

优化分级真空预压法处理吹填土试验研究

齐嘉炜¹, 魏海涛^{1*}, 何军杰², 赵文博¹

(1. 中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100086; 2. 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 通过室内模型试验对常规真空预压法、分级真空预压法和优化分级真空预压法的加固效果进行了对比研究, 通过对加固过程中土体沉降量、排水量和真空度等变化规律及加固前后土体的含水率、颗粒粒径分布曲线指标对比分析, 得到真空度传递规律, 并对不同真空负压预压机理进行分析, 指出优化分级真空预压法的处理效果优于其它两种工法, 且在第一阶段(-20 kPa)后直接施加较大的真空吸力(-80 kPa)不会导致排水板的进一步淤堵并且可以提高排水效率。

关键词: 优化分级真空预压; 模型试验; 颗粒运移; 含水率

中图分类号: TU449

文献标识码: A

Experimental Study on Dredger Fill with Optimized Graded Vacuum Preloading Method

QI Jiawei¹, WEI Haitao^{1*}, HE Junjie², ZHAO Wenbo¹

(1. AVIC Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100086, China;

2. Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Tibet, Linzhi, 860000, China;)

Abstract: A comparative study of the reinforcement effect of conventional vacuum preloading method, graded vacuum preloading method and optimized graded vacuum preloading method is carried out through indoor model test. Through the comparative analysis of the change law of soil settlement, drainage and vacuum degree during the reinforcement process, and the comparison of the soil moisture content and particle size distribution curve indicators before and after reinforcement, the vacuum degree transfer law is worked out and the mechanism of different vacuum negative pressure strengths are analyzed. The results show that the optimized vacuum preloading method is better than the other two, and directly applying a large vacuum suction force (-80 kPa) after the first stage (-20 kPa) will not cause further blockage of the drainage plate and can improve drainage efficiency.

Key words: optimized vacuum preloading; model experiment; particle movement; moisture content;

在围海造陆的过程中由于沿海地区缺少中粗砂等比较理想的吹填材料, 而且运输不便、费用较高, 沿海很多围海造陆工程不得不就地取材, 采用近海新近沉积的海底淤泥(粘性土)作为吹填料。淤泥具有高含水率、高压缩性、高孔隙比、低渗透性、低强度、不均匀等性质, 其固结时间长, 工后沉降大等问题对工程而言极其不利。目前吹填土地基多采用真空预压法加固, 但在处理过程中受到过大的真空吸力作用时, 土体中细颗粒随排出水向排水板方向迁移, 导致塑料排水板被大量细粒

吹填土中的粘粒包裹形成泥膜, 阻碍吹填土排水固结, 降低固结效率^[1-3], 造成了真空预压处理工艺在处理吹填土的加固过程中后期效果不明显以及处理后土体不均匀的问题。因此对于传统的真空预压方法进行改进, 以提高其固结效率和加固效果是非常必要的。

分级真空预压法是对传统真空预压的改进方法之一, 其利用不同真空度(-20、-40、-60、-80 kPa)令土体逐步固结, 用以改善传统真空预压法效率低、工期长、细颗粒容易堵塞排水板的问

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 西藏自治区科学技术厅青年项目(XZ202001ZR0025G)

作者简介: 齐嘉炜(1989-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 工程师, 从事岩土工程设计、施工工作。

* 通讯作者: 魏海涛(1983-), 男, 江苏泰州人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程设计、施工工作。

题。目前对分级真空预压法的研究中,多数是利用室内模型试验对于土体排水量、预压前后土体的基本物理性质进行对比和分析,较少从颗粒迁移和排水板淤堵等细观方面进行分析,本文重点从细颗粒迁移及其它物理性质方面分析各阶段不同真空度对土体固结的影响,试图对于分级真空预压法进行工法方面的改进和优化。

1 试验方案

1.1 试验内容

通过室内模型试验比较常规真空预压法和分级真空预压法在处理过程和效果等方面的区别,对分级真空预压法进行工法方面的改进和优化。具体试验方案如下:首先进行两组真空预压室内试验,常规真空预压法是在试验开始时就将抽真空强度设定在 -80 kPa 并保持不变;分级真空预压法是在试验开始时将真空强度设定为一个较小值(-20 kPa),在一定时间后逐步增加到 -40 、 -60 、 -80 kPa 。两组试验经历相同的处理时间后停止抽真空,通过对比两组试验的排水量和各层土样的沉降量、含水率等参数来分析两种方法的处理效果,并从机理上解释其原因。在此基础上根据试验结果对分级真空预压法在工法方面进行优化并进行优化分级预压法的试验:优化分级预压法在试验开始时将抽真空强度设定为和分级真空预压法相同的真空强度(-20 kPa),在一定时间后将抽真空强度直接增加到 -80 kPa 并保持不变,经历和以上两组试验相同时间后停止抽真空并根据试验的排水量和各层土样的沉降量、含水率等参数来分析优化分级预压法的处理效果^[4]。

1.2 试验用土

本试验所用土样为南京秦淮河畔淤泥质粘土,其基本物理性质指标见表 1,颗粒粒径分布曲线见图 1。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),判断此土料为高液限粘土。为了消除其他因素对试验结果的影响,需要保证模型土样的起始状态相近。土样取回后需要风干,随后碾压、过筛,按含水率 $w=95.0\%$ 配置土样,用搅拌机搅拌均匀,将土样放入模型筒中并静置 24 h。

表 1 试样基本物理性质表

Tab. 1 Table of basic physical properties of samples							
土 样	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	孔隙比
淤泥	95.0	1.41	2.56	59.7	30.8	29	3.533

