

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.010

# 联合竖向排水体真空预压处理软土模型试验研究

储诚富, 蔡沪荣, 宗文强

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章针对当前软土固结排水中所用塑料排水板(prefabricated vertical drain, PVD)存在的缺陷,综合考虑工业废料尾矿砂和农作物秸秆的合理利用,提出以排水板、尾矿砂和棉花秸秆为原材料制成联合竖向排水体(combined vertical drain, CVD);通过自行设计的室内模型试验,研究CVD和普通PVD真空预压处理软土的差异性。试验结果表明:相比于PVD,使用CVD处理软土时真空度衰减平均降低37.11%,孔隙水压力消散最大值提升27.56%,排水速率最大可提高1.5倍,表层沉降增加37.02%;相比于PVD,使用CVD处理后的软土平均含水率多降低6.65%,十字板剪切强度平均值提升8.34 kPa,不同位置土体的物理性质差异更小。试验研究证明,使用CVD处理软土是可行的,具有比PVD更好的排水固结效果。

**关键词:**联合竖向排水体(CVD);排水固结法;软土;室内模型试验;废物利用

**中图分类号:**TU471.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)10-1364-08

## Model test study on vacuum preloading treatment of soft soil with combined vertical drain

CHU Chengfu, CAI Hurong, ZONG Wenqiang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In this paper, the shortcomings of prefabricated vertical drain(PVD) used in the current consolidation and drainage of soft soil are addressed, and considering the reasonable utilization of industrial waste tailings sand and crop straw, a combined vertical drain(CVD) is proposed using drainage boards, tailings sand, and cotton straw as raw materials. The differences in vacuum preloading treatment of soft soil between CVD and conventional PVD were studied through self-designed indoor model tests. The results show that compared to PVD, the vacuum attenuation of soft soil treated with CVD decreases by an average of 37.11%, the maximum dissipation of pore water pressure increases by 27.56%, the drainage rate can increase by up to 1.5 times, and the surface settlement increases by 37.02%. Compared to PVD, the average moisture content of soft soil treated with CVD is reduced by 6.65%, the average value of vane shear strength increases by 8.34 kPa, and the physical properties of soil at different locations are less different. The study proves that using CVD to treat soft soil is feasible and has better drainage and consolidation effects than PVD.

**Key words:** combined vertical drain(CVD); drainage consolidation method; soft soil; indoor model test; waste utilization

真空预压排水固结法是常用的软土地基处理方式之一<sup>[1-4]</sup>。竖向排水体在真空预压中起提供竖向排水通道和真空度传递的作用,是配合排水

固结法发挥功效的关键部分。当前软土地基处理常用的竖向排水体是塑料排水板(prefabricated vertical drain, PVD)<sup>[5]</sup>, PVD虽然在真空预压前

收稿日期:2023-06-19;修回日期:2023-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42172307)

作者简介:储诚富(1975—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: chuchengfu@hfut.edu.cn.

期有较好的排水效果,但是在中后期的排水中存在以下问题:在真空预压过程中,部分细小土颗粒会随自由水一同运移至近 PVD 周围,堵塞排水通道<sup>[6]</sup>;部分土颗粒还会透过 PVD 的滤膜直接进入排水体内部,导致 PVD 淤堵<sup>[7]</sup>;PVD 会随土体沉降而发生弯折,使排水体的排水效率下降,真空度传递受损<sup>[8-9]</sup>。对于竖向排水体的改进,相关研究大多是围绕 PVD 进行工艺改进。文献[10]以新旧生产工艺下的排水板滤膜类型为变量,探讨防淤堵特性更好的滤膜制作工艺。文献[11]提出用一种生物可降解的纺黏非织造布作为 PVD 的滤膜;这种滤膜在排水固结工作结束后可快速降解,避免因竖向排水通道的长期存在而加剧次固结沉降<sup>[12]</sup>。文献[13]通过现场试验,对比整体式 PVD 与普通 PVD 加固效果,发现整体式 PVD 的优势并不明显。由于 PVD 极难氧化分解,长期存留于地基之中会造成白色污染<sup>[14-15]</sup>。

近年来,基于对环境保护的重视,研究人员开始使用可再生的秸秆资源替代塑料,用于制作竖向排水体。文献[16]将小麦秸秆制成毡后直接用于软土固结排水,室内试验证明了其设计的可行性。文献[17]以小麦秸秆为原料生产一种可降解排水板,这种排水板在施工结束后 1 年左右降解消失。秸秆资源在我国数量极其可观且合理利用率有待提高,扩充农作物秸秆资源化利用渠道,能为农民增收创收,助力可持续发展<sup>[18-21]</sup>。

