

排水固结处理后地基强夯加固的试验研究

Experimental study on improving the drained and consolidated ground with DCM

李福民

(深圳市土地投资开发中心, 广东 深圳 518026)

摘要: 通过对强夯后淤泥层中孔隙水压力场分布的测试, 分析了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, 研究了强夯后淤泥层中的液化空间的发展, 由此进一步分析了强夯的有效影响深度及影响范围, 其结果与采用等效拟静力法计算结果基本一致。提出了应用试验手段选择强夯击数、夯点间距及有效影响深度等强夯参数的方法。

关键词: 强夯; 地基处理; 试验

中图分类号: TU 441.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0499-04

作者简介: 李福民(1964-), 男, 江苏泰州人。毕业于铁道部科学研究院, 硕士学位, 现任深圳市土地投资开发中心总工程师, 副研究员。主要从事地基处理, 市政工程的设计、施工及研究工作。

LI Furmin

(Shenzhen Land Investment Development Center, Shenzhen 518026, China)

Abstract: By measuring the distribution of pore water pressure field in soft clay during DC, the variation of pore water pressure with depth and time in the foundation of soft clay is analyzed, the development of liquefaction space in muck during DC is studied, and furthermore, the effective influence depth and scope are analyzed in this paper. The results are generally consistent with the results calculated by the method of pseudo-static method. A method to choose the number of DC, the spacing of DC, the effective influence depth and other parameters through the experiment is presented.

Key words: DCM; ground treatment; experiment

1 前言*

深圳某堆场工程所处区域原为一片鱼塘, 淤泥厚 3.7~10.4 m, 其物理力学性质较差。该地基已在一年前采用塑料插板排水固结堆载预压方法进行了软基处理, 水平排水体采用 0.5 m 厚砂垫层, 其上堆填 4.0 m 人工填土, 呈中密状态。原预压土厚度为 1.5 m, 允许工后沉降不大于 15 cm。现堆场功能改变, 需采用天然地基修建仓库及办公楼, 要求设计荷载大于 80 kPa, 允许工后沉降小于 5 cm, 因而该地基必须重新进行地基处理。考虑到施工简便、工期等因素, 选用强夯法对经排水固结处理后的地基进行加固处理, 以满足新的工程技术要求。国内外许多学者对采用强夯加固软粘土地基进行了大量的研究^[1,2], 而对于本工程上层为 4.0 m 人工填土, 下伏为经排水固结处理后的淤泥, 强夯加固工程效果如何, 如何选取强夯施工参数等问题需进一步探索。

2 现场试验

根据地质条件及上部荷载的变化, 选择两个典型的试验区(A 区为仓库区, B 区为堆场区), 试验区面积为 20 m×20 m, 每个试验区夯击三遍, 第三遍为满夯, 夯点间距为 5.0 m, 共夯击 16 点, 夯锤直径 2.0 m, 锤重 200 kN, 夯击能量为 3600 kN·m, 沿不同位置、不同深度埋设

孔隙水压力测头 11 个, 其夯点及测点位置见图 1、2。

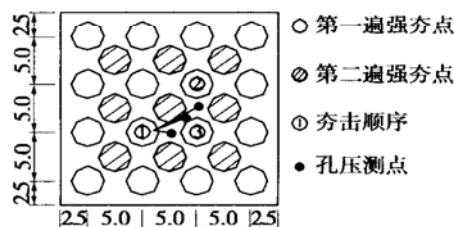


图 1 夯点及孔压测点平面布置图

Fig. 1 Arrangement of DC and pore water pressure gauge

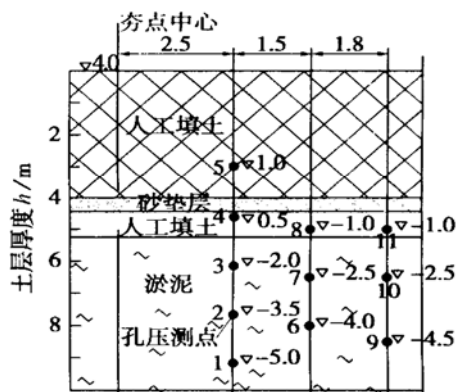


图 2 孔隙水压测点在各土层的布置

Fig. 2 Arrangement of pore water pressure gauge in the ground

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,

测量各测头在夯击过程中孔隙水压力的增长与消散。

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, 确定三遍强夯间的合理时间间隔。

3 试验结果及分析

3.1 孔隙水压力的增长与消散

强夯过程中孔隙水压力增量曲线见图 3(此仅给出 A 区 2 号 B 区 11 号测点的消散曲线)。由图 3 可见:

