

第26届
全国结构工程学术会议
论文集

第 I 册

PROCEEDINGS OF THE 26TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. I

主编：陆新征

《工程力学》杂志社

2017.9

CSTAM2017-P33

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在包头度过了它 25 岁生日后，今年在湖南长沙召开第 26 届全国结构工程学术会议。

湖南是我国中部的重要省份，山川秀美、人杰地灵，有着悠久的历史和文化。特别是近代以来，湖南曾国藩、左宗棠、毛泽东等名人辈出，对中国近现代史发展起到了重大的推动作用。

长沙位于湘江之滨，自秦设“长沙郡”以来，长沙一直是我国中部的重要政治、经济、交通和文化中心。京广铁路建成后，长沙更成为我国中部交通大动脉的关键枢纽。长沙在我国的文化教育领域一直占据着非常重要的地位，位于长沙的岳麓书院为中国古代四大书院之一，是世所罕见的“千年学府”。目前长沙拥有多所著名高等院校，特别是长沙的土木工程学科影响力在全国名列前茅。

今年会议的东道主中南大学 2000 年由原中南工业大学、长沙铁道学院、湖南医科大学合并组建而成，其最早溯源可追寻到 1903 年创办的湖南高等实业学堂和 1914 年创办的湘雅医学专门学校。学校学科门类齐全，是一所以工科和医学为特长，涵盖理学、文学、法学、经济学、管理学、哲学、教育学、历史学、艺术学，辐射军事学的综合研究型大学。中南大学有国家级创新平台 27 个，学校牵头和参与组建国家“2011 协同创新中心”（简称“2011 计划”）2 个，拥有“高等学校学科创新引智计划”（简称“111 计划”）6 个，国家重点实验室 3 个、国家工程研究中心 4 个、国家工程实验室 5 个、国家工程技术研究中心 2 个。先后入选国家“211 工程”、“985 工程建设高校”，“111 计划”、“2011 计划”，是一所在国内外具有重要影响的高等院校。

在中国力学学会结构工程专业委员会、中南大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 301 篇，分装为 3 卷，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰硕的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2017 年 9 月

第 26 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 301 篇，共计 1974 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 91 篇（共 650），包括特邀报告和三个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 钢筋混凝土结构、材料与构件；3. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；

第 II 册论文 105 篇（共 658 页），包括三个学科类别：4. 钢结构、材料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；

第 III 册论文 105 篇（共 666 页），包括三个学科类别：7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他。

第 26 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 I 册目录

特邀报告

胶合木梁抗剪性能研究综述	曹磊 陈伯望 (001)
开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施	陈仁朋 王诚杰 鲁立 孟凡衍 (007)
耦合有限元物质点法及其在流固耦合问题中的应用	陈镇鹏 宋言 张雄 吴博 (023)
一种高效的 FE-PSBFE 耦合方法及在岩土工程弹塑性分析中的应用	孔宪京 陈楷 邹德高 刘锁 余翔 (034)
传统纤维模型的一些新发展	陶慕轩 丁然 潘文豪 许立言 周萌 聂建国 (046)
子结构混合试验方法研究与应用	王涛 潘鹏 (068)
建筑结构用再生混凝土水平受力构件研究进展	王玉银 王庆贺 耿悦 (081)
轨道结构建模精细化程度对高速铁路连续梁桥地震易损性的影响	魏标 杨添涵 蒋丽忠 (098)
双面叠合混凝土剪力墙平面内和平面外抗震性能研究	薛伟辰 李亚 蔡磊 胡翔 (108)
行业标准《屋盖结构抗风设计规范》(征求意见稿)的主要内容	杨庆山 (118)
三维各向异性砂土 UH 模型	姚仰平 田雨 刘林 (124)
混凝土随机损伤本构模型研究新进展	余志武 单智 (132)
运动方程自适应步长求解的一个新进展——基于 EEP 超收敛计算的线性有限元法	袁驷 袁全 闫维明 李易 邢沁妍 (141)

1. 力学分析与计算

无内结点 Serendipity 单元族插值函数构造的新方法	蔡萌 张建亮 夏志成 (150)
海洋环境下结构疲劳寿命评估研究	陈莉 党堃 (159)
深海浮式平台系泊系统静力分析	陈宗立 张敏 吴衍剑 杨风艳 (164)
设纵肋矩形钢管混凝土轴压柱临界屈曲荷载求解	程高 李慧 任鹏举 (169)
毛竹管抗压承载力的试验研究	邓友生 王露 王欢 周友 彭凯 (174)
降级钻杆接头抗扭和抗拉性能的三维有限元分析	冯少波 狄勤丰 李宁 陈锋 周波 姜尔标 (180)
仿竹高层结构抗弯刚度分析	何湘粤 汪帅 胡玉峰 蒋志刚 (187)
基于线性强化模型的双层厚壁圆筒极限内压统一解	姜志琳 赵均海 吕美彤 张磊 (191)

轨道梁周期支承缺失下的频响特性	康 雷 应祖光 倪一清 (199)
钢纤维混凝土轴压全曲线试验与数值模拟研究	李 悦 李亚强 (204)
多跨超静定梁影响线的快速解析求解	李银山 霍树浩 韩 旭 李欣业 (210)
高温后中空夹层钢管混凝土柱压弯机理分析	刘 晓 徐建辉 (214)
行波激励下单跨框架结构动力响应的解析解	刘铁林 李文博 刘 泓 (221)
外贴 FRP 加固混凝土梁的界面剪应力分析	刘兴喜 徐荣桥 (225)
自行设计膝假体应力遮挡效应分析	刘艳强 龙 震 黄荣瑛 (233)
基于约束变分原理的桁架截面尺寸优化设计方法	刘宇斌 郑 欣 张圣君 沈 峰 傅向荣 (237)
考虑土-结构相互作用的某高层结构地震动力分析	卢佳盛 李 勇 孙宝印 古 泉 (241)
Winkler 地基上有限长梁非线性自由振动中土体质量的影响效应分析	马建军 聂梦强 高笑娟 秦紫果 (250)
弹性约束下 Timoshenko 夹层梁的热屈曲行为研究	钮 鹏 李 旭 李世荣 金春福 柳 杨 (257)
履带式起重机接地比压分布研究	汤 渊 宋振森 遇 瑞 (262)
混凝土徐变计算模型及其实用性评述	汪建群 吕 鹏 许 巧 罗许国 祝明桥 (268)
自适应有限元-离散元算法、ELFEN 软件及页岩体积压裂应用	王永亮 鞠 杨 陈佳亮 杨永明 C. F. Li (273)
垫梁弹性力学解答	文国庆 陈华燕 (285)
两级隔振系统主动控制力研究	邢云林 卢爱贞 娄 宇 陈 骝 (291)
球形载流线圈中导电圆板的磁弹性固有振动	徐浩然 胡宇达 (297)
随机结构动力可靠度计算的条件概率方法	杨 杰 马萌璠 王 旭 (301)
非协调元刚度矩阵研究	张 杉 李 奇 (307)
考虑层间滑移的多层组合梁挠度计算	张永平 徐荣桥 (312)
基于二阶效应的穿斗式木构架力学性能分析	赵大星 高 亮 (318)
基于弯扭耦合理论的颤振频率计算方法	郑 欣 刘宇斌 陈 璞 沈 峰 张圣君 傅向荣 (324)
基于弹性力学理论的弹性基础梁求解	文国庆 何 兵 (329)
基于人群-结构耦合作用甘肃省体育馆悬挂结构振动舒适度评估	朱前坤 蒲兴龙 惠晓丽 张 琼 杜永峰 (334)

