



地址：香港油尖旺區大角咀通州街 111 號雲之端 509 室
邮编：999077
电话：00852 2742 8981
电子邮箱：zgjxscb@163.com

先进工程集成
ADVANCED ENGINEERING INTEGRATION

2025 年 第 1 卷 第 1 期

先进工程集成

ADVANCED ENGINEERING INTEGRATION

2025 / 01

第 1 卷 第 1 期

月刊 创刊于 2025 年



ISSN 2095-7971



定价：30 元 / 册

主办单位 中國紫荊學術出版社有限公司

先进工程集成

ADVANCED ENGINEERING INTEGRATION

2025年1月第1卷第1期（月刊，创刊于2025年）

2025 Volume 1 Issue 1 (Monthly, Founded in 2025)

主办单位 中國紫荊學術出版社有限公司

主 编 陈学文

副主编 吴 谦

编 务 樊利兰 符宇芬 龚赛群 姚明花

编辑出版 《先进工程集成》编辑部

电子邮箱 zgjxscb@163.com

网 站 www.global-infrastructure-
investment.com

稿件查询 00852 2742 8981

出版日期 每月 25 日

联系地址 香港油尖旺區大角咀通州街
111 號雲之端 509 室

邮 编 999077

Sponsored by China Bauhinia Academic Publishing
House Co., Limited

Editor in Chief CHEN Xuewen

Deputy Editor in Chief WU Qian

Editors FAN Lilan FU Yufen GONG Saiqun YAO Minghua

Edited and Published by *Advanced Engineering Integration*
editorial department

Email zgjxscb@163.com

Telephone 00852 2742 8981

Publication Date The 25th of each month

Address RM 509, 5/F THE CLOUD 111 TUNG CHAU ST TAI
KOK TSUI HONG KONG

Postal Code 999077

《先进工程集成》编辑委员会

ADVANCED ENGINEERING INTEGRATION Editorial Committee

学术顾问 李烈军

主 任 张孝锋

副主编 吴 谦

编 委 （按姓氏拼音排序）

陈朝杰 丁 熊 冯 雨 郭会娟

黄 炼 李建华 李 森 黎世光

刘福龙 刘 萍 吴军伟 俞 洁

张 娜 张小开

Academic Consultant LI Liejun

Director ZHANG Xiaofeng

Members (Sorted by alphabetical order of surname in Pinyin)

CHEN Chaojie DING Xiong FENG Yu

GUO Huijuan HUANG Lian LI Jianhua

LI Sen LI Shiguang LIU Fulong

LIU Ping WU Junwei YU Jie

ZHANG Na ZHANG Xiaokai

城市新基建

智慧城市 迎机遇



2025 年 第 1 卷 第 1 期 (月刊, 创刊于 2025 年)

■ 前沿动态

- 001 东非既有米轨铁路轨道修复施工方法及验收标准研究 戴德馨
003 基于 XDoG-Wiener 算法的混凝土结构裂缝识别技术研究 刁连鹏
005 基于 Rosin-Rammler 的离散元扩大头抗浮锚杆抗拔力学特性影响研究 杨靖

■ 技术集成应用

- 010 阿联酋乌姆盖万 150MIGD 海水淡化厂基础沉降施工控制技术 潘登
015 大跨度曲线钢箱梁上跨双线铁路施工全过程性能监测研究 张平
020 建筑平移改造前期基坑支护设计与实践 陈心兴
023 公路软土路基处理中的水泥搅拌桩施工工艺及质量控制措施研究 赵子龙
027 上跨高速公路大跨度桥梁转体监控技术研究 张冬, 黄波, 陶永博, 等
030 粉土地区基坑开挖空间作用对运营隧道变形的影响研究 孙永生
034 城市地下综合管廊深基坑支护受力与变形特性研究 董建鹏
038 基于颗粒离散元方法的膨胀土路基破坏特征研究 谭福官
042 高速公路拼接段沉降变形特性及地基处理方案研究 李庆广
046 基于响应面法的中央索面预应力混凝土斜拉桥参数敏感性分析 肖云华, 钟开建, 何驰
050 地铁暗挖车站爆破施工对既有大型建筑物结构稳定性的影响分析 龙明华, 龙星宇
053 基于粒子群算法的火力发电厂粉煤灰高性能混凝土配合比优化 杨东林

■ 设备材料集成

- 056 彩色防滑罩面在隧道洞口亮化工程中的应用 郑志华, 赵普, 李明
059 高速公路机电系统故障预测方法研究 张凤
062 长短桩复合地基在软土区水闸地基处理中的应用 欧强, 韦昌友
065 高速公路隧道机电系统温度监测研究 张婷婷
068 基于蜡类降黏剂的温拌 SBS 改性沥青试验研究 周义生, 彭凯, 张阳光, 等
071 抗滑超薄沥青路面快速修补材料及尺寸设计 刘锦盛
074 高模量沥青混合料路用性能试验分析 方天明
077 道路桥梁工程原材料试验检测技术分析 鄂淑英
080 某公园河道淤泥的资源化利用研究 陈石
083 铜芯电线电缆的制造工艺与创新发 展路径 张舒婷, 袁舒畅, 叶汝夏

目次

■ 先进工程管理

- | | | |
|-----|---------------------------|---------------|
| 087 | 精益设计管理在房地产项目中的应用研究 | 池仁安 |
| 090 | 基于 BIM 的铁路桥梁全周期绿色智能维养研究 | 路芳, 郭芳, 张晨, 等 |
| 093 | 悬臂式连续梁施工质量管理研究 | 于红健 |
| 098 | 桥梁承台钢板桩围堰施工安全性分析 | 周光军 |
| 102 | 基于逼近理想排序法的公路桥梁施工质量管理研究 | 姚金体 |
| 105 | 公路独柱墩桥梁加固方法及抗倾覆性能分析 | 张志成 |
| 108 | 公路工程施工质量管理水平评价研究 | 吴双萍 |
| 115 | 高速公路沥青混凝土路面施工技术及质量控制措施研究 | 张同新 |
| 119 | 改扩建高速公路隧道特殊路段施工及监控量测方法研究 | 田玉杰 |
| 121 | 市政代建工程项目进度控制中的预警机制及纠偏措施 | 余培清 |
| 124 | 县域城市道路建设中的工程质量控制与管理研究 | 侯茂盛 |
| 127 | 生态袋护坡在高速公路边坡防护中的施工流程与质量控制 | 张国雄 |
| 131 | 山岭重丘区高速公路改扩建工程造价控制难点及策略分析 | 刘为鉴 |
| 134 | 高速公路工程造价影响因素及控制措施分析 | 罗志钦 |
| 140 | 沥青路面施工现场压实度检测研究 | 蒋和友 |
| 144 | 基于数字孪生技术的水利工程建设全过程控制方法研究 | 陈凤 |
| 147 | 土岩复合地层坑中坑分层开挖监测分析 | 白圻业 |
| 150 | 粤东地区防洪排涝现存问题及强化策略 | 聂磊 |

■ 工程教研

- | | | |
|-----|----------------------------|-----------------|
| 153 | 基于数字孪生技术的害虫识别系统及其在职业教育中的应用 | 潘力, 罗志霄, 揭英昊, 等 |
|-----|----------------------------|-----------------|

■ 创新探索

- | | | |
|-----|--------------------------------|---------|
| 157 | 三维激光扫描与无人机倾斜摄影融合技术在滑坡体精细测量中的应用 | 张昊 |
| 160 | 基于三维激光扫描技术的建筑物变形监测与数据分析 | 石自桂 |
| 166 | 三维激光扫描仪技术在市政管网检测中的应用 | 钟素珍 |
| 170 | 点云数据融合与三维建模优化在地质工程中的应用 | 江梦馨 |
| 174 | 激光雷达在复杂地形测绘中的应用 | 何明洋 |
| 180 | 无人机遥感技术在山区道路测绘中的应用 | 韦威 |
| 183 | 多源遥感数据融合在土地利用变化监测中的应用 | 林月卿 |
| 188 | 某水电站扩机工程进水口岩坎爆破施工技术研究 | 杨勇, 周环宇 |
| 192 | 综合物探法在地下管线探测中的应用 | 张小涛 |

