



填海区回填土地基强夯处理技术

胡杰

(盐田港东区国际集装箱码头有限公司, 广东 深圳 518083)

摘要: 某港口工程为填海回填土地基, 地层土质复杂且不均匀。针对复杂且软弱的回填土地基, 为验证强夯处理加固效果与优化强夯施工参数, 采用2 500 kJ的夯击能, 通过多区试夯、多遍点夯、设置最大夯击数、复夯及保险性碾压等技术措施对地基进行加固。经静荷载板试验等方法对夯前夯后场地地基进行分析评价, 强夯法能使回填土地基达到加固设计要求。

关键词: 港口工程; 填海区; 回填土; 地基处理; 强夯法

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0258-06

Dynamic compaction treatment technology for backfill foundation in reclamation area

HU Jie

(Yantian East Port International Container Terminals Limited, Shenzhen 518083, China)

Abstract: A port engineering involves land reclamation with backfill soil foundation, where soil layers are complex and uneven. In response to the complex and weak backfill foundation, in order to verify the reinforcement effect of dynamic compaction treatment and optimize the dynamic compaction construction parameters, we use a compaction energy of 2 500 kJ, and apply technical measures to reinforce the foundation, such as multi-zone test compaction, multiple point compaction, setting the maximum number of compaction blows, repeated compaction, and ensuring rolling. Then we analyze and evaluate the foundation before and after compaction by test method such as static load plate test. The dynamic compaction method can make the backfill soil foundation meet design requirements for reinforcement.

Keywords: port engineering; reclamation area; backfill soil; foundation treatment; dynamic compaction method

1 工程概况

本工程强夯加固的填海区面积约30.5万m², 场地上部有厚度7~15 m的人工回填层, 由碎石土、填砂及素填土等组成。建设场地回填土层包

括①₁ 素填土、①₁₋₁ 填砂、①₂ 人工填石、①₃ 填土混碎石、①₄ 碎石混填土、①₅ 粉质黏土等, 回填时间一般为5~10 a。相关参数及特征见表1。

表1 回填土层参数及特征

Tab. 1 parameters and characteristics of backfill soil layer

土层及编号	厚度/m	标贯标准值/[击·(30 cm) ⁻¹]	土层特征
① ₁ 素填土	0.60~13.70	11.1	湿-饱和、可塑, 回填时间短, 未完成自重固结
① ₁₋₁ 填砂	0.50~9.60	9.6	饱和, 松散-稍密, 主要呈透镜体分布
① ₂ 人工填石	3.50~5.19	397.2(换算值)	小碎石为主, 块径7.0~18.0 cm
① ₃ 填土混碎石	1.30~24.10	131.7(换算值)	湿-饱和, 结构松散, 黏土和粉、砂土混碎块石
① ₄ 碎石混填土	1.10~23.60	210.4(换算值)	湿-饱和, 结构松散, 碎砾石填充黏性土及粉、砂土
② ₅ 粉质黏土	0.70~15.70	5.9	饱和, 软塑-可塑, 偏软
③ ₅ 中粗砂	0.50~9.10	19.9	饱和, 中密, 砂质不纯, 颗粒不均匀, 粗砂为主
⑤残积土	0.50~9.10	20.3	饱和, 硬塑, 遇水易软化

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 胡杰(1992—), 男, 工程师, 从事市政工程、水运工程施工管理。

建设场地周围分布的地表水主要为海水。发育的地下水类型主要包括上层滞水、孔隙潜水和基岩裂隙水。上层滞水主要分布于回填土中, 主要受大气降水补给, 孔隙潜水和基岩裂隙水与地表水水力联系较强, 主要受海水补给。勘察期间对各勘探孔静止地下水水位进行测量, 受地形起伏和黏性土层分布影响, 地下水水位高程起伏较大, 一般为 $-3.70\sim 8.86$ m。

2 试夯施工

本工程要求处理后的地基承载力特征值不小于

180 kPa, 土基面回弹模量不小于 60 MPa, 地基加固深度 4 m, 设计总夯击能为 $3\ 000\sim 3\ 500$ kJ/m²。在确定夯后地基承载力特征值和加固深度等参数后, 应通过试夯确定强夯方案、施工参数, 并根据试夯结果优化设计参数和工艺参数。由于本工程加固面积达 30 万 m² 以上, 为了摸索出合适的强夯参数, 一共设置 3 个试夯区, 采用 3 遍点夯、1 遍普夯, 具体试夯参数及检测结果见表 2。

