

# 高能级强夯地基土载荷试验研究

水伟厚<sup>1</sup>, 王铁宏<sup>2</sup>, 王亚凌<sup>3</sup>

(1. 上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 2. 中国建设部, 北京 100835; 3. 中化岩土工程有限公司, 北京 102600)

**摘要:** 通过在某沿海碎石土回填地基上成功实施的 10000 kN·m 高能级强夯系列试验, 为 10000 kN·m 高能级强夯的设计、监测和检测提供了依据。本文根据对不同能级强夯后地基土平板载荷试验结果的分析与对比, 得到了碎石场地强夯后  $P-S$  曲线为直线(缓降)型, 其极限承载力和变形模量高, 变形量小; 夯点与夯间地基土的密实度基本一致; 无需过大增加荷载板的面积等试验结果。

**关键词:** 高能级强夯; 平板载荷试验; 荷载板面积

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)07-1090-04

作者简介: 水伟厚(1976-), 男, 博士, 主要从事地基处理设计、检测技术研究。E-mail: sh191@126.com。

## PLT for high energy dynamic compaction of foundation backfilled with crushed stone

SHUI Wei-hou<sup>1</sup>, WANG Tie-hong<sup>2</sup>, WANG Ya-ling<sup>3</sup>

(1. Shanghai Modern Architectural Design Group, Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 2. Ministry of Construction of P. R. China, Beijing 100835, China; 3. China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China)

**Abstract:** A series of experiments of high energy dynamic compaction (DC) were successfully executed on a rubble filled site in a coastal area for the first time in China. The experiment provided the parameters for the design, construction and detection of 10000 kN·m DC. The detected results of plate loading test (PLT) were analyzed and compared with other DC with different energy levels. Some conclusions for rubble filled site after DC were acquired that the mild  $P-S$  curves indicated that the high bearing capacity and small deformation of foundation, the density of rubble at compacted drop points and between them was nearly equal, and it was not necessary to over-increase the area of loading plate.

**Key words:** high energy dynamic compaction; plate loading test (PLT); area of loading plate

## 0 引言

笔者曾对 10000 kN·m 高能级强夯试验过程中的地面变形和孔隙水压力的监测结果及不同能级强夯的标准贯入试验结果进行了对比分析, 得到了碎石土地基上 10000 kN·m 强夯的施工参数、孔压变化特征与 10000 kN·m 强夯有效加固深度的建议值<sup>[1-3]</sup>。本文介绍了系列试验中不同强夯能级作用下夯后地基土平板载荷试验的实测结果, 得出了一些有实用意义的结论, 以期为地基处理规范中强夯部分的修订和发展提供实用参数, 进而指导今后高能级强夯地基处理的工程实践<sup>[4-6]</sup>。

## 1 土层条件与施工工艺

本试验场地最大填土厚度为 11~14 m。夹有较多大块开山石, 粒径较大, 地层详见文献[2]中图 1。

主夯能级 10000 kN·m, 采用 180 kN 和 220 kN 的圆形铸铁组合锤, 第一遍、第二遍夯点间距 10 m × 10 m; 第三遍采用 3000 kN·m 能级插点夯, 满夯能级 1000 kN·m, 夯印搭接 1/3。10000 kN·m 主夯的功效在于处理更大深度地基, 3000 kN·m 插点夯的功效在于处理主夯点之间楔形土地基。夯点布置可参见文献[1]中图 1。

系列试验进行了较为详尽的监测和检测。本文以 10000 kN·m 能级强夯平板载荷试验结果为主, 并与 3000, 6000, 8000 kN·m 的平板载荷试验结果做对比分析, 并对工程中的相关问题进行了探讨。

基金项目: 国家建设部科研攻关基金资助项目(04-2-016); 上海现代建筑设计集团基金资助项目(2004-结-地-03)

收稿日期: 2006-07-12

## 2 平板载荷试验

平板载荷试验是一种较为直观的试验,它是在一定面积的承压板上向地基土逐级施加荷载,测求地基土的压力与变形特性的原位测试方法。它反映承压板下一定深度、宽度范围内地基土的强度、变形的综合特性,成果可靠,对成份和结构不均匀的回填土尤为适合。

