

温控非饱和土三轴试验装置的研制及其应用

蔡国庆^{1,2}, 赵成刚¹, 白 冰¹, 李 舰¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院岩土工程系, 北京 100044; 2. 纽卡斯尔大学岩土与材料模拟中心, 澳大利亚 纽卡斯尔 2308)

摘 要: 高放核废物地质处置、地热资源开采与贮存以及城市地下供热管道设计等现代岩土工程的建设都需要考虑温度的影响, 使得温度对天然非饱和土体基本性质影响的研究成为土力学的重要课题之一。为了研究非饱和土水力和力学性质受温度影响的规律, 需要研制新的温控试验装置, 以便为这种研究提供工具和手段。基于对既有非饱和土静三轴仪的改造, 研制了一种温控非饱和土三轴试验装置, 通过将所研制的温控压力室与非饱和土三轴试验系统的有机结合, 实现了试验过程中对温度控制及量测的目的。利用该试验装置, 对不同温度下非饱和土土水特征曲线进行了测定, 所得结果与现有理论结果相吻合。

关键词: 非饱和土; 温度控制; 三轴试验装置; 压力室; 土水特征曲线

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)06-1013-07

作者简介: 蔡国庆(1983-), 男, 江苏镇江人, 博士, 主要从事非饱和土本构关系、多场耦合等方面的研究工作。E-mail: caiguqing@bjtu.edu.cn。

Development and application of a temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

CAI Guo-qing^{1,2}, ZHAO Cheng-gang¹, BAI Bing¹, LI Jian¹

(1. Department of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong

University, Beijing 100044, China; 2. Centre of Geotechnical and Materials Modelling, the University of Newcastle, NSW 2308, Australia)

Abstract: With the development of modern geotechnical engineering practices such as construction of high-level radioactive waste repositories, exploitation and utilization of geothermal resources, and design of the heat-supply pipelines in cities, the researches on the influence of temperature on the basic mechanical properties of natural unsaturated soils have become one of the most important issues in soil mechanics. A new temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils is proposed, which can be used to study the temperature effect on seepage and strength-deformation characteristics of unsaturated soils. With the combination of the existing static triaxial test system and a new temperature-controlled pressure chamber, the proposed test system can realize better control of temperature. Using the new temperature-controlled triaxial test system, the soil-water characteristic curves under different temperatures are tested, and the experimental data are consistent with the existing theoretical results.

Key words: unsaturated soils; temperature control; triaxial test system; pressure chamber; soil-water characteristic curve

0 引 言

作为一种固、液、气三相多孔介质, 非饱和土在自然界分布极为广泛, 尤其是在干旱与半干旱地区更为突出。除此之外, 很多实际工程中的土体也大都处于非饱和状态, 例如边坡、土坝、路堤填土以及废物填埋场隔离土层等。所以, 对非饱和土基本特性开展研究对实际工程具有很高的应用价值。20 世纪 90 年代以来, 对非饱和土的研究已成为国际土力学界的研究热点问题, 在理论和试验研究中均取得了较大的进展^[1-4]。

需要指出的是, 现有的关于非饱和土基本性质的研究, 不论是本构模型还是室内试验, 大多是在常温下进行的, 即忽略温度变化的影响。然而, 自然界的土体总是处于特定的自然环境之中, 其基本性质将随着所处的水分、温度条件的不同而产生差异, 忽略周围环境因素影响而得到的土体基本性质将会产生较大误差, 难以满足实际工程的需要^[3]。虽然由于冻土工

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078019, 50978022); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2011YJS043)

收稿日期: 2011-05-27

程的发展,使得考虑低温对土体性质影响的研究取得了很多的成果,但高温对土体影响的研究则相对发展缓慢。近期,随着一大批现代岩土工程建设的发展,使得考虑较高温度对非饱和土基本性质影响的研究逐渐受到国内外研究者的关注^[5]。例如,在高放核废料地质处置库中,作为缓冲/回填材料的非饱和膨润土是一道重要的人工屏障,由于受核废料放出的热量影响使得土体温度发生变化,导致非饱和土持水性能、渗透特性以及变形性质均有别于常温土体。此外,在地热资源的开发利用、二氧化碳地下封存、高压电缆埋设以及石油开采等诸多工程建设领域,开展温度(高温)对非饱和土基本性质影响的研究,都有着重要的理论意义和应用价值。笔者及所在团队也对此开展了相关研究工作^[6-10]。

