

新型非脱钩强夯机的研发与应用

张俊强¹, 陈超军¹, 杨帆¹, 于永堂², 董宝志³

(1. 湖南九虎智能科技有限公司, 湖南 常德 415900; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030031)

摘要: 为了解决传统非脱钩强夯机的机身稳定性差、施工效率低、操作灵活性差和施工质量保障难等难题, 结合强夯施工特点, 采用了创新性的机械液力传动系统、施工臂架平台动态稳定技术、夯击深度自动检测技术、卷扬多级安全制动技术、控制系统等多项技术, 研发了新型机液一体式非脱钩强夯机。结果表明: 新型非脱钩强夯机实现了起锤、放锤及夯锤空中起停的灵活操作, 具有大扭矩、高效率、高稳定性、高安全性的优点。工程实际应用表明, 在相同的工况条件下, 采用新技术的非脱钩强夯机的施工效率是脱钩强夯机的2.5~3.0倍, 与强夯智能施工管理系统结合后, 不需现场挂钩和人工测量, 进一步提升了施工效率, 同时解决了施工安全问题。该研究可为非脱钩强夯施工工法的推广、非脱钩强夯设备的发展方向提供参考。

关键词: 强夯施工; 非脱钩强夯机; 传动系统; 稳定技术; 安全制动技术

中图分类号: TU662

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0098-07

Research and application of non-decoupling dynamic compaction machinery

ZHANG Jun-qiang¹, CHEN Chao-jun¹, YANG Fan¹, YU Yong-tang², DONG Bao-zhi³

(1. Hunan Jiuhu Intelligent Technology Co., Ltd., Changde 415900, Hunan, China;

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

3. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract: Due to the challenges of inadequate stability, low construction efficiency, limited operational flexibility, and difficulties in ensuring construction quality in traditional non-decoupling dynamic compaction machinery, a range of innovative technologies for dynamic compaction construction is introduced. These include a mechanical hydraulic transmission system, dynamic stability technology for the construction arm platform, automatic compaction depth detection technology, a multi-level safety braking system for the winch, and a comprehensive control system. Through this approach, a new iteration of hydraulic-integrated non-decoupling dynamic compaction machinery has been developed. The results show that the new non-decoupling dynamic compaction machinery achieves flexible operation of starting, releasing, and start control of the hammer in the air, with the advantages of high torque, high efficiency, high stability, and high safety. Notably, practical engineering applications have shown that under the same working conditions, the construction efficiency of non-decoupling dynamic compaction machineries using new technology is 2.5-3.0 times that of decoupling dynamic compaction machineries. When combined with intelligent dynamic compaction monitoring systems, on-site hooking and manual measurement are not required, further improving construction efficiency and solving construction safety issues. This work can provide valuable reference for the promotion of non-decoupling dynamic compaction construction methods and the development direction of non-decoupling dynamic compaction equipment.

Key words: dynamic compaction construction; non-decoupling dynamic compaction machinery; transmission system; stability technology; safety braking technology

