

DOI: 10.11779/CJGE201803010

一种新型非饱和土温控三轴试验系统的研制与初步应用

李 剑^{1,2}, 王 勇², 孔令伟², 汪明元³, 程 朋^{1,2}, 马永政⁴

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310012; 4. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要: 为研究温度对非饱和土水力、力学和声学性质的影响, 自主研发一套带有弯曲元和精密体变量测的温控式三轴仪。本设备通过在 GDS 应力路径非饱和土三轴试验系统中增设温控内压力室的方式, 实现了对温度变化的精确控制及量测; 通过将压差传感器与温控内压力室相结合, 实现了温度变化情况下试样体变的精确量测; 同时增设了一套弯曲元测试系统, 增加了仪器的功能, 实现了温度变化情况下对试样实时波速的测试。通过对杭州湾粉细砂土开展 4 个温度水平的三轴剪切试验以及同一温度水平下的波速测试, 结果表明: 新仪器能够稳定的控制温度变化条件、精确测量温度变化条件下试样的体变以及测量温度变化条件下试样的实时波速, 初步检验了仪器性能的可靠性。该设备整体结构简单, 拆装方便, 可实现常规非饱和(饱和)土试验与温控非饱和(饱和)土试验之间自由切换, 互不干扰。设备研制的成功, 将为非饱和(饱和)土的热-水-力-声耦合特性的研究提供方便有效的测试装置。

关键词: 温控; 三轴仪; 非饱和土; 弯曲元; 体积变化

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)03-0468-07

作者简介: 李 剑(1990-), 男, 江苏泗阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋含气沉积物。E-mail: 524680876@qq.com。

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

LI Jian^{1,2}, WANG Yong², KONG Ling-wei², WANG Ming-yuan³, CHENG Peng^{1,2}, MA Yong-zheng⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key

Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Ltd., Hangzhou 310012, China; 4. Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature on the hydraulic, mechanical and acoustic properties of unsaturated soils, a temperature-controlled triaxial apparatus with the bender element system (BES) and precision volume change measurement is developed. The instrument can accurately control and measure temperatures by adding a temperature-controlled inner pressure chamber into the stress path unsaturated triaxial testing system of geotechnical digital systems. A differential pressure sensor and the temperature-controlled inner pressure chamber are combined to achieve the precision measurement of volume change of specimens under different temperatures, whilst the BES is equipped to perform the real-time wave velocity tests. A series of experiments are carried out on the sand in Hangzhou Bay, including the triaxial shear tests under four temperature levels and the wave velocity tests under the same temperature level. The results show that the new instrument can control the temperature stably and accurately measure the volume change and the real-time wave velocity of the specimens under different temperatures. The performance of the instrument is satisfactory. Additionally, the instrument has the advantages of simple integral structure, convenient assembly and disassembly, and the function to perform freely the switching tests between the conventional and the temperature-controlled for unsaturated (saturated) soils without mutual interference. The successful development of the instrument will provide a convenient and effective testing device for the study on the hydro-hydraulic-mechanical-acoustic coupling characteristics of unsaturated (saturated) soils.

Key words: 温度控制; 三轴仪; 非饱和土; 弯曲元; 体积变化

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579237); 浙江省自然科学基金项目(LY13E080009); 中国电建集团科技项目(KY2014-01-06-W3)

收稿日期: 2017-06-11

*通讯作者(E-mail: wang831yong@163.com)

0 引言

温度对岩土体热-水-力耦合特性的影响是环境工程地质和岩土工程领域中的一个重要课题, 尤其在核废料地下储藏、热能储存、热管线的埋设、石油气开采、爆炸软基处理、城市热岛效应等领域, 研究温度对岩土体的影响具有重大意义。室内试验是研究岩土体温度效应的基本手段之一, 而常规的土工试验设备不能满足研究的需要, 为此国内外学者对温控土工仪器的研制开展了许多工作^[1-9]。

