

【工程应用】

直接强夯法处理低含水量大厚度 湿陷性黄土的效果分析

徐文涛^{1,2}, 董宝志³, 于永堂^{1,2*}, 赵霞³, 曹立人⁴, 岳峰⁴

(1. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030031; 4. 兰州工大工程检测科技有限公司, 甘肃 兰州 730207)

摘 要: 我国西北地区湿陷性黄土分布广泛, 湿陷性强, 湿陷等级高, 天然含水量低, 夯实处理的难度大。为评估直接强夯法处理大厚度、低含水量和强湿陷性黄土的效果, 在兰州市某工业建设项目场平工程的填方区和挖方区分别开展了 8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m 和 25 000 kN·m 强夯能级的强夯试验, 并进行了地基土取样室内试验和地基承载力原位检测。试验检测结果表明: 当地基土的含水量平均值在 6.4%~8.8% 范围内, 经 8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m 和 25 000 kN·m 能级强夯处理后, 挖方区消除黄土湿陷性的深度分别为 2 m、4 m、5 m 和 11 m, 填方区消除黄土湿陷性的深度分别为 3 m、7 m、8 m 和 12 m; 强夯处理后地基承载力特征值均不小于 220 kPa。相关成果可为低含水量、大厚度湿陷性黄土的强夯处理设计和施工提供参考。

关键词: 强夯法; 低含水量; 黄土; 湿陷性; 承载力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0134-10

Effect analysis of direct dynamic compaction on collapsible loess with low moisture content and large thickness

XU Wen-tao^{1,2}, DONG Bao-zhi³, YU Yong-tang^{1,2*}, ZHAO Xia³, CAO Li-ren⁴, YUE Feng⁴

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

2. College of civil engineering Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

3. Shanxi Jin Baodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, Shanxi, China;

4. Lanzhou Gongda Engineering Testing Technology Co., Ltd., Lanzhou 730207, Gansu, China)

Abstract: Collapsible loess is widely distributed in Northwest China, with strong collapsibility, high collapsibility grade, low natural moisture content, and it is difficult to tamp. In order to evaluate the effect of direct dynamic compaction on loess with large thickness, low water content and strong collapsibility, dynamic compaction tests with dynamic compaction energy levels of 8 000 kN·m, 12 000 kN·m, 16 000 kN·m and 25 000 kN·m were carried out in the filling area and excavation area of an industrial construction project in Lanzhou, and the indoor test of foundation soil sampling and in-situ detection of foundation bearing capacity were carried out. The test results show that the average water content of the local foundation soil varies from 6.4% to 8.8%. After dynamic compaction with 8 000 kN·m, 12 000 kN·m, 16 000 kN·m and 25 000 kN·m energy level, the depth of eliminating loess collapsibility in the filling area is 3 m, 7 m, 8 m and 12 m respectively, and the depth of eliminating loess collapsibility in the excavation area is 2 m, 4 m, 5 m and 11 m respectively. The characteristic value of foundation bearing capacity after dynamic compaction treatment are larger than 220 kPa. The relevant results can provide reference for the design and construction of dynamic compaction treatment of low water content and large thickness collapsible loess.

Key words: dynamic compaction method; low moisture content; loess; collapsibility; bearing capacity

收稿日期: 2022-03-16

作者简介: 徐文涛 (1998—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事湿陷性黄土地基处理技术研究。E-mail: 2065580005@qq.com。

*通信作者: 于永堂 (1983—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 高级工程师, 主要从事湿陷性土地基处理技术和岩土原位测试技术的研发与应用。
E-mail: yuyongtang@126.com。

0 引言

我国西部黄土丘陵沟壑区广泛分布着湿陷性黄土^[1-2],黄土受水浸湿后,在一定压力下土体结构会迅速破坏^[3],并产生显著的附加下沉,特别是低含水量、大厚度湿陷性黄土,湿陷性强,产生的危害更大。在湿陷性黄土场地上开展工程建设,如何消除黄土湿陷性,提高地基承载力,是工程中关注的焦点问题。根据土质条件和建筑物类别不同,湿陷性黄土处理方法主要有强夯法、挤密桩法、换土垫层法和预浸水法等,其中强夯法因施工简单、速度快和效果好等优点,近年来被广泛应用^[4-9]。湿陷性黄土是一种典型的非饱和土,采用强夯法处理时,利用冲击型的动力荷载使土中的孔隙减小,土体变得密实,从而消除或部分消除黄土湿陷性,提高地基承载力,减少地基变形。

近年来,国内学者们结合具体工程案例,对强夯法处理湿陷性黄土的效果进行了一系列现场试验研究,并基于试验结果总结分析了中、高能级强夯处理湿陷性黄土的效果^[10-12]。随着强夯设备性能提升、地基处理深度的增大,超高能级强夯逐步在工程中得到应用,有学者研究了20 000 kN·m超高能级强夯处理经分层碾压(或分层强夯)后的填筑体,使回填土分阶段再压缩,大幅减少场地的工后沉降,缩短填筑体压缩达到稳定时间^[13]。我国西北地区气候干旱缺水,黄土的天然含水量低。由于黄土富含碳酸钙盐胶体,当含水量降低时,土颗粒由于胶体黏结强度增大,地基处理所需的能量增大,此外,随着含水量降低,土的液性指数也逐渐降低,土的坚硬程度也越来越大,地基处理需要更高的能量。采用高能级、超高能级强夯对大厚度、低含水量湿陷性黄土进行直接强夯处理的实施效果如何,目前尚缺乏相关经验和试验资料。

本次在兰州新区某工业建筑场平工程的挖方区和填方区分别开展了8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m和25 000 kN·m能级的试夯试验,通过现场取样及室内测试获得了强夯前后不同深度地基土的基本物理力学性质指标,并通过现场载荷试验测试了夯后地基土的承载力特征值,分析了夯沉量和夯击次数关系,比较了强夯法有效加固深度实测值与经验值及规范值,总结了不同强夯能级消除黄土湿陷性的效果,相关成果可为大厚度湿陷性黄土的强夯处理设计和施工提供参考。