表 2 试夯区参数
Tab. 2 Parameters of trial compaction area

试夯区	起夯面高程/m	点夯能量/kJ	普夯能量/kJ	夯击遍数	第 1、2 遍点夯间距/m	第 3 遍点夯间距/m
1 [#]	5.5(原状土)	2 000	1 500	3 遍点夯+1 遍普夯	7	3.5
2 [#]	5.5(原状土)	3 000	1 500	3 遍点夯+1 遍普夯	8	4
3 [#]	5.5(5.0 高程回填 0.5 厚开山石起夯)	2 500	1 500	3 遍点夯+1 遍普夯	8	4

试夯区	第 1、2 遍夯击数/击	第 3 遍夯击数/击	普夯击数/击	夯坑补料情况	荷载板试验结果/kPa	夯后高程及夯沉量/m
1 [#]	6	10	2	就地推平, 未补料	144(不合格)	5.2(-0.3)
2 [#]	8	8	2	第 3 遍点夯前补料	180(合格)	5.7(隆起 0.2)
3 [#]	8	8	2	未补料	180(合格)	5.4(-0.1)

3 试夯分析与强夯参数选取

3.1 试夯分析

1) 3 个试夯区仅 1[#] 试夯区地基承载力不满足设计 180 kPa 的要求, 可能是因为点夯能量 2 000 kJ 偏小, 对地层的加固效果不好, 影响深度较浅。

2) 1[#] 试夯区载荷板选取的位置为最大夯沉量 1.95 m 的夯点处, 在回填后仅靠普夯难以达到密实效果, 须控制普夯前的夯坑深度, 不宜过大。

3) 2[#] 试夯区在施工过程中进行夯坑填料, 最终夯后高程不降反升, 其余 2 个试夯区的夯后高程均有降低, 在大规模施工时要考虑夯坑少填、慎填。

4) 由于填海区人工填土层的成分不均, 沿海区域还受雨季、台风季的影响, 避免出现雨后地表土受水浸泡而不能承受强夯机械的重力, 在 3[#] 试夯区表层铺设了 0.5 m 厚的开山石垫层, 改善

作业面环境。在实际试夯过程中, 降雨后的 3[#] 试夯区因铺设了石料垫层, 基本不受影响。

3.2 强夯参数选取

通过对 3 个试夯区分析, 点夯能量 2 000 kJ 偏小, 加固效果不好, 点夯能量 3 000 kJ 又偏大, 造成夯击过程中夯坑较深, 填料夯后整体地面隆起。因此, 最终选取的强夯参数为: 1) 采取 3 遍点夯、1 遍普夯, 点夯能量 2 500 kJ, 普夯能量 1 500 kJ。2) 第 1、2 遍点夯间距为 7.0 m, 跳档夯, 点夯击数均为 6 击; 第 3 遍点夯击数 ≥ 10 击, 夯点布置见图 1, 普夯点搭接 1/4 锤径, 普夯单个夯点 2 击。3) 第 1、2 遍点夯只对击数有要求, 第 3 遍点夯要求最后 2 击平均夯沉量不大于 5 cm 且夯坑周围无明显隆起, 则可收锤。4) 第 3 遍夯击过程中对夯坑深度进行控制, 夯击过程中若夯坑深度超过 1.2 m, 则在夯击过程中补料, 直至满足收锤标准。

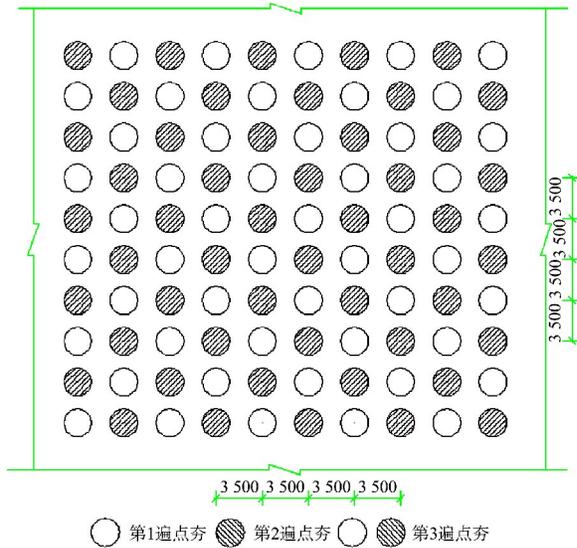


图1 夯点布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of tamping points (unit: mm)

