

文章编号: 1001-4888(2018)03-0435-07

尾矿砂二维非饱和渗流的实验研究^{*}

林雪松¹, 陈殿强², 王来贵³

(1. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁有色勘察研究院, 辽宁沈阳 110013;

3. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究尾矿砂非饱和渗流, 通过自行设计的仪器进行了二维非饱和渗流实验, 得到了实验中的基本现象和渗流稳定后含水率沿水平和竖直方向的分布。利用直剪实验测试了非饱和尾矿砂抗剪强度参数与含水率关系。通过分析综合获取了非饱和尾矿砂抗剪强度参数的空间分布, 并利用分析结果解释了非饱和渗流中的基本现象。研究表明: 尾矿砂非饱和渗流中出现了明显的裂缝和错层; 非饱和尾矿砂内沿水平和竖直方向含水率分布均近似服从指数规律; 粘聚力随含水率的增加先增后减; 内摩擦角随含水率的增加单调递减; 抗剪强度参数具有空间分布特点; 裂缝和错层源于抗剪强度参数的分布与变化。

关键词: 尾矿砂; 非饱和渗流; 含水率; 粘聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-263

0 引言

含水率的分布状态是影响尾矿坝安全的重要因素, 在坝体安全度分析中必须着重考虑。尾矿坝上存在大量非饱和尾矿砂, 非饱和尾矿砂内部的含水率作为整个尾矿坝含水率分布的一部分, 对坝体安全度的影响不容小觑, 应该予以研究。非饱和尾矿砂内部的含水率分布可通过非饱和渗流实验得出。多年来国内外学者针对非饱和渗流实验进行过很多有意义的研究。姚华等通过对 7 种粗粒土料进行室内竖管法毛细水上升高度实验, 建立了粗粒土毛细水上升高度与时间的关系曲线, 并分析了各曲线变化规律和原因^[1]。董斌等通过对 12 种不同粗细土料进行室内竖管法毛细水上升高度实验, 得到毛细水上升高度与时间关系曲线, 并分析了影响因素和变化规律^[2]。苗强强等开发了一套毛细上升实验系统, 对非饱和含黏土砂做了 3 个不同初始含水率的毛细上升实验, 得到了试样各个断面的含水率和吸力随时间的变化规律^[3]。张志军等研究了某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律^[4]。纵观以往的研究, 都集中在一维问题, 而尾矿坝非饱和渗流问题涉及 3 个维度, 维度方面的不足易导致研究结果与工程实际偏差较大, 因此有必要增加测试维度以提升实验结果的参考价值。本文首先设计实验仪器进行尾矿砂二维非饱和渗流实验, 得到非饱和渗流中的基本现象和非饱和尾矿砂内部含水率的空间分布, 然后利用常规直剪实验测试非饱和尾矿砂抗剪强度参数与含水率的关系, 最后综合两部分结果得到非饱和尾矿砂抗剪强度参数的空间分布情况。拟通过研究给出非饱和尾矿砂内含水率和抗剪强度参数的空间分布, 为考虑非饱和部分的尾矿坝安全评估工作提供基础资料。

^{*} 收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-05-07

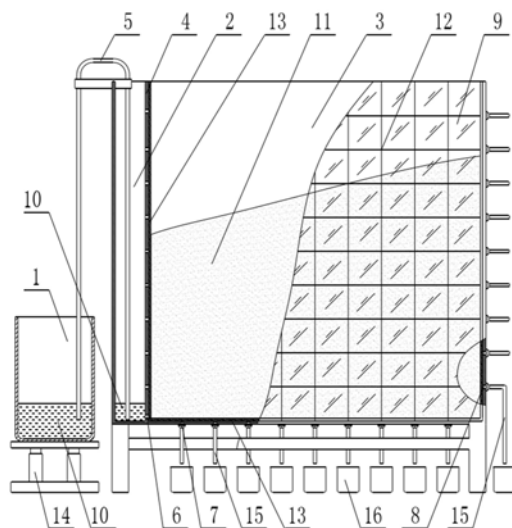
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474121, 51404136, 51274110); 辽宁省教育厅城市研究院项目(LJCL007); 国家自然科学基金煤炭联合基金重点资助项目(U1361211); 辽宁省百千万人才项目([2015]33 号)。

