

第24届
全国结构工程学术会议
论文集

第 I 册

PROCEEDINGS OF THE 24TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. I

主编：陆新征

《工程力学》杂志社
2015.10

CSTAM2015-P32

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在兰州渡过了它 23 岁生日后，今年在福建厦门召开了第 24 届全国结构工程学术会议。

福建位于东海与南海的交通要冲，与台湾岛隔海相望，是我国东南沿海的重要窗口，是古海上丝绸之路的发源地。我国历史上伟大的航海家郑和从此扬帆远航，开启了我国与世界交流的重要篇章。

厦门市近代一直是我国东南重要贸易和航运中心，特别是改革开放后，厦门市作为最早实行对外开放政策的四个经济特区之一，为我国经济腾飞做出了重要开创性贡献。

今年会议的东道主厦门大学是由著名爱国华侨陈嘉庚先生于 1921 年创办的享誉海内外的著名高校。在厦门大学 90 余年的建校历史中，为我国高等教育事业做出了重要贡献。厦门大学目前建有多个国家级重点学科、重点实验室和工程研究中心，近年来发表了大量高水平的期刊论文，多次获得国际及国家级重要奖励，入选我国“211”工程和“985”工程。根据世界知名期刊《Nature》发布的统计报告，厦门大学科研实力长期名列国内所有科研机构前十名。

在中国力学学会结构工程专业委员会、厦门大学、厦门理工学院、《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 209 篇，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富的收获。

论文集主编 陆新征



2015 年 10 月

第 24 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 209 篇，共计 1250 页，分装成 2 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册只载本册目录。

第 I 册论文 99 篇（共 616 页），包括特邀报告和两个学科类别：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 110 篇（共 634 页），包括四个学科类别：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；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 24 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

钢管混凝土内栓钉抗剪承载力试验研究	陈宝春 陈津凯 (001)
热电耦合场中压电粘弹性微梁的静力坍塌分析	陈昌萍 胡海涛 (011)
基于数值子结构方法的 RC 框架结构地震动非线性分析	古 泉 孙宝印 张沛洲 欧进萍 (019)
横向预应力钢套箍加固 RC 柱研究综述	郭子雄 黄群贤 刘 阳 梅 真 (026)
电化学修复对钢筋混凝土结构服役性能的作用效应	金伟良 陈佳芸 毛江鸿 许 晨 夏 晋 (036)
厦门翔安海底隧道的若干结构监测技术	雷 鹰 郑嘉鹏 (046)
装配式混凝土叠合梁的数值模拟分析	林树枝 黄 渊 (063)
超大型中微子探测器有机玻璃球与不锈钢网壳方案的设计优化分析	王元清 王综轶 杜新喜 衡月昆 宗 亮 秦中华 (071)
再生混合混凝土及其组合构件的研究现状	吴 波 计明明 赵新宇 (079)
若干新型高效结构加固技术及应用	吴 刚 (090)
整体式桥台研究综述	徐 明 刘鹏飞 (114)
一种新的结构修改算法及其在工程设计中的应用	杨 任 宋 琦 陈 璞 (123)
二维变分不等式问题的自适应有限元分析	袁 驷 刘泽洲 邢沁妍 (130)

1. 力学分析与计算

基于构形易损性理论的斜拉桥倒塌模式分析	陈小斌 蒋志刚 严 波 (139)
普通玻璃受冲击破坏的有限离散元方法分析	陈旭东 Andrew H C Chan 杨 健 (143)
平行导线中轴向运动导电梁的动力稳定性分析	胡宇达 张立保 (148)
折架在平面结构试验面外约束中的应用	解晋珍 曲 哲 王 涛 (152)
基于有限质点法的短程线型球面网壳强震作用下倒塌模式优化研究	金 林 喻 莹 夏 萍 (157)
FRP-钢管-混凝土组合柱稳定性分析的改进统一参数法	柯淼宏 张灿辉 张建霖 (163)
基于结构响应统计矩对结构参数灵敏度的损伤识别	雷 鹰 王加祥 杨小梅 (167)
刚性模型测压试验的管路信号修正	李寿科 方湘璐 孙洪鑫 卢倍嵘 (171)
复杂载荷下变刚度超静定梁快速解析求解	李银山 韦炳威 李 彤 贾佩星 (175)
对金属材料塑性屈服与断裂判据修正的讨论	李智慧 汤安民 (179)

