

试论我国黄土力学研究中的若干新趋向

Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics

谢定义

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:在分析已有文献资料的基础上,对黄土的分类定名,黄土的水敏性,黄土的结构性,黄土的动力特性,黄土土力学的理论基础,黄土工程的设计,黄土地基的处理,黄土规范的框架等问题研究中的新趋向进行了探讨,提出了笔者倾向性的看法,总结给出了需要进一步研究的课题。

关键词:黄土力学; 研究; 新趋向

中图分类号: TU 444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2001)01-0003-11

作者简介: 谢定义,男,1931年1月生,1952年毕业于西北工学院,1962年获前苏联科学技术副博士学位,现为西安理工大学教授,从事岩土工程、土动力学、非饱和黄土力学的教学研究工作。

XIE Ding-yi

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the analysis of literatures some new tendencies on classification, water sensitivity, soil structure, dynamic characteristics of loess soil, on theoretical foundation of loess soil mechanics, design of loess engineering and frame of loess standard are explored and in the same time, the tendentiousness of the author is proposed. In summary, several problems worthy to be further studied are listed.

Key words: loess soil mechanics; research; new tendency



1 引言*

土力学作为研究土材料的基本力学规律以及利用这些基本规律解决土体稳定性问题的科学,经过近一个世纪的发展已经形成了自己比较完整的体系。但是,在将这个体系用于解决特殊条件下的土力学问题时,这个体系必须渗入各自条件相应的特殊性,形成土力学家族中的不同分支。土动力学的特殊性在于作用荷载的非静性,即时变荷载的速率效应与往复效应;非饱和土力学的特殊性在于因气相存在而形成的收缩膜效应,吸力成了贯穿它的主线;冻土力学的特殊性在于低温下冰的存在以及土中水的迁移、成冰机理和力学效果。这里所指的黄土力学^[1,2],其特殊性应在于它变形强度对水作用的特殊灵感性,即水敏性。研究这些动效应、膜效应、热效应以及湿效应对土材料力学特性及土体稳定性影响的机理、规律及其预估与分析,使得这些土力学的分支既有土力学在总体上的共性,又有各分支自己特殊的个性。离开了个性,它自身也就失去了存在的前提。因此,黄土力学研究的课题、思路、理论、方法和应用都应该突出黄土的个性,建立黄

土力学自己的理论基础、计算方法和运作规律。本文试图从这个角度探讨一下黄土力学的若干基本问题。探讨这些问题的目的,不仅在于学科健康而迅速发展的需要,更在于我国当前工程建设的实际需要。黄土占据我国西北、华北等地区 64 万 km^2 疆土的事实,西部大开发战略实施中基础设施建设、生态环境改善均与黄土密切联系的事实,以及需对近些年来在黄土力学研究上许多带有趋向性的见解作出正确判断的事实,无不呼唤着黄土力学的新振兴与新发展。笔者曾在《黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来》一文中作过一些讨论^[3],本文将进一步从几个侧面作一些剖析。

2 黄土的分类定名问题

黄土是一个统称,它由于生成的年代、成因、环境、地域以及生成后历史变迁上的差异而会具有不同的性质,因此,仍然需要有一个恰当的分类定名体系,分别反映各自有倾向性和代表性的属性,以便更好地了解

* 收稿日期: 2000-10-13

和应用各类黄土, 获取相应的科学数据和特性规律。目前人们经常遇到的黄土分类定名体系, 一是以地质特征(地层、年代、成因)为基础的体系, 如 Q_1 黄土、 Q_2 黄土、 Q_3 黄土、 Q_4 黄土, 午城黄土、离石黄土、马兰黄土, 老黄土、新黄土、新近堆积黄土, 风积黄土、冲积黄土、洪积黄土、坡积黄土等; 二是以湿陷特性为基础的体系, 如非湿陷性黄土、湿陷性黄土, 自重湿陷性黄土、非自重湿陷性黄土等; 三是以颗粒组成特性为基础的体系, 如沙黄土、粉黄土、粘黄土以及砂质粉黄土、粘质粉黄土、粉质粘黄土等。此外, 像大孔土, 类黄土等等也时有所闻。每一种的分类定名都可以从不同角度带给我们关于黄土的若干信息以及这些信息在不同土类上的差异, 从而为它的应用和积累更多的资料提供方便。

对于第一种分类定名体系, 一提到 Q_1 黄土, 人们就知道它是早更新世的产物, 形成于距今 120 万年到 70 万年间, 在我国以山西隰县午城镇的黄土为典型代表(午城黄土), 颜色较红, 含有红棕色埋藏土壤层, 夹有 17~18 层钙质结核层, 在底部有时夹有小石粒, 数量少, 厚度薄, 质地较均匀、致密、坚实, 低压缩性, 无湿陷性, 一般仅分布于古地形的较低凹部位。一提到 Q_2 黄土, 人们就知道它是中更新世的产物, 形成于距今 70 万年到 10 万年间, 在我国以山西离石县陈家崖的黄土为典型代表(离石黄土), 分布面积很广, 厚度也大(有时达 100 m 以上), 是构成黄土塬区的主体。它自上而下, 普遍含有红色的土壤层, 土层致密, 承载力很大。根据其中存在的显著不整合面可分为上下两部。上部黄土为黄色, 地形上多呈陡壁, 无湿陷性或有轻微湿陷性, 或在大压力下有较强的湿陷性(故大型工程用常规压力去评价湿陷性是危险的)。不过, 这种湿陷性黄土层与古土壤层、钙质结核层的互层结构, 对其间黄土层的湿陷有调整、约束、支撑、减压作用及各层间的互相抑制作用, 可使 Q_2 黄土层的湿陷危害性大大减弱^[4]。下部黄土颜色较红, 土质较硬、无湿陷性, 其中含有十几层埋藏土壤层及钙质核结层, 埋藏层的厚度较薄, 间距较小, 地形上常呈缓坡。一提到 Q_3 黄土, 人们就知道它是晚更新世的产物, 形成于距今 10 万年到 5 千年间, 在我国以北京西北丰沙铁路雁翅车站以西 23 km 处的斋堂村马兰阶地的黄土为典型代表(马兰黄土), 颜色淡灰黄色, 无层理, 较疏松, 柱状节理, 大孔结构发育, 有湿陷性或强烈湿陷性, 有些地区有溶洞(黄土喀斯特), 普遍覆盖于离石黄土之上, 遍及黄土的主要分布地区, 是建筑工程中一般主要遇到的湿陷性黄土。同样, 一提到 Q_4 黄土, 人们也就知道它是全新世的产物, 形成于距今 5 千年内。它们主要分布于塬

梁的边坡及河谷阶地的坡脚与低阶地上, 处于地层上部, 受各种影响较大, 情况复杂, 性质差异很大。有的系早期堆积的黄土, 沉积时代较长(在下部), 比较密实, 湿陷性轻微; 有的与 Q_3 黄土相似, 比较疏松, 有湿陷性, 甚至强烈湿陷性; 也有的系滑坡和崩塌物组成的近期堆积层(一般 3~8 m), 成岩作用很差, 土质疏松, 压缩性与承载力较低, 湿陷性差别较大, 沿深度和平面上分布很不规律, 常为引起工程设计上的注意而称之为新近堆积黄土^[4]。由此可见, 形成时代愈早, 地层位置愈深, 黄土的密实度愈高, 工程性质愈好。一般认为, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 甚至早期的黄土为原生黄土(或黄土), 以风成为主, 而 Q_4 或 Q_4 的近期黄土为次生黄土(或类黄土, 黄土状土), 以水成为主。这种对黄土从生成时代到物理力学性质的勾画, 可以起到“呼名见人”的效果, 已为广大岩土工作者所接受。

