

# 内河码头回填料压缩-渗流耦合特性试验

梁越<sup>1,2,3</sup>, 卢孝志<sup>3</sup>, 郝建云<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;  
2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;  
3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

**摘要:**利用高级固结试验系统对不同配合比的砂泥岩混合料进行压缩固结试验,研究不同竖向压力下土体的压缩、回弹及再压缩过程中压缩与渗透的耦合变化特征。试验结果表明:土体的压缩系数随竖向压力的增大趋于稳定,随泥岩含量的增大而增大;压缩指数随泥岩含量的增大而增大,即泥岩含量越高,土体的压缩性越强;土体渗透系数随孔隙比的增大而加速增大,随泥岩含量的增大而减小;提出一维渗流-压缩固结耦合有限差分计算方法,克服了太沙基固结理论中渗透系数恒定及小变形的假定。

**关键词:**砂泥岩混合料;压缩固结;渗透特性;压缩指数;孔隙水压力;有限差分法;内河码头

**中图分类号:**TU411.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2014)06-0070-06

**Experimental study on consolidation-seepage coupling of backfill in inland river ports**//LIANG Yue<sup>1,2,3</sup>, LU Xiaozhi<sup>3</sup>, HAO Jianyun<sup>3</sup> (1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** We used the GDSCTS (GDS advanced consolidation testing system) for consolidating and permeating experiments on the mixed filling with different mix proportion. To do this, we proposed experiments for studying the coupling characteristics of the consolidating and the permeating in soils compression under instantaneous step loading. The results show that the compressibility tends to be stable with the increasing vertical pressure and goes up with the increasing mudstone content. The compression index also increases with the increasing mudstone content, which means that the more the mudstone content is, the higher the compressibility of soil would be. The permeability exponentially increases with the increasing of the void ratio and decreases with the increasing of mudstone content. Thus, we proposed an algorithm based on the finite difference method for 1-D seepage-consolidation coupling. The algorithm is more appropriate to describe the consolidation of soils than the Terzaghi's consolidation theory because the permeability is related to the void ration and the large deformation is permitted in the new method.

**Key words:** mixed filling of sandstone and mudstone; compression and consolidation; permeability characteristics; compression index; pore water pressure; finite difference method; inland river ports

饱和土体在外部荷载的作用下孔隙水排出,超静孔隙水压力逐步消散,土体有效应力及变形逐步增大,这个过程称为土体的压缩固结<sup>[1]</sup>。确定土体压缩固结特性是研究土体沉降、强度与变形的关键。土体的固结与土体的孔隙性和渗透性密切相关,土体固结的快慢,即孔隙的减小速度,取决于孔隙水流出的速度。孔隙水流出的速度与超静孔隙水压力的 大小和土体的渗透性有关,而土体的渗透性又受孔隙性控制<sup>[2]</sup>,因此土体压缩固结是孔隙变化与孔隙

渗流相互影响的耦合过程。  
我国中东部渗透性差、压缩变形大的软土、吹填土等特殊土分布广泛,研究人员对其压缩固结的规律、机理以及计算理论进行了大量研究。房后国等<sup>[3]</sup>基于软土微观结构,提出了海积软土的排水固结机理;胡瑞林<sup>[4]</sup>通过对动力排水固结法的介绍,评述了软土动力固结机理;李冰河等<sup>[5]</sup>基于有限差分方法,建立了求解软黏土非线性一维固结问题的半解析方法;李传勋等<sup>[6-7]</sup>针对软土固结过程中土体

的渗透性变化问题,对固结过程中流固耦合过程进行了探索。其他相关的研究成果也极大地推进了人们对土体压缩固结特性的认识<sup>[8-11]</sup>。

近年来,随着长江航运事业的发展,长江上游港口码头建设任务繁重。长江上游水文地质条件复杂,以重庆港为例,港区岸坡地形陡峭,码头后方堆场多采用岸坡开挖与回填相结合的方式(图1),回填区的变形与沉降关系着码头的正常运行。回填区填料为岸坡的开挖破碎料,根据长江上游尤其是三峡库区的地质特性,岸坡地层大多为砂泥岩互层,破碎的砂岩材料强度与变形特性要优于泥岩,然而为了施工的方便及节约成本,回填料不可能将泥岩全部剔除,而是混合了一定比例的泥岩颗粒<sup>[12]</sup>。因此,确定不同混合比例条件下砂岩、泥岩破碎颗粒混合料的压缩固结特性对研究回填区变形与沉降具有重要的工程意义。