1 试验概况

1.1 地质条件

本工程场地位于兰州新区皋兰县西岔镇,属于典型的黄土丘陵沟壑地貌,后经大规模的人工挖填改造,现状地形平缓开阔。在钻探揭露的岩土层深度范围内,场地内分布的主要地层有:人工填土层(Q₄^{ml})、第四系全新统冲洪积层(Q₄^{al+pl})、第四系上更新统风积层(Q₃^{col})、第四系上更新统冲洪积层(Q₃^{al+pl})、第三系中新统咸水河组岩层(N_{1X}),各层岩性分述如下:

①素填土(Q₄^{ml}):松散-稍密,以粉土为主,土质较纯,结构松散,系近期人工回填而成。

②黄土状粉土(Q₄^{al+pl}):稍密,褐黄色,以粉粒为主,土质较纯,可见白色盐质斑点,针状孔隙发育,干强度低、韧性低,稍湿,分布于沟谷深部区域,具微弱水平层理。

③马兰黄土(Q₃^{col}):分为3个亚层:③₁层马兰黄土:稍密,褐黄色,以粉粒为主,土质较纯,干强度低、韧性低,具微弱水平层理。稍湿,场地分布不连续。③₂层马兰黄土:中密褐黄色,以粉粒为主,土质较纯,干强度低、韧性低,具微弱水平层理。稍湿,场地分布较广,局部间夹少量稍密薄层。③₃层马兰黄土:密实,褐黄色,以粉粒为主,土质较纯,干强度低、韧性低。稍湿,场地分布较广,局部间夹少量中密薄层。

④角砾(Q₃^{al+pl}):中密-密实,杂色,呈半胶结状,一般粒径5~15 mm,最大粒径60 mm,次棱状为主,分选性中等,颗粒间呈无序排列,粒径大于2 mm的颗粒质量约占总质量的55%~65%,母岩类型主要为片岩、砂岩,隙间为粉土、粉砂、砾砂充填,稍湿,场地分布不连续。

⑤砂砾岩(N_{1X}):强风化,褐红色,泥、钙质胶结,角砾含量约5%~30%,粒径一般在0.2~1.5 cm之间,块状构造,层理结构,钻进较易,岩芯呈碎块状、饼状、短柱状,风化不均匀,大部手掰易断,少量不易掰断,遇水、空气易软化,属软质岩石。

根据勘察结果,场地内①层素填土、③层马兰黄土均具有湿陷性,湿陷性中等-强烈,②层黄土状粉土和④层角砾不具湿陷性。①层素填土的湿陷系数 δ_s 为0.023~0.132,自重湿陷系数 δ_{zs} 为0.003~0.087,湿陷性中等-强烈;③₁层马兰黄土的湿陷系数 δ_s 为0.013~0.153,自重湿陷系数 δ_{zs} 为0.003~

0.130, 湿陷性中等-强烈; ③₂层马兰黄土的湿陷系数 δ_s 为 0.003~0.231, 自重湿陷系数 δ_{zs} 为 0.001~0.230, 湿陷性中等-强烈; ③₃层马兰黄土的湿陷系数 δ_s 为 0.004~0.121, 自重湿陷系数 δ_{zs} 为 0.002~0.113, 湿陷性中等-强烈。填方区自重湿陷量为 1 853.25~1 892.25 mm, 挖方区自重湿陷量为 156.00~3 109.50 mm, 应按自重湿陷性场地考虑; 填方区湿陷量为 1 853.25~1 892.25 mm, 挖方区湿陷量为 309.75~3 206.25 mm, 场地地基湿陷等级均应按IV级(很严重)考虑。

1.2 试夯方案

试夯区在工程场地中的平面位置如图 1 所示。

本次在挖方区和填方区共布置了 8 个试夯区, 其中 S1~S4 位于挖方区, S5~S8 位于填方区, 试夯区 20 m 深度范围内的地层分布及地基土物理力学性质指标见表 1, 采用轻型击实试验测试, 试验土层的最优含水量为 13.7%~13.9%, 最大干密度为 1.77~1.80 g/cm³。试验区 S1、S5 的尺寸为 26m×26m, 其他试验区的尺寸为 35 m×35 m, 满足《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[14] 的有关规定。本次在填方区和挖方区, 分别进行了 8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m、25 000 kN·m 共 4 种能级的试夯试验。要求有效加固影响深度范围内消除黄土湿陷性, 降低地基土的压缩性, 同时要求处理后地基土的承载力特征值 $f_{ak} \geq 200$ kPa。

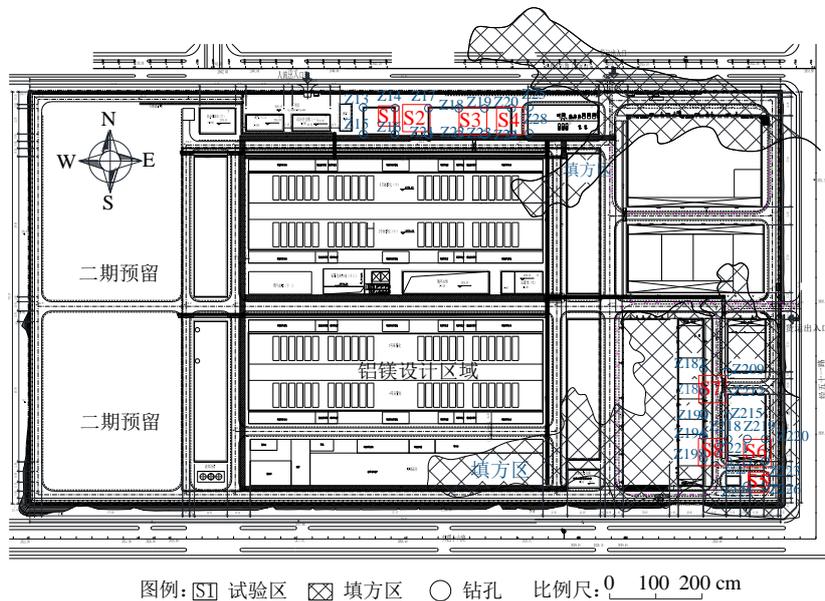


图 1 试夯区的布置示意图

Fig. 1 Layout of the test compaction area

表 1 试夯区地层分布及基本性质指标

Table 1 Stratigraphic distribution in the test compaction area and physical properties