0 引言

强夯法是一种经济高效、节能环保的地基处理方法,可提高地基强度、降低地基压缩性、消除湿陷性、提高抗液化能力^[1]。强夯法施工和强夯机是紧密联系在一起的,强夯法对机械设备具有独特的要求并受其限制,强夯机性能与强夯工艺所承担的任务对象(锤重、落距、场地地质条件)相对应^[2]。强夯机按照夯锤的下落方式可分为脱钩式和非脱钩式两种,前者通过脱钩装置使夯锤与吊钩脱离,实现自由落锤,进行下一次落锤前,需要通过人工挂钩;后者的夯锤提升和下落都是通过提升钢丝绳始终与强夯机的提升机构连接,实现带载高速落锤^[3-4]。非脱钩式强夯机与脱钩式强夯机相比,操作更方便,无需人工挂钩,安全性和作业效率更高,可显著节省施工成本。非脱钩式强夯机一般应用于无法看到、无法进行自动挂钩的孔内深层超强夯^[5-7](Super Down-Hole Dynamic Consolidation,简称 SDDC)和水上冲击夯实^[8-9],以及在地表上实施的强夯能级在 3 000 kN·m 以内的强夯作业。当前非脱钩强夯机施工时,存在以下主要问题^[10-11]:(1)卷扬拉力不足,卷筒扭矩较小,夯孔内土体对夯锤吸附作用较大,夯锤深陷夯孔内无法起锤;(2)强夯机具有提升过程满载率高和频繁突然卸载等特征,因变幅系统以及整机的弹性作用,夯锤脱钩时强夯机易发生主臂后倾甚至整机向后倾覆事故;(3)夯锤起锤高度、夯击深度及夯击次数由人工操作,施工质量和效率难以得到保障;(4)卷扬不具备自动制动功能,制动由操作者凭经验掌握,制动时间不易控制,操作存在安全隐患,过早或过晚制动都会对卷扬造成损害,缩短其使用寿命;(5)起锤和放锤及夯锤空中起停操作易发生主臂及钢丝绳来回摇晃,无法对准夯孔,施工效率低、操作灵活性差。针对现有非脱钩强夯机存在的不足,笔者团队从传动系统、卷扬机构和控制系统等方面着手,结合强夯法施工特点,研发了新型非脱钩强夯机,并在实际工程中得到了推广应用,相关研究成果可为类似强夯机的研制和工程应用提供参考。

1 非脱钩强夯机简介

湖南博邦重工有限公司研制的新型非脱钩强夯机的实物照片如图 1 所示,创新了机械液力传动系统、施工臂架平台动态稳定技术、夯击深度自动

检测技术、卷扬多级安全制动技术、控制系统等多项技术^[12-17],在系列型号中单绳最大拉力可达 40 t,起锤最大高度可达 22 m,实现起锤、放锤及夯锤空中起停灵活操作,主臂及钢丝绳摇晃程度微小,保障每次夯击质量,具有大扭矩、高效率、高稳定性、高安全性、操作灵活性强等优点,有效地解决了现有非脱钩式强夯机的不足之处。

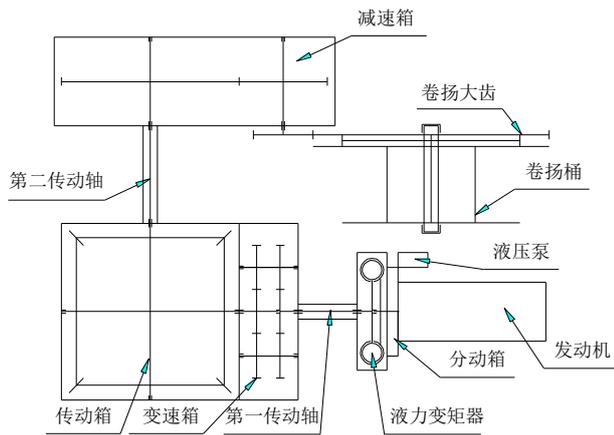


图 1 新型非脱钩强夯机

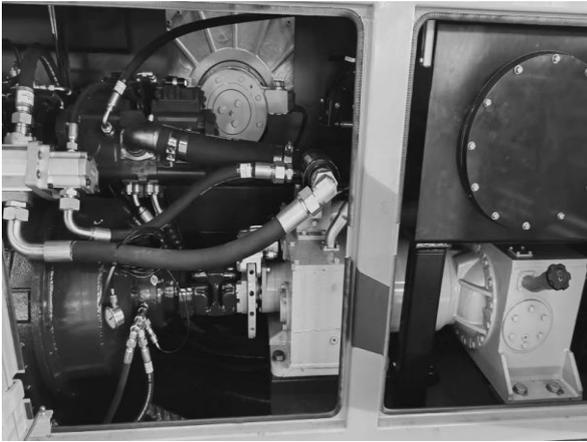
Fig. 1 A new type of non-decoupling dynamic compaction machinery

