

## 杂填土地地区高层住宅地基强夯处理施工工法

陈磊杰<sup>1</sup> 史建霞<sup>2</sup>

1 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010

2 中建二局第一建筑工程有限公司, 北京 100023

**[摘要]**河南省某市刘东新居二号院项目是政府安置房项目, 项目工期紧、质量要求严格。在土方开挖阶段, 发现项目地质情况与勘察资料出入较大, 基坑西侧(约占基坑面积 50%)发现大量生活垃圾, 埋深达 18~19m, 因此需变更设计。综合项目工期、安全、造价、质量等方面因素, 项目最终采用置换生活垃圾土结合强夯处理方案。项目周边情况较复杂, 近邻项目南侧是建筑工地配套的生活区、龙飞商砼(混凝土搅拌站), 直线距离约 30m, 项目东侧是郑州地铁 2 号线城郊线, 距离项目约 100m。强夯施工过程中产生剧烈振动波, 会对周边建筑物和构筑物产生较大影响。因此本项目强夯施工的关键就是如何选取合适的夯锤能级和有效的防护措施, 在不损害周边建构物的情况下, 又能满足地基处理要求。经过多次试夯并配合严密的监测, 确定了夯锤能级和分层夯实的厚度。项目强夯施工耗时 45d, 比预期快了 1 个月, 节约建设投资约 1200 万元且周边建构物均未受损。因此, 笔者在此结合项目的实际情况, 将强夯施工过程中的施工工艺、控制要点进行详细介绍, 以供参考。

**[关键词]**强夯施工; 施工工艺; 夯锤能级; 振动测试; 隔振沟

DOI: 10.33142/ect.v2i1.10693

中图分类号: TU753

文献标识码: A

## Construction Method of Dynamic Compaction Treatment for High-rise Residential Foundation in Mixed Fill Areas

CHEN Leijie<sup>1</sup>, SHI Jianxia<sup>2</sup>

1 Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430010, China

2 The First Construction Engineering Company Ltd. of China Construction Second Engineering Bureau, Beijing, 100023, China

**Abstract:** The second courtyard project of Liudong New Residence in a certain city of Henan Province is a government resettlement housing project, with a tight construction period and strict quality requirements. During the earthwork excavation stage, it was found that there was a significant discrepancy between the geological conditions of the project and the survey data. A large amount of household waste was found on the west side of the foundation pit (accounting for about 50% of the pit area), with a burial depth of 18-19 meters. Therefore, a design change is needed. Taking into account factors such as project duration, safety, cost, and quality, the project ultimately adopts a combination of replacing domestic waste soil and dynamic compaction treatment plan. The surrounding situation of the project is quite complex. The south side of the project is the living area supporting the construction site and Longfei Commercial Concrete (concrete mixing station), with a straight-line distance of about 30m. The east side of the project is the suburban line of Zhengzhou Metro Line 2, which is about 100m away from the project. Severe vibration waves generated during dynamic compaction construction can have a significant impact on surrounding buildings and structures. Therefore, the key to the dynamic compaction construction of this project is how to select the appropriate level of the compaction hammer and effective protective measures, while meeting the requirements of foundation treatment without damaging surrounding buildings. After multiple trials and close monitoring, the energy level of the compactor and the thickness of the layered compaction were determined. The project's dynamic compaction construction took 45 days, which was one month faster than expected, saving about 12 million RMB in construction investment, and the surrounding buildings and structures were not damaged. Therefore, based on the actual situation of the project, the author will provide a detailed introduction to the construction technology and control points during the dynamic compaction construction process for reference.

**Keywords:** dynamic compaction construction; construction technology; hammer energy level; vibration testing; isolation ditch

### 引言

在建筑施工过程中, 当天然地基或其他人工地基(如生活垃圾回填料, 在将垃圾全部挖出后进行素土回填, 经过处理后在其上建造住宅)不能满足建筑物对地基强度、稳定性以及变形要求时, 常需要对地基进行加固, 以改变地基土质的工程性能, 进而满足建筑工程要求, 现有技术

中在对建筑施工地基处理时, 通常采用强夯机来对地基进行强夯的方法, 进而达到加固地基的目的。由于本项目周边环境复杂, 南侧为商砼站用房, 距离基坑边坡直线距离 30m 左右; 东侧 200m 区域为地铁 2 号线地上及地下路线。在综合考虑社会效益和经济效益的情况下, 通过合理布置强夯点施工顺序以及控制强夯能级来避免对周围建筑物

