

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.008

# 平原水库运行条件下的土工膜气胀试验研究

王柳江<sup>1</sup>, 刘斯宏<sup>1</sup>, 孙 来<sup>2</sup>, 樊科伟<sup>1</sup>, 胡天瀚<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 为研究土工膜气胀及其与地下水位上升、水库蓄水及库水位骤降等影响因素的关系, 研制了土工膜气胀模型试验装置, 并对不同模拟工况下的土工膜位移、膜下气压、吸力、孔隙水压力以及竖向土压力的变化规律进行了试验研究。结果表明: 膜下气压和孔隙水压力均随地下水位上升而增大, 其大小由地下水位上升幅度决定; 当地下水位与土工膜之间的非饱和区域较小时, 膜下孔隙压力受库水荷载作用增加显著, 在蓄水初期极易引发土工膜气胀变形, 建议在膜上设置一定压重防止土工膜被顶起; 膜下孔隙压力变化滞后于膜上荷载, 库水位骤降时, 膜下气压将大于膜上荷载, 从而引起土工膜气胀破坏。

**关键词:** 平原水库; 土工膜; 非饱和土; 气胀; 孔隙气压力

**中图分类号:** TU41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2017)06-0522-06

## Experimental study on the air expansion of geomembrane under operation condition of plain reservoir

WANG Liujiang<sup>1</sup>, LIU Sihong<sup>1</sup>, SUN Lai<sup>2</sup>, FAN Kewei<sup>1</sup>, HU Tianhan<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Power China, Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** It is recognized that air expansion of geomembrane is essentially a three-phase coupled problem, which is water-air-solid in unsaturated soil, and is influenced by the rise of ground water level, storage of the reservoir and the rapid draw down of the water level in the reservoir. In this respect, a special laboratory equipment for the air expansion test of geomembrane is developed. Air expansion tests are then conducted to explore the variations of the displacement, gas pressure, suction, pore water pressure and vertical earth pressure under different working conditions. The test results show that the pore air pressure and pore water pressure are increased with the rise of the ground water level and the magnitude of the air pressure is dependent on the rising amplitude of groundwater level. It is found that the pore pressure of the soil under the geomembrane is significantly increased due to the increased water pressure during storage in the reservoir, and air expansion failure in the geomembrane is more likely to be induced at the initial storage period, especially when the unsaturated zone between the ground water level and geomembrane is small. It is therefore suggested that a certain amount of preloading could be applied over the geomembrane to prevent its expansion behaviour. As the pore pressure response below the geomembrane is usually later than the preloading above the geomembrane, pore pressure would become larger than the preloading applied during the rapid draw down of water level in the reservoir, which will lead to the air expansion failure on the geomembrane.

**Key words:** plain reservoir; geomembrane; unsaturated soil; air expansion; pore air pressure

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAB07B05); 国家青年科学基金(51509077); 浙江省港航局科技计划(2015-2-42); 中央高校基本科研业务费专项(2016B03514, SJLX16\_0205)

作者简介: 王柳江(1985—), 男, 浙江武义人, 副教授, 博士, 从事非饱和土多场耦合数值分析研究。E-mail: 15850514642@163.com

土工膜全库盘防渗技术是水库常见的防渗措施之一,在工程中已得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。对于采用土工膜全库盘防渗的平原水库,水库蓄水初期,土工膜膜下非饱和土层中孔隙气体极易聚集,导致土工膜局部或大面积浮起,甚至胀破<sup>[4]</sup>。如山东省淄博市新城水库全库铺塑约 1.0 km<sup>2</sup>,因气胀破坏导致严重渗漏<sup>[5]</sup>;济南市玉清湖水库北店子沉砂池坝坡铺设复合土工膜,坝前 10 m 范围内出现严重气胀破坏,并进一步加剧了库水渗漏,引起库外农田浸没等严重问题<sup>[6]</sup>。由于土工膜全库盘防渗技术在大型平原水库的应用相对较少,因此土工膜气胀问题尚未引起广泛关注,其形成机理以及防治措施尚缺乏系统研究。

