

# 近代土力学研究动向

魏汝龙\* 盛崇文\*

**[摘要]** 本文介绍土力学的三个主要组成部分,即理论土力学、计算土力学和实验土力学在近10年来的发展状况。理论土力学主要研究土体中发生的各种现象的宏观、微观机理及其影响因素,并且尽可能将这些物理现象抽象化为数学方程,以便在不同的初始和边界条件下求解,进行理论计算分析。由于土体性质和实际工程的边界条件往往过于复杂,以致在许多情况下很难得出精确解或闭合解,从而使理论土力学在定量地分析工程问题方面的作用受到一定的限制。计算土力学的兴起,为各种岩土工程问题提供了许多有力的分析计算手段。实验土力学则为上述理论分析和数值计算测定有关计算指标和参数,研究各种室内或原位试验,以及为校核和验证这些分析计算结果而进行的模型试验和离心模型试验等。

## 一、前言

从1925年Terzaghi发表《土力学的基本原理》以来,土力学的发展已有60多年的历史。作为力学的一个分支,土力学本来应当是运用数学和力学手段进行分析的科学,但是,由于土体的性质非常复杂,土力学迄今尚未能完全摆脱经验的成分。所以,直到70年代,Peck还在宣扬Terzaghi早期提出的观点:土力学不是科学,而是一门艺术。随着研究的深入,经验逐步上升到理论;大型电子计算机和数值计算方法的发展,使人们可以通过数学分析合理地预测土体受力后的破坏和变化;而近代测试技术的广泛应用,又促使出现了一些能够比较精确地测定土体性质的先进手段。这样,土力学的三个重要组成部分:理论土力学、计算土力学和实验土力学,在最近十年内都有了十分迅猛的发展。

## 二、理论土力学

土力学的基本课题为预测或说明土体在荷载作用下发生的应力、变形和孔隙压力及其随时间的变化过程。为此,首先要建立能描述变化过程及其机理的理论及相应的本构模型。

在土力学发展初期,即本世纪20—40年代,理论土力学有两大支柱——极限平衡理论和固结理论。实质上,这两个理论涉及土体的三项基本力学性质:强度、变形和渗透性,因而包含有三种特定的本构模型:强度本构关系采用库伦摩阻定律;应力应变计算采用理想弹性模型;而渗透计算则采用达西线性定律。

土的抗剪强度理论是极限平衡理论的基础。有效应力原理的确立大大深化了人们对于土的强度的认识,也推动了对于土的强度的研究,包括各种各样强度理论及其相应的破坏准则的提出和验证。60年代还开始考虑中主应力、各向异性和主应力偏转对于强度的影响等。80年代土力学研究的焦点转向土的应力应变模型,而强度问题往往只是结合应力应变的研究而加

\* 南京水利科学研究院

以探讨,例如将破坏准则当作是不同应力水平下的屈服函数的界限。

在60年代初,人们对于土体的力学性质的认识发生了一次新的飞跃,其主要标志是对土的剪胀性的认识。这样就使土力学的发展脱离了弹性力学的范畴。土的应力应变模型从此由古典的理想弹性体经过非线性弹性体而发展到弹塑性体。其中最早的开创性工作就是著名的剑桥模型。有人将此工作列为标志近代土力学开端的里程碑。此后,有一些人试图更全面地考虑土的各种各样的复杂性质及其影响因素,例如土的各向异性、粘弹塑性、应变软化、以及复杂的应力组合和应力路径等。但是考虑的因素越多,本构模型的表达式就越复杂,也就越难于在实际工程中推广应用。因此,当前的主要方向应该是针对具体工程问题和特定土类,寻求能包括主要影响因素、尽可能简单而又有足够精度的本构方程,或者在试验中尽量模拟现场条件而得出本构方程,直接用于工程计算。

达西线性定律是最常用的渗透本构关系,它对大多数情况是适用的。但是,也存在非线性的或非达西型的渗透情况,例如,密实粘土中的小梯度渗流,粗粒土中的大雷诺数渗透等。以前,在土力学中土的渗透问题没有受到应有的重视。实际上,土的渗透性不仅影响到土体的固结过程,而且还牵涉到土体渗透变形和水力劈裂等问题。例如,在非线性或非达西型渗流定律以及非线性应力应变关系的基础上,已提出多种比较符合实际情况的非线性固结理论,并开始研究非饱和土的渗流固结问题,而美国 Teton 坝的失事,更引起人们对于渗流变形和水力劈裂的广泛注意。

