

第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集

岩土力学与工程研究新进展

张 嘎 于艺林 © 主编

New Frontiers in Rock and Soil
Mechanics & Engineering in China



人民交通出版社
China Communications Press

New Frontiers in Rock and Soil Mechanics & Engineering in China

岩土力学与工程研究新进展

——第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集

张 嘎 于艺林 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和中国岩石力学与工程学会主办的第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集,经组委会遴选,共收录学术论文70篇。内容涵盖了土的基本特性和测试技术、基础工程、地基处理、地下工程、土工构筑物与边坡、土动力学与岩土地震工程、规范与标准、工程勘察与实录等方面,反映了我国岩土力学与工程领域的青年学者近年来的科研成果和主要进展。

本书可供从事岩土力学及相关研究的学者、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土力学与工程研究新进展——第七届全国青年
岩土力学与工程会议论文集 / 张嘎,于艺林主编. ——
北京:人民交通出版社,2011.4

ISBN 978-7-114-08983-1

I. ①岩… II. ①中… III. ①岩土力学—学术会议—
文集②岩土工程—学术会议—文集 IV. ①TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 052714 号

书 名: 岩土力学与工程研究新进展
——第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集

著 作 者: 张 嘎 于艺林

责任编辑: 陈志敏 王 霞

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 24.25

字 数: 752 千

版 次: 2011 年 4 月 第 1 版

印 次: 2011 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08983-1

定 价: 128.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

第七届全国青年岩土力学与工程会议

(2011 年 4 月 15 日~18 日)

主办单位:

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会
中国岩石力学与工程学会

支持单位:

中国建筑学会地基基础分会
中国力学学会岩土力学专业委员会
中国水利学会岩土力学专业委员会
中国振动工程学会土动力学专业委员会

承办单位:

清华大学

协办单位:

北京工业大学
北京航空航天大学
北京交通大学
北京科技大学
中国水利水电科学研究院

顾问委员会

主 席:

钱七虎 陈祖煜 冯夏庭

委 员:(以拼音为序)

蔡美峰 陈祖煜 樊启祥 冯夏庭 龚晓南 顾金才 韩风险 何满潮 黄茂松
李广信 李 宁 李永盛 刘汉龙 栾茂田 钱七虎 唐春安 滕延京 汪 稔
王金华 王卫东 伍法权 谢和平 谢永利 叶阳升 袁 亮 张建民 郑 刚

学术委员会

主 席:

张建民

副主席:(以拼音为序)

陈云敏 黄茂松 孔令伟 刘汉龙 伍法权 郑 刚

委 员:(以拼音为序)

蔡永昌 曹卫平 常方强 陈 健 陈锦剑 陈立宏 陈仁朋 董晓强 杜延军
樊恒辉 樊秀峰 方祥位 丰土根 冯锦艳 宫剑飞 韩建刚 韩 煊 胡黎明
介玉新 雷华阳 李德吉 李国玉 李杭州 李宏儒 李进军 李 旭 李忠诚
刘 润 柳金峰 卢 波 路德春 梅国雄 苗 雨 潘华利 钱建固 沈 扬
司马军 宋 飞 苏立君 孙 锐 童朝霞 王 军 王瑞斌 王曙光 王忠涛
吴江斌 吴曙光 吴志坚 许成顺 杨 军 杨蕴明 叶冠林 袁中夏 詹良通
张 嘎 张连卫 张旭辉 张玉成 赵吉东 赵剑豪 赵静波 赵淑萍 甄伟文
周海清 周宏磊 周万欢 邹东峰 邹新军

组织委员会

主 席:

张 嘎

副主席:(以拼音为序)

胡黎明 刘耀儒 杨 军

委 员:(以拼音为序)

陈立宏 陈育民 邓 刚 冯世进 胡黎明 李 旭 李 悦 刘 润 刘晓丽
刘耀儒 路德春 童朝霞 王乃东 王玉杰 徐 明 徐文杰 许成顺 杨 军
于艺林 张 嘎 张连卫 张其光 郑瑞华 周 平 朱 斌

秘 书:

郑瑞华 于艺林

前 言

第七届全国青年岩土力学与工程会议在 2011 年 4 月 15 日至 18 日在北京隆重召开。本届会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国岩石力学与工程学会主办,并得到中国力学学会岩土力学专业委员会、中国水利学会岩土力学专业委员会、中国建筑学会地基基础专业委员会、中国振动工程学会土动力学专业委员会等学会的支持,由清华大学等单位承办。本届会议是继在杭州(1992)、大连(1995)、南京(1998)、武汉(2001)、西安(2004)、上海(2007)召开的前六届会议之后全国中青年岩土力学与工程科技工作者的又一次学术盛会。

