

尾矿砂土淋滤固结机理研究

曹净¹, 陈颖辉¹, 李睿¹, 赵党书¹, 黄绍铿²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 通过试验研究, 初步分析了上游法尾矿堆积坝干滩面和泥滩面表面的尾矿砂土在排放尾矿液过程中, 由于尾矿液渗入尾矿砂土体中, 使其形成非饱和——饱和状态交替环境, 在渗透力和毛细吸力作用下产生淋滤固结; 并初步探讨了尾矿砂土的淋滤固结机理。

关键词: 尾矿砂土; 尾矿坝; 渗流

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)05 - 0073 - 05

Study on the Mechanism of Leaching Consolidation of Tailings

CAO Jing¹, CHEN Ying-hui¹, LI Rui¹, ZHAO Dang-shu¹, HUANG Shao-keng²

(1. Faculty of Civil and Architecture Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China; 2 College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this paper, through the study and analysis, a cyclic unsaturated - saturated state is formed owing to tailing liquid osmosizes tailings sand soil in the course of venting tailing liquid. A preliminary analysis is made on leaching consolidation of tailings under the influence of seepage force and capillary suction. The mechanism of leaching consolidation of tailings is also preliminarily researched.

Key words: tailings sand soil; tailings dam; seepage

0 引言

上游法尾矿堆积坝坝体堆积尾矿由水力冲填作用堆积而成, 刚堆积时一般比较松散, 孔隙比较大 (0.8 ~ 1.20), 强度较低. 随后在其上覆堆积尾矿砂土的重力作用下, 会产生一些固结沉降. 上游法尾矿堆积坝尾矿液是经输送管道在其坝顶分段定时向其沉积面上排放, 各段每次排放的时间一般为 1 ~ 3 h, 每段下一次排放矿液将要隔几天或 10 几天以后, 这样周期性排放尾矿液的工艺将在干滩面和泥滩面之下的尾矿砂土体中形成非稳定渗流, 使其处于非饱和至饱和状态交替环境之中^[1]. 这种非稳定渗流对尾矿砂土固结又会产生何种影响是值得探讨的.

1 现场尾矿液渗透试验

向干滩面排尾矿液时, 每次排放矿液的时间较短 (一般不超过 3 h), 且每次排放尾矿液后在干滩面表面留下一层 2 ~ 3 mm 的泥皮. 在沉积滩面用内径 130 mm, 高 120 mm 的套管取原状尾矿砂样, 引正在排放的尾矿液至试验坑道作渗透试验, 试验水头约为 10 ~ 15 cm, 共作了 21 组, 试验结果见表 1. 对

表 1 现场尾矿液渗透试验结果^[1]

Tab 1 Experiment result of tailings field permeability test

土类	平均渗透系数 k/cm · s ⁻¹	3 h 尾矿液可向	
		下渗透深度 /cm	7 d 尾矿液可向 下渗透深度 /cm
尾细砂	1.29 × 10 ⁻³	14	780
尾粉砂	5.14 × 10 ⁻⁴	5.6	310

刚排放完尾矿液的沉积滩面表层进行开挖也发现只有表面 10 ~ 15 cm 厚的尾矿砂土浸润饱和, 其下的尾矿砂土仍然是干的, 这表明现场尾矿砂土渗透试验的结果与实际基本上吻合. 在停止排放尾矿液后, 沉积

收稿日期: 2004 - 11 - 03

第一作者简介: 曹净 (1966.7 ~), 男, 博士, 高级工程师. 主要研究方向: 城市环境岩土工程. E-mail: cjl117@sina.com

滩表层饱和尾矿砂土中水的补给途径被中断,且其水量是有限的,主要由其下的非饱和尾矿砂土吸收,不可能继续再往下渗透数米之深,并且干滩面浸润线埋深一般在10m以上,在近坝顶尾矿液排放口处可达30m以上,即使在泥滩面浸润线埋深也达1~2m。另外,沿竖直方向每隔一定的隔距,尾矿堆积体中存在有一层2~3mm厚的泥皮,这也相应降低了尾矿砂土竖直方向上的渗透性。因此,尾矿液只能对干滩面和泥滩面表层尾矿砂土体浸润饱和,其饱和区很难与其下的坝体浸润面连通,在尾矿水浸润饱和区之底与其下的浸润面之间始终存在一个非饱和区。

