

DOI: 10.11779/CJGE201712002

# 考虑板土相互作用的排水板通水特性试验研究

朱群峰<sup>1, 2</sup>, 高长胜<sup>1, 2</sup>, 占鑫杰<sup>\*1, 2</sup>, 张凌<sup>1, 2</sup>, 杨守华<sup>1, 2</sup>, 明经平<sup>1, 2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 为研究排水板在实际工况下的通水特性, 研制排水板纵向通水量测试新仪器, 采用室内真空预压模型试验、堆载预压模型试验和直接充灌淤泥等方法来制作板土单元体(试样), 并开展板土单元体(试样)通水能力测试。试验结果表明: 无论是直接充灌淤泥法、堆载预压法还是真空预压法, 高性能排水板通水量均大于现行规程试验结果, 而普通排水板通水量均小于现行规程试验结果, 现行规程方法高估了真空预压后普通排水板的通水能力。对比结果表明: 高性能排水板在堆载预压后通水能力与真空预压后通水能力接近, 而普通排水板在堆载预压后通水能力明显高于真空预压后通水能力。因此, 对于变形大且固结时间长的新近吹填淤泥地基加固工程应优先选用高性能排水板。

**关键词:** 高性能排水板; 普通排水板; 通水量测试新仪器; 板土单元体; 模型试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2158-07

作者简介: 朱群峰(1966-), 男, 湖北罗田人, 教授级高级工程师。主要从事软基处理咨询、设计、监测及科研工作。

E-mail: qfzhu@nhri.cn

## Experimental study on discharge capacity of prefabricated vertical drain considering interaction of PVD and soil

ZHU Qun-feng<sup>1, 2</sup>, GAO Chang-sheng<sup>1, 2</sup>, ZHAN Xin-jie<sup>1, 2</sup>, ZHANG Ling<sup>1, 2</sup>, YANG Shou-hua<sup>1, 2</sup>, MING Jing-ping<sup>1, 2</sup>

(1.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In order to study the practical discharge capacity of prefabricated vertical drain (PWD), a new apparatus is developed. The laboratory vacuum preloading model tests, surcharge preloading model tests and direct filling tests are used to produce the PVD-soil element samples, and the discharge capacity measurements of PVD-soil element samples are conducted. The test results show that regardless of using the direct filling tests, laboratory vacuum preloading tests and surcharge preloading tests, the discharge capacity of high-performance PVD is higher than that measured by the current specification, and that of the traditional PVD is lower than the value measured by the current specification. The results by the current specification overestimate the discharge capacity of the traditional PVD under vacuum preloading. The comparative test results reveal that the discharge capacity of the high-performance PVD under surcharge preloading is close to that under vacuum preloading, and the discharge capacity of the traditional PVD under surcharge preloading is higher than that under vacuum preloading. Therefore, for the newly dredged soft soil reinforcement project, when the settlement of soil is large and the consolidation period is long, the high-performance PVD should be preferred.

**Key words:** high-performance PVD; traditional PVD; new apparatus for discharge capacity measurement; element of PVD and soil; model test

## 0 引言

塑料排水板是软基排水固结过程中关键的排水材料。目前中国普通排水板通常以处理软土厚度进行选材分类, 常规的A、B、C型排水板板宽一般为10 cm, 纵向通水量大于(15~40) cm<sup>3</sup>/s, 滤布等效孔径<75 μm, 滤布渗透系数大于 $5 \times 10^{-4}$  cm/s, 这些普通排水板已在软基加固工程中普遍应用<sup>[1-3]</sup>。近年来, 随着超软淤泥地基处理工程日益增多, 工程界对排水板性能开展了更多探索, 如在一些重要和重大工程中, 为保

证排水板的持久排水作用, 提出采用高性能塑料排水板<sup>[4]</sup>。高性能塑料排水板芯板材料采用纯新聚丙烯塑料, 齿槽挺直光滑, 芯板和滤膜采用热黏合工艺, 整体性较强。同时高性能排水板滤布等效孔径大于普通

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401006); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y316004, Y317007); 软弱土与环境土工教育部重点实验室开放基金(2017P02)

收稿日期: 2016-10-26

\*通讯作者(E-mail: xjzhan@nhri.cn)