试验区	钻孔编号	20 m 深度范围内地层分布/m		含水量 w/%		干密度 ρ_d /(g/cm ³)		压缩模量 E_{s1-2} /MPa	
		①层素填土	③层马兰黄土	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
S1	Z14	—	20.0	4.9~7.4	6.4	1.35~1.51	1.43	5.4~15.1	9.5
S2	Z17、Z21	—	20.0	5.6~9.8	8.2	1.36~1.42	1.41	3.7~12.8	7.7
S3	Z18、Z19、Z22、Z23	—	20.0	5.1~7.8	6.5	1.35~1.55	1.42	5.2~22.0	11.3
S4	Z20、Z24	—	20.0	5.8~9.3	6.6	1.38~1.52	1.43	5.4~15.3	9.2
S5	Z225、Z226	16.3~18.5	1.5~3.7	5.7~7.5	6.6	1.37~1.51	1.41	7.2~15.1	10.0
S6	Z219、Z220、Z222、Z223	20.0	—	7.9~9.7	8.8	1.25~1.44	1.37	5.5~17.3	9.7
S7	Z186、Z212	9.2~13.9	6.1~10.8	6.5~9.3	8.1	1.31~1.44	1.38	4.9~21.7	10.2
S8	Z194、Z198、Z218、Z221	15.3~20.0	0.0~4.7	5.9~10.5	8.3	1.30~1.41	1.37	8.7~16.8	9.9

试夯试验点的布置分为 2 种类型如图 2 所示, 强夯试验参数见表 2。如图所示, 当强夯能级为

8 000 kN·m 时, 分 2 遍完成, 夯点布置方式见图 2 (a), 第一遍点夯夯点间距为 7 m, 第二遍夯在

正方形中心插点布置; 第三遍为满夯, 1/4 搭接布置, 夯击次数为 2 击。当强夯能级为 12 000 kN·m、16 000 kN·m 和 25 000 kN·m 时, 共分五遍完成, 夯点布置方式见图 2 (b), 第一、二遍为点夯, 第一遍夯点间距为 10 m, 第二遍夯点位于第一遍夯点形

成的正方形中心插点布置; 第三、四遍为插夯, 其中第三遍夯点位于第一遍夯点所成正方形边线中心横向布置, 第四遍夯点位于第一遍夯点所成正方形边线中心纵向布置; 第五遍为满夯, 锤印搭接 1/4, 夯击次数为 2 击。

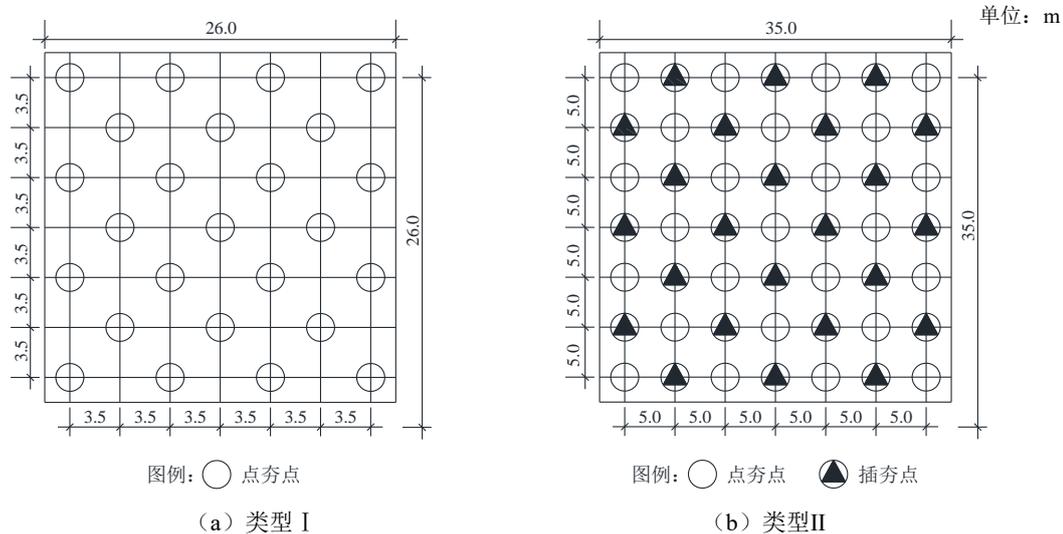


图 2 夯点布置图

Fig. 2 Layout of tamping points of dynamic compaction test

表 2 强夯试验参数

Table 2 Parameters of dynamic compaction test

试验区	场地类型	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	
		点夯 (2遍)	插夯 (2遍)	满夯 (1遍)	直径/m		锤重/kN		点夯	插夯		点夯	插夯
					点夯	插夯	点夯	插夯					
S1	挖方区	8 000	—	2 000	2.5	—	523	—	15.3	—	7	200	—
S5	填方区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S2	挖方区	12 000	6 000	2 000	2.8	2.5	1 380	523	8.6	12.0	10	200	150
S6	填方区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S3	挖方区	16 000	8 000	2 000	2.8	2.8	1 380	1 380	11.5	6.0	10	250	200
S7	填方区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S4	挖方区	25 000	10 000	3 000	2.8	2.8	1 380	1 380	18.5	7.5	10	300	200
S8	填方区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1.3 试夯过程

