真空预压法加固尾矿软泥现场试验研究

胡良才,李哲辉,郭大平,李玉雷,张 宁

(中核第四研究设计工程有限公司,河北 石家庄 050021)

摘要:针对尾矿泥含水率高、强度低导致的铀尾矿库坝体稳定性差及覆盖层施工难度大等问题,开展了真空预压法联合塑料排水板加固尾矿泥现场试验,分析了在不同塑料排水板间距下尾矿泥地表沉降、分层沉降、侧向位移、固结度、孔隙水压力等参数的变化规律,并进行了现场十字板剪切试验及地基承载力试验。研究表明,真空预压法可加速尾矿泥脱水,有效降低尾矿泥含水率,提高尾矿泥强度及承载力,且排水板间距 1.0 m 时的加固效果较好。真空预压法成本低、效果好、安全环保,在尾矿泥原位脱水加固中具有广阔的应用前景。

关键词:尾矿泥;真空预压法;塑料排水板;加固;现场试验

中图分类号:TV551.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)01-0061-07

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.09.05

铀尾矿作为铀矿石选冶金属后产生的废弃物,含有原矿石中 85%的放射性[1]。为合理处置尾矿,通常在平地、傍山或拦截山谷筑坝形成尾矿库[2]。由于尾矿颗粒较细且堆积筑坝过程尾矿未经压实,故尾矿库在遭遇地震、洪水时易发生溃坝事故[3-4]。铀尾矿中的放射性核素会在酸性渗水浸泡下析出,存在与地下水发生水力联系、导致地下水受到污染的风险。同时,铀尾矿不断析出氡及其子体,而氡是主要致癌物之一[5],因此铀尾矿库是典型的放射性危险源[6]。

尾矿库事故多发与尾矿泥含水率高、强度低相关,而尾矿在自重作用下脱水固结速度极慢[7],如何加速尾矿泥原位脱水从而加固尾矿泥,一直是国内外关注的重点[8]。真空预压法是常用的软基处理方法,其施工方便、周期短、费用低,在港口、机场、高速公路等设施软基处理中得到了广泛应用[9-11]。

与黏土等普通土相比,尾矿泥成分更复杂、颗粒更细、含水率更高,真空预压法在尾矿泥脱水加固中的应用研究多采用室内试验或数值模拟方法[12-14],尚缺乏在大规模工程应用上的研究和经验。因此,笔者以某铀尾矿库为研究对象,开展了真空预压法加固尾矿泥现场试验,分析了在不同排水板间距下尾矿泥沉降量、含水率、地基承载力等变化规律,旨在为工程安全设计提供依据。

1 工程概况

1.1 尾矿库概况

某铀尾矿库位于湖南省,尾矿库 3 面被江水环绕,距江边最短距离不足 3 km。尾矿库南北长约 1 400 m,东西长约 900~1 500 m,是由 9 个坝段与 3 个丘陵山头围拦而成的平地型尾矿库。

尾矿库事故应急池位于尾矿库北侧,应急池南北长约 200 m,东西长约 1 200 m。在应急池使用后期,运营企业将其作为钛尾矿泥贮存场所,因此应急池内存有大量钛尾矿泥和铀尾矿泥。

1.2 尾矿物理力学特性

考虑到尾矿库内尾矿泥深度较大,开展真空预压现场试验危险性高,而应急池中尾矿泥物理力学性质与尾矿库中的尾矿泥接近,因此在事故应急池尾矿泥分布典型的区域选择试验区进行现场试验。

试验区域地层条件自上而下分别为:钛尾矿泥层,厚 4.50~5.90 m,平均厚 5.23 m;尾粉质黏土,厚 1.30~1.80 m,平均厚 1.52 m;第四系全新统残坡积层,该层未穿透,揭露厚度 1.50~2.90 m,平均厚 2.03 m。试验区岩土层物理力学指标见表 1。

收稿日期:2022-09-09

基金项目:中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(NRE2021-13)

第一作者简介:胡良才(1983—),男,河北邢台人,硕士,高级工程师,主要从事铀尾矿库科研、设计工作。

表 1 试验区岩土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil in the test area