航空发动机轮盘和叶片的非线性振动	刘 艮 张 伟 (184)
单支 Michell 平面螺旋结构的构建和优化	刘贺平 王媛媛 张庆华 王龙昆 罗阿妮 (188)
全张力索杆穹顶结构局部断索动力响应分析	陆金钰 董 霄 武啸龙 李 娜 (194)
张拉整体基本单元自动构型理论	罗阿妮 王龙昆 曹鹏飞 袁 李 袁 野 刘贺平 (199)
横向激励下桩基动力响应中群桩效应分析	马建军 高笑娟 刘丰军 贾振华 (208)
集中荷载-悬索耦合系统的面内非线性振动	彭 剑 胡 霞 谢献忠 (214)
高超临界下圆柱绕流的数值计算	秦其伟 刘小兵 刘庆宽 (218)
轴向压缩条件下 IsoTruss 结构屈曲破坏模式研究	隋倩倩 范华林 (224)
大型钢包回转台疲劳寿命分析	唐 雪 严 波 伍 川 张 亮 (228)
矩柱/圆柱非定常气动干扰对载荷影响的数值研究	汪松柏 李绍斌 宋西镇 (232)
纤维模型非线性梁柱单元的研究及数值模拟	王 飞 钟铁毅 刘海锋 杨风利 李清华 (240)
静载荷作用下旋转运动导电圆板的磁弹性振动	王 彤 胡宇达 (247)
地面雷达天线罩风载下的数值模拟与风洞试验的研究	王丽君 佟丽莉 (251)
四节点四边形薄膜单元解析几何刚度矩阵推导的杆件比拟法	文 颖 曾庆元 (258)
基于结构参数不确定性的结构损伤识别	翁梦秀 雷 鹰 (263)
点阵夹芯板全局动力学分析	吴启亮 张 伟 (267)
十六极电磁轴承幅频响应特性研究	吴瑞琴 张 伟 (271)
亚曼苏水电站厂房基坑排水井排水效果研究	吴玉龙 孙成祥 张建海 李 莉 黄志刚 (275)
有限元线法在热传导问题中的发展现状	徐 冰 林思奇 张宏涛 高建岭 (280)
有限元线法 EEP 超收敛计算简约格式的再简约	徐俊杰 袁 驷 (286)
圆柱体水平出筒过程水弹道动态仿真方法研究	徐志程 赵 静 惠俊鹏 俞启东 (293)
结构损伤定位的改进 ULS 方法	杨秋伟 邵彩军 李 娟 李翠红 (297)
复数域上强非线性系统主共振-主参数共振的 MLP 方法与改进多尺度法一致性	杨志安 孟佳佳 李 熙 (301)
脱空对圆钢管混凝土抗剪性能的影响分析	叶 勇 韩林海 陶 忠 (308)
筒壁卸料动态压力的 PFC ^{3D} 数值模拟	原 方 庞 焜 董承英 徐志军 (314)
考虑轴力和弯矩耦合的非线性梁柱单元	张晓东 唐光武 (317)
基于 p 型超收敛计算的一维有限元自适应分析	钟 博 叶康生 袁 驷 (321)
磁西矿千米深井不均匀原岩应力场有限元模型研究	周晓敏 管华栋 (327)

2. 钢筋混凝土结构、材料与构件

异形截面轻钢 EPS 混凝土剪力墙抗震性能试验研究	崔成臣 黄 强 李东彬 李红超 (335)
压型钢板-再生混凝土组合板的受弯性能分析	崔晓曦 张建伟 曹万林 (342)
钢筋混凝土楼板连续倒塌的一种简化模拟方法	刁梦竹 李 易 陆新征 闫维明 (348)
混凝土板破坏预报模型试验研究	董承全 陈 辉 胡在良 秦成超 (356)

高韧性混凝土拉伸荷载下的裂缝控制能力研究	傅柏权 蔡向荣 (360)
钢骨-钢管混凝土轴压短柱承载力	关 萍 陈兰响 (364)
基于纤维单元的预应力混凝土构件非线性有限元分析模型研究	
.....	郭宗明 张耀庭 卢杰志 王晓伟 李瑞鸽 (368)
配箍率对 HRB400 级箍筋 RPC 简支梁斜裂缝影响研究	何 来 金凌志 李月霞 (377)
超高性能钢纤维混凝土抗压性能试验研究及其数值模拟	
.....	黄 靓 徐慎春 赵永娇 苏 宇 陈昉建 (384)
一种角钢式屈曲约束支撑混凝土梁柱连接节点有限元分析	李文明 李帼昌 (388)
风机基础损伤破坏发展机理研究	吕伟荣 朱 峰 张家志 祝明桥 卢倍嵘 石卫华 黄海林 (393)
钢纤维对高强钢筋 RPC 无腹筋梁的剪切性能影响研究	梅 臣 金凌志 杨 蕊 (398)
一种新型钢骨混凝土组合框架滞回性能以及地震反应分析	潘梦阳 周 奎 林 杰 (405)
钢筋混凝土 U 型薄壁纯扭构件截面翘曲效应非线性分析	宋冠中 叶英华 陈圣刚 刁 波 (410)
基于桁架+拱模型的高强钢筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算方法	
.....	宋亚运 唐 婷 彭金成 曹 霞 (416)
混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临界幂律行为	王影冲 王 鼎 郝圣旺 (423)
应用无网格伽辽金法 (EFGM) 分析超高性能混凝土 (UHPC) 动力劈裂失效模式	
.....	徐慎春 黄 靓 苏 宇 仵鹏涛 (430)
裂缝宽度及环境对钢筋混凝土粘结性能的影响	许豪文 刁 波 沈 宇 叶英华 (434)
型钢布置形式对型钢混凝土巨型柱性能的影响研究	颜家胜 石建光 王卫锋 (439)
基于修正压力场理论的 GFRP 混凝土梁截面抗剪承载力分析	
.....	杨 健 刘清风 陈家伟 周 岱 季 清 (445)
钢筋与混凝土粘结界面局部断裂能的确定	杨树桐 陈瑜嘉 (449)
开裂混凝土氯离子侵蚀特性试验研究	尹月酉 (457)
不同剪跨比高强钢筋 RPC 无腹筋梁剪切延性浅析	张 猛 金凌志 (463)
海工混凝土结构耐久性设计的几个问题	周新刚 (469)
基于双层交通混凝土箱梁抗弯性能试验研究	祝明桥 谢子蓉 汪建群 谷志鹏 禹见达 (476)

3. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

预估结构初始广布疲劳损伤发展的概率疲劳分析方法研究	常文魁 李宴宾 薛景川 (482)
典型机身组装壁板剪切稳定性分析	陈 莉 刘秀丽 习江静 (487)
电流变夹层板的拓扑优化研究	陈春强 陈 前 (491)
大展弦比机翼结构整体结构刚度的静力学确定方法	何景武 王亚龙 赵嘉俊 袁宁宁 (498)
基于 Python 和 MATLAB 的 CAE 可视化分析平台的设计开发	
.....	胡 哲 马 骏 赵艳雄 何景武 (504)
双曲正切型非线性包装系统跌落冲击响应分析的 HAM 及其修正	李宏卫 王 军 (508)

载荷加重对疲劳寿命分散系数的影响研究	李宴宾 张 茂 (514)
基于钢筋锈蚀的混凝土结构全寿命周期成本优化设计分析	陆春华 袁思奇 高 远 (519)
双光束激光焊钛合金加筋壁板剪切稳定性分析与试验验证	吕媛波 魏玉龙 张文东 (525)
大型宽体客机复材机身舱门区结构补强研究分析	马 骏 王 岩 赵艳雄 何景武 (530)
夹层结构声振耦合特性的声波导模式分析方法	宁少武 史治宇 钱登辉 张 杰 李疆怀 (536)
太阳能飞机推进系统电池布置对结构振动影响的分析研究	潘 阳 金楷杰 王亚龙 (543)
船底肋板在尖锐礁石搁浅场景下的受力分析	孙 斌 胡志强 王 晋 (547)
车架系统动态响应多目标优化	王 彬 史治宇 张 杰 (553)
一种上单翼单转轴折叠结构方案的设计分析	王 帅 何景武 耿立超 (561)
中外翼下壁板连接紧固孔加工误差修理分析	习江静 董登科 陈 莉 常文魁 (566)
超音速气流下自由层阻尼壁板气弹特性研究	裘 安 张 伟 于天俊 (571)
微动接触状态对铝合金磨损速率影响的数值模拟与分析	尹 东 唐力晨 赵杰江 钱 浩 霍永忠 (577)
柔性多梁结构的解析模态分析	于天俊 张 伟 杨晓东 (586)
FLNG 舷侧结构与 LNGC 旁靠时的抗撞性研究	张东伟 胡志强 陈 刚 (591)
一种尾推式水上飞机浮筒防水溅机构设计研究	赵天龙 何景武 (601)
飞行器自由层阻尼壁板的多脉冲轨道和同宿树	周 莎 张 伟 于天俊 (605)
橡胶硬度及尺寸对拉压垫结构粘接强度影响的有限元分析	卓 轶 (611)

第Ⅱ册目录

4. 钢结构、材料与构件

钢管混凝土叠合柱在电厂汽机房结构中的适用性探讨	陈锦阳 邢国雷 侯 超 王勇奉 (001)
多层装配式钢框架体系和研究	陈学森 施 刚 王 喆 王 琼 (005)
考虑随机缺陷的钢框架支撑结构试验研究与有限元分析	金 路 刘 丹 贾连光 (009)
高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元模型优化	李幅昌 陈博文 刘 余 (015)
钢管混凝土叠合柱-钢梁节点的有限元模拟	廖飞宇 李永进 (019)
不等高开缝钢板剪力墙低周反复试验研究	陆金钰 谯旭东 唐 屹 王恒华 (023)
三面受火的内配型钢方钢管混凝土柱火灾全过程分析	毛文婧 王文达 王景玄 (029)
高强钢结构研究进展和规程编制	施 刚 胡方鑫 石永久 (035)
Q460GJ 钢焊接 H 形梁整体稳定性能试验研究	王赛博 熊 刚 徐国友 杨 波 戴国欣 聂诗东 胡 鹰 张伟富 (040)

Q345GJ 钢焊接 H 形截面残余应力测试	
.....魏奇科 白巨波 熊 刚 杨 波 戴国欣 胡 鹰 聂诗东 张伟富 (045)	
风荷载作用下输电塔线耦联体系响应分析	徐 博 张盈哲 谢 强 (050)
带焊缝缺陷输电杆塔直缝焊管承载力试验研究	殷鹏飞 秦 亮 张琳琳 谢 强 (054)
可替换独立耗能梁段抗震性能分析	殷占忠 任亚歌 陈 伟 梁亚雄 (058)
斜拉索空间姿态对风雨激振影响研究	郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (067)
温度对 X80 管线钢韧/脆转变区断裂韧性的影响	卓小敏 徐 杰 李朋朋 (071)
碗扣式脚手架稳定性影响因素分析	邹阿鸣 李全旺 张 浩 (075)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

软岩浅埋隧道三台阶七步开挖变形破坏机理研究	陈 峥 何 平 张安琪 王秀英 (080)
露地联采高陡岩质边坡稳定性微震监测应用初步研究	方 军 李庶林 胡静云 (086)
地震作用下地下商业街结构动力反应的影响因素分析	高照宇 陈清军 (094)
基于连续边界条件的土层厚度随时间变化的平均固结度研究	
.....何利军 吴立松 张 涛 梅国雄 (099)	
基于地质雷达技术的隧道衬砌缺陷识别分析	贺建涛 董 军 张 健 田 川 (107)
土压缩系数非线性表达式	胡佳星 李正农 (111)
盾构隧道施工过程及支护方式对高速铁路高架桥群桩基础影响分析	
.....刘 喆 何 平 张安琪 陈 峥 (115)	
多管式钢烟囱风致干扰效应研究	刘晓玲 李晓娜 刘庆宽 (124)
不同煤层条件对支承压压力及矿压显现规律的影响	盛园园 魏 平 (129)
刚性芯夯实水泥土桩复合地基大比例静力试验及结果分析	王维玉 赵 拓 王利广 李仕良 (134)
地震波反演与地下结构的动力响应分析	王沿朝 陈清军 (139)
复杂结构性材料一维全状态函数模型研究	卫振海 王梦恕 张顶立 (144)
刚性桩复合地基在岩溶地区高层住宅基础的应用	吴志华 吴敏捷 (158)
考虑横观各向同性效应 Wolffersdorff 亚塑性模型的改进	熊保林 汤劲松 张保俭 (162)
某土石坝超深厚覆盖层场地地震动特性研究	杨正权 赵剑明 杜 超 刘小生 杨玉生 (168)
往复荷载作用下预应力高强混凝土管桩延性分析	杨志坚 王文进 康谷贻 (175)

