

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0274-05

# 柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性试验研究

陈善雄<sup>1,2</sup>, 许锡昌<sup>1</sup>, 赵文光<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

**摘要:** 开展了粉喷桩复合地基承载性能试验, 实测了柔性荷载下桩、土应力, 探讨了复合地基中桩土应力比及其变化规律。研究表明, 粉喷桩复合地基荷载-沉降曲线一般表现为缓变型; 粉喷桩复合地基承载力宜按相对沉降法取相对沉降比为 0.01 所对应的压力。由于砂垫层的流动补偿作用, 柔性荷载下桩土应力比随荷载的增加变化较为平缓, 在复合地基承载力基本值附近桩土应力比变化范围为 1.73~6.83, 平均值为 3.20。

**关键词:** 柔性荷载; 粉喷桩复合地基; 承载特性; 试验研究

**中国分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## Experimental study on bearing characteristics of dry jet mixing pile composite ground under flexible load

CHEN Shan-xiong<sup>1,2</sup>, XU Xi-chang<sup>1</sup>, ZHAO Wen-guang<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The bearing characteristics of dry jet mixing pile composite ground are investigated. The stresses on pile and soil and their variation under flexible load have been measured; and pile-soil stress ratio of composite ground with DJM pile under flexible load and its variation with the load have been studied. The investigation indicates that the static loading test curves of composite ground are of gradually varied shape; it is feasible that load corresponding to relative settlement ratio  $s/b = 0.01$  is taken as basic bearing capacity value of composite ground according to relative settlement method. Because of running compensation effect of cushion, pile-soil stress ratio  $n$  changes comparatively gentle with load. Pile-soil stress ratio  $n$  changes about 1.73-6.83; its average value is 3.20.

**Key words:** flexible load; dry jet mixing pile composite ground; bearing characteristics; experimental study

## 1 前言

刚性基础下水泥搅拌桩复合地基的工程性状, 如单桩承载力、桩间土承载性能、沉降特性与计算方法、桩土应力比等已得到了深入的研究<sup>[1-3]</sup>, 并推动了粉喷桩的工程应用, 而柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性研究则相对较少, 其理论研究远远落后于工程实践, 这一点已引起了部分研究者的注意, 并开始进行了一些初步的研究<sup>[4-6]</sup>, 但系统研究成果还很少。

鉴于此, 笔者依托河南省交通厅科研项目“湖沼地基及高填方路基沉陷处治”(2002P240)开展

了粉喷桩复合地基工程性状试验研究, 着重讨论柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性。

## 2 试验设计

本研究采用平板载荷试验来研究柔性荷载下复合地基承载特性。柔性荷载(如路堤荷载)下复合地基中桩与土体的沉降并不满足桩土“等应变”假设, 桩存在一定的相对向上刺入变形, 为此, 在荷载板下增加一定厚度的砂垫层, 以模拟柔性荷载的流动补偿效应。试验采用堆载法, 按《建筑地基处理技术规程》<sup>[7]</sup>实施。单桩复合地基静载试验的具体安排见表 1。

收稿日期: 2005-11-10 修改稿收到日期: 2006-02-18

基金项目: 河南省交通厅科研项目(No. 2002P240)资助。

作者简介: 陈善雄, 男, 1965 年生, 在读博士生, 研究员, 主要从事非饱和土土力学和地基处理的理论与工程应用研究工作。

E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

表 1 单桩复合地基静载试验安排

承压板尺寸 / m	数量 / 组	桩号	试验加载值 / kPa	垫层厚度 / cm
1.2×1.2	3	1, 2, 3	300	10
1.2×1.2	3	4, 5, 6	300	30
1.2×1.2	3	7, 8, 9	300	20
1.0×1.0	3	10, 11, 12	300	10
1.0×1.0	3	13, 14, 15	300	30