FRONTIER DEVELOPMENTS

- 001 Research on Track Repair Construction Method and Acceptance Criteria of Existing Meter Gauge Railway in East Africa
DAI Dexin
- 003 Research on Concrete Structure Crack Identification Technology Based on XDoG-Wiener Algorithm
DIAO Lianpeng
- 005 Research on the Influence of Discrete Element Exlarged Head Anti-floating Anchor Pull-out Mechanical Property Based on Rosin-Rammler
YANG Jing

TECHNOLOGY INTEGRATION AND APPLICATION

- 010 Foundation Settlement Control Technology for 150MIGD Seawater Desalination Plant in Umm-al-Qaiwain of the United Arab Emirates
PAN Deng
- 015 Research on Whole Process Performance Monitoring of Large-span Curved Steel Box Girder Overcrossing Double-track Railway Construction
ZHANG Ping
- 020 The Design and Practice of Foundation Pit Support in the Early Stage of Building Translation Reconstruction
CHEN Xinxing
- 023 Research on Cement Mixing Pile Construction Process and Quality Control in Highway Soft Soil Subgrade Treatment
ZHAO Zilong
- 027 Research on Swivel Monitoring Technology for Large-span Bridges Overcrossing Expressways
ZHANG Dong, HUANG Bo, TAO Yongbo, et al.
- 030 Research on the Influence of the Spacial Effect of Foundation Pit Excavation on the Deformation of Operating Tunnel in Silty Soil Area
SUN Yongsheng
- 034 Research on the Force and Deformation Characteristic of Deep Foundation Pit Support for Urban Underground Comprehensive Pipe Gallery
DONG Jianpeng
- 038 Research on Failure Characteristic of Expansive Soil Subgrade Based on Particle Discrete Element Method
TAN Fuguan
- 042 Research on Settlement and Deformation Characteristic and Foundation Treatment Scheme of Expressway Splicing Section
LI Qingguang
- 046 Parameter Sensitivity Analysis of Central Cable Plane Prestressed Concrete Cable-stayed Bridge Based on Response Surface Methodology
XIAO Yunhua, ZHONG Kaijian, HE Chi
- 050 Analysis of the Influence of Undercutting Subway Station Blasting Construction on the Stability of Existing Large Building Structure
LONG Minghua, LONG Xingyu
- 053 The Optimization of Mixture Proportion for Fly Ash High-performance Concrete in Thermal Power Plant Based on Particle Swarm Optimization Algorithm
YANG Donglin

EQUIPMENT AND MATERIAL INTEGRATION

- 056 Application of Colored Anti-Skid Overlay in Tunnel Portal Brightening Engineering
ZHENG Zhihua, ZHAO Pu, LI Ming
- 059 Research on Fault Prediction Methods for Expressway Electromechanical System
ZHANG Feng
- 062 Application of Long-Short Pile Composite Foundations in Sluice Foundation Treatment in Soft Soil Areas
OU Qiang, WEI Changyou
- 065 Research on Temperature Monitoring for Electromechanical System in Expressway Tunnels
ZHANG Tingting
- 068 Test Research on Warm Mix SBS Modified Asphalt Based on Wax-Based Viscosity Reducer
ZHOU Yisheng, PENG Kai, ZHANG Yangguang, et al.
- 071 Rapid Repair Material and Size Design for Anti-Skid Ultra-Thin Asphalt Pavement
LIU Jinsheng
- 074 Analysis of Road Performance Tests for High Modulus Asphalt Mixture
FANG Tianming

- 077 Analysis of Raw Material Test and Detection Technologies for Road and Bridge Engineering E Shuying
 080 Research on Resource Utilization of River Silt in a Park CHEN Shi
 083 Manufacturing Process and Innovative Development Paths for Copper Core Wires and Cables
 ZHANG Shuting, YUAN Shuchang, YE Ruxia

■ ADVANCED ENGINEERING MANAGEMENT

- 087 Research on Application of Lean Design Management in Real Estate Projects CHI Ren'an
 090 Research on BIM-Based Whole-Cycle Green and Intelligent Maintenance of Railway Bridges
 LU Fang, GUO Fang, ZHANG Chen, et al.
 093 Research on Construction Quality Management for Cantilever Continuous Beams YU Hongjian
 098 Safety Analysis of Steel Sheet Pile Cofferdam Construction for Bridge Bearing Platforms ZHOU Guangjun
 102 Research on Highway Bridge Construction Quality Management Based on the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution YAO Jinti
 105 Analysis of Reinforcement Methods and Anti-Overturning Performance for Highway Single-Column Pier Bridge
 ZHANG Zhicheng
 108 Research on Evaluation of Highway Engineering Construction Quality Management Level WU Shuangping
 115 Research on Construction Technologies and Quality Control Measures for Expressway Asphalt Concrete Pavement
 ZHANG Tongxin
 119 Research on Construction and Monitoring Measurement Methods for Special Sections on Reconstructed and Expanded Expressway Tunnels
 TIAN Yujie
 121 Early Warning Mechanism and Corrective Measures in Progress Control of Municipal Agent Construction Engineering Projects
 YU Peiqing
 124 Research on Engineering Quality Control and Management in County-Level Urban Road Construction HOU Maosheng
 127 Construction Process and Quality Control of Ecological Bag Slope Protection in Expressway Slope Protection
 ZHANG Guoxiong
 131 Analysis of Difficulties and Strategies for Cost Control in Expressway Reconstruction and Expansion Engineering in Mountainous and Heavily-Hilly Areas
 LIU Weijian
 134 Analysis of Influencing Factors and Control Measures for Expressway Engineering Cost LUO Zhiqin
 140 Research on Compaction Degree Detection at Asphalt Pavement Construction Site JIANG Heyou
 144 Research on Whole Process Control Method for Water Conservancy Engineering Construction Based on Digital Twin Technology
 CHEN Feng
 147 Analysis of Monitoring for Pit-in-Pit Layered Excavation in Soil-Rock Composite Strata BAI Qiye
 150 Existing Problems and Strengthening Strategies for Flood Control and Drainage in Eastern Guangdong Region NIE Lei

■ ENGINEERING TEACHING AND RESEARCH

- 153 Pest Identification System Based on Digital Twin Technology and Its Application in Vocational Education
 PAN Li, LUO Zhixiao, JIE Yinghao, et al.

■ INNOVATION AND EXPLORATION

- 157 Application of Integrated 3D Laser Scanning and UAV Oblique Photography Technology in Precision Measurement of Landslide Mass
 ZHANG Hao
 160 Building Deformation Monitoring and Data Analysis Based on 3D Laser Scanning Technology
 SHI Zigui
 166 Application of 3D Laser Scanner Technology in Municipal Pipe Network Detection
 ZHONG Suzhen
 170 Application of Point Cloud Data Fusion and 3D Modeling Optimization in Geological Engineering
 JIANG Mengxin
 174 Application and Accuracy Analysis of LiDAR in Complex Topographic Surveying
 HE Mingyang
 180 Application of UAV Remote Sensing Technology in Mountainous Road Surveying and Mapping
 WEI Wei
 183 Application of Multi-Source Remote Sensing Data Fusion in Land Use Change Monitoring
 LIN Yueqing
 188 Research on Blasting Construction Technology for Rock Ridge at the Intake of a Hydropower Station Expansion Project
 YANG Yong, ZHOU Huanyu
 192 Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Methods in Underground Pipeline Detection
 ZHANG Xiaotao

东非既有米轨铁路轨道修复施工方法及验收标准研究

Research on Track Repair Construction Method and Acceptance Criteria of Existing Meter Gauge Railway in East Africa

戴德馨

DAI Dexin

中国路桥工程有限责任公司，北京 100010

China Road & Bridge Corporation, Beijing 100010, China

摘要：东非地区米轨铁路修复施工不同于国内既有铁路的大修工程，一是既有米轨铁路处于废弃及半废弃状态，修复难度大。二是当地近百年未进行铁路建设，铁路相关产业空白，没有相关国家或行业标准、规范等，施工缺乏参照标准。文章以乌干达米轨铁路为例，根据其线路状况及乌干达国情，采取修复施工的主要方法，制定修复过程中的关键控制指标，以确保铁路线路的畅通运行，提高火车运行效率。

关键词：铁路轨道；修复施工方法；验收标准

Abstract: The repair construction of meter gauge railway in East Africa is different from the major repair project of existing railways in China. Firstly, the existing meter gauge railway is in a state of abandonment and semi-abandonment, making repair very difficult. Secondly, there has been no railway construction in the local area for nearly a hundred years, the railway related industry is blank, there are no relevant national or industry standards, norms, etc., and the construction lacks reference standards. Taking Uganda meter gauge railway as an example, according to its line conditions and Uganda's national conditions, this paper adopts the main methods of repair construction, and formulates key control indicators in the repair process, so as to ensure the smooth operation of railway line and improve the efficiency of train operation.