试夯前清理、平整场地, 标出夯点位置、测量地面高程。夯机就位、夯锤对准夯点位置, 测量夯前锤顶高程, 将夯锤吊到预定高度脱钩自由下落进行夯击, 测量锤顶高程, 往复夯击, 按表 2 中设计的强夯施工参数, 按规定的夯击次数及控制标准, 完成一个夯点的夯击。重复以上工序, 完成第一遍全部夯点的夯击, 用推土机将夯坑填平, 测量场地高程。按上述程序逐次完成全部夯击遍数后, 采用

低能级进行满夯, 将场地表层松土进行夯实, 并测量夯后场地高程变化。

1.4 试验检测

试验结束后, 采用常规土工试验, 按照《土工试验方法标准》对强夯前后不同深度土体的物理和力学性质指标(包括干密度、压缩模量和湿陷系数等)变化; 根据《建筑地基处理技术规范》进行现场平板载荷试验, 确定地基承载力特征值。具体检测内容、方法及测点布置情况如表 3 所示。

表3 检测内容、方法及测点布置情况

Table 3 Detection content, method and arrangement of measuring points

检测内容	检测方法	检测点布置及检测要点
物理力学性质指标	常规土工试验	在试夯区内随机选点, 开挖探井取样进行室内含水量、密度试验、压缩试验和湿陷性试验等, 竖向取样间距均为 1.0 m。
地基承载力特征值	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 2.0 m ²), 首级压力 110 kPa, 分级压力增量 55 kPa, 最大加载量 440 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 夯沉量与夯击次数关系

对各试验区夯点观测值取平均值, 得到夯沉量与夯击次数关系如图 3 所示。由图可知, 第一击的夯沉量最大, 而后随着夯击次数的增加, 单击的夯沉量逐渐减小, 最后趋于稳定值。夯锤对土体施加冲击荷载使土体结构破坏重组, 在结构破坏及重组初期, 夯击次数增加, 夯沉量变化幅度较大, 结构重组完成后, 夯击次数继续增加, 土体变得更密实, 该阶段夯沉量变化幅度较小。

本次在强夯施工过程对挖方区和填方区夯坑的夯沉量测量结果如下:

在挖方区试夯场地内, 当强夯能级为 8 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯点共 25 个, 夯击数平均为 8 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 1.63 m。当强夯能级为 12 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 2.29 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 8 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 15 cm, 夯坑平均深度 1.30 m。当强夯能级为 16 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 25 cm, 夯坑平均深度 2.61 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 8 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 1.35 m。当强夯能

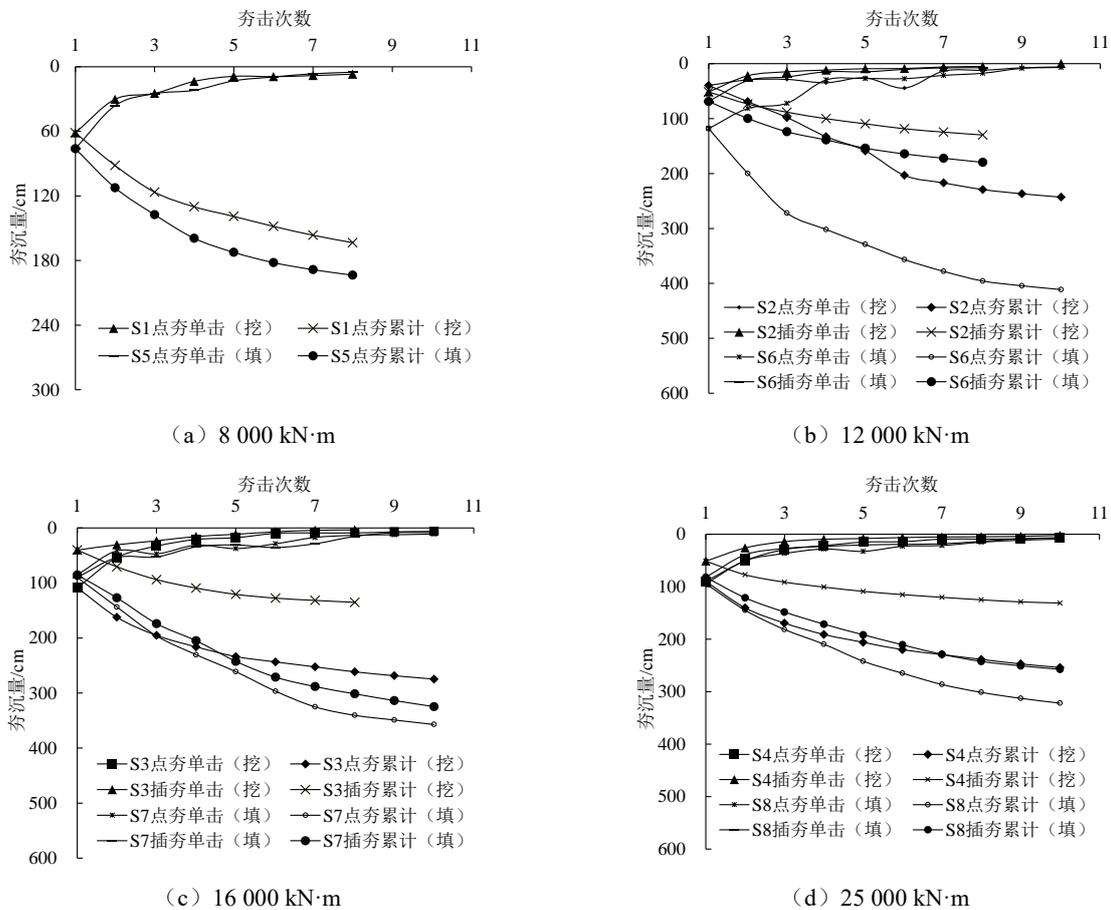


图3 夯坑的夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig. 3 Relationship between tamping settlement and tamping times

