

# 大面积回填深厚粘土强夯试夯分析

龚丽飞<sup>1,2</sup>, 蒋云杰<sup>3</sup>

- (1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;  
2. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029;  
3. 徐州市水利建筑设计研究院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:**为掌握深厚粘土强夯施工参数是否合理、可行,依据不同的回填深度,选用不同强夯试夯参数,对试夯后回填土性状进行了测试和分析。工程场地由一定膨胀性的粉质粘土和粘土回填形成,最大深度达8 m以上,设计采用强夯法处理。从试夯结果分析可知,处理6~8 m回填深度区域,夯击能3 000 kN·m、间距6 m的夯击参数在处理效果上优于夯击能2 000 kN·m、间距5 m的夯击参数。深厚回填粘土的强夯处理参数选取上优先考虑处理深度,通过调整夯点间距、夯击点数达到施工各项参数的最优组合。实践证明,开展试夯工作在强夯设计与施工过程中尤为重要。

**关键词:**强夯;试夯;深厚回填土

**中图分类号:**TU447

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-5322(2014)02-0048-06

## 1 工程概况

该工程为大型标准物流园,占地面积约为321.4亩。拟建场地地貌单元属成都平原东边缘浅丘台地,场地地形特征为浅丘和丘间平地,大部分为果树及鱼塘、民房等山地,原始地形起伏较大。地层以粘性土和细砂岩为主,少数地段分布有卵石土,由于卵石孔隙由粘土充填,地下水主要为深部基岩内的裂隙水,水量较少;标高为516~534 m,相对最大高差约为18 m。

## 2 回填土物理力学参数

该工程回填土土源一部分为场区内开挖区域的表层粘性土,全风化和强风化的细砂岩;另一部分为外购素填土、建筑垃圾等废弃土料。因此场地回填土区域土体条件较为复杂,主要表现为:(1)处理深度内不同性质土体相互掺杂;(2)土层分布不均匀性尤为突出;(3)回填深度纵向上变化幅度较大;(4)含水量较高,表现有一定的膨胀性。

## 3 场区夯击区域划分及参数

按工程总体规划设计,场区内平整标高在

524.3~525.3之间,场地回填深度变化较大,回填最大深度在9.0 m左右。

场区内回填区域拟采用强夯处理方法进行地基处理<sup>[1,2]</sup>。考虑强夯效果的经济性与合理性,对场地划为4类不同处理深度区域,分别采用不同的夯击能进行处理。图1为场地回填深度等值线图及试夯位置。

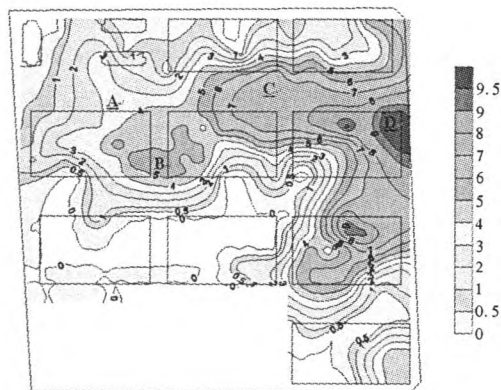


图1 物流园回填土深度及试夯位置

Fig.1 The backfill depth and location of trial tamping for logistics park project

收稿日期:2013-10-09

作者简介:龚丽飞(1981-),男,江苏海门人,工程师,硕士,主要研究方向为软土地基处理。

各区域在强夯前进行试夯,试夯目的为获得强夯试验参数,了解强夯加固后地基土的各项物理力学性质的变化及地基土的承载力。试夯区采用不同夯击能检验夯击效果,表 1 给出了大面积回填区内各试夯参数<sup>[3,4]</sup>,本文主要对其中一个试夯区加以分析探讨。

表 1 大面积回填区域各处理深度区试夯参数表  
Table 1 The parameter table of trial tamping for different treating depth of large backfill region

试夯区	夯击能/(kN·m)	夯点数	夯点间距/m	每点夯击数	夯击遍数	处理深度	夯点布置形式
A	1 500	5	5	5~8	2	≤4 m	第一遍呈正方形,第二遍在第一遍正中插点,满夯为夯点搭接夯,搭接宽度为锤径的 1/4
	1 000	满夯	1.6	3	1		
	2 500	5	6	5~8	2		
B	1 000	满夯	1.6	3	1	4~6 m	
	2 000	5	5	5~8	2		
	1 000	满夯	1.6	3	1		
C	3 000	5	6	5~8	2	6~8 m	
	1 000	满夯	1.6	3	1		
	2 000	5	5	5~8	2		
D	1 000	满夯	1.6	3	1	≥8 m	
	4 000	5	6	5~8	2		
	3 000	5	5	5~8	2		
	1 000	满夯	1.6	2	3		

