

# 非饱和土性状及其与工程问题的联系

包承纲<sup>1, 2</sup>, 詹良通<sup>3</sup>

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;  
3. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 首先讨论非饱和土研究的现状, 指出目前存在的几种观点及其特点, 然后针对不同类型的工程问题分别讨论了非饱和土性状与这些工程问题的联系, 最后对非饱和土理论实用化发展方向进行了思考和讨论。

**关键词:** 非饱和土; 性状; 工程; 吸力

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0129-08

**作者简介:** 包承纲(1935-), 男, 教授级高级工程师, 浙江大学、河海大学和浙江大学宁波理工学院兼职教授, 长期从事岩土工程研究与实践工作。

## Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems

BAO Cheng-gang<sup>1, 2</sup>, ZHAN Liang-tong<sup>3</sup>

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The current state of the research on unsaturated soils was reviewed. Then, the relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems was discussed. The relevant engineering problems included air and water flow, wetting/drying-induced ground movement, slope stability, earth pressures and bearing capacity in unsaturated soils. Finally, some ideas were proposed on the further research towards the application of unsaturated soil theories in engineering practice.

**Key words:** unsaturated soils; soil behavior; suction; engineering

## 0 引言

地球上大部分的表层土均处于非饱和状态, 不仅在那些干旱和半干旱地区, 就是在河、海附近地区的土层也可能处于非饱和状态, 例如海洋底下含油或含气的沉积物。另外工程建设中常遇到的压实土层(如土石坝、路基、压实粘土衬垫等), 也是非饱和的。与工程相联系的非饱和土问题常常出现在不同类型的土层中, 尤其像膨胀土、黄土、残积土、若干红土等那些被称为“特殊土”的土类, 工程问题时遇到。在世界上有超过60%以上的国家都曾经或者正在遭受这些非饱和和特殊土所带来的工程危害。据统计, 其所造成的损失在美国居然超过风灾、洪灾、地震、泥石流等自然灾害损失的总和, 年损失近100亿美元<sup>[1]</sup>。面对广泛和日益严重的非饱和土工程问题, 岩土工作者不得不认真应对, 并就其性状和防治补救措施进行研究。

早在20世纪30年代, 即土力学成为一门独立学科后不久, 土力学研究者就开始考虑非饱和土问题。70多年的发展使非饱和土力学理论和测试技术的研究取得了重大进展。第一届国际非饱和土会议(1995)

的水平报告中<sup>[2, 3]</sup>, Fredlund教授和Delage教授均指出:“目前非饱和土力学理论研究已经发展到可以把传统的饱和土力学当作一个特例的统一土力学理论。”

然而, 非饱和土理论在工程中应用明显落后于理论的研究, 非饱和土的许多研究成果还没在工程中得到应用。直到目前, 非饱和土问题还是主要被若干研究者所关心, 但许多工程师仍习惯于利用传统的饱和土力学理论来处理非饱和土问题, 并且想当然的认为基于饱和土力学理论的工程设计方法偏于安全。这些是值得我们认真思索的。

## 1 关于非饱和土研究思路

从目前国际和国内的非饱和土研究来看, 主要存在3种趋势。

(1) 从宏观和微观的层面上对非饱和土的基本特性和工程性状进行较为本质的研究。他们试图从根本上认识非饱和土的真实面目和各种性状, 包括其物质组成(矿物成分和胶结物质)、结构(structure)和组

构 (fabric) (包括孔隙研究)、应力变量 (stress variables)、体积变化、抗剪强度和剪切刚度特性、吸力变化对土的含水率、水的流动以及变形的影响, 然后在认识其面目和行为的基础上再建立相关的本构关系和各种计算公式, 并进行数值模拟。代表人物为西班牙的 Alonso E E<sup>[4]</sup>。应当说他们的工作是根本的和比较严谨的, 有其优点。但目前他们主要致力于非饱和土特性的研究, 与工程实际的联系尚有一段距离, 因此它在工程界的影响也不十分大。我国按此思路进行类似研究的非饱和土工作者比较少, 不过他们的不少研究成果对于解释非饱和土的性状很有用处, 而且可预见, 这个学派的影响会在日后逐渐显露出来。

(2) 把非饱和土的研究尽量与现有的饱和土力学的原理、方法和成果联系起来, 即在现有饱和土的有关原理的基础上考虑一定的非饱和土特性指标, 形成 “modified” 新公式, 以便尽快在工程实际问题中得到应用。这种做法也是可理解的。由于饱和土力学较成熟, 在工程中应用也较成功, 而且已积累了很多经验, 工程师们应用现有的土力学已十分习惯, 因此在饱和土力学基础上建立的非饱和土力学, 易于被工程界接受, 并在工程中推广应用。20 世纪 50 年代末, Bishop 提出的试探性的非饱和土有效应力表达式<sup>[5]</sup>:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

Bishop 是根据混合流体理论 (mixture fluid theory) 提出这个表达式的, 并未充分认识水气界面的表面张力的作用, 且其中  $\chi$  值的物理意义没有明确的定义, 因此其后受到了不少同行的质疑和评论。

后来有不少学者对上述 Bishop 公式作了进一步的解释和说明, 或对上述公式作一些改变, 或者用推演的方法说明该式与以后的双应力变量公式两者等价, 尤其关于有效应力对非饱和土的有效性也引起许多研究者的兴趣和讨论, 这类文章在国内的出版物中时有出现。但至今为止, 上述这些推演出来的新公式还没得到普遍的认同。

