

区域性土的岩土工程问题 学术讨论会论文集

1996. 10. 南京

PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON
GEOTECHNICAL ASPECTS OF REGIONAL SOILS

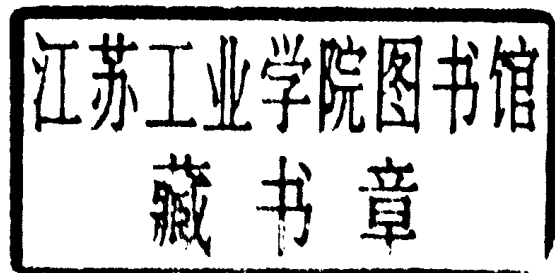


原子能出版社

区域性土的岩土工程问题

学术讨论会论文集

魏道堃 顾尧章 洪萼辉 主编



原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集/魏道堦,顾尧章,洪萼辉主编,一北京:原子能出版社,1996.10

ISBN 7-5022-1607-3

I. 区… II. ①魏…②顾…③洪… III. 岩土工程-学术会议-文集 IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 17996 号

内 容 提 要

我国幅员广大,土质条件比较复杂。从东到西,从南到北广泛分布着软粘土、冲填土、膨胀土、红粘土、泥炭土、冻土、湿陷性黄土、黄泛区粉土,以及风化壳等区域性土类。这是一本汇集各地有关区域性土的理论研究成果和工程实践经验的会议论文集,由从事理论研究和工程实践第一线的学者和工程技术人员撰写。全书内容丰富,既有一定的理论深度,又有较强的实用性。可供土木和建筑工程领域内从事岩土工程勘察、设计与施工的工程技术人员参考,也可供大专院校有关专业师生和研究单位有关人员学习和参考。

区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集

魏道堦、顾尧章、洪萼辉主编

© 原子能出版社,1996

原子能出版社出版发行

责任编辑 张恩海

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮编编码:100037

浙江省总工会杭州钟声电子技术服务部排版

萧山新华印刷厂印刷

* * *

开本:787×1092mm 1/16 印张:29 字数: 740 千字

1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月第一次印刷

印数:0001-1000

定价:70.00 元

主办单位

《岩土工程师》编辑部

沿海地区岩土工程专家组

协办单位

同济大学地下建筑与工程系

上海隧道工程股份有限公司

南京建筑工程学院

会议组委会名单(以姓氏笔划为序)

孔清华	王吉望	史美筠	刘金砺
许镇鸿	李振明	何广讷	杜嘉鸿
杨林德	张旷成	邵信发	屈智炯
郑广琦	侯学渊	洪萼辉	费鸿庆
宰金珉	宰金璋	袁灿勤	徐少曼
徐庆怡	钱征	顾尧章	顾晓鲁
殷宗泽	郦能惠	程骁	傅德明
潘秋元	廖济川	魏琅	魏道垛

致 谢

谨向对本次学术讨论会进行赞助和给予大力支持的下列单位表示衷心感谢:

上海隧道工程股份有限公司

天津市九洲基础工程公司

陕西省建筑科学研究设计院地基基础工程处海南工程处

济南黄河基础工程公司

宁波市地基基础研究所

会议组委会

前 言

我国地域广大,地质条件复杂,从东到西,从南到北,土层分布差异较大。在东南沿海及内陆地区分布有含水量较高的软粘土,在西北广大地区则是孔隙比较大的黄土,北方的冻土、广西一带南方地区的膨胀土,还有盐渍土、泥炭土、红粘土以及山区的坡(残)积土等。随着经济建设的飞跃发展,特别是改革开放以来,土木建筑工程遍及全国各个地区。全国各地的工程技术人员在他们的工程实践中,逐渐认识并掌握了区域性土的性状以及地基基础技术。为了交流有关区域性土的性状及对各种区域性土的地基基础技术方面的工程经验和研究成果,给广大工程技术人员提供一个交流、经验研讨技术的讲台,就显得十分必要。鉴于此,由《岩土工程师》杂志和沿海地区岩土工程专家组牵头发起了以区域性土的岩土工程问题为主题的学术讨论会,亦即第六次岩土工程系列研讨会。

本次岩土工程学术讨论会首先是在1994年10月新疆乌鲁木齐会议(即第五次岩土工程系列研讨会)期间,由岩土工程师之友联谊会上提出的。之后,以《岩土工程师》主编及有关专家组成的组委会,拟定了会议主题和征文内容,特邀国内著名专家作专题报告。

征文通知发出后得到了全国广大同仁的支持和鼓励。组委会收到了大量的稿件。1995年12月底,《岩土工程师》主编并邀请有关专家在上海对提交本次讨论会的论文进行了审查和筛选。参加审稿的专家认为,提交本次讨论会的论文,内容丰富,涉及面广,既有一定的理论深度,又有可资借鉴的工程经验,与《岩土工程师》面向生产,贴近工程,理论联系实际的宗旨合拍。

为方便阅读,本论文集在编辑时把内容分为如下几个方面:专题报告、试验研究、理论分析与探讨、区域性土的工程特性、岩土工程勘察设计与施工。与以往几次专一主题的研讨会不同,本次研究会的内容较为庞杂,要对如此庞杂的内容作综合评述,难度较大,所以本次研讨会没有按照惯例撰写综合报告。

在出版论文集过程中,原子能出版社给予大力支持。下列企业和单位给予经济上的资助:上海隧道工程股份有限公司、天津市九洲基础工程公司、陕西省建筑科学研究院地基基础工程处海南工程处、济南黄河基础工程公司、宁波市地基基础研究所。值此论文集出版之际,组委会向他们表示衷心感谢。

