

文章编号:1006-2467(2019)07-0812-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.07.007

管夯深层加固方法的软基现场工艺试验

唐建辉, 李平, 王新浪, 金奕潼

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 土木与交通学院, 南京 210098)

摘要: 为了克服传统强夯法加固软土地基的局限性,提出了一种管夯深层加固方法,并介绍了管夯深层加固方法所用机械设备、加固原理和施工工艺,同时,在福建省某软土地基处理项目中开展了管夯深层加固方法的现场工艺试验,分析了管夯填料用量和深层降水方式等影响因素.结果表明:所提出的管夯深层加固方法能够有效避免管内夯击过程中超静孔隙水压力的积累,且在夯后静置约1 d即可消散超静孔隙水压力;采用管夯深层加固方法加固后,增加了淤泥质土中粗粒填料比例,使得地基土体的锥尖阻力和锥侧阻力均成倍增长,地基有效处理深度可达15 m以上,从而克服了采用传统强夯法出现的超静孔隙水压力消散周期长、有效加固深度浅的缺陷.

关键词: 软土地基; 管夯深层加固; 孔压消散; 有效加固深度

中图分类号: TU 472.31

文献标志码: A

Field Technological Test on Soft Ground Improvement by the In-Tube Deep Dynamic Compaction Method

TANG Jianhui, LI Ping, WANG Xinlang, JIN Yitong

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering;
College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of traditional dynamic compaction method, a new technique of intube deep dynamic compaction was proposed. The equipment, reinforcement mechanism and construction procedures of this new method were described. Based on the field test in Fujian, some factors such as filler content and deep dewatering were monitored during reinforcement. The test results show that the accumulation of excess pore water pressure during the tamping process can be effectively avoided by the intube deep dynamic compaction method, and the excess pore water pressure will dissipate completely after 1 day of dynamic consolidation. When the sand grains are added into the soil, the tip resistance and cone side resistance increased exponentially after the reinforcement, and the effective depth of foundation treatment can reach more than 15 m in depth. The defects of the long period of dissipation of excess pore pressure and shallow depth of the effective reinforcement in conventional dynamic consolidation method are overcome.

Key words: soft soil foundation; in-tube deep dynamic compaction; dissipation of excess pore pressure; depth of effective reinforcement

收稿日期:2018-02-28

基金项目:中央高校基本科研业务费(2018B13614),国家自然科学基金(51408187)资助项目

作者简介:唐建辉(1994-),男,河南省周口市人,硕士生,主要从事软土地基处理研究.

通信作者:李平,男,博士,副教授,电话(Tel.):025-83770235;E-mail:lipings0110@163.com.

强夯法是一种经济有效的地基处理方法,是由 Menard 等^[1]提出的,已在碎石土、砂土、湿陷性黄土、杂填土以及低饱和度黏土或粉土等地基的加固中得到了广泛应用^[2-5],但仍存在局限性.具体表现在:一是对于软土地基(特别是淤泥质土)的加固效果尚存在争议,夯后超静孔隙水压力能否快速消散是决定强夯法加固成败的关键因素^[6-7];二是强夯的有效加固深度一直是困扰软土地基深层加固的主要问题^[8-9].为此,工程技术人员将强夯法与其他地基加固技术联合使用,例如降水联合强夯法^[10]、强夯置换法^[11]、电渗强夯法^[12]和砂井-强夯法^[13]等.此外,也有学者利用高能级强夯置换法加固饱和软土地基^[14-15].虽然这些联合处理方法取得了很大进展,但对于我国沿海工程建设中经常遇到的深层软土,这些方法的处理效果欠佳,其主要原因是深层软土的超静孔隙水压力消散慢、加固困难.因此,本文提出了一种管夯深层加固方法,将传统强夯工艺中采用的由地基表层向下夯实改为由地基纵向深层夯起,通过由深到浅的逐层夯实达到了深层加固的效果.管夯深层加固方法不仅适用于渗透系数较高的土质(吹填砂和夹层粉砂等),而且适用于渗透系数较低的软土(淤泥质土和粉质黏土等).为了探究其在加固软土过程中的最佳施工工艺、加固效果及影响因素等,本文在福建省某软土地基处理项目中开展了现场工艺试验,以期在管夯深层加固方法在大面积软土地基加固处理中的应用提供参考.