(3) 在非饱和土的特性进行研究和认识的过程中, 同时加强与工程问题的衔接, 建立既反映了非饱和土主要特性, 同时在形式上也比较简便的实用分析和计算方法, 并尽量在工程中应用, 这方面代表性的工作为加拿大 Fredlund D G 所进行<sup>[6]</sup>。在 20 世纪 70 年代, 他在研究非饱和土力学性状的基础上提出了非饱和土的双应力状态变量 (即吸力和净正应力), 对吸力的意义和作用作了比较清楚的阐述, 对抗剪强度问题提出了用  $\phi^b$  表达吸力对强度的贡献的概念, 对土壤学中所用的土水特征曲线的工程含义及在工程问题分析中的应用做了许多有价值的工作。这个学派的研究在目前国际上较为流行。在国内, 不少非饱和土研究

者也遵循着既重视非饱和土基本性质的研究也注意在保持非饱和土真实面目的思路下, 对问题作合理的简化, 以便工程实际应用。应当说, 这样的途径相对来说是比较合适的, 但这样的发展途径仍带有一定的过渡性质, 因此还要加强对非饱和土基本特性进行宏观、细观和微观 3 个层面上的综合研究。

除了上述 3 种主要发展趋势以外, 还有一些研究者根据某些试验成果直接提出了非饱和土力学性状的一些关系式, 其目的也是试图用简单的方法将非饱和土引入到工程应用中。这些研究者有的急于求成, 在对非饱和土 “本来面目” 和基本性质尚未基本认识之前就急于企图对它 “画像”, 提出了一些描述它的力学行为的关系式, 因此成果的应用价值尚不明朗。

总之, 非饱和土的合理研究途径应当首先研究非饱和土基本特性, 尤其是水和气在土中孔隙中的迁移规律为前提, 在基本弄清其力学性状的基础上, 联系非饱和土工程中各种可能的相关特性, 如体变特性, 强度特性, 水气运动特性等建立符合非饱和土本来面目的本构模型和其它关系, 建立数值分析方法和实用计算方法, 并在工程中应用、验证和进一步完善。在这过程中还应注意以下 3 方面。

(1) 研究应在宏观、细观和微观 3 个层面上同时进行, 才能对非饱和土的特性有较为全面的认识, 就是应当研究它的矿物组成和结构、胶结物质的特性及土中的各种孔隙及分布等。细观研究包括水、气、土粒交界面上的表面张力现象及水—土相互作用, 水、气界面的存在所引起的吸力 (即孔隙气压力与孔隙水压力之差) 是影响非饱和土性质和性状的最重要因素, 是非饱和土研究中的核心问题。宏观方面研究与饱和土中的研究大体相似, 即土体在外力和吸力作用下的宏观表现, 包括体变、抗剪强度、渗透及扩散特性等。

(2) 非饱和土测试技术, 尤其是可靠与简便的吸力测试技术是至关重要的, 由于非饱和土性质的复杂性, 要完全从理论上探究, 有时是十分困难的。根据试验成果发现规律性的东西, 然后通过理论加以解释, 这是必要的途径。非饱和土的核心变量——吸力的测试技术和预测方法不解决好, 非饱和土在实际中的应用就会受到影响。

(3) 要将非饱和土与饱和土进行特性比较, 明确两者在基本特性和力学性状上的相似点和区别所在, 尤其是对区别点的认识, 以便弄清哪些饱和土力学理论和原理可以或有可能延伸到非饱和土方面, 哪些不能随便延伸而必须建立自己的理论和计算方法? 哪些基于饱和土力学的工程设计方法偏于安全, 哪些偏于危险? 这样才能澄清目前在非饱和土研究中的盲目现象, 少走弯路, 有助于非饱和土力学更顺利地发展。

## 2 非饱和土性状与工程问题的联系

### 2.1 水、气运移问题

水、气运移问题是非饱和土的根本问题。由于边界条件(流量或流体压力)变化引起的水或气运移将改变非饱和土层中的吸力场(孔气压或孔水压),从而改变非饱和土体的性状,如抗剪强度和体积变化。处于地下水位以上的非饱和土层(又称包气带)直接与大气环境接触,其表面边界条件随着气候条件的变化而改变。旱季的蒸发作用或植被的蒸腾作用造成包气带中水分向上迁移,浅层土体中的孔隙水压力将逐渐降低,以致表层土发生干缩开裂。雨季的降雨入渗造成水分向下迁移,这将导致浅层土体中的孔隙水压力上升,土体的抗剪强度降低,对于膨胀土或黄土,土层则可能发生膨胀或湿陷。如果多年期间向上与向下水分迁移量不平衡,地下水位将发生改变。又如,库区的水位升降将造成土石坝和库区岸坡中的浸润线和孔压场发生改变,以致影响坝坡和岸坡的稳定性。因此,水、气运移分析是解决非饱和土工程问题的首要任务。