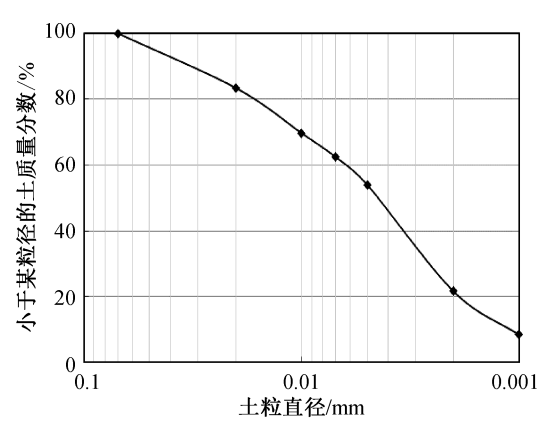
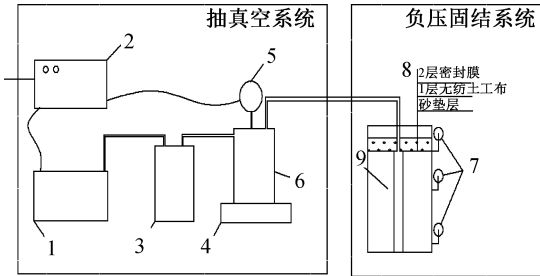


图 1 淤泥颗粒粒径分布曲线
Fig. 1 Distribution curve of silt particle size

1.3 试验装置

模型试验装置如图 2、图 3 所示,模型装置主要包括抽真空系统和负压固结系统两部分。



注:1-真空泵,2-控制电箱,3-水气分离装置,4-电子秤,5-电接点真空表,6-储水装置,7-真空表,8-密封层和砂垫层,9-排水板。

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device



图 3 试验装置实物照片

Fig. 3 Photo of test device

各部分装置介绍如下:

1.3.1 抽真空系统

组成部分有,真空泵:佐藤真空 ST-50 型真空泵,排气速率 50 L/min。控制电箱:控制电接点真空表。水气分离装置:防止在高真空度下汽化的水蒸气进入到真空泵中,影响真空泵的工作效率,

甚至有可能损坏真空泵。电子秤:最大量程 30 kg,最小精度 0.1 g。电接点真空表:用来控制抽真空强度,试验过程中设置抽真空强度为 -80 kPa。电接点真空表启动后,膜下真空度高于 -85 kPa 时控制电箱开关关闭,真空泵停止抽气;当低于 -75 kPa 时控制电箱开关开启,真空泵开始抽气,整个试验过程中使真空度保持在 $-75 \sim -85$ kPa 之间。储水装置:用来储存真空预压过程中排出的水。

1.3.2 负压固结模型

组成部分有,模型筒:模型容器材料为有机玻璃,其内径为 30 cm,外径 32 cm,高度 90 cm,壁厚为 1 cm。在模型筒内壁涂抹凡士林,用来减弱内壁摩阻力对试验结果的影响。真空表:在侧壁距离底部 0、25、50 cm 的位置设置 3 个真空表,在排水板底部设置 1 个真空表,用来监控抽真空过程中侧壁和排水板底部的真空度。沉降标:在模型筒侧壁内侧距离底部 30 cm 和 60 cm 的位置分别布置 2 个沉降标,用来观测抽真空过程中土体上部和下部的沉降量。排水板:排水板采用国产 B 型塑料排水板,长度为 62 cm,宽度为 5 cm,厚度为 0.4 cm。密封系统:由下到上由砂垫层、无纺土工布、密封膜组成。砂垫层以中粗砂为主,要求含泥量(粒径小于 0.075 mm 的颗粒)小于 5%,无纺土工布在抽真空过程中用来防止密封膜被排水板顶破。

1.4 试验过程

(1)按照图 2 将装置连接紧密,并检验密封性。

(2)将配置好的土样装入模型筒中,并静置 24 h。

(3)启动控制电箱,真空泵开始抽气,三组试验的区别如下:第一组始终保持真空负压在 $-75 \sim -85$ kPa 之间直到试验结束;第二组起始真空负压设定在 -20 kPa,在一定时间后逐步增加到 -40 、 -60 、 -80 kPa 直到试验结束;第三组起始真空负压设定在 -20 kPa,在排水速率低于 40 mL/h 后增加到 -80 kPa 直到试验结束。在试验过程中分别对排水量和模型筒内不同位置处的沉降量、真空负压值等数据进行监测记录,在试验结束后对真空预压后土样的含水率和颗粒粒径分布曲线进行测试。

2 试验结果分析

2.1 排水量和排水速率

在试验过程中利用储水装置储存模型筒内排出的水,并在不同的时间用电子称称量排出的水的质量,并计算相对应的排水速率。三组试验的

排水量和排水速率分别见图 4 和图 5。

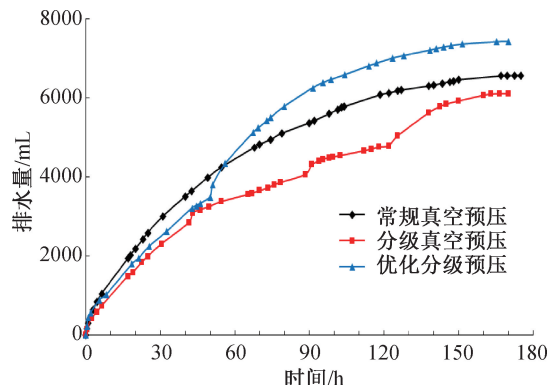


图 4 初始含水率 95.0% 的三组试验排水量对比

Fig. 4 Comparison of three groups of experimental displacement with initial moisture content of 95.0%

