

25 000 kN·m 超高能级强夯处理大厚度填土地基现场试验研究

史光富¹, 雷渊², 贺建虎³, 郭志强⁴

(1. 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 山西 晋中 030620; 2. 榆林洪宇环保再生资源有限公司, 陕西 榆林 719000;
3. 陕西金汇建设工程有限公司, 陕西 榆林 719000; 4. 陕西中北工程质量检测技术有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 超高能级强夯是处理深厚湿陷性黄土地基、大厚度非均匀碎石回填地基的有效方法, 但缺乏工程应用经验的积累。为评估 25 000 kN·m 能级强夯处理大厚度新近素填土地基的效果, 依托榆林某工业园区场平工程, 开展了现场试夯试验, 通过平板载荷试验和标准贯入试验检测夯后地基的承载力和密实度。试验结果表明: 夯后地基的承载力特征值不低于 260 kPa, 夯后是夯前的 2.6 倍以上; 在地基 22 m 深度范围内, 夯后地基土的标贯击数是夯前的 1.8~8.8 倍, 根据承载力指标判断的有效加固深度约为 20 m。相关成果可为超高能级强夯处理类似大厚度素填土地基提供参考。

关键词: 强夯法; 填土; 超高能级; 强夯试验; 砂土

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0012-07

Application of 25 000 kN·m ultra high energy level dynamic compaction in the treatment of large thickness filled soil foundation

SHI Guang-fu¹, LEI Yuan², HE Jian-hu³, GUO Zhi-qiang⁴

(1. Shanxi Third Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Jinzhong 030620, Shanxi, China;
2. Yulin Hongyu Environmental Protection Renewable Resources Co., Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China;
3. Shaanxi Jinhui Construction Engineering Co., Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China;
4. Shaanxi Zhongbei Engineering Quality Inspection Technology Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China)

Abstract: Ultra high energy level dynamic compaction proves to be an effective treatment for improving deep collapsible loess foundation and thick, non-uniform gravel backfill foundation. However, it lacks sufficient engineering application experiences. To assess the impact of high energy level 25 000 kN·m dynamic compaction on the treatment of thick recently filled soil foundation, on-site trial compaction tests were carried out in the leveling project of an industrial park in Yulin. The bearing capacity and density of the compacted foundation were tested through plate loading tests and standard penetration tests. The results show that the characteristic value of the bearing capacity of the compacted foundation is no less than 260 kPa, more than 2.6 times its pre-compaction characteristic value. Within the depth of 22 m, the standard penetration blow count of the compacted foundation soil is 1.8-8.8 times compared to pre-compaction levels. Based on the bearing capacity index, an estimated effective reinforcement depth of approximately 20 m was determined. The relevant findings can provide valuable references for the treatment of similar thick plain fill foundation using ultra high energy level in dynamic compaction.

Key words: dynamic compaction method; filling soil; ultra high energy level; dynamic compaction test; sandy soil

0 引言

强夯法, 又称动力压实法或动力固结法, 由法国工程师 L MENARD 于 1960 年代创立。该方法利用重锤自由落下的冲击和振动能量, 对地基土进行强力夯实, 提高其承载力和抗变形能力。强夯法主要适用于加固砂土、碎石土、低饱和度粉土、黏性土、湿陷性土、杂填土和素填土等地基^[1-2]。自 1970 年引入中国以来, 强夯法因其高效、经济、安全、环保等优点^[3-4], 在工业与民用建筑、仓库、油罐、公路、铁路、机场跑道及码头等领域的地基处理中得到了广泛应用^[5-6]。

