

强夯法处理高填方地基的探索与实践

董宝志¹, 赵翊豪², 赵霞¹, 文字坤¹, 文晨宇¹, 季江峰²

(1. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030031; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 近年来我国山区、丘陵地区通过挖填造地方式形成了大量高填方地基, 强夯法因处理厚度大、效率高等优点, 在高填方地基处理中逐步得到推广应用。本文介绍了强夯法在黄土、杂填土及碎石土高填方地基处理中的应用实例, 结果表明: (1) 黄土高填方地基经 8 000 kN·m 及 12 000 kN·m 能级强夯处理后, 土体孔隙率降低, 干密度增加, 8 m 及 12 m 深度范围内大部分土层的湿陷性已消除, 其余部分经处理后变为湿陷性轻微, 地基承载力显著增加, 地基承载力特征值不小于 200 kPa; (2) 碎石土高填方地基经 3 000 kN·m 及 10 000 kN·m 能级强夯处理后, 地基承载力特征值可达 250~461 kPa, 不仅能够满足设计要求, 并且还有足够大的安全储备; (3) 杂填土高填方地基经 25 000 kN·m 能级强夯处理后, 有效加固深度自起夯面起算不小于 18 m, 在 0~20 m 范围内平均动力触探锤击数提高 2.0~7.9 倍, 地基承载力特征值大于 200 kPa。

关键词: 强夯法; 黄土; 碎石土; 杂填土; 高填方地基

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0001-11

Exploration and practice of dynamic compaction for treating high fill foundation

DONG Bao-zhi¹, ZHAO Yi-hao², ZHAO Xia¹, WEN Yu-kun¹, WEN Chen-yu¹, JI Jiang-feng²

(1. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, Shanxi, China;

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

Abstract: In recent years, a large number of high fill foundations have been formed in mountainous and hilly areas of China through excavation and filling. Due to the advantages of large treating thickness and high efficiency, dynamic compaction has gradually been promoted and applied in the treatment of high fill foundations. This article introduces the application examples of dynamic compaction in the treatment of high fill foundations of loess, miscellaneous fill, and crushed stone. The results show that: (1) After the high fill foundation of loess is treated with 8 000 kN·m and 12 000 kN·m energy level dynamic compaction, the porosity of the soil decreases, the dry density increases, and the collapsibility of a large part of the soil layer in the depth range of 8 m and 12 m has been eliminated. The remaining parts become slightly collapsible after treatment, and the bearing capacity of the foundation significantly increases. The characteristic value of foundation bearing capacity shall not be less than 200 kPa. (2) After being subjected to 3 000 kN·m and 10 000 kN·m energy level dynamic compaction treatment, the characteristic value of the foundation bearing capacity can reach 250-461 kPa, which not only meets the design requirements but also has sufficient safety reserves. (3) After being treated with 25 000 kN·m energy level dynamic compaction, the effective reinforcement depth of the high fill foundation of miscellaneous fill is not less than 18 m from the compaction surface. Within the range of 0-20 m, the average number of dynamic penetration hammers increases by 2.0-7.9 times, and the characteristic value of the foundation bearing capacity is greater than 200 kPa.

Key words: dynamic compaction; loess; crushed stone; miscellaneous fill; high fill foundation

0 引言

我国是一个山区、丘陵面积较大的国家, 这些地区的显著特点是地形起伏、沟壑纵横, 为增加工

程建设用地, 陆续通过挖填造地方式开发建设用地, 形成了大面积、大厚度、大方量的高填方工程。这里高填方工程涉及地质条件复杂的原场地和填料性质特殊的填筑体, 面临着填方场地的沉降及不

均匀沉降、高陡挖填边坡稳定性等诸多问题。特别是高填方地基作为未来的建筑用地使用,若不对其进行加固处理可能会出现填方地基持续下沉难以稳定,最终导致建(构)筑物的开裂破坏甚至倒塌。为此,需要控制填方压实度,提高地基承载力,减少工后沉降与不均匀沉降。

在西北黄土丘陵沟壑地区,大量采用黄土作为回填料,黄土以粉粒为主,具有结构疏松、孔隙大、低湿度、垂直节理发育、成分均匀无层理及遇水湿陷等特征。近年来,不少学者对强夯处理湿陷性黄土地基的相关问题展开了研究,如翁效林等^[1]通过研究表明,夯击作用下能够改变黄土结构的自重湿陷性,减少地基沉降量;詹金林等^[2]提出了3 000~15 000 kN·m 高能级强夯处理湿陷性黄土设计、施工及检测应注意的问题;王兰民等^[3]建议黄土地震陷性处理可结合湿陷性处理进行,但应注意压实系数要高于0.94;吕秀杰等^[4]提出使用强夯加固湿陷性黄土地基宜采取极限孔隙比作为夯击效果检测标准,夯点采用三角形布置,夯法选择重锤低落。为了准确评价黄土强夯效果,贺为民等^[5]建立了采用静力触探法评价强夯地基承载力的定量方法和标准;王吉利等^[6]、冯志焱等^[7]采取孔内深层强夯法对黄土地基进行加固,并通过载荷试验结果直接评价加固效果。

在山区填谷等工程中,大量使用碎石土作为填料,碎石土地基具有不均匀性强、离散性大、孔隙率高等特点。近年来,一些学者对碎石土地基的加固与处理方法开展了相关研究工作,如赵振东等^[8]发现经过高能级处理后的碎石土地基,地基承载力特征值和变形模量不仅满足设计要求,而且有足够的安全储备;谢春庆等^[9]依托高填方工程,总结出了适合碎石土地基的系统处理方法,提出了工后沉降估算公式;黄涛等^[10]结合现场试验表明,强夯结合碾压的方法,可以加速填方层的固结,缩短加固时间。为了准确评价强夯加固效果,郭成超等^[11]通过探地雷达定性探测强夯作用的影响深度和范围;彭振斌等^[12]提出了利用瑞利波波速临界值来判定强夯效果;刘远等^[13]通过多道瞬态瑞雷波法与取土测试、常规载荷试验结合的方法定量检测评价了强夯地基的加固效果。

