

温控土工三轴仪的研制及其应用

陈正汉, 谢 云, 孙树国, 方祥位, 李 刚

(后勤工程学院, 重庆 400041)

摘 要: 为了研究温度对土的力学性质的影响, 研制了一套温控土工三轴仪。该设备采用模块结构, 体小轻巧; 实现了三轴仪与恒温箱的巧妙结合, 能经受高压高温; 对温度、吸力、应力、应变既能较好地控制, 也能较准确地量测; 体变、排水、气压量测精度高, 传压滞后小; 数据自动采集处理, 应用方便, 造价低; 能进行控制温度的饱和土与非饱和土试验。利用该设备对陶岔胀土进行了三种应力路径的控制温度的三轴试验, 结果表明, 温度对该土的变形、强度和土-水特征曲线有较大影响。温控土工三轴试验设备的研制成功为研究土的热力学特性提供了有力工具。

关键词: 温控; 三轴仪; 电热恒温箱; 吸力; 体变; 排水; 非饱和土; 膨胀土;

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)08-0928-06

作者简介: 陈正汉(1947-), 男, 1991 年在西安理工大学获工学博士学位, 现任解放军后勤工程学院教授、博士生导师, 主要从事岩土工程教学与非饱和土、湿陷性黄土、膨胀土及岩土工程稳定性的研究。

Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application

CHEN Zheng-han, XIE Yun, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, LI Gang

(Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: New test equipment for soils was developed by combining unsaturated triaxial apparatus with electric thermostat-box. It consists of several parts, its volume is small and its weight is light. The apparatus can withstand high temperature and high pressure. Test temperature, suction, stress and strain can be either controlled perfectly or measured correctly. The precision of measuring total volume change and drainage water volume as well as pore air pressure is satisfactory, and the hysteresis time for transmitting pressure is minor. Test data are gathered and treated automatically by computers. The cost for developing the apparatus was not much. This equipment can be used to perform the test with temperature-controlled for saturated soil or unsaturated soil. Three groups of triaxial tests with temperature controlled for unsaturated expansive soils were carried out, and the test results show that temperature exerts great effect on the mechanical behavior of the soil, such as strain, strength and soil-water characteristics curve et al.

Key words: temperature-controlled; triaxial apparatus; electric thermostat-box; suction; volume change; drainage; unsaturated soil; expansive soil

0 前 言

近年来, 在核废料的地下贮藏、高压电缆和其它热管线的埋地敷设、为保护地下水免受固体废物污染的工程覆盖层设计、地热开采、石油气开采等领域, 对土的热-水-力耦合过程的研究引起了国内外学者的关注, 研制开发探讨土的热力学性质的仪器设备首当其冲。例如, 为了研究温度对掩埋核废料的 Boom 粘土(是一种膨胀土)力学性质的影响, 欧洲学者做出了很大努力, 西班牙 Catalunya 工业大学研制出温控非饱和土固结仪^[1], 土样盒置于硅油槽内, 硅油由浸在其中的电热器加热, 土样温度和硅油温度分别用热电偶量测, 基质吸力用轴平移技术施加, 试验温度介于 22℃~80℃; 比利时学者 Bruyn 和 Thimus 研制

成高温三轴仪^[2], 用于饱和 Boom 粘土的研究, 加热元件是浸没在压力室水(或硅油)中的铜螺旋管, 温度可加到 80℃(以水为加热流体)或 120℃(以硅油为加热流体), 但试样温度难以保持均匀和稳定; 法国路桥大学的 Sultan、Delage 和 Cui 改进了 GDS 三轴仪^[3], 用绕在压力室外围的线圈加热, 温度可达 100℃, 也用于饱和 Boom 粘土的研究, 但 GDS 三轴仪的压力室罩比较笨重, 也有试样温度不易保持均匀和稳定的问题。再如, 为了探讨温度对由砂和膨润土混合物组成的深埋核废料覆盖层的力学特性的影响, 加拿大学者 B Wiebe, J Graham, Tang & D Dixon 研制了一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372115)

