

液压快速夯实技术及其施工参数的确定方法

张占奎¹, 陈崇欣², 侯忠成², 梁钦锐², 欧阳山^{3*}

(1. 山东省机械施工有限公司, 山东 济南 250021; 2. 山东鼎信岩土科技有限公司, 山东 济南 250200;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 本文结合技术标准、参考文献和已完工项目的施工经验, 介绍液压快速夯实技术及其主要施工参数的确定方法。在提出对梅纳 (Menard) 公式修正后的加固深度计算公式的同时, 进一步证明该公式计算结果的可行性。加固深度和加固效果与夯击能量、遍数、击数等参数有关, 实际应用时需通过试夯确定施工参数。为保证夯实效果, 施工中要求液压夯实机在最大提升高度时的夯击频率应大于 30 次/min, 停锤标准以控制总锤击数为主, 以控制最终 10 击平均夯沉量为辅。

关键词: 液压快速夯实技术; 施工参数; 夯击能; 加固深度; 沉降

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0048-06

Rapid hydraulic compaction technology and determination method of its construction parameters

ZHANG Zhan-kui¹, CHEN Chong-xin², HOU Zhong-cheng², LIANG Qin-kai², OUYANG Shan^{3*}

(1. Shandong Machinery Construction Co., Ltd., Jinan 250021, Shandong, China;

2. Shandong Dingxin Geotechnical Technology Co., Ltd., Jinan 250200, Shandong, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: This work combines technical standards, references, and construction experiences of completed projects to introduce rapid hydraulic compaction technology and the determination method of its main construction parameters. The study not only introduces a modified formula for calculating reinforcement depth rooted in Menard's formula but also advances the validation of the formula results. The depth and efficacy of reinforcement exhibit correlations with key parameters, including compaction energy, number of passes, and blow counts. In practical applications, the determination of construction parameters necessitates iterative trial compaction. To ensure optimal compaction results, the compaction frequency of hydraulic compaction machine must exceed 30 times per minute at the maximum lifting height during construction. The cessation criterion involves the control of the overall blow counts, complemented by considering the average compaction settlement over the final ten blows.

Key words: rapid hydraulic compaction technology; construction parameters; compaction energy; reinforcement depth; settlement

0 引 言

液压快速夯实技术是 20 世纪 90 年代在英国发展起来的一种技术, 用于快速致密土壤, 以修复飞机跑道上的弹坑。而国内最初应用是使用额定势能 36 kJ 的液压夯实机对公路桥背回填的路基补强, 解决桥头跳车问题^[1-3]。2015 年我公司采用额定势能 36 kJ 的液压夯实机对肥槽回填部位进行夯实处理。

随着装备的发展、夯击能的不断增大、施工技术的不断进步, 应用范围扩大至工业与民用建筑的地基处理, 并积累了大量经验。目前液压快速夯实技术的能量为 150 kJ, 地基处理的最大深度为 7.0 m, 处理后的地基承载力最大为 300 kPa, 建筑物层高为 16 层。

液压快速夯实技术的有效加固深度与夯击能及土质有关。对于黏性土, 有效加固深度为 4.0~

收稿日期: 2020-10-26

作者简介: 张占奎 (1973—), 男, 内蒙古乌海人, 本科, 高级工程师, 主要从事建筑工程领域的工作。E-mail: sdjstf@163.com。

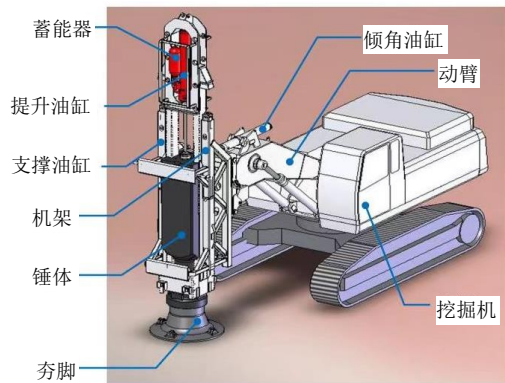
*通信作者: 欧阳山 (2000—), 男, 广东惠州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程领域的工作。E-mail: oysxjd@163.com。

6.0 m, 对于砂类土, 有效加固深度为 4.0~7.0 m, 而影响深度可以达到 7.0~10.0 m^[4-5], 故液压快速夯实技术适用于浅层地基的夯实处理。与传统的强夯技术相比, 液压快速夯实法单击夯击能量小, 但高频率的冲击夯实可弥补其能量不足。液压快速夯实法具有作用力峰值小、作用时间长、施工振动小、没有飞石且移位方便等特点, 在周围环境对施工振动有要求的场地可以代替强夯法进行地基加固处理; 与传统的表层碾压设备(冲击碾、振动碾等)相比, 其贯穿能力强而均匀, 在地基处理中不易形成表层硬壳, 夯实处理的深度和密实度都大于表层碾压设备。因此, 液压快速夯实技术所采用的快速动态夯实技术填补了传统强夯技术和传统的表层压实技术的空白。本文结合工程实践, 对液压快速夯实技术及其施工参数进行总结分析, 以期

