

DOI: 10.11779/CJGE20230188

浅议土的复杂性

李广信

(清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 土的复杂性使人很难对其严密地定名与分类, 几乎不可能精准地预测其行为。土的复杂性来源于其是天然的产物和碎散的颗粒集合体。土的天然属性使其具有三相组成, 土中水成为土力学中理论上的难点, 也常常是一切地质灾害与工程事故的根源。土力学教学中所谓的土是被简单化了, 与大自然中的原状土有着很大的差别。土的碎散性使其受力变形性状与物理性质相耦合, 在受力变形的过程中其组成、状态、结构都处于不断地变化中, 这就是其力学性质非常复杂的主要原因。通过 DDA (Discontinuous deformation analysis) 分析揭示了土颗粒运动与土的各种变形特性间的联系; 土的湿化试验表明了塑性应变是度量土的应力-应变特性的主要因素。人类与土之间有着长期的密切的关系, 土作为人类的载体、材料、工具与武器, 是人类须臾不可离开的东西。在长期的生活与生产过程中, 人们积累了关于土的丰富的经验, 也吸取了很多教训。至今经验性的方法仍然是在岩土工程的综合判断与工程决策中的基本方法。

关键词: 复杂性; 自然的产物; 碎散组成; 经验论; 岩土三角形

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)05-1085-09

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工作。E-mail: ligx@tsinghua.edu.cn。

On complexity of soil

LI Guangxin

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

Abstract: The complexity of soil makes it difficult to name and classify it strictly, and it is almost impossible to predict its behavior accurately. The complexity of soil comes from that it is a natural product and a collection of fragmentary particles. The natural attribute of soil makes it have three-phase composition, and among them, the water in soil causes theoretical difficulties in soil mechanics, and is also the source of almost all geological disasters and engineering accidents. The so-called soil is simplified in soil mechanics teaching, and it is greatly different from the undisturbed soil in nature. In fragmentary soil, its mechanical deformation couples with physical properties, and its composition, state and structure are constantly changing in the process of stress deformation, which is the main reason why its mechanical properties are very complex. The relationship between the movement of soil particles and the various deformation characteristics of soil is revealed through DDA. The wetting tests of soil show that the plastic strain is the main factor to measure the stress-strain characteristics of soil. There is a long and close relationship between the humans and the soil, and as the carrier, material, tool and weapon of mankind, the soil is an indispensable thing for mankind. In the process of long-term life and production, people have accumulated rich experience about soil and learned a lot of lessons. Up to now, the empiricism is still the basic method in the comprehensive judgment and engineering decision-making of geotechnical engineering.

Key words: complexity; natural product; fragmentary composition; empiricism; geotechnical triangle

0 引言

恩格斯在《自然辩证法》一书中写到:“亚里士多德已经说过, 这些较早的哲学家都设想原初本质是某种物质, 空气和水; 后来赫拉克利特设想是火, 但是没有一个人设想是土, 因为它的组成太复杂”^[1]。古希腊的哲学们只看到土的组成太复杂, 尚无缘深入认识土的状态、结构与力学性质的复杂性。直到 20 世纪

初太沙基以其丰富的工程经验和杰出的悟性创建了土力学这门学科, 其性质的复杂性才更深刻地被人认识。土力学是与工程地质关系紧密, 采用经典工程力学基本手段, 考虑碎散介质特性的一门学科。由于土性质的复杂性、影响因素的多样性以及作为天然碎散材料

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52090081, 52108372)

收稿日期: 2023-03-03

不可控的变异性,在解决实际问题时,很难做到如经典力学那样精准与明晰。

20 世纪 60 年代—80 年代,计算机技术的快速发展,促进了非线性有限元等数值计算的广泛应用,进而推动了土的应力-应变-强度的本构关系数学模型的研究。一时间百花齐放,经典力学中的各种手段都被用于描述土的本构关系,线弹性、非线性弹性、弹塑性(线弹性-完全塑性、单屈服面、多屈服面、边界面、应变空间)、黏弹塑性、内时理论、损伤理论等模型纷纷登场,各夸自家颜色好。正如 Poorooshasb 所说,各种本构模型“它们已经在形式非常复杂而不再适用于一般的应用”,“即使是影响土的变形的所有因素都知道了,我们仍然不能用一个公式准确地描述它”^[2]。

1987 年在美国的克利夫兰召开了“非黏性土的本构关系国际研讨会”^[3],会前公布了某种砂土的有关资料和“基本试验”(如常规三轴压缩试验等)的试验结果以及“目标试验”(复杂应力路径试验)的应力路径,在国际范围内征求本构模型参赛。但“目标试验”的结果要在全部提交预测结果后用以评分。会议共有 32 个模型参赛,评分标准如图 1 所示。图 1 中实曲线为试验结果, S_i 为得分系数,即得分数为 $S_i \times 100$ 。

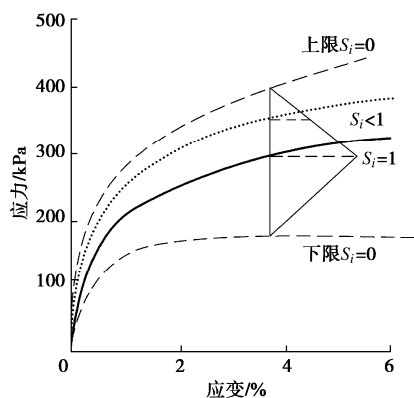


图 1 目标试验中轴向应力应变预测的评分标准

Fig. 1 Scoring criteria of stress-strain prediction in target tests

即使如此宽松的评分标准,预测其轴向应力-应变的及格率才为 31%;而在预测体应变中,由于它具有剪胀性,能猜到是体胀还是体缩已属不易,最高分为一个弹塑性模型所获得(40 分)。在建筑工程中能预算出建筑物的地基沉降或基坑支护的位移与实测值比较的误差在 20%左右就已经令人十分满意了。

