

黏性土水理性质温度效应研究

邵玉娴^{1,2}, 施斌^{1*}, 刘春¹, 顾凯¹, 唐朝生¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院 地球环境计算工程研究所, 江苏南京 210093; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 温度影响着黏性土的液塑限、膨胀性和渗透性等水理性质, 对于不同的黏性土, 这种影响往往差异很大。为了系统地研究这一影响的规律性和机理, 以南京地区3种不同矿物组分的黏性土为研究对象, 开展了土样在5℃~50℃范围内吸附结合水量、液塑限、膨胀性和渗透性的试验研究。结果表明: 温度升高时, 黏性土液限减小, 膨胀性增加, 渗透性增加, 这种温度效应根本原因在于吸附结合水量变化。亲水矿物由于其吸附结合水量大, 对温度效应起主要作用。亲水矿物含量较多的黏性土, 液限随温度变化大, 而膨胀率则变化小。亲水矿物含量对渗透性的温度效应影响显著, 对比吸附结合水试验: 温度升高时, 其渗透水由吸附结合水为主转为渗透结合水和自由水为主, 渗透系数可上升近十倍。揭示了黏性土3种基本水理性质温度效应的规律性及机理, 为相关的地质灾害的评估和预防提供理论基础。

关键词: 黏性土; 水理性质; 温度; 机理

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)10-1576-07

作者简介: 邵玉娴(1983-), 女, 江苏扬州人, 博士研究生, 从事环境岩土工程和地温场研究。E-mail: shaoyx@cma.gov.cn。

Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils

SHAO Yu-xian^{1,2}, SHI Bin¹, LIU Chun¹, GU Kai¹, TANG Chao-sheng¹

(1. The School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Temperature has great influence on the hydro-physical properties of clayey soils, such as Atterberg limits, swelling and permeability. This temperature effect may be distinct among different types of soils. In order to systematically study the regularity and mechanism of the effect, this research is conducted to evaluate the adsorbed water content, Atterberg limits, swelling and permeability through laboratory study in the range of 5℃~50℃, among three common types of clayey soils in Nanjing with different mineral compositions. The results indicate that the liquid limit reduces, the swelling increases, the permeability increases with rising temperature, and the temperature effect is fundamentally due to the change of adsorbed water content. Hydrophilic minerals, which contain large amounts of adsorbed water, play an important role in the temperature effect. With the increase of hydrophilic minerals, the temperature effect on the liquid limit increases and the effect on the swelling ratio decreases. The content of the hydrophilic minerals has significant impact on the temperature effect of permeability. The results of adsorbed water content show that the adsorbed water transports to penetrate water and free water when temperature rises, and permeability may increase by tenfold. It indicates the laws and mechanism of the temperature effect on three basic hydro-physical properties of clayey soils, which provides a theoretical basis for assessment and prevention of corresponding geological hazards.

Key words: clayey soils; hydro-physical property; temperature; mechanism

0 引言

黏性土的工程性质及变化规律一直是岩土工程研究的重要领域。温度作为一个基本物理场, 对黏性土的工程性质会产生重要影响^[1-2]。这种影响表现在随着温度的升高, 土的渗透性、强度、膨胀性等发生变化^[3-5]。当前, 在全球变暖和大规模城市化的大背景下, 城市大气中的热岛效应日益严重, 同时也对城市下垫

面中的土体温度场产生影响, 使地温场升高。地温场的变化必然会影响土的工程性质, 并导致一系列地质灾害^[6-7]。因此, 对黏性土工程性质的温度效应研究具

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730739); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09B_011Z)

收稿日期: 2010-08-04

*通讯作者

有重要的实际意义。

从 20 世纪 60 年代开始, 黏性土工程性质的温度效应逐渐引起国际岩土届的关注^[1-3]。近年来, 一些国外学者的研究表明, 黏性土的强度、渗透性、压缩和蠕变等性质均受温度变化的影响^[3-5, 8-9]。其中一些试验反映, 这种温度效应与土颗粒的结合水膜的变化有着密切的联系^[2, 3, 5]。这些研究大多针对单一土类, 缺乏系统性和广泛的适用性。我国对土体工程性质温度效应研究较少, 且主要集中在冻土和核废料处置领域中, 如吴青柏研究了冻土的冻融循环作用及其水分迁移的温度效应机理^[10]; 刘亚晨等对核废料贮库围岩介质的热-水-力耦合作用进行了分析^[11]。但这些研究成果的温度范围大多在 0℃ 以下或者高温条件下, 很少涉及到一般的常温条件。虽然一些学者对城市化过程中黏性土的热力学行为做了初步研究, 但主要局限于温度对黏性土变形和结构强度的影响^[12-13]。