通讯作者: 林雪松(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为尾矿坝渗流中的力学问题。Email: lxs488@qq.com

1 实验方案

1.1 实验仪器

尾矿砂二维非饱和渗流研究的需要比较特别,通过调研没有找到可用于研究的已有实验装置,因此只能自行设计并制作。制作中曾经进行过多次修改,最终使用的仪器各部组成如图 1 所示。



1—水位调节容器, 2—储水腔室, 3—储料腔室, 4—隔档立板, 5—虹吸管, 6—水平渗水孔,
7—竖直漏水孔, 8—水平漏水孔, 9—透明面板, 10—清水, 11—实验砂土料, 12—方格网络标线,
13—透水阻料覆层, 14—升降底座, 15—导水管, 16—量杯

图 1 实验仪器

Fig. 1 Experimental apparatus

水位调节容器与储水腔室之间利用虹吸现象保持联通,允许通过调整水位调节容器中的水位来控制储水腔室中的水位。储水腔室与储料腔室之间利用格挡立板分隔,格挡立板上布设了渗水孔。通过设置竖直漏水孔和水平漏水孔来监测竖直方向和水平方向的渗漏状况,所有渗漏水均通过导水管导入量杯进行测量。为保证实验中尾矿砂不外泄,在储料腔室的各有孔面均布设透水阻料覆层。方格网络线在水平和竖直方向上的间距均为 10cm,设置方格网络线的目的一方面是有利于实验的观察与比较,另一方面是为了将交点作为取样测试点。

抗剪强度参数与含水率关系实验采用 STSJ-5A 型电动四联直剪仪,该设备属常规实验仪器,因此不做详细介绍。

1.2 实验对象

实验对象为某铁矿尾矿砂,颗粒组成如表 1 所示。从表中可看出,小于 0.019mm 粒径含量大于 50%,大于 0.074mm 粒径含量小于 10%,大于 0.037mm 粒径含量小于 30%,因此实验对象完全可以归类于细尾矿砂^[5,6]。实验尾矿砂填筑干密度为 $1.51\text{g}/\text{cm}^3$,饱和状态体积含水率为 49.80%。

表 1 细粒尾矿砂粒径组成

Tab. 1 The ingredients of fine tailings

粒径范围/mm	>0.074	0.074~0.037	0.037~0.019	0.019~0.01	<0.01
含量/%	4.31	17.13	25.03	29.37	24.16

1.3 实验内容

(1) 非饱和渗流实验

非饱和渗流实验的探究内容包括渗流中的基本现象和达到稳态后含水率的空间分布,通过对基本现象的记录,一方面可判断系统是否达到稳态,另一方面也可考察系统达到稳态之前将产生何种效应

与结果。实验中将储水腔室的水位设定为 5cm 的恒定值,然后由透明面板观察润锋位置。每隔一定时间间隔对系统状况进行拍照记录。初始阶段润锋发展速度比较快,拍照间隔较短,实验中设置为 1h,随着实验的进行,润锋发展速度越来越慢,拍照时间逐渐延长,最终的拍照时间间隔为 24h。在非饱和渗流进行到一定阶段,体系会达到稳定状态,然后采用烘干法测定网格点处的含水率。

(2)抗剪强度参数与含水率关系实验

抗剪强度参数与含水率关系实验的目的是获取粘聚力、内摩擦角与含水率的关系。设定 12 个含水率值和 2 个剪切速度值。含水率设定值为 3.75%、9.00%、13.50%、18.00%、22.50%、26.70%、30.90%、35.25%、38.70%、43.20%、46.05% 和 48.90%,必须涵盖非饱和渗流实验涉及的全部含水率,剪切速度值设定为 0.8mm/min 和 1.2mm/min。每种含水率和剪切速度下正压力取值分别为 100kPa、200kPa、300kPa 和 400kPa。共计需进行 24 次有效实验,使用 96 个有效试样。