#### (1) 非饱和一饱和渗流分析方法和主要技术困难

这里首先讨论非饱和土中水的运移,又称非饱和渗流。一般认为,水在非饱和土中的渗流与饱和渗流类似,也服从达西定律,也受总水头(即位置水头与孔压水头之和)驱动,它们间的不同点只是在于孔压的数值和土体的水力参数(hydraulic parameters)。非饱和土中孔隙水压力为负值,导水系数是吸力(或含水率)的函数。基于上述机理的非饱和渗流理论与饱和渗流理论是统一的,因此可以将浸润线上线下的非饱和区和饱和区当作一个统一区域进行非饱和一饱和渗流分析。与传统的饱和土渗流分析方法相比,非饱和一饱和渗流分析的好处在于:①分析时不需人为假定浸润线的初始位置,避免了繁琐的浸润线位置的迭代计算。在非饱和一饱和渗流场中,孔压为零的等势线即为浸润线,它是由计算直接得到;②考虑了浸润线以上非饱和区对渗流场的影响,包括非饱和土的储水能力及其低渗透性能,而传统的饱和渗流分析往往忽略或简化了非饱和区的影响。因此,对于涉及非饱和区的渗流问题(如土石坝、边坡等),非饱和一饱和渗流分析方法更加符合实际情况,且计算过程比较简单。

目前非饱和一饱和渗流分析存在的主要技术困难包括3个方面:①地表流量边界的确定,包括降雨入渗量和蒸发量,这两个量不仅与当地的气象条件有关,而且还取决于表层土的水力特性及其中的孔压剖面<sup>[7]</sup>。另外,如果表层土体含有裂隙,情况将更为复杂;②非饱和土层中初始条件的确定,包括初始地下水位及初始孔压场。前面提到过,地下水位主要取决于多年间包气带中水分收支平衡,因此,地下水位的确定

依赖于长期的气象资料和表层土的水力参数;③非饱和土的导水系数的确定,如前所述,非饱和土导水系数是吸力或饱和度的非线性函数,它的直接测试费时,且仍存在技术困难。目前国内外在此方面的研究成果非常缺乏。可能正是由于非饱和一饱和渗流分析存在的上述困难,以致许多工程师倾向于忽略非饱和区的渗流。然而,只有正视困难,才能更深入认识包气带中土体的性状,才能更合理地解决涉及非饱和土的工程问题。

#### (2) 降雨入渗过程

降雨入渗问题是最为典型的非饱和渗流问题。由于非饱和土水力特性(hydraulic properties)随着吸力的变化而改变,因此降雨入渗规律非常复杂。对于初始干燥的地面,雨水入渗量是时间的函数:在初始阶段由于表层土中吸力比较大,所以入渗速度等于降雨强度;然而,随着表土吸湿,吸力降低,同时水力梯度降低,以致表土的入渗能力逐渐降低,最终将低于降雨强度,这时地表将出现积水或坡面径流,在此期间,表土的入渗速度仍等于降雨强度;在形成地表积水或坡面径流之后,表土的入渗速度将随时间增加而降低,最终趋于表土的饱和渗透系数,即表土的最小入渗能力。如果降雨强度一直小于表土的最小入渗能力,表土的入渗速度将等于降雨强度,即所谓的受雨量控制的入渗过程。对于初始干燥、均质的非饱和地层,降雨入渗过程中典型的含水率剖面可分为3个区域,由上至下分别为饱和区、传输区和湿润区。

降雨入渗过程中非饱和土层中含水率剖面(或孔压剖面)与诸多因素有关,主要因素包括土层的水力参数、初始含水率剖面、降雨强度和历时等。Zhan & Ng (2004)利用一维竖直入渗问题的解析解对影响入渗过程的各主要参数进行的敏感性分析,所考虑的参数包括饱和渗透系数 $k_s$ 、土水特征曲线的脱水斜率 $\alpha$ 、非饱和土的储水能力 $\theta_s - \theta_r$ 和降雨量 $q^{[8]}$ 。分析结果表明:对于给定的初始条件,降雨入渗过程主要受 $k_s/\alpha$ 控制,其值越大,湿润锋前进得越快。入渗过程中孔压剖面的变化主要取决于 $q\alpha/k_s$ ,其值越大,浅层土体中孔压上升(或吸力下降)越多。在3个水力参数( $k_s$ ,  $\alpha$ 和 $\theta_s - \theta_r$ )中, $k_s$ 和 $\alpha$ 的影响占主导地位。然而, $k_s$ 和 $\alpha$ 之间的相对重要性取决于非饱和土层中初始孔压剖面。另外,初始孔压剖面对入渗过程有显著的影响。

降雨入渗过程还受其他一些因素影响。斜坡上降雨入渗规律更为复杂,雨水入渗使得表层土首先饱和或接近饱和,以致其渗透系数比下卧的非饱和土高,这可能导致顺坡向的渗流大于垂直于坡向渗流,并在坡内产生滞水层,它对边坡的稳定是很不利的。对于裂隙发育的非饱和膨胀土,雨水往往先从裂隙灌进去,

并填满裂隙,然后缓慢地向裂隙周边的土体渗流。随着入渗时间增加,非饱和膨胀土吸水膨胀,裂隙逐渐闭合,以致表层土的入渗系数显著降低<sup>[9]</sup>。如果膨胀土层中裂隙不发育或呈闭合状态,降雨入渗速度是很小的。另外,雨水入渗过程还可能受气体流动的影响,例如,在底部边界不透气的情况下,雨水入渗的同时,原有的空气不能自由排出,将导致气压增加,从而增加了水入渗阻力,明显降低水的入渗速率,大量的试验也证明了这一点。因此,从严格意义上讲,应进行水气二相流分析<sup>[10]</sup>。