目前, 在黏性土工程性质温度效应上还缺乏系统的研究。当前的研究多关注于黏性土宏观工程性质的变化, 而忽视了温度影响的内在机理。在研究不同黏性土时, 温度效应常常有较大差异, 甚至表现相反的规律, 这些现象也还没有统一的认识^[1-2, 5]。从本质上讲, 温度效应是土中水分在量和质上的变化以及水-土作用关系变化的外在体现。本课题在国家自然科学基金重点项目“城市热岛效应环境中土体工程性质变化及其灾害效应研究”(40730739)资助下, 通过一系列室内试验, 比较系统地研究了 3 种不同矿物成份的黏性土的液塑限、膨胀性和渗透性受环境温度影响的规律。综合黏性土吸附结合水量随温度的变化规律, 定量分析了温度对黏性土水理性质的影响机理。结果表明, 这些温度效应主要是由结合水膜的变化引起的, 同时亲水矿物含量(伊蒙混层矿物)对这种温度效应的强度有重要作用。本文定量分析了黏性水理性质的温度效应, 从而为了解和掌握地温场变化所带来土体工程性质影响及其灾害效应提供理论基础。

1 试验方案

为了研究不同矿物组分对黏性土温度效应的影响, 试验首先选取了南京地区 3 种不同黏性土作为试

验土样, 分别为南京地区广泛分布的淤泥质土(S1)、下蜀土(S2)和膨胀土(S3)。淤泥质土取自南京段长江阶地上, 属现代新近沉积粉质黏性土, 呈灰黑色, 天然含水率约为 55%, 并含有 2.5% 的有机质; 下蜀土为中、晚更新世亚黏性土, 呈棕黄色, 天然含水率约为 25%; 膨胀土取自南京浦口地区, 呈灰白色密块状, 天然含水率约为 20%。3 种土的基本物理参数和矿物成分见表 1。可以看到, 3 种黏性土的液塑限呈递增变化, 而伊蒙混层矿物含量也呈递增变化。

试验在步入式高低温交变湿热实验室进行。该实验室的控温范围为 -10~80℃, 控温精度为 ±0.5℃, 控湿范围为 50%~98%。参照南京地区浅表层土体的温度变化区间^[9], 本文试验的控温区间为 5~50℃, 在此温度区间内的不同温度下进行了吸附结合水量、界限含水率、无荷膨胀率和渗透试验。

2 温度对黏性土吸附结合水量的影响

2.1 试验过程

吸附结合水量的测量方法有多种, 如 X 射线衍射法、加压排水法、离心机法和吸湿法等, 本文采用文献[14]中介绍的容量法进行测量。此方法的原理是烘干土浸泡水后, 土粒分散并充分吸附水分, 在土粒周围形成密度较大的结合水膜, 从而引起了水的体积变化。在黏性土中, 渗透结合水的重度接近 1 或等于 1, 而几个典型黏性土矿物的吸附结合水的平均重度达到 1.3^[2]。通过在不同温度下观测盛有定量烘干黏性土和水的容量瓶中水的体积变化, 计算得到单位干土的吸附结合水量(图 1)。试验采用同温水体和土样, 并对瓶中水的体积变化进行蒸发校正来提高试验精度。

2.2 结果分析

图 1 为试验得到的 3 种土样吸附结合水量随温度变化的曲线。从图中可以看出: ①相同温度下, 吸附结合水含量呈 S3> S2> S1; ②随着温度升高(5~50℃), 3 种土的吸附结合水量都近似呈线性降低。

