

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231007001

# 多次分段控制注浆钢花管高速公路软基加固应用\*

袁 坤

(中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,北京 100081)

**摘要:** 针对软土路基压缩性高、孔隙比大、天然含水率高、抗剪强度较低且工后易沉降等特点,依托潮惠高速公路K28+120~K28+700段软基加固抢险实际工程,提出使用多次分段劈裂注浆竖向钢花管微型桩快速处治技术,采用数值模拟软件建立钢花管加固深厚软土路基数值模型,研究不同桩间距对软基滑移处治效果的影响,结果表明:(1)竖向钢花管具有桩体及抗滑作用,多次分段控制注浆通过劈裂、挤密、置换提高深厚淤泥土的承载力及桩土摩阻力;(2)数值模拟分析表明多次分段控制注浆竖向钢花管纵向间距 $<1.5\text{ m}$ ,钢花管之间的相互协同作用明显,纵向间距 $>1.5\text{ m}$ ,钢花管之间的协同作用相对减弱。横向间距为 $1.0\text{ m}$ ,路基稳定性提高显著,当竖向钢花管横向间距 $>1.5\text{ m}$ ,路基稳定性系数的逐渐趋于平缓;(3)运营期监测结果表明,多次分段控制注浆竖向钢花管加固段的路基沉降基本趋于稳定,控制沉降效果明显,为类似工程整治提供借鉴。

**关键词:** 高速公路;多次分段控制注浆钢花管;数值分析;深厚软基

**中图分类号:** U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1428-11

## Multiple Segmented Control Grouting of Steel Flower Pipes in Highway Soft Subgrade Reinforcement Application

YUAN Kun

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited,  
Beijing 100081, China)

**Abstract:** In response to the characteristics of soft subgrade, including high compressibility, large porosity, high natural water content, low shear strength, and susceptibility to post-construction settlement, this study proposes a rapid treatment technique using multiple segmented splitting grouting of vertical steel flower pipe micro-piles. The method was applied in an emergency soft subgrade reinforcement project on the K28+120 to K28+700 section of the Chaozhou-Huizhou Expressway. Numerical simulation software was used to establish a numerical model of steel flower pipe reinforcement for deep soft subgrade, studying the impact of different pile spacing on the treatment effect of soft subgrade sliding. The results indicated that: 1) The vertical steel flower pipes exhibited both pile body and anti-sliding effects. Multiple segmented grouting improved the bearing capacity and pile-soil friction of deep silt soil through splitting, compaction and replacement. 2) Numerical simulations showed that

\* 收稿日期:2023-10-07;修回日期:2024-04-05

基金项目:中国铁道科学研究院集团有限公司青年基金(2022YJ107)、中国铁道科学研究院集团有限公司基金重点项目(2023YJ221)资助

作者简介:袁坤(1989—),男,高级工程师,博士。主要从事岩土工程地质灾害防治方面的研究。

E-mail: yuankun0616@163.com

when the longitudinal spacing of vertical steel pipes with multiple segmented grouting was less than 1.5 meters, the synergistic effect between pipes was significant. When the spacing exceeded 1.5 meters, the synergistic effect between the pipes weakened. A transverse spacing of 1.0 meter significantly improved subgrade stability, while spacing greater than 1.5 meters resulted in a gradual levelling off of the stability coefficient. 3) Monitoring results during the operational phase indicated that the settlement of the reinforced subgrade had stabilized, with noticeable control over settlement, offering valuable insights for similar projects.

**Keywords:** highway; multi-stage control grouting steel pipe; numerical analysis; deep soft subgrade

## 0 引言

由于软土具有强度低、含水量高、压缩性强等特点,即使采用复合地基,线路运营一段时间后,路基沉降仍可能发生在合理范围之外。此时,必须进行沉降处理,以确保线路的畅通<sup>[1-4]</sup>。日趋严格的施工后沉降控制标准为道路路基填筑、失稳变形和固结沉降分析带来新的机遇和挑战;特别是伴随我国土地复垦的快速发展,浅层软土、湖泊和沿海地区的地基处理和加固技术困难重重<sup>[5]</sup>。目前,国内外学者已对深厚软基滑移病害处治技术进行大量的研究,但投入在营运高速公路处治工程中的实践应用却较少。如何切实处治高速公路深厚软基滑移病害对提升高速公路运营稳定性和安全性具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

徐前卫等<sup>[8]</sup>研究各种灌浆方式下路基沉降变形、土壤侧向变形和孔隙水压力的演变规律,归结出灌浆对地层的扰动机理,提出桩底灌浆能够有效控制路基沉降,并在此基础上,给出合理注浆施工参数;刘汉龙等<sup>[9]</sup>综合分析现浇混凝土大直径管桩、浆固碎石、桩板结构等多种路基沉降控制技术,提出沉降控制的关键环节;王欢等<sup>[10]</sup>构建车辆竖向振动分析模型和有限元仿真模型,研究高速公路软土路基过渡段长度和分段不均匀沉降之间的关系;Q. Yang等<sup>[11]</sup>汇总多年来软土受循环荷载下的动态反映特征,分析总结软土在循环荷载条件下强度和刚度的退化、孔隙水压力变化和变形的累积,归纳总结软土细颗粒和低渗透率是造成路基病害的主要原因;王笑等<sup>[12]</sup>提出路基沉降蠕变“鲸鱼算法”,结合 Matlab 和 Abaqus 数值模拟软件,实现工后 10 年路基沉降预测;张玉芳等<sup>[13]</sup>通过大型模型试验提出多段控制注浆钢花管群桩结构可以在钢花管周围形成“树根状”水泥柱复合抗滑体,提高周围土体

