

DOI: 10.11779/CJGE201808003

土力学理论需要发展与变革

赵成刚^{1,2}, 李 舰¹, 宋朝阳¹, 蔡国庆¹, 刘 艳¹

(1. 北京交通大学土建学院, 北京 100044; 2. 桂林理工大学土木建筑学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 土力学经过 90 多年的发展, 已经成为岩土工程中不可缺少的理论分析工具。但土力学目前仍然处于半理论、半经验的状态, 其理论预测结果具有非常大的不确定性。如何克服这些不足, 使土力学理论不断向前发展和变革, 是土力学研究者不可推卸的责任。首先, 基于土的易变性与敏感性论证了土是一种非常复杂的、难以用简单的一、两个变量进行精确定量描述的材料; 其次, 揭示了土力学目前是一种简化的理论, 忽略了很多影响因素, 难以描述土的复杂性质, 由此产生了非常大的不确定性; 第三, 指出有效应力原理实质上是一种等效的近似方法, 并就有效应力的定义、表述、理解和作用及其局限性进行了研究和探讨; 最后, 针对土力学目前存在的不足以及发展、变革的需求, 提出了建立考虑多因素相互作用和影响的土力学理论的观点, 提倡用多个因素(或多场)作用的观点研究和描述土的性质和行为。

关键词: 土力学发展; 不确定性; 有效应力; 多因素影响的土力学

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)08 - 1383 - 12

作者简介: 赵成刚(1955 -), 男, 教授, 主要从事土力学基础性理论研究, 涉及理性土力学、非饱和土力学、岩土地震工程等方面。E-mail: cgzhao@bjtu.edu.cn。

Theories of soil mechanics need reform and development

ZHAO Cheng-gang^{1,2}, LI Jian¹, SONG Zhao-yang¹, CAI Guo-qing¹, LIU Yan¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: With more than 90 years of development, the soil mechanics has become an indispensable theoretical analysis tool in geotechnical engineering. On the one hand, the soil mechanics is still a subject containing half theory and half experience, and its theoretical predictions are greatly uncertain. On the other hand, the geotechnical engineering problems become more complex and more important with the economic and social development. These situations force the development and reform of theories of soil mechanics. Firstly, the soil is demonstrated to be a kind of variable and sensitive material consisting of solid particles, pore water and pore air. Thus, it is difficult to accurately and quantitatively describe soil behaviors by using a simple one or two variables. Secondly, it is revealed that the principle of effective stress is a kind of simplified theory ignoring the effects of other factors on the strength and deformation of soils with the exception of effective stress. Therefore the classic soil mechanism is difficult to describe the complex soil behaviors, which results in a very large uncertainty of predicted results for soil behaviors. Thirdly, it is pointed out that the principle of effective stress is an equivalent approximation method, and the definition, expression and comprehension of the effective stress and its limitations are studied and discussed for saturated and unsaturated soils as follows: (1) In fact, the effective stress is an equation to describe the distribution of the total stress to the effective stress and the pore pressure. Then a two-phase saturated soil is simplified to a single-phase medium. The change of pore water pressure with void ratio, soil structure and other factors under given loading conditions implies that the effective stress is not an independent stated variable. (2) The single stress expressions for unsaturated soils is also proposed in the same way. However, its depicting ability for mechanical behaviors of unsaturated soils is not satisfactory. Then, the double stress variables are proposed to describe the mechanical behaviors of unsaturated soils. (3) It should be noted that the effective stress is the main controlling variable for the strength and deformation of saturated soils rather than the only one. Finally, in view of the current shortcomings of soil mechanics and the demand of geotechnical engineering problems, it is proposed to establish the soil mechanics considering the interaction and influence of multiple factors, and to advocate the study and description of

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478135)

收稿日期: 2017 - 09 - 11

soil behavior with the viewpoints of multiple factors (or multiple fields) rather than using only the effective stress.

Key words: development of soil mechanics; uncertainty; effective stress; soil mechanics with multi-factor

1 概述

从 Terzaghi 于 1925 年出版第一本土力学^[1]以来,土力学经历了 90 多年的发展,取得了辉煌的理论成果,并成功地用于土木工程的实践。目前很多重大土木工程的建设都要用土力学理论进行分析和预测。土力学已经成为土木工程建设、运行和维护中不可缺少的理论分析工具。由于土力学的迅速发展和取得成功, Terzaghi 于 1948 年在 Rotterdam 召开的第 2 届世界土力学与基础工程大会所做的报告中充满自信地指出:“土力学于 1936 年就已经创建了描述理想土性质的理论,并给工程师们提供了一系列的理论概念和方法,它们已经涵盖了土的工程性质和行为中所有重要方面”。

然而随着人类社会的不断发展和进步,人们所面临的工程问题越来越复杂,土力学所要处理的问题也更加宽广、更加复杂和多变^[2]。土力学遇到了前所未有的问题和困难,例如:分析和处理非饱和土的问题^[3];开挖隧道出现涌水时的稳定性;土的动力与液化问题^[4-5];冻融对路基沉降的影响^[6];高速铁路路基长期的沉降、变形分析与控制;核废料的处置;气候的变化(降雨和蒸发等)对边坡稳定的影响;油、气的开采对地基沉降的影响;垃圾填埋场的分析与处理;废水和污染物扩散和运移;力和孔隙水流动耦合作用的数学描述;溶解、弱化和风化作用对岩土体的作用和影响;CO₂的封存等。这些都是 Terzaghi 时代没有遇到,难以处理而目前又迫切需要解决的问题。这些工程问题对土力学提出了严峻的挑战。

通常土力学的发展有两个推动力:①实际工程的需要;②土力学理论内在发展的需要。前面给出的是实际工程需要解决的问题,它们为土力学理论的发展提供了推动力。

在处理土的工程问题时,工程师们需要一套理论工具去分析所遇到的土的变形和强度问题,由此导致土力学的出现和发展。工程师不像力学家和数学家讲究系统、科学、严密和精确性,他们采用完全实用主义的方法,建立了工程中能够方便使用的土力学理论。例如:沉降计算时,用弹性理论分析应力,而沉降变形分析的结果却是塑性的、不可恢复的沉降;在承载力、土压力和稳定性计算时,将土体假定为理想弹塑性体,即没有失稳时土是刚体,一旦失稳时它就变成了理想塑性体;在固结理论推导中用线弹性本构关系,但其固结理论预测的变形却是不可恢复的;假定渗流、

变形和强度之间无直接联系,渗流、强度与变形的理论分别是根据不同的假定建立的; Terzaghi 固结理论假定荷载是一次施加,并此后不随时间变化;土力学中各理论和模型之间缺少有机和统一的理论基础;经验公式和方法还随处可见等。很显然这些做法与土的实际情况相差很大,因此导致理论预测结果存在非常大的误差和不确定性。但这些实用主义做法的好处是简单、实用。其缺点也是显而易见的,即缺少科学性、严谨性和前后一致性,并且其预测结果的不确定性非常大。所以土力学不是一门严密的学科,而实际上是一门半理论、半经验的学科。在这门学科中经验和工程判断起着重要的作用。因此工程师的经验和技艺在处理工程问题中发挥了重要的、有时是决定性的作用。

