

# 朔黄重载铁路路基斜向高压旋喷桩加固效果

狄宏规<sup>1</sup>, 冷伍明<sup>2</sup>, 周顺华<sup>1</sup>, 朱德兵<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 结合朔黄重载铁路路基加固前后检测试验数据和斜向高压旋喷桩的加固机理, 对斜向高压旋喷桩技术加强既有线路基的综合效果进行了探索研究。研究表明, 斜向高压旋喷桩能显著提高路基的强度、刚度、承载力及路基 45° 扩散线以内土体的密实度, 是一种快速有效的既有线路基加固技术。

**关键词:** 既有重载铁路; 路基加固; 斜向高压旋喷桩; 加固效果评价

中图分类号: TP15

文献标志码: A

## Reinforcement Effect of Inclined High-pressure Jet Grouting Piles for Shuo-huang Heavy Haul Railway

DI Honggui<sup>1</sup>, LENG Wuming<sup>2</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1</sup>, ZHU Debing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the field test data of Shuo-Huang heavy haul railway subgrade and the reinforcement mechanism of inclined high-pressure jet grouting piles (IHJGP), a study was made of the comprehensive reinforcement effects of this technology. Studies show that the strength, the stiffness, the bearing capacity and the soil compactness of the subgrade reinforced by IHJGP improves significantly, which proves that IHJGP is an effective reinforcement technology for the existing railway embankment.

**Key words:** existing heavy haul railway; subgrade strengthening; inclined high-pressure jet grouting pile; evaluation of reinforcement effect

重载铁路输送能力大, 经济和社会效益显著, 发展铁路重载运输, 已成为世界各国铁路运输发展的方向, 也是我国加速提高铁路运输能力的主要途径<sup>[1]</sup>。由于既有重载铁路路基所受动载强度大, 受载频率高, 导致铁路路基病害多发, 严重危及行车安全。

作为我国西煤东运的第二大通道——朔黄重载铁路, 其路基填料主要为 C 组<sup>[2]</sup>, 路基填料的主要物理力学指标见表 1。由表 1 可见, 填料为细粒土, 塑性指数偏高, 液限大于 30%, 透水性差, 承载力较低。由于路基填料土性较差, 加之线路沿途分布有太行山区冻土、湿陷性黄土和近海处盐碱沼泽地基等不良气候和地质作用, 经过几年的运营, 朔黄铁路沿线产生了较为严重的路基病害。随着重载铁路运输轴重的加大、牵引质量的不断提高以及行车密度的不断增加, 朔黄重载铁路路基的使用条件将更加恶化, 路基病害产生的几率将进一步加大, 必须对其路基进行加固强化。目前常用的路基加固方法主要包括换填法、注浆法、旋喷桩法、封闭基床、挤密桩、加筋土等, 然上述方法用于既有线加固时存在影响线路运营、无法改善土质或加固效果不理想等问题<sup>[3-7]</sup>。鉴于此, 朔黄重载铁路扩能改造工程中首次设计并采用了不影响线路运营的斜向高压旋喷桩旁侧加固技术。目前, 国内外关于斜向高压旋喷桩的受力变形机理、加固效果评价等方面的研究鲜见报道, 文献<sup>[8]</sup>对朔黄铁路过渡段路基加固后的路基状态进行了检测分析, 但并未作加固前后路基状态的对比。

本文对朔黄铁路试验段路基进行了加固前后路基状态的检测。根据加固前后检测数据的对比分析, 对斜向高压旋喷桩技术加强路基的综合效果进行了探索研究, 可为类似工程提供参考。

收稿日期: 2012-12-24

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2009AA11Z101)

第一作者: 狄宏规(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为路基工程、地下工程。E-mail: dihongguila@126.com

通讯作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下工程开挖理论、施工环境控制和铁道工程。

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

表 1 路基填料的主要物理力学指标  
Tab.1 Material's properties of Shuo-Huang heavy haul railway

填料	液限/%	塑限/%	塑性指数	大于 0.075 mm 颗粒百分比/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	孔隙比	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
粉质黏土	36.7	22	14.7	9.35	14	26.5	0.71	1.86