2 尾矿淋滤固结室内试验

为模拟排放的尾矿液对堆积尾矿砂土固结的实际影响情况,在室内做了5种状态下的淋滤固结试验,试验条件见表2,图1为淋滤室内试验装置图。其中第2种为尾细砂与精矿按重量2:1的混合料制作试验土柱,第3种为尾粉砂与精矿按重量2:1的混合料制作试验土柱,第5种为用河砂与粉土混合料(细砂)制作试验土柱。试验过程及有关数据见表3,各组土柱的沉降量(s)随加水淋滤次数(n)的关系见图2,图3为第3淋滤试验组的部分加水淋滤过程中土柱的沉降差(Δs)与加水淋滤时间(t)关系曲线,淋滤试验每次加水淋滤过程中土柱的沉降差(Δs)与加水淋滤时间(t)关系曲线示意图如图4所示,尾矿淋滤固结试验结果见表4。

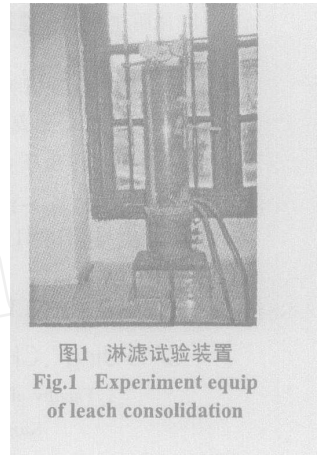


图1 淋滤试验装置
Fig.1 Experiment equip
of leach consolidation

表2 淋滤固结试验条件^[1]

Tab.2 Experiment conditions of leach consolidation test

编号	土柱土类	淋滤水	每次加水量	土柱高度	土柱直径	孔隙比	密度	土粒密度	不均匀系数	中值粒径	排水情况
			/mL	/mm	/mm	e	$/g \cdot cm^{-3}$	/Gs	/Cu	/mm	
1	放矿液干料	尾矿水	100~200	645	111	1.11	1.75	3.25	6.39	0.109	让排水
2	尾细砂+精矿	蒸馏水	300	475	137	0.913	1.88	3.46	2.97	0.175	让排水
3	尾粉砂+精矿	蒸馏水	100	470	137	0.808	2.18	3.44	4.12	0.067	让排水
4	河砂(细砂)	尾砂水	500	635	111	0.792	1.48	2.66	2.91	0.236	让排水
5	河砂+粉土(细砂)	尾砂水	200	633	111	1.232	1.22	2.73	4.62	0.205	让排水

表3 淋滤固结试验过程有关数据^[1]

Tab.3 Related data of leach consolidation test process

编号	土柱土类	试验天数	加水次数	每次加水淋滤过程中土柱膨胀回弹量	土柱沉降 s 与加水淋滤次数 n 关系图
		/d	次	/mm	
1	放矿液干料	110	127	0.005~0.03	见图2
2	尾细砂+精矿	27	44	0.002~0.005	见图2
3	尾粉砂+精矿	27	44	0.005~0.02	见图2
4	河砂(细砂)	26	25	0.002~0.006	见图2
5	河砂+粉土(细砂)	37	33	0.001~0.045	见图2

表4 淋滤固结试验尾矿物理学指标试验结果^[1]

Tab.4 Physics mechanics index experiment result of tailings leach consolidation test

编号	土类	试验天数 /d	加水次数 /次	总沉降 s /mm	孔隙比 e		密度 $/g \cdot cm^{-3}$		淋滤后 C_q /kPa	淋滤后 q /(%)
					淋滤前	淋滤后	淋滤前	淋滤后		
1	放矿液干料	110	127	7.5	1.11	1.09	1.75	1.77	45.38	34.0
2	尾细砂+精矿	27	44	0.15	0.913	0.907	1.88	1.89	12.20	29.3
3	尾粉砂+精矿	27	44	0.84	0.808	0.775	2.18	2.22	7.10	35.1
4	河砂(细砂)	26	25	0.334	0.792	0.782	1.48	1.49	2.9	27.1
5	河砂+粉土(细砂)	37	33	0.368	1.232	1.219	1.22	1.23	12.76	26.9

在每次加水淋滤初期,淋滤水在土柱顶部的透水石(10mm厚)或带孔钢板(5mm厚)上面形成稳定水位,水对透水石或带孔钢板存在着向上的浮力,但其浮力小于透水石或带孔钢板的重量,还不足使透水石或带孔钢板向上浮起,因此,这时室内模拟试验中的百分表读数表明的回弹应为试验土柱的膨胀回弹所引

