

中厚层吹填淤泥超软地基 一次真空预压处理现场试验

袁保军, 方伟

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 随着围海造地的发展, 吹填淤泥越来越厚。对中厚层吹填淤泥超软地基提出一次真空预压法进行加固处理方式。现场试验采用有砂垫层和无砂垫层2种真空预压法对6~10 m中厚层吹填淤泥超软地基进行一次加固。通过现场监测对真空度、地表沉降、孔隙水压力、分层沉降等规律进行分析。通过加固前后土体抗剪强度和物理指标的对比, 得知一次真空预压法对中厚层吹填淤泥超软地基加固效果明显。另外, 试验结果显示, 有砂垫层和无砂垫层2种真空预压法加固效果无明显差异。

关键词: 中厚层吹填淤泥; 超软地基; 真空预压; 现场试验

中图分类号: U 655.54⁺4.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0202-05

Field test on one-time vacuum preloading treatment of ultra-soft soil ground with medium-thick fill of dredged silt

YUAN Bao-jun, FANG Wei

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: As the land reclamation industry develops, the dredged silt will be hydraulically filled thicker and thicker, therefore it is proposed to employ the one-time vacuum preloading method to consolidate the ultra-soft soil ground with medium-thick fill of dredged silt. During the field test, the one-time consolidation improvement of the ultra-soft ground filled with 6 ~ 10 m thick of dredged silt is performed by two methods, i. e. vacuum preloading with and without sand cushion. Meanwhile, the vacuum degree, ground settlement, pore water pressure, layered settlement and other regularities are monitored and analyzed. Upon a comparison of shear strength and physical properties of soil mass measured before and after consolidation, it is shown that the ultra-soft ground with medium-thick fill of dredged silt is improved and consolidated remarkably using the one-time vacuum preloading method. In addition, the test results indicate that the two methods of vacuum preloading with and without sand cushion make no significant difference to the consolidation effect.

Keywords: medium-thick fill of dredged silt; ultra-soft soil ground; vacuum preloading; field test

近些年, 沿海地区围海造地工程越来越多, 利用吹填海底淤泥成陆并进行软基处理的方式在浙江沿海应用较广。真空预压被普遍认为是处理软基的有效方法。文献[1]~[3]提出的无砂垫层真空预压法适合吹填淤泥形成的超软地基, 并得到广泛应用。该方法为人工打设塑料排水板方式的浅层真空

预压技术, 一般在吹填土厚度为3~6 m时采用^[1,3,4]。

随着围海造地从浅滩向深海发展, 吹填淤泥越来越厚。受到人工打设排水板深度的限制, 吹填淤泥大于6 m时, 上述无砂垫层真空预压法不具备施工可行性。但可以采用二次真空预压法, 即首先采用无砂垫层真空预压浅层处理, 使软基

收稿日期: 2014-07-30

作者简介: 袁保军(1980—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程设计、研究工作。

表层形成硬壳层, 满足二次处理施工条件, 再采用常规真空预压法进行深层加固^[5]。二次处理能够达到地基处理目的, 但工期较长、造价较高。

本文依托温州市瓯江口新区一期软基处理工程, 提出一次真空预压处理中厚层吹填淤泥超软地基方法, 通过场试验, 采用2种一次真空预压处理方案分别进行加固, 分析2种方案下地面沉降、孔隙水压力、分层沉降等, 对加固效果进行分析、对比。

1 工程概况

温州市瓯江口新区一期软基处理工程位于温州市瓯江口外, 介于灵昆岛(属温州市瓯海区)和霓屿岛(属温州市洞头县)之间。该工程总面积约15 km², 采用吹填海底淤泥方式成陆, 吹填淤泥深度3~10 m, 其中深度6~10 m的中厚层吹填淤泥超软地基区域面积约3 km²。试验区位于中厚层吹填淤泥超软地基区域中间, 吹填淤泥厚度7~8 m, 其物理力学指标见表1。

