

讨 论

关于土力学理论发展的一些看法

——兼与杨光华同志商榷*

李广信

(清华大学水利水电工程系, 北京)

【编者按】当今岩土工程学界,读者所看到的本构模型何止数十种!岩土本构关系的研究,我国专家已经和正在跻身世界行列。这一课题正在展现色彩斑斓的研究成果。青年岩土工作者为这些成果所感染,愿为这一研究而献身,这是十分可喜的。但是任何基本理论的研究不可能一蹴而就,尤其岩土本构模型的研究,没有大量的实践资料和坚实的理论基础,是断无成就的。本期将李广信、杨光华两同志的文章奉献给广大读者,希望从事本构关系的研究者,特别是青年研究者,能从中得到有益的启示。

一、前 言

关于土的本构关系理论系统的研究工作,在国外已有30多年的历史,在我国也有10多年了。在此期间人们提出数以百计的关于土的本构关系的数学模型,引进了各种理论。可以说,几乎力学中的一切手段和理论的新发展都先后被用于土的本构关系研究中。人们用各种手段来验证这些数学模型,与数值计算方法相结合,力图用它们解决一些实际工程问题。土的本构关系研究的这种蓬勃发展,向人们展示了土力学发展中的一个新的领域,也为丰富和发展力学学科作出了贡献。

但综观土的本构关系理论的发展与应用,可以发现,真正较普遍用于工程实际、为工程界所接受的数学模型还寥若晨星。Duncan 等人所提出和发展的双曲线模型是比较成功的一个。“成功的模型”比较少的原因,主要是本构模型的多功能要求和简便性要求之间的矛盾。由于土的力学性质的复杂性,为了尽可能多地反映土的性状,会使模型复杂化。尽管如此,还是不能完全成功地反映土的所有性状。比如没有一个模型能成功地描述各种应力路线下土的应力应变关系。所以,继70年代土的本构模型的全面展现之后,80年代的研究工作主要是趋于深入和实用。一方面,人们引用和创造一些新理论与方法来解决以前无法解决的特殊的土力学问题。例如用内时理论、边界面理论来解决存在着主应力方向旋转和循环的近海工程问题,用损伤理论来处理土的水力劈裂与应变软化等问题。另一方面,一些长期从事本构模型研究的学者们在解决实际工程问题的过程中,努力综合、简化、修正原有模型,使其为工

*杨光华同志文章“岩土类材料的多重势面弹塑性本构模型理论”载本期。

程师们所乐于接受。这也是一项十分重要的工作。

近年来,杨光华同志就土的弹塑性模型的课题写出了多篇论文。在当前基础理论研究工作受冷落的情况下,这是难能可贵的。论文表现出他的数学和力学的功底,也表明他的勤奋。但就其成果看,他的研究工作所走的道路是有问题的:由于试验和实际工程方面工作的不足,使其对土的性质的复杂性了解不够,只能徘徊在纯数学的小径中。作者自谓的“统一的模式”、“新的、更一般的数学本构理论体系”也只是在前人或别人的成果中兜圈子。因而其理论常会顾此失彼,也未能证实其在使用上的简捷性。这就向人们提出了一个问题:有志于从事岩土工程和岩土力学工作的青年学者们应当走一条什么样的研究道路,才能不浪费自己的才华和精力,从而在此学科中作出自己的贡献。笔者就土力学中理论发展的问题谈几点看法,以期就教于前辈、共勉于来者。

二、土的力学性质的复杂性

对于人类,土是最古老的材料之一。“水来土湮”,古代人类在与洪水的斗争中,土是他们最原始的武器。同时,在土层深厚的大河名川中下游两岸,也是人类发源、繁衍和生息的乐园,目前也还是政治、经济和文化发达的地区。在这些广袤深厚的土层上,人类耕耘营造、生生不息,取得了关于土的丰富的知识和经验。但土力学发展成为一门独立的学科却是1925年卡尔·太沙基(Karl·Terzaghi)发表了“土力学”一书以后的事。因而在庞大的力学家族中,土力学还是一个较年轻的成员。这种情况是与土本身的力学性质的复杂性有关的。

