

# 强夯与强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究

吴道祥<sup>1,2</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 王国强<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**在地基土层含水量较大的情况下,为了解决强夯时产生的超孔隙水压力问题,提出了加固饱和粉土、粉质粘土地基的强夯置换碎石桩法。某建设场地分别采用强夯法与强夯置换碎石桩法进行了现场对比试验研究,对强夯地基与强夯置换碎石桩复合地基分别进行了圆锥动力触探和载荷试验测试,试验结果表明,强夯碎石桩法处理效果好,桩体密实、强度高,桩间土的承载力也较直接强夯的地基承载力提高了13 kPa,强夯置换碎石桩复合地基的承载力达到208 kPa,满足了设计要求。

**关键词:**强夯置换; 复合地基; 静载试验; 地基承载力

**中图分类号:** TU472.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-5060(2008)04-0622-05

## Field test research on the bearing capacity of dynamic consolidation ground and compound foundation consolidated dynamically and soil-replaced by gravel piles

WU Dao-xiang<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, WANG Guo-qiang<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to reinforce saturated silt and silty clay ground and solve the problem of excess pore water pressure in the course of dynamic consolidation, a method of dynamic consolidation and replacement by gravel piles is put forward. Field tests are carried out and a contrastive study is made between the method of dynamic consolidation with the heavy rammer and the method of consolidation with heavily rammed gravel piles. The dynamic cone penetration test and static load testing are carried out on the dynamic consolidation foundation and the compound foundation dynamically consolidated and soil-replaced by gravel piles. The test results have showed that the ground treated by the method of dynamic consolidation with heavily rammed gravel piles has high density and strong strength, that the bearing capacity of the ground soil between piles is 13 kPa higher than that of the straight dynamic consolidation foundation, and that its bearing capacity reaches 208 kPa, which is up to the design requirement.

**Key words:** dynamic consolidation and replacement; compound foundation; static load testing; bearing capacity of foundation

大量工程实践证明,强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度粉土与粘性土、湿陷性黄土、杂填土和素填土等承载力较低地基。对高饱和度的粉土与粘土地基,尤其是淤泥与淤泥质土,处理效果差<sup>[1,2]</sup>。

近年来,由于工程的实际需要产生了强夯置换碎石桩和强夯置换砂桩的地基处理方法。强夯置换是利用夯击时的冲击和振动强行将砂、碎石等挤填到饱和和软土层中,置换原饱和和软土,形成“桩柱”或密实砂、石层,即砂、碎石复合地基。同

收稿日期:2007-04-30;修改日期:2007-06-11

基金项目:合肥工业大学科学研究发展基金资助项目(040702F)

作者简介:吴道祥(1975-),男,湖北洪湖人,合肥工业大学讲师,同济大学博士生;  
王国强(1951-),男,安徽泾县人,合肥工业大学教授,硕士生导师。

时,未被置换的桩间土与下卧土层,在动力作用下排水固结,变得更加密实。从而使地基土承载力提高,降低其压缩性,改善土振动液化条件<sup>[3-7]</sup>。

皖南某建设场地地基土为淤泥质粉质粘土、高饱和度的粉质粘土及粉细砂,土质软弱不能满足工程建设的要求,根据场地的工程地质条件,选择强夯方法对地基进行加固处理。

为了更好的进行经济技术条件对比,选择经济、可靠和适宜的处理方法,在建设场地选择2个土质相同的试验场地,1#试验区进行强夯处理;2#试验区进行强夯置换碎石桩处理,通过现场测试和理论计算将强夯与强夯置换碎石桩复合地基处理效果进行对比分析。试验表明,强夯法处理地基不能满足设计要求,而强夯置换碎石桩复合

地基的处理效果明显优于强夯地基的处理效果。满足设计要求。

## 1 场地工程地质条件

皖南某建设场地在山间沟谷区,地表为耕地及水塘,地势较为平坦,南低北高,地下水位埋深0~1.0 m,地震动峰值加速度0.05 g。地基土上部为淤泥质粉质粘土、下部是粉质粘土和稍密状态的粉细砂,场地地基土的工程性质见表1所列。