近年来, 随着国家经济持续快速发展和能源化工项目建设规模的扩大, 同时受国家耕地保护及环境保护政策的限制, 工业用地日益紧张, 工业用地走向荒山、大海、盐碱地、荒漠已是大势所趋, 填土工程大量涌现^[7], 其中, 有些场地的填土厚度达几十米甚至上百米, 由于回填土层过厚, 需经过较长时间的固结后方可投入使用, 大幅增加了造地的时间和经济成本, 经济时效低。为高效处理这些大厚度填土地基, 在环境允许、土质条件适宜的情况下, 强夯法性价比高, 但低能级强夯处理深厚回填土地基的有效加固深度有限^[8], 此时需要采用超高能级强夯技术。目前我国强夯方面的施工指导规范仅规定了 1 000~18 000 kN·m 能级的施工参数及效果^[9-10], 处理土层厚度在 15 m 以内, 而 18 000 kN·m 以上超高能级强夯还属于超规范范畴, 实际应用中强夯处理地基能级已达到 25 000 kN·m 乃至 30 000 kN·m^[11]。目前, 国内外的一些专家学者对于超高能级强夯的加固参数设计、振动影响和加固效果等方面进行了研究^[12-14], 因其加固机理复杂, 影响因素较多, 导致理论研究远远落后于工程实践^[15-16], 至今尚未形成一套相对成熟完善的指导体系。

为了评估超高能级强夯对大厚度填土地基的处理效果, 本次依托榆林市某工业园区场平工程, 开展了 25 000 kN·m 能级处理素填土地基的现场试验, 并采用平板载荷试验和标准贯入试验方法, 对夯后地基的承载力和密实度进行了检测。相关研究成果可为类似填土地基的处理提供参考。

1 试验概况

1.1 地质条件

该场地地处鄂尔多斯盆地陕北台向斜的东北

部, 场地地层自上而下依次由第四系全新世人工素填土 (Q_4^{ml})、风积细砂 (Q_4^{col})、中细砂 (Q_4^{col}) 及第四系晚更新世风积粉土 (Q_3^{col}) 构成, 各层岩土野外特征分述如下:

①素填土 (Q_4^{ml}): 褐黄色, 稍湿, 松散。成分以粉土为主, 含少量细砂、粉砂, 混合回填, 含植物根系。为近期回填, 未固结。本层厚度 5.50~18.50 m, 全场分布。

②素填土 (Q_4^{ml}): 褐黄色, 稍湿, 稍密。成分以粉土为主, 含少量粉砂, 混合回填, 含植物根系。为近期回填, 未固结。局部为压实填土, 本层厚度 1.10~12.0 m, 该层场地大面积分布。

③细砂 (Q_4^{col}): 褐黄色, 稍湿, 松散。成分以石英长石为主, 含少量云母, 质纯净, 颗粒均匀, 分选性好, 含有暗色矿物成分, 局部为粉砂夹层。本层厚度 0.90~2.80 m, 该层局部分布。

④细砂 (Q_4^{col}): 褐黄色, 稍湿, 稍密。成分以石英长石为主, 含少量云母, 质纯净, 颗粒均匀, 分选性好, 含有暗色矿物成分, 局部夹粉砂夹层。本层厚度 0.70~8.40 m, 该层场地大面积分布。

⑤中细砂 (Q_4^{col}): 褐黄色, 稍湿, 密实。成分以石英长石为主, 含少量云母, 质纯净, 颗粒均匀, 分选性好。本层厚度 0.60~7.40 m, 该层场地大面积分布。

⑥粉土 (Q_3^{col}): 褐黄色, 密实。成分以粉粒为主, 无光泽, 韧性差, 干强度低, 摇振反应迅速, 含暗色矿物成分及少量钙质结核。该层未揭穿, 最大揭露深度为 27.10 m, 全场分布。

试验区的典型地层剖面如图 1 所示, 各土层的标准贯入试验实测击数统计结果如表 1 所示, 包括频数 (n)、最小值 (\min)、最大值 (\max)、平均值 (φ_m)、标准差 (σ_f) 和变异系数 (δ)。本场地需处理土层为①和②素填土, 均属于近期回填形成, 土质松散且不均匀。其中①素填土层平均标贯击数为 6.4 击, 最小标贯击数为 2 击, ②素填土层平均标贯击数为 13.4 击, 最小标贯击数为 9 击, 表明①素填土层整体及②素填土层局部具较高压缩性和低强度特性, 处于欠压密状态。根据《工程地质手册》^[17] 标准贯入试验锤击数与地基承载力关系, ①素填土层承载力特征值不大于 100 kPa。

本文针对场区的地质条件, 对地基基础方案进行了对比分析, 认为钻孔灌注桩法虽然能够保证地基的结构稳定性, 但其施工成本较高, 且对环境有一定的影响。与之相比, 超高能级强夯则具有有效提高地基的承载力和变形模量、能够节省材料、缩