物理力学指标	密度/($t \cdot m^{-3}$)	含水率/%	塑限/%	液限/%	液性指数	孔隙比	饱和度/%	压缩系数/MPa^{-1}	水平渗透系数/($cm \cdot s^{-1}$)	垂直渗透系数/($cm \cdot s^{-1}$)	地基承载力/kPa
钛尾矿泥	1.26	164.7	52.5	72.2	5.94	4.21	96	3.32	5.22×10^{-5}	2.47×10^{-5}	15.0
尾粉质黏土	1.30	121.0	35.2	53.6	4.68	3.50	92	3.41	2.59×10^{-5}	1.56×10^{-5}	20.1
第四系残坡积层	2.01	19.0	17.7	25.4	0.22	0.57	90	0.15	3.08×10^{-7}	2.77×10^{-7}	125

由表 1 可见，钛尾矿泥、尾粉质黏土含水率分别高达 164.7%、121.0%，孔隙比分别为 4.21、3.50，渗透系数为 $1.56\times10^{-5}\sim5.52\times10^{-5}$ cm/s，表层钛尾矿泥承载力仅 15.0 kPa，属于含水率高、孔隙比大、渗透系数低、承载力弱的软弱泥层。

2 现场试验

2.1 试验方案

试验区总面积为 4 000 m^2，根据塑料排水板间距不同，分为 A、B 两个子试验区，子试验区尺寸均为 50 m×40 m(长×宽)。为保证真空预压效果，在试验区周边设置黏土密封墙，采用膨润土作为密封墙造浆用土。密封墙深约 10.0 m，墙底深入第四系黏土层不小于 1 m，墙厚不小于 1.2 m，渗透系数为 $2.68\times10^{-6}\sim8.17\times10^{-6}$ cm/s。为提高承载力，在尾矿泥上部铺设土工格栅及土工布(400 g/m^2)。在土工布上部铺设 0.5 m 厚砂垫层，作为施工垫层和排水垫层。

塑料排水板采用 C 型板，宽 100.0 mm、厚 4.5 mm，排水板顶部埋入砂垫层中，长度不小于 0.3 m。排水板为正三角形布置，试验区 A、B 排水板间距分别为 1.0、1.2 m，插板深度均为 9.0 m。排水板接 ϕ80 mm 的波纹滤管，滤管按照横向(宽度方向)间距 4.0 m、纵向(长度方向)间距 20 m 布设，在管体上每隔 5 cm 钻 1 个直径8～10 mm 的孔，孔呈梅花形布置，管外包 150 g/m^2 长丝针刺土工布滤水层。

密封膜采用聚乙烯膜，膜厚为 0.12～0.16 mm，共铺设 2 层。密封膜底部铺 1 层土工布作为垫层，以防止抽真空时砂垫层中的尖锐物体刺破密封膜。抽真空装置为 IS 型真空泵，按照服务面积 1 000 m^2/台进行布置，即每个试验区布置 2 台真空泵。真空预压试验场地剖面示意如图 1 所示。

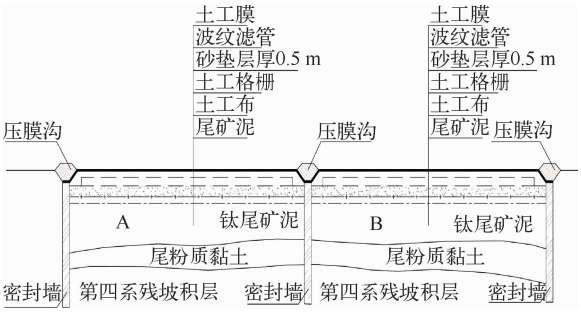


图 1 试验场地剖面示意图

Fig. 1 Cross section schematic of the site

2.2 监测仪器布置

试验过程中，对试验区地表沉降、分层沉降、侧向位移、孔隙水压力等进行监测；真空预压完成后，进行现场十字板剪切试验及地基承载力试验。试验场地及监测点布置如图 2 所示。

2.3 真空度

为避免抽真空太快导致黏土密封墙剧烈变形破坏，在真空预压初期控制抽真空速度，使得真空度在开始抽真空 14 d 后达到 80 kPa。同时利用压膜沟形成的天然围堰蓄水，作为真空预压的补充荷载。真空预压区恒载时间 90 d，期间保持膜下真空度不小于 80 kPa。连续 5 d 实测地表沉降量小于 2 mm/d 或尾矿泥总应变固结度达 80% 以上时，终止真空预压。

