

DOI: 10.11779/CJGE2016S1023

# 塑料排水板芯板及滤膜物理力学性能研究

王婧<sup>1, 2, 3</sup>, 李涛<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
3. 广州港湾工程质量检测有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 塑料排水板作为真空预压地基处理法中水分排出的竖向通道, 其性能的优劣影响对地基处理效果起到至关重要的作用。对不同排水板的芯板及滤膜开展一系列的物理力学性能试验, 得出整体式芯板横截面积稍微大于分离式芯板; 防淤堵系列芯板的整体力学性能要优于常规系列芯板; 且滤膜样本中编织布相对于无纺布而言厚度较薄、质量较轻, 力学性能表现上也明显劣于无纺布滤膜; 无纺布样本中, 防淤堵无纺布较常规无纺布厚度较薄、质量较轻, 但其力学性能表现要优于后者; 防淤堵整体式排水板通水性能为最优。

**关键词:** 排水板; 芯板; 滤膜; 物理力学性能

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0125-05

**作者简介:** 王婧 (1986-), 女, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程和地下结构方面的研究。E-mail: phdwangjing@163.com。

## Physical and mechanical properties of core and filter membrane for plastic vertical drains

WANG Jing<sup>1, 2, 3</sup>, LI Tao<sup>1, 2, 3</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China; 3. Guangzhou Harbor Engineering Quality Examination Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** The plastic vertical drain is a vertical channel of water discharge in foundation treatment by vacuum preloading. The effect of the performance on the foundation treatment is very important. A series of physical and mechanical tests are carried out for different plastic vertical drains. The transverse sectional area of the integral core plate is slightly larger than that of the separation core plate. The mechanical properties of the anti-clogging core plate is superior to those of the conventional core board. For the membrane samples, the thickness of woven cloth is thinner than that of the non-woven fabric, with lighter quality. The mechanical performance is also significantly inferior to that of the non-woven fabric. For the non-woven fabric samples, the thickness of the anti-clogging non-woven fabric is thinner than that of the conventional one, with lighter quality. The mechanical performance is superior to that of the conventional non-woven fabric. The anti-clogging integral drains show optimal performance.

**Key words:** plastic vertical drain; core board; filter membrane; physical and mechanical property

## 0 引言

在真空预压法地基处理中, 排水板是其中一个重要的部分。作为地基中水分排出的竖向通道, 排水板有助于加快地基的固结, 使其在更快达到工程所需性能<sup>[1-2]</sup>。良好物理力学性能的排水板及合理的布置形式, 可以使工程取得令人满意的加固效果; 反之, 在使用过程中则有可能会出现地基强度增长缓慢, 加固效果不佳等问题<sup>[3-4]</sup>。

排水板在使用过程中, 其物理力学性能深刻影响着地基处理效果, 排水板的截面面积、芯板强度及抗弯

能力的差异均可能导致排水板通水能力的显著变化<sup>[5]</sup>。地基中的水分在流入芯板过程中, 会带离部分细颗粒土通过排水板滤膜, 当滤膜的厚度、孔径、质量不符合时, 可能会滞留大量的细颗粒土, 产生严重的淤堵, 导致排水板的通水性能降低<sup>[6]</sup>。故有必要对排水板及其滤膜的常规物理力学性能进行分析研究, 找出影响排水板排水能力的主要影响因素。本文通过选取各种不同类型的排水板及滤膜, 对其进行一系列物理力学

性能试验, 研究排水板和滤膜的特性, 供实际工程使用参考。

## 1 排水板的类型

在地基处理中, 应用于工程的排水板一般由不同截面形状的塑料芯板, 外面包裹土工织物(滤膜)而成。其中, 芯板起骨架作用, 构建起排水板的主要排水通道; 外包土工织物起保土、过滤作用, 防止排水过程中土颗粒大量进入排水通道。

### 1.1 芯板的类型

起骨架作用的芯板, 按不同范围可划分成多种类型。

按芯板的材质划分, 现阶段最常见材料为聚丙烯(polypropylene, PP)及聚乙烯(polyethylene, PE)等高分子材料。目前国内生产的排水板一般由这两种混合配制, 使其既具有聚丙烯的刚性, 又具有聚乙烯的柔性和耐候性。