4 强夯施工与出现的问题

4.1 强夯施工

在选取强夯施工参数后,先后投入了12台强夯设备进行施工,流程见图2。

强夯施工要点为^[1-4]: 1) 夯锤质量的选取必须合适,质量偏低的夯锤其提升高度过高,下坠时夯锤偏斜严重,对加固效果有影响。2) 单击夯能与总夯击能对加固效果有直接影响,在施工时必须保证单击夯能与总夯击能符合要求,在施工过程中定期校验锤质量,避免因磨损造成夯锤质量降低,影响加固效果。3) 每击夯沉量、累计夯坑沉降量等数据对指导强夯施工起着尤为重要的作用。施工过程中应如实填写强夯施工纪录,计算每击夯沉量。4) 每遍点夯完成后,进行夯坑推平,将夯坑周围的土料进行深层下推,测量、计算每遍点夯后场地平均高程和本遍夯击的有效夯沉量。5) 强夯法效果受对地下水位和孔隙水压力影响较大,地下水位在起夯面2 m以下时进行施工较为合适。每遍点夯必须有充足的间隔时间,间隔7 d左右基本能满足要求。若遇到降雨、软弱区则适当延长间隔时间,必要时进行孔隙水压力检测。

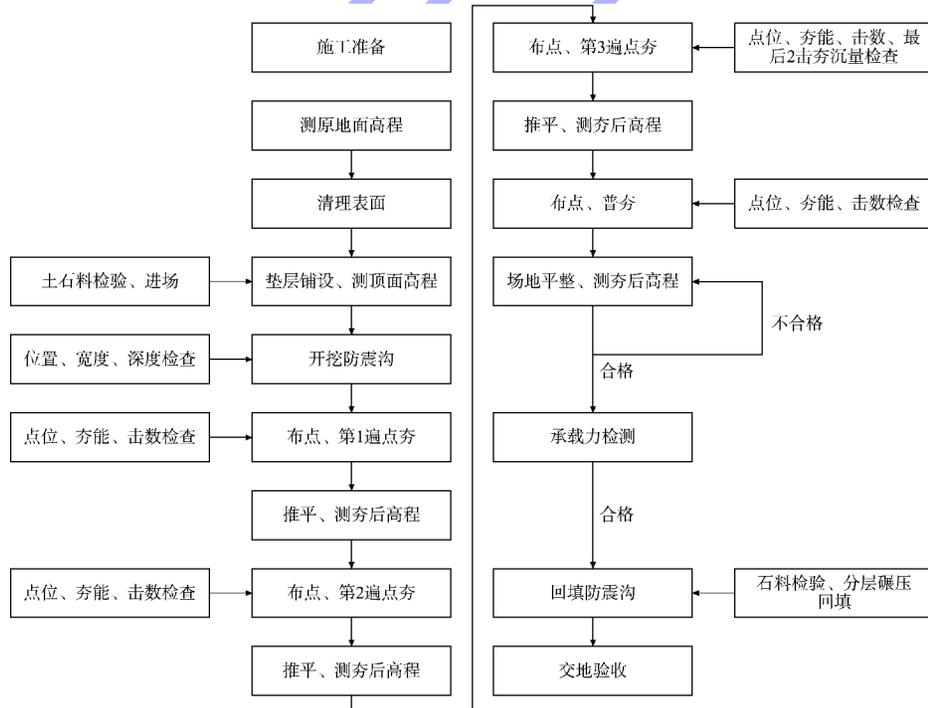


图2 强夯工艺流程

Fig. 2 Process flow of dynamic compaction

4.2 出现的问题

由于强夯参数选择较为合理,施工过程中又对各工序进行了严格把控,前期的强夯施工十分

顺利,第1、2遍点夯效果很好,第3遍各夯点均能按照设计要求收锤,总夯击能也在预设区间内。但随着强夯区域往填海区中心推进时,按选取的

强夯参数进行施工时，第3遍点夯出现了一系列问题，使现场施工陷入困境。主要问题有：1) 夯坑过深陷锤、渗水积水，见图3；2) 无法收锤；3) 地面隆起严重；4) 出现软弱区。



a) 夯坑过深陷锤



b) 夯坑渗水积水

图3 夯坑过深导致的陷锤和渗水积水
Fig.3 Hammer sink, water seepage and accumulation caused by overly deep tamping pit