1 管夯深层加固方法

1.1 管夯深层加固工艺设备及加固原理

管夯深层加固方法所用设备包括起重吊钩、振动锤、脱钩器、夯锤、真空吸水管和夯管等,如图 1 所示.其结构工作原理:将夯管与振动锤相结合,在夯管两侧设置真空吸水管、上部设置进料口、内置管夯锤,利用脱钩器的张开和闭合而使管夯锤起吊和脱落,以达到所需的夯击能.在夯击过程中,一边夯击一边抽水,以使夯击产生的超静孔隙水压力快速消散.对于不能夯击的流塑状淤泥或黏性土,则可通过灌入粗粒填料进行夯击置换.

管夯深层加固方法是建立在夯管振动、深层降水和强夯置换基础上的,其加固原理概述如下:

(1) 振动挤密. 将夯管在振动锤作用下打入土层深部,在挤密夯管周边土体的同时,利用高频振动来破坏软土的原状结构,使得软土产生水平状裂隙,从而打通或扩大地下水的渗透通道,增强其渗透性.

(2) 深层排水固结. 利用真空吸水管降低夯管

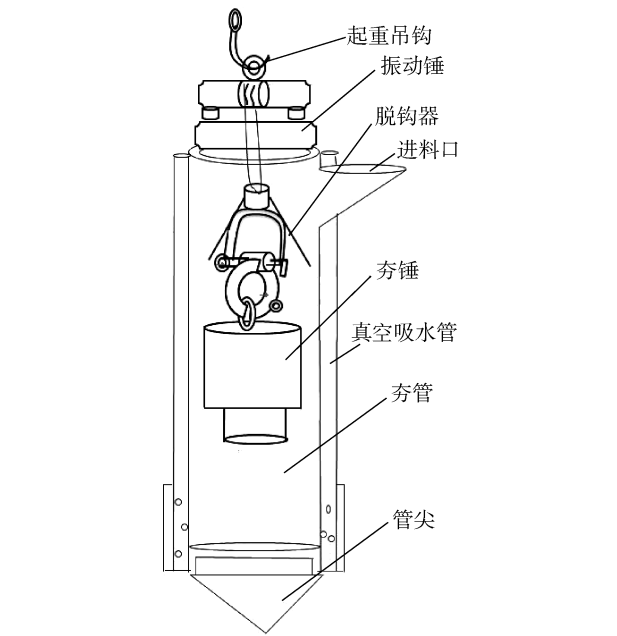


图 1 管夯工艺设备结构示意图
Fig. 1 Structure of the platform equipment

周边地下水位,快速消散夯击过程中土体产生的超静孔隙水压力,加速土体的固结.

(3) 强夯置换. 在夯管内灌入质量较好的土料或砂石料,通过夯击每层填料,以对软土层进行强夯置换,并在夯管位置形成密实墩体,促使软弱地基土压实、固结.

1.2 施工工艺

图 2 所示为管夯现场施工图. 管夯深层加固施工工艺及要点:

(1) 夯管入土. 将夯管套入预埋的夯尖,夯锤吊在夯管底部距夯尖靴约 20 cm 的位置. 开启振动锤,将夯管打入所设计的夯管入土深度.

(2) 深层降水. 连接夯管两侧的真空吸水管,开启真空泵,对夯管周边进行深层降水.

