



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

2025

第四届土木工程计算与仿真技术学术会议

会议主题：土木工程计算、仿真与智能技术的创新发展

摘要集

2025年5月28-30日 浙江·杭州



目录

专题 1：土木工程材料的本构模型

冻融循环作用下钢渣沥青混合料孔隙冻胀力计算模型

白雪峰（内蒙古建筑职业技术学院） 1

多层木竹结构房屋抗震性能的模拟与性能设计方法

李智、赵亦非、郭玉荣、王睿（浙江大学、湖南大学、浙江农林大学） 2

骨架可降解土体本构模型研究探索

马鹏程、陈云敏（中国石油大学（华东）、浙江大学） 4

基于启发式运动模拟策略的混凝土三维细观建模方法

陈涛、杨小梅、肖诗云（福州大学、大连理工大学） 5

考虑相关损伤-自愈效应的复合材料三维弹-粘塑性本构模型与仿真分析

朱兴一（同济大学） 6

珊瑚砂蠕变本构模型

王少伟、许江波、吴雄（长安大学） 7

压气储能隧洞衬砌层混凝土石墨烯增强复合材料加固机理研究

方昱（浙江科技大学） 9

搅拌摩擦焊接铝合金接头受力性能与断裂行为研究

贺鹏程、李贝贝、王静峰、王元清（合肥工业大学、清华大学） 11

复杂环境下混凝土耐久性劣化机理的数值研究

刘清风（上海交通大学、上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室） 13

道砟颗粒摩擦特性的离散元仿真及其对宏细观力学行为的影响研究

薛立华、肖军华、王凯超、霍云博（同济大学） 14

几种力学本构模型在木构件中运用及效果评估

周乐、胡潇毅、刘洪潮、侯鑫（浙江农林大学） 15

专题 2：土木工程结构的复杂行为仿真模拟

装配式结构中的粘结锚固问题与钢筋肋尺度精细化模型 16

赵唯坚（浙江大学）

FRP-混凝土界面黏结失效细观模拟 17

章子华、王轩、周春恒、蔡涛涛、赵天霖、郭佳洸（宁波大学）

UHPC-钢-混凝土新型结合段抗弯性能研究

罗军、权自然、邵旭东、赵军（郑州大学、湖南大学） 19

采用高强材料的内置箍筋钢管混凝土受压性能研究

李伟捷、李威（中国矿业大学（北京）、清华大学） 20

超弹性多稳态张拉整体的准静态仿真计算方法

许植胤、陆金钰（东南大学） 21

车辆移动荷载作用下道路窨井盖周边沥青路面结构动力分析

睦子凡、查旭东（长沙理工大学） 22

典型古建筑木结构高效模拟方法及承载特征分析

余攀、杨庆山、S.S. Law（重庆大学） 24

基于 FPMCAE 平台的海上浮式风机整机多尺度耦合模型动力性能研究

谭麒麟、蔡宇翔、喻莹、罗尧治（汕头大学、浙江大学） 26

基于局部柔度矩阵的钢管混凝土结构刚度计算方法

侯川川、高晟哲、韩林海（北京航空航天大学、清华大学） 27

具有荷载缓和功能的大型形状自适应索网试验和数值模拟

叶诚、罗尧治（浙江大学） 28

强降雨条件下非饱和植被边坡中水分入渗解析计算研究

江文豪（福州大学紫金地质与矿业学院、中国科学院武汉岩土力学研究所） 30

旋转开合屋盖体系运动全过程协同分析

董淑钦、罗尧治、喻莹、沈雁彬（浙江大学长三角智慧绿洲创新中心、浙江大学、汕头大学） 32

基于多尺度有限元分析的预制桥面板抗弯性能研究

赵启良、王玲茂、袁琳琳、赵唯坚、孙博超（浙江大学） 34

基于有限质点法的多跨连续钢桁架桥梁连续性倒塌模拟分析

金亚霏、蔡宇翔、罗尧治（浙江大学、汕头大学） 35

基于 GPU 并行加速的有限质点法在二维结构静-动态断裂分析中的应用

康玉峰、郑延丰、罗尧治（浙江大学、浙江省空间结构重点实验室） 37

循环加载频率对颗粒材料液化特性影响的离散元数值模拟研究

周鑫辉、罗尧治、沈雁彬（浙江大学、浙江大学长三角智慧绿洲创新中心） 39

专题 3：基于全寿命周期的重大土木工程计算和分析**边坡生态防护全生命周期碳排放测算**

吴雄、许江波、王少伟（长安大学） 40

基于概率水文模型的桥梁桩基全寿命周期冲刷韧性评估与优化

张大牛、朱彦洁、熊文（东南大学） 42

二维 $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结光电性能第一性原理研究及其在建筑材料中的应用

杨爱荣（内蒙古建筑职业技术学院） 43

专题 4：基础设施多尺度、多物理场模拟和长期性能预测**基于流-固-粘聚损伤相场耦合模型的混凝土三维细观水力压裂模拟**

杨贞军、李辉（武汉大学、The University of Newcastle）	44
PD-SPH 流固耦合模型及其在爆炸毁伤分析中的应用	
黄谢平、朱斌、陈云敏、陈祖煜、孔祥振、方秦（浙江大学、中国水利水电科学研究院、陆军工程大学）	46
风浪流震耦合作用下漂浮式风机动力反应整机一体化分析方法	
王丕光、于万里、杜修力（北京工业大学）	48
基于可解释机器学习的结构承载性能预测研究	
戴理朝（长沙理工大学）	49
基于热-力耦合相场模型的锈蚀钢筋混凝土火致损伤模拟	
缪坤廷、潘子超、方许锐、陈艾荣（同济大学、慕尼黑工业大学、香港理工大学）	50
离子医院大体积复杂混凝土结构施工过程的数值模拟研究	
高鹏、江敦辉、孙饶忠、陆俊（合肥工业大学、南京水利科学研究院）	52
侵蚀离子在混凝土中的电-化耦合传输行为	
刘齐民（武汉理工大学）	55
热-湿-氯-氧多场作用下混凝土中钢筋非均匀锈蚀模型研究	
张幅一（浙江农林大学）	56
热氧老化作用下钢渣与沥青间相互作用机理的多尺度研究	
张乐、维利思、邱贺枰、满都拉（内蒙古建筑职业技术学院、长安大学、内蒙古大学）	58
温度对饱和/非饱和混凝土硫酸盐侵蚀行为影响数值模拟	
李兆光、洪梦姝、牛荻涛、王艳、郭冰冰（西安建筑科技大学、同济大学）	60
考虑粘弹性影响的粘附耐久性理论研究及应用	
吴锐、王冠楠（浙江大学）	62
专题 5：基础设施、城市及城市群模拟	
基于监测数据的建筑（群）地震反应智能预测及韧性评价	
李爽、胡彬彬、李长青、翟长海（哈尔滨工业大学大学）	63
基于情景模拟的城市工程系统地震次生灾害级联失效研究	
鲁正、严德裕、蒋欢军、李江远（同济大学）	65
复杂街区爆炸荷载快速计算方法	
罗定坤、黄阳、陈素文（同济大学）	66
专题 6：计算风工程	
风电机组载荷代理模型及风电场功率载荷协同优化研究	
刘震卿（华中科技大学）	68

基于图像的屋盖结构风压预测

黄友钦、傅继阳、吴玖荣（广州大学） 70

气候变化下台风危险性和海上风电结构可靠度评估

盛超、戴靠山、洪汉平（四川大学、哈尔滨工业大学（深圳）） 71

高速列车过站对站台雨棚的风压特性数值模拟研究

陈金明、沈国辉、汪郭立（浙江大学） 72

海上风电场风力机塔架抗台风结构优化设计

高伟伟、黄铭枫（广西大学、浙江大学） 74

连续波浪状屋盖结构表面风压分布特征数值模拟

郭晨广、廖孙策、孙建平、黄铭枫（浙江大学、温州大学、广西大学） 76

专题 7：优化方法在土木工程中的应用**机器学习驱动的自适应 SMA-Geiger 索穹顶主动控制预测模型研究**

张海琛、陆金钰、许植胤、侯江军、邹俊（东南大学） 78

基于高精度数值仿真的海上风电支撑结构体型优化与动力特性识别研究

席义博、张昕、王振宇（浙江大学） 79

海上光伏阵列结构风振响应与疲劳寿命预测

梁世栋、黄铭枫、周园元（浙江大学、广西大学） 81

基于机器学习的模块间节点受剪性能多目标优化方法研究

邓恩峰、李羽辰、高峻栋、张哲、廉俊逸（郑州大学） 83

基于降维概率密度演化方程的结构抗震可靠性优化方法

杨家树、律梦泽（西安建筑科技大学、香港科技大学） 85

疲劳损伤结构风险检测的贝叶斯最优试验设计

高腾飞、刘炎（华中科技大学） 87

一种新型双菱形撑杆张弦梁结构的主动控制试验与数值模拟研究

邹俊、陆金钰、张海琛、许植胤（东南大学） 89

专题 8：分子动力学在土木工程中的应用**基于分子动力学模拟的纳米孔道内碳酸钙生长成核机制研究：基体与钙硅比的影响**

王可睿、路兴海、于娇、王攀、侯东帅（青岛理工大学） 91

分子模拟辅助混凝土材料设计

王攀、侯东帅（青岛理工大学） 93

水泥基材料低温特性的分子动力学模拟研究

柴松岳、王攀、侯东帅（青岛理工大学） 94

专题 9：土木工程计算与仿真方法的实验验证

带搭接柱与内嵌型钢的环形空腹内筒结构的静载试验与多尺度仿真分析

许浩铭、罗尧治（浙江大学） 96

基于改进 Jaya 算法和 DREAM 的变分贝叶斯学习的输电塔结构损伤识别

林昭生、胡琴（华中科技大学） 97

基于质量比的主次结构共同作用振动台试验研究

黄宝锋、张誉心、李文婷（上海师范大学） 99

简支梁桥在驳船撞击下的动力行为及模型简化策略

陈天黎、罗尧治、沈雁彬（浙江大学、浙江大学长三角智慧绿洲创新中心） 100

专题 10：基础设施健康监测中的计算方法

基于三维点云数据与物理模型融合的斜拉索索力识别方法

李尧、朱彦洁、熊文（东南大学） 101

基于无人机视觉扫描振动测试的桥梁结构损伤识别

李攀杰、胡梦豪、闫帅辉（郑州大学） 102

基于振动的桥梁拉索疲劳评估与损伤检测

徐斌、吴自饶（郑州大学） 103

考虑温度影响的板式无砟轨道 CA 砂浆层脱空损伤识别

管运豪、胡琴（华中科技大学） 104

桥梁水下声呐智检

朱彦洁、熊文、张帅辉、严靖、黄泽林（东南大学） 106

基于整体动力响应的预应力索杆结构全局索力识别

陈耀、周浩东、何若琪、冯健（东南大学） 108

大跨度连续刚构桥温致动力特性演化机理分析与服役性能评估

黄民水（武汉工程大学） 109

专题 11：大数据以及图像处理技术在土木工程中的应用

基于 YOLO 的混凝土结构裂缝特征提取及量化方法

许江波、王少伟、孙文、吴雄（长安大学） 110

基于机器视觉算法的桥梁火灾场景快速识别方法

吴西强、熊文、朱彦洁、蔡春声（东南大学） 112

基于全场视觉和动态贝叶斯的桥梁拉索瞬时阻尼辨识

王军营、朱前坤、张琼、王宪玉、杜永峰（兰州理工大学、甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司） 114

专题 12: 人工智能技术在土木工程中的应用**多因素驱动的钢结构腐蚀防护优化决策系统**

吴海英、罗尧治、周观根（山西大学、浙江大学、浙江东南网架集团有限公司） 115

基于大语言模型的交通基础设施损伤识别与维护

唐志一、杨朝显、李伟、肖雄文、许蔚（昆明理工大学、云南省教育厅基础设施智能运维科技创新团队） 116

基于概率深度强化学习的深基坑临近建筑结构监测优化

秦剑君、潘越（上海交通大学） 117

基于深度学习的机电管线点云补全方法

王骞、越宏哲（东南大学） 118

基于深度学习的桥梁水下声呐点云数据集与语义分割

黄泽林、朱彦洁、熊文（东南大学） 119

基于图深度学习的工程结构体系智能计算研究与应用

王琛、樊健生（清华大学） 120

基于图像-参数特征融合增强生成对抗网络的面板堆石坝分区智能设计

廖文杰、张宗亮、刘彪、陆新征、刘地福、刘强、段志杰、刘超（西南交通大学、桥梁智能与绿色建造国家重点实验室、中国水电工程顾问集团有限公司、中国电力建设集团有限公司、清华大学、河海大学、北京工业大学、） 121

具有荷载适应性的算子学习智能计算方法

刘旭亮、鲍跃全（哈尔滨工业大学） 123

摩擦型混合联肢墙智能抗震韧性初步设计方法

唐琦、崔瑶（大连理工大学） 124

人工智能在区域高铁简支梁桥震后损伤分析中的应用

朱志辉、钟杰鑫、李霞、王棕（中南大学） 126

桥梁病害检测中三维点云和二维图像的跨模态融合

熊文、马翔腾、朱彦洁、蔡春声、江旻容（东南大学） 127

专题 13: 数字孪生技术在土木工程中的应用**面向预应力钢结构安全评估的数字孪生建模及推演方法**

刘占省、史国梁（北京工业大学） 129

海上风机支撑结构“数字-力学”孪生方法研究

张柏楠、张春磊、彭根强、韩勃（山东大学） 131

融合 LLM 与数字孪生的冻土工程监测与评估

张玉芝、王盟、梁少杰、贾明涛（石家庄铁道大学） 133



长大桥梁虚拟建造研究与实践摘要

赵璐、郭彬彬（华中科技大学） 135

基于长期地震作用下钢筋混凝土核安全壳力学行为的非线性有限元模型更新

付斯、汪家继（香港大学） 137

基于三维激光点云的桥梁灾后快速检测：车桥碰撞案例研究

马天宇、朱彦洁、熊文、张倍阳、胡楷文（东南大学、中铁桥隧技术有限公司） 139

专题 14：土木工程机器人应用中的计算与仿真技术

基于机械臂的建筑瓷砖铺贴功能开发

李可娜、宋志飞、廖一维、满轲（北方工业大学） 140

基于四足机器人的施工安全巡检功能开发研究

李可娜、宋志飞、李响、廖一维、满轲（北方工业大学） 142

物理约束与数据驱动融合的锈蚀 RC 构件滞回特性表征

袁方、陈治希（深圳大学） 144

专题 15：土木工程计算仿真软件的研发与工程应用

黄河体育场大悬挑钢索组合空间结构施工模拟与试验研究

鲁建、陈江、亓祥成、董鹏、芦燕、王力晨（中建八局第一建设有限公司、天津大学） 145

基于参数化数值风洞的建筑抗风性能分析软件开发与应用

程明、李昀、王义凡、尹鹏飞、张慎（中南建筑设计院股份有限公司） 147

基于数据融合的建筑结构动力弹塑性多尺度分析参数化建模

王秀宇、王强、杨春晓、焦中朴（沈阳建筑大学） 149

专题 16：其他土木工程计算仿真相关研究

基于多面体张拉整体的杆驱动可负重翻滚机器人参数分析

刘继磊、陆金钰（东南大学） 151

基于自复位 SMA-ECC 构件的功能可恢复混凝土框架数值模拟及地震易损性分析

李宗翱、陈玮祎、钱辉、张敬科、师亦飞（郑州大学、河南理工大学） 152

降维-迭代重分析方法及其在结构非线性分析中的应用

李文雄、陈穗茵、黄家员（华南农业大学） 154

近断层地震动作用下新型横向软钢挡块高墩梁桥抗震性能研究

潘子昂、杨华平、漆启明、余瑞峰（成都大学） 155

六杆张拉整体翻滚机器人驱动优化设计

冯晓东、宋思远、赵树彬、崔文华、方益明（河海大学、绍兴文理学院） 157

自适应肋环型索穹顶结构形态优化控制研究

张海影、陆金钰、乔文涛（石家庄铁道大学、东南大学） 159

沥青混凝土裂纹分支和连接的近场动力学数值模拟研究

阮莉、罗尧治、沈雁彬（浙江大学、浙江大学长三角智慧绿洲创新中心） 160

广义变分原理在斜拉悬索协作体系桥梁早期设计阶段中的应用

李奕璇、韦鹏、冯倩、徐荣桥（浙江大学） 161

冻融循环作用下钢渣沥青混合料孔隙冻胀力计算模型

白雪峰^{1,*}

1. 内蒙古建筑职业技术学院，交通与市政工程学院，内蒙古呼和浩特 010000

摘 要：

通过界面特性及孔隙特征参数分析发现，冻融循环作用会对钢渣沥青混合料造成损伤。材料在冻结和融化过程中会对沥青砂浆、沥青胶浆以及集料与沥青的界面粘结处产生影响，且目前关于冻融循环对钢渣沥青混合料的影响机理研究较少。孔隙中的水冻结时，会膨胀挤压孔隙壁，冰晶会刺破沥青砂浆，使小孔隙体积增大、孔隙率上升、沥青砂浆损伤增多。为剖析冻融循环作用机理，对冻胀作用及盐水侵蚀作用进行模型简化，将二者视为独立影响因素，分别分析其对钢渣沥青混合料（SAM）的影响。为分析钢渣沥青混合料不同孔径的微细观孔隙的冻胀力作用，把饱水孔隙假设为球体，将孔隙中水结冰膨胀等效为球体膨胀，把孔隙内壁的边界条件假设为弹簧结构，将冻胀力作用简化为边界弹簧对球体膨胀的约束，以球体半径方向为研究对象，可将其视为一端固定、另一端有弹簧约束的杆件，弹簧代表单位面积孔隙内壁的约束，其约束力即为单位面积沥青砂浆所受的由孔隙水结冰膨胀产生的冻胀力。研究表明，在冻胀产生的新增孔隙处，融雪盐溶液会在冰晶的冻结与融化过程中，形成盐溶解度的动态平衡，盐结晶不断溶解与析出，盐水冲刷并吸附于沥青表面、置换沥青，进而造成侵蚀破坏。冻融循环过程中，冻胀作用与盐水侵蚀作用存在复杂的耦合关系。

关键词：冻融循环；钢渣沥青混合料；孔隙；冻胀力；盐水侵蚀

通讯作者简介：内蒙古建筑职业技术学院讲师，博士。主要从事道路工程材料方面的研究。

多层木竹结构房屋抗震性能的模拟与性能设计方法

李智¹, 赵亦非¹, 郭玉荣², 王睿^{3,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 湖南大学, 土木工程学院, 湖南长沙 410082

3. 浙江农林大学, 风景园林与建筑学院, 浙江杭州 311300

通讯作者邮箱: ruiwang@zafu.edu.cn

报告人: 李智

摘要:

本文以世界首座6层竹结构办公楼的工程实践为基础, 探讨了一种木竹框架-支撑-剪力墙结构体系, 旨在揭示多层木竹结构房屋中关键子结构单元的抗震机理, 并进一步完善基于性能需求的多层木竹结构抗震设计方法与理论。研究内容主要包括四个方面: 首先, 提出了工程竹材的多向本构关系模型, 并针对其老化和高温条件下的力学行为建立了相应的本构关系模型; 其次, 研究了适用于多层建筑的木竹框架剪力墙构件及其连接系统, 通过试验研究和理论分析明确了其力学性能; 再次, 对木竹框架剪力墙进行了拟静力试验, 并提取关键参数构建了墙体的动力学分析及拟动力实验的恢复力模型; 最后, 提出了一种多层木竹结构房屋试验-数值混合分析模型的构建方法, 同时基于能力谱法探讨了适用于多层木竹结构的性能抗震设计方法。

相关研究表明, 竹材可被视为一种具有显著各向异性特征的生物质单向纤维增强复合材料。在建筑工程中, 建议使用交错或编织布蔑的工程胶合竹材, 以有效避免材料发生脆性断裂破坏。竹材的破坏准则主要由其极限拉压应变值控制, 而温湿循环老化及高温会显著降低与极限应变值对应的强度值, 但对特征极限应变值的影响较小。木竹轻型框架复合墙体的单调加载与滞回加载实验结果表明, 此类结构构件具有优异的抗侧向承载能力, 且结构性能与建筑功能之间实现了良好的平衡, 适用于4至6层的多层建筑。此外, 木竹轻型剪力墙的抗侧向力学性能及其滞回特性主要取决于覆面板与骨架之间的连接件性能。基于钉连接件信息的分析, 可以实现对木竹框架剪力墙力学性能的有效模拟。多层木竹结构的试验-数值混合分析模型在建模成本与模拟精度之间达到了较好的平衡, 能够为多层木竹结构房屋的工程设计提供有力支持。

本项目的研究成果不仅能够推动木竹材料在多层建筑中的广泛应用, 还将为相关领域的抗震设计提供科学依据和技术支持。

关键词: 竹材本构关系; 木竹复合框架剪力墙; 多层结构; 恢复力模型; 抗震性能。

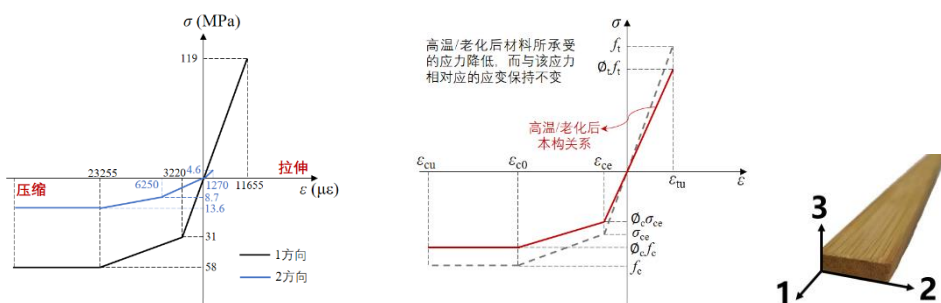


图1 竹材 1-2 平面本构关系模型

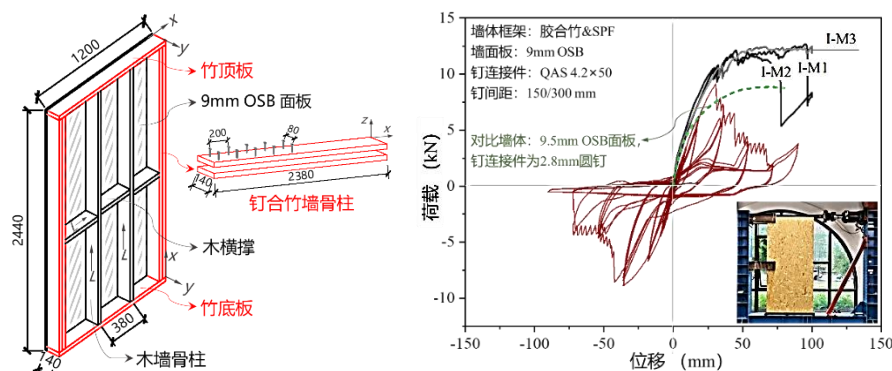


图2 木竹复合剪力墙及其连接件系统力学性能试验

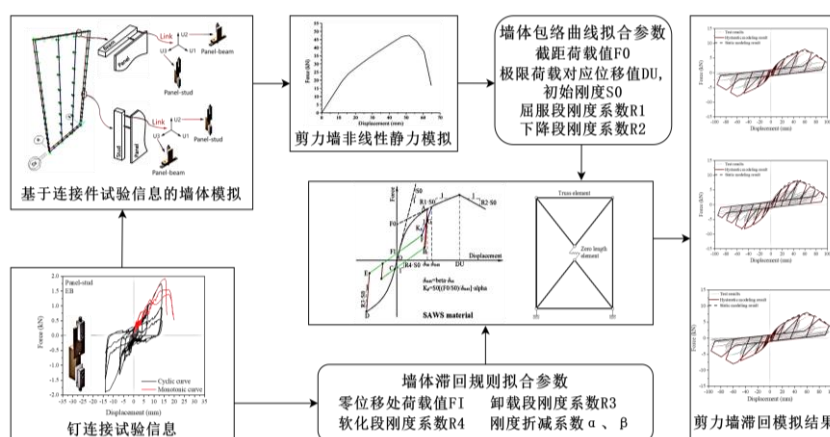


图3 木竹复合剪力墙的恢复力模型

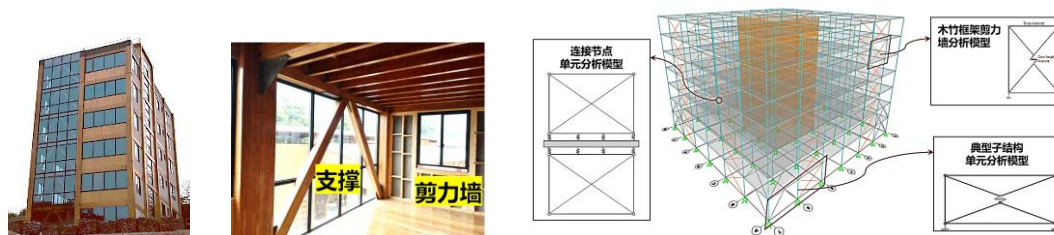


图4 多层木竹结构房屋的试验-数值混合分析模型

通讯作者简介：浙江农林大学风景园林与建筑学院讲师。主要从事现代竹木结构、构件及关键节点模拟方面的研究。

骨架可降解土体本构模型研究探索

马鹏程¹, 陈云敏^{2,*}

1. 中国石油大学(华东), 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580

2. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: chenyunmin@zju.edu.cn

报告人: 马鹏程

摘 要:

广义的骨架可降解土体是指在物理、化学或生化等因素作用下, 产生颗粒粒径变化、固相质量损失或颗粒间结合作用减弱的土体。典型的骨架可降解土体包括颗粒破碎土(如钙质砂、土石坝骨料等)、城市固体废弃物、水合物沉积土等。骨架降解导致土体力学性质劣化, 在涉及到骨架可降解土体的岩土工程问题中, 若不能合理分析骨架降解对土体应力-应变关系的影响, 可能导致严重的安全问题。然而, 在以太沙基有效应力原理及固结理论为代表的传统土力学和以剑桥模型为开端的第二代土力学理论中, 通常将土体的强度和变形仅看作是颗粒重新排列的宏观表现, 而不考虑土颗粒自身的变化, 这显然不能合理描述骨架可降解土体的力学行为。发展土力学理论使其适用于骨架可降解土体, 不仅是应对复杂岩土工程问题必然要求, 亦是探索新一代土力学的开端。

本研究是将土体弹塑性本构理论发展应用于骨架可降解土体的探索。降解导致的土骨架弱化是土体力学性质劣化的根本原因, 以此为切入点, 在硬化方程中引入描述骨架降解程度的变量, 建立了土体加载-降解屈服方程, 通过反映硬化参数与内变量的正相关性以及与骨架降解程度的负相关性刻画土体的降解-骨架弱化现象。然后, 提出了骨架可降解土体弹塑性本构模型的一般性模型框架, 包括应力空间内屈服面的几何形状方程、内变量演化方程、加载-降解屈服方程、屈服面几何形状在降解作用下的演化方程等控制方程, 为骨架可降解土体本构建模提供了通用思路。最后, 根据颗粒破碎土体、城市固体废弃物和结构性软土各自的骨架降解特征建立了其加载-降解方程, 进而基于修正剑桥模型、统一硬化模型和边界面塑性理论分别建立了它们的本构模型, 给出了基于一般性模型框架建立骨架可降解土体本构模型的典型案例。

关键词: 骨架可降解土; 本构模型; 骨架弱化

通讯作者简介: 浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师、中国科学院院士。主要从事软弱土静动力固结、降解固结和灾害防控理论与技术以及多相介质超重力实验及工程技术研究。

基于启发式运动模拟策略的混凝土三维细观建模方法

陈涛^{1,*}, 杨小梅¹, 肖诗云²

1. 福州大学, 土木工程学院, 福建福州 350108

2. 大连理工大学, 建设工程学院, 辽宁大连 116024

通讯作者邮箱: tchen@fzu.edu.cn

报告人: 陈涛

摘 要:

细观尺度数值模拟是研究混凝土复杂力学行为的有效手段, 而建立具有真实细观结构的数值试件则是实现高精度模拟的关键。本文提出了一种启发式运动模拟策略, 用于构建高骨料含量的三维随机骨料模型。该算法将骨料间的重叠比拟为挤压变形, 进而把骨料投放问题转化为骨料构型弹性势能的优化问题; 通过变步长地动态调整骨料的空间位置, 在迭代过程中逐渐消除骨料间的重叠, 从而实现优化问题的求解。本建模方法采用支持映射隐式地描述骨料形状, 可表示较为广泛的骨料类型, 并利用 GJK 和 EPA 算法将不同形状骨料的碰撞检测统一到同一框架中, 可实现混合骨料形状的建模。此外, 通过宽相和窄相两级碰撞检测, 减小了碰撞计算的工作量。文中通过构建不同骨料类型的系列样本, 研究了骨料级配对填充率的影响。数值实验结果表明, 所提算法在计算效率和鲁棒性方面均表现出显著优势。

关键词: 三维细观建模; 混凝土; 粗骨料; 碰撞检测; 随机填充。

通讯作者简介: 福州大学土木工程学院副研究员。主要从事混凝土多尺度计算方法、钢筋混凝土结构耐久性方面的研究。

考虑相关损伤-自愈效应的复合材料三维弹-粘塑性本构模型与仿真分析

朱兴一^{1,*}

1. 同济大学, 交通学院, 上海市嘉定区 201800

通讯作者邮箱: zhuxingyi66@tongji.edu.cn

报告人: 朱兴一

摘 要:

基于试验所观察到的物理现象, 构建材料的本构模型, 能够系统地描述材料在不同荷载条件下的力学响应。因此, 本研究基于沥青砂浆的力学试验结果, 针对所观测到的速率依赖性和压-拉不对称性, 构建了三维粘弹-塑性模型。其中, 粘弹性部分由广义 Maxwell 模型表示, 它由一个线性弹簧和几个弹簧-粘壶元件并联组成; 塑性部分由一个摩擦滑块表示, 并与线性弹簧相串联。针对塑性部分, 由于本模型中的摩擦滑块与线性弹簧相串联, 计算该分支时需要从总应变中扣除塑性应变部分。考虑到沥青砂浆具有压-拉不对称性, 选用与静水压力相关的 Drucker-Prager 塑性屈服准则, 来评价材料在不同受力状态下的塑性响应; 当确定材料的塑性屈服面后, 采用隐式弹性预测方法(径向返回映射法)将过度预估的应力映射回屈服面, 并计算塑性应变增量; 基于上述运算, 最终给出粘弹-塑性模型的一致性切线模量。该模型涵盖了沥青砂浆试验中所观测到的速率依赖特性、压-拉不对称性、永久变形等材料非线性特征, 并且认为粘弹性在材料特性中占主导地位。此外, 本研究通过在仿真中引入间歇期以考虑自愈合的影响, 重点研究了损伤、断裂和自愈合的相互耦合作用。同时, 对自愈合的影响因素进行了展开分析, 研究了不同间歇时间加载速率和损伤水平下的材料整体力学响应、自愈合效率和愈合后的损伤断裂模式。结果表明, 损伤越大的区域, 最佳自愈合效率越低, 并且需要更长的时间才能达到最佳愈合状态; 当产生裂纹时, 其邻近区域的材料几乎丧失自愈合能力; 沥青混合料几何结构的非线性导致其内部材料的自愈合能力同损伤水平一样呈高度非线性分布。

关键词: 损伤-自愈效应; 粘弹-塑性; 本构模型; 有限元仿真



珊瑚砂蠕变本构模型

王少伟¹, 许江波^{1,*}, 吴雄¹

1. 长安大学, 公路学院, 陕西西安 710061

通讯作者邮箱: xujiangbo@yeah.net

报告人: 王少伟

摘要:

珊瑚砂作为岛礁工程地基的核心材料, 其长期蠕变特性直接影响建筑物的沉降稳定性。本文针对南海珊瑚砂的蠕变特性, 通过单轴及三轴压缩蠕变试验, 系统分析了不同应力水平下的变形规律。试验表明, 珊瑚砂蠕变呈现显著的非线性与滞后性, 其应变-时间曲线可分为弹塑性阶段与稳定蠕变阶段, 初始弹塑性变形占总变形量的 80% 以上, 如图 1 所示。传统元件模型 (如 Burgers 体、开尔文体等) 对珊瑚砂蠕变的模拟存在较大偏差 (平均误差 > 10%), 主要因模型参数固定化无法表征非线性衰减特征。

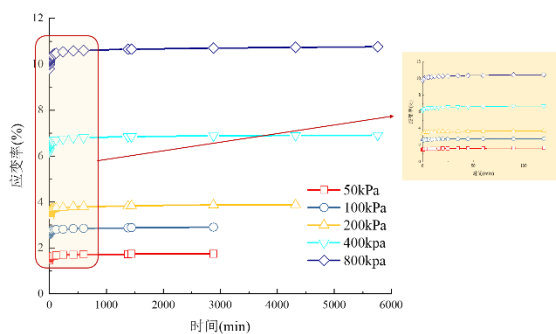


图 1 不同压力作用下珊瑚砂应变-时间曲线

为解决上述问题, 本文提出一种改进的非线性 H-M-K 蠕变模型 (如图 2 所示), 通过引入时间函数修正黏性系数, 构建由弹性体 (描述瞬时变形)、非线性 H-M 体 (并联弹性体与指数型黏性元件) 及 Kelvin 体 (表征稳定蠕变) 串联的复合模型。模型创新性地结合同伦方法优化参数反演过程, 显著提升了参数识别效率与计算收敛性。单轴蠕变试验验证显示, 改进模型的计算结果与试验值拟合度极高, 平均误差小于 1.5%, 相关系数达 0.919 (极强相关), 较传统模型精度提升 60% 以上。

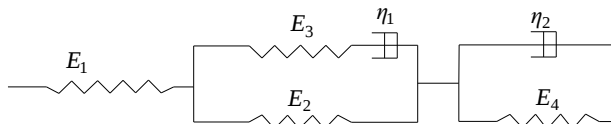


图 2 改进 M-H-K 结构模型示意图

进一步将模型推广至三维状态, 通过应力张量分解与广义胡克定律构建三维本构方程, 如式 1 所示。基于三轴蠕变试验数据的验证表明, 模型在围压 100–300 kPa 下的平均误差为 1.462%, 相关系数达 0.948, 有效解决了传统一维模型无法描述复杂应力状态的局限性。此外, 结合马尔代夫维拉纳国际机场工程实例, 模型预测结果与现场监测数

据的平均相对误差为 4.72%，相关系数超过 0.94，验证了其在复杂工程环境中的适用性。

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_3} \left\{ 1 - \frac{G_2}{G_2 + G_3} \exp \left[\frac{G_2 G_3 (1 - e^{\lambda t})}{(G_2 + G_3) \lambda H} \right] \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_4} \left[1 - \exp \left(\frac{G_4 t}{H_2} \right) \right] \quad (1)$$

研究表明，本文提出的非线性 H-M-K 模型通过多元件串联结构与时间函数修正，可精准描述珊瑚砂各蠕变阶段的非线性特征，兼具理论严谨性与工程实用性。研究成果为岛礁工程长期变形预测与地基稳定性评估提供了重要理论支撑。

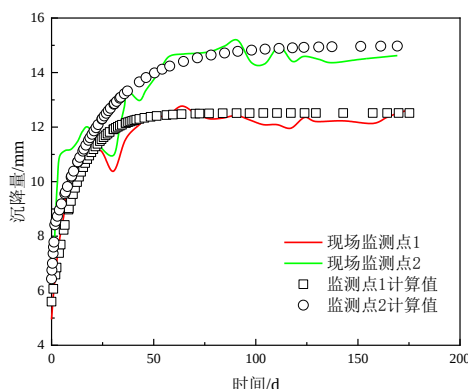


图 3 现场检测值与计算结果对比

关键词：珊瑚砂；蠕变变形；本构模型

通讯作者简介：长安大学公路学院副教授、博士生导师。陕西省岩石力学与工程学会副秘书长，陕西省和西安市秦创原“科学家+工程师”项目首席科学家，研究方向涵盖智能感知与运维等。



压气储能隧洞衬砌层混凝土石墨烯增强复合材料 加固机理研究

方昱^{1,*}

1. 浙江科技大学，土木与建筑工程学院，浙江杭州 310023

通讯作者邮箱: y_fang@zust.edu.cn

报告人: 方昱

摘 要:

压缩空气储能电站作为新型储能设施需求规模巨大,对我国能源结构改革有着极为重要的意义。立足于基础设施安全性和可靠性要求,针对实际工程建设过程中存在的地下隧洞混凝土衬砌受高温以及循环荷载影响下面临的加固补强问题,综合采用本构模型修正、数值模拟、物理模型试验、材料性能试验等多种手段开展研究。基于非局部应变梯度理论,建立纳米尺度增强相复合材料本构模型,开发热力耦合的数值计算方法,构建一套适用于模拟功能梯度石墨烯增强复合材料加固混凝土衬砌的全过程数值模拟模型;自主设计的有压隧洞物理模型试验系统,研究了充放气循环荷载作用下对混凝土内衬以及围岩的影响规律;采用材料性能试验获取石墨烯增强复合材料加固混凝土的本构参数,结合物理模型试验验证数值模型的精确性和稳定性。研究成果将有助于揭示压气储能隧洞衬砌层在石墨烯复合材料加固之后的变形和破坏规律,为我国新能源基础设施建设提供科学依据。



图1 新型电力系统

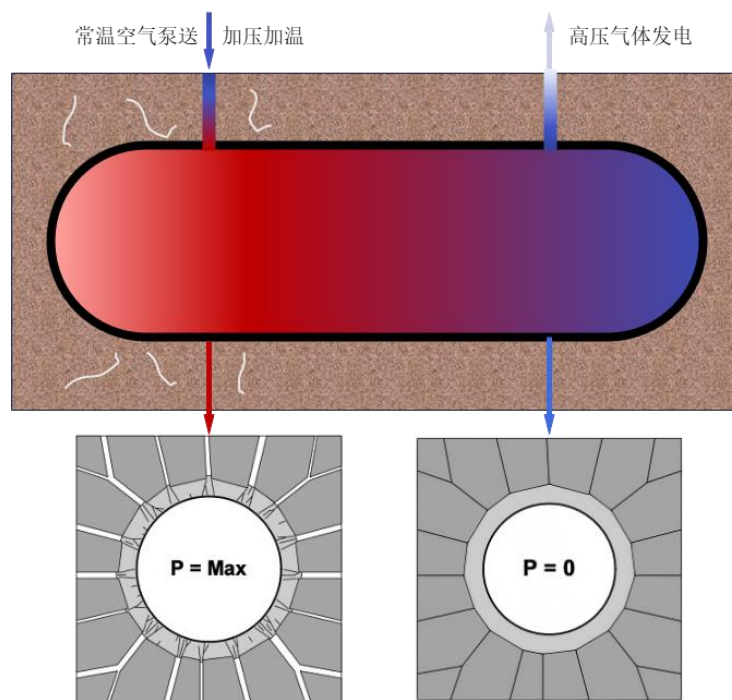


图 2 洞室膨胀围岩变化示意图

关键词：混凝土结构；混凝土本构关系；特种混凝土结构

通讯作者简介：浙江科技大学土木与建筑工程学院讲师。主要从事混凝土材料本构模型、深层地下隧洞结构以及 BIM 在装配化建筑中的应用方面的研究。



搅拌摩擦焊接铝合金接头受力性能与断裂行为研究

贺鹏程¹, 李贝贝^{1,*}, 王静峰¹, 王元清²

1. 合肥工业大学, 土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009

2. 清华大学, 土木工程系, 北京 100004

通讯作者邮箱: LBBHFUT@hfut.edu.cn

报告人: 李贝贝

摘 要:

铝合金凭借其低密度、高比强度、耐腐蚀性及良好的综合成本优势, 在航空航天、轨道交通和工业建筑等领域得到了广泛应用。相较于传统熔化焊接工艺, 搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 作为一种固相连接技术, 能够有效缓解铝合金熔化焊接过程中常见的冶金问题, 提高接头质量, 展现出广阔的科学研究价值和工程应用前景。

开展了 FSW 铝合金接头静力力学性能研究。对 5mm、8mm、12mm 和 16mm 厚的 6061-T6 铝合金板及 12mm 厚的 7075-T6 铝合金板进行搅拌摩擦焊对接焊接试验。结合维氏硬度试验和单调拉伸试验, 研究了不同焊接参数下的接头硬度分布和静力强度力学性能, 明确了焊接影响区软化分布规律和接头强度弱化程度, 优化了不同厚度铝合金的最佳焊接工艺参数。在此基础上, 进一步探讨了搅拌摩擦焊接铝合金对接接头的单调应力-应变本构关系, 评估了多种本构模型的适用性; 建立了三阶段 Ramberg-Osgood 的应力-应变本构模型, 为 FSW 铝合金接头的理论分析和力学行为仿真提供支撑。

进行了 FSW 铝合金接头低周循环本构模型研究。对 6061-T6 和 7075-T6 铝合金 FSW 对接接头及母材光滑圆棒试样进行了 11 种制度的加载试验, 包括单调拉伸和循环加载, 获取不同加载制度下的滞回曲线。采用 Ramberg-Osgood 模型标定了部分加载制度下的循环骨架曲线, 分析了铝合金及其 FSW 接头屈服面和边界面的演化规律。此外, 采用麻雀优化算法 (SSA) 识别了 Chaboche 模型和 Steel4 模型关键参数, 提出了考虑弹性模量退化、屈服面硬化和积分点历史最大塑性应变的改进型 Chaboche 模型。通过在 Abaqus 中编写 UMAT 子程序验证了该模型的准确性和有效性, 为搅拌摩擦焊接铝合金结构在低周循环荷载作用下的力学行为预测提供理论依据。

开展了搅拌摩擦焊接铝合金接头单调拉伸和低周循环荷载作用下断裂性能研究, 研究对象包括 6061-T6 和 7075-T6 铝合金母材、FSW 焊缝及热影响区的缺口圆棒试样。采用 SSA 识别的微孔扩张模型 (VGM)、应力修正临界应变模型 (SMCS) 和 Johnson-Cook 模型 (J-C) 的韧性关键参数, 能有效预测 6061-T6 和 7075-T6 铝合金母材、焊缝及热影响区的断裂荷载与断裂位移, 且预测误差在 15% 以内。基于改进型 Chaboche 模型, 对各材料的低周循环响应进行模拟, 分别标定了循环微孔扩张模型 (Cyclic Void Growth Model, CVGM) 和考虑受压补偿效应的 Johnson-Cook 模型 (U-J-C 模型) 的损伤参数; CVGM 模型与 U-J-C 模型均能较准确地描述低周循环加载下的搅拌摩擦焊铝合金

断裂行为, 预测的启裂时刻与试验结果吻合良好。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝合金; 力学性能; 循环本构模型; 延性断裂预测模型

通讯作者简介: 合肥工业大学土木与水利工程学院研究员、博士生导师。主要从事金属材料及其高新结构方面的研究。



复杂环境下混凝土耐久性劣化机理的数值研究

刘清风^{1,2}

1. 上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室/船舶海洋与建筑工程学院, 上海

2. 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海

通讯作者邮箱: liuqf@sjtu.edu.cn

报告人: 刘清风

摘 要:

在复杂的服役环境下, 氯盐侵蚀、碳化、冻融破坏、碱骨料损伤、盐结晶破坏、钙溶蚀等病害会对混凝土结构基础设施的长期性能和工作寿命构成严重威胁。为深入理解钢筋混凝土因有害介质侵蚀所导致的结构耐久性劣化机理, 本系列研究首先基于严格微观电化学定律和对混凝土多相结构的参数控制, 在细微观尺度下建立多离子传输多相数值表征方法(即“双多模型”), 从而揭示多离子传输与单一离子传输在对混凝土长期性能预测时的差异, 并探明离子间相互作用、混凝土的各向异性、骨料-砂浆界面过渡区、离子吸附结合效应、双电层效应等细微观因素的具体影响。同时基于这一数值表征方法, 进一步研究碳化、冻融循环、干湿交替、荷载开裂、碱-硅反应、硫酸盐侵蚀、钙离子浸出等多种致病因素与最为主流的耐久性劣化因素——氯离子侵蚀的共同作用机制, 实现了多病害耦合作用的数学物理表述, 进而揭示一些未能在前人模型中发现的重要现象和结论, 为大型基础设施的建设和运维, 提供理论参考。

关键词: 混凝土耐久性; 多离子传输; 氯盐侵蚀; 碳化作用; 长期性能;

通讯作者简介: 刘清风(1986-), 刘清风, 上海交通大学教授、博士生导师, 国家优秀青年科学基金、国际古斯塔沃·科洛内蒂奖章、中国硅酸盐学会青年科技奖获得者、国家重点研发计划项目青年首席、Elsevier中国高被引学者。主要从事混凝土结构耐久性、多孔介质中的离子传输、电化学修复/防护技术、绿色高性能混凝土材料等方向研究。

道砟颗粒摩擦特性的离散元仿真及其对宏观力学行为的影响研究

薛立华¹, 肖军华^{1,*}, 王凯超¹, 霍云博²

1. 同济大学, 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804

通讯作者邮箱: 25310016@tongji.edu.cn

报告人: 薛立华

摘 要:

对于道砟等散粒体材料, 粒间摩擦是影响有砟道床变形与整体稳定性的关键因素。已有研究表明, 摩擦型材料的摩擦系数具有速度相关性和频率依赖性, 并受到颗粒表面粗糙度的显著影响。然而, 现有多数分析将道砟摩擦系数简化为常数, 可能导致道床稳定性分析结果与实际情况产生偏差。针对列车荷载作用下道砟颗粒的振动摩擦行为, 作者前期通过粒间振动摩擦试验, 揭示了表面粗糙度与运动状态对摩擦系数的影响规律, 并建立了相应的摩擦特性表征模型。

本文围绕上述摩擦模型在离散元仿真中的数值实现与应用开展研究。首先, 提出基于空间随机场的颗粒粗糙度赋值方法, 用于重构符合实际概率分布特征的多面体颗粒粗糙度, 以表征粗糙度对摩擦行为的影响。其次, 开发颗粒振动频率计算子程序, 并嵌入离散元计算流程, 实现摩擦系数随颗粒运动状态的动态更新。在此基础上, 扩展多面体颗粒接触本构模型, 实现摩擦系数对振动频率、滑动速度及表面粗糙度的耦合响应。

进一步, 结合竖向循环加载条件下的道砟直剪试验, 开展了相应的离散元仿真, 分析摩擦特性模型在不同振动频率条件下对道砟宏观力学行为的模拟能力。结果表明, 随着振动频率升高, 道砟试样的峰值剪切强度与剪胀量均呈下降趋势。基于摩擦特性的仿真结果能够有效反映上述规律, 而恒定摩擦系数模型在高频加载条件下对峰前剪应力和剪胀性的预测存在明显偏差。细观分析显示, 该差异主要由大颗粒周围局部变形模式的变化及摩擦系数差异引起的力链结构稳定性变化所致。

关键词: 铁路道砟、颗粒摩擦特性、频率相关性、表面粗糙度、离散元方法

通讯作者简介: 肖军华, 同济大学教授、博士生导师, 交通运输工程学院副院长, 主要从事铁路基础散体材料动力学研究。入选国家万人计划青年拔尖人才、交通运输部中青年科技创新领军人才。兼任世界交通运输大会轨道交通学部联合主席、上海市土木工程学会铁道工程专业委员会副主任委员、《International Journal of Transportation Science and Technology》、《Intelligent Transportation Infrastructure》、《城市轨道交通研究》等期刊编委等。



几种力学本构模型在木构件中运用及效果评估

周乐¹, 胡潇毅^{1,*}, 刘洪潮¹, 侯鑫¹

1. 浙江农林大学, 光机电工程学院, 浙江杭州 311300

通讯作者邮箱: jimhxy08@zafu.edu.cn

报告人: 周乐

摘 要:

本研究系统探讨了木材构件在不同力学阶段的本构模型适用性, 建立了多尺度协同分析框架。针对弹性阶段力学行为, 基于有限元方法构建了正交各向异性模型, 其相较于各向同性模型显著优化了应力分布模式: 纵向纤维的高刚度特性有效缓解了应力集中效应, 横向力学弱化特征与《木结构一般规范》挠度控制要求形成良好适配, 揭示了木材“强纵向-弱横向”的固有力学本质。在弹塑性分析层面, 通过 Hill 各向异性屈服准则与 Mises 各向同性准则的对比研究, 发现各向异性模型能精准表征木材非线性变形特征, 支撑点区域呈现塑性应变非对称聚集现象, 跨中区域应变梯度分布则受纤维方向强化效应调控, 证实木材各向异性对塑性变形模式具有决定性影响。针对古建筑木构件长期服役特性, 研究构建了线性和非线性粘弹性本构耦合模型, 解析了木材时变力学响应机制。该模型不仅捕捉到动态加载条件下的速率敏感性特征, 还揭示了持续荷载作用下的应力松弛规律与能量耗散路径, 为木质材料在循环荷载和蠕变工况下的行为预测提供了理论支撑。通过四点弯曲试验和数字图像相关技术 (DIC) 结合有限元分析 (FEM), 验证了模型在应变场重构和失效模式预测方面的可靠性。研究提出了“服役状态匹配”原则, 构建了三级协同分析体系, 即弹性校核-弹塑性极限分析-粘弹性长期预测, 实现了木结构从短期安全评估到长期性能演化的全周期精细化模拟。该体系为古建筑木构件的保护修复与性能优化提供了跨尺度、多物理场的创新解决方案。

关键词: 木构件; 本构模型; 有限元; DIC; 模拟;

通讯作者简介: 浙江农林大学光机电工程学院副教授, 硕士生导师。主要从事计算力学和木材断裂力学相关研究。

装配式结构中的粘结锚固问题与钢筋肋尺度精细化模型

赵唯坚^{1,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: zhaoweijian@zju.edu.cn

报告人: 赵唯坚

摘 要:

建筑工业化是建筑业发展的方向, 装配式结构是实现工业化建造的重要手段之一。在预制装配式混凝土结构中, 构件之间的接头是关键部位, 而构件之间的连接主要依赖于钢筋的连接。预制构件之间钢筋的连接手段主要有搭接连接和机械连接, 两种连接形式的性能均取决于钢筋与混凝土的粘结强度, 可以说钢筋的锚固和粘结问题即是装配式结构连接的核心问题。另一方面, 为了改善和提升钢筋的锚固和粘结性能, 机械锚固技术和超高强混凝土材料的利用也取得了较大的进展。

关于钢筋粘结和锚固问题的研究历史悠久, 研究人员首先从实验入手, 进而尝试给出粘结滑移关系以用于数值模拟和设计。然而, 粘结滑移性能的影响因素多, 如混凝土强度、钢筋直径和外形参数、锚固长度、应力状态和边界条件等, 导致钢筋与混凝土之间的相互作用非常复杂。由于大多数试验都只能在特定条件下进行, 试验方法不统一, 数据测量难度大, 导致试验结果离散性大。在数值模拟研究中, 模型参数取值方面依赖很大的经验性, 模型通用性差, 不同模型之间参数取值相差较大。国标 GB/T 50010 建议, 在条件许可的情况下, 逼近试验测定相关参数。

一般认为, 变形钢筋的粘结应力主要来自机械咬合作用。基于这一假定, 可以将粘结滑移关系这种界面属性转化为结构属性来处理。为此提出并尝试了一种肋尺度精细化建模方法(如图示), 即采用实体单元直接对钢筋表面的几何形状(肋)进行建模, 通过材料之间的几何形状匹配和力学性能差异来反映变形钢筋与混凝土之间的咬合作用。建模过程中仅需提供材料在单轴应力状态下的本构模型, 无需设置界面单元和假定粘结滑移关系。相比于界面单元法, 肋尺度精细化建模的方法更具普适性。

本报告以课题组近年开展的多个装配式结构研究场景为例, 介绍装配式混凝土结构中的粘结锚固问题及解决方案, 概观肋尺度精细化模型的应用方法和效果。

关键词: 装配式结构; 锚固和粘结; 界面单元; 粘结滑移关系; 肋尺度精细化模型

通讯作者简介: 浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师。主要从事混凝土结构与组合结构、装配式结构与智能建造方面的研究。



FRP-混凝土界面黏结失效细观模拟

章子华^{1,*}, 王轩¹, 周春恒¹, 蔡涛涛¹, 赵天霖¹, 郭佳洸¹

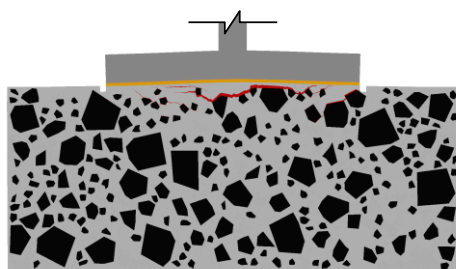
1. 宁波大学, 土木工程与地理环境学院, 浙江宁波 315012

通讯作者邮箱: zhangzihua@nbu.edu.cn

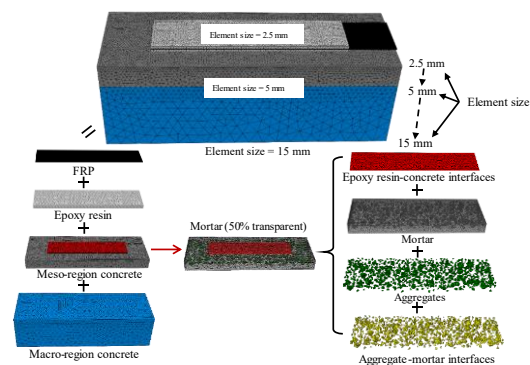
报告人: 章子华

摘 要:

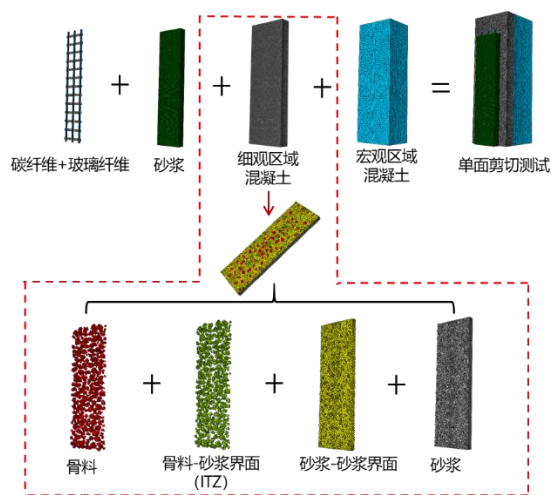
纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Plastics, FRP) 具有轻质高强、耐腐蚀、耐疲劳等优点, 有助于提高混凝土结构的耐久性, 近年来被广泛应用于土木工程结构的加固领域。运用 FRP 材料加固混凝土结构的形式多样, 包括外贴 FRP 片材、FRP 网格增强砂浆 (Textile Reinforced Mortar)、FRP 筋混凝土等。FRP 材料与砂浆、混凝土构成典型的多相材料复合体系, 各材料之间通过界面黏结实现协同工作。由于 FRP 材料的特殊性, 导致其与混凝土的界面黏结作用较弱, 使界面成为结构薄弱环节。因此, FRP 与混凝土的界面黏结性能与失效机理是学界长期关注的关键科学问题之一。已有研究表明, FRP-混凝土界面的细观结构特征对界面黏结性能有重要影响。鉴于目前缺乏有效的界面失效观测手段, 报告人及其团队通过多种手段建立了外贴 FRP 加固混凝土、FRP 筋混凝土、TRM 加固混凝土等多种类型 FRP-混凝土试件的细观有限元模型, 在准确描述其几何形态、界面相互作用的基础上, 对 FRP-混凝土界面黏结滑移行为进行了有效模拟, 揭示了该过程中各相材料的变形和损伤发展规律, 开展了各因素对界面黏结性能影响的定量分析, 为 FRP-混凝土界面黏结失效分析提供了有力工具, 同时为 FRP 加固混凝土结构的宏观力学响应分析提供了理论依据。



