

21 世纪土力学的思考*

谢定义

(西安理工大学水利水电学院, 710048)

1. 在 20 世纪 20 年代, 以太沙基《土力学》专著的问世为标志, 产生了土力学这门新的学科。它以正确反映和预测土的力学性质和行为, 确保各类工程的土体在各种复杂环境下的变形和强度稳定性为主要任务。几十年来, 土力学得到了突飞猛进的发展, 在城乡建设、铁路公路、水利电力、港口、机场、采矿等各类工程建设中起到了重要的作用。到目前为止, 如果仅从技术上来讲, 土力学已经有能力应付一切复杂的建筑环境, 土力学自由王国的领域得到了空前的开拓, 从了解土和利用土走向主动地对土进行改造, 从被动的土体稳定性可估走向主动的可控。但是, 作为一门科学, 土力学毕竟还很年轻, 而它所工作的对象却是那么复杂而多变。它不仅涉及到弹性力学、塑性力学、流变学、地质学、矿物学、化学、数学等多种学科, 而且视其环境条件, 还会与水文地质学、地震工程学、流体动力学等许多学科发生密切的关系。同时, 还受到各种工程材料、施工技术等诸多因素的重要影响。因此, 从根本上来讲, 土力学仍然面临着人类未曾有过的新挑战, 工程规模、工程条件的新变化, 给土力学提出了一系列亟待解决或需要合理解决的新课题。土力学必须在处理问题条件上进一步提高它的实际性, 以面对因素多, 环境差, 条件苛, 要求高的实际, 作出准确可靠的决策; 土力学必须在理论体系上进一步提高它的完整性, 以建立一套能够描述土的力学性质与行为的力学模型, 反映和区别对待不同因素之间的相互作用和内在联系; 土力学必须在测试计算上进一步提高它的精确性, 以揭示和利用更加真实的土力学规律。最终, 土力学必须使土工建筑和地基工程进一步提高在其使用上的耐久性(已不只是稳定性了), 以消减大量人力、财力、物力和时间上无味浪费。而且, 土力学的发展, 要求它能用愈来愈简单的方法, 愈来愈短暂的时间来解决愈来愈复杂的岩土工程问题。这就不能不在它与计算机科学的结合上花更大的气力。

2. 对于纪元, 由 20 世纪到 21 世纪似乎是跳跃式的, 一夜之间就可以跨入一个新世纪。但是, 对于学科的发展, 它必须是循序渐进的。土力学在新世纪中将要绽露出的基本特色不能离开 20 世纪土力学发展的良好基础。21 世纪的土力学将在 20 世纪土力学发展中所形成的一系列具有生命力的生长点上。为了发现这种具有强大生命力的生长点, 回顾一下 20 世纪土力学发展中的重大事件是非常必要的。

(1) 在 20 世纪里, 土力学在有效应力原理、渗透固结理论、极限平衡理论的基础上形成与逐渐完善, 建立了理论土力学的雏形, 饱和土的研究得到了长足的进展, 以它为基础和借鉴, 提出了一系列实用土力学的方法, 在工程建设中发挥了重要的作用。但直到 60 年代初, 它的进步仍然十分缓慢, 手段仍然十分落后。60 年代中期以来, 土力学的理论从数学力学的发展和它们向土力学领域的渗透中得到了新的活力。计算机和量测技术的发展, 将土力学这门以实验和经验为基础、以复杂材料为对象的学科推向了一个崭新的发展阶段。

(2) 本构关系的研究结束了长期以来以线弹性多孔介质模型研究变形问题、以刚塑性模型研究强度问题、从而结束了本来一个由应力、应变、强度到稳定连续发展的过程被人为割裂开来的局面。这是土力学发展中一次带有根本性质的革命。它与计算机数值方法在解决一系列实际问题上的有力结合, 极大地调动了广大学者进行研究的积极性, 使弹性力学、弹塑性力学、弹粘塑性力学、连续介质力学、松散介质力学、损伤力学等的新理论和新方法在揭示土性规律、深化土力学问题研究中发挥了巨大作用, 为土力学的发展带来了新的繁荣。

(3) 在 20 世纪中, 非饱和土力学研究的复苏是土力学发展中又一次带有根本性质和长远影响的事件。量

* 到稿日期: 1997-03-10.

