

# 基于非均质地层模型的注浆微型桩加固路基效果分析

周珂<sup>1,2</sup>,雷进生<sup>1,2\*</sup>,刘金鑫<sup>2</sup>,刘婉纯<sup>2</sup>,石智强<sup>2</sup>,党润萌<sup>2</sup>

(1.防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002;2.三峡大学 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**针对路基沉降等公路路基病害治理问题,该文考虑病害路基土性参数的空间非均质性,对注浆微型桩加固路基特性进行分析。基于随机分形算法生成空隙率、弹性模量、渗透系数的随机分布剖面图,构建非均质地层模型,对路基进行注浆扩散模拟;基于注浆扩散计算结果,分析注浆微型桩加固路基的作用效果。结果表明:由于地层物理参数分布的不均匀性,注浆浆液扩散边界和固化区域分布不规则;浆液充填桩体周围土层孔隙,硬化并胶结形成结石体,可以明显改善桩周土的物理力学性能,提高桩侧摩阻力和桩端阻力;注浆微型桩加固后的路基在荷载作用下的位移沉降量明显降低,路基加固后承载能力明显提高。

**关键词:**路基工程;路基加固;数值模拟;注浆微型桩;非均质地层

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## 0 引言

资料显示,中国高速公路由于路基病害造成的路面早期病害占60%以上<sup>[1-2]</sup>。路基沉陷<sup>[3-4]</sup>、边坡滑塌<sup>[5]</sup>、碎落和崩塌等常见的路基病害常导致路面病害,需采用适当措施进行病害路基的修复加固。周德泉等<sup>[6]</sup>、朱登元等<sup>[7]</sup>、徐前卫等<sup>[8]</sup>、祝争艳等<sup>[9]</sup>将注浆技术与路基加固理论相结合,利用注浆手段加固病害路基,取得了较好的治理效果。

路基土体在振动荷载作用下会产生液化、流变,导致路基发生竖向和侧向变形,单纯的注浆加固不能完全解决病害路基的侧向变形问题。微型桩通常用于建筑物的纠偏、基础加固、滑坡治理以及基坑或边坡的支护<sup>[10-15]</sup>,利用注浆微型桩进行路基的注浆加固能够充分发挥浆液与桩体自身的作用,有效解决路基沉降变形问题。

土具有原位变异性<sup>[16]</sup>与非均质性,土体物理力学特征及空间分布呈非均匀性<sup>[17-18]</sup>。病害路基土体物性指标及空间分布特征影响浆液运动扩散范围,针对病害路基土体物理力学参数空间非均质性,将路基地层的特征和特性视为随机过程,构建非均质的路基地层

模型,是分析病害路基地层内浆液运动扩散特性和评估注浆微型桩加固路基效果的重要方法。

本文从浆液加固与桩体作用两方面进行注浆微型桩加固路基的机理分析,并运用多物理场耦合软件构建非均质路基地层模型,开展注浆微型桩加固病害路基的数值模拟,分析采用微型桩进行非均质路基地层条件下注浆加固前后土层物性参数变化,以及路基在荷载作用下的位移变化,进行微型桩加固路基沉降控制技术的研究。

## 1 注浆微型桩加固路基

### 1.1 微型桩加固路基注浆工艺

将微型桩应用于公路路基的加固,是《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)中推荐的施工经验措施。微型桩为钢花管,打入路基土体后用水泥基浆液注浆,水灰比取0.5~0.55。注浆前,采用水泥砂浆对钢花管外侧孔口段进行封孔,封孔深度1.0~1.5 m。如图1所示,微型桩加固病害路基注浆分为两个阶段。第一阶段从PVC注浆管底开始注浆,孔口注浆压力0.2~0.4 MPa。当每延米注浆量达到150 kg或浆液渗漏较严重时,上拔注浆管。在浆液凝固后,

收稿日期:2022-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51709155,51279092)