另据统计,我国目前尾矿库堆存的各类尾矿超过  $230 \times 10^8$  t<sup>[22]</sup>。尾矿的堆放不仅消耗大量建设管理资金,占据大量土地面积,不合理安置还会成为诱发地质灾害的潜在威胁<sup>[23]</sup>。由于大部分尾矿砂的粒径是粉细砂级别<sup>[24-25]</sup>,将其直接用于制作竖向排水体时,渗透性无法满足要求,因而将尾矿砂用于软土固结排水的相关研究很少。

本文综合考虑工业废料尾矿砂和农作物秸秆的合理利用,提出一种联合竖向排水体(combined vertical drain, CVD),在优化竖向排水体设计,使其更高效、经济、环保和避免次生危害的同时,扩充秸秆和尾矿砂的合理利用渠道;通过室内模型试验,对比研究 PVD 与 CVD 在软土排水固结中的实际效果,探讨 CVD 用于软土排水固结处理的可行性与适用性,为 CVD 的工程实际应用提供理论支撑。

## 1 CVD 设计

CVD 的设计如图 1 所示。

1) 秸秆排水板。考虑到环保因素和次固结沉降危害,本文设计方案所使用的排水板为可降解秸秆排水板。相关研究证明,可降解秸秆排水板在综合排水性能上与 PVD 性能十分接近<sup>[26]</sup>。本文采用棉花秸秆,棉花秸秆本身具有一定程度透水性,将其粉碎成颗粒后制成竖向排水板。

2) 注砂层。由于秸秆过量使用会增加土的有机质含量,对土的工程性质不利,在尾矿砂中加入适量秸秆颗粒,在改善渗透性的同时能尽量减少土体有机质含量。在打设竖向排水板的同时,借助匹配设计的排水体插打设备,向排水板两侧同时注入秸秆颗粒和尾矿砂混合物——注砂层。注砂层与秸秆排水板搭配形成 CVD。

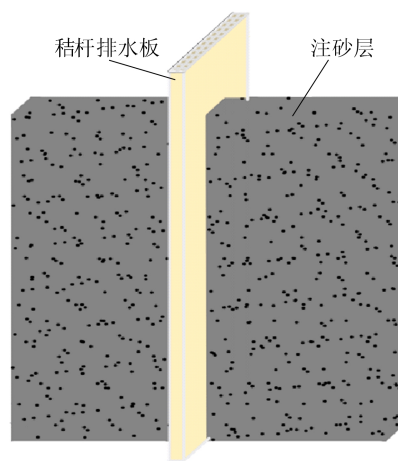


图 1 CVD 模拟图

## 2 室内试验研究

### 2.1 土样物理力学性能测试

试验软土取自安徽省合肥市肥东县南淝河某支流。将土样烘干后去除杂质并粉碎,再按照 60% 含水率配制试验用土样。土样基本物理力学性质如下:土体含水率 60%;液限 51.9%;塑限 24.1%;液性指数 1.3;塑性指数 27.8。

### 2.2 试验对象

2 种竖向排水体:① 5 cm 宽普通排水板(PVD);② CVD。CVD 中排水板宽度为 5 cm,单侧注砂层宽度和厚度分别为 5.0、1.5 cm,注砂层的秸秆掺加质量占混合物质量 10%,秸秆颗粒粒径在 5 mm 以下。在真空预压室内模型试验开始前,进行常水头渗透试验测试,试验用 CVD 中注砂层材料渗透系数为  $2.96 \times 10^{-4}$  m/s,与粗砂渗透系数接近。

### 2.3 室内模型试验装置及试验步骤

室内模型试验装置连接方式如图 2 所示,实物图片如图 3 所示。试验装置主要由模型箱、竖向排水体、水气分离瓶、真空泵、真空压力调节阀、密封膜和真空表等部分组成。

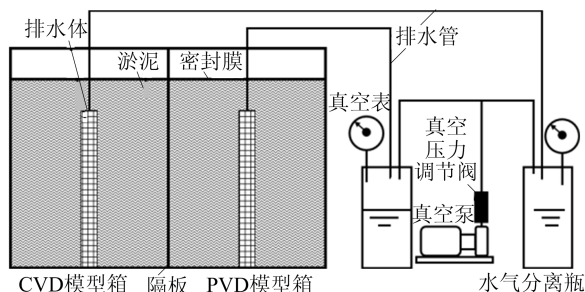


图 2 室内模型试验装置设计图

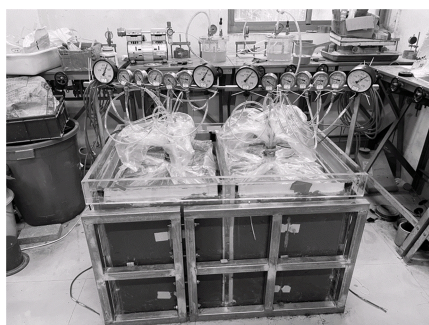


图 3 室内模型试验装置实物图片

将竖向排水体和各项检测设备在模型箱中安装并固定位置后,将试验软土倒入模型箱中静置 48 h;土样静置的同时,对试验土样进行密封处理。在真空预压开始前,先将试验软土表层析出的水排出,并检测装置密封性,确定装置密封性良好后,开始真空预压排水固结试验。