6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

基于易损性分析的自锚式悬索桥传感器布置	陈永健 罗春楠 林 文 罗钰梁 魏道标 刘思涵 (181)
三塔悬索桥中塔顶主缆抗滑移问题研究	冯江晓 董 军 (185)
运营实桥在线监测系统的建立及数据初步分析	何文朋 雷家艳 (188)
单梁法分析曲线梁桥的适用条件研究	焦驰宇 张 羽 龙佩恒 侯苏伟 (194)

不同路堤表面风速分布的数值计算研究	李聪辉 石 超 刘庆宽 (203)
单箱双室箱梁的局部扭转和畸变效应研究	蔺鹏臻 雒 敏 (208)
基于 ANSYS 的土木结构一致多尺度有限元建模方法探讨	司旭龙 董 军 (213)
我国桥梁健康监测系统工程应用存在的问题及对策	苏 成 廖 威 陈 冉 (217)
正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能	苏庆田 田 乐 韩 旭 邵长宇 (224)
大跨径刚性系杆刚性拱桥承载能力评定	朱尚清 (230)
基于上塔柱及曲臂部分节段整体吊装施工塔柱竖转过程中钢管支架变形分析	
.....	田 川 董 军 贺建涛 杨 林 (236)
基于 FPS 下的城市曲线梁桥的抗震动力学分析	王 煦 焦驰宇 董 军 (240)
刚柔复合式路面接缝处疲劳损伤特性分析	王骁帆 刘朝晖 李 盛 (244)
成桥状态空间主缆线形计算	张 龙 李全旺 林道锦 颜智法 (249)
扁平箱梁涡激力的展向相关特性研究	张海东 刘小兵 王彦彪 (253)
桥梁伸缩缝局部冲击荷载的模型实验	章 伟 林 云 丁 勇 张晓东 (257)
基于实测车辆荷载模型的既有桥梁承载能力评估	朱尚清 (261)

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

基于 FEMA-P58 方法的校园建筑地震经济损失预测案例分析	曾 翔 刘诗璇 许 镇 陆新征 (266)
高层建筑结构基于性能的抗震设计研究现状及性能目标设定	陈家伟 石建光 (273)
基于平稳随机激励下相关函数的结构损伤识别	邓永懋 雷 鹰 (279)
U 型钢板力学性能受硬度和层数的影响分析	杜红凯 韩 淼 闫维明 崔相东 (283)
连续摇摆墙-屈曲约束支撑框架抗震性能分析	冯玉龙 吴 京 孟少平 (290)
屈曲约束支撑框架的刚度布置方法	傅 康 吴 京 庞熙熙 冯玉龙 (295)
真型试验线路六分裂导线防舞数值模拟研究	何小宝 严 波 杨晓辉 张 博 (301)
储液结构隔震优化模型及其影响参数分析	侯钢领 李 祯 贾晓飞 宋天舒 (305)
基于 OpenSees 的主裙楼 RC 框架结构碰撞反应分析	林 杰 周 奎 潘梦阳 (314)
集中荷载作用下侧向弹性支撑悬臂钢梁侧扭屈曲的能量变分解	
.....	刘迎春 张文福 计 静 卢召红 梁文锋 侯桂兰 (319)
多连拱板结构的静动力学性能分析	柳锦春 唐德利 荣 超 (323)
一种改进张弦桁架抗倒塌性能的方法研究	陆金钰 武啸龙 许 庆 (330)
基于响应时间段统计矩的损伤检测方法	罗素娟 雷 鹰 (336)
基于云图法的规则桥梁概率地震需求模型	马海滨 卓卫东 林 杰 邢文杰 谷 音 孙 颖 (340)
带楼板钢管混凝土叠合柱-钢梁节点抗震性能数值分析	钱炜武 李 威 韩林海 赵晓林 (347)
混凝土斜交梁桥车桥耦合振动分析	上官萍 卓卫东 黄新艺 谷 音 樊超越 (353)
风荷载作用下不同加强层体系的动力响应	邵 辉 卢山郎 张建霖 张建国 (362)
静止车辆作用对公路连续梁桥地震反应特性的影响分析	
.....	沈铂坦 黄新艺 魏祥湘 卓卫东 上官萍 (367)

