

高填方碎石土地基 16 000 kN · m 能级强夯试验研究

王铁宏¹ 水伟厚² 王亚凌³

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

摘 要:通过在某港口罐区大厚度回填碎石土地实施的国内首次最高能级——16 000 kN · m 能级强夯系列试验与大面积施工研究,据地面变形、重型动力触探和面波测试结果评价地基加固效果,建立了碎石土强夯能级与累积夯沉量的关系式,提出了加固效果不仅与能级有关,而且和锤重与落距组合有关;并结合课题的系列试验,提出了 16 000,14 000,12 000,10 000 kN · m 能级的有效加固深度等结论,为规范的修订和发展提供了参数依据。

关键词:高能级强夯;16 000 kN · m;重型动力触探;累积夯沉量;有效加固深度

1 前言

为研究不同能级强夯和相同能级不同锤重落距组合对碎石回填地基的加固效果,在本课题系列试验研究的基础上进行了本试验^[1-4]。试验项目包括 16 000 kN · m 大面积强夯、14 000 kN · m 单点夯、12 000 kN · m 群夯、10 000 kN · m 单点夯、8 000 kN · m 单点夯和 6 000 kN · m 单点夯(锤重分别为 180,250,460 kN),其中 16 000 kN · m 强夯为国内首次实施的最高能级的强夯,其他能级涵盖了国内目前工程上常用的高能级^[1-4]。试验场地位于某港口罐区,本文就相同能级、不同锤重强夯试验、单点夯试验、群夯试验的检测结果进行对比分析和讨论,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^[1,5,6]。

2 工程地质条件

根据场地钻孔资料,场地地层结构自上而下分别为:

①素填土①(Q₄^{ml}):黄褐色、灰褐色,松散,稍湿,主要由板岩碎块及粘性土等组成,碎块含量 65%~75%。粒径 3~8 cm,个别粒径大于 40 cm,厚度为 6.20~10.80 m。

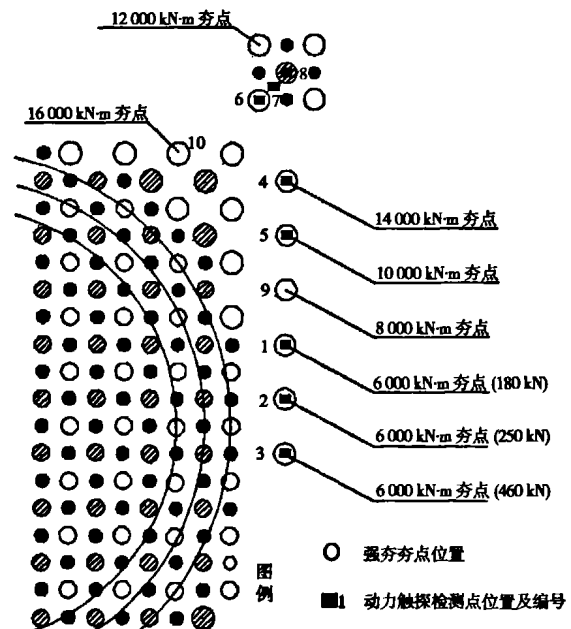


图 1 试验区夯点和检测点平面布置示意图

②素填土②(Q₄^{ml}):黄褐色、灰褐色,松散,稍湿~湿,主要由板岩碎块及粘性土等组成,碎块

含量 35% ~ 55%。粒径 1 ~ 10 cm,个别粒径大于 40 cm,厚度为 1.60 ~ 5.40 m。

③含砾粉细砂(Q_4^{al-pl}):灰褐色,饱和,松散,含有 30% 左右的石英质砾石及少量海生物遗骸,厚度为 0.50 ~ 1.50 m。

④粉质粘土(Q_4^{al-pl}):灰褐色,湿,软塑 ~ 可塑,含有砾碎石及少量贝壳等海生物遗骸,厚度为 0.70 ~ 1.60 m。

⑤强风化板岩(Zwhg):黄褐色,稍湿,岩体具散体结构,岩芯呈碎石土状,干钻不易进尺,岩体基本质量等级为 V 级,厚度为 0.50 ~ 1.00 m。

3 地面变形监测结果

该罐区试验夯施工动用两台机组,12 000 kN·m 及以上能级的强夯施工采用的是课题组研制成功的专利机械——CGE 1800 B 型强夯机。从现场施工来看一次成孔中间不加料的夯点坍塌量较大,夯坑深度较浅。夯点布置如图 1 所示,各点夯沉量曲线如图 2 所示,对应的击数、夯坑体积等参数见表 1。

