

塑料排水板地基侧向变形的模型试验与仿真分析

吴其长, 徐方, 张期树, 彭扬发, 韩, 阮波, 杨奇

Model tests and simulation analyses on lateral deformation characteristics of PVD-improved ground

WU Qichang, XU Fang, ZHANG Qishu, PENG Yangfa, HAN Xu, RUAN Bo, and YANG Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究

王天园, 邓岳保, 毛伟, 刘铨

水文地质工程地质. 2020, 47(1): 62-68

基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究

A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology

程瑾, 曹凯, 吴玉涛, 金亚伟, 张勇, 张珍, 高天宇, 王小东 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 125-134

拓宽方式对软土路基工程特性影响的离心模型试验

Centrifugal test on influence of widening styles on the engineering characteristics of soft soil

叶观宝, 葛敬文, 许言, 张振, 饶烽瑞, 戚得健 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 112-117

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309058

吴其长, 徐方, 张期树, 等. 塑料排水板地基侧向变形的模型试验与仿真分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 113-125.
WU Qichang, XU Fang, ZHANG Qishu, et al. Model tests and simulation analyses on lateral deformation characteristics of PVD-improved ground[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 113-125.

塑料排水板地基侧向变形的模型试验与仿真分析

吴其长¹, 徐方^{1,2}, 张期树³, 彭扬发¹, 韩谔⁴, 阮波^{1,2}, 杨奇¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 湖南铁院土木工程检测有限公司, 湖南长沙 410075; 3. 中南林业科技大学土木工程学院, 湖南长沙 410004; 4. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南长沙 410021)

摘要: 为探明不同预压模式下塑料排水板 (prefabricated vertical drains, PVD) 处理软土地基的侧向变形特性, 以指导软土地区相关工程的设计与施工, 通过室内大比例模型试验对比分析堆载预压和真空联合堆载预压下 PVD 地基的侧向变形特性。此外, 结合有限元仿真分析, 系统研究真空联合堆载预压下堆载速率 (LR)、堆载大小 (p_s) 和真空压力大小 ($|p_v|$) 对 PVD 地基侧向变形的影响规律。研究表明: 真空联合堆载预压相较堆载预压可以匹配更快的堆载速率和更大的堆载, 且达到最大堆载后的后续固结阶段, PVD 地基的向外侧向变形并无明显增长, 反观堆载预压工况, 地基的最大向外侧向变形仍可增长达 10%, 局部深度位置侧向变形可增长超 30%。真空联合堆载预压下 PVD 地基的侧向变形轮廓整体随 p_s 与 LR 的增加及 $|p_v|$ 的减小而向预压区外侧移动, 且地基的侧向变形速率及最大向外侧向变形 (δ_{om}) 深度随之增加。此外, 堆载施加过程中 PVD 地基的向外侧向变形呈阶梯型规律增加, 其最大值 δ_{om} 近似随 p_s 增加而线性增大, 随 LR 增加及 $|p_v|$ 减小而非线性增长。同等荷载改变量下, $|p_v|$ 的改变相较于 p_s 改变对地基侧向变形的影响更为显著。研究结果可为真空联合堆载预压处理软土地基的分析与设计提供参考。

关键词: PVD 地基; 真空联合堆载预压; 侧向变形; 模型试验; 有限元分析

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0113-13

Model tests and simulation analyses on lateral deformation characteristics of PVD-improved ground

WU Qichang¹, XU Fang^{1,2}, ZHANG Qishu³, PENG Yangfa¹, HAN Xu⁴, RUAN Bo^{1,2}, YANG Qi¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. Hunan Tiesuan Civil Engineering Testing Co. Ltd., Changsha, Hunan 410075, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 4. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Changsha, Hunan 410021, China)

Abstract: To explore the lateral deformation characteristics of prefabricated vertical drains (PVD)-improved soft ground under different preloading loads and provide guidance for the design and construction of relevant structures in soft deposit regions, this study analyzed the lateral deformation characteristics of PVD-improved

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2024-01-27

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ40766); 国家自然科学基金项目 (51709284); 湖南铁院土木工程检测有限公司检测研究基金项目 (HNTY2021K09); 上海局杭州铁路枢纽指挥部横向科研课题项目 (2022-129)

第一作者: 吴其长 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 224811007@csu.edu.cn

通讯作者: 张期树 (1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事路基与地基基础教学与科研工作。E-mail: H20220235@csuft.edu.cn

ground under surcharge preloading and combined vacuum and surcharge preloading using large-scale model tests. The influence of loading rate (LR), surcharge load (p_s), and vacuum pressure magnitude ($|p_v|$) on the lateral deformation of PVD-improved ground under combined preloading was systematically studied using finite element analyses. The results show that the preloading under combined vacuum and surcharge could match faster loading rates and larger surcharge loads compared to surcharge preloading alone. In the subsequent consolidation stage after reaching maximum surcharge load, there is an insignificant increase in the outward lateral deformation of PVD-improved ground under combined preloading; in contrast, the maximum outward lateral deformation of the ground under surcharge preloading could still increase by 10%, and the lateral deformation of localization depths could increase by over 30%. The lateral deformation profile of PVD-improved ground under combined preloading overall moves outward with the increase of p_s and LR , and the decrease of the $|p_v|$; meanwhile the lateral deformation rate and the depth of the maximum outward lateral deformation (δ_{om}) increase. The outward lateral deformation of PVD-improved presents step growth patterns during the surcharge loading process, and the δ_{om} increases approximately linearly with the increase of p_s , but increases nonlinearly with the increase of LR and the decrease of $|p_v|$. With the same load change, the variation in $|p_v|$ has a more significant impact on the ground lateral deformation compared to the variation in p_s . This study can provide basic information for the analysis and design of soft ground improvement under combined vacuum pressure and surcharge load.

Keywords: PVD-improved ground; vacuum combined surcharge preloading; lateral deformation; model test; finite element analysis

我国沿海地区广泛分布有软土地基, 由于软土地层压缩性大、含水率高、强度低和渗透性差等特点, 修建铁路、公路等基础设施前通常需要对其进行加固或处理^[1-2]。塑料排水板 (prefabricated vertical drains, PVD) 结合预压固结法因经济性好、对环境影响小等优点而得到广泛应用^[3-5]。

地基内插入 PVD 可为土体提供水平向排水边界, 有效缩短地基的排水路径, 进而加速地基土的排水固结。PVD 地基的预压方式包括真空预压、堆载预压以及真空联合堆载预压^[6]。真空预压通过密封膜、真空泵、真空管道及 PVD 对土体施加真空负压, 从而促进孔隙水排出, 并压密土体。真空负压类似各向同性的“抽吸荷载”, 在引起土体体积压缩的同时, 并不会在地基内引起剪切应力, 因此会使地基产生沉降和向内收缩的侧向变形。堆载预压则通过填筑砂垫层和路堤提供预压荷载, 会同时在地基内引起竖向固结应力及水平向剪切应力, 进而引发地基沉降和向外膨胀的侧向变形。真空联合堆载预压则通过真空压力和堆载的联合作用增加地基的预压荷载, 进而增大地基的压密程度和固结沉降, 但随预压方案的变化, 地基可能表现出整体向内、整体向外和浅层向内而深部向外等 3 种不同侧向变形形态^[7]。而今, 已有诸多学者通过现场试验^[8]、模型试验^[9]和理论分析^[10]研究了 PVD

