

粉喷桩复合地基工后沉降的现场研究

王 祥

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 通过采用粉喷桩复合地基处理工后沉降要求严格的高速铁路软土地基的现场试验, 对粉喷桩复合地基处理软土地基的加固效果进行了系统的研究。试验表明, 粉喷桩复合地基处理类似本试验段条件的高速铁路软土地基可以在较短工期内满足 5 cm 工后沉降的要求。无论是硬壳层还是淤泥质黏土层, 粉喷桩复合地基的单位压缩值比塑料排水板排水固结法地基要小的多, 黏土层的压缩模量得到了明显的提高。设置了碎石垫层后, 粉喷桩桩体并无明显的向柔性基础刺入的现象发生, 且垫层的设置达到了均化基底应力及调整差异沉降的目的。实测的孔隙水压力和沉降分析表明, 与天然地基相比, 粉喷桩复合地基的固结速率得到了较为明显的提高。位于地基不同位置的桩土应力比在不同时间不同荷载作用下是不同的, 荷载稳定后的桩土应力比平均值为 5.0。

关键词: 高速铁路; 粉喷桩复合地基; 工后沉降; 软土地基处理

中图分类号: TU413.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)03-0362-06

作者简介: 王 祥(1970-), 男, 博士, 国家注册土木工程师, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质路基工程的科研、设计和施工工作。E-mail: masterwxpf@sina.com。

Field tests on post-construction settlement of DJMP composite foundation

WANG Xiang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The effectiveness of soft soil improved by dry jet mixing pile (DJMP) composite foundation is fully studied through the field tests on high-speed railways. Under the geological conditions, 5-cm post-construction settlement of the soft soil improved by the DJMP composite foundation can be controlled in a short period. The compressibility of the soft soil treated by the DJMP is smaller than that by plastic drain belt both for crust and silt soil. The modulus of compressibility of silty soil improves greatly. The stress and differential settlement of the composite foundation can be adjusted by gravel mat. The pile doesn't penetrate into embankment with gravel mat under embankment. Pore water pressure and settlement data measured in field tests indicate that the rate of consolidation is faster than that of natural soft soil. The ratio of stress between piles and soil changes with sites, time and load. The ratio of stress between piles and soil is about 5 under the stable load.

Key words: high-speed railway; DJMP composite foundation; post-construction settlement; soft soil foundation improvement

0 前 言

随着社会和经济的发展, 对交通的要求也越来越高, 建造高速铁路已成为必需。然而在南方广泛分布的深厚软土将对高速铁路建设带来重大影响, 是造桥还是对软土进行处理, 将带来巨大的投资差异。

对于粉喷桩处理软土地基, 已经进行了大量的研究^[1-7], 但多数研究中的工后沉降标准较低。而高速铁路工后沉降控制标准很严格, 路堤工后沉降要求小于 5 cm, 竣工初期年沉降速率小于 2 cm, 桥路过渡段路基工后沉降要求控制在 3 cm 以内^[8], 粉喷桩复合地基处理能否满足高速铁路严格的工后沉降要求, 值得进一步研究。本次试验的工后沉降控制标准为 5 cm, 为我国首次采用如此高的工后沉降控制标准进行的铁路

软土地基处理试验研究。

1 试验概况及工程地质概况

1.1 试验段概况^[9-10]

试验工点属太湖湖积平原, 地形平坦, 有人工鱼塘分布, 地面标高 2.5 m 左右。粉喷桩处理段里程为 k0+155~+276.51, 桩长 12.5~16.5 m, 桩径 0.5 m, 路肩处间距 1.2 m, 边坡处间距 1.4 m, 排距为 1.2 m。水泥采用 P.O.32.5 级, 掺入比为 15%。

