

# 粉喷桩复合地基承载力计算方法的探讨

杨顺安 张红艺 韦宏鹤 刘虎中

(中国地质大学,武汉 430074)

**【摘要】** 粉喷桩复合地基承载力的确定,目前主要采用现场静力载荷试验的方法。通过理论分析和工程验证,提出了一种根据静载资料确定复合地基承载力的新方法——回弹法。它具有理论依据充分,结果唯一,不受试验曲线和人为因素影响。

**【关键词】** 粉喷桩 复合地基 承载力 回弹法

**【Abstract】** The bearing capacity of jet powder pile composite foundation is usually determined by the field static loading test at present. A new method rebounding determining bearing capacity of composite foundation by the static loading test data is put forward based on the theoretical analysis and project practice. This method possesses the sufficient theoretical basis and sole result, and is not influenced by the experimental curves and man-made factors.

**【Key words】** jet powder pile composite foundation bearing capacity rebounding method

## 0 前言

粉喷桩软土加固技术发展很快,专项技术规程的颁布(《软土地基深层搅拌加固法技术规程》YBJ225-91),标志着该技术在设计及施工上已趋于成熟。

粉喷桩复合地基是利用深层搅拌机械将固化剂(水泥、石膏等)均匀拌入软土中,使二者发生化学反应而在软土中形成抗压强度高并具有整体性、水稳性的桩柱体;桩柱体与桩周软土共同承担外部荷载所形成的复合地基。目前多应用于沿海淤泥质地层的大面积加固改良工程,在泥炭土和新近冲积土中亦有成功的实例。

粉喷桩复合地基的承载力确定(YBJ225-91),建议采用现场静力载荷试验的方法,并给出了具体标准。但实践表明;由于粉喷桩复合地基与其它类型的复合地基相比,力学特征有一定的差异性,完全照搬常规方法来处理静载试验资料,确定地基承载力具有很大的人为性。笔者在参与多项粉喷桩加固工

程的质量检测工作中,收集了大量的现场静载试验资料并对地基承载力的确定方法进行了对比研究,发现目前常用的某些方法和公式存在着理论依据不足和人为因素干扰等缺陷;粉喷桩复合地基承载力计算方法在现有基础上进行改进是完全可行的。现以深圳宝安新中心区甲岸路粉喷桩加固工程为例对相关问题探讨如下。

## 1 工程概况

深圳市宝安新中心区位于广深公路以西,珠江入海口东侧的滨海潮间带,占地面积约8平方公里;甲岸路为其中的次干道之一,道路设计全长920m,总幅宽50.0m,机动车道宽21.0m。软基加固方案采用粉喷桩,设计桩径55cm,正方形布桩,桩心距1.2m,桩长4~6m,桩端超过淤泥层底部0.5~1.0m,场区内各土层的分布及物理力学性质指标见表1。

粉喷桩施工结束后,在现场作复合地基静力载荷试验4组(见图1),其中(a)、(b)为

**作者简介:** 杨顺安,男,岩土工程研究所所长,1970年毕业于北京地质学院水文地质及工程地质系。主要从事岩体力学、工程地质教学及软土工程性质和加固改良的研究工作。

表 1 场区内各土层及物理力学性质指标表

层序	土名	厚度 m	含水量 $w/(\%)$	容重 $\gamma/\text{cm}^3$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p(\%)$	液性指数 $I_L/(\%)$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
①	人工填土	1.50	32.3	1.98	0.795	25.0	0.52	7.09
②	灰黑色淤泥	3.00	77.2	1.54	2.146	28.4	1.83	2.23
③	含贝壳淤泥	1.00	43.5	1.88	0.989	24.5	0.86	4.72
④	含砾粘土	>3.0	28.6	1.98	0.749	23.4	0.28	7.77