为液压快速夯实技术的应用和推广提供参考。

1 液压夯实机的工作原理

液压夯实机的工作原理如图 1(a) 所示, 通过装载机或者挖掘机提供液压动力提升冲击锤, 将夯锤提升至一定高度后释放, 冲击锤芯重量 3~12 t, 落高 1.2~1.5 m, 冲击频率约 40~60 次/min, 夯锤在重力和液压蓄能器的共同作用下加速下落, 击打静压在地面上的夯脚, 夯击能量通过夯帽座、夯脚直接传递给地基, 起到夯实、压密地基的作用^[6]。工程上常用的液压夯实机如图 1(b) 所示, 额定势能为 108 kJ, 与 45 t 以上挖掘机成套后使用, 锤体重量为 9 t, 最大提升高度为 1.2 m, 夯板直径为 1.5 m。



(a) 液压夯实机工作原理



(b) 液压夯实机实物照片

图 1 液压夯实机的工作原理及实物照片

Fig. 1 Working principle and photo of hydraulic compactor

2 液压夯实机的参数和性能

2.1 额定夯击能

额定夯击能 (kJ) = 锤体重力 (kN) × 锤体最大提升高度 (m)。应根据土质类别、加固深度等要求合理选择单击夯击能, 并确定液压夯实机的规格型号。

2.2 夯击频率

夯实机液压油缸在蓄能器加力作用下落锤加速度应大于重力加速度, 落锤末速度应大于自由落体速度。1.2 m 高度的自由落体时间是 0.49 s, 当落锤时间大于自由落体时间时, 说明液压系统不仅没有对锤体加力, 反而起阻滞作用, 单击夯击能会小于额定夯击能。故夯击频率不仅影响施工效率, 而且影响实际夯击能量。一般而言, 最大提升高度时的夯击频率应大于 30 次/min, 才能达到规定的有效加固深度^[1]。《液压快速夯实地基技术标准》

(T/SDCEAS 10006—2021) 中表 5.3.1 要求夯击频率为 40~70 次/min^[7]。

3 液压快速夯实法主要施工参数的确定

3.1 单击夯击能

夯击能分 3 个等级: 轻型 (12~30 kJ)、中型 (36~60 kJ)、重型 (84~108 kJ)。点夯能量应根据加固深度及土质类别等条件确定, 满夯能量应不低于点夯能量的 1/2。

路基填筑补强单击夯击能一般为 36 kJ, 夯板直径 1.0 m, 分层厚度 1.0~1.5 m, 夯点击数 9~12 击, 夯点间距 1.5 m, 夯板边缘距桥台等结构物 0.2~0.3 m, 距低强度结构物 0.5 m 以上^[8-10]。建筑物地基处理夯击能一般为 84 kJ 以上, 夯板直径 1.5 m, 处理深度 3~7 m, 夯点击数 40~120 击, 夯点间距 2.5 m, 夯板边缘距地下室外墙等结构物 0.5~1.0 m。

3.2 有效加固深度

液压快速夯实法是一种动力压密加固方法，加固原理类似于现有的一些强夯理论，加固深度的计算可参照梅纳（Menard）公式^[11]：

$$Z = k\sqrt{QH} \quad (1)$$

式中： Z 为地基土加固有效深度，m； Q 为夯锤重量，t； H 为落距，m； k 为深度修正系数。液压快速夯实法虽然与强夯法都是动力压密方法，但液压快速夯实法是通过夯脚将冲击能量传递到地基土中，其快速夯击的频率要远远大于强夯。对土壤的压实深度值不仅与其自身的参数（如行程高度、液压系统的加力系数、夯锤与夯脚的重量、夯脚的接地面积）有关，还与土壤的刚度和黏性阻尼系数密切相关^[12-13]。因此，对液压快速夯实法地基加固深度的计算不能简单参照梅纳（Menard）公式进行计算，还需考虑液压系统的加力系数、土壤的类型及

