

DOI: 10.11779/CJGE20221153

# 砂-黏土中结合水含量及渗透性的非等温耦合效应

黄远浩<sup>1,3</sup>, 张志超<sup>\*1,2,3</sup>, 肖杨<sup>1,2,3</sup>, 李林航<sup>1,3</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

3. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 土体结合水性、渗透性及温度之间的耦合关系, 很大程度上决定了土体的温度-渗流-应力耦合行为。开展了非等温条件下饱和土的结合水含量及渗透性试验研究, 以揭示温度变化对不同粒径和黏粒含量土体吸附结合水含量和渗透系数的影响机制。研究表明, 升温可导致土体吸附结合水含量显著降低, 且结合水含量-温度关系显著依赖于颗粒粒径和黏粒含量。由于土粒间的相互作用及结构性效应依赖于黏粒含量及温度, 成型砂土/低含黏土和黏土/高含黏土样结合水含量分别不同程度地高于和低于散状土样。同时, 温度升高将引起土体渗透系数不同程度的增大, 这与升温下自由水运动黏度和吸附结合水含量的降低等因素密切相关, 这些因素的作用程度又依赖于黏粒含量和土体孔隙率。在非等温条件下, 忽略结合水效应将分别高估和低估低黏粒含量和高黏粒含量土体的渗透性随温度的变化。

**关键词:** 饱和土; 结合水含量; 温度; 渗透系数; 黏粒含量

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)02-0375-10

**作者简介:** 黄远浩(1997—), 硕士研究生, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: 17307972530@163.com。

## Non-isothermal coupled effects of bound water content and permeability in sand and clay

HUANG Yuanhao<sup>1,3</sup>, ZHANG Zhichao<sup>1,2,3</sup>, XIAO Yang<sup>1,2,3</sup>, LI Linhang<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster

Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of City

in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The couplings among characteristics of bound water, permeability of soils and temperature largely determine the thermal-hydraulic-mechanical behavior of soils. To study the bound water content and the permeability of soils under non-isothermal conditions, the temperature-controlled laboratory measurements of the bound water content in saturated sand, clay and sand-clay mixtures, combined with the corresponding permeability tests, are carried out in this study based on the bulk density method. It is shown that temperature elevation leads to remarkable decreases of the bound water content, largely depending on the soil particle size and the clay content. The bound water contents under different temperatures measured for the packed soil samples with low and high clay contents are obviously higher and lower than those measured for the samples of dispersed soil particles, respectively, due to the interactions and structures among soil particles. The increases of soil permeability with the temperature elevation are also observed in the tests, which are highly related to the heating-induced and clay-content-dependent decreases of the free-water kinematic viscosity and the bound water content. The thermally induced changes of permeability can be overestimated for the soils with low clay contents and underestimated for those with high clay contents if ignoring the effects of bound water.

**Key words:** saturated soil; bound water content; temperature; coefficient of permeability; clay content

## 0 引言

在土体孔隙中, 结合水是由于带负电荷土体颗粒表面与水化阳离子间的静电引力作用而吸附在颗粒表面一定距离范围内的孔隙水, 对土体(尤其是黏性土)的物理力学性质具有十分重要的影响。已有研究表明, 岩土体吸附结合水的状态(譬如黏滞系数、含量及水

膜厚度等)受到温度的显著影响<sup>[1-5]</sup>。在诸如能源桩基等能源地下工程中<sup>[6]</sup>, 土体温度场将发生较为明显的变化(温度变化量可在 10~35℃), 结合水物理力学

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978104)

收稿日期: 2022-09-19

\*通信作者: (zhangzhichaopt@163.com)

状态的温度效应将导致土体的热固结现象,并影响其物理力学性质<sup>[3-5]</sup>和相关岩土结构的性能<sup>[6]</sup>。

目前已有相关试验及理论对结合水对土体物理力学性质的影响开展了研究工作,表明结合水含量对黏土渗透性<sup>[7-10]</sup>、压缩/剪切模量<sup>[3]</sup>、剪切强度<sup>[11-13]</sup>和蠕变行为<sup>[14-15]</sup>等均存在显著的影响。而受土颗粒表面与水分子之间氢键的影响,结合水膜的厚度与温度关系密切,即在一定的温度条件下,结合水与自由水之间存在相互转化<sup>[16-17]</sup>。结合水状态的这种温度效应通常被认为是热固结现象<sup>[18-19]</sup>的主要机制。同时,已有一定数量的试验工作对结合水与土体渗透性之间的关系开展研究。Delage等<sup>[5]</sup>、Habibagahi<sup>[8]</sup>和王媛等<sup>[20]</sup>研究了渗透系数随温度升高而降低的规律,并表明了结合水膜的改变在其中的重要作用(通过改变自由水流动的通道及运动黏度来影响土体渗透性)。Teng等<sup>[21]</sup>的研究则表明了温度对砂-黏混合物渗透性的影响。

可见,结合水含量显著影响土体等温及非等温物理力学性质,对非等温条件下土体结合水含量及渗透性变化规律的深入研究有助于更好地理解土体温度-渗流-应力耦合行为的物理机制。然而,目前对土体结合水含量的定量研究仍相对较少,尤其仍需要从实证角度对土体热固结行为背后的结合水变化机制进行定量验证。在通常的温度-渗流-应力耦合模型中,温度对渗透系数的改变仅通过自由水运动黏度及密度的温度依赖性来表征<sup>[22]</sup>,而忽略了结合水及其温度效应的影响。目前,结合水含量的测试方法主要包括重度法<sup>[23]</sup>、热分析法<sup>[24]</sup>、等温吸附法<sup>[25]</sup>、红外光谱法<sup>[26]</sup>及核磁共振法<sup>[2]</sup>等。其中,重度法主要根据自由水吸附于固体表面后体积的改变来计算结合水含量,常用于对土体结合水含量的测试<sup>[23,27]</sup>。相较于其他方法,重度法原理简明、操作简单,且更易于实现对成型土结合水含量的测试。目前已有的相关研究中,利用重度法在容量瓶中对散粒状土样吸附结合水含量的测试居多,而未考虑温度对成型土样结合水吸附能力的影响。

综上所述,尽管目前对土体中结合水及结合水效应已有一定的研究成果,但针对非等温条件下成型土样结合水含量及渗透性变化规律的定量研究仍较不足。在此背景下,本文的主要研究目的是基于改进的重度法,利用自主设计的温控结合水-渗透性联合测试装置,对不同温度下饱和土吸附结合水含量和渗透系数的变化开展试验研究,揭示土粒粒径、黏粒含量、土样状态(压实/散状)等因素对饱和土体吸附结合水含量及其温度效应的影响,从而进一步研究非等温条件下不同黏粒含量土体渗透系数的变化规律及其背后的结合水机制。

## 1 试验方法与方案

为了研究饱和土体在不同温度下吸附结合水含量的变化规律及其对土体渗透性的影响机制,本文设计了一种土体结合水-渗透系数温控联合测试装置,所使用的试验装置、试验原理和试验方案详述如下。