2 实验结果

2.1 非饱和渗流实验基本现象

渗流不同时期的润锋分别如图 2~4 所示,图中润锋均标记为 AA'。由图 2 和图 3 可知,不同渗流阶段润锋形状既有相同之处也有不同之处。相同之处为水平向位移均大于竖直向位移。不同之处为随着渗流的发展,水平向与竖直向位移的差距逐渐缩小,早期二者比值近似为 2:1,中期二者比值近似为 7:5,由此可推断水平向渗流速度大于竖直向渗流速度,但随着渗流的发展,二者差距在逐渐减小。

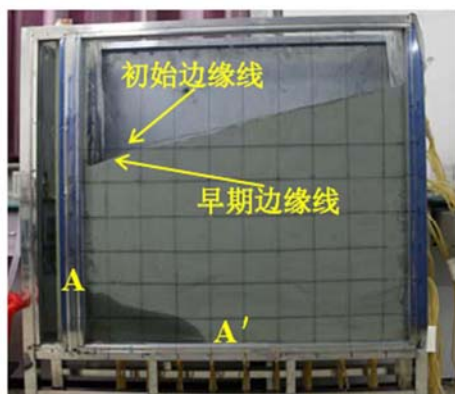


图2 早期实验状态

Fig. 2 Early experiment state

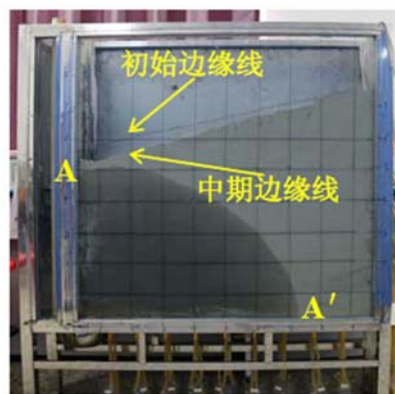


图3 中期实验状态

Fig. 3 Medium experiment state

另外,图 2~4 中还可观察到湿陷现象。图 2 中不是很明显,但图 3 和图 4 中却显而易见。图 2 中初始边缘线与早期边缘线结合的比较紧密,只在润锋上方二者存在可识别差异,而图 3 中初始边缘线和中期边缘线是完全相互区别的两条线,图 4 中最大湿陷量达 6cm 左右。湿陷的发展与非饱和渗流过程具有较强的相关性,早期非饱和部分所占比重较小,湿陷现象并不明显,于是形成图 2 中所示情况;随着渗流的发展,非饱和范围逐步扩大,湿陷现象也变得非常明显,如图 3 所示。虽然湿陷现象是伴随着非饱和渗流而产生的,但从现象出现的位置来看,湿陷现象要先于润锋的发展,在图 2 和图 3 中均出现了润锋未达到的位置就已经出现湿陷现象的情况。尾矿砂非饱和渗流中还形成了裂缝,在干砂和湿砂中都有裂缝产生,干砂中的裂缝如图 5 所示,湿砂的裂缝标记为图 4 中的 BB'。从图 5 中看出,干砂中的一条裂缝还发展成了错层,错层距离平均达 2cm 以上。湿砂中的裂缝未出现错层,但裂缝的深度和宽度均明显大于干砂,湿砂中的裂缝深度达 40cm 左右。干砂中的裂缝是陆续出现的,第一条裂缝是在实验开始以后不久出现的,湿砂中的裂缝出现时间晚于干砂中的裂缝,但发展速度比干砂快。仪器底部监测结果显示,从实验开始即存在底部渗水现象,水由距离储水腔室最近的两排孔中渗出,总的渗流速度逐渐减小,最后近似趋于恒定值,且第一排孔渗流现象在实验中停止,到实验结束只有第二排孔有水渗出。

