

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.06.007

不同养护条件下黏土热力学性质试验

肖勇杰

(福州职业技术学院 建筑工程学院, 福州 350108)

摘要: 温度对土的物理力学特性有较大影响, 对黏土开展了不同养护条件下的温控三轴试验, 研究了黏土在不同温度、不同时间下的热力学特性。试验结果表明: 黏土具有热固结性质, 随着温度的增加, 黏土的固结速度加快, 试验固结时间呈下降趋势; 在临界温度以下, 土体应力-应变曲线呈现软化特性, 为脆性破坏; 在临界温度以上, 土体应力-应变曲线呈现硬化特性, 为塑性破坏; 黏土具有类似于混凝土“养护温度”的性质, 即同一温度作用下, 养护时间越长, 主应力差越大; 黏聚力在临界温度范围以内, 随温度升高而降低, 而在临界温度以上, 随温度升高而增大; 内摩擦角在临界温度范围以内, 基本不受温度变化的影响, 而在临界温度以上, 内摩擦角随温度增加而增大; 黏土强度随养护时间的增长过程分为快速增长阶段、较快增长阶段、缓慢增长阶段, 其最佳养护时间为快速增长阶段和较快增长阶段。

关键词: 黏土; 热力学; 温控三轴试验; 养护; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)06-068-07

Experimental study on thermomechanical behaviour of clay under different curing conditions

XIAO Yongjie

(School of Architectural Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: The physical and mechanical properties of soil are greatly influenced by temperature. Triaxial tests under different curing conditions were carried out on clay to investigate its thermomechanical behavior. This paper presents the findings of a laboratory investigation into the thermomechanical behavior of clay. Experimental results show that clay exhibits thermal consolidation properties. As temperature increases, the consolidation speed of clay accelerates, and the consolidation time shows a decreasing trend. Below the critical temperature, the stress-strain curve of the soil presents softening characteristics and brittle failure. Above the critical temperature, the stress-strain curve shows hardening characteristics and plastic failure. Clay exhibits a behavior similar to the “curing temperature” of concrete, where a longer curing time results in a greater principal stress difference. Within the critical temperature range, cohesion decreases with increasing temperature, while above the critical temperature, cohesion increases with temperature. Within the critical temperature range, the internal friction remains unaffected by temperature changes. However, above the critical temperature, the internal friction increases with temperature. The strength development of clay with curing time is divided into rapid growth,

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J05128); 福建省中青年骨干教师教育科研资助项目(JZ230082)。

Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (2019J05128) and Young and Middle-aged Teachers Education Scientific Research Project of Fujian Province (JZ230082).

作者简介: 肖勇杰(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土力学与基础工程方向研究, (E-mail)xiao_yongjie@126.com。

followed by a stage of less rapid growth and slow growth. The optimal curing time occurs during these rapid growth stages.

Keywords: clay; thermomechanical behaviour; temperature control triaxial test; curing; cohesion; internal friction

土体热力学特性在一些工程应用中起到主导地位,如地热结构的热交换桩、油砂提取烃类物质、放射性废弃物处理、城市“热岛”效应等^[1]。这些工程中,土体温度变化可以达到30℃以上。由于热效应引起的工程地质问题越来越多,许多学者开展了土体热力学特性的研究。Demars等^[2]研究发现在排水条件下黏土温度的上升会引起体缩现象。Towhata等^[3]研究表明正常固结黏土表现出热收缩行为,而超固结黏土则表现为热膨胀行为。Hueckel等^[4]进行了各向异性应力状态条件下热诱导体积变化的研究。Burghignoli等^[5]研究表明不同温度下的压缩曲线相互平行,且土体温度越高,孔隙比越小。上述研究侧重点是温度对土体体变的影响,而未深入探讨土体的热力学特性。

