

· 地基与基础 ·



不同加载方式下真空加固吹填软土的 现场试验与数值模拟*

武亚军, 覃萍, 邹道敏, 孙德安
(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 吹填软土在真空负压作用下发生排水固结时, 其强度和变形特性与真空负压的加载方式关系密切。首先对吹填软土进行了真空预压现场加固试验, 通过对地表沉降、真空度跟踪监测, 研究并比较不同负压加载方式下地基沉降规律及加固效果; 然后采用FLAC^{3D}建立三维弹塑性数值模型, 对软土地基采用不同加载方式进行数值模拟, 并与现场试验的实测数据进行对比, 深入探讨加载方式对软土地基固结影响的细观机理。研究表明: 采用真空预压法加固吹填软土地基时, 慢速加载方式比瞬时加载方式更有利于土体的加固, 建议在实际工程中采用分级加载方式施加真空荷载。

关键词: 吹填软土; 现场试验; 数值模拟; 植物垫层; 瞬时加载; 分级加载

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0165-08

In-situ tests and numerical simulation of soft soil consolidation using vacuum preloading method under various loading

WU Ya-jun, QIN Ping, ZOU DAO-min, SUN De-an

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Under vacuum negative pressure, the deformation and strength characteristics of soft soil have a close relationship with the loading mode. Firstly, we carry out the vacuum consolidation test to the filled soft soil. Based on the monitoring of foundation settlement and vacuum degree, we compare the foundation settlement law and consolidation effect under different loading modes. Adopting FLAC^{3D}, we establish elastic-plastic 3D numerical simulation model to simulate the soft soil by different loading modes, the result of which is compared with the real-measured data of field test to probe into the mechanism of the effect of the loading mode on consolidation of soft soil. The research indicates that taking multi-stage loading is more advantageous than that of the instantaneous loading to the consolidation of soil when vacuum preloading is adopted to consolidate soft soil foundation. So it is recommended to use the multi-stage loading pattern for the vacuum loading in the project.

Key words: soft soil; in-situ test; numerical simulation; stalk cushion; instantaneous loading; multi-stage loading

由于吹填软土强度低, 地基承载力基本为零, 常规地基处理方法通常很难实施, 真空预压法往往被作为这类地基加固的首选方案^[1]。但由于吹填软土一般具有高含水量、无结构强度、呈流泥状等与普通软土明显不同的工程特性^[2-3], 故真

空预压法在用于吹填软土处理过程中还存在诸多问题无法解决, 围绕这些问题, 目前的研究工作主要集中在如下几方面: 1) 现场工艺实施方面: 夏玉斌提出直排式真空预压法以降低真空度传递损失^[4]; 董志良基于无砂垫层真空预压提出了超软

收稿日期: 2012-12-21

*基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项 (B.37-0118-07-001)

作者简介: 武亚军 (1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程中软地基处理、基坑边坡支护、地下建筑结构工程等方面的教学与科研工作。

弱土浅表层快速加固方法^[5]，应用于天津滨海新区吹填造陆工程，发现了“土柱”现象并进行了数值模拟^[6-7]；唐彤芝通过吹填淤泥负压加固的现场试验认为在真空负压吸力作用下土颗粒很容易随孔隙水一起移动^[8]，并在排水板周围形成“淤泥抱团区”。2) 物理模型方面：闫澍旺等通过室内模型试验认为真空预压过程中塑料排水板发生弯折是导致地基强度局部无法提高的原因^[9]。3) 室内土工试验方面：Myint通过超软土中心排水的固结试验发现细颗粒土有随孔隙水渗流向砂井移动的趋势^[10]；成玉祥通过SEM微结构扫描研究了吹填泥浆在真空预压加固前后的微结构变化规律^[11-12]；Chai J C等通过试验研究了真空预压下地基的沉降规律^[13]；Sathananthan I通过大规模径向排水固结试验研究土体涂抹区内含水量与土体渗透性的相关性^[14]。

董志良提到的“土柱”和唐彤芝提到的“淤泥抱团区”均指真空预压时产生的地基不均匀沉降和土体强度难以进一步提高的现象(图1)。



图1 竖向排水道附近的“土柱”

