均尝试采用单值的有效应力或应力状态变量,且都含有土的参数,但是将土的性质纳入应力状态描述将会导致许多困难,也与连续介质力学的观点相矛盾,试验结果也表明,量测出来的土的性质同所建议的有效应力之间不存在单值的关系。

Bishop^[19]提出了获得广泛应用的非饱和土有效应力表达式,通过定义一个与土的饱和度有关的参数将两个独立的应力状态变量联系起来,其物理意义可理解为单位土面积基质吸力的作用面积。Bishop 和 Donald^[20]曾初步验证过该有效应力表达式的正确性,试验结果也同时证明了使用独立的两个应力状态变量是可行的。

Jennings 和 Burland 通过压缩试验得出,当粗粒土的饱和度高于 20%、粉土高于 40%~50%、黏土高于 85% 时, Bishop 公式才适用,随后, Aitchison 给出了一些修正的有效应力公式^[21]。陈正汉等^[22]在不考虑非饱和土的剪胀性和湿胀(湿陷)特性的条件下,导出了各相异性多孔介质中有多种不混溶流体流动时有效应力的普遍公式,同时导出了有效应力参数表达式。徐永福^[23]根据非饱和土微孔隙分布的分形模型,得到了能够反映非饱和土结构特性的

有效应力公式。

有效应力应用于非饱和土虽然概念明确,但有效应力与土性参数相关联,在试验和理论上都存在困难,因而许多研究者倾向于采用多应力状态变量来描述非饱和土的力学性状。

自 20 世纪 70 年以来, Frelund 和 Morgenstern 在充分认识上述局限性和总结前人工作成果的基础上,提出双应力状态变量理论,并根据非饱和土中各相力的平衡导出了平衡方程,定义了描述非饱和土的三个应力张量(组合之一)来描述非饱和土的应力状态^[24]。

1.2 渗透特性

研究土的渗透特性对于解决土的渗流与变形耦合问题十分重要。水通过土的缓慢运动通常称为渗流或渗透。以往常规渗流分析中主要考虑饱和区内的渗流情况,而没有考虑非饱和区内水的流动,如求解均质各向同性饱和土的二维渗流微分方程时,绘制流网的图解法曾经被大量应用,该方法要事先知道渗流域的边界条件,并定出水头边界或流量边界,考虑非饱和区的低渗透性而一般假设浸润线作为不透水的上部边界,由于此线又是最上部的流线,故等势线必须与之正交。但该方法分析各向异性、非均质土时,将变得十分困难。实际工程中,考虑非饱和土区的渗透性影响十分重要,如天然边坡土在长时间连续降雨时的失稳破坏、膨胀土浸湿时引起的地面隆起,特别是地下水位的上升造成建筑物地基承载力下降,地基的稳定与变形因而受到影响等。总之,将土的饱和区和非饱和区作为一个整体来研究将是十分必要的。

对于稳态流分析,认为土体中任何一点的水头和渗透系数不随时间而变化;对于非稳态流,认为水头(或渗透系数)随时间而变化。但不管是稳态流,还是非稳态流,水头和渗透系数均随空间位置而变化。Neuman^[25]基于平面应变问题对土坝进行了饱和-非饱和渗流数值模拟,首先将有限单元法用于饱和-非饱和渗流中,并提出了用不变网格法分析自由面渗流的 Galerkin 方法; Lam 等^[26]解答了饱和-非饱和土体中的若干经典渗流问题,并于 1988 年用 Galerkin 的加权残余原理建立了二维非稳态渗流问题的有限元公式。

在国内,陈守义(1997)、姚海林(2002)、李兆平(2001)及包承纲(2004)等均对降雨入渗条件下非饱和土边坡的稳定性进行了一定的研究;张家发^[27]建立了考虑降雨入渗补给条件的三维饱和-非饱和