1.1 机械液力传动系统

新型非脱钩强夯机的机械液力传动系统原理及实物见图 2。如图 2 所示,发动机后面设计通用分动箱(PTO),通过分动箱将扭矩传递给液压泵组和液力变矩器。液压泵组带动的液压系统负责整机的行走、回转、变幅、控制伺服等,液力变矩器的输出动力通过传动系统带动主卷扬旋转,满足主卷扬高强度施工需求。采用液力变矩器带动卷扬旋转,能消除传动系统的冲击和振动,液力变矩器的变矩性能使卷扬起动性能好,经现场测试结果显示,新设备的扭矩较传统设备最大可以提升 2.5 倍,单绳拉力可以达到 40 t,系统最大绳速可达 3 m/s,在非脱钩 20 t 额定拉力的情况下,单绳提升速度可达 1.2 m/s。柔性连接的特性使系统具备过载保护功能,能实现系统低速变扭下的大扭矩、高加速度,在额定工况附近效率可达 85%~92%,大幅提高施工效率。在本传动系统中,允许输出轴的转速与输入轴的转速存在速差,两轴的转速差随传递扭矩的大小而不同,负荷增大时输出转速自动下降变扭,提升卷扬的单绳拉力,反之自动上升,系统有良好的自动变速性能。载荷与发动机之间柔性连接,从而使载荷的瞬态变化波动影响不到发动机,能够保证发动机有稳定的工作区,延长发动机工作寿命。



(a) 原理图



(b) 实物图

图2 机械液力传动系统原理及实物

Fig. 2 Principle and photo of mechanical hydraulic transmission system

1.2 施工臂架平台动态稳定技术

新型非脱钩强夯机的施工臂架平台动态稳定技术原理示意图见图3。如图3所示,在主臂上安装有连杆缓冲机构,机构安装了缓冲油缸,并与回转平台上的支撑座铰接,以此将主臂后仰的载荷直接传导到回转平台上,达到限制主臂回弹角度与频率的目的。当主臂反弹后仰时,缓冲油缸受压,通过油缸结构设计抵消冲击,减小了震动幅度与频率。在转台尾部安装后坐力缓冲系统,安装了后座油缸。起锤时,强夯机靠后座配重平衡力来平衡该前倾力。此时,后座油缸自动伸长支撑着地,当后座油缸伸长支撑在地面上达到预设后坐力时,系统油路锁死,停止向后座油缸供油,后座油缸停止伸长。放锤时,整机后仰,后座油缸对地面有一定的支撑力,且防后倾油缸进出油路锁死,该后倾冲击力通过后座油缸作用在地面上,从而防止强夯机后倾,减少强夯机前后摇摆,提高强夯机平台工作稳定性,减少强夯机回转支撑和回转平台所受的冲击力,延长强夯机回转支撑及回转平台寿命。在第一

次放锤后,由于地面受到后倾冲击力作用,地面会下沉,防后倾油缸未支撑着地,在第二次起锤时,系统再次向后座油缸补油,使后座油缸伸长接触地面支撑达到预设后坐力时,再一次停止向后座油缸供油,后座油缸停止伸长,进出油路锁死,进行第二次放锤作业。采用此技术后,臂架摆动幅度可以控制在 2° 以内,摆动时间可以控制在1s左右,大幅提升工作稳定性。

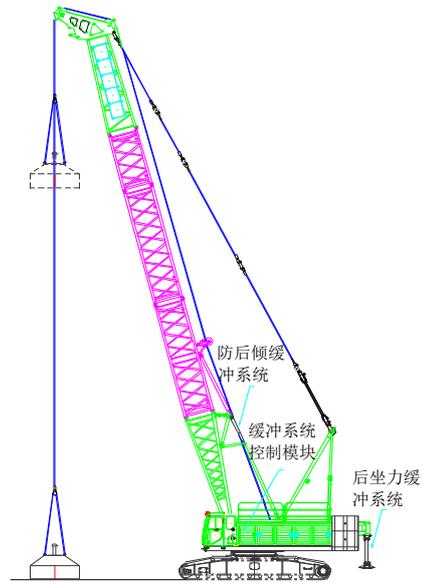


图3 施工臂架平台动态稳定技术原理示意图

Fig. 3 Principle of dynamic stability technology for the construction arm platform

