

DOI: 10.11779/CJGE201904013

# 多边界条件下缓冲/回填材料的膨胀特性

李胜杰, 唐朝生\*, 王东伟, 陈志国, 施斌

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 高放废物处置库中缓冲/回填材料的膨胀特性是评价其屏障性能的关键因素。受试验仪器等条件的限制, 以往的膨胀试验基本都是在恒体积和恒应力这两种极端边界条件下开展的, 无法有效反映处置库中的复杂应力-应变环境。研发了一套新型的多边界条件膨胀仪, 集成了恒体积、恒应力和柔性等刚度 3 种边界条件。利用该膨胀仪对中国高庙子 (GMZ) 缓冲/回填材料开展了一系列膨胀试验, 分析了边界条件对试样膨胀特性的影响。结果表明: 研发的多边界条件膨胀仪具有操作简单、性能稳定等特点, 能有效地模拟各种边界条件; 边界条件对试样膨胀指标具有重要影响, 对应的最终膨胀力关系为: 恒体积>柔性等刚度>恒应力边界条件, 最终膨胀率关系为: 恒应力>柔性等刚度>恒体积边界条件; 膨胀平衡极限 (SEL) 曲线可作为评价土体在复杂边界条件下水化时的最终体变和膨胀力的参考。研究结果对进一步认识土体的膨胀特性和指导高放废物处置库中缓冲/回填材料的设计具有一定参考意义。

**关键词:** 核废物地质处置; 缓冲/回填材料; 多边界条件膨胀仪; 膨胀特性; 边界条件; SEL 曲线

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0700-07

**作者简介:** 李胜杰(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事缓冲/回填材料的胀缩特性研究。E-mail: lishengjie2333@126.com。

## Effects of boundary conditions on swelling behavior of buffer/backfill materials

LI Sheng-jie, TANG Chao-sheng, WANG Dong-wei, CHEN Zhi-guo, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The swelling behavior of buffer/backfill materials in high-level radioactive waste (HLW) repository is one of the significant indices evaluating their buffer/backfill properties. Due to the limitations of test apparatus, most of the previous swelling tests are performed under two simple extreme boundary conditions of constant volume (CV) and constant mean stress (CMS), which can not effectively reflect the complex stress-strain state in the repository. A new set of multi-boundary conditions dilatometer is designed to carry out a series of swelling tests under CV, CMS and constant stiffness (CS) boundary conditions. Based on this custom-made test apparatus, the swelling behavior of GMZ buffer/backfill materials is tested under complex boundary conditions. The results indicate that the developed test apparatus has the advantages of simple operation and stable performance, which can effectively stimulate various boundary conditions. The boundary conditions have an important influence on the ultimate swelling indices of samples. More specifically, the relationship between various boundary conditions and the corresponding swelling pressure is  $CV > CS > CMS$ , and the relationship between these conditions and the corresponding swelling strain is  $CMS > CS > CV$ . The swelling equilibrium limit (SEL) curve can be used as a reference for predicting the ultimate swelling strain and pressure of soils during hydration under complex boundary conditions. The test results have certain reference significance for further understanding the swelling behavior and guiding the design of buffer/backfill materials in HLW repository.

**Key words:** nuclear waste geological disposal; buffer/backfill material; multi-boundary condition dilatometer; swelling behavior; boundary condition; SEL curve

## 0 引言

近年来, 随着全球能源危机加剧, 核能迎来了蓬勃发展的历史机遇, 但同时也面临着诸多挑战, 其中最为突出的就是在核能在利用过程中产生的大量高水平放射性废物 (高放废物) 的安全处置问题<sup>[1]</sup>。目前国际上公认切实可行的处置方法为深地质处置, 即将

预处理后的高放废物埋置到距地表 500~1000 m 的稳

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41572246, 41772280); 优秀青年科学基金项目 (41322019); 国家自然科学基金重点项目 (41230636); 江苏省自然科学基金项目 (BK20171228、BK20170394); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2015-2020)

**收稿日期:** 2018-01-09

**\*通讯作者** (E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn)

定地质体中,并在地质体(围岩)间采用缓冲/回填材料封填,从而实现高放废物与人类生存环境的长期或永久隔离。缓冲/回填材料的主要成分为富含蒙脱石的膨润土,具有极低的渗透性和吸附性,能有效阻隔高放废物核素向外迁移和扩散<sup>[2-3]</sup>。当处置库中的膨润土受到地下水的侵蚀时,会产生显著的膨胀变形,能有效密封围岩及处置库施工过程中存在的缝隙<sup>[4]</sup>。而当膨胀变形受到围岩的限制时,会产生膨胀力,有利于平衡围岩应力<sup>[5-6]</sup>。因此,对于缓冲/回填材料而言,合理的膨胀性对处置库的长期安全运行具有重要意义。