经典的黏性土双电层理论认为^[1-2], 土体中黏性土矿物基面上一般都带有负电荷作为电位离子, 形成黏性土双电层的内层。这些负电荷由晶层表面的吸附阳

表 1 3 种黏性土的物理参数和矿物成分

Table 1 Physical properties of three kinds of clayey soils

编号	颗粒组成/%			比重 G_s	液限 $w_L\%$	塑限 $w_P\%$	塑性指数 I_p	黏土矿物成分相对含量/%			有机质 含量 /%
	砂粒	粉粒	黏粒					伊蒙混层矿物	伊利石	绿泥石和高岭石	
S1	1.3	82.7	16.0	2.70	32.7	21.5	11.2	23.7	64.6	8.5	2.5
S2	11.2	75.3	13.5	2.71	36.7	22.2	14.5	61.8	32.1	6.1	0.0
S3	7.7	79.8	12.5	2.68	46.3	25.3	21.0	87.4	4.3	8.5	0.0

*表中的物理参数是在 20℃下试验得到，或经过温度校正得到的 20℃下的值。

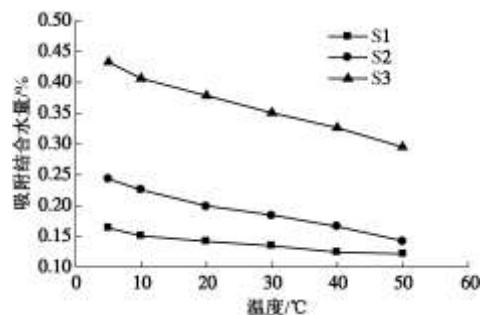


图 1 不同温度下土的吸附结合水量变化曲线

Fig. 1 Adsorbed bound water content at various temperatures

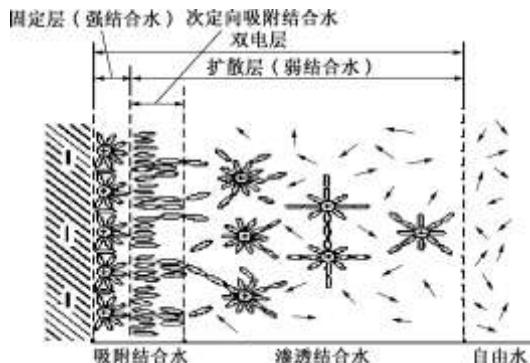


图 2 黏土颗粒双电层结构示意图（引自文献[2]）

Fig. 2 Electric double layer of clayed particle (after Reference [2])

离子所补偿，后者形成了双电层的外层，即结合水膜，它由固定层（强结合水）和扩散层组成（弱结合水），扩散层又由次定向吸附结合水和渗透结合水组成（图 2）。其中强结合水在试验温度范围内基本不会发生变化，次定向吸附结合水与渗透结合水作为弱结合水，对温度的敏感度比强结合水要大得多^[2]。由于渗透结合水重度接近或等于 1，其减少量不会带来水总体积的变化，因此，本试验中吸附结合水量的变化主要是次定向吸附结合水量的变化。

由于试验土样经 125℃烘干，黏性土中的大部分有机质含量已经分解，因此不考虑有机质的吸水作用，吸附结合水量主要与土中的亲水矿物含量有关。结合图 1 和表 1，S1，S2，S3 的吸附结合水量的温度效应呈现递增的规律，这与亲水的伊蒙混层矿物含量的变化一致。伊蒙混层矿物是不规则混层矿物，由伊利石

和蒙脱石两种单位晶层无规则的相互叠置，具有蒙脱石和伊利石的特性，其阳离子交换量、比表面积和颗粒表面的负电荷量都远远高于伊利石和高岭石^[15]，因此其吸水性强，且具有较高的活性。由试验可以得到，黏性土的吸附结合水量与亲水矿物（伊蒙混层矿物）的含量成近似正比关系；同时，亲水矿物含量越高的黏性土，其吸附结合水对温度的变化越敏感。

从微观上看（图 2），升温加剧了水分子的热运动，部分次定向吸附结合水分子游离出吸附水膜，并使得次定向吸附结合水量减小，结合水膜内的渗透结合水也相应减少^[1-2]，部分弱结合水向自由水转变。因此，试验中吸附结合水量的减小在微观上可以看作黏性土的结合水膜厚度的减小。随着结合水膜厚度减小，相互间作用力和土结构也发生变化，并引起宏观上各种水理性质和力学性质的变化。为了定量地研究这种宏观的变化及其内在规律性，在获得不同温度下 3 种土吸附结合水量的基础上，开展了不同温度下黏性土的液塑限、膨胀性和渗透性的温度效应研究。