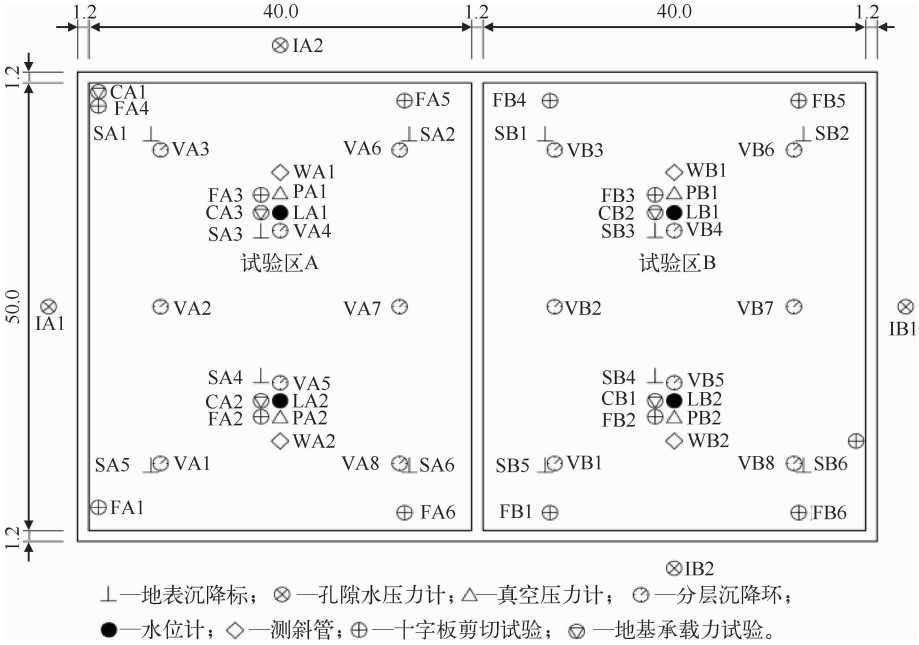


图 2　试验场地及监测点布置图

Fig. 2　Plane schematic of the site and layout of instrumentation

3　试验结果与分析

3.1　地表沉降

在试验区中间及 4 个角落分别设置沉降杆用于观测地表沉降，每个试验区设置 6 个观测点，现场试验期间试验区地表沉降曲线如图 3 所示。真空预压前 10 d，试验区 A 各监测点的沉降速度为 113.33～161.43 mm/d，沉降量达到总沉降量的 38%～55%；11～20 d 的沉降速度降为 52.88～102.45 mm/d，沉降量达到总沉降量的33.97%～61.74%；21～30 d 的沉降速度降为 30.15～41.71 mm/d，沉降量达到总沉降量的 60.55%～84.58%。真空预压前 10 d，试验区 B 各监测点的沉降速度为 70.27～100.22 mm/d，沉降量达到总沉降量的 47.98%～61.93%；11～20 d 的沉降速度降为 32.45～40.58 mm/d，沉降量达到总沉降量的 78.37%～84.78%；21～30 d 的沉降速度降为 7.96～12.39 mm/d，沉降量达到总沉降量的 87.45%～90.64%。