模糊数学的创始人扎德(ZADEH L A)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”。对于力学性质极其复杂土的正是如此。老子的《道德经》开篇第一句就是“道可道,非常道”,即可以表述清楚的对象都是

简单的,如果大自然中万物发展与变化规律可以完全清楚地表达出来,那么他就不是永恒的“道”了。“道法自然”,土是大自然的产物,它也是不可能完全清楚表述的。

土的复杂性还体现在对其命名上。在土力学的教材中与课堂上常会有粗粒土、细粒土与黏性土、无黏性土这样的叫法。其实深究起来这一些混乱与有歧义的叫法。语文老师在课堂上讲:在岑参的“走马川行雪海边,平沙莽莽黄入天”“一川碎石大如斗,随风满地石乱走”等诗句中,前者说的是细粒土,后者说的是粗粒土,即所谓“飞沙走石”。土木系土力学老师在课堂上又教导我们说:粒径超过 0.075 mm 的粗颗粒质量超过总质量 50% 的土为粗粒土;反之为细粒土^[4]。水利系土力学老师又讲:根据水利部主编的《土的工程分类标准》^[5],粗颗粒质量不大于总质量 25% 的土叫作细粒土。根据老师的教导,感觉粗粒土应当总是透水性强、抗剪强度高、压缩模量大的土,但如图 2 所示的大颗粒含量大于 50%,小于 65% 的粗粒土,如果粗颗粒都被黏土所裹挟呈悬浮状态而未能形成骨架,其渗透系数、内摩擦角与压缩模量都由黏土性质所主导,它甚至可以作堆石坝的防渗心墙材料。

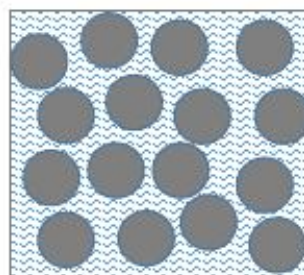


图 2 含有黏土的粗粒土

Fig. 2 Coarse-grained soil with clay

同样,黏性土与无黏性土也是容易相当混乱的术语。有人认为黏聚力 $c=0$ 的土是无黏性土,也有人认为黏性土=细粒土,无黏性土=粗粒土。其实无黏性土是没有规范明确定义的,只是在《建筑地基基础术语标准》中含混地认为^[6]:“颗粒间不具备黏聚力,在抗剪强度中黏聚力可以忽略的粗粒土”。这里的“可以忽略”是一个模糊的概念,取决于工程的性质和设计者的胆量与意愿。粗粒土常具有可观的黏聚力,如图 2 中的混合粗粒土,天然胶结的砾石卵石层,铁板沙层,密实的强咬合砂石层,潮湿的具有很强基质吸力的粉细砂等的黏聚力就难以忽略;另外粗粒土强度包线的非线性也会推演出黏聚力。在实际上由于边界条件的限制,不可能用直剪仪或三轴仪直接进行 $\sigma_m(\sigma_3)=0$ 的试验,因而黏聚力 $c=0$ 是无法直接测定的,黏聚力 c 通常是通过强度包线的截距确定的。

黏性土是由塑性指数 I_p 或塑性指数加液限 w_L 定名的, 决定于其黏土矿物及其含量; 细粒土是以大于 0.075 mm 的颗粒含量不大于 50% 定名的, 正如身高小于 1 m 的侏儒不能认为是儿童一样, 细粒土也不等同于黏性土。细粒土中的粉土类就不属于黏性土, 当然也不属于无黏性土。其实在粗粒土与细粒土之间, 黏性土与无黏性土之间存在着广袤的空间。

作为天然材料, 土的组成与性质的复杂性造成了定名的困难, 不同工程门类所关心的土的物理力学性质不同; 如建筑行业主要关心地基土的承载力与变形, 而水利水电行业则更重视土的水力特性, 致使各行业的分类也不尽相同。

《道德经》中的第二句话也适用于土的复杂性: “名可名, 非常名”, 即可清楚明确定名的都是简单的对象, 大自然存在着很多界限模糊的事物。

土的复杂性主要源于两个因素: ①其为天然材料, 是长期地质历史的产物, 千差万别, 千奇百怪; ②它的碎散性, 使其表现出一些不同于连续介质的特殊的性质。

1 作为天然材料的土

作为一种天然材料, 土的组成、状态、结构及相应的力学性质呈现极其复杂的情况。地球上的土通常由固、液、气三相组成, 而放眼太阳系以及全宇宙, 可能会有不少星球与空间都存在岩石风化的产物——土, 但其主要是物理风化。只有幸运的同时存在液态水与大气层的地球上才会具有化学风化, 这就造成了三相组成的土, 也产生了独特的黏土矿物。也正是土中水使土的物理力学性质变得更为复杂。土中水是土力学理论中的难点, 也是很多地质灾害与工程事故的根源。这可能源于静与超静孔隙水压力、渗透力、湿陷、湿胀、液化、冻胀、渗透变形、流滑、冲蚀等。所以太沙基说: “在工程实践中, 与土相关的难题几乎全部是因土孔隙中的水所致, 而与土本身无关。在一个没有水的星球上, 土力学也就没用了”^[7]。顾宝和^[8]最近的一篇文章标题是“难缠的水, 可怕的水”。该书从抗浮设防水位、裂隙水、渗透破坏、水压力几方面, 以很多失事的典型案例说明了土中水的难缠与可怕。