产生较大的影响,同时保证施工后地基基础满足设计要求。

### 1 项目概况

刘东新居二号院总建筑面积 126675.92 m<sup>2</sup>,建筑地面总高度 99.9m,最高层数 33 层。4 栋高层、1 栋幼儿园、1 栋综合楼。其中 1#楼、2#楼、3#楼、4#楼为高层住宅楼,地上 32~33 层,地下 1~3 层,建筑高度 98.1~99.9m。5#楼为幼儿园,地上 3 层,地下 2 层,建筑高度 13.7m。6#楼为社区配套综合用房,地上 3 层,地下 2 层,建筑高度 12.1m。地下车库地下 2 层。结构形式:主楼剪力墙结构,地库、幼儿园、综合楼框架结构。

### 2 强夯施工特点

强夯施工在工程行业应用比较普遍,但截止目前尚无成熟的设计计算方法来确定强夯的主要施工参数。目前通常是针对具体工程根据经验初步选定设计参数,再通过现场试验的验证和必要修改后,最终确定适合于现场土质条件的设计参数<sup>[1]</sup>。强夯法的主要设计参数包括:有效加固深度、夯击能、夯击次数、夯击遍数、间隔时间、夯击点布置和处理范围等。强夯的有效加固深度深为:单层 8000KN·m 高能量级强夯处理深度达 12m,如果进行分层多次强夯,处理深度可达到约 24~54m。本项目要求强夯完成后地基承载力不小于 150KPa,压缩模量 8MPa。检测方法为静载和动探或标贯。每层强夯后检测均需达到承载力及相关要求。因项目周边情况复杂,强夯前需要进行试夯,最终确定合适的夯击能、夯击次数、夯击遍数、间隔时间、夯击点布置。

### 3 工艺原理

#### 3.1 原理

强夯法的运行原理是借助夯锤从高处坠落产生的冲击力,将土层颗粒压实,以增大土层颗粒的密实度,使其形成稳定的土体结构,进而达到提高地基承载力和稳定性的目的<sup>[2]</sup>。

##### 3.1.1 影响深度

强夯地基加固深度可以用影响深度来表示,这是强夯法施工的主要参考依据,且直接关乎地基处理效果。影响深度 H 可以用以下公式求得:  $H \approx \sqrt{Mh}$  式中,影响深度同夯锤重量 (M) 以及落下距离 (h) 密切关联。此外,影响深度有时也会受到地基土性质、锤底单位压力、夯击次数和不同土层厚度等因素的影响<sup>[2]</sup>。

##### 3.1.2 夯击能

夯击能可以细分为单位夯击能和单击夯击能。其中,单位夯击能与地基土类别存在密切关联:在同等条件下,细颗粒土的单位夯击能要高于粗颗粒土的;单击夯击能是夯锤重量和落下距离的乘积,对应的加固深度应依据工程项目特性来灵活调整<sup>[2]</sup>。

##### 3.1.3 夯击次数

夯击次数是强夯法中的重要参数之一,通常夯击次数的确定需遵循夯沉量最大、夯坑周围隆起量最小的原则。施工过程中需要根据项目的具体情况进行试夯,最终确定

合适的夯击次数。

### 3.2 防振措施

强夯施工过程中会产生剧烈的振动波,当强夯施工所产生的振动,对邻近建构筑物或设备产生有害的影响时,应采取防振或隔振措施。本项目通过开挖隔振沟以及对不同区域强夯能级的控制。做到强夯施工中对周围建构筑物基本不产生影响。

### 4 施工工艺及操作要点

#### 4.1 试夯、周边建构筑物振动测试

本项目周边环境复杂,近邻项目南侧是建筑工地配套的生活区(中天生活区和办公区)、龙飞商砼(混凝土搅拌站),直线距离约 30m,项目东侧是郑州地铁 2 号线城郊线,距离项目约 100m。强夯施工过程中产生剧烈振动波,会对中天生活区和龙飞商砼内的建筑物和构筑物造成损害,甚至房屋倒塌。项目东侧的地铁线路是高架桥形式,对振动波扰动更加敏感。因此本项目强夯施工前先进行多次试夯,根据每次试夯的检测数据和对周边带来的影响,最终确定强夯施工的夯锤能级(夯锤的大小和提升高度)。



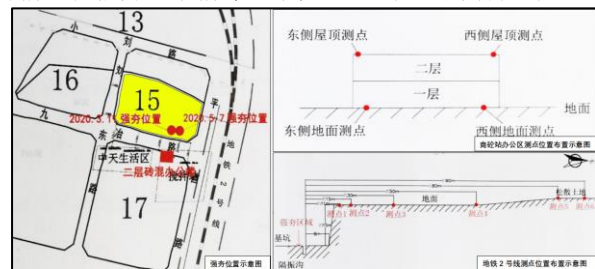
图 1 强夯施工震动范围示意图

##### 4.1.1 南侧商砼站楼栋振动测试

强夯区域距离商砼站内最近的两层砖混办公楼约 30m 左右,该建筑与强夯位置见图 2。对该栋建筑物共进行 2 次强夯振动测试,分别如下:

(1) 第一次测试共布置 2 个测点,分别位于二层砖混办公楼顶的东、西两侧。

(2) 第二次测试共布置 4 个测点,在第一次测试点位的基础上,增加一楼地面的东、西两侧测点。第二次强夯前,在强夯区域前布置了宽 1m、深 3m 的隔振沟。



**图 2 强夯位置及测点示意图**
**4.1.2 测试结果及数据分析**
**(1) 未设置隔振沟情况下**
**表 1 商砼站二层办公楼顶振动速度幅值统计表**

|      |    | 主频 (Hz) | 振动速度幅值 mm/s | 容许值 mm/s | 是否满足规范要求 |
|------|----|---------|-------------|----------|----------|
| 东侧屋顶 | 东西 | 7.42    | 3.74        | 8.4      | 是        |
|      | 南北 | 7.23    | 8.53        | 8.4      | 否        |
|      | 竖向 | 7.23    | 8.48        | 8.4      | 否        |
| 西侧屋顶 | 东西 | 7.42    | 3.43        | 8.4      | 是        |
|      | 南北 | 8.20    | 6.42        | 8.4      | 是        |
|      | 竖向 | 9.18    | 8.19        | 8.4      | 是        |

由上表可见，东侧屋顶南北向振动速度幅值为 8.53mm/s、竖向振动速度幅值为 8.48mm/s，均超过容许值 8.4mm/s，不满足规范要求；西侧屋顶满足规范要求，但竖向振动速度幅值接近容许值。

**(2) 设置隔振沟情况下**
**表 2 采取隔振时商砼站二层办公楼顶振动速度幅值统计表**

|      |    | 主频 (Hz) | 振动速度幅值 mm/s | 容许值 mm/s | 是否满足规范要求 |
|------|----|---------|-------------|----------|----------|
| 东侧屋顶 | 东西 | 7.62    | 4.28        | 8.4      | 是        |
|      | 南北 | 7.81    | 6.57        | 8.4      | 否        |
|      | 竖向 | 7.42    | 8.29        | 8.4      | 否        |
| 西侧屋顶 | 东西 | 7.62    | 3.83        | 8.4      | 是        |
|      | 南北 | 7.23    | 4.82        | 8.4      | 是        |
|      | 竖向 | 10.94   | 8.08        | 8.4      | 是        |

由上表可见，由表可见，东侧、西侧屋顶振动速度幅值均满足规范要求，但竖向振动速度幅值接近容许值。

**4.1.3 强夯区域至地铁 2 号线上方地表振动速度衰减测试**
**(1) 振动测试点位布置**

振动测试点、隔振沟、强夯试夯区域相对位置关系见下图。强夯区域前布置宽 1m、深 3m 隔振沟，隔振沟距离基坑底部边缘约 8m。共布置 6 个测点，距强夯区域水平距离分别为：11m、15m、30m、50m、80m、90m（见图 5-2）。

**4.1.4 测试结果及数据分析**
**表 3 地面传播测点 1-6 测试振动速度幅值统计表**

| 测点编号与方向 |    | 振动速度幅值 mm/s |
|---------|----|-------------|
| 测点 1    | 东西 | 9.70        |
|         | 南北 | 4.39        |
|         | 竖向 | 10.56       |
| 测点 2    | 东西 | 8.31        |
|         | 南北 | 4.15        |
|         | 竖向 | 9.22        |

| 测点编号与方向 |    | 振动速度幅值 mm/s |
|---------|----|-------------|
| 测点 3    | 东西 | 4.78        |
|         | 南北 | 1.79        |
|         | 竖向 | 7.37        |
| 测点 4    | 东西 | 4.12        |
|         | 南北 | 5.18        |
|         | 竖向 | 3.74        |
| 测点 5    | 东西 | 3.46        |
|         | 南北 | 8.30        |
| 测点 6    | 东西 | 1.93        |
|         | 南北 | 5.31        |
|         | 竖向 | 0.52        |

由上表可知，东西向与竖向振动速度幅值随距离成衰减规律：东西向振动速度幅值有 9.7mm/s 衰减至 1.93mm/s，竖向振动速度幅值由 10.56mm/s 衰减至 0.52mm/s。地铁左线保护区域上方最大振动速度幅值为 5.52mm/s（南北向），满足规范要求。