### (3) 非饱和土中气体运移

与非饱和土中水的运移相比,目前国内外对非饱和土中气体运移问题的研究比较少,这可能是由于后者不如前者普遍和重要的缘故。然而对于有些工程问题,气体迁移的研究很重要,如垃圾填埋场中填埋气体迁移问题、煤层中瓦斯的迁移和突出问题等。

城市生活垃圾含有大量有机质,其在填埋场封闭环境下降解产生大量的气体(主要是甲烷和二氧化碳)。如果填埋气体导排系统受阻,则可能由于压力过大而发生爆炸;另外,甲烷迁移到地表附近与空气混合物(当前者含量在5%~15%时)遇到明火易发生爆炸或火灾。国内已有二十多个城市垃圾填埋场曾发生过爆炸或火灾事故<sup>[11]</sup>。现场实测资料表明:垃圾填埋场中气体的压力比一般非饱和土中的大,在一定条件下填埋场气体压力可高达400 kPa<sup>[12]</sup>。垃圾填埋场中的气、水运移是相互影响,耦合作用的。与一般的非饱和土类似,气相的存在使得液相的渗透系数降低,气体压力的变化将改变液相流动的驱动力,从而影响了液相的运移;反过来液相的存在会影响气相的渗透系数,液相的运动将改变气相压力的大小及其分布。由于垃圾填埋场气体压力比较大,且变化比较显著,所以垃圾土中的水—气耦合效应要比一般的非饱和土更为突出。另外,垃圾土气相中的可溶性气体(即CO<sub>2</sub>)与液相之间存在溶入和逸出现象,即气、液两相中CO<sub>2</sub>存在一定质量体积转化关系。因此,垃圾填埋场中气、水运移问题非常复杂,该问题的研究对已建垃圾填埋场的安定性和环境效应的合理分析与评价,以及现代卫生垃圾填埋场的科学设计都有重大的意义。

## 2.2 干/湿引起的地基变形问题

干/湿引起的地基变形问题在膨胀土和黄土地区特别突出。在膨胀土地区建设的轻型结构(公路、低层房屋等)往往由于地基中含水率(或吸力)改变而发生隆起或下陷。引起地基土体含水率变化的因素有很多,主要包括自然气候条件以及施工和使用过程中各种人为因素。

季节性的干湿循环将使直接暴露在大气中的浅层膨胀土地基中含水率不断发生变化,地基因而发生隆起或下陷。因此,在膨胀土地区建设的房屋地基或路基必须采取有效的防渗或排水设施,以保持地基中水分收支平衡。然而,长期的干旱或湿润气候将打破包气带的水分收支平衡,使其中的含水率(或吸力)剖面发生显著的变化,并导致地下水位变动,因此可能膨胀土地区大面积隆起或下陷,例如英国在1975—1976年的长期干旱期间,大量房屋地基发生显著的下陷变形,上部结构开裂,以致各保险公司的赔偿总金额多达25亿英镑<sup>[50]</sup>。

膨胀土地区的地基变形问题还与植被密切相关。有植被良好地区的工程建设中往往会发生砍树现象,砍树之后,原有的巨大根系丧失了吸水能力,以致根系及其附近的地基中含水率将逐渐增加而隆起<sup>[13]</sup>。相反,在没有植被地区的工程建成之后,往往会种植树木或草坪,由于植物的生长不断从土层中吸收水分,因此地基中含水率将逐渐减少下陷。因此,在具有显著胀缩土地区,不能房屋周围及路基周边盲目的植树或砍树,如需植树,应考虑合理布局,例如房屋的两侧对称地植树。

膨胀土地区的工程施工也可能改变地基土层中含水率。开挖或填方施工可能切断地表水或地下水原有的排水通道,导致水分在地基中蓄积。施工用水的随意排放也可能造成局部地基中含水率升高。另外,工程建成之后使用期间,也可能发生地基土层中含水率改变的情况。例如,住宅小区建成之后,绿化带的过量浇水、生活污水管发生渗漏等可能造成房屋地基隆起。因此,在工程施工过程及建成之后,应注意保持地基土层水分收支平衡。

在黄土地区,干/湿引起的地基变形问题主要表现为湿陷变形。黄土地基湿陷变形的内因是黄土内在的特殊结构,外因是引起地基中含水率增加的各种因素。与上述情况类似,引起地基中含水率增加的因素也包括自然气候条件以及施工和使用过程中各种人为因素。在工程施工过程及建成之后,应注意避免或减少黄土地基中含水率升高。

显然,传统的饱和土变形理论无法合理计算和预测由干/湿引起的膨胀土或黄土地基变形,因此应采用非饱和土力学理论和特殊的试验方法研究与分析上述变形问题。自20世纪60年代以来,许多研究者对此做了大量工作。例如,对于膨胀土地基隆起,Jennings & Knight (1957)提出了双固结法<sup>[14]</sup>,Smith(1973)建议采用直接模拟法<sup>[15]</sup>,Fredlund & Rahardjo(1993)提出过用“常体积”膨胀力试验结果来预测总隆起量的方法等<sup>[6]</sup>。