地基的沉降变形特性, 并已形成了较为完善的沉降计算理论和方法^[11-13]。

关于 PVD 地基的侧向变形, 亦有学者开展了一些研究。邹育麟等^[14]由路基原位观测发现, 堆载预压下 PVD 地基的水平位移与沉降存在明显的正相关性。蒋建清等^[15]基于现场试验发现, 堆载作用下 PVD 地基顶部软土层会向堆载区内移动, 深部软土层则会向堆载区外移动。雷鸣等^[16]结合工程实例分析发现, 真空预压下 PVD 地基整体侧向变形向内收缩, 但由于土体水位下降, 亦存在土体向外挤出的趋势。张世民等^[17]根据现场监测数据, 分析得到真空联合堆载预压下, PVD 地基的水平位移随深度增加会逐步由收缩变形转变为向外挤出的变形。陈继斌等^[18]基于现场观测数据, 分析了堆载作用下 PVD 地基最大侧向变形增量与路堤中心线处地表沉降增量的关系, 并提出基于“S”型曲线的侧向变形-地基深度分布模型。Chai 等^[19]通过归纳分析现场实测资料, 提出了真空联合堆载预压下, PVD 地基最大净侧向变形的经验预测方法。Xu 等^[20]在 Chai 等^[19]的基础上, 进一步通过实测数据的统计分析, 提出了堆载预压下, PVD 地基最大侧向变形的经验公式。另外, 也有学者结合现场试验和有限元方法对 PVD 地基的侧向变形进行了仿真研究。Ye 等^[21]通过有限元分析发现, 真空预压下 PVD 地基侧

向变形整体向内移动,且水平位移大小随深度增加而迅速衰减。高彦斌等^[22]基于有限元仿真计算指出,PVD地基侧向变形速率可能出现前期超出控制指标,破坏时却低于控制指标的特点。

综上,相较PVD地基的沉降变形研究,有关其侧向变形特性的探索仍较为薄弱,有关PVD地基侧向变形影响因素及变化规律的研究尚不深入,尤其缺乏对不同预压模式下PVD地基侧向变形的对比分析与探索。对此,本文重点开展了堆载预压以及真空联合堆载预压PVD地基的大比例模型试验,详细分析了2种预压模式下,PVD地基的侧向变形特性以及沉降规律。同时,结合有限元仿真计算,进一步分析了真空联合堆载预压下,PVD地基侧向变形的影响因素和变化规律。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

本文研制的PVD地基模型试验装置由模型箱、堆载施加系统、真空施加系统和变形测量系统组成。模型箱尺寸为1.60 m(长)×0.61 m(宽)×1.00 m(高),主体框架由型钢组成,正面与背面采用透明有机玻璃板作为模型箱墙体,中间用有机玻璃面板隔开,可同时填筑2个独立的模型地基。表面堆载由3个加压气缸及3块宽0.16 m的加压钢板施加,两边钢板施加荷载为中间钢板施加荷载的一半,以模拟实际工程中的路基填土荷载。模型地基的侧向变形和分层沉降由紧贴玻璃墙设置的柔性橡胶条和分层沉降标直观进行观察和测量。图1为模型地基布置示意图。

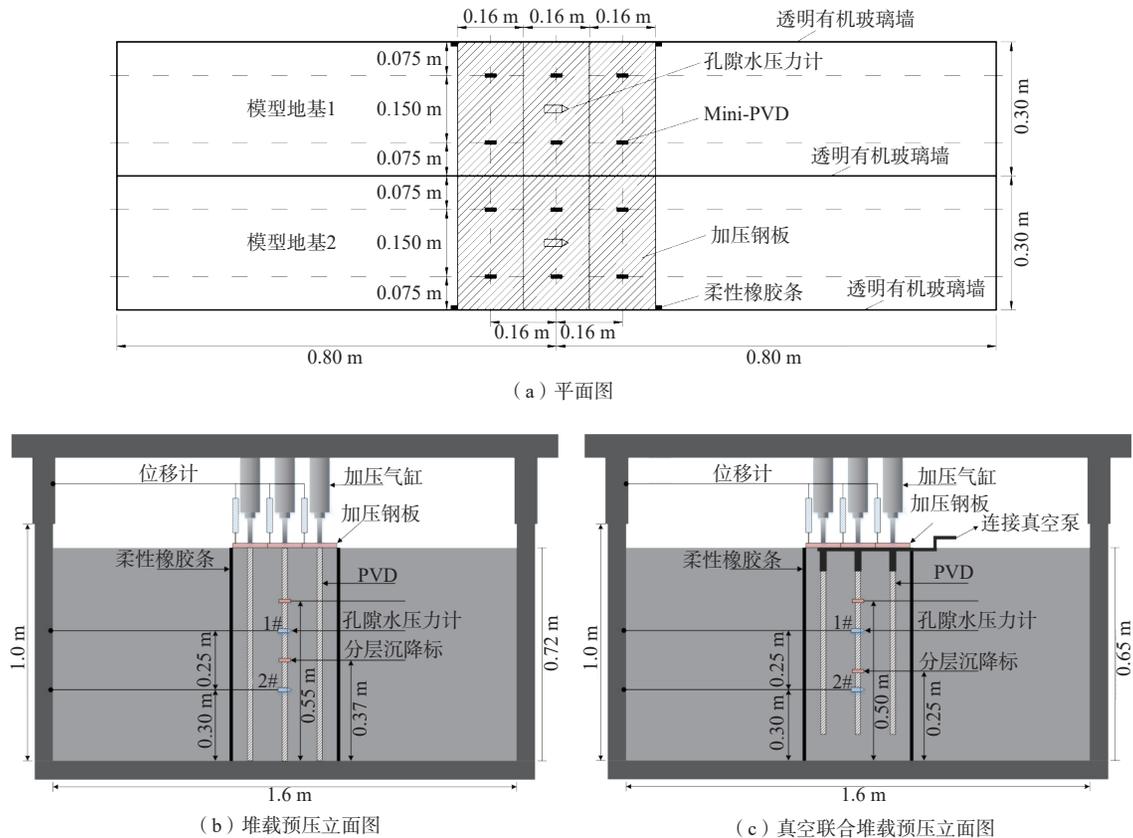


图1 模型地基布置示意图

Fig. 1 Layout illustration of model ground

1.2 试验方案

1.2.1 排水方案

模型箱底面和表面均铺设3层土工布,作为顶部和底面的排水边界。地基土中插入等效PVD提供径向排水边界。现有商用PVD对于模型试验而言尺寸与刚度均偏大,地基变形过程中,PVD的弯折变形会

显著扰动模型地基,从而影响试验结果的可靠性。因此,本文采用过滤膜包裹的多孔无胶过滤棉作为竖向排水体^[23](即等效PVD),其横截面尺寸为30 mm×10 mm,布设间距为160 mm×150 mm(图1),排水单元体影响范围等效直径约为排水体等效直径的7倍。堆载预压下,等效PVD全长穿透模型地基(图1b)。

真空联合堆载预压下,为预防漏气、保证较优的联合预压加固效果,参考既有文献[24],等效 PVD 的底部和顶部各预留 0.1 m 厚的软土层,其顶部通过密封橡胶帽与真空管路相连(图 1c),并在模型地基表面布设 2 层塑料密封薄膜,以避免漏气问题。模型箱底部设置 2 根塑料排水软管,排水管道出口处与模型地基表面保持齐平,以尽量保持模型地基表面和底面水位一致,并减小真空“抽吸”作用对模型地基饱和度的影响。

1.2.2 变形量测方案

模型地基表面沉降采用精度 0.1 mm 的 LVDT 位移计进行监测记录,记录频率为 10 min 记录 1 次。侧向变形和分层沉降通过紧贴透明有机玻璃墙的柔性橡胶条和分层沉降标的位置变化进行观测记录,试验中详细记录了堆载达到最大值时和最终卸载前等一系列时间节点的地基侧向变形和分层沉降。其中,柔性橡胶条对称布置于加载区边缘。加载区宽度小于模型箱长度三分之一,考虑地基一般为剪切破坏模式,模型地基的潜在剪切破坏面不会扩展至模型地基边界处。此外,本文主要关注模型地基堆载区边缘的侧向变形,该位置离模型边界相对较远,参考既有文献的研究经验[23],可认为模型箱边界对该位置处侧向变形的影响较小;需要注意的是,在靠近模型箱边界的区域,模型箱的边界约束效应对地基侧向变形的影响仍是不可忽视的。模型地基内的分层沉降标则布置于加载区中心线以下,其加载前的位置如图 1 所示。