Cekerevac等^[6]开展了常温以上(22~90℃)饱和黏土的热力学特性,对于低温环境下黏土的热力学特性有待进一步研究。欧孝夺等^[7]通过三轴试验研究膨胀土与红黏土的热力学特性,探讨了红黏土与膨胀土的抗剪强度指标与温度之间的相关关系。该研究通过将试样静置在恒定温度的密闭容器中模拟温度因素,达到静置时间后再将试样安装到三轴仪器上进行不固结不排水(UU)试验。采用这种方法易对试样造成损害,产生试验误差,且只能进行不固结不排水(UU)试验。范高飞等^[8]和陆嘉楠等^[9]对黏土进行了温控三轴剪切试验。

上述研究成果从不同角度反映了黏土服役温度下的热力学特性。但实际工程中,黏土需在一定条件下静置一段时间(定义该过程为“养护”)才承受外部荷载,对于不同养护条件下黏土的热力学特性的研究甚少。笔者通过开展黏土在不同养护条件(不同温度、不同时间)下的温控三轴试验,探讨黏土的热力学特性,尝试从热力学试验角度进行黏土力学特性的研究。

1 试验简介

1.1 试验仪器

试验采用全自动岩土温度-渗透-应力-化学耦合多功能三轴试验系统进行固结排水(CD)试验,如图1所示,其主要由主机系统、温度控制系统、压力体积控制器、数据采集系统4个部分构成。该试验设备能够模拟环境温度(-20~80℃)变化、保持土壤化学成分和化学元素含量不变的前提条件下,对土壤的物理力学性能和渗透特性进行研究;实现环境温度变化和土壤化学元素迁移条件下,土壤的物理力学特性和渗透特性的研究;完成化学场、温度场、渗流场和应力场任意组合条件下,土壤相关特性的试验。

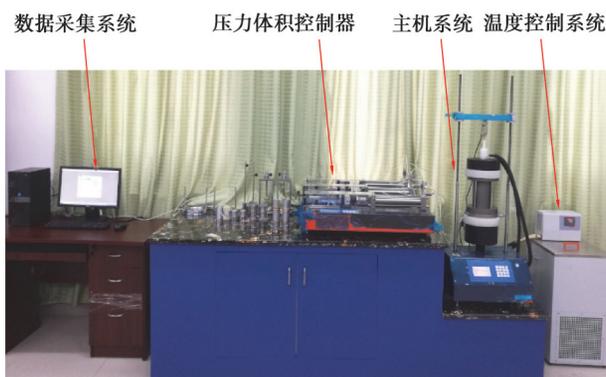


图1 试验仪器

Fig. 1 The apparatus for the test

1.2 试样制备

试验所采用土样为福建地区的黏土,土样的物理性质指标如表1所示,试样直径39.1 mm、高80 mm。

表1 土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil

含水量 ω /%	孔隙比 e	容重 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p
36.69	0.93	17.51	46.93	25.78	21.15

1.3 试验方案

1)饱和:试样装好后,进行温度控制,将压力室水温分别设置为1、5、10、20、40、60、80 °C,对试样进行反压饱和,当孔压系数 B 值达到0.98以上,认为试样饱和。

2)固结:将试样分别在围压100、200、300 kPa的条件下进行排水固结,待试样的固结度达到95%以上时,认为固结完成。

3)养护:固结完成后,试样在目标温度下进行养护,养护时间分别为0、30、60、90 h。

4)剪切:在目标温度下,对试样进行连续加载,剪切速率为0.5%/min,直至试样破坏或应变量进行到20%。

2 试验结果及分析

2.1 固结时间

图2为试样反压饱和后,试样固结时间与温度的关系曲线。试验结果表明:1)黏土存在“热固结”现象,即随着温度的增加,黏土的固结速度加快,试验固结时间呈下降趋势。分析其原因,温度的升高会降低水的动力黏滞系数^[10],及引起矿物颗粒的热膨胀^[11],从而诱使土体的渗透系数增大。2)显然围压的增大能够缩短试样的固结时间,与现有研究结论一致^[12-14]。