性状、夯板面积等影响因素。考虑以上因素，本文提出对梅纳（Menard）公式进行修正后的计算公式：

$$Z = k\sqrt{\mu QH} \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (2)$$

式中： μ 为液压系统加力系数^[11]，取 $\mu=1.58$ ； k 为深度修正系数，根据经验，填土和砂类土取 $k=1.0\sim 1.2$ ，天然地基取 $k=0.9\sim 1.1$ ； Q 为夯锤重量，t； H 为落距，m； D 为常用夯板直径（额定夯击能 36 kJ 以下的夯板直径为 1.0 m，84 kJ 夯板直径为 1.25 m，108~150 kJ 夯板直径为 1.5 m），m； d 为定制夯板直径，m。根据以上公式计算的加固深度分别与技术标准^[7]、参考文献及工程实践数据进行比较，能够进一步验证该公式计算的有效加固深度具有可行性。

（1）按修正公式计算的加固深度与技术标准预估加固深度比较，见表 1。

表 1 计算加固深度与技术标准预估加固深度比较

Table 1 Calculated reinforcement depth and estimated reinforcement depth from technical standards

单击夯击能 E/kJ	常用夯板直径/ m	修正公式计算加固深度/m		技术标准预估加固深度/m	
		填土地基	天然地基	填土地基	天然地基
36	1.00	2.38	2.15	2.0	1.5
86	1.25	4.01	3.64	3.5~4.5	3.0~4.0
108	1.50	4.96	4.54	4.5~5.5	4.0~5.0

由表 1 可见，按修正公式计算的加固深度与技术标准预估加固深度基本接近。

（2）参考文献[7-9]中液压快速夯实法加固深度公路行业路基填筑补强主要使用额定势能 36 kJ 的液压夯实机，加固深度一般为 1.5 m^[7-9]，略小于以上计算加固深度，分析原因是由于路基补强夯实前已经分层碾压，土壤呈坚硬密实状态，再加上夯点击数并不高（一般 12~15 击），导致其能量不足以击穿表层硬结向更深处土层传递。苏丹港后方堆场项目回填材料为珊瑚料，单击夯击能为 108 kJ，夯板直径为 1.25 m，每遍夯点间距为 2.4 m，分 3 遍施工，夯点采用梅花状形式，单点累计夯击数为 55 击，标准贯入试验表明，0~6 m 深度范围内加固效果很明显，深度 6 m 处标贯击数从夯前的 15 击提高到 22 击，深度 7 m 处标贯击数从夯前的 17 击提高到 22 击，7~10 m 深度范围内击数也有一定提高^[5]。按照以上公式计算（取 $D=1.5$ m， $d=1.25$ m），加固深度为 7.14 m，与现场实测结果基本一致。

（3）工程实践中液压快速夯实法加固深度

a) 山东泰星年产 10 000 t 硼酸法硼酸锌建设项

目，地基类型为杂填土，单击夯击能 108 kJ，夯板直径 1.5 m，夯点间距为 3.0 m×3.0 m，中间插点，分 3 遍施工，单点累计夯击数为 80 击，重型动力触探试验表明，3 个试夯区有效加固深度为 0~6 m，影响深度为 6~8.5 m。夯前夯后加固深度对比统计见表 2。

表 2 夯前夯后加固深度对比统计表

Table 2 Comparison of reinforcement depth before and after compaction

深度/ m	山东泰星项目		唐冶热源厂项目	
	夯前动探/击	夯后动探/击	夯前标贯/击	夯后标贯/击
1	5	12	10	24
2	5	14	13	21
3	6	12	15	21
4	4	9	16	20
5	3	6	14	17
6	4	6	15	16
7	5	8	14	14
8	4	5	13	14
9	6	6	17	17

b) 唐冶热源厂兰炭热水锅炉地基处理项目, 地基类型为湿陷性黄土, 单击夯击能 108 kJ, 夯板直径 1.5 m, 夯点间距为 2.5 m×2.5 m, 分 2 遍施工, 单点累计夯击数为 40~60 击, 原位检测试验表明, 5.0 m 范围内地基均匀性较好, 黄土湿陷性已经消除, 有效加固深度为 5.0 m。夯前夯后加固深度对比统计见表 2。

工程实践也表明, 实测的有效加固深度与计算的加固深度接近, 对于黏性土, 有效加固深度为 4.0~6.0 m, 对于砂类土, 有效加固深度为 4.0~7.0 m, 影响深度可以达到 7.0~10.0 m。

c) 济南国际机场二期改扩建项目场道岩土工程现场试验段, 场地内上部地层为黄河冲积漫滩相新近堆积土, 以黏性土、粉土为主, 判定浅部粉土、粉砂为可液化土, 液化等级为轻微-中等, 且粉土位于地下水位变化范围内, 其物理力学性质受地下水的影响较大。夯击能为 70 kJ、110 kJ 和 150 kJ 下夯点距测孔 2 m 时的孔隙水压力变化统计见表 3。