为了解荷载在桩与桩间土之间的分配规律，在桩顶和桩周土顶面布置了土压力盒，分别测试了桩顶和桩周土顶面的应力。土压力盒的布置见图 1。每组试验共布置 5 个压力盒，其中桩顶上布置 2 个，桩周土体中布置 3 个。

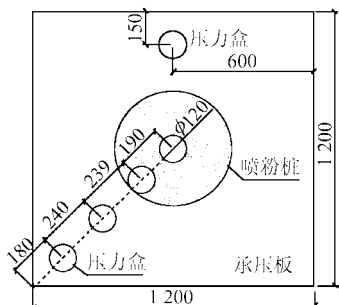


图 1 土压力盒埋设布置图(单位: mm)

Fig.1 Arrangement of pressure cells(unit: mm)

本次试验依托 G106 国道线河南信阳汪湖桥南头粉喷桩处理工程开展。106 国道线汪湖桥南头长约 60 m，填方高约 3.4~4.0 m，回填成分多为黏性土。该工程自 1999 年建成以来出现大幅度沉陷，最大沉陷达 80 cm，直接影响过往行车安全。工程地质勘察表明，路基下普遍存在厚度为 3.40~4.00 m 的回填土，其回填时间短，固结程度差，其自身的固结沉降是造成路面沉陷的主要原因。该土层地基承载力为 70 kPa，压缩模量为 3.8 MPa。

根据沉陷路段路基特征及回填物成分，回填土层采用喷粉桩进行加固处理，处理范围：沿路基纵向长 60 m，宽 12 m，桩按 1 m×1 m 和 1.1 m×1 m 的梅花形布置，设计总桩数 763 根，桩端持力层下部为粉质黏土层，有效桩长 5.00 m，桩径为 500 mm，固化剂采用 p32.5 普通硅酸盐水泥，喷灰量 50 kg/m，偏差不大于 8%。

### 3 试验成果

#### 3.1 复合地基静载试验

图 2 和图 3 给出了单桩复合地基静载试验荷载-承压板沉降 ( $P-s$ ) 曲线，其承压板宽度分别为

1.2 m 和 1.0 m，可以看出，在荷载作用下承压板沉降量随外荷增加而增大，且随外荷增加呈加剧趋势，复合地基  $P-s$  曲线逐步向下弯曲，为一条平缓的光滑曲线，看不出明显的拐点，相邻两级压力所对应的沉降量之比亦无一定规律。

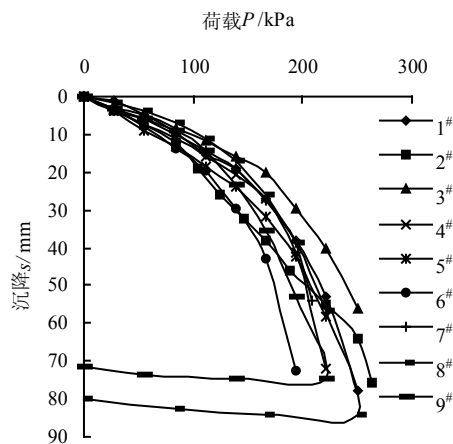


图 2 单桩复合地基荷载试验曲线 (1.2 m 宽方形承压板)

Fig.2 Static loading test curves of single pile composite ground for square bearing plate with 1.2 m width

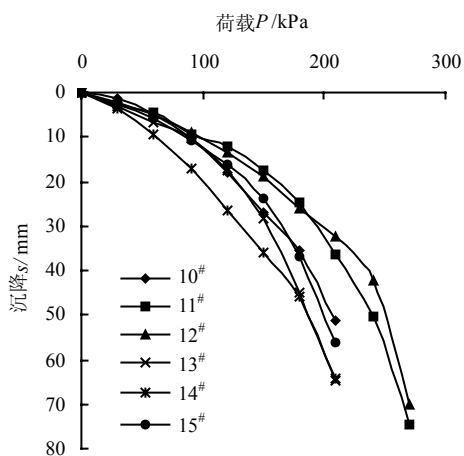


图 3 单桩复合地基荷载试验曲线 (1.0 m 宽方形承压板)