城市发展一般由中心地带向周围扩延,经常将已有的、早期规划的填埋场囊括其中,填埋场中有大量的杂填土。杂填土地基具有结构松散、密实度低、强度低、压缩性高及均匀性差的缺陷。杂填土

内部常含腐殖质以及亲水性、水溶性物质,将导致地基产生大的沉降及浸水湿陷变形。从土体性质上可以看出杂填土与碎石土、湿陷性黄土具有相似的特点,若对其不进行加固处理,直接作为填料使用,必然会引起一系列的工程问题。王国强等^[14]通过载荷试验发现经强夯后的地基承载力有显著提高,提高幅度达0.9~2.5倍,最高达3.5倍,压缩模量达到7.0~9.5 MPa;李浩等^[15]通过工程实例表明使用强夯技术加固杂填土,地基承载力得到明显提高;王家磊等^[16]提出在强夯土层、夯锤能级和夯点布置方式一定的情况下,存在最佳单点夯击次数,且与地基土层夯密“饱和状态”相对应;万建军等^[17]对淤泥质土上覆杂填土地基进行强夯处理后,地基承载力满足设计要求,并确定了各种施工参数对处理效果的影响;江立群^[18]发现杂填土地基在进行强夯处理后,地基承载力满足设计要求,且基本消除了填土湿陷性。

综上,强夯法作为一种高效经济的加固方法,受到了广泛的推广,经历多年发展,现在强夯能级可达30 000 kN·m,最大处理深度可达20 m。本文介绍了强夯法在黄土、碎石土及杂填土高填方地基中的实际应用案例,为强夯法在高填方地基处理中的设计、施工和质量检测积累经验。

1 强夯法处理既有黄土高填方地基实例

1.1 工程概况

甘肃兰州某10万吨负极材料项目,位于兰州新区秦川园区,纬四十八路以南、经五十路以西,场地东西方向长约954 m,南北方向宽约528 m,占地面积约50.4万m²,总建筑面积约27.4万m²,主要建设内容包括生产作业区、仓库、公辅设施、厂前区等。根据设计要求,该地区经强夯处理后地基承载力特征值不小于200 kPa,压缩模量不小于8 MPa,强夯影响深度范围内消除湿陷性或降低至轻微湿陷。

1.2 工程地质概况

工程场地地层包括第四系全新统人工填土层(Q₄^{ml})、全新统冲洪积层(Q₄^{al+pl})、上更新统风积层(Q₃^{col})、上更新统冲洪积层(Q₃^{al+pl})、第三系中新统咸水河组岩层(N_{1X})。岩土基本物理力学性质指标统计如表1所示,黄土高填方地基原场地典型地层剖面如图1所示。室内试验结果显示,场地内①层

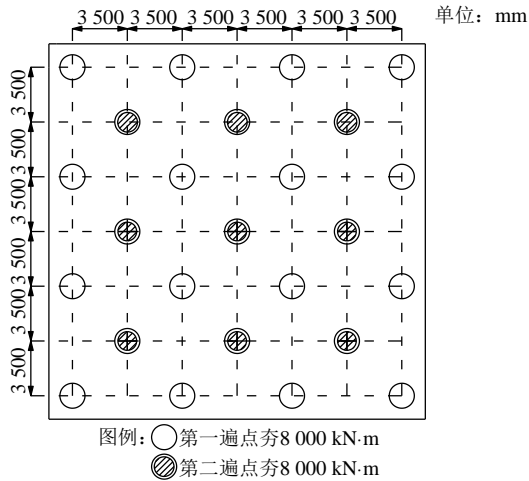


图2 区域I夯点布置图

Fig. 2 Layout of tamp spots in Area I

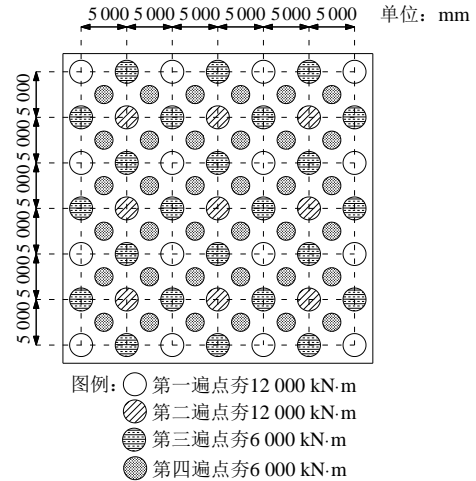


图3 区域II夯点布置图

Fig. 3 Layout of tamp spots in Area II

表2 黄土高填方地基强夯设计参数

Table 2 Design parameters for dynamic compaction of loess high fill foundation

分区	主点夯			辅点夯			满夯			夯沉量平均值/m	布点间距/m	是否注水
	夯击能/ (kN·m)	夯击数	遍数	夯击能/ (kN·m)	夯击数	遍数	夯击能/ (kN·m)	夯击数	遍数			
区域I	8 000	8	2	—	—	—	2 000	2	1	0.76	7×7	是
区域II	12 000	10	2	6 000	8	2	2 000	2	1	1.33	10×10	是