目前,对土工膜下非饱和土水气运移规律的研究更多集中在环境岩土领域,重点研究封场后膜下气体产生和水气迁移规律等,与平原水库的气胀问题有所不同<sup>[7-10]</sup>。近几年,国内一些学者针对平原水库土工膜气胀问题开展了探索性研究。李旺林等<sup>[11]</sup>研制了专用气胀试验装备,研究了初次蓄水时土工膜缺陷渗漏引起的膜下非饱和区中孔隙气体的变化规律,验证了由土工膜缺陷渗漏引起的膜局部隆起变形现象;袁俊平等<sup>[12]</sup>开展了现场试验,通过模拟平原水库不同运行条件,研究库盘膜下水气运移规律,论证了库盘防渗土工膜浮起失稳的可能性,并提出相应的排水排气措施;Cao 等<sup>[13]</sup>基于混合流体理论开发了考虑水气二相流的非饱和土固结程序,并对现场试验进行了数值分析;张凯等<sup>[14]</sup>基于多孔多相连续介质理论,通过引入排气率的概念,提出了考虑水气二相流的非饱和土简化固结理论,并对库盘土工膜下的水气运移规律进行了分析。由于平原水库土工膜气胀现象的实质是非饱和土在封闭边界条件下的水、气、固三相耦合问题,涉及土工膜下非饱和土体变形、孔隙水压力和孔隙气压力三者的相互耦合作用。然而,已有研究中大都采用孔隙混合流体压力来统一描述孔隙水压力和孔隙气压力,虽然一定程度上也能反映实际规律,但更多的是适用于土体饱和度和较高的情况,且无法将水气变化单独分离开来,这对于解释全库盘铺膜平原水库的气胀形成机制仍存在不足。

为深入研究全库盘土工膜防渗平原水库土在真实运行条件下的气胀机理,本文通过研制专门的土工膜气胀模型试验装置,开展地下水位上升、膜上蓄水和库水骤降 3 种运行工况下的模型试验,研究土工膜下非饱和试样的竖向位移、孔隙气压力、孔隙水压力、吸力以及竖向土压力的耦合变化规律。

1 试验设备研制

为模拟平原水库土工膜在实际工作条件下的气胀发生、发展过程,研制了土工膜下气压测试仪,如图 1 所示。该装置由固结系统、压力控制系统和测量系统组成,能够模拟土工膜封闭条件下的非饱和土在上部荷载变化、地下水位变化等情况下的膜下土体位移、孔隙水压力和孔隙气压力的变化规律。

