

文章编号: 1000-5013(2010)04-0468-05

# 城市主干道软基处理的现场监测数据分析

常方强, 涂帆

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 采用中间为袋装砂井, 两边为粉喷桩的联合处理方式处理试验路段, 通过在软基内埋设测斜管、沉降盘、孔压计和压力盒等, 对路基沉降、侧向变形、孔压以及桩土应力比进行监测。结果表明, 袋装砂井处理的路中部分沉降较大, 而粉喷桩处理的路肩部分沉降较小, 其中后者沉降约为前者的 1/40; 路堤填土达设计标高后, 路中沉降大约还需 5 个月才能基本稳定, 而粉喷桩处理的路肩在填土结束后沉降很快就达到稳定; 交砂(袋装砂井)处的侧向位移比坡脚(粉喷桩)处的大得多, 前者的最大侧移在 5.5 m 深度处, 后者的最大侧移在地表附近; 粉喷桩桩土应力比最大值约为 1.80, 路堤填筑完成后, 应力比逐步减小, 最后稳定在 1.1 左右。

**关键词:** 软基处理; 城市主干道; 沉降; 监测; 粉喷桩; 袋装砂井

**中图分类号:** TU 433; U 412.3

**文献标识码:** A

城市主干道的道路两边通常埋设如煤气、电缆、供水和雨污水等各种市政管道<sup>[1]</sup>。这些管道对地基沉降变形要求严格, 且管道铺设往往需要有一定坡度。若路基工后差异沉降过大, 会导致管道损坏折断, 影响正常工作, 而且污染周围环境, 造成严重后果。福建泉州大坪山隧道连接线道路工程对路基工后沉降的要求: 主车道要求小于 20 cm, 两侧埋设管道部分要求小于 10 cm<sup>[2]</sup>。文[3-6]监测并分析粉喷桩复合地基承载力、孔隙水压力和桩土应力比等, 阐述了粉喷桩加固软基的特性。排水固结法主要作用为加速软基排水, 与超预压载配合能够提高软土力学性能<sup>[7-8]</sup>。为满足城市主干道路基断面不同位置工后沉降要求不同的状况, 大坪山隧道连接线道路工程采用中间为袋装砂井<sup>[2,8]</sup>, 两侧为粉喷桩的处理方式, 即“中间软, 两边硬”的联合处理方法。本文在试验路段上, 埋设沉降盘、测斜管、土压力盒、孔压计和分层沉降磁环等, 监测路基在施工及放置期的特性, 检验这种地基处理方法的效果和可行性。

## 1 现场监测设计

### 1.1 工程地质概况

工程场地由海相沉积而成, 地基土自上而下有如下 8 层: (1) 填土, 基本缺失; (2) 粉质粘土, 基本缺失; (3) 淤泥, 深灰色、饱和、流塑、含有机质, 厚 7~15 m, 局部夹透镜体状粗砂; (4) 粉质粘土, 灰黄色、饱和、可塑; (5) 粉土, 灰黄色、饱和、中密至密实, 厚 0.4~2.5 m; (6) 粗砂, 灰黄色、饱和、稍密, 大多厚约 1 m; (7) 残积砾(砂)质粘性土, 褐黄色、饱和、硬塑; (8) 强风化花岗岩。

淤泥具有高压缩性、低强度和低渗透性等特点, 其物理力学指标: 容重为  $15.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 含水量为 62.1%, 孔隙比为 1.69, 液限为 48.2%, 塑限为 30.3%, 塑性指数为 18.2%, 液性指数为 1.76%, 直剪试验粘聚力为 13.4 kPa(角度为  $1.9^\circ$ ), 压缩模量为 1.6 MPa, 渗透系数为  $3.3 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 1.2 软基处理方案

工程软基路段均为填方区。为解决路基的稳定和沉降问题, 在试验 I 区采用联合地基处理方案: 路中部分(60%的路基宽度)采用袋装砂井固结法, 路基两侧(40%的路基宽度)采用粉喷桩法。袋装砂井直径为 7 cm, 加固深度为 13 m, 间距为  $1.1 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ ; 粉喷桩直径为 0.5 m, 桩长为 8~14 m, 水泥掺量为

收稿日期: 2009-05-25

通信作者: 常方强(1980-), 男, 讲师, 主要从事环境岩土工程的研究。E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(E0710019); 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS621)

