

饱和软弱地基冲压处理试验研究

黄晓波, 周立新, 杨志夏

(空军工程设计研究局, 北京 100068)

摘 要: 冲压处理饱和软弱地基是一种新型的软基处理方法, 对于处理浅层固结硬壳层十分有效, 应用于土基处理领域, 特别适用于公路、场道的地基处理。以某大型工程的饱和软弱地基为例, 在划分的试验区块进行冲压动力固结试验, 试验过程中监测孔隙水压力并分析监测结果, 提出了合理的施工参数和间歇周期。检测表明, 处理后地基获得了良好的加固效果; 冲压试验为工程提供了合理的施工方法和施工工艺, 也为展开大面积施工提供了保证。

关 键 词: 软弱地基; 冲压; 处理; 孔隙水压力; 试验

中图分类号: TU 477

文献标识码: A

Test study on saturated soft ground treatment by dynamic compaction

HUANG Xiao-bo, ZHOU Li-xin, YANG Zhi-xia

(Air Force Engineering Design & Research Institute, Beijing 100068, China)

Abstract: Taking a large project for example, the dynamic compaction tests are carried out to treat its saturated soft foundation. The pore water pressure is monitored; the working parameters and intermission cycle are defined. The results show that the stabilization is well acquired according to checking. At the same time, the success is acquired in the application of the project.

Key words: soft foundation; dynamic compaction; treatment; pore water pressure; test

1 引 言

冲击压实技术起源于中国古代的人工打夯法, 由于其效率低、劳动强度大, 逐步被光轮压路机和振动压路机所取代。然而, 由于冲击压实具有的巨大冲击能和能获得深层压实效果, 促使人们探求更先进的设备。从 20 世纪 50 年代起, 经过了 40 多年的研究、改进和完善, 已经发展成高能量连续式冲击压路机。90 年代冲击压实的设备及工艺传入我国后已被广泛应用于建筑、交通、水利、机场等各类工程中的土基处理及填土压实, 它具有效率高、综合成本低等优点, 应用于土基处理领域, 特别适用于公路、场道的地基处理, 已在许多工程中都取得了良好的处理效果和经济效益。本文将某大型工程的饱和软弱地基处理为例, 划分试验区块进行了冲压动力固结试验, 通过现场试验和对孔隙水压力监测, 确定了最佳的施工控制, 取得了良好的地基加固效果。

2 试验概述

2.1 工程概况

拟建场区地形较为平坦, 属于黄河下游泛滥冲洪积平原。地下水位埋深在 1.7~2.0 m 之间。据钻探资料分析: 场区范围内为第四系地层, 其浅表部土层为新近沉积, 土的各项力学指标都较差, 为本区域的软弱层(中软场地), 其主要地层物理力学指标^[1]平均值见表 1。

拟建建筑物为场道, 主要为填方施工, 地基处理的设计要求^[2]: 最终剩余沉降量小于 8 cm, 不均匀坡差小于 1.5 %, 压实度: 0~80 cm 达到 95 %, 大于 80 cm 达到 90 %, 消除原土基下 6 m 范围内的液化现象。地基存在的主要问题有: 地基沉降量不能满足设计要求; 地面下 6 m 范围内饱和砂粉土均有液化的可能; 地基土的压实度不满足要求。综合分析, 为满足设计要求试验场地必须进行地基处理, 为此在场地内划分了冲压试验区, 通过试验研究来确定冲压的适用性和合理的施工控制。

表 1 场地土层的主要物理力学性质指标

取样深度 /m	含水量 /%	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比	固结系数 / MPa^{-1}	压缩模量 /MPa
10~1.30	23.0	1.54	0.738	5.21	2.64
10~2.30	25.7	1.53	0.758	4.85	3.0
10~3.30	25.2	1.51	0.782	5.06	2.3
10~4.30	26.8	1.52	0.776	5.21	6.78
10~5.30	26.0	1.54	0.745	5.43	9.4
10~6.30	27.4	1.54	0.725	5.38	9.3

2.2 冲压动力固结原理

采用冲压法进行动力固结具有许多独特的优势。首先, 冲压的应力作用方式兼具有揉、挤、冲击等多种作用, 在这些作用下很容易使土体中产生大量的微裂隙, 这些裂隙的存在可大大加速地基土中孔隙水的排出以加速土体固结^[3]。冲压相当于小能量的强夯, 根据有关计算可知, 25 kJ 三边冲压机的速度为 10~12 km/h 时相当于 350 kN·m 强夯。而在动力固结理论中, 固结过程应该是由表层至深层逐渐发生的, 这种低能量的强夯对进行浅层固结, 即处理硬壳层是十分有效的^[4]。