真空预压过程中,始终控制水气分离瓶内真空度保持在 82 kPa 左右,抽真空 20 d;真空预压过程中对试验模型同步进行真空度、排水量、孔隙水压力和表层沉降实时监测。

真空预压结束后对试验土体进行含水率测试和十字板剪切强度测试。

CVD 模型箱真空度探头、孔隙水压力计、含水率测点、十字板剪切强度测点布置情况如图 4 所示,表层沉降观测点平面布置如图 5 所示。PVD 模型箱中各监测项目测点布置与 CVD 模型箱一致。

真空度探头于排水体顶部、中部及底部各布置 1 个;在竖向距模型箱底部 25 cm,水平向与排水体距离 10、20 cm 位置(图 4 中  $K_1$ 、 $K_2$ )各布置

1 个孔隙水压力计;在竖向距模型箱底部 10、20、30、40 cm 高度处,在图 4 所示位置(以  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  表示)各布置 4 个含水率测点,共 16 个测点;在竖向距模型箱底部 10、40 cm 高度处,在图 4 所示位置(以  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  表示)各布置 4 个十字板剪切强度测点,共 8 个测点。

真空预压过程中,在模型箱土体表层,以 8 cm 间距纵横分布,布设 48 个表层沉降监测点,观测试验土体表层沉降随时间变化情况。图 5 中, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  为选取的 4 个代表性位置。

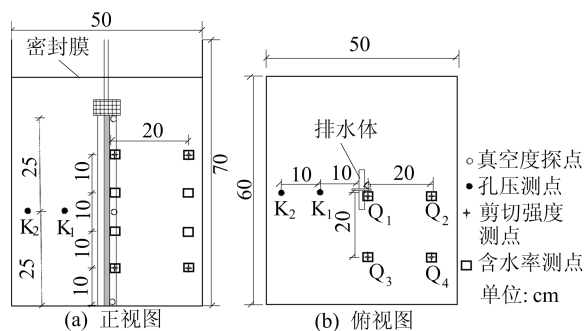


图 4 CVD 模型箱真空度、孔压、含水率、十字板剪切强度测点

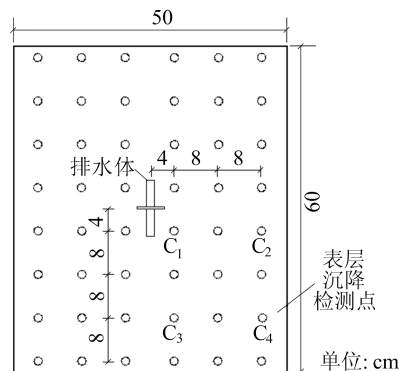


图 5 表层沉降监测点位平面布置示意图

## 3 试验结果分析

### 3.1 排水体真空度

PVD、CVD 水气分离瓶及排水体真空度随时间变化情况分别如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,真空度在由水气分离瓶传向竖向排水体顶部的过程中均有衰减,在竖向排水体内沿深度方向传播中也有不同程度的衰减。在试验开始阶段,CVD 和 PVD 中的真空度沿深度衰减的幅度不明显,但仍可发现 CVD 的真空度随深度衰减程度要小于 PVD。这是由于 CVD 比 PVD 多出注砂层结构,注砂层可协同排水板一同向模型箱深部传递真空压力,更多的真空度