南京是我国岩土工程的主要发源地之一,是专家云集人才辈出的一块福地,第六次岩土工程系列研讨会能在南京召开是值得广大岩土工程同仁高兴的事。南京建筑工程学院作为会议东道主,从领导到工作人员的热情和踏实工作,将为会议的圆满成功提供可靠的保证。

编 者

于1996年9月
杭州

目 录

一、专题报告

当前非饱和土力学研究中的若干问题·····	沈珠江	1
关于区域性土的几个问题·····	郑颖人 陆 新 郑宏录	11
海洋工程中岩土工程的若干问题·····	何广讷	19
中国区域性土的分布、岩土工程性质和它们的形成·····	高国瑞	24
软土挖方性状研究与支护结构设计新进展·····	宰金璋	32
上海地铁区间隧道土压平衡盾构施工技术·····	傅德明	46
宁波深厚软土地层高层建筑桩基技术的进展(干取土灌注桩专题)·····	孔清华 桂淞莉	54

二、试验研究、理论分析与探讨

塔里木风成砂土工程特性试验研究·····	吴崇礼 张建国 纪玉成	62
塔克拉玛干沙漠砂循环界限剪应变研究·····	朱腾明 王幼青 张克绪等	67
黄土静动力性能试验研究·····	陈国兴 张克绪 仝 筠等	73
石家庄市黄土状土粒度成分与塑性关系初步分析·····	陈追田	78
影响宁夏膨胀土膨胀变形的因素·····	徐永福 殷宗泽	82
膨胀土三向和单向变形特性研究·····	王 园	88
干湿循环对膨胀土工程性质影响的初步研究·····	刘松玉 钟 理	93
膨胀土击实土渗透特性的初步研究·····	张鉴城	99
宁夏膨胀土渠道边坡变形规律试验研究·····	孙长龙 殷宗泽 王宝田等	102
膨胀土地基砂垫层处理现场试验研究·····	孙长龙	109
上海软土非线性流变特性及本构模型·····	谢 宁 孙 钧	115
堤坝下软基预应变土工织物加筋效果分析·····	徐少曼 康进王	120
应用劈裂灌浆方法加固松软地基的研究·····	王士恩 吴木林	126
福州地区溺谷相软土相关性的初步探讨·····	邱宗新	129
硬粘土开挖问题中强度软化初探·····	冯铁群 沈珠江	134
泥炭质粘土地基处理的离心模型试验研究·····	杜建成 张利民	141
钻孔灌注桩承载性状的分析与探讨·····	张建德 汪永森 孔国强	146
软土中复合地基桩土应力比问题评述·····	吴兰根 李永波	152
冻土地区的加筋挡土墙的现场试验研究·····	陈 轮 郭瑞平 李广信等	159

三、区域性土的工程特性

盐渍土的工程特性、评价及改良·····	徐攸在	165
山东滨海地区盐渍土的工程性质·····	郑广琦	173
中国红粘土特征、工程应用与研究展望·····	王毓华	177
重庆红粘土的物理力学性质特性·····	张 英 邓安福	185
六盘水市红粘土的工程性质特征·····	姜国政	190
云南风化玄武岩红土工程性能浅析·····	万广生	194
玄武岩风化的“红粘土”形成及岩土工程性能探讨·····	陈光瞰	201
广州市红层风化岩的某些特征及其岩土工程评价·····	伍四明 刘惠生	207
花岗岩残积土工程性质研究·····	张文华 张旷成	212
深圳地区花岗岩残积土物理力学性质的一些规律·····	王荆丹	219
论钙质泥质岩系红色残积土的工程特征——以清远地区为例·····	张治邦	222
日照市区花岗岩闪长岩风化壳的工程地质分带研究·····	陈震宇	229

试论扬州沿江软土的工程性质及其处理方法·····	钱玉林	刘怀明	郭贵全	233
南京城区古河道漫滩相沉积饱和粉土的工程地质特征·····	袁灿勤	陈文兴		236
山西省饱和黄土的工程特性与加筋砂卵石垫层的运用·····	董完毛	王步云		241
银川地区地基土成因及地基处理·····		张万林		248
黄河三角洲海岸带冲积土的工程性质·····		王中正		254
苏南地区超固结土的工程性状及形成机理探讨·····		冯兆祥		261
洛阳市涧西区西苑路一带湖积土固结特征研究·····		张红艺		267
论徐州市老粘性土的工程特性·····		汪吉林		278

四、岩土工程勘察设计与施工

天津市河西银行大厦基坑护壁的设计与计算·····	潘家明	宋文梅		284
软土地区沉井施工中需注意的一些技术问题·····		吴红兵		289
软土地基基坑滑塌修复挖土和处理技术措施·····	姜天鹤	吴志飞		297
钻孔灌注桩支护体系在基坑开挖中应用的探讨·····	吴才德	沈俊杰		302
软土地基中合理桩型的选择·····		曾守群		306
南京六〇工程的软粘土地基加固处理·····		俞皓		309
支护体系与主体结构共同作用在地下车库中的应用·····	沈俊杰	吴才德		317
张巨河人工岛软基处理分析与综合评价·····	杨书遂	张宝增		321
天津软土特性及地基设计经验·····	徐文忠	徐激抒		332
汕头市软土地基的特征及其处理·····	许镇鸿	史宏彦		337
砂桩和土工织物复合地基——一种盐渍土地基的处理方法 ·····	张胜利	徐庆怡	郑连生等	341
压密注浆法加固新近堆填土地基的效果及机理分析·····		蒋兴宝		346
深圳地区填土的岩土工程问题及工程实践·····	黄力平	黄明年		349
强夯法处理湿陷性黄土地基的设计与施工·····	师管孝	朱武卫		354
强夯法加固大型冷却水塔湿陷性黄土地基·····		彭志圣		359
深圳南油妈湾港淤泥吹填与加固技术的探讨·····		余文天		366
几种特殊围岩中的隧洞设计与施工对策·····	黎运棻	刘小梅		371
膨胀岩土与路基处理·····	俞皓	蒋永康		376
治理膨胀土地基的砂桩设计·····		周光孔		380
以膨胀土作为持力层的桩基础·····	刘利民	李建华	张建新等	387
残积土地基上某挡土墙失效的原因分析·····		陈国臻	执笔	391
某水源邻近地区成片民房开裂的原因分析·····		高大钊		397
安徽省新汴河开挖渠坡失稳破坏规律及其防治·····	陶太江	王志建	荣福海等	402
基坑的岩土工程勘察要点·····		谢仲屏		408
高层建筑与综合地质勘察——以某高层建筑为例·····	许君	付仁平		413
有关建筑基坑的地下水防治·····		郭志业		421
福兴投资区某综合车间桩基勘察浅议·····	邱宗新	许如海		426
山东青州一带地基土的特征与桩基应用·····	孙胜东	叶志刚	左凤兰等	430
冻结法加固地层的原理与应用·····		陈湘生		437