### 1.1 基本试验原理

研究表明,土体中吸附结合水的密度明显高于自由水,并随着与土颗粒表面距离的增大而逐渐减小,渗透结合水密度则接近于自由水<sup>[23]</sup>。20世纪50至60年代,Wit等<sup>[28]</sup>、Mackenzie<sup>[29]</sup>及莫斯科大学研究人员等<sup>[23]</sup>对土体矿物结合水性进行了较为详细的研究工作,表明20℃下吸附结合水平均密度约为1.3 g/cm<sup>3</sup>。这与近期的等温吸附法土体吸附结合水测试数据<sup>[30]</sup>相一致。因而,采用重度法<sup>[23]</sup>测量土中吸附结合水含量具有可行性。它利用给定质量土颗粒充分吸附已知体积的液相自由水,通过测量自由水吸附为结合水后密度增大所引起的水总体积的变化来计算散状土体中吸附结合水的含量。但上述方法通常需考虑水分蒸发的影响,并通过读取容量瓶刻度来测量体积变化,因而测量精度有限。本文则基于改进的重度法并结合渗透性测试,进一步设计了可用于测量不同温度下成型土样吸附结合水量的装置(见下文)。

### 1.2 试验材料与试验装置

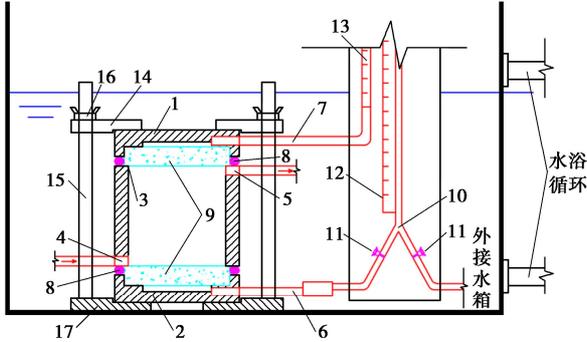
本试验中着重研究不同粒径及不同矿物土样吸附结合水的温度效应,因而涉及的试验材料包括砂土、黏土及砂-黏混合土。其中,砂样采用经筛分的福建标准砂(主要矿物成分为石英(>96%)),依据其粒径大小分为粗砂、中砂、细砂和粉砂(粉砂由石英砂和硅微粉按照1:1配制而成),如表1所示。黏土试样则采用钙基膨润土颗粒(粒径0.018~0.013 mm),主要成分为蒙脱石,具有较好的吸水性。利用比重瓶法在20℃恒温及真空饱和条件下测得经高温烘干黏土颗粒及不同粒径砂粒的相对质量密度,其中膨润土颗粒相对质量密度为2.694,砂粒相对质量密度见表1。

表1 试验用不同砂样粒径

类别	粗砂	中砂	细砂	粉砂
粒径/mm	0.6~1	0.355~0.5	0.15~0.2	0.038~0.15(石英砂) 0.038~0.018(硅微粉)
相对质量密度	2.609	2.602	2.616	2.660

试验采用的温控土体结合水-渗透系数测试装置简图如图1所示,其主体部分为由有机玻璃制成的圆柱形试样室(直径61.8 mm,高40 mm),此外还包括与试样室上端和下端连通的水位观测管,真空泵(抽

气速率 1 L/s, 可达到 5PA 真空度), 恒温水箱 (外循环泵流量 8 L/min, 控温精度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )。试验时将装置置于与恒温水箱连接形成循环水路的水浴内, 以控制试样温度。利用该装置, 可通过容量瓶法与变水头法测量不同温度下同一试样的结合水含量与渗透系数。



1-上盖; 2-下盖; 3-试样筒; 4-第一进水口; 5-第一出水口; 6-第二进水口; 7-第二出水口; 8-密封环; 9-透水石; 10-Y形管; 11-阀门; 12-刻度板; 13-水位管; 14-固定盘; 15-支撑杆; 16-螺母; 17-底座

图1 温控土体结合水-渗透系数测试装置示意图

Fig. 1 Temperature-controlled devices for combined tests on bound water content and coefficient of permeability

### 1.3 试验方案及流程

试验中, 首先将土样在  $250^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干 8 h 以完全去除结合水。称取质量为  $m_s$  的烘干黏土、砂土或砂-黏混合土样, 其中混合土样的黏土颗粒含量分别取 5%, 10%, 20%, 并与不同粒径组的砂土按比例搅拌均匀, 采用重度法测量  $10^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$  不同温度下散状土样和成型土样的吸附结合水含量及渗透系数。采用分层干铺法在试样室内制备成型土样并控制其干密度, 继而在设定的温度条件下对试样进行饱和并使其充分吸附结合水。主要试验工况信息见表 2。试验中采用高精度天平称取质量, 试样底部和顶部采用滤纸和透水石作为反滤层。为保证试验结果准确性, 所有试验均采用相同的透水石, 每次试验结束后将其置于  $250^\circ\text{C}$  烘箱内烘干 8 h 以上再取出继续使用。试验时, 将安装好的装置固定在水浴箱内并安装水位管, 按如下方法和步骤开展成型土样的结合水及渗透试验:

(1) 为保证试验时土样、试样室和水位管与孔隙水处于相同的目标试验温度  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ), 并缩短土颗粒吸附结合水至平衡状态所需时长、避免土颗粒与水之间存在明显温差, 需利用循环水泵将干土样及装置在预定的恒定温度下进行充分预热, 并使用相应温度下的水进行试验。

(2) 通过装置底部进水口通入目标水温的脱气水, 缓慢浸没试样并使水面上升至顶部出水管内一定高度处。关闭底部水阀, 顶部连通抽气泵对试样进行真空饱和, 在此过程中保持水浴循环运行。

(3) 完成真空饱和后, 打开装置的底部水阀, 继续保持水浴循环, 保证整个装置 (包括顶部和底部观测管) 处于目标温度, 使土颗粒充分吸附结合水并在设定温度下达到平衡。在此过程中, 由于自由水被吸附为结合水后密实度增大, 观测管水位可发生一定程度的变化, 待水位保持不变后, 即可认为已完成结合水的吸附过程。

(4) 吸附结束后使用胶头滴管滴入设定温度的水至观察管最大刻度线处, 取出装置并利用吸水纸等使其表面干燥后称取装置连同土样及水的总质量, 记为  $m_{\text{swd}}$ 。记土样吸附结合水质量为  $m_b$ , 装置自身 (包括透水石及滤纸) 质量为  $m_d$ , 则此时观察管及孔隙内的自由水总质量  $m_f = m_{\text{swd}} - m_d - m_s - m_b$ , 装置内土样、吸附结合水和自由水占据的总体积为

$$V = \frac{m_s}{G_s \rho_{4^\circ\text{C}}} + \frac{m_b}{\rho_b} + \frac{m_{\text{swd}} - m_d - m_s - m_b}{\rho_f} \quad (1)$$

其中,  $\rho_f$  和  $\rho_b$  分别为试验温度下纯水的密度和吸附结合水的平均密度,  $\rho_{4^\circ\text{C}}$  为纯水在  $4^\circ\text{C}$  时的密度,  $G_s$  为土颗粒相对质量密度 (采用混合土样时, 其相对质量密度为各组分散颗粒相对质量密度的重量加权平均值)。根据已有研究,  $20^\circ\text{C}$  下  $\rho_b$  可取为  $1.3 \text{ g/cm}^3$  [2, 20]。进一步地, 根据 Hiebl 等 [3] 对结合水热胀系数的研究, 可得各试验温度下吸附结合水平均密度, 如表 3 所示。