1.2.3 试验工况

针对堆载预压和真空联合堆载预压,各进行了 2 组模型试验。由大量现场试验数据[19-20]可知,堆载大小(p_s)往往视实际情况(如路堤填筑高度)不等,真空压力大小(p_v)则由于受海拔、真空泵抽气性能、密封条件和设备状态等多因素影响而多在 60~85 kPa 变化,一般多为 80 kPa,联合预压下堆载速率(LR)一般为 2~6 kPa/d,仅堆载预压下 LR 多为 1~3 kPa/d。综合考虑,本文模型地基加载工况如表 1。

表 1 试验工况
Table 1 Test conditions

工况	p_v /kPa	p_s /kPa	LR /(kPa·d ⁻¹)	
堆载预压	工况1	0	44	2
	工况2	0	44	3
真空联合堆载预压	工况3	-65	60	4
	工况4	-65	60	6

注:由于真空压力(p_v)为抽吸荷载,为区别于堆载荷载,因此用负值表示真空作用。

模型试验采用的 p_v 为 65 kPa,比工程实际常用的 80 kPa 小。实际工程中,软土地基的厚度一般在 10 m 以上,地表处 p_v 虽达到 80 kPa,但其随深度均存在较为明显的衰减。Bergado 等[25]基于某现场试验的监测数据表明地表 p_v 为 80 kPa,深度 16 m 处衰减为 55 kPa,地基的 p_v 平均值约为 63 kPa。此外,姜彦彬等[26]关于真空负压分布规律的试验研究中,15 m 厚地基模型的平均膜下 p_v 为 88.4 kPa,稳定期整个模型的 p_v 平均值为 67 kPa。本文模型箱高度为 1.0 m,模型地基经砣码预压静置后的厚度为 0.65 m;试验中为保障模型地基的密封性,等效 PVD 的底部和顶部各预留 0.1 m 厚的软土层作为密封层(图 1c),实际等效 PVD 的长度仅有 0.45 m,可认为模型地基的真空压力沿深度衰减有限。可见,本文模型地基的 p_v 平均值为 60~65 kPa,与工程实际中软土地基的 p_v 平均值偏差并不大,所得的试验结果对实际工程仍具有指导意义。

1.3 模型地基填筑与加载

1.3.1 模型地基填筑

模型试验所用软土取自广州南沙港地区淤泥质土,原状土呈灰黑色,流塑状,略具腐臭味,土质细腻粘滑,局部含腐殖质及贝壳碎片,其天然重度为 15.39~18.44 kN/m³,天然孔隙比 0.81~1.78,压缩系数为 0.40~1.82 MPa⁻¹,颗粒密度为 2.60~2.68 g/m³,标贯试验平均击数为 1.68 击。

模型地基填筑前,在模型箱底部铺设排水土工布和排水软管,并在模型箱内壁涂抹凡士林进行润滑处理,以减小侧壁摩擦对试验结果的影响。此外,采用透明胶带将柔性橡胶条紧密粘贴于模型箱前后内壁,后续填筑模型地基时,再逐层揭去胶带,保障模型地基填筑完成后,可于模型箱外侧看见清晰的橡胶条轮廓。同时,在模型地基填筑至一定高度时,紧贴模型箱内部布设分层沉降标(长 3 cm、宽 1 cm 的塑料薄片)。柔性橡胶条和分层沉降标具体位置见图 1。

为保障模型地基填筑的密实性,避免地基内部出现气泡和空隙,将现场取回的淤泥质软黏土加入适量水搅拌至流塑状态,再分层填入模型箱,直至设计标高(即模型箱顶面以下 5 cm 处)。填筑完毕的模型地基用单块重 25 kg 的砣码及刚性板均匀预压静置 60 d 以上,以使地基土获得一定的基础强度。预压静置完成后的模型地基如图 2 所示。

模型地基预压静置完成后,于其两侧端部位置取土开展一维压缩固结试验和固结不排水三轴压缩试验,所得重塑土的压缩指数(C_c)、膨胀指数(C_s)、有效



图 2 预压静置后的模型地基

Fig. 2 Model ground after preloading and resting

内聚力(c')和有效内摩擦角(φ')分别为 0.581、0.116 2、1.3 kPa 和 26.2°。室内液塑限联合测定法所得模型地基土的液限和塑限含水率分别为 52.6% 和 30.3%。模型地基中取土后留下的小坑用含水率相近的重塑土回填平整。重塑土的内摩擦角达 26.2°, 可能与淤泥质重塑黏土的特性有关, 因为模型地基经砒码预压固结静置后已具备一定的强度。另外, 固结不排水三轴压缩试验中采用的围压为规范推荐的 100, 200, 300, 400 kPa, 即试验所得重塑土在该围压范围内的平均有效内摩擦角为 26.2°, 这与孟静等^[27]基于固结慢剪试验所得的上海软黏土有效内摩擦角范围(23.0° ~ 27.1°)相近。

预压完成后的模型地基物理力学参数见表 2, 由表 2 可知, 仅堆载下模型地基的先期固结应力和密度均优于联合预压工况的模型地基。

表 2 预压静置后模型地基的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of model ground after preloading and resting

荷载模式	$\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	$w'/%$	$w/%$	e_0	H_0/m	POP/kPa
仅堆载	16.22	80.8	62.4	1.650	0.72	6.125
真空联合堆载	15.47	100.0	70.0	1.875	0.65	3.500

注: γ' 为经砒码预压静置后的地基土的初始重度; w' 为填筑模型地基时所用流塑态土体的含水率; w 、 e_0 和 H_0 分别为填筑完成并经砒码预压静置后的模型地基的初始含水率、初始孔隙比和初始厚度; POP为模型地基的先期固结压力与其自重应力的差值(即静压砒码对应的压力值)。

1.3.2 加载试验

卸除静压砒码进行模型地基的加载试验。加载前, 采用直径 4 mm 的钢筋将等效 PVD 插入模型地基, 并在模型地基表面铺设 3 层土工布作为表面排水层。真空联合堆载预压试验中, 还需做好真空管道的连接以及模型地基表面密封处理。随后, 将真空压力加载至设计值, 待真空压力稳定后, 按照设计的堆载速率逐级进行堆载。当堆载达到最大值后, 保持当前

荷载状态对模型地基进行预压固结, 直至地基的沉降和侧向变形基本不再随时间变化时终止试验。试验过程中, 通过观测柔性橡胶条和分层沉降标的位置变化, 记录模型地基的侧向变形和分层沉降。

2 试验结果

各组模型试验荷载-时间曲线如图 3 所示。4 组模型试验中, 工况 2(堆载预压)与工况 4(真空联合堆载预压)由于堆载速率过快, 在堆载逐级施加的过程中已发生坍塌破坏, 其沉降时间曲线如图 4 所示, 破坏时模型地基表面沉降陡增, 破坏后的地基土如图 5 所示, 地基产生了较大的侧向挤出变形, 并伴随有加载区外地基表面的隆起现象。可见堆载速率(LR)是影响 PVD 地基变形和稳定的关键因素之一。工况 1(堆载预压)与工况 3(真空联合堆载预压)因加载速率适中, 均成功完成模型地基的加载试验。后续不同预压荷载下, 模型地基试验结果的分析只针对成功完成加