我们知道,理论力学将对象理想化为刚体;材料力学将对象理想化为线弹性的固体;连续介质力学将对象理想化为均匀连续介质。这种理想化的连续介质,对土体来说,仍嫌粗糙。土由不连续的固体颗粒、液体和气体三相组成。固体颗粒的矿物成分、粗细、形状、级配、密度及构造,土粒间孔隙中水与气体的比例及形态都对土的力学性质有很大的影响。

土与其他力学学科所研究的对象不同之处还在于它是地质历史的产物。它们历尽沧桑,经历过漫长的风化、搬运、沉积和地壳运动等过程,形成其独特的性质。原状土一般是不均匀的、各向异性的,有一定的胶结性或特定的结构性。因而重复性极少,严格地讲,世界上没有性质完全相同的两种原状土。同样,在室内试验研究中的重塑土也由于存制样、固结方式和程序等差别,很难达到完全一致。而在室内试验中研究原状土,取样扰动或代表性问题,就成了研究工作的严重障碍。

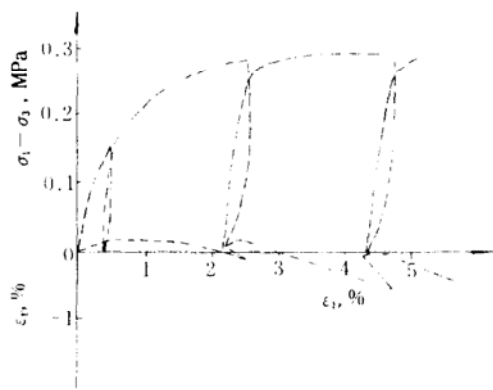


图1 常规三轴加载—卸载—再加载试验

因此,土的力学性质比其他材料复杂得多,而且影响因素也更多。比如土的应力应变关系是明显的非线性、弹塑性、具有剪胀(缩)性、应变硬化(或软化)、流变性等等,且与应力状态、应力历史和应力路线有关,一般呈各向异性,有明显的卸载-再加载回滞圈,存在着各种因素的耦和关系。因而,在目前已有的数以百计的本构模型中,尚无一个模型能反映上述的所有性质和影响因素。图1表明,在大量的不同土的常规三轴压缩试验中,试样在卸载过程中体积是收缩的^[1]。图2表示在 π 平面上应力

路线为圆周的真三轴试验中(八面体正应力 p 与八面体剪应力 q 均为常数),试样的体应变 ϵ_v 和八面体剪应变 ϵ 与应力路线长度 S_σ 间关系^[2,3]。现有本构关系模型都不能或很难反映以上两种

现象。

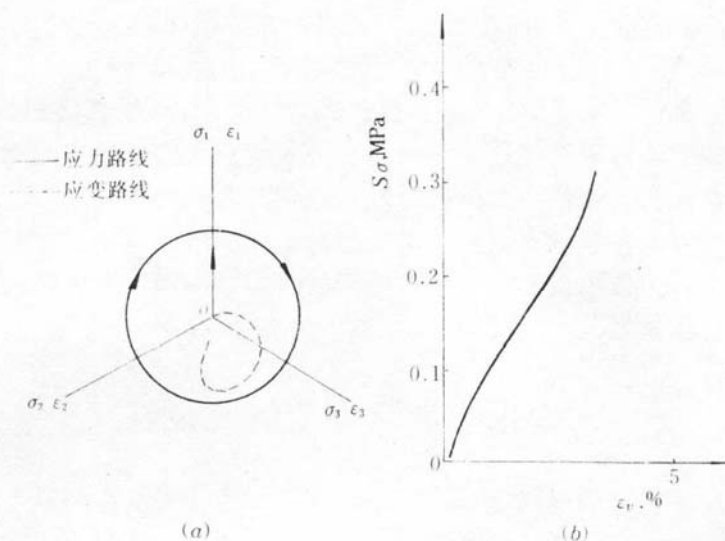


图2 π 平面上应力路线为圆的真三轴试验

三、实践在土力学中的地位

由于土的力学性质复杂多变,所以土力学的发展离不开实践。在建立和验证土的力学理论时离不开试验和现场观测。在实际工程问题时,也离不开长期实践经验。理论的正确性也只能在工程实践中得到检验。所以试验—理论—工程实践是土力学的主要工作方法。