作者简介:周珂,男,硕士研究生.E-mail:2449387875@qq.com

\*通信作者:雷进生,男,博士,教授.E-mail:lei-jinsheng@163.com

将安装有带封孔器的PVC注浆管再次插入钢花管至预设注浆段,进行第二阶段注浆。注浆自下而上分段进行,分段长度0.4~0.6 m,注浆压力0.2~0.5 MPa。

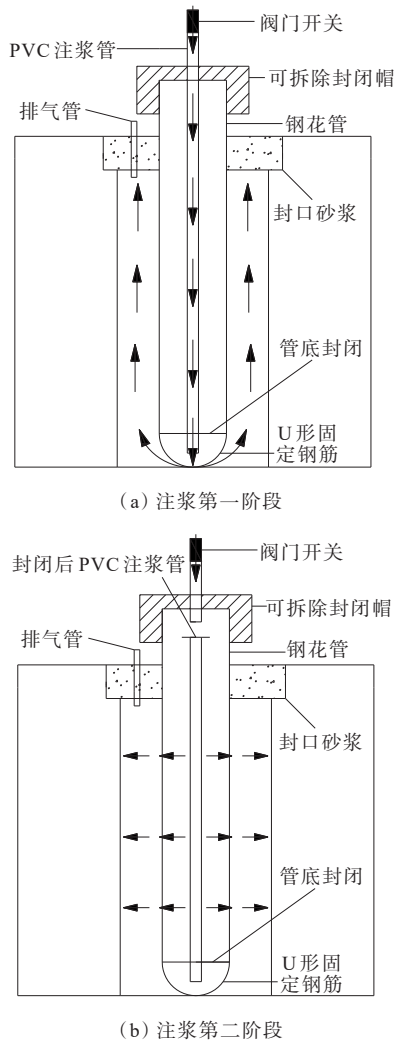


图1 微型桩注浆示意图

## 1.2 注浆微型桩加固路基机理

### (1) 浆液的作用影响分析

浆液通过PVC注浆管后,在渗透或压力扩散作用下进入路基土层充填孔隙,通过硬化、胶结作用形成具有一定强度的结石体,固结、改善和提高路基土物理力学性能,并减少路基沉降。

### (2) 桩体的作用影响分析

浆液经过钢花管上预设的出浆孔,使钢花管的内外侧充满浆体,形成微型钢管桩<sup>[19]</sup>。微型钢管桩形成加固路基的骨架,与桩周路基土体共同承载路基的基底应力,能有效提高路基的整体性与稳定性。桩间土变形模量与桩体自身的变形模量相比存在较大差距,微型桩会约束桩间土的侧向位移,使应力主

要由微型桩桩体承担。对于固定总量的基底应力而言,微型桩承载的应力份额增大,其桩间土所承载的应力份额会减少,路基土承载力也会随之提高。

## 2 非均匀地层模型构建

### 2.1 构建非均匀地质模型的基本步骤

考虑土层参数空间差异性,建立非均质路基地层模型的步骤如下<sup>[20-21]</sup>:

(1) 对获得的路基土层参数及勘察点坐标进行分析与预处理。

(2) 将已知坐标点视为控制点,利用控制点坐标及其对应的土性参数地质信息作为数据源,绘制地勘区域的地形剖面图。

(3) 根据地勘区域控制点的实际分布,采用从上到下、从左到右的顺序建立平面四边形网格。在数据缺少的条件下将其改为三角形。

(4) 将路基地层空隙率视为基本物理量,利用随机分形插值算法对基本量进行赋值,建立路基岩土体空间地质剖面,生成路基地层空隙率分形分布场。

(5) 土体弹性模量、渗透系数等参数与空隙率之间存在函数相关性,利用空隙率与上述参数之间的函数关系,生成渗透率、弹性模量等参数的随机分布场。

### 2.2 随机分形二维算法

采用基于二维随机分形理论的Diamond-Square算法,该算法实现原理如图2所示,其递归步骤如下<sup>[18,22]</sup>:

(1) Diamond步:由图2(a)、(b)、(c)可知,该过程分为初始参数赋值、中点参数生成、菱形格网成形三步。即假定数组为方形,以方形格网4个角点为初始参数值,按线度值进行二等分,在其中点位置生成新参数值,该参数值为初始参数值的平均值添加某随机增量生成,由此可得菱形格网。

(2) Square步:取每4个点构建菱形,在菱形中心位置生成新参数值,以角点参数值为基准值,添加与Diamond步相同的增量,计算各边中点值,可再次形成方形格网,如图2(d)所示。

Diamond步与Square步完成后,再进行算法迭代,如图2(e)所示。一个种子正方形经过一次递归细分得到4个方形,二次循环该过程可得16个方形,以此类推,方形数目等于 $2^{2i}$ ,其中 $i$ 为递归过程的次数。经过多次迭代,直到达到要求为止。

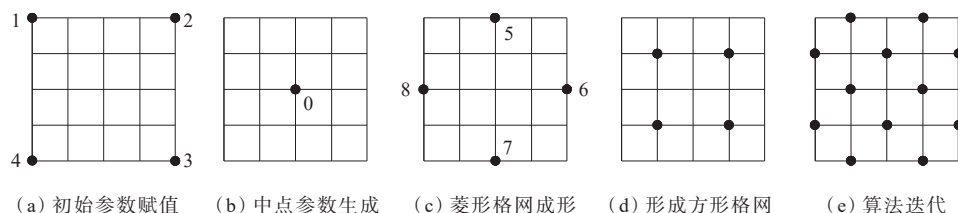


图 2 Diamond-Square算法实现原理

对于正方形的4个点1、2、3、4,在得到其参数值之后,再计算正方形中点0与边中点5、6、7、8的参数值<sup>[18-23]</sup>。中点0参数值如下:

$$I_0 = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) / 4 + g_0 \quad (1)$$

