

文章编号 1000-5013(2004)02-0161-04

# 粉喷桩复合地基桩土应力比的 原型测试分析

郭力群

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362011)

**摘要** 通过对泉州市安吉路路基试验段实测,探讨粉喷桩复合地基的桩土应力比  $n$  和地基沉降的变化规律. 结果表明,  $n$  值随荷载增大而增大,但又随沉降增大而减小,而且工程实测的  $n$  值略显偏小. 导致  $n$  值较小的主要原因是,复合地基变形较大和上部桩间土为模量较大的填砂,桩、砂的变形模量接近. 鉴于前述原因,重要工程中利用实测桩土应力比计算复合地基沉降合理.

**关键词** 粉喷桩, 复合地基, 桩土应力比, 原型测试

**中图分类号** TU 473.1+6 TU 431

**文献标识码** A

泉州市城东分区是泉州市规划的一个独立组团,在建的安吉路是城东到市区和洛江区的一条捷径,属城市主干道“二纵”之一的重点建设工程. 该工程的关键技术之一是软土路段的处理. 为了保证软土路基的稳定和软基路段的质量,选择了两个典型路段作为软基试验段(试验区)和(对照区). 提前安排施工,埋设有关仪器,进行原型观测和分析,取得实测资料,验证并优化设计,以指导全线施工. 本文着重介绍软基试验区中,粉喷桩复合地基的桩土应力比测试成果及分析.

## 1 工程概况和工程地质条件

安吉路全长 5 km,为城市一级主干道,路面标准宽度 50 m,双向六车道. 其中,软基路段长 2.53 km,几乎占道路全长的一半. 软基试验区位于蒲潭河段,桩号为(K5+880)~(K5+940). 蒲潭河宽度超过 120 m,但桥长仅 16 m. 有 110 m 需要回填 2.0~2.5 m 砂至河面上,桥台置于回填砂上. 填土高度(不包括砂垫层)2.8 m,边坡斜率 1:1.5,路基底宽约 65 m. 由于工程地质勘察时,蒲潭河尚未填砂,河道两侧的钻孔(K5+879, K6+003)资料显示的地层剖面,如图 1 所示. 该路段的软基处理方法为粉喷桩复合地基配合堆载预压,软基处理标准断面如图 2 所示. 粉喷桩的桩径为  $\varnothing 500$  mm,设计桩长约 14 m,实际桩长以施工电流控制,水泥掺量为 16%,桩间距 1.2~1.3 m,采用梅花型布置,置换率为 15.7%. 地层分布自上而下为 3 层. (1) 淤泥. 层深灰色,饱和、流塑、含少量腐叶、根茎,局部夹薄层砂,厚 7~15 m. (2) 粉质粘土. 呈灰黄色、饱和、可塑、夹砂粒. (3) 强风化花岗岩. 淤泥和粉质粘土的代表性物理力学性

