

DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20230928002

# 黄土铁路路堤滑坡破坏机制与防治技术研究

范家玮<sup>1,2</sup>, 张玉芳<sup>1,2</sup>, 周文皎<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 2021年7月20日, 河南省遭遇极端暴雨, 诱发大量路基水害。通过对路基水害开展现场调查, 查明了水害发生区内区域地形地貌及水文地质条件, 提出了黄土路堤滑坡破坏模式, 并结合数值模拟分析路堤滑坡的破坏机制。运用多次分段控制注浆钢花管的防治技术对路堤边坡进行整治, 采用挖探调查、高密度电法的手段探究钢花管加固黄土路堤的注浆效果, 并结合数值模拟分析注浆加固前后黄土路堤边坡的稳定性。研究结果表明: (1) 路堤滑坡不同于路堤浅表层溜坍的坡面病害, 是一种严重的坡体病害, 常由于坡脚地形低洼, 降水在路堤边坡坡脚或下部汇集, 浸泡软化路堤边坡, 引起边坡岩土抗剪强度不足导致滑坡。(2) 数值模拟结果表明坡脚积水深度对路堤边坡的竖向应力场无明显影响, 对积水侧边坡的水平应力场与位移场影响显著; 随着积水深度增大, 路堤边坡最大剪应变的最值增大, 稳定系数减小。(3) 挖探调查与高密度电法探测结果表明钢花管注浆技术在黄土地层劈裂注浆效果良好, 黄土边坡内部孔隙被水泥浆体充填, 隔绝了坡体内部的流水通道, 抑制坡体内部受水侵蚀。(4) 钢花管注浆加固后数值模拟结果表明, 整治加固后路堤稳定性显著提升。研究成果为铁路系统工务部门的水害防治工作提供参考。

**关键词:** 路基; 铁路水害; 路堤滑坡; 破坏机制; 防治技术

中图分类号: U216.41 文献标识码: A

## Research on the Failure Mechanism and Prevention Technology of Loess Railway Embankment Landslide

FAN Jiawei, ZHANG Yufang, ZHOU Wenjiao

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co. Ltd, Beijing 100081, China;  
2. National Key Laboratory of High-Speed Railway Track System, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** On July 20, 2021, Henan Province suffered from extreme rainstorm, and a large number of subgrade water damage occurred. Through on-site investigation of subgrade water damage, the terrain, geomorphology, and hydrogeological conditions of the area where the water damage occurred were identified. The failure mode of loess embankment landslide was proposed, and the failure mechanism of embankment landslide was analyzed through numerical simulation. The prevention technology of multiple segmented control grouting with steel floral pipes was used to rectify embankment slope. Excavation investigation and multi-electrode resistivity method were used to explore the grouting effect of steel floral pipes in strengthening loess embankment, and numerical simulation was used to analyze the stability of loess embankment slopes before and after grouting reinforcement. The research results indicate that: (1) Embankment landslide is different from slope surface diseases caused by shallow slip-collapse of embankment. It is a serious slope body disease which is caused by low-lying terrain at the foot of the slope, where precipitation accumulates at the foot or lower part of the embankment slope, soaking and softening the embankment slope, resulting in insufficient shear strength of the slope, leading to landslides. (2) The numerical simulation results indicate that the depth of accumulated water at the foot of the slope has little effect on the vertical stress field of the embankment slope but has a significant impact on the horizontal stress field and displacement field of the accumulated water side slope. As the depth of accumulated water increases, the maximum shear strain of the embankment slope increases, and the stability coefficient decreases. (3) The results of excavation investigation and multi-electrode resistivity method detection indicate that the steel floral pipes grouting technology has a good effect on splitting grouting in loess

\* 收稿日期: 2023-9-28; 修回日期: 2023-11-02

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2022G020); 青海省重点研发与转化计划(2022-SF-158); 中国铁道科学研究院集团有限公司基金项目(2022YJ333)资助

作者简介: 范家玮(1997—), 男, 助理研究员, 博士。主要从事地质灾害防治研究。E-mail:jiaweif3@163.com

strata. The internal pores of the loess slope are filled with cement slurry, isolating the flow channels inside the slope and suppressing water erosion inside the slope. (4) The numerical simulation results after the steel floral pipes grouting reinforcement indicate that the stability of the embankment is significantly improved after the reinforcement. The research results provide reference for the water damage control work of the railway system engineering department.

**Key words:** Subgrade; Railway water damage; Embankment landslide; Failure mechanism; Prevention technology

## 0 引言

2021年7月,我国河南省遭遇极端暴雨,诱发严重路基水害,造成长时间中断交通,危害铁路运营安全。黄土路堑边坡主要为晚更新世至全新世冲积黄土,路堤边坡亦为当地黄土填筑,多处路基边坡呈自然裸坡状,极易受降雨侵蚀。极端暴雨造成路堑边坡和路堤边坡均产生地质灾害,其中路堤滑坡灾害最为严重,是线路快速抢通的“卡脖子”难题,深入研究该类灾害破坏模式的致灾机制与防治技术,对灾后抢险复旧工作具有重要意义。

目前国内外学者对铁路路基边坡水害的研究取得了一定的成果。关于路堤边坡水害的理论研究,国内外学者的研究重点聚焦在依托水害现场调查剖析边坡水害成因,以及采用数值模拟方法分析水对路堤边坡稳定性的影响。胡涛<sup>[1]</sup>与王斌<sup>[2]</sup>以侯月线、宝中线、兰新线等水害为例,沿线调查路基边坡失稳地段的工程地质条件,从路基边坡岩土成分内因、降水及外界荷载扰动外因方面分析了路基边坡水害的致灾原因。Liu J X等<sup>[3]</sup>与Feng J W等<sup>[4]</sup>依托国内铁路沿线历史降雨数据,通过数值模拟计算分析铁路路堤在暴雨条件下的稳定性。Xu S和Zs áki<sup>[5]</sup>、ISHIZUKA等<sup>[6]</sup>、Polemio M等<sup>[7]</sup>、Roshan MJ等<sup>[8]</sup>依托国外水害实例,建立了综合考虑应力、变形和渗流的多场耦合模型,构建了渗流作用下的边坡极限平衡方程,通过数值模拟渗流分析研究降雨强度及其持续时间对边坡稳定性的影响。

