

DOI: 10.11779/CJGE201810017

实用主义与土力学

李广信

(水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:通过对有效应力原理、强度准则、地基沉降计算、本构关系模型、非饱和土以及工程中土的参数等方面的论述,说明了土力学的实用主义特色;指出土作为一种十分复杂的材料,土力学作为一门感性很强的实用的学科,研究者应立足于工程实用,密切结合实际,不惮于亲自参与工程实践,才能认识和理解土力学与土工实践中实用主义的有效性和必要性,才会获得切实的成果,为岩土工程作出贡献。也同时指出了实用主义的局限性,它常常与经验主义为邻,因而土力学的概念和理论是不容忽视的。

关键词:实用主义;土力学;有效应力原理;强度准则;沉降计算;土的本构模型;非饱和土

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)10-1897-08

作者简介: 李广信(1941-),男,教授,主要从事土的本构关系、土工合成材料和地基基础等方面的研究。E-mail: ligx@tsinghua.edu.cn。

Pragmatism and soil mechanics

LI Guang-xin

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the recount and analysis about the principle of effective stress, strength criterion, settlement calculation, constitutive model, unsaturated soil and calculation parameters in engineering practice of soils, it is drawn that the pragmatism is a characteristic and effective work method in the subject of soil mechanics. The soil is a very complex kind of material, and soil mechanics is a practical subject. Therefore, the researches on the soils have to be based on engineering application because of the pragmatism characteristic of soil mechanics. The pragmatism and empiricism are often interlinked with each other, and the concept and theory in soil mechanics are not allowed to be overlooked.

Key words: pragmatism; soil mechanics; principle of effective stress; strength criterion; settlement calculation; constitutive model of soils; unsaturated soil

0 引言

模糊数学的创始人扎德(L.A.Zadeh)讲过:“当系统的复杂性增加时,我们做出系统特点的精确而有意义的描述的能力将相应降低”。这对于土力学和土工实践也是非常适用的。

人们通常认为太沙基(Karl Terzaghi)是土力学学科的奠基人。尽管他后来在美国身为教授,但太沙基本人长期就是一位工程师,他从工程实践出发,删繁就简,提炼出一些实用性很强的理论与方法,往往伴随很多的假设与近似。他在力学的框架下考虑和解决土工问题,往往是尽量趋于实用化,而并不十分在意理论的严密性。土力学的这种实用主义倾向引起一些精于数学、力学的学者们对其不屑与诟病。

由于土的性质的复杂性,影响因素的多样性以及作为天然材料不可控的性质变异性,在解决实际问题时,经典数学与力学往往难以奏效,实用主义也就成

为土力学的有效的工作方法和极有特色的风格,当然由于有关土的工程实践领域的扩展,土力学也需要不断发展和提高。

1 关于有效应力原理

太沙基在他的《Soil Mechanics in Engineering Practice》一书中,对于著名的有效应力原理,写道:“Fortunately, although no theoretical basis for Eq. 15.2($\sigma = \sigma' + u$) has been found, its empirical basis is so well established that a quantitative knowledge of the interparticle reactions is not needed.”^[1]

在欧美使用很广泛的《土力学》教材,《Craig's Soil

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2017YFC0404803, 2017YFC0804602); 国家自然科学基金项目(41790434)

收稿日期: 2018-08-29

Mechanics》中也指出：“Terzaghi presented his Principle of Effective Stress, an intuitive relationship based on experiment”^[2]。也就是说，有效应力原理表示的是基于试验资料的直观的应力关系。

有效应力原理确实不是从严密的复杂的微分方程推导而来，也不是从微观的颗粒间相互作用的定量关系推导得来的。但实践是检验真理的唯一标准，大量的试验结果和工程实践已经证明了有效应力原理的正确性。例如预压渗流固结对地基加固处理，利用有效应力和总应力强度指标进行土体的稳定分析，对于渗透变形的理解与工程措施，地基的固结沉降与固结度的预测等一系列工程实践都证明了它的适用性和有效性。该原理已经成为土力学中指导工程实践的最基本、最重要的理论之一。

很多学者也进行了理论、试验和工程测试，指出了混凝土和岩体尽管是多孔，但非碎散的介质，有效应力原理不能简单照搬使用；非饱和土的有效应力原理的适用性也还没有取得一致的认可。

目前各种教材中对该原理的推导都是基于粗粒土，见图 1。关于黏土颗粒的土骨架形成与颗粒间力的传递，常常被一些人所质疑，主要是由于黏土颗粒外有结合水层，它是否属于土骨架？它是否能够传递孔隙水压力？

