



高强度超载预压联合强夯软基 处理技术现场试验研究*

张永宏¹, 王挺², 高公略¹, 王文字²

(1. 淮海工学院 土木学院, 江苏连云港 222005; 2. 中国化学工程南京岩土工程公司, 江苏南京 210044)

摘要: 江苏金港湾国际物流园区建于连云港市沿海的深层软土上。“8 m高强度超载预压联合强夯”方案被首次采用对B型集装箱堆场进行软基处理, 并获得成功, 大大突破了本地区以往的超载预压高度。该工程案例不仅为连云港市的高强度软基处理提供了成熟经验, 而且证明了高强度软基处理具有可行性和可操作性, 对在沿海软土上修建港区具有良好的借鉴作用。

关键词: 高强度超载预压; 联合强夯; 软基处理技术; 现场试验

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0162-06

Field test on high-strength overload preloading combined dynamic compaction for soft foundation treatment technology

ZHANG Yong-hong¹, WANG Ting², GAO Gong-lue¹, WANG Wen-yu²

(1. Dept. of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;

2. China's Chemical Engineering Nanjing Geotechnical Engineering Company, Nanjing 210044, China)

Abstract: Jiangsu Jingangwan international logistics park is constructed in Lianyungang coastal deep soft soil, “8 m high-strength overload preloading combined dynamic compaction” scheme is first used successfully on container yard B for soft foundation treatment, which broke through significantly the overloading prepressing height in the local area before. The engineering case not only serves successful experience for the high-strength soft foundation treatment in Lianyungang city, but also verifies the feasibility of the high-strength soft foundation treatment. It may serve as reference for the construction of port area on coastal soft soil ground.

Key words: high-strength overload preloading; combined dynamic compaction; soft foundation treatment technology; field test

1 工程概况及软基特性

江苏金港湾国际物流园区建于连云港市沿海软基中, 总面积22 km², 其中保税物流中心B型集装箱堆场面积为17.7万m²。场地平均高程为2.40 m, 第1层为黏土, 软塑, 厚1~2 m; 第2层为淤泥, 厚16.0~18.5 m, 流塑。地基主要软土层特性见表1。

表1 地基主要软土层特性

层号	垂直渗透系数 $K_{v}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	水平渗透系数 $K_{h}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	含水率/%	孔隙比	压缩模量/MPa
1	2.35×10^{-7}	2.91×10^{-7}	36.9	1.115	2.58
2	2.50×10^{-7}	3.73×10^{-7}	64.0	1.830	1.70

由表1中数据可知, 场地软土含水率高、承载力低、压缩性高、渗透性低且埋藏深厚, 不处

收稿日期: 2012-10-10

*基金项目: 江苏省建设厅基金项目(JS2008ZD03)

作者简介: 张永宏(1966—), 男, 副教授, 从事桥梁及软基处理工程。

理,在荷载作用下基础会产生较大的沉降,且沉降历时很长,将影响建筑物的正常使用。

2 软基处理方案

集装箱场地设计荷载55 kN,要求工后沉降小于30 cm,为加快地基固结,确保本区经地基处理后能够及时交付使用,根据场地使用荷载和对残余沉降的使用要求,采用“8 m高强度超载预压+强夯”的方案进行软基处理,具体工艺流程如下。

2.1 打塑排板

先场地整平;然后铺设土工布;再铺20 cm碎

石加50 cm砂;最后打设塑料排水板,间距为1 m,正方形布置,平均深度18 m,并穿过淤泥层进入黏土层不小于1 m。

2.2 堆载预压

施工期堆载预压分为三级完成,每级堆载2.5 m山场石:第一级堆载预压至50 d后进行第二级堆载,预压至100 d后进行第三级堆载,三级堆载结束后一直预压至270 d,固结度达90%以上,方可进行卸载,在分级加载过程中,每级还需分层上载,每层加载高度控制在1 m之内。三级堆载见表2。

