

# 塑料排水板的等效直径

高长胜, 张 凌, 汪肇京, 魏汝龙

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 首先, 通过室内模型试验认为, 一字形塑料排水板在换算成等效直径的砂井时换算系数宜为 0.85 ~ 0.9。然后, 对等效直径的各种研究方法进行了讨论, 并给出了排水板等效直径的定义。

**关 键 词:** 等效直径; 换算系数; 塑料排水板

**中图分类号:** TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2002)04-0028-05

## Equivalent diameter of prefabricated drains

GAO Chang-sheng, ZHANG Lin, WANG Zhao-jing, WEI Ru-long

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Based on laboratory model tests, it is considered to be suitable to select a conversion coefficient 0.85 ~ 0.9 to convert the band shaped prefabricated drains into sand wells with an equivalent diameter. Some issues existing in the study on the equivalent diameter of prefabricated drains are analyzed, and a definition for the equivalent diameter of prefabricated drains is given.

**Key words:** equivalent diameter; conversion coefficient; prefabricated drains

在软土上建设工程, 地基必须经过处理才能满足要求. 塑料板排水法就是一个既经济又可靠的软土地基加固方法. 目前, 均按照砂井地基的设计理论进行排水板地基的设计. 设计时, 将排水板换算为等效直径的圆形砂井进行计算, 该等效圆形砂井的直径称为塑料排水板的等效直径. 可见, 等效直径是排水板地基设计中最基本的参数之一. 通常, 排水板等效直径  $d_w$  的换算式<sup>[1]</sup>为

$$d_w = \alpha(a + b)/2$$

其中:  $\alpha$  为排水板等效直径的换算系数;  $a, b$  分别为排水板的宽度和厚度.

由于排水板和砂井这两种排水井在材质和形状等方面存在差异, 加上渗流的空间性造成了它们在地基固结特性中的不同. 因此, 在进行排水板加固软土地基设计时, 合理地确定等效直径就至关重要. 对此, 国内外的众多学者进行过大量的研究, 所得到的换算系数  $\alpha$  也各不相同. Hansbo<sup>[1]</sup> 认为,  $\alpha = 1.0$ ; Fellenius 等<sup>[2]</sup> 通过现场试验, 得出  $\alpha = 1.5 \sim 3.0$  (在粘土中) 和  $\alpha = 2.5 \sim 4.0$  (在粉土中); 刘家豪等<sup>[3]</sup> 根据天津新港现场固结效果对比试验反算得到  $\alpha = 1.06$ ; 严驰等<sup>[4]</sup> 通过室内通水量对比试验, 得到  $\alpha = 3$ ; Jansen, Hoedt<sup>[2]</sup> 认为, 流入排水板的水明显比流入圆形砂井的小, 建议  $\alpha = \pi/4$ ; 《地基处理手册》<sup>[5]</sup> 建议, 排水板的打设深度在 10 m 左右时, 取  $\alpha = 0.75$ . 本文通过室内模型试验对排水板等效直径的换算系数取值及其研究方法进行了分析、讨论.

收稿日期: 2002-02-27

作者简介: 高长胜(1973-), 男, 安徽蚌埠人, 工程师, 硕士, 主要从事地基加固与基础工程的试验研究.

# 1 室内模型试验

## 1.1 试样制备

在经改装后的大型自动稳压压缩仪(试样桶的直径为50 cm,高为75 cm)上进行试验.试验的土料为苏州优质块状高岭土,晒干粉碎后过0.75 mm的筛,其主要物理力学性质、特性指标见表1.人工制备试验土样的具体方法是,加入土料液限3倍的水(即土料自重的140%),充分搅拌浸泡使其排气饱和,将浸泡好的土浆倒入内壁经处理后的压缩仪内,注意排出其间空气,全部土浆倒入试样筒后,静置24 h,并让水从底部阀门倒流,以排出可能掺有的空气,加上荷载板调整加荷设备进行分级加荷,每级的预压固结压力及预压时间为:荷载板加荷1 d、9 kPa加荷3 d和18 kPa加荷7 d.若使固结压力再增大,一方面需要更长的试验时间;另一方面使土样的含水量变得较小,强度变大,不利于模型试验.