Mitchell 等^[10]为研究温度对饱和黏土蠕变特性的影响, 研制了一台温控三轴仪, 通过直接循环加热压力室内流体来控制试样的温度, 通过反压水体积变化来测量体变。Demars 等^[11]为研究温度循环变化对土体体变的影响, 研制了一台温控三轴仪。该设备通过压力罩内的螺旋铜管与外部控温水浴装置联合控温, 体变通过反压水体积变化来反映。Bergenstahl 等^[12]开发了一套温控三轴仪。加热元件为设置在三轴室内试样周围的金属薄片, 体变通过反压水体积变化来测量。Sultan 等^[13]为了研究温度对土体前期固结应力和超固结比对温度变化引起的体变的影响, 基于英国 Geotechnical Digital Systems (GDS) 三轴仪, 开发了一台温控三轴仪。该装置通过设置在压力罩外壁的加热线圈进行控温。通过测量排出/吸入压力室内的流体体积来测量试样的体积变化。Abuel-Naga 等^[14]针对温度对曼谷软黏土剪切强度和屈服强度的影响, 研制一台温控三轴仪。通过设置在压力罩外壁的 3 个加热线圈进行控温, 体变通过反压水体变来反映。

国内研制温控土工仪器的起步比较晚。陈正汉等^[15]研制了国内第一台温控土工三轴仪。该设备通过将三轴室置于电热恒温箱内进行控温, 体变通过测量进(出)压力室内的流体体积来反算。蔡国庆等^[16]基于英国 GDS 非饱和土静三轴仪研发了一台温控非饱和三轴仪。通过在压力罩内设置环形筒状电热板, 对压力罩内流体和土样进行加热, 体变通过反压水体变来反映。刘干斌等^[17]基于 TAJ-20 动静三轴试验系统研发了一台温控动三轴试验装置。通过设置在压力室外壁的两块弧形加热板, 从外部对压力室、压力室内的流体以及试样进行加热; 通过对上传力杆和活塞杆进行加热, 实现从内部对压力室试样的直接加热。体变通过反压水体变来反映。

通过对上述现有国内外温控土工三轴设备的对比分析, 可从控温方式和体变量测方式两方面对它们的特点予以总结。

(1) 控温方式

现有的温控土工三轴仪的控温方式主要有以下 3 种: ①从外部进行控温, 主要通过在三轴压力室外壁设置加热元件, 包括加热线圈、加热板等(如 Sultan 等^[13]、Abuel-Naga 等^[14])或将三轴仪置于恒温箱内(如陈正汉等^[15])来实现; ②从内部进行控温, 主要通过在压力室内设置加元件, 包括加热棒、加热片或螺旋铜管来实现(如 Demars 等^[11]、Bergenstahl 等^[12]、蔡国庆等^[16]); ③内外联合控温, 通过在压力室外部设置加热板从外部加热, 通过加热上传力杆和活塞杆对内部试样加热(如刘干斌等^[17])。第一种控温方式, 传热路径长, 试样达到预设温度所需时间最长。此外出于对压力室导热性能的要求, 一般采用金属压力室, 不仅不能观察到试样的实时变化情况, 而且笨重。优点是不需要改变压力室内部结构, 对试样的扰动较小。第二种控温方式, 由于直接对压力室内的流体加热, 所需加热时间短。但不足之处在于, 压力室内的结构及有限的空间限制了加热元件的体积和排布, 导致不能对压力室内流体均匀加热; 第三种控温方式, 从控温角度来讲效果最好, 但由于需要对上传力杆、活塞杆以及外压力室加热, 实施起来较为困难, 因此这种加热方式不适合大部分普通三轴设备。

(2) 体变量测

现有的温控土工三轴仪器测量饱和土样体变的方式与常规三轴仪相同, 均通过测量试样孔隙水体变来反算试样体变, 此类方法这里不再赘述。而量测非饱和土试样的体变, 则主要通过测量进(出)压力室内流体的体积来反算体变,(如 Sultan 等^[13]、陈正汉等^[15])。这种测量非饱和土体变的方式需要预先标定不同围压和温度情况下压力室及其连接管路的变形, 不仅操作繁琐, 而且体变量测的精度较低。