Keywords: railway track; repair construction method; acceptance criteria

分类号：U213

作者简介：戴德馨，男，本科，工程师，研究方向为海外铁路项目管理。

1 工程概况

乌干达米轨铁路网为东非米轨铁路网的一部分，全长约 1266 km，主要分为东线和东北线两部分，铁路设计最大轴重为 18 t，设计速度为 40 km/h^[1]。东非区域既有米轨铁路的修复施工，当地没有可以参照的施工验收标准^[2]。因此，针对既有米轨铁路修复项目施工验收标准的确定，是项目成败的关键因素。

乌干达托罗罗至纳曼维米轨铁路修复项目，是对托罗罗至坎帕拉段的既有米轨铁路的紧急修复工程，主线全长 222 km，另含港支线和岔线 12 km，共计 234 km。该项目的主要施工内容包含路基修复、涵洞及排水施工、轨道工程修复施工三大类。其中轨道工程施工包含道砟清筛、更换钢轨、更换钢枕、更换道岔、道砟的补充及捣固，以及轨道线型的调整等工作^[3]。

2 轨道工程的主要缺陷

(1) 道砟淤积板结，钢枕及钢枕锈蚀、磨损、变形；(2) 轨道扣配件等缺失，导致轨道的轨距超出误差允许范围；(3) 轨道的平面及竖向线型差。

3 轨道工程修复及施工方法

3.1 主要修复方法

针对既有米轨铁路轨道的诸多缺陷，采用的主要修复方法如下：

(1) 清筛板结的道砟，补充道砟，并理顺排水系统；(2) 更换受损的钢轨及钢枕；(3) 更换道岔、补充扣

配件;(4)捣固道砟、起拨道调整轨道线型。

3.2 施工方法

轨道修复施工,需要根据当地的条件,考虑设备、材料、工期、及造价等状况制订相应的施工方案。

(1)轨道工程修复施工流程。主要流程:施工准备→道砟清筛→更换钢轨及钢枕→补充道砟→道砟捣固→线型初调→道岔及平交道口更换→二次捣固→轨道精调→完工验收。

(2)主要施工方法。①道砟清筛:以九齿耙、镐、铲等工具为主,人工进行施工。按工效每人划分段落,用工具将板结的道床扒开,再用九齿叉、九尺耙等工具将道砟与泥土筛分开。再把清筛出来的道砟耙回枕盒,清筛出来的土扒到路肩上,对破损路肩进行修补。在清筛时,要检查轨道是否平整,若发现不平整之处,则用道镐将道砟捣入轨枕底部,保证轨道的状态稳定。②更换钢轨及钢枕:将线路按照10 km左右的距离进行分段,在区段施工前,由业主及承包商的技术人员对各区段进行联合踏勘调查,确认要更换的轨道位置、长度及需要补充的扣配件数量,并做好标记。随后利用火车将钢轨及钢枕等材料运至现场工点,堆存在轨道边。再人工逐段拆除既有的轨道,更换新的钢轨及钢枕,并进行初捣及调轨,待补砟后再进行最后的道砟捣固及调整轨道线型。③补砟施工:根据对线路的踏勘调查,预估所需的道砟量。结合既有车站的分布情况,将线路划分为若干区段,并估算段落道砟需求量,制订道砟供应及储存计划。补砟采用人工配合补砟车进行施工。装载机给补砟车上料后,补砟车沿线路开往补砟点,由人工开启补砟车上的卸料阀,火车在前进过程中缓慢卸料。期间配置一名指挥人员,用对讲机与火车司机及卸渣操作手联系,控制火车前进速度及卸砟速度,以确保卸砟量充足且均匀^[4]。④捣固及调轨施工:捣固调轨施工采用人工配合液压捣固机及液压起拨道机等设备进行施工。捣固调轨施工分三次进行,首先使用道镐、手持式捣固机及小型液压起拨道机对轨道进行初调,确保火车以低速运行,进行补砟作业。补砟后,再使用液压捣固机、液压起拨道机进行再次捣固,调整轨道线型的施工。待第二遍捣固完成后,使用补砟车装载道砟在轨道上行驶以对轨道进行压载,检查捣固及调轨的效果。压载后检查轨道,并对线型不满足要求的段落进行最终捣固及精调。

4 轨道修复施工关键控制点及验收标准

4.1 道砟的质量控制

道砟的质量为轨道工程的关键控制指标,其质量控制主要分为原材料的性能及道砟的粒径要求。结合当地实际情况,与乌干达铁路局商定的道砟质量验收标准如表1所示。

表1 道砟质量验收标准

项目	指标	备注
母料抗压强度/MPa	≥ 80	
道砟粒径/mm	19 ~ 63	
道砟级配/mm	17 ~ 38 ≤ 20%	检测批次:最大 2 000 m ³ /批
	39 ~ 63 ≥ 80%	
压碎值	≤ 30%	
冲击值	≤ 25%	
磨耗值	≤ 50%	
针状指数	≤ 50%	
片状指数	≤ 50%	

4.2 轨道修复施工的质量控制

由于该项目为修复工程,大部分轨道段落为既有旧轨道,小部分段落使用新轨道材料铺设,既有旧轨道材料状态不佳,对轨道的几何尺寸及各项参数影响较大。因此,在满足安全的条件下,将轨道工程的验收标准分为两类,新轨段落轨道修复施工验收标准如表2所示,旧轨段落轨道修复施工验收标准如表3所示。

4.3 现场测量及计算方法

(1)轨距的测量。使用轨道尺进行测量,每20 m测量一处,每处连续测量7根钢枕处的轨距,取轨距偏差的最大值^[5]。(2)轨距变化率的测量。使用轨道尺进行测量,每20 m测量一处,每处连续测量8根钢枕处的轨距值,用第5根钢枕处的轨距值减第1根钢枕处的轨距值,得到的差值除以4,即为轨距变化率,其他钢枕的数据依次计算,得到的结果取最大值。(3)轨道扭曲及超高变化率的测量。轨道扭曲用于直线段检查,超高变化率用于曲线段的检查。使用轨道尺进行测量,每20 m测量一处,每处连续测量8根钢枕处两侧钢轨的高差,用第5根钢枕处的轨距值减第1根钢枕处的轨距值,得到的差值除以两根钢枕处的间距,即为轨道扭曲和超高变化率的值,其他钢枕的数据依次计算,得到的结果取最大值。

表 2 新轨段落轨道修复施工验收标准

序号	检查项目	要求及容许偏差	检查频率	检查方法
1	道砟线型	道砟线型直顺, 轮廓尺寸满足要求	全部检查	目视检查
2	扣配件安装	扣件安装齐全并紧固	全部检查	目视检查
3	轨枕间距	轨枕安装间距满足要求	全部检查	目视检查
4	轨枕方正	所有钢枕与钢轨保持垂直状态	全部检查	目视检查
5	钢轨接缝处高差	$\leq 2 \text{ mm}$	20 m 检查一处	钢尺检查
6	轨缝宽度	4 ~ 16 mm	20 m 检查一处	钢尺检查
7	轨距	+16 mm; -4 mm	20 m 检查一处	轨距尺检查
8	轨距变化率	新轨新枕段 $\leq 3 \text{ mm/枕}$ 新轨旧枕段 $\leq 6 \text{ mm/枕}$	20 m 检查一处	轨距尺检查
9	轨道扭曲 (直线段)	$\leq 4 \text{ mm/m}$	20 m 检查一处	轨距尺检查
10	超高变化率 (曲线段)	$\leq 4 \text{ mm/m}$	20 m 检查一处	轨距尺检查
11	弦量变化率 (曲线段)	$\leq 20 \text{ mm}$	每个曲线段测三处	10 m 弦线进行测量, 钢尺检查

