



文章编号:1006-7329(2002)05-0032-06

## 钢渣桩在湿陷性黄土地基中的 应用和环境效应研究\*

张 伟<sup>1</sup>, 张 彬<sup>1</sup>, 黄 涛<sup>1</sup>, 王 峰<sup>2</sup>

(1.武汉大学 土建学院,湖北武汉 430072;2.大屯煤电公司,江苏徐州 221611)

**摘要:**通过钢渣桩在河南某地湿陷性黄土中的静荷载试验、土压力测试等试验的试验结果,对钢渣桩复合地基、桩间土和钢渣单桩的  $p-s$  曲线、附加应力沿深度变化规律进行了分析;研究了桩间土承载力、桩土应力分担比、桩土荷载分担比的变化规律,对钢渣单桩和碎石桩以及钢渣桩复合地基和灰沙桩复合地基等的承载力特性进行对比和分析,并对钢渣桩复合地基的环境效应进行了探讨,得出了有益的结论。

**关键词:**钢渣桩;复合地基;湿陷性黄土;荷载分担比;环境效应

**中图分类号:**TU473.1

**文献标识码:**A

对生产排除的尾矿等工业废渣的处理是冶炼企业需要解决的问题。采用钢渣作为地基加固材料处理软土地基,既提高地基土的强度,减少其沉降量,又充分利用钢渣,解决钢渣所带来的污染环境的问题。

### 1 钢渣桩处理湿陷性黄土地基的加固机理

#### 1.1 挤密作用

在钢渣桩的成桩过程中,对土体产生横向挤密作用,土颗粒彼此移动,小颗粒填入大颗粒的空隙,空隙比减少,密实度增加,土体的变形模量增大,从而改善土的强度特性和变形特性,组成桩土复合地基。

#### 1.2 桩体的应力集中作用

在桩土复合地基中,桩体的变形模量远较桩周土的大,因而使应力集中于桩体,相应地减少了桩周土体中的附加应力,提高了地基的承载能力,减少了地基的沉降。

#### 1.3 加速地基土的排水固结

钢渣桩在桩土复合地基中起到了排水通道的作用。不但可以使地基中的空隙水压力迅速消散,避免地基土的塑性破坏,还可以加速地基土的固结和其强度的提高。

#### 1.4 大大减少湿陷性黄土的湿陷性

由于钢渣桩对土体的挤密作用、置换作用和加速土体的排水固结作用,使得湿陷性黄土的湿陷系数大为降低,从而消除和大大减少了消除湿陷性黄土的湿陷性。

\* 收稿日期:2002-07-10

基金项目:“教育部全国高等学校骨干教师资助计划”项目

作者简介:张 伟(1971-),男,河南南阳人,博士生,主要从事复合地基和岩土工程数值计算方面的研究。

## 2 钢渣桩处理湿陷性黄土的试验研究及成果分析

### 2.1 工程地质情况

河南某地区湿陷性黄土属第四系全新统近期( $Q_4^{2al}$ )和早期( $Q_4^{1al}$ )冲积的非自重湿陷性黄土;湿陷等级为I-II级,极少数地段达到III级,湿陷系数一般为0.025~0.086,厚度4~5 m,局部最大埋深8.50 m左右。其性能指标如表1。

表1 湿陷性黄土性能指标

土层	含水量 (%)	空隙比	压缩系数 $a_{100-200}$ ( $MPa^{-1}$ )	湿陷起始压力 (kPa)	承载力标准值 (kPa)
$Q_4^{2al}$	18~24	0.80~1.10	$\geq 0.5$	$\leq 100$	$\leq 100$
$Q_4^{1al}$	20~23	0.758~0.95	$\geq 0.44$	110~120	110~115

### 2.2 承载力特性的变化规律

#### 2.2.1 桩间土

现场静荷载试验结果表明,天然地基土经挤密后的桩间土,地基承载力比天然地基承载力提高,相同压力下,其变形模量比天然地基大,见图1及表2,同时土工试验结果表明桩间土的湿陷系数减小为0~0.01,其湿陷性已基本被消除。

表2 天然地基、桩间土载荷试验数据表

地基类型	承载力 ( $p/kPa$ )	$p$ 对应的沉降量 ( $s/mm$ )	变形模量 ( $E_0/MPa$ )	压板直径 ( $\varphi/mm$ )
天然地基	150	4.5	13.8	560
1#桩间土	180	3.0	18.9	560
2#桩间土	170	4.1	15.5	560