(5) 在相同的温度下, 在空置装置内 (包含透水石及滤纸) 加入脱气水至观测管最大刻度处, 此时装置内水体占据的总体积应与步骤 (4) 所得体积  $V$  一致, 称取此时装置连同水的总质量, 记为  $m_{\text{wd}}$ 。则有  $V = (m_{\text{wd}} - m_d) / \rho_f$ , 将其与式 (1) 联立即可得到温度  $T$  下单位质量土样吸附的结合水质量 (即吸附结合水含量, 定义为  $w_b = (m_b / m_s) \times 100\%$ ) 为

$$w_b = \frac{\frac{m_{\text{swd}} - m_s}{\rho_f} + \frac{m_s}{G_s \rho_{4^\circ\text{C}}} - \frac{m_{\text{wd}}}{\rho_f}}{m_s \left( \frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_b} \right)} \times 100\% \quad (2)$$

(6) 结合水测试结束后即可基于相同的装置对同一试样进行设定温度下的变水头渗透试验。渗透试验材料与结合水试验为同一试样, 最大程度减少了因试样制备差异造成的误差, 从而方便更好地将结合水变化规律与渗透性变化相联系。

区别于通常的容量瓶法, 本试验采用的重度法可测量成型土样的结合水含量。同时, 与容量瓶法通过土颗粒吸附结合水引起的体积差推算结合水含量不同, 本方法利用吸附平衡后相同体积土-水体系和纯自由水的质量差推算结合水含量。其优点为, 利用高精度天平得到的质量数据精度远高于人工读取体积刻度值, 同时无需考虑容器内水的蒸发作用。需要说明的

是, 本方法测得的主要为吸附结合水的含量。本试验同时测量了散状土样在不同温度下的吸附结合水含量, 以比较其与成型土样吸附结合水能力的差异。所采用的方法与上述成型土测试方法、流程和计算公式一致, 只需将试验装置换为相对质量密度瓶。试验中, 对每组试样进行3次重复试验, 取3次测量值的平均值。

表2 试验工况汇总表

Table 2 Details of testing conditions in this study

编号	组分	温度/°C	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
D1~30	粗砂至粉砂、黏土	10~60	散状
P1~6	90%粗砂+10%黏土	10~60	1.53
P7~12	90%中砂+10%黏土	10~60	1.53
P13~18	90%粉砂+10%黏土	10~60	1.53
PS1~6	100%细砂	10~60	1.53
PS7~12	95%细砂+5%黏土	10~60	1.53
PS13~18	90%细砂+10%黏土	10~60	1.53
PS19~24	80%细砂+20%黏土	10~60	1.53
PS25~30	100%黏土	10~60	1.53
PS31~36	100%黏土	10~60	0.93
PS37~42	90%细砂+10%黏土	10~60	1.4
PS43~48	90%细砂+10%黏土	10~60	1.5
PS49~54	90%细砂+10%黏土	10~60	1.6

注: “D”代表散状土样吸附结合水试验, “P”代表成型土样吸附结合水试验, “PS”代表成型土吸附结合水+渗透性试验, 干密度单位为 g/cm<sup>3</sup>。

表3 试验温度下自由水和结合水密度

Table 3 Densities of free and bound water used in tests

温度/°C	单位: g/cm <sup>3</sup>					
	10	20	30	40	50	60
自由水	0.998	0.998	0.996	0.992	0.988	0.983
结合水	1.308	1.3	1.291	1.281	1.272	1.261

## 2 结合水非等温试验结果

### 2.1 散状土样结合水含量

不同温度下散状土样吸附结合水量随温度变化如图2所示。可见, 黏土吸附结合水的能力远高于砂土(图2(a))。尽管如此, 砂粒吸附结合水的能力可随着粒径的减小而有所增强。粗砂、中砂和细砂颗粒的结合水含量大致相当, 均处于低水平(图2(c)); 而粉砂包含小粒径砂粒, 其结合水含量明显高于其他粒径组砂土(图2(b))。在10°C~60°C温度范围内, 不同类型土颗粒中结合水含量均随温度升高而显著下降, 这与温度较高时土颗粒表面水化阳离子扩散运动加剧有关。颗粒吸附结合水量越高, 单位温升引起的结合水含量下降越大。这是因为结合水含量越大, 水膜相对于粒径的厚度也越大, 弱结合水层在整个吸附结合水层内的体积占比更大, 因而更易受到温度的影响。

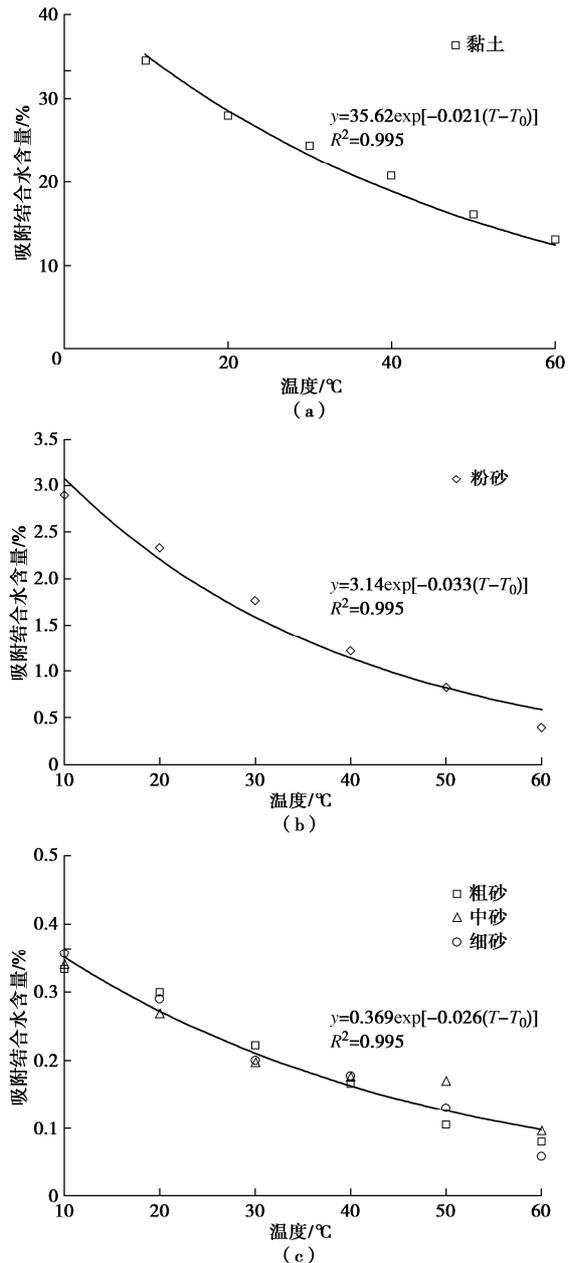


图2 散状砂土及黏土试样吸附结合水含量与温度的关系

Fig. 2 Relationships between adsorbed bound water content and temperature for dispersed samples of sand and clay