关于路堤边坡水害防治技术的研究,国内外学者已取得了一定的研究成果。路基边坡水害的防治技术主要有预应力锚索框架梁、土钉墙、挡土墙、微型桩、抗滑桩等<sup>[9-12]</sup>,孙建华<sup>[13]</sup>针对某高速铁路路堤边坡,结合现场实际情况,提出了挖方减载的防治措施。钱征宇<sup>[14]</sup>针对湿陷性黄土路堤边坡,分析其主要工程特征并总结了施工运营过程中出现的主要工程技术问题,为湿陷性黄土铁路工程的选线、路堤加固措施的选取提供了技术支撑。王飞<sup>[15]</sup>、程康<sup>[16]</sup>、王星博<sup>[17]</sup>、Shun-Chuan WU等<sup>[18]</sup>、Zhou M R等<sup>[19]</sup>研究袖阀管劈裂注浆技术加固黄土路基的整治效果,表明袖阀管可满足黄土路基浅表层、小范围劈裂注浆的需求。

国内外学者已取得的研究成果表明,现阶段众

多学者的研究工作遵循着具体问题具体分析的研究思路,主要围绕着灾后现场调查分析水害致灾原因,依托工程案例开展路基边坡的防治技术研究,但尚未对区段内暴雨诱发的路堤滑坡灾害的破坏机制和防治技术开展针对性研究,针对黄土地层劈裂注浆技术的研究以袖阀管为主,缺乏针对钢花管劈裂注浆技术加固黄土边坡有效性的研究。本文以“7.20”暴雨诱发的路堤滑坡灾害为研究对象,采用现场调查、现场试验、数值模拟的研究手段,提出黄土路堤滑坡破坏模式,研究路堤滑坡破坏机制,运用注浆钢花管防治技术整治路堤边坡,实现线路的快速抢通,并多手段分析注浆钢花管防治技术的注浆效果,为铁路部门的防洪工作提供参考。

## 1 铁路水害沿线工程地质概况

### 1.1 地形地貌

铁路水害工点位于我国中部洛阳盆地与黄河下游的华北平原南部过渡地段,具体位于黄河及其支流伊洛河南岸,整体地势南高北低,最高点位于南部山区,最低点位于黄河河床。区内铁路总体走向NE~SW,东段沿黄河南岸山区布设,中、西段位于伊洛河南岸紧邻河流布设。根据区域的地貌成因类型与形态特点,可将区域地貌划分为构造剥蚀丘陵地貌和河流堆积平原地貌<sup>[20]</sup>。

### 1.2 地层岩性

根据野外地质调绘及钻探揭示(见图1),铁路水害沿线地层主要为第四系全新统人工堆积层( $Q_4^{ml}$ );第四系全新统冲积层( $Q_h^{al}$ ):以黄土状粉土为主,沿伊洛河河谷分布;第四系上更新统冲积层( $Q_{p3}^{alp}$ ):以黄土状粉质黏土为主,粒径较小,夹薄层亚粘土及钙质结核。由新至老分述如下:

#### (1) 第四系全新统人工堆积层( $Q_4^{ml}$ )

人工填土( $Q_4^{ml}$ ):褐灰色、黄褐色、灰黑色,松散,由黏粒与粉粒组成,土质极不均匀,局部夹杂碎石、砾石,可见植被根、茎及腐殖质。

#### (2) 第四系全新统冲积层( $Q_h^{al}$ )

黄土状粉土(局部存在粉质黏土夹层)( $Q_h^{al}$ ):褐黄色、浅黄色,土质均匀,结构疏松,主要成分为粉粒,次为黏粒,轻微摇振反应,刀切面稍光滑,干强度中等,韧性一般。

#### (3) 第四系上更新统冲积层( $Q_{p3}^{alp}$ )

黄土状粉质黏土 ( $Q_{p3}^{alD}$ ): 褐黄色、灰黄色, 可塑状, 土质均匀, 结构较致密, 含钙质结核, 无摇振反应, 刀切面稍光滑, 干强度中等, 韧性中等, 岩芯呈土柱状。



a) 人工填土

b) 黄土状粉土



c) 黄土状粉质黏土

图1 地层岩性

Fig.1 Stratigraphic lithology

### 1.3 气象条件

铁路水害沿线属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区, 海拔平均 110 m, 年平均气温 11℃, 无霜期约 185 天, 年降水量 500-600 mm, 降雨量多集中于汛期六、七、八、九月, 占全年降雨量一半以上。2021 年 7 月 18 日至 7 月 20 日, 郑州局部最大降雨量达到 500~657 mm, 2 天内降雨量与该地区年降雨量持平。7 月 18 日至 9 月 7 日, 郑州累计降雨量达 862.2 mm, 超过历史同期降雨量。

### 1.4 水文地质条件

依据铁路水害沿线多处地质钻孔勘察资料, 地表向下 26 m 深度范围内未揭露地下水, 铁路水害沿线地下水位较深。

## 2 路堤滑坡破坏模式及破坏机制

路堤滑坡灾害严重影响铁路的运行安全, 深入研究其破坏模式与破坏机制有助于防洪工作的精准开展。本节首先依托现场调查提出路堤滑坡破坏模式, 分析其破坏特征并进行典型案例剖析; 其次采用数值模拟的手段剖析路堤滑坡的破坏机制。

### 2.1 路堤滑坡破坏模式

路堤滑坡是一种路堤边坡的坡体水害, 在该破坏模式下, 由于坡脚地形低洼, 降水在路堤边坡坡脚或下部汇集, 浸泡软化路堤边坡, 引起边坡岩土抗剪强度不足导致滑坡。

#### 2.1.1 破坏特征分析

在该破坏模式下, 路堤坡脚处往往存在有利于汇集降水的地形特征, 而缺失排水通道, 当遭遇强降雨, 降水不断向坡脚地势低洼处汇集, 降水无法排泄故而形成“水塘”。坡脚长时间持续积水, 积水不断向路堤下部土体渗透, 增大其含水率, 致使路堤边坡底部强度降低, 底部承载力不足, 边坡破坏

特征如下:

1) 当路堤边坡坡脚短时间积水时, 积水渗透进入坡脚附近小范围土体, 使其含水率增大, 土体软化强度降低, 承载力不足以支撑其上部边坡, 致使坡脚土体坍塌。

2) 当路堤边坡坡脚或下部持续泡水时, 边坡坡脚或下部土体会受到水的不断渗入, 导致坡体内部大范围土体软化并且抗剪强度降低, 泡水部分土体抗剪强度小于所受剪切应力时将导致弧形滑移破坏, 并牵引路堤上部变形开裂, 当弧形滑移面与上部牵引裂面贯通后, 形成路堤滑坡。

#### 2.1.2 典型案例剖析

##### (1) 案例 1

铁路水害沿线某路堤地段, 线路走向 241°; 路堤边坡高约 16~19 m, 坡度 35~40°, 坡面植被以灌木及低矮乔木为主。坡脚处系沟谷地带, 沟谷内有林地及当地农田, 沟谷四周壑坡近直立, 黄土裸露, 植被一般发育。根据野外地质调绘及钻孔结果揭露, 该路堤地段地层为上覆人工填土与下伏黄土状粉土、黄土状粉质黏土, 钻孔揭露黄土受积水浸泡渗透而呈软泥状。受强降雨影响, 路堤下方过水涵洞淤堵, 长时间排水不畅导致路堤坡脚处持续积水(见图 2), 下部坡脚积水水面至谷底水深约 3 m。路堤边坡坡脚外侧沟谷内农田被淹, 树木仅可以看到树梢处, 沟谷内积水长期浸泡使得路堤边坡坡脚黄土软化, 抗剪强度降低, 当剪切应力大于抗剪强度时导致剪切破坏的发生, 坡体内部形成滑裂面, 引起路堤滑坡。现场调查发现路堤肩出现沿线路方向的长大拉张裂缝, 裂缝长 20 m, 宽 40~50 cm, 下错 20~30 cm (见图 3)。



图2 铁路水害沿线某路堤坡脚积水航拍图  
Fig.2 Aerial photo of rainfall accumulation at the foot of an embankment along water damaged railway



图3 铁路水害沿线某路堤滑坡后缘拉张裂缝  
Fig.3 Tension crack on trailing edge of an embankment landslide along water damaged railway



(2) 案例 2

如图 4 所示，铁路水害沿线某路堤地段，路堤边坡高约 18 m，边坡植被为灌木，坡面无防护措施，坡脚外侧为排水河道。受 2021 年 7 月暴雨影响，路堤下方排水涵洞淤堵，河道排水条件不良，河水淤积于路堤坡脚形成水塘，现场调查发现水流持续补给坡脚水塘，坡脚积水引起长时间的水泡路堤，坡脚软化，土体抗剪强度降低，诱发路堤滑坡（见图 5）。



图 4 铁路水害沿线某路堤坡脚积水航拍图

Fig.4 Aerial photo of rainfall accumulation at the foot of an embankment along water damaged railway

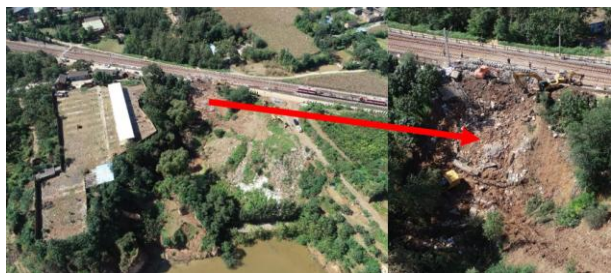


图 5 铁路水害沿线某路堤滑坡航拍图

Fig.5 Aerial photo of an embankment landslide along water damaged railway

现场调查发现发生滑坡的斜坡系高填方路堤，该滑坡后缘及侧界清晰（见图 6），滑坡长约 50 m，宽约 30 m，下错近 10 m。滑体滑动向前缘推挤，滑坡前缘树木倾斜、倾倒，滑坡体前缘向上隆起。滑坡已历经蠕动、挤压、微动、滑动、大动阶段，即滑坡经大破坏而急剧滑动后原地貌已明显改观，呈现出不稳定的地貌形态。



图 6 滑坡后缘及侧界

Fig.6 Trailing edge and lateral boundary of landslide

2.2 路堤滑坡破坏机制

以铁路水害沿线黄土路堤边坡实际工点为例进行数值模拟，通过设置路堤边坡的尺寸、岩土体力学参数、边界条件等参数保证数值模拟时路堤边坡的破坏过程与现场实际工程一致，模拟不同坡脚积水深度情况下边坡的受力与变形过程。

2.2.1 数值模型建立

根据现场调研资料，选取 2.1.2 节描述的实际工程案例典型断面建立数值计算模型（见图 7）。边坡土体为粉土层，坡高 19 m，路堤基底原状土体为粉质黏土层，数值模型的计算采用摩尔-库伦（Mohr-Coulomb）模型。

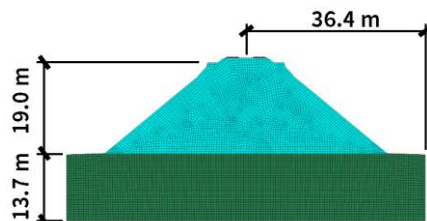


图 7 数值计算模型

Fig.7 Numerical calculation model

2.2.2 计算参数选取

数值模拟的计算参数由现场钻探取原状土样开展物理力学试验确定，土体的力学参数取值如表 1 所示。土体泡水前饱和度为 0.54，土体饱水后饱和度为 1.00。

表 1 路堤边坡土体参数

Table 1 Soil parameter of embankment slope

饱和 和 度	密度 /kg m <sup>-3</sup>	变形 模量 /MPa	孔 隙 率	饱和渗 透系数 /cm s <sup>-1</sup>	粘 聚 力 /kPa	内 摩 擦 角/°	泊 松 比	
0.54	1840	26.22	0.41	4.5×10 <sup>-4</sup>	22.6	21.4	0.30	
0.65	1888	21.00	0.41	4.5×10 <sup>-4</sup>	20.0	21.1	0.32	
粉土	0.77	1935	15.00	0.41	4.5×10 <sup>-4</sup>	13.0	20.4	0.34
0.88	1982	9.00	0.41	4.5×10 <sup>-4</sup>	12.0	20.2	0.38	
1.00	2030	4.65	0.41	4.5×10 <sup>-4</sup>	10.2	20.0	0.40	
粉质	0.54	1900	25.78	0.40	8.5×10 <sup>-5</sup>	29.4	16.8	0.30
黏土	1.00	2090	5.85	0.40	8.5×10 <sup>-5</sup>	15.6	14.3	0.40

