



真空预压地基土体沉降及强度增长特征

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

摘要: 结合目前对真空预压的理论认识和工程实践, 对某工程真空预压地基土体的孔隙水压力消散、沉降、物性参数、强度参数的变化特征进行分析。结果表明: 孔隙负压消散量受土体扰动及沉降导致的排水板弯折和淤堵的影响较大, 可能导致其不简单地随深度增大而减小; 计算吹填土的沉降量时, 经验系数可取大些, 下部原位土体的沉降经验系数可适当取小些; 加固后的土体物性参数及强度参数明显变好, 且在排水板底深度以下仍有强度增长。结合监测数据的分析结果, 对真空预压的有效深度和加固效果进行讨论。结果表明: 土体的有效加固深度受真空负压和土体排水阻力的综合影响; 在排水板深度范围内的土体加固效果明显, 而该深度以下的加固效果则随深度增大逐渐降低并最终趋于无。

关键词: 真空预压; 沉降; 强度增长; 处理效果
中图分类号: U 655.54⁺4.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)12-0148-05

Soil settlement and strength increasing characteristics in vacuum-preloaded foundation

ZHANG Yun-dong, ZHANG Qian, CHENG Jin, CHANG Jin-zhao
(CCCC Tianjin Port and Waterway Prospecting and Design Research Institute, Tianjin 300450, China)

Abstract: Based on the theoretical understanding and engineering practice, we analyze the variation characteristics of pore water pressure dissipation, settlement, physical properties and strength properties of vacuum-preloaded foundation soil, which indicates that: The value of pore water pressure dissipation is affected significantly by curving and clogging of PVD caused by disturbances of soil structure and settlement, making it do not simply decrease with the increase of the depth; The empirical coefficient of dredger fill can be a little larger, and the undisturbed soil can be a little smaller; The physical properties and the strength properties are improved obviously, and the soil under the depth of drain boards are also improved. According to the analyzing result of the monitoring data, we discuss the effective depth and strengthening effect of vacuum preloading method, which reveals that: The effective strengthen depth of soil is affected by the value of vacuum and drainage resistance; The strengthening effect of soil within the depth range of drainage board is obvious, and that below the depth range of drainage board will reduce gradually with the depth increase and reach to no effect at last.

Keywords: vacuum preloading; settlement; increase of strength; treatment effect

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 年代始, 随着经验的积累和理论的进一步深入研究, 其设计理论、施工工艺等都已经比较成熟, 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^[1-3]。相对于

其工程应用, 目前真空预压的理论和试验研究还较少, 其理论上的不成熟限制了该法进一步发展和应用^[4]。

目前, 对真空预压加固理论的研究主要以工程监测数据的分析、数值计算和试验研究 3 种方式为主。尽管对真空预压的机理、真空预压的加

固深度、真空预压的影响范围、地下水位的变化等都有了较深入的认识,但还存在着一系列的分歧,对于以上问题尚缺少权威性的、广泛认可的结论,因此许多问题有待进一步深入研究^[5]。

本文以天津临港经济区北港池北侧真空预压项目为依托,仅根据真空预压处理淤泥和淤泥质土地基的监测资料,统计分析真空预压处理地基土体的物性和沉降变形参数的变化规律,为理论研究提供参考资料,也为以后类似工程的地基处理提供参考依据。

1 工程概况

1.1 工程概况

项目区位于天津临港经济区北港池北侧,项

目建设用地面积约 2 km²,地基处理总面积约 181 万 m²,设计为真空预压处理的地基面积约为 38 万 m²,其余采用真空联合堆载预压。场地原泥面地貌类型为水下淤泥质浅滩,其高程为 0 ~ -2 m,自西向东地势逐渐降低。场地经吹填后,现地面高程为 3.2 ~ 4.0 m。

1.2 工程地质概况

本场地勘察深度范围内的软土地层均为第四系,按其成因、沉积韵律、岩性及其物理力学指标特征从上至下共划分为 7 个工程地质亚层。其中第 1 层为吹填土层,第 2、3 层为原状沉积的淤泥和淤泥质土,其物理力学性质均较差,承载力低,软土层总厚度约 14 m。各软土分层及厚度见表 1。