冲压施工相当于一种连续的夯拍过程, 具有波浪起伏及周期间歇等特点, 这种间歇周期通过合理规划分作业面积等手段很容易与土基的孔压消散周期相协调, 使孔压消散持续发生在最有效的消散阶段, 即使动力固结过程持续高效进行, 比传统强夯法^[5]更有效的利用冲击能, 并可缩短固结周期。冲压的冲击能量较低 (相比于强夯法), 在其作用下土体在一定程度上仍可保持原有的结构强度, 并在此基础上进一步密实提高。

2.3 试验参数及工序

在划出的冲压试验区内, 本着以质量好、工期快、投资少为目的确定施工参数: 25 kJ 三边形冲压机, 行驶速度为 10~12 km/h, 冲压遍数为 12, 16, 20, 24, 28, 32。

冲压施工程序为: 进行测量放线定位→清除表层植物土→按 20.20 m 方格网测量场地标高→铺设滤水土工布→回填 20 cm 砂砾石→平整并进行高程测量→回填粉土至一定高程(回填厚度为 20~50 cm)→平整并进行高程测量→进行冲击压实→平整并测量冲压后高程→回填粉土至设计高程(回填厚度 120 cm)→平整并进行高程测量→进行冲击压实→面层平整并清理至基底设计标高。应特别提出的是, 粉土填料的含水量应控制在最佳含水量附近(按最佳含水量 $\pm 2\%$ 范围进行预控); 冲压机的行驶速度不小于 10~12 km/h。

在整个冲压试验施工过程中, 进行孔压监测、表面沉降观测、干密度检测, 了解了动力固结的变化规律、预处理沉降量以及有效处理深度等相关数据, 选择合理的施工及控制参数。

3 孔隙水压力的监测

冲压作用使土体中的孔隙水排出, 一定深度的土体被密实, 达到某种程度的超固结状态。在外动力的作用下土中的孔隙水会产生超孔隙水压力, 其大小一般随着外动力的加、卸载而变化, 如图 1 所示^[6]。

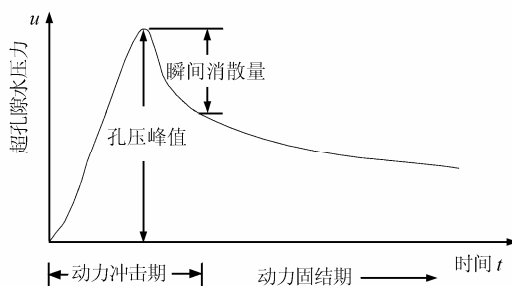


图 1 超孔隙水压力变化示意图

Fig.1 Scheme of the pore water pressure

由图 1 可知, 在外动力的加载阶段超孔隙水压力迅速升高, 冲击能卸去的一瞬间超孔隙水压力迅速下降, 此瞬间孔隙水压力的消散量称为瞬间消散量, 但此时土体中仍保持一定的孔隙水压力, 土体就在此压力作用下排水固结。在动力固结期孔隙水压力不能过低, 太低就无法达到固结排水作用, 但过高会使土体原有结构被破坏、强度丧失, 致使土体无法被有效密实。有关研究表明, 使孔隙水压力维持在一定范围内, 其消散周期要比在孔压极限的状态的消散周期缩短 2~5 倍, 而确定最佳的超孔压范围是进行孔压监测试验主要目的。

在动力冲击期瞬间消散量是随施力次数的增加而逐渐降低至趋于收敛的。一般认为, 当瞬间消散量相当于超静水压力总量的 10%~20% 时可达到较好的固结目的。对冲压施工过程中的监测要可以得出最佳超孔压范围、孔压随深度变化、最佳超孔压与冲压遍数的关系和冲压施工合理间歇周期。

4 监测结果分析

自冲压试验施工开始孔压检测, 分别读取施工过程中的孔压峰值、孔压瞬间消散量及冲压 20 遍时的消散周期。冲压 20 遍结束且待孔压消散至总

量的 10 %后, 又进行了 20~32 遍的冲压。数据整理后绘制了 1.5 m 埋深时孔压瞬间消散量与冲压遍数关系曲线和冲压遍数与孔压峰值关系特征曲线, 如图 2 和图 3 所示。可以看出, 在间歇前的 20 遍冲压中瞬间孔压消散值逐渐减小, 而孔压峰值不断增大; 在间歇后的冲压中亦有类似的规律。瞬间消散量与孔压峰值见表 2。