土体的膨胀性主要通过两个关键指标进行评价,即膨胀应变和膨胀力。为了测试这两个指标,许多学者在一维固结仪中开展了大量试验,并分析各种影响因素。Delage 等<sup>[7]</sup>采用渗析法控制试样吸力进行了膨胀试验,发现吸力变化会影响土体的膨胀特性;王志俭等<sup>[8]</sup>发现膨润土-砂混合物的膨胀变形与含水率无关;刘月妙等<sup>[9]</sup>开展了一系列膨胀试验,发现膨胀力与试样初始干密度和蒙脱石含量有关,且会随着初始干密度的增大而增大;叶为民等<sup>[10]</sup>指出高压实 GMZ 膨润土的膨胀力与干密度之间存在指数关系,干密度是影响试样膨胀力的关键参数;秦冰等<sup>[11]</sup>采用 GMZ 膨润土探讨了干密度、竖向荷载、浸泡液体、吸湿方式等对其膨胀变形的影响,结果表明高浓度溶液会抑制试样的膨胀变形;唐朝生等<sup>[12]</sup>探究了不同试验方法对高压实缓冲/回填材料膨胀特性的影响,发现试样的膨胀特性与试验方法有关,且在恒体积条件下试样膨胀指标与吸力呈特定函数关系。此外,还有很多科研人员也对缓冲/回填材料的膨胀特性进行了研究,并取得了一系列研究成果<sup>[13-19]</sup>。

然而,需要指出的是,以往的膨胀性试验基本都局限于两种极端边界条件:恒体积和恒应力(图1)。前者完全限制试样在水化过程中的变形,主要用于测试膨胀力;后者始终维持试样水化过程中的竖向应力不变,主要用于测试膨胀变形。事实上,介于这两种极端边界条件之间,还存在其它无限种可能的柔性边界条件,即土体在水化过程中,变形和限制应力没有受到严格约束,可随水化时间而变化<sup>[20]</sup>。比如试样所受到的限制应力随膨胀变形量的增加而增加,这种增加可以是线性的,即对应柔性边界条件的刚度系数为常数(等刚度条件),也可以按照一定的函数关系呈非线性发展(变刚度条件)(图1)。

以核废料地质处置库为例(图2),位于不同位置的缓冲/回填材料,在遇水膨胀时对应的边界条件是不同的。靠近围岩处材料的膨胀空间受到限制,等效于恒体积边界条件;位于储物罐正下方的材料相当于在

恒应力边界条件下水化膨胀;而其他过渡区的材料都相当于在柔性边界条件下水化膨胀,膨胀变形和所受到的侧限压力是一个动态变化的过程<sup>[21]</sup>。此外,在处置库运营过程中,堆载、卸载等环境条件变化都会引起处置库的应力重新分布,部分边界条件会进一步发生改变。因此,缓冲/回填材料在水化过程中对应的边界条件实际上非常复杂。然而,目前国内外关于边界条件对缓冲/回填材料膨胀特性的影响研究非常少,这对于高放废物处置库的优化设计显然是不利的。非常有必要在试验中模拟各种水化环境,系统掌握缓冲/回填材料在不同边界条件下的膨胀行为,从而更科学地指导处置库的设计与施工。

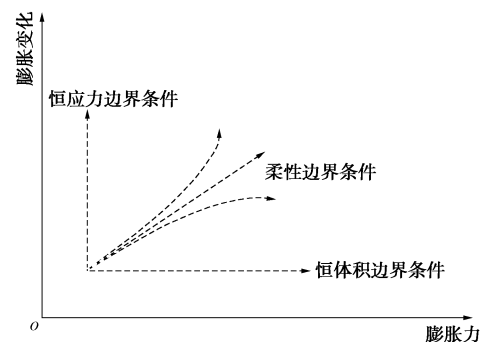


图1 土体膨胀试验中对应的几种边界条件

Fig. 1 Several boundary conditions during soil swelling tests

为此,本文自主研发了一款新型多边界条件膨胀仪,能在试验过程中实现恒体积、恒应力和柔性等刚度3种边界条件的自由切换,模拟多种应力-应变路径。利用该仪器对 GMZ 膨润土开展了一系列膨胀试验,探讨了边界条件和试验路径对膨胀特性的影响。