测技术和计算技术的发展,不再使研究者们对非饱和土力学望而生畏。非饱和土大量存在及其对工程建筑巨大影响的事实,和土动力学的迅速发展一起是土力学开始走向成熟的一个重要标志。

(4) 当前,土力学所研究的材料,不仅涉及到粘性土和无粘性土(粗粒的与细粒的)等各种土类,涉及到黄土、红土、膨胀土、冻土、分散土等各种具有特殊性质的区域性土,而且已经超越了一般地质土的范围,伸向尾矿料、粉煤灰、海洋土、加筋土、污染土、星际土、改性土以及土工合成材料,使土力学的作用延伸到更大的材料空间,也是土力学在 20 世纪划时代的成就。由地质土材料,到类土材料再到复合土材料,不只是范围上的扩大,而是带有本质性的转变。如果说人工合成材料的应用是岩土工程中的一次革命的话,那么土力学对复合材料的研究将成为这场革命的坚强卫士。不彻底揭示人工合成材料在土体中工作的机理和变形强度特性,这场革命就将会有夭折的危险。

(5) 20 世纪土力学研究中另一个带有根本性的事件就是土质结构的微观细观研究与宏观力学特性的结合(土质学与土力学在更深更细层次上的结合)。它使人们不再把土作为一个简单的宏观体,而是把它作为一个具有复杂力学、化学特性的结构体。微细观结构的特性与细粒土的双电层理论和收缩膜理论的结合,解释了一系列关于土质结构特性发生和发展的机理。土结构在荷载作用下的变化,为力学特性的定向、滑动、破损、压密等的研究和分析提供了有力的根据。目前,表征土结构性的定量指标的研究正引起许多研究者的重视。它的出现将会和粒度、密度、湿度指标一起为完整描述土的物理本质,为将结构性变化与土力学特性相联系,找到合理的途径。

(6) 还应该看到,20 世纪 70 年代以来兴起的土力学非确定性研究,将概率统计方法和可靠度理论引入土性指标和土体稳定性的分析,是一个合乎情理、符合土力学复杂研究对象和土力学课题特点的新发展。它使土力学对于土体稳定性的评价更加接近事物的本来面目,防止了一些实际工作者对问题过分简单的肯定与否定。虽然,从非确定性的角度解决土力学问题的理论和方法还不很成熟,还缺乏丰富的经验,但毫无疑问,它的基本方向是有发展活力的。

(7) 20 世纪土力学发展的又一个功绩是通过大量工程实践和理论分析,对几十年来出现的多种理论和多种方法进行了多方面的检验,从为数众多的理论和方法中经过筛选、淘汰、补充、修正,使一些从不同侧面所揭示的正确规律相融合,端正了研究的思路方向,为一些正确有效的理论和方法建立了它们在土力学发展史上应有的地位,是土力学发展上一个历史抉择性的重大成就。

(8) 应该特别指出的是作为土力学发展基础的原状样取土技术,土工室内测试技术,原位测试技术,模型试验技术,土工离心模型试验技术以及原型观测技术等,形成了土力学发展中强有力的支柱。目前已提出了在高围压、粗粒径、大深度、大范围、长时间以及复杂应力与静动荷载条件下进行室内外土工试验颇为有效的设备和方法。而且,在测试数据与土质特性之间建立了大量的经验关系。这是土力学的非常宝贵的财富。此外,已经较广泛地应用于获取真实土性参数的反分析方法,在某种意义上,也是一种对土性参数更有生命力的测试。数值方法作为一种有力的手段,可以在不同条件的组合下,通过利用部分试验成果的仿真分析,获得更符合实际的本构关系、破坏准则与力学参数,并且,在这个基础上,还可以得到更复杂情况下的土性行为,使土工试验技术开始摆脱了人力、物力、财力和时间上的巨大投入,孕育着土工试验技术划时代的大转变。

