

土的抗剪强度与本构关系 学术讨论导言

黄文熙

(清华大学, 北京)

在国家基本建设中,岩土工程占有重要的地位。有效地使用这门工程技术,可以减少工程量,降低造价与缩短工期。因此进一步开展这门工程技术的研究,将对四化建设起到重要的作用。

绝大多数的工程建筑物如房屋、桥梁、铁路、公路、机场等等都是建筑在土基上的;也有一些建筑物如挡土墙、水闸、隧道、管道等等都是埋置在土基中的;更有一些建筑物如堤、坝等等本身是用土料筑成的。在作这些土基与土工建筑物的设计与施工时,土料工程特性如抗剪强度,应力与应变关系,渗透性等的测定,以及如何在作土体的变形与稳定计算中选用适当的土料工程特性指标是土力学及基础工程这门技术科学中最重要的研究课题。

本文将分两节来阐述笔者对这个课题研究动向的一些不成熟看法,即①土工试验,②数值计算与模型试验,提请批评指正。

一、土工试验

结构工程师作钢结构或混凝土结构设计时,可以根据材料的规格来确定它们的工程特性指标,因此一般不需要做钢或混凝土的材料试验。岩土工程师则不同,由于每个工程所遇到的土,性质不同。因此必需就地采取土料,对它们的工程力学性质,包括应力应变关系,强度和渗透性等进行检定。由于同一种土的力学性质指标是随土的结构、密度、应力历史等因素而异的,因此如何根据具体的工程要求,采取试样和选择适当的试验仪器与试验方法,以及如何在设计计算中适当地选用这些试验数据,都是值得深入思考的问题。

举饱和粘土地基为例:当地基承载后,地基中任何一个土单元所受的总应力,孔隙压力,有效应力与含水量(或密度)是随着时间变化而变化的。土的这种固结过程,也就是各个土单元不断建立动力平衡的过程。一个土单元必然在一定时期产生某一定变形,它也可能在一定时期因应力与变形达到某种特定数值而发生破坏。但是如何根据土样的变形与强度试验资料来确定土体中单元的变形以及判断它是否发生破坏,是到现在还没有彻底解决的问题。

为了取得不扰动土样进行室内试验,需要对影响试样质量的全部环节,包括钻进工艺,取土方法,取土器构造,运输与保管,土样的试验室制备以及试验方法(如恢复土样的原始应力状态等)等环节,都有相应的重视和措施。否则取土器再好也发挥不了作用。目前对这些环节虽然有一些规定,但还没有开展不同扰动程度的土样对测定各种力学性质指标影响的研究。因此目前对如何保证勘测工作的质量还难于提出合理和明确的要求。

关于饱和粘土的强度,已往的研究已指明它的抗剪强度是它的含水量(或密度)和作用在剪切面上有效法向应力的函数。同时土料的应力历史或代表应力历史的硬化参数对强度也有影响。但用不同试验设备如直剪仪或三轴压缩仪和用土工试验操作规程中规定的种种常规试验方法测定的强度指标是各不相同的。因此如何针对土体中各单元的特殊条件(即它的有效应力,含水量与应力历史)根据试验资料去确定相对的单元强度,并不是一件轻而易举的事。

土体中的应力分布以及土体的变形主要取决于土的应力-应变关系。代表这种关系的数学模式称土的本构关系模型。现在这些模型大都是根据常规三轴压缩试验在侧压力保持不同常数下进行的试验资料按不同理论假设来建立的。

