

# 碎石桩法与强夯法联合工艺 处理软土地基应用研究

王月香

(武汉大学, 武汉 430072)

陈茂林

(江苏理工大学土木教研室, 镇江 212013)

**【摘要】** 就碎石桩法与强夯法结合处理软土地基工艺的机理作一探讨,并结合工程实例,就实际存在的几点问题进行了讨论。

**【关键词】** 软土;碎石桩;强夯;加固深度;复合地基

**【中图分类号】** TU472.31

## Research of the Combining work of Gravel Piles and Dynamic Consolidation Method Used in Improving Soft Soil Foundation

**【Abstract】** The mechanism of the combining work of gravel piles and dynamic consolidation method used in improving soft soil foundations is mainly discussed. Based on an example introducing the application of the new method, some problems existing in the practice are debated.

**【Key words】** soft soil; gravel pile; dynamic consolidation; consolidation depth; composite foundation

### 0 引言

饱和软土地基,由于其一般为细胞状或絮状结构,且含有较多的有机质,因而其物理力学性质较差,如大孔隙比、高含水量、高压缩性及低渗透性等。正是由于这些有别于其它类土的特殊性和复杂性,其加固技术向来是一个比较困难的问题,而且工程人员在应用中发现,对于软土处理如果单纯采用一种方法,当地基处理面积很大时则存在工程造价高、工期长等较多不足,因此,考虑采用综合处理方法已势在必行。实践证明,碎石桩与强夯法结合处理软基是近年来运用的较为成功的方法之一,在此法中二者相互补充,如碎石桩体在对土体进行置换、挤密的同时,又为强夯作用形成竖向排水通道,而强夯反过来亦增强碎石桩的上部加固效果等,彼此相辅相成,取得了较为理想的效果。

本文旨在对这种联合工艺作一探讨,为今后更好的运用推广提供一些理论依据。

### 1 软土地基碎石桩与强夯法联合工艺

#### 1.1 联合工艺机理研究

对于饱和软土,由于其含水量高、粘粒含量高、粗颗粒含量少、渗透性差,若直接采用强夯效果很差,甚至夯后地基承载力降低,导致这种现象的关键因素在于强夯过程中和强夯以后,饱和软土中超孔隙水压力不能消散,地下水不能排出,强夯所施加的能量根本不能改变土体结构,全部被超孔隙水压所吸收,甚至于引起原有土体结构破坏,形成“橡皮土”。但若在饱和软土中打入挤密碎石桩,使其在饱和软土中形成竖向排水通道,随着几次强夯震动后的时间推移,土体中的自由水和毛细水将随着超孔隙水压力降低从土的颗粒间隙或人工排水通道中,由高压区向低压区排泄,软土产生排水固结。同时作为竖向排水通道的碎石桩体,在地基挤密和强夯夯击双重作用下,桩体产生径向变形,迫使周围土体产生被动抗

力,从而发生“挤土效应”,使土的相对密度  $D_r$  增加,而且此时强夯引起的大部分剪应力集中于桩体,使桩间土承受的剪应力得以衰减,增强了地基土的抗液化能力。因此软土地基经碎石桩和强夯联合作用后,地基土性能将大大改善,密度、抗液化能力以及承载力将大幅度提高,并且强夯后的硬壳层构成一个承台置于较密的碎石桩上,也增加了地基的整体强度和均匀性。

## 1.2 联合设计施工

### 1.2.1 试验性设计与施工<sup>[1]</sup>

结合工程场地地质条件,进行方案可行性分析,若确定为碎石桩与强夯结合加固,则可先进行小区试验,对其施工参数、地基处理效果进行分析比较。

#### 1) 试验小区设置

主要据地质条件进行划分,同时考虑工程造价。

#### 2) 挤密碎石桩设计与施工

①桩距:与布桩方式有较大关系。当采用梅花型布桩时,桩距一般为3~4倍桩径;若为正方形时,为2.5~3.5倍桩径。

②桩径:与成桩工艺及软弱土层厚度有关。例如采用沉管挤密碎石桩时,桩径为沉管直径。当加固的土层较厚,桩径应较大,反之则适当减小。

③桩长:视地质条件而定。当软弱土层厚度不大时,一般应穿过软弱土层,并进入下层好土1~2倍桩径;若厚度较大,也可不用全部穿过。笔者建议,最好对这两种情况进行对比试验,通过试验结果加以优化选择。