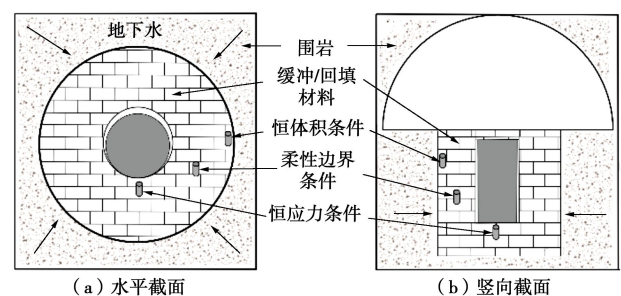


图2 地质处置库中缓冲/回填材料对应的水化膨胀边界条件示意图

Fig. 2 Schematic view of different infiltration boundary conditions in HLW repository

## 1 多边界条件膨胀仪

### 1.1 仪器介绍

如前所述,传统的膨胀试验方法主要对恒应力和恒体积两种极端边界条件进行模拟,存在一定的局限性,具体表现在:①边界条件单一;②试验控制方法

复杂,尤其是恒体积条件难以精确控制;③试验过程无法转换边界条件,无法测试试验路径。为了克服这些问题,本文研发了一套新型的多边界条件膨胀仪(申请专利号:Z.L.201610425067.9),主要由固结仪(图3,内径39.1 mm)、饱和系统(GDS压力-体积控制器)、边界条件切换系统(上/下横梁、拉杆组件#1, #2, #3, #4和量力环)、竖向加载系统(加载框架和砝码吊盘)、应力-应变测量系统(压力传感器、位移传感器1和2)和数据采集系统(数据采集器和计算机)等6部分组成(图4)。

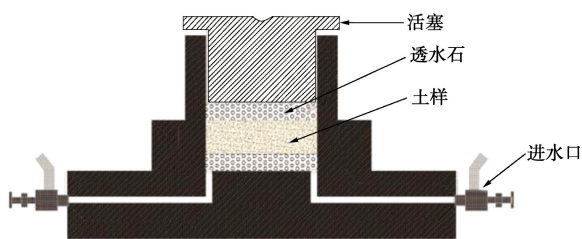


图3 固结仪示意图

Fig. 3 Schematic view of oedometer cell

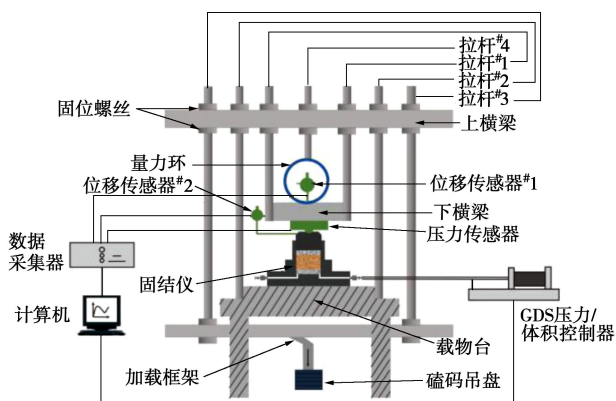


图4 多边界条件膨胀仪示意图

Fig. 4 Schematic view of multi-boundary condition dilatometer

其中,固结仪置于载物台上,压力传感器安装在下横梁上,并与固结仪中的活塞相接触,用于测量竖向压力。GDS压力-体积控制器与固结仪的底坐与相连,用于饱和试样,并控制水压力。量力环通过拉杆#4固定在上、下横梁之间,用于模拟柔性等刚度边界条件(竖向压力随试样的变形量线性增加)。当试样吸水膨胀时,量力环会发生与试样竖向等量的变形,从而对试样产生反向作用力,限制试样的变形。拉杆组件#1, #2和#3的上部通过螺母固定在上横梁上,其中拉杆组件#1的下部固定在下横梁上,拉杆组件#2的下部固定在载物台上,拉杆组件#3与加载框架相连。加载框架基于杠杆原理进行加载。位移传感器#1用于测量试样的竖向变形,位移传感器#2用于测量量力环的变形,它们和压力传感器都与数据采集相连,将采集