2010年Myint通过单向固结试验研究不同加载速率对沉降和孔压的影响，认为加载方式对超软土固结有影响^[10]，但并未涉及真空荷载施加方式的影响。笔者认为引起这种现象的原因可能很多，但真空荷载的施加方式无疑是一个重要因素，目前还见到关于这方面的专题报道。为此，本文采用现场试验与数值模拟手段对不同加载方式下吹填软土强度与变形情况进行深入研究。

1 不同加载方式的现场试验

1.1 试验区概况

试验场地位于上海崇明县崇启大桥附近，场地为吹填形成，吹填土厚度约4.0 m，吹填后3 a进行试验，当时现场地表长满高度超过1 m的芦苇，其物理力学性质指标见表1，主要的软土层淤泥质土的颗粒分析曲线见图2。土体强度非常低，十字板剪切强度小于5 kPa，地基承载力特征值只有20 kPa，为达到耕地使用要求必须进行加固。

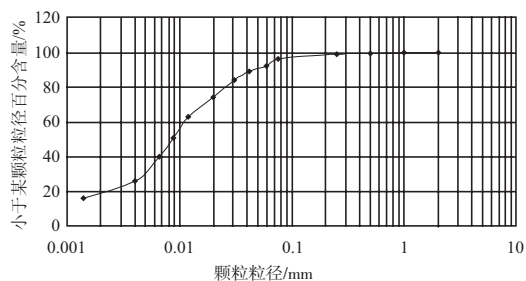


图2 淤泥质土颗粒分析曲线

表1 处理前吹填土物理力学性质参数

| 土层名称 | 厚度/m | 含水量/% | 密度/(t·m ⁻³) | 孔隙比 | 聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 压缩系数/MPa ⁻¹ | 压缩模量/MPa |
|--------|---------|-------|-------------------------|------|--------|----------|------------------------|----------|
| 土 | 0~0.2 | 47.3 | 1.74 | 1.32 | 13.5 | 15.25 | 1.01 | 2.30 |
| 淤泥质土 | 0.2~2.8 | 57.8 | 1.66 | 1.41 | 10.0 | 11.00 | 1.08 | 2.23 |
| 淤泥质粉质土 | 2.8~4.0 | 39.8 | 1.82 | 1.10 | 16.0 | 17.00 | 0.68 | 3.08 |
| 粉质土 | 4.0~ | 34.6 | 1.86 | 0.96 | 14.0 | 18.50 | 0.48 | 4.08 |

为了研究真空预压吹填淤泥质土采用不同加载方式时对土体固结性状的影响，现将场地分为A区和B区同时进行试验。其中，A区采用快速加载方式，B区采用慢速加载方式。A和B区面积均为625 m² (边长均分别为25 m×25 m)，两块场地之间以及场地其余3边均留有宽度为0.6 m的密封沟，试验区分区见图3。

A和B区加载方式的区别为二者水平排水排气

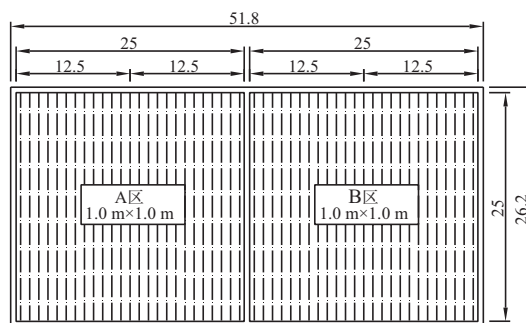


图3 不同加载方式真空预压试验分区

通道不同。A区主管通过变径接头直接将真空度传递到排水板内,而B区通过植物垫层将真空度传递到竖向排水体内。因此,A区的真空度传递效率要明显高于B区,可以认为是快速加载,B区真空荷载升高较慢,认为是慢速加载。

1.2 A区无垫层真空预压试验方案

1) 清除芦苇,平整场地。

2) 将厚度4 mm和宽度100 mm的整体式排水板(热熔排水板,滤膜等效孔径 O_{98} 为75 μm)按每根长度4.5 m截取,并配好变径接头,按行1.0 m间距、梅花型、4.0 m深度(插打时板底需折弯约0.5 m)进行插打,同时在主管、排水板和土体中埋设真空度监测探头。

3) 主管采用 $\phi 32$ mm钢丝按间距1.0 m铺设在地表,并与竖向排水板通过变径接头连接。

4) 在地表上依次铺设一层250 g/m^2 无纺土工布和两层厚0.014 mm的聚氯乙烯密封膜,并将密封膜埋入密封沟后回填厚约0.5 m的淤泥质土以加强密封效果。