1.4 强夯处理效果

图4为区域I经8 000 kN·m能级强夯后,压缩模量及湿陷系数随深度的变化趋势,从图4中可以看出:1号探井在8 m处理范围内消除湿陷性,土体的湿陷系数为0.003~0.014,压缩模量为2.7~13.1 MPa;2号探井在8 m处理范围内,土体的湿陷系数为0.009~0.024,其中探井开挖深度在1 m、2 m、5 m、6 m、8 m处的湿陷系数小于0.015,为非湿陷性黄土,3 m、4 m、7 m处的湿陷系数为0.015~0.030,为湿陷性轻微,压缩模量为3.10~11.0 MPa;3号探井在8 m处理范围内,湿陷系数为0.007~0.031,其中探井开挖深度在1 m、2 m、5 m、7 m处的湿陷系数小于0.015,定义为非湿陷性黄土,3 m、4 m处的湿陷系数为0.015~0.030,为湿陷性轻微,6 m处的湿陷系数为0.030~0.070,为湿陷性中等。

图5为区域II经12 000 kN·m能级强夯后,压缩模量及湿陷系数随深度的变化趋势,从图5中可以看出:1号探井处理深度范围内的湿陷系数为0.006~0.079,其中探井在1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、8 m深度处的湿陷系数小于0.015,为非湿陷性黄土,7 m处的湿陷系数为0.015~0.030,为湿陷性轻微,9 m、11 m处的湿陷系数为0.030~0.070,为湿陷性中等,10 m处的湿陷系数大于

0.070,为湿陷性强烈,处理深度范围内的土体压缩模量为4.1~12.7 MPa;2号探井处理深度范围内的湿陷系数为0.002~0.015,其中探井开挖深度在1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m、8 m、9 m、10 m处的湿陷系数小于0.015,为非湿陷性黄土,11 m处的湿陷系数为0.015~0.030,为湿陷性轻微,处理深度范围内的土体压缩模量为6.2~9.6 MPa;3号探井处理深度范围内的湿陷系数为0~0.060,其中探井开挖深度在2 m、3 m、4 m、5 m、7 m、8 m、9 m、11 m处的湿陷系数小于0.015,为非湿陷性黄土,1 m、10 m处的湿陷系数为0.015~0.030,为湿陷性轻微,6 m处的湿陷系数为0.030~0.070,定义为湿陷性中等,处理深度范围内的压缩模量为5.2~13.2 MPa。

检测点平板载荷试验的荷载-沉降关系曲线如图6所示,由图6可知,各检测点在最大荷载400 kPa下均未发生破坏,加压荷载为200 kPa时,各试验点的“s/d”(s为沉降量,d为承压板直径)值介于0.005 0~0.009 3,均小于0.010。根据规范中关于平板载荷试验取值的有关规定,地基承载力特征值不超过1/2最大加载量,因此本试夯区经8 000 kN·m及12 000 kN·m能级强夯处理后,地基承载力特征值不小于200 kPa。

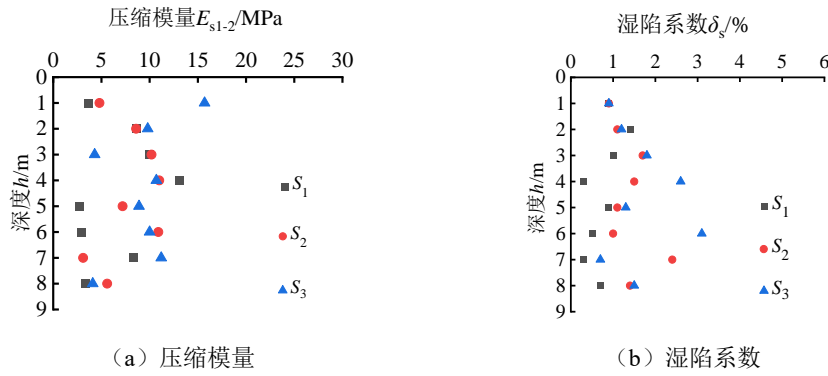


图 4 区域I强夯结果

Fig. 4 Dynamic compaction results of Area I

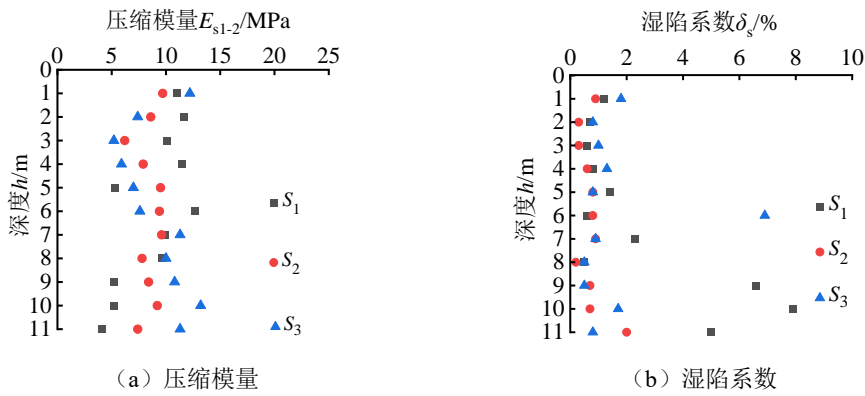


图 5 区域II强夯结果

Fig. 5 Dynamic compaction results of Area II

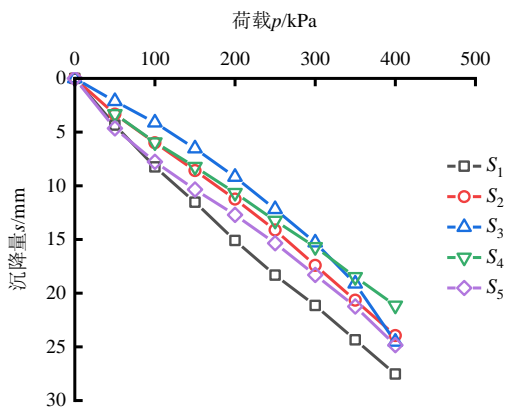


图 6 平板载荷试验曲线

Fig. 6 Plate loading test curve

2 强夯法处理既有碎石土高填方地基实例

2.1 工程概况

四川省乐山市某 10 万吨正极材料项目用地面积约 20 万 m^2 , 总建筑面积约 13 万 m^2 。该项目主要包括 2 个标准厂房、办公用房、倒班楼、研发楼、其他配套用房及附属设施工程。根据建筑物设计地坪标高及场地现状标高计算, 工程场地的最大填方