近年来,在老一辈学者的关心和指导下,国内一批青年学者崭露头角,已经成为岩土力学与工程研究的新生力量。在此背景下,第七届全国青年岩土力学与工程会议为中青年岩土力学与工程科技工作者搭建了展示风采的舞台、汇报进展的讲台、交流学术的平台。自 2010 年 8 月发出征文通知以来,得到了全国各地乃至海外从事岩土力学与工程研究的青年学者的热烈响应和大力支持,共收到论文 400 余篇。经审查,收入《岩土力学》增刊学术论文 90 余篇,收入本论文集学术论文 70 篇。这些论文涉及到土的基本特性和测试技术、基础工程、地基处理、地下工程、土工构筑物与边坡、土动力学与岩土地震工程、规范与标准、工程勘察与实录等内容,基本上反映了我国岩土力学与工程青年学者近年来的科研成果和主要进展。

本次会议得到了有关学会、单位和专家的大力支持,特别是《岩土力学》编辑部为本次会议专门出版增刊并付出了大量劳动,在此谨致谢意。同时,向为本次会议撰稿的作者和为本论文集出版而辛勤工作的人员致以深深的谢意。

本论文集的出版得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)和国家自然科学基金的资助,特此致射。

编 者

2011 年 4 月

第 I 部分 土的基本特性与测试技术

使用热探针法测定土的热传导系数·····	陈 宝	姚聪琳	许 邹	(3)
含水量对黏土—结构接触面力学特性影响的试验研究·····	冯大阔	张 硕	张 嘎	(9)
单轴压缩下红砂岩低周疲劳损伤特性分析 ·····	高丙丽	张引合	张 琨	刘朝科 刘 慧 任建喜(13)
微风化闪长岩的蠕变试验研究 ·····	顾士彬	王春秋	顾士坦	董晓莉(18)
地铁隧道恐怖爆炸袭击炸药当量估算方法研究 ·····	孔德森	张秋华	史明臣	(22)
天津海积软土蠕变性状试验研究 ·····	雷华阳	贾亚芳		(28)
粗粒土的颗粒破碎与临界状态 ·····	刘恩龙	李国英	陈生水	钟启明(33)
急倾斜多煤层开采相似材料模拟的试验研究 ·····	刘书会	魏晓刚	刘书贤	魏亚强(38)
重塑土工程压实特性的电阻率定量评价方法 ·····	刘志彬	戴文龙		(42)
基于 BOTDA 光纤传感技术的 H 型钢应变测量试验研究 ·····	彭 智	王 平	何 宁	丁 勇 梁 超(47)
膨胀土收缩开裂的温度效应 ·····	唐朝生	顾 凯	高 磊	(51)
剪胀角的取值对有限元数值计算结果的影响 ·····	唐晓松	刘文平	何 佳	(56)
加筋粗粒料动剪切模量和阻尼比试验研究 ·····	杨 贵	高德清	任青文	(61)
对称型修正的邓肯—张模型研究 ·····	岳喜军	李献民	秦立科	张志辉(65)
堆石坝坝体填筑材料动力特性试验研究 ·····	郑瑞华	于艺林	张 嘎	程 嵩 张建民(69)

第 II 部分 基础工程与地基处理

利用沉渣的群桩室内模型试验研究 ·····	陈 健	宋林辉	梅国雄	(77)
基于土压力法分析基坑开挖与邻近桩基的相互作用及其工程应用 ·····	褚 峰			(84)
山区土石混填地基强夯加固深度确定方法探讨 ·····	董 倩	孔凡林	熊启东	刘东燕(89)
砂土中扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究 ·····	郭 钢	刘 钟	卢璟春	张 义 贾玉栋(95)
强夯碎石桩法在盐渍土地基处理中的应用·····	胡岱文	金 晓	吴曙光	(101)
黄土地区事故建筑物基础托换工程加固方案研究·····	胡玉定	王 燕	韩晓雷	(104)
饱和粉土中水平受荷斜桩性状大尺寸模型试验研究 ·····	孔令刚	袁廉华	王书行	顾 明 陈仁朋 陈云敏(107)
竖向荷载作用下高承台管桩极限承载力分析·····	雷华阳	刘利霞	陆培毅	霍海峰(112)

基坑支撑拆除方式对比研究·····	李福清	蒋耀港	姚 渊	李振宁	史志远(116)
有效应力下的摩尔强度准则分析软基处理的方法·····	牛文杰	李洪然(122)			
沿非对称方向水平荷载下群桩响应的数值初探·····	苏 栋	袁胜强	李锦辉(126)		
裙式吸力基础水平承载力影响因素数值分析·····	王 梅	李大勇(132)			
复合地基静载荷试验中载荷板尺寸的数值分析·····	张东明	董友扣	邓 帮	王 海(136)	
桩基竖向受力特性及其影响因素分析 ·····	张秋华	孔德森	史明臣(140)		
预应力复合土钉在基坑支护中的受力分析研究·····	张豫川	张 可(145)			
近海风电机组吸力式桶形基础模型试验初步研究 ·····	朱 斌	孔德琮	陈仁朋	孔令刚	陈云敏(150)