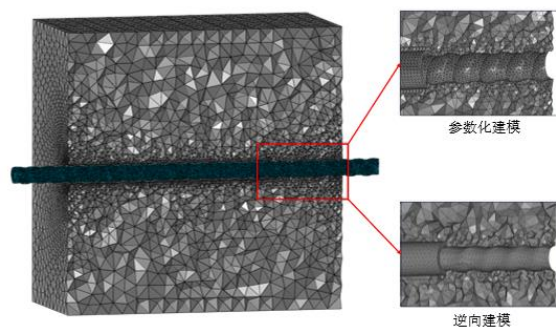
FRP-混凝土正拉试件二维细观模型



FRP-混凝土剪切剥离试件三维细观模型



TRM-混凝土剪切剥离试件三维细观模型



FRP 筋混凝土精细有限元模型

关键词: 纤维增强复合材料; 纤维网格增强砂浆; 随机骨料; 细观; 界面黏结

通讯作者简介: 宁波大学土木工程与地理环境学院教授、博士生导师。主要从事土木工程复合结构及计算方法研究。



UHPC-钢-混凝土新型结合段抗弯性能研究

罗军^{1,*}, 权自然¹, 邵旭东², 赵军¹

1. 郑州大学, 土木工程学院, 河南郑州 450001

2. 湖南大学, 土木工程学院, 湖南长沙 410082

通讯作者邮箱: luojun@zzu.edu.cn

报告人: 罗军

摘 要:

钢-UHPC (ultra high performance concrete, UHPC) 组合桥梁结构具有自重轻、抗裂强度高、施工便捷等优点。应用于大跨多跨连续梁桥跨中部位时, 能有效增大桥梁的跨越能力, 但与预应力混凝土 (PC) 形成的 UHPC-钢-混结合段区域结构新颖, 构造复杂, 截面刚度变化大, 关键构造传力机理尚不明确, 缺乏负弯矩抗弯性能研究。本文以山东滨州黄河五桥为工程背景, 进行 UHPC-钢-混凝土新型结合段 1:3 负弯矩缩尺模型试验 (模型长×宽×高: 6.3m×2.1m×1.6m), 并建立精细化有限元模型, 从整体到局部分析了结合段的构造设计、应力状态与传力机理, 对新型结合段结构的抗弯承载力及计算理论进行系统研究。结果表明, 当荷载为 3750kN (设计荷载 1440kN 的 2.6 倍) 时, 新型结合段的荷载-跨中位移曲线仍处于线弹性阶段, 极限承载力为 6366 kN, 结构由于混凝土梁段顶板大面积受拉损伤导致结构失去承载能力而破坏, 具有足够的强度和优异的变形性能; 增大承压板厚度和 UHPC 层延伸长度均可有降低结合段受弯拉应力水平的作用; 荷载由承压板及剪力连接件传递扩散至结合段的过程中, 钢结构承担轴力比例显著下降, 混凝土结构承担轴力比例显著上升, 与承压板距离为 2.5 倍钉身长度时, 应力分布趋于均匀, UHPC 层轴力占比随着远离承压板由 3%持续缓慢上升至 10.1%, UHPC-钢-混凝土新型结合段传力路径合理, UHPC 层可有效改善钢梁段截面刚度和提高承载能力; 此外, 将有限元分析与理论计算相结合, 提出了 UHPC-钢-混凝土新型结合段开裂力矩和极限承载力的计算理论, 新型结合段结构的开裂力矩和极限承载力的理论计算值与有限元分析值吻合良好, 差异分别为 4.8%和 8.3%。

关键词: 大跨连续梁桥; UHPC-钢-混凝土结合段; 抗弯性能; 传力机理; 有限元分析

通讯作者简介: 罗军, 男, 工学博士, 国家公派瑞士洛桑联邦理工大学联培博士, 博士后, 郑州大学土木工程学院副教授、博士生导师, 国家自然科学基金函评专家, 国家一级注册建造师, 主持国家自然科学基金、中国人民解放军某部队军工项目等纵、横项课题 20 余项, 发表 SCI 论文 20 余篇, 主要从事超高性能混凝土 (UHPC) 及新型桥梁结构的研究。

采用高强材料的内置箍筋钢管混凝土受压性能研究

李伟捷¹, 李威^{2,*}

1. 中国矿业大学(北京), 力学与土木工程学院, 北京 100083

2. 清华大学, 土木工程系, 北京 100084

通讯作者邮箱: iliwei@tsinghua.edu.cn

报告人: 李伟捷

摘 要:

对采用高强材料的内置螺旋箍筋钢管混凝土柱受压性能进行了研究。钢管, 混凝土和螺旋箍筋的强度最高分别达 771.7MPa、108.5MPa 和 1597.6MPa。研究参数包括截面形状、箍筋间距、钢管强度、偏心率、长径比等。研究表明, 对于采用高强材料的圆形截面构件, 内置螺旋箍筋可以显著提升轴心和偏心受压承载力以及构件的延性。在构件达到峰值荷载时, 螺旋箍筋达到或接近屈服强度。对于采用高强材料的方形截面构件, 螺旋箍筋可以有效改善构件的延性, 但对承载力几乎没有影响。在构件达到峰值荷载时, 试件中部受压侧螺旋箍筋可以达到屈服强度。在峰值后阶段, 中部截面其他位置处箍筋应力持续增加。减小箍筋间距有助于提升构件的受力性能, 而提高钢管强度有助于促进螺旋箍筋性能的发挥。研究还表明, 偏心率和长径比的增加将削弱箍筋的约束作用; 基于该结果, 给出了建议的最大长径比限值。

关键词: 钢管混凝土; 螺旋箍筋; 高强材料; 受压性能

通讯作者简介: 清华大学土木工程系教授、博士生导师。主要从事钢-混凝土组合结构的研究。



超弹性多稳态张拉整体的准静态仿真计算方法

许植胤¹, 陆金钰^{1,*}

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: davidjingyu@seu.edu.cn

报告人: 许植胤

摘 要:

张拉整体结构是由受拉索和受压杆组成的预应力空间结构, 而多稳态张拉整体是具有多种稳定平衡状态的张拉整体结构。由于其多个稳定不同形态的构型以及不同构型之间转换快速变化的能量, 多稳态张拉整体的应用从土木工程领域的向机器人和超材料等大变形的领域。现有研究大多基于线弹性材料的假定对多稳态张拉整体进行找形以及形态之间转换的仿真分析。但是在在大变形情况下, 弹性索的本构关系不是完全的线弹性, 而是非线性的(超弹性), 现有研究方法会带来很大的计算误差。针对上述研究现状, 本研究使用 Ogden 模型建立了超弹性拉索的本构关系, 实现了超弹性张拉整体的找形, 并将其融入了多稳态张拉整体结构的找形和稳态转换仿真计算过程中。

首先, 提出了一种新的超弹性张拉整体结构找形方法。基于 Ogden 超弹性模型, 推导了超弹性张拉整体的切向刚度矩阵计算方法, 将其嵌入 Levenberg-Marquardt 找形方法中, 实现了找形算法对于几何非线性和材料非线性的考虑。进行了平面 2 杆 4 索张拉整体和 6 杆 24 索张拉整体的模型试验, 平衡构型的索长最大误差仅为 3.77%, 验证了找形方法的正确性。将超弹性张拉整体找形算法应用于 4 个张拉整体算例并与线弹性模型比较, 结果表明, 4 个算例中最大的形状误差为 80%, 这突出了考虑材料非线性的重要性。

其次, 采用超弹性张拉整体找形方法, 对张拉整体进行多稳态的找形。研究开展了 3 杆 6 索多稳态张拉整体、6 杆 24 索多稳态张拉整体以及截断十二面体多稳态张拉整体共 3 个算例, 仿真计算结果表明, 引入材料非线性后多稳态张拉整体的各个稳态与线弹性模型计算结果不同。

最后基于准静力假定, 进行了多稳态张拉整体形态转换过程的跟踪计算。算例结果表明: 算法成功实现了对于形态转换全过程中的构件内力、变形的计算。进一步的, 探索了不同的驱动路径对于超弹性张拉整体形态转换的影响。

本研究提出一种考虑材料非线性和几何非线性的仿真计算方法, 能够以较高精度对多稳态张拉整体进行找形、力学分析、形态转换跟踪计算。研究能够推动基于多稳态张拉整体的超材料、机器人和可展开结构的发展。

关键词: 张拉整体; 稳态转换; 切线刚度矩阵; Ogden 超弹性模型; 准静态假定

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事钢结构、空间结构、智能结构研究。

车辆移动荷载作用下道路窨井盖周边沥青路面结构动力分析

胥子凡¹, 查旭东^{1,*}

1. 长沙理工大学, 交通学院, 湖南长沙 410114

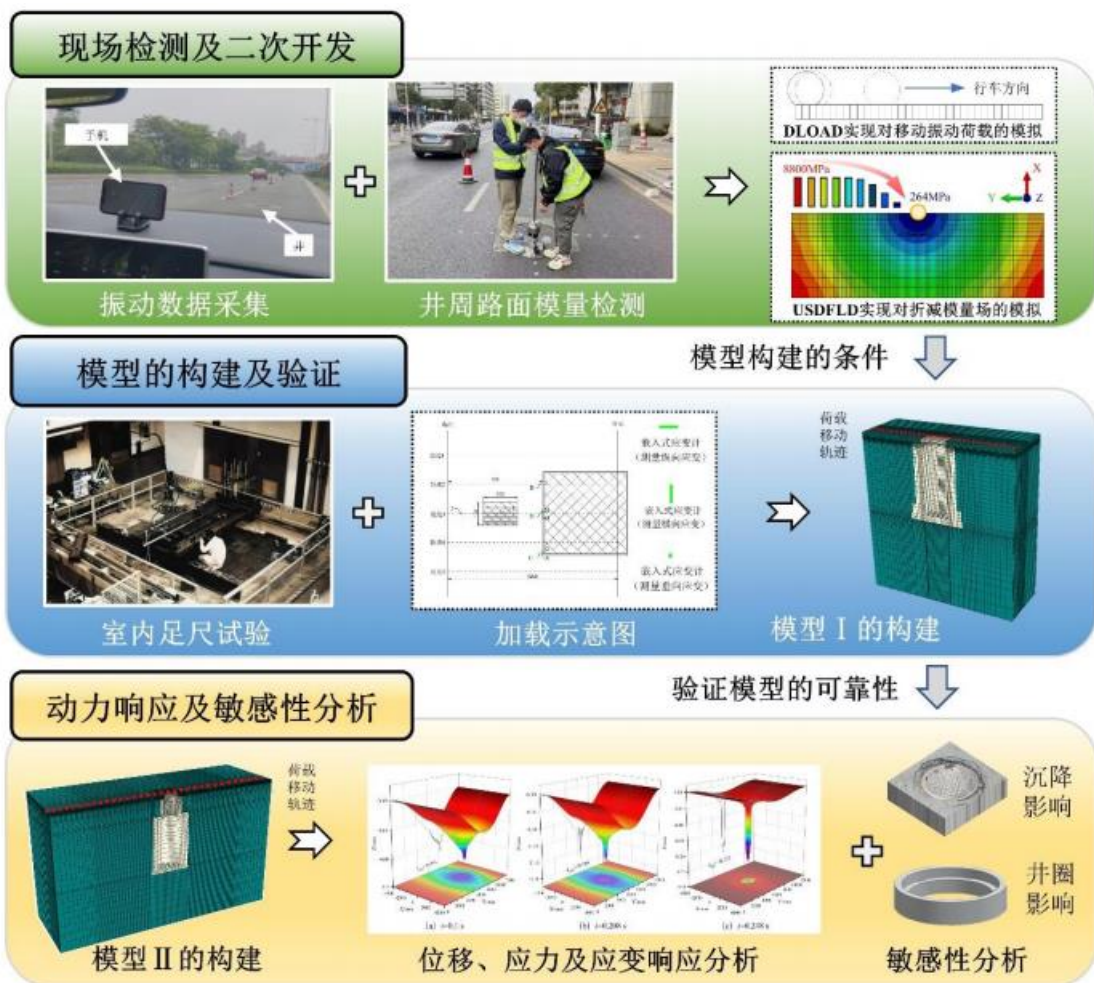
通讯作者邮箱: zhaxd410@163.com

报告人: 胥子凡

摘 要:

在日益增长的交通荷载作用下, 井周沥青路面开裂、沉陷和拥包等病害频发, 道路服役品质和使用寿命显著下降。为探究窨井对其周边沥青路面结构性能的影响规律和机制, 本文基于振动传感器采集的加速度数据及结构动力学方程推导车辆驶过井-路结构时的动载特性, 根据加载频率和模量折减曲线计算井周路面模量场, 以此构建窨井及井周沥青路面结构三维有限元模型, 从而分析井周沥青路面结构在移动车辆荷载作用下的动力响应, 并通过极差和方差分析法确定道路结构材料、窨井材料及沉降对井周路面性能和使用寿命的影响程度。结果表明: 在移动荷载长期作用下, 井前区域所承受的荷载冲击系数增至 1.90, 较大的动载致使井周沥青路面模量由远及近呈现出先缓后急的下降趋势, 可通过倒指数函数拟合表示; 相较远离窨井沥青路面, 井周路面路表最大弯沉和面层层底纵向拉应变峰值分别增大约 1 倍和 28 倍, 上、中、下面层层顶压应力峰值分别增加 21.9%、17.8% 和 48.7%; 面层模量、沉降和井圈模量对井周沥青路面性能存在高度显著影响, 井圈和井身模量的减少或者沉降增加, 致使面层疲劳寿命减少 81.3% 至 98.8%, 井周区域急剧衰减的疲劳寿命表征其易损坏, 从而影响道路整体的服役水平。本研究结果为揭示井周路面的损坏机制提供了理论依据, 有助于指导窨井和路面的结构设计。

关键词: 道路工程; 井周沥青路面; 动载特性; 数值模拟; 动力响应



通讯作者简介：长沙理工大学交通学院二级教授、博士生导师。长期从事交通运输工程领域道路与铁道工程学科及道路桥梁与渡河工程专业的教学、科研和技术服务工作，主要研究方向包括道路工程设计理论与方法、道路工程材料及道路安全与环境等。

典型古建筑木结构高效模拟方法及承载特征分析

余攀^{1,*}, 杨庆山², S.S. Law²

1. 重庆大学, 建筑城规学院, 重庆 400045

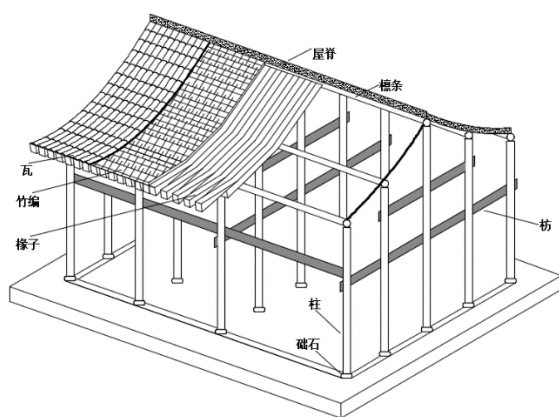
2. 重庆大学, 土木工程学院, 重庆 400045

通讯作者邮箱: ypwhut@163.com

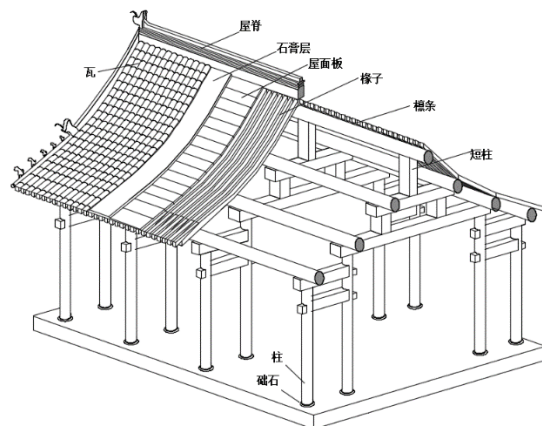
报告人: 余攀

摘 要:

中国古代建筑是世界建筑史上浓墨重彩的一笔, 穿斗式(图 1(a))和抬梁式(图 1(b))木结构是古建筑木结构两类典型的结构形式。由于长期服役, 古建筑木结构的节点和构件不可避免地存在一定程度的损伤, 需要采取必要的修复加固措施。因此, 节点及木结构的精确受力分析是古建筑木结构预防性和针对性保护的必要前提和关键过程。古建筑木结构最显著特点是梁柱之间采用榫卯连接, 节点形制各异且通常存在缝隙, 榫头和卯口的摩擦滑移-接触行为使得节点及构架的受力性能分析较为复杂, 导致科学合理的古建筑保护措施难以开展。本研究考虑榫卯节点的缝隙影响和摩擦滑移-接触行为, 推导了半榫节点在轴向、剪切、转动自由度的力学模型, 分析了半榫节点在这三个自由度的滑移-接触受力特征。为了满足典型古建筑木结构的建模需求, 同时建立了透榫和联系枋榫的力学模型。基于榫卯节点和浮搁柱脚的理论模型建立了穿斗式(图 2(a))和抬梁式(图 2(b))木结构的计算效率高、精度高的数值模型, 通过拟静力分析了考虑榫卯节点缝隙影响下穿斗式和抬梁式木结构侧向承载特征及耗能特征。结果表明抬梁式木结构的承载能力明显大于穿斗式木结构, 并且在榫卯连接开始工作后, 抬梁式木结构的刚度也大于穿斗式木结构。穿斗式木结构外荷载输入能量主要转化为榫卯节点所做的功和框架的弹性应变能, 重力势能始终是抬梁式木结构外荷载输入能量转换的主要部分。



(a) 穿斗式木结构



(b) 抬梁式木结构

图 1 典型古建筑木结构

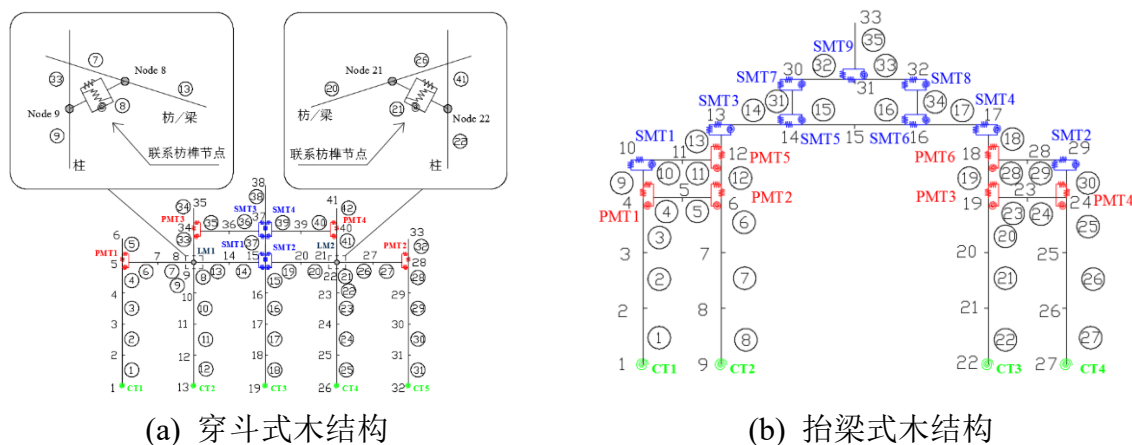


图 2 穿斗式和抬梁式木结构的计算模型

关键词：古建筑木结构；穿斗式；抬梁式；高效模拟；承载性能

通讯作者简介：重庆大学助理研究员/博士后。主要从事古建筑木结构节点、结构受力性能分析及古建筑木结构修缮研究。主持国家自然科学基金青年基金、山西省基础研究计划-青年项目、山西省文物保护基金项目。以第一/通讯作者在Engineering Structures、Journal of Building Engineering、Structures、International Journal of Architectural Heritage等国际Top和权威SCI期刊发表论文十余篇。

基于 FPMCAE 平台的海上浮式风机整机多尺度耦合模型动力性能研究

谭麒麟¹, 蔡宇翔¹, 喻莹^{1*}, 罗尧治²

1. 汕头大学, 工学院, 广东汕头 515063

2. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: yuying@stu.edu.cn

报告人: 喻莹

摘 要:

在全球能源转型与“双碳”目标驱动下, 深远海风电开发成为我国清洁能源体系建设的战略方向。半潜式浮式风机作为适应深水环境的关键技术, 其动力性能评估面临风-浪-流多场耦合与结构-流体复杂交互的挑战。本文基于 FPMCAE 平台, 提出一种多尺度耦合建模方法, 通过有限质点法 (FPM) 分别构建半潜式浮式风机整机的索-梁和索-壳耦合模型, 解决传统方法在非线性能动力响应分析中的局限性。研究首先建立索、梁、壳单元的质点运动方程, 推导风 (叶素动量理论)、浪 (Morison 方程)、流荷载的质点等效外力计算方法。基于 FPMCAE 平台, 分别开发索-梁模型 (系泊缆为索单元, 平台/塔筒/叶片为梁单元) 和索-壳模型 (系泊缆为索单元, 平台/塔筒/叶片为壳单元), 对比分析频域与时域动力特性。结果表明: 索-梁整机模型能有效捕捉结构变形趋势, 计算效率高; 而索-壳整机模型能更精确捕捉叶片根部、立柱-横撑连接处等关键位置的应力集中。纵荡运动对波谱峰频敏感, 垂荡在极端海况幅值下激增 80%, 纵摇受平台横向尺度抑制; 迎浪侧系泊链张力显著高于侧链, 差值达 3 倍。FPMCAE 平台通过 GPU 并行和显式求解, 高效处理叶片、塔筒、浮式平台的大变形和大变为, 有效模拟了系泊缆松弛-张紧交替过程。本研究为深远海浮式风机设计提供了高精度、高效率的多尺度分析工具, 支撑平台轻量化与系泊优化, 助力我国海上风电从“近海固定式”向“深海浮式”技术跨越。

关键词: 有限质点法; FPMCAE 平台; 多尺度耦合; 浮式风机; 动力响应

通讯作者简介: 喻莹, 汕头大学工学院教授、工学院副院长, 博士生导师。长期从事工程结构动力灾变, 智能结构与材料、计算力学等方向的教学和研究工作。先后主持国家级和省部级项目二十余项, 出版论著 2 本, 授权发明专利 6 项, 发表论文 60 余篇。现任教育部工程教育专业认证协会培训专家、中国钢结构疲劳与稳定分会理事等职务。



基于局部柔度矩阵的钢管混凝土结构刚度计算方法

侯川川^{1,*}, 高晟哲¹, 韩林海²

1. 北京航空航天大学, 交通科学与工程学院, 北京 100191

2. 清华大学, 土木工程系, 北京 100084

通讯作者邮箱: houcc@buaa.edu.cn

报告人: 侯川川

摘 要:

由于外钢管和核心混凝土在荷载和环境耦合作用下的累计损伤, 钢管混凝土结构在长期服役过程中刚度会逐步退化, 导致其内力分布、变形和振动等特性的改变。对钢管混凝土结构刚度进行评估的前提是发展有效的计算方法, 而现有研究中所定义的刚度计算方法均是针对其整体结构的“平均刚度”, 而缺乏对损伤下其局部刚度变化及其规律的认识。针对此, 本文提出了基于局部柔度矩阵的钢管混凝土结构刚度计算方法, 可有效反映核心混凝土损伤等对其局部刚度的影响规律, 并实现了考虑损伤参数的钢管混凝土刚度快速计算, 为长期服役下钢管混凝土结构刚度评估提供了参考。具体工作包括:

(1) 考虑钢管-核心混凝土之间的组合作用, 基于大量参数分析, 提出了钢管内核心混凝土的裂缝应力强度因子 (K_{II} , K_{I2} , K_{II}), 在此基础上, 推导了考虑核心混凝土开裂的钢管混凝土单元局部柔度矩阵 ($[c_{ij}]$), 从而定量表征了核心混凝土裂缝长度、位置和数量等参数对钢管混凝土单元刚度的影响规律, 在此基础上, 建立了带损伤钢管混凝土结构单元刚度矩阵 ($[k_{ij}]$)。

(2) 建立了考虑损伤参数的钢管混凝土铁木辛柯梁单元简化模型和相应的带实体裂缝的三维精细化有限元模型。考虑多种损伤场景, 采用精细化有限元模型结果对简化模型的精度进行了验证, 结果表明简化模型可快速、精确实现对带裂缝钢管混凝土结构的刚度计算。

(3) 基于以上模型, 分析了核心混凝土开裂和界面脱空等因素耦合作用对钢管混凝土结构刚度的影响规律, 明晰了界面脱空和核心混凝土开裂耦合导致结构刚度降低的作用机理。

关键词: 钢管混凝土, 局部柔度矩阵, 刚度, 应力强度因子, 混凝土裂缝

通讯作者简介: 北京航空航天大学交通科学与工程学院副教授、博士生导师。主要从事钢管混凝土结构力学性能和损伤识别研究。

具有荷载缓和功能的大型形状自适应索网试验和数值模拟

叶诚¹, 罗尧治^{1,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: luoyz@zju.edu.cn

报告人: 叶诚

摘 要:

索网结构由于其构件轻、性价比高, 在体育场馆、展览馆、交通站台等大跨度建筑中得到越来越多的应用。大跨度的索构件和复杂的结构体系相结合, 导致索网在发生破坏后需要大量的维护支出。因此, 提高其承载能力和韧性具有重要意义。目前, 提高索网结构性能和安全性的方法有主动控制、被动控制和混合控制。这些方法通过控制结构形状的变化和重新分配内力来减少外部载荷的影响。这些方法有些依赖于复杂的测量设备, 有些需要更换现有的结构部件, 从而增加了建筑空间和成本要求。荷载缓和体系的概念为大型索网结构的形状控制提供了一种新的方法。与现有的形状自适应或耗能系统相比, 该体系引入了一种基于滑动电缆的荷载缓和机制, 如图 1 所示。这种机制可以在没有外部控制或执行器的情况下被动适应不同荷载。与传统的刚性结构相比, 索网结构表现出更大的变形敏感性, 这为荷载缓和体系的引入提供了基础。

本文采用实验和数值两种方法研究了具有荷载缓和功能的大型索网结构的工作原理和形状自适应性能。参考 Cutler 索网设计实验模型, 如图 2 所示。由于 Cutler 索网的性能不是本研究的重点, 因此根据其结构形式和体系组成重新设计了实验模型。

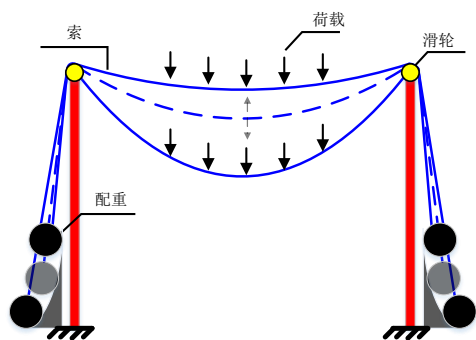


图 1 荷载缓和体系

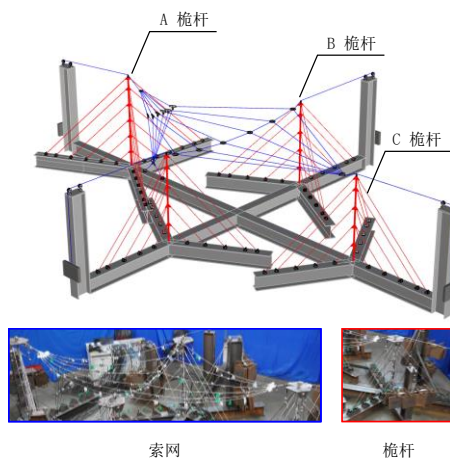


图 2 试验模型及示意图

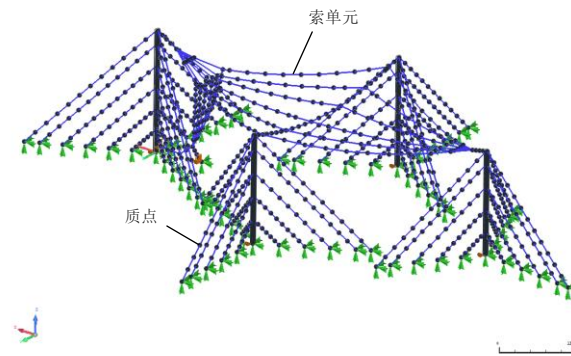


图 3 索网结构的 FPM 模型

本文采用有限质点法（FPM）进行结构数值分析，如图 3 所示。FPM 是一种基于向量力学的无网格方法，它利用有限离散质点的特性来描述整个结构。这种方法有效地避免了有限元中常见的刚度矩阵奇异等数值问题。此外，FPM 利用虚拟运动技术将单元运动分解为刚体位移和纯变形，从而提高了在大几何非线性条件下的计算稳定性。这些特征使得 FPM 特别适合分析复杂的结构响应，例如结构在动态行为和机构运动模拟中的响应。考虑到这些优点，本研究采用 FPM 对实验结构进行建模和计算。

本文主要发现和结论如下：

(1)搭建 $4.72\text{ m} \times 2.32\text{ m}$ 的索网模型进行实验验证，证实了将索、滑轮和配重集成在一起的荷载缓和体系的运行可行性。该系统能够自适应地改变索网的形状，无需更换索或辅助测量设备。配重系统利用重力势能降低了结构内能的变化。

(2)荷载缓和体系有效降低了索网结构在荷载作用下的轴力，最大可降低 30 - 40%。荷载缓和体系的引入有助于节省索材料用量，提高结构的承载能力。

(3)利用 FPM 进行的数值模拟有效地反映了与索滑移和大位移相关的复杂行为。对于索网结构在荷载缓和过程中的整体响应，数值计算结果与试验观测结果基本一致，但局部存在一定偏差。这种方法能够再现对荷载缓和体系性能至关重要的结构变形特征。

关键词：索网结构；荷载缓和体系；实验；有限质点法；形状自适应

通讯作者简介：浙江大学土木工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为大跨度空间结构理论与方法、结构复杂行为分析、结构健康监测、无线传感监测技术、结构 CAD/CAM 软件、基础设施智慧与韧性等。

强降雨条件下非饱和植被边坡中水分入渗解析计算研究

江文豪^{1,2,*}

1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108

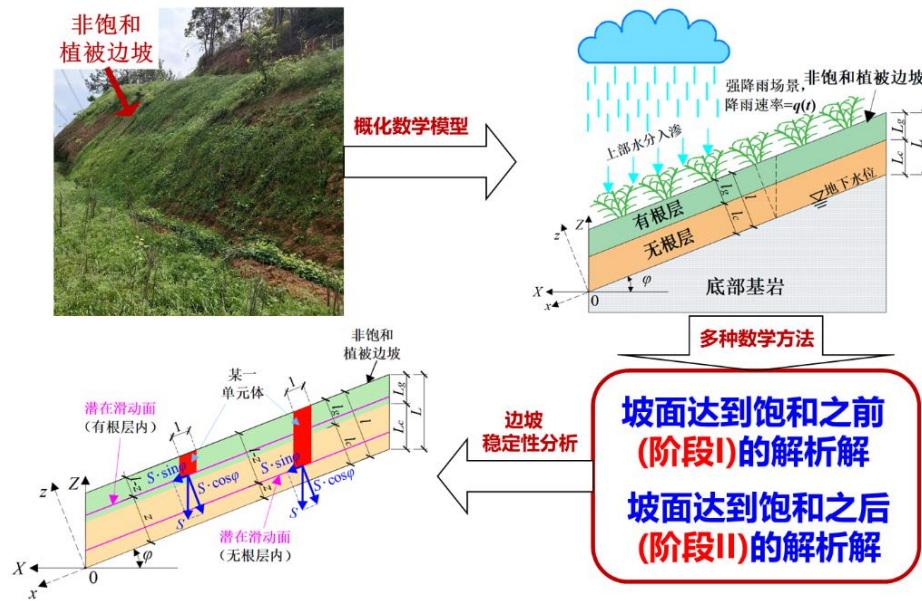
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071

通讯作者邮箱: Geo_jiang2020@163.com

报告人: 江文豪

摘 要:

强降雨事件是常见的自然现象。针对强降雨条件下非饱和植被边坡(由有根层和无根层组成)中水分入渗问题,将入渗过程分为坡体表面达到饱和状态之前和之后的两个阶段。在此基础上,采用变量分离、积分运算和级数变换等多种数学方法,首次获得了相应解析解。接着,通过与两个现有解析解及相应数值解比较,有效验证了所发展解析解。最后,基于所定义的安全系数 F_s ,研究了多个关键因素对非饱和植被边坡稳定性影响。结果表明:强降雨速率增大会降低安全系数 F_s ,但由于坡面达到饱和状态后雨水无法完全入渗,因而其对坡体稳定性的影响会呈现先增后减的变化趋势;蒸腾速率增大可增强非饱和植被边坡的整体稳定性,但也会增大强降雨条件下的累计入渗量。因此,在强降雨入渗后,其对坡体稳定性的影响有所减小;根系抗拉强度增大会增加有根层的安全系数 F_s ,但不影响无根层的稳定性。根系形状主要影响有根层的安全系数 F_s ,且这种影响主要与根系面积占比相关。相比于“均布型”根系形状,“指数型”根系形状下无根层的安全系数 F_s 稍大。本研究所发展解析解及所得结果可为强降雨条件下非饱和植被边坡中水分入渗分析及其稳定性评估提供理论指导。



论文报告的摘要图

关键词：强降雨条件；非饱和植被边坡；水分入渗；解析解；稳定性分析

通讯作者简介：江文豪，男，1996年生，博士，副教授，主要从事：（1）污染场地防渗屏障（包括底部防渗垫层、竖向隔离墙和填埋场覆盖层）中污染物运移理论研究；（2）固结与溶质运移耦合模型研究；（3）边坡降雨入渗解析理论及降雨诱发边坡失稳等方面研究工作。目前已在 *Computers and Geotechnics*, *Geotextiles and Geomembranes*, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *Journal of Engineering Mechanics*, *International Journal of Geomechanics*, *Geosynthetics International*, *Soils and foundations*, *岩土力学*, *岩土工程学报*, *岩石力学与工程学报*, *土木工程学报*, *工程力学* 等国内知名期刊上发表论文 40 多篇，其中以一作或通讯作者在 SCI/EI 期刊发表论文 30 多篇。E-mail: Geo_Jiang2020@163.com.

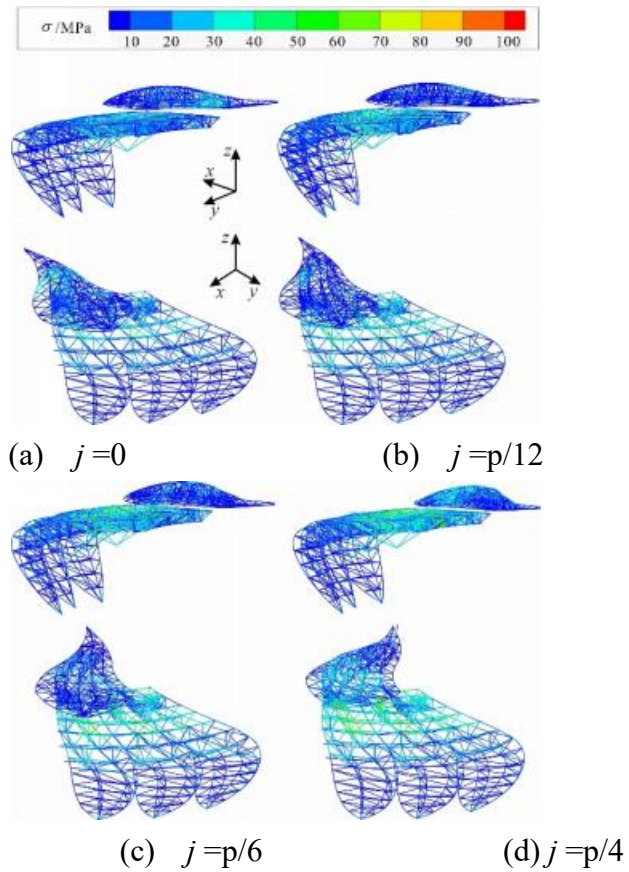


图2 不同开合程度下 Mises 应力分布图

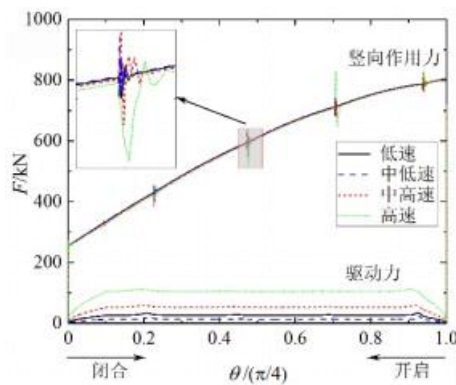


图3 不同开启速度下驱动力和主动轮轮轨间作用力随旋转角度 q 的变化关系

关键词：开合屋盖；协同分析；运动全过程；有限质点法；动力效应

通讯作者简介：浙江大学建筑工程学院大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事空间结构、数值仿真、结构健康监测等研究。

基于多尺度有限元分析的预制桥面板抗弯性能研究

赵启良¹, 王玲茂¹, 袁琳琳¹, 赵唯坚^{1,*} 孙博超¹

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: zhaoweijian@zju.edu.cn

报告人: 赵启良

摘 要:

随着预制混凝土桥面板施工复杂度的增加, 基于高性能纤维增强砂浆 (HPFRM) 的新型带头钢筋接头被提出。针对该接头在不同搭接长度及砂浆强度条件下的受弯性能, 本研究利用 DIANA 有限元分析软件构建了三种三维有限元仿真模型: 常规实体模型、多尺度简化模型及多尺度精细化模型, 并在此基础上进行了系统数值分析。为了验证数值分析结果的准确性, 本研究通过四点弯曲试验对数值模拟中的承载力、裂缝发展形态及破坏机理进行了对比验证。结果表明, 随着高性能纤维增强砂浆强度的提升, 接头区的受弯承载力显著增加, 表明高强度砂浆能够有效提升接头区域的整体刚度与抗裂能力。此外, 在相同砂浆强度下, 接头搭接长度对受弯承载力具有阈值效应, 低于阈值时易发生接头破坏并导致应力传递失效, 超过阈值后破坏模式转为桥面板的弯曲破坏。基于有限元分析结果, 对高强度高性能纤维增强砂浆接头推荐搭接长度不小于 45.6 mm, 对应接头宽度不低于 100 mm; 对中等强度高性能纤维增强砂浆接头则推荐搭接长度不低于 95 mm, 对应接头宽度不低于 150 mm。对比三种仿真方法, 常规模型具备较高效率, 但在描述钢筋-砂浆界面非线性互锁行为时需要预设粘滑关系; 多尺度简化模型在效率与精度间取得平衡; 多尺度精细化模型通过对钢筋肋部的实体建模, 较真实地反映了带肋钢筋与高性能纤维增强砂浆的机械咬合作用, 无需假设粘滑关系, 其数值结果与试验破坏形态及力学性能高度吻合, 具备更广泛的应用潜力。综上, 本研究通过高精度数值仿真为高性能纤维增强砂浆带头钢筋接头的设计提供了系统性指导, 并以结构试验对仿真结果进行了必要验证。所得结论可为预制桥面板接头的工程化应用与优化设计提供理论依据和数值参考。

关键词: 多尺度有限元模拟; 预制桥面板接头; 高性能纤维增强砂浆; 钢筋机械锚固技术

通讯作者简介: 浙江大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事装配式混凝土结构和智能建造方面的研究。



基于有限质点法的多跨连续钢桁架桥梁连续性倒塌模拟分析

金亚霏¹, 蔡宇翔², 罗尧治^{1,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 汕头大学, 土木与智慧建设工程系, 广东汕头 515063

通讯作者邮箱: luoyz@zju.edu.cn

报告人: 金亚霏

摘 要:

近年来,随着经济的发展和城市化进程的加速,交通需求不断增加,交通桥梁工程蓬勃发展的同时,桥梁倒塌事故也时有发生。连续倒塌是一种结构极端破坏形式,其发生对结构物本身及人身、经济、安全都会产生巨大影响。作为重要生命线工程之一,桥梁工程发生倒塌引起的后果较一般结构更为严重,因此对桥梁结构抗塌性的检验十分重要。对多跨连续桥梁倒塌的有效模拟是检验桥梁结构抗塌性的关键。鉴于实际实验模拟方法的高成本和低效性,数值模拟方法在多跨连续桥梁抗塌性检验中尤为重要。由于钢桁架桥梁渐进倒塌中钢结构的大应变、低周循环疲劳和断裂等复杂力学行为,钢桁架桥梁的数值模拟较难实现且应用不广。有限质点法(FPM),以向量力学理论和数值计算为基础,通过质点的运动来描述结构的行为,在结构复杂行为研究领域有较大优势。基于有限质点法现有的钢材滞回循环本构模型(Steel hysteresis cyclic model, SHCM),在这里我们引入了一个更加精细的基于纤维以及本构的断裂模型。新的本构模型新增了退化曲线,修正了滞回准则和再加载曲线,使其能更有效的模拟钢材在大应变幅值下的滞回行为,同时还能捕捉钢材的颈缩、疲劳和断裂等退化行为。该改进本构模型主要由五个部分组成,分别是滞回准则、单轴加载曲线、滞回骨架曲线、退化曲线和再加载曲线。应用该钢材本构模型,本文对一座等比例三维钢桁架桥模型进行渐进倒塌模拟分析,如图1所示。数值建模以美国马里兰州的弗朗西斯·斯科特·基桥为原型,其于2024年3月因桥墩处受轮船撞击,主跨桥梁全面倒塌,东北方向最靠近主跨的三跨度桥面发生了连续性倒塌破坏,桥梁路面通道被切断,造成六人死亡两人受伤。可发现,数值模型中由西南侧桥墩失效后,钢桁架开始下沉并引发了其两侧跨中部钢构件不同程度的损坏与断裂,随着时间的推移,钢桁架桥的破坏倒塌进一步发展,导致了主跨两端钢构件与其余跨度钢构件的连接失效,最终导致主跨完全倒塌,仿真模拟结果与实际倒塌过程比对,有较高的一致性。结果表明,应用本文描述的方法,解决了钢桁架桥梁渐进倒塌中钢结构的大应变、低周循环疲劳和断裂等复杂力学行为难以模拟的难题,实现了钢桁架桥梁渐进倒塌中纤维梁截面逐步开裂过程和强不连续性行为的模拟。该研究为理解多跨连续钢桁架桥梁的渐进倒塌复杂过程和结构安全性检验提供了更全面的新模拟方法。

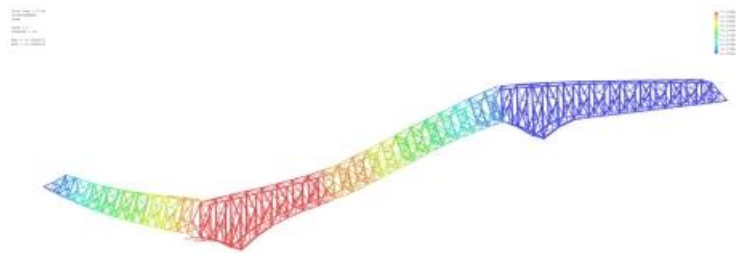


图 1 钢桁架桥梁连续性倒塌数值模拟过程

关键词：有限质点法；倒塌；钢桁架桥梁；断裂模型

通讯作者简介：浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师。主要从事空间结构研究。



基于 GPU 并行加速的有限质点法在二维结构静-动态断裂分析中的应用

康玉峰¹, 郑延丰^{1*}, 罗尧治^{1,2}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 浙江省空间结构重点实验室, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: yanfeng39@zju.edu.cn

报告人: 康玉峰

摘 要:

断裂作为结构的主要失效模式之一, 会严重影响结构的使用寿命, 因此研究裂缝在结构中的形成和传播机理十分重要。传统有限单元法在处理断裂问题时, 需频繁重组全局刚度矩阵, 裂缝扩展引起的强不连续性和非线性常导致数值收敛困难, 难以高效准确求解。而基于向量式力学发展而来的有限质点法 (Finite Particle Method, FPM), 采用点值描述和途径单元的概念来描述连续体的变形与运动, 各质点运动方程的求解相互独立, 避免了刚度矩阵的数值求解困难, 同时具有高并行性的优势。粘聚区模型 (Cohesive Zone Model, CZM) 作为通用非线性断裂模型, 具有避免裂纹尖端奇异性且易于实现的优势。因此, 将 FPM 和 CZM 相结合是结构高效断裂分析的一个有前景的方法。基于 FPM 在处理结构断裂问题时的优势, 本文提出一种适用于二维结构静-动态断裂分析的高效数值方法。该方法基于 FPM 构建显式力学分析框架, 结合 CZM 以模拟断裂过程区的牵引-分离行为, 并通过图形处理单元 (Graphics Processing Unit, GPU) 并行加速策略显著提升求解效率。具体做了如下研究:

(1) 在理论模型构建方面, 本文结合四质点粘结单元建立了 CZM 的力学响应模型, 能够完整描述裂缝从线弹性响应、软化演化到最终失效的全过程。在此基础上, 引入率相关牵引-分离准则, 用以刻画裂缝面在不同加载速率下的强度提升效应, 实现了静载与动载断裂行为的统一模型构建。

(2) 并行计算方面, 为解决大规模断裂模拟所面临的计算瓶颈, 本文采用 NVIDIA CUDA 架构实现全流程并行求解。质点更新、单元内力计算以及粘结单元响应均在 GPU 上并行执行, 并通过采用 SoA 结构优化内存访问效率, 进一步提升并行性能。

(3) 在数值验证方面, 本文开展了静载下混凝土梁断裂分析、动载下混凝土拉伸断裂分析及经典 Kalthoff 剪切断裂问题模拟 (见图 1-3)。结果表明, 裂缝路径、荷载-位移曲线与裂缝扩展速度均与实验及文献结果高度一致, 验证了方法的准确性与可靠性。效率评估显示, GPU 加速方案相较 CPU 串行最高可提升约 24 倍, 相较 Abaqus/Explicit 亦提升约 11.5 倍, 展现出优越的计算效率与并行能力。

综上所述, 本文提出的基于 GPU 并行加速的有限质点法静-动态断裂分析方法具备良好的断裂分析能力、数值稳定性和并行效率, 在大规模结构静载与动载作用下的裂缝

行为分析方面有巨大潜力。

关键词：有限质点法；断裂行为分析；粘聚区模型；并行计算

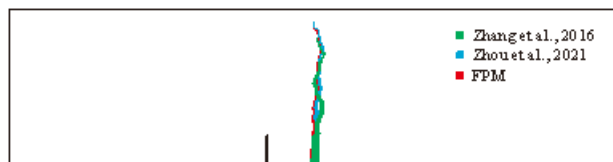


图 1 混凝土梁静态开裂路径

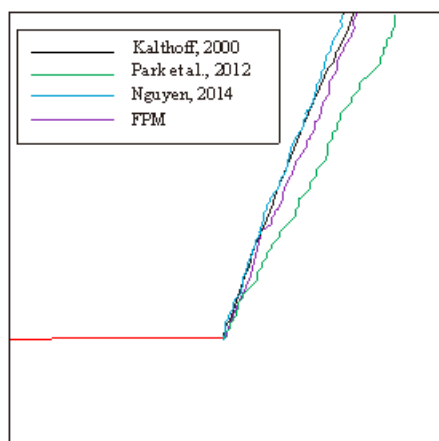


图 2 Kalthoff 板动态开裂路径

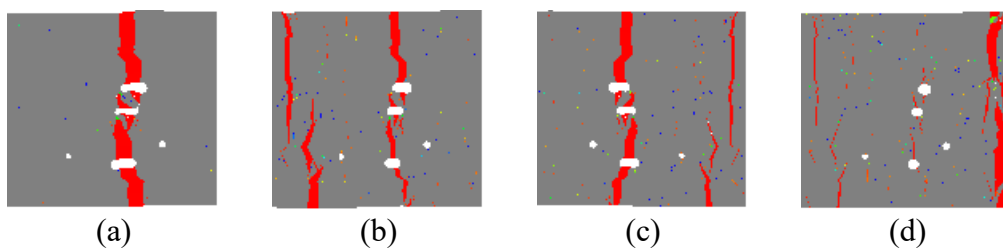


图 3 不同加载速率 $\dot{\epsilon}$ (s^{-1})下混凝土的开裂路径: (a) $\dot{\epsilon} = 1$; (b) $\dot{\epsilon} = 18$; (c) $\dot{\epsilon} = 22$; (d) $\dot{\epsilon} = 50$

通讯作者简介：浙江大学土木工程学院特聘研究员、博士生导师。主要从事结构复杂行为分析，深地空间结构，人工智能(AI)与计算力学方面的研究



循环加载频率对颗粒材料液化特性影响的离散元数值模拟研究

周鑫辉^{1,2}, 罗尧治^{1,2}, 沈雁彬^{1,2*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 浙江大學长三角智慧绿洲创新中心, 未来城市(智慧城市)实验室, 浙江嘉兴 314100

通讯作者邮箱: ybshen@zju.edu.cn

报告人: 周鑫辉

摘 要:

砂土液化特性作为岩土工程领域的核心研究课题,其受循环加载频率影响的机理研究具有重要意义。研究表明,循环加载频率通过改变土体加载速率,会显著影响砂土的液化特性。然而,现有研究存在以下局限性:(1)相关结论主要基于宏观室内试验,缺乏细观层面的机理阐释;(2)受实验设备限制,常规室内试验的加载频率范围(通常小于 2 Hz)难以覆盖实际地震荷载(可达 10 Hz)及土工离心机振动台试验(可达 100 Hz)所涉及的高频工况。

针对上述研究局限,本研究采用二维离散元方法(2D DEM),开展一系列应力控制的不排水循环双轴试验模拟,覆盖 0.5~128 Hz 的宽频域循环加载工况,系统探究了循环加载频率对颗粒材料液化特性影响的细观机理。离散元分析表明:加载频率对颗粒材料液化前阶段行为影响甚微,但会显著延缓液化过程中及液化后超静孔隙水压力与轴向应变的发展(即“滞后效应”)。该“滞后效应”会轻微提升颗粒材料的抗液化强度,并显著改变应力-应变曲线与有效应力应力路径的形态特征。通过组构各向异性和力学配位数对颗粒材料接触结构演化进行量化表征,发现宏观液化行为发展的滞后可归因于接触结构演变的减缓,具体表现为:在高频荷载作用下,颗粒材料缺乏足够时间完成颗粒重排列、接触断裂与再生成等过程,导致接触结构调整速率降低。本研究从细观角度揭示了循环加载频率影响颗粒材料液化特性的内在机理。

关键词: 颗粒材料, 液化特性, 循环加载频率, 离散元, 细观机理。

通讯作者简介: 浙江大学建筑工程学院副教授、博士生导师。主要从事大跨空间结构设计、复核、施工分析、检测评估、健康监测等方向的研究

边坡生态防护全生命周期碳排放测算

吴雄¹, 许江波^{1,*}, 王少伟¹

1. 长安大学, 公路学院, 陕西西安 710061

通讯作者邮箱: xujiangbo@yeah.net

报告人: 吴雄

摘要:

边坡生态防护作为一种综合工程护坡与植物护坡优势的技术, 不仅能够显著提高边坡的稳定性, 还能有效减少碳排放, 现已成为交通基础设施建设的重要组成部分。为评估边坡生态防护工程全生命周期的碳排放量, 采用文献调研和数据库检索的方法, 分析了边坡生态防护碳排放来源, 划定了边坡生态防护全生命周期碳排放测算的边界, 建立了边坡生态防护全生命周期碳排放因子库, 构建了边坡生态防护全生命周期碳排放测算模型, 最后结合工程实例对边坡全生命周期碳排放模型进行验证分析。

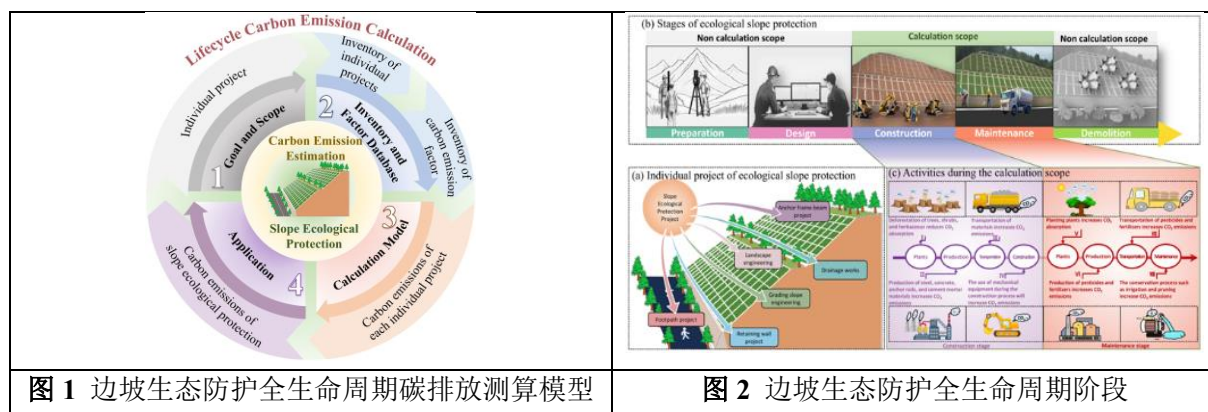


图1 边坡生态防护全生命周期碳排放测算模型

图2 边坡生态防护全生命周期阶段

边坡生态防护工程包括图2所示的六个单项工程, 按照全生命周期理论可划分为准备阶段、设计阶段、建设阶段、养护阶段以及拆毁阶段五个阶段, 边坡生态防护全生命周期碳排放测算重点考虑建设阶段和养护阶段。

碳排放系数法在测算速度、准确性及适用范围均有更好的表现, 因此基于此方法构建边坡生态防护碳排放测算模型。碳排放系数法的计算可依据式(1)进行:

$$E = \sum_{i=1}^n Q_i \times EF_i \quad (1)$$

式中, E : 碳排放总量, 单位: kg; Q_i : 某种碳源的消耗量, 单位: kg; EF_i : 该碳源的当量碳排放系数。

研究发现, 建设期是边坡生态防护全生命周期中最大的碳排放来源。锚杆框格梁护坡工程和挡土墙工程占整个工程碳排放量的 76.62%, 植物碳汇工程可中和 134.5 吨的碳排放, 是唯一吸收碳排放的工程。建设期材料生产占边坡生态防护工程案例全生命周期碳排放总量的 95%。边坡生态防护工程生命周期碳排放测算结果的相对标准差低于 5%。

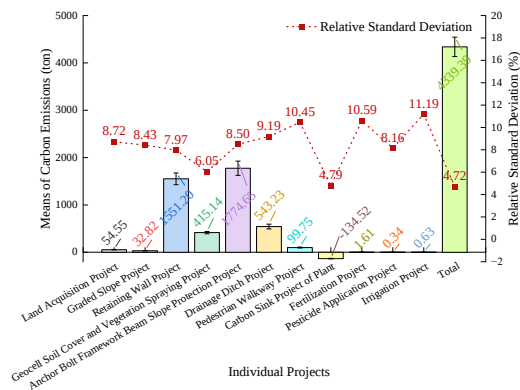


图3 单项工程测算结果及误差

结果表明，测算模型可以较好的兼容输入数据的误差和波动。碳排放因子库需要根据实际情况进行更新，满足地域性、权威性、时效性原则。边坡加固材料是控制生态护坡工程碳排放的关键环节，种植植物增加碳汇可以较好的降低碳排放量。研究结果完善了边坡生态防护全生命周期碳排放测算模型，可以为碳排放控制策略提供有效的技术支撑。

关键词：岩土工程；边坡生态防护；全生命周期；碳排放因子；碳排放测算模型

通讯作者简介：长安大学公路学院副教授、博士生导师。陕西省岩石力学与工程学会副秘书长，陕西省和西安市秦创原“科学家+工程师”项目首席科学家，研究方向涵盖智能感知与运维等。

基于概率水文模型的桥梁桩基全寿命周期冲刷韧性评估与优化

张大牛¹, 朱彦洁¹, 熊文^{1,*}

1. 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: wxiong12@hotmail.com

报告人: 张大牛

摘 要:

桥梁桩基在其全寿命周期中受洪水冲刷影响显著, 然而现有研究较少针对桥梁桩基在冲刷灾害下的韧性进行定量评估。为此, 本文提出一种基于概率水文模型的桥梁桩基全寿命周期冲刷韧性量化评估框架。首先构建了考虑冲刷灾害特征及对应修复措施的桥梁桩基全寿命周期功能曲线; 其次, 采用分数差分自回归滑动平均 (FARIMA) 模型对桥址流域的日流量数据进行水文建模, 生成桥址流域全寿命周期水文序列进而得到目标桩基全寿命周期内的时变冲刷深度; 然后, 建立包含冲刷演化过程和韧性修复措施的三维桥梁桩基有限元模型, 将冲刷深度历程作为输入、桩基损伤指标作为输出; 最终, 提取有限元模型中桩基时变损伤指标输入至功能曲线, 由此计算全寿命周期内桥梁桩基冲刷韧性。以美国北达科他州某实际桥梁为例, 应用所述冲刷韧性评估框架得到如下关键结果: 当桩基功能修复阈值为 0.2 时, 桥梁生命周期内平均修复次数为 2 次, 对应的临界冲刷深度为 5.2m; 当桩基功能修复阈值升高至 0.8 时, 平均修复次数升至 6 次, 临界冲刷深度降为 2.1m; 桩基冲刷韧性在功能修复阈值为 0.52、临界流速为 1.4m/s 时达到最大, 平均韧性值为 5.7。研究表明, 冲刷韧性随桩基功能修复阈值先升高后降低, 过高的功能修复阈值虽可提高修复频率, 但单次韧性提升效果下降; 过低则导致修复频率不足, 整体韧性提升效果亦受限。因此, 应根据具体工程设定合理修复阈值, 以实现桥梁桩基在冲刷灾害下的全寿命周期韧性最大化。

关键词: 桥梁桩基; 局部冲刷; 韧性评估; 水文不确定性; 全寿命周期;

通讯作者简介: 东南大学交通学院桥梁工程系教授、博士生导师。主要从事桥梁抗水与冲刷、桥梁智能建造与运维与数字桥梁等方面的研究。



二维 $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结光电性能第一性原理研究及其在建筑材料中的应用

杨爱荣

1. 内蒙古建筑职业技术学院, 建筑工程与测绘学院, 内蒙古呼和浩特 012000

通讯作者邮箱: yair1110@126.com

摘 要:

近年来, 全球对低碳建筑材料的需求不断攀升, 开发新型光电建筑材料、可再生能源和智能建筑材料具有重要的社会和经济意义。目前尽管光催化材料能够利用太阳能实现环境净化或能源转化, 但其转换效率低, 且自洁效果的持久性和稳定性仍是亟待解决的关键问题。

$\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结不仅可以实现光电转换, 还能够与建筑材料的功能性相结合, 提供智能化和自适应的建筑解决方案。 MoS_2 是一种二维过渡金属硫化物, 具有优异的光学和电学性能。 Ga_2O_3 则是一种宽禁带半导体, 具备高击穿电场、高热导率和良好的化学稳定性。将 MoS_2 和 Ga_2O_3 结合形成异质结构时, 可促进载流子的分离和传输。界面会产生特殊的物理效应进而影响材料对光线的吸收、反射和透射。通过调控异质结中的电荷分布和能带结构, 可以实现对光线透过率的动态调节, 从而影响材料的导电性能和载流子输运特性。

本研究利用第一性原理密度泛函理论(DFT)对 MoS_2 和 Ga_2O_3 的电子结构进行计算, 计算 $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 的异质结界面结构, 研究能带对齐、界面态及其对光电性能的影响。基于理论计算, 预测 $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结在不同光照条件下的光电响应。通过调控 MoS_2 的层数、 Ga_2O_3 的晶体结构以及异质结的界面特性等手段, 进一步改善其光电性能。并评估异质结的热力学稳定性。研究结果表明:

(1) 点缺陷(V_{Ga} , H_i)和碱金属元素(Li, Na, K)共存使得 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 结构更为稳定。 $\beta\text{-Ga}_3\text{O}_5$ 体系显示出磁性, 磁性来源于的自旋极化和巡游电子, 以及轨道之间杂化耦合双交换作用。掺杂后体系的载流子迁移率和载流子寿命增大, 光催化活得到提高。

(2) 与 Ga_2O_3 和 MoS_2 的单层材料相比, $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结在可见光至紫外光区域表现出了更优异的光吸收特性。

(3) $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结展示了诸多优异性能, 包括增强的光吸收能力、优化的带隙宽度以及提升的电荷载流子分离效率等, 通过精细的电子结构调控更进一步优化了其光电转换效率和稳定性。

后续将探索 $\text{MoS}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 异质结于建筑材料的结合, 设计出适合不同建筑环境的光电功能材料, 实现微观材料特性与宏观建筑应用之间的有效整合, 推动光电材料在建筑领域的应用。

关键词: 第一性原理; 异质结; 光催化; 磁电性能; 绿色建材。

通讯作者简介: 内蒙古建筑职业技术学院副教授、博士。主要从事信息功能材料计算和绿色建筑材料方面的研究。

基于流-固-粘聚损伤相场耦合模型的混凝土三维细观水力压裂模拟

杨贞军^{1,*}, 李辉²

1. 武汉大学, 土木建筑工程学院, 湖北武汉 430000

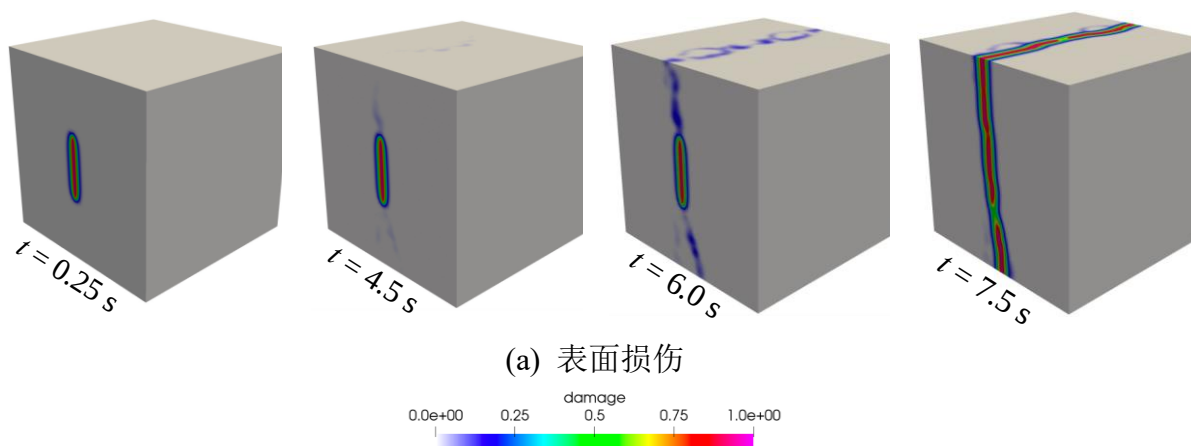
2. Discipline of Civil, Surveying and Environmental Engineering, School of Engineering, The University of Newcastle, Callaghan, 2308, Australia.