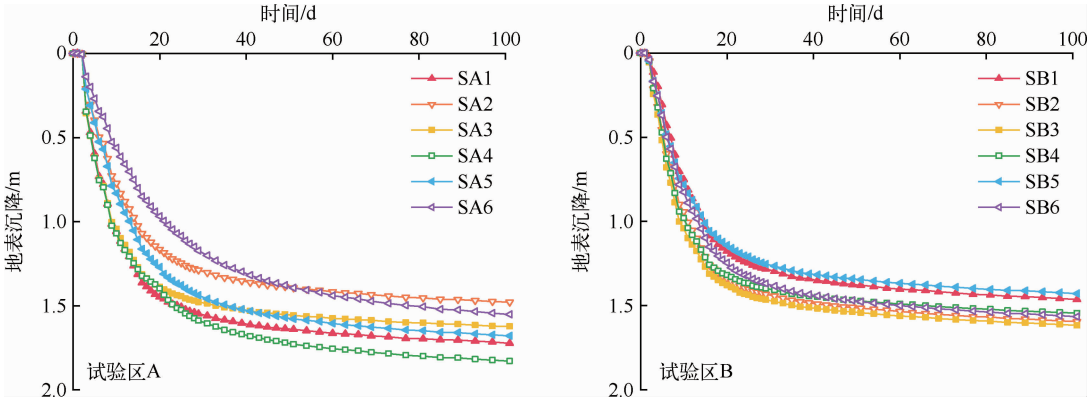


图 3　地表沉降曲线

Fig. 3　Surface settlement with time during vacuum preloading

从图 3 可看出，真空预压初期地表沉降速度较大，之后逐步下降；至预压中后期沉降速度已经很小，沉降基本趋于稳定；大部分地表沉降是在真空预压前 30 d 内完成的。同时，由于尾矿泥深度较浅，中间位置监测点最终沉降量与角落监测点最终沉降量差别不大。

真空预压法处理后，试验区 A、B 平均沉降量分别为 1.65、1.54 m，平均沉降差为 0.11 m；排水板间距越小，场地沉降越大。试验区边缘沉降规律与中心区域基本一致，说明真空预压期间试验区周圈密封墙是持续有效的。

3.2 分层沉降

在试验区中间位置布置 2 个分层沉降监测点，每个监测点布置 1 根监测管，监测管内设置多个沉降磁环，沉降磁环初始深度分别为 1、2、3、4、5、6、7 m，试验区分层沉降量曲线如图 4 所示。可以看出，真空预压初期各层沉降速度较大，之后逐渐变小，最后趋于稳定。分层沉降量随深度增大而逐渐变小，最下层尾矿泥分层沉降量最小。