温控非饱和土三轴试验系统研制的关键在于均匀高效的调控温度和实现温度变化情况下精细地测量试样的体变。基于上文对现有温控土工三轴仪优缺点的分析中可以发现, 现有的几种控温方式均存在一定的不足, 且对温度变化条件下试样体变的量测精度也不高。为克服上述问题, 本文基于现有的英国 GDS 非饱和三轴试验系统, 加以改造完善, 实现了对非饱和试样均匀高效的温度变化调控和温度变化下试样体变的精密测量。同时增设了新的功能, 可实现不同温度载荷条件下试样的实时波速量测。

1 试验装置的组成及特点

本文针对现有温控土工三轴试验设备的不足, 基于普通英国 GDS 非饱和三轴试验系统, 在保留原有功能的基础上加以改进, 研制了一套新型温控非饱和土

三轴试验系统。基本研发思路是，在GDS改进后的内压力室内、外壁上直接安装螺旋铜管，实现对非饱和试样均匀高效的温度调控以及温度变化下精确测量非饱和试样的体变；同时增设GDS弯曲元测试系统，实现不同温度条件下三轴试样实时波速的量测。

本文研制开发后的非饱和土温控三轴试验系统实景图如图1所示，主要由普通英国GDS非饱和三轴试验系统、体变量测系统、温度控制系统、弯曲元测试系统组成，下面对各部分结构做进一步介绍。

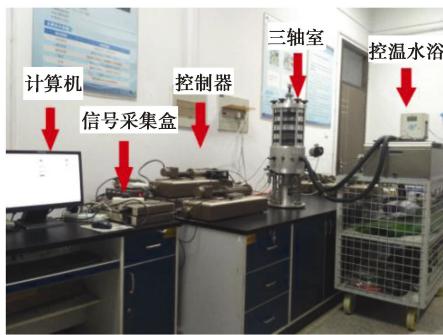


图1 非饱和土温控三轴试验系统实景图

Fig. 1 Temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

(1) 普通英国GDS非饱和三轴试验系统，其三轴室结构示意图如图2所示。该试验系统配备了非饱

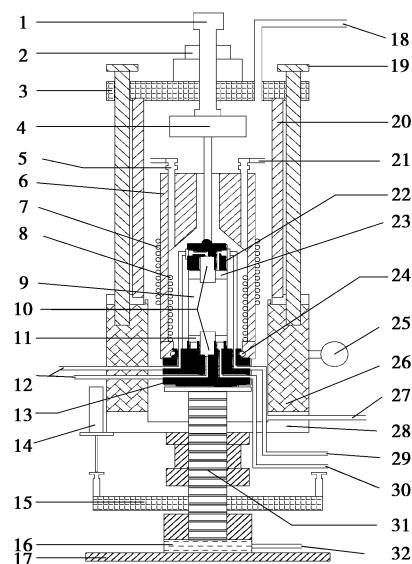


图2 温控非饱和土三轴试验系统三轴室结构示意图
Fig. 2 Schematic drawing of pressure chamber of temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

Fig. 2 Schematic drawing of pressure chamber of temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils

和土底座和常规饱和土底座，可进行不同应力路径下非饱和（饱和）三轴试验。做常规饱和土试验时该设备的安装组成不再赘述，这里重点介绍做非饱和土试验时设备的安装组成。如图2所示，非饱和土底座13安装在三轴压力室内，其上设有高进气值陶土板11，非饱和土底座13的结构示意图见图3。如图2所示，试样帽22通过顶帽尼龙管29与气压控制器相连，非饱和土底座13通过底座尼龙管30与反压控制器相连。高进气值陶土板11透水不透气，与气压和反压控制器相配合，可实现对试样9内水、气的单独控制，进而控制基质吸力。气动控制器与进气尼龙管18相连，可以控制气压源进入内、外压力室室内的气压，即控制围压。这里的气动控制器与前文提到的气压控制器不同，气动控制器是控制外部有压气源进入内、外压力室室内的气压，本质上相当于气压阀，而气压控制器则是通过压缩自身气缸内的气体给试样施加压力。轴压控制器通过承压水尼龙管32与非饱和土底座13下部的液压缸31相连，通过轴压控制器内的承压水16控制非饱和土底座13下部的液压缸31的升降来对试样9施加轴向压力。轴向荷载和轴向位移，分别通过轴向荷载传感器4和竖向位移传感器14测量。所有的控制器和传感器均与信号采集盒相连，可通过计算机采集信息并控制试验进程。