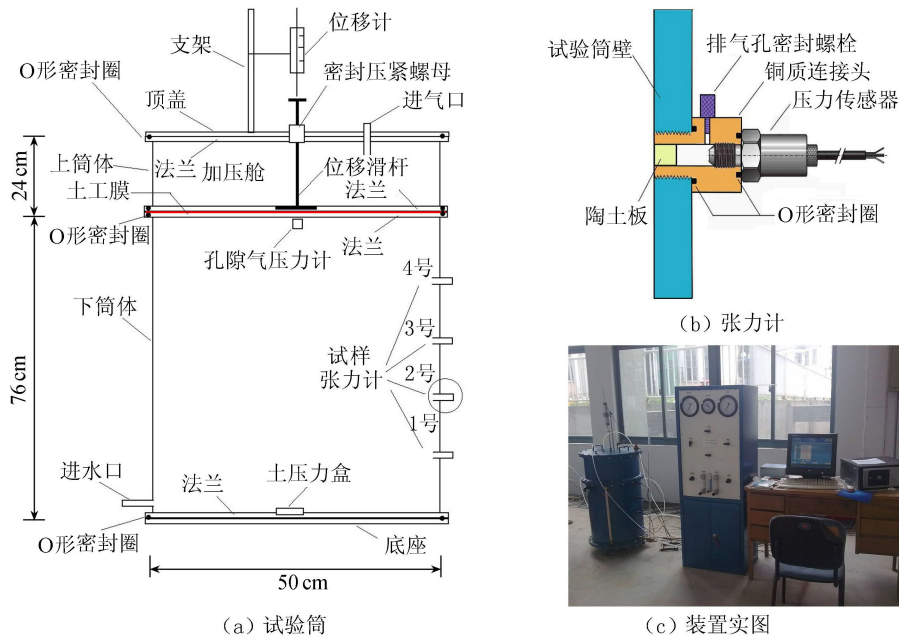


图 1 土工膜气胀试验装置

Fig. 1 Experiment equipment for air expansion test on geomembrane

固结系统由膜上系统、膜下系统以及膜体结构组成。其中,膜上系统为由上筒体、顶盖和接口等组成的加压舱,用于施加竖向荷载;膜下系统由下筒体、底座及接口组成;膜体结构由土工膜和密封装置组成。上筒体与顶盖之间、上筒体-土工膜-下筒体之间及下筒体与底座之间通过法兰盘相连,且法兰盘之间均设 O 形密封圈。

压力控制系统由气压力控制系统(加压/抽气)和进出水控制系统(进水/排水)组成,用于控制膜上荷载和膜下地下水位。

测量系统包括位移计、张力计、孔隙气压力计和土压力盒。其中,位移计采用 YHD-150 型回弹式直线位移传感器,量程 150 mm,精度 0.1%;张力计为 HQ100 型压差式传感器(量程为 0~500 kPa),通过在传感器与筒体之间加设空腔,在空腔前布置进气值为 5 kPa 的陶瓷板,使得张力计不仅能测量饱和状态下的正孔隙水压力,也能测量非饱和状态下的土体吸力;孔隙气压力计布置在土工膜下,同为 HQ100 型压差式传感器(量程为 0~500 kPa);土压力盒测得的为土水混合压力,包含水压力。

2 试验模拟方法

2.1 试样制备

由于平原水库中一般为砂土地基,试验土样取自南京江心洲中部的细砂土,属于含细粒土砂(SF)。土体饱和渗透系数为  $5.57 \times 10^{-5}$  cm/s,密度为 2.70 kg/m<sup>3</sup>。试样采用分层击实法制备,控制试样含水率为 5.62%,干密度为 1.47 g/cm<sup>3</sup>,初始孔隙比为 0.878,初始饱和度为 17.3%。

制样时,先在试验筒内壁均匀涂抹一薄层白凡士林,减小土样与筒壁之间的摩擦,并在试验筒的进出水口、进气抽气口处放置好薄土工布或金属滤网,以免试验过程中土颗粒流出堵塞通水通气管道;然后在试验筒底部铺设一层 2 cm 厚的粗砂层,保证模拟地下水位上升时筒内水位可以均匀上升;当填土高度达到张力计所在位置时,将预先 7 d 置于蒸馏水中饱和的张力计安装在试验筒壁上,然后覆土压实以保证土样与陶瓷板接触良好,张力计自筒底往上每隔 15 cm 布置 1 个,共 4 个;当土样达到预定高度后,用水平尺进行整平,在试样表面中心位置设孔隙气压力传感器,所有连接传感器的数据线均通过在试验筒侧壁开孔引出,孔口采用 O 形密封圈密封,再将土工膜平铺在试样表面,膜上放置上筒体,并通过螺栓和上、下连接法兰进行固定,上、下法兰盘与土工膜之间均设置了耐磨损 O 形橡胶密封圈。试样制备结束后,安装试验筒顶盖和位移计,试验筒必须保证完全密闭。试验开始前,先静置 12 h,然后在试样表面施加 100 kPa 荷载,之后再静置 48 h,待试样内土体吸力稳定后开始进行试验。

2.2 试验过程

试验经历 3 个阶段,总历时 91.5 h。

第 1 阶段:模拟地下水位上升阶段。设土工膜位置为±0 m 水位高程。通过底座一侧进水口向筒体内缓慢注水,控制进水流量 6.5 mL/min,略小于土体的饱和和渗透系数,使试样内的浸润线缓慢上升。待通水约 67 h 后,膜下水位接近-0.06 m 高程,关闭进水阀门,模拟地下水位上升工况结束。