通讯作者邮箱: zhjyang@whu.edu.cn

报告人: 杨贞军

摘 要:

水力压裂是混凝土高坝安全、页岩油气和干热岩地热能开采、核废料地质封存等工程实践中的关键问题。准确模拟混凝土等准脆性材料在微细观尺度下的水力裂缝扩展过程, 对于揭示裂缝多尺度演化机制、优化水工结构设计、提高能源开采效益等具有重要的科学意义和工程应用价值。然而, 目前多数数值模型在处理非均质材料多尺度损伤演化及裂缝扩展过程中, 仍面临随机性强、裂缝形态复杂、网格重分、计算量大等诸多挑战。为此, 本文分别将最近发展的流-固-粘聚损伤相场耦合模型与 Weibull 随机场模型及随机骨料模型相结合, 提出了两种细观水力压裂模拟数值方法用于模拟二维/三维准脆性材料中复杂的水力损伤与裂缝扩展过程。本文以受水压作用的混凝土立方体压裂实验为案例进行了模拟与分析。首先, 通过 2400 组基于随机场模型的蒙特卡洛模拟, 系统研究了抗拉强度、随机场相关长度以及围压对裂缝扩展与流体流动的影响。结果表明: 较高的抗拉强度方差导致平均峰值压力降低, 而较大的相关长度与围压则呈现相反的影响。随后, 对砂浆、多边形/多面体骨料及界面过渡区 (ITZ) 构成的混凝土随机骨料模型进行了水力压裂模拟, 发现峰值压力与围压之间呈线性关系并与实验数据吻合良好。本文研究结果表明所发展的方法在模拟混凝土复杂水力压裂过程方面具有一定的潜力, 可为工程压裂设计及参数分析提供参考。



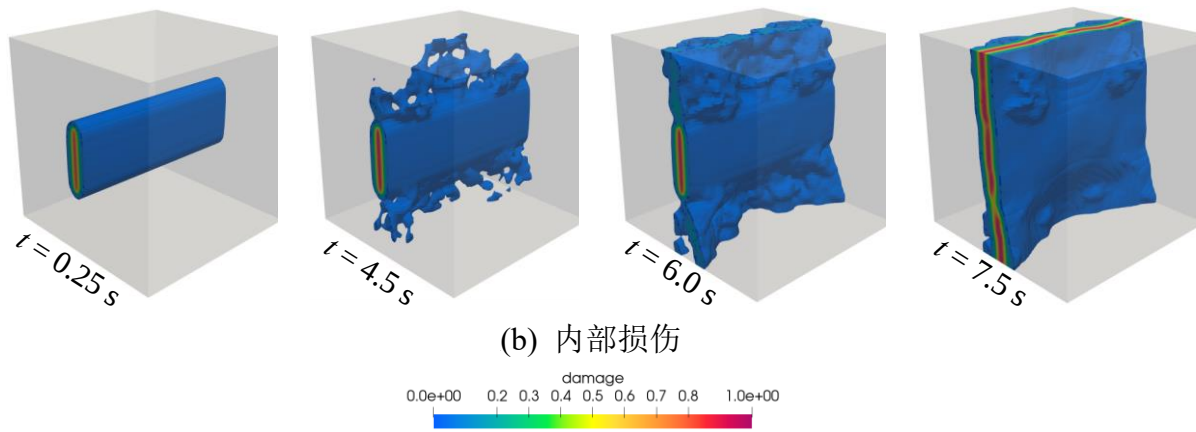


图 1 随机场细观模型的水力裂缝扩展过程。

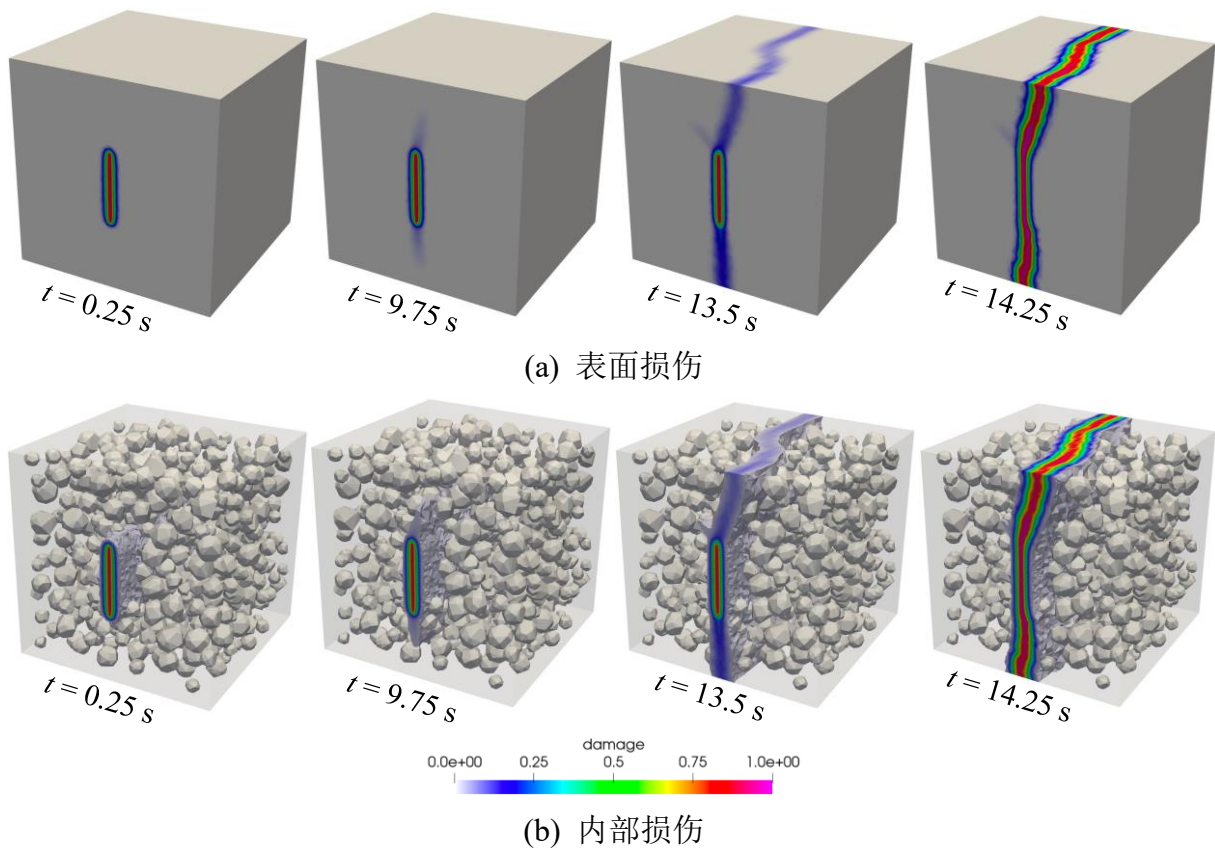


图 2 随机骨料细观模型的水力裂缝扩展过程。

关键词：准脆性相场；流固耦合；多场耦合；细观断裂；水力压裂

通讯作者简介：杨贞军，男，武汉大学土木建筑工程学院二级教授、博士生导师。主要从事复杂材料多尺度随机断裂损伤力学理论与计算模拟和实验验证、页岩气和干热岩开采中水力劈裂的热-流-固-损伤多场耦合模拟、高性能数值方法的开发和应用等研究。

PD-SPH 流固耦合模型及其在爆炸毁伤分析中的应用

黄谢平^{1,*}, 朱斌¹, 陈云敏¹, 陈祖煜², 孔祥振³, 方秦³

1. 浙江大学, 超重力科学与技术研究院, 浙江杭州 310058

2. 中国水利水电科学研究院, 岩土工程研究所, 北京海淀 100048

3. 陆军工程大学, 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007

通讯作者邮箱: huangxieping@zju.edu.cn

报告人: 黄谢平

摘 要:

流固耦合现象广泛存在于土木、水利、海洋及航空航天等实际工程领域, 有效模拟流固耦合过程是实现复杂工程问题全过程精确分析的关键。光滑粒子流体动力学方法 (SPH) 在捕捉流体大变形、自由面和多相界面等方面具有优势, 而近场动力学方法 (PD) 在处理固体材料的大变形、裂缝扩展和断裂等非连续过程方面表现出独特优势。为此, 建立了基于 PD 和 SPH 无网格粒子方法的多尺度耦合模型, 并通过溃坝洪水冲击结构、开闸泄洪等典型算例, 验证了模型在预测复杂流体行为、流固界面剧烈相互作用以及结构非线性变形响应方面的有效性和计算稳定性。

在此基础上, 将 PD-SPH 模型应用于地下爆炸和水下爆炸等典型爆炸毁伤场景。针对地下爆炸问题, 采用 SPH 模拟炸药起爆与爆炸气体运动过程, PD 模拟土体的大变形响应, 引入高压状态方程修正 Drucker-Prager 砂土本构模型。模拟结果与离心模型试验结果对比表明, 该模型能够真实再现地下爆炸引起的土壤破碎、抛掷和成坑过程 (图 1)。针对混凝土坝水下爆炸问题, 进一步引入混凝土塑性损伤本构模型, 综合考虑混凝土材料应变率效应、自由水效应、Lode 角效应及拉压损伤累积等力学特性, 实现对混凝土坝破坏全过程的高精度模拟。模拟结果准确再现了炸药起爆、冲击波传播、库水-坝体结构流固耦合、坝体破坏的多场耦合过程, 预测坝体裂缝位置和形态与离心模型试验结果高度吻合 (图 2)。上述研究工作均基于自主开发的数值计算程序完成, 为爆炸毁伤分析提供高精度模拟工具, 摆脱对国外商业计算软件 LS-DYNA 或 ABAQUS 的长期依赖。

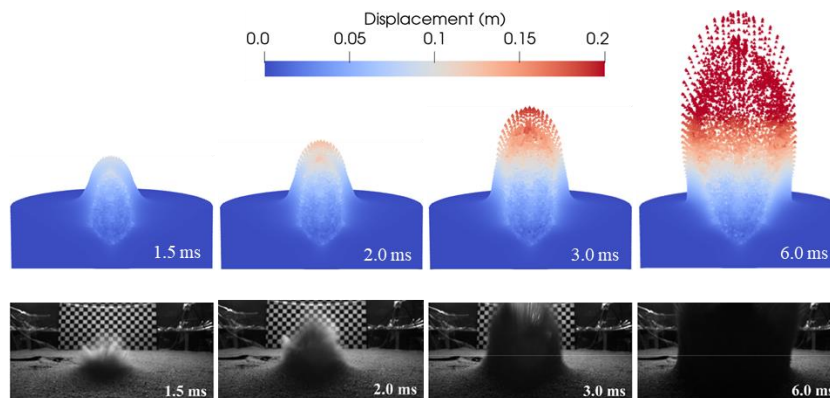


图 1 地下爆炸土壤抛掷现象: (上) PD-SPH 模拟; (下) 离心模型试验



注：TNT 炸药当量 1g，埋深 40mm，离心加速度 106g，原型当量 1.2t。

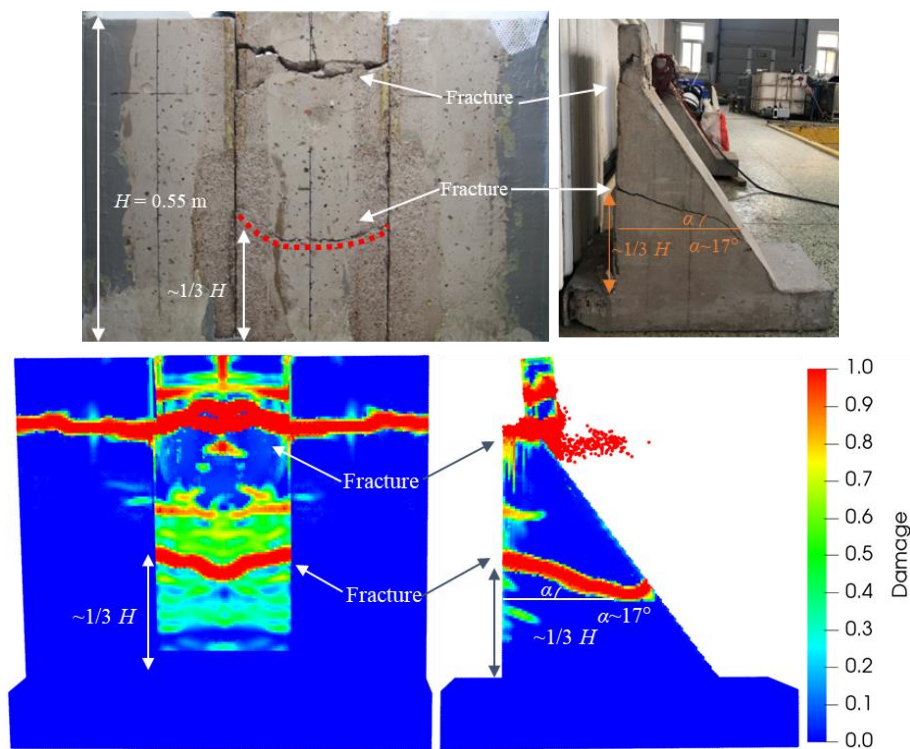


图 2 混凝土坝断裂破坏结果：（上）离心模型试验；（下）PD-SPH 模拟

注：TNT 炸药当量 2.2g，爆距 20mm，离心加速度 80g，原型当量 1.1t。

关键词：近场动力学方法；光滑粒子流体动力学方法；流固耦合；地下爆炸；水下爆炸。

通讯作者简介：黄谢平，浙江大学超重力科学与技术研究院，博士后/助理研究员。主要从事爆炸毁伤效应方面的研究，一作/通讯在 IJIE, TUST, C&G 等主流期刊发表学术论文 20 余篇，3 篇论文被选为 Featured Article, Cover Article 和 Editor's Pick。主持国家自然科学基金青年科学基金、中国博士后科学基金特别资助、面上资助和国家 BC 档资助项目。

风浪流震耦合作用下漂浮式风机动力反应整机一体化分析方法

王丕光^{1,2,*}, 于万里¹, 杜修力^{1,2}

1. 北京工业大学, 建筑工程学院, 北京 100124

2. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124

摘 要:

海上漂浮式风电系统在其服役周期内长期承受风、波浪、海流等多种环境荷载的共同作用, 同时还可能遭遇地震、台风等极端荷载, 其结构动力响应具有显著的多场耦合特性与高度非线性。为了准确揭示多荷载耦合作用下浮式风电系统的动力响应机制, 本文提出了全耦合一体化分析方法, 构建了风-浪流-地震-结构相互作用的多物理场联合建模框架。首先, 基于计算流体力学(CFD)方法, 在 FLUENT 平台上建立了考虑自由液面演化、湍流效应与结构运动反馈的气-液-固三向耦合高保真数值模型, 采用动态网格更新与 VOF 方法精确捕捉气-液-固多相流相互作用, 通过 MRF 模型实现旋转叶片与平台运动的动态耦合实现了复杂海洋环境中风浪传播、浮体运动及其相互作用的全过程模拟。该模型可有效捕捉局部非线性流场特征和瞬态涡结构演化过程, 反映风浪联合作用下平台周围流体响应的动态变化。其次, 结合 FAST 软件与 ABAQUS 非线性结构分析, 建立跨平台协同求解框架, 开发了运动边界传递、应力积分反馈的混合耦合接口, 构建了包括浮式平台、系泊、塔架、叶片、控制系统在内的耦合动力学分析模型, 系统集成了气动载荷、结构响应与伺服控制反馈的时域交互机制。最后, 基于该一体化分析框架, 开展了典型工况下风-浪震耦合作用下浮式风电结构的动力响应特性分析, 重点评估了风浪相位差、波浪传播方向、地震作用、平台六自由度运动等因素对结构动力响应的影响规律。

关键词: 漂浮式风力机; 多荷载耦合; 高保真分析模型; ABAQUS-FAST; 动力响应分析

* 基金资助: 北京市自然科学基金资助(JQ24050)

通信作者: 王丕光 (1985-), 男, 山东临沂, 教授, 博士, 海洋工程结构抗震; Email: wangpiguan1985@126.com



基于可解释机器学习的结构承载性能预测研究

戴理朝^{1,*}

1. 长沙理工大学, 土木与环境工程学院, 湖南长沙 410023

通讯作者邮箱: 1252211046@qq.com

报告人: 戴理朝

摘 要:

在长期荷载与外部环境的影响下, 预应力混凝土(PC)结构内部的钢绞线与钢筋会发生锈蚀, 锈蚀导致钢绞线发生锈胀以及混凝土脱落等问题, 降低PC结构的力学性能, 缩减其服役年限, 使得结构安全性能大大降低, 准确预测锈蚀PC结构的抗弯承载力对保障其服役安全具有重要意义。目前对锈蚀PC结构抗弯承载力的预测方法主要采用传统的机理模型, 包括理论推导、经验公式以及数值模拟。这些机理模型方法往往会引入一系列的简化与假设, 导致计算结果精度不高和适用性有限。为此, 本研究基于数据驱动, 考虑了几何参数、材料参数和锈蚀参数等特征影响, 提出了一种基于机器学习算法的锈蚀PC结构抗弯承载力预测模型。首先, 结合贝叶斯优化算法建立三个黑箱模型来预测锈蚀PC结构的抗弯承载力。然后, 利用SHAP加性解释方法量化了特征参数对抗弯承载力的敏感性, 并选择出模型的关键特征。随后, 根据这些关键特征参数, 建立了基于遗传编程(GP)的锈蚀PC结构抗弯承载力实用模型。进一步对模型进行了验证, 并与现有经验模型进行了比较。结果表明, 可解释机器学习模型能够量化特征参数对抗弯承载力的影响, 并获得特征重要性排序。模型通过符号回归拟合了锈蚀PC梁的抗弯承载力计算公式, 有效揭示了基本特征与抗弯承载力之间潜在的非线性关系。计算公式的准确性和可解释性介于现有经验模型和黑箱模型之间。

关键词: 预应力混凝土结构; 锈蚀; 抗弯承载力; 机器学习; 遗传编程

通讯作者简介: 长沙理工大学土木与环境工程学院副教授、博士生导师, 湖湘青年英才。主要从事桥梁结构耐久性与可靠性研究、桥梁结构安全运维、智能算法在工程结构中应用的研究。主持国家自然科学基金(青年、面上)、湖南省自然科学基金等项目5项, 作为骨干参与国家973计划、国家重点研发计划项目等10余项, 获湖南省科技进步一等奖、中国公路学会科学技术奖一等奖、日内瓦国际发明展银奖、长沙市知识产权转化奖等。

基于热-力耦合相场模型的锈蚀钢筋混凝土火致损伤模拟

缪坤廷^{1,2}, 潘子超^{1,*}, 方许锐³, 陈艾荣¹

1. 同济大学, 土木工程学院, 上海 200092

2. 慕尼黑工业大学, 工程与设计学院, 慕尼黑 85748

3. 香港理工大学, 土木及环境工程系, 香港

通讯作者邮箱: z.pan@tongji.edu.cn

报告人: 潘子超

摘 要:

服役于海洋等氯盐环境的钢筋混凝土结构长期受氯离子侵蚀作用, 极易发生钢筋锈蚀与混凝土开裂等耐久性问题。这些初始损伤在结构服役期间会逐步累积, 进而影响整体性能。如果在服役过程中遭遇火灾等极端荷载, 结构内部已有的腐蚀裂缝和损伤将对后续火灾作用下的损伤产生显著影响, 从而改变结构的破坏模式与损伤演化路径。因此, 明确受到锈蚀损伤的混凝土在火灾作用下的损伤演化规律, 对于在役钢筋混凝土结构的火灾损伤评估与加固具有重要指导意义。

本文结合断裂相场理论, 建立了热-力耦合相场细观模型, 对锈蚀混凝土在火灾作用下的裂缝扩展行为与局部剥落规律进行了系统研究。在模型中, 将混凝土视为由粗骨料、砂浆基体和界面过渡区 (ITZ) 组成的三相非均质材料。损伤演化过程采用断裂相场方法进行描述, 并引入热膨胀应变、温度相关的材料性能退化模型以及相场相关的导热系数退化模型, 从而实现温度场、力学场与相场的全耦合求解。钢筋锈蚀通过在钢筋-混凝土界面施加膨胀位移进行模拟, 以捕捉锈蚀引起的开裂行为。随后, 将上述锈蚀损伤结果作为火灾阶段的初始条件, 进而实现结构从锈蚀状态向火灾状态的全过程响应模拟。

为验证模型的准确性和稳定性, 本文首先采用 L 型板断裂试验和单轴拉伸试验等经典算例对相场模型进行了验证。结果表明, 该模型在裂缝路径预测和荷载-位移曲线方面具有良好的精度和网格无关性。随后, 通过火灾引起的损伤以及力学性能退化算例对热-力耦合相场模型进行了进一步验证, 结果证明该模型能够准确模拟火灾作用下的损伤过程。最后, 利用 COMSOL Multiphysics 软件建立二维混凝土试件模型, 开展了一系列模拟分析, 重点研究不同锈蚀程度、骨料体积分数及钢筋布置形式对火灾下损伤扩展路径与破坏形态的影响规律。模拟结果表明: 火灾作用下, 裂缝萌生于 ITZ 区域, 并沿骨料边界呈放射状扩展。在高温持续作用下, 裂缝逐步演化为网状, 并产生局部剥落。已有的锈蚀裂缝会成为热裂缝的传播路径, 两者在空间上相互融合贯通, 显著影响裂缝走向与最终剥落位置, 如图 1 所示。骨料含量的增加将加剧热膨胀失配效应, 进而导致裂缝密度和剥落深度增加。不同钢筋布置位置形成的锈蚀裂缝形态各异, 也显著改变了火灾阶段裂缝的发展趋势和破坏区域分布。

综上所述, 本文提出的热-力耦合相场模拟框架能够有效模拟“先锈蚀后火灾”连续作



用下混凝土的裂缝演化行为及热致损伤机制。该方法不仅能够捕捉复杂细观结构中裂缝的相互作用关系，还可以作为锈蚀混凝土结构抗火性能分析与灾后评估的数值支撑工具。未来可以进一步引入水分迁移、蒸汽压和外部荷载等因素，将模型拓展至热-力-湿多物理场，以提升其预测能力和工程适应性。

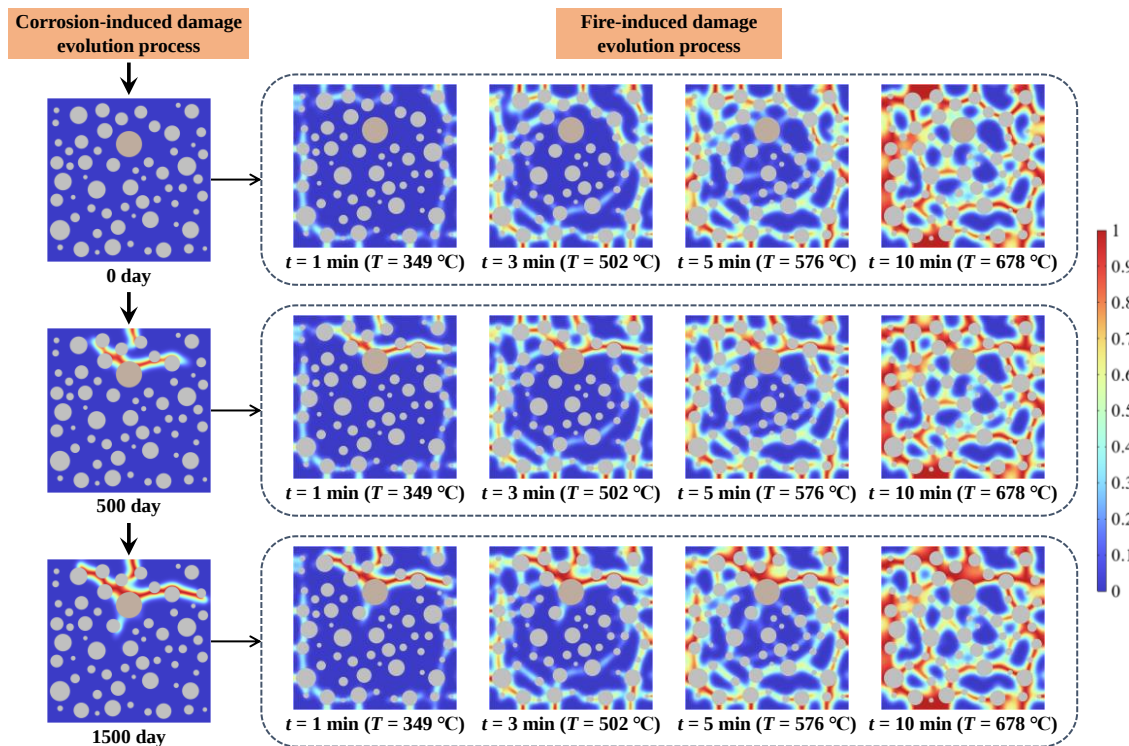


图1 不同锈蚀时间（0，500和1500天）下钢筋混凝土的火致损伤

关键词：锈蚀混凝土；火致损伤；相场法；热-力耦合；细观模型

通讯作者简介：同济大学土木工程学院桥梁工程系副教授。主要从事颗粒及纤维增强型复合材料数值仿真、混凝土材料耐久性能数值模拟以及基于相场理论的桥梁混凝土结构在长期和极端荷载作用下的安全和耐久性能等方面的研究。

离子医院大体积复杂混凝土结构施工过程的数值模拟研究

高鹏^{1,*}, 江敦辉¹, 孙饶忠¹, 陆俊²

1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230000

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024

通讯作者邮箱: penggao@hfut.edu.cn

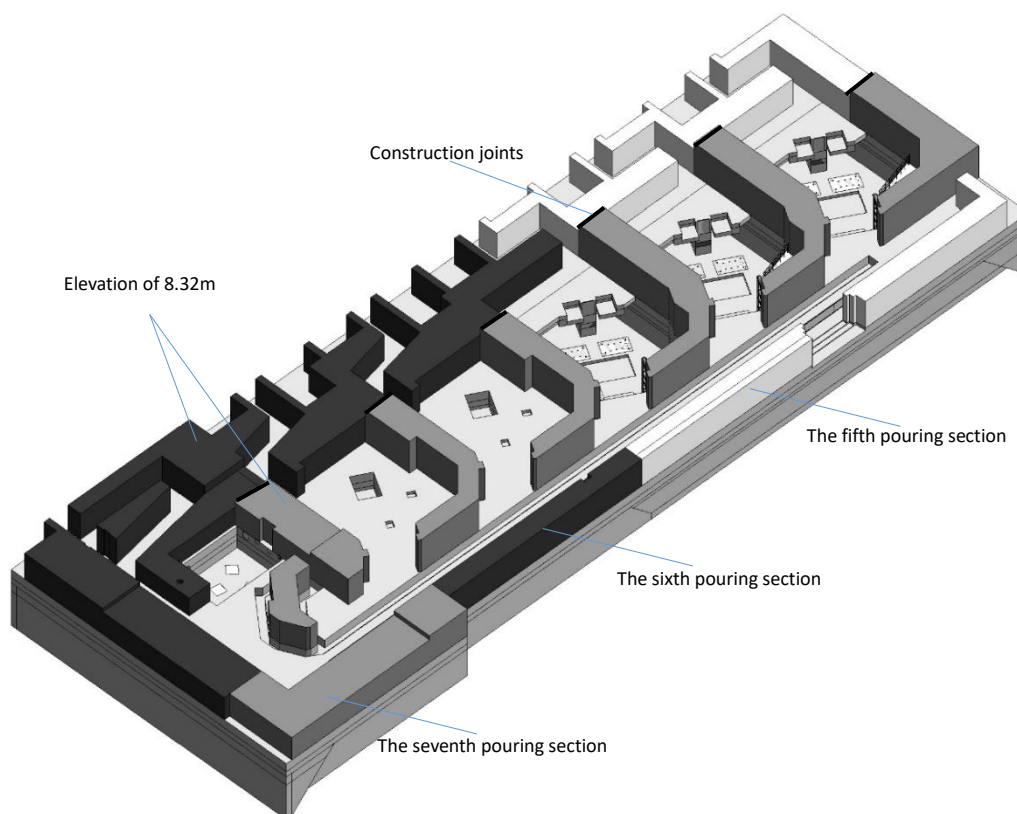
报告人: 高鹏

摘 要:

离子医院采用高能质子射线放疗肿瘤的技术, 房屋结构需要一定密度和厚度的混凝土来实现辐射屏蔽。其混凝土具有大体积的特征, 同时结构复杂和配筋密集。在合肥离子医院项目施工中对混凝土配合比进行优化设计, 对结构实施分层分段浇筑, 实时温度监测和养护措施调整。为配合结构施工, 采用 ABAQUS 软件建立顺序热力耦合的有限元方法, 对大体积复杂混凝土结构的施工过程进行了模拟。模拟中采用 FORTRAN 编写子程序, 分别实现了混凝土的水化热、早龄期时变弹性模量和考虑收缩的热膨胀系数函数; 采用“生死单元”技术实现结构混凝土的分层分段浇筑模拟。首先通过足尺试块的温度场对模拟方法进行验证, 温度模拟结果与实测数据较为吻合且误差在 5% 以内。然后对医院混凝土结构施工过程中温度场进行模拟, 分析了不同时间和部位结构温度的分布规律, 并与监测数据对比, 较好的控制了混凝土的最高温度、表里温差和降温速率。最后对医院混凝土结构施工过程中的应力场进行模拟, 分析了不同时间和部位的应力分布规律, 并对施工过程中的应力分布和成因进行分析。配合各施工措施保证了混凝土结构在施工过程中的温度和裂缝控制效果。



图 1 离子医院



(b) wall

图 2 质子区.

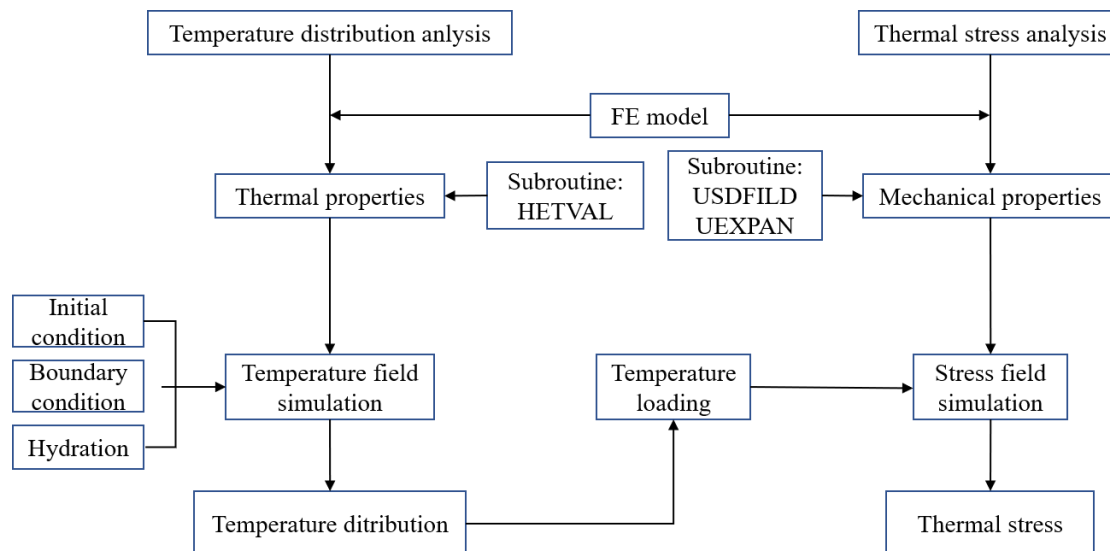


图 3. 模拟方法步骤

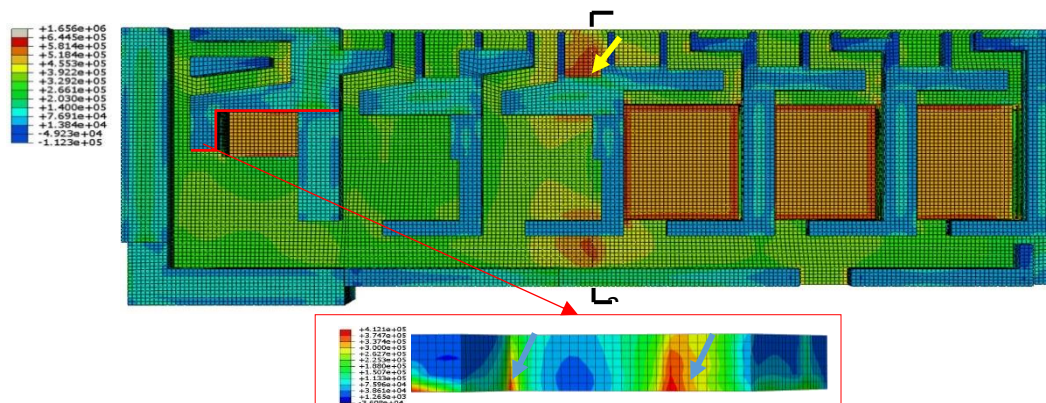


图 4. 第七次浇筑的八天后的结构温度应力

关键词：离子医院；大体积混凝土；温度应力；裂缝控制；有限元模拟。

通讯作者简介：合肥工业大学土木与水利工程学院副教授、硕士生导师。主要从事混凝土结构方面的研究。

侵蚀离子在混凝土中的电-化耦合传输行为

刘齐民^{1,*}

1. 武汉理工大学, 土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070

通讯作者邮箱: liuqm@whut.edu.cn

报告人: 刘齐民

摘 要:

离子侵蚀是导致混凝土结构性能退化的关键因素。针对现有耐久性理论模型将混凝土表面离子浓度简化为常数或线性变化的局限性, 本文基于非平衡热力学理论, 建立了混凝土扩散-反应电化学细观模型。该模型特点在于: (1) 能完整描述氯离子、硫酸根离子等在外界溶液-混凝土界面处的动态传输行为; (2) 系统考虑水泥浆体、骨料及界面过渡区(ITZ)三相介质中水化产物与游离离子的溶解-沉淀反应; (3) 控制方程基于质量守恒定律和麦克斯韦方程组构建, 本构关系严格遵循热力学第二定律推导; (4) 计算域同时包含混凝土结构及其周边溶液环境。经多组实验数据验证以及参数分析, 揭示了 ITZ 厚度、骨料几何特征、外加电势及离子扩散系数等参数对离子传输特性的影响规律, 并观测到混凝土-溶液界面处存在显著的离子浓度突变现象, 这一发现为深入理解溶液环境对混凝土耐久性的影响机制提供了新的理论依据。

关键词: 混凝土; 耐久性; 离子传输; 电迁移

通讯作者简介: 武汉理工大学土木工程与建筑学院副教授、硕士生导师。主要从事混凝土耐久性研究。

热-湿-氯-氧多场作用下混凝土中钢筋非均匀锈蚀模型研究

张帼一^{1,*}

1. 浙江农林大学, 风景园林与建筑学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: guoyizhang@zafu.edu.cn

报告人: 张帼一

摘 要:

本研究建立了一个钢筋锈蚀的动态自平衡电化学耦合模型, 用于系统性地研究混凝土结构中钢筋锈蚀过程与热湿耦合传输之间的多物理场相互作用机制。该模型创新性地整合了氯离子在水泥浆体与界面过渡区 (ITZ) 中的多相传输机制 (包括扩散、对流和吸附作用)、气态氧与溶解氧的动态自平衡关系以及锈蚀阴极反应过程中的氧消耗动力学。通过建立宏电池与微电池的动态自平衡关系, 模型实现了对温度场、湿度场、氯离子浓度场和氧气浓度场等多场耦合作用下钢筋非均匀锈蚀过程的定量表征, 可准确模拟自然气候环境中混凝土内钢筋的脱钝行为、锈蚀扩展动态以及锈层分布演化规律。为验证模型可靠性, 本研究同步开展了人工气候加速锈蚀试验, 系统监测了时变环境条件下的温度、相对湿度、氧气浓度及锈蚀电流密度等关键参数。试验与模拟结果表明, 混凝土内部温度场分布相对均匀, 而湿度场呈现显著的非均匀特征, 这种非均匀性在保护层附近尤为突出, 并显著影响氯离子的对流传输与局部积聚行为。同时, 氧气浓度分布与相对湿度场表现出强相关性, 且由于与外部浸泡溶液距离的差异, 钢筋边缘区域的锈蚀电流密度显著高于中心区域, 证实了宏电池效应的存在。进一步地, 本研究将该模型成功应用于海洋大气环境下暴露 7 年的混凝土梁介质传输分析、海南文昌火箭发射塔结构的耐久性评估以及盐渍土环境中硫酸盐-氯离子耦合侵蚀下的钢筋锈蚀规律研究。模型计算结果与长期现场观测数据及实验室测试结果均表现出良好的一致性, 验证了该模型在复杂环境条件下混凝土耐久性预测方面的准确性与工程适用性。本研究建立的建模方法为混凝土结构耐久性设计与寿命预测提供了重要的理论工具和技术支撑。本研究的图形摘要如图 1 所示。

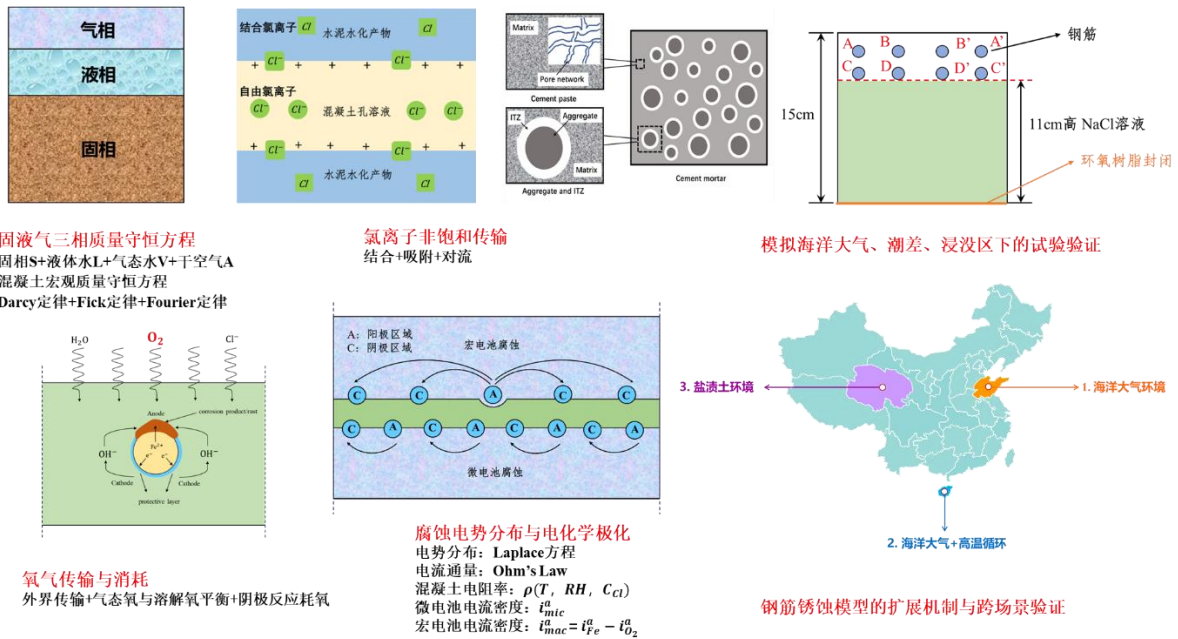


图 1 图形摘要

关键词：时变环境；钢筋锈蚀；多场耦合传输；电化学极化；人工气候加速锈蚀实验。

通讯作者简介：张幅一，女，1997年生，博士毕业于浙江大学结构工程专业，师从金贤玉教授，现任浙江农林大学土木工程系讲师，主要从事钢筋混凝土结构耐久性数值模拟与试验验证方面的研究。参与国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家自然科学基金面上项目等，在《Corrosion Science》、《Construction and Building Materials》等国内外高水平期刊上以第一作者或通讯作者发表SCI论文23篇，以第一作者或通讯作者在中科院一区Top期刊上发表SCI论文6篇，以通讯作者发表ESI高被引论文1篇（2023年材料科学领域全球前1%），授权实用新型专利一项。

热氧老化作用下钢渣与沥青间相互作用机理的多尺度研究

张乐¹, 维利思¹, 邱贺枰², 满都拉^{1,3,*}

1. 内蒙古建筑职业技术学院, 交通与市政工程学院, 内蒙古呼和浩特市 010070

2. 长安大学, 材料科学与工程学院 陕西省西安市 710076

3. 内蒙古大学, 交通学院, 内蒙古呼和浩特市 010070

通讯作者邮箱: zhangle0412@163.com

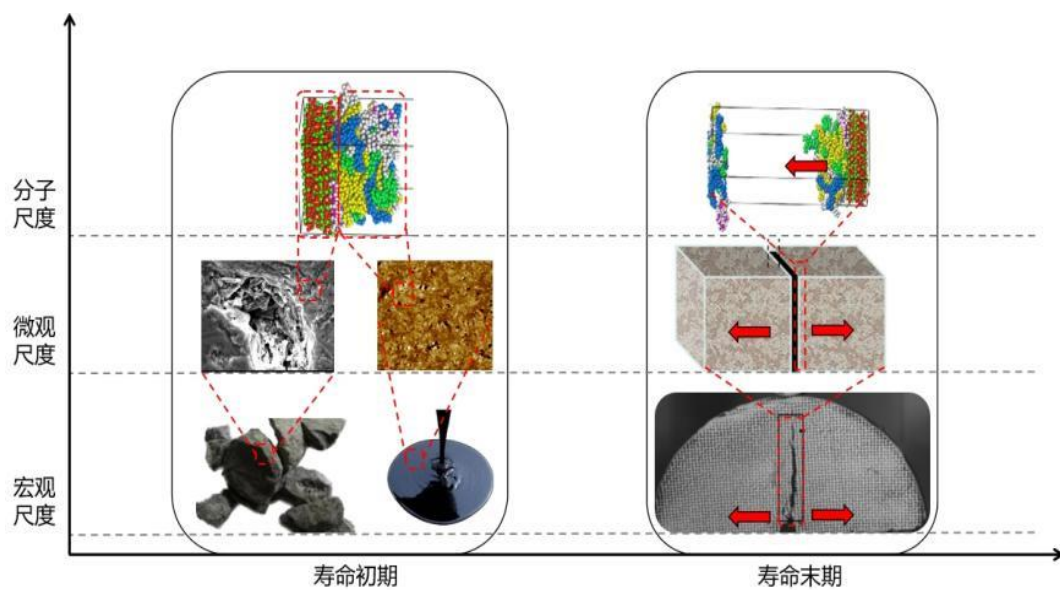
报告人: 张乐

摘 要:

我国公路总里程位居世界首位, 但天然矿料紧缺与钢渣、废旧轮胎等固废处理难题并存。本研究提出将钢渣作为集料替代品、废旧轮胎胶粉改性沥青, 实现"双废综合利用", 并针对钢渣-胶粉改性沥青界面相互作用开展多尺度研究。在钢渣-沥青界面寿命初期, 钢渣的高碱性成分、复杂的表面结构都对钢渣-沥青界面寿命初期强度形成具有积极作用; 胶粉改性沥青则为沥青混合料提供更好的抗老化性能。在表面能研究中发现室温下钢渣表面与沥青的粘附性能更差, 因此钢渣沥青混合料拌和生产需要更高的温度与更长的拌合时间。在分子尺度, 发现钢渣与沥青之间的非键相互作用方式主要为氢键, 并且硅酸三钙对钢渣-沥青界面寿命初期相互作用贡献最大; 沥青与钢渣之间存在分子扩散, 部分沥青扩散到集料内部, 同时松散的集料也会扩散到沥青中去。

在钢渣-沥青界面寿命末期, 钢渣胶粉改性沥青混合料的低温抗裂性能最好, 在直接拉伸粘结破坏试验中当沥青膜厚在 25 μm 左右时, 沥青主要为结构沥青。界面的粘附性能是影响沥青混合料的主要因素。在分子尺度, 钢渣分子表面的沥青分子在外力作用下会产生断裂, 并有一部分沥青分子继续更紧密的粘附在钢渣分子表面, 这一部分沥青定义为"粘附界面", 其厚度为 29.6 $\text{\AA}$ 。

最后, 分别在钢渣-沥青界面寿命初期、末期进行多尺度多因素相关性分析, 找到具有较高相关性的跨尺度关键指标, 将宏观-微观-分子尺度的关键指标机进行跨尺度曲面拟合, 得到跨尺度方程。结果表明, 宏观-微观-分子尺度在界面寿命初期、末期可以分别建立跨尺度的相关性方程, 通过该方程可以对宏观-微观-分子尺度间的关键性指标进行跨尺度计算。揭示了钢渣-沥青界面相互作用形成机理: 在分子尺度通过氢键与扩散作用相互作用形成强度, 并在微观尺度的微结构作用下扩大氢键作用并提供一定程度上的机械咬合强度, 在宏观尺度表现为钢渣与沥青之间粘附作用。钢渣-沥青界面相互作用破坏机理: 在界面寿命末期受外力与长期老化的作用钢渣表面的沥青分子被破坏, 残留一部分沥青紧密的黏附在钢渣分子表面, 微观表现为外力与长期老化的作用下界面粘附失效强度下降, 沥青与集料的断面可以看到较薄的沥青残留, 宏观上是钢渣沥青混合料抗裂性能的下降。



图文摘要

关键词：钢渣-胶粉改性沥青混合料；相互作用；界面全寿命周期；分子动力学；跨尺度

通讯作者简介：内蒙古大学交通学院教授、硕士生导师。从事城市道路耐久性研究、大数据+土木工程材料设计研究。

温度对饱和/非饱和混凝土硫酸盐侵蚀行为影响数值模拟

李兆光¹, 洪梦姝^{2, 3}, 牛荻涛², 王艳^{1,*}, 郭冰冰²

1. 西安建筑科技大学, 材料科学与工程学院, 陕西西安 710055

2. 西安建筑科技大学, 土木工程学院, 陕西西安 710055

3. 同济大学, 土木工程学院, 上海 200092

通讯作者邮箱: lizhaoguang@xauat.edu.cn

报告人: 李兆光

摘 要:

随着“一带一路”倡议的深入推进, 西部地区大量基础设施相继建成或投入运营, 隧道作为关键交通纽带, 具有重要的战略意义。然而, 由于西部复杂的地质构造, 隧道建设过程中面临诸多新挑战, 如高浓度地下盐水、高地应力和高地热等。其中, 高地热环境对隧道衬砌混凝土长期性能影响尤为显著。因此, 探明温度作用下隧道衬砌混凝土硫酸盐侵蚀行为, 对高地热环境隧道的安全服役评估和耐久性设计具有重要意义。本研究聚焦混凝土在温度和硫酸盐侵蚀耦合作用下的劣化行为, 系统开展了饱和与非饱和条件下、均匀与梯度分布温度场作用下混凝土硫酸盐侵蚀数值模拟。基于 Fick 第二定律与非饱和流动理论建立传输模型, 结合反应热力学和动力学控制反应项计算, 构建了考虑温度的混凝土硫酸盐侵蚀反应-传输模型, 并通过 Matlab 接口程序实现该模型的 COMSOL-GEMS 联合求解。

结果表明, 在均匀温度下, 温度升高导致水泥基材料质量损失范围扩大, 高温引起的 pH 降低导致水化产物不稳定; 梯度温度下, 侵蚀表面及钙矾石最大体积减少, 但其在水泥基材料内部的分布范围更广; 梯度温度增加导致侵蚀面孔隙率增大, 而内部孔隙率则呈下降趋势。相比均匀温度, 梯度温度下硫酸盐侵蚀对水泥基材料造成的局部损伤较轻, 但离子扩散范围更广, 内部受影响区域更大。此外, 研究了不同侵蚀时间、温度和温度场形式影响下, 毛细吸盐后的水泥基材料内物相组成、孔隙率、饱和度分布及 $i-t^{1/2}$ 关系。结果表明, 水敏性渗透率模型能够更准确模拟水泥基材料毛细吸水过程, 梯度温度条件下的硫酸盐侵蚀范围和物相含量波动较大, 但孔隙率变化较均匀温度条件更小, 侵蚀破坏相对减轻; 吸水速率与孔隙率呈衰减型指数关系, 梯度温度下吸水速率普遍高于均匀温度条件。