含摩擦阻尼器钢连梁的往复加载试验	师 骁 王彦栋 曲 哲 纪晓东 (376)
长周期地震动作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究	孙 颖 陈天海 卓卫东 谷 音 许智星 (382)
某古塔结构地震反应分析	谭 辉 杨 悦 张小波 费毕刚 刘晶波 (390)
基于 Hilbert 变换的非线性自由振动系统参数识别研究	王立岩 李东升 (394)
基于响应部分观测的分段线性恢复力参数的识别方法	王龙飞 雷 鹰 (400)
陶瓷装甲的一种抗侵彻模型及其验证	吴立朋 (404)
新型偏心支撑框架滞回性能数值评估	吴瑞尧 王春林 孙 逊 (411)
高层连体建筑抗震性能化分析与设计	吴志华 吴敏捷 (415)
采用耗能剪切板的双柱式高墩地震损伤控制研究	谢 文 孙利民 (420)
余震地区桥梁施工过程易损性分析	杨 成 陈文龙 徐腾飞 (429)
建筑玻璃抗冲击性能研究	杨 健 王星尔 王 瞳 张杨梅 赵世伟 (436)
新型伸臂加强层阻尼体系的风振控制研究	姚渊铭 范慧能 张建霖 (442)
预应力度对预应力混凝土框架结构抗震性能影响研究	张 江 张耀庭 杨 力 (449)
古建筑木材料拉-压疲劳试验研究	张宸赫 廖红建 钱春宇 李杭州 宋 丽 郑建国 (457)
带斜筋单排配筋低矮剪力墙的抗震性能	张建伟 杨兴民 曹万林 胡剑民 (462)
工字形钢-混组合梁等效截面法的适用性问题	
.....	张文福 付 烨 刘迎春 计 静 卢召红 梁文锋 (470)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

某多层住宅楼燃气爆炸后结构受损检测鉴定及处理方案	蔡向荣 (474)
某小高层宿舍楼桩基质量缺陷分析及加固设计	常 婧 王 蕊 曹 霞 (478)
任意方向荷载下拉压异性二杆结构柔度优化	胡杰云 周克民 (483)
连梁刚度折减系数影响分析	刘云博 范 重 (489)
SRC 组合铰缝加固疲劳性能试验研究	罗 征 王银辉 袁伟东 胡晓佳 (495)
基于实测数据的港工混凝土结构环境荷载模型及耐久性分析	
.....	庞 龙 应宗权 范志宏 田俊峰 李全旺 (502)
预拌干混砂浆柔性抹灰施工工法	史雅慧 张继超 周海涛 孙芳芳 (508)
车载过程非平稳性对桥梁时变可靠度的影响	王 草 李连友 李全旺 (513)
基于简化弹性层状体系的船厂柔性地坪结构设计方法研究	吴毅彬 黄 延 瞿 革 (517)
考虑施工中人为错误的响应面法	谢 楠 赵 凯 陈威克 安宇骢 张 晖 (527)
非标准圆形斜拉索气动性能试验研究	闫煦东 樊利兵 刘庆宽 (533)
可简易更换橡胶垫板的橡胶板式支座节点的设计研究	于岩磊 (538)
基于风洞试验的高层建筑围护结构抗风设计	左太辉 李庆祥 黄啟明 (543)
大型船厂工业刚性地坪结构设计方法研究	吴毅彬 黄 延 瞿 革 (549)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

高韧性水泥基复合材料单轴拉伸试验研究	蔡向荣 傅柏权 (556)
低热水泥混凝土温控特性及在地下工程适用性研究.....	段寅 袁葳 岳朝俊 (560)
基于 Info-gap 理论的结构损伤识别方法研究.....	刘纲 李坤 王茜 (565)
火灾后中空夹层钢管混凝土柱偏压力学性能研究.....	刘晓 鲍俊涛 王兵 (571)
三本国际土木工程期刊热点论文调查	裴正南 张道博 王新 许镇 陆新征 (579)
高性能泡沫铝框架填充墙连接装置有限元模拟	沙奔 李爱群 (589)
降阶模型在风力机叶片流固耦合计算中的应用研究.....	孙芳锦 张大明 梁爽 (594)
裂缝宽度和挠度控制的 GFRP 筋混凝土梁的设计方法.....	涂建维 赵权 (598)
新型板囊组合结构抗压变形分析	王广政 李志刚 (605)
钢纤维 TRC 薄板的常温及高温后弯曲力学性能.....	王激扬 沈玲华 徐世焱 (610)
建筑结构设计总信息的辅助确定方法	杨迪珊 石建光 何柳辰 (616)
盐水干湿循环作用下 TRC 加固 RC 受弯梁的研究	尹世平 叶桃 贾申 那明望 (622)
PVC 膜材料不同温度下的应力松弛性能预测.....	张营营 许珊珊 张其林 (629)

钢管混凝土内栓钉抗剪承载力试验研究

—第 24 届全国结构工程学术会议特邀报告—

*陈宝春, 陈津凯

(福州大学土木工程学院, 福州 福建 350108)

摘 要: 在钢管混凝土构件的钢管内壁上设置栓钉(内栓钉)可以加强钢管与核心混凝土的组合作用。以核心混凝土强度、栓钉直径和长度为主要参数进行了 8 个设置栓钉的钢管混凝土试件推出试验, 并与 1 个不设置栓钉的钢管混凝土试件和 4 个设置栓钉的组合梁试件进行对比。结果表明, 钢管混凝土内栓钉试件的受力由弹性段、弹塑性段、荷载下降段和荷载残余段四个阶段组成。栓钉剪断破坏时荷载达到最大, 混凝土未出现开裂和压碎现象, 钢管应力也很小。有栓钉钢管混凝土试件的极限荷载为 673.3~1356.9 kN, 远大于无栓钉试件 S4-1 的 85.7 kN, 栓钉能极大改善脱粘后钢管混凝土构件的共同工作性能。有栓钉钢管混凝土试件推出过程中, 核心混凝土不会与钢管分离, 栓钉的作用得到较充分的发挥, 其极限荷载是组合梁的 1.69~1.73 倍。钢管混凝土内栓钉的抗剪承载力随核心混凝土强度的提高而提高、随栓钉直径的增大而增大, 而受栓钉长度的影响较小。在试验结果分析基础上, 提出钢管混凝土内栓钉抗剪承载力计算公式, 可供工程应用和进一步研究参考。

