



真空预压法处理高液限黏土 适用性模型试验研究

程 瑾，张云冬，张 乾，张 勇
(中交天津港航勘察设计院有限公司，天津 300450)

摘要：设计真空预压法处理高、低液限黏土的室内模型对比试验，研究真空预压法对某工程高液限黏土的适用性及其对高、低液限黏土两种土样的处理效果。结果表明：试验后各土样的含水率、孔隙比明显减小；密实性、强度明显提高；高液限土样的体积压缩率为 47.4%，低液限土样的体积压缩率为 22.9%。真空预压法适用处理本工程高液限黏土，处理效果明显。

关键词：真空预压；模型试验；高液限土；对比分析

中图分类号：U 655.54+4.4 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)11-0155-05

Model experimental study on applicability of vacuum preloading to treat high liquid limit clay

CHENG Jin, ZHANG Yun-dong, ZHANG Qian, ZHANG Yong
(CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Designing the comparative model experiment, we study the treatment effect of high and low liquid limit clay with vacuum preloading method, esp. the applicability of vacuum preloading method to treat high liquid limit clay in a project and the treatment effect for the two kinds of clay (high and low liquid limit) samples with this method. The result indicates that the moisture content and void ratio of clay samples decreased obviously; The density and strength of them also improved obviously; The volume compression ratio of high liquid limit clay is 47.4%, and the volume compression ratio of low liquid limit clay is 22.9%. It is applicative to treat high liquid limit clay with vacuum preloading method in this project, and the treatment effect is obviously.

Keywords: vacuum preloading; model experiment; high liquid limit clay; comparative analysis

真空预压地基处理方法对于处理淤泥及淤泥质土具有处理效果好、污染少、经济效益好等优点。自 20 世纪 80 年代开始，随着经验的积累和理论的进一步深入研究，其设计理论和施工工艺均已相对成熟^[1-2]，因而促进了该法在沿海地区淤泥及淤泥质土地基处理中的广泛应用^[3-5]。目前对于真空预压的研究^[6-10]主要包括真空预压新工艺、数值模拟、加固机理、模型试验、现场试验、以

及真空预压对土的微观结构的影响。但由于真空预压法本身的局限性，并不是所有的淤泥及淤泥质土都能运用该方法进行地基处理，工程上不乏真空预压法地基处理失败的案例。尤其对于黏粒含量高、液限高、塑性指数大（规范^[11]要求塑性指数大于 25）的土，应进行试验研究以确定其真空预压的适用性。

马来西亚槟城填海二期工程场地为海相沉积

的软土，具有颗粒细、液限高、塑性指数大的特点，因而不能确定真空预压法处理该类土的适用性，且当地没有真空预压处理地基的案例可循。通过在工程现场采取少量土样并进行土工试验和室内抽真空试验，为真空预压法在本工程地基处理中的应用提供参考依据。

1 工程概况

马来西亚槟城填海二期工程场地现状为潮间带和浅海，拟采用吹填造地方式形成人工岛，从而为城市发展、旅游及经济发展提供土地资源，总造地面积约 370 万 m²。

本工程地基处理的主要对象为吹填土、原位沉积的第 1 层淤泥和第 2 层淤泥质黏土，总厚度 15 ~ 25 m 不等。场地土的主要特征是颗粒细、含水率高、孔隙比大、液限高、塑性指数大。但由于场地岩土工程勘察报告采用的规范是英国岩土勘察规范，而英标与国标在颗粒分析、液塑限试验方法、岩土分类等方面的差异，难于将原地质报告里的关键参数与国内已经取得的岩土工程经

验参数结合使用，故需要对场地软土取样并进行土工试验和真空预压试验，以取得软土层的关键物理、力学参数，并确定该种土质是否适合抽真空。

2 试验方案

2.1 试验设计

为了取得与国内土质有对比性的成果，在连云港取得土样（正在进行真空预压地基处理的场地，为非高液限黏土）分别同时进行抽真空模型试验。试验土样的颗粒分析及物性参数见表 1 和表 2。