表 3 旧轨段落轨道修复施工验收标准

序号	检查项目	要求及容许偏差	检查频率	检查方法
1	道砟线型	道砟线型直顺, 轮廓尺寸满足要求	全部检查	目视检查
2	轨枕方正	所有钢枕与钢轨保持垂直状态	全部检查	目视检查
3	轨缝宽度	4 ~ 16 mm	20 m 检查一处	钢尺检查
4	轨距	+16 mm; -4 mm	20 m 检查一处	轨距尺检查
5	轨道扭曲 (直线段)	$\leq 8 \text{ mm/m}$	20 m 检查一处	轨距尺检查
6	超高变化率 (曲线段)	$\leq 8 \text{ mm/m}$	20 m 检查一处	轨距尺检查
7	弦量变化率 (曲线段)	$\leq 40 \text{ mm}$	每个曲线段测三处	10 m 弦线进行测量, 钢尺检查

4.4 工程验收评定

(1) 道砟质量的评定。根据道砟的总量, 检查道砟试验检测的频次是否满足要求, 所有的道砟试验检测均需合格。(2) 轨道验收的评定。根据线路的长度, 检查现场检测记录的完整性, 检测记录的里程需连续且完整。每个检测记录包含的段落内检测合格点的比例大于总检测点数的 90%, 曲线段弦量变化率检测点的合格比例需大于 66.6%。(3) 道岔的验收。每处道岔均需进行检测并填写检测记录, 检测结果需全部合格。

5 结束语

文章以乌干达米轨铁路修复项目为例, 针对东非地区既有米轨铁路的线路淤积、轨道变形等问题, 结合当地的条件, 经研究提出了一套修复施工方案。通过清理线路、补充道砟、更换钢轨及钢枕、捣固调轨

等方式, 有效改善既有轨道的性能, 提高现有铁路的运行效率及安全性能。

参考文献

- [1] 王平, 徐井芒, 方嘉宸, 等. 高速铁路轨道结构理论研究进展[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 18-26.
- [2] 徐浩, 代玮武, 周双喜, 等. 修复材料性能对框架板式无砟轨道板角离缝的影响研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023, 36(3): 50-56.
- [3] 李永迪. 轨道交通区间隧道钻穿应急处置及修复施工[J]. 隧道与轨道交通, 2022(2): 42-45, 81.
- [4] 阮舒敏, 赵坪锐, 宁秋娴, 等. 无砟轨道层间离缝植筋修复后的传力特性[J]. 铁道建筑, 2022, 62(5): 23-26.
- [5] 尹志春, 刘洋, 杨德要, 等. 轨道交通车辆黏接接头修复技术研究[J]. 机车车辆工艺, 2021(5): 28-30.

基于 XDoG-Wiener 算法的混凝土结构裂缝识别技术研究

Research on Concrete Structure Crack Identification Technology Based on XDoG-Wiener Algorithm

刁连鹏

DIAO Lianpeng

中铁建设集团有限公司华东分公司, 江苏 苏州 215300

East China Branch of China Railway Construction Group Co., Ltd., Suzhou 215300, Jiangsu, China

摘要: 混凝土结构是常见的建筑结构形式, 建设期内养护不到位, 后期运维过程中出现偶然荷载因素等, 都会导致混凝土出现裂缝。就混凝土结构裂缝而言, 常规的人工目视检查精度与效率较低, 已不能满足现代化检测需要。文章基于 XDoG-Wiener 算法对混凝土结构裂缝识别技术开展相应的研究。通过高精度数字相机对混凝土裂缝信息进行数字采集, 提出了用 XDoG-Wiener 耦合算法对混凝土结构信息进行裂缝信息边缘检测, 通过优化二进制阈值函中敏感参数取值, 运用 Wiener 模板算法进行降噪处理, 实现数字图像裂缝信息可视化。

关键词: 混凝土结构; 裂缝; XDoG-Wiener 算法; 边缘检测

Abstract: Concrete structure is a common form of building structure. Insufficient maintenance during the construction period and occasional load factors during later operation and maintenance can lead to cracks in the concrete. As for cracks in concrete structures, conventional manual visual inspection has low accuracy and efficiency, and can no longer meet the needs of modern detection. Conduct corresponding research on concrete structure crack identification technology based on XDoG-Wiener algorithm. A high-precision digital camera was used to digitally collect concrete crack information, and the XDoG-Wiener coupling algorithm was proposed to detect the edge of crack information in concrete structures. By optimizing the sensitive parameter values in the binary threshold function and

using the Wiener template algorithm for noise reduction, the visualization of crack information in digital images was achieved.

Keywords: concrete structure; cracks; XDoG-Wiener algorithm; edge detection

分类号: TU528

1 研究背景

受不良地质条件、施工管理不当、自然灾害等因素影响, 混凝土结构物难免出现开裂现象^[1]。当混凝土结构承担的荷载超过材料本身的极限强度时, 就可能出现混凝土表面开裂、结构物破坏、局部形变等现象。混凝土开裂的检测工作尤为重要, 通过裂缝检测结果可以判断结构物的安全性, 及时加固补救, 杜绝安全隐患。为详细了解混凝土裂缝状况, 准确掌控结构动态, 对裂缝结构开展开裂信息采集、管理工作必不可少^[2]。一般而言, 典型混凝土裂缝主要采用目视检查与现场记录或照片拍摄的方式进行, 该方法可以对受损结构进行快速调查研究, 判断混凝土开裂的总体情况, 归纳有代表性的裂缝, 初步提出通用性维修加固建议。

随着科技水平的逐步提高, 形成可视化、全面化、精确化的记录结果成为结构物开裂信息采集工作的现实要求。就交通土建结构而言, MIMM、MIMM2、MIMM-R^[3] 公路隧道移动式测绘厢车可对受损隧道衬砌表面进行拍摄与信息记录, 采用 LED 矩阵式光源对隧道洞身进行去暗处理, 同时配备高精度激光传感

作者简介: 刁连鹏, 男, 本科, 工程师, 研究方向为混凝土结构施工与管养。

摄像机进行拍摄, 利用惯性测量装置 (IMU) 进行裂缝物的物理姿态解算, 测绘厢车可以保持低速运行状态对隧道进行全断面扫描, 提供衬砌连续的图像。祝志恒等^[4]基于透视变换及形函数平面变换算法研究, 提出了一种结构物图像的展平方法, 通过该方法可对开裂结构形成一套标准化的数字图像处理技术, 在保障拍摄图像精度的同时有效还原混凝土裂缝特征。WANG T T 等^[5]基于激光照射点辅助 CCD 相机拍摄的数字图像, 提出运用图片描廓方法 (Profile-Image Method, PIM) 对混凝土结构裂缝信息进行采集, 通过对数字图像进行全景图像展平以获取裂缝信息。通过 CCD 相机获取的数字图像精度与质量较高, 且该方法可以识别宽度大于 0.45 mm 的混凝土裂缝。

文章以全景数字图像为基础, 提出运用 XDoG-Wiener 耦合算法对全景图像进行裂缝信息边缘检测, 通过优化二进制阈值函数中敏感参数取值与 Wiener Filtering 模板, 实现全景图像裂缝信息可视化。

2 边缘检测技术

2.1 一阶微分算子

边缘检测 (Edge Detection) 是结构物裂缝图片常用的处理方式, 可以迅速找出数字图像中亮度明显变化的区域^[6]。受损结构数字图片转置为灰度图后, 裂缝与混凝土表面之间灰度急剧变化的区域称为边缘, 灰度变化的状态可以采用灰度的分布梯度表示。边缘检测中较为传统的方式侧重于识别与图像梯度相关的像素, 由此引出的一阶微分算子利用图片沿特定方向的一阶导数值判定图像梯度, 通过函数变化率最大的方向确定图像边缘^[7]。

一般采用 Prewitt 算子与 Sobel 算子一阶微分算子对数字图像进行边缘检测。Prewitt 与 Sobel 算子通过一个足够小且是整数的滤波器对整张图像在水平和垂直两个方向上做卷积, 当梯度大于等于某个阈值即识别为边缘。此类滤波器对噪声非常敏感。因此通常会对图像进行预模糊去除高频, 从而减少噪声干扰。除上述两种一阶微分算子外, Canny 算子也常被用于边缘检测, 其提供了一种通过梯度幅度阈值处理的改进方式。在获得提的梯度方向与大小之后进行非最大抑制检测图像局部最大值, 从而定位数字图像边缘。滞后阈值增强了检测边缘线的相干性, 并减少了边缘精