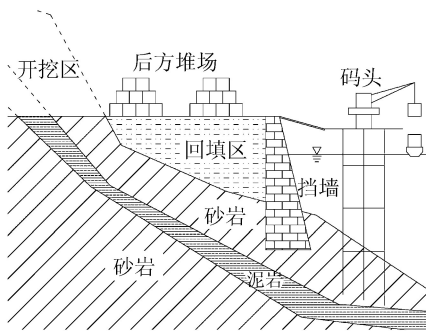


图1 重庆港区岸坡地质情况及典型结构示意图

土体的孔隙大小由组成土体颗粒的细颗粒控制<sup>[13]</sup>,根据土体渗透性、压缩性与孔隙的关系,土体渗透及土体固结也主要与土体中的细颗粒有关。因此,本文利用重庆港区岸坡开挖过程中的砂岩、泥岩破碎料,通过筛分获得了土料中的砂岩、泥岩细颗粒材料,按一定的配合比制得试样,在室内进行压缩固结与渗透试验,分析不同配合比条件下砂岩、泥岩混合料的压缩与渗透规律。

1 压缩固结试验

利用高级固结试验系统(GDS advanced consolidation testing system, GDSACTS)开展相关的试验研究。本试验系统可在固结过程中进行土体渗透试验,已在土体固结特性试验研究中得到了大量的应用并取得了良好的试验效果<sup>[14-15]</sup>。试验系统由计算机、固结容器、位移传感器、压力及体积数字控制器、数据采集系统及分析软件等组成,试样内径为100 mm,初始高度为30 mm。

试验先取重庆港区岸坡开挖过程中的砂岩、泥岩破碎料,筛分得到土料中对固结及渗透起控制作

用的砂岩、泥岩细颗粒材料。砂岩颗粒密度为2.71 g/cm<sup>3</sup>,泥岩颗粒密度为2.69 g/cm<sup>3</sup>,利用激光粒度分析仪得到两种材料的颗粒级配,如图2所示。

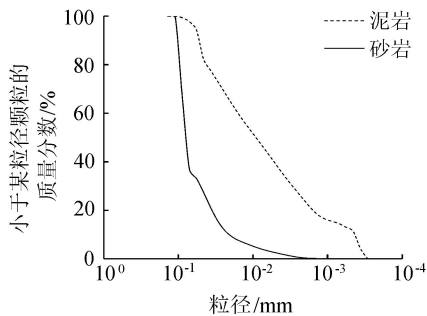


图2 试样采用的砂岩、泥岩材料级配曲线

按一定的砂岩、泥岩颗粒质量比例混合制样,采用6:4、4:6、2:8以及0:10这4种不同的砂岩、泥岩质量比,即泥岩的质量分数分别为40%、60%、80%、100%。制样后,按以下步骤进行试验:①抽真空饱和;②装样;③给试样顶面施加恒定竖向压力,并施加恒定孔隙压力,模拟瞬时加载,使试样在恒定有效应力作用下发生单向排水压缩固结;④加压过程中监测试样顶面位移随时间变化;⑤每级压力持续固结24 min,并在单级固结结束后进行渗透试验,渗透试验过程中保持竖向应力不变;⑥渗透试验后,改变试样顶面竖向压力大小,进行下一级荷载的固结及渗透试验。

为分析试样的压缩及回弹特性,采用的试样顶面竖向加压方案为:50 kPa→100 kPa→200 kPa→400 kPa→800 kPa→400 kPa→200 kPa→100 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa→400 kPa→800 kPa→1 600 kPa。每级荷载下的固结结束后,保持竖向压力不变并进行渗透试验,以确定压缩完成后土体渗透性的变化。

2 试验结果分析

2.1 压缩固结过程

试验过程中监测了瞬时加载后试样顶面的竖向位移随时间的变化关系。以纯泥岩试样(质量分数为100%)为例,图3为试样压缩过程中每级荷载条件下顶面位移与时间的关系曲线。可以看出,瞬时施加荷载后,试样迅速沉降,随着时间的推移沉降速度由快变慢,沉降量逐渐趋于稳定值,每级荷载下的位移与时间的关系曲线接近于双曲线形状。试样在每级荷载下的最终沉降量与竖向压力的大小有关,每级荷载下的沉降量随着施加竖向压力的增加而增大。

在竖向荷载增加到一定值后对试样进行逐步卸载,然后重新加载,探索试样的回弹和再压缩特性。以竖直向下为位移正方向,则回弹位移为负值,回弹及再压缩过程中位移与时间的关系曲线如4所示。