1.3 夯击深度自动检测技术

新型非脱钩强夯机的夯击深度自动检测技术原理示意图见图4。如图4所示,深度检测系统的压绳缸安装在臂架上,位于卷扬起重钢丝绳的出绳端,在压绳缸上设置信号检测端接近开关,接近开关与零点信号开关相连接,并由接近开关触发零点信号开关,零点信号开关与控制器的连接。原理就是通过起重钢丝绳的松紧情况,带动压绳缸伸缩运动产生信号,再由控制器来确定系统零点。钢丝绳松弛时,启动系统,压绳缸可以自由伸出,在起锤时,钢丝绳拉紧压缩压绳缸缩回,控制器采集零点信号开关通断信号,确定强夯机起锤零点。卷扬释放夯锤后,夯锤落地,钢丝绳又处于松弛状态。当再次启动系统时,在钢丝绳拉紧压缩压绳缸的过程中,又得到了一个零点信号,确定新的零点。整套系统通过钢丝绳的松紧机械取点,系统安全可靠,调整好的零点反馈,在钢丝绳拉紧的瞬间通过电信号传递,零点位置确认可以做到零延时,以保证零点的准确可靠,进一步准确地确定高度落差,避免高度误差形成的夯能不足或浪费。

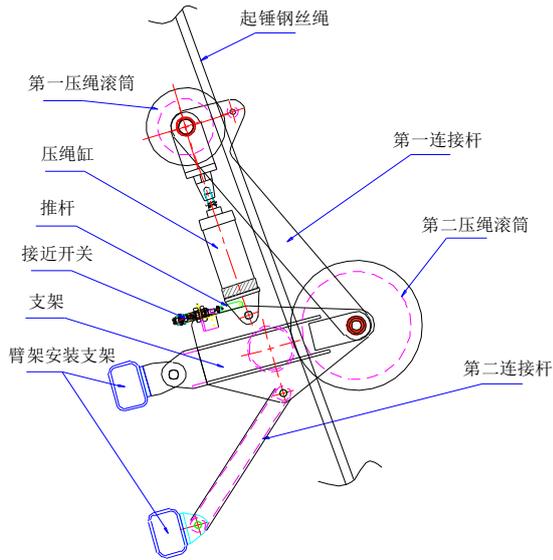


图 4 夯击深度自动检测技术原理示意图

Fig. 4 Principle of automatic detection technology for compaction depth

1.4 卷扬多级安全制动技术

新型非脱钩强夯机的卷扬多级安全制动技术原理如图 5 所示,卷扬制动机械的三部分组成如下:

- (1) 抱刹制动, 该系统负责驻车制动和重载制动;
- (2) 一级盘式制动, 卷扬运动过程中的减速制动;
- (3) 二级盘式制动, 卷扬运动中减速制动+主制动。

各级制动通过控制系统相互配合, 实现不同的制动需求。在启机开启工作模式后, 起锤和放锤前, 二级盘式制动启动, 与抱刹配合双保险, 避免卷扬异动; 在执行起锤和放锤动作后, 依次解除二级盘式

制动和抱刹制动, 充分利用抱刹和盘式制动各自优点, 提高操作时卷扬机的平顺性、稳定性和安全性。在放锤时, 为了达到在落锤过程中的卷扬机灵活自由和落地后的制动干脆利落, 通过传感器感应、控制器控制, 由多级制动依次配合, 达到夯锤落地后的逐级制动, 落地后, 一级制动减速, 紧接着二级制动介入制动, 两者配合使卷扬机能在最小的转动范围内柔和制动, 以保障起重钢丝绳出绳量在 2~3 m 范围内, 不会影响下一次夯击。