2. 钢筋混凝土结构、材料与构件

疲劳损伤本构及 RC 构件正截面承载力劣化规律	陈 杰 庞 森 吴洁琼 刁 波 (342)
间接加载 RPC 简支梁抗剪承载力试验研究	陈逸聪 宋亚运 曹 霞 (350)
超低温环境下混凝土梁受弯性能研究	成 煜 谢 剑 严加宝 (357)
氯盐干湿循环作用下 CFRP 筋嵌入式加固混凝土耐久性能研究	巩家宗 杨树桐 (364)
混凝土基于有限元-离散元耦合的跨尺度分析方法	古 泉 汪 磊 刘轲奇 (370)
钢管再生混凝土短柱高温加固后的轴压试验研究	何媛媛 董江峰 袁书成 王清远 (382)

酸雨腐蚀后圆钢管再生混凝土纯弯力学性能研究.....	胡志慧 黄 宏 (387)
小剪跨比钢筋混凝土墙拉剪性能试验研究	纪晓东 程小卫 徐梦超 (393)
火灾后钢筋混凝土梁托柱转换结构节点单元承载性能分析.....	孔维一 傅传国 刘伟庆 (404)
边界条件和跨高比对混凝土 U 型薄壁梁受扭性能的影响	李 阳 许见超 郭全全 陈圣刚 叶英华 (414)
框架摇摆墙结构中摇摆墙刚度需求的动力分析	李威齐 曲 哲 (421)
基于光纤光栅传感器的钢筋混凝土粘结应力分布试验研究.....	林红威 赵羽习 冯璋曜 (425)
高温后型钢再生混凝土梁受弯研究	刘 晓 尤洪旭 (431)
PUFA 复合材料加固钢筋混凝土圆截面桥墩的试验研究.....	刘广福 张连振 (438)
RC 梁板子结构边中柱失效条件下防倒塌数值研究	罗力中 喻 君 任兆鹏 (443)
不锈钢钢筋粘结性能研究初探	孟宪宏 王亚楠 夏 程 (450)
叠合板式双肢剪力墙抗震性能的非线性研究	沈小璞 高彬森 张红亚 (454)
开洞深受弯构件受剪性能研究进展	史尚冕 吴 涛 刘 喜 魏 慧 刘全威 (460)
型钢-UHTCC 组合梁静载力学性能试验研究.....	孙超杰 李庆华 吕君锋 (469)
钢板加固钢筋混凝土矩形梁底部钻孔力学性能研究.....	孙业昂 尹冠生 郑碧玉 (475)
混凝土气体渗透性的影响因素研究	汤士海 刘卫东 (482)
多螺箍筋柱轴压承载力研究	唐 琼 李 易 陆新征 闫维明 (487)
混凝土塑性损伤模型损伤因子计算方法对比研究.....	滕 楠 孙景江 杜 轲 (494)
城市建筑群震害仿真中 RC 框架模型的骨架线及其参数研究	吴开来 林旭川 陆新征 孙柏涛 (500)
组合十字形截面钢管混凝土柱轴压力学性能试验研究.....	徐传国 黄 宏 陈梦成 (506)
BFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能试验研究.....	杨 超 杨树桐 戚德海 (511)
混凝土裂缝制造方法试验研究	杨 三 (521)
钢筋混凝土梁承载力与疲劳特性的研究	杨海威 刘帅江 蔡 红 陈 超 姚如洋 尹冠生 (527)
混凝土碳化深度预测模型研究现状及展望	余志武 肖沐惕 刘 鹏 贺鹏飞 范 洁 (532)
混凝土结构几何与尺寸效应 CA 模型研究.....	袁素叶 陈梦成 (541)
静态与动态加载下, 纤维混凝土细观断裂研究: 离散体-连续体耦合有限元模型	张 慧 黄宇劼 杨贞军 徐世焱 (551)
基于变形性能的钢筋混凝土柱水平位移研究	张 宁 (559)
纤维增韧轻骨料混凝土力学性能研究进展	张林琳 吴 涛 魏 慧 刘 喜 孙艺嘉 (564)
钢筋套筒挤压连接的预制 RC 柱非线性有限元分析	张微敬 张晨骋 (570)
足尺预应力混凝土双 T 板静力学性能试验研究	赵 培 张文龙 周 威 何金生 (576)
酸雨腐蚀后圆钢管再生混凝土构件偏压力学性能.....	周 璐 黄 宏 陈梦成 (583)
双层交通混凝土箱梁传力路径试验研究与分析	祝明桥 蒋 俏 张紫薇 石卫华 (589)

3. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

复杂载荷下橡胶金属一体式隔振器静强度试验	陈 安 陈永辉 闫文伟 (597)
----------------------------	-------------------

飞机结构大变量优化设计分析研究	姜 鹄 何景武 (601)
机载天线罩力学仿真和优化	李亦民 (607)
卡勾式分离机构设计与分析	涂金崇 王晓东 陈 刚 (611)
切向油膜阻尼实验研究	王佳丽 张广鹏 王立宇 (617)
LNG 船舷侧碰撞损伤后剩余极限强度评估	王泽平 胡志强 陈 刚 (622)
基于大展弦比机翼整体结构刚度设计的动力优化.....	徐华聪 何景武 熊跃熙 (629)
有界窄带激励柴油机轴系扭振多自由度系统主参数共振.....	杨志安 卞雅媛 赵利沙 (635)
材料失效准则在船舶搁浅数值仿真中的应用	赵百惠 胡志强 陈 刚 (644)

