

# 防渗土体掺盐后工程特性试验

陈式华<sup>1,2</sup>, 沈水进<sup>1,2</sup>, 陈来华<sup>1,2</sup>, 陆国鑫<sup>1</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;  
2. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020)

**摘要:**为研究防渗土体在掺入食盐后的工程特性变化,测定符合设计规范要求掺盐量,分别在水库大坝和河道堤防的防渗土样中掺入不同类型、不同掺量的食盐,进行土样物理化学及力学特性试验。试验结果表明:低液限黏土在精盐掺量不大于3.29%,混合盐掺量不大于2.99%时,水溶盐质量分数均符合规范要求;在试验的掺盐范围内,渗透系数均在 $1 \times 10^{-7} \sim 7.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 之间,满足规范要求,其他指标虽有变化,但变幅不大。

**关键词:**防渗土体;掺盐量;工程特性;试验研究

**中图分类号:**TV443      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2015)03-0066-05

**Test of engineering properties of impervious soil with salt**//CHEN Shihua<sup>1,2</sup>, SHEN Shuijin<sup>1,2</sup>, CHEN Laihua<sup>1,2</sup>, LU Guoxin<sup>1</sup>(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Conservancy Disaster Prevention and Reduction, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** In order to study changes in engineering properties of impervious soil with salt and to determine the critical value of salt content that conforms to design criterion, experiments were performed for testing physical, chemical, and mechanical properties of samples. These impervious soil samples were taken from river embankment and reservoir dam, and then they were mixed with various kinds and amounts of salt. The results show that the salt contents, in low liquid limit clay, all conform to the criterion with refined salt no more than 3.29% and mixed salt no more than 2.99%. Within the tested salt content range, the permeability coefficients are all between  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  and  $7.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , which satisfy the criterion. Moreover, other indicators in experiments do change, but not much.

**Key words:** impervious soil; salt content; engineering property; test research

我国南方属亚热带地区,特殊的自然地理条件十分适宜白蚁生存繁衍,是白蚁灾害的多发区域。白蚁主要通过河道堤防、水库大坝中筑巢破坏防渗体结构及影响土体物理和化学性质<sup>[1-2]</sup>,当水位上涨时可能引起堤坝管涌、流土、滑坡和坝体溃决。近年来,因白蚁危害而造成的垮坝溃堤等事故多有发生,蚁害已成为我国南方水利工程决堤溃坝的主要祸根之一,给水利工程的正常运行和人民的生命财产造成极大的威胁。

防治白蚁对堤坝的危害,以往采用的主要方法有挖穴取巢、投放白蚁诱饵剂、烟剂熏杀、毒土灌浆等<sup>[3]</sup>,但这些方法存在诸如费时费力、实施难度大、有效时间短、环境污染大等问题,这就促使人们去寻找一种既经济又环保的防治方法。用食盐预防白蚁入侵堤坝的方法解决了这些问题<sup>[4-6]</sup>,该方法是在白

蚁筑巢部位的防渗黏土中掺入适量的食盐,阻止白蚁入侵到堤坝内部筑巢并破坏防渗体,从而达到从根本上防治白蚁入侵堤坝的目的,但掺盐后对防渗土体理化指标的影响程度尚不明确。本文通过对防渗土体掺盐前后土体工程特性的试验研究,分析了在土样中掺入不同种类、不同掺盐量的食盐对防渗土体工程特性的影响,提出了掺盐量的合理范围,掌握了掺盐后防渗土体特性的变化规律,并在具体工程实例中加以应用,取得了较好的效果。

## 1 试验方法

### 1.1 试验用料

试验用土取自某大坝套井回填土和某河道堤防的防渗土,分别简称土样1和土样2。

食盐选用3种类型,分别为:①浙江盐业集团有

限公司出品的“雪涛”牌食用精盐;②一般食用粗盐;③浙江蓝海星盐制品有限公司出品的“蓝海星”牌健康平衡盐(混合盐)。

### 1.2 试样制备和测试方法

首先对原土风干、碾碎,并以四分法分成两部分:①过5 mm筛的土样,进行击实、颗粒分析、界限含水率等试验;②过2 mm筛的土样,进行力学、物理化学试验。直接剪切、固结、压缩、渗透等试验中的试样根据击实试验的成果和96%压实度进行制备。测试方法参照SL237—1999《土工试验规程》<sup>[7]</sup>。