短施工周期和降低工程总投资等优势。

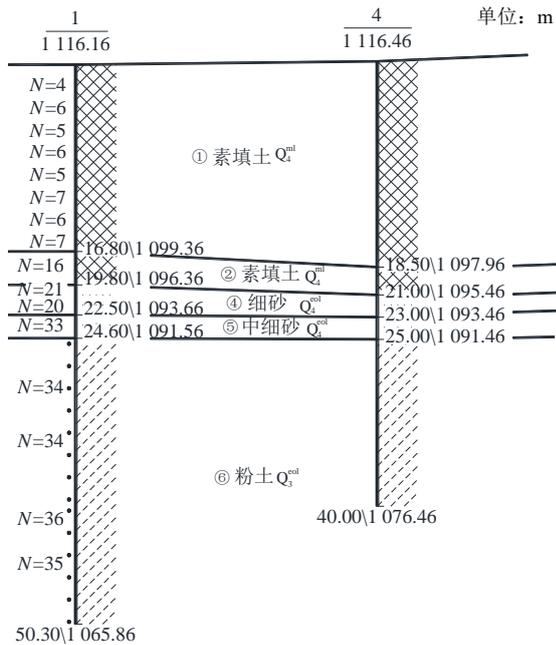


图1 试验区地层剖面图

Fig. 1 Stratigraphic profile of the experimental area

1.2 试夯方案

本次采用 25 000 kN·m 超高能级强夯对厚度为 18.0~20.0 m 素填土场地进行处理, 按设计要求夯后地基的承载力特征值需不小于 260 kPa, 有效加固深度不小于 20 m。因此, 为合理确定施工参数, 保证处理的效果, 在大面积强夯施工前, 先在场区内进行试夯, 试验区在整个工程场区内的平面位置如图 2 所示。通过试夯检测数据, 分析强夯地基的

加固影响深度、有效加固深度、承载力、密实度等指标, 从而确定最优的能级组合、夯击遍数、夯击间距等施工参数。

表1 标准贯入试验实测击数统计表

Table 1 Statistical table of measured blow counts in standard penetration test

土层类别	n	min-max	φ_m	σ_f	δ
①素填土	310	2~13	6.4	2.0	0.31
②素填土	166	9~19	13.4	2.2	0.17
③细砂	6	8~10	9.0	0.9	0.10
④细砂	76	16~30	22.8	4.8	0.21
⑤中细砂	98	31~47	35.1	3.9	0.11
⑥粉土	320	21~48	33.6	3.7	0.11

试夯试验参数和夯点布置分别见表 2 和图 3。本次试夯施工分七遍进行: 第一遍、第二遍夯点为主夯点, 夯击能为 25 000 kN·m, 第一遍夯点呈正方形布置, 夯点间距 12 m, 第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形中心; 第三遍、第四遍夯点为插夯点, 夯击能为 15 000 kN·m, 第三遍位于第一遍夯点所成正方形横向边线中心位置, 第四遍位于第一遍夯点所成正方形纵向边线中心位置; 第五遍、第六遍为加固夯, 夯击能为 4 000 kN·m, 第五遍在第一、三遍夯点位置进行加固, 第六遍在第二、四遍夯点位置进行加固; 第七遍为满夯, 夯击能为 2 000 kN·m, 夯击一遍, 击数 2 击, 彼此锤印搭接 1/4。