的抗剪强度,同时也增强钢花管群桩结构的抗滑性能。

然而,多次分段控制注浆竖向钢花管技术处治深厚软基滑移病害,其荷载传递特征、沉降特性、注浆效果及桩身受力情况等尚不能完全确定,亟需现场试验与理论研究实证。本文依托潮惠高速公路 K28+130~K28+500 段应急抢险加固工程,基于深厚软基病害变形开裂特点对病害区域进行综合治理,提出使用多次分段控制注浆竖向钢花管群桩整治深厚软基变形加固技术,采用数值软件建立有限元模型,研究竖向注浆钢花管不同布设间距、注浆效果等因素对软基变形病害整治效果的影响,并通过长期监测验证控制注浆竖向钢花管加固软基效果。

## 1 工程地质条件

潮惠高速公路 T2 标段地属汕头市潮阳区,软土路基标段示意如图 1 所示。所在地区地形平坦。K28+123~K28+700 段路基灾害发生区域东侧为下关大桥,西侧临近关埠大桥,与榕江垂直距离 600 m,地下水含量丰富。根据勘察资料和现场调查,路堤填筑材料为碎石土,碎石成分为花岗岩,厚度约 7 m,路基中第四系厚度较大。路堤地层岩性特征由上至下分别为:耕植土( $Q_4^{pd}$ ),厚度 0.80~1.50 m;淤泥( $Q_4^{mc}$ ),厚度 19.00~23.80 m;淤泥质粉质黏土( $Q_4^{mc}$ ),厚度 0.50~2.60 m;粉质黏土( $Q_4^{al}$ ),厚度 3.30~6.00 m;粉砂( $Q_4^{al}$ ),厚度为 0.70 m;中砂( $Q_4^{al}$ ),厚度为 4.00 m;粗砂( $Q_4^{al}$ ),厚度为 3.20 m;砾砂( $Q_4^{al}$ ),厚度 1.20~3.50 m。路基所在区域雨量充沛,雨季为 3~10 月,年降雨量 1 650~2 740 mm。历年相对湿度平均为 84%。所在区域地下水类型为松散层孔隙潜水,其中砂层为主要含水层。



图1 潮惠高速公路T2标段示意

Fig.1 Schematic diagram of Section T2 of Chaohui Expressway

## 2 路基病害分析

### 2.1 路基病害情况

该段路基原设计方案为碎石换填联合管桩地基加固,管桩施工及路堤填筑基本完成时,路面发生纵向开裂(见图2),K28+123~K28+150段以及K28+450~K28+500段都不同程度上出现不均匀沉降,在K28+612处涵洞伸缩缝裂缝宽约10 cm(见图3),严重影响高速公路通车情况。



图2 路基纵向贯通裂缝宽1~7 cm

Fig.2 Longitudinal through cracks in the subgrade, 1~7cm wide



图3 涵洞伸缩缝裂缝宽10 cm

Fig.3 Cracks in culvert expansion joint, 10 cm wide

### 2.2 原因分析

该段路基病害变形严重,水平位移和沉降变形量超过工后沉降允许控制值,为摸清路基病害成因,采用钻探、静力触探等手段对该段路基进行现场试验检测。病害原因分析结果如下:

1)淤泥厚度较深,约为19.00~23.80 m,现场钻孔揭露淤泥的含水率高,承载力极低,压缩系数极大,同时前期施工碎石换填未达到淤泥层厚,致使路基始终存在较大沉降变形隐患。

2)路基填筑高度为7 m,长期重力荷载作用下导致底部深厚淤泥不均匀沉降,填筑路基出现路基失稳,最终表现为线路方向贯通裂缝。

## 3 注浆钢花管加固工程措施

### 3.1 软基加固方案

根据路基病害原因分析,提出使用多次分段控制注浆竖向钢花管技术对潮州至惠州高速公路T2标段K28+123~K28+700软土路基进行加固。断面布置如图4所示。

K28+123~K28+700段设置22排深层竖向注浆钢花管,钢花管采用 $\Phi 89 \times 3.75$  mm钢管制作,垂直线路方向间距1.5 m,平行线路方向间距2.4 m,以穿过连续砂层或粉质黏土厚度 $\geq 6$  m来控制钻孔深度。

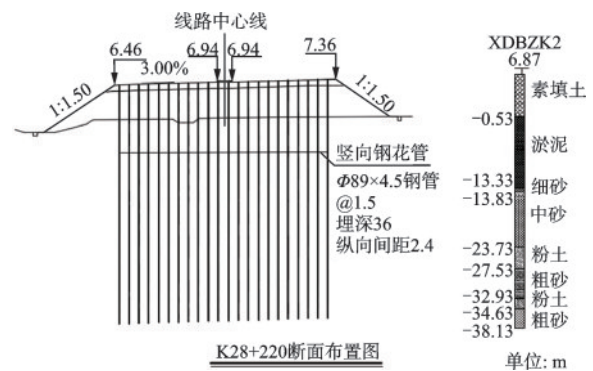


图4 软基加固断面布置示意

Fig.4 Cross-sectional layout of soft subgrade reinforcement

### 3.2 多次分段控制注浆钢花管加固机理

#### 3.2.1 结构形式

多次分段控制注浆钢花管结构是由钢花管、对中环、二次劈裂注浆管、三角形底托架、一次注浆管、橡胶注浆枪头、钢管底托架等组成,如图5所示。

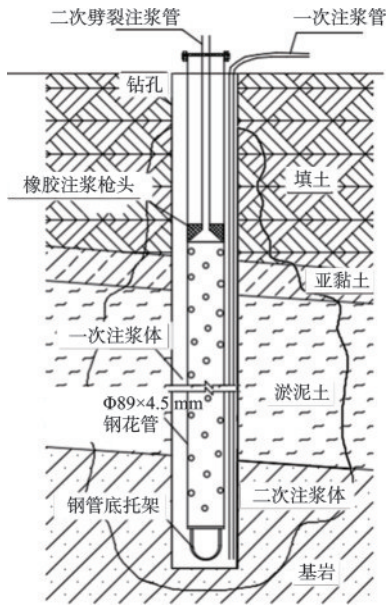


图5 多次分段控制注浆钢花管示意

Fig.5 Schematic diagram of multiple segmented control grouting of steel flower pipes