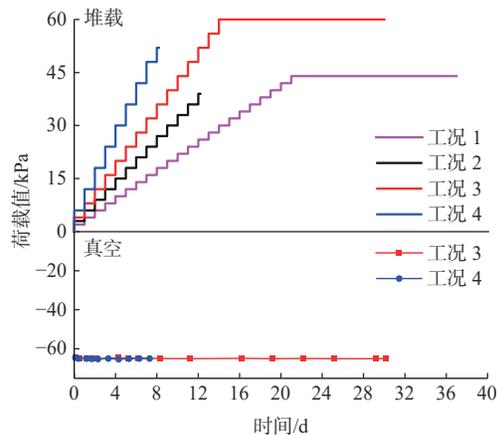


图 3 荷载-时间曲线

Fig. 3 Variations in load with time

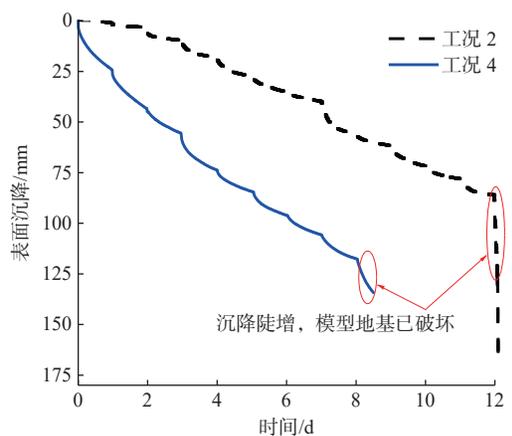


图 4 工况 2 和工况 4 沉降-时间曲线

Fig. 4 Variations in settlement with time (Case 2 and Case 4)

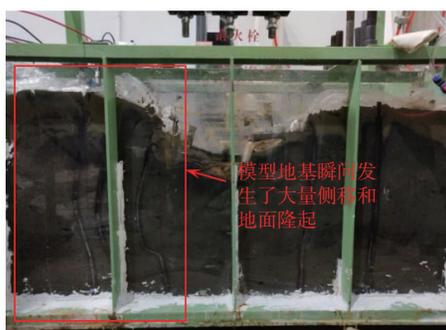


图 5 模型地基坍塌破坏 (工况 4)

Fig. 5 Collapse failure of model ground (Case 4)

载试验的工况 1 与工况 3 进行阐释分析。

2.1 侧向变形

图 6(a)(b)分别为堆载预压(工况 1)与真空联合堆载预压(工况 3)下,模型地基加载区边缘的侧向变形发展过程,图 6(c)为 2 种预压模式达到最大堆载且

预压固结 15 d 后的侧向变形对比图,图中正值表示朝向加载区外的变形,负值表示朝向加载区内的变形。由图 6(c)可见:2 种预压模式下,PVD 地基侧向变形均近似呈左右对称分布,且最终的向外最大侧向变形均在 16.5 mm 左右。但在侧向变形分布上,真空联合堆载预压下,表层地基土收缩变形较明显,整体向外的侧向变形略小,且最大向外侧向变形出现的位置较浅,2 种预压模式下最大向外侧向变形发生位置分别为 25, 15 cm。对比图 6(a) (b),在达到最大堆载后的固结阶段,真空联合堆载预压下,地基整体的侧向变形趋于稳定,且局部表现出轻微的朝向加载区内(简称“向内”)的发展趋势;而堆载预压下地基土的侧向变形仍表现出了明显的朝向加载区外的(简称“向外”)增长趋势,最大向外侧向变形增长量达 1.5 mm (约 10%),个别深度处增量可超 4 mm(约 32%)。

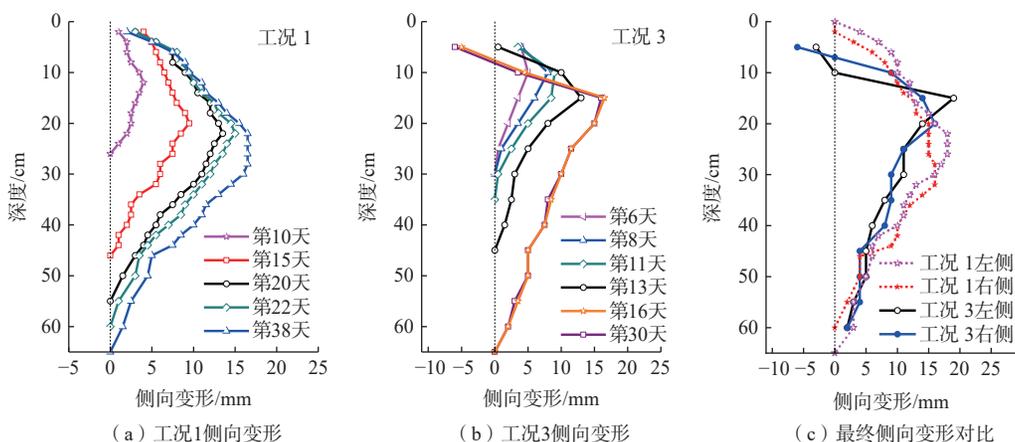


图 6 工况 1 和工况 3 侧向变形

Fig. 6 Lateral deformation in Case 1 and Case 3

对比分析 2 种预压荷载下地基的侧向变形发展规律可知:联合预压下,真空压力使地基土受到近似各向同性的“抽吸”力作用,促使地基土产生向内收缩的侧向变形,并在一定程度“中和”堆载引起的向外侧向变形。因此,在堆载及堆载速率均较大的工况下,工况 3 模型地基因真空压力的存在,向外的侧向变形整体上反而略小于工况 1,并在地基表面产生较为明显的向内收缩侧向变形。

2.2 沉降

图 7 为堆载预压(工况 1)与真空联合堆载预压(工况 3)下,模型地基的表面沉降及分层沉降曲线。由图 7 可知:2 种预压方式在堆载施加过程中的沉降均呈阶梯型规律增加;随各级堆载的施加,地基表面

沉降先迅速增加,后增长速率逐渐变缓。但在达到最大堆载后的固结阶段,真空联合堆载预压下,地基的表面沉降可达最终沉降的 17%,而堆载预压下约为 9.5%。同时,真空联合堆载预压下的模型地基 40 cm 深度处分层沉降无太大发展,15 cm 深度处分层沉降发展亦较缓,而堆载预压下的模型地基 17 cm 和 35 cm 深度处分层沉降均增长较多,增长占比达约 16%。

2 种预压荷载下,地基的沉降发展规律在堆载施加过程中较为一致,但在达到最大堆载后的固结阶段表现出一定的发展趋势差异。究其原因,工况 3 最终堆载及堆载速率均较工况 1 大,加之真空压力的作用,工况 3 地基土的最终竖向固结应力明显大于工况 1,且由于工况 3 堆载施加较快,其达到最大堆载所需

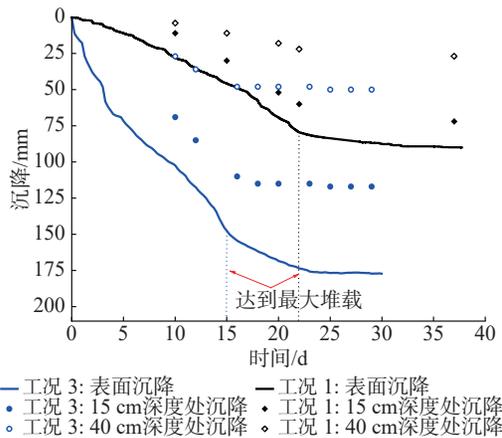


图 7 工况 1 和工况 3 沉降时间曲线

Fig. 7 Variations in settlement with time (Case 1 and Case 3)

的时间较短, 因此堆载结束时刻, 其固结度较小, 致使其达到最大堆载后的后续表面沉降占比较大。而随着加载和固结的进行, 因等效排水板弯折和淤堵效应, 真空压力会随深度增加而有所衰减, 模型箱内壁与分层沉降标之间的润滑作用可能有所减弱, 摩擦效应增大, 影响了分层沉降的准确性, 因此工况 3 测得的地基表面沉降虽增长较多, 但测得的深层沉降受上述因素影响, 增长却较缓慢。堆载预压下, 工况 1 则在达到最大堆载后的预压固结阶段仍产生了一定的向外侧向变形, 由于泊松效应, 该部分侧向变形会引起地基沉降进一步增加, 致使地基土分层沉降相较于工况 3 仍有较大发展。