表 1 土质颗粒分析

粒径/mm	连云港土样 颗粒百分比/%	槟城土样 颗粒百分比/%
>0.25	0	0
0.25~0.075	0.20	2.0
0.075~0.05	5.25	17.3
0.05~0.01	26.00	19.8
0.01~0.005	18.75	27.4
<0.005	49.80	34.0
<0.002	25.70	22.3

表 2 土样物理性质参数

土样	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
连云港土样	90.8	1.47	2.56	54.3	34.4	19.95	2.90
槟城土样	240.2	1.26	6.48	95.4	59.1	36.30	5.14

试验步骤如下：

1) 试验模型土样制作：将采得的土样搅拌均匀，按土样源分成 5 份，其中江苏连云港土样 2 件（编号 1-1[#] 和 1-2[#]），槟城土样 3 件（编号 2-1[#]，2-2[#]，2-3[#]），试验前在每个模型土样中采取土样进行室内土工试验，以获得试验前土的物理、力学性质。

2) 真空预压试验：将试验模型土样放入抽真空密封装置中，该装置由 5 个单体长方柱组成，长方柱底边长为 20 cm，柱高为 30 cm，塑料排水板宽度为 5 cm，采用同一真空气源，按现场真空预压地基处理的密封形式、加载流程等要求进行抽真空试验（图 1）。

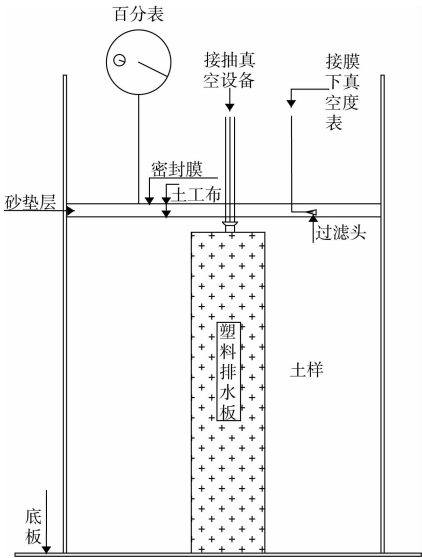


图 1 抽真空密封系统

3) 试验监测: 按真空预压, 岩土工程监测的技术要求进行膜下真空度、膜顶沉降等指标进行观测, 直至土样变形稳定为止。

4) 试验结果检测: 达到卸载标准后, 进行土的物理、力学指标试验, 原位测定微型十字板强度。

2.2 试验监测及卸载

初期抽真空时, 为防止排水板堵死, 将真空压力分 3 级加载, 分别为 20、40 和 85 kPa。经过近 11 d 的抽真空, 按照真空预压岩土工程监测的变形观测要求, 待土样变形基本稳定时, 即可停止抽真空。各土样沉降观测曲线见图 2。

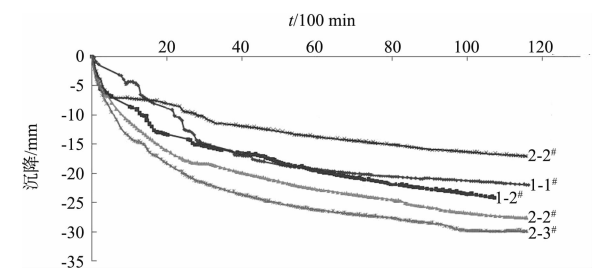


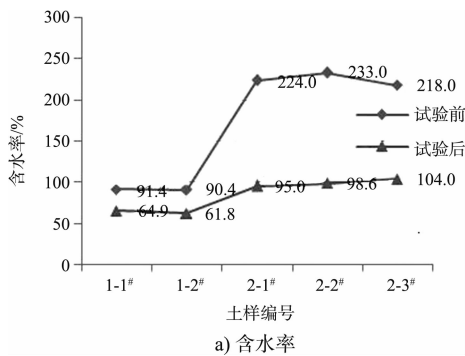
图 2 沉降-时间曲线

从沉降时程关系曲线可以看出: 抽真空试验前期, 土样沉降速率较快, 随着时间的推移, 土样的沉降变形速率变小, 曲线所反映的土样变形现象与已有的真空预压土样变形规律相符合。