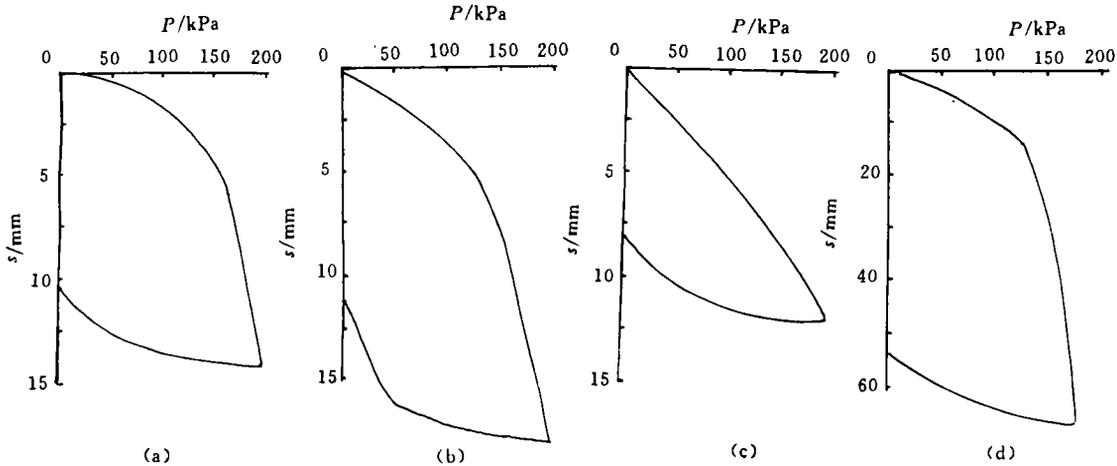


图 1 粉喷桩复合地基静载试验曲线

单桩复合地基试验(承压板  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ ), (c)、(d)为双桩复合地基试验(承压板  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ )。

## 2 粉喷桩复合地基的主要力学特征

粉喷桩复合地基的力学特征有以下几点,对其承载力有很大的影响。

(1)由于固化剂掺入量很少(占被加固土体质量的  $7\% \sim 15\%$ ),其水解和化学反应完全处于粘土颗粒的包围之中,硬化速度缓慢而复杂,加固土的强度增长比混凝土慢得多,大量资料表明经过四个月(120d)养护后的桩体仍未达到最终强度。因此,在进行粉喷桩复合地基承载力试验和计算时,必须考虑到粉喷桩体强度增长速率对承载力的影响;

(2)粉喷桩体的强度与混凝土桩相比要小得多,其压缩变形也大得多,粉喷桩的抗压强度一般为  $1 \sim 2\text{MPa}$ (龄期 120d),其压缩模量通常在  $200 \sim 300\text{MPa}$  之间,所以复合地基的承载力受桩体抗压强度的局限;

(3)与混凝土桩基础相比,粉喷桩复合地

基的应力集中现象不太明显,主要视桩体与桩间土强度的差别大小而定,二者差别越大,应力集中现象就越明显,它可以通过复合地基承载力与加固前软土地基承载力的比值间接反映出来。如豫东地区黄河新近冲积粉土(承载力  $80 \sim 100\text{kPa}$ )中采用粉喷桩复合地基加固后承载力提高到原来的 1.5 倍左右( $120 \sim 150\text{kPa}$ ),而深圳地区海相淤泥(承载力  $40 \sim 60\text{kPa}$ )采用粉喷桩复合地基加固后承载力可提高到原来的 2 倍以上( $100 \sim 160\text{kPa}$ )。因此,在确定粉喷桩复合地基承载力及进行沉降计算时,必须考虑到应力集中现象的差异;

(4)深圳地区海相淤泥多位于滨海古潮间带鱼塘区内,所以在粉喷桩加固施工前必须用山皮土敷设一层  $1 \sim 2\text{m}$  厚的工作垫层(人工硬壳层),垫层的存在一方面使上部荷载分散均匀化,一方面增加了下部桩体群的应力集中现象。另外,因为载荷试验只能反映压板宽度 2 倍深度内土体的平均性质,表部