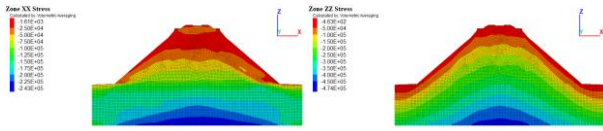
2.2.3 计算结果分析

(1) 应力场分析

图 8 为坡脚积水 1 m 时的路堤应力云图，由图可知：水平应力和竖向应力的分布规律大致相同，路堤表面处应力近似为零，随着深度增大，路堤所受上覆荷载逐步增大，路堤整体受到的压应力逐渐增大，在模型底部达到最大值，整体上呈现“凸”字型分布。水平应力和竖向应力最大值分别为-0.243 MPa 和-0.474 MPa（负值表示受压）。

从应力等值线的分布来看，水平应力的等值线

形状在路堤左右两侧坡脚附近出现明显的不均匀分布，这是由于路堤右侧坡脚处积水，该处土体受水浸泡软化，剪切模量、粘聚力、内摩擦角减小，抗剪能力变差，导致右坡脚处的水平应力出现了明显的不均匀分布；而竖向应力的分布形式受积水影响不大。

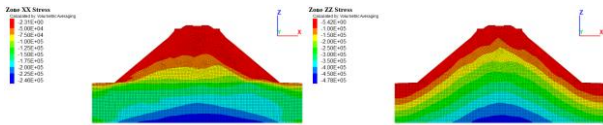


a) 水平应力 b) 竖向应力

图 8 坡脚积水 1 m 工况应力云图

Fig.8 Stress nephogram when the depth of accumulated water is 1 m

图 9 为坡脚积水 2 m 时的路堤应力云图，水平应力和竖向应力的分布规律与 1 m 工况基本一致，整体上呈现“凸”字型分布。水平应力和竖向应力最大值分别为-0.246 MPa 和-0.478 MPa（负值表示受压）。与积水 1 m 工况相比，积水 2 m 引起路堤右坡脚处的水平应力分布产生突变的区域面积增大；竖向应力分布形式受积水影响不大。

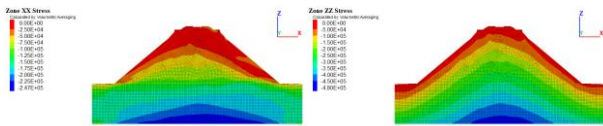


a) 水平应力 b) 竖向应力

图 9 坡脚积水 2 m 工况应力云图

Fig.9 Stress nephogram when the depth of accumulated water is 2 m

图 10 为坡脚积水 3 m 时的路堤应力云图，水平应力和竖向应力的分布规律与前两种工况基本一致，水平应力和竖向应力最大值分别为-0.247 MPa 和-0.480 MPa（负值表示受压）。总体而言，坡脚积水深度改变对竖向应力场的分布形式及其数值大小产生的影响不大；对积水的右侧边坡处的水平应力分布则会产生明显的影响。



a) 水平应力 b) 竖向应力

图 10 坡脚积水 3 m 工况应力云图

Fig.10 Stress nephogram when the depth of accumulated water is 3 m

## (2) 位移场分析

提取坡脚积水 1 m 工况下的总位移云图，如图 11 所示。位移最大值位置位于右侧坡脚处，路堤边坡总位移沿着坡面向上逐渐减小。坡脚积水 1 m 时，坡脚处沿 Z 方向高约 1.0 m、沿 X 方向宽约 1.5 m

范围内位移最大值为 4.11 cm，对比应力云图和总位移云图，位移的极值区范围与路堤右坡脚处的水平应力分布产生突变的区域基本一致，证明了坡脚积水导致该处土体力学性质劣化，抗剪能力减弱。

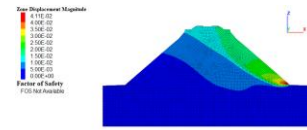
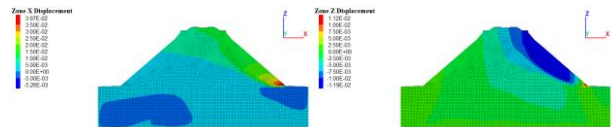


图 11 坡脚积水 1 m 工况总位移云图

Fig.11 Magnitude displacement nephogram when the depth of accumulated water is 1 m

图 12 为坡脚积水 1 m 工况下的路堤水平位移和竖向位移云图，由图可知：在坡脚积水作用下，路堤水平位移的最大值位置位于坡脚处，路堤水平位移沿着路堤坡面向上逐渐减小，路堤竖向位移的最大值则位于路堤的路肩位置；水平位移和竖向位移的最大值分别为 3.97 cm 和 1.19 cm。坡脚处水平位移最大是因为坡脚土体在水中浸泡，土体近似饱和状态，坡脚处的土体强度降低，在上覆土体荷载的作用下产生水平位移；路肩处竖向位移最大是因为坡脚土体强度不足以支撑边坡的整体稳定，边坡产生滑移。



a) 水平位移 b) 竖向位移

图 12 坡脚积水 1 m 工况位移云图

Fig.12 Displacement nephogram when the depth of accumulated water is 1 m

图 13 为坡脚积水 2 m 时的总位移云图，路堤总位移云图的整体分布形式与坡脚积水 1 m 工况较为相似，位移的最大值位置均处于右侧坡脚处，之后沿着右侧坡面向上不断发展。坡脚积水增至 2 m 时，坡脚处沿 Z 方向高约 2 m、沿 X 方向宽约 5 m 范围内位移最大值增至 12.20 cm，整体位移的极值区域也从坡脚处逐步向上扩展，坡脚积水深度的增大导致坡脚进一步软化。