确定位的误差^[8]。

2.2 二阶微分算子

与一阶微分算子相比, 二阶微分算子主要寻找灰度突变处, 而不是根据梯度的变化加以判断。因此, 二阶微分算子比一阶微分算子精度更高。

Laplacian 算子是一个典型各向同性二阶微分算子, 由于其具有旋转不变的特性, 很好地解决了二维问题带来的困扰。然而, 作为二阶导数, Laplacian 算子对噪声非常敏感, 因此可以采用低通滤波器进行预模糊, 以消除噪声干扰。Gaussian 平滑滤波器常作为这种具有理想频率和尺度空间特性的滤波器, 形成 Log 算子^[9]。

DoG 算法将原始灰度图像的模糊图像从另一幅灰度图像进行增强, 通过 DoG 降低模糊图像的模糊度。DoG 运算从一幅图像中减去另一幅图像, 可以保存在两幅图像中共同频带中含有的空间信息。相当于一个带通滤波器, 能过滤原始图像中被保留的频率之外的所有其他频率信息。

Log 算法对背景相对单一的墙体处理效果较好, 且裂缝特征明显, 背景复杂的混凝土表面, 处理结果中噪点较少但特征不明显。利用 DoG 算子处理背景相对单一的墙体, 处理效果较差且裂缝特征不明显, 混凝土表面处理结果中噪点较多但特征明显, 两种算法均存在一定的局限性。

3 扩展高斯差分算法

为解决前述一阶、二阶微分算子边缘检测存在的问题, 采用 eXtended difference-of-Gaussians (XDoG) 算法对混凝土结构全景展开图进行边缘检测工作。前述 DoG 算子并没有严格的边缘检测标准, 为达到边缘增强效果, 使用 DoG 响应的阈值函数进行判别:

$$T_{\varepsilon}(u) = \begin{cases} 1 & u \geq \varepsilon \\ 0 & u < \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{\varepsilon}(u)$ 为 DoG 响应的阈值函数; u 为 DoG 算子的输出; ε 为用以控制算法对噪声敏感性的参数。

采用 DoG 的变形形式:)

$$D_{\sigma, k, \tau}(x) = G_{\sigma}(x) - \tau \cdot G_{k\sigma}(x) \quad (2)$$

式中: $D_{\sigma, k, \tau}$ 为 DoG 算子表达式; G 为高斯卷积核; τ 为控制高斯差分图的参数; k 为缩放比率; σ 为高斯卷积核的方差。

通过修正式 (1) 可以取得更清晰的结果, 尤其是通过连续函数代替二进制的阈值:

$$T_{\varepsilon, \varphi}(u_1) = \begin{cases} 1 & u_1 \geq \varepsilon \\ 1 + \tanh[\varphi \cdot (u_1 - \varepsilon)] & u_1 < \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{\varepsilon, \varphi}(u_1)$ 为改进的阈值函数; \tanh 为双曲正切函数; u_1 为高斯差分图中每个像素点的灰度值; φ 为输出曲线斜率的控制参数。

对图像函数 $f(x, y)$ 而言, $T_{\varepsilon, \varphi}(D_{\sigma, k, r} * f)$ 可以定义为 XDoG 过滤器, 其中 “*” 为卷积。

XDoG 算法对控制方程参数的选取比较敏感, 需调整控制方程参数赋值, 以应对不同拍摄的条件及拍摄结果, 进一步优化所得图像的清晰度。不同参数条件下 XDoG 的处理效果如图 1 所示, 由图 1 可知, 当 ε 为 88 时, 整体识别效果最好, 能有效刻画混凝土表面基本细节。但是, 混凝土结构全景图像混凝土表面干扰因素繁多, 还是存在噪点干扰。因此, 如何采用 XDoG 算子检测图像进行去噪处理是亟须解决的问题。

4 二维自适应维纳滤波图像去噪

混凝土表面非开裂处由于色差、污渍、施工缝等原因, 难免检测出连续的线条, 再加上混凝土表面本身不平顺, 易产生干扰的孤立噪点。因此, 需要对这些孤立噪点进行处理及抑制, 减少检测图片的干扰因素。从自定义的输入数据中滤除噪点, 实现所提取信息有效化的操作即为滤波, 常用的滤波器有算术均值滤波、中值滤波及二维自适应维纳滤波等。

维纳滤波 (Wiener Filtering) 是一种基于最小均方误差 (Mean-Square Error, MSE) 准则的滤波方法, 其通过使 MSE 最小化提取被平稳噪声干扰的信号。在去噪效果较好的自适应滤波中, MSE 可以作为其目标函数。二维自适应维纳滤波通过误差 (输出信号与期望的信号值) 的控制, 自动调整输入信号, 以获得更接近期望的信号值。

不同过滤器去噪效果对比如图 2 所示。基于均值滤波、中值滤波、二维自适应维纳滤波, 对 XDoG 混凝土结构边全景图像图 2 (a) 进行去噪处理。操作系统为 Windows10 64-bit, 处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU@2.20 GHz, 内存 8 GB。