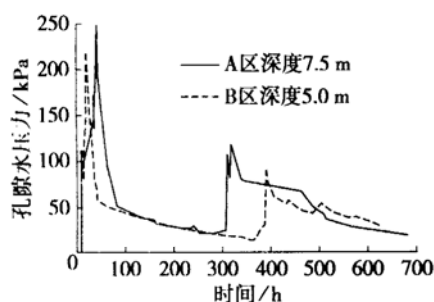


图 3 强夯后孔隙水压力监测曲线

Fig. 3 Pore water pressure curve measured after DC

(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 250 kPa, B 区 11 号测点峰值达 218 kPa。第二遍强夯时, A 区 2 号测点峰值达 118 kPa, B 区 11 号测点峰值达 82 kPa, 第一遍强夯较第二遍强夯上升幅值大, 这主要是由于第一遍强夯时破坏了土层的结构, 使淤泥的孔隙水压力快速升高, 而第二遍夯击时, 由于地基土的强度特别是人工填土的强度的提高, 在淤泥层上形成了密实的人工填土硬壳层, 因而第二遍强夯对淤泥结构的破坏较小。

(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 87%, 第二遍后 120 h, 孔隙水压力仅消散 41%; B 区第一遍强夯后 120 h, 孔隙水压力消散 83%, 第二遍后 120 h, 孔隙水压力仅消散 35%。第一遍强夯后孔隙水压力消散速度比第二遍快, 这主要是因第一遍强夯时, 原排水固结堆载预压处理时的塑料排水板及铺设的砂垫层仍起很重要的排水作用, 第二遍强夯后, 原先排水系统遭到破坏, 排水效果变差。

(3) 以孔隙水压力消散 85% 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 1~5 号测点孔压增量随深度变化如图 4 所示。由图可见, 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 5.0~8.0 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。

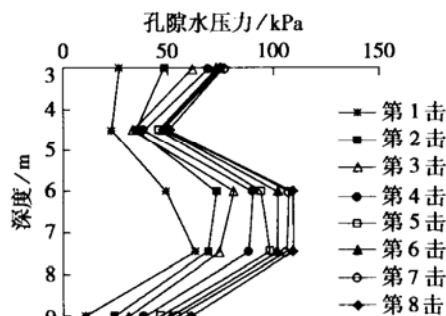


图 4 A 区孔隙水压力随深度变化曲线

Fig. 4 Variation of pore water pressure with depth in zone A

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 6~6.5 m 处 3、7、10 号测点孔压与距离的关系如图 5 所示。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。

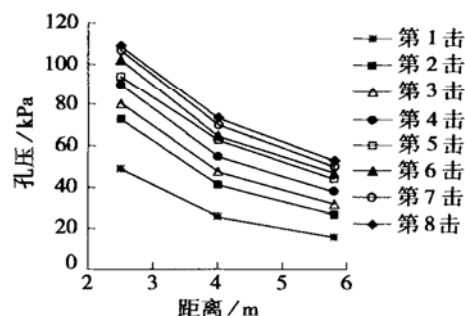


图 5 A 区孔压随距离变化曲线

Fig. 5 Variation of pore water pressure with distance

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曲线(图 4), 还可以看出, 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(曲线较为密集)。

图 6 描绘了相邻两击孔隙水压力增量值与相应夯击次数之间的关系。

A 区第一遍强夯时, 第 1 击孔压增量占总增量的 30%~50%, 第 2 击孔压增量占总增量的 20%~25%;

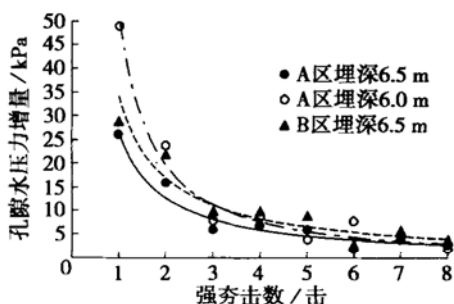


图6 孔隙水压力增量与强夯击数关系曲线

Fig. 6 Curves of pore water pressure increment vs number of DC

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14%~15%。

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41.2%, 第2击占15.7%, 第3~5击各占10%~15%, 第6击占10%左右。由此可以看出, 第二遍强夯时第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 强夯加固的有效影响深度