如图2所示, 黏土颗粒及不同粒径砂样的吸附结合水含量可表示为温度的指数衰减函数:

$$w_b = w_{b0} \exp[-k(T - T_0)] \quad (3)$$

式中:  $T_0$  为参考温度(取10°C),  $k$  和  $w_{b0}$  分别为结合水相对衰减指数和参考温度下的结合水含量, 受到颗粒粒径大小及矿物成分的影响。图3为20°C下散状硅砂及膨润土吸附结合水含量( $w_{b20}$ )与试样平均粒径的关系。图3同时给出了基于重度法(重度法)或等温吸附法的石英<sup>[27]</sup>和膨润土<sup>[27, 30]</sup>吸附结合水含量的文献数据。可见, 本文试验数据与已有文献中土体吸附结合水测试数据相比在数值和规律上具有可比性和合理性”。相同矿物成分土颗粒吸附结合水量随着粒径的

减小而显著增大 ( $w_{b20} \propto d^{-0.863}$ ), 而相同粒径下黏土矿物吸附结合水量明显高于非黏土矿物。土粒比表面积  $A_s \propto 6d^{-1}$  (假定颗粒为圆球), 则有  $w_{b20} \propto A_s^{0.863}$ , 即吸附结合水量为颗粒比表面积的幂函数。进一步地, 土颗粒吸附结合水膜厚度可按下式计算:

$$t = \frac{w_b}{\rho_b A_s} \quad (4)$$

由式 (4) 可见,  $t/d \propto d^{-0.863}$ , 结合水膜与颗粒粒径的比值随粒径减小而显著增大, 从而可减小土体的有效渗流孔隙, 影响土体渗透性及力学性质。

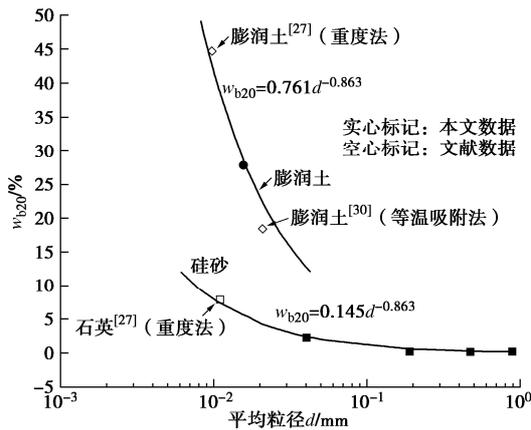


图 3 散状硅砂及膨润土吸附结合水含量与颗粒粒径关系

Fig. 3 Relationships between absorbed bound water content and particle size for dispersed samples of bentonite and siliceous sand

### 2.2 成型土吸附结合水含量及土样组份的影响

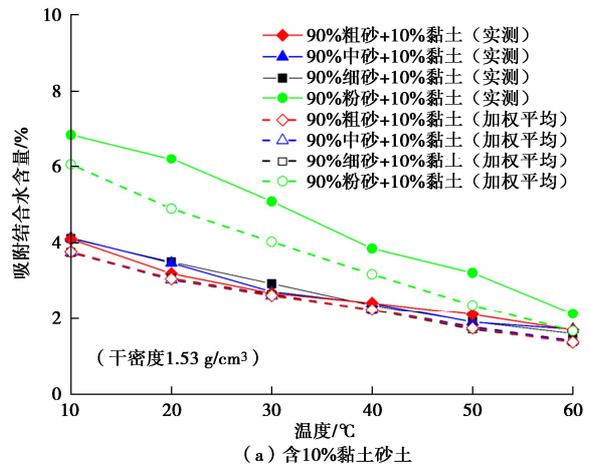
为了验证实际土体中颗粒间相互作用等因素对吸附结合水含量的影响, 本试验同时给出了不同颗粒组份成型土样(除特别说明外, 干密度均控制为  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ) 的吸附结合水含量。依赖于温度和组份的差异, 各试样的饱和和总含水率的变化区间分别为  $26\% \sim 29\%$  (干密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$  混合土样和纯黏土土样) 和  $72\% \sim 78\%$  (干密度  $0.93 \text{ g/cm}^3$  纯黏土土样)。记土样中某组份的单位质量土粒吸附结合水质量为  $w_b^i$  (由 2.1 节中散状土样测定), 则当各组份吸附结合水过程相互独立、不受土体微观结构的影响时, 土体吸附结合水含量可表示为各组份  $w_b^i$  的质量加权平均, 即

$$w_b = \sum_{i=1}^N \theta_i w_b^i \quad (5)$$

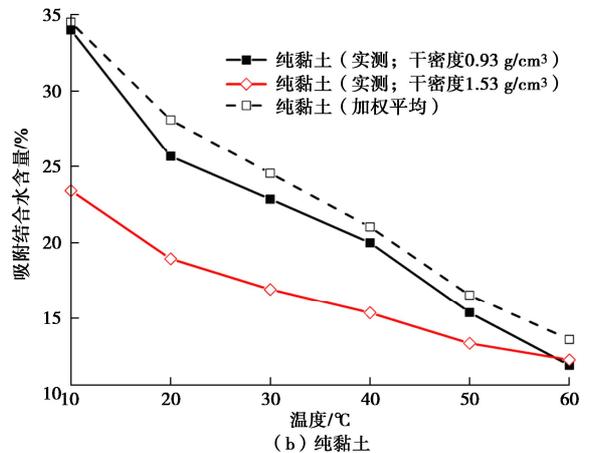
式中:  $N$  为组份数量;  $\theta_i$  为第  $i$  组份的质量分数。图 4 (a) 为 90% 不同粒径砂土-10% 黏土混合成型土样的吸附结合水含量与温度的实测关系曲线 (实线) 和由式 (5) 得到的加权平均关系曲线 (虚线)。各试样吸附结合水含量依赖于温度和组份, 但均不超过饱和和总含水率。与图 2 (b), (c) 相比, 10% 黏粒的加入明显提高了砂土的吸附能力。对于粗砂、中砂和细砂与黏土的混合土样, 结合水含量及其与温度的关系主要受黏粒控制; 而粉砂自身具有一定的吸附结合水能力,

在 10% 黏粒掺量下, 其吸附结合水量同时受砂粒与黏粒的影响。对于所有含 10% 黏粒的试样, 各温度下实测结合水含量值均高于加权平均值; 其中以含黏粉砂尤为显著。与此不同的是, 纯黏土试样实测结合水含量低于加权平均值, 且试样密度越高, 偏低越为显著, 如图 4 (b)。

在砂-黏混合土中, 砂粒接触处形成较为狭窄的楔形区域, 该区域内及邻近的水分子受到两个颗粒表面静电引力场的叠加作用; 此外, 较细小的黏粒可附着于砂粒表面或填充于砂粒接触区域, 从而形成砂粒-黏粒与孔隙水分子间的协同作用, 增大砂粒表面吸附结合水的能力。这是图 4 (a) 中结合水含量实测值高于加权平均值的重要原因。另一方面, 当邻近土颗粒表面的双电层结构互相嵌入, 不同颗粒作用在水分子上的静电引力方向呈钝角时, 一部分静电引力将相互抵消, 从而降低结合水吸附量。当颗粒间孔隙小至无法容纳单个颗粒所能吸附的最大结合水量时, 土体 (整体或局部) 的孔隙体积即决定了结合水吸附量的极限。