5) 安装出膜器、真空射流泵和沉降标后,试抽真空检查密封性,若密封膜紧贴地面则说明密封效果好,可以正式抽真空。

6) 抽真空过程中对A区的真空度和地表沉降进行监测。

1.3 B区植物垫层真空预压试验方案

1) 使用轻型工具将芦苇压倒整平。

2) 将厚度4 mm和宽度100 mm的排水板(B型板,滤膜等效孔径 O_{98} 为75 μm)按每根长度5.0 m截取,并按1.0 m间距、梅花型、4.0 m深度(插打时板底需折弯约0.5 m,地表预留露出0.5 m与水平通道连接)人工插打,芦苇根系插入困难时可表层引孔穿越,同时在主管、排水板和土体中埋设真空度监测探头,真空度探头埋设位置与A区相同。

3) 主管与地表水平铺设的整体式排水板垂直并通过变径接头连接,同时将已插打的竖向普通排水板的露头就近与水平向铺设的整体式排水板缠绕连接,主管间距12.5 m,水平排水板间距为1.0 m。

步骤4)~6)与A区相同。

1.4 试验成果分析

A和B区分别进行50 d真空负压加载后卸载。试

验过程对A和B区的真空度、地面沉降进行测试。

1.4.1 真空度

测得A和B区塑料排水板内和塑料排水板之间土体内的真空度随时间变化曲线(图4~7)。

图4为A区塑料排水板中不同深度(即1,2,3,4 m)处真空度随时间的变化曲线。从图4可以看出,第1,2 d真空度在塑料排水板中的增长速度很快,且大约在第9 d时基本达到稳定,稳定状态的真空度分别约78,75,70,65 kPa。

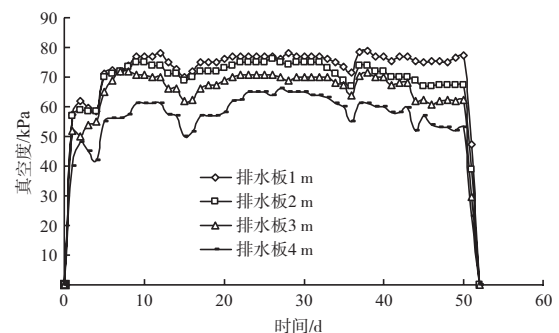


图4 A区塑料排水板中不同深度处的真空度变化曲线

图5为A区中相邻两根竖向塑料排水板之间土体内不同深度(即1,2,3,4 m)处真空度随时间的变化曲线。可以看出,土体中真空度在第1,2 d时的增长速度很快,且大约在第11 d时基本达到稳定,稳定状态的真空度分别约74,65,59,52 kPa。此处的真空度与塑料排水板中的相比,其达到稳定状态的时间稍晚,稳定时的真空度值也较小,且越往下减小的幅度越大,这一点也有学者得出过类似的结论^[10]。

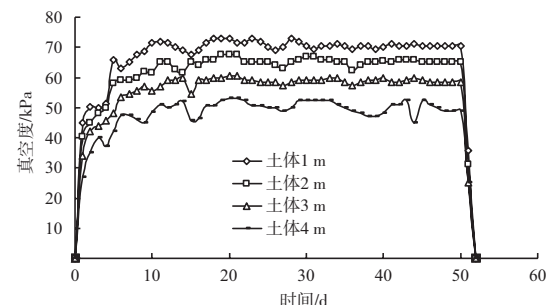


图5 A区土体中不同深度处的真空度变化曲线

图6为B区竖向塑料排水板中不同深度(即1,2,3,4 m)处真空度随时间的变化曲线。可以看出B区竖向排水板内的真空度呈渐进式增长,且在35 d之后才趋于稳定,稳定后的真空度大约为78,72,