对于第二种分类定名体系, 由于它为我国历代湿陷性黄土地基规范所采用而在岩土工程界影响最深^[5]。但它只能提供关于黄土湿陷特性方面的信息, 而且这些信息又以黄土在侧限低压力压缩下饱和浸水所得的湿陷变形为基础, 与通常工程上遇到的非侧限(一般为有限侧胀)非饱和(一般为不同增湿)和非低压(较大的建筑物)的条件有较大的出入, 使得湿陷性的有关指标在工程计算应用上受到限制, 大大减弱了它的应用价值。此外, 它除了关于黄土湿陷性在特定条件下的有关信息之外, 很难从它了解到关于黄土强度、渗透或其他性质的任何信息。它虽然抓住了一个最重要的性质, 但作为黄土的分类却有太大的局限性。

第三种分类定名体系与土力学中常用的分类定名思路相一致, 体现了将粘粒含量视为土的粒径组成影响土性最活跃的因素这一规律。尽管颗粒组成只是由扰动土的土颗粒大小级配来反映, 但, 众所周知, 它在一定程度上也是造成土矿物成分, 结构排列, 湿密程度以及力学特性上差异的重要依据。如粗粒土, 一般多为单粒结构, 石英成分, 薄膜水少, 透水力强, 无粘性; 而细粒土多为絮状结构, 粘土矿物, 薄膜水多, 有粘结强度, 透水性差等等。一提到砂黄土、粉黄土或粘黄土, 它们的前缀必然带来一般土力学中大家所熟知的关于砂土、粉土或粘土的若干信息。如砂黄土将会有较小的架空结构性, 较大的侧向移动性, 较小的粘聚力, 较大的透水性; 粘黄土将会有较稳定的联结性, 较小的湿陷性, 较大的粘聚力, 较小的透水性; 而粉黄土将会有更小稳定的粒状(含团粒)架空结构性, 更大的湿陷性等。而它们的字根却提醒人们注意黄土的特殊性, 从而使土的共性与黄土的个性相结合。各种不同情况下黄土个性的定量反映, 可以通过相应条件下的

试验确定, 并可直接应用于黄土工程的设计计算。经过日积月累, 将可能对黄土各个次亚类在其更小的变化领域内获得关于湿陷性、压缩性、抗剪性、渗透性、击实性等方面的经验数据与关系, 为黄土力学打下坚实的基础。因此, 从黄土力学的需要出发, 这种分类体系有深入研究的必要。遗憾的是, 它在目前还没有得到应有的肯定和广泛的应用。关键问题仍在于不同土类的分类指标及其界限值的确定。文献[6]根据对全国20226组(其中青海4949组, 甘肃1161组, 宁夏1318组, 陕西7897组, 山西2517组, 河南607组, 内蒙36组, 山东657组, 辽宁657组, 黑龙江38组)黄土试验成果的细致分析得到: 对黄土来说, 塑性指数仍然是分类定名的良好指标, 并以它为基础提出了把黄土区分为砂黄土($4 \leq I_p < 6$), 粉黄土($6 \leq I_p < 17$), 粘黄土($I_p \geq 17$), 以及必要时, 将粉黄土再分为砂质粉黄土($6 \leq I_p < 9$), 粉黄土($9 \leq I_p < 15$)和粘质粉黄土($15 \leq I_p < 17$)三个亚类, 将粘黄土再分为粉质粘黄土($17 \leq I_p < 20$)和粘黄土($I_p \geq 20$)等两个亚类的建议, 这可作为进一步研究的基础。

3 黄土的水敏性问题

黄土的水敏性是指其对水的特殊敏感性, 即天然低湿度下具有明显高强度和低压缩性的黄土, 在一旦浸水甚至增湿时会发生强度大幅度骤降和变形大幅度突增的特性。它们在定量上的不可忽视性和在定性上的急速发展性, 是黄土变形影响其上建筑物稳定性的两大突出问题。对它们从产生机理、影响因素、预估方法、指标选择以及工程应用诸方面的研究成了黄土力学的特色和重点。笔者在这里用水敏性一词是想比常用的湿陷性一词更加体现这类变形和强度与水关系的特殊本质, 并同时包容增湿与浸湿以及湿陷与湿剪的影响。抓住水敏性来研究黄土的力学特性就抓住了问题的本质, 抓住了黄土力学的灵魂。力荷载和水荷载(广义的力)及它们在状态、路径、速率、历史、水平上的变化与黄土湿、密、构特性综合作用的力学效应和物理机制是勾画黄土特有面孔和心灵的主线条。近年来, 黄土力学的研究出现了由侧限压缩到三轴压缩, 由常规三轴应力路径到多种复杂应力路径, 由浸水湿陷量到湿陷敏感性, 由狭义的浸水饱和湿陷到广义的浸水增湿湿陷, 由单调的增湿变形到增湿减湿、间歇性湿陷变形, 由增(减)湿路径到增(减)湿路径与加(卸)荷载路径的耦合, 由湿陷性到湿剪性以及由宏观特性分析到宏、微观结合的力学特性分析等诸多方面的发展^[7~19], 大大地丰富了对黄土特殊变形强度性质的认

识, 缩短了黄土力学与工程实际应用之间的距离。研究表明:

(1) 黄土的水敏性来源于黄土特殊的地域与生成条件造成的粉粒性、富盐性、大孔性、欠压密性、非饱和性和各向异性, 即低的湿度, 低的密度及脆弱的架空结构。这些方面在实际上的差异使黄土反映出颇不相同的水敏性, 即颇不相同的湿陷性, 湿陷敏感性和湿剪强度的弱变性。

(2) 应力状态、应力历史、应力路径、应力速率、应力水平与增湿状态、增湿历史、增湿路径、增湿速率、增湿水平的变化是引起黄土在变形和强度上反映出不同水敏性的主要外因。对当今具有同样湿—密—构状态的黄土, 当水荷载特性相同时, 应力低于结构强度(或先期固结压力或湿陷起始压力)时, 增湿变形较小, 不同应力路径和应力速率对密度—结构状态虽有所影响, 但变化较小, 除非对特别重要的工程一般可以忽略。只要应力水平不会超过增湿条件下黄土的破坏应力, 变形将仍然主要由相应的增湿特性所决定。当力荷载特性相同时, 低于湿陷起始含水量的增湿同样影响不大, 不超过历史上最大增湿含水量的增湿(含多次增湿)也不会引起新的湿陷变形。增湿变形主要决定于最终的含水量, 而分级增湿或连续增湿甚至增减湿交替只有较小的联系^[11~14]。遵循着以上的规律, 可以在应力路径与增湿路径的交替变化过程中分析黄土的增湿变形过程。

(3) 当黄土的含水量增大时, 强度的降低与变形的增大是同一个本质反映出的不同侧面。对承受一定剪应力达到变形稳定的黄土试样逐级增湿(即增大水荷载)时, 剪切变形将连续逐级增大。如果将此所加的剪应力视为对应于破坏增湿级的湿剪强度, 则它与对此含水量级下的试样逐级增加剪应力所求得的相应抗剪强度一样, 也符合库伦公式, 而数值上可能的不同反映出应力路径的影响^[13]。因此, 黄土的抗剪强度也主要由黄土的含水量来决定, 随着含水量的增大, 内摩擦角, 尤其是粘聚力均逐渐降低^[1], 表明了黄土土体稳定分析中按土的实际含水量状态分别采用不同强度的十分必要性。当前的困难在于正确预计土体内原始的水份入渗时的含水量分布状态。