传递路径意味着真空度在传递过程中的损失更少。在真空预压后期,同一排水体内不同位置的真空度差异更加显著。

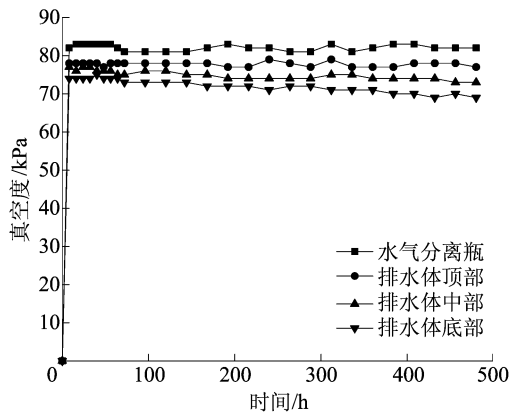


图 6 PVD 排水体真空度变化曲线

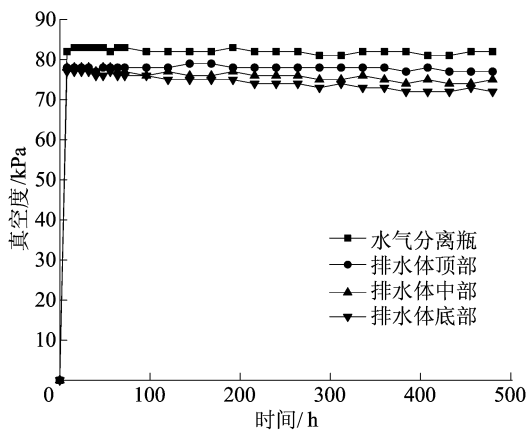


图 7 CVD 排水体真空度变化曲线

在真空预压过程中,由数据可计算出 CVD、PVD 的真空度衰减幅度分别为每 10 cm 1.39、2.21 kPa,使用 CVD 处理软土时真空度衰减比 PVD 降低 37.11%。由于 CVD 是注砂层与排水板组合的结构,拥有更多的孔隙通道,且真空预压过程中,相当一部分土体颗粒被注砂层阻挡,排水板淤堵程度轻于 PVD,因此 CVD 的真空度衰减弱于 PVD。

### 3.2 孔隙水压力

CVD、PVD 模型箱试验单元内  $K_1$ 、 $K_2$  处孔隙水压力随时间变化曲线如图 8 所示。由于试验土质渗透性较差,对真空度反应不够敏感,从图 8 可以看出:在真空预压初期,孔隙水压力消散并不明显;在真空预压中期,孔隙水压力消散得很快;后期孔隙水压力消散速率趋于平缓。同一模型箱内,距离竖向排水体越近的土体,孔隙水压力消散越快,并且孔隙水压力消散最大值也越大,这说明在真空预压过程中,土体的固结是由近排水体处

逐渐向远离排水体的方向扩展的。CVD 的孔隙水压力消散快于 PVD,且消散最大值也大于 PVD。CVD 中  $K_1$ 、 $K_2$  处最大值分别为 45.96、38.74 kPa,两者相差 7.22 kPa;而 PVD 中  $K_1$ 、 $K_2$  处最大值分别为 32.51、24.12 kPa,两者相差 8.39 kPa。相比于 PVD,CVD 在真空预压时软土孔隙水压力消散最大值提升 27.56%,这说明相比于 PVD,CVD 真空固结引起的土体有效应力变化更大,同时对土体影响范围更广。

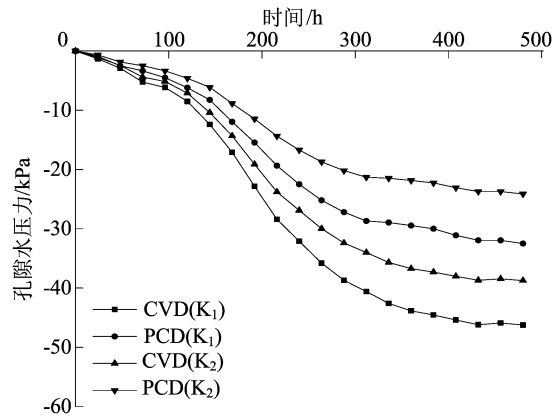


图 8 CVD、PVD 孔隙水压力随时间变化曲线

### 3.3 排水效果

对收集尾水的水气分离瓶称取质量,再减去水气分离瓶瓶身质量,得到 CVD、PVD 模型箱内实际排水量和排水速率随时间变化关系如图 9 所示。从图 9 可以看出:在真空预压期间,模型箱排水速率几乎呈下降趋势;在排水初期,模型箱的排水量和排水速率都很高,尤其在开泵后,排水速率处于顶峰;在排水后期,2 个模型箱内排水速率相比于排水初期的下降趋势更趋于平缓。对比 CVD 与 PVD 的排水速率可以发现,在真空预压期间,CVD 的排水速率在大部分时间内大于 PVD 的排水速率,最大时 CVD 的排水速率接近 PVD 的 1.5 倍。随着抽真空的进行,2 个模型箱排水速率差距不断减小,直至两者排水速率值均趋近于 0。

CVD 排出 27.76 kg 水仅需 168 h,而 PVD 在 480 h 内的排水总量仅为 26.85 kg。在经历 480 h 真空预压后,CVD 的排水总量为 38.75 kg,比 PVD 多 11.9 kg。对比 2 个模型箱的排水量数据可发现,CVD 的排水效果明显优于 PVD。相比于 PVD,CVD 与土体接触面积更大,形成更多排水路径的同时,缩短了排水距离,使得土体内更多的自由水能顺利排出。