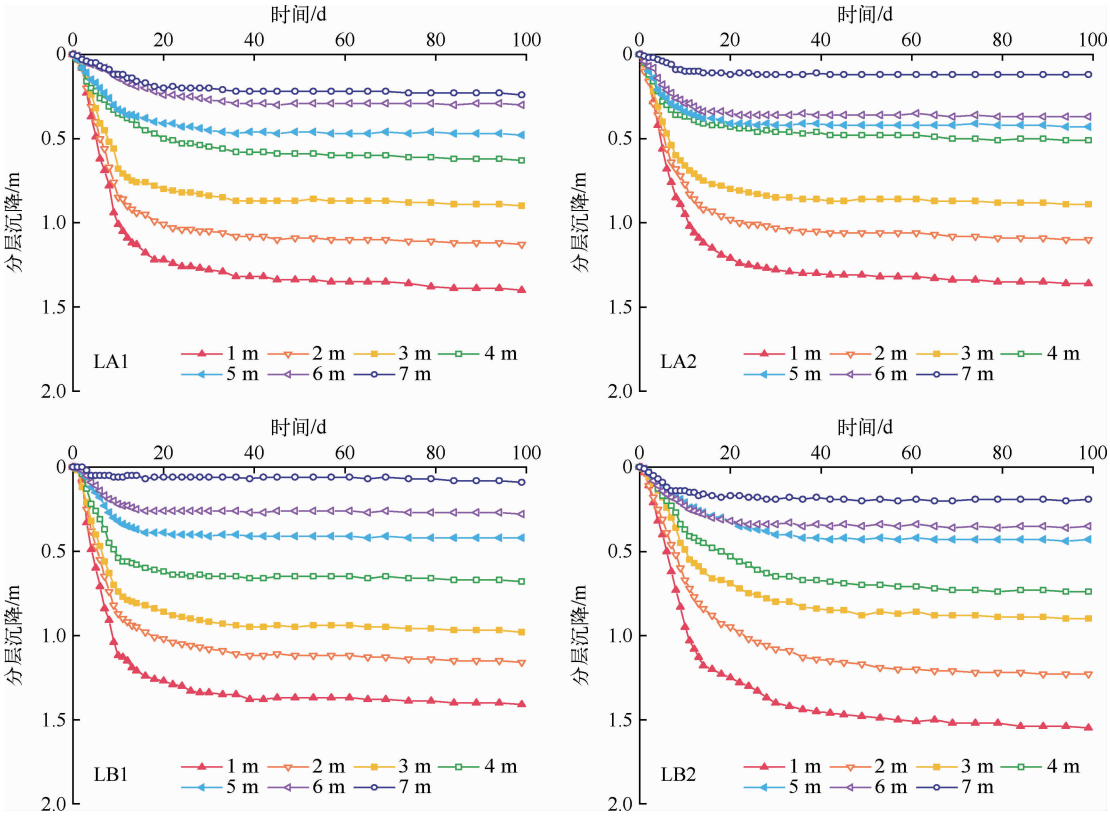


图 4 分层沉降曲线

Fig. 4 Layered settlement with time during vacuum preloading

3.3 侧向位移

每个试验区外侧设置 2 个侧向位移监测点，以朝向试验区方向为正方向，侧向位移变化曲线如图 5 所示。可以看出，随着真空预压的持续，试验区周围土体逐渐发生正侧向位移。试验区 A 的侧向位移监测点 IA1、IA2 在试验初期产生负侧向位移，这是由于测斜管在场地围堰压力作用下发生偏离试验区的位移。IA1、IA2 最终侧向位移量分别为 1.15、1.34 m；IB1、IB2 最终侧向位移量分别为 1.20、1.25 m。侧向位移量随深度加大而逐渐变小，大部分侧向位移发生在距地表 4 m 范围内。

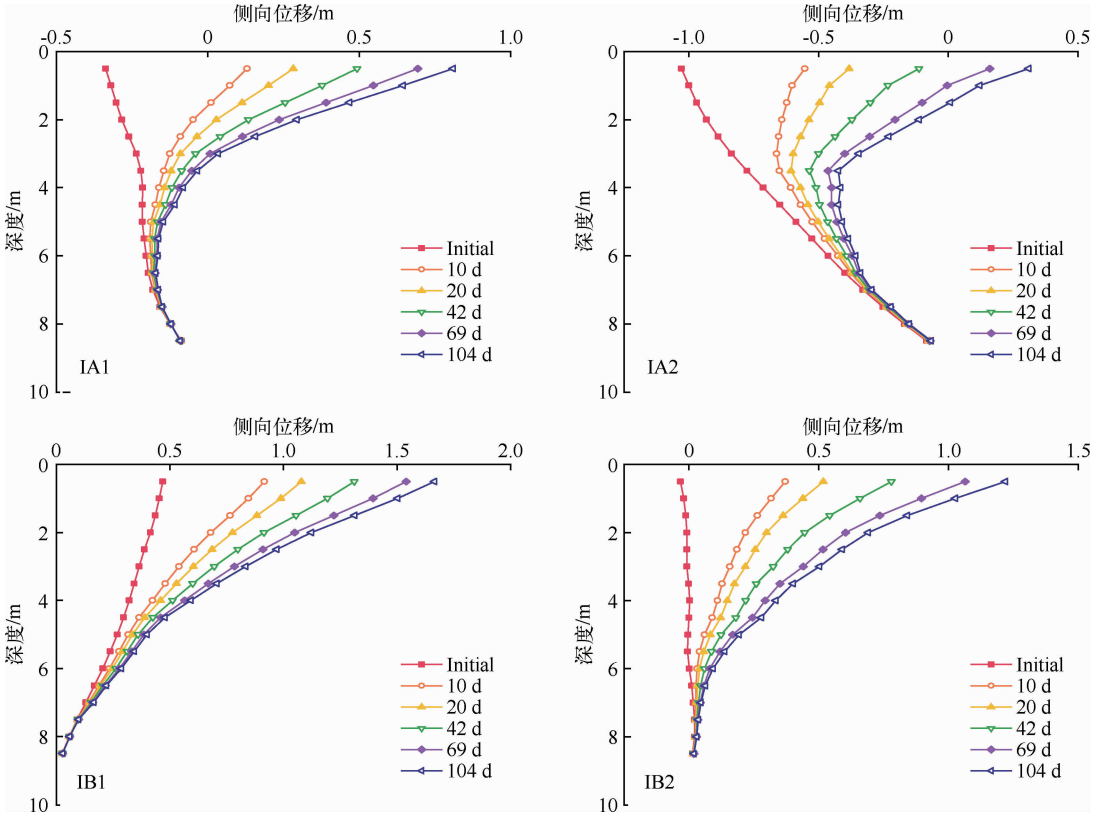


图 5　试验区侧向位移曲线

Fig. 5　Lateral displacement of tailings during the vacuum preloading

3.4　固结度

真空预压满载 90 d 后，根据地表沉降监测结果，按照《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147-2—2009)[15] 中的公式计算各监测点应变固结度。