到的数据自动存入计算机中。

## 1.2 工作原理

在试验中,如果需要模拟恒体积边界条件,只需把上横梁上的所有拉杆固定即可,此时试样的膨胀变形被完全限制,膨胀力通过压力传感器进行测量(图5(a))。如果需要模拟恒应力边界条件,只需固定拉杆组件#1和#3,同时放松拉杆#2和#4,在砝码吊盘添加砝码,通过拉杆组件3对试样施加恒定的竖向应力,竖向应力的可通过砝码重量和加载框架的杠杆比进行控制,也可通过压力传感器进行测量,试样的膨胀变形量位移传感器进行测量(图5(b))。如果需要模拟柔性等刚度边界条件,只需放松拉杆组件#1,同时固定其它拉杆组件,量力环的变形不再受到拉杆#1的限制,其将随着试样的膨胀产生与之等量的变形,量力环变形越大,对试样产生的竖向限制应力越大,限制应力的可通过量力环的变形和刚度系数计算得到(图5(c))。通过调整各拉杆组件的松紧状态,便可在试验过程中实现上述3种边界条件的任意切换,开展不同路径的膨胀试验。

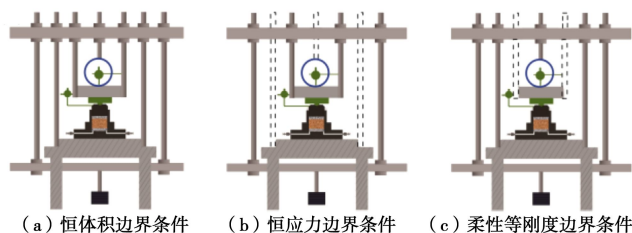


图5 不同边界条件下试验仪器装置图

Fig. 5 Schematic view of test apparatus under different boundary conditions

## 1.3 操作方法

以开展多边界条件下缓冲/回填材料膨胀试验为例,介绍设计的多边界条件膨胀仪的具体操作方法。

(1)将载有试样的固结仪放在载物台上,并确保压力传感器与固结仪顶部活塞相接触。

(2)根据所需边界条件,调整仪器拉杆松紧(图5),如恒体积条件只需固定所有拉杆;恒应力条件控制拉杆#1、拉杆#3固定,拉杆#2、拉杆#4松开;柔性等刚度边界条件控制拉杆#1松开,其余拉杆固定。

(3)在调整好所需边界条件后,对各构件进行微调,确保压力传感器与位移传感器接触良好后,打开电脑,采集试验数据。

(4)向固结仪中注水,开始膨胀试验。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本试验采用的土体为取自内蒙古的GMZ膨润土,



它已经被确定为中国高放废物地质处置库的首选缓冲/回填材料<sup>[6]</sup>。其风干含水率为8.5%，主要矿物成分为蒙脱石（75.4%），伴生矿物有石英、方解石、长石、白云母等，这与其他缓冲/回填材料如MX-80、FEBEX和Kunigel-V1膨润土矿物成分类似<sup>[22-24]</sup>。温志坚<sup>[25]</sup>分析了GMZ膨润土的基本物理化学性质，如表1所示。

表 1 GMZ 膨润土的基本物理化学性质<sup>[25]</sup>

Table 1 Basic physical and chemical characteristics of GMZ01 bentonite <sup>[25]</sup>				
相对密度 度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	阳离子交换容量 $/(\text{mmol} \cdot (100\text{g}^{-1}))$	蒙脱石含量 $/\%$
2.71	276	37	77.06	75.4

2.2 试验方法

将风干的GMZ膨润土置于固结仪中，上下面分别放置滤纸和透水石，在压力机上压实到目标干密度 $1.6\text{ g/cm}^3$ ，控制压样速度为 $0.05\text{ mm/min}$ ，试样的高度为 $20\text{ mm}$ ，直径为 $39.1\text{ mm}$ 。试样压实到指定干密度后，保持压力 $2\text{ h}$ ，减小卸荷回弹效应。

将压制好的试样连同固结仪一起移致多边界条件膨胀仪，调整各组件确保压力传感器与试样上方的活塞顶部相接触，并连接GDS压力-体积控制器，通过加装框架对试样施加 $100\text{ kPa}$ 的初始压力，设定好边界条件后，打开固结仪底部的通水阀门，对试样进行饱和，饱和时的供水压力设置为 $15\text{ kPa}$ 。

本次研究共开展了7组试验，相关试验参数如表2所示。每组试样分别对应不同的边界条件：恒体积CV、恒应力CMS和柔性等刚度柔性边界条件（CS1-CS5），旨在探究边界条件对缓冲/回填材料膨胀特性的影响。在柔性等刚度边界条件试验中，采用了5个不同刚度系数 $k$ 的量力环来模拟不同的环境条件。

