

# 高能级强夯加固粗颗粒碎石回填地基现场试验

冯世进<sup>1,2</sup>, 水伟厚<sup>3</sup>, 梁永辉<sup>3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

**摘要:** 利用能级为 15 000 kN·m 的高能级强夯加固粗颗粒碎石回填地基, 测试夯击过程中夯坑及其周边土体的沉降变形, 并对强夯后的地基加固效果进行检测与评价。可发现, 第 1、2 和 3 遍夯击时的平均夯坑深度分别达到 4.38、3.71 和 1.93 m, 夯击过程中地表土体都发生沉降变形, 并未发生隆起; 利用多道瞬态面波法评价该场地强夯加固深度至少达到 16.5 m, 并且在整个加固深度范围内, 未出现软弱层, 夯后地基承载力远高于设计要求值。最后, 提出了利用 Menard 公式评价高能级强夯处理粗颗粒碎石回填地基有效加固深度时  $n$  值的范围, 为同类场地条件下高能级强夯工程的设计、施工与检测提供了参考。

**关键词:** 高能级强夯; 粗颗粒碎石土; 加固深度; 现场试验  
**中图分类号:** TU431 **文献标识码:** A

## Field Test Evaluation of High Energy Dynamic Compaction on Coarse-grained Gravel Fills

FENG Shijin<sup>1,2</sup>, SHUI Weihou<sup>3</sup>, LIANG Yonghui<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shanghai 200011, China)

**Abstract:** A field test study was carried out by using high energy dynamic compaction (HEDC) with 15 000 kN·m energy on coarse-grained gravel fill materials. In the course of tamping, the settlement of the crater per drop was monitored for all impact points at the first three passes, and the ground surface deformations around three impact points were also measured. It can be seen that the average crater depths reach 4.38 m, 3.71 m and 1.93 m for the first, second and third passes, respectively. Also, no ground heave was observed during construction. After HEDC, the spectral analysis of surface wave (SASW) test was undertaken before and after HEDC in order to determine the depth of improvement. The

SASW measurements indicated the depth of improvement following HEDC was not less than 16.5 m and there were no obvious weak layer. Based on three plate-load tests, the allowable bearing capacities of the site after HEDC also met the design requirements. Finally, the  $n$  values in Menard formula was determined to calculate the improvement depth for HEDC of coarse-grained gravels. This provides the references for the design, construction, and detection of HEDC at similar sites.

**Key words:** high energy dynamic compaction (HEDC); coarse-grained gravel fills; depth of improvement; field test

近年来,我国沿海城市填海造陆工程建设迅速发展,这类沿海造陆工程的填土厚度很多都达到 10 m 以上,大部分都采用单击夯击能大于 8 000 kN·m 的高能级强夯进行处理,取得了较好的加固效果。但是,我国建筑地基处理技术规范<sup>[1]</sup>仅仅规定了 1 000~8 000 kN·m 能级的强夯施工参数,由于高能级强夯加固机理与低能级强夯加固机理有较大差别,采用低能级强夯的设计方法去设计高能级强夯工程会导致非常大的误差。目前,已有很多学者开展强夯法的研究,但是主要集中在低能级强夯的加固机理、设计施工参数和振动传播等方面<sup>[2-4]</sup>。近年来,一些学者开始研究高能级强夯的加固机理和设计方法, Feng 等<sup>[5-6]</sup>分析了 8 000 和 12 000 kN·m 能级作用下强夯处理粗颗粒碎石回填地基的加固效果; 水伟厚等<sup>[7]</sup>、王铁宏等<sup>[8]</sup>详细分析了碎石回填地基在 10 000 kN·m 能级强夯时的地表变形和土体孔压变化,并分析了强夯前后土体土性的变化; 年廷凯等<sup>[9-10]</sup>通过现场试验分析了山谷型与滨海型两种不同土质条件下碎石回填地基的高能级强夯加固效果。可以发现,现有的高能级强夯研究主要集中在能

级为  $8\,000\sim 12\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 而近年来更高能级夯击能(大于  $12\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ )在实际工程中逐渐得到应用, 对于更高能级强夯条件下土体的受力变形性状、强夯施工方法和设计参数需要进一步研究。

