

土力学学科发展的现状与展望

殷宗泽

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 分析了土力学学科发展的现状,讨论了今后发展的趋势,对于主要几个研究领域中比较成熟的部分和比较活跃的部分进行了分析,提出了如何发展土力学学科的看法.

关键词 土力学;土体的变形与稳定;非饱和土;环境土工;地基加固

中图号 TU43

1925 年太沙基出版了世界上第一本土力学专著,从而开创了一门新的学科.70 多年来,这门学科蓬勃发展,形成了完整的理论体系,并在工程实践中发挥了重大作用.

现代的建筑工程愈来愈多样化、复杂化、大型化.房屋从一般楼房发展到多层、高层、超高层;交通设施由普通公路、铁路发展为高速公路、高速铁路;土石坝的高度已由几十米发展到百米级、二百米级,乃至三百米级;桥梁、码头、机场也愈来愈大,此外还有大型的地下工程.这些都对土力学学科提出了更高的要求,从而大大刺激了学科的迅速发展.

土力学所要回答的两大基本问题仍然是土体的变形和稳定.不过,复杂的工程问题所要回答的不再是一维竖向变形,以及沿给定面上的抗剪强度,而是要考虑各种因素对变形和稳定的影响,譬如荷载的多维性、荷载随时间的变化、重复荷载、振动荷载,地层条件和边界形状的复杂性,土体类型和结构的复杂性,饱和程度的变化,物理状态的变化,渗流和孔隙压力的存在,土与结构的相互作用,时间、温度等因素的作用等等.这引出了土力学学科许多领域,如土体本构理论、强度理论、固结理论、流变理论、非饱和土力学理论、土压力理论、边坡稳定和地基承载力理论、土动力学、环境土力学、地基加固的方法与理论等.

土力学的这些领域在 21 世纪都要发展,都会发展,而且各领域是互相联系、互相影响的,不可偏废.但也要承认,发展是不平衡的,有些领域会相对地比较稳定,有些则可能会有突破性发展.分清哪些领域有较大发展余地,即所谓发展前沿领域,哪些相对稳定,对于我们确定今后的研究工作重点是很必要的.

所谓前沿领域,须具备两个条件:(a)有重要的学术意义和工程实用价值,在该领域的突破能推动学科的发展,并在工程中发挥重大效益;(b)当前在理论上还不够成熟,有突破的可能性.有些理论已经相当成熟了,就很难有新的突破,如数学中的微积分,力学中的理论力学等.同样,土力学中也存在相对较成熟的领域,只是由于土的复杂性以及土力学还比较年轻,至今还没有哪一个学科领域成熟到能与微积分学相比的地步.正是由于年轻,土力学中的许多学科领域还不成熟,还有较大发展余地.研究工作的重点自然应该放在那些相对地不太成熟的领域和课题上.因此,分清哪些相对成熟,哪些有较大发展余地很有必要.本文拟对此作粗浅的讨论.文中没有覆盖土力学学科的全部领域,笔者了解较少不敢妄加评论的内容没有列入.

1 土工测试

土体力学规律不是凭空想出来的,它依据试验,包括室内和现场试验,又可分为样品试验和模型试验.样品试验,无论试样大小,都只能代表土体中的一个点.一个点在各种状态下的性能由试验给出,再用数学方法给出土体中各点所处的状态(受力、变形、渗流),则总体规律可得.模型试验是一个缩小了的总体,仍然要通过某种方法推广到原型总体.而现场观测是对实在总体作直接研究,也是一种 1:1 的模型试验.各种试验方法

有各自的特色和相互无法代替的用处,这就决定了它们需要全面发展。

当前,土工测试的上述各方面都有了很大发展。土体的物理力学性质、微观结构等的试验仪器和方法逐步成熟。尤其三轴仪,除了普通三轴仪外,还发展了应力路径三轴仪、 K_0 固结三轴仪、非饱和土三轴仪、真三轴仪、高压三轴仪、大型三轴仪、动三轴仪、共振柱三轴仪等,成为土体力学特性试验的主要设备。模型试验已发展了静力模型、动力模型、渗透力模型、离心模型等。现场试验和现场观测设备和方法已经多样化。但是,当前的测试技术只适应当前的学科水平。在新世纪土力学学科要发展,还必须发展实验技术。