表 3 不同夯击能下夯点距测孔 2 m 时的孔隙水压力变化统计表

Table 3 Pore water pressure change under different compaction energy (compaction point 2 m away from the measuring point)

夯击能/kJ	不同埋深孔隙水压力最大值/kPa				
	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m
70	27.04	26.06	11.77	10.71	8.41
110	57.44	20.81	16.33	18.24	11.46
150	65.45	35.27	28.40	23.31	18.24

(4) 孔隙水压力试验监测结论

夯击能为 70 kJ、110 kJ 和 150 kJ 下夯点距测孔 2 m 时的孔隙水压力变化对比图见图 2。由图 2 可见: a) 不同夯击能作用下的孔隙水压力均随深度加深逐渐变小, 且夯击能越大, 孔隙水压力越大, 埋深 4 m 时, 采用 150 kJ 夯击能时孔隙水压力最大, 为 65.45 kPa; b) 夯击能越大, 影响深度越深, 埋深 12 m 处, 采用 150 kJ 夯击能时孔隙水压力最大为 18.24 kPa; c) 处理液化土时夯击能影响深度可达 12 m。

3.3 夯击次数和停锤标准

采用基于颗粒离散元法的 PFC2D 进行数值仿真, 采用 36 kJ 夯击能, 第 3、6、12 击时, 冲击荷载到达深度分别为 1 m、1.5 m、2 m, 到 20 击夯击结束时作用深度达到 2.5 m^[14]。该数值仿真结果与现场实测情况基本一致。随着夯击次数的增加、夯

击能量的累积, 上部土层孔隙率降低、密实度增加后, 形成一定形态的刚性体, 将夯击能量逐渐向下部土层传递。

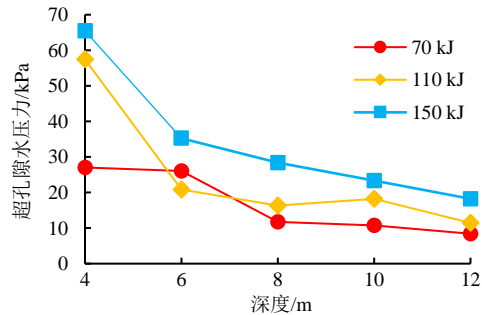


图 2 不同夯击能下夯点距测孔 2 m 时的孔隙水压力变化对比图

Fig. 2 Comparison of pore water pressure change under different compaction energy (compaction point 2 m away from the measuring point)

济南世纪开元创意产业园项目, 地基类型为湿陷性黄土, 单击夯击能为 108 kJ, 夯板直径为 1.5 m, 距夯板边缘外侧 0.35 m 沿圆周均匀布置 6 个沉降观测标, 第 1 点 S1 埋深 1.5 m, 其余观测点埋深按 0.5 m 增加, 第 6 点 S6 埋深 4.0 m。观测每 10 击各沉降标的沉降量, 并绘制累计沉降量曲线图, 见图 3。

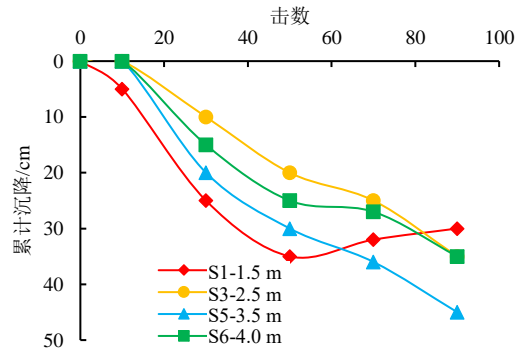


图 3 累计沉降量曲线图

Fig. 3 Cumulative settlement curve

(1) 从累计沉降量曲线图可以看出: a) 夯击数在 0~50 击时, 沉降量与夯击数基本呈线性关系, 每 10 击的平均沉降量为 5 mm; 50 击以后曲线的斜率降低、沉降量减少, 每 10 击的平均沉降量为 2~3 mm。b) 冲击荷载在第 10 击时所能达到的深度为 1.5 m, 10 击以后开始向深部土层传递。50 击以后, 深度 1.5 m 处沉降标累计沉降量开始降低, 说明该处土层开始上翻隆起, 导致沉降标上浮。