(9) 最后,在土力学研究中已经把相互作用的研究提到了重要地位,它是系统论思想的体现。这种相互作用研究包括了四个方面。一是土中各组成相之间的相互作用,考虑了固、液两相介质中应力与渗流的耦合,孔隙水压力增长与消散的耦合,固、液、气三相介质中骨架应力、孔隙气压力和孔隙水压力的耦合,有的还考虑到固相与油、水两种液体作用的耦合;二是土体与其中复合体的相互作用,如土与深层搅拌桩、高压旋喷桩、挤密碎石(砂)桩,以及灰土、二灰土或其他材料所形成的桩或垫层之间的相互作用,除了考虑其物理力学作用外,还考虑到化学作用;三是土体与其中或相邻结构体的相互作用,如土与刚性桩、深基坑支撑、土层锚杆、板桩、喷锚支护、抗滑桩、护坡桩等之间的相互作用,是非常实用而具有理论意义的课题;四是地基与上部结构之间的相互作用,通过地基与基础之间应力和变形的协调关系,将地基、基础和上部结构视为一个统一的系统来分析。此外,静动应力变化之间的相互作用问题,土体刚度衰化与应力重分布之间的相互作用问题,也具有理论与实际意义,并逐渐得到了研究者注视。显然,将这些问题的研究放在土力学研究的重要地位是完全正确的。

3. 从上面的简单回顾,可以看出土力学学科在21世纪的发展基础,看出21世纪土力学大厦主要支柱的生长点。这些生长点可以概括为理论土力学、实验土力学与应用土力学三个方面。而无论在那一个方面都需要现代计算机技术的支持。如果我们看到20世纪计算机技术迅猛发展的势头及其在各行各业中已经发挥的巨大作用,我们就有充足的理由,以不管怎样都不会过分的程度预见到计算机技术在土力学学科领域各个方面的无比威力。21世纪将是计算机大显身手的世纪,它将成为一切大戏的主角。理论土力学中客观规律探索研究时复杂数学物理方程的求解和各种影响因素的对比分析离不开它,实验土力学中的测试控制、数据采集与处理离不开它,应用土力学中工程施工的反馈控制、规划设计中的人工智能技术等方面更是离不开它。因此,计算土力学应该理所当然地成为21世纪土力学学科又一根重要的支柱,而且成为土力学在理论、实验和应用诸方面有效活动的筋脉。21世纪土力学的一切运动一旦离开了与计算机技术的结合,将会失去自己的活力。也许,这样地强调计算土力学的作用,也只会有所低贬而绝对不会过分夸张!21世纪土力学的四大支柱,即理论土力学、实验土力学、应用土力学和计算土力学,应该是相互联系,互相促进,互相补充的。失去任何一根支柱,土力学将会失态或失色,土力学的学科大厦将会失常甚至失稳。此外,从岩土力学的发展往往是先实验后理论,岩土工程的发展往往是先技术后理论这一特点出发,21世纪的土力学必须充分重视实验的揭示与经验的总结,使已有的理论螺旋式地上升,并且形成新的理论和它们之间的渗透与结合。下面不妨对21世纪的土力学作一个概略的描绘。