## 1 路基加固方案

调研发现,朔黄铁路路基病害主要表现为路基下沉外挤、基床翻浆冒泥、道碴陷槽、排水不良、边坡不稳等. 针对上述病害,朔黄公司分别于 2000 年和 2003 年采用多种方法对路基病害严重的地段进行了两次重点整治<sup>[7]</sup>,取得了一定的效果,但部分过渡段路基下沉问题仍旧突出,路基承载力不能满足朔黄线进一步重载扩能的要求,而且所选的部分方法需封闭线路,影响运营. 为进一步改善路基下沉问题,提高路基的承载力等,经过相关单位综合论证,拟采用不影响线路运营的斜向高压旋喷桩技术对路基进行加固. 通过现场调研和多方协商,确定朔黄铁路路基下沉较为严重的 K51+250~K51+320 路涵过渡

段(工点 I)和 K54+000~K54+035 路桥过渡段(工点 II)为加固试验段.

工点 I 和工点 II 试验段路基填土高度分别约为 4 m 和 7 m,路基顶面宽约 11 m,硬路肩宽约 0.7 m,路堤坡度 1:1.5,两侧边坡采用强度编号 M5 的水泥砂浆砌片石形成方格形骨架及拱形骨架,骨架内种植紫穗槐防护. 通过室内 1:10 模型试验和有限元分析,确定路基横断面布桩形式如图 1 所示. 具体设计参数为:路堤两侧自路肩以下 1 m(即  $a=1$  m),沿边坡方向及线路方向打设桩径为 0.5 m 的斜向高压旋喷桩,桩沿边坡方向间距  $b=2$  m,沿线路方向间距 3 m,桩与水平方向成  $\beta=15^\circ$  角向下,第 1 排桩设置到  $45^\circ$  扩散线,以下各排桩交叉长度  $c$  为 1~2 m. 为加劲路基基床范围强度,在第 1 排桩加密倾斜角度  $\theta=5^\circ$  的旋喷桩,与  $\beta=15^\circ$  角桩交错布置.

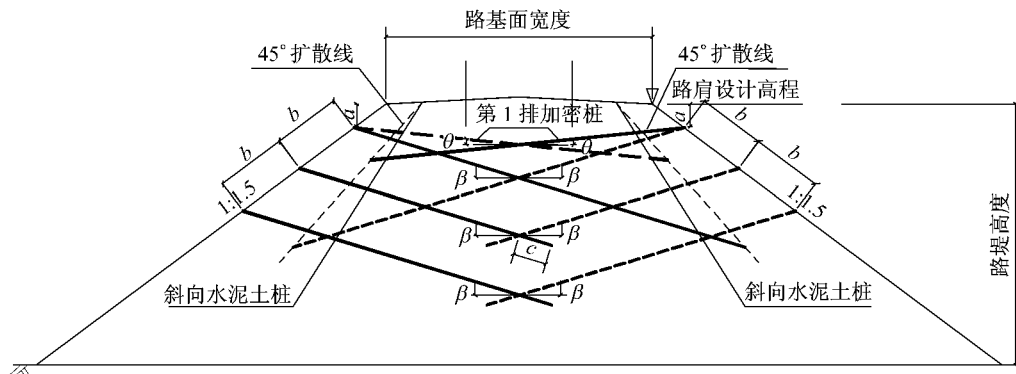


图 1 横断面布桩示意图

Fig.1 Piles arrangement in the cross-section of the subgrade

## 2 路基静动力性能检测方案

为了科学地评价斜向高压旋喷桩技术加固朔黄重载铁路路基的综合效果,必须对加固前后路基的静动力性能进行全面的检测.

### 2.1 加固前路基静动力性能检测

文献[9-13]对当前的既有线路基检测和评估方法进行了研究,分析比较了各检测方法的功能和优缺点,根据路基病害类型、检测方法的适用性及可靠性对既有线路基检测方法的选取给出了建议. 考虑到朔黄铁路实际病害情况和既有线路基检测方法的特点,试验组对工点 I 路涵过渡段和工点 II 路桥过