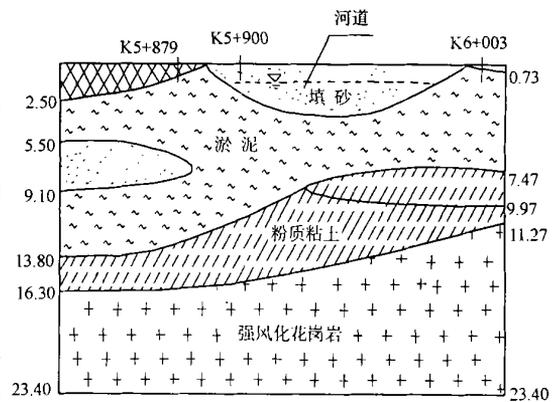


图 1 试验区工程地质剖面图

**收稿日期** 2003-11-09

**作者简介** 郭力群(1970-),男,讲师,硕士,主要从事软基处理与基础工程的研究. E-mail: anthony-guo@sina.com

**基金项目** 福建省自然科学基金资助项目(D020014)

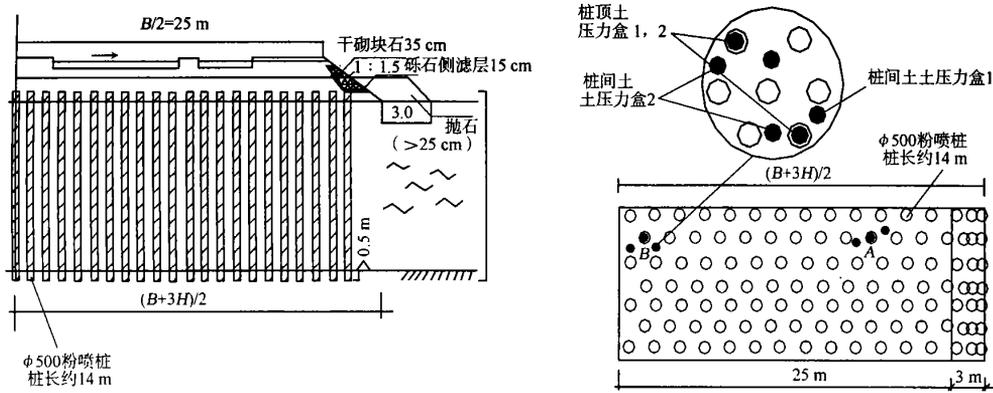


图2 软基处理标准断面图及土压力盒埋设位置

质指标,如表1所示.表中  $w$  为水的质量分数,  $\gamma$  为重度,  $e$  为孔隙比,  $L_L$  为液限,  $w_p$  为塑限,  $I_p$  为塑性指数,  $I_L$  为液性指数,  $K$  为渗透系数,  $w_o$  为有机质质量分数, 指标为均值.

表1 淤泥和粉质粘土的物理力学性质指标

/ (%)	/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$e$	$L_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$	$I_L$	直剪试验(快剪)		压缩试验		$K \times 10^{-7} / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$w_o$
							$C / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$	$a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	$E_s / \text{MPa}$		
0.621	15.9	1.69	48.2	30.3	17.9	1.76	13.4	1.9	1.71	1.62	3.3	0.032
0.218	20.0	0.57	27.7	18.4	9.3	0.36	82.7	22.5	0.16	9.79	-	-

## 2 量测仪器与测点布置

试验区的水泥搅拌桩复合地基现场测试,主要有两方面的内容.(1) 桩土应力比.(2) 复合地基变形规律.本文着重探讨加载过程中桩土应力比变化规律,复合地基沉降对桩土应力比的影响,以及在荷载一定的情况下,桩土应力比随时间的变化规律.试验选用直径 110 mm 的国产钢弦式土压力盒,特配 30 cm 直径(置于桩顶)和 30 cm  $\times$  30 cm(置于桩间土)的硅油囊,量程为 300 kPa.先将带有硅油囊的土压力盒制成 6 cm 高的水泥砂浆预制块,保证硅油囊的受力薄膜高出预制块 2~3 mm.在要埋设土压力盒的桩顶和桩间土处,砍去 10 cm 桩头和挖去 10 cm 土,整平铺砂后放上预制块(桩上土压力盒硅油囊面朝上,桩间土的朝下),然后铺 30 cm 砂.土压力盒预制块的做法如图3所示, K5+900 断面土压力盒埋设情况,如图2所示.土压力量测过程中,我们着重考虑了以下2个技术问题.(1) 消除土压力盒加工应力的影响.刚加工好的土压力盒,初始频率很不稳定.使用前我们经定期测量后,挑选初始频率稳定的土压力盒.(2) 土压力盒的标定.除了进行了砂标外,还进行了现场标定,取得了比较符合实际情况的率定系数<sup>[1]</sup>.

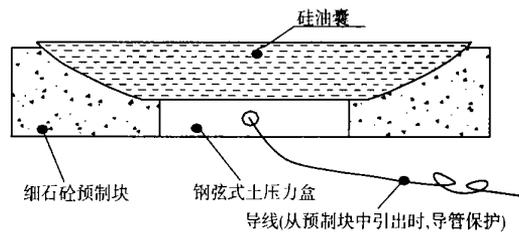


图3 土压力盒预制块示意图

质指标,如表1所示.表中  $w$  为水的质量分数,  $\gamma$  为重度,  $e$  为孔隙比,  $L_L$  为液限,  $w_p$  为塑限,  $I_p$  为塑性指数,  $I_L$  为液性指数,  $K$  为渗透系数,  $w_o$  为有机质质量分数, 指标为均值.

## 3 测试成果与分析

桩土应力比( $n$ ),是指复合地基中桩顶上的平均应力( $p_p$ )与桩间土的平均应力( $p_s$ )之比,即  $n = p_p / p_s$ .桩土应力比是反映复合地基工作性状,以及计算复合地基承载力和沉降的主要参数.  $n$  与地基土的特性、桩长、桩径、水泥掺量、面积置换率、荷载水平和时间等诸多因素有关.试验中以3个土压力盒为一组,其中1个土压力盒置于桩顶上,2个置于桩间土上,在 K5+900 断面埋设 A, B 两组.表2是填土高、沉降、桩土应力比的代表性数据.在粉喷桩施工完成后 35 d,开始进行填土.填土路堤(包括砂垫层)荷载  $P$  按实际填土重量计算,填土密度为  $1.9 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ .图4,5分别是 A 组和 B 组土压力盒的  $P \sim S$  曲线和  $P_p, p_s, n$  与  $t$  的关系曲线.