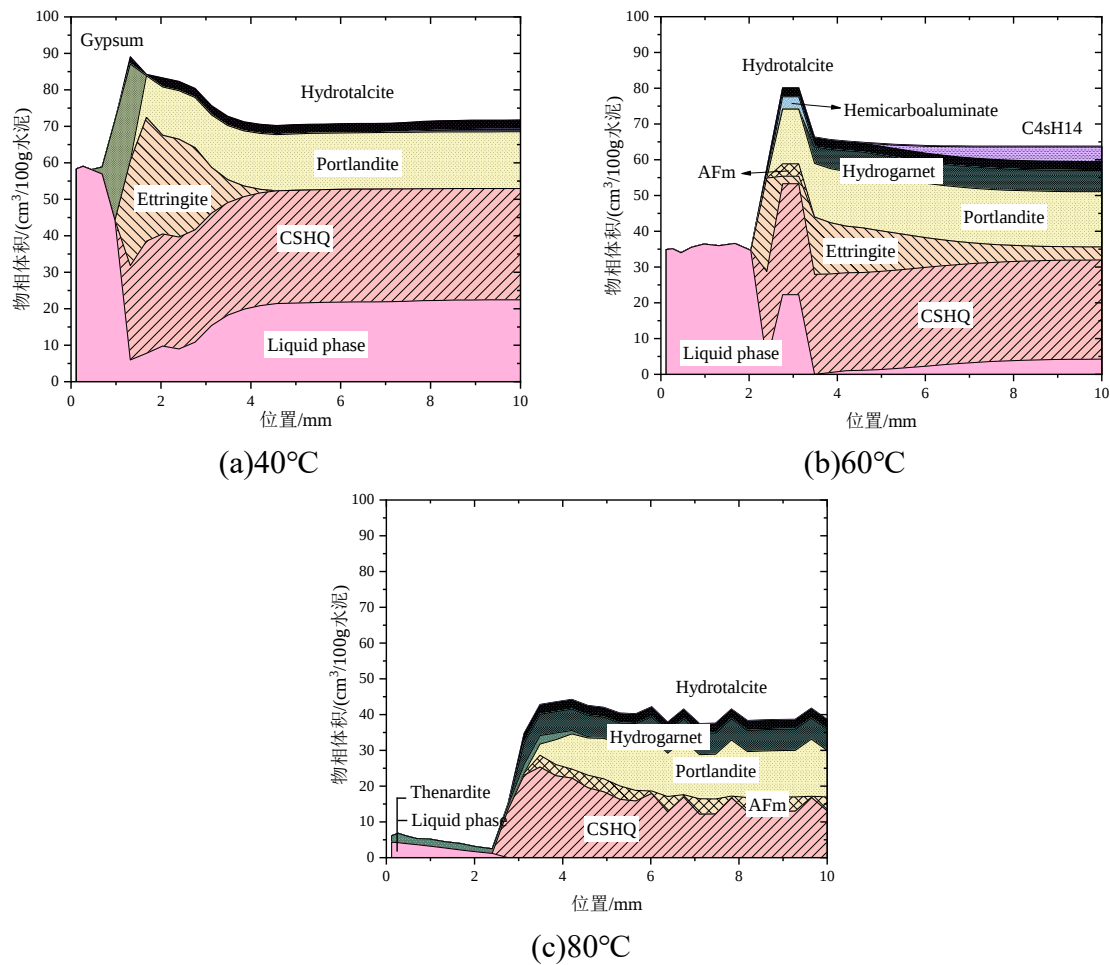


图 1 不同温度下硫酸盐侵蚀后物相体积分布

关键词：硫酸盐侵蚀；温度影响；反应-传输模型；饱和/非饱和条件；混凝土耐久性

通讯作者简介：王艳（1982—），西安建筑科技大学材料科学与工程学院教授、博士生导师，国家优秀青年科学基金获得者，获陕西省杰出青年科学基金，入选陕西省“特支计划”青年拔尖人才，教育部“现代混凝土结构安全性与耐久性”创新团队核心成员。主要从事隧道与地下工程结构耐久性与长寿命保障方面的研究。

考虑粘弹性影响的粘附耐久性理论研究及应用

吴锐¹, 王冠楠^{1,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: guannanwang@zju.edu.cn

报告人: 王冠楠

摘 要:

物体间的粘附能维持多久是一个困扰了科学界数个世纪的难题, 准确预测和调控粘附寿命对多个领域至关重要。由于粘附行为受多种因素影响, 且涉及多个时间尺度, 使得研究面临诸多挑战。目前的耐久性理论大多基于经验或半经验公式, 往往局限于特定工况或应用, 未能深入揭示现象背后的力学机制。为此, 本文从基础粘附模型出发, 系统探讨粘附失效机理, 构建了预测粘附寿命和接触演变的理论框架, 并基于此开发了一套界面和粘弹性测试方法。最后, 以纤维复合材料加固结构为例, 从材料与结构层面详细研究了界面粘附及材料粘弹性在工程应用中对系统性能的影响。

受自然界和生活中的粘附现象启发, 提出了粘附失效的三种典型模式。突破了传统界面耗散主导的裂纹扩展模式框架, 深入解析了现有理论难以解释的长期粘附失效现象。并结合实验研究, 探讨不同失效模式的力学机制及边界条件。此外, 还首次揭示了拉力作用下接触面积增长这一反直觉现象, 并在理论层面做出解释。根据上述粘附耐久性理论开发了一套实用的测量方法。进一步构建多尺度分析框架, 用于准确预测 FRP 加固结构的短期与长期性能, 以及静、动力特性。通过引入流变模型来模拟粘结层和 FRP 的时变行为, 实现了待加固结构、粘结层和 FRP 板的统一建模。相关工作发表在《Science Advances》《International Journal of Mechanical Sciences》《Engineering Structures》《Composite Structures》等杂志。

关键词: 粘附耐久性; 粘弹性; 非完美界面; 纤维复合材料; 结构加固

通讯作者简介: 王冠楠, 浙江大学“百人计划”研究员, 博导。主要从事细观力学本构与多尺度建模等方面的研究工作。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目、优秀青年基金项目、国家重点研发计划子课题等项目。担任国际功能梯度材料顾问委员会委员、以及期刊《Composite Structures》等期刊青年编委/编委。入选中国科协“青年人才托举工程”项目。



基于监测数据的建筑（群）地震反应智能预测及韧性评价

李爽^{1,*}, 胡彬彬¹, 李长青¹, 翟长海²

1. 哈尔滨工业大学大学, 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090

通讯作者邮箱: shuangli@hit.edu.cn

报告人: 李爽

摘 要:

历史地震表明,我国地震危险性高且灾害严重,约70%的100万以上人口城镇、65%地级市、25个省会城市位于7度及以上设防烈度区;自1949年建国以来,各类自然灾害造成的人员伤亡中,地震占比为52%。仅以我国“两横三纵”区域的城市为例,与全国数据相比,人口占比超过20%、GDP占比超过55%、地铁里程占比超过95%、高科技公司占比超过80%、年科研投入占比超过70%、高水平大学占比超过80%。城市的灾害脆弱性已经成为新时期制约城市可持续发展的瓶颈问题之一,抗震韧性城市期望震后城市功能可以维持或城市功能降低后可以快速恢复,被认为是提升城市防灾减灾能力的本质途径。建筑(群)是城市维持功能的重要组成部分,也是人生活和生产的主要载体,明确和提升建筑(群)的抗震能力是城市防灾减灾工作的重要内容,也是实现以人为本韧性城市建设的关键环节。本研究发展了一系列方法用于实现城市建筑(群)地震响应智能分析,包括基于建筑地震反应等效的地震动缩减方法、结合多源数据和人工智能的城市建筑基本信息获取方法、通过监测数据快速形成地震动场的方法、通过监测数据构造建筑全域反应的方法、建筑(群)地震响应及破坏状态快速预测方法。同时,本研究针对各类功能性建筑提出了建筑(群)功能评价的统一方法、恢复过程评价及抗震韧性评价方法。基于我国华北某城市建筑群,应用以上提出的方法进行了分析。研究结果可对抗震韧性城市建设提供方法和技术上的支持。

关键词: 监测数据, 建筑(群), 智能方法, 地震反应, 韧性评价

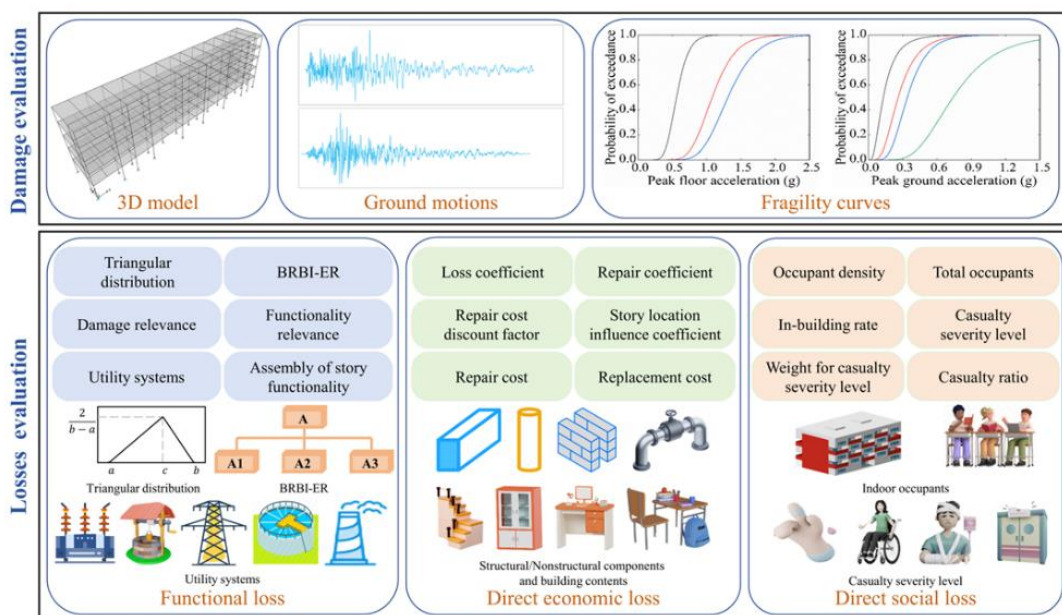


图 1 单体建筑分析

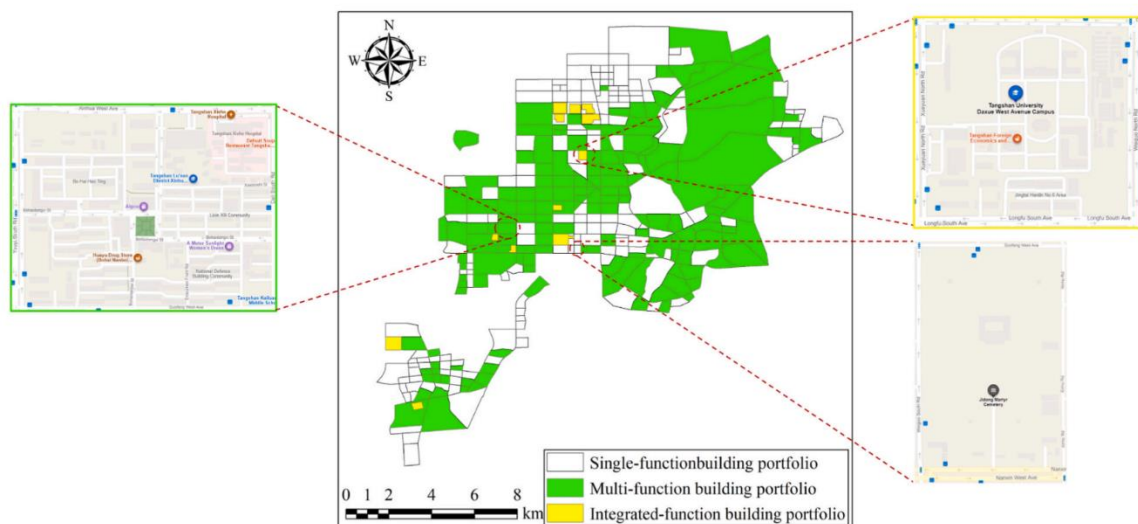


图 2 建筑群分析

通讯作者简介: 李爽, 哈尔滨工业大学土木工程学院教授, 国家级青年人才计划入选者。主要从事抗震韧性城市、建筑结构倒塌机制与应对方面的研究。主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目课题等近 30 项。获得国家科技进步一等奖(排 10), 黑龙江省自然科学二等奖 2 项(排 1、排 2)等, 发表 SCI 论文 110 余篇, 出版专译著和教材 7 部。



基于情景模拟的城市工程系统地震次生灾害级联失效研究

鲁正^{1,2,*}, 严德裕¹, 蒋欢军^{1,2}, 李江远¹

1. 同济大学, 结构防灾减灾工程系, 上海 200092

2. 同济大学, 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092

通讯作者邮箱: luzheng111@tongji.edu.cn

报告人: 鲁正

摘要:

本研究综合考虑承灾体之间的功能关联和地理关联, 利用情景模拟方法建立适用于城市工程系统的级联失效模型, 针对研究区域展开案例分析, 揭示震后次生灾害扩散及承灾体级联失效演化过程。结果显示, 城市工程系统中各类基础设施网络呈现出高度的相互依赖性, 显著增大了灾害后果的扩散范围, 在地震灾害风险管理和应急响应中须予以考虑; 基于动态情景模拟的灾害演化分析揭示了灾损后果的时变放大效应。工程系统初始破坏程度主要取决于震级, 后续演化情景中破坏程度变动与震级和关联强度密切相关。地震震后的演化情景中, 即使初始破坏程度较小, 但在关联强度较高的情况下, 工程系统的破坏程度会随着时间的推移明显恶化; 在震后次生灾害演化扩散阶段, 各种承灾体呈现出不同的受灾敏感度, 如学校、加油站等设施更易受到灾害影响, 因此应提前为这些承灾体制定防御和应对计划; 网络关键节点具有显著的时序演化特征, 地震灾害早期次生效应主要通过电力系统节点传播, 中后期则转为以危险源设施(如加油站)为主导, 成为灾害后果在区域范畴内广泛蔓延的主导性因素, 基于节点时序分析结果可以将网络节点划分为早期主导型、中期爆发型、晚期敏感型三种类型, 并分别采取针对性的措施阻断灾害传播。

关键词: 地震; 承灾体; 级联失效; 情景模拟; 次生灾害

通讯作者简介: 鲁正, 同济大学土木工程学院教授、博士生导师, 入选国家优青, 上海市优秀学术带头人(青年), 主要从事结构抗震减振与韧性提升, 智能防灾减灾方面的研究, 以第一或通讯作者发表 SCI 论文百余篇。主持国家自然科学基金项目 4 项, 主持国家重点研发计划课题 1 项。获得省部级科技进步奖一等奖 5 项, 获评上海市青年五四奖章标兵。

复杂街区爆炸荷载快速计算方法

罗定坤¹, 黄阳¹, 陈素文^{1,2*}

1. 同济大学, 土木工程学院, 上海 200092

2. 同济大学, 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092

通讯作者邮箱: swchen@tongji.edu.cn

报告人: 陈素文

摘 要:

复杂街区场景中作用于结构上的爆炸荷载与空间结构布置存在强耦合关系。爆炸冲击波在空间中发生多次反射、绕射, 使得爆炸荷载难以基于半经验方法或快速算法准确描述。多物质数值模拟方法可较准确模拟爆炸流场的时空演化过程, 但计算代价较大, 不能满足复杂环境爆炸荷载的快速计算需求。基于深度学习的爆炸荷载评估方法有望以低计算代价获取高精度爆炸荷载, 然而现有研究主要针对特定爆炸工况下特定测点的爆炸荷载特征参数预测, 尚无法适用复杂街区场景下多样化的空间结构布置形式, 难以实现爆炸流场演化过程的预测。为实现复杂街区场景爆炸荷载的快速准确预测, 本文提出了一种融合冲击波传播物理机制的深度学习计算方法, 如图 1 所示。首先基于镜像爆源算法及时空通道融合深度学习模型架构, 实现典型街道场景爆炸流场时空演化过程预测; 之后, 通过引入能量密度因子作为物理机制, 基于二维流场边界压力输入实现跨区域冲击波传播过程预测; 最后, 基于分区分块、逐步推进式模型推理策略, 实现了复杂街区场景爆炸流场演化过程预测。研究结果表明, 所提出模型在复杂街区场景中多个时刻荷载云图输出均与数值模型结果表现出较高一致性, 且相比数值模型显著降低了计算代价及存储需求。研究成果有利于实现复杂街区场景下爆炸荷载快速计算, 进而指导灾后建筑结构损伤快速评估。

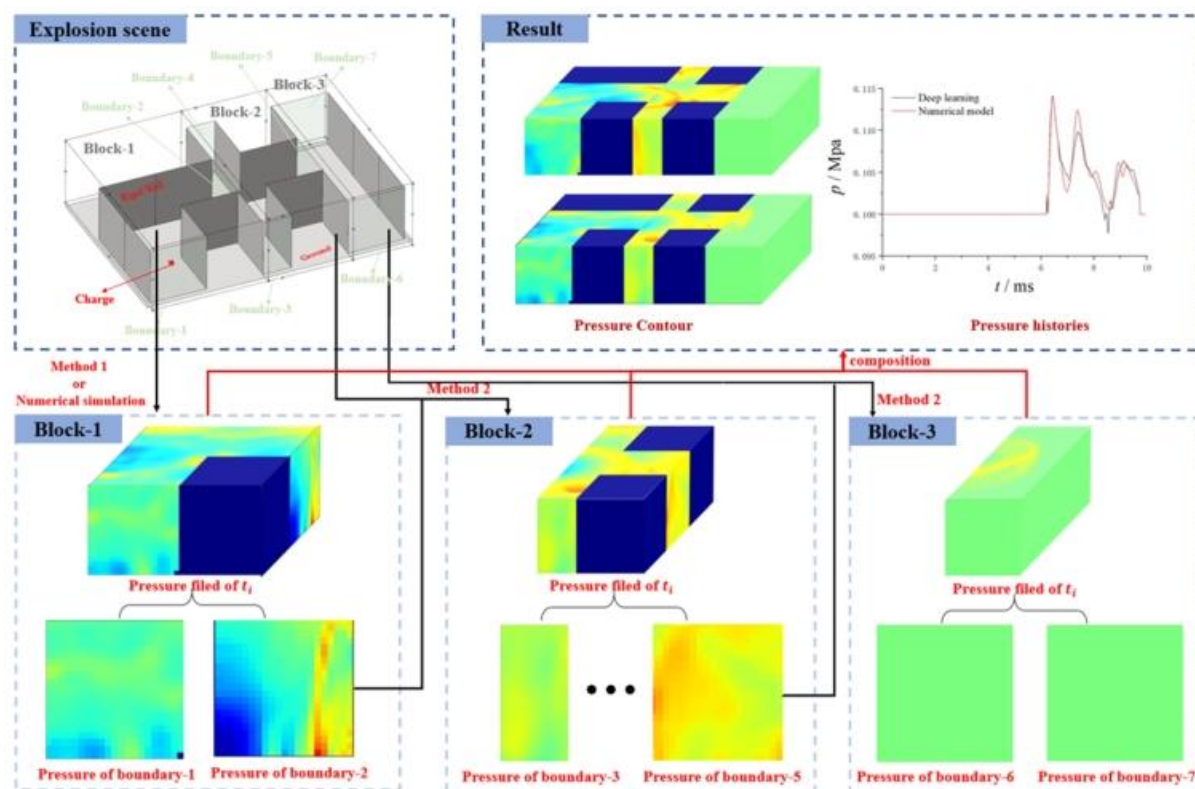


图 1 基于冲击波传播物理机制及深度学习模型的复杂街区爆炸荷载快速计算方法

关键词：复杂街区；爆炸荷载；镜像爆源法；深度学习；快速计算

通讯作者简介：同济大学教授，博士生导师。长期从事工程结构防恐抗爆和钢结构多重灾害防御等方面研究。主持 4 项国家自然科学基金项目、英国皇家工程院牛顿科研合作项目和十三五重点研发计划课题等国家级科研课题。研究成果发表学术论文百余篇，获授权国家发明专利 11 项，省部级科技进步奖 5 项，主参编《民用建筑防爆设计标准》等标准 11 部。

风电机组载荷代理模型及风电场功率载荷协同优化研究

刘震卿^{1,*}

1. 华中科技大学, 土木与水利工程学院, 湖北 武汉

通讯作者邮箱: liuzhenqing@hust.edu.cn

报告人: 刘震卿

摘 要:

随着风电场规模的扩大, 尾流效应导致的功率损失与机组疲劳载荷增加问题日益显著。现有研究多聚焦于偏航控制的功率优化^[1], 但普遍忽视疲劳载荷的影响, 且未充分分析尾流湍流对下游机组的动态作用。针对上述问题, 本文提出一种基于深度神经网络的风电场功率-载荷协同优化算法, 旨在实现功率提升与载荷控制的协同目标。

通过OpenFAST 计算了不同风速、湍流强度、偏航角及尾流湍流工况下风电机组的结构动力学响应^[2], 定量分析了塔底面外弯矩疲劳载荷特性。研究发现, 疲劳载荷随湍流强度与风速增加而显著上升, 而偏航角增大会降低机组载荷但牺牲功率输出; 同时, 上游机组偏航引发的尾流偏转会加剧下游机组载荷分布的不均衡性。为快速预测复杂尾流作用下的疲劳载荷, 本文创新性地设计了一种卷积神经网络(CNN)与全连接网络融合^[3]的代理模型(见图 1): 采用CNN 提取二维风速分布的高阶非线性特征, 结合全连接网络处理湍流强度与偏航角等参数, 最终通过特征融合层实现载荷预测。模型经 3840 组数据训练后, 测试集均方根误差仅为 885 kN·m, 验证了其高精度与泛化能力。

基于差分进化算法开展了风电场偏航角协同优化^[4]。以 Lillgrund 海上风电场布局为原型^[5], 对比了单一功率优化与功率-载荷协同优化策略的性能。结果表明: 在额定风速以下工况(4–16 m/s), 协同优化算法可使风电场总功率提升约 8%, 与单一功率优化效果相当; 同时, 其显著降低了功率优化引发的附加疲劳载荷(见图2), 平均载荷增量由 18.7% 降至 2.8%, 减少幅度达 85%。在额定风速以上工况(>16 m/s), 算法可进一步通过偏航控制降低载荷 10%–24%, 而无需牺牲功率输出。优化后的偏航角分布显示, 上游机组偏航角趋近上限 25°时, 下游机组则随尾流恢复逐渐减小, 体现了算法对尾流空间异质性的自适应能力。本研究首次实现了风电场层面的功率与疲劳载荷协同优化, 提出的深度学习代理模型为复杂尾流作用下的载荷快速预测提供了新思路, 差分进化算法的全局搜索特性保障了多目标优化的鲁棒性, 推动了风电场智能化运行与寿命延长。

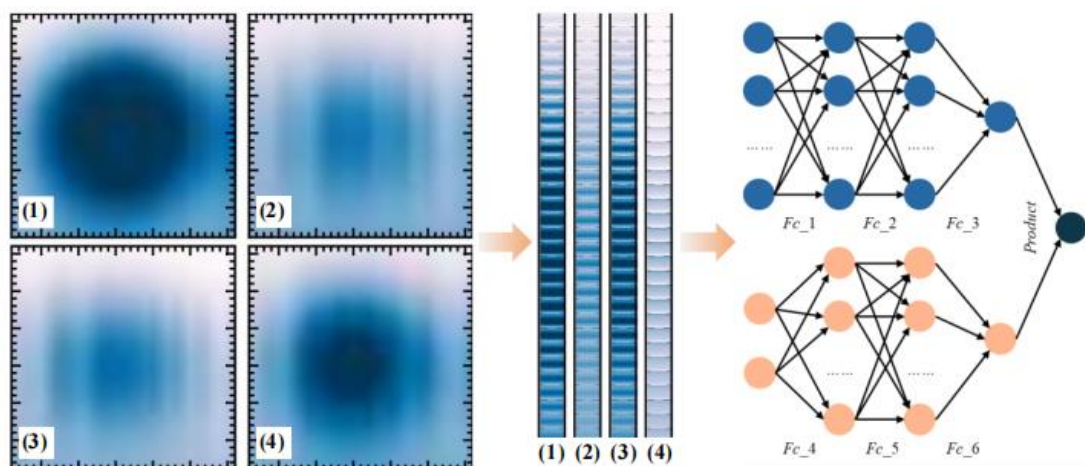


图1 卷积神经网络与全连接网络融合的载荷代理模型

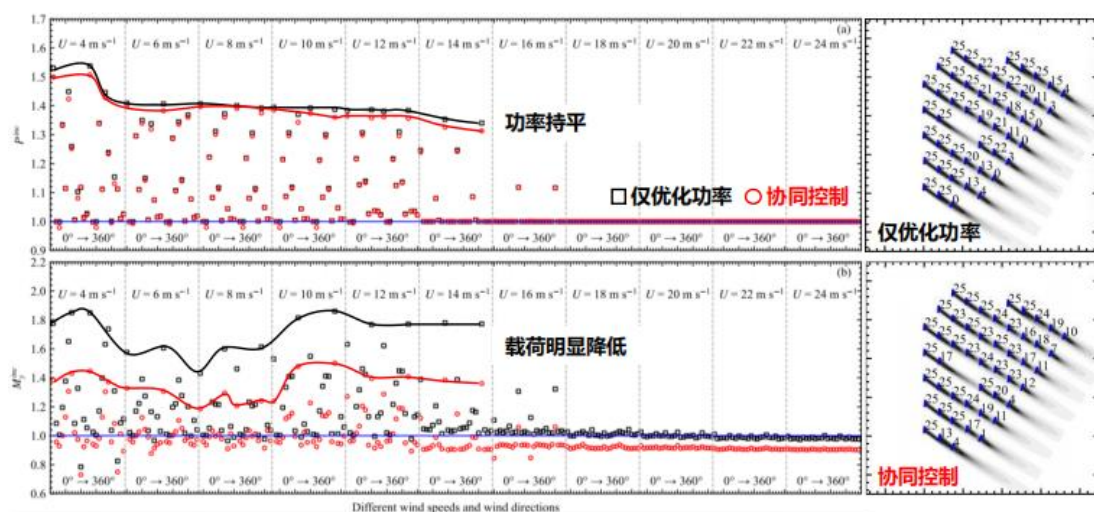


图2 仅功率优化和功率-载荷协同控制的偏航优化结果对比

关键词：风电场；功率优化；载荷优化；偏航控制；深度神经网络

参考文献

- [1] Yize Wang; Zhenqing Liu; Fatigue analysis of wind turbine and load reduction through wind-farm-level yaw control, Energy, 2025: 136266
- [2] Yang Yang; Musa Bashir; Jin Wang; Jie Yu; Chun Li; Performance evaluation of an integrated floating energy system based on coupled analysis, Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113308
- [3] Zhenqing Liu; Yiwen Cao; Yize Wang; Wei Wang; Computer vision-based concrete crack detection using U-net fully convolutional networks, Automation in Construction, 2019, 104: 129–139
- [4] Qi Yao; Jie Tang; Yiming Ke; Li Li; Xiaoqin Lu; Yang Hu; Fang Fang; Jizhen Liu; Anti-tropical cyclone load reduction control of wind turbines based on deep neural network yaw algorithm, Applied Energy, 2024, 376: 124329
- [5] Rebecca Jane Barthelmie; S C Pryor; Sten Tronæs Frandsen; Kurt Schaldemose Hansen; JG Schepers; K Rados; Wolfgang Schlez; Anja Neubert; LE Jensen; S Neckelmann; Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(8): 124329

通讯作者简介：华中科技大学土木工程学院教授、博士生导师，主要从事风资源评估与高效利用、风力发电机降载优化及振动控制方面的研究。

基于图像的屋盖结构风压预测

黄友钦¹, 傅继阳^{1,*}, 吴玖荣¹

1. 广州大学, 风工程与工程振动研究中心, 广东广州 510006

通讯作者邮箱: yqhuang@gzhu.edu.cn

报告人: 黄友钦

摘 要:

屋盖结构是一种典型的风敏感结构, 一般通过风洞试验来获得屋面风荷载分布, 但风压场与屋面位置、风场参数、结构外形等诸多参数有关, 而风洞试验包含的参数类型较少且试验成本较高, 因此通过风压预测来实现基于风洞试验的有限数据进行风压信息拓展, 是结构风工程的重要研究内容。人工神经网络是风压预测的主要方法, 但现有方法主要采用单个测点为训练样本, 在预测精度和效率等方面仍有待于提高, 且现有研究主要针对单个结构外形参数进行预测, 缺乏更系统的外形预测方法。本研究将建立基于图像的风压时程与统计值预测方法, 提升风压预测的精度和效率, 应实现针对多个结构外形参数的风压场预测。该研究有助于扩展现有风压预测方法的适用范围, 且为屋盖的自动气动优化建立技术基础。

关键词: 屋盖风压预测, 图像样本, 卷积神经网络, 超分辨率, 风压时程, 风压统计值

通讯作者简介: 广州大学风工程与工程振动研究中心教授、博士生导师, 广州大学副校长、国家杰青。主要从事结构风工程方面的研究。(不超过 150 字, 宋体, 10 号字)

气候变化下台风危险性和海上风电结构可靠度评估

盛超¹, 戴靠山^{1,*}, 洪汉平²

1. 四川大学, 建筑工程学院, 四川成都 610065

2. 哈尔滨工业大学(深圳), 土木与环境工程学院, 广东深圳 518055

通讯作者邮箱: kdai@scu.edu.cn

报告人: 盛超

摘要:

气候变化预期将改变并强化台风活动, 对海上风电结构的可靠性和灾害韧性构成严峻挑战。然而, 针对我国东南沿海地区未来台风-海浪联合危险性及其对风电结构基于可靠度设计影响的研究还较少涉及。本研究建立了一种基于物理机制且计算高效的台风多灾害模拟框架, 并将其应用于考虑共享社会经济路径(SSP) 5-8.5 情景下的六个全球气候模式。结果表明, 尽管存在显著的模式间差异, 强台风发生频率呈现上升趋势(95% 置信水平)。时-空分析显示台风活动密度与最大风速 75%分位数持续增加。区域平均的 50 和 500 年一遇风速和显著浪高重现期值预计从 2015–2044 到 2073–2100 分别增长 6% 和 5%。高斯 copula 函数能有效表征风-浪极值的联合分布, 环境等值线表明风-浪联合危险性加剧——主要由台风强度增强驱动, 而非相关性变化。可靠性分析表明, 现行 IEC 推荐的台风荷载设计值或历史 50 年一遇重现期值均无法保障风电结构目标可靠性, 而采用远期危险性预测值可实现这一目标。本研究为我国东南沿海台风多灾害危险性评估和提升海上风电结构气候适应性和灾害韧性提供了科学依据和参考价值。

关键词: 台风-海浪危险性, 气候变化, 东南沿海, 结构可靠度, 海上风电结构

通讯作者简介: 戴靠山 四川大学建筑与环境学院土木系教授、博士生导师。主要从事能源基础设施工程韧性及防灾技术研究。

高速列车过站对站台雨棚的风压特性数值模拟研究

陈金明¹, 沈国辉^{1,*}, 汪郭立¹

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: ghshen@zju.edu.cn

报告人: 陈金明

摘要:

当高速列车通过车站时, 列车周围的列车风会在站内产生空气压缩效应, 对站内人员和站体结构产生不利影响, 其中对于雨棚的影响较明显。对这类问题, 目前大部分学者采用 CFD 方法展开研究。宋杰^[1]采用仿真与试验对比研究列车高速过站对雨棚的影响, 发现当车头和车尾通过时会产生较大的压力瞬变; 何连华^[2]等采用动网格技术模拟了武汉站高速列车过站时的列车风, 发现列车风的影响主要集中在头部和尾部, 对比不同速度发现头部列车风侧向影响范围与速度成正相关。在此背景下, 本文通过 CFD 动网格技术对典型高速列车过站时车站雨棚的风压展开研究, 分析高速列车过站时雨棚的风压时程规律和分布规律, 并总结运行速度、雨棚形式等因素对风压的影响。



图 1 几何模型建模

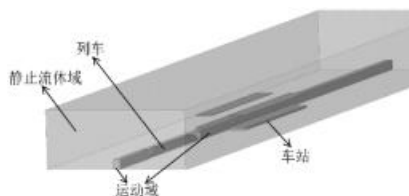


图 2 计算域设置

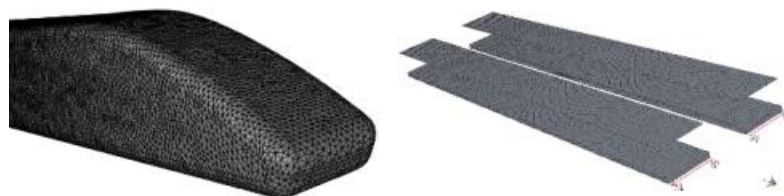


图 3 网格划分

几何建模见图 1, 列车模型参考我国 CRH400AF 型动车组, 采用简化的车头、中间车、车尾三车编组, 车体高 4.05m, 宽 3.36m, 全长 79.4m; 车站采用双路正线轨道, 雨棚为无柱式雨棚, 包括封闭与半封闭两种形式, 车站长度为 100m, 站台高度为 1.25m, 雨棚离站台高度为 6m, 站台及雨棚宽度均为 10m; 计算域尺度为 450m×80m×30m。

计算域设置见图 2, 选取横截面略大于列车且长度方向贯通计算域的区域作为运动域, 其余部分为静止域, 采用动网格技术使运动域在计算域中运动, 从而实现列车运动。网格划分见图 3, 对列车部分采用非结构网格, 其余区域均为结构化网格, 网格总数为 618 万, 并通过验证满足网格无关性要求。湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 出入口边界条件分别为压力出入口条件, 壁面边界均为无滑移壁面, 时间步长为 0.001s, 最大迭代次数为 20 次。计算中在站内不同位置布置一系列测点, 监测实时风压数据。

数值模拟结果如下图 4-图 8 所示。

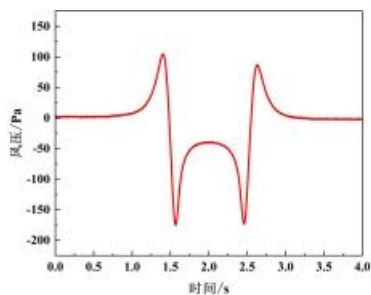


图4 风压时程曲线

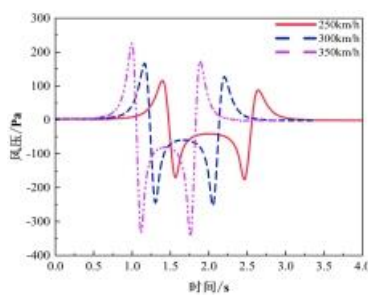


图5 不同速度下风压时程

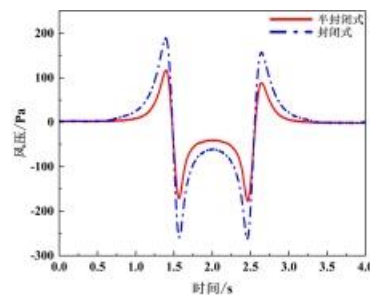


图6 不同雨棚形式风压时程

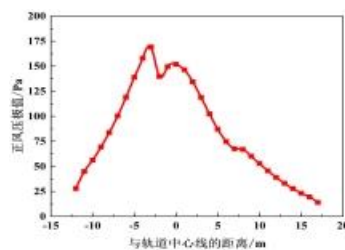
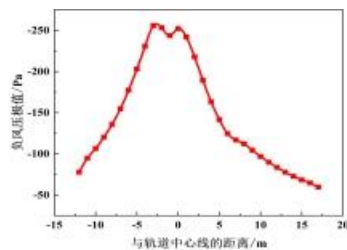


图7 风压极值沿垂直轨道方向分布

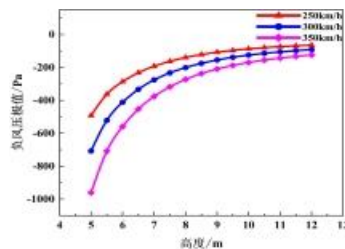
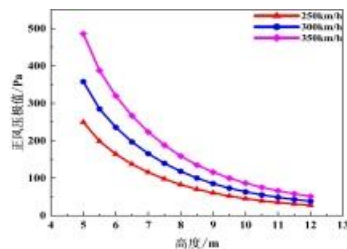


图8 风压极值沿高度方向分布

列车高速通过车站时，当车头到达时其前端气体受挤压后作用于雨棚产生正压力，车头通过后气体具有一定速度，从而产生一定负压区，因此雨棚风压呈现先正后负的瞬变，车尾则相反，中间车通过时始终为负压；列车过站时引起的雨棚风压大小与列车的运行速度成正相关，且风压极值近似与速度平方成正比；相同的列车运行速度下，封闭式雨棚由于泄压空间较小，所受风压显著高于半封闭式雨棚；在垂直轨道方向上，雨棚所受正负风压极值与距轨道中心线的距离均近似呈二次曲线衰减关系；在高度方向上，风压是随着测点高度的增加逐渐递减的，且列车运行速度越大随高度递减越快。

关键词：高速列车；列车风；风压；数值模拟；雨棚；

参考文献

- [1] 宋杰. 高速列车过站时的数值模拟及风致振动研究[D]. 北京交通大学, 2012.
- [2] 何连华, 赵鹏飞, 潘国华, 等. 武汉站高速列车过站列车风的数值模拟研究[J]. 铁道建筑, 2008, (08): 108-110.

通讯作者简介：浙江大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事结构风工程、结构计算分析等方面的研究。

海上风电场风力机塔架抗台风结构优化设计

高伟伟¹, 黄铭枫^{1, 2*}

1. 广西大学, 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004

2. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: mfhuang@zju.edu.cn

报告人: 高伟伟

摘 要:

我国海上风电场风力机面临台风灾害的严重威胁, 风荷载往往是大型风力机塔筒结构设计的控制性荷载。为了确保塔筒能够满足台风环境下的抗风要求, 通常需要采用厚壁塔筒。然而, 这种方法显著增加了塔筒结构的重量以及其制造和运输成本。本文研究台风环境下大型风力机塔筒结构的抗风优化设计, 即在满足风致振动和风致疲劳等设计要求的条件下获得风力机塔筒结构的最优壁厚。

采用启发式粒子群算法(PSO)开展了塔筒结构的多约束抗风优化计算, 其中定义了塔筒结构自重最小化作为优化目标, 而风致振动、风致疲劳等作为设计约束条件。海上风电场的台风风场模拟采用了气象中尺度 WRF-WFP 模式, 图 1 表示台风经过风电场中心时垂直风廓线的变化, 在近地面, 台风的风速先增大后减小, 在 500m 的高度, 台风的风速廓线总体符合指数或对数规律。风力机动力响应仿真模拟则采用了 FAST 模型。图 2 给出了风力机塔筒结构抗风优化设计的总体流程。为便于设计, 如图 3 所示将整个塔筒结构分为 10 段, 每段的长度为 13m。假设塔直径从顶部到底部线性增加, 设计变量包括塔的顶部和底部的直径, 以及每个塔段的厚度。为了确保优化结果可用于工程实际的, 将每个设计变量定义在指定取值范围内。塔架底部通常需要比顶部更大的直径以承受更大的重力载荷和风荷载。因此, 底部塔段的直径被限制为大于顶部塔段的直径。优化结果表明, 在风致振动有效控制的前提下, 多种工况下风力机塔筒的整体力学性能表现良好, 在优化过程中, 风力机塔架的重量最初是增加的, 这可以使得设计变量不超过取值范围, 而一旦得到可行的解决方案, 塔筒重量便逐渐减少并收敛。此外, 在优化后的设计变量中, 塔筒底部和顶部的直径被设为中等值, 这是用来控制横向振动幅度和疲劳水平, 而其中一些中间段的厚度被设置为它们的下限以减小塔筒的重量。优化后的塔筒质量减轻了 5%, 风致疲劳寿命也得到了优化。

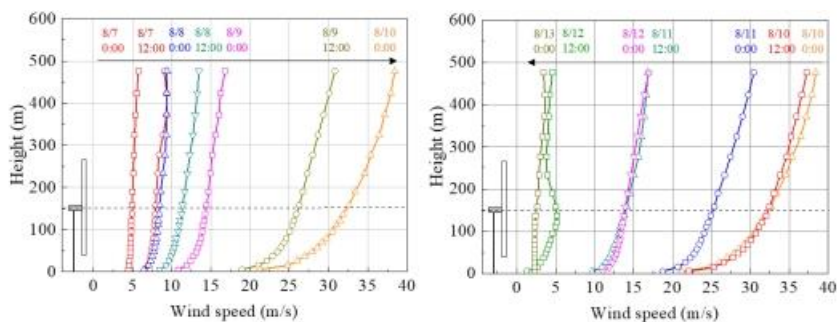


图 1. 台风期间风廓线的演变

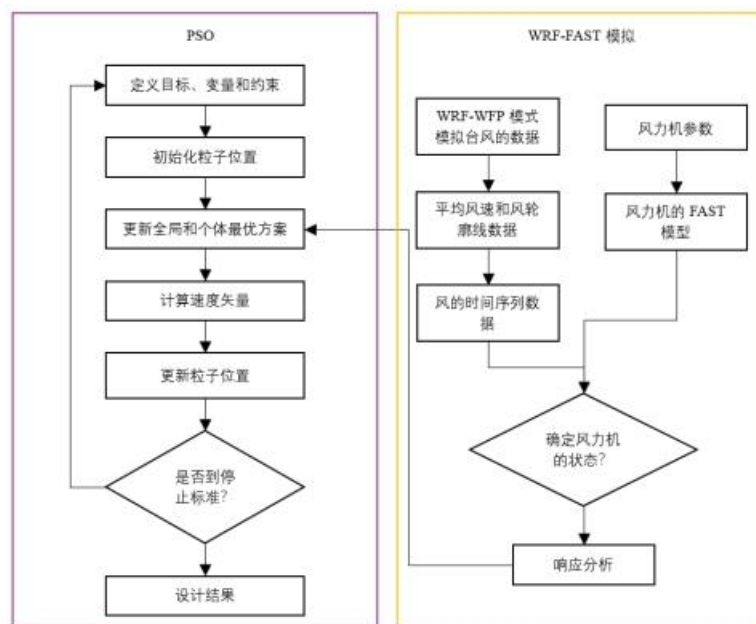


图 2. 海洋环境风力机塔筒结构抗风优化设计总体流程

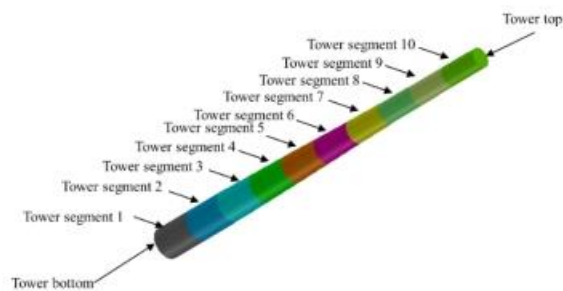


图 3. 风力机塔筒分段厚度设计变量

关键词：海上风力机；台风；PSO；设计优化；

通讯作者简介：广西大学土木建筑工程学院教授、博士生导师、长江学者特聘教授。主要从事结构风效应、结构动力可靠度优化和计算风工程方面的研究。

连续波浪状屋盖结构表面风压分布特征数值模拟

郭晨广¹, 廖孙策², 孙建平¹, 黄铭枫^{1,3,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 温州大学, 防灾减灾工程研究所, 浙江温州 325035

3. 广西大学, 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004

通讯作者邮箱: mfhuang@zju.edu.cn

报告人: 郭晨广

摘 要:

G60 科创走廊的楼顶屋盖结构为典型的大跨度悬挑结构, 纵向跨度约 743 米, 横向跨度约 123 米, 已超越以往多数屋盖结构的尺度, 对风荷载尤为敏感。其屋盖表面为连续波浪状起伏的复杂曲面, 结构形式为镂空的空间网格结构。在来流作用下, 屋盖会产生包括撞击、分离、再附和漩涡脱落在内的复杂湍流现象, 风压分布受局部特征湍流影响显著, 与整体来流特性存在明显差异。由于现行设计规范尚缺乏对类似复杂形体的体形系数分布规定, 深入研究屋盖表面风压的分布特性及其影响机制, 对于提升类似结构的抗风设计水平具有重要意义。张建^[1]等人的研究表明, 波纹形屋盖表面风荷载分布显著区别于平屋盖, 忽略其形态效应将导致设计结果偏于不安全。

获取大跨度屋盖表面风荷载信息的主要手段包括现场实测、风洞试验和数值模拟。现场实测具有较高的真实性和可靠性, 但应用范围受到一定限制。风洞试验具有良好的准确性和可操作性。相比风洞试验, 计算流体力学 (CFD) 不仅可在任意位置布设测点, 便于获取局部风压信息, 还具有较强的可视化能力, 便于分析流场结构。目前常用的数值模拟方法主要包括稳态雷诺平均 (RANS) 方法和瞬态大涡模拟 (LES) 方法。其中 LES 方法能解析更丰富的湍流细节, 更适合用于复杂流动结构和风压脉动响应的研究。本研究采用 LES 对大跨度屋盖结构的风荷载特性进行数值分析。设置 0° 、 45° 、 180° 和 225° 四个风向角。入流脉动风采用 NSRFG (Narrow-band Synthesis Random Flow Generation) 方法生成^[2], 以真实地再现自然风的湍流特性。

当风正对屋盖时, 迎风面承受较大的平均负风压, 背风面则因屋盖的波浪形起伏而呈现复杂的风压分布: 凹陷区域主要承受平均正风压, 而凸起区域则表现出更大绝对值的平均负风压。当来流倾斜吹向屋盖时, 平均风压系数呈现出正负相间的条带状分布特征, 尤其在凸起部位的迎风前缘, 会形成条带状的负风压极值区。在所研究的四个风向角中, 正对屋盖的来流工况下, 脉动风压系数整体水平更高。由于来流在背风侧凹陷区域形成复杂的气流分离和漩涡脱落现象, 导致脉动风压系数的较大值通常出现在这些凹陷区域, 尤其位于屋盖凸起部位的下游。本文采用 Ma^[3]提出的 HDSB 方法对风压系数的非高斯特性进行峰值因子估计, 进而计算风压系数的极大值与极小值。结果表明, 极值风压系数的分布趋势与平均风压系数基本一致, 但极小值风压系数的绝对值普遍大于极大值风压系数, 说明屋盖结构更易遭受向上的极端吸力作用。图 1 展示了四个风向角条件下极小值风压系数的分布情况。由于屋盖结构形态复杂, 波峰与波谷交错分布, 在



来流作用下形成复杂湍流，一些测点的脉动风压呈现出明显的双峰特征。表现出双峰特征的脉动风压多为峰度小于 3 的“硬响应”过程，表明风压波动主要由气流分离与再附引起的突变控制，缺乏强烈的尖峰。进一步分析发现，具有“硬响应”特征的测点主要分布在屋盖下游区域的迎风面，典型位置包括波峰（凸起部位）的迎风前缘以及波谷（凹陷部位）的背风后缘。

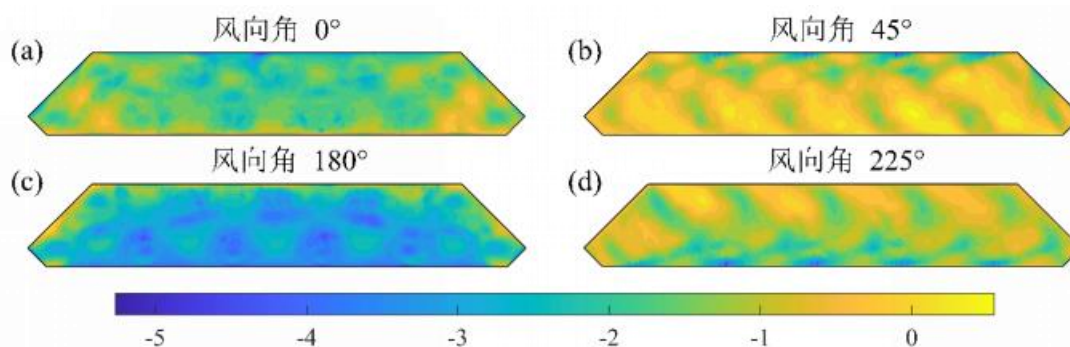


图 1 极小值风压系数

图 2 展示了在 0° 风向角下，沿屋盖短轴方向各测点处脉动风压的归一化功率谱密度分布情况。结果表明，尽管轴线上不同位置的测点在低频区域的风压能量基本一致，但在高频区域的能量衰减速率存在明显差异，整体呈现出越靠近下游，衰减越快的趋势。此外，所有测点的功率谱均在归一化频率约 0.6 处出现明显的窄带尖峰。这种尖峰现象主要源于屋盖中部向下倾斜区域所形成的背风区，在该区域内，来流容易发生气流分离与漩涡脱落，从而激发出具有特定频率特征的局部湍流结构。

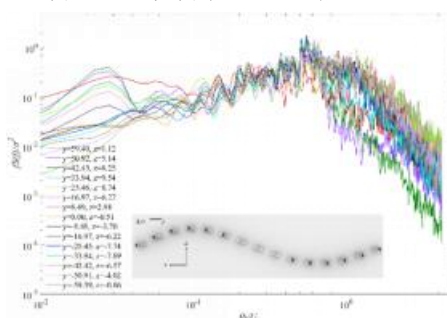


图 2 功率谱密度

- [1] 张建;李波;单文姗;杨庆山;范重. 波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J/OL]. 建筑结构学报, 2017(03 vo 38): 111-117.
- [2] YU Y, YANG Y, XIE Z. A new inflow turbulence generator for large eddy simulation evaluation of wind effects on a standard high-rise building[J/OL]. Building and Environment, 2018, 138: 300-313.
- [3] MA X, XU F, KAREEM A, 等. Estimation of Surface Pressure Extremes: Hybrid Data and Simulation-Based Approach[J/OL]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(10): 04016068.