收稿日期: 2004-09-20

套高温高压三轴仪^[4],如图1所示。该三轴仪的压力室为铝筒,可承受3 MPa的液压。压力室内充水(试验温度为26℃时)或充硅油(试验温度为65℃和100℃时),用缠绕在压力室外侧的两条硅油带加热,压力室置于绝热罩内。用两个电阻热元件在试样中部测温度,电阻热元件用硅橡胶带包裹。试样套两层橡胶膜。对低温用乳胶膜,对高温用一层丁基胶膜和一层硅橡胶膜。由于增设了绝热罩,因而压力室内的温度较为均匀稳定,在温控方面优于欧洲两家的三轴仪。但图1所示的三轴仪既不能测量吸力,也不能控制吸力。

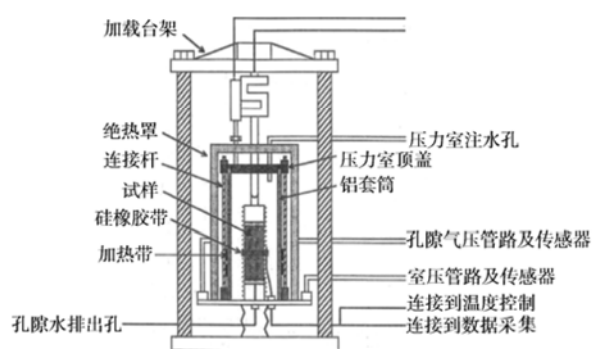


图1 文献[4]介绍的高温高压三轴仪压力室结构示意图

Fig. 1 The high-pressure / high-temperature triaxial cell introduced in Reference [4]

由于砂和膨润土混合料组成的深埋核废料覆盖层的吸力很大(初始总吸力约3.5~4.5 MPa),加拿大Manitoba大学的J Blatz和J Graham于2000年研制出一套新的高温高压三轴系统^[5](图2),可承受10 MPa的液压和100℃的高温。新的高温高压三轴系统置于温控实验室内^[6],温度的波动范围控制为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。该系统的最大特点是用离子溶液上方的水蒸汽平衡控制试样吸力,用电偶湿度计测量试样总吸力,故可做高吸力水平的非饱和土试验。蒸汽通道是闭合的,采用微型泵循环,整个系统的水蒸汽和离子溶液之总质量是常量。土样周边贴有土工布条,为蒸汽提供通道。布条宽15 mm,其长度可覆盖土样上下底面,其刚度能在2.5 MPa室压下为蒸汽提供通道。压力室内设4根立杆,以便在室内安装量测仪器。荷载传感器置于压力室内。用一个位移传感器量测轴向应变,两个位移传感器量测试样中部的径向应变。用两个热电偶湿度计量测吸力,一个埋在试样中部,一个斜埋在试样顶部靠边角处。如此一来,制样困难。Tang等在2002年对此加以改进^[7],只用一只热电偶湿度计测总吸力,并将其上半部分装在试样帽中心线下部的圆柱形不锈钢套中。湿度计的下半部分呈锥形,直径5 mm,长7 mm,可插入土样顶部预先钻好的小孔中。

Manitoba大学的高温高压三轴系统由于置于温控

实验室内,无需增设加热设备,但建立温控实验室的费用很高,且在做高温试验时工作人员无法忍受。该系统能测出很高的吸力,但只能测出总吸力,或由总吸力的变化近似得知基质吸力的变化,而不能测定基质吸力。此外,对吸力水平较低的常见情况(吸力在数百kPa范围之内),该系统就显示不出优点了。

综上所述,现有温控三轴仪都存在不尽人意之处,研制应用方便、花费较低的三轴试验系统是很有意义的。解放军后勤工程学院与江苏省溧阳工程实验设备厂合作,经3年努力探索,研制成国内第一套温控土工三轴试验设备。初步的研究结果表明,该设备性能良好,可供实用。