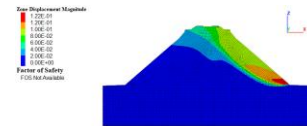


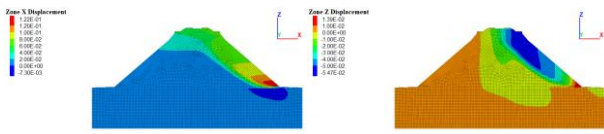
图 13 坡脚积水 2 m 工况总位移云图

Fig.13 Magnitude displacement nephogram when the depth of accumulated water is 2 m

图 14 为坡脚积水 2 m 工况下的路堤水平位移和竖向位移云图，由图可知：在坡脚积水作用下，路堤水平位移的最大值位置位于坡脚处，路堤水平位移沿着路堤坡面向上逐渐减小，路堤竖向位移的



最大值则位于路堤的路肩位置；水平位移和竖向位移的最大值分别为 12.20 cm 和 5.47 cm。



a) 水平位移 b) 竖向位移

图 14 坡脚积水 2 m 工况位移云图

Fig.14 Displacement nephogram when the depth of accumulated water is 2 m

图 15 为坡脚积水 3 m 时的总位移云图，总位移云图整体形式与前两种工况有一定相似性，位移的最大值位置均处于右侧坡脚处，之后沿着右侧坡面向上不断发展。当坡脚积水增至 3 m，坡脚处沿 Z 方向高约 3 m、沿 X 方向宽约 8 m 范围内位移最大值增至 43.60 cm，位移极值区域也进一步沿着坡面向上扩展，整个右侧坡面的位移数值均达到 10 cm 以上，在 3 m 坡脚积水的作用下，土体受水浸泡饱和的影响区域增大，更大范围的土体强度降低，路堤边坡发生较大范围的整体滑移失稳。

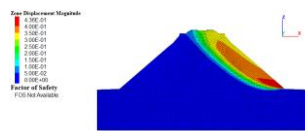
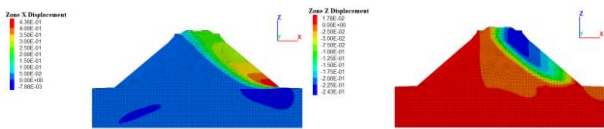


图 15 坡脚积水 3 m 工况总位移云图

Fig.15 Magnitude displacement nephogram when the depth of accumulated water is 3 m

提取路堤的水平 and 竖直方向位移云图，如图 16 所示。当坡脚积水增至 3 m 时，路堤水平位移的最大值位置仍在坡脚处，水平位移最大值增至 43.60 cm，路堤水平位移沿着路堤坡面向上逐渐减小；路堤竖向位移的最大值也仍然位于路堤的路肩位置，竖向位移的最大值增至 24.3 cm，该数值与现场调查时发现的路肩上沿线路方向拉张裂缝的下错距离一致。



a) 水平位移 b) 竖向位移

图 16 坡脚积水 3 m 工况位移云图

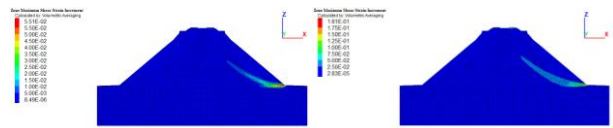
Fig.16 Displacement nephogram when the depth of accumulated water is 3 m

对比三种不同坡脚积水深度工况的总位移和各向位移可以发现，路堤的水平位移数值整体上比竖直位移更大，对总位移的影响更大。这是因为在坡脚积水的作用下，坡脚处的土体逐渐软化，强度降低，土体沿弧线向下滑移过程中，在水平方向挤压坡脚处土体，导致路堤在坡脚位置处出现水平位移

最大值。

### (3) 最大剪应变分析

图 17 为不同坡脚积水深度工况下的最大剪应变云图，由图可知：不同工况下，路堤最大剪应变云图在坡体内均呈现圆弧形，最大值位置均位于右侧坡脚处，之后沿着弧线向着路堤内部不断斜向上发展。随着坡脚积水从 1 m 不断增至 2 m 和 3 m 时，最大剪应变云图的极值区不断向上发展扩大，并且最大剪应变的最值也从 0.055 增至 0.181 和 0.795。坡脚积水会导致坡脚处的土体不断软化，抗剪强度逐渐降低，在重力作用下路堤上方土体会逐渐向坡脚处不断滑移，剪应变的极值区发展方向就是路堤土体的滑移轨迹。



a) 坡脚积水 1 m b) 坡脚积水 2 m



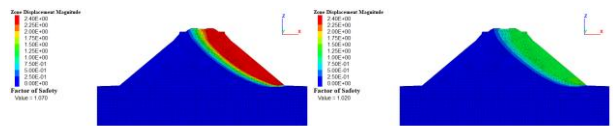
c) 坡脚积水 3 m

图 17 最大剪应变云图

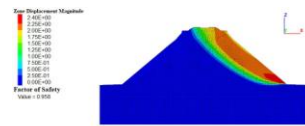
Fig.17 Maximum shear strain nephogram

### (4) 稳定系数分析

对不同坡脚积水深度工况下路堤边坡的土体进行强度折减，对路堤边坡破坏失稳时的位移分布情况进行分析，求得不同坡脚积水深度工况对应的稳定系数值。



a) 坡脚积水 1 m b) 坡脚积水 2 m



c) 坡脚积水 3 m

图 18 路堤失稳总位移云图

Fig.18 Magnitude displacement nephogram of embankment instability

由图 18 可知：不同坡脚积水深度工况下路堤滑移失稳时，位移分布形式较为相似，且都在坡脚处出现位移最大值。坡脚积水取 1 m、2 m、3 m 时，对应的路堤边坡稳定系数分别为 1.070、1.020、0.958，说明坡脚积水的增大会导致路堤边坡稳定系数的下降，在工程实际中为了保证路堤边坡的稳定，