按芯板的截面类型划分, 大致可分为沟槽型、折丝型、尖三角型、凸点型等, 表1展示了各种截面类型的具体形式。目前国内大部分排水板芯板均属于沟槽型的十字纹, 为并联十字型的横截面形式。

表1 排水板芯板截面类型

Table 1 Types of drainage plate core

截面类型	具体形式
沟槽型	城垛纹
	十字纹
折丝型	
尖三角型	
凸点型	单边 双边

按芯板塑料处理方式划分, 可分为原生料及再生料, 再生料为一种较环保的处理方式, 为对废弃塑料的再次利用, 生产出芯板。不过, 由于工艺及材料特性, 再生料的物理力学性能一般比原生料要差。

### 1.2 滤膜的类型

排水板芯板外包的滤膜大多采用纤维纺制而成的土工织物。

按材质划分, 排水板滤膜中较常见为涤纶(polyester, PET)、丙纶(polypropylene, PP)及尼龙(polyamide, PA), 也有少量混掺了天然纤维。国内的排水板滤膜中, 采用涤纶的占了大部分, 因为涤纶在物理力学各项性能上综合而言比其他材料更优秀。

按不同成纤方式划分, 主要可分为编织布及无纺布两大类。编织布由两组平行的纤维组成, 称为经线及纬线, 利用编织设备和工艺将经纱与纬纱交织在一起织成布状; 区别于编织布, 无纺布则是由设备对纤

维进行定向或随机排列, 形成纤网结构。较前者而言, 无纺布纵横两个方向的力学性能更为平衡。

按构成纤维类型划分, 大致可分为短纤维及长纤维。短纤维网与长纤维纺丝网的区别在于长纤维网的各向同性好, 其性能不取决于设备成纤的方向。综合而言, 长纤网的物理力学性能要较短纤优异, 在长期的发展中, 现阶段国内生产的排水板滤膜一般都有长纤维网经后处理而成。

对无纺布而言, 还可以按其纤网固结方式不同划分。一般比较常见的为针刺式(机械固结), 热粘式(热粘固结), 热轧式(热熔固结)等。针刺式无纺布由于通过刺针在纤维网间反复穿刺而成, 其孔径一般较其他形式要大; 热轧式无纺布则是由热花辊在纤维网上辊轧而成, 在纤网上留下一系列高密度纤维粘结而成的熔点, 纤网的空间结构性大大增强, 提高了抗皱性能, 使热轧式无纺布的力学性能较其他类型优异。

图1展示了现阶段国内排水板滤膜的常见类型。

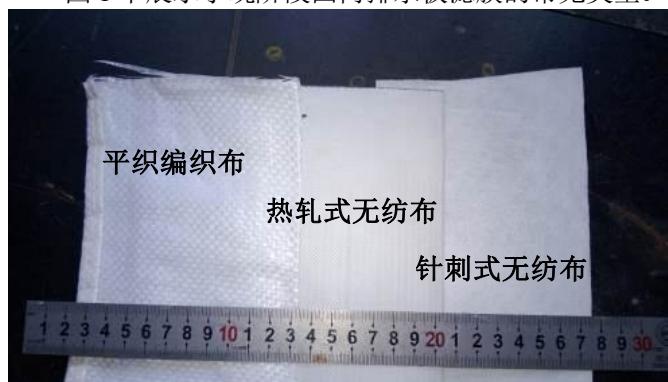


图1 不同类型的排水板滤膜

Fig.1 Different types of drainage plate filter

### 1.3 排水板的整体性能类型

对于排水板整体, 根据滤膜与芯板间的关系, 还可以分为分离式排水板和整体式排水板两大类。前者芯板与滤膜是分开的, 滤膜被制作成略大于芯板尺寸的土工织布长套包裹于芯板四周, 芯板可以与滤膜互相抽离; 后者则是滤膜被粘合在芯板槽纹上形成一个整体, 两者间不可作相对移动。图2展示了不同结合类型的排水板。

