

# 桩网复合地基土工格栅加筋效应的试验研究

曹新文<sup>1</sup>, 卿三惠<sup>2</sup>, 周立新<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 铁道第二勘察设计院, 四川 成都 640031;

3. 成都铁路局, 四川 成都 640031)

**摘要:** 以遂渝铁路松软地基为工程背景, 原位测试了铺设与不铺设土工格栅两种情况的粉喷桩复合地基的剖面沉降、桩顶和桩间土的土压力、土工格栅拉力。分析结果表明: 桩顶和桩间土的土压力与填土高度成正比, 铺设土工格栅能有效改善附加应力的传递, 提高桩土应力比, 粉喷桩+土工格栅加筋垫层复合地基的桩土应力比为 3.75。土工格栅的拉力与沉降成幂函数关系。分析结果对粉喷桩桩网复合地基设计有重要参考价值。

**关键词:** 基础工程; 粉喷桩; 复合地基; 土工格栅; 加筋

**中图分类号:** TU 47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 3162 - 06

## EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCEMENT EFFECT OF GEOGRID ON COMPOSITE FOUNDATION WITH DRY JET MIXING PILES

CAO Xinwen<sup>1</sup>, QING Sanhui<sup>2</sup>, ZHOU Lixin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. The 2nd Survey and Design Institute of China Railway, Chengdu, Sichuan 640031; 3. Chengdu Railway Bureau, Chengdu, Sichuan 640031, China)

**Abstract:** In a test sector of soft ground on the 200 km/h mixed passenger and freight railway from Suiling—Chongqing, the settlement of the composite ground with the dry jet mixing(DJM) piles reinforced by the geogrid, and the stress on the DJM piles and the ground soil as well as the tensile force of the geogrid were measured to study the reinforcement effect of the geogrid on the composite ground with the DJM piles. As shown by the test, the stresses on the piles and the soil were increased with the height of the embankment linearly. The tensile forces of the geogrid were changed along with the settlement exponentially. Compared to the composite ground with the DJM piles without geogrid, the settlement of the composite ground with the DJM piles reinforced by the geogrid were reduced by 30% - 65%, and the stress ratio between the piles and the soil was 3.75.

**Key words:** foundation engineering; dry jet mixing(DJM) piles; composite foundation; geogrid; reinforcement

## 1 引言

在加固处理公路和铁路软土地基路堤时, 粉喷桩(dry jet mixing, DJM)+碎石垫层复合地基是最常用的方法之一。该方法在工程实践中取得了良好的效果, 对其研究也较深入, 但至今对其沉降方面的

研究仍不能令人满意, 其中对沉降分析影响最大的桩土应力比的研究以理论分析为主, 其测试结果也限于荷载板试验<sup>[1~3]</sup>, 真实荷载情况下的桩土应力比尚无详细的报道。土工格栅加筋垫层也是松软土地基加固处理的方法之一。利用土工格栅加筋作用, 均化附加应力分布, 对提高地基承载力和控制地基沉降的作用十分明显<sup>[4~6]</sup>, 并在设计方法和设计理

**收稿日期:** 2005 - 05 - 20; **修回日期:** 2005 - 09 - 14

**基金项目:** 铁道部重点资助项目(2004G24)

**作者简介:** 曹新文(1966 - ), 男, 1987 年毕业于华中工学院力学系, 现任副教授, 主要从事路基工程、地基处理方面的教学与研究。E-mail: caoxinwen@home.swjtu.edu.cn

论方面进行了研究。近年来，在粉喷桩+碎石垫层复合地基中铺设土工格栅，构成所谓的桩网复合地基，其机制是利用土工格栅的加筋作用，将荷载传递到粉喷桩上，以充分发挥粉喷桩的强度和刚度，降低地基土承受的附加土压力，从而控制地基沉降。该方法在客运专线铁路的路基工程中得到了运用。但由于其作用机制很复杂，目前主要依靠经验来进行设计。王 钊和王协群<sup>[7]</sup>基于网单元的受力平衡条件，对路堤荷载下桩土应力比、工后沉降与桩间距(置换率)、上覆路堤荷载水平、工后沉降量、桩间天然土的承载力、网的刚度等各主要影响因素之间的关系进行了理论分析。本文通过遂渝铁路松软土地基粉喷桩桩网复合地基的沉降、土压力、土工格栅拉力的原位测试，对比分析了铺设与不铺设土工格栅两种情况下，粉喷桩桩网复合地基的桩土应力比及沉降，研究了土工格栅的加筋效应以及桩网复合地基的荷载传递规律。