附录:部分赞助单位简介

上海隧道工程股份有限公司(449);天津市九洲基础工程公司(450);陕西省建筑科学研究设计院地基基础工程处海南工程处(451);济南黄河基础工程公司(452);宁波市地基基础研究所(453)

当前非饱和土力学研究中的若干问题

沈珠江

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘 要 本文主要介绍 1995 年召开的第一届国际非饱和土会议上所反映的几个值得讨论的问题,特别是非饱和土的本构模型问题,并就今后的研究途径提出自己的见解。

1 前 言

有关非饱和土的研究历史几乎与饱和土一样长久,但由于难度很大,长期以来进展缓慢,直到最近才出现加速发展的趋势。1995 年 9 月在巴黎召开的第一届国际非饱和土会议正是非饱和土研究历史上重大转折的标志。

笔者曾把非饱和土力学的发展历史划分成三个阶段^[1],即①探索期(70 年代以前),②成熟期(70 年代中~90 年代中)及③完成期(90 年代中到 21 世纪 20~30 年代)。第一阶段的成就以下列 Bishop 的非饱和土有效应力公式为代表^[2]

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

第二阶段以 Fredlund 的双变量理论为开端,直至 90 年代初西欧学派发展了非饱和土的弹塑性模型和中国学者发展了非饱和土的固结理论。第一届国际非饱和土会议正是这一阶段成就的总结。今后阶段的主要任务是建立能描述非饱和土主要变形特性的本构模型,并在此基础上建成相应的变形理论和破坏理论的基本框架。

本文将主要围绕第一届国际非饱和土会议上讨论的几个问题,介绍当前非饱和土力学研究的现状,并从笔者本人的理解水平出发,探讨今后的研究途径。

2 强度特性

早期的非饱和土强度表达式通常写为

$$\tau_f = c + \sigma' \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

其中有效应力 σ' 的定义如式(1)所示。Fredlund 提出双变量理论后把上式改为^[3]

$$\tau_f = c + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi_b \quad (3)$$

式中, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力。两式相比,可见式(1)中的 χ 相当于

$$\chi = \operatorname{tg} \varphi_b / \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

近年来积累的大量试验资料表明, φ_b 并不是一个土性常数,因此式(3)未必见得比式(2)优越。

这次会议上,许多学者建议了非饱和土抗剪强度的非线性表达式。例如, Rohm 和 Vilar 认为抗剪强度与吸力之间可能存在双曲线关系^[4]。而 Fredlund 本人也从吸力作用面积随饱和度

的降低而减少的理论出发,建议了下列非线性强度公式^[5]

$$\tau_f = c + \operatorname{tg}\varphi(\sigma - u_a) + \operatorname{tg}\varphi \int_0^{\frac{S - S_r}{1 - S_r}} \left[\left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right) \right] ds \quad (5)$$

$s = u_a - u_w$ 为吸力, S 为饱和度, S_r 为残余饱和度(风干土)。前者可以用下列水分特征曲线的经验公式计算

$$S = \left[1 + \frac{\ln(1 + \frac{s}{s_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{s_r})} \right] \left[\frac{1}{\ln(e + (\frac{s}{a})^n)} \right]^m \quad (6)$$

s_r 为 $S = S_r$ 时的吸力, a 为进气压力, n 和 m 为两个参数, e 为自然对数底。上式参数太多,不便应用于实际应用。我们认为下列双曲线公式可能更实用

$$\tau_f = c + (\sigma - u_a) \operatorname{tg}\varphi + \frac{u_a - u_w}{1 + d(u_a - u_w)} \operatorname{tg}\varphi \quad (7)$$

与饱和土的公式相比,此式只多了一个参数 d 。对于文献[5]中所列资料,取 $d = 0.0025$ 的拟合曲线将与式(5)的结果基本一致(图1)。比较式(7)和式(2),可见此时