### 3.2.2 加固机理及参数设计

通过改善软土的强度特性加固路基,减小路基的沉降变形和失稳破坏,同时采用合理的有控注浆原则及施工控制技术,才能够确保注浆施工和整治后高速运营安全<sup>[14-15]</sup>。多次分段控制注浆竖向钢花管加固软土路基技术加固机理如下:

1) 桩体作用:钢花管通过多次分段劈裂注浆形成微型桩,能够提供一定的侧摩阻力抵抗路基下沉。根据以往经验<sup>[16]</sup>,多排注浆钢花管按照 $1.5\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 间距布设构成钢花管微型群桩,具有微型群桩效应。同时钢花管能起到软土路基加筋作用,再结合钢花管内高压劈裂注浆,提高软土路基强度,其群桩效应更加明显。

2) 渗透注浆作用:在常压作用下,管外一次注浆浆液充填钻孔与孔壁之间的空隙,浆液渗入到钢花管周围土体中,对土体中土颗粒之间存在的孔隙、气体、水进行排挤或充填,而不会破坏土颗粒之间原有的结构。可根据渗透注浆理论中球形扩散理论来计算相应的扩散半径,具体公式如下:

$$P_u = \sigma_c + 2K_0\gamma h(1-\nu) \quad (1)$$

式中, $\sigma_c$ 为软土抗压强度; $\gamma$ 为土体重度; $H$ 为注浆孔深度; $K_0$ 为静止侧向压力系数; $\nu$ 为泊松比。

考虑到渗透注浆的特点,注浆压力应保持适当,过高的压力会导致浆液的渗透转变为压密或劈裂现象。根据实际施工情况,我们可以将地基视为

半无限空间,在注浆过程中,应将灌浆压力控制在一定的极限值 $P_u$ 以下,以确保浆液在土壤中发生渗流。这样的控制策略有助于保持注浆效果的稳定性。

3) 挤密作用:针对二次高压劈裂注浆技术,钢花管自身被用作注浆通道。在首次注浆8~12小时后,即管外浆液初凝时,对钢花管进行高压劈裂注浆。第二次高压浆液通过钢花管表面的注浆眼劈裂初凝的初次注浆体,并形成新的注浆通道,不断向周围土体延伸。这样的处理可以实现对周围岩土体的挤密、充填和置换作用,从而改变软土的特性。

通过施加高压作用于水泥浆,对周围淤泥土体产生附加压力,使土体发生剪切破坏。浆液劈裂扩散到四周土体,最终在淤泥土体中形成交错联接的网络状或条带状浆脉结石体。这些结石体形成一种骨架结构,同时替代淤泥土中的孔隙、水分和气体等,有效增强淤泥土体的强度和承载力。

在选择劈裂注浆参数时,确保在一定的注浆时间和注浆压力下各钢花管之间能够形成浆液联接通道以提高工程效率至关重要。因此,采用基于宾汉姆流体流变方程和渗流运动方程推导出的渗透注浆形式扩散参数理论公式<sup>[17]</sup>(见式(2)),以及扩散理论模型(见图6)。

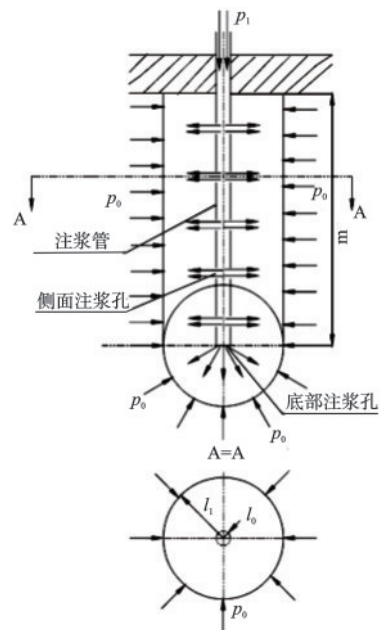


图6 宾汉姆流体的柱-半球形扩散理论模型

Fig.6 Column-hemispherical diffusion theory model of Bingham fluid

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{2(a+1)\varphi l_1^3 \beta}{(5+4a)tKl_0} + \frac{4}{3}\lambda(l_0 - l_1) \quad (2)$$

式中,  $\Delta p$  为注浆压力差;  $p_1$  为注浆压力;  $p_0$  为注浆点处地下水压力;  $a$  为注浆管上侧面的注浆孔数;  $\varphi$  为被注浆介质或材料的孔隙率;  $l_1$  为第  $t$  时刻宾汉姆流体在半球体部分的扩散半径;  $\beta$  为宾汉姆流体的塑性黏度与水的黏度之比, 现场采用毛细管黏度计或旋转黏度计等流体黏度计进行测量、分析与计算获取;  $t$  为注浆时间;  $K$  为被注介质或材料的注浆系数, 通常可以使用现场注水试验获得参数值;  $l_0$  为注浆管半径;  $\lambda$  为启动压力梯度, 是在获得被注介质或材料空隙度  $\varphi$  与渗透系数  $K$  的基础上, 根据式(3)分布计算得到:

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{\frac{8K\mu}{\varphi}} \\ \lambda = \frac{2\tau_0}{r_0} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\tau_0$  为屈服应力, 同样通过毛细管黏度计现场测定。