渡段路基分别进行了压实度  $K$  试验、轻型动力触探  $N_{10}$  试验、地基系数  $K_{30}$  试验、二次变形模量  $E_{v2}$  试验、动态变形模量  $E_{vd}$  试验、地质雷达测试及弹性波探测. 由于试验段路肩硬化,上述前 5 个试验主要在基床底层及以下路基本体的旁侧边坡上进行. 针对既有线路基检测中进行  $K_{30}$  和  $E_{v2}$  试验困难的问题,设计了一套有效的反力装置及试验台,解决了在路堤边坡上进行  $K_{30}$  和  $E_{v2}$  试验的反力问题及在边坡斜面上安放仪器设备困难的问题,具体操作方法见文献[14]. 地质雷达和弹性波的测试在轨面和道床表面进行,用以探测轨面以下道床和路基的状态. 表 2 为试验段路基检测方法及其测点布置,表中前 5 个试验的有关测试方法、适用范围及数据处理等参见《铁

路土工试验规程》(TB10102—2004)和《铁路工程地质原位测试规程》(TB10018—2003),地质雷达和弹性波探测则依据本项目开发的设备和软件进行测试

和数据处理。

表 2 试验段路基检测方法及其测点布置

Tab.2 Detection methods and the arrangement of measuring points (area)

检测项目	工点 I				工点 II			
	K51+271~+273		K51+278~+280		K54+020~+022		K54+030~+032	
	基床底层	路基本体	基床底层	路基本体	基床底层	路基本体	基床底层	路基本体
压实度 K	2	2	2	2	2	2	2	2
$N_{10}$ 试验	2	2	2	2	2	2	2	2
$K_{30}$ 试验	1	1	1	1	1	1	1	1
$E_{v2}$ 试验	1	1	1	1	1	1	1	1
$E_{vd}$ 试验	3	3	3	3	3	3	3	3
地质雷达测试	检测工点 I 和工点 II 区段轨面以下道床和路基的状态							
轨下弹性波探测	检测工点 I 和工点 II 区段轨面以下道床和路基的状态							

2.2 加固后路基静动力性能检测

加固后路基状态检测项目同加固前,但加固后测点包括加固桩体(压实度试验除外)和桩间土,且加固后测点应在加固前测点附近.因现场路基填筑存在一定的不均匀性,上述试验间的试验位置应尽可能靠近,以便于各试验指标之间的比较分析.采用斜向旋喷桩加固后,由于桩与土体共同分担荷载作用,加固后测试值按复合地基中桩与土的面积分担比进行桩-土复合计算.另外,在桩体上进行试验时,需要考虑到桩体自身的强度和刚度会比较大,若出现检测仪器接近极限状态时便终止试验.

造成欠密实的原因是多方面的,一方面我国早期重载铁路线路设计标准较低,填料和压实质量控制不严;另一方面重载铁路轴重大、运量大、行车密度高,导致路基填料在车振荷载作用下密实度下降较快.从图中还可以看出,加固后部分测点压实系数有所减小,分析认为这主要与压实系数 K 试验的试验位置及测试深度有关.由于高压旋喷桩通过浆液劈裂土体而形成水泥桩体,对路堤边坡浅部土体(灌砂法测试深度为 20 cm)的挤密作用有限.另外,对于浅部土体,施工时的机械振动对浅部土体的扰动也更为明显.

3 测试结果分析

3.2 轻型动力触探  $N_{10}$  试验

3.1 压实度 K 试验

根据《铁路工程地质原位测试规程》(TB10018—2003)中一般黏性土地基基本承载力  $\sigma_0$  与  $N_{10}$  的关系  $\sigma_0 = 8N_{10} - 20$ ,将加固前后被测土体的实测  $N_{10}$  值换算为地基基本承载力  $\sigma_0$ ,如图 3 所示.

图 2 为试验工点加固前后压实系数 K 分布图.从图中可以看出,试验段路基加固前后的压实系数  $K < 0.80$ ,小于重载铁路路基基床底层  $K \geq 0.95$  和基床以下填土  $K \geq 0.90$  的压实标准<sup>[15]</sup>,路基处于欠

