

粉喷桩处理软基的变形及固结测试分析

罗喜元

(铁道第四勘察设计院地路处, 湖北武汉 430063)

【摘要】 以广珠准高速铁路软土路堤试验粉喷桩处理段的变形及孔压测试数据为基础, 对用粉喷桩处理深厚软土地基的沉降、基底横向差异沉降、边桩变形、孔压分布规律及固结进行了分析。

【关键词】 软土地基; 粉喷桩; 变形; 固结

【中图分类号】 TU 472

Analysis on the Deformation and Consolidation of the Soft Ground Improved by Dry Jet Mixing Piles

Luo Xiyuan

(The Fourth Survey and Design institute of China Railway, Hubei Wuhan 430063 China)

【Abstract】 Taking the results of the test on the soft foundation improved by DJM piles on the Guangzhou-Zhuhai Qusai-High-speed Railway for example, the settlement of the soft ground, the transverse differential settlement of the ground, the deformation of the piles between two sides of the embankment, the distribution of the pore water pressure and the consolidation of the ground are analyzed.

【Key Words】 soft ground; DJM piles; deformation; consolidation

0 引言

为了研究深厚软土地基各处理方法的性状, 铁四院在珠海斗门开展了高应力水平的软土路堤填筑试验研究。

1 试验概况

广(州)珠(海)准高速铁路及珠海港支线穿越第四系松软地层, 全线软土路堤长 50.3 km^[1]。试验路堤位于珠海斗门县白蕉镇, 试验路堤范围选择在 DK122+366.02~+690 的直线地段, 路堤长 323.98 m, 路基面宽 12 m, 设计路堤高约 6.4 m(含预压土高 1.4 m)。1995 年 11 月试验工作开始, 1996 年 10 月完成预压土填筑, 在预压荷载作用下观测至 1997 年 12 月, 历时 2 年零 2 个月。

粉喷桩试验断面位置为 DK 122+410~+450, 路堤中心实际填高 7.0 m(含路堤填筑过程中的中心沉降量), 埋设元件断面软土厚 33 m。粉喷桩的设计桩长 16 m, 桩径 0.5 m, 桩间距 1.2 m, 正三角形布置, 置换率 15.7%, 采用普通硅酸盐水泥, 喷灰量不少于 45 kg·m⁻¹。

为了控制路堤填筑速率及保证路堤的稳定性, 评价地基加固效果, 研究加固区与下卧层的压缩分

布规律, 分析柔性桩复合地基桩土应力比的变化规律等, 布置了原位测试元件(见图 1)。边桩的位置在坡脚外 2~8 m, 土压力盒分别埋设在粉喷桩桩头及桩间土上, 土压力盒四周采用细砂覆盖, 尽量减小由于土压力盒本身材料造成的应力集中。

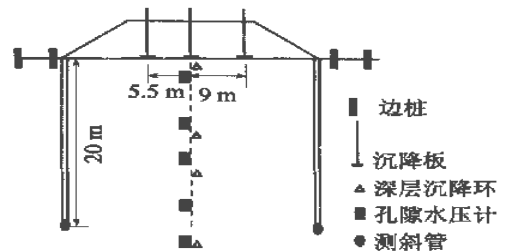


图 1 观测元件布置示意图

1.1 试验断面工程地质概况

试验路堤地处三角洲平原区。场地地层上部为第四系近代滨海相特征显著的海陆相混合沉积的松软层, 下部为寒武系八村群砂页岩。地层土质分布较均匀, 层位稳定, 自上而下为: ①粘土: 褐黄色, 软塑, 厚 2 m; ②软黏土: 浅灰~深灰色, 流塑, 厚 12 m, 层中交互沉积有许多薄层粉砂。③淤泥: 深灰色, 流塑, 厚约 12 m, 底部普遍为一层厚 1~2 m