我们发现如下现象:通常在一门学科中,工程经验的作用和科学理论的作用成反比关系;科学所起的作用和占有的比重越大,工程经验和技艺的作用就越小。人类土木工程的实践表明,土力学诞生之前,岩土工程完全依靠经验和技艺。土力学诞生之后,随着学科不断发展,科学理论所起的作用也越来越大。面对这种状况,一方面要在应用中要积累更多的经验,培养和提高处理工程问题的技艺和水平。但另一方面,也要促使土力学和岩土工程学科的理论不断向前发展,最后和其它学科一样达到成熟的水平,即仅利用科学理论就能够较为准确地预测土的行为,这也是土力学研究者所追求的目标。

由于认识到 Terzaghi 时代(1925 年—1963 年)的经典土力学中存在上述实用主义的局限性,以 Roscoe 为代表的剑桥学派建立了更加科学、具有较好力学基础(基于塑性力学理论)的临界状态土力学理论^[6-9]。这一理论使经典土力学中一维的沉降计算拓展为二维或三维的变形计算^[10],并基于塑性理论可以讨论三维强度问题。这些范围更广的变形和强度问题在实际工程中是经常遇到的,但用 Terzaghi 时代的经典土力学理论^[11]是难以处理和解决的。临界状态土力学理论无论在建立科学、严密的理论方面,还是在工程应用领域都推动了土力学理论的向前发展。

下面讨论第 2 个推动力,即土力学理论内在发展的需要。作为一门科学理论的要求,土力学应该发展成为一门严密,没有矛盾,前后一致的理论,并且仅用土力学理论就能够较为准确地预测土的力学行为,这是土力学理论内在发展的需要,也是其成熟的标志。

然而,目前土力学理论的现状与这种需要还有很

大的距离。为此需要研究: ①如何建立科学、严密的土力学理论; ②如何减少这一理论预测的不确定性, 并努力使其成为较为精确和成熟的理论。针对第①个问题, 刘艳等^[12]做了一些初步的探索, 但还远未达到成熟的目标。本文将对第②个问题进行探讨和研究, 并就有效应力原理的局限性和用多个影响因素(多场)的观点研究和描述土的行为进行讨论, 这种讨论有助于促进建立较为精确和成熟的土力学理论, 并逐渐地使第②个问题得到解决。

2 土的易变性与敏感性

笔者在深入学习土力学的时候, 就不断地思考, 土的碎散性及其三相构成, 为何成为了土的易变性和敏感性的基础, 而土的易变性和敏感性又是如何影响到土力学理论预测的不确定性呢? 思考的结果是, 土的碎散性和三相构成, 使土不同于其他材料。首先, 碎散性和三相构成导致土成为一种碎散颗粒的沉积物, 其中离散颗粒之间的黏结力较弱(与混凝土相比), 并由此形成了一种以摩擦性为主的颗粒沉积材料, 它的强度和刚度取决于颗粒之间联结的强度和刚度, 而不取决于颗粒本身的强度和刚度。其次, 由于土颗粒之间的黏结力较弱, 导致液—固—气各相的相互作用与这种颗粒之间的黏结作用的大小相近, 不可忽略。例如毛细作用, 水中盐分不同浓度的结晶作用、双电层作用等物理—化学作用; 实际上液—固—气各相的相互作用就构成了土颗粒之间黏结作用的一部分。另外, 液—固—气各相的相互作用与外界的各种影响因素直接相关, 由此使得土体成为一种易变性材料(这种易变性主要是指土的强度和变形性质的易变性), 导致土的工程性质对很多外界因素都很敏感, 例如外界温度、湿度、地下水的迁移、荷载等的作用。与其他建筑材料(例如钢材、砖石、混凝土等)相比, 土是一种对很多外界因素都很敏感的易变性材料^[13-14]。也就是说, 土的强度和变形性质对很多外界因素都很敏感。已有的研究表明, 土的工程性质与这些外界因素的关系一般都是非线性的。由土的易变性、多相性、对很多外界因素都很敏感, 并且其性质变化一般都是非线性等原因, 导致土是一种非常复杂的、难以用简单的一、两个变量就可以进行较为精确定量描述的材料。

3 描述土变形和强度性质的变量

科学理论就是对客观世界的(本质)现象进行定量的描述。这种定量描述的第一步是选择变量。从热力学的观点, 选择何种变量对客观现象进行描述是一

个基础性问题。变量的选择不是唯一的, 通常这种选择具有多种可能。变量越少, 相应的理论就会越简单。就土而言, 因前述土的易变性和敏感性, 很多外界因素或变量的影响都是不可忽略的(例如密实程度、饱和度、温度等)。因此, 变量的选择面临着既要简单、又需要考虑很多敏感因素的两难抉择。一般要求变量的选择不应该是随意的, 而应该具有理论和科学的依据, 例如应该优先选取能量守恒方程中变形功所包含的变量形式作为力学状态变量, 因为这种做法的理论基础是普适的能量守恒方程。

变量的选择至关重要, 它决定了建立何种控制方程和本构方程。但在经典土力学中却很少遇到这一问题, 究其原因, 主要是由于有效应力原理的影响和作用而导致的。有效应力原理已经告诉我们: 是有效应力控制了土体的变形和强度^[14]。因此有效应力原理已经选择好了独立状态变量, 即有效应力。而且该原理还告诉我们: 土体的变形和强度是有效应力的函数。基于这一原理, 接下来的工作就是探讨有效应力与变形或强度的函数关系。

4 土的变形和强度的理论描述的简单性要求

前述已经表明, 土是易变和敏感的, 所以影响其变形和强度的因素和变量很多并且很复杂。试图在一个模型中精确定量地描述土所具有的各方面的力学性质和行为通常是徒劳无益的。这是因为目前对土的认识水平和测试手段还远不能满足建立这种精确、定量理论的需求。因此从实际应用出发, 要求建立尽可能简单的模型。一个简单的、好的数学模型通常需要满足以下3个要求^[13]: ①忽略次要特征和因素; ②选择尽可能少的变量, 这些变量应该能够描述需要考虑的重要影响因素和特征, 并满足工程要求的精度; ③尽可能的简单、实用。

在土力学中, 这样建立的简单模型不可能描述土所具有的广泛的、各方面的力学性质和行为, 它的适用范围是有限的, 所以在处理不同工程问题时需要选用不同的模型。但工程处理的好与坏, 不完全依赖于所采用的理论或模型, 它还依赖于工程经验和工程判断力。

岩土工程中最经常遇到的土的问题是土的强度和变形问题。而如何理解和描述土的强度和变形的性质就成为土力学理论研究中的重中之重。目前为了简化, 通常所建立的强度和变形模型仅采用有效应力作为其唯一控制变量, 并建立了相应的关系方程。有少数理论略复杂些, 除了有效应力外, 还采用了其他的少数

几个变量,例如比体积^[7-9]、状态参量^[15]等,以便于能够更好地描述土的实际行为。总体上说,土力学理论还是一种非常简化的理论,这也是工程应用的要求。但其缺点是预测结果具有非常大的不确定性。