2.3 强夯密实

堆载预压结束后,卸载整平至始夯高程,强

表2 B型集装箱堆场堆载高度及预压时间

堆载预压分级	堆料密度/($t \cdot m^{-3}$)	堆载厚度/m	预压荷载/kPa	预压时间/d	地基交工高程/m
塑排板+砂石垫层	1.7(砂石料)	0.7	11.9		
第一级荷载	1.7(石料)	2.5	42.5	0~50	卸载至高程4.75 m,并碾压整平至交工高程4.03 m
第二级荷载	1.7(石料)	2.5	42.5	50~100	
第三级荷载	1.7(石料)	2.5	42.5	100~270	
总计		8.2	139.4	270	

夯始夯高程=地基处理后交地高程+强夯夯沉量,利用底部山场石作为强夯垫层,一遍点夯结束后将场地推平,再进行下一遍点夯,最后普夯,每遍夯实间隔为14 d,夯点布置为正方形,点夯的收锤标准最后2击平均夯沉量小于10 cm,普夯要求夯印搭接为1/3锤底直径。

设计采用2 000 $kN \cdot m/m^2$ 夯击能进行点夯,估算夯沉量为80 cm,结果夯不动,将点夯夯击能变更为3 000 $kN \cdot m/m^2$,最后场地平均夯沉量为73 cm。说明预压处理后的地基强度好于设计预测。实际夯击指标见表3。

表3 实际夯击指标

夯击荷载分级	夯击能/($kN \cdot m \cdot m^{-2}$)	跳档夯距离/m	夯击数
第一遍点夯	3 000	8×4	>6
第二遍点夯	3 000	8×4	>7
普夯	800	2×2	2

后来由于时间太紧,加之场地交接等原因,最后4个孔隙水压力计均被破坏,强夯时水压力没能得到监测。

2.4 碾压整平

采用25 t重型振动压路机进行振动碾压,激振力210~270 kN,碾压4~8遍,一个来回为一遍,每遍间隔不小于4 h,搭接宽度不小于30 cm,相邻碾压遍间采用正交行驶方向交错碾压。最后场地经振动碾压整平至交地高程。

2.5 铺结构层

最后铺设堆场结构层:38 cm钢筋混凝土面层、25 cm水泥稳定碎石、15 cm级配碎石层。

3 监测结果与分析

监测时间2009-05-18—2010-03-21。一共埋设沉降板19块、分层沉降4组、孔隙水压力4组、边桩8组、测斜4组和土压力4组。施工期间监测控制标准见表4,监测仪器平面布置见图1,沉降板平面布置见图2。

表4 施工期间监测的加载速率控制标准

垂直沉降量/ ($mm \cdot d^{-1}$)	水平位移/ ($mm \cdot d^{-1}$)	孔隙水压力	卸载固结度/%	连续10 d实测沉降速率/ ($mm \cdot d^{-1}$)
<10	<5	$\sum \Delta u / \sum \Delta p < 50\%$	≥90	≤1.5

注:指标可根据现场监测情况进行适当调整。

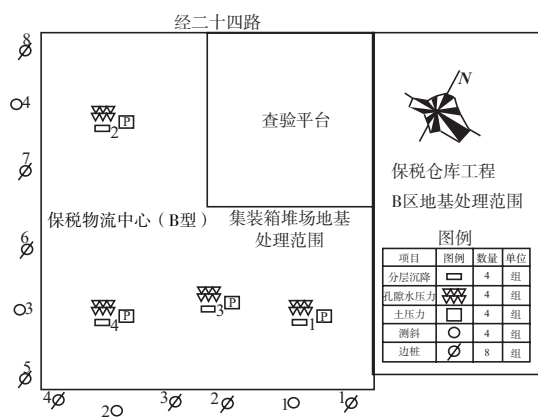


图1 监测仪器平面布置

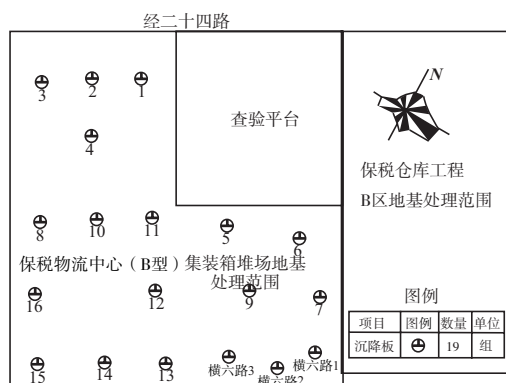


图2 沉降板平面布置

3.1 沉降监测数据分析

实际工程质量的控制主要体现在固结度和工后沉降2个指标,利用三点法推算结果见表5,以沉降板1的沉降-时间变化曲线为例,见图3。

表5 沉降固结度、工后沉降汇总(截至2010-03-21)