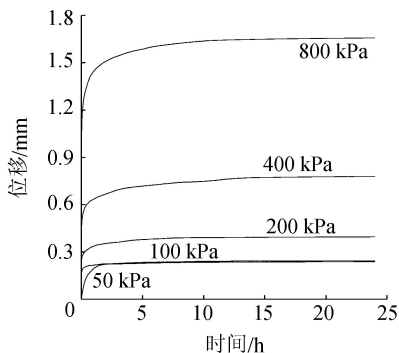


图3 压缩过程中位移与时间的关系曲线

可以看出,回弹及再压缩过程中每级荷载下位移与时间的关系曲线也呈双曲线形状。结合图2可知,回弹过程中每级荷载下的回弹量要小于加载过程中的压缩量,即在回弹过程中,试样已产生了一定量的不可恢复的塑性变形;再压缩过程中每级荷载下的沉降量也明显小于压缩过程,即试样在经过一轮压缩过程后试样的压缩性有很大的降低。

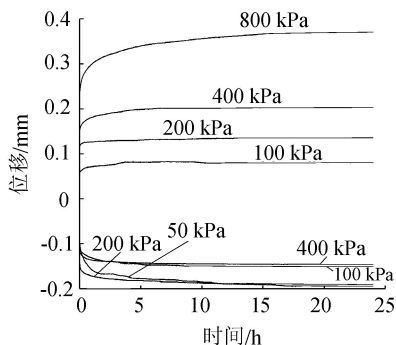


图4 回弹及再压缩过程中位移与时间的关系曲线

每个试样的压缩—回弹—再压缩试验过程持续336h,整个压缩过程中试样顶面位移与时间的关系曲线如图5所示。通过不同压力条件下试样的压缩情况对比可以看出压缩过程、回弹过程以及再压缩过程中试样的固结特性的差异。

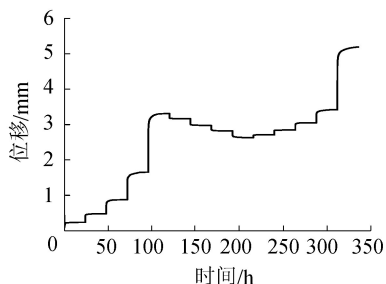


图5 整个压缩过程中位移与时间的关系曲线

## 2.2 压缩固结特性

土体孔隙比与竖向压力的大小有关,根据图5所示的每级荷载作用下试样顶部的最终沉降量,可以得到孔隙比与沉降量之间的关系,即

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{h_i}{H} \quad (1)$$

式中: $e_0$  为初始孔隙比; $e_i$  为施加第  $i$  级荷载后的孔隙比; $h_i$  为施加第  $i$  级荷载后试样的沉降量; $H$  为试样初始高度。

图6为纯泥岩试样在压缩—回弹—再压缩过程中孔隙比  $e$  与竖向压力  $p$  之间的关系曲线( $e-p$  关系曲线)。可以看出,在加载阶段,孔隙比随竖向压力的增加呈线性减小的趋势。回弹曲线与再压缩曲线形成一个回滞环,当再压缩荷载超过压缩最大荷载时,试样沉降量进一步增大,与压缩曲线呈现一定的连续性。如果对于表示压力值的坐标取对数,则可以得到试样压缩的  $e-\lg p$  关系曲线,如图7所示。可以看出,当竖向压力较大时, $e-\lg p$  关系曲线接近直线,直线的斜率反映了土体的压缩性能。

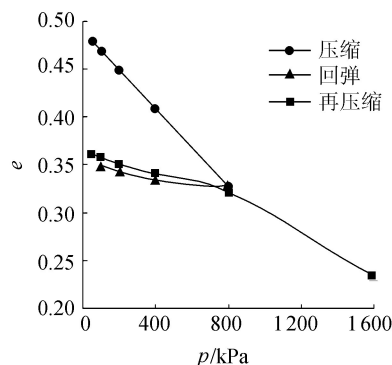


图6 纯泥岩试样压缩试验  $e-p$  关系曲线

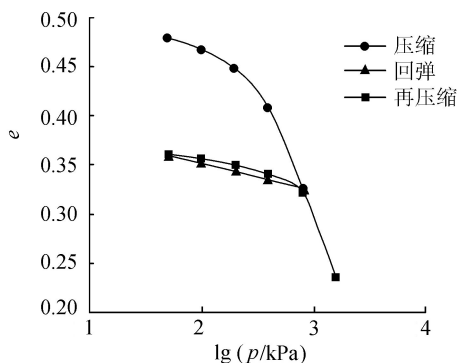


图7 纯泥岩试样压缩试验  $e-\lg p$  关系曲线

## 2.3 渗透特性

土体的压缩固结主要是孔隙水流出、孔隙减小的过程,因此土体的固结速度由孔隙水的流出速度确定,而水流出的速度与土体的渗透性有关。在每级荷载下的压缩试验完成后,在试样内进行了定水头条件下的一维渗透试验,根据不同水头差条件下的单位时间内通过试样截面的渗透流量计算土体的渗透系数  $k$ ,发现不同泥岩含量试样的渗透特性基本服从达西定律。根据每级荷载下压缩结束后测得的渗透系数,得到不同试样的  $k-e$  关系曲线,如图8所示。可以看出,渗透系数与孔隙比关系密切,渗透系数随孔隙比的增大呈加速增大,当土体的孔隙比由0.23增大