5 土力学理论预测的不确定性的讨论

笔者第一次阅读 Whitman 1960 年在美国 Colorado 举办的著名的黏土剪切强度会议上发表的文章^[16]的中文译文时,受到了巨大的震撼,使笔者对原本深信不疑的有效应力原理,产生了质疑,第一次认识到有效应力原理也存在局限性。文中^[16]说到,“我们必须认识到:①有效应力和抗剪强度之间的关系不是单一的;……,第①点告诉我们想要精确地测定强度,除了考虑有效应力外,还得考虑其他影响因素。因此,应该非常谨慎地阐述有效应力原理,使读者能够清楚地理解这一原理的确切含义及其缺点。”另外,他还指出^[16],莫尔-库仑抗剪强度有效应力表达式“ τ_f 好像唯一取决于 σ'_{ij} 。事实上远不是这样的,影响 τ_f 的还有许多其他因素。一种比较全面的表达式为

$$\tau_f = f(\sigma'_{ij}, e, T, H, S, E, S_r, F, C, \sigma'_{2r}) \quad (1)$$

式中 τ_f 为破坏时刻的剪应力; σ'_{ij} 为剪切破坏面上的有效压应力; e 为破坏时的孔隙比; T 为时间; H 为应力历史; S 为土的结构; E 为环境作用; S_r 为饱和度; F 为土的生成条件; C 为毛细张力; σ'_{2r} 为垂直于最大剪切变形面的有效应力。……,当然不能直接用式(1)来计算抗剪强度,式(1)的意义在于它指出了抗剪强度的性质是相当复杂的。”

在 Whitman 的启发下,笔者认识到,影响强度的重要因素不仅有有效应力,而且还有很多其他因素,并且不可忽略;如果忽略这些因素的影响就会产生较大的误差,并导致所建立的模型的预测结果具有非常大的不确定性。另外笔者提出并认为:这种情况不仅是针对强度的,对土的变形情况也是如此。因为,强度仅是土的整个变形过程的特殊点或特殊阶段,所以对强度有影响的因素也必然会对变形具有影响;由于变形过程的描述需要的是更加细致和复杂,对变形影响的因素也必然会更多和更加复杂,至少应该相同。根据这一认识,在式(1)的基础上又增添了一些新的影响因素,提出了强度和变形的表达式为

$$\tau_f = f(\sigma_{ij}, u_w, u_a, e, \dot{L}, T, H, S, C, A, S_r, F, t, c, E, \dots), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = f'(\sigma_{ij}, u_w, u_a, e, \dot{L}, T, H, S, C, A, S_r, F, t, c, E, \dots) \quad (3)$$

式中 σ_{ij} 为总应力; u_w 为孔隙水压; u_a 为孔隙气压, \dot{L} 为加载速率; A 为吸附作用 (adsorptive action); t 为温度作用; c 为土的矿物成分和构成的影响。这些影响因素并不都是独立的,把它们尽可能多地罗列出

来是想表示影响因素很多。另外,这些影响因素与强度和应变的函数关系也是未知的。

人们正确地认识到有效应力的影响最大,采用有效应力作为唯一的独立变量,满足上述简单性的要求,并可以得到较为简单的强度和变形的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= f(\sigma'_{ij}), \\ \varepsilon_{ij} &= f'(\sigma'_{ij}), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, σ'_{ij} 为有效应力。把式(4)第一个方程等号右侧的函数 f 取为线性关系,则得到用有效应力表达的莫尔-库仑强度公式;式(4)第二个方程为一般性的应力-应变方程的表达式。纵观整个土力学研究的历史,主要就是围绕着式(4)中的两个关系而展开的(渗流除外)。也就是说,把主要研究精力用于如何建立式(4)中的两个关系。

把式(4)与式(2)、(3)相比,可以看出,式(4)仅考虑了有效应力的影响,而忽略了很多其他因素的影响。忽略其他因素的影响,不等于它们不存在,它们必然会表现其影响。所以,式(4)的预测结果就会产生很大的误差,由此导致它具有非常大的不确定性。以前很少有人采用对比式(4)与式(2)、(3)的方式进行分析和研究。土力学理论预测的不确定性到底有多大?下面将就此进行讨论。

5.1 沉降变形预测的不确定性

Duncan^[17]在 ASCE 第 27 届 Terzaghi 讲座的报告中给出了两个关于沉降变形工程实例,说明沉降变形预测的误差和不确定性。

第一个例子是美国旧金山 Bay Farm 岛的一个建筑工程。该建筑工程场地 1880 年前是受到潮汐影响的 6~15 m 厚度的淤泥 (mud) 场地,出于商业和居住的目的,1967 年开始开发该区域,在该区域的淤泥场地吹填砂 2.5~6 m 厚。1969—1979 年的沉降监测表明:①该区域沉降很大,1979 年已经出现 2 m 的沉降;②沉降是不均匀的,1979 年测量到的沉降从 1 m 多 (4 ft) 到 2 m 多 (7 ft),其沉降差是明显的。1979 年沉降仍然在继续。开发商要想在该区域开发和建筑房屋必须要估计房屋浅基础的最大不均匀沉降,即要估计将要建设建筑物的 23 m 长的方形场地的最大不均匀沉降。开发商雇佣了两个岩土工程公司, A 和 B 公司,对这一场地最大不均匀沉降进行了预测和评估。最初, A 公司预测的不均匀沉降为大到 300 mm, B 公司预测的不均匀沉降为大于 30 mm。由于 A 和 B 公司的预测结果相差很大 (相差 10 倍),难以确定采用哪个公司的预测结果进行设计。为此开发商进行协调,协调后给出修正的结果为: A 公司预测不均匀沉降小于 250 mm, B 公司预测不均匀沉降小于 50 mm。两个公司

预测的结果仍然相差很大(相差 5 倍),难以进行设计。最后, 开发商请求 Duncan 教授对这一场地最大不均匀沉降进行预测和评估, Duncan 教授最后预测的不均匀沉降为 100 mm。到 1992 年该场地的实际不均匀沉降为 45~60 mm。

第二个例子是日本大阪关西国际机场 (Kansai International Airport) 的建设工程。该机场坐落在人工岛上, 因此可以预见其沉降必然很大。机场于 1987 年开始填海建设, 1994 年开始运营。设计时, 机场寿命期的地表沉降是需要考虑的重要因素。1986 年机场设计时所给出的预估沉降, 见表 1。由于实际监测的沉降值与预估值相差很大(见图 1)。1990 年根据实际监测的数据, 设计和研究人员对原计算模型进行了调整, 给出了新的预估沉降值(见表 2)。表 1, 2 中 50 a 后的总沉降分别为 8, 11.6 m, 它们相差 3.6 m 和 1.4 倍。图 1 还给出了到 1990 年的实际监测的数据。Duncan 进一步指出: 针对洪积黏土 (diluvial clay) 沉降速率, 1990 年预估值是 1986 年预估值的 36 倍。

表 1 1986 年预测 50 a 后沉降的预估值^[17]