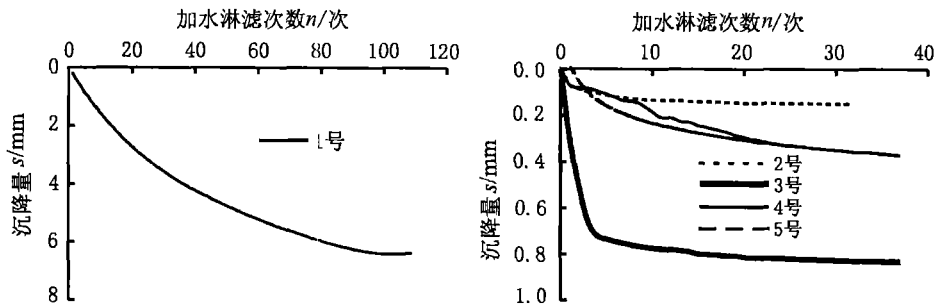


图2 淋滤试验 $s \sim n$ 关系曲线

Fig.2 Relative curve between s and n of the leach test

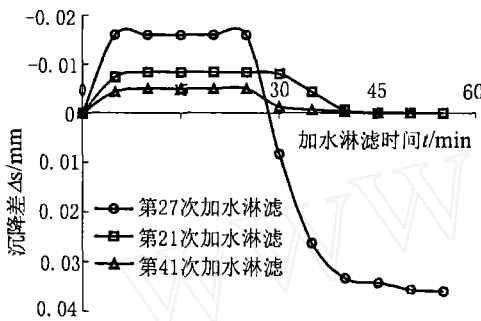


图3 3号淋滤固结试验 $s \sim t$ 关系曲线

Fig3 Relative curve between s and t of the third leach consolidation test

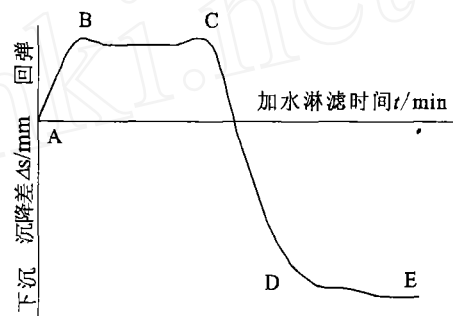


图4 每次淋滤过程中土柱 $s \sim t$ 关系曲线示意图

Fig.4 Sketch map of the relate curve between s and t of each leach process

起,即由于土粒间毛细吸力消失所引起的。

试验表明:上游法尾矿堆积坝独特的排放尾矿液工艺,使其干滩面和泥滩面表层一定厚度范围内的堆积尾矿砂土体中频繁的形成非稳定渗流,导致尾矿砂土体处于饱和~非饱和状态频繁交替循环之中,每次排放尾矿液过程中,尾矿砂土体的收缩下沉量大于或等于其膨胀回弹量,如图 3, 4所示;随排放尾矿液的次数增加,每次排放尾矿液过程中的沉降量相应减小如图 2, 3所示,当排放尾矿液次数达到一定量后,每次排放尾矿液过程中干滩面和泥滩面表层一定埋深范围内尾矿砂土体的膨胀回弹量与其收缩下沉量接近,甚至相等,其总沉降量趋于稳定如图 2, 3所示.淋滤固结作用对不均匀系数大的尾粉砂和尾粉土尤为明显。

3 尾矿砂土淋滤固结机理分析

室内模拟尾矿砂土淋滤固结试验结果表明:水的淋滤作用可加速尾矿砂土密实而固结.尾矿砂土体的固结(压缩)随加水淋滤次数的增加先逐渐增加,但当加水淋滤达到一定次数后,试验土柱基本上不再沉降,其高度趋于稳定见图 2~3.在每次淋滤过程中,尾矿砂土体先膨胀,膨胀到一定量后,再趋于稳定,当停止加水淋滤,水位从试验土柱顶部消失约 5 min后,即淋滤水水头压力消失后,尾矿砂土体快速下沉而收缩见图 3.随加水淋滤次数的增加,加水淋滤初期(即在形成稳定淋滤水位过程中)试验土柱的膨胀回弹量逐渐减小见图 3.每次淋滤过程中,土的中值粒径愈小及不均匀系数愈大者,其膨胀回弹量愈大;土的中值粒径愈大及不均匀系数愈小者,其膨胀回弹量愈小;粉砂的膨胀回弹量明显比细砂的膨胀回弹量大.淋滤固结试验结果表明,除了尾矿砂土在加水淋滤过程中存在膨胀回弹现象外,一般砂土也存在膨胀回弹现象。