根据以上公式, 结合现场施工情况, 即可在已知注浆压力  $p_1$  与注浆点地下水压力差  $\Delta p$  条件下, 求出注浆体在现场土体中的扩散半径  $l_1$ 。通常认为, 当  $l_1$  大于钢花管最大间距的一半时, 即可认定钢花管劈裂注浆达到互相连接状态, 在软弱土层中形成网络状或条带状的浆脉通道。

4) 路基侧向抗滑作用<sup>[18-20]</sup>: 通过竖向钢花管对软土路基进行加固, 竖向钢花管桩群能够承担一定的抗剪强度, 相较于传统一次注浆, 多次分段控制注浆型钢花管微型桩的单桩水平承载力有明显提高, 能够有效的控制路基侧向滑动, 同时多次劈裂注浆将滑坡推力作用在钢花管桩的受力点下移, 改善滑坡推力的作用方式, 提高路基抵抗侧向失稳能力。

## 4 数值模拟分析

### 4.1 数值模型建立

以施工图设计断面 K28+620 为背景, 应用 Plaxis 2D 有限元软件建立模型<sup>[21-23]</sup>。路基面宽 33 m, 为土层界限和边界范围, 土体单元形状采用平面应变三角形单元, 钢花管采用数值模拟提供的 Embed-

ded Beam Row 单元。左侧和右侧边界的水平位移固定, 底部边界固定, 地下水位设为距地面 2 m, 在整体区域施加重力场。有限元网格模型如图 7 所示。

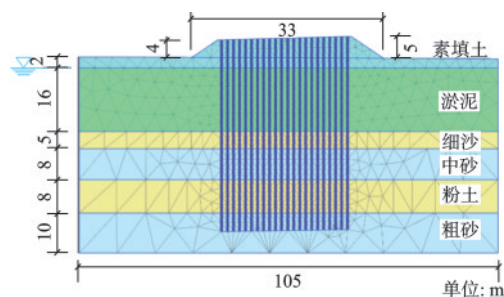


图7 模型网格划分

Fig.7 Model meshing diagram

### 4.2 参数选取

软土的本构模型采用土体硬化(HS)模型<sup>[24-26]</sup>, 根据现场取样检测, 软土路基力学指标参数见表 1。

表 1 软土路基力学指标参数

Table 1 Mechanical properties of soft subgrade

参数	素填土	淤泥	细沙	中砂	粉土	粗砂
重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	20	17	20	20	19	20
黏聚力/kPa	20	3	16	14	21	11
内摩擦角/(°)	30	5	18	16	11	12
弹性模量/MPa	50	1.5	4	5	5	3
泊松比	0.4	0.4	0.35	0.35	0.4	0.35

### 4.3 数值模拟结果

#### 4.3.1 路基填筑(回填土体但未施工钢花管)

##### (1) 沉降变形

淤泥地基上共计回填高 7 m 土体, 根据图 8 中填筑路基总位移云图显示重力荷载作用下, 土体竖向沉降总位移为 1.491 m。

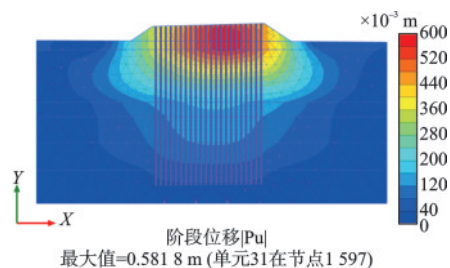


图 8 填筑路基沉降位移云图

Fig.8 Settlement displacement nephogram of filled subgrade

(2)路基稳定性稳定性系数

使用Plaxis数值模拟软件中强度折减法计算得到未施工钢花管时的路基稳定性系数 $F_s=0.94$ ,路基填筑后数值模型的破坏模式如图9所示。

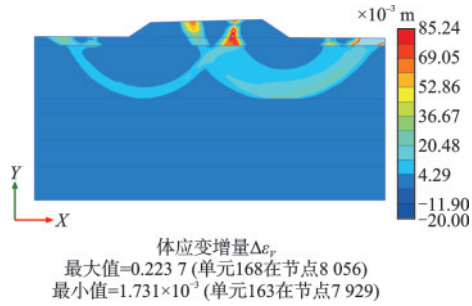


图9 路基填筑后破坏模式

Fig.9 Failure mode diagram of subgrade after filling

根据路基填筑后破坏模式图可得,软基条件下填筑路基单元体应变增量最大值在路基中线左右两侧近似对称分布,表现形式为路面单元体应变增量较大,与实际情况下路基出现贯通裂缝破坏情况相符。

4.3.2 竖向钢花管加固填筑路基

(1)钢花管桩体作用(不考虑注浆效果)

只考虑竖向钢花管的作用,不考虑注浆效果,竖向钢花管间距按照1.5 m布设,加固后的路基稳定性系数 $F_s=1.143$ ,沉降位移为0.58 m,与未施加竖向钢花管相比稳定性系数提高了21.6%。加固后沉降位移云图如图10所示,钢管侧摩阻力如图11所示,侧摩阻力最大值为7 kPa,在淤泥侧摩阻力值极低,几乎为零。

(2)考虑钢花管和注浆共同作用

通过在现场劈裂注浆后进行钻探取样。结果显示经过提升后的淤泥强度指标黏聚力 $C=5$  kPa,内摩擦角 $\varphi=6^\circ$ 。将这些提升后的指标代入模型计