(3) 提升夯锤灌料. 将夯锤提升至进料口以上,从进料口灌入粗粒填料,随后,放下夯锤并将其顶在砂石料上;提升夯管 2~3 m,随着夯管上提,夯尖打

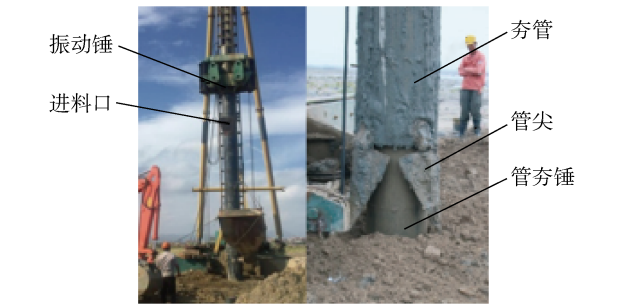


图 2 管夯现场施工图
Fig. 2 Site construction

开,夯管内砂石料下落。

(4) 第 1 级夯击. 提升夯锤 2~3 m,将灌入的填料与涌入的泥土进行击密夯实,在满足夯沉量的条件下,再次提升夯管 2~3 m,进行下一级填料夯击。

(5) 最后一级夯击. 提升夯管至地表面,停止振动,然后,提升夯锤 2~3 m 并夯实,单根填料管夯击完成。

将管夯深层加固工艺用于大面积施工时,如果在外围设置密封墙、内层布置井点降水或管井降水网格并辅以浅层动力固结方法,则能够满足不同层

厚、深度和地质条件的复杂软土地基加固处理条件。

2 现场工艺试验

2.1 工程概况

试验场地位于福建省沿海区域,场地原为滨海滩涂地,经过长期吹填及人工回填平整,场地地形相对平坦,场区地下水位离地表 0.6 m. 根据地质勘察资料,场地地层自上而下可分为:① 素填土;② 淤泥质土;③ 粉质黏土;④ 残积黏性土;⑤ 全风化花岗岩,其主要的力学性能参数见表 1。

表 1 各土层的力学性能参数

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of soil strata

土层	层顶埋深/m	重度/(kN·m ⁻³)	含水率/%	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/MPa ⁻¹
②层淤泥质土	0.60~12.80	16.5	45.7	1.25	13.4	6.1	0.85
③层粉质黏土	6.80~12.80	17.7	30.3	0.89	22.1	15.1	0.35
④层残积黏性土	10.20~21.10	18.5	36.7	1.07	17.2	17.7	0.55

2.2 试验分区与仪器布置

现场试验分为 A、B 区域,共计 200 m². 试验区平面图见图 3. A 区为填料管夯区,B 区为无填料管夯区,面积均为 100 m². 根据填料用量及降水条件将 A 区分为区域 A1、A2、A3、A4,其中区域 A1、A2、A3 的填料用量分别为 3.5、5.0、6.0 m³,且均为无降水区,区域 A4 的填料用量为 5.0 m³,为降水区. 根据降水条件将 B 区分为区域 B1(无填料、无降水区)和区域 B2(无填料、降水区)。

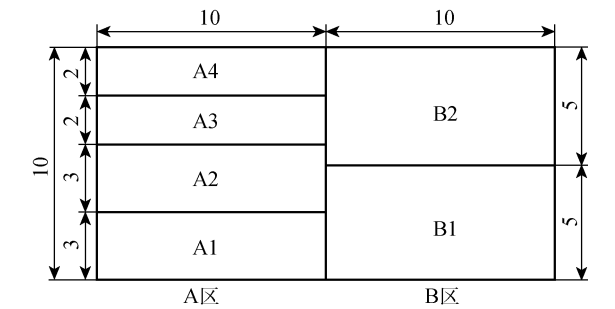


图 3 试验分区(m)

Fig. 3 View of test area (m)

试验所用填料为现场废弃、含泥量(质量分数计)为 30%~50%的中粗砂,试验区管夯点布置形式均为 2.0 m×2.0 m 的梅花型. 试验中,为便于机械作业及增强降水效果,在管夯点周边布置了辅助井点降水点,如图 4 所示. 现场试验包括填料区夯点周边土体竖向位移、孔隙水压力的测试. 试验中,在区域 A4(距离夯点中心 1.0 m)埋设了一组孔隙水压力计,埋设深度分别为 4、7、10、13、16、19 m;在试

验 A 区的 4 个区域设置了夯点周边土体的竖向位移的测量标点,其中测量标点 1 号和 4 号距离夯点中心 0.5 m,2 号和 5 号距离夯点中心 1.0 m,3 号和 6 号距离夯点中心 1.5 m. 试验中,孔隙水压力、竖向位移监测点的具体位置见图 5(夯点周边土体竖

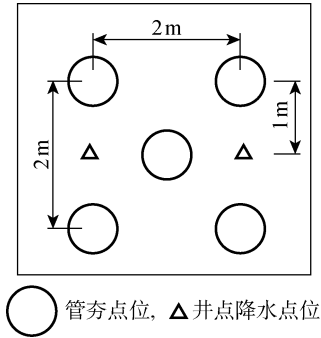
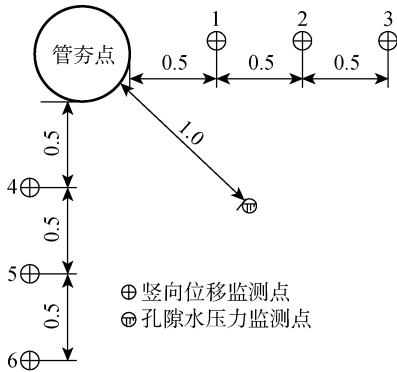


图 4 管夯点及辅助井点降水点的布置

Fig. 4 Layout of tamping point and auxiliary well point



向位移的正值代表土体隆起,其负值代表土体沉降).