级为 25 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 30 cm, 夯坑平均深度 2.38 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 1.25 m。

在填方区试夯场地内, 当强夯能级为 8 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯点共 25 个, 夯击数平均为 8 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 1.94 m。当强夯能级为 12 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 3.96 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 8 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 15 cm, 夯坑平均深度 1.80 m。当强夯能级为 16 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 25 cm, 夯坑平均深度 3.41 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 3.01 m。当强夯能级为 25 000 kN·m 时, 第一、二遍点夯共 25 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 30 cm, 夯坑平均深度 3.01 m; 第三、四遍插夯点共 24 个, 夯击数平均为 10 击, 最后 2 击平均夯沉量小于 20 cm, 夯坑平均深度 2.42 m。

对不同强夯能级的点夯累计夯沉量进行统计分析, 结果如图 4 所示。

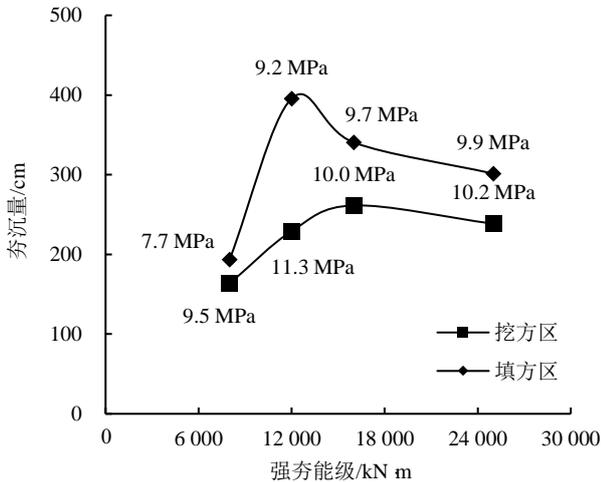


图 4 强夯能级与夯沉量关系曲线

Fig. 4 Relationship between dynamic compaction energy level and compaction amount

由图 4 可知累计夯沉量受地基土结构性强弱以及强夯能级的影响, 在相同强夯能级下, 填方区点夯累计夯沉量大于挖方区点夯累计夯沉量, 这是由于填方区土体结构性弱于挖方区土体结构性, 破坏土体结构所消耗的能量少, 更多的能量用于土体夯

实压密, 从而使填方区的夯沉降量更大。

在填方区或挖方区内, 累计夯沉量随着强夯能级的增加呈现先增大后减小的趋势, 即存在一个最优强夯能级, 低于最优能级时, 累计夯沉量随着强夯能级的增加而逐渐趋于平稳, 但由于场地压缩模量等物理性质指标不同, 导致夯沉量变化。综上所述, 累计夯沉量受强夯(外部因素)和土体结构性(内部因素)共同影响。

2.2 干密度与强夯能级关系

不同强夯能级处理后的地基土, 在 5 m、8 m、11 m 深度范围内, 试夯区的平均干密度如图 5 所示。由图可知, 干密度随强夯能级的增加呈曲线形式增大, 在 12 000 kN·m 和 16 000 kN·m 能级之间存在一个拐点, 拐点左侧干密度增大速度快, 拐点右侧干密度增大速度减小, 曲线逐渐平缓。此外, 挖方区拐点处对应的强夯能级小于填方区拐点处对应的强夯能级; 在相同能级下, 填方区夯实土体的干密度大于挖方区。通过以上分析可知, 当采用强夯法处理湿陷性黄土时, 若以干密度(或压实系数)作为强夯法处理某一深度范围内土层的控制标准, 则应合理选用强夯能级, 避免造成能级浪费。

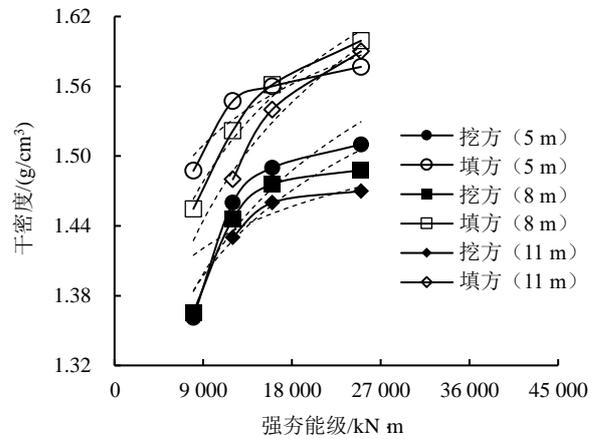


图 5 干密度与强夯能级关系曲线

Fig. 5 Relationship between dry density and dynamic compaction energy level

2.3 强夯前后地基土的变化特征

强夯后各土层的物理力学性质指标沿深度分布情况如图 6 所示, 挖方区在 16 000 kN·m 能级强夯前后的物理力学性质指标对比曲线如图 7 所示。挖方区和填方区夯后地基土的压缩模量变化和消除湿陷性的情况如下:

由图 6 可知, 相同深度范围内, 能级越高, 湿陷系数和自重湿陷系数降低越显著; 能级越高, 干密度和压缩模量提高越显著。在挖方区试夯场地内, 当夯击能 8 000 kN·m 时, 土层的含水量较低,

所检测深度 0~8 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 58.3%, 消除湿陷性深度约为 2 m, 压缩模量的范围为 2.20~8.13 MPa, 平均值为 8.01 MPa。当夯击能为 12 000 kN·m 时, 所检测深度 0~11 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 46.2%, 消除湿陷性的深度约为 4 m, 压缩模量的范围为 3.20~11.87 MPa, 平均值为 11.01 MPa。当夯击能 16 000 kN·m 时, 所检测深度 0~16 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 21.6%, 消除湿陷性的深度约为 5 m, 压缩模量的范围为 4.20~11.85 MPa, 平均值为 10.12 MPa。当夯击能为 25 000 kN·m 时, 所检测深度 0~20 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 70.6%, 湿陷性消除的深度约为 11 m, 压缩模量的范围为 5.60~14.57 MPa, 平均值为 13.19 MPa。