(2) 分析以上实测结果, 进一步表明: a) 夯击次数与加固深度和加固效果有关, 加固深度随夯击次数增大而增大, 本案例经济的夯击次数为 50~

60 击。实际应用时应通过试夯确定夯击次数和停锤标准。为保证夯实效果, 停锤标准应以控制锤击数为主, 以控制最终 10 击平均夯沉量为辅。b) 液压夯击能夯坑深度一般小于 1.5 m, 当采用 36~54 kJ 的能量进行满夯时, 满夯的夯击次数不必过高, 12 击以内最为经济。技术标准^[7]“5.2.5 条”规定: 满夯的夯击次数不宜低于 6~9 击, 实践经验一般采用 6~8 击即可满足表层加固要求。

4 结 论

(1) 液压快速夯实技术适用于浅层地基的夯实处理, 所采用的高速动态夯实技术填补了传统的表层压实技术(如碾压、振动压实)和传统强夯技术之间的空白, 其效果接近或好于强夯^[15]。

(2) 液压夯实机的夯击频率不仅影响施工效率, 而且影响实际夯击能量。一般而言, 最大提升高度时的夯击频率应大于 30 次/min, 才能达到规定的有效加固深度。工程施工采用的夯实机夯击频率一般大于 40 次/min, 地基基础施工应采用经质量检验合格的设备^[16]。

(3) 本文提出的对梅纳(Menard)公式进行修正后的公式, 对计算液压快速夯实技术的有效加固深度具有可行性。

(4) 夯击次数与加固深度和加固效果有关, 加固深度随夯击次数增大而增大, 实际应用时应通过试夯确定夯击次数和停锤标准。为保证夯实效果, 停锤标准应以控制锤击数为主, 以控制最终 10 击平均夯沉量为辅。

参考文献

- [1] 曹斌, 余崇俊. 高速液压夯实机与施工技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 220-222.
CAO Bin, YU Chong-jun. High-speed hydraulic rammer and its construction technology[J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2014, 10(2): 220-222.
- [2] 王进, 马军星. 液压高速夯实机及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006(1): 51-53.
WANG Jin, MA Jun-xing. Hydraulic high-speed compactor and application[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006(1): 51-53.
- [3] 邹劲, 唐海云. 桥头跳车理论浅析及质量控制[J]. 山西科技, 2005(4): 97-98.

- ZOU Jin, TANG Hai-yun. Analysis of bridgehead-jumping theory and quality control[J]. Shanxi Science and Technology, 2005(4): 97-98.
- [4] 司癸卯, 张燕飞, 张成. 快速液压夯实机在地基处理中的应用分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(2): 175-178.
SI Gui-mao, ZHANG Yan-fei, ZHANG Cheng. Applicable analysis on high-speed hydraulic compactors during foundation treatment[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013, 11(2): 175-178.
- [5] 袁求武, 王锐劲, 李晓辉, 等. 快速夯实机在某工程地基处理中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(7): 28-30.
YUAN Qiu-wu, WANG Rui-jin, LI Xiao-hui, et al. Application of RIC used in foundation treatment of some project[J]. Construction Technology, 2012, 41(7): 28-30.
- [6] 刘明华, 王吉庆. 高速液压夯实机补强台背路基的施工工艺及工程应用[J]. 公路与汽运, 2016(4): 217-219.
LIU Ming-hua, WANG Ji-qing. Construction technology and engineering application of high-speed hydraulic rammer to strengthen subgrade at abutment back[J]. Highways & Automotive Applications, 2016(4): 217-219.
- [7] 山东土木建筑学会. 液压快速夯实地基技术标准: T/SDCEAS 10006—2021[S]. 济南: 中国建材工业出版社, 2021.
Shandong Civil Engineering and Architecture Society. Technical Standard for Rapid Hydraulic Compaction of Foundation: T/SDCEAS 10006—2021[S]. Jinan: China Building Materials Press, 2021.
- [8] 曹斌, 刘岩. 高速液压夯实机在高速公路路基填筑中的应用[J]. 公路, 2016, 61(11): 71-75.
CAO Bin, LIU Yan. Application of high-speed hydraulic compactor in expressway subgrade filling[J]. Highway, 2016, 61(11): 71-75.
- [9] 庄仲欣. 高速液压夯实技术在高速铁路路基工程中的应用研究[J]. 路基工程, 2018(3): 153-156.
ZHUANG Zhong-xin. Application research of rapid hydraulic compaction techniques in high-speed railway subgrade engineering[J]. Subgrade Engineering, 2018(3): 153-156.
- [10] 周荣, 宋晓东. 高铁高填方路基高速液压夯实施工参数研究[J]. 路基工程, 2015(5): 56-59, 65.
ZHOU Rong, SONG Xiao-dong. Study on parameters of high-speed hydraulic compaction for high fill subgrade of high-speed railway[J]. Subgrade Engineering, 2015(5): 56-59, 65.

