

超高能级强夯法处理既有深厚杂填土地基现场试验研究

董宝志¹, 赵霞¹, 梁谊², 姚晋东¹, 徐晓³, 张帅丰⁴

(1. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030017; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 山西省勘察设计院有限公司, 山西 太原 030013; 4. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对深厚杂填土地基的一次性处理要求土体密实度与均匀度的需求, 以山西阳泉某独立储能电站工程为背景, 开展 20 000 kN·m 与 25 000 kN·m 超高能级强夯技术的对比试验与效果评价。通过夯沉量动态监测、重型动力触探试验 (DPT)、平板载荷试验 (PLT)、压缩模量试验及瑞利波测试, 并分析强夯加固效果。结果表明: 综合重型动力触探试验 (DPT) 与平板载荷试验 (PLT) 结果, 25 000 kN·m 和 20 000 kN·m 能级强夯的有效加固深度分别达到 18.0 m 和 16.0 m, 经两种能级处理后的杂填土地基承载力特征值均不低于 200 kPa, 有效加固范围内土体压缩模量达到 15 MPa; 根据地面下 16 m 深度范围内瑞利面波测试数据, 25 000 kN·m 和 20 000 kN·m 能级强夯后的波速分别提高了 34.4% 和 60.9%, 证实了杂填土地基密实度的显著提升。随着夯击遍数增加, 两种能级强夯的累计夯沉量均呈现逐遍递减趋势, 表明地基土体密实度与均匀性得到显著改善。

关键词: 超高能级强夯; 深厚杂填土地基; 现场试验; 有效加固深度

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0071-08

Field Experimental Study on the Treatment of Existing Thick Miscellaneous Fill Foundation by Ultra-high Energy Level Dynamic Compaction Method

DONG Baozhi¹, ZHAO Xia¹, LIANG Yi², YAO Jindong¹, XU Xiao³, ZHANG Shuaifeng⁴

(1. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030017, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China;

3. Shanxi Survey Design Research Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030013, China;

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

Abstract: In response to the one-time treatment demand for deep mixed soil foundation, a comparative experiment and effect evaluation of 20 000 kN·m and 25 000 kN·m ultra-high energy level dynamic compaction technology were conducted based on an independent energy storage power station project in Yangquan, Shanxi Province. Through comprehensive testing methods such as dynamic monitoring of compaction settlement, heavy dynamic penetration test (DPT), plate load test (PLT), compression modulus test, and Rayleigh wave test, the effectiveness of dynamic compaction reinforcement was systematically analyzed. The results indicate that based on the results of the comprehensive heavy-duty dynamic penetration test (DPT) and plate load test (PLT), the effective reinforcement depths of the 25 000 kN·m and 20 000 kN·m energy level dynamic compaction reached 18.0 m and 16.0 m, respectively. The characteristic values of the bearing capacity of the mixed fill soil foundation after the two energy level treatments were not less than 200 kPa, and the compression modulus of the soil within the effective reinforcement range reached 15 MPa. According to the Rayleigh surface wave test data within a depth range of 16m below the ground, the wave veloci-

收稿日期: 2025-06-20

修稿日期: 2025-08-25

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目 (2022KXJ-086); 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBSF-499); 西安市秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目 (2023JH-DWJS-0048)

作者简介: 董宝志 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从地基处理技术研究工作。E-mail: 66619996@qq.com

ty of the 25 000 kN · m and 20 000 kN · m energy levels increased by 34.4% and 60.9% respectively after dynamic compaction, confirming a significant improvement in the compactness of the mixed fill soil foundation. As the number of compaction passes increases, the cumulative settlement of both levels of dynamic compaction shows a decreasing trend with each pass, indicating a significant improvement in the compactness and uniformity of the foundation soil.

Keywords: ultra-high energy level dynamic compaction; thick miscellaneous fill foundation; field experimental; effective reinforced depth

强夯法是利用重锤从高处自由落体对地基土施加冲击和振动作用,以提高地基强度、降低压缩性、消除湿陷性、提高土体抵抗液化能力,因其施工简便、效率高、成本低等优点被广泛使用。超高能级强夯法是一种采用更高的夯击能量对地基土体进行强力夯实,从而显著改善地基土物理力学性质的地基处理技术,因其高能级、深加固、低成本、短周期的技术特性,有效解决传统地基处理的瓶颈问题,尤其是对深厚大填土地基的加固处理,为现代工程建设提供了更高效、经济、环保的选择^[1]。