非稳态渗流的数学模型,并利用编写的程序对三峡船闸高边坡饱和-非饱和非稳态的渗流场进行了数值模拟;朱伟等^[28]对大型河堤洪水的渗透试验的饱和-非饱和渗流状况进行了有限元解析;詹良通等^[29]对非饱和膨胀土的强度及变形特性进行了三轴试验研究。

1.3 宏观体变理论

近年来,很多学者在非饱和土领域开展了大量的研究工作,提出了若干类型非饱和土的本构关系,主要体现在三个方面,其一,应力与体积-质量本构关系,建立了:应力状态变量与应变、变形及土体体积-质量特性,如孔隙比、饱和度、含水率之间的关系;气体-水混合体的密度方程;气体-水混合体的压缩方程。其二,应力与应力本构关系,描述了量测不排水加荷条件下,将孔隙压力与法向应力相联系的孔隙压力参数;建立了将剪应力与应力状态变量相联系的强度方程。其三,应力梯度与渗流速率本构关系,描述了气体与孔隙水的渗流定律。体积变化的本构关系只是土力学中使用的若干本构关系中的一种。

Biot(1941)在土体各向同性和线弹性响应假定的基础上提出了三维固结理论。该理论假设土体为非饱和状态,孔隙水中含有封闭气泡。为全面描述非饱和土的变形状态,使用了两个本构关系:其一是针对土体结构,另一个则针对土体内的液相。在公式中用了两个相互独立的应力变量(有效应力和总应力),共采用4个体变系数表征土体应力和变形状态。Fredlund等(1977)对非饱和土提出了一种半经验半理论的本构关系,即从三个独立的应力状态变量中任意选取两个来描述土体积变化时所需的变形状态变量满足多相连续体的连续方程;1979年,Fredlund等^[30]又假定土是各向同性线弹性材料,将饱和土的广义定律引申到非饱和土的本构关系中,用应力变量(如总应力、孔隙气压力和孔隙水压力等)给出非饱和土的弹性本构关系。Alonso(1990)根据土饱和程度的临界状态,在压缩试验和三轴试验的基础上,提出了非饱和土弹塑性 Barcelona 本构模型。Alonso(1995)为了反映某些非饱和土的湿陷变形特性,提出了一种经验屈服轨迹方程。

国内,刘祖德等^[31]对膨胀性土的浸水变形性状进行了三轴试验,根据试验结果总结了膨胀性土的变形特征;张原丁^[32]对湿陷性黄土在不同含水率和压力下进行了试验研究;陈正汉^[33]根据非饱和土相关三轴试验结果,对 SI 屈服面提出了模型修正;孙

建中等^[34]进行了黄土在多种初始含水率的应力应变关系的试验研究;汪东林等^[35]对非饱和重塑黏土的变形性状进行了试验研究。

1.4 体变测试技术

非饱和土的本构关系将相应的变形状态变量和应力状态变量联系起来,引入体积变化系数起了关键作用。而这些系数一般可由不同的室内土工试验获得(Fredlund, 1989; Rahardjo, 1990; Ho, 1992),但是试验方法和技术较饱和土复杂得多,例如如何控制试样的基质吸力就是一个很难解决的问题。Escario^[36]研制出第一台非饱和土固结仪,在1980年又研制出了第一台非饱和土直剪仪,用来测试基质吸力对非饱和土强度的影响程度;Fredlund^[30]和Gan^[37]对Escario非饱和土仪器进行了改正;Ho^[38]针对孔隙比本构面的对数形式,提出了孔隙比本构面的近似表示形式;Delage和Vicol(1992)利用半渗透技术研制出了常规非饱和土固结仪,用来测控土样内的基质吸力;1995年,Romero研制出了温控非饱和土固结仪。俞培基等^[39]使用了将高进气陶土板作为底座的三轴仪;杨代泉和沈珠江(1990)对常规三轴仪进行了改进,保证了量测精度和试样的小型化;刘国楠等(1994)改装了非饱和土常规三轴仪,使之能同时量测试样的孔隙水压力和控制孔隙气压,并与轴移技术所测得的基质吸力进行了对比验证;徐永福^[40]对非饱和土三轴仪的压力室进行了改装,并于1998年用改装可测吸力的三轴仪,研究了宁夏膨胀土上的变形性质和强度特性。这两种仪器都采用内置荷载传感器和数据自动采集,既可控制竖向压力,又可控制基质吸力;詹良通和吴宏伟(2006)利用三套新研制的双压力室非饱和土三轴仪,用来研究吸力变化对非饱和膨胀土变形和抗剪强度特性的影响。