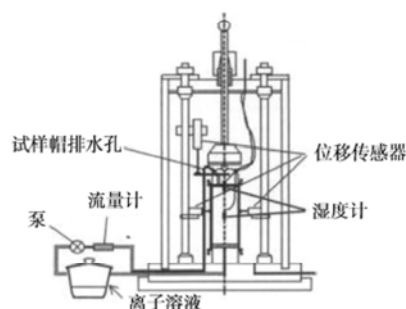


图2 Manitoba大学的控制吸力高温高压三轴压力室示意图^[5]

Fig. 2 Triaxial cell with controlled suction^[5] in Manitoba University

1 研制目标、途径与问题

参照国外同类仪器,新设备的主要研制目标是:

- ①三轴压力室及相关管道要能经受100℃左右高温和5 MPa的液压,部分量测仪表也要耐高温;
- ②温度和基质吸力可控可测,基质吸力上限暂定为1500 kPa;
- ③体变、排水量的量测精度要高(特别是非饱和土);
- ④使用方便、造价低;
- ⑤既可用于饱和土,更能用于非饱和土。鉴于非饱和土的测试技术比饱和土的复杂得多,故本文把工作重点放在温控非饱和土三轴仪的研制上。

实现上述目标的最佳途径之一就是把土工三轴试验技术(特别是非饱和土测试技术)与电热恒温箱结合起来,因为恒温箱规格型号很多,可按需配置。但由此引起了一系列问题需要解决。①恒温箱内部空间有限,同时考虑到控制操作最好在箱外进行,压力室及其相关元件必须与控制部件、动力设备等分离,且应比较轻便。体大笨重的常规三轴显然不能担当此任,对其仅作小的改进亦于事无补。②联结恒温箱内外部件的各种管道(还有信号线)要穿过恒温箱,必须解决穿越通道问题;同时,为了尽可能减小恒温箱内外的热量交换及由此引起的恒温箱内的温度波动,联结

管道的直径必须尽量细。③置于恒温箱内的部件和联结管道的材料必须能经受高温高压,不会氧化锈蚀。第四,温控试验历时较长(特别是非饱和土试验),试验温度较高时压力室中的水有可能从压力活塞与其轴套之间蒸发渗漏,影响体变量测精度,需采取专门措施解决。另外,还要注意采取其它措施,以提高体变、排水、气压的量测精度。

2 新仪器的结构与关键技术

新研制的温控土工三轴仪的实体照片如图 3 所示。该仪器采用模块组合结构,主要由电热恒温箱、台架与压力室、轴向加载部件、轴向荷载与轴向变形量测元件、轴向荷载与轴向变形控制系统、水-气-电路控制柜、精密体变量测装置、排水体积量测装置、孔隙水压力与孔隙气压力量测元件、微机与数据采集处理系统等 8 个部分组成。

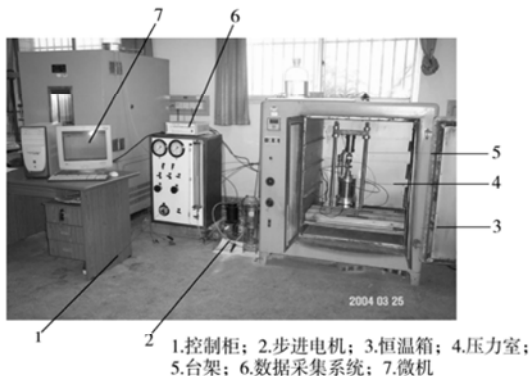


图 3 后勤工程学院的温控三轴试验系统照片

Fig. 3 Photograph of temperature-controlled triaxial apparatus in Logistical Engineering University

(1) 电热恒温箱。内部空间为 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.0\text{ m}$, 最高工作温度是 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度波动范围为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度用 3 套仪器监测: ①箱顶上的温度计; ②正面左上角的自动仪表(图 3); ③箱体左侧壁中部的自动仪表。考虑到各种联结箱内外部件的管道和信号线穿过恒温箱侧壁较穿过顶部有利, 暂且拆除侧壁中部的监测自动仪表, 这样就在恒温箱侧壁中部偏下的位置出现了一个直径 1.6 cm 的贯穿孔(图 4), 可供使用。