沉降板编号	累计天数/d	累计沉降/ mm	固结度/%	S_e /mm	工后沉降/ mm
1	307	1 071	97.13	1 103	32
2	282	863	96.43	895	32
3	282	894	91.92	973	79
4	282	865	96.12	900	35
5	278	900	91.02	989	89
6	278	928	95.20	975	47
7	278	848	91.40	928	80
8	270	897	95.83	936	39
9	267	841	90.70	927	86
10	263	816	90.90	898	82
11	251	851	92.49	920	69
12	245	887	90.91	976	89
13	245	775	92.52	838	63
14	245	884	93.47	946	62
15	245	739	93.13	794	55
16	245	834	95.39	874	40
横六路1	245	816	90.15	905	89
横六路2	245	822	94.78	867	45
横六路3	244	887	91.30	972	85

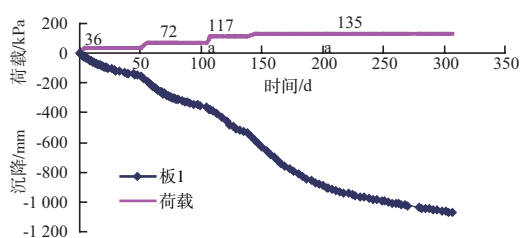


图3 沉降板1沉降-时间变化曲线

1) 集装箱堆场区域19块沉降板截至2010年3月21日平均值为864 mm;推算固结度平均值为93.20%;堆载最终沉降平均值为927 mm;工后沉降平均值为63 mm。

2) 施工过程中,各沉降板每天沉降量均未超出10 mm/d,至3月份各沉降板连续10 d实测沉降速率均在1.5 mm/d之内。

3.2 分层沉降数据分析

随着深度的增加,各土层沉降量逐渐减少,-2 m处磁环累计位移最大,主要沉降分布在-10~-2 m;4组中最底面磁环固结度范围为93.22%~97.56%,表明有效影响深度能达到-12 m;加载过程中各磁环沉降速率逐渐增大,进入预压阶段沉降速率放慢。以第1组分层沉降变化曲线为例,见图4。

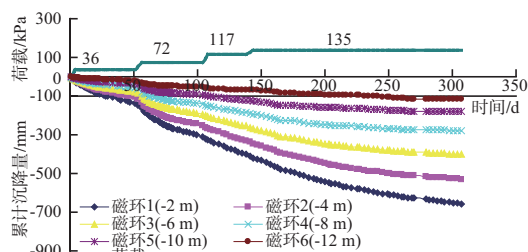


图4 第1组分层沉降变化曲线

3.3 孔隙水压力数据分析

开始堆载,孔隙水压力急剧增大,达到最大值后慢慢消散。4组均满足 $\Delta u/\Sigma \Delta p < 50\%$ 的标准,如 K_1 孔, Δu 最大增幅为18.9 kPa,堆载高度为2.5 m,附加应力增幅为42.5 kPa, $18.9/42.5=0.44 < 50\%$ 。越接近地表上部,荷载引起的孔隙水压力越大且消散也越快。孔隙水压力监测数据及推算固结度见表6。以第1组超孔隙水压力变化曲线为例,见图5。

表6 孔隙水压力监测数据 (截至2010-03-21)

孔压编号	孔内高程/m	孔压消散/kPa	孔压消散度/%	孔压固结度/%
K ₁	-3	25.1	82.84	51.17
	-6	23.2	86.89	48.21
	-9	19.3	96.41	43.24
	-12	10.6	98.15	43.92
K ₂	-3	22.0	66.87	58.57
	-6	19.0	71.43	55.19
	-9	14.6	82.02	51.82
	-12	12.1	97.58	49.79
K ₃	-3	23.0	77.97	48.31
	-6	19.3	83.91	47.27
	-9	15.5	87.57	41.51
	-12	10.9	97.32	44.10
K ₄	-3	25.1	74.93	48.03
	-6	18.9	76.21	47.35
	-9	12.9	81.13	44.87
	-12	11.4	90.48	43.00