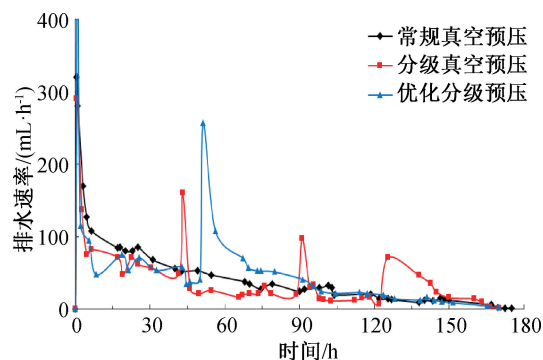


图 5 初始含水率 95.0% 的三组试验排水速率对比

Fig. 5 Comparison of three groups of experimental drainage rates with initial moisture content of 95.0%

从图 4 可以看出,最终排水量最大的是优化分级真空预压法,总排水量为 7 427 mL;常规真空预压法和分级真空预压法的排水量分别为 6 750 mL 和 6 110 mL。在图 5 中常规真空预压法在抽真空初期排水速率很快,10 h 之内排水速率均高于 100 mL/h。高含水率淤泥在静置 24 h 后土体发生初步固结,自由水在砂垫层和表层土体中较为集中,在抽真空初期,由于砂垫层和表层土体的含水率高于其他部位土体,因此排水速率很高,随着时间的增长排水速率逐渐降低,分析可知是由于靠近塑料排水板的土体固结完成,距离排水板远端的土体相对于排水板附近的土体排水路径增加,导致远端土体的排水速率降低。排水速率在 70 h 之后减少到 30 mL/h,120 h 之后降低到 15 mL/h,整个排水过程中排水速率基本是逐渐降低,在 170 h 之后不再排水,总排水量为 6 750 mL。

分级真空预压法前期排水速率较快,但在 5 h 之后就降到了 100 mL/h 以内,相比常规真空预压

排水速率减少得更快,这是因为初始真空吸力较低,在较低的真空吸力作用下排水的速率也会降低。在40 h之后排水速率低于40 mL/h,由于排水速率较低固将真空吸力调整为-40 kPa,可以观察到排水速率迅速增加,在图5中形成了第一个凸起,但在3 h内排水速率下降到与调整之前差不多的数值。随后在排水速率降低到稳定数值后(90 h和120 h)分别将真空吸力调整为-60 kPa和-80 kPa,可以观察到分级真空预压曲线的排水速率形成了第二个和第三个凸起。

优化分级预压法前期排水速率类似分级真空预压法,在50 h后排水速率降低到40 mL/h以下,固将真空吸力调整为-80 kPa,可以看出优化分级预压法的曲线有一个很高的凸起,随后排水速率下降,但下降的速率低于常规分级预压和分级真空预压,排水后期排水速率虽然还在缓慢下降,但维持在小于40 mL/h的范围内,且优化分级预压法稳定后的排水速率大于其余两种方法。

2.2 含水率

真空预压法处理后土体的含水率可以直观地体现真空预压的处理效果。采用《土工试验规程》(SL237—1999)中的含水率试验(SL237-003—1999)对三组试验中的土体进行含水率测试。为了更好地研究土体中不同位置的处理效果,在测量含水率取样时以排水板为中心,分别取距离表面不同深度和距离排水板不同距离的试样若干,取样位置见图6,距离表面的深度分别为20、40、60 cm,在同一层中距离排水板分别为0、5、10、15 cm四个位置取样测含水率。

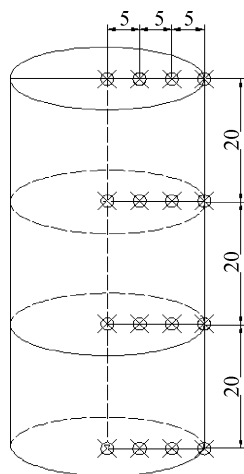


图6 含水率取样位置图(单位:cm)

Fig. 6 Water content sampling location map (unit: cm)

图7为表面土体含水率随距排水板距离变化

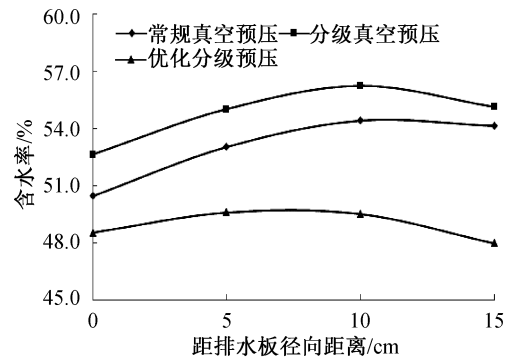


图7 试样表面土体含水率随距排水板距离变化曲线

Fig. 7 Variation curve of soil moisture content on sample surface with distance from drainage board

曲线。从图中可以看出:经过处理后优化分级预压法的含水率最低,为48.5%~49.6%;分级真空预压法的含水率为50.5%~54.4%,常规真空预压法的含水率最高,为52.6%~56.2%。含水率随距排水板距离逐渐升高,但在筒壁处含水率有所下降,三种方法处理后表面土体含水率都较为均匀,含水率差值均在5%以内,其中优化分级预压法含水率差值最小(1.1%),处理效果最为均匀。但在离排水板15 cm处的土体含水率低于离排水板5 cm和10 cm,这是由于表层土体的排水边界为砂垫层和塑料排水板,因此水分会直接从砂垫层排出,导致边界的含水率低于中间土样的含水率。