**4.2 工艺流程及操作步骤**
**4.2.1 强夯施工**

由上述实验测量数据确定夯锤能级，现场基坑范围内强夯分两个大的区域：生活垃圾区域（基坑西半部分）和建筑垃圾区域（基坑东半部分）。

**4.2.1.1 西部生活垃圾区域：3000kN.m**

考虑场地附近有地铁线路等，为减少强夯振动的影响，此区采用 3000kN.m 能级处理。场地分三层回填，每层 4m。具体强夯参数为：布点方式为边长 6m 的正方形中间插一点，第一遍夯点呈正方形布置，夯点间距 6m，能级 3000kN.m，击数待定，施工完毕后夯坑回填、整平；第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形中心，能级 3000kN.m，击数待定（同时将第一遍夯点和第二遍夯合并作业），施工完毕后进行夯坑回填、整平；第三遍为满夯，夯击能 1000kN.m 一遍，击数 2 击，彼此锤印搭接 1/4。

停锤标准：3000kN.m 点夯停锤标准为最后两击夯沉量 ≤ 50mm；夯坑周围地面不应发生过大的隆起；不因夯坑过深而发生提锤困难。如果夯坑过深，提锤困难或发生吸锤现象，应在夯坑中填砂砾石土后再进行强夯。

距离西侧边坡 15m 范围内区域强夯施工无因边坡垂直度比较大，不利于开挖隔振沟，强夯过程中，此区域根据场情况适当降低夯击能。

**4.2.1.2 东部建筑垃圾区域：2000kN.m**

布点方式为边长 5m 的正方形中间插一点，第一遍夯点呈正方形布置，夯点间距 5m，能级 2000kN.m，击数待定，施工完毕后夯坑回填、整平；第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形中心，能级 2000kN.m，击数待定（同时将第一遍夯点和第二遍夯合并作业），施工完毕后进



行夯坑回填、整平；第三遍为满夯，夯击能级 1000kN.m 一遍，击数 2 击，彼此锤印搭接 1/4。

停锤标准：2000kN.m 点夯停锤标准为最后两击夯沉量 ≤ 50mm；夯坑周围地面不应发生过大的隆起；不因夯坑过深而发生提锤困难。如果夯坑过深，提锤困难或发生吸锤现象，应在夯坑中填砂砾石土后再进行强夯。

距离东侧和南侧边坡 8m 范围内区域强夯施工：因边坡垂直度比较大，不利于开挖防振沟，强夯过程中，此区域根据现场情况适当降低夯击能。

#### 4.2.2 回填土施工

最顶层夯坑回填时，根据现场实际情况确定回填土厚度，夯后标高应达到桩基施工标高。

##### 4.2.2.1 施工顺序

根据施工方案及现场情况：西部生活垃圾区域需要分三层强夯，所以拟在施工过程中先施工西部生活垃圾区域，在此区域分层强夯、土方回填过程中穿插施工东部建筑垃圾区域，以加快施工速度。

先施工西部生活垃圾区域第一层点夯，在施工此区域过程中，应先将东部建筑垃圾区域回填至设计标高，待西部生活垃圾区域第一层点夯结束后，夯机移至东部建筑垃圾区域进行点夯作业。土方单位配合将西部生活垃圾区域第一层点夯夯坑填平，填平后夯机移至西部生活垃圾区域实施满夯施工，完成西部生活垃圾区域第一层强夯施工。

西部生活垃圾区域第一层强夯施工结束后，夯机移至东部建筑垃圾区域继续实施点夯作业，土方单位配合将西部生活垃圾区域第二层回填完成，回填完成后，夯机移至西部生活垃圾区域实施第二层点夯施工。第二层点夯结束后，夯机移至东部建筑垃圾区域继续并完成点夯作业，土方单位配合将第二层点夯夯坑、东部建筑垃圾区域填平，填平后夯机移至西部生活垃圾区域实施第二层满夯施工，完成西部生活垃圾区域第二层强夯施工。

西部生活垃圾区域第二层强夯施工结束后，夯机移至东部建筑垃圾区域实施满夯作业，土方单位配合将西部生活垃圾区域第三层回填完成，回填完成后，夯机移至西部生活垃圾区域实施第三层点夯施工。第三层点夯结束后，夯机移至东部建筑垃圾区域继续进行满夯作业，土方单位配合将第三层点夯夯坑填平，夯机进行满夯施工，完成所有区域施工。