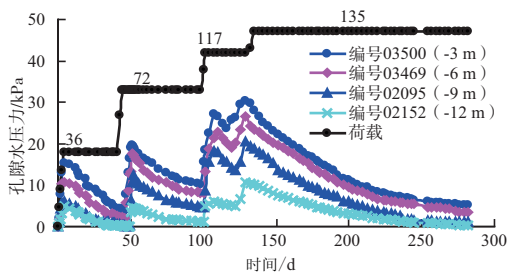


图5 第1组超孔隙水压力变化曲线

3.4 土压力数据分析

土压力监测的目的是了解土压力随堆载厚度的变化情况。土压力监测结果见表7。

表7 土压力监测结果

土压力编号	土压力/kPa	堆载高度/m	堆载密度/(t·m ⁻³)
1	130.91	7.5 ~ 7.7	1.70 ~ 1.75
2	129.77	7.5 ~ 7.7	1.69 ~ 1.73
3	133.04	7.5 ~ 7.7	1.73 ~ 1.77
4	132.09	7.5 ~ 7.7	1.72 ~ 1.76

3.5 表层水平位移数据分析

侧向位移包括表层水平位移 (边桩位移) 和深层水平位移 (测斜) 两部分, 是分析预压荷载下地基的稳定性以及由于侧向位移所引起的沉降大小的重要依据。

3.5.1 表层水平位移数据分析

随着堆载增加, 边桩位移也在缓慢增加, 但每天的位移值不大, 如果荷载接近地基的极限

荷载时, 边桩位移就迅猛增大, 荷载外的地面会发生隆起, 这预示地基将发生破坏, 这时应立即采取措施停止加载, 甚至卸除部分荷载待地基固结, 各项指标恢复正常后再加载。由表8数据看出, 最大水平位移速率基本满足5 mm/d的要求, 其中边桩3位置区域在2010-09-18—2010-10-07因堆载过快发生滑移塌陷, 位移速率超过警戒值5 mm/d, 经卸载和反压护道处理后, 位移降至5 mm/d之内。

表8 表层水平位移监测数据 (截至2010-03-21)

边桩编号	累计水平位移/mm	边桩位移速率/(mm·d ⁻¹)
1	98.0	4.4
2	114.9	4.3
3	162.3	7.1
4	112.6	4.5
5	116.5	4.6
6	97.4	4.1
7	104.0	4.0
8	107.8	3.9

3.5.2 深层水平位移数据分析

在堆载预压过程中, 上部土体位移量较大, 随着深度的增加位移量逐渐减小。深层水平位移监测数据见表9。以测斜管1变化曲线为例, 见图6。

表9 深层水平位移监测数据 (截至2010-03-21)

深层水平位移编号	最大位移/mm	对应深度/m
第1组	214.03	0.5
第2组	308.47	0.5
第3组	180.61	2.0
第4组	226.30	1.5