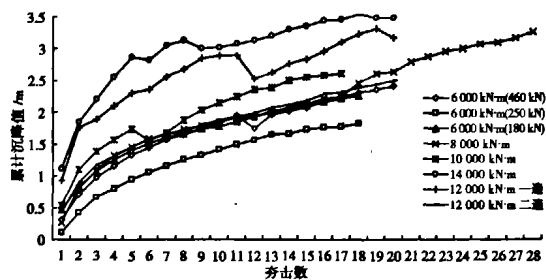


图 2 实测累积夯沉量曲线

表 1 强夯施工记录

夯点编号	夯击数	最后两击平均下沉量/cm	坑深/m	上口径/m	累计夯沉量/m	夯坑理论填料/m ³
6 000 kN·m (180 kN)	18	5	2.12	5.2	2.12	10.5
6 000 kN·m (250 kN)	18	3	2.2	5.3	2.2	11.5
6 000 kN·m (460 kN)	20	6	2.65	5.5	2.65	17
8 000 kN·m	17	6	2.8		2.8	
10 000 kN·m	17	3	3.17	7.1	3.35	41
12 000 kN·m	20	6	3.8			
14 000 kN·m	20		3.86	8.1	4.04	53
16 000 kN·m	11	8.5	5.63	7.35	5.63	

6 000 kN·m 能级试验选用 3 种锤的参数如下:

锤重/kN	锤的直径/m	锤高/m	落距/m
460	2.5	1.8	13.1
250	2.7	1.4	24.0
180	2.5	1.0	33.4

从图 2 和表 1 可以看出,对 6 000 kN·m 能级在 3 种不同锤重单点夯施工中,460 kN 锤的累计夯沉量为 2.65 m,250 kN 锤的累计夯沉量为 2.20 m,180 kN 锤的累计夯沉量为 2.12 m,按规范要求停锤标准分别夯击了 20,18,18 击。其中 460 kN 锤的夯坑较深,其他 2 种锤重无明显差别。

其他能级的夯锤均为 460 kN,落距与能级相适应。8 000 kN·m 单点夯累计夯沉量为 2.8 m,10 000 kN·m 和 14 000 kN·m 单点夯夯沉量分别为 3.35 m 和 4.04 m,夯击了 17 击和 20 击;12 000 kN·m 群夯施工中在夯到 20 击左右因夯坑坍塌无法继续进行施工,累计夯沉量为 3.8 m。16 000 kN·m 单点夯累计夯沉量为 5.63 m,由于四周坍塌量较严重,16 000 kN·m 能级夯击到 11 击时就无法继续进行施工。各点施工中均未发生土体隆起现象。

夯沉量可直观反映加固效果。本次试验中强夯能级与累积夯沉量实测曲线如图 3 所示,可以看出,随强夯能级增加,累计夯沉量趋势几乎呈直线增加。由此可建立的关系式为:

$$h = 0.03E + 15 \quad (1)$$

式中 h 为累计夯沉量,cm; E 为强夯能级,kN·m。

公式的适用条件为:①较大粒径的素填土、山皮石、碎石土、建筑垃圾杂填土等;②填土深度超过 2 h 倍以上;③强夯能级不小于 1 500 kN·m;④对填土地面强夯施工前进行土方量的估算时亦可采用。由于填土的不均匀性,经多个项目的验算,按此公式计算的误差范围在 20 cm 左右。

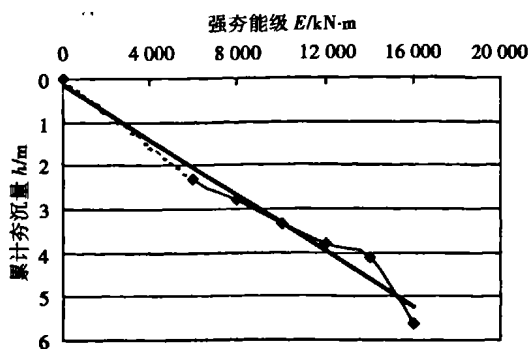


图3 强夯能级与累积夯沉量实测曲线

4 地基加固效果对比分析

4.1 重型动力触探试验

在不同接地静压力夯锤、单点夯、群夯试验后,分别对试验区进行动探检测,绘制了动探曲线,为更加准确反映同一区域的加固效果,夯前、夯后动探试验曲线均一一对应。

4.1.1 相同能级不同锤重加固效果比较

1[#],2[#],3[#]动探检测点位于6 000 kN·m强夯夯点处,锤重分别为180,250,460 kN,修正后的夯前、夯后动探曲线如图4所示。需要说明的是,本次试验中动探击数在浅层均较小是由于检测时夯坑内后续填料未进行满夯的原因。表2为根据动探击数所换算的地基承载力、变形模量。