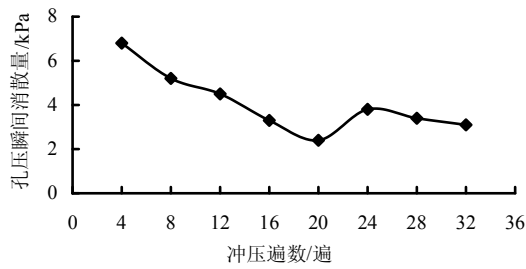


图2 1.5 m埋深孔压瞬间消散量与冲压遍数关系
Fig.2 Relation between number of lashing and reduction of pore water pressure(1.5 m)

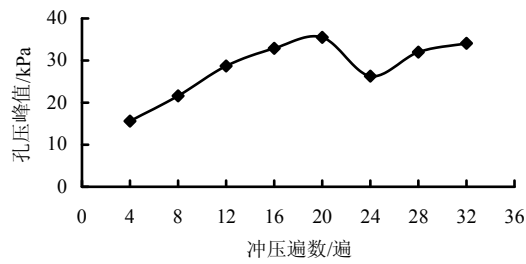


图 3 冲压遍数与孔压峰值关系特征曲线
Fig.3 Relation between number of lashing and peak value

表 2 孔压峰值消散量

Table 2 The reduction of peak value

参数	峰值消散量							
冲压遍数/遍	4	8	12	16	20	24	28	32
孔压峰值/kPa	15.6	21.6	28.7	32.9	35.5	26.3	32.0	34.1
瞬间消散量/kPa	6.8	5.2	4.5	3.3	2.4	3.8	3.4	3.1
瞬间消散率/%	43.6	24	15.7	10.2	6.8	12	10.6	9.1

前已述及: 瞬间消散量为孔压峰值的 10 %~20 %时可达到较好的固结效果。由此得出一次性冲压遍数不宜大于 16 遍, 间歇后一次性冲压遍数不宜大于 12 遍, 在现场也可看到进行 16~20 遍的冲压后局部出现弹簧土的现象。此外, 在间歇期观测了孔压消散情况, 其 1.5 m 的观测曲线如图 4 所示。从图中看到, 孔隙水压力的消散越来越小, 消散率达 30 %后已经非常微弱, 剩余孔压很难在短时间内消散, 消散达 30 %的时间约为 4 d, 可知第一次冲压完成后的间歇周期不宜少于 4 d。

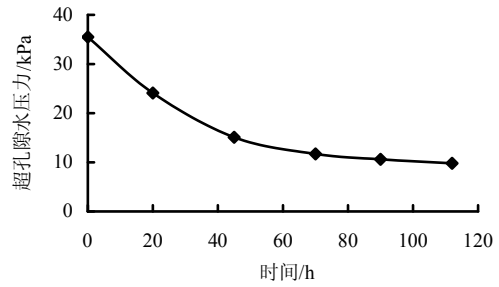


图 4 孔隙水压力消散特征曲线
Fig.4 Feature curve of reduction of peak value

5 处理后检测

5.1 标贯试验

为了验证冲压处理效果, 进行了冲压前后的标贯对比。图 5 为冲压前后标贯对比曲线图。由图可知, 从总体上看冲压处理后标贯数均有明显增加, 地基土强度有大幅提高; 在 0~4.50 m 随着深度的增加, 标贯击数的增加量逐渐减小, 而 5.50 m 左右其增量又有所增加。分析原因是处理后的检测点在此深度上土层出现变化(局部砂夹层等)。另外, 根据规范要求并通过处理后标贯击数来判定设计要求深度范围内已完全消除了液化。

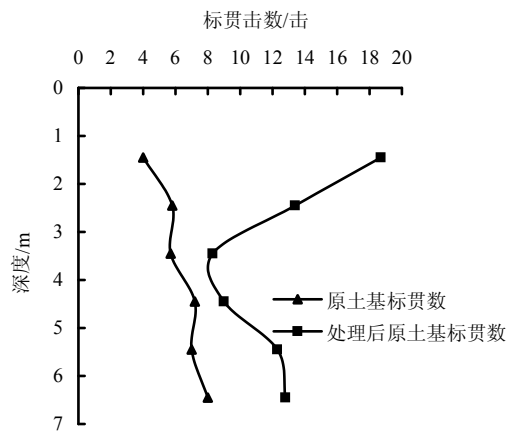


图 5 冲压前后标贯资料对比曲线
Fig.5 Curve of SPT

5.2 干密度试验

取样测试干密度并进行了处理前后的对比试验。图6为冲压前后干密度对比曲线, 表4为处理后土体压实度^[7]。可以看出, 冲压处理后干密度值明显增加, 处理后地基土体得到了压实; 随着深度的增加, 冲压对地基土体的影响减弱, 干密度的增加量逐渐减小。另外, 土体的压实度满足设计要求。