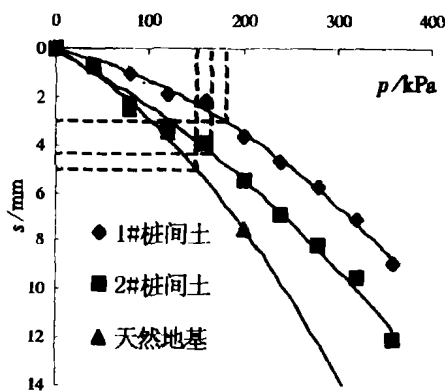


图1 天然地基与钢渣桩桩间土  $p-s$  曲线

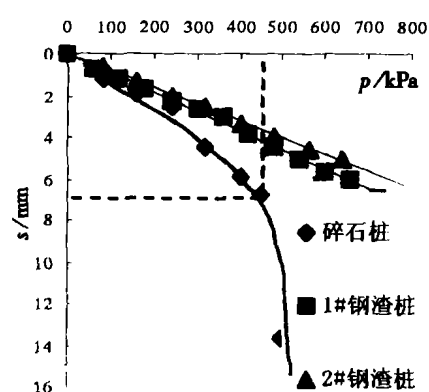


图2 钢渣桩与碎石桩单桩  $p-s$  曲线

#### 2.2.2 单桩

钢渣桩单桩的静荷载试验结果如图2及表3,从图中可知钢渣桩的单桩承载力大于450 kPa,且1#、2#钢渣桩分别达到780 kPa、640 kPa,设计时单桩承载力取450 kPa计算置换率是有一定程度富余的。与碎石桩比较,钢渣桩单桩承载力高得多,变形亦小。

由上可知,碎石桩在压力为450 kPa时即出现比例界限,而钢渣桩在压力为650 kPa,甚至780 kPa时不但没有出现拐点,而且  $p-s$  呈线性关系。说明压力为450 kPa时碎石桩已开始出现鼓胀变形,而钢渣桩由于自身板结具有足够的粘结强度,使其单桩承载力提高。

表 3 钢渣桩、碎石桩单桩载荷试验数据表

地基类型	承载力	$p$ 对应的沉降量	变形模量	压板直径
	$p/\text{kPa}$	$s/\text{mm}$	$E_0/\text{MPa}$	$\varphi/\text{mm}$
碎石桩	450	6.8	22.0	550
1# 钢渣桩	>780	>7.40	-	560
2# 钢渣桩	>640	>5.12	-	560

### 2.2.3 钢渣桩复合地基

静载试验结果见图 3、表 4,从图表中可以看出,钢渣桩复合地基承载力  $p$  在 315 ~ 380 kPa 之间,变形模量在 13.0 ~ 16.0 MPa 之间,比天然地基分别提高 120% ~ 133% 和 21% ~ 52%,较好地改善了地基性能。

### 2.2.4 综合评价

通过对比分析各种桩型复合地基承载力的改善规律,得出的结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,钢渣桩、石灰粉煤灰钢渣桩、水泥粉煤灰钢渣桩的提高幅度较大,达 132% ~ 181%。灰砂桩、石灰粉煤灰桩提高幅度较小,为 26.8% ~ 76.1%。综上可见,钢渣桩复合地基处理湿陷性黄土地基的效果是显著的。

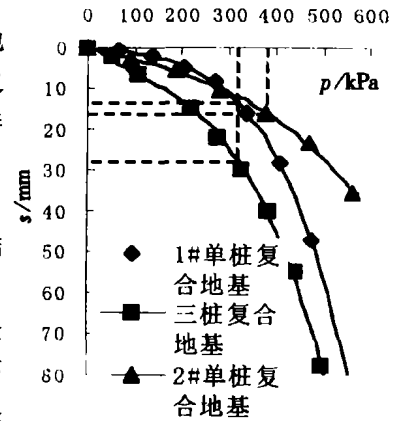
图 3 钢渣桩复合地基  $p-s$  曲线

表 4 钢渣桩复合地基载荷试验数据表

地基类型	承载力	$p$ 对应的沉降量	变形模量	压板直径
	$p/\text{kPa}$	$s/\text{mm}$	$E_0/\text{MPa}$	$\varphi/\text{mm}$
1# 钢渣桩复合地基	320	13.0	15.9	1 060
三桩复合地基	315	16.0	15.2	1 800 × 1 600
2# 钢渣桩复合地基	380	15.9	18.0	1 060

