

粉喷桩处理软弱路基的设计与沉降分析

周德泉^{1,2}, 刘宏利², 张可能¹, 阳军生²

(1. 中南大学, 长沙 410083; 2. 长沙交通学院, 长沙 410076)

[摘要]以某软基试验工程为例,介绍了水泥粉喷桩处理软弱路基的设计思路和分层沉降的观测方法,并对测试结果进行分析,认为效果良好。

[关键词]粉喷桩 软弱路基 分层沉降

[中图分类号]TU472.3 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2001)02-0080-04

粉喷法最早于 1967 年由瑞典的 Kjeld Paus 提出,1971 年首次采用粉喷法制成石灰粉喷桩试桩,1974 年应用于稳定路堤和深基坑并取得专利,此后在欧美广泛应用。国内从 1983 年初开始进行采用石灰粉喷桩加固软基的试验研究,并于 1984 年 7 月首次用于广东云浮硫铁矿铁路专用线上单孔 4.5 m 盖板箱涵的软基处理。1985 年 4 月通过铁道部鉴定,并开始逐步推广,特别是在近几年的高速公路软基处理中愈来愈受青睐。1992 年在沪宁高速公路昆山段进行水泥粉喷桩的试验研究,并经交通部验收,予以推广。目前国内工程中使用的粉喷桩深度多为 10 m~15 m,最大桩长已达 27 m^[1]。但从粉喷法问世起,工程应用一直相对超前于理论研究,也就

是说,粉喷桩及其复合地基的设计理论和变形机理还不够完善。本文选择益(阳)—常(德)高等级公路 K81+80~K81+180 路段作为试验工程,介绍了水泥粉喷桩复合地基的设计,测试了水泥粉喷桩复合地基和“不处理”段的分层沉降,并对结果进行了分析与讨论。

1 设计概况

1.1 地质资料

勘察表明,场地有厚约 3 m 的软土,在试验工程路基范围内呈“L”形分布,即在东侧由北向南延伸,并于 K81+110 处折向西,横穿路基,地层结构及其物理力学性质指标见表 1。

表 1 地层结构及其物理力学性质指标

土名	填土	粉质粘土	粘土	细砂	砾石
层厚(m)	0.6~2.5	0.3~3.3	0.7~4.6	0.6	未揭露
天然含水量 (%)	34.3	26			
天然重度 (kN/m ³)		18.9	20.5		
空隙比 e		0.91	0.66		
塑性指数 IP (%)		15.3	24.75		
液性指数 IL	0.4	0.74	0.12		
压缩模量 E ₁₀₀₋₂₀₀ (MPa)	7.7	5.33	9.75	22.4	72.5
内摩擦角 φ(°)		2.87	11.6		
粘聚力 c _a (kPa)		11.7	54.4		
十字板强度 c _u (kPa)	25.58	14.51			
比贯入阻力 P _s (kPa)	842~865	178~211	1566~1643		
触探击数 N _{63.5} (N)		0	8(16)	(14)	38

1.2 水泥粉喷桩复合地基设计方案

该路段原采用明挖清淤,但由于路基及两侧大面积为鱼塘,施工队边挖边填,导致清淤不彻底,填土厚度不均,不得不重新处理。经分析对比,认为采用粉喷桩复合地基方案可行,其设计以刚性基础底面处桩与土产生等位移为基本前提,设计思路如下:

1) 场地砾石层埋深 5 m~7 m,拟以此作持力层,定出桩长 L,按式(1)确定单桩竖向承载力标准值,按式(2)确定 f_{cu,k},再据式(3)^[2]确定水泥掺入比 a_w。

$$R_k^d = q_s \cdot U_p \cdot L + \cdot A_p \cdot q_p \quad (1)$$

$$f_{cu,k} = R_k^d / (\cdot A_p) \quad (2)$$

[收稿日期]2000-06-01;[修定日期]2000-07-10;[责任编辑]王梅。

$$\ln(a_w) = (f_{cu,k} + 687.6) / 517.5 \quad (3)$$

式中: R_k^d —单桩竖向承载力标准值(kN); $f_{cu,k}$ —与粉喷桩桩身加固土配比相同的室内加固土试块(边长 70.7 mm 的立方体)的 90 d 龄期的无侧限抗压强度平均值(kPa); A_p —桩的截面积(m^2); γ —强度折减系数,该处取 0.4; q_s —桩间土的平均摩擦力,对路基填土、淤泥质粉质粘土取 8 kPa,对粘土、细砂取 15 kPa; U_p —桩周长(m); L —桩长(m); q_p —桩端天然地基土的承载力标准值(kPa); β —桩端天然地基土的承载力折减系数,取 $\beta = 0.5$; a_w —水泥重/被加固土重,用省去 % 符号的值代入。