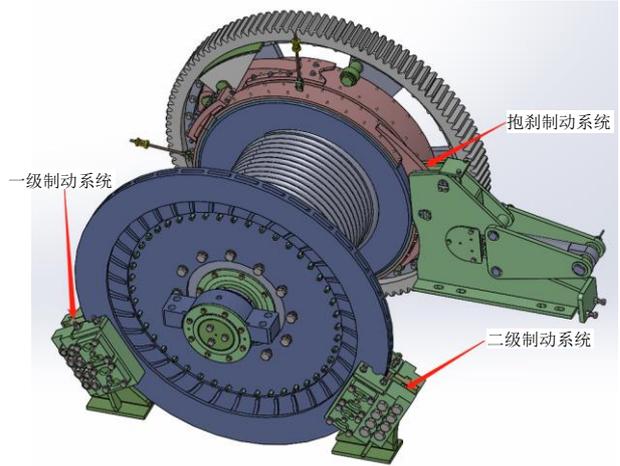


图 5 卷扬多级安全制动技术原理

Fig. 5 Principle of multi-level safety braking technology for the winch

1.5 控制系统

新型非脱钩强夯机的控制系统结构图如图 6 所示。

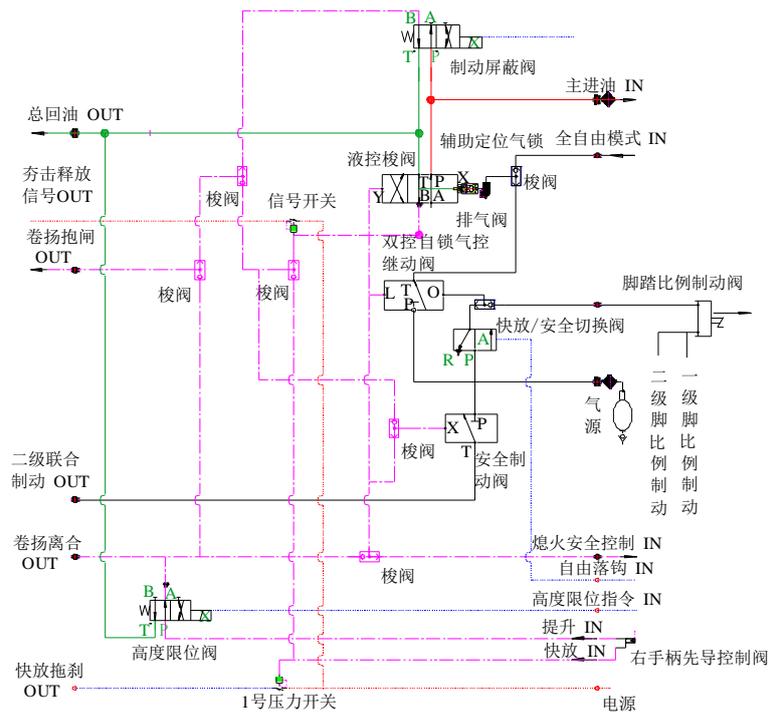


图 6 控制系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of control system

非脱钩强夯机的卷扬控制是关键技术,该系统提供了脚制动放锤模式、手柄制动放锤模式以及电控按钮放锤模式。通过控制器实时采集发动机扭矩、转速等数据,当发动机转速达到预设值时,卷扬机逐级解锁,卷扬控制手柄解锁,才能操纵卷扬离合器接合和制动器松开;在发动机转速未达到预设值时,卷扬机处于制动状态,系统锁止,卷扬控制手柄不能操纵卷扬的动作。此控制系统配合多级安全制动,可防止发动机突然熄火、卷扬提前或延迟解锁、提前或延迟制动等问题,保护了卷扬离合器,延长卷扬离合器的使用寿命,实现起锤、放锤及夯锤空中起停的灵活操作。

2 工程应用

云南碳中和示范产业园基础设施建设项目位于泸西县城东北白水镇,白水塘水库西南,S203以东,泸弥高速以北,占地面积约 $5.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。根据勘察阶段钻探揭露深度范围内的地层结构及成因类型表明,场地地层结构属多层型,地基土成层条件中等复杂,地表主要为耕植土及人工填土地层,其下为第四系坡洪积相及第四系坡残积相黏性土

地层,下伏基岩为三叠系中统个旧组灰质白云岩。地基处理采用 $3\,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $4\,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $5\,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $6\,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 4个能级,满夯为 $2\,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$,3击、 $d/3$ 搭接(d 为夯锤直径)。本工程点夯施工采用脱钩强夯机,满夯施工采用非脱钩和脱钩两种强夯机。满夯施工的实测结果显示,脱钩强夯机完成一个周期(3锤,挪锤)需要约 $110 \sim 120 \text{ s}$,非脱钩强夯机完成一个周期仅需要约 $40 \sim 45 \text{ s}$,非脱钩强夯机的施工效率是脱钩强夯机的 $2.5 \sim 3.0$ 倍。例如,当地基处理面积为 $5\,000 \text{ m}^2$ 场地,按照1d的施工工期要求,需要采用3台脱钩强夯机,但采用非脱钩强夯机则仅需要1台。此外,脱钩强夯机作业时还要考虑强夯机之间的安全距离,受场地和空间限制,常常无法满足安全距离要求,而非脱钩强夯机为单台施工,则不需要考虑安全距离的问题。