68,60 kPa。虽然B区此处的真空度增长速度相对A区竖向排水板中的慢,但最终所达到的最大真空度与A区基本一致。

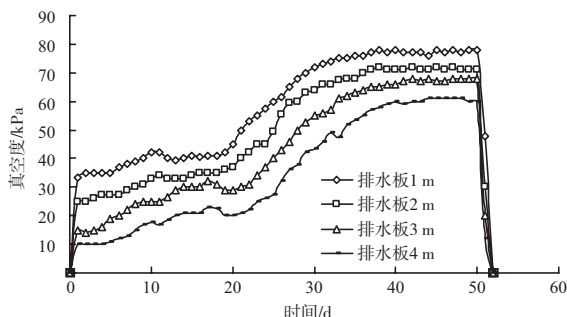


图6 B区塑料排水板中不同深度处的真空度变化曲线

图7为B区内两根塑料排水板之间土体不同深度(即1,2,3,4 m)处真空度随时间变化曲线。可以看出此处的真空度增长缓慢,在35 d之后才趋于稳定,稳定时的真空度值约为71,65,58,51 kPa,其变化规律与该区塑料排水板中真空度的变化基本一致,只是数值比塑料排水板的小。

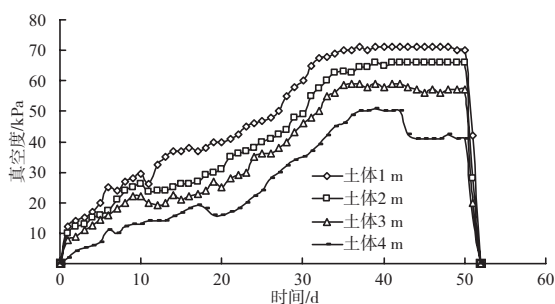


图7 B区土体中不同深度处的真空度变化曲线

A和B区真空度传递规律之所以不同,分析认为主要是由两区的真空度传递路径不同以及传递过程中真空度损失的大小差异造成的。

A区中由真空泵产生的真空度直接由主管传递给竖向排水板,再由塑料排水板将真空度传递到周围土体中,这一过程中真空度传递路径单一,真空度损失比较小,使施加在土体上的真空荷载具有短期内达到较大、且一直持续到卸载的特点。

对于B区,由真空泵产生的真空度除一部分与A区相同的路径传递给土体外,还有一部分会通过水平排水板的外包滤布传给周围的芦苇垫层,再由芦苇垫层传递到下面的土体。这一过程芦苇垫层会损耗掉一部分真空度,致使竖向塑料排水

板中的真空度需要等到芦苇垫层及表层土体中大部分空间形成较高的真空度后,才能逐渐向下、向外传递。因此,对于下部土体来说,真空度传递的速度很慢,其上荷载具有较长时间内渐进式施加的特点。

1.4.2 地面沉降

试验测得的两个区地表的总平均沉降如图8所示。从图8可以清晰看出,前33 d A区沉降速度比B区快;33 d时A和B区的沉降量相同;33 d之后A区的沉降量小于B区。达到稳定状态时,A区的最大沉降量约52 cm,B区的最大沉降量约54 cm。虽然A区采用快速加载方式使土体的真空度快速达到较高值,但其最终沉降量却小于采用慢速加载的B区。可见,并非真空度施加速度越快数值越大其沉降量也越大。

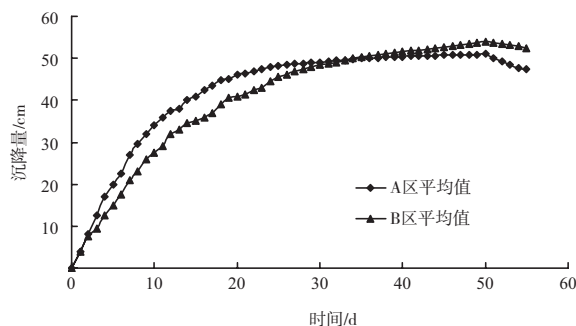


图8 A区和B区地表平均总沉降曲线

2 数值模拟

为了深入研究加载方式对软土真空固结效果的影响,本文同时采用岩土数值分析软件FLAC^{3D}对现场试验中快速和慢速两种加载方式下的土体特性进行了分析。考虑到计算工作量较大,在不影响分析结果的前提下,本文按照对称的原则选取有代表性的单位厚度墙体(其中包括单排一半的排水板),同时考虑了足够的影响范围,建立了数值计算模型。