第 III 部分 地 下 工 程

隧道开挖面被动失稳数值模拟研究·····	陈仁朋	齐立志	汤旅军(159)
隧道施工围岩的反分析优化计算·····	邓 帮	朱红明	魏华彬 叶忠武(164)
基于 UDEC 的铀铜矿节理岩体采空区稳定性分析 ·····	胡建华	张行成	雷 涛 罗先伟(170)
前导洞对减轻 TBM 开挖岩爆效果数值分析 ·····	黄满斌	唐春安	马天辉 唐烈先(175)
千米深井软岩条件下大断面硐室群工程实践·····	李 帅	潘建钟	王法强 费 杰 黄勤功(179)
高地震烈度下超大直径海底盾构隧道地震响应分析·····	刘继国	郭小红	程 勇(184)
双圆隧道对平面 P 波的散射与动应力集中 ·····	刘齐建(190)		
拱脚加长锚杆锚固洞室抗爆数值模拟分析·····	马海春	顾金才	张向阳 徐景茂(194)
锚固洞室抗爆实验介绍及数值模拟分析·····	马海春	顾金才	张向阳 徐景茂 高光发(198)
深部煤巷断面优化及锚网带索耦合支护设计·····	齐 干	郭志飏	唐强达(203)
直拱形洞室岩爆过程的数值试验·····	王 振	唐春安	马天辉 黄志平 唐烈先(211)
深部软岩硐室破坏原因及加固技术分析·····	王振伟	李连华	魏兴民(218)
双洞山岭隧道洞口段受力状态数值分析·····	臧万军	孙铁成	高 波(223)
长大竖井支护结构稳定性有限元分析·····	周舒威	李庶林(229)	
矿山工程地质灾害及其防治·····	朱志洁(236)		

第 IV 部分 土工构筑物与边坡

边坡岩体工程分类体系的模糊层次结构设计·····	陈志英(243)
冰雪融化入渗对土质边坡稳定性的影响·····	廖瑞祥 王世梅 邹良超 万 佳(248)
库水作用下孙家庄滑坡的复活机理研究·····	万 佳 王世梅 陈 勇(252)
均质大坝渗流的非饱和渗流计算·····	王 建 胡黎明 李恒震(258)
黏性填土的地震主动土压力分布研究·····	王奎华 马少俊(265)
基于 FLAC 有限差分法的边坡稳定性分析 ·····	王小平 孟国涛(272)
河谷下切对红层滑坡变形的影响分析和模型试验·····	吴红刚 马惠民 周德培 冯 君(277)

滑坡灾害易损性定量评估关键问题探讨·····	吴 越	刘东升(283)
边坡稳定可靠度分析中的滑面问题·····	吴振君	汤 华(289)
基于 CACA-SVM 的边坡位移反分析及工程应用·····	徐 飞	王 珂 罗 凯(295)
土石坝溃坝流量过程线研究·····	徐 耀	李 明 张利民 张建民(300)
地震土压力计算公式探讨·····	余东升	吴曙光 侯俊伟(306)
基于 ObjectARX 的滑坡支挡结构设计软件的开发 ·····	周海清	张红利 陈正汉(312)

第 V 部分 规范、标准与工程勘察

黏土冻胀预报的半分析方法·····	邴 慧	邓 津(319)
无线传感器网络在地铁隧道中实时监测的应用探究·····	嵇 中	吴 俨 朱合华 李晓军(324)
基于巴楚地震的我国规范液化判别方法适用性检验 ·····	李兆焱	袁晓铭 王维铭 孙 锐 曹振中 陈龙伟(330)
《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T 213—2010)中的设计计算方法 ·····	刘汉龙	丁选明(337)
多年冻土区块石路基变形特性监测分析·····	穆彦虎	马 巍 孙志忠 刘永智(343)
构造复杂地区某新建大型桥梁详勘始末·····	宋明健	钟义敏 杨 庆(350)
基于载荷试验计算土体变形模量的新方法·····		王正泓(355)
某电厂新近沉积土工程特性研究·····	杨生彬	刘志伟(359)
砾石土心墙坝心墙料填筑的三点击实快速检测方法研究·····	张 计	邓 雄(363)
浅埋偏压公路隧道洞口段施工监测分析·····	张永兴	娄 勇 黄 达 刘小军 杨 超(367)
非线性条件下地层力计算新方法·····	郑德帅	高德利(373)

第 I 部分

土的基本特性与测试技术

使用热探针法测定土的热传导系数

陈宝^{1,2} 姚聪琳¹ 许邹¹

(1 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 200092; 2 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系 200092)

