

粉体喷射搅拌桩设计及施工质量控制

周 勇

山东省交通工程总公司,山东 济南 250021)

摘要 阐述了粉体喷射搅拌桩的原理、受力特征以及由其构成的复合地基的主要力学特性,并通过道路地基处理设计实例,对用应力修正法和桩身压缩法计算复合地基压缩量时存在的差异及原因进行了分析;对施工质量控制中存在的问题提出了几点看法。

关键词 粉体喷射搅拌桩;复合地基;置换率;沉降量;压缩变形;施工控制

中图分类号 U415.5

文献标识码 A

1 引言

水泥深层搅拌桩技术是近 20 年发展起来的一种对软土地基加固的新方法。目前,该方法有湿喷(喷浆)和干喷(喷粉)之分;其施工方法根据施工机械的不同,又有双轴搅拌和单轴搅拌之别。无论哪种方法,均具有无振动、无噪音、无侧向挤压、无泥浆排放污染环境、施工机具简单、加固费用低廉、施工效率高等优点。因此,该方法的应用不仅在地基加固方面,而且在深基坑围护工程等方面迅速得到推广。

自 80 年代深层搅拌法通过铁道部技术鉴定后,经过系统的试验研究和大量的工程实践,进一步掌握了水泥加固土的机理和工程性质,以及粉体喷射搅拌桩复合地基的承载特性,并提出了粉体喷射搅拌桩复合地基的设计方法。

复合地基作为地基处理的一个重要部分,是随着高新技术的发展以及机械设备的先进而异军突起的一种地基处理方法,是在软弱地基中采用置换或增强的手段,在土中设置由散体材料(土、砂、碎石等)或弱胶结材料(石灰粉、水泥等)构成加固桩柱体(亦称增强体)与桩间土(亦称基体或桩周土)一起共同承受建筑荷载。有时,桩周土土质在某些加固材料设置过程中还受到不同程度的改善,从而提高地基的强度和刚度。

2 粉体搅拌桩

2.1 粉体喷射搅拌桩的原理

粉体喷射搅拌桩(亦称粉喷桩)是利用深层搅拌机械,在软弱地基内边钻进边往软土中喷射雾状粉体(或浆液)固化剂,同时借用搅拌轴的旋转搅拌使喷入土中的粉体与软土充分拌合一起,使地基土和固化剂发生一系列的物理—化学反应,形成稳定的石灰土(或水泥土)并形成抗压强度比天然土高的多,且具有整体性、水稳性的桩柱体,由若干根这类桩柱体和周围土构成复合地基,以承受上部荷载。

2.2 粉体喷射搅拌桩加固地基特点

(1)使用固化材料(干燥状态)可更多地吸收软土地基中的水分,对加固含水量较高的软土、极软土以及泥炭土地基效果显著。

(2)固化材料全面地被喷射到靠搅拌叶片旋转过程中产生的空隙里,同时,又靠土的水分把它粘附到空隙内部,随着搅拌叶片的搅拌,使固化剂均匀地分布在土中,不会产生不均匀散乱现象,有利于提高地基土的加固强度。

(3)与高压旋喷或喷浆深层搅拌相比,输入地基中的固化材料要少得多,无浆液排出,无地面隆起现象。加固 1m^3 泥炭土的水泥用量约 200—300kg,加固 1m^3 软土的水泥用量约 80—100kg,若土质条件适宜,用生石灰 40kg 即可。

(4)固化材料从施工现场供给机的储仓一直到喷入地基土中,是连贯密封系统,中途不会发生粉尘外溢污染环境。若使用水泥、石灰粉作固化剂,可以用散装水泥罐车把材料运送到现场,再将导管与供给机上的储仓相连接,可不断地补充、供给粉体固化剂。

