

DOI: 10.11779/CJGE202209018

土力学发展的四个阶段的思考

杨光华

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要: 土力学的发展以变形特性作为依据, 可以分为四个阶段。第一阶段主要是研究土的一维压缩变形, 以压缩试验的 $e-p$ 曲线为标志; 第二阶段是研究土的三维压缩变形的形态, 以 Roscoe 的临界状态面为标志, 建立 $e-p-q$ 的三维曲面; 第三阶段是以 Duncan-Chang 本构模型为标志, 以土的压硬性和剪软性为特点, 更直观地以土的剪切变形研究为主; 第四阶段应该是以现场原位土为研究对象, 以原位测试技术为主要手段, 掌握原位土的力学特性, 发展原位土力学, 更好地服务于工程实际。第四阶段应该是今后值得努力的方向。

关键词: 土的压缩; 土的临界状态面; 原位土土力学

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)09-1730-03

作者简介: 杨光华(1962—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 总工程师, 主要从事土的本构理论、深基坑工程、高层建筑基础工程和软土工程的科研及设计。E-mail: 1084242143@qq.com。

Thinking of four stages of development of soil mechanics

YANG Guang-hua

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The development of soil mechanics can be divided into four stages based on the deformation characteristics. The first stage is mainly to study the one-dimensional compression deformation of soils, which is marked by the $e-p$ curve of the compression tests. Studying the three-dimensional compression deformation of soils is the second stage, which is marked by the critical state surface of Roscoe, and the three-dimensional surface of $e-p-q$ is established. The Duncan-Chang constitutive model is the symbol of the third stage. It is characterized by the compactness and shear softness of soils, more intuitively focusing on the study of the shear deformation of soils. Moreover, the fourth stage should take the field in-situ soils as the research object, use in-situ testing technology as the main method, master the mechanical properties of in-situ soils, develop in-situ soil mechanics, and better serve the engineering practice. The fourth stage should be a worthwhile direction in the future.

Key words: compression of soil; critical state surface of soil; in-situ soil mechanics

如果从 1925 年 Terzaghi 发表《土力学》开始算起, 土力学的发展已近百年了, 但今天应用于指导土工工程设计的方法仍然还是一种半理论半经验的方法。以最基本的地基沉降计算为例, 目前比较权威的《建筑地基基础设计规范》提供的地基沉降计算公式^[1], 是采用一个变化范围较大的经验系数 (0.2~1.4) 对理论计算值进行修正而得到的, 说明目前还是较难准确计算地基的沉降。同样, 对地基的允许承载力的合理确定也还是没有很科学解决的, 例如规范采用允许地基塑性区深度为基础宽度的 $1/4$ 作为允许承载力或地基承载力特征值, 即 $P_{1/4}$, 也是一种半理论半经验的结果。即使采用认为最可靠的现场载荷板试验, 由于与实际基础的尺寸不同, 用载荷板试验确定的承载力特征值也是半理论半经验的。

在当今现代科技日新月异的情况下, 土力学该如何发展, 土力学理论工程应用的瓶颈在哪里, 值得回顾和思考。

笔者认为: 从土的变形特性的角度, 土力学的发展可以分为四个阶段。

第一阶段: $e-p$ 曲线

有效应力原理是土力学的基石, 主要是研究饱和土中土骨架与土中水的应力转换, 认为控制土体强度的主要是土骨架的有效应力, 而对于土的沉降, 也认为主要是土中水的排出引起的压缩固结沉降, 因而把地基的沉降主要看作一维压缩沉降, 从而研究孔隙比 e 与压力 p 的关系, 通过一维压缩试验确定 $e-p$ 曲线,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078143)