为了研究非饱和土基本性质的温度效应,常温下的土工试验设备已不能满足要求,因此研制温控非饱和土试验设备显得尤为迫切与重要。国际上对温控土工设备的研制始于 20 世纪 60 年代^[11],但一直发展缓慢,进入 20 世纪 90 年代后,随着一批先进温度控制技术的发展应用,使温控土工仪的研制进入一个相对活跃的时期^[12-15],但这些温控土工仪及其研制都局限于饱和土的范围内。而国内的研究则起步较晚,直到 2005 年才由后勤工程学院的陈正汉教授带领其研发团队研制成中国第一台温控土工三轴仪^[16]。白冰等研制了一种用于饱和土的热固结试验装置,并开展了相关试验研究^[17]。

近期,北京交通大学研制了一台温控非饱和土三轴试验装置,在对国内外现有的温控土工三轴试验系统进行介绍和评述的基础上,本文介绍了笔者所研制的温控试验装置的主要组成部件及功能和特点,并利用它对不同温度下的非饱和土的土水特征曲线进行了测定。

1 国内外研制现状及分析

为了研究温度对土体性质的影响,国内外学者对温控土工仪器开展了大量的研制工作。Mitchell 等^[11]为研究饱和黏土的蠕变特性,研制了一套温控三轴试验设备。如图 1 所示,压力室置于一个充满高温气体的腔体中,腔体中气体的温度通过一个外接的恒温箱控制。试样的温度则是通过将储存器中的热水在压力室中进行循环流动来实现。当试样的温度达到目标值时,上述热水循环系统停止工作,同时,试样的温度将通过压力室外围的热空气而保持常数。该设备可实现对试样温度的控制范围为 40F~140F(华氏温度),误差为 0.5F。试样的温度通过嵌入试样底部 0.5 英寸

的铁-铜合金温差电耦(该温差电耦被置于一个直径为 1/16 英寸的不锈钢管中)来测量。孔隙水压力则通过固定在试样底部透水石处的压力传感器测量,同时,通过空气调节器,可使孔压的控制精度达到 0.1 kPa。试样高度的改变通过一个最小刻度为 0.0025 mm 的仪表读出。

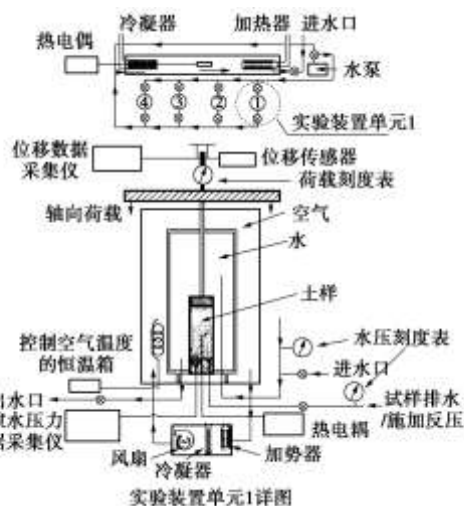


图 1 Mitchell 和 Campanella (1963)温控三轴仪

Fig. 1 Temperature-controlled triaxial test system (Mitchell and Campanella, 1963)

Demars 等^[12]研制了一台可研究循环温度荷载引起土体体变的三轴仪,试验装置如图 2 所示。试验中,试样的初始高度为 7.2 cm,直径为 3.6 cm,通过水浴和红铜线圈实现对试样的加热。需要指出的是,在极端天气环境下,该装置中水温实际值与控制值存在 2℃左右的误差,测量温度的热电偶放置于水浴池中。为了得到试样各部分温度均匀所需要的时间,在试验开始之前,利用放置于标定试样中心的镍铝-镍铬合金热电偶来测定试样达到热平衡所需要的时间,标定试验完成后,需将上述置于试样中心的热电偶移开,以减小对试样的扰动。为了减小在高温作用下土体与周围的水之间所可能产生的渗透,将试样套入两层乳胶膜内,两层乳胶膜之间涂上聚硅氧油润滑剂。