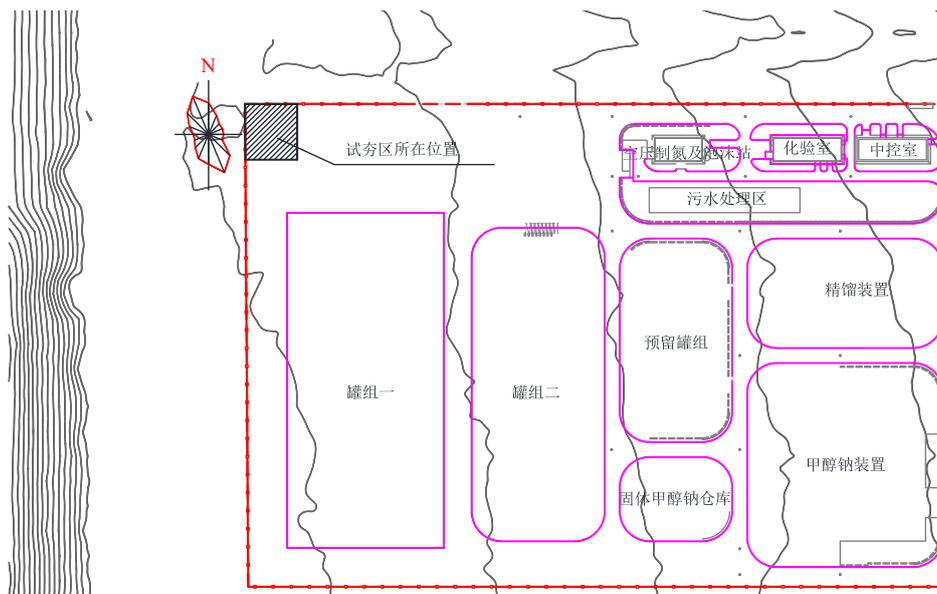


图2 试夯区位置示意图

Fig. 2 Location of compaction trial test area

1.3 试夯过程

测量地面高程→夯区测量放线→第一遍点夯

放线→一遍点夯施工→夯坑回填、整平→测量地面高程→第二遍点夯放线→第二遍点夯施工→夯坑

回填、整平→测量地面高程→第三遍插夯放线→三遍插夯施工→夯坑回填、整平→测量地面高程→夯区测量放线→第四遍插夯放线→四遍插夯施工→夯坑回填、整平→测量地面高程→夯区测量放线→第五遍加固夯放线→五遍加固夯施工→夯坑回填、整平→测量地面高程→夯区测量放线→第六遍加固夯放线→六遍加固夯施工→夯坑回填、整平→测量地面高程→测放满夯基准线→满夯施工→场地

整平、测量地面高程→验收→交工验收。

1.4 试验检测

试夯施工结束后, 根据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[18], 采用静载荷试验法确定夯后强夯地基的承载力特征值是否满足设计要求, 通过标准贯入试验法确定强夯地基密实度是否满足设计要求。检测点的平面位置如图 3 所示, 具体检测内容及方法见表 3。

表 2 试夯试验参数
Table 2 Test parameters of trial test

试夯遍次	类别	能级/(kN·m)	夯锤参数		落距/m	夯点间距/m	最后两击平均夯沉量 控制值/mm	最低击数 控制值/击
			直径/m	锤重/kN				
第一遍	点夯	25 000	2.8	1 300	19.3	12	300	12
第二遍	点夯	25 000	2.8	1 300	19.3	12	300	12
第三遍	插夯	15 000	2.8	750	20.0	12	200	10
第四遍	插夯	15 000	2.5	750	20.0	12	200	10
第五遍	加固夯	4 000	2.5	210	19.1	6	100	6
第六遍	加固夯	4 000	2.5	210	19.1	6	100	6
第七遍	满夯	2 000	2.5	130	15.4	1/4 搭接	—	2