收稿日期: 2021-08-23

主要是用于计算土的压缩沉降, 这个观点一直影响和沿用至今, 如规范中的沉降计算主要还是用一维压缩试验的 $e-p$ 曲线计算沉降, 然后通过经验系数修正计算值。

第二阶段: $e-p-q$ 曲面

单向压缩试验时得到的 $e-p$ 曲线是土体越压缩越密的, 土不会发生破坏, 实际上土体在荷载的作用下, 随着荷载的增大, 最后会达到破坏状态, 一维压缩试验不能全面反映土的实际受力变形状态。剑桥学派通过土的三轴试验, 建立了 $e-p-q$ 曲面, 考虑了剪应力对孔隙比的影响和土的破坏过程, 更全面地认识土的孔隙比 e 与应力状态的关系, 得到所谓的 Roscoe 面, 并发现土体破坏时孔隙比与 $p-q$ 的关系, 即临界状态线, 可以更全面地认识孔隙比 e 与应力状态的关系, 并提出建立了临界状态的土力学理论和最早的土体本构模型——剑桥弹塑性模型, 使土力学进入到更好描述土的强度与变形性状的本构模型研究为主的现代土力学阶段。

第三阶段: 土的压硬性和剪软性

临界状态理论虽然建立了 $e-p-q$ 的三维空间面, 但还是关注土的压缩变形 e , 而真正影响土的强度和变形的应该是剪切变形, 而不是孔隙比变化引起的沉降变形。在临界状态理论基础上建立的剑桥模型在表述剪切变形时, 通过能量函数的假设获得剪切塑性变形与塑性体积变形关系, 而能量函数并不能直接测定, 假设不同的能量函数会得到不同的结果, 感觉不够踏实。为此, 后来变成研究剪胀方程, 即研究剪应变与体应变的关系方程。

Duncan-Chang 模型^[2]通过常规三轴试验描述了土的压硬性与剪软性, 其依据的常规三轴试验曲线如图 1 所示, 表现为随围压 σ_3 的增加土变硬, 即 σ_3 越大, 相同的剪应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 对应的应变越小, 即为土的压硬性, 而对于同一个 σ_3 的曲线随着剪应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 的增大, 应变非线性变大, 即土变软, 直至破坏。这是最直观地反映土体压硬性和剪软性的结果, 是土与金属材料变形特性的最大不同。该模型在假设试验曲线可用双曲线表达基础上, 获得了土体切线模量的表达式为

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}\right)^2 K \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n, \quad (1)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (2)$$

如图 1 的切线, 地基的沉降变形计算用 E_t 参数, 较好地考虑了土体的压硬性和剪软性, 直观地反映了

土的剪切变形特点。图 1 的试验曲线由土样的常规三轴试验得到, 结果直观可靠, 是土的力学特性认识的一个重要进步。

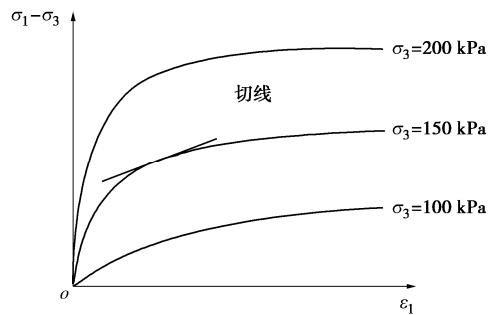


图 1 土样常规三轴试验曲线

Fig. 1 Curves of soils by conventional triaxial test

第四阶段: 原位土力学

前面对于土的力学特性的认识都是基于土样室内试验而获得的, 或重塑土试验的结果。实践中发现, 由于土是一种天然形成的材料, 更有一些由岩石风化而成的土, 如残积土, 具有较强的结构性, 土样经取样应力释放之后, 结构性遭到破坏, 与现场原位土的性质已不同。同样有一定胶结的砂土, 取样扰动后结构发生了破坏, 室内土样与现场土已发生了变化, 如果用扰动过的土样进行试验得到的力学特性指标是不能真实反映现场原位土的力学特性的, 用这样的土样所得到的试验指标进行地基沉降变形等的计算误差很大, 前面提到的《建筑地基基础设计规范》沉降计算的修正经验系数为 0.2~1.4, 最小与最大相差 7 倍, 最小经验系数为 0.2, 就是考虑用室内扰动土样试验得到的变形刚度比现场原位土的变形刚度要小, 用于计算所得的沉降偏大, 因而要乘以 0.2 的系数进行修正。但这种经验系数法修正也不是长久之计, 改进的方法是采用现场原位试验的测试方法, 来测定现场原位土的力学指标, 如土的变形模量参数, 用于计算, 以提高计算的准确性。例如, 笔者提出用现场压板试验确定土的初始切线模量 E_{t0} 和强度指标 c, φ 。假设图 2 的压板载荷试验曲线可以用双曲线方程 (3) 来表示^[3-5], 则拟合试验结果可以得到双曲线方程的两个参数 a, b , 由这两个参数可以得到地基的极限承载力 p_u 和土的初始切线模量 E_{t0} 。

$$p = \frac{s}{a + bs}, \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{p_u}, \quad a = \frac{1}{k_0} = \frac{D(1 - \nu^2)\omega}{E_{t0}}, \quad (4)$$