厚度约 37 m, 最大挖方厚度约 15 m, 采用强夯法进行地基加固处理, 设计要求地基处理后的地基承载力特征值不小于 250 kPa。

2.2 工程地质概况

本工程场区地层由第四系全新统人工填土 (Q_4^{al})、残坡积层粉质黏土 (Q_4^{dl+cl}) 及侏罗系中统沙溪庙组 (J_2) 砂质泥岩组成, 典型地层剖面如图 7 所示, 各岩土层的基本特征如下: ①素填土: 红褐色、黄褐色、灰褐色、灰黑色, 松散, 稍湿, 为场地平整期间原场地挖方区弃土回填, 回填时间最长约 1 年, 属欠固结土, 揭露厚度为 0.5~42.0 m; ②粉质黏土: 灰褐色、灰黑色, 可塑, 局部夹少量软塑, 稍有光泽, 干强度中等, 韧性低, 揭露厚度为 1.0~3.9 m, 粉质黏土基本物理力学性质指标统计如表 3 所示; ③砂质泥岩: 根据风化程度可分为③₁层强风化砂质泥岩及③₂层中风化砂质泥岩。③₁层和③₂层均为砖红色、棕红色, 泥质胶结, 主要成分为黏土矿物, 岩体基本质量等级为V级。砂质泥岩的基本物理力学性质指标统计如表 4 所示。

本工程填方区的主要填料为设计地坪标高以上开挖的土层, 主要为各类粉质黏土和砂泥碎石组成的碎石土。

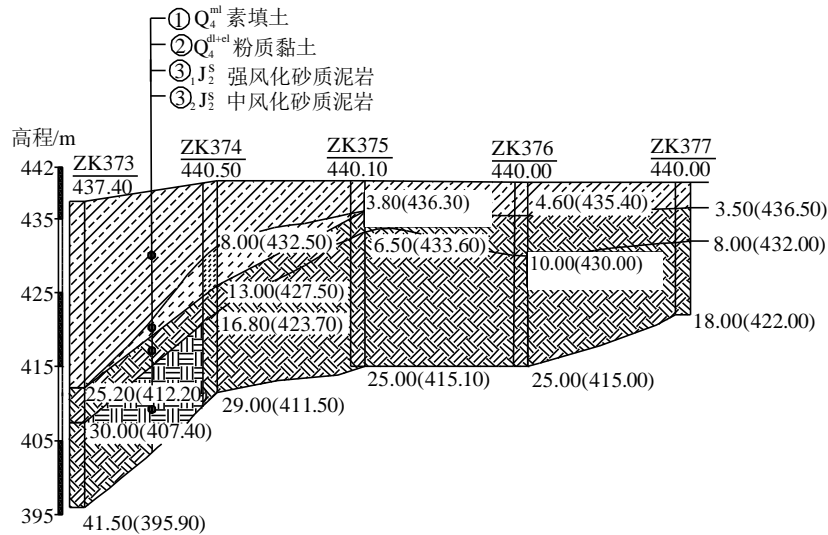


图7 碎石土高填方地基原场地典型地层剖面图

Fig. 7 Typical stratigraphic profile of crushed stone high fill foundation original site

表3 粉质黏土基本物理力学性质指标统计表

Table 3 Statistical table of physical and mechanical property indicators of silty clay

指标	试样数	范围	平均差	标准差	变异系数	标准值
含水率 $w/\%$	30	22.9~29.0	26.4	1.30	0.05	—
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	30	1.85~2.01	1.93	0.05	0.02	—
比重 G_s	30	2.70~2.71	2.70	0.01	0.00	—
孔隙比 e	30	0.65~0.87	0.78	0.06	0.07	—
液限 $\omega_L/\%$	30	30.90~37.20	34.10	1.58	0.05	—
塑限 $\omega_P/\%$	30	15.30~22.30	19.70	1.58	0.08	—
塑性指数 I_P	30	11.40~16.50	14.30	1.36	0.09	—
液性指数 I_L	30	0.28~0.68	0.46	0.11	0.23	—
压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	30	0.22~0.39	0.30	0.05	0.18	—
压缩模量 E_{s1-2}/MPa	30	4.82~8.29	6.19	1.04	0.17	—
黏聚力 c/kPa	30	25.00~42.00	31.00	4.23	0.13	30.0
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	30	12.40~18.90	15.00	1.55	0.10	14.5

表4 砂质泥岩基本物理力学性质指标统计表

Table 4 Statistical table of physical and mechanical property indicators of sandy mudstone

岩石类别	指标	试样数	范围	平均差	标准差	变异系数	标准值
强风化砂质泥岩	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	100	2.35~2.18	2.29	0.04	0.02	—
	单轴抗压强度 R_a/MPa	100	3.07~0.46	1.49	0.50	0.33	1.44
中风化砂质泥岩	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	210	2.57~2.31	2.43	0.04	0.02	—
	单轴抗压强度 R_a/MPa	210	12.09~1.16	5.88	1.71	0.29	5.76