$$\chi = \frac{1}{1 + d(u_a - u_w)} \quad (8)$$

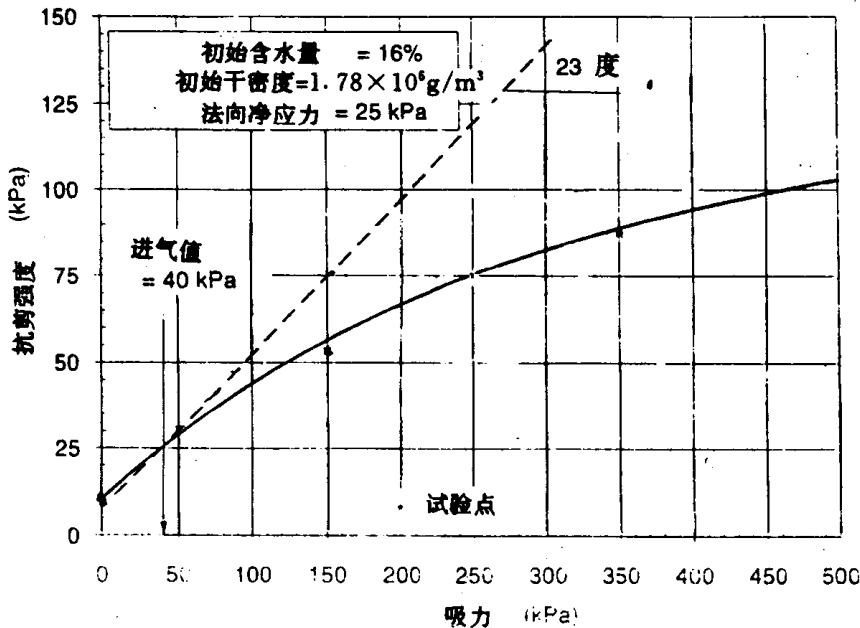


图1 非线性强度包线

非饱和土的抗拉强度与毛管吸力有直接的关系,即开始时随饱和度的降低和吸力的增大而增大,但随着饱和度的进一步降低,吸力作用的面积大幅减少,所以抗拉强度增加到某一峰值后又开始下降。这种具有峰值的非线性函数可以用下式表示^[6]

$$p_a = \alpha S(1 - S)^m \quad (9)$$

p_a 为毛管张力,即等于抗拉力, α 和 $m(0.3 \sim 1)$ 为两个参数。

3 变形特性

关于非饱和土的变形特性,到目前为止研究得比较多的主要是体积变形特性,而且所用的试料大多是人工制备土。

Fredlund 首先提出,非饱和土在 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 作用下的压缩均可用半对数公式表示^[7]

$$e = e_1 - C_c \log \frac{\sigma - u_a}{(\sigma - u_a)_1} - C_m \log \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_1} \quad (10)$$

而回弹时则有

$$e = e_2 - C_{cs} \log \frac{\sigma - u_a}{(\sigma - u_a)_2} - C_{ms} \log \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_2} \quad (11)$$

足标 1 和 2 分别代表加荷和减荷前的初始状态, C_c, C_m, C_{cs} 和 C_{ms} 分别为针对 $\sigma - u_a$ 和 $u_a - u_w$ 两个变量的压缩和回弹指数。但是到目前为止,Fredlund 及其学生们的研究工作只限于两个变量中有一个保持为常量的试验工作^[8],两个变量同时变化时,上式是否符合实际,尚待检验。

如前面的非线性强度理论一样,从下列非线性有效应力表达式出发,建立相应的体积变形公式仍不失为一种可能的选择

$$\sigma' = \sigma - u_a + f(u_a - u_w) \quad (12)$$

Karube 曾提出过类似的想法^[9]。此时式(10)可以改写为

$$e = e_1 - C_c \log \frac{\sigma - u_a + f(u_a - u_w)}{[\sigma - u_a + f(u_a - u_w)]_1} \quad (13)$$

非线性函数可以采用前面建议的双曲线函数或另一种较简单的幂函数,即

$$f(u_a - u_w) = \frac{u_a - u_w}{1 + d(u_a - u_w)} \quad (14)$$

或

$$f(u_a - u_w) = d(u_a - u_w)^n \quad (14a)$$

前式只有一个参数 d ,后式有 d 和 n 两个参数。参数多了,适应性当然就好一些,但测定起来也麻烦一些。

以上的研究思路显然不适用于湿陷性土。但是,大量的试验结果表明,即使是膨胀土,在高围压下也有明显的湿陷性,见图 2^[10]。通过人工制备的膨胀土试样还表明,这种试样具有明显的双重孔隙结构,即团粒之间为大孔隙,团粒内部粘土颗粒之间还有小孔隙。湿化主要是大孔隙结构的破坏造成的,而小孔隙的变化则具有胀缩可逆性。试样开始吸水时因团粒膨胀而整体膨胀,但一定时期以后又因团粒之间抗滑阻力的降低而发生湿陷。试验结果还表明,体积收缩在干湿循环过程中均会有一些发展。

文献[11]介绍了用高于和低于最优含水量制备成干密度相同的两种试料的浸水试验结果,说明在不控制吸力的常规试验中,高含水量试样没有湿陷性,低含水量试样则有相当大的湿陷性,并且湿陷量在 $\sigma_v = 0.6 \text{ MPa}$ 附近有一个明显的峰值,当 $\sigma_v = 1.5 \text{ MPa}$ 时湿陷性又消失。但在控制吸力下进行湿化试验时(即当 σ_v 增加时减小含水量使吸力保持不变,然后再增加含水量进行湿陷试验),湿陷量并不出现峰值,而是随 σ_v 增大而保持增长的势头(见图 3)。但李章泌对黄土的制备试样进行同样试验结果表明,不论常规试验或控制吸力试验,湿陷量都在 $\sigma_v =$

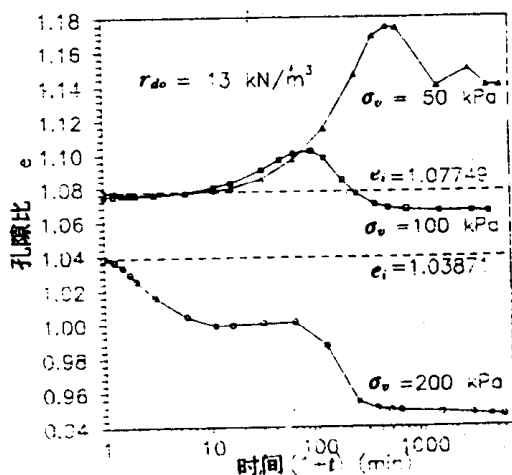


图 2 人工制备膨胀土试样的浸水变形

0.4MPa 附近有明显的峰值,而且当 σ_v 达到 1.2MPa 时湿陷性大体上消失,如图 4^[12]。两种试料的不同表现显然与它们所含的粘土矿物成分和孔隙结构不同有关。