(a) 含 10% 黏土砂土



(b) 纯黏土

图 4 含 10% 黏土砂土(a)及纯黏土(b)结合水含量随温度变化

Fig. 4 Variations of bound water content with temperature for packed (a) sand samples with clay of 10% and (b) pure clays

上述结合水吸附量发生折减的现象主要出现在具有较大吸附力影响范围、结合水膜相对厚度较大且往往呈团簇状的板状黏粒之间。譬如对于图 4 (b) 所示干密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$  纯黏土试样, 较低温度下由散状颗粒确定的吸附结合水含量已超过 ( $10^\circ\text{C}$ ) 或接近 ( $20^\circ\text{C}$ ) 试样自身的饱和总含水率, 因而其实测吸附结合水含量明显低于加权平均值, 此时试样孔隙水主要以结合水为主。而即便对于孔隙较为充足的松散黏土 (图 4 (b) 中干密度  $0.93 \text{ g/cm}^3$  纯黏土试样), 结合水含量实测值也低于组合值。更一般地, 对于砂-黏混合土, 随着黏粒含量的增加, 结合水含量实测值也逐渐由高于向低于加权平均值变化。如图 5 (a) 所示, 对于细砂-黏土混合试样, 上述变化趋势的临界黏粒含量约为 12.5%, 受温度影响较小。图中,  $\varepsilon(w_b)$  为结合水含量实测值与加权平均值的差值, 即  $\varepsilon(w_b) = w_{b\text{实测}} - w_{b\text{加权}}$ , 各温度下细砂-黏土混合试样吸附结合水含量实测值见图 5 (b)。各温度下,  $\varepsilon(w_b)$  均与黏粒含量近似呈线性关系; 温度越大, 加权平均值的绝对误差越小。当黏粒含量较大时, 土体吸附结合水能力的温度敏感性更为显著, 温度-结合水含量曲线斜率绝对值更大 (如图 5 (b))。

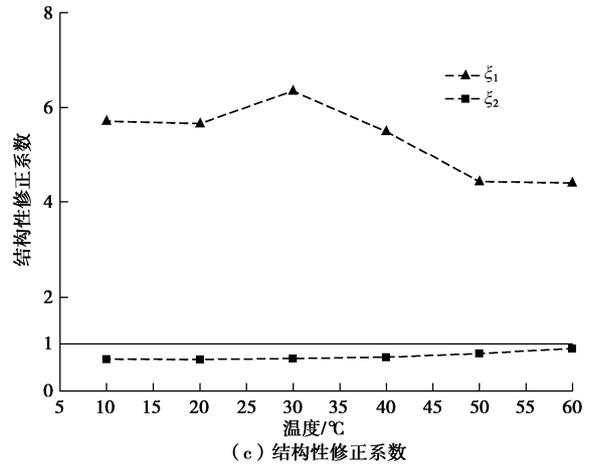
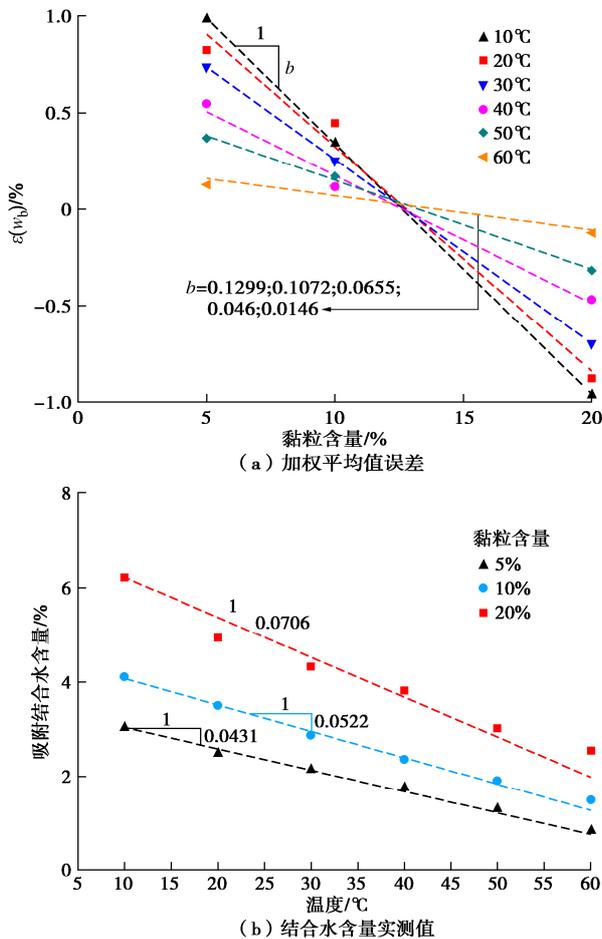


图 5 细砂-黏土混合土样结合水含量-温度关系

Fig. 5 Relationships between bound water content and temperature for fine sand-clay mixtures

因而, 上述不同土颗粒及水分子间的物理化学相互作用及土体孔隙对吸附结合水含量的影响不可忽略, 且其影响具有双向性, 与颗粒粒径及黏粒含量密切相关。从而, 散状土比重瓶法可能明显低估低黏粒含量砂土的土体结合水含量, 而高估高黏粒含量砂-黏混合土及黏土的结合水含量。相应地, 式 (5) 应进一步引入对土体微观结构性的考虑, 譬如

$$w_b = \sum_{i=1}^N \theta_i \xi_i (d_i, e, T) w_b^i \quad (6)$$

式中:  $\xi_i$  为第  $i$  相结合水含量的结构性修正系数, 应为相应组份粒径  $d_i$ 、土样孔隙比  $e$  和温度  $T$  的函数。

对于砂-黏混合土体,  $N = 2$ ; 记  $i = 1$  和  $2$  分别为砂土相和黏土相, 则  $\xi_1 (>1)$  和  $\xi_2 (<1)$  分别表征土体微观结构性引起的砂粒和黏粒吸附结合水能力的增大和降低。其中,  $\xi_2$  与黏粒含量基本无关。注意到  $\varepsilon(w_b)$  与 5%~20% 范围内黏粒含量成线性比例关系 (图 5 (a)), 因此可假定黏粒含量大于 5% 时同一温度下结构性修正系数近似为常数。根据散粒土和成型土结合水含量测试结果 (图 1, 5 (b)), 由式 (6) 可计算得到细砂-黏土混合土样的结构性修正系数如图 5 (c) 所示。总体上,  $\xi_1$  和  $\xi_2$  随温升分别呈下降和上升趋势, 表明升温可减弱结合水含量的微观结构性效应。而在较低温度范围内 ( $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ),  $\xi_1$  呈随温升有所增大, 这可能是由于升温时吸附结合水膜厚度减小导致黏土颗粒与砂粒的结合更为紧密, 增强了后者的吸附能力。

图 6 为不同温度下各试样吸附结合水含量与黏粒含量的关系。当黏粒含量从 5% 降低至 0% 时, 黏粒对砂粒的包裹和填充效应将迅速削弱。相应地, 结构性系数  $\xi_1$  将由图 5 (c) 所示水平快速下降至接近 1 的小