掺盐量(以100 g干土质量计)范围:0~4.0%。对这2种土样按不同类型、不同掺盐量的要求制备物理化学和力学试验试样。

## 2 试验结果

首先对选用的2种土样进行原土的击实试验、物理化学及力学性质试验,确定土样的最大干密度

和最优含水率,不同粒径土体质量分数、界限含水率、水溶盐质量分数、氯化钠含量、有机质含量、pH值、分散性、渗透系数等指标试验结果见表1~3。

依据试验方案,在土样1、2中加入“雪涛”牌食用精盐研究掺盐量对防渗土工程特性的影响,试验结果分别如表4和表5所示。

为研究不同食盐类型对防渗土工程特性的影响,在土样2中分别掺入“雪涛”牌食用精盐、一般食用粗盐以及“蓝海星”牌混合盐,进行对比试验。这3种食盐的主要成分见表6,对比试验结果见表7、表8。

## 3 试验结果分析

由表1可知,土样1为高液限黏土,土样2为低液限黏土。由表2、表3可知,2种土样均为非分散性土;pH值分别为6.67和5.05,均属酸性土(pH值小于7);水溶盐质量分数分别为0.152%和

表1 原土的物理性质指标

土样编号	击实试验			不同粒径土粒质量分数/%				界限含水率			土的分类
	击数/次	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水量/%	>2mm	2~0.075mm	0.075~0.005mm	<0.005mm	液限/%	塑限/%	塑性指数	
土样1	25	1.53	26.0	4.9	11.1	37.1	46.9	46.1	27.3	18.8	高液限黏土
土样2	25	1.61	20.8		3.1	60.4	36.5	35.9	21.2	14.7	低液限黏土

表2 原土的化学性质指标

土样编号	水溶盐质量分数/%		氯化钠质量分数/%	有机质质量分数/%	pH值	分散性
	易溶盐	中溶盐				
土样1	0.093	0.059			6.67	不分散
土样2	0.006	0.260	0.005	1.18	5.05	不分散

表3 原土的力学性质指标

土样编号	含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/(10 <sup>-7</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	直接剪切试验		固结试验		
				黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/MPa	固结系数/(10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
土样1	26.0	1.47	8.2	32	20.2	0.182	10.24	4.40
土样2	20.7	1.55	5.6	21	23.2	0.127	13.82	4.13

注:直接剪切试验采用固结快剪测定方法,下同。

表4 掺盐前后界限含水率及物理化学试验结果

土样编号	掺盐量/%	界限含水率			水溶盐质量分数/%		氯化钠质量分数/%	pH值	分散性
		液限/%	塑限/%	塑性指数	易溶盐	中溶盐			
土样1	0	46.1	27.3	18.8	0.093	0.059		6.67	不分散
	0.4	42.6	25.2	17.4	0.460	0.059		6.65	不分散
	0.8	40.9	24.0	16.9	0.868	0.057		6.61	不分散
	1.2	40.0	23.5	16.5	1.223	0.052		6.61	不分散
	2.0	38.8	22.6	16.2	2.042	0.048		6.59	不分散
土样2	0	35.9	21.2	14.7	0.01	0.260	0.005	5.05	不分散
	1.0	34.2	19.9	14.3	1.04	0.044	0.936	5.08	不分散
	2.0	33.8	19.8	14.0	1.87	0.170	1.846	4.94	不分散
	2.5	33.5	19.6	13.9	2.27	0.048	2.241	5.00	不分散
	3.0	33.3	19.5	13.8	2.63	0.033	2.625	4.91	不分散
	4.0	33.0	19.3	13.7	3.80	0.044	3.669	4.88	不分散