本次将非脱钩强夯机与UDS300强夯智能施工管理系统相结合,如图7所示,利用北斗高精度定位技术,结合各类传感器(落距传感器、智能接收机)、显示终端,在施工过程中对夯击遍数、夯锤落距、夯点位置、沉降量变化等进行记录和计算,并对数据存储及回传至施工管理平台,登录监控平台可及时掌握施工质量、工程计量和施工进度等。



图7 UDS300强夯智能施工管理系统

Fig. 7 UDS300 intelligent construction management system for dynamic compaction

非脱钩强夯机与强夯智能施工管理系统结合后, 省去现场挂钩和测量人员, 可大幅度节省人工成本, 节省测量时间, 同时也降低了施工安全风险。

3 结 论

(1) 强夯机作业性能的好坏和施工能力的高低, 直接影响着强夯工程的进度、安全、效益以及强夯工艺的发展。针对传统非脱钩强夯机的机身稳定性差、施工效率低、操作灵活性差和施工质量难保障等问题, 结合强夯施工特点, 研发了新型机液一体式非脱钩强夯机。

(2) 研发的新型非脱钩强夯机在机械液力传动系统、施工臂架平台动态稳定技术、夯击深度自动检测技术、卷扬多级安全制动技术、控制系统等多项技术上进行了创新, 使卷扬最大单绳拉力提升达到 40 t 以上, 最大提升速度达到 3 m/s, 在额定 20 t 单绳拉力情况下, 提升速度能达到 1.2 m/s 的稳定工作状态, 实现了起锤、放锤及夯锤空中起停的灵活操作, 具有大扭矩、高效率、高稳定性、高安全性的优点。

(3) 新型非脱钩强夯机与传统脱钩强夯机相比, 施工效率提升了 2.5~3.0 倍, 与强夯智能施工管理系统结合后, 省去了现场挂钩和测量人员, 可大幅度节省人工成本, 节省测量时间, 同时也降低了施工安全风险。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姜旭, 刘中星, 李跃, 等. 浅谈国内强夯技术和施工机械的现状和发展趋势[J]. 建设机械技术与管理, 2014, 27(8): 105-110.
JIANG Xu, LIU Zhong-xing, LI Yue, et al. Talking about the current situation and development trend of the domestic dynamic compaction technology and the construction machinery[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2014, 27(8): 105-110.
- [3] 王欣, 郑亚辉, 白朝阳, 等. 强夯机的技术现状与发展[J]. 建筑机械化, 2012, 33(3): 39-43, 7.
WANG Xin, ZHENG Ya-hui, BAI Chao-yang, et al. Technical current situation and development of the dynamic compaction machinery[J]. Construction Mechanization, 2012, 33(3): 39-43, 7.
- [4] 李建青, 周楚健, 雷发荣. 强夯机夯击能效率测试方法研究[J]. 内燃机与配件, 2021(6): 76-77.
LI Jian-qing, ZHOU Chu-jian, LEI Fa-rong. Research on the test of tamping energy efficiency of dynamic compactor[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021 (6): 76-77.
- [5] 周小松, 乔建伟, 夏玉云, 等. SDDC 挤密桩处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(5): 7-13.
ZHOU Xiao-song, QIAO Jian-wei, XIA Yu-yun, et al. Experimental study on the treatment of collapsible loess with SDDC pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(5): 7-13.
- [6] 胡长明, 梅源, 王雪艳, 等. 素土挤密桩处理超高填方下深厚湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 201-203.
HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan, et al. On treating deep collapsible loess foundation by compiling earth to super high fills[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 201-203.
- [7] 程雪, 尚君辉, 许瑞虎, 等. 履带式强夯机在孔内深层超强夯法中的应用[J]. 建筑机械, 2016(4): 64-66, 71, 8.
CHENG Xue, SHANG Jun-hui, XU Rui-hu, et al. Crawler type dynamic compaction machine in deep hole over the application of dynamic compaction method[J]. Construction Machinery, 2016 (4): 64-66, 71, 8.
- [8] 王中, 柳延江. 抛石棱体分层强夯工艺在重力式码头施工中的应用[J]. 水运工程, 2019(增刊 1): 52-56.
WANG Zhong, LIU Yan-jiang. Application of riprap prismatic layered dynamic compaction technology in gravity quay construction[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(S1): 52-56.
- [9] 叶锋, 童新春, 张功新, 等. 重锤夯实抛石基床的有效加固深度试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1008-1012.
YE Feng, TONG Xin-chun, ZHANG Gong-xin, et al. Experimental research on effective reinforced depth of rubble bed with heavy tamping compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1008-1012.
- [10] 王锡良, 水伟厚, 吴延炜. 强夯机的发展与应用现状[J]. 工程机械, 2004(6): 31-35, 1.
WANG Xi-liang, SHUI Wei-hou, WU Yan-wei. Progress

