

变动水压荷载对真空预压加固效果的影响^①

刘爱民

(中交天津港湾工程研究院有限公司,天津 300222)

摘要:目前成功实施的几项潮差带地区真空预压工程未考虑膜上变动水压荷载的影响,单纯将膜下真空压力作为预压荷载,这明显偏于保守。根据具体工程的加固效果,分析膜上变动水压荷载对真空预压加固效果的影响,并给出在潮差带地区进行真空预压设计时预压荷载的取值方法,研究结果可供类似工程参考。

关键词:真空预压;潮差带;变动水压;荷载

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0467-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0467

Influence of Varied Water Pressure Loading on Strengthening Effect of Vacuum Preloading

LIU Ai-min

(CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co. Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The vacuum preloading technique has often been applied to underwater soft-ground improvements in intertidal zones. However, in those construction activities, the varying water pressure load has not been considered, and the vacuum load was just taken as the vacuum pressure below the membrane. This treatment was obviously conservative. This research aims to analyze the effect of variant water pressure on the soil ground improvement through practice, and proposes a determination method for the vacuum load for the vacuum preloading technique in intertidal zones. The preloading may be taken as the sum of the vacuum load and the average water pressure above the membrane, and the latter should be calculated through the intertidal water level during the construction period and the ground elevation. This method for load determination may serve as a valuable reference for engineering design.

Key words: vacuum preloading; intertidal zone; varied water pressure; load

0 引言

随着我国国民经济的迅猛发展,在潮差带地区修建码头、护岸、围埝以及海上人工岛等工程项目越来越多,常常需要采用真空预压技术对水下软土地基进行加固,以解决水下开挖稳定、缩小围埝断面尺寸和缩短施工工期等问题。

目前真空预压和真空联合堆载预压技术的加固机理已经非常明确^[1],我们通过室内模型试验,也探

明了恒水压条件下水下真空预压加固地基技术的加固机理:水下真空预压的预压荷载等于预压前的孔隙水压力和预压后(完全固结)的孔隙水压力之差,当膜下砂垫层中的孔隙水压力小于0时,膜上水可全部作为预压荷载起作用^[2]。对于潮差带地区水下真空预压,其主要特点是膜上水压是随潮水位和地面标高的变化而变化,也就是说每一天每一时刻的膜上水压都是不同的,变动水压对真空预压荷载和

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2010EG124225)

作者简介:刘爱民(1969—),男,教授级高级工程师,主要从事地基处理技术研发和设计工作。E-mail:liuaimin1987@163.com

加固效果的影响目前还不清楚。目前成功实施的几项潮差带地区真空预压工程都未考虑膜上变动水压的影响,单纯将膜下真空压力作为预压荷载^[3-7],这明显是偏保守的。而膜上变动水压对预压荷载的贡献如何考虑、考虑多少,目前尚不明确,国内外也未见该方面的相关报道。根据目前潮差带地区水下真空预压的施工工艺和特点,铺密封膜都是趁低潮时施工,铺膜完成时膜上都处于无水压状态。因此,我们认为潮差带地区水下真空预压技术的加固机理同真空联合堆载预压的加固机理相似,但由于联合堆载荷载是一个变动的水压荷载,其对预压荷载的贡献是潮差带地区水下真空预压技术加固机理研究的重点。为此我们结合具体工程的加固效果,分析研究变动水压荷载对真空预压加固效果的影响,并给出在潮差带地区进行真空预压设计时预压荷载的取值方法。

1 工程概况

表 1 加固前后各土层的主要物理力学指标统计表

Table 1 Main physical and mechanical indexes of each soil layer before and after improvement

土层编号	土层	状态	含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa	黏聚力 c _q /kPa	内摩擦角 Φ _q /(°)
①	淤泥	加固前	54.3	16.9	1.540	26.8	1.15	1.18	2.2	9.3	1.48
		加固后	42.4	17.8	1.208	21.9	0.97	0.87	2.54	19.47	6.2
②	淤泥质黏土	加固前	45.7	17.7	1.280	23.5	1.02	0.95	2.4	12.73	2.87
		加固后	37.1	18.6	1.024	18.9	0.91	0.78	2.95	18.05	7.5
③	黏土	加固前	32.5	19.3	0.880	16.5	0.76	0.45	4.1	15.8	11.8
		加固后	30.3	19.4	0.840	16.1	0.71	0.41	4.7	15.8	11.8