国内外已展开多项超高能级强夯试验,验证了其技术可行性,王铁宏等^[2]开展国内首次 10 000 kN · m 高能级强夯试验,通过地表变形与孔隙水压力动态响应分析,并与 3 000 kN · m 能级强夯进行对比研究,揭示了沿海碎石土地基在高能级强夯作用下的孔压演化规律,提出了适用于该地质条件的施工控制参数,为高能级强夯工程的设计优化、施工监测及质量评价提供了重要依据;Wei 等^[3]通过 10 000 kN · m 超高能级强夯处理中国西南土石混填体的现场试验(含表面波、动力触探及载荷试验),结果表明:10 m 厚填土地基承载力超 300 kPa、变形模量达 15 MPa,但 30 m 厚填土需辅以其他加固措施;韩晓雷等^[4]在湿陷性黄土地区采用 15 000 kN · m 的超高能级强夯处理可以完全消除深厚黄土地基的湿陷性;詹金林等^[5]通过夯后动力触探试验、瑞雷波试验、标准贯入测试、平板载荷试验检测得出,18 000 kN · m 能级强夯加固抛石填海造陆地基处理效果良好;何立军等^[6]研究了 25 000 kN · m 能级强夯对黏性土为主填土地基的加固效果,从强夯检测角度探讨圆锥动力触探击数与标准贯入击数的相关性及其适用性;史光富等^[7]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均符合要求;针对大连机场填海工程的开山碎石料厚填地层,采用超高能级强夯试验后,地基密实度显著提高,有效消除沉降^[8-9]。国内现行标准^[10]对强夯能级上限未明确限制,但实际工程中 20 000 kN · m、25 000 kN · m 能级已广泛应用^[11-12]。然而,国内

外关于超高能级强夯处理深厚杂填土地基的研究和工程验证甚少以及尚未确定其是否满足设计要求。

本次依托山西省阳泉市某独立储能电站工程,在深厚杂填土地基上进行了 20 000 kN · m、25 000 kN · m 能级的强夯施工振动现场测试,通过夯沉量结果分析、重型动力触探试验、平板载荷试验和瑞利面波测试验证了地基承载力、有效加固深度和土体压缩模量等满足设计要求。

1 工程概况

1.1 工程规模及布置

山西省阳泉市某独立储能电站项目占地面积约 7 万 m²,地基处理面积约 5 万 m²。主要建筑物包括综合楼、主变压器基础、出线构架、SVG、预制舱基础、电池集装箱基础、地理式箱泵一体式消防给水泵站、GIS 基础、蓄水池、化粪池、事故油池等。拟建场地所处地貌单元属于剥蚀侵蚀低中山地貌。相对标高介于 864.49 ~ 866.70 m 之间,相对高差为 2.21 m。

1.2 地质条件

本场区地层自上而下由杂填土(Q_4^m)、页岩(C_2^b)、砂岩(C_2^b)及灰岩(O_2^f)组^[13],典型地层剖面如图 1 所示,各岩土层的野外基本特征如下所示:

①杂填土(Q_4^m):杂色,由炉渣、灰渣、风化基岩碎块、卵砾石等为主组成,均匀性较差,厚度为 4.90 m ~ 23.10 m。堆填方式随意且无序,未经专门碾压或夯实,堆填时间为 4 ~ 6 年左右。动力触探 N63.5 修正值在 2.80 ~ 6.10 击,平均 4.40 击,根据《工程地质手册》^[14]动力触探试验锤击数与地基承载力、压缩模量关系,该层天然地基承载力特征值不大于 70.00 kPa,变形模量不大于 7.00 MPa。

②页岩(C_2^b):灰黑色,泥质结构,层状薄层理构造,局部含强风化泥岩薄层或透镜体,多呈泥质结构,层状薄层理构造,全~强风化,岩芯呈碎块状,局部柱长 5.0 cm ~ 10.0 cm,手捏易碎,局部节理发育,遇水易软化,在空气中易风化成碎片,质量基本等级为 V 级,RQD 在 10% ~ 20% 左右。岩块天然湿度单

轴抗压强度介于 1.20 MPa~6.40 MPa,平均 3.60 MPa,属极软岩。

③砂岩(C_2^b):灰白、灰黄色,砂粒结构,块状构造,主要矿物成分为长石、石英等,强风化,较破碎,裂隙较发育,岩芯多呈碎块状,局部为短柱状。岩石质量指标 RQD 为 30%~50% 左右。岩块饱和单轴抗压强度介于 12.30 MPa~34.50 MPa 之间,平均 21.60 MPa,岩石质量等级为Ⅳ类,属较软岩。

④灰岩(O_2^f):灰白~青灰色,隐晶质结构,中厚层状构造,中等风化,岩体较完整,主要矿物成分为方解石等,较破碎,裂隙发育,岩芯多呈短柱状,局部为柱状。岩石质量指标 RQD 为 50%~70% 左右。岩块饱和单轴抗压强度介于 43.70 MPa~59.30 MPa 之间,平均 51.50 MPa,岩石质量等级为Ⅲ类,属坚硬岩。