为考察较深土层的情况,宜选用较大尺寸的承压板(如 2.5 m × 2.5 m 或 3.0 m × 3.0 m 板),这样平板载荷试验的结果基本可反映较大深宽范围内填土层的工程性质。但承压板过大,试验周期长,加载量大,试验难度大,费用高。故应因地制宜,选择合理的承压板面积。

## 3 载荷试验结果

本次系列试验共进行了 19 组平板载荷试验,其中 2.5 m × 2.5 m 板的平板载荷试验装置示意图见图 1。荷载板采用多层厚钢板叠和,确保不出现影响测试结果的变形。大面积施工区的 10 个平板载荷试验均布置在夯间,变形模量为<sup>[5]</sup>

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为地基土的变形模量 (MPa),  $I_0$  为刚性承压板性态系数, 方形板取 0.886;  $P$  为  $s = (0.10 \sim 0.15) d$  时承压板底的荷载强度 (kPa),  $s$  为与荷载强度  $p$  对应的沉降量 (mm),  $d$  为承压板直径或边长 (m), 结合对炸山回填碎石土的工程经验, 取其泊松比  $\mu = 0.224$ 。利用平板载荷试验确定的强夯土地基承载力特征值和变形模量值见表 1。

表 1 3000, 6000, 8000, 10000 kN · m 能级强夯后平板载荷试验成果表

Table 1 The results of PLT after 3000, 6000, 8000 & 10000 kN · m DC

项目	能级/(kN · m <sup>-1</sup> )									
	Z1 (10000)	Z2 (10000)	Z1 (3000)	Z2 (3000)	P1 (3000)	P2 (3000)	P3 (3000)	Z1 (6000)	Z2 (6000)	
荷载板边长/m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa	350	400	240	180	280	250	240	250	240	
变形模量 $E_0$ /MPa	36.2	39.44	55.8	20.2	68.2	41.1	82.9	65.4	43.9	

项目	能级/(kN · m <sup>-1</sup> )										
	P1 (8000)	P2 (8000)	P3 (8000)	P4 (8000)	P5 (8000)	P6 (8000)	P7 (8000)	P8 (8000)	P9 (8000)	P11 (6000)	
荷载板边长/m	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.5	1.5	
承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa	300	300	280	300	280	300	300	300	250	230	
变形模量 $E_0$ /MPa	66.3	52.3	64.4	61.3	61.0	109.6	64.3	53.3	50.2	45.3	

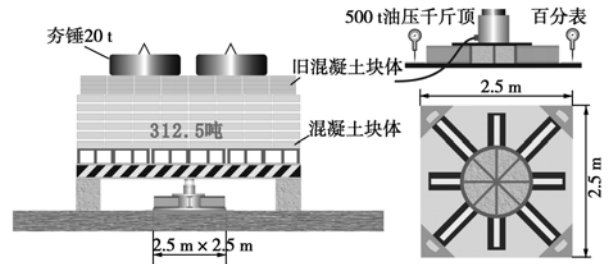


图 1 平板载荷试验及 2.5 m 承压板平、侧面示意图

Fig. 1 PLT and loading plate

表 1 中 10000 kN · m 试验区满夯后布置了两个平板载荷试验点 Z1, Z2, 承压板面积为 1.5 m × 1.5 m, 试验的  $p-s$  曲线见图 2。两点的试验曲线基本相似, Z2 点试验曲线在 350 kPa 之前沉降量略大于 Z1 点, 之后沉降量略小于 Z2 点。