边中点5、6、7、8的参数值为

$$I_5 = (I_1 + I_2 + I_0) / 3 + g_5 \quad (2)$$

$$I_6 = (I_1 + I_3 + I_0) / 3 + g_6 \quad (3)$$

$$I_7 = (I_2 + I_4 + I_0) / 3 + g_7 \quad (4)$$

$$I_8 = (I_3 + I_4 + I_0) / 3 + g_8 \quad (5)$$

$$g_0 = (d/2)^H \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \cdot G \quad (6)$$

式中: $d$ 为网格间距; $H$ 为赫斯特指数; $\sigma$ 为原始数据标准方差; $n$ 为迭代次数; $G$ 为服从标准正态分布的高斯随机数。 $g_5$ 、 $g_6$ 、 $g_7$ 、 $g_8$ 的计算与 $g_0$ 类似。

在随机分形算法中,需重复计算随机增量 $g_0$ 、 $g_5$ 、 $g_6$ 、 $g_7$ 、 $g_8$ 等,由式(6)可知这些量与赫斯特指数 $H$ 、原始数据的标准方差 $\sigma$ 等有关。

### 2.3 二维非均质地层模型

根据表1给出的数据,绘制基于随机分形的土层空隙率分布图、弹性模量随机分布图、渗透系数随机

分布图,如图3~5所示。

表 1 土体物理指标参数(粉土0~8 m)

项目	空隙率	弹性模量/ MPa	渗透系数/ ( $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
最大值	0.45	13.87	5.98
最小值	0.12	6.60	1.50
平均值	0.28	10.25	3.86
标准差	0.04	1.20	0.80
变异系数	0.14	0.12	0.21

注:变异系数无单位。

## 3 基于非均质地层模型的路基注浆模拟

### 3.1 土体物性参数动态变化模型

注浆扩散过程及压力差异使路基土体颗粒间的空间分布及土层空隙率等物性指标发生动态变化,影响浆液扩散范围和病害路基注浆治理效果<sup>[22,24]</sup>。注浆数值模拟需建立基本物理量(空隙率)与渗透率、密度和弹性模量等参数的动态变化数学模型。

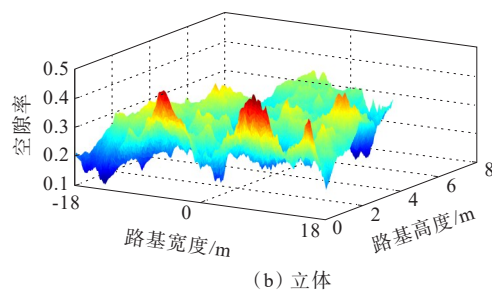
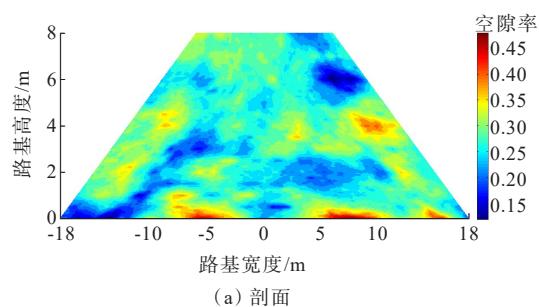


图 3 基于随机分形的土层空隙率分布图

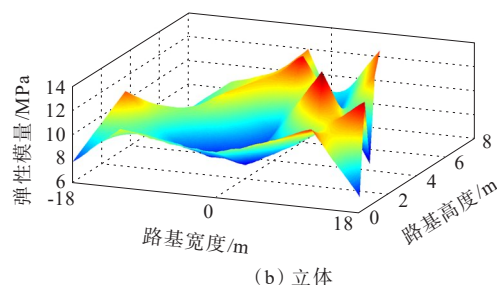
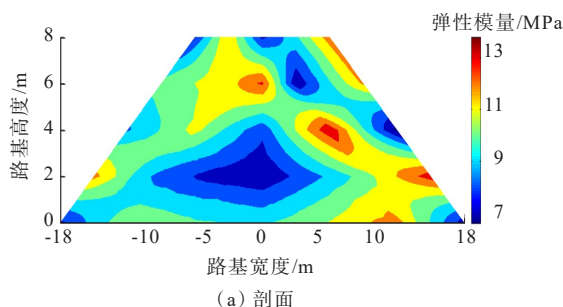