的粉砂层,为欠固结土,OCR约为0.6;④淤泥:深灰色,流塑,厚5.5~17 m;⑤细砂、中砂夹黏土:棕

黄色,松散~中密,厚2~7 m。

1.2 试验断面土层物理力学指标统计(见表1)

表1 试验断面土层物理力学指标统计

深度 <i>h</i> /m	含水量 <i>w</i> /%	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 <i>e</i>	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 模量 E_s /MPa	竖向固结 系数 C_v / ($10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	径向固结 系数 C_h / ($10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	固结快剪 C_{cu} /kPa	φ_{cu} /($^\circ$)	快剪 C_u /kPa	φ_u /($^\circ$)
0~14	54.50	16.7	1.501	22.6	1.34	1.79	1.385	1.930	15.1	17.7	8.86	3.56
14~26	64.53	16.1	1.823	25.0	1.20	1.29	1.183	1.234	11.0	14.4	7.92	1.23
26~43	51.10	16.6	1.600	25.3	1.12	1.92	4.545		32.0	11.9	11.0	2.71

2 实测变形分析

2.1 地表沉降与深层沉降成果分析

地表沉降及深层沉降 $P-T-s$ 曲线见图2(沉降板晚于深层沉降环约一个月埋设)。沉降速率与填筑速率是正相关的,进入预压期不久后,加固区与下卧层的沉降速率已较接近,这表明后期的沉降主要是由下卧层的压缩引起的。经粉喷桩处理后的复合地基变形有较明显的减少,而下卧层的变形变化不明显,且其固结速率较慢,预压6个月时,工后沉降为46.7 cm,大于准高速铁路的工后沉降标准^[2]。

经计算,处理区与下卧层的沉降比值为1:1.6。工程实践表明,粉喷桩若打入持力层沉降很小,若不打穿软土层,成为悬浮式桩时沉降较大^[3]。因此在沿海地区广泛分布的深厚软土上修建准高速铁路、高速铁路,若要在较短的时间内(如预压6个月)满足其工后沉降要求,且要采用粉喷桩处理,则必须加大处理深度。何开胜、陈宝勤就制成27 m超长水泥搅拌桩成功处理了油罐地基^[4]。

2.2 计算变形与实测变形分析

对于粉喷桩复合地基加固区变形计算,实际工程中应用较多的如复合模量法、应力修正法、等效实体法、桩身压缩模量法等;下卧层的变形计算方法常用分层总和法计算,其下卧层顶的应力采用应力扩散法、等效实体法、双层地基法计算^[5~7]。

各种方法计算的最终变形见表2。对于加固区的沉降,用复合模量法、等效实体法和桩身压缩模量法计算得到的值偏小,而应力修正法得到的值偏大。用应力修正法计算得到的变形与实测值较接近,这与能较为准确地得到桩土应力比有关^[6]。在桩土变形协调的情况下,应力修正法与桩身压缩模量法得到的值应该相等。

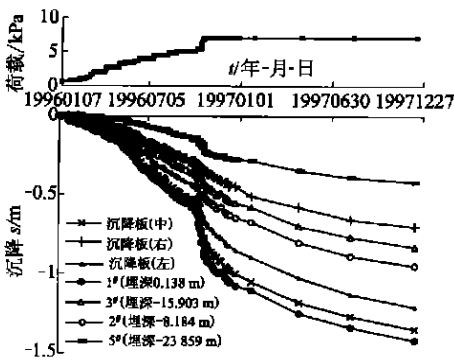


图2 地表沉降及深层沉降 $P-T-s$ 曲线

表2 各种方法计算的最终变形对比表

加固区变形/cm					下卧层变形/cm			
复合模量法	应力修正法	等效实体法	桩身压缩模量法	实测值	应力扩散法	等效实体法	双层地基法	实测值
24.6	83.3	26.8	13.1	65.8	104.3	164.8	60.1	105.6