## 2 工程概况

试验工点位于遂渝铁路 DK10+310~DK10+390 处，该线路穿过丘间洼地，地势平缓。表层为第四系冲洪积松软土，厚度 6~12 m，软塑~流塑状。粉质黏土呈透镜状产出，硬塑状(见图 1)。天然土的物理力学指标见表 1。路堤填土高度为 11 m，边坡坡度为 1:1.5，路堤顶宽为 12 m，下伏基岩为泥岩。

地基采用粉喷桩加固处理，桩径为 0.5 m，桩间距为 1 m。桩长穿透软基，深入基岩 0.5 m。粉喷桩顶部厚 0.5 m、铺设两层双向、抗拉强度为 50 kN/m 的土工格栅碎石垫层。土工格栅碎石垫层从下而上分别为 0.1 m 碎石+土工格栅+0.3 m 碎石+土工格栅+0.1 m 碎石。土工格栅的幅宽为 4 m，沿线路横断面方向铺设，幅与幅之间的搭接重叠宽度不小于 0.1 m，并用尼龙绳连结，以保持土工格栅的整体性。

## 3 现场测试方案

为了对比分析，设计了 3 个测试断面：ZY1 (DK10+320)，ZY2(DK10+336)和 ZY3(DK10+366)。其中，ZY1 和 ZY2 断面为铺设土工格栅碎石垫层，ZY3 断面为没有铺设土工格栅的碎石垫层，两者的垫层厚度相同，均为 0.5 m。ZY1 的松软土厚度为

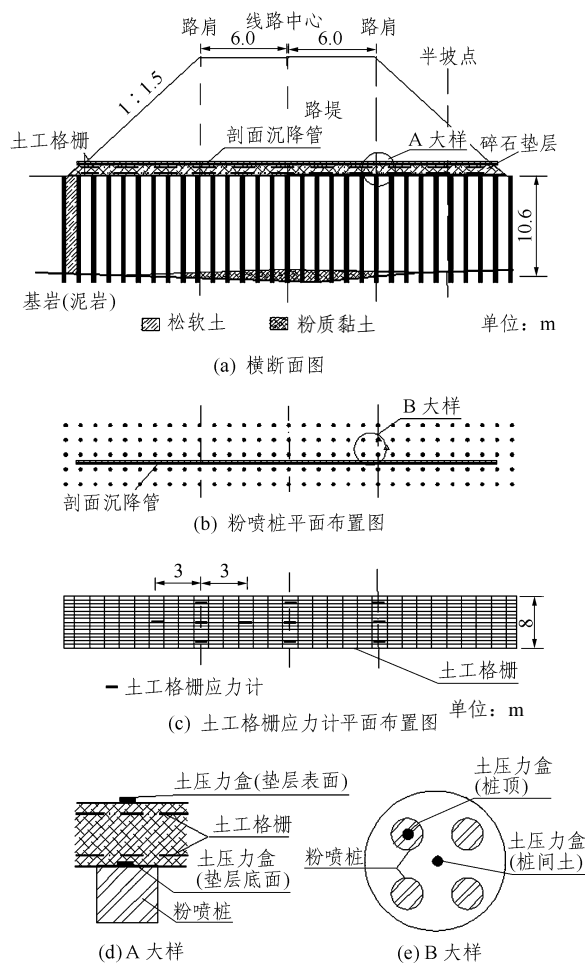


图 1 传感器布置示意图

Fig.1 Layout of the sensor distribution

表 1 土物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soil

土的名称	$\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$w$ /%	$e_0$	$c_u$ /kPa	$\phi_u$ /( $^\circ$ )	$S_r$ /%	$a_{0.1-0.2}$ /MPa $^{-1}$
松软土	18.5	39	0.85	10	5	95	1.02
粉质黏土	19.5	31	0.84	35	9	95	0.58