Bergenstahl 等^[13]研制了一套温控三轴仪用于研究某一温度下土体的变形特性。整体设计思路是将一个传统的标准三轴仪与加热装置、热电偶以及恒温箱相连接以实现三轴试验的温度控制,如图 3 所示。3 个 50×100 mm 的金属薄片加热部件垂直放置于压力室内部的试样周边位置。用一个热耦作为热伺服控制器的引子,另一个热耦置于试样中心以对试样进行温度量测。该装置对温度的控制误差为 ±0.1℃。对于轴向荷载和位移的量测则分别通过压力室顶部的测力传

传感器和轴向位移传感器来进行。孔隙水压力通过试样底部的传感器进行控制和测量。

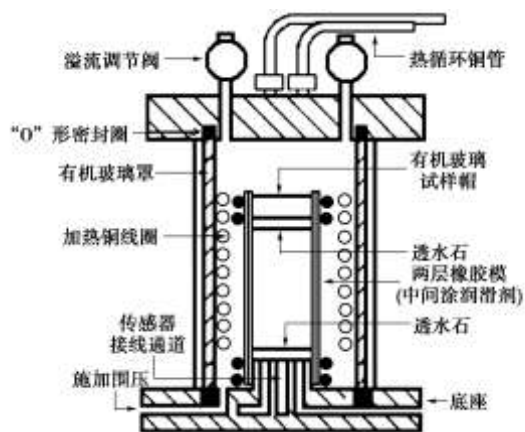


图 2 Demars 和 Charles (1982)温控三轴仪

Fig. 2 Temperature-controlled triaxial test system (Demars and Charles, 1982)

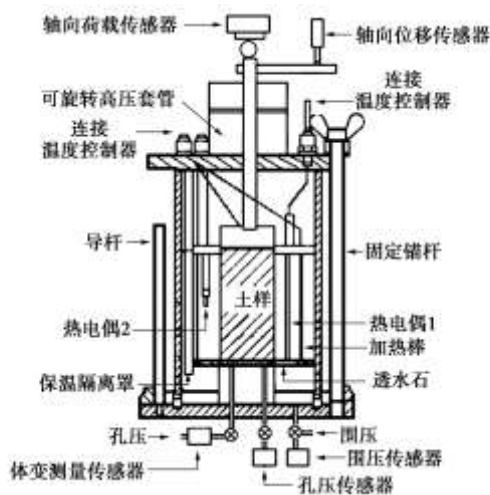


图 3 Bergenstahl 等 (1994)温控三轴仪

Fig. 3 Temperature-controlled triaxial test system (Bergenstahl et al., 1994)

Kuntiwattanakul 等^[14]研制了一套如图 4 所示的双压力室温控三轴仪。该三轴仪的最大特点是包括两个压力室，内部压力室中充满水，并通过其中的加热棒进行直接加热。输入热棒的能量通过一个控制器件实现自动校正，从而弥补由于压力室内热量向周围环境转移而造成的热量损失，该方法能使温度的控制误差保持在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。内、外两个压力室之间充满空气，作为将压力由压力控制器转移到内压力室中水的媒介，同时，空气还可作为一种绝缘介质以减小从内压力室向外发生热传递而引起的热量损失。此外，为了进一步减小热量损耗，内压力室的底部设置了一个塑性底盘。试样尺寸为直径 5 cm，高度 10 cm。

De Bruyn 等^[15]设计了一套高温三轴仪，如图 5 所示。该装置通过铜线圈对试样周围的水进行加热，并

对热水进行循环。最高温度能达到 80°C 。在压力室的内外均布置温度传感器。试样的轴向荷载通过设置在外部的压力传感器进行量测，该压力传感器在对压力室内的压力值进行实时监控的同时，对温度的敏感性较小。