在理论土力学的发展中,还有两种趋势值得重视,首先是对土的微观结构的研究,用来说明或补充土体的宏观力学性状。其次,随着概率统计方法和可靠性分析等在土力学中的应用,有人开始考虑采用随机型本构模型代替现有的定值型本构模型。此外,近年来断裂力学和损伤力学的概念也引入土力学中。有人正在研究土体中剪切带的形成及其分叉问题。

### 三、计算土力学

上面已经指出,由于土力学课题的复杂性,往往无法采用一般的解析方法求得精确解。因此,在近代土力学发展初期,还缺乏适当的分析计算手段,工程设计中仍采用一些半经验的方法,如分层总和法,圆弧滑动法和库伦土压力理论等。

60年代后期,有限元法引入土工计算,标志着土力学的新分支——计算土力学的诞生。20年来,随着电子计算机和数值计算技术的迅猛发展,计算土力学已取得不少重要进展。例如,应力应变计算从以往的线弹性平面问题分析,发展到目前对非线性、大变形和粘弹塑性等三维问题的分析。计算方法也已从常用的差分法、有限元法、边界元法发展到离散元、杂交元、无界元、半解析元、摄动有限元、随机有限元等。反算分析方法也日益引起重视。

现还正在研究开发各种耦合方法。在特定条件下,将两种不同的数值计算方法(例如差分法和有限元法,有限元和边界元,有限元和无界元)结合起来处理同一课题,以提高数值方法解决实际问题的能力。例如,在研究土体固结和变形的耦合解时,在空间域中采用有限元法离散,而在时间域中则采用差分法离散,得到十分好的效果。

从70年代开始,随着结构工程中概率理论和统计方法的广泛应用。人们开始采用这些手段来研究土体的另一重要特性——土的分散性。诚然,象一次二阶矩法, Monte Carlo 模拟法等应用于若干土工问题已取得令人鼓舞的结果,但对诸多土性指标的统计参数依旧认识肤

浅,资料贫乏。又由于现阶段一些土性指标(例如液化势)具有模糊性,所以模糊数学亦已开始向土力学渗透。

但是,计算土力学迄今仍存在一个很大的缺陷,即计算结果往往与现场实测资料相差很大。原因可能是选用的模型和测定的参数与土体实际性状不符,特别是后者的影响较大。因此,土力学中的反算分析方法近年来有了较大发展。但反算得出的参数代表实际工程的综合效应,其物理意义不明确,不能真正反映土体特性。因此,反算分析并不能代替土工试验。

#### 四、实验土力学

在土力学发展的早期,土的室内试验和现场观测主要停留在定性描述的感性认识阶段。最早的定量测试是测定土的压缩曲线和抗剪强度,以便为计算地基沉降和土坡稳定或土压力提供指标。

随着土力学从定性研究向定量研究发展,特别是60年代电子计算技术的兴起和数值计算技术的发展,人们对工程设计和土工计算中所需的土工参数,提出了越来越高的要求,这就大大促进了实验土力学的发展。

许多年来,土的强度测定始终受到普遍重视。例如盒式直剪仪早在19世纪就在法国出现,而目前的流行形式则还是本世纪30年代制定的一种设计。在40年代,特别是在有效应力普及以后,人们在室内测定土的强度主要采用较新的三轴试验技术。到了60年代,又有人对此试验方法提出疑问,尤其是将其结果应用于安全系数较低而又包含有侧向位移的破坏情况,以及主应力轴发生较大偏转的情况。由于许多大型的离岸建筑物都属于这种类型,因而直接施加剪切荷重的直剪试验重新引起各国兴趣是毫不奇怪的。当时盒式直剪试验已受到严厉批判,单剪试验看来能避免盒式直剪试验的某些缺点,而又保留着简单易行的特点,因而颇受人们欢迎。同时,为了弥补三轴试验的不足,不少人建议采用三轴压缩、三轴伸长和单剪试验的组合,以分析许多实际工程。因此,从60年代中期开始,单剪试验也曾风行一时。尽管不久在国际上兴起一股反对单剪试验的旋风,然而,赞成单剪试验的还是大有人在,直到1987年英国土工杂志《Geotechnique》还为它发表一期专刊,讨论它在工程中的实际应用。