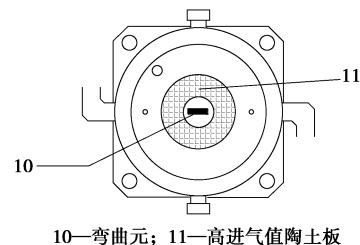


图3 非饱和土底座结构示意图

Fig. 3 Schematic drawing of pedestal for unsaturated soils

(2) 体变量测系统的改造。体变量测系统是基于现有的英国GDS非饱和三轴试验系统配套的内压力室改进而来，使其在保留原有高体变测量精度的基础上，进一步满足螺旋铜管和温度传感器安装的结构要求，改造后的内压力室实景图如图4所示，结构图如图5所示。具体的改造体现在以下两方面：①如图6所示，新内压力室由上、下两部分黏合而成，上部分的空腔内径比原配内压力室空腔内径略大，为内壁螺旋铜管的安装创造了空间条件，上部分的脖颈与原配内压力室脖颈的尺寸相同，从而保证体变测量精度与原配内压力室相同，下部分为圆环状，其内径与原配内压力室空腔内径相同，以满足与原配非饱和土底座尺寸配套的需求。上、下部分黏合而成的新内压力室，高度与原配内压力室相同，外径上略有扩大。②如图

7 所示, 在新内压力室上部开设 3 个孔, 其中有两个内壁螺旋铜管伸出孔 37, 用于内壁螺旋铜管 8 的伸出, 一个温度传感器伸出孔 36, 用于安装温度传感器。

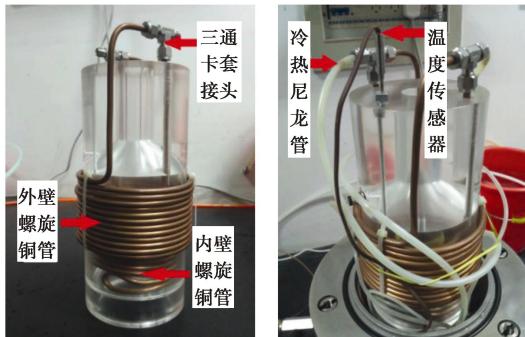


图 4 内压力室实景图

Fig. 4 Inner pressure chamber

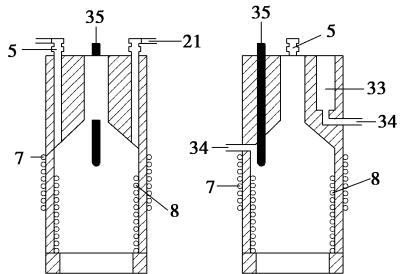


图 5 内压力室结构示意图 (剖切方向相互垂直)

Fig. 5 Schematic drawing of inner pressure chamber (cutting direction perpendicular to each other)

(3) 温度控制系统的实现。温度控制系统是通过在内压力室 6 上直接安装螺旋铜管, 并与外部的控温水浴设备相连来实现, 内压力室 6 的实景图如图 4 所示, 结构图如图 5 所示。如图 5 所示, 内壁螺旋铜管 8 紧贴内压力室 6 内壁, 两端分别从内压力室 6 顶部穿出, 并分别接在两个三通卡套接头 5 上, 外壁螺旋铜管 7 紧贴内压力室 6 外壁, 两端同样分别接在上述两个三通卡套接头 5 上, 两个三通卡套接头 5 剩余的接头各接一根冷热循环尼龙管 21, 两根冷热循环尼龙管 21 从十二通道环上 26 的两个通道穿出, 并分别与控温水浴循环系统的进、出口相连接。控温水浴循环系统控温范围为 0~95℃, 控温精度 ± 0.01 ℃, 控温水浴循环系统内的温度水在内、外壁螺旋铜管内循环, 对内压力室 6 内、外的脱气水进行控温, 内壁螺旋铜管 8 沿试样 9 高度方向环绕在试样 9 周围, 可对试样 9 进行均匀高效的控温, 外壁螺旋铜管 7 同步对内压力室 6 外侧的脱气水进行加热, 既减小了内压力室 6 由于内外温度差异而导致的变形, 也对内压力室 6 起到更好的保温作用。此外另设一温度传感器 35, 测量精