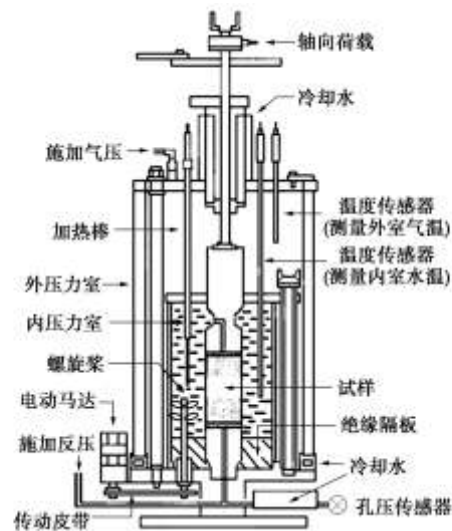


图 4 Kuntiwattanakul 等(1995)双压力室温控三轴仪

Fig. 4 Temperature-controlled triaxial test system (Kuntiwattanakul et al., 1995)

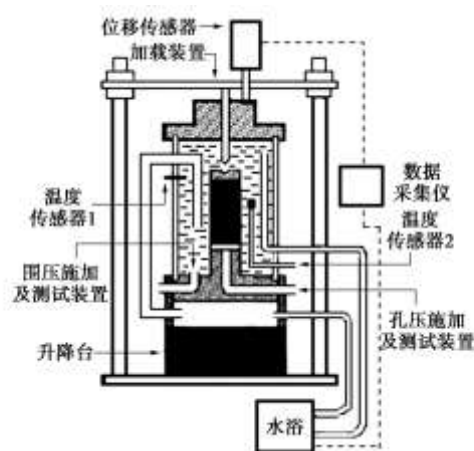


图 5 De Bruyn 和 Thimus (1996)温控三轴仪

Fig. 5 Temperature-controlled triaxial test system (De Bruyn and Thimus, 1996)

在研制温控非饱和土三轴仪过程中，采用合理有效的加热方式及相应的控制技术是新仪器研制成功的关键。通过对现有的温控土工试验仪的对比，不难发现，主要加热方式有以下 3 种：①通过加热器直接加热压力室中的水；②在压力室外缠绕加热线圈；③将试验系统放置于温控实验室内。

第一种加热方式实现难度最小，应用也最广泛，但该加热方式的一个最大缺陷在于布置在压力室中的加热器（加热棒或螺旋铜管）很难对压力室中的水进行均匀加热，为了克服这一弊端，曾有研究者采用在

压力室内加装一个电动螺旋桨,对加热过程中的水进行搅动,以使压力室内不同位置的水的温度达到均衡,从而最终使土样不同部位的温度达到一致^[18]。但是,加装电动螺旋桨会产生另外一个问题,即水流的扰动会对各种线路和传感器产生不可预知的影响。第三种加热方式无需在试验设备上加装加热装置,无疑大大减小了在仪器研制上的难度,但温控实验室的建设成本较高,实验人员也难以适应高温环境。相比而言,第二种加热方式是最为合理同时也较为经济的一种方式,在加热线圈外面再包裹一层隔热层,防止热量的散失,同时也使压力室外围保持人体适应温度。

2 新仪器的组成及主要特点

新仪器是把英国 GDS 公司生产的非饱和土静三轴仪经改造而制成的,它可以实现对试验温度的控制。GDS 三轴仪的最大特点是通过数字加压控制系统,准确控制试样加/反压及试验过程中的各压力值,并可快速反映相应阶段的体积变化量,实现对试验过程的精确控制和自动化数据采集,取得较高精度的试验结果。

图 6 为所研制的温控非饱和土三轴试验系统实景图,图 7 为压力室系统示意图,其特征表现在:

(1) 温控装置包括加载台架、压力罩、温度控制系统。

加载台架由承台⑭、升降台⑮、底座⑰、2 根支杆⑲、横梁⑳和轴向荷载传感器㉔、支架㉕、轴向位移传感器㉖构成。2 根支杆⑲下端与承台⑭固定连接,上端穿过横梁㉔两端,由固定螺栓⑲固定连接。轴向荷载传感器㉔上端与横梁中点处相连接,下端与活塞杆⑱相接触。轴向位移传感器㉖下端与顶盖②相接触,上端通过支架㉕与活塞杆⑱相连接。