表 5 天然地基及复合地基承载力对比表

桩名	钢渣桩 (单桩)	灰砂桩 (三桩)	石灰粉煤灰钢渣桩 (单桩)	石灰粉煤灰桩 (单桩)	水泥粉煤灰钢渣桩 (单桩)
天然地基承载力(kPa)	142				
天然地基承载力(kPa)	330 ~ 350	180 ~ 205	350 ~ 360	210 ~ 250	370 ~ 400
提高幅度(%)	132 ~ 146.5	26.8 ~ 44.4	146.5 ~ 153.5	47.9 ~ 76.1	160.6 ~ 181.7

## 3 复合地基桩土应力(桩土荷载)分担比大小及规律研究

为了研究研究复合地基桩土应力分担比大小及规律,分别在单桩复合地基、三桩复合地基的桩身及桩间土内在深度 0.1 m、1.0 m、2.0 m、4.0 m、6.0 m 的位置埋置了土压力盒。

### 3.1 附加应力沿深度变化规律

复合地基桩间土一定深度埋置的土压力盒测试结果如图 4、图 5 所示。分析两图,可见应力主要集中在 0 ~ 2.0 m 范围内,其后趋于稳定,当压力大于 219 kPa 时,应力在大于 5.5 m 处深度以后,附加应力减小梯度增大,随后趋于稳定。

### 3.2 桩土应力比变化规律

通过分别埋置于桩间土和桩身的压力盒,测定各自的应力值,研究两者之间比例的大小,做出不同荷载水平下应力分担比的关系曲线,如图 6。

分析上图,可知单桩复合地基随  $p$  增大,  $n$  亦随之增大,当  $p = 355 \text{ kPa}$  时,  $n$  增至最大值 6.1,

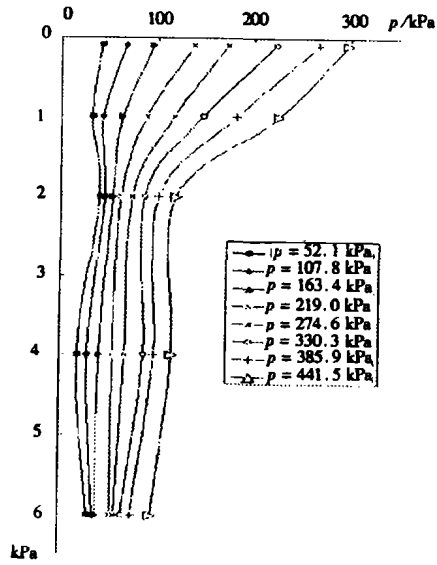


图4 不同荷载下应力  $\sigma$  - 深度  $H$  关系曲线

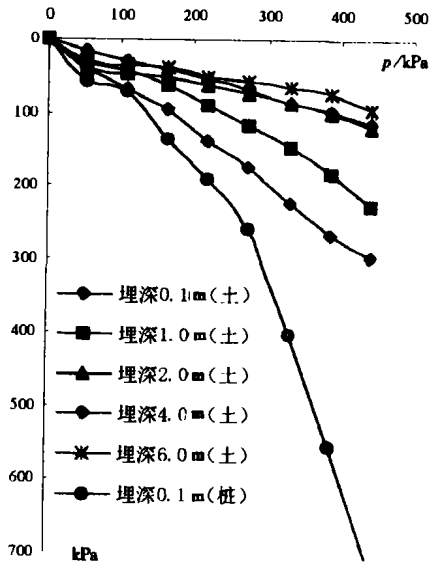


图5 不同深度下荷载  $p$  - 应力  $\sigma$  关系曲线

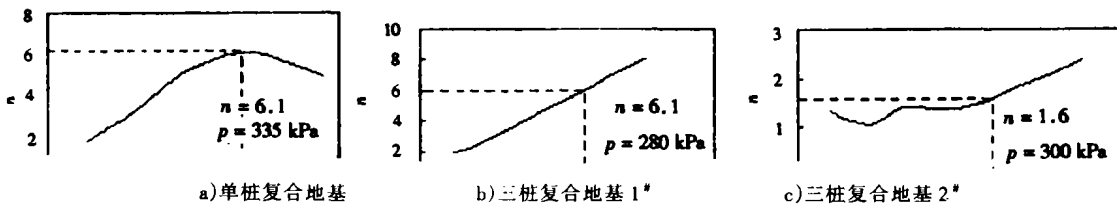


图6 荷载  $p$  -  $s$  应力分担比  $n$  关系曲线

以后随  $p$  的增大,  $n$  又开始减小; 1# 三桩复合地基随  $p$  增大,  $n$  由 1.9 增大到 8.2, 当  $n = 6.1$  时,  $p = 280$  kPa。三图中  $n$  的变化规律表明, 随着荷载的增大, 复合地基中桩承担的荷载增大,  $n$  值在 6.1 后开始减小, 表明桩承担的荷载达到极限, 转而由土承担。综合上述分析, 建议在实际工程中  $n$  取 6.0。