(2) 台架与压力室。这一部分与电机及调速装置分离, 结构轻巧, 移动方便。台架的外围尺寸是 $0.30\text{ m} \times 0.28\text{ m} \times 0.80\text{ m}$ 。当作温控试验时, 可将其置于电热恒温箱内, 下垫木板和耐热材料(图 3, 4)。台架和压力室都用不锈钢制成, 压力室的侧壁厚 1 cm , 可用于常温、高温和高压环境试验; 与压力室及轴向加载部件相连的水、气管道(共 7 条)均采用内径 1 mm 、外径 3.2 mm 的不锈钢管(图 4), 能承受 100 个大气压, 在温度较高时不会发生过大的膨胀, 对提高体变、排

水的量测精度和减少恒温箱内外热量交换有利。



图 4 温控土工三轴压力室照片(置于恒温箱内)

Fig. 4 Photograph of temperature-controlled triaxial cell in Logistical Engineering University

非饱和土的温控试验历时较长, 为了防止试验温度较高时压力室中的水从压力活塞与其轴套之间蒸发渗漏, 在压力活塞轴套上部专门设置了一个小水室(图 5), 其中的水压力与压力室中的水压力相等, 因而压力室中的水与小水室中的水就不会互相侵入。由于有压力水源不断补充, 故小水室中始终充满着水。

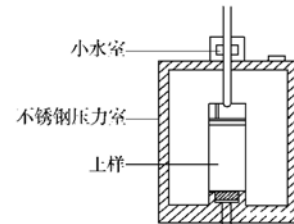


图 5 温控土工三轴压力室照片(置于恒温箱内)

Fig. 5 Pressure cell around load piston

试样下面有一高进气值陶土板, 其进气值是为 1500 kPa 。饱和的陶土板透水不透气, 试样中的水可通过陶土板排出, 气体则不能直接通过, 从而可实现水、气的独立控制, 进而可控制基质吸力。溶解在水中的气体可随水一起透过陶土板而积聚在陶土板下面, 在试样底座专门刻设螺旋槽^[8], 水从底座中心进入螺旋槽, 最后从螺旋槽末端流出, 这样即可冲走陶土板下的气泡, 提高量测排水量的精度。

试样上面放一块单孔薄铜板, 以便在做控制吸力试验时对试样施加气压。若做不排气试验, 则在试样帽上安装微型压力传感器, 探头直径 3 mm , 封装在外径 8 mm 的螺母中(图 6), 可量测试样中的孔隙气压力^[9]; 装在底座上的传感器可量测孔隙水压力。

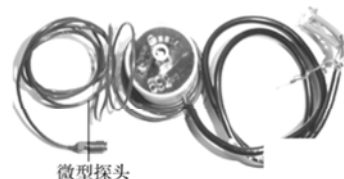


图 6 微型压力传感器照片

Fig. 6 Photograph of micro-transducer

(3) 轴向加载部件、轴向荷载和轴向变形量测元件。轴向加载部件是一柱形液压活塞，固定于台架横梁下方。活塞与轴套之间采用滚动隔膜密封，下端接荷载传感器，试样的轴向变形用位移传感器量测（图4）。两种传感器均系阜新传感器厂生产，可耐 100 ℃ 高温。两传感器引线和 7 条水、气管道皆从恒温箱侧壁的小孔引出（图4），并用石棉堵塞缝隙。

(4) 轴向荷载与轴向变形控制系统。此系统由步进电机及其驱动器、调压筒组成（图7），既能控制试验的应变速率，也能控制试验的轴向荷载大小；设有 7 档应变速率，可供选用。调压筒用黄铜制成，与加载活塞室之间用上述不锈钢管联通，内充纯净水（不宜用油），这样易于排除管路中的小气泡，并有效减少传压滞后时间。