试验在发展土力学理论中是非常重要的。首先,在建立理论和模型时,要通过试验了解在一定条件下土的主要特点和影响因素,确定各物理量间的函数关系及模型中参数值。其次,通过试验来验证理论的可靠性和适用条件,根据试验确定现场原状土的参数值大小。由于不同土性质的重复性很少及原状土取样扰动等原因,对参数的现场测试及反分析常常是必要的。在验证理论与模型时,各种模型试验也是十分必要的。

工程实践是土力学理论发展的源泉和最终检验标准。土力学中的理论发展依赖于工程实践,理论与实践密不可分。如土压力理论与挡土墙问题,土的变形与基础的沉降问题,土中渗流与闸坝防渗排水问题,在土力学教材中常常是形影不离的。近年来一些新的研究课题也可从工程实践中找到依据,如水力劈裂问题的研究始于某土坝的失事,内时理论和界面模型的发展与近海采油有关。另外,在工程实践中,通过现场观测与理论预测的比较,通过大量的现场施工,工程运用及失事的实例来判别理论的优劣、可靠性及使用条件。

因此,早期的土力学奠基者与当代的国内外土力学的大师们也都是经验丰富的工程师,他们活跃于工程第一线,涉足于几乎同时代的一切重大工程。他们善于正确地估价和熟练地运用各种试验手段和理论工具,所有这些与他们丰富的经验相结合,进行正确的综合判断,解决重大实际工程问题,从而也推动着土力学理论的发展。

四、土力学理论的发展

面对土这样一种极复杂的研究对象,理论的发展是艰难的。但经过学者们的不懈努力,土力学中的理论和数学方法,还是取得了很大的成就并不断前进。太沙基关于饱和土体的渗

流固结理论为土力学的诞生打下了基础,成为土力学中为数不多的较系统而严密的理论之一。目前,由于计算机技术和计算方法的发展,使土的本构关系数学模型的研究出现了空前繁荣的局面。也使张量分析、矩阵运算、变分原理、概率论与数理统计、模糊数学、灰色理论和突变理论等数学方法和弹性、塑性、内时、破损等一些力学理论都在土力学中得到应用,并表现出其独特的形式。

(一)土力学中的理想化和假设

从感性认识上升到理论需要科学抽象。在此过程中,摒弃对象的非本质特性,强化、纯化一些本质的特点。亦即将对象理想化。对于土这种复杂的对象,针对不同的问题、不同的条件,研究者常常采用不同的理想化,这就形成了各种不同的关于土的物理模型和数学模型。例如在土的本构关系数学模型的研究中,线弹性模型将土极度简化,将其理想化成符合广义虎克定律的连续的固体,这在简单应力路线下的单调加载和应力水平不高时还是可用的。理想塑性模型已经涉及到土的不连续性,将土体理想化为两块固体块间有一个不连续的滑裂面,它适于描述土的与强度有关的问题。应变硬化的弹塑性模型,实际上将土理想化为散粒状的弹性固体颗粒的集合,在外力作用下,固体颗粒本身的变形是弹性的,而颗粒间的相对滑动和本身的破碎产生不可恢复的塑性变形。由于它反映了土的不连续散粒体结构这一特点,所以能描述土的弹塑性、剪胀性、应变硬化和强度特性。