度为 0.1℃, 温度传感器 35 伸进内压力室 6 内的脱气水中, 温度传感器 35 的数据线从十二通道环 26 的一个通道伸出, 与信号采集盒连接, 将内压力室内实时温度传输到计算机上。

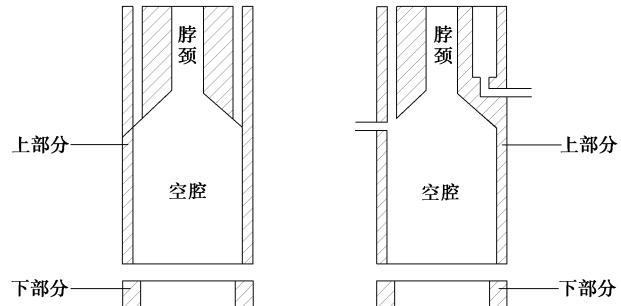
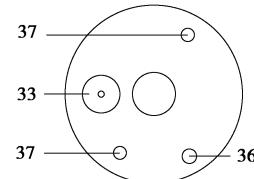


图 6 内压力室黏合前结构示意图 (剖切方向相互垂直)

Fig. 6 Schematic drawing of inner pressure chamber before adhesion (cutting direction perpendicular to each other)



33—一体变参照筒; 36—温度传感器伸出孔; 37—内壁螺旋铜管伸出孔

图 7 内压力室俯视图

Fig. 7 Top view of inner pressure chamber

(4) 增设弯曲元测试系统。弯曲元测试系统主要由发射端、接收端、弯曲元主控制箱以及弯曲元测试配套软件组成。如图所示 2, 试样帽 22 上的弯曲元为 S 波的激发端和 P 波的接收端, 非饱和底座 13 上的弯曲元为 S 波的接收端和 P 波的激发端。弯曲元信号线 12 从十二通道圆环 26 上穿出, 并与弯曲元主控制箱连接, 通过安装在计算机上的弯曲元测试软件可以进行 S 波和 P 波的激发、接收、显示、存储。试验之前通过该软件, 可对波类型、周期、放大倍数、采样频率以及采样时间等参数进行设置。

综上所述, 本文具体在以下几个方面做了改进:

(1) 参照原有的英国 GDS 非饱和三轴试验系统配套的有机玻璃内压力室, 重新设计加工了一个有机玻璃内压力室, 在保留原有内压力室精密测量试样体变功能的基础上, 进一步满足了安装温控螺旋铜管和温度传感器的需求, 实现了温度变化情况下精确测量非饱和试样的体变。

(2) 紧贴有机玻璃内压力室壁沿试样高度方向安装内壁螺旋铜管, 使整个试样完全被内壁螺旋铜管包围, 对试样形成了从上到下的环向加热, 实现了对试样均匀高效的温度调控。

(3) 紧贴有机玻璃内压力室外壁沿轴向安装外壁螺旋铜管, 对内压力室外侧的脱气水进行同步加热, 既减小了内压力室由于内外温差引起的变形, 也对内压力室起到更好的保温作用。

(4) 在有机玻璃内压力室上安装温度传感器, 该温度传感器与内压力室内的脱气水接触, 用来测量内压力室内的实时温度。

(5) 加装了一套英国 GDS 弯曲元测试系统, 可以量测不同温度下三轴试样的实时波速。

(6) 外压力室包裹一层保温石棉, 进一步加强保温效果。

与现有设备相比, 本文研发的新设备优点在于: ①在进行常规温控非饱和土试验的基础上, 可以精确测量温度变化情况下非饱和试样的体变以及不同温度条件下土样的实时波速; ②在内压力室内、外壁安装的螺旋铜管, 可以使内压力室内、外同步升温, 不仅减小了温度应力引起的内压力室变形对测量试样体变的影响, 而且对试样的实际控温效果更均匀高效, 保温性也更强; ③钢管、温度传感器均集成在内压力室上, 结构简单, 拆装方便, 使得常规非饱和土试验与温控非饱和土试验之间可以自由切换, 互不干扰。④控温操作简便, 温度、体变和波速等数据的测量、采集、存储等实现了高度自动化。