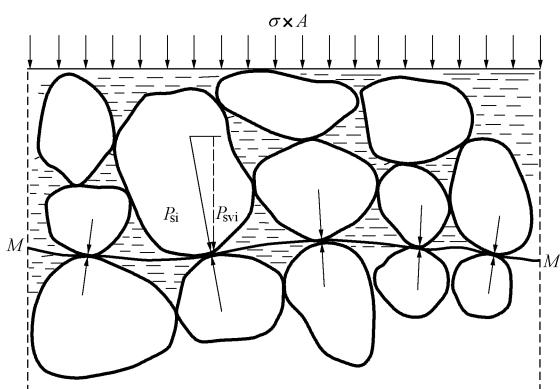


图 1 有效应力原理的推导示意图

Fig. 1 Sketch of principle of effective stress

研究表明，一般黏土颗粒表面的 3 层水分子（大约几个纳米）属于强结合水，它和黏土表面紧密结合，具有类似于固体的性质，可以将其归入土骨架的系统。

对于弱结合水，随着距离颗粒表面更远，其性质更近于自由水。James K. Mitchell 指出 “The recent findings that the viscosity and diffusion properties of adsorbed water in clay are essentially the same as for bulk water are significant”^[3]。他认为达西定律、有效应力原理对于黏土也是适用的。

2 土强度的莫尔-库仑理论

关于材料的强度，常见到“强度准则”与“强度理论”这两种提法。材料强度的数学表达式可以叫“强度准则”；而反映了材料强度的机理的表述则为“强度理论”，后者通常也表示为相应的数学公式。当前工程中广泛使用的仍然是古老的 Mohr-Coulomb 强度准则（理论），一般认为这一准则不能反映土的强度的非线性，也不能反映中主应力对土的抗剪强度的影响。多年来，土的强度是一个很热门的研究领域，曾有很多土的抗剪强度准则被提出，它们有的能够反映土强度的非线性，也都能够反映中主应力的影响，例如莱特-邓肯 (Lade-Duncan) 强度准则^[4]、松岗元-中井照夫 (Matsuoka-Nakai) 空间滑动面强度准则^[5]和俞茂宏双剪应力强度理论（统一强度理论）^[6]等。可是在工程界不可替代的，广泛应用的还是 Mohr-Coulomb 强度准则，原因在于它的实用性：表述简单、可用直剪或三轴试验测定其参数、工程设计计算方便简洁；另外，它区别于古典强度理论，正确地反映了土强度的机理：土体的破坏面上的抗剪强度与该面上的正应力有关。

大量的试验结果表明，土的破坏面上抗剪强度与该面上的正应力 σ_n 之间，或三轴试验中的抗剪强度与围压 σ_3 之间并非总是线性关系。近年来我国的西南地区先后兴建了一批 200~300 m 级的高土石坝，再加上几十米的深厚覆盖层，其中的砾石、堆石承受极大的围压。在其稳定分析中不考虑强度的非线性是无法正确进行设计的。图 2 表示的是 9 个高堆石坝堆石材料的非线性强度，可以表示为式 (1)，其中的 $\Delta\varphi$ 可达 $10^\circ \sim 13^\circ$ 。土的另外一种强度非线性公式表示为式 (2)，其参数范围列于表 1。

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a} , \quad (1)$$

$$\tau_f = A\sigma_n^b . \quad (2)$$

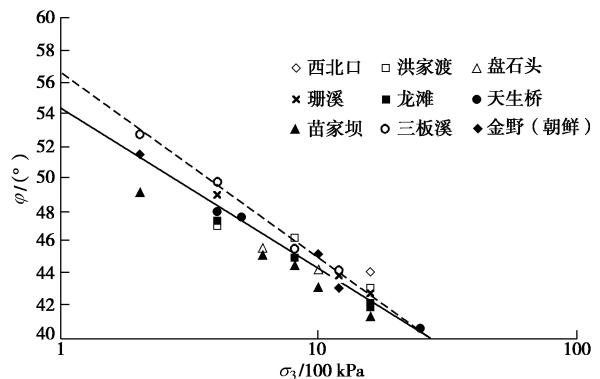


图 2 一些高堆石坝材料强度与围压关系

Fig. 2 Relationship between strength of soils and confining pressure in some high dams

表1 式(2)中的参数范围

Table 1 Parameters of Equation (2)