(5)粉体喷射搅拌施工,可以加固成群桩,也可以交替搭接加固成壁状、格栅状或块状。材料来源广泛,如水泥、生石灰、消石灰以及矿渣、干燥砂和粉煤灰等,如果工程需要还可以使用两种以上的混合材料。因此,对地基加固适应性强,不同的地质要求可以找出与之相适应的固化材料。适用的工程对象较广,可作为建筑物或构造物的地基加固、土体防护和支护桩、挡土墙以及水工构筑物的基础等。

2.3 粉体喷射搅拌桩的受力特征

由于粉喷桩发展历史较短,因此对桩的受力性能的认识尚处于不成熟阶段,尤其是基底应力分布、变形特征、桩身应力传递以及桩间土的应力分担比等等,还有待深入研究。大量试验实践资料表明,其受力特征主要有以下三个方面:①水泥粉喷桩形成的复合地基基底应力分布情况基本符合刚性基础—匀质地基体系的应力特征。②水泥粉喷桩是介于刚性桩与散体材料桩之间的桩型。由于水泥石桩抗压强度较低,当荷载小时,桩身发生变形,但仍遵循刚性桩应力传递规律;当承受的荷载较大时,桩身上部变形较大,往下桩身应力与桩间土摩擦力逐步衰减。③水泥粉喷桩的置换率对承载力的影响比较显著,随置换率的提高,复合地基承载力明显增大,但群桩承载力小于单桩承载力之和,产生一定的群桩效应。

2.4 影响应力比的因素

桩柱体与桩间土的强度有明显差别,在承受应力时,应力将重新分布,桩柱体应力集中而桩间土应力降低。应力比是桩柱体承受的应力与桩间土承受的应力之比,两种地基材料的差异直接影响复合地基的应力比,其影响因素有以下五个方面:

①桩间土性质相同时,在不发生刺入破坏的条件下,桩柱体质量越好,则其原位变形模量越高,应力比越大。

②桩柱体质量相同时,一般认为应力比是随着土质变好而减小。

③桩间土性质相同,桩柱体质量相同时,在不发生刺入的情况下,应力比随着荷载的增大而增大。

④复合地基在承受荷载后,桩柱体与桩间土的应力分配要经过一段时间才能完成(达到稳定值)。正常情况下,应力比开始时随时间延长而缓慢增长,再趋于稳定;经过预压的土,应力比在低应力下的应力变化规律与正常情况相同,但应力高于一定值后则随时间延长而缓慢减小,再趋于稳定值。但这两种情况的稳定时间均不长。

⑤其它因素,如置换率 a_s 、桩的长细比等因素也会影响应力比。

从桩土应力比的影响因素来看,目前工程上在使用应力比时存在着某些误区,主要是对某一竖向增强体复合地基将应力比作为一个固定值来对待。实际上,应力比是随荷载、时间及地基深度而改变。只要含有桩土应力比的计算公式,就应对不同时空的应力比值加以区分。

2.5 粉喷桩的压缩变形

粉喷桩由于其受力的特殊性,在复合地基压缩变形计算方面还不太成熟,但从许多现场观测资料来看,由粉喷桩组成的复合地基,其最终压缩变形基本能控制在允许的范围内。目前部分计算公式其计算值大多偏于安全,各种计算所得值相差较大。现行的《粉体喷射搅拌法加固软土层技术规范》(B10113—96)对复合地基压缩变形量建议值范围在 20—50mm,实际设计过程中一般不再计算复合地基的压缩变形。以下通过设计实例对应力比和压缩变形进行探讨。

3 设计实例

某一级汽车专用线一桥头,地下水位较高,埋深仅在地表下 1.5m 左右,该处天然土层承载力较低,且软弱土层厚度均在 20m 以上。考虑到公路与桥头衔接的需要,对地基土沉降量有较高的要求(控制在 10cm 以内),因而必须对地基进行加固,而浅层地基处理方案显然不能实施,综合考虑了现场实际情况及其它各种因素后,选择使用粉喷桩对地基进行加固。