表 2 试验中试样参数

Table 2 Specific parameters of samples				
试样编号	干密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	竖向荷载/ $\text{kPa}$	边界条件	刚度系数 $k/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
CV	1.6	100	恒体积	—
CMS	1.6	100	恒应力	—
CS1	1.6	100	柔性等刚度	239.33
CS2	1.6	100	柔性等刚度	538.12
CS3	1.6	100	柔性等刚度	1115.24
CS4	1.6	100	柔性等刚度	2390.05
CS5	1.6	100	柔性等刚度	4089.98

3 结果与讨论

膨润土吸水饱和过程中，膨胀率和膨胀力时程变化曲线如图6所示。恒体积条件下，测得的恒体积条件

试样的膨胀率始终为零（图6（a）），说明研发的仪器具有良好的恒体积控制效果，而对应的膨胀力随时间表现出先迅速增加，后缓慢增加，最终趋于稳定的三阶段特征（图6（b））。在恒应力条件下，测得的恒应力条件下试样的膨胀力始终等于初始施加的竖向应力 $100\text{ kPa}$ ，而对应的膨胀率时程曲线也呈典型的三阶段特征。这些现象与前人在恒体积和恒应力边界条件下的研究结果一致<sup>[10, 14, 26]</sup>。在柔性等刚度边界条件下，无论是试样（CS1-CS5）的膨胀率还是膨胀力，均随时间先增加而后逐渐趋于稳定，膨胀指标的变化速率随时间逐渐减小，与恒体积和恒应力条件相似。

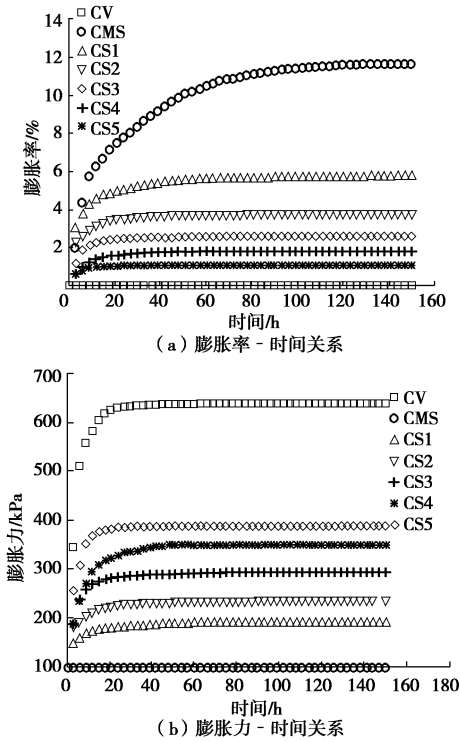


图 6 不同边界条件下 S1 试样膨胀指标与时间的关系  
Fig. 6 Variation of swelling indices with hydration time during S1 phase

土体的膨胀性在本质上取决于黏土矿物的水化作用。通过情况下，水化首先发生在亲水性较强的黏土矿物中，如蒙脱石矿物表面、侧面断口以及晶层间可交换阳离子周围。随着水分不断进入土样中，蒙脱石矿物晶片周围吸附的水分子层逐渐增厚，通常情况下，晶片周围最多可吸附4层水分子，每层水分子厚度约为 $0.3\text{ nm}$ ，从而增加晶片之间的间距。当土样干密度较低或者限制应力较小时，除了吸附4层水分子，蒙脱石矿物周边还会形成扩散双电层，从而进一步增加晶层间距。上述微观水化过程在宏观上即表现为土体体积的膨胀变形<sup>[27]</sup>。Delage等<sup>[7]</sup>在研究中还指出，土样中的团聚体是由若干黏土矿物晶片相互叠加而成，水化过程中大团聚体会逐渐分散成若干小团聚体，单个团

聚体中晶片数量有可能从几百个减小到几十个,在此过程中,团聚体间孔隙会不断被填充,并引起体积膨胀,这也是导致土样产生宏观膨胀变形的内在机制之一。当土样的体积膨胀变形受到限制时,其膨胀势可通过膨胀力的大小进行反映。