7.0 m，ZY2 和 ZY3 的松软土厚度为 10.6 m。

每个测试断面布置了剖面沉降管用于地基沉降观测。剖面沉降管位于碎石垫层表面，贯通路堤底部，通过剖面沉降仪进行观测。

按土压力测试目的不同，分别在垫层底面的桩顶、桩间地基土和垫层表面桩顶位置布置了土压力盒，见表 2 和图 1。其中，土压力盒 ZY1-1 与 ZY1-4，ZY1-2 与 ZY1-5，ZY1-3 与 ZY1-6 的平面位置相同；ZY1-1，ZY1-2，ZY1-3 直接埋设于垫层底面的桩顶；ZY1-4，ZY1-5，ZY1-6 则埋于桩顶上方垫层表面。ZY2-6，ZY2-7，ZY2-8，ZY2-9，ZY2-10，ZY3-4 直接埋于垫

表2 土压力盒布置

Table 2 Distribution of the soil pressure sensors

断面	编号	具体位置	埋设地段
ZY1	ZY1-1	左路肩	
	ZY1-3	线路中心	土工格栅垫层底面, 桩顶
	ZY1-5	右路肩	
	ZY1-2	左路肩	
	ZY1-4	线路中心	土工格栅垫层表面, 桩顶
	ZY1-6	右路肩	
ZY2	ZY2-1	半坡点	
	ZY2-2	左路肩	
	ZY2-3	线路中心	土工格栅垫层底面, 桩顶
	ZY2-4	右路肩	
	ZY2-5	半坡点	
	ZY2-6	半坡点	
	ZY2-7	左路肩	
	ZY2-8	线路中心	土工格栅垫层底面, 桩间土
	ZY2-9	右路肩	
	ZY2-10	半坡点	
ZY3	ZY3-1	半坡点	
	ZY3-2	左路肩	土工格栅垫层底面, 桩顶
	ZY3-3	线路中心	
	ZY3-4	右路肩	桩间土

层底面的桩顶; ZY2-1, ZY2-2, ZY2-3, ZY2-4, ZY2-5, ZY3-5 分别埋于 ZY2-6, ZY2-7, ZY2-8, ZY2-9, ZY2-10, ZY3-4 附近的桩间地基土。土压力盒为钢弦式土压力盒, 埋设前均经过标定。

在 ZY2(DK10+336)断面的 2 层土工格栅上布置了 22 个土工格栅应力计。2 层布置的平面位置相同(见图 1(c))。土工格栅应力计为柔性应力计, 应力计拉伸模量与土工格栅接近, 每个应力计在安装前均进行标定, 通过测试应力计的应变值换算成土工格栅的拉力。

所有测试传感器在地基处理完毕后埋设到位, 随路堤填土施工过程进行测试, 路堤竣工后, 每隔一定时间进行测试。

## 4 测试结果分析

### 4.1 地基沉降

图 2 是路堤高度为 10 m 时, 地基剖面沉降  $S$  沿线路横断面(以线路中心为原点, 左为负)的分布。3 个断面的分布形状基本相似, 与一般路堤下地基的沉降分布规律相同。线路中心的沉降最大, 随着距线路中心距离的加大, 沉降逐渐减少, ZY1 断面沉降的变化速率最小, ZY2 次之, ZY3 最大。图 3 是线路中心沉降  $S$  随填土高度  $h$  和时间  $t$  的变化。施工期内, 随着填筑高度增加, 地基沉降随之增加。路堤填高 10 m 时, ZY1, ZY2 和 ZY3 断面线路中心的沉降量分别为 0.266, 0.320 和 0.529 m。由于 ZY1, ZY2 和 ZY3 断面松软土厚度不同, 填土高度相同, 故以沉降量与软土地基厚度之比  $k_s$  来进行比较更为合理, 3 个断面的  $k_s$  分别为 0.038, 0.030 和 0.050, ZY3 的  $k_s$  比 ZY1 和 ZY2 分别大 31% 和 65%。由此可见, 无土工格栅时, 由于粉喷桩刚度比地基刚度大, 路堤填土是散粒体, 在地基沉降过程中, 碎石垫层随地基下沉, 因此, 地基沉降较大。铺设土工格栅后, 地基沉降时, 由于土工格栅加筋作用, 土工格栅碎石垫层及路堤填土作为一个整体而沉降, 有效地降低了地基沉降量, 均化了沉降沿横断面分布。