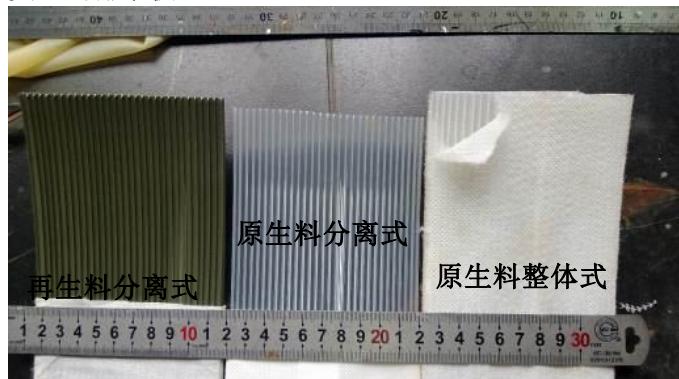


图2 不同结合类型的排水板

Fig. 2 Different types of drainage plate

根据《水运工程塑料排水板应用技术规程》(JTS 206—1—2009) 中排水板型号的规定, 按照生产的不同排水板所达到的物理力学指标划分成 4 类, 而现行工程考虑的排水板性能多按这 4 种型号进行划分。具体见表 2。

表 2 常用排水板型号及性能指标

Table 2 Common drain board models and performance parameters

项目	A型	B型	C型	D型	备注
打折深度/m	$\leq 15$	$\leq 25$	$\leq 35$	$\leq 50$	
纵向通水量 $(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\geq 15$	$\geq 25$	$\geq 40$	$\geq 55$	侧压力 350 kPa
滤膜渗透系数 $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		$\geq 5 \times 10^{-4}$			试样水中浸泡 24 h
滤膜等效孔径/mm		$< 0.075$			以 $O_{95}$ 计
排水板抗拉强度/kN	$\geq 15$	$\geq 25$	$\geq 40$	$\geq 55$	延伸率 10%
滤膜抗拉强度 干态 $(\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\geq 15$	$\geq 25$	$\geq 40$	$\geq 55$	延伸率 10%
					湿态 $\geq 15 \geq 25 \geq 40 \geq 55$ 延伸率 15%

在国内, 目前应用较多的为 B 型及 C 型排水板。

## 2 排水板芯板物理力学性能分析

### 2.1 芯板的物理性能

试验中选取了 4 种不同类型的排水板, 分别为常规分离式(CF, 普通热轧无纺布滤膜, 滤膜芯板分离)、常规整体式(CZ, 普通热轧无纺布滤膜, 滤膜芯板粘合)、防淤堵分离式(FF, 新型防淤堵热轧无纺布, 滤膜芯板分离)及防淤堵整体式(FZ, 新型防淤堵热轧无纺布, 滤膜芯板粘合)。芯板统一采用并联十字型截面, 见图 3。

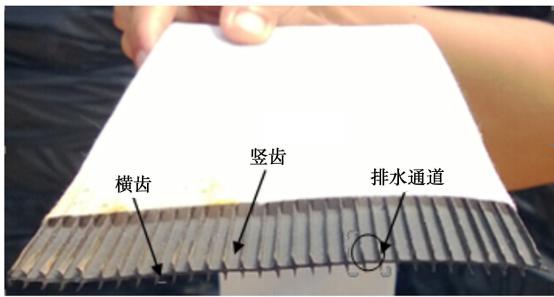


图 3 排水板芯板截面形式

Fig. 3 Sectional forms of drainage plate core plate

试验排水板芯板可分为竖齿、横齿、排水通道 3 个部分。其中竖直向凸齿为竖齿, 用于支撑滤膜, 形成内部排水通道; 横齿在水平向将各个竖齿以一定间隔连接起来; 排水通道由两个竖齿及一个横齿组成, 是排水板排水时供水流排走的通道。试验排水板芯板共有 31 个竖齿, 30 个排水通道。4 种类型排水板芯板的尺寸如表 3。

可见, 4 种排水板芯板的尺寸都十分接近, 为厚度 4.0~4.5 mm, 宽度 100~101 mm。从整体上来看, 整体式的横截面积比分离式的要高出一点。

表 3 排水板芯板的物理性能

Table 3 Physical properties of drain boards

样品 编号	厚度 /mm	宽度 /mm	竖齿 厚度 /mm	横齿 厚度 /mm	整体横截 面积/mm <sup>2</sup>	芯板横截 面积/mm <sup>2</sup>	截面过水 面积/mm <sup>2</sup>
			/mm	/mm	/mm <sup>2</sup>	/mm <sup>2</sup>	/mm <sup>2</sup>
CF	4.02	100.04	0.43	0.38	402.16	86.06	316.10
CZ	4.52	101.63	0.45	0.67	459.01	124.14	334.88
FF	4.06	100.65	0.40	0.33	408.65	91.67	316.99
FZ	4.19	100.50	0.59	0.40	421.10	107.93	313.16