场地地基土层软弱,地下水位高,土体呈饱和状态,压缩性大,属于软弱地层,天然地基不能满足设计要求,必须对软弱地层进行加固处理,改善地基土的工程特性,要求地基加固处理后的复合地基承载力特征值不小于200 kPa。

表1 场地地基土工程性质

土层编号	土层名称	层厚/m	土层性质描述	地基承载力特征值/kPa
①	淤泥质粉质粘土	0.5~3.5	深灰色,淤泥夹大量植物根茎,下部见贝壳及朽木,流塑~软塑,饱和,断面较粗糙,干强度低、高压缩性土	70
②	粉质粘土	1~2	灰黄色,含少量粉细砂及腐殖质,软塑~可塑,饱和,断面较粗糙,无光泽反应,干强度低,韧性低,高压缩性土	100
③	粉细砂	>2	灰白色,颗粒均匀,局部夹粉质粘土,颗粒成分为石英、长石及少量云母,透水性较好,饱和,稍密,中压缩性土	160

## 2 强夯置换碎石桩复合地基现场试验

由于该地基处理的工程量大,经研究从众多地基处理方案中选定强夯和强夯置换碎石桩复合地基进行试验。

为探讨强夯法在该工程地质条件下的可行性,并为确定强夯施工参数提供依据,根据场地土质和设计要求,先进行试夯初步设计,并选择代表性地段分区试夯。

试验时先进行单点试验,再根据单点试验的结果布置强夯试验区和强夯置换碎石桩试验区,最后综合确定强夯施工参数。

### 2.1 强夯施工方案的确定

针对土体的特点,在强夯法试验时,边夯边添级配良好的碎石料找平,以提高地基承载力、减少沉降。采用夯锤质量为15 t,落距10 m,锤底直径2.0 m,夯点三角形布置,夯点间距为4.0 m,强夯有效深度3.0 m,每个夯点夯击10次,夯击3遍。

### 2.2 强夯碎石桩现场试验平面布置

本试验根据地层条件选择有代表性的场地12 m×12 m,碎石桩夯点间距为3 m×3 m,呈矩形网格布置,共25个夯点,然后桩间土满夯。如

图1所示。

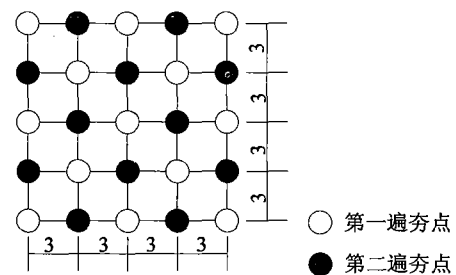


图1 2#试验区碎石桩夯点平面布置图

### 2.3 强夯置换碎石桩复合地基施工参数确定

(1) 碎石桩成桩夯击:单击能量750 kN·m,夯锤为重5 t铸钢锤,夯底直径0.9 m,锤底静压强78.6 kN/m<sup>2</sup>,单位夯击能量为1 179 kN·m/m<sup>2</sup>。为使强夯时产生的孔隙水压力尽快消散,提高加固效果,采用跳夯法施工,分2遍进行,边夯边在夯坑内填入级配良好的碎石。碎石料主要成分为10~50 mm的碎石,每次填料后夯打5~6击,每个夯点夯打击数不少于30击。

(2) 桩间土加固满夯:考虑到场地土层含水量较大,采用重锤低落距满夯。单击能量

2 500 kN·m, 夯锤重为 25 t 平底钢锤, 底面直径 2.2 m, 夯锤底静压强 65.8 kN/m<sup>2</sup>, 单位夯击能为 1 579 kN·m/m<sup>2</sup>。满夯夯击 3 遍。在满夯夯击前, 先将碎石桩已成型的地基土开挖 1.5 m 左右, 用 50 cm 厚碎石土满铺褥垫层, 用推土机推平, 然后再满夯褥垫层。

### 3 地基处理效果的检验

强夯地基的质量检测方法, 宜根据土性选用原位测试和室内试验<sup>[8]</sup>。对于强夯置换处理后的复合地基, 由于其含有碎石等粗粒径材料, 取得供室内进行土工试验的原状样品难度很大。因此, 适用原位测试确定地基的承载力, 本次采用圆锥动力触探和现场平板载荷试验检验施工质量, 验证设计结果。