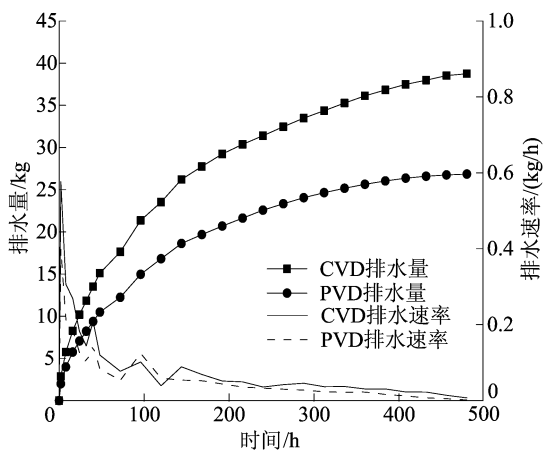


图 9 CVD、PVD 排水量与排水速率随时间变化曲线

### 3.4 表层沉降

统计 2 个模型箱中沉降监测点的最终沉降量,计算出 CVD、PVD 固结后土体最终平均沉降分别为 11.77、8.59 cm, CVD 固结后土体比 PVD 多沉降 37.02%。这是由于 CVD 与 PVD 相比,真空度传递效果更好,排水量更大,固结后土体变得更密实。CVD、PVD 模型箱中 4 个代表性位置处,土体表层沉降随时间变化情况分别如图 10、图 11 所示。

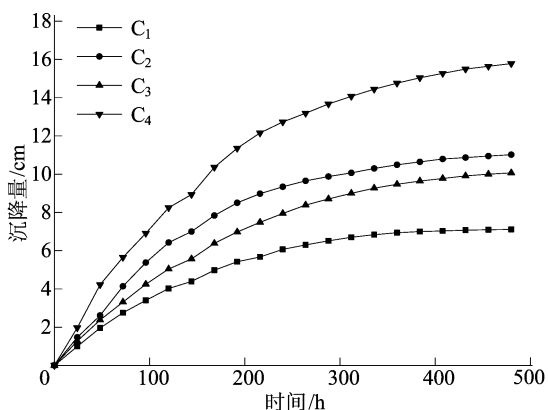


图 10 CVD 模型箱中 4 个位置处沉降随时间变化情况

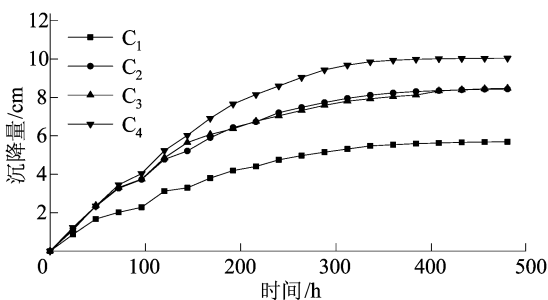


图 11 PVD 模型箱中 4 个位置处沉降随时间变化情况

由图 10、图 11 可知,在真空预压的前 240 h

内,各位置土体沉降变化较大,沉降量占整个真空预压期间沉降总值的 85%。对比同一模型箱内不同位置沉降数据可以发现,2 个模型箱内土体均呈现中心位置间沉降相对较小、边缘沉降相对较大的特点。

从图 10、图 11 可以看出:在 CVD 固结后土体中,  $C_2$  点与  $C_3$  点虽然与竖向排水体中心距离相同,但  $C_2$  点沉降量大于  $C_3$  点的沉降量;在 PVD 固结土体中,  $C_2$ 、 $C_3$  处的沉降量大致相同。推测造成 CVD 固结后土体中  $C_2$ 、 $C_3$  处沉降差异的原因是 CVD 中注砂层的存在导致的,真空压力在  $C_3$  的传递效果比  $C_2$  更好,更多的细小土颗粒随自由水运移至  $C_3$  附近聚集,导致  $C_3$  点沉降小于  $C_2$  点。而 PVD 固结土体时仅有排水板,真空压力在  $C_3$  和  $C_2$  径向位置的传递效果大致相同,因而  $C_3$  和  $C_2$  的沉降量也大致相同。

以竖向排水体中心点为轴心,可将土体表面看作中心对称图形,将监测所得沉降数据取平均值后,绘出 2 个模型箱土体最终沉降后的表面三维图形,如图 12、图 13 所示。