第 II 册目录

4. 钢结构、材料与构件

圆钢管混凝土中钢-混凝土界面粘结强度影响因素分析	陈 兵 李 威 初金良 (001)
钢-混凝土组合梁部分塑性发展受弯承载力分析	杜德润 谷顺顺 许云龙 (005)
加劲肋加强 H 型钢弦杆-方支管 T 型节点滞回性能试验研究	郭新泽 高 飞 (011)
LYP100 钢材大应变下滞回性能	何 群 陈以一 田 海 (018)
异型网架结构分级优化方法及其工程应用	侯钢领 王晓东 邱继军 (026)
摇摆桁架-BRB-钢框架体系地震失效模式与抗震性能分析	贾明明 周 洲 吕大刚 杨 宁 (032)
装配式方钢管柱-桁架梁连接节点单调试验研究	李 普 程 欣 赵珍琲 (039)
钢框架柱失稳型连续性倒塌的鲁棒性分析	李六连 李国强 聂建国 李云贵 孙建运 (044)
Q345qC 钢材及其焊接接头低周疲劳性能研究	廖燕华 谢 旭 唐站站 (053)
一种简易可滑移耗能钢柱脚的本构关系研究	刘美香 段树金 谢小峰 (059)
输电铁塔主材节点初始刚度影响因素研究	刘圣西 江文强 安利强 葛永庆 (063)
防屈曲钢板剪力墙失效演化与耗能特征分析	刘逸凡 郝圣旺 (068)
大跨空间结构选型经济影响因素分析	牟在根 杨雨青 葛 鹏 张相勇 (075)
预制装配式 RCS 节点的有限元模拟与分析	潘志宏 司 启 江 鑫 周智彬 张义保 (083)
部分填充钢-混凝土组合柱双向压弯计算研究	宋世明 何雅雯 陈以一 (090)
低碳钢在反复荷载作用下的损伤及力学模拟	唐站站 谢 旭 诸葛翰卿 郭 悬 陈令坤 (097)
高强钢螺栓连接组合柱极限承载力有限元分析	吴 强 林旭川 吴开来 陈祎安 王宇航 (101)
组合式自平衡室外动力倒塌试验反力架设计	肖宇哲 李 易 陆新征 何浩祥 (108)
双钢板-混凝土组合结构研究进展	严加宝 王 哲 J.Y.Richard Liew (114)
考虑螺栓连接滑移影响的输电铁塔塔身结构分析	杨风利 (118)
利用入模温差检测钢管混凝土密实性的试验研究	杨鸿玉 刘卫东 危 鼎 王桂玲 沈 健 (125)
高强钢动态力学性能研究进展	叶嘉毅 蒋志刚 刘希月 (132)

复式钢管混凝土柱-钢梁节点抗弯承载力研究	张 磊 赵均海 吕美彤 姜志琳 (137)
开敞式悬挑建筑风荷载优化研究	张夏萍 李庆祥 张 敏 肖丹玲 黄啟明 (142)
FAST 圈梁支承结构性能理论与实验研究	赵保庆 王启明 李志恒 雷 政 (146)
基于物理理论滞回模型的空间桁架结构地震连续倒塌分析	郑华冬 樊 剑 李 乾 (151)
钢材破坏条件与极限分析法在钢结构中应用探索	郑颖人 王 乐 孔 亮 阿比尔的 (162)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

基于 ANSYS-UPFs 的邓肯张 E-B 模型开发	曾勇文 金 海 杨建培 (175)
牵引式滑坡模型的破坏机理及其验证	陈勋辉 黄耀英 武志刚 孔庆梅 林 莉 朱 敏 (180)
地下连续墙钢筋笼吊装仿真及优化	高绍武 漏家俊 艾国庆 黄秋亮 周雪莲 任鸿频 (186)
基于双剪统一强度理论应变模型的隧道结构稳定性分析	关少钰 白涌滔 (191)
翻砂涌水过程中沉井内壁受力模拟	洪 杰 魏 凯 张明金 杨绍林 (198)
石家庄地铁时光街站基坑开挖数值模拟	胡青华 刘淑红 李卫国 冯 策 (202)
基于荷载传递法的冻土地区钻孔灌注桩回冻中后期承载力计算	刘 秀 白家豪 冯德成 储江伟 (206)
基于 Pushover 方法的地下商业街结构地震易损性分析	龙祎雯 陈清军 (215)
柱形孔扩张问题的双剪统一解	吕美彤 赵均海 姜志琳 张 磊 (220)
基于 ABAQUS 强度折减法的抗滑桩加固边坡稳定性分析	马海春 郑翠玲 崔可锐 钱家忠 (227)
高铁隧道衬砌空洞缺陷的几何特征分析	任 仁 董 军 李东清 王永刚 (234)
基于 ABAQUS 的地下空间结构振动台试验数值模拟方法探究	任兰萌 陈清军 (238)
地下结构对车辆引发振动的减振效应实测分析	任晓崧 王显好 宗 刚 李广振 (243)
不同埋置深度软土地铁隧道的地震响应研究	任永强 周志光 (249)
地下结构地震反应分析中人工边界条件和地震波动输入方法对比研究	谭 辉 刘晶波 王东洋 宝 鑫 李述涛 (260)
考虑场地-城市效应的区域震害模拟案例分析	田 源 陆新征 王 刚 许 镇 (265)
横穿既有线的深基坑围护结构受力变形特征分析	王 侦 肖志武 汪庆桃 卢志远 (271)
拱顶含空洞缺陷下高铁隧道衬砌的动力响应分析	王永刚 董 军 李东清 任 仁 王 超 (277)
考虑颗粒破碎的堆石料湿化变形特性离散元模拟	王蕴嘉 周梦佳 宋二祥 (281)
基于微结构元集合的结构材料模型	卫振海 王梦恕 张顶立 (286)
基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析	温科伟 刘树亚 杨红坡 (294)
地铁车站 PBA 工法施工对邻近管线的影响	徐鸣阳 郭 超 赵俭斌 张玉龙 董 旭 (303)
岩石地基扩展基础钢筋及混凝土应力应变数值分析	颜復林 曾祥勇 张可刚 (308)
改进的 PHC 管桩与承台连接处桩端受力性能研究	杨志坚 雷岳强 李帼昌 王景明 (317)
上硬下软地基中自升式平台连续插桩模拟	殷齐麟 董 胜 (324)
基坑工程内支撑活络端结构革新性研究	张明聚 杨 萌 苑 媛 谢治天 (329)
洞室轴线与基坑边坡走向夹角对基坑稳定性的影响	朱 芮 王桂林 李 念 (335)
考虑侧阻与端阻影响的基桩水平承载力传递矩阵解	竺明星 龚维明 卢红前 王 磊 (343)