Fig.3 Static loading test curves of single pile composite ground for square bearing plate with 1.0 m width

将复合地基与原地基的  $P-s$  曲线(图 4)对比不难发现，在相同荷载作用下复合地基承压板沉降量明显低于原地基承压板沉降量，由于粉喷桩的加入，地基得到了明显的改善，其承载力明显提高，压缩性明显降低，粉喷桩发挥了置换作用。

#### 3.2 桩、土应力与桩土应力比

以 8<sup>#</sup> 试桩为例，图 5 给出了单桩复合地基中桩顶、土面应力随荷载变化曲线，其他试验情况类似。可以看出，总体上随着荷载的增加，桩顶压力

和土面压力越来越大，土面压力与桩顶压力的增加同步，其变化趋势较为接近。

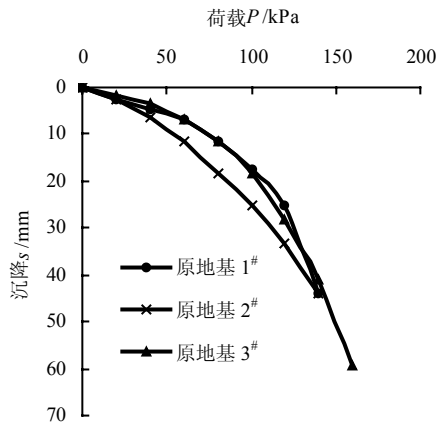


图4 原地基(桩间土)载荷试验荷载-沉降曲线  
Fig.4 P-s curves of static loading test of nature foundation

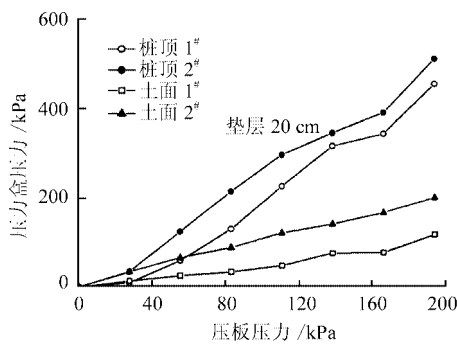


图5 典型桩顶、土面应力-载荷曲线(8#桩)  
Fig.5 Curves of typical stress on pile No.8 and soil vs. load

根据实测桩顶、土面应力值，整理得到桩土应力比随载荷的变化曲线见图6。可见桩土应力比n随载荷的增加有一定程度的起伏，但桩土应力比n随载荷的增加变化较为平缓，在复合地基承载力基本值附近，范围为1.73~6.83，平均值为3.20。

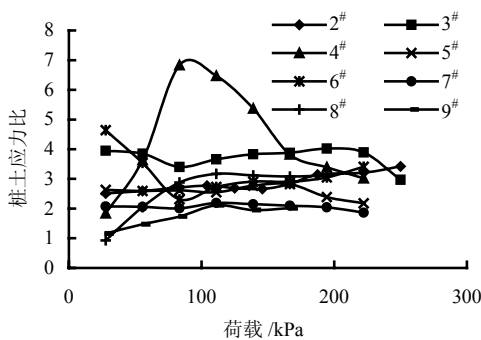


图6 桩土应力比-载荷曲线  
Fig.6 The measured curves of pile-soil stress ratio vs. load

## 4 成果分析

### 4.1 复合地基承载力评价方法

目前利用静载试验 P-s 曲线确定粉喷桩复合地基承载力的常用方法有：比例界限法、二倍沉降增量法、切线交会法、斜率法、极限压力法和相对沉降量法等6种，见图7。前5种均是利用土体载荷试验曲线形状特征来确定地基承载力，由于土体力学性质的差异，其载荷试验曲线具有不同的形状特征，且由于技术人员的习惯及熟练程度不同，即便用同一试验资料绘制的曲线形状特征也会有差异，人为因素的影响十分明显。