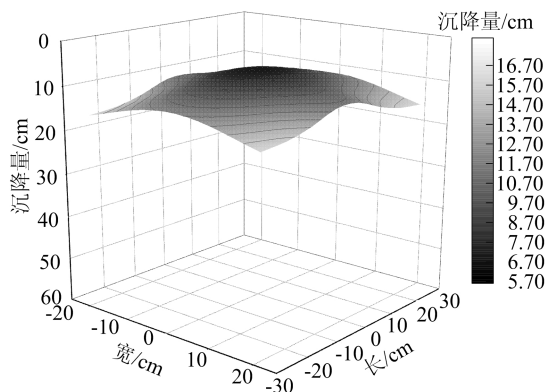


图 12 CVD 土体表层最终沉降情形

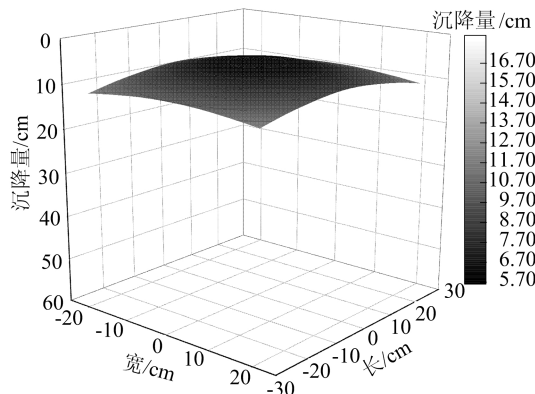


图 13 PVD 土体表层最终沉降情形

从图 12、图 13 可以看出,2 个模型箱沉降后

土层表面形状都近似于倒扣的漏斗状,CVD 固结后土体中心位置与模型箱边缘位置沉降差异比 PVD 固结后土体的更大。

### 3.5 土体含水率

2 个模型箱内土体不同位置含水率随深度变化曲线如图 14、图 15 所示。

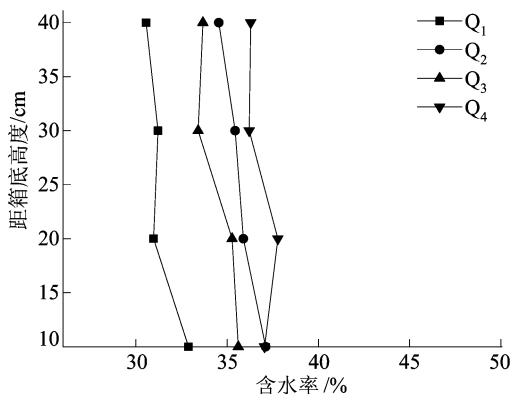


图 14 CVD 固结土体含水率沿深度变化曲线

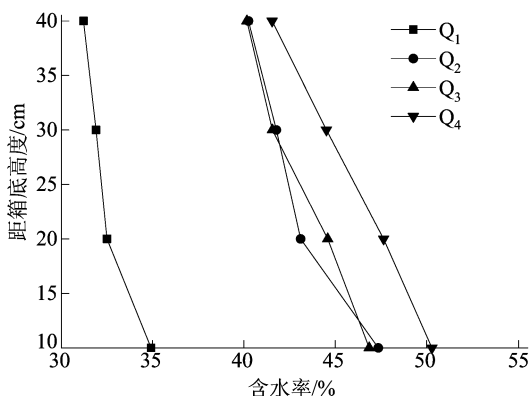


图 15 PVD 固结土体含水率沿深度变化曲线

试验前土体每个位置的初始含水率均在 60%左右,从图 14、图 15 可以看出,真空预压结束后,不同位置的土体含水率都有不同程度的降低,与排水体径向距离越近的土体,其含水率越低,这是由于距离排水体越近的土体,排水路径越短,真空度越高,排水固结效果越好。同一水平位置土体含水率均沿深度增加而增大;在相同水平位置和土体高度上,CVD 固结后土体的含水率大都低于 PVD 固结后土体的含水率;CVD 固结后土体各位置间含水率差异比 PVD 固结后土体的更小;PVD 固结后土体在近排水体的 Q<sub>1</sub> 位置有较低含水率,其他位置的含水率都比较高。随着测试位置与排水体距离的不断增大,CVD 固结后土体与 PVD 固结后土体的含水率差距逐渐增大。统计同一径向位置上不同高度土体含水率,

计算出平均含水率。在 Q<sub>1</sub> 位置上,CVD 固结后土体平均含水率比 PVD 固结后土体的多降低 9.17%。由此可见,不仅在同一影响范围内,CVD 比 PVD 有更好的排水固结效果,在与排水体径向距离更远的位置,CVD 降低土体含水率的能力比 PVD 更强。CVD 与 PVD 固结后土体的总平均含水率分别为 34.62%、41.27%,前者比后者多降低 6.65%。

### 3.6 十字板剪切强度

2 个模型箱内不同位置土体抗剪强度变化曲线如图 16 所示。由图 16 可知:同一径向距离上,排水固结后的土体抗剪强度随深度增加有明显的降低趋势;在同一水平高度上,与竖向排水体中心距离越远的土体,其抗剪强度也越低。对比 CVD 与 PVD 固结后土体在相同位置的剪切强度数据可以发现,每个位置上 CVD 固结后土体剪切强度都高于 PVD 的。与竖向排水体水平距离越远的土体,CVD 与 PVD 固结后土体的剪切强度差异越明显;距离模型箱底部越近的土体,CVD 与 PVD 固结后土体的剪切强度差异也越大。CVD 和 PVD 的十字板剪切强度平均值分别为 18.81、10.47 kPa,前者比后者高出 8.34 kPa。