表1 试验土料的物理力学性质指标

Tab.1 Physical and mechanical index of the test soils

液 限	塑 限	塑性指数	粒径组成(为总土质量的百分数)		
$W_L/(\%)$	$W_P/(\%)$	$I_P/(\%)$	$>0.05\text{ mm}/(\%)$	$0.05\sim0.005\text{ mm}/(\%)$	$<0.005\text{ mm}/(\%)$
47.1	27.4	19.7	4.5	37.5	58

试验采用了3种不同形状即一字形(YDM)、十字形(SDM)和圆形(ODM)排水板.一字形排水板尺寸为 $2.65\text{ mm}\times56\text{ mm}$ ,以该种尺寸的排水板为基础制作表面积相同的十字形排水板,圆形排水板由表面积相同的砂井代替,并用自制设备将它们插入到预压好的试验土样中心.在土样中的相同深度埋设微型孔隙压力仪.孔隙压力测点的平面布置见图1.

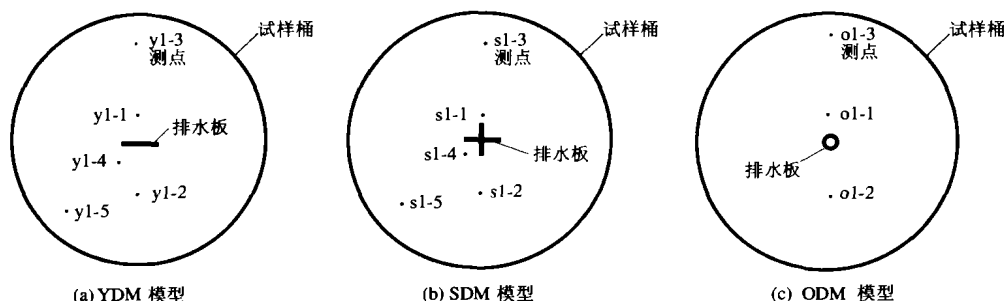


图1 试样中孔隙压力测点的平面布置示意图

Fig.1 Layout of the observation points for pore pressure

## 1.2 试验方法<sup>[6]</sup>

为减轻插排水板等对土样的影响,试验时先预压36 kPa荷载并使土样的沉降趋于稳定,然后再施加72 kPa荷载进行试验.由于3种不同形状排水井试验所用的土样是用相同土料制备,土样的直径与高度相同,且饱和度和应力应变历史也相同,故能确保模型试验具有较好的重复性.根据模型试验的实际情况,没有考虑井阻和涂抹作用的影响.模型试验中得到的沉降、孔隙压力消散及相应的固结度曲线见图2~图4.