线路为双线, 路基面宽 13.8 m, 考虑路堤本体沉

基金项目: 铁道部高速办项目

收稿日期: 2008-12-09

表 1 试验段土体物理力学指标统计一览表
Table 1 Physical and mechanical properties of soil

地层	含水率 $w/\%$	重度 γ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	压缩模量 E_s/MPa	快剪		固结快剪		固结系数 C_h/C_v $/(\text{10}^{-3}\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	渗透系数 K_h/k_v $/(\text{10}^{-3}\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
							c/kPa	$j/(\text{^\circ})$	c/kPa	$j/(\text{^\circ})$		
①	31.9	19.2	0.89	40.9	19.7	4.61	24.5	8.7	14.0	15.5	1.45/2.09	0.4/0.52
②	44.4	17.8	1.23	35.8	19.9	3.03	8.4	6.3	3.7	18.9	3.37/1.92	1.44/0.68
③-1	35.0	18.8	0.97	33.2	19.8	8.77	29.0	10.6	4.0	26.7	4.95	0.57
③-2	26.0	19.9	0.70	33.5	16.4	5.70	30.5	7.9			3.85	0.71

表 2 试验元件布置一览表
Table 2 Components for tests

地基分层沉降	地基侧向位移	地基剖面沉降	断面地基沉降	位移边桩	路基面沉降	格栅应力应变
1 孔 12 点	2 孔 40 m	宽度 40 m	3 个	10 个	3 套	横向 30 个, 间距 0.6~1.4 m
基底竖向应力	桩土应力比	桩土沉降差	孔隙水压力	应力铲	下卧层水平应力	下卧层竖向应力
横向 20 个, 间距 1.2~1.4 m	1 组 3 个, 共 3 组 9 个	1 组 3 个, 共 3 组 9 个	间距 4 m, 共 5 个	1 组 3 个, 共 3 组 9 个	1 组 3 个, 共 3 组 9 个	1 组 3 个, 共 3 组 9 个

降及软土地基工后沉降, 每侧加宽 0.2 m, 线间距 5.0 m。路堤填土高 4.35~5.95 m, 采用梯形断面, 路堤边坡坡率为 1:1.5。

1.2 试验段工程地质概况

试验段地基各层地层岩性自上而下分述如下: ①黏土, 灰黄色, 软~硬塑, 夹有少量铁锰结核, 表层 0.2~0.5 m 为种植土, 层厚 0.76~3.60 m, 属中等压缩性土。②淤泥质粉质黏土, 深灰色, 流塑, 含少量腐植物, 局部夹有薄层粉砂, 大多数灵敏度超过 16。③黏土, 粉质黏土, 粉土, 局部夹薄层粉砂, 呈交错断续沉积, 层理清晰, 具体分布如下: ③-1, 粉质黏土夹薄层粉砂, 绿灰色, 软塑, 厚 0~4.1 m, 具中等压缩性。③-2, 黏土, 深灰色~浅灰色, 硬塑, 厚 0~8.1 m, 呈透镜体分布。属中等偏低压缩性土。④粉砂, 可分为上下两层, 上部夹有薄层黏性土, 具体分述如下: ④-1, 粉砂, 褐黄色, 中密, 饱和, 厚 0~6.7 m, 不均匀夹有薄层黏土, 其 $N_{63.5}=5\sim45$ 击, 算术平均值 21.5 击; ④-2, 粉砂, 褐黄色, 深灰色, 中密~密实, 饱和, 厚大于 10m, 其 $N_{63.5}=19\sim48$ 击, 算术平均值 24.4 击。

地基土物理力学指标统计分析见表 1。

2 现场测试分析

整个试验段地基处理分别采用了浆喷桩、粉喷桩、塑料排水板真空联合堆载预压、塑料排水板超载预压、砂桩等地基加固措施。本论文主要研究其中的粉喷桩复合地基测试结果。

本试验主要通过控制粉喷桩的施工工艺、提高路堤填筑压实度等方面来试图满足其工后沉降的要求。通过在复合地基中埋设各种测试元件, 研究粉喷桩复

合地基变形、应力随上部荷载、时间的的变化规律, 以及研究采用上述措施能否满足高速铁路工后沉降的要求。各种测试元件数量、间距等见表 2。

2.1 地面沉降随荷载时间变化规律

粉喷桩复合地基地表沉降随填土荷载的施加和稳定而呈现有规律的增加和稳定过程。在加荷较快时, 沉降速率较大, 路堤本体填筑完成后, 沉降速率收敛的很快, 放置 6 个月后, 沉降速率 0.05~0.1 mm/d 以下。粉喷桩复合地基最大沉降速率为 5.8~7 mm/d, 粉喷桩复合地基路堤的填筑不受稳定性的控制。