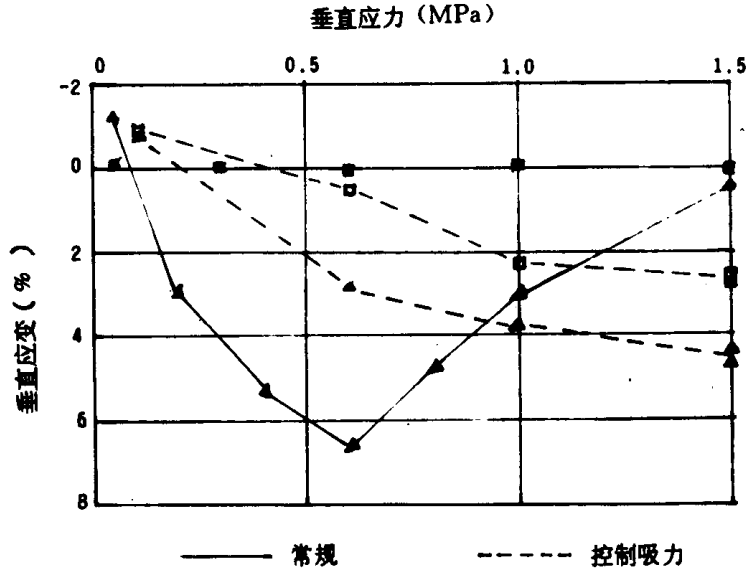


图 3 低塑性粉土的浸水变形

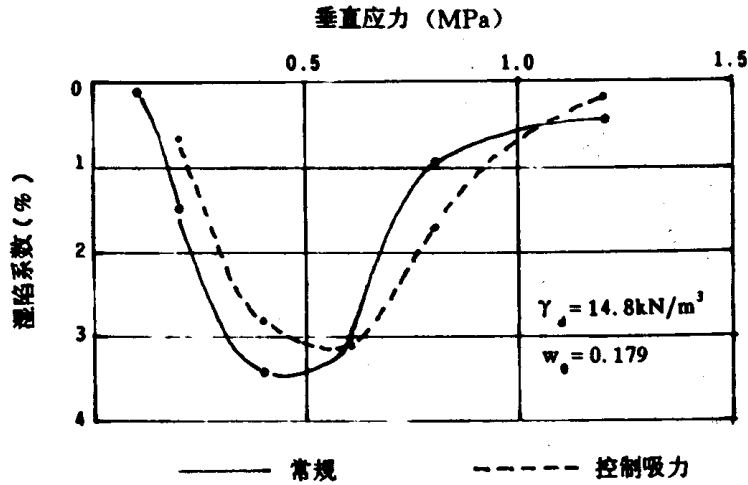


图 4 黄土试样的浸水变形

4 状态变量

以净应力 $\sigma - u_a$ 和吸力 $u_a - u_w$ 作为双变量的理论虽然取得多数学者的共识,但是笔者认为,在建立非饱和土的强度和变形理论时,寻找一个更合适的量作为第二变量,仍是一个值得讨论的问题。

首先,吸力的原意来自吸水,即是控制孔隙水流动的因素。但控制孔隙水流动的是总吸力,包括基质吸力和溶质吸力,而对强度和变形的影响则主要是基质吸力。这就意味着,在描述孔隙水和土骨架运动时,不一定要采用同一种变量。其次,由于单位土体内吸力的作用面积随饱和度的降低而减少,吸力的影响具有强烈的非线性,直接应用吸力作变量并不方便。为此,人们自然就想到是否可以应用另一种称之为折减吸力或等效吸力的变量 s' 代替原来的吸力 $s = u_a - u_w$ 作为第二变量^[13],即令

$$s' = \chi s \quad (15)$$

χ 的含义与式(1)或式(8)一致,并可称为折减系数。以上是从强度出发定义折减吸力。如果从变形出发定义折减吸力,则 s' 直接就是式(14)的 $f(u_a - u_w)$ 。采用这一研究途径将使有效应力公式 $\sigma' = \sigma - u_a + s'$ 重新被启用,例如式(13)可以简写为

$$e = e_1 - C_e \log \frac{\sigma'}{(\sigma')_1} \quad (16)$$

同样地,适用于饱和土的本构关系公式中,只要把围压或平均应力加上 s' ,即可原封不动地搬到非饱和土中来。例如,Duncan 模型的切线模量公式可以写为

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3 + s'}{p_a} \right)^n \left(1 - R_f \frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 \quad (17)$$

而剑桥模型的屈服函数可以写为

$$(\sigma_m + s') \left[1 + \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_m + s'} \right)^2 / M^2 \right] = (\sigma_m + s')_0 \exp \left(\frac{\epsilon_v^p}{\lambda - \kappa} \right) \quad (18)$$

式中, σ_m 为平均压应力, σ_1 为广义剪应力, $(\sigma_m + s')_0$ 代表塑性体应变 $\epsilon_v^p = 0$ 时的起始有效应力。

当然,这里需要研究的是,折减吸力 s' 或折减系数在多大程度上与应力路线有关。如果关系不大,这意味着重新认识的非饱和土有效应力原理将会有广阔应用的前景,否则,其适用范围就比较窄。