膨胀指标的变化速率随时间逐渐减小(图6),有3个方面的原因:①在初始阶段,土样的吸力较高,吸水能力较强,水分能快速进入土体内部,与亲水性黏土矿物发生水化作用,但随着时间的增长,吸力和土样的吸水能力减小,黏土颗粒的水化速率因此而降低;②由于水分从土样的底面进入,因此靠近进水端面的亲水性黏土矿物最先发生水化膨胀,导致对水分迁移起主导作用的团聚体间大孔隙尺寸不断缩小,渗透性降低,水分向土样上部迁移速率随时间减小<sup>[26]</sup>;③随着时间的延长,土样的含水率的饱和度逐渐增加,土样的总体水化反应减弱,结构变形逐渐达到稳定<sup>[12-13]</sup>。

在不同边界条件下,土样的最终膨胀指标有较大差异(图6):最终膨胀率从大到小依次为恒应力条件(11.7%)、柔性等刚度条件(1.1%~5.8%不等)和恒体积条件(0),最终膨胀力从大到小依次为恒体积条件(638.3 kPa)、柔性等刚度条件(192.2~387.5 kPa不等)和恒应力条件(100.0 kPa)。由此可见,柔性等刚度条件下土样的最终膨胀指标均位于恒应力和恒体积条件之间。刚度系数不同,对应的最终膨胀指标也不同,最终膨胀率随刚度系数的增加而减小,而最终膨胀力随刚度系数的增加而增加。如CS1、CS2、CS3、CS4和CS5共5个试样,对应的量力环刚度系数分别为239.33, 538.12, 1115.24, 2090.05, 4089.98 N/mm, 土样的最终膨胀率分别为5.8%, 3.8%, 2.6%, 1.8%, 1.1%, 而其膨胀力分别为192.2, 235.1, 292.9, 349.3, 387.5 kPa。由此可见,边界条件对土样的膨胀特性有重要影响。

在恒应力条件下,试样在整个膨胀过程中所受到限制应力始终与初始施加的竖向应力相等,即为100.0 kPa,小于其它边界条件下的限制应力,土样的膨胀势能主要以膨胀变形的形式进行体现,因此最终膨胀率(11.7%)高于其他边界条件。而在恒体积条件下,土样的膨胀变形完全收到限制,只有一小部分膨胀势能消耗在内部颗粒的位移和重新排列,剩余部分完全通过膨胀力的形式进行体现,因此测得的最终膨胀力(638.3 kPa)高于其他边界条件。柔性等刚度边界条件下,虽然初始竖向荷载都为100.0 kPa,但一旦试样发生膨胀变形,对应的限制应力也相应增加,限制应力水平总体上处于恒体积和恒应力条件之间,因此其膨胀率和膨胀变形也处于这上述两种边界条件之间。需要指出的是,如果量力环的刚度系数越大,试样发

生相同膨胀变形时其承受的限制应力也越大,这解释了土样的最终膨胀率随刚度系数的增加而减小、最终膨胀力随刚度系数的增加而增加的现象(图6)。

图7为不同边界条件下S1组试样吸水膨胀过程中的孔隙比-竖向应力发展过程。恒应力和恒体积条件下土样的孔隙比-竖向应力关系分别图中的垂直线和水平线,柔性等刚度条件对应的为斜线,分布在恒应力和恒体积条件之间,且量力环的刚度系数越大,其孔隙比-竖向应力关系曲线的斜率越小,越向水平线靠近。根据试样在每种边界条件下膨胀平衡后达到的最终孔隙比和对应的竖向应力,可拟合得到如图所示的膨胀平衡极限(SEL)曲线,即最终孔隙比与最终膨胀力呈指数递减关系。该曲线反映了试样在不同边界条件下达到膨胀平衡时的最终应力-应变状态,可用于评价土体的总体膨胀特性,对预测土体在复杂边界条件下水化时的最终体变和膨胀力有一定参考意义<sup>[21, 28]</sup>。理论上,对于给定的土体,其完全饱和后的膨胀势能只取决于亲水性黏土矿物种类和含量。换言之,同一种土体的SEL曲线应该是唯一的,其位置不受初始状态和边界条件的影响。然而,需要指出的是,在实验室测试土体的膨胀指标时,不同的测试方法、初始状态、边界条件有可能影响试样的微观结构、水化程度及膨胀势能的损耗程度<sup>[12, 29-30]</sup>,从而导致SEL曲线的位置发生偏移,但这需要在今后开展更精细的研究加以论证。