本文对能级为  $15\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  的高能级强夯加固粗颗粒碎石回填地基进行现场试验研究, 在夯击过程中测试夯坑及其周边土体的沉降变形, 在加固处理后, 利用多道瞬态面波法评价高能级强夯的加固深度, 并利用载荷试验确定夯后地基土体的承载能力。最后, 结合其他类似工程实例, 提出了利用 Menard 公式评价高能级强夯处理粗颗粒碎石回填地基有效加固深度时  $n$  值的范围, 为同类地区高能级强夯工程的设计、施工与检测提供了参考, 为我国建筑地基处理技术规范<sup>[1]</sup>中有关强夯部分的修订和发展提供依据。

## 1 现场地质条件

试验场地为炸山填海、填谷形成, 场地回填土结构松散且为新近回填, 极少部分回填土体粒径达到  $80\text{ cm}$ 。填土成分不均匀, 表面略有起伏, 整个试验场地填土厚度为  $16.5\text{ m}$  左右, 地下水位受潮汐影响较大, 在地面以下  $5.81\sim 7.10\text{ m}$  波动。根据试验场地夯前钻孔揭露, 场地地层自上而下划分为 4 层: ①素填土, 褐黄色, 稍密, 主要由全风化~中风化花岗岩块石、碎石、砾石和粗砂堆积而成, 层厚在  $16.5\text{ m}$  左右, 粒径大小主要在  $3\sim 40\text{ cm}$  之间, 钻进十分困难, 土的颗粒级配较差, 承载力较低; ②粉砂, 灰黄色, 饱和, 松散~稍密, 层厚在  $7.8\sim 8.9\text{ m}$  之间, 矿物成分以石英和长石为主, 局部地层含有少量细砂、淤泥和中砂; ③砾砂, 灰色, 饱和, 稍密, 层厚在  $4.4\sim 7.2\text{ m}$  之间, 矿物成分以石英和长石为主, 含粘粒较多; ④强风化花岗岩, 灰黄色~灰白色, 块状构造, 中粒花岗结构, 结构构造大部分破坏, 长石大部分已蚀变, 岩体较破碎, 节理裂隙发育, 岩芯呈碎块状, 偶见短柱状, 钻进较困难。

## 2 高能级强夯施工参数

试验场地为  $40\text{ m}\times 40\text{ m}$  的正方形, 整个强夯过程分为 4 遍, 夯锤为直径  $2.5\text{ m}$  的平锤, 夯点施工布置图见图 1 所示。图中,  $S_1\sim S_3$  分别为第 1, 2, 3 遍夯点,  $D_1\sim D_3$  为动力触探测点,  $R_1\sim R_3$  为表面波检测点,  $P_1\sim P_3$  为静力载荷试验点。第 1 遍采用

$15\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯, 夯点间距为  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ , 收锤标准按最后两击平均夯沉量不大于  $30\text{ cm}$  且击数不少于 15 击控制。第 2 遍也采用  $15\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯, 夯点位于第 1 遍 4 个夯点中心, 夯点间距为  $10\text{ m}$ , 收锤标准按最后两击平均夯沉量不大于  $25\text{ cm}$  且击数不少于 13 击控制。第 3 遍采用  $8\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯一遍, 夯点位于第 1, 2 遍相邻两个主夯点中间, 收锤标准按最后两击平均夯沉量不大于  $10\text{ cm}$  且击数不少于 10 击控制。第 4 遍为满夯施工, 夯击能量为  $2\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 每点夯 3 击, 夯印搭接面积为  $1/3$  夯底面积。满夯结束后整平场地, 测量标高。