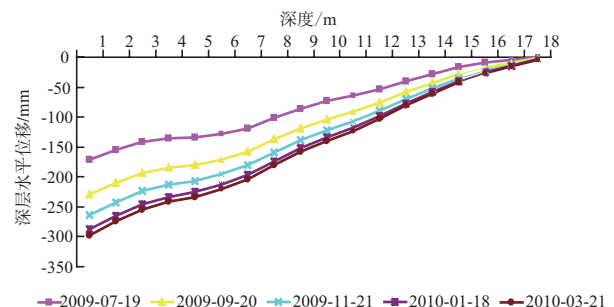


图6 测斜管1变化曲线

3.6 加固前后十字板和土工试验分析

3.6.1 十字板剪切试验

经十字板剪切试验, 淤泥层原状土平均剪切强度第1组提高了8.51 kPa、第2组提高了8.49 kPa,

第3组、第4组只做了地基处理之前。以第1组十字板原状土 C_u 处理前后比较为例,见图7。

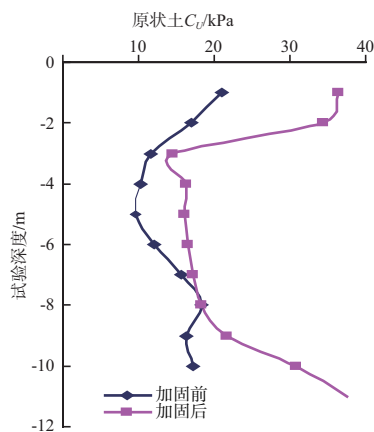


图7 第1组十字板原状土 C_u 处理前后比较

3.6.2 土工试验

从表10试验数据可看出: 0~2 m深度区的土

表10 地基处理前后3组钻孔土工试验数据

深度/m	孔	位置	w /%	e	I_L	E/MPa
1~2	1	前	26.8	0.81	0.44	3.58
		后	44.3	1.32	0.89	2.05
	2	前	33.3	0.96	0.38	3.19
		后	37.6	1.00	0.63	3.43
	3	前	29.5	0.87	0.42	3.24
		后	30.5	0.89	0.22	4.42
3~4	1	前	62.6	1.77	1.32	
		后	57.6	1.58	1.35	1.85
	2	前	56.3	1.61	1.11	
		后	54.8	1.61	1.40	2.10
	3	前	78.8	2.22	1.67	
		后	50.3	1.39	1.36	2.42
5~6	1	前	66.2	1.85	1.33	1.90
		后	58.0	1.62	1.64	2.08
	2	前	74.1	2.08	1.41	1.56
		后	66.6	1.85	2.11	1.70
	3	前	71.8	2.02	1.42	1.61
		后	50.1	1.40	1.30	2.13
7~8	1	前	70.2	1.95	1.34	
		后	56.8	1.58	1.25	1.90
	2	前	51.4	2.02	1.30	
		后	65.2	1.82	1.69	1.69
	3	前	72.2	2.01	1.47	
		后	61.0	1.71	1.45	1.97
9~10	1	前				1.59
		后	52.6	1.51	1.01	2.14
	2	前	71.0			1.42
		后	63.8	1.76	1.45	1.83
	3	前	75.0	2.11	1.16	1.35
		后	64.3	1.77	1.95	1.74

性强度有一定程度的降低, 这是后期的强夯使表层黏土受到扰动造成的, 同时强夯破坏了塑排板顶部, 使正常的排水机制受损, 使表层黏土含水率稍大。2~10 m深度区的土性含水率、孔隙比有一定的减少, 抗剪强度、弹模有一定的增加。

3.6.3 浅层平板荷载试验分析

采用1 000 mm×1 000 mm的刚性承压板, 在强夯完成的场地顶面上试验一组, 经过1 320 min的试验观测, 最大加载量为346 kPa, 累计沉降量达16.63 mm, 试验点 p - s 曲线上比例界限不明, 则取 s - $\lg p$ 曲线比例界限值173 kPa为该点地基承载力的特征值, 满足设计荷载55 kPa的3倍要求。浅层平板荷载试验数据见表11, 浅层平板荷载试验曲线见图8。

表11 浅层平板荷载试验数据 (2011-09-11)

级数	荷载/kPa	本级沉降/mm	累计沉降/mm	本级历时/min	累计历时/min
1	58	0.78	0.78	120	120
2	86	0.46	1.24	120	240
3	115	0.61	1.85	120	360
4	144	1.12	2.97	120	480
5	173	1.21	4.18	120	600
6	202	1.59	5.77	120	720
7	230	1.43	7.20	120	840
8	259	1.98	9.18	120	960
9	288	2.25	11.43	120	1 080
10	317	2.31	13.74	120	1 200
11	346	2.89	16.63	120	1 320