2.1 数值计算模型

如图9所示,计算域为:y方向为单位宽度;z方向为土层厚度方向,取20 m;x方向取12 m,并向外扩24 m,共36 m。

单元类型:土体与涂抹区为六面体实体单元,涂抹区尺寸为0.2 m×0.2 m,模型有19 551个节点,15 840个单元。

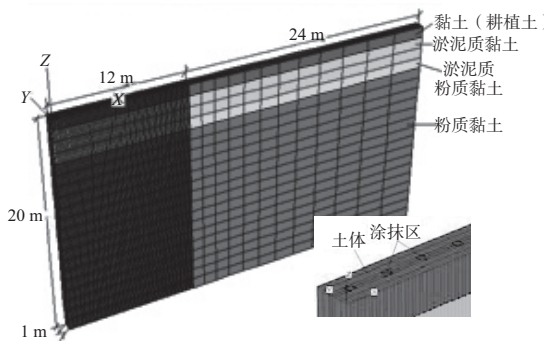


图9 数值分析模型

边界条件: $x=0$ 和 $x=36$ m两侧 x 方向位移固定; $y=0$ 和 $y=1$ m前后两侧面 y 方向位移固定; $z=-20$ m模型底面位移完全固定; 除 $x=36$ m一侧外其余各面均无外来流量补充; 塑料排水板插设深度为5 m, 看作负压边界, 不作实体单元考虑。

2.2 施加真空负压

模拟分3个阶段进行: 初始应力平衡计算、加载和卸载。真空负压荷载施加在塑料排水板位置所在直线的节点上, 负孔压沿深度方向线性递减。

本构模型: 不同加载阶段采用不同的本构模型。在初始应力平衡计算阶段, 采用摩尔库仑模型; 在加载导致土体发生渗流固结时, 采用基于Biot固结理论的各向同性渗流模型; 卸载阶段采用弹性模型。

参数设置: 比奥系数为1, 抗拉强度为-500 kN, 流体密度=1 000 kg/m³。其中比奥系数是指单元中流体体积的改变量占该单元本身体积改变量的比例, 这里认为土体颗粒不可压缩, 故比奥系数取1, 比奥模量 M 通过下式确定:

$$M=(K_u-K)/\alpha^2 \quad (1)$$

式中: K_u 为土体的不排水体积模量; K 为土体的体积模量, 在自重平衡计算阶段取 4×10^6 kPa, 加载阶段取 1.7×10^4 kPa。

2.2.1 瞬时加载工况模拟

1) 初始应力平衡计算阶段。

模拟的第1步首先进行初始应力平衡计算, 即自重应力计算, 采取在渗流方式下进行。计算中最大不平衡力为 $1.0 \times e^{-5}$ N, 即当不平衡力达到 $1.0 \times e^{-5}$ N时程序默认已达到平衡状态, 将自动进行下一步计算。

2) 加载阶段。

为模拟A区快速加载工况, 采用瞬时加载方式进行数值模拟, 加载方式为将土体表面的真空荷载瞬时加至目标加载量80 kPa, 并保持该加载量50 d不变直至卸载。

由于瞬时加载时加载速度非常快, 渗透系数还来不及改变, 因此加载过程中不考虑渗透系数变化。

3) 卸载阶段。

卸载时间为10 d。卸载方式为释放塑料排水板所在直线各节点的孔压值, 同时将土体表面($z=0$)塑料排水板处各节点的孔压置零。

2.2.2 分级加载工况模拟

1) 初始应力平衡计算阶段。

此阶段与瞬时加载模拟时相同。

2) 加载阶段。

为模拟B区慢速加载工况, 采用4级分级加载方式。各级负压加载量和加载时间见表2。

表2 各加载阶段参数设置

| 加载级数 | 加载量(真空度)/kPa | 加载时间/d |
|------|--------------|--------|
| 1 | -20 | 5 |
| 2 | -30 | 10 |
| 3 | -20 | 15 |
| 4 | -10 | 20 |