6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

某整体式桥台桥梁的设计与施工	陈 洪 薛俊青 Bruno Briseghella 吴庆雄 陈宝春 (356)
变轴力钢筋混凝土墩柱抗震性能研究	陈 嵘 雷俊卿 (362)
构件价格波动对高速铁路连续梁桥地震风险评估影响	陈源浚 蒋丽忠 魏 标 (369)
基于动载试验的公轨两用特大桥动力性能和行车舒适性研究	勾红叶 周 文 蒲黔辉 洪 彧 (373)
一种考虑非线性接触关系的二维轮轨耦合单元模型	 古 泉 李维泉 国 巍 刘永斗 蒋丽忠 余志武 (382)
考虑土-结构相互作用的整体式桥台斜交梁桥地震反应研究	谷 音 吴怀强 郭鸿翔 卓卫东 (393)
基于多浮体水弹性方法的海上浮桥典型工程应用研究	郭 飞 孙永岗 徐 进 李志富 (404)
浅基础桥梁在主震和余震序列作用下的倒塌概率研究	郭 悬 唐站站 池 沛 陈令坤 (409)
基于 Pushover 分析的高速铁路线路抗震性能评估	国 巍 胡 瑶 钱 晋 (414)
基于能量平衡的高速铁路桥梁摩擦摆隔震支座性能设计方法	 黄 哲 国 巍 胡 瑶 Tony T.Y Yang (418)
基于压电陶瓷的预应力波纹管压浆密实性监测数值研究	蒋田勇 郑俊博 (424)
不同墩柱形式曲线桥主梁合理数值模拟方法研究	焦驰宇 胡 彪 刘陆宇 龙佩恒 (428)
深海重型设备浮力辅助安装模拟研究	焦春硕 王浩霖 董 胜 (438)
在役车行索道桥的运营现状及结构改进措施研究	景天虎 刘均利 莫时旭 王晓峰 (443)
不同激励作用下钢弹簧浮置板轨道减振效果研究	李林峰 马 蒙 刘维宁 杜林林 (450)
液体晃动动力学中的若干问题讨论	李遇春 欧亿鹏 (455)
基于实测波面数据的波浪力计算方法	梁春明 魏 凯 张家瑞 (460)
适用于福建省的太阳辐射模型建立	林健辉 薛俊青 Briseghella Bruno 陈宝春 (464)
基于 OpenSees 的车桥耦合竖向振动研究	刘汉云 余志武 国 巍 (470)
强地震下高速铁路桥上行车精细化模拟及行车安全性分析	国 巍 李君龙 刘汉云 (475)
锈蚀坑对吊杆高强钢丝疲劳寿命影响的数值分析	楼纪昂 马伟龙 彭 卫 (481)
合龙段温度场的分区时变温升速率计算方法	潘旦光 程 业 刘文军 马 骏 丁民涛 (487)
新型钢木混合梁力学性能试验研究	时国松 董 军 陈会芳 吕丽娟 (493)
山区悬臂人行观景桥梁结构风洞试验研究	苏 益 李明水 (497)
锚拉板式钢-混组合索塔锚固体体系粘结滑移性能试验研究	谭冬莲 秦凤江 (502)
基于损伤状态均匀荷载面曲率的简支梁损伤识别	唐盛华 苏彬建 周 楠 楚加庆 (507)
无缝桥面板式引板滑移材料摩阻系数试验研究	 唐玉凤 薛俊青 张培权 Briseghella Bruno 陈宝春 (514)
高水头船闸阀门顶止水抗冲磨与变形特性试验	王 新 胡亚安 严秀俊 (520)
矩形容器内液体一阶晃动模态试验识别	王鹏翔 李遇春 王立时 (526)
坑角效应对紧邻建筑物变形性状的研究	王巍浩 董 军 时国松 (530)
曲线桥的刚体模型及地震碰撞响应分析	王玉梅 郭 迅 丁 堃 (535)
组合与叠合双重作用钢-砼连续梁负弯矩区滑移	王园园 段树金 牛润明 (544)
基于渐变参数并层等效反演的碾压混凝土坝流固耦合分析模型	魏博文 周方明 徐镇凯 (548)

基于不同代理模型的某自锚式悬索桥模型修正	夏志远 李爱群 李建慧 端茂军 (557)
斜拉索参数振动稳定性能量分析及实验验证	谢子洋 李遇春 吴南方 (563)
矩形悬臂梁浸入水中的湿频率试验值与数值解	杨晓军 李遇春 刘 哲 (568)
不同宽深裂缝条件下混凝土氯离子渗透试验研究	余建福 董 军 康春祥 (572)
基于 EMD 和马氏距离的斜拉桥主梁损伤识别方法	俞 鹏 王银辉 陈 闯 (577)
半开式桁架桥结构稳定性分析	岳子翔 温庆杰 卓 涛 (583)
夏威夷 ALEUTIAN 海啸的 NEOWAVES 数值模拟	翟金金 董 胜 (591)
车轮动荷载作用下模数式桥梁伸缩缝强度分析	张 纬 丁 勇 王 博 杨 阳 俞丹波 (596)
山区钢桁梁悬索桥加劲梁合理安装方案研究	张 兴 杜 斌 张玉涛 王 涛 (600)
基于移动质量的简支梁损伤识别方法研究	张海宾 侯吉林 张青霞 潘 峰 (609)
射流簇底流消能旋涡区脉动压力特性研究	张陆陈 王余杰 骆少泽 (614)
宽箱连续梁桥顶推过程滑道反力不均匀的改善措施研究	赵凌志 占玉林 赵人达 (618)
钢拱架-混凝土组合拱桥施工阶段稳定性分析	郑玉国 贺 浩 宋英梁 夏鸿翔 (624)
既有结构混凝土累积损伤原位评估方法	钟 铭 (629)
运营环境作用对跨海大桥模态频率的影响研究	周 毅 孙利民 谢谟文 (641)
基于条件数的虚拟质量优化布置与损伤识别方法	周润芳 侯吉林 张青霞 潘 峰 (648)
建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析	宗 刚 郑玉琴 任晓崧 张永红 (653)

第III册目录

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

损伤可控型钢框架边节点的试验研究	蔡 鑫 邹 昀 郑黎君 李天祺 丁 杰 赵桃干 康金鑫 (001)
PGV/PGA 影响活断层区轻轨高架桥地震响应注记	陈令坤 蒋丽忠 冯玉林 张清华 余志武 (007)
不同频谱特性地震动下风电塔破坏分析	戴靠山 赵 志 毛振西 (014)
爆炸作用下斜拉桥 A 型钢筋砼桥塔动态响应过程模拟研究	戴智涵 严 波 (021)
重复打击下防护结构地冲击初步分析	邓国强 (028)
场地地震反应分析中侧向人工边界距离的选取及影响	董士欣 白建方 (033)
削弱型节点钢框架抗冲击性能研究	范国玺 宿专青 王德斌 唐晓成 (039)
平面张拉整体梁的地震响应和振动控制	冯晓东 蒋 舸 杜时贵 (044)
连梁型钢滞变阻尼器数值分析以及性能比较	付文祥 周晓青 (051)
适用于高层建筑时程分析的地震波库建立	韩小雷 尤 涛 崔济东 季 静 (057)
TLD 对结构非线性地震反应的影响分析	贺 磊 唐贞云 洪 越 韦宏鹄 李振宝 (064)
一种新型变曲率摩擦摆力学性能的试验研究	洪 越 唐贞云 李振宝 (070)
空心钢管混凝土叠合构件抗冲击性能分析	胡昌明 韩林海 侯川川 (076)