3.1 未经加固地基土沉降量及附加应力计算

3.1.1 理论附加应力采用分层总和法进行计算
工程地质情况见图 1。

地基处理拟采用粉喷桩,固结材料采用水泥,设计桩长为 13m,桩径为 0.5m,桩底持力土层为较密实的粘土层,桩底埋入该土层为 0.75m。

理论附加应力计算值见表 1。

3.1.2 理论沉降量的计算

天然地基理论沉降量的计算值见表 1。

根据标准贯入试验计算沉降量(适用于砂土层):

$$\Delta S = \frac{0.4P_0 \times H}{N \times \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right)} = \frac{0.4 \times 270.635 \times 15.05}{35 \times \log \left(\frac{270.635 + 78.99}{270.635} \right)} = 5.0 \text{ (mm)}$$

$$P_0 = \frac{201.42 + 339.85}{2} = 270.635 \text{ (kPa)}$$

$$\Delta P = \frac{90.5 + 67.48}{2} = 78.99 \text{ (kPa)}$$

$$H = 36.5 - 21.45 = 15.05 \text{ (m)}$$

式中: ΔS —砂层的沉降量; P_0 —砂层自重应力平均值; H —砂层厚度; N —标准贯入锤击数; $N=35$; ΔP —附加应力平均值。

3.2 单桩容许承载力

3.2.1 由桩身强度计算单桩容许承载力

$$[P] = \eta \times P_p \times A_p \quad \text{公式见文献 1)}$$

表 1 理论沉降量计算值

层号	深度 h _i	分 层 厚 度 h _i	自 重 应 力 kPa	附 加 应 力 kPa	平均自重 应力△P kPa	平均附加 应力△P kPa	P ₀ +△P kPa	分层沉 降 量 h _i	合 计 h _m
1	0.00	1.50	0.00	128.70					37.5
2	1.50		28.95	128.90					
3	3.00	1.50	43.20	128.70	36.08	128.80	164.88	0.011	
4	4.85	1.85	60.76	127.30	51.99	128.00	179.99	0.019	
5	6.35	1.50	82.95	125.50	66.31	127.30	193.61	0.016	
6	7.85	1.50	94.25	123.60	77.40	126.40	203.80	0.054	
7	9.35	1.50	105.15	123.30	88.50	124.60	213.05	0.052	
8	10.85	1.50	115.54	118.30	99.60	123.80	223.35	0.086	
9	12.25	1.40	129.94	115.40	110.34	121.10	231.44	0.030	
10	13.85	1.60	145.29	110.30	122.74	116.90	239.59	0.017	
11	15.35	1.50	159.09	104.60	137.62	112.90	250.47	0.017	
12	16.85	1.50	172.89	100.70	152.19	107.50	259.64	0.019	
13	18.35	1.50	186.69	97.00	165.99	102.70	268.64	0.016	
14	19.85	1.50	201.42	90.50	179.79	98.90	278.64	0.010	
15	21.45	1.60			194.07	93.80	287.82	0.006	
16					此层为中砂层,其沉降量在路基施工结束时已基本稳定。				5.0
17	36.50		339.85	67.48	67.48/339.85=0.199≤0.20 所以不再计算				
18	38.00	1.50	352.79	67.10	346.32				
					359.26				

式中：η_i—桩身强度折减系数，取 0.35；P_i—桩身强度，按 P_i=2MPa 计算；A_p—桩的截面积，m²。

$$[P]=\frac{0.35\times2\times\pi d^2}{4}=\frac{0.35\times2\times3.14\times0.5^2}{4}=137.4(kN)$$