线路中心处沉降量最大, 左线中心沉降板由于与线路中心的沉降板相距仅 2.5 m, 其沉降与线路中心沉降板沉降非常接近, 位于右线路肩的沉降板与其它两个沉降板的沉降也相差不大。

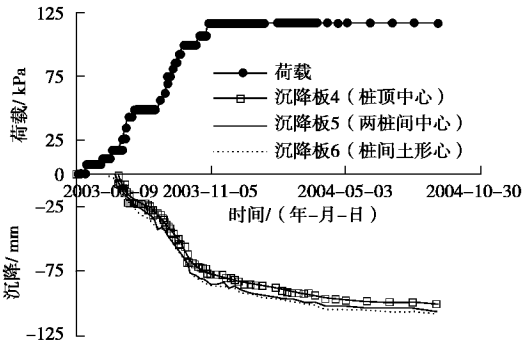


图 1 同一里程不同桩间位置的沉降变化曲线

Fig. 1 Variation of settlement with time and load and site

从图 1 同一里程不同桩间位置沉降板沉降（均位于线路中心附近）可知, 粉喷桩桩顶中心、两桩间中心、桩间土形心沉降规律及沉降数值没有明显差异, 最大沉降差异仅 7 mm 左右, 这表明设置了 50 cm 厚碎石垫层后, 粉喷桩桩体并无明显的向柔性基础刺入

的现象发生。

2.2 深层沉降随荷载时间变化规律

随着荷载的增加,各深度的沉降也增加,加荷较快时,沉降发生也较快;路堤本体荷载填筑完成后,各深度沉降逐渐得到收敛,沉降速率与填筑速率是正相关的。

土层②即淤泥质黏土层的压缩量最大,其压缩占总压缩的比例达 44.9%~66.8%,硬壳层土层①的压缩比例占总压缩的比例为 7.6%~14.1%,这两个土层的压缩占总压缩的比例为 52%~81%。

图 2 为各阶段地基各部分压缩比值随时间及荷载的变化曲线。从图中曲线比值 1 可以看出,粉喷桩复合地基加固区与下卧层的压缩比值在填筑初期逐渐下降,说明这期间下卧层的压缩增加比加固区的快,应力向下卧层传递。至进入路堤放置期后,比值基本保持不变,比值为 1.5~4 左右,这说明本试验段粉喷桩复合地基的压缩主要由加固区的压缩变形引起,即使进入路堤放置期后较长时间也如此。

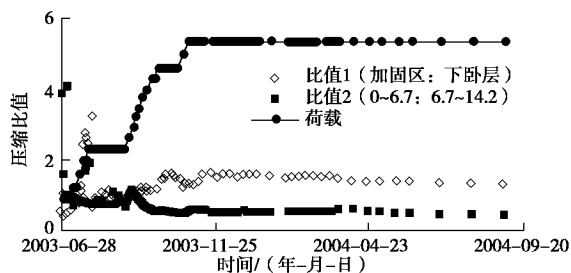


图 2 k0+240 断面地基各部分压缩比值随时间及荷载的变化曲线

Fig. 2 Variation of compressibility ratio with time and load in different areas of soil

从图中比值 2 可以看出,粉喷桩复合地基加固区上半部与下半部压缩比值在填筑初期逐渐上升,至停止填筑时,比值下降;再开始填筑时,比值又有所上升,但上升的幅度不大;其后又重复发生类似现象;进入路堤放置期后,比值基本保持不变。这说明刚开始加荷时,粉喷桩复合地基加固区上部的压缩速率加快,承担更多的应力,至停止填筑时,粉喷桩复合地基加固区上、下部的应力有所调整,上部的应力有所减小,下部的应力有所增加,致使下部复合地基压缩比上部的快;重新填筑后,上部的应力增加比下部的快,上部复合地基的压缩速率加快;进入路堤放置期后,比值基本保持不变,说明进入路堤放置期后,复合地基加固区的应力传递调整基本完成。

2.3 粉喷桩复合地基压缩与排水固结法处理地基压缩的对比

与粉喷桩复合地基相邻的排水固结超载预压法处理地基断面的里程为 k0+535,地层工程地质条件(土

层 1 为硬壳层,厚度为 3 m;土层 2 为淤泥质黏土层,厚度为 7.4 m)、加荷过程(路堤填筑时间为 6 个月)、路堤填筑高度(路堤填筑高度为 7.61 m,比粉喷桩复合地基的填筑高度稍高一些)与粉喷桩复合地基 k0+240 断面的基本相似。