(4) 黄土的变形和强度与含水量的变化有非常密切关系, 因此, 可在不同的初始含水量下研究黄土的变形和强度, 其变形的差值即为增湿的变形增量, 强度的差值即为增湿的强度增量。它们不同于一般土类之处, 仅在于这种差值对含水量的变化具有更加明显的可变性。利用不同含水量对应的模量值应该可以综合反映此时黄土的变形与强度特性, 从而有可能从长期

以来用湿陷量来反映黄土特性的圈子里走出来,使黄土力学特性的研究从总体上不再与传统土力学的体系相分离(当然从量及变化上仍有明显的差异)。有的资料采用弦线模量来拟合黄土地基的载荷试验曲线,已收到较好的效果^[20, 21]。事实上,在黄土湿陷性本构关系的研究中,用天然含水量和饱和含水量条件下分别求得变形的差值来计算湿陷变形以及由双线法求湿陷系数的方法早已得到了较普遍的应用。

4 黄土的结构性问题

结构性(构度)应该是描述土物理本质中比粒度、密度、湿度更为重要的一个侧面。它的重要性早为太沙基所指出^[22],也早为一系列学者所重视。只是因为对它作定量描述上的困难而使它一直游离于对土物性的定量表述之外,但它的定性描述仍然显示出了它在土性机理分析上极端的重要性。如果说结构性对任何土都是重要的,那末,对黄土就更是不可回避的,具有更大的意义。研究黄土的结构性及其在力和水作用下的变化规律对整个土力学研究的对象都会有很大的辐射作用。并且从现代计算土力学的发展看,研究能够反映土结构性特点的本构关系应是当代土力学的一个中心课题^[23, 24]。

在土力学中,研究土结构性问题的根本目的在于揭示结构性及其变化的力学效果。从这个观点出发来考察当代土结构性研究的三条基本途径,即细观形态学途径,固体力学途径及土力学途径^[25~28]时,人们在承认细观形态学对土结构性研究所取得的重要成果在深化土性变化机理分析上已发挥重大作用的同时,也不能不为它在定量引入本构关系表述方面的巨大困难而焦虑。目前,将黄土受力、水作用后结构由损伤到破坏作定量描述的固体力学方法,因其可以回避在寻求独立表示土结构性参数上的困难,使结构性本构关系的建立出现了新的活跃。但它仍然遇到了建立不同湿密状态土在受到外力作用过程中损伤变量正确表述的困难。显然,如果能够找到一个能合理反映土的结构性及其随水与力的作用而变化的土结构性参数,无疑会使问题的解决更加直观、更加灵活,会使土力学的参数体系更加完善。文献^[28, 29]中关于综合结构势这一新指标的提出及其合理性、灵敏性、稳定性与普遍性的检验,给沿土力学途径研究土的结构性本构关系给予了新的希望。研究表明:

(1)黄土的结构可视为一个由单粒、集粒或凝块等骨架单元共同形成的空间结构体系。它的单元形态(单粒的矿物碎屑与集粒或凝块)确定了力的传递性能和土的变形性质,它的连接方式(点接触、面接触)确定

了土的结构强度,它的排列方式(大孔隙、架空孔隙、粒间孔隙)确定了土的稳定性。单粒点接触、架空孔隙占优势的结构,湿陷性大;集粒或凝块、面接触、粒间孔隙占优势的结构,湿陷性小^[15~17]。

(2)黄土结构性的研究,应既注意揭示土颗粒排列的几何特征(以孔隙分布特征最为敏感),又注意揭示土颗粒联结(物理的和化学的,而以化学的为最敏感)的力学特征,同时将结构与组构相结合,探讨黄土的非均质性、各向异性。当前的主要任务是由对结构某些特性侧面确定性的定量化走向对结构综合整体动态性的定量化^[28, 29]。

(3)从黄土力学的观点,结构性研究的根本目的在于揭示结构性对土力学行为的影响及内在联系,因此,将土的细观结构与宏观力学行为相结合是一条正确的研究途径。仅从二者的对比说明它们之间定性联系的研究应该被二者定量关系的研究所代替。努力将两方面作动态变化的代表一并纳入到同一个统一的力学模型(结构性力学模型)应是土结构研究的中心目标。

(4)黄土的结构性问题在其结构联结没有遭到破坏以前表现为它维持结构可稳性的能力,它和颗粒联结的特性与稳定性有关;在结构联结遭到破坏以后表现为结构可变性的能力,它和颗粒的排列特性与均匀性有关。对它们所反映的结构特性做出直接的量测是一件困难很大的事情,但使土的结构性遭到破坏对其结构可稳性和结构可变性作出定量的量测,并按它们在结构性中的作用找出合理的参数,以反映土的综合结构势,是比较容易的。对黄土的原状土,它的重塑土和饱和土所作的压缩曲线为基础求取综合结构势这一个土结构性参数的方法,具有自己的合理性、灵敏性、稳定性和简易性^[28, 29]。

因此,如果说黄土结构性研究的途径可以归纳为如上细观形态学途径,固体力学途径和土力学途径的话,则它们的相互配合可望取得新的进展,尤其是寻求一个参数来独立、有效地表征土结构性及其变化的努力,具有更大的吸引力。

5 黄土的动力特性问题

在我国广大的黄土地区中,地震动强度大于或等于 $0.20g$ 的区域约占50%,大于或等于 $0.15g$ 的区域约占80%^[30]。在历史上80多次强震(8级以上6次,7级以上22次,6级以上52次)过程中,黄土地区发生滑坡、震陷甚至液化的事例多有记载。因此,这个区域内经济建设的合理布局,尤其是西部大开发战略的实施,不能不考虑黄土体的动力稳定性。黄土动力特性的研究应是一个无可争辩的重要课题。

自然, 黄土动力特性的研究必须既借鉴土动力学中通常对砂土的研究, 更面对黄土的特殊性, 即结构性、欠压密性、非饱和性以及由此而表现出的各向异性与对水作用的特殊敏感性, 既重视静、动力作用, 更重视水作为广义力的作用力以及水与静、动力作用不同路径组合的影响。在黄土动力特性研究的主题、黄土的动强度破坏标准、黄土试样的合理高径比与联接方式、黄土的起始含水量控制方法、黄土上作用不规则动荷载等效处理的有效性等方面的问题上, 都不能照搬饱和砂土动力学的研究方法。近年来, 不仅对于等幅往返荷载下黄土的动三轴试验已做出了较系统的探索(从试验方法, 主要课题, 强度标准, 基本特性规律, 水、力荷载路径, 动静强度关系, 湿陷与震陷联系, 黄土的震陷等方面)^[31~33], 而且对于不规则动应力过程和随机不规则动荷载过程条件下黄土动三轴试验的方法也做了开拓性的工作^[32, 34]。目前, 在黄土动力特性的研究中, 将水力、静力、动力特征和土的湿密构特征综合作用下的力学效应和物理机制的研究与黄土的区域性变化相结合应该是一条主线。研究表明:

(1) 黄土的动力试验中, 试样的高径比以取 1 为宜, 试样的两端应与活塞和底座相粘结(动应力大于轴向固结应力时), 试样的破坏宜取屈服标准, 试样初始含水量的控制宜用滴水转移法, 作用的不规则动荷不宜作简单的往返应力等效处理^[35]。