3 结果与分析

根据试验场地的地质资料,本文试验设计的地基处理深度为 10 m,并根据不同的填料用量确定不同的夯击级数,其中区域 A1 共进行 3 级夯实,区域 A2、A3、A4 共进行 4 级夯实.

3.1 夯点周边土体的沉降量

通过监测不同填料用量下管夯点周边土体竖向位移的变化情况,并结合降水与不降水工艺进行对比分析,从而得到管夯施工的最佳填料用量.在区域 A3 的管夯试验过程中发现,当填料用量 6.0 m^3 时管夯点周边土体竖向位移超过 10 cm,考虑到工程造价及后期的表层压实,不宜采用这种工况,故图 6 示出了区域 A1、A2 和 A4 夯点周边土体的竖向位移(d)变化情况.由图 6 可以看出,当夯管入土深度(H)为 10 m 以下时,由于夯管对土体的侧向挤压作用而使周边土体隆起、竖向位移增大,而且位移变化量沿夯点中心向外逐渐减小,对周边土体的水平影响范围为 1.5~2.0 m.

由图 6(a)和(b)可见:在夯管入土深度为 10~5 m 时,向夯管内共投料 3.0 m^3 ,在区域 A1 和区域 A2,夯点周边土体的竖向位移变化不大,说明此时的投入填料量与土层置换量基本平衡;在夯管入土 5 m 至地表层段,土质大多为素填土,在管夯填料过程中极易产生土体挤压的竖向位移,且在填料用量达到 5.0 m^3 时的竖向位移较大,最大竖向位移为 6.3 cm;第 1 级夯击时的周边土体竖向位移比夯管入土和第 2 级夯击时的竖向位移小,表明此时的周边土体有所沉降,这是由于夯管的真空吸水管及夯点附近的井点在管夯作业过程中不断抽取地下水的缘故.

另外,在灌入相同填料量(5.0 m^3)条件下,无降水区填料夯点周边土体出现了隆起(见图 6(b)),而降水区填料夯点周边土体产生了沉降(见图 6(c)),表明填料管夯并结合降水的施工工艺对深层软土起到了较好置换效果.

现场试验还发现,采用夯管直径 600 mm,夯管入土深度 10 m,其成孔后的竖向增强体直径可以达到 800 mm.在这种最佳工艺条件下,以成桩半径为计算条件,采用等价体积指标确定最佳的填料置换量,记单根桩的填料用量为 V ,成桩半径为 R ,则 $V=\pi R^2 H$,计算可得 $V=5.0\text{ m}^3$,可见,与实际情况相吻合.