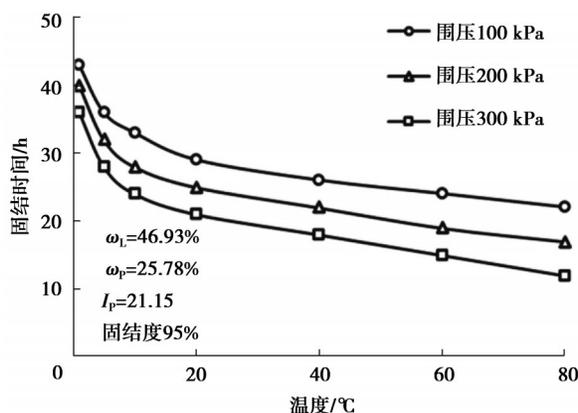


图2 试样固结时间与温度的关系

Fig. 2 Relationship between consolidation time and temperature

2.2 主应力差

在围压200 kPa、养护时间0 h的情况下,开展不同温度条件的三轴试验,绘制主应力差与应变的关系曲线,如图3所示。从图中得到如下规律:1)存在某一“临界温度”(10 °C左右),在临界温度以下(1~10 °C),土体应力-应变曲线呈现软化特性,为脆性破坏;在临界温度以上(10~80 °C),土体应力-应变曲线呈现硬化特性,为塑性破坏。这和霍明等^[15]研究土的破坏形式(土温低,多成脆性破坏;土温高,成塑性破坏)的描述是一致的。需要说明的是,由于温度对土性的影响非常复杂,临界温度也因土体的差异而不同。2)在临界温度以下,土体应力-应变曲线形态基本相同。在1 °C时,破坏时应力峰值为520 kPa,对应的应变在11.7%;在5 °C时,破坏时应力峰值为489 kPa,对应的应变为13.1%。说明在临界温度以下,随着温度的降低,黏土的脆性增

加。这种现象主要是由于低温情况下黏土的黏聚力增大,从而增强土体的强度。3)在临界温度以上,土体应力-应变曲线形态基本相同。温度 $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主应力差随温度升高增长幅度较小;温度 $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主应力差随温度升高而明显增大。说明高温条件下,黏土的塑性较大,其强度也会增大。

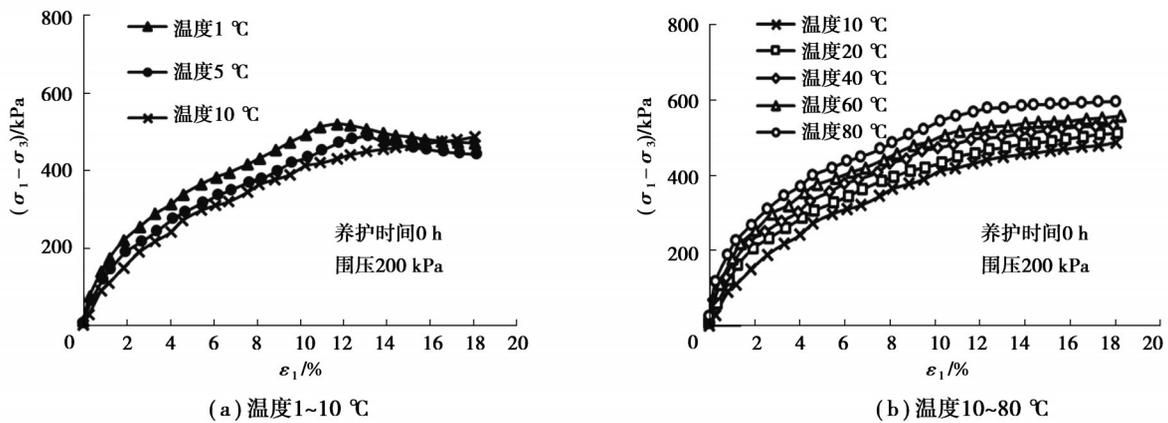


图3 不同温度条件下主应力差与应变关系

Fig. 3 Relationship between strain and principal stress difference at different temperature

进一步开展不同养护时间条件下三轴试验,试验结果如图4所示。研究表明:黏土具有类似于混凝土“养护温度”的性质,即同一温度作用下,养护时间越长,主应力差越大。这是由于温度效应的累积造成的^[16]。