### 2.3 非饱和土边坡稳定问题

非饱和土边坡稳定最突出的问题是降雨入渗诱发的边坡失稳。降雨入渗使得边坡浅层土体中含水率升高, 并可能导致滞水的发生, 以致土体中原有的吸力及其抗剪强度的贡献降低甚至完全丧失, 边坡稳定安全系数可能因此而降低。对于降雨条件下边坡稳定问题, 边坡浅层土体中孔隙水压力分布剖面是最为关键的不确定因素, 这是由于它不仅与降雨条件(包括雨型、雨强、降雨历时等)有关, 而且还与边坡中土层剖面、土性参数(主要是水力参数)以及降雨前土层中初始含水率(或吸力)分布场有关。

#### (1) 无粘性土边坡

自20世纪90年代以来, 许多研究者在降雨入渗对边坡稳定影响方面做了大量工作, 包括进行现场监测<sup>[17-23]</sup>和数值模拟<sup>[24-28]</sup>。这些研究大多是针对弱胀缩性土(如残积土), 研究成果表明: 降雨入渗对边坡中孔压剖面的影响随着土层深度的增加显著降低, 影响深度一般小于3 m。长时间的降雨入渗往往会导致滞水层和顺坡向层间流的产生。边坡表面的植被情况和覆盖条件可能明显影响降雨入渗强度及边坡中孔压场。土层剖面的非均质性以及相对透水区或隔水层的存在将显著改变降雨入渗条件下边坡中的渗流场, 以致影响边坡中孔压分布剖面。

对于上述弱胀缩性土边坡, 降雨入渗条件下边坡稳定的分析和评价方法比较简单。首先, 根据边坡的边界条件和土层剖面进行非饱和一饱和渗流分析, 获得不同降雨入渗条件下的孔压场(包括地下水位以上的吸力场)。然后, 将获得的孔压场输入到边坡稳定分析程序(如采用极限平衡法), 计算不同降雨入渗条件下的边坡稳定安全系数。在边坡稳定分析中, 一般假定吸力对抗剪强度的贡献体现在土体凝聚力的改变, 这样, 传统极限平衡分析方法的公式的形式保持不变, 原有的程序只需稍作修改就可适用。

#### (2) 粘性土边坡

如上所述, 降雨入渗对弱胀缩性土边坡稳定影响作用比较简单, 主要是影响边坡浅层土体中孔压场。然而, 对于强胀缩性土边坡(如膨胀土), 降雨入渗对边坡稳定影响机理要复杂得多, 这是由于这种土的水-土相互作用非常强烈: 降雨入渗不仅会改变浅层土体中含水率和孔压场, 而且可能改变边坡中的应力场和变形场。

2001年, 香港科技大学与长江科学院合作, 在湖北枣阳选取了一个11 m高的中膨胀土渠道边坡进行人工降雨模拟试验和多种仪器的原位综合监测(监测区域长31 m×宽16 m)。埋设的仪器包括张力计、热传导吸力探头、含水率探头、土压力盒、测斜管、雨

量计、蒸发计以及地表径流量测系统。在约一个月的监测期间共进行两场人工降雨模拟(共570 mm)<sup>[29, 30]</sup>。现场试验和监测结果表明: 非饱和膨胀土中水土相互作用是一个相当复杂的问题, 它涉及吸力(或水分)、变形、应力和抗剪强度之间的耦合作用, 还受膨胀土中丰富的裂隙显著影响: ①在降雨前的干旱季节, 膨胀土干缩开裂, 张裂隙逐步向四周和深部发展。裂隙不仅破坏了土体原有的完整结构, 而且为雨水入渗打开方便之门; ②在雨季, 降雨入渗造成了浅层的非饱和膨胀土体含水率增加, 吸力降低, 同时土体吸水膨胀。吸力降低使得土颗粒间的有效应力降低, 从而导致了土体抗剪强度的降低。吸水膨胀使得土体的孔隙比增加, 也会导致抗剪强度的降低。降雨入渗的这一双重效应是降雨诱发膨胀土边坡失稳的主要原因之一; ③降雨入渗会造成边坡浅层土体中水平应力显著增加, 这是由于膨胀土体在水平方向的膨胀趋势受到限制, 则以膨胀力的形式表现出来。水平应力显著增加可能使得土体的应力比达到被动极限状态, 发生局部破坏。在一定条件下(如持续降雨), 此局部破坏面可能会向四周逐渐发展, 最后发展成为膨胀土中常见的渐进式滑坡。降雨入渗造成的土体竖向膨胀软化和边坡中水平应力的增加是与非饱和膨胀土的胀缩性相关的, 因此是膨胀土边坡所特有的。

最近, 剑桥大学在离心机里研究季节性的干湿循环对超固结粘土边坡稳定的影响<sup>[31]</sup>。该研究采用一个可控制湿度的密封模型槽来实现坡面边界的干湿交替, 并通过提高离心加速度来加速水分运移速度, 使得历时几年的干湿循环过程转为只有十几个小时的模型试验。研究结果表明: 干湿循环造成了边坡浅层土体反复收缩和膨胀, 虽然位移方向均以坡面的垂线方向为主, 但每次循环结果均产生一个向坡下的残余变形, 该残余变形随循环次数的增加不断累积, 它使得坡肩附近的土层出现张裂隙, 并在坡脚附近形成剪应力集中区, 最终边坡模型发生渐进累积破坏。因此, 由长期的季节性干湿循环导致的向坡下的蠕变是造成超固结粘性土边坡渐进累积破坏的重要原因之一。