#### 3.1 强夯地基土的圆锥动力触探试验

1# 试验区强夯时夯坑可达 0.6~1.0 m 深, 坑底形成一层厚度为夯坑直径 1 倍左右的硬壳层, 承载力可提高 2~3 倍。本次在强夯施工结束后 30 d 对地基土进行了圆锥动力触探(表 2 所列)。

原位测试动力触探试验结果表明, 埋深 1.0~2.0 m 地基土的地基承载力特征值提高了 100 kPa, 埋深 2.0~3.5 m 地基承载力特征值提高了 60 kPa, 而埋深 3.5~5.0 m 地基土的地基

承载力特征值提高了 40 kPa, 提高较少。

表 2 强夯后地基土的动力触探结果

埋深/m	$N_{63.5}/N$	$f_{p,k}/kPa$
1.0~2.0	3.40	170
2.0~3.5	3.15	160
3.5~5.0	5.02	200

#### 3.2 强夯地基载荷试验

强夯加固饱和粉质粘性土时, 夯击破坏了土体原有结构并产生裂隙, 土体有效应力减小, 孔隙水压力增大, 裂隙引起渗透性增大; 其次夯击产生的动应力加速了饱和土的排水, 孔隙水压力消散后土体固结, 土体有效应力增加, 强度提高。

1# 试验区强夯地基载荷试验共取 3 个点。3 个试验点 Q-S 曲线(见图 2 所示)均呈现倾斜状, 无明显拐点。1#、2#、3# 试验点在加载至 350 kN 时, 沉降量分别是 62.43 mm、57.05 mm、54.20 mm 沉降较大。该试验地基的极限承载力不小于末级荷载值。应取最大试验荷载值的一半与  $S/b=0.01$  对应荷载值, 两者中低值作为该试验点的地基承载力特征值。强夯地基承载力特征值为 162.3 kPa, 与动力触探所测数据基本吻合。强夯数据见表 3 所列。

表 3 强夯载荷试验结果

试验点位	最大试验荷载 /kPa	地基最大沉降 /mm	设计值沉降/mm	极限承载力 /kN	承载力特征值 /kN	对应荷载/kPa
1#	350	62.43	13.32	350	175	155
2#	350	57.05	10.65	350	175	164
3#	350	54.20	9.87	350	175	168

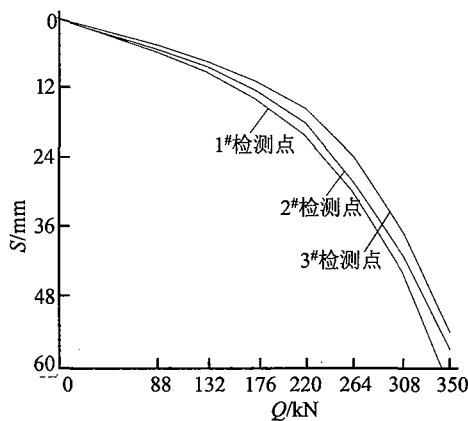


图 2 1# 试验区荷载-位移试验曲线

碎石桩本身是一个受力置换桩, 桩体大而密实, 承载力较高。桩间土埋深 1.0~2.0 m, 地基承载力特征值提高了 110 kPa; 埋深 2.0~3.5 m, 地基承载力特征值提高了 70 kPa; 埋深 3.5~5.0 m, 地基承载力特征值提高了 60 kPa。

表 4 强夯置换碎石桩与桩间土的动力触探结果

埋深 /m	碎石桩		桩间土	
	$N_{63.5}/N$	$f_{p,k}/kPa$	$N_{63.5}/N$	$f_{p,k}/kPa$
1.0~2.0	12.8	470	3.74	180
2.0~3.5	10.4	400	3.35	170
3.5~5.0	11.6	420	5.48	220