表 1 岩土分层及其参数						
层号	名称	层厚度/m	天然含水率 W/%	天然密度 ρ/(g·cm ⁻³)	天然孔隙比 e	描述
1 ₁	淤泥质粉质黏土	1.8	55.32	1.62	1.45	灰色,流塑状
1 ₂	淤泥	2.6	50.77	1.73	1.37	灰色,灰黑色,流塑状,局部夹粉土
2 ₁	淤泥质黏土	2.1	59.16	1.69	1.55	灰色,流塑状
2 ₂	淤泥	1.7	59.23	1.64	1.68	灰色,流塑状-软塑状
2 ₃	淤泥质粉质黏土	2.4	36.74	1.84	1.02	灰色,流塑状-软塑状
3	淤泥质黏土	3.3	45.02	1.77	1.24	灰色,软塑
4	粉质黏土	未见底	27.33	1.90	0.80	灰色,可塑状

1.3 设计参数及监测

依据岩土工程勘察资料,结合地基处理后承载力的要求(80 kPa),确定真空预压地基处理设计参数(表 2)。

表 2 真空预压设计参数					
面积/m ²	膜下真空度/kPa	预压时间/d	固结度	沉降量/mm	残余沉降/mm
378 589	85	105	90	997	≥20

注:塑料排水板为正方形布置,厚 4 mm,垫层厚 800 mm。

卸载标准:达到以下任何一条即可卸载。
1)按实测沉降曲线推测的固结度≥90%;
2)连续 5 d 地表实测沉降平均值不大于 2.5 mm/d;
3)真空预压恒载达到 105 d。

监测方案:每 1 万 m²布置 1 组监测和检测点,监测内容包括孔隙水压力消散特征、土体分层沉

降特征等。地基处理前、后,分别进行钻孔取样,进行土工试验,以确定地基处理的效果。

2 地基土体沉降特征分析

2.1 膜下土体孔隙水压力消散特征

图 1 为孔隙水压力消散量与深度的关系。

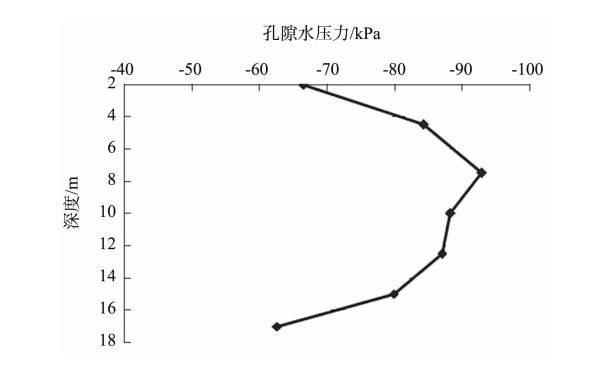


图 1 孔隙水压力消散量与深度的关系

从图 1 可以看出：孔隙水压力消散量与深度的关系为非线性关系，表现为从地表向下一定深度范围（8 m）逐渐升高，在某一深度（8 m）达到最大值并趋于稳定，然后随深度增大又逐渐降低。一般认为真空负压的消散量是随时间逐渐增长趋于稳定，随深度增加逐渐降低，但对于真空负压消散量是如何随深度降低的，与深度有怎样的函数关系，当前还没有一个令人信服的说法。出现以上现象的原因，笔者认为可能是由于吹填土部分渗透性较差、沉降量较大导致塑料排水板弯折及淤堵明显，而深部土体沉降量小、渗透性好，两者综合作用则出现在深度 8 m 处孔压消散达到最大，随着深度的继续增大，真空负压逐渐降低。真空负压最大值出现的位置应与土体的性质、土体受扰动的深度及程度等因素有关。