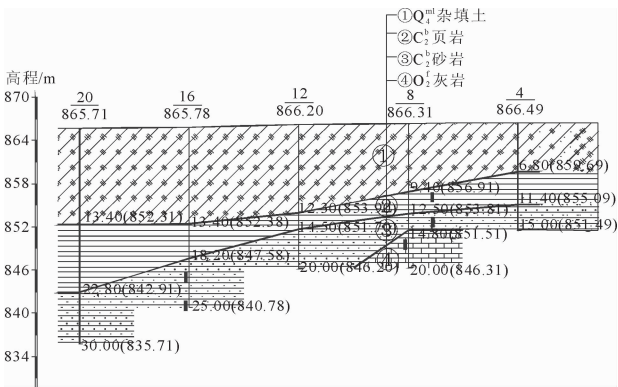


图 1 典型地层剖面图

由于杂填土堆积条件、堆积时间、物质来源不同和组成成分复杂,造成杂填土的性质很不均匀、密度变化大、分布差异大等特点,地基处理难度极大。选择杂填土地基的处理方法时,主要考虑其加固效果、经济费用、工程周期、环境影响以及地区经验等方面综合比较,最后采用超高能级强夯法处理。

2 设计要求与试夯方案

2.1 设计要求

场地杂填土土层具有厚度较大且空间分布不均的特征,目前尚未完成自重固结过程。基于工程设计要求,需对该填土地基进行加固处理,其主要目的为提高地基承载力,有效控制沉降变形。经处理后地基承载力特征值 f_{ak} 不小于 200 kPa,压缩模量 E_s 不小于 15 MPa,且有效处理深度不小于 15.00 m。

2.2 施工方案

针对杂填土厚度不均、自重固结未完成及一次

性处理深度大于 15 m 的核心难题,本次施工方案突破《建筑地基处理技术规范》^[10] (JGJ 79—2012) 中常规强夯能级限制,对杂填土区域提出采用 25 000 kN·m、20 000 kN·m 超高能级强夯处理,强夯设计参数如表 1 所示,两种强夯能级的试夯区夯点布置情况如下:

(1) 25 000 kN·m 能级的试夯区夯点布置如图 2(a) 所示。夯区主夯点为边长 10 m 的正方形中间插一点形式,第一遍夯点呈正方形布置,单击夯击能为 25 000 kN·m;第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形的中心,单击夯击能仍为 25 000 kN·m;第三遍插夯点位于第一遍夯点所成正方形边线的中心,单击夯击能为 12 000 kN·m;第四遍复夯点和插夯点位于第一、二、三遍夯点原点位置及其形成的正方形的中心位置,夯击能级为 4 000 kN·m;第五遍满夯一遍,2 击,夯击能级为 2 000 kN·m,1/4 夯印搭接。

(2) 20 000 kN·m 能级的试夯区夯点布置如图 2(b) 所示。夯区主夯点为边长为 10 m 的正方形中间插一点,第一遍主夯点呈正方形形状布置,夯击能级为 20 000 kN·m;第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形中心,单击夯击能为 20 000 kN·m;第三遍插夯点位于第一遍夯点所成正方形边线的中心位置,单击夯击能为 10 000 kN·m;第四遍复夯点和插夯点位于第一、二、三遍夯点原点位置及其形成的正方形中心位置,单击夯击能为 4 000 kN·m;第五遍满夯一遍,2 击,单击夯击能为 2 000 kN·m,夯印搭接 1/4。

2.3 试验检测

为验证了地基承载力、有效加固深度和土体压缩模量等是否满足设计要求。进行了重型动力触探试验、平板载荷试验、瑞利面波测试、室内土工试验。

(1) 重型动力触探试验:采用重型(N63.5)圆锥动力触探试验,试验采用自动落锤法,钻杆直径 42 mm,试验从施工桩顶标高开始连续贯入,记录每贯入 10 cm 的锤击数。

(2) 平板载荷试验:在试夯区内随机选点,进行慢速维持荷载法平板载荷试验(载荷板为直径 1.6 m、面积约为 2.0 m²),首级压力为 40 kPa,分级压力增量为 40 kPa,最大加载量为 400 kPa。

(3) 瑞利面波测试:采用瞬态瑞雷波,现场数据采集通常采用纵排列接收瑞雷波。首先做现场试验,并结合现场情况选择合适的工作参数,如偏移距、道间距、记录长度、采样间距等。