2 饱和土的体变特性

饱和土由孔隙水和土颗粒构成,理论上不含空气成份,饱和度为1,故称饱和土为两相系。饱和土体中任意点的应力(即有效应力)可以从作用于该点的总应力计算得出。实践证明,饱和土只需要单一应力状态变量就可以描述其力学特性,其合理性已为试验所证实并被普遍接受(Bishop, 1950; Skempton, 1961)。研究表明,土的饱和程度无论是从非饱和到饱和状态,还是从饱和到非饱和状态,应力状态均能平顺过渡,饱和土和非饱和土理论并非完全彼此孤立的。实际上,饱和土可被看成是非饱

和土的一个特例。非饱和土的另一个特例是干土,由空气和土颗粒构成,不含水成份,其饱和度为0,故干土也为两相系。

饱和土的强度、变形以及渗流理论的研究起步较早,理论相对完善,一些经典理论在工程实际中还得到了广泛应用,虽然仍存在着不同程度的缺陷,但总体上已经取得了很大成功。Terzaghi (1936)建立了饱和土一维固结微分方程,指出对饱和土这种特殊情况,只剩下第一应力张量,同时采用有效应力概念描述饱和土的应力状态; Terzaghi 和 Peck (1948)给出了土体小应变时一定初始条件与边界条件下的线性解析解; Carter (1979) 针对土体大应变情况做了数值分析; Lambe 和 Whitman (1979) 提出了饱和土在三轴加荷条件下的孔隙水压力公式,并指出在饱和土中渗透系数是孔隙比的函数,但一般情况下,假定饱和土的渗透系数为常数; Hird (1992) 和 Indraratna (1997) 均从 Hansbo (1981) 理论出发,推导出了将砂井地基三维固结有限元问题转换为平面应变问题来处理时的等效变换公式; Takeji Kokusho 等^[41]指出饱和土体中的水流受 Darcy 定律所控制,与非饱和土的主要区别是,饱和土通常假定渗透系数为常量,由非饱和土过渡到饱和土是一个比较平稳的过程; K. H. Xie 和 C. J. Leo (2004) 给出了不同厚度的饱和均质黏土一维大应变固结的理论解答; Mahmoud 和 Hassanen (2007) 采用二维换算边界有限单元法对饱和土进行了动力固结耦合分析,该方法将饱和土视为两相介质,也是对 Biot 固结理论的一种拓展。

在我国,钱令希和钟万勰等 (1993) 运用非线性弹塑性模型对饱和土的固结进行了有限元分析,给出了饱和土壤固结弹塑性分析的基本方程; 沈珠江 (1995) 提出把混合物理论引入土力学中成为一种时尚; 张均锋 (1999) 对冲击载荷下的饱和砂土渗流强化与结构破坏情况进行了实验研究,提出排水沉降不是均匀现象,还出现了纵向排水通道、横断裂纹等现象; 谢康和等 (2004) 基于 Biot 固结理论对饱和土体中半封闭压力隧洞的应力和位移场进行了分析,建立了压力隧洞的半封闭边界条件,通过对控制方程的解耦,得到了孔隙水压力的消散方程; 丁洲祥和龚晓南等 (2005) 提出了欧拉描述的大变形固结理论,弥补了以往大变形固结理论的控制方程,忽视了固结过程中排水引起的质量变化的不足; 谢康和等 (2006) 进行了应力历史影响的饱和土一维非线性固结分析,并考虑地基应力历史的影响,通过半解