图 4 弹性模量随机分布图

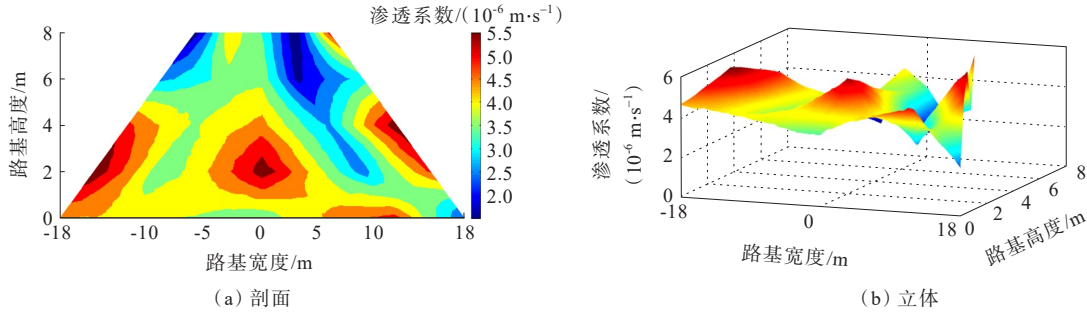


图5 渗透系数随机分布图

### (1) 空隙率动态变化模型

Cheng等<sup>[25]</sup>得到土体在渗透压力下空隙率动态变化关系式:

$$n = 1 - \frac{1 - n_0}{1 + \varepsilon_v} (1 - \Delta p / K_s) \quad (7)$$

式中:  $n$  为实时动态空隙率;  $n_0$  为空隙率初始值;  $\varepsilon_v$  为体积应变;  $\Delta p = p - p_0$  ( $p$  为当前时刻压力,  $p_0$  为初始压力,  $\Delta p$  为压力差);  $K_s$  为土体的体积模量:

$$K_s = \frac{E}{3/(1 - 2\nu)} \quad (8)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

### (2) 渗透率动态变化模型

微型桩注浆过程中, 土层渗透率影响土体固结强度与变形特性, 渗透率与土层空隙率有关。土体渗透率的动态变化关系式<sup>[20]</sup>为:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} \left[ 1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} + \Delta p / K_s \frac{(1 - n_0)}{n_0} \right]^3 \quad (9)$$

式中:  $k_0$  为初始渗透率;  $k$  为实时动态渗透率。

### (3) 平均密度动态变化模型

注浆过程中, 空隙率的动态变化会直接影响土体密度的变化, 路基土体与浆液共同作用的平均密度<sup>[22]</sup>为:

$$\bar{\rho} = (1 - n) \rho_s + n \rho_f \quad (10)$$

式中:  $\rho_f$  为浆液密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_s$  为土体固相颗粒密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

### (4) 弹性模量动态变化模型

空隙率动态变化会直接影响弹性模量取值。弹性模量表达式<sup>[17]</sup>为:

$$E = a \exp \left[ - \left( \frac{n - b}{c} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中:  $a = 45.50$ ;  $b = 0.05678$ ;  $c = 0.3654$ 。

## 3.2 注浆扩散模拟

模型尺寸: 注浆扩散几何模型采用路基横剖面

多孔注浆模型, 路基高度 8 m, 上宽 12 m, 下宽 36 m, 路基边坡比 1:1.5。注浆孔直径 200 mm, 深度取 6 m。微型桩注浆孔的间距一般为 1.0~1.5 m<sup>[26]</sup>, 本模型取 1.0 m。

边界条件: 路基土层两侧为滚轴约束、下部为固定约束。在路基注浆模拟前, 对路基土层施加重力作用下的预应力, 从而进行地应力平衡, 并使其相应的变形为 0; 对于渗流场, 注浆孔的注浆范围为 0.7~2 m, 注浆压力为 0.3 MPa, 选用浆液的水灰比为 0.7。注浆模拟过程中采用的参数表达式见表 2。

表2 注浆扩散模拟参数表达式

参数名称	符号	单位	取值或表达式
空隙率	$n$		由随机方法生成
土体颗粒密度	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	2 400
土体表观密度	$\rho_d$	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\rho(1 - n)$
泊松比	$\nu$		0.3
弹性模量	$E$	Pa	结合土性参数相关性由随机方法生成
体积模量	$K_s$	Pa	$E/[3(1 - 2\nu)]$
Biot系数	$\alpha$		0.85
多孔介质渗透率	$k$	$10^{-6} \text{ m}^2$	结合土性参数相关性由随机方法生成

计算采用三角形网格, 单元数 4 616 个, 自由度 48 605 个。计算时长为 350 s, 前 10 s 每 1 s 输出一次结果, 之后每 10 s 输出一次结果。路基注浆扩散模型的网格划分如图 6 所示。模拟桩体编号从左往右依次为 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup>, 考虑微型桩桩体注浆分两序间隔施工, I 序孔依次施工完成后再进行 II 序孔施工。