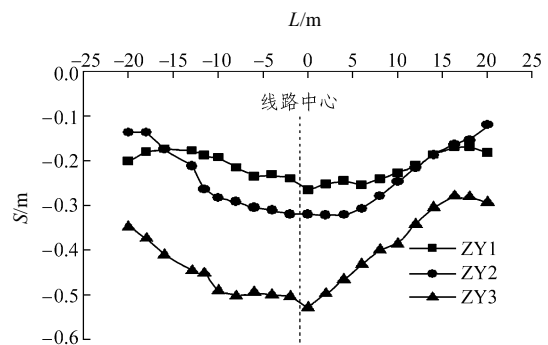


图 2 地基沉降  $S$  沿横向分布曲线

Fig.2 Distribution of  $S$  along cross-section

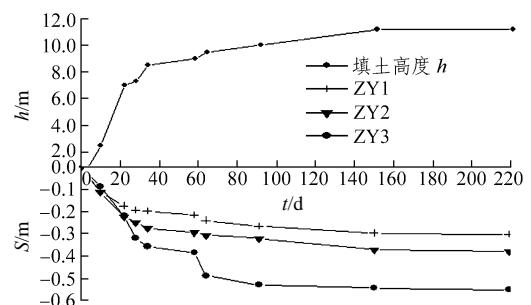


图 3  $S-t, h-t$  关系曲线

Fig.3 Curves of  $S-t$  and  $h-t$

### 4.2 土压力与桩土应力比

典型的桩顶和桩间土土压力 $\sigma_H$ 随路堤填土高度 $h$ 的变化,可采用线性拟合,即

$$\sigma_H = k_0 h \quad (1)$$

各测点的拟合系数 $k_0$ (单位: kPa/m)与相关系数的平方 $R^2$ 见表3。除个别测点(主要因为位置特殊如半坡点)的相关系数的平方 $R^2$ 小于0.90外,其他测点的相关系数的平方 $R^2$ 均在0.90以上,说明式(1)线性相关性好。比较各测点的土压力的变化情况,只需比较系数 $k_0$ 即可。

表3 土压力系数

Table 3 Coefficient  $k_0$  of the soil pressures

编号	$k_0$ /(kPa · m <sup>-1</sup> )	$R^2$
ZY1 - 1	75.50	0.980
ZY1 - 3	50.00	0.970
ZY1 - 5	74.30	0.780
ZY1 - 2	37.90	0.920
ZY1 - 4	22.60	0.960
ZY1 - 6	24.40	0.960
ZY2 - 6	11.60	0.650
ZY2 - 7	14.40	0.960
ZY2 - 8	17.50	0.893
ZY2 - 9	8.58	0.946
ZY2 - 10	20.00	0.930
ZY2 - 1	42.70	0.530
ZY2 - 2	49.50	0.930
ZY2 - 3	64.60	0.911
ZY2 - 4	49.27	0.845
ZY2 - 5	44.30	0.900
ZY3 - 1	59.90	0.960
ZY3 - 2	67.50	0.920
ZY3 - 3	65.15	0.840
ZY3 - 4	14.46	0.610
ZY3 - 5	35.10	0.980