注:①桩土应力比取填筑到位时的3.5,粉喷桩压缩模量取50 MPa^[5],桩侧摩阻力取十字架抗剪强度的一半为6.6 kPa^[6],扩散角 β 按GB 50007-2002^[8]取;②最终沉降采用双曲线法由深层实测值推算得到;③下卧层变形采用分层总和法得出的主固结沉降乘以由沉降速率法得到的 m_s 而得^[9,10]。

对下卧层的压缩,应力扩散法得到的值与实测值较接近,而等效实体法值偏大,双层地基法值偏小。

2.3 路堤基底横向差异沉降

不同时期的横向差异沉降坡度见表3。路堤基底最大差异沉降坡度平均值达5.55%,且进入预压

期后,横向差异沉降有进一步增大的趋势。若通车后差异沉降进一步发展,则可能造成行车的不安全,有必要在设计施工时予以考虑。为了减小差异沉降,可在桩上铺设土工合成材料来调整路堤基底的应力分布,达到均化基底应力的目的。

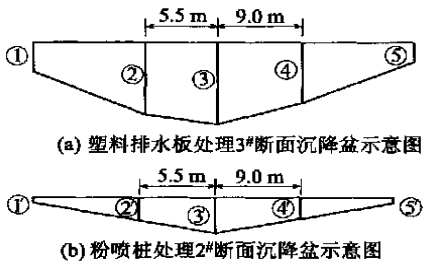
①谢树彬,姬安宁,陈光辉等.粉喷桩的工程特性与设计计算方法研究专辑.铁路地质与路基.2000(1):21~40

表3 不同时期的横向差异沉降坡度表

	坡度/%			
	i_{01}	i_{12}	i_{23}	i_{34}
1996-10-23	5.90	2.30	4.88	4.32
1997-01-24		2.50	5.59	
1997-04-28		2.62	6.17	
平均	5.90	2.47	5.55	4.32

注： i_{01} 、 i_{12} 、 i_{23} 、 i_{34} 分别为边桩左、沉降板左、沉降板左、中、沉降板中、右、沉降板右、边桩右的横向坡度值

不同处理方式的沉降盆图见图3。从与相邻的塑料排水板处理的3#断面的沉降盆图相比^[1]，两者差异较大，经粉喷桩处理后的沉降盆图呈三角形分布，而塑料排水板处理的沉降盆图近似呈梯形。



注：“1.5”及“1'，5'”代表距坡脚2m处的边桩沉降，其值分别为485mm、287mm及52mm、59mm；“2.3，4”及“2'，3'，4'”代表沉降板沉降，其值分别为1912mm、2088mm、1700mm及603mm、741mm、341mm

图3 不同处理方式的沉降盆示意图

2.4 边桩变形分析

边桩沉降随时间荷载变化曲线见图4。从图4可知，在填筑初期，随着荷载的增加，坡脚外2m处的边桩沉降向下；至快速填筑时，边桩上升；进入预压期后，边桩又下沉，其最大值为8.7cm。而坡脚外8m处的沉降在加荷初期(极限高度以内时^[1~2])，其值为正，其后，沉降向下发生；进入快速填筑时，边桩位移又向上发生，逐渐变为正值，进入预压期后，边桩又向下位移，转为负值。不论是坡脚外2m或8m处的边桩，其沉降的变化趋势大致相似。

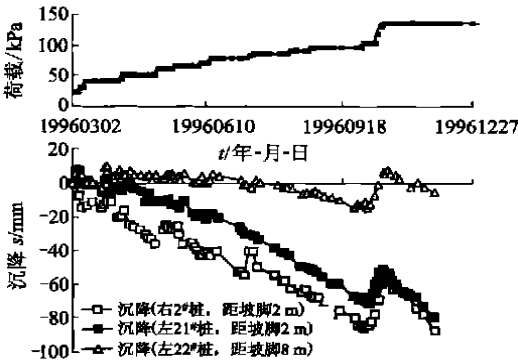


图4 边桩沉降随时间荷载变化曲线

边桩位移随时间荷载变化曲线见图5。无论是坡脚外2m处边桩还是坡脚外8m处的边桩水平位移变化规律基本相似，呈整体移动的趋势。在加荷初期，随着荷载的增加，其水平位移亦向外增大；在快速填筑时，边桩的水平位移向外明显剧增；进入预压期后，边桩水平位移又有所收敛。水平位移最大值为16.5cm。