试夯 C 区共计 41 个夯点,具体布置详见图 2。试夯区夯点布置间距为 5 m 和 6 m 两种形式,均为正方形布置。2 000 kN·m 夯击能夯点为 23 个,5 m 间距;3 000 kN·m 夯击能夯点为 18 个,6 m 间距。强夯地基有效加固深度不小于回填深度,地基承载力特征值大于 100 kPa。

4 试夯过程监测初步分析

4.1 夯沉量测量

图 3、图 4 分别给出了两个子区域内各夯点各击夯沉量曲线图。

从图 3 可以看出,2 000 kN·m 夯击能、5 m 夯间距区域内夯坑在 6~7 击之后夯沉量开始趋于水平趋势,且均在 8~10 cm 之间,部分夯坑最后一击夯沉量小于 8 cm,从图 4 可以看出,3 000 kN·m 夯击能、6 m 夯间距区域内夯坑在 6~7 击之后夯沉量开始趋于水平趋势,且均在 6~10 cm 之间,最后一击夯沉量多数小于 8 cm。

4.2 最后两击平均夯沉量

图 5、图 6 给出了各夯点的最后两击平均夯沉量。从点夯的夯沉量可以看出,2 000 kN·m

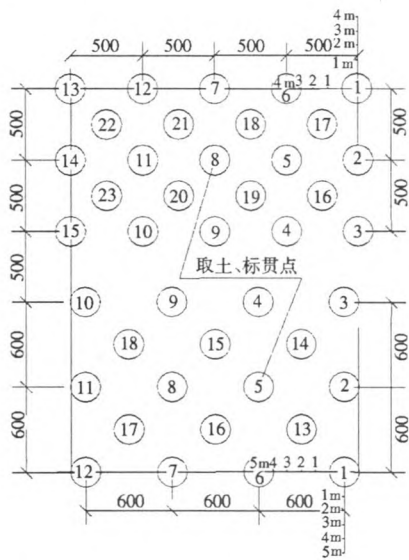


图 2 处理深度 6~8 m 区试夯夯点布置图  
Fig.2 Layout of trial tamping point for 6~8 m treatment depth

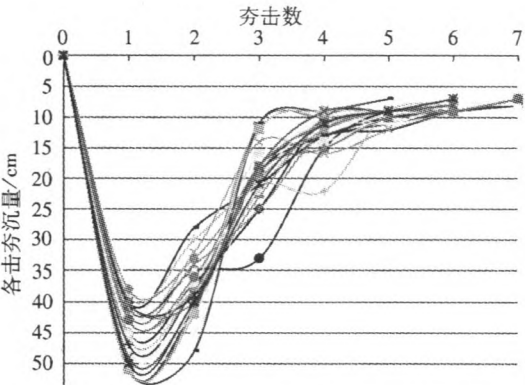


图 3 2 000 kN·m 夯击能、5 m 夯间距夯点  
各击夯沉量曲线  
Fig.3 Curve of each ramming settlement value about 2 000 kN·m tamping energy and 5 m tamping space

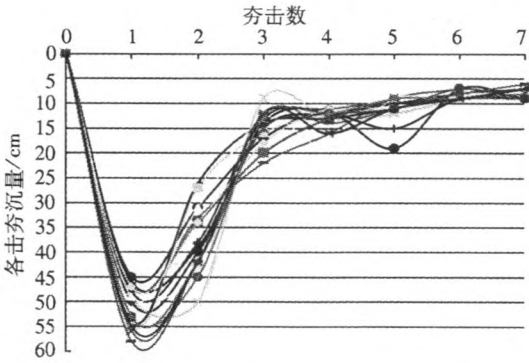


图 4 3 000 kN·m 夯击能、6 m 夯间距夯点  
各击夯沉量曲线  
Fig.4 Curve of each ramming settlement value about 3 000kN·m tamping energy and 6m tamping space

夯击能、5 m 夯间距和 3 000 kN · m 夯击能、6 m 夯间距最后两击平均夯沉量若小于 10 cm, 夯击数均要在 6 击以上, 符合初步设计的 6 ~ 8 击要求。因大面积填土差异性大, 对 6 ~ 8 m 深填土区域的强夯, 在确保强夯效果前提下, 无论采用何种能级, 击数以 7 击为准, 最后两击平均夯沉量可控