2.3 强夯处理概况

本工程综合考虑建筑物场平设计标高、填筑体分层强夯厚度、料源试验指标、上部结构荷载等因素，采取的地基处理措施如下：

(1) 挖方区采用 3 000 kN·m 低能级强夯，分

3 遍进行夯实处，挖方区夯点布置如图 8 所示。

第一遍采用 3 000 kN·m 能级点夯，夯点间距为 5.0 m，收锤标准为最后两击平均夯沉量不大于 5 cm；第二遍采用 3 000 kN·m 能级点夯，夯点间距为 5.0 m，夯点位于第一遍夯点所形成的正方形的

中心, 收锤标准按最后两击平均夯沉量不大于 5 cm; 第三遍为 1 500 kN·m 能级满夯, 每点夯 3 击, 要求 1/4 夯印搭接, 用于夯实地表浅层填土。既有碎石土高填方地基强夯设计参数如表 5 所示。

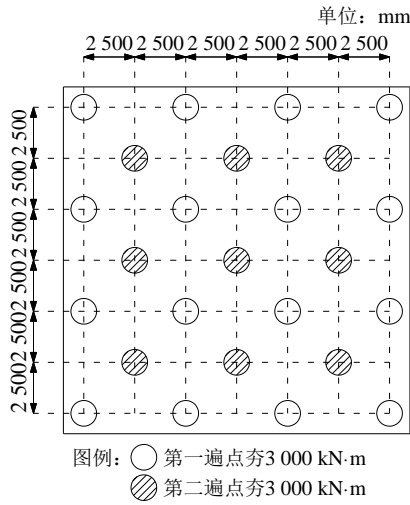


图 8 挖方区夯点布置图

Fig. 8 Layout of tamp spots in excavation area

(2) 填方区采用 10 000 kN·m 能级分层强夯处理, 分层厚度为 8 m。现场施工时, 原场地与填筑体交接面的处理如图 9 所示, 在挖方区设计标高下 3.0 m 深度内按 1:2 开挖成斜坡, 3.0~8.0 m 深度内按 1:2 开挖成台阶, 每级台阶高度为 1.0 m, 每级台阶宽度为 2.0 m。

(3) 填方区分 4 遍进行夯实, 填方区夯点布置如图 10 所示, 第一、二遍采用 10 000 kN·m 能级点夯, 夯点采用正方形布置, 夯点间距为 9.0 m, 第二遍夯点位于第一遍夯点所形成的正方形的中心, 两遍强夯点采用隔行跳打施工, 第一、二遍收锤标准为最后两击平均夯沉量不大于 20 cm; 第三遍为

5 000 kN·m 能级插点夯, 位于第一、二遍夯点所成正方形边线的中心, 收锤标准按最后两击平均夯沉量不大于 10 cm, 夯击完成后及时将夯坑填平; 第四遍为 3 000 kN·m 能级满夯, 每点夯 3 击, 1/4 夯印搭接, 以夯实地基浅部填土。具体强夯设计参数如表 5 所示。

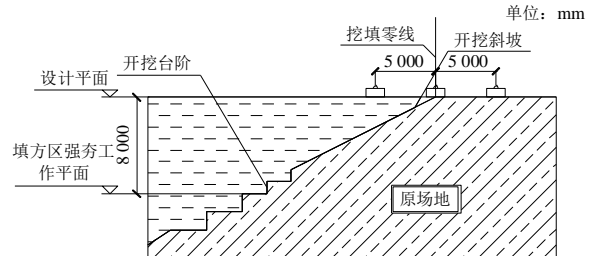


图 9 原场地与填筑体交接面处理示意图

Fig. 9 Interface treatment between the original site and the filling body

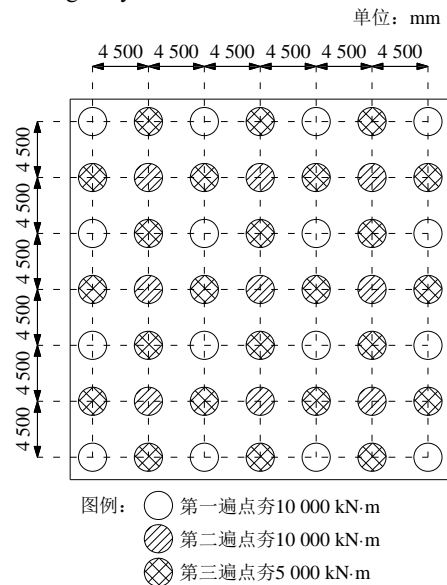


图 10 填方区夯点布置图

Fig. 10 Layout of tamp spots in the filling area

表 5 既有碎石土高填方地基强夯设计参数

Table 5 Design parameters for dynamic compaction of crushed stone high fill foundation

处理区域	主夯能级/ (kN·m)	遍数	夯型	单击夯能/ (kN·m)	分层厚 度/m	夯点间距	夯点 布置	收锤 标准
挖方区	3 000	1	点夯	3 000	—	5.0 m	正方形	≤ 5 cm
		2	点夯	3 000		5.0 m	正方形	≤ 5 cm
		3	满夯	1 500		1/4 夯印搭接	搭接型	—
填方区	10 000	1	点夯	10 000	8.0	9.0 m	正方形	≤ 20 cm
		2	点夯	10 000		第一遍间插点	正方形	≤ 20 cm
		3	点夯	5 000		第一、二遍间插点	正方形	≤ 10 cm
		4	满夯	3 000		1/4 夯印搭接	搭接型	—