因此, 对于强胀缩性土坡, 降雨入渗条件下边坡中水土相互作用及其对边坡稳定的影响是一个相当复杂的问题, 该问题的分析应采用吸力-变形-应力耦合数值模型, 同时应考虑裂隙的影响<sup>[31]</sup>。最近, 有些学者在此方面开展了一些探索性的研究工作<sup>[9, 32]</sup>。

### 2.4 支挡结构的土压力问题

支挡结构后面的填土或边坡往往是非饱和的, 至少部分是非饱和的。非饱和土层的存在对土压力的影响主要表现在张裂区深度和土压力系数的改变。对于静止状态, 由于非饱和土中表面张力对土颗粒有张拉



作用,粘性土地表往往会出现开裂区,开裂深度与吸力剖面有关,如果假设吸力随深度线性降低,则开裂区随地表处的吸力值的增加而加深。理论上讲,静止土压力系数随着吸力的增加而线性减少。对于主动状态,由于非饱和土中吸力对土体抗剪强度有贡献,且该贡献主要表现为表观凝聚力的增加,因此张裂区深度将比相应饱和土的大,具体深度可根据浅层土体中的吸力剖面和抗剪强度参数(包括 $\phi^b$ )来确定。根据类似原理,主动和被动土压力系数可根据浅层土体中的吸力剖面和抗剪强度参数(包括 $\phi^b$ )来计算,在计算中假定吸力对土体抗剪强度有贡献全部体现在表观凝聚力的增加,这样,土压力系数的计算公式的形式与饱和土是一致的。一般来说,非饱和土层中吸力增大,主动土压力系数降低,而被动土压力系数增加。值得注意的是接近地表的非饱和土层中吸力剖面随外界的气候条件的变化而变化,所以作用在支挡结构上的土压力处于不断变化之中,因此在进行支挡结构设计时,必须考虑各种气候条件中最不利的情况。另外,与饱和土类似,非饱和土层的土压力也与支挡结构的变形有关。一般来说,非饱和土层进入主动或被动状态所需的变形要比饱和土的小。

对于非饱和膨胀土来说,土压力问题还涉及土体吸湿膨胀力问题。当雨水入渗到非饱和膨胀土中,土体在竖向可自由膨胀,但在水平方向的膨胀趋势将受到支挡结构的限制,则以膨胀力的形式表现出来。显然,膨胀力的大小与水平方向容许变形有密切的关系,如果容许变形很小,则膨胀力可能非常大。从此意义上讲,膨胀土地区宜采用柔性的支挡结构,如加筋土挡墙,另外,墙后填土或挖方应采取表面防渗措施及内部排水措施。在支挡结构设计时,不宜将室内试验中用常体积法测得的膨胀压力值直接应用到挡墙后面的土压力计算中,这是由于挡墙后面土体变形情况与试验中不同的缘故,挡墙后面土体在竖向可自由变形,在水平方向挡墙一般也容许一定的变形,而在常体积膨胀力试验中,试样竖向和水平向变形均被完全限制。

对于细粒非饱和土,其中的吸力对抗剪强度的贡献非常可观,工程师可考虑在工程设计中利用它。例如,在非饱和土层进行的临时性基坑开挖工程可考虑采用无支护开挖。从理论上讲,其临界开挖深度等于两倍的张拉区的深度。若土层上部出现张裂缝,则临界无支护开挖深度将有所减少。当然,无支护开挖工程中必须做好防渗措施及排水措施,以保持非饱和土体中原有的吸力。

## 2.5 地基承载力问题

路基及建筑物的浅基础往往是落在非饱和土层上,由于其中的吸力对土体的抗剪强度存在贡献,所

以地基承载力比相应饱和土的高。如果非饱和土层中吸力会长期存在,工程师在地基承载力设计时可考虑由吸力引起的附加抗剪强度对承载力的贡献,承载力计算时可认为吸力引起附加抗剪强度主要体现在表观凝聚力,这样地基承载力的计算公式与饱和土的一致。当然,若非饱和土中吸力会受当地的气候的影响而不能保证时,必须考虑一定安全系数。

## 3 非饱和土理论实用化问题的讨论

非饱和土理论之实用化是许多非饱和土研究者经常思考和探索的问题。这是理论发展的必然趋势和终极目的,否则就不必进行理论研究,对非饱和土也是如此。但实用化过程中也应注意以下问题。

(1) 任何实用化都必须有一定的理论基础和一个正确的方向(思路),至少在物理概念上是明确的。否则很难发展下去。在以往科学发展史上,往往有许多深奥的、重要的理论,其实用的表达式则十分简单,太沙基的饱和土有效应力原理就是一个很好的例证。这种简单的形式是在经过仔细的、科学的研究论证,并在实践中不断检验而“浓缩”出来的,遵循“从简单到复杂再回到简单”的科学规律形成的。因此,任何学科的发展,任何理论的形成都有一个初期发展的摸索过程,弄清一些基本东西,并在实用中逐渐形成一套理论,那些前期的基本工作是不应当被忽视的。