ZY1断面上,土工格栅垫层底面的桩顶测点ZY1-1, ZY1-3, ZY1-5三个测点中的 $k_0$ 最小为50.2,最大为75.48,按填土重度20 kN/m<sup>3</sup>计算路堤填土在地基表面产生的附加土应力,桩顶土压力是附加应力的2.00~3.87倍。土工格栅垫层表面的桩顶测点ZY1-2, ZY1-4, ZY1-6三个测点中系数 $k_0$ 最小为22.55,最大为37.98,按相同方法计算,土压力是附加应力的1.1~1.9倍,平均值为1.14,与附加应力十分接近。比较土工格栅碎石垫层上下相同平面位置的测点,垫层底面桩顶土压力是垫层

表面桩顶土压力的2倍。由此可见,土工格栅的加筋作用可有效地将荷载传递到桩顶,而垫层表面附加应力分布比较均匀,与计算结果基本一致。

桩土应力比是评价复合地基的重要指标,根据经验公式推算复合地基承载力和沉降时,绝大多数公式都包含桩土应力比。桩土应力比受桩体材料、地基土特性、桩长、桩径、置换率等因素的综合影响。国内外学者采用不同的方法对桩土应力比进行过研究<sup>[8~10]</sup>,但这些研究都存在一定的局限性,如荷载试验得出的桩土应力比没有考虑实际荷载的形式、地基沉降等因素。本次测试了实际路堤荷载作用下的桩间和桩顶土压力,因此,由此计算得出的桩土应力比具有代表性,ZY-2断面,平面位置相同的桩顶与桩间土2个测点 $k_0$ 的比值,最小的为2.22(ZY2-5, ZY2-10),最大为5.74(ZY2-4, ZY2-9),平均为3.75,此值可作为相同地基条件下复合地基的设计参数。ZY3-5与ZY3-4为桩顶和桩间土测点,二者的 $k_0$ 的比值为2.42,与ZY2断面桩土应力比的最小值接近,比平均值低54%。这说明,铺设土工格栅能有效地提高桩土应力比,充分发挥粉喷桩的强度。

### 4.3 土工格栅受力分析

土工格栅的拉力 $T$ 随时间 $t$ 和填土高度 $h$ 的变化见图4。线路中心、左右路肩处的 $T$ 值是横向位置相同的3个测点的平均值,比单个测点的值更有意义。由此可见, $T$ 随路堤高度 $h$ 增加而增大。在路堤达到设计高度后, $T$ 随时间波动变化。在路堤填筑阶段,线路中心平面位置,下层测点的 $T$ 值大于垫层上层的 $T$ 值。随着时间增长,上下两层测点的 $T$ 值逐渐接近。线路中心处下层格栅的拉力 $T$ 的最大值为37.89 kN/m,为土工格栅的抗拉强度的78%。

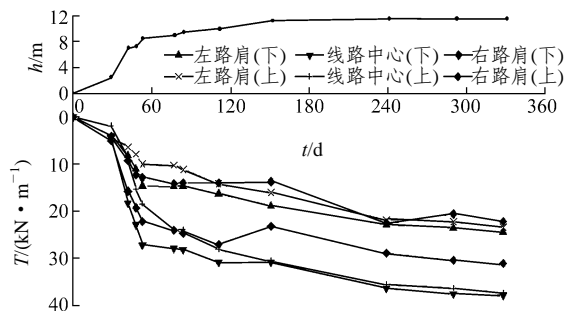


图4 土工格栅的拉力 $T$ 与 $t, h$ 关系

Fig.4 Relation of tension force  $T$  and parameters  $t, h$  for geogrid

图5是土工格栅拉力 $T$ 沿线路横断面分布。在填土高度较低时,离线路中心较远测点的 $T$ 值较大。随着路堤高度增加,距离线路中心越远的测点,其 $T$ 值随路堤高度增加的变化速率越慢,线路中心的 $T$ 值增加速度最快,逐渐形成线路中心大,两侧小的分布形状。路堤高度为10m时,下层土工格栅在左、右路肩处的拉力 $T$ 大小为线路中心处拉力 $T$ 的61.3%和56.4%,上层土工格栅在左、右路肩处的拉力 $T$ 是线路中心处拉力 $T$ 的81.0%和62.6%。