值。这对应于图 6 中黏粒含量 0%~5%范围内吸附结合水含量随黏粒含量显著的非线性增长。总体而言, 各温度下吸附结合水含量与黏粒含量成幂函数关系, 温度越低, 吸附结合水含量对黏粒含量的依赖性越高。在温度荷载及恒定外部应力共同作用下, 结合水含量的降低及结合水膜厚度的减小可改变颗粒体系内的力链平衡状态、引起颗粒重组运动, 从而导致土体热固结的产生。因此, 上述吸附结合水含量测试分析将有助于更深入理解土体热固结机制<sup>[3, 5, 18]</sup>以及建立有效的土体热-力耦合模型。

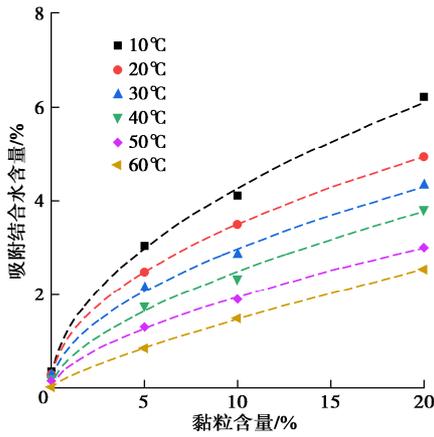


图 6 不同温度下黏粒含量对细砂结合水含量的影响

Fig. 6 Effects of clay content on bound water content of fine sands at different temperatures

### 3 非等温渗透试验结果分析

本文对表 2 中成型纯细砂、纯黏土及细砂-黏土混合饱和土样, 在完成吸附结合水测试后同时进行相应温度下的渗透试验, 以揭示土体渗透系数温度效应的机理, 尤其是其与结合水含量变化之间的关系, 以及土体密实度和黏粒含量的影响。渗透试验工况见表 2, 共包括 9 组 54 个试样 (“PS” 试样), 每组试样均对应 10°C~60°C 6 个温度值。本节图中未注明干密度值的试样, 干密度均为 1.53 g/cm<sup>3</sup>。

图 7 为不同温度下砂土(黏粒含量 0%)、黏土(黏粒含量 100%)及砂-黏混合土样渗透系数试验结果。可见, 温升导致各试样渗透系数显著提高; 黏粒含量越高, 在相同的温升幅值下, 更多的结合水转化为自由水, 因而渗透系数的上升趋势也越为显著(如图 7 (a))。对于纯黏土, 在 40°C~60°C 范围内, 渗透系数随温度呈指数上升; 对于纯砂土, 渗透系数增长则较为缓慢, 如图 7 (b)。如图 7 (c), 较小的黏粒含量也可对砂土渗透性产生显著的影响, 5%黏粒含量使渗透性下降了两个数量级。这与 5%黏粒下显著的结合水含量增长(图 6)以及黏粒在砂土孔隙中的填充有

关, 二者均减小了土体有效孔隙及其连通性。在黏粒含量 5%~100%范围内, 渗透系数对数值与黏粒含量基本呈线性关系。由于高温时较低的结合水含量, 相同黏粒含量增量下, 温度越高渗透系数降低幅度越小, 如图 7 (c)。上述试验结果说明非等温条件下, 需综合考虑土体微观结构及不同颗粒组份与结合水间的相互作用对土体渗透性的影响。

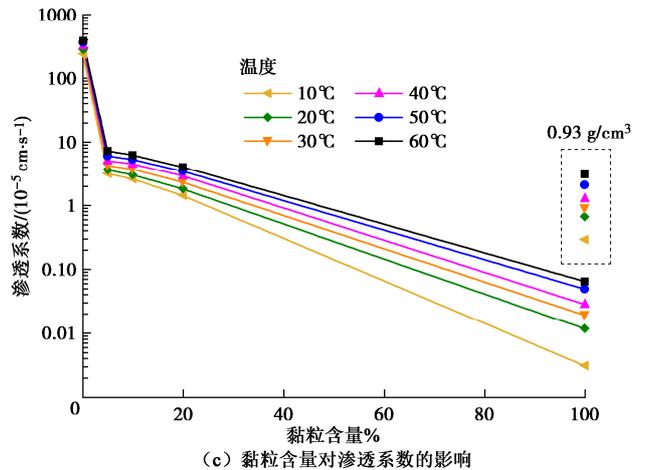
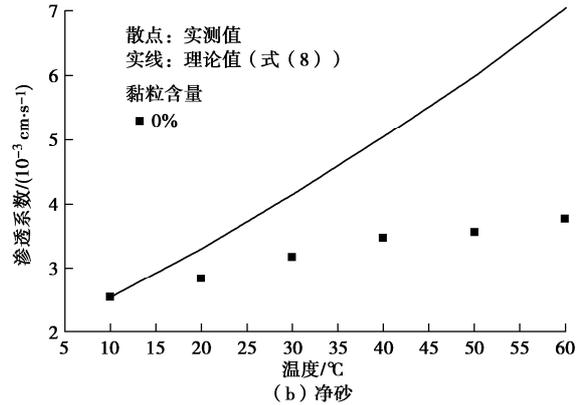
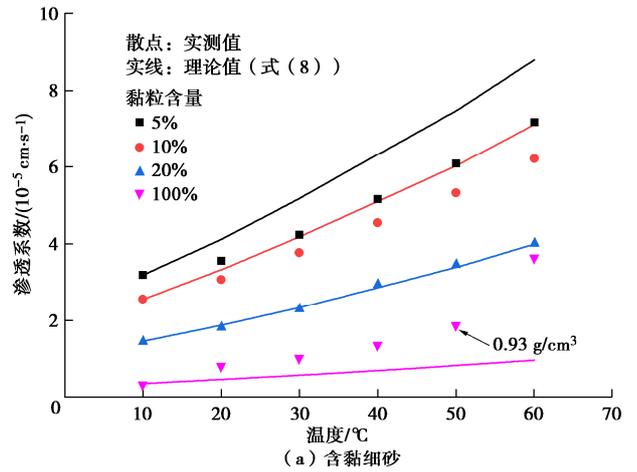


图 7 非等温条件下细砂渗透系数

Fig. 7 Coefficients of permeability under non-isothermal conditions

在经典渗流理论中, 渗透系数通常可表示为土骨架本征渗透率  $\kappa$  以及孔隙水(自由水)密实度  $\rho_f$  (见

表2)和动力黏度 $\mu_f$ 的函数,即

$$K = \kappa \rho_f g / \mu_f = \kappa g / \nu_f \quad (7)$$

式中: $g$ 为重力加速度; $\nu_f$ 为自由水运动黏度。以 $T_0 = 10^\circ\text{C}$ 时各黏粒含量土样的渗透系数为已知参考值,由式(7)可得温度 $T$ 下的渗透系数可表示为

$$K_T = K_{T_0} \frac{\kappa_T \nu_{fT_0}}{\kappa_{T_0} \nu_{fT}} \quad (8)$$

式中:符号下标的“ $T$ ”和“ $T_0$ ”分别指代相应量在当前温度和参考温度下的值。自由水的运动黏度与温度的关系通常可表示为<sup>[32]</sup>