表 1 强夯处理设计参数

主夯能级/(kN·m)	夯击遍数	夯点类型	单击夯击能/(kN·m)	夯点布置	夯点间距/m	夯击次数	收锤标准/mm
25000	1	主夯点	25000	正方形	10	12	≤250
	2	主夯点	25000	正方形	10	12	≤250
	3	插夯点	12000	正方形	10	10	≤200
	4	加固夯(插夯点+复夯点)	4000	正方形	5	8	≤100
	5	满夯点	2000	搭接型	1/4 夯印搭接	2	—
20000	1	主夯点	20000	正方形	10	12	≤250
	2	主夯点	20000	正方形	10	12	≤250
	3	插夯点	10000	正方形	10	10	≤200
	4	加固夯(插夯点+复夯点)	4000	正方形	5	8	≤100
	5	满夯点	2000	搭接型	1/4 夯印搭接	2	—

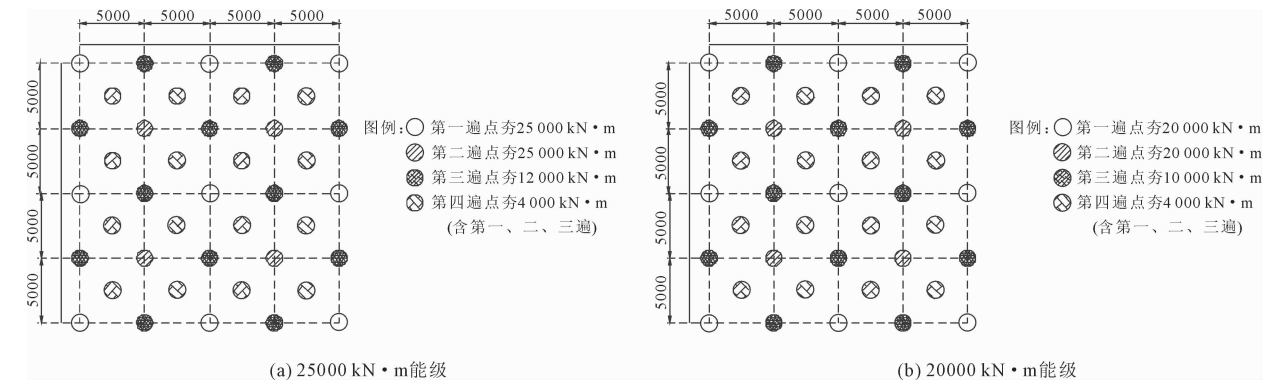


图 2 强夯夯点布置示意图

3 试验结果与分析

3.1 夯沉量结果分析

图 3 为夯击能为 25 000 kN·m 的第一遍主夯点、第二遍主夯点、第三遍插夯点和第四遍复夯和插夯累计夯沉量随夯击次数的变化,图中 A1—A9、B1—B4、C1—C12、D1—D16 代表各单击夯击点。从图中可以看出:第四遍复夯和插夯的累计夯沉量明显小于第一遍点夯、第二遍点夯和第三遍插夯的累计夯沉量,表明夯后地基得到了较好的处理。

图 4 为夯击能为 20 000 kN·m 的试夯区第一遍主夯点、第二遍主夯点、第三遍插夯点和第四遍复夯和插夯累计夯沉量随夯击次数的变化,图中 A1—A9、B1—B4、C1—C12、D1—D16 代表各单击夯击点。从图中可以看出第四遍复夯和插夯的累计夯沉量明显小于第一遍点夯、第二遍点夯和第三遍插夯的累计夯沉量,表明夯后地基得到了较好的处理。

3.2 重型动力触探试验结果分析

通过夯前夯后地基土体重型动力触探锤击数对比,来反映强夯对杂填土体的加固效果。图 5 为 25 000 kN·m 能级试夯区不同深度夯前夯后重型

动力触探锤击数对比曲线,可以看出,在 20 m 的深度范围内,夯前地基(18#和 Q1#检测点)的动力触探锤击数为 4~7 击,夯后地基夯间(2#检测点)和夯点(1#检测点)的动力触探锤击数明显大于夯前地基(18#和 Q1#检测点)的动力触探锤击数。数据表明,强夯处理显著提升了各深度土层的密实度,初步判定,25 000 kN·m 能级强夯加固影响深度自起夯面算起不小于 18.0 m。

图 6 为 20 000 kN·m 能级试夯区不同深度夯前夯后重型动力触探锤击数对比曲线,可以看出,在 16.00 m 的深度范围内,夯前地基(17#和 Q1#检测点)的动力触探锤击数为 5~7 击,夯后地基夯间(2#检测点)和夯点(1#检测点)的动力触探锤击数明显大于夯前地基(17#和 Q1#检测点)的动力触探锤击数。数据表明,强夯处理显著提升了各深度土层的密实度,初步判定,20 000 kN·m 能级强夯加固影响深度自起夯面算起不小于 16.0 m。

3.3 平板载荷试验结果分析

处理后地基承载力检测依据《建筑地基处理技术规范》^[10](JGJ 79—2012)附录 A 进行,平板载荷试验如图 7 所示,承压板采用面积为 2 m²(承压板