综合分析可知, 真空联合堆载预压相较于堆载预压有较好的土体加固效果, 可以适应较快的加载速率及较大的堆载, 能够在快速实现软土地基加固处理的同时, 减小堆载作用下地基土向外挤压的侧向变形, 处理效果更好、应用范围更广, 特别是对建筑结构物密集的地区具有良好的适应性。

3 加载参数对地基侧向变形的影响效应

3.1 有限元模型

模型试验相较于现场试验, 虽然能获得更为广泛和具体的测试数据, 但因其仍只能测得个别点位的变形特性, 且试验耗时较长, 不适于进一步增大试验工况。对此, 本文进一步开展真空联合堆载预压下 PVD 地基加载参数对其侧向变形影响的多工况仿真分析,

以为相关加载设计提供参考。

依据工况 3 的模型试验结果, 基于 PLAXIS 2D 有限元软件建立仿真模型, 研究真空联合堆载预压下各加载参数(如堆载速率、堆载大小、真空压力大小等)对 PVD 地基侧向变形的影响规律。根据模型地基的对称性, 建立其二分之一的平面应变有限元模型, 并约束模型地基左右两侧的水平位移以及底面的水平和竖向位移, 设置左右两侧为非排水边界, 顶面和底面为排水边界。在相应位置设置排水单元模拟等效 PVD, 并保持排水单元的间距与模型试验的 PVD 间距一致, 将排水单元行为设置为“真空”, 且施加相应的真空压力。PVD 模型网格采用 15 节点三角形单元划分。同时, 考虑 PVD 地基的大变形效应, 模型网格随分析步和模型地基的变形实时更新。图 8 为模型地基的有限元网格图, 共计包含 2 197 个单元和 17 863 个节点。

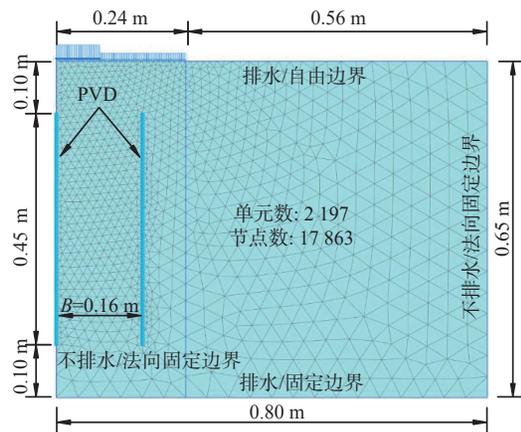


图 8 模型地基有限元网格

Fig. 8 Finite element mesh of model ground

地基土体本构模型采用修正剑桥模型, 模型参数取值如表 3。表 3 中, λ 和 κ 分别为 $e-\ln p$ 曲线下的正常固结线斜率和膨胀线斜率(e 为土体孔隙比, p 为土体固结压力), 可分别根据土体压缩指数(C_c)和膨胀指数(C_s)换算得到; K_0 为地基土的静止土压力系数, 由 Jaky^[28] 提出的经验公式(1)计算得到; M 为修正剑桥模型的临界状态线斜率, 根据 PLAXIS 材料模型手册中 M 与 K_0 的关系反算得出^[29]; k_v 为土体的竖向渗透系数, 由土体一维压缩固结试验结果反算得出; k_h 为

表 3 模型地基的本构模型参数

Table 3 Constitutive properties of model ground

参数	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	λ	κ	e_0	K_0	M	$k_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_{hp}/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_{hv}/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	POP/kPa
取值	15.47	0.252 3	0.050 5	1.875	0.558	1.41	2.35×10^{-5}	3.53×10^{-5}	1.41×10^{-5}	3.5

土体水平向渗透系数,对于重塑软黏土一般可取为 k_v 的 1.5 倍^[30]; k_{hp} 为平面应变条件下的等效水平向渗透系数。

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (1)$$

采用 PLAXIS 2D 建立平面应变有限元模型时,需将实际空间中离散分布的 PVD 转化为连续分布的排水墙,并将土体的水平向渗透系数进行等效转换。参考韩誥^[31]的研究,地基土的水平向等效渗透系数可按式(2)换算得到。

$$k_{hp} = \frac{4B^2k_h}{\mu D_e^2} \quad (2)$$

$$\mu = \ln \frac{D_e}{d_s} + \frac{k_h}{k_s} \ln \frac{d_s}{d_w} - \frac{3}{4} + \frac{2\pi l^2 k_h}{3q_w} \quad (3)$$

$$d_w = \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

式中: B ——PVD 间距/m;

D_e ——PVD 单元体的直径/m,根据单条 PVD 处理面积等效的原则换算得其值为 17.48 cm;

μ ——无量纲常数,依据 Hansbo^[32] 径向固结理论,按式(3)计算;

l ——PVD 的长度/m;

a, b ——PVD 截面的长度/m、宽度/m;

d_w ——PVD 的等效直径/m,按式(4)计算得其值为 2 cm;

q_w ——PVD 的排水能力/($m^3 \cdot a^{-1}$);

d_s, k_s ——涂抹区直径/m、涂抹区土体水平向渗透系数/($m \cdot s^{-1}$)。

Chai 等^[19]根据大量现场试验,发现 k_s 一般为 k_h 的 1/10 ~ 1/2, d_s 一般为 d_w 的 4 ~ 6 倍,本文综合考虑取 $k_s=1/6k_h, d_s=4d_w$ 。商用 PVD 的横截面多为长 100 mm、

宽 3 ~ 5 mm,对应的排水能力 q_w 在 $100 m^3/a$ 左右;本文模型试验所用 PVD 的横截面长和宽分别为 30 mm 和 10 mm,按横截面周长比例估算,模型试验所用等效 PVD 的排水能力 q_w 可近似取为 $40 m^3/a$ 。根据以上研究,按式(2)计算得到 k_{hp} 为 $1.41 \times 10^{-5} m/d$ 。

图 9(a)(b)分别为有限元模型与工况 3 试验所得的沉降和侧向变形结果对比图。图 9(a)中,分层沉降的有限元结果比实测略大的原因可能是,实测中分层沉降标与模型箱内壁仍存在一定摩擦效应,致使沉降标不能完全自由地随地基土沉降而下沉。图 9(b)中,有限元所得地基土深层侧向变形小于实测值,并呈现一定的向内收缩趋势,其原因在于试验中使用的柔性橡胶条仍具有一定的劲度系数,表层土较大的向外侧向变形牵引深层柔性橡胶条向外移动,致使深层位置处橡胶条不能随土体内缩变形而向内迁移。另外,有限元仿真表明,模型地基的深层水平位移(如深度 40 ~ 50 cm)可能出现向内收缩的情况。根据地基附加应力计算理论^[33],模型地基表面施加的堆载经扩散后,于 40 ~ 50 cm 深度范围处引起的附加应力(包括竖向正应力和水平向切应力)已较小,然而模型试验所用 PVD 长度较短(不足 1 m),可认为真空压力在 PVD 全长范围并未明显衰减。因此,模型地基 40 ~ 50 cm 深度处,真空压力对地基土的变形可能占主导作用,致使模型地基深层位置亦可出现向内的侧向变形。而数值计算结果显示底部土体出现侧向变形向外的反转,这是由于等效 PVD 插入深度仅 55 cm,底部土体内并未插入等效 PVD,主要受剪切作用而发生向外的侧向变形。总体而言,有限元仿真所得地基沉降及侧向变形与实测结果较为吻合,可用于进一步开展多工况仿真分析。