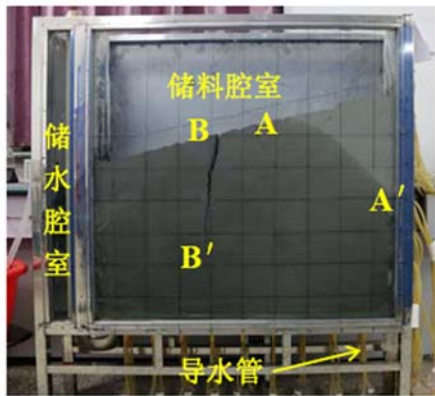


图 4 稳定状态

Fig. 4 Steady state



图 5 裂缝与错层

Fig. 5 Cracks and staggered floor

2.2 含水率空间分布

由含水率测量实验得到体积含水率沿水平方向和竖直方向的分布情况如图 6 和图 7 所示。分析图 6、图 7 可知,在水平和竖直方向,含水率均逐渐降低,降低趋势具有明显的非线性,且变化趋势与指数函数比较接近。在图 6 中,高度 0cm 处的曲线有一段近似直线,是因为测量点处于饱和区域内,除去饱和区域的点,各条曲线大致平行。由于曲线与指数函数比较接近,若需引入含水率的水平或竖直向分布假设,完全可以考虑指数函数形式。

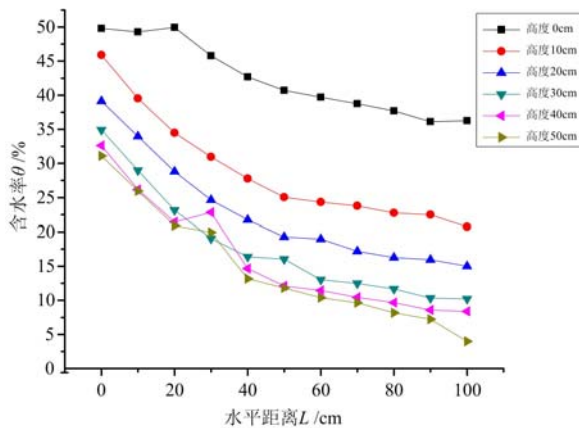


图 6 水平向含水率分布

Fig. 6 Horizontal water content distribution

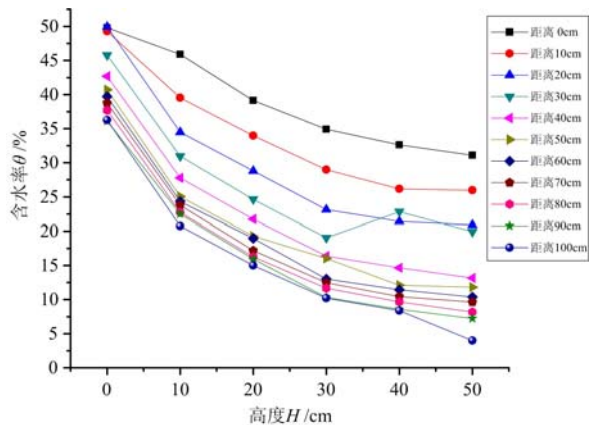


图 7 竖直向含水率分布

Fig. 7 Vertical water content distribution

2.3 抗剪强度参数与含水率的关系

不同剪切速度下粘聚力和内摩擦角与含水率的关系分别如图 8 和图 9 所示。分析图 8 和图 9 可知,在两种剪切速度下,粘聚力随含水率的增加先增后减,内摩擦角随含水率的增加单调递减,粘聚力变化趋势与高斯分布函数较接近,内摩擦角大致呈指数衰减。粘聚力曲线比较平滑,内摩擦角曲线波动相对较大。含水率处于 26.7%~30.90%之间的粘聚力处于最大值。含水率处于 3.75%~22.50%的内摩擦角变化幅度比较显著,处于 22.50%~48.90%的内摩擦角变化幅度比较小,基本已经不再随含水率的变化而变化。