Table 1 1986 estimates of settlement at Kansai International Airport after 50 years ^[17]		
土层 (1)	预估沉降值/m (2)	预估沉降值/ft (3)
Alluvial clay	6.5	21
Diluvial clay	1.5	5
总计	8	26

表 2 1990 年预测 50 a 后沉降的预估值^[17]

Table 2 1990 estimates of settlement at Kansai International Airport after 50 years ^[17]		
土层 (1)	预估沉降值/m (2)	预估沉降值/ft (3)
Alluvial clay	5.5	18
Diluvial clay	5.5	18
填土	0.6	2
总计	11.6	38

5.2 强度理论预测的不确定性

Wroth 等在第 11 届国际土力学和基础工程大会的主题报告中指出^[18], 在获取了一些 London 黏土的土样后, 每一直径 100 mm 的土样都被加工成为直径 38 mm 的三轴试样, 以具有相同地质历史的 3 个试样为一组, 这 3 个试样在不同围压下进行固结, 然后再进行常规三轴排水压缩试验。每一组试验可以得到相应的破坏包线, 并可确定一对排水强度参数 (c' , φ')。总共有 14 组强度参数试验数据, 他们具有相当大的离散性: φ' 在 16.2°~25.0° 变化, 平均值为 21.2° ,

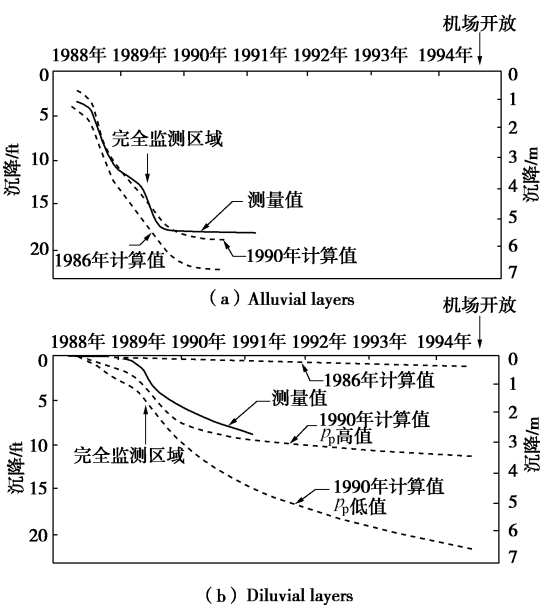


图 1 关西机场观测沉降和预测沉降^[17]

Fig. 1 Calculated and measured settlements of Kansai International Airport^[17]

其最大和最小摩擦系数相差 1.6 倍; c' 在 6.9~56.2 kN/m² 之间剧烈的变化, 平均值为 30.8 kN/m², 其最大和最小值相差 8.1 倍。这里还仅仅涉及了试验中存在的误差和不确定性, 当然这种不确定性也是与采用了莫尔-库仑抗剪强度理论有关, 即莫尔-库仑抗剪强度理论过于简单(仅考虑了应力变化的影响, 而忽略了其他的影响), 并导致其中强度参数 (c' , φ') 的误差和不确定性。

另外, 还存在如何认识和确定莫尔-库仑抗剪强度公式所表达的具体强度含义。例如峰值和残余强度就有很大的区别, 排水与不排水强度差别也很大。实际工程当中, 如何根据具体的工程情况来确定相应的强度参数, 它依赖于对土的工程性质的认识、工程经验以及工程判断, 其不确定性也很大的。Vaughan 等^[19]就这种情况进行了一些讨论, 他指出, 峰值强度有时要比残余强度高出一倍左右 (Wroth 等^[18]在讨论残余强度时也有同样的结论)。因此工程中采用这两种不同的强度参数获得的强度预测值会有一倍的差距。

另外, 吉勃斯^[20]指出, 即使经过认真准备和试验, 其土样的试验抗剪强度结果仍然存在一定的误差, 有些土可能产生的误差大到 5% (甚至 10%)。

Vaughan 还就渗流理论预测的不确定性进行了讨论^[19], 这里不再赘述。

从上述关于变形沉降和强度预测的不确定性的讨论中, 可以看到, 与其他建筑结构理论 (钢结构、混凝土结构、砖石结构等理论) 的预测结果相比, 土力学理论的预测结果的不确定性要大很多。本质上说,

目前土力学理论所得到的结果,最多也仅能对实际情况做粗略的大致估计,其精度很差,不确定性非常大。

5.3 不确定性产生的原因

这么大的不确定性到底是如何产生的?关于这一问题的研究和讨论并不多见,而这正是本文要讨论的主要问题之一。

笔者认为从理论本身的角度而不考虑外界环境和客观条件变化所产生的不确定性,土力学理论预测结果产生非常大的不确定性的一个重要原因是土力学理论过于简化。例如 Terzaghi 时代的经典土力学^[1],仅采用有效应力作为表达土体沉降和强度的唯一控制变量,这样的做法难以准确地描述具有很多影响因素和非常复杂的土的行为,因而导致误差和不确定性非常大。不确定性是由于理论模型与实际情况不符而产生的。这种理论模型与实际情况的不符,主要有:①实际情况中有重要影响的因素没有考虑(前面已经讨论过了)。②土力学理论中采用了很多与实际情况相差很大的假定(第1节论述过一些)。上述是理论方面的不确定性,下面是与外界环境和条件相关的不确定性。③场地的边界条件难以准确地确定,例如排水条件,动力问题中边界处能量的散射与动应力。④选用的参数与实际情况有偏差。⑤土的性质随空间和时间而变化,但理论模型没有考虑。这些情况都会导致或产生较大的误差和不确定性。

6 有效应力的探讨

6.1 饱和土有效应力

根据热力学理论,独立状态变量是与路径无关的,即它们对自己的历史没有记忆。力学中的应力就是所描述的系统中一个独立状态变量,应力应该对自己的历史没有记忆,也就是应力的状态与其应力历史和路径无关。根据独立状态变量的要求,考察一下有效应力是否满足这一要求。

土力学中通常可以得到总应力和通过测量得到孔隙水压力值,并认为,饱和土中总应力是分别由液相孔隙水和固相土颗粒骨架共同承担的。Skempton^[21]、邵龙潭等^[22]通过力的平衡方程,建立了表征体元中外力引起的总应力与饱和土内部土骨架与液相之间的内应力的平衡关系方程,即通过平衡方程给出外力引起的总应力是如何在土体内部的土骨架与液相之间进行分配的。通常孔隙内液相的应力被认为是可测的孔隙水压力,所以在孔隙水压力和总应力已知时,根据平衡关系就可以得到由土骨架所承担的应力。这种土骨架承担的应力不是一个可测量,而是一个抽象的量。它应该包含除了可测的孔隙水压力影响以外,所有其

他内部因素的影响(当然这些内部因素会受外部环境或因素的影响),并且是用应力的方式表达的。为何可以这样表述和解释?