2) 以减少差异沉降为目的,采用试验路段西侧硬粘土的承载力为复合地基的承载力。按式(4)计算粉喷桩置换率 m ,再按式(5)确定总桩数 n 。

$$m = (f_{sp,k} - \beta \cdot f_{s,k}) / (R_k^d / A_p - \beta \cdot f_{s,k}) \quad (4)$$

$$n = (m \cdot A) / A_p \quad (5)$$

式中: $f_{sp,k}$ —复合地基承载力标准值(kPa); $f_{s,k}$ —桩间天然地基土承载力标准值(kPa); R_k^d, A_p —见公式(1); β —桩间土承载力折减系数, $\beta = 0.1$; A —地基加固的面积(m^2)。

3) 根据 m 和 n ,确定粉喷桩的间距和排列。

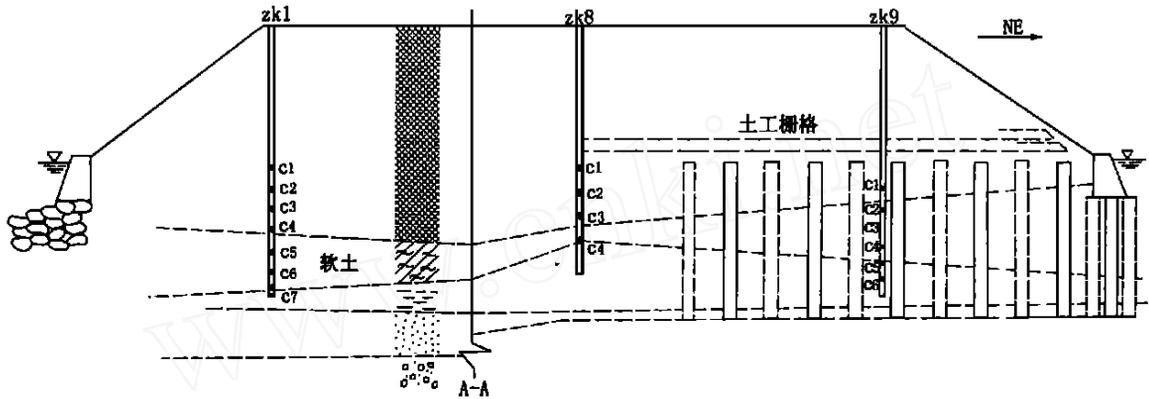


图 1 粉喷桩复合地基设计示意图

设计结果见图 1,即在东侧软基区域,先施工水泥粉喷桩,然后在压实填土中距离桩顶 0.6 m 和 1.2 m 处平铺二层 CE131 土工格栅,而 K81 + 110 处西侧的软土分布范围小,采用“不处理”方案,以便于分析比较。粉喷桩采用普硅 425 # 水泥,掺入比为 15%,桩径为 $\phi 50$,中心距为 2 m,按梅花形排列,且在路基边坡脚线附近加密,桩端坐落在砾石层上。

1.3 分层沉降观测设计

粉喷桩施工和相关检测完成^[3]以后,于 1998 年 8 月 18 日开始填筑路堤,至 9 月 27 日施工完底基层。为了深入研究处治效果,10 月 29 日至 11 月 6 日,分别在试验路段的 K81 + 110.5、K81 + 127.5 和 K81 + 156.5 三个断面共钻孔 9 个,如图 2 所示,并安装波纹管,以观测分层沉降(图 1)。钻孔不穿过粘土层,以防止涌砂。波纹管的径向刚度较大,而纵向刚度比土小,外径为 $\phi 85$ mm,内径为 $\phi 75$ mm,波纹距为 10 mm,是一种圆形聚氯乙烯塑料管。埋设前,将金属环按 0.5 m 或 1.0 m 左右的间距固定在波纹管外壁上,并在最底端采取封底措施,以防止泥砂进入管内阻塞管道。为了防止波纹管因地基土层产生侧向变形而被挤偏,影响探头提放,安装时须用外

