

文章编号:1007-1229(2007)06-0046-04

强夯法设计参数的确定与现场试验研究

郑晓, 刘胜群, 卓凡

(江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州 341000)

摘要:结合实际工程现场测试试验结果,提出了应用现场试验结果选择强夯单位夯击能及有效影响深度,强夯击次数和夯击遍数,夯点间距及布点间距等强夯参数的方法.通过施工现场强夯过程孔隙水压力场分布的测试、土层中垂直变形和水平变形的测定、夯击数与夯沉量的测试,得到强夯加固软粘土地基时孔隙水压力随深度、距离的变化规律及夯击数与夯沉量的变化规律,根据这些变化规律有效选择相关强夯法设计参数.

关键词:强夯法; 现场试验; 结果分析; 参数确定

中图分类号:TU47 **文献标识码:**A

Ascertaining the Design Parameters of Intense Densification and the Study of Scene Experiment

ZHENG Xiao, LIU Sheng-qun, ZHUO Fan

(Faculty of Economics and Managerial Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Based on the results of project scene experiments, this article gives a way to choose parameters of the unit strike power of intense densification, the times of intense densification, space of the strike places and the space of design places. This article firstly gets laws about the intense densification under small opening water pressure of the depths and spaces in consolidating the soft clay foundation, and secondly gets laws about the times and intensity of pounding a strike. These laws are all gotten by the experiments of small opening water pressure scatters, the perpendicularity and Level deformations in soil layer and the times and intensity of pounding a strike. Then we can use laws to choose the design parameters of intense densification effectively.

Key words: the method of intense densification; scene experiment; result analysis; parameters ascertain

强夯法处理地基是20世纪60年代末由法国Menard(梅那)技术公司首先创用的.这种方法是將很重的锤(一般100-400kN)从高处自由落下(落距一般为5-40m)给地基以强大冲击力和振动,从而达到提高地基土的强度并降低其压缩性的目的.强夯法加固软土地基主要设计参数有:单击夯击能,有效加固深度,夯点间距及布点间距,夯击次数和夯击遍数,夯锤静压力(直径),锤重和落距,饱和夯击能,锤击贯入度等.这些参数在实际施工中确定是否合理,将直接影响到强夯加固地基的效果.为使地基达到预期的加固效果,确保强夯的顺利实施,按照《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004)和《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)的有关规定和要求,结合工程实际情况,首先选取待处理区进行试夯,以指导下一步大面积的强夯施工,试夯的施工参数及实施过程如下.

1 工程概况

某机场工程所处区域原为大片鱼塘,淤泥厚3-5m,其物理力学性质较差.该地基其上堆填人工填土,

收稿日期:2007-08-20

基金项目:江西省教育厅科技研究项目(赣教技字[2007]211号).

作者简介:郑晓(1963-),男,高级工程师.

呈中密状态. 预填土厚度为 4~5 m. 现场要求采用天然地基修建飞机跑道及航站楼, 要求设计荷载大于 150 kPa, 允许工后沉降小于 5 cm, 要求加固深度不小于 8 m, 因而该地基必须进行地基处理. 考虑到施工简便、工期等因素, 选用强夯法对地基进行加固处理, 以满足工程技术要求.

2 现场试验

根据地质条件及上部荷载的要求, 选择两个典型的试验区(A 区为机场跑道区, B 区为航站楼区), 试验区面积为 40 m × 40 m, 每个试验区夯击 3 遍, 分别为主夯、次夯, 第三遍为满夯, 夯击点间距分别为 8 m × 8 m、4.0 m × 4.0 m、满夯搭夯四分之一, 主夯及次夯夯击点采用正方形布置, 满夯夯点采用等边三角形布置, 单击夯击能分别为 3000 kN·m、2000 kN·m、1000 kN·m, 强夯试验的主要内容: 先夯击 1 号点, 后依次夯击 2 号、3 号点, 夯击过程为连续进行, 时间间隔不大于 1 h, 孔隙水压力测头测量各测头在夯击过程中孔隙水压力的增长与消散; 记录夯击次数与夯沉量关系; 测定夯间变形测头土层垂直变形和水平变形.

强夯试验的目的: 根据不同深度、不同距离孔隙水压力的测定, 分析孔隙水压力随深度、距离的变化规律, 确定最佳夯点间距、合理的强夯击数及强夯有效影响深度. 分析各测点孔隙水压力消散情况, 确定 3 遍强夯间的合理时间间隔.