3 温度对土的液塑限影响

3.1 试验过程

试验土样采用风干土样，分别测定试样在 5℃、20℃、40℃和 50℃下的液、塑限。首先将试样在指定温度下养护 24 h，然后用液塑限联合测定仪测定土样在该温度下的液、塑限。在温度 5~50℃范围内，土中有机质仍然保留^[16]。

3.2 试验结果分析

图 3 给出了 3 种土样在不同温度下液限、塑限和塑性指数测定值。从图中可以得出如下规律：①在相同温度下 3 种土的液限、塑限和塑性指数都呈 $S1 < S2 < S3$ ；②温度的改变对 3 种土的界限含水率都产生了影响，其中塑限受温度影响不大，液限和塑性指数受温度影响较大；③ $S2$ 和 $S3$ 的液限和塑性指数都随温度升高减小， $S1$ 的液限和塑性指数随温度升高而增大；④3 种土的界限含水率与温度之间的关系基本

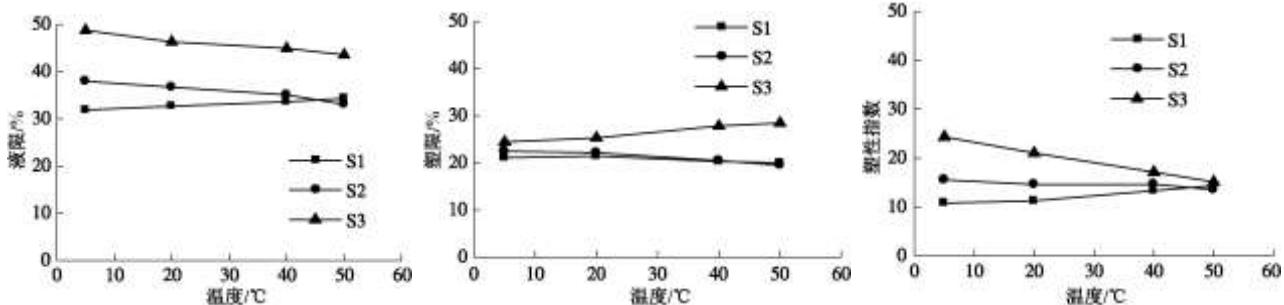


图 3 不同温度下土的液限、塑限和塑性指数

Fig. 3 Liquid limit, plastic limit and plasticity indices of soils under various temperatures

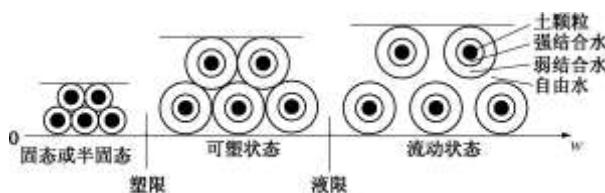


图 4 土的 3 种典型稠度状态示意图

Fig. 4 Modes of soil consistency

呈线性变化的趋势，变化幅度呈 $S1 < S2 < S3$ 。

界限含水率是黏性土的最基本、最重要的物理指标之一，它综合地反映了黏性土的物质组成，广泛应用于土的分类和评价。土中的黏粒含量、亲水矿物和有机质的含量是影响黏性土界限含水率大小的主要因素^[17]。由于 3 种黏性土的粒度组成差异不大，伊蒙混层矿物的含量和有机质含量决定了其界限含水率的不同。有机质的比表面积和吸水性要远大于一般黏土颗粒，如高岭土、伊利土黏粒，但低于蒙脱石颗粒^[16]，因此 3 种土界限含水率主要由伊蒙混层矿物的含量决定。3 种土中伊蒙混层矿物的含量呈 $S1 < S2 < S3$ ，相同温度下 3 种土的液限、塑限和塑性指数也呈 $S1 < S2 < S3$ ，这与吸附结合水量试验的规律也一致。