从图 2 可以看出, 在采用二维自适应维纳滤波处理过的图像中, 干扰噪点的数量远远小于均值滤波及

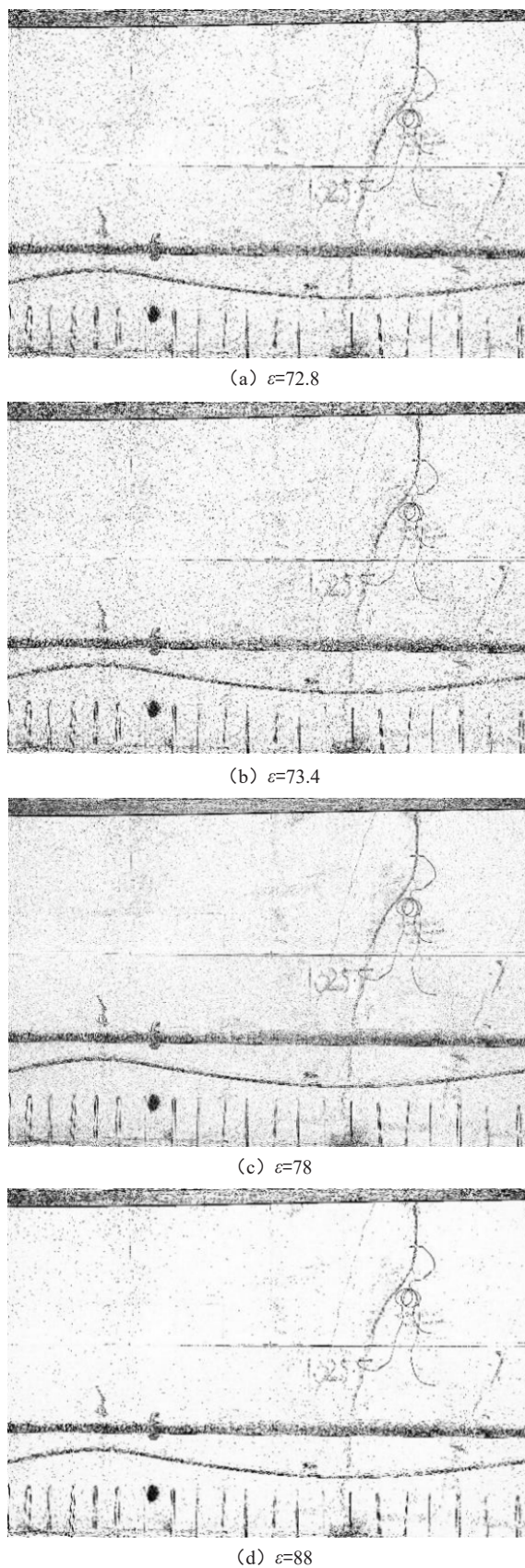


图 1 不同参数条件下 XDoG 的处理效果

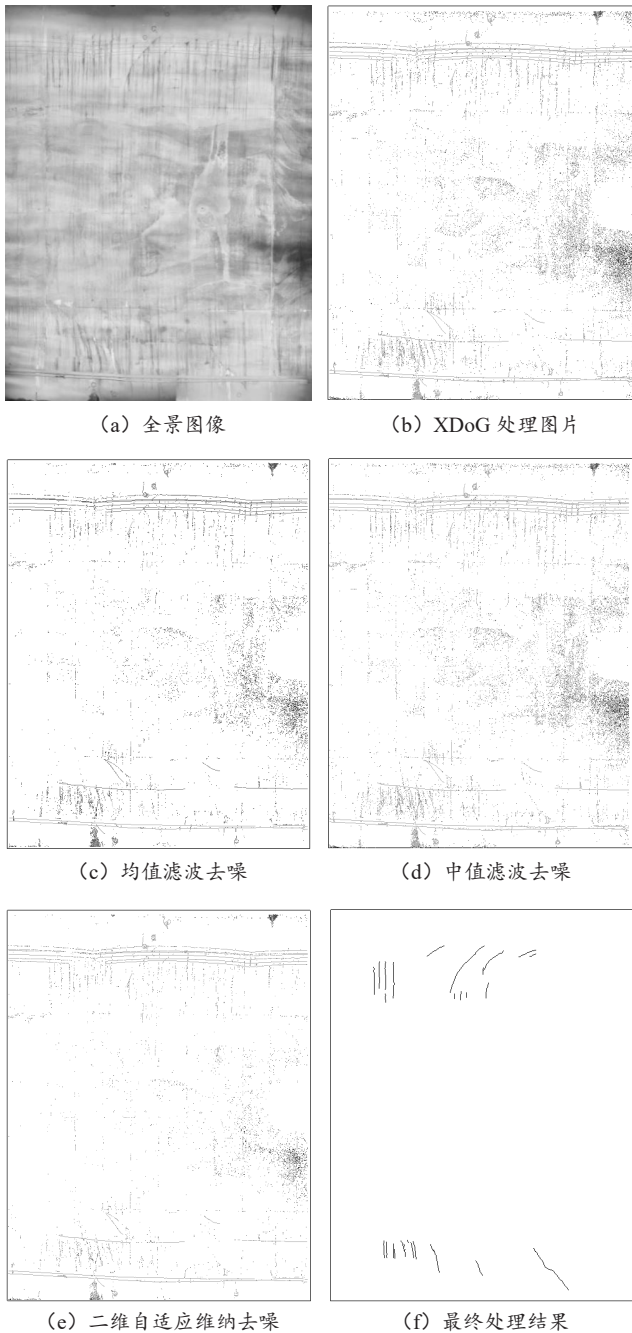


图2 不同过滤器去噪效果对比

中值滤波所处理的结果。通过量化计算得出, XDoG 边缘检测图原本共有 49 351 处孤立噪点, 均值滤波去噪后的图像残存 22 783 个噪点, 中值滤波去噪后的图像存在 49 181 个噪点, 而通过二维自适应维纳方式处理过的图像仅存 15 871 个噪点。二维自适应维纳滤波在处理混凝土结构全景展开图中类似“盐噪”的干扰噪点时, 效果相较均值滤波与中值滤波更好, 在保持原有裂缝信息的同时, 对孤立噪点的去除效果更明显。因此,

为进一步优化基于 XDoG 算法所得的混凝土结构全景图像边缘检测结果, 此处采用二维自适应维纳滤波对所得边缘检测结果图像进行去噪处理。

可以采用 XDoG-Wiener 算法对混凝土结构全景展开图进行裂缝信息识别的后处理工作, 实现裂缝信息可视化。此外, 为进一步有效获取裂缝信息, 需要对 XDoG-Wiener Filtering 算法处理后的全景展开图进行裂缝信息提取。此处采用 Zhang-Suen 算法, 对基于 XDoG-Wiener 算法处理后的全景展开图进行光栅图转矢量图操作, 将原始 JPG 格式的检测图像转置为 DWG 格式。经过搜寻、删除转置图像中的无关干扰因素及残存孤立噪点, 即可最终获取如图 2 (f) 所示的依托工程混凝土结构开裂信息。

5 结论

(1) XDoG-Wiener 耦合算法可以对全景图像进行裂缝信息边缘检测, 有效刻画混凝土表面开裂基本细节。对混凝土结构全景图像进行降噪及裂缝信息边缘检测, 可以在保障全景图像裂缝信息高效识别前提下减少 2/3 原始噪点干扰。

(2) 通过优化二进制阈值函中敏感参数取值与 Wiener Filtering 模板, 实现全景图像裂缝信息可视化。

参考文献

- [1] 闫占豹, 王战军, 俞海龙, 等. 混凝土结构裂缝的无损检测方法[J]. 东北水利水电, 2023, 41(2):66-67.
- [2] 熊飞, 苏波, 王岗. 基于压电波动法的混凝土梁裂缝深度与位置监测[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(3):359-365.
- [3] 祖庆芝. 基于分水岭算法的矩形钢管混凝土构件刚度裂缝检测[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2022, 40(1):1-6.
- [4] 祝志恒, 阳军生, 肖超, 等. 基于形函数的隧道衬砌内壁影像展平方法及其应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(3):101-106.
- [5] WANG T T, JAW J J, HSU C H, et al. Profile-image method for measuring tunnel profile improvements and procedures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(1):78-90.
- [6] 山本秀树, 重田佳幸, 安田亨. 基于高速行驶车辆的3D隧道检查系统: MIMM-R: 使用图像, 激光和雷达技术的检查, 调查和诊断支持技术[J]. 建设机械施工, 2017, 69(9):33-38.
- [7] 丁威, 俞珂, 舒江鹏. 基于深度学习和无人机的混凝土结构裂缝检测方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊1):1-12.
- [8] 余加勇, 李锋, 薛现凯, 等. 基于无人机及MaskR-CNN的桥梁结构裂缝智能识别[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12):80-90.
- [9] 汪辛, 丁志凯, 刘胜春. 基于BOTDA的混凝土结构裂缝识别试验研究及工程应用[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9):151-157.

基于 Rosin-Rammler 的离散元扩大头抗浮锚杆 抗拔力学特性影响研究

Research on the Influence of Discrete Element Enlarged Head Anti-floating Anchor Pull-out Mechanical Property Based on Rosin-Rammler

杨 靖

YANG Jing

中铁建设集团有限公司, 北京 100040

China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China

摘要:目前,抗浮锚固技术已被广泛应用于工程建设中。然而,学界对扩大头抗浮锚杆与不同级配土体相互作用的力学机制的研究尚不充分。因此,文章针对扩大头抗浮锚杆与土体级配的相互作用展开了研究。首先通过 Rosin-Rammler 函数构建级配曲线,并以曲线形状参数 m 值表征土体颗粒的不均匀性,然后进行拉拔数值模拟。结果表明,在拉拔过程中, m 值越大,土体颗粒越不均匀,并且拉拔承载力随着 m 值的增大而减小。同时,速度传递区域由类锥形转为类矩形分布,接触力链由粗支网状转为细支网状。

关键词: 抗浮锚杆; Rosin-Rammler 函数; 力学特性; 离散元法

Abstract: At present, anti-floating anchorage technology has been widely used in engineering construction. However, the research on the mechanical mechanism of the interaction between the enlarged head anti-floating anchor and different graded soils is not sufficient. Therefore, this paper studies the interaction between the enlarged head anti-floating anchor and the soil gradation. Firstly, the grading curve is constructed by Rosin-Rammler function, and the curve shape parameter m value is used to characterize the non-uniformity of soil particles, and then the pull-out numerical simulation is carried out. The results show that during the pull-out process, the larger the m value is, the more uneven the soil particles are, and the pull-out bearing capacity decreases with the increase of m value. At the

same time, the velocity transmission area changes from a cone-like to a rectangular-like distribution, and the contact force chain changes from a coarse-branched mesh to a fine-branched mesh.