表 5 掺盐前后力学试验结果

土样编号	掺盐量/ %	含水率/ %	干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/ (10 <sup>-7</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	直接剪切试验		固结试验		
					黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/ MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/ MPa	固结系数/ (10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
土样 1	0	26.0	1.47	8.2	32	20.2	0.182	10.24	4.40
	0.4	26.0	1.47	7.9	31	20.2	0.177	10.53	4.84
	0.8	26.0	1.47	3.1	31	20.2	0.293	6.36	4.06
	1.2	25.1	1.47	5.4	36	20.7	0.249	7.49	3.60
	2.0	25.1	1.47	7.6	35	20.6	0.256	7.28	3.37
土样 2	0	20.7	1.55	5.6	21	23.2	0.127	13.82	4.13
	1.0	20.5	1.55	4.1	22	21.8	0.136	12.90	4.16
	2.0	20.5	1.55	3.0	22	21.3	0.166	10.57	4.21
	2.5	20.5	1.55	1.6	23	20.9	0.194	9.05	4.26
	3.0	20.5	1.55	1.0	21	20.6	0.213	8.24	3.88
	4.0	20.5	1.55	2.0	21	19.4	0.219	8.01	4.33

表 6 3 种食盐的主要成分

食盐类型	氯化钠质量 分数/10 <sup>-2</sup>	氯化钾质量 分数/10 <sup>-3</sup>	碘酸钾质量 分数/10 <sup>-6</sup>
精 盐	96		18 ~ 33
粗 盐	91	0.2 ~ 20	18 ~ 33
混合盐	85	30 ~ 130	18 ~ 33

0.266%, 满足规范要求; 土样 2 有机质质量分数为 1.180%, 满足规范要求<sup>[8]</sup>。2 种土样 96% 压实度下的渗透系数分别为 8.2 × 10<sup>-7</sup>cm/s 和 5.6 × 10<sup>-7</sup>cm/s, 均满足规范要求<sup>[8]</sup>, 也符合防渗体填筑的质量要求<sup>[9-10]</sup>。

### 3.1 掺盐前后物理化学性质的对比

从表 4 可以看出, 土样 1 和土样 2 在掺入精盐后, 随着含盐量的增大, 相应的液、塑限及塑性指数均有所减小, 并随着掺盐量的增加其变化趋势有所放缓。这是因为在较低的掺盐量下, 盐类溶解在水中, 增大了土颗粒的水膜扩散层厚度, 从而较快地降低了其可塑性; 但随着掺盐量的增大, 土体中盐分以

两种形式存在, 一部分溶解在水中, 降低其可塑性, 另一部分则析出, 起到颗粒阻滑作用, 从而抵消了可溶盐的掺入对可塑性的削弱<sup>[11-12]</sup>, 因此, 液、塑限及塑性指数的减小后期放缓, 其变化规律如图 1 所示。而由表 7 可知, 在相同掺盐量下, 不同食盐类型对土样界限含水率的影响不明显。

同样, 从表 4、表 7 可知, 土样 1 和土样 2 的易溶盐随着掺盐量的增加而增加; 在掺盐量为 2% 和 3% 时, 土样 2 掺入不同类型食盐时其物理化学性质变化差异不大, 这是由于掺入的食用盐以氯化钠为主, 为易溶盐, 因此, 其水溶盐中的易溶盐质量分数必然随着掺盐量的增加而增加, 且食盐的类型对土体物理化学性质的影响不是主要的。水溶盐的变化规律见图 2。

由图 2 可知, 当土样 2 的精盐掺量增加到 4.0% 时, 水溶盐质量分数达到 3.84%; 混合盐掺量增加到 3.0% 时, 水溶盐质量分数达到 3.01%, 均不