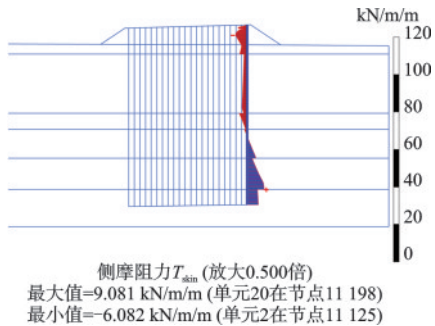


图10 路基沉降位移云图

Fig.10 Settlement displacement nephogram of subgrade

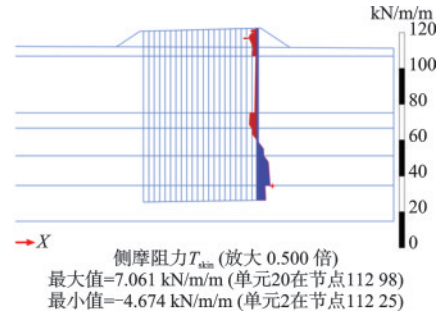


图11 钢花管侧摩阻力

Fig.11 Lateral friction of steel flower pipes

算得到路基稳定性系数 $F_s=1.52$ ,沉降位移为0.38 mm,与未施工钢花管相比稳定性系数提高了61.7%。注浆条件下淤泥强度改善后的沉降位移如图12所示。

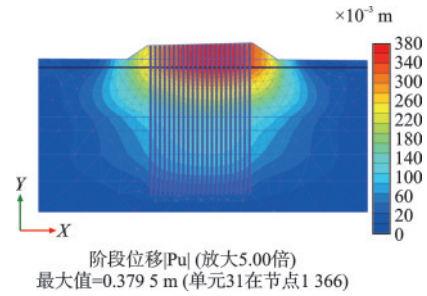


图12 钢花管和注浆共同作用下沉降位移云图

Fig.12 Settlement displacement nephogram of the combined action of steel flower pipe and grouting

注浆后钢管侧摩阻力如图13所示,侧摩阻力最大值为9 kPa,钢花管在淤泥中侧摩阻力值明显升高,最大值为2.8 kN/m<sup>2</sup>。

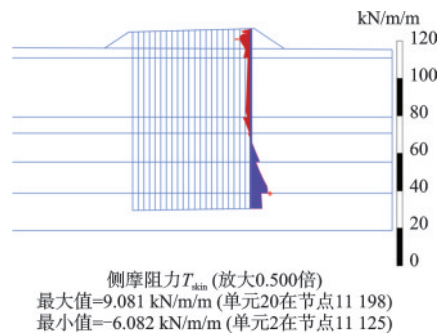


图13 注浆后钢花管侧摩阻力

Fig.13 Lateral friction of steel flower pipes after grouting

4.4 影响因素分析

影响多次分段控制注浆钢花管加固软基效果的主要因素有:注浆效果、竖向钢花管间距、竖向钢花管排距。

以高速公路线路方向为纵向,高速公路垂直线路方向为横向,通过改变不同注浆效果、不同钢管花管间距对路基稳定性进行数值分析,主要分为以下工况进行计算:

(1)横向间距是1.0 m,注浆效果按5%、10%、15%、20%,纵向间距调整为1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m;

(2)横向间距是1.5 m,注浆效果按0%、5%、10%、15%、20%,纵向间距调整为1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m;

(3)横向间距是2.0 m,注浆效果按5%、10%、15%、20%,纵向间距调整为1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m。

#### 4.4.1 不同注浆效果对路基稳定性的影响

综合现场劈裂注浆后的土体取样、强度检测效果和过往注浆工程经验<sup>[27]</sup>,进行综合分析。劈裂注浆提高淤泥的强度按提高5%、10%、15%和20%4种工况考虑,路基稳定性具体计算结果如图14所示,劈裂注浆对路基稳定性提高率如图15所示,路基稳定性提高系数=(劈裂注浆路基稳定性系数-未劈裂注浆稳定性系数)/劈裂注浆路基稳定性系数。

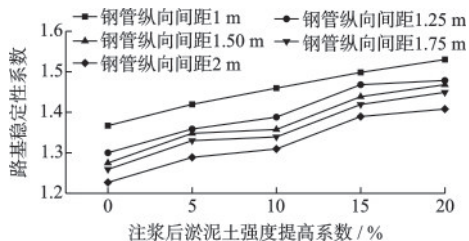


图14 不同注浆效果对路基稳定性系数的影响

Fig.14 Influence of different grouting effects on subgrade stability coefficient

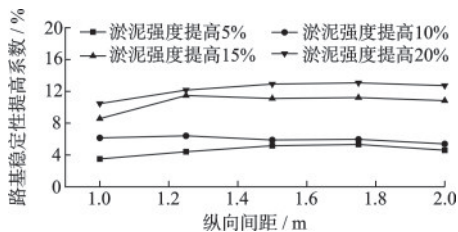


图15 不同纵向间距对路基稳定性提高系数的影响

Fig.15 Influence of different longitudinal spacing on the coefficient of subgrade stability improvement

由图14可知:①在同种间距条件下,路基稳定性系数随着劈裂注浆对淤泥强度指标提高率的增大而增大;②在同种注浆效果条件下,路基稳定性

随竖向钢花管纵向间距的增大而减小;③钢花管纵向间距为1 m时,路基稳定性显著提高,且随着劈裂注浆对淤泥强度指标提高率的增大而增大。

由图15可知,路基稳定性系数增长速率随着纵向间距的增大而呈现出先增大后减小,纵向间距为1.5 m时,路基稳定性提高系数最高,能达到13%。因此,建议在设计软基加固时,多次分段控制注浆竖向钢花管纵向间距1.5 m。

#### 4.4.2 不同纵向间距对路基稳定性的影响

为研究不同纵向间距对路基稳定性的影响,通过数值模拟按横向间距为1.5 m,纵向间距分别为1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m 5种工况进行计算分析,分析结果如图16所示。