关键词: 钢管混凝土; 栓钉; 推出试验; 组合梁; 抗剪承载力; 计算公式

EXPERIMENTAL STUDIES ON SHEAR-BEARING CAPACITY OF HEADED STUD IN CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

*CHEN Bao-chun, CHEN Jin-kai

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Headed stud in the inner-surface of steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) could improve the composite performance of steel tube and core concrete. Taking the grade of core concrete, diameter and length of headed stud as the key parameters. 8 CFST specimens with headed stud were conducted, together with 1 CFST specimen without headed stud and 4 composite beam specimens with headed stud for comparison. The results show that the load-slip curve of CFST specimen with headed stud consists of the linear elastic stage, the elastic-plastic stage, load descent stage and load residual stage. The headed stud was cut off at the maximum load without phenomenon of fracture or crush in concrete, and the stress of steel tube was low. The ultimate load of CFST specimens with headed stud is 673.3~1356.9 kN, much higher than 85.7 kN of the specimen S4-1 without headed stud, the headed stud can improve the composite performance of debonded CFST. Core concrete in CFST specimens did not separate from steel tube in the process of push-out test, the bearing capacity of headed stud could play its function better, and their ultimate bearing capacities are 1.69~1.73 times of those of the composite beam specimens. The shear-bearing capacity of headed stud in CFST increases with the increase of grade of core concrete and stud diameter, while it is little affected by stud length. Based on the analysis on experimental results, calculation formula of shear-bearing capacity of headed stud in CFST is proposed, which can be available for engineering application and further study.

Key words: concrete-filled steel tube; headed stud; push-out test; composite beam; shear-bearing capacity; calculation formula

基金项目: 国家自然科学基金(51178118)

作者简介: *陈宝春(1958—), 男, 福建罗源人, 教授, 博导, 从事桥梁与结构工程研究(E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn);

陈津凯(1987—), 男, 福建龙岩人, 博士生, 从事组合桥梁结构研究(E-mail:chjinkai@163.com).

钢管混凝土结构在土木工程中得到广泛应用,得益于钢管与混凝土的组合作用。对钢管与混凝土界面粘结强度已开展了大量的试验研究。研究表明,圆钢管与混凝土抗剪粘结强度在 0.43~1.032MPa 之间^[1]。然而,实际结构中,由于混凝土收缩、温度变化等常导致界面粘结的破坏^[2],即出现脱粘现象,会给结构受力带来不利影响^[3]。对于桁式或格构式结构,腹杆或联接件与钢管混凝土弦杆或柱肢的钢管相联,当钢管与管内混凝土发生脱粘时,难以将荷载传至管内混凝土,结构的整体性受到影响,钢管局部也可能因受力过大而发生局部破坏^[4]。为此,可在钢管内设置抗剪钢板环、钢筋环、钢筋钉、栓钉等连接件。薛立红等^[5]对前三种连接件进行了试验研究,根据试验结果给出了连接件的计算公式并对构造提出了建议。

钢板环较多地用于建筑结构中的梁柱结点,钢筋环在小跨径的钢管混凝土实肋拱中也有应用,但其抗剪承载力较低。栓钉是钢-混凝土组合梁中广泛应用的一种柔性抗剪连接件^[6-7],可应用于大跨度钢管混凝土桁式拱桥中(称之为内栓钉),具有施工简单、受力性能好的特点^[8],已被用于贵州总溪河大桥中^[9]。然而,对于钢管混凝土内栓钉的抗剪性能,目前未见文献的报道。最相近的文献[5]所进行的钢筋钉试验中,采用的钢管直径仅 165mm,壁厚仅 5mm,钢筋钉与钢管的焊接没有全焊透,推出过程中钢筋钉处的钢管出现了局部转动,这些都与实际情况有所不同,提出的影响钢筋钉抗剪承载力的因素为钢筋钉长度与钢管壁厚的比值、混凝土的局部抗压能力的结论,也有待商榷。

为了解内栓钉在钢管混凝土结构中的工作性能,同时配合总溪河大桥的建设,作者开展了钢管混凝土内栓钉的系列研究。本文是研究的第一部分,对象为单根栓钉的抗剪承载力。试验参数为核心混凝土强度、栓钉直径和长度。同时,还制作了不设栓钉试件和组合梁的推出试件以进行对比。

1 试验设计

1.1 试件设计

共制作 13 个试件,包括 8 个设置栓钉、1 个不设置栓钉的钢管混凝土试件和 4 个设置栓钉的组合梁试件。

钢管混凝土试件采用了较大的钢管和较厚的管壁,以避免文献[5]出现的问题。钢管直径为 600mm,壁厚为 14mm,长度为 650 mm。设置栓钉的试件(如图 1 所示),根据试验加载对称性要求,沿试件横断面每隔 90°各设 1 根,一个试件共 4 根。栓钉构造见图 2,采用市场上常见的 $\Phi 16$ mm、 $\Phi 19$ mm 和 $\Phi 22$ mm 三种直径,长度有 50 mm、80 mm 和 100 mm 三种,以 80 mm 为主。核心混凝土强度取 C35 和 C55 两种。