### 2.2 芯板的力学性能

在真空预压加固过程中, 随着土体的固结沉降, 排水板相应亦会随土层变形, 发生弯曲。若芯板的质量较差, 排水板弯曲处芯板竖齿可能会发生倒折屈服, 导致在该处土颗粒滞留, 严重堵塞排水通道, 降低排水板的通水能力。为此, 在排水板使用之前, 其芯板的可塑性, 抗倒折性必须满足要求。

排水板纵向拉伸强度主要测试排水板所能承受的最大拉力及破坏时的延伸率, 可从侧面反映排水板芯板的强度及可塑性。试验按(SL235—2012)《土工材料合成材料测试规程》中“塑料排水带(板)拉伸试验”进行, 表 4 为试验结果汇总。从表中可以看出, 防淤堵系列的排水板拉伸强度总体上要优于常规系列, 前者定应变时的拉伸强度约优于后者 6%~8%; 断裂伸长率则是整体式系列表现较优, 比常规式约大 4%~5%, 这一定程度上反映了排水板滤膜与芯板黏合后改善了排水板整体的延伸性能, 使排水板的塑性性能增强。

表 4 排水板拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of drainage plate

样品 编号	最大力 /kN	定应变负荷 (10%)/kN	断裂伸长 率/%	1kN 时延 伸率/%
CF	3.280	3.235	12.360	0.848
CZ	3.315	3.205	17.165	0.920
FF	3.413	3.403	10.775	0.958
FZ	3.530	3.458	14.620	0.933

排水板芯板压屈强度主要为测试排水板芯板收到垂直于板面压力时, 竖齿的抗折强度和变形趋势。试验按《土工材料合成材料测试规程》(SL 235—2012)中“塑料排水带(板)芯板压屈试验”进行, 图 4 为芯板应变-应力曲线。

从曲线图中可以看出, 4 种芯板变形趋势大约一致。从其曲线变化情况来看, 属于规范中对软板的定义, 即随着竖齿的折服, 在等压力的情况下, 轴向应变逐渐减少, 而不是突然增大, 发生倒伏。加至 600 kPa 时, 除常规整体式芯板产生较大的轴向应变, 其余 3

者在数值上均差不多, 这与芯板的竖齿高度有很大关系。从表 3、4 可以看出, 常规整体式排水板约比其余三者厚度大 0.2~0.3 mm 左右, 这意味着其竖齿亦比其余三者长 0.2~0.3 mm, 从线刚度的角度来看, 常规整体式芯板受压时要显得更为柔软。另外, 防淤堵系列芯板在卸载至 0kPa 时变形恢复较多, 意味其经过塑性发展后, 残余应变较少。

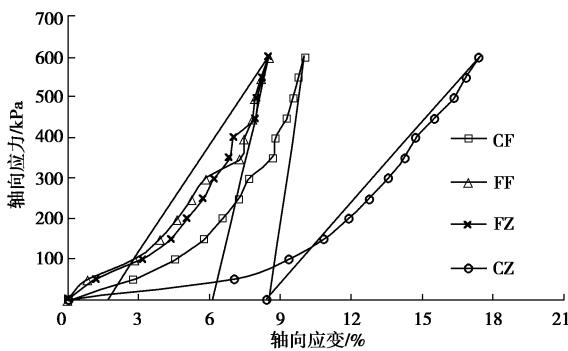


图 4 排水板芯板应力 - 应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relation curves of drainage plate core

### 3 排水板滤膜物理力学性能

#### 3.1 滤膜的物理性能

试验中选取了 4 种不同类型的土工织物滤膜进行研究比较, 分别为大孔径编织尼龙网 (DBN), 中孔径编织尼龙网 (ZBN), 小孔径常规热轧无纺布 (XCW) 及小孔径防淤堵热轧无纺布 (XFW)。具体见表 5。