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t}, \tag{1}$$

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta}, \tag{2}$$

$$U'_{rz} = \frac{S_t}{S_\infty} \times 100\% , \tag{3}$$

式中：S_t—满载 t 时间的实测沉降量，m；S_0—满载开始时的实测沉降量，m；t—满载预压时间，从满载时刻算起，s；S_∞—最终沉降量，m；α、β—计算参数，可根据实测资料确定；U'_{rz}—t 时间地基应变固结度。尾矿泥应变固结度计算结果见表 2。可以看出，试验区 A 尾矿泥应变固结度为 95.50%～96.29%，平均为 96.04%；试验区 B 尾矿泥应变固结度为 88.84%～96.60%，平均为 94.54%，试验区 A 尾矿泥应变固结度略大于试验区 B。

表 2　真空预压后试验区固结度

Table 2　Consolidation degree of test site at the end of vacuum preloading

沉降监测点	真空预压沉降量(S_t) / m	最终沉降量(S_∞) / m	固结度(U'_{rz})/%
SA1	1.72	1.80	95.50
SA2	1.48	1.54	96.22
SA3	1.63	1.69	96.26
SA4	1.83	1.90	96.29
SA5	1.68	1.75	95.91
SA6	1.56	1.62	96.04
SB1	1.46	1.52	96.35
SB2	1.60	1.69	94.66
SB3	1.62	1.68	96.60
SB4	1.55	1.62	95.64
SB5	1.43	1.50	95.17
SB6	1.57	1.77	88.84

3.5 孔隙水压力

在每个试验区中间位置设置孔隙水压力监测点，孔隙水压力计初始深度分别为 1、3、5、7 m，尾矿泥中孔隙水压力随时间变化曲线如图 6 所示。可以看出，真空预压初期，各层尾矿泥中孔隙水压力迅速消散，随着真空预压的进行，孔隙水压力消散速度变缓，最终趋于稳定。

3.6 十字板剪切试验

在真空预压卸载后，进行现场十字板剪切试验，以检测真空预压加固效果。真空预压前，钛尾矿泥十字板剪切强度为 2.9 kPa；真空预压加固后，试验区 A、B 的钛尾矿泥十字板剪切强度分别为 41.5、39.6 kPa。真空预压前，铀尾矿泥十字板剪切强度为 6.4 kPa；真空预压加固后，试验区 A、B 的铀尾矿泥十字板剪切强度分别为 69.6、65.0 kPa。真空预压后试验区 A、B 各层尾矿泥十字板剪切强度均较真空预压前明显增加，且试验区 A 的强度增加值大于试验区 B。