### 3.3 桩土荷载分担比变化规律

桩土荷载分担比变化曲线如图 7 所示。可知单桩复合地基随基底压力的增大, 桩分担荷载比  $p_p/p$  逐渐增大, 土分担荷载比  $p_s/p$  逐渐减小, 当基底压力  $p$  增至 335 kPa (相当于比例界限值) 时,  $p_p/p$  为最大值 54%,  $p_s/p$  为最小值 46%, 此后  $p_p/p$  开始减小,  $p_s/p$  则增大; 当基底压力  $p = 445$  kPa 时,  $p_p/p = p_s/p = 50%$ , 桩土各分担一半荷载; 当基底压力  $p$  继续增大时,  $p_s/p > 50%$ ,  $p_p/p < 50%$ , 即土分担荷载一半以上。而三单桩复合地基随基底压力的增大, 桩分担荷载比  $p_p/p$  逐渐增大, 土分担荷载比  $p_s/p$  逐渐减小, 当基底压力增至  $p = 270$  kPa (比例界限值) 时,  $p_p/p$  为 51%; 当基

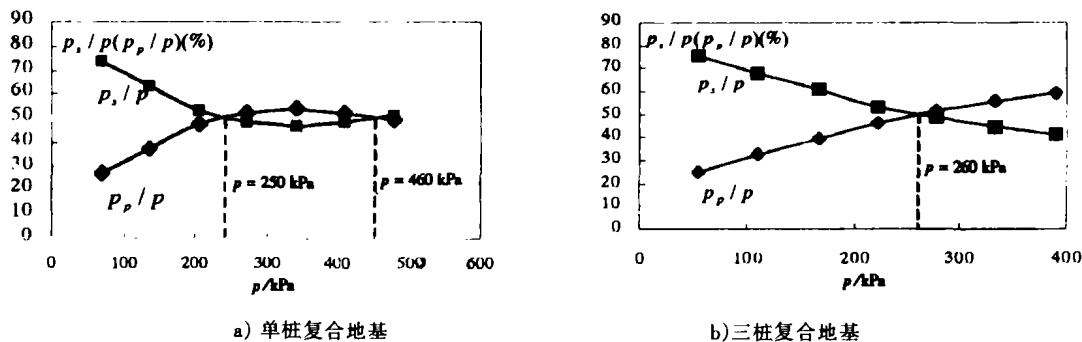


图7  $p \sim p_p/p(p_s/p)$  关系曲线

底压力  $p = 260 \text{ kPa}$  时, 桩土各分担一半荷载; 当基底压力继续增大时,  $p_p/p > 50\%$ , 并逐渐增大,  $p_s/p < 50\%$ , 并逐渐减小。

### 4 钢渣桩复合地基的环境效应

#### 4.1 单桩施工影响范围研究

为测定钢渣桩在成桩过程中, 地基土侧向附加应力在水平、垂直方向上的变化趋势, 在试桩施工时选定编号 22# 的钢渣桩, 在距桩中心 1 m、4 m 和 8 m 的不同深度 4.5 m、6.5 m、8.5 m 处埋设土压力盒, 现场采用全自动测试仪器, 以“开孔夯击过程”和“填渣夯击过程”两种情况记录数据, 测定其土压力, 分析成桩时的影响范围的大小。

对各压力盒开孔夯击和填渣夯击的最大值、最小值及平均值进行统计, 并对同一深度的压力盒做压力(平均值)随距离变化的 ( $p-L$ ) 曲线, 见图 8。结果表明, 随着离桩中心距离的增大, 压力值减小, 且幅度较大; 距桩中心 1 m、4 m、8 m 处的最大侧压力值见表 6。