排水板。排水板滤布等效孔径是影响其功效的重要指标, 该指标值是工程技术人员根据材料生产工艺水平和工程实践总结得到的。一般来说, 较小的等效孔径可能会使孔隙水无法通畅排出, 而较大的等效孔径又易使细土颗粒透过滤布后淤积在排水板芯槽内, 出现堆积淤堵, 通水能力下降。目前中国排水板规程<sup>[5]</sup>中均规定滤布等效孔径要小于  $75 \mu\text{m}$ , 欧洲标准《垂直排水井技术规程》中规定排水板滤布等效孔径要小于  $100 \mu\text{m}$ , 而高性能排水板滤布等效孔径多在  $80\sim150 \mu\text{m}$  之间(已超出国内外规程要求), 其允许淤泥地基一些细小土颗粒随孔隙水排出, 而不被吸附在排水板滤布中<sup>[6]</sup>。

塑料排水板通水能力是其重要性能指标, 对被加固软土排水固结效果起决定作用, 常采用通水量表示。现行规程排水板通水量测试方法<sup>[7]</sup>是在板体外侧套上乳胶膜, 施加  $350 \text{ kPa}$  侧压力, 然后测试其通水量。部分研究者为考虑弯折因素影响, 采用人为弯折排水板, 套上乳胶膜, 然后测试其通水量<sup>[8]</sup>。以上方法均无法考虑板土相互作用下排水板弯折后的实际通水能力。俞炯奇通过对比工程使用前、后的排水板性能指标, 指出当排水板随土体固结发生弯折后, 其通水性能显著降低<sup>[9]</sup>。目前考虑板土相互作用的排水板通水量测试结果未见报道, 特别是针对中国市场上常见的 SPB 型普通排水板和高性能排水板。

本文首先介绍新研制的排水板通水量测试新仪器, 随后通过 3 种不同方法(真空预压模型试验、堆载预压模型试验、充灌淤泥试验)制备“板土单元体”试样, 采用新研制仪器测试“板土单元体”中排水板通水量, 据此研究排水板在接近实际工况的通水性能。

## 1 排水板通水量测试新仪器

### 1.1 现行规程排水板通水量测试仪器

现行规程中排水板通水量测试仪器如图 1 所示。测试方法<sup>[7]</sup>是在排水板外侧套上乳胶膜, 施加恒定侧压力( $350 \text{ kPa}$ ), 调节进出水管水位, 保持试验水力梯度  $i=0.5$ , 然后测试其通水量。该方法无法考虑板土相互作用以及板体弯曲的影响。

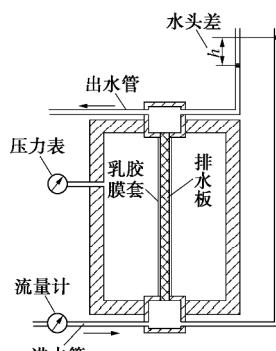


图 1 现有规程排水板通水量测试仪器

Fig. 1 Measuring apparatus of discharge capacity of PVD in

current specification

### 1.2 排水板通水量测试新仪器

排水板通水量测试新仪器主要由压力室、排水板通水及控制系统、侧压力控制系统等组成, 其示意图如图 2 所示。

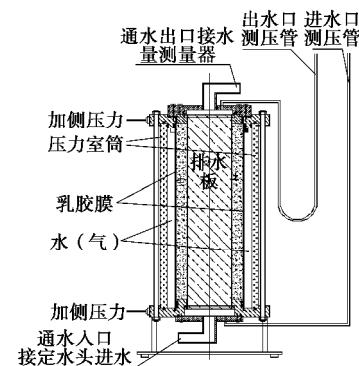


图 2 排水板通水量测试新仪器示意图

Fig. 2 Illustration of new measuring apparatus of discharge capacity of PVD

压力室直径为  $240 \text{ mm}$ , 高度为  $410 \text{ mm}$ 。在压力室内, 试样和围压水通过乳胶膜分隔。侧压力控制系统由压力源、调压阀、水等组成。压力源采用压缩空气, 调压阀控制试样周围水压。排水板通水与控制系统由水箱、进出水端测压管、量筒等组成。

采用新仪器测试时, 首先在压力室底座上安装“板土单元体”试样(制作方法见第 2 节), 随后连接进水管和进水端水头测量管路, 安装压力室及上部通水装置, 连接出水端水头测量管路, 向压力室内通水, 对试样施加压力后测量其通水量。