3 试验结果

3.1 孔隙水压力的增长与消散

(1) 夯击时, 各点孔隙水压力急剧上升, 上升幅值基本与各测点夯击后所受到的有效附加荷载一致, 第一遍强夯时, A 区 2 号测点峰值达 220 kPa, B 区 11 号测点峰值达 198 kPa. 第二遍强夯时, A 区 2 号测点峰值达 110 kPa, B 区 11 号测点峰值达 75 kPa, 第一遍强夯较第二遍强夯上升幅值大.

(2) 停止夯击, 孔隙水压力立即消散. A 区第一遍强夯后 120 h, 孔隙水压力消散 82%, 第二遍后 120 h, 孔隙水压力仅消散 38%; B 区第一遍强夯后 120 h, 孔隙水压力仅消散 79%, 第二遍后 120 h, 孔隙水压力仅消散 31%.

(3) 以孔隙水压力消散 75% 作为控制两遍强夯间的时间间隔标准, 由此可以确定三遍强夯的时间间隔. 第一遍强夯时, A 区需 11 d 时间, B 区需 18 d 时间; 第二遍强夯后, A 区需 24 d, B 区需 27 d.

3.2 孔隙水压力随深度变化

第一遍强夯过程中, 夯击第一点时, 距夯点中心 2.5 m 处 1 到 5 号测点孔压增量随深度变化如下: 在人工填土层附近的土层中孔隙水压力增加较小, 淤泥土层中孔隙水压力急剧增长, 其增长规律为上部淤泥层增长幅值大, 下部淤泥层增长幅值小. 且可明显看出, 土层 5.0 m 至 8.0 m 孔隙水压力增量最大, 8.0 m 以下增加幅值减小, 在砂垫层附近孔隙水压力几乎瞬间消散难以测得其最大值. 第二遍强夯时, 孔隙水压力随深度变化规律与第一遍基本一致.

3.3 孔隙水压力与距离的关系

将同一深度(或深度相近)测点的孔隙水压力与夯点的距离作一曲线, 可得到孔隙水压力与距离的关系, 第一遍强夯时埋深 6 m 至 6.5 m 处 3、7、10 号测点孔压与距离的关系为: 孔隙水压力随距离增加而迅速衰减, 这与强夯冲击波在土体中的衰减规律极为相似. 第二遍强夯时孔隙水压力增量较第一遍小, 其随距离的变化也较第一遍缓慢.

3.4 孔隙水压力增量与强夯击数的关系

从孔隙水压力增量与深度关系, 可以看出, 第 1 击时孔隙水压力增量值很大, 第 2 击至第 6 击孔隙水压力增量有所减小, 第 6 至第 8 击, 孔隙水压力相应增量明显减小. A 区第一遍强夯时, 第 1 击孔压增量占总增量的 27%~47%, 第 2 击孔压增量占总增量的 19%~23%, 第 3、4、5 击各占总增量的 10%~12%, 第 6、7、8 击合计占总增量的 12%~14%. A 区第二遍强夯时, 根据测试结果, 第 1 击孔压增量占总增量的 40%, 第 2 击占 14%, 第 3 至 5 击各占 9%~13%, 第 6 击占 9% 左右. 由此可以看出, 第一遍强夯时第 1 击所产生的孔隙水压力增量较大, 以后各击孔压缓慢递减. 由此可见, 当强夯击数增加到一定时, 孔隙水压力增量不明显, 合理的强夯击数可根据孔压增量的变化来选择. 该强夯处理区域最为合理的强夯击数为 6 击.

4 参数的确定

4.1 单位夯击能与有效加固深度的确定

强夯的单位夯击能,根据地基土类别、结构类型、荷载大小和要求处理的深度等综合考虑,并通过现场试验确定.本工程为细颗粒土,根据规范选择现场试验单位夯击能为:3000 kN·m、2000 kN·m、1000 kN·m.夯锤锤重主夯为 300 kN 及次夯和满夯为 200 kN 均为圆锤,直径为 2 m,主夯与次夯落锤高度为 10 m,满夯落锤高度为 5 m.锤底对称每 50 cm 设直径为 25 cm 通气孔.现场试验表明,在相同夯击能量下,重锤低落距的加固效果要优于轻锤高落距.