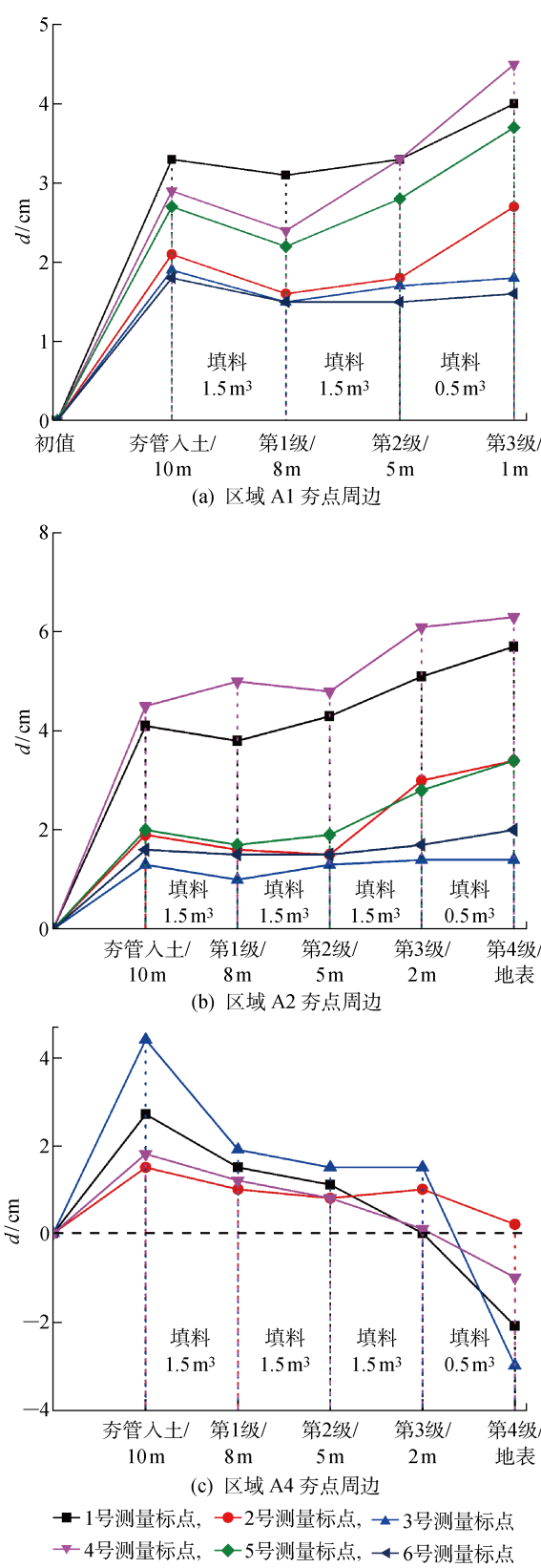


图 6 管夯各级填料施工阶段夯点周边土体竖向位移的变化情况

Fig. 6 Vertical displacement around tamping points

3.2 孔隙水压力

对填料降水区域 A4 进行为期 24 h 的孔隙水压

力监测. 在逐级填料夯击后, 对不同土体深度处孔隙水压力的变化情况进行分析. 完成监测点管夯作业后, 停止施工, 间隔 1~2 h 测试 1 次孔隙水压力的变化情况, 所得不同土体深度下区域 A4 的孔隙水压力(p)随填料夯击级数和时间的变化情况如图 7 所示.

由图 7 可见: 在夯管入土并进行第 1 级夯击后, 当土体深度大于等于 13 m 时, 孔隙水压力均出现了

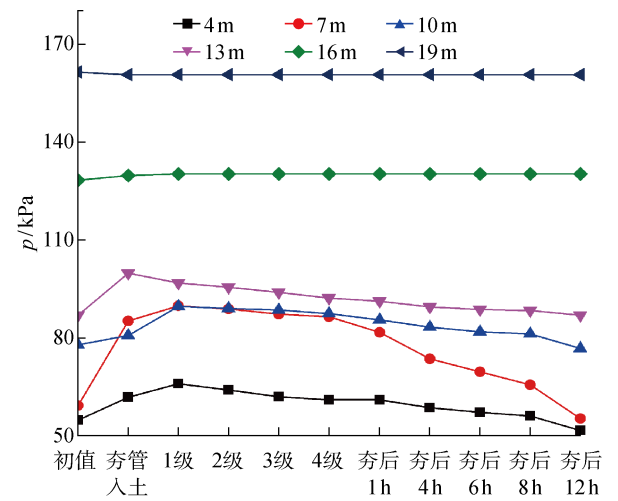


图 7 管夯作用下区域 A4 的孔隙水压力变化情况
Fig. 7 Variation of pore water pressures under tamping point A4

明显增加, 说明夯管入土时产生的振动及夯击对土体产生的挤压作用明显; 管夯深层加固方法的超静孔隙水压力随着夯击级数的增加而减小, 这与传统强夯法施工中超静孔隙水压力随夯击级数增加而增加的结果^[6]相反. 这是因为在逐级填料夯击的过程中, 夯管两侧的真空吸水管不断抽水而降低了水位, 使夯击产生的超静孔隙水压力得以快速消散. 另外, 在管夯作业完成后, 超静孔隙水压力经过 1 d 左右即消散, 这是由于降水的作用以及填料管夯形成的砂桩对软土渗透性的改善作用的缘故.

3.3 静力触探测试结果分析

在管夯施工前后分别对填料试验区进行了静力触探试验, 测点均选自管间土中, 针对②层淤泥质土的试验结果见表 2. 可以看出: 加固前, 主要的测试土层为淤泥; 加固后, 淤泥中含中粗砂, 由于管内夯击作用而使得填料向周围挤压, 对管间土起到了一定的置换作用; 加固后, 土体的锥尖阻力和锥侧阻力均成倍增长, 随着填料用量增加, 锥尖阻力和锥侧阻力逐渐增大, 表明由填料管夯对管间土的“侧向挤密”、“颗粒填充”和“置换”等联合作用而产生了显著的加固效果; 对比区域 A2 与区域 A4, 在相同的填料用量情况下, 降水区土体的锥尖阻力和锥侧阻力的增幅大于无降水区, 即降水施工加固的优势较为明显.