土力学是一门实验性很强的学科,离开了实验和测试就无法发展。另一方面,土工试验如果离开了理论的指导,也就失去了意义。二者是相辅相成的。有些试验设备和试验方法是在理论指导下提出的,例如三轴仪剪切试验,就依据了库仑-摩尔强度理论,没有这种理论是想不出三轴仪的;有些理论又是在现有试验设备和方法的基础上产生的,如邓肯双曲线模型就是利用了现有的三轴仪所作的应力应变关系曲线。土工测试技术的发展须与土力学理论的发展紧密配合,要特别重视新仪器、新方法的研究。新理论的产生,起初只是一些设想,要证明设想符合实际必须通过试验。于是,研制新仪器,提出新的试验方法,用试验证实了设想,则设想就上升为理论,或者通过试验发现了新的规律,就总结出了理论。我们无法预知下一世纪会出现哪些新仪器、新方法,但可以肯定土工测试领域必定有新的重大发展,因为土力学理论的发展是与其同步的。

2 固结理论

可以说饱和土的固结理论已经成熟。

太沙基把土体的压密与渗透结合起来,推导了一维的固结微分方程。它恰当地反映了土体固结的机理。在一维条件下,它是精确的^[1]。依据该微分方程,已经给出了各种实用情况下的解析解,包括边界的透水与不透水、荷载随时间线性增加、双层土地基、土层厚度随时间变化等^[2],还可以反映简单的非线性固结问题。对于较复杂的边界条件、加荷条件,可用有限元或差分法求解。

二维和三维固结问题,比奥固结理论是严格的。它不仅能解出孔压分布,而且也给出位移场。用有限元法求解,可以考虑任何复杂的边界条件、荷载条件、土层情况,还可反映土体应力应变非线性、弹塑性和骨架的流变^[3]。

应该说,饱和土的现有固结理论是比较完善的。无论在机理上,还是在各种类型实际应用的应用上,都已经不存在障碍,落后于实际的只是参数确定。不少工程的固结计算结果与实际量测结果有相当的差别,就在于参数确定不那么符合实践。这方面的改进,还值得研究。

至于非饱和土固结,虽然已经有不少成果,但是还不成熟。有些在建立方程时考虑的因素较全面^[4,5],但解题复杂,难以实用;有些作了简化^[6,7],但又不全面。目前还没有形成公认的非饱和土固结理论,而且初始条件和边界条件的确定也是个棘手的问题。非饱和土固结理论及其实际应用还有一个较长的研究过程。

3 土坡与地基稳定性

自从弗伦纽斯提出圆弧滑动法以来,已经出现了数十种土坡稳定分析的方法,包括极限平衡的方法、极限分析方法、有限元法等。其中摩根斯坦的方法、陈祖煜修正的方法以及杨布方法,都较完善地处理了力的平衡关系,且可考虑任意形状滑面。孙君实从极限分析和模糊极值理论建立了稳定分析方法,其计算结果与摩根斯坦的也很接近^[1]。不少研究表明,满足总体平衡几个条件的方法,不管作了什么样的补充假定,其计算结果都比较接近,误差不超过5%,即使简化毕肖普法误差也不大^[8,9]。可以说,计算土坡稳定安全系数的方法已经达到了相当高的精度,而且其上限、下限也已然估计出来,再作什么改进也不会有质的飞跃了。

地基稳定分析从极限平衡出发建立的公式已不下十余个,包括朗肯、普朗特、太沙基、迈耶霍夫、汉森、魏锡克、别列赞采夫、索科洛夫斯基等^[1,10]。所考虑的因素逐步全面,方法已趋成熟,不过不像土坡稳定分析那么有把握。

关于土坡和地基稳定的问题从可靠度方面来研究还没有达到实用化的程度,还不够成熟^[11]。考虑复杂因素的计算也有待改进。譬如,膨胀土边坡和地基的稳定性;有加强体(如土工织物)存在时的稳定性;滑动面为空间曲面的情况;有动力荷载下的情况;滑动从软弱区开始逐步扩展的情况以及考虑蠕变的稳定性等等。