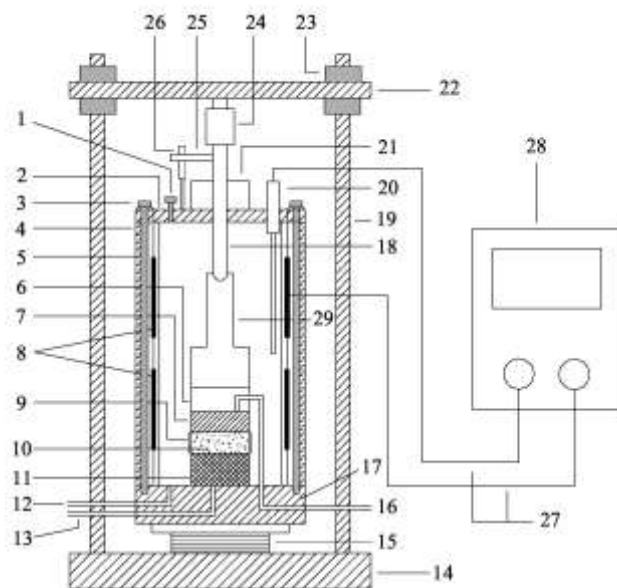


图 6 温控非饱和土三轴试验系统实景图

Fig. 6 Temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

压力罩包括顶盖②、外壁④、活塞杆⑱。顶盖②与外壁④焊接,外壁④与底座⑰之间通过由上至下贯穿整个外壁的固定螺杆③固定连接,压力罩整体置于

由升降台⑮支撑的底座⑰上。压力罩外壁④为不锈钢制成的空腔式结构,从外到内依次布置隔热石棉⑤、固定螺杆③、筒状电热板⑧。压力罩顶盖②上设置一排气阀①,中央设置一可上下滑动的活塞杆⑱,其下端通过防水轴套⑲穿过顶盖②中心与压力罩内部的有机玻璃试样帽⑥相接触,上端与轴向荷载传感器㉔相接触。进行非饱和土土水特征曲线测试时,由于试样高度较小,在轴向活塞杆⑱和有机玻璃试样帽⑥之间设置增高垫块㉙。



1-排气阀; 2-压力室顶盖; 3-压力室固定螺栓; 4-不锈钢外壁; 5-隔热石; 6-有机玻璃试样帽; 7-透水石; 8-筒状电热板; 9-橡皮膜; 10-土样; 11-高进气值陶瓷板; 12-围压施加及测试管; 13-反压施加及测试管道; 14-加载架承台; 15-升降台; 16-气压施加及测试管道; 17-压力室底座; 18-轴向活塞杆; 19-加载架支杆; 20-温度传感器; 21-防水轴套; 22-横梁; 23-加载架固定螺栓; 24-轴向荷载传感器; 25-支架; 26-轴向位移传感器; 27-导线; 28-温度控制器; 29-增高垫块

图 7 温控非饱和土三轴仪压力室系统结构图

Fig. 7 Schematic diagram of pressure chamber of temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

温度控制系统包括温度传感器⑲、导线⑲、温度控制器㉘。温度传感器⑲通过一固定螺帽固定于压力室顶盖②,其一端置于压力室内的水中,另一端通过导线⑲与温度控制器㉘相连接。温度控制器㉘接电源。

(2) 筒状电热板⑧为压力室温度改变提供热源,首尾相接环绕压力室上下各布置一块,其内部电阻丝的两端通过导线⑲与温度控制器㉘相连接。

(3) 与压力罩相连的温度控制器㉘能够对压力室内的温度进行精确控制。

(4) 压力罩外壁④是由不锈钢制成的空腔式结构,靠外一侧设置保温用隔热石棉⑤,有效防止热量的散失。

(5) 围压施加及测试管道⑫一端与压力室内部相连接,另一端与常规非饱和土三轴仪围压控制器相连

接; 反压施加及测试管道⑬一端与压力室内试样底部的高进气值陶土板⑪相连接, 另一端与常规非饱和土三轴仪反压控制器相连接; 气压施加及测试管道⑯一端穿过压力室内试样顶部的有机玻璃试样帽⑥与透水石⑦相接触, 另一端与常规非饱和土三轴仪气压控制器相连接。

(6) 压力罩底面与压力室底座⑰顶面齐平, 压力罩顶盖②四周的 6 个圆孔与底座⑰四周的 6 个圆孔一一对应, 并在压力室不锈钢外壁④内部上下贯通。

(7) 压力室底座⑰中央设置高进气值陶土板⑪, 陶土板⑪上放置土样⑩, 土样外部由橡皮膜⑨包裹, 顶部依次为透水石⑦、有机玻璃试样帽⑥, 试样帽⑥顶部与活塞杆⑱相接触。