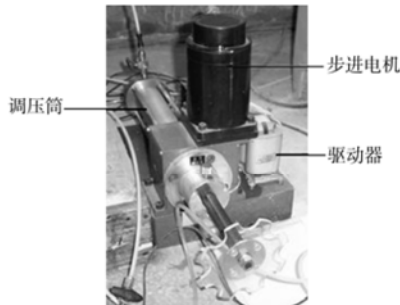


图7 步进电机、驱动器及调压筒照片

Fig. 7 Photograph of step motor, driver & pressure-controller

(5) 水、气、电路控制柜（图8）。气压与液压都用调压阀控制，空压机用电接点继电器控制。



图8 水、气、电路控制柜

Fig. 8 Control device for water, gas and power

(6) 精密体变量测装置（图9）。其主要部件是一支装在有机玻璃筒中的注射器，有压气体进入玻璃筒推动注射器，注射器中的无气水进入内层压力室并给试样施加液压。试样的体变反映为注射器内水的体积变化。注射器的位移用带传感器的百分表量测，百分表每走一格，所对应的体变是 0.006 cm^3 ，大大提高了量测试样体变的精度^[9]。为了保证水不被从注射器内壁与活塞之间挤出，在注射器中的无气水上面覆盖一层厚约 1cm、粘度合适的矿物油。

(7) 排水体积量测装置。排水量管为内径 4 mm 的尼龙管，在尼龙管下端连接压差传感器，通过量测水柱高度可得出排水体积。排水管内发生 1 mm 的变化相应于 0.012 cm^3 的水体积变化。量测排水体积的另一种方法是增设了一套专门装置（图10），直接读取；通过手轮调节排水管的水面高度（调节范围约 80 cm），使其与试样中心处于同一高程。



图9 精密体变量测装置

Fig. 9 Device for measuring volume change

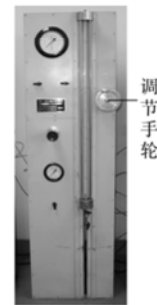


图10 可调节水位高程的排水体积量测装置

Fig. 10 Device for measuring volume of drained water

(8) 微机与数据采集处理系统。

3 新仪器的功能与特色

与国外现有温控三轴仪^[2~7]及国内现有非饱和土三轴仪^[10]相比，新仪器有以下功能与特色：

(1) 台架、压力室、水气管道全由不锈钢制成，可用于常温、高温和高压环境试验。

(2) 试验的温度、基质吸力、应变速率、加载速率、荷载大小、围压、水压、气压均可按需设置；在做不排气试验时，基质吸力可测。因而，既能用于非饱和土，也能用于饱和土（只需一个常规压力室底座）。

(3) 台架和压力室与步进电机及调速装置分离，体积较小，重量轻，可置于恒温箱内；水、气管道很细，穿越恒温箱侧壁及密封较容易；从而实现了三轴仪与电热恒温箱的巧妙结合。无需增设专门的加热、隔热设备，更不必建造控制高温的恒温实验室，可节省大量资金。

(4) 水、气管道承压高、管径细，胀缩量小，对

减少恒温箱内外热量交换有利;气压和压力室液压在试验中保持常数,加之试验速率低,管道中的水、气处于相对静止状态,故恒温箱外部管道中的水、气对恒温箱内部管道中及压力室中的水、气温度的影响甚微,试验温度浮动范围完全可由恒温箱的技术指标控制。

(5) 专门设置的小水室、精密体变量测装置及细径高压钢管提高了体变量测精度。试样底座设置的螺旋槽、排水量测装置及细径高压钢管提高了排水量测精度。微型压力传感器提高了量测不排气试验中的孔隙气压力精度。

(6) 液压加载系统中用水而不用油,易排气,传压滞后小。试验数据自动采集处理,应用方便。

4 新仪器的初步应用

应用温控土工三轴仪,对南阳膨胀土做了三种应力路径的温控试验:①温度、净围压及基质吸力都等于常数的三轴排水剪切试验;②温度和净围压都等于常数而基质吸力增大的收缩试验;③温度和基质吸力都等于常数而净平均应力增大的均压固结试验。试验用土取自陶岔引丹渠首,探井位于南水北调中线工程的渠坡上,重塑制样。试样的直径和高度分别是 3.91 cm 和 8 cm,初始干密度为 1.5 g/cm^3 ,初始含水量为 24.2%,土粒比重 2.73。