在稳定分析中一个极其普遍而实际的问题是强度指标的选用。不管快剪还是固结快剪指标,拿到什么用什么显然是不合适的。指标对安全系数的影响实际上比计算方法的影响更大,是值得重视的。

4 土体的强度和本构关系

土体的强度和本构关系是土体的基本力学性质,两者又是紧密相联系的,讲应力应变关系不能不涉及强度,有人从广义的角度来谈本构关系,也包含强度,因此,这里将两者放在一起讨论。

关于土体的变形,起初人们只注意到竖向变形,即沉降。大学教材中至今也只讲沉降。对于建筑物较小、地基条件不复杂的情况,确实只要考虑竖向变形就行了。然而,随着建筑的多样化、大型化、复杂化,不考虑侧向变形就难以正确设计建筑物。以土坝为例,过去坝较低,二三十米,以均质坝为主,只要边坡稳定就行。估计一下沉降量仅仅为了知道要补充多少填土的方量。现在是百米乃至二百米高土石坝,不再是均质的,常设有混凝土防渗墙,坝产生多大水平位移,防渗墙能否适应这样的水平位移,就成了设计中的关键问题。因此,必须要考虑二维乃至三维的变形,这就要求发展土体的本构模型理论。

30 多年来,已经出现了上百个模型,弹性非线性的、弹塑性的,其中应用较广的有双曲线模型^[12]、修正剑桥模型^[13]、我国学者提出的椭圆-抛物双屈服面模型^[14]、南水模型^[15]、清华模型^[23]等也都有相当的应用。动力本构模型中边界面模型受到了较多关注。之所以出现这样多的模型,一是反映了问题的复杂性、困难性,现有的模型总存在这样那样的问题,人们不满意,才想出各种各样的方法去改进,提出新模型;二是说明了问题的重要性,引得众多学者不遗余力地去研究。在出现上百个模型后,近年来本构关系的研究似乎稍冷,但新的研究热在下一世纪还会出现,因为还没有找到大家普遍接受的既实用又较完善的模型,而且土体变形规律也还没有完全揭示出来。

土体的强度决定于应力状态。库仑建立了给定面上抗剪强度与法向应力间的关系,后来引入摩尔圆理论,可以考虑大小主应力对强度的影响。为了反映中主应力的影响,又推广到应力空间内的破坏面,提出广义米塞斯准则、拉德准则、松岗元准则等^[1]。

影响强度的另一重要因素是孔隙水压力,提出了有效应力法、总应力法就是考虑到这一因素。此外,强度还受到土结构性、超固结比、孔隙比、含水量、荷载性质、荷载历史、加荷速率等多种因素影响。对此,本世纪已有了广泛的研究,但并未完全弄清。稳定分析和土压力计算有时误差较大,实际上还是因为强度的确定不准确。

无论强度还是变形,对于软粘土来说,都随时间而变,这就是流变。流变理论应用于土力学,揭示了地基变形长期不能稳定、土坡在长期使用后滑动的原因,给出了强度和变形规律的定量描述。土体的流变问题仍有待深入研究^[16]。

土体强度和变形的宏观规律是与其微观结构直接相关的,通过微观的试验研究,可以更清楚地认识宏观规律的机理,从而可以更准确地把握宏观规律。这一方面的研究国内外均有进展,但受仪器设备的限制,尚不普遍。微观与宏观的有机结合有可能使土体力学特性的研究走上新的台阶。

动荷载作用下的变形、强度以及液化的规律,比静荷载作用下的更复杂,更难把握,因而也就更不成熟,更有发展余地。有限元法解动力问题以及动力试验的发展使土动力学的研究开创了新局面,也为其深化提出了新的课题。

土体强度和变形的研究可以说贯穿于土力学的全部发展史。这个领域进入了成熟阶段,才可以说土力学进入成熟阶段。到目前为止,它依然是学科前沿的重要领域。

5 土工数值计算及数学分析方法

土体中的问题是复杂的,成层、各向异性、非线性、复杂边界条件、复杂加荷条件、涉及土与水的共同作用、涉及土与结构的共同作用,求解析解要作很多简化假定,实际上是不精确的。随着电算技术的发展,用数值方法解复杂问题成为可能,就使土工数值计算成为一个新的领域迅速发展。数值解也有若干方法,其中有限元法最为优越。自 1966 年首次用于土坝非线性应力变形分析以来,已迅速应用于土力学的各领域,包括桩基础、复合地基、挡土结构、地下工程、固结问题、流变问题、动力问题、膨胀土的变形、黄土的湿陷等。土力学中的计算问题差不多都可以用它。它也确实能解决许多用传统计算方法无法解决的问题^[17]。