(1) 孔隙水压力虽然是可测量,但对于具体的饱和土来说,在确定的外力作用下,其孔隙水压力的具体值却与饱和土的内部结构和刚度相关。例如同一饱和土,即使在同一外力作用下,不同孔隙比的土样,其孔隙水压力也是不同的。通常孔隙比大的土样,其孔隙水压力也大;反之,孔隙比小的土样,其孔隙水压力也小。所以孔隙水压力值是具体饱和土的结构和刚度相关的量。

(2) 有效应力是根据平衡方程,把总应力减去可测的孔隙水压力的结果。它不是一种可测的量,因而是一个抽象的、通过计算得到的量。对于这一抽象量的物理意义,后来的研究者给出了不同的说明和解释,例如粒间力、骨架应力等。

(3) 饱和土的结构和刚度不是一成不变的,而是随着一些对其具有重要影响的因素的变化而变化。所以影响具体饱和土的结构和刚度的因素(例如孔隙比、土体内部各相的物理-化学作用、黏结作用等)的变化,都会影响到孔隙水压力的变化,由此也会影响到土骨架承担的那部分总应力的变化,即影响到上述抽象应力的变化。Terzaghi 把土骨架承担的这种抽象应力称之为有效应力。

(4) 孔隙水压力不是一个独立的状态变量。它虽然是一个可测量,但它不是可控量,即它是响应变量,而不是自变量。它的大小和变化除了与外力作用相关外,还与其内部结构和刚度的变化相关。实质上它应该是一个内变量而不是一个独立的应力变量。但工程界很多人误认为孔隙水压力是一个独立的应力状态变量。另外,孔隙水压力一般是指孔隙中自由水的压力,虽然它是可测量,但对测量得到的孔隙水压力的含义最近却存在新的看法,即这种孔隙水压力不能反映土颗粒表面吸附水的压力情况(通常孔隙水的势能相同,但吸附水的压力较高)及孔隙水与颗粒表面的物理化学作用^[23]。砂土、高岭石、伊利石等因孔隙水的物理化学作用较小,测量得到的孔隙水压力与孔隙水承担的压力相差不大,可以认为测量得到的孔压就是孔隙水承担的压力。蒙脱石由于颗粒表面与孔隙水物理化学作用较大,吸附水也较厚,其压力值相对也较大。这时如果仍然认为测量得到的孔压就是孔隙水承担的压力,就会低估孔隙水承担的压力,而高估土颗粒骨架承担的有效应力。

(5) 有效应力是一种表述平衡状态时的应力方程,对于饱和土来说,该应力方程就是

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \quad (5)$$

这一方程的力学含义是总应力如何在饱和土的土骨架和液相之间进行分配。总应力通常是按土骨架和液相各自的刚度进行分配。既然涉及到土骨架和液相的刚度,也必然会涉及它们的结构和孔隙比,即土体内部各相结构的几何参数和颗粒之间的联结强度。由于孔隙水压力是宏观可测量的,虽然它的大小取决于土的结构,但只要采用某种手段测量得到孔隙水压力值,即只要知道孔隙水压力,利用平衡条件,即根据式(5)就可以得到有效应力值。

(6) 有效应力应该包括除了孔隙水压力以外所有与总应力起相互平衡作用的因素的影响,并且认为这些影响因素是作用在土骨架上的。关于这一点, Terzaghi 开始时并没有给出清晰的解释,只是指出,有效应力是控制饱和土强度和刚度的应力变量。所以针对此,后来的研究者对有效应力给出了很多的解释,并根据各自的观点发展出了不同的有效应力表达式。例如: Skempton^[21]定义有效应力为土颗粒之间的作用应力; Mitchell 等^[24]给出了考虑物理-化学作用的有效应力的表达式; Nuth 等^[25]称有效应力为土的骨架应力。

基于上述 6 点说明,可以知道有效应力是一种表述平衡状态的应力方程,它不是独立的状态变量,并且这种应力方程是应力路径相关的方程(与孔隙比或变形相关),因而它不是描述应力的状态变量,它是一种应力方程,可以称之为有效应力方程。

Terzaghi 指出^[11]: “the pressure in the water produces neither a measurable compression nor a measurable increase of the shearing resistance. This part is called the neutral stress”, 即由孔隙水承担的孔隙水压力是中性应力,它不会产生可测的压缩,也不会增加土的剪切抵抗。“the effective stress, because it represents that part of the total stress which produces measurable effects such as compaction or an increase of the shearing resistance”, 即有效应力,表示了总应力中某一确定部分,会对土的压缩和增加剪切抵抗产生可测的效应。

前面讲过岩土工程师是实用主义者。通过大量的研究和试验,人们认识到有效应力方程可以和单相连续介质力学中的应力变量相类似地使用,即用有效应力方程替代或等效为连续介质力学中的应力变量,就可以用与单相连续介质力学中同样的方式建立适用于饱和土的变形和强度的关系。当然这是一种简化的近似方法。为何称这种方法为简化的近似方法,原因有两个: ①把本来是二相、复杂的液相流动与固体变形的两场耦合问题(注意两场问题就不再是单相的力学

问题),通过有效应力方程,将其简化为或等效作为单相的力学问题处理。也就是说,将两场耦合问题简化和近似为一种固体的变形和强度问题,而不论孔隙流体是怎样流动和变化的。②有效应力方程不是独立的应力状态变量,把有效应力方程作为应力状态变量处理,这是一种不严格的近似处理方法。这种处理方法中,有效应力或有效应力方程本质上不再是一个独立的状态变量,它是与总应力和内部结构都相关的量。它的物理意义也不再是总应力或孔隙水压力,而是转化为一种等效的有效应力。

6.2 非饱和土有效应力

非饱和土是一种三相土体,由于增加了一相(气相),非饱和土的性质更加复杂,更加难以用简化和等效的方法进行描述。首先,孔隙内的流体压力(水压和气压)难以用宏观的、直接的、方便的方法测量。所以就不能像饱和土那样通过可测的孔隙水压力,并利用平衡方程,就可以确定其有效应力。其次,由于非饱和土中存在三相之间的相互作用,导致孔隙内的流体作用变得复杂,难以用简单的流体压力描述。再次,由于存在毛细作用,非饱和土有效应力也变得复杂了,难以较好地描述。

最重要的是,把原本为三相、复杂的气-液流体的流动与固体变形的 3 场耦合问题,通过有效应力方程,将其简化为等效的单相力学问题处理。这种做法是否可行,这一问题将通过非饱和土应力变量发展的历史加以讨论。

开始是用饱和土有效应力去分析非饱和土的问题,其结果是相关性很差,难以采用这种方法。后来通过长期的研究和试验,人们发现非饱和土中表征毛细作用的吸力($u_a - u_w$)对非饱和土的工程性质具有重要影响,并且吸力是用孔隙气相和液相压力差的形式表示的,满足内应力表示的要求。当用吸力描述毛细现象时,其吸力($u_a - u_w$)值通常是负值;按饱和土的孔隙水压力的观点,这是一种负孔隙压力,它会增加其有效应力值。但吸力($u_a - u_w$)是如何增加非饱和土的有效应力的呢?其增加的具体表达式为何?这是非饱和土力学研究者关注的重要问题。

Bishop 等^[26-27]经过数学推演得到单变量的非饱和土有效应力的表达式:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij} \quad (6)$$

式中, χ 为与饱和度相关的参数。 χ 的具体表达式为何?这是后来的学者研究兴趣之一。由针对饱和土所讨论的分配方式可知,非饱和土的总应力应该在土骨架和气、液相中按各自的刚度去分配它们所承担的应力。因此,如果孔隙内的压力已经知道,饱和土有效

应力就是(基于平衡方程)通过总应力减去孔隙内压力的结果。就非饱和土而言,孔隙内的压力为何?它是否可以测量得到?它的具体表达式为何?