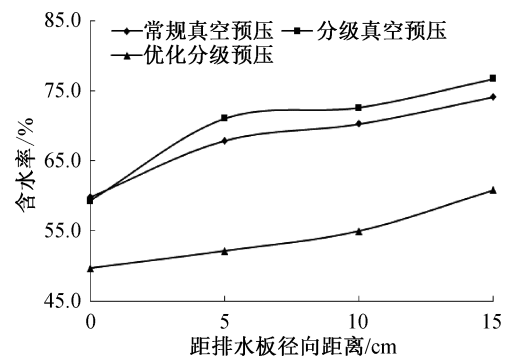


图8 距表面20 cm土体含水率随距排水板距离变化曲线

Fig. 8 Variation curve of soil moisture content with distance from drainage board 20 cm from surface

图8为距表面20 cm土体含水率随距排水板距离变化曲线,从图中可以看出:优化分级预压法的含水率最低,为49.7%~60.8%;分级真空预压法和常规真空预压法的含水率分别为59.3%~76.7%和59.8%~74.1%。含水率随距排水板距离逐渐升高,与表层土体相比,常规真空预压法和分级真空预压法经过处理后土体含水率不均匀,差值都大于15%。优化分级预压法均匀性较好,

含水率差值为 11.1%。

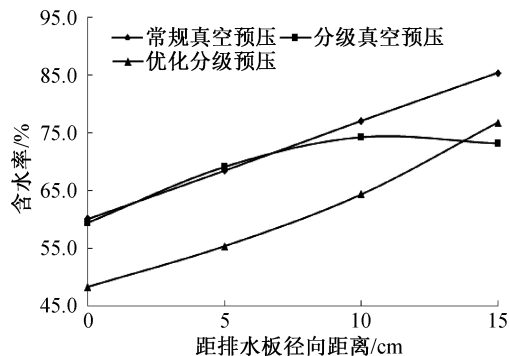


图 9 距表面 40 cm 土体含水率随距排水板距离变化曲线

Fig. 9 Variation curve of soil moisture content with distance from drainage board 40 cm from surface

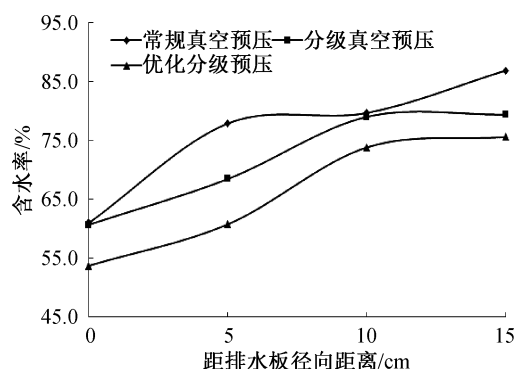


图 10 距表面 60 cm 土体含水率随距排水板距离变化曲线

Fig. 10 Variation curve of soil moisture content with distance from drainage board 60 cm from surface

图 9 为距表面 40 cm 土体含水率随距排水板距离变化曲线,从图中可以看出与图 8 相同的规律,优化分级预压法的含水率最低,为 46.4%~76.8%;分级真空预压法和常规真空预压法的含水率分别为 59.4%~74.2%和 60.2%~85.4%。含水率随距排水板距离逐渐升高,与表层土体相比,三种方法处理后土体含水率都不均匀,差值均大于 15%。

图 10 为距表面 60 cm 土体含水率随距排水板距离变化曲线。从图中可以看出:优化分级预压法的含水率依旧最低,为 53.7%~75.7%;分级真空预压法和常规真空预压法的含水率分别为 60.7%~79.4%和 61.1%~86.9%。

由图 7—图 10 可总结出如下规律:距离排水板距离越近含水率越低,即处理效果越好,远离排水板位置的含水率较高。对比不同深度土体的含水率,发现表层土体处理效果明显好于下部其它深度土体。这说明在真空预压过程中,排水边界是非常重要的,靠近排水板位置排水路径短,因而排出水量多,远离排水板位置排水路径长,排水损

失的能量多,排水效果不如靠近排水板位置的土体;同理表层土体上方是砂垫层,排水路径短,因此处理后含水率相对下层其它土体要低很多。

优化分级预压法各处土体的含水率要明显低于其他两种预压方法。可以看出在同一位置优化真空预压法的含水率要显著低于其他两种方法,而分级真空预压法则要略微低于常规真空预压法。优化分级预压法对靠近排水板的土体(距离排水板 5 cm 之内)的处理效果要好于其它两种预压方法。优化分级预压法在距离排水板 5 cm 之内最高含水率为 60.8%,其它两种方法的含水率则要超过 70%。

2.3 真空负压

在试验过程中利用电接点真空表监测砂垫层的真空负压值,在排水板底部设置一个真空表,在模型筒侧壁不同高度(距模型筒底部 0、25、50 cm)分别设置 3 个真空表,用来监测排水板底部和侧壁不同位置的真空负压值,监测结果见图 11—图 13。

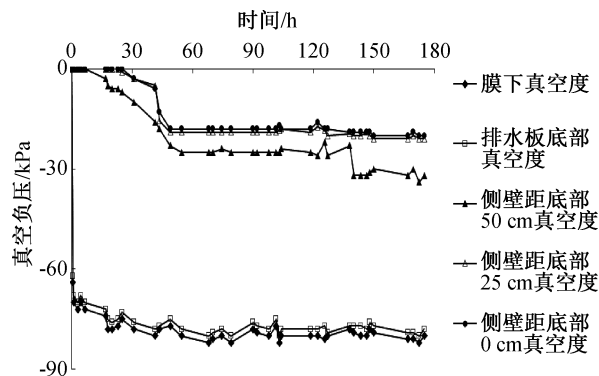


图 11 常规真空预压法真空负压随时间变化图

Fig. 11 Variation of vacuum negative pressure with time in normal vacuum preloading method