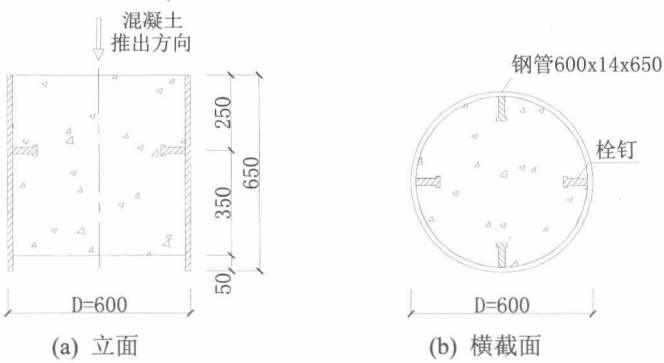


图 1 设置内栓钉的钢管混凝土试件构造图 /mm

Fig.1 Details of CFST specimens with headed stud

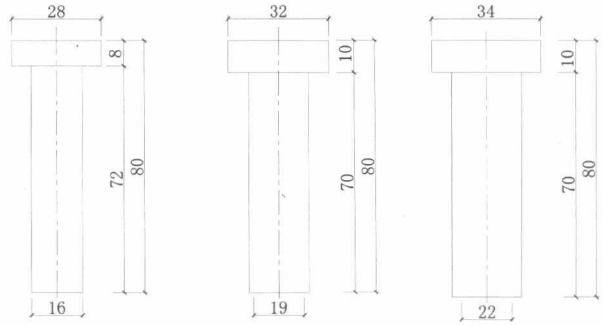


图 2 栓钉构造图 /mm

Fig.2 Details of headed stud

组合梁试件尺寸设计参考了钢管混凝土试件和欧规 4^[10]的标准推出试件规定,见图 3。对应栓钉规格与核心混凝土强度等参数与钢管混凝土试件相同,但少了 $\Phi 19$ mm 直径的栓钉和长度变化的试件。

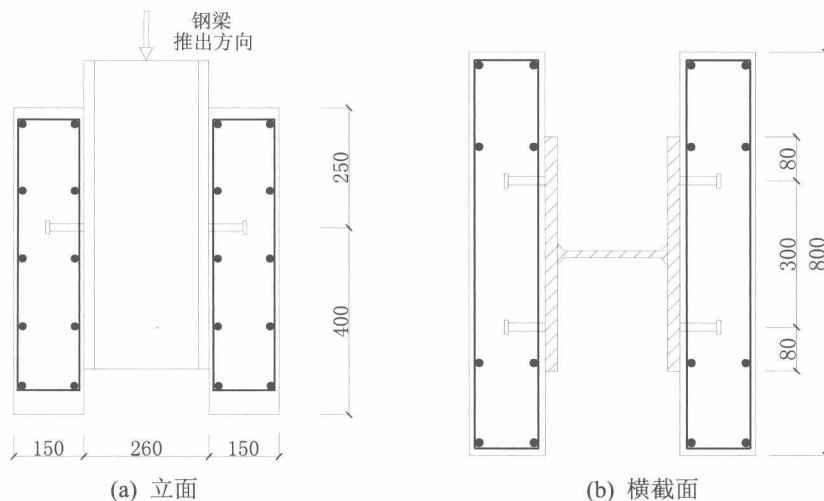


图3 组合梁试件构造图 /mm

Fig.3 Details of composite beam specimens

试件参数汇总列于表1。试件 S4-1 为无栓钉试件，其余按组别 S、混凝土强度 C、栓钉直径 D 和长度进行编号 L。

1.2 试件制作与材料属性

按规定长度制作钢管或 H 型钢后，画出栓钉位置，采用手工电弧焊焊接栓钉。焊接工艺及标准按照《栓钉焊接技术规程》(CECS226.2007)^[11]。对焊接的试件进行了拉力试验和弯曲试验，各项性能均符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433-2002)^[12]的有关规定。试验目的是测得栓钉抗剪承载力，因此在栓钉焊接完成后，在钢管内壁或钢板上进行粘贴透明胶带和刷油的隔离处理，以减小界面的粘结力和摩擦力，模拟脱粘情况。隔离处理后，浇注混凝土。C35 混凝土中水泥：碎石：中砂：水配合比为 473：1126.6：580.4：203.3；C55 的配合比为 535：1091.2：562.1：203.3，采用 42.5# 普通硅酸盐水泥。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)^[13]测得的混凝土材性数据列于表 1。

表 1 构件参数一览表
Table 1 Description of specimens

组号	试件编号	试件类型	栓钉 $D \times L/\text{mm}$	混凝土强度/ MPa	混凝土弹性模量/极限滑移/ ($\times 10^4 \text{MPa}$)	S_u/mm	N_u/kN	Q_u/kN
I	S1-C55-D16-L80	钢管 混凝土	16×80	58.3	3.84	6.01	782.1	174.1
	S1-C55-D19-L80		19×80	58.3	3.84	7.02	1071.7	246.5
	S1-C55-D22-L80		22×80	58.3	3.84	8.06	1356.9	317.8
II	S2-C35-D16-L80		16×80	35.5	3.30	8.79	673.3	146.9
	S2-C35-D19-L80		19×80	35.5	3.30	10.34	874.9	197.3
	S2-C35-D22-L80		22×80	35.5	3.30	11.76	1156.5	267.7
III	S3-C55-D16-L50	组合梁	16×50	58.3	3.84	5.94	754.1	167.1
	S3-C55-D16-L100		16×100	58.3	3.84	6.04	799.7	178.5
IV	S4-1		-	58.3	3.84	2.67	85.7	-
V	S5-C55-D16-L80		16×80	58.3	3.84	5.18	404.4	101.1
	S5-C55-D22-L80		22×80	58.3	3.84	7.31	741.2	185.3
	S5-C35-D16-L80		16×80	35.5	3.30	6.24	339.2	84.8
	S5-C35-D22-L80		22×80	35.5	3.30	8.08	634.4	158.6