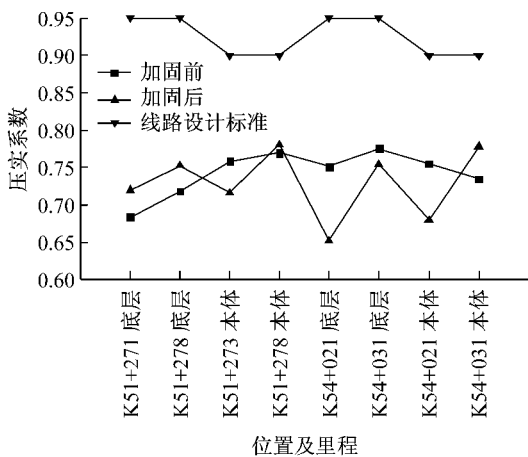


图 2 加固前后压实系数 K 分布图

Fig.2 Test results of the compaction coefficient K

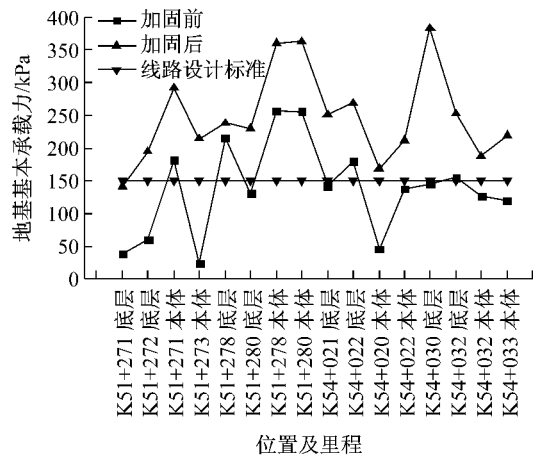


图 3 加固前后地基基本承载力  $\sigma_0$  分布图

Fig.3 Test results of the basic bearing capacity of foundation  $\sigma_0$

按朔黄重载铁路路基设计标准,基床底层及以下路堤地基承载力应 $\geq 150$  kPa.从试验结果来看,加固前超过 60%的测点地基承载力不满足设计标准要求,承载力较低,采用斜向高压旋喷桩加固后,各测点的地基承载力均满足或接近设计标准要求,路基承载力得到了显著提高.分析认为,斜向高压旋喷桩加固对路基桩周土有一定的挤密作用,旋喷高压注浆时浆液进入孔隙后会在路基中形成脉状或板状结构(这一点在边坡开挖地锚埋设坑的过程中得到了证实),使得探杆的贯入阻力增大,再加上桩的加筋复合作用,使得路基整体性增强,地基承载力大幅度提高.

### 3.3 平板载荷试验

平板载荷试验包括地基系数  $K_{30}$  试验、静态变形模量  $E_{v2}$  试验及动态变形模量  $E_{vd}$  试验等,主要用来表征路基的承载力和刚度.目前,重载铁路路基设计中并未采用  $E_{v2}$  和  $E_{vd}$  控制标准,但对于路基而言,静、动弹性模量是较为重要的力学和变形指标,因此,本次加固前后路基状态评价中对试验段路基的  $E_{v2}$  和  $E_{vd}$  值进行了检测与分析.

图 4 为加固前后地基系数  $K_{30}$  分布图,根据重载铁路路基压实标准<sup>[15]</sup>,基床底层及以下路堤  $K_{30}$  应大于  $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ .由图 4 可知,加固前地基系数  $K_{30}$  均不满足要求,加固后地基系数较加固前约提高了 44%~84%,但仍有少量测点  $K_{30}$  值不满足标准要求.

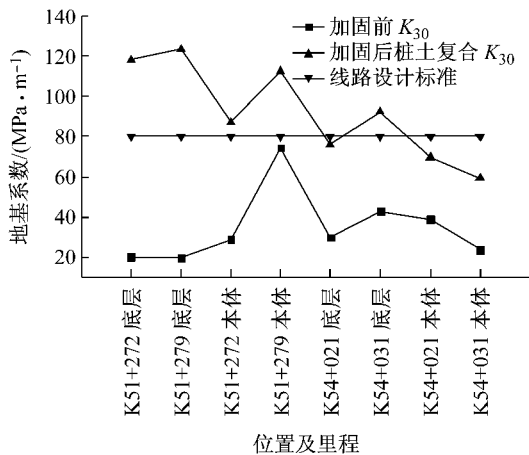


图 4 加固前后地基系数  $K_{30}$  分布图

Fig. 4 Test results of the foundation coefficient  $K_{30}$

图 5 和图 6 分别为加固前后静态变形模量  $E_{v2}$  和动态变形模量  $E_{vd}$  分布图.从图中可以看出,加固前试验段路基的  $E_{v2}$  测试值分布在 6.8~21.7 MPa 之间,加固后  $E_{v2}$  值提高了 39%~86%;加固前  $E_{vd}$  测试值分布在 7.2~14.7 MPa,加固后  $E_{vd}$  约提高了

22%~58%.结合《客运专线无砟轨道铁路设计指南》(铁建设函[2005]754号),建议在重载铁路路基基床底层及以下路堤检测试验中, $E_{v2}$ 以 30 MPa、 $E_{vd}$ 以 15 MPa 作为参考控制值.