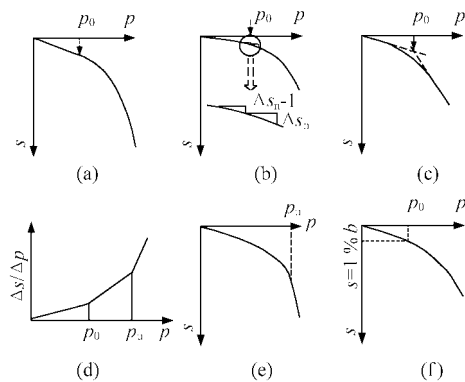


图7 利用静载试验曲线确定地基承载力的常用方法  
Fig.7 Usual method determining bearing capacity of ground by static loading test curve

试验表明，粉喷桩复合地基 P-s 曲线多为缓变型，相对沉降量法是比较适合粉喷桩复合地基的，但规范<sup>[7]</sup>建议的相对沉降比的范围较宽，较难把握。对柔性荷载，建议取上限，即取相对沉降比为0.01所对应的压力为粉喷桩复合地基的承载力，其理由如下：在刚性基础上荷载作用初期桩和桩间土满足位移协调条件，荷载按地基材料的刚度大小不断进行分配，表现为基底应力逐渐向桩集中，桩发挥较强的承载作用，复合地基变形较小。随着荷载的逐步增大，复合地基变形逐步加剧，在 P-s 曲线上往往表现为，在荷载小于承载力时 P-s 曲线较为平缓，随着荷载的增大，曲线逐步下弯。规范建议的相对沉降比即是针对这种情况而提出的；柔性荷载下荷载作用初期垫层即产生流动补偿作用，桩相对向上刺入柔性垫层，致使桩间土承担较多的荷载，桩上应力集中不明显，桩的作用相对较弱，桩的上刺入使桩间土有一定的压缩量，复合地基的沉降也将增大。桩顶上刺入还将使桩顶以下一定长度范围内的桩侧产生负摩阻力，桩身压缩量增大，在 P-s 曲线上往往表现为加荷初期沉降量较大。

## 4.2 地基承载力与变形模量

取相对沉降比为 0.01 对应的压力为复合地基承载力基本值, 见表 2。由表可见, 粉喷桩复合地基承载力随置换率的变化而变化, 且存在一定的变异性, 这与土和桩各自的变异性有关, 随置换率的增大粉喷桩复合地基承载力相应提高, 置换率越大, 桩的置换作用则越强烈, 这一结论与以往的认识是一致的。在置换率  $m = 13.6\% \sim 19.6\%$  范围内, 粉喷桩复合地基承载力约为原地基承载力的 134%~146%, 地基承载力提高 34%~46%, 加固效果明显。

表 2 粉喷桩复合地基承载力与变形模量汇总表  
Table 2 Summary sheet of bearing capacity and deformation modulus of composite ground

桩号	置换率 / %	垫层厚度 / cm	承载力 / kPa		变形模量 / MPa	
			基本值	标准值	基本值	平均值
1 <sup>#</sup>			95.50		7.93	
2 <sup>#</sup>		10	82.20	96.50	6.83	8.02
3 <sup>#</sup>			111.80		9.29	
4 <sup>#</sup>			88.70		7.37	
5 <sup>#</sup>	13.6	30	83.40	83.70	6.93	6.95
6 <sup>#</sup>			79.00		6.56	
7 <sup>#</sup>			96.50		8.02	
8 <sup>#</sup>		20	107.30	101.13	8.91	8.40
9 <sup>#</sup>			99.60		8.27	
10 <sup>#</sup>			105.00		8.72	
11 <sup>#</sup>		10	105.90	102.67	8.80	8.53
12 <sup>#</sup>			97.10		8.07	
13 <sup>#</sup>	19.6		93.90		7.80	
14 <sup>#</sup>		30	99.30	101.20	8.25	8.41
15 <sup>#</sup>			110.40		9.17	