摘要 在比较分析影响土壤热传导系数的主要因素的基础上,采用基于热探针法的 KD2 热传导仪,对不同孔隙比和含水率的上海⑤₁层灰色粉质黏土进行了热导率测试,建立了可反映饱和土体热传导系数与含水率和孔隙比之间关系的经验公式;试验发现,当土样处于非饱和状态且其含水率较低时,土的热传导系数随含水率升高而增大,而当含水率较高时,热传导系数则随含水率升高而减小。

关键词 粉质黏土;热传导系数;含水率;孔隙比

中图分类号 TU 443

文献标识码 A

Measuring the thermal conductivity of soils with heat probe method

Chen Bao^{1,2} Yao Conglin¹ Xu Zou¹

(1 Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092; 2 Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: By the comparison and analysis of main factors effecting on the thermal conductivity of soils, some tests were carried out in order to investigate the thermal conductivity of the No. 5-1 layer silty clay of Shanghai with KD2 Thermal properties analyzer based on the heat probe method, the empirical formula between soil thermal conductivity and water content or void ratio were proposed. The test results presented that the thermal conductivity of soils with different water contents shows different characteristics. The thermal conductivity increases with water content when water content is low, but decreases when water content is high.

Key words: silty clay; thermal conductivity; water content; void ratio

1 引言

土体的热学特性是当今岩土工程领域的重要课题,在实际工程中的应用也非常广泛,如地铁隧道等封闭地下建筑的防火设计,热能储存与地热资源开发,石油、天然气管道的设计与放置,以及高放废物地质处置系统设计等。其中,土的热传导系数成为土体热学特性的一项关键指标,能够直接反映土体中热量向周围介质场的传递特性。大量研究表明,土体热传导系数受含水率、孔隙比、比热容、盐浓度、矿物成分等因素的影响,且在众多因素中,含水率与孔隙比是影响土的热传导系数的主要因素^[1-7]。

国内外众多学者曾对各类土的热传导特性进行过许多研究。Tang (2008)等试验研究了干密度、含水率、饱和度等对美国 MX80 膨润土导热系数的

影响,并提出了热传导系数与孔隙气体体积的线性关系式^[8]。Abu-Hamdeh(2001)通过单探针和双探针方法定性得到了黏土热导率随着密度和含水率增加而增加的结论^[9],还对砂土和黏土的比热容理论预期值和试验测试值进行了对比,推导出土的比热容、导热系数与其干密度、含水率的经验公式^[10]。陈善雄、陈守义(1999)对四种砂土的热导率进行过研究,归纳出了热导率与孔隙比和饱和度的经验公式^[11]。苏天明(2006)等给出了饱和黏土、粉质黏土热导率与含水率、孔隙比之间的对数拟合经验公式^[12]。肖琳、李晓昭等(2008)给出了砂土、粉土和粉质黏土在不同干密度范围内的热导率随含水率的变化曲线,指出热导率随含水率的增大而增大,其值在含水率较低时的变化比含水率较高时变化剧烈,其试验所得的热导率随含水率变化趋势与文献^[12]中恰好相反^[13]。

然而,从已有的研究成果来看,很多研究并未严格区分饱和与非饱和两种不同状态,有关饱和土的相关预测理论仍不完善,且对于非饱和土热传导系数随含水率的变化趋势,众学者得出的结论也并完全一致。

本文拟采用试验的方法测定饱和土体热传导系数与含水率(孔隙比)之间的关系,并通过文献比较和分析,研究饱和及非饱和土体的热传导系数与含水率、孔隙比的关系。

2 热传导系数预测理论

2.1 饱和土预测理论

Woodside 和 Messmer(1961)提出了饱和土体的热传导模型^[14]:

$$\lambda_p = \lambda_s^{1-wG_s/(1+wG_s)} \lambda_w^{wG_s/(1+wG_s)} \quad (1)$$

式中: λ_p 、 λ_s 、 λ_w 、 w 、 G_s 分别为饱和土体热传导系数预测值、土颗粒热传导系数,水的热传导系数($0.60 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、饱和土体含水率、土的重度。据验证,该模型与海洋沉积土的实际热传导性十分吻合。此经验公式可推知,饱和土的热传导率其随含水率的增大而减小。

2.2 非饱和土预测理论

Kahr 等(1982)曾提出膨润土热传导系数的预测公式^[15]:

$$\lambda_p = -0.56 + 0.6\rho + 0.4\rho^3[w/(w+1)] \quad (2)$$

式中: λ_p 、 ρ 、 w 分别为热传导系数预测值、膨润土密度和含水率。将(2)式化为关于含水率与孔隙比两参量的关系式:

$$\lambda_p = -0.56 + 0.6(1+w)G_s/(1+e) + 0.4(1+w)^2G_s^3/(1+e)^3 \quad (3)$$

由(3)可得:当含水率 w 不变时,土的热传导系数 λ_p 随孔隙比 e 的减小而增大;当孔隙比 e 不变时,土的热传导系数 λ_p 随含水率 w 的增大而增大。而当土体处于饱和状态时, λ_p 可用含水率 w 或孔隙比 e 的单值函数表示, λ_p 用含水率 w 只需取式(2)中 $\rho = G_s(1+w)/(1+wG_s)$ 得饱和状态时的热传导系数预测公式:

$$\lambda_p = -0.56 + 0.6G_s(1+w)/(1+wG_s) + 0.4w(1+w)^2G_s^3/(1+wG_s)^3 \quad (4)$$