直径 b 为 0.80 m) 的圆形钢筋混凝土板,其沉降主要由板四周的 4 个沉降观测点的百分表观测。试验采用慢速法^[15],加荷期间,每级荷载施加后按第 10 min、20 min、30 min、45 min、60 min 测读载荷板的沉

降量,以后每半小时读数一次,直至达到稳定标准,然后施加下一级荷载。稳定标准为每小时位移变形量小于 0.1 mm 并连续出现两次,最大试验荷载为 400 kPa。

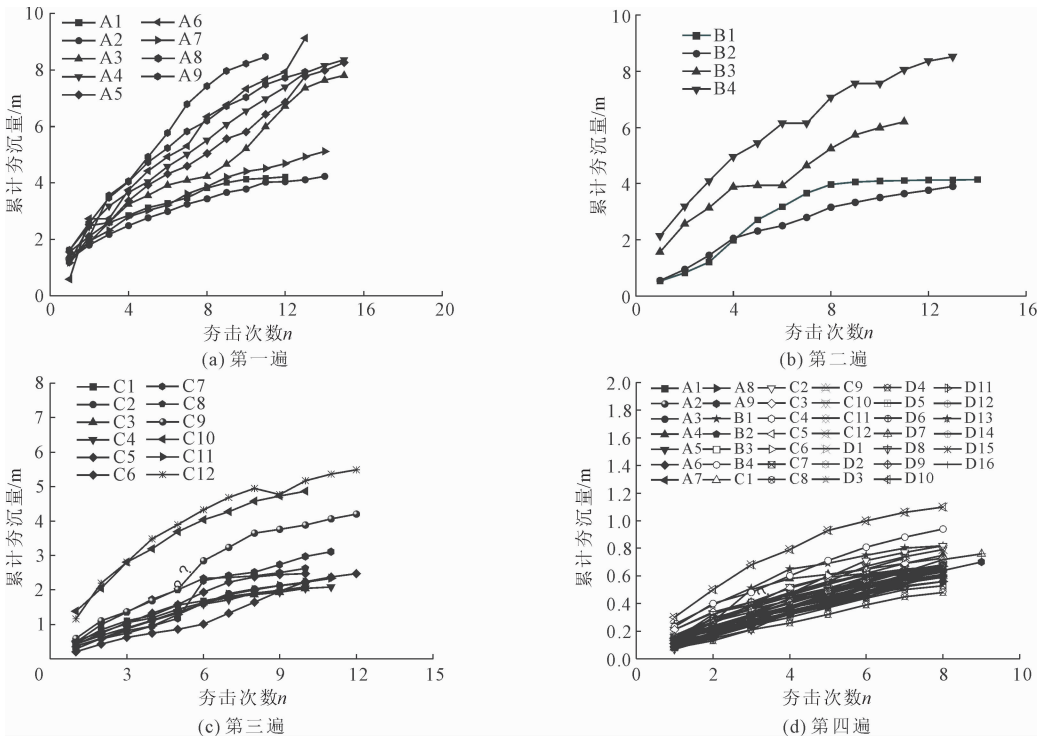


图 3 25 000 kN · m 能级的累计夯沉量随夯击次数变化曲线

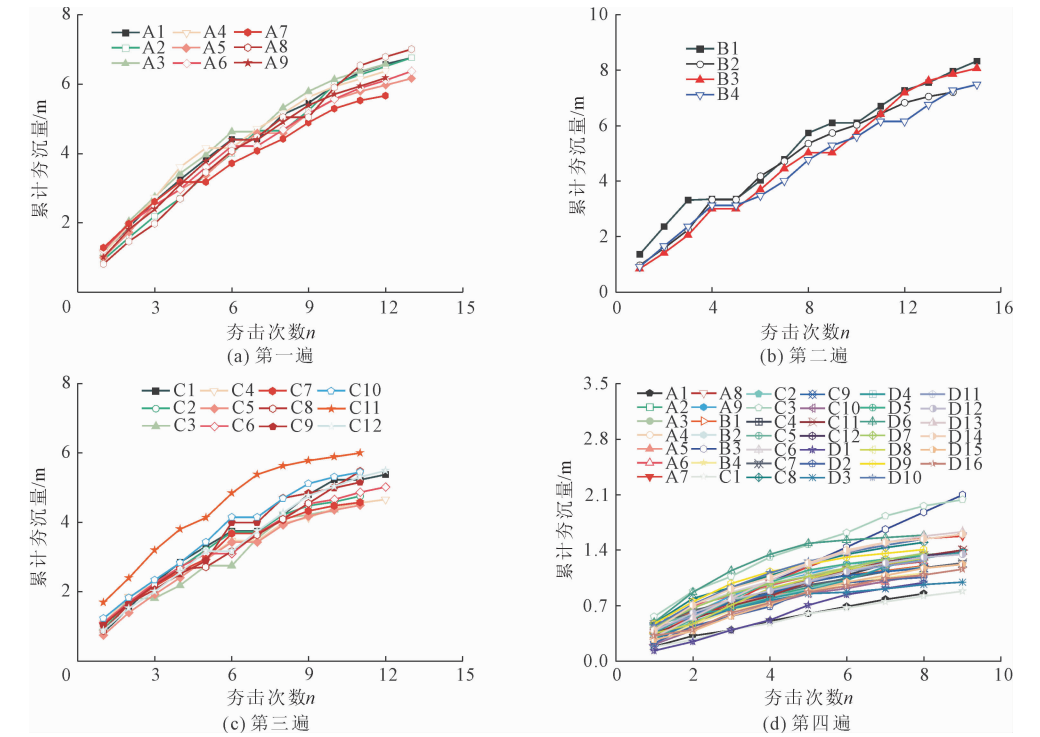


图 4 20 000 kN · m 能级的累计夯沉量随夯击次数变化曲线

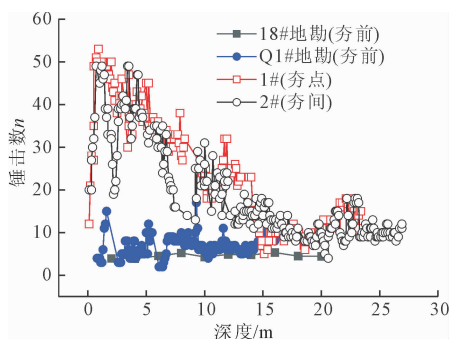


图 5 25 000 kN·m 能级夯后夯后重型动力触探锤击数对比曲线

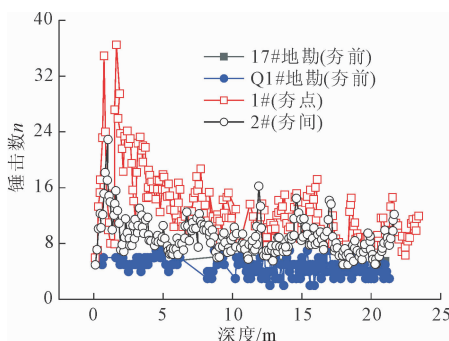


图 6 20 000 kN·m 能级夯后夯后重型动力触探锤击数对比曲线



图 7 平板载荷试验

图 8(a) 为 25 000 kN·m 能级夯后地基土体的荷载-沉降曲线。从图 8(a) 可以看出, 当试验荷载加载到最大荷载 400 kPa 时, 试验点 P1、P2 和 P3 的累计沉降量分别为 18.88 mm、28.83 mm 和 21.57 mm 均小于 48 mm, 未超过压板直径 b 的 0.06 倍, 卸荷至零后残余沉降介于 16.46 mm ~ 23.13 mm 之间。