在大学本科课堂上的《土力学》淡化了土的天然属性, 将土类和土性理想化与简单化。其中介绍的土基本是二相的饱和(或干)的重塑土, 这样就掩盖了天然土的多样性、多变形和复杂性。学过这样的土力学的学生毕业后到工程实践中, 就会遇到一个过不去的断桥而使其手足无措。他们会遇到以其含水量计算

的液性指数 I_L 远大于 1.0 , 而并不呈现流态, 并具有很高强度的原状结构性软土, 如图 3 (图 3 选自 The Division of Building Research, National Research Council of Canada. Hand by P.C. MacMillan) 所示的高灵敏度原状淤泥土, 其无侧限抗压强度可以达到 100 kPa , 而重塑后即变成泥浆; 他们也会在基坑工程中看到本应无黏聚力的 $3\sim 4\text{ m}$ 厚潮湿的粉细砂层可近于竖直开挖; 强胶结的卵石层用各种钻具都难以穿过。

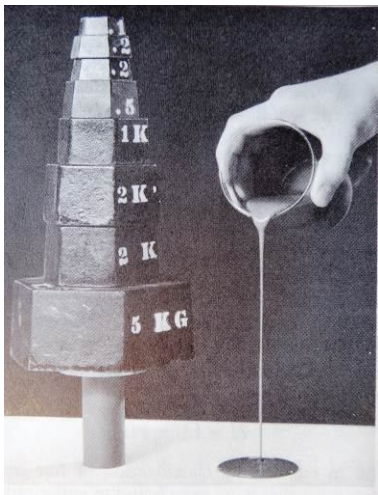


图 3 原状与重塑的淤泥土

Fig. 3 Undisturbed and remolded silt

在课堂上, 他们被告知: 变形模量 E_0 与压缩模量 E_s 的关系为

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

由于泊松比 $\nu \leq 0.5$, 所以 E_0 不可能大于 E_s 。其实土的模量是一个很难讲清的参数, 而实际上通过载荷试验测得的变形模量常常大于室内试验的压缩模量, 见表 1^[9]。

表 1 变形模量与压缩模量间的经验关系

Table 1 Empirical relationship between deformation modulus and constrained modulus

土类	E_0/E_s		土类	E_0/E_s	
	变化范围	平均值		变化范围	平均值
老黏土	1.45~2.80	2.11	新近沉积黏性土	0.35~1.94	0.93
一般黏性土	0.60~2.80	1.35	新近沉积淤泥质土	1.05~2.97	1.90

济南某建筑工程地基中的闪长岩残积土, 勘察报告中室内试验给出的压缩模量为 $E_{s1-2} = 3.76\text{ MPa}$, $E_{s3-6} = 8.6\text{ MPa}$, 而通过现场深层载荷试验得到的变形模量 $E_0 = 28\text{ MPa}$, 旁压试验得到的变形模量为 $E_0 = 20\sim 27\text{ MPa}$ 。最后基础方案由长桩基础改为天然基础, 9 栋高层建筑实测沉降量仅为 $11\sim 22\text{ mm}$ ^[10], 可见室内

试验中取样的扰动常常会使参数严重失真。

在土力学课堂上会讲到，饱和软土的不排水强度 c_u 是不排水三轴压缩试验破坏时莫尔圆的半径；而其无侧限压缩强度 q_u 是其莫尔圆的直径，所以 $q_u=2c_u$ 。可是杭州地铁某基坑工程的勘察报告却给出如表 2 所示数据。可见。十字板剪切试验测得的 c_u 甚至大于室内试验的无侧限抗压强度 q_u 。这也反映了取样后的室内试验与原位测试的差别。

表 2 淤泥质土的强度指标

Table 2 Strength indexes of silty soil

土层	无侧限抗压强度	十字板剪切
	q_u/kPa	c_u/kPa
④ ₁	25.34	28.4
⑤ ₁	24.06	34.1

主要的问题就是取样、运输、存储、制样、试验过程中的扰动。所以在国外严格规定，对于饱和软土，除了取样规定采用薄壁取土器和精细的取样技术外，还要求：

- (1) 保证试样完全饱和。
- (2) 试样必须是原状、均匀、无缺陷的。
- (3) 在饱和黏土情况下,初始的有效围压等于残余（负）孔压，没有回弹及固结。
- (4) 取样后，试样必须快速地（5~15 min）试验到破坏,以免发生水分蒸发和表面干燥。

目前我国的取样与试验还很难达到这样的要求，所以室内试验测到的强度与刚度与原状土比较常常是偏小的。

地球上的土具有很强的地域性与时域性。即使是见多识广的岩土工程专家、大师也不敢自称为无土不知。有鉴于此，岩土工程师应因地制宜，深入现场，注重调查研究，重视地方规范与当地的工程技术人员

的意见。
太沙基于 1951 年在伦敦召开的“建筑研究会议”上抱怨说：“地基基础不能分享建筑成功的荣誉，因地基基础本身及其成败得失之因深埋于地下，他被当成了非亲生的孩子（stepchildren），由于缺少关爱，结果惹出来不少麻烦”^[11]。地基土深埋于地下，使天然土、水的分布及其物理力学性质很难确知，这就进一步加深了土的复杂性。在浩瀚的力学领域，似乎土力学也属于 stepchildren。

2 作为碎散材料的土

土木工程中的砖、石、钢、木与混凝土，在一定的应力范围内，其受力变形并不改变其物理性质，因而在一定范围内是或近似是线弹性的。土作为一种由碎散颗粒组成的集合体，不同于连续固体的稳定性，