2 初步应用

为验证新研制的新型温控非饱和土三轴试验系统的可靠性, 采用杭州湾粉细砂开展了 4 个温度水平的三轴剪切试验以及 4 个温度水平的 S 波波速测试。为节省试验时间和突出设备控温和体变量测功效的检验, 本次试验采用了饱和试样。

2.1 试验土样

试验用砂样取自杭州湾, 采用重塑样。将砂样烘干后过 2 mm 筛除去较大颗粒、有机腐殖物以及贝壳碎屑等杂质, 采用英国 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪测试其粒度分布和累计体积百分数, 测得的级配曲线如图 8 所示。试验用砂的基本物理指标见表 1。

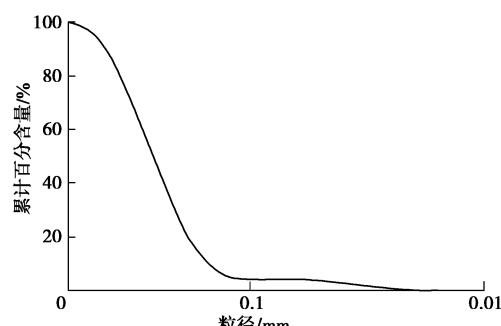


图 8 杭州湾砂颗粒分曲线

Fig. 8 Grain-size distribution curves of sand in Hangzhou Bay

表 1 杭州湾砂基本参数

Table 1 Parameters of sand in Hangzhou Bay

砂土类型	比重	最小干密度 (g·cm ⁻³)	最大干密度 (g·cm ⁻³)
杭州湾砂	2.68	1.197	1.541

2.2 试验方法及试验结果分析

(1) 三轴剪切试验

试样直径为 50 mm, 高度为 100 mm, 相对密实度 50%, 干砂分 5 层振捣成样。饱和方式为先通二氧化碳驱替出试样内的空气, 再以 5 kPa 的水头通无气水进行水头饱和, 其后施加反压进一步反压饱和, 当 B 值大于 0.98 时认为试样完全饱和。三轴排水剪切试验控制温度为 5℃, 20℃, 40℃, 60℃, 净围压为 200 kPa, 剪切速率为 0.05 mm/min。固结稳定标准为关闭排水阀后 5 min 内孔隙压力不上升。有明显剪切峰值的曲线取峰值强度为破坏值, 无明显峰值的取轴向应变达到 15% 的偏应力为破坏标准。

图 9 表明, 室温为 18℃ 左右时, 内压力室温度升高到 60℃ 需要 2 h, 平均每分钟升高约 0.35℃, 而降低到 5℃ 需要 3 h, 平均每分钟降温约 0.1℃, 而一旦达到各级预定温度后, 系统能稳定的维持在各级预设温度上, 充分的体现了本文研发系统控温的有效性以及稳定性。

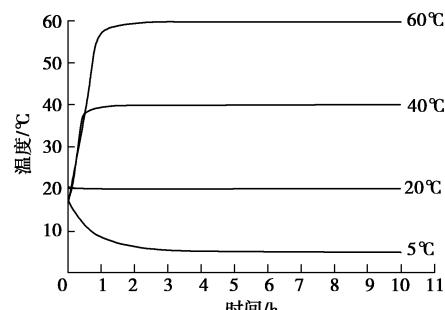


图 9 不同控温目标下内压力室温度与时间曲线

Fig. 9 Temperature-time curves of inner pressure chamber under different target temperatures

图 10 是选取 20℃ 时, 反压控制器测得的试样体变与体变量测系统测得的试样体变做出的对比图, 从图中可以看出, 两条体变曲线在变化规律上保持一致, 在数值上也基本相同, 检验了文研发试验系统的体变量测系统测量的精确性。