2.4 强夯处理效果

强夯处理结束后, 在强夯地基处理范围内, 每

500 m² 设置一处检测点, 进行平板载荷试验。根据平板载荷试验结果绘制 p-s 曲线, 强夯区域 p-s 曲

线基本可以分为存在明显转折点和不存在明显转折点两类,典型试验曲线如图11所示。当 $p-s$ 曲线具有明显直线段及转折点时,以转折点所对应的荷

载定为地基承载力特征值;对于 $p-s$ 曲线无明显转折点时,取 $s=0.01d$ (s 为沉降量, d 为承压板直径)对应的荷载值为地基承载力特征值。

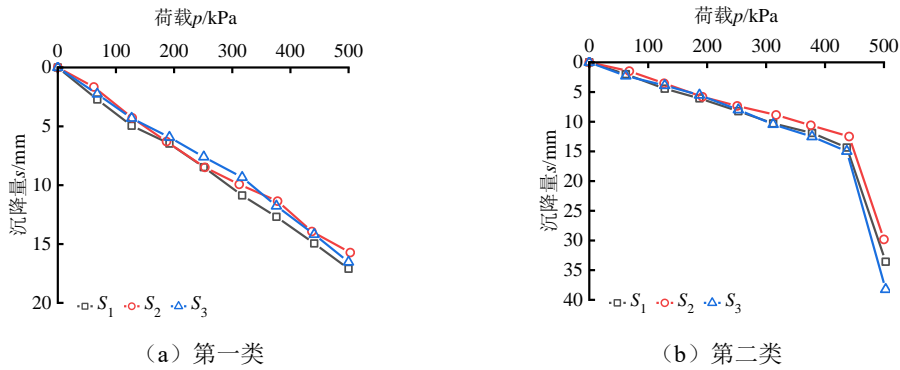


图11 平板载荷试验 $p-s$ 曲线
Fig. 11 Plate loading test $p-s$ curve

由上述方法确定的各检测点地基承载力特征值统计结果如图12所示。从图12中可以看出,碎石土高填方地基经强夯加固后的承载力特征值满足设计要求的 $f_{ak} \geq 250$ kPa,部分检测点承载力特征值远大于设计要求的 $f_{ak} \geq 250$ kPa,有足够大的安全储备。

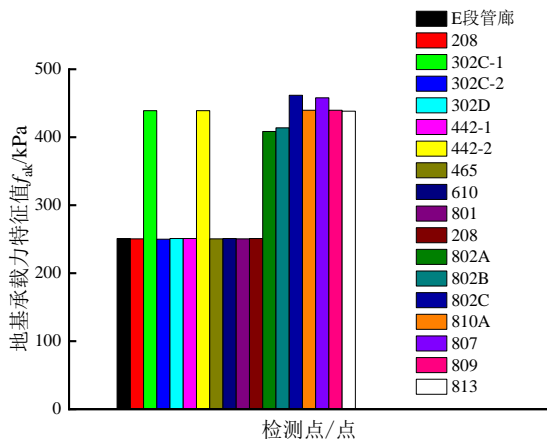


图12 各检测点地基承载力特征值统计结果
Fig. 12 Statistical results of characteristic values of bearing capacity in each testing point

3 强夯法处理既有深厚杂填土高填方地基实例

3.1 工程概况

山西省阳泉市某独立储能电站项目占地面积约7万 m^2 ,地基处理面积约5万 m^2 。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。根据建(构)筑物特点,场地地基处理采用两种方式,综合楼、主变压器等对承载力和变形要

求高的采用SDDC法,其余采用超高能级强夯法。

3.2 工程地质概况

本工程场区地层由第四系全新统人工杂填土(Q_4^m)、页岩(C_2^b)、砂岩(C_2^s)及灰岩(O_2^f)组成,典型地层剖面如图13所示,各岩土层的基本特征如下:①杂填土(Q_4^m):杂色,主要由炉渣、灰渣、风化基岩碎块、卵石等组成,均匀性较差。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。杂填土动力触探试验结果统计表6所示。动力触探 $N_{63.5}$ 修正值在2.8~6.1击,平均4.4击,层厚4.9~24.4 m。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5~10 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1.2~6.4 MPa,平均3.6 MPa,属极软岩。③砂岩(C_2^s):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为12.3~34.5 MPa,平均21.6 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为43.7~59.3 MPa,平均51.5 MPa,岩石质量等级为III类,属坚硬岩。

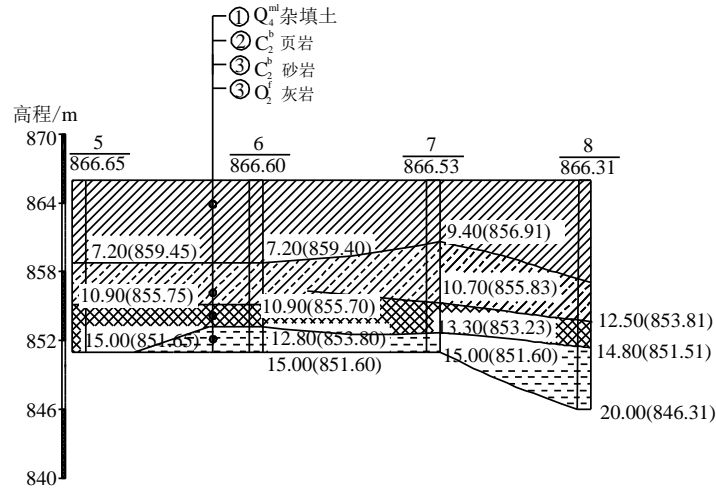


图 13 杂填土高填方地基原场地典型地层剖面图

Fig. 13 Typical stratigraphic profile of the original site of high fill foundation with miscellaneous fill