表 7 土样 2 不同掺盐类型和掺盐量下界限含水率及物理化学试验结果

掺盐量/%	食盐类型	界限含水率			水溶盐质量分数/%		氯化钠 质量分数/%	pH 值	分散性
		液限/%	塑限/%	塑性指数	易溶盐	中溶盐			
2.0	精 盐	33.8	19.8	14.0	1.87	0.170	1.846	4.94	不分散
	粗 盐	33.9	20.0	13.9	1.86	0.050	1.852	4.96	不分散
	混合盐	34.0	19.9	14.1	1.78	0.021	1.768	4.82	不分散
3.0	精 盐	33.3	19.5	13.8	2.63	0.033	2.625	4.91	不分散
	粗 盐	33.8	20.2	13.6	2.66	0.061	2.633	4.96	不分散
	混合盐	33.8	20.0	13.8	2.98	0.029	2.445	4.71	不分散

表 8 土样 2 不同掺盐类型和掺盐量下力学试验结果

掺盐量/%	食盐类型	含水率/%	干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/ (10 <sup>-7</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	直接剪切试验		固结试验		
					黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩系数/ MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/ MPa	固结系数/ (10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
2.0	精 盐	20.5	1.55	3.0	22	21.3	0.166	10.57	4.21
	粗 盐	20.5	1.55	1.2	18	20.3	0.164	10.70	4.28
	混合盐	20.5	1.55	1.1	19	20.4	0.175	10.03	2.84
3.0	精 盐	20.5	1.55	1.0	21	20.6	0.213	8.24	3.88
	粗 盐	20.5	1.55	1.3	18	19.3	0.187	9.39	4.24
	混合盐	20.5	1.55	3.2	19	20.1	0.222	7.91	3.62

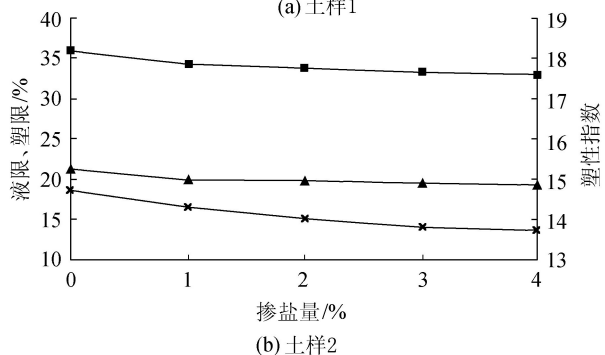
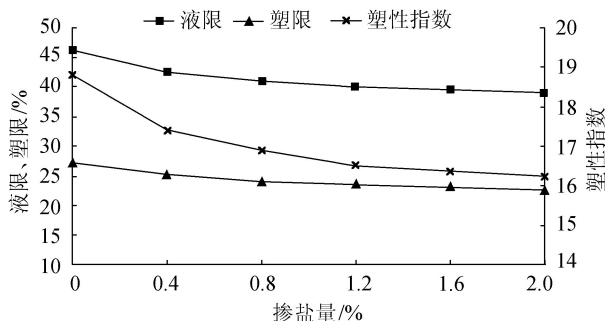


图1 界限含水率随掺盐量变化曲线

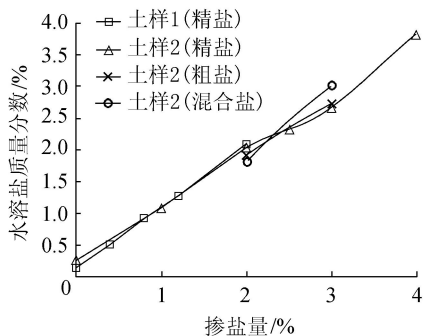


图2 水溶盐质量分数随掺盐量变化规律

满足规范要求(小于或等于3%)。通过线性内插法计算可得,当水溶盐质量分数为3.0%时,对应的精盐掺量为3.29%,混合盐掺量为2.99%。

通过测定土样掺入食盐前后的pH值可以看出,虽然2种土样随着掺盐量的增加略有减小,但均不是很明显;从分散性角度上来看,这2种土样掺盐前后并无区别,仍为非分散性土。

### 3.2 掺盐前后力学性质的对比

**a. 渗透系数。**由表5、表8可知,2种土样在掺入食盐后,其渗透系数均在 $1 \times 10^{-7} \sim 7.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ,与原土相比均略有减小。这主要因为黏性土中结合水膜占据了土中大部分孔隙体积,而随着食盐的掺入,增大了细小土颗粒的水膜厚度,而这种结合水膜又是不流动的,所以导致渗透系数有所减小。