硬壳层的存在对载荷结果有很大的影响,从图1中也可以明显看出,双桩静载试验的沉降量比单桩的大3倍左右,人工硬壳层的存在是这种差异的主要原因之一。由于与路基相比,压板宽度要小的多,王盛源建议尽量不要在硬壳层中进行单桩复合地基载荷试验。

### 3 粉喷桩复合路基承载力确定方法的讨论

对于均布条型荷载,当基础埋深为零时,其临塑荷载 $P_{cr}$ 可由下式算出:

$$P_{cr} = \frac{\pi c \cdot \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \pi/2} \quad (1)$$

式中:

$\varphi$ ——地基土的内摩擦角( $^\circ$ ),单独计量时,弧度;

$c$ ——地基土的粘聚力,kPa。

由受荷特征分析,粉喷桩复合路基所受荷载基本上应属于均布条型荷载,基础埋深亦可视为零。利用上式计算临塑荷载并确定地基承载力在理论上完全成立,但在现实中却很难行得通。因为粉喷桩复合地基 $\varphi$ 、 $c$ 值的确定在目前尚无可行的办法。同样原因,极限承载力理论计算公式在此也无能为力。因此,YBJ225-91中规定采用现场载荷试验确定粉喷桩复合地基的承载力,并给出了具体的标准。

现场载荷试验的成果一般能反映相当于1~2倍载荷板宽度的深度内基础土体的平均力学性质,对于成份或结构很不均匀的土层,显示出用其它方法所难以代替的作用。

利用现场载荷试验 $p-s$ 曲线确定地基承载力,目前有多种方法,但都建立在什塔耶曼夫理论的基础上。什氏认为:竖向均布荷载作用于刚性圆形板下各点的沉降为:

$$s = \frac{\pi(1-\nu^2)}{2E_0} r p \quad (2)$$

$$\text{或 } s = \frac{\pi(1-\nu^2)}{4E_0} d p \quad (3)$$

当为刚性的方形板时,板下各点的沉降为:

$$s = 0.88 \frac{(1-\nu^2)}{E_0} b p \quad (4)$$

式中: $s$ ——刚性圆形板或方形板下各点的沉降,mm;

$r, d$ ——分别为圆形板的半径,直径,mm;

$b$ ——刚性方形板的宽度,mm;

$\nu$ ——地基土的泊松比(侧膨胀系数);

$E_0$ ——地基土的变形模量,kPa;

$p$ ——圆形板或方形板上的平均压力,kPa。

很显然,什氏公式是建立在地基土为半无限均质体的假设基础之上的,由于粉喷桩复合地基为非均质体,因此,在利用什氏理论整理载荷试验资料确定地基承载力时,必须考虑到这种差异,不能盲目采用现行有关方法。

目前利用静载试验 $p-s$ 曲线确定粉喷桩地基承载力时,常用方法有以下几种(见图2)。

#### (1) 转折点法

取 $p-s$ 曲线首段直线转折点所对应的压力为比例界限压力,该方法适用于直线段及转折点比较明显的 $p-s$ 曲线。

#### (2) 二倍沉降增量法

当某级压力下的沉降增量 $\Delta s_i$ 大于或等于前级压力下沉降增量( $\Delta s_{i-1}$ )的二倍时,可取该前级压力为比例界限压力;该法一般适用于软粘土,但试验时的压力级必须合适。