16%, 桩距为 1.2 m × 1.3 m。试验 II 区位于桥头地段, 为减少桥头不均匀沉降, 全断面采用粉喷桩处理。

1.3 监测方案的布置

为保证路堤施工过程中的稳定性, 要掌握袋装砂井处理的淤泥层孔压消散规律及软基固结度, 检验粉喷桩设计参数, 并按图 1 所示的位置布置监测仪器。在路基的中心、左右交砂(离袋装砂井与粉喷桩交接位置 2 m 距离的袋装砂井处理部分)、左右交桩(离袋装砂井与粉喷桩交接位置 2 m 距离的粉喷桩处理部分), 以及左右路肩和右坡脚处埋设沉降盘以监测总沉降; 在路中、右交砂和右交桩路基内 20 m 深度内, 每 2 m 埋设分层沉降磁环以监测分层沉降; 在左右交砂和右坡脚处埋设测斜管以监测侧向变形; 在路中位置处的路基 3, 6, 9, 12 m 深度内分别埋设孔压计以监测孔压变化; 选择路肩处的桩头和桩间土埋设土压力盒以监测桩土应力。

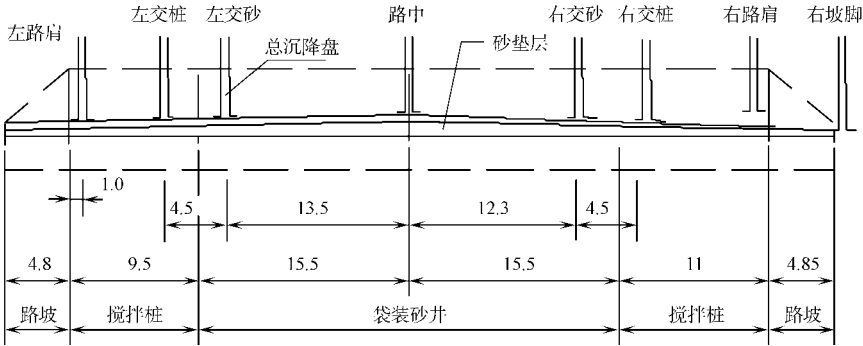


图 1 软基处理方案与监测方案的剖面图(单位: m)

Fig. 1 Soft ground treatment and monitoring(unit:m)

2 结果分析

2.1 路基总沉降的监测

在路基表面埋设沉降盘, 并于其中间打设一根标杆, 标杆底部位于地基中的未风化基岩上。通过测量沉降盘顶与标杆顶之间的差值, 可计算出路基的总沉降量。该段面 8 个监测点的沉降( $S$ )随时间( $t$ )变化, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 路中袋装砂井处理处的沉降最大, 交砂处的次之, 交桩处的相对较小; 沉降随着填土荷载的增大而增大, 沉降速率与填土速率紧密相关。如路中测点, 前期填土的 110 d, 填土速率  $0.4 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$ , 沉降速率  $4.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 其后的 70 d, 填土速率  $0.8 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$ , 沉降速率  $5.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。填土 180 d 可达设计高度, 路中沉降持续到约 330 d, 即沉降在填土结束后约 5 个月才趋于稳定。采用粉喷桩处理的路肩部分, 沉降在填土结束后很快达到稳定。

根据沉降观测值推算最终沉降, 进而计算工后沉降, 以确定管道埋设及路面的施工时间, 这是路基沉降观测的主要目的。根据最终沉降常用的预测方法推算该段面各测点的最终沉降, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 双曲线模型的预测值比其余两个方法的预测值大, Verhulst 模型的预测值次之, 指数模型的预测值最小, 且后两者的预测值十分接近。

表 1 最终沉降的预测结果

	Tab. 1 Prediction of final settlements							mm
沉降观测点	左路肩	左交桩	左交砂	路中心	右交砂	右交桩	右路肩	右坡脚
双曲线模型	42	267	964	1 388	826	99	29	49
指数模型	41	257	952	1 373	815	98	27	47
Verhulst 模型	41	258	956	1 380	823	98	27	48

根据图 2 和表 1 的结果可知, 填土达设计标高后, 路中大约还需 130 d 才能满足工后沉降小于 20 cm 的要求; 而路肩在填土完成后, 工后沉降很快就满足要求。该段面各测点的沉降值, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 粉喷桩处理的软基沉降明显小于袋装砂井处理的沉降; 交桩和交砂测点的水平距离 4.0 m, 但前者仅为后者的 1/8~1/4。