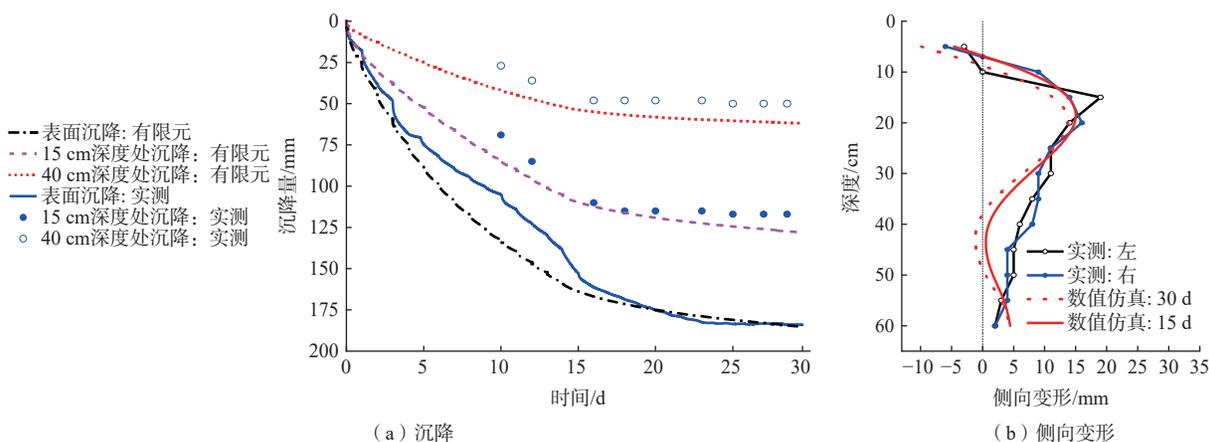


图 9 沉降和侧向变形对比
Fig. 9 Comparison of settlement and lateral deformation

3.2 加载参数的影响效应

为系统研究真空联合堆载预压下堆载速率、堆载大小及真空压力大小对 PVD 地基侧向变形的影响规律, 采用上述建立的有限元模型进行多工况仿真研究, 具体工况见表 4。表中个别工况在尚未加载至预设条件时, 地基已发生坍塌破坏。由于破坏工况无法获得预定条件下的侧向变形轮廓及最大向外侧向变形, 后文只针对未破坏工况分析加载参数对 PVD 地基侧向变形的影响效应。

表 4 加载参数分析工况

Table 4 Simulation conditions of loading parameters

工况	p_v /kPa	p_s /kPa	LR /(kPa·d ⁻¹)	影响因素	备注
M1	-65	60	2	LR	加载破坏
M2	-65	60	3		
M3	-65	60	4		
M4	-65	60	5		
M5	-65	48	4	p_s	
M6	-65	52	4		
M7	-65	56	4		
M8	-50	48	4	p_v	加载破坏
M9	-55	48	4		
M10	-60	48	4		

3.2.1 堆载速率的影响

图 10(a)为不同堆载速率下, 达到最大堆载并固结 15 d 后加载区边缘侧向变形轮廓; 由图可知, 随堆载速率的增加, 地基整体侧向变形逐渐由朝向加载区转变为远离加载区发展, 且浅层最大向外侧向变形出现的深度相应增加。图 10(b)为堆载期间各工况最大向外侧向变形随时间的变化曲线; 由图可见, 随堆载速率的增加, 地基的侧向变形速率显著增大; 较小堆载速率下, 地基的侧向变形随时间变化的曲线较为平

滑。图 10(c)则为最终预压固结结束后, 地基最大向外侧向变形随堆载速率的变化规律; 由图可知, 地基最大向外侧向变形与堆载加载速率呈非线性递增关系。当堆载速率为 2 kPa/d 时, 最大向外侧向变形为 -6.1 mm, 即此时侧向变形是向内的, 而当堆载速率增大为 3 kPa/d 和 4 kPa/d 时, 最大向外侧向变形增长为 1.7 mm 和 13.6 mm, 侧向变形模式逐步发生改变。当堆载速率增加至 5 kPa/d 时, 模型地基在加载至 45 kPa 时发生坍塌破坏, 破坏前最大侧向变形可达 28 mm。

3.2.2 堆载大小的影响

图 11(a)为不同堆载大小下, 达到最大堆载并固结 15 d 后加载区边缘侧向变形轮廓; 可见, 随堆载的增大, PVD 地基的侧向变形整体向外发展, 侧向变形的“弓”字形轮廓幅度随之增大, 最大向外侧向变形深度受堆载大小的影响并不敏感(略微增加)。图 11(b)为堆载期间各工况最大向外侧向变形随时间的变化曲线; 由图可知, 堆载施加期间地基的侧向变形同样呈阶梯型规律增加。图 11(c)为最终预压固结结束后, 地基的最大向外侧向变形随堆载大小的变化规律; 可见, 地基的最大向外侧向变形近似随堆载的增加而线性增大, 堆载每增加 5 kPa, 最大向外侧向变形增长约 1.8 mm。

3.2.3 真空压力大小的影响

图 12(a)为不同真空压力大小($|p_v|$)下, 达到最大堆载并固结 15 d 后加载区边缘侧向变形轮廓; 由图可知, 随着 $|p_v|$ 的增大, 地基整体侧向变形向内收缩, 而最大向外侧向变形深度则呈现上移的趋势。图 12(b)为堆载期间各工况最大向外侧向变形随时间的变化曲线; 可见, 堆载施加期间 $|p_v|$ 的改变对地基侧向变形的增长影响明显, $|p_v|$ 越小, 地基向外侧向变形的速率越