在养护时间30 h内,主应力差受温度影响较显著,养护时间超过30 h后,主应力差增势减弱。说明养护时间对黏土强度影响主要集中在养护前期。

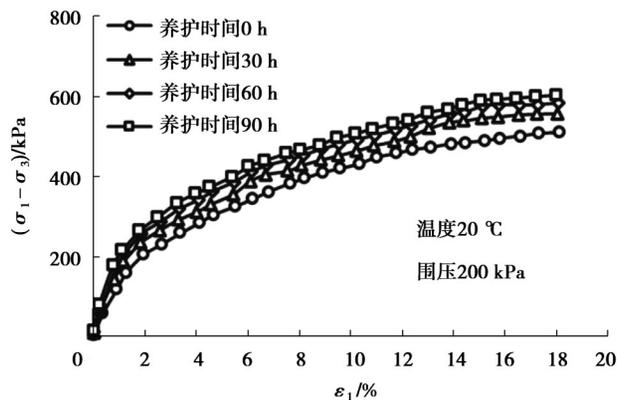


图4 不同养护时间下主应力差与应变关系

Fig. 4 Relationship between strain and principal stress difference at different curing time

2.3 黏聚力

通过三轴试验结果计算出黏聚力,并绘出黏聚力与温度的关系曲线,如图5所示。结果表明:1)黏聚力与温度之间的关系呈抛物线的关系。2)在临界温度范围以内,养护时间相同的情况下,黏聚力随温度升高而降低。这是因为低温环境下,黏土颗粒附近的黏滞水膜会增厚,诱使黏土可塑性增强,从而提高土体黏聚力^[17]。3)在临界温度以上,养护时间相同的情况下,黏聚力随温度升高而增大。原因是黏土中的黏土矿物、盐类和水发生物理化学反应,生成难溶的结晶或沉淀物,且某些离子、元素从水溶液渗入到土体孔隙中或晶格体上,从而提高黏土的胶结作用^[18]。

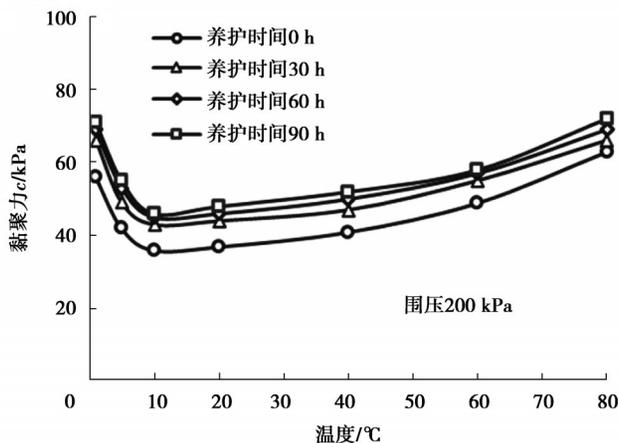


图5 黏聚力与温度关系

Fig. 5 Relationship between cohesion and temperature

从图5还可发现,在相同温度情况下,黏聚力随养护时间增长而逐渐增大。进一步将温度20 °C、围压200 kPa条件下,计算出养护时间分别为0、30、60、90、120、150、180 h的黏聚力,如图6所示。试验结果表明: 1)黏聚力与养护时间密切相关。根据黏聚力的增长速度,将黏聚力随养护时间的增长过程分为快速增长阶段、较快增长阶段、缓慢增长阶段。在养护前期(养护时间0~30 h范围内),黏聚力随养护时间基本呈线性增长,处于快速增长阶段;在养护中期(养护时间30~90 h范围内),黏聚力随养护时间的增长速度减慢,由快速增长阶段过渡到较快增长阶段;在养护后期(养护时间超过90 h),黏聚力随养护时间的增长趋势趋于水平,由较快增长阶段过渡到缓慢增长阶段。2)黏聚力对应于快速增长阶段、较快增长阶段、缓慢增长阶段的增长率分别为55%、34%、11%。由此可知,存在适合黏土的黏聚力增长的最佳养护时间(快速增长阶段和较快增长阶段)。