在填方区试夯场地内, 当夯击能为 8 000 kN·m 时, 所检测深度 0~8 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 56.9%, 试验数据离散性较大, 消除湿陷性的深度约为 3 m, 压缩模量范围为 3.30~15.36 MPa, 平均值为 13.87 MPa。当夯击能 12 000 kN·m 时, 所

检测深度 0~11 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 60.9%, 消除湿陷性的深度约为 7 m, 压缩模量范围为 3.00~8.69 MPa, 平均值为 7.45 MPa。当夯击能 16 000 kN·m 时, 所检测深度 0~16 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 50.8%, 消除湿陷性的深度约为 8 m, 压缩模量范围为 2.10~14.61 MPa, 平均值为 12.37 MPa。当夯击能为 25 000 kN·m 时, 所检测深度 0~20 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 56.1%, 消除湿陷性的深度约为 12 m, 压缩模量范围为 4.80~10.25 MPa, 平均值为 10.09 MPa。与挖方区消除湿陷性的对比结果可以发现, 相同强夯能级下, 填方区消除湿陷性的深度大于挖方区。

由图 7 可知, 挖方区场地在 16 000 kN·m 能级强夯处理后, 5 m 以内土体的干密度和压缩模量提高效果显著, 检测深度范围内湿陷系数和自重湿陷系数与夯前相比均降低, 但仅 5 m 范围内的湿陷系数小于 0.015。5 m 范围内, 夯后较夯前湿陷系数降低 53.1%, 自重湿陷系数降低 60.0%, 压缩模量提高 26.6%, 干密度提高 8.1%。

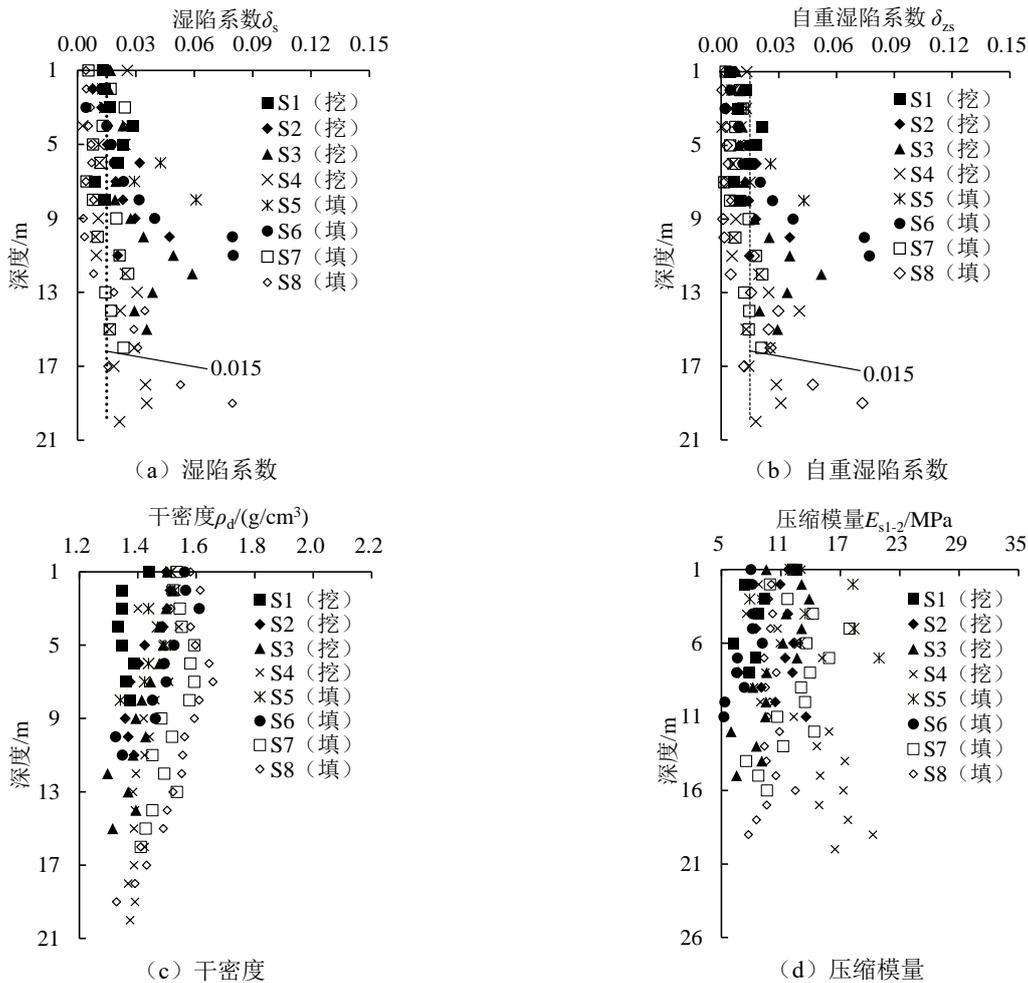


图 6 挖填方试夯区夯后主要物理力学性质指标对比

Fig. 6 Comparison of main physical and mechanical properties after tamping in excavation and filling area