表 2 管夯加固前后的静力触探试验结果对比
Tab. 2 Results of static cone penetration test before and after ground treatment

试验分区	阶段	土层状态	土层厚度/m	锥尖阻力平均值/MPa	锥侧阻力平均值/kPa
A1	加固前	淤泥	11.5	0.60	8.61
	加固后	含泥中粗砂	8.7	6.23	44.80
A2	加固前	淤泥	11.3	0.50	8.21
	加固后	含泥中粗砂	9.2	7.22	47.73
A3	加固前	淤泥	11.6	0.50	7.84
	加固后	含泥中粗砂	10.2	7.57	58.68
A4	加固前	淤泥	11.2	0.60	7.77
	加固后	含泥中粗砂	9.6	7.62	52.73

3.4 静荷载试验结果分析

对于填料管夯区而言, 管夯后形成的竖向增强体与管间土相结合而组成类似于散料桩复合地基. 因此, 本文在填料管夯区 A 进行复合地基增强体单桩的静载荷测试试验, 在无填料降水区 B2 进行浅层平板载荷测试试验. 试验压板面积为 1 m×1 m, 检测结果见表 3. 由表 3 可知: 填料管夯区地基土的承载力特征值明显大于无填料区; 对比填料管夯无

降水区 A1~A3 的测试结果, 其地基土承载力特征值并非一直随着填料用量的增加而增加, 而在 6.0 m³ 的填料区 A3 的承载力特征值比 5.0 m³ 的填料区 A2 的小, 其原因在于所形成的竖向增强体的承载能力主要取决于填料的性质和夯击能的大小. 在本文的试验中, 每次填料后进行管内强夯的夯击能和夯击级数相同, 所以填料用量过大时的夯击效果减弱, 但增加填料用量可使桩顶沉降变形减小, 对控

表 3 静荷载试验结果
Tab. 3 Results of static loading test

试验分区	最大试验荷载/ kPa	最大试验荷载下的 桩顶竖向位移/mm	残余变形量/ mm	极限承载力/ kPa	地基土承载力 特征值/kPa
A1	240	74.45	69.18	210	105
A2	240	56.63	50.91	210	105
A3	210	46.93	36.16	180	90
A4	240	66.54	62.71	240	120
B1	180	68.37	64.82	150	75
B2	187	71.20	67.98	150	75

制后期沉降有利. 在填料用量均为 5.0 m³ 的情况下, 填料降水区域 A4 的承载力比填料无降水区域 A2 的承载力有所提高, 其地基土承载力可达 120 kPa. 可见, 降水对承载力的提高具有较强辅助作用.

4 结论

(1) 在本文的试验条件下, 采用管夯深层加固方法加固软土的最佳施工工艺参数为夯管直径 600 mm, 夯管入土深度 10 m, 其成孔后的竖向增强体直径可达 800 mm. 在这种工艺条件下, 以成桩半径为计算条件, 采用等价体积指标确定最佳的填料置换量, 可以达到最佳处理效果.

(2) 与传统强夯法相反, 采用管夯加固方法夯击产生的超静孔隙水压力随着填料夯击级数的增加而减小, 单点管夯施工累计形成的孔隙水压力在约 1 d 即可消散.

(3) 在淤泥质土中填入粗粒填料加固后, 地基土体的锥尖阻力和锥侧阻力均成倍增长, 且其在降水区的增幅大于无降水区.

(4) 填料管夯区的地基土承载力特征值明显大于无填料区, 且降水对承载力的提高具有较强的辅助作用. 采用管夯深层加固方法进行大面积施工时, 如果辅以浅层动力固结, 则可达到更好的加固效果.

参考文献:

[1] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation[J]. **Géotechnique**, 1975, 25(1): 3-18.

[2] 高政国, 杜雨龙, 黄晓波, 等. 碎石填筑场地强夯加固机制及施工工艺[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(2): 377-384.

GAO Zhengguo, DU Yulong, HUANG Xiaobo, *et al.* Reinforcement mechanism and construction technology of broken stone fills by dynamic consolidation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and**

Engineering, 2013, 32(2): 377-384.

