饱和细粒尾矿大变形固结试验 在尾矿库的研究及应用

吴小刚 汪 斌 项宏海 周玉新 (中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司)

摘 要 基于 gibson 提出的大变形和非线性固结理论,描述出建立在拉格朗日坐标系下的大变形固结特征方程。结合华东某铜矿尾矿库细粒尾矿筑坝的研究项目,在对该尾矿库饱和细粒尾矿进行一系列固结试验的基础上,分析饱和细粒尾矿固结度在自重应力下与时间因素的演化过程,分析细粒尾矿固结度与颗粒组成、分层厚度等因素变化关系;并将理论计算值与离心机试验值进行对比,论证了大变形固结理论在细粒尾矿固结变形研究方面的适用性,并将试验成果应用于实例。

关键词 饱和细粒尾矿土 大变形固结 时间因素 尾矿坝

Research and Application of the Large Strain Consolidation of Saturated Fine-Grained Tailings in Tailings Reservoir

Wu Xiaogang Wang Bin Xiang Honghai Zhou Yuxin (SinoSteel Maanshan Mining Research Institute Co., Ltd.)

Abstract Based on the Gibson's nonlinear large strain consolidation theory, the secular equation of the large strain consolidation under the Lagrange coordinate system was formulated. Based on the series consolidation tests of the saturated fine tailings carried out in a research project of tailing dam construction with fine tailings in a copper mine in East China, the evolutionary process of the consolidation degree under the influence of deadweight and time factors, and the relationship of the consolidation degree with the granulometric composition and sub-layer thickness were analyzed. A comparison between the theoretical calculation result and the centrifuge test result was made, illustrating the applicability of large strain consolidation theory in the research of consolidation deformation of fine tailings. The research result has been used in a real case.

Keywords Saturated fine tailing soil, Large strain consolidation, Time factor, Tailing dam

在矿山领域中,选矿厂排出的尾矿浆一般会堆 积在尾矿库中储存,随着选矿技术的发展,尾矿粒度 越来越细。像尾沙类含水量很高、孔隙比很大的软 土在自重及地面荷载作用下,将发生很大的固结变 形,甚至稳定后的沉降量占初始土层厚度的一半以 上。由于库内尾沙在固结变形过程中压缩系数和渗 透性变化很大,传统的 Terzaghi 固结变形理论已不 太适用^[1-2]。

与 Terzaghi 固结变形理论不同, Gibson 提出的 大变形和非线性固结理论^[2],考虑了压缩系数和渗 透系数与孔隙比的函数关系,考虑了大变形引起的 几何非线性。定义了一个表征土体非线性特征的参 数。可用于孔隙比大、压缩性高的软土固结分析。 Gibson 提出大变形固结理论以后,国内外一些学者 做了进一步的研究和应用工作^[38]。本文通过华东 某铜矿尾矿库尾矿浆固结试验,得到该尾矿库5类 尾矿土典型试样固结试验特性曲线,总结出非线性 参数、土层厚度对尾矿土样大变形固结影响的规律 特性。

1 饱和土体大变形固结理论

基于非线性假定的 Gibson 大变形固结理论将 压缩系数和渗透系数均作为孔隙比(e)的系数,以e 作为基本变量,渗透速度以孔隙水相对土骨架的流 速及相对流速来表示,考虑到固结引起的几何非线 性以及数学处理方便,方程采用不随时间改变的固

吴小刚(1984—)男,中钢集团马鞍山矿山研究院,硕士研究生, 243004 安徽省马鞍山市湖北路9号。

相坐标系。

取固相坐标系方向向上为正,可得到以固相坐标 Z 表示的大变形固结微分方程^[2-3]:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w (1+e)} \frac{\mathrm{d}\sigma'}{\mathrm{d}e} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \left(G_s - 1 \right) \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}e} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial t} = 0, \qquad (1)$$

式中, e 为孔隙比; k(e) 为与孔隙比有关的渗透系数; γ_w 为水的重度; σ' 为土体的有效应力; G_s 为土颗粒在固相坐标系中的取值。

式(1)具有高度非线性,即使简单的边界条件 也很难求得其解析解,这里需要对式(1)进行简化 成线性方程或拟线性方程,并在一定的初始条件和 边界条件下,求得其解析解。