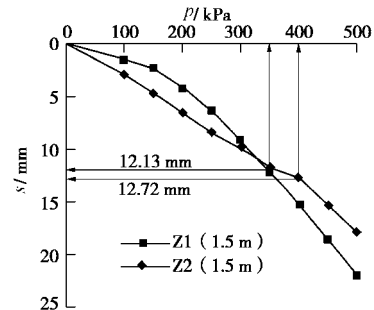


图 2 10000 kN · m 试夯区平板载荷试验关系曲线

Fig. 2 The 10000kN · m PLT results of Z1 & Z2 in the test sites

3000 kN · m 能级强夯在试验区满夯后布置了 2 个平板载荷试验点 Z1, Z2, 在大面积施工后布置了 4 个平板载荷试验点 P1, P2, P3 和 P9, 除了 P9 承压板面积为 2.5 m × 2.5 m 之外, 其它荷载板面积均为 1.5 m × 1.5 m, 各点的  $p-s$  曲线见图 3。其中, Z1 布置在夯点上, Z2 布置在夯间, 大面积施工区的 4 个平板

载荷试验均布置在夯间。需要说明的是 Z2 点由于夯坑积水, 满夯时发现该点表层形成橡皮土。在加载量达到 350 kPa 时的沉降量已超过 80 cm, 承载力检测时不满足要求, 在图 3 中未绘出。从图 3 可以看出, 试验曲线基本上是直线发展, 没有陡降段, 荷载板周围土体没有明显隆起。P9 点荷载板面积 6.25 m<sup>2</sup>, 是其它 4 个荷载板面积的 2.8 倍, 在 150 kPa 之前变形量较大, 之后与其它荷载试验的结果相似, 变形量略大于 P1, P2 和 P3, 但小于 Z1。承载力特征值取为 250 kPa, 与其它小板的平板载荷试验结果相差不大。从图 3 还可以看出, 在相同荷载下夯点上 (Z1 点) 的变形量比夯间试验点还要大, 虽最大变形量也不超过 30 mm。

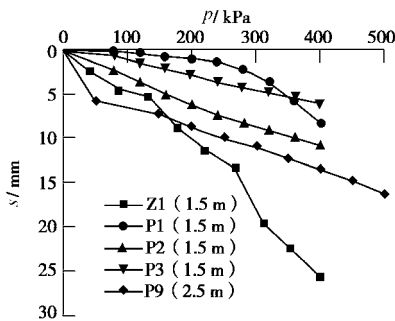


图 3 3000 kN·m 强夯区平板载荷试验结果  
Fig. 3 The PLT results of the 3000 kN·m DC

6000 kN·m 能级强夯在试验区满夯后布置了两个平板载荷试验点 Z1, Z2, 在大面积施工后布置了 1 个平板载荷试验点 P11, 荷载板面积均为 1.5 m×1.5 m, 各点的 p-s 曲线见图 4。其中, Z2 布置在夯点上, Z1 布置在夯间, 大面积施工区的平板载荷试验 P11 布置在夯间。从图 4 看出, 夯点上的 Z2 点和夯间的 Z1, P11 点承载力和变形特性差别不大。p-s 曲线为直线(缓降)型, 在 400~500 kPa 时的总变形量很小, 均在 20 mm 以内。

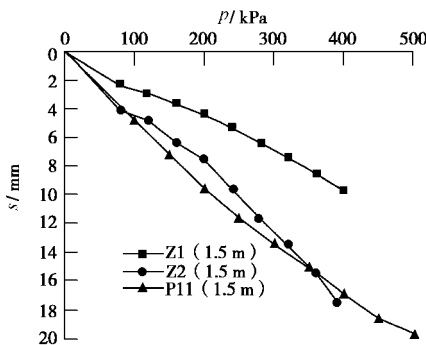


图 4 6000 kN·m 强夯区平板载荷试验结果  
Fig. 4 The PLT results of the 6000 kN·m DC

8000 kN·m 能级强夯在大面积施工后布置了 8 个平板载荷试验点 P1~P9, 其中 P1~P4 承压板面积

为 2.5 m×2.5 m, P5~P9 荷载板面积均为 1.5 m×1.5 m, 各点的 p-s 曲线见图 5。整体上看, 试验曲线均为缓变型, 变形量均在 30 mm 以内。虽然荷载板的大小相差了近 3 倍, 但从图 5 中基本看不出大板和小板的区别。这不仅说明了本场地上强夯后夯点夯间基本一致, 地基的均匀性良好, 故在选择试验点位置时不必刻意定位于夯点还是夯间。而且从试验结果可以看出, 只要荷载板的面积达到一定大小(如本场地碎石填土用 1.5 m×1.5 m 板), 无需再增大荷载板的面积。如对本场地地质条件, 使用 2.5 m×2.5 m 板比 1.5 m×1.5 m 板将会增加大量的试验费用、试验周期和难度。