从土质学角度看，宏观上的黏性土稠度状态（固态，塑态，液态）^[18]是由其微观上土水关系决定的。图 4 为这 3 种稠度状态对应的微观理想化模型，随着含水率的增加，黏性土逐渐由固态转化为塑态和流动状态，颗粒间联结力逐步减弱到无。在微观上，颗粒间由强结合水联结转为弱结合水联结，最后转为自由无联结状态。塑限对应强、弱结合水联结的界限，即黏土颗粒周围以强结合水为主要联结。在试验温度范围内强结合水几乎不受温度影响^[2]，3 种土的塑限随温度升高的变化量很小，因此，塑性指数的变化主要受液限变化控制。黏性土的液限对于弱结合水联结与流动状态的界限，与土中的结合水膜厚度密切相关^[19]。根据吸附结合水试验，结合水膜厚度随温度升高而减小，并使土颗粒之间的作用力减弱，在较低的含水率下才能保持土的可塑状态，即黏性土的液限降低。伊蒙混层矿物吸附大量结合水，而 $S3$ 伊蒙混层矿物最多，所以其液限最大，温度升高导致的结合水减少量也相应最大，液限降低最为明显； $S2$ 的伊蒙混层矿物较少，其液限和温度变化率也相应较小。

可以看出，伊蒙混层矿物含量对黏性土的液塑限及其温度效应有重要作用。但是， $S1$ 的液限随温度略有上升，呈现出相反的规律，这与其含有一定量的有机质有关。根据 Abdallah 等人的研究^[16]，当有机质含量低于 10% 时，其吸水作用占主导作用。并且，随着

温度升高，黏性土中的有机质活化能增大，吸附能力增强^[20]。本试验采用的淤泥质土（ $S1$ ）中含有 2.5% 的有机质成分，因此 $S1$ 的液限反而略有升高。当然，温度对土的界限含水率的影响机理十分复杂，如不同矿物之间的作用、颗粒组成、水的黏滞性，试样受热膨胀而产生的结构变化等均可能对其产生影响。从本试验研究上看，伊蒙混层矿物和有机质含量起了重要作用。

4 温度对土的膨胀性影响

4.1 试验过程

将 3 种风干土样过 2 mm 筛，用压样法分别制成 4 组不同含水率 (w) 和干密度 (ρ_d) 的 12 个试样，分别为试样组 I 为 $w=15\%、\rho_d=1.46 \text{ g/cm}^3$ 的试样，试样组 II 为 $w=15\%、\rho_d=1.58 \text{ g/cm}^3$ 的试样，试样组 III 为 $w=20\%、\rho_d=1.46 \text{ g/cm}^3$ 的试样，试样组 IV 为 $w=20\%、\rho_d=1.58 \text{ g/cm}^3$ 的试样。试样放进保湿皿，在 5℃ 环境下水封养护 48 h 后，量取每个试样的初始高度。对试样用固结仪进行 5℃ 下的无荷膨胀率试验，经 72 h 静置，百分表读数稳定后升温至 20℃，进行 20℃ 的无荷膨胀率试验，同样经 72 h 膨胀稳定后再升温至 45℃，读数稳定后结束试验。

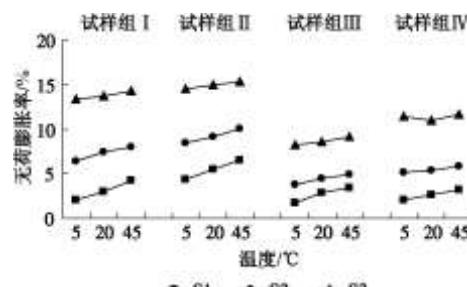


图 5 试样在不同温度下的无荷膨胀率

Fig. 5 Non-load swelling ratio of soil samples at various temperatures

4.2 结果分析

黏性土的膨胀机理极为复杂，目前还没有定论，主要的理论有双电层理论、吸力势理论、晶格扩张理论、矿物叠片体作用理论等^[21]。结合双电层和吸力势理论来看，双电层系统中存在吸力和斥力。一方面，靠近黏土颗粒表面的高浓度阳离子可产生斥力，从而使颗粒分散；另一方面，由于层间溶液比外力渗压溶液具有较高的电解质浓度，水的渗透压力产生斥力。根据前人的研究^[2]，温度升高时，双电层离子的数量和活动性增强，并使这种斥力增加。同时，温度升高时，结合水膜变薄，土颗粒间吸力减弱。在宏观上，这种吸力和斥力的此消彼长就表现为黏性土的整体膨