3 加固效果

为了确保软基加固的施工质量,及时掌握加固过程中地基土的固结度和侧向位移情况,在施工过程中对地表沉降、分层沉降、孔隙水压力、侧向位移和水位进行监测,同时在各区中心位置处安排了加固后的现场取土和十字板强度检验。各仪器和检测孔的布置情况见图 1。

(1) 地表沉降

真空预压期间各区地表沉降统计结果及固结度计算结果见表 2。

(2) 孔隙水压力

孔隙水压力传感器分别埋设在四根排水板所围区域的中心处,按设计要求在不同深度埋设孔隙水压力测头。抽真空开始后,孔隙水压力急剧消散,真空预压后期孔隙水压力消散很小,变化缓慢。2 区孔隙水压力变化曲线见图 2。

天津港某码头区宽度仅为 50 m,如采用传统接岸结构型式,按照放坡要求则码头总宽度将达到 70 m 以上,无法满足 50 m 码头宽度的限制要求。为此提出了通过潮差带水下真空预压加固地基技术,提高岸坡土体强度指标来保证岸坡及接岸结构稳定的新思路,该方案技术上可行,且工程造价较低,工期也较容易控制。

潮差带地区水下真空预压岸坡处理范围宽度方向垂直于码头前沿线,宽度为 36.4 m,长度为 573.0 m,共分 4 个区,水下真空预压处理总面积为 20 857.2 m²。加固区涨潮时淹没,低潮时露滩时间约为 4 h。

2 地质条件

加固区场地埋深 20.0 m 深度范围内土层自上而下分布为:①淤泥,②淤泥质黏土,③黏土。各土层主要物理力学指标见表 1。

表 2 地表沉降统计结果表

Table 2 Statistical result of ground settlement

区号	满载时间/d	沉降量/mm	固结度/%	综合固结度/%	沉降速率/(mm·d ⁻¹)
1 区	106	724	88.0	90.70	1.07
2 区	106	885	87.6	90.95	1.43
3 区	106	718	88.9	92.58	1.04
4 区	106	688	93.2	95.61	0.61