三轴排水剪切试验控制温度为 15, 30, 45, 60 °C, 净围压控制为 50, 100, 200 kPa, 基质吸力控制为 100 kPa。试验中,孔隙水压力 $u_w = 0$, 试验时只需控制总室压力和气压力为常数即可。先对土样进行控制吸力和净围压为常数的排水固结,在排水和固结稳定后进行剪切。固结过程的稳定标准为体变在 2 h 内不超过 0.006 cm^3 ,并且排水量在 2 h 内不超过 0.012 cm^3 。剪切速率控制为 0.00555 mm/min 。

收缩试验的温度控制为 45 °C, 净围压控制为 50 kPa, 基质吸力分级施加,试验结束时基质吸力为 300 kPa。

均压固结试验的温度控制为 45 °C, 基质吸力控制为 100 kPa, 净平均应力 p 分级施加,试验结束时净平均应力为 300 kPa。

图 11 是不同温度下三轴排水剪切试验的偏应力与轴应变的关系曲线(即 $q - \varepsilon_a$ 曲线),表明土强度随温度升高而升高,起始切线杨氏模量也随温度升高而增大。

图 12, 13 分别是 45 °C 时的收缩试验和均压固结试验的比容与基质吸力的关系曲线(即 $v - s$ 曲线, $s = u_a - u_w$)和比容与净平均应力的关系曲线(即, $v - p$ 曲线),并与卢再华的常温试验结果^[11]进行比

较。从两图可知,随着温度增高,控制吸力的均压试验中的屈服应力降低,而在控制净平均应力的收缩试验中,温度对屈服吸力的影响不大。

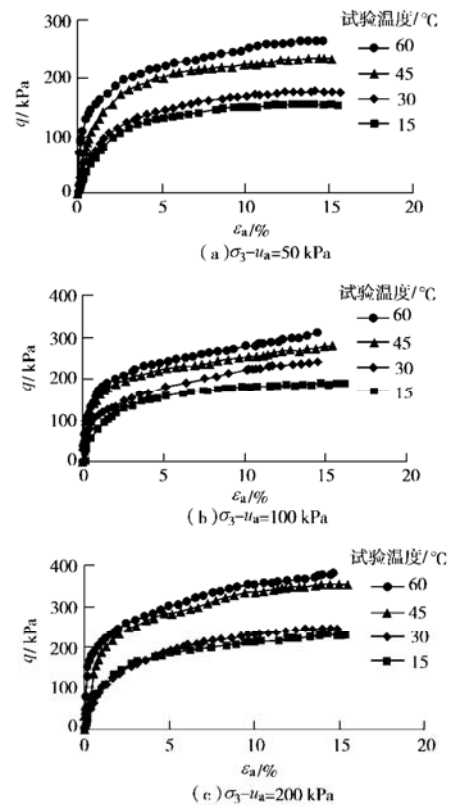


图 11 不同温度下土的应力应变曲线

Fig. 11 Strain-stress curve under different temperatures

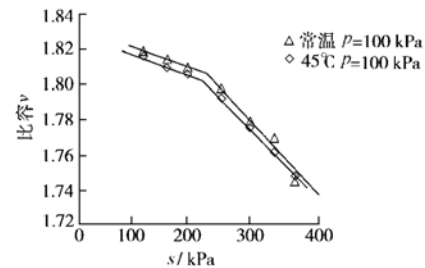


图 12 控制净平均应力为常数的收缩试验的 $v - s$ 关系曲线

Fig. 12 The relationship of specific volume and suction for shrink test with constant net mean stress