制在 10 cm 以内<sup>[4]</sup>。

5 m 间距区域内的各夯坑总沉量在 120 cm ~ 145 cm 之间, 平均为 132.5 cm; 6 m 间距区域内的各夯坑总沉量在 130 cm ~ 155 cm 之间, 平均为 142.5 cm, 显然, 6 m 间距效果较为明显。

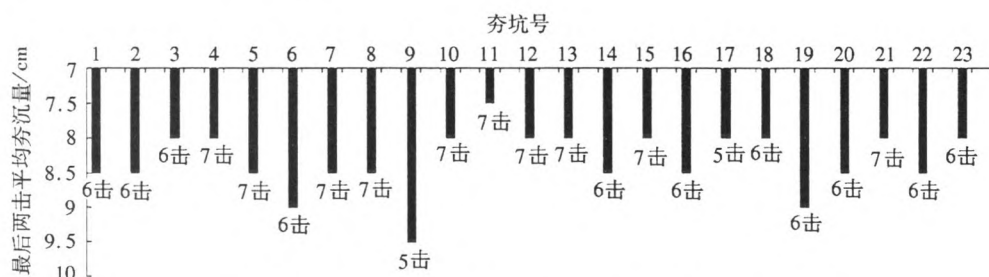


图 5 2 000 kN · m 夯击能、5 m 夯间距最后两击平均夯沉量

Fig. 5 The average amount of the last two blows ramming settlement about 2 000 kN · m tamping energy and 5 m tamping space

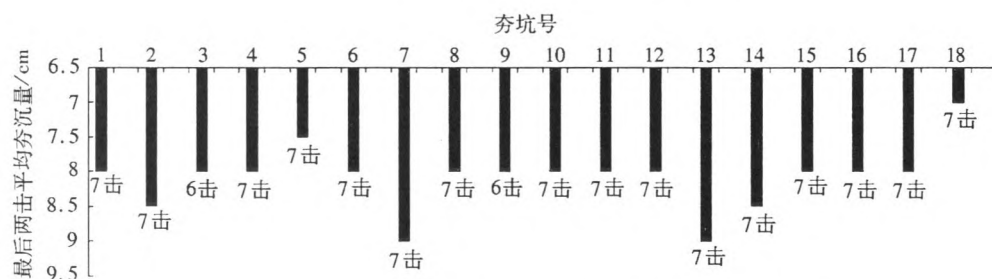


图 6 3 000 kN · m 夯击能、6 m 夯间距最后两击平均夯沉量

Fig. 6 The average amount of the last two blows ramming settlement about 3 000 kN · m tamping energy and 6 m tamping space

### 4.3 坑周隆起测量

图 7 为 5 m 间距、2 000 kN · m 能级的 1# 夯坑和 6 m 间距、3 000 kN · m 能级的 1# 夯坑不同夯击次数下周边总隆起量的对比图。从图中可以看出, 5 m 间距、2 000 kN · m 能级的 1# 夯坑具有一定的隆起量, 6 m 间距、3 000 kN · m 能级的 1# 夯坑总隆起量几乎不存在; 其次, 6 m 间距、3 000 kN · m 能级的夯坑夯击数为 7 击, 5 m 间距、2 000 kN · m 能级的夯坑夯击数为 6 击。从两夯坑总夯击能、夯坑总沉量以及夯击数来看, 6 m 间距、3 000 kN · m 的夯坑周边隆起量小于 5 m 间距、2 000 kN · m 能级的夯坑, 总夯沉量大于 5 m 间距、2 000 kN · m 能级区域内的夯坑夯沉量, 说明 6 m 间距、3 000 kN · m 夯击效果要优于 5 m 间距、2 000 kN · m 试夯区域; 从总隆起量的影响范围来看, 强夯处理深度 6 ~ 8 m 的填土时夯坑间距采用 6 m 较为合理, 这与总夯沉量的效果相一致。