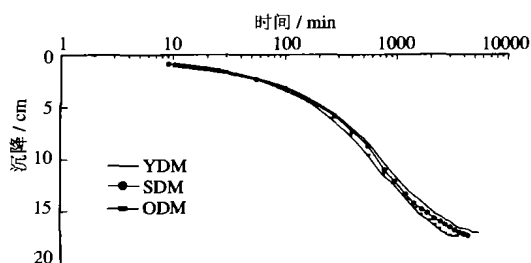


图2 试验沉降过程线  
Fig.2 Settlement curves in the tests

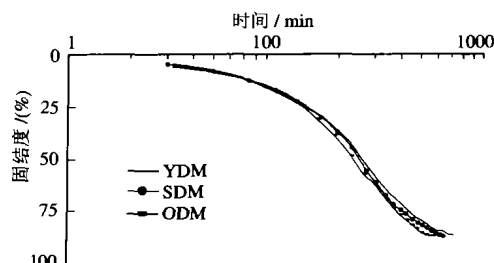


图3 试验固结度过程线  
Tab.3 Consolidation curves in the tests

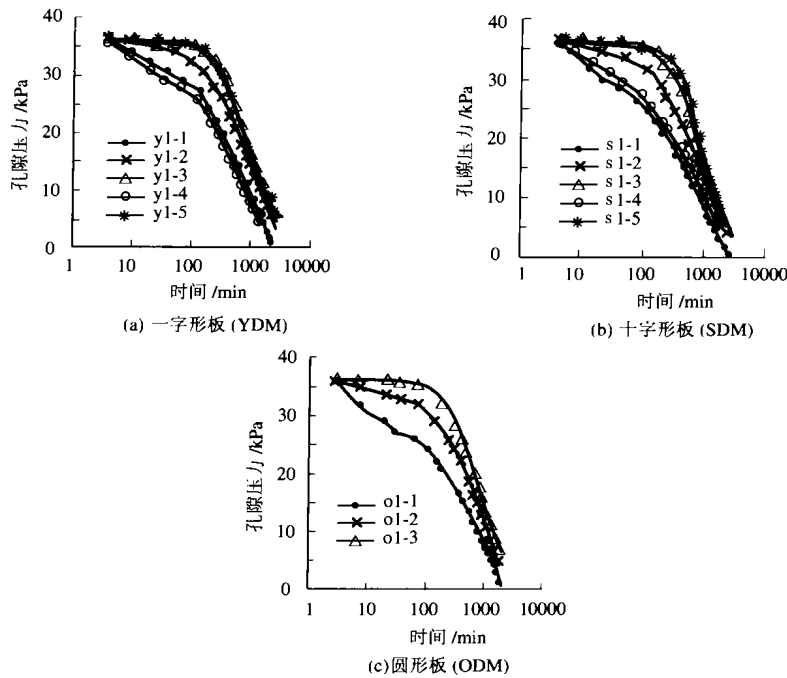


图 4 试验中各测点孔隙压力消散过程

Fig.4 Pore pressure curves in the tests

### 1.3 排水板等效直径计算<sup>[6]</sup>

模型试验中,塑料排水板地基的平均固结度 $\overline{U}_x$ ,是由竖向排水和径向排水共同作用引起的.首先,按一维固结理论计算竖向固结度 $\overline{U}_z$ ,然后,按 Carrillo 定理<sup>[7]</sup>计算径向固结度 $U_r$ ,进而由地基固结理论计算出换算系数 $\alpha$ .根据模型试验结果,计算得出的3种排水板的换算系数分别为0.88(一字形)、0.94(十字形)和1.0(圆形).

### 1.4 试验结果分析

(1)由沉降过程线可见,在排水板表面积相同的情况下,圆形排水板地基的固结沉降速率最快,十字形和一字形分列其后,说明排水板地基的固结效果不仅与排水板的表面积有关,还与排水板的形状有关.

(2)由孔隙压力消散过程可见,固结开始时,排水板地基的孔隙压力消散的梯度较大,随着固结度的提高,其消散梯度逐渐变缓,这与加压开始时排水板地基的沉降速率较快,其后沉降速率较慢是相一致的.

(3)孔隙压力消散过程表明,一字形排水板的孔隙压力测点距中心距离相同而位置不同时,其孔隙压力并不相等,但测点越远离中心,这种差异就越小.这说明完全沿用砂井固结理论分析排水板地基是不严密的.

(4)根据试验结果计算出一字形排水板的等效直径换算系数 $\alpha = 0.85 \sim 0.90$ 较为适宜.

## 2 有限元计算与工程实例分析

为验证模型试验结果的可靠性,在利用南水弹塑性模型<sup>[8]</sup>的基础上,应用 Biot 固结理论编制的有限元程序对圆形排水板(ODM)模型进行有限元计算<sup>[6]</sup>.在72 kPa 试验荷载作用下,ODM 模型的沉降、测点孔隙压力的有限元计算值和模型中实测的过程线分别见图5.可见,两者的规律基本一致.