应尽量避免在路堤坡脚处持续积水。

### 3 钢花管防治技术效果分析

#### 3.1 整治工程措施

针对水害灾情严重、抢险任务紧迫的路堤滑坡快速控制难题，采用多次分段控制注浆钢花管防治技术整治路堤边坡，为铁路水害的应急抢险与快速抢通提供技术途径。

选取 2.1.2 节描述的实际工程案例施作整治工程。坡顶处设置两排竖向钢花管，钢花管长 12 m，水平间距（沿线路方向）1 m，垂直间距 0.75 m。坡面设置两排斜向钢花管，钢花管长 12 m，水平间距（沿线路方向）2 m，第一排距路肩垂直高度 4 m，第二排距路肩垂直高度 11 m。坡脚设平台连接板，厚度 0.5 m。平台连接底部设置三排竖向钢花管，钢花管长 6 m，水平间距（沿线路方向）1 m，垂直间距 0.75 m。框架梁横梁和竖肋截面尺寸 50×40 cm。整治工程断面图见图 19。

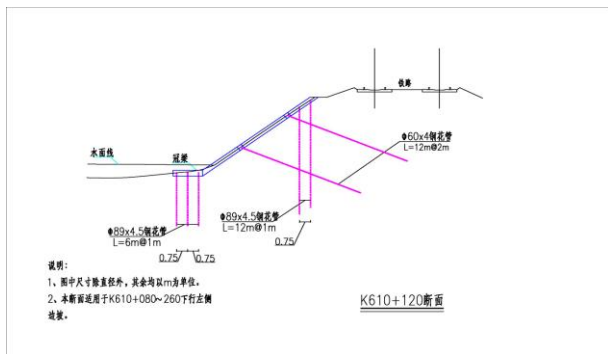


图 19 钢花管防治技术整治路堤边坡工程断面图

Fig.19 Sectional view of regulation project of embankment slope by steel floral pipes prevention technology

#### 3.2 挖探调查分析

在钢花管锚固段以下 1.2~2.2 m 深度范围内挖探调查各浆脉的空间分布与几何尺寸（见图 20），计算劈裂注浆体在调查平面内的体积置换率，如表 2 所示，钢花管管周的劈裂注浆体在 1 m 扩散半径范围内综合置换率为 5%，根据以往工程实践经验，全风化花岗岩、全风化页岩、亚粘土地层注浆置换率小于 3%<sup>[21]</sup>，黄土地层劈裂注浆效果良好，浆体充填土体孔隙，隔绝坡体内部流水通道。



图 20 1~3#水泥浆体挖探调查照片

Fig. 20 Photo of digging investigation of 1~3# cement slurry

表 2 黄土地层钢花管劈裂注浆体置换率  
Table 2 The replacement rate of the steel grouting pipe slurry in loess stratum

调查平面面积/m <sup>2</sup>	锚固段以下深度范围/m	土体体积/m <sup>3</sup>	注浆体体积/m <sup>3</sup>	置换率/%
2	1.2-1.4	0.4	0.01800	4.5000
	1.4-1.6	0.4	0.02016	5.0400
	1.6-2.2	1.2	0.06213	5.1775
	合计	2.0	0.10029	5.0145

#### 3.3 高密度电法分析

基于钢花管注浆前后高密度电法电阻率成像物探试验，探究钢花管注浆技术的劈裂注浆效果，如图 21 a) 所示，在注浆前，沿剖面方向 30-50 m 处 7-14 m 深度范围、沿剖面方向 50-85 m 处 3-12 m 深度范围、沿剖面方向 85-113 m 处 8-14 m 深度范围内呈低电阻值区，该区域电阻值在 10 mΩ 左右，且该低电阻值区在剖面内呈现连续带状分布，推测该区域呈现低电阻值与黄土整体密实度较低、含水率较高有关。

如图 21 b) 所示，在注浆后 2 个月，连续带状分布的低电阻值区消失，剖面内电阻值提高。沿剖面方向 30-50 m 处 7-14 m 深度范围内呈高电阻值区，该区域电阻值范围为 73.1~337 mΩ，电阻值较注浆前显著提升；沿剖面方向 50-85 m 处 3-12 m 深度范围内，与注浆前相比，连续带状分布的低电阻值区被几处独立分布的椭球状中高电阻值区取代；沿剖面方向 85-113 m 处 8-14 m 深度范围内电阻值为 7.40~73.1 mΩ，电阻值较注浆前提升。黄土边坡内部的孔隙得以充填，凝固之后的水泥浆体封堵坡体内部裂隙，隔绝了坡体内部的流水通道，钢花管注浆技术抑制坡体内部受水侵蚀的效果良好。

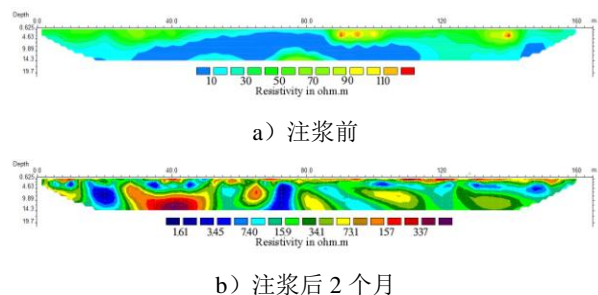


图 21 高密度电法试验成果解译

Fig.21 Test interpretation results of multi-electrode resistivity method

#### 3.4 数值模拟分析

为验证钢花管防治技术整治工程的有效性，以图 19 所示整治措施为方案背景进行数值模拟，并按照 2.2 节坡脚积水的最不利工况设置边界条件，分析在坡脚积水 3 m 深度情况下整治措施的有效性。



3.4.1 数值模型建立

依据图 19 所示边坡整治工程断面图的技术方案,结合 2.1.2 节描述的实际工程案例典型断面建立数值计算模型(见图 22)。

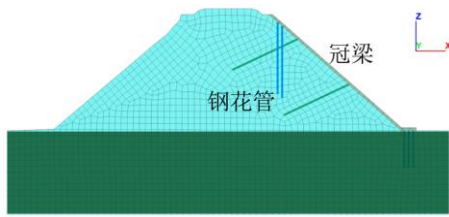


图 22 加固后数值计算模型

Fig.22 Numerical calculation model after reinforcement

3.4.2 计算参数选取

依据挖探调查结果,钢花管劈裂注浆的影响半径为 1 m,未受注浆影响的土体物理力学参数取值见表 1。注浆后粉土粘聚力提升至 35 kPa,内摩擦角提升至 23°;粉质黏土粘聚力提升至 40 kPa,内摩擦角提升至 20°。冠梁、钢花管材料参数取值见表 3。数值模型中土体计算采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型,冠梁、钢花管等结构采用弹性(Elastic)模型。