(8) 增高垫块②由上下两个直径不同的圆柱体组成, 其顶部与轴向活塞杆⑱相接触, 顶部的半圆形凹槽与轴向活塞杆⑱顶部的半圆形凸起半径相等而吻合; 底部与有机玻璃试样帽⑥相接触, 两者直径相等。

本仪器的研制针对现有技术存在的不足, 提供了一种利用既有常规 GDS 非饱和土三轴仪而建立的温控非饱和土三轴仪压力室系统。在不影响常规 GDS 非饱和土三轴仪原有功能的基础上, 使之进一步满足温度变化情况下非饱和土三轴试验的要求。

为达到上述目的, 本研究的基本思路是: 研制的温控非饱和土三轴仪压力室与常规 GDS 非饱和土三轴仪能配套使用, 在保持原有功能基础上增加温度控制的功能。为此, 采取合理有效的加热方式及相应的控制技术是该项研制的关键。本项研制采用对压力室内的水进行直接加热的方式来实现温度控制, 同时在以下 3 个方面作了具体改进:

(1) 为了能够使土样整体均匀受热, 在压力罩内设置两个环形筒状电热板, 分别布置于压力罩轴向上下位置处。

(2) 为了防止压力室内热量的散失, 将压力罩设计成空腔结构, 并在腔体内的加热板外部设置隔热石棉。

(3) 非饱和土土水特征曲线测试时, 为缩短试验时间, 试样高度一般较小, 轴向活塞杆⑱与有机玻璃试样帽⑥无法接触, 为此, 在它们之间设置一增高垫块②。

与现有技术相比, 本文所研制的装置的优点表现在: ①在常规 GDS 非饱和土三轴仪基础上实现了对温度的有效控制, 可开展不同温度下的多种非饱和土土工试验; ②对温度的控制操作简便, 数据的测量和采集实现自动化, 且所测数据精确; ③环形筒状电热板的设计形式, 有效保证了加热的均匀性; ④压力罩腔体内隔热石棉的设计形式, 有效防止压力室内热量的

散失; ⑤增高垫块的设置, 减小了试样的高度, 有效缩减了原仪器进行土水特征曲线试验所需的时间, 提高了效率。

3 初步应用

利用所研制的温控非饱和土试验装置, 对非饱和土土水特征曲线 (SWCC) 进行试验测定。

试验所用的土样为取自北京地铁八号线二期某车站基坑粉质黏土, 地层埋深 7~9 m, 基本土性参数示于表 1。利用该粉质黏土制备成直径 70 mm、高 20 mm 的重塑土样, 使其初始含水率为 20%, 初始干密度为 1.6 g/cm³, 将制备好的试样经真空抽气加蒸馏水饱和, 其饱和度达 99%。

表 1 试验用粉质黏土的基本土性参数

Table 1 Basic properties of silty clay used in this study				
天然 含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒比重
2.16	33.4	20.1	13.3	2.73

控制试验温度分别为 25℃、40℃, 在某一温度条件下 (温度的恒定一般需要 24 h), 施加 500 kPa 的围压, 分别施加 460 kPa 的气压和 455 kPa 的反压, 然后逐级减小反压至 450, 440, 410, 360, 260, 160, 60 kPa, 从而使得试样内部吸力分别维持在 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400 kPa。在每一个阶段, 当吸力稳定后 (一般每一级吸力施加需要 4~5 d 时间达到平衡), 读出每一阶段孔隙水体积的变化值, 从而得到不同温度条件下, 试样含水率与吸力的关系, 即可测出不同温度下的土水特征曲线 (SWCC)。试验结果如图 8~10 所示。