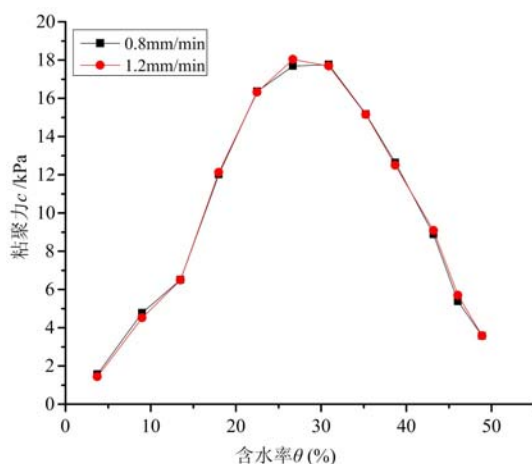


图8 粘聚力与含水率的关系

Fig. 8 Relation of cohesion and water content

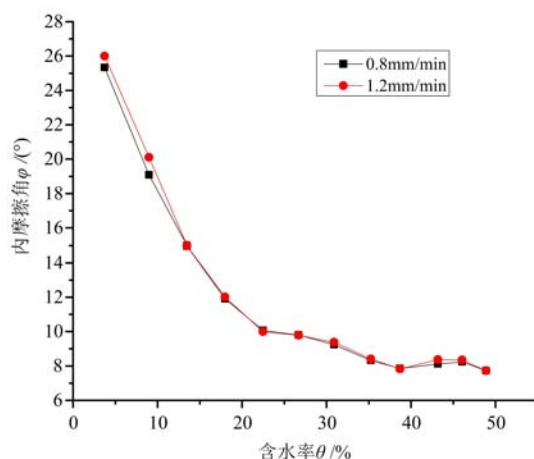


图9 内摩擦角与含水率的关系

Fig. 9 Relation of internal friction angle and water content

3 实验结果的讨论与思考

3.1 抗剪强度参数的空间分布

将含水率沿水平和竖直方向的分布和抗剪强度参数随含水率的变化进行分析综合,可得尾矿砂抗剪强度参数的空间分布情况如图10~13所示。分析图10可知,高度0cm处粘聚力随水平距离的增加而增加,高度10cm、20cm和30cm处粘聚力随水平距离的增加先增后减,高度40和50cm处粘聚力随水平距离的增加单调递减。分析图11可知,距离0cm和10cm处粘聚力随高度的增加单调递增,其他距离处粘聚力随高度的增加先增后减。其中距离20cm和30cm处增加趋势明显,减小趋势不明显,距离90cm和100cm处增加趋势不明显,减小趋势明显。

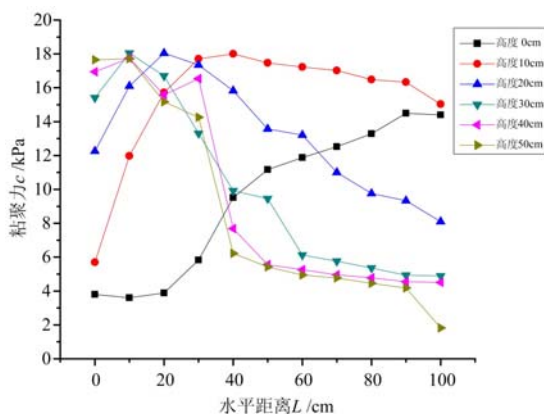


图10 粘聚力与距离的关系

Fig. 10 Relation of cohesion and distance

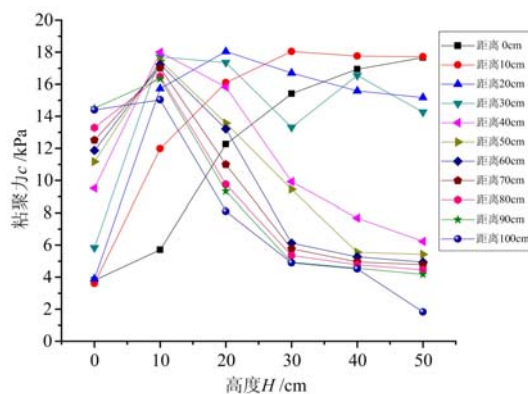


图11 粘聚力与高度的关系

Fig. 11 Relation of cohesion and height

分析图12可知,不同高度处内摩擦角随距离的增加单调递增,近似满足线性函数关系,但在不同高度处函数变化的斜率明显不同,高度值越小函数斜率越小,在高度0cm处函数斜率近似为0。图13中不同水平距离处内摩擦角与高度的关系与图12基本一致。

抗剪强度参数沿水平和竖直方向的分布构成了抗剪强度参数的空间分布,通过实验可得粘聚力和内摩擦角在非饱和尾矿砂内部具有一定的空间分布,实际工程中的某些问题(比如尾矿坝安全系数的计算),应反映非饱和尾矿砂内部抗剪强度参数的空间分布情况,由此得到的分析计算结果将更接近实际。