首先,孔隙内的压力是其内部气相压力与液相压力的某种组合。其次,孔隙内的压力难以直接测量得到。再次,孔隙内压力的具体组合形式或表达式取决于孔隙的大小和分布以及气相和液相各自在孔隙内的结构与分布以及各相的相互作用。所以即使知道孔隙内气压和液压的具体数值,也难以确定孔隙内压力。因为这两种流体压力的组合方式还取决于它们的结构、分布和它们的相互作用。

假定非饱和土由三相组成,并忽略物理化学作用,赵成刚等^[28]推导得到了非饱和土的平均骨架应力的表达式,并定义该式为非饱和土的有效应力:

$$\begin{aligned}\sigma'_{ij} &= \sigma_{ij} - [u_w S_r + u_a (1 - S_r)] \delta_{ij} \\ &= \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + (u_a - u_w) S_r \delta_{ij} \quad (7)\end{aligned}$$

由式(7)中间的等式可以看到,孔隙内综合流体的压力是由气压 u_a 和液压 u_w 按各自的体积分数进行分配并总合而成的结果。由此可以看出,这一有效应力是总应力减去孔隙内综合流体压力的结果,即除了孔隙内综合流体承担的外力以外,所有其他的外力都由有效应力承担。而有效应力也包含了除了孔隙内综合压力外,所有内部因素的影响,例如毛细作用、物理化学作用、吸附作用等。式(7)很明显没有考虑各相之间的相互作用等,它们隐含在有效应力之中。

Lu等^[29]给出非饱和土的有效应力表达式如下:

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) - \sigma_{ij}^s \quad (8)$$

式中, σ_{ij}^s 为Lu等^[29]定义的吸应力。显然,吸应力 σ_{ij}^s 是式(6)右端最右项的替代项。与前述先确定孔隙内的压力,然后(利用平衡条件)再确定有效应力相反。Lu等首先讨论土颗粒之间的作用力,由此确定非饱和土的有效应力。但这样做遇到了更大的困难,因为这时需要处理的是土体内部一些细观和微观的作用和影响,这些影响多数都难以定量分析和描述,只能做定性的估计和判断。最后还是通过宏观试验综合考虑很多影响因素给出总的定量结果。吸应力的分析和处理就是采用这种方式。

研究和试验表明,用单变量有效应力难以描述复杂的非饱和土的工程性质。Nuth等^[25]也论证了这一观点。所以Coleman^[30]、Bishop等^[27]、Blight^[31]提出了用净应力 $(\sigma_{ij} - u_a)$ 和基质吸力 $s = (u_a - u_w)$ 两个变量描述非饱和土的强度和变形。这两个变量实质上是两个物理方程,而不是两个独立状态变量。Fredlund^[32]利用零位试验,验证了采用这两个变量的正确性。此后,用这两个变量作为研究和描述非饱和土的变形和强度的性质已经居于主流地位。

把复杂的气-液流动与固体变形的三场耦合问题,用一个有效应力将其等效或简化为单相连续介质力学的强度和变形问题,这种做法的适用性受到了质疑。而用两个变量对非饱和土的变形和强度的描述能力无疑要优于单变量有效应力的描述能力。这已经被近期非饱和土力学研究的实践所揭示^[2,33]。

目前仍然有人研究非饱和土单变量有效应力,并试图让有效应力包含更多因素的影响,例如Lu等^[34]试图通过土水特征曲线和吸应力把吸附或黏吸的作用包括进非饱和土有效应力中。然而,需要注意的是变量选择的简单性要求^[13],并且这种简单性要求是基本性的,但人们很多时候却总是置之不理。针对非饱和土,选用简单变量的好处是:①各个变量是相互独立的,便于试验和分析中控制它们(复合变量或变量方程就不宜控制)。②不含材料参数,应力空间在整个变形过程中是不变的。所以试验和分析中易于控制,试验数据也容易分析和解释;如果变量包含材料参数或变形影响,则在该变量作用下土体的响应就难以准确的区分是该变量的影响还是材料参数或变形的影响所造成的,并使该变量变化的路径变得复杂级。③变量变化的路径明确。另外,如果变量过于复杂(例如它是包含了很多内变量的方程),其变量和该变量变化的路径在试验和分析中难以有效的控制,它们的响应也很难确定是由该变量的方程内的何种内变量所引起的。

采用何种变量,依赖于使用者的认识和方便^[35]。另外从实用的角度,强度模型和本构模型的优劣不仅取决于所选择的变量,更重要的是取决于模型对土的关键性质的描述能力。

6.3 有效应力的作用问题

有效应力原理实质上包含了两个方面的内容:①有效应力的定义及其表达式;②有效应力的作用。前面6.1、6.2节主要讨论了有效应力的定义和表达式,下面将讨论有效应力的作用问题。

前面指出Terzaghi认为^[11],有效应力对饱和土的压缩和剪切抵抗会产生可测的效应,而孔隙水压力是中性应力,它不能产生这种效应。这就是Terzaghi对有效应力作用问题的讨论和说明。随后,人们正确地认识到,是有效应力决定了土的变形和强度。

通常对有效应力的作用有两种观点:①有效应力是控制土体变形和强度的唯一变量;②有效应力是控制土体变形和强度的应力变量,但并不是唯一变量。

多数人正确和清楚地认识到(包括太沙基本人),式(5)仅定义了有效应力及有效应力的确定方法,但并不认为它是控制变形和强度的唯一变量。但是令人遗憾的是,在很多文献中都给出,有效应力是土体强

度和变形的唯一控制变量或自变量的表述;也许研究者主观思想上并不认为如此,但客观文献上确实是如此表达的。例如土力学中很多强度理论方面的研究就是如此。这种情况就属于上述第①种观点,这种观点的局限性在于:它仅承认有效应力是控制变量,并没有明确指出或反映其他因素对强度和变形的影响。

土作为摩擦性材料,其变形和强度主要取决于土颗粒接触传递的骨架应力(有效压应力)、土颗粒接触点的数目、接触面积及其摩擦系数以及颗粒之间的连接强度。所以土的变形和强度并不唯一取决于土颗粒之间的骨架应力,其他影响土颗粒接触点的数目、接触面积及其摩擦系数以及颗粒之间连接强度的因素也会影响土的变形和强度。例如孔隙比、物理-化学作用、吸力和饱和度等因素。所以在土力学研究中不但要关注有效应力的影响,还需换一个角度,考虑上述其他因素作为独立变量的影响,而不是仅在某些参数和前提条件中考虑这些因素的影响。因为这些因素的变化会改变原有的变形和强度关系。例如把温度或饱和度这两种因素作为独立变量考虑就比仅作为两个参数或前提和初始条件考虑,要全面和完备许多。低温度或低饱和度情况下,土的变形和强度关系就与高温或高饱和度情况下其变形和强度关系有很大的不同。因此,把温度或饱和度这两种因素作为独立变量考虑就比仅作为两个参数或前提和初始条件考虑,要周全。另外,从前述式(1)、(2)也可以看到,影响土体强度和变形的因素除了有效应力以外还有很多,这些影响因素如果忽略或不考虑就会产生误差。为减少这种误差,就应该考虑增加少数一、两个有重要影响的因素或变量。