除了对土的理想化要作一些基本的假设外,在建立土的本构关系数学模型时,常需要作一些附加的假设。但这种假设应建立在坚实的实践和理论的基础上,应避免人为的任意性。对于土的弹塑性模型中的屈服面,不同的人有不同的假设,有人假设它与破坏面形状一致,有人假设它与等塑性应变面一致;有人认为屈服面是分部或多重的,等等。应指出,这些假设都有一定的试验成果做为依据,对应于一定的土类和条件,通过试验验证,有其一定的实用性。比如设屈服面与破坏面形状相同并以破坏面为极限,实际上强化了土的摩擦特性,对一定应力路线下的砂土有一定适用性。而屈服面为帽子形状能反映在等向应力下土粒的位移和破碎,配以塑性体应变为硬化参数,较适用于软粘土。人为的取消屈服面,或从纯数学的某种概念出发,建立一种适用于抽象的“土”的理论是很难有实用价值的。

(二)关于数学方法在土力学中的应用

“纯数学的对象是现实世界的空间形式和数量的关系,所以是非常现实的材料。这些材料以极度抽象的形式出现,这只能表面上掩盖它起源于外部世界的事实”^[4]。在土力学和土工问题中,数学方法是必不可少的。但由于土和实际工程问题的复杂性,数学还远不能解决一切问题。数学计算可做为设计和施工的参考,而经验和综合的判断常起重要的作用。这是由以下三个因素决定的:

第一,数学本身的发展水平和层次问题。初等数学常伴以高度的理想化,如线弹性模型。而弹塑性模型则必须应用高等数学。统计数学可研究因果关系的不确定性——随机关系,这对影响因素众多的土工问题是强有力的,并在一些新规范中得到使用。而研究亦此亦彼的、互补律破缺的模糊数学,在岩土工程中可能是前途广阔的。一些其他新的、高层次的数学理论,可能更深刻有效地解决土和岩土工程中的问题。所以要提倡数学家们了解岩土力学的特点和实践,也应提倡岩土工程工作人员敏感地吸收新的数学理论,以便互相渗透和促进。

第二、数学方法在一个学科中解决问题的能力,与该学科本身的发展水平有关。恩格斯在1883年写到:“数学的应用:在固体力学中是绝对的,在气体力学中是近似的,在液体力学中已经比较困难了;在物理学中多半是尝试性的和相对的;在化学中是最简单的一次方程

式;在生物学中等于零”^[5]。随着各学科的发展,数学的应用水平现在已大大地提高了。但对于由固体、液体和气体三相组成的土,数学的应用现在仍然是相对的和有条件的。这是因为对于土的力学性质的影响机理还不完全清楚,许多土的物理量间尚找不到定量关系,而复杂的边界条件使土工问题更加复杂化。例如,两个研究单位对同一土石坝的初次蓄水问题进行有限元计算,当考虑堆石料的湿化变形时,一个计算结果认为坝顶前移,另一个则相反。所以在解决复杂的土工问题时,数学计算结果只做为综合判断的参考。而成功的工程实录和有经验的专家们的经验常常是决定性的。

第三,数学应用的可能性也与一定的技术背景有关。没有计算机的出现,数值计算方法和许多数学理论在土力学中应用是不可想像的。而目前测试和试验手段也影响了数学方法在土力学中的应用。因为若所测的参数值误差在50%以上,那么精雕细刻的数学模型和精密的计算方法也就没有意义了。

因而,在土力学问题中应用数学方法时,一定要了解研究对象——土的特点。这样就应当既以试验及观测的结果为出发点,又需用室内试验、模型试验及现场观测来验证。杨光华在其论文(以下简称杨文)中提出:“从数学角度出发”,“从全新的概念进行研究”。从而放弃了屈服面的概念,力图找到塑性状态方程 $\epsilon_i^p = f_i(\sigma_j)$ 。首先,土并不存在塑性应变 ϵ_i 与主应力状态 σ_j 间的唯一性关系,它们的关系与应力路线有关;其次,屈服面是判断加卸载的依据,在实际工程问题中,如土石坝初次蓄水时,正确判断加卸载是至关重要的,因而屈服面不是可有可无的。他在批评多重屈服面模型时说它“缺乏坚实的数学基础,它是为了使模型计算和试验结果更符合而采用的。”杨文所提出的理论与多重屈服面模型比较,至少前者不能判断加、卸载,也不能适应较多的应力路线,且在实用上也未表现出什么简捷性,不易为工程师们所理解和使用,而只是在数学技巧上争奇斗妍,在理论上并未真正前进一步。所以从事土力学理论研究至少应了解土的力学性质的复杂性,应从实际出发而不是从数学出发。当理论的严密性与对实际结果的描述能力不能两全时,宁肯暂时“缺乏坚实的数学基础”,而力求与试验结果和观测结果更“符合”,先使其能实用,以后再逐步完善、简化。