3.2.2 根据地质报告提供的土层摩阻力计算单桩容许承载力

$$[P]=U_p\sum f_i l_i+\alpha A_p Q_p$$

式中：U_p—桩周长，m；
f_i—桩周第 i 层土容许摩阻力，kPa；分别为 13.5kPa 和 15kPa；
l_i—桩周第 i 层土的厚度，m；分别为 12.5m 和 0.75m；
α—桩尖土天然地基承载力折减系数，取 0.5；
Q_p—桩尖土天然地基承载力，取 250kPa。

$$[P]=\pi d\{3.5\times12.25+0.75\times15\}+\frac{0.5\times\pi d^2}{4}\times250=357.94\text{ (kN)}$$

文献 1 中 3.2.1 条的“条文说明”认为，考虑到粉喷桩端部喷粉量较小，且原状土已被扰动，故当桩长>10m 时不计桩端支力。

$$[P]=357.94-\frac{0.5\times\pi d^2}{4}\times250=333.4\text{ (kN)}$$

上述“条文说明”中同时认为：单桩承载力由桩身强度和土对桩的支承力决定，两者取小者，故单桩容许承载力取[P]= 137.4kN

3.3 置换率 α_s 的计算

根据文献 1 中复合地基承载力计算公式：

$$\sigma_{sp}=\alpha_s\times\sigma_p+(1-\alpha_s)\times\sigma_s\times\beta$$

式中：σ_{sp}—复合地基容许承载力，σ_{sp}=P-p；
其中 P=γH=1.95×15.1=294.45 (kPa)
p=γh=1.95×8.5=165.75 (kPa)

式中 γ=1.95t/m³，见工程地质图)

$$\therefore \sigma_{sp}=P-p=294.45-165.75=128.70(kPa)$$

σ_s—桩间土天然地基容许承载力，取 110kPa；
σ_p—桩身许承载力，σ_p=η×P_i=0.35×2=0.7MPa=700 (kPa)

β—桩间承载力折减系数，取 β=0.25。
128.70=a_s×700+27.5-27.5×a_s。
a_s=0.15 符合《规范》规定的 0.1—0.2 的取值范围)