表2 1[#],2[#],3[#]点土层的承载力和变形模量

检测点号	锤重/kN	土层分类	承载力/kPa			E_0 /MPa		
			夯前	夯后	提高幅度/%	夯前	夯后	提高幅度/%
1	180	素填土①	160	168	5.00	12	12.42	3.50
		素填土②	240	292	21.67	16	19.25	20.31
		粉质粘土	140	167	19.29	5.58*	5.58*	0.00
		强风化板岩	320	359	12.19	21	23.45	11.67
2	250	素填土①	200	162	23.46	14	12.1	15.70
		素填土②	240	263	9.58	16	17.5	9.38
		粉质粘土	140	167.5	19.64	5.05*	5.58*	10.50
		强风化板岩	320	356	11.25	21	23.25	10.71
3	460	素填土①	160	186	16.25	12	13.3	10.83
		素填土②	160	280	75.00	12	18.48	54.00
		粉质粘土	140	167.5	19.64	5.05*	5.58*	10.50
		强风化板岩	320	349	9.06	21	22.83	8.71

注:表中数据右上角标注“*”为粉质粘土的压缩模量。

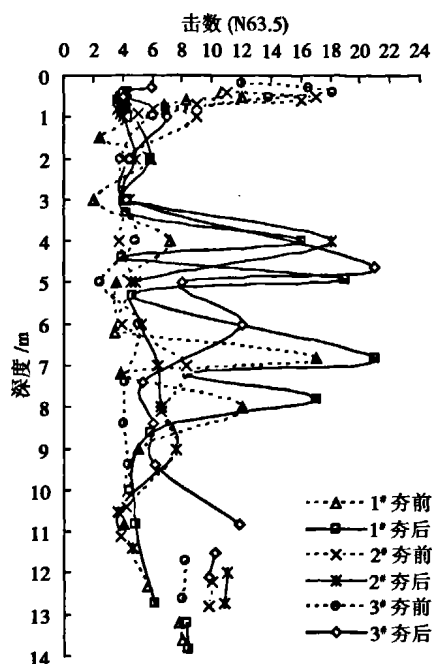


图4 1[#],2[#],3[#]夯前、夯后动探对比曲线

虽填土土质极不均匀,动探曲线差异性较大,但通过夯前夯后对比和表2可以看出,460 kN锤强夯处理效果最好,250 kN锤次之,均优于180 kN锤。460 kN锤强夯加固深度在8.0 m左右,250 kN锤强夯加固深度在5.0 m左右,180 kN锤强夯加固深度在4.5 m左右。在检测深度范围内,1[#]点承载力平均提高幅度为14.54%,变形模量平均提高幅度为8.87%;2[#]点承载力平均提高幅度为15.98%,变形模量平均提高幅度为11.57%;3[#]点承载力平均提高幅度为29.99%,变形模量平均提高幅度为21.01%。可见相同能级下,夯锤越重,地基土加固密实度越好,地基土承载力提高越大,有效加固深度越深。再次用实践证明了重锤低落距的加固效果要优于轻锤高落距,也说明有效加固深度不仅与能级有关,而且和锤重与落距的组合有关。因此行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002[5])(以下简称“规范”)中根据能级判定加固深度是针对重锤低落距提出的,对轻锤高落距宜取小值或打折使用。