(3) 深层水平位移

随着真空预压的进行,加固区外侧土体向加固区内方向进行位移,各区最大位移量为 59~181 mm,且位移最大值发生在表层。

(4) 水位观测结果

在抽真空前期,加固区外侧水位下降较快,下降幅度为 2.5 m 左右,后期变化不大,基本维持在标高 0.0~-1.5 m 范围内。

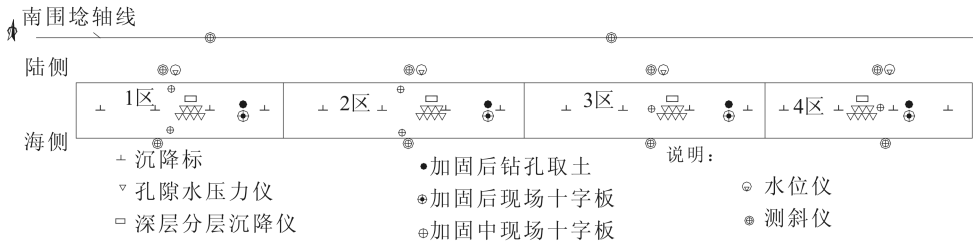


图 1 监测仪器和检测位置平面布置图

Fig.1 Layout of monitoring instrument and check point

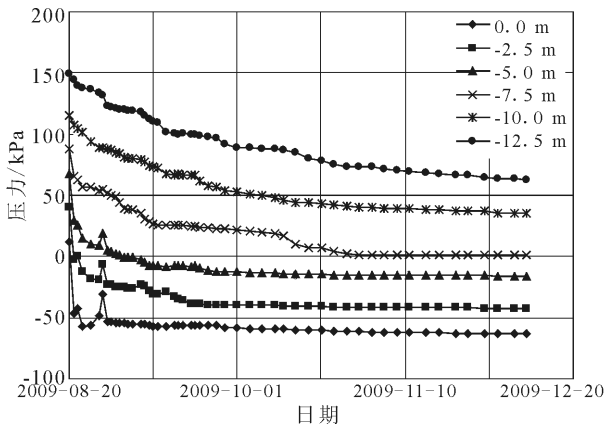


图 2 2 区真空压力变化时程线

Fig.2 Variation of vacuum pressure with time in zone 2

表 3 加固后十字板检验结果

Table 3 Vanes strength after improvement

1 区		2 区		3 区		4 区	
标高/m	C_u /kPa	标高/m	C_u /kPa	标高/m	C_u /kPa	标高/m	C_u /kPa
-0.33	46.5	-0.56	51.00	-0.38	45.2	-0.39	43.8
-0.83	41.8	-1.06	46.75	-0.88	44.1	-0.89	41.5
-2.33	41.65	-2.56	42.06	-2.38	37.80	-2.39	32.47
-2.83	33.70	-3.06	40.46	-2.88	42.06	-2.89	45.78
-5.33	28.49	-5.56	33.01	-5.38	33.54	-6.39	27.68
-5.83	32.88	-6.06	33.01	-5.88	28.22	-6.89	32.47
-6.83	35.07	-7.56	34.07	-7.38	32.47	-8.39	31.94
-8.33	38.36	-8.06	37.27	-7.88	39.93	-8.89	33.01
-8.83	41.65	-9.56	38.33	-9.38	39.93	-10.39	35.14
-10.33	42.47	-10.06	40.46	-9.88	41.53	-10.89	36.73
-10.83	41.37	-11.56	43.12	-11.38	43.65	-12.39	54.83
-12.33	53.97	-12.06	32.47	-11.88	43.65	-	-

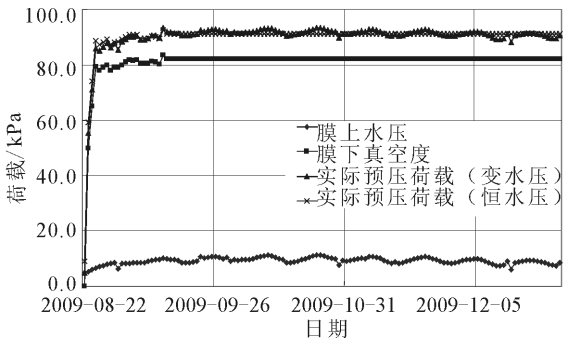


图 3 预压荷载-时间变化分析图

Fig.3 Variation of preload with time

(5) 加固后土性分析

① 十字板剪切试验结果

为保证后期岸坡区在开挖过程中的稳定,卸载后分别在各加固区中心位置处进行 1 组十字板剪切试验,以确定加固后的地基抗剪强度,结果显示加固后土体抗剪强度在加固深度范围内都达到或超过了设计提出的 27 kPa 的要求,加固后十字板强度统计见表 3。

② 加固后取土检验结果

加固后加固范围内各土层物理力学指标改善明显,具体见表 1。

4 预压荷载分析

以 2 区为例,对施工期间的潮水位和地表标高进行统计,计算出每天的平均膜上水压力,再结合膜下真空度观测结果,可以计算出每天的实际预压荷载(变动水压情况下)。再将每天的膜上水压荷载进行平均,求出平均膜上水压荷载,将平均膜上水压荷载和膜下真空荷载相加求得实际预压荷载(恒水压情况下,暂时假定实际预压荷载为平均膜上水压荷载和膜下真空荷载之和)。计算结果见图 3。

为了分析潮差带地区变动水压对真空预压加固效果的影响,采用数值分析的手段进行模拟分析。

选取 2 区 S29 号钻孔为典型钻孔,塑料排水板间距 0.8 m,正方形布置,插板深度至标高 -15.0 m,真空荷载按实测的真空度数据选取,由于处于水下区,因此,模拟分析考虑了铺膜后上覆水压对地基加固效果的影响,实际水压按照施工期间平均膜上水压荷载计算。抽气开始 3 d 后真空荷载达 80 kPa,满载 105 d 后卸载。模拟分析采用岩土工程通用的 PLAXIS 有限元软件,平面应变形式分析,本构模型为 Mohr-Coulomb 模型。分两个工况进行计

算:工况一是初始抽气阶段,时间为 3 d,荷载包括平均膜上水压荷载和线性增加的真空荷载,3 d 后真空荷载达到 80 kPa;工况二是满载阶段,真空荷载与平均膜上水压荷载共同作用,时间为 105 d。

计算所需参数根据加固前勘察报告选取,其中弹性模量 E 基本根据压缩模量的 2 倍选用,2a1 和 2a 软土层的弹性模量值是根据沉降量的计算值与实测值相对比后,反分析所得到的,取值小于 2 倍的压缩模量。表 4 为计算所选的参数。