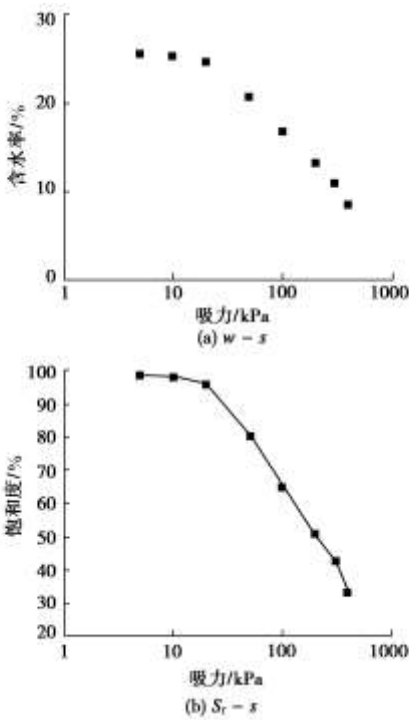


图 8 温度为 25℃时的土水特征曲线

Fig. 8 Soil-water characteristic curves at 25℃

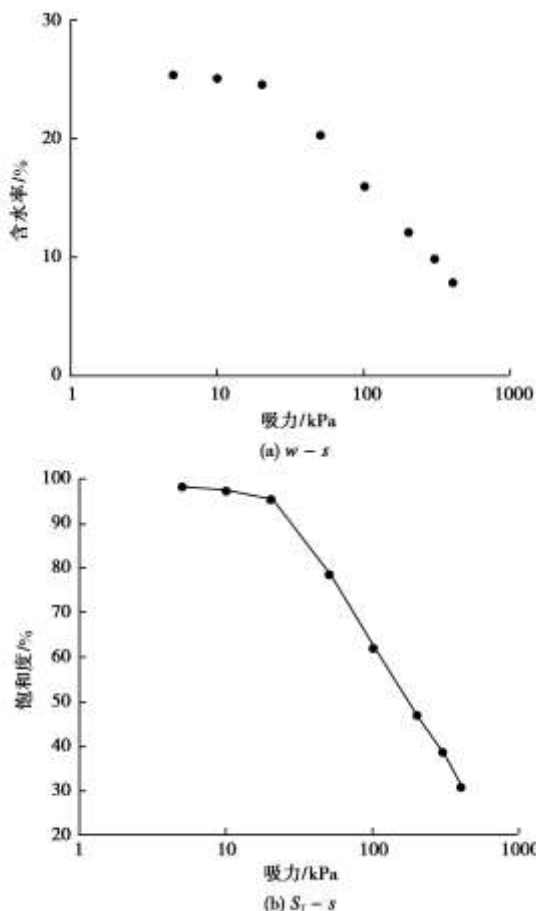


图 9 温度为 40℃时的土水特征曲线

Fig. 9 Soil-water characteristic curves at 40℃

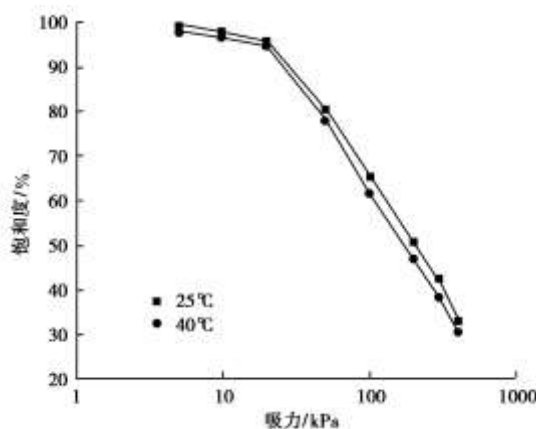


图 10 温度 25℃和 40℃时土水特征曲线对比

Fig. 10 Comparison between SWCCs at 25℃ and 40℃

试验结果表明,随着温度的升高,非饱和土土-水特征曲线向下移动,相同吸力下的饱和度降低,同时,温度的升高还引起了非饱和土土-水特征曲线进气值的下降,这些都表明:温度的升高导致了非饱和土的持水性能的降低。这一规律与基于热力学的理论模型预测结果^[7]相吻合。

4 结 论

(1) 本文研制了一种温控非饱和土三轴仪。通过对既有 GDS 非饱和土静三轴仪进行改进,加设温控压力室及温控装置,实现对土样的温度控制。所研制的装置可用来进行不同温度下非饱和土土水特征曲线测试及静三轴试验,克服了常规试验不能进行温度变化试验的不足。

(2) 温控压力室的温度控制范围在 20℃到 100℃之间,围压施加范围为 0~1 MPa,吸力控制范围在 0 到 500 kPa 之间。具体试验过程中,可根据需要进行选择。