表 3 冠梁、钢花管等材料参数

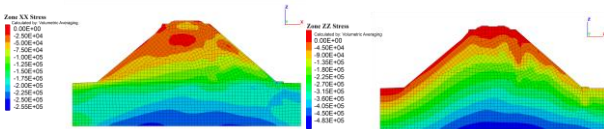
Table 3 Crown beams and steel grouting pipe parameters

	密度/kg m <sup>-3</sup>	弹性模量/MPa	泊松比
冠梁	2360	3.00e4	0.20
钢花管	7850	2.06e5	0.20

3.4.3 计算结果分析

(1) 应力场分析

图 23 为加固后坡脚积水 3 m 时的路堤应力云图,应力云图的分布趋势与未加固时相似,路堤的表面处应力为零,之后随着深度增大,路堤所受上覆荷载逐步增大,路堤整体受到的压应力逐渐增大,在模型底部达到最大值。在钢花管及注浆的作用下,模型右侧边坡的水平与竖向应力有所增大,整体表现不对称分布。水平应力和竖向应力最大值分别为 -0.255 MPa 和 -0.483 MPa(负值表示受压),相较于未加固时分别增加 0.008MPa 和 0.003MPa。



a) 水平应力 b) 竖向应力

图 23 加固后坡脚积水 3 m 工况应力云图

Fig.23 Stress nephogram when the depth of accumulated water is 3 m after reinforcement

(2) 位移场分析

图 24 为加固后坡脚积水 3 m 时的路堤总位移云图,总位移的最大值位于施作了坡脚竖向钢花管

的区域,沿着右侧坡面向上位移逐渐减小。施作钢花管后的总位移最大值为 1.55 cm,在路肩位置总位移仅有约 0.5 cm,而未加固情况下坡脚处位移最大值为 43.60 cm,且整个右侧坡面的位移数值均达到 10 cm 以上,故整治措施能够有效的减少边坡受水浸泡,底部总位移减小 42 cm,加固效果明显。

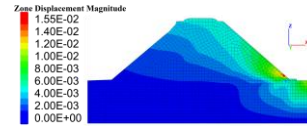
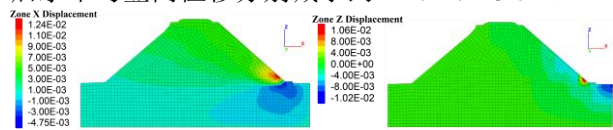


图 24 加固后坡脚积水 3 m 工况总位移云图

Fig.24 Magnitude displacement nephogram when the depth of accumulated water is 3 m after reinforcement

进一步分析钢花管加固后坡脚积水 3 m 条件下路堤位移在不同方向的分布,提取路堤的水平与竖直方向位移云图,如图 25 所示。与未加固时相比较,路堤水平位移的最大值位置仍在坡脚处,水平位移最大值为 1.24 cm,路堤水平位移沿着路堤坡面向上逐渐减小;路堤竖向位移的最大值则由路肩变为坡脚位置,竖向位移的最大值为 1.06 cm,在坡脚钢花管支挡作用的影响下表现为向上变形。施作钢花管后水平与竖向位移分别减小约 42 cm、23 cm。



a) 水平位移 b) 竖向位移

图 25 加固后坡脚积水 3 m 工况位移云图

Fig.25 Displacement nephogram when the depth of accumulated water is 3 m after reinforcement

整治前后对比可以发现,钢花管加固能够有效的减小因坡脚积水而产生的边坡位移,总位移减小约 97%。加固后模型的水平位移与竖向位移均位于坡脚处,这是因为坡脚土体受水浸泡饱和,土体强度降低,坡面位移被钢花管加固约束住,位移变形积聚到边坡底部。

(3) 最大剪应变分析

图 26 为最大剪应变云图,边坡最大剪应变为 0.0142,与未加固时相比较,最大剪应变减小约 0.7808,剪应变数值急剧减小。同时,剪应变主要产生在坡脚位置,与加固前的沿边坡滑移面发展有所不同,也进一步说明加固后并未有发生边坡滑移的风险。

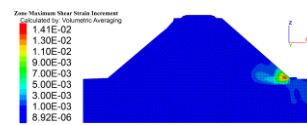


图 26 加固后最大剪应变云图

Fig.26 Maximum shear strain nephogram after reinforcement

(4) 稳定系数分析

对该工况下路堤边坡的土体进行强度折减,分



析路堤边坡破坏失稳时的位移分布情况,如图 27 所示。路堤边坡稳定系数为 1.164,较未加固时增加 0.206,进一步说明施加钢花管对边坡稳定性有提高作用。同时,可以看出最不利情况下边坡失稳发生在左侧边坡而非右侧积水边坡,说明此时破坏并非由坡脚积水引起,而是由边坡自身的坡形与岩土性质决定,施加钢花管对边坡的加固效果明显。

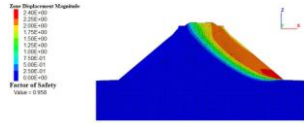


图 27 加固后路堤失稳总位移云图

Fig.27 Magnitude displacement nephogram of embankment instability after reinforcement

## 4 结论

本文以黄土路堤滑坡为研究对象,采用现场调查、现场试验、数值模拟的研究手段,提出黄土路堤滑坡破坏模式,研究路堤滑坡破坏机制,分析注浆钢花管防治技术效果,得出如下结论:

(1)路堤滑坡是一种路堤坡体病害,路堤坡脚的低洼地形使得降水汇集与积聚,为病害的孕育提供地形条件。边坡坡脚持续积水,浸泡软化路堤边坡,引起边坡岩土抗剪强度不足导致弧形滑移破坏,并牵引路堤上部变形开裂,当弧形滑移面与上部牵引裂面贯通后,形成路堤滑坡。

(2)坡脚积水深度对路堤边坡的竖向应力场无明显影响,路堤表面处竖向应力为零,随着积水深度增大,竖向应力在模型底部达到最大值,整体上呈现“凸”字型分布。坡脚积水深度对积水侧边坡的水平应力场影响显著,随着积水深度增大,路堤积水侧坡脚的水平应力分布产生突变的区域面积增大。