3 讨论与分析

3.1 试验前后各土样物理参数

选取试验前后变化较大的物理指标如含水率、密度、孔隙比、液性指数 4 个参数进行分析, 以抽真空试验前后土样物理性质的变化, 评价确定抽真空试验的效果。各参数的对比见图 3。



a) 含水率

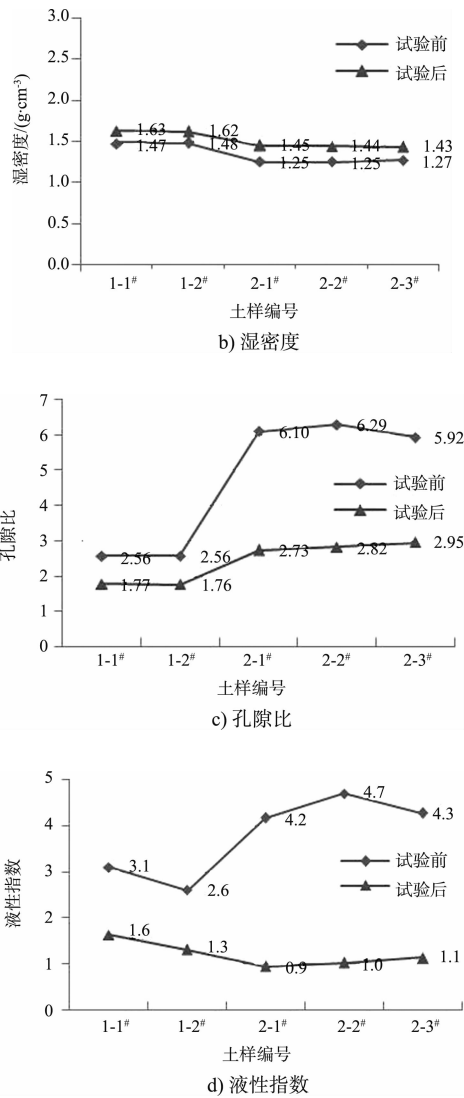


图 3 试验前后参数对比

从图 3 a) 可看出, 试验后土样含水率明显降低。连云港土样试验前含水率平均为 90.9%, 试验后含水率平均为 63.4%, 平均降低约 30%; 滨城土样试验前含水率为 225.0%, 试验后含水率为 99.2%, 平均降低约 56%。

从图 3 b) 可看出, 试验后湿密度明显增大。连云港土样试验前湿密度平均值为 1.475, 试验后平均值为 1.625, 平均增大约 10%; 滨城土样试验前湿密度平均为 1.256, 试验后湿密度平均为 1.440, 平均增大约 15%。

从图 3 c) 可看出, 试验后孔隙比明显减小。连云港土样试验前孔隙比平均为 2.56, 试验后孔隙比平均为 1.765, 平均减小约 30%; 滨城土样试验前孔隙比平均为 6.10, 试验后孔隙比平均

为 2.83，平均减小约 54%。

从图 3 d) 可看出，试验后液性指数明显减小。连云港土样试验前液性指数平均为 2.85，试验后液性指数平均为 1.45，平均减小约 48%；槟城土样试验前液性指数平均为 4.4，试验后液性指数平均值为 1.0，平均减小约 76%。

从各土样试验前后物性参数的对比分析可看出，抽真空后各土样的含水率降低、孔隙比减小、湿密度增大，土由流塑状转变为流塑-软塑状态，土样的物理性质发生了很明显的变化，抽真空试验取得的效果很明显。