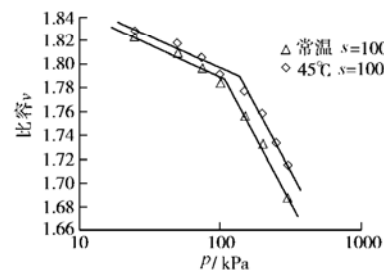


图 13 控制吸力为常数的均压试验的 $v - p$ 关系曲线

Fig. 13 The relationship of specific volume and net mean stress for isotropic compress test with constant suction

5 结 语

新研制的温控土工三轴仪采用模块组合结构和一系列特殊措施, 实现了三轴仪与恒温箱的巧妙结合; 体小轻巧, 便于移动, 能经受高压高温工作环境; 试验温度、基质吸力、应变速率、加载速率、荷载大小、围压、水压、气压、均可按需设置; 基质吸力可测; 体变、排水、气压量测精度高, 传压滞后小; 试验数据自动采集处理, 可用于研究温度对非饱和土及饱和土的力学性质的影响。新仪器造价低, 总体上达到了国际先进水平, 在结构设计、材料选择、元件配置、密封技术、量测手段、使用功能等方面具有显著的特色。对重塑非饱和膨胀土的温控试验的初步研究结果表明, 温度对该土的变形、强度和土-水特征曲线有较大影响。因而新仪器是探讨土的热力学特性的有力工具。

参考文献:

- [1] Romero E, Loret A, Gens A. Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell [A]. Alonso, Delage. Proc of 1st Int Conf on Unsaturated Soils[C]. Paris, 1995.(1): 553 - 559.
- [2] Bruyn D De, 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.
- [3] Sultan N, Delage P, Cui Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay [J]. Engineering Geology. 2002, 64: 135 - 145.
- [4] Wiebe B, Graham J, Tang G X, Dixon D. Influence of pressure, saturation, and temperature on the behaviour of unsaturated sand-bentonite [J]. Can Geotech J, 1998, 35: 194 - 205.
- [5] Blatz J, Graham J. A system for controlled suction in triaxial tests [J]. Geotechnique, 2000, 50(4): 465 - 469.
- [6] Blatz J, Graham J. Elastic-plastic modeling of unsaturated soil using results from a new triaxial test with controlled suction [J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 113 - 121.
- [7] Tang G X, Graham J, Blatz J, et al. Suction, stresses, and strengths in unsaturated sand-bentonite [J]. Engineering Geology. 2002, 64: 147 - 156.
- [8] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 方祥位, 文 君. 非饱和土固结仪与非饱和土直剪仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 161 - 166.
- [9] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报. 1993, 15(3): 9 - 20.
- [10] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82 - 90.
- [11] 卢再华, 陈正汉, 孙树国. 南阳膨胀土变形与强度特性的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 717 - 723.

CI-Premier Conference Announcement-2005 & 2006

Ref	Date	Rvent	Venue
CFRD05	19~26 Sep.2005	Symposium on CONCRETE FACE ROCKFILL DAM and the 20 th Anniversary of China's CFRD Construction	Yichang, China
RB05	19~21 Oct. 2005	9 th Int'l Conference on INSPECTION, APPRAISAL, REPAIRS & MAINTENANCE OF STRUCTURES Call for papers status	Fuzhou, China
BR05	24~26 Oct. 2005	4 th Int'l Conference on NEW DIMENSIONS IN BRIDGES, FLYOVERS, OVERPASSES & ELEVATED STRUCTURES Call for papers status	Fuzhou, China
SI05	07~09 Dec.2005	6 th Asia-Pacific Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES Call for papers status	Perth, Australia
HM05	12~14 Dec. 2005	Int'l Conference on STRUCTURAL CONDITION MONITORING AND DAMAGE IDENTIFICATION Call for papers status	Perth, Australia
SS06	16~17 May, 2006	8 th Int'l Conference on STEEL, SPACE AND COMPOSITE STRUCTURES-The Steel Advantage Call for papers status	Malaysia

Tel: (065)67332922 Fax: (065)62353530 e-mail: cipremie@singnet.com.sg