堆石类型	A/kPa	b
砂岩	6.8	0.67
板岩(好)	5.3	0.75
板岩(差)	3.0	0.77
玄武岩	4.4	0.81

Robert D. Holtz 指出：“莫尔早在 1900 年就假设了一个实际材料的破坏准则：当破坏面上的剪应力达到了该面上的某个单值函数时，材料就破坏了”^[7]。用公式表示则为

$$\tau_{\text{ff}} = f(\sigma_{\text{ff}}) \quad (3)$$

所以库仑公式是假设抗剪强度与其作用面上的正应力呈线性关系，而莫尔-库仑准则则已经包含有非线性情况（递增函数关系）。

中主应力对于土的抗剪强度的影响也是一个相当古老的课题，相对于 $\sigma_2 = \sigma_3$ 情况，中主应力增加会提高土的强度已经成为人们的共识。图 3 表示的各种边界条件的真三轴仪试验成果^[8]，可见大于小主应力的中主应力确实提高了砂土的内摩擦角，但其定量的规律性并不明确。

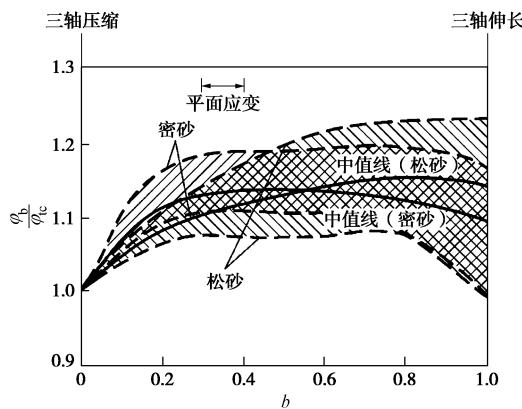


图 3 各种真三轴试验揭示的中主应力与土强度关系

Fig. 3 Relationship between strength of soils and intermediate principle stress in all kinds of true triaxial tests

从图 4 发现，当试验的围压大到一定程度，三轴试验与平面应变试验的砂土内摩擦角基本相等；另外由于原状土基本上都是横观各向同性的，试验表明，主应力方向对抗剪强度的影响大于中主应力的影响^[9]。

可见中主应力对土的抗剪强度的影响是没有多少实际意义的，从实用的角度出发，忽略它是偏于安全的，在规定的最小安全系数中可以适当考虑这一因素。

基于以上的情况，那些精雕细刻的各种土的强度准则只是在某些方面揭示和反映了土的强度的影响因素，反映了人们对土的强度的认识，在实际工程中基本没有被采用。无尽无休地用所谓“高级”的强度准

则去推演土力学中的一切极限平衡课题，可能只是自娱自乐。

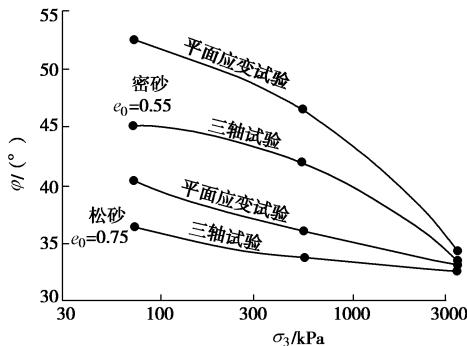


图 4 围压与中主应力对土强度的影响

Fig. 4 Influences of confining pressure and intermediate principle stress on strength of soils

3 沉降计算的单向压缩分层总和法

到目前为止，地基的沉降计算还是采用单向压缩的分层总和法。为简化计算，该法作了如下基本假定：
①假定基底压力为线性分布；②用弹性理论计算基础中点下的附加应力；③土的变形参数是常数；④荷载是瞬时施加的；⑤假定地基只发生单向沉降，即土处于侧限应力状态；⑥只计算主固结沉降，不计瞬时沉降和次固结沉降；⑦将地基分为若干层，分别计算基础中心点下地基中各分层土的压缩变形量 s_i ，认为地基的总沉降量 s 等于 s_i 之和；⑧适当考虑上述假定引入的误差，根据荷载和地基条件（压缩模量的当量值 \bar{E}_s ）对计算沉降量进行修正。

计算结果要采用“沉降计算经验系数 ψ_s ”修正，该经验系数的取值见表 2。我在讲授《土力学》课程时，有的同学觉得精心计算的结果竟要乘以 1.4~0.2 的修正系数是不可理喻的，从而质疑土力学作为一门“力学”的合法性，称其为“伪科学”。

表 2 沉降计算经验系数 ψ_s Table 2 Settlement correction factor ψ_s

\bar{E}_s/MPa	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
$p_0 \geq f_{ak}$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2
$p_0 \leq 0.75f_{ak}$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