$$\nu_f = \frac{0.01775}{1 + 0.033T + 0.000221T^2} \quad (9)$$

显然,式(8)未考虑结合水及其温度效应的影响,其对应的渗透系数理论值见图7(a),(b)。升温条件下,渗透性的结合水温度效应主要体现在3个方面:①通过结合水含量的减小,直接增大渗流有效孔径以及孔隙的连通性;②结合水膜厚度变化诱发热固结现象,通过孔隙减小间接引起渗透系数降低;③在高温及低结合水含量状态下,靠近颗粒表面处自由水的流动直接受到粗糙颗粒表面的阻滞,降低土体渗透系数。本文试验中,各试样的饱和及测试过程均在目标温度下进行,未经历显著的变温过程,且试样未受到外部应力作用。根据热固结相关试验及理论<sup>[3,5]</sup>,基本可排除明显热固结对本试验的影响。因而,本文分析中可仅考虑温度效应①和③,后者在理论上可等效为骨架本征渗透率或者孔隙水平平均运动黏度的变化。对于在高温下仍可保持较高结合水含量的黏土及高黏粒含量土体,前者的影响甚于后者,较高温下渗透系数随温升快速增长。因此,忽略结合水效应的渗透系数理论值将明显偏低(如图7(a)中纯黏土)。而随着黏粒含量的降低,前者的影响逐渐减弱;当上述两者的影响相当时,实测渗透系数将与由式(8)所得理论值相吻合,如图7(a)中含20%黏粒土样。黏粒含量低于20%时,结合水含量降低,效应③逐渐占据主导,降低了渗透系数随温度的增长趋势,从而使理论值高估了升温下的渗透系数,如图7(a),(b)。

图8进一步给出了不同干密度下含10%黏粒饱和和细砂的渗透系数随温度变化的实测值和理论值。显然,干密度对温度-渗透系数关系曲线斜率的影响较为明显,干密度越小曲线斜率越大。这表明松散土渗透性相较于密实土对温度的依赖性更为显著,这是由于松散土孔隙中自由水所占比例更大,升温时由自由水运动黏度降低引起的渗透性提高更为显著。如图5(a)所示,对于10%黏粒含量土样,相比散状土样,土体结构性效应引起吸附结合水量的增大,因而其结合水含量将随密实度增大而提高;相应地,温度效应①引

起的渗透性增长将更大程度上抵消效应③引起的渗透性削弱,使得密实土样渗透系数实测值更接近理论值,如图8所示。同理可解释渗透系数实测值与理论值吻合的临界黏粒含量从松散土样的20%(图7(a))降低至较密实土样的10%(图8中干密度 $1.6\text{ g/cm}^3$ 试样)。

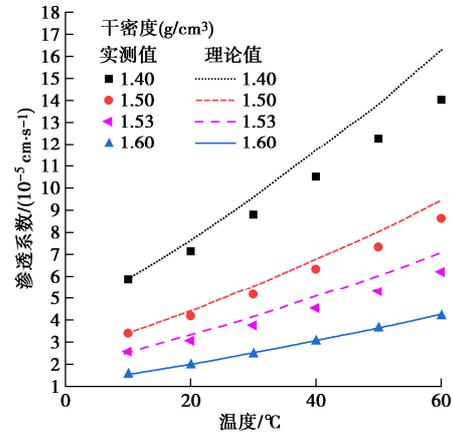


图8 干密度对不同温度下含10%黏粒细砂渗透系数的影响  
Fig. 8 Effects of dry density on coefficient of permeability of fine sand with clay of 10% at different temperatures

为了说明吸附结合水含量 $w_b$ 对饱和土渗透性的影响,可定义孔隙水等效运动黏度 $\bar{\nu}_w$ 为孔隙内吸附结合水层和自由水层的体积分数加权平均值:

$$\bar{\nu}_w = (\phi_f \nu_f + \phi_b \bar{\mu}_b / \rho_b) / (\phi_f + \phi_b) \quad (10)$$

式中: $\bar{\mu}_b$ 为吸附结合水层的平均动力黏度; $\phi_f$ 和 $\phi_b$ 分别为吸附结合水和自由水的体积分数,按下式确定:

$$\phi_f = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \frac{\rho_d}{\rho_b} w_b \quad (11a)$$

$$\phi_b = \frac{\rho_d}{\rho_b} w_b \quad (11b)$$

式中:吸附结合水密度 $\rho_d$ 按表3确定; $\rho_d$ 为土样干密度,各温度下不同试样的 $w_b$ 由第2节中试验结果确定。为简化起见,本文仅考虑吸附结合水。

图9为各温度下不同试样实测渗透系数 $K$ 与 $\bar{\nu}_w$ 及土体总孔隙率 $n$ ( $n = \phi_f + \phi_b$ )之间的关系,其中 $\bar{\mu}_b$ 取为 $880\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (根据 $20^\circ\text{C}$ 下各试样实测渗透系数进行标定)。可见, $K/n$ 与 $\bar{\nu}_w$ 之间存在明确的对应关系,渗透系数随着 $\bar{\nu}_w$ 的增大而显著减小。 $\bar{\nu}_w$ 的大小综合反映了温度对自由水动力黏度以及吸附结合水含量的影响,这也从侧面映证了本研究中吸附结合水含量随温度变化规律的合理性。由第2节的分析,后者又密切依赖于温度、黏粒含量和土样密实度。如图9,砂-黏混合土样及纯黏土的 $\ln(K/n)$ 值与 $\bar{\nu}_w$ 整体上存在唯一的线性关系;而从纯砂土至5%含黏量范围内, $\ln(K/n)$ 值呈快速下降趋势,这与图7中渗透系数的变化规律相对应,可能与低黏粒含量下砂土孔隙结构及渗流孔道迂曲程度的显著变化有关。

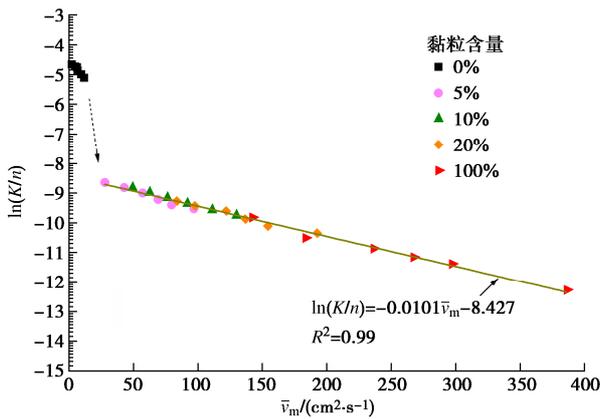


图9 实测渗透系数与孔隙水等效运动黏度及孔隙率的关系

Fig. 9 Relationship among coefficient of permeability and porosity of soils and equivalent kinematic viscosity of pore water

## 4 结 论

本文通过土体结合水含量及渗透性温控试验深入研究了饱和砂土、黏土和不同含黏量砂-黏混合土中吸附结合水含量以及渗透系数与温度之间的关系, 并揭示二者间的内在联系和机理, 得到以下3点结论。