式中, D 为试验压板的直径, ν 为土的泊松比, ω 为压板的形状系数。

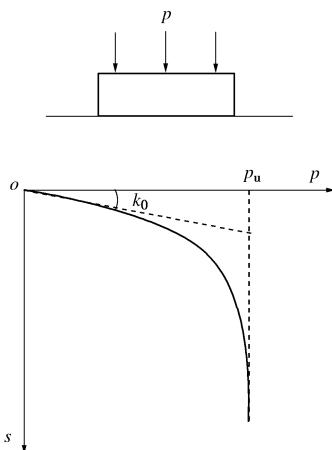


图 2 现场压板载荷试验曲线

Fig. 2 In-situ plate load test curves

如式(4)得到地基的极限承载力 p_u 和土的初始切线模量 E_{t0} ，由地基极限承载力 p_u 可以得到土的强度指标 c ， φ ，则不同应力水平下土的切线模量方程可表示为

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right)^2 E_{t0} \quad (5)$$

而式(3)中土的 3 个力学参数： E_{t0} ， c ， φ 就是通过现场原位试验直接得到的，能更好地反映原位土的力学特性。这样，用式(5)的变形参数计算地基的沉降会获得更符合实际的结果。式(5)反映了土的压硬性和剪软性。

图 3 所示为利用切线模量方程式(5)，采用数值方法计算得到的压板载荷试验的结果，计算曲线与试验曲线比较接近^[5-6]，比利用理想弹塑性模型得到的曲线更接近试验曲线。

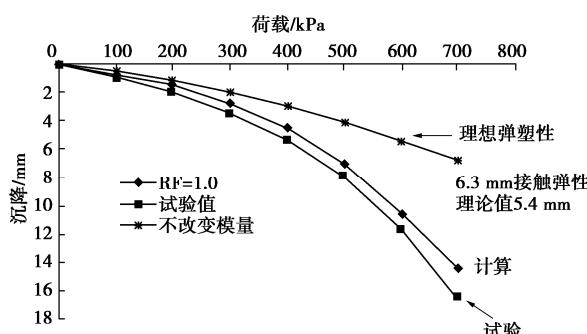


图 3 压板载荷试验计算比较

Fig. 3 Comparison between calculated results and those of plate load tests

因此，鉴于土质材料的天然特殊性，为更好掌握

天然土的力学特性，应大力发展原位试验技术，并发展与之相关的理论研究^[6-7]，发展基于原位试验的土力学理论，即原位土力学，使理论更符合实际，应是更好解决土工工程的途径。这应该是土力学发展的第四个阶段，也是更值得期待的阶段，可以更有效地提高土力学计算的准确性，提高工程设计水平。

参考文献：

- [1] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [2] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629 - 1653.
- [3] 杨光华. 基础非线性沉降的双曲线模型法[J]. 地基处理, 1997(1): 50 - 53. (YANG Guang-hua. Hyperbola model in calculating the nonlinear settlement of foundation[J]. Ground Improvement, 1997(1): 50 - 53. (in China))
- [4] 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. Nonlinear 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))
- [5] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 1 - 18. (YANG Guang-hua. Innovation and development of modern theories for foundation design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 1 - 18. (in Chinese))
- [6] 杨光华. 地基沉降计算的新方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (YANG Guang-hua. The New Method to Calculate the Settlement of the Foundation and its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [7] 杨光华. 发展原位土力学研究的意义[C]// 2012 年南方岩土战略论坛论文集, 广州, 2012. (YANG Guang-hua. Significance of developing in-situ soil mechanics research[C]// Southern Geotechnical Strategy Forum Proceedings 2012, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Guangzhou, 2012. (in Chinese))