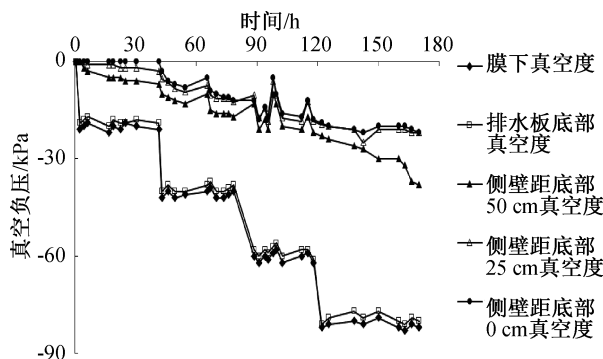


图 12 分级真空预压法真空负压随时间变化图

Fig. 12 Variation of vacuum negative pressure with time in graded vacuum preloading method

从图 11—图 13 中可以看出,在开始抽真空

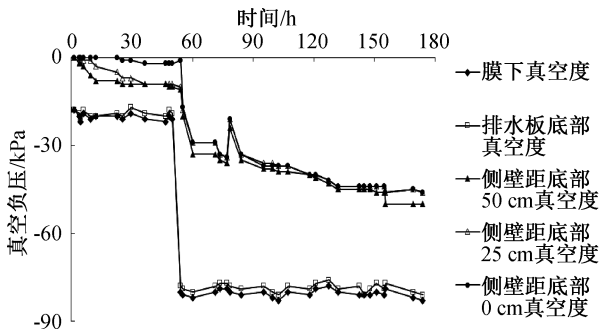


图 13 优化分级预压法真空负压随时间变化图

Fig. 13 Variation of vacuum negative pressure with time in optimized vacuum preloading method

后砂垫层和排水板底部的真空负压值均迅速增加,在1 h左右的时间达到设计负压值。排水板底部的真空负压值略小于砂垫层,这说明真空度在从砂垫层向排水板传递过程中存在一定损失,这一现象在很多工程实践中也能得到证实。真空度在排水板中的衰减与排水板型号、排水板周围土质等因素存在密切关系。在三组试验使用的土体相同的前提下,预设不同的真空负压并没有对排水板中的真空度损失造成影响,可以计算得到真空度在排水板中的损失为2~3 kPa/m。由此可以推测,假设排水板打设深度为15 m时,真空度沿排水板会衰减30~45 kPa。同时通过图11—图13看出真空度在排水板中的传递基本不存在延迟^[5-6]。

值得注意的是在图11(常规真空预压法)中侧壁的三个真空表在数值分别达到25、20、20之后基本不再变化,图12(分级真空预压法)和图13(优化分级预压法)中真空度则是整体缓慢上升最后稳定。由于影响真空度传递的因素有很多,研究表明主要是排水体的通气能力,反映在土体中则是渗透系数。三组试验用了相同的土体,但真空度的变化却不同,这表明真空负压值的改变(-20、-40、-60、-80 kPa)对于真空度的传递是有影响的。常规真空预压法使用了恒定的-80 kPa真空负压值,真空度在土体中传递时克服了各种阻力形成了稳定的真空通道,但在传递过程中由于真空负压过大,导致土体中的细小颗粒随着流动的气体和水向排水板迁移。导致排水板周围土体的渗透系数降低,从而使真空度传递需要更高的能量,因此真空度上升的很慢。分级真空预压法在抽真空开始时使用了较小的真空负压值使土体中的细小颗粒固结从而形成稳定的真空通道,但在后期改变真空负压时,改变的真空负压值不够大

(-40、-60 kPa)造成真空度传递上升值较缓慢。优化的分级预压法结合了前两者的长处,利用较小的真空负压值使土体中的细小颗粒固结,随后施加了较大的真空负压值(-80 kPa)使气流和水有足够的能量在真空通道中传递,也导致真空度增长变快。

2.4 各层沉降

试验开始前填土高度为70 cm,为了监测试验过程中土体的沉降规律,在土体表层和距表层35 cm(土体高度的一半)试验模型筒侧壁的不同位置分别设置沉降标,在试验后计算同一层三个沉降标的平均值,从而得出土体的最终平均沉降值。三种不同真空预压法的最终沉降量和各分层沉降量对比见图14。

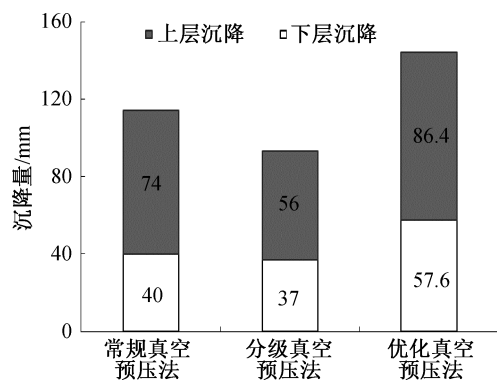


图 14 各真空预压方法沉降量对比

Fig. 14 Comparison of settlement of different vacuum preloading methods

从总沉降量来分析,常规真空预压法、分级真空预压法和优化分级预压法的最终沉降量分别为114、93、144 mm;优化真空预压法的总沉降量比常规真空预压法大26.3%,分级真空预压法由于中期真空负压过低导致排水速率提高不明显,影响了中后期土体固结效率,最终沉降量比常规真空预压法小了18.4%。