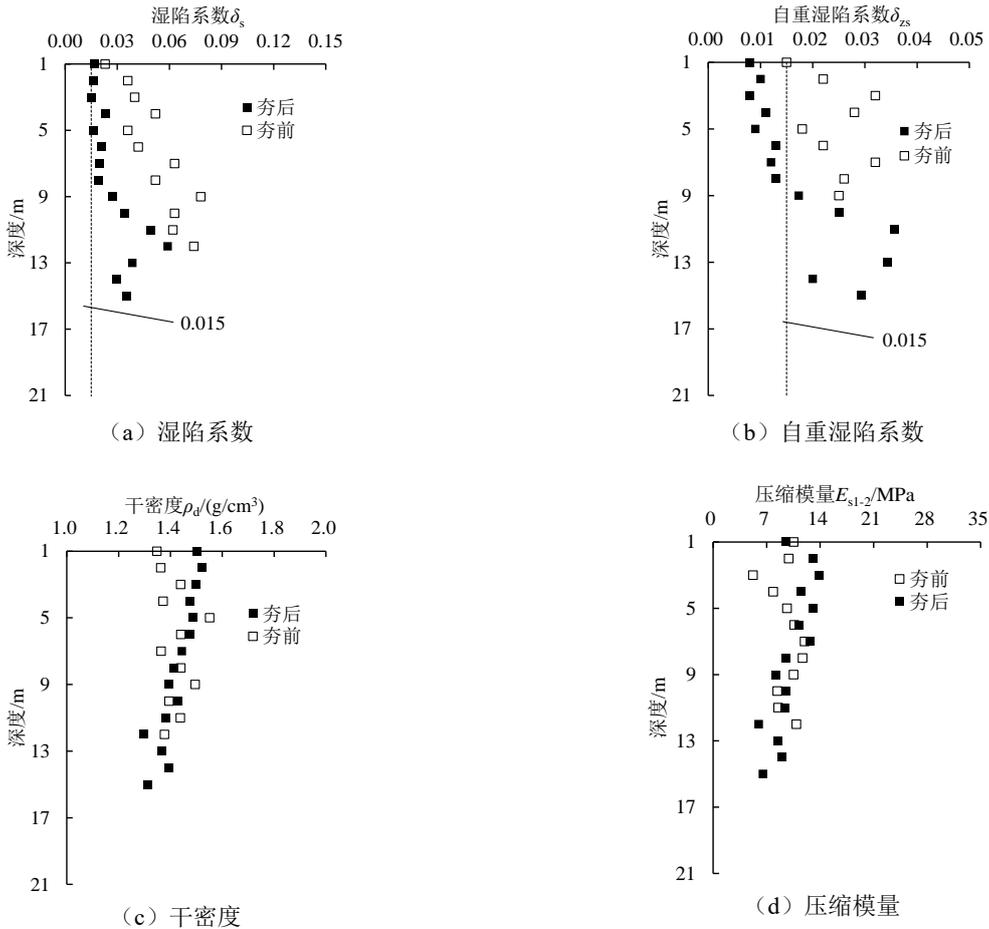


图 7 挖方区 16 000 kN·m 能级强夯前后的主要物理力学性质指标对比

Fig. 7 Comparison of main physical and mechanical property indexes before and after 16 000 kN·m energy level dynamic compaction in excavation area

2.4 有效加固深度确定方法的对比

当湿陷性黄土场地的地基处理是以消除湿陷性为主要目标时, 对应的有效加固深度是以夯后湿陷系数 (或自重湿陷系数) 小于 0.015 时的深度作为界限。影响有效加固深度的因素很多, 除锤重和落距外, 还与地基土的物理力学性质、不同土层的厚度和埋藏顺序、地下水位以及强夯工艺参数 (如夯击次数、锤底单位压力等) 都有着密切关系。经大量工程实测资料的统计分析, 有学者建议采用式 (1) 所示的梅纳修正公式估算有效加固深度^[15-16]。

$$H = k\sqrt{Mh} \quad (1)$$

式中: H 为有效加固深度, m; M 为夯锤重, t; h 为夯锤落距, m; k 为折减系数, 与土质、能级、锤型、锤底面积和工艺选择等多种因素有关, 黄土取 0.34~0.50。

根据土层的基本物理力学性质指标的检测要求, 按照消除湿陷性的控制要求, 可以确定不同夯击能下的有效加固深度, 将不同强夯能级时的实测有效加固深度与《钢制储罐地基处理技术规范》^[17] 中的经验值进行对比。强夯的有效加固深度的对比如表 4 所示。由表可知, 当湿陷性黄土的含水量较低时, 黄土实测有效加固深度明显低于梅纳修正公式估算值和规范预估值的加固深度。

表 4 强夯的有效加固深度的对比

Table 4 Comparison of effective reinforcement depth by dynamic compaction

强夯能级/kN·m	根据经验公式 ^[16] 估算的加固深度/m	根据规范 ^[17] 预估的加固深度/m	实测加固深度/m
8 000	10.0~14.0	8.0~9.0	2.0~3.0
12 000	12.0~17.0	10.0~11.0	4.0~7.0
16 000	14.0~20.0	12.5~13.0	5.0~8.0
25 000	18.0~25.0	—	11.0~12.0

2.5 强夯地基的承载力特征

各试夯区平板载荷试验的荷载-沉降关系曲线如图8所示。

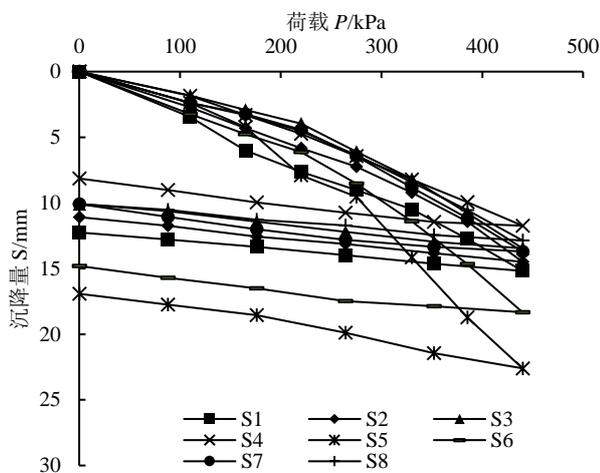


图8 平板载荷试验曲线

Fig. 8 Curves of plate load tests

由图可知,在试验加载范围内,荷载-沉降关系曲线呈缓变型,未见明显的比例界限。各试夯区的试验点在最大荷载440 kPa均未发生破坏,当荷载为220 kPa时,各试验点的“ s/d ”(s为沉降量,d为承压板直径)值介于0.004 9~0.009 9,均小于0.010。根据规范[14]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。本工程挖方区、填方区地基分别经8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m和25 000 kN·m能级强夯处理后,地基承载力特征值均不低于220 kPa,夯后较夯前挖方区地基承载力特征值提高83.3%,填方区地基承载力特征值提高120.0%(夯前挖方区地基承载力特征值为120 kPa,填方区地基承载力特征值为100 kPa)。