Keywords: anti-floating anchor; Rosin-Rammler function; mechanical property; discrete element method

分类号: TU470

1 研究背景

近年来,随着一、二线城市基础建设的日益完善,城市地上建设空间面临紧缺问题,特别是一线城市。为了解决此问题,亟须合理开发地下空间,以满足人们的需求。在地下空间建设中,地表水常对结构体产生浮力作用。为了应对浮力问题,当前的工程措施有抗浮锚杆、抗浮桩和排截水法等。相较抗浮桩和排截水法而言,抗浮锚杆具有造价低、施工简易、抗浮效果显著等优点,在工程中得到了广泛应用^[1]。

目前,学者针对抗浮锚杆受拉时的力学特性开展了大量研究^[2]。尽管取得了一定的进展,但是尚未围绕抗浮锚杆与不同级配土体相互作用的机制展开研究。因此,文章采用离散元数值模拟开展抗浮锚杆与不同级配土体相互作用的机制研究。首先通过 Rosin-Rammler 函数构建级配曲线,并以形状参数 m 值表征颗粒不均匀性,然后采用离散元法对抗浮锚杆在不同 m 值下进行拉拔模拟,最后详细讨论了不

作者简介: 杨靖,男,本科,工程师,研究方向为建筑工程。

同 m 值下抗浮锚杆在拉拔时的受力特性。

2 工程概况

工程项目位于南宁市某住宅楼群，住宅楼群体建筑高度均为 93.9 m，地下 2 层，埋深为 10 m，地上为框剪结构，地下为剪力墙结构，且采用筏板基础。其地质勘探的土层中含有圆砾土层，该土层内颗粒粒径为 2 ~ 20 mm，最大粒径为 74.2 mm。由相关规范可知，圆砾粒径为 2 ~ 60 mm，地勘土层中圆砾的粒径表明地层中存在粒径分布不均匀的现象。

3 数值建模

3.1 Rosin-Rammler 函数

为了研究粒径分布不均匀条件下抗浮锚杆的受力特征，运用对数分布函数建立不同分布特征的级配曲线，并以曲线形状参数 m 表征土体颗粒的不均匀性。颗粒粒径服从 Rosin-Rammler 函数分布：

$$f(x, P_{80}, m) = 1 - e^{-\ln(0.2) \left(\frac{x - d_{\min}}{P_{80} - d_{\min}} \right)^m} \quad (1)$$

式中： x 为粒径； P_{80} 为小于某颗粒质量百分数为 80% 所对应的粒径，取 1.4 mm； m 为反映曲线形状的参数； d_{\min} 为最小粒径。

分布曲线如图 1 所示。

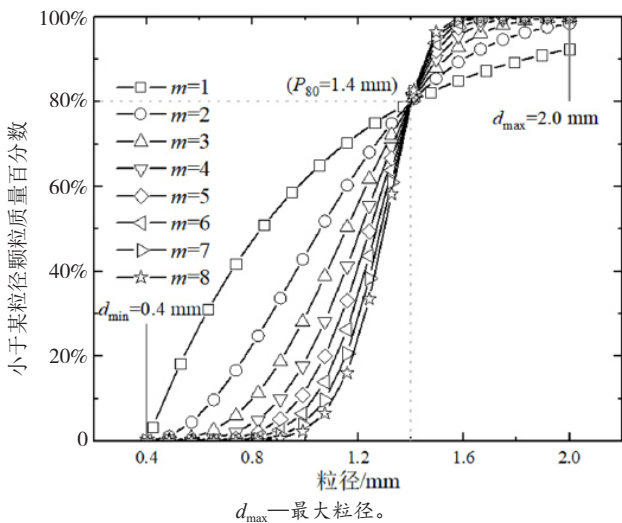


图 1 分布曲线

3.2 细观参数

文章所用离散元数值模拟软件为 PFC2D，该软件的原理是每个颗粒都满足牛顿第二定律和力 - 位移定

律。根据陶瑞等^[3]研究的离散元数值模拟参数的选取规则，确定了细观参数，即密度为 2 650 kg/m³，阻尼系数为 0.7，颗粒 - 颗粒 / 墙体摩擦系数为 1.0，重力加速度为 10 m/s²，颗粒 - 颗粒 / 墙体有效弹性模量为 10⁸ (10⁹) Pa，刚度比为 1.3，法向和切向黏结强度均为 1.0 Pa。

3.3 模型建立

抗浮锚杆拉拔数值试验分为三个步骤：

(1) 所有颗粒随机生成在刚性矩形盒内，其平均粒径为 d_{avg} 。同时，数值试样中颗粒粒径满足 $d_{\text{min}}=0.4$ mm 和 $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$ (最大粒径 / 最小粒径) = 5，并服从 Rosin-Rammler 函数分布，曲线形状参数 m 取值为 [1,8]。平均粒径的公式如下：

$$d_{\text{avg}} = \frac{d_1 \times d_{1n} + \dots + d_6 \times d_{6n}}{d_{1n} + \dots + d_{6n}} \quad (2)$$

式中： $d_1, \dots, d_6, d_{1n}, \dots, d_{6n}$ 为不同粒径及生成相应的颗粒数量。

(2) 采用重力沉积法制样，在沉积过程中，颗粒 - 颗粒 / 墙体的摩擦系数设置为 0。无摩擦条件可生最致密的样本，因此，所有不同颗粒样品在平衡后具有相同的相对密度^[4]。当样品的平均配位数稳定时，认为样品达到平衡，而后对颗粒 - 颗粒 / 墙体的摩擦系数重新赋值，为 1.0。最后将岩土体取相同高度，并使其达到平衡状态。

(3) 首先，删除拟创建锚杆区域的颗粒；其次，创建墙体，并以坐标点生成扩大头抗浮锚杆；最后，给锚杆端头施加 1 m/s 的速度，进行拉拔试验，当锚杆离开岩土体且岩土体颗粒达到稳定时，认为拉拔试验结束^[5]。

4 结果与分析

4.1 不同 m 值下颗粒的分布情况

4.2

密堆积条件下的颗粒体如图 2 所示。由图 2 可知，随着 m 值的增大，细颗粒含量变多，并形成具有规则性的水平层状分布，尤以图中黑色的颗粒为代表。

4.3 不同 m 值下拉拔承载力的演变

为了确定不同 m 值下抗浮锚杆拉拔的受力特性，对抗浮锚杆施加恒定的拉拔速度 1 m/s，拉拔时极限承载力时程曲线如图 3 所示。由图 3 可知，当 $m < 5$ 时，土体的应力递减；当 $m > 5$ 时，土体的应力增大。这