表1 试验区吹填淤泥物理力学指标

含水率 W/ %	比重 G _s	密度 ρ/ (g·cm ⁻³)	孔隙 比/e ₀	孔隙 率/n	饱和度 S _v /%	液限 W _L /%	塑限 W _p /%	塑性 指数 I _p	液性 指数 I _L	颗粒占比/%						渗透系数			
										沙粒/mm		粉粒/mm		黏粒/mm		垂直 K _v / (cm·s ⁻¹)	水平 K _h / (cm·s ⁻¹)		
										0.500 ~ 0.250	0.250 ~ 0.100	0.100 ~ 0.075	0.075 ~ 0.050	0.050 ~ 0.010	0.010 ~ 0.005			0.005 ~ 0.002	<0.002
69.9	2.8	1.6	1.9	65.8	97.8	49.2	27.9	21.4	2.0	2.4	2.6	1.1	5.8	25.2	17.8	17.6	25.5	1.60 × 10 ⁻⁷	1.76 × 10 ⁻⁷

2 试验方案

中厚层吹填淤泥软基采用一次真空预压处理目前面临2个问题: 1) 吹填土上机械打设排水板是否可行; 2) 一次真空预压工艺处理中厚层吹填淤泥的效果能否达到设计目标。经研究, 通过在吹填淤泥软基上铺设由竹笆和土工合成材料组成的工作垫层, 采用改装的轻型门架式插板机, 可以解决问题1。试验区采用以下2种方案进行试验对比, 分析研究问题2。

方案1为普通有砂垫层真空预压法, 为满足砂垫层铺设和排水板打设条件先在吹填土上铺垫一层工作垫层, 然后铺设40 cm砂垫层, 机械打设塑料排水板, 排水板间距0.8 m, 正方形布置, 然后铺设真空膜进行抽真空120 d。

方案2为无砂垫层的真空预压法, 与方案1的区别是取消40 cm砂垫层, 其余相同。

试验区共2万 m², 设3个分区: SY1、SY2-1和SY2-2区。SY1区面积为3 000 m², 采用方案1处理, SY2-1和SY2-2区面积分别为7 000 m²和10 000 m², 均采用方案2处理。试验区排水板打设深度约10 m。

3 工作垫层设置排水板打设

本次试验工作垫层由下往上分别为1层编织

布、1层土工格栅、2层竹笆及1层无纺布(图1)。

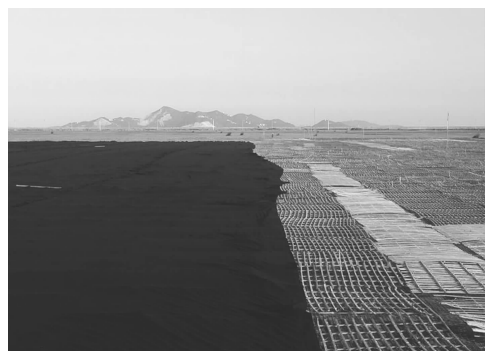


图1 现场铺设工作垫层

工作垫层铺设完成后, SY1区铺设40 cm砂垫层, 然后机械打设塑料排水板。打板机械为改装的轻型门架式插板机, 自重约7 t, 轨道下铺设枕木降低接地压强(图2)。



图2 打设排水板

根据现场试验情况，有砂区域排水板打设较易，且效果较好；无砂区域排水板打设时出现吹填地基淤泥翻浆现象，打设后场地表面有较多水和淤泥，排水板外露部分受淤泥污染较严重。