新仪器主要特点是能模拟排水板随土体发生弯曲的实际工况, 可考虑排水板与土体相互作用。因此, 用新仪器来测试排水板通水量能真实反映排水板的实际通水特性。

## 2 板土单元体制备

板土单元体试样包括真空预压板土单元体、堆载预压板土单元体和充灌淤泥板土单元体。

### 2.1 试验土样

试验土料采用连云港疏浚造地的吹填淤泥。将湿土料晾晒风干后碾压分散; 过  $5 \text{ mm}$  筛, 剔除贝壳、植物根茎等杂物。将土料按照含水量 75% 配制成泥浆, 在塑料容器内浸泡 15 d 以上。浸泡过程中充分搅拌, 促使土颗粒分散、排气饱和。土体基本物理性质指标如表 1 所示。

### 2.2 塑料排水板

塑料排水板分别采用高性能塑料排水板和国标 SPB-100 型普通塑料排水板(如图 3 所示)。

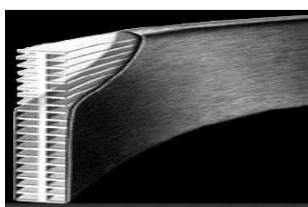
表1 土体物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil

比重 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 $I_p$	颗粒含量/%		
				>0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm
2.75	54.8	24.8	30	7.6	44.9	47.5



(a) 普通排水板



(b) 高性能排水板

图3 普通排水板和高性能塑料排水板

Fig. 3 Traditional and high performance PVDs

对两种塑料排水板开展基本性能测试, 测试方法参照《土工合成材料测试规程》(SL235—2012)<sup>[7]</sup>, 测试结果如表2, 3所示。从表中可知, 相比于普通塑料排水板, 高性能排水板复合体抗拉强度高、伸长率大, 滤膜抗拉强度高, 等效孔径大。根据规程方法<sup>[7]</sup>测试得到高性能排水板和国标SPB-100型排水板的通水量分别为90.9 cm<sup>3</sup>/s和38.2 cm<sup>3</sup>/s。

### 2.3 真空预压板土单元体制备

真空预压是吹填淤泥的主要加固方式, 真空预压“板土单元体”是本文的主要研究对象。真空预压板土单元体(试样)的制备方法: 首先开展淤泥的真空预压模型试验, 试验结束后以排水板为中心, 取直径大于150 mm, 高度大于450 mm的土柱。为制备包裹排水板的“板土单元体”试样, 同时适应仪器尺寸并且便于试验安装, 用钢丝锯等工具将土柱整修成直径150 mm, 长度400 mm, 排水板长度450 mm(两端长

表2 SPB-100型塑料排水板基本性质指标

Table 2 Basic characteristics of SPB-100 PVD

复合体					滤膜					
单位长度质量 $(g \cdot m^{-1})$	厚度 /mm	宽度 /mm	复合体抗拉强度 /kN	复合体伸长率/%	单位面积质量 $(g \cdot m^{-2})$	厚度 /mm	纵向干态抗拉强度 $(N \cdot cm^{-1})$	横向湿态抗拉强度 $(N \cdot cm^{-1})$	渗透系数 $(cm \cdot s^{-1})$	等效孔径 /mm
88	4.0	98.5	2.94	9.4	78	0.37	31.2	22.5	$11.6 \times 10^{-3}$	<0.074
			延伸率 10%				伸长率 10%	伸长率 15%		$O_{98}$

表3 高性能塑料排水板基本性质指标

Table 3 Basic characteristics of high-performance PVD

复合体					滤膜					
单位长度质量 $(g \cdot m^{-1})$	厚度 /mm	宽度 /mm	复合体抗拉强度 /kN	复合体伸长率/%	单位面积质量 $(g \cdot m^{-2})$	厚度 /mm	纵向干态抗拉强度 $(N \cdot cm^{-1})$	横向湿态抗拉强度 $(N \cdot cm^{-1})$	渗透系数 $(cm \cdot s^{-1})$	等效孔径 /mm
117	4.4	102	4	30	126	0.39	63.2	60.1	$8.5 \times 10^{-3}$	0.1
			延伸率 10%				伸长率 10%	伸长率 15%		$O_{98}$

度比土柱大25 mm)的试样。取样和整修过程中操作均匀规范, 减小对试样的扰动。“板土单元体”中土体形成一定的应力水平, 限制了排水板变形, 因此取样后排水板弯曲曲率基本没有变化。“板土单元体”试样制备后安装在测试新仪器中, 然后开展通水量测试。