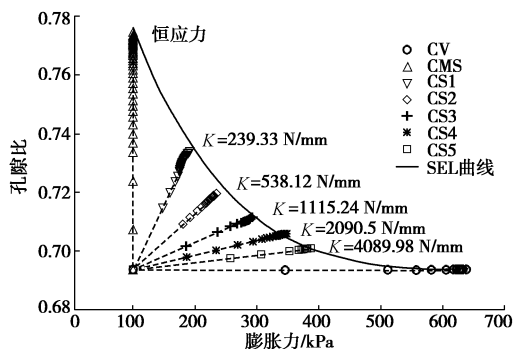


图7 S1组试样饱和过程中孔隙比与竖向应力之间的关系

Fig. 7 Variation of void ratio with vertical stress during S1 phase

## 4 结 论

利用自主研发的多边界条件膨胀仪在恒体积、恒应力和柔性等刚度边界条件对GMZ膨润土的膨胀特性开展了试验研究,得到以下3点结论。

(1) 研发的多边界条件膨胀仪能分别模拟恒体积、恒应力和柔性等刚度柔性边界条件,并能根据需要在各种边界条件之间灵活切换,模拟复杂的试验路径,为研究复杂环境条件下土体的膨胀特性提供了新

的研究方法。

(2) 边界条件对试样的膨胀指标具有重要影响。不同边界条件下, 试样饱和后测得的最终膨胀指标呈现较大的差异。对于最终膨胀率: 恒应力 > 柔性等刚度 > 恒体积; 对于最终膨胀力: 恒体积 > 柔性等刚度 > 恒应力。

(3) 根据试样在不同边界条件下膨胀平衡后获得最终孔隙比和对应的膨胀力, 可确定试样的膨胀平衡极限曲线。该曲线反映了土体膨胀达到平衡时的最终应力-应变状态, 对预测土样在复杂边界条件下水化时的最终体变和膨胀力有一定参考意义。

需要指出的是, 高放废物处置库中不同位置处缓冲/回填材料的边界条件具有显著差异, 其在吸水饱和过程中可能因此表现出不同的膨胀行为。此外, 边界条件还会随时间发生调整, 从而使土体的膨胀特性表现更多的不确定性, 给处置库的优化设计带来挑战。事实上, 除了高放废物处置库, 在膨胀土地区开展工程实践也同样会遇到前述的各种复杂边界条件。因此, 在进行室内膨胀试验时, 应针对不同的边界条件及组合方式选择与工况条件相适应的试验方法, 设计合理的试验路径, 才能使试验结果更具参考价值。本文围绕膨胀边界条件问题只是开展了初步研究, 接下来将针对该课题开展更细致更系统的研究工作, 为读者提供复杂边界条件和试验路径下土体膨胀特性相关的更多的研究成果。

## 参考文献:

- [1] 王 驹. 高放废物深地质处置: 回顾与展望[J]. 铀矿地质, 2009, **25**(2): 71 - 77. (WANG Ju. Geological disposal of high level radioactive waste in China: review and prospect[J]. Uranium Geology, 2009, **25**(2): 71 - 77. (in Chinese))
- [2] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 重塑 CO<sub>x</sub> 泥岩在饱和过程中应力应变的演化规律[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1166 - 1171. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG A M, et al. Stress and strain evolution of remoulded CO<sub>x</sub> argillite during saturation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1166 - 1171. (in Chinese))
- [3] YE W M, CHEN Y G, CHEN B, et al. Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2010, **116**(1): 12 - 20.
- [4] 叶为民, 潘 虹, 王 琼, 等. 自由膨胀条件下高压实砂-膨润土混合物非饱和和渗透特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 869 - 874. (YE Wei-min, PAN Hong, WANG Qiong, et al. Saturated permeability of highly compacted sand-bentonite mixtures under unconfined conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 869 - 874. (in Chinese))
- [5] SUN D A, CUI H B, SUN W J. Swelling of compacted sand-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2009, **43**(3): 485 - 492.
- [6] YE W M, CUI Y J, QIAN L X, et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2009, **108**(3/4): 169 - 176.
- [7] DELAGE P, HOWAT M D, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, **50**(1/2): 31 - 48.
- [8] 王志俭, 刘泉声. 密实砂-膨润土混合物膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 331 - 334. (WANG Zhi-jian, LIU Quan-sheng. Experimental study of swelling characteristics of compacted sand-bentonite mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 331 - 334. (in Chinese))
- [9] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 中国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, **17**(1): 44 - 47. (LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen, et al. Study on compactability and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, **17**(1): 44 - 47. (in Chinese))
- [10] 叶为民, SCHANZ T, 钱丽鑫, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 3861 - 3865. (YE Wei-min, SCHANZ T, QIAN Li-xin, et al. Characteristics of swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 3861 - 3865. (in Chinese))
- [11] 秦 冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1005 - 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behavior of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(7): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [12] TANG C S, TANG A M, CUI Y J, et al. Investigating the swelling pressure of compacted crushed Callovo-Oxfordian claystone[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011, **36**(17): 1857 - 1866.
- [13] 张虎元, 崔素丽, 刘吉胜, 等. 混合型缓冲回填材料膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3087 - 3095.