不同高厚比 L 形短肢剪力墙结构弹塑性地震反应分析	黄选明 孙连营 黄广华 张新江 (082)
大当量 TNT 自由空气爆炸数值模拟研究	李宝岩 戴智涵 (086)
夹层玻璃抗爆性能数值分析	李欣然 周晓青 (091)
叠层天然橡胶支座抗震性能的实时混合试验研究	李翊鸣 吴意诚 彭天波 (096)
基于模拟退火算法的软钢阻尼器排布优化分析	李宗京 辛岩磊 (101)
土动力学问题数值计算中材料阻尼的模拟	董士欣 白建方 (106)
钢筋不均匀锈蚀对桥梁抗震性能的影响	刘 婕 谢 旭 雷燕云 (115)
考虑限位的层间隔震弹塑性地震响应分析	刘德稳 刘彦辉 盛冬发 赵 焯 (121)
抗常规钻地弹遮弹技术研究进展	刘先斌 詹昊雯 蒋志刚 (131)
冲击荷载下 FRP-火灾后混凝土界面正拉粘结性能试验研究	罗 威 章子华 张裕华 诸葛萍 (136)
直流场回路地震反应研究	吕 玮 曾 迪 周德才 冯千秀 张立红 邸庆霜 (140)
基础隔震结构地震动力反应分析	牟在根 杨雨青 凌 峰 常卫华 (144)
工程抗震设计中的一些力学理论问题及应用现状	钱国桢 孙宗光 (155)
小型汽车撞击后框架柱剩余承载力的数值研究	钱蓝萍 李 易 陆新征 闫维明 (159)
试验设计对基于响应面法模型修正的影响研究	秦世强 胡 佳 张亚州 (167)
管线系统抗震支架力学试验研究	尚庆学 李 泽 刘瑞康 王 涛 (172)
钢筋混凝土矩形空心桥墩拟静力数值分析	申彦利 高素云 (179)
新型 SRC 框架-支撑结构弹塑性抗震行为研究	沈小璞 陈宏瑞 (185)
实测序列型地震动下基于损伤的结构强度折减系数的研究	孙潮旭 陈 隽 张永群 (191)
有关居民住宅楼内燃气爆炸冲击波特性的研究	孙庆文 闫秋实 朱 渊 (195)
自复位隔震桥墩振动台模型试验	唐径遥 夏修身 韦性涵 张颖周 (203)
地震作用下桁架结构响应分析	滕振超 赵添佳 赵 佳 (208)
基于向量式有限元的输电塔地震响应分析	王 唯 龙晓鸿 (213)
采用运动量边界条件的振动台混合试验原理	王 贞 王纯鹏 许国山 吴 斌 (221)
不同核心区尺寸的 PE 纤维水泥基复合材料框架节点抗震性能试验研究	王激扬 陈荣达 马卫强 万成霖 (226)
自适应 TMD 及其减振性能的数值模拟	王梁坤 施卫星 张全伍 拜立岗 施志国 (231)
复合冲击载荷下螺栓法兰结构失效研究	王青文 袁杰红 周仕明 (237)
长周期超高层建筑结构最不利地震动选取方法的研究及准确性评价	吴 轶 杨 春 陈智远 陈 麟 张春梅 (242)
销钉剪断效应的线性与双线性模型研究	吴意诚 彭天波 (252)
强震及其余震对屈曲约束支撑性能需求的影响	谢鲁齐 吴 京 黄 卿 (257)
泥石流冲击作用下结构动力响应分析	熊海贝 周明慧 曹纪兴 (261)
玻纤格栅配筋砌块墙体抗震性能试验研究	徐春一 逯 彪 余 希 (266)
不同母线金属薄壁管冲击特性研究	杨 辉 尹冠生 姚如洋 (275)
特高压电力设备隔震技术研究	姚 堃 钱 江 (283)
地震灾害房屋易损性新方法研究	姚新强 孙柏涛 杨在林 陈宇坤 杨绪连 (288)
大跨减震体系梁桥在近断层脉冲型地震动作用下的响应分析	喻隽雅 袁万城 (303)

模拟砼靶侵彻的 FEM/CSC-SPH/HJC 耦合法.....	詹昊雯 刘 飞 蒋志刚 宋殿义 (309)
高宽比不等的叠合板式 L 型剪力墙抗震性能研究	沈小璞 熊皓月 马 巍 (315)
弯剪破坏钢筋混凝土柱地震损伤模型	张 勤 王 娜 邴 鹏 贡金鑫 (320)
压型钢板组合楼板单向板受拉薄膜效应研究	张号浩 潘 睿 (326)
基于向量式有限元的海上风电基础结构-船舶碰撞分析	张建华 林佳悦 王启宇 杨思远 刘书建 (330)
基于抗震性能的高烈度区高端阀厅选型研究	张立红 胡 晓 曾 迪 周德才 毛 宇 吕 玮 (338)
大型 LNG 储罐在爆炸荷载作用下的冲击响应分析	张如林 贾娟娟 管友海 程旭东 (342)
基于静—动力分析相结合方法的桥梁桩基础地震反应分析及抗震性能评价	张永亮 卢肖素 陈兴冲 宁贵霞 (353)
我国核电厂审查水平地震的确定方法研究	赵 雷 李小军 王玉石 (360)
近场脉冲型地震作用下 PC 框架结构抗震性能分析	郑福聪 郭宗明 张耀庭 (364)
单排配筋 L 形截面剪力墙振动台试验研究	郑文彬 张建伟 曹万林 (373)
模型校验后高层建筑非线性抗震性能分析	周 云 周 祎 李紫玮 易伟建 (379)
轴力作用下剪切钢板阻尼器力学性能试验研究	朱柏洁 张令心 王 涛 (384)
钢桥墩在空间地震作用下的结构损伤特性研究	诸葛翰卿 谢 旭 唐站站 (389)
桥墩扭转刚度对高铁连续梁桥地震易损性的影响	左程骏 魏 标 蒋丽忠 (395)
结构周期延长对倒塌分析中地震动强度指标选择的影响	左占宣 李 爽 翟长海 谢礼立 (401)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