径为 $\phi 60$ mm,内径为 $\phi 55$ mm 的硬塑料管插入波纹管中,并逐段连接与波纹管同时进入孔内,并用中、细砂加水回填。在露出地表的波纹管外部套上 $\phi 108$ mm 的钢管,加盖后用 8 号铁丝紧固。钢管的

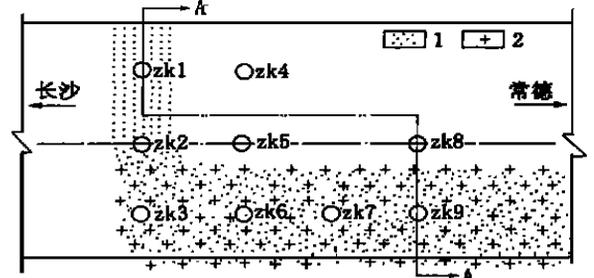


图 2 试验路段及沉降观测点布设示意图

1—软土分布区;2—粉喷桩区

底端浇筑混凝土,使钢管与底基层嵌固,确定长度时以保证管顶与将施工的混凝土路面平齐为原则。待回填的中、细砂完成沉降并与波纹管外壁和各层土紧密结合后,从 11 月 23 日开始至 1999 年 3 月 13 日共完成 9 次沉降观测。其方法是,先用 Ni1 型精密水准仪测得各管口高程,然后用分层沉降仪测得各金属环距管口的深度,再换算出各金属环的高程,从而求出各环的沉降。

2 测试结果与分析

表 2 12月4日至3月13日共100d堤顶沉降对比

孔号	ZK1	ZK3	ZK4	ZK5	ZK6	ZK7	ZK8	ZK9
S(mm)	31.22	20.80	16.72	17.30	23.38	20.42	19.29	23.92

从表 2 可知,粉喷桩复合地基(ZK3、ZK6、ZK7 和 ZK9 处)的沉降量与西侧(ZK4、ZK5 和 ZK8)接近,且明显低于天然软基(ZK1)的沉降量,起到了减少路堤两侧非均匀沉降的目的,说明了粉喷桩处理湖区软土的效果是非常显著的。

从图 3 可知,桩间土与天然软基一样,沉降随深度递减,这与文献[4]观测到的结果是一致的。说明桩间土的附加应力随深度减少。

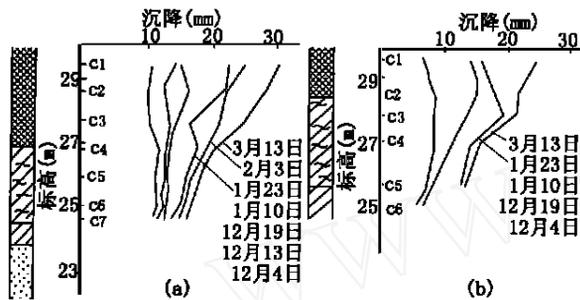


图 3 复合地基与天然软基分层沉降观测结果

(a) —ZK1 天然软基; (b) —ZK9 复合地基

图 4 是复合地基顶面处的荷载—沉降—时间曲线。据该曲线运用双曲线法推求了 1998 年 12 月 4 日以后的最终工后固结沉降值 S_I 。据复合模量法(E_c 法)和应力修正法(E_s 法)求出了加固区的最终沉降量^[6],并推求了观测期完成的固结度^[7],见表 3。现对计算说明如下:

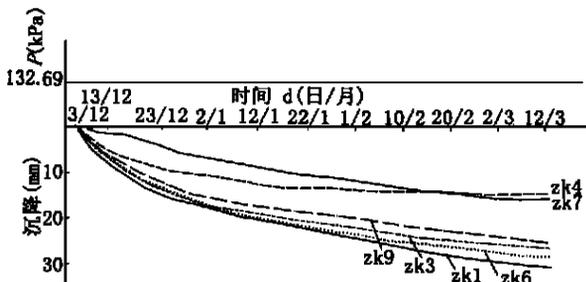


图 4 粉喷桩复合地基顶面处的荷载—沉降—时间
($p-S-t$) 曲线

1) 该路段于 1998 年 8 月 20 日开始在粉喷桩顶部填筑,9 月 27 日施工完底基层,固结时间从 9 月 8 日起算。观测期完成的固结度是指 1999 年 3 月 13 日完成的固结度与 1998 年 12 月 4 日完成的固结度之差。

2) 计算复合地基固结度时, E_c 采用静载试验结

果^[3], $m = 0.069$ 。

3) ZK1 和 ZK4 的 S 未修正。路堤荷载下复合地基减小沉降的原因在于加固区的压缩量大为减小^[5]。本粉喷桩以砾石层作持力层,其复合地基顶部的沉降量即加固区的沉降量。分析表 3 发现:

(1) ZK1 和 ZK4 的沉降差为 39.1 mm,而复合地基(ZK7、ZK9、ZK3 和 ZK6)各孔的最终沉降量平均值为 70.8 mm,与 ZK4 的沉降差仅为 9.5 mm,即对试验路段而言,沉降差降低了 75.7%,这说明,粉喷桩减少了非均匀沉降;

(2) 某段时间内,粉喷桩复合地基的固结速率比原天然软基提高 3.75%~15.4%;

(3) E_c 法结果比 E_s 法小。很多资料反映,沉降计算值大于实测值,故 E_c 法可能更实用;

(4) 从固结度、 S 和工后最终沉降值反算发现:复合地基的瞬时沉降很大,这说明,复合地基现有的最终沉降和固结度计算方法很不完善,还需不断改进。

表 3 天然地基和复合地基沉降计算值和实测值对比

孔号	S 的计算(mm)		观测期完成固结度(%)	S_I 实测值(mm)	备注(位置)
	E_c 法	E_s 法			
ZK7	68.5	70.7	20.7	27.0	复合地基
ZK9	72.4	77.3	17.0	32.3	复合地基
ZK3	71.7	75.7	20.1	33.3	复合地基
ZK6	70.6	74.2	19.6	29.41	复合地基
Zk1	100.4		12.4	40.0	天然软基
ZK4	61.3		12.2	25.6	清淤彻底

为了深入研究粉喷桩的作用机理,采用有限单元法对试验路段某断面的变形进行分析讨论。根据该工程的条件,采用平面应变模型,将桩简化为一边长为桩径的矩形。模型边界条件采用位移边界条件,即模型两侧和底部才有位移约束。由于粉喷桩底部到达砾石层,不考虑桩体刺入砾石层的相对位移,桩体和土体之间不设置接触面单元。土工格栅铺设在粉喷桩上部,故在计算模型中未对土工格栅加以考虑。

ZK1 和 ZK3 的分层沉降计算值与实测值(黑点表示)的对比见图 5。从该图可知,两者吻合较好,均反映桩间土体沉降随深度递减,粉喷桩减少了桩间土的分层沉降。但路堤部分误差较大,其主要原因是:压实填土孔壁稳定,沉降环和回填砂无法携孔壁土一起沉降。

图 6 表达了该断面在桩顶处沉降的影响规律及有、无桩情况的对比(图中黑点表示节点位置)。从该图上部曲线可知,距路中 4.5 m~27 m 范围施工

了粉喷桩,其沉降比天然地基小;路中部位沉降稍大、路肩部位沉降较小,原因是路中部位的附加应力较大;距中线 4.5 m 以内未施工粉喷桩,沉降较大,但比其侧面未施工粉喷桩时的沉降减少了。对比可知,粉喷桩明显减少了路基的沉降量。