从分层沉降量来分析,常规真空预压法、分级真空预压法和优化分级预压法的上层沉降量分别为74、56、86 mm,下层沉降量分别为40、37、58 mm;无论何种方法上层土体都是主要的加固土层,三种方法上层土体压缩量分别占总沉降量的64.9%、60.2%、60.0%,下层沉降量分别占总沉降量的35.0%、39.8%、40.0%。采用分级真空预压法之后下层土体沉降值所占的比例大于常规真空预压法,说明分级真空预压法的各层沉降量与常规真空预压法相比较为均匀。

2.5 颗粒粒径分布曲线

本次试验的颗粒粒径分布曲线采用激光粒度分析仪测定。颗粒分析试验结果见图 15—图 17, 图中不同位置的试样由字母和数字的编号组成, “h”代表距表面的距离, “r”代表距排水板的距离, 如“h20r5”代表距表面 20 cm、距排水板 5 cm 位置处的取样点。

图 15 为常规真空预压法距表面不同深度处的颗粒分布曲线。从图 15(a)可以看出在表面土中, 各个位置的颗粒分布曲线在距排水板不同距离处粒组含量差别较大, 其中距排水板 0 cm 和 5 cm 的土体颗粒分布曲线在图 15(a)中明显高于距排水板 10 cm 和 15 cm 的曲线, 这说明靠近排水板的土体细颗粒含量高于远离排水板的土体, 总体的规律是越靠近排水板土体的细颗粒含量越高; 图 15(b)、(c)中也显示了相同的规律, 但不如图 15(a)中明显; 图 15(d)中距排水板的不同距离处土体颗粒粒径分布曲线基本相同。在试验前土样经过搅拌后初始状态应是均匀一致的, 但在试验后土样颗粒分布曲线在横向和竖向却显示出不同的分布规律, 这说明在抽真空作用过程中细颗粒随着水土混合流体向排水板方向发生了运移。

图 16 为分级真空预压距表层土体不同距离的颗粒分布曲线。图 16(a)、(b)的颗粒分布曲线略微有些差异, 而图 16(c)、(d)的曲线则基本相同。对比图 16(a)、(b)可以发现, 分级真空预压法明显限制了细小颗粒的运移, 在抽真空过程中真空负压会导致细颗粒向排水板周围运移, 由于真空负压强度和渗流力呈现正相关性, 所以排水板中的真空负压强度越大, 细颗粒向排水板周围移动的数量越多。在真空预压初期, 较大的空隙比在较强的渗流力作用下形成了所谓的“土桩”^[7], 严重影响真空预压中后期土体的加固效率。如果在真空预压初期使用较低的真空负压强度, 使径向渗流力减小, 土颗粒发生径向移动的趋势相对减弱, 从而对排水板周围土体孔隙比和渗透性的影响都较小, 减轻排水板滤膜和周围土体的淤堵情况。因此在真空预压初期使用较低的真空负压强度是合理且有意义的。

图 17 为优化预压距表层土体不同距离的颗粒分布曲线。可以看出优化分级预压法的颗粒分布曲线和分级真空预压法的曲线是类似的, 这说明优化分级预压在一定程度上也限制了土体细颗粒的运移。与分级真空预压不同的是, 优化分级预

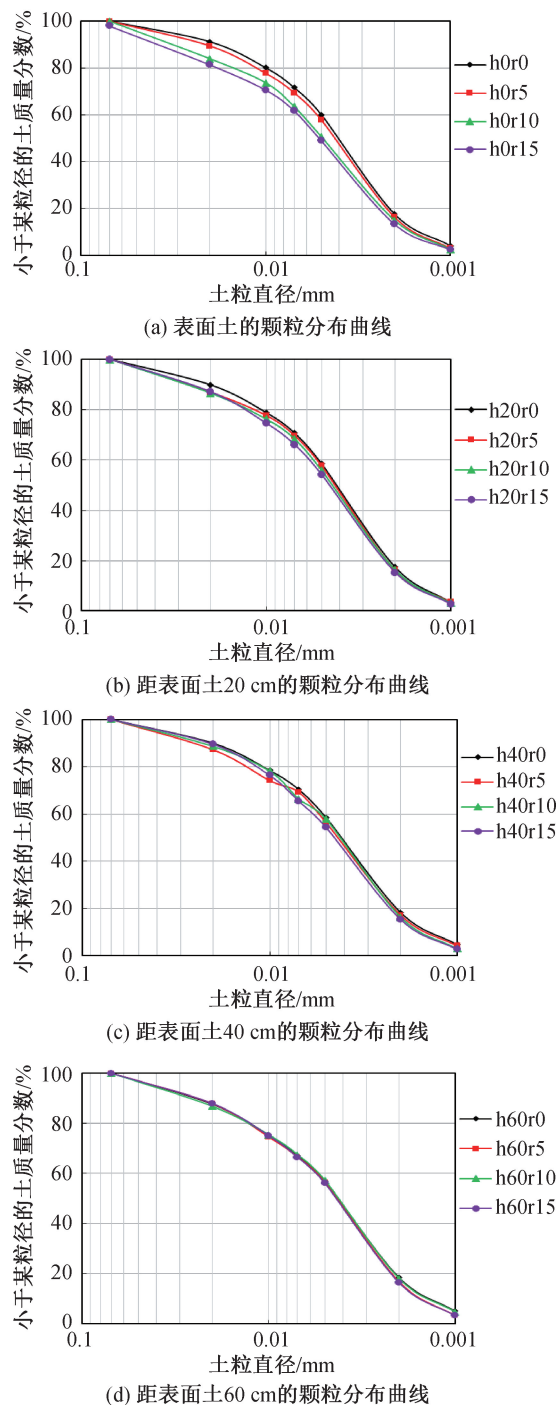


图 15 常规真空预压法距表面不同深度的颗粒分布曲线
Fig. 15 Particle distribution curves at different depths from the surface by normal vacuum preloading method