#### (3) 切线交会法

取 $p-s$ 曲线首尾段两切线交会点所对应的压力为比例界限压力,适用于 $p-s$ 曲线有明显弧度的情况,但作切线任意性大。

#### (4) 斜率法

在 $p-\Delta s/\Delta p$ 曲线上,取第一转折点所对应的压力为比例界限压力,第二转折点所对应的压力为极限压力。

#### (5) 实测法

当试验进行至土体的终止条件时,可根据实际情况,在 $p-s$ 曲线上定出极限压力。

以上几种方法均利用土体载荷试验曲线

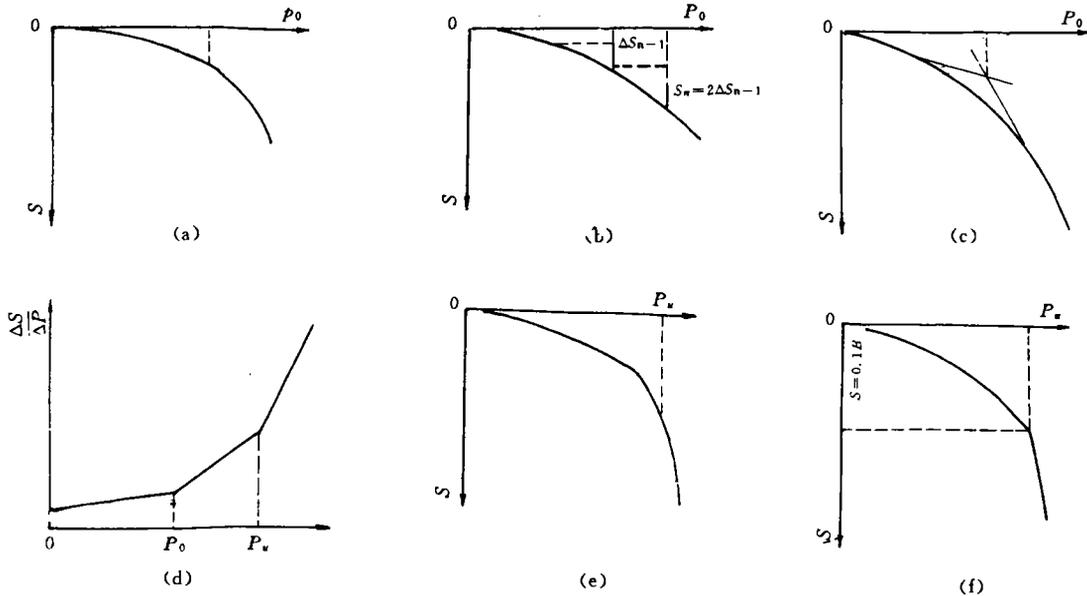


图 2 地基承载力确定方法示意图

形状特征来确定地基承载力,由于不同力学性质的土体其试验曲线具有不同的形状特征,而且由于不同技术人员的习惯及熟练程度不同,即使用同一试验资料绘制的曲线也会有差异,人为因素的影响十分明显。

(6) 相对沉降量法

由于中—高压缩性土的基本承载力往往受允许沉降量的控制,故可以从沉降量的观点来考虑地基承载力。由变形计算原理得知;如果载荷板和基础下的压力相同且地基是均匀的,则它们的沉降值  $s$  与承压面宽度  $b$  的比值( $s/b$ )大致相等。基于上述理论,YBJ225-91 建议在  $p-s$  曲线上,取沉降量为承压板宽度的 0.004~0.010 所对应的压力为粉喷桩复合地基的承载力。该方法与前几种方法相比理论依据要充足一些,但沉降量取值上下限达 2.5 倍,在运用时仍需靠技术人员的经验来解决。

在利用上述几种方法确定粉喷桩复合地基承载力时,除普遍受试验曲线和人为因素影响很大外,粉喷桩复合地基的非均匀性是其理论依据不足的最大难题。因此在实践中

多同时采用几种方法分别确定承载力,然后根据实际情况综合确定实际承载力。

为了解决以上几种方法的缺陷,我们在理论研究和工程实践的基础上提出了一种利用载荷回弹曲线来计算地基承载力的方法,简称为“回弹法”。其基本思路为:

将基础视为弹塑体,在外应力作用下产生体应变  $d\epsilon_v$ ,它由弹性体应变  $d\epsilon_v^e$  和塑性体应变  $d\epsilon_v^p$  两部分组成,即:

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p \quad (5)$$

塑性应变的计算相当复杂和不成熟,而弹性应变部分可以由弹性理论直接得出:

$$d\epsilon_v^e = dp/K_s \quad (6)$$

式中: $K_s$ ——体积弹性模量,可由土的压缩回弹曲线( $\lg P-e$ )求出(见图 3)。

$$K_s = \frac{1+e}{K} P \quad (7)$$

式中: $K$ ——回弹曲线的斜率;