最简化的土的本构关系模型是线弹性模型。代表应力-应变关系的两个参数,即弹性模量 E 与泊桑比 ν 都是常数。过去计算地基中的应力分布采用的鲍辛内斯克(Boussinesq)解答,也就是应用这种本构模型的一种具体计算结果。近年来由于电子计算机与计算技术的发展,已有可能求取非线性问题的数值解答。对本构关系也采用了一些非线性模型。目前最常使用的非线性弹性模型是邓肯-张模型。这个模型的最大缺点是忽视了土的剪胀性。为此采用这种模型进行各种土工边值问题计算时,不可能将土在纯剪切作用下产生的体积变化影响在分析计算中表达出来。弹塑性模型的出现,其主要目的是纠正这种缺点。同时由于引进了硬化参数,也在一定程度上反映了应力历史的影响。目前由于学者们对土的塑性理论中采用的一些概念,如破坏面,屈服面,等势面,流动规则,硬化参数等等理解并不一致,因此在整理试验资料推导本构关系数学模型时,常常作一些缺乏充分理论根据的补充假定,这就导致了种种不同的弹塑性本构关系数学模型的出现。为此对这些模型分别进行验证及作比较研究也是当代主要研究任务之一。另外,推导土的本构关系数学模型时,通常采用的试验资料是从常规三轴压缩试验(即 $\sigma_2 = \sigma_3$)获得的。这类数学模型通常只包含两个主应力变量,即八面体法真应力 p 与八面体剪应力 q ,而忽视了第三主应力变量即劳台角 θ 的影响。为此对平面应变与向三轴压缩(即 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)等其它复杂应力组合状态,就需要对如何修整模型,重新作研究。一般的常规三轴压缩试验是在侧压力保持常数下进行的,根据这种应力路线的试验资料推得的本构模型是否适用于其它应力路线也是要研究的。现有的试验结果证明,应力路线对试验结果是有影响的。因此从理论上讲,应该选择与原型受力过程相同的应力路线来进行试验才合适。但是由于地基或土体内各单元的应力路线不同,并且事先也不可能正确地知道原型各单元的应力历史,因此要严格地按照这种理论要求做试验,事实上也难于做到。为此选择什么试验方法和采用什么理论假设来建立本构关系数学模型以便用于地基或土工建筑物的应力分布、变形与稳定等设计计算,都需要通过地基或土工建筑物的模型试验或原型观测资料去检验它们的正确性。

强度与变形都取决于有效应力,而有效应力又决定于孔隙压力,因此应重视孔隙压力产生机理的研究。孔隙压力与本构关系间的关系过去曾在假定土是线弹性的基础上找出一些联系,今后应结合土的非线性与弹塑性特点进行更深入的探讨。对于砂土和少粘性土更应进行周期荷载作用下孔隙压力的发展规律的深入研究,因为现有的计算模式与实验资料的拟合情况都有很大的局限性,这对砂土地基和少粘性土筑成的土坝液化可能性的准确估计有严重影响。

土是一种性质十分复杂的工程材料。除了上述各点外还有许多特点如极峰强度与最终强度的差别,剪切速率对强度的影响,以及土的湿化与流变特性等等都应结合具体工程对象,进行具有实际意义的探索。

土工试验一般都是结合具体工程的土料进行的。我国幅员广阔，土料种类繁多，包括软粘土、黄土、红土、膨胀土、硬裂隙粘土、分散性土、冻土、海洋土，残积土和不同颗粒大小与级配的砂砾等等。他们的性质千差万别，时常需要为它们创造不同的试验设备与试验方法去确定其各别特性。

目前我国已制订了土工试验操作规程。一般常规试验应用的仪器与仪表，国内已设有专业工厂能自制供应。近年来仪器制造主要向动态，大型与高压三方面发展。现在震动三轴仪，大型三轴仪(试样直径为70厘米)，大型直剪仪，连续加荷固结仪，高压固结仪，高压三轴仪，大型击实仪等都已能生产供应。正在试制中的有真三轴仪，扭剪仪，振动单剪仪，共振柱以及供其它特殊试验用的仪器和仪表。在仪器与仪表方面，当前我国存在着的主要问题是进一步改进制造工艺和提高产品质量问题。土工试验与国外的最大差距则是在测试设备与资料整理的自动化方面。这在动力试验方面尤其急需迎头赶上，否则不但浪费人力并且测验精度也无法保证。