4.1 有效影响深度

国内外许多学者采用不同方法对强夯加固的有效影响深度进行了研究, 不同方法对有效影响深度的判别标准也各不相同^[3]。但目前最常用的仍是Menard及其修正公式 $Z = \alpha \sqrt{WH}$, 式中 H 为夯锤的落距, W 为锤重, Z 为影响深度, α 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Menard修正公式仍较难合理地确定强夯的有效加固深度。

王成华提出了等效拟静力法^[4]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0.2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

$$H = \frac{\alpha p_e - 0.2(\gamma - \gamma')d_w}{0.2\gamma' + \gamma'p_e/D} \quad (H > d_w) \quad (1)$$

$$p_e = \sqrt{\frac{\eta KE_0 WH}{NC(1 - \mu^2)D^3}}, K = E_d/(E_0 - E_d)$$

式中 p_e 为等效拟静压力; η 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; γ , γ' 为水上土的天然容重和下水土

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 为锤形常数, 对圆形锤 $C = 0.62$, 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, 对淤泥及淤泥质粘土取0.33~1, 对一般粘性土及松散的细砂取0.25~0.5, 对冲填土及人工填土取0.17~0.33, 对较软的土取大值, 较硬的土取小值。 μ 为土的泊松比, 成层土地基的 E_0 , μ , 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, 笔者认为根据强夯后软粘土中孔隙水压力的增长规律可检验强夯有效影响深度。

在强夯作用下, 饱和土中的孔隙水压力变化, 可以反映土的动力固结作用程度。由于土的液化是以动三轴试验中孔压接近或等于周围土压力来定义的, 所以也可以把强夯作用下的地基土液化理解为: 在一定深度处, 土中的动孔隙水压力接近或等于纵向土压力时所处的状态。所以可以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。

4.2 等效拟静力法计算结果及孔压实测情况

采用等效拟静力法计算强夯加固的有效深度, 其关键是计算参数的选择, 根据地质资料, 各参数的选择为: 夯锤重为 $W = 200$ kN; 落距 $H = 18$ m; 锤径 $D = 2.0$ m; K 取0.17; 人工填土层地基变形模量为6.34 MPa, 层厚5.5 m, 泊松比 μ 为0.30, 淤泥层地基变形模量为2.9 MPa, 层厚5.0 m, 泊松比为0.42; 按土层厚度加权平均可求得 $E_0 = 4.70$ MPa, $\mu = 0.357$; 地下水埋深 $d_w = 3.0$ m; 水上土的天然容重 $\gamma = 18.9$ kN/m³; 下水土的天然容重 $\gamma' = 17.4$ kN/m³, 则 $\gamma' = 7.4$ kN/m³; 由式(1)可算出强夯有效加固深度为8.77 m。采用公式计算第二遍强夯的有效加固深度时, 计算参数应根据地基土情况的变化而有所变化。

将在第2, 8夯击下淤泥层中各点的实测孔隙水压力场分布描绘于图7上, 其他任意点的孔隙水压力值, 可近似地由相邻两点的测量值用线性内插法求得。在平面图上找出孔隙水压力增量等于土的自重应力的各点, 即孔压增量与竖向土的自重应力比 $R_p = 1$ 的点, 可认为是强夯的液化空间边界, 由此可确定强夯的加固影响范围和影响深度。

由图7可见, 本次试验A区的强夯有效加固深度为

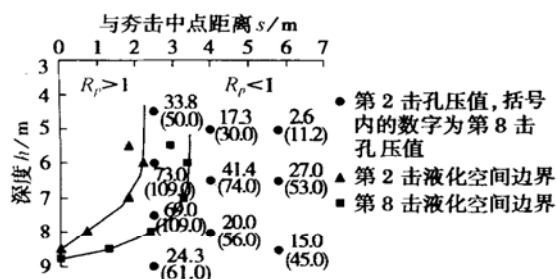


图 7 A 区强夯后的液化空间的发展

Fig. 7 The development of liquefaction space after DC in zone A
8.5~9.0 m 左右, B 区的强夯有效加固深度比 A 区略小, 其强夯有效加固深度为 8.0~8.5 m(图中未列出)。