关于强夯加固有效深度的确定问题,目前常用的两种方法给出的都是范围概念.第 1 种方法国内普遍采用的 Menard 公式: $H=a(mh)^{1/2}$ 来估算加固深度,式中 h 为夯锤的落距, m 为锤重, H 为影响深度, a 是待定的修正系数,其变化范围很大,是与地基土的特性、土的密实度、振动主频及地下水位等因素有关的一个综合而复杂的函数,因而采用 Menard 公式仍较难合理地确定强夯的有效加固深度.

第 2 种方法:王成华^[2]提出了等效拟静力法来计算不同土层地基中强夯有效影响深度,该方法将夯击力视为等效拟静荷载.从引起等效塑性沉降的角度看,该等效拟静力应达到或超过地基的极限荷载.其基本假定为强夯拟静压力引起的拟静附加应力达到土自重应力倍处深度以内,土体才产生塑性变形,此深度即为强夯地基的加固深度.由此导出强夯加固有效影响深度为 $H=[a_p-0.2(r-r')d_w]/(0.2r'+bp_e/D)$ 和 $p_e=[nKE_0WH/C(1-m^2)D^3]^{1/2}$,式中 p_e 为等效拟静压力; n 为考虑机具摩擦、空气阻力、弹性变形等能量损耗效率系数,一般可取 0.67; d_w 为地下水位埋深; r, r' 为水上土的天然容重和下水土的有效容重; a, b 为常数,对圆锤 $a=0.135, b=0.024$,对方锤 $a=0.167, b=0.029$; C 为锤型系数,对圆锤 $C=0.62$,对方形锤 $C=0.89$; D 为锤径, E_0 为地基变形模量, E_d 等效弹性模量; K 为模量系数,对淤泥及淤泥质取 0.33 至 1,对一般粘性土及松散的细砂取 0.5,对冲填土及人工填土取 0.17 至 0.33,对较软的土取大值,较硬的土取小值. m 为土的泊松比,成层土地基的 E_0, m, K 可按土层厚度取加权平均值.

由于强夯问题的复杂性及计算理论的不完善性,强夯有效影响深度必须有现场试验来验证,但目前现场检验有效影响深度的方法和标准也不一致,特别是强夯在软粘土中的有效影响深度还没有较好的方法检验.本工程采用王成华的等效拟静力法计算有效加固深度,并用强夯后软粘土中孔隙水压力的增长规律来检验强夯有效影响深度.根据王成华等效拟静力法公式(夯击能为 300 kN × 10 m、圆锤直径为 2 m)计算得有效加固深为 8.46 m.通过沿不同深度埋设一系列孔隙水压力传感器,测出每击强夯后地基土中孔隙水压力值的分布场,再根据孔隙水压力随距离、深度的变化规律,计算孔隙水压力增量接近土的自重应力所对应的深度,确定为强夯的有效加固深度.经强夯后的液化空间呈柱锥状,深度越大,强夯影响范围越小.第 2 击时强夯的有效影响深度为 8.2 m,在第 6 击强夯后,有效影响深度为 8.52 m,与等效拟静力法计算结果基本符合.而用梅那公式($a=0.5$)计算得有效加固深度为 9.12 m,显然比实际要大.本工程认定加固深度为 8.5 m.可以达到加固深度 8 m 的要求.

4.2 夯击次数的确定

夯点的夯击次数是强夯设计中的一个重要参数,不同土质的夯击次数亦不同.对于单个夯点来说,是先加固浅层后加固深层,试验表明,当夯锤与地面瞬间接触时,与锤底接触土体的竖向压缩量最大,锤下土体竖向变形的深度不断加大,当达到某一夯击次数后,就不再随着夯击次数的增加而加大.这个夯击次数称之为饱和夯击次数或饱和夯击能.

由夯击过程中孔压测试结果可以看出,第一遍强夯时第 1 击所产生的孔隙水压力增量较大,以后各击孔压缓慢递减.由此可见,当强夯击数增加到一定时,孔隙水压力增量不明显,合理的强夯击数可据孔压增量的变化来选择.该强夯处理区域最为合理的强夯击数为 6 击.

从现场试夯得到的夯击次数与夯沉量关系曲线可以看出,第一遍第一击夯沉量最大,然后连续夯击时,夯沉量递减,击数为第 6 击时夯沉量趋于稳定(第 6 击绝对夯沉量小于 5 cm).根据现场测试的孔隙水压力数据和夯击次数与夯沉量关系曲线,可以得到第一遍主夯点的夯击数为 6 击.同理得:第二遍次夯点的夯击数为 4 击;第三遍插夯点的夯击数为 2 击.