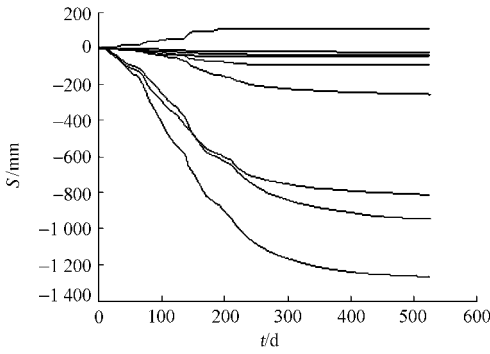


图 2 沉降随时间的关系

Fig. 2 Relationship between settlement and time

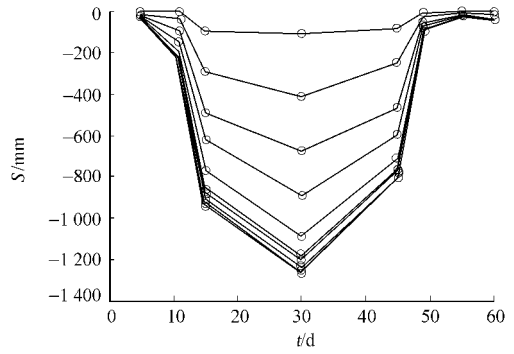


图 3 弯沉盆的形状

Fig. 3 Settlement at tested section

2.2 路基分层沉降的监测

路基分层沉降深度( $h$ )的测试结果,如图 4 所示.由图 4 可看出,无论是何种软基处理方法,其沉降主要发生在 14 m 深度内,该深度内为淤泥,以下为中粗砂.由此可见,地基土层的性质是影响压缩层深度的主要因素.

由图 4 还可看出,路中袋装砂井处理部分,80% 的沉降发生在 7 m 深度内,其中 5 m 深度内单位深度压缩量约为  $180 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ .在袋装砂井处理的右交砂处,5 m 深度内和 5~7 m 深度内的单位深度压缩量约为  $140 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $80 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ ;而粉喷桩处理的右交桩处,相应深度的单位深度压缩量仅为  $10 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ ,均大约为前者的 1/14.

2.3 路基的侧向位移

路基侧向位移( $\Delta$ )的监测结果,如图 5 所示.由图 5 可知,14 m 以下基本上没有侧向位移,与沉降发生深度一样,主要与土层情况有关;交砂处的最大侧向位移约 240 mm,比坡脚处的约 50 mm 大得多.

由图 5 还可看出,最大侧移的深度不同.交砂处的最大侧移在 5.5 m 深度处,坡脚处的最大侧移在地表附近.路基的侧向位移是由于路堤荷载产生的水平应力引起的.根据弹性力学公式计算路基中不同深度处的水平应力,水平应力随着深度的增大而减小.交砂处路基的侧向位移既受到路堤中间部分的作用,也受到交砂处与坡脚之间路堤荷载的作用.因此,交砂处路基不同深度的侧移,是路中与路边荷载及其二种不同处理方法产生的路基土水平变形模量的综合较量的结果.

根据图 5,该工程交砂处的最大侧移在路基表面下约 5.5 m 处;坡脚处只受到一个方向的路堤荷载作用,未处理的地基为软土.因此,最大侧向位移发生在地表.

2.4 孔隙水压力的监测

在路中及交砂处的不同深度埋设孔压测头,监测填土和放置期孔压的增长和消散情况.孔压测头测得的是总的水压力,扣除地下水的静水压力后,得到该深度处的孔压(超静水压力).路中测点的测试结果,如图 6 所示.

由图 6 可以看出,填土过程中的间歇阶段,不同深度处的孔压均有所消散,可见袋装砂井起了加速排水的作用.随着填土速率的增大,孔压增长速率也增大;填土达到设计高度,孔压达最大值,然后呈下降趋势.路堤荷载引起的地基中的孔压随着深度的增加而减小.该段面填土高度为 3.5 m,15 m 深度处的最大孔压为 0.3 kPa,表明填土荷载对此深度土体影响较小.

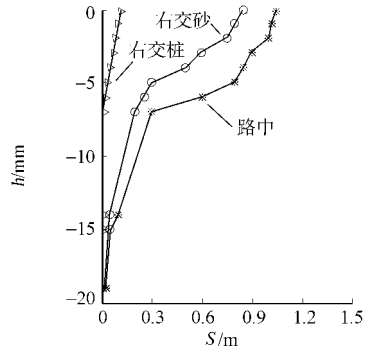


图 4 路基的分层沉降

Fig. 4 Settlement at different layers

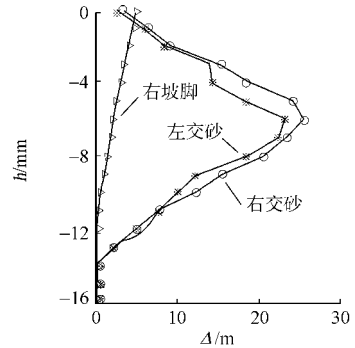


图 5 不同深度处的侧向位移

Fig. 5 Lateral displacements at different depths

采用弹性力学的 Boussinesq 公式, 计算路中心孔压测试点处的地基竖向附加应力. 经计算, 在 3, 6, 9, 12, 15 m 深度处的附加应力分别为 69. 0, 67. 4, 64. 1, 59. 8, 55. 1 kPa. 各个深度处的孔压测试值均比附加应力计算值小得多. 12 m 深度处的最大孔压仅为 2. 3 kPa, 而根据图 4 可知, 该处的沉降也非常小. 孔压实测值比计算值小, 主要是由于加载过程中袋装砂井并能够快速消散超孔压.