(1) 理论土力学是土力学学科发展的龙头。它将在继续从现代数学与现代力学汲取新的活力以外,以非确定性为基础的理论,如概率统计,随机过程,模糊数学等将在形成更加符合土及类土材料的非确定性力学理论方面起积极作用。理论土力学活动的主要对象将可能是非饱和土力学和土动力学,本构理论仍然是问题的核心。而且,随着建筑工程对耐久性要求的日益重视,土力学中对于因时间因素而出现的流变特性,必将比以往更加显示出深入研究的必要性。前者,即非饱和土力学,对土力学研究带有普遍性,具有较大的覆盖面。它是20世纪土力学理论成果在深度和广度上的发展。从认识论上是由特殊性到一般性的升华,是认识从各个侧面到全貌的变化。21世纪非饱和土力学理论必须建立在对非饱和土力学特性和土中水、气运动规律充分揭示的基础上。而20世纪由于受到测试技术和计算水平的限制,在这一方面的工作相当薄弱,远远不足以支撑对象非饱和土这样具有复杂力学特性的对象建立真正理论框架的工作。已经形成的、以推理分析为基础的强度理论和以简化假定为前提的固结理论都需要进一步受到检验和修正。为了解决非饱和土力学的特殊规律和力学模型,不能不把非饱和土的应力理论(包括有效应力理论)作为一项首当其冲的工作。后者,即土动力学,对土力学研究带有特殊性,但它却囊括了作为岩土工程建设中一个非常重要且经常与基本静力荷载相组合的荷载面。尤其是已经揭示出土在其动力特性方面的特殊规律性及其在实际上重大作用,正调动着人们对它作进一步发掘的积极性。20世纪的土动力学,对动力机器基础的动载起步较早,可以说已作了较广泛的研究,对地震的动载起步较晚,再加上它的随机性和复杂性,只作了探索性研究,很多研究还极不完善。无论从液化评判,动本构关系或动力反应和土体动力稳定性分析方面都将会发生翻天覆地的变化,现有的理论和方法将会经受较大的否定与改变。而且,它的研究将会从动强度的侧重面转向动变形,将土体动力稳定性的设防线移向永久变形控制。在这些研究中,过于简化的理论条件将逐步为实际存在的复杂条件所替代。不同土质条件,原状结构试样,不规则应力波形,复杂及高应力作用,静动应力耦合变化等将引起越来越多的注视。原位测试、原型观测与土工动力离心模型试验的成果将为土动力学的发展日益重要地提供新的营养。理论土力学从这两个方面的发展,需要有坚实的数学力学基础和对丰富的实践经验资料的精心分析和高度概括。21世纪相关学科的进一步发展同样将是理论土力学新进展的坚实基础。

(2) 实验土力学是土力学学科发展的基础。随着工程建设逐渐向高、大、深、重的发展,以往基于低压力的土工试验设备和技术将逐渐受到更大的限制。适应于高应力、粗粒径、大位移、多因素和复杂应力组合的设备和方法必将得到新的发展。原位测试需要而且有可能在土力学实验研究中分担愈来愈多的任务。对于以重力为主的细粒土土工建筑物,土工离心模型试验将成为验证计算方法和解决土工问题的一种强有力的手段。微观结构分析试验与宏观力学特性试验的结合,将在创立岩土结构性指标和结构性模型方面作出有力的贡献。数值分析和多因素多环节影响下的计算机仿真分析将大大扩展特定条件下土工试验与实地监测成果的

功用, 补足更复杂条件下土性参数测试上的困难和缺陷, 而成为一种土力学的特殊试验手段。如果将土在应力增长下应变的发展视为土材料受荷损伤的反映, 则现在研究材料损伤的各种方法, 如声波法、 γ 射线法、CT 识别法等都将在土工实验方面助一臂之力。21 世纪的实验土力学, 将不再仅仅是建立在采样、制样、模拟影响因素而进行的重复测试, 它具有与理论土力学密切配合的广阔天地。