到0.55时,土体的渗透系数由 $8.0\times10^{-7}\text{cm/s}$ 增大到 $6.0\times10^{-5}\text{cm/s}$ ,增大了约2个数量级。

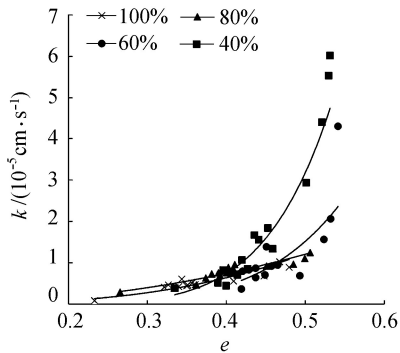


图 8 不同泥岩质量分数的  $k$ - $e$  关系曲线

### 2.4 回弹特性

根据试验结果,不同试样的压缩及渗透规律十分类似,但试样中砂岩、泥岩的含量对土样的压缩性及渗透性依然有很大的影响。土体的压缩系数反映了两级荷载之间的压缩性,即图 6 中  $e$ - $p$  关系曲线上两点之间的割线斜率。如竖向压力  $p_1$ 、 $p_2$  条件下对应的孔隙比分别为  $e_1$ 、 $e_2$ ,则有

$$a=\frac{\Delta e}{\Delta p}=\frac{e_1-e_2}{p_2-p_1}\tag{2}$$

式中: $a$  为压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ,其值与竖向压力的大小有关。

图 9 为压缩过程中不同泥岩质量分数的压缩系数  $a$  与竖向压力  $p$  的关系。可以看出,除纯泥岩试样外,试样压缩系数随竖向压力的升高而增大,当竖向压力较高时压缩系数逐渐趋于恒定值。压缩系数与砂泥岩配合比也密切相关,泥岩含量越高,同一级压力下的压缩系数越大;而砂岩含量越高,压缩系数越小。

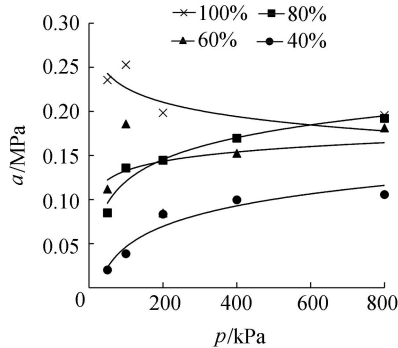


图 9 不同泥岩质量分数的  $a$ - $p$  关系曲线

通过试样压缩—回弹—再压缩的  $e$ - $\lg p$  关系曲线,可以得到压缩指数与回弹指数,其中压缩指数为  $e$ - $\lg p$  关系曲线直线段的斜率;回弹指数取  $e$ - $\lg p$  关系曲线回弹段及再压缩段的平均斜率。通过计算发现回弹指数远小压缩指数,将回弹指数扩大 10 倍,二者与泥岩质量分数的关系如图 10 所示,可以看出

回弹指数的值基本上为压缩指数的  $1/20\sim1/10$ ,且泥岩含量越低,压缩指数与回弹指数的差值越大。随着试样中泥岩含量的增加,压缩指数呈升高的趋势,而回弹指数呈线性减小。

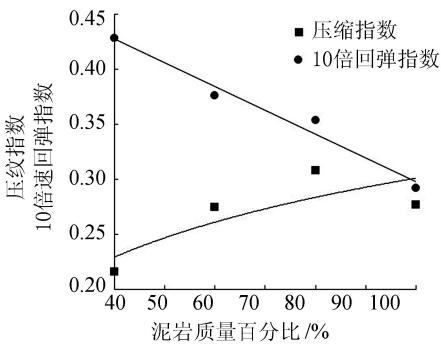


图 10 压缩指数、回弹指数与泥岩质量分数的关系曲线

压缩系数、压缩指数及回弹指数是反映土体压缩性及回弹性的重要参数。通过以上的分析可以看出,土体的压缩性与砂岩、泥岩配合比密切相关,泥岩含量越高,土体压缩性越大,土体越容易发生沉降。回弹指数反映了土体卸载回弹的特性,表征了卸载过程中土体的回弹模量,即砂岩含量越高,土体的回弹模量越大,回弹特性越明显。