4.1.2 不同能级强夯加固效果比较

3[#],4[#],5[#],9[#]检测点位置分别位于6 000,14 000,10 000,16 000 kN·m能级强夯夯点处,

4[#],5[#],9[#]修正的夯前、夯后动探曲线分别如图5所示,3[#]修正的夯前、夯后动探曲线分别如图4所示。

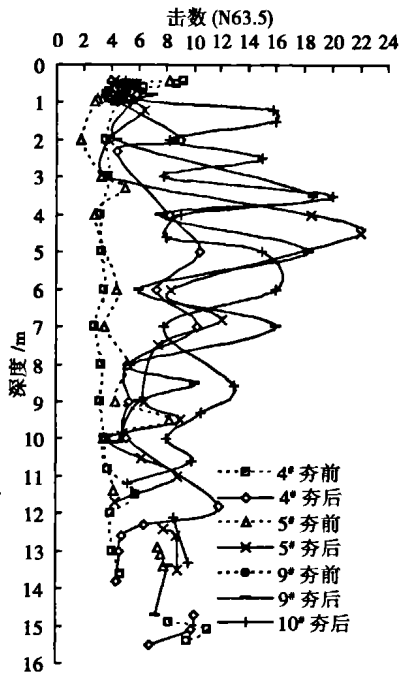


图5 4[#],5[#],9[#],10[#]夯前、夯后动探对比曲线

表3 4[#],5[#]点土层的承载力和变形模量

检测点号	能级/(kN·m)	土层分类	承载力/kPa			E_p /MPa		
			夯前	夯后	提高幅度/%	夯前	夯后	提高幅度/%
4	14 000	素填土①	100	192	92.00	8.30	13.58	63.61
		素填土②	120	296	146.67	10.0	19.53	95.30
		粉质粘土	140	167.5	19.64	5.58*	5.58*	0.00
		强风化板岩	320	350	9.38	21.0	22.85	8.81
5	10 000	素填土①	120	174	45.00	10.0	12.72	27.20
		素填土②	160	284	77.50	12.0	18.75	56.25
		粉质粘土	140	167	19.29	5.05*	5.58*	10.50
		强风化板岩	320	352	10.00	21.0	23.03	9.67

注:表中数据右上角标注“*”为粉质粘土的压缩模量。

表3为在不同能级条件下根据动探击数所换算的地基承载力、变形模量。

从动探曲线图4、图5和表2、表3可以看出,16 000 kN·m能级单点夯加固深度在14.5 m左右,14 000 kN·m能级单点夯加固深度在13.5 m左右,10 000 kN·m能级单点夯加固深度在11.0 m左右,8 000 kN·m能级单点夯加固深度在9.0 m左右。在检测深度范围内,4[#]点承载力平均提高幅度为66.92%,变形模量平均提高幅度为41.93%;5[#]点承载力平均提高幅度为

37.95%,变形模量平均提高幅度为25.91%。可见能级越大,地基土加固密实度越好,地基土承载力提高越大,有效加固深度越深。同时可以看出,单点夯动探曲线的差异性使得加固效果的判定较为困难。

4.1.3 单点夯与群夯加固效果比较

6[#],7[#],8[#]检测点位于群夯加固区域,能级均为12 000 kN·m。修正的夯前、夯后动探曲线分别如图6所示。

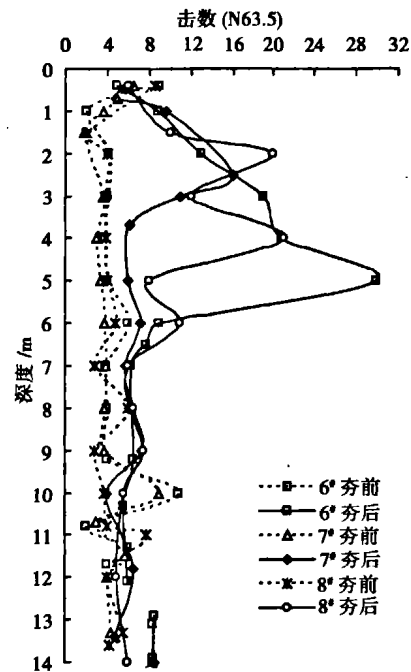


图6 6[#],7[#],8[#]夯前、夯后动探对比曲线

表4为在相同能级条件下根据动探击数所换算的地基承载力、变形模量。

从图6和表4可以看出,12 000 kN·m能级群夯区3个点的有效加固深度均在11.5 m左右。在检测深度范围内,6[#]点承载力平均提高幅度为78.13%,变形模量平均提高幅度为46.44%;7[#]点承载力平均提高幅度为60.13%,变形模量平均提高幅度为34.78%;8[#]点承载力平均提高幅度为64.76%,变形模量平均提高幅度为37.95%。12 000 kN·m能级群夯强夯不同检测点加固深度相差不大,不同点检测深度范围内平均承载力和平均变形模量相差不大。