(3) 基于所研制的温控非饱和土三轴仪开展了不同温度下的非饱和土土水特征曲线测试,结果表明仪器能够较好反映温度对非饱和土基本性质的影响规律。

参考文献:

- [1] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 405 - 430.
- [2] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 41 - 54.
- [3] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [4] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展以及面临的挑战[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(12): 3521 - 3540. (ZHAO Cheng-gang, WEI Chang-fu, CAI Guo-qing. The new development and challenge for soil mechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(12): 3521 - 3540. (in Chinese))
- [5] TANG A M, CUI Y J. Modelling the thermomechanical volume change behaviour of compacted expansive clays[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 185 - 195.
- [6] CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. A nonlinear multi-field coupled model for soils[J]. *Science China: E*, 2011, **54**(5): 1300 - 1314.
- [7] CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Volume change behaviour of unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(23): 2495 - 2504.
- [8] 蔡国庆, 赵成刚, 刘 艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (in Chinese))

- Chinese))
- [9] 蔡国庆, 赵成刚, 刘 艳. 一种预测不同温度下非饱和土相对渗透系数的间接方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1405 - 1410. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. An indirect method for predicting permeability functions of unsaturated soils at different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **32**(5): 1405 - 1410. (in Chinese))
- [10] 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土渗流和变形强度特性的温度效应[J]. 力学进展, 2010, **40**(2): 147 - 156. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on seepage and strength-deformation characteristics of unsaturated soils[J]. Advances in Mechanics, 2010, **40**(2): 147 - 156. (in Chinese))
- [11] MITCHELL J K, CAMPANELLA R G. Creep studies on saturated clays[C]// Laboratory Shear Testing of Soils: a Symposium, ASTM-NRC. Ottawa, 1963: 90 - 110.
- [12] DEMARS K P, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, **19**: 188 - 194.
- [13] BERGENSTAHL L, GABRIELSSON A, MULABDIC M. Changes in soft clay caused by increases in temperature[C]// Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi, 1994: 1637 - 1640.
- [14] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics on clay[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(1): 427 - 441.
- [15] DE-BRUYN D, THIMUS J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of boom clay: the results of an initial laboratory programme[J]. Engineering Geology, 1996, **41**: 117 - 126.
- [16] 陈正汉, 谢 云, 孙树国, 等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 928 - 933. (CHEN Zheng-han, XIE Yun, SUN Shu-guo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 928 - 933. (in Chinese))
- [17] 白 冰, 陈星欣. 一种用于饱和土的热固结试验装置及其应用[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 896 - 900. (BAI Bing, CHEN Xing-xin. A test apparatus for the thermal consolidation of saturated soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 896 - 900. (in Chinese))
- [18] UCHAIPICHAT A, KHALILI N. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt[J]. Géotechnique, 2009, **59**(4): 339 - 353.

科技期刊数字化、标准化出版点滴 2

——规范表示量符号下标

当不同的量使用同一字母作量符号, 或同一个量有不同的使用特点, 或有不同的量值要表示时, 为了相互区别, 可以使用主符号附加下标的形式(必要时还可使用上标及其他标记)作量符号。表示下标时, 应注意区分下标符号的类别、正斜体、大小写等。规范使用下标有以下规则:

(1) 数字、数学符号、记号(标记)、代表变动性数字的字母(连续性字母)、量符号、单位符号、来源于人名的缩写、关键英文词的首字母、英文词的缩写均可作下标。

(2) 下标为量符号, 表示变动性数字的字母, 坐标轴符号和表示几何图形中的点、线、面、体的字母时用斜体, 其余则用正体。

(3) 下标为量符号、单位符号时, 大小写同原符号; 英文写作下标时, 来源于人名的缩写用大写, 一般情况下的缩写用小写。

(4) 要优先使用国际上和行业中规定或通用的下标写法。

(5) 当一个量符号中出现两个以上的下标或下标所代表的符号比较复杂的时, 可把这些下标符号加在“()”中共同置于量符号之后。

(6) 少用复合下标, 即下标的下标(二级下标)、二级下标的下标(三级下标)。

(摘自梁福军《科技论文规范写作与编辑》)