- (ZHANG Hu-yuan, CUI Su-li, LIU Ji-sheng, et al. Experimental study of swelling pressure of compacted bentonite-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **30**(10): 3087 – 3095. (in Chinese))
- [14] CUI S L, ZHANG H Y, ZHANG M. Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite—sand mixtures as a buffer/backfill material in China[J]. Engineering Geology, 2012(3): 65 – 73.
- [15] CUI Y J, TANG A M, LOISEAU C, et al. Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand – bentonite mixture under constant-volume and free-swell conditions[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, **33**: 462 – 471.
- [16] SUN D A, ZHANG J Y, ZHANG J R, et al. Swelling characteristics of GMZ bentonite and its mixtures[J]. Applied Clay Science, 2013, **84**(10): 224 – 230.
- [17] CHEN Y G, ZHU C M, YE W M, et al. Swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite under salinization-desalinization cycle conditions[J]. Applied Clay Science, 2015, **114**: 454 – 460.
- [18] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 1 – 11. (CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and losses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 1 – 11. (in Chinese))
- [19] 孙文静, 孙德安, 刘仕卿, 等. 高吸力下高庙子钙基膨润土的土水-力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 346 – 353. (SUN Wen-jing, SUN De-an, LIU Shi-qing, et al. Hydro-mechanical behaviour of GMZ Ca-bentonite at high suctions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 346 – 353. (in Chinese))
- [20] 唐朝生, 黄立明, 叶为民, 等. GMZ01 缓冲/回填材料在柔性边界条件下的膨胀特性[C]// 第四届废物地下处置学术研讨会. 南昌, 2012. (TANG Chao-sheng, HUANG Li-ming, YE Wei-min, et al. Swelling deformation characteristic of GMZ01 backfill/buffer material under the soft boundary conditions[C]// Proceedings of the 4th Seminar on Geological Disposal of High-level Radioactive Nuclear Waste. Nanchang, 2012. (in Chinese))
- [21] SIEMENS G, BLATZ J A. Evaluation of the influence of boundary confinement on the behavior of unsaturated swelling clay soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(3): 339 – 356.
- [22] LLORET A, VILLAR M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behavior of heavily compacted FEBEX bentonite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2007, **32**(8/9/10/11/12/13/14): 701 – 715.
- [23] WANG Q, TANG A M, CUI Y J, et al. Experimental study on the swelling behavior of bentonite/claystone mixture[J]. Engineering Geology, 2012, **124**(1): 59 – 66.
- [24] 孙德安, 孟德林, 孙文静, 等. 两种膨润土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 973 – 978. (SUN De-an, MENG De-lin, SUN Wen-jing, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 973 – 978. (in Chinese))
- [25] 温志坚. 中国高放废物处置库缓冲材料物理性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(4): 794 – 800. (WEN Zhi-jian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 794 – 800. (in Chinese))
- [26] 陈志国, 唐朝生, 叶为民, 等. 水-力耦合条件下膨润土-砂混合物的体变特性研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 1041 – 1051. (CHEN Zhi-guo, TANG Chao-sheng, YE Wei-min, et al. Volume change characteristics of bentonite-sand mixture under hydro-mechanical coupling condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 1041 – 1051. (in Chinese))
- [27] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 干湿循环条件下高压实膨润土的微观结构特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1173 – 1177. (YE Wei-min, WAN Min, CHEN Bao, et al. Micro-structural behaviors of densely compacted GMZ01 bentonite under drying/wetting cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1173 – 1177. (in Chinese))
- [28] MOLLINS L H, STEWART D I, COUSENS T W. Predicting the properties of bentonite-sand mixtures[J]. Clay Minerals, 1996, **31**(2): 243 – 252.
- [29] NAVARRO V, MORENA G D L, YUSTRES Á, et al. Predicting the swelling pressure of MX-80 bentonite[J]. Applied Clay Science, 2017, **149**: 51 – 58.
- [30] SCHANZ T, AL-BADRAN Y. Swelling pressure characteristics of compacted Chinese Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. Soils and Foundations, 2014, **54**(4): 748 – 759.