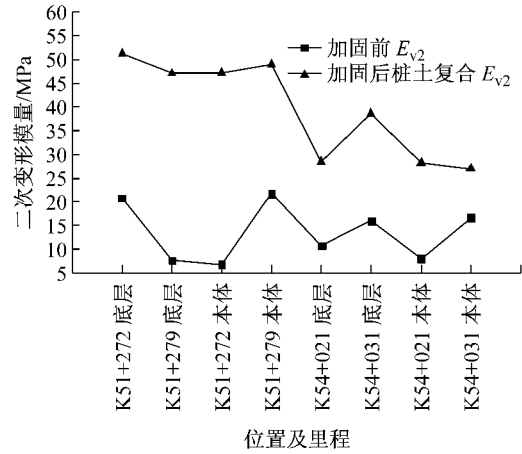


图 5 加固前后变形模量  $E_{v2}$  分布图

Fig. 5 Test results of the second modulus of deformation  $E_{v2}$

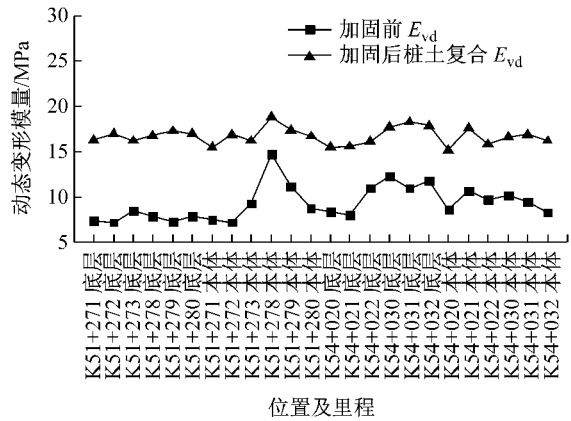


图 6 加固前后动态变形模量  $E_{vd}$  分布图

Fig. 6 Test results of the dynamic modulus of deformation  $E_{vd}$

平板载荷试验表明,斜向旋喷桩法加固既有线路基能显著提高路基的刚度和承载力.分析认为,路基刚度和承载力的提高一方面得益于旋喷桩的密实及脉状与板状胶结作用,更为重要的是,在复合地基中由于桩-土之间的相互作用(摩擦剪切作用)能将路基内附加应力的集中情况弱化,将桩及桩以下土体应力扩散至整个路基断面宽度,使得应力分布均匀,从而起到明显的加筋效果.正是由于斜向高压旋喷桩具有上述加固作用,使得加固后路基的刚度和承载力有了显著的提升.

### 3.4 地质雷达和弹性波探测

图 7 和图 8 分别为工点 II (K53+990~K54+

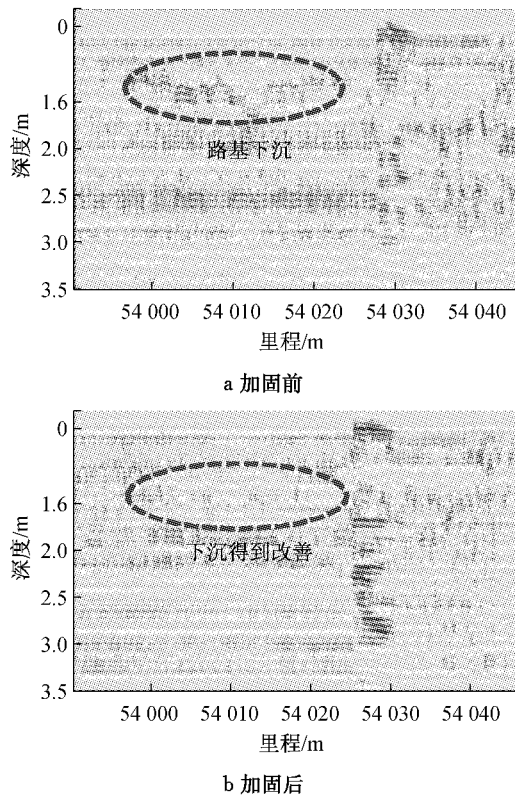


图 7 工点 II 雷达探测路基成像剖面  
Fig.7 Radar images of the subgrade profile of the test section II