试验点 P1、P2 和 P3 的荷载-沉降曲线均呈缓变型, 比例界限点不明显, 依据《建筑地基处理技术规范》^[10] (JGJ 79—2012) A0.7 条款, 取相对变形 $s/b = 0.010$ (s 为承压板的沉降量, b 为承压板的直径) 所对应的荷载, 确定的地基承载力特征值分别为 317 kPa、211 kPa 和 287 kPa, 均大于最大加载压

力的一半时, 按相对变形确定的承载力特征值不应大于最大加载压力的一半, 因此各试验点地基承载力特征值均按最大加载压力 400 kPa 的一半 200 kPa 取值。

图 8(b) 为 20 000 kN·m 能级夯后地基土体的荷载-沉降曲线。分析结果与图 8(a) 基本一致。

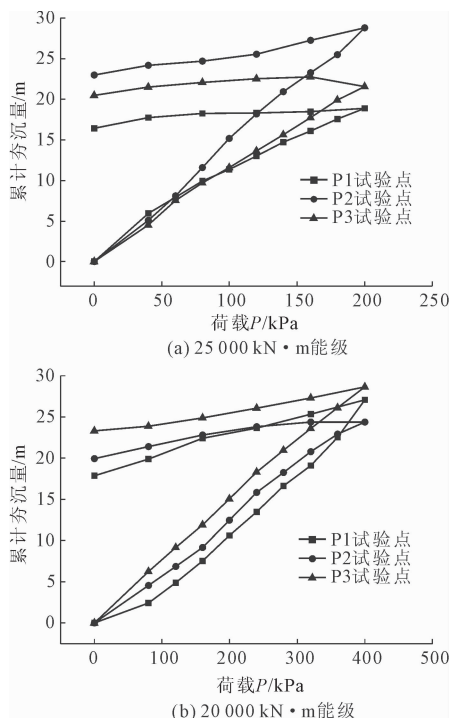


图 8 平板载荷试验曲线

3.4 压缩模量试验结果分析

根据平板载荷试验结果, 依据《建筑地基检测技术规范》^[15] (JGJ340—2015) 第 4.4.6 条变形模量计算公式, 见式(1), 计算得到 25 000 kN·m 能级、20 000 kN·m 能级试夯区检测点在荷载板影响深度范围内的土体变形模量分别为 18.00 MPa ~ 23.00 MPa、18.00 MPa ~ 26.00 MPa。进一步, 根据式(2)换算得到土体压缩模量为 22.00 MPa ~ 28.00 MPa、22.00 MPa ~ 31.00 MPa。