2.5 桩土应力比

采用国产刚弦式土压力盒, 受压面为薄铁皮包裹着的硅油囊, 硅油囊的尺寸为 30 cm 直径(用于桩顶)的圆形和 30 cm×30 cm(用于桩间土)的正方形. 将带有硅油囊的土压力盒嵌在 6 cm 高的水泥砂浆预制块内, 硅油囊受力薄膜应高出预制块 2~ 3 mm. 上述措施是为了减小土压力盒与土和桩的模量差距, 减轻可能产生的应力集中和土拱效应, 使得测试值尽可能接近实际值. 在要埋设土压力盒的地方, 降低 10 cm 高度, 整平铺砂后放上预制块, 再铺 30 cm 厚度的砂.

土压力测试值的影响因素很多, 最主要的有: 压力盒表面与测试材料之间的刚度匹配; 土压力盒的长期稳定性; 室内标定压力盒的条件不符合实际情况(即使进行现场标定, 标定条件也不一定是实际情况的再现). 尽管如此, 通过埋设土压力盒获得压力分布的方法还是很有实际意义的.

根据土压力测试值整理的桩土应力及应力比的结果, 如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 桩顶和桩间土上的应力随着填土的增高而增大. 填土达设计高度后, 桩顶应力逐渐减小, 桩间土应力继续增大, 随着时间的推移, 二者趋于接近. 填土初期, 由于桩的压缩模量比土的大, 承担了较大的应力, 桩土应力比达到最大值约 1. 80. 随着荷载的增加, 桩压缩变形, 直至桩顶与桩间土表面的沉降量接近. 在这过程中, 上部荷载逐步从桩顶转移到桩间土上, 因此, 桩土应力比逐渐减小, 最后稳定在 1. 1 左右.

3 软基处理方法的比较

联合处理法(Ⅰ区)与粉喷桩处理法(Ⅱ区)的沉降和侧移数据, 如表 2 所示. 表 2 中:  $S_{max}$ ,  $\Delta_{max}$  分别为最大沉降值和最大侧移值;  $\Delta h_{5m}$  为 5 m 深度单位深度压缩. 由表 2 可以看出, 联合处理法的路中沉降和单位深度压缩量都比单独粉喷桩法的大得多; 坡脚处均采用粉喷桩处理, 故二者的沉降、侧向位移和单位深度压缩量相差不大.

4 结论

为满足城市主干道路基工后沉降的特殊要求, 减少工程造价, 采用中间为袋装砂井, 两边为粉喷桩的联合处理方式. 通过对沉降、侧向位移、孔压和桩土应力监测值的分析, 可得到如下 6 点结论.

(1) 联合处理的路基, 路路段面测点沉降的大小顺序: 路中> 交砂> 路肩> 坡脚. 其中, 交砂处的沉降约为路中沉降的 2/3, 路肩沉降约为路中沉降的 1/48~ 1/30