表现出与液体相似的流动性。古希腊哲学家赫拉克利特说过：“人不能两次踏入同一条河流”，你踏入一条河，现在温柔地抚摸你小腿的河水已经不是一秒钟以前的那些河水了，子在川上曰“逝者如斯夫”，也是这个意思。如果你关注一个建筑物的施工、一个基坑的开挖、一个现场测试或一个试样的试验过程，就会发现在这些过程中所涉及的土，其组成、状态、结构、颗粒间的相对位置及其力学性质是不断变化的。由碎散颗粒组成的土其受力变形是与其物理性质相耦合的。可以说土是处于不断地流动与变化中，或者土是有生命的。

图 4 表示的是首先在 OA 段在为 K_0 条件下固结（侧限压缩）的试样，到 A 点进行 $\sigma_3=K_0\sigma_{1A}$ 的常规三轴压缩试验，其后应力应变曲线为 AB 段。在拐点 A 点的两条曲线的斜率分别为 E_s 和 $E_t=E_0$ 。这条曲线可以近似描述地基土中某一土单元在其沉积→固结压缩→进行浅层载荷试验→达到极限状态的全过程。在 OA 阶段是其成长健壮的阶段，沉积土层在逐渐增加的大面积均布自重应力作用下其孔隙比减小，密度增加、含水率减少，压缩模量增加而逐渐被压密。从 A 点开始，是加载过程，它开始承受较大剪应力，应力水平 σ_1/σ_3 提高，模量降低，也是其逐渐衰弱、老化的过程，因压缩与剪切而发生沉降。在最后阶段，土颗粒在剪切过程中重新排列，甚至产生剪切滑动面而破坏。就像一个人的生老病死的全过程，其体内的状况在不断变化，其骨密度、器官与细胞的也经历了由兴到衰。

有人用 Sacramento 河砂进行了各种围压下的排水三轴试验^[12]，它们用相对密度 $D_r=1.0$ ，孔隙比 $e=0.61$ 的这种砂试样进行在最高围压达到 13.7 MPa 的试验，在这个围压下剪切过程中其体积一直是减小的，应力应变曲线是应变硬化。在试样剪切破坏以后，其孔隙比达到 0.37，级配曲线右移，细颗粒含量由 4% 增为 12%。可以想像在极高围压下的压缩与剪切过程中，砂土颗粒不断滑移、转动、错位、楔进、破裂、磨损的经历。

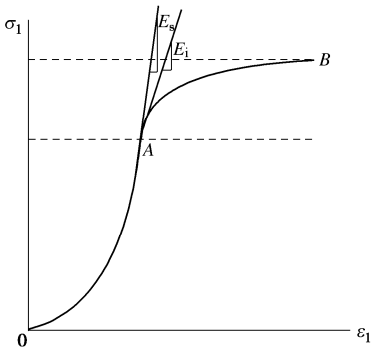


图 4 一个土试样的两段试验

Fig. 4 Two-stage tests of one sample

土体受力时颗粒间接触点压力会发生弹性变形，而粒间的剪力也会驱动颗粒产生相对位移。有人认为这种颗粒间所有的相对位移都产生不可恢复的塑性变形（应变），实际情况可能是很复杂的。

在图 5 中，虚线表示的是上部颗粒的初始位置，实线为移动后的位置。图 5（a），（b）中颗粒移动后其位（势）能不变或降低而处于稳定的位置，所以减载时其位移与变形是不可恢复的，将产生塑性应变；图 5（c），（d）上部颗粒移动后位能提高了，是不稳定的，剪力减少后它们将会恢复到原位，减载时其位移可恢复，产生了似乎是“弹性”应变。这种情况造成了土受力变形的复杂性。

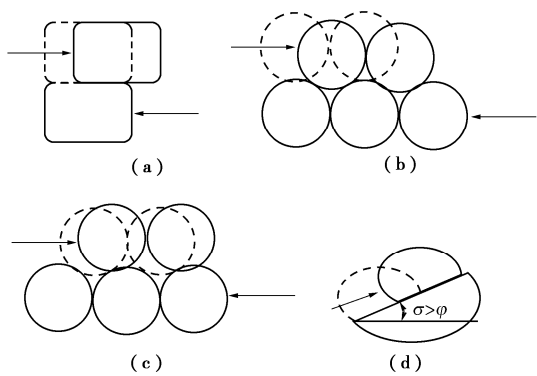


图 5 土颗粒相对位移的几种形式

Fig. 5 Several forms of relative displacement of soil particles

关于土变形的非线性、压硬性、弹塑性、加卸载的滞回圈、剪胀（缩）性、应变硬（软）化等已经为人们所知，另一种奇怪的现象是土的减载体缩，观察大量不同应力路径的试验，都发现土在减载时体积不是回弹体胀，而几乎都是体积收缩^[13-14]。图 6 为用二维的 DDA（非连续变形分析）计算的模型砂的应力应变的过程^[15]，其中设颗粒间滑动摩擦角 φ_r 为 15° 。颗粒初始按最密实状态排列。图 6（a）为在不同阶段的颗粒的排列；图 6（b）为计算的应力应变曲线，以体胀为正，可以发现减载体缩现象；图 6（c），（d）为颗粒两种不同排列时的粒间力的极限平衡分析。