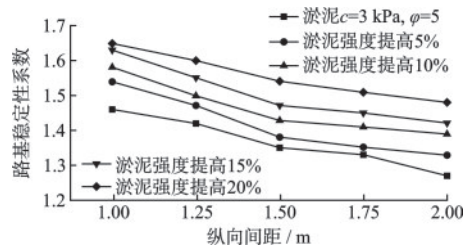


图16 不同纵向间距对路基稳定性系数的影响

Fig.16 Influence of different longitudinal spacing on subgrade stability coefficient

由图16可知,在同种间距条件下,路基稳定性系数随着劈裂注浆对淤泥强度指标提高率的增大而增大;在同种注浆效果条件下,路基稳定性随着竖向钢花管纵向间距的增大而减小,路基稳定性系数在纵向间距为1.5 m处发生转折,在纵向间距1.0~1.5 m时,路基稳定性系数减小速率快,在1.5~2.0 m时,路基稳定性系数减小趋于平缓。结果表明,间距<1.5 m时,竖向钢花管与竖向钢花管之间相互协同作用明显,间距>1.5 m,竖向钢花管与竖向钢花管之间协同作用相对减弱。

#### 4.4.3 不同横向间距对路基稳定性的影响

为研究不同横向间距对路基稳定性的影响,通过数值模拟按纵向间距按1.0 m,横向间距分别为1.0、1.5、2.0 m 3种工况进行计算分析,分析结果如图17所示。

由图17可知,在同种横向间距条件下,路基稳定性系数随着劈裂注浆对淤泥强度指标提高率的增大而增大;在同种注浆效果条件下,路基稳定性随着竖向钢花管纵向间距的增大而减小。当竖向钢花管横纵向间距都为1.0 m,路基稳定性提高显

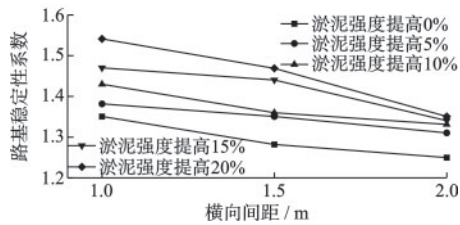


图 17 不同横向间距对路基稳定性系数影响

Fig.17 Influence of different transverse spacing on subgrade stability coefficient

著,当竖向钢花管横向间距 $>1.5$  m,路基稳定性系数逐渐趋于平缓。

#### 4.4.4 不同间距对路基沉降的影响

为研究不同间距对路基沉降的影响,通过数值模拟按横向间距 1.0、1.5 m,纵向间距分别为 1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m 10 种工况进行计算分析,分析结果如图 18 和图 19 所示。

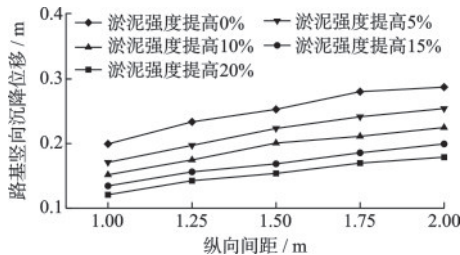


图 18 横向间距 1.0 m,不同纵向间距路基稳定性系数曲线图  
Fig.18 Curves of subgrade stability coefficient with transverse spacing of 1.0 m and different longitudinal spacings

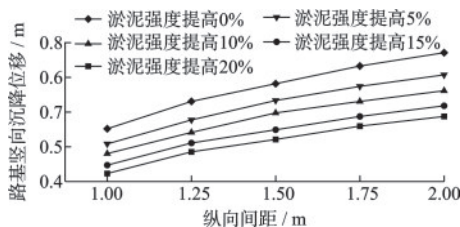


图 19 横向间距 1.5 m,不同纵向间距路基稳定性系数曲线图  
Fig.19 Curves of subgrade stability coefficient with transverse spacing of 1.5 m and different longitudinal spacings

由图 18 和图 19 可知:①在同种横向间距条件下,路基沉降位移随着劈裂注浆对淤泥强度指标提高率的增大而减小;在同种注浆效果条件下,路基沉降位移随着竖向钢花管纵向间距的增大而增大;②竖向钢花管横向间距 1.0 m 的路基沉降位移远小于横向间距为 1.5 m,表明横向间距降低能够有效减小路基沉降。

## 5 工程效果评价

为验证多次分段控制注浆竖向钢花管处治高速公路软基的治理效果及为公路竣工验收、公路建设提供数据基础,施工完成后,对 K28+240~K28+590 段反压联合竖向钢花管施工区域、K27+920~K28+030 段反压联合调坡处理区域进行监测,累计监测周期 36 个月。

监测方案每个断面布设 5 个监测点,分别为 3 个沉降位移监测点和 2 个深部位移监测点,具体监测方案如图 20 所示。

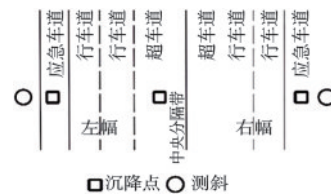


图 20 K27+920~K9+030 段路基监测平面布置

Fig.20 Subgrade monitoring layout of Section K27+920 to K9+030

表面沉降采用天宝电子水准仪测量,侧向位移采用 CX-06B 测斜仪观测,现场监测如图 21 所示,表面沉降观测采用相对高程计算,监测频率根据现场实际情况和后期路基加固处理及路面情况动态调整,累计监测结果见表 2,累计沉降位移如图 22 所示,累计水平位移如图 23 所示。