④对于其成孔方法以及成桩工艺视具体条件而定。

⑤施工质量控制:参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91),对碎石桩的桩径、碎石料、桩长及桩身连续性等进行质量监控。

#### 3) 强夯的设计与施工

挤密碎石桩完工之后,待孔隙水压力初步消散再进行强夯。

#### ① 夯锤的选用

先根据实际情况选用合适的锤重,同时为了防止增加起锤阻力,宜选用较大的锤底面积,据国内外资料报道,加固软土时,锤底面积可采用4~6 m<sup>2</sup>。

#### ② 夯击参数的确定

一般由单点夯试验,可以确定强夯有效夯实系数、最佳夯击能量、夯击击数及夯坑间距。具体做法可参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91)设计与执行。一般情况下,最佳夯击能量可取1500~3000 kN·m,夯点间距取5~10 m。夯击击数按现场试夯得到的夯击击数和夯沉量关系曲线确定,以最后两击的沉降量不超过50 mm为准。为了使应力扩散均匀和便于施工机械行走,还应铺设垫层,垫层厚度一般为0.5~2.0 m。

#### ③ 群夯试验

用a、b确定的强夯参数,在试验区进行群夯试验。施工时一般采用三遍夯击,第一、二遍点夯,第三遍满夯。但考虑碎石桩的排水、置换、加筋等作用,有时可直接进行普夯,锤印搭接1/4~1/3。

#### ④ 试验成果整理、分析。

### 1.2.2 正式设计与施工

根据试验性设计、施工及检测结果,分析得出合理施工参数,进行整个地基的处理。

### 1.3 联合法处理地基的效果分析

要检验强夯法与碎石桩结合处理地基的效果,应据试验要求,对于加固后复合地基承载力、变形与压缩模量进行试验和评价。其主要方法有载荷实验、标贯试验或其它原位、土工试验(如静、动力触探、旁压等和室内土工试验方法),并与未处理地基的原状试验成果进行对照比。若无条件,则:

#### 1) 复合地基承载力可按下式进行估算

假定桩与桩间土共同在荷载作用下,桩与桩间土满足变形协调条件,根据力的平衡原则,建立方程:

$$p_0 A_0 = p_s A_s + p_p A_p \quad (1)$$

式中:  $p_0$ 、 $p_s$ 、 $p_p$  分别是复合地基、加固后桩间土和碎石桩的承载力。令:

$$A_0 = A_s + A_p, \eta = p_p / p_s, \alpha = A_p A_s$$

$$\text{化简后: } p_0 = p_s [1 + \alpha(\eta - 1)] \quad (2)$$

同理根据等应变条件, 可得到

$$E_0 = [1 + \alpha(\eta - 1)] E_s \quad (3)$$

2) 复合地基沉降估算<sup>[2]</sup>

$$s = m_s \sum p_0 (Z_i \alpha_i - Z_{i-1} \alpha_{i-1}) / E_{01} \quad (4)$$

( $i=1, 2, \dots, n$ )

式中:  $s$ ——复合地基最终沉降量 mm;

$m_s$ ——沉降计算经验系数, 根据建筑物沉降观测资料及经验确定;

$n$ ——地基沉降计算深度范围内所划分的土层数, 复合地基可作为一层, 如果计算深度超过复合地基而进入天然地基土层, 其天然地基按实际情况分层;

$p_0$ ——基础底面处的附加压力标准值, kPa;

$Z_i, Z_{i-1}$ ——基础底面到第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面的距离, m;

$\alpha_i, \alpha_{i-1}$ ——基础底面计算点到范围内平均附加应力系数, 可按“GBJ7-89”规范附录采用;

$E_{01}$ ——复合地基层的实际应力状态时的变形模量, 复合地基层以下地层为压缩模量, 按实际应力状态时取值, kPa。

3) 若复合地基加固区下卧层为软弱土层, 则须对下卧层的承载力进行验算, 即<sup>①</sup>:

$$p_{\text{下}} + p_z = p_{\text{下}} + \gamma(h+d) \leq f_z \quad (5)$$

其中:

$$p_{\text{下}} = p \cdot B \cdot L / [(B+2h \tan \theta)(L+2h \tan \theta)]$$

若为条形基础, 仅考虑宽度方向扩散, 则:

$$p_{\text{下}} = p \cdot B / [B+2h \tan \theta]$$

式中:  $p_{\text{下}}$ ——下卧层顶面处附加压力, kPa;