### 3 简化固结模型

土体压缩过程中水的渗透性依然可以用达西定律描述,且渗透性受孔隙比的控制。根据图 8 所示的  $k$ - $e$  关系曲线,对渗透系数  $k$  取常用对数,可得  $\lg k$ - $e$  关系曲线,如图 11 所示。

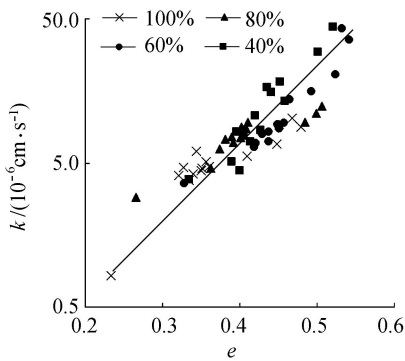


图 11  $\lg k$ - $e$  关系曲线

从图 11 可以看出, $\lg k$  与  $e$  之间基本满足线性关系,可以用下式表示:

$$\lg k=Ae+B\tag{3}$$

式中: $A$ 、 $B$  为拟合系数。不同砂岩、泥岩配合比条件下的  $A$  与  $B$  值可以利用数据拟合得到,图 12 为  $A$ 、 $B$  值与泥岩质量分数的关系。可以看出  $A$ 、 $B$  值都与泥岩质量分数呈线性关系,但变化趋势相反, $A$  值随泥岩质量分数的增加而减小,而  $B$  值随泥岩质量分数的增加而增加。利用线性拟合,可以得到  $A$ 、 $B$  两

值与泥岩质量分数的关系:

$$\begin{cases} A = -0.0612w + 8.6177 \\ B = 0.0239w + 8.5951 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $w$  为泥岩质量分数。

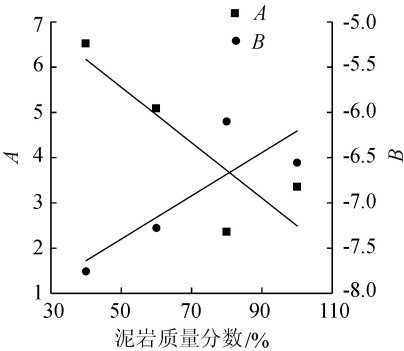


图 12 拟合系数与泥岩质量分数的关系曲线

在土体的压缩固结过程中,土体的变形大部分由于孔隙水的流出而造成的体积减小。土体压缩过程中的渗透性与孔隙性是耦合的,在试样材料组成已知条件下,一旦确定了孔隙比与渗透系数的耦合关系,便可以建立起土体压缩变形的计算模型。本文基于以上的试验结论,提出一种基于有限差分格式的砂岩、泥岩混合料一维压缩固结计算方法,其需满足以下假设:①土体均质且饱和;②土颗粒与水均不可压缩;③水的流动为竖向一维渗流,且服从达西定律;④每级荷载下的压缩系数  $a$  为定值。可以看出,与太沙基固结理论相比,本方法在压缩固结分析中不再需要假定渗透系数为定值,且也不需要小变形假定。对于一定厚度土体,按间距  $\Delta h$  离散成的差分格式如图 13 所示。

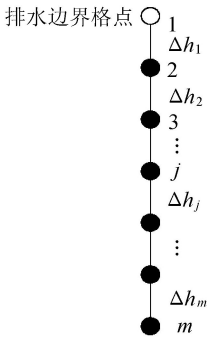


图 13 一维渗流-固结耦合有限差分格式

在某段时间  $\Delta t$  内,流经格点  $j-1$  与  $j$  之间界面以及格点  $j$  与  $j+1$  之间界面的体积流量分别为

$$\begin{cases} q_{j-1,j} = k_j I_{j-1,j} \Delta t = f(e_j) \frac{u_j - u_{j-1}}{\rho_w g \Delta h_j} \Delta t \\ q_{j,j+1} = k_j I_{j,j+1} \Delta t = f(e_j) \frac{u_{j+1} - u_j}{\rho_w g \Delta h_j} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad k_j = f(e_j) = 10^{Ae_j+B} \quad (6)$$