压在施加 -20 kPa 的真空负压后, 直接施加了 -80 kPa 的真空负压, 而分级真空预压则是逐步施加 -40、-60、-80 kPa 的真空负压。两种方法在颗粒分布曲线中并没有明显的差异, 这说明细颗粒在前期较小的真空负压 (-20 kPa) 作用下初步固结后, 施加大的真空负压 (-80 kPa) 并不会造成细颗粒的二次迁移。根据龚晓楠的真空渗流场理

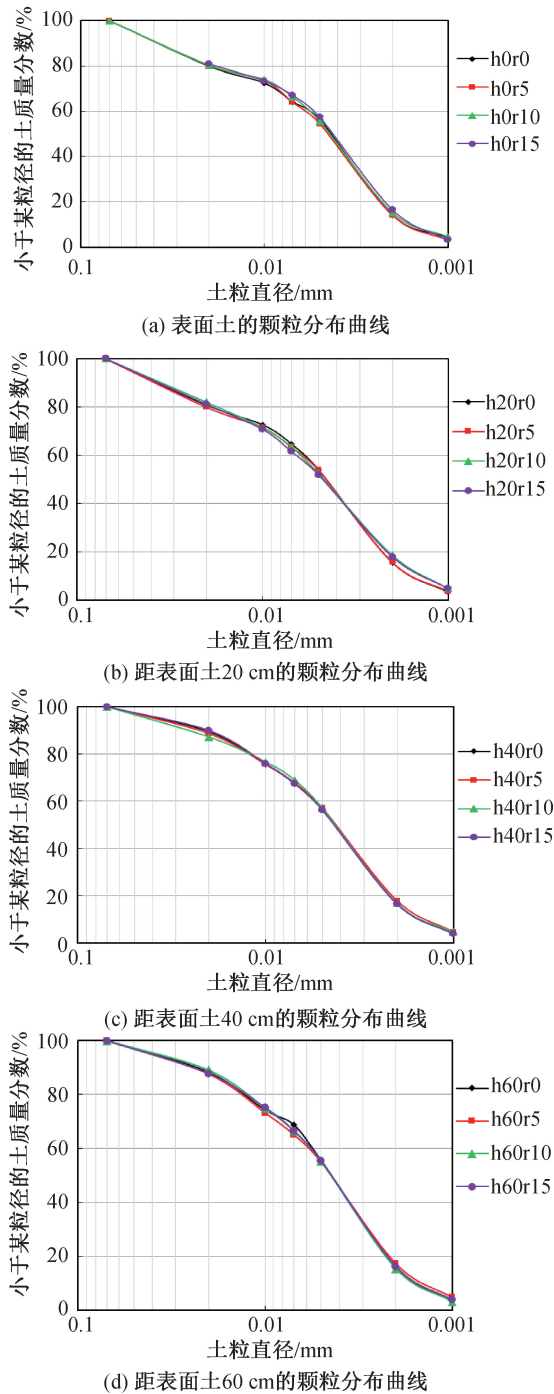


图 16 分级真空预压法距表面不同深度的颗粒分布曲线

Fig. 16 Particle distribution curves at different depths from the surface by graded vacuum preloading

论^[8],在较小的真空吸力作用下,随着孔隙水的排出逐渐在土体中较大的连通通道中形成真空渗流场,真空吸力随着真空渗流场传递到离排水板更远的土体中,从而形成新的连通通道。在形成稳定的连通通道后施加的真空负压不会再引起土体细颗粒的移动,所以不会改变连通通道的大小,从而不对排水渗流造成影响。