在其它条件基本相似的情况下,沉降主要与路堤填筑高度、土层厚度有关,把沉降除以路堤的填筑高度和土层厚度,其值进行对比可以分析单位荷载单位厚度土体的压缩情况。

图 3 为两种地基土层的单位荷载单位厚度的压缩随时间的变化。从图中可以看出,无论是硬壳层还是淤泥质黏土层,粉喷桩复合地基的单位压缩值比塑料排水板排水固结法地基要小的多。在淤泥质黏土层,塑料排水板地基的单位压缩值为粉喷桩复合地基单位压缩值的 3~4 倍;在硬壳层,相应的比值约为 1.5~2 倍。

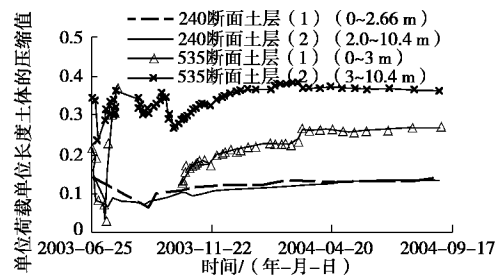


图 3 两种地基单位荷载单位厚度的压缩比值随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of compressibility ratio of soil treated by DJMP and PVD

塑料排水板地基的硬壳层压缩比其下淤泥质黏土层土体的压缩要小的多,而粉喷桩复合地基两种地层土体的压缩几乎相同(这与粉喷桩无侧限抗压强度在两种地层大致相同有关)。说明经粉喷桩处理后,不管是硬壳黏土层,还是淤泥质黏土层的土体压缩模量均得到了明显的提高,尤其是淤泥质黏土层的土体。

2.4 路堤基底横向差异沉降

铁路交通不同于一般公路交通,为了运营的安全及平稳,不但对工后沉降进行控制,还对轨面的平整状态有严格要求。横向不均匀沉降会引起轨面在水平面上高低偏差,影响高速列车运行的平稳和安全。

不同时间不同处理方式的沉降盆图见图 4(①代表粉喷桩处理地基,②代表塑料排水板超载预压处理地基)。从与相邻的塑料排水板处理的 k0+535 断面的沉降盆图相比,两者差异较大,经粉喷桩处理后的沉降盆图比塑料排水板地基的“扁平”的多。对于坡脚外的沉降,两种处理方法的地基相差不大,而在路堤底下的地基中,塑料排水板处理的地基沉降要大的多,虽然塑料排水板地基的软土厚度比粉喷桩复合地基的厚度要小的多(k0+535 断面软土厚度为 7.4 m,粉喷

桩复合地基断面软土厚度为 12.64 m)。

对于设置柔性碎石加筋垫层的粉喷桩复合地基，其横向差异沉降较小，该垫层的设置达到了均化基底应力的目的及调整差异沉降的目的。

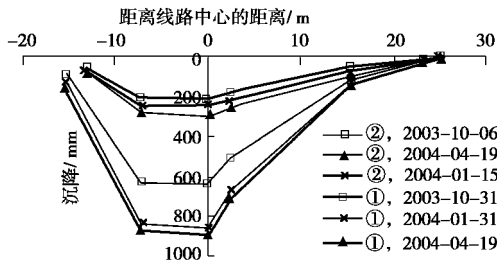


图 4 不同处理方式的沉降盆示意图

Fig. 4 Settlement of soil treated by DJMP and PVD

2.5 复合地基固结测试分析

粉喷桩复合地基孔隙水压力与荷载及时间的关系变化曲线如图 5 所示。从图中可知，各测点的孔隙水压力随着路堤填高的增加而增加，停止填筑后，复合地基加固区和下卧层孔隙水压力逐渐减小，但消散的速度较慢。有的测点在进入荷载稳定期后，其孔隙水压力甚至有一定程度的上升，可能是受地下水位变化的影响。一般而言，在路基填筑过程中，地基浅层的孔隙水压力增大较多，深层的孔隙水压力增大较小。