(2) 学科的特点不同,问题的复杂性也会不同,其所用的方法和技术也必然不同。处理问题时,所用的方法能简则简,不能简则先繁些,再逐步简化,总要“水到渠成”才好,不可急于求成。非饱和土的特性远比饱和土复杂,有些工程问题比较简单或可用饱和土延伸的方法对付,但有些是不可能的,则不要勉强为之。如果非饱和土问题都可从饱和土推广,都可通用,太沙基又为何把它自己的理论严格地限于饱和土的范围。可见他是对非饱和土的复杂性有所了解的。

(3) 目前提出的许多实用方法或简化方法都可以在实践中试用,并加以检验,只要它在道理上基本正确,站得住脚。倘若有些实用方法其理论基础尚不足,可以再作一些补充的基础性研究工作,使其完善,不要轻易否定。笔者以为应当鼓励在实用化方面的努力,尤其在当前的情况下。

(4) 目前从事非饱和研究的多集中于高等院校和大的科研机构,不少研究生选择非饱和土方面的研究课题作为研究方向,这是好现象。在他们的学习过程中,笔者以为有两点值得注意:首先是对现有国内外的文献进行精读,真正领会其实质,并且融会贯通,使对非饱和土的“真面目”有一个概括的、正确的认识,在此基础上,再研究本构关系;其次是要寻找一

些实际例子进行研究, 不要“制造”一个算例, 然后得出自己的“新理论”可以在工程应用, 甚至为“今后非饱和土的实用化指出了方向”等轻率的结论。

#### 4 非饱和土研究的发展问题

总的说来, 国外对非饱和土研究的热度要比国内的高, 尤其有不少著名学者坚持在非饱和土基本特性课题上进行研究, 且不断有新的、有价值的成果问世。国际上的学术活动也远比国内活跃。这种现象是很值得我们深思的。

笔者认为在非饱和土的研究上, 我们还有一些问题值得注意, 特提出供参考和讨论。

(1) 非饱和土今后的发展必须走工程实用的道路, 这个目标应当明确, 否则它就没有生命力, 也不可能持续发展下去。但要注意的是, 至今人们对非饱和土的力学性质仍了解得不大透彻。倘若有些不成熟的或理论上还缺乏必要基础的计算方法和工程措施在工程中草率应用, 不免会造成一定的负面影响, 不利于非饱和土研究的进一步开展。因此处理好必要的理论与工程中应用和验证的关系是当前非饱和土研究中的重大议题之一。

(2) 目前非饱和土研究中还存在不少认识问题, 阻碍着研究的发展。例如, 非饱和土研究到底是否有必要? 工程中用饱和土公式来处理非饱和土问题是不是偏于安全吗? 既然饱和土的与非饱和土的有效内摩擦角几乎相等, 又何必研究非饱和土问题? 既然吸力不稳定, 很难利用, 那么工程中就不必考虑了, 反正也省不了多少钱? 既然非饱和土研究很有必要, 为何在其发展过程中时起时落? 等等这些认识若不得澄清, 非饱和土研究也很难顺利开展。

(3) 吸力在非饱和土研究中的重要性不言而喻, 但吸力的测定技术和预测方法都还比较复杂, 室内和现场量测吸力的仪器设备的可靠性与简便性都有待改进, 现场的观测中, 探头的埋设技术应特别引起注意, 如有必要应作专门研究, 以保证测读成果的准确性。

(4) 关于理论研究, 就基本性质而言, 以往对基质吸力研究较多, 对溶质吸力的作用研究较少; 对于水、气运移问题, 数值模拟较多, 参数测试和现场验证比较缺乏; 在力学性状方面, 以往对强度特性研究较多, 对固结问题, 尤其是固结与流动的耦合问题的研究相对较少; 即使在强度研究中也对因含水率变化引起的结构性改变导致强度变化的微观层面的研究, 显得不足。有些问题往往是只知其然, 不知其所以然。

(5) 关于理论应用方面, 笔者并不认为所有的非饱和土问题都必须按非饱和土理论来解决, 如果有些问题估计与按饱和土处理结果差别不大, 而且证明是

偏安全的, 那么也可采用饱和土的方法; 再者, 如果非饱和土工程在其运用过程有饱和的可能, 而这又是最坏的工况, 那么当然仍用饱和土的传统方法来解决。问题是有些工程实践中, 简单地采用饱和土的一套传统方法并不能证明结果是偏于安全的。这在某些特殊土的工程中, 时会遇到。例如膨胀土边坡在入渗条件下的稳定问题, 现场监测结果已表明, 降雨入渗条件下边坡中土—水相互作用机理非常复杂, 雨水入渗不仅起土体中吸力降低而软化, 而且还造成土体膨胀而软化及应力比的增加。季节性的干湿循环会造成膨胀土边坡土体向坡下蠕变, 最终导致渐进累积破坏。这些复杂的土—水相互作用机理不研究明白, 很难对膨胀土边坡稳定进行正确设计和处理。

(6) 对非饱和土工程进行原型观测是必要的和有用的。由于非饱和土性质复杂, 有些规律只能从实际观测值中寻找规律, 然后再作理论上的补充研究, 但应注意资料的代表性以及规律的普遍性的论证。