60年代以后,有限元法在土力学计算中获得相当广泛的应用。因此,上述各种测定强度的试验仪器也被用来测定土的应力应变特性。当然,在上述各种仪器中,土样的应力应变状态不均匀也引起许多人不满意。到了70—80年代,人们又开始重视中主应力、应力途径和主应力偏转等对土的强度和应力应变性质的影响,因而研究开发出各种能够考虑这些因素的试验新技术,如平面应变仪、真三轴仪、任意应力途径三轴仪、空心扭剪仪和方向剪力仪(directional shear test device)等。但是,这些设备都比较复杂,只适用于研究工作。

相对来说,压缩试验的变化较少,其容器基本上仍保持最初的一维压缩的环刀形式。为了减少环壁摩擦阻,曾采用过涂抹油脂或镶配低摩擦阻衬砌等方法。后来又研究出一些能在压缩过程中测定侧压力、孔隙压力和施加反压力的容器。70年代后期,压缩试验的加荷方法有了较大改进,即从分级加荷改为连续加荷,采用等加荷速率、等应变速率或等梯度加荷方法等,大大缩短了试验周期,提高了精度。

由于室内试验无法避免取土扰动影响,所以原位测试方法日益受到重视。除以前流行的一些常规方法有了很大改进(例如砂土中的标准贯入试验,可采用实际传递的能量进行分析,

软粘土中的十字板抗剪强度试验可采用电测而废除了校正孔,以及适用于各种土类的静力触探试验可采用多功能探头等)外,最近二三十年内又研究开发出自钻式旁压仪、测定原位侧压力的应力计等。各种类型的土压力计、土应变计、测斜仪、声波发射仪、分层沉降仪和土坡稳定警报器等原位监测设备也有了较大发展。

多年来,土工模型试验始终未能起到象水工模型或结构模型在水力学和结构力学中那样的作用。这主要是由于土体性质随其应力状态而变化,一般的土工模型却由于按比尺缩小而不能重现土体原位应力水平。因此,土工模型往往不能反映原型土体的实际性状,也无法将其结果外插或延伸而推测原型的性状。只有土工离心模型试验可以利用离心力来模拟原型应力水平和影响。这种试验虽然早在30年代就已提出,但是限于当时的测试工具简陋,无法测出定量的资料,只能作些定性的唯象观察,所起作用也不大。近年来,随着电子观测手段的突飞猛进,为这种试验带来了广阔的前景,不少国家已建立起大型土工离心机,用来检验重大工程的设计方案,或验证土工数学模型及其计算结果。甚至有人断言,象土与结构物共同作用这样的课题,只能采用土工离心模型进行研究,别无其他途径。而反对的意见则认为,离心模型中土粒的比尺效应可能有很大影响,这是需要进一步研究的问题。

## OUTLOOK ON RECENT DEVELOPMENT OF MODERN SOIL MECHANICS

Wei Rulong      Sheng Chongwen

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

### Abstract

The three main branches of the soil mechanics—theoretical, computational and experimental soil mechanics have been developed rapidly during the last decade. The theoretical soil mechanics is devoted to study the macro- and micro-mechanism of various phenomena occurred in the soil mass and the major factors having influence on them, and to abstract these physical phenomena into mathematical equations which can be solved under different initial and boundary conditions in order to carry out theoretical prediction. Owing to the extreme complexity of the soil properties and the boundary conditions in the engineering problems, it is very difficult in many circumstances to attain the exact or closed solution, and hence the capability of the theoretical soil mechanics to analyze quantitatively the practical problem is limited in some extent. However, it is fortunate that many powerful numerical methods have been provided for the geotechnical problems recently by the computational soil mechanics. The experimental soil mechanics is specialized to investigate all kinds of laboratory or in-situ tests to determine the relevant soil parameters for the theoretical prediction and numerical calculation, as well as the model tests including centrifuge model tests to check and verify the prediction and calculation.