图4 真空预压模型试验示意图

Fig. 4 Illustration of vacuum preloading model tests

真空预压模型试验(如图4所示)共分为4组, 试验过程如下<sup>[6]</sup>: 首先在钢筒(直径730 mm、高度1200 mm)中充灌含水量75%的淤泥浆, 静置10 d后排出表面积水和浮泥, 铺设无纺布, 在浮泥表面均匀分布插设4根排水板, 再铺设约7 cm厚砂垫层。排水板下端至模型筒底板, 上端高出砂垫层约15 cm。砂垫层上铺一层无纺布后覆盖密封膜。砂垫层中埋设直径约2.5 cm的滤管, 与抽气管及抽真空系统连接。模型试验前取筒中淤泥测试其含水量, 4个模型筒中淤泥含水量接近。

吹填淤泥尚未完成自重固结, 如直接抽真空至设计值, 淤泥颗粒会在排水板周围形成“土柱”, 进而影响加固效果。为保证加固效果, 负压荷载分3级逐级增加(33, 60, 80 kPa), 由自动控制系统启闭电磁阀



来稳定负压荷载。真空预压模型试验中加载过程如图 5 所示。

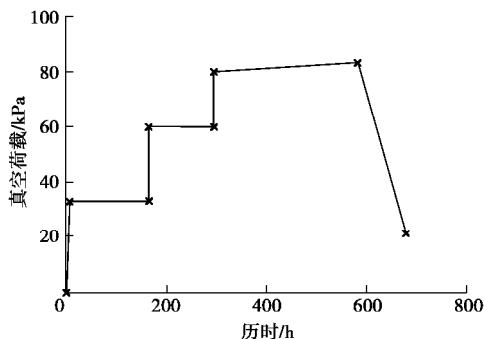


图 5 真空预压模型试验加载过程线

Fig. 5 Applied vacuum pressures during vacuum preloading model tests

控制模型筒 (#1~#4) 土体压缩变形(率)分别为 10%, 15%, 20% 和 25%, 当变形达到预定值时关闭抽气阀停止抽气。模型试验中淤泥沉降曲线如图 6 所示。

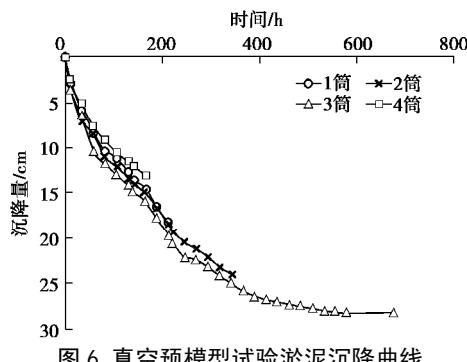


图 6 真空预压模型试验淤泥沉降曲线

Fig. 6 Settlement versus time in vacuum preloading model tests

各模型筒 (#1~#4) 中淤泥实际固结压缩量和压缩变形如表 4 所示。

表 4 真空预压模型试验中最终真空间度和压缩变形

Table 4 Final vacuum pressures and consolidation settlements in vacuum preloading model tests

模型筒编 号	最终真空间度 /kPa	淤泥固结 压缩量/mm	压缩变形率 /%
1	60	182	16.2
2	80	239	21.4
3	80	281	25.6
4	33	130	11.7

## 2.4 堆载预压板土单元体制备

堆载预压板土单元体(试样)制备方法为:首先开展淤泥堆载预压模型试验, 试验结束后以排水板为中心, 取直径大于 150 mm, 高度大于 450 mm 的土柱。用钢丝锯等工具, 将土柱修整成直径 150 mm, 长度

400 mm, 排水板长度 450 mm(两端长度比土柱长 25 mm)的板土单元体(试样)。最后将“板土单元体”试样安装在测试新仪器中, 开展通水量测试。

堆载预压模型试验在油桶中进行(直径 680 mm, 高 780 mm), 荷载通过杠杆式大型固结仪分级施加(如图 7 所示)。首先在筒中充灌含水量 75% 的泥浆, 充灌、静置方法与真空预压模型相同。在土体中均匀插设 4 根排水板(3 根高性能板和 1 根普通板), 再铺设约 10 cm 厚砂垫层。砂垫层上安装载荷板, 板上布置小口径通孔以利于排水。荷载分 5 级逐级(1.6, 22, 50, 80, 107 kPa)施加避免淤泥挤出。堆载预压模型试验中加载过程如图 8 所示。