(2) 黄土的动力特性研究在小动荷时仍以应力应变关系(或动模量与阻尼比)为主; 在大动荷时, 振陷是一个比较突出的问题, 强度问题次之; 黄土的结构强度使黄土有一个明显的振陷临界动应力; 饱和黄土仍会有“类似液化”的现象(变形骤增, 强度锐减, 但破损历时较长, 孔压水平较低), 干燥黄土有剪切液化现象, 它是巨大动应力对黄土拉裂、剪损与搓揉破坏造成的结果。

(3) 黄土初始含水量的不同会使黄土的动变形-强度特性有明显差异。干型黄土($w_0 < w_s$)的高强度和低变形使黄土对动、静力的反映均比较迟钝, 振陷不大, 强度破坏一般属脆性的受拉破坏, 应力-应变关系为直线型。湿型黄土($w_s < w < w_L$)的振陷随初始含水量的增大而增大, 强度破坏常属塑性的剪切破坏, 应力应变关系为双曲线型, 初始模量对应力应变关系有较灵敏的归一性。饱和黄土($w_0 > w_L$)虽与湿型黄土有相似的动变形强度规律, 但其在量上有更大的强度降低与变形增大的反应。如前所述, 有时还可以表现出类似振动液化的现象, 造成更大的危害性^[36, 37]。

(4) 当动应力作用于已受静压作用(或增湿作用)的黄土上时, 如此动应力尚不足以引起这种土的强度

破坏, 则动应力所引起的动变形与已产生的压缩变形和之后的湿陷变形之和(或增湿变形与之后压缩变形之和)仍将限定在初始含水量下的黄土在力和水作用下压缩与湿陷变形的总和之内, 且动应力愈大, 这一部分动变形也愈大, 使后继的增湿变形(或压缩变形)减小。否则, 如动应力足以引起土试样的破坏, 则动应力的作用将使总的变形增大, 并为后继的湿陷变形(或压缩变形)提供更有利的条件。在总变形中, 或者以湿陷变形为主(初始含水量较低时), 或者以动变形为主(初始含水量较高时)。当增湿与水共同作用时, 不仅动变形增大, 而且变形稳定的时间会大大缩短^[38]。

(5) 在振陷系数与湿陷系数之间寻求经验的转换关系, 有利于用湿陷系数来预估一定振次和动应力下的振陷系数。在黄土静强度与动强度之间也存在有较密切的联系^[31]。只要土的动强度不发生大幅度的降低, 它们之间的换算系数与地基规范中推荐的动承载力调整系数相接近。

(6) 随机不规则动荷的作用, 可以由计算机控制施加。向一组试样分别施加不同幅值的动应力时程(黄土的含水量较低时, 分级施加对其反应影响不大, 允许对一个试样采用分级加荷, 以减小试验工作量), 测记动应变和动孔压的时程, 整理动应力-动应变曲线, 研究动变形与动强度的方法不再有振次的概念, 直接控制动荷时程(给定波型)的三要素(最大幅值, 卓越周期, 及持续时间)。此时的动残余应变仍随动应力幅的增大而由不变、缓增到急增变化, 动应力-动应变曲线仍然符合双曲线关系, 参数却是卓越周期的线性函数, 即定性上与等幅循环荷载下相同, 但定量上与等幅循环荷载相比, 有振陷临界动应力偏大, 动振陷值偏小, 模量值偏小, 阻尼比值偏大的趋势^[34, 35]。

(7) 当用随机不规则动荷进行黄土的动力特性试验时, 寻求某种能全面表征这类荷载时程本质特性的特征参数是当务之急。用随机荷载过程幅值分析的参数(均值方差等)研究变形和强度, 用相关分析的参数(互相关函数, 互功率谱等)研究阻尼比, 用频谱分析的参数(传递函数等)研究动模量的思路, 其合理性得到了初步试验的证明^[39]。

注意到国外在黄土动力特性方面研究文献的缺乏, 我国在这方面的研究成果理所应当受到了国际上的注视^[35, 37]。但无论如何, 当前的研究成果只是一个良好的开端, 它无论在数量上, 范围上或深度上, 尤其是应用上都还远远满足不了我国建设规模的需要。在一些问题上虽有见解, 但缺乏共识, 虽有文献, 但缺乏规范, 虽有点上的成果, 但缺乏区域性的概括和可资参选的成熟数据。学科的发展和工程的实践都要求黄

土动力特性的研究有一个更大的深度, 更大的覆盖面和更大的实用性。

6 黄土力学的理论基础问题

黄土作为典型的非饱和土, 20 世纪末又一次活跃的非饱和土力学理论不能不涉及黄土特殊的力学特性, 而长期以来以总应力分析为基础的黄土力学特性研究, 也不能不从当代非饱和土力学理论中寻求自身发展的新途径。把黄土力学研究作为非饱和土力学特殊的一枝互相借鉴、彼此推动, 已经成了一个适应形势、顺理成章的大趋势。

当代的非饱和土力学把水气交界面(即收缩膜)外侧与内侧应力之差——吸力($u_a - u_w$)作为各种土性特征的纽带和体现土三相变化及其作用的核心。非饱和土吸力的定性定量特性决定着非饱和土的应力特性、渗透特性、强度特性、变形特性和固结特性^[40]。正是由于赋予了吸力如此过分重要的作用, 再加上吸力测定上众所周知的难度, 使得现代非饱和土力学建立在较为脆弱的基础上。将吸力作为除净应力($\sigma - u_a$)以外另一个独立的应力状态变量而使建立适合于土特性的单应力变量有效应力的途径逐渐受到冷遇的状况, 又使现代非饱和土力学在充分应用传统饱和土力学丰富的理论成果方面受到了障碍和限制, 削弱了自己继承与发展的广阔空间。对于黄土, 如前所述, 含水量的变化是影响其变形—强度特性最本质的因素。尽管含水量变化对吸力有重要影响, 但含水量的变化除对吸力有影响之外, 也会引起一些吸力所不能反映或反映十分迟钝的其他因素(如黄土结构联结的减弱或破坏等)有所变化。在这种情况下, 树立吸力主导地位的努力将很难得到实际土性变化的支持。因此, 寻求一个能够合理地、全面地反映含水量变化和力的变化对黄土结构联结(包括吸力效应、嵌固效应和胶结效应等引起的)影响的单应力变量有效应力的表达式, 具有特殊重要的意义, 不应有丝毫的放松。Bishop 的有效应力表达式, 即 $\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w)$, 是一种影响较为深广的这类表达式, 但它将式中的系数 x 限定在的 $0 \leq x \leq 1$ 范围内这一点(即干土的 $x = 0$, 饱和土的 $x = 1$), 使自己只能对吸力变化的影响有所反映, 而对土的其它结构性联结对有效应力的影响基本上无能为力。并且, 除了这个参数在物理概念上的模糊性以及它对饱和度、应力路径、浸水路径等的依赖性之外, 国内外的研究都发现了它在有些情况下可以远远超过 1 甚至小于 1 的结论^[41]。对造成这些问题的原因不能不从非饱和土的有效应力原理这一根本上来进行考察。如果我们回到太沙基关于有效应力原理