5 问题分析与解决措施

5.1 问题分析

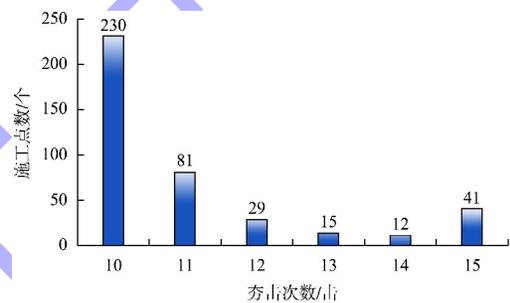
在强夯施工出现问题可能有以下原因^[5-8]：1) 加固面积在30万m²以上，由于填海区地质情况不均，回填料有好有坏，设置3个试夯区不足以寻找出适用于整个区域的强夯参数；2) 地表隆起很有可能是填料过多造成的，夯坑体积为土体被夯击密实的压缩体积，过多的填料又将本被压缩的体积给弥补回来，本质是在进行土石置换，下层软弱土体全被挤压上翻，地层整体挤密效果不佳；3) 夯坑过深、无法收锤、夯坑渗水和积水的情况可能是间隔时间不够、锤击数分配不合理等原因，造成夯击能累积过快，致使孔隙水压力未全部消散、击穿硬壳层造成下卧的软弱层被扰动；4) 总

夯能不宜过大，应设置总夯能上限值，避免影响深度过大，扰动、液化地层软土，引起地面隆起的同时，还可能会加剧后期的沉降量。

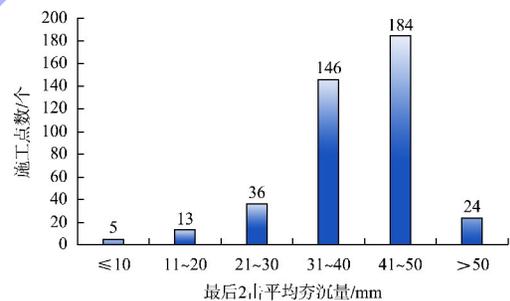
5.2 解决措施

1) 化整为零，分区试夯。为了摸清地质情况，探索科学、合理的施工参数，将加固区域“化整为零”，划分为27个小区，每块小区均做50~100个点位的试夯，整理数据并进行分析。

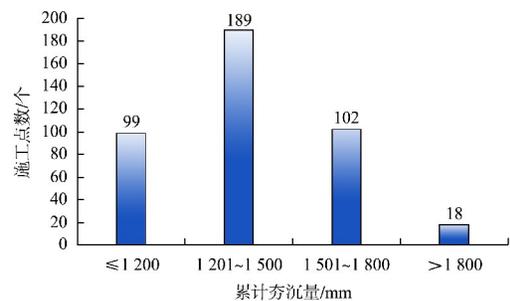
2) 求大同，存小异，动态施工。通过对所有试夯区的数据汇总后筛选了408个典型数据进行统计分析，结果见图4。



a) 第3遍点夯锤击数



b) 第3遍点夯最后2击平均夯沉量



c) 第3遍点夯的累计夯沉量

图4 试夯区数据分析结果

Fig.4 Data analysis results of trial compaction area

通过对数据整理分析后，除少数点位外，大部分夯点均能收锤。为了避免总夯击能超标，结

合试夯数据,增设了第3遍最大夯击数15击的收锤标准。在后续施工过程中应该遵循“求大同、存小异”的标准,对于少数不能收锤的点,先记录搁置,后续采取翻晒、换填、强夯半置换的技术措施进行解决。