胀。本课题组另文发表的成果也表明^[22], 当温度升高时, 土样的整体强度降低。这也从侧面反映了, 土颗粒间吸力在这一过程中是减小的。

图 5 中给出了 3 种土的 4 组试样在不同温度下的无荷膨胀率 (δe)。从图 5 可以看出, 伊蒙混层矿物含量是决定黏性土膨胀率的根本因素, 在各组试验中, δe 均按 S1 到 S3 递增变化; 所有试样的无荷膨胀率随温度基本都呈线性增长; 对同一种土而言, 含水率相同的情况下, 干密度大的试样 δe 更大; 而干密度相同的情况下, 含水率小的试样 δe 更大。综合而言, 单位体积内的干土质量越大, 试样中亲水矿物的含量越高, 膨胀率也就越大。而含水率较小的土样, 其吸水膨胀的空间也较大, 因此无荷膨胀率也略大一些。

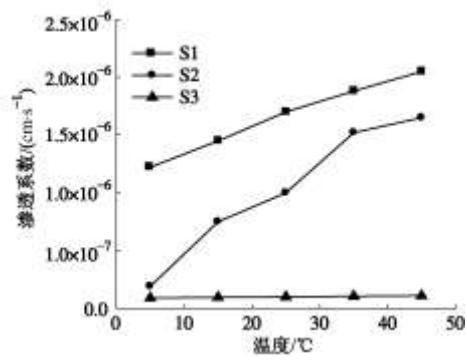


图 6 试样在不同温度下的渗透系数

Fig. 6 Permeability of soil samples at various temperatures

吸附结合水量实验表明, 伊蒙混层矿物含量越大, 吸附结合水量越多, 温度升高时的吸附结合水减小量越大。而从膨胀性实验上看, S3 亲水矿物最多, 温度增加导致的膨胀增量反而最小, 表现出相反的规律。据前苏联兹洛切夫斯卡娅等人研究^[2], 蒙脱石黏性土在温度 40~70°C 时与在 20°C 相比, 其双电层离子的数量和活动性增加近 1.5~2 倍, 而高岭石黏性土为 2~3 倍。这样, 对于伊蒙混层矿物, 其升温引起的斥力和膨胀变化反而较小。黏性土膨胀性是多种机制共同作用的结果, 吸附水膜的变化只是其中一个方面。

5 温度对土的渗透性的影响

5.1 试验过程

将风干碾碎后的 3 种土分别过 2 mm 筛, 并制成若干干密度 1.57 g/cm³ 的渗透试样, 在恒温条件下, 采用标准的变水头渗透装置 (TST-55 型土壤渗透仪和水头装置) 对试样进行渗透试验, 得到不同温度 (5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C) 下试样的渗透系数。

5.2 试验结果分析

图 6 为同种干密度 3 种土样在不同温度下的渗透

系数: ①相同温度下, 渗透系数与土中的伊蒙混层矿物含量成反比, S1>S2>S3; ②3 种土的渗透系数都随着温度升高基本呈线性增长, 变化幅度呈 S2>S1>S3, S2 的渗透系数提高了一个数量级 (从 10⁻⁷ 升至 10⁻⁶)。

黏性土的渗透系数主要受水的动力黏滞系数和结合水黏滞阻力作用^[4, 8, 23]。当温度升高时, 动力黏滞系数降低, 同时由于次定向水减少, 结合水膜变薄, 其黏滞阻力也相应降低。因此, 3 种土渗透系数随温度升高而降低。