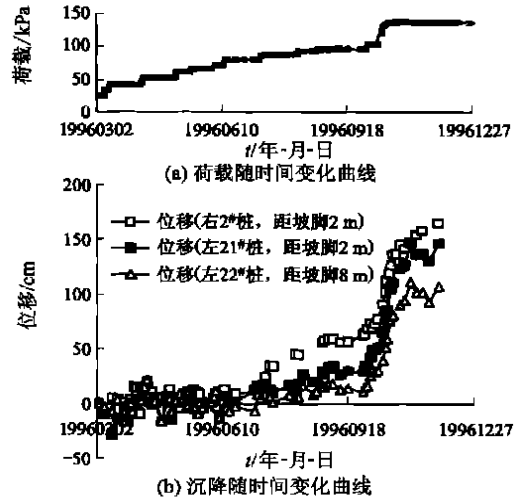


图5 边桩位移随时间荷载变化曲线

无论是边桩的沉降和位移，其变化规律均与塑料排水板处理断面的边桩变形差异较大。在整个填筑期间，塑料排水板处理断面的2m处边桩沉降近似呈线性下沉，8m处的沉降几乎在0值附近变化；2m处边桩位移一直内移，8m处的位移在0值左右摆动，至快速填筑时略有外移。

3 固结分析

3.1 孔隙水压力分析

不同时期的实测孔隙水压力沿深度分布曲线见图6^[11]。从图6可知，随着时间的推移，处理区和未处理的孔隙水压力逐渐消散，且孔隙水压力消散速度随着时间的推移逐渐减慢。孔隙水压力沿深度的分布呈“梨”形，接近地表孔隙水压力很小。这说明在填筑施工过程中，该区域的孔隙水压力并未随着填筑荷载的增大而升高，而是消散的速度比叠加的速度快；随着深度的增大，孔隙水压力也增大，在未处理区接近粉喷桩的底部，孔隙水压力达最大值；深度大于17.5m后，孔隙水压力又逐渐减小。在17.5~20m深度范围内，填筑到位时孔隙水压力几乎与用Boussinesq理论计算的附加应力值相等(假定地基土体中附加应力传递符合Boussinesq理论)。

实测孔压与固结度沿深度分布曲线见图6。近地表5m范围内，固结度接近100%；在15~20m范围

内,固结度仅为 40 %左右;大于 20 m 以后,固结度又逐渐增大。这种现象是由于地表土体排水途径较短,而粉喷桩底部土体的排水途径最长造成的。进入预压期后,从各个测点的孔隙水压力消散速率来看,除了离地表最近的测点孔隙水压力消散较快外,其它各测点的孔隙水压力消散速率基本相同。

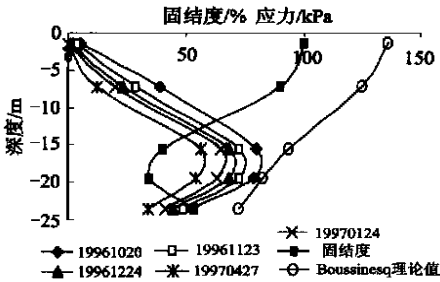


图 6 实测孔压与固结度沿深度分布

3.2 固结分析

实测孔压和沉降推算的加固区和下卧层的固结度见表 4。经计算,未处理的天然地基(预压约 6 个月时)的固结度仅 22.8 %左右,处理后加固区固结速度有较大提高,软土经与水泥混合成为水泥土桩后,其饱和度大大降低,这从根本上改变了土的固结特性,这是粉喷桩处理区固结加快最重要的原因。在假定粉喷桩处理区是饱和的情况下。处理后的固结系数比处理前的固结系数大 5 倍以上。在二灰土复合地基固结特性分析中,也得到了复合地基具有加速地基固结的作用^[12]。