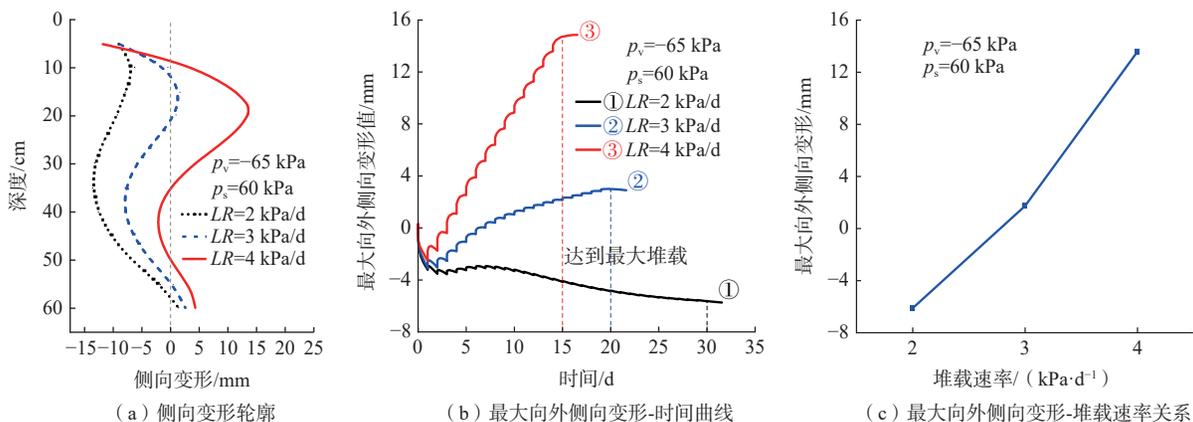


图 10 堆载速率影响

Fig. 10 Effect of loading rate

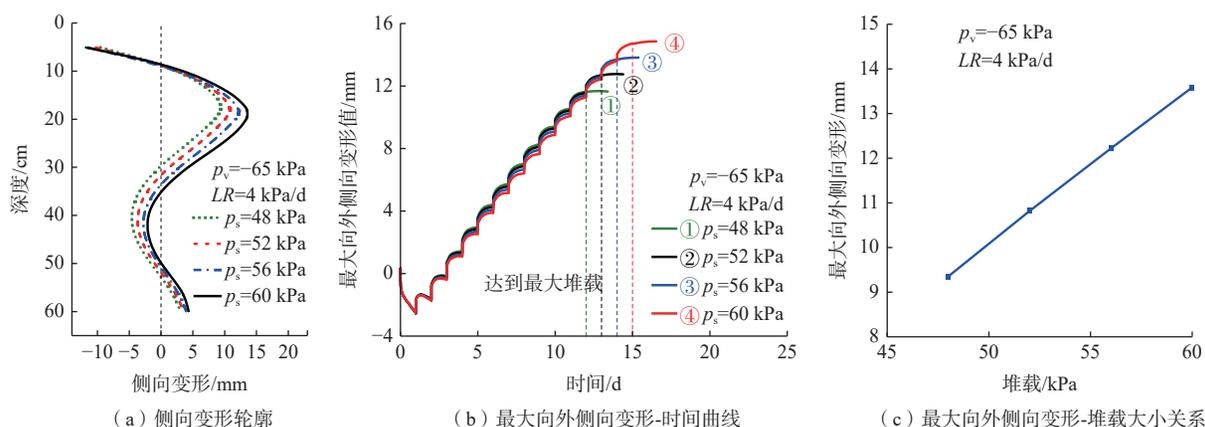


图 11 堆载大小影响

Fig. 11 Effect of surcharge load

大, 最终地基的向外侧向变形也相应增大。图 12(c) 为最终预压固结结束后, 地基的最大向外侧向变形随 $|p_v|$ 的变化规律; 可见, 地基最大向外侧向变形随 $|p_v|$ 的增大而非线性减小。当 $|p_v|$ 为 65 kPa 时, 最大向外侧向变形为 9.4 mm, 但当 $|p_v|$ 分别减小为 60 kPa 和 55 kPa 后,

最大向外侧向变形分别增长为 14.4 mm 和 23.2 mm。而当 $|p_v|$ 减小为 50 kPa 时, 堆载至 40 kPa 模型地基即发生坍塌破坏, 破坏前最大侧向变形可达 27 mm。且对比图 11(b) 可知, 同等荷载改变量下, 改变 $|p_v|$ 对侧向变形的影响相较改变堆载的影响更加明显。

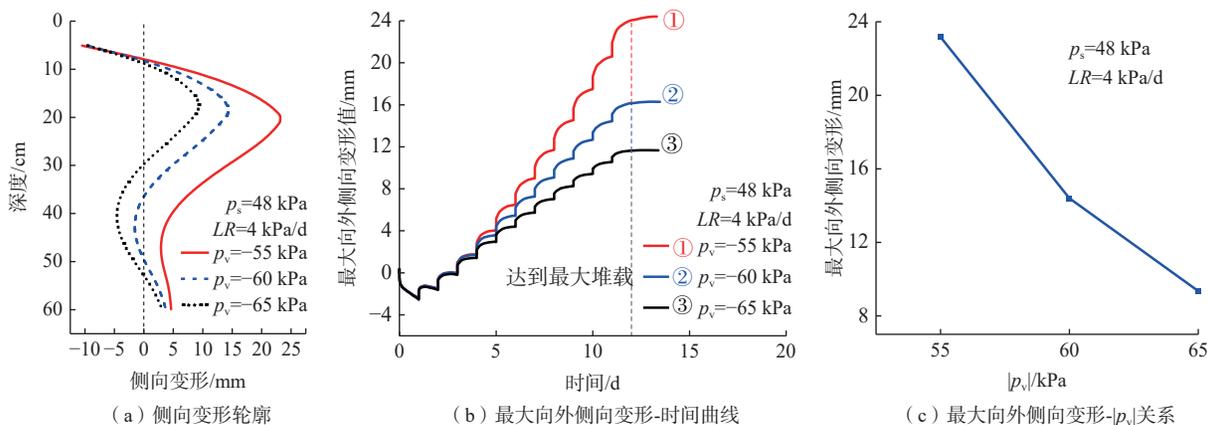


图 12 真空压力大小影响

Fig. 12 Effect of vacuum pressure

4 分析与讨论

4.1 侧向变形机制分析

图 13 为土体初始应力状态及不同预压模式下土单元体应力状态示意。预压前(即初始状态), 软土地基中的侧向土压力系数(K_e)一般为静止土压力系数(K_0)。真空预压时, 土体等同于受到各向同性抽吸荷载作用, $K_e > K_0$ (图 13b), 即土体侧向有效应力大于维持 K_0 状态所需的数值, 土体处于“被动受压”状态, 倾向于产生向内收缩的侧向变形。反之, 当土体受堆载预压时, 土单元体所受竖向应力和水平向剪切应力均明显增长, 由于泊松效应和剪切应力的作用, 此时土

体表现为“主动滑移”状态, 土体竖向压缩固结的同时, 会产生向外膨胀的侧向变形。真空联合堆载预压下, 土体既受真空抽吸荷载作用, 又伴随有堆载引起的竖向固结应力和水平向剪切应力, 此时土体的预压荷载和竖向压缩变形增加, 但真空压力引起的向内侧向变形与堆载引起的向外侧向变形间的消长关系则随具体加载工况不同而变化, 二者叠加后会使得地基的侧向变形随加载方案变化而呈现不同的模式(即整体向内、整体向外或浅层向内而深层向外)。

4.2 加载参数影响讨论

堆载速率的增大使得地基达到同等堆载大小的

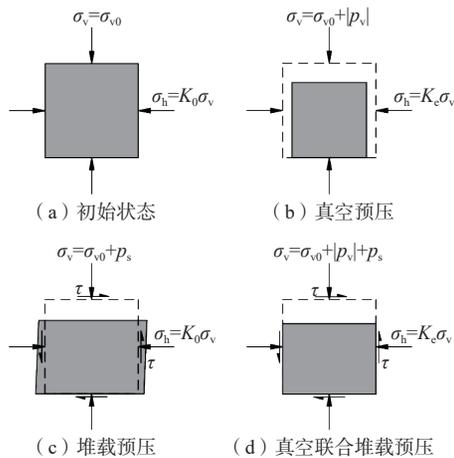


图 13 不同预压模式土体应力状态示意图

Fig. 13 Soil stress state under different preloading modes

加载和固结时间减少,使得地基的排水固结较不充分,荷载增加较快的同时,地基强度与刚度的增长相对较小,从而引发较快的侧向变形速率及较大的向外侧向变形,甚至导致地基的坍塌破坏。相反,真空压力的增加不仅能增大抽吸荷载强度,减小地基内的剪切应力和剪切变形,还能促进地基土的排水固结。因此,较大真空压力下,地基土强度与刚度增长较快,对堆载引起的向外侧向变形的限制也越大,地基最大向外侧向变形及其出现深度随之减小。可见,实际工程设计中,通过控制 PVD 地基的堆载速率可有效调控 PVD 地基的侧向变形(包括变形速率和最大向外侧向变形值)。基于本文研究,建议堆载速率不应大于 4 kPa/d,以防过大堆载速率下地基发生坍塌破坏。此外,调节真空压力和堆载大小亦可对侧向变形起良好控制作用,增大真空压力和减小堆载,均能有效减小 PVD 地基向外的侧向变形。同等荷载改变量下,真空压力相较于堆载对侧向变形的影响较大,建议优先通过控制真空压力的大小对地基侧向变形进行调控。而从地基稳定性角度考虑,真空压力越大,地基稳定性越高,过小的真空压力可能无法保障排水板地基在真空联合堆载预压下的稳定性。

5 结论

(1)在达到最大堆载后的固结阶段,联合预压下排水板地基的侧向变形并无明显增长,且局部表现出向内收缩的发展趋势,而堆载预压下地基的侧向变形仍继续向外发展,个别深度处增量可达 30%。