表 6 杂填土动力触探试验结果统计表

Table 6 Statistical table of dynamic penetration test results for miscellaneous fill

数据类别	统计数量	范围/击	平均差/击	标准差/击	变异系数
实测值	175	3.0~9.0	5.2	1.407	0.267
修正值	175	2.8~6.1	4.4	0.812	0.183

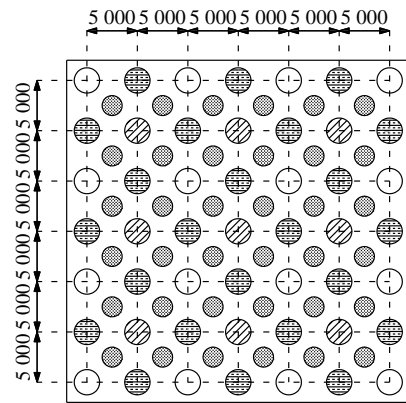
3.3 强夯处理概况

本工程综合考虑建筑物场平设计标高、填筑体分层强夯厚度、料源试验指标、上部结构荷载等因素, 采取的地基处理措施如下:

本工程各建筑物场地整平标高为 866.0 m, 基础埋深为 2.0~6.6 m, 其基底标高为 859.4~864.0 m, 基底位于杂填土中。根据建筑物设计要求, 对厚度超过 20 m 的杂填土区域采用 25 000 kN·m 能级强夯处理。既有深厚杂填土高填方地基强夯设计参数如表 7 所示, 夯点布置如图 14 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, 夯击能级为 25 000 kN·m; 第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形的中心, 夯击能级仍为 25 000 kN·m; 第三遍插夯夯点位于第一遍与第二遍夯点所形成的正方形的中心, 夯击能级为 12 000 kN·m; 第四遍加固夯位于第一、二、三遍夯点原点位置及所成正方形的中心位置, 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。

单位: mm



图例: ○ 第一遍夯点 25 000 kN·m
 ⊘ 第二遍夯点 25 000 kN·m
 ⊗ 第三遍夯点 12 000 kN·m
 ● 第四遍夯点 4 000 kN·m

图 14 夯点布置图

Fig. 14 Layout of tamp spots

表 7 既有深厚杂填土高填方地基强夯设计参数

Table 7 Design parameters for dynamic compaction of existing thick miscellaneous fill high fill foundation

遍数	类别	能级/(kN·m)	夯点布置	夯点间距/m	击数
1	点夯	25 000	正方形	10	12
2	点夯	25 000	正方形	10	12
3	插夯	12 000	正方形	10	10
4	加固夯	4 000	正方形	5	8
5	满夯	2 000	搭接型	1/4 夯印搭接	2

3.4 强夯处理效果

典型场地的夯后平板载荷试验 $p-s$ 曲线如图 15 所示。由图 15 可知, 当试验荷载加载到最大荷载 400 kPa 时, S_1 、 S_2 和 S_3 试验点的累计沉降量分别为 18.88 mm、21.57 mm 和 28.83 mm, 均未超过压板直径的 0.06 倍, 卸荷至零后残余沉降介于 16.46~23.13 mm。 S_1 、 S_2 和 S_3 试验点的荷载-沉降曲线均呈缓变型, 比例界限点不明显, 而按相对变形 $s/b=0.010$ (b 为承载板直径) 确定的地基承载力特征值分别为 317 kPa、211 kPa 和 287 kPa, 均大于最大加载荷载的 1/2, 根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012), 地基承载力特征值为 200 kPa。

强夯前后不同深度土层平均重型动力触探试验结果如表 8 所示。由表 8 可知, 夯后地基(1 号为夯点、2 号为夯间检测点)较夯前地基(18 号和 Q1 号检测点)的平均动力触探锤击数明显提高, 在

0~3 m、3~6 m、6~9 m、9~12 m、12.0~16.5 m、16.5~20.0 m 内分别提高约 7.9、7.1、4.8、3.8、2.4、2.0 倍, 强夯有效加固深度自起夯面起算不小于 18 m。

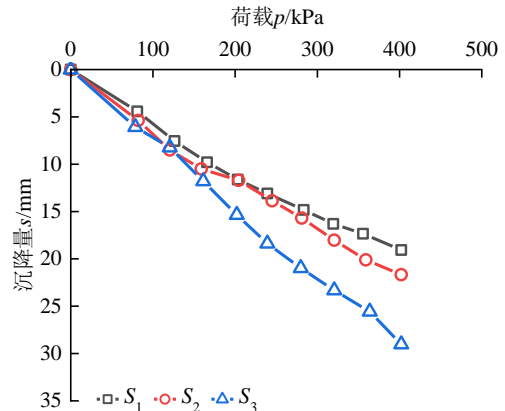


图 15 夯后平板载荷试验 $p-s$ 曲线

Fig. 15 Plate loading test $p-s$ curves after dynamic compaction

表 8 强夯前后平均重型动力触探试验结果

Table 8 Average heavy dynamic penetration test results before and after dynamic compaction

深度范围/m	夯前			夯后			夯后较夯前的平均动力触探锤击数之比
	18 号	Q1 号	平均值	1 号	2 号	平均值	
0~3	4	6	5.0	43	36	39.5	7.9
3~6	4	7	5.5	39	39	39.0	7.1
6~9	5	7	6.0	32	26	29.0	4.8
9~12	5	7	6.0	23	22	22.5	3.8
12.0~16.5	5	7	6.0	15	14	14.5	2.4
16.5~20.0	5	—	5.0	—	10	10.0	2.0