表 4 各种方法计算的固结度

时 间	实测孔压推算固结度 U/%		实测沉降推算固结度 U/%	
	处理区	下卧层	处理区	下卧层
填筑到位时	59.7	15.9	63.6	36.5
预压约 3 个月	71.5	32.5	80.4	54.5
预压约 6 个月	76.4	42.6	83.3	66.2

对于加固区的固结度,由实测沉降推算值与实测孔压推算值相差不大;对于下卧层的饱和软土,由实测孔隙水压力推算的固结度比沉降推算的固结度小 20 %左右,这种固结度的差异^[13,14]值得进一步研究^[15]。实测沉降推算的固结度始终比实测孔压推算的固结度稍大,这与理论分析的结果是一致的^[13,16]。

4 结 论

1)采用粉喷桩处理深厚软基,加固区沉降得到减小,而下卧层的沉降仍然较大,且其固结速率较慢,对控制工后沉降不利。若要在较短时间内满足

准高速铁路较高的工后沉降的要求,必须加大处理深度。由于粉喷桩调整差异沉降的能力较弱,其路堤基底的横向差异沉降有增大的趋势。

2)对于柔性基础下柔性桩复合地基,在其桩底仍有软弱土体的情况下,其加固区的沉降计算采用应力修正法比较符合实际;而对于下卧层的压缩值采用应力扩散法比较合理。

3)与未加固的土体相比,粉喷桩加固区的固结完成较快。地基土体中的孔隙水压力呈“梨”形分布,粉喷桩顶处土体孔隙水压力消散的较快,而粉喷桩桩底附近土体孔隙水压力消散的较慢。

参 考 文 献

- 杜文山,李小和,陈明德等.深厚层软土路堤控制后期沉降加固方法的研究.见:铁道第四勘察设计院主编.软土地基试验研究文集.武汉:中国地质大学出版社.2001.313~343
- 王 祥.粉喷桩在深厚软基处理中的试验研究.岩土工程学报 2001,23(4):513~515
- 蒋振雄,易 敏.粉喷桩在高速公路软基处理中的若干问题.见:龚晓南等主编.高速公路软弱地基处理理论与实践.上海:上海大学出版社 1998.12~219
- 何开胜,陈宝勤.超长水泥搅拌桩的试验研究和工程应用.土木工程学报 2000,33(2):80~86
- 龚晓南.复合地基.杭州:浙江大学出版社,1992.138~167
- TB 10113-96.粉体喷搅法加固软弱土层技术规范.
- 地基处理手册编委会.地基处理手册(第二版).北京:中国建筑工业出版社 2000.419~493
- GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范.
- 郑大同,孙更生.软土地基与地下工程.北京:中国建筑工业出版社 1984.121~223
- 吴慧明.不同刚度基础下复合地基性状研究:[学位论文].杭州:浙江大学,2000
- 俞亚南,张仪萍,张土乔.桥头软基粉喷桩处理现场试验研究.土木工程学报,2002,35(4):65~69
- 徐 洋,谢康和,卢廷浩.二灰土桩复合地基三维固结有限元分析.岩土工程学报,2002,24(2):254~256
- 折学森.软土地基沉降计算.北京:人民交通出版社,1998.10~110
- 魏汝龙.从实测沉降过程推算固结系数.岩土工程学报,1993,15(2):12~19
- 沈珠江.软土工程特性与软土地基设计.岩土工程学报,1998,20(1):100~111
- 罗志强.饱和粘性土地基沉降与固结变量的计算分析.广东工学院学报,1996,13(3):96~102