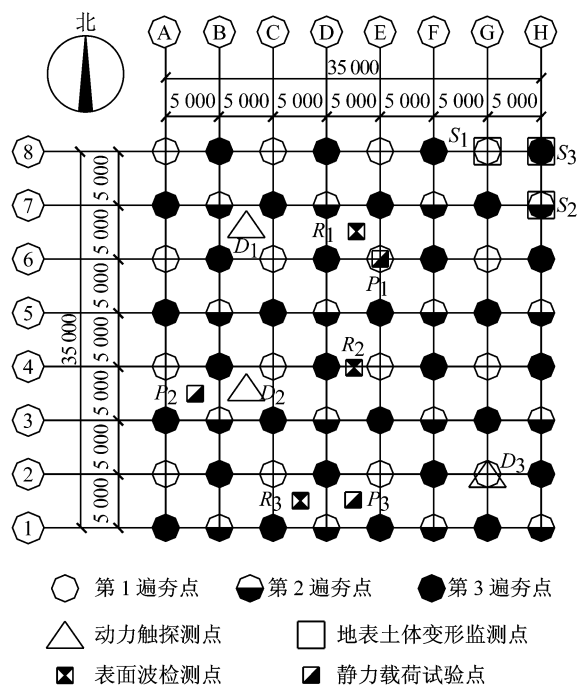


图 1 试验场地夯点及测点布置图(单位: mm)

Fig.1 Layout of impact points and test points (unit: mm)

## 3 现场试验方案

### 3.1 土体变形测试

为了分析高能级强夯作用下土体的变形规律, 在施工过程中, 对图 1 中每个单点夯的每一击夯击变形都进行测试, 得到每个单点夯在每击作用下的变形量。为了监测夯坑周围土体的变形, 以及判断夯坑周边是否出现隆起现象, 在第 1, 2 和 3 遍夯击过程中, 分别选取  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  夯点进行地表沉降变形观测, 具体监测点的位置如图 1 所示。在每个监测点的东西和南北方向分别布置 4 个沉降观测点, 第 1

个观测点距离夯锤边缘为 2 m,其余观测点间距均为 1 m.

### 3.2 高能级强夯加固地基效果现场测试

为了评价高能级强夯加固地基的效果,必须对夯后地基进行检测.对高能级强夯地基处理效果的评价主要包括有效加固深度、地基承载力和场地均匀性等.目前在实际工程中,主要采用现场试验评价强夯地基加固效果,一般采用多项检测手段进行综合评价.在本试验场地,最初采用动力触探试验实测不同深度处触探击数,进行夯前夯后对比,评价地基处理的深层加固效果,确定不同深度内地基土的承载力特征值、变形模量等.3个动探点  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$  的位置如图 1 所示.但是,本场地主要由炸山花岗岩块石回填,在动探时遇到块石反弹,击数很高,每 10 cm 击数都在 20 击以上,导致动探试验无法进行,在 3 个动探点都出现类似情况.通过综合对比,最后采用多道瞬态面波法评价高能级强夯加固地基的效果.

多道瞬态面波测试是利用面波在不均匀介质中的频散特性,首先通过锤击形成振源,产生一定频率范围内的面波,不同频率的面波叠加在一起,以复合波的形式向前传播,将所采集的信号经过频谱分析和相位谱分析,把记录中不同频率的面波进行分离,从而得到一条频散曲线,然后对各个测点实测波形提取速度频散数据,根据频散数据反演出分层剪切速度,绘制等效剪切波速随深度变化曲线,对土层均匀性和加固效果进行评价.本文试验是采用日本 OYO 公司 McSEIS-SXW 高分辨率表面波地震仪进

行测试,测点  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  的具体位置如图 1 所示,数据采集前进行了场地噪音和干扰调查,进行检波器的一致性检验,并通过现场试验确定采集参数.

### 3.3 夯后地基承载力测试

为了确定高能级强夯后地基承载力,在试验场地进行了 3 组静载荷试验  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ ,具体测点位置如图 1 所示.载荷试验时,在承压板与土层接触处,铺设厚度不大于 20 mm 的中、粗砂层并找平,以保证底板水平,并与土层均匀接触.试验加荷方法采用分级维持荷载沉降相对稳定法(慢速法),每级荷载增量(即加荷等级)取被测试地基土层预估极限承载力的 1/10,沉降值的量测精度均达到 0.01 mm,沉降相对稳定标准一般采用连续 2 h 的每小时沉降量不超过 0.1 mm.