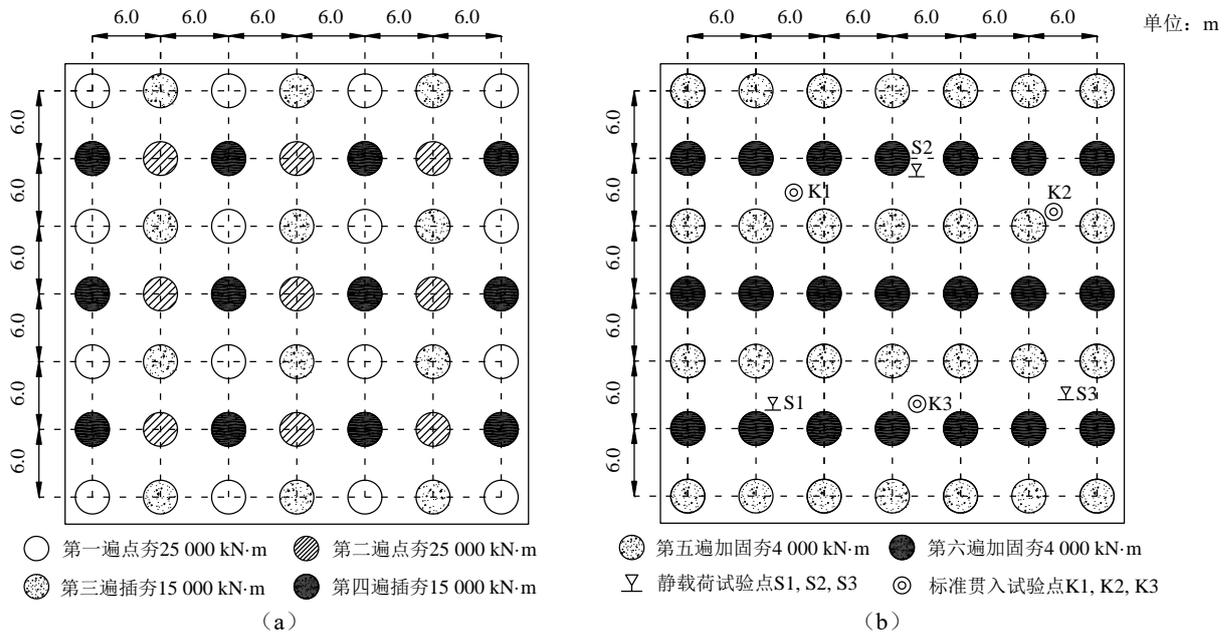


图 3 夯点布置示意图
Fig. 3 Layout of tamp spots

表 3 试验检测内容、方法
Table 3 Detection content and method

检测内容	检测方法	检测要点
地基承载力特征值	静载荷试验法	采用慢速维持荷载法进行试验(载荷板为直径 1.6 m、面积约为 2.0 m ²), 试验反力采用堆重法, 100 t 油压千斤顶加荷, 精密压力表量测试验压力, 百分表观测沉降, 加荷等级为 8 级, 每级 65 kPa, 终止荷载为 520 kPa
密实度	标准贯入试验法	在垫层顶标高处, 先用钻具钻至试验土层标高, 然后使穿心锤自由下落, 落距为 76 cm, 将标贯器连续打入土层 45 cm, 记录打入土层 30 cm 后的锤击数。沿深度方向每米做 1 次标准贯入试验

2 试验结果与分析

2.1 强夯地基的承载力特征值

图4为试夯区的平板载荷试验曲线。由图4可见,各检测点的终止荷载为520 kPa,各试验点的沉降量变化范围为10.19~11.69 mm;另外,还可以看出各检测点的 P - S 曲线均为缓变形曲线,未出现明显的陡降现象,且在试验过程中,承压板周围没有出现地面隆起及开裂现象,这说明各检测点的载荷试验均未达到极限破坏阶段。因此,根据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015),各检测点的极限承载力均大于520 kPa,若取安全系数 $K=2$,则各检测点的承载力特征值均大于260 kPa,是夯前地基承载力的2.6倍以上。