- and application situation of dynamic compaction machinery[J]. Construction Machinery and Equipment, 2004(6): 31-35, 1.
- [11] 罗鉴. 机液一体式强夯机市场前景及发展趋势[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(16): 192-193.
LUO Jian. Market prospects and development trend of mechanical-hydraulic integrated dynamic compaction machine[J]. Modern Business Trade Industry, 2018, 39(16): 192-193.
- [12] 张俊强. 一种强夯机: 中国, CN201920370797.2[P]. 2020-02-14.
ZHANG Jun-qiang. A type of dynamic compaction machinery: China, CN201920370797.2[P]. 2020-02-14.
- [13] 张俊强. 一种强夯机防后倾控制系统: 中国, CN202021437615.8[P]. 2021-03-02.
ZHANG Jun-qiang. A anti backtilt control system for dynamic compaction machinery: China, CN202021437615.8[P]. 2021-03-02.
- [14] 张俊强. 一种强夯机起锤零点信号检测装置: 中国, CN202021436418.4[P]. 2021-05-04.
ZHANG Jun-qiang. A zero point signal detection device for dynamic compaction machinery starting hammer: China, CN202021436418.4[P]. 2021-05-04.
- [15] 张俊强. 一种卷扬离合器打滑报警系统和强夯机: 中国, CN201910291301.7[P]. 2021-02-26.
ZHANG Jun-qiang. A winch clutch slip alarm system and dynamic compaction machinery: China, CN201910291301.7[P]. 2021-02-26.
- [16] 张俊强, 陈超军, 熊龙非. 一种卷扬自动刹车系统: 中国, CN201810148294.0[P]. 2024-03-15.
ZHANG Jun-qiang, CHEN Chao-jun, XIONG Long-fei. A automatic braking system for winch: China, CN201810148294.0[P]. 2024-03-15.
- [17] 张俊强, 贺勃. 一种强夯机控制系统: 中国, CN202221498053.7[P]. 2022-11-04.
ZHANG Jun-qiang, HE Bo. A control system for dynamic compaction machinery: China, CN202221498053.7[P]. 2022-11-04.

【简 讯】

岩土工程西湖论坛（2024）：交通岩土工程新进展（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2024）拟定于2024年10月18—20日在杭州花家山庄召开。近年来，我国交通工程快速发展，许多岩土工程新理论、新技术和新材料在我国交通工程建设中得到应用和发展，同时也有诸多技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进交通岩土工程领域技术的进一步发展和提高，更好地为我国交通工程建设服务，岩土工程西湖论坛（2024）的主题定为“交通岩土工程新进展”。本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第8册《交通岩土工程

新进展》，并由中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与！

会议时间：2024年10月18—20日（18日报到）

会议地点：杭州花家山庄

会议主题：交通岩土工程新进展

联系方式：宋秀英

（0571-88208775, xysong2020@163.com）

www.geo-forum.cn