$p_z$ ——自重压力, kPa;

$\gamma$ ——下卧层底面以上复合地基和承台的平均重度, 地下水位以下应取浮重度, kN/m<sup>3</sup>;

$h$ ——加固区厚度, m;

$d$ ——基础埋深, m;

$p$ ——复合地基上荷载, kPa;

$B, L$ ——分别为矩形基础底面宽度和长度, m;

$\theta$ ——扩散角, 与加固土和下卧层土性质有关;

$f_z$ ——软弱下卧层顶面地基承载力设计值。

## 2 工程实例

某火电厂<sup>[3]</sup>, 位于第四纪冲洪积形成的场地上。场地自上而下主要土层分别为:

①冲填土层: 新近冲填而成, 呈流塑状, 固结度仅 30%~50%, 含有大量有机质, 厚 1.2~3.0 m。

②粉土层: 软塑, 饱和, 属中等压缩土, 十字板剪切强度为 17 kPa, 地基承载力标准值为 95~110 kPa, 厚约 8 m。

③淤泥粉质粘土层: 呈软~流塑状, 灵敏度较高, 属高压缩性土, 地基承载力标准值为 85 kPa, 层厚 3.5~4 m, 层顶标高约 10 m。

④粉土层: 可塑~硬塑状, 土层由中等压缩性逐渐过渡到低压缩性。地基承载力标准值达 180 kPa。

因篇幅限制, 各地层的物理力学性质指标统计表在此略。

由于场地压缩性大, 地基承载力低, 不能满足建筑物对地基的设计要求, 因此必须进行加固处理。

### 2.1 地基处理方案

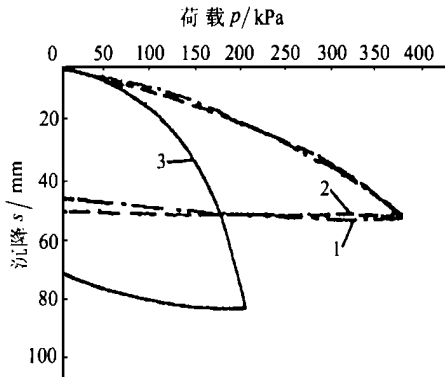
经多种方案比较, 决定采用振动碎石桩和强夯联合处理。为了给加固设计提供可靠参数, 在地基处理前先进行了 10 m 和 15 m 两种桩长的原位对比试验。试验采用功率为 50 kW

① 龚晓南等. 复合地基引论(二). 地基处理, 1991

的振动打桩机作为成桩机械,沉管直径为400 mm。碎石桩按梅花型布桩,桩距为1.1 m,填料粒径为20~50 mm、含泥量不大于5%。振动碎石桩施工前,为便于打桩机进入场地,先提前1个月插打了三角形布置、间距为1 m、深3 m的塑料排水板,在上铺设30~50 mm的碎石垫层,以加速表层流塑状冲填土的排水固结,提高承载力。振动碎石桩施工后,再采用底面积为4 m<sup>2</sup>、重135 kN的重锤以9 m的落距(能量为1 200 kN·m)进行普夯,每夯点夯二击,搭夯1/4夯锤。