7 多因素相互作用和影响的土力学理论

科学理论总是沿着从简单到复杂的道路发展。土力学理论也是沿着同样的道路发展。例如,首先是基于 Terzaghi 有效应力原理,简单的饱和土力学在 1925—1960 年得到迅速的发展;1960 年以后,略为复杂一些的土的本构模型和强度理论得到了发展;与此同时较为复杂的非饱和土力学也得到了迅速发展。

随着社会的发展,土力学面临的问题也更加复杂和多变^[2, 36]。因此要求土力学理论能够分析和处理的变量也将更多、更复杂。

目前,由于计算机和有限元等数值方法的发展,土力学数值求解的方法和计算能力已经优先于土力学理论本身的发展。这表明,土力学已经具备了分析和处理更多、更复杂变量的计算和求解能力。

接下来,土力学理论的发展不能还是仅采用有效

应力这一个变量的研究方式。而应该考虑增加一至两个变量甚至更多的变量,以便于分析和处理更为复杂的工程问题,实际上在非饱和土力学的研究中已经这样做了。下面将介绍一些研究,这些研究除了采用有效应力外,再增加一至两个变量,建立了相应的模型,这些模型对土的工程性质具有较好的描述能力。

7.1 增加 1 个变量所建立的模型

Roscoe 等^[6-8]基于三维轴对称情况中有效应力(适用于三轴仪的应力状态)和比体积 v ,并针对正常固结黏土建立了剑桥模型。但用同样的方法分析砂土时却遇到了困难和问题^[37]。例如同一点和同一深度取到两个砂样,并重塑成两个具有不同孔隙比的砂样,施加同样的试验方法和同样的荷载,这两个砂样却得到不同的响应;其中疏松砂样的响应是压缩,而密实砂样的响应是膨胀。即砂土的体积与有效应力之间的关系不具有唯一性。所以如何统一描述整个不同孔隙比范围和应力水平作用下砂土的响应,是当时研究者所关注的问题^[37]。Li 等^[38]通过增加了一个描述砂土剪胀、剪缩变化趋势的状态参量,解决了这一问题,建立了可以统一描述整个不同密度范围和应力水平作用下砂土的本构模型。该模型可以较好的描述具有不同密实程度的砂土在较大应力水平作用下砂土的变形过程和行为。由此可以看到,当必要时增加一个变量或状态参量的好处。

另外,在挡土墙理论分析中,主动土压力和被动土压力是两种特殊情况,它们反映了挡土墙土压力的两个极限值。而实际挡土墙的土压力是处于这两个极限压力之间。通过长期的实践人们发现,实际挡土墙的土压力是与挡墙的位移密切相关。因此,挡墙位移对于实际存在的土压力的计算显得尤为重要。徐日庆等^[39]将位移量作为内摩擦角 ϕ_m 以及外摩擦角 δ_m 的修正参数;宋飞等^[40]将位移量作为内摩擦角 ϕ 的修正参数;他们对挡土墙的土压力计算方法进行了修正。这两种方法虽然反映了挡土墙位移的影响,但不是将其作为独立变量处理的。卢国胜^[41]将挡墙位移作为土压力 P 的修正参数,其结果是将挡墙位移作为独立变量进行考虑的。由这些研究可以了解到,挡土墙土压力的计算模型中增加了挡墙的位移量,可以较好地反映挡土墙实际存在的土压力情况。

7.2 非饱和土中单应力变量与双应力变量的比较

在非饱和土强度理论中,采用单变量有效应力,其强度可表示为^[42]

$$\tau_f = c + [\sigma_{ij} - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi, \quad (9)$$

式中, $[\]$ 内为非饱和土单变量有效应力。

而采用双变量,即净应力和吸力 $(u_a - u_w)$, 非饱

和土强度可表示为^[42]

$$\tau_f = c + (\sigma_{ij} - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (10)$$

这是两种不同形式的表述。式(9)、(10)中, c 和 φ 为试验得到的黏聚力和内摩擦角, φ^b 为非饱和土试验中吸力作用对应的摩擦角。式(10)右端最右项是吸力或毛细作用影响项, 它可以视作为黏聚力并入到 c 中。

在式(10)等式右侧第3项与式(9)中的对应项 $\chi(u_a - u_w) \tan \varphi$ 中, 有两方面不同: ①其物理意义完全不同。式(9)中 $\chi(u_a - u_w)$ 是作为有效应力的一部分, 它对强度的影响是作为有效应力而施加其上的, 它反映了摩擦作用的影响。②式(10)等式右侧第3项中 $(u_a - u_w)$ 可以独立变化, 而不受有效应力的约束, 它反映了毛细作用的影响, 并可以并入到黏聚力中去。

值得注意的是, 式(10)中 $\tan \varphi^b$ 是吸力 $(u_a - u_w)$ 对强度的影响系数, 它可以独立、方便地包含毛细或吸附作用中饱和度的影响, 例如它可以表示为 $\tan \varphi^b = S_r \tan \varphi'$ 。而式(9)中 $\tan \varphi$ 却不能这样处理, 因为它是有效应力对应的摩擦系数, 其物理意义和表达方式已经确定了, 它不是吸力对应的系数, 物理意义不一样, 对强度的影响也就不一样。由此表明, 采用两变量与单变量的不同, 以及采用两变量的优越之处。采用两变量分析变形问题, 可以更好地体现这种方便、灵活和优越之处, 这里不再赘述。

7.3 提倡用多个因素(多场)作用的观点研究和描述土的行为

在经典理论框架下所进行的研究难以突破该理论的束缚, 对经典理论的不足和局限性也很难有全面和深入的认识。只有跳出经典理论的框架, 摆脱其影响, 以更加宽广的视角重新审视经典理论, 才会对其不足和局限性有全面和深入的理解和认识。目前关于有效应力原理的讨论, 多数是在经典土力学的框架下进行的, 因此难有新的认识。本文意在从更加宽广的视角重新审视有效应力原理, 研究者不但要注意有效应力的影响(当然这肯定是正确的), 还需换一个视角, 考虑其它更多因素作为独立变量的影响。另外, 工程实践也要求土力学考虑更多因素变化的影响, 例如冻土地区温度的变化, 核废料处置中的温度、渗流、污染物扩散等, 需要发展和建立新的理论和模型。

这些更多因素或变量的变化会改变原有变形和强度的关系, 例如前述的低饱和度与高饱和度情况下土的变形和强度关系就有很大的不同。从多个因素(多场)作用的视角审视原有的土力学问题, 会产生很多新的问题和知识增长点、会拓宽和加深对原有问题的认识和理解。例如从多个因素(多场)作用的角度研