析法确定地基固结过程中正常固结与超固结的分界面; 张引科等 (2007) 研究了饱和土的球对称固结与 Mandel-Cryer 效应,通过直接求解饱和土球对称 Biot 固结方程,得到了球对称固结方程在真实空间的解析解; 蔡元强和徐长杰等 (2007) 基于 Gibson 控制方程给出了厚层饱和土循环加载过程中承受不同压力时的一维有限应解答,域变换时,仍然保留了 Laplace 变换; 熊伟和尚守平等 (2008) 对动荷载作用下的饱和砂土动剪模量进行了试验研究,得到了该土样在四种饱和度、三种固结压力下的最大动剪模量以及动剪模量比归一化曲线。

3 土的体变理论应用

3.1 工程应用现状

在工程应用方面,现阶段非饱和土的体变理论主要集中在环境的变化引起膨胀土的膨胀或湿陷性土的收缩对建筑物造成的破坏等方面,也就是说,目前对非饱和土的研究大多针对自然条件的改变,而考虑外加荷载与碱饱和效应方面的研究较少。膨胀土分布在世界各地,在季节性的干湿循环中,地表浅层的非饱和膨胀土往往表现明显的胀缩特性,通常对机场、道路、露天边坡以及少层建筑物等产生严重破坏。为此,国内外学者针对膨胀土的力学特性进行了大量的试验研究; 湿陷性黄土具有特殊的工程特性,对黄土地区的地基、边坡和洞室等的稳定带来了较大的危害。基于此,采用传统的饱和土力学变形理论已经无法合理计算因干湿循环而引起的膨胀土、湿陷性土等对建筑物产生的变形影响,需要采用非饱和土力学理论和针对性的试验来研究其变形影响问题,尤其是研究其他类型非饱和土的地面下沉、基坑位移、边坡稳定、地基或路基沉降以及坝体位移等实际问题,将具有更重要的现实意义。

地下水位的降低引起孔隙水压力的变化,土层饱和度降低,产生有效应力增量,土体再次发生固结而使得地面或基底产生沉降。在地基沉降的研究中,人们常常采用饱和土理论来计算含有非饱和土层的地基沉降量。饱和土固结理论离不开有效应力原理,土体的变形或体变,是由于有效应力发生改变的结果。而有效应力发生改变一般分为三种情况: 其一,外荷载和土的自重应力不变,但孔隙水压力发生了改变; 其二,自重应力和孔隙水压力增量为零,而外荷载增量大于零,地基中形成附加应力; 其三,孔隙水压力和外荷载同时发生变化。譬如,深基坑降水稳定后,基底上覆土层含水率降低,产生有效应

力增量。同时,建筑物开始施工,外荷载不断增加,有效应力增量和附加应力共同使地基产生沉降。

对于第一种情况计算地表沉降时,传统方法仅对饱和区进行了计算分析,而忽略了非饱和区的竖向变形。Hsin-Yu Shan(1998)在对台湾沿海地区地表沉降的调查中发现饱和土以上的非饱和土区域受降雨影响产生的沉降可观,通过监测或计算,结果表明,非饱和土层的沉降量占计算深度范围内土层总沉降量的比例约为47.9%;Kai-Yuan Ke(2004)通过对不同环境条件下的非饱和土柱开展了实验室排水固结试验。试验表明,土柱的非饱和部分产生的沉降量可观,不能忽略。

对于第二种情况计算基底沉降时,传统方法先将地基按地下水位标高分成两个区域。计算地下水位之上非饱和土层的自重应力时,一般采用土的天然重度;计算地下水位之下土层的自重应力时,则考虑使用土的浮重度。我国国家现行地基基础规范及有关规程计算地基沉降时,引入了经验系数,同时还对分层总和法公式进行简化,求解出各分层地基土的变形后,最终达到求解地基受压层的总沉降量的目的。