图 7 堆载预压模型试验示意图

Fig. 7 Illustration of surcharge preloading model tests

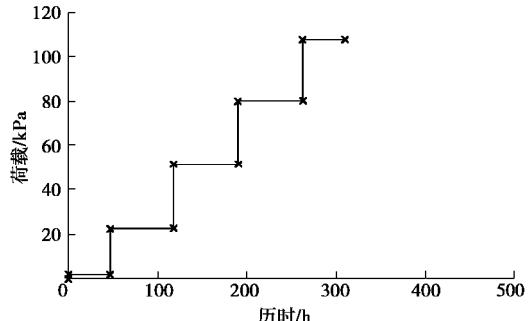


图 8 堆载预压模型加载过程线

Fig. 8 Applied pressures during surcharge preloading model tests

堆载预压模型试验中控制土体最终压缩率为 25%, 土体沉降曲线如图 9 所示。

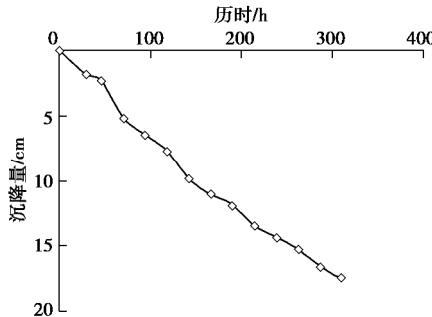


图 9 堆载预压模型试验淤泥沉降曲线

Fig. 9 Settlement versus time in surcharge preloading model tests

## 2.5 充灌淤泥板土单元体制备

充灌淤泥板土单元体制备方法为：将长度为450 mm的排水板试样一端插入压力室底座芯槽，用橡胶圈挤入排水板与芯槽之间的间隙并盖上盖板，使排水板与芯槽柔性密封。将乳胶膜下端固定在直径150 mm的底座上并用橡皮圈扎紧，在乳胶膜外安装定型筒（内径155 mm），将乳胶膜上端翻套在定型筒上口并将排水板套上保护套，防止充灌淤泥时过分污染排水板；向定型筒支撑的乳胶膜内充灌淤泥，充灌过程中随淤泥高度逐步提升排水板保护套直至完全拔出。淤泥充灌接近上口时安装加高筒，使淤泥面高出定型筒上口约20 mm；淤泥上加2 kg重物，静置18~20 h后移去加高筒，除去超高淤泥土，使土柱高度为400 mm，试样制备完成。

充灌淤泥板土单元体试样中包括3组高性能直板试样、1组普通直板试样、2组人为弯折高性能板试样。其中2组人为弯折高性能板均弯折5处，装样时控制板体弯折率。

## 3 通水量测定方法

采用真空预压、堆载预压板土单元体试样测试通水量时，首先将试样一端的排水板插入压力室底座芯槽，用橡胶圈挤入排水板与芯槽的间隙并盖上盖板，使排水板与芯槽柔性密封。修整试样，使土柱与底座接合良好。用承膜筒将乳胶膜套在试样上，下端与底座用乳胶橡皮圈扎紧密封；安装试样固定筒，将乳胶膜上端翻套在固定筒上口。

采用充灌淤泥方法制备的试样已直接固定在压力室内。在试样排水板上端套上引导套，安装上盖，排水板穿出上盖芯槽后拔出引导套，用橡胶圈加盖板将排水板与芯槽之间缝隙密封；乳胶膜上端与试样上盖用乳胶橡皮圈扎紧密封。

板土单元体（试样）安装后，连接底部排水板通水装置，连接进水管和进水端水头测量管路；安装压力室及上部通水装置，连接出水端水头测量管路。压力室进水，施加350 kPa侧压力，测量前根据排水板长度调整试验水头，使其满足水力梯度，预压60 min后开始测量。试验过程中间隔2~3 h记录一次通水量和时间，直至通水量测值满足6 h误差≤5%，最后测定值即为排水板通水量试验结果。排水板通水量<sup>[7]</sup>按下式计算：

$$Q = \frac{V}{ti} \quad , \quad (1)$$

式中， $Q$ 为通水量（ $\text{cm}^3/\text{s}$ ）， $V$ 为 $t$ 时段内通过排水板的水流量（ $\text{cm}^3$ ）， $t$ 为通过 $V$ 流量所经历的时间（s）， $i$ 为水力梯度，设定为0.5。