注： p_0 为基底附加压力。

土力学学科建立近百年来，所提出的地基的沉降计算方法层出不穷。其中理论方法有弹性理论法；基于现场测试的有应变影响系数法、载荷试验法、旁压仪法和静力触探法；实用的方法有斯肯普顿-别伦方法、黄文熙法、Lambe 的应力路径法、曲线拟合法和剑桥模型的物态边界法等；数值计算的方法包括有

限元法、差分法和集总参数法 (Lumped parameter method)^[10]。但是基础工程中的地基沉降计算方法仍然采用最简单的单向压缩分层总和法。

斯肯普顿 (Skempton) 和别伦 (Bjerrum) 提出了一种“考虑三维效应的分层总和法”^[11], 其中采用各层饱和黏土在附加应力作用下产生的超静孔隙水压力 Δu 代替地基土的竖向附加应力 $\Delta\sigma_1$, 下面式 (4) 表示的是均匀地基土单向压缩的分层总和法, 式 (5) 是考虑三维效应的分层总和法。

$$s = \int_0^h m_v \cdot \Delta\sigma_1 \cdot dz \approx \sum_{i=1}^n m_v \cdot \Delta\sigma_1 \cdot h_i , \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s_c &= \int_0^h m_v \cdot \Delta u \cdot dz = \int_0^h m_v \cdot \Delta\sigma_1 \left[A + (1-A) \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \right] dz \\ &= \mu_c \int_0^h m_v \cdot \Delta\sigma_1 dz , \end{aligned} \quad (5)$$

即

$$s_c = \mu_c s , \quad (6)$$

其中 Δu 与应力增量的关系式如下:

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] . \quad (7)$$

对于饱和土孔压系数 $B=1.0$, 而孔压系数 A 则与土的模量有直接关系, 见表 3。

表 3 孔压系数 A 与不同软硬土类的关系

Table 3 Pore pressure coefficient A for all kinds of soils

土类	A (用于计算沉降)
很松的细砂	2~3
灵敏性黏土	1.5~2.5
正常固结黏土	0.7~1.3
轻超固结黏土	0.3~0.7
重超固结黏土	-0.5~0.0

可以发现式 (6) 中的沉降计算修正系数 μ_c 与沉降计算经验系数 ψ_s 是完全等效的。它表示的是用孔压系数 Δu 代替土的竖向附加应力 $\Delta\sigma_1$ 所计算的沉降量之差。图 5 是计算的系数 μ_c 与孔压系数 A 的关系。

从表 2 和图 (5) 可以发现:

(1) 基底附加压力 p_0 如小于 $0.75f_{ak}$, 这就表示其应力与应变关系基本在线性区间, 修正系数 ψ_s 较小; 基底附加压力 p_0 如大于 f_{ak} , 则表示在一些区域应力与应变关系已接近屈服, 成为非线性, 修正系数 ψ_s 加大。

(2) 在图 (5) 中, 当土层厚度与基础宽度之比 $H/B=0$ 时, 亦即趋近于单向压缩时, $\mu_c=1.0$; 对于条形基础, $H/B=10$ 时, 即土层深厚时, μ_c 为 $0.2\sim1.2$, 这与表 2 的 ψ_s 是基本一致的。

可见, 单向压缩的分层总和法的沉降计算经验系数 ψ_s 在一定程度上考虑了土体变形的非线性; 也吸取了斯肯普顿-别伦的方法, 用容易取得的压缩模量的当

量值 \bar{E}_s 取代难以测定的各层土的孔压系数 A_i , 由于孔压系数 A 反映了土的剪胀(缩)性, 也就是考虑了土体变形的三维效应, 可见单向压缩的分层总和法是一种吸取了其他计算方法的优点, 能够反映土的多种变形特性和边界条件, 贴近于工程实际情况的实用主义方法。