二、数值计算与模型试验

在土工结构物与地基设计中，为了保证设计的经济合理与运行安全，需要进行一些计算与模型试验。当前研究的问题大致可分成下列各类：

1. 稳定与不稳定渗流；
2. 土坡与地基的稳定；
3. 地基的沉降或变形以及地基与建筑物的相互作用；
4. 土坝的应力与变形；
5. 土坝抗震与砂土液化。

在五十年代电子计算机与计算技术特别是有限单元法发展之前，由于计算手段的限制，学者们只能对土料特性作一些简单化的假定，以便对地基沉降、地基与土坡稳定和挡土墙土压力等问题作出一些估算，以作为设计的依据。现在电子计算机容量日增，计算方法也层出不穷，像有限差分法、有限元法、边界单元法、特征线法等等都在土工计算中应用。并且对各种计算方法本身，在如何简化程序，提高速度，提高精度等方面也都在进行研究。现在似乎可以说，凡是能用计算解决的土工问题，依靠现有计算技术，大致都能求得一些数值解答。近年来不少二元与三元的稳定与非稳定渗流问题是利用计算解决的。过去习惯上通用的渗流电拟模型试验有逐渐被数值计算取代的趋势。常用的土坡与地基的稳定分析方法有瑞典法、毕肖普法、扬布法、摩根斯顿-泼莱斯法等。这些方法都是以极限平衡理论的条分法为基础的，不同之处在于对土条间相互作用力的不同假设。这些方法都未考虑土体的应力-变形关系，求出的只是在假定的应力分布条件下沿着假定的滑动面滑动的平均安全系数。当前科研的倾向是用有限单元法根据土的本构关系去确定土体中的应力分布与破坏区范围，从而推算土体的抗滑安全度。这种倾向事实上也代表我们现在所采取的解决一切土工问题，包括地基变位、地基与建筑物的相互作用、土坝的应力与变形、土坝抗震与砂土地基液化等问题的共同途径。在进行这些土工问题计算时，许多学者所采用的土本构关系模型是线性的或非线性弹性模型。后者最常用的是邓肯-张模型。由于弹性模型忽视了土的剪胀性，这将给计算结果带来多大误差是难于估计的。

目前对房屋地基的沉降计算，地基与上层建筑物的相互作用分析一般还是采用线性本构

关系数学模型。房屋地基中的应力分布现在计算时一般还是忽视不同地层的影响,采用鲍辛内斯克解答。只是对变形计算有的采用了三轴压缩试验结果。此外国内学者曾对轴对称的油罐地基与平面应变的土堤采用过弹塑性本构关系数学模型进行验算,并将计算结果与实测值验证。对锚定板桩结构也曾用非线性弹性模型进行验算。有关土坝问题如分层填筑、蓄水变形、心墙和坝壳间的应力转移等都曾用线性或非线性弹塑性模型进行过验算。土石坝的三维应力分析也是采用线弹性模型进行的。上面这些分析都是按总应力法进行的。近几年来国内外都有人着手研究考虑土坝心墙孔隙压力变化的有效应力分析方法。有的借用假定固结过程中总应力不变的泰沙基固结理论,把孔隙压力变化与骨架变形分离开来计算。理论上比较完善的方法是从比奥(Biot)固结理论出发,把不完全饱和的孔隙当作充满着可压缩的流体进行分析。但孔隙压力在饱和与非饱和粘土中成长与消散的机理现在还没有弄清楚,因此必需尽力解决这个问题。

土石坝抗震设计采用什么计算方法,应视不同土料而异。许多现场调查资料证明对于地震作用下强度无显著减弱的粘土和粘性土,干的和稍湿的无粘性土,或非常紧密的无粘性土所填筑的坝,能经受比设计假定高得多的地震力而不致破坏,因此常规的拟静力分析已满足实际需要,毋需采用动力反应分析。对于用疏松和中密的饱和无(或少)粘性土填筑的坝,如水力冲填坝、水坠坝和尾矿坝,只能利用有限单元一类动力反应分析,方能考虑到地震所产生的超静水孔隙压力。这些超静水孔隙压力随时间而产生的重分布,以及随着应力水平或震动持续时间的增长引起的强度降低等因素,将影响坝体或坝基在地震时或地震后的稳定。对于高烈度地区的高土石坝应用动力分析研究坝体的抗裂性能。现在计算中采用的本构模型限于线性或非线性粘弹性模型。至于更复杂的,适用于周期荷载的弹塑性模型的使用,目前还没有尝试成功。

计算结果的可靠性,除了受计算方法本身的收敛性与稳定性影响外,更重要的是选用土料性质指标或土的本构关系模型是否适当。前面已经指出,土的强度与应力-应变关系等指标的选择是很困难的。目前这些选择还带着很多的随意性和习惯性。因此一切计算结果,实质上还是定性的和半经验的。在这种情况下,盲目追求计算精度,是徒劳的。

一切计算结果必需经过原型观测或模型试验的验证,才能证明计算方法,计算中所采用的土料试验方法和本构关系模型的可靠性。原型观测资料的采集是十分重要的,对于重要或典型工程尤其应该重视,因为它不仅可以验证设计计算方法,也可以监视工程在运行中的情况,以便必要时采取措施,防止发生事故。模型试验的好处是等于在工程实施前就采集原型资料来进行研究,以便在设计时能不断修正设计,从而确保设计的经济与安全。并且它不但可以验证计算方法,同时可在模型中加大荷载以观察工程的破坏过程,从而可在设计中加强保护措施。这在其它场合是做不到的。