## 4 高能级强夯施工过程中变形分析

### 4.1 夯坑沉降变形分析

图 2 为每击作用下夯坑沉降变形曲线.可以发现,在每一遍夯击过程中,由于场地填土条件的不同,单击作用下夯坑沉降变形变化较大,但对于每一遍夯击,所有夯点的第 1 击沉降变形最大.对于第 1、2 遍夯击,在前 4 击时,随着夯击数的增加,单击作用下夯坑沉降变形迅速减小;当超过第 4 击时,单击作用下夯坑沉降变形变化不大,除个别夯点外,其余夯点单击沉降变形都小于 0.3 m.对于第 3 遍夯击,在第 3 击以后,绝大部分夯点单击沉降变形都小于 0.3 m.

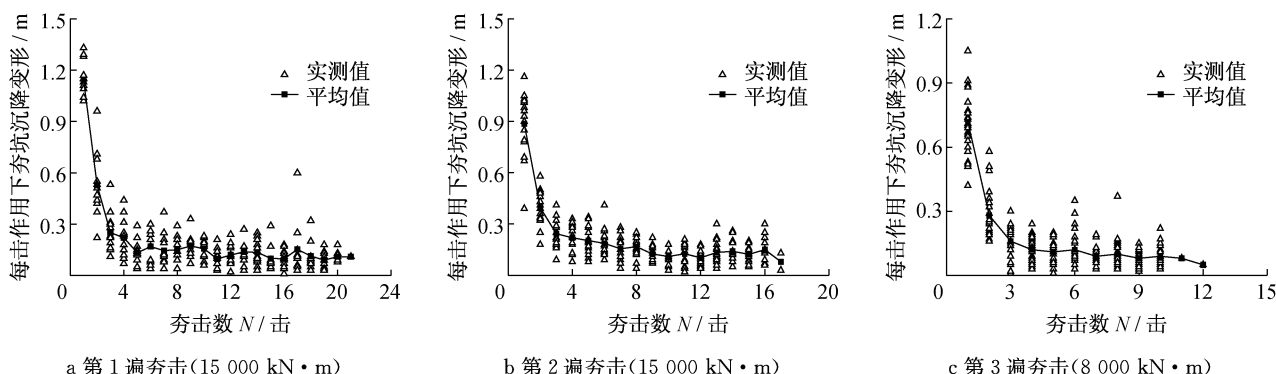


图 2 每击作用下夯坑沉降变形曲线

Fig.2 Increment of crater depth per drop for different impact points

图 3 为不同夯击遍数时每击作用下夯坑平均沉降对比图.可以发现,尽管第 1、2 遍夯击能都为 15 000 kN·m,第 1 遍的前 2 击夯击变形比第 2 遍的前 2 击夯击变形要大得多,这是由于第 2 遍夯击

时土体已在第 1 遍夯击作用下更加密实所致;到了第 3 击以后,第 1、2 遍的单击作用下夯坑的沉降变形比较接近.由于第 3 遍夯击的夯击能仅为 8 000 kN·m,并且在第 1、2 遍夯击后土体更加密实,所以

第3遍夯击时每击作用下夯坑平均沉降都小于第1、2遍.

图4为不同夯击遍数时夯坑平均深度对比曲线.可以发现,第1、2和3遍夯击后平均夯坑深度分

别为4.38、3.71和1.93 m.随着夯击数的增加,第1遍夯击对应的平均夯坑深度最深,第2遍次之,第3遍最小.

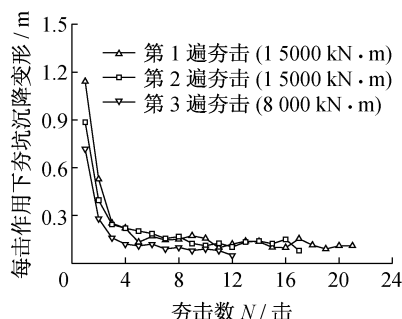
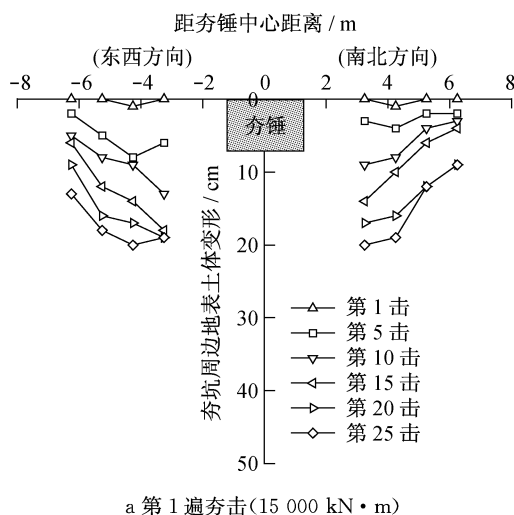