是因为随着 m 值的增大，土体内的细颗粒含量组分增加，使土体内部变得更密实，进而导致抗浮锚杆在拉拔时承受较大的阻力。

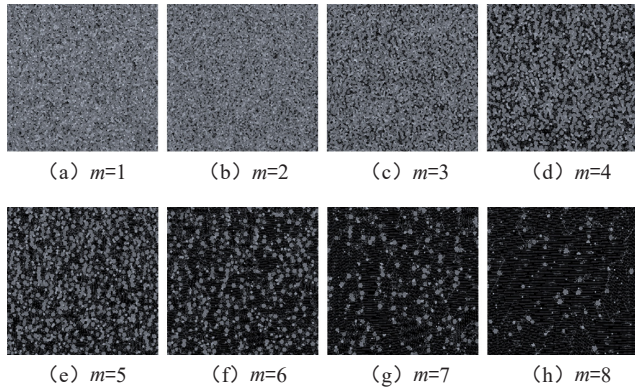


图2 密堆积条件下的颗粒体

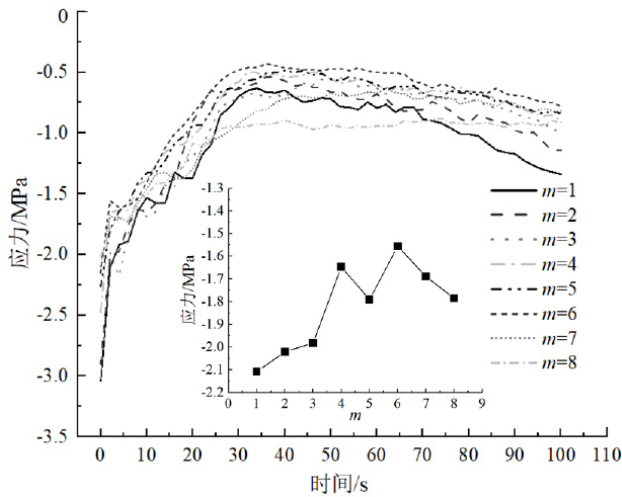


图3 拉拔时极限承载力时程曲线

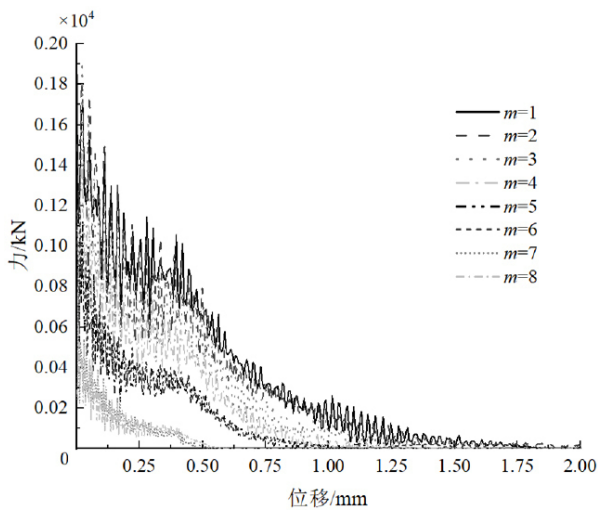


图4 抗浮锚杆的力-位移关系图

抗浮锚杆的力-位移关系图如图4所示，由图4可知，随着 m 值的增大，锚杆承载力逐渐减小，承载力随锚杆位移的增大而逐渐减小，最后减至0。当承载力为0时，锚杆底部已经脱离土体，仅靠锚杆的其他部位提供抗拔力。当锚杆底部即将脱离土体时，锚杆的承载力达到了极限值，且该值在图4中第一个波谷值分别对应不同 m 值下的拉拔极限承载力，取整后分别为 1 100 kN、1 160 kN、880 kN、870 kN、560 kN、570 kN、240 kN 和 270 kN。其中， $m=1$ 时，拉拔极限承载力与文献 [3] 的结果较为吻合。

不同 m 值下颗粒运动的速度云图如表1所示，描述了不同 m 值下抗浮锚杆拉拔的运动过程，纵向对比发现，抗浮锚杆在拉拔过程中依次经历了初始阶段、极限阶段、土体隆起阶段、拉拔切土阶段和稳定阶段。横向对比发现，随着 m 值的增大，土体颗粒区域逐渐减小，这是因为颗粒生成区域与颗粒平均粒径相关。换言之， m 值越大，细颗粒含量越多，粗颗粒含量越少，最终导致生成土体颗粒区域存在减小的趋势。此外，在相同时间下，速度扩散范围随 m 值增加而减少，速度传递区域由类锥形转为类矩形分布。造成这种分布的原因可能是粗颗粒含量逐渐减少，进而导致粗颗粒间接触力链减少，最终使土体与抗浮锚杆相互作用减弱。

4.4 不同 m 值下力链的分布情况

上一节发现，随着 m 值的增大，细颗粒含量增加，速度传递区域由类锥形转为类矩形分布，推测这可能是粗颗粒间接触力链减少造成的。为了验证这一推测，在计算时间为 10 s 时对不同 m 值的接触力链分布图进行比较，接触力链分布情况如图5所示。由图5可知，随着 m 值的增加，接触力链由粗支网状转为细支网状；随着细颗粒的增加，颗粒出现了规则排布，并且接触力链呈现类多边形分布；锚杆在拉拔时土体产生的潜在裂缝由倾斜逐渐变为垂直分布，并与细颗粒的规则排布相对应。

5 结论

文章对扩大头抗浮锚杆与土体级配的相互作用展开了研究，主要研究结论如下：

- (1) 锚杆的拉拔承载力随颗粒不均匀性 m 值的增加而减小，最终趋于稳定；
- (2) 结合速度云图和接触力链分布发现，随着 m

表 1 不同 m 值下颗粒运动的速度云图

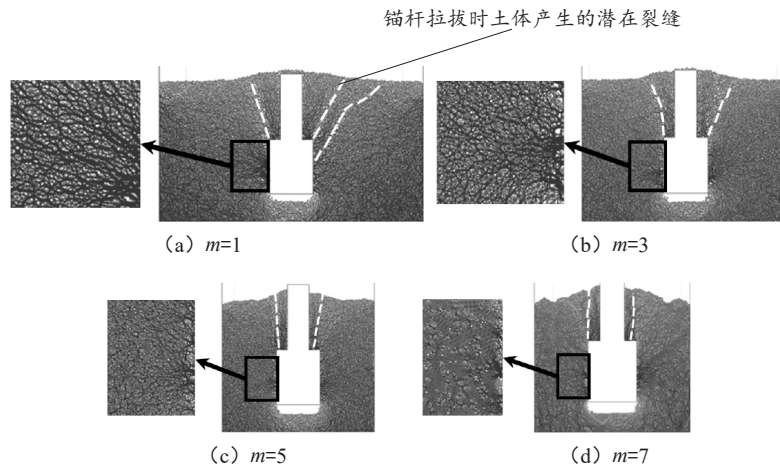
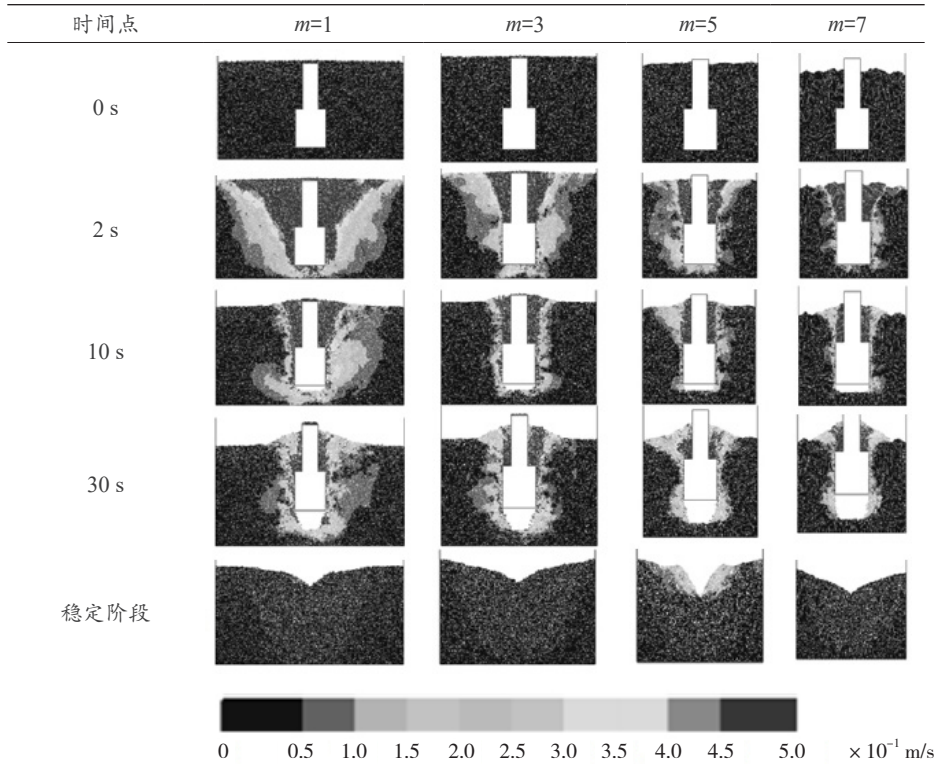


图 5 接触力链分布情况 (计算时间为 10 s)

值的增加, 速度传递区域由类锥形转为类矩形分布, 接触力链由粗支网状转为细支网状。

参考文献

[1] 白晓宇, 苏悦, 闫楠, 等. 抗浮锚杆受力特性试验研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15):6290-6302.
 [2] 王雷, 祝磊, 查安敏, 等. 扩大头抗浮锚杆抗拔承载力试验及数值模拟分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2023, 24(3): 6-11.

[3] 陶瑞, 乔建刚, 李景文. 抗浮锚杆锚固界面渐进性失效演化机理 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(3):402-410.
 [4] 高晓峰, 彭涛, 赵勇, 等. 砂卵石地层中扩大头形状对PSB抗浮锚杆抗拔特性的影响分析[J]. 四川地质学报, 2022, 42(3):435-440.
 [5] 谭昊. 基于特征粒径理论的镶齿滚刀最优钻压分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6):1222-1230.