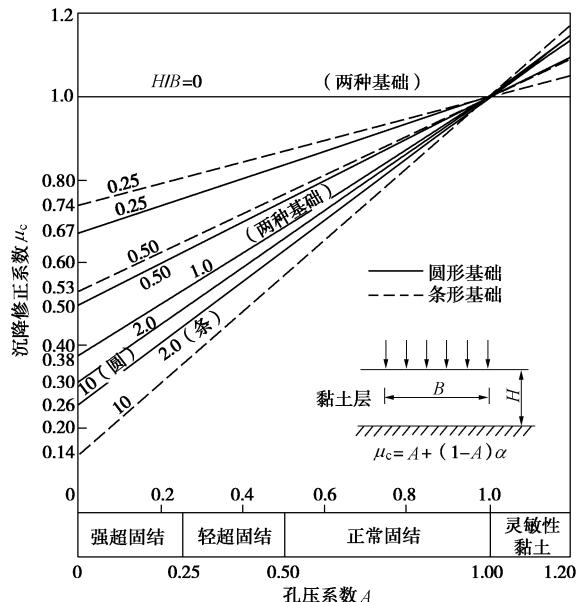


图 5 孔压系数 A 与沉降计算修正系数 μ_c 的关系

Fig. 5 Relationship between A and μ_c

4 土的本构关系数学模型

土的本构关系数学模型的研究从 20 世纪 60 年代到 80 年代呈现出万紫千红、百花齐放的繁荣景象, 形成土力学中难得一见的理论研究的热潮, 甚至吸引了一些纯力学的学者们游弋于其中。但随后其研究归于沉寂, 一些研究成果也逐渐远离工程应用, 成为少数数学爱好者的俱乐部。回顾和总结这段研究的结果, 可以看出大浪淘沙, 少数的几个模型存留了下来, 并为工程技术人员所接受和使用, 也对后来的大型土工问题提供了数值计算的理论基础, 为岩土工程作出了不可磨灭的贡献。

这些被工程界广泛接受的模型有: 邓肯和张提出的非线性双曲线模型、剑桥模型、弹性-理想塑性模型和考虑土体剪胀的三参数 $K-G$ 模等。总结原因, 可以发现其规律是: ①能反映土的基本变形特点, 形式简单, 大多是建立在广义胡克定律的基础上; ②参数少并易于从基本试验取得, 其物理意义清楚; ③通过较多的应用, 并与实测的数据对比验证, 取得经验, 形成计算通用软件, 得到普及与推广。

我国在改革开放的 30 多年中, 水利水电工程中出现了一批 200~300 m 级的高堆石坝, 对于这些规模

空前的高坝，其稳定和变形数值计算成为必不可少的环节。经多年的实践和竞争，《碾压土石坝设计规范》条文说明 8.4.5 中总结指出^[12]：“我国最常用的非线性弹性模型是邓肯和张等人提出的非线性双曲线—指数（E-B）模型。黄文熙提出的清华弹塑性模型、沈珠江提出的南京水科院双屈服面弹塑性模型、成都科技大学提出的非线性弹性修正 K-G 模型、河海大学提出的椭圆—抛物线双屈服面模型等也在一定范围得到应用”。目前基坑和地下工程中常用的有邓肯—张双曲线模型、莫尔—库仑模型、修正剑桥弹塑性模型、PLaxis HS 模型。

2010 年，美国著名的土的本构关系研究专家 H. B. Poorooshahb 在他的 “The last lecture” 中对土的本构关系研究现状指出^[13]：“即使影响土的变形的所有因素都知道了，我们仍然不能用公式准确地表述它们”；“它们已经在形式上非常复杂，肯定不能用于解决岩土工程的实际问题。土的本构模型的研究目前已经达到了一个开始下降的拐点（The point of diminishing return）”；“即使是能够反映土的所有变形特性的模型，其计算结果也只能给出工程问题的一个估计或猜测，所以在很多情况下，用复杂的模型计算的结果与简单的弹性模型的结果几乎没有差别”。

土是一种极其复杂的材料，土的本构关系模型常常是较为深奥的。研究和模型提出者应立足于实用，删繁就简、深入浅出。完成繁复的试验、理论推演、试错、验证、编程，使其实用化，交给工程师的应当是浅显的、实用的和有效的工具。而不能简单地罗列一大堆方程和参数，使人望而生畏。

建立本构关系数学模型的根本目的是立足于工程应用，有人主张研究建立本构模型也是为了加深对土的应力变形特性的理解。其实增强对土的应力变形特性的理解最有效的途径是进行系统的土工试验，试验可以建立对土性的认识和感觉；可以揭示和发现土在不同应力水平、应力路径和排水条件下土的强度变形特性，所以黄文熙先生说：“试验资料是永恒的”。而看我国目前一些有关“本构模型”的文章，主要还是那些对于土性所知有限的研究生们为了发表论文所作的数学作业。往往是在已有的模型上修修补补，或者以曲线拟合代替模型；自己一般不作试验，从别人的论文曲线上扒数据，用以确定参数和进行“验证”。

有的“模型”力图表现土的所有变形特性，参数多达 20 多个，且意义不清，确定参数的试验不明。所谓的模型验证，除了引用他人的数据，就是用确定参数的基本试验来进行所谓的“验证”。最后的结果往往是“先射箭，后画靶；打到哪，指到哪”，总是“符合得很好”。