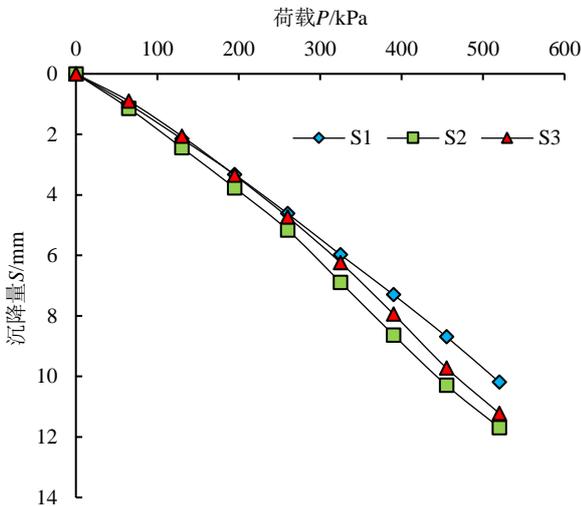


图4 试夯区的平板载荷试验曲线

Fig. 4 Plate loading test curve of the trial test area

2.2 强夯地基的密实度及加固深度

试夯区不同深度标准贯入实测击数统计值如表4所示,试夯区标准贯入试验曲线如图5所示,根据试夯前后的标准贯入试验结果表明,夯后地基土在22 m深度范围内,夯后标贯击数平均值约是夯前的1.8~8.8倍,表明强夯对地基土的加固效果显著。在22~26 m深度范围内,夯后的标贯击数平均值约为夯前的1.1~2.1倍,这表明强夯对于深度超过22 m的中细砂层也有一定程度的加固效果,但随着土层深度增加,强夯的振动能量逐渐衰减,对地基土的加固效果不断减弱。根据《工程地质手册》中标准贯入试验锤击数与地基承载力的经验关系,在20 m深度范围内,地基承载力可达到260 kPa。若以地基承载力作为有效加固深度的判定指标,可判断其有效加固深度约为20 m。

表4 试夯区不同深度标准贯入实测击数统计值

Table 4 Statistical table of measured blow counts in standard penetration test at different depths in the trial test area

测试深度/ m	标贯击数平均值/击		增大幅度/ 倍	夯后密实 程度
	夯前	夯后		
1.0~1.3	—	27.3	—	中密
2.0~2.3	4	35.3	8.8	密实
4.0~4.3	6	28.7	4.8	中密
6.0~6.3	5	27.0	5.4	中密
8.0~8.3	6	20.7	3.5	中密
10.0~10.3	5	19.7	3.9	中密
12.0~12.3	7	18.0	2.6	中密
14.0~14.3	6	20.0	3.3	中密
16.0~16.3	7	25.3	3.6	中密
18.0~18.3	16	28.3	1.8	中密
20.0~20.3	21	42.3	2.0	密实
22.0~22.3	20	42.3	2.1	密实
24.0~24.3	33	38.5	1.2	密实
26.0~26.3	34	38.5	1.1	密实
28.0~28.3	34	—	—	—
30.0~30.3	34	—	—	—

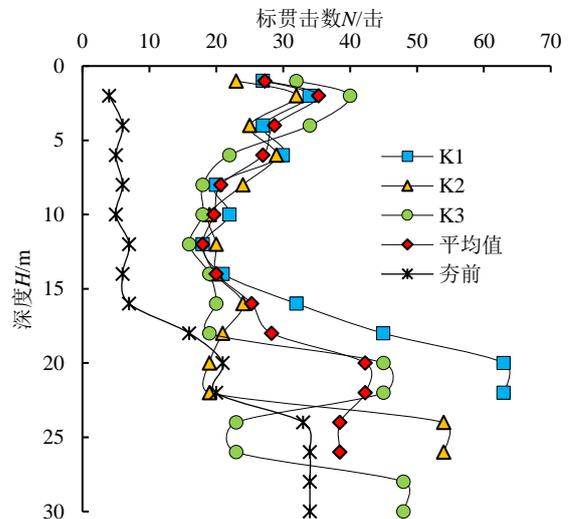


图5 试夯区标准贯入试验曲线

Fig. 5 Standard penetration test curves in the trial test area

3 结论

本文采用25 000 kN·m超高能级强夯对大厚度素填土地基的处理试验得到以下结论与建议:

(1) 夯后地基的平板载荷试验结果表明,夯后地基的承载力特征值大于260 kPa,是夯前地基承载力特征值的2.6倍以上,地基的承载力显著提高,能够满足设计要求。

(2) 夯后地基土的标准贯入试验结果表明, 标贯击数在影响范围内相较夯前增加了 1.8~8.8 倍, 加固影响深度约 22 m。若以地基承载力特征值作为判定标准, 有效加固深度约 20 m。

(3) 对主要成分为粉土的大厚度素填土地基采用“2 遍 25 000 kN·m 点夯+2 遍 15 000 kN·m 插夯+2 遍 4 000 kN·m 加固夯+1 遍 2 000 kN·m 满夯”的施工参数是合理的, 可用于指导类似填土地基的处理。