2.2 土体分层沉降特征分析

图 2 为场区各监测点的土体分层沉降均值曲线和加固前后根据各土层孔隙比的变化计算得到的分层沉降曲线。

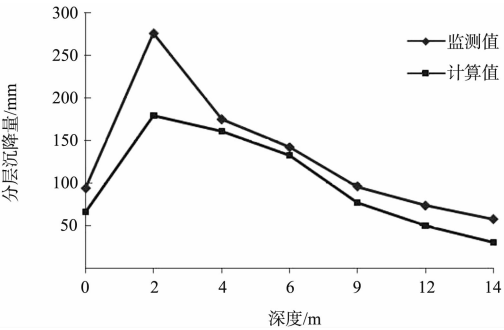


图 2 土体分层沉降与深度的关系曲线

从图 2 可看出，计算曲线位于监测曲线下方，但两者随深度的变化有较好的一致性，两者差距最大点在深度约 2 m 处。出现如此大偏差的可能原因是第 1 层吹填土（厚约 4 m）的成层性和均匀性较差、其沉降难以通过土体孔隙比的变化（取样的代表性、扰动性等因素）计算准确，两曲线的差值在吹填土部分为 1.41 ~ 1.53 倍；吹填土以下原位沉积的淤泥和淤泥质土两曲线的差值在 1.06 ~ 1.24 倍之间。

2.3 土体总体沉降特征

图 3 为总体沉降特征曲线。

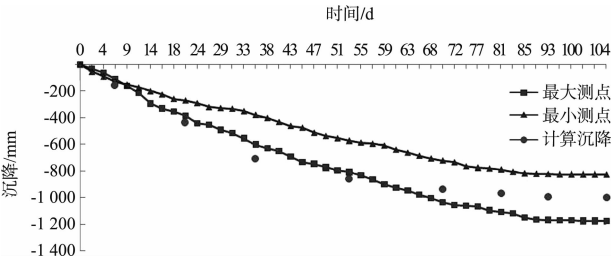


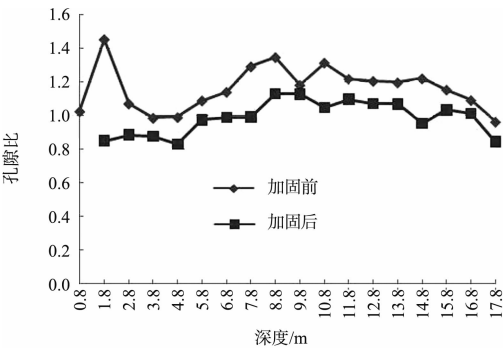
图 3 总体沉降特征曲线

由图 3 可看出，该工程区总体沉降最大值曲线、最小值曲线和沉降计算曲线随时间的变化有较好的一致性。但在预压初期，计算曲线的下沉速度较快，到后期逐渐变缓，且位于最大值曲线和最小值曲线的中间。计算最大沉降量与最小监测沉降量比值为 1.20 倍，最大监测沉降量与计算最大沉降量的比值是 1.18 倍，监测最大沉降量与监测最小沉降量的比值是 1.42 倍。

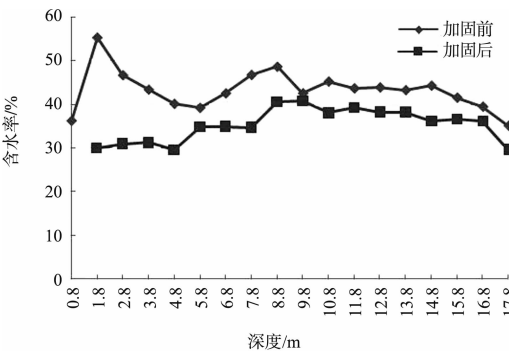
3 地基土体物理力学参数变化特征分析

3.1 地基土物理参数变化特征

图 4 显示加固前后地基土物理参数变化情况。



a) 孔隙比



b) 含水率

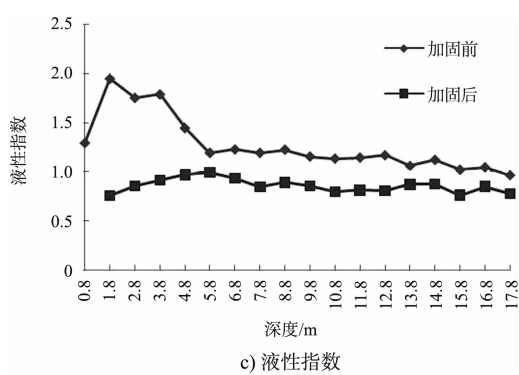


图 4 加固前后地基土物理参数对比

从图 4a) 和 4b) 可看出, 经真空预压处理后的地基, 含水率明显降低, 孔隙比明显减小。从加固前后曲线的变化趋势可看出中上部土层的含水率和孔隙比比深部土层变化明显。中上部的吹填土和原位沉积的淤泥的孔隙比和含水率变化较大, 含水率最大可降低 20%, 孔隙比最大可减小约 0.6, 曲线的总体变化是, 中上部土层变化较大, 向深部变化逐渐变小。