现在讨论采用含水量或饱和度作为非饱和土第二变量的可能性。鉴于含水量的量测比吸力的量测简单得多,这一研究途径无疑是有吸引力的。如果吸力与含水量之间存在唯一关系,那末用含水量代替吸力本来是顺理成章之事。但是实际的水分特征曲线具有滞回圈,即吸水和失水时互不重合。因此,含水量作为普遍适用的状态变量可能不合适,但对单纯吸水问题,可以假定吸力与含水量或饱和度之间存在下列唯一关系

$$\theta = f(s) \quad (19)$$

这时采取这一途径无疑有其独特的优点。

式(19)常称水分特征曲线。有关的经验公式很多,前面的式(6)就是其中的一个。下列 Genuchten 建议的公式也是常用的^[14]

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \alpha \frac{s}{\gamma_w} \right)^{-n} \quad (19a)$$

式中, θ 为体积含水量, θ_s 和 θ_r 分别为饱和及残余体积含水量, γ_w 为水容重, α 和 n 为两个参数。笔者认为,从实用角度出发,应用下列单参数公式将更为方便^[15]

$$S = S_r + (1 - S_r) \exp(-\alpha s) \quad (19b)$$

文献[16]通过试验发现,重量含水量 w 和吸力之间有更好的唯一关系,原因是体积含水量与孔隙的排列,即土的密度有很大关系,重量含水量却与此无关,而吸力主要取决于小孔隙的弯液面半径,也与土的密度关系不大。重量含水量是岩土工程师最熟识的,因此,只要针对所要研究的土类事先确定 w 与 s 的关系,用 w 作为变量无疑是十分方便的。

5 本构关系

从以上对状态变量的讨论已经可以看出,建立非饱和土的本构关系可以有以下三条途径。

5.1 广义应力空间理论

把吸力作为一个独立变量好比把通常有 6 个分量的应力空间扩展到七维空间,后者可以

称为广义应力空间。当研究的目标只限于八面体应力时,相当于把二维应力空间扩展到三维应力空间。Alonso 建议的三维空间屈服函数就是剑桥模型的椭圆屈服函数的推广^[17],如图 5。目前,西欧和日本的学者都热衷于发展这类非饱和土弹塑性模型^[18],但其内容都是大同小异的。

5.2 有效应力理论

如前面的式(16)和式(17)那样,用有效应力 $\sigma' = \sigma - u_a + s'$ 代入饱和土的有关公式中,也可以建立非饱和土的本构关系。当然,这一类模型的局限性较大,例如用于湿陷性土就有一定困难。

5.3 应力和含水量双变量理论

笔者认为,用含水量代替吸力有很大的实用价值。如果三维应力空间中的 s 轴用含水量 w 代替,同样可以建立相应的屈服面和相应的弹塑性理论^[19]。此外,笔者还建议过一种以含水量为变量的黄土损伤力学模型^[20]。

但是,即使对于饱和土,到目前为止已提出的各种非线性和弹塑性模型实际上都是从扰动土出发的,都不能反映原状土的软化特性。土体的软化可以分为减压软化、剪胀软化和损伤软化三类。减压软化是指围压降低引起强度和模量的降低,是超固结土的特性。减压软化常常伴随着剪胀软化,但剪胀软化并不一定发生在超固结土中。例如密实砂土也发生剪胀软化,它的剪胀软化应当与咬合力的丧失有关。损伤软化专指胶结强度丧失引起的软化,不一定伴随着体积膨胀,相反,对孔隙比很高的土类,软化还可能伴随着剪缩。吸力降低引起的软化与减压软化类似。如果把吸力、胶结力和咬合力这些粒间作用力合起来看作广义吸力^[15],那末引起软化的原因不是外加围压的降低,就是内在广义吸力的降低。由此可见,现有弹塑性理论把软化与剪胀必然地联系在一起,不符合原状土的复杂的变形特性。

我们认为,新一代的本构模型必须考虑变形过程中土体结构的变化,即是区别于现有的非线性模型和弹塑性模型的结构模型^[21]。在建立这样的本构模型之前,必须首先定出能反映结构性的基本指标。这些指标大体上包括三个方面,即孔隙率指标,破损率指标和定向率指标。下面简单讨论之。

(1) 孔隙率指标

孔隙率可以用平均孔隙率和大孔隙率表示,前者即通常定义的孔隙率,后者可用大于颗粒平均粒径 D_{50} 的孔隙所占的体积率来表示。许多土类的孔径分布曲线具有两个峰值,分别代表大孔隙和小孔隙的优势孔径。此时,也可以用两种优势孔径之比 $C_d = d_1/d_2$ 来表示,见图 6^[22]。

(2) 破损率

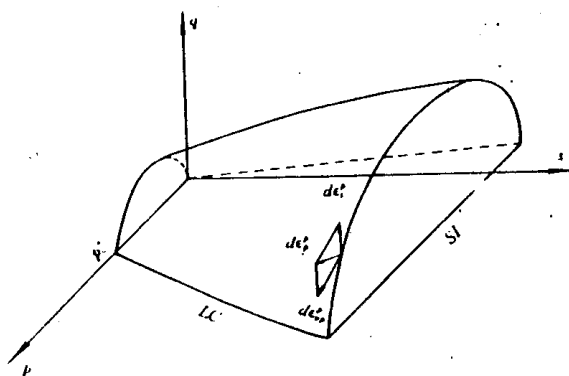


图 5 空间屈服面

这里所指的破损包括颗粒本身的破碎和颗粒之间胶结力的损伤。对粗粒土,破损率可以通过试样受力前后的平均粒径变化来表示,例如定义破损率为 $C_b = (D_{50} - D'_{50}) / D_{50}$, D_{50} 和 D'_{50} 分别是试验前后的粒径。粘土颗粒往往形成团粒,团粒内的颗粒之间有较强的胶结力,团粒之间或团粒与粉土之间只有很弱的胶结力。如果粘土颗粒的平均粒径为 $\bar{D}_{50}$,试验前后的团粒的平均粒径分别为 D_{50} 和 D'_{50} ,则建议粘土的破损率用下式表示