对于第三种情况计算基底沉降时,场地土层自上而下出现两种情形,稳定水位以上为非饱和土层,稳定水位以下为饱和土层。受试验条件的限制,非饱和土的力学特性和变形性状尚不为人们所熟悉,工程中仍然沿用上述传统方法解决问题。

无论是第一种情况,还是第二种情况,针对饱和区域土的变形计算,使用有效应力原理,已经获得了很大成功。但是,计算降水饱和地基的沉降时,应将非饱和土层和饱和土层区别开来对待,使计算条件与实际情况更加贴切,计算值的可靠性更高。

3.2 目前存在的问题

用于计算地基变形的的方法很多,其中广泛应用于实际工程的地基沉降计算方法主要有:分层总和法、现行规范法、弹性力学公式法以及变形发展三分法等。用这些方法解决饱和土的变形问题,许多方面已经取得了很大的成功。但是,若将它们应用于解决大型基础下层状地基的变形问题中,将会带来一些困难和问题,具体表现在以下几个方面:

(1) 分层总和法是计算地基最终沉降量最常用的方法。分层总和法采用 K_0 (完全侧限)条件下的地基土压缩性指标,计算有限深度范围内土层的压缩量。对于部分类型基础,如条形基础、扩展基础等,通常取其基底中心处的地基附加应力进行近似

计算。根据以往经验,这种做法基本上可以解决基础形状简单、尺寸不大的多层或少层建筑基础的基底沉降问题。但是,随着高层建筑和超高层建筑的增多,作用荷载和基础尺寸不断加大,基础型式多变,特别是对于一些大型、复杂、重要的基础,如筏形基础、构造板扩展基础等,仅仅计算基底中心点的沉降是远远不够的,且该点的沉降值不一定就是最大值。

(2) 现行规范法是在分层总和法的基础上,采用土层平均附加应力系数,结合地区经验规定了较为适宜的土层沉降计算深度,计算结果运用沉降经验系数修正后,须满足地区建筑物基础沉降允许值。这种做法是对分层总和法进行了改进,使沉降计算结果较大程度上接近实测值。但是,规范法仍然没有克服分层总和法单点计算基底沉降的缺点。对于筏形基础、构造板扩展基础等大型基础,误认为最大荷载作用点就是最大沉降发生点,忽略了有效附加应力空间传递过程中出现应力扩散、传递和叠加同时进行的事实。因此,设计基础和地基时,人们常常将最大荷载作用点作为地基最大变形控制点,存在一定的安全隐患。

另外,采用规范法计算地基变形时,常常会出现下列情况:①对于低压缩性土层,如砂类土,变形计算值远大于实测值;②对于中等压缩性土层,变形计算值与实测值相近;③对于高压缩性土层,如粉质黏土等软弱夹层土,变形计算值小于实测值。

(3) 运用弹性力学相关理论公式计算地基沉降量时,遵照半无限空间内地基呈均质和线性变形等假设。这种方法用于计算岩石地基或较密实的砂类土地基的变形时,计算结果比较理想。但是,在实际工程中,地基类型复杂,难以满足假设条件,受荷载的传递和叠加影响的土层深度有限,研究表明,无黏性土(如砂类土等)地基的变形模量是随深度而增大的,计算结果往往偏大。另外,还有一个缺点是无法考虑相邻基础之间的作用影响。

(4) 变形发展三分法考虑地基变形过程中可能出现的三种变形情形,即瞬时沉降、固结沉降和次压缩沉降。计算地基沉降时,将这三个分量分开来计算,然后叠加。提出将单向压缩条件下的沉降计算结果乘上经验修正系数,得到了地基考虑侧向变形修正后的固结沉降,计算精度得到了提高。但是,变形发展三分法只适用于黏性土地基。