在软土固结过程中实际上其渗透系数是不断变化的^[15], 而且渗透系数的变化会影响土体的固结速率, 因此为了更真实地模拟土体的固结必须考虑这一影响, 本文模拟分级加载时, 在每级负压加载之前, 根据孔隙比对渗透系数进行调整(未考虑涂抹区渗透系数变化), 土体孔隙比 e 与渗透系数 k 之间取半对数关系^[16], 即

$$e=e_0+c_k \lg k/k_0 \quad (2)$$

式中: e_0, k_0 为土体初始时刻的孔隙比和渗透系数; e, k 为任意时刻的孔隙比和渗透系数,

$$c_k=(e_1-e_2)/(\lg k_1-\lg k_2) \quad (3)$$

3) 卸载阶段。

卸载时间和方式与瞬时加载方式模拟时相同。

2.3 负压加载模拟结果

在瞬时加载和分级加载模拟过程中对位置

$x=0.5\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$ (即第1根塑料排水板)处节点的地表沉降进行监测; 对位置 $x=1\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$ (即第1根和第2根塑料排水板之间)处不同深度节点的真空度进行监测; 同时还对加固区边界处地表节点的水平位移进行了监测。

2.3.1 分级加载模拟结果变形云图和孔压云图

分级加载结束后, 土体的沉降云图, 侧向变形云图和孔压云图如图10~12所示。瞬时加载情况下的沉降云图、侧向位移云图与孔压云图分布情况与分级加载的情况相似, 不再赘述。

分级加载后土体沉降云图如图10所示。由图10可以看出, 真空预压分级加载后, 加固区土体的沉降量在土体上表面最大, 最大沉降量达 54 cm , 并沿土层深度方向沉降量逐渐衰减, 由于排水板插设深度为 5.0 m , 地表 5.0 m 以下土体基本没有发生沉降; 影响区范围内土体的沉降量很小。

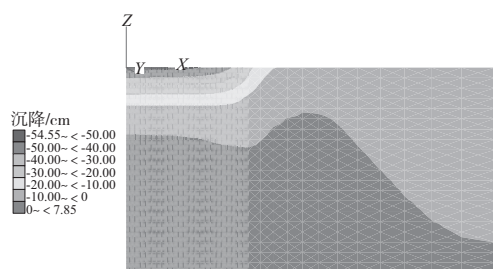


图10 分级加载沉降云图

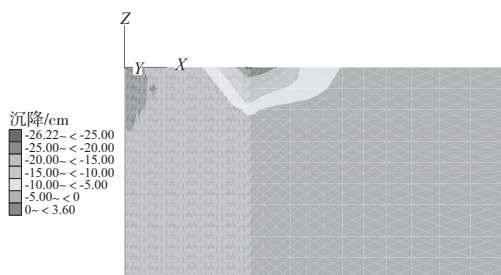


图11 分级加载加固区边界土体侧向位移云图

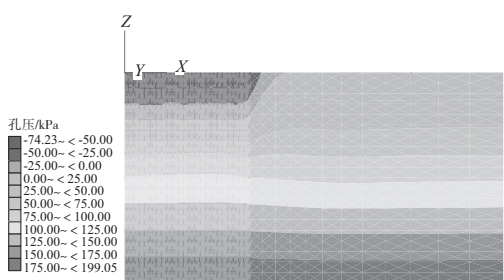


图12 分级加载孔压云图

分级加载后加固区边界土体侧向位移云图如

图11所示。由图11可以看出, 由于对土体施加真空荷载, 土体加固后发生较大的向内侧向位移。侧向位移在土体加固区边界上表面达到最大, 最大向内侧向位移量为 26 cm ; 沿土层深度方向侧向位移量逐渐衰减。

真空荷载分级加载至 80 kPa 时土体孔压云图如图12所示。由图13可以看出, 真空荷载释放前, 土体加固区内孔隙水压力在土体上表面达到 80 kPa , 并沿土层深度方向逐渐衰减。

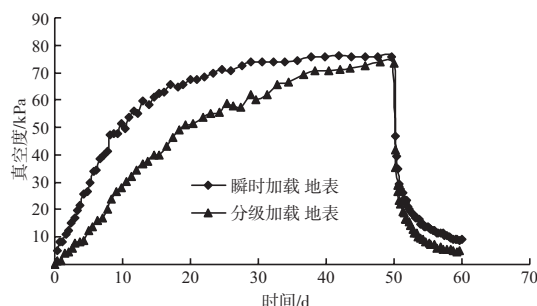


图13 地表处土体内真空度变化曲线

2.3.2 真空度

图13为位置 $x=1\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$ (即第1根和第2根塑料排水板之间)处瞬时加载和分级加载模拟得到的地表土体的真空度变化曲线。从图13可以看出, 瞬时加载模拟的真空度在土体中传递的速度比分级加载模拟的快。并且两种模拟结果的地表处土体的最大真空度小于 80 kPa , 说明真空度从排水板中心横向传递的过程中有损失, 这与实际加载情况相符。