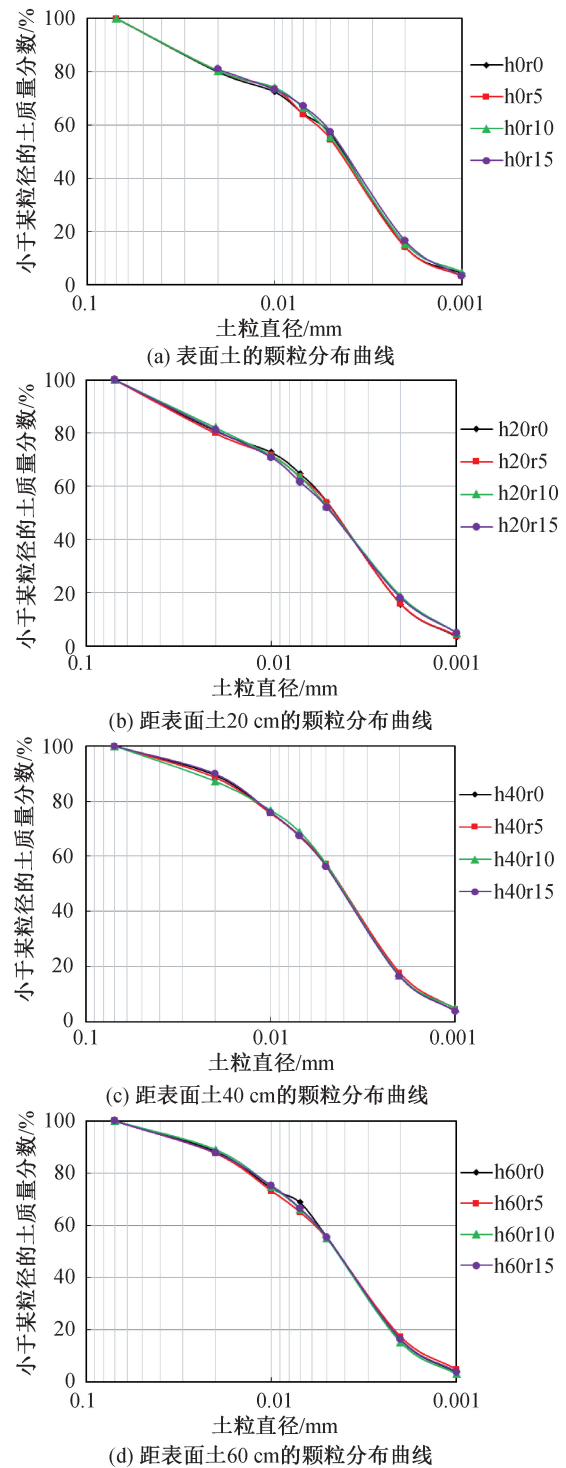


图 17 优化分级预压法距表面不同深度的颗粒分布曲线

Fig. 17 Particle distribution curves at different depths from the surface by optimized vacuum preloading

2.6 优化分级预压法预压机理分析

真空预压法是以抽真空的方式来降低排水通道中的绝对压力,令其小于土中原有的孔隙水压力,从而达到渗流所需的水力梯度来实现排水加固的目的。根据太沙基的有效应力原理,真空预

压法加固的整个过程中总应力并没有增加($\Delta\sigma = 0$),因此在加固过程中降低的孔隙水压力即等于土体增加的有效应力,即 $\Delta\sigma' + \Delta u = 0$ 或 $\Delta\sigma' = -\Delta u$ 。图 18 中当抽真空强度为 u_1 时增加的有效应力为 p_1 ,显然在相同的情况下当抽真空强度为 u_2 ,增加的有效应力增长了 p_2 。这说明真空负压强度越大,土体获得有效应力的增长越大,土体处理效果越好。但由于前节中分析了较大真空负压强度引起细颗粒移动造成的排水效率下降问题,所以在抽真空前期采用较小的真空负压强度,在土体初步固结后转而采用较大的真空负压强度使土体的有效应力获得较大的增大,这便是优化分级预压法的优越性所在。

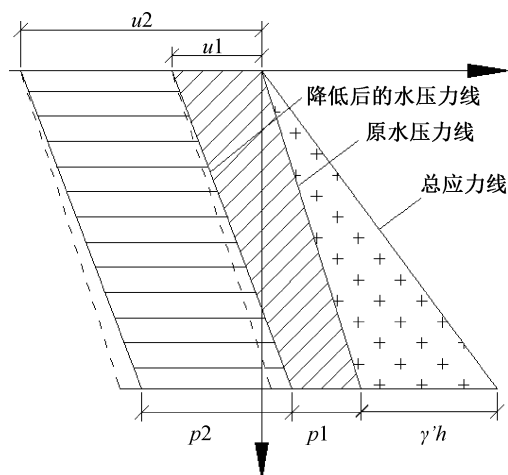


图 18 真空预压法有效应力图^[9]

Fig. 18 Effective stress diagram of vacuum preloading method

3 小结

1) 经过三种不同加载方式(“-80 kPa”、“-20”→“-40”→“-60”→“-80” kPa、“-20”→“-80” kPa)处理后的吹填土含水率都有了明显的降低,在相同处理时间内优化分级预压法的处理效果优于常规真空预压法和分级真空预压法。

2) 抽真空初期直接施加较大的真空吸力(-80 kPa)可加快排水效率,但较大的真空吸力会造成土体细颗粒向排水板方向迁移,导致排水板周围细颗粒含量增高,使排水板周围土体孔隙比

减小、渗透性降低,造成排水板滤膜淤堵,降低抽真空中后期的固结效率。

3) 分级真空预压和优化分级真空预压加固吹填土时,通过对比颗粒分布曲线可以得出首级较低真空负压作用下可以极大限制细颗粒向排水板迁移的规律,且经第一级真空预压加固后土体固结形成较稳定的真空通道,在后续各级真空预压时排水速率升高。

4) 对比分级真空预压和优化分级预压法加固效果可以发现,经过第一级较低真空负压(-20 kPa)加固后土体固结,再逐级增加真空吸力并不能有效地增加排水和固结效率,直接施加较大的真空吸力(-80 kPa)也不会导致排水板淤堵,说明在土体经第一级真空预压加固后可以直接施加加大的真空吸力,有利于提高真空预压的效率。

参考文献:

- [1] 杨 静. 高粘粒含量吹填土加固过程中结构强度的模拟试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [2] 张中琼. 高粘粒含量吹填土快速加固的室内模拟试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [3] YOU ZhiXian. Flow Channeling in Soft Soils and Its Influence on Consolidation [D]. USA: University of Colorado at Boulder, 1993.
- [4] 宋 晶. 分级真空预压法加固高粘性吹填土的模拟试验与三维颗粒流数值分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [5] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(09): 1429-1433.
- [6] 刘佳有, 吴正友, 席 平. 国产 SPB—I 型和日本丸红 GEODRAIN—L 型塑板真空度传递性能的现场试验研究[J]. 水运工程, 1990(12): 1-8.
- [7] 武亚军, 覃 萍, 杨建波. 真空荷载下超软土固结试验及土颗粒移动数值模拟研究[J]. 水运工程, 2013(09): 116-122.
- [8] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(02): 7-10.
- [9] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989(04): 45-56.

(责任编辑 王利君)