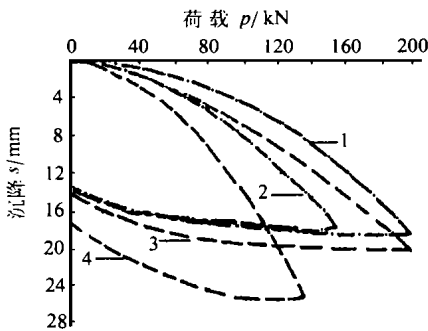
### 2.2 地基加固效果评价

在试验加固结束后40 d,场地土强度基本恢复,并有所提高情况下,进行了包括静载试验、动力和静力触探试验以及室内土工试验(见图1~图6)。



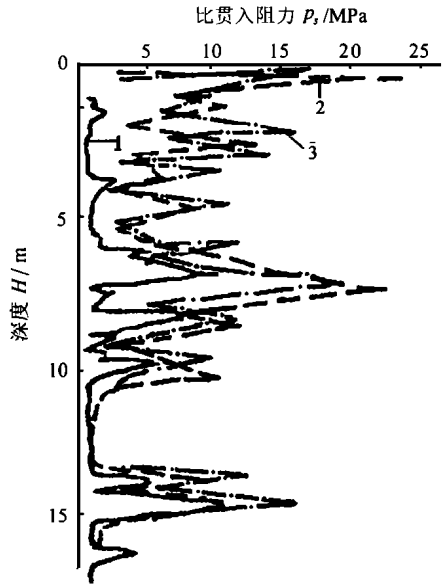
1—10 m 长桩;2—15 m 长桩;3—天然地基

图1 复合地基 p-s 试验曲线图



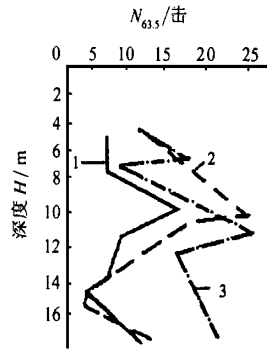
1—10 m 单桩;2—10 m 长碎石桩加固区桩间土;  
3—15 m 单桩;4—15 m 长碎石桩加固区桩间土

图2 桩间土与单桩 p-s 试验曲线图



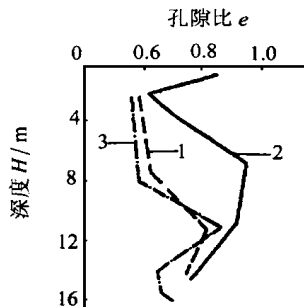
1—天然地基;2—采用10 m长碎石桩加固后地基;  
3—采用15 m长碎石桩加固后地基

图3 静力触探曲线图



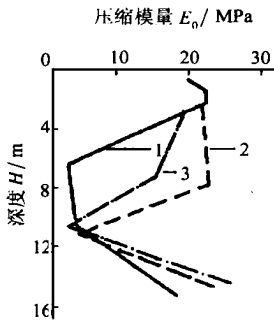
1—天然地基;2—采用10 m长碎石桩加固后地基;  
3—采用15 m长碎石桩加固后地基

图4 标准贯入试验锤击数图



1—10 m 长桩加固区;2—天然地基;3—15 m 长桩加固区

图5 加固区孔隙比的变化图



1—10 m 桩长加固区;2—天然地基;  
3—15 m 桩长加固区

图6 加固区土体压缩模量的变化图

通过试验结果发现:

1)如图1所示,经过加固后的地基承载力与未加固前相比,具有大幅度提高,并且可以看出10 m与15 m桩长对复合地基承载力的提高程度几乎相同,两种情况下复合地基极限承载力都约为370 kPa。

2)图2是以直径为500 mm的圆形小载板按堆载法测得的单桩与桩间土的 $p-s$ 曲线,由图可见,采用10 m桩长加固方案较采用15 m桩长加固方案桩间土承载力更高。采用前者时,桩间土极限承载力约为160 kN,采用后者时,桩间土极限承载力约为130 kN。由该图还可看出,无论是采用10 m还是15 m桩长加固,桩间土与桩在同样沉降下所承受的荷载均相差不大,如采用桩10 m还是15 m桩长加固,桩间土与桩在同样沉降下所承受的荷载均相差不大,如采用桩长10 m加固,当 $s=10$  mm时,桩间土承受荷载约为115 kN,而单桩承受荷载约为150 kN,因此若将复合地基看为一个整体,则桩与土共同承担荷载。

3)由图3~6可以看出,在桩长范围内由于碎石桩与强夯的共同作用,土体的标贯值、静力触探比贯入阻力、压缩模量比加固前明显增大,孔隙比也明显减小,土体的密实度大大提高,并且对土体孔隙比的影响深度还超过桩的加固长度,这一结果可认为是碎石桩与强夯