的统一表达式, 即 $\sigma' = \sigma - u$ 上来, 则这里的 u 将可被视为一种等效的孔隙压力。它对非饱和土来说应该综合地反映含水量变化以及由它影响到的各种力学效果(孔隙环境、联结状态等)使孔隙压力特征发生的变化, 即综合反映收缩膜、双电层和结构性诸方面变化的特性。它远远超出了普通意义上孔隙压力的概念。非饱和土有效应力的研究, 既应遵循太沙基关于饱和土有效应力原理表述的本质精神, 又要注意非饱和土, 尤其是具有明显结构性的黄土在体现这种本质精神时的特殊性。如果说饱和土的孔隙压力(即孔隙水压力)不发生消散时土无任何变形发生, 或有效应力无任何改变, 那么, 非饱和土的结构性不发生任何变化时, 非饱和土亦无任何变形发生, 或有效应力无任何改变。而非饱和土结构性的变化既依赖于湿度状态的变化, 也依赖于湿度变化引起结构变化后本来没有改变的总应力使结构性引起的次生变化(排列和联结的新生状态)。所以, 这个等效孔隙压力应该是湿、密、构状态变化的函数(密、构状态的变化中也有未改变的总应力与湿度变化引起的结构状态变化所产生的次生贡献)。或者, 从总体上讲, 它应受土中湿、密、构和总应力效应的综合影响, 一般具有明显的非线性。在建立非饱和土有效应力表达式时应该树立这样一个基本的观点。这个观点不仅不违反太沙基的有效应力原理, 而正好是将原来饱和土有效应力原理的本质精神向非饱和土有效应力原理的开拓。笔者曾在这种应力传递机理分析的基础上建立了如下的非饱和土有效应力表达式^[42], 即

$$p' = (p - u_a) - x_p(u_a - u_w), \quad q' = q - x_q(u_a - u_w),$$

其中 $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, $q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$, x_p 、 x_q 为非饱和土对球应力和偏应力的孔隙压力影响系数, 它们都是随应力状态(p , q)导致土发生的球应变 ε_v 和偏应变 ε_s 而变化的参数。它的数值不受由 0~1 的限制, 可视土湿密构状态的变化大于 1(结构性强时, 或结构性破坏后发生膨胀时), 甚至小于 1(结构性遭到浸湿破坏而发生湿陷时)。这个表达式考虑了吸力及其它可能的湿密构及力变化的影响, 容纳了各类土的特殊性质和协调了应变发展过程中的非线性。它可以只根据普通非饱和土三轴试验所得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线, $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 曲线以及 $(u_a - u_w) - \varepsilon_1$ 曲线得到, 即得到 $x_p - \varepsilon_v$ 和 $x_q - \varepsilon_s$ 曲线。而且, 进一步由有效应力表达式得到 p' 、 q' , 得到 $p' - \varepsilon_v$ 曲线和 $q' - \varepsilon_s$ 曲线, 即有效应力的本构关系。此时, 采用一定的强度破坏标准(如 $\varepsilon_{if} = 15\%$ 等)所对应的 ε_{vf} 和 ε_{sf} 得到强度破坏包线($q'_f - p'_f$ 曲线), 算出非饱和土的有效应力强度参数 c' 、 ϕ' 值。在

这个过程中无需作任何人为的假定,或去专门建立关于吸力强度的关系式。初步的实验已经表明,这条路对黄土的浸水增荷过程是畅通的^[43]。

7 黄土工程的设计问题

常遇到的黄土工程有黄土地基工程,黄土边坡工程和黄土洞室工程。它们的设计必须在一般岩土工程的基础上融入这些工程在黄土地区的各种特点,并从它们各自的稳定特征出发,进而解决设计计算与增稳措施问题。

黄土地基工程的稳定特征在于可能的浸水湿陷变形所引起的后果,应该把尽可能减小地基黄土湿度的剧烈变化,尤其是局部变化作为重要的内容,贯穿到规划、设计、施工、监测的全过程。从场址选择中选取排水通畅好,洪水威胁小,新建水库地下水位上升远,湿陷性黄土层厚度小等,到总平面设计中的地表水畅通,距水池及水道有一定防护距离,主要建筑物放在低湿陷等级段上以及做好竖向和水平排水系统等,再到设计施工中的浸湿可能控制条件分析,湿陷量计算,承载力确定,基础型式选择,基坑防排水,最后到根据实际需要选定全部消除或部分消除有害湿陷量的地基处理范围、标准、措施和选定抵抗或适应湿陷变形不均匀性危害的结构措施以及设置对湿陷变形及其影响所必要的监测措施,都必须始终渗透进对黄土湿陷变形的预防、控制,正确反映与合理处置的经验、理论方法和必要的研究^[5]。

黄土边坡工程的稳定特征在于对黄土天然边坡稳定现状的诊断,预防其工作条件的进一步恶化(如坡顶加载,坡脚开挖,坡体增湿,裂隙开展,植被破坏等),更在于对黄土挖方边坡,特别是塬边渠道高挖方边坡使坡体原有应力平衡遭到破坏后应力的释放和重分布(坡顶开裂,坡脚应力集中)与黄土多层结构(黄土层,古土壤层,钙质结核层等),倾斜坡顶,垂直节理以及增湿部位、程度与方式变化等条件下新平衡的形成与正确反映。这是一个高难度的土体强度稳定问题。设计计算中必须正确解决黄土边坡工程在其坡比,坡高,坡型(上陡下缓,上缓下陡,一坡到顶与大平台等)甚至坡工(开挖支护与护坡技术)之间的整体合理配合问题^[1,44]。从总体上讲,这个问题虽在付出了相当学费之后得到了一定的实践经验和局部认识,但还缺乏较为系统深入的研究。没有一个对稳定性的正确评定,就不可能有选择增稳措施的主动性、针对性与经济有效性。目前,已发展了许多可用于黄土边坡上的增稳措施,如坡顶夯实,坡面防水(天沟,侧沟,拱形微沟),坡脚防护(砌护、锚护、喷浆等),坡体排水(水平排水

管,垂直排水井等)等等,但黄土边坡的稳定分析评价方法还基本上没有被突破。此外,黄土边坡在临水情况下的湿陷变形(渠道边坡)、搜底崩塌(库岸边坡)、雨水冲刷(冲沟、剥落)等问题的解决也具有重要的实际意义。