(5) 在运用规范修正法计算层状砂土地基的变形时,一些地区地方规程对砂土和软弱夹层土的沉

降计算经验修正系数值虽然给予了细化和补充,但是,因部分砂土和软弱夹层土沉降计算经验系数是在有限经验条件下提出的,沉降计算结果与实际值仍相差甚远。

4 层状土变形计算方法

分析层状土的变形,除了首先要考虑不同类型土的本构关系、土层物理力学性质、基底有效附加应力的空间传递等,还应考虑因基坑降水可能产生的非饱和效应。此时,地基沉降不仅仅因为基底附加应力的作用,基底上覆土层产生的有效应力增量对地基沉降的贡献同样不可忽略。研究表明,随着高层建筑和超高层建筑的不断增多,作用荷载和基础尺寸不断加大,基础型式多变,特别是对于一些大型、复杂、重要的基础,基底最大荷载作用点不一定是最大沉降发生点,基础中心点的沉降值也不一定是最大沉降值。传统的地基沉降计算方法只能在弹性范围内采用统一的土材料本构模型逐次单点计算地基沉降量,应用局限性较大,如果仍采用该方法确定大型基础下层状地基最大沉降发生点和计算其最大沉降量将具有盲目性和不合理性,也给大型基础建(构)筑物的安全使用带来较大隐患。到目前为止,如何准确计算和完整描述非自由场层状土的静力变形成为研究者们一直致力解决而尚未很好解决的问题。

Mendoza 等^[42]在 1988 年针对震区墨西哥城建筑物基础的行为进行了分析,指出层状土的力学性状并非是一些单一土层力学性状的简单组合,同砂土或碎石土相比较,软弱土层(如淤泥质土和粉质黏土等)具有明显的非线性特性,该类土层的存在使层状土的整体性能变得更加复杂起来。之后,美国地震工程研究所(EERI)^[43]在洛马普列塔地震分析报告中也得出了相同的结论。层状土中软黏土层受到地震荷载作用时能够强化地面运动并且加剧建筑物的总体损害程度。Naoki Takahashi、Chung-Jung Lee 等^[44-45]分别对由砂土层和黏土层交互构成的层状土进行了地震响应联机测试试验研究,发现黏土层具有强化和减弱地面运动的双重特性,即位于有液化倾向的砂土层之下的黏性土将减弱短周期结构物的地震运动,但强化长周期结构物的地震运动。Enayat Masoud 等^[46]提出土体结构和孔隙比是影响土体渗透性的主要因素,起着控制土体变形的作用,并提出了一个层状土变形的概念模型。李纯等^[47-49]基于宏微观多孔介质理论,研究了大型基础

下基底有效附加应力在层状土内的空间传递路径与叠加原理,提出了层状土变形分析模型,推导了层状土变形计算方法,基于通用塑性理论简化了 Pastor-Zienkiewicz 本构模型,运用自编程序 SSBS 对大型基础下层状土的静动力变形性状进行了三维数值模拟分析,计算结果得到了工程实测数据的验证。实践证明,层状土变形分析方法较好地克服了传统分层总和法只能单点计算基底沉降的不足,为工程设计和施工有效防控重大工程突出灾害的发生提供了可靠的基础数据和理论参考。

5 结论及建议

近年来,各国学者从工程实际出发,针对层状土的体变特性及其变形计算方法从实验、数值模拟、变形机理及地基改良等方面都进行了一系列的分析研究,可得到以下四个方面的主要结论:

(1) 非饱和土与饱和土的体变理论是可以统一起来的,即当饱和度 $S = 1$ 时,饱和土成为非饱和土的一种特殊形式。

(2) 在饱和土形成为非饱和土的过程中,产生的有效应力增量对土层变形的贡献不能忽略,因此,如果采用饱和土理论来分析非饱和土的力学性状,所得结果会产生较大误差。

(3) 层状土的力学性状(特别是其动力特性)并非是一些单一土层力学性状的简单组合。同砂土或碎石土相比较,软弱土层(如淤泥质土和粉质黏土等)具有明显的非线性特性,该类土层的存在使层状土的整体性能变得更加复杂起来。

(4) 大型基础下层状土的最大沉降并不一定发生在基础中心处,且基底最大荷载作用点沉降值也不一定是沉降最大值,因此,按照传统方法计算得到的结果存在一定的安全隐患。

综上所述,目前关于层状土的静动力特性研究仍十分有限,开展有条件下的实验室试验和工程实测,建立层状土性能与材料力学参数智能预测系统,为理论模型提供精准的物理力学参数,以及针对层状地基中不同类型土进行精确力学性能分析,是今后值得深入研究的方向。

参考文献:

- [1] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [2] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1990, 40(3):405-430.