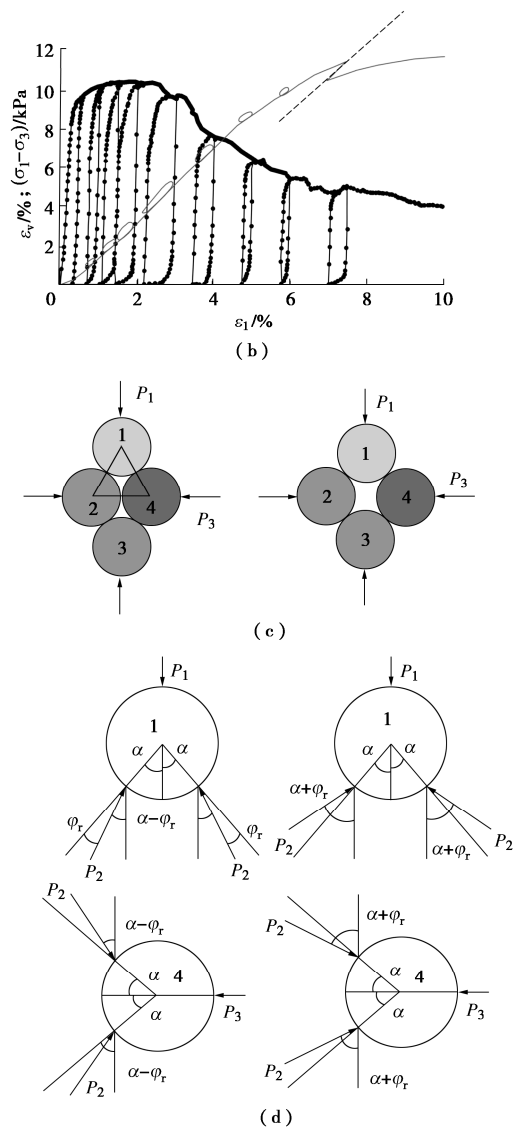
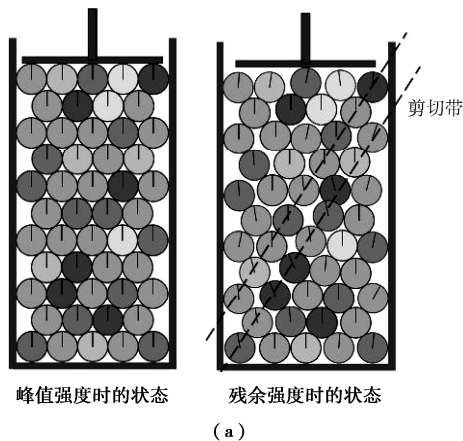


图 6 用 DDA 分析模型砂应力应变关系

Fig. 6 Analysis of stress-strain relationship of model sand with DDA

在图 6（d）中，其左侧图为向下加载时，颗粒 1 推动颗粒 2、4 侧移，颗粒 1 与颗粒 4 力的极限平衡状态；右侧图表示竖向卸载时，颗粒 4 向上推动颗粒 1 两颗粒力的极限平衡状态。表 3 表示颗粒不同排列时，极限状态下 P_1/P_3 。

表 3 加载与卸载极限状态的 P_1/P_3

Table 3 P_1/P_3 at critical state of loading and unloading

状态	$\alpha / (^\circ)$	P_1/P_3	
		加载	卸载
初始—峰值	30	3.732	1.000
峰值强度以后	35	2.748	0.839
残余强度	45	1.732	0.577

根据图 4、6 和表 3，可以分析颗粒间运动与土的应力应变特性间的关系。

（1）非线性

在图 4 中，对于侧限压缩或各向等压试验，竖向

应变 ε_v 主要源于土的孔隙减少, 在压缩过程中, 土变密、变硬, 表现为压密性, 压缩曲线是上凹的, 如图 4 中的 OA 段; 在 $\sigma_h < K_0 \sigma_v$ 的试验中, 颗粒向下位移将推动其下部颗粒侧移而体胀, 见图 6 (c), (d), 随着竖向应力 σ_v 的增加, 颗粒侧移, 阻力减少, 模量逐渐减小, 如图 4 的 AB 段, 形成上凸的曲线。

(2) 剪胀性

从图 6 (c) 可见, 从二维颗粒的正三角形排列到正方形排列其孔隙比增加了 0.17, 图 6 (b) 中计算的最大剪胀量约为 0.12, 这是由于达到残余强度时, 除了剪切带附近外, 颗粒没有完全达到正方形排列, 见图 6 (a)。

(3) 应变软化

图 6 (b) 中, 峰值强度 σ_f 与残余强度 σ_r 值之比为 0.42, 而表 3 中 P_1 的峰值与残余值之比为 0.46, 二者较接近。从图 6 (a) 中可以清楚地看到剪切带的发生, 表明剪切带控制抗剪强度。

(4) 滞回圈

图 6 (b) 第 5 次加、卸载表现出明显的滞回圈。在图 6 (d) 和表 3 中, 卸载时, P_1/P_3 在 2.748~0.839 时, 颗粒基本不动, 只发生弹性应变; 当卸载到 $P_1/P_3=0.839$, 颗粒 2, 4 向内推动颗粒 1, 使其上升, 产生竖向回弹; 反之, 当再加载到 $P_1/P_3=2.748$ 时, 颗粒 1 又向两侧推动 2, 4, 产生再加载时的竖向应变增加。在边界面本构模型中, 滞回圈内的这种可恢复应变并不认为都是弹性变形, 而被认为是在边界面内的屈服与塑性应变。

(5) 减载体缩

与滞回圈相对应的, 当减载到 P_1/P_3 表 3 中的最右一列时, 颗粒 2, 4 向内移动, 推起颗粒 1 发生竖向的上升, 同时孔隙体积减少, 伴随着是试样体积收缩而不是回弹, 这在最后一次减载时更明显。