垫层厚度对粉喷桩复合地基承载力影响无明显的规律性, 对此可以这样理解: 在荷载板下增加的一定厚度的砂垫层发挥了流动补偿作用, 达到了模拟柔性荷载作用的目的, 其成果可以反映柔性荷载下粉喷桩复合地基的工程性状。

粉喷桩复合地基变形模量随置换率的变化而变化, 且存在一定的变异性。总的来说, 随置换率的增大粉喷桩复合地基变形模量相应提高, 压缩性减低, 在置换率  $m = 13.6\% \sim 19.6\%$  范围内, 粉喷桩复合地基变形模量约为原地基变形模量的 229%~249%, 地基变形模量提高 129%~149%, 地基土由高压缩性变为中等压缩性。垫层厚度对粉喷桩复合地基变形模量的影响无明显的规律性。

## 4.3 桩土应力比

桩土应力比  $n$  即桩顶应力与桩间土平均应力之比, 是反映复合地基工作状态的一个重要参数, 至今尚无一个被工程界接受的较完善的计算模式, 仍要依赖于现场测试。通常刚性基础下桩土应力比-荷载曲线呈上凸形<sup>[2]</sup>, 存在明显的峰值, 如图 8 所示。

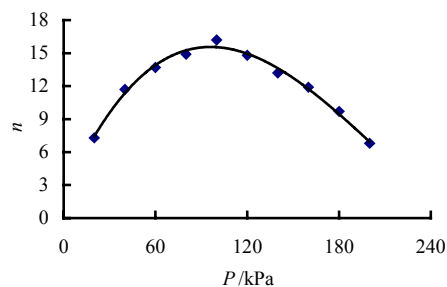


图 8 刚性基础下典型桩土应力比-荷载变化曲线  
Fig.8 Typical curves of pile-soil stress ratio vs. load for rigid foundation

对柔性荷载, 桩和桩间土不必满足位移协调条件, 垫层可以调节荷载在桩和桩间土的分配比例。初始加荷时承压板下的砂垫层发挥了流动补偿作用, 桩土能基本同步发挥作用, 桩土应力比  $n$  随荷载的增加变化较为平缓。

孙军等<sup>[6]</sup>根据雍六高速公路长江二桥江北接线工程的实测土压力值, 整理得到桩土应力比在填土过程中的变化,  $n$  随着填土荷载的增加而增大, 在填土间歇期又有所降低; 在整个填土时间内变化不大, 范围为 3.5~4.5, 填土结束之后基本不再改变, 保持在 3.55 左右, 桩身应力和桩间土应力很快就进入了稳定期。本文得到的柔性荷载下  $n$  平均为 3.20, 与其接近。

## 5 结 论

(1) 在荷载板下增加一定厚度的砂垫层发挥了流动补偿作用, 可以模拟柔性荷载的作用, 其成果能反映柔性荷载下粉喷桩复合地基的工程性状。

(2) 路基经粉喷桩加固后地基承载力得到了明显提高, 地基土的压缩性大幅度下降, 且置换率越大, 桩的置换作用则越明显。垫层厚度对粉喷桩复合地基承载力的影响无明显的规律性。

(3) 粉喷桩复合地基  $P-s$  曲线一般表现为缓变型, 这与被加固地基土  $P-s$  曲线特点相似, 反映粉喷桩复合地基仍属于地基范畴。

(4) 粉喷桩复合地基承载力宜按相对沉降量法确定, 建议取  $s/b=0.01$  ( $b$  为承压板宽度) 所对应的压

力为粉喷桩复合地基的承载力。

(5) 柔性荷载下, 由于砂垫层的流动补偿作用, 桩与土能相互协调工作, 桩土应力比随荷载的增加变化较为平缓。在复合地基承载力基本值附近, 桩土应力比平均值为 3.20。