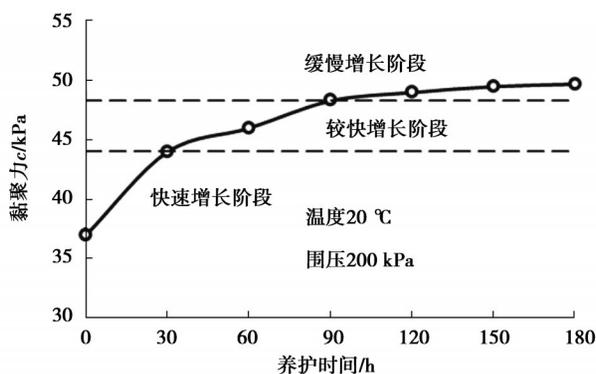


图6 黏聚力与养护时间关系

Fig. 6 Relationship between cohesion and curing time

2.4 内摩擦角

图7为不同养护时间下黏土内摩擦角随温度的变化规律。从图7中可看出:1)在临界温度范围以内,养护时间相同的情况下,内摩擦角基本不受温度变化的影响。这是因为土的内摩擦角与土颗粒结构、大小、形状及密实度密切相关^[9]。而临界温度以下,只诱发黏土颗粒附近的黏滞水膜增厚,未改变土体颗粒结构等物理性状,内摩擦角不受温度影响。2)在临界温度以上,养护时间相同的情况下,内摩擦角随温度增加而增大。说明在临界温度以上,黏土矿物、盐类和水发生物理化学反应,引起一些矿物溶解和另一些矿物沉淀,这些矿物形成大的凝聚体颗粒,导致黏土内摩擦角增大。

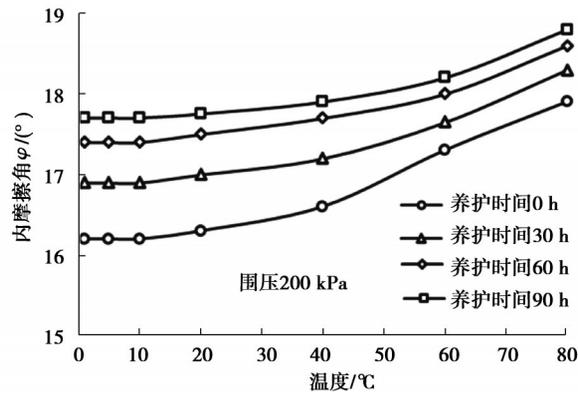


图7 内摩擦角与温度关系

Fig. 7 Relationship between internal friction and temperature

从图7还可发现,在相同温度情况下,内摩擦角随养护时间增长而逐渐增大。进一步在温度20℃、围压200 kPa条件下,计算出养护时间分别为0、30、60、90、120、150、180 h的内摩擦角,如图8所示。研究表明,内摩擦角随养护时间的变化规律与黏聚力的变化规律一致;内摩擦角随养护时间的增长过程分为快速增长阶段、较快增长阶段、缓慢增长阶段;黏土的内摩擦角的最佳养护时间段为快速增长阶段和较快增长阶段。