根据工程情况和参数建立模型划分网格。采用 15 节点的三角形单元,网格密度较大,因此得出的结果在计算上是可靠的。左右边界约束侧向位移,下边界竖向和侧向位移均约束,为固定边界。加固区域左右两边各延伸 10 m。图 4 为划分网格后的模型图。

根据分析步骤进行了模拟计算,加固后的沉降

分布见图 5。图中,加固后地表沉降量为 881 mm,实测沉降值为 885 mm,相差 4 mm,基本一致。插入塑料排水板的部分是模拟加固的区域。加固区域的中间位置不受边界等影响,其值是实际要进行分析的值。所以在加固区域中间位置的地表选取一点,分析该点的沉降曲线,并与实测的地表沉降曲线相比较,结果见图 6。

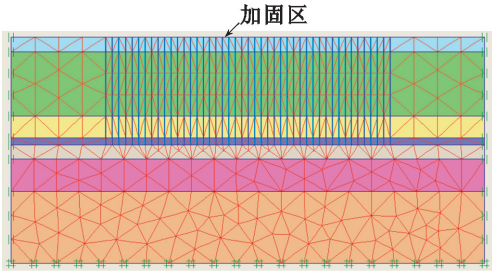


图 4 模型划分网格
Fig.4 Mesh of numerical model

表 4 计算参数

Table 4 Calculation parameters

土层编号	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 C_{eq} /kPa	内摩擦角 $\Phi_{\text{eq}}/(^{\circ})$	渗透系数 $K_v/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	渗透系数 $K_h/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	泊松比	弹性模量/MPa
1	18.1	15.7	10.23	3.00E-04	3.00E-04	0.32	6.22
2a1	16.85	15.51	8.47	6.00E-0.6	1.16E-05	0.35	1.34
2a	17.66	16	10.31	2.79E-06	7.50e-06	0.35	1.74
2b	19.32	14.39	15.06	5.01E-07	6.30E-07	0.32	8.98
3b	20.09	7.94	28.4	3.50E-06	1.28E-06	03	28.59
3c	19.9	0	30	1.00e-02	1.00E-02	0.25	53.6

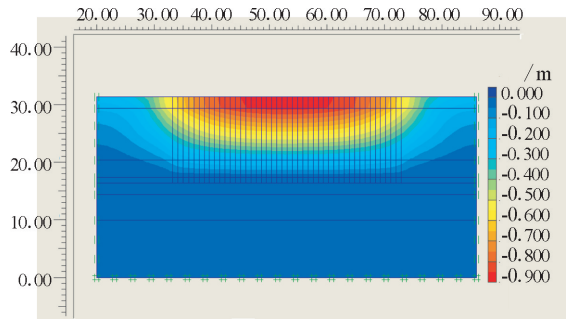


图 5 加固后沉降量分布图

Fig.5 Ground settlement after improvement

由图 6 可以看出,计算值与实测值趋势基本一致,前期阶段拟合较好,基本吻合,后期计算值要大于实测值,停泵前又基本一致。这是因为计算值是一种理想状态下的计算结果,而实测值所处的现场工程环境复杂,完全相同的拟合是不可能的,故认为这里的沉降计算值与实测值基本吻合,说明模拟方法和参数的取值是可行的,那么其他物理量的计算值也应当是合理的。所以真空预压作用下的有效应力模拟计算值应是合理的。而且在真空荷载和平均

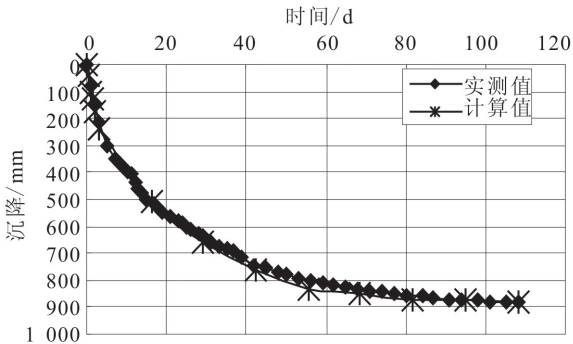


图 6 沉降量的计算曲线和实测曲线比较

Fig.6 Comparison of ground settlements determined by calculation and measurement

膜上水压荷载作用下,地基排水固结,有效应力不断增加,从而引起了十字板强度的增加,承载力增加,地基被加固。地基强度增长与有效应力间关系为 $\Delta\tau = \sigma' \tan\varphi$ ($\Delta\tau$ 为地基强度增长; σ' 为有效应力; φ 为土层内摩擦角)。因此将与加固前十字板取土相对应深度上的有效应力提取出来,计算十字板强度增加值,从而确定加固后的十字板强度值,结果见图