式中: $k_j$  为格点  $j$  处的渗透系数; $I_{j-1,j}$ 、 $I_{j,j+1}$  分别为格

点  $j-1$  与  $j$  之间、格点  $j$  与  $j+1$  之间的水力梯度; $u_{j-1}$ 、 $u_j$ 、 $u_{j+1}$  分别为格点  $j-1$ 、 $j$ 、 $j+1$  处的超静孔隙水压力; $f(e_j)$  为孔隙比与渗透系数的关系方程; $\rho_w$  为水的密度; $g$  为重力加速度。

根据质量守恒,  $\Delta t$  时间处格点  $j$  处损失的流量为

$$\Delta q_j = q_{j-1,j} - q_{j,j+1} = f(e_j) \frac{2u_j - u_{j-1} - u_{j+1}}{\rho_w g \Delta h_j} \Delta t \quad (7)$$

水的流出引起土体孔隙的减小,则  $\Delta t$  时间后,格点  $j$  处的孔隙比以及格点间距变为

$$\begin{cases} e_j^{(n+\Delta t)} = e_j^{(n)} - [1 + e_j^{(n)}] \frac{\Delta q_j}{\Delta h_j} \\ \Delta h_j^{(n+\Delta t)} = \Delta h_j^{(n)} - \Delta q_j \end{cases} \quad (8)$$

式中: $e_j^{(n)}$ 、 $e_j^{(n+\Delta t)}$  为格点  $j$  处  $n$ 、 $n+\Delta t$  时刻的孔隙比; $\Delta h_j^{(n)}$ 、 $\Delta h_j^{(n+\Delta t)}$  为格点  $j$  处  $n$ 、 $n+\Delta t$  时刻的格点间距。每个格点的压缩量根据孔隙比的变化量求得;土体的总沉降量为各格点压缩量求和。

在孔隙比发生变化的同时,格点的超静孔隙水压力也在消散。根据假定,压缩过程中压缩系数  $a$  为定值,根据  $a$  的定义,结合太沙基固结理论及有效应力原理,在总应力不变条件下,有

$$\Delta u = -\Delta \sigma' = \frac{\Delta e}{a} \quad (9)$$

式中: $\Delta u$  为超静孔隙水压力; $\Delta \sigma'$  为有效应力变化量。

那么孔隙比减小后的超静孔隙水应力变为

$$u_j^{(n+\Delta t)} = u_j^{(n)} + \Delta u = u_j^{(n)} + \frac{1}{a} [e_j^{(n+\Delta t)} - e_j^{(n)}] \quad (10)$$

在得到了新的超静孔隙水压力以后,重复式(5)、式(7)、式(8)、式(10)的计算,进行下一时步压缩固结的模拟,直至达到预设的固结时间或超静孔隙水压力消散为零。在此过程中,排水边界上的超静孔隙水压力一直取零。

以纯泥岩压缩试验为例,对有限差分法进行验证。试样初始高度  $H = 3 \text{ cm}$ ,初始格点间距  $\Delta h = 0.3 \text{ cm}$ ,即得到 11 个有限差分格点。取压缩系数  $a = 0.2 \text{ MPa}^{-1}$ ;时步长度  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 。利用有限差分法对压缩过程中竖向压力为 200 kPa 条件下的试样压缩进行计算。200 kPa 竖向压力的前一级压力为 100 kPa,因此荷载瞬时加载后,在试样内形成的初始超静孔隙水压力为 100 kPa。将以上参数代入式(5)、式(7)、式(8)、式(10)进行计算,得到试样顶部位移即土体的沉降量。为了进行对比,同时利用太沙基固结理论对算例进行计算,并将计算结果与