第 2 阶段:模拟膜上蓄水阶段。该阶段在第 1 阶段结束后 1.5 h 开始,共历时 14 h,膜上水压共分 6 级增加,每级增加 60 kPa,每两级之间间隔 1.5 h,其中第 5 级与第 6 级间隔 3 h。

第 3 阶段:模拟膜上库水骤降工况。该阶段历时 10 h,膜上水压由 460 kPa 降至 100 kPa。

3 试验结果分析

图 2~4 分别为试验模拟地下水位上升、膜上蓄水和库水骤降 3 种工况下对应的各测值时程变化曲线。图中  $P$  为膜下孔隙压力; $W_r$  为地下水位高程; $L$  为膜上荷载; $E$  为试样底部土压力; $S$  为试样表面竖向位移; $t$  为时间。

3.1 地下水位上升工况

图 2(a)为土工膜的膜下气压、孔隙水压力与地下水位随时间变化曲线。可以看出,膜下气压随着地下水位的上升而增大,且当地下水位接近土工膜时,其上升速率有所提高。膜下气压增大的主要原因为试验筒底部土体孔隙水压力增大,导致孔隙水持续往试样顶部渗透,在此过程中同步驱动孔隙气体往上流动,由于试样表面被土工膜封闭,孔隙气体在地下水位与土工膜之间不断聚集压缩,孔隙气压随之增大,根据 Boyle