- [3] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980(44):892-898.
- [4] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31:521-532.
- [5] Liu Zhengnan, Zhang Rui, Liu Zhaojing, et al. Experimental study on swelling behavior and its anisotropic evaluation of unsaturated expansive soil[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021:6937240.
- [6] Abbas Mohamed Farid, Shaker Abdullah Ali, Al-Shamrani Mosleh A. Hydraulic and volume change behaviors of compacted highly expansive soil under cyclic wetting and drying[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023,15(2):486-499.
- [7] The U. S. National institute of standards and technology (NIST). Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings [R]. Technology Administration, U. S. Department of Commerce, Washington D C, 2007 .
- [8] 徐永福. 膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J]. 岩土工程学报,2020,42(11):1979-1987.
- [9] Donald I B. Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressure [C]//Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. Soil mech. Found. Eng. , 1965:200-205.
- [10] Qian Kai, Li Bing. Research advances in design of structures to resist progressive collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29 (5): B4014007.
- [11] Fredlund D G. Volume change behavior of unsaturated soils[D]. University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada, 1973:490.
- [12] Fredlund D G. Theory formulation and application for volume change and shear strength problems in unsaturated soils[C]//Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Aug. ,1985.
- [13] 孙德安. 非饱和土力学特性及本构模型[J]. 岩土工程学报,2023,45(1):1-23.
- [14] 张克恭,刘松玉. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [15] Chen Bo, Gao You, Sun De'an, et al. Simple testing method for measuring the triaxial stress-strain relations of unsaturated soils at high suctions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2021,44(2):535-546.
- [16] Huang Wengui, Leong Eng-Choon, Rahardjo Harianto. Upper-bound limit analysis of unsaturated soil slopes under rainfall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018,144(9):04018066.
- [17] Liu Xiaowen, Wang Wendong, Shi Yu. Unsaturated soil deformation theory and test verification based on the catastrophe model [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022,15(11):1035.
- [18] 陈正汉,郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学,2019,40(1):1-54.
- [19] Bishop A W. The principle of effective stress[J]. Lecture delivered in Oslo, Norway, published in Teknisk Ukeblad, 1959,106(39):859-863.
- [20] Bishop A W, Donald I B. The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus[C]//Proc. 5th Int. Conf. Found. Eng. (Paris, France), 1961:13-21.
- [21] Jennings J E, Burland J B. Limitation to the use of effective stresses in partly saturated soils [J]. Geotechnique, 1962,12(2):125-144.
- [22] 陈正汉,王永胜,谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报,1994,16(3):64-71.
- [23] 徐永福. 我国膨胀土分形结构的研究[J]. 河海大学学报,1997,25(1):18-23.
- [24] Fredlund D G, Morgenstern N R. Pressure response below high air entry discs[C]//Proc. 3rd Int. Conf. Expensive soils. Haifa, Israel: Jerusalem Academic Press, 1973:97-108.
- [25] Neuman S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Proc. ASCE, Hydraulics Div. , 1973,99(12):2233-2250.
- [26] Lam L, Fredlund D G, Barbour S L. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: A geotechnical engineering approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988,24(4):565-580.
- [27] 张家发. 三维饱和非饱和和稳定非稳定渗流场的有限元模拟[J]. 长江科学院院报,1997,14(3):35-38.
- [28] 朱伟,刘汉龙,高玉峰,等. 河堤内非稳定渗流地实测与分析[J]. 水利学报,2001(3):92-97.
- [29] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学,2003,24(2):151-158.
- [30] Fredlund D G, Hasan J U. One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils[J]. Can. Geot. Jour. , 1979,16(3):521-531.
- [31] 刘祖德,王园. 膨胀土浸水三向变形研究[J]. 武汉水力电力大学学报,1994,27(6):616-621.
- [32] 张原丁. 论黄土的湿陷敏感性[J]. 岩土工程学报,1996,18(5):83-87.
- [33] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量