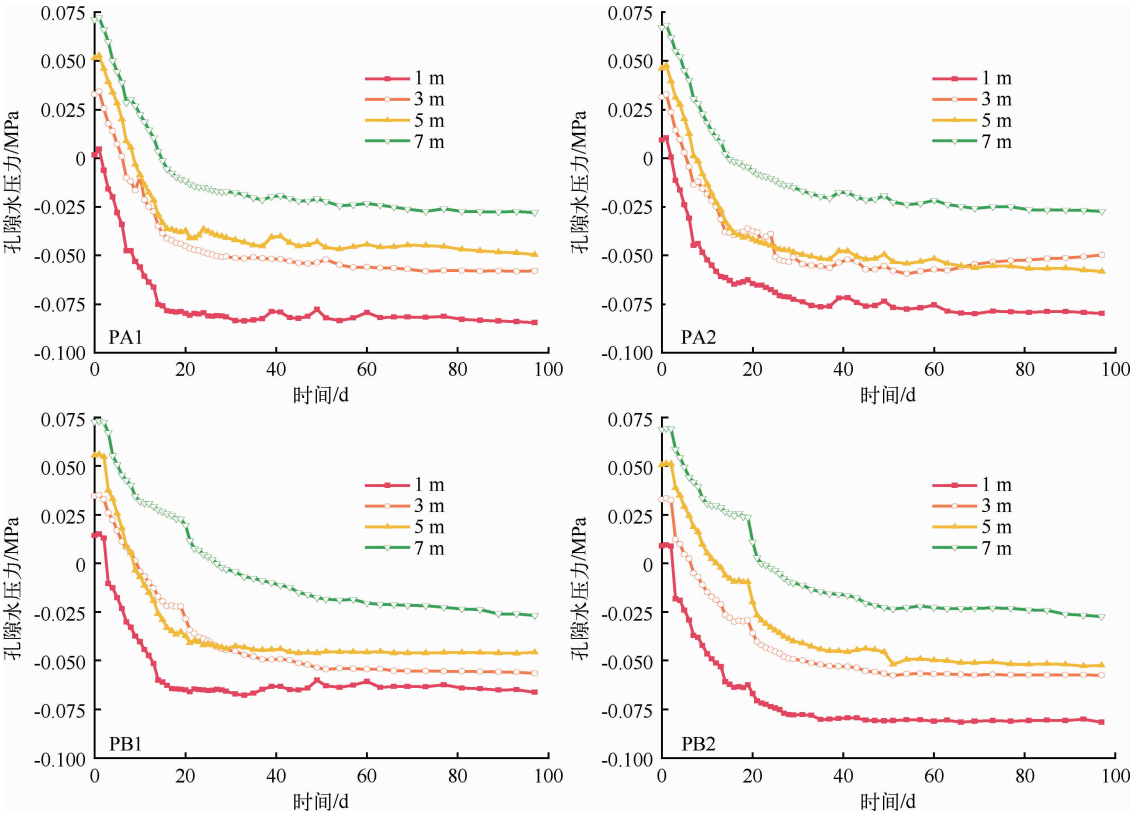


图 6 孔隙水压力曲线

Fig. 6 Variation of pore-water pressure with time

3.7 地基承载力

地基承载力试验结果显示，真空预压前试验区 A、B 地基承载力仅为 15.0 kPa；真空预压后试验区地层承载力大幅提高，试验区 A、B 地基承载力分别为 97.3、88.6 kPa，满足覆盖层施工人员及机械进场作业要求。需要指出的是，真空预压前的地基承载力为各试验区最上部钛尾矿泥的承载力；真空预压后的承载力为铺设 0.5 m 厚砂垫层情况下，进行场地表面现场平板载荷试验得到的承载力平均值。

3.8 其他物理力学指标

为全面分析真空预压加固尾矿泥效果，还进行了尾矿泥含水率、密度、孔隙比、压缩系数等物理力学指标检测，检测结果见表 3。

表 3　真空预压前后尾矿泥物理力学指标

Table 3　Physical and mechanical properties of tailings before and after vacuum preloading

尾矿泥类型	状态	场地	密度/(t·m^{-3})	含水率/%	孔隙比	压缩系数/MPa^{-1}
钛尾矿泥	真空预压前		1.26	164.7	4.21	3.32
	真空预压后	试验区 A	1.34	124.4	3.77	3.10
		试验区 B	1.29	128.7	3.94	3.27
铀尾矿泥	真空预压前		1.30	121.0	3.50	3.41
	真空预压后	试验区 A	1.44	93.2	2.09	1.90
		试验区 B	1.31	104.9	2.87	2.17

由表 3 可见，真空预压后各层尾矿泥物理力学指标均得到很大改善，且试验区 A 的指标改善程度优于试验区 B。

4　结论

真空预压后，某铀尾矿库试验区 A 平均沉降量为 1.65 m，试验区 B 平均沉降量为 1.54 m，排水板间距 1.0 m 时的平均地表沉降量较大；各层尾矿泥物理力学指标均明显改善，尾矿泥含水率、孔隙比、压缩系数均明显降低，密度、十字板剪切强度、地基承载力均大幅提高；且排水板间距 1.0 m时对物理力学指标的改善比间距 1.2 m 更明显。

尾矿泥承载力低、机械设备难以施工时，可在尾矿泥上铺设土工织物加筋层及砂垫层，增加尾矿泥的承载力。真空预压法安全环保，在尾矿泥原位脱水加固方面具有广阔的应用前景。对放射性铀尾矿泥进行真空预压原位脱水加固时，应采取措施切实做好人员辐射防护工作。

参考文献：

[1] WAGGITT P. A review of worldwide practices for disposal of uranium mill tailings[R]. Canberra: Supervising Scientist for the Alligator Rivers Region, 1994.

[2] 廖文景，朱远乐，王淇萱. 基于无人机智能巡航的尾矿库安全管理系统研究[J]. 矿业研究与开发，2021，41(9)：165-170.