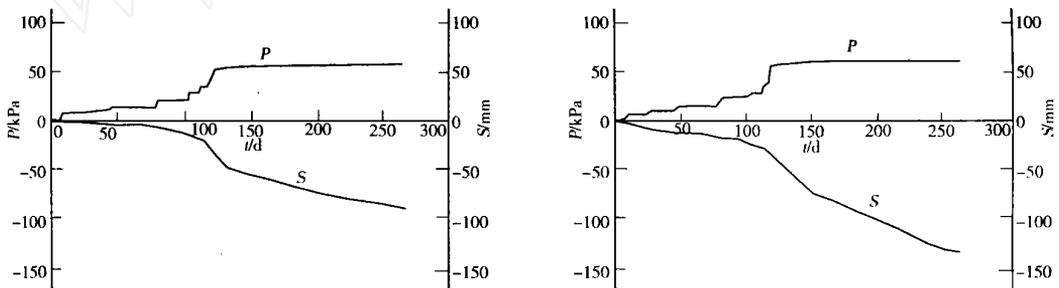
通过对图4,5和表2的综合分析可以看出:(1) 加载初期  $p_p, p_s, n$  均随  $P$  的增大而增大,但  $p_p$  的

增幅大,  $\sigma_s$  的增幅小. 表明荷载主要由桩承担, 呈现桩身应力集中现象. 在填土施工间歇期, 桩、土应力持续增长, 桩土应力比  $n$  基本平稳, 未发生明显增减变化, 对应最大填土荷载的最大桩土应力比为 1.8 ~ 3.2. (2) 加载初期, 填土速度较慢, 地基变形缓慢增长. 施工约 110 d 后, 因等载预压集中填土 1.5 ~ 2.0 m, 地基沉降迅速增长. 随着沉降的增加, 桩土应力比明显降低到 1.5 ~ 2.3. 其中, A 组的桩土应力

表 2 加载过程复合地基桩土应力比与沉降对应关系

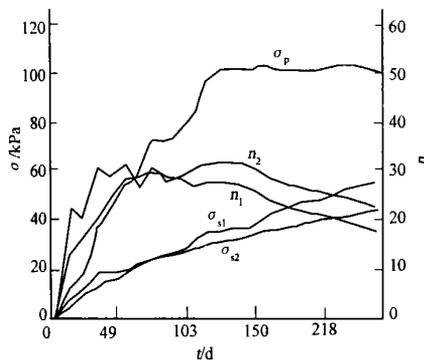
组别	H/ m	0	0.3	0.4	0.7	1.1	1.3	2.0	2.6	2.8	2.8
	t/ d	0	6	25	45	78	103	118	120	150	264
A 组	$n_1$	0	2.1	3.0	2.9	2.9	2.7	2.8	2.8	2.5	1.8
	$n_2$	0	1.2	2.0	2.5	2.8	3.0	3.2	3.2	2.9	2.3
	S/ mm	0	0	3	6	10	15	23	28	57	90
B 组	$n_1$	0	0.7	1.5	1.6	1.9	2.0	2.1	2.1	2.0	1.8
	$n_2$	0	1.5	2.2	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.5
	S/ mm	0	2	7	11	14	21	28	33	67	124

比比 B 组大, A 组压力盒处的地基沉降较 B 组小. 并且, 试验段两个试验区其余 4 组土压力盒, 和泉厦高速公路的试验段的土压力试验结果, 都有类似的结果. 本文限于篇幅不能一一列出. 这说明沉降的大小会对桩土应力比产生影响, 沉降大则  $n$  值小; 反之沉降小, 则  $n$  值大. 文献资料及泉厦高速公路软基试验段得到的桩土应力比规律都表明, 粉喷桩复合地基的桩土应力比不是常数. 随荷载增加而增加, 同级

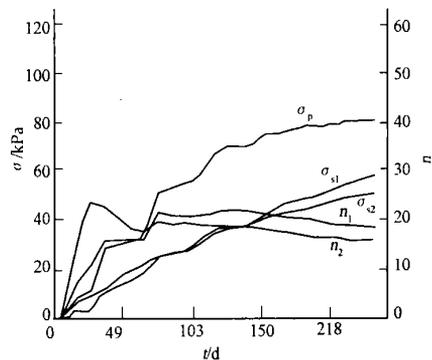


(a) 荷载(地基沉降)过程曲线

(a) 荷载(地基沉降)过程曲线



(b)  $P, p, s, n$  与  $t$  的关系曲线



(b)  $P, p, s, n$  与  $t$  的关系曲线

图 4 A 组土压力盒处

图 5 B 组土压力盒处

荷载下随时间逐渐减小,  $n$  值在 3 ~ 6 (甚至 10) 之间变化<sup>[1~3]</sup>. 本试验的  $n$  值的基本变化规律与一般结论类似, 但  $n$  值较小. 造成  $n$  值较小的原因之一就是, 复合地基沉降较大. 另外, 由于上部桩间土为模量较大的填砂, 桩、砂的变形模量接近, 因而导致桩身应力集中现象不明显. 上述两种因素综合作用, 致使  $n$  值较小.