通过设置各桩孔的注浆压力来反映施工顺序, 注浆压力时序控制通过关联线性内插函数实现, 桩体注浆压力的关联函数定义如表 3 所示。注浆扩散边界采用土层实时渗透压力  $p_f$  进行评定, 假定  $p_f > 0.1 \text{ MPa}$  为浆液扩散的边界。注浆扩散过程如图 7 所示。



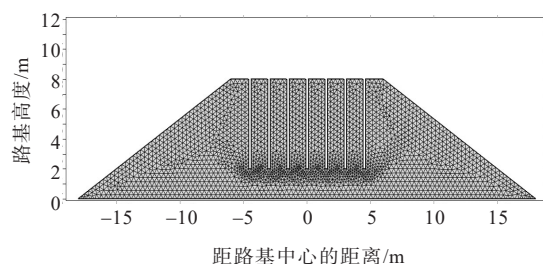


图 6 路基注浆扩散网格划分

表 3 关联函数定义

桩体编号	工序	$t/s$	$f(t)$	备注
1 <sup>#</sup>	I	0、1、2、350	0、1、1、1	$t$ 为时间, $f(t)$ 为注浆压力的关联函数;当 $f(t)$ 为0时代表未施加注浆压力, $f(t)$ 为1时代表施加注浆压力
3 <sup>#</sup>		0、10、11、350	0、0、1、1	
5 <sup>#</sup>		0、20、21、350	0、0、1、1	
7 <sup>#</sup>		0、30、31、350	0、0、1、1	
2 <sup>#</sup>	II	0、40、41、350	0、0、1、1	
4 <sup>#</sup>		0、50、51、350	0、0、1、1	
6 <sup>#</sup>		0、60、61、350	0、0、1、1	

由图 7 可知:在前 100 s 内,浆液主要在微型桩注浆孔之间进行扩散;在 100~350 s 期间,由于浆液的渗透扩散以及劈裂与挤密效应,注浆孔四周会生成结石体,并置换微型桩体周围泥土,充填其空隙;到

350 s 时,浆液与土体的结石体已将桩周土的空隙基本充填完毕,但由于路基的土层是非均质的,土层空隙率等物性参数在土层中也是不均匀分布的,因而注浆微型桩之间仍存在着一些土体空隙不能被完全充填,这不仅符合非均质地层模型的特点,也符合实际注浆情况。

## 4 注浆加固后效果分析

注浆加固前,对路基施加汽车荷载。车道与车辆荷载共同组成汽车荷载,车道均布荷载标准值取 10.5 kN/m,车辆荷载标准值取 550 kN,故路基汽车荷载为 1 226 kN<sup>[27]</sup>,路基土体在汽车荷载作用下各物理参数分布云图(注浆加固前)如图 8 所示。

注浆加固后路基土与固结体物理参数云图如图 9 所示,注浆加固前后土体物理参数见表 4。

通过注浆加固前后土层物理参数对比可知:路基加固区域土体物理参数明显提高,加固区域土体的密度增大到 2 328 kg/m<sup>3</sup>,约为加固前的 1.2 倍;弹性模量增大到 706 MPa,约为加固前的 51 倍,体积模