干滩面和泥滩面表层堆积尾矿砂土一般为尾细砂、尾粉砂和尾粉土,单粒结构.尾矿砂土在水力冲填下刚堆积时,比较松散,粗颗粒之间的空隙和粗颗粒接触面间松散地充填微细颗粒。

在排放尾矿液前,尾矿砂土处于非饱和状态,粗颗粒接触面间存在有薄膜水,如图 5(a)所示,在毛细

吸力作用下,尾矿粗颗粒间存在有一种势能,使颗粒有相互靠近的趋势,由于粗颗粒接触面间充填有微细颗粒和存在化学胶结^[1-3],从而阻止颗粒相互靠近。

当向干滩面排放尾矿液时,尾矿液浸入干滩面和泥滩面表层堆积尾矿砂土中使其浸润饱和,如图5(b)所示,粗颗粒间的毛细吸力消失,使颗粒有相互靠近趋势的势能也随之消失,为此,尾矿砂土体有微小的膨胀。这一阶段为每次加水淋滤过程中,开始加水至淋滤水在试验土柱顶部的透水石或带孔钢板之上面形成稳定水位的过程,也是土柱由非饱和浸润至饱和的过程,对应于如图4所示曲线的AB段。

随着排放尾矿液的继续,干滩面和泥滩面表层堆积尾矿砂土体在一定范围内被浸润饱和。对试验土柱而言,这时试验土柱已充分浸润饱和,尾矿土柱膨胀结束;对于干滩面和泥滩面表层尾矿砂土体而言,其浸润饱和区还在不断扩展,尾矿砂土的膨胀还没有结束。由于排放尾矿液在干滩面和泥滩面浅层堆积尾矿砂土体上面形成一相对稳定的水位,在浸润饱和区形成渗流。在渗透力的作用下,粗颗粒之间空隙中的微细颗粒重排而密实,粗颗粒接触面间的部分微细颗粒在渗透力作用下被渗流挟走进入下面的粗颗粒间的空隙中,如图5(c)所示。这一阶段对应于如图4所示曲线的BC段。

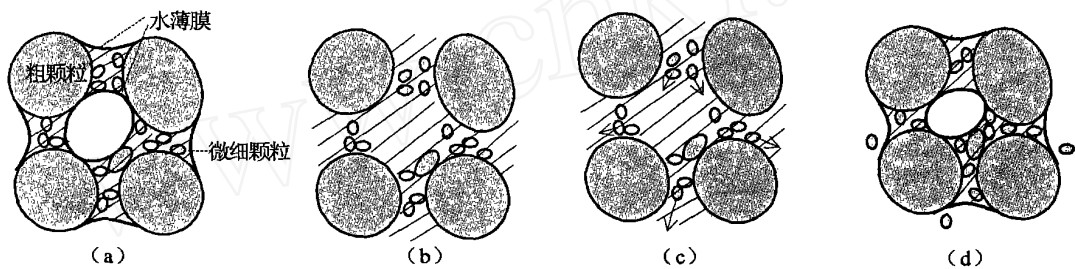


图5 尾矿砂土淋滤固结过程示意图

Fig.5 Sketch map of leach consolidation process of tailings

停止排放尾矿液后,试验尾矿土柱尾矿砂土中的水仍继续下渗,从上而下先后由饱和状态过渡到非饱和状态;而干滩面和泥滩面表层堆积尾矿砂土体中浸润饱和区的水分被其周围或其下的非饱和尾矿砂土吸收,浸润饱和区尾矿砂土由饱和状态过渡到非饱和状态。这时在尾矿砂土粗颗粒接触面间又重新形成薄膜水,在毛细吸力的作用下,产生使颗粒相互靠近的势能,由于粗颗粒接触面间的部分微细颗粒已被渗流挟走进入到粒间空隙中,在毛细吸力势能和尾矿砂土土颗粒自重的共同作用下,粗颗粒相互靠近,从而使尾矿砂土密实,如图5(d)所示。这一阶段尾矿砂土体收缩下沉,且在较短时间内完成,对应于如图4所示曲线的CD段。随着表层尾矿砂土中饱和区的逐渐消失,其下沉量减小并趋于稳定,尾矿砂土处于非饱和状态,如图4所示曲线的DE段。