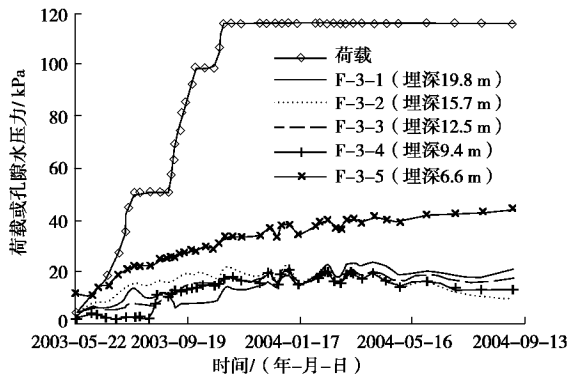


图 5 粉喷桩地基孔隙水压力随荷载变化情况

Fig. 5 Variation of pore water pressure with time and load

由于粉喷桩复合地基桩体的应力集中现象，使桩周土的固结特性发生变化，主要表现在：①孔隙水压力变化幅度较小，且孔隙水压力最大值仅 20~35 kPa。②虽然桩体为排水性很差的水泥土，但孔隙水压力的

消散仍然明显。总体而言，粉喷桩复合地基的孔隙水压力值较小，且荷载稳定后，孔隙水压力消散缓慢。

虽然粉喷桩处理地基的目的并不是为了固结，而是要形成桩土共同作用的复合地基。但实测的孔隙水压力和沉降分析表明，与天然地基相比，粉喷桩复合地基的固结速率得到了较为明显的提高。

表 3 为实测孔压和沉降推算的加固区和下卧层的固结度(消散度)。采用考虑多级加荷的改进的太沙基法计算，未处理的天然地基(放置约 6 个月时)的固结度仅 26.3%左右，处理后复合地基的固结速度有较大提高。

日本的师寺昌明认为，搅拌桩复合地基具有明显的加速固结的作用，对于桩体模量比为 50 的搅拌桩复合地基，其在固结度较小时的固结甚至比砂井地基的还要快^[11]。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]。

无论是加固区还是下卧层，两种方法推算的值均随时间的增加而增加，但速率变缓慢，这与一般饱和土体的渗透固结规律是一致的。

2.6 桩土应力分担

粉喷桩 k0+180 断面 5 组桩土应力比随荷载变化如图 6 所示，从中可知，位于地基不同位置的桩土应力比在不同时间不同荷载作用下是不同的。随着荷载的增加，桩土应力比也增大，路堤本体填筑完成进入荷载稳定期后，多数位置的桩土应力比亦趋于稳定。桩土应力比最大值在 6.2~6.5 之间，荷载稳定后的桩土应力比平均值为 5.0。

当停止填筑时，桩间土所承担的荷载有所减小，而桩上的荷载有所增加，这与荷载稳定时，土逐渐固结卸荷，外荷向桩上转移有关，桩土应力比随着桩间土的固结而增加。

为了研究位于桩间不同位置测试应力对桩土应力比的影响，在桩间的不同位置埋设了土压力盒。两桩中心、桩间土形心及桩顶土压力盒布置示意图 7，测试结果见图 8。

从图中可知，桩顶处应力比桩间土形心处应力、桩顶处应力比两桩中心处应力得到的桩土应力比并无明显的差异，桩土应力比的变化规律基本相同。

表 3 k0+240 断面各种方法计算的固结度(消散度)

Table 3 Degree of consolidation calculated by settlement and pore water pressure

时间	实测孔压推算消散度 $U/\%$		实测沉降推算固结度 $U/\%$	
	加固区	下卧层	加固区	下卧层
填筑到位时	55.7	57.9	68.4	51.9
放置约 3 个月	66.7	72.8	85.4	61.4
放置约 6 个月	67.8	75.3	89.9	65.4

表 4 k0+180 断面地表路堤中心各阶段沉降相关表(在路堤荷载作用下)

填筑期				放置约 3 个月			放置约 6 个月			S_{∞} /mm	工后沉降/mm
S /mm	S/S_{∞} /%	S_{tmax} /(mm·d ⁻¹)	S_{tt} /(mm·d ⁻¹)	S /mm	S/S_{∞} /%	S_{tt} /(mm·d ⁻¹)	S /mm	S/S_{∞} /%	S_{tt} /(mm·d ⁻¹)		
85.6	69.0	5.20	0.496	91.7	73.9	0.166	104.9	84.5	0.118	124.1	19.2