$$C_b = \frac{D_{50} - D'_{50}}{D_{50} - \bar{D}_{50}} \quad (20)$$

$D'_{50} = \bar{D}_{50}$ 时, $C_b = 1$, 即团粒全部破碎为颗粒。

(3) 定向率

粘土片状颗粒的定向可用主定向角和下列各向异性率表示

$$C_a = \frac{R - r}{R}$$

R 代表椭圆形定向分布图的长轴半径, r 为其短轴半径, 如图 7^[23]。

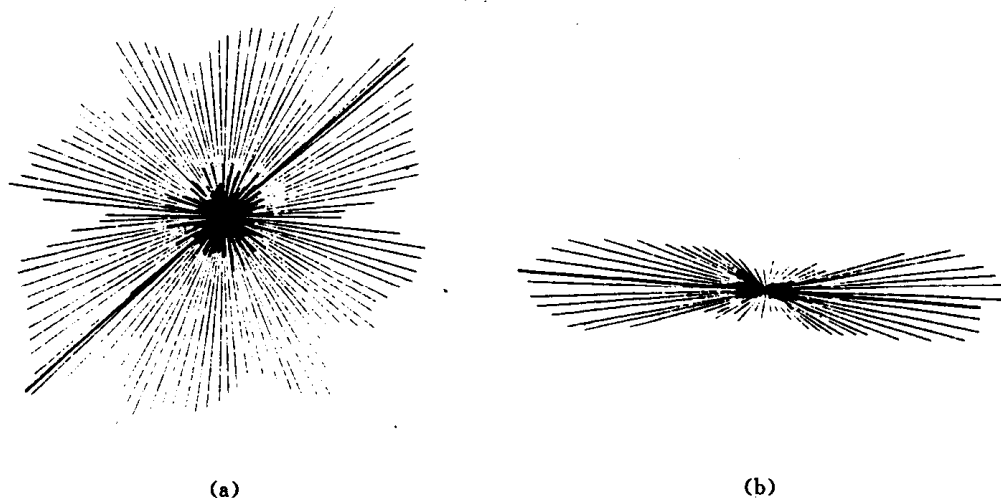


图 7 粘土颗粒的定向分布

(a) 疏松结构, 主定向角 43°, 各向异性率 5.1%;

(b) 层状结构, 主定向角 0°, 各向异性率 51.9%。

其次是要对这些指标的变化规律作出假设。下面是我们初步考虑到的若干基本假说。

(1) 最小孔隙率原理

土体的孔隙率有逐渐变小的倾向, 在某一应力状态下土样经过一定扰动后再回复原应力状态时, 孔隙的体积将有一定的减小。这一原理实际上是最小势能原理的反映, 可以用来解析往复荷载下和主应力轴旋转下不排水土样孔隙压力逐步积累的现象。

(2) 稳定孔隙率原理

稳定孔隙率是指某一应力状态下结构完全破坏的饱和扰动土的孔隙率 n_s ^[15]。该原理认为, 土体结构破损过程中, 其孔隙率 n 将向稳定孔隙率靠近。 $v_s = n - n_s$ 即代表土体可能产生的体

积变化。对湿陷土, $v_s > 0$, 对湿胀土, $v_s < 0$ 。黄土的实际湿陷系数 δ_s 应当小于 v_s 。

(3) 颗粒定向原理

土体变形过程中, 颗粒的定向角逐渐趋向于与大主应力垂直的方向, 各向异性率逐步增大, 这一原理反映了应力引起的各向异性。

(4) 颗粒滑动原理

颗粒(包括团粒)之间的滑动方向与主剪应力方向一致。这一原理是塑性理论中 Plandtl-Reuss 和以后的正交流动法则的基础。

(5) 颗粒破损原理

颗粒(包括团粒)的破损随粒间作用力的增大而增大, 而粒间作用力与平均压应力和主剪应力成正比。

土体的非弹性变形来源于颗粒的滑动和破损, 前者反映了塑性变形, 后者则可称为脆性变形。在上述原理的基础上, 再做一些补充规定, 就可以建立起宏观的应力(包括吸力或含水量)与应变之间的关系。这方面的研究工作尚待深入。

6 黄土的固结变形理论

在以上讨论的基础上, 下面就黄土在荷载和浸水共同作用下的固结变形问题的研究方向提出一些看法。

首先, 针对通常遇到的单调吸水的情况, 我们认为还是采用含水量代替吸力作为变量更切合实际。在变形方程中采用含水量作为变量的同时, 在渗流方程中可以根据不同的情况或者采用含水量, 或者采用吸力作为变量。对于地基浸水等无压渗流问题, 用含水量更简单一些。对渠道渗水等兼有正和负孔隙水压力的一般情况, 最好用吸力作为变量。但对渗流和变形耦合问题, 即使用孔隙水压力作为变量, 渗流方程中必然同时出现孔隙水压力和含水量两种变量, 即^[24]

$$\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial u_w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial u_w}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial u_w}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} k_z = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (22)$$

因此, 在建立固结变形联立方程式时, 仍然必须计入式(19), 或在孔隙气压力等于大气压力的假设下改写为

$$\theta = f(-u_w) \quad (23)$$

在气连通的非饱和土中, 排气过程一般发生很快, 对于缓慢发生的浸水变形问题, 忽略孔隙气压力是完全可以的。

其次考虑变形问题。如果用含水量作为变量, 并把本构关系写为

$$\{\Delta \sigma\} = [D](\{\Delta \epsilon\} - \{c\} \Delta \theta) \quad (24)$$