根据图 22 和图 23 可得,K28+240~K28+590 段使用多次分段控制注浆竖向钢花管加固后的路基沉降位移和水平位移改善明显,多次分段控制注浆竖向钢花管加固的路基沉降速率 25.2~35.5 mm/a,水平位移速率 0.1~16.6 mm/a,其他区域沉降速率 70.2~174.1 mm/a,水平位移速率 15.3~90.1 mm/a。水平位移及沉降速率与未使用多次分段控制注浆竖



图 21 路面沉降和路基水平位移现场观测

Fig.21 Field observation of pavement settlement and horizontal subgrade displacement

表2 K27+911~K29+061路段施工方案汇总表  
Table 2 Summary of construction plan for K27+911~K29+061 road section

断面设置	施工期加固设计方案		
断面号	左幅反压情况	右幅反压情况	其他措施
K27+920 关埠大桥头	反压	反压	左右幅调坡处理
K28+030	反压	反压	左右幅调坡处理
K28+240	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+280	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+340	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+410	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+470	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆, 右幅轻质土
K28+530	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+590	反压	不反压	右幅路面钢花管注浆
K28+900 (28857中桥头)	反压	反压	右幅轻质土, 左右幅调坡处理
K28+970	反压	反压	右幅轻质土
K29+030 下底大桥头	反压	反压	右幅轻质土, 坡脚 80 m 钢管桩, 左右幅调坡处理

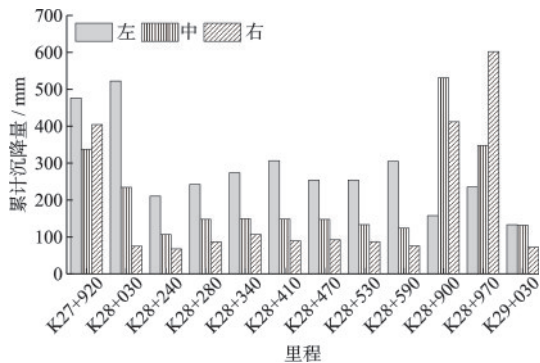


图22 K27+920~K29+030段路基累计沉降量  
Fig.22 Cumulative settlement of subgrade for Section K27+920 to K29+030

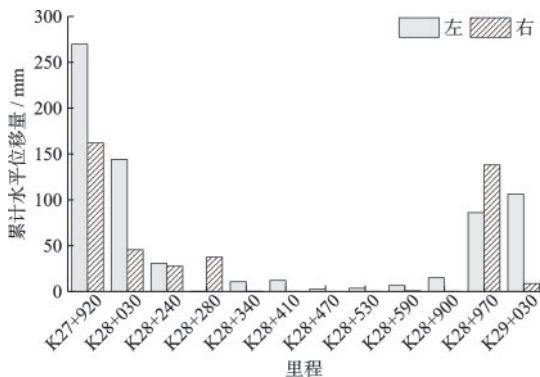


图23 K27+920~K29+030段路基累计水平位移量  
Fig.23 Cumulative horizontal displacement of subgrade for Section K27+920 to K29+030

向钢花管加固方案相比大幅降低,表明多次分段控制注浆竖向钢花管加固深厚层软土路基效果显著。

## 6 结论

(1)潮惠高速公路路基病害主要原因为路基淤泥厚度较大,淤泥承载力极低,压缩系数极大,前期碎石换填未完全排除淤泥,深部换填不到位导致路基沉降变形。

(2)多次分段控制注浆竖向钢花管既具有桩体作用,又对软土路基进行渗透、挤密和劈裂注浆,改变软土中孔隙气压和孔隙水压,同时注浆体在软土中形成结石体构成网状骨架结构,提高软土的强度和承载力,设计参数明确,加固效果明显。

(3)数值分析表明多次分段控制注浆竖向钢花管加固软土纵向间距 $<1.5\text{ m}$ ,竖向钢花管之间的协同作用明显,间距 $>1.5\text{ m}$ ,竖向钢花管之间的协同作用相对减弱。横向间距为 $1.0\text{ m}$ ,路基稳定性提高显著,当竖向钢花管横向间距 $>1.5\text{ m}$ ,路基稳定性系数的逐渐趋于平缓,综合考量得到最优组合为横向间距 $1.5\text{ m}$ 、纵向间距 $1\text{ m}$ 。

(4)运营期间,路基沉降基本趋于稳定,表明多次分段控制注浆钢花管降低沉降及水平位移效果明显,施工完成后立即见效,滞后性弱。且同时具有施工便捷、快速等优点。

## 参考文献:

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.  
Liu H L, Zhao M H. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115. (in Chinese)
- [2] 张玉芳, 魏少伟, 李健, 等. 道路边坡灾害整治新技术及应用[C]//2018世界交通运输大会论文集. 北京: [s.n.], 2018:856-865.  
Zhang Y F, Wei S W, Li J, et al. New technology and application of road slope disaster prevention [C]//Proceedings of the China Highway Society Conference. Beijing: [s.n.], 2018:856-865. (in Chinese)
- [3] 商拥辉, 陈钊锋. 不同试验条件下高速铁路路基床累积变形差异探究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 357-362.  
Shang Y H, Chen Z F. Study on Accumulative defor-