3.2 关于裂缝的思考

非饱和渗流中出现的裂缝明显由湿陷引起。目前对湿陷问题比较统一的认识是:湿陷过程中必然

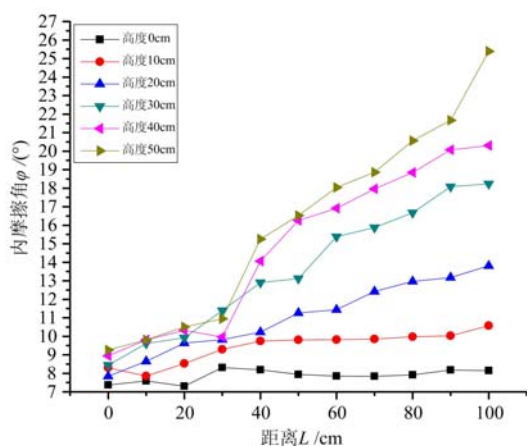


图 12 内摩擦角与距离的关系

Fig. 12 Relation of internal friction angle and distance

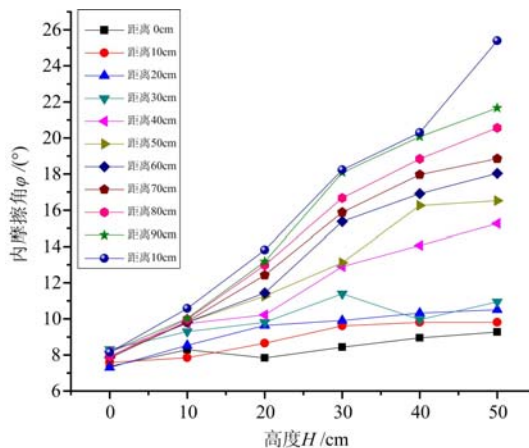


图 13 内摩擦角与高度的关系

Fig. 13 Relation of internal friction angle and height

伴随着孔隙率变化、结构失稳和突变现象^[7,8]。通过接下来的分析可知以上三方面内容在实验中均有体现。实验对象的变形首先源自孔隙率的减小,随着非饱和渗流的发展,含水率不断增加,颗粒间逐渐形成了较厚的水膜,粘聚力开始增大,在粘聚力增大与水膜润滑的共同作用下,颗粒间结合变得紧密,因此间距变小,孔隙率变小。实验对象的变形还源于湿陷中的结构失稳,从抗剪强度参数与含水率关系中看出,随着含水率的增加,内摩擦角减小,粘聚力先增后减,因此必定出现抗剪强度随含水率的增加而减小的情况,此时随着含水率的增加将出现局部坍塌,导致整体变形。由于含水率变化是导致湿陷的原因,因此变形应该与含水率等值线有一定关系,可以假设实验对象内部每一质点都在沿着近似垂直于润锋的方向运动,且运动可沿水平和竖直方向分解,竖直向运动分量导致整体沉降和错层的出现,水平向运动分量导致裂缝的产生。随着非饱和渗流的发展,裂缝原本应逐渐出现和发展,就像干尾矿砂中的裂缝一样,但是对于湿尾矿砂,由于结合比较紧密,内部存在抵抗裂缝生成的作用力,导致裂缝暂时难以出现,这一过程必然形成能量的逐渐积累,随着含水率的变化,湿砂内部促使裂缝产生的能量集聚越来越多,在生成裂缝的作用力超过非饱和尾矿砂内部的抵抗力之后,所有能量爆发出来,导致湿砂内部裂缝迅速发展,而且宽度也很大,此过程体现了湿陷中的突变现象。仪器底部的渗水本应从第一排孔中流出,然而最终却是第二排孔中始终有水流出,原因可能是第一排孔淤堵,或是存在内部裂缝形成绕渗。但在最终挖掘实验对象测含水率时并未发现内部裂缝,因此应为第一排孔处出现了淤堵,由此可见实验中裂缝只出现在实验对象顶端,底部并未出现。