本试验中, 土样干密度 1.57 g/cm³, 由表 1 中 3 种土比重可以计算到, 饱和渗水时 3 种试样的水土质量比约为 0.265。由图 1 可知, 在 5~50°C 间, S3 中的吸附结合水与土重比介于 0.30~0.43。本试验 S3 中, 水土质量比低于这个范围, 因此, 颗粒间水以吸附结合水为主导, 升温时的渗透系数及其增长速率很小。而对于 S2, 随温度增加, 其吸附结合水与土重比由 0.24 降到 0.14, 颗粒间的渗透结合水和自由水不断增加, 渗透系数迅速上升。在 5°C 时, 0.24 与本试验的水土质量比 0.265 很近, 同时渗透系数也接近于 S3, 说明此时吸附水膜的黏滞阻力起主要作用。在升温过程中, 随着 S2 中部分吸附结合水向渗透结合水和自由水的转变, 渗透增强, 因此变化较曲折, 同时变化率较大。S1 的吸附结合水与土重比介于 0.12~0.16, 显著低于 0.265, 其渗透水以渗透结合水和自由水为主, 渗透系数主要受水的动力黏滞系数影响, 因此, 渗透系数最大且呈线性变化。

6 结论和讨论

温度影响黏性土的各种水理性质, 如液塑限、膨胀性和渗透性等。本文一系列试验表明, 随着温度升高: ①液塑限降低, 其中塑限变化较小; ②膨胀性增加; ③渗透性增加。

结合黏性土双电层理论分析, 宏观性质变化与微观上颗粒吸附水膜的变化具有很高的关联性。吸附结合水量试验表明: 温度升高时, 吸附结合水量呈近似线性减少。这说明在微观上, 颗粒周围的次定向吸附结合水随着温度升高而不断游离出吸附水膜, 从而使吸附水膜及结合水膜变薄, 黏土颗粒之间作用力减弱。温度上升的微观效应改变了黏性土的基本水理性质: ①结合水膜变薄, 液限降低, 塑限受强结合水控制而变化很小; ②吸力减弱, 颗粒在斥力控制下发生膨胀; ③吸附结合水向渗透结合水和自由水转变, 渗透系数增大。4 个系列试验相互映证说明: 宏观上的水理性质温度效应是土中水分在量和质上的变化以及水-土作用关系变化的外在体现。

试验表明, 这些水理性质也受亲水矿物(伊蒙混层矿物)含量的影响。在吸附结合水量试验中, 总吸附结合水量与伊蒙混层矿物含量呈近似正比关系; 同时, 温度升高时, 较多伊蒙混层矿物的土样, 其吸附结合水量减少量也较大。因此, 随着亲水矿物的增加, 吸附结合水量增加, 黏性土的液限和膨胀性增加, 而渗透率减小。

综合温度和伊蒙混层矿物含量的影响。

(1) 对于液限, 较多的亲水矿物, 吸附结合水量较多, 温度升高带来的变化较大。

(2) 但是对于膨胀性, 较多的亲水矿物, 温度升高带来的变化反而小。黏性土膨胀性的机制复杂, 基于双电层的解释具有其局限性。吸附水膜的作用只能说是其中一方面的影响因素, 其规律性和机理, 有待于进一步的研究发展。

(3) 在渗透性上, 温度效应表现出与亲水矿物含量及水土比有着极大的相关性。特别对于S2, 当温度由5℃升到45℃时, 其渗透水由吸附结合水为主转为渗透结合水和自由水为主, 其渗透系数上升近一个数量级。由于黏性土是一些重要工程的主要防渗材料, 如土石坝、垃圾填埋场、核废料储库等。温度效应及矿物含量对黏性土渗透性的影响有至关重要的作用。