为求解式(1),先引入

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{\mathrm{d}\sigma'}{\mathrm{d}e} , \qquad (2)$$

$$\lambda(e) = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}e} \left(\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}\sigma'} \right) , \qquad (3)$$

其中, g(e) 为等代固结系数; $\lambda(e)$ 为表征土体非线 性特征的试验参数。g(e) 与 Terzaghi 固结系数有如 下关系:

$$g(e) = \frac{c_v}{(1+e)^2},$$
 (4)

式(3)中 $\lambda(e)$ 为孔隙比和有效应力的关系,假设 $\lambda(e)$ 为常数,对式(3)进行变换可得:

$$e = (e_0 - e_\infty) e^{-\lambda \sigma'} + e_\infty, \qquad (5)$$

其中, eo 为初始孔隙比;e_x 为稳定孔隙比。

将式(2)、(3)代入固结微分方程并进行无量纲 化^[10],可得到:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial Z^2} - N \frac{\partial E}{\partial Z} = \frac{\partial E}{\partial T} , \qquad (6)$$

其中,

· 54 ·

$$E(Z,T) = \frac{e(z,t)}{e(0,0)},$$
 (7)

$$Z = \frac{z}{h},\tag{8}$$

$$T = \frac{gt}{h^2},\tag{9}$$

 $N = \lambda h(\gamma_s - \gamma_w). \tag{10}$

定义大变形固结的固结度为

$$U(T) = \frac{\int_0^1 [E(Z,0) - E(Z,T)] dZ}{\int_0^1 [E(Z,0) - E(Z,\infty)] dZ} =$$

$$\frac{\int_{0}^{1} [e(z,0) - e(z,t)] dz}{\int_{0}^{1} [e(z,0) - E(z,\infty)] dz}, \qquad (11)$$

式中, e(z,t) 为固相坐标系下 z 处 t 时刻的孔隙比。 e(z,0) 为初始时刻的孔隙比, $e(z,\infty)$ 为固结稳定 后的孔隙比。引入自重固结单面排水的饱和土体初 始条件和边界条件。用数值方法解出式(11), 即可 得到固结度 U(T) 与固结时间 T 的的函数关系, 为 了便于工程应用, 将固结度和时间因素的关系用图 表的形式表示, 图 1 给出了不同 N 值下自重固结单 面排水的固结度与时间因素的关系曲线。其中: B 为 稳定孔隙比与初始孔隙比的比值: $B = e_x/e(0,0)$; R 为土层顶部的标准化 e 值: R = e(l,t)/e(l,0)。



图1 自重固结单面排水

2 饱和细粒尾矿自重固结试验

为研究饱和细粒尾矿在单面排水情况下大变形 固结孔隙比和应力的关系,需要进行室内固结试验, 这里选取华东某铜矿尾矿库全尾矿、提取出全尾矿 中+0.074 mm 粗颗粒占全尾矿总重的 30%、40%、 提取出全尾矿所有+0.074 mm 粗颗粒以及提取全 尾矿所有+0.05 mm 粗颗粒后的尾矿土样等5类土 样进行室内固结试验。5 类饱和细粒尾矿土样的颗 粒划分和物理性质分别见表1、2。

表1 饱和细粒尾矿土样颗粒划分

土样 编号	+0.25	+0.1	+0.074	4+0.05	+0.00	5-0.00	5 $d_{\rm cp}$	备 注
1	9.47	25.35	12.94	25.77	14.29	12.18	0.08	2002.5 入库全尾矿
2	5.03	13.47	6.87	20.41	36.81	17.4	0.057	提取出 30% +0.074 mm 后尾矿
3	2.56	6.86	3.51	23.52	42.95	20.30	0.055	提取出 40% +0.074 mm 后尾矿
4	0	0	0	27.35	49.33	23.32	0.0311	提取出所有 +0.074 mm 后尾矿
5	0	0	0	0	67.90	32.10	0.011	提取出所有 +0.05 mm 后尾矿

表 2 5 类尾矿土样物理性质

土样 编号	土样类别	含水量 /%	t密度 /(t/m ³)	孔隙比	比重	液限/%	塑限 /%
1	尾轻亚粘土	24.6	2.20	0.746	3.12		
2	尾重亚粘土	25	2.31	0.996	3.33	25.0	15.0
3	尾重亚粘土	45	2.25	1.45	3.54	34.0	16.5
4	尾矿泥	57.5	2.19	1.76	3.35	34.6	23.1
5	尾矿泥	68.9	1.66	2.23	3.26	54.0	34.6