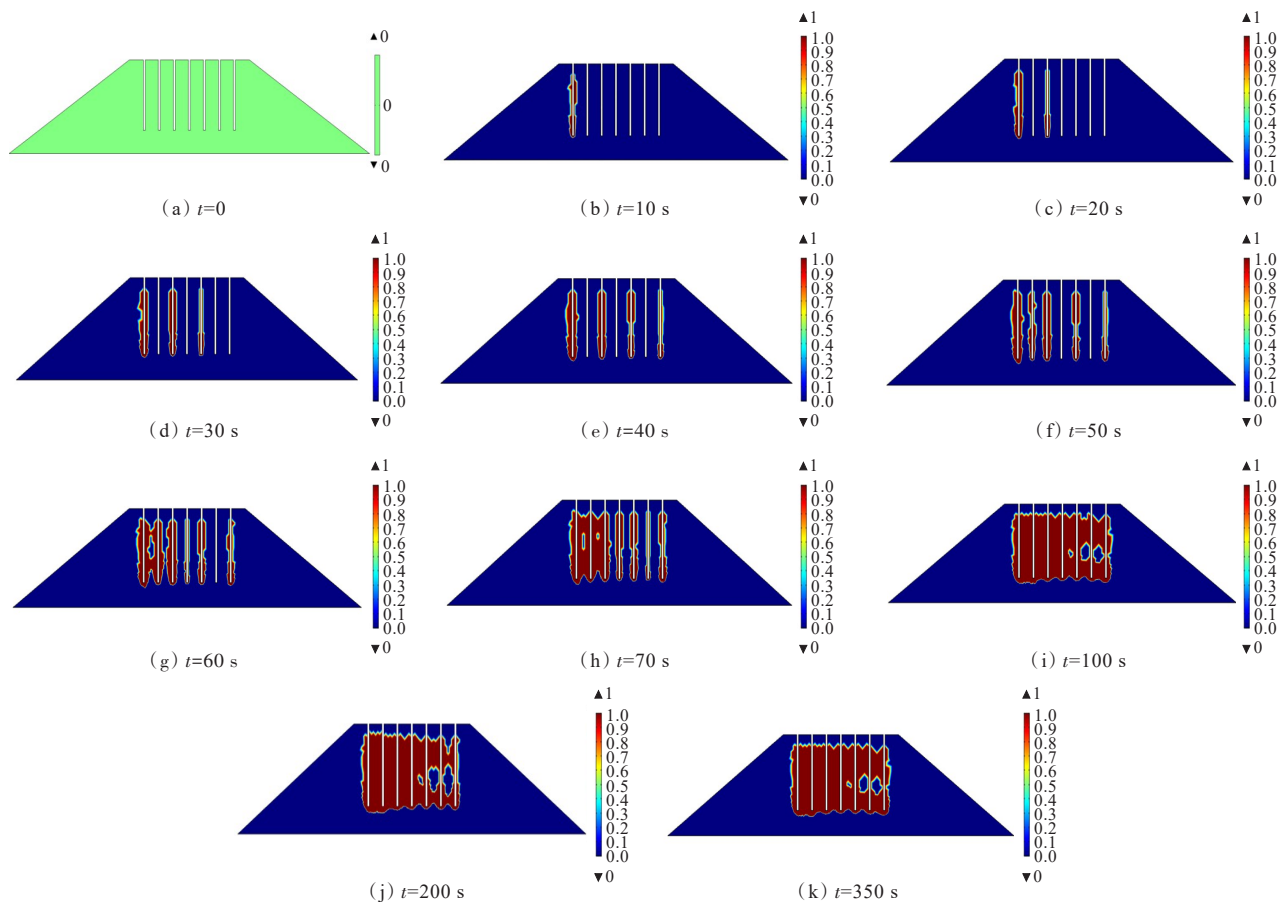


图 7 注浆扩散过程图

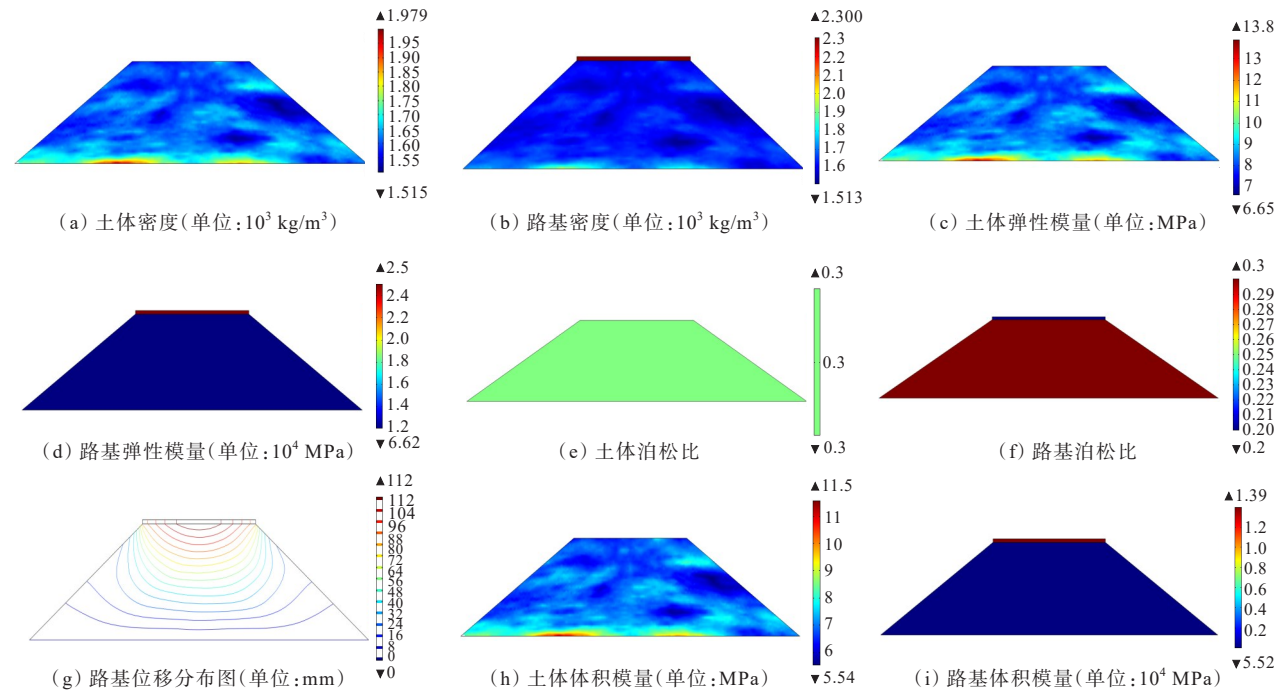


图8 荷载作用下注浆微型桩加固前路基土体物理参数云图

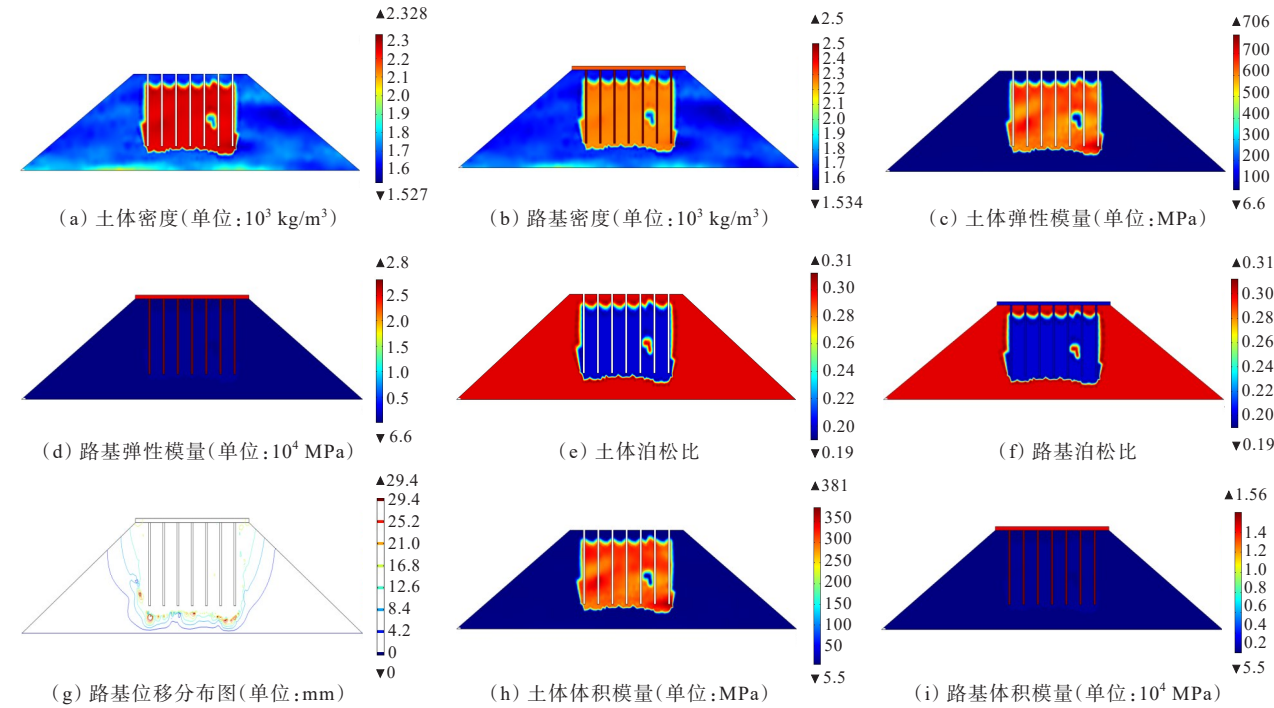


图9 荷载作用下注浆微型桩加固后路基土与固结体物理参数云图

表4 注浆微型桩加固路基前后土体物理参数(最大值)对比

工况	土体密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	土体弹性 模量/MPa	土体 泊松比	土体体积 模量/MPa
路基加固前	1 979	13.8	0.30	11.5
路基加固后	2 328	706.0	0.31	381.0

量增大到381 MPa,约为加固前的33倍。桩基注浆加固后,土层位移为29.4 mm,相比加固前路基沉降

量减少了74%,说明桩基注浆后能有效控制路基沉降,且注浆过后桩体被注浆结实体所包围,形成一个扩大的柱体,可以改善桩周土的物理力学性能,并使桩端受力面积增大,桩土接触条件得到改善,进而使桩侧摩阻力提高。

因此,在实际工程中,利用微型桩进行病害路基的注浆加固,不仅可以有效控制病害路基的沉降,还

能适当缩短桩长,减小桩径,节约工程造价。

## 5 结 论

(1) 针对路基常见的病害问题,考虑注浆微型桩的特点,基于随机分形算法,结合土性参数间的相关性,探讨以空隙率为基本量,对渗透系数、弹性模量等基本物性参数在单元体内的赋值,生成各物性参数的随机分形剖面图,构建二维随机非均质地层模型,可以很好地模拟注浆微型桩加固路基效果。