3) 步步为营,多遍累积。由于填海造陆的地基大多松软,渗透性也较弱,对于饱和度高的细颗粒土,夯击数过多会导致部分夯击能消耗于土体的水平变形上,从而加剧地表的隆起,最终导致垂直压缩的夯击效率降低。为了充分消散其孔隙水压力,降低液化程度,提高夯实加固效果,宜采取多遍夯击的方式^[9]。通过“步步为营、多遍累积”的夯击方式,使孔隙水压力得到充分消散,使总能级逐步累积至预设标准。通过对数据的分析后,优化了原有施工工艺,增加了夯击遍

数,具体施工措施为:①夯坑不再额外补料,改为将夯坑周边土石料推入的方式;②第3遍的点夯分2~3次实施,逐步将总夯击能积累至设计值;③设置合理的总夯击数,本工程第3遍的点夯总夯击数不大于15击,如果最大夯击数不能满足收锤标准,则需要标记该夯点,后续采用其他方式进行处理;④对夯坑深度 ≥ 1.5 m的夯坑做标记,后续普夯前进行处理。

4) 智慧系统,数字施工。对于30万 m^2 以上的加固面积来说,夯点众多,施工记录困难,人工记录存在少计、漏记、篡改的情况。为了准确记录夯点的施工情况,本工程引入了强夯智能施工系统。该系统能辅助放样定位、自动记录施工参数,避免少打、漏打的情况出现,极大程度上保障了施工质量,见图5。

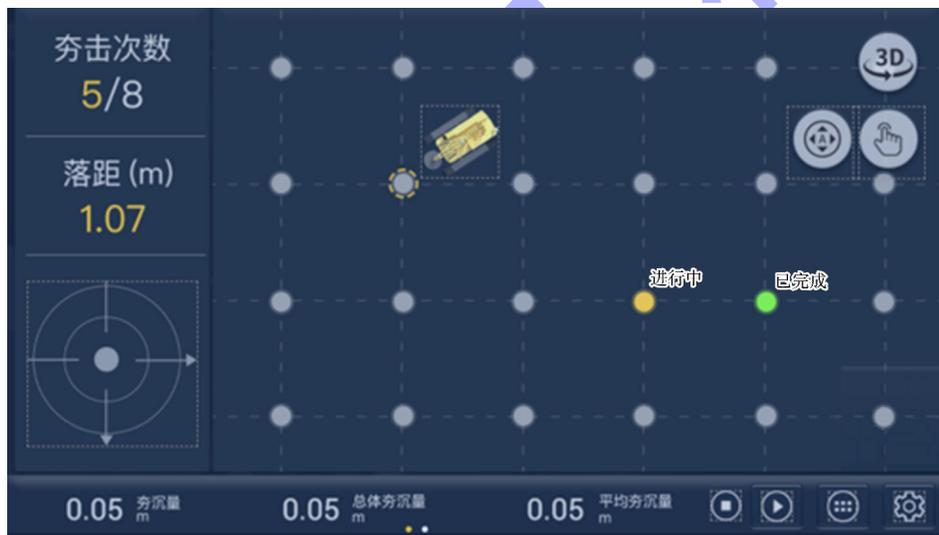


图5 强夯智能施工系统

Fig. 5 Intelligent construction system for dynamic compaction

5) 复夯、碾压双重保险。地基的表层是基础的主要持力层,表层处理不好将会使建筑的总沉降量与不均匀沉降增大^[10]。普夯的目的是为了解决夯点之间的未夯土和夯坑内回填的虚土,但普夯的影响深度有限,若夯坑较深,则坑内虚土会较厚,单靠普夯不能达到很好的处理效果。本工程的地基处理采取复夯和碾压的双重措施。

复夯:在点夯结束后,对深度超过1.5 m的夯坑进行标记,在夯坑推平后在夯坑深度超过1.5 m的点位再补相同能量的强夯2~4击,确保坑内虚

土的密实。

碾压:由于强夯地基受水浸泡后,其地基承载力会有较大降低^[11],在普夯完成后,在土基面还进行了10次碾压处理。在进一步密实地基表层的同时,还形成了隔水层,降低了地表水的下渗,进一步保证了强夯质量。