试验数据进行对比。图 14 为不同方法得到的时间沉降比与时间的关系曲线。

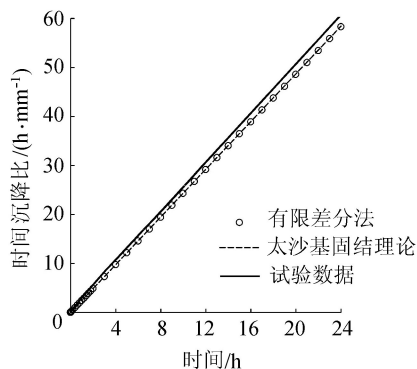


图 14 时间沉降比与时间的关系曲线

由于时间与位移变形量之间呈双曲线关系,所以时间沉降比与时间之间基本呈线性关系。可以看出,有限差分法与太沙基固结理论的结果非常相近,但由于太沙基固结理论假定了压缩过程中渗透系数的值恒定,因此其结果中压缩达到最大值所需要的时间略小于有限差分法的结果。当土体渗透性随孔隙比变化更敏感时,这种差别势必更大。同时需要指出的是,有限差分法与太沙基固结理论的结果在压缩初始阶段都明显要大于试验数据,造成这种现象的主要原因在于高级固结试验系统在进行瞬时加载时,是通过向压力室内注入一定压力的水实现的,水的注入及压力的稳定需要一定的时间,因此竖向荷载的施加并非严格意义上的瞬时施加,而是有一个时间过程,而土体压缩速度最快的阶段恰恰在压缩的初始阶段,在荷载施加至预定值以前,已经造成了超静孔隙水压力的大量消散,使得试验初始阶段试样的顶面位移小于理论值。但对于最终压缩量,计算值与试验值相差较小,从图 5 可得压缩过程中 200 kPa 竖向压力下的最终顶面位移为 0.395 mm,而有限差分法与太沙基理论的计算结果分别为 0.411 mm 与 0.412 mm。

## 4 结 论

a. 瞬时加载条件下土体压缩沉降量与时间呈双曲线关系;土体的变形主要由于压缩作用下孔隙水的流出而造成的孔隙减小。

b. 土体的压缩系数与竖向压力的大小有关,随着竖向压力的增大趋于稳定;压缩系数受砂岩、泥岩配合比的影响,泥岩含量越高,压缩系数越大。

c. 压缩指数随泥岩含量的增大而增大,泥岩含量越高,土体的压缩性越强。土体的回弹指数值约为压缩指数的  $1/20 \sim 1/10$ ,随泥岩含量的增大而减小。

d. 土体渗透系数随孔隙比的增大而加速增大,  $\lg k-e$  关系呈线性;同时渗透系数还与砂岩、泥岩配

合比有关。

e. 基于一维渗流-压缩固结耦合过程的有限差分法不再假定渗透系数为定值,而是孔隙比的函数;不需要小变形假定,考虑了压缩变形对计算的影响,当土体压缩变形较大时依然适用。

## 参考文献:

- [1] ZHUANG Yingchun, XIE Kanghe. Study on one-dimensional consolidation of soil under cyclic loading and with varied compressibility [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2005, 6(2): 141-147.
- [2] 邓英尔, 黄润秋, 刘慈群. 非饱和低渗透黏土非线性渗流定律与固结[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 14(1): 99-105. (DENG Ying'er, HUANG Runqiu, LIU Ciqun. Nonlinear flow law and consolidation in unsaturated low-permeability clays [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2009, 14(1): 99-105. (in Chinese))
- [3] 房后国, 刘娉慧, 肖树芳, 等. 海积软土排水固结机理分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(2): 207-212. (FANG Houguo, LIU Pinghui, XIAO Shufang, et al. Analysis on mechanism of drain and consolidation of marine soft soil [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(2): 207-212. (in Chinese))
- [4] 胡瑞林. 软黏土动力排水固结机理研究综述[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 45-51. (HU Ruilin. On the mechanism of dynamic consolidation with drainage of soft clay and its applications [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 45-51. (in Chinese))
- [5] 李冰河, 谢永利, 谢康和, 等. 软黏土非线性一维固结半解析解[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(1): 27-32. (LI Binghe, XIE Yongli, XIE Kanghe, et al. Semi-analytical solution of one dimensional non-linear consolidation of soft clay [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(1): 27-32. (in Chinese))
- [6] 李传勋, 谢康和, 卢萌盟, 等. 变荷载下基于指数渗流双层地基一维固结分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1565-1571. (LI Chuanxun, XIE Kanghe, LU Mengmeng, et al. Analysis of one-dimensional consolidation of double-layered soil with exponential flow considering time-dependent loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1565-1571. (in Chinese))
- [7] 刘忠玉, 纠永志, 乐金朝, 等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维非线性固结分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2348-2355. (LIU Zhongyu, JIU Yongzhi, YUE Jinchao, et al. One-dimensional nonlinear consolidation analysis of saturated clay based on non-darcy flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 2010, 29(11): 2348-2355. (in Chinese))

(下转第 81 页)