除掉电拟渗流模型试验外,过去学者们对土工模型试验并不重视。其原因是土工结构和地基中的应力场主要是由于土自重所引起的。如用原型土料作 $1/n$ 的缩尺模型,那么模型中所产生的应力只为原型的 $1/n$ 倍。由于土不是线弹性体,它的应力-应变关系是随应力水平而异的,因此模型中所产生的应力场将与原型不同,从而产生的模型变形也并不等于原型的 $1/n$ 倍。此外由于模型应力水平低,在原型中土体因应力达到强度而破坏时,模型中还没有达到破坏情况。因此模型不可能模拟原型的破坏状态,也就是不能解决原型的稳定问题。这一切说明在地心吸力等于 g 的空间来进行土工模型试验,模型不能模拟原型的变形与稳定,因此这种模型试验缺乏实际意义。与此相反,如果我们将缩尺为 $1/n$ 的模型放在地心吸力等

于 ng 的空间进行,那么由于模型应力水平与原型相等,模型的变形就等于原型的 $1/n$,模型的稳定安全度也与原型相等了。将模型放在特制的离心机中转,并使转速 ω 与模型重心距转轴的半径 R 建立起 $\omega^2 R = ng$ 的关系,就能达到这个目的。由于最近电子、录象、照相等技术的发展,使模型在转动时各点所发生的应力,孔隙压力,位移等能测量出来,故最近二十年来土工离心机模型试验的应用已受到普遍的重视。现在苏联、英国、日本、法国、丹麦、美国都已建成了大中型土工离心机。许多国外大学也建置了小型土工离心机供科研与教学之用。

近年来在中型和大型土工离心机上已进行的土工试验包括:土坝与土坡的变形、稳定与渗流冲刷问题;近海平台的地基稳定问题;挡土建筑与地下洞室的土压力传播与稳定问题等等。利用小型土工离心机可进行一些基础研究,例如:成层土的压缩与固结;受垂直或水平载荷的桩与土的相互作用;土锚与土的相互作用;过水土坡的冲刷;土坝渗流;加筋土与挡土建筑的变形与稳定;砂土液化等等。如何在土工离心机模型上施加动力荷载,以及如何在模型转动时实现坝的分层填筑等等也在进行研究。如何提高在试验中采集数据的技术也代表一种研究方向。看来土工离心机试验与土工离心机模型试验已成为验证计算方法和解决土工问题的一种有力手段,而在我国这方面的科研工作,基本上还没有开展。为此必需急起直追,努力赶上。

三、结 论

最后我想再度强调一下,由于土工设计计算对象是土,而土却是一种非线性和弹塑性的工程材料,因此吸引了许多爱好数理分析的力学与土木工程学者来从事这方面的研究,并从而形成了数值岩土力学(Numerical Geomechanics)这样一门新的岩土工程学科分支。但是由于土的工程性质极为复杂,为配合设计计算选择适当的试验方法,适当的试验资料整理方法和建立适当的本构关系数学模型,都不是轻而易举的事。因此目前在实际上应用的一些工程设计方法基本上都还是半经验的。它们都是某种试验方法,某种试验资料整理方法与某种数值计算方法相互配套的产物。例如软粘土坡的 $\phi = 0$ 稳定分析,采用的试验方法是无侧限压缩试验、分析的方法是条分法。所得的安全度如在1.00以上,则土坡就认为是安全的。实践告诉我们,很多实例证明这一套试验和分析方法是可用的。而且它的最大变化范围一般也在0.75与1.50之间。目前的其它种种试验研究可用以提高我们的认识,并从而改进这类设计计算方法。但要彻底改变土工设计计算这种半经验式的局面,还是难以想象的。因此盲目追求试验,理论分析或数值计算任何一个环节的精度,是对问题缺乏全面认识的表现,实际上是与事无补的。

土力学与基础工程是一门技术科学,它是依靠工程实际的发展才能发展的。现在学科发展还远落在工程实践之后。许多实践上已取得的经验和知识,往往要在实际中使用了10至15年后才能在正规书本中见到。因此脱离工程实际来进行土工研究,其成功是不能想象的。为了实现四化,我们必需通过实际工程的锻炼培养许多能针对具体工程解决实际困难的岩土工程专家。就是从事岩土工程的教学与科研工作者,也应从有实际经验的专家中选拔。只有严格地执行这条干部培训路线,岩土工程这门工程技术才能得到真正的、飞跃的发展。