五、土力学发展之浅见

(一)加强信息工作

土力学中的信息应包括:不同土在各种试验条件下的试验成果,各类现场测试及工程实录资料,各种模型试验成果,工程实践中正反两方面的经验等。目前,取得信息的手段和处理信息的工作都有待发展。

在室内试验技术方面,原状土的取样技术应有所突破;室内试验仪器的应力路线比较单调,有时试样尺寸不足;模型试验方法不多,也不够普及。在现场测试方面手段不多,取得的信息量不大,对试验结果的分析与判释工作有待加强。所以广泛地采用一切新技术、新工艺、新材料、研制更先进、更适用的仪器和工具,加强数据处理技术,自动控制及现场长期观测的自动化,所有这些是当务之急。

在信息范围方面,关于土的主应力方向旋转、土应力路线转折和应力循环条件下土的性状、各种特殊土、海洋深处甚至地球外天体上的土的性状研究都已摆在日程上。因而作艰苦深入的试验工作,揭示土的特殊的力学性质,逐步加深对其特性的认识是十分有意义的工作。

在信息处理方面,全国各地乃至全世界各部门都有大量的试验,测试与观测资料以及各种技术报告。利用计算机网络系统形成巨大的信息库,使信息工作社会化、系统化和网络化。既可弥补个人经验之不足,又可为各种新理论的开拓和发展建立坚实的基础。

(二) 土力学理论上的发展

近年来, 随着材料科学的发展, 从细观上研究材料的力学性质成了力学与材料科学共同的前沿。在土力学中, 关于固体颗粒、水、气三相的关系, 关于如加筋土一类的复合材料, 关于土与其他材料间的接触及联合作用问题, 都可望从细观研究中得到突破。这个领域也可能是新的数学与物理方法应用的广阔天地。

将土力学、岩石力学、地质学有机结合, 考虑地质年代、成因、沉积、搬运等过程对岩土材料力学性质的影响, 引进较先进的数学理论与方法, 在某些领域可能有突破性的进展。

土本身是一种复合材料, 随着工程技术的发展, 它又常与其他材料联合作用形成加筋土、改良土、甚至可能出现人造土。因而将材料中成分分别考虑后再让他们相互作用可能是一个途径。如有效应力原理正确地解决了土中骨架与孔隙水间的应力分配。在加筋土研究中, 有人将合成材料对土骨架的附加压应力分析出来, 就可用以往建立的各种土的本构模型计算加筋土的应力应变关系^[6]。黄文熙教授建议, 在计算不排水条件下饱和或近饱和土体时, 体积模量取孔隙水的模量 K_w , 剪切模量 G 取土骨架的模量 G_s , 组成刚度矩阵进行计算^[7]。他还建议用此种思想来进行基础沉降计算。

岩土力学与岩土工程的复杂性使常规的数学手段应用受到限制。因而, 研究一因多果的随机性的概率论与数理统计理论, 研究亦此亦彼的模糊数学, 研究事物不连续变化的突变理论以及系统论、控制论、信息论等“软科学”中一些理论与手段将会得到有效的应用。尤其是随着智能计算机的出现与发展, 岩土工程中的专家系统可能成为解决工程实际问题的有力武器。当然这一切更有赖于岩土工程中信息工作的发展, 信息越广泛、丰富, 理论的运用就越可靠、有效。