拆除试样时测量排水板通水段长度，计算对应 $i=0.5$ 时的水头，用不同水头所测得通水量关系，内插计算得到的通水量为该排水板通水量试验结果。

## 4 试验结果分析

### 4.1 真空预压后排水板通水量试验结果

真空预压制备试样通水量测试结果如表5所示。<sup>#1, #2, #3</sup>模型筒分别开展2组高性能板和1组普通板测试，<sup>#4</sup>模型筒中淤泥压缩率低，加固结束后淤泥土尚处于流塑状态，开挖取样和切削制样十分困难，只开展1组高性能板和1组普通板测试。

根据表5可知：弯曲率相近时，高性能排水板通水量远高于普通排水板。对于高性能排水板，板体弯曲率（7.0%~25.4%）对通水量结果影响较小（150.5~176.9  $\text{cm}^3/\text{s}$ ）。对于普通排水板，板体弯曲率对通水量有一定影响：当排水板弯曲率为4.3%时，其通水量为17.2  $\text{cm}^3/\text{s}$ ；当排水板弯曲率为24.5%时，其通水量降低至9.3  $\text{cm}^3/\text{s}$ 。真空预压后普通排水板的通水量结果（8.5~17.2  $\text{cm}^3/\text{s}$ ）远低于规程试验结果（38.2  $\text{cm}^3/\text{s}$ ，SL 235—2012）。

表5 真空预压后排水板通水量试验结果

Table 5 Discharge capacities of PVD by vacuum preloading model tests

筒编号	排水板	模型压缩率/%	排水板实际长度/cm	板弯曲率*/%	通水量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	高性能-1	16.2	43.4	7.8	155.2
1	高性能-2	16.2	43.0	7.0	176.9
1	普通	16.2	53.0	24.5	9.3
2	高性能-1	21.4	45.4	11.9	150.5
2	高性能-2	21.4	53.6	25.4	160.1
2	普通	21.4	47.0	14.9	8.5
3	高性能-1	25.6	45.5	12.1	153.1
3	高性能-2	25.6	53.5	25.2	164.2
3	普通	25.6	48.8	18.0	11.0
4	高性能-1	11.7	41.5	3.6	174.3
4	普通	11.7	41.8	4.3	17.2

注：板弯曲率是指排水板弯曲长度（实际长度-40 cm）与实际长度之比。

### 4.2 堆载预压后排水板通水量试验结果

堆载预压后排水板通水量测试结果如表6所示。试验共测试2根高性能板和1根普通板。

表6 堆载预压后排水板通水量试验结果

Table 6 Discharge capacities of PVD by surcharge preloading tests

排水板	模型压缩率/%	实际长度/cm	板弯曲率*/%	通水量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
高性能-1	25.9	44.0	9.1	156.7
高性能-2	25.9	50.3	20.5	146.7
普通	25.9	43.8	8.7	25.3

注：板弯曲率是指排水板弯曲长度（实际长度-40 cm）与实际长度之比。

根据表6可知，弯曲率接近时（8.7%~9.1%），

高性能排水板通水量 ( $156.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) 远高于普通排水板 ( $25.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ )。

#### 4.3 充灌淤泥后排水板通水量试验结果

充灌淤泥后排水板通水量测试结果如表 7 所示。高性能直板通水量为  $112.8\sim133.6 \text{ cm}^3/\text{s}$ ; 普通直板通水量为  $61.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 其值约为高性能直板通水量的 50%。人为弯折后, 高性能排水板通水量降低。

表 7 充灌淤泥后排水板通水量试验结果

Table 7 Discharge capacities of PVD by slurry filling tests

排水板	排水板状态	压缩率/%	通水量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
高性能-1	直板	—	120.0
高性能-2	直板	—	133.6
高性能-3	直板	—	112.8
普通-1	直板	—	61.7
高性能-4	人为弯折	15.3	110.4
高性能-5	人为弯折	24.9	92.8

#### 4.4 堆载预压、真空预压排水板通水量对比分析

对比表 5, 6 试验结果可知, 高性能排水板在两种加载方式(真空、堆载)作用下的通水量测试结果接近。普通排水板在真空预压后通水量明显低于堆载预压后通水量: 4 组真空预压后普通排水板通水量平均值为  $11.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 为堆载预压后普通排水板通水量 ( $25.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) 的 45% 左右, 其主要原因是两种荷载(堆载、真空)作用下淤泥颗粒的迁移形式不同。吹填淤泥颗粒间连接较弱, 真空负压作用下, 淤泥颗粒向排水板运移, 部分颗粒吸附在滤膜中, 部分颗粒积聚在排水板弯折处或芯槽中<sup>[10-11]</sup>; 而堆载作用下, 淤泥颗粒向排水板的迁移作用较小。因此堆载预压后普通排水板的通水能力比真空预压后排水板的通水能力大。