6 夯后加固效果检测

本工程地基处理完成后一共进行了6个荷载板试验,均能满足地基承载力特征值 ≥ 180 kPa的

要求, p - s (荷载-沉降)曲线见图6。夯后高程也从起夯面5.5 m降至5.2 m左右, 达到了预期目标。

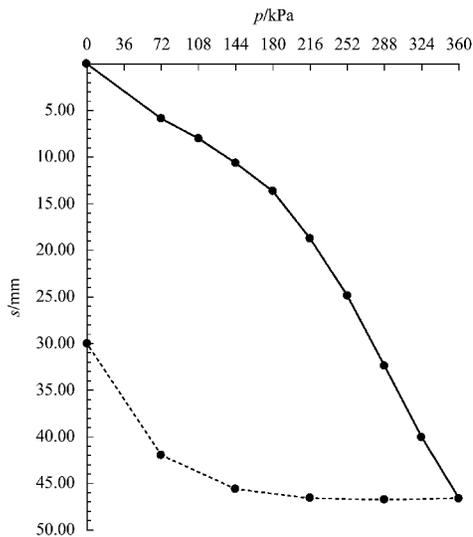


图6 荷载板试验 p - s 曲线

Fig. 6 p - s curve of load plate test

7 结论

1) 对于大面积的填海区强夯施工应多进行试夯, 充分收集施工参数, 才能摸索出适宜本区域强夯施工的参数。在大规模施工时, 在拟定的施工参数上还需要根据实际情况进行动态调整。

2) 对于饱和度高的细粒土地层, 宜采用多遍夯击的工艺, 让夯击能逐步累积的同时, 还能让孔隙水压力充分消散。

3) 饱和细粒土地层宜设置最大夯击数, 控制总夯击能降低工程费用的同时, 还能避免地表过多的隆起、深层软弱土过度扰动的问题。

4) 对于大面积的强夯作业宜安装相关智能系统, 能大幅提高对施工参数的监督与记录。

5) 对于夯坑过深的点位必须在回填后对坑内虚土进行2~4击复夯, 使坑内虚土得到密实, 增强表层的处理效果。同时在普夯完成后, 宜用压路机对土基面进行10遍左右的保险性碾压, 进一步增强土基面的密实度。

参考文献:

[1] 孙涤, 胡瑞庚, 张龙龙, 等. 抛石填海地基高能级强夯工程试夯试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2016, 37(4): 21-27.

SUN D, HU R G, ZHANG L L, et al. Experiment study on riprap reclamation foundation on high energy dynamic compaction [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2016, 37(4): 21-27.

[2] 詹金林, 水伟厚, 何立军, 等. 18 000 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.

ZHAN J L, SHUI W H, HE L J, et al. Experimental study on treatment of thick gravel soil for marine reclamation land using dynamic compaction of 18 000 kN·m [J]. Industrial construction, 2010, 40(4): 96-99.

[3] 周宝江, 邵旭. 不同能级强夯法处理新近吹填粉细砂地基现场试验[J]. 水运工程, 2024(9): 238-244.

ZHOU B J, SHAO X. Field test on recently reclamation silty fine sand foundation treated by different energy levels of dynamic compaction [J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 238-244.

[4] 黄学明, 李第甲, 宝艳军, 等. 强夯法在碎石回填土工程中的应用研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(16): 168-171, 174.

HUANG X M, LI D J, BAO Y J, et al. Application research of dynamic compaction method in gravel backfill soil engineering [J]. Automation application, 2024, 65(16): 168-171, 174.

[5] 张连海. 强夯法加固软土地基技术及效果评价研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(15): 66-68, 111.

ZHANG L H. Research on dynamic compaction method for strengthening soft soil foundation technology and effect evaluation [J]. Shanxi architecture, 2024, 50(15): 66-68, 111.

[6] 周静. 河谷区多层软土地基强夯处治分析[J]. 北方交通, 2024(4): 75-78, 82.

ZHOU J. Analysis on dynamic compaction treatment for multi-layer soft soil foundation in river valley area [J]. Northern communications, 2024(4): 75-78, 82.

[7] 李英鸽. 强夯法地基加固机理分析与现场应用研究[J]. 现代工程科技, 2024, 31(7): 139-141.

LI Y G. Mechanism analysis and on-site application research of dynamic compaction method for foundation reinforcement [J]. Modern engineering technology, 2024, 31(7): 139-141.