钢材和栓钉材料属性按《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)^[14]规定进行，测得钢管与钢板的屈服强度为 275.2 MPa，极限强度为 428.8 MPa，弹性模量为 $2.02 \times 10^5 \text{MPa}$ 。栓钉材性见表 2。

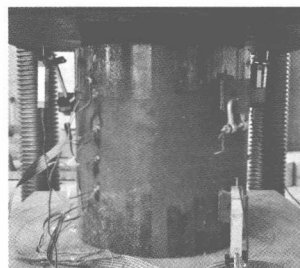
表 2 栓钉材料属性试验结果
Table 2 Material property of headed stud

直径/(mm)	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/($\times 10^5$ MPa)
$\Phi 16$	341.9	478.4	2.04
$\Phi 19$	339.0	483.6	2.00
$\Phi 22$	332.8	467.3	2.11

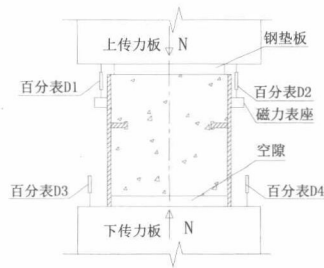
1.3 试验装置与试验过程

试验在福州大学结构实验室 10000kN 电液伺服长柱压力试验机上进行,采用推出试验的方法,加载与测试装置见图 4。在试件上端钢管与上传力板之间、下传力板上各布置两个位移计测量钢管与核心混凝土的相对位移及上下传力板间的位移;在钢管和栓钉表面粘贴应变片测应变,布置如图 4(b)所示。荷载值在试验机上读出,位移及应变由 DH3816 应变测试仪采集。

试验时将试件放置于压力机下传力板上,试件核心混凝土顶面放置直径 550 mm、厚度 50 mm 的钢垫板。试验采用单调分级加载的方式,先进行预加载,使各部分接触良好并检查各仪表运行情况。在加载初期,每级加载约为预估极限荷载的 1/20,持荷 2 min,在每级加载过程中观察钢管壁变形并测试位移与应变。当钢管与核心混凝土之间出现明显的非线性滑动后,则采用缓慢连续加载,数据采样间隔为 10 s/次。除第 II 组加载至极限荷载下降约 20%停止加载外(为切开钢管观察栓钉是否破坏),其余均加载至滑移值达到 20 mm 时停止。



(a) 试件加载照片



(b) 加载示意图

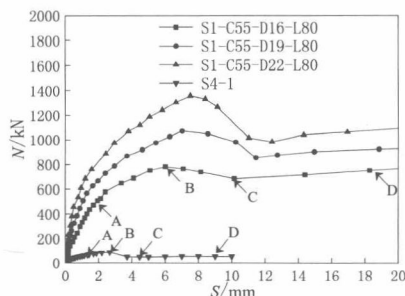
图 4 试验装置图

Fig.4 Test Set-up

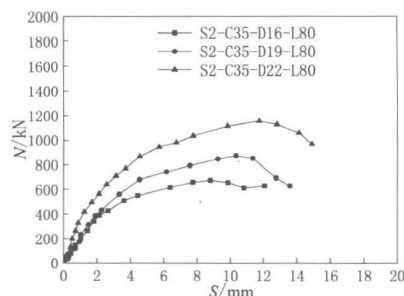
2 试验结果与分析

2.1 试验过程

试件的荷载-滑移曲线(N - S 曲线)如图 5 所示。取荷载-滑移曲线中的第一个峰值点对应的荷载 N_u 为试件(4 个栓钉)极限承载力,与 N_u 对应的滑移值为试件极限滑移 S_u ,栓钉抗剪承载力 Q_u (将 N_u 扣除 S4-1 测得的粘结力后除以 4),见表 1 最后三列。



(a) 第 I 组和第 IV 组



(b) 第 II 组

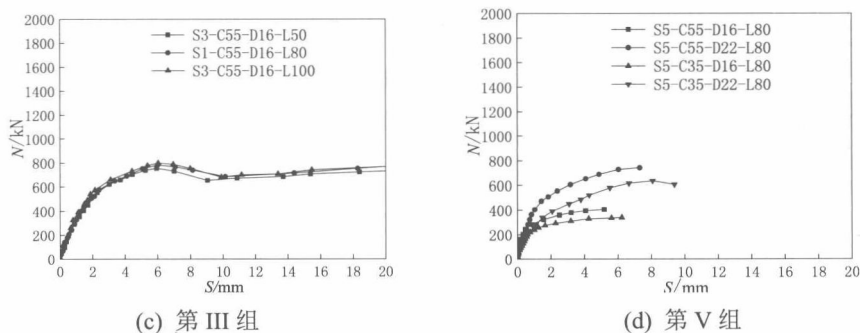


图5 试件荷载-滑移曲线(N-S 曲线)

Fig.5 Load-slip curves of specimens (N-S curves)

从图 5(a)~图 5(c)可以看出, 设置内栓钉的钢管混凝土荷载-滑移曲线(