即饱和土的热传导系数 λ_p 随含水率 w 的增大而减小,与非饱和状态时趋势相反。

Kuntsson(1983)提出了膨润土热传导系数的

又一关系式^[16]:

$$\lambda_p = \lambda_0 + K_e(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (5)$$

式中: λ_0 和 λ_1 为饱和度等于 $S_r=0$ 和1时的热传导系数; K_e 为饱和度的函数,表示饱和度对热传导系数的影响;具体数值可由下列公式求取:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= 0.034n^{-2.1} \\ \lambda_1 &= 0.56n2^{(1-n)} \\ K_e &= 1.0 + \lg S_r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: n 为膨润土的孔隙度; S_r 为饱和度。

对于饱和土样 $S_r=1$, $\lambda_p=\lambda_s=0.56n2^{(1-n)}$, 本质上是 Woodside 模型中当 $\lambda_w=0.56$, $\lambda_s=2$ 时的公式。此关系式不能直接反应热传导系数随孔隙比与含水率变化趋势,却可得出土的热传导系数与土的饱和度之间存在严格的线性关系。

文献[12]对南京地区饱和黏性土的热传导系数与含水率、孔隙比的关系进行了研究,提出了饱和土体的孔隙比或含水率和热传导系数的关系可用对数关系进行拟合,只是不同土体参数不同。南京地区饱和黏性土热传导系数有如下关系式:

$$K = -0.504 \ln w + 3.09 \quad (7-1)$$

$$K = -0.6335 \ln e + 1.2858 \quad (7-2)$$

式中: w 为黏性土的含水率; e 为粉质黏土的孔隙度。因为当土体处于饱和时, $e=G_s w$,是 w 的单值函数。此时,(7-2)式则为:

$$K = -0.6335 \ln w - 0.6335 \ln G_s + 1.2858$$

这与(7-1)不相符,说明以上关系式在严格意义上并不针对饱和土。由上式可知,热传导系数随含水率的增加而降低,随孔隙比的增加而降低。

3 试验

3.1 试验材料

本次试验对象为上海⑤₁层灰色粉质黏土,是地铁盾构隧道工程经常穿越的主要土层之一,其主要性质如表1。

表1 粉质黏土的基本性质

Table 1 Basic properties of silty clay

指 标	数 值
比重 G_s (Mg/m^3)	2.72
液限 w_L (%)	37.7
塑限 w_P (%)	24.6
塑性指数 I_p	13.1
孔隙比变化范围	0.82~1.13

3.2 试样制备

上海⑤₁层粉质黏土的孔隙比变化范围在 0.82~1.13 之间。为了在热传导测试中有效控制试样孔隙比和含水率,试验采用固结法制取预定孔隙比的饱和试样,并进行热传导性测定。为此,制备了孔隙比分别为 1.10、1.05、1.00、0.93、0.91、0.85、0.81 的 7 组饱和土样,用于测定不同含水率条件下土的热传导系数。

采用固结法获取的饱和土样尺寸为:直径 50mm,高 70mm。固结完成后,将试样缓慢推出并置于烧杯中,用保鲜膜封住烧杯口,然后放入保湿皿中保湿 24h,待试样充分回弹后再进行热传导系数的测试。测试后再将试样置于烘箱中烘干,测量其干土质量,计算热传导系数测试时土样的含水率,并校验其饱和度和孔隙比,由此得出热传导系数对应的土样真实孔隙比(回弹后)。

3.3 试验仪器及测试原理

3.3.1 KD2 型热传导仪

热传导测定采用美国培安公司的 KD2 型热传导仪(图 1)。该传导仪可用于量测较软的土壤的热传导特性,其探针能直接插入土壤。通过监测热传递过程中的温度变化计算获得土样的热传导系数(K)。

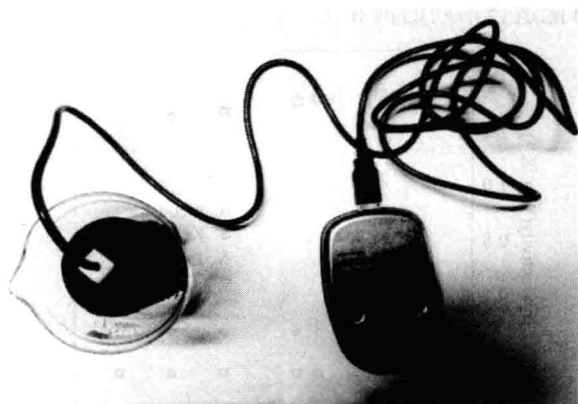


图 1 KD2 型热传导仪

Fig.1 KD2 Thermal properties analyzer

KD2 的热传导系数测试范围为 $0.1 \sim 2 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,精确度为 $\pm 5\%$,测试时间为 2min,工作环境温度为 $5 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