学科的交叉会结出硕果。土力学应密切注视材料科学、环境科学、数学、计算机科学和力学的新的发展和前沿学科的新进展。不应墨守成规, 不能从功利主义观点对待科学研究工作。

六、岩土力学的人才培养问题

近年来, 大批大学生和研究生进入岩土力学领域。他们的思路开阔、理论根底扎实, 给这一领域带来了生气。另一方面, 也应该承认他们对岩土材料的特性了解不足, 缺少实践经验。随着一些新理论的引进和计算技术的发展, 使他们误以为在岩土工程中可以仅用计算手段来精确地穷极一切问题。因而往往忽视艰苦细致的试验与现场观测工作, 片面追求理论的深奥和公式的繁杂以及计算的精确, 热衷于搞出适用于抽象的“土”、适用于一切条件的理论与模型, 热衷于搞出“全新的”、“统一的”、“一般的”理论。“不动则已, 一动至少就要创造一个完整的体系”^[8]。由于他们对现场条件、取样扰动及试验手段造成的误差不了解, 因而他们不知道有时恰当地使用简单的理论与计算方法比不适当地使用“高级”的模型和精确的计算方法更接近实际情况。正因为如此, 他们有时作一些无效的工作。

扎实细致的试验工作和现场观测工作以及对于工程实践的广泛了解对于从事岩土力学工作的青年是十分重要的。这样才有可能使他们学到的理论知识得到用武之地, 有可能有所突破。“文革”中曾把一个专攻拓扑学的研究生分配到某水利工地去打山洞。他在10多年的工程实践中将拓扑学的知识用于解决岩石塌方问题, 提出了被誉为“目前解决岩石塌方问题的唯一理论”的“块体理论”, 受到国外专家的推崇, 并说他去打山洞真是“幸运”。当然“文革”中的这种幸运是偶然的, 但理论一旦结合于实践, 会产生巨大的力量却是必然的。

这就涉及到岩土力学中的人才培养问题。首先, 科研人员和工程技术人员之间应加强了了解和交流。前者一般对工程问题缺少感性认识, 后者容易囿于局部工程实践。所以, 从有几年工程经验的大学毕业生中选拔研究生和让工程技术人员进修培训是必要的手段。这也涉及学校教育与社会教育如何配合的问题。在研究生工作中, 应尽量避免一篇论文仅为一种程序的情况。应使他们对本学科特点有较为清楚的了解, 重视试验工作和实际工程问题。否则培养的研究生很难适应今后工作。

另外, 应提倡从其他学科, 尤其是一些新兴学科招收研究生和研究人員, 吸取营养, “不拘一格降人才”。提倡人才交流和双学位制; 必要时, 打破学科界限, 建立研究中心。在对岩土材料的特点有一定了解的前提下, 学科的渗透和在边缘学科着手工作, 常会产生突破性的进展。

参 考 文 献

- [1] 黄文熙、濮家骝, 硬化规律对土的弹塑性应力-应变模型影响的研究, 清华大学水利工程系, 1979。
- [2] Wood, D. M., Truly Triaxial Stress-strain Behaviour of Kaolin, Proceedings of the Symposium on Plasticity and Soil Mechanics, Ed. A. C. Palmer, 1973, p. 67.
- [3] Proceedings of Workshop on Limit Equilibrium Plasticity and Generalized Stress-strain in Geotechnical Engineering, McGill University, 1980, p. 92.
- [4] 恩格斯, 反杜林论, 人民出版社, 1970, 第一版, p. 35.
- [5] 恩格斯, 自然辩证法, 人民出版社, 1970, 第一版, p. 249.
- [6] 陈轮、李广信, 加筋土的弹塑性模型计算, 第三次全国塑性力学学术交流会论文, 1990。
- [7] 黄文熙, 土坝弹塑性应力分析简捷法, 岩土工程学报, Vol. 11, No. 6, 1989, p. 1.
- [8] 恩格斯, 反杜林论, 人民出版社, 1970, 第一版, p. 4.