直到下次排放尾矿液时,又重复上述过程。这一过程中粗颗粒间空隙中的微细颗粒在渗透力的作用下而重排或被渗流挟走进入下面的粗颗粒间的空隙中,以及干滩面和泥滩面表层尾矿砂土体的浸润饱和区逐渐下移,并最终消失,毛细吸力逐渐恢复。如此频繁地重复上述尾矿液淋滤过程,干滩面和泥滩面表层尾矿砂土体在其自重和毛细吸力的共同作用下加速密实而固结沉降。

尾矿砂土在水力冲填作用下,刚堆积初,比较松散,尾矿液的淋滤使其在自重和毛细吸力的共同作用下加速密实而固结沉降。但随向沉积滩面排放矿液达到一定次数后,原沉积滩面表层尾矿砂土体的固结沉降量趋于稳定,表明尾矿淋滤固结基本完成。其原因如下:其一,随排放尾矿液次数的增加,尾矿砂土体逐渐密实,粗颗粒接触面间的大部分微细颗粒在非稳定渗流渗透力的作用下进入粒间的空隙中,粗颗粒已相互靠得很近,甚至直接接触,毛细吸力引起的势能已不足使尾矿更密实;其二,随非饱和、饱和状态的氧化-还原环境交替次数的增加,沉积滩面浅层的尾矿砂土颗粒间的化学胶结将逐渐发挥作用^[3],非稳定渗流的渗透力已不足以克服尾矿颗粒间化学胶结力而把粗颗粒接触面间的微细颗粒带走和使颗粒间空隙中的微细颗粒重排密实。尾矿淋滤固结作用基本完成的同时,随尾矿砂土颗粒间的产生化学胶结,其化学固结也开始发挥作用。

当然,尾矿堆积坝作为一堆积过程,首先在其上覆不断堆积尾矿的重力作用下,仍在发生重力固结作

用而沉降;另外,在非稳定渗流的作用下,下伏尾矿砂粗颗粒间的空隙被上覆尾矿砂中的微细颗粒所充填,这将不利于下伏尾矿砂土的重力固结作用的发挥。

4 结束语

上游法尾矿堆积坝,堆积尾矿砂土除在其上覆堆积重力作用下密实而固结沉降外,由于其排放尾矿液的独特工艺,使得在干滩面和泥滩面表层的尾矿砂土体中形成非稳定渗流,从而使尾矿砂土处于非饱和、饱和频繁交替环境之中,并使尾矿砂土产生淋滤固结作用。每次向干滩面排放尾矿液时,尾矿液淋滤干滩面和泥滩面表层的尾矿砂土,使其浸润至饱和,尾矿砂土颗粒间的毛细吸力逐渐消失,尾矿砂土体膨胀回弹,浸润完全饱和后,尾矿砂土体膨胀回弹结束,饱和区内已形成渗流,在渗透力作用下粗颗粒接触面间的部分微细颗粒被渗流挟走进空隙中。当停止排放尾矿液后,被饱和的尾矿砂土由饱和逐渐过渡到非饱和状态,尾矿砂土颗粒间的毛细吸力逐渐恢复,在毛细吸力及其自重的共同作用下粗颗粒更加进一步靠近些,从而使尾矿砂土更密实而固结。

上游法尾矿堆积坝,一般均存在淋滤固结作用,并对尾矿堆积坝的稳定性是有益的。

参考文献:

- [1] 曹净. 攀钢马家田尾矿堆积环境及其特性研究 [J]. 中国矿业, 2003, 12(6): 4~7.
- [2] 孔丽丽,陈守义. 武山尾矿坝无纺土工织物滤层化学淤堵问题初探 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 444~449.
- [3] 曹净,龚宪伟,李鸿翔,等. 攀钢马家田尾矿化学固结机理初探 [J]. 桂林工学院学报, 2000, 20(2): 147~150.
- [4] 郝建英,雍岐龙,赵希英,等. 无机胶粘岩土的抗渗性能研究 [J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29(1): 93~96.

(上接第 77 页)

5 结论

研究计算了轴心受压柱和小偏心柱两种情况,不考虑钢筋和混凝土之间的粘结作用. 利用 ANSYS 处理大偏压柱的有限元计算问题还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及计算 [M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 336~354.
- [2] 李卫,过镇海. 高温下混凝土的强度和变形性能试验研究 [J]. 建筑结构学 1993, 14(1): 8~16.
- [3] 刘利先. 增大截面法加固高温损伤钢筋混凝土柱受力性能的试验研究: [硕士学位论文] [D]. 北京:清华大学, 2002. 14~18.
- [4] 吕彤光. 高温下钢筋的强度及变形试验研究: [硕士学位论文] [D]. 北京:清华大学, 1996. 20~22.