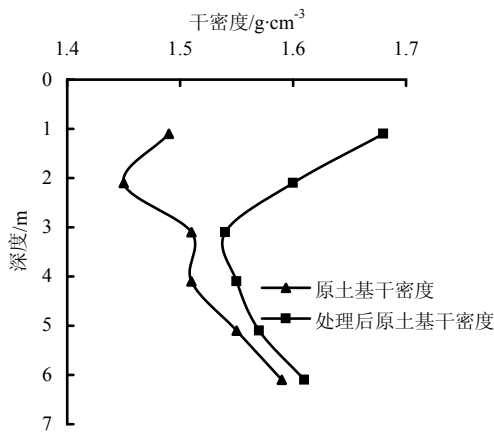


图 6 冲压前后干密度资料对比曲线
Fig.6 Curve of dry density

表 3 冲压后土层压实度
Table 3 Compaction factor in lashing silt

取样深度/m	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10
压实度	1.00	0.95	0.916	0.923	0.935	0.952

5.3 压缩模量试验

将试验所得压缩模量数据剔除异常点后取平均值，并列入处理前相应深度的压缩模量平均值^[1]，冲压处理前后压缩模量平均值的对比情况见表4。由表中数据可以明显看出，冲压处理后土基的压缩模量普遍提高，尤其是4 m以上地层提高显著。冲压处理后土基的压缩指标明显改良，可压缩性降低，即起到了一定的沉降预处理作用。另外，通过冲压后地基土体沉降的观测，经冲压处理后的沉降量达到了10.13 cm，满足沉降设计要求。

表 4 冲压处理前后压缩模量对比
Table 4 Compress modulus of lashing test

深度 /m	压缩模量(平均值) /MPa	
	处理前	处理后
1.00	2.64	3.71
2.00	3.00	6.51
3.00	2.30	5.10
4.00	6.78	8.97
5.00	9.50	9.80
6.30	9.30	9.41

5.4 前期固结压力试验

为了解采用冲压法动力固结的效果和固结层厚度及固结状态，为沉降计算提供参数，在冲压完成后通过钻孔取样，进行了高压固结试验^[1]。对比各试验结果，选取了有代表性的钻孔试验数据列于表 5。由表看出，经冲压处理后，6 m 以上土层均处于超固结状态，且随深度增加而固结程度逐渐降

低，至 6 m 处已接近正常固结状态。冲压处理在地基浅层形成了超固结的“硬壳层”。达到了预期的处理效果。

表 5 代表性钻孔地基土体的先期固结压力
Table 5 P_c of ground soil

清表后原地面下深度/m	0.4	1.4	4.9	6.4
先期固结压力/kPa	286	270	164	99

6 结 论

(1) 在冲压过程中，通过对现场孔隙水压力的监测，确定了合理的施工控制，这是在饱和软弱土上冲压效果取得成功的重要保证。

(2) 在本工程中，冲压施工控制标准为：冲压机的行驶速度为 10~12 km/h，冲压遍数不宜少于 28 遍。冲压宜分 2 次进行，第 1 次连续冲压遍数不宜大于 16 遍，第 2 次连续冲压遍数不宜大于 12 遍，两次冲压间歇期不宜小于 4 d。

(3) 处理后检测表明，采用冲压处理方法可减少地基沉降与不均匀沉降、消除一定深度的场地液化、提高强度和刚度，使地基土达到稳定、密实、均匀，完全满足设计要求。

(4) 冲压的影响深度特别适用于公路、场道等土基的有效影响深度，就本工程而言，冲压对工程的适宜性显然很好。

(5) 在施工中应加强和完善监测手段，确保冲压地基处理的顺利进行。

参 考 文 献

[1] JTJ051—93, 公路土工试验规程[S].
[2] MH5014—2002, 民用机场飞行区土(石)方与道面基础施工技术规范[S].
[3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理及计算[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994. 199—259.
[4] 王旭东, 肖树芳, 房后国. 天津海积软土结合水固结分析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 390—394.
WANG Xu-dong, XIAO Shu-fang, FANG Hou-guo. Analysis on the bound water consolidation of marine soil in Tianjin[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 390—394.
[5] JGJ79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].
[6] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 35—40.
[7] JTJ059—95, 公路路基路面现场测试规程[S].