本次试验工作垫层的设置刚好满足排水板打设的需求，对于大面积工程的实施，可根据吹填土质、场地晾晒时间等因素调整工作垫层中竹笆的用量。

4 现场监测及成果分析

试验区真空预压监测内容包括：膜下真空度、表层沉降、孔隙水压力及分层沉降等（图3）。

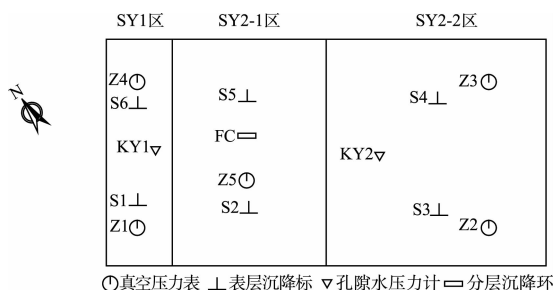


图3 真空预压监测平面

4.1 真空度分析

图4为抽真空期间膜下真空度随时间变化曲线。初期开泵率从20%逐渐增加达到80%，膜下真空度随着开泵率的增加逐渐提高，开泵率达到80%后膜下真空度基本维持在80 kPa左右。抽真空总时间为123 d，其中试抽真空为23 d，正式抽真空100 d，正式抽真空第100 d卸载，真空度快速下降。

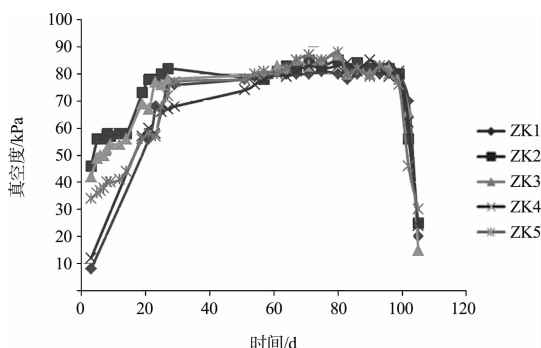


图4 膜下真空度随时间变化曲线

4.2 表层沉降分析

吹填土地基真空预压沉降由插板期间沉降和真空预压期间沉降两部分组成。根据现场测量、沉降观测数据对插板后静置期及抽真空期间地基沉降进行分析。

1) 插板及静置期地基沉降。

经测量，施工前吹填地基表面较平整，平均高程约4.14 m。排水板插设用时约1个月，静置时间1个月后抽真空。经测量，抽真空时场地高程约2.75 m。插板及静置期地基沉降约1.4 m。

近期吹填土属于欠固结土，在自重作用下将产生很大的固结沉降^[6]。由于吹填淤泥地基土的渗透系数及固结系数较小，打设排水板之前沉降缓慢，打设排水板后，自重固结加速，在较短的时间发生很大的沉降，土体中的水沿着排水板自然流出。对于真空预压而言，先期发生的固结沉降可以缩短真空预压时间，减少地基处理成本，土体自重固结不会产生真空预压前期土体细颗粒在“负压”作用下向排水板聚集形成“土柱”现象^[7]，有利于真空预压处理效果。

2) 抽真空地基沉降。

图5为真空预压期间表层沉降随时间变化曲线。抽真空前40 d沉降速率较快，沉降量与时间近似成线性关系，后期沉降速率略缓，抽真空结束平均沉降约1.2 m。S1测点位于有砂垫层真空预压区，S2测点位于无砂垫层真空预压区，两者沉降曲线规律基本一致，沉降差异也较小。

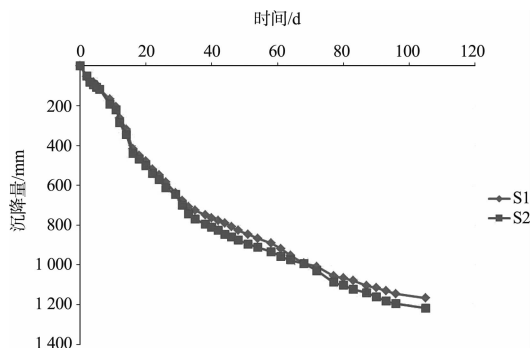


图5 表层沉降随时间变化曲线

加固前后地基总沉降为2.6~2.7 m，其中插板后静置期沉降约占53%，真空预压期沉降约占47%。

插板后静置一段时间对软基处理有很好的帮助。

4.3 孔隙水压分析

图 6 为各深度孔隙水压力随时间变化曲线。在抽真空初期, 孔隙水压力随着时间的增加, 真空压力的升高, 孔隙水压力增加, 其规律与真空度基本吻合; 越深孔隙水压力越大, 表明浅层地基较深层孔隙水压力消散较快。由于后期试验区被水淹没, 孔隙水压力无法观测, 导致后期数据缺失。