5 工程实践中的非饱和土

Fredlund 对非饱和土提出基质吸力 $s = u_a - u_w$ 的概念，为非饱和土力学建立了理论基础^[14]。开拓了土力学的新领域。但它过于复杂，具有很大的不确定性，使工程师们对其“敬而远之”。

其实，在工程实践中人们遇到非饱和土的机会往往多于饱和土，因而非饱和土并不是稀有的物种。我们从地基中取出不同含水率的原状土，进行直剪试验、三轴试验与侧限压缩试验，求取其抗剪强度、压缩模量，用于工程设计和稳定变形分析，已经成为惯例，其实基质吸力的影响就含在其中了。当然将基质吸力从其受力体系中分离出来，形成双应力体系，对于深入了解非饱和土的强度和变形肯定是有学术价值和实际意义的。

但是基质吸力的本质是细粒土的毛细力的表现，从微观看它实际上是一种分子、离子层次的电化学作用。在用压力板法进行吸力量测时，我们对罐内的土样施加某压力通过压力板把孔隙水挤出，使其减小到某一含水率，就认为这个压力的大小就等于土样在这个含水率下的基质吸力值。这正如我们用力拧饱和的毛巾，施加一定的力，毛巾就有一定的含水率，认为在这个含水率毛巾的吸力的数值就等于施加的力，可即使强如西楚霸王也不可能将毛巾拧得如太阳晒得那么干。黏土颗粒表面强结合水（3 层水分子）对应的“吸力”可达 10^6 kPa 的量级（见图 6），这种吸力在土力学中没有实际意义。近年来发现高堆石坝中，随着堆石料含水率的循环变化会发生长期变形，这是由于粒间水对于大颗粒土的润滑与使颗粒接触点软化，造成的滑移、滚动和接触点破损而发生的变形。这种由含水率变化引起的堆石料的变形就应当与吸力没有什么关系。

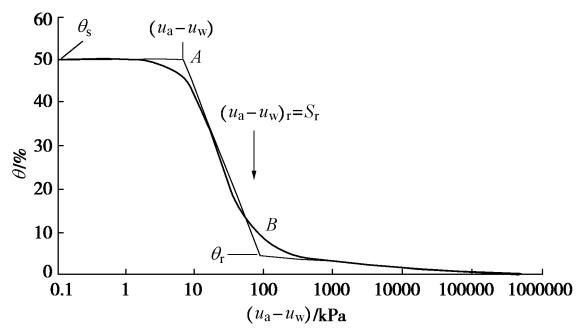


图 6 典型土的土-水特征曲线

Fig. 6 Typical soil-water characteristic curve

由于基质吸力与土的强度和变形参数间存在许多不确定性，室内和野外量测土的吸力也是相当困难的，

这就给用吸力来分析计算工程中的非饱和土造成很大困难。一些工程技术人员就企图在工程应用上绕开吸力，在已有的强度理论和本构模型中加入含水率（或饱和度）作为参数；通过不同含水率的同一种土类、同一干密度的试样进行试验，确定定量关系。有人通过一系列试验建立了常见土的抗剪强度与含水率（饱和度）之间的关系式^[15]：

$$\tau = c(w) + \sigma \tan \varphi(w) , \quad (8)$$

式中， w 为土的含水率。当降雨，基坑的侧壁土含水率增加时，可用该式验算其安全系数的减少，预测其安全度。

也可将邓肯-张双曲线模型的主要参数建立与含水率的关系：

$$E_i = K(w) p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n . \quad (9)$$

由于含水率增加使土产生的变形肯定是不可恢复的塑性应变，在土的弹塑性模型的硬化参数中包括含水率（或饱和度）是很适用的，即硬化参数表达为

$$H = f(\varepsilon_y^p, w) . \quad (10)$$

在弹塑性模型中，硬化参数是建立土的应力应变关系的桥梁，对于一种土料进行增湿试验，其初始含水率为 0，在围压 $\sigma_3=100$ kPa， $\sigma_1-\sigma_3=200$ kPa 应力状态下，增湿到 10%，其轴向应变增加，试验与通过弹塑性模型计算的结果见图 7^[16]，模型的硬化参数表达如下：

$$H = \frac{p_0}{1+k} = \frac{\left\{ \frac{1}{m_4} \left[\frac{\varepsilon_{v0}^w}{f_w(w)} \right] \right\}^{1/m_5}}{1+k} , \quad (11)$$