**b. 抗剪强度。**由表5可知,2种土样掺入精盐后,土样2的内摩擦角随着掺盐量的增加而减小,黏聚力变化不明显;对土样1来说,当掺盐量为0~0.8%时,黏聚力随着掺盐量的增加而略有减小,内

摩擦角则基本不变,这可能是掺盐量变化幅度较小所致,当掺盐量为1.2%~2.0%时,出现的黏聚力和内摩擦角均大于掺盐量为0~0.8%时之值,其原因可能是试样的含水率不同所致。在相同掺盐量下,在土样2中掺入不同盐类后黏聚力和内摩擦角均表现为精盐大于混合盐大于粗盐的规律(表8)。假设作用于剪切面上的正应力为100kPa,则2种土样的抗剪强度变化规律如图3所示<sup>[13]</sup>。

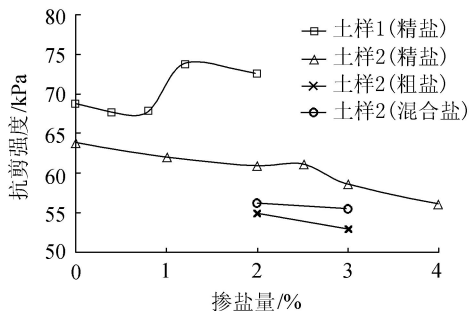


图3 抗剪强度随掺盐量变化规律

**c. 压缩特性。**由表5可知,土样1在掺入精盐后,压缩系数在掺盐量为0.8%时达到一个峰值,而压缩模量达到一个谷值,即认为在试验条件下,存在一个临界掺盐量,为0.8%;而土样2在掺入不同盐类后,压缩系数变化趋势均表现为随着掺盐量的增加而增大,压缩模量则正好相反。这主要是由于含盐量的增加,土中的水能充分溶解掺入的盐,降低了土体的密实度,使得土的压缩性提高。而相同掺盐量下,对土样2掺入不同盐类后,其压缩系数上升幅度由大到小依次为混合盐、精盐、粗盐;压缩模量下降幅度由大到小依次为混合盐、精盐、粗盐(表8)。2种土样的压缩系数及压缩模量随掺盐量的变化规律分别见图4、图5。

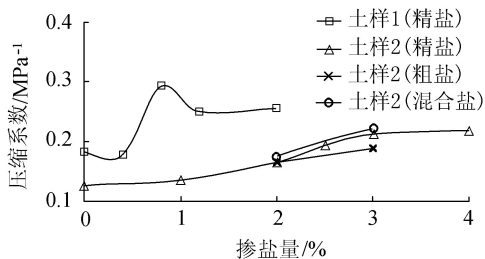


图4 压缩系数随掺盐量变化规律

## 4 工程实例

龙溪水库位于浙江省玉环县中部龙溪乡大密溪村,始建于20世纪50年代,为黏土心墙坝,坝长210m,坝高23.6m,总库容331.67万 $\text{m}^3$ ,是一座以供水为主,兼有防洪、灌溉、供水等综合利用的小(1)型水库。由于多年运行,水库坝坡风化严重,沉降明显,下游有较大面积渗水;坝体内有白蚁活动迹

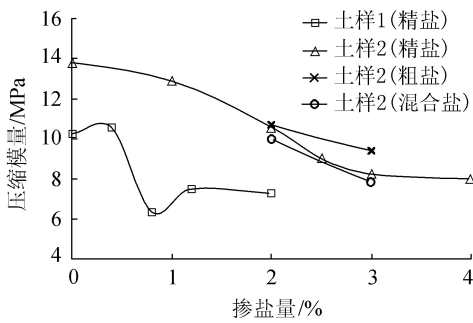


图5 压缩模量随掺盐量变化规律

象,虽经多次治理,但仍无法达到根治蚁害的目的。

2009年,在龙溪水库除险加固施工中,在大坝黏土心墙套井回填土料中掺入食盐,具体施工方案是在原坝体黏土心墙处采用冲抓套井取土,然后用掺盐量为0.8%的高液限防渗黏土进行回填,每层厚度0.3m,施工质量以抽检防渗土料回填后压实度96%控制。工程完工后蓄水运行至今,水库坝体未发现白蚁活动迹象,下游坝坡也没有发现渗漏出水等工程隐患,水库向周边大部分地区供应饮用水,发挥着良好的经济和社会效益。