#### 3.3 圆锥动力触探试验

2# 试验区动力触探试验结果见表 4 所列。

与强夯法相比, 桩间土埋深 1.0~2.0 m、2.0~3.5 m, 地基承载力特征值提高了 10 kPa,

埋深 3.5~5.0 m,地基承载力特征值提高了 20 kPa。故碎石桩的挤密排水作用使桩间土承载力较直接强夯地基提高得多,处理深度也较深。

3.4 强夯置换碎石桩与桩间土的载荷试验

由于强夯置换碎石桩复合地基先施工碎石桩,产生振动挤密作用,土体中结合水变成自由水,孔隙水压力增大,并且对周围土体有较大扰动产生空隙。

在夯击土体形成的附加应力作用下,孔隙水延碎石桩体消散,孔隙水压力降低后自由水又转变结合水,其土粒结构重新排列、调整,土体强度恢复很快。之后再进行满夯,孔隙水进一步消散,土体固结,承载力明显提高<sup>[9,10]</sup>。

2# 试验区通过现场勘探,碎石桩体在土中延伸到了第③层粉细砂顶面处,桩体直径中间大,

两端小,呈鼓形状,桩体直径上中下还比较均匀,平均直径 1.3 m。勘测后又分别对碎石桩和桩间土进行了 3 个载荷试验。

(1) 桩间土 3 个试验点 Q-S 曲线(见图 3 所示)均呈现倾斜或缓倾斜,无明显拐点。1#、2#、3# 试验点在加载至 350 kN 时,沉降量分别是 51.45 mm、43.90 mm、47.42 mm,沉降较大。桩间土承载力特征值为 175 kPa,比直接强夯地基承载力特征值提高了 12.7 kPa。具体数据见表 5 所列。

(2) 碎石桩三个试验点 Q-S 曲线(见图 3 所示)均呈现缓倾斜,无明显拐点。1#、2#、3# 试验桩在加载至 800 kN 时,沉降量分别是 34.26 mm、36.78 mm、42.41 mm,沉降较少。碎石桩承载力特征值为 400 kPa,具体数据见表 6 所列。

表 5 桩间土载荷试验结果

试验点位	最大试验荷载 /kPa	地基最大沉降 /mm	设计值沉降/mm	极限承载力 /kN	承载力特征值 /kN	对应荷载/kPa
1#	350	51.45	7.92	350	175	180
2#	350	43.90	5.52	350	175	190
3#	350	47.42	7.19	350	175	186

表 6 碎石桩载荷试验结果

试验桩位	最大试验荷载 /kPa	地基最大沉降 /mm	设计值沉降/mm	极限承载力 /kN	承载力特征值 /kN	对应荷载/kPa
1#	800	34.26	3.75	800	400	500
2#	800	36.78	4.11	800	400	465
3#	800	42.41	4.54	800	400	425

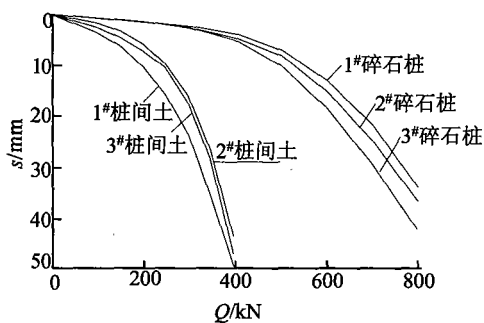


图 3 2# 试验区荷载-位移试验曲线

由 2 个试验区动力触探和载荷试验可以看出碎石桩承载力高,碎石桩既用作加固地基的置换受力桩,又用作排水井,使桩间土排水固结,桩间土也较直接强夯地基承载力高。

3.5 复合地基的承载力计算值

用面积比公式核算复合地基的承载力标准

$$f_{sp,k} = mf_{p,k} + (1-m)f_{s,k} \quad (1)$$

其中,  $m = A_p/A$ ;  $f_{sp,k}$  为强夯置换复合地基承载力特征值;  $f_{p,k}$  为强夯置换碎石桩承载力特征值;  $f_{s,k}$  为强夯置换桩间土的承载力特征值;  $m$  为桩与桩间土的面积置换率;  $A_p$  为桩的截面积;  $A$  为一个桩负担处理面积; 经计算  $m$  为 0.147,但由于桩体直径中间大两端小,此值偏低。

(1) 由动力触探确定①、②层土的复合地基承载力:

① 淤泥质粉质粘土

$$f_{sp,k} = 0.147 \times 470 + (1 - 0.147)180 = 222.78$$

② 粉质粘土

$$f_{sp,k} = 0.147 \times 400 + (1 - 0.147)170 = 203.92$$

(2) 由荷载试验确定的复合地基土的综合承载力:

(下转第 630 页)

较高的自由网平差分析。

(3) 对于不同精度等级的观测,本文所建立的确置信概率的函数应采用不同的系数,不能一概而论,影响平差精度。

### [参 考 文 献]

- [1] 陶本藻,刘大杰. 参数估计统一模型[J]. 武汉测绘科技大学学报,1990,15(4):76-84.
- [2] 姜晨光,贺 勇,赵玉楠. 利用秩亏自由网平差及坐标转换理论解算平面控制网[J]. 地矿测绘,2000,(3):3-5.
- [3] 刘国林,张纯连,孙青平. 非线性普通秩亏自由网平差[J]. 解放军测绘学院学报,1999,16(3):165-168.
- [4] 刘国林,姜 岩,陶华学. 非线性最小二乘参数平差[J]. 测绘学报,1998,27(3):224-230.
- [5] 陈希儒,韦来生. 数理统计教程[M]. 上海:上海科技出版社,1994:88-131.
- [6] 刘恒昌,周 颢,赵保华,等. 基于数理统计方法的可靠性分析[J]. 中国科学技术大学学报,2004,34(2):241-245.
- [7] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986:

65-140.

- [8] Zhu Linnan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. J Glaciol Geocryol,1988,10(1):8-14.
- [9] Wu Ziwang. Classification of frozen soil in engineering constructions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982,4(4):43-48.
- [10] Hagwood C, Rosenthal L. Reliability of conformance tests[J]. IEEE Transactions on Reliability,2001,50(2): 51-55.
- [11] 王 拓. 总体均值置信区间的简便表示[J]. 统计研究, 1996,(增刊):70-75.
- [12] 游祖吉,樊功瑜. 测量平差教程[M]. 北京:测绘出版社, 1991:79-158.
- [13] 陶本藻. 自由网平差与变形分析[M]. 北京:测绘出版社, 1984:56-99.
- [14] 武汉测绘科技大学测量平差教研室. 测量平差基础 [M]. 3版. 北京:测绘出版社,1996:84-165.

(责任编辑 张秋娟)

### (上接第 625 页)

$$f_{sp,k} = 0.147 \times 400 + (1 - 0.147)175 = 208.18$$

由计算得出强夯置换碎石桩复合地基承载力满足设计 200 kPa 的要求。

### 4 结 束 语

本文研究表明,在场地地基土层为饱和的软土情况下,由于土的透水性差,直接采用强夯方法处理的地基加固效果差,地基加固深度较浅,深层土承载力提高较少。如果经开挖再分层回填夯实既不经济又费时情况下,可以考虑强夯置换碎石桩复合地基,碎石桩既用做排水井,又用做加固地基的置换受力桩。

由于碎石桩是一个直径大而密实的柱体,强夯的作用力会更直接通过它传入桩体以下的深层土层中,改善深层土的加固效果,改善土体的渗透和动力特性,从而使处理后的地基在强度、变形、渗透性和动力特性等方面得到全面改善。

### [参 考 文 献]

- [1] 郑颖人,陆 新,李学志,等. 强夯加固软粘土地基的理论

与工艺研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(1):18-22.

- [2] 王国强,李瑛霞,吴道祥,等. 厚层含淤泥新杂填土地基强夯法处理效果分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1868-1872.
- [3] 张凤文,周洪彬. 强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):522-525.
- [4] 白 冰,刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长消散规律[J]. 岩土力学,1998,19(2):33-38
- [5] Menard L, Borioise Y. Theoretical and practice aspects of dynamic consolidation [J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3-18.
- [6] Hu R L, Yueng M R, Lee C F, et al. Mechanical behaviour and microstructural variation of loess under dynamic compaction [J]. Engineering Geology, 2001, 59(3/4): 203-217.
- [7] JGJ79-2002, 建筑地基处理技术规范 [S].
- [8] 徐至钧,张亦农. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京:机械工业出版社,2004:117.
- [9] 孟庆山,王吉利,江 稔. 采用不同加固方案处理软土地基的对比研究[J]. 岩土力学,2002,23(3):375-377.
- [10] 周 健,贾敏才,池 永. 无填料振动冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8): 1350-1355.

(责任编辑 朱华新)