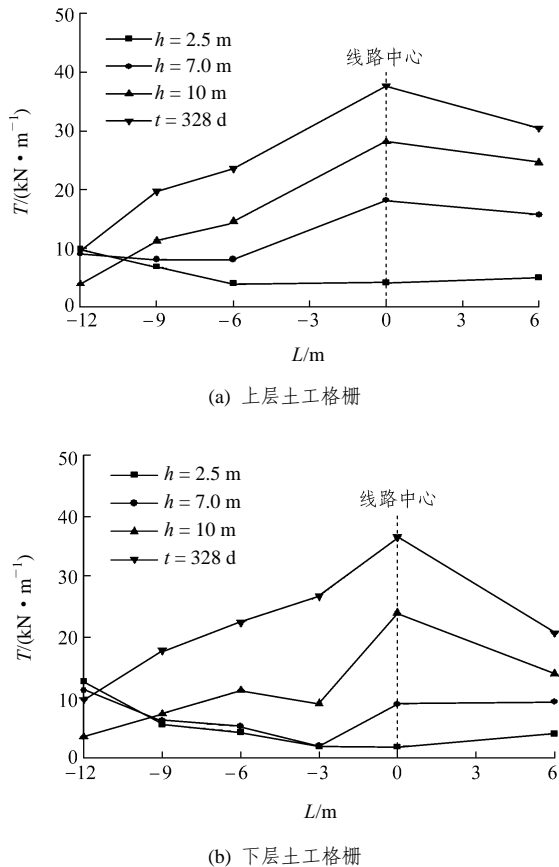


图5 土工格栅拉力 $T$ 沿横断面分布  
Fig.5 Distribution of  $T$  along cross-section

综合分析土工格栅拉力 $T$ 的变化规律,土工格栅拉力 $T$ 的大小与地基沉降有着密切的联系。图6是线路中心、两侧路肩的土工格栅拉力与相同平面位置(ZY2断面)地基的沉降 $S$ 的关系曲线,土工格栅拉力 $T$ 与同位置的沉降 $S$ 可用幂函数来描述:

$$T = \alpha S^\beta \quad (2)$$

式中: $\alpha$ ,  $\beta$ 为拟合参数。表4给出了各位置的 $\alpha$ ,  $\beta$ 值,相关系数的平方 $R^2$ 在0.95以上。可见,上层土工格栅测点的 $\beta$ 值接近,为1.81。垫层下层测点的 $\beta$ 值也接近,为1.91,说明垫层下层土工格栅拉力 $T$ 随沉降的变化较垫层上层大,垫层下层土工