注：① S ， S_{∞} 分别为 t 时、最终沉降， S_{tmax} ， S_{tt} 分别为最大、平均沉降速率；②最终沉降采用双曲线法推算。

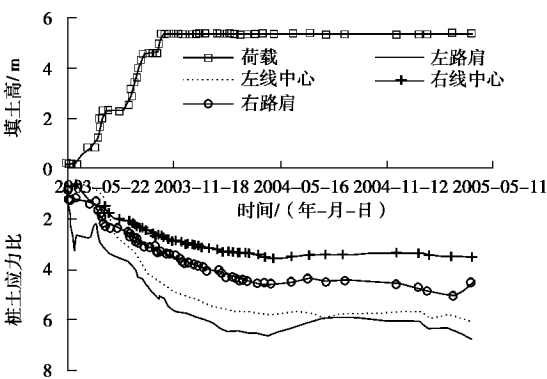
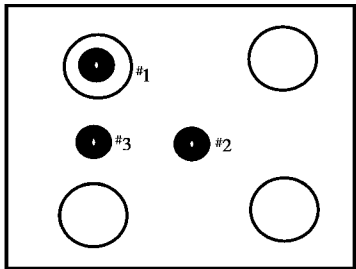


图 6 粉喷桩复合地基不同位置桩土应力比随荷载变化情况
Fig. 6 Variation of ratio between piles and soil with time and load



#1、#2、#3 分别代表桩顶、桩间土形心及两桩中心元件
图 7 两桩中心、桩间土形心及桩顶土压力盒布置示意
Fig. 7 Arrangement of earth pressure cells

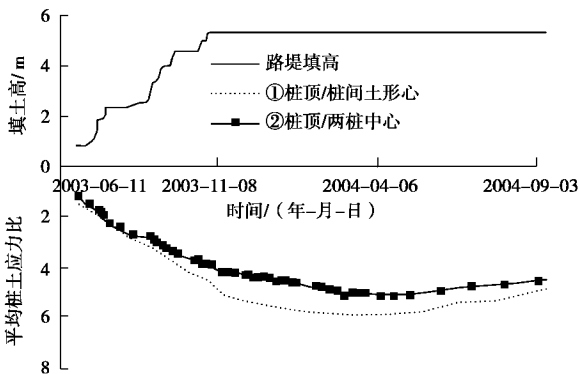


图 8 粉喷桩复合地基平均桩土应力比随荷载变化
Fig. 8 Variation of average ratio between piles and soil with time and load

3 粉喷桩复合地基加固效果的分析

表 4 为 k0+180 断面地表路堤中心各阶段沉降相关表。从表可知，在粉喷桩复合地基路堤填筑完成放置约 6 个月后，沉降完成 84.5%，此时工后沉降为 1.92

cm，加上列车及轨道等后期荷载产生的沉降约 2 cm，已经小于高速铁路所要求的一般路堤 5 cm 工后沉降标准，这充分说明采用粉喷桩复合地基处理类似本试验段条件的高速铁路软土地基是可以在较短时间内满足工后沉降的要求。

4 结 论

(1) 用粉喷桩复合地基处理类似本试验段条件的高速铁路软土地基可以在较短工期内（本试验为放置 6 个月）满足 5 cm 工后沉降的要求。

(2) 无论是硬壳层还是淤泥质黏土层，粉喷桩复合地基的单位压缩值比塑料排水板排水固结法地基要小的多。经粉喷桩复合地基处理后，不管是硬壳黏土层，还是淤泥质黏土的压缩模量均得到了明显的提高，尤其是淤泥质黏土。在淤泥质黏土层，塑料排水板地基的单位压缩值为粉喷桩复合地基单位压缩值的 3~4 倍；在硬壳层，相应的比值约为 1.5~2 倍。

(3) 粉喷桩桩顶中心、两桩间中心、桩间土形心沉降规律及沉降数值没有明显差异，设置了 50 cm 厚碎石垫层后，粉喷桩桩体并无明显的向柔性基础刺入的现象发生。粉喷桩复合地基横向差异沉降形成的坡度较小，沉降盆图较“扁平”，柔性垫层调整差异沉降的能力较强，垫层的设置达到了均化基底应力及调整差异沉降的目的。