图3 不同夯击遍数时每击作用下夯坑平均沉降对比图

Fig.3 Average increment of crater depth per drop at different passes

#### 4.2 夯坑周边地表土体沉降变形分析

图5为夯坑周边土体竖向位移随夯击数变化关系曲线,可以发现,3个监测点在夯击过程中地表土体都是发生沉降变形,并未发生隆起,并且随着夯击数的增加,地表沉降变形都是在逐渐增大.水伟厚等<sup>[7]</sup>在类似场地条件下,监测3000 kN·m的强夯过程中夯点周边土体发生隆起变形,因此通过与低能级强夯相比,高能级强夯施工时地表土体发生的是沉降变形,这表明高能级强夯具有更好的加固效果.由图5可知,能级越大,地表竖向变形增大,径向变形范围也增加.在监测过程中发现夯点周边土体的沉降影响区域基本为圆形, $S_1$ ,  $S_2$ 和 $S_3$ 三个夯点的影响半径都超过5 m(距夯锤边缘处),这进一步证明在前3遍夯击过程中,夯点之间的距离取为10 m是合适的.



a 第1遍夯击(15 000 kN·m)

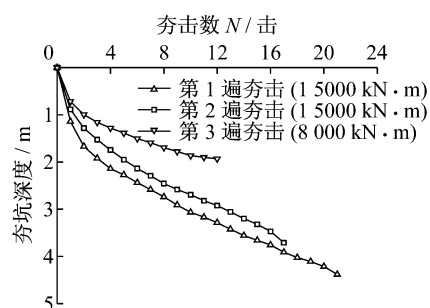
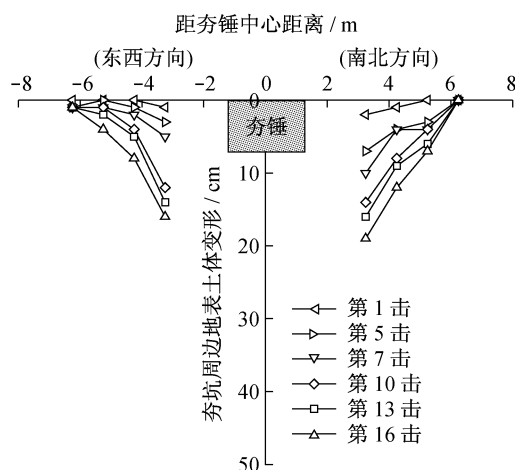
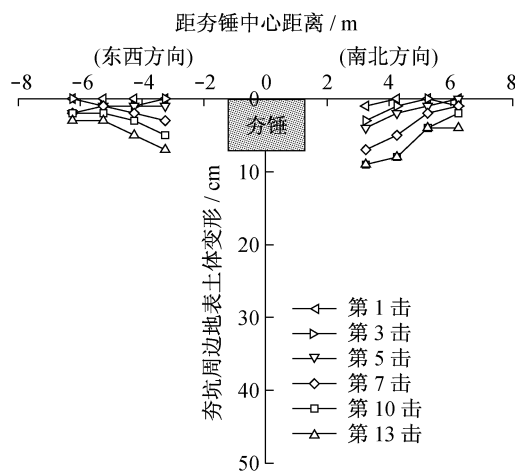


图4 不同夯击遍数时夯坑平均深度对比图

Fig.4 Variation between average crater depth and number of drops at different passes



b 第2遍夯击(15 000 kN·m)



c 第3遍夯击(8 000 kN·m)