为了验证由模型试验结果分析得到的排水板等效直径的合理性,选取某地基工程<sup>[9]</sup>的现场实测数据进行对比.在现场地基的同一土层中分别选取了双向渗透固结(竖向和径向)和仅有径向固结的监测结果<sup>[6]</sup>进行对比后表明,当地基双向渗透固结的固结度大于50%时,由 Carrillo 定理推求的径向固结度 $U_r$ 和仅有径向固结产生的固结度 $\overline{U}_r$ 基本相等.由于按模型试验结果计算排水板等效直径时,选取的固结度均大于60%,因此,计算是可靠的.

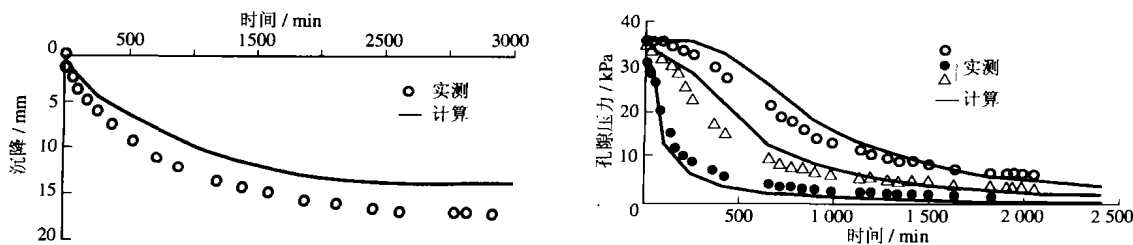


图5 ODM模型的沉降、孔隙压力有限元计算值和模型实测的过程线

Fig. 5 Calculated and measured curves of settlement and pore pressure in ODM model

### 3 等效直径研究方法

目前,研究排水板等效直径的方法主要有:①现场对比试验;②室内通水量对比试验;③室内模型试验;④有限元分析法。

现场对比试验是最直接的研究方法,它能较好地反映排水板在地基中的实际情况,但应注意排水井井阻和涂抹作用对试验结果的影响。其试验方法是选取土质条件相同的两个试验区,控制排水板和砂井的间距及打设深度,观测并计算两区域的固结情况。由径向固结度公式<sup>[6]</sup>

$$\bar{U}_r = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right)$$

其中:  $T_h = C_h t / d_e^2$ ,  $C_h$  为地基水平固结系数,  $t$  为地基固结时间,  $d_e$  为排水井的影响直径;  $F(n) = F_j + \pi G$ ,  $F_j = \left(\ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln s - \frac{3}{4}\right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{k_h}{k_s}\right) \left(1 - \frac{s^2}{4n^2}\right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2}\right)$ , 井阻因子  $G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2$ ; 井径比  $n = d_e / d_w$ ,  $d_w$  为排水井直径, 涂抹区影响范围比  $s = d_s / d_w$ ,  $d_s$  为排水井周围涂抹区直径,  $k_h$  为地基水平渗透系数,  $k_s$  为地基扰动区渗透系数,  $k_w$  为井料渗透系数,  $H$  为排水板打设深度。

可见,若被加固地基的软土厚度不大,且又能有效地减小施工扰动,这时的井阻和涂抹作用对地基固结的影响较小,得出的排水板等效直径就较为可靠;若软土厚度较大,且土的灵敏度又较高,井阻和涂抹作用就较大。由于排水板和砂井的通水性状及通水量不同,它们在地基中产生的井阻作用也不同。此外,打设砂井的导管尺寸比排水板的大,对土的扰动影响也较大,它们的涂抹作用也不同。在计算时,必须分别考虑它们的井阻和涂抹作用的影响。否则,对于某一特定的排水板在不同地基中做试验,就会得出不同的等效直径,这显然是不合理的。