表4 4[#],5[#]点土层的承载力和变形模量

检测点号	能级/(kN·m)	土层分类	承载力/kPa			变形模量 E_v /MPa		
			夯前	夯后	提高幅度/%	夯前	夯后	提高幅度/%
6	1200	素填土①	120	441	267.50	10	26.76	167.60
		素填土②	200	203	1.50	14	14.16	1.14
		粉质粘土	140	190	35.71	5.38*	6.11*	9.50
		强风化板岩	320	345	7.81	21	22.58	7.52
7	1200	素填土①	120	287	139.17	10	18.98	89.80
		素填土②	120	198	65.00	10	13.92	39.20
		粉质粘土	140	190	35.71	5.38*	6.11*	9.50
		强风化板岩	320	322	0.63	21	21.13	0.62
8	1200	素填土①	120	320	166.67	10	21.03	110.30
		素填土②	120	199	65.83	10	13.96	39.60
		粉质粘土	140	167.5	19.64	5.38*	5.38*	0.00
		强风化板岩	320	342	6.88	21	21.4	1.90

注:表中数据右上角标注“*”为粉质粘土的压缩模量。

比较图4、图5和图6可以发现:虽填土不均匀,但图6所示的6[#],7[#],8[#]点群夯检测结果的均匀性远好于图4和图5显示的其他点的均匀性,加固效果也易于判定。因此,规范规定的施工前的强夯试验宜进行群夯试验来判定加固效果,而非单点夯试验。

4.2 瑞雷波测试加固效果分析

本次试验采用SRS 24型多功能工程地震仪,数据采集前进行了场地噪音和干扰调查,并进行了检波器的一致性检验,并通过现场试验确定的采集参数如下:

道数:24道;道距:1m或0.5m;偏移距:10m或15m;采样点数:1024;采样率:1ms;检波器:4.5Hz;震源:采用20磅大锤人工锤击地面。

(1)能级相同、锤重不同的强夯加固效果比较

对于6000kN·m强夯加固试验,当锤重分别为180,250,460kN时,对加固区进行瑞雷波测试,提取频散曲线进行反演,将反演的横波波速分层进行计算等效横波波速,计算深度为1~13m,等效波速曲线如图7所示。图中空白区表示测点旁边10m处未经强夯法加固处理区域的测点。从图7波速曲线可以看出,同空白区相比较,同为6000kN·m能级,460kN锤和250kN锤的有效加固深度均在9.0m左右,180kN锤的有效加固深度明显较浅,在4.0左右。460kN锤加固后地层均匀性要好于250kN锤。

(2)不同能级强夯、单点夯与群夯加固效果比较

通过6000,8000,10000,12000,14000kN·m能级强夯加固后波速比较:能级越高等效横波波速越高;8000~14000kN·m强夯后地层波速相差不大,可能是地层的差异性对强夯加固效果的影响;群夯加固后地层的均匀性较单点夯加固的均匀性为好。

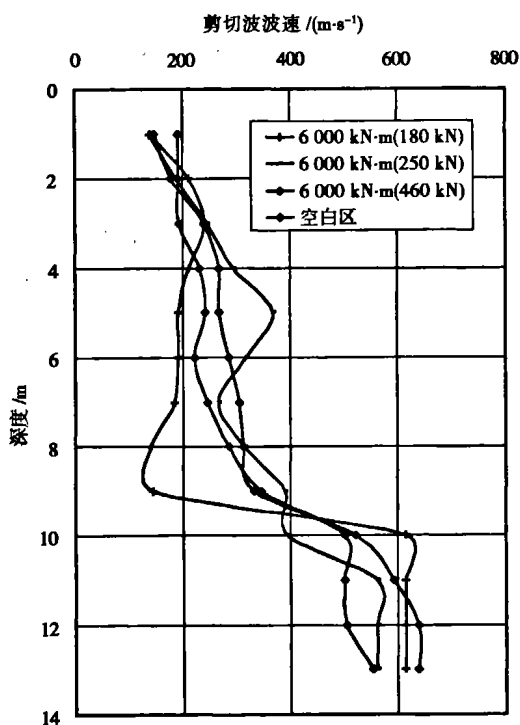


图7 6000kN·m能级不同锤重加固前后瑞雷波波速曲线

5 高能级强夯的有效加固深度

笔者在文献[2]中统计收集了国内外强夯法地基有效加固深度的9类40多种确定方法及10多种判定方法和标准,对有效加固深度进行了分析。从工程实用角度澄清了有效加固深度的定义及其与影响深度的区别,建议规范明确界定有效加固深度的深刻内涵和量化指标,避免由于概念分歧在合同中产生纠纷,提出并推荐了综合确定有效加固深度的原则、方法和判定标准。

