

传统与分级真空预压的模型试验研究

熊 站¹, 汪明元², 严 乾¹, 王友博¹, 王亚军^{1*},
祝 幸³, 李 强¹, 王治云⁴

(1. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 舟山 316022;

2. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

3. 碧桂园集团, 广东 佛山 528000; 4. 舟山市新海洋岩土工程有限公司, 浙江 舟山 316022)

摘 要:为了将真空预压排水固结技术应用到舟山围海造陆工程实践中,以长峙岛海域海相软土为实验原材料,通过室内模型试验,探讨了传统真空预压与分级真空预压处理的效果。结果表明:传统真空预压中由于土体细小土颗粒的迁移导致排水板发生淤堵,而分级真空预压由于低真空产生的渗流力较小,土颗粒难以发生迁移而形成稳定的结构,一定程度上减缓排水板发生淤堵。在本次真空预压作用时间内,分级真空预压比传统真空预压的排水固结效果更好,预压后土体的沉降量更大、含水率更小,后期处理效果更好。此外,提出的固结度-时间公式对预测土体的固结度具有一定的价值。

关键词:真空预压;海相软土;分级真空预压;淤堵

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)03-0043-07

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.03.005

舟山是一座海岛城市,当前陆域面积仅为 1 440 km²,而未来“一体一圈五岛群”规划中尚需拓展的城市面积约在 200 km²以上,其中绝大部分空间的形成只能通过向海洋扩张来完成,以舟山大、小鱼山岛的海上围垦为例,竣工后形成的陆域面积可达 41 km²,由此形成的深水岸线约为 4 000 m^[1-2]。依据前期研究,舟山近海海相沉积物的含盐量高,且离子交换量偏大,致使微观颗粒被较厚的扩散水膜所包围,各向异性的超载会破坏粒间结构,“片架一片堆”结构特征极为显著,微观一介观结构极不稳定^[3]。由于海相软土在自重的长时间固结下仍然具有高含水率、高压缩性和低承载能力,无法满足建筑的承载要求。因此,在工程建设之前固结这些软黏土是很有必要的。

真空预压排水固结技术广泛应用于软土地基的加固^[4],利用抽真空的方法,使土体中形成一个局部的负压源,通过降低排水板中的孔隙水压力,使排水板和周围土体之间形成孔压差,土体中的孔隙水在压力差的作用下渗流到排水板中排出土体,从而增加有效应力来压密土体^[5]。然而,工程实践表明,由于传统真空预压过程中淤泥层的孔隙结构不稳定,颗粒运动的累积效应引起排水板外部堵塞,导致在持续的真空预压过程中固结效率明显降低^[4]。故以长峙岛海域海相软土为实验原材料,通过室内模型试验,探讨传统真空预压与分级真空预压处理的效果,分析孔隙水压力、沉降量、排水量、固结度和含水率等各项参数来反应海相软土的加固效果。

收稿日期: 2018-05-14

资助项目:国家自然科学基金项目——基于模糊随机损伤力学的混凝土高坝抗震安全评价研究(51109118);中国电建集团华东水利水电勘测设计研究院基础研究课题——围海造路工程中大规模吹填泥浆快速排水固结技术的模型试验与研究(21188006615)

作者简介:熊 站(1994-),男,硕士研究生,主要从事海淤泥土固化方面研究. E-mail: 287411661@qq.com

* **通讯作者:**王亚军(1976-),男,教授,主要从事岩土工程力学方面研究. E-mail: aegis68004@163.com

(李 燕 编辑)

1 材料与方方法

1.1 材料

本研究所用海相软土取土位置在长峙岛海域一侧(122°10'48"E, 29°58'48"N),具体地理位置如图 1 黑点所示。长峙岛在经历几次不同规模的围海造陆作用后,海岸堆沉积特点愈加突出,由此形成的是大量的泥质海滩,海岸及潮差带均分布有大范围、极深厚的海相软土^[5]。