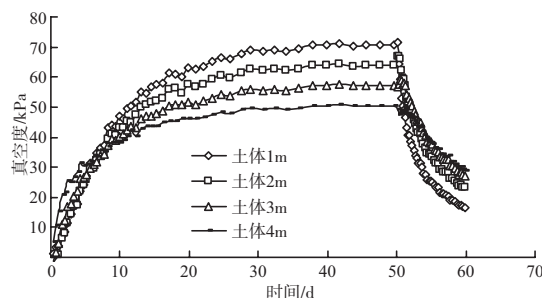


图14 瞬时加载土体中不同深度处真空度变化曲线

图14为位置 $x=1\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$ (即第1根和第2根塑料排水板之间)处瞬时加载时土体中不同深度处真空度变化曲线。由图14可知, 瞬时加载时土体地表上的真空度增长速度较快, 呈渐进式增长, 达到稳定时, 地表下 $1, 2, 3, 4\text{ m}$ 处的真空度分别达到

71,64,57,51 kPa, 与A区土体中相应深度的实测真空度值结果一致。

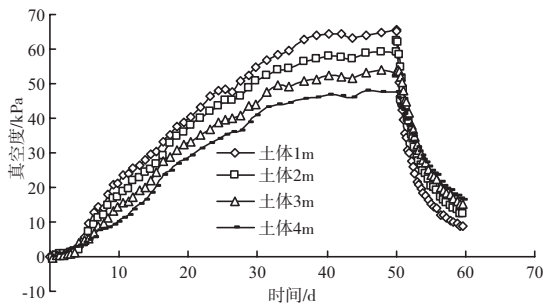


图15 分级加载土体中不同深度处真空度变化曲线

分级加载工况下土体处不同深度的真空度变化曲线如图15所示, 由图15可知, 土体的真空度呈渐进增长, 且与瞬时加载相比, 真空度传递较慢。达到稳定时, 地表下1,2,3,4 m处的真空度分别达到64,59,54,47 kPa, 与瞬时加载相比, 相应深度处的真空度值偏小。这一结果与A和B区的试验一致。且相应深度的真空度值与B区土体中相应位置的实测结果基本相同。

2.3.3 地表沉降对比

图16为位置 $x=0.5\text{ m}$, $y=0.5\text{ m}$ (即第一根塑料排水板)处瞬时加载和分级加载模拟得到的塑料排水板处地表沉降随时间变化的对比曲线。从图16可以看出, 数值模拟结果与试验情况基本一致。在加载阶段的大约前35 d, 瞬时加载的沉降量比分级加载的大, 但之后的沉降趋势相反, 最终沉降量是分级加载模拟的结果偏大约2 cm。当负压加载达到50 d之后, 由于释放孔压, 两种模拟结果的土体均出现回弹变形, 回弹量大约3 cm。

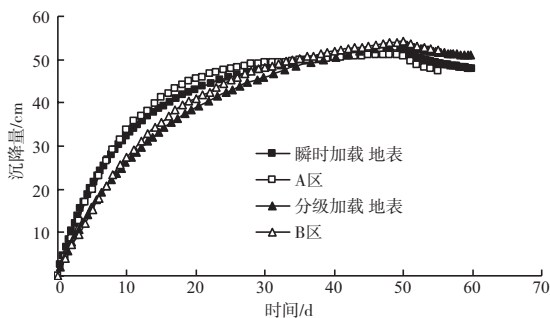


图16 瞬时加载和分级加载地表排水板处沉降变化对比曲线

2.3.4 水平位移对比

图17为加固区边缘($x=12\text{ m}$)地表瞬时加载和分级加载时节点水平位移随时间变化的对比曲线。

从图17可以看出, 任意时刻瞬时加载的水平向位移比分级加载的大, 且最大位移量分别为30.7 cm和26 cm, 相差近5 cm。说明实施快速加载, 在将会对土体产生较大的侧向位移。