## 5 材料与设备

以刘东新居二号院项目为例，强夯施工地基处理，具体使用材料及设备见下表：

表 4 材料与设备表

| 序号 | 材料设备名称 | 规格型号 | 单位 | 数量 |
|----|--------|------|----|----|
| 1  | 夯锤     | 10t  | 个  | 1  |
| 2  | 履带式起重机 | 20t  | 辆  | 1  |
| 3  | 脱钩器    | /    | 个  | 1  |

|   |            |        |   |   |
|---|------------|--------|---|---|
| 4 | 推土机        | /      | 辆 | 2 |
| 5 | 动态数据采集分析系统 | DH5910 | 台 | 1 |
| 6 | 拾振器        | 891-II | 台 | 6 |

## 6 质量控制

### 6.1 执行标准

- (1) 建筑工程容许振动标准 (GB50868-2013)
- (2) 地基动力特性测试规范 (GB/T50269-2015)
- (3) 建筑地基处理技术规范 (JGJ79-2012)
- (4) 强夯试夯方案及施工图纸设计资料

### 6.2 质量检验

(1) 施工过程中检查强夯的各项检测数据和现场施工记录，与强夯设计参数不符时应及时进行补夯或者采取其他有效措施。

(2) 检查现场强夯点放线准确度，放线误差 ≤ 50mm，用白石灰或醒目的小彩旗定出夯点的位置，不允许点位遗漏。

(3) 施工过程中要做好各项参数的记录，遇到特殊情况要及时向相关负责人反馈。

(4) 强夯过程中，夯锤下落形成的锤坑周边地面不应发生过大的隆起。

(5) 施工过程中应注意检查夯锤的对点情况，夯锤中心应与放线点垂直对应，偏差值不得超过 150mm，施工中若夯锤中心偏移超过允许值，应该重新对点。

(6) 夯击过程中如出现歪锤，应分析原因并及时调整，坑底垫平后才能继续施工。

(7) 强夯施工期间应保证回填土的含水率符合设计值，夯坑及周边场地不得有积水。

(8) 强夯施工完成后，视土质情况间隔一定时间后对地基处理质量进行检测。对于粉土、黄土、黏性土间隔时间为 2~4 周，对于沙土和碎石土地基，其间隔时间为 1-2 周。本项目回填土为黄土，间隔时间为 3 周。

### 6.3 强夯检测报告

试验按照《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012) [6] 处理后地基静载荷试验要点进行，加荷分级不应少于 8 级，最大加载量不应小于设计要求的两倍。本工程 29 点强夯处理地基静载荷试验最大加载压力均为 304kPa，每级加载量为 38kPa，均分为 8 级。具体分级见下表：

表 5 浅层平板荷载试验分级表

| 分级       | 1  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|----------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 荷载 (kPa) | 38 | 76 | 114 | 152 | 190 | 228 | 266 | 304 |

经过检测，强夯处理后的地基满足设计要求。

## 7 经济效益分析

刘东新居二号院项目原设计单位变更设计方案为地下三层外加一层架空层，地下总建筑面积 36830 m<sup>2</sup>。目前设计为地下二层，局部位置地下一层，总建筑面积为 28146 m<sup>2</sup>。地下车库综合成本测算为 1608.78 元/m<sup>2</sup>。

(1) 强夯合同额为 60 万。

(2) 强夯置换采用素土回填约 4851 m<sup>3</sup>、换填深度 6m。共计使用土方 29106m<sup>3</sup>，合同额 85 万元

(3) 采用强夯置换基础可节约=(36830-28146) \*1608.78-600000-850000=1252.065 万元

## 8 结语

该工法重点介绍了在项目周边建构筑物复杂情况下，该如何开展强夯施工、采取哪些防振措施。同时，阐述了试夯过程中测量工作如何去做，结合测量数据确定强夯的各项参数。从刘东新居二号院运用该工法施工结果来看，该工法可以为高层建筑地基处理、环境复杂项目强夯施工带来借鉴意义，具有一定的应用前景。

### [参考文献]

[1]李浩,刘东,侯超群.强夯法对杂填土地基处理效果的

实例分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012(6):814-819.

[2]杨潇.强夯法在大面积深厚填土地基施工中的应用——以甘肃省兰州市兰州新区某工程为例[J].房地产世界,2022(12):272-273.

[3]马晓平.强夯法处理深厚杂填土及湿陷性黄土地基实例[J].城市建筑,2020(7):159-160.

[4]GB50868-2013,建筑工程容许振动标准[S].

[5]GB/T50269-2015,地基动力特性测试规范[S].

[6]JGJ79-2012,建筑地基处理技术规范[S].

作者简介:陈磊杰(1988.11—)男,学历:本科,专业:建筑学,主要从事工作方向:施工管理,目前就职单位:中国市政工程中南设计研究总院有限公司