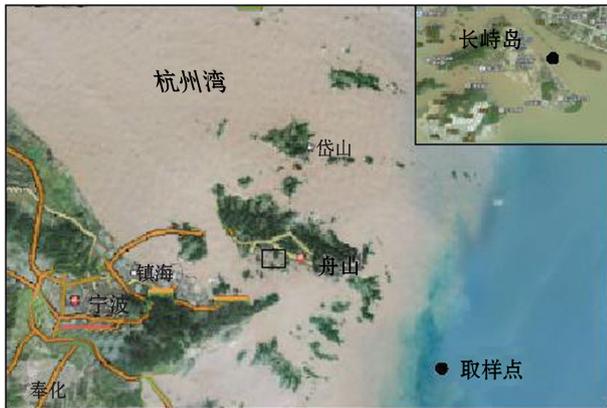


图 1 取样点地理位置

Fig.1 Geographical location of sampling



图 2 海相软土

Fig.2 Marine soft soil

经对多组土样性质观察分析发现,其表观呈灰黑色,有腥臭味,颗粒细腻,土样中普遍夹杂海洋生物残体。海相土的物理性质如表 1 所示,含水率高、初始孔隙比大、呈流塑状,塑性指数 $10 < I_p < 17$,液限 $W_L < 50\%$,依据土的分类标准(GB/T 50145—2007)^[6]和岩土工程勘察规范(GB 50021—2001)^[7]应将其定名为低液限粉质黏土。试验中所使用的排水板的宽度和厚度分别为 10.0 cm 和 0.5 cm,滤膜的渗透系数和等效直径分别为 0.014 cm/s 和 0.012 cm。

表 1 海相沉积物的性质

Table 1 Properties of the marine sediments

含水率 $\omega/\%$	比重 G_s	天然密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	液性指数 I_L	塑性指数 I_p
96.1	2.71	1.45	2.67	22.0	37.8	4.69	15.8

1.2 试验装置

真空预压固结技术的试验装置主要由模型桶、真空泵(功率 3.85 kW)、水气分离瓶、排水板、真空管、自制铁架(用于固定排水板和孔隙水压力计)等组成;数据采集系统包括真空表、孔隙水压力计、直尺、电子秤(图 3)。试验使用的材料有密封膜、土工织物、胶布、玻璃胶等。

1.3 试验过程

模型桶的直径 50 cm,高 90 cm,排水板的打入深度 65 cm,孔隙水压力计距排水板 15 cm,埋设深度 80

cm(图 3)。将海相软土一层一层装入放模型桶直至土样高度为 90 cm,放一层土工织物和两层土工膜在土样上;用真空管连接鸭嘴帽(图 4)、水气分离瓶和真空泵,并用玻璃胶密封接头,其中鸭嘴帽与排水板镶嵌固定;用胶布密封土工膜与鸭嘴帽的接头处,并在模型桶边界处涂一层淤泥;标记各表层沉降测点的位置。本次试验为两组平行试验,其中,传统真空预压试验被命名为 Test 1,真空压力维持在 80 kPa,分级真空预压试验被命名为 Test 2,真空压力分为 20, 40 和 80 kPa 三级加载,依据检测所得土体表层沉降量和排水量的变化趋势决定下一级真空压力的施加。当其中一组试验土体每 12 h 的沉降量小于 0.1 mm 时,可以认为土体固结趋于稳定,同时停止 2 组试验,测土体不同深度下的含水率。