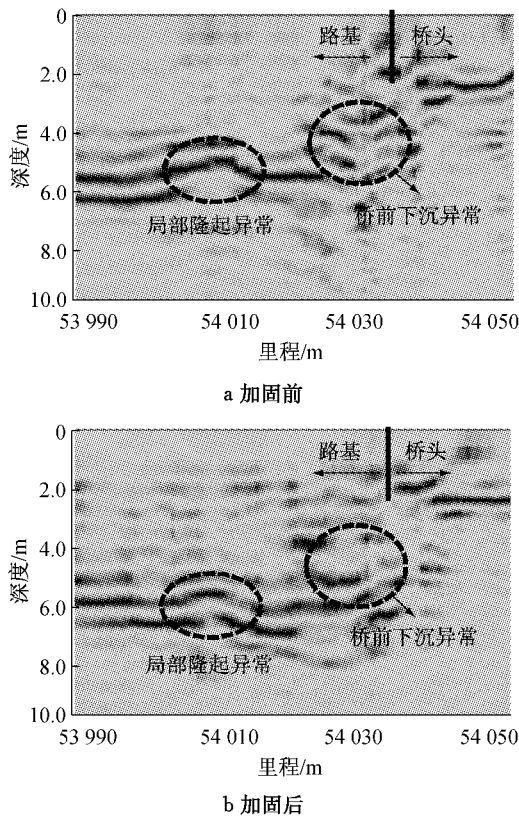


图 8 工点 II 弹性波探测路基成像剖面  
Fig.8 Elastic wave images of the subgrade profile of the test section II

090)加固前后的地质雷达和弹性波探测成像剖面图,从地质雷达探测结果来看,加固前 K54+000~K54+020 浅部路基存在局部下沉现象,加固后路基下沉现象得到明显改善.从弹性波探测结果来看,工点 II 路基在加固前主要存在的问题有两个:一是 K54+025~K54+035 桥前过渡段路基下沉,从剖面特征上表现为速度偏低,同相轴缺失或不连续;二是 K54+005~K54+015 区段的同相轴出现了隆起和错断,下部同相轴存在缺失.采用斜向旋喷桩加固后,桥头位置的同相轴过渡平滑,说明下沉问题得到改善,同时路基局部隆起异常也有明显改观.

地质雷达和弹性波探测结果表明,采用斜向高压旋喷桩加固路基后,试验段路基整体的密实度有所提高,这一点从弹性波和雷达反射面的平滑性和一致性都能得到体现.分析认为,高压喷射时部分浆液进入土粒之间的空隙和病害位置处,形成脉状和板状水泥结石体,具有充填改良作用.而高压旋喷注浆结束后,当水泥土混合浆液尚未凝结时,浆液将产生挤压力,对桩周土有一定的压密作用.特别地,对于图 1 中路基 45°扩散线范围内的路基,由于受到路基两侧斜向旋喷桩的共同加固作用,加固效果比路基 45°扩散线以外路基更好,密实度更高.

### 4 结论

结合朔黄重载铁路路基加固前后检测试验数据和斜向高压旋喷桩的加固机理,对斜向高压旋喷桩加固既有线路基的加固效果进行了探究,得到了以下结论:

- (1)轻型动力触探  $N_{10}$  试验、地基系数  $K_{30}$  试验、静态变形模量  $E_{v2}$  试验及动态变形模量  $E_{vd}$  试验结果表明,斜向高压旋喷桩能有效地提高路基的强度、刚度和地基承载力.
- (2)压实度  $K$  试验、地质雷达及弹性波探测结果表明,斜向高压旋喷桩能从整体上提高路基的密实度,但不同位置密实效果存在差别,加固后路基 45°扩散线以内密实度明显提高,过渡段路基下沉有所改善.
- (3)斜向高压旋喷桩能增强路基的整体性能,起到明显的加筋效果,是一种快速有效的既有线路基加固方法.

### 参考文献:

[1] 赵欣. 大秦线重载铁路路基质量评估理论与方法的研究[D].