关键词：大跨度屋盖；大涡模拟（LES）；风压分布；特征湍流

通讯作者简介：浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为结构风效应、结构动力可靠度优化和计算风工程。主持国家自然科学基金项目 10 余项，已发表科研论文 120 余篇，其中 SCI 期刊论文 60 余篇。

机器学习驱动的自适应 SMA-Geiger 索穹顶主动控制预测模型研究

张海琛¹, 陆金钰^{1,*}, 许植胤¹, 侯江军¹, 邹俊¹

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: davidjingyu@seu.edu.cn

报告人: 张海琛

摘 要:

自适应结构是指能够感知外界环境变化并做出相应反应的结构, 因此在设计时不需要设置较大的安全系数, 造成材料的浪费。形状记忆合金 (SMA) 是一种典型的智能材料, 可以利用其形状记忆效应实现结构的主动控制。先前的研究已利用 SMA 丝制作主动单元, 实现了对索穹顶结构形态的控制, 并建立了主动控制模型和以结构形态控制为目标的优化控制数学模型。然而, 在求解控制策略的过程中, 优化控制模型在变量较多时的计算效率相对较低, 限制了其实用性。

为了提升计算效率, 本文以自适应 SMA-Geiger 索穹顶为研究对象, 首先, 通过 MATLAB 生成 1500 组随机荷载, 其中均布荷载、半跨荷载以及随机荷载的占比为 1:1:1, 考虑到结构的对称性, 对均布荷载与半跨荷载的控制变量进行简化处理。随后, 基于控制模型计算各工况下的结构内力与节点位移, 并借助优化控制数学模型求解相应的控制策略, 构建结构状态与控制策略数据库。在此基础上, 基于机器学习技术构建结构形态控制预测模型, 并通过均方误差 (MSE) 和相关系数 (R) 值对预测模型的准确性进行评估。最后, 随机生成一组均布荷载、半跨荷载与随机荷载, 分别采用优化控制数学模型与预测模型求解控制策略, 并开展自适应 SMA-Geiger 索穹顶结构主动控制试验, 以验证所提出方法的有效性。

通过研究发现, 控制策略与结构所荷载工况之间存在较为复杂的非线性映射关系, 尤其是荷载类型复杂、控制变量较多的情况下, 使用神经网络难以构建准确的预测模型。因此需要引入更多的输入特征, 如单元内力和节点位移, 并采用数据增强与多层复杂隐含结构的神经网络模型, 以提升模型的拟合能力和训练效果。结合索穹顶结构试验结果, 基于神经网络构建的自适应 SMA-Geiger 型索穹顶结构控制策略预测模型可以生成有效的结构形态控制策略, 并显著提升控制策略求解效率, 具有良好的应用前景。

关键词: 索穹顶结构; 形状记忆合金; 优化控制模型; 机器学习; 结构控制试验

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事智能空间结构、建筑结构数字化设计, 钢结构连续倒塌分析研究



基于高精度数值仿真的海上风电支撑结构体型优化与动力特性识别研究

席义博¹，张昕^{1,*}，王振宇^{1,*}

1. 浙江大学，建筑工程学院，浙江杭州 310058

通讯作者邮箱：xin.zhang1259@zju.edu.cn

报告人：席义博

摘 要：

海上风电正迈向高质量跃升发展的新阶段，对于提质增效、降低成本的需求日益迫切。作为海上风电机组的关键承载部件，支撑结构具有高维强非线性且动力敏感的特点，在多源荷载作用下表现出复杂的动态响应。本文针对传统工程分析方法存在的计算效率低、数据分析和优化能力受限的难题，开发了高精度的风电基础结构数值仿真方法，并开展了海上风电支撑结构的体型优化以及动力特性研究。

首先，本文提出了海上风电导管架基础的高效建模框架(图 1(a)-(c))，基于图数据结构开发了适用于复杂型式结构的信息化参数建模方法，实现了导管架基础的快速参数分解与建模；同时，建立了适用于模拟复合风浪环境下导管架结构响应的数值仿真模型。模型中同时包含了风荷载、波浪荷载在结构上的真实加载，以及非线性桩土相互作用，实现了海上风电导管架基础的真实工况仿真。提出的高效建模框架能够有效提升复杂结构的建模效率，为后续开展结构体型优化分析奠定基础。

其次，本文提出了考虑多约束条件的海上风电导管架基础混合优化框架(图 1 (d)-(f))，通过全局和局部优化，实现结构整体以及细部的多尺度优化。混合优化框架以最小化结构质量为优化目标，根据设计准则综合考虑了极限承载力、疲劳承载力以及屈曲等多约束条件，以达到在满足结构控制指标的前提下降低结构质量的目的。此外，混合优化框架集成了基于适应度排名的遗传算法(R-GA)和改进的多值离散粒子群优化算法(xMVP-PSO)，能够有效解决工程问题中参数关联性强以及非连续域取值的问题。利用提出的高效建模与混合优化框架能够精准控制结构设计冗余，达到降低海上风电建设成本的目的。

最后，本文基于监测数据开展了支撑结构动力特性识别与疲劳评估研究(图 2)。提出了海上风电支撑结构模态参数自动化识别以及阻尼评估方法，为揭示海上风电支撑结构的动力学特性提供了可靠手段，实现了面向大量监测数据的模态参数快速准确辨识，并量化掌握了海上风电支撑结构的多源阻尼构成。提出了一种考虑长周期应力循环特征的海上风电支撑结构疲劳评估修正方法，揭示了支撑结构在长期服役中的应力循环特征，有效提升了支撑结构疲劳评估的精度。

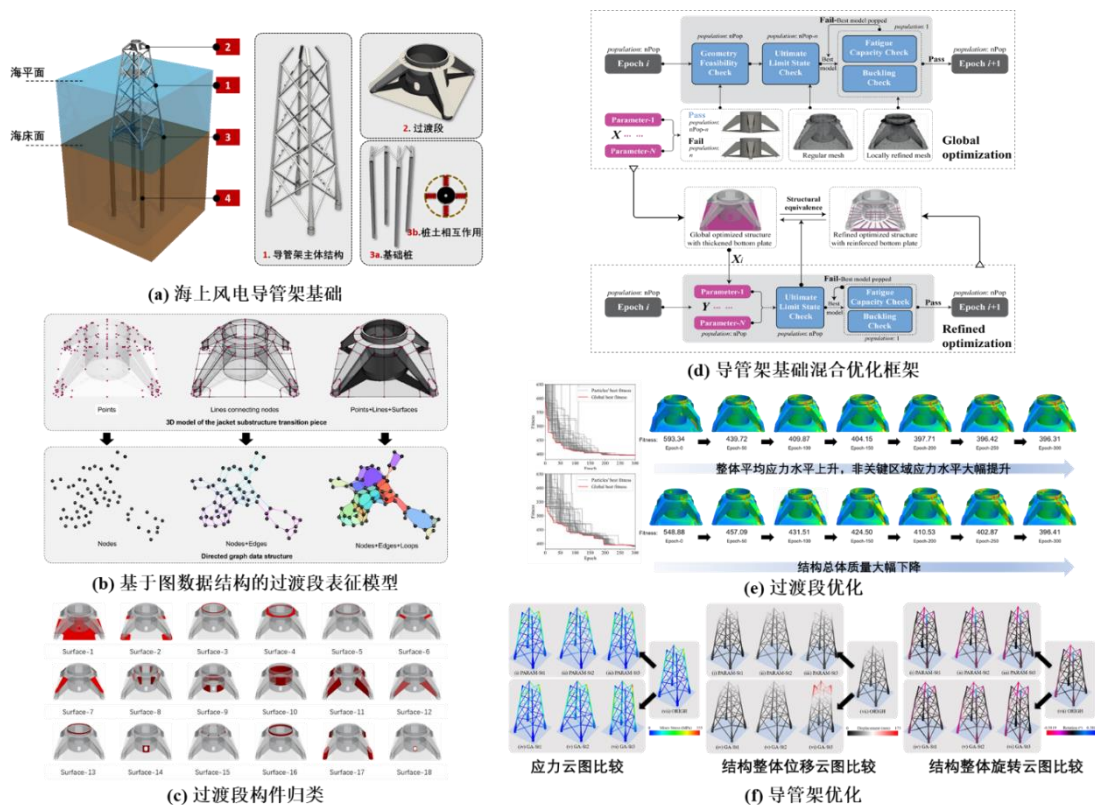


图 1 海上风电导管架基础高效建模与结构优化

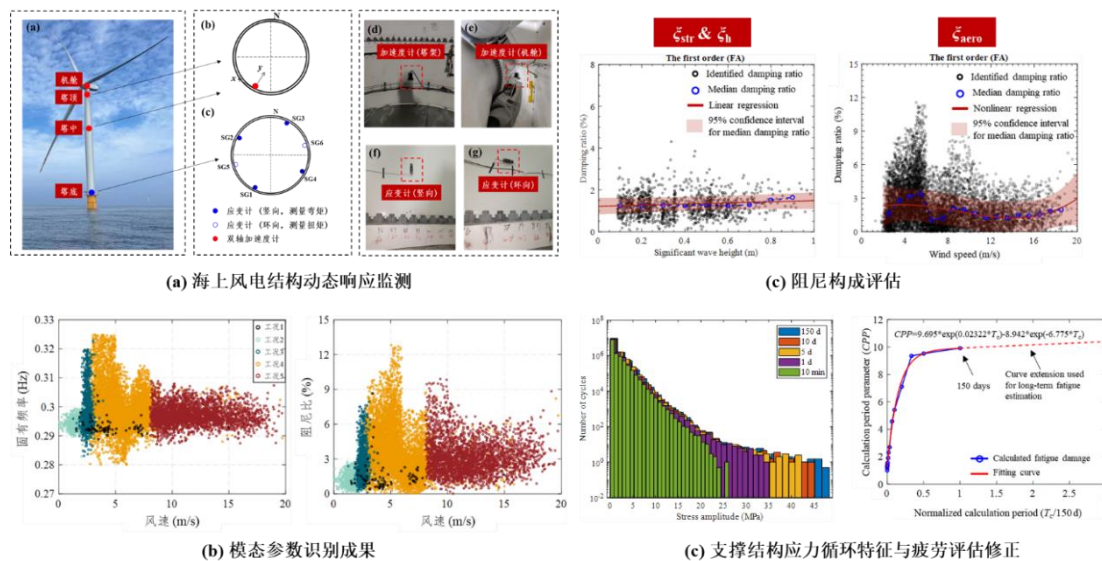


图 2 海上风电支撑结构动力特性识别与疲劳评估

关键词: 海上风电; 导管架结构; 信息化建模; 体型优化; 动力特性识别

通讯作者简介: 张昕: 浙江大学建筑工程学院助理研究员, 主要从事复杂结构高效仿真与优化方面的研究; 王振宇, 浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师。主要从事海上风电结构方面的研究。



海上光伏阵列结构风振响应与疲劳寿命预测

梁世栋^{1,*}, 黄铭枫^{1,2}, 周园元²

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 广西大学, 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004

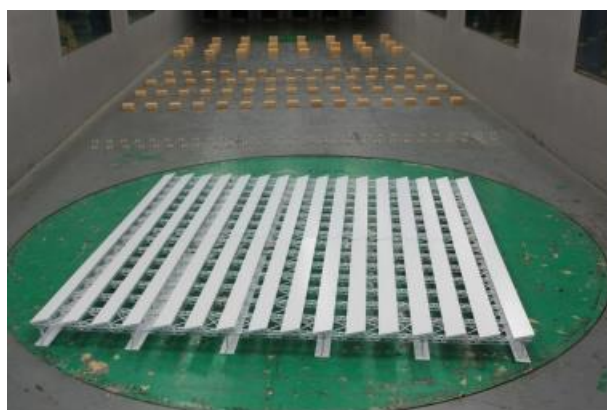
通讯作者邮箱: sdliang@zju.edu.cn

报告人: 梁世栋

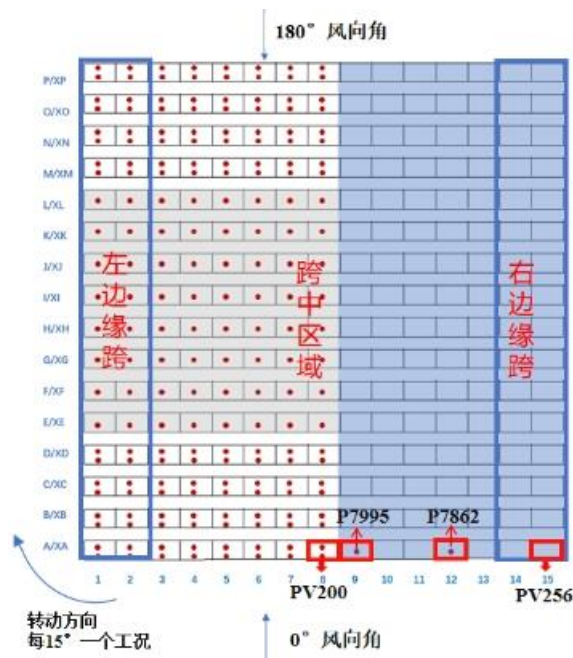
摘要:

随着“双碳”目标的推进, 海上光伏快速发展, 但其结构在复杂风环境下的风致振动与疲劳问题亟待研究。本文以中国东南沿海某 16 排 15 跨海上光伏阵列对象, 通过刚性模型风洞试验和有限元分析, 探究了不同风向下光伏组件的风荷载分布、动力响应及疲劳损伤演化规律。

光伏阵列风洞试验模型及风向角定义如图 1 所示, 试验中采用了中国荷载规范规定的 A 类地貌风场, 模拟了 0° 至 180° 风向 (间隔 15°) 下光伏阵列面板的风压分布。基于风洞试验结果, 得到了如图 2 所示的风压系数云图。迎风第一排跨中区域在 0° 和 180° 风向下风压系数最大 (0.748 和 0.862), 边缘跨区域在 30° 和 150° 风向下出现风压极值 (绝对值达 0.897), 且迎风排对后排的遮挡效应显著 (最大遮挡率 66.4%)。斜风向 (30° 、 150°) 下, 边缘跨因尾流干扰和涡脱落导致气动阻尼降低, 风压分布呈现梯度递减规律。



(a) 风洞试验



(b) 风向角定义

图 1 光伏阵列风洞试验及风向角定义

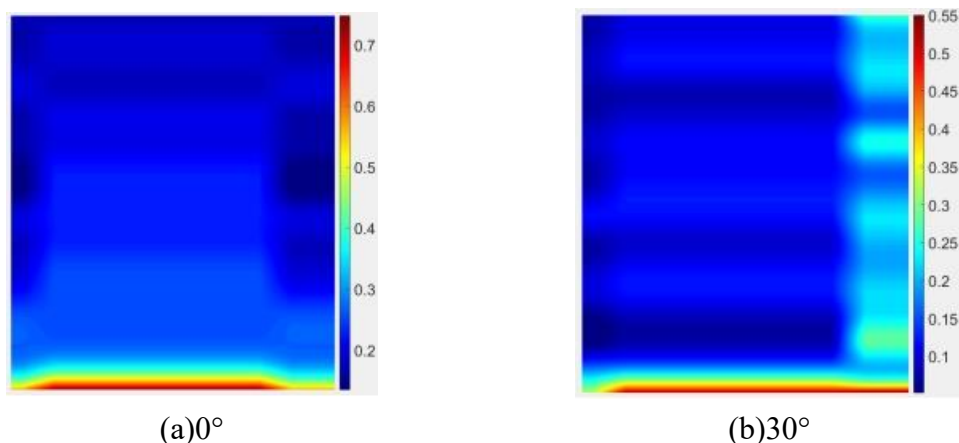


图2 不同风向角下的风压系数

基于 SPA2000 建立有限元模型, 本文分析不同风速和风向下的结构动力响应, 图3和图4为不同风向角下光伏面板的动力响应结果。结果显示: 边缘跨光伏组件(PV256)在30°和150°风向下位移响应最大(14.5mm), 而跨中组件(PV200)在0°和180°风向下响应最显著(13.9mm)。以上结果表明, 海上光伏阵列的风压分布和风致响应都具有显著跨向和风向依赖性, 边缘跨与跨中区域的最不利风向不同。

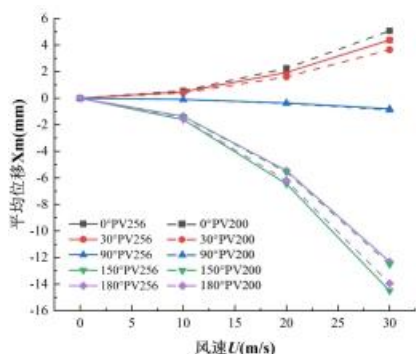


图3 不同风向跨向的平均位移响应(mm)

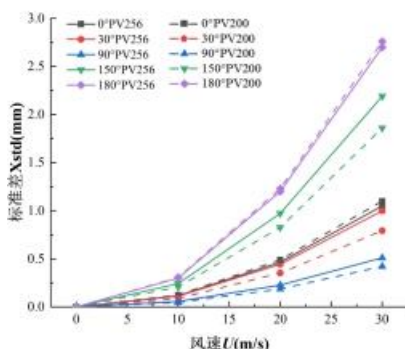


图4 不同风向跨向的平均位移响应标准差(mm)

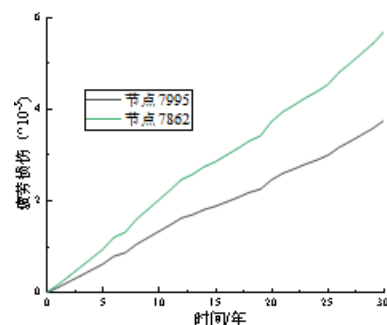


图5 疲劳损伤结果

采用雨流计数法和 Miner 线性累积损伤理论, 同时结合风速风向联合概率密度分布, 评估支撑结构关键节点的疲劳寿命。选取节点 7862 和 7995 两个易损部位, 计算 30 年服役期内的累积损伤, 结果如图 5 所示。结果显示: 最大损伤值(节点 7862)仅达 6×10^{-5} , 远低于失效阈值 ($D=1$), 表明该光伏阵列在该地区的疲劳失效风险较低。

关键词: 海上光伏; 风振响应; 疲劳寿命; 风洞试验; 风速风向联合概率分布

通讯作者简介: 浙江大学建筑工程学院博士研究生。主要从事结构风工程、结构疲劳分析方面的研究。



基于机器学习的模块间节点受剪性能多目标优化方法研究

邓恩峰¹, 李羽辰¹, 高峻栋^{1,*}, 张哲¹, 廉俊逸¹

1. 郑州大学土木工程学院, 河南, 郑州 450001

通讯作者邮箱: gaojundong@zzu.edu.cn

报告人: 邓恩峰

摘要:

模块化钢结构建筑由于其工业化程度高、施工效率快等特点, 现已成为建筑工业化的重要发展方向。模块间连接对于模块化建筑的力学性能有重要的影响。然而, 目前关于模块间连接的受剪性能及优化设计方法的研究尚不充分。基于前期完成的一种模块化钢结构全装配可吊装节点(Fully Prefabricated Liftable Connection, FPLC)受剪性能试验研究, 综合运用有限元分析、机器学习算法和多目标优化算法, 对 FPLC 受剪性能展开了深入研究, 旨在为模块化钢结构建筑的节点设计提供科学依据和有效方法, 有限元模型如图 1 所示。

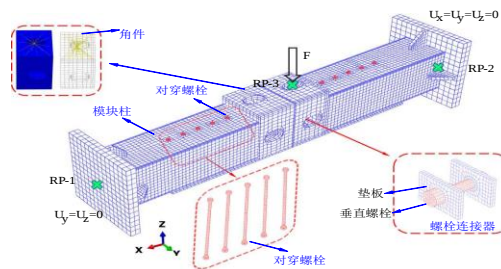


图 1 有限元模型

(1) 利用 ABAQUS 软件建立 FPLC 精细有限元模型。所有部件采用实体单元 C3D8R, 部件间连接分别采用“Tie”连接和“面-面接触”, 并合理设置接触参数和网格尺寸。材料本构模型考虑实际受力特性, 引入相应损伤准则。通过将模拟的破坏模式与试验结果对比, 验证了模型的准确性, 典型破坏模式对比如图 2 所示。利用该模型进行参数分析, 研究垫板厚度和受剪方向对 FPLC 受剪性能的影响, 垫板厚度增加可提高节点抗剪承载力, 受剪方向改变会使角柱节点破坏模式转变为节点板与垫板受弯破坏, 且不同受剪方向下其荷载-位移曲线不对称。

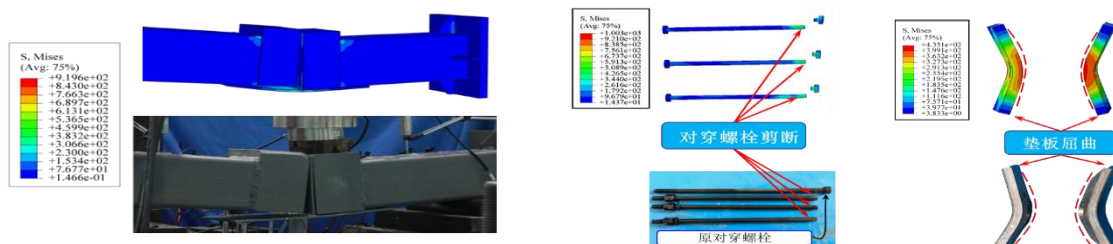


图 2 破坏模式对比

(2) 基于 FPLC 受剪性能关键参数交叉, 构建包含 1000 个样本的数据库, 如图 3 所示。采用单层神经网络、多层神经网络、遗传算法优化的神经网络、随机森林、支持向量机和卷积神经网络六种主流机器学习算法对数据库进行训练和测试, 以决定系数、平均绝对误差和均方根误差评估算法预测精度和泛化能力。研究表明, 遗传算法优化的神经网络对 FPLC 屈服承载力和极限承载力映射能力强, 支持向量机对屈服位移和极限位移映射能力强。

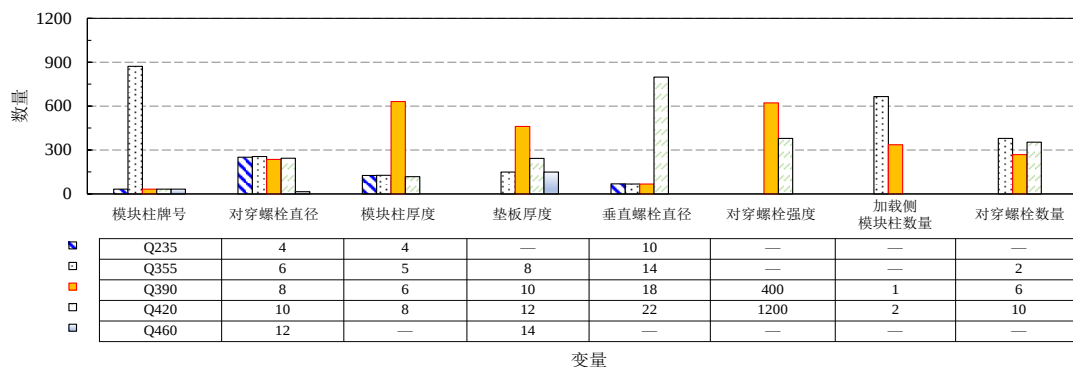


图 3 数据库样本集合

(3) 将遗传算法优化的神经网络和支持向量机进行堆栈, 构建 FPLC 受剪性能代理模型。以 FPLC 屈服承载力、极限承载力和用钢量为优化指标, 采用 NSGA-II 算法进行多目标优化, 随着遗传代数的增加, Pareto 最优解更加集中且稳定。与初始设计相比, 在相似的屈服承载力和极限承载力下, 用钢量显著降低, 如表 1 所示。

表 1 优化后 FPLC 试件

构件编号	f_{mc} (MPa)	d_b (mm)	t_c (mm)	t_p (mm)	d_{vb} (mm)	f_b (MPa)	n_b (根)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	用钢量 (kg)
①SJ2	355	6	6	10	22	1000	1	15.4	4.8	23.2	7.4	50.8
②SJ6	355	6	6	10	22	1000	5	32.1	12.0	48.7	15.9	51.4
③优化后试件	460	8	5	10	6	1000	5	58.7	10.9	76.7	15.2	37.9

(4) 选取 4 组优化试件, 建立了一个四层模块化钢结构有限元模型, 如图 4 所示。在竖向荷载和风荷载作用下进行了静力分析, 对比了优化前后四层模块化钢结构的受剪性能和层间位移角, 以验证优化方法的可靠性。

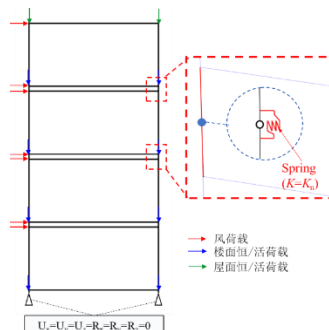


图 4 风荷载作用下四层 FPLC 连接有限元模型

关键词: 模块化钢结构; 模块间连接; 受剪性能; 机器学习; 多目标优化

通讯作者简介: 高峻栋, 郑州大学土木工程副教授、硕士生导师。主要从事钢结构方面的研究。



基于降维概率密度演化方程的结构抗震可靠性优化方法

杨家树^{1,*}, 律梦泽²

1. 西安建筑科技大学, 土木工程学院, 陕西西安 710055

2. 香港科技大学, 土木及环境工程学系, 香港 999077

通讯作者邮箱: jiashu.yang@xauat.edu.cn

报告人: 杨家树

摘 要:

在建筑结构设计, 地震作用通常起到控制作用。然而, 地震激励的幅值、频率特性与持时具有不可避免的随机性。若不能合理考虑地震激励的随机性, 可能导致结构具有较高的失效风险。基于可靠性的结构优化设计可以定量考虑地震激励随机性, 是提高工程结构设计自动化与理性化水平并实现结构成本与安全性权衡的重要途径^[1]。在基于可靠性的结构优化过程中, 需分别对一系列候选设计参数计算结构可靠度, 从而导致极高的计算成本。对于随机地震激励下的工程结构系统, 通常采用首次超越概率作为结构失效概率的度量, 而首次超越失效问题的复杂性则给基于抗震可靠性的结构优化带来了更大的挑战。因此, 精确且高效的结构动力可靠度分析方法就显得尤为重要。降维概率密度演化方程^[2]的提出为分析随机地震作用下线性与非线性结构系统的随机响应与可靠度提供了新的强大工具。因此, 本研究旨在探索降维概率密度演化方程在基于抗震可靠性的结构优化中的应用。针对随机地震作用下的结构系统, 通过构造并求解吸收边界过程的降维概率密度演化方程, 可基于 $10^2 \sim 10^3$ 次确定性样本分析实现高精度的抗震可靠度分析。由于抗震可靠度需要通过数值方法获得, 其关于设计变量的灵敏度不具有解析解。因此, 本研究将上述抗震可靠度分析方法与一种基于代理模型的零阶优化方法结合, 以高效求解抗震可靠度约束下的结构优化问题。该优化算法采用高斯过程回归模型代替精确可靠度约束函数, 并通过引入主动学习策略, 有效降低了建立代理模型所需的候选解数量。最后, 通过若干数值算例验证了以上方法的有效性, 部分结果如图 1 所示。

关键词: 结构可靠性优化; 抗震可靠性; 降维概率密度演化方程; 随机地震激励

参考文献:

- [1] Yang JS, Chen JB, Beer M. Seismic topology optimization considering first-passage probability by incorporating probability density evolution method and bi-directional evolutionary structural optimization. *Engineering Structures*, 2024, 314: 118382.
- [2] Lyu MZ, Chen JB. A unified formalism of the GE-GDEE for generic continuous responses and first-passage reliability analysis of multi-dimensional nonlinear systems subjected to non-white-noise excitations. *Structural Safety*, 2022, 98: 102233.

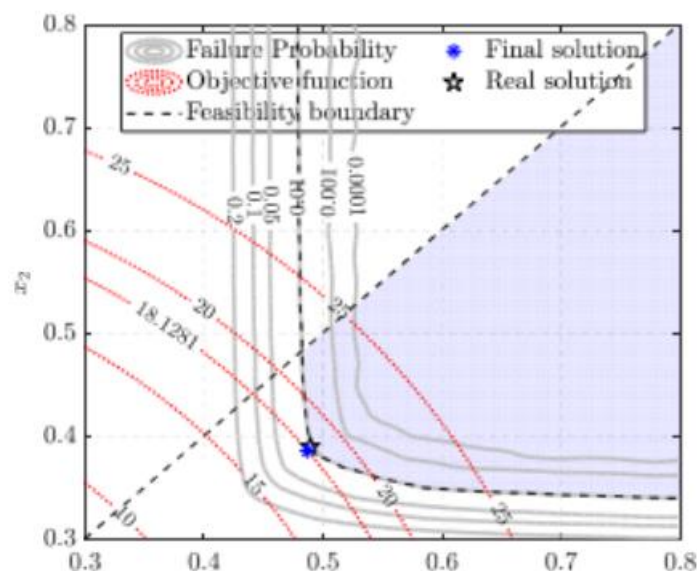


图 1 二维设计问题优化结果验证

通讯作者简介: 西安建筑科技大学土木工程学院讲师。主要结构优化和结构可靠性分析方面的研究。

疲劳损伤结构风险检测的贝叶斯最优试验设计

高腾飞¹, 刘炎^{1,*}

1. 华中科技大学, 船舶与海洋工程学院, 湖北武汉 430074

通讯作者邮箱: yanliuch@hust.edu.cn

报告人：高腾飞

摘 要:

基于风险的检测(Risk-Based Inspection, RBI)方法作为疲劳结构完整性管理的关键工具,已在工程领域获得广泛应用。然而,现有 RBI 方法存在理论局限性,主要表现为无法在规划阶段考虑未来检测结果所带来的知识更新效应。这导致检测策略通常基于静态风险模型制定,无法有效利用连续检测过程中获取的动态信息,从而难以实现理论最优解。本研究旨在解决 RBI 中后验分布传播与更新的关键挑战,提出一种创新性检测规划方法。

本研究构建了一个整合信息价值与传统风险和生命周期成本的贝叶斯最优试验设计框架。通过引入 Jensen-Shannon 散度作为信息增益的量化指标，该框架能够精确评估检测活动对结构状态不确定性降低的贡献。这种整合使检测决策不仅考虑直接的风险降低和成本效益，还能评估其对未来决策过程的信息价值，从而实现检测策略的全面优化。为克服贝叶斯方法在实际应用中的计算复杂性，本文将检测规划表述为序贯决策问题，并采用深度强化学习技术进行求解。通过构建能够模拟结构疲劳损伤进展和检测活动的环境，强化学习代理在大量模拟交互中学习最优检测策略。该方法将复杂的计算负担转移至离线训练阶段，而在线部署时能够迅速提供自适应的检测决策，无需进行实时贝叶斯计算，显著提升了方法的实用性。

研究通过实际疲劳问题验证了所提方法的有效性,针对疲劳敏感结构进行检测维修资源的最优分配。实验结果表明,与传统 RBI 方法相比,本文提出的方法能够基于新获取的检测信息动态调整检测计划,在满足风险控制的同时实现生命周期成本的最优。

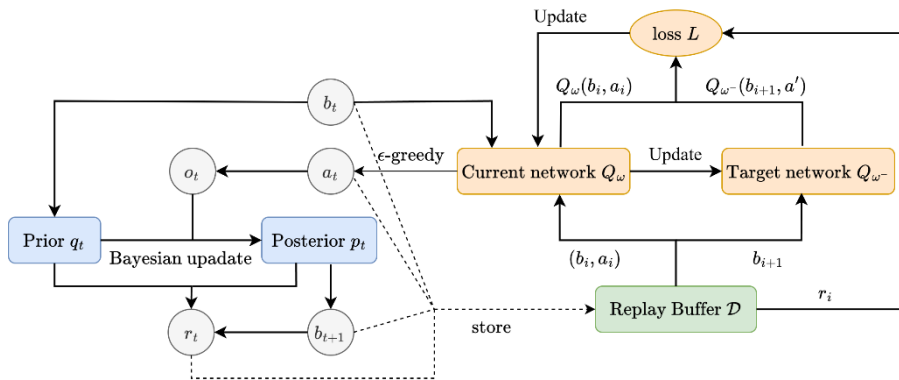


图 1 基于深度强化学习的风险检测策略框架

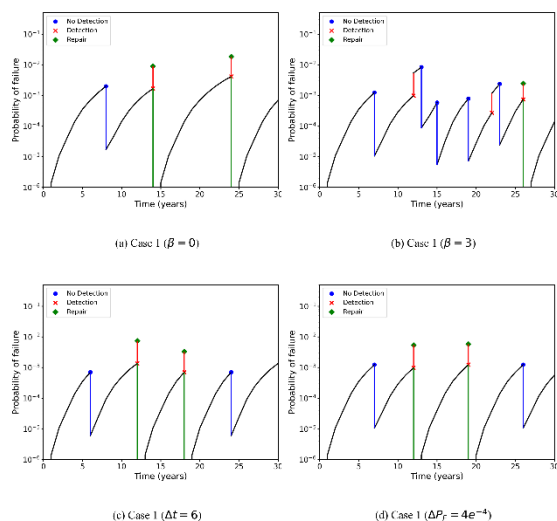


图 2 不同检修策略下的失效概率变化对比

关键词:

最优试验设计; 基于风险的检测; 序贯决策; 疲劳损伤

通讯作者简介: 华中科技大学船舶与海洋工程学院副教授、博士生导师。主要从事全生命周期管理、人工智能等方面的研究。



一种新型双菱形撑杆张弦梁结构的主动控制试验与数值模拟研究

邹俊¹, 陆金钰^{1,*}, 张海琛¹, 许植胤¹

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: davidjingyu@seu.edu.cn

报告人: 邹俊

摘 要:

自适应张弦梁结构具备主动感知与调控能力, 能够动态优化结构形态与内力分布, 显著增强结构在复杂荷载工况下的承载性能与环境适应性, 在大跨度空间结构领域展现出广阔的应用前景。然而, 当前多数自适应张弦梁结构通过在撑杆中直接引入主动驱动器实施控制, 在复杂荷载工况下, 这种方式难以满足结构对控制精度和灵敏度的要求, 严重制约了结构对外界环境变化的适应能力。针对上述问题, 本文提出一种新型双菱形撑杆自适应张弦梁结构 (DRABSS)。该新型撑杆由上、下双菱形主动撑杆构成, 上菱形主动撑杆用于提升结构控制灵敏度, 下菱形主动撑杆则着重提高结构控制精度。基于菱形放大机制, 本文建立了双菱形主动撑杆的几何位移和驱动力模型, 深入分析撑杆初始夹角对其控制功能的影响, 并推导了双菱形主动撑杆的设计公式, 同时验证了公式的准确性。此外, 为进一步验证 DRABSS 主动控制模型的精确性与控制算法的有效性, 本文分别构建了以结构位移、应力为目标的目标优化控制模型, 以及同时考虑结构位移和应力的多目标优化控制模型, 并开展了 DRABSS 在单目标和多目标下的主动控制数值模拟与试验研究。研究利用遗传算法 (GA) 求解不同荷载工况下结构的最优控制策略。试验与数值模拟结果显示, 经主动控制后, 结构位移和应力显著降低。在对称荷载工况下, 位移优化控制效果优于非对称荷载工况。相较于应力优化控制, 位移优化控制更易实现。当外部荷载越靠近两端支座, 应力控制难度显著增加。与单目标控制相比, 多目标控制可同时兼顾位移和应力两个关键因素, 能够有效避免结构出现局部过大变形或应力集中现象。试验与数值模拟结果高度吻合, 充分验证了 DRABSS 主动控制模型的精确性和控制策略的有效性。本文研究成果为 DRABSS 作为新型结构体系应用于结构主动控制领域奠定了理论与试验基础。

关键词: 自适应张弦梁结构; 菱形放大机制; 遗传算法; 多目标优化; 试验与数值模拟。

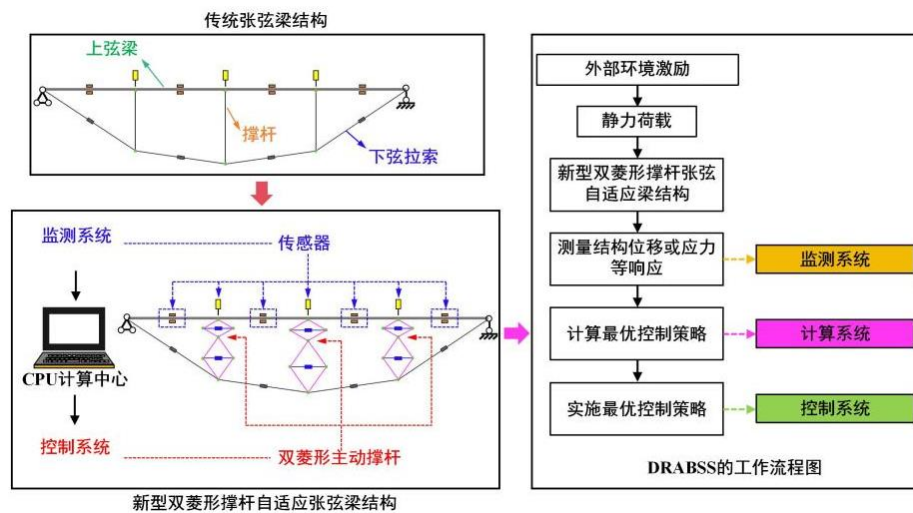


图 1 DRABSS 的主动控制概念图

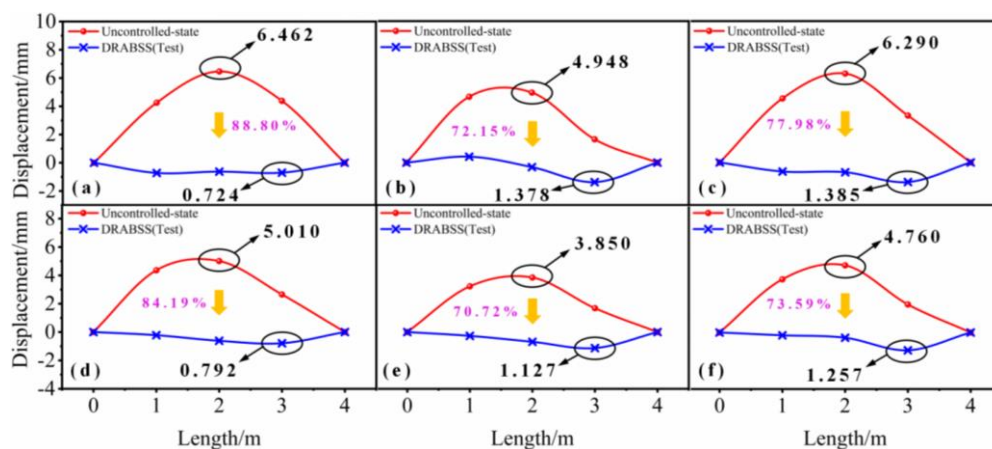


图 2 DRABSS 控制前后结构位移对比图（部分图）

表 1 不同控制目标下的 DRABSS 试验与数值模拟结果对比

控制目标	误差率	全跨	半跨	非对称_1	非对称_2	1/4 跨_1	1/4 跨_2
位移控制	$ D _E$	4.46%	-1.28%	-5.23%	2.13%	5.39%	5.31%
	$ S _E$	13.29%	-3.13%	-0.76%	5.86%	2.15%	13.94%
应力控制	$ D _E$	-4.73%	-2.86%	2.39%	3.64%	2.92%	11.76%
	$ S _E$	1.24%	-5.22%	10.82%	7.25%	-4.03%	4.18%
位移和应力控制	$ D _E$	4.70%	4.21%	2.38%	4.04%	6.83%	4.61%
	$ S _E$	2.62%	-6.02%	4.99%	-3.13%	7.00%	-4.01%

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院教授、博士生导师, 1981 年生, 江苏苏州人。主要从事智能空间结构、新型大跨空间结构体系和设计应用、张拉整体结构以及数字化设计方面的研究。



基于分子动力学模拟的纳米孔道内碳酸钙生长成核机制研究：基体与钙硅比的影响

王可睿¹，路兴海¹，于娇¹，王攀¹，侯东帅^{1,*}

1. 青岛理工大学，土木工程学院，山东青岛 266520

通讯作者邮箱：dshou@outlook.com

报告人：王可睿

摘 要：

水泥基材料中的多种组分都会与二氧化碳发生反应生成碳酸钙，但碳酸钙(CaCO_3)在混凝土内部的成核和生长机理尚不清楚。采用分子动力学模拟，从四种不同基体分析研究，发现碳酸钙更容易在水化硅酸钙(C-S-H)基体表面成核，进而探究在不同钙硅比的C-S-H影响下，碳酸钙的生长过程。通过分子模拟从微观角度研究碳酸钙在混凝土孔道内的形成过程和成核机制。

首先研究混凝土材料中不同组分对碳酸钙形成的影响，以水化硅酸钙、钙矾石、氢氧化钙和二氧化硅为基体建立了四个分子动力学模型，研究发现碳酸钙团簇在孔道溶液中主要依靠离子键成核生长，钙离子和碳酸盐离子以离子键的形式结合先形成较小的团簇，进而聚集生长成核，碳酸钙与基体界面处主要是通过钙氧离子键相连接，其中C-S-H基体界面处具有更多游离钙离子和羟基，能够为碳酸钙的形成提供更多的成核位点。水化硅酸钙是水泥基材料的主要水化产物之一，我们进一步探究碳酸钙在不同钙硅比的C-S-H受限孔道内的成核过程，模型图如图1所示， Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 在C-S-H纳米孔中的团簇行为可以分为三个阶段：快速团簇阶段、缓慢团簇阶段和稳定团簇阶段，如图2所示。 CaCO_3 团簇的锚定机制由离子键和氢键决定，大团簇通过离子键优先吸附在C-S-H界面。钙硅比1.5的C-S-H可以通过离子键和氢键为 CaCO_3 的形成提供更多的成核位点，更有利于团簇的生长。C-S-H基质中的 Ca^{2+} 主要以两种方式影响碳酸根离子的吸附行为：一方面， Ca^{2+} 溶解并直接与溶液中的 CO_3^{2-} 形成团簇，另一方面， Ca^{2+} 稳定地吸附在C-S-H表面，这有利于作为吸引更多 CaCO_3 团簇的吸附位点。大的团簇允许 CO_3^{2-} 通过离子键而不是氢键优先吸附在C-S-H表面上。该研究有助于了解水泥基材料中 CaCO_3 的早期形成过程，为碳化养护技术的发展奠定理论基础。

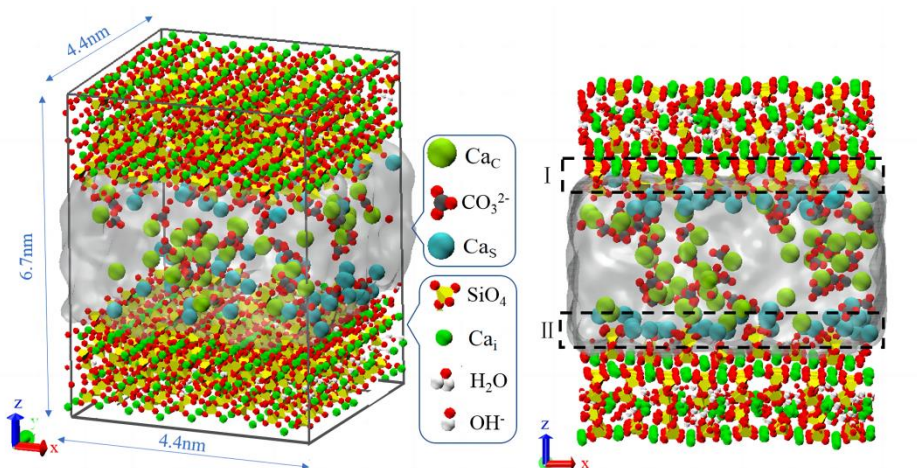


图 1 含有碳酸钙的纳米孔道示意图

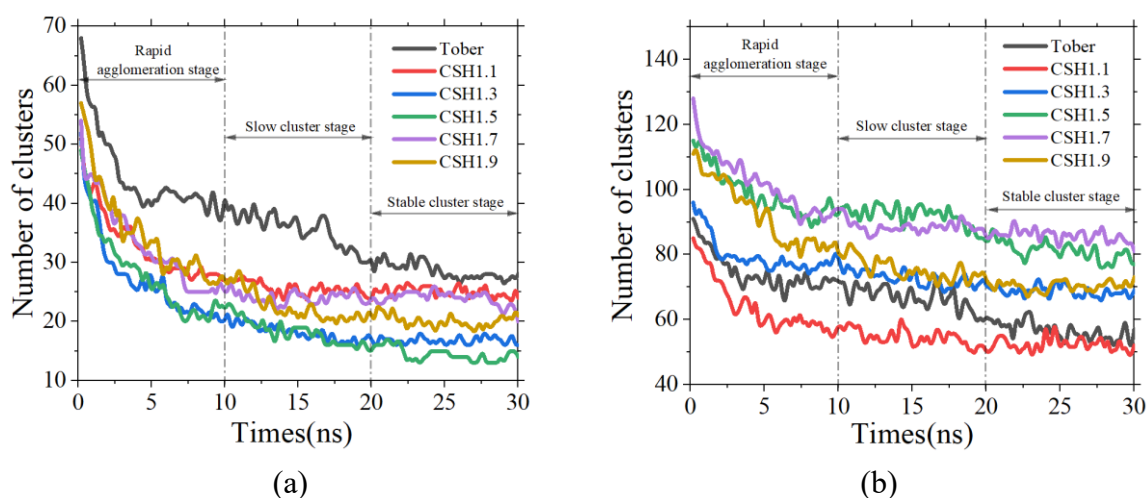


图 2 不同钙硅比模型中团簇数量的变化曲线 (a) 钙离子与碳酸根形成的团簇 $\text{Ca}_c\text{-O}_c$ (b) 基体表面钙与碳酸根形成的团簇 $\text{Ca}_s\text{-O}_c$

从分子尺度揭示 C-S-H 钙硅比对水泥基材料碳化的影响, 为开发低碳水泥或碳化养护技术提供理论支撑, 对提升混凝土耐久性和推动碳中和目标具有重要意义。

关键词: 分子动力学模拟; 碳酸钙; 生长成核过程; 水化硅酸钙; 纳米孔道

通讯作者简介: 青岛理工大学土木工程学院院长、二级教授、博士生导师, 国家级青年人才, 山东省青年泰山学者。主要从事混凝土耐久性、固废建材化、材料计算理论方面的研究。近三年发表 SCI 论文 60 余篇, 引用 3000 余次。

分子模拟辅助混凝土材料设计

王攀^{1,*}, 侯东帅¹

1. 青岛理工大学, 土木工程学院, 山东青岛 266520

通讯作者邮箱: wangpan@qut.edu.cn

报告人: 王攀

摘 要:

混凝土作为全球用量最大的人造建筑材料, 其性能优化与耐久性提升对现代基础设施可持续发展至关重要。传统混凝土研究多基于宏观实验和经验模型, 难以深入揭示材料在原子尺度下的反应机制、界面行为及长期劣化过程。随着计算材料科学的突破, 分子模拟技术为理解混凝土微观结构与宏观性能的关联提供了全新视角。本报告以“分子模拟辅助混凝土材料设计”为题, 通过分子尺度模拟与机器学习方法的深度融合, 建立“微观机制-介观结构-宏观性能”的跨尺度关联模型, 为高性能混凝土设计提供全新范式。重点展示: 分子模拟指导材料增韧设计、分子模拟指导高效减水剂设计、分子模拟指导钢筋钝化膜设计以及机器学习与分子模拟结合相关研究。

关键词:

分子模拟; 混凝土; 韧性; 机器学习

通讯作者简介: 青岛理工大学土木工程学院教授、博士生导师。

水泥基材料低温特性的分子动力学模拟研究

柴松岳¹, 王攀¹, 侯东帅^{1,*}

1. 青岛理工大学, 土木工程学院, 山东青岛 266520

通讯作者邮箱: dshou@outlook.com

报告人: 柴松岳

摘 要:

作为全球使用最广泛的建筑工程材料, 水泥基材料凭借其成本效益高、强度优异、制备工艺简单等特点, 被广泛应用于房屋建筑、交通基础设施及地下工程等领域。然而, 在寒冷地区, 冻融循环导致的耐久性劣化问题尤为突出, 其结构损伤机理与防护措施已成为学界关注焦点。作为水泥材料最主要的水化产物, 水化硅酸钙 (C-S-H) 决定了材料的宏观特性, 对大部分物理和化学性质起到决定作用, 是普通硅酸盐水泥中粘结力的主要来源。C-S-H 作为水泥基材料的最小组成单元以及强度来源, 从纳观尺度研究其相关低温行为与特性, 有助于自下而上对材料设计提供指导。

自 Powers 提出静水压理论至今, 混凝土低温性能研究已历时 80 载。此外, 现有研究已阐明引气剂、矿物掺合料等材料的抗冻改善机理。然而, 有关使用分子动力学 (Molecular Dynamics, MD) 模拟技术研究 C-S-H 界面溶液及凝胶孔隙的低温响应机制的报告很少。基体成分对冻结过程的调控机理仍待揭示。鉴于此, 团队采用 MD 模拟技术开展了广泛研究, 力求从纳观视角研究饱和凝胶孔体系和水化硅酸钙表面溶液冻结过程, 进一步揭示水泥基材料复杂低温机理及盐离子作用机理, 为从分子角度指导寒区混凝土材料的设计与施工提供理论依据。本报告主要包括以下几部分:

(1) 为明晰基体成分组成的差异对表面溶液冻结行为的影响, 我们通过 MD 模拟研究了纯水溶液在不同钙硅比 (C/S) 的 C-S-H 基体表面处的冻结行为。模拟发现, 当冰晶冻结峰靠近 C-S-H 表面时, C-S-H 基体对水分子的扰动与约束增强, 通过氢键和离子键相互作用阻止了界面处水分子进一步参与结晶, 进而构成了未冻水膜结构。随着钙硅比的增加, 硅氧链缩短导致表面缺陷增多, 对水分子的约束能力减弱, 未冻水膜厚度由 9.63 Å (C/S=1.1) 减至 7.88 Å (C/S=1.7)。

(2) 低温环境下, 水泥基材料中的孔隙水发生冻结, 冰晶从大孔隙向小孔隙扩展。在此过程中, 水泥基材料中的大多数孔隙会被冰填充, 并在低温下展现出良好的机械性能。我们的分子动力学模拟揭示了孔径和温度对凝胶孔内未冻水膜结构的明显影响, 从氢键等角度阐明了冻结凝胶孔结构的力学性能及其破坏机理, 追踪了结构的破坏过程。

(3) 盐冻侵蚀是影响混凝土结构耐久性的关键问题, 为明晰胶凝材料凝胶孔隙中离子溶液的冻结行为和微观机制, 分别建立了含水和 NaCl、Na₂SO₄ 溶液的饱和 C-S-H 凝胶

孔隙模型。研究了孔内离子溶液在低温下的冻结行为。结果发现 Na^+ 和 Cl^- 延缓了孔隙水的冻结，而 SO_4^{2-} 在冻结锋附近积累，显著阻碍了冻结进程。

关键词：分子动力学模拟；冻融破坏；水化硅酸钙；低温特性；混凝土

通讯作者简介：青岛理工大学土木工程学院院长、二级教授、博士生导师，国家级青年人才，山东省青年泰山学者。主要从事混凝土耐久性、固废建材化、材料计算理论方面的研究。近三年发表 SCI 论文 60 余篇，引用 3000 余次。

带搭接柱与内嵌型钢的环形空腹内筒结构的静载试验与多尺度仿真分析

许浩铭¹, 罗尧治^{1,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

通讯作者邮箱: luoyz@zju.edu.cn

报告人: 许浩铭

摘 要:

本研究以一个实际工程项目为基础,探讨了带搭接传力柱和内嵌型钢的弯曲空心内筒结构(Curved Hollow Inner Tube Structure with Lapping Column and Embedded Steel, 简称CHLC)的静载承载性能。同时,采用多尺度仿真技术分析了结构在加载过程中的破坏行为。尽管近年来取得了一定进展,但由于缺乏适用的加载方法,关于带搭接传力柱钢筋混凝土结构静载性能的研究仍然较为有限。目前已有的研究^[1-3]多集中于传力节点的有限元建模以及影响节点承载力的关键设计参数,而较少对整体结构进行系统分析。为弥补这一研究空白,本文以1:8的比例进行了CHLC的现场静载试验,旨在探讨结构在设计荷载作用下的应力-位移响应。此外,研究还通过多尺度仿真识别了结构在极限荷载下的破坏模式,并将仿真结果与现场试验结果进行对比,以验证其可靠性。试验装置包括一个锚固在基坑内的环形地梁,沿梁横向布置九个多点垂直加载框架用于静载加载。多尺度仿真采用梁单元和壳单元进行整体分析,同时在破坏区域采用实体单元进行精细建模,从而实现了结构全过程的综合仿真,有效验证了现场试验结果的可靠性。研究结果明确指出了设计荷载作用下结构的最大应变区域及极限状态下的初始破坏位置。总体而言,多尺度仿真结果与实测数据高度一致,不仅验证了试验的准确性,也为带搭接传力柱结构的模拟提供了可靠的方法依据。

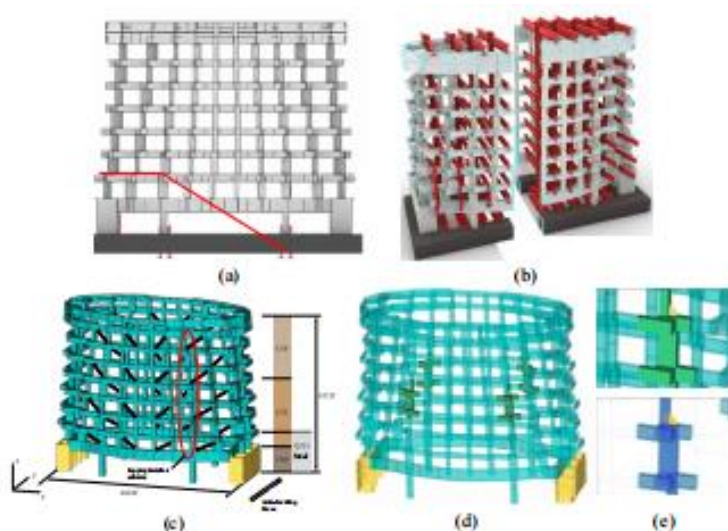


图1 CHLC 模型、加载装置和多尺度仿真模型

关键词: 环形空腹内筒结构, 搭接柱节点, 静载试验, 多尺度仿真

通讯作者简介: 罗尧治 浙江大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事空间结构与钢结构体系、理论和设计, 结构复杂行为分析与软件平台, 结构健康监测, 基础设施智慧与韧性以及先进结构设计与智造等方面的研究。



基于改进 Jaya 算法和 DREAM 的变分贝叶斯学习的输电塔结构损伤识别

林昭生¹, 胡琴^{1,*}

1. 华中科技大学, 土木与水利工程学院, 湖北武汉 430074

通讯作者邮箱: husthuqin@hust.edu.cn

报告人: 林昭生

摘 要:

针对具有大量不确定性参数的复杂空间输电塔结构, 其模型修正易呈现局部可识别甚至不可识别的情形, 同时面临损伤识别精度不足以及后验分布计算困难等挑战。本文提出一种结合变分贝叶斯推断、改进 Jaya 算法和多链差分自适应进化算法 (multi-chain differential evolution adaptive algorithm, DREAM) 的稀疏贝叶斯学习方法。该方法构建了基于 DREAM 多链采样的变分贝叶斯推断求解框架, 突破了传统单链采样算法对建议分布的过度依赖, 无论后验分布是否满足标准形式, 均可实现高精度的后验概率分布计算。同时改进 Jaya 算法的进化策略并引入自适应混沌扰动机制, 有效解决了原始 Jaya 算法易陷入局部最优的缺陷, 从而平衡结构损伤识别精度与效率的需求。

基于输电塔缩尺模型实验, 采用两阶段损伤识别策略验证方法有效性。第一阶段无损模型修正结果如表 1 所示, 表中数据显示: 修正后固有频率平均误差从初始模型的 36.70% 降至 3.05%; MAC 平均值从 0.90 提升至 0.98。该修正后的有限元模型可为第二阶段斜支撑损伤识别提供可靠的基准。在第二阶段设置了 Case 1 和 Case 2 两类典型损伤工况。本研究开展四组算法进行对比研究, 其中有基于改进 Jaya 算法和 DREAM 多链采样的变分贝叶斯方法 (简称为 EJaya+DREAM), 基于改进 Jaya 算法和延迟拒绝自适应单链采样算法 (delayed rejection adaptive Metropolis, DRAM) 的变分贝叶斯方法 (简称为 EJaya+DRAM), 基于原始 Jaya 算法和 DREAM 多链采样的变分贝叶斯方法 (简称为 Jaya+DREAM), 以及基于改进 Jaya 算法和差分进化 (differential evolution, DE) 多链采样的变分贝叶斯方法 (简称为 EJaya+DEMC)。表 2 展示了各算法计算得到的最可能值 (most probable values, MPVs) 和识别误差。结果表明, EJaya+DREAM 算法在所有损伤单元中的平均识别误差仅为 0.65%, 较 EJaya+DRAM (2.30%)、Jaya+DREAM (2.85%) 及 EJaya+DEMC (1.45%) 显著降低, 验证了所提方法在复杂损伤场景下的精度优势。该两阶段损伤识别策略的结果表明, 通过迭代计算模型参数与超参数, 所提方法可精准识别结构损伤位置与程度; 同时, 还可利用后验分布评估参数的不确定性水平。

表 1 无损工况测量和模型修正前后计算的频率和 MAC 值

	阶数	1	2	3	4	5	6	平均值
	测量值 (Hz)	35.20	40.45	58.77	119.92	125.61	207.12	
修正前	计算值 (Hz)	47.53	55.46	94.49	158.24	172.35	244.67	--
	误差 (%)	35.03	37.11	60.78	31.95	37.21	18.13	36.70
	MAC	0.99	0.98	0.91	0.91	0.86	0.76	0.90
	计算值 (Hz)	36.82	39.92	61.60	121.55	129.01	199.94	--
修正后	误差 (%)	4.60	1.31	4.82	1.36	2.71	3.47	3.05
	MAC	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.96	0.98

表 2 两种损伤工况在不同算法下的识别结果

损伤工况	单元 编号	损伤 程度	EJaya+DREAM		EJaya+DRAM		Jaya+DREAM		EJaya+DEMC	
			MPVs	误差 (%)	MPVs	误差 (%)	MPVs	误差 (%)	MPVs	误差 (%)
Case 1	8	1.000	0.999	0.100	0.997	0.300	0.996	0.400	0.998	0.200
	40	1.000	0.991	0.900	1.000	0.000	0.990	1.000	0.993	0.700
Case 2	25	1.000	0.993	0.700	0.990	1.000	0.987	1.300	0.992	0.800
	26	1.000	0.991	0.900	0.921	7.900	0.913	8.700	0.959	4.100
平均值	--	--	0.994	0.650	0.977	2.300	0.972	2.850	0.986	1.450

关键词: 损伤识别; 变分贝叶斯推断; 多链差分自适应进化算法; 改进 Jaya 算法; 输电塔。

通讯作者简介: 华中科技大学土木与水利工程学院建筑工程系副教授。主要从事土木工程结构健康监测、损伤诊断和安全评估方法研究。

基于质量比的主次结构共同作用振动台试验研究

黄宝锋¹，张誉心¹，李文婷¹

1. 上海师范大学建筑工程学院

摘 要：

为研究地震荷载下主结构与次结构共同作用影响，通过缩尺钢框架振动台试验，从动力特性、地震加速度反应、地震应力反应角度，讨论了质量比、次结构放置楼层对主次结构耦合体系地震反应的影响。结果表明，质量比对主次结构耦合体系的地震响应有明显影响，随着质量比的增加，结构加速度反应的高阶振型占比增大，但质量比对结构阻尼比的影响不明显。主次耦合体系地震反应与输入地震波关系较大，一般情况下，次结构所在楼层的加速度反应会明显增大。若次结构存在使结构自振周期接近地震卓越周期，则主结构地震反应明显增大。

简支梁桥在驳船撞击下的动力行为及模型简化策略

陈天黎^{1,2}, 罗尧治^{1,2}, 沈雁彬^{1,2,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 浙江大学长三角智慧绿洲创新中心, 未来城市(智慧城市)实验室, 浙江嘉兴 314100

通讯作者邮箱: ybshen@zju.edu.cn

报告人: 陈天黎

摘 要:

桥梁结构在其服役期内可能受到偶然性船舶撞击的威胁。针对简支梁桥在驳船撞击作用下的动态响应和损伤破坏, 开展了梁桥下部结构缩比模型试验和原型船-桥碰撞数值仿真研究。首先, 分别进行了 1:5 缩尺驳船船艏和刚性体侧向撞击双柱式桥墩模型试验, 获取了撞击力时程、船艏压溃深度和桥墩的动力行为。基于 LS-DYNA 有限元分析软件, 开展试验的数值仿真, 通过对比预测结果与试验数据, 验证了采用的数值模拟方法、材料模型和参数的适用性。其次, 对江苏省某原型梁桥在驳船撞击下的动力行为进行了分析, 研究了驳船-梁桥撞击过程, 驳船质量、撞击速度和角度对梁桥动力行为的影响。进一步, 基于太阳埠大桥船撞倒塌事故, 建立了耦合的驳船-太阳埠大桥碰撞精细化有限元模型, 对该事故进行复现, 并讨论了船撞期间梁桥的动力行为。为提高计算效率, 建立了四种简化的梁桥有限元模型, 以及驳船侧撞和正撞时非耦合的撞击力时程模拟方法。最后, 结合驳船撞击下优化的梁桥有限元模型和非耦合的撞击力时程模拟方法, 提出了梁桥在驳船侧撞和正撞时的模型简化策略, 可为原型船-桥碰撞数值模拟分析提供参考。

关键词: 船-桥碰撞; 缩尺试验; 数值模拟; 动力行为; 模型简化

通讯作者简介: 浙江大学建筑工程学院副教授、博士生导师。主要从事大跨空间结构设计、复核、施工分析、检测评估、健康监测等方向的研究。



基于三维点云数据与物理模型融合的斜拉索索力识别方法

李尧¹, 朱彦洁¹, 熊文^{1,*}

1. 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: wxiong12@hotmail.com

报告人: 李尧

摘 要:

斜拉索是斜拉桥的重要组成部分, 准确的索力识别对于桥梁结构健康评估至关重要。然而, 传统的索力测量方法存在适用性有限、效率低、影响准确性的因素众多等缺点。为了解决这一问题, 本文将三维点云数据的几何保真度与有限元模型的强大分析能力相结合, 提出了一种数据-模型融合的索力识别方法。首先利用三维激光扫描技术采集目标斜拉索的三维点云数据, 实现毫米级精度的斜拉索索形识别。然后, 根据斜拉索的基本设计信息, 结合斜拉索的抗弯刚度和边界条件, 建立斜拉索的有限元模型。最后, 在有限元模型中通过施加张力调整斜拉索的索形, 使其与基于三维点云数据确定的索形一致, 并确定索力。该方法在中国某长江大桥上进行了实桥验证, 将识别的索力与液压千斤顶测量的索力进行了比较, 结果显示最大误差为 3.4%, 证实了该方法用于自主、非接触式索力识别的可靠性和有效性。此外, 本文对索形测量误差、抗弯刚度和边界条件进行了不确定性分析。分析表明, 由于索形测量误差导致的索力识别误差在 3%以内。斜拉索抗弯刚度引起的索力识别误差在 10%, 特别是倾斜角小的短索受影响较大。边界条件对索力识别的影响很小, 误差小于 2%。因此, 本文所提出的数据-模型融合的斜拉索索力识别方法有望成为斜拉桥检测和维

关键词: 三维点云数据; 索形识别; 索力识别; 有限元模型; 数据-模型融合

通讯作者简介: 东南大学交通学院桥梁工程系教授、博士生导师。主要从事桥梁抗水与冲刷、桥梁智能建造与运维与数字桥梁等方面的研究。

基于无人机视觉扫描振动测试的桥梁结构损伤识别

李攀杰^{1,*}, 胡梦豪¹, 闫帅辉¹

1. 郑州大学, 土木工程学院, 河南郑州 450001

通讯作者邮箱: lipanjie@zzu.edu.cn

报告人: 李攀杰

摘要:

精确测定桥梁动力参数是桥梁监测养护规范的明确要求。但现有技术难以对量大面广桥梁快速测定动力参数, 且测点稀疏致振型分辨率低, 极大增加了微小病害发现难度。研究提出用无人机(UAV)视觉抵近桥梁进行高精度位移、高密度测点的分块扫描振动监测, 以此获取动力参数并用于损伤识别。主要包括三个方面: 一是针对无人机自运动及相机参数难标定问题, 提出"测点自参考"与"相机无标定"的动力参数识别理论体系, 建立伪、真振型片段的数学关系递推还原整体高密度测点振型; 二是建立振型测量误差和离散化误差与损伤识别精度的定量关系模型, 提出最优测点间隔计算方法为测点设计提供依据; 三是针对损伤指标众多却缺乏决策机制问题, 通过量化损伤与不确定性对损伤指标的影响, 提出损伤识别结果可靠度分析理论, 以损伤识别能力曲线为依据建立损伤判别机制。研究有三方面增益: 桥梁动力参数快速测定、高密度测点振型提高损伤分辨率、建立损伤判别的决策机制。

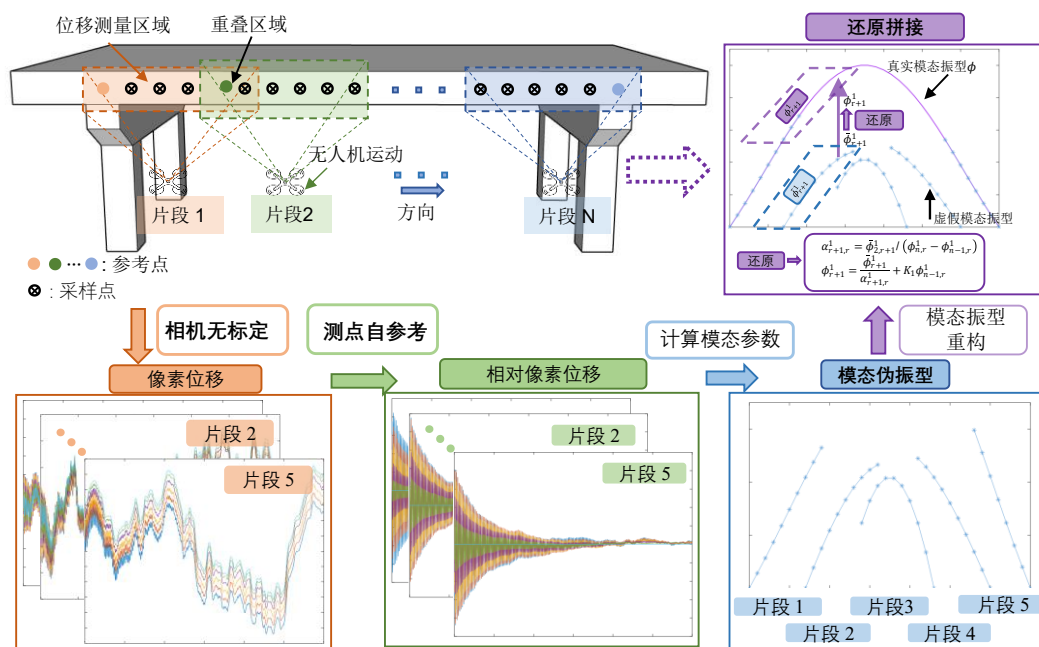


图1 基于无人机视觉扫描振动测试的动力参数识别

关键词: 无人机; 计算机视觉; 损伤识别; 自运动; 动力参数

通讯作者简介: 郑州大学土木工程学院讲师、硕士生导师。主持省部级项目2项, 主持参与横向课题多项, 获河南省科技进步二等奖一项。主要研究方向: 桥梁快速振动测试, 结构参数识别不确定性量化及损伤识别研究。已发表SCI论文21篇, 授权国家发明专利5项。

基于振动的桥梁拉索疲劳评估与损伤检测

徐斌^{1,*}, 吴自饶¹

1. 郑州大学, 土木工程学院, 河南郑州 450001

通讯作者邮箱: xubin_tmxy@zzu.edu.cn

报告人: 徐斌

摘 要:

索力监测与评估是在役索承式桥梁结构健康监测的重要组成部分。振动监测方法因其经济、方便等优点, 被广泛应用于拉索监测中, 以评价拉索的安全性。本文研究了振动监测数据在拉索疲劳评估和损伤检测中的应用。针对拉索疲劳评估, 提出了一种全场域实时监测和智能感知技术方案。这意味着可以评估整个拉索的疲劳状态。首先, 提出了一种基于幅值和相位估计 (BRAPES) 的时变索力识别方法, 以实时获取疲劳应力。此外, 提出了一种基于振型叠加原理的全长位移反演方法, 以获得拉索在全场域的疲劳应力时程。将这两种方法结合起来, 采用 Miner 线性疲劳损伤累积理论来评价拉索的疲劳损伤状态。该方案可以同时考虑拉索的疲劳应力和力学性能随时间的变化。针对拉索损伤检测问题, 提出了一种考虑交通车辆和温度影响的拉索刚度折减识别方法。该方法利用人工智能方法去除交通车辆和温度对振动监测数据的影响。然后, 应用基于拉索横向动刚度理论的基于振动的拉索抗弯刚度识别方法, 检测拉索刚度的变化的变化。最后, 确定了拉索的惯性矩的损伤准则, 用于拉索的损伤评估。

关键词: 斜拉索; 动刚度; 时变频率; 疲劳评估; 损伤检测

通讯作者简介: 徐斌, 郑州大学土木工程学院讲师、硕士生导师。主要研究方向为复杂缆索结构动力学分析、桥梁缆索智慧感知、结构健康监测与全寿命周期管理。

考虑温度影响的板式无砟轨道 CA 砂浆层脱空损伤识别

管运豪¹, 胡琴^{1,*}

1. 华中科技大学, 土木与水利工程学院, 湖北武汉 430074

通讯作者邮箱: husthuqin@hust.edu.cn

报告人: 管运豪

摘 要:

水泥乳化沥青 (cement-asphalt, CA) 砂浆层是板式无砟轨道结构的关键层, 在服役期间难以避免出现损伤。及时准确地识别出损伤的位置和严重程度, 对于运营部门制定维修计划进而确保高速列车的安全运营至关重要。CA 砂浆具有较强的温度敏感性, 环境温度变化引起 CA 砂浆层力学性能的改变可能会导致砂浆层小损伤被掩盖。为了减少环境温度变化对 CA 砂浆层损伤识别结果准确性造成的干扰, 该研究提出在使用基于马尔科夫链蒙特卡洛贝叶斯模型修正技术识别 CA 砂浆层脱空损伤时, 考虑砂浆层的温度影响。通过实验验证, 对所提方法的可行性和适用性进行了深入探究, 为高速铁路板式无砟轨道的损伤检测提供了理论基础。首先基于单轴压缩蠕变试验获取 CA 砂浆粘弹性参数, 并在三维有限元模型中引入相应粘弹性本构。随后构建实验室缩尺模型, 并对 CA 砂浆层进行为期一年的温度监测, 基于激励锤实验验证所提方法的可行性与适用性。通过核密度估计和蒙特卡罗样本进行后验概率密度函数 (posterior density function, PDF) 估算, 同时计算出不确定模型参数并量化其不确定性。

基于实验室模型中 CA 砂浆层所监测到的温度和激励锤实验采集的实测加速度响应数据集, 考虑 CA 砂浆层的温度影响, 采用本文所提方法对 CA 砂浆层脱空损伤进行识别, 结果汇总如表所示。三种不同温度工况中, CA 砂浆层预先设置的损伤区域①位置均能被准确识别, 并且预设损伤区域的脱空程度预估值为 20.33%。区域③因二次填充不均匀而表现出的轻微损伤也与实际模拟结果一致。同时, 在三种温度工况下, 各不确定模型参数的样本均值均非常接近, 说明在脱空损伤检测中考虑温度影响是可行且有效的, 并且对于三种温度工况, 参数的平均变异系数分别为 23.21%、24.60%和 22.50%。不同温度下脱空损伤检测不确定性水平的高度一致性表明, 所提方法能够有效地处理温度变化引起的不确定性。基于收敛至重要性区域的不确定参数样本, 可利用核密度估计分别获得各温度工况下 CA 砂浆层模型参数的后验 PDF, 如图 1 示, 可明显观察到其均近似为高斯分布。三种温度工况下各参数的后验 PDF 趋势几乎一致, 尤其是 θ_1 的分布极为相似, 这进一步验证了所提方法在 CA 砂浆层脱空损伤识别中考虑温度影响时具有良好的鲁棒性。



表 1 基于不同温度工况下的 CA 砂浆层脱空损伤识别结果

温度	--	θ_{GD}	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_B	平均值
19.8°C	样本均值	1.11	0.80	0.98	0.88	1.02	2.00	/
	变异系数(%)	10.20	32.77	26.29	31.03	25.48	13.47	23.21
7.3°C	样本均值	--	0.80	1.02	0.88	1.10	--	/
	变异系数(%)	--	32.64	27.16	28.66	9.92	--	24.60
26.9°C	样本均值	--	0.79	1.03	0.89	1.09	--	/
	变异系数(%)	--	34.12	22.34	23.51	10.02	--	22.50

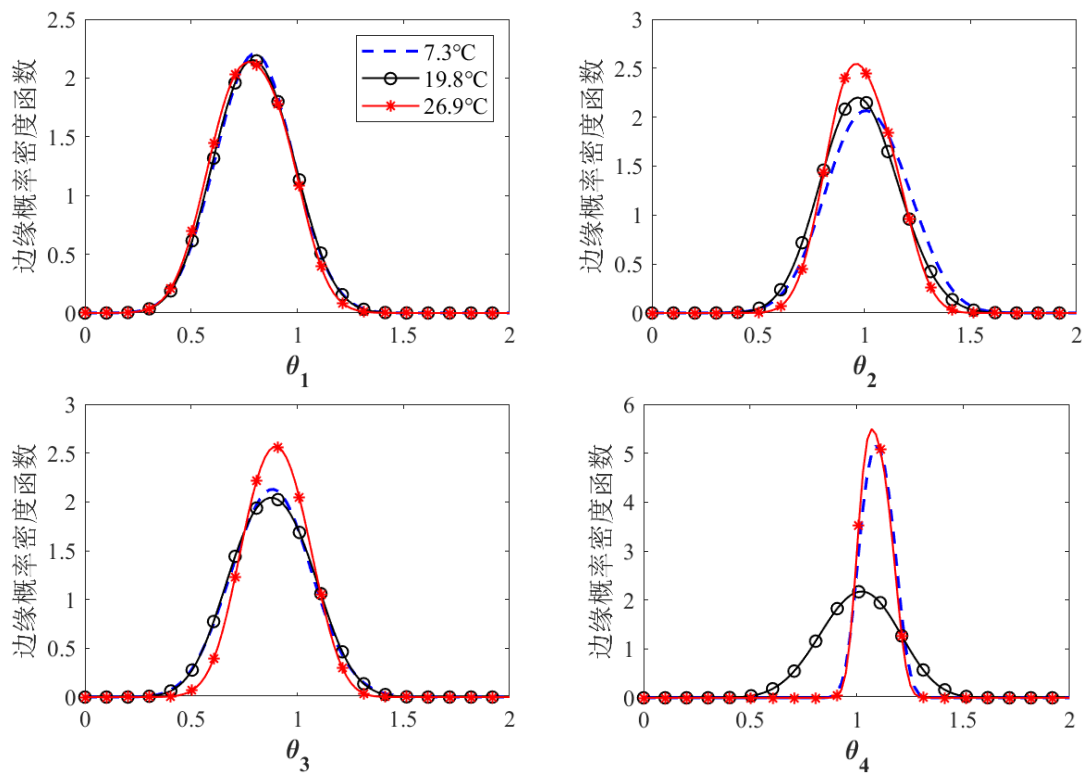


图 1 基于不同温度工况下不确定参数后验概率密度函数分布图

关键词：损伤识别；环境温度；贝叶斯模型修正；马尔科夫链蒙特卡洛；无砟轨道。

通讯作者简介：华中科技大学土木与水利工程学院建筑工程系副教授。主要从事土木工程结构健康监测、损伤诊断和安全评估方法研究。

桥梁水下声呐智检

朱彦洁¹, 熊文^{1,*}, 张帅辉¹, 严靖¹, 黄泽林¹

1. 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: wxiong12@hotmail.com

报告人: 朱彦洁

摘 要:

由于复杂的水下环境, 依赖视觉和人工探摸的常规桥梁水下基础检测手段效果受限。相比之下, 基于声学原理的三维声呐凭借其获取目标物的完整三维形态并实时呈像的优势, 为桥梁水下检测提供了数字化和更为有效的解决手段。然而, 目前桥梁水下声呐检测的分析手段仍然依赖于技术人员的主观经验和人工操作, 智能化和自动化程度低。因此, 提出基于声呐点云的桥梁水下智能化检测框架。首先, 采用深度学习方法对声呐点云去噪、补全以提高数据质量; 针对由于复杂环境导致的声呐点云噪声的问题, 提出了基于深度学习的桥梁水下声呐点云去噪方法, 基于流型学习构建自监督网络结构, 将点云降至低维流型进行去噪, 在自建声呐去噪数据集上测试, 相比先进的竞争去噪算法, 倒角距离平均减少 15.50%, 豪斯多夫距离平均减少 14.06%, 取得竞争性优势, 可以有效去除声呐点云噪声; 针对由于扫描侧路径限制、群桩遮蔽等原因导致的声呐点云缺失问题, 提出了一种基于分形原理的声呐点云补全网络框架, 采用对抗生成式的网络结构, 并提取不同分辨率的点云特征, 逐步重建补全点云, 在自建桩基补全数据集上测试, 相比先进的竞争补全算法, 倒角距离平均减少 89.44%, 豪斯多夫距离减少了 50.1%, 取得竞争性优势, 可以有效补全桩基缺失形态。其次, 针对基于声呐的冲刷形态特征提取自动化程度低且缺乏表面形态特征的问题, 提出了一种无监督识别和精确重建桥梁局部冲刷坑形态的算法, 使用局部三元值模式对冲刷坑地形建模进行点云二值化, 基于蜣螂优化算法确定算法中待定参数, 并结合识别结果提出自适应权重的冲刷坑地形点云重建方法。在模拟冲刷坑数据上识别达到 0.9017 的 F1 得分, 重建精度指标 RMSE 为 3.70×10^{-6} , 并在芜湖长江大桥检测中进行了工程验证, 实现对跨越不同深浅水区的桥梁局部冲刷坑形态的快速提取和精确重建。同时, 针对桥梁水下桩基病害检测精细化和数字化的挑战, 基于最小割方法和 IMDA 对桩基形态进行精细提取, 在实测数据中桩基提取指标召回率和 F1 分别达到 0.97 和 0.84。然后提出了两阶段桩基病害识别方法, 先基于迭代的中位数绝对偏差初步拟合并判断桩基缺陷位置, 进一步利用密度特征使用 DBSCAN 精细识别桩基点云病害区域, 病害识别指标最大 GTOR 和 IOU 分别可达 95.8% 和 85.9%; 针对桥梁水下薄壁结构的空洞病害检测的困难, 提出了钢结构腐蚀空洞的病害自动化识别方法, 采用基于几何特征的方法对钢套箱点云进行去噪进而采用自适应 Alpha Shape 算法提取腐蚀空洞区域, 并用德劳内三角化算法计算评估出结构的整体空洞损伤率, 病害区域识别准确率达到 91%。最后, 为了进一步验证所提智能检测框架的准确性, 开展

了桩基病害识别实验，自制剥落、开裂、露筋等病害构件，试件沉水后实地测量验证了所提方法的精度；为了进一步验证所提智能检测框架的工程可行性，在泰州、芜湖、苏通、崇启长江大桥的检测中，应用了所提智能检测框架，实现了对水下基础结构和桥梁局部冲刷坑形态的智能化分析，验证了工程可行性。

关键词：桥梁水下检测；三维声呐点云；数字化检测；人工智能

通讯作者简介：东南大学交通学院桥梁工程系教授、博士生导师。主要从事桥梁抗水与冲刷、桥梁智能建造与运维与数字桥梁等方面的研究。

基于整体动力响应的预应力索杆结构全局索力识别

陈耀^{1,*}, 周浩东¹, 何若琪¹, 冯健¹

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 330029

通讯作者邮箱: chenyao@seu.edu.cn

报告人: 陈耀

摘要:

预应力索杆结构轻质高效, 广泛应用于大型公共建筑, 其稳定性主要依赖预应力提供的几何刚度。通过索力识别可确定预应力分布情况, 进而推断结构刚度特征, 评估结构状态。传统索力直测方法因成本高昂导致测试数据有限, 难以全面评估结构状态。动力测试为索力识别提供了新思路, 但预应力索杆结构的周期对称特性易引发模态跃迁与局部化, 降低识别精度。为此, 本文提出一种基于结构整体动力响应的索力识别方法, 构建结构监测信息与索力参数的解析关系, 建立融合反馈驱动误差优化机制的鲁棒稀疏贝叶斯学习全局索力识别框架, 识别模型如图 1 所示。在传统的跨模态应变能方法中考虑结构几何刚度的影响, 通过建立模态参数与结构全局索力之间的映射, 构建考虑几何非线性的索力识别框架, 扩大可用模态的范围, 并有效缓解索力损失前后模态之间不匹配的影响。将测量噪声建模为混合高斯分布以更精准描述评估不确定性, 并通过拉普拉斯先验嵌入稀疏损伤约束, 增强反演稳定性。基于灵敏度分析, 构建模态残差与参数增量的映射关系, 实现结构模型迭代更新和反演结果动态修正, 提高方法对大跨空间索杆结构的适用性。对比所提方法和已有方法进行索力识别时的性能差异, 分别讨论噪声分布和目标模态对识别结果精度和稳定性的影响。数值模拟结果表明, 所提方法在多种噪声水平下均表现出较高的精度与鲁棒性, 突显了该方法在复杂预应力结构实际工程中的适用潜力, 为实现索杆结构力学性能的高效精准评估提供了有效技术路径。

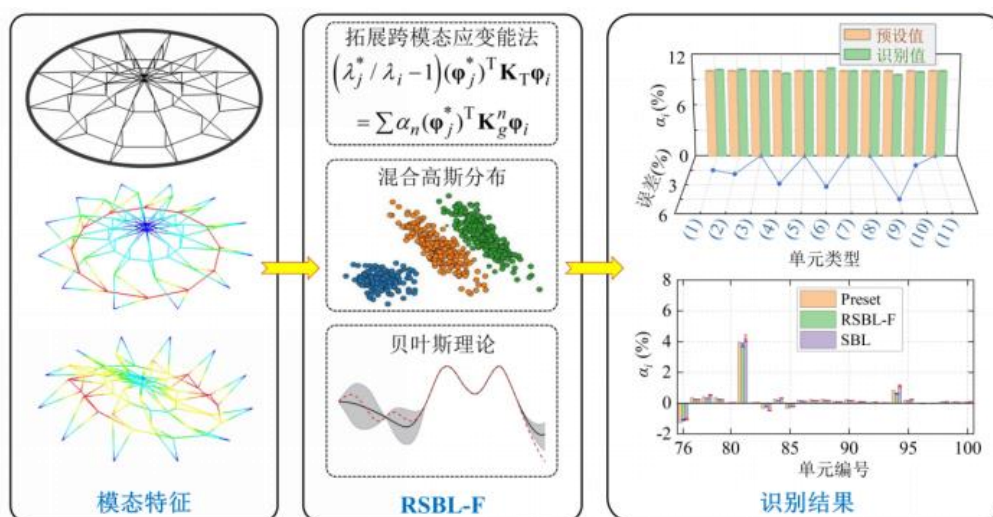


图 2-1 预应力索杆结构全局索力识别模型

关键词: 预应力索杆结构, 索力识别, 稀疏贝叶斯学习, 不确定性量化

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院青年首席教授、博士生导师。主要从事预应力索杆体系、折纸结构、复杂结构设计与分析等方向的研究工作。

大跨度连续刚构桥温致动力特性演化机理分析与服役性能评估

黄民水¹

1. 武汉工程大学，土木工程与建筑学院，湖北武汉

通讯作者邮箱：10286887@qq.com

报告人：黄民水

摘 要：

大跨度连续刚构桥长期暴露于自然环境中，受太阳辐射、桥位风场扰动以及四季变化等多因素的影响，结构内部逐渐形成不均匀的温度分布。非均匀温度场可能使桥梁结构的动力特性向着不利的模式转变，甚至引发桥梁结构的破坏。然而现阶段，大跨度连续刚构桥主梁的温度分布模式尚不明确，温度对该桥型动力特性影响的机理研究缺乏理论性和系统性，温度作用下该桥型的服役性能评估研究更是鲜有报道。因此，本研究基于热力学、桥梁结构动力学、数值模拟、概率方法、深度学习算法以及健康监测技术，依托实际工程实现了大跨度连续刚构桥三维日照温度场的精细仿真；进行了温度对大跨度连续刚构桥动力特性影响的量化研究，探究了弹性模量、主梁纵向变形、约束刚度变化、支座结冰、温度内力以及综合影响等诸多因素引起的结构动力特性变化程度，基于量化结果总结归纳了温度作用对大跨度连续刚构桥动力特性的影响规律；最后，实现了温度作用下大跨度连续刚构桥长期服役性能评估。

基于 YOLO 的混凝土结构裂缝特征提取及量化方法

许江波^{1*}, 王少伟¹, 孙文¹, 吴雄¹

1. 长安大学, 公路学院, 陕西西安 710061

通讯作者邮箱: xjiangbo@yeah.net

报告人: 许江波

摘要:

针对传统混凝土裂缝检测方法存在效率低、主观性强、复杂场景适应性差等问题, 本研究提出了一种融合多模块改进的 YOLOv8-seg 实例分割模型 (LSCD-YOLOv8-seg) (图 1), 并建立完整的裂缝特征量化体系。首先在主干网络中引入大型可分离核注意力 (LSKA) 模块优化 SPPF 结构, 通过分解卷积核维度增强细长裂缝特征捕获能力; 采用空间深度卷积 (SPDCConv) 替代步长卷积层, 将空间信息转化为深度特征, 改善小目标识别精度; 设计融合膨胀残差与重参数化模块 (DWR-DRB) 的 C2f 结构, 利用多尺度空洞卷积扩展感受野, 提升复杂裂缝特征融合效果。结合 MPDIoU 损失函数优化边界回归机制, 通过最小点距损失增强裂缝轮廓分割精度。实验表明, 改进模型在 Roboflow 裂缝数据集上的 mAP50 达到 65.273%, 较基准模型提升 3.07 个百分点, mIoU 提高至 60.2%, 推理速度保持 90.82FPS。通过层自适应稀疏剪枝技术, 模型参数量减少 56%, GFLOPs 降至 65, 推理速度提升至 156.25FPS, 配合通道知识蒸馏恢复精度损失, 最终模型的 mAP50 较 YOLOv8x 提升 3.5%。

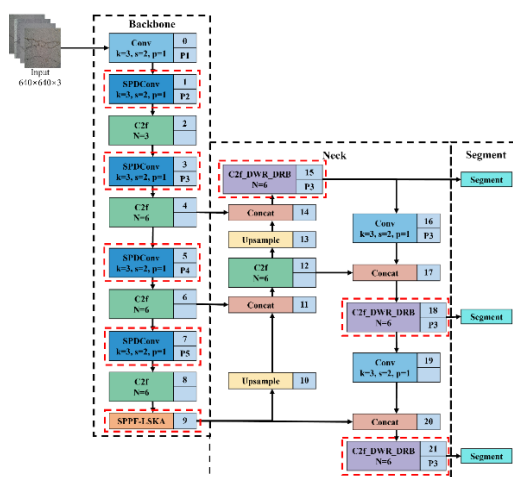
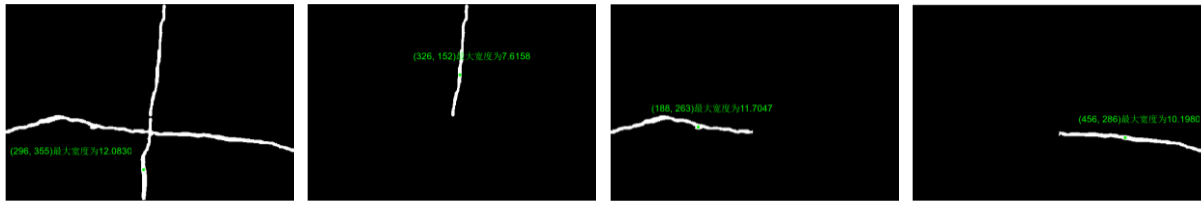


图 1 改进模型 LSCD-YOLOv8-seg 结构图

在特征量化方面, 基于分割结果构建二值化掩模, 采用骨架法提取裂缝中轴线, 通过连通区域划分实现交叉裂缝分段处理。实验显示复杂交叉裂缝总长计算误差小于 0.95%, 单裂缝长度检测误差低于 4.73%。结合正交骨架线法建立宽度计算模型, 设置动态分析区域 (半径 5-15pixel) 进行法向距离计算, 最大宽度检测误差小于 5%, 平均误差约 2.5% (图 2)。该方法在混凝土桥梁、隧道等实际工程测试中, 裂缝识别准确率达 91.6%, 量化结果与人工测量值相关系数 $R^2 > 0.97$ 。



(a) 裂缝整体最大宽度位置 (b) 裂缝区域 2 最大宽度位置 (c) 1-1 裂缝最大宽度位置 (d) 1-3 裂缝最大宽度位置

图 2 裂缝最大宽度位置及最大宽度值

本研究创新性在于：（1）构建端到端的裂缝检测-量化体系，解决传统方法流程割裂问题；（2）通过注意力机制与空间深度卷积协同优化，提升模型在光照不均、纹理干扰等复杂场景的鲁棒性；（3）开发轻量化部署方案，使高精度模型可在移动设备运行；（4）提出分区正交量化算法，有效处理交叉裂缝的测量难题。当前局限主要体现于数据集的工程场景覆盖度，未来将通过多光谱成像技术增强模型在渗水、腐蚀等复合损伤场景的检测能力。

关键词：混凝土裂缝；YOLO；实例分割；裂缝量化；卷积神经网络

通讯作者简介：长安大学公路学院副教授、博士生导师。陕西省岩石力学与工程学会副秘书长，陕西省和西安市秦创原“科学家+工程师”项目首席科学家，研究方向涵盖智能感知与运维等。主要研究方向如下：

- 一、复杂环境下岩石动力学特性研究
- 二、边坡的防护预警体系研究
- 三、装配式波纹钢涵洞力学响应特征研究

基于机器视觉算法的桥梁火灾场景快速识别方法

吴西强^{1,*}, 熊文¹, 朱彦洁¹, 蔡春声¹

1 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: wuxiqiang@seu.edu.cn

报告人: 吴西强

摘 要:

桥梁在现代交通系统中发挥着至关重要的作用, 然而火灾可能对其结构性能造成显著影响。本研究构造机器视觉算法及数据集, 实现桥梁火灾场景特征的快速评估。首先, 基于 YOLO 算法开发了火灾和桥梁识别算法模型 (图 1), 并通过网络图像采集构建了算法训练数据集, 利用该数据集对算法进行了训练, 将其部署于实际桥梁火灾案例的场景识别 (图 2)。随后, 以实际桥梁火灾事故为例, 采用火灾模拟软件 FDS 对预测的火灾场景进行了火灾动力学仿真, 获得随时间和空间变化的局部温度场, 将此温度场导入预先建立的有限元模型进行热-力耦合分析, 以评估火灾下桥梁结构的安全性。结果表明: 火焰识别准确率达 0.80, 桥梁侧面识别准确率达 0.98, 说明所提出的算法模型能够有效识别桥面上下方的火灾场景; 通过与实际火灾图像对比, 模型可准确定位火源位置、火焰高度及桥面区域。有限元模拟显示, 经历火灾后桥梁结构整体性未受显著影响 (图 3), 燃烧期间仅产生毫米级形变, 与火灾后现场调查结果一致。本研究可为探索人工智能算法在桥梁灾后调查中的应用提供参考。

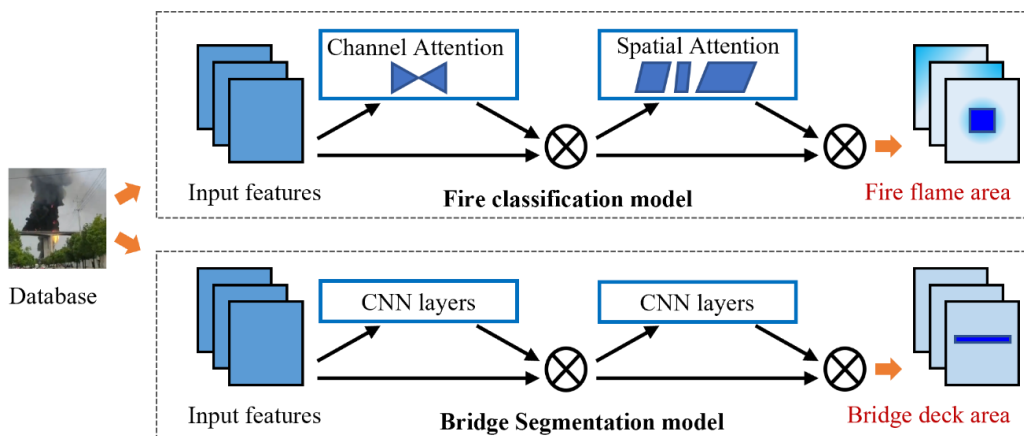


图 1 火灾与桥梁结构特征识别算法模型



图 2 火灾区域与位置识别结果

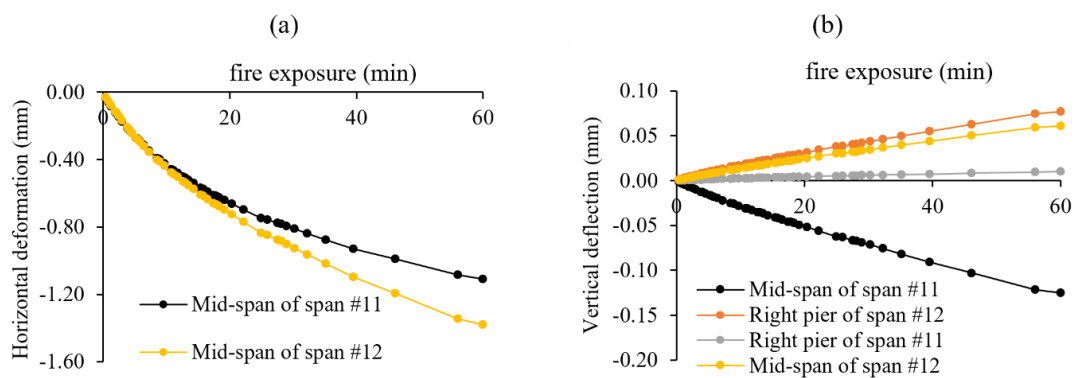


图 3 (a)火灾下支座处的水平位移；(b)火灾影响区域不同位置处的竖向位移。

关键词：桥梁火灾；火灾检测；有限元模拟；机器视觉

通讯作者简介：东南大学交通学院副教授、硕士生导师。主要开展了桥梁结构抗火性能评估及交通基础设施智能防灾减灾方面的研究工作，近五年发表相关 SCI 论文 10 余篇，主持国家自然科学基金青年项目 1 项。

基于全场视觉和动态贝叶斯的桥梁拉索瞬时阻尼辨识

王军营¹, 朱前坤^{1,2,*}, 张琼^{1,2}, 王宪玉^{1,3}, 杜永峰^{1,2}

1. 兰州理工大学, 防震减灾研究所, 甘肃兰州 730050

2. 兰州理工大学, 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃兰州 730050

3. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃兰州 730030

通讯作者邮箱: zhuqklut@qq.com

报告人: 王军营

摘 要:

拉索作为斜拉桥的关键受力构件, 其阻尼特性的瞬时变化对结构安全性与减震性能的评估具有重要意义。传统运行模态分析方法往往存在多模态耦合效应难以有效分离、结果离散性大等问题, 且受限于传感器布设数量, 易导致关键模态信息的丢失。此外, 在模态参数的时变分析中, 数据时段划分多依赖算法特性或工程经验, 难以精准捕捉参数的瞬时变化。尽管已有方法结合贝叶斯模型选择与动态规划实现数据段的“最优划分”, 但大多依赖长时序监测, 且采用硬分割策略, 仅在参数显著变化时进行分段, 难以反映数据的连续依赖性及对高时效辨识的需求。为此, 本文提出一种基于全场视觉测量与动态贝叶斯推理的瞬时阻尼辨识方法。该方法充分利用视觉数据的信息密度优势, 突破测点数量限制, 构建适用于短时测量的加权软分割数据处理框架, 实现阻尼特性瞬时变化的鲁棒辨识。具体而言, 方法融合基于金字塔嫁接网络的拉索分割模型与基于视频压缩感知的分辨率提升技术, 构建全场视觉测量方案以提取拉索振动全场信息; 引入空间图先验约束挖掘视觉数据的空间相关性; 并在动态规划框架下, 耦合加权软分割策略与基于 Gabor 母小波的贝叶斯连续小波变换推理, 实现对阻尼参数瞬时演化特性的高效识别。通过基于物理图形模型的数值模拟对算法性能进行了初步验证, 实桥测试进一步证实了该方法在复杂环境下对阻尼特性的高精度与强鲁棒性辨识能力。

关键词: 桥梁拉索; 结构健康监测; 全场视觉; 动态贝叶斯; 瞬时阻尼;

通讯作者简介: 兰州理工大学大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事桥梁智慧监测与运维方面的研究。

多因素驱动的钢结构腐蚀防护优化决策系统

吴海英^{1,2,3,*}, 罗尧治^{2,*}, 周观根³

1. 山西大学, 电力与建筑学院, 山西太原 030031

2. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

3. 浙江东南网架集团有限公司, 浙江杭州 311209

通讯作者邮箱: wuhaiying@sxu.edu.cn/luoyz@zju.edu.cn

报告人: 吴海英

摘 要:

钢结构在现代建筑及各工业领域广泛应用, 每年因钢铁腐蚀引起的损失非常庞大, 如果采取有效的腐蚀防护措施, 大约 25%-40% 的腐蚀损失是可以避免的。根据腐蚀过程的影响因素和腐蚀机理, 人们发展了各种腐蚀防护方法, 以寻求最佳防护效果, 但是由于数据信息交流渠道不畅, 使腐蚀防护数据资源不能充分利用。本研究立足国家解决腐蚀问题的重大需求, 以钢结构的腐蚀防护为研究对象, 对各种腐蚀环境下的腐蚀机理、腐蚀损伤数据及腐蚀防护方法开展系统研究, 进而将腐蚀防护设计与飞速发展的计算机、互联网以及数据库技术相结合, 引入人工智能, 构建钢结构腐蚀防护智能管理系统, 实现: ①腐蚀机理、腐蚀情况数据及腐蚀防护方法的查询, 为钢结构腐蚀评估、寿命预测, 合理选材、设计相应的防腐方案提供有力的参考依据和指导作用; ②防护方法的系列化、标准化, 形成指南; ③根据用户需求, 依据钢材的腐蚀环境、设计使用年限、成本要求、防护效果及防护材料的环保性为用户智能推荐多种防护方案, 并自动计算多种方案的评分, 推荐出最优的防护决策方案。本研究具有重要的实际应用背景和理论价值, 其实施可为钢结构全生命周期的腐蚀防护提供技术支撑, 特别是在提高防护效率、降低经济损失、提升结构安全性及绿色节能等方面具有潜在的推动作用。

关键词: 钢结构; 腐蚀机理; 腐蚀损伤; 腐蚀防护方法; 智能优化决策系统

通讯作者简介: 吴海英, 山西大学电力与建筑学院教授、硕士生导师, 主要从事钢结构腐蚀与防护、钢结构疲劳与断裂的研究。罗尧治, 浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师, 主要从事空间结构方面的研究。

基于大语言模型的交通基础设施损伤识别与维护

唐志一^{1,2,*}, 杨朝显^{1,2}, 李伟^{1,2}, 肖雄文^{1,2}, 许蔚^{1,2}

1. 昆明理工大学, 建筑工程学院, 云南昆明 650500

2. 云南省教育厅基础设施智能运维科技创新团队, 云南昆明 650500

通讯作者邮箱: tang@kust.edu.cn

报告人: 唐志一

摘 要:

当前, 人工智能大模型技术正加速赋能土木工程基础设施的智能运维与管理, 特别是在结构健康监测与交通安全设施领域展现出强大潜力。传统方法在数据获取、语义理解与知识推理方面存在效率低、泛化差等局限, 而多模态大模型为解决碎片化信息整合、跨模态认知与任务型问答提供了新路径。本报告围绕三项最新研究成果展开: 一是提出面向结构健康监测领域的跨语言文本数据自动化构建框架, 结合 GOT-OCR2.0 与 DeepSeek-V3, 实现高质量结构化语料生成; 二是基于低秩适配策略对 Qwen2.5-VL 与 LLaVA-Next 两个多模态大模型进行微调, 实现交通安全设施损伤识别与语义分析的高效协同, 提升模型在图文理解、因果推理与维护策略生成等任务中的综合表现; 三是构建基于检索增强生成技术的公路安全设施智能问答系统, 创新引入“语义指纹”知识库与双层混合检索机制, 提升垂直领域问答准确性与一致性。上述研究展示了大模型在土木工程智能化变革中的实际应用价值, 为未来基础设施领域数据驱动的智能诊断、知识增强与决策支持奠定技术基础。

关键词: 大语言模型, 多模态数据, 检索增强生成, 低秩适配, 损伤识别

通讯作者简介: 唐志一, 校聘副教授, 硕士生导师。云南省兴滇英才青年人才, 昆明理工大学高层次人才, 主要从事结构健康监测数据科学与工程方向的研究工作, 在领域顶级期刊发表论文十余篇, 含高被引论文 3 篇。承担省部级项目 2 项, 获得省部级奖励 2 项。



基于概率深度强化学习的深基坑临近建筑结构监测优化

秦剑君^{1,*}, 潘越¹

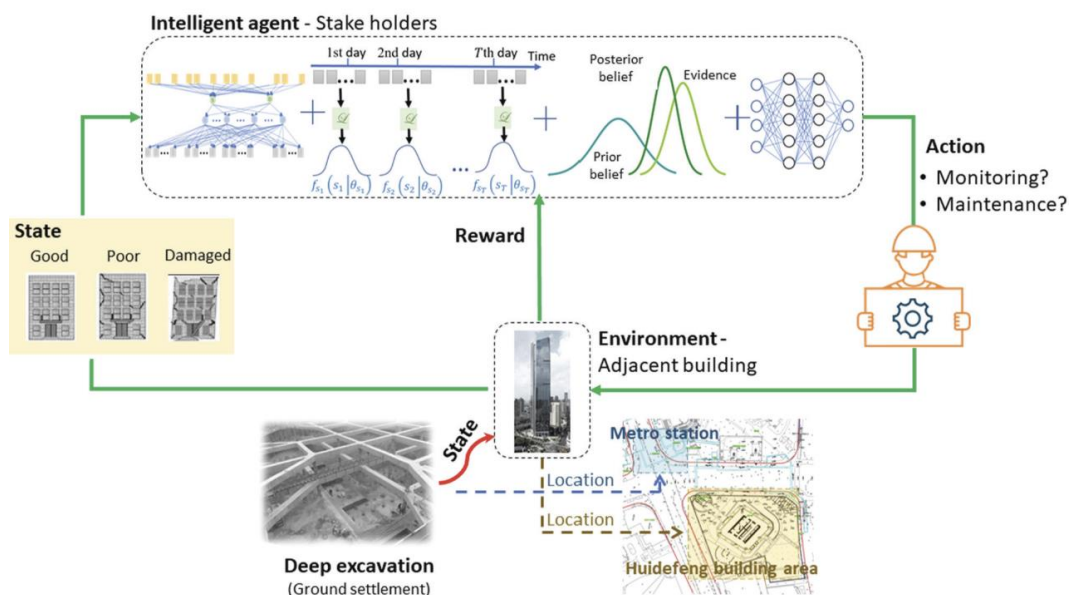
1. 上海交通大学, 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

通讯作者邮箱: jianjunqin@sjtu.edu.cn

报告人: 秦剑君

摘要:

在深基坑开挖过程中, 监测临近建筑结构的性态对于确保安全至关重要。本报告将提出一种新的概率深度强化学习 (PDRL) 理论框架来优化健康监测策略, 以最大限度地降低成本和基坑开挖引起的风险。首先, 建立贝叶斯双向广义回归神经网络作为概率模型, 以动态方式描述基坑引发的地面沉降与临近建筑结构性态之间的关系。随后, 训练一种双深度 Q 网络方法, 该方法可以捕捉挖掘管理问题的现实特征, 形成一个闭环决策回路, 用于持续学习监控策略。最后, 介绍提出的 PDRL 方法应用于上海地铁 14 号线的一个实际深基坑工程案例。这种方法可以估计损坏发生和维护行动的时变概率, 并更新临近建筑结构的性态预测。根据 PDRL 提出的策略, 如果对监测数据的质量有充分的信心, 则在开挖项目的中期阶段而不需要基坑开挖伊始就对临近建筑结构进行监测。当数据的不确定性水平上升时, 最优的监测开始日期需要提前。报告提出的 PDRL 方法具有鲁棒性, 可以解决环境和模型中嵌入的不确定性, 从而有助于优化监测计划, 实现风险最小化。



关键词: 深基坑工程, 健康监测, 概率深度强化学习, 风险评估, 贝叶斯方法。

通讯作者简介: 秦剑君, 苏黎世瑞士联邦理工大学理学博士, 上海交大副教授、博士生导师。在欧洲和国内高校工作多年间专注于运用人工智能及贝叶斯方法等数学工具研究建筑结构和大型基础设施等风险决策分析理论。迄今共发表学术论文七十余篇, 多篇 SCI 期刊论文获奖。主持国家自然科学基金、科技部高端外专和重点研发项目子课题等项目。其曾获得上海市优秀毕业生、国家优秀自费留学生奖学金及 Wiley 颁发的“Hojjat Adeli Award for Innovation in Computing”等荣誉, 并入选上海海外高层次人才计划等。Research 等学术期刊青年编委。

基于深度学习的机电管线点云补全方法

王骞^{1,*}, 越宏哲¹

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 310058

通讯作者邮箱: qianwang@seu.edu.cn

报告人: 王骞

摘要:

点云数据在既有建筑模型重建中得到了广泛应用。然而, 机电系统 (MEP) 由于受到遮挡、传感器分辨率有限及采集视角受限等因素的影响, 常常导致采集的点云数据不完整, 进而严重影响模型重建的准确性和效率。现有点云补全方法多基于传统的特征拟合或机器学习技术, 存在依赖人工经验强、泛化能力差等问题。近年来, 深度学习在点云补全任务中表现出显著优势, 具备高效推理能力和较强的泛化能力。然而, 现有深度学习方法多依赖 ShapeNet 等标准数据集, 对复杂的 MEP 构件点云的补全研究仍较为欠缺, 且尚无专门针对 MEP 构件的补全数据集可供训练与评估。

为解决上述问题, 本文提出了一套面向 MEP 构件的点云补全研究框架。首先, 结合 MEP 领域知识, 通过参数化建筑信息模型 (BIM) 建模生成高质量、无遮挡的 MEP 构件点云数据集。其次, 采用基于角度的遮挡模拟方法, 模拟不同视角下的点云缺失情况, 生成多样化的遮挡点云数据。随后, 系统评估了五种典型深度学习点云补全算法及五种训练策略 (包括预训练与联合训练) 的效果。研究结果表明: (1) 基于预训练策略的 PoinTr 模型在 Chamfer 距离与 F-score 等评价指标上表现最优, 即使在缺失率高达 75% 的条件下仍能实现有效补全; (2) 所提出的方法在三个实际任务中均验证了其实用性与鲁棒性, 包括真实场景下的实例级点云补全、场景级点云补全, 以及点云补全对后续分类任务精度的提升。

关键词: 点云补全; 深度学习; 机电管线

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院教授、博导, 国家高层次青年人才。主要从事智能建造与运维管理方面的研究。主持或参与国家重点研发计划、国家自然科学基金等 10 余项课题。在智能建造领域国际权威期刊发表 SCI 论文 60 余篇, 累计引用 4900 余次。曾获广东省土木建筑学会科学技术二等奖、东南大学青年五四奖章等荣誉。



基于深度学习的桥梁水下声呐点云数据集与语义分割

黄泽林¹, 朱彦洁¹, 熊文^{1,*}

1. 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: wxiong12@hotmail.com

报告人: 黄泽林

摘 要:

桥梁水下声呐点云的语义分割是桥梁冲刷和基础病害缺陷检测的重要处理步骤。然而, 复杂水下环境产生的噪声和声呐定位引入的旋转严重干扰了点云的分割。目前的分割算法鲁棒性有限, 并缺乏轻量化模型。为了解决这些问题, 提出了一种基于动态图卷积的轻量级声呐点云语义分割网络。该网络基于边卷积进行点云局部特征提取, 使用 SE 注意力机制进行特征细化, 并采用密集连接的网络结构来增强鲁棒性。为了训练并评估模型, 基于三座长江大桥水下基础检测的实测点云数据创建了桥梁声呐点云开源数据集 BrSPCD。通过坐标正则化和泊松圆盘采样进行点云预处理, 人工分割并进行标记, 得到 116 个包含 3072 个点云的局部语义场景和 4 个完整语义场景点云数据。性能实验结果表明, 该算法具有优异的语义分割性能, 无噪声与旋转干扰工况下 F1 得分为 0.9217, 超过包括 AGConv 在内的七种先进深度学习算法, 取得竞争性优势。在最大噪声工况下 F1 得分仅下降 4.87%, 相比竞争算法的 F1 得分 14.04% 的平均下降率低 65.24%, 说明所提模型具有良好的抗环境噪声性能。在最大旋转干扰工况下 F1 得分仅降低 4.11%, 相比竞争算法的 F1 得分 5.81% 的平均下降率低 29.30%, 说明所提模型可以很好应对声呐点云中存在旋转错位带来的干扰。消融实验验证了 SE 注意力机制模块和密集连接网络结构的有效性。算法在崇启长江大桥水下检测的场景点云语义分割中进行了测试, 在四个桥墩的水下声呐点云的分割中 F1 取得了 0.916 的得分。最后, 复杂性分析表明, 与竞争算法相比, 所提出的方法具有轻量化特点, 平均运行时间缩短了 85.02%。

关键词: 桥梁水下检测; 桥梁声呐点云数据集; DGCNN; 桩基提取; 三维声呐点云;

通讯作者简介: 东南大学交通学院桥梁工程系教授、博士生导师。主要从事桥梁抗水与冲刷、桥梁智能建造与运维与数字桥梁等方面的研究。

基于图深度学习的工程结构体系智能计算研究与应用

王琛¹, 樊健生^{1,*}

1. 清华大学, 土木工程系, 北京 100084

通讯作者邮箱: fanjsh@tsinghua.edu.cn

报告人: 王琛

摘 要:

结构计算分析是贯穿结构工程全寿命周期的关键技术之一。近年来, AI 技术凭借卓越的拟合能力与计算效率, 正日益广泛地被应用于土木工程计算分析中, 以期超越经典模型的性能表现。然而, 现有研究难以完整考虑真实工程体系数字化表征, 导致体系精细响应智能计算的空白, 限制了新兴智能技术对实际工程的应用赋能。本文提出了基于非欧空间图数据的工程结构通用数字化方法, 填补体系层次高保真表征方法的研究空白; 分别针对设计工况弹性分析与极端工况非线性分析构建了工程体系端到端深度学习计算架构 **StructGNN**, 能够以秒级获得体系全域全过程响应, 在非线性情形下, 计算效率相较传统有限元可提升 1000~10000 倍; 在此基础上, 借助深度学习的梯度传播特性, 研发了工程结构体系超高维设计参数可微分优化架构 **StrucTopt**, 可优化参数量提升至万级别, 效率相较传统机器优化算法提升 10000 倍以上, 大幅加速工程设计流程; 同时, 考虑到反演与优化问题的数学等价性, 基于可微分优化架构提出了工程结构大规模参数智能反演模型, 突破了传统反演“维度灾难”问题。为解决物理监测“测不全、没法测”问题, 进一步研发了面向数字孪生的工程体系智能虚拟传感技术, 可根据局部测点信息实时推演结构全域力学响应, 为项目安全风险决策提供更为全面的信息服务。

关键词: 智能计算; 智能设计优化; 智能反演; 图深度学习; 数字孪生

通讯作者简介: 清华大学土木工程系教授、博士生导师。主要从事组合结构、结构计算分析、结构检测监测研究。负责完成及在研国家重点研发计划项目、基金委创新研究群体、重大项目课题、杰出青年基金等项目, 获聘长江学者、万人计划创新领军人才。

基于图像-参数特征融合增强生成对抗网络的面板堆石坝分区智能设计

廖文杰^{1,2,*}, 张宗亮^{3,4}, 刘彪³, 陆新征⁵, 刘地福⁶, 刘强¹, 段志杰⁷, 刘超³

1. 西南交通大学, 土木工程学院, 中国成都 610031
2. 桥梁智能与绿色建造国家重点实验室, 中国成都 610031
3. 中国水电工程顾问集团有限公司, 中国北京 100120
4. 中国电力建设集团有限公司, 中国北京 100085
5. 清华大学, 土木工程系, 中国北京 100084
6. 河海大学, 水利水电工程学院, 中国南京 210098
7. 北京工业大学, 土木工程学院, 中国北京 100144

通讯作者邮箱: liaowj@swjtu.edu.cn

报告人: 廖文杰

摘 要:

在生成式人工智能(AI)等先进技术的推动下,混凝土面板堆石坝(CFRDs)设计正逐步从数字化向智能化转变。生成式 AI 具有强大的数据特征提取与挖掘能力,能够通过推理高效地生成新的设计方案,这些优势为智能 CFRD 设计提供了关键的技术支持。然而,CFRD 设计是一项高度专业化和复杂的任务,传统的生成式 AI 技术通常难以生成专业的设计方案。为应对这一挑战,本研究探索了一种专门针对 CFRD 坝体轮廓设计这一关键任务的生成式智能设计方法。提出了一种基于特征融合生成对抗网络(GANs)的 CFRD 坝体轮廓智能设计方法,该方法能够实现设计数据的密集表征与增强,完成 GAN 模型训练和自动化评估,从而解决了小样本多模态图像-参数数据融合这一关键难题。作者通过算法分析和案例研究,验证了 CFRD 轮廓智能设计方法的有效性。与传统的工程师设计相比,该方法的设计效率提高了近 10 倍,设计时间从 1-2 小时缩短到 6 分钟左右。所提出的智能设计方法具有巨大的潜力,为堆石坝智能设计的进一步发展提供了有价值的参考。

关键词: 面板堆石坝智能分区设计; 图像-参数特征融合; 生成对抗网络; 参数化生成数据增强; 图像像素矢量化。

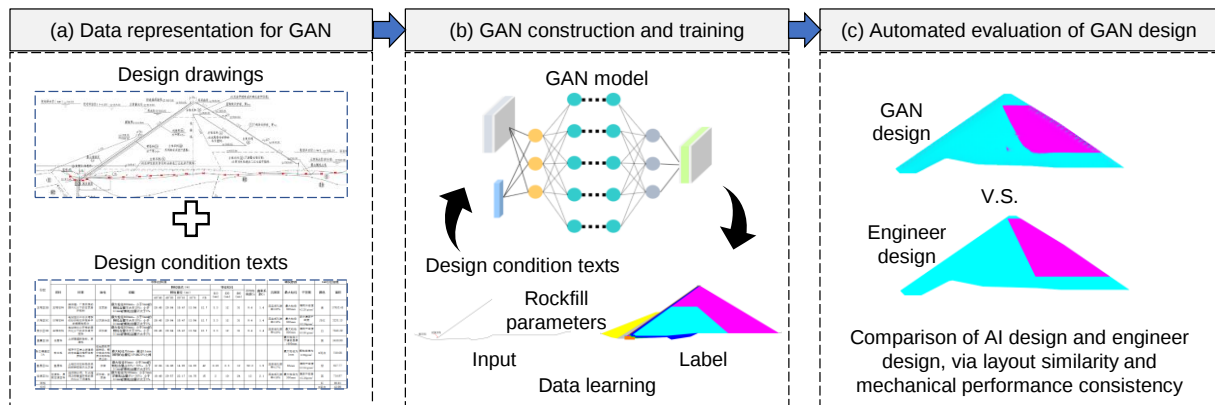


图4 堆石坝全坝区智能化设计工作流程

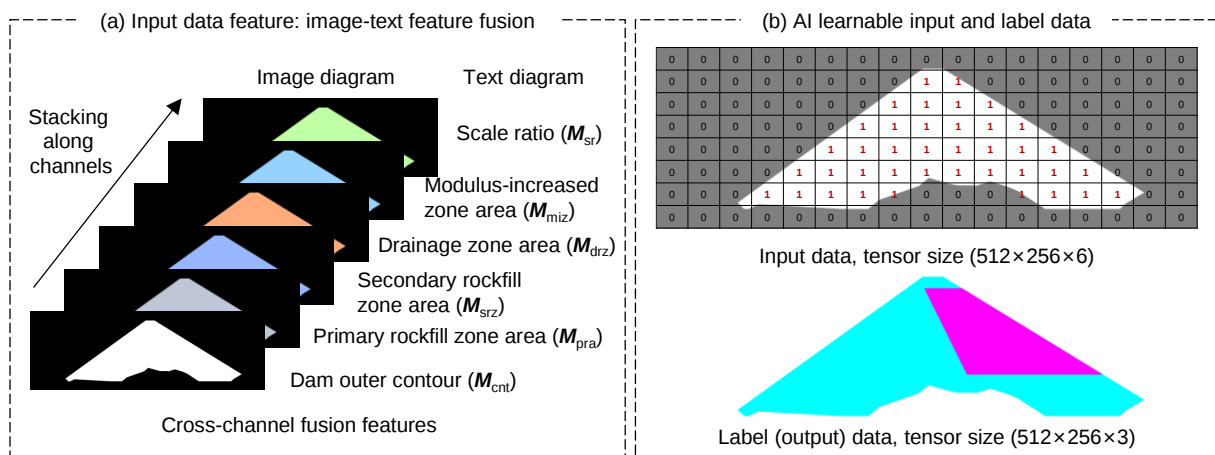


图5 图像-参数特征融合方法

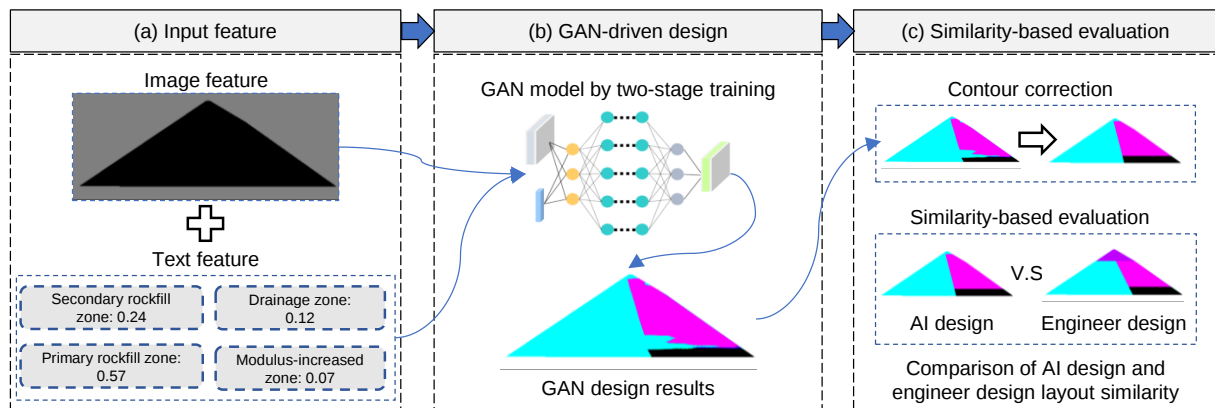


图6 典型土石坝案例的生成式智能设计

通讯作者简介: 廖文杰, 西南交通大学土木工程学院特聘副研究员。主要从事工程结构智能设计与优化的研究。

本研究感谢中央高校基本业务费(2682025CX041)支持。



具有荷载适应性的算子学习智能计算方法

刘旭亮¹, 鲍跃全^{1,*}

1. 哈尔滨工业大学, 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001

通讯作者邮箱: Baoyuequan@hit.edu.com

报告人: 刘旭亮

摘 要:

土木工程计算与仿真技术是预测与分析工程结构力学响应的重要手段。工程结构的力学行为可通过力学偏微分方程组描述, 复杂结构的该类方程通常难以解析求解。以有限元法为代表的数值仿真方法是近似求解力学偏微分方程组的主要途径, 在结构设计与性能分析等工程问题中发挥关键作用。数值方法通过将连续介质离散为有限单元, 结合材料属性与边界条件构建刚度矩阵及系统方程, 经求解线性方程组和后处理可获取位移场、应力场及应变场等力学响应。这一技术特性使得数值方法能够灵活处理复杂几何结构及多种类多形式的荷载作用。然而, 数值方法的精确求解依赖于合理的网格划分, 而系统方程规模将随自由度增加而显著扩大, 导致计算资源需求呈指数级增长以及计算时间的增加。同样引起注意的是, 即使边界条件或材料参数发生微小变化, 传统数值方法仍然需对不同荷载场景进行独立模拟。上述瓶颈制约了其在优化设计、不确定性量化、可靠性分析及数字孪生构建等领域的应用。近年来人工智能与科学研究以及工程科学协同发展, 基于机器学习技术的智能计算方法被应用于求解固体及流体的控制方程。基于机器学习的智能计算方法通过训练后, 仅需前向传播即可预测全场解, 这一特性使其成为突破传统数值方法计算资源与速度瓶颈的潜在解决方案。数据驱动的智能方法已在结构响应预测中取得进展, 但其可解释性不足与泛化能力有限的问题制约其在工程问题中进一步应用。将力学定律嵌入网络是增强智能计算方法可解释性的可靠途径。物理信息神经网络为代表的物理驱动方法能无监督方式训练网络, 但需为不同荷载场景独立训练网络, 使其陷入与传统数值方法相似的困境。最近的研究指出此类局限是函数学习方法学习‘输入参数-响应’的函数映射导致的, 基于机器学习的求解器应学习‘输入空间-解空间’的算子映射。深度算子网络以及神经算子等算子学习方法为算子学习任务开发并被应用于智能计算。然而, 现有方法通常为特定荷载形式设计, 缺乏荷载适应性, 且通常仅考虑特定响应, 需要进一步发展以满足力学响应计算的功能需求。本研究分析讨论了现有智能计算方法缺乏荷载适应性的数学原因, 基于算子的通用逼近定理提出了一种新颖的深度算子网络框架, 将力学偏微分方程嵌入网络, 用于适应多种类多形式荷载场景的固体响应智能计算。

关键词: 智能计算, 人工智能, 算子学习

通讯作者简介: 鲍跃全 哈尔滨工业大学土木工程学院教授、博士生导师。研究方向: 结构健康监测 Email: baoyuequan@hit.edu.cn

摩擦型混合联肢墙智能抗震韧性初步设计方法

唐琦^{1,2}, 崔瑶^{1,2,*}

1. 大连理工大学, 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁大连 116024

2. 大连理工大学, 建设工程学院, 辽宁大连 116024

通讯作者邮箱: cuiyao@dlut.edu.cn

报告人: 唐琦

摘 要:

摩擦型混合联肢墙 (Frictional Hybrid Coupled Wall, FHCW) 通过引入摩擦型钢桁架连梁 (Frictional Truss Coupling Beam, FTCB) 和摩擦型铰支墙 (Frictional Pin Supported Wall, FPSW) 消能部件, 替换传统钢筋混凝土联肢剪力墙中复杂且易损的连梁和墙脚, 震后损伤集中在易于更换的摩擦消能器中, 显著提高了抗震韧性。

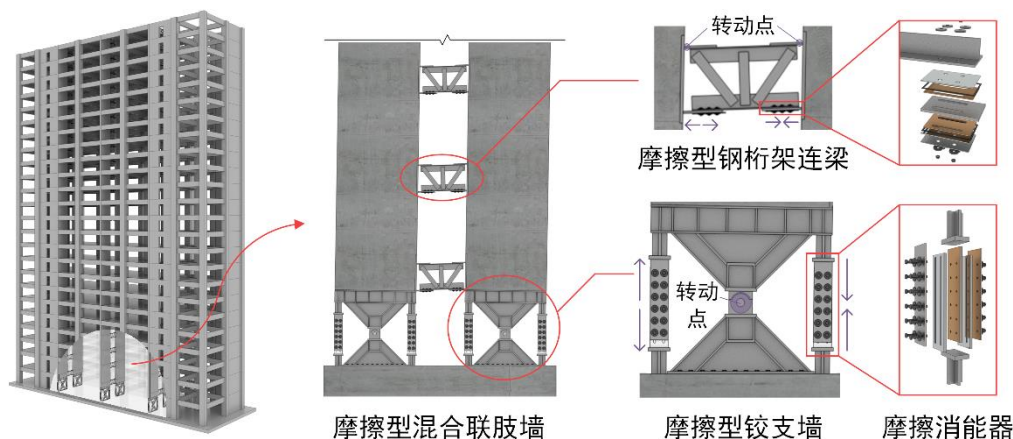


图 1 摩擦型混合联肢墙

摩擦型钢桁架连梁和摩擦型铰支墙具有刚度、承载力与延性解耦的力学特点。弹性刚度由连梁桁架杆件或铰支墙消能器板件决定, 屈服承载力由摩擦消能器起滑力控制, 延性则通过消能器设计行程体现。通过刚度与承载力的灵活组合, 可以实现“多水准、多目标”的抗震设防, 即不同地震水准下的定制化性能目标:

- 小震作用下, 摩擦型钢桁架连梁和铰支墙均不发生滑移, 可提供较大的弹性刚度, 结构整体处于弹性状态, 震后无需修复即可继续使用;
- 中震作用下, 摩擦型钢桁架连梁率先起滑并耗散能量, 震后损伤集中在可更换的连梁消能器中, 主体结构保持弹性, 少量修复即可正常使用;
- 大震作用下, 摩擦型铰支墙与连梁协同起滑耗能, 上部墙肢绕铰支座发生刚体转动, 避免结构性破坏; 震后借助自重复位, 有效减少残余变形, 更换消能器即可修复, 避免因连梁或墙脚严重损伤导致的拆除重建。

然而由于结构设计参数与抗震韧性指标间的高维强非线性, 设计人员难以直接辨明不同设计参数组合的抗震韧性表现, 通常需要在完成包含概念设计、初步设计、详细设



计等环节的常规设计后，附加“评估—调整—再评估”的迭代环节以实现抗震韧性目标。其中，初步设计阶段所决定的结构刚度、承载力和延性等设计参数，对抗震韧性表现有着关键影响。目前基于弹塑性时程分析的抗震韧性评估计算密集、耗时费力，难以在方案多变、细节未定的初步设计阶段提供高效的设计决策支持，从而可能造成大量设计迭代。同时，由于实际工程的人员、时间和计算成本限制，迭代调整往往囿于初始参数附近，可能错失设计空间内的最优设计参数组合。

本文基于 FHCW 体系的抗震机理，选择了弹性耦合比、超强系数、FTCB 起滑位移角和 FPSW 起滑位移角作为 FHCW 体系的关键设计参数。这些参数分别紧密关联着 FHCW 体系的刚度分配、屈服强度、刚度以及极限强度，能够全面描述其能量分配与损伤时序特性。提出了基于损伤控制的初步设计方法，根据设计参数确定 FTCB 和 FPSW 的滑移承载力和弹性刚度，进而生成原型结构并建立简化分析模型，从而实现初步设计与后续设计流程的顺畅衔接。

遵循规范标准和性能目标确立样本空间，通过简单随机抽样获得 10,000 个样本。对这些样本在多遇、设防、罕遇地震水准下进行了抗震韧性评估，获取了韧性指数，据此建立了 FHCW 体系抗震韧性数据库。采用 XGBoost（极端梯度提升）算法构建了 FHCW 体系的韧性评估代理模型。应用代理模型对某 20 层 FHCW 双肢墙的设计参数进行优化。通过构造权衡抗震韧性和建设成本的适应度函数，结合粒子群优化算法，能够快速找到设计空间内不同资金投入下韧性指数最高的设计方案。研究发现，韧性项权重大于 0.8 后，继续追加投入，韧性收益减少，因而建议采用权重为 0.8 时的最优设计方案。相比于基于弹塑性时程分析的韧性评估，使用代理模型计算适应度函数，优化耗时从数月缩减至几分钟，且预测误差控制在 10% 以内，显著提高了设计参数组合优化的效率。

关键词：抗震韧性，摩擦型混合联肢墙，韧性评估，初步设计，机器学习

通讯作者简介：大连理工大学建设工程学院教授、博士生导师。主要从事建筑钢结构抗震韧性提升理论及关键技术的研究，对建筑钢结构抗震理论、设计方法、性能评估及提升技术进行深入研究，为实现城市可持续发展提供了技术和理论支撑，也为桥梁、码头等基础设施的抗震韧性提升提供了科学依据。

人工智能在区域高铁简支梁桥震后损伤分析中的应用

朱志辉^{1,2,*}, 钟杰鑫², 李霞², 王棕²

1. 中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南长沙 410075

2. 中南大学, 土木工程学院, 湖南长沙 410000

通讯作者邮箱: zzh0703@163.com

报告人: 朱志辉

摘 要:

我国地震高发区与铁路主干线呈现显著空间重叠, 区域铁路桥梁极易遭受地震影响。为应对震后应急决策需求, 亟需建立高效、准确的区域铁路桥梁震后损伤快速评估方法。该过程需同时考虑地震波场空间分布及桥梁群体结构损伤, 而传统数值方法存在计算开销大、评估效率低等瓶颈, 难以满足时效性的需求。为此, 本文基于人工智能方法分别开展地震波场模拟和震后铁路简支梁桥轨道线形预测, 主要工作如下:

(1) 建立了基于傅里叶神经算子(FNO)的随机点源地震波场模拟方法, 实现不同位置点震源的波场快速模拟。针对二维复杂场地中的反射、折射和衍射变化引起的预测误差较大的问题, 提出了基于残差连接和自适应卷积的改进 FNO 方法, 有效提升了对复杂地形条件下波场分布的模拟精度; 进一步考虑三维波动问题的高维性与非线性特征, 引入 U-Net 网络结构, 通过多层编码和解码提高 FNO 的特征提取能力, 有效实现三维场地不同位置点源地表三方向波场的快速精准预测, 可为地震动模拟与区域桥梁抗震分析提供技术参考。

(2) 建立了基于多尺度 CNN-Attention 的铁路简支梁桥震后轨道线形智能预测框架。考虑震致轨道损伤受地震动时程序列不同尺度时频域信息耦合影响的特点, 设计异构卷积核组提取地震动加速度时程序列的多尺度高维特征, 引入加性注意力机制提升长序列特征的关键信息捕捉能力, 采用串行叠加和并行拼接的方式, 构建深度神经网络架构; 进一步融合改进损失函数与优化算法, 搭建铁路简支梁桥震后轨道线形智能预测框架, 实现区域铁路简支梁桥震后损伤快速评估, 可为震后应急决策提供参考。

关键词: 不多于 5 个, 用分号隔开。(宋体, 12 号字)

地震波场; 高铁简支梁桥; 轨道残余变形; 傅里叶神经算子; 卷积神经网络;

通讯作者简介:

中南大学土木工程学院教授、博士生导师。湖南省芙蓉学者特聘教授、湖南省中青年科技托举人才。现任中南大学基建处处长, 高速铁路建造技术国家工程研究中心副主任, 土木工程国家级实验教学示范中心(中南大学)主任。长期从事“高速列车-轨道-桥梁耦合动力学及行车安全性”的教学和科研工作。



桥梁病害检测中三维点云和二维图像的跨模态融合

熊文¹, 马翔腾¹, 朱彦洁^{1*}, 蔡春声¹, 江旻容¹

1. 东南大学, 交通学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: yanjie@seu.edu.cn

报告人: 马翔腾

摘要:

随着桥梁服役年限增长, 裂缝等病害的深度信息对评估结构安全与耐久性至关重要。传统二维视觉检测技术受限于投影特性, 难以获取三维空间缺陷特征; 近年来, 三维点云技术为桥梁缺陷检测提供了新的视角, 通过提供深度信息来补充传统的 2D 视觉方法,

而单一的三维点云方法在微小病害识别精度与效率上存在局限性。基于此, 本研究提出了一种融合三维点云与二维图像的跨模态空间病害识别方法, 实现多尺度裂缝的三维识别与深度量化。

首先, 使用基于多尺度分组 (MSG) 的 PointNet++ 网络与 3D 点云配准算法, 构建面向深度 $D \geq 2\text{cm}$ 裂缝的三维语义分割框架, 通过同源配准补偿分割过程的点云采样损失; 然后, 针对上一步点云分割遗漏的微小裂缝, 设计了 3D-2D 跨模态融合算法: 将点云投影为深度图后, 训练 YOLO11 网络进行语义分割, 并逆向重构裂缝三维坐标

。

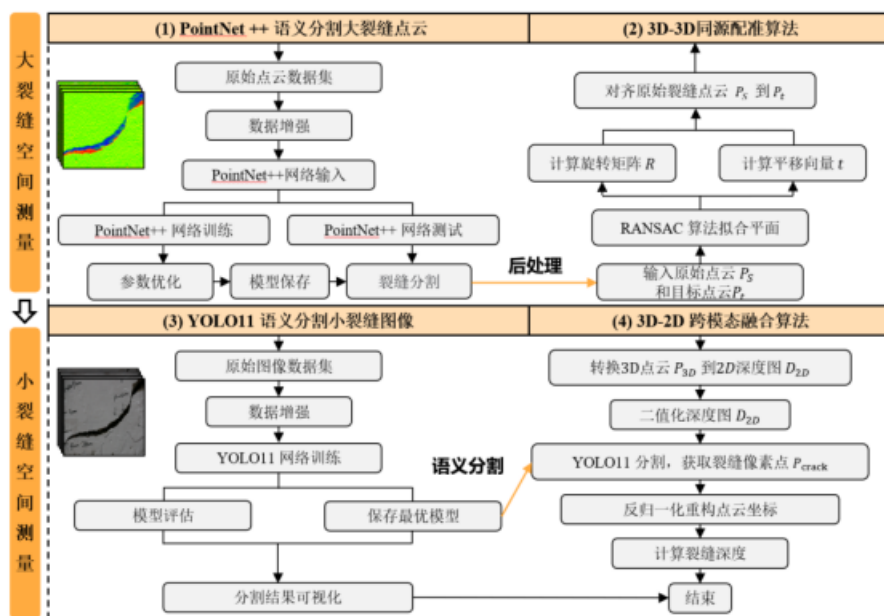


图1 整体方法流程图

以开裂的混凝土梁为试验对象, 结果表明, 该方法对不同尺度的缺陷具有较好的鲁棒性。PointNet++模型在深度 $D \geq 5\text{cm}$ 裂缝点云上取得0.91 的平均交并比 (mIoU), 较深度 D 为2-5cm 的裂缝提升了5%; 而YOLO11 模型在二维深度图上对微小裂缝的检测 准确率达 85%, 平均精度 (mAP50) 为0.75, 有效补足点云分割的盲区。最后, 深度统 计分析揭示, $D \geq 5\text{cm}$ 裂缝深度服从Gamma 分布, 微小裂缝中, 大部分样本服从Gamma 分布, 少样本服从 Gaussian 分布。

尽管该模型具有良好的精度和稳定性, 但钢筋混凝土梁的粗糙和不均匀表面会对点云数据的质量产生负面影响, 特别是在含有毫米级裂缝的区域。不完整的数据捕获妨碍了准确的病害识别。未来的研究将集中在毫米尺度的病害上, 实现低密点云的提质重构。

关键词: 深度学习; 桥梁检测; 跨模态; 特征配准; 点云和图像融合

通讯作者简介: 东南大学交通学院副教授、硕士生导师、交通学院院务助理、桥梁工程系副主任。主要 从事数字桥梁 (激光点云/声呐点云、机器视觉、知识图谱) 方面的研究。主持国家自然科学基金面上 项目 1 项、青年基金项目 1 项, 主持教育部重点实验室开放课题 1 项, 共同主持产学研合作项目近 20 项。



面向预应力钢结构安全评估的数字孪生建模及推演方法

刘占省^{1,*}, 史国梁¹

1. 北京工业大学, 建筑工程学院, 北京 100124

通讯作者邮箱: lzs4216@163.com

报告人: 刘占省

摘 要:

预应力钢结构常作为大型体育场馆的主要受力体系, 建立高保真孪生模型、准确分析其即时力学行为是提升结构可靠性的重要途径。实现上述目标需要高效可靠的模型更新与计算分析技术。目前的研究大多依赖试验和有限元仿真, 存在成本高、计算效率低和精度不足等缺陷。本文提出了预应力钢结构安全状态分析的数字孪生方法。形成了集成物理空间结构实体、结构数字孪生体和模型动态更新算法的力学响应分析架构, 如图1所示。将有限元模型与编程语言融合, 开发了适用于预应力钢结构模型更新的计算方法。将试验结构作为参数修正的对比目标, 形成了孪生模型的建立方法。依托孪生建模方法进行结构力学响应分析。

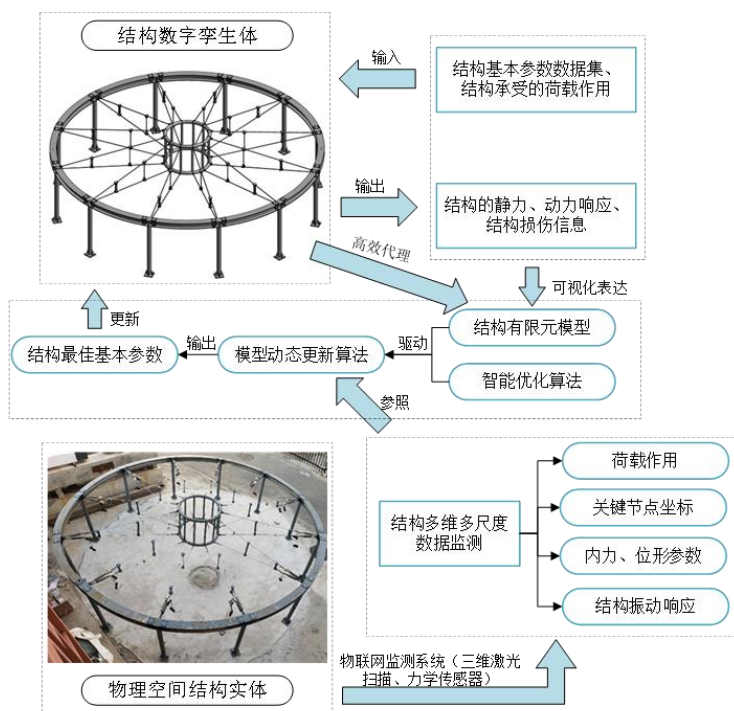


图1 结构数字孪生建模架构

针对结构构件失效对安全状态的影响, 在孪生建模的基础上提出了基于改进的LSTM神经网络的构件失效力学响应分析方法。根据结构试验模型设计了构件失效及力学响应采集机制。以实测参数作为评估仿真精度的指标。为了提高有限元仿真计算的精度, 提出了瞬态动力分析方法。基于仿真模型和计算方法, 进行典型失效工况的力学响

应分析和参数分析, 得到最不利的失效模式, 给出服役期构件失效的最佳维护措施。充分考虑构件失效的时间关联性, 提出了基于 IPSO 优化的 CNN-BiLSTM 的力学响应预测方法。结合有限元仿真数据样本和预测方法, 建立构件失效与力学响应之间的映射关系, 如图 2 所示。最终, 实现了构件失效的连续动态分析, 获取了最不利的失效路径。

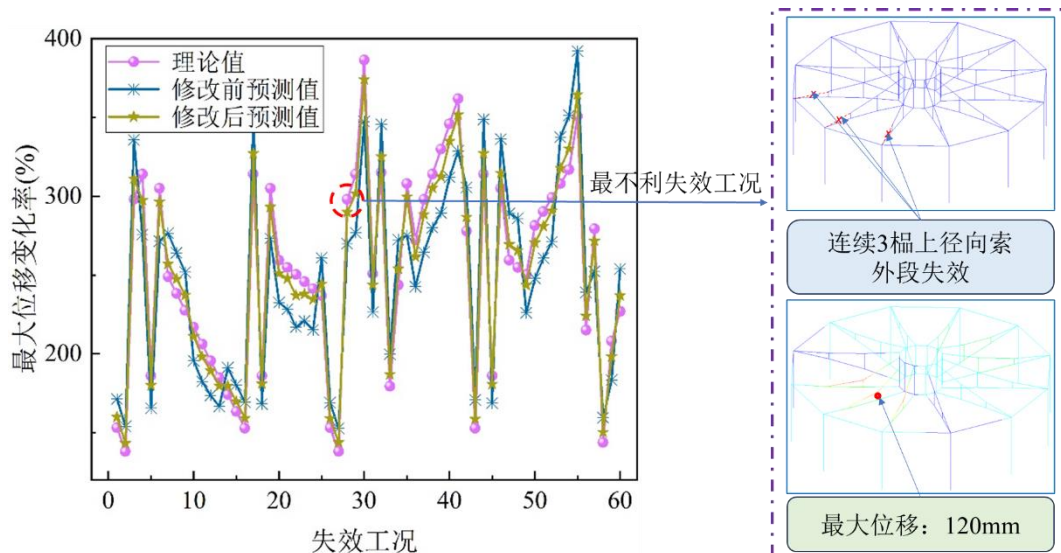


图2 失效工况与力学响应之间的映射关系

以索桁架结构为例验证了分析方法的有效性。构建模型更新所需的目标函数和优化参数, 开展结构的力学响应分析和损伤识别。结果表明, 更新后的孪生模型可以精准匹配结构力学行为的实测数据。针对结构的静力和动力响应, 孪生模型的仿真精度在 94% 以上, 仿真精度显著提高。面向结构的损伤识别, 通过对比更新前后的参数, 可以高效获取损伤的类型、位置和程度。研究成果可以为大跨度钢结构的精细化建模和服役期的健康监测和安全维护提供依据。

关键词: 数字孪生; 预应力钢结构; 安全评估; 推演分析

通讯作者简介: 北京工业大学建筑工程学院教授、博士生导师、科发院副院长, 智能建造专业负责人。主要从事数字孪生、智能建造方面的研究。



海上风机支撑结构“数字-力学”孪生方法研究

张柏楠¹, 张春磊², 彭根强², 韩勃^{2,*}

1. 山东大学, 软件学院, 山东济南 250101

2. 山东大学, 土建与水利学院, 山东济南 250061

通讯作者邮箱: bo.han@sdu.edu.cn

报告人: 韩勃、张柏楠

摘 要:

针对现有数字孪生技术在海上风电工程中存在的力学映射缺失问题,本研究创新提出了一种融合数值仿真、人工智能与实时监测的“数字-力学”孪生方法。传统数字孪生技术多停留在监测数据采集、存储及可视化等基础层面,其“以虚映实”的本质难以实现风机结构力学行为的精准预测。本研究自主研发了 CFD-FDEM 双向流固耦合数值模拟程序,开发了基于 GPU 加速的并行计算程序,攻克了海上风机支撑结构-基础体系多物理场耦合模拟的计算效率瓶颈。通过数值模拟构建了极端环境荷载、复杂地质条件下海上风机灾变数据集,基于数据集,采用时间序列深度学习方法建立了具有力学机理嵌入特征的 AI 代理模型,实现了桩-土相互作用体系应力应变分布及整体变形的实时预测,预测准确率达到 90%。创新性地提出“线下仿真训练-线上实时预测”的双向驱动架构:线下依托 GPU 加速技术开展高精度流固耦合数值模拟生成训练数据集,构建具有物理可解释性的深度神经网络模型;线上通过实时采集风机结构响应数据驱动 AI 代理模型,实现结构力学状态的动态推演与灾变预警。研究成果应用于海上风机桩基结构“数字-力学”孪生平台,突破了传统数字孪生技术中力学模型缺位的技术瓶颈,将数字孪生层级从“以虚映实”提升至“以虚预实”,为海上风电结构全寿命周期安全评估提供了创新性的解决方案。

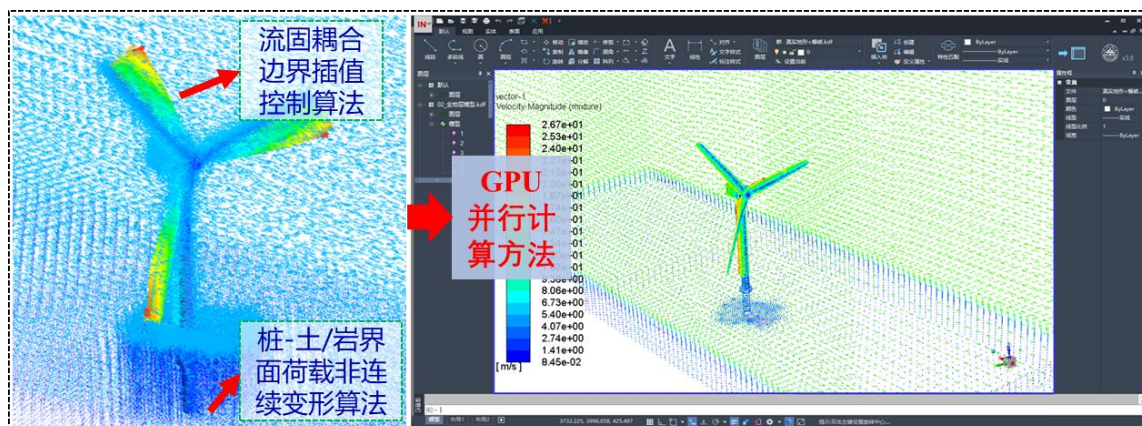


图 1 CFD-FDEM“流体-风机-结构-海床”一体化耦合计算平台



图 2 仿真数据驱动的悬臂梁“数字-力学”孪生模型



图 3 海上风机可视化数字孪生系统

关键词: 海上风电; 数字孪生; CFD-FDEM 流固耦合; GPU 并行加速; AI 代理模型

通讯作者简介: 韩勃, 山东大学研究生院常务副院长、党委研究生工作部部长、国家卓越工程师学院执行院长, 土建与水利学院教授、博士生导师, 主要从事海上风电与海洋岩土工程方面研究。

第一作者简介: 张柏楠, 山东大学软件学院博士后, 主要从事海上风机支撑结构一体化数值模拟与数字孪生运维技术方面的研究。



融合 LLM 与数字孪生的冻土工程监测与评估

张玉芝^{1,*}, 王盟², 梁少杰³, 贾明涛³

1. 石家庄铁道大学安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043

通讯作者邮箱: zhangyuzhi@stdu.edu.cn

报告人: 张玉芝

摘 要:

为解决多年冻土地地区基础设施室内试验和长期服役中存在的实时监测难、形变识别不准、稳定性预测弱等核心难题, 本研究围绕“智能感知-多模态融合-动态评估”三个层次, 构建了一套融合大语言模型 (LLM) 与数字孪生 (Digital Twin) 技术的冻土监测与路基稳定性预测分析框架, 涵盖感知、处理、识别、推演四个关键环节, 主要工作分为两个部分。

第一部分: 冻土含冰量识别与全场变形测量的多模态智能增强方法。

在已有基于瞬态热源法的冻土孔隙含冰量无损测量技术基础上, 面向工程实用性问题, 提出生成式人工智能增强的含冰量率定方法。针对传统模型在使用前需大量土性试验标定、前后处理复杂等技术瓶颈, 构建了多模态 LLM 驱动的含冰量标定智能体, 可在率定前快速完成数据降噪、模型拟合与结果平差, 大幅度降低人工干预, 提高标定效率和泛化能力。

同时, 为实现跨尺度、可复现的冻胀变形观测, 提出多模态大模型驱动的数字图像相关 (DIC) 测量体系。结合传统 LLM+知识增强生成 (KAG), 将规范文献嵌入模型结构, 实现测量流程参数自动生成、图像特征与算法匹配的智能化识别过程。构建图像-参数-响应的向量知识库, 推动 DIC 系统由“经验调参”向“知识调用”演进, 支撑自主研发算法的低门槛应用与大规模部署。

第二部分: 多年冻土地地区路基结构稳定性演化建模与风险预测机制研究。

针对高温高含冰量多年冻土区域的公路路基长期服役过程, 构建融合力学理论、数据挖掘与机器学习的结构状态预测机制。通过构建信息-物理融合建模框架, 耦合气候、地温、沉降等多源监测数据, 探索结构-环境互馈机制。引入物理信息融合驱动算法, 重构路基-地温-水热响应的协同演化路径, 揭示热-水-力耦合条件下病害早期演化模式, 实现对路基变形趋势的分阶段预测与状态感知。

本研究通过融合多模态大模型与数据驱动算法, 实现从数据感知-知识标定-变形识别-稳定性推演的全流程耦合, 构建面向寒区基础设施数字孪生需求的智能分析范式,

对高温高含冰量冻土路基的实时评估与动态调控具有重要理论与应用价值。

关键词: 多模态大语言模型(Multimodal Large Language Models); 冻土含冰量率定; 数字图像相关测量(Digital Image Correlation, DIC); 数字孪生基础设施; 多年冻土路基稳定性预测

通讯作者简介: 博士后、副教授，硕士生导师。主持国家自然科学基金 3 项，河北省重点研发计划等省部级课题 9 项，参与国家科技支撑计划、河北省创新研究群体等科研项目 10 余项，主持及参与企事业单位横向课题 10 余项。发表学术论文 50 余篇，其中 SCI、EI 检索 30 余篇，授权国家发明专利及软件著作权等 10 余项；获河北省科技进步一等奖 1 项。



长大桥梁虚拟建造研究与实践摘要

赵璐¹, 郭彬彬^{1,*}

1. 华中科技大学, 建筑工程学院, 湖北武汉 43000

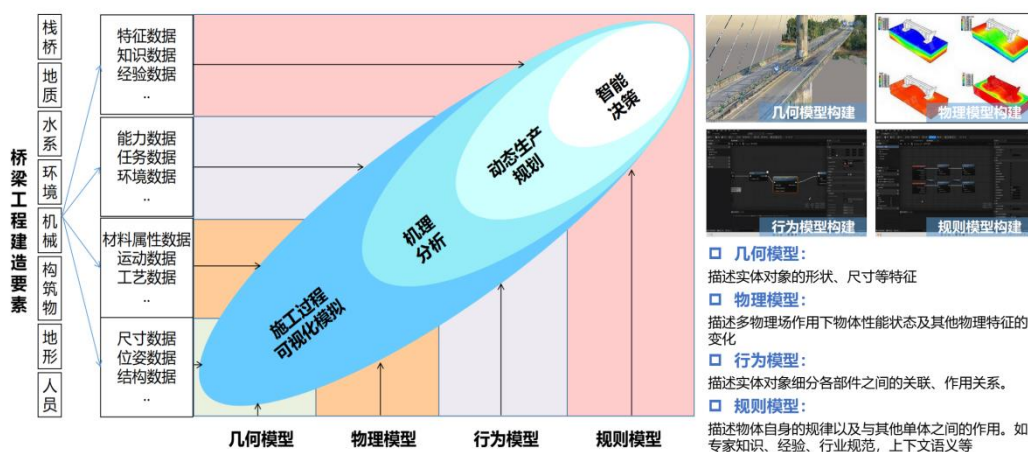
通讯作者邮箱: 631336134@qq.com

报告人: 赵璐

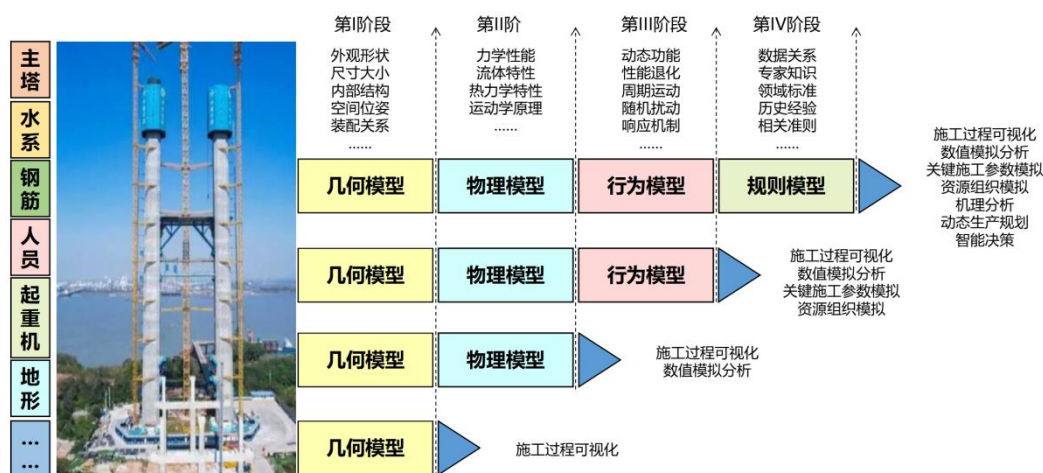
摘 要:

中交二航局是国内桥梁工程建造领域的领军企业, 智行国际作为其子公司, 在工程数字化领域具有丰富经验, 本次分享将系统阐述二航局长大桥梁虚拟建造体系、关键技术及实践成果, 为行业提供借鉴。

长大桥梁作为重要交通基础设施, 具有自然环境恶劣、施工窗口期短、资金密度高的特点, 传统施工模式依赖经验决策, 易因工艺选型、资源组织或精度控制失误引发安全、质量及成本风险。在此背景下, 虚拟建造技术的数字化预演为复杂工程提供了系统性解决方案。



虚拟建造体系以高保真多维模型为核心, 构建“方案设计-仿真推演-反馈优化”的工作流程, 通过数据驱动的全要素模拟, 实现施工方案的正向辅助设计与动态优化。首先, **多维建模**构建了涵盖几何、物理、行为、规则的四维模型, 实现人机料法环工程全要素的集成与动态抽象。其次, **仿真推演**通过专项方案模拟、特种设备行为仿真及工艺参数计算, 实现施工过程的全方位预演。最后, **智能决策**依托专家知识库, 实现资源配置的动态优化与方案比选, 显著提升施工效率与经济效益。



在典型项目实践中，虚拟建造技术展现出强大的应用效能。在某特大桥**锚碇地连墙基础**施工中，通过优化原槽段划分方式，减少钢筋笼槽段共 36 个。在某特大桥**沉井施工**中，通过风浪流变化及千斤顶动作对沉井位移及稳定性影响数值模拟分析，实现沉井精准定位下沉。在某特大桥**空间曲线钢斜塔**施工中，针对高倾斜塔的异形结构线形控制难题，虚拟吊装仿真动态规划吊装路径，规避多种空间干涉场景，将理论线形与实测偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内。

虚拟建造平台作为技术落地的核心载体，以多维模型为基础，具备四大核心功能：**方案正向推演**：联动设计、施工、管理环节，生成最优施工组织设计；**数值模拟分析**：支持复杂工况下的参数敏感性分析与风险预判；**全要素协同**：覆盖进度、质量、安全、成本的全闭环管理；**开放生态融合**：结合 AI 大模型实现方案智能生成与文档自动生成。

该平台已成功应用于多个重大项目，显著提升施工效率与安全性，推动行业向智能化、绿色化转型。未来，随着数字孪生与 AI 技术的深度融合，虚拟建造将进一步助力“中国桥梁”持续引领全球基建创新。

关键词： 多维建模；仿真推演；数值模拟分析；全要素协同；开放生态融合

通讯作者简介：郭彬彬，中交武汉智行国际工程咨询有限公司科数部经理，高级工程师。主要从事工程数字化技术研究与推广。



基于长期地震作用下钢筋混凝土核安全壳力学行为的非线性有限元模型更新

付斯¹，汪家继^{1,*}

1.香港大学，土木工程系，香港薄扶林道

通讯作者邮箱：cewang@hku.hk

报告人：付斯

摘 要：

随着全球对核电站安全的关注不断加深，确保核反应堆结构在地震作用下的稳定性和安全性显得尤为重要，钢筋混凝土核安全壳（RCCV）作为最后一道屏障，在有效防止放射性物质外泄、避免对环境和公众造成重大影响的作用中扮演了关键角色。近期，我们的研究团队使用部署在台湾的一座大型振动台，对于一个 1/20 比例缩尺的钢筋混凝土安全壳试件开展了一系列单向地震加载的振动台试验，并对位移、加速度、应变等数据进行量测与收集。

我们根据试件的几何尺寸与约束条件，在有限元软件 Abaqus 中构建了高保真的有限元模型，并采用基于多层壳单元的双轴钢筋混凝土本构模型，应用 Abaqus 中的隐式求解器开展了精细有限元模拟。针对材料本构模型中的五个重要参数以及瑞利阻尼相关的两个参数，我们提出了基于力学行为的非线性有限元模型更新过程框架（图 1），并分别以模拟退火算法和遗传算法作为更新算法，开展了单次地震与多次地震下的大规模模型更新工作。对于持续时间 20 秒的单次地震作用的模型更新，我们采用 4 组不同的峰值加速度地震输入，结果显示，更新后的模型可以对于试验量测的时程数据（位移和加速度）进行良好模拟，误差保持在 15% 以内，同时形成了一套包含 3400 组不同材料和阻尼参数的核安全壳有限元模拟结果数据集。利用上述数据集，我们采用包含六个傅里叶层的傅里叶神经算子（FNO）模型架构训练出一个可用于核安全壳力学数字孪生的深度学习模型，结果表明，傅里叶神经算子模型能够捕捉到参数变化的趋势，经训练后，模型的推断速度相比单次有限元计算速度实现超过 5000 倍的速度提升。我们利用该预训练的深度学习模型替换有限元模拟过程并开展模型更新工作，该更新过程从采用有限元软件的 210 小时减少到 15 分钟，与试验量测数据相对比，结果保持在令人满意的精度水平，表明基于高性能 GPU 并行计算的结构非线性模型更新具有广泛的应用前景。此外，为了拓展模型更新的适用范围，我们还在持续时间分别为 20 秒和 50 秒，具有不同峰值加速度的多次地震作用条件下开展了非线性有限元模型更新工作，结果显示，更新后的模型可以反映长期地震作用下的力学行为（图 2），对于结构累积损伤和承载能力退化具有良好的预测能力。这项研究对于数字孪生在钢筋混凝土结构健康监测和性能评估中的应用起到了有效促进作用。

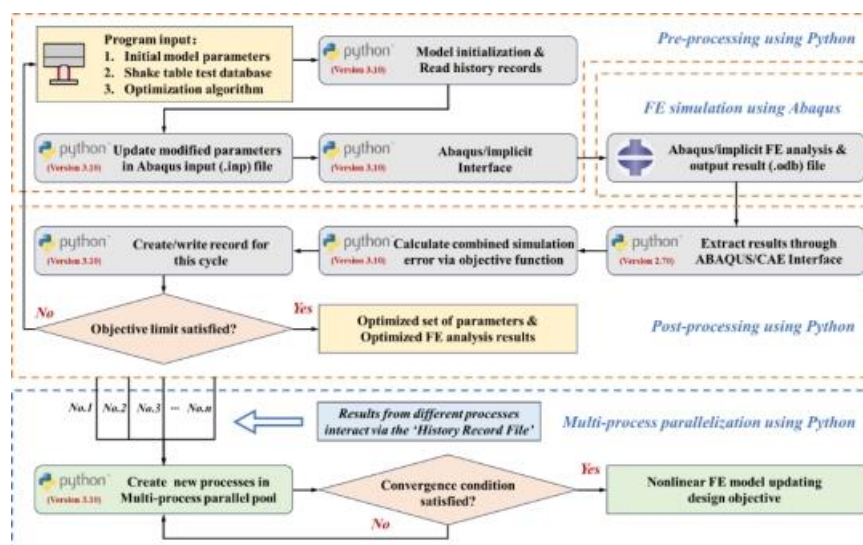


图 1 非线性有限元模型更新过程框架

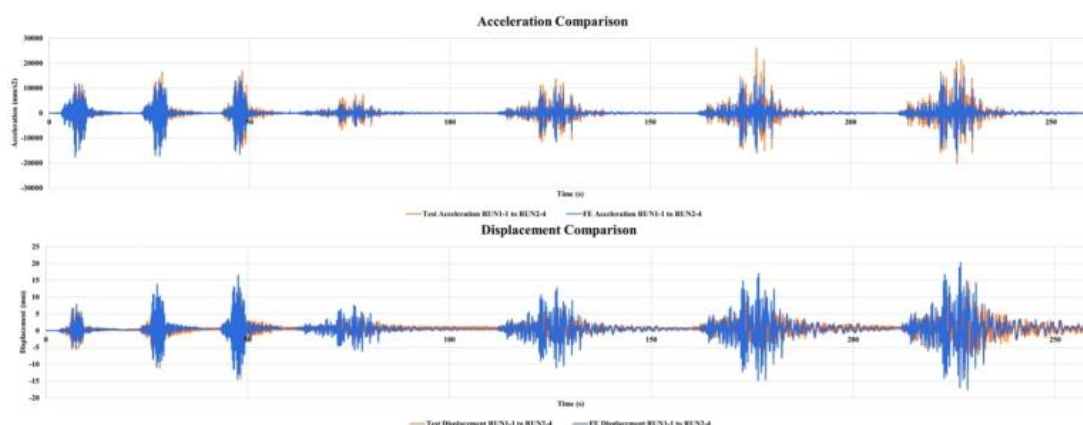


图 2 长期地震作用下的钢筋混凝土核安全壳力学行为模拟与预测

关键词:

振动台试验; 有限元模拟; 非线性模型更新; 傅里叶神经算子 (FNO); 数字孪生

通讯作者简介: 香港大学土木工程系助理教授、博士生导师。主要从事机器学习方法与计算力学、结构工程、超级计算机等领域方面的研究融合。



基于三维激光点云的桥梁灾后快速检测：车桥碰撞案例研究

马天宇¹，朱彦洁^{1,*}，熊文^{1,*}，张倍阳^{1,2}，胡楷文¹

1. 东南大学，交通学院，江苏南京 211189

2. 中铁桥隧技术有限公司，江苏南京 211800

通讯作者邮箱：yanjie@seu.edu.cn; wxiong12@hotmail.com

报告人：马天宇

摘 要：

随着交通量的增加，车辆与桥梁的碰撞事故频繁发生，给桥梁的安全运营带来了巨大威胁。面对突发的车桥碰撞事故，桥梁管理机构迫切需要快速、准确的损伤检测方法来评估受损桥梁的使用性能，为灾后桥梁的快速修复提供技术支撑。然而桥梁的服役性能与碰撞事故的桥梁损伤形态密切相关。由于传统的测量方法只能采集有限个数据点，无法获得桥梁受损区域的三维空间形态，因此无法为桥梁的损伤评估和灾后快速修复提供有效的数据支撑。近些年三维激光扫描技术得到了快速发展，该技术为及时、准确地检测受损桥梁的三维空间形态提供了保证。基于三维激光扫描技术，本研究以一座发生车桥碰撞事故的自锚式悬索桥为案例，提出了车桥碰撞灾后应急检测方案，并为桥梁管理机构的应急响应决策提供有效的技术支撑。本研究重点关注高质量桥梁三维激光点云模型的快速建立、桥梁的主梁与主缆空间形态识别以及碰撞损伤区域的精细化评定。基于受损桥梁的三维激光点云模型，提取主梁、主缆的空间线形、吊杆的空间偏位以及索夹的局部损伤深度。检测结果表明主梁、主缆的空间线形呈现明显的不对称性，主梁线形的最大高差达到 0.418m，主缆线形的最大高差达到 0.536m，并且主梁出现了横向扭转，需要对主缆采取紧急加固措施。此外，检测结果显示吊杆在车辆的撞击作用下横向偏移了 17.12°，索夹的最大损伤深度达到 33.06mm，需要立即更换索夹。

关键词：桥梁工程；车桥碰撞；灾后快速检测；三维激光点云；空间形态识别

通讯作者简介：朱彦洁，东南大学交通学院副教授、硕士生导师。主要从事激光点云、声呐点云、机器视觉以及知识图谱的研究。

熊文，东南大学交通学院教授、博士生导师。主要从事数字桥梁、桥梁抗水、桥梁冲刷、桥梁智能建造与运维以及桥梁结构分析与性能设计的研究。

基于机械臂的建筑瓷砖铺贴功能开发

李可娜^{1,*}, 宋志飞¹, 廖一维¹, 满轲¹

1. 北方工业大学, 土木工程学院, 北京 100144

通讯作者邮箱: likena2008@163.com

报告人: 李可娜

摘要:

在建筑行业面临劳动力成本上升、老龄化问题加剧以及工人技术水平参差不齐的背景下, 同时当前建筑行业仍较为依赖人工, 自动化程度低。而建筑施工机器人的发展为解决这些问题带来希望。在瓷砖铺贴领域, 传统手工铺贴存在施工周期长、劳动量大、效率低等弊端, 瓷砖铺贴机器人则具备减少劳动力、保证铺贴效率和质量的优点, 成为研究热点。本文聚焦于基于六自由度机械手臂的建筑瓷砖铺贴功能展开研究。

本文首先阐述了发展机械化建筑施工技术、研究建筑施工机器人的必要性。并介绍了建筑施工机器人在国内外的研究现状。实验研究选用遨博科技公司的 2D 机器视觉开发套件。该套件整合多种技术, 结构模块化, 支持二次开发, 其机器人为 6 关节 6 自由度, 末端工具包括电动扳手和气动吸盘。同时, 利用机器视觉系统, 使机器人能感知环境并决策。在此基础上, 设计了瓷砖铺贴功能场景及方案, 优化了铺贴动作流程, 减少示教位置点, 提高了机器人运行精度。



图 1 机械臂示教器操作界面

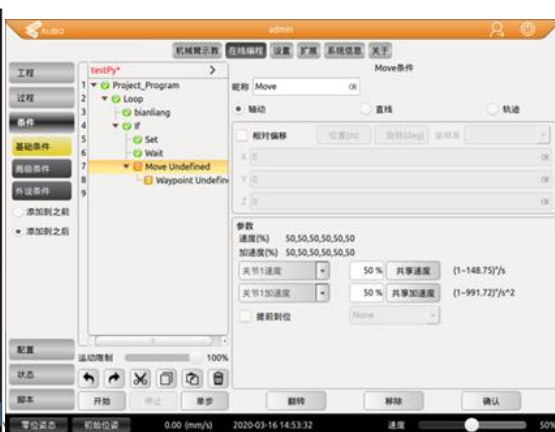


图 2 机械臂在线编程运动命令

通过对六自由度机械手臂运动编程及二次开发, 运用运动命令、选择合适运动属性、考虑相对位移以及选定法兰坐标系等方式, 实现了实验室模拟建筑工程瓷砖铺贴过程的自动化。在实验室条件下, 成功完成机械手臂在操作台上的瓷砖粘水泥砂浆并规则铺贴的功能开发, 编制了相应程序流程。

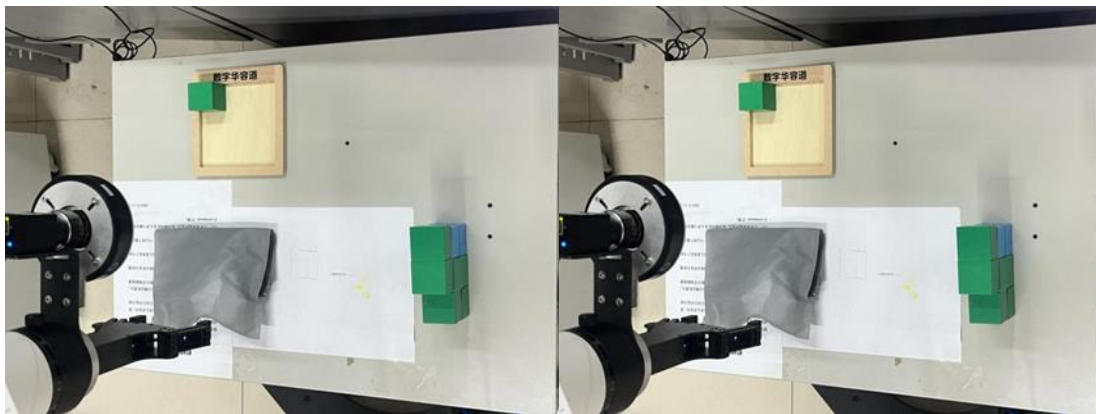


图3 瓷砖铺贴模拟实验完整循环

论文的创新点在于基于六自由度机械手臂，通过运动编程实现实验室环境下的瓷砖铺贴功能，为后续实际工程环境中的建筑功能开发提供了基础和方法。并展望在实际大型项目中，应借助 BIM 模型输入或视觉识别墙体位置来设置点位，增加真实环境验证并修正；同时，现实施工中粘取水泥砂浆环节至关重要，需精细设计，如增加涂抹过程或引入另一台机械手臂进行协作，开发两台机械手臂的通讯及动作协调控制功能，从而推动建筑施工机器人的量产和大规模应用，提升施工效率和质量。

关键词：六自由度机械臂；运动编程；瓷砖铺贴；功能开发

通讯作者简介：李可娜(1982-)，女，工学博士，北方工业大学土木工程学院副教授、硕士研究生导师。主要研究方向为智能化建造。

基于四足机器人的施工安全巡检功能开发研究

李可娜^{1,*}, 宋志飞¹, 李响¹, 廖一维¹, 满轲¹

1. 北方工业大学, 土木工程学院, 北京 100144

通讯作者邮箱: likena2008@163.com

报告人: 李可娜

摘 要:

本文介绍了一种基于四足机器人的施工安全巡检功能的研究和实现方法, 利用四足机器人的运动能力和感知能力, 实现了在建筑施工过程中对人员是否佩戴安全帽的实时检测和警报功能。传统的人工巡检和视频监控方式存在诸多弊端, 人工巡检耗费大量人力物力, 且易受环境和人为因素干扰, 导致巡检效率低、质量差。为解决这些问题, 本文聚焦基于四足机器人的施工安全巡检功能展开研究。

研究选用云深处“绝影 Lite2”四足机器人, 借助其运动能力和智能感知能力, 实现对建筑施工现场的高效巡检。首先利用开源的 Helmet-Asian 和 Helmet-Europe 数据集训练基于 YOLOv5 算法的安全帽检测模型。考虑到机器人的 GPU 性能及实际运行需求, 选择轻量化的 YOLOv5s 模型, 训练完成后, 生成的模型文件可用于后续检测任务。



其次, 基于 ROS 系统进行开发。创建“safety_helmet_detection”的 ROS 功能包, 其包含描述包信息和依赖关系的文件、启动节点的 launch 文件、存放预训练模型的 models 文件夹、实现安全帽检测功能的 Python 脚本以及从 PC 拷贝的已训练好的 yolov5 代码和模型。其中, launch 文件设置模型路径参数并启动实现检测功能的节点, python 脚本负责订阅摄像头图像、使用 YOLOv5 模型检测安全帽、发布检测结果图像, 若检测到未佩戴安全帽情况则播放警告音频。

同时, 本实验使用四足机器人的 16 线激光雷达与 Xavier NX 主板实现机器人的实地建图&定位&导航&避障功能。机器人能实现实时定位和在线 3D 建图, 通过融合 imu 实现了高速旋转、摔倒不丢失定位的性能, 并使用 move_base 功能包实现四足机

器人准确地识别和定位目标点，并按照预设的路径自主地完成巡逻任务，并实现自动避开障碍，未发生偏移与碰撞情况。

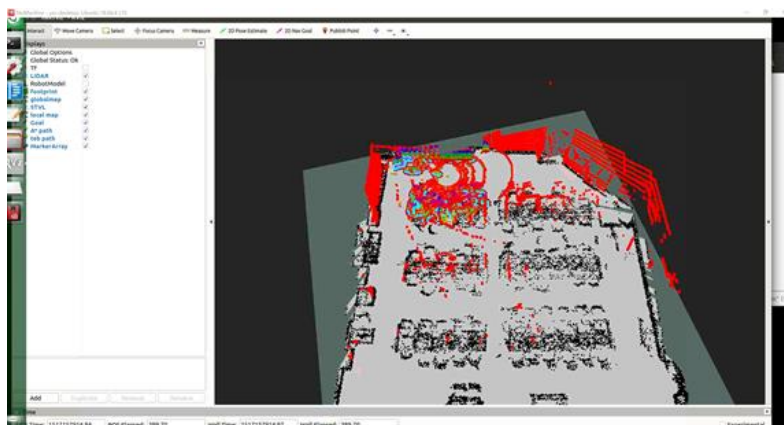


图2 栅格图与实时定位导航

最终通过在学校实验室的测试验证，该安全帽检测方法和四足机器人巡检功能运行良好。能在不同场景、角度和光照条件下，准确识别人员是否佩戴安全帽，并用不同颜色边界框标注，还可处理多人同时在画面中的情况，避免短暂误报，仅当未佩戴安全帽情况持续超 0.5 秒时发出警报。

本文研究成果一方面结合 YOLOv5 算法和 ROS 系统，实现端到端的安全帽检测和巡检方案，满足施工现场安全管理需求，提升工作效率和安全水平；另一方面，开发流程具有良好的迁移性，通过重新搜集标注训练集、重新训练 YOLO 模型并替换机器人中的模型，即可轻松拓展检测其他目标，如各类安全设备和违规行为，也能将该方案应用于工厂、电厂等更多需要巡检的场景，为提升多领域安全巡检水平提供了创新思路和实践经验。