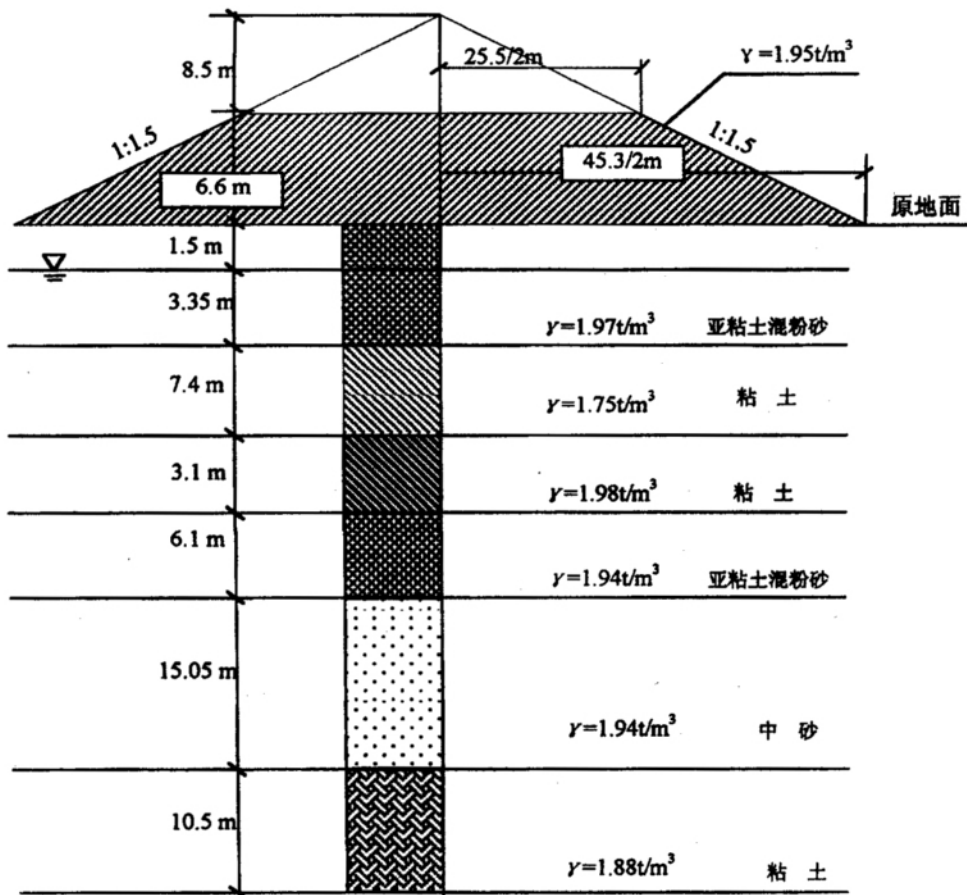


图1 工程地质图

3.4 桩距 d 的计算 (梅花形布置)

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{0.227}{d^2} \Rightarrow d = 1.2\text{m} \\ \alpha_s = 0.15 \end{cases}$$

3.5 桩总根数计算

已知该段软土设计处理长度为 126m, 宽度为 45.3m, 则

$$N = \left(\frac{B}{1.2} + 1\right) \times \left(\frac{L}{1.2 \times \sin 60^\circ} + 1\right) = 4737 \text{ (根)}$$

总桩长 = $4737 \times 13 = 61583$ 延米)

3.6 计算桩的应力集中系数及桩间土应力减小系数

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s \times \beta} = \frac{0.7 \times 100}{110 \times 0.25} = 25.5$$

按文献 1 ‘条文说明’ 3.2.3 的公式计算:

$$\mu_p = \frac{n}{1 + (n+1) \times \alpha_s} = 5.45 \text{ (桩上应力集中系数)}$$

$$\mu_s = \frac{n}{1 + (n+1) \times \alpha_s} = 0.214 \text{ (桩上应力集中系数)}$$

式中: n —桩、土应力比; $\sigma_p = 0.7\text{MPa}$ 见本节 3, 以下同); $\sigma_s = 110\text{kPa}$; $\beta = 0.25$; $\alpha_s = 0.15$ 。

由于在计算置换率时, 已确定了桩和土的应

力分担, 由此可见, n 取值采用上述计算方法更为合理, 这样计算出的桩上应力集中系数和桩间土的应力减小系数更符合实际。

3.7 粉喷桩群体范围内的压缩变形 S_1 计算

按文献 1 ‘条文说明’ 3.2.5 中 ④ 的计算式, 通过计算桩身的压缩量确定加固区土层的压缩量:

$$S_1 = \frac{(\mu_p \times \sigma_{sp} + Q_p) \times L}{2 \times E_p} = \frac{(5.45 \times 128.70 + 250) \times 13}{2 \times 2700000} =$$

$$0.023\text{m} = 2.3(\text{cm})$$

注: 此公式采用的是桩身压缩量法, 适用于桩体不发生刺入破坏的情况。

式中: Q_p —桩底端端承载力密度 (即桩尖土天然地基承载力), 取 250kPa (见本节 2);

L —粉喷桩长, 即加固区厚度, 取 13m ;

E_p —桩身材料变形模量, 取 270MPa ;

μ_p 、 σ_{sp} 同前。

3.8 路基总沉降量计算

$$H_1 = 37.5 + 5.0 = 42.5(\text{cm})$$

$$H_2 = H_1 - 5.0 - h + 2.3 = 42.5 - 5.0 - 29.8 + 2.3 = 10(\text{cm})$$

满足设计要求)

式中: H_1 —未加固地基在荷载作用下的总沉降量, cm ;

H_2 —加固处理后地基剩余总沉降量,cm;
 h —未加固地基在荷载作用下相应厚度内的压缩量,cm。
 $h=29.8\text{cm}$,式中的 5.0cm 为砂层的沉降量,由于砂层在路基施工过程中逐渐固结,至路基工程结束时其沉降固结已基本稳定,故在设计时不再考虑其对剩余沉降量的影响。