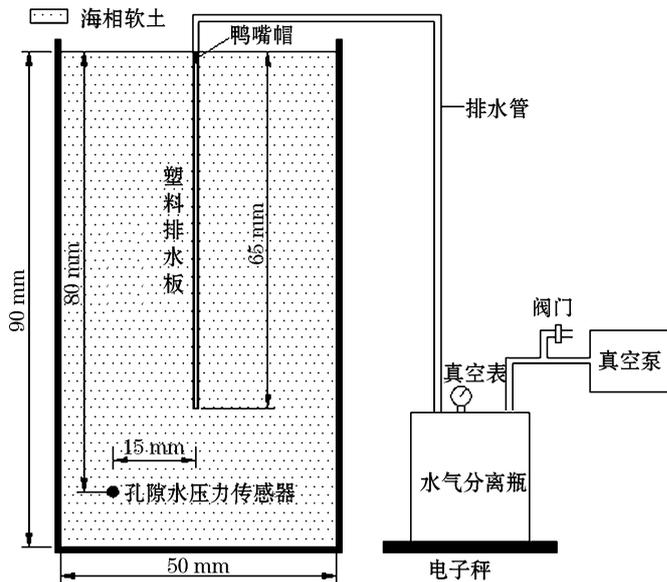


图 3 试验模型的示意图

Fig.3 A sketch map of the tested model



图 4 鸭嘴帽

Fig.4 Airtight cap

3 结果与分析

3.1 孔隙水压力

孔隙水压力是评价软土地基改良效果的一个重要的参数,由于许多不可控的因素,孔隙水压力的消散是非常复杂的,此外,监测点的布置也很大程度上影响了孔隙水压力消散的分析。图 5 描绘了孔隙水压力随时间变化曲线,由于孔隙水压力接收器在真空预压过程中出现故障导致 4 400 min 后的孔隙水压力读数无法测读。由图可知,Test 2 在一级和二级加载阶段孔隙水压力消散速度分别为 -0.00156 kPa/min 和 -0.00466 kPa/min ,可见二级加载作用下孔隙水压力的消散速度为一级加载的 3 倍,孔隙水压力消散速度变快。从孔隙水压力的消散趋势可知,Test 1 在 4 400 min 内的孔隙水压力消散速度快于 Test 2 的二级加载,这是因为前

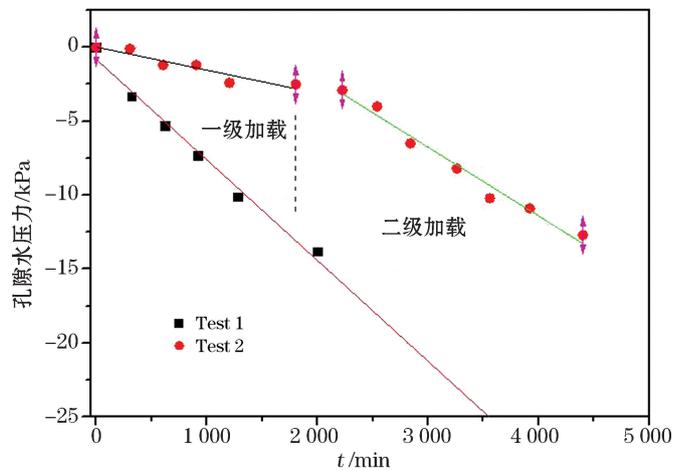


图 5 孔隙水压力随时间变化的曲线

Fig.5 Change of pore water pressure with time

期土体中含有大量的自由水,土颗粒之间还处于游离状态,土颗粒的迁移现象还不明显,此时排水板的通透性很好,施加的真空压力越大,土体中的自由水在渗流场的作用下被排出的速度越快,体现在孔隙水压力消散的速度越快。此外,根据孔隙水压力的埋设深度可知真空预压的有效加固深度能在排水板以下。

3.2 表面沉降量和排水量

沉降量反映了土体的变形程度,也是用来反映软土地基改良效果的一个重要参数。土体平均表面沉降量和排水量随时间变化的关系曲线如图 6 所示,Test 1 的沉降量与排水量在试验初期明显大于 Test 2,与图 5 孔隙水压力的消散具有一致性,随后沉降量和排水速度减缓直至趋于稳定,但 Test 2 在后期的沉降速度和排水速度明显大于 Test 1,这是因为随着 Test 1 后期继续抽真空,土体中的自由水被大量排出,且细小土颗粒会随着水的渗流而发生迁移重组,靠近排水板一侧聚集了大量的细小颗粒,进而形成致密的“土柱”^[8],导致滤膜被堵塞,排水效率严重下降。Test 2 的排水板没有明显的淤堵问题,由于前期施加的真空荷载较小,产生的渗流力无法使土颗粒发生大量迁移,随着自由水的缓慢排出,土颗粒之间形成稳定的结构,尽管之后逐级施加高真空,但土体稳定的结构会阻碍细小颗粒迁移而减缓排水板淤堵。Test 2 的最终沉降量和排水量大于 Test 1,说明 Test 2 加固舟山近海海相软土的效果更好。此外,后期 Test 2 的沉降量还有继续增大的趋势,说明土体将产生进一步的固结。由图 6 可知,土体表面沉降量和排水量随时间的变化具有一致性,进一步说明了沉降的发生是由于土体中水份的排出,土中应力由孔隙传递渐渐变为土粒接触点传递进而发生压缩变形。