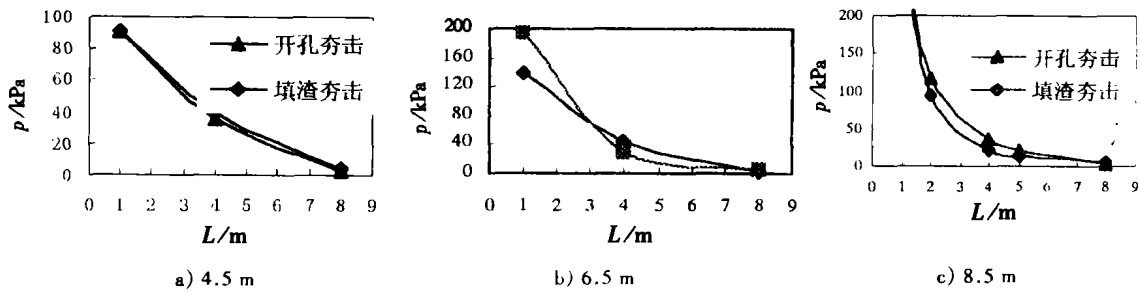


图 8 不同深度平均侧向土压力  $p$ -距离  $L$  关系曲线

表 6 不同距离处最大侧压力值表

距离(m)	1 m	4 m	8 m
沉管夯击	> 300(kPa)	60(kPa)	10(kPa)
填渣夯击	> 300(kPa)	50(kPa)	6(kPa)

#### 4.2 施工时地基隆起量

为测定施工时地表隆起高度, 分别在 A、B 区选顶一根桩(施工编号 30#、2#), 测量距桩中心 0.3 m、0.6 m、1.1 m、1.6 m、2.6 m、3.6 m、5.6 m、7.6 m 处施工前后标高, 通过施工前后所测标高的变化, 即可求得各测点的隆起量, 见图 9。结果表明, 在距桩中心 0.3 m 处隆起量较大, 可达 38 cm, 随着距离的增大, 逐渐减小, 在离桩中心 7.9 m 处隆起量仅为 1~3 cm。

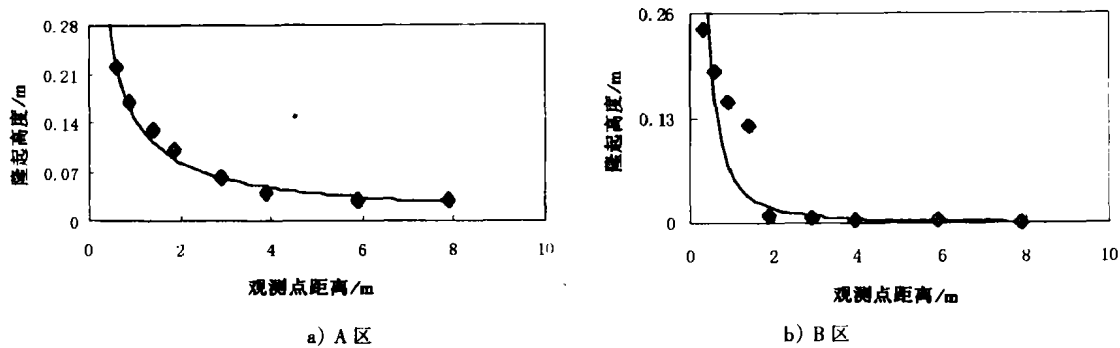


图 9 隆起量监测结果图

## 5 结语

用钢渣桩处理湿陷性黄土地基,可以改善湿陷性黄土的性能,大大提高其承载能力,增加其变形模量,减小地基土的沉降量;它是一种节约投资、有利环保的地基处理措施,具有较好的经济效益和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [2] 叶书麟,韩杰,叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [3] 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [4] 黄涛,等. 钢渣桩复合地基承载特性研究[J]. 工程勘察,1998,(5):15-18.

## Application of Steel Slag Pile in Collapsible Loess Foundation and Research on Its Environmental Effect

ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Datun Coal and Electricity Company, Xuzhou 221611, China)

**Abstract:** In this paper, based on the results of static load test and soil pressure test of steel slag pile in collapsible loess foundation some where in Henan Province, the  $p-s$  curves of soil around piles and single steel slag pile and the composite foundation are analyzed. The rules of variation of subsidiary stress with depth are analyzed as well. The rules of variation for the bearing capacity of soil around piles, pile-soil stress ratio and pile-soil load ratio are studied. The bearing capacity characters of single steel slag pile are compared with those of gravel pile as well as steel slag pile composite foundation compared with lime stone pile foundation. The environment effect of steel slag pile composite foundation is also discussed. Some useful conclusions are given.

**Keywords:** steel slag pile; composite foundation; collapsible loess; pile-soil load ratio; environment effect