从图 4c) 可看出土层从加固前的流塑状态转变为软塑-可塑状态, 土体状态明显变好。尤其是浅部的吹填土, 液性指数变化最大, 原位沉积的中下部各土层液性指数变化稍小, 但也均从流塑状转变为软塑状。

3.2 地基土力学参数变化特征

图 5 显示加固前后地基土力学参数的变化情况。

从图 5a) 和 5b) 可看出, 各土层的强度均有不同程度的增长。从曲线的变化趋势可看出, 浅部土体强度的增长量比深部土体大, 尤其在 7 ~ 10 m 段强度增长量最大。

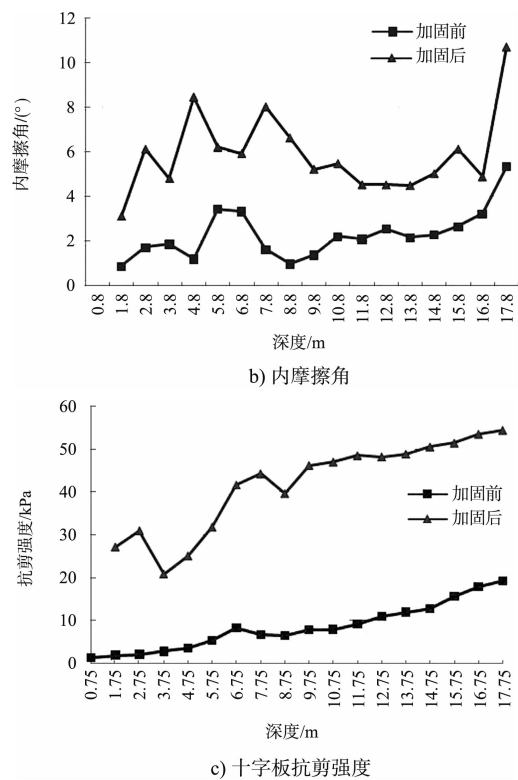
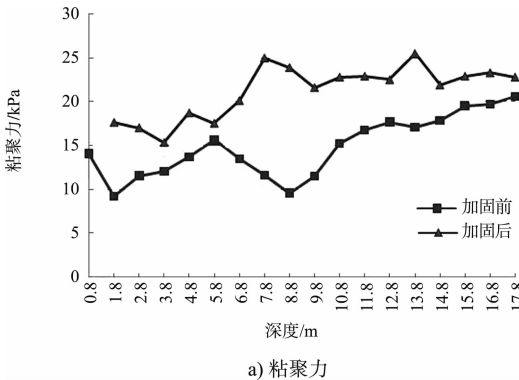


图 5 加固前后地基土力学参数对比

从图 5c) 可看出, 加固后的土体强度比加固前明显增大。中浅部的土体, 从加固前小于 10 kPa 增大到加固后均大于 20 kPa, 在 7 ~ 10 m 段土体强度增长幅度较大, 且在约 8 m 深度出现一个峰值; 深度从约 10 m 开始, 土体强度增长与深度成正相关, 且一般在 50 kPa 左右。

3.3 地基土物理力学参数变化特征机理

根据加固前后地基土的物理参数变化规律, 结合真空预压加固软土技术的原理可得到以下认识: 在真空负压作用下, 土中的孔隙水不断被抽走, 土体有效应力逐渐增大, 土体逐渐被压密, 因而各土层的孔隙比、含水率、液性指数 (土状态) 均变好; 而对于浅部的土体, 一般负压比深部的负压大, 排水路径也相对短, 因而孔隙水排出的更充分, 因而浅部土体的物理参数比深部土体的物理参数变化幅度大。

而地基土体的强度变化与其物理参数的变化有一定的类似, 但由于浅部的吹填土加固前强度极低, 虽其强度增长比例大, 但其最终强度并没有深部土体的强度大, 此可能与吹填土的结构完全破坏导致其渗透排水性差、预压时沉降量大导