黄土洞室工程的稳定特征一般已不在于它的水敏性。在黄土地层自下而上的 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 变化中, Q_1 黄土因其土质好,埋藏深,厚度小,故对通常的洞室意义不大; Q_4 黄土因其土质疏松,强度低,湿陷大,故一般在其中不宜建洞;而 Q_2 和 Q_3 黄土的下部,不仅有一定深度,而且分布广,厚度大,土质较密,湿度较低,强度较高,无湿陷,才是黄土洞室的主要地层。因此,黄土洞室工程的稳定特征就与深层黄土的力学特性紧密地联系在一起。在地下水位比较高的地区,一些洞室也会穿越高湿度的 Q_2 、 Q_3 黄土。这类黄土的弱透水性往往会造成在其中施工降水的困难,或者给抽水机造成间歇工作的条件,在设计和施工上都会遇到一些新问题。它在一些小工程中已取得了有价值的经验,而对一些大的隧洞工程,则仍需对其在饱和黄土中成洞的条件进行较深入的研究^[35]。但是,无论如何,在黄土地区大量的洞室工程对象仍然是低湿度的 Q_2 、 Q_3 黄土层。这类黄土层的应力应变关系一般可以为硬化型(高围压下),也可以为软化型(低围压下)。但变形不大时,一般常可按直线变形体来对待(只有作用应力超过了它的比例极限后,才按弹塑性体来考虑)。它的弹性变形并不是理想的弹性。在受洞室开挖掌子面约束时,更会出现较明显的延迟变形或弹性后效。它和黄土在深层应力下存在的流变性质一起,使得变形要随时间发生变化。此外,当开挖卸荷引起地应力释放时,其可恢复的变形虽表现为弹性,但也会有一部分滞后(其不可恢复的部分表现为塑性或粘性,视应力大于或小于比例极限而定)。这些随时间变化的变形与开挖支护的迟早相交织,构成了黄土洞室工程中在具体确定作为衬砌上主要荷载的黄土围岩形变压力上的巨大困难。目前的处理中,常将这些变形随时间变化的影响统一由一个对不同衬砌方式经验确定的暴露系数(支护前的自由位移与支护后的约束位移之比)来反映,并取用长期模量和长期强度的数值,用弹性理论或弹塑性理论(视应力的大小)来进行计算。实践证明这样处理的结果,对于变形最终能趋于稳定的洞室变形来说是可以接受的^[1]。这也是黄土洞室工程中研究弹塑性理论解答必要性之所在。但,无论如何,这种解答仍然离不开一定的简化。从总体上看,黄土洞室工程中的山岩压力问题仍然没有得到解决。早在60年代就提出了考虑黄土的各向异性,洞室的旁山偏压,双洞

的间距以及施工方法等对山岩压力影响的问题^[45],但尚未见到深入的研究成果。因此,从发展上来看,以有限单元法为基础的数值计算仿真分析的方法具有更大的前景。

8 黄土地基处理问题

黄土地基的处理一般包括高湿度(湿陷性黄土饱水转化而成,饱和度 $>70\%$)软弱黄土以提高地基承载能力和减少有害压缩变形为目的的处理和低湿度湿陷性黄土(尤其是自重湿陷性黄土)以消除或减小湿陷变形危害为目的处理两种类型。

对于第一类黄土地基,因其已消除了湿陷性,原来非自重湿陷性黄土的欠压密性、大孔性等已使饱和黄土转化为高压缩性,但同时伴随着较高的灵敏度(6.1~12.5,因微晶碳酸盐胶结和析水能力强),较高的触变性(因可溶盐含量高)和较强的侧向移动性。此时,虽然从原则上讲,适宜于一般软土地基处理的方法在这里仍然可用^[36],但是应该注意这些由黄土的湿陷性所遗留下来的特殊性质。通常可视其对需要处理厚度的要求选择地基处理的方法。当处理厚度浅且有较好的下卧层时,可用砂石垫层法(虽然沉降量可能较大,但却比较均匀,有利于降低造价,加快建设速度)。更深时可用砂石垫层与加强上部结构整体性的箱基或筏基相结合,或用振冲碎石桩(因它仍有较大的沉降或不均匀沉降,已应用较少)。挤密砂桩因饱和黄土的侧向约束很小,强夯法因易产生“橡皮土”现象(既使预埋了砂袋)而不宜采用,但夯坑填土法效果仍然较好。处理较深且有好的下卧层时用混凝土灌注桩或必要时用钢筋混凝土预制桩。至于高压旋喷桩,深层搅拌桩等,往往因质量不易保证,且费用较大,它和硅化法,碱液加固法等,常是事故处理时的选择对象^[46,47]。

对于第二类黄土地基,当其属于非自重湿陷性黄土且处理厚度不大(小于3 m)时,灰土垫层仍然是一种经济有效的方法(但一般需要较大的翻挖场地,不利于冬、雨季施工)。深度相对较大(5~8 m)且环境影响要求较低时,可选择强夯法,但它的有效性性与夯击的最佳击数(9~12击),夯锤的底面积(锤重10~15 t,锤底面上静压力宜在2~2.5 t/m²之间),以及基土的含水量(最好为最优含水量附近)有关^[48]。强夯处理深度(以消除湿陷性为标准)估算的梅拉系数约为0.35~0.50左右。由于夯击动能最初消耗于土的压缩增密,故其振动与噪声随土的逐击压密而逐渐增大,但振动的幅值却随夯源距的增大而急剧减小,故影响范围仍然有限,夯击能量100 t·m时,6度地震级的影响范围约为20~30 m。此外,由于强夯的振动周期约在0.1 s

左右,不会引起周围房屋(自振周期为0.15~0.2 s)的共振现象^[41]。为了再加大加固处理的深度,桩基虽常作为可选方法之一,但如无可靠的桩端持力层(如几十米下也无作桩基持力层的非湿陷性土层等),桩上作用的负摩擦力会造成桩的很大负担,甚至使桩基无能为力。此时,真正有优势的方法常是挤密桩(孔内填以灰土或素土)。它是解决高厚湿陷性黄土地基现实经济有效的途径^[42],对调整地基的不均匀性和提高防水抗渗性能也有一定的优越性。近年来,它与强夯相结合而出现的深层孔内强夯方法进一步拓展了挤密桩法的深度(可达30 m左右),也为消纳垃圾等废料(作为孔内填料)开辟了道路^[49]。此外,针对黄土的水敏性而效法软土地基上的预压法而在黄土地基上采用预湿法处理也是一种好的思路。它和其它方法(垫层、强夯、挤密等)结合应用,也是消除高、厚自重湿陷性黄土地基有害变形的好方法^[45]。但它除了要求有充足的水源条件外,防止预浸水对周围建筑及地下设施等产生不均匀沉降的危害是问题的另一个侧面,应用时需特别慎重。从地基抗震角度看,预浸水法并不可取。

可以看出,对于低湿度高湿陷性黄土地基处理的以上各种方法都是在放弃利用这种地基原有高强度和低压缩性的基础上使黄土结构先破坏(夯、挤、湿)、再变密,而只在有限较小的深度内消除湿陷变形的危害性。这种“不破不立”的被动处理思路得到了近年来发展的“顺水推舟”主动处理思路的挑战^[50]。基于土水势原理和薄膜水转移理论提出的浅层砂夹层阻水方案和深层导渗并散水方案,既保持利用原来黄土低湿度下固有高强度和低压缩性的有利性,又减小、防止原来黄土高湿陷性在浸水时可能的湿陷危害性。它们在面对干旱半干旱区内黄土浸水主要来自地面渗水和水道水管局部短期有限漏水造成不均匀湿陷变形方面(不包括地下水位上升或大面积长期浸水等情况),有着重大的积极意义和经济效益,其思路有创造性,方法有现实性,有继续研究和开拓的价值。

9 黄土规范的框架问题

从60年代开始,我国已制订实施了三代湿陷性黄土地区建筑规范(66规范,78规范,90规范),现在,第四代的黄土规范即将问世。这些黄土规范,既是学习苏联先进经验的产物,又带有明显的中国特色,是科学理论与工程实际紧密结合,指导我国黄土地区大规模经济建设的文件,是中国广大黄土力学与工程工作者多年心血的结晶。它的基本特点可以概括为^[5]:

(1) 以工业民用建筑的湿陷性黄土地基为主要对象,不涉及到水工及道路建筑中湿陷性黄土的边坡与

洞室。对非湿陷性黄土地基仍按一般土质条件下常用的方法对待,故称为湿陷性黄土地区建筑规范。

(2) 把对建筑场地黄土湿陷等级评定的结果与建筑物重要性相结合作为地基适宜性评判和地基湿陷性处理的根本依据。

(3) 黄土场地湿陷等级的划分以地基的计算自重湿陷量和地基的总湿陷量为依据。前者为全部湿陷性土层各点在其上黄土饱和和自重压力作用下饱和浸水时的湿陷量,后者为一定范围内的湿陷性黄土层各点在自重压力和附加压力共同作用下饱和浸水时的湿陷量(其计算范围视地基土的湿陷类型和建筑物等级而定,即非自重湿性黄土地基取基底下5 m或压缩层,自重湿陷性黄土地基上的甲、乙类建筑取全部湿陷性土层,丙、丁类建筑取10~15 m)。在它们的计算中分别引入了考虑土质地区差异和地基侧向挤出与浸水机率的修正系数。

(4) 黄土地基是否需要处理主要视低湿度黄土地基的湿陷变形量(压缩变形量很小,一般可忽略)和高湿度黄土地基的压缩变形量是否能为建筑物所允许。校核承载力时,对低湿度黄土地基(小于塑限)取塑限含水量下的承载力,对高湿度(大于25%)黄土地基取饱和含水量下的承载力。地基处理的原则,对甲类建筑是全部消除地基的湿陷量,对乙、丙类建筑是部分消除地基的湿陷量,并采取相应的排水措施和结构措施。剩余的湿陷量对乙类建筑应不大于20 cm,且处理厚度不小于湿陷范围的2/3(整片处理时不小于4 m),对丙类建筑应不大于30 cm,且处理厚度按II、III、IV级场地分别不小于2 m,3 m和4 m。处理后下卧层顶面的承载力应不超过承载力的设计值。

应该肯定,我国黄土规范在确定自重湿陷量与非自重湿陷量,场地湿陷等级标准,建筑物的分类标准,地基承载力基本值、标准值和设计值,沉降计算的系数,地基处理的原则标准,有效的排水措施与结构措施以及地基处理方法可用性分析等方面,均做了大量细致的调查研究与总结,使黄土建筑规范一代胜过一代。但是,不难看出,我国在30多年来基本上沿用下来的这个黄土建筑规范的基本框架也暴露出一些与工程要求日益不相适应的缺陷,例如:

(1) 过分地依赖于经验,难于吸收当代土力学与黄土力学研究的新成果,也不利于刺激新研究课题与工程应用的结合。

(2) 相对单一地以防止湿陷性黄土地基发生湿陷事故为目标,缺乏随工程建筑发展的动态适应性。工业与民用建筑已由低层或多层建筑为主向中高层建筑发展,或由轻型向高、大、重型发展,它们的黄土地基往

往或是要求深入到地下水位以下,或是需要从承载力角度予以处理,由湿陷量过大要求处理的地基已大大减少。与此同时,黄土深基坑设计与防护处理,黄土地基上的基础工程(桩基、箱基、复合地基)等方面的问题引起了人们更多的注意。另外,湿陷性黄土地区的边坡工程(如塬边挖方高边坡、黄土滑坡、黄土沟壑地区高填方路堤)以及黄土隧洞(过水、过车),黄土地铁,黄土地区的震陷等问题也都是急需解决的问题。因此,黄土规范需向湿陷性黄土地区岩土工程建设规范努力,推动黄土力学与工程的结合。

(3) 以最大湿陷势为主线的地基设计思想,即以全部或部分湿陷性土层的饱和浸水湿陷量衡量场地优劣和采取工程对策的思想与实际常有过大差距,会在有些条件下造成不必要的浪费。事实上,黄土地基上建筑物的破坏与其说是湿陷量过大,还不如说是湿陷差过大。黄土地基的主要威胁不是来自均匀土层的全面浸水,更不是来自全部或大部分湿陷性黄土层的湿陷。地基的浸水(地下水位上升除外)也不会都达到充分浸水的饱和湿陷水平,而只是沿地基深度的不同增湿。在一些黄土塬区,地下水位很深,降雨量很少,最大湿陷势的可能性变成现实性的条件十分渺茫。所以,应该把注意力更多地投向湿陷差上,投向湿陷的可能性上,投向增湿湿陷的实际预测上,即以可能湿陷势的设计思想逐渐取代最大湿陷势的设计思想。

不可否认,要使我们的现行规范立刻转轨是不现实的,必须慎重从事,但对今后规范的发展方向应该是可以而且需要广泛议论的。在目前,需要加强研究增湿过程中黄土的变形特性,计算出黄土在逐级增湿(直到黄土的完全饱和)过程中增湿变形发展的过程。从这里,一方面可以看出黄土对增湿变化的敏感性,另一方面也可以在预计最大可能增湿情况下求得可能增湿变形势作出黄土地基的设计。如果我们从安全出发仍然需要用全部或部分土层饱和浸水条件作控制的话,那么它只可以作为设计的校核情况,而要求更低的安全系数。这种将设计分为设计情况与校核情况的作法是工程设计中为保证安全与经济的统一所广泛采用的方法。

10 结 论

在结束本文对黄土力学研究中若干新趋向讨论的时候,我们非常引以自豪的是中国学者在黄土力学特性和应用研究中做了无愧于世人期望的艰苦工作和可贵成果。我们应该而且可能为黄土力学国际水平的创新作出应有的贡献。当前,西部大开发伟大战略的推进,已经奏响了向黄土力学与工程结合进军的新号角!

在这里,不妨引用笔者在《黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来》^[3]一文中对面向新世纪黄土力学与应用研究发展趋向的一点看法作为本文的结论,同广大黄土力学与工程界的工作者共商。

“……对于黄土力学特性进行多侧面,多理论,多方法研究的根本目的在于使人们的认识逐渐向黄土客观真实规律相靠近,以增强人们在解决有关复杂工程问题的思考面、可靠度和主动性,在于发挥黄土作为地基、边坡、洞室等土体环境时的各种可能利用的潜力。因此,继续突出黄土对水的特殊敏感性,深化理论,加强应用,争取获得突破性的进展仍然是这个问题的主题。对一度反映矛盾最突出的黄土地基湿陷问题,我们曾经不得不把它作为黄土研究的第一目标,而且不得不把设计的设防标准面对全部或大部湿陷性土层的完全浸湿,即把主要的注意力投向最大湿陷势(湿陷位移势、湿陷速度势、湿陷强度势)的准确评价和它可能引起灾害的预防处理上,就是说以最大湿陷势为黄土地基研究和设防的中心。在发现了这种思想在现实与经济上的不合理性之后,人们虽然开始注意到实际增湿及其特性的研究,注意到利用自然低湿度黄土较高承载能力的研究,注意到湿陷性黄土与结构物共同作用的研究,注意到黄土中浸入水分转移与分布规律的研究,但这种研究,并没有引起普遍的重视,更没有使根本的设计研究思想受到应有的冲击。面对新世纪,黄土力学特性和应用研究上的上述以“最大湿陷势”为中心的传统思想受到以“可能湿陷势”为中心这种设计研究思想的挑战是理所当然的。新世纪中黄土力学特性与应用的研究不能再不由分说地把全部或大部湿陷性土层(实际上只是一部分)受到饱和浸水(实际上只是一定的增湿)时的最大湿陷量作为黄土地基研究和设防的目标,而应该只把实际可能受到不同浸湿程度的那一部分土层所可能产生的湿陷量中为建筑物正常工作所不能许可的那一部分湿陷量作为研究和设防的目标。这就不能不要求发展对黄土浸水的控制技术,发展对不同形态浸入水分转移与分布特性的实测技术与计算理论,发展对广义湿陷量与不同增湿增荷条件下进行准确计算的理论与方法,发展湿陷过程中土与结构物共同作用的理论与方法,发展既能充分利用自然低湿度黄土较高的承载能力,又能具有良好经济性的湿陷性黄土地基处理的新方法。而且,只有在这种新的设计研究思想下,才有可能也才有必要来考虑黄土作为非饱和土时吸力的巨大贡献,发展以现代非饱和土力学理论为基础的、有效应力的黄土力学研究的新理论,有必要探索非饱和黄土特殊的结构性所可能提供的潜力,有必要逐渐逾越由于长期的习惯势力所