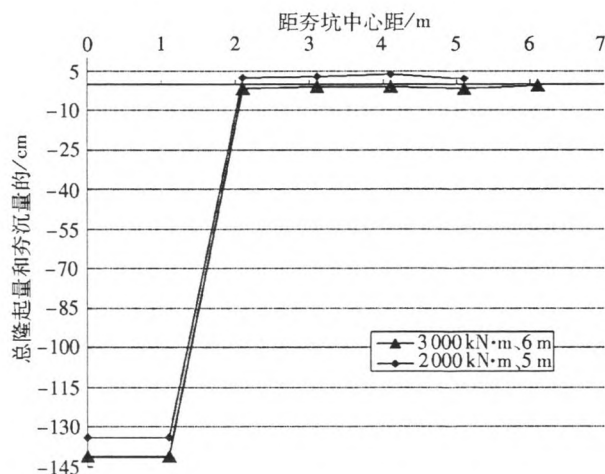


图 7 5 m 间距和 6 m 间距 1# 夯坑各击夯沉量与周边隆起量曲线

Fig. 7 Curve of tamping settlement vs. ground heave about 5 m, 6 m tamping spacing for 1# tamping point

## 5 试夯加固效果分析

### 5.1 回填土物理力学指标

图8~13分别给出了两子区域夯前夯后、孔隙比、压缩模量、含水量等土的几个参数的比较。

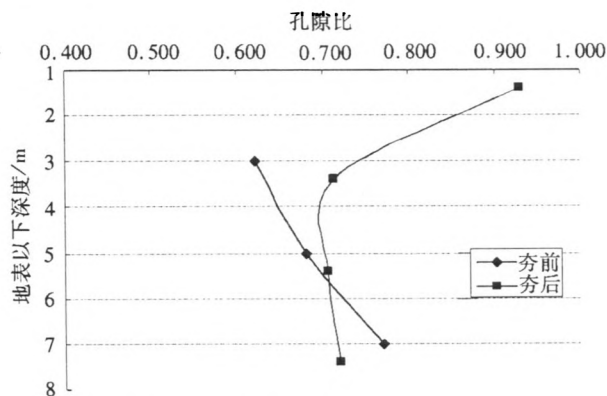


图8 夯前夯后孔隙比(5 m间距、2 000 kN · m 能级)

Fig.8 Comparison of pre-compaction void ratio and compacted void ratio (5 m spacing, 2 000 kN · m level)

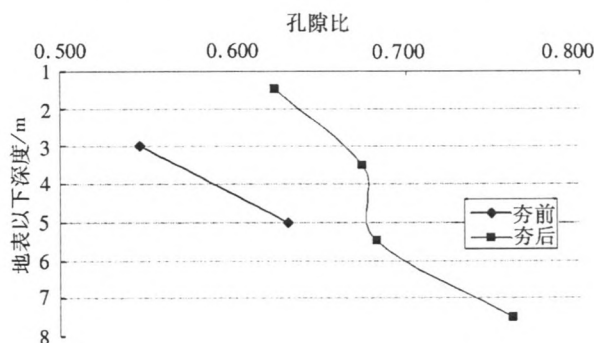


图9 夯前夯后孔隙比(6 m间距、3 000 kN · m 能级)

Fig.9 Comparison of pre-compaction void ratio and compacted void ratio (6 m spacing, 3 000 kN · m level)

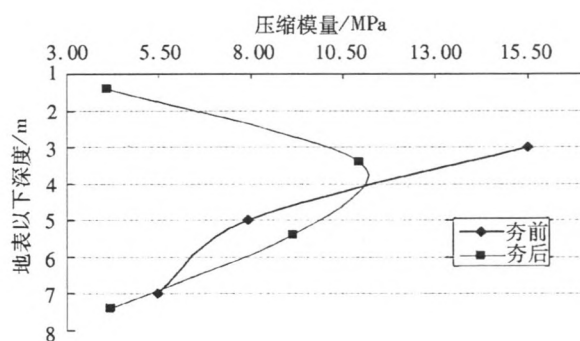


图10 夯前夯后压缩模量(5 m间距、2 000 kN · m 能级)

Fig.10 Comparison of Es before and after compaction (5 m spacing, 2 000 kN · m level)

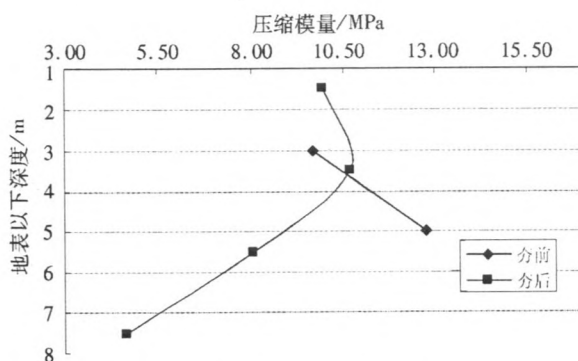


图11 夯前夯后压缩模量(6 m间距、3 000 kN · m 能级)