3.2 试验前后各土样力学参数

试验前后各土样力学参数的对比见图 4。

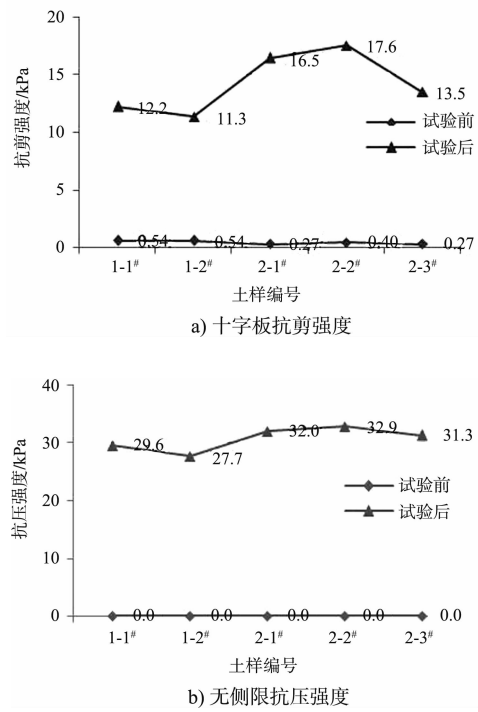


图 4 试验前后各土样力学参数的对比

从图 4 a) 和图 4 b) 可看出：试验前各土样的抗剪强度很低，几乎为 0，而抗压强度试验则由于土样过软而无法完成，可认为其抗压强度为 0；试验后各土样的抗剪强度和抗压强度均明显增大很多，试验后连云港土样的抗剪强度平均值为 11.8 kPa，抗压强度平均值为 28.6 kPa，试验后槟城土样抗剪强度平均值为 15.8 kPa，抗压强度平均值为 32.1 kPa。

3.3 试验结束后土样体积压缩率

为尽量将土样的压缩率计算准确，采用 2 种方法确定试验前后土样体积的变化：

方法 1：假设试验前土样的干土总质量 m_T 不变，根据试验前土样的总质量 m 、试验前后土样的含水率 w_1 和 w_2 、湿密度 ρ_1 和 ρ_2 5 个指标，根据各指标之间的关系推算得到试验前后土样的体积，从而得到土样的体积压缩率。

方法 2：直接称量试验前后土样的质量 m_1 和 m_2 和试验前后土样的湿密度 ρ_1 和 ρ_2 4 个指标计算试验前后土样的体积，进而得到土样的体积压缩率。计算结果见表 3。

表 3 土样体积压缩率

土样来源	土样编号	体积压缩率/%	
		方法 1	方法 2
连云港	1-1#	23.4	24.1
	1-2#	22.3	21.8
槟城	2-1#	48.1	47.4
	2-2#	48.2	49.6
	2-3#	43.0	45.3

从表 3 可看出：1) 两种方法所得同一土样的计算结果基本相近；2) 槟城土样的体积压缩率（平均为 47.4%）比连云港土样的体积压缩率（平均为 22.9%）大。

3.4 槟城土样和连云港土样的对比分析

从试验前后各土样的物理力学指标的对比分析可看出，试验后槟城土样的抗剪强度 (15.8 kPa) 和抗压强度 (32.1 kPa) 均比连云港土样的抗剪 (11.8 kPa) 和抗压强度 (28.6 kPa) 大，而试验前两土样的强度几乎相同，都为 0。再结合前述物性参数的对比，试验后槟城土样的孔隙比和含水率比连云港土样的大，而湿密度和液性指数比连云港土样的小。从土体密实度的角度可知，虽然槟城土样的含水率高、孔隙比大、湿密度小，但其强度却比连云港土样的大，状态也比连云港土样的稍好（试验后平均液性指数比连云港土样小）。因此从试验效果看，高液限的槟城土样真空预压试验效果比低液限的连云港土样真空预压试验效果好。