将尾矿土样进行室内固结试验,得到5类尾矿 土样的压缩试验值,将试验值用公式(5)进行非线 性拟合。拟合曲线见图2所示。





图 2 5 类尾矿土典型试样室内固结试验拟合曲线

5 类尾矿土的固结试验曲线用式(5)进行拟 合^[11],可以依次得到各土层的非线性系数和等代固 结系数如下表3。

		表3	各土样的			
参	数	1	2	3	4	5
$\lambda(e)$	/Pa ⁻¹	5.5	15.2	35	45.2	67.2
g(e) /	(m^2/d))0.1826	$.67 \times 10^{-2}$	1.32 × 10 ⁻	$^{2}1.94 \times 10^{-3}$	$^{6}2.7 \times 10^{-4}$
	各土林	羊每一	分层的土	上粒高度	计算公式	为
			l = h/($(1 + e_0)$		(12)
	得到谷	各土样	在每一分	}层的土	粒高度如	表4。

表4 各土样每一分层的土粒高度

土样编号	1.5	2.5	6.5	11.5	16.5	21.5			
1	0.86	1.43	3.71	6.57	9.43	12.29			
2	0.75	1.25	3.25	5.76	8.27	10.77			
3	0.61	1.02	2.653	4.69	6.735	8.75			
4	0.543	0.91	2.355	4.17	5.98	7.79			
5	0.46	0.774	2.012	3.56	5.11	6.66			

选取上述5种饱和细粒尾矿土样进行堆积高度 分别为1.5 m、2.5 m、6.5 m、11.5 m、16.5 m 和 21.5 m离心机模型固结试验,得到了5类尾矿试样 离心模型试验固结时间。图3(a)~(c)分别为1 号、3 号、5 号土样离心模型试验和理论计算的固结 度与时间曲线。

从图 3(a)~(c)中可以看出,每种饱和细粒尾 矿土样在不同堆积厚度下,其固结度与时间曲线形 状有所差异。根据公式 $N = \lambda h(\gamma_s - \gamma_w)$ 可知,土粒 高度 h 和非线性参数 λ 均影响 N 的取值,随着非线 性参数 λ 的增大,土粒高度越大其对曲线形状的影 响越明显(当 $\lambda = 0$ 时,N = 0,土粒高度不影响曲线 形状)。因此,随着饱和细粒尾矿土样粒度的越来 越细,土层厚度为1.5~21.5 m 的土样固结度与时 间曲线形状差异会越来越大,试验曲线反映出这种 变化趋势。



 ■ -1.5 m 厚度土样试验值;▲ -2.5 m 厚度土样试验值; ★ -6.5 m 厚度土样试验值;● -11.5 m 厚度土样试验值;
 ● -16.5 m 厚度土样试验值;▼ -21.5 m 厚度土样试验值
 □ -1.5 m 厚度土样理论计算值;△ -2.5 m 厚度土样理论计算值;
 ☆ -6.5 m 厚度土样理论计算值;○ -11.5 m 厚度土样理论计算值;
 ◇ -16.5 m 厚度土样理论计算值;▽ -21.5 m 厚度土样理论计算值

比较图 3(a) ~ (c) 中理论计算曲线与试验拟 合曲线可以看出, 饱和细粒尾矿土样固结过程中离 心机固结试验得到的固结速度比理论计算的要快, 达到相同固结度的试验时间较理论计算时间要短, 且尾矿土样粒度越细,固结过程中两者时间差异越 大。但尾矿土样完成固结所需的时间离心机试验值 与理论计算值较接近。