7. 可以看出计算所得的十字板强度与实测值基本相同,说明在预压荷载分析时考虑平均膜上水压荷载与真空荷载的共同作用是合理的,在平均膜上水压荷载和真空荷载作用下地基得到了加固,且加固效果显著。

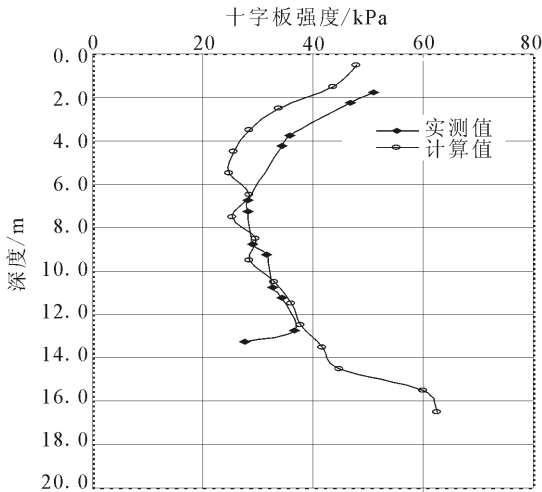


图 7 加固后十字板强度比较图

Fig.7 Comparison of vane strengths determined by calculation and measurement after improvement

5 结论

在进行潮差带地区水下真空预压加固地基设计时,预压荷载可以取膜下真空荷载和平均膜上水压荷载之和。由于平均膜上水压荷载不宜准确计算,建议在设计时可以采取以下方法确定潮差带地区水下真空预压的预压荷载。

(1) 当平均膜上水压荷载不大时,可直接将膜下真空预压荷载做为预压荷载。该方法简便易行,平均膜上水压荷载可以作为安全储备考虑,对设计安全控制有利。

(2) 当平均膜上水压荷载较大时,可将膜下真空预压荷载与平均膜上水压荷载之和做为预压荷载。平均膜上水压荷载可根据施工期间的潮水位和地面标高进行分析计算,计算时应考虑低潮落滩时

间的长短,同时建议不考虑地基沉降对地表标高的影响。

参考文献(References)

[1] 许胜,王媛. 真空预压法加固软土地基理论研究现状及展望[J].岩土力学,2006,27(增刊 2):943-947.
XU Sheng,WANG Yuan.State-of-arts and Prospect of Consolidation Theory for Soft Soil By Vacuum Preloading[J].Rock and Soil Mechanics,2006,27(Supp2):943-947.(in Chinese)

[2] 张敬,刘爱民.水下真空预压的加固机理分析[J].岩土工程学报,2007,39(5):644-649.
ZHANG Jing,LIU Ai-min. Analysis of Mechanism of Consolidation of Soil Improved with Underwater Vacuum Preloading Method[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,39(5):644-649.(in Chinese)

[3] 刘超,曹威,张建民.海上风电结构地基土动应力变化规律研究[J].地震工程学报,2014,36(2):220-227.
LIU Chao,CHAO Wei,ZHAN Jian-min. Numerical Study on Stress Change within the Foundation of Offshore Wind Generators[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(2):220-227.(in Chinese)

[4] 王淑云,张旭辉,鲁晓兵.潮间带土在吊装荷载下的动力性质[J].地震工程学报,2014,36(2):580-584.
WANG Shu-yun,ZHANG Xu-hui,LU Xiao-bing. Dynamic Properties of Soil in Intertidal Zone under Cyclic Lifting Loads[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(3):580-584.(in Chinese)

[5] 董志良,李婉,张功新.真空预压法加固潮间带软土地基的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊 2):3490-3494.
DONG Zhi-Liang,LI Wan,ZHANG Gong-xin. Experimental Study on Treatment of Soft Soil in Intertidal Zone with Vacuum Preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(Supp2):3490-3494.(in Chinese)

[6] LIU Ai-min,YAN Shu-wang,Yin Chag-quan.Improvement of Underwater Soft Subsoil in Tidal Zones by Vacuum Preloading Technique[J].Applied Mechanics and Materials,2011,71-78:3643-3652.

[7] LIU Ai-min,YAN Shu-wang.New Construction Method of Marine Cofferdam on the Soft Ground in Tideland[J].Applied Mechanics and Materials,2012,446-449:1785-1790.