(3) 应用土力学是土力学学科发展的动力。这种动力来自岩土工程建设的实际需要。没有应用前景的任何研究都是没有活力的。理论研究虽然因其认识的过程性往往不能直接地应用于生产建设, 但它却能够为土力学的应用提供思路、轮廓或方法上指示。应用的过程是检验理论和发展理论必要的步骤。所以, 尽快地将研究成果变成实际生产力是研究和工程的需要。21 世纪的应用土力学应该将人工智能放在重要的地位。有了人工智能就可以更好地解决专家生命的有限性和专家思维的延续性之间这一长期存在的矛盾。20 世纪中专家和广大岩土工作者积累的丰富经验和对它的进一步总结, 为建立专家系统的知识库提供了大量的资料, 而且将继续得到新的丰富。有了专家系统来模仿专家在科技领域内工作将给应用土力学带来无限的生机。人工智能已经由初级的模拟思维发展到思维与知识的结合, 又发展到用人工神经网络构造专家系统, 能够通过实例集的自学习和自组织, 发挥专家的作用。21 世纪的应用土力学应该充分注意人工智能这个领域的迅速发展, 以面对土质的地基工程、边坡工程、洞室工程、支护工程以及环境工程中各种实际课题。土体整治技术是应用土力学的又一个重要方面。这种整治包括增强性整治、托换性整治和环保性整治。它们以减灾、耐久、保护环境为目的。增强性整治可以包括增密(挤密、振密、夯密、压密)、置换(层状置换、柱状置换)、加筋(均匀加筋、局部加筋)、锚喷、胶固、挖填、排水、防渗等各种地基处理措施。对这些措施的加强机理、设计施工、质量控制、效果检验、经济效益以及经验总结都应该成为实用土力学长期工作的内容, 使它们的应用更加走向优化。托换性整治将是对 20 世纪一大批建筑物增层加高、改型换貌或事故处理, 以满足其连续服役要求的实际课题, 将在一个相当长的时期内越来越提醒人们的注意。环保性整治已经尖锐地提到土力学工作者的面前, 显示出十分迫切的要求。对因废渣、废液、尾矿、污水、粪便、化肥、生活及建筑垃圾等对土体和水体的浸入和污染而形成的污染土介质, 需对其物理力学特性、土介质中污染物的治理, 固体废物深埋处置工程中岩土介质、固体废物和地下水的相互作用, 多孔介质中渗流与污染物的运移规律以及工程应用与工程措施, 都是需要认真解决的新问题。由于大气降水、灌溉、地震、开挖等引起的边坡失稳问题, 由于煤矿、盐矿及油气开采, 地下水抽汲, 黄土浸湿, 疏松土湿化, 喀斯特发展以及振动等引起的各类地面下沉问题, 也是环保性整治中需要继续解决的课题。21 世纪的土力学应该为人类造就一个更加良好的生存环境。

应用土力学另一个重要问题是人工合成材料的应用。人工合成材料在排水、防渗、滤层、加筋等各个方面都已起到了良好的作用。但对它的设计理论和应用技术的研究还只刚刚起步, 还有大量的潜力等待发掘, 应用中丰富经验有待总结。这个问题的扩展将应是土体与其中各类复合体或结构体之间相互作用问题的研究, 包括力的传递机理, 合理布置方式以及材料与结构类型等。它的发展将给传统的土力学带来不可估量的冲击。以计算机监控测试相结合使土工问题的测试、设计与施工相互反馈, 全面优化的技术, 使土力学能够更加准确地、及时地和动态地解决一些相对复杂的工程问题的日子也不会多么遥远。它可能会以我们今天还难以预料的速度、深度和广度, 迫使 21 世纪的岩土工作者给予重视。此外, 在古文物保护中的许多土力学问题和岩石力学问题一起, 不能不显示出无以类比的重要性。

(4) 计算土力学是土力学学科发展的筋脉。它紧密联系和沟通着理论土力学、实验土力学和应用土力学, 并且给它们的交叉和渗透以新的精确度和效率。计算离不开建模, 建模离不开理论, 理论离不开实践。它们之间的关系是连环式的结合。如前所述, 计算土力学的发展可不断提供对复杂的土工问题进行数值计算或模拟试验的新途径, 它将从当前以洞察内涵为主的计算, 发展到以数值预估为主; 从当前以检验设计施工方案为主的计算, 发展到以优化和提供设计施工方案为主。这种发展上的转变必须是计算机技术、数值方法和土性规律正确而有机的结合。计算土力学应是它们的完满结合, 它带有 21 世纪的时代特征。应该指出, 由于土力学研究对象本身和所处环境条件的复杂性, 以及理论建立中各种假定的简化性, 任何计算都不可能囊括一切情况。因此, 土力学的计算应该建立针对不同类型问题的理论、方法和软件, 成为一个完整的系列, 而且计算结果还必须与专家的综合判断相结合。这才是土力学解决问题的正确途径。