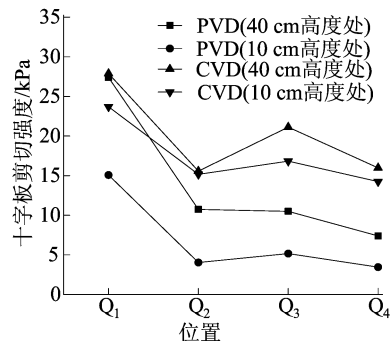


图 16 不同高度处十字板剪切强度变化曲线

### 3.7 颗粒分析

真空预压开始前,取少量配制好的试验土样,分析其在固结前的颗粒组成情况。真空预压结束后,分别在 2 个模型箱内 40 cm 高度处取样,取样具体部位为:CVD 固结土体在紧贴注砂层表面 1 cm 范围内取样;PVD 固结土体在紧贴排水板滤膜 1 cm 范围内取样。3 组试样的颗粒分析结果如图 17 所示。

在真空预压过程中,近排水体侧土体内排水通道是自由水在土体中运移路径最集中的区域,也是最容易形成淤堵的区域。近排水体处土体孔隙通道的减少,一方面源于土体自身压缩变形造

成的孔隙体积减小,另一方面原因是随自由水一同运移至此处的细小土颗粒的截留淤堵。由图 17可知,真空预压结束后,相比试验前的土体,CVD 和 PVD 固结后土体的细小土颗粒比例明显增大,这是在真空压力作用下,细小土颗粒向近排水体侧土体运移造成的结果。

对比 CVD 与 PVD 固结后土体的颗粒分析结果可以发现,PVD 固结后土体小粒径土颗粒占比较 CVD 固结的土体更高,如  $5\ \mu\text{m}$  以下的黏粒部分,CVD 固结后土体的占比为 35.16%,而 PVD 固结后土体达到 39.97%。CVD 与 PVD 固结后土体的取样位置都在距箱底 40 cm 高度处,该高度上近排水体侧的真空度在真空预压期间基本相等。排除该处真空度差异和抽真空时间带来的影响,造成 CVD 与 PVD 固结后土体的粒径分布差异的原因在于 CVD 有注砂层,注砂层中分布的孔隙通道比试验土体的更大。由于注砂层的存在,随自由水一同运移至排水体周围的细小土颗粒有一部分被储存于注砂层的孔隙通道内,有效延缓了近排水体侧土体孔隙通道的淤积堵塞,因而为自由水的排出争取更多时间。

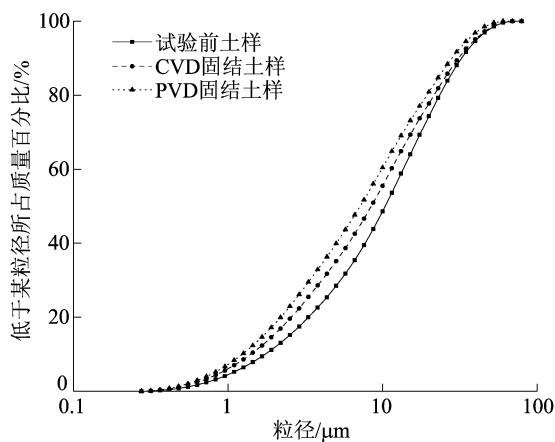


图 17 真空预压前后土体颗粒级配曲线

## 4 结 论

1) 真空预压全程,CVD、PVD 真空度衰减值分别为每 10 cm 1.39、2.21 kPa,CVD 真空度随深度衰减幅度小于 PVD,有更优良的真空度传递特性。在相同土体位置上,CVD 固结土体的孔隙水压力消散速率快于 PVD 固结的土体,孔隙水压力消散最大值也大于 PVD 固结的土体。

2) 试验初期 CVD 的排水速率接近 PVD 的 1.5 倍,随后两者差距逐渐减小,直至排水速率值

都趋近于 0;最终 CVD 排水总量达 38.75 kg,比 PVD 多 11.9 kg。CVD 固结土体中,注砂层周围土体的沉降相对模型箱边缘土体较小,CVD 固结后土体的不同位置沉降差异比 PVD 的更大。

3) CVD 固结土体的总平均含水率比 PVD 固结土体的多降低 6.65%,CVD 固结后软土十字板剪切强度平均值比 PVD 固结后的高出 8.34 kPa。

4) 2 个模型箱内排水体周围土体相比于试验前土体,小粒径土颗粒占比明显增大,但 CVD 固结土体的细小土颗粒占比低于 PVD 固结的土体。推测其原因是由于 CVD 中注砂层的存在,使得随自由水一同运移至排水体周围土体中的细小土颗粒可以被储存于注砂层的孔隙通道内,延缓了近排水体侧土体孔隙通道的淤堵。