秸秆粉煤灰轻质隔墙板成型技术研究	陈俊颖 姚 勇 褚云朋 耿 睿 (411)
基于单模态 Lamb 波的焊接钢板裂纹损伤监测	陈泽宇 孙晓丹 何 建 张伟晔 (415)
监测极值应力的解耦和预测方法	樊学平 屈 广 肖青凯 刘月飞 (424)
风机基础加固设计与计算分析	何潇锐 吕伟荣 翁红幸 卢倍嵘 石卫华 (429)
华中某地框架结构填充墙严重歪闪事故原因分析	黄选明 黄广华 杨旭东 赵云翔 孙连营 (436)
超高层框架-核心筒施工阶段地震作用下时程响应与领先层数研究	靳海芬 张 洛 刘丰宁 何 政 (442)
表层嵌贴预应力 CFRP 加固 RC 梁端部剥离破坏研究	李 恒 丑佳璇 苏 鹏 刘 洋 彭 晖 (446)
某在建教学楼光纤光栅监测数据分析	梁 曦 金陵志 邓云飞 (451)
某框架-核心筒超高层结构竖向变形在季节性温度变化下的施工模拟分析	刘丰宁 何 政 (457)
预制板不同吊装方式下的性能试验研究	刘体锋 李成才 吴二军 李二要 (461)
基于时变监测极值数据的桥梁构件动态可靠性修正与预测分析	刘月飞 樊学平 (467)
基于解耦荷载效应的桥梁时变可靠性分析	刘月飞 肖青凯 屈 广 樊学平 (476)
风荷载作用下火灾中玻璃首次破裂时间和应力分布模拟预测	陆 伟 陈昊东 王青松 孙金华 (486)
一种新型无机胶的植筋锚固性能试验研究	尚守平 黄新中 杨 甜 (491)
抚河特大桥钢板桩围堰设计与验算	邵俊虎 占玉林 李世春 蒋海军 (497)
玄武岩纤维 TRC 加固砌体柱的抗压性能试验研究	万成霖 王激扬 沈玲华 马卫强 (502)
基于 ARIMA 模型的深基坑沉降预测分析	万冬伟 付 强 孙天烁 金陵志 (508)

钢绞线锈蚀产物分布及混凝土裂缝发展研究	王 磊 伍 一 戴理朝 (514)
粘贴钢板加固 T 型混凝土梁受弯性能研究	谢 军 张延年 王 柳 (521)
高大模板支架的容错优化设计研究	谢 楠 赵 凯 胡 杭 潘明栋 (527)
基于高维模型表达的 RC 框架地震易损性分析	谢致远 龙晓鸿 陈 星 (534)
基于可靠度理论的小高层施工期安全监测研究	张金丹 常 婧 曹 霞 张士保 (541)
表面内嵌 GFRP 筋加固混凝土 T 形梁受弯试验研究	张延年 谢 军 刘 新 (550)
钢管混凝土柱轴压极限承载能力的可靠性及参数影响分析	赵 超 刘月飞 樊学平 (556)
基于随机反应谱理论的支柱类电气设备抗震性能评估方法研究	朱全军 高政国 陈应禄 杨 钦 (564)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

基于 MCFT 的 RPC 梁抗剪承载力计算软件介绍	陈 璇 金凌志 周家亮 蒋春松 (572)
基于 CCD 相机的宋家庄公铁立交桥挠度监测系统	单宝华 王 蕾 霍晓洋 袁文厅 (580)
环氧基形状记忆聚合物超弹-粘弹性本构理论及试验研究	樊鹏玄 赵 兵 陈务军 (588)
检测方位对金属磁记忆信号的影响	付美礼 包 胜 楼煌杰 林 立 (595)
氧化石墨烯掺量和水灰比对水泥基复合材料性能和微观结构的影响	戈娅萍 彭 晖 肖 斌 杨振天 (601)
高速铁路隧道预分支电缆风洞试验研究	李必雄 李寿科 (607)
钢丝网-喷射 UHTCC 薄板抗弯性能试验研究	穆富江 王激扬 李伟平 徐世琅 (611)
基于移动设备的结构动力分析学习软件研发	孙意斌 肖 岩 (617)
基于单目视觉的三维测量系统及在钢管组件变形检测的应用	唐昀超 李丽娟 刘 锋 冯文贤 梁星河 司徒伟明 (624)
输电线路酒杯型铁塔覆冰仿真研究	王 飞 李栋梁 宋 斌 汪长智 张子富 (634)
土遗址用 GFRP 锚杆双锚固模型试验与模拟分析	王 南 张景科 黄军朋 樊 孟 李卷强 王玉超 (641)
UHMWPE 层合板抗侵彻数值模拟研究	王 玺 陈 斌 (645)
DIC 方法位移与应变测试结果可靠性实验研究	王曼漪 胡其高 陈丁丁 新川和夫 (650)
地埋管换热器长期稳定性的一种简化分析方法	熊泽琛 郭红仙 程晓辉 (656)
刹车片型摩擦消能器的单轴力学性能试验研究	叶良浩 曲 哲 贺思维 朱文灿 侯和涛 (662)

胶合木梁抗剪性能研究综述

—第 26 届全国结构工程学术会议特邀报告—

曹 磊^{1,2}, *陈伯望¹

(1. 中南林业科技大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410004; 2. 湖南工业大学土木工程学院, 湖南, 株洲 412007)

摘 要: 木材的剪切性能相对其它力学性能较低, 在不确定的多种应力作用下, 胶合木梁很可能产生剪切破坏。然而, 因其抗剪性能研究较为复杂且较少, 胶合木梁的抗剪设计常被忽视。本文整理和分析了胶合木梁抗剪性能研究现状, 介绍和分析了影响胶合木梁抗剪性能的因素, 包括剪跨比、构件尺寸、测试方法、裂纹及干湿条件等, 分类总结和评价了胶合木梁抗剪设计的几种理论方法, 为胶合木梁的抗剪设计提供参考。

关键词: 胶合木; 抗剪性能; 两梁理论; 断裂力学; Weibull 脆性断裂理论

中图分类号: TU531.2; TU366.3 **文献标志码:** A

RESEARCH REVIEW ON SHEAR BEHAVIOR OF GLULAM

CAO Lei^{1,2}, CHEN Bo-wang¹

(1. College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: Shear behavior of wood is lower than its other mechanical performance, so the glulam beam may well appear shear failure under the influence of uncertain various stresses. However, because the study on shear behavior of glulam beam is complex and little, the shear design of glulam beam is often overlooked. The research statuses on shear behavior of glulam beam are summarized and analyzed. The influence factors on shear behavior of glulam beam are introduced and analyzed, including the shear span ratio, the size of the component, test method, crack, dry and wet condition etc. Several theoretical approaches of the shear design of glulam beam are classified, summarized and evaluated. The reference is provided for the shear design of glulam beam.

Key words: glulam; shear behavior; two-beam theory; fracture mechanics; Weibull brittle fracture theory

长期以来, 木结构构件的设计主要是以抗弯性能和抗压性能设计为主, 而抗剪性能设计常被认为抗剪承载力比较大而被设计者所忽视。其实, 木材的剪切强度较低, 且存在端裂、裂纹、节子等各种缺陷, 在不确定的受力过程中伴随着多种应力状态, 很有可能产生剪切破坏^[1-2], 例如胶合木柱在受压过程中产生 45° 角褶皱的剪切破坏^[3], 胶合木梁在受弯过程中沿中性轴产生顺纹错动剪切破坏等。因此, 在胶合木构件的设计中有必要考虑剪切性能设计。随着工程结构越趋复杂, 许多设计者逐渐开始重新考虑胶合木的抗剪性能设计。

目前, 美国的木结构规范及相关技术标准采用清材小试件的顺纹剪切强度作为容许剪应力值^[4-6], 但是实际工程应用的胶合木构件含有各种缺陷、且在干湿循环中容易产生干裂、强度降低, 因此不能用清材小试件的剪切强度直接代替^[7]。从 1990 年起, 许多学者开始着手研究胶合木梁的抗剪性能, 探索这两者之