究土的变形和强度, 即把不同的影响因素作为独立变量(或独立的场量)处理, 而不再是简化为有效应力, 并作为单相的力学问题处理。这样做的优点在7.2小节中以强度问题为例进行了讨论。这样做还可以考虑多变量或多场之间的耦合作用。显然, 从多变量或多场的角度研究土的变形和强度问题是更加完备、更加科学的方法。

通过有效应力把非饱和土三相耦合问题转化或等效为单相连续介质的力学问题, 这种方法仅能处理平衡问题; 一旦遇到不平衡问题, 难以处理。例如土中存在液-气的流动时, 饱和度会发生变化, 这种情况下必须对变形和渗流分别处理。也就是说, 需要把液体的流动变化作为独立变量考虑进来, 并需要增加相应的微分方程进行分析, 而不能再按有效应力变量中的参数或内变量来考虑。

也许有人会问, 变量是否越多越好? 答案是否定的。请不要忘记, 增加一个变量, 就极大地增加了数学和物理描述以及求解的复杂性和难度, 另外相应的参数也会获取困难。因此, 在满足精度的要求下, 变量越少越好。

有人认为, 从多变量或多场的角度研究土的变形和强度是把简单的问题复杂化。笔者认为, 科学的认识和研究总是从简单到复杂, 如果总是停留在简单的土力学理论上, 不再前进, 土力学理论就难有实质性进展, 这不符合科学发展的规律。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage[M]. Deuticke Vienna, 1925. (TERZAGHI K. Earthwork mechanics based an physics of soils[M]. Deuticke Vienna, 1925. (in German))
- [2] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. Géotechnique, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [3] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [4] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 1 - 50. (ZHANG Jian-min. New advances in basic theories of sand dynamics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 1 - 50. (in Chinese))
- [5] 陈国兴. 岩土地震工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

- [6] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, WROCH C P. On the yielding of soils[J]. *Géotechnique*, 1958, **8**(1): 22 - 53.
- [7] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A H. Yielding of soils in states wetter than critical[J]. *Géotechnique*, 1963, **13**(3): 211 - 240.
- [8] ROSCOE K H, BURLAND T B. On the generalized stress-strain behavior of wet clay[C]// *Engineering Plasticity*. Cambridge, 1968: 535 - 609.
- [9] SCHOFIELD A, WROTH P. Critical state soil mechanics[M]. London: McGRAW-HILL, 1968.
- [10] 姚仰平. UH 模型系列研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(2): 193 - 217. (YAO Yang-ping. Advanced UH models for soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(2): 193 - 217. (in Chinese))
- [11] TERZAGHI V K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [12] 刘 艳, 赵成刚, 蔡国庆. 理性土力学与热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing. Rational soil mechanics and thermodynamics[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [13] 赵成刚, 白 冰. 土力学原理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2017: 2-3, 53. (ZHAO Cheng-gang, BAI Bing. Fundamentals of soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2017: 2-3, 53. (in Chinese))
- [14] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [15] LI X S, DAFALIAS Y F, WANG Z L. State-dependent dilatancy in critical-state constitutive modeling of sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(4): 599 - 611.
- [16] WHITMAN R V. Some considerations and data regarding the shear strength of clays[M]// *ASCE, Soil Mechanics and Foundations Division, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soil*. Colorado, 1960: 581 - 614.
- [17] DUNCAN J M. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1993, **119**(9): 1333 - 1359.
- [18] WROTH C P, HOULSBY G T. Soil mechanics-property characterization and analysis procedures[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*. San Francisco, 1985: 1 - 55.
- [19] VAUGHAN P R. Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering[J]. *Géotechnique*, 1994, **44**(4): 573 - 609.
- [20] GIBBS H J. shear strength of cohesive soils[C]// *ASCE, Soil Mechanics and Foundations Division, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soil*. Colorado, 1960: 33 - 162.
- [21] SKEMPTON A W. Effective stress in soils, concrete and rocks[M]// London: Selected Papers on Soil Mechanics. Thomas Telford, 1984: 106 - 118.
- [22] 邵龙潭, 郭晓霞. 有效应力新解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia. The new solution for effective stress[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014. (in Chinese))
- [23] GONÇALVÈS J, ROUSSEAU-GUEUTIN P, DE MARSILY G, et al. What is the significance of pore pressure in a saturated shale layer?[J/OL]. *Water Resources Research*, 2010, **46**(4), W04514. DOI: 10.1029/2009WR008090.
- [24] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [25] NUTH M, LALOUI L. Effective stress concept in unsaturated soils: clarification and validation of a unified framework[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, **32**(7): 771 - 801.
- [26] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. *Teknisk Ukeblad*, 1959, **106** (39): 859 - 863.
- [27] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of the effective stress in saturated and partially saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1963, **13**(3): 177 - 197.
- [28] 赵成刚, 刘真真, 李 舰, 等. 土力学有效应力及其作用的讨论[J]. *力学学报*, 2015, **47**(2): 356 - 361. (ZHAO Cheng-gang, LIU Zhen-zhen, LI Jian, et al. Effective stress in soil mechanics and the discussions about its functions[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, **47**(2): 356 - 361. (in Chinese))
- [29] LU N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(2): 131 - 142.
- [30] COLEMAN J D. Stress-strain relations for partly saturated soils[J]. Correspondence to *Geotechnique*, 1962, **12**(4): 348 - 350.
- [31] BLIGHT G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 1967, **93**(SM2): 125 - 148.
- [32] FRELUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state

- variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division (ASCE), 1977, **103**(5): 447 - 466.
- [33] 刘 艳, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 非饱和土力学理论的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, **37**(4): 457 - 465. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research progress of unsaturated soil mechanics[J]. Mechanics in Engineering, 2015, **37**(4): 457 - 465. (in Chinese))
- [34] LU N, KHORSHIDI M. Mechanisms for soil-water retention and hysteresis at high suction range[J/OL]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(8): 04015032. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001524.
- [35] 陈正汉, 秦 冰. 非饱和土应力状态变量的研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, QIN Bing. On stress state variables of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [36] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3521 - 3540. (ZHAO Cheng-gang, WEI Chang-fu, CAI Guo-qing. Development and challenge for soil mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3521 - 3540. (in Chinese))
- [37] 蔡正银, 李相菴. 砂土的剪胀理论及其本构模型的发展[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1122 - 1128. (CAI Zheng-yin, LI Xiang-song. Development of dilatancy theory and constitutive model of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1122 - 1128. (in Chinese))
- [38] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 449 - 460.
- [39] 徐日庆, 龚 慈, 魏 刚, 等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(1): 119 - 122. (XU Ri-qing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational movement effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, **39**(1): 119 - 122. (in Chinese))
- [40] 宋 飞, 张建民. 考虑挡墙位移效应的被动侧土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 151 - 157. (SONG Fei, ZHANG Jian-min. Computational method of earth pressure at passive side considering wall displacement effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 151 - 157. (in Chinese))
- [41] 卢国胜. 考虑位移的土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 586 - 589. (LU Guo-sheng. A calculation method of earth pressure considering displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 586 - 589. (in Chinese))
- [42] 谢定义. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))