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pb}{s} \quad (1)$$

式中: E_0 为变形模量, MPa; I_0 为刚性承压板的形状系数, 圆形承压板取 0.785; μ 为土体泊松比, 根据经验取 0.27; p 为 $p-s$ 曲线线性段的压力值, kPa; b 为承压板直径, m; s 为与 p 对应的沉降量, mm。

$$E_s = E_0/\beta \quad (2)$$

式中: E_s 为压缩模量, MPa; β 为经验系数, $\beta = 1 - 2\mu^2/(1 - \mu)$ 。

图 9 为根据动力触探试验经验值^[16] 和室内土

工试验得到的 25 000 kN·m 和 20 000 kN·m 能级夯后地基土体压缩模量随深度的变化对比图。综合考虑平板载荷试验、室内试验和动力触探试验结果,综合分析,可得 25 000 kN·m 能级试夯区在 18 m 深度范围内的土体压缩模量达到 15 MPa;当深度 >18 m 时,土体压缩模量达到 10 MPa。20 000 kN·m 能级试夯区在 16 m 深度范围内的土体压缩模量达到 15 MPa;当深度 >16 m 时,土体压缩模量达到 10 MPa。

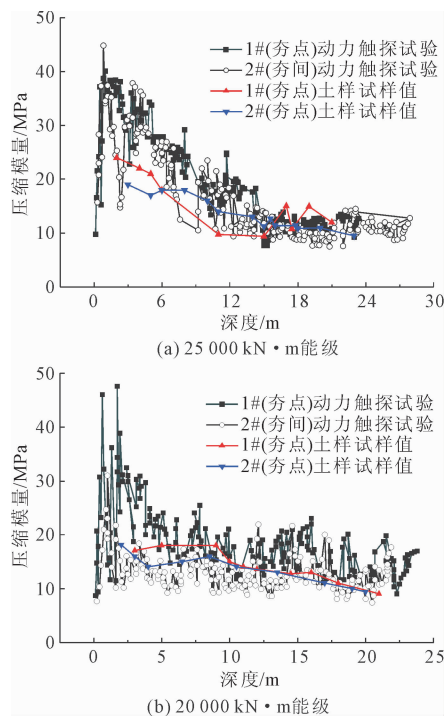


图 9 夯后地基土体压缩模量随深度的变化曲线

3.5 瑞利面波测试结果分析

根据瑞利面波测试结果(图 10),不同能级强夯处理前后地基土体的波速变化特征如下:25 000 kN·m 能级作用下,夯前地基在 0.00 m~3.00 m、3.00 m~6.00 m 和大于 6.00 m 深度范围内的瑞利波速分别为 110 m/s~130 m/s、130 m/s~150 m/s 和大于 150 m/s;夯后相应深度范围的波速分别提升至 190 m/s~210 m/s、210 m/s~230 m/s 和大于 230 m/s。测试数据显示,在 16.00 m 深度范围内,25 000 kN·m 和 20 000 kN·m 能级强夯处理后波速较夯前分别提高 34.4% 和 60.9%。依据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[14]中瑞利波速与地基力学参数的对应关系,处理后地基平均波速大于 200 m/s,表明杂填土地基密实度得到显著改善。经换算,处理后地基承载力特征值可达 200 kPa,变形模量大于 20 MPa,满足地基承载力及变形控制要求。