## 5 结论

a. 掺入食盐后,液、塑限及塑性指数均随着掺盐量的增加逐渐变小,且变化趋势有所放缓;pH值随着掺盐量的增加略有减小的趋势;加盐后土样仍为非分散性土。

b. 在本文试验范围内,2种防渗土样的水溶盐质量分数随着掺入食盐量的增加有所增大;当精盐掺量不大于3.29%,混合盐掺量不大于2.99%时,土样2水溶盐质量分数满足规范要求。

c. 在各种试验条件下,适量掺盐对土样渗透系数的影响均不是很明显;抗剪强度随着食盐掺量的增加有所减小。

d. 在试验条件下,低液限黏土(土样2)压缩系数随着食盐掺量的增大而增大,而压缩模量则随之减小;但高液限黏土(土样1)在掺盐量0.8%时达到一个临界值,即压缩系数达到一个峰值,同时压缩模量达到一个谷值。

e. 在掺入不同类型、相同掺盐量的食盐时,土样的界限含水率变化不明显;抗剪强度变化幅度由大到小依次为精盐、混合盐、粗盐;压缩系数上升幅度由大到小依次为混合盐、精盐、粗盐;压缩模量下降幅度由大到小依次为混合盐、精盐、粗盐。

f. 工程实例应用情况表明,掺盐后防渗土体在工程特性没有不利变化的前提下,起到了防治白蚁入侵堤坝的效果,且经济有效、方便快捷,具备良好的推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] SARCINELLI T S, SCHAEFER C E G R, LYNCH L S, et al. Chemical, physical and micromorphological properties of termite mounds and adjacent soils along a toposequence in Zona da Mata, Minas Gerais State, Brazil [J]. *Catena*, 2008(10): 1-7.
- [2] LÉONARD J, RAJOT J L. Influence of termites on runoff and infiltration: quantification and analysis [J]. *Geoderma*, 2001, 104(1): 17-40.
- [3] 周维. 水库堤坝白蚁防治研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [4] 陈来华, 潘存鸿, 陈森美, 等. 利用食盐预防白蚁入侵堤坝的新技术[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(1): 140-144. (CHEN Laihua, PAN Cunhong, CHEN Senmei, et al. New technology of using salt to prevent termites for dikes and dams [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(1): 140-144. (in Chinese))
- [5] 陈来华, 陈森美. 盐土防治白蚁入侵堤坝的研究与应用[R]. 杭州: 浙江水利河口研究院, 2008.
- [6] 陈来华, 徐有成. 盐碱土壤防治堤坝蚁害初探[J]. *科技通报*, 2003, 19(6): 502-505. (CHEN Laihua, XU Youcheng. Primary discussion on prevention and control of ant damage in dikes with saline-alkali soil [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2003, 19(6): 502-504. (in Chinese))
- [7] SL237—1999 土工试验规程[S].
- [8] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].
- [9] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Jumping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))
- [10] 高鹏, 吴世勇. 两河口水电站心墙防渗料掺砾试验[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(5): 64-66. (GAO Peng, WU Shiyong. An experimental study of gravelly impervious materials for core wall in Lianghekou Hydropower Station [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(5): 64-66. (in Chinese))
- [11] 邴慧, 何平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1958-1962. (BING Hui, HE Ping. Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1958-1962. (in Chinese))

(下转第118页)

Air lock phenomenon and law during long-distance pipeline dewatering [ J ]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(5): 13-16. (in Chinese))

[14] 鞠岚, 廖柯熹, 陈莎, 等. 成品油管道落差地段水力特性研究[J]. 天然气与石油, 2011, 6(3): 14-16. (JU Lan, LIAO Kexi, CHEN Sha, et al. Hydraulic characteristics research of product oil pipeline at gap location[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 6(3): 14-16. (in Chinese))

[15] 陈家琅. 石油气液两相管流[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 20-22.