Fig.11 comparison of Es before and after compaction (6 m spacing, 3 000 kN · m level)

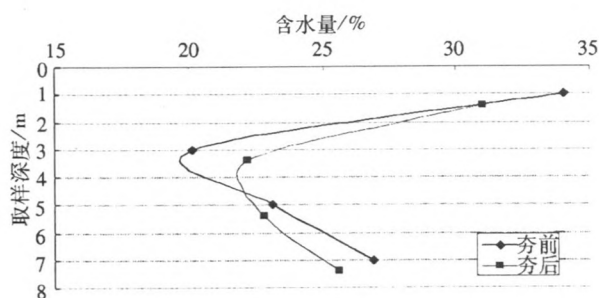


图12 夯前夯后含水量(5 m间距、2 000 kN · m 能级)

Fig.12 Comparison of pre-compaction water content and compacted water content (5 m spacing, 2 000 kN · m level)

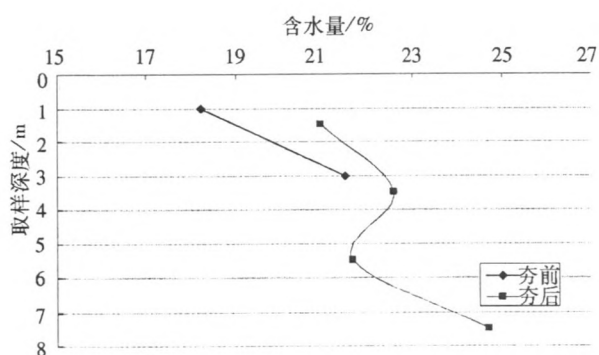


图13 夯前夯后含水量(6 m间距、3 000 kN · m 能级)

Fig.13 Comparison of pre-compaction water content and compacted water content (6 m spacing, 3 000 kN · m level)

图8、9为两个能量等级和间距的夯前夯后孔隙比,可以看出,底部深处土体孔隙比减小,说明强夯能有效地提高底层土体的密实度;图10、11为两个能量等级和间距的夯前夯后压缩模量比较,可以看出土层中部压缩模量提高,底层由于土体孔隙水压力来不及消散从而使得土体压缩模量出现减小的现象;图12、13为两个能量等级和间



距的夯前夯后含水量比较,可以看出底部土层含水量有所减小,这说明经过强夯后底层土体的水向四周以及上部土层迁徙或消散,但压缩模量以及标贯水压力的消散比较缓慢。

从图 8~13 中可以看出,经强夯处理后回填土中下部物理性质均能得到改善,土体两种能级影响深度满足试夯 C 区处理深度的要求,说明强夯加固十分有效,但夯前夯后上部回填土层表现一定的差异性和不规律性,其主要原因是:(1)由于现场回填土受到大型车辆等施工设备反复碾压,表层在夯前已形成一定厚度的硬壳层,但经过点夯和满夯后,完全破坏回填土已形成的表层结构;(2)由于表层红砂土具有一定的膨胀性、颗粒的离散性以及强夯所造成的土体隆起,使得夯后土的孔隙比、压缩模量以及含水量等物理参数表现出有增有减的现象,亦说明满夯能级在一定程度上有所偏高;(3)回填过程中没有经过初步的压实处理,回填土体不做密实度要求,回填土土体差异较大,导致夯前夯后选取的试验孔位代表性存在一定的不足。但穿过表面硬壳层到达一定深度,夯后孔隙比、压缩模量以及含水量等物理参数比夯前得到比较明显的改善,强夯对较深处土的处理效果明显。

## 5.2 现场标贯试验

图 14 为夯前夯后标贯比较,表层土体含水量为 18.2% 左右,强夯后标贯击数得到明显的提高,但较深土体标贯击数有所减小,其主要原因在于该区深度较大,底层土体含水量较高(23.1%~26.9%),强夯后孔隙水压力急剧提高,孔隙水压来不及消散,导致底层土体标贯夯前夯后出现差异。同时通过标贯值的变化可以看出,该试夯区强夯影响深度 > 8m,满足该处处理深度的要求。