#### 4.5 堆载预压、充灌淤泥排水板通水量对比分析

表 8 汇总了堆载预压和充灌淤泥 2 种方法得到的排水板通水量试验结果。从表 8 可知, 排水板弯曲程度相近时, 堆载预压后高性能排水板通水量大于人为弯折排水板通水量, 其主要原因可能是: 高性能排水板芯板强度高不易弯折, 随土体固结发生变形后, 仍能保持弧形弯曲状态而维持较好的通水能力。而人为弯折排水板时可能会导致弯折处通水断面变小, 通水能力降低。堆载预压后普通排水板的通水量 ( $25.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) 低于充灌淤泥直板的通水量 ( $61.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), 排水板发生弯折后其通水能力大幅降低。

#### 4.6 现行规程与本文试验结果对比分析

现行规程<sup>[7]</sup>排水板通水量测试方法(见 2.2 节)没有考虑板体弯曲和板土相互作用, 其测试结果具有如下特征: ①对于普通排水板, 规程方法测试通水量 ( $38.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) 高于堆载预压和真空预压排水板通水量测试结果 ( $25.3, 11.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ ); ②对于高性能排水板, 规程方法测试通水量 ( $90.9 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) 低于堆载预压、真

空预压后排水板通水量 ( $146.7\sim176.9 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), 其主要原因是: 规程方法中排水板外套乳胶膜, 并施加 350 kPa 水压, 排水板的排水通道在水压作用下发生较大变形。而考虑板土相互作用的测试方法中, 高性能排水板包裹在土体中, 随土体固结发生弯曲变形, 土体侧向限制作用比水压限制作用小, 因此测试的通水量比规程测试值高。

表 8 堆载预压、充灌淤泥后排水板通水量试验结果

Fig. 8 Discharge capacities of PVD by surcharge preloading tests and slurry filling tests

试验类型	排水板	模型压缩率/%	实际长度/cm	板弯曲率/%	通水量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
堆载	高性能-1	25.9	44.0	9.1	156.7
堆载	高性能-2	25.9	50.3	20.5	146.7
堆载	普通	25.9	43.8	8.7	25.3
充灌淤泥	高性能-1	人为弯折	47.3	15.3	110.4
充灌淤泥	高性能-2	人为弯折	53.3	24.9	92.8
充灌淤泥	普通-1	—	40.0	直板	61.7

注: 板弯曲率是指排水板弯曲长度(实际长度-40 cm)与实际长度之比。

试验后对随土体固结变形的排水板形态进行了观察。高性能板在土体固结压缩时呈“S”型弯曲变形, 而普通板发生弯折变形。前者排水通道仍然顺畅, 通水能力与直板接近; 后者通水能力在弯折后明显降低。

根据试验结果, 真空预压后普通排水板通水量较低 ( $11.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), 而高性能排水板通水量为普通排水板通水量的 10 倍, 因此, 对于变形大且固结时间长的新近吹填淤泥地基加固工程应优先选用高性能排水板。

#### 4.7 排水板通水量影响因素

根据本文试验结果及分析, 排水板通水量与以下因素相关:

(1) 板土相互作用, 表现为排水板的变形形式(弯曲、弯折)、弯曲率、土体颗粒向排水板运移等。排水板随土体固结发生变形, 弯折变形比弯曲变形的通水量降低更明显; 弯曲率越大, 其通水量降低更明显; 土颗粒在真空负压作用下吸附到排水板滤膜, 积聚在排水板芯槽和弯折处, 使得竖向排水通道面积降低, 排水路径减少, 导致排水板通水量降低。

(2) 加载方式。在同样变形条件下, 普通排水板在真空预压后通水量明显低于堆载预压后通水量。

(3) 排水板种类。加固后高性能排水板通水量变化较小, 普通排水板通水量显著降低。

(4) 约束方式。考虑板土相互作用的排水板通水量测试结果与规程方法结果有较大差异, 原因是以上两种方法中排水板的约束方式不同。考虑板土相互作用的方法更接近实际工况。