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578554); 国家国际科技合作与交流专项(2014DFA53120); 现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室资助

作者简介: 曹 磊(1985—), 湖南益阳人, 讲师, 博士, 主要从事现代木结构及其应用研究(E-mail: 362542731@qq.com);

*陈伯望(1965—), 湖南汉寿人, 教授, 博士, 主要从事现代木结构及组合结构研究(E-mail: tmcwb@163.com)。

间的关系。胶合木梁抗剪性能影响因素较多,且在剪切试验过程中伴随有弯矩和垂直于纹理的应力,纯剪切应力难以测得,故胶合木梁的抗剪性能研究是一个复杂的科学难题。

本文将全面系统的综述影响胶合木梁抗剪性能的因素,探讨胶合木抗剪强度计算的理论方法,旨在为胶合木梁的抗剪设计提供参考。

1 影响胶合木梁剪切性能的因素

胶合木梁的抗剪性能受到剪跨比、测试方法、构件尺寸、荷载类型、裂纹、节子、斜纹、含水率及干湿条件等较多的影响,本文将着重选取以下几点进行探讨。

1.1 剪跨比

胶合木梁的剪切破坏形态与剪跨比和加载点的位置有关。剪力跨是加载点距离最近支座端的距离,而剪跨比则是剪力跨与截面有效高度之比。美国的木结构规范 ASTM D198 建立了剪跨比破坏形态的关系:当剪跨比小于 2.5 时,胶合木梁将会产生较高概率的剪切破坏;而当剪跨比大于 2.5 小于 6 时,既有可能产生剪切破坏,也有可能产生弯曲破坏;而当剪跨比大于 6 时,剪应力可以忽略不计,产生弯曲破坏^[8]。Zakic^[9]采用跨中集中力加载测试了 10 根跨高比为 8.5 的胶合木梁,只有 2 根产生了剪切破坏,其余均为弯曲破坏。

胶合木梁的剪跨比对其抗剪强度影响显著,抗剪强度随着剪跨比的增大而逐渐减小。Keenan 等^[10]在跨中集中荷载作用下测试了不同剪跨比(0.75~2.5)小尺寸云杉胶合木的剪切强度,结果表明:剪跨比对胶合木梁的剪切强度有明显的影。Foschi 和 Barret^[11]研究均布荷载作用下和集中荷载作用下不同剪跨比或跨高比的抗剪强度,并提出了一个胶合木剪切强度的设计方法,结果表明:胶合木梁的剪强度随着剪跨比或跨高比的增大而减小。而 Liu^[12]采用 Weibull 强度统计理论建立两参数的 weibull 模型分析了尺寸与抗剪强度的关系,剪应力采用初等梁理论计算,且忽视了支点处普通梁理论与有限元分析的不同,故所分析的结果不依赖于剪跨比。

1.2 构件尺寸

胶合木梁的剪切强度与其它材料一样存在尺寸效应,其强度随着截面积或体积的增大而逐渐减小。Foschi 和 Barrett^[11,13]及 Liu^[12]均对胶合木梁的剪切强度开展相关研究,均发现其剪切强度分布符合 Weibull 强度统计理论,表明构件的剪切强度受构件尺寸的影响。Foschi 和 Barrett 还认为剪切强度是胶合木梁体积的函数,并依此建立三参数的 Weibull 模型。Soltis 和 Gerhardt^[14]归纳总结了多个学者关于剪切强度与胶合木体积的研究成果,不论什么加载方式,胶合木梁的剪切强度与其体积成反比例幂函数关系。而 Keenan^[10]等测定了不同小尺寸的云杉胶合木的剪切强度,线性回归发现胶合木的剪切强度与其体积没有依存关系,而是与剪切面积有关系。

Rammer 和 Soltis^[15]采用五点弯曲法测试了不同尺寸的南方松和花旗松胶合木梁的剪切强度,并与清材小试块的测试结果进行对比分析,推导出了一个与剪切面积有关的经验方程:

$$\tau = \frac{1.3C_f\tau_{ASTM}}{A^{1/5}} \quad (1)$$

式中: τ 为胶合木的剪切强度; C_f 取 2,为调整清材小试块实际破坏强度的应力集中因子; τ_{ASTM} 为 ASTM D143 中清材小试块的剪切强度; A 为剪切面积。这说明胶合木梁的剪切强度是剪切面积的幂函数,随着剪切面积的增大而减小,该研究结果与 Longworth^[16]的研究结果一致。但是,剪切强度与剪切面积的相关性比与体积的相关性好。

1.3 测试方法

胶合木梁在测试过程中伴随着弯曲应力和压应力,可能不会产生剪切破坏,因此,测试方法将会影响构件是否产生剪切破坏,此外,不同测试方法所产生的剪切强度也存在差别。目前,胶合木梁剪切测试方法主要有三种:跨中集中力加载法,五点弯曲法,四点弯曲法。Bruce A Craig 和 Frank Lam^[17]采用三种测试方法测试了剪跨比为 5:1 或 6:1,截面尺寸为 44×184mm 的 PSL,试验结果发现:五点弯曲法产生了

100%的剪切破坏,跨中集中力加载法产生了 37.5%的剪切破坏,四点弯曲法则不适合做剪切试验,并得出了五点弯曲法与跨中集中力加载法获得的剪切强度比值为 1.34~1.53。Riyanto 和 Gupta^[18]比较三种不同的测试方法对截面为 38×89 的花旗松做了剪切试验,试验结果表明:五点弯曲产生了 49%的剪切破坏,跨中集中力加载法产生了 56.7%的剪切破坏,而四点弯曲法则只产生了 10.5%的剪切破坏。Douglas R Rammer^[19]采用五点弯曲法研究了不同组坯的南方松和花旗松胶合木梁的抗剪性能,分别获得了 74%和 89%的剪切破坏率。由此可知,五点弯曲法和三点加载法均能获得较高的剪切破坏率,而四点加载法不适合做剪切试验。还有一些学者均成功采用五点弯曲法测定木结构构件的剪切强度^[20-21]。因此,为了获得较高的剪切破坏率,本文推荐采用五点弯曲测试胶合木结构构件的剪切强度。

1.4 裂纹及裂缝

木结构构件在干燥过程中,或在干湿循环的使用环境中容易产生断裂或裂纹,而构件强度会降低,在荷载作用下很有可能沿着裂纹或断裂的位置破坏,因此,构件的破坏形态较为复杂。许多学者通过对既有现代木结构桥梁的调查发现,桥梁构件均产生了较多的裂纹,并有不断恶化的迹象,选取 25 根带裂纹的构件进行测试,结果发现,带裂纹发生剪切破坏的构件有 20 根,最大剪切强度损失达 72%或 40~45%^[19],由此可见,裂纹或断裂等将降低胶合木梁的承载力。Newlin 和 Heck^[22]测试了使用 23 年木结构桥梁构件的剩余强度,结果发现,所有构件的剪切破坏均发生在裂纹、裂环及螺栓连接处,因此带有裂纹的木结构构件承载力会降低,剪切破坏也将沿着裂纹的方向开展。Pousette A 研究了裂缝的宽度、深度及不同裂缝类型对胶合木剪切强度的影响^[23]。