表 5 排水板滤膜的物理性能

Table 5 Physical properties of drainage plate filters

滤膜类型	纤维原料	处理方式	纤维密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	单位质量/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm
DBN	PA, 单丝	平织	1.14	28.2	0.118
ZBN	PA, 单丝	平织	1.14	39.4	0.111
XCW	PET, 长纤	热轧	1.38	90.8	0.357
XFW	PET, 长纤	热轧	1.38	74.3	0.339

#### 3.2 滤膜的力学性能

在下插排水板进行真空预压加固时, 地层的水平应力及抽真空导致的负压将会使滤膜紧紧贴在芯板上。质量差、延伸率较大的滤膜在加固过程中, 很可能会陷入排水通道中, 阻塞向上的排水通道, 导致不良的加固效果。为了衡量滤膜在这方面的力学性能表现, 现按规范对试验中所用到的滤膜均进行了干态拉伸试验; 同时对两种热轧无纺布滤膜进行了湿态拉伸试验, 试验结果见表 6。

从表 6 中可以看出, 常规热轧无纺布的最大力及断裂伸长率均为各类型滤膜中的最低值, 意味着其延伸性能较差, 可承受最大力较小; 从定应变负荷项可

以看出, 相对于热轧无纺布, 尼龙网在较小力的情况下, 很容易就到达了 10% 的伸长率; 从干态湿态拉伸对比来看, 在滤膜完全湿润的情况下, 其拉伸强度, 断裂伸长度均有一定程度的下降; 若两种无纺布横向对比而言, 从拉伸强度, 伸长率, 或定应变时负荷值而言, 防淤堵无纺布均要优于常规无纺布, 这意味着在实际真空预压使用当中, 防淤堵式滤膜更小机率出现松弛或变形。

表 6 排水板滤膜的力学性能

Table 6 Mechanical properties of drainage plate membranes

样品编号	试验条件	定应变负荷(10%)/N	定应变负荷(15%)/N	最大力/N	断裂伸长率/%
XCW	干态	151.75	170.25	176.50	16.50
	湿态	94.64	95.51	102.38	14.09
XFW	干态	166.50	189.59	275.46	35.47
	湿态	125.43	142.28	181.19	31.74
DBN	干态	80.56	137.94	408.57	45.06
ZBN	干态	51.23	86.24	311.53	41.62

### 4 排水板通水量性能

试验按照《土工合成材料测试规程》(SL 235—2012) 中的“塑料排水带(板)通水量试验”在常规纵向通水量测定仪中进行, 在 350 kPa 的围压下测试排水板通水量随时间的变化情况。4 种塑料排水板的竖直通水量试验结果如表 7 所示。

表 7 4 种排水板纵向通水量

Table 7 Vertical water flow of four kinds of drainage plates

排水板类型	常规分离式	常规整体式	防淤堵分离式	防淤堵整体式
通水量/(cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	151.2	246.9	222.0	234.5

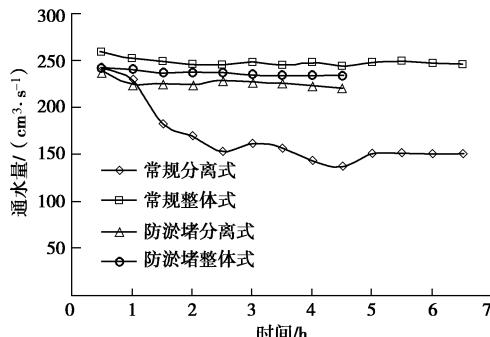


图 5 4 种排水板纵向通水量曲线

Fig. 5 Curves of flows of four kinds of vertical drainage plates

从图 5 可以看到, 4 种排水板在试验开始时候 (0.5~1 h), 其通水量在 240~255 cm<sup>3</sup>/s 之间, 通水量相差不大, 最大差值都在最小值的 10% 之内; 常规分离式在试验 1.5 h 后降水量大幅度降低 20%, 随后

在 5 h 后稳定在  $151 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 总的降低幅度最大, 达 37.7%; 其余 3 种排水板降低幅度: 常规整体式为 4.8%, 防淤堵分离式为 7.0%, 防淤堵整体式为 0.6%, 这 3 类排水板降低幅度较低, 稳定较快, 一般在 2~3 h 即可达到稳定值。4 种排水板中通水量最大的为常规整体式。