二者结合产生的“增强效应”所致。

4)综合图1~图6,可得出结论:采用10 m桩长加固比采用15 m桩长加固效果要好,且更经济。究其原因,可能是因为碎石桩复合地基承载力的大小主要取决于桩间土对碎石桩侧向约束能力的强弱,在一定的桩间土条件下,桩间土对碎石桩的约束能力是相同的,因此碎石桩复合地基加固应存在一个合理桩长的问题,当桩长超过某一数值时,增加桩长并不能显著提高地基承载力。

试验结束后,采用桩长为10 m碎石桩加固方案以及相应强夯试验参数对整个加固区域进行了处理,取得了良好效果。

### 3 结语与几点问题的讨论

由于碎石桩法与强夯法结合应用于软土地基加固还处于经验积累时期,所以在工程中应用时还是应注意现场监测。笔者就二者结合工艺在总结前人结果的基础上,得出以下认识:

1)碎石桩与强夯结合,其加固影响深度都超过单纯采用强夯或碎石桩法的影响深度,效果显著。

2)碎石桩法与强夯结合处理软基时,因软土地层具有一定的灵敏度,强夯能级不宜过大,可采用低能级强夯与碎石桩结合,在试验的基础上选择最佳设计与施工参数。

3)碎石桩的桩长存在一个合理桩长的问题,在一定条件下,桩长超过某一数值时,增加桩长并不能提高地基承载力。如本例所示,按一般情况(未考虑强夯作用)设计,则应穿过淤泥粉质粘土层(高压缩性土),并进入粉土层1~2倍桩径,大约为15 m,但实践证明,采用10 m即取得了良好效果,因此确定碎石桩的合理桩长时,在考虑强夯的基础上,宜进行对比试验,以进行参数优化设计。

总的来说,强夯法与碎石桩结合,在方案可行性的条件下,选择合理设计与施工参数可取得良好的技术与经济效益。

## 参 考 文 献

- 1 夏林等. 挤密碎石桩与强夯法加固处理湿陷性黄土地基. 武汉工业大学学报, 1996, 18(2): 31~33
- 2 吴延杰等. 干振碎石桩设计计算的研究. 见: 第七  
届土力学及基础工程学习会议论文集. 北京: 中国  
建筑工业出版社, 1994. 560~561
- 3 刘景政等. 地基处理与工程实例分析. 北京: 中国  
建筑工业出版社, 1998. 380~385
- 4 收稿日期: 2000-11-20
- 5 杨高升, 刘家豪. 蒙特卡罗法在塑料板地基稳定性  
分析中应用. 见: 中国土木工程学会港口工程学  
会, 塑料排水学术委员会编, 第四届塑料板排水法  
加固软基技术研讨会论文集. 南京: 河海大学出版  
社, 1999. 251~256
- 6 谢康和, 曾国熙. 砂井地基的优化设计. 土木工程  
学报, 1989, 22(2): 3~12
- 7 洪国镇. 罗泾港区湿排粉煤灰软基加固工程. 见:  
中国土木工程学会港口工程学会, 塑料排水学术  
委员会编. 塑料板排水法加固软基工程实例集. 北  
京: 人民交通出版社, 1999. 51~59
- 8 嘉门雅史, 三村卫. 用土工聚合物水平排水材料加  
固粘性土填土变形的有限元分析. 见: 中国土木工  
程学会港口工程学会, 塑料排水学术委员会编. 第  
四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集.  
南京: 河海大学出版社, 1999. 14~23
- 9 收稿日期: 2000-11-06

(上接第 95 页)

## 岩土工程技术加入“万方数据——数字化期刊群”

为了实现科技期刊编辑、出版、发行工作的电子化, 加速科技信息交流的网络化进程, 本刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”, 本刊发表的论文, 将一律由编辑部统一送入“万方数据——数字化期刊群”, 以进入因特网并提供信息服务。凡有不同意见者, 请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。在万方数据资源系统上开通的数字化期刊群, 期刊总数达到 2000 种, 90% 以上属进入中国科技论文统计源的核心期刊(网址: <http://www.periodicals.com.cn>)。本刊全文内容按照统一格式制作被编入“万方数据——数字化期刊群”, 读者可上因特网进入“万方数据——数字化期刊群”查询浏览本刊内容。欢迎各界朋友通过“万方数据——数字化期刊群”向我刊提出宝贵意见和建议, 或征订本刊。

《岩土工程技术》编辑部