[3] SANTAMARINA J C, TORRES-CRUZ L A, BACHUS R C. Why coal ash and tailings dam disasters occur[J]. Science, 2019, 364(6440): 526-528.

[4] 胡良才，郭大平，李哲辉，等. 精细地形下铀尾矿库溃坝三维数值模拟研究[J]. 铀矿冶，2020，39(1)：56-61.

[5] 潘英杰，何顺祖. 铀尾矿(渣)地下充填技术的讨论[J]. 铀矿冶，2013，32(2)：109-112.

[6] 潘自强，刘华. 核与辐射安全[M]. 北京：中国环境出版社，2015.

[7] RUIZ E, HUAMANI L, PAUCAR J, et al. Planning the dewatering of a tailings storage facility[J]. Mine Water and the Environment, 2021, 40: 270-284.

[8] FOURIE A B, JOHNS D G, JONES C J F P. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44: 160-172.

[9] SUN L, GAO X, ZHUANG D, et al. Pilot tests on vacuum preloading method combined with short and long PVDs [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46: 243-250.

[10] DING H, PENG Y, ZHANG P, et al. Numerical simulation of vacuum preloading for reinforcing soil inside composite bucket foundation for oshore wind turbines [J]. Marine Science and Engineering, 2019, 7: 1-12.

[11] ZHENG G, LIU J, LEI H, et al. Improvement of very soft ground by a high-efficiency vacuum preloading method: a case study [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(5): 631-642.

[12] 刘江涛，金亚伟，董柱，等. 超压真空密实技术在尾矿库治理中的应用研究[J]. 云南地质，2011，30(4)：479-481.

[13] 章延平. 某尾矿库滩面治理地基处理技术研究[J]. 山西建筑，2018，44(31)：59-60.

[14] 张晨. 塑料排水板在尾矿坝中的应用及其渗流场数值模拟[D]. 西安：西安理工大学，2021.

[15] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 真空预压加固软土地基技术规程：JTS 147-2—2009[S]. 北京：人民交通出版社，2009.

(下转第 72 页)

Experimental Study on the Removal Uranium From Nitric Acid Wastewater by Special Resin

WANG Hao[1], ZHI Meifeng[1], CHEN Xuexu[2], WAN Qiang[2], ZHANG Jiayu[1], ZHANG Xinyu[2]
(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;
2. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin 644000, China)

Abstract: The experimental study of deep uranium removal by two kinds of special resins was carried out for high nitric acid uranium-containing wastewater in nuclear fuel element plant. The effects of adsorption equilibrium time and acidity, deep uranium removal capacity, and dynamic adsorption performance were investigated. The resin adsorption equilibrium capacity was measured. The results show that, under the conditions of original acidity (about 3 mol/L), static adsorption time for 8 hours, the uranium concentration in wastewater can be successfully reduced to less than 0.05 mg/L by the special resins. Under the conditions of original acidity, dynamic adsorption time for 30 minutes, the concentration of uranium in the first two bed volume adsorption tail liquid of the two resins is about 0.7 mg/L. The resins exceed breakthough point in a short time. It can be considered to increase the kinetic properties of the resin by changing the group type.

Key words: nitric acid wastewater; special resins; deep uranium removal

(Continued from page 67)

Field Tests of Reinforcing Fine Tailings With Vacuum Preloading Method

HU Liangcai, LI Zhehui, GUO Daping, LI Yulei, ZHANG Ning
(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor dam stability and difficult construction of cover system caused by high water content and low strength of fine tailings, a series of field tests of the vacuum preloading method combined with prefabricated vertical drains to reinforce fine tailings were carried out. The surface settlement, layered settlement, lateral displacement, degree of consolidation and pore water pressure of tailings under different spacing of prefabricated vertical drains were analyzed, and vane shear test and bearing capacity test of tailings were conducted. The research results show that vacuum preloading method can accelerate dewatering of tailings, effectively reduce the water content, then improve the strength and bearing capacity of tailings, and the reinforcement effect of prefabricated vertical drains spacing of 1.0 m is better than that of 1.2 m. As a technology with low cost, good effect, safety and environmental protection, vacuum preloading method has a broad application prospect in in-situ dewatering and reinforce of fine tailings.

Key words: fine tailings; vacuum preloading method; prefabricated vertical drains; reinforcement; field test