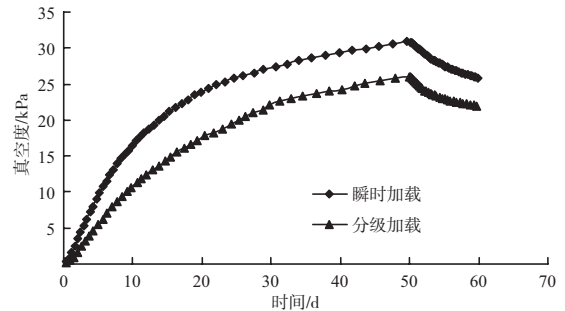


图17 加固区边缘($x=12\text{ m}$)地表水平位移变化曲线

3 结论

1) 通过对两种不同垫层的真空预压加固软土进行现场试验, 说明了植物垫层真空预压法是可行的, 且效果要好于无垫层真空预压法, 由于植物垫层真空预压无需另外增加水平排水通道, 经济性比较好, 可在类似地基处理工程中进一步推广应用。

2) 无垫层真空预压法对地基土的加载方式可认为是短期加载, 能在短时间内形成较高的真空负压, 使周围土体中的水很快排出, 初期形成了较大的沉降量, 但同时地基沉降稳定速率也比较快, 最终的施工沉降量相对较小; 植物垫层真空预压法对地基的加载方式可认为是渐进缓慢加载, 它不会在短期内达到较高的真空负压, 但是地基沉降量却在逐步增加, 且衰减速率比较慢, 所完成的施工沉降量比较大。

3) 在对真空负压分级加载加固吹填软土进行FLAC^{3D}数值分析中, 考虑了孔隙比与渗透系数的变化关系, 从变形、孔压计算值与实测值的对比来看, 在真空固结过程中考虑渗透系数的变化是比较符合工程实践情况的。

4) 在对现场试验进行数值模拟时, 采用瞬时加载方式和分级加载方式分别模拟A区的快速加载试验和B区的慢速加载试验的方法比较合理, 并且根据加载试验的实际情况, 在模拟过程中将瞬时加载工况下排水板处的真空度瞬时加载至-80 kPa, 而分级加载工况下采用分步施加真空荷载, 导致瞬

时加载工况的前期沉降速率快于分级加载工况，之后随着分级加载工况下真空度的逐级增大，致使土体的沉降速率逐渐加快，最终大于瞬时加载工况下的沉降量，分级加载工况模拟结果优于瞬时加载工况。数值模拟得到的沉降过程和最大沉降量及真空度变化过程和真空度值与试验结果基本一致。

5) 传统观念认为真空预压所施加的是球形应力，不必担心地基破坏可以一步加载到最大值，并作为优点考虑，故对真空负压的加载方式没有太多关注，但通过本项研究发现，对于吹填淤泥来说真空加载方式会影响地基处理效果，建议在真空预压加固淤泥质软土时采用分级真空加载。

参考文献：

[1] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及工程应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.

[2] 朱耀庭, 郑爱荣, 李卫. 吹填超软土固结特性的试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(11): 120-123.

[3] 叶国良, 郭述军, 朱耀庭. 超软土的工程性质[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集. 天津: [s.n.], 2010: 12-25.

[4] 夏玉斌. 直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 376-384.

[5] 董志良, 张功新, 莫海鸿, 等. 超软弱土浅表层快速加固方法及成套技术: 中国, 200810026168.4[P]. 2008-07-23.

[6] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层

超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1 073-1 080.

[7] 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.

[8] 唐彤芝, 黄家青, 关云飞, 等. 真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J]. 水运工程, 2010 (4): 115-122.

[9] 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.

[10] Myint W B, Victor C, Kai S W. Constant rate of loading test on ultra-soft soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(3): 1-9.

[11] 成玉祥, 杜东菊. 真空预压处理吹填土的微结构特征试验[J]. 煤田地质与勘探, 2010 (4): 52-55.

[12] 成玉祥. 滨海吹填土结构强度形成机制与真空预压法关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

[13] Chai J C, Carter J P, Hayashi S. Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 2005. (12): 1552-1561.

[14] Sathananthan I, Indraratna B. Laboratory evaluation of smear zone and correlation between permeability and moisture content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: ASCE, 2006 (7): 942-945.

[15] 董志良, 陈平山, 莫海鸿, 等. 真空预压下软土渗透系数对固结的影响[J]. 岩土力学, 2010, 35(5): 1452-1456.

[16] 江辉煌. 砂井处理超软地基的固结计算[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.

(本文编辑 武亚庆)