试验后槟城土样的平均含水率为 99.2%, 试验后连云港土样的平均含水率为 63.4%, 而槟城土样试验后的抗剪和抗压强度却比连云港土样的大。此外根据经验, 天津地区的土样含水率达到 70% 以上时, 其强度也几乎为 0。出现此现象的原因可能是由于高液限黏性土含有的亲水矿物多、吸附水的能力较强, 致使试验后在土体强度相当的情况下, 高液限土的含水率明显比低液限土的含水率高。

3.5 真空预压法处理黏土的适用性分析

从以上模型试验各土样试验前后的含水率可看出, 试验后各土样的含水率与液限值很接近; 从天津临港北港池北侧软基处理前后的地基土含水率与液限的比较可知, 处理后地基土的含水率与液限值也较接近。具体对比结果见表 4。

表 4 真空预压试验前后土样含水率与液限值的对比

参数来源		液限	处理前 含水率/%	处理后 含水率/%
模型试验	槟城土样	95.4	225.0	99.2
	连云港土样	54.3	90.9	63.4
天津临港北港池北侧软基处理		28.7	55.3	32.4

从表 4 可初步得出以下认识: 若真空预压对软土处理的效果显著, 则处理后的软土含水率与液限值较接近且比液限值稍小; 若两者的差值较大, 则可认为真空预压处理的效果不甚理想或不好, 则不推荐使用真空预压方法处理软基。

4 结论

- 1) 槟城土样液限高、塑性指数大, 属于高液限黏性土。真空预压试验前后槟城土样的强度有很明显的提高且处理效果比低液限的连云港土样处理效果好, 因而槟城土样适宜采用真空预压法进行地基处理。
- 2) 槟城土样与连云港土质相比, 在处理后
- 的地基土强度基本相同, 但槟城土样处理后的体
- 积压缩率平均为 47.4%, 较连云港土样的体积

压缩率平均为 22.9% 大, 地基处理后的沉降量将较大。

- 3) 槟城土样属于高液限黏性土, 与低液限黏性土的连云港土样相比, 抽真空后的土质, 在强度相当的情况下, 其平均含水率较大, 而湿密度和液性指数比连云港土样小。
- 4) 真空预压法处理后的软土, 若处理效果好, 则处理后的地基土含水率与液限较接近且比液限值稍小, 可推荐采用真空预压法处理地基; 若处理效果不好, 则处理后的地基土含水率比其液限大得较多, 则不推荐采用真空预压法处理地基。

参考文献:

[1] 陈德洋, 高辉. 无砂垫层真空预压法处理淤泥土地基施工关键工艺分析[J]. 科技风, 2015(2): 30.

[2] 岑仰润. 真空预压加固地基试验及理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[3] 张红, 张金良, 朱永年, 等. 真空联合堆载预压处理深厚软土效果分析[J]. 土工基础, 2014, 27(6): 43-46.

[4] 雷鸣. 真空预压加固高铁软基试验研究及机理探索 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

[5] 龚丽飞, 朱芳芳, 唐彤芝, 等. 吹填淤泥土真空预压沉降计算修正系数的分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(6): 71-77.

[6] 鲍树峰, 董志量, 莫海鸿, 等. 高黏粒含量新吹填淤泥加固新技术室内研发[J]. 岩土力学, 2011, 36(1): 61-67.

[7] 吴仕帆. 真空预压加固吹填土地基有限元分析及室内模型试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[8] 吴贵芬, 高玉峰, 魏代现, 等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 95-98.

[9] 程欣, 曹亮宏, 洪宝宁. 真空预压加固高速公路软基的现场试验研究[J]. 广东公路交通, 2001(3): 78-84.

[10] 刘汉龙, 李豪, 彭劼, 等. 真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 145-149.

[11] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].