[16] 万五一. 长距离输水系统的非恒定流特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[17] 胡建永, 张健, 陈胜. 串联加压输水工程事故停泵的应急调度[J]. 人民黄河, 2013, 35(8): 74-76. (HU Jianyong, ZHANG Jian, CHENG Sheng. Emergency dispatch of pump-stop for series connection pressurization water supply project [ J ]. Yellow River, 2013, 35(8): 74-76. (in Chinese))

[18] 怀利 E B, 斯特里特 V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组, 译. 北京: 水利水电出版社, 1983.

[19] 郑源. 输水管道系统水流冲击截留气团与含气水击研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.

[20] 李晓燕. 长距离重力流输水管道水击防护方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

[21] 梁兴, 刘梅清, 张进国, 等. 空气罐对输水管道水击的防护研究[J]. 排灌机械, 2005, 23(6): 16-18. (LIANG Xing, LIU Meiqing, ZHANG Jinguo, et al. Protection study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(6): 16-18. (in Chinese))

[22] 龙侠义. 输配水管线水击数值模拟与防护措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[23] 童乐一, 樊红刚, 陈乃祥. 跨海引水工程的控压措施研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 71-76. (TONG

(上接第 46 页)

[10] 周秋景, 李同春, 宫必宁. 循环荷载作用下脆性材料剪切性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 573-579. (ZHOU Qiuqing, LI Tongchun, GONG Bining. Experimental study on shear behaviors of brittle materials under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 573-579. (in Chinese))

[11] GHRIB F, TINAWI R. An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams [J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 1995, 24: 157-173.

[12] 杜荣强. 混凝土静动弹塑性损伤模型及在大坝分析中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[13] 赵兰浩. 考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.

(收稿日期: 2014-01-24 编辑: 骆超)

Leyi, FAN Honggang, CHEN Naixiang. Research on the method of control pressure of diversion project in the sea [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 71-76. (in Chinese))

[24] 龚娟, 张健, 俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 166-169. (GONG Juan, ZHANG Jian, YU Xiaodong. Optimization of impedance orifice of air vessel in high-lift water supply system[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 166-169. (in Chinese))

[25] 唐寅. 水击的研究与防护[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.

[26] KIM S H. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm [ J ]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 629-636.

[27] WAN W, HUANG W, LI C. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection [ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014, 136(1): 871-876.

[28] 高松竹, 蒲家宁, 许萍, 等. 空气罐控制输液管道水击研究[J]. 管道技术与设备, 2004, 4: 17-19. (GAO Songzhu, PU Jianing, XU Ping, et al. Study on controlling water hammer of pipelines by air tank [ J ]. Pipeline Technique and Equipment, 2004, 4: 17-19. (in Chinese))

[29] 王文蓉, 叶亚玲, 鞠小明. 压力空气罐对火电厂补给水系统瞬态负压的防护研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(1): 27-30. (WANG Wenrong, YE Yaling, JU Xiaoming. Protection study avoiding transient negative pressure by air vessel of thermal power station pumping system [ J ]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(1): 27-30. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-04-15 编辑: 骆超)

(上接第 70 页)

[12] 梁健伟, 房营光, 陈松. 滨海盐渍土的强度特性试验与机理分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(7): 36-40. (LIANG Jianwei, FANG Yingguang, CHEN Song. Experiment and mechanism analysis on strength characteristics of coastal saline soil [ J ]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(7): 36-40. (in Chinese))

[13] 洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 等. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 52-55. (HONG Anyu, YANG Xiaosong, DANG Jinqian, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soil [ J ]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 52-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-03-18 编辑: 郑孝宇)