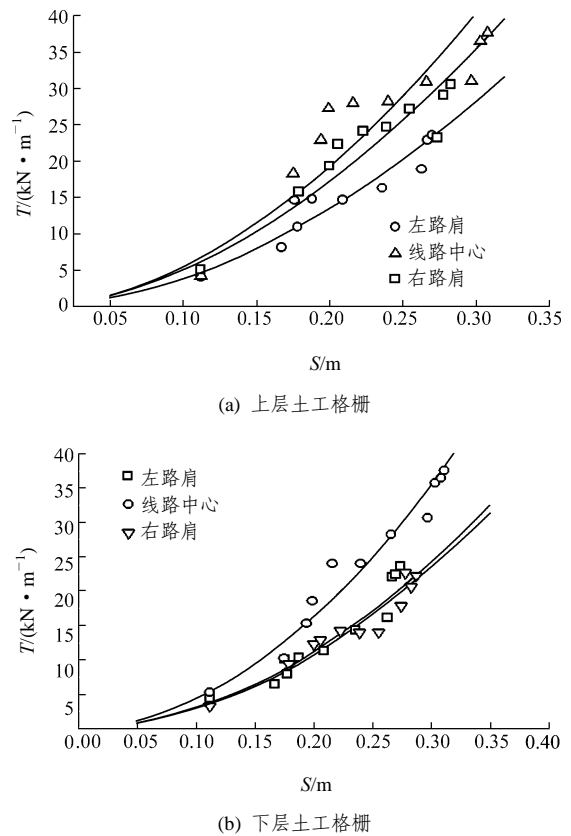


图6 土工格栅拉力 $T$ 与 $S$ 关系曲线  
Fig.6 Relation of  $T$ - $S$  of geogrid

表4 拟合参数 $\alpha$ ,  $\beta$ 值  
Table 4 Fitting values of  $\alpha$ ,  $\beta$

名称	位置	$\alpha$	$\beta$
上层土工格栅	左路肩	254.92	1.826 6
	线路中心	360.89	1.824 1
	右路肩	300.68	1.775 5
下层土工格栅	左路肩	242.28	1.907 5
	线路中心	356.55	1.917 2
	右路肩	235.23	1.914 4

格栅的拉力受沉降的影响更为突出。左路肩、线路中心、右路肩3个位置,上、下两层的 $\alpha$ 值相差分别为5%,1%和27.8%。由此可推断, $\alpha$ 值主要取决于平面位置, $\beta$ 值取决于竖向位置。

### 5 结论

- (1) 土工格栅加筋垫层有效地降低了粉喷桩桩网复合地基复合沉降量,均化了地基横断面沉降,从而改善地基沿线路横向的分布。
- (2) 土工格栅加筋垫层有利于荷载在粉喷桩桩网复合地基的扩散,能充分发挥粉喷桩的刚度和强

度。

(3) 土工格栅加筋垫层能够提高桩土应力比, 粉喷桩桩网复合地基的桩土应力比为 3.75。

(4) 土工格栅拉力与沉降成幂函数关系。拟合参数  $\alpha$ ,  $\beta$  值分别取决于平面和竖向位置。

### 参考文献(References):

- [1] 郭力群. 粉喷桩复合地基桩土应力比的原型测试分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 161 - 164.(Guo Liqun. Analyzing the prototyping measurement of pile soil stress ratio on the composite ground with dry cement jet mixing piles[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2004, 25(2): 161 - 164.(in Chinese))
- [2] 朱中卫, 方磊. 粉喷桩复合地基桩土应力比试验研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3): 113 - 115.(Zhu Zhongwei, Fang Lei. Experimental study on the stress ratio between pile and soil of DJM pile composite foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(3): 113 - 115.(in Chinese))
- [3] 宋修广, 郭宗杰, 刘金章, 等. 粉喷桩复合地基的数值计算分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 494 - 497.(Song Xiuguang, Guo Zongjie, Liu Jinzhang, et al. Numerical analysis of dry jet mixing pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 23(4): 494 - 497.(in Chinese))
- [4] 黄广军, 张千里, 俞锡健, 等. 加筋垫层对地基沉降控制效果的多方案比较[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 598 - 601.(Huang Guangjun, Zhang Qianli, Yu Xijian, et al. Comparison of settlement control of reinforcement layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 598 - 601.(in Chinese))
- [5] Richard J V, John B G, Mysore S N. Geosynthetic reinforced levee test section on soft normally consolidated clays[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(4): 362 - 383.
- [6] 马时冬. 土工格栅加筋垫层的效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 491 - 495.(Ma Shidong. Verification of reinforced effect on geogrid cushion for foundation strengthening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 491 - 495.(in Chinese))
- [7] 王钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基的设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 731 - 733.(Wang Zhao, Wang Xiequn. Design of foundation reinforced with geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6), 731 - 733.(in Chinese))
- [8] 饶为国, 赵成刚. 桩-网复合地基应力比分析与计算[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 74 - 79.(Rao Weiguo, Zhao Chenggang. The behavior of pile-net composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 74 - 79.(in Chinese))
- [9] Sean D, Hinchberger R, Kerry R. Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: predicting reinforcement strains at failure[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21(2): 151 - 175.
- [10] 杨新安, 黄宏伟, 程军. 粉喷桩加固复合地基数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2002, 22(增): 11 - 14.(Yang Xin'an, Hunag Hongwei, Cheng Jun. Study on DJM pile composite foundation with numerical simulation method[J]. Journal of China Railway Society, 2002, 22(Supp.): 11 - 14.(in Chinese))