(2)各级堆载施加期间,PVD 地基的侧向变形均呈阶梯型规律增长。地基最大向外侧向变形出现的

深度随堆载速率的增加而明显增大,随堆载的增加而略微增大,随真空压力的增大则有所减小(上移)。

(3)堆载速率是影响 PVD 地基侧向变形和稳定性的关键因素之一。随着堆载速率增大,真空联合堆载预压下地基的侧向变形逐步由向内收缩转而向外挤压,侧向变形速率明显增加,且其最大向外侧向变形随之而非线性增大。实际工程设计中的堆载速率建议不宜大于 4 kPa/d。

(4)真空联合堆载预压下 PVD 地基的侧向变形轮廓整体随堆载的增大而向外移动,随真空压力的增大而向内移动,且最大向外侧向变形随堆载的增加而近似线性增大,随真空压力增大而非线性减小。同等荷载改变量下,真空压力变化相较堆载变化对地基侧向变形的影响更为显著。

参考文献 (References) :

- [1] 袁波,邵吉成,骆嘉成,等.基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(1):66-74. [YUAN Bo, SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, et al. An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 66-74. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 袁帅,王君,吴朝峰,等.虹吸排水法处理软土地基的水位与沉降计算模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):208-218. [YUAN Shuai, WANG Jun, WU Zhao Feng, et al. Calculation model for water level and settlement of soft foundation treated by siphon drainage[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 208-218. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 彭扬发,周洋,王宁波,等.塑料排水板地基变形的简易算法[J].铁道科学与工程学报,2022,19(7):1898-1907. [PENG Yangfa, ZHOU Yang, WANG Ningbo, et al. Simple method for evaluating deformation of PVD-improved grounds[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1898-1907. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 程瑾,曹凯,吴玉涛,等.基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(4):125-134. [CHENG Jin, CAO Kai, WU Yutao, et al. A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,

- 2022, 49(4): 125 - 134. (in Chinese with English abstract)]
- [5] CHAI J C, SHEN J S L, LIU M D, et al. Predicting the performance of embankments on PVD-improved subsoils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 93: 222 - 231.
- [6] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93 - 110. [LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(4): 93 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [7] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, BARAL P, et al. Performance of marine clay stabilised with vacuum pressure: Based on Queensland experience[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(3): 598 - 611.
- [8] 杨晓杰, 刘冬明, 王孝存. 深厚软弱土层沉降变形规律堆载试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 2): 4259 - 4266. [YANG Xiaojie, LIU Dongming, WANG Xiaocun. Loading test study on settlement deformation law of deep soft soil layer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup 2): 4259 - 4266. (in Chinese with English abstract)]
- [9] ALMEIDA M S S, DEOTTI L O G, ALMEIDA M C F, et al. Vacuum preloading on structured clay: Field, laboratory, and numerical studies[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(10): 04021198.
- [10] 陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 等. 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 138 - 145. [CHEN Ligu, WU Haotian, CHEN Xiaobin, et al. Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 138 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NGUYEN T N, BERGADO D T, KIKUMOTO M, et al. A simple solution for prefabricated vertical drain with surcharge preloading combined with vacuum consolidation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 304 - 322.
- [12] TIAN Yi, JIANG Guosheng, WU Wenbin, et al. Elliptical cylindrical equivalent model of PVD-assisted consolidation under surcharge combined with vacuum preloading and its application[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 139: 104389.
- [13] 蔡袁强, 周岳富, 王鹏, 等. 考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算 [J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3705 - 3713. [CAI Yuanqiang, ZHOU Yuefu, WANG Peng, et al. Calculation on the settlement of dredged slurry treated by vacuum preloading method with consideration of clogging effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3705 - 3713. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 邹育麟, 李建兴. 排水板堆载预压处理软土路基原位观测试验 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1658 - 1663. [ZOU Yulin, LI Jianxing. In-situ observation test of soft soil subgrade treated by preloading method[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(8): 1658 - 1663. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 蒋建清, 曹国辉, 刘热强. 排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 551 - 558. [JIANG Jianqing, CAO Guohui, LIU Reqiang. Field test on behaviours of marine soft soil foundation treated with plastic drainage plate and sand column combined with surcharge preloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup 2): 551 - 558. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 雷鸣, 徐汉勇, 匡希龙, 等. 真空作用下软土固结机制及实例分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1433 - 1439. [LEI Ming, XU Hanyong, KUANG Xilong, et al. Analysis of consolidation mechanism and example of treating soft foundation in vacuum preloading[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(6): 1433 - 1439. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张世民, 王秀婷, 崔耀, 等. 真空联合堆载预压近海软基加固效果分析 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 59 - 65. [ZHANG Shimin, WANG Xiuting, CUI Yao, et al. An analysis of the effect of vacuum combined with surcharge preloading on offshore soft foundation reinforcement[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 59 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 塑料排水板处理软基侧向变形规律及预测模型 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 218 - 225. [CHEN Jibin, ZHAO Qihua, PENG Sheqin, et al. Lateral deformation law of soft soil subgrade treated by plastic drainage plate and forecasting model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(2): 218 - 225.

- (in Chinese with English abstract)]
- [19] CHAI Jinchun, ONG C Y, CARTER J P, et al. Lateral displacement under combined vacuum pressure and embankment loading[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(10): 842 – 856.
- [20] XU Fang, CHAI Jinchun. Lateral displacement of PVD-improved deposit under embankment loading[J]. *Geosynthetics International*, 2014, 21(5): 286 – 300.
- [21] YE Guanbao, XU Yan, ZHANG Zhen. Performance evaluation of PVD-reinforced soft soil with surcharge and vacuum preloading[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(4): 421 – 433.
- [22] 高彦斌, 张松波, 郭永发. 软土地基的变形速率及稳定性控制 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 11 – 17. [GAO Yanbin, ZHANG Songbo, GUO Yongfa. Deformation rates and stability control of soft foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(2): 11 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CHAI Jinchun, XU Fang. Experimental investigation of lateral displacement of PVD-improved deposit[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 9(5): 585 – 599.
- [24] CHAI Jinchun, MIURA N, KIREKAWA T, et al. Optimum PVD installation depth for two-way drainage deposit[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2009, 1(3): 179 – 191.
- [25] BERGADO D T, JAMSAWANG P, JONGPRADIST P, et al. Case study and numerical simulation of PVD improved soft Bangkok clay with surcharge and vacuum preloading using a modified air-water separation system[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(1): 137 – 153.
- [26] 姜彦彬, 何宁, 许滨华, 等. 真空预压负压分布规律模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1874 – 1883. [JIANG Yanbin, HE Ning, XU Binhua, et al. Model tests on negative pressure distribution in vacuum preloading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1874 – 1883. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 孟静, 高彦斌, 袁聚云. 上海地区重塑粘性土有效内摩擦角试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2008, 16(增刊 1): 677 – 680. [MENG Jing, GAO Yanbin, YUAN Juyun. Study on the effective angle of internal friction of remolded clay in shanghai[J] *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(Sup 1): 677 – 680. (in Chinese with English abstract)]
- [28] JAKY J. Pressure in silos[C]//*Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Balkema, 1948: 103 – 107.
- [29] PLAXIS 2D Material Model Manual[M]. Netherlands: Delft University of Technology & PLAXIS, 2020.
- [30] CHAI Jinchun, RONDONUWU S G. Surcharge loading rate for minimizing lateral displacement of PVD improved deposit with vacuum pressure[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(6): 558 – 566.
- [31] 韩谓. 真空—堆载联合预压下 PVD 地基的侧向变形预测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2021. [HAN Xu. Study on prediction method of lateral deformation of PVD-improved ground under combined vacuum pressure and surcharge load[D]. Changsha: Central South University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [32] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]//*Proceedings 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm, Balkema, 1981: 677 – 682.
- [33] DAS B M. Principles of geotechnical engineering[M]. Singapore: Cengage Learning, 2021.

编辑: 刘真真