## 5 结 论

为研究排水板在实际工况下的通水特性, 研制了

排水板通水量测试新仪器，分别采用室内真空预压模型试验、堆载预压模型试验和充灌等方法制备板土单元体（试样），开展排水板实际通水特性试验。综合本文工作，得到如下结论：

（1）研制了新型的排水板通水量测试仪器，可以满足长度 400 mm，直径 150 mm 板土单元体试样通水量测试。测试时既可以通过模型试验制作原状试样，也可以采用直接充灌淤泥的方法制样。该仪器可以考虑板土相互作用对其通水量的影响。

（2）板土单元体通水量试验结果表明：无论是采用真空预压法、堆载预压法还是直接充灌淤泥法时，高性能排水板通水量略大于常规方法试验结果，而普通排水板通水量远小于常规方法试验结果。其主要原因是：高性能板芯板强度高，随土体固结压缩时呈“S”型弯曲，其排水通道仍然顺畅，通水能力与直板接近；普通排水板芯板强度低，随土体固结压缩发生弯折变形，通水能力因弯折而明显降低。

（3）高性能排水板在真空预压后通水能力与堆载预压后通水能力接近；而普通排水板在真空预压后通水能力明显低于堆载预压后通水能力。因此，对于变形大且固结时间长的新吹填淤泥地基加固工程应优先选用高性能排水板。

## 参 考 文 献：

- [1] 赵维炳, 刘家豪, 高长胜, 等. 工程排水加固技术发展现状与展望[C]// 第六届全国工程排水与加固技术研讨会. 南京, 2005: 1 - 11. (ZHAO Wei-bin, LIU Jia-hao, GAO Chang-sheng, et al. Present situation and prospect of practice of drainage and reinforcement engineering[C]// Proceedings of the 6th Symposium on Drainage and Improvement Engineering. Nanjing, 2005: 1 - 11. (in Chinese))
- [2] 刘家豪. 塑料板排水法加固软土地基技术的发展[C]// 第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会. 广州, 1999: 1 - 7. (LIU Jia-hao. Development of drainage and improvement method on soft soil[C]// Proceedings of the 4th Symposium on Weak Ground Improvement Using Prefabricated Drains. Guangzhou, 1999: 1 - 7. (in Chinese))
- [3] 杨明昌. 塑料排水板 6 年检测资料的统计与分析[C]// 第七届塑料板排水法加固软基技术研讨会. 深圳, 2008: 167 - 171. (YANG Ming-chan. Statistics and analysis on detection data of prefabricated vertical drain of 6 year[C]// Proceedings of the 7th Symposium on Drainage and Improvement Engineering. Shenzhen, 2008: 167 - 171. (in Chinese))
- [4] 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, 35(9): 2529 - 2534. (LE Chao, XU Chao, WU Xue-feng, et al. Experimental research on clogging characteristics of two types of PVD filters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2529 - 2534. (in Chinese))
- [5] JTS 206—2009 水运工程塑料排水板应用技术规程[S]. 2009. (JTS 206—1—2009 Technical specification for application of plastic drainboard for port and waterway engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [6] 高长胜, 朱群峰. 高性能塑料排水板通水性能模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014: 1 - 42. (GAO Chang-sheng, ZHU Qun-feng. Model test on discharge capacity of high performance prefabricated vertical drain[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014: 1 - 42. (in Chinese))
- [7] SL 235—2012 土工合成材料测试规程[S]. 2012. (SL 235—2012 Specification for test and measurement of geosynthetics[S]. 2012. (in Chinese))
- [8] JEONG Y, LEE S. Flow capacity reduction of prefabricated vertical drain by kinking deformation[C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, 2007: 1315 - 1319.
- [9] 俞炯奇, 孙伯永. 长期在地下工作后的塑料排水板的性能研究[J]. 水利学报, 2007(增刊): 711 - 715. (YU Jiong-qi, SUN Bo-yong. The capacity of prefabricated strip drains after application in the soft soil foundation for a long time[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S0): 711 - 715. (in Chinese))
- [10] 闫澍旺, 孙立强, 李伟, 等. 真空加固超软土工艺的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 341 - 347. (YAN Shu-wang, SUN Li-qiang, LI Wei, et al. Model tests on vacuum preloading technology of super-soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 341 - 347. (in Chinese))
- [11] 孙立强, 闫澍旺, 李伟, 等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 984 - 990. (SUN Li-qiang, YAN Shu-wang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 984 - 990. (in Chinese))