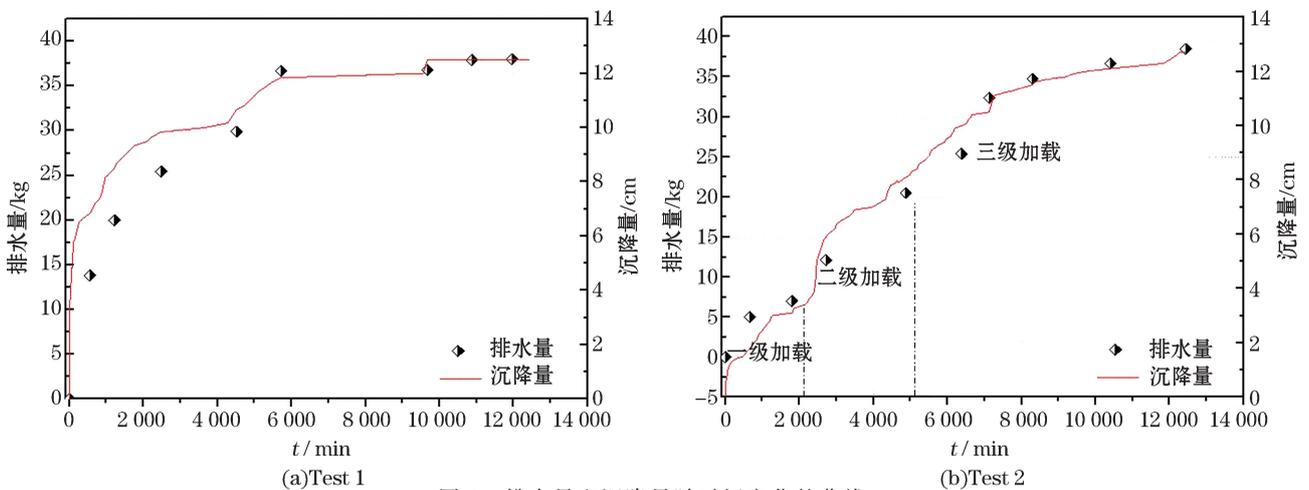


图 6 排水量和沉降量随时间变化的曲线

Fig.6 Change of drainage and settlement with time

3.3 平均固结度

平均固结度可以通过表面沉降计算,是评价土体加固效果的重要指标,为当前沉降量 S_{at} 与最终沉降量 S_c 的比值。然而对于土体的加固而言,最终沉降量无法获得,只能预测。计算土体最终沉降量的方法有多种^[8-10],本文选用 Asaoka^[8]提出的方法,即对于相同时间间隔 t 下的一组沉降值($S_1, \dots, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, \dots, S_N$),描绘 S_n 与 S_{n-1} 的关系曲线($n=1, \dots, N$),作倾角 45° 的直线与 $S_n - S_{n-1}$ 直线的交点即为最终沉降量 S_{ult} (图 7)。选取两组试验的 S_1 为 1 000 min,时间间隔 t 为 2 000 min, N 为 6,计算 Test 1 和 Test 2 的土体最终沉降量 S_{ult} 分别为 13.0, 13.6 cm,因而平均固结度 U_z 分别为 96.2%, 93.4%。由固结度随时间的变化曲线(图 8)可知,前期 Test 1 的固结度明显大于 Test 2,之后逐渐减缓,两者缓慢接近。如果继续施加真空,Test 2 的固结度将超过 Test 1,若工程中对固结度的要求较高,建议使用 Test 2。

固结度随时间变化的拟合曲线呈指数分布,公式:

$$U_t = U_{ult} + A_1 e^{-t/t_1}, \quad (1)$$

式中, U_{ult} 为最终固结度, t 为固结时间, A_1, t_1 可以通过试验数据获得, 所有的拟合参数如表 2 所示。可见, 拟合曲线与试验数据点具有很好的一致性, 几乎没有偏差。而且该公式具有一定的物理意义, 当固结时间 t 趋向无穷, 理论上最终固结度 U_{ult} 趋向于 1.0, 式(1)计算的 Test 1 和 Test 2 最终固结度分别为 0.985 和 1.035, 的相对误差仅为 1.5% 和 3.5%; 当时间 t 趋向于 0 时, Test 2 拟合公式计算的固结度趋近于 0, 与初始泥浆的固结度相同, 而 Test 1 拟合公式对前期固结度的预测不准确, 当固结度超过 0.6 以后拟合效果较好。

表 2 固结度拟合参数

Table 2 Fitted parameters of the consolidation degree

试 验	U_{ult}	A_1	t_1	相关系数(R^2)
Test 1	0.985	-0.46	4.05×10^3	0.986 9
Test 2	1.035	-1.02	5.33×10^3	0.988 2