采用 Menard 方法, 若按一般粘性土取修正系数 $\alpha = 0.5$, 则有效影响深度 $Z = 9.5$ m, 显然比实际要大。

采用等效拟静力法计算的强夯影响深度与实测结果基本一致, 但仍有一定的误差, 由于影响强夯效果的因素很多, 因而在一个区域内进行强夯, 其影响深度一般是一个范围值, 该堆场强夯有效影响深度在 3600 kN·m 的夯击能时应为 8.5~9.0 m。

根据图 7 所示液化空间的变化可得到以下结论:

(1) 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 8.5 m, 在第 8 击强夯后, 有效影响深度为 8.7 m。强夯的有效影响深度主要与单击夯击能量有关, 夯击次数对强夯有效影响深度的影响不大。

(2) 随着夯击次数增加, 可使液化空间范围扩大, 即强夯影响范围增大。第 2 击时强夯的有效影响范围为 1.2~1.5 m, 强夯过程中液化空间不断变大, 在第 8 击强夯后, 有效影响范围达 3.0 m。

(3) 由强夯诱发液化而产生的孔压增量存在一极大值, 因而在相同的单点夯击能下, 液化范围也趋于一个极大值, 当孔压达到极大值后, 此时土体充分压密, 淤泥处于固结阶段。

(4) 夯点间距的选择可根据强夯后液化范围的大小确定。任意加大夯击次数, 并不能使液化范围任意扩大, 只有在有限的夯击次数下才可能获得最佳效果, 根据孔压比 $R_p = 1$, 可划分强夯有效的影响范围, 从图中可看出, 在 3600 kN·m 夯击能下, A 区夯点的有效影响范围为 2.5~3.2 m 左右, B 区夯点的有效影响范围为 2.5 m 左右, 因而可判断, 夯点间距选择为 5.0~6.0 m 是较为合适的。

5 加固效果对比测试

在第二遍强夯完成后 16 d, 选用标准贯入法对加固前后地基土进行原位测试, 以确定强夯对不同土层

的加固效果。对比测试结果如表 1 所示。

表 1 强夯前后标贯平均值 N 的对比

Table 1 Comparison of N before and after DC

土层名称	强夯前标贯平均值 / 击	强夯后标贯平均值 / 击
人工填土	7.7	12.6
淤泥层(上部 5 m)	1.7	3.2
淤泥层(下部 4 m)	1.7	1.7

由对比测试结果可看出, 强夯处理有效地加固了填土层, 另一方面, 使下伏一定深度范围内的淤泥产生了动力固结效应, 明显改善了淤泥的工程性质, 测试揭示的加固深度与前述分析的有效影响深度是一致的。

6 结 论

(1) 强夯加固经塑料插板排水固结处理后的地基有明显的效果, 一方面使人工填土趋于密实, 另一方面在一定深度范围内使下伏淤泥层产生动力固结, 改善了淤泥的性质。

(2) 孔隙水压力的消散速度与淤泥层中的排水通道有密切关系, 因而要保证强夯加固软粘土的效果, 就必须在软粘土中设置排水通道, 并采取措施防止强夯对排水通道的破坏。

(3) 用等效拟静力法计算得到的强夯的有效影响深度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。

(4) 通过对淤泥层中孔隙水压力场的测量和分析, 可以确定强夯的夯点间距、强夯有效影响深度、最佳夯击数等强夯参数。

(5) 夯点间距的选择, 应根据强夯一点时地基土的液化范围来确定, 对饱和土, 夯点间距应选择为 2.5~2.7 倍锤径较为合理。不同类型的地基土, 都有其特定的最佳夯击数, 夯击数过多, 除增加工程造价外, 有时还会使已夯实的地基土变成弹簧土。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
- [2] 杨进. 强夯加固吹填土地基的试验研究[A]. 第六届土力学及基础工程学术会议文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1991. 703-706.
- [3] 常璐. 软弱地基强夯加固效果评价的研究现状[J]. 地基处理, 1998, 9(4): 3-9.
- [4] 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.