3 结语

实测和分析计算结果表明,水泥粉喷桩复合地基有效地减少了非均匀沉降。

1) 计算加固区最终沉降量时,认为复合模量法

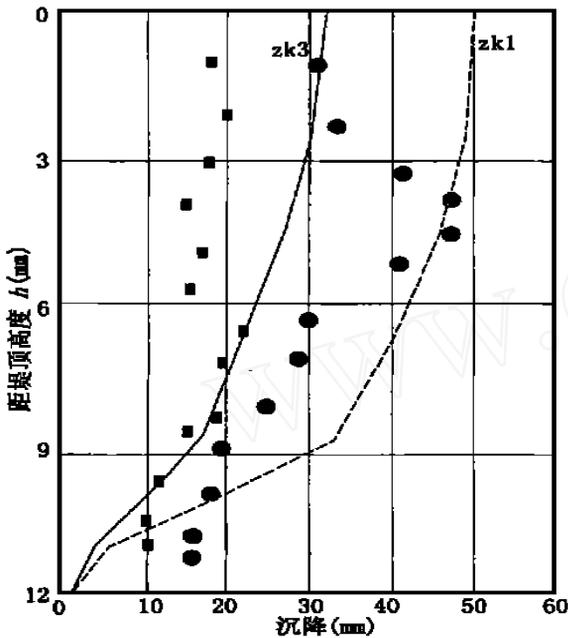


图 5 ZK1、ZK3 分层沉降计算值与实测值对比
比应力修正法精确度要高,但计算结果仍大于实测

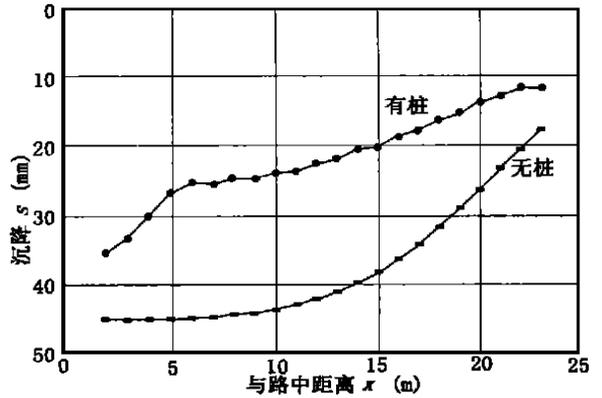


图 6 有、无桩时复合地基顶部沉降对比
值;同等条件下,粉喷桩复合地基的固结度高于天然地基的固结度。

2) 相同荷载作用下,桩间土的分层沉降类似于天然地基随深度递减,但沉降值降低了。

[参考文献]

- [1] 何开胜,陈宝勤. 超长水泥土搅拌桩的试验研究和工程应用[J]. 土木工程学报. 2000(2):80~86.
- [2] 马海龙,费勤发. 粉喷桩地基试验研究及设计方法[J]. 岩土力学. 1995,16(3):49~53.
- [3] 周德泉,等. 水泥粉喷桩复合地基承载力分析及原型试验研究[J]. 长沙交通学院学报. 2000(1):47~52.
- [4] 蒙庆辉,等. 某高速公路扩建工程软基加固现场试验研究[M]. 高速公路软弱地基处理理论与实践. 无锡:上海大学出版社,1998,124~133.
- [5] 杨涛. 复合地基沉降计算理论、位移反分析模型和二灰土桩软基加固试验研究[博士论文][D]. 河海大学,1997.
- [6] 龚晓南. 复合地基引论(四)[J]. 地基处理. 1992,3(3):24.
- [7] 谢康和,等. 复合地基固结理论研究现状与发展[J]. 地基处理,1993,4(3).

DESIGN IDEA AND SETTLEMENT ANALYSIS ON REINFORCING WEAK SUBGRADE WITH POWDER- SPRAY PILE

ZHOU De - quan ,LIU Hong - li ,ZHANG Ke - neng ,YANG Jun - sheng

Abstract : Taking some test engineering of soft ground for example , this paper introduces the design thinking of cement powder - spray pile treating weak subgrade and the observation way of settlement in layers , analyses the experimental results , and thinks that there are good results.

Key words : powder - spray pile , weak subgrade , settlement in layers



[第一作者简介]:

周德泉(1966年-),男,1990年毕业于中南工业大学探矿工程专业,1999年在湖南大学道路与铁道工程专业获硕士学位,目前在长沙交通学院从事岩土工程方面的教学及科研工作,同时在中南大学地质工程专业攻读博士学位。

通讯地址:长沙市赤岭路45号 长沙交通学院岩土教研室 邮政编码:410076