3 结论

(1) 挖方区和填方区的湿陷性黄土地基采用8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m和25 000 kN·m能级处理时,点夯的单点击数分别为8击、10击、10击和10击时,最后2击的平均夯沉量分别可控制在20 cm、20 cm、25 cm和30 cm。

(2) 当地基土的含水量平均值在6.4%~8.8%之间变化时,经8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m和25 000 kN·m能级强夯处理后,挖方区有效加固深度分别为2 m、4 m、5 m和11 m,填方区有效加固深度分别为3 m、7 m、8 m和12 m。

(3) 当地基土经8 000 kN·m、12 000 kN·m、

16 000 kN·m和25 000 kN·m能级强夯处理后,土的压缩性明显降低,承载力显著提高,夯后挖方区和填方区的地基承载力特征值均不低于220 kPa,能够满足上部结构对地基承载力的要求。

(4) 在相同深度范围内,挖方和填方地基土经强夯处理后,地基土的干密度均随着强夯能级的增加而呈曲线形式增大,并在12 000 kN·m和16 000 kN·m之间存在一个拐点,超过拐点后通过提高夯击能来增大干密度的效果逐步不明显。

参考文献

- [1] 黄雪峰,陈正汉,方祥位,等.大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2):4332-4338.
HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, et al. Study on treatment thickness and treatment method of large-thickness self-weight collapsible loess foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4332-4338.
- [2] 安国霞,买振军,周洁.大厚度黄土质素填土湿陷性深度变化规律及地基处理研究[J].煤炭工程,2018,50(8):57-60.
AN Guo-xia, MAI Zhen-jun, ZHOU Jie. Study on the law of large thick loess squash friction and foundation treatment[J]. Coal Engineering, 2018, 50(8): 57-60.
- [3] 黄雪峰,杨校辉.湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J].岩土力学,2013,34(增刊2):222-228.
HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. Research progress on field flooding test of collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 222-228.
- [4] 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.
WANG Jia-lei, HAN Jin-bao, MA Xin-yan, et al. Field experimental study on the reinforcement of deep mixed-fill foundations with high-energy-level dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
- [5] 毛洪运,朱江鸿,喻小,等.强夯法消除风积粉细砂湿陷性研究[J].工程地质学报,2019,27(4):745-752.
MAO Hong-yun, ZHU Jiang-hong, YU Xiao, et al. Study on the elimination of collapsibility of aeolian silty sand by dynamic compaction method[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 745-752.

- [6] 朱彦鹏, 师占宾, 杨校辉. 强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 120-125.
ZHU Yan-peng, SHI Zhan-bin, YANG Xiao-hui. Experiment of dynamic compaction method to deal with high fill foundation of mountain airport[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 120-125.
- [7] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211211.1843.002.html>.
LIANG Yong-hui, WANG Wei-dong, FENG Shi-jin, et al. Field test research on collapsible silt foundation treatment for high fill airport[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211211.1843.002.html>.
- [8] 腊润涛, 张荣. 强夯法处理湿陷性黄土地基的效果评价[J]. 公路, 2020, 65(1): 54-57.
LA Run-tao, ZHANG Rong. Evaluation of the effect of dynamic compaction on collapsible loess foundation[J]. Highway, 2020, 65(1): 54-57.
- [9] 李岩磊, 孙晓红, 师秀钦. 湿陷性黄土地基处理方案优选[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2018, 51(增刊 1): 205-208.
LI Yan-lei, SUN Xiao-hong, SHI Xiu-qin. Optimization of treatment scheme for collapsible loess foundation[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2018, 51(S1): 205-208.
- [10] 申明平. 湿陷性坝基强夯法处理效果分析与评价[J]. 人民长江, 2017, 48(6): 62-65, 80.
SHEN Ming-ping. Analysis and evaluation of the treatment effect of collapsible dam foundation dynamic compaction[J]. People's Yangtze River, 2017, 48(6): 62-65, 80.
- [11] 黄雪峰, 陈正汉, 张广平, 等. 高能量强夯在处理湿陷性黄土地基和不良地质体工程中应用研究[J]. 后勤工程学院学报, 2007(1): 5-10.
HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, ZHANG Guang-ping, et al. Research on the application of high-energy dynamic compaction in the treatment of collapsible loess foundation and poor geological body engineering[J]. Journal of the School of Logistics Engineering, 2007(1): 5-10.
- [12] 滕光亮. 大厚度黄土地区单击夯击能影响强夯加固效果的试验研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(3): 759-763.
TENG Guang-liang. Experimental study on the effect of single-click tamping on the effect of dynamic tamping in large thickness loess areas[J]. Chinese Journal of Earthquake Engineering, 2020, 42(3): 759-763.
- [13] 水伟厚, 董炳寅, 梁富华. 湿陷性黄土地区高填方压实场地 20 000 kN·m 超高能级强夯处理试验研究[C]// 龚晓南, 罗嗣海, 等编. 第十四届全国地基处理学术讨论会论文集. 江西, 2016: 247-253.
- [14] 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, 2012.
Ministry of Housing and Urban-rural Development, PRC. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [15] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3-18.
- [16] 苏冰. 洛阳石化总厂化纤工程 4.6 万 m² 地基强夯处理[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 221-226.
SU Bing. Dynamic compaction treatment of the 46 000 m² foundation of the chemical fiber project of Luoyang Petrochemical General Plant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 221-226.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, PRC. Technical Code for Ground Treatment of Steel Tanks: GB/T 50756—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.