3.3.2 仪器测试原理

KD2 型热传导仪的测试原理是基于热探针法。依据《ASTM D 5334—00, 2000》^[17]该热传导

仪通过监测特定电压下线性热源的热消散来计算试样的热传导系数。传导仪包括控制器和探针两部分(图 1),其中探针包括加热元件(热线的长度为 60mm,直径为 1.28 mm)和置于线中的热敏电阻两部分,因此兼有发热和监测的双重功能。测量过程中,控制器平衡 30s 后,提供已知电流来对已知电阻的探针加热 30s,微处理器计算出加热所需提供的电源量,同时,探针的热敏电阻测得 30s 内温度的改变,接下来的 30s 监测热传递过程中探针的冷却速率,最后利用这个过程中基于时间的温度改变量来计算试样的热传导系数。

此试验装置的测试基于以下基本假定:

- (1) 热源可视为无限远。
- (2) 测试媒介为无限大,均匀,各向同性的。
- (3) 初始温度是均衡的。
- (4) 水与土颗粒的热传导系数均为定值。
- (5) 固结土样中土颗粒和水分均匀分布。

虽然这些假设并非严格意义上成立,它们对于热力学性质测是具有足够的精确度的。

具体公式如下:

各项均匀,同性介质中的放射性热传导公式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

式中: T 为温度($^\circ\text{C}$); t 为时间(s); κ 为热扩散率($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$); r 为放射距离(m)。

当通电加热的探针插入介质中时,初始温度由 T_0 开始升高:

$$T - T_0 \cong \frac{q}{4\pi\lambda_h} \left[\ln(t) - \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\kappa}\right) \right] \quad (9)$$

式中: q 为单位长度单位时间产生的热量(Wm^{-1}),可根据加热时的电源供应获知; λ_h 为热传导系数($\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$); γ 为欧拉常数(≈ 0.5772)。

由于已知 $\Delta T = T - T_0$ 与 $\ln(t)$ 是以斜率 m 线性相关的,故热传导系数可由下式计算得到:

$$\lambda_h \cong \frac{q}{4\pi m} \quad (10)$$

3.4 试验方法与步骤

用探针由试样中心垂直插入,形成一个直径约 1.3mm,深度约 6mm 的孔。由于针径较小,插入样品时可忽略对土样的压紧作用。按控制器的左键,控制器平衡之后对探针加热,由于加热时间

短,试样内温度升高不超过 1°C ,避免了因加热导致周围材料中水分迁移。随后监测冷却速率进而得到热传导系数。每个饱和土样只钻取一个孔,取三次测量结果的平均值作为各含水率对应的热传导率,每次测量时间间隔至少为 5min ,以防止在连续快速的多次测量下,样本的温度没有足够的时间与前次读数相平衡而导致结果不准确。

3.5 试验结果

如表 2 给出了各孔隙比下饱和的上海⑤₁层粉质黏土的含水率和热传导系数实测数据。

表 2 上海⑤₁层粉质黏土的热传导系数

Table 2 Thermal conductivity of Shanghai No. 5-1 silty clay

孔隙比 e	含水率 $w(\%)$	热传导系数 $K(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
0.81	29.78	1.36
0.85	31.25	1.34
0.91	33.46	1.32
0.93	34.19	1.31
1.00	36.76	1.28
1.05	38.60	1.25
1.10	40.44	1.21

4 试验分析及有关理论比较

4.1 试验分析

对表 2 中土样的热传导系数和含水率数据进行多种数学拟合,以对数关系拟合程度最高。通过拟合得到上海地区饱和粉质黏土样品热传导系数和含水率的相关曲线(见图 2)以及拟合参数。

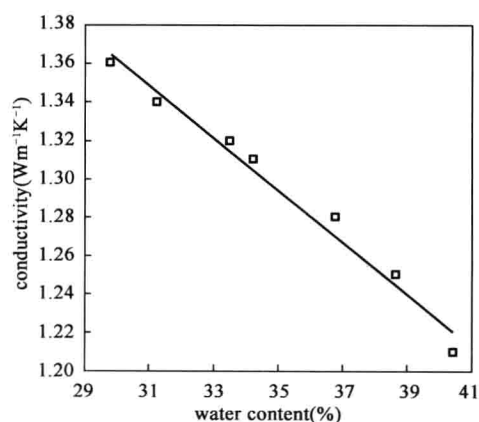


图 2 饱和土 w 和 K 的关系

Fig. 2 Relationship between w and K of saturated soil

由图 2 可知,处于饱和状态的上海⑤₁层粉质黏土的含水率和热导率可用对数关系来描述,经

验公式为:

$$K = \ln(5.376 - 0.049w) \quad (11)$$

相关系数 $R^2 = 0.98255$ 。

根据拟合结果,可得到如下结论:

(1)饱和土体的热传导系数随着含水率的增加而降低,呈下降曲线,非线性规律。与饱和土的预测理论相符。

(2)从拟合曲线以及相关系数来看,用对数关系比用指数或乘幂关系拟合程度要高。

(3)含水率增加导致饱和土体热传导系数降低的原因是土颗粒的热传导系数大于水的热传导系数,随着含水率增加,土体中固体颗粒所占的比例相应降低,导致饱和土体的热传导系数降低。

4.2 饱和土不同预测理论比较

如图 3 给出了不同预测理论下上海地区饱和土的热传导系数,可以看出用文献[12]得出的南京地区饱和土经验公式计算得出的预测结果与实际比较相符,说明上海的饱和粉质黏土与南京的饱和黏性土的含水率和热传导系数之间的关系十分接近,都可用对数关系拟合,只是土体参数不同。而用 Woodside 与 Kahr 的公式预测(水的热传导系数为 $0.60\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,土颗粒的热传导系数为 $2.0\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,土的比重为 2.72Mg/m^3),结果与实测值拟合很差。由此可见,不同的预测模型可能适合不同的饱和土。

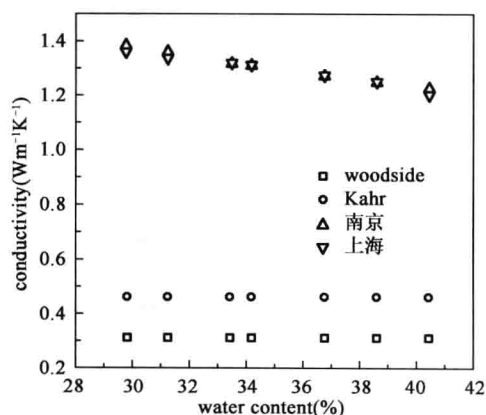


图 3 热传导系数预测值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison between predicted thermal conductivity and measured value

在严格意义上,文献[12]试验中的土样饱和度并非为 1,因此在将“饱和状态”下的热传导系数与孔隙比之间的经验公式换算为热传导系数与含水率之间的关系时,与原公式并不吻合。这种对

应关系的不唯一性,对实际应用产生了影响。

4.3 非饱和土不同预测理论比较

影响土热传导系数的因素很多,例如含水率、孔隙比、干密度及土样成分等。在所有影响因素中,含水率和孔隙比起主要作用,也是最难控制的因素。含水率反应土体组成成分变化,孔隙比反映孔隙对土体结构的影响。在研究过程中应注意保持单一变量,如在研究含水率对土的热力特性的影响时应保持孔隙比不变,反之亦然。

4.3.1 含水率对热传导系数的影响

国内外众多学者均通过干土吸湿逐步升高土的含水率的试验得出热传导系数随含水率的升高而增大的结论。从图 4a)可以看出文献[13]中,热传导系数变化分为急剧变化和平缓变化两部分。当含水率较低时,热传导系数变化急剧,随含水率升高,热传导系数增长变缓。

图 4b)中可看出,文献[12]中,由含水率较高的非饱和土得到饱和土的经验公式,从侧面反映出热传导系数随含水率的升高可能呈降低的趋势,与前述趋势恰好相反。

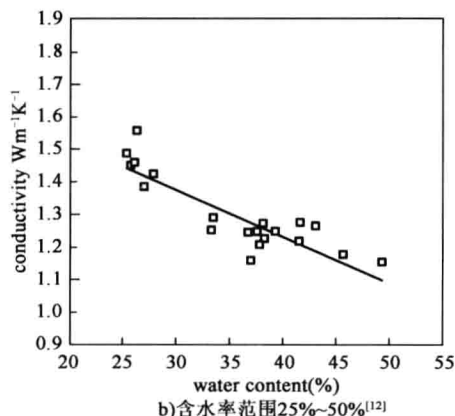
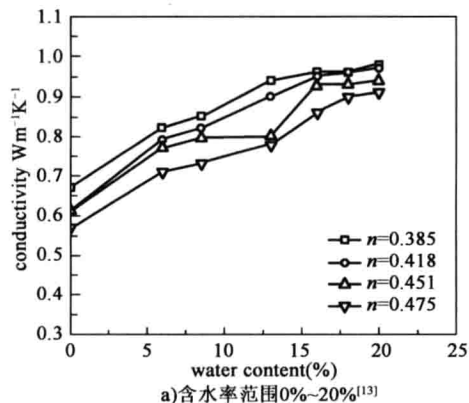