自然界中真实的土, 其级配与颗粒形状远比这里复杂, 但其基本机理应是一样的。土体受力变形与其物性变化间的关系如图 7 所示。应力增加→颗粒本身及其间关系改变(物性变化)→塑性应变 ε_{ij}^p →应力应变关系性质变化, 这就是土的力学复杂性的根源。在各种力图反映土的本构关系的模型中, 主要工作就是建立连结这种耦合关系的纽带与关键参数。如弹塑性模型的硬化参数 H 、损伤模型的损伤变量 W 、内时理论模型的内时变量 I 、塑性应变耗散理论中的塑性应变势 λ 、Desai 使用的扰动因子 D , 都不约而同地将它们作为塑性应变 ε_{ij}^p 的函数。可见塑性应变是土在受力变形过程中物性变化的反映与度量尺度, 也是影响受力时应力应变性质的关键因素。

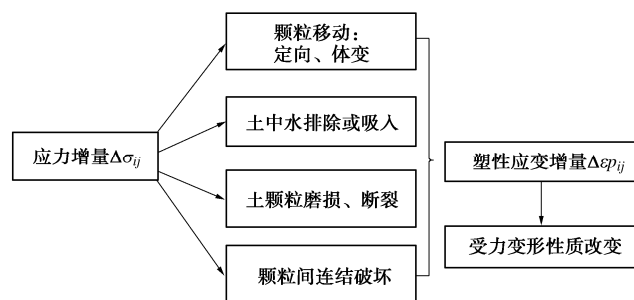


图 7 土的受力变形与物性间的耦合

Fig. 7 Coupling between mechanical deformation and physical properties of soil

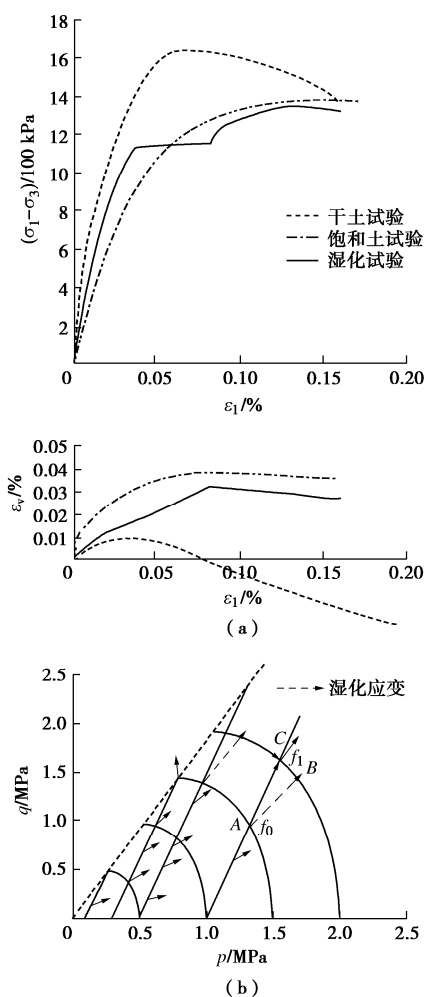


图 8 干、湿堆石模拟料及其湿化三轴试验

Fig. 8 Simulation material of dry and wet rockfill and its wetting triaxial test

引起土产生塑性应变的不仅仅是应力, 湿度、振动、温度(冻融)等广义的“作用”都会引起其塑性变形。其中土的湿陷(化)与湿胀是最常见的现象。高堆石坝建成后初次蓄水, 由于高压下堆石坝料初次遇水湿化变形, 会发生较大的坝体沉降, 成为高堆石坝的关键技术问题。图 8 为小浪底堆石坝的模拟堆石料的湿化试验曲线^[16]。

在清华弹塑性模型中, 土在干、湿情况下的屈服

函数的形式是一致的, 表示为 $f(\sigma_{ij}) = H(\varepsilon_{ij}^p)$ 。干土三轴试验应力状态 σ_{ij} 达到图 8 (b) 中的 A 点, 对应的屈服面为 f_0 。保持应力状态不变, 向干试样内加水饱和, 发生湿化轴向压缩与体积收缩, 塑性应变由 ε_{ij}^p 增加到 $(\varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^s)$, 其中 ε_{ij}^s 为湿化应变, 它无疑是塑性应变。这样, 饱和以后的湿土, 其应力状态 σ_{ij} 未变, 仍然在 A 点, 但由于其塑性应变增加到 $(\varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^s)$, 相应的屈服面 $H(\varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^s)$ 在 C 点 f_1 , 但其应力状态点位于其屈服面 f_1 之内, f_1 相当于它的前期屈服面。湿化后的土料在 $A \rightarrow C$ 加载过程就只会产生弹性应变, 图 8 (a) 中的湿化试验曲线清楚地表明了这种变形的弹性阶段。

湿化试验表明塑性应变是土的应力应变性质的一个决定性的尺度, 并且这个塑性应变不管是什么原因引起的。

3 人类与土

易传里有“地势坤。君子以厚德载物”, 地者土也, 大地之土层以其宽阔的胸怀与厚重的品格承载万物, 哺育万物, 生发万物, 归藏万物。我们的祖先在进化到人之初最早接触的对象之一就是土, 土成为人类的载体、材料、工具与武器, 新、旧石器时代的石器与陶器也都是土。远古人类的最大的威胁是洪水与猛兽, 6000 多年前在黄土高原上栖息的半坡村的先人们, 在其群落聚集地的四周开挖有深宽均为 5~6 m 的壕沟以防御猛兽与外部落的入侵;《山海经》记载: 在 4100 年前“洪水滔天, 鲧窃帝之息壤以堙洪水, 不待帝命。帝命祝融杀鲧于羽郊。鲧复生禹, 帝乃命禹卒布土以定九州”。这里的“卒布土”就是大兴土方工程以堙塞洪水。