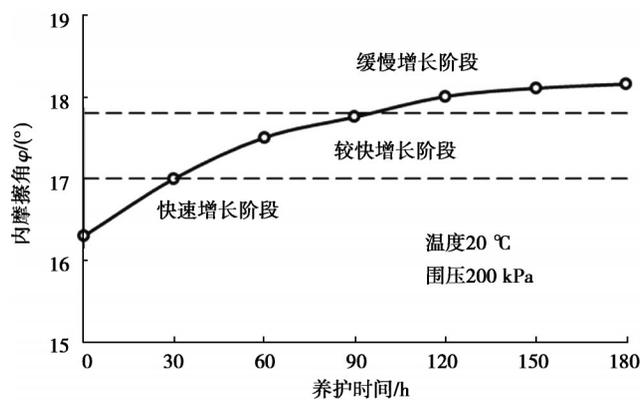


图8 内摩擦角与养护时间关系

Fig. 8 Relationship between internal friction and curing time

3 结论

- 1) 黏土具有热固结性质,随着温度的增加,黏土的固结速度加快,试验固结时间呈下降趋势。
- 2) 存在某一“临界温度”(10℃左右)。在临界温度以下(1~10℃),土体应力-应变曲线呈现软化特性,为脆性破坏;随着温度的降低,黏土的脆性增加。在临界温度以上(10~80℃),土体应力-应变曲线呈现硬化特性,为塑性破坏;主应力差随温度升高而增大。
- 3) 黏土具有类似于混凝土“养护温度”的性质,即同一温度作用下,养护时间越长,主应力差越大。
- 4) 在临界温度范围以内,养护时间相同的情况下,黏聚力随温度升高而降低。在临界温度以上,养护时间相同的情况下,黏聚力随温度升高而增大。
- 5) 在临界温度范围以内,养护时间相同的情况下,内摩擦角基本不受温度变化的影响。在临界温度以上,养护时间相同的情况下,内摩擦角随温度增加而增大。
- 6) 黏土强度(黏聚力和内摩擦角)随养护时间的增长过程分为快速增长阶段、较快增长阶段、缓慢增长阶段,其最佳养护时间为快速增长阶段和较快增长阶段。

参考文献

- [1] Laloui L, Moreni M, Vulliet L. Comportement d' un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de Chaleur[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 388-402.
- [2] Demars K R, Charles R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(2): 188-194.
- [3] Towhata I, Kuntiwattanaku P, Seko I, et al. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(4): 170-183.
- [4] Hueckel T, Pellegrini R. Effective stress and water pressure in saturated clays during heating-cooling cycles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 1095-1102.
- [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] Cekerevac C, Laloui L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(3): 209-228.
- [7] 欧孝夺, 吴恒, 周东. 广西红黏土和膨胀土热力学特性的比较研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1068-1072.
Ou X D, Wu H, Zhou D. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1068-1072.(in Chinese)
- [8] 范高飞, 刘干斌, 尹铁锋, 等. 不同温度下饱和黏土抗剪强度试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(16): 101-104.
Fan G F, Liu G B, Yin T F, et al. Experimental study on shear strength of saturated clay at different temperatures[J]. Building Structure, 2016, 46(16): 101-104.(in Chinese)
- [9] 陆嘉楠, 徐洁, 陈永辉. 温度影响粉质黏土固结和强度特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 598-603.
Lu J N, Xu J, Chen Y H. Experimental study of temperature effects on consolidation and strength properties of silty clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 598-603.(in Chinese)
- [10] Habibagahi K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. Indian Geotechnical Journal, 1977, 7(1): 14-34.
- [11] Delage P, Sultan N, Cui Y J. On the thermal consolidation of boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 343-354.
- [12] Mašin D, Khalili N. A thermo-mechanical model for variably saturated soils based on hypoplasticity[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(12): 1461-1485.
- [13] Ng C W W, Lai C H, Chiu C F. A modified triaxial apparatus for measuring the stress path-dependent water retention curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(3): 490-495.
- [14] Abuel-Naga H M, Bergado D T, Bouazza A, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(8): 942-956.
- [15] 霍明, 汪双杰, 章金钊, 等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1165-1172.
Huo M, Wang S J, Zhang J Z, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1165-1172. (in Chinese)
- [16] Hueckel T, François B, Laloui L. Explaining thermal failure in saturated clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 197-212.
- [17] Zhou C. Experimental study and constitutive modelling of cyclic behaviour at small strains of unsaturated silt at various temperatures[D]. Hong Kong: Hong Kong University, 2014.
- [18] Hueckel T. Thermally and chemically induced failure in geomaterials[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2009, 13(7/8): 831-867.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Li G X. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.(in Chinese)

(编辑 郑洁)