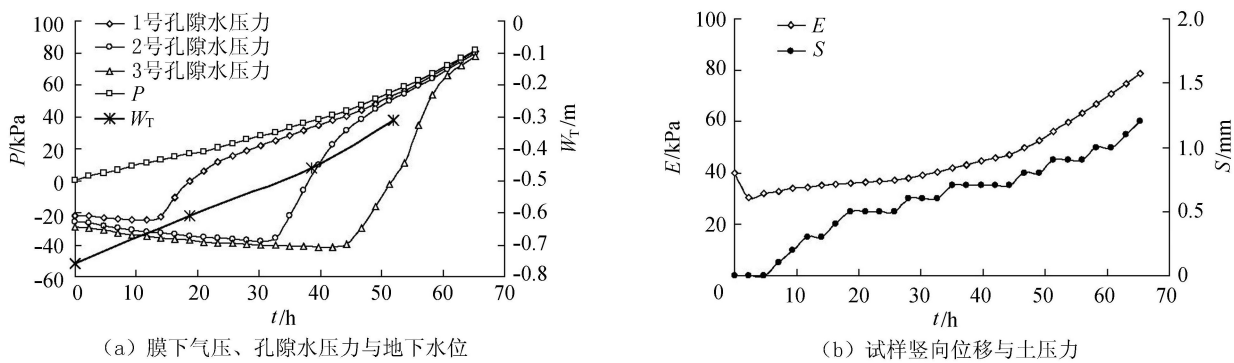


图2 地下水位上升过程中各测值随时间变化

Fig. 2 Variations of the measured values during the rising of groundwater table

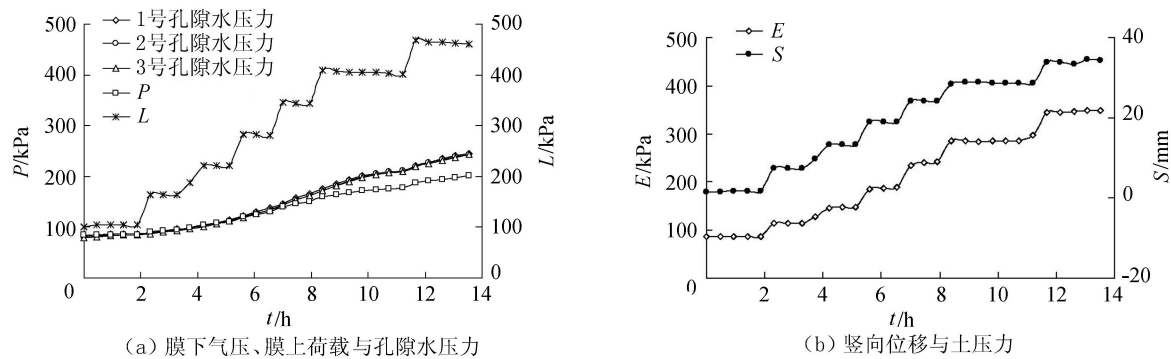


图3 膜上蓄水过程中各测值随时间变化

Fig. 3 Variations of the measured values during the impounding of the reservoir

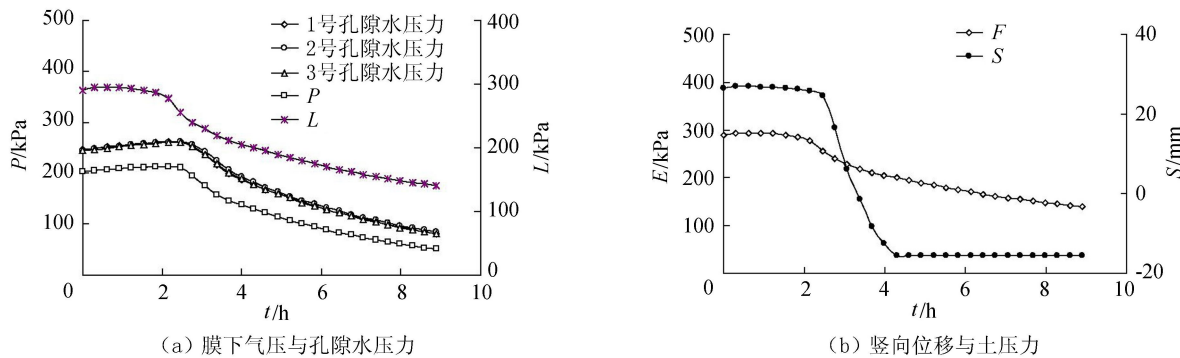


图4 库水骤降过程中各测值随时间变化

Fig. 4 Variations of measured values during the sudden drawdown of water level in the reservoir

定律,随着空气体积的压缩其压强也逐渐增大。对于饱和度较低的土体,其吸水能力较强,孔隙水具有较大的向上运移趋势,且土体中孔隙气体处于完全连通状态或部分连通状态,孔隙气体可以较快从水位上升面流动至土样顶部的膜下气压测点处。因此,对于膜下土体饱和度较低的情况,孔隙气压随地下水位的变化尤为明显,这解释了膜下气压从通水一开始就以较大速率增大的现象。

由于4号张力计在试验时受损,试验只给出了1号、2号和3号孔隙水压力的结果。由孔隙水压力的变化曲线可以看出:在地下水位上升至张力计所在位置之前,张力计所在位置的土体处于非饱和状态,此时测得的为土体吸力,其随着地下水位上升还略有增大,说明该阶段孔隙气压力的增长速率略大于孔隙水压力;当地下水位靠近张力计所在位置时,地下水在毛细管力作用下快速往上迁移,孔隙水压力迅速增大,吸力消失,当吸力等于零时,说明地下水位已达到张力计所在位置,由此绘制的地下水位随时间上升曲线如图2(a)所示,可见地下水位上升速率为0.85 cm/h;此后,当地下水位超过张力计所在位置时,孔隙水压力快速增大,最终趋于膜下气压增长曲线,即当地下水位上升至土工膜位置时,膜下孔隙水压力与孔隙气压力相等。

图2(b)为土工膜竖向位移及底部土压力随时间变化曲线。可以看到土工膜产生了约1.5 mm的沉降,



未发生气胀变形,这是由于由地下水位上升产生的膜下气压小于 100 kPa 的膜上荷载,且考虑土体湿化变形影响,试样产生了较小的沉陷。对于土压力,在地下水位上升初期发生了应力重分布,土压力由 40 kPa 减小到 30 kPa,后随孔隙水逐渐渗入土样而逐渐增大,且在地下水位达到-0.3 m 后增速明显增大。值得注意的是,土压力初始值小于上部预压荷载 100 kPa,这可能与试样和筒体内壁之间的摩擦作用有关。