这里讲的是鲧盗取了天帝的“息壤”, 用以治水。在《淮南子》中也提到“禹乃以息土填洪水, 以为名山”。可见大禹也是用息土来治水的。那么这个息壤或者息土是什么东西呢? 郭璞在《山海经注》中说: “息壤者, 言土自长息无限, 故可以塞洪水也”。面对滔滔的洪水, 碎散的土石极易被冲走, 正如屈原所质疑的“洪象极深, 何以填之?”(天问)。看来息壤或者息土在流水中不会被冲毁, 并且可以不断填筑增长, 所以被用来阻截洪水。从先秦时建造的都江堰工程可以发现, 古人在治水中, 会将竹、木、柴、草与土石结合, 造成竹笼、杓槎、羊圈、埽捆, “以堙洪水”。图 9 是中国古代在治水中应用的几种型式的加筋土, 它们就应是所谓的“息壤”之类^[17]。

古人在与大自然抗争中, 就地取材, 因地制宜, 聪明地发明了各种型式的加筋土。在河流的上游, 他

们用竹木与河卵石组合, 形成巨大的结构体, 拦洪筑堰、堵塞决口(图 9 (a), (b), (c)); 在塞外戈壁与黄土高原, 用柴草与砂石做成埽捆, 堵口抢险, 护坡护岸, 或树枝+砂土筑墙建坝(图 9 (d), (e)); 图 9 (f) 是在浙江余杭 5000 多年前良渚古城大型水利工程中使用的草裹泥, 将太湖湖岸的淤泥用茅草包裹, 用芦苇绑扎, 用竹筏运送, 建成良渚古城附近土方为 260 万方的 11 个土坝。

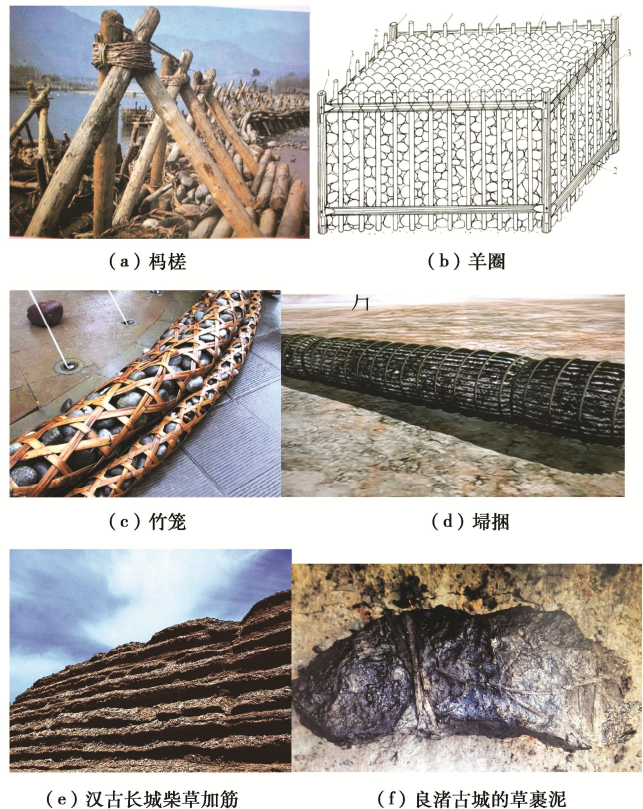


图 9 我国古代的各种加筋土技术

Fig. 9 Various reinforced soil technologies in ancient China

千百万年以来, 人类在利用土这种极其复杂多样的材料过程中, 探求摸索, 积累了丰富的经验。古人在岩土工程实践中, 基本的途径是试错。屈原所写的“九折臂而成医兮, 吾至今而知其信然”(惜颂), 就是在失败和挫折的教训中取得经验学习知识。据说大禹之父鲧治水采用“欲壅防百川, 堕高堙庠”的方略, 就是主要以“堵”的方法, 结果“治水无状”被“殛之于羽山。”而大禹吸取了鲧失败的教训, 以疏导为主, 湮(塞、填)、导、蓄相结合, 终于战胜了洪水。明代的潘季驯在治理黄河时也是采用束水冲沙, 将泥沙疏导下去的思路。而在 20 世纪 50 年代我国的三门峡水库工程又重蹈了鲧的覆辙, 堵塞河水使泥沙淤积成灾。

“试错”并非只限于古人所为, 除非人类掌握了绝对的真理, 否则就总是在试错。恩格斯讲: 我们对大自然的每一次胜利, “自然界都报复了我们”^[1]。在

岩土工程中,有时我们成功地改造了自然,如围垦湿地、填海(湖)造地,但却恶化了环境,破坏了自然界的平衡。

至今已学习与掌握了一些土力学理论知识,但在土工问题中仍然是经验化的方法起主导作用。太沙基讲过“一个具有详尽工程资料的案例,应当受到与十个具有创意的理论一样的重视”。英国的 Burland 在 1987 年提出岩土工程三角形^[18],并成为英国《岩土工程手册》中指导性的思想^[19]。

这个三角形是将“场地剖面”、测试的性状(特性、参数)”和“合适的模型”分别置于三角形的 3 个顶点(见图 10);而把“经验化:此前的案例、成熟的经验”置于中心位置。可以看到 3 个顶点:勘察,试验与测试,理论、物理、数值模型,这三者都是工具,是手段,而岩土工程占支配地位的综合判断与工程决策则是经验化的。这就是岩土工程不同于其他工程门类的被奉为经典的独特的工作方法,也是人类发展史上一直采用的方法。