## 6 总结

(1)处理深厚回填粘土合理控制强夯施工参数能有效达到预期的处理效果和要求。

(2)该地基的填土从沉降量与隆起量来看,采用 5 m 间距、2 000 kN·m 能级与 6 m 间距、

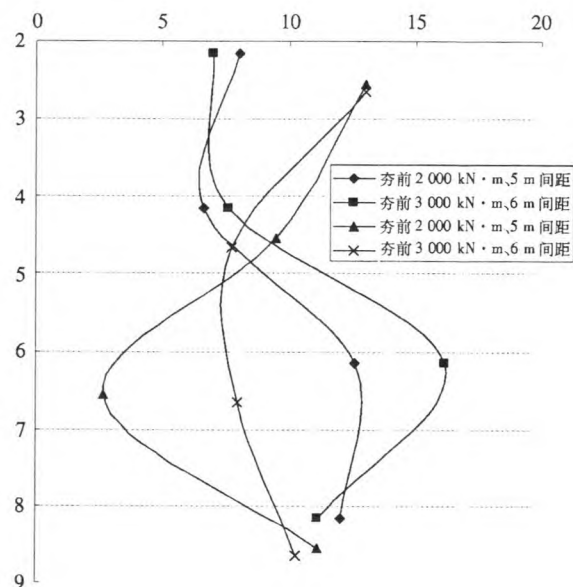


图 14 夯前夯后标贯

Fig. 14 Comparison of pre-compaction standard penetration and compacted standard penetration

3 000 kN·m 能级两种不同试夯参数,地基强度均能得到有效改善,消除一定的地基沉降量,两者均能满足设计要求。各自夯击数下最后两击平均夯沉量控制在 10 cm 以内,但试夯区域沉降差异较大,5 m 间距、2 000 kN·m 能级场地整体下沉量小于 6 m 间距、3 000 kN·m 能级的情况,同时 5 m 间距、2 000 kN·m 的能级隆起量明显大于 6 m 间距、3 000 kN·m 能级。

(3)从夯击沉降、隆起量以及夯前夯后现场标贯及室内土工试验可以看出,采用 6 m 间距、3 000 kN·m 能级的强夯效果与 5 m 间距、2 000 kN·m 能级的强夯效果基本一致。

(4)综合上述两个方面,考虑夯击能的有效利用、夯击加固影响深度,确保强夯加固的效果,大面积强夯采用 3 000 kN·m 夯击能、6 m 夯击间距。由于回填土多样性,导致结构性较差,不同夯击参数下夯击效果具有一定的差异,且与设计参数选取、施工工艺等密切相关,因此大面积回填土方强夯施工应充分分析地质情况,通过现场试验来寻求最佳的施工参数与施工工艺<sup>[5,6]</sup>。

参考文献:

[1] 王仕传,凌建明. 强夯在预压后的大面积软土地基处理中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(2): 230 - 233.

[2] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] 杨建国,彭文轩,刘东燕. 强夯法加固的主要设计参数研究[J]. 岩土力学,2004,25(8):1 335 - 1 339.

[4] 中国建筑科学研究院. JGJ79 - 2012. 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[5] 黄达,金华辉,吴雄伟. 碎石土强夯加固效果荷载试验分析[J]. 岩土力学,2013,48(3):435 - 454.

[6] 陈景河. 强夯法在广西应用中的若干问题研究[D]. 南宁:广西大学,2005.

Analysis of Dynamic Compaction Test for Depth Clay Backfills

GONG Lifei<sup>1,2</sup>, JIANG Yunjie<sup>3</sup>

1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu 210029, China;

2. Nanjing R&D Tech Group CO. , Ltd, Nanjing Jiangsu 210029, China;

3. Xuzhou Water Conservancy Construction Design and Research Institute. , Xuzhou Jiangsu 221000, China

**Abstract:**The project site had been backfilled by silt clay and clay which had the characteristics of expansive soil. The maximum depth of backfills was more than 8 m, dynamic compaction was designed to treat backfills. In order to grasp the parameters of dynamic compaction for deep backfills are reasonable and feasible, we chose different parameters of dynamic compaction test with different depths, tested and analyzed backfill properties after compaction test. The results of test showed that compaction parameters of 3 000 kN · m and 6 m in the treatment effect was superior to parameters of 2 000 kN · m and 5 m for 6 ~ 8 m depth backfills, adjust the distance and compaction count to the construction of optimal parameter and treatment effect. Proved by practice, carry out compaction test work in dynamic consolidation design and construction process is particularly important. As far as parameters selection be concerned, we firstly consider from the depth of processing, and adjust the spacing, blow count of tamping points to the optimal parameter of construction and treatment effect. It is particularly important to carry out dynamic compaction test in process of design and construction process.

**Keywords:**dynamic compaction; tamping test; depth backfill

(责任编辑:张英健)