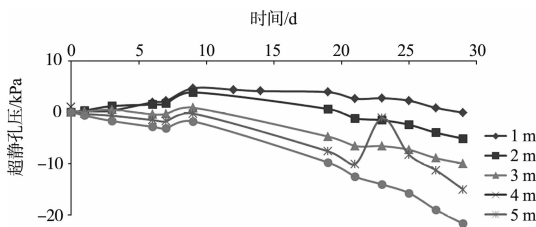


图 6 孔隙水压力随时间变化曲线

4.4 分层沉降分析

图 7 为试验区土层不同深度处沉降量随时间变化曲线。从图中可以看出, 地基表面往下各土层压缩量呈逐渐减小趋势。吹填土厚度 7 ~ 8 m, 地基沉降主要以吹填土固结为主。

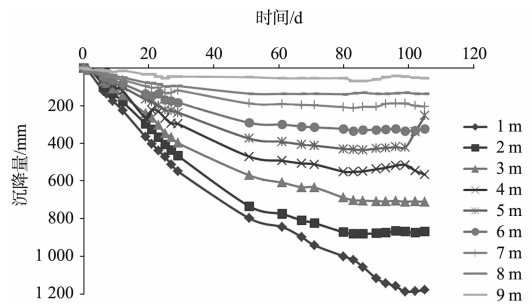


图 7 分层沉降随时间变化曲线

5 处理效果分析

5.1 加固前后土体性质对比

表 2 为真空预压前后土体的参数。从表 2 可以看出, 地基土体在真空预压处理后含水率、孔隙比、液性指数均得到较大幅度降低, 说明真空预压效果明显。真空预压前, 取样土体呈流动状, 无法实施剪切试验, 真空预压后对取样土体进行了固结快剪试验, 并根据 GB 5007—2011 《建筑地基基础设计规范》第 5.2.5 条, 地基承载力公式 ($f_a = M_b \gamma_b + M_d \gamma_{md} + M_c C_k$) 计算得到加固后 0 ~ 1.5 m 范围吹填土地基承载力特征值达 50 kPa 以上, 1.5 m 以下范围吹填土地基承载力特征值达 30 kPa 以上。

表 2 真空预压前后土体参数对比

深度/m	含水率/%		孔隙比		液性指数		粘聚力/kPa (处理后固快试验)	摩擦角/(°)
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后		
0 ~ 2	60.2	44.3	1.82	1.24	1.52	1.36	11.6	10.1
2 ~ 4	66.2	55.7	1.90	1.56	1.81	1.47	10.3	8.0
4 ~ 6	74.5	56.4	2.08	1.60	2.15	1.56	10.8	7.8
6 ~ 8	76.8	50.3	1.95	1.41	2.36	1.60	11.3	9.2

试验区为吹填淤泥场地, 吹填完工后, 土体平均含水率约 80% ~ 90%, 经过晾晒后, 土体含水率略有降低, 其中表层含水率降低幅度较大。真空预压后土体含水率得到较大程度的降低, 平均约 52%。根据土体物理指标分析土体压缩与实测沉降基本吻合。