试验中, 也发现少量的有机质(2.5%)会改变黏性土液限的温度效应, S1液限随温度升高而升高。而在其它试验中, 没有观察到明显的有机质对水理性质的影响。关于有机质的影响及其温度效应, 是进一步的研究方向。本文研究的是温度对黏性土3种基本水理性质的影响, 这些性质的变化必然会影响到黏性土的整体工程性质, 并可能导致一系列的灾害。如何对这些灾害效应进行评估、预防也是需要进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K, KENICHI S. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [2] A .И .库里契茨基, 等. 土中结合水译文集[M]. 李生林, 等译. 北京: 地质出版社, 1982. (СВЯЭАННАЯ ВОДА В СИСТЕМАХ, et al. Translations of the soil bound water[M]. LI Sheng-lin, et al trans. Beijing: Geological Press, 1982. (in Chinese))
- [3] PASSWELL R E. Temperature effects on clay consolidation[J]. J Soil Mech and Found Engng Div, ASCE, 1967, 93(3): 9—21.
- [4] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(4): 343—354.
- [5] BURGHIGNOLI A, DESIDERI A, MILIZIANO S. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(4): 764—780.
- [6] 施斌, 刘春, 王宝军, 等. 城市热岛效应对土的工程性质影响及灾害效应分析[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1167—1173. (SHI Bin, LIU Chun, WANG Bao-jun, et al. Urban heat island effect on engineering properties of soil and the related disaster effect[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11): 1167—1173. (in Chinese))
- [7] 施斌, 邵玉娟, 刘春, 等. 城市“热岛”效应对土体工程性质的影响及其关键科学问题[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 180—187. (SHI Bin, SHAO Yu-xian, LIU Chun, et al. Impact and key issues of urban heat island effect to soil engineering properties[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 180—187. (in Chinese))
- [8] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42: 287—296.
- [9] TANG A M, CUI Y J. Modelling the thermomechanical volume change behaviour of compacted expansive clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 185—195.
- [10] 吴青柏, 刘永智, 施斌, 等. 青藏公路多年冻土区冻土工程研究新进展[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 55—61. (WU Qing-bai, LIU Yong-zhi, SHI Bin, et al. Advance research on frozen engineering permafrost region along Qinghai-Xizang Plateau Highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1): 55—61. (in Chinese))
- [11] 刘亚晨, 刘泉声, 吴玉山, 等. 核废料贮库围岩介质不可逆过程热力学和热弹性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 361—365. (LIU Ya-cheng, LIU Quan-shen, WU Yu-shan, et al. Irreversible thermodynamics and thermoelasticity of fractured rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 361—365. (in Chinese))
- [12] 吴恒, 张信贵, 易念平, 等. 城市环境下的水土作用对土强度的影响[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 25—30. (WU Heng, ZHANG Xin-gui, YI Nian-ping, et al. Influence of water-soil interaction on soil strength in urban areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 25—30. (in Chinese))
- [13] 吴恒, 欧孝夺, 周东. 城市环境下黏性土的热力学行

- 为初探[J]. 广西科学, 2003, **10**(3): 205 - 207, 215. (WU Heng, OU Xiao-duo, ZHOU Dong. Thermal mechanics conductivity of the clayey soil in urban environment[J]. *Guangxi Sciences*, 2003, **10**(3): 205 - 207, 215. (in Chinese))
- [14] 吴凤彩. 黏性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(6): 84 - 93. (WU Cai-feng. The adsorbed bound water content measurement and some characteristics of seepage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, **6**(6): 84 - 93. (in Chinese))
- [15] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Special geotechnical engineering soil property[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [16] ABDALLAH I, HUSEIN M, et al. Effects of organic matter on the physical and the physico-chemical properties of an illitic soil[J]. *Applied Clay Science*, 1999, **14**: 257 - 278.
- [17] IAN J, CHRISTOPHER D R. Liquid limit and the temperature sensitivity of clays[J]. *Engineering Geology*, 1998, **49**: 95 - 109.
- [18] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Qinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [19] BOJANA D. Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value correlations[J]. *Applied Clay Science*, 2009, **45**: 90 - 94.
- [20] AGREN G I, WETTERSTEDT J A M. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, **39**: 1794 - 1798.
- [21] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Expansive soil problems on engineering construction[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [22] 邵玉娴, 施斌, 高磊, 等. 温度对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 高校地质学报, 2009, **15**(2): 213 - 217. (SHAO Yu-xian, SHI Bin, GAO Lei, et al. Laboratory study on influence of temperature on shear strength of unsaturated clayey soil[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, **15**(2): 213 - 217. (in Chinese))
- [23] 王媛, 施斌, 高磊, 等. 黏性土渗透性温度效应试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(3): 351 - 356. (WANG Yuan, SHI Bin, GAO Lei, et al. Laboratory tests for temperature effects of clayey soil permeability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(3): 351 - 356. (in Chinese))

《建筑科学与工程学报》2012年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学与中国土木工程学会联合主办的学术性期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决

策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大16开本, 128页, 每期定价10.00元(含邮寄费), 全年共40.00元, 国内外公开发行, 邮发代号: 52-140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学内, 邮 编: 710064, 电 话: (029)82334397, E-mail: jzxb@chd.edu.cn。

(《建筑科学与工程学报》编辑部 供稿)