图4 含水率对热传导系数的影响

Fig.4 Effects of water content on thermal conductivity

对比以上两个结论,前者的含水率变化均处于较低的范围,都在0~20%之间,而后者选择南京地区非饱和土的含水率处于较高的范围,在25%~50%之间。含水率的高低导致两种相反趋势的原因可能是:土颗粒与水的导热系数远大于空气的导热系数。在含水率较低时,土体内热传导的主要途径为颗粒间的热传导,干燥状态下在颗粒的周围增加少量水分后,首先会在颗粒表面形成一层水化膜,使颗粒间形成点接触,土体热传导系数迅速增大;继续增加水分,水化膜厚度增大,颗粒间形成面接触,热传导系数将继续增大;而在含水率较高时,土颗粒间存在大量自由水,接近饱和状态,起决定作用的是土颗粒与自由水之间的比例,当自由水不断增加导致含水率升高时热传导系数由于固体颗粒所占比例的减少而降低,与饱和土的趋势一致。

4.3.2 孔隙比对热传导系数的影响

Tang(2009)在研究MX80土的试验中,在控制含水率尽量相同的条件下(最大误差不超过0.6%),得出热传导系数随干密度的增大而增大,即随孔隙比的增大而减小的结论^[8],试验结果与许多其他学者的预测理论相吻合。原因是土的孔隙增大,单位体积的土颗粒变少,且被水化膜包围的土粒逐渐被空气隔开,空气逐渐增多,热传导系数逐渐变小。但目前热传导系数与孔隙比之间尚无成熟的经验公式。文献[12]中虽得出相关的对数拟合公式,但其试验中并未控制单一变量,试验土样的含水率最大相差接近8%。

5 结论

(1)饱和土体的热传导系数随着含水率的增加而降低,不同地区的饱和土很可能具有不同的热学性质,众多学者提出了多种经验公式。本文通过试验得出上海地区饱和土的热传导系数与含水率之间的关系,用对数关系进行拟合得到的经验公式为 $K = \ln(5.376 - 0.049w)$ 。

(2)对非饱和土,当含水率较低时,热传导系数随之升高而增大;当含水率较高时,热传导系数随之升高而减小。而这种趋势是否存在于所有的土中,以及这两种趋势之间的“临界含水率”与土自身物理特性之间的关系还有待进一步研究。

(3)非饱和土热传导系数随孔隙比的升高而降低。

参考文献

- [1] Ampofo F. , Maidment G. and Missenden J. Under-ground railway environment in the UK Part 1 Review of thermal comfort[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 611- 631.
- [2] Abu-Hamdeh N. H. and Reeder R. C. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1285-1290.
- [3] Noborio K. and McInnes K. J. Thermal conductivity of salt-affected soils[J]. 1993, 57(2): 329-334.
- [4] Nusier O. and Abu-Hamdeh N. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils [J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39 (2): 119-123.
- [5] De Vries D. A. Thermal properties of soil[M]. In: W. R. van Wijk (Ed.), Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1963, pp. 210-235.
- [6] Tarnawski V. R. and Leong W. H. Thermal conductivity of soils at very low moisture content and moderate temperatures[J]. Transport in Porous Media, 2000, 41(2):137-147.
- [7] 白冰,周成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响 [J]. 岩土力学, 2003,24(4): 533-537.
BAI Bing, ZHOU Cheng-gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(4): 533-537.
- [8] Tang A. M. , Cui Y. J. et al. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites[J]. Applied Clay Sciences, 2008, 41: 181-189.
- [9] Abu-Hamdeh N. H. SW-Soil and water: measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(2): 209-216.
- [10] Abu-Hamdeh N. H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1), 97-102.
- [11] 陈善雄,陈守义. 砂土热导率实验研究[J]. 岩土工程学报, 1994,16(5): 47-53.
CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Experimental study on thermal conductivity of sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 47-53.
- [12] 苏天明,刘彤,李晓昭,等. 南京地区土体热物理性质测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (16) : 1278-1283.
SU Tian-ming, LIU Tong, LI Xiao-zhao. Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(16) : 1278-1283.
- [13] 肖琳,李晓昭,赵晓豹,等. 含水率与孔隙率对土体热导率影响的室内实验[J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2008,9(3): 241-247.
XIAO Lin, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao et al. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008,9(3): 241-247.
- [14] Woodside W. and Messmer J. Thermal conductivity of porous media[J]. J. Appl. Phys. , 1961, 32: 1688-1706.
- [15] Kahr, G. , Müller-Vonmoos, M. Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. NTB 82-06, Nagra, Hardstrasse 73, CH-5430 Wettingen, Schweiz, 1982.
- [16] Knutsson, S. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite[R]. SKB Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. , SKB 83-72, October 1983.
- [17] ASTM D 5334-00, 2000. Standard test methods for determining of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. Vol. 04. 08, ASTM, 100 Barr-Harbor Dr. , West Conshocken, PA 19428-2059.