图5 夯坑周边土体随夯击数变化关系曲线

Fig.5 Ground surface deformation around three impact points

## 5 高能级强夯加固地基效果分析

### 5.1 有效加固深度分析

图6为测点 $R_1$ 剪切波速随深度变化关系曲线。测点 $R_2$ 和 $R_3$ 夯前夯后剪切波速随深度变化规律基本类似,夯前的剪切波速随深度变化不大;但是,在夯后,上层土体的剪切波速比下层土体的剪切波速要大,随着深度增加剪切波速基本在逐渐减小,这表明上层土体的强夯加固效果比下层土体要好,这正是由于夯击过程中,夯击能量随深度逐渐消散所致。夯前的剪切波速处在 $210\sim 260\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,而夯后剪切波速基本处在 $240\sim 300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,高能级强夯后土体的剪切波速明显得到提高。通过对比夯前夯后剪切波速随深度变化曲线,可以发现强夯加固深度至少达到 $16.5\text{ m}$ ,并且在整个加固深度范围内,并未出现软弱层。

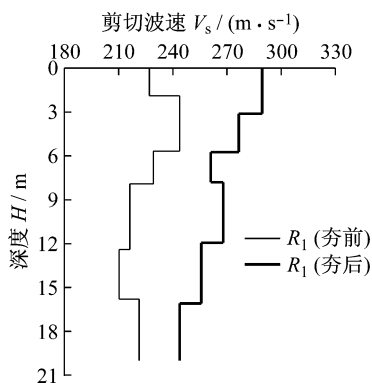


图6 剪切波速随深度变化关系曲线

Fig.6 Shear wave velocity profiles before and after high energy dynamic compaction

在工程实践中,一般根据式(1)评价强夯法处理地基的有效加固深度。

$$D = n(WH)^{0.5} \quad (1)$$

式中: $D$ 为有效加固深度; $W$ 为夯锤重量, $t$ ;  $H$ 为夯锤夯击高度, $m$ ;参数 $n$ 为修正系数,参数 $n$ 与夯击过程中的施工参数及地基土的基本物理力学性质密切相关。结合其他类似工程实例,图7列出了高能级强夯处理粗颗粒碎石回填地基有效加固深度与 $(WH)^{0.5}$ 关系曲线,可以发现,如果采用式(1)评价高能级强夯处理粗颗粒碎石回填地基有效加固深度,修正系数 $n$ 处于 $0.3\sim 0.47$ 之间。

### 5.2 夯后地基承载力分析

图8为载荷试验关系曲线,在最大荷载( $2\,000\text{ kPa}$ )作用下, $P_1$ ,  $P_2$ 和 $P_3$ 分别对应的沉降变形为

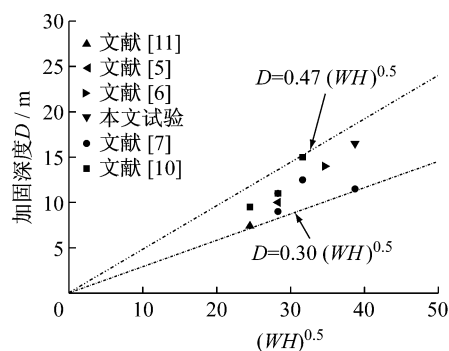


图7 加固深度与 $(WH)^{0.5}$ 关系曲线

Fig.7 Relationship between depth of improvement and  $(WH)^{0.5}$

$21.54, 28.53$ 和 $12.84\text{ mm}$ .可以发现,3个测点的静载荷曲线都未出现陡降段,未发生突然破坏。按照 $s/b = 0.01$  ( $s$ 为沉降值, $b$ 为荷载板宽度)和承载力特征值不超过最大加载量一半的原则<sup>[12]</sup>,可以确定 $S_1$ ,  $S_2$ 和 $S_3$ 静载试验点的地基承载力特征值分别为 $776, 556$ 和 $1\,000\text{ kPa}$ ,远超过设计要求值。