关键词：四足机器人；安全巡检；YOLOv5；ROS

通讯作者简介：李可娜(1982-)，女，工学博士，北方工业大学土木工程学院副教授、硕士研究生导师。主要研究方向为智能化建造。

物理约束与数据驱动融合的锈蚀 RC 构件滞回特性表征

袁方¹, 陈治希¹

1. 深圳大学, 土木与交通工程学院, 广东深圳 518060

通讯作者邮箱: fyuan@szu.edu.cn

报告人: 袁方

摘要:

钢筋锈蚀对钢筋混凝土 (RC) 结构的抗震性能有着显著的负面影响, 因此, 需要锈蚀 RC 结构进行及时、精准的评估, 以确保其安全性和可靠性。然而, 锈蚀本身的随机性及其对结构构件的复杂影响, 使得使用经验模型或有限元方法进行准确预测极具挑战性。针对锈蚀 RC 构件塑性较复杂滞回特性的量化表征难题, 本研究提出一种融合物理约束 (包含破坏模式分类约束及滞回参数物理边界约束) 与机器学习的滞回模型构建框架, 突破传统线性回归方法在泛化能力上的局限性以及纯数据驱动模型存在的物理不一致性问题。通过整合国内外锈蚀试验数据, 构建具有统一坐标系与标准化边界条件的滞回曲线数据库。基于 PEER 三级破坏模式分类准则, 采用机器学习分类器实现破坏模式的精准辨识, 进而驱动滞回模型类型的自适应匹配。结合有限元参数反演与差分进化算法, 在物理边界约束下标定塑性较滞回模型参数。基于反向传播神经网络 (BPNN) 模型及萤火虫优化算法, 建立“构件特征参数—破坏模式—滞回参数”的非线性映射关系, 为锈蚀 RC 结构弹塑性时程分析提供概率化塑性较本构库。

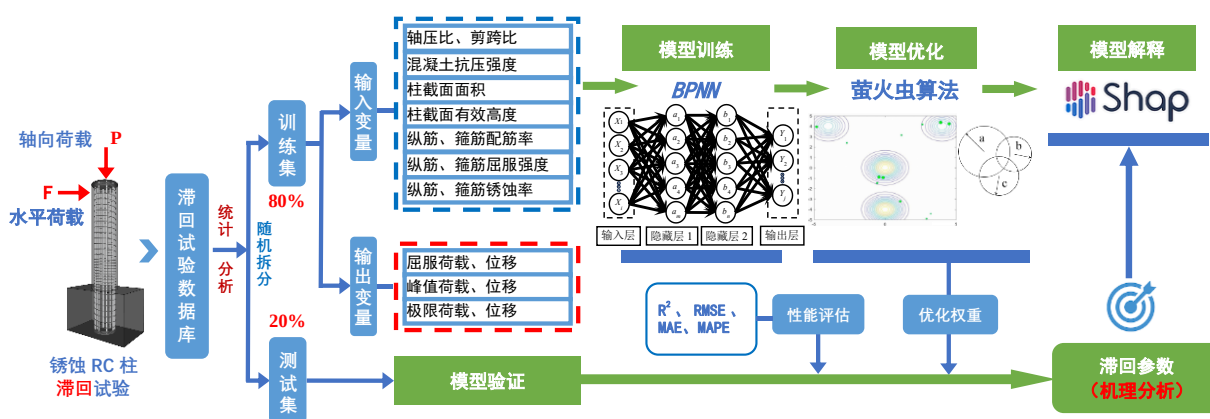


图 1 基于 BPNN 的滞回参数预测流程图

关键词: 机器学习, 反向传播神经网络, 锈蚀, 钢筋混凝土柱, 滞回性能

通讯作者简介: 深圳大学土木与交通工程学院副教授、土木工程系副主任、博士生导师。主要从事城市滨海混凝土结构抗震性能及耐久性评估与提升方面的研究。



黄河体育场大悬挑钢索组合空间结构施工模拟与试验研究

鲁建^{1,*}, 陈江¹, 亓祥成¹, 董鹏¹, 芦燕², 王力晨²

1. 中建八局第一建设有限公司, 工程研究院, 山东济南 250100

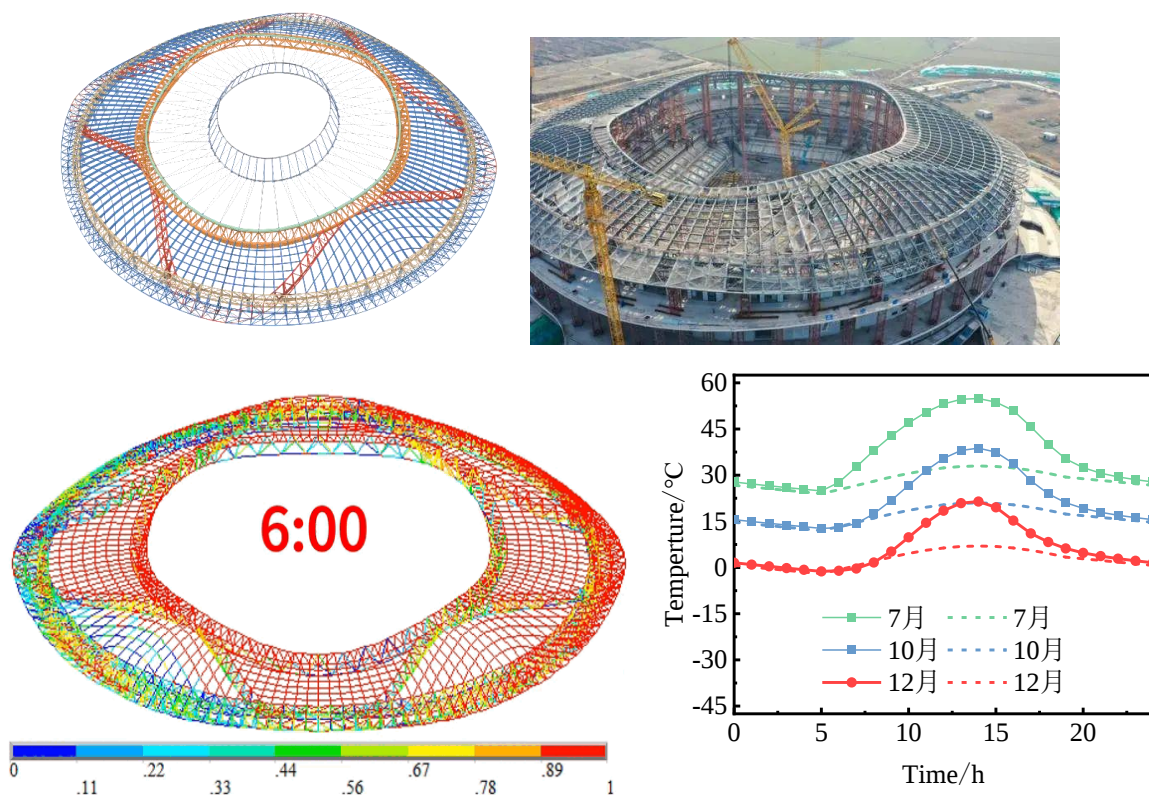
2. 天津大学, 建筑工程学院, 天津 300354

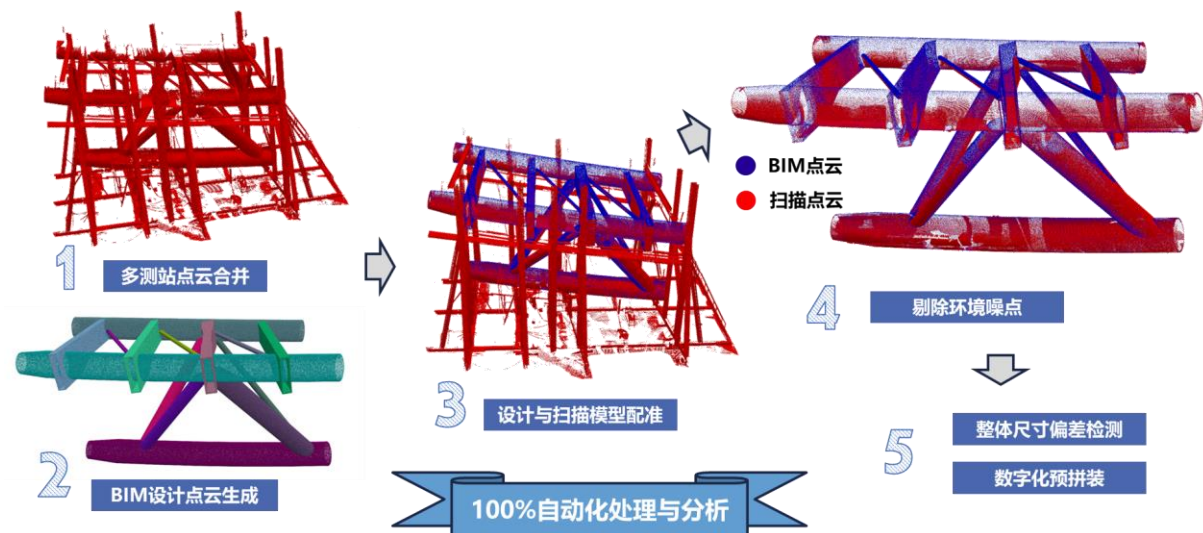
通讯作者邮箱: lujian2020@126.com

报告人: 鲁建

摘 要:

黄河体育场位于山东济南, 是山东首座 6 万人体育场, 平面投影为中央开孔的直径约 280m 圆形, 总高度 60m, 屋顶沿环向呈波浪起伏, 立面呈马鞍形。其主体结构采用大悬挑星形管桁架+CFRP-钢索组合轮辐式索桁结构, 能够显著提高结构的抗震性能和减小结构风振响应。由于该结构体系具有跨度大、体系复杂、施工过程难度大等特征, 针对施工过程中关键难题, 相继开展了复杂钢结构日照非均匀温度场效应分析及软件开发、智能胎架优化方法及软件开发、基于多源点云的复杂钢结构数字化尺寸检测技术及软件开发, 最后针对 CFRP-钢索组合索桁结构开展了 1:15 缩尺模型试验研究, 开展了张拉成型试验、经理加载试验、模态试验、断索试验研究。通过复杂数值分析、软件开发和试验研究, 为黄河体育中心专业足球场顺利施工提供了理论支撑, 并节约了工程造价, 提高了施工效率。





关键词：大跨空间结构；大悬挑星形管桁架网壳结构；CFRP-钢索组合索桁架；多源点云技术；缩尺模型试验

通讯作者简介：中建八局一公司工程研究院业务经理、博士后。主要从事大跨空间结构及“平急两用”公共基础设施建造技术方面的研究。



基于参数化数值风洞的建筑抗风性能分析软件开发与应用

程明¹，李昀¹，王义凡，尹鹏飞¹，张慎^{1,*}

1. 中南建筑设计院股份有限公司，武汉 430072

通讯作者邮箱：a664900495@qq.com

报告人：程明

摘 要：

在当今建筑领域，随着住建部“建设好房子”目标的推进，建筑性能化设计逐渐成为现代建筑设计的核心趋势，而建筑抗风性能作为关键构成要素，其重要性日益凸显。传统规范法与风洞试验在应对复杂建筑体型风荷载评估时，暴露出诸多局限性，难以满足精准设计需求。鉴于此，本文创新性地提出了一种基于参数化数值风洞的建筑结构抗风性能分析方法，并成功实现软件化。该软件深度融合参数化建模工具 Grasshopper 与开源 CFD 求解器 OpenFOAM，搭建起从建筑方案模型到 CFD 计算模型的高效转化桥梁，实现快速处理分析。经过物理风洞试验验证，CFD 计算模型的准确性与可靠性得以充分证实。此外，基于典型工程案例，进一步印证了该方法在实际应用中的适用性与高效性。研究表明，所构建的参数化数值风洞解决方案，具备高效、精确分析复杂建筑结构抗风性能的显著优势，为建筑抗风设计领域开辟了新的技术路径，具有广阔的应用前景与重要的实践价值。

一、建筑参数化数值风洞解决方案

在建筑参数化建模方面，基于 Grasshopper 平台，提出了从建筑方案模型到 CFD 计算模型的快速转化方法。该方法解决了参数化建筑模型在几何处理和网格划分中的难题，提高了模型的适用性和分析效率。

针对建筑数值风洞技术，研究了计算域建立与网格划分、边界条件与湍流模型设置、后处理能力提升等关键技术。提出了满足阻塞比要求的计算域设定方法，采用 OpenFOAM 的结构-非结构网格划分算法实现高效网格划分。同时，基于物理试验的数值参数标定，以 CAARC 模型为例，通过与风洞试验结果对比，验证了数值模拟的精度与可靠性，并给出了边界条件和湍流模型等数值参数的建议值。

为提升后处理能力，基于 VTK 开展了抗风性能后处理研究。针对工程应用需求，对计算结果进行轻量化和分析指标二次开发，为风压系数等关键参数提供校核功能，满足了建筑结构领域在风压分布、体型系数等方面的可视化和统计分析需求。

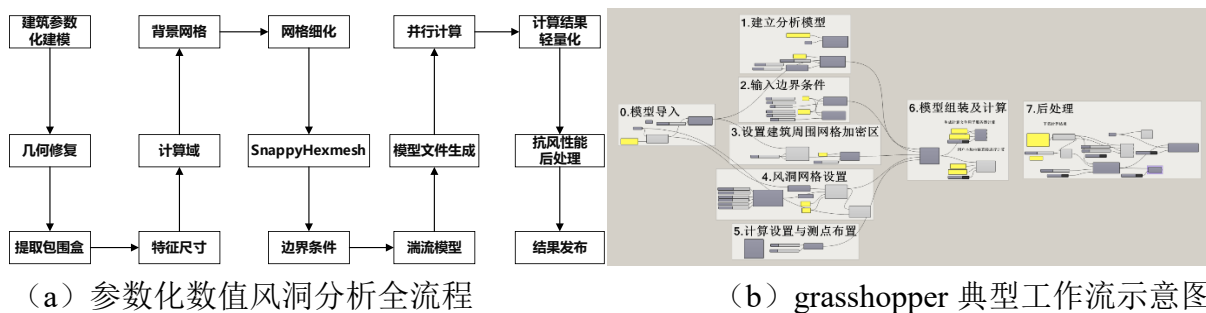


图 1 参数化数值风洞解决方案概述

二、基于 CAARC 的数值参数标定

通过对比风压测量结果,发现 CFD 计算能够有效模拟高层建筑绕流场基本特征,如建筑两侧风速加速现象、尾部涡旋回流区域以及建筑顶部风速回流等。在风压系数对比分析中,网格方案 2 在建筑迎风面正压和背风面负压模拟上较为接近风洞试验结果,综合考虑精度与成本,后续采用该方案进行数值风洞风荷载分析。多风向角对比结果表明,CFD 模拟的测点风压分布变化规律与风洞试验吻合良好,平均风压误差在 5%左右,满足工程精度要求。

三、工程应用

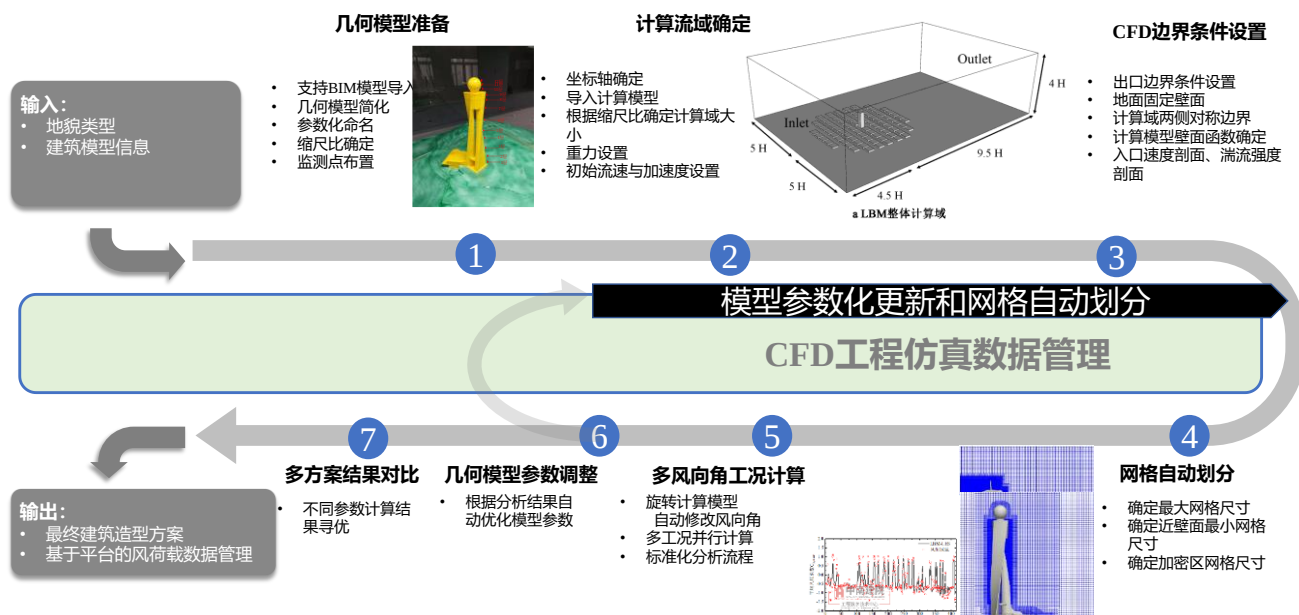


图 2 典型工程应用

关键词: 建筑结构; 抗风性能; 参数化建模; 数值风洞; OpenFOAM;

通讯作者简介: 张慎(1982-), 男, 博士, 正高职高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴专家, 湖北省劳动模范, 荆楚工匠。研究方向为建筑全生命周期管理和数值仿真。E-mail: zhangshen202@163.com



基于数据融合的建筑结构动力弹塑性多尺度分析参数化建模

王秀宇¹, 王强^{1,*}, 杨春晓¹, 焦中朴¹

1. 沈阳建筑大学, 土木工程学院, 辽宁沈阳 110168

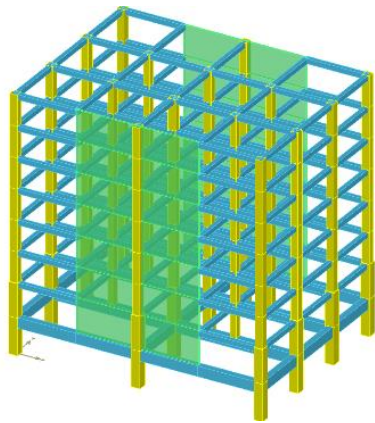
通讯作者邮箱: wangqiangsy@163.com

报告人: 王强

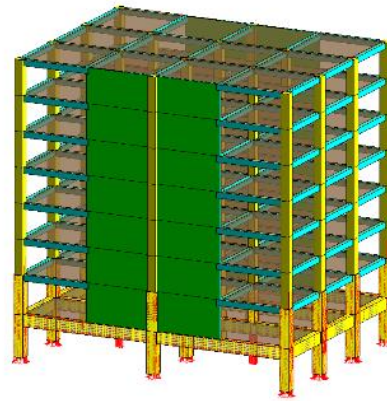
摘要:

结构动力弹塑性分析可以高效、细致、低成本地预演结构在复杂荷载作用下的弹塑性、损伤破坏乃至倒塌行为,是建筑结构性化设计的重要内容。以往结构模型中常采用纤维梁单元模拟梁柱构件,多层壳单元模拟墙板构件,尽管计算效率较高,但无法准确合理地描述节点与复杂构件的精细构造与受力行为。已有的多尺度模型分析方法研究表明,结构不同区域采用精细程度不同的单元模型并进行合理的界面自由度耦合,可以较好地平衡计算效率与准确性。一些学者研究了将结构设计模型或 BIM 模型转换为结构有限元分析模型的方法,但缺少可用于结构多尺度分析的参数化建模方法。本文将具备丰富建筑信息的 BIM 模型与具备完整荷载等设计信息的设计模型进行异构模型信息数据融合,提出了多尺度结构模型参数化建模与分析方法。首先,基于构件虚拟切割方法,分离并提取 Revit BIM 模型指定区域内的构件几何和材料信息,并基于钢筋细部特征参数,对 BIM 模型中的钢筋构造信息进行冗余信息过滤与重构。随后,通过构件位置坐标与构件标签,将 BIM 模型与结构设计软件 PKPM 设计模型进行数据匹配,并对设计模型信息进行调整更新,从而实现结构 BIM 模型与结构设计模型的数据融合。再次,采用 Revit 软件与有限元软件 ABAQUS 的 API 接口函数,依据 PKPM 设计结果构建整体结构的有限元梁壳单元模型,将 BIM 模型自动映射为局部精细化实体模型。最后根据构件的几何拓扑关系,建立梁-壳-实体单元的界面自由度耦合。依据上述流程,本文开发了建筑结构多尺度分析建模程序 PA-TRANS,按分析需求参数并结合之前提出的材料本构模型,参数化地构建具备细节信息的 ABAQUS 精细有限元 CAE 模型。模型分析结果表明,本文研究成果能够高效、准确地建立结构多尺度分析模型,局部精细化实体模型信息细致、精确,能够有效克服梁壳模型因平截面假定及剪切非线性考虑不足等因素导致的模拟失真问题,为建筑结构动力弹塑性与倒塌过程的精细化分析提供了技术支撑。

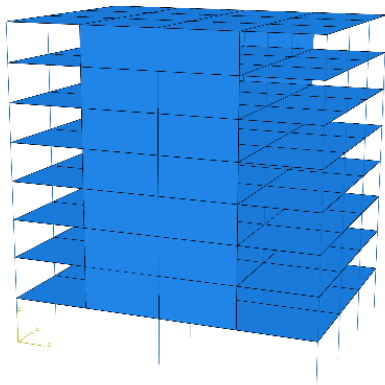
关键词: 多尺度模型; 数据融合; 参数化建模; 界面自由度耦合; 动力弹塑性



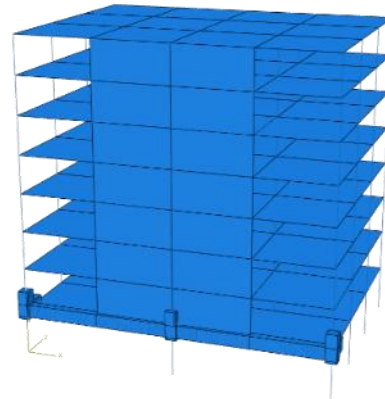
(a) PKPM 结构模型
(a) PKPM structural model



(b) Revit 结构模型
(b) Revit structural model



(c) 梁壳单元结构模型
(c) Beam-shell element structural model



(d) 多尺度结构模型
(d) Multi-scale structural model

图 1 框支剪力墙结构的模型图

Fig. 1 Structural model diagram of frame-supported shear wall system

基于多面体张拉整体的杆驱动可负重翻滚机器人参数分析

刘继磊¹, 陆金钰^{1,*}

1. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 210096

通讯作者邮箱: davidjingyu@seu.edu.cn

报告人: 刘继磊

摘 要:

随着人工智能的兴起与发展, 智能结构的概念在土木工程领域, 尤其是空间结构领域逐渐推广。张拉整体高效的结构形式和可变性引起了结构工程、机器人技术、计算机和其他交叉学科领域的学者的关注, 基于智能张拉整体结构出现了一系列新概念, 例如可展开结构, 可变结构和移动机器人等。可负重翻滚机器人是一种基于多面体张拉整体结构设计的球形移动机器人, 由刚度较大的压杆和弹性较大的拉索构成, 利用自身形变产生滚动。然而针对杆驱动可负重翻滚机器人缺乏必要的参数分析, 其实物结构的设计多基于经验, 并未给出具体的参数分析流程, 也未考虑材料参数对机器人翻滚功能和性能的影响。因此, 为获得易滚动、低能耗且结构稳定的可负重翻滚机器人, 将压杆质量、拉索刚度和中心质量作为材料参数, 将质心偏移量作为功能参数, 将压杆内力、拉索内力、细绳内力、能量、内部空间和内外空间比作为性能参数, 建立材料参数与功能参数和性能参数的关系。然后, 以基于十二面体的 6杆24索、二十面体的10杆30索和截断六面体的12杆36索三种张拉整体机器人为例, 分析材料参数对功能参数和各项性能参数的影响。在此基础上, 提出参数优化方案, 指导参数选择, 并通过试验验证结果的正确性。为后续此类机器人的实物制作提供参考, 使得机器人成型后更易滚动、能耗更低, 且结构内部空间变化更合理。

关键词: 多面体张拉整体; 杆驱动; 翻滚机器人; 参数分析

通讯作者简介: 陆金钰, 东南大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事智能空间结构方面的研究。

基于自复位 SMA-ECC 构件的功能可恢复混凝土框架数值模拟及地震易损性分析

李宗翱¹, 陈玮祎¹, 钱辉^{1,2,*}, 张敬科¹, 师亦飞¹

1. 郑州大学, 土木工程学院, 河南郑州 450001

2. 河南理工大学, 土木工程学院, 河南焦作 454003

通讯作者邮箱: lizongao1994@zzu.edu.cn

报告人: 李宗翱

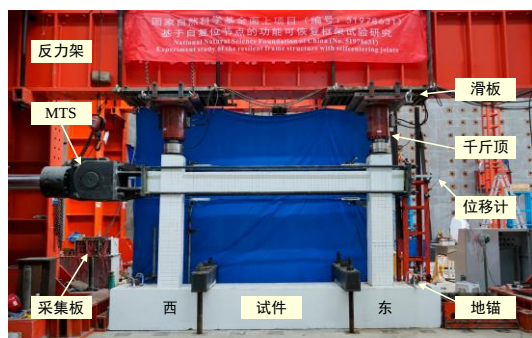
摘 要:

随着我国城镇化的发展, 城镇人口和财产密度不断升高, 对震后结构的快速修复与功能的快速恢复的需求也日益提高, 在这一背景下, “可恢复功能结构”的设计理念愈加受到重视。

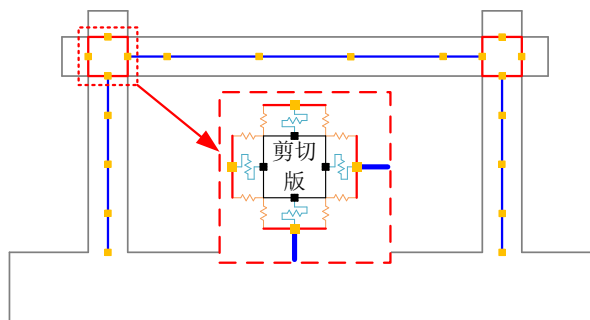
SMA 与 ECC 结合应用于钢筋混凝土结构中, 可同时降低结构震后的残余变形与损伤, 实现结构在震后的功能恢复。因此, 本文提出了基于 SMA-ECC 的功能可恢复框架结构, 并进行了系统性的研究。制作了 RC 框架和 SMA-ECC 框架试件, 通过拟静力试验对比了两种框架的滞回特性。结果表明, SMA-钢筋挤压锚固套筒连接展示了优异的性能和良好的破坏模式。SMA-ECC 框架在各个加载阶段的损伤均小于 RC 框架, 达到极限破坏时, 整体损伤仍较低。SMA-ECC 框架展示了显著的“旗帜形”自复位滞回特性, 表现出较好的延性, 显示出优异的可恢复能力。

进行了基于 SMA-ECC 的功能可恢复框架数值模拟及参数分析。建立了良好的有限元模型。探究了多种参数对其抗震性能的影响。参数化优化分析结果表明, 在功能可恢复框架的梁和柱的塑性铰区应均采用 SMA-ECC 材料; 应确保 SMA-ECC 材料的替换长度完全覆盖塑性铰区; 在设计 SMA 筋的配筋率时, 应主要考虑其满足结构的承载力需求。经过参数优化的 SMA-ECC 框架模型展现出卓越的可恢复性能和综合抗震性能。弹塑性时程分析结果表明, 设计的功能可恢复框架结构在设防地震、罕遇地震和极罕遇地震作用下均符合预期的可恢复性能目标。

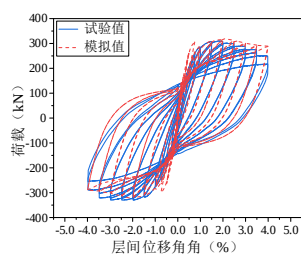
本文对基于自复位 SMA-ECC 的功能可恢复框架结构, 进行了增量动力分析。结果表明, 钢筋混凝土框架结构和功能可恢复框架结构抗倒塌易损性上呈现出一定的相似性, 但是两种结构在最大残余层间位移角上的表现出显著差异。功能可恢复框架结构即使在强震影响下也能维持较低的损伤概率, 在保证生命安全的基础上, 还能保持其结构功能的持续性, 有效地实现了结构在震后的功能可恢复。



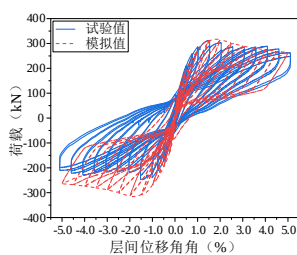
(a) SMA-ECC 框架拟静力试验



(b) SMA-ECC 框架有限元模型

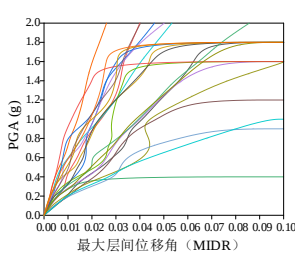


(a) RC框架

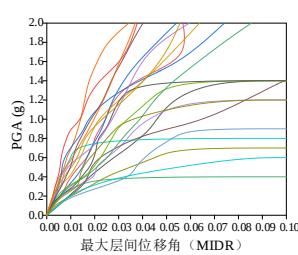


(b) SMA-ECC框架

(c) 数值模拟与试验结果对比验证



(a) 钢筋混凝土框架结构



(b) 功能自恢复框架结构

(d) 地震易损性分析 IDA 曲线

图 1 自复位 SMA-ECC 自复位构件的功能可恢复混凝土框架地震易损性分析

关键词：形状记忆合金；自复位结构；可恢复功能；数值模拟；地震易损性

讯作者简介：钱辉（1978-），男，河南理工大学土木工程学院院长、郑州大学特聘教授、博士生导师。主要从事智能材料与结构、可恢复功能防震结构方面的研究。主持承担国家自然科学基金 4 项，各级科研项目 20 余项。获得省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项。

降维-迭代重分析方法及其在结构非线性分析中的应用

李文雄^{1,*}, 陈穗茵¹, 黄家员¹

1. 华南农业大学, 水利与土木工程学院, 广东广州 510642

通讯作者邮箱: leewenxiong@scau.edu.cn

报告人: 李文雄

摘 要:

构建一种基于方程系统降维与预处理迭代求解的结构静力重分析方法。首先, 针对局部修改结构的重分析问题, 将刚度改变所引起的结点力变化看作附加荷载, 从而构建局部修改结构的等效降维方程系统。在此基础上, 采用预处理迭代求解技术完成降维方程的求解, 从而实现局部修改结构的快速重分析。然后, 将这种重分析方法与结构非线性求解技术相结合, 实现材料非线性条件下的结构静动力高效分析。数值算例表明, 该方法有效集成了系统降维与迭代求解算法, 在中小范围修改的情况下, 展现出显著的效率优势。进一步地, 针对大范围修改结构的重分析问题, 探讨了将上述“降维-迭代”重分析方法与高维模型表征技术相结合的策略, 将大范围修改问题分解为若干小范围修改问题, 分别求解并重构原问题的位移解。数值算例验证了该方法在大范围修改结构重分析中良好效果。

关键词: 结构重分析; 系统降维; 预处理迭代求解; 高维模型表征

通讯作者简介: 华南农业大学水利与土木工程学院副教授、硕士生导师。主要从事计算力学和结构非线性分析方面的研究。



近断层地震动作用下新型横向软钢挡块高墩梁桥抗震性能研究

潘子昂¹, 杨华平^{1,*}, 漆启明¹, 余瑞峰¹

1. 成都大学, 建筑与土木工程学院, 四川成都 610106

通讯作者邮箱: qiqiming@cdu.edu.cn

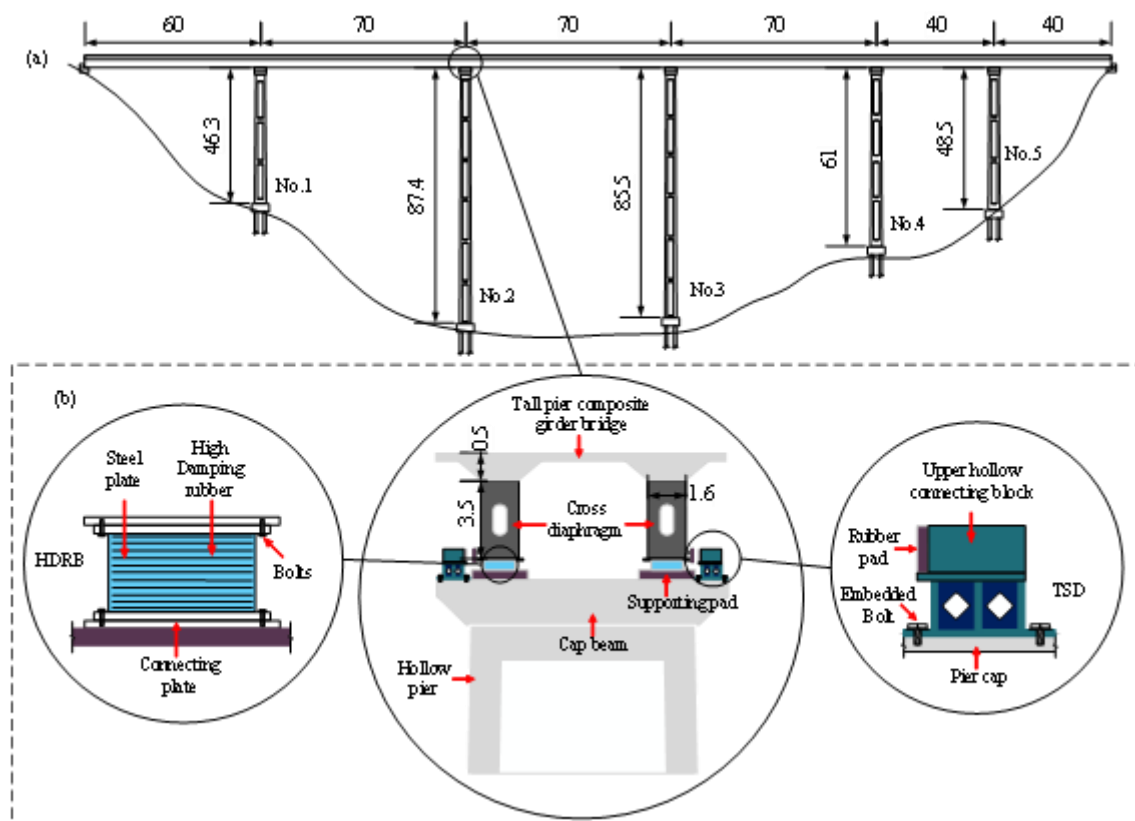
报告人: 潘子昂

摘 要:

随着交通基础设施的快速发展,高墩梁桥因其大跨度和高墩的结构特点,广泛应用于公路、铁路等项目中。然而,这种桥梁类型在地震下的抗震性能仍是工程设计中的重大挑战。传统的抗震设计方法通常侧重于增加结构的刚度和强度,但这种方法在面对脉冲型地震动等特殊地震波时,可能无法有效地控制桥梁的位移和内力响应,导致桥梁结构发生超出设计预期的变形。如何在保证桥梁稳定性的前提下,提升其抗震性能,尤其是在地震动影响下的表现,是目前桥梁工程领域亟待解决的问题。本研究旨在通过提出一种新型的横向软钢阻尼器(TSD),提高高墩梁桥的抗震性能。

本文介绍了 TSD 在高墩梁桥中的设计与布置。TSD 通过吸收地震中的横向振动能量,减少桥梁的动态响应,改善桥梁在地震中的表现。在此基础上,本研究利用 ABAQUS 软件对 TSD 的滞回行为进行了模拟。并根据近断层地震动下的抗震响应,优化了 TSD 的基本参数。在进一步的分析中,还研究了脉冲型地震动特性对桥梁抗震响应的影响。脉冲型地震动常常表现为强烈的高频成分,对桥梁的内力分布和整体响应有显著影响。研究表明,当 TSD 具备合理的屈服强度、初始间隙和屈服后刚度比时,能够显著减少墩顶位移及内力,提升桥梁的抗震性能。此外,研究还发现,脉冲周期的变化对桥梁的内力响应也产生了重要影响。研究表明,脉冲周期越大,桥梁的内力响应越强,尤其当结构的自振周期与脉冲周期匹配时,桥梁的内力响应会显著增强。因此,优化 TSD 的设计,不仅能够提升桥梁在地震中的表现,还能够有效控制由于脉冲型地震动引发的桥梁结构破坏。此外,最大速度脉冲在桥梁结构高阶振型的研究中起到了关键作用。研究显示,分析最大速度脉冲对内力的影响有助于提高计算效率,从而有效减少模拟时间,为实际工程中的抗震设计提供更加高效的优化方案。

综上所述,本研究提出的 TSD 优化设计在高墩梁桥的抗震性能提升方面具有显著的应用前景。通过合理配置 TSD 的参数,可以有效减少桥梁的位移和内力响应,提高桥梁在地震中的安全性。该研究不仅为高墩梁桥的抗震设计提供了新的思路,同时也为其他类型桥梁的抗震设计提供了参考。未来,随着计算技术的进一步发展,结合智能材料与控制技术的研究将可能成为桥梁抗震设计的另一个重要方向,从而实现更为安全和高效率的桥梁建设。



关键词：高墩叠合梁桥；近断层地震动；速度脉冲。

通讯作者简介：成都大学土木工程学院副教授，硕士生导师。具有较为深厚的桥梁工程理论功底和丰富的实践经验，具备斜拉桥、悬索桥、大跨度拱桥、组合结构桥梁等多种复杂桥型的设计经验，参与了怒江特大桥、南盘江特大桥等我国多座重点桥梁的抗震分析及研究工作，主研国家自然科学基金、中国铁路总公司重大课题等多项科研课题。主要研究方向：桥梁抗震。



六杆张拉整体翻滚机器人驱动优化设计

冯晓东^{1,2,*}, 宋思远², 赵树彬², 崔文华³, 方益明³

1. 河海大学, 未来技术学院, 江苏南京 210024

2. 绍兴文理学院, 土木工程学院, 浙江绍兴 312000

3. 绍兴文理学院, 机械与电气工程学院, 浙江绍兴 312000

通讯作者邮箱: fengxiaodong@usx.edu.cn

报告人: 冯晓东

摘 要:

为降低六杆张拉整体机器人 (TR-6) 的驱动成本, 提出了一种基于索驱动的遗传天牛须混合优化策略。首先, 根据 TR-6 机器人的初始几何构形, 建立起机器人的等效模型, 以机器人单步驱动前后的应变能差值为目标函数, 构建了综合考虑重力矩、翻滚能量及索调控量等约束条件的驱动优化模型。然后, 通过非刚体运动分析 (NRMA) 方法确定不平衡状态下机器人的姿态, 利用遗传天牛须混合算法获取最优的机器人驱动方案, 并在 ADAMS 系统中开展了仿真验证。最后, 采用电机驱动方式对 TR-6 机器人进行了物理样机测试, 验证了所提方法的有效性和实用性。研究表明, 该方法可有效降低张拉整体机器人的驱动成本 (单索方案比双索方案节省应变能约 14%), 并为此类机器人的研究提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 张拉整体机器人; 优化策略; 驱动成本; 遗传天牛须混合优化驱动约束优化模型:

$$\begin{aligned} \text{minimize } \Delta U = U_1 - U_0 & \begin{cases} U_0 = \sum \frac{F_0^2 L}{2EA}, \\ U_1 = \sum \frac{F_1^2 (\Delta l_a, \Delta l_b) L}{2EA} \end{cases} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} T_{i,j} = \mathbf{G} \frac{\mathbf{L}_{i \rightarrow j} \times \mathbf{L}_{g' \rightarrow i}}{\|\mathbf{L}_{i,j}\|} \leq 0 \\ \Delta U + mgH_2 \geq mgH_4 + E_k \\ 0 \leq \Delta l_a \leq 0.5l_a \\ 0 \leq \Delta l_b \leq 0.5l_b \\ \Delta l_a + \Delta l_b \leq 0.5(l_a + l_b) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

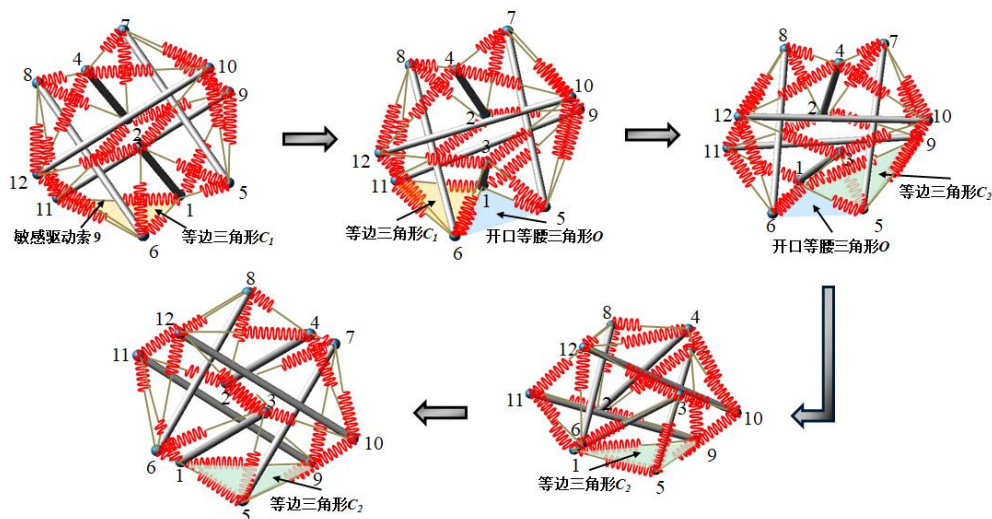


图1 进化步态 COC 的单步翻滚仿真实现过程

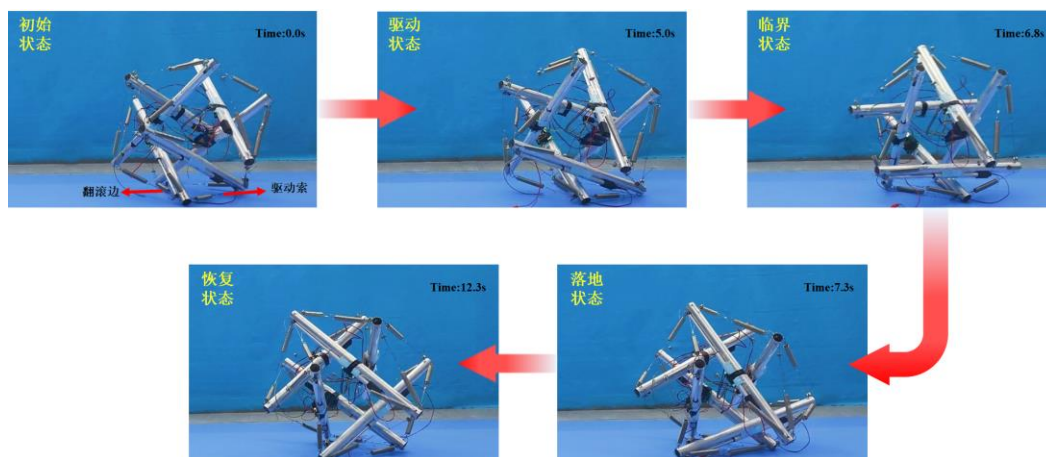


图2 进化步态 COC 的执行过程

通讯作者简介: 冯晓东, 河海大学未来科技学院教授、博士生导师。浙江省高校领军人才, 美国土木工程学会 (ASCE) 会员, 国际薄壳与空间结构协会会员 (IASS) 会员, 全国一级注册结构工程师。主要从事智能结构 (智能机器人、航天器外伸臂、登月缓冲装置)、可展与折叠结构、大跨度空间结构 (网架、网壳、张拉整体、张弦梁、索穹顶、弦支穹顶、膜结构等) 的形态设计与优化、力学性能分析、主动振动控制、结构健康监测等研究。

自适应肋环型索穹顶结构形态优化控制研究

张海影¹, 陆金钰^{2,*}, 乔文涛¹

1. 石家庄铁道大学, 土木工程学院, 河北石家庄 050043

2. 东南大学, 土木工程学院, 江苏南京 211189

通讯作者邮箱: davidjingyu@seu.edu.cn

报告人: 张海影

摘 要:

在结构工程中引入主动控制技术可使结构具备主动适应环境变化的响应能力。本研究将主动控制技术引入索穹顶结构, 构建了一种自适应索穹顶系统, 重点探究了该穹顶系统在荷载作用下的力学性能与主动控制能力, 包括研究穹顶结构的内力与位移响应以及在此类工况下实施形态控制的可行性。本文针对 Levy 型索穹顶结构, 设计并制作了含主动撑杆与长度可调索的试验模型, 通过试验与仿真手段探究结构在不同荷载工况下的内力优化与控制能力。首先基于智能算法确定已建立的索穹顶结构形态控制计算模型的最优调节量, 继而通过试验验证方案的可行性与正确性。结果表明: 精细化试验模型拼装张拉后预应力分布与理论值吻合良好, 最大误差不超过 6%; 在对称与非对称超载工况下, 试验与仿真的杆件内力平均降幅几乎相同, 但非对称超载工况下的总调控量相较于对称工况显著增加, 说明非对称荷载作用下需施加更大的调控量才能实现等效的内力优化与控制效果。这些结果不仅验证了仿真结果的准确性, 还证明了主动控制技术可显著提升索穹顶结构的环境适应性, 为大跨度空间结构在极端荷载下的性能提升提供了新范式。

关键词: 索穹顶结构; 自适应结构; 主动控制; 形态优化; 智能算法

通讯作者简介: 东南大学土木工程学院教授、博士生导师。主要从事新型大跨空间结构体系和设计应用、智能空间结构体系方面的研究。

沥青混凝土裂纹分支和连接的近场动力学数值模拟研究

阮莉^{1,2}, 罗尧治^{1,2}, 沈雁彬^{1,2,*}

1. 浙江大学, 建筑工程学院, 浙江杭州 310058

2. 浙江大学长三角智慧绿洲创新中心, 未来城市(智慧城市)实验室, 浙江嘉兴 314100

通讯作者邮箱: ybshen@zju.edu.cn

报告人: 阮莉

摘 要:

开裂是沥青路面的常见病害之一, 沥青混凝土裂纹扩展过程中常伴有裂纹分支和连接, 探究沥青混凝土的裂纹分支和连接过程, 对量化沥青混凝土裂纹扩展路径十分重要。然而, 采用断裂力学和耗散能理论模拟沥青混凝土中的裂纹路径, 难以获得沥青混凝土裂纹扩展过程中的裂纹分支和连接现象, 针对沥青混凝土中的裂纹分支和连接尚处于初级阶段, 也未对其进行量化。本研究针对现阶段研究存在的不足, 从沥青混凝土裂纹分支和连接的理论、数值模拟方法、量化方面展开研究, 运用弹性-黏弹性对应原理, 将弹性状态下常规态型近场动力学理论拓展至黏弹性状态, 构建相应的理论模型。在此基础上, 结合 CT 扫描图像建立沥青混凝土的近场动力学数值模型, 并采用小梁弯曲试验和半圆弯曲试验验证数值模型的有效性, 通过沥青混凝土数值模型计算裂纹分支和连接。沥青混凝土的裂纹分支包含两个阶段, 第一阶段为沥青混凝土内初始裂纹产生裂纹分支形成对角裂纹、翼型裂纹、马尾状裂纹和劈裂裂纹, 对应于裂纹分支路径分形维度曲线快速增长阶段; 第二阶段为对角裂纹、翼型裂纹、马尾状裂纹和劈裂裂纹产生裂纹分支, 对应于裂纹分支路径分形维度曲线的缓慢增长阶段。裂纹分支路径在 AC-13、AC-25 和 PAC-13 沥青混凝土中形成四种裂纹分支类型, 在 AC-20 沥青混凝土中形成五种裂纹分支类型。裂纹分支过程包括裂纹尖端的动态扩展、裂纹尖端扩展方向的偏转和裂纹分支的扩展, 裂纹分支路径的分形维度达到 1.6 ± 0.4 。沥青混凝土的裂纹连接主要发生在对角裂纹、翼型裂纹、马尾状裂纹和劈裂裂纹, 以及它们产生的裂纹分支之间, 在 AC-13、AC-20、AC-25 和 PAC-13 沥青混凝土中均形成四种裂纹连接类型。裂纹连接过程包括裂纹尖端的动态扩展、裂纹尖端的接触和裂纹尖端的完全融合, 促使沥青混凝土中的裂纹形成连通的体系, 裂纹路径的分形维度达到 1.8 ± 0.1 。本研究追踪沥青混凝土裂纹分支和连接路径的全过程, 为预测多裂纹扩展状态下的沥青混凝土寿命提供科学支撑。

关键词: 沥青混凝土; 裂纹分支; 裂纹连接; 近场动力学

通讯作者简介: 浙江大学土木工程学院副教授、博士生导师。主要从事大跨空间结构设计、复核、施工分析、检测评估、健康监测等方向的研究。

广义变分原理在斜拉悬索协作体系桥梁

早期设计阶段中的应用

李奕璇¹，韦鹏¹，冯倩^{1*}，徐荣桥^{1*}

1. 浙江大学，建筑工程学院，浙江杭州 310058

通讯作者邮箱：fengqian@zju.edu.cn、xurongqiao@zju.edu.cn

报告人：李奕璇

摘 要：

近年来，斜拉悬索协作体系桥梁因兼具斜拉桥与悬索桥的优点，在沿海地区桥梁建设中颇受青睐。然而，这两种结构体系的结合使得桥梁早期设计阶段中的参数选择变得更为复杂。本研究以宁波常洪大桥为工程背景，基于一类和二类广义变分原理，开展了不同荷载工况下结构的静力响应以及自振特性分析。结果表明：Ritz 法和 Hellinger-Reissner 法两类广义变分方法在关键截面处的位移与内力计算结果上与有限元模型高度吻合。其中，Hellinger-Reissner 法通过引入独立的内力函数，有效避免了位移高阶导数引起的截断误差，计算精度较 Ritz 法略有提升。对于一阶正对称和反对称自振频率计算结果的精度满足早期设计阶段的要求。最后，对结构设计参数进行了敏感性分析，主缆相对刚度的变化对结构变形与内力影响最为显著，自由振动过程中主缆和主梁的势能占比达 80%以上，在早期设计阶段中主缆与主梁参数的选择至关重要。相较于有限元方法，广义变分原理的应用能够在保证计算精度的前提下快速确定关键参数，为后续结构的深入分析提供可靠的指导。

关键词：变分原理；斜拉悬索协作体系桥梁；Hellinger-Reissner 广义变分

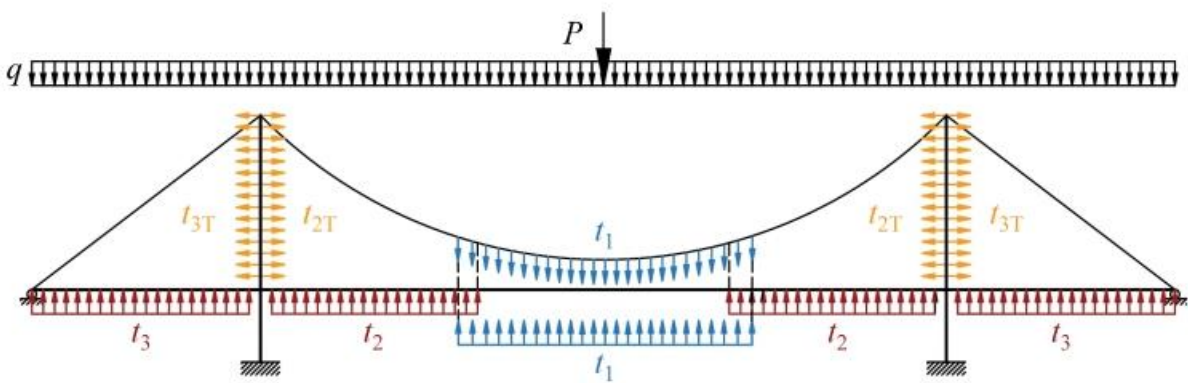


图 1 斜拉悬索协作体系桥梁力学简化模型

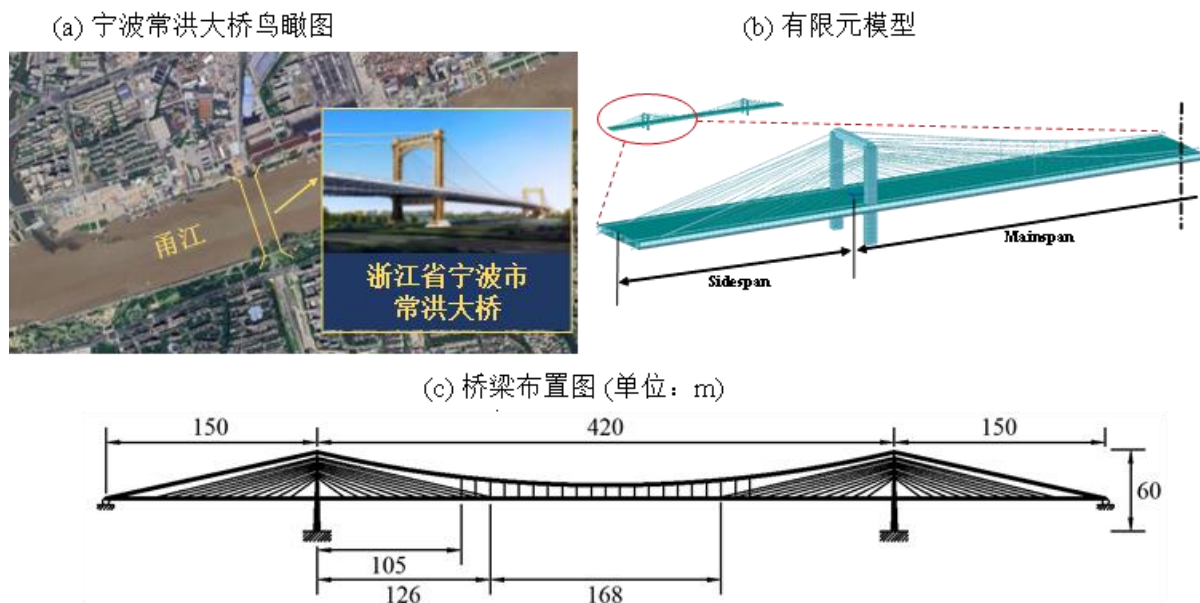


图 2 宁波常洪大桥工程简介

通讯作者简介:

冯倩, 浙江大学建筑工程学院专职研究员, 主要从事钢筋混凝土结构耐久性分析和装配式桥梁结构静动力特性分析等方面的研究; 徐荣桥, 浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师, 主要从事桥梁与隧道结构的设计计算和分析理论、交通基础设施信息化和智能化、桥隧结构加固分析理论、智能材料与结构等方面的研究。

指导单位：

中国建筑学会建筑结构分会

主办单位：

浙江大学

承办单位：

浙江大学建筑工程学院

协办单位：

香港理工大学

华中科技大学

清华大学

广西大学

浙江工业大学

宁波大学

浙江理工大学

浙江科技大学

浙大城市学院

浙江大学长三角智慧绿洲创新中心

国家超重力场科学中心（筹）

超重力离心模拟与实验装置国家重大科技基础设施

多相介质超重力相演变国家基础科学中心

先进结构设计与建造技术国家地方联合工程研究中心

海洋土木工程科技部国际联合研究中心

软弱土与环境土工教育部重点实验室

浙江省智能建造与工程软件重点实验室

浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心

公路数智养护浙江省工程研究中心

河北省高端工程机械智能制造重点实验室

Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience

《建筑结构》杂志社

《空间结构》杂志社