以上设计实例所有计算均采用《规范》(B10113—96),《规范》‘条文说明’3.2.5 中说明:在计算复合地基沉降量时,采用应力修正法与桩身压缩量法的理论计算值是相等的,但从该实例来看,却存在较大差异,以下通过计算进一步探讨。

3.9 应力修正法

3.9.1 求压缩量

按文献 1 ‘条文说明’3.2.5 中 1) 的计算式,根据桩间土承担的荷载,按桩间土的压缩模量,忽略粉喷桩的存在,采用分层和法计算加固区的土层压缩量:

$$S_1=\mu_s\times h=0.214\times 29.8=6.38(\text{cm})$$

式中 μ_s —土上应力减小系数;

h —未加固地基在荷载作用下相应厚度内的压缩量。

由本节 7、9 分别得到的 S_1 可以看出,二者的差别较大,且由此计算的剩余总沉降量

$$H_2=42.5-5.0-29.8+6.38=14.08(\text{cm})。$$

该计算值已远超过设计容许值(即剩余沉降量不大于 10cm 的要求),假定采用应力修正法计算能满足设计要求,则可逆推出置换率:

由 $H_2=H_1-5.0-h+S_1$ (式中符号意义及量值同前)

假定 $H_2=10\text{cm}$,

则 $S_1=10-42.5+5.0+29.8=2.3(\text{cm})$

$$\mu_s=\frac{S_1}{h}=\frac{2.3}{29.8}=0.0772(\text{土上应力减小系数})$$

$$\mu_s=\frac{1}{1+(n-1)\times\alpha_s}=0.0772 \quad \text{其中 } n=25.5 \text{ 见本节 6)}$$

节 6)

3.9.2 求桩距 d

$$\begin{cases} \alpha_s=\frac{0.227}{d^2} \Rightarrow d=0.68\text{m} \\ \alpha_s=0.49 \end{cases}$$

3.9.3 求桩的根数

$$N=\left(\frac{B}{0.68}+1\right)\times\left(\frac{L}{0.68\times\sin60^\circ}+1\right)=14535 \text{ 根})$$

桩总长= $14535\times 13=188955$ 延米)

式中 $B=45.3\text{m}, L=126\text{m}$ 见本节 5)

根据上述计算,要达到沉降量在控制范围内,在不改变桩长设计的情况下,复合地基的压缩量应控制在 2.3cm 之内,两种方法的计算结果比较如表 2。

表 2 两种计算结果比较

	桩身压缩量法	应力修正法
置换率 α_s	0.15	0.49
桩的根数 N	4737	14535
总长度 (m)	61581	188955

可以看出,用应力修正法计算所用的桩数为桩身压缩法的 3 倍多。由此可见,用应力修正法来控制设计是很不经济的。

3.9.4 影响应力修正法的主要因素

1) 各层原状土的压缩模量与相应桩柱体的压缩模量之比,即 $n=\frac{E_p}{E_s}$ 是随着深度的变化而变

化的, $\mu_s=\frac{1}{1+(n-1)\times\alpha_s}$ 也随之而变化,因此用固定值 μ_s 来计算不妥。

2) 桩柱体荷载通过桩土接触面的摩擦力传到桩间土,越深处桩柱体应力越小,同时土体应力亦沿深度逐渐扩散,但桩柱体与土体应力沿深度扩散的速率并不相同,因而在加固区深度内,桩柱体与土体的附加应力比不会相同, n 值就不同, $\mu_s=\frac{1}{1+(n-1)\times\alpha_s}$ 也就不同。同样说明用固定值 μ_s 来计算是不妥的。

4 施工质量控制

笔者根据多个粉喷桩工程施工控制实践认为粉喷桩施工除应满足有关规范规定外,还应注意以下几点:

1) 由于粉喷桩桩位较近,必须严格控制钻机钻头的对中精度和钻杆的倾斜度,以免造成整体搭接成壁或影响后续桩的就位。

2) 预搅时可用高速,提升喷粉时应采用中低速,应严格按设计用灰量喷送水泥,尤其是长桩,端部持力层较硬,对喷粉产生的负压过大,不易满足设计用灰量要求,且易造成送灰管爆裂。少数承包商为减轻施工困难,擅自将用灰量降低,从而不能保证桩身质量。

3) 为了便于施工操作及施工监理控制,设计

单位随桩尝试的水泥掺量尽量不要超过 2 个。

4) 粉喷桩施工时要经常测定地基土的含水量,特别是地表下 5m 范围内。若水量小于 25%,应在桩施工完成后及时洒水养护;若含水量大于 40%,应适当提高水泥掺量。

5) 施工钻进时,若遇到地下障碍物(如抛石等),要及时组织有关人员进行分析研究,测定障碍物影响范围及深度,根据具体情况,通过分析计算,可选用大直径的旋喷桩代替粉喷桩。

6) 质量检测:由于粉喷桩是一种不同于砼桩的柔性桩,桩身应力波特性和钻孔灌注桩,因此,将钻孔桩无损检测测试桩身完整性的方法套用到粉喷桩的检测中,往往出现较大的误区,还需进一步研究完善。可采用钻芯取样、开挖取样直接抽检桩身强度、以及通过静载试验来测定复合地基的承载能力。

5 小结

1) 地基处理的核心是处理方法的正确选择与实施过程的严格控制。对某一具体工程而言,在选择处理方法时,要综合考虑各种影响因素,力求合理、经济。

2) 复合地基是在软弱地基中加入散体材料或弱胶结材料形成加固桩柱体,并与桩间土共同承受上部荷载。虽然在诸多方面还有待深入探讨,但复合地基能获得较好的加固效果,适用范围广,且较为经济,因而近二十年在国内外发展很快,并形成了系列。

3) 粉体搅拌桩是利用深层搅拌机械,在软弱地基土中边钻进、边往土中喷射雾状粉体、边搅拌,使喷入软土中的粉体(石灰粉、水泥粉等)与

软土充分拌合在一起,形成抗压强度比天然土高得多、具有整体性、水稳性的桩柱体,并由若干根这类桩与桩周土构成复合地基。喷射干燥状粉体,能充分吸收软土中的水分,对一般含水量较高的软土加固效果尤为显著,且较其它方法输入固化剂要少得多,因此不会出现地表隆起现象。施工过程中只要加强管理,则无振动、无污染,对周围的环境和建筑物无不良影响。

4) 水泥粉喷桩是介于刚性桩与散体材料之间的桩型,复合地基基底应力分布情况符合匀质地基体系特征。

5) 水泥粉喷桩虽然桩身受力性能等方面还有待于进一步探讨,但许多工程实践证明,在软土区用它是可行的,其实施沉降量能够满足设计要求。

6) 在粉喷桩设计计算中部分公式得出的结果往往偏于安全,与实际观测值偏差较大。

7) 从上述计算实例看,在计算复合地基压缩量时,采用桩身压缩法公式的计算结果与实际观测值更为接近。

8) 随着对地基研究的不断深入,计算方式和计算手段逐渐得到完善,特别是在高等级公路建设领域,粉喷桩的应用前景更为广阔。

参考文献:

- [1] 粉体喷搅法加固软弱土层技术规范·(TB10113-96)
- [2] 叶书麟·地基处理·北京·中国建筑工业出版社,1988
- [3] 地基与基础译文·(5)·北京·中国建筑工业出版社,1979
- [4] 公路软土地基路堤设计·施工技术规范·(JTJ-094)
- [5] 建筑地基基础设计规范·(GBJ-89)