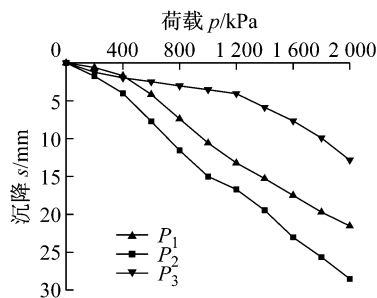


图8 载荷试验关系曲线

Fig.8 Load-settlement curves for plate load test

## 6 结语

利用 $15\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能级的高能级强夯法加固粗颗粒碎石土回填地基,通过对夯坑及其周边土体沉降变形进行观测,并对高能级强夯后地基的加固效果进行评价,可以发现高能级强夯法处理粗颗粒碎石回填地基具有较好的加固效果,具体结论如下:

(1) 对于第1、2和3遍夯击,对应的夯坑深度范围分别为 $3.80\sim 4.75\text{ m}$ ,  $2.92\sim 3.95\text{ m}$ 和 $1.41\sim 2.36\text{ m}$ ,平均夯坑深度分别为 $4.38\text{ m}$ 、 $3.71\text{ m}$ 和 $1.93\text{ m}$ 。

(2) 在夯击过程中地表土体都是发生沉降变形,未发生隆起,并且随着夯击数的增加,地表沉降变形都是在逐渐增大;与低能级强夯相比,高能级强夯具有更好的加固效果。

(3) 对于含有大量碎石的回填地基,单一动力触探试验难以评价高能级强夯加固效果,而多道瞬态面波法是较好的评价方法;通过对比夯前、夯后剪切波速随深度变化曲线,可以确定强夯加固深度至少达到 16.5 m,并且在整个加固深度范围内,未出现软弱层。

(4) 通过静载荷试验,确定 3 个试验点的地基承载力特征值分别为 776、556 和 1 000 kPa,远超过设计要求值。

(5) 采用 Menard 公式评价高能级强夯处理粗颗粒碎石回填地基有效加固深度时,修正系数  $n$  处于 0.3~0.47 之间,这为同类地区高能级强夯工程的设计、施工与检测提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 2002.  
JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of building [S]. 2002.
- [2] Chow Y K, Yong D M, Yong K Y, et al. Dynamic compaction of loose granular soils: effect of print spacing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994,120(7), 1115.
- [3] Pan J L, Selby A R. Simulation of dynamic compaction of loose granular soils[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33: 631.
- [4] Arslan H, Baykal G, Ertas O. Influence of tamper weight shape on dynamic compaction[J]. Ground Improvement, 2007, 11(2), 61.
- [5] Feng S J, Shui W H, Gao L Y, et al. Field studies of the effectiveness of dynamic compaction in coastal reclamation areas [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69:129.
- [6] Feng S J, Shui W H, Gao L Y, et al. Application of high energy dynamic compaction in coastal reclamation areas[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2010, 28(2): 130.
- [7] 水伟厚,王铁宏,王亚凌. 碎石回填地基上 10 000 kN·m 高能级强夯标准贯入试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1309.  
SHUI Weihou, WANG Tiehong, WANG Yaling. SPT for dynamic compaction with 10 000 kN·m high energy on foundation backfilled with crushed stone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10):1309.
- [8] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 10 000 kN·m 高能级强夯地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759.  
WANG Tiehong, SHUI Weihou, WANG Yaling, et al. Experimental research on the ground deformation and pore water pressure during 10000 kN·m high energy level dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 759.
- [9] 年廷凯,李鸿江,杨庆,等. 沿海碎石回填地基上高能级强夯系列试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1029.  
NIAN Tingkai, LI Hongjiang, YANG Qing, et al. Field tests of high energy dynamic compaction on foundation backfilled by crushed stone in coastal area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7), 1029.
- [10] 年廷凯,李鸿江,杨庆,等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1):139.  
NIAN Tingkai, LI Hongjiang, YANG Qing, et al. Research on improvement effect of high energy dynamic compaction (HEDC) under several complicated geological conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 139.
- [11] Feng S J, Shui W H, Tan K, et al. Field evaluation of dynamic compaction on granular deposits[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2011,25(3):241.
- [12] DB21/907—2005 建筑地基基础技术规范[S]. 2005.  
DB21/907—2005 Technical code for building foundation[S]. 2005.