造成的禁锢,活跃研究中的创新意识。考虑到岩土环境工程在今后日益发展中的重要作用和黄土力学研究全面发展在经济建设中的巨大潜力,黄土边坡工程中挖方高边坡的稳定性和黄土洞室工程中复杂长大洞室的成洞条件和分析方法以及其中有效的黄土本构关系和黄土动力特性规律的深入研究,也应该是值得给予足够重视的方面。它们正好同上述非饱和黄土力学以及黄土内水分转移分布等基础性质的问题是紧密联系的。因此,笔者认为,至少下列的问题,在新世纪黄土力学特性和应用的研究中要占据重要的地位。第一,寻求和应用黄土力学特性研究的基础理论;第二,探索和应用黄土结构性量化的有效参数;第三,揭示和应用黄土动力学的特性规律;第四,发展和应用黄土地基处理的新途径;第五,完善和应用黄土湿陷大变形与结构共同作用的理论与方法;第六,发展和应用黄土高边坡和黄土大洞室分析中有效的本构关系;第七,重视和应用黄土中浸入水分转移与分布的特性规律;第八,总结和应用黄土地区工程建设的丰富经验,推动黄土地区工程建设法规与规范的不完善……”

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996.
- [2] 钱鸿缙, 王继堂, 罗宇生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [3] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, (4): 273~284.
- [4] 刘厚健, 黄天石. 蒲城老黄土的湿陷特性与评价[A]. 全国黄土会议论文集[C]. 新疆科技卫生出版社, 1993. 50~55.
- [5] GBJ25-90 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1991.
- [6] 朱慕仁. 中国黄土地基工程分类体系及其定名商讨. 中国黄土分类定名及其应用研讨会, 南京, 1989.
- [7] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1~12.
- [8] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新编[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [9] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷若干问题[J]. 土木工程学报, 1985, 19(3).
- [10] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q_3)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 21~31.
- [11] 张苏民, 张 炜. 减湿和增湿时黄土的湿陷性[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 57~61.
- [12] 余雄飞, 等. 新疆黄土的工程性质[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994.
- [13] 刘明振. 湿陷性黄土间歇性浸水试验[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(1): 47~54.

- [14] 雷祥义. 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. 地质学报, 1989, (2): 182~ 190.
- [15] 高国瑞. 中国黄土微结构[J]. 科学通报, 1980(2).
- [16] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, (12): 1203~ 1208.
- [17] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12: 1~ 9.
- [18] 林崇义. 黄土的结构特性[A]. 中科院土木建筑研究所黄土基本性质研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [19] 汪国烈. 黄土湿陷性与湿陷敏感性及其对工程的影响[A]. 非饱和土理论与实践学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国土木工程学会力学及基础工程学会, 1992. 203~ 220.
- [20] 焦五一. 地基变形计算的新参数—弦线模量的原理和应用[J]. 水文地质工程地质, 1982, (1): 30~ 33.
- [21] 焦五一. 对地基基础弦线模量设计法若干问题的讨论[J]. 西北建筑工程学院学报, 1995, (3): 6~ 15.
- [22] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [23] 沈珠江. 关于黄土力学的研究途径[A]. 中加非饱和土学术研讨会论文集[C]. 武汉, 1994. 153~ 160.
- [24] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95~ 97.
- [25] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21~ 28.
- [26] 苗天德, 王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性和黄土变形机理[J]. 中国科学, 1990, (1): 86~ 96.
- [27] 王永焱, 林在贯. 黄土的结构与物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [28] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, (6): 651~ 656.
- [29] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形—强度的关系[J]. 水利学报, 1999, 21(10): 1~ 6.
- [30] 国家地震局. 中国抗震设防区划图[Z]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [31] 巫志辉, 方彦. 原状黄土在增湿时的震陷特性[A]. 第三届全国土动力学学术会议[C]. 上海, 1990. 285~ 290.
- [32] 张振中, 孙崇绍, 段汝文, 王兰民. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [33] 谢定义, 余雄飞. 原状黄土动力特性研究中一些问题的讨论[A]. 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编[C]. 西安, 1986.
- [34] 王兰民, 张振中, 等. 随机地震荷载作用下黄土动强度的试验方法[J]. 西北地震学报, 1991, 13(3).
- [35] Wang lanmin, et al. Dynamic behaviors of loess under irregular seismic loading[A]. Proc of 2 Intern Conf on Earthquake Construction and Design, Vol 1[C]. Berlin Germany, 1994. 398~ 401.
- [36] 巫志辉, 谢定义, 余雄飞, 方彦. 洛川黄土动变形强度特性研究[A]. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1991. 799~ 802.
- [37] Wu Z H, Xie D Y. Dynamic characteristics of intact loess[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1987(1): 148~ 167.
- [38] Wu Z H, Xie D Y. Dynamic deformation research of intact loess[A]. Proc of Intern Conf on Engineering Problem of Regional Soils[C]. Beijing, 1988. 336~ 339.
- [39] 刘保健, 谢定义. 随机荷载土动力特性测试分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [40] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学(中译本)[M]. 陈仲颐, 张在明, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [41] Blight G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils[J]. J Soil Mech Found Eng Div, 1967, 93(SM2): 125~ 148.
- [42] 汪国烈. 谈自重湿陷性黄土地地上高层建筑物和主要建(构)筑物的地基处理[A]. 全国湿陷性黄土地区建设工程标准技术委员会上的发言[C]. 兰州: 甘肃省建筑科学研究所, 1998.
- [43] 刘奉银. 非饱和土力学基本试验设备的研制与有效应力原理的新探讨[M]. 西安: 西安理工大学, 1999.
- [44] 贾士谔, 张继春, 吕智江. 黄土路堑边坡稳定性的调查研究(铁道科学研究院铁研(论)058)[R]. 北京: 铁道科学研究院, 1963.
- [45] 戈宁, 林培源. 隧道地层压力的研究途径与研究方向(铁道科学研究院科技情报所专题情报资料(第62-25号))[J]. 地层压力研究述评, 1962, 11: 1~ 8.
- [46] 罗宇生. 湿性黄土地基处理[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 87~ 91.
- [47] 钟龙辉. 高湿度软弱黄土地基的处理[Z]. 全国黄土会议, 太原, 1997.
- [48] 陕西省建筑科学研究所, 等. 强夯法处理湿陷性黄土地基的研究与应用, 编号 86-18[R]. 西安: 陕西省建筑科学研究所, 1986.
- [49] 司炳文. 湿陷性黄土地基处理新技术(DDC)[A]. 全国黄土学术会议论文集[C]. 新疆卫生出版社, 1994. 245~ 247.
- [50] 谢定义, 刘奉银, 余雄飞, 徐森. 深厚湿陷性黄土层地基处理新途径的探讨[A]. 全国黄土会议论文集[C]. 新疆卫生出版社, 1994. 327~ 332.