4 结论

(1) 利用自行设计和制作的实验仪器进行了尾矿砂二维非饱和渗流实验,结果表明无论是干尾矿砂还是湿尾矿砂都会出现裂缝,在干尾矿砂中裂缝还会伴随错层现象。湿砂中的裂缝无论在宽度还是在深度方面都要超过干尾矿砂,裂缝产生的原因主要是非饱和渗流中的湿陷现象。如果有水向外渗出,非饱和渗流稳定后,含水率无论在水平还是竖直方向均逐渐减小,减小趋势大致相同,均可用指数函数来描述。稳定后的润锋是一条斜线。

(2) 通过常规直剪实验测试了非饱和尾矿砂抗剪强度参数与含水率关系,实验结果表明粘聚力随含水率的增加先增后减,内摩擦角随含水率的增加单调递减。粘聚力与含水率关系可近似用高斯分布函数描述,内摩擦角随含水率关系近似于指数函数。将直剪实验结果与非饱和渗流实验结果综合起来得到非饱和尾矿砂内部的抗剪强度参数空间分布情况,应用得到的结果可解释非饱和渗流中变形和裂缝出现的原因。

参考文献:

- [1] 姚华, 张喜发, 张冬青. 影响粗粒土毛细水上升高度的因素研究[J]. 勘察科学技术, 2007(1):10-13 (YAO

- Hua, ZHANG Xifa, ZHANG Dongqing. Research on affecting factors of rising height of capillary water on coarse grained soil[J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology, 2007(1):10—13 (in Chinese))
- [2] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10):1569—1574 (DONG Bin, ZHANG Xifa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10):1569—1574 (in Chinese))
- [3] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1):327—333 (MIAO Qiangqiang, CHEN Zhenghan, TIAN Qingyan, et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1):327—333 (in Chinese))
- [4] 张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 等. 某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5):1345—1351 (ZHANG Zhijun, LI Yajun, LIU Xuanzhao, et al. Rising law of capillary water in tailings dam of metal mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5):1345—1351 (in Chinese))
- [5] 《中国有色金属尾矿库概论》编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[R]. 北京:中国有色金属工业总公司, 1992 (Editorial Committee of China Nonferrous Metals Tailings Ponds Conspectus. China nonferrous metals tailings ponds conspectus[R]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Company, 1992 (in Chinese))
- [6] 尾矿设施设计参考资料编写组. 尾矿设施设计参考资料[M]. 北京:冶金工业出版社, 1980 (Edditorial Group of Tailings Establishments Design References Data. References data of tailings establishments design[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1980 (in Chinese))
- [7] 谢婉丽, 王延寿, 马中豪, 等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. 现代地质, 2015, 29(2):397—407 (XIE Wanli, WANG Yanshou, MA Zhonghao, et al. Research status and prospect of loess collapsibility mechanism[J]. Geoscience, 2015, 29(2):397—407 (in Chinese))
- [8] 孙强, 张晓科, 李厚恩. 湿陷性黄土变形的微结构突变模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3):663—666 (SUN Qiang, ZHANG Xiaoke, LI Houen. Research on microstructural catastrophe model of deformation of collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3):663—666 (in Chinese))

Experimental study on two-dimensional unsaturated seepage of tailing sand

LIN Xue-song¹, CHEN Dian-qiang², WANG Lai-gui³

(1. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Nonferrous Exploration and Research Institute, Shenyang 110013, China; 3. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study unsaturated seepage of tailings, two-dimensional unsaturated seepage experiment was carried out by using self-designed apparatus. Basic phenomenon in the experiment and rate of water content distribution along both horizontal and vertical directions in seepage steady state were obtained. The relation between shear strength parameter of unsaturated tailings and rate of water content was measured by direct shear test. The spatial distribution of unsaturated tailing sand shear strength parameter was obtained through analysis and synthesis, which was used to explain fundamental phenomenon in seepage experiment. Experimental results show that in tailings unsaturated seepage, obvious cracks and staggered floor appear. The rate of water content distribution along horizontal and vertical direction in unsaturated tailings is approximately exponential. With the increase of rate of water content, cohesion first increases and then decrease. Internal friction angle decreases monotonically with the increase of rate of water content. The shear strength parameter has the spatial distribution characteristics. The appearance of cracks and staggered floor is due to the distribution and change of shear strength parameters.

Keywords: tailing sand; unsaturated seepage; rate of water content; cohesion; internal friction angle