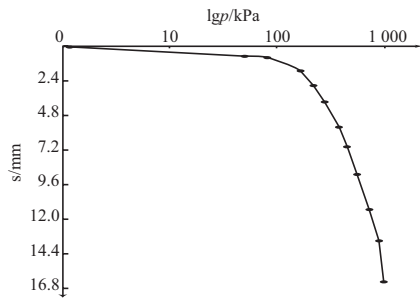


图8 浅层平板荷载试验曲线

4 “高强度超载预压+强夯”技术分析

4.1 高强度超载预压可行性分析

如果没有综合措施, 在连云港市软基上, 采

用单纯堆载的极限高度只有2~3 m,金港湾物流园区B型集装箱堆场是连云港市第一次高强度堆载8 m并结合强夯处理的工程案例,之所以获得成功,只有在采用综合处理措施的情况下或四周有相应条件的情况下。对B型集装箱堆场软基采取的综合措施为:1)先打设塑料排水板,不仅提高了排水效力,而且等于在软基中加筋,增加了软基抗蠕变能力;2)分级预压避免了一次加载过大带来的地基不稳问题;3)四周也在进行堆载预压,堆载高度3.2~4.5 m不等,制约了软基向四周滑动的可能。正是在上述条件下,8 m高强度超载预压方案才是可行的。

4.2 强夯可行性分析

强夯(DC)是通过对地表进行高夯击能作用实现的。它能使地面松散山场石致密化、承载力提高;对于饱和低渗透黏土,强夯引起的土骨架变形和颗粒间的滑移会使受影响的区域渗透系数进一步减少及造成孔隙水压力增加,会导致软基局部液化,而塑料排水板释放了孔隙水压力,提高了强夯的效力,使软基致密,使沉降提前发生,提高了软基抗液化阻力。

因此,在配合塑料排水板和多级预压的情况下,并在一定厚度石料上,采取强夯是可行的,可进一步提高地基压实度、提高地基承载力、减少地基工后沉降,增强软基处理效果。

4.3 “高强度超载预压+强夯”可加快沉降,提升强度

堆荷270 d,软基平均下降了927 mm;强夯又使场地平均下沉了73 cm,强夯使软土与石料层更加密实。两者的结合,加快了沉降,提升了基础强度。从已修建的堆场情况看,集装箱堆场整体强度很好。

4.4 “高强度超载预压+强夯”经济合理

连云港市以往对软基处理主要采用山场石换填,挖掉了上层黏土硬壳层,过重的换填石反而加大软基后期沉降,影响堆场的使用,使后期维修堆场的费用很高;如果采用粉喷桩处理则一次性造价过高。金港湾采用的“高强度超载预压+强

夯”就较经济合理。

4.5 “高强度超载预压+强夯”方便施工

堆载预压的山场石可直接作为便道使用;另外,堆填的山场石在施工车辆、雨水等作用下,自然密实,减少了后期的压实工作。

5 结论

B型集装箱堆场要求软基处理一次到位,所采用的软基处理措施,与其周围相邻区所采用的“塑排板+超载预压”不一样,和保税B区“超载预压+强夯”的处理也不一样,堆载高度和夯击能均比它们要大,从观测数据来看,对B型集装箱堆场软基采用的“高强度超载预压+强夯”处理方案达到了预期的效果。同时通过本研究得到:

- 1)“高强度超载预压+强夯”在一定的条件下,是可行的;
- 2)“高强度超载预压+强夯”能较好地加快沉降、提高地基承载力、减少工后沉降;
- 3)“高强度堆载预压+强夯”经济合理,施工方便。

参考文献:

- [1] 金晖,杨军.连云港庙岭三期工程设计与施工一体化控制研究[J].水运工程,2007(5):98-103.
- [2] 章定文,刘松玉,于新豹.连云港海相软土工程特性及处治方法探讨[J].工程地质学报,2003(3):250-257.
- [3] 周健,张健,姚浩.真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J].岩土力学,2005(S1):198-200.
- [4] 周健,姚浩,贾敏才.大面积软弱地基浅层处理技术研究[J].岩土力学,2005(10):1685-1688.
- [5] 肖勇.低能量强夯法在港口工程软基加固中的应用[J].水运工程,2004(5):35-40.
- [6] 罗大方.强夯法在港口工程地基处理中的应用及其效果评价[J].水运工程,2006(8):97-102.
- [7] 程祖锋,孙秀娟,谌会芹.某港口工程地基处理中的强夯影响范围研究[J].工程地质学报,2007(1):88-91.

(本文编辑 郭雪珍)