致的排水板弯折和淤堵明显等因素有关；而在孔隙水压力消散量最大的位置对应的是土体强度增长的峰值，此可能是由于孔隙水压力的消散量对土体强度的增长有直接的影响，即孔隙水压力消散量大，则土体排水量多，有效应力增长量大，土体压密效果好。

4 讨论与分析

4.1 真空预压加固深度

对于真空预压加固深度的研究，已有的研究成果表明，加固深度影响范围可以达到垂直排水通道以下某一距离^[6-8]，但这个距离具体有多大，目前尚无明确的说法。以上监测数据的分析结果表明，在排水板底高程为 -13.6 m (深度约 16.5 m) 时，该深度以下的土体是有沉降和强度增长的，该结果和前人的认识是一致的。

真空预压的加固深度为什么不是 10 m^[5]？是不是竖直排水通道设置的深度越大，真空预压加固地基的深度就越大呢？针对这个问题，结合前人的研究成果和监测数据，有以下几点认识：

1) 真空负压在通过砂垫层、竖向排水体向土体扩散的过程中，一方面由于阻抗的作用，另一方面因真空负压在土体和竖向排水体中产生负压水头，致使真空负压能量随深度增大而降低。

2) 在图 6 中，取任意土柱（均质）中的任意一个高度为 ΔH 的微元体，假设微元体中心的真空负压为 P 。由于该点水头的大小不仅与真空负压 P 的大小有关，还与阻力 f (土体中为水流动的阻力) 的大小有关。在仅考虑这两种因素情况下，土体中某点的实际水头 H 是该点的真空负压水头 $H_1 = F(p)$ 和阻力水头 $H_2 = F(f)$ 的差值，即 $H = H_1 - H_2$ 。

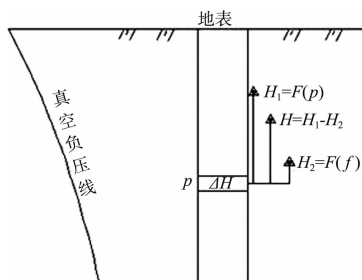


图 6 土微元体

3) 在土体中任意一点，只要该点的实际水头 $H > 0$ ，该点的孔隙水就能通过水头升高流向上部邻点（或水平邻点，与排水体的设置有关），依此类推，孔隙水逐步流到地面。

4) 随着深度的增大，真空负压水头逐渐减小，而阻力水头不变（材料一定），则最终会达到一个平衡的零点，在该点真空负压水头与阻力水头相等 $H_1 = H_2$ ，实际水头 $H = 0$ ，因而该点的孔隙水不能流向上部（或水平）邻点，该点以下的孔隙水不能排出，则真空预压处理深度达到极限。

5) 在水平排水体中也遵循同样的规律，只是排水体的阻力更小。土体中的孔隙水先克服水平流动阻力，然后进入排水体。

4.2 真空预压加固效果

从图 1 可知，孔隙水压力消散在某一深度（8 m）达到最大值并趋于稳定，与其深度段对应的土体的粘聚力、内摩擦角和十字板剪切强度增长量均较大。

对加固前后地基土体的物性参数和强度参数的分析表明，土体不仅在排水板深度范围以内有明显的强度增长，而且在排水板底深度以下也有一定程度的强度增长。其原因可能是：在真空负压一定的情况下，在预压荷载的时间内，真空负压水头与阻力在排水板深度范围内还没有达到平衡，该平衡点位于插板深度以下，该平衡点以下的土体不能被加固。

5 结论

1) 吹填土及经扰动的原位沉积的淤泥及淤泥质土，由于原有结构破坏，导致土体渗透性变差，传递真空负压的能力变差，因而真空负压的最大消散量在地表下一定深度位置出现。本工程地质条件下，最大孔隙负压消散量出现在深度 8 m 左右。

2) 土体分层沉降的特征是在浅部的吹填土体的实测沉降与计算值差异较大，比值为 1.41 ~ 1.53，向深部的原位沉积土，该比值逐渐减小为 1.06 ~ 1.24。类似工程计算沉降时，可将浅部吹填土的沉降系数取 1.40 ~ 1.50，深部原位沉积的土的沉降系数取 1.0 ~ 1.20。

（下转第 160 页）