土工数值分析,是把数值方法应用于土力学,解决土工中所遇到的一些特殊问题。现在有些问题已经得到了解决,如土体的非线性、变形与渗流的耦合、土坝施工逐级加荷、深基坑开挖、土与结构的共同作用等;有些问题虽然作了近似的数值模拟,但还不令人满意,如土体浸水变形、接触面的变形、桩基础、加筋土、隧道的

盾构施工等,用非线性有限元法解决土工问题还有许多工作要做。

除了数值分析而外,还有许多数学方法近年来被用于土工分析,其中有重大影响的是概率论和数理统计方法,从而形成了土工可靠度分析的新领域。土工结构设计中存在大量的不确定性因素,长期使用安全系数笼统地处理众多不确定性,而许可安全因数的取值又主要凭经验,有一定盲目性。60年代末,概率统计方法开始引入土工设计,开辟了一种处理土工不确定性的新方法,这种方法正逐步被工程界接受,并部分地被引入规范,但这一领域还不成熟,还有很大发展余地。

此外,在土工中得到应用的数学方法还有模糊数学、优选法、分形几何、反分析、神经网络、灰色系统等,其中有些涉及面稍大,有些涉及面较小。数学方法为解决复杂的土工问题提供了工具,还将得到进一步的深化。

6 非饱和土力学理论

传统土力学理论是解决饱和土问题的,试验方法针对饱和土,所得出的规律也主要适用于饱和土。工程中遇到的大量非饱和土问题是近似地用饱和土的方法处理的,但有些土在饱和前后力学性质有很大变化,如膨胀土浸水后体积膨胀,黄土浸水后体积收缩,它们的强度在浸水后都降低,用饱和土的方法难以反映由非饱和到饱和所引起的力学性质的变化。于是非饱和理论提出来了,引入吸力解释了许多现象,揭示了一些规律。以 Fredlund^[18]理论为代表,形成了较完整的非饱和土理论体系。我国学者在非饱和土理论方面也做了大量的研究,取得显著成就,但非饱和土理论毕竟较年轻,许多规律有待进一步揭示,成为新的研究热点是无疑的。

7 环境土力学

随着现代化工业的发展以及城市的发展,环境问题愈来愈突出,已经形成了专门的环境工程学科。相应地,土力学中也出现了研究环境问题的学科分支,即环境土力学。环境土力学研究与环境有关的土力学问题,如城市垃圾的填埋处置、土体的石油污染、核废料的处置、沙漠化作用、海岸的浸蚀等。它涉及的不仅是土力学知识,还与化学、物理、生物学等学科有关,是一个边缘性的交叉学科。美国对这一领域的研究起步较早,在城市规划与实施中均已考虑环境问题,连著名的 ASCE 刊物岩土力学分册也已改名为岩土工程与环境土工分册。中国现已开始关注环境工程,但环境土工还没有形成热点,发表的有关论文甚少,这与我国当前的经济发展水平有关。随着现代化程度的提高,这个问题必将突出起来,并在下一世纪成为土力学研究热点之一。

8 地基加固技术和理论

软弱地基处理技术近年来有了很大发展,提出了许多新方法,包括换土法、预压法、强夯法、各种形式的复合地基、桩基础以及土工合成材料和轻质填料的应用等,此外还有托换技术、锚固技术、纠偏技术等。各种加固技术的提出是依据土力学的基本原理,但加固方法实施后又要求土力学更深入地去研究它、解释它、设计它,因而促进了地基加固中的土力学理论的发展。这就是工程实用土力学,其中有些理论相对较成熟,如排水固结预压的理论、桩基础设计理论、复合地基设计理论;有些虽可用近似的方法设计,但还不太成熟,如加筋土、土钉、支护结构的受力和变形等方面的理论。所谓相对较成熟,是指有了较多研究,有整套设计方法,其实也未必十分完善。譬如桩基中的稀桩的设计、摩擦桩中的负摩擦、桩长的合理选择、复合地基中的临界桩长、超固结土中桩的摩擦力、水平荷载下的桩基设计等,都还有待改进^[19-20]。