(2) 填土达到设计高度后, 路中的沉降持续约 5 个月才趋于稳定, 而路肩的沉降在填土结束后, 很

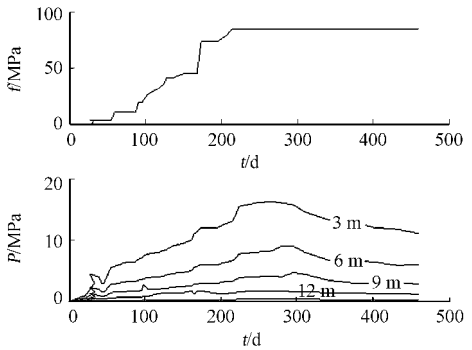


图 6 孔隙水压力的累积与消散  
Fig. 6 Accumulation and dissipation of pore pressure

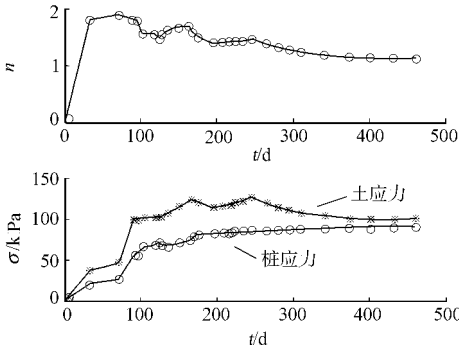


图 7 桩顶和桩间土应力  
Fig. 7 Soil pressure along pile

表 2 软基处理方法的比较				
Tab. 2 Comparison among soft ground treatment methods				
处理方法	监测位置	$S_{max}/mm$	$\Delta h_{5m}/mm \cdot m^{-1}$	$\Delta_{max}/mm$
联合处理	路中	1 269	180.0	—
	交砂	948	140.0	240
	坡脚	46	10.0	50
粉喷桩	路中	206	4.0	—
	坡脚	53	6.7	23

快就达到稳定.

(3) 地基土层的性质是影响压缩层深度的重要因素.

(4) 坡脚处的侧移比交砂处的侧移小, 前者约是为后者的 1/5. 由此可见, 粉喷桩减少软弱路基侧向位移的效果明显. 坡脚和交砂处的最大侧移分别在地表附近和 5.5 m 深度处.

(5) 粉喷桩复合地基的桩土应力比最大值约为 1.8, 在填土完成后, 其应力比逐步减小, 最后稳定在 1.1 左右.

(6) 从经济上考虑, 袋装砂井每米造价约 3.5 元, 比粉喷桩每米造价 32 元低得多, 整个试验段可节省造价约为 50%. 采用联合处理的方法, 利用粉喷桩地基沉降小沉降快的特点, 满足管道路基工后沉降要求高的同时, 又可以提早进行反开槽和铺设管道的施工, 而在此施工期间, 路中袋装砂井地基的沉降也基本完成.

因此, 联合处理方法, 既达到缩短工期, 减少全断面粉喷桩处理费用, 又能满足工后沉降的特殊要求, 是一种可行的方法. 该路段通车 5 a, 路面状况良好.

参考文献:

[ 1 ] 郭力群. 城市主干道软基复合处理[ J ]. 福建工程学院学报, 2005, 3( 1 ): 24-27.  
[ 2 ] 卢怀, 马时冬. 城市主干道软基处理的特点[ J ]. 岩土工程界, 2004, 7( 11 ): 38-40.  
[ 3 ] 林彤. 粉喷桩加固软基的试验研究[ J ]. 岩土力学, 2000, 21( 2 ): 134-137.  
[ 4 ] 林彤, 刘祖德. 水泥土粉喷桩复合地基试验研究[ J ]. 中南公路工程, 2004, 29( 3 ): 22-25.  
[ 5 ] 罗喜元. 粉喷桩处理软基的变形及固结测试分析[ J ]. 岩土工程技术, 2004, 18( 2 ): 86-89.  
[ 6 ] 陈斌, 张仪萍. 粉喷桩复合路基的沉降特性与预测技术试验研究[ J ], 中南公路工程, 2006, 31( 4 ): 1-4.  
[ 7 ] 向先超, 汪稔, 朱长歧. 软基处理中的扁铲侧胀试验研究[ J ]. 岩土力学, 2005, 26( 11 ): 1849-1852.  
[ 8 ] 王福胜. 高等级公路路基袋装砂井可行性分析[ J ]. 岩土工程学报, 1991, 13( 6 ): 70-76.

In-Situ Measurement Data Analysis of Soft Ground  
Treatment for Urban Trunk Road

CHANG Fang-qiang, TU Fan

( College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China )

**Abstract:** The joint-treatment method, that is, middle section with bagged sand well ( BSW ) and both sides with dry jetting mixing ( DJM ) is adopted to treat a road section. Some measuring instruments are buried in the road section, including Inclinator tube, settlement plate, pore water pressure meter, and pressure cell. Various parameters are monitored, including settlement, lateral displacement, pore pressure and pile-soil stress ratio. The results show: settlement in both sides treated by DJM is approximately 1/40 of that in middle section treated by BSW; roadbed settlement of middle section would last at least 5 months after filling finished, while the settlement at road-shoulder could be stable soon after filling finished due to DJM; lateral displacement treated by BSW is larger than that at the foot treated by DJM, the depth of maximum lateral displacement by BSW is 5.5 mm, while the maximum lateral displacement by DJM occurs on the ground surface; pile-soil stress ratio reaches the maximum value of about 1.8 and decreases gradually after filling finished, and then remains at stable value near 1.1.

**Keywords:** soft ground treatment; urban trunk road; settlement; monitoring; dry jetting mixing pile; bagged sand well

( 责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平 )