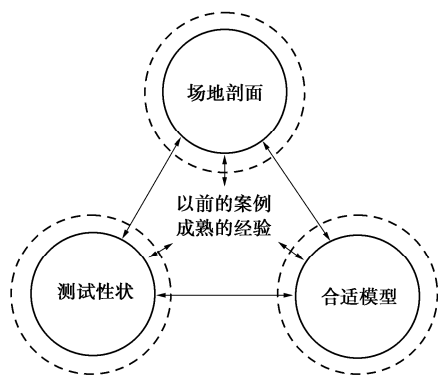


图 10 岩土工程三角形

Fig. 10 Geotechnical triangle

在各类土木工程部门中,与岩土有关的工程事故常常占很大的部分,中国改革开放 40 余年,空前地大兴基本建设,其中建筑工程与地铁工程中的基坑事故、建筑工程地基基础失稳与沉降问题并不少见。顾宝和在《岩土工程典型案例述评》一书中详细评述分析了中国 40 余年来在岩土工程中典型的 31 个案例,其中近一半是失事与发生问题的案例^[10]。英国有关部门曾统计,地基基础问题可占建筑工程问题的 50%左右^[18]。土性的复杂、多样、多变使岩土工程永远不能其他学科与工程门类那样精准。

4 结 论

对于土的复杂性,本文在几个方面进行了一些讨论。它不可能把土的复杂性讲的很清楚透彻,但希望能对人们,尤其是对青年岩土工程技术人员有所裨益。

(1)土的组成、状态、结构与力学、水力性质极为复杂,这种复杂性源于土的天然属性及其碎散的组成。人们很难对其严密地定名与分类,也不可能精准地描述它们。

(2)作为大自然的产物,地球上的土通常为三相组成。其中土中水是土力学理论中的难点;也是地质灾害与工程事故主要的祸首。其自然属性造成土的多样性、多变性和复杂性,在课堂与教材中,通常是把土简单化与概念化,对于自然界原状土的真知只有在长期的工程实践中学习与积累。

(3)土的碎散性使其承载时表现出其受力变形与物理性质间的耦合,在受力变形过程中,其颗粒本身以及颗粒间的相互位置与连结都会随之不断变化,造成其组成、状态、结构的变化,表现出一种流动性或活性。与此相关,土的应力应变关系中也因此表现出非线性、弹塑性、压密性、剪胀(缩)性、应变硬(软)化、减载-再加载的回滞圈以及减载体缩等独特的现象。其中塑性应变是连结土的力学性质与物理性质间的纽带。

(4)土与人类间有着不可分离的悠久的历史,广袤的大地为人类提供了载体、材料、工具与武器。在千万年的生活与生产过程中,人类认识土、利用土,改造土,取得了经验,发明了无数令人惊艳的材料、工艺工法、工程理念。同时,在生产与生活的实践中,在不断的试错过程中,也会受到大自然的惩罚,吸取了教训。时至今日,利用勘察、试验与理论、物理、数值模型为工具,靠经验化的综合判断与决策,依然是岩土工程的基本工作方法。

致 谢:感谢介玉新,朱自立,朱洪在附图方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] 恩格斯. 自然辩证法[M]. 北京:人民出版社, 1971. (Engels. Dialectics of Nature[M]. Beijing: People's Publishing House, 1971. (in Chinese))
- [2] POOROOSHASB H B. The last lecture[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology. Saga, 2010.
- [3] KNODEL P C, BIANCHINI G, SAADA A, et al. Complex stress paths and validation of constitutive models[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, 14(1): 13.
- [4] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))

- [5] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (Standard for Engineering Classification of Soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [6] GB/T 50941—2014 建筑地基基础术语标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (GB/T 50941—2014 Standard for Terms Used in Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [7] TERZAGHI K. Soil Moisture and Capillary in Soil[M]. New York: McGraw-Hill book Co., 1969.
- [8] 顾宝和. 岩土之问[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (GU Baohe. Questions about Rock and Soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese))
- [9] 顾晓鲁, 郑刚, 刘畅. 地基与基础[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (GU Xiaolu, ZHENG Gang, LIU Chang. Foundation and Foundation[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [10] 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 Baohe. Review on Typical Cases of Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [11] TERZAGHI K. The Influence of Modern Soil Studies on the Design and Construction of Foundations[M]. London: Building Research Congress, 1951.
- [12] LEE K L, SEED H B. Drained strength characteristics of sands[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(6): 117-141.
- [13] 李广信. 应力路径对土的应力应变关系的影响[D]. 北京: 清华大学, 1980. (LI Guangxin. Influence of Stress Path on Stress-Strain Relationship of Soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 1980.(in Chinese))
- [14] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47-50. (LI Guangxin, WU Shifeng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 47-50. (in Chinese))
- [15] 张国新, 李广信, 郭瑞平. 不连续变形分析与土的应力应变关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, **40**(8): 102-105. (ZHANG Guoxin, LI Guangxin, GUO Ruiping. Stress strain relationship for soil using discontinuous deformation analysis[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, **40**(8): 102-105. (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 Guangxin. Characteristics and development of Tsinghua Elasto-plastic Model for soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(1): 1-10. (in Chinese))
- [17] 李广信. 从息壤到土工合成材料[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 144-149. (LI Guangxin. From “xi-rang” to geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 144-149. (in Chinese))
- [18] BURLAND J B. Nash lecture: the teaching of soil mechanics-a personal view[C] //Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Volume 3. Rotterdam: A A Balkema, 1989.
- [19] BURLAND J B. ICE Manual of Geotechnical Engineering[M]. London: ICE Publishing, 2012.