地基加固的研究包含两个方面:(a)创造新的加固方法。这与机械、电子、材料、化工等学科是紧密相联的。随着这些学科的发展和生产水平的提高,将会出现新的方法。利用这些学科的新成就是创造新加固方法和新工艺的重要一环。(b)提出相关的设计方法和设计理论。这要在现有土力学理论基础上,创造合乎新加固方法机理的计算分析理论,从而使土力学理论也得到发展。

9 结 论

土力学作为独立的学科,已有 70 年的历史。70 年对一门学科的发展来说,犹如早晨八九点钟的太阳,正处在蓬勃发展的阶段。土体十分复杂,这给土力学学科的发展增加了难度,也提供了宽阔的余地。土力学学科中已有些成熟的理论,但更多的是不完善、不成熟,大部分领域都有值得深入研究的课题。随着科学技术的飞速发展,预期在新的世纪土力学学科也必将出现多方面的重大突破。

参 考 文 献

1 钱家欢 殷宗泽. 土工原理与计算. 第 2 版. 北京: 中国水利电力出版社, 1996. 216 ~ 218

2 黄文熙. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 1983. 148 ~ 161

3 殷宗泽. 土体的沉降与固结. 北京: 中国电力出版社, 1998. 39 ~ 42

4 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理理论——数学模型、试验研究、边值问题 [学位论文]. 西安: 陕西机械学院, 1991

5 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

6 Chang C S, Duncan J M. Consolidation analysis of partly saturated clay using elastic-plastic effective strain model. Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993(7) 39 ~ 55

7 Yin Z Z, Sun C L, Miao L C. Consolidation of unsaturated expansive soils. 2nd Int Conf on Unsaturated Soils, Beijing: International Academic Press, 1998. 533 ~ 537

8 Yu H S, Salgado R, Sloan S W, Kim J M. Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability. ASCE J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 1998, 124(1) : 1 ~ 11

9 Duncan J M, Wright S G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. Engrg Geology, 1980, 16 5 ~ 17

10 钱家欢. 土力学. 南京: 河海大学出版社, 1996. 201 ~ 220

11 Low B K, Gilbert R B, Wright S G. Slope reliability analysis using generalized method of slices. ASCE J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 1998, 124(4) 350 ~ 362

12 Duncan J M, Chang C Y. Non-linear analysis of stress and strain in soils. ASCE SMFD, 1970 9(5) : 1629 ~ 1653

13 Roscoe K H, Burland J B. On the generalized stress-strain behavior of wet clay. In: Heyman, Lechie. Engineering Plasticity Cambridge: Cambridge Univ Press, 1968. 536 ~ 609

14 殷宗泽. 一个土体的双屈服面应力-应变模型. 岩土工程学报, 1988. 10(4) 64 ~ 71

15 沈珠江. 土体应力应变分析的一种新模型. 见: 第五届全国土力学及基础工程学术讨论会文集. 北京: 中国建筑工程出版社, 1987 : 101 ~ 105

16 Lin H D, Wang C C. Stress-strain-time function of clay. ASCE J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 1998, 124(4) 289 ~ 296

17 钱家欢 殷宗泽. 土工数值分析. 北京: 中国铁道出版社, 1991. 185 ~ 250

18 Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley and Sons Inc, 1993. 1 ~ 477

19 Miller G A, Lutenegeger A J. Influence of pile plugging on skin friction in overconsolidated clay. ASCE J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 1987, 123(6) 525 ~ 533

20 Rollins K M. Lateral load behavior of full-scale pile group in clay. ASCE J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 1998, 124(6) : 468 ~ 478

Status and Prospects of Soil Mechanics Development

Yin Zongze

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Abstract The development status of soil mechanics is analysed , and development tendency is discussed , some well-developed and the well-concerned areas are studied. Suggestions concerning the further development of soil mechanics are put forward.

Key words soil mechanics ; deformation and stability of soil body ; unsaturated soil ; geoenvironmental engineering ; foundation treatment