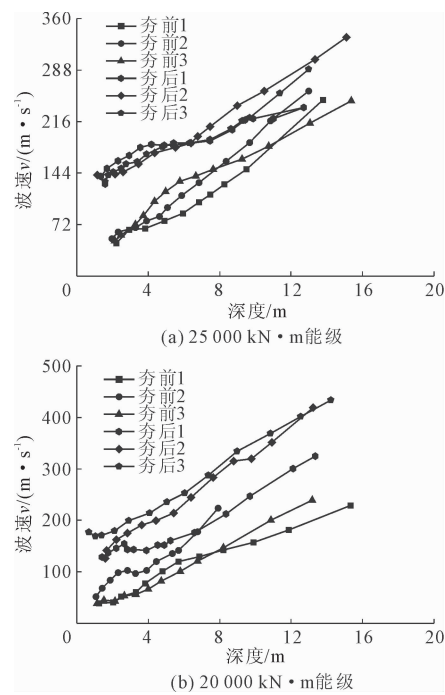


图 10 瑞利波波速随深度变化曲线

3.6 加固效果综合评价

通过夯沉量观测、动力触探、平板载荷及瑞利面波测试等多种检测方法验证,25 000 kN·m 与 20 000 kN·m 能级强夯处理后,地基承载力均大于 200 kPa,有效加固深度分别达 18.0 m 与 16.0 m,压缩模量提升至 15 MPa,瑞利波速较夯前提高 34.4%~60.9%,各项指标均满足设计要求,杂填土密实度与均匀性显著改善。工程实践表明,对于加固后效果检测,平板载荷试验结果准确可靠、适用土类广,能反映地基真实变形特性,但设备庞大、测试周期长,影响深度有限,不宜用于大面积检测;动力触探测试速度快、效率高,适用于大面积检测;瑞利波测试快速便捷、适用性广,但对参数计算精度要求较高,难以直接获取详细的土层力学指标。基于检测结果与工程适用性分析,建议施工阶段通过夯沉量进行过程控制,验收阶段采用动力触探试验、瑞利波进行全域快速检测,对于结构敏感区域开展一定数量平板载荷试验。

4 结 论

(1) 通过夯沉量观测、动力触探、平板载荷及瑞利面波测试等多种检测方法验证,25 000 kN·m 与 20 000 kN·m 能级强夯处理后,地基承载力均 ≥ 200 kPa,有效加固深度分别达 18.0 m 与 16.0 m,压缩模量提升至 15 MPa,瑞利波速较夯前提高 34.4%

~60.9%,各项指标均满足设计要求,杂填土密实度与均匀性显著改善。

(2) 针对类似大厚度杂填土地基,建议采用超高能级强夯(20 000 kN·m~25 000 kN·m),夯击次数8~9次/遍,夯点间距按能级动态调整。施工前需通过试夯确定区域适应性参数,并以夯沉量稳定性和多方法检测结果作为质量控制依据。

参考文献:

- [1] 王家磊,韩进宝,马新岩,等.高能级强夯加固深厚杂填土地基现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1154-1163,1189.
- [2] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等.10000 kN·m高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究[J].岩土工程学报,2005(7):759-762.
- [3] Wei Yingjie, Yang Yuyou, Wang Jintai, et al. Performance evaluation of high energy dynamic compaction on soil-rock mixture geomaterials based on field test[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01734.
- [4] 韩晓雷,席亚军,水伟厚,等.15000 kN·m超高能级强夯法处理湿陷性黄土的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(3):91-93.
- [5] 詹金林,水伟厚,何立军,等.18000 kN·m能级强夯处理深厚填海碎石土的试验[J].工业建筑,2010,40(4):96-99.
- [6] 何立军,秦劭杰,刘增华,等.25000 kN·m高能级强夯地基标贯和动探试验对比研究[J].地基处理,2023,5(4):271-278.
- [7] 史光富,雷 渊,贺建虎,等.25000 kN·m超高能级强夯处理大厚度填土地基现场试验研究[J].地基处理,2023,5(S2):12-18.
- [8] 王孝健,谢锦波.超高能级强夯加固深厚抛石填海地基工艺试验研究[J].中国港湾建设,2025,45(1):55-61.
- [9] 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.
- [10] 建筑地基处理技术规范:JGJ79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 朱建民,董宝志,于永堂,等.杂填土斜坡场地强夯振动传播规律与影响参数分析[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-11[2025-05-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20250225.1121.004.html>.
- [12] Fu Jianbao, Zhang Ruiqi, Liu Aimin. Filed test on 25000 kN·m ultra high energy level dynamic consolidation on large thickness gravel foundation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018,439(5):1-6.
- [13] 工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [15] 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.
- [16] 秦振华.软土地基平板载荷试验稳定标准的研究[J].岩土工程学报,2017,39(S2):87-90.

(上接第 22 页)

- [13] 王永维,罗苓隆,吴 体,等.优秀历史建筑保护的基本原则[J].四川建筑科学研究,2010,36(3):1-4.
- [14] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [15] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [16] Huang Wei, Kazemi-Kamyab H, Sun Wei. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Cement & Concrete Composites, 2017,77:86-101.
- [17] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求:T/CECS 10107—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [18] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T50129—2011[S].北京:建筑工业出版社,2011.
- [19] 砌体结构工程施工质量验收规范:GB 50203—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [20] 试验基本力学性能试验规范:GB/T 50129—2011[S].北京:住房和城乡建设部,2011.
- [21] 刘 宇.UHP-ECC加固极低强度砂浆的砖砌体柱轴压试验及施工技术分析[J].水利与建筑工程学报,2025,23(5):106-112.