3.2 膜上蓄水工况

该试验阶段,1 号、2 号和 3 号孔隙水压力计均已处于水位线以下,由图 3(a)所示膜下气压及孔隙水压力变化曲线可以看出,随着膜上荷载的逐级增加,膜下气压及孔隙水压力也逐渐变大,膜下气压与孔隙水压的变化规律基本一致,孔隙气压力略小于孔隙水压力。这是由于试样在上部荷载作用下产生了较大的竖向变形(图 3(b)),从而导致土体孔隙减小,使得孔隙内的孔隙气和孔隙水受到压缩,而此时土体处于封闭系统内,无排水排气通道,则土体孔隙中的孔隙气和孔隙水与土体骨架一起承担土体受到的上部荷载。同时,由于土体大部分处于饱和或高饱和状态,孔隙气体以气泡的形式存在于封闭的孔隙水之中,此时的孔隙气压与孔隙水压基本接近,其变化规律也一致。

可以发现,在地下水位较高(即地下水位与土工膜之间非饱和土区域较小)时,库水上升容易引起膜下孔隙压力增大,且在膜上荷载较小时,膜上荷载与膜下孔隙压力值较为接近,可能会引起土工膜产生局部隆起,这在文献[7]现场试验中已有发现;当膜上荷载较大时,膜下孔隙水压力和气压力均小于膜上荷载,土工膜产生气胀的可能性较小。为避免在库水上升初始阶段产生局部气胀现象,在土工膜表面设置一定的压重可较好地防止土工膜被顶起。当然,对于一般砂性土地基上的平原水库,蓄水深通常为 5~12 m 左右,地下水位较低,且低压力下砂性土的压缩性相对较小,库水上升几乎不会引发土工膜气胀现象。

图 3(b)为土工膜竖向位置和土压力变化曲线。可以看出土工膜竖向位置和竖向土压力均随膜上荷载增大而增大,其中土工膜竖向位置增高约 34 mm,竖向土压力增大至 349 kPa 左右,其增大幅度小于膜上荷载。

3.3 库水骤降工况

由图 4(a)所示膜下气压及孔隙水压变化情况可见,随着膜上荷载减小,膜下气压及孔隙水压力在起始阶段基本保持不变,当膜上荷载减小到约 289 kPa 时,土工膜在膜下孔隙水压力和孔隙气压力的作用下产生了明显的气胀变形(图 4(b))。文献[7]现场试验结果同样表明,水库快速降水时,靠近库区中心处的膜下孔隙压力的减小幅度接近或略小于膜上荷载减小幅度,使得膜下压力值接近或略大于膜上荷载与静水压之和,土工膜处于被顶起的状态。分析上述引起气胀的原因,主要是在库水位骤降工况下,膜下孔隙压力变化明显滞后于膜上荷载。在土工膜被顶起后,由于膜上荷载的继续减小及土工膜与试样表面之间形成了一定的空间,土体中的孔隙水压力及膜下气压逐渐减小,与此同时,试样底部的竖向土压力也随着膜下气压及孔隙水压力的减小而逐渐减小。

4 结 论

- a. 土工膜的膜下气压随地下水位上升而增大,是引发土工膜气胀的主要原因;当土体位于地下水位以上时,非饱和土体吸力基本保持不变且略有增加,说明土体负孔隙水压同样随地下水位上升而增大,但增大速率略小于孔隙气压力;当地下水位接近和淹没土体时,土体从非饱和状态转变为饱和状态,孔隙水压力快速增大,且最终趋向于膜下气压值。
- b. 当地下水位与土工膜之间的非饱和区域较小时,库水上升容易引起膜下孔隙压力增大,且在膜上荷载较小时,膜上荷载与膜下孔隙压力值较为接近,土工膜可能会产生隆起变形,建议在土工膜上部设置压重平衡膜下土体孔隙压力。
- c. 当库水骤降时,膜下孔隙压力消散滞后于膜上荷载,当库水降至一定水位后,将出现膜下气压大于膜上荷载的情况,从而导致土工膜产生隆起变形,其中地下水位与土工膜之间非饱和区越小,土工膜产生气胀破坏的可能性越大。