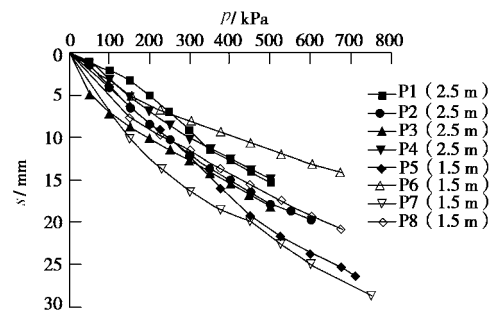


图 5 8000 kN·m 施工区平板载荷试验结果  
Fig. 5 The PLT results of the 8000 kN·m DC

如果对不同能级的试验区(或)施工区平板载荷试验结果取平均值, 可以发现 3000 kN·m 区的承载力特征值为 240 kPa; 6000 kN·m 区的承载力特征值也为 240 kPa; 8000 kN·m 区的承载力特征值为 284 kPa; 10000 kN·m 区只有两个试验点, 数量较少, 平均的承载力特征值较高, 达到了 375 kPa。

由图 2~5 可以看出, 大部分 p-s 曲线为直线(缓降)型, 最大加载量虽然达到了设计承载力要求的两倍, 但没有达到极限荷载。所得承载力试验结果只能代表了该地基处理后满足了工程设计要求, 而不是地基真实的承载力特征值, 其极限承载力将高于或远高于上述承载力特征值的 2 倍。

### 4 结 语

(1) 通过 19 组平板载荷试验, 得到了碎石场地上 3000, 6000, 8000, 10000 kN·m 能级的承载力和变形模量;

(2) 3000 kN·m 区和 6000 kN·m 区平均的承载力特征值为 240 kPa; 8000 kN·m 区平均的承载力特征值为 284 kPa; 10000 kN·m 区平均的承载力特征值达到了 375 kPa。

(3) 碎石场地强夯后 p-s 曲线均为直线(缓降)型, 其极限承载力较高。在 400~500 kPa 时的总变形

量很小,基本上均在 30 mm 以内。

(4) 本类场地强夯加固后夯点与夯间地基土的密实度基本一致,静载试验反映的承载力和变形特性基本相同。在选择试验点位置时不必考虑定位于夯点还是夯间,宜选择具有代表性的位置。

(5) 从试验结果来看,只要荷载板的面积达到一定大小(如本场地碎石填土用 1.5 m × 1.5 m 板),不必过大增加荷载板的面积。

本课题的试验结果可供沿海碎石土回填地基、山区回填地基和大厚度的湿陷性土地基处理参考,对华北、东北的粉砂土地基以及经过预处理形成排水通道适宜强夯的淤泥质土等的地基处理亦可借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 10000 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 – 762. (WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, 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 – 762. (in Chinese))
- [2] 水伟厚,王铁宏,朱建锋. 碎石回填地基上 10000 kN·m 高能级强夯标准贯入试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1309 – 1312. (SHUI Wei-hou, WANG Tie-hong, WANG Ya-ling. SPT research during 10000 kN·m high energy dynamic compaction for foundation backfilling with crushed stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1309 – 1312. (in Chinese))
- [3] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 2005(3): 27 – 38. (WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al. The definite method and decision criterion on effective depth of dynamic compaction improvement[J]. Standardization of Engineering Construction, 2005(3): 27 – 38. (in Chinese))
- [4] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (WANG Tie-hong, Case histories in ground treatment of great engineering of china[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [6] 水伟厚. 冲击应力与 10000 kN·m 高能级强夯系列试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. (SHUI Wei-hou. Impact stress and 10000 kN·m series of experimental investigations of high energy level dynamic compaction[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))