4 结 论

本文基于工程实例, 介绍了强夯法在黄土、杂填土及碎石土高填方地基处理时的设计、施工方法及处理效果, 结果表明:

(1) 黄土高填方地基经 8 000 kN·m 及 12 000 kN·m 能级强夯处理后, 土体孔隙率降低, 干密度增加, 8 m 及 12 m 深度范围内的大部分土层的湿陷性已消除, 其余部分经处理后变为湿陷性轻微, 地基承载力显著增加, 地基承载力特征值不小于 200 kPa。

(2) 碎石土高填方地基经 3 000 kN·m 及 10 000 kN·m 能级强夯处理后, 地基承载力特征值可达 250~461 kPa, 不仅能够满足设计要求, 并且还有足够大的安全储备。

(3) 杂填土高填方地基经 25 000 kN·m 能级强夯处理后, 有效加固深度自起夯面起算不小于

18 m, 在 0~20 m 范围内平均动力触探锤击数提高 2.0~7.9 倍, 地基承载力特征值大于 200 kPa。

参考文献

- [1] 翁效林, 王玮, 刘保健. 湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 17-22.
WENG Xiao-lin, WANG Wei, LIU Bao-jian. Model test on deformation characteristics of widening collapsible loess roadbed and dynamic compaction method treatment effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 17-22.
- [2] 詹金林, 水伟厚. 高能级强夯处理湿陷性黄土设计施工检测应注意的问题[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 457-460, 464.
ZHAN Jin-lin, SHUI Wei-hou. Collapsible loess

- foundation treatment and the quality control for dynamic compaction method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S2): 457-460, 464.
- [3] 王兰民, 袁中夏, 王峻, 等. 强夯处理后黄土地基的动力特性与抗震性能[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(增刊 2): 2840-2847.
WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Jun, et al. Dynamic characteristics and seismic resistance of loess ground treated with dynamic compaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(S2): 2840-2847.
- [4] 吕秀杰, 龚晓南, 李建国. 强夯法施工参数的分析研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1628-1632.
LU Xiu-jie, GONG Xiao-nan, LI Jian-guo. Research on parameters of construction with dynamic compaction method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1628-1632.
- [5] 贺为民, 范建. 强夯法处理湿陷性黄土地基评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊 2): 4095-4101.
HE Wei-min, FAN Jian. Evaluation of collapsible loess subgrade treated by dynamic compaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S2): 4095-4101.
- [6] 王吉利, 刘怡林, 栾茂田, 等. 强夯法处理黄土路基检测方法试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(增刊 1): 4562-4567.
WANG Ji-li, LIU Yi-lin, LUAN Mao-tian, et al. Testing study of quality detection methods of loess roadbed treated with dynamical compaction method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(S1): 4562-4567.
- [7] 冯志焱, 林在贯, 郑翔. 孔内深层强夯法处理湿陷性黄土地基的一个实例[J]. *岩土力学*, 2005, 26(11): 1834-1836, 1848.
FENG Zhi-yan, LIN Zai-guan, ZHENG Xiang. An example of treating collapsible loess by super down hole deep compaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1834-1836, 1848.
- [8] 赵振东, 赵翔宇. 高能级强夯处理碎石土地基的应用研究[J]. *工程勘察*, 2011, 39(10): 29-32.
ZHAO Zhen-dong, ZHAO Xiang-yu. Application study on the treatment of gravel soil foundation by using high energy level dynamic consolidation[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, 39(10): 29-32.
- [9] 谢春庆, 刘汉超, 甘厚义. 高填方块碎石夯实地基变形的研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(1): 38-41.
XIE Chun-qing, LIU Han-chao, GAN Hou-yi. Study on deformation of ground under high fill of block and detritus[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(1): 38-41.
- [10] 黄涛, 刘辉. 强夯结合碾压控制高填方沉降的机理研究[J]. *西南交通大学学报*, 2007, 42(2): 158-162.
HUANG Tao, LIU Hui. Study on mechanism of high fill settlement controlled by dynamic compaction and bedded-earth rolling[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(2): 158-162.
- [11] 郭成超, 乐金朝, 黄江华. 探地雷达法检测强夯效果的试验[J]. *物探与化探*, 2010, 34(6): 836-838.
GUO Cheng-chao, YUE Jin-chao, HUANG Jiang-hua. A test on the effect of the ground-penetrating radar detection technology for strong punning[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(6): 836-838.
- [12] 彭振斌, 王继华, 陈安, 等. 地基强夯效果的综合评价[J]. *无损检测*, 2005, 27(6): 324-326.
PENG Zhen-bin, WANG Ji-hua, CHEN An, et al. Comprehensive evaluation of the effect of foundation dynamic consolidation[J]. *Nondestructive Testing*, 2005, 27(6): 324-326.
- [13] 刘远, 孙进忠, 赵体, 等. 强夯地基处理效果的多道瞬态瑞雷波检测[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(6): 2910-2916.
LIU Yuan, SUN Jin-zhong, ZHAO Ti, et al. Quantitative evaluation of dynamic consolidation effect of foundation based on multi-channel transient Rayleigh wave method[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2910-2916.
- [14] 王国强, 李瑛霞, 吴道祥, 等. 厚层含淤泥新杂填土地基强夯法处理效果分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(12): 1868-1872.
WANG Guo-qiang, LI Ying-xia, WU Dao-xiang, et al. Effect analysis of heavy tamping treatment of foundation of a thick layer of recently deposited miscellaneous fill containing mud[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(12): 1868-1872.
- [15] 李浩, 刘东甲, 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, 35(6): 814-819.