- 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011.  
ZHAO Xin. Study on the assessment theory and measures of subgrade quality of Da-Qin heavy haul railway[D]. Beijing: School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, 2011.
- [ 2 ] 宫全美. 铁路路基工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.  
GONG Quanmei. Railway subgrade engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [ 3 ] Arulrajah A, Abdullah A, Bo M W, et al. Ground improvement techniques for railway embankments [ J ]. Ground Improvement, 2009, 162(13): 3.
- [ 4 ] 叶朝良,朱永全,郭京浩. 既有线路路基基床加固方法的讨论[J]. 路基工程,2006(3):63.  
YE Chaoliang, ZHU Yongquan, GUO Jinghao. Discussion about strengthening methods of existing railway subgrade bed[J]. Subgrade Engineering, 2006(3): 63.
- [ 5 ] 周顺华,王炳龙,宫全美. 土工格室加固基床的动应力传播原理[J]. 铁道学报,2003,25(1):96.  
ZHOU Shunhuan, WANG Binglong, GONG Quanmei. Principle of dynamic stress propagation in the subgrade treated by geocell[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 96.
- [ 6 ] 龚炼,王炳龙,杨龙才. 浙赣线提速路基基床承载力评估及加固措施[J]. 铁道建筑技术,2007(1):53.  
GONG Lian, WANG Binglong, YANG Longcai. Study on the bearing capacity and treatment method of subgrade for speed-raising subgrade of Zhejiang-Jiangxi railway line[J]. Railway Construction Technology, 2007(1): 53.
- [ 7 ] 王定举. 用斜向单管高压旋喷桩整治朔黄铁路路基病害[J]. 铁道建筑,2006(9):55.  
WANG Dingju. Application of inclined high-pressure jet grouting piles in subgrade diseases treatment of Shuo-Huang heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2006(9): 55.
- [ 8 ] 李懿,王连俊,丁桂伶,等. 朔黄重载铁路路桥过渡段加固路基的检测与分析[J]. 北京交通大学学报,2012,36(4):44.  
LI Yi, WANG Lianjun, DING Guiling, et al. Detection and analysis of subgrade reinforced in bridge-subgrade transition section of Shuo-Huang heavy haul railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(4): 44.
- [ 9 ] 杨新安,高艳灵,刘征. 论铁路既有线路基检测[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2363.  
YANG Xin'an, GAO Yanling, LIU Zheng. Inspection on railway track substructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supplement 1): 2363.
- [10] 方焘,刘新荣,耿大新,等. 既有线路基提速改造健康状态综合评价方法[J]. 西南交通大学学报,2012,47(4):591.  
FANG Tao, LIU Xinrong, GENG Daxin, et al. Comprehensive assessment method for health status of subgrade in existing line speed-raising reconstruction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(4): 591.
- [11] 程远水,朱忠林,张千里,等. 提速线路路基检测评估方法及适用条件分析[J]. 铁道建筑,2007(1):74.  
CHENG Yuanshui, ZHU Zhonglin, ZHANG Qianli, et al. Detecting methods and its application conditions of speeding railway subgrade[J]. Railway Engineering, 2007(1): 74.
- [12] 赵凤林,张健. 既有线路路基基床评价与测试研究[J]. 铁道工程学报,2011(4):15.  
ZHAO Fenglin, ZHANG Jian. Study on evaluation and test of road base of existing railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(4): 15.
- [13] 黄大维,杨有海,黄纪强,等. 戈壁粗粒土填料填筑铁路路基压实评价指标研究[J]. 中国铁道科学,2012,33(2):21.  
HUANG Dawei, YANG Youhai, HUANG Jiqiang, et al. Study on the assessment indexes of compaction quality for railway subgrade constructed by Gobi coarse-grained soil filler [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 21.
- [14] 狄宏规,冷伍明,赵春彦,等. 既有铁路路基  $K_{30}$  和  $E_{v2}$  检测辅助装置及方法[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(5):67.  
DI Honggui, LENG Wuming, ZHAO Chunyan, et al. Auxiliary devices and methods of  $K_{30}$  and  $E_{v2}$  tests on existing railway embankment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 67.
- [15] 阚叔愚,陈岳源,周锡九. 重载铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.  
KAN Shuyu, CHEN Yueyuan, ZHOU Xijiu. Heavy haul railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.