5.2 加固前后土体强度对比

图 8 为吹填地基加固前后十字板剪切强度

沿深度变化曲线。从图 8 可以看出, 加固前后土体强度得到明显提高。处理后表层 0 ~ 1.5 m 土层十字板强度约 30 ~ 40 kPa, 深度 3 ~ 5 m 处土层十字板强度降低至 15 kPa 左右, 深度 5 m 以下土层十字板强度随深度增加逐渐提高。无砂垫层和有砂垫层真空预压法处理效果无明显差异。

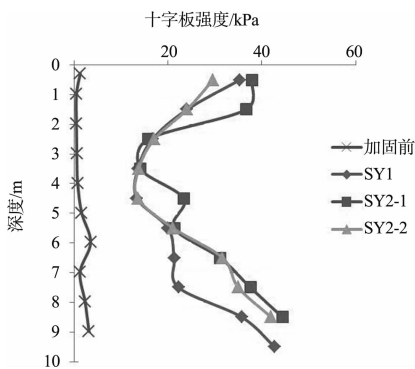


图8 加固前后十字板剪切强度沿深度变化曲线

沉降数据分析显示,吹填土处理之前厚度为7~8 m,处理后吹填土厚度约5 m。图8显示,吹填土表层0~1.5 m处理效果较好,下部3~5 m处理效果较差。笔者认为产生这种现象的原因为吹填土变形大造成排水板在一定深度范围发生很大扭曲变形,影响加固效果:1)表层0~1.5 m排水板变形较小,真空度传递较好,孔隙水压消散亦快,处理效果较好;2)下部3~5 m受上部排水板变形影响越来越大,真空度的传递受阻,并阻效应明显,导致处理效果较差;3)处理后深度5 m以下地基基本为天然地基,其强度随深度呈增加态势。

5.2 有砂和无砂垫层两种真空预压法处理后土体强度对比

图8中SY1区位于有砂垫层真空预压区,SY2-1和SY2-2区位于无砂垫层真空预压,可见SY1区与SY2-1、SY2-2区的十字板强度竖向规律基本一致,各深度强度亦无较大差异,表明有砂和无砂垫层两种真空预压效果无明显差异。

有砂和无砂垫层2种真空预压效果相当。分析原因为:1)砂垫层较薄,对地基产生的附加应力较小,且真空预压后期膜上腹水约1.0 m深,砂垫层产生的附加应力占总附加应力比重较小;2)试验区工作垫层较厚,竹笆之间产

生的空隙具有良好的排水性,代替了砂垫层横向排水作用。

6 结论

1)针对中厚层吹填淤泥超软地基,提出采用一次真空预压处理技术。通过加强工作垫层,采用改装的打板机械进行插设塑料排水板等改进真空预压工艺,处理后土体强度得到明显提高。

2)一次有砂垫层真空预压与一次无砂垫层真空预压技术的加固效果相比,两者无明显差异。

3)对于新近吹填地基,排水板插设后土体在自重荷载下发生明显固结沉降,所以地基在排水板插设后静置一段时间,自重固结沉降可以减少真空预压时间,且避免抽真空初期细微土粒受“负压”作用向排水板周围淤堵形成“土柱”的现象。

参考文献:

- [1] 关云飞,唐彤芝,陈海军,等.超软地基真空预压浅层加固现场试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):97-101.
- [2] 董江平,张雄壮,洪磊,等.超软海底淤泥地基无砂垫层真空预压处理效果研究[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2010,24(4):335-340.
- [3] 仓基俊,关云飞,李小梅.吹填软基无砂垫层真空预压快速加固新技术及现场试验研究[J].水电能源科学,2012,30(2):92-94.
- [4] 龚丽飞,唐彤芝,关云飞,等.吹填土浅层真空预压处理技术[J].施工技术,2013,42(1):80-82.
- [5] 冯会芳.新近吹填淤泥形成超软土地基的加固处理方法[J].港工技术,2011,48(5):59-60.
- [6] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [7] 习志雄.真空预压法处理吹填淤泥质软土地基的颗粒流数值模拟[D].北京:北京交通大学,2010.

(本文编辑 郭雪珍)