[3] 张建辉, 张静堃, 孟黎, 等. 强夯加固风成砂地基的土层沉降研究[J]. **工程力学**, 2014, 31(增): 145-148.

ZHANG Jianhui, ZHANG Jingkun, MENG Li, *et al.* Soil layer settlement of compacted aeolian sand foundations[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(S): 145-148.

[4] FENG S J, DU F L, SHI Z M, *et al.* Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction[J]. **Engineering Geology**, 2015, 185: 105-115.

[5] 陈忠清, 徐超, 叶观宝, 等. 强夯加固粉土地基试验研究[J]. **工业建筑**, 2013, 43(4): 106-110.

CHEN Zhongqing, XU Chao, YE Guanbao, *et al.* Field evaluation of dynamic compaction on silt foundation[J]. **Industrial Construction**, 2013, 43(4): 106-110.

[6] 江荣丰. 动力固结法加固饱和土地基的适用条件研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(增 1): 3197-3202.

JIANG Rongfeng. Applicable conditions of dynamic consolidation method in saturated soil foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(S1): 3197-3202.

[7] 白冰, 徐华轩, 刘海波, 等. 强夯法加固铁路松软土地基现场试验研究[J]. **中国铁道科学**, 2010, 31(4): 1-6.

BAI Bing, XU Huaxuan, LIU Haibo, *et al.* Field test study on the reinforcement for the saturated soft soil foundation of railway using the dynamic consolidation[J]. **China Railway Science**, 2010, 31(4): 1-6.

[8] 文思强, 李云鹏, 马康. 强夯能量利用率反演及加固影响范围研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(增 2): 185-192.

WEN Siqiang, LI Yunpeng, MA Kang. Research on inversion of energy efficiency and compacted and affected scope of dynamic compaction[J]. **Rock and**

- Soil Mechanics**, 2015, 36(S2): 185-192.
- [9] 袁海平, 韩治勇, 石贤增, 等. 强夯法在皖江软土地基处理中的应用[J]. **施工技术**, 2016, 45(11): 50-54.
- YUAN Haiping, HAN Zhiyong, SHI Xianzeng, *et al.* Application of dynamic compaction method in soft soil subgrade treatment in Wanjiang region [J]. **Construction Technology**, 2016, 45(11): 50-54.
- [10] 刘洋, 张铎, 闫鸿翔. 吹填土强夯加排水地基处理的数值分析与应用[J]. **岩土力学**, 2013, 34(5): 1478-1486.
- LIU Yang, ZHANG Duo, YAN Hongxiang. Numerical simulation and application of dynamic compaction with drainage for hydraulic fill deposits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1478-1486.
- [11] 郑凌透, 周风华. 强夯置换软土中碎石墩形成过程的试验研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(1): 90-97.
- ZHENG Lingwei, ZHOU Fenghua. Experimental study of forming process of replacement pier in soft soil using dynamic replacement method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 90-97.
- [12] 符洪涛, 王军, 蔡袁强, 等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(3): 612-620.
- FU Hongtao, WANG Jun, CAI Yuanqiang, *et al.* Experimental study of combined application of electro-osmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground reinforcement [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(3): 612-620.
- [13] 刘红军, 吴腾, 马江, 等. 基于孔压监测的强夯置换和砂井-强夯处理饱和软土地基试验研究[J]. **中国海洋大学学报**, 2015, 45(2): 109-114.
- LIU Hongjun, WU Teng, MA Jiang, *et al.* An experimental study on saturated soft ground improvement with dynamic compaction replacement and DCM combined with sand-drain based on monitoring of pore water pressure[J]. **Periodical of Ocean University of China**, 2015, 45(2): 109-114.
- [14] 马健, 姜爽, 刘丽. 高能级强夯置换处理软土地基孔隙水压力研究[J]. **施工技术**, 2017, 46(8): 12-15.
- MA Jian, JIANG Shuang, LIU Li. Research on pore water pressure for treatment of soft soil foundation by high energy dynamic compaction replacement method [J]. **Construction Technology**, 2017, 46(8): 12-15.
- [15] 孙田磊, 刘叔灼, 王永平, 等. 高能级强夯加固软基现场试验研究[J]. **武汉大学学报**, 2014, 47(6): 789-793.
- SUN Tianlei, LIU Shuzhuo, WANG Yongping, *et al.* In-situ experimental research on high energy dynamic compaction on soft foundation[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2014, 47(6): 789-793.

(本文编辑:何雪)