(3)坡脚积水深度对积水侧边坡的位移场影响显著,随着积水深度增大,土体受水浸泡饱和的影响区域增大,更大范围的土体强度降低,积水侧边坡水平位移和竖向位移不断增大,最大剪应变的峰值增大,稳定系数不断减小。

(4)通过钢花管注浆后的挖探调查,钢花管注浆技术在黄土地层劈裂注浆效果良好,注浆置换率达 5%。通过钢花管注浆前后高密度电法探测分析,注浆前连续带状分布的低电阻值区被几处独立分布的椭球状中高电阻值区取代,注浆后黄土地层电阻值显著提升,注浆前黄土整体密实度较低、含水率较高的问题已通过注浆得以改善。

(5)数值模拟表明钢花管防治技术整治路堤边

坡可有效控制路堤边坡的位移量,大幅降低路堤边坡的最大剪应变,提升边坡稳定系数。

## 参考文献:

- [1] 胡涛. 侯马—月山铁路路基水害特征及防治技术研究 [D].兰州交通大学,2015.  
Hu T. The Study of Characteristics of Subgrade Flood Disaster and Reinforcement & Control Technology of Houma-Yueshan Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [2] 王斌. 兰州铁路局管辖内湿陷性黄土路基病害模式及防治措施研究[D].西南交通大学,2015.  
Wang B. Study on Subgrade Diseases Model and Prevention Measures of collapse Loess in Lanzhou Railway Administration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [3] Liu J X, Liu Y T, Hu Q J. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):903-910.
- [4] Feng J, Zhang L, Gao L, et al. Stability of railway embankment of China under extreme storms[J]. Environmental Geotechnics, 2018, 6(5):269-283.
- [5] Xu S, Zs áki A M. Maximum safe freight train speed on railway embankments under rapid drawdown conditions based on coupled stress-seepage slope stability analysis[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27:100486.
- [6] ISHIZUKA M, MATSUMARU T, WATANABE K, et al. Dynamic response characteristic analysis for the railway embankments seriously damaged in the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake[J]. Geosynthetics Engineering Journal, 2006, 21:195-202.
- [7] Polemio M, Lollino P. Failure of infrastructure embankments induced by flooding and seepage: a neglected source of hazard[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2011, 11(12):3383-3396.
- [8] Roshan M J, Rashid A, Wahab N A, et al. Stability of Railway Embankment in Saturated and Unsaturated Conditions[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1153(1):012007 (14pp).
- [9] 张玉芳,范家玮,袁坤.重大滑坡灾变机制与防治新技术研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(08):1910-1927.  
Zhang Y F, Fan J W, Yuan K. Disaster-induced mechanisms and prevention and control new technologies of major landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(08):1910-1927. (in Chinese)

- [10] 吴红刚,冯文强,艾挥等.山区机场高填方边坡工程实践与研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(02):385-400.  
Wu H G, Feng W Q, Ai H, et al. Engineering Practice and Research on High Fill Slope of Mountainous Airport [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018,38(02):385-400. (in Chinese)
- [11] 李玉瑞,吴红刚,赵金等.模拟降雨作用桩锚-加筋土组合结构加固边坡研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(03):516-523.  
Li Y R, Wu H G, Zhao J, et al. Study on Simulated Rainfall Effect on Pile-anchor-reinforced Soil Combined Structure for Slope Reinforcement [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019,39(03):516-523. (in Chinese)
- [12] 范家玮,张玉芳,李知军等.陇海铁路路堤沉降变形与深部位移监测及防治[J].铁道建筑,2022,62(10):126-130.  
Fan J W, Zhang Y F, Li Zh J, et al. Monitoring and Prevention of Settlement Deformation and Deep Displacement of Lanzhou-Lianyungang Railway Embankment [J]. Railway Engineering, 2022,62(10):126-130. (in Chinese)
- [13] 孙建华.既有线路高边坡滑坡及坍塌病害治理施工[J].科技创新与应用,2016(11):253.  
Sun J H. Treatment and Construction of Landslide and Collapse Diseases for High Slope of Existing Line Cutting Slope [J]. Technology Innovation and Application, 2016(11):253. (in Chinese)
- [14] 钱征宇.湿陷性黄土地区铁路的主要技术问题及其工程措施[J].中国铁路,2006(02):28-32+82.  
Qian Zh Y. Main Technical Problems and Engineering Measures of Railway in Collapsible Loess Areas [J]. China Railway, 2006(02):28-32+82. (in Chinese)
- [15] 王飞.袖阀管注浆土体劈裂特征及基于加速度响应的无损评价[D].兰州交通大学,2020.  
Wang F. Cleavage Characteristics of Sleeve Valve Pipe Grouting Soil and Nondestructive Evaluation Based on Acceleration Response [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [16] 程康.兰新高速铁路某区段路基沉降整治措施及治理效果研究[D].兰州交通大学,2018.  
Cheng K. The Study on remediation measures and treatment effect of a section of Lanzhou-Xinjiang high speed railway subgrade settlement [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [17] 王星博.兰新高速铁路军马场至民乐区间路基沉降监测与防治技术研究[D].兰州交通大学,2018.  
Wang X B. Studies on Subgrade Settlement Monitoring and Prevention Technology in Jun Ma chang-Minle of Lanzhou-Xinjiang High-speed Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [18] Shun-Chuan WU, Jin AB, Gao Y T. Studies of sleeve-valve-pipe grouting technique and its effect on soil reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):1353-1358.
- [19] Zhou M R, Zhang J B, Chen Z C, et al. Experimental Study on Mixing Ratio of Sleeve Valve Pipe Grouting Casing Material Based on Loess Foundation[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018.
- [20] 尹海魁,许皞,李大伟,夏书培,周亚鹏,赵文廷.中国土地自然类型划分的探讨[J].江苏农业科学,2017,45(01):217-223.  
Yin H K, Xu H, Li D W, et al. Discussion on the Classification of Natural Types of Land in China [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(01):217-223. (in Chinese)
- [21] 袁坤.多次分段控制注浆钢管花管支挡加固技术的研究与应用[D].中国铁道科学研究院,2019.  
Yuan K. Research and application of multi-section control grouting steel tube support reinforcement technology [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019. (in Chinese)