5) 试验研究证明,使用 CVD 处理软土是可行的,具有比 PVD 更好的排水固结效果。

## [参 考 文 献]

- [1] 宋丁豹. 水平排水板真空预压法处理疏浚淤泥固结特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [2] ZHOU Y, CHEN S L, GUO W, et al. Recent developments in the vacuum preloading technique in China[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 13897.
- [3] 郭炳川. 真空预压加固新近吹填土新工艺及机理研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- [4] 邵玉. 真空预压法处理软土地基的加固研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [5] 饶俊勇,彭德刚,何利君. 堆载预压法在处理灰堤软土地基中的应用[J]. 电力勘测设计, 2018(5): 1-5.
- [6] 雷华阳,李宸元,刘景锦,等. 交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2112-2125.
- [7] 吕有畅,欧阳财禄,金锦强,等. 不同含水率吹填土 APAM-真空预压试验研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会议论文集:上册. [出版地不详:出版者不详], 2022: 333-336.
- [8] CAI Y Q, QIAO H H, WANG J, et al. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading[J]. Engineering Geology, 2017, 222: 10-19.
- [9] 应舒,陈平山. 真空预压法中塑料排水板弯曲对固结的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3633-3640.
- [10] 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.
- [11] 鲁伟涛,靳向煜. PBST 纺黏土工排水板滤膜的可降解性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 213-219, 243.

(下转第 1377 页)

- in THP-1 monocytes by retinoic acid[J]. *Immunology*, 2002, 106(1):53-59.
- [19] LIBBY P, BURING J E, BADIMON L, et al. Atherosclerosis[J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2019, 5(1):56.
- [20] FARABI L, SINHA S K, LUSIS A J. Roles of macrophages in atherogenesis[J]. *Front Pharmacol*, 2021, 12:785220.
- [21] REKHI U R, OMAR M, ALEXIOU M, et al. Endothelial cell CD36 reduces atherosclerosis and controls systemic metabolism[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8:768481.
- [22] YU M, JIANG M X, CHEN Y L, et al. Inhibition of macrophage CD36 expression and cellular oxidized low density lipoprotein (oxldl) accumulation by tamoxifen: a peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR)  $\gamma$ -dependent mechanism[J]. *J Biol Chem*, 2016, 291(33):16977-16989.
- [23] XU S, PELISEK J, JIN Z G. Atherosclerosis is an epigenetic disease[J]. *Trends Endocrinol Metab*, 2018, 29(11):739-742.
- [24] PRASHER D, GREENWAY S C, SINGH R B. The impact of epigenetics on cardiovascular disease[J]. *Biochem Cell Biol*, 2020, 98(1):12-22.
- [25] LV Y C, TANG Y Y, ZHANG P, et al. Histone methyltransferase enhancer of zeste homolog 2-mediated abca1 promoter DNA methylation contributes to the progression of atherosclerosis[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(6):e0157265.
- [26] LEE J, SONG J H, PARK J H, et al. Dnmt1/Tet2-mediated changes in Cmp methylation regulate the development of nonalcoholic fatty liver disease by controlling the Gbp2-Ppar $\gamma$ -CD36 axis[J]. *Exp Mol Med*, 2023, 55(1):143-157.

(责任编辑 闫杏丽)

## (上接第 1370 页)

- [12] LYDIE K. 塑料排水板处理软土地基次固结的数值分析[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- [13] 刘爱民, 梁爱华, 尹长权. 整体式塑料排水板与普通塑料排水板加固效果对比试验[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊1):130-133.
- [14] 李仲鑫. 秸秆排水体真空预压处理高含水率疏浚淤泥固结特性研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- [15] 王军, 蔡袁强, 符洪涛, 等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6):1257-1268.
- [16] 梁同好, 严正春, 刘超, 等. 新型排水体麦秸秆真空预压排水室内实验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊1):3432-3440.
- [17] 冯旭松, 翁佳兴, 宗珊, 等. 小麦秸秆在可降解排水板生产中的应用研究[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2018, 16(1):1-4.
- [18] WANG Y J, WANG Q, WANG N H. The role of rationality and altruism in rural households' acceptance of straw energy utilization: evidence from Northeast China[J]. *Energy Policy*, 2023, 177:113537.
- [19] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81:2695-2702.
- [20] 曹志宏, 黄艳丽, 郝晋珉. 中国作物秸秆资源利用潜力的多适宜性综合评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(1):179-186.
- [21] 石祖梁, 王飞, 王久臣, 等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(5):8-16.
- [22] 羊勇位. PVA-尾矿砂 ECC 性能研究[D]. 济南:山东大学, 2022.
- [23] 贺勇, 蒋文强, 陈科平, 等. 海因环氧树脂复合黏土-尾矿砂固化体强度特性及微观机制[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(11):3528-3540.
- [24] 梁志鹏, 孙畅, 毕万利, 等. 高硅型铁尾矿机械活化效果及机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(8):2810-2818.
- [25] 侯贺子, 李翠平, 王少勇, 等. 尾矿浓密中泥层沉降速度变化及颗粒沉降特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(6):1428-1436.
- [26] 李长辉, 武航, 程国勇, 等. 不同排水板真空预压软土加固对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(10):2819-2827.

(责任编辑 张淑艳)