(2) 在注浆压力作用下,浆液由钢花管中向四周扩散,沿着桩侧和桩端渗透(前 100 s 内)。在 100~350 s 期间,由于浆液的渗透扩散以及劈裂与挤密效应,注浆孔四周会生成结石体,并置换微型桩体周围泥土,充填其空隙。当注浆时间初步稳定时( $t=350$  s),微型桩被注浆结石体所包围,使得桩端受力面积增大,桩周土的物理力学性能及桩土接触面条件得到改善,桩周土的侧阻力得到提高。

(3) 采用注浆微型桩对路基进行加固后,路基加固区域土体的物性参数(密度、弹性模量、体积模量等)得到有效改善,被加固区域土体体积显著增大,同时病害路基的沉降量明显降低,表明注浆微型桩能有效控制路基沉降。在实际工程中,合理地利用注浆微型桩,不但能有效控制路基沉降,还能适当缩短桩长,减小桩径、节约工程造价。

## 参考文献:

- [1] 邹静蓉,张治强,李涛.普通干线公路半刚性基层沥青路面破坏机理及控制措施[J].公路交通科技,2018,35(5):1-7,48.
- [2] 刘耀堂.CGMT桩在高速公路路基加固中的应用研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [3] 张健明,唐仁华,毛凤山,等.基于AGA-SVM公路软基沉降预测[J].中外公路,2020,40(2):12-15.
- [4] 张满想,赵健,郭昕,等.灰色模型在路基沉降预测中的研究及应用[J].中外公路,2020,40(4):21-25.
- [5] 邹文华,刘辉,邓小钊,等.连续强降雨工况土质边坡非饱和渗流及稳定性分析[J].中外公路,2019,39(6):11-15.
- [6] 周德泉,杨帆,周毅.路基病害处治技术与应用[J].中外公路,2010,30(6):17-21.
- [7] 朱登元,管延华,刘惠忠,等.袖阀管劈裂注浆加固粉土路基实验研究[J].岩土工程学报,2012,34(8):1425-1431.
- [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(S2):268-273.
- [9] 祝争艳,袁青泉.基于导管注浆的现役高速公路不均匀沉降处治技术研究[J].中外公路,2020,40(4):33-37.
- [10] 龚健,陈仁朋,陈云敏,等.微型桩原型水平荷载试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3541-3546.
- [11] 郭亮,周峰,李俊才,等.多次注浆微型桩水平承载力试验与数值模拟分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2010,32(6):64-70.
- [12] HWANG T H, KWON O Y. Installation methods of micro-piles by the length ratio of pile and the depth of rock layer[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2011, 27(4):5-20.
- [13] HORVATH J S. New structural model for multicomponent pile cross sections under axial load[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6):875-879.
- [14] KERSHAW K A, LUNA R. Full-scale field testing of micropiles in stiff clay subjected to combined axial and lateral loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1):255-261.
- [15] 陈强,陈炜韬,马青杰.滑坡含水量对注浆钢管微型桩加固效果的影响[J].公路交通科技,2011,28(9):17-21.
- [16] 李红中,马占武,张修杰,等.岩土参数空间分布特征及其制约机理研究[J].中外公路,2019,39(5):14-20.
- [17] 雷进生.碎石土地基注浆加固力学行为研究[D].武汉:中国地质大学,2013.
- [18] 杨广,唐红梅.注浆微型桩群在危岩治理中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(S1):673-677.
- [19] 梁俊,王琪,刘坤良,等.基于随机中点位移法的三维地形模拟[J].计算机仿真,2005,22(1):213-215,223,240.
- [20] 雷进生,刘非,王乾峰,等.非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2246-2254.
- [21] 雷进生,夏磊,王乾峰,等.非均质地层地质剖面的随机预测模型[J].地下空间与工程学报,2016,12(1):84-89.
- [22] 雷进生,鲁文浩,程爽,等.基于非均质地层模型的桩基注浆数值模拟[J].长江科学院院报,2018,35(5):79-84.
- [23] 彭仪普.地形三维可视化及其实时绘制技术研究[D].成都:西南交通大学,2002.
- [24] 冉启全,李士伦.流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究[J].石油勘探与开发,1997(3):61-65,100.
- [25] CHENG P D, LI L, TANG J, et al. Application of time-varying viscous grout in gravel-foundation anti-seepage treatment[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2011, 23(3):391-397.
- [26] 徐恒国.粉质黏土注浆试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(S2):268-271.
- [27] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.