### 参考文献

- [1] 张继文. 粉喷桩工程性状试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 260—263, 266.  
ZHANG Ji-wen. An experiment study on the engineering properties of DJM pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 260—263, 266.
- [2] 雪飞胜, 肖建勇. 粉喷桩复合地基承载特性试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2000, 18(4): 66—69.  
XUE Fei-sheng, XIAO Jian-yong. Research and test on the composite foundation bearing capacity of cement-soil pile[J]. **Journal of Changsha Railway University**, 2000, 18(4): 66—69.
- [3] 杜建成, 张利民. 水泥粉喷桩地基桩土应力分布研究[J]. 地基处理, 1996, 7(4):8—11.  
DU Jian-cheng, ZHANG Li-ming. Study on stress distribution of pile and soil in dry jet mixing pile composite ground[J]. **Ground Improvement**, 1996, 7(4): 8—11.
- [4] 窦远明, 戴为民, 刘晓立, 等. 柔性荷载作用下水泥土桩复合地基的承载力与沉降特性的研究[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2): 80—83.  
DOU Yuan-ming, DAI Wei-mine, LIU Xiao-li, et al. Study on bearing capacity and settlement of cement-soil piles under flexible load[J]. **Journal of Hebei University of Technology**, 2001, 30(2): 80—83.
- [5] 杨涛. 路提荷载下柔性悬桩复合地基的沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 741—743.  
YANG Tao. Settlement analysis of composite ground improved by flexible floating piles under road embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 741—743.
- [6] 孙军, 应后强, 邹坚. 深层搅拌桩复合地基的现场试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(6): 52—54.  
SUN Jun, YING Hou-qiang, ZHOU Jian. Field experimental study on composite foundation with deep mixing piles[J]. **Advance in Science and Technology of Water Resources**, 2002, 22(6): 52—54.
- [7] JGJ79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].

### 修改论文要点

修改论文时, 首先应该推敲审稿专家提出的意见, 并仔细审视自己的论文, 从学术角度去充实和完善论文, 包括突出论文创新之处及亮点, 整理论文表述结构, 核对公式及其参数符号意义、图表、参数单位的正确性, 将变量斜体, 向量、矢量, 矩阵加黑并斜体等。论文书写应文笔流畅, 以向读者展示出高水平、高质量论文。

其次, 注重写好中英文文摘。文摘应包含正文的要点, 一般来说, 文摘应包含三方面: (1) 研究对象(目的); (2) 研究方法(含所用的设备、材料, 研究过程); (3) 结果和结论。写英文文摘时, 不能因为某些内容不好翻译就弃掉要点; 文摘要尽量简短, 篇幅一般控制在 400 字左右, 尽可能删掉课题研究的背景信息。文摘中出现的数字应该是最重要, 最关键的数据。不需要自己标榜自己的研究成果。文摘将脱离原文而独立存在, 因此不能出现图表及公式。文摘中的内容应在正文中出现, 文摘不能对原文进行补充和修改。文摘中的缩写名称在第一次出现时要有全称。文摘的句子应尽量简短。主谓语要搭配。以第三人称叙述。同时, 提供完整对应的、标准格式的中英文对照作者名及其单位, 以及详细的个人简介。关键词尽量用名词或名词性词组, 避免用形容词或形容词性词组做关键词。中英文关键词要对应。

第三, 撰写论文时参考过的资料应该作为参考文献一一列出, 其序号应与论文中引用处出现的先后顺序一致。对于有英文原文的文献应该同时列出; 中文文献作者列出 3 名后加等, 外文文献则列出全部作者; 文献的格式因文献类型不同其列出的单数不禁相同, 比如, 期刊: 作者名. 论文题名[J]. 出版年, 期(卷): 起止页码. 出版物: 著者. 著作名[M]. 出版地: 出版者, 出版年(英文文献格式同), 具体文献可参照编辑部提供修改范例(或征稿简则)。

《岩土力学》编辑部