式中， k ， m_4 ， m_5 为试验参数， f_w 为一个含水率的函数， p_0 为屈服轨迹与 p 轴上的交点， ε_{v0}^w 为在 p_0 点增湿发生的体应变。对于堆石料与碎石料，含水率变化引起的变形是无法用吸力来描述的，但也可以类似地用含水率作为变量来描述。

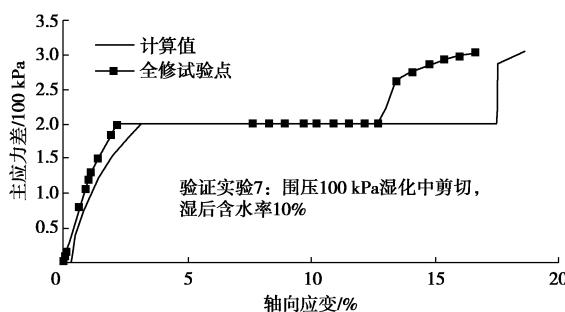


图 7 土料的增湿试验与模型计算

Fig. 7 Comparison between numerical and wetting test results

6 土参数的实用性

土的强度和变形参数通常通过室内试验来求取。但在工程中，我们需要的是更贴近于实际的参数，而不是理论上的参数。

根据虎克定律，土的变形模量 E_0 与压缩模量 E_s 间的关系为

$$E_0 = \beta E_s = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) E_s . \quad (12)$$

可见， $\beta < 1.0$ ， $E_0 < E_s$ ，可是通过土样的室内试验确定的 E_s ，又往往小于通过载荷试验确定的 E_0 。表 4 为常见地基土两种参数比值的范围，可见 E_0/E_s 常常是大于 1.0 的。

表 4 变形模量与压缩模量间的经验关系

Table 4 Relationship between deformation and constrained moduli

土的种类	E_0/E_s	平均值
老黏土	1.45~2.80	2.11
一般黏性土	0.60~2.80	1.35
新近沉积黏性土	0.54~2.68	0.98
新近沉积淤泥质土	0.35~1.94	0.93
红黏土	1.05~2.97	1.90
	1.04~4.87	2.36

济南万科化纤厂路项目地基在 10 多米厚的有胶结密实的卵石层下的第⑤层为闪长岩残积土 (Q_1^{el})，呈土状—粉细砂状，具塑性，风化程度不均。普遍分布，厚度较大，局部为强风化闪长岩。通过取样进行室内试验得到压缩模量 $E_{s1-2}=3.76$ MPa， $E_{s3-6}=8.6$ MPa，而用深层载荷试验测得的变形模量 $E_0=28$ MPa；现场旁压试验结果，旁压模量为 20~27 MPa。可见差别之大^[17]。通过现场的测试，将原拟的桩基础改为了天然地基，经观测建筑物最大沉降只有 10~20 mm。避免了基桩穿过卵石层和残积土层的困难，也大大降低了造价。杨光华近年来一直倡议通过现场载荷试验成果进行沉降计算，无疑是很有见地的^[18]。

7 实践中对土力学学科特点的理解

经本科六年的学习后，1966 年后又在清华干了两年“革命”，然后我就被分到黑龙江省的一个县工作，在工程实践中摸爬滚打干了 10 年。1969 年那里是与苏联战斗的前线，战备要求限期一年在呼兰河（生在这里的萧红曾写下《呼兰河传》）上建成两座大桥。我参加了主桥的设计和负责全程的基础施工，全面负责了副桥的设计与施工。图 8，9 就是这两座桥。

其中呼兰河大桥是一座长度 330 m 的双曲拱桥，1970 年竣工时人民日报给予报道。现在仍然在使用

(在旁边又增加了一座梁式桥)。此桥7跨,共有20根直径1.5 m的钻孔灌注桩作为基础。施工前没有时间,也根本不安排工程地质勘察,也未定桩长,定下桩位后直接在水中搭木架由30多民工用“大锅锥”开钻。我全程跟班负责,当民工提起一锅,发现是中砂,再根据民工推钻用力的情况,判断是稍密、中密还是密实,从一本油印的规范中查出摩阻力。最后当摩阻力加端阻力的安全系数得到2.0时,即下令停钻,下钢筋笼,下导管,浇筑混凝土。一根桩施工常常是两三天,不能漏掉每一钻,民工三班倒,我晚上就在岸边的工棚里打个盹。



图8 呼兰河大桥

Fig. 8 Master bridge of Hulan River



图9 呼兰河二道河副桥

Fig. 9 Accessory bridge of Hulan River

长期的、切实的工程实践是正确认识和理解土力学学科特点的基础。在基层各种工地干了10年,这样的工程阅历会使你对于土力学和土工实践中的实用主义的理解和认识真切而深刻。