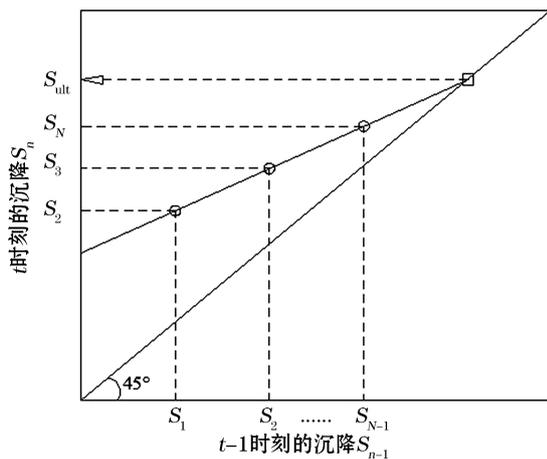


图 7 Asaoka 方法的示意图

Fig.7 A sketch map of Asaoka's method

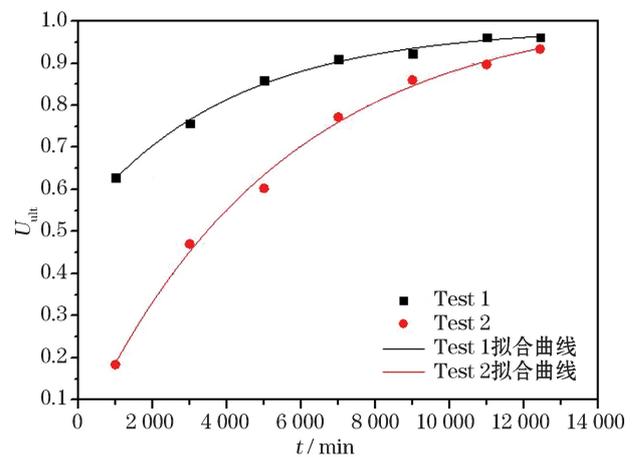


图 8 固结度随时间的变化曲线

Fig.8 Change of consolidation degree with time

3.4 含水率

含水率从另一个角度反映了软土地基的改良效果。在真空荷载作用下, 随着孔隙水渗流的排出, 将会导致含水率的减少和土体强度的增加, 因此对含水率的研究是非常重要的。Test 1 和 Test 2 在不同深度下土体的含水率如表 3 所示, 土体含水率从浅层到深层依次递增, 这是因为真空在土体的传递过程中会发生能量损耗, 导致深层土体的真空度较小。Test 2 各层的含水率要小于 Test 1 的, 说明 Test 2 的加固效果更好, 最小含水率为 39.7%, 相对于初始含水率, 减少了 60% 左右。图 9 描绘了土体平均含水率随时间的变化关系, Test 2 土体平均含水率变化趋势分为 3 段, 与逐级施加的真空荷载具有一一对应关系。Test 1 前期平均含水率的减少速率明显大于 Test 2, 之后由于 Test 1 排水板的淤堵, 排水速率减缓, 最终 Test 2 土体平均含水率小于 Test 1。

表 3 不同深度下土体的含水率

Table 3 Rate of water content in the soil at different depths

试 验	含水率		
	0~30 cm	30~60 cm	60~90 cm
Test 1	39.7%	42.4%	44.2%
Test 2	37.0%	40.7%	42.6%

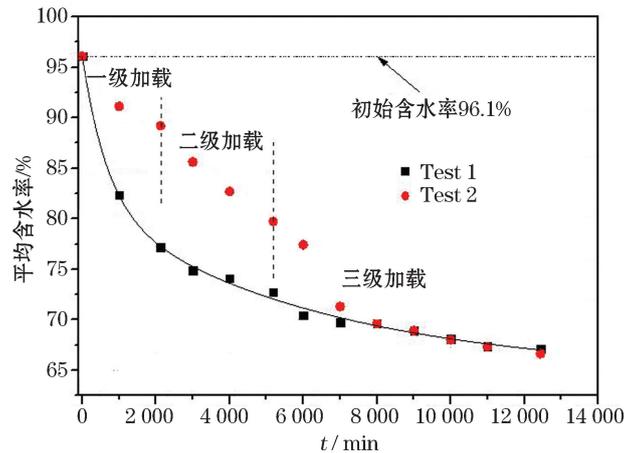


图9 土体平均含水率随时间的变化曲线

Fig.9 Change of the average rate of water content in soil with time

4 结 语

本文研究了舟山近海海相软土在室内真空预压模型试验下的固结特性,探讨了传统真空预压与分级真空预压处理效果,得到以下主要结论:

1) 分级真空预压比传统真空预压的排水固结效果更好,预压后土体的沉降量更大、含水率更小,后期处理效果更好,排水板没有明显的淤堵现象,因而继续施加真空土体将产生进一步的固结,而传统真空预压后期的固结效果已不明显。如果工程中对土体沉降量和含水率的要求较高,建议使用分级真空预压;

2) 提出了固结度随时间呈指数变化的公式,当固结度达到 0.6 以后,拟合效果很好,且具有一定的物理意义,当固结时间 t 趋向无穷,与理论上最终固结度 U_{ult} 的相对误差仅为 1.5% 和 3.5%,因而对土体固结度的预测具有一定的价值。

参考文献 (References):

- [1] WANG Y J, JIN F, ZHANG C H, et al. Liquefaction failure pore-pressure models of Zhoushan marine sandy soil under cyclic exciting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 582-597. 王亚军, 金峰, 张楚汉, 等. 舟山海域海相砂土循环激励下的液化破坏孔压模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 582-597.
- [2] WANG M Y, SHAN Z G, WANG Y J, et al. Dynamic elastic moduli and damping ratios of marine sediments at Zhoushan DAISHAN based on dynamic triaxial tests under strain control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1503-1512. 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1503-1512.
- [3] XIONG Z, WANG M Y, ZHU X, et al. Study on properties of marine dredged slurry in the offshore area of Zhoushan and suggestion of the technique of handling [J]. Coastal Engineering, 2017. 熊站, 汪明元, 祝幸, 等. 舟山近海海相吹填泥浆的性状研究及处理技术建议[J]. 海岸工程, 2017, 36(3): 59-64.
- [4] ZHU J C. Echanism and technology of vacuum combined with surcharge preloading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [5] ZHU X. Vacuum preloading experiments of the marine reclamation works in Zhoushan[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017. 祝幸. 舟山海相沉积物真空预压排水固结机理与实验研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- [6] Ministry of Water Resources. Soil classification standard:GB/T 50145-2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2007. 中华人民共和国水利部. 土的分类标准:GB/T 50145-2007[S]. 北京:中国计划出版社, 2007.

- [7] Ministry of Construction Comprehensive Survey and Research Institute. Geotechnical survey specification:GB 50021—2001[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. 建设部综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. Soils & Foundations, 1978, 18(4): 87-101.
- [9] ZENG G X, WANG T R, GU Y Z. Some aspects of sand-drained ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(3): 74-81. 曾国熙, 王铁儒, 顾尧章. 砂井地基的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(3): 74-81.
- [10] CHU J, YAN S W. Estimation of degree of consolidation for vacuum preloading projects[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(2): 158-165.

A Model Test Study on Traditional and Staged Vacuum Preloading

XIONG Zhan¹, WANG Ming-yuan², YAN Qian¹, WANG You-bo¹, WANG Ya-jun¹, ZHU Xing³,
LI Qiang¹, WANG Zhi-yun⁴

(1. Harbor and traffic engineering portage College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Hydro China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310012, China;

3. Country Garden Holdings, Foshan 528000, China;

4. Zhoushan New Ocean Geotechnical Engineering Co., Ltd, Zhoushan 316022, China)

Abstract: In order to apply vacuum preloading drainage consolidation technology to the practice of reclamation land in Zhoushan, the treatment effects of traditional and staged vacuum preloading are discussed by taking the marine soft soil in the Changchi Island as the experimental raw material and carrying out model test in the laboratory. The main conclusions are as the followings: the traditional vacuum preloading may cause the clogging of drainage board due to the migration of fine particles in the soil; while the staged vacuum preloading can, to a certain extent, reduce the clogging of drainage board because the soil particles are difficult to migrate due to the small seepage force produced by low vacuum and form a stable structure. Within the preloading time of this model test, the staged vacuum preloading produces a better effect of drainage consolidation than the traditional one, showing that after the preloading the soil body is larger in the amount of settlement, smaller in the rate of water content and better in the effect of post-treatment. In addition, the formula of consolidation degree-time proposed in the paper has a certain value in predicting the consolidation degree of soil.

Key words: vacuum preloading; marine soft soil; staged vacuum preloading; clogging

Received: May 14, 2018