Norris 和 Erickson^[24]初步研究了裂纹对剪切强度的影响,假定集中于裂纹顶端的应力是裂纹长度与深度的比值的函数,而这个函数是通过试验得到的经验函数。他们采用两种不同的加载方式对阿拉斯加云杉做了 15 次试验,得到了以下方程:

$$\frac{\tau_c}{\tau_m} = 0.674 \frac{d}{x} \sqrt{\frac{x-a}{a}} - 0.053 \quad (2)$$

式中: τ_c 是中性轴的剪切应力; τ_m 是最大剪切应力; x 为集中荷载的位置; d 为梁高; a 为裂纹长度。

1.5 干湿条件

一些学者的研究结果显示,干燥之后的胶合木梁的剪切强度大于没有干燥的胶合木梁的剪切强度,对于南方松,干湿剪切强度比一般在 1.45~1.75 之间^[25]。

2 胶合木梁抗剪强度设计理论研究

目前,胶合木梁抗剪强度设计理论研究主要有 Weibull 脆性断裂理论、两梁理论及断裂力学理论。根据构件是否存在裂纹,抗剪强度的分析也不同。对于无裂纹、裂缝等缺陷的构件,常采用 Weibull 脆性断裂理论,或是与清材小试块的剪切强度建立的经验公式,如式(1)。对于有裂纹的构件,常采用两梁理论和断裂力学理论。下面就分别作相关介绍。

2.1 Weibull 脆性断裂理论

胶合木梁的剪切强度遵从 Weibull 分布。Foschi 和 Barrett 基于有限元应力分析和 Weibull 脆性断裂理论提出了一个设计方法^[26]。剪切应力分析通过建立二次等参单元有限单元分析,受压本构关系采用非线性,而受剪和受拉采用线性,得到如下结论:1) 高应力分布在支座和加载点附近,并向中性轴逐渐递减;2) 由初等梁理论剪切公式计算的远离支座和加载点的最大剪应力是较保守的;3) 中性轴附近的剪应力大小和分布与受压本构关系的非线性无关。根据 Weibull 脆性断裂理论,则有如下表达式:

$$F_V = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{V^*} \int_V \left(\frac{\tau - \tau_0}{m} \right)^k dv \right\} \quad (3)$$

式中: F_V 为剪切荷载; m 、 k 、 τ_0 是材料常数; V^* 为参考体积,常取为单位体积 1; τ_0 为最小的剪切强度值,假定为 $\tau_0 = 0$ 。由 $\int_V \tau^k dv = \tau^{*k}$, 则有:

$$\tau_m^k I[k] = \tau^{*k} \quad (4)$$

式中: τ_m 为构件的特征应力, 其中 $I[k] = \int_V (\theta[x, y, z])^k dv$, $\theta[x, y, z]$ 是一个 x, y, z 的函数。

Foschi 和 Barrett 提出的设计方法和程序考虑了构件尺寸和荷载类型, 并用试验数据进行了验证。该设计方法已被加拿大设计规范所采纳。但是, 该方法计算过程较为复杂。Liu^[12]也采用 Weibull 脆性断裂理论提出了一个剪切强度的设计方法, 但是剪切应力是根据初等梁理论, 基于剪合力分布计算的, 其剪切强度值与跨高比无关。

2.1 两梁理论

Newlin 等^[27]为了研究端裂及裂纹对剪切强度的影响, 对沿梁长含一条裂纹悬臂梁做了相关试验, 在试验与分析的基础上作了如下假定: 1) 假定胶合木梁为各向同性材料; 2) 假定垂直于纹理方向的应力为零; 3) 假定在支撑处及裂纹处的反力为 $P/2$ 。由此提出了著名的“两梁理论”来解释裂纹的影响, 在集中荷载作用下, 其公式如下:

$$V = \frac{P(l_0 - x)(x/h)^2}{l_0[(2 + (x/h)^2)]} \quad (5)$$

式中: P 为荷载; x 为荷载的位置; l_0 为净跨径; h 为截面高度。若需得到均布荷载, 则对其沿长度方向积分即可。

这个公式后来经 Soltis 和 Gerhardt 验证不能正确的预测没有裂纹等缺陷梁的剪切强度, 裂纹及截面尺寸对剪切强度的影响仍需要进一步的研究确认^[14]。

2.3 断裂力学理论

Port 于 1964 年第一次将断裂力学应用到木材中, 此后 Foschi 和 Barret 采用有限元分析的方法研究了木梁的应力集中因子与梁尺寸的关系, 对小尺寸的端裂木梁进行了试验, 考虑了集中荷载和均布荷载两种荷载类型, 并且推导出了 II 型的临界应力集中因子 K_{II} 。经试验验证, 该公式同样适用于大尺寸构件^[28]。

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a H} \quad (6)$$

式中: $\tau = 3V/2bd$ 为名义应力剪切强度, b 为梁宽, d 为梁高, V 为剪力; a 为裂缝的长度; H 是与 a/s 和 s/d 有关的非尺寸参数, 由有限单元方法所决定。对于集中荷载, H 采用下面的值:

$$(a/s)^{1/2} H = A + B(a/s) \quad (7)$$

式中: A 和 B 为 s/d 的二次函数; s 为剪力跨的长度, 即荷载到支撑点之间的距离; d 为梁高。Foschi 和 Barret 采用式(6)测得了临界应力集中因子。

Murphy 利用边界配置法推导出了一个简化方程来评估集中荷载梁的裂纹影响, 并给出 II 型临界应力集中因子的方程如下^[29]

$$K_{II} = \left[-2.785 \left(\frac{a}{d} \right) - 0.731 \right] \frac{R}{b\sqrt{d}} \quad (8)$$

式中: R 为离裂纹最近的支座反力; a 为裂纹的长度; b 为梁的宽度。对于所有尺寸的梁的测试结果与 Foschi 和 Barret 的结果一致。

以上两个研究主要是针对有端裂纹梁的研究, 而且主要是基于 II 型断裂的研究。此后, Murphy 应用 III 型断裂模式预测了裂纹对木梁强度的影响^[30]。

胶合木梁抗剪强度的断裂理论分析均假定裂纹的开展方向是沿着纤维的方向开展, 可以很好地模拟和解释裂纹对木材剪切破坏的影响, 但是对于混合型裂纹不适用。在实际结构构件中, 裂纹分布不均匀、不规则, 且裂纹的开展是随机的, 多属于混合型裂纹。因此混合型裂纹对木梁剪切强度的影响还需要进一步深入的研究。