4.3 夯击遍数的确定

在现场强夯试验中显示,单击夯击能、夯击次数和土质相同条件下,群夯的加固深度小于单点夯.这主要是由于群夯时夯点间应力扩散相互交叉影响的群夯效应所至.为了最大限度的减少群夯效应,提高加固深度,工程中多采用分遍强夯工艺.即在夯点的布置方式上分主夯点、次夯点及满夯点.在工艺流程上先夯主夯点、后夯次夯点、最后满夯.为了尽量减少群夯效应的影响,一般主夯点的间距较大,单击能量较高,夯击次数较多.而后夯点和满夯夯点的夯间距、单击夯击能和夯击次数逐渐减少.根据本工程的加固深度和其它要求,现场试验决定采用三遍夯击加固工艺.即为:先夯主夯点、后夯次夯点、最后满夯.

4.4 关于夯击点间距的确定及夯点的布置

夯击点间距的大小,通过现场试夯试验时的原位测试(在夯间埋置土层垂直变形、水平变形和孔隙水压力测定)来确定.本工程要求处理深度较大,第一遍的夯间距不宜过小,根据现场原位测试数据,并考虑尽量减少群夯效应的影响,第一遍主夯点夯击间距为 $8\text{m} \times 8\text{m}$,夯点的布置为正方形布置.选择第一遍夯击间距偏大,是为了避免夯击时在浅层形成密实层而影响夯击能往深层传递.第二遍夯点在第一遍夯点之间插夯,夯击间距为 $4\text{m} \times 4\text{m}$,也为正方形布置.第三遍为满夯,搭夯为夯锤直径的四分之一,夯点为等边三角形布置.单击夯击能分别为 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $2000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$,夯击次数分别为 6 击、4 击、2 击,夯间距分别为 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 、 $4\text{m} \times 4\text{m}$.

4.5 遍间歇时间的确定

地基土的可夯性主要取决于地基土孔隙水压力消散的性质,为利于土中超静孔隙水压力的消散,两遍夯击之间应有一定的时间间隔,称为遍间歇时间.该间隔时间取决于超静孔隙水压力的消散程度,一般以超静孔隙水压力的消散速率达到 75% 为进行下一遍强夯的标准.

本工程在试夯前埋设孔隙水压力传感器,通过试夯确定超静孔隙水压力的消散程度,从而决定两遍夯击之间的间隔时间.根据现场试验测得的孔隙水压力的增长与消散资料,由此可以确定 3 遍强夯的时间间隔.第一遍强夯时,A 区需 11d, B 区需 18d;第二遍强夯后,A 区需 24d, B 区需 27d.

4.6 关于满夯

点夯完成并整平夯坑后,由于夯坑内回填的是虚土,且因夯点间地基土在点夯时并未被加固,因此需要用满夯工艺来处理.满夯能量一般为主夯能量的 $1/2-1/3$,夯 2-3 击,一般不超过 4 击,并使锤痕互相叠压 $1/4-1/3$.根据本工程现场试验的实际情况,满夯时单位夯击能选择为 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ (锤重 200kN 落距为 5m),夯击数为 2 击,使锤痕互相叠压 $1/4$.

认为满夯能量越大越好,满夯击数越多越好,是一个误区.对于含水量偏低的表层土来说,过度满夯会造成扰动层过厚的缺陷.对于含水量偏高的表层土来说,过度满夯会产生“橡皮土”问题.

5 结 论

(1)用等效拟静力法计算得到的强夯有效影响深度的结果与试验结果较为一致,如果土的各项参数选择正确,等效拟静力法是一个较好的估算强夯影响深度的方法.

(2)通过对土层中孔隙水压力场及土层中垂直变形、水平变形的原位测量和分析可以确定强夯的夯点间距、强夯有效影响深度、最佳夯击击数等强夯参数.

(3)随着夯击次数的增加,单击夯击沉降量不断变小,最后趋于稳定,可以利用这一规律确定夯击数.

(4)在相同单位夯击能量的条件下,重锤低落距的加固效果要优于轻锤高落距.所以,为了达到较优的工程加固效果,工程中在单位夯击能一定时,宜采用重锤低落距的做法.

(5)为了尽量减少群夯效应对加固深度的影响,采用分遍夯击工艺时,首遍夯点间距宜布置略大些.

参考文献:

- [1]GB50007-2002.建筑地基基础设计规范[S].
- [2]王成华.强夯地基加固深度估算方法述评[J].地基处理,1991,2(1):20-24.