8 结 论

我常对学生们说,土力学是一门很“土”的力学。土力学是厚重的、粗犷的,用经典的力学来改造土力

学,将其移进书斋,请入象牙塔;养在深闺,搬进绣房,抹上浓厚的微积分的胭脂,穿上华丽的可靠度的衣裙,挂满了能量原理的流苏,会提高其颜值,也就使其成为“伪娘”而毫无用处。

土力学中的实用主义也常表现为它的不严密性和随意性;实用主义与经验主义也往往只有一步之差与一墙之隔。土力学历史上的各种理论与试验研究与探索并不全是无用与无效的,它们常常是现在的实用主义方法的基础。我们提倡处理工程问题要简洁,但不应轻视与抹杀土力学的理论与概念。靠经验包打天下,将复杂的工程问题随意简单化,必将会受到惩罚。所以刘建航院士提出的“理论导向,实测定量,经验判断,检验验证”应当是岩土工程实践应遵循的准则。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [2] KNAPPETT J A, CRAIG R F. Craig's soil mechanics[M]. 8th ed. Spon Press, 2012.
- [3] MICHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [4] LADE P V. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface[J]. Int J Solids and Structure, 1977, **13**(11): 1019 - 1035.
- [5] NAKAI T, MATSUOKA H. Shear behaviors of sand and clay under three dimensional stress condition[J]. Soils and Foundations, 1983, **23**(20): 26 - 42.
- [6] 俞茂宏, 周小平, 张伯虎. 双剪土力学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012. (YU Mao-hong, ZHOU Xiao-ping, ZHANG Bo-hu. Twin shear soil mechanics[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2012. (in Chinese))
- [7] ROBERT D H, WILLIAM D K. An introduction to geotechnical engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc, 1981.
- [8] LEE K L. Triaxial compressive strength of saturated sands under seismic loading conditions[D]. Borkley: University of California at Borkley, 1965.
- [9] LADE P V, DUCAN J M. Stress path dependent behavior of cohesionless soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, **102**(1): 51 - 68.
- [10] 李广信. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016. (LI Guang-xin. Advance soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [11] SKEPTON A W, BJERRUM L. A contribution to the

- settlement analysis of foundations on clay[J]. Géotechnique, 1957, 7(4): 168 - 178.
- [12] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 2001. (SL274—2001 Design code for rolled earth-rock fill dams[S]. 2001. (in Chinese))
- [13] POOROOSHAB H B. The last lecture[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology. Saga: Institute of Lowland and Marine Research, Saga University, 2010.
- [14] 弗雷德隆德 D G 拉哈尔佐 H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, Trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [15] 梁金国, 冯怀平. 基于非饱和土理论的简化强度判断公式研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(11): 11 - 13. (LIANG Jin-guo, FENG Huai-ping. Research on simplified strength quation based on unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(11): 11 - 13. (in Chinese))
- [16] 李广信. 土的清华弹塑性模型及其发展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 1 - 10. (LI Guang-xin. Characteristics and development of Tsinghua Elasto-plastic Model for soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [17] 顾宝和. 岩土工程典型案例述评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (GU Bao-he. Review of classic case in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015. (in Chinese))
- [18] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927 - 1931. (YANG Guang-hua. Nonliner settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1927 - 1931. (in Chinese))

第十三届“孙钧讲座”学术报告 2 号通知

“孙钧讲座”基金理事会将于 2018 年 10 月 27 日在同济大学举办第十三届“孙钧讲座”学术报告会（第二讲），届时将特邀深圳地铁集团有限公司总工程师、深圳大学特聘教授、煤炭科学研究院建井研究院院长、中国工程院陈湘生院士作“效能最大化的城市轨道交通：践行孙钧先生教诲”学术报告。

主 办：“孙钧讲座基金”理事会
协 办：同济大学土木工程学院地下建筑与工程系，中国土木工程学会工程风险与保险研究分会，上海市土木工程学会

岩土力学与工程专业委员会，上海市力学学会岩土力学专业委员会，上海市土木工程学会地下工程专业委员会，中国土木工程学会土力学及岩土工程分会软土工程专业委员会，中国土木工程学会隧道及地下工程分会风险管理专业委员会，上海市创造学会土木与环境专业委员会，上海隧道工程股份有限公司，福建省闽南建筑工程有限公司

联 系 人：许建聪 (021-65982923, 13788907984, xjc0702@163.com); 张子新 (13601681538); 艾智勇 (021-65982201, 13671536166)。

(大会组委会 供稿)