#### 参考文献:

- [1] STEINBERG M. Geomembranes and The Control of Expansive Soils in Construction [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1998.
- [2] FREDLUND D G. The scope of unsaturated soil mechanics: an overview [C]// Proc of 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995.
- [3] DELAGE P, GRAHAM J. Mechanical behavior of unsaturated soils: understanding the behavior of unsaturated soils requires reliable conceptual models [C]// Proc of 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995.
- [4] ALONSO E E, GENS A, HIGHT D W. Special problem soils – general report [C]// Proc of 9th European Conf of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin, 1987.
- [5] BISHOP A W. The principle of effective stress [J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 106 (39): 859 – 863.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soil Mechanics [M]. New York: Wiley Inter Science, 1993.
- [7] HILLEL D. Environmental Soil Physics [M]. Sandiego: Academic Press, 1998.
- [8] ZHAN L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4).
- [9] ZHAN Liang-tong. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of

- Science and Technology, 2003.
- [10] 陈家军, 奚成刚, 王金生. 非饱和带水-气二相流数值模拟研究进展[J]. 水科学进展, 2000, **11**(2): 208 - 214. (CHEN Jia-yun, XI Cheng-gang, WANG Jin-sheng. Study progress of numerical simulation on water-air flow in unsaturated zone[J]. Recent Developed on Water Science, 2000, **11**(2): 208 - 214.)
- [11] 方 满. 垃圾填埋场爆炸灾害的发生与控制途径[J]. 灾害学, 1997, **12**(3): 89 - 92. (FANG Man. Development and control of blast hazard in landfill[J]. Hazard Science, 1997, **12**(3): 89 - 92.)
- [12] PROSSER R, JANECEK A. Landfill gas and groundwater contamination[C]// Landfill closure-Environmental protection and land recovery, ASCE, Geotechnical Special Publication. 1995.
- [13] RICHARD B G, PETER P, EMERSON W W. The effect of vegetation on the swelling and shrinkage of soils in Australia [J]. Géotechnique, 1983, **33**(2): 127 - 139.
- [14] DRISCOLL R. The influence of vegetation on the swelling and shrinkage of clay soils in Britain [J]. Géotechnique, 1983, **33**, (2): 93 - 105.
- [15] Jennings, knight. The prediction of total heave from the double oedometer test [C]// Proc Symp Expansive Clays. 1957.
- [16] SMITH W. Method for determining the potential vertical rise, PVR. texas test method tex-126-E [C]// Proc Workshop Expansive Clay and Shales in Highway Design and Construction. 1973.
- [17] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong [C]// Proc 4th Int Symp Landslides. Toronto, 1984.
- [18] JOHNSON K A, SITAR N. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation [J]. Can Geotech J, 1990, **27**(6): 789 - 801.
- [19] AFFENDI A A, FAISAL A. Field measurement of soil suction [C]// Proceeding of 13th International Conference on Soil Mechanical and Foundation Engineering. Newdelhi, 1994.
- [20] LIM T T, RAHARDJO H, CHANG M F, FREDLUND D G. Effect of rainfall on matric suction in a residual soil slope [J]. Canadian Geotech J, 1996, **33**(2): 618 - 628.
- [21] GASMO J M, HRITZUK K J, RAHARDJO H, LEONG E C. Instrumenttation of an unsaturated residual soil slope [J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, **22**(2): 128 - 137.
- [22] ZHANG J, JIAO J J, YANG J. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China [J]. Engineering Geology, 2000, **57**: 31 - 38.
- [23] RAHARDJO H, LEONG E C, REZAUR R B. Instrumented slopes for the study of rainfall-induced slope failures [J]. Geotechnical Engineering, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003, 307 - 312.
- [24] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage [J]. Computers and Geotechnics, 1998, **22**(1): 1 - 28.
- [25] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 非饱和土边坡降雨入渗参数分析 [J]. 岩土力学, 1999, **20**(1): 1 - 14. (WU Hong-wei CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parameter analysis of raining infiltration for unsaturated soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(1): 1 - 14.)
- [26] FOURIE A B, ROWE D, BLIGHT G E. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a drv ash dump [J]. Geotechnique, 1999, **49** (1): 1 - 13.
- [27] LEONG E C, LOW B K, RAHARDJO H. Suction profiles and stability of residual soil slopes [C]// Proceedings of Slope Stability Engineering. Balkema, 1999.
- [28] GASMO J M, RAHARDJO H, LEONG E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope [J]. Computers and Geotechnics, 2000, **26**: 145 - 165.
- [29] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 143 - 157.
- [30] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 龚壁卫. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 151 - 158. (ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang, GONG Bi-wei. Field monitoring of unsaturated expansive soil slope under raining and infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 151 - 158.)
- [31] TAKE W A. Physical modeling of seasonal moisture cycles and progressive failure in embankments [D]. University of Cambridge, 2003.
- [32] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1 - 15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2004, **26**(1): 1 - 15.)
- [33] 沈珠江, 米占宽. 膨胀土渠道边坡降雨入渗和变形耦合分析[J]. 水利水运工程学报, 2004, (3): 7 - 11. (SHEN Zhu-jiang, MI Zhan-kuan. Coupled analysis of infiltration and deformation for canal slope in expansive soil[J]. Journal of Hydro-science and Engineering, 2004, (3): 7 - 11.)