如图 11 所示, 是试验测得的不同温度条件下杭州湾砂土三轴剪切路径下的应力应变曲线。由图可看出, 试验温度从 5℃ 升高到 60℃ 的过程中, 饱和砂的三轴剪切峰值强度下降了 37.32 kPa, 平均每升高 1℃ 峰值强度下降 0.68 kPa。整体规律是强度随着温度的升高而有所降低, 这一规律与 Mitchell 等^[10]、Murayama

等^[18]、Sheriff 等^[19]、Hueckel 等^[20]研究的结果相一致, 验证了本非饱和土温控三轴试验系统性能的可靠性。

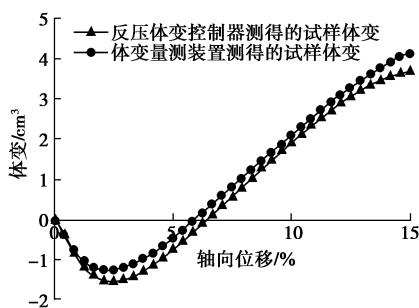


图 10 20℃时体变量测对比曲线

Fig. 10 Contrast curves of volume change under 20°C

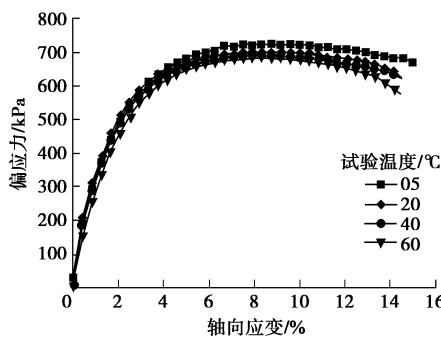


图 11 不同温度下杭州湾砂的应力应变曲线

Fig. 11 Strain-stress curves of sand in Hangzhou Bay under different temperatures

(2) 波速测试试验

S 波波速测试的激发波为正弦波, 激发频率为 20 kHz, 试验控制温度为 5℃、20℃、40℃、60℃, 净围压为 200 kPa, 试验结果如图 12 所示。

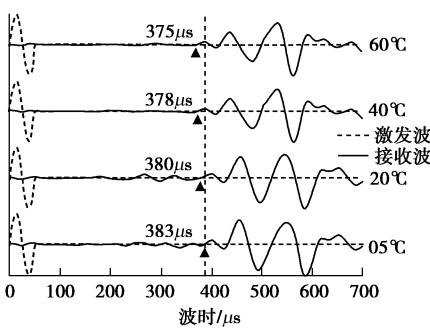


图 12 不同温度下杭州湾砂的 S 波波形图

Fig. 12 S-waveform of sand in Hangzhou Bay under different temperatures

图 12 展示了不同温度下杭州湾砂的 S 波波形图。本文采用初达波法判定剪切波的初达时间, 接收波的起跳点由图中的实心三角形标记出。可以看出: 不同温度水平下所得的 S 波波型稳定正常, 表明弯曲元测试系统的稳定性。随着温度的升高接收波的波时略有变化, 但最高温 60℃与最低温 5℃时的波时仅相差 8

μs, 而 20 kHz 时弯曲元测试系统自身系统误差为 5 μs, 所测波时变化与系统误差处于同一量级, 说明弯曲元系统在本文温度测试范围内受温度变化的影响不大。由于 P 波在饱和砂中的传播速度随温度的升高而增加^[21], 而弯曲元 S 波测试的初达时间判定受到近场效应的影响, 因此, S 波所测波时随温度升高出现略微变化, 这是由于饱和介质中 P 波受温度的影响更为显著所引起的。综上, 本非饱和土温控三轴试验系统可以满足不同温度条件下土样实时波速的量测。

3 结 论

(1) 本文基于现有的英国 GDS 非饱和土三轴试验系统, 研发了一套新的温控非饱和土三轴试验系统, 通过在重新设计的内压力室上直接安装内、外螺旋铜管的方式, 在保留原设备精密体变测量功能的基础上, 实现了对试样均匀高效的控温以及温度变化情况下体变的精确量测, 同时增设弯曲元测试系统, 增加了仪器的功能, 实现了不同温度条件下试样实时的波速量测。