从试验曲线形态可以看出,对于每种尾矿土样, 土层高度越大,固结越缓慢,为了加快饱和细粒尾矿 的固结,可以创造较短的排水距离,以降低大变形固 结的土层厚度。

对比这些曲线可以看出,对于相同的土层厚度, 饱和细粒尾矿土样颗粒越细,即对应的非线性系数 越大,其固结越缓慢,达到相同固结度所花费的时间 越长。

3 固结试验成果应用

华东某铜矿为了节约成本,减少井下充填对长 江江砂依赖,须提取全尾砂中粗颗粒用于井下充填, 留下较细颗粒送至尾矿库堆置。对于上游法尾矿堆 积坝,尾矿土作为子坝筑坝材料,其固结程度会影响 坝体的安全性。该铜矿提取全尾矿中粗颗粒成分 时,其尾矿库(坝)上升到每一高程所需的时间如图 4 所示(图中尾矿土样编号同表1~4)。



图4 尾矿库上升至每一高程所需的时间

1-全尾矿;2-提取出全尾 30% +0.074 mm 粗粒 后尾矿;3-提取出全尾 40% +0.074 mm 粗粒后尾 矿;4-提取出全尾所有 +0.074 mm粗粒后尾矿;5 -提取出全尾所有 +0.05 mm 粗粒后尾矿

参照该铜矿尾矿库设计方案,在入库尾砂量保 持稳定的情况下,尾矿库在高程 23.5 m 至 37.5 m 高程段上升速度最快,尾砂堆积子坝的固结度在该 高程段的排尾期间达到 80% 以上,即可满足设计要 求。在各种粒径的尾矿浆入库的情况下,相应的用 于堆积子坝的尾矿土样固结度与时间的关系参照固 结试验成果图 3。

由图 3 和图 4 对比分析,当提取占全尾矿总量 40%的+0.074 mm 粗粒入库,即采用 3 号尾矿土样 进行堆筑子坝时,在子坝堆筑不同高度的的情况下, 子坝达到 80%固结度所需的时间试验值和理论值均 小于尾矿库上升时间;当提取全尾矿中所有 .56. +0.074 mm粗粒,即采用4号尾矿土样筑坝时,子坝 固结度达到80%所需的时间离心机试验值满足要 求,理论计算时间与尾矿库上升时间接近。因此,该 铜矿排尾中提取+0.074 mm 粗粒应不小于原尾总量 的40%,以满足尾矿筑坝的固结指标设计要求。

4 结 论

通过上述固结试验,得到以下结论:

(1)饱和细粒尾矿土的固结变形特征可以利用 大变形固结理论解释,尾矿土完成固结时间的离心 机固结试验值与理论计算值相近。但在完成固结之 前,离心机固结试验时间比理论计算时间要短,且尾 矿土非线性系数越大,固结过程中试验值与理论值 时间差异越大。

(2)利用细粒尾矿筑坝需要考虑到尾矿土的大 变形固结特性。尾矿土颗粒本身的非线性系数、尾 砂堆积坝的堆坝高度、排水条件都会影响到尾砂坝 的固结,采取适当的工程措施可以促进尾矿坝体的 固结,提高坝体安全性。

(3)在理论上,该铜矿的入库尾矿颗粒平均粒 径可降至0.0311 mm,但由于其粘粒和胶体较多, 尾矿排水性差,固结慢,因此筑坝高度和上升速度受 到限制。

参考文献

- Mikasa M. The consolidation of soft clay[J]. Civil Engineering in Japan, 1965, 1(1):21-26.
- [2] 中钢集团马鞍山矿山研究院.武山铜矿细粒筑坝可行性研究 报告[R].马鞍山:中钢集团马鞍山矿山研究院,2002.
- [3] Gibson R E, England G L, Hussey M H L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers [J]. Geotechnique, 1967, 17 (3):261-273.
- [4] Gibson R E, Schiffman R E, Cargil K W. The theory of one dimensional consolidation of saturated days: finite nonlinear consolidation of thick homogenous layers [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981,18(2):280-293.
- [5] 谢康和,郑 辉,Leo C J. 软粘土一维大应变固结解析理论
 [J].岩土工程学报,2002,24(6):680-684.
- [6] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电 出版,1996.
- [7] 谢新宇,朱向荣,谢康和,等.饱和土体一维大变形固结理论新 进展[J].岩土工程学报,1997,19(4):30-38.
- [8] 白 冰.饱和土体固结变形特征的一种非线性描述[J].岩石 力学与工程学报,2005,24(11):1966-1971.
- [9] 赵维炳,施建勇.软土固结与流变[M].南京:河海大学出版 社,1996. (收稿日期 2008-12-08)