- mation difference of high railway subgrade bed under different test conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(2): 357-362. (in Chinese)
- [4] Zhang Y, Wan L, Li X. The deformation characteristics of soft clay under cyclic loading[C]//International Conference on Structures and Building Materials(ICS-BM). Switzerland: Trans Tech Publications, 2012. 1709-1712.
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3):1-49. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese)
- [6] 冯玉涛, 王全才, 刘军. 山区高速公路富水陡坡高路堤病害原因及其处治技术[J]. *灾害学*, 2020, 35(1): 90-93. Feng Y T, Wang Q C, Liu J. Causes and treatment techniques of high embankment diseases on steep slope with rich water in mountainous areas [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(1):90-93. (in Chinese)
- [7] Zuo S, Li T Y, Jiang P, et al. Study on the in situ test of the treatment effect for the riverbank soft soil subgrade in the Hetao Area[J]. *Geofluids*, 2022(7):1-12.
- [8] 徐前卫, 苏培森, 唐卓华, 等. 软土路基沉降病害治理的注浆加固技术及其试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增2):268-273. Xu Q W, Su P S, Tang Z H, et al. Numerical analysis on the settlement mechanism of high-speed railway subgrade and the reinforcement by grouting[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(Sup2): 268-273. (in Chinese)
- [9] 刘汉龙, 顾湘生. 城际快速铁路软土路基沉降控制新技术[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(增1): 181-186. Liu H L, Gu X S. New technology for settlement control of soft soil roadbed on intercity rapid railway[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(Sup1): 181-186. (in Chinese)
- [10] 王欢, 王选仓, 高志伟. 高速公路软基过渡段均衡沉降处治[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(7):50-54. Wang H, Wang X C, Gao Z W. Treatment of highway soft foundation transition section isostatic settlement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(7):50-54. (in Chinese)
- [11] Yang Q, Ren Y, Niu J, et al. Characteristics of soft marine clay under cyclic loading: a review[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(3): 1027-1046.
- [12] 王笑, 陈辉, 王赵明, 等. 考虑软土蠕变效应的路基沉降有限元反演分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(3): 460-466. Wang X, Chen H, Wang Z M, et al. Finite element inverse analysis for soft soil subgrade settlement considering creep behavior[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(3): 460-466. (in Chinese)
- [13] 张玉芳, 魏少伟, 周文皎, 等. 多次分段注浆钢花管桩群结构抗滑性能模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(5):982-992. Zhang Y F, Wei S W, Zhou W J, et al. Model test study on anti-sliding behaviours of multiple segmented grouting steel pile group structure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(5):982-992. (in Chinese)
- [14] 刘鹏飞, 梁树文, 郑亮亮. 帷幕注浆加固法在高含水率黄土隧道中的应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(4): 1137-1144. Liu P F, Liang S W, Zheng L L. Application of curtain grouting reinforcement technique in tunnel with high water content loess stratum [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(4): 1137-1144. (in Chinese)
- [15] 李坛. 高速铁路软土路基病害机理分析及整治技术[J]. *铁道建筑技术*, 2019(7):125-129. Li T. Mechanism analysis of soft soil subgrade disease in high-speed railway and related treatment technology [J]. *Railway Construction Technology*, 2019(7): 125-129. (in Chinese)
- [16] 周文皎, 魏少伟, 张玉芳. 多次分段注浆钢花管单桩抗滑性能模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4412-4420. Zhou W J, Wei S W, Zhang Y F. Model test study on anti-sliding performance of multiple segment grouting steel-tube [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4412-4420. (in Chinese)
- [17] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 宾汉姆流体柱-半球形渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(增2):47-53. Yang Z Q, Niu X D, Hou K P, et al. Study on diffusion parameters of bingham fluid based on column-hemispherical penetration grouting [J]. *Journal of Sichuan University*, 2015, 47(Sup2): 47-53. (in Chinese)
- [18] 施峰. PHC管桩荷载传递的试验研究[J]. *岩土工程学*

- 报, 2004, 26(1): 95-99.
- Shi F. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 95-99. (in Chinese)
- [19] 李文, 蒋丽君, 李振存, 等. 花管注浆法在半填半挖路基沉陷处治中的应用研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2):75-78.
- Li W, Jiang L J, Li Z C, et al. Application research of steel pipe grouting method in treatment of subsidence of semi-filled and semi-excavated roadbed [J]. Journal of China&Foreign Highway 2014, 34(2): 75-78. (in Chinese)
- [20] 范家玮, 张玉芳, 周文皎. 黄土铁路路堤滑坡破坏机制与防治技术研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4):772-783.
- Fan J W, Zhang Y F, Zhou W J. Research on the failure mechanism and prevention technology of loess railway embankment landslide[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(4):772-783. (in Chinese)
- [21] Ariyaratne P, Liyanapathirana D. Review of existing design methods for geosynthetic-reinforced pile-supported embankments [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(1): 17-34.
- [22] Demir S, Özener P. Numerical investigation of seismic performance of high modulus columns under earthquake loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18(4):811-822.
- [23] 律文田, 王永和, 冷伍明. PHC管桩荷载传递的试验研究和数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 466-470.
- Lyu W T, Wang Y H, Leng W M. Testing and numerical analysis of load transfer mechanism of PHC pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 466-470. (in Chinese)
- [24] 顾绍付, 刘维正, 石志国, 等. 在役高速公路深厚软基滑移病害微型桩处治分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6):43-51.
- Gu S F, Liu W Z, Shi Z G, et al. Stability analysis of micropile treatment deep soft foundation for in-service highway against sliding [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 43-51. (in Chinese)
- [25] 王杰, 李迪安, 田宝吉, 等. 新型桩-土-撑组合支护体系工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增2): 93-96.
- Wang J, Li D A, Tian B J, et al. Theoretical analysis and engineering application of new pile-soil-support system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup2):93-96. (in Chinese)
- [26] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- Wang W D, Wang H R, Xu Z H. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290. (in Chinese)
- [27] 孙轶轩, 于佳琪, 令狐勇生, 等. 高速铁路黄土路基注浆扩散范围模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(11): 122-126.
- Sun Y X, Yu J Q, Linghu Y S, et al. Experimental study on diffusion range model of grouting in loess subgrade of high speed railway [J]. Railway Engineering, 2023, 63(11): 122-126. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)