(1) 土粒吸附结合水能力与粒径呈反比, 相同粒径下黏粒吸附结合水含量显著高于砂粒。总体上, 非等温条件下土粒吸附结合水含量可表示为温度的指数衰减函数。成型土吸附结合水含量随温度的变化趋势整体上与散状土样类似, 并依赖于土体的黏粒含量; 黏粒含量越大, 单位温升引起的结合水含量降低越为显著。在各温度下, 结合水含量与黏粒含量成幂函数非线性关系, 在0%~5%黏粒含量范围内单位黏粒含量增量引起的结合水含量增大最为显著。

(2) 依赖于黏粒含量, 成型饱和土吸附结合水量受到粒间相互作用及孔隙的显著影响, 其机理受多物理过程影响, 可增强砂土及低含黏土而降低或限制纯黏土及高含黏土的结合水吸附作用。在5%~20%黏粒含量范围内, 成型土与散状土吸附结合水量的差值与黏粒含量成线性关系并与温度值成反比, 黏粒含量达到临界值(约12.5%)时, 两者基本一致。采用散状土样测试结果计算成型土结合水含量时, 需分别考虑砂粒相和黏粒相吸附结合水的结构性修正系数。

(3) 升温将引起土体渗透系数不同程度的增大, 这与升温下自由水运动黏度和吸附结合水含量的降低等因素密切相关, 后者又依赖于黏粒含量和土体孔隙率。非等温条件下土体渗透性需综合考虑土体微观结构性及不同颗粒组份与结合水之间的相互作用。较低黏粒含量即可显著降低饱和砂土渗透系数, 且温度越高黏粒含量对渗透性的影响越小。忽略结合水含量及其温度效应将分别高估和低估低黏粒含量和高黏粒含量土体的渗透性随温度的变化程度。此外, 松散土渗

透性相较于密实土具有更显著的温度依赖性。

## 参考文献:

- [1] STEPKOWSKA E T, PÉREZ-RODRÍGUEZ J L, MAQUEDA C, et al. Variability in water sorption and in particle thickness of standard smectites[J]. *Applied Clay Science*, 2004, **24**(3/4): 185-199.
- [2] LIU K Q, JIN Z J, ZENG L B, et al. Determination of clay bound water in shales from NMR signals: the fractal theory[J]. *Energy & Fuels*, 2021, **35**(22): 18406-18413.
- [3] DRNEVICH P V, TIDFORS M, SÄLLFORS G. Temperature effect on preconsolidation pressure[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1989, **12**(1): 93.
- [4] 白冰, 苏钟琴, 杨海朋. 一种饱和粉质黏土的热固结特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(1): 12-16, 23. (BAI Bing, SU Zhongqin, YANG Haipeng. Experimental study of thermal consolidation of a saturated silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(1): 12-16, 23. (in Chinese))
- [5] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(2): 343-354.
- [6] KONG G Q, FANG J C, LV Z X, et al. Effects of pile and soil properties on thermally induced mechanical responses of energy piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, **154**: 105176.
- [7] 孙军杰, 田文通, 刘琨, 等. 基于泊肃叶定律的土体渗透系数估算模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(1): 150-161. (SUN Junjie, TIAN Wentong, LIU Kun, et al. Estimation model of soil permeability coefficient based on Poiseuille's law[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(1): 150-161. (in Chinese))
- [8] HABIBAGHI K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 1977, **7**(1): 14-34.
- [9] PUPPALA A J, PUNTHUTAECHA K, VANAPALLI S K. Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(6): 736-751.
- [10] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1971, **19**(3): 151-158.
- [11] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay[J]. *Soils and Foundations*, 1995, **35**(1): 147-162.

- [12] MORITZ L. Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperature[R]. Linköping: Swedish Geotechnical Institute, 1995.
- [13] MORIN R, SILVA A J. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(B1): 511.
- [14] 肖树芳, 房后国, 王清. 软土中结合水与固结、蠕变行为[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(4): 531-535. (XIAO Shufang, FANG Houguo, WANG Qing. The bound water, consolidation and creep behavior of soft soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(4): 531-535. (in Chinese))
- [15] CHEN J, ANANDARAJAH A, INYANG H. Pore fluid properties and compressibility of kaolinite[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(9): 798-807.
- [16] LI S, WANG C M, ZHANG X W, et al. Classification and characterization of bound water in marine mucky silty clay[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(5): 2509-2519.
- [17] WANG H K, QIAN H, GAO Y Y, et al. Classification and physical characteristics of bound water in loess and its main clay minerals[J]. *Engineering Geology*, 2020, **265**: 105394.
- [18] MORTEZA ZEINALI S, ABDELAZIZ S L. Thermal consolidation theory[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, **147**(1): 04020147.
- [19] 张志超, 程晓辉. 饱和土非等温固结和不排水剪切的热力学本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(7): 1297-1306. (ZHANG Zhichao, CHENG Xiaohui. Thermodynamic constitutive model for non-isothermal consolidation and undrained shear behaviors of saturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(7): 1297-1306. (in Chinese))
- [20] 王媛, 施斌, 高磊, 等. 黏性土渗透性温度效应实验研究[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))
- [21] TENG Y, LI Z, ZHENG W, et al. Role of Temperature on Threshold Gradient and Permeability of non-Darcian Flow in Sand and Clay Mixtures[C]// Brussels: InterPore 2020, 2020.
- [22] GATMIRI B, DELAGE P. A formulation of fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of saturated porous media—numerical approach[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(3): 199-225.
- [23] 李生林. 土中结合水译文集[M]. 北京: 地质出版社, 1982. (LI Shenglin. . The Translations of Soil Bound Water[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982. (in Chinese))
- [24] LEE D J, LEE S F. Measurement of bound water content in sludge: the use of differential scanning calorimetry (DSC)[J]. *Journal of Chemical Technology AND Biotechnology*, 1995, **62**(4): 359-365.
- [25] LI Y L, WANG T H, SU L J. Determination of bound water content of loess soils by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis[J]. *Soil Science*, 2015, **180**(3): 90-96.
- [26] 宋功保, 张建洪, 郭颖, 等. 海泡石中水的红外光谱及其结构稳定性的指示作用[J]. *岩石矿物学杂志*, 1999, **18**(1): 80-86. (SONG Gongbao, ZHANG Jianhong, GUO Ying, et al. Infrared spectrum of water in sepiolite and its role of indicating structural stability[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1999, **18**(1): 80-86. (in Chinese))
- [27] 胡湘锋. 黏土中水的形态对其工程性质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. (HU Xiangfeng. A Study on the Influence of Water's State in Clay on Its Engineering Properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [28] De WIT C T, ARENS P L. Moisture content and density of some clay minerals and some remarks on the hydration pattern of clay[C]//Transactions of the International Congress of Soil Science. Amsterdam, 1950.
- [29] MACKENZIE R C. Density of water sorbed on montmorillonite[J]. *Nature*, 1958, **181**(4605): 334.
- [30] 焦文灿. 广西北部湾海积软土结合水特性及蠕变释水机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021. (JIAO Wencan. Reasarch on the Characteristics of Bound Water and Wate Release Mechansim of Creep of Marine Soft Soil in the Bbeibu Gulf of Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese))
- [31] HIEBL M, MAKSYMOW R. Anomalous temperature dependence of the thermal expansion of proteins[J]. *Biopolymers*, 1991, **31**(2): 161-167.
- [32] KATOPODES N D. Free-Surface Flow: Environmental Fluid Mechanics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.