代入平衡方程式中, 就可得出下列微分方程组

$$\left. \begin{aligned} L_x(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z, \Delta \theta) &= 0 \\ L_y(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z, \Delta \theta) &= 0 \\ L_z(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z, \Delta \theta) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式(22), (23)和(25)是组成固结变形问题的控制方程式, 包含 3 个位移 u_x, u_y, u_z 和孔隙水压力 u_w 及含水量 θ 共 5 个变量。

有关式(24)的具体表达式, 我们曾建议过两条途径。其一是从损伤力学观点出发, 假定原

状黄土为理想弹性体,其模量矩阵为 $[D]_i$,完全扰动土(损伤土)为双曲线型非线性材料,其割线及切线模量矩阵分别为 $[D]_i$ 及 $[D]_t$,并假定损伤比的演化规律为

$$\omega = 1 - \exp(-a\epsilon_1 - bD_r) \quad (26)$$

式中, $D_r = (\theta - \theta_0)/(\theta_s - \theta_0)$, θ_s 和 θ_0 分别为饱和和天然含水量,则式(24)中^[20]

$$[D] = (1 - \omega)[D]_i + \omega[D]_t - a(1 - \omega)([D]_i - [D]_t)\{\epsilon\}\left\{\frac{\partial \epsilon_1}{\partial \epsilon}\right\}^T \quad (27)$$

及

$$\{C\} = \frac{b(1 - \omega)(\theta_s - \theta_0)}{(\theta_s - \theta)^2}([D]_i - [D]_t) \quad (28)$$

这一途径仍不失为简单可行的,当然式(26)不一定是合适的, D_r 改为等于 $(\theta - \theta_0)/\theta_s$ 也许更好,这些都是可以进一步研究的。

第二种可能的选择是我们最近建议的广义吸力模型^[15]。在这一模型中,我们已考虑了前面的稳定孔隙比原理,颗粒滑动原理(即采用了塑性增量理论)及颗粒破损原理。至于颗粒定向原理,对于以粉粒为主的黄土,本来就不重要。当然,有关这一模型的细节还待深入研究。

至于流行于西方的弹塑性模型,它至多只能描述图3中虚线所示那样的湿化变形,而不能描述图4所示的湿化变形,有关这一点我们已在文献[19]中深入讨论过。因此,这类模型对于黄土没有多大的应用前景。

7 结束语

以上着重介绍了第一届国际非饱和土会议上反映的非饱和土研究中的一些新的进展及笔者在有关问题上的一些研究成果,特别探讨了非饱和土本构关系的研究方向。我们认为,今后在这一领域研究中既要了解国际上的动向,又不宜盲目跟着赶潮流。尤其在黄土问题上,我国学者在这方面已做了很多工作,取得丰硕的成果,更应该独立发展自己的理论。我们希望,在今后非饱和土领域内能拿出更多的理论上有创新和实践上有发展的论文,迎接1998年即将在北京召开的第二届国际非饱和土会议。

参 考 文 献

- 1 沈珠江. 非饱和土力学的回顾与展望. 水利水电科技进展, 1996(1)
- 2 Bishop A W, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. Research conf. on shear strength of cohesive soils, Univ of colorado, 1960
- 3 Fredlund D G, et al. The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geot. J., 1978, 15(3)
- 4 Rohm S A and Vila O M. Shear strength of an unsaturated sandy soil. Proc. First Int. Conf. on Unsaturated soils, 1995, I: 189~193
- 5 Fredlund D G, et al. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Unsaturated soils, 1995, I: 63~70
- 6 Mikulitsch W A and Gudehus G. Uniaxial tension, biaxial loading and wetting tests on loess. Unsaturated soils, 1995, I: 145~150
- 7 Fredlund D G. Appropriate concepts and technology for Unsaturated soils. Can. Geot. J., 1979, 16(1)
- 8 Ho D Y F and Fredlund D G. Determination of the volume change moduli and respective inter-relationships for two unsaturated soils. Unsaturated soils, 1995, I: 117~122
- 9 Karube D, et al. Yielding function of unsaturated soil under triaxial compression. Proc. Japan Society Civil Eng., 1989, 460: 205~212

- 10 Alonso E E, et al. Experimental behaviour of highly expansive double-structure clay. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 11~16
- 11 Gens A, et al. Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 83~88
- 12 Li Z M. Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 139~144
- 13 Shen Z J. Reduced suction and simplified consolidation theory for expansive soils. *Unsaturated soils*, 1995, II ; 1321
- 14 Van Genuchten M T. A closed form equaion for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science soc. of Amer. J.* 1980, 47; 419~425
- 15 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论. *岩土工程学报*, 1996, 18(2): 1~9
- 16 Wan AWL, et al. On the relations of suction, moisture content, and soil structure in compacted clays. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 215~222
- 17 Alonso E E 等. 非饱和土弹塑性应力应变特性模拟. *岩土工程学报*, 1995, 17(6): 42~51
- 18 Cui Y J, et al. An elasto-plastic model for compacted soils. *Unsaturated soils*. 1995, II ; 703~710
- 19 沈珠江. 黄土的损伤力学模型探索. 第七届土力学及基础工程学术会议论文集, 建筑工业出版社, 1994: 145~149
- 20 沈珠江. 关于黄土力学的研究途径. 中加非饱和土学术研讨会, 武汉, 1994: 153~160
- 21 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题. *岩土工程学报*, 1996, 18(1): 95~97
- 22 Oberg A L and Sallfors G. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 151~158
- 23 Shi Bin. Quantiative analysis of the microstructural changes of remoulded clayey soil in the process of compaction. *Unsaturated soils*, 1995, I ; 23~30
- 24 沈珠江. 现代土力学和非饱和土固结理论. 第三届华东地区岩土力学讨论会论文集, 1995, 34~40