排水板过水面积的变化是影响纵向通水量变化的主要因素, 影响过水面积的变化主要考虑滤膜和芯板两方面因素。由于常规整体芯板的压曲强度较低, 相同围压下压缩变形量较大, 因此, 虽然常规整体式的理论排水面积最大, 但加上侧压力作用影响, 排水面积应差别不大。因此主要考虑为滤膜的因素引起排水面积的改变。从分离式和整体式的芯板和滤膜的结合方式看, 分离式芯板是内包于滤膜的, 不可避免地滤膜的周长总是大于排水板的边长和, 在侧压力作用下滤膜有更多的“余料”陷入排水通道, 改变排水面积; 而整体式滤膜是胶结于芯板竖齿上的, 滤膜始终是“紧绷”状态, 侧压力作用下变形较小, 对排水面积的影响只取决于滤膜的延伸率, 影响程度相对较低。这就是分离式系列的通水量均要小于整体式系列的主要原因。

4 种排水板中常规分离式通水量最低, 原因有以下 4 个方面: ①理论排水面积小; ②相对于防淤堵滤膜, 常规无纺滤膜在相同拉力作用下变形更大, 有更多的滤膜陷入排水通道的槽齿; ③相对于整体式排水板, 滤膜不是紧绷状态, 围压作用下对排水面积的影响大; ④排水通道的不均匀程度高。

## 5 结 论

本文对不同排水板的芯板及滤膜进行了一系列的物理力学性能试验, 得出以下 4 点结论。

(1) 4 种排水板芯板的尺寸及物理性质接近, 整体式芯板横截面积稍微大于分离式芯板。

(2) 排水板芯板均表现出符合要求的力学性能, 其中防淤堵系列芯板的整体力学性能要优于常规系列芯板。

(3) 滤膜样本中编织布相对于无纺布而言厚度较薄, 质量较轻, 力学性能表现上也明显劣于无纺布滤膜; 无纺布样本中, 防淤堵无纺布较常规无纺布厚度较薄, 质量较轻, 但其力学性能表现要优于后者。

(4) 4 种排水板的通水性能由大到小依次为常规

整体式、防淤堵整体式、防淤堵分离式、常规分离式。

## 参考文献:

- [1] 毕平均. 高性能塑料排水板在软基处理工程中的应用[J]. 水运工程, 2012(2): 134~137. (BI Ping-jun. Application of high-performance wick drain in soil consolidation engineering [J]. Port and Waterway Engineering, 2012(2): 134~137. (in Chinese))
- [2] 丁明武, 陈平山, 林涌潮. 浅表层加固技术在新吹填淤泥地基处理中的应用[J]. 水运工程, 2011(10): 120~124. (DING Ming-wu, CHEN Ping-shan, LIN Yong-chao. Application of surface-layer improvement technology for newly-dredged sludge foundation treatment [J]. Port and Waterway Engineering, 2011(10): 120~124. (in Chinese))
- [3] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程, 2012(1): 158~163. (CHEN Ping-shan, DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin. Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique [J]. Port and Waterway Engineering, 2012(1): 158~163. (in Chinese))
- [4] 林少波, 黄建华, 陈平山. 浅层加固技术中抽真空作用强度对加固效果的影响[J]. 水运工程, 2011(2): 108~110. (LIN Shao-bo, HUANG Jian-hua, CHEN Ping-shan. Effect of vacuum intensity to consolidation performance in surface-layer improvement technique [J]. Port and Waterway Engineering, 2011(2): 108~110. (in Chinese))
- [5] 宋晶, 王清, 夏玉斌, 等. 真空预压处理高黏粒吹填土的物理化学指标[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1476~1480. (SONG Jing, WANG Qing, XIA Yu-bin, et al. Physical and chemical indicators of dredger fill with high clay by vacuum preloading [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1476~1480. (in Chinese))
- [6] 乐超, 徐超, 吴雪峰, 等. 两种塑料排水板滤膜淤堵特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014(9): 2529~2534. (LE Chao, XU Chao, WU Xue-feng, et al. Experimental research on clogging characteristic of two types of PVD filters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(9): 2529~2534. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)