(4) 粉喷桩复合地基的孔隙水压力值较小，且荷载稳定后，孔隙水压力消散缓慢。但实测的孔隙水压力和沉降分析表明，与天然地基相比，粉喷桩复合地基的固结速率得到了较为明显的提高，放置 6 个月后，其整体的固结度在 70% 以上。

(5) 位于地基不同位置的桩土应力比在不同时间不同荷载作用下是不同的。桩土应力比最大值在 6.2~6.5 之间，荷载稳定后的桩土应力比平均值为 5.0。

致 谢：本试验工作得到铁道部尤昌龙博士、李怒放教授的指导，由铁四院、同济大学、中铁二十局集团有限公司等共同完成，对参与试验的所有人员表示衷心感谢！

参考文献：

[1] 王 祥. 粉喷桩在深厚软基处理中的试验研究[J]. 岩土工

- 程学报, 2001, **23**(4): 513 - 515. (WANG Xiang. Experimental study on treating deep soft soil with dry jetting mixing pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 513 - 515. (in Chinese))
- [2] 郑俊杰, 袁内镇, 张小敏. 多元复合地基的承载力计算及检测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(3): 391 - 393. (ZHENG Jun-jie, YUAN Nei-zhen, ZHANG Xiao-min. Computation and testing methods for the bearing capacity of multi-element composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(3): 391 - 393. (in Chinese))
- [3] 宫必宁, 郭建强. 水泥深层搅拌桩声学性质与应力波反射法测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 449 - 453. (GONG Bi-ning, GUO Jian-qiang. Acoustics characteristics of deep cement agitating pile and measurement of stress wave reflection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 449 - 453. (in Chinese))
- [4] 陈 甦, 彭建忠, 沈剑林, 等. 水泥粉喷桩钻芯检测工程实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 1891 - 1893. (CHEN Su, PENG Jian-zhong, SHEN Jian-lin, et al. Engineering practice on drilling core examination of DJM piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(12): 1891 - 1893. (in Chinese))
- [5] 郑俊杰, 区剑华, 吴世明, 等. 多元复合地基的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 208 - 212. (ZHENG Jun-jie, OU Jian-hua, WU Shi-ming, et al. Theory and practice of multi-element composite ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 208 - 212. (in Chinese))
- [6] 潘殿琦, 蒙祥源. 水泥搅拌咬合桩的施工与检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 518 - 521. (PAN Dian-qi, MENG Xiang-yuan. Construction and monitoring of gnawing pile with cement mixing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(3): 518 - 521. (in Chinese))
- [7] 张忠坤, 李海斌, 殷宗泽, 等. 路堤下复合地基临界桩长探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 522 - 526. (ZHANG Zhong-kun, LI Hai-bin, YIN Zong-ze, et al. On critical length of pile in composite foundation under embankment of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 522 - 526. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. 新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007. (The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Interim design code for passenger special railway with speed of 300~350 km/h[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [9] 铁道第四勘察设计院, 等. 软土地基沉降估算方法及不同地基处理方法加固效果研究报告[R]. 武汉, 2005. (The Fourth Survey and Design Institute of China Railway, et al. Report of methods of settlement calculation and effect by different soft soil ground treatment[R]. Wuhan, 2005. (in Chinese))
- [10] 铁道第四勘察设计院. 软土地基综合勘探精度及物理力学参数选取方法研究[R]. 武汉, 2005. (The Fourth Survey and Design Institute of China Railway. Research of precision of comprehensive prospecting and selection of physics and mechanics parameters[R]. Wuhan, 2005. (in Chinese))
- [11] 张 捷, 韩 杰, 叶书麟. 水泥土复合地基的固结特性分析[C]//第七届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. (ZHANG Jie, HAN Jie, YE Shu-lin. Analysis on consolidation of cement-soil composite foundation[C]// Proc of the 7th Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994. (in Chinese))
- [12] 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[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 254 - 256. (XU Yang, XIE Kang-he, LU Ting-hao. Consolidation analysis of composite ground with lime-flyash columns by 3D FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 254 - 256. (in Chinese))