$e$ ——土的孔隙比。

显然,在静载试验期内,基础土体的总变形量减去弹性变形量就是塑性变形量。对静

载试验来讲,可不考虑其塑性变形而只考虑弹性变形,即以弹性变形极限作为基础的承载力。

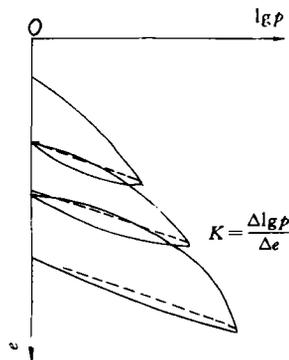


图3 回弹试验曲线

在现场进行了一组反复加、卸载的静力载荷试验,在  $\lg p-s$  曲线(见图3)上可以看出,回弹曲线的斜率  $k = \frac{\Delta \lg p}{\Delta e}$  基本上为一固定值。回弹量则随前期固结压力的增加而略有增加。它表明基础土体的弹性应变  $d\epsilon_e$  与塑性应变  $d\epsilon_p$  是完全可以区分开的;因此,利用静载试验的回弹曲线来确定地基土的临塑荷载和承载力亦应是可行的。具体方法是:在静载试验达到终止条件后(通常为设计承载力的两倍),逐级卸载至零,作出其  $p-s$  压缩曲线和回弹曲线,然后在压缩曲线上找出其下缩量与试验回弹量相同的一点,该点所对应的压力值即为地基容许承载力。

为验证回弹法的可行性,利用不同方法对深圳宝安新中心区甲岸路粉喷桩复合地基的4组静载试验资料(见图1)进行了确定地基承载力的对比试验(见表2),由表中可以看出,不同方法确定的承载力可相差一倍左右,不同方法之间无明显相关性。回弹法确定的复合地基承载力单桩普遍高于双桩(前述硬壳层作用),其中C点承载力低于设计要求,复核试验记录发现在开始卸载前(200kPa压力下)承压板周围土体出现了明显的裂缝,表明地基已处于剪切破坏状态;抽

芯检测亦发现其中一根桩为不合格桩。而其它几种方法均未反映出这种差异;它表明回弹法比其它方法更能客观地反映实际情况,在确定复合地基静载试验承载力方面具有独到的作用。该工程以回弹法为主要方法提交的静载试验成果得到了有关各方的认可。利用该方法曾对强夯复合地基的承载力进行了对比,效果也不错。

表2 复合地基静载试验承载力对比表

编号	试验龄期/d	容许承载力/kPa				$\lg p-lgs$ 法
		沉降增量法	相对沉降法	比例界限法	回弹法	
(1)	154	150	146	100	145	75
(2)	136	150	107	150	148	150
(3)	163	>200	193	100	84	125
(4)	112	175	172	150	104	116

#### 4 结 语

笔者经过理论分析和工程验证后提出的一种新方法——回弹法。主要内容是利用现场静载试验的  $p-s$  压缩曲线和回弹曲线,根据曲线的回弹量确定地基土的弹性变形极限,并以压缩曲线上下沉量与试验回弹量相同点所对应的压力值作为地基容许承载力。该方法与其它现行方法相比,理论依据更加充分,并不受试验曲线和人为因素的干扰和影响;该方法对静载试验确定地基承载力有否普遍意义,尚需进一步的研究和验证。笔者学识有限,文中不妥之处,望同行专家指正。

#### 参 考 文 献

- 1 林宗元. 岩土工程试验监测手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994
- 2 冶金工业部建筑研究总院. YBJ225-91 软土地基深层搅拌加固法技术规程. 北京: 冶金工业出版社, 1991
- 3 郑颖人, 龚晓南. 岩土塑性力学基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989

收稿日期: 1997-06-20