(2) 新温控非饱和土三轴试验系统通过不同的安装方式, 可以开展温控条件下非饱和(饱和)土的不同应力路径三轴试验和实时波速测试试验。控温范围为 0~95℃, 控温精度 ±0.01℃。体变量测精度为土 0.04% 试样体积。结构设计简单, 拆装方便, 使得常规非饱和(饱和)土试验与温控非饱和(饱和)土试验之间可以自由切换, 互不干扰。

(3) 应用所研制的温控非饱和土三轴试验系统, 对杭州湾粉细砂开展了 4 个温度水平下的三轴排水剪切试验以及 4 个温度水平的 S 波波速测试。试验结果表明, 新仪器能够较好的反映温度变化对土体的影响, 验证了新仪器控温的有效性的可靠性。同时, 体变曲线对比的高度吻合也验证了新仪器体变量测的可靠性。波速测试试验证明新仪器可以满足不同温度条件下土体实时波速的量测, 验证了新仪器弯曲元波速测试系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[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))
- [2] KOHGO Y, SAITO H, PYONE W W. Temperature effects on mechanical behavior of unsaturated soils and their modeling[J]. Journal of the Agricultural Engineering Society

- Japan, 2013, **81**: 429 – 437.
- [3] JOBMANN M, MELESHYN A. Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal[J]. *Mineralogical Magazine*, 2016, **79**(6): 1389 – 1395.
- [4] LIU E L, XING H L. Modeling of thermo-mechanical behavior of saturated clays[M]// *Computational Science – ICCS 2007*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1151 – 1155.
- [5] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of boom clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, **37**(2): 343 – 354.
- [6] 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))
- [7] TANG A M, CUI Y J. Modelling the thermo-mechanical volume change behaviour of compacted expansive clays[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 185 – 195.
- [8] 姚仰平, 牛 雷, 杨一帆, 等. 考虑温度影响的非饱和土本构模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(10): 2881 – 2888. (YAO Yang-ping, NIU Lei, YANG Yi-fan, et al. Constitutive model for unsaturated clays considering temperature effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(10): 2881 – 2888. (in Chinese))
- [9] 李彦龙, 王 俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2839 – 2844. (LI Yan-long, WANG Jun, WANG Tie-hang, et al. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(10): 2839 – 2844. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] DEMARS K R, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, **19**(2): 188 – 194.
- [12] BERGENSTAHL L, GABRIELSSON A, MULABDIĆ M. Changes in soft clay caused by increase in temperature[C]// *XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi, 1994: 1637 – 1640.
- [13] SULTAN N, DELAGE P, CUI Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay[J]. *Engineering Geology*, 2002, **64**(2/3): 135 – 145.
- [14] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, LIM B F. Effect of temperature on shear strength and yielding behavior of soft Bangkok clay[J]. *Soils & Foundations*, 2007, **47**(3): 423 – 436.
- [15] 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))
- [16] 蔡国庆, 赵成刚, 白 冰, 等. 温控非饱和土三轴试验装置的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1013 – 1019. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, et al. Development and application of a temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(6): 1013 – 1019. (in Chinese))
- [17] 刘干斌, 范思婷, 叶俊能, 等. 温控动三轴试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1345 – 1352. (LIU Gan-bin, FAN Si-ting, YE Jun-neng, et al. Application and development of a temperature-controlled dynamic triaxial test system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(7): 1345 – 1352. (in Chinese))
- [18] MURAYAMA S. Effect of temperature on elasticity of clays[R]. *Effect of Temperature and Heat on Engineering Behavior of Soils 103*, Washington D C: Highway Research Board, 1969.
- [19] SHERIF M A, BURROUS C M. Temperature effects on unconfined shear strength of saturated, cohesive soil[R]. Washington D C: Highway Research Board, 1969.
- [20] HUECKEL T, BORSETTO M. Thermoplasticity of saturated soils and shales: constitutive equations[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **116**(12): 1765 – 1777.
- [21] SHUMWAY G. Sound Velocity vs Temperature in Water-Saturated Sediments[J]. *Geophysics*, 1958, **30**(7): 494 – 505.