综合文献[1]中珠海高栏港项目、恒基达鑫项目及文献[4]中惠州大亚湾项目的10000kN·m和国内近期的几个12000kN·m项目的

实测结果,得到的有效加固深度建议值如图8所示:对碎石土回填地基,10 000 kN·m有效加固深度可取11~12 m,12 000 kN·m可取12~13 m,14 000 kN·m可取13~14 m,16 000 kN·m可取14~15 m,预测18 000 kN·m的有效加固深度在16 m左右。

由图8可以看出:随强夯能级增加,有效加固深度增加,但增幅逐渐减小。能级从10 000 kN·m到16 000 kN·m,增加了60%,但有效加固深度增加了仅2~4 m。若用Menard公式计算,Menard修正系数均为0.35~0.38,与文献[1]的预测值基本一致。由此可得到2个结论:一是若要求有效加固深度达到15 m,应采用16 000 kN·m能级;二是能级增加,得到的有效加固深度的增幅递减,故不必再继续增加强夯能级。若要求的有效加固深度超过15 m,可通过分层强夯等方法实施。

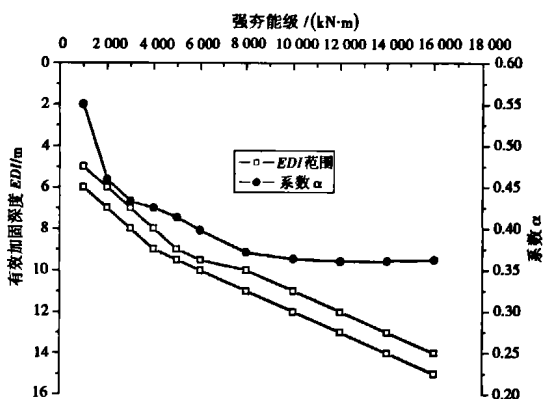


图8 有效加固深度与修正系数值

需要说明的是:对碎石土回填地基10 000~16 000 kN·m施工时的累计夯坑深度在3.5~6.0 m,夯坑较深时会出现大量塌孔现象,现场实测的夯坑直径常达6~8 m,因此影响了夯击能进一步向下传递。因为建议塌孔现象明显时有效加固深度取小值,反之取大值。

6 结论

本文通过在某港口罐区回填土场地实施的国内首次最高能级——16 000 kN·m能级强夯系列试验与大面积施工研究,据地面变形、动力触探和面波测试试验结果评价地基加固效果,获

得了采用高能级强夯进行地基处理设计的一些相关参数和结论:

①对碎石土等粗颗粒土,有效加固深度建议值为:10 000 kN·m可取11~12 m,12 000 kN·m可取12~13 m,14 000 kN·m可取13~14 m,16 000 kN·m可取14~15 m。若要求有效加固深度达到15 m,应采用16 000 kN·m能级。

②能级16 000 kN·m比10 000 kN·m增加了60%,有效加固深度仅增加了26%左右,成本却增加了近100%。仅靠能级增加得到的有效加固深度的增幅衰减明显,故对要求有效加固深度较大的工程,不必一味地增加能级,应考虑分层处理或结合其他方法进行处理。

③本次试验中16 000 kN·m和14 000 kN·m单点夯实测累计夯沉量分别为5.63 m和4.04 m;建立的强夯能级与累积夯沉量的关系式,可用于填土场地强夯施工前土方量的估算。

本课题的试验研究积累了完整的实测数据,为探讨高能级强夯提供了重要的可资比较的经验。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. 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,2005.
- [2] 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.
- [3] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,裴捷. 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):759-762.
- [4] 水伟厚,王铁宏,王亚凌. 碎石土地基上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):1309-1312.
- [5] 水伟厚,王铁宏,王亚凌. 高能级强夯地基土的载荷试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,(7)(录用待刊).
- [6] 中华人民共和国行业标准. JGJ 79—2002,建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建工出版社,2002.