(4) 超高能级强夯与低能级强夯相比, 会产生更大的施工振动。当施工场地毗邻建(构)筑物及边坡时, 应加强振动监测, 并评估施工振动对周边环境和建(构)筑物结构振动的影响情况。

参考文献

- [1] 中国工程建设标准化协会. 强夯地基处理技术规程: CECS 279: 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Ground Treatment by Heavy Tamping: CECS 279: 2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [2] 叶国良, 徐宾宾. 强夯加固理论及研究综述[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(4): 1-5.
YE Guo-liang, XU Bin-bin. Reinforcement mechanism of dynamic compaction and its literature review[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(4): 1-5.
- [3] 高斌峰, 杨洁, 张新蕊, 等. 强夯工程 100 问[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
GAO Bin-feng, YANG Jie, ZHANG Xin-rui, et al. 100 Questions about Dynamic Compaction Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [4] 高洪伦. 强夯加固地基的研究与应用[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2001, 11(3): 19-20.
GAO Hong-lun. Research and application of dynamic compaction to strengthen foundation[J]. Journal of Luoyang Technology College, 2001, 11(3): 19-20.
- [5] 于健, 刘江, 郭玉彬, 等. 超高能级强夯法现场试验分析[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(12): 42-46.
YU Jian, LIU Jiang, GUO Yu-bin, et al. Field test analysis on super high energy dynamic compaction[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(12): 42-46.
- [6] 董宝志, 冯振甲, 赵雅芳. 强夯法在现代物流园填土地基处理中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2020(12): 27-28.
DONG Bao-zhi, FENG Zhen-jia, ZHAO Ya-fang. Application of dynamic compaction method in the treatment of land filling foundation in modern logistics park[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text) Engineering Technology, 2020(12): 27-28.
- [7] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.
DONG Bing-yin, SHUI Wei-hou, QIN Shao-jie. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1-16.
- [8] 胡瑞庚, 时伟, 水伟厚, 等. 深厚回填土地基高能级强夯有效加固深度计算方法及影响因素研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(3): 35-40.
HU Rui-geng, SHI Wei, SHUI Wei-hou, et al. Study on the effective depth of improvement and influential factors for deep backfilled soils by using high energy dynamic compaction[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 35-40.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢制储罐地基处理技术规范: GB/T 50756—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Steel Tanks: GB/T 50756 — 2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [11] 尹广田, 于健. 高填方土石料地基强夯有效加固深度分析[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(7): 31-36.
YIN Guang-tian, YU Jian. Analysis on effective reinforcement depth of dynamic compaction for high fill earth-rock foundation[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(7): 31-36.

- [12] 徐文涛, 张忠雄, 董宝志, 等. 大厚度湿陷性黄土填方地基增湿强夯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(1): 151-159.
XU Wen-tao, ZHANG Zhong-xiong, DONG Bao-zhi, et al. Experimental study on wetting and dynamic compaction of large thickness collapsible loess fill foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(1): 151-159.
- [13] 徐文涛, 董宝志, 于永堂, 等. 直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊 1): 134-143.
XU Wen-tao, DONG Bao-zhi, YU Yong-tang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction on collapsible loess with low moisture content and large thickness[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 134-143.
- [14] 冯世进, 水伟厚, 梁永辉. 高能级强夯加固粗颗粒碎石回填地基现场试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 679-684.
FENG Shi-jin, SHUI Wei-hou, LIANG Yong-hui. Field test evaluation of high energy dynamic compaction on coarse-grained gravel fills[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(5): 679-684.
- [15] 李怡文, 陈颖辉, 邹梦超. 深厚回填土地基强夯加固效果影响因素研究[J]. 结构工程师, 2022, 38(5): 133-139.
LI Yi-wen, CHEN Ying-hui, ZOU Meng-chao. Study on influence factors of strong reinforcement effect of deep backfilling land bas[J]. Structural Engineers, 2022, 38(5): 133-139.
- [16] 张北战, 姚仰平, 方雨菲. 填土地基强夯加固效果研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊 1): 30-34.
ZHANG Bei-zhan, YAO Yang-ping, FANG Yu-fei. Reinforcement effect of dynamic compaction on a backfilled foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(S1): 30-34.
- [17] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological Engineering Handbook[M]. Fifth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.