笔者通过模型试验研究了地下水位上升、膜上蓄水以及库水骤降 3 种工况下的土工膜气胀现象,初步探讨了土工膜下非饱和土中的水气固三相变化规律。下一步,将着重开展土工膜缺陷渗漏下的气胀和膜下排气措施试验研究,同时建立非饱和土的水气固三相耦合模型对土工膜气胀机理及排气措施进行理论分析。

参考文献:

[ 1 ] 顾淦臣. 土工膜用于水库防渗工程的经验[J]. 水利水电技术进展, 2009, 29(6): 34-38. (GU Ganchen. Experience of applying geomembrane in reservoir seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 35-38. (in Chinese))

[ 2 ] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 2-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 2-9. (in Chinese))

[ 3 ] 杜晖. 平原水库土工膜防渗技术研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[ 4 ] 李旺林, 魏晓燕, 李志强, 等. 平原水库库盘防渗土工膜气胀现场试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(10): 129-132. (LI Wanglin, WEI Xiaoyan, LI Zhiqiang, et al. Research on air expansion of geomembranes used in plain reservoir basins for anti-seepage[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(10): 129-132. (in Chinese))

[ 5 ] 王薇, 崔化宇, 李国伟. 水平铺塑在新城水库库区防渗中的应用[J]. 人民黄河, 2003, 25(9): 38-39. (WANG Wei, CUI Huayu, LI Guowei. Application of horizontal plastic paving in the seepage control of the new town reservoir[J]. Yellow River, 2003, 25(9): 38-39. (in Chinese))

[ 6 ] 徐瑞兰, 刘英豪, 韦济生. 浅析玉清湖水库中垂直铺塑的位置对自身及其坝坡稳定的影响[J]. 山东水利, 1999(10): 34-35. (XU Ruilan, LIU Yinghao, WEI Jisheng. Influence of the position of vertical plastic spreading Yuqing Lake Reservoir on its dam slope stability[J]. Shandong Water Resources, 1999(10): 34-35. (in Chinese))

[ 7 ] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 165-182. (CHEN Yunmin, SHI Jianyong, ZHU Wei, et al. A review of geoenvironmental engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 165-182. (in Chinese))

[ 8 ] 陈云敏, 谢焰, 詹良通. 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 184-190. (CHEN Yunmin, XIE Yan, ZHAN Liangtong. One-dimensional consolidation model for landfills considering solid-liquid-gas interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 184-190. (in Chinese))

[ 9 ] CHEN Y M, XU X B, ZHAN L T. Analysis of solid-liquid-gas interactions in landfilled municipal solid waste by a bio-hydro-mechanical coupled model[J]. Science China-Technological Sciences, 2012, 55(1): 81-89.

[ 10 ] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46. (CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1-46. (in Chinese))

[ 11 ] 李旺林, 李志强, 魏晓燕, 等. 土工膜缺陷渗漏引起气胀的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1161-1165. (LI Wanglin, LI Zhiqiang, WEI Xiaoyan, et al. Air expansion caused by leakage water resulting from geomembrane defects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1161-1165. (in Chinese))

[ 12 ] 袁俊平, 曹雪山, 和桂玲, 等. 平原水库防渗膜下气胀现象产生机制现场试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 67-73. (YUAN Junpin, CAO Xueshan, HE Guilin, et al. Field test study of mechanism of bulge phenomenon under geomembrane in plain reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 67-73. (in Chinese))

[ 13 ] CAO Xueshan, YUAN Junping, HE Guilin, et al. In situ test and analysis method of air bulging under geomembranes in a shallow-lined reservoir[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43: 24-34.

[ 14 ] 张凯, 刘斯宏, 王柳江, 等. 土工膜防渗平原水库膜下气场数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 97-100. (ZHANG Kai, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Numerical simulation of air field under geo-membrane in anti-seepage plain reservoir[J]. South-to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 97-100. (in Chinese))