在进行室内通水量对比试验时,由于排水板的通水量一般较砂井大,往往会得出换算系数  $\alpha > 1$  的结果。但室内通水量的测试结果仅反映排水井通水能力的大小,在工程应用中,应先考虑各种影响因素,计及一个折减系数  $F_s$ 。由于排水板和砂井的材质及形状不同,折减系数  $F_s$  也不同。若排水板的材质较差或过分弯曲,造成在地基中的通水能力过低、土体中的水排出不畅,表明地基的井阻较大,势必降低了地基的固结速率;反之,当排水板的通水能力高于某一值时,流入排水板内的水能顺利地排出,此时在地基固结中的井阻作用就可忽略不计,再继续加大通水能力也未必能提高土体的固结速率。通水量大,只能说明排水板和砂井在地基中的井阻作用不同,在井阻作用不同的前提下,研究排水板等效直径的大小显然是不合理的。

室内模型试验能有效地控制试验条件,以保证砂井地基和排水板地基处于相同的理想状态,若能合理地控制试验中有关的影响因素,其所得的结果应较为合理。

三维有限元法能全面考虑排水板形状的不同对渗流场和边界条件的影响,较好地反映水在地基中的渗透状况。但土体本构模型、施工扰动边界、扰动区内参数和井阻大小的确定等尚需进一步研究。若能合理地确定计算模型和土的计算参数,则能取得较为合理的研究结果。

以往研究工作中,对井阻和涂抹作用的影响考虑较少,以致出现了不同的研究结果,甚至出现在不同情况下同一排水板有多个不同等效直径的错误结果。因此,合理规范排水板等效直径的概念,对于准确、清晰地

确定排水板等效直径十分重要. 通过以上分析, 排水板等效直径应是在理想井条件下, 某规格的排水板在地基中的固结效果相当于在相同条件下多大的砂井直径. 等效直径仅取决于排水板的表面积和形状, 而与通水量的材质等无关, 形状和表面积相同的排水板, 其等效直径应是唯一的. 地基中的实际固结效果应按非理想井的固结理论, 根据被加固地基的有关情况确定井阻和涂抹作用的大小之后, 再做进一步计算.

#### 4 结 语

(1) 完全沿用砂井的固结理论分析排水板加固软土地基是不严密的.

(2) 室内模型试验表明, 对于表面积相同的排水井, 形状越接近圆形, 加固地基的固结效果越好. 一字形排水板在换算等效直径时的换算系数  $\alpha = 0.85 \sim 0.9$  较为适宜.

(3) 排水板等效直径是排水板本身的固有特性, 它仅与排水板表面积和断面形状有关, 对于相同形状和尺寸的排水板, 其等效直径相同, 且不应随板材和被加固土体性质的不同而变化.

(4) 排水板等效直径应是在理想井条件下, 某规格的排水板在地基中的固结效果相当于在同样条件下多大的砂井直径.

#### 参 考 文 献:

- [1] Hansbo S, Jamiolkowski M, Kok L. Consolidation of soil by vertical drains[J]. *Geotechnique*, 1981, 31(1): 45-66.
- [2] Holtz R D, Jamiolkowski M. Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance[M]. London: Plymouth Company Ltd, 1991. 9-56.
- [3] 刘家豪. 塑料板排水法加固软基技术的现状与展望[A]. 刘家豪. 第一届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1990. 14-28.
- [4] 严 弛, 陈 环. 对塑料排水板等效直径的分析[A]. 刘家豪. 第三届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1996. 136-142.
- [5] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 63-67.
- [6] 高长胜. 不同板形排水板地基模型试验与非理想井应用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 1998.
- [7] Carrillo N. Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils[J]. *J of Math and Phys*, 1942, 21(1): 1-5.
- [8] 沈珠江. 新弹塑模型在软土地基固结分析中的应用[J]. 水利水运科学研究, 1993, (1): 55-63.
- [9] 汪肇京, 魏汝龙, 林本义. 蛇口三突堤码头堆场预压试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990.