### 4 复合地基加固区压缩量

根据现场实测的  $n$  值, 可以按《JG 79-91 建筑地基处理技术规范》<sup>[4]</sup> 中的复合模量法, 计算加固深度范围内的压缩量, 与现场分层沉降实测的压缩量进行对比. 复合地基压缩模量  $E_{sp}$  为

$$E_{sp} = [1 + m(n - 1)] E_s \quad (1)$$

加固区土层压缩量<sup>[5]</sup>  $s_1$  为

$$s_1 = (P / E_{sp}) H, \quad (2)$$

在式(1),(2)中,  $m$  为复合地基面积置换率,  $E_s$  为桩间土加权平均压缩模量,  $P$  为复合地基上的附加应力增量,  $H$  为加固区厚度. 根据 A, B 位置处实测的分层沉降曲线, 可以确定其相应的压缩层范围为 13 ~ 14 m. 由此表明, 土层压缩主要发生在粉喷桩复合地基加固区内. 由于路基底宽  $B = 65$  m, 则  $B/H$  在 5 倍左右, 地基沉降可以按一维压缩考虑, 并认为  $P$  沿加固深度不衰减. 按式(1), (2) 计算复合地基加固区的沉降  $s_1$  及相关参数如表 3

表 3 加固深度范围内复合地基的压缩量

组别	$m$	$n$	$E_{sp}/\text{MPa}$	$P/\text{kPa}$	$H/\text{m}$	$s_1/\text{mm}$	$s^*/\text{mm}$
A 组	0.157	3.0	7.1	53.2	12.0	93.7	94.2
B 组	0.157	2.0	5.4	53.2	13.5	133.5	140.1

所示. 表中,  $s^*$  为利用实测分层沉降过程线推算的加固区最终压缩量.

对表 3 中压缩量的计算值  $s_1$  和实测推算值  $s^*$  加以对照, 可以看出两者比

较接近, 误差仅在 4.7% ~ 5.8% 范围内. 说明本次实测的桩土应力比, 能较好反映复合地基实际工作状态. 用实测  $n$  值计算复合地基加固区的压缩量, 是比较可靠的.

## 5 结论

通过该试验段的现场测试, 可以得到 4 个结果. (1)  $n$  值随着  $P$  的增大而增大, 基本呈线性关系. 在荷载一定的情况下,  $n$  值随时间基本不变. (2)  $n$  值随着复合地基沉降的增加而减少. (3) 导致  $n$  值较小的主要原因是, 复合地基变形较大和地表桩间土为填砂, 桩、砂的变形模量接近, 降低了桩身应力集中现象. 复合地基的沉降, 也是影响桩土应力比大小的一个重要因素. (4) 在复合模量法中, 利用实测的桩土应力比计算加固区沉降, 是一种比较合理的途径. 目前, 试验段的成果已在设计修改中得以体现, 并应用到后续路段的施工中.

## 参 考 文 献

- 1 马时冬. 水泥搅拌研究桩复合地基桩土应力比测试[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 48 ~ 51
- 2 秦建庆, 叶观宝. 水泥土桩复合地基桩土分担荷载的试验研究[J]. 工程勘察, 2000, 19(1): 32 ~ 34
- 3 叶观宝, 叶书麟. 水泥土搅拌桩加固软基的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 270 ~ 274
- 4 中国建筑科学研究院编. JGJ 79-91 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992. 22 ~ 25
- 5 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 138 ~ 139

## Analysing the Prototyping Measurements of Pile-Soil Stress Ratio on the Composite Ground with Dry-Cement Jet Mixing Piles

Guo Liqun

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** In a test sector of soft ground on Anji Road of Quanzhou, the field measurements of pile-soil stress ratio and subsidence of foundations are performed on the composite ground with dry-cement jet mixing piles. The author inquires into the regular pattern of the change of  $n$  by way of these field measurements. As shown by the test, value  $n$  increases with the increase of load but it decreases with the increase of subsidence. The measured value  $n$  of this project is to the small side. The principal causes of a fairly small value  $n$  include: a fairly great deformation of foundation; the interpile soil on the upper part are sand filling with fairly great modulus; pile and sand have approximate modulus of deformation. In view of causes mentioned above, it is reasonable for the important projects to calculate subsidence of composite ground by using measured pile-soil stress ratio.

**Keywords** dry-cement jet mixing pile, composite ground, pile-soil stress ratio, prototyping measuring