- [ 4 ] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil [J]. Buildind and Envirment, 2007, 42, 681-688.
- [ 5 ] 曾静, 邓志斌, 兰霞, 等. 竹城公路高液限土与红黏土路用性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 89-98. (ZENG Jing, DENG Zhibin, LAN Xia, et al. Experimental study on properties of high liquid limit soil and red clay of Zhucheng highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 89-98. (in Chinese))
- [ 6 ] 李方华. 高液限土填料改良的最佳掺砂砾石比试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 785-788. (LI Fanghua. Experimental study of optimal proportion of gravel adopted to improve the properties of high liquid limit soil subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 785-788. (in Chinese))
- [ 7 ] 程涛, 洪宝宁, 刘顺青, 等. 高液限土最佳掺水泥比的确 定[J]. 四川大学学报, 2012, 44(2): 64-69. (CHENG Tao, HONG Baoning, LIU Shunqing, et al. Determine the best ratio of mixed cement of high liquid limit soil[J]. Journal of Sichuan University, 2012, 44(2): 64-69. (in Chinese))
- [ 8 ] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [ 9 ] 曾宪新, 钟扬有. 掺砂改良高液限土修筑路基技术研究 [J]. 广东交通职业技术学院学报, 2005, 4(1): 13-19. (ZENG Xianxin, ZHONG Yangyou. Study on subgrade construction by mixing sand to improve high-liquid limit soil [J]. Journal of Guangdong Communications Polytechnic, 2005, 4(1): 13-19. (in Chinese))
- [ 10 ] 赵昌清, 蒋理珍, 刘银生. 高液限黏土的砂砾改良法 [J]. 湖南交通科技, 2004, 30(1): 25-27. (ZHAO Changqing, JIANG Lizhen, LIU Yinsheng. Gravel improvement method of the high liquid limit soil [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2004, 30(1): 25-27. (in Chinese))
- [ 11 ] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].
- [ 12 ] GDJTG/TE01—2014 广东省高液限土路基修筑技术 指南[S].
- [ 13 ] 施有志. 高液限土路堤填筑技术研究[J]. 铁道标准设 计, 2006(11): 7-10. (SHI Youzhi. Research on filling technology of the high-liquid limit soil embankment[J]. Railway Standard Design, 2006(11): 7-10. (in Chinese))
- [ 14 ] 李书华. 高液限土填筑及压实控制标准研究[D]. 南 京: 河海大学, 2009.
- [ 15 ] 张宁, 邓捷, 吴立坚. 福建高液限土的工程特性研究 [J]. 公路, 2009(12): 143-146. (ZHANG Ning, DENG Jie, WU Lijian. Study on road made by high liquidlimit soil of Fujian Province [J]. High Way, 2009(12): 143-146. (in Chinese))
- (收稿日期: 2014-03-06 编辑: 胡新宇)

+++++  
(上接第 75 页)

- [ 8 ] 孟庆山. 淤泥质黏土在冲击荷载下固结机理研究及应 用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1762. (MENG Qingshan. Research on mechanism of silty soft clay under impact loading and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1762. (in Chinese))
- [ 9 ] 孙丽云, 刘忠玉, 乐金朝, 等. 考虑非 Darcy 渗流时循环 荷载下饱和黏土一维固结分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 62-68. (SUN Liyun, LIU Zhongyu, YUE Jinchao, et al. One-dimensional consolidation of saturated clays under cyclic loading considering non-Darcy flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 62-68. (in Chinese))
- [ 10 ] 魏静, 王建华, 张力霆. 软黏土渗透诱发固结机理及固 结参数确定的研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(7): 16-18. (WEI Jing, WANG Jianhua, ZHANG Liting. Seepage-induced consolidation mechanism of soft clay and consolidation parameter determination [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(7): 16-18. (in Chinese))
- [ 11 ] 文海家, 张永兴. 超软土的排水固结机理分析[J]. 重庆 大学学报: 自然科学版, 2002, 25(9): 82-85. (WEN Jiahai, ZHANG Yongxing. Analysis on mechanism of drain and consolidation of super soft soil [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(9): 82-85. (in Chinese))
- [ 12 ] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩 横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1307-1313. (WANG Duoyin, LAN Chao, HE Guangchun, et al. Researches on lateral support behavior of large diameter rock-socketed cast-in-place piles at river port by laboratory model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1307-1313. (in Chinese))
- [ 13 ] ABERG B. Void sizes in granular soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(3): 236-239.
- [ 14 ] 齐添, 谢康和, 李西斌. 软土的一维非线性固结计算参 数及其测定[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(8): 1388-1392. (QI Tian, XIE Kanghe, LI Xibin. Laboratory determination of one-dimensional nonlinear consolidation computational parameters of soft soil [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(8): 1388-1392. (in Chinese))
- [ 15 ] 齐添, 谢康和, 应宏伟, 等. 基于 GDS 的萧山黏土非线性 压缩特性试验研究[J]. 科技通报, 2007, 23(4): 723-728. (QI Tian, XIE Kanghe, YING Hongwei. Experimental investigation on nonlinear compression behavior of xiaoshan clay [J]. Bulletin of Science And Technology, 2007, 23(4): 723-728. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-09-29 编辑: 周红梅)