- 变化特性[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):85-93.
- [34] 孙建中,刘健民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):365-367.
- [35] 汪东林. 非饱和土体变试验研究及其在地面沉降中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [36] Escario V. Suction controlled penetration and shear tests [C]//Proc. 4st Int. Conf. Expensive Soils (Denver, CO), ASCE, 1980,2:781-797.
- [37] Gan J K M. Direct shear strength testing of unsaturated soils [D]. University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada, 1986:587.
- [38] Ho D Y F. The relationship between the volumetric deformation moduli of unsaturated soils[D]. University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada, 1988:379.
- [39] 俞培基,陈愈迥. 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):18-26.
- [40] 徐永福. 非饱和膨胀土的力学特性及其在工程应用[D]. 南京:河海大学,1997.
- [41] Takeji Kokusho, Tetsuro Kojima. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002,128(2):129-137.
- [42] Mendoza M J, Auvinet G. The Mexico Earthquake of September 19, 1985: Behavior of building foundations in Mexico City [J]. Earthquake Spectra, 1988,4(4):835-853.
- [43] Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Loma Prieta Earthquake Earthquake, October 17, 1989 [R]. Preliminary Reconnaissance Rep., 1989:1-51.
- [44] Kobayashi Mio, Noda Toshihiro, Nakai Kentaro, et al. Effects of strong ground motion with identical response spectra and different duration on pile support mechanism and seismic resistance of spherical gas holders on soft ground[J]. Applied Sciences, 2021,11(23):11152.
- [45] Lee Chung-Jung, Chen H T, Line H C, et al. Centrifuge modeling of the seismic responses of sand deposits with an intra-silt layer[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014,65:72-88.
- [46] Enayat Masoud, Shoaie Gholamreza, Nikudel Mohammad Reza, et al. A conceptual model and evaluating experiments for studying the effect of soil deformation on its permeability [J]. Shock and Vibration, 2021:6652223.
- [47] 李纯,张森,付诗梦,等. 大型基础下层状砂土静力变形性状测试[J]. 工程力学,2013,30(8):217-221.
- [48] 李纯,修占国,王斐笠. 大型基础下含软弱夹层的层状砂土变形计算[J]. 东北大学学报,2018,39(4):579-583.
- [49] Li Chun, Xiu Zhanguo. Analyzing the deformation of multilayered saturated sandy soils under large building foundation [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(9):3764-3776.

特邀作者简介

李纯(1971—),男,安徽潜山人,东北大学土木工程系副教授,博士,硕士生导师,英国伯明翰大学访问学者,剑桥大学做短暂学习。1995年至2004年,在中国建筑东北设计研究院从事岩土工程科研、设计和施工管理工作,独立或参与完成各种类型的工程项目共约120余项;2004年9月至今,在东北大学土木工程系从事教学和科研工作,主要研究方向为宏微观多孔介质理论、地下工程技术及应用、建筑结构实用设计方法。主讲“高层建筑结构设计”、“岩土工程勘察”及“土木工程施工”等课程。主持和参加国家重大专项计划项目、国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金项目、辽宁省自然科学基金项目及大型横向科研合作项目等40余项。参编专著2部。在国内外学术期刊上发表学术论文60余篇,其中被SCI、EI和ISTP收录20余篇;获中国授权专利2项,实质期审查4项。获得辽宁省研究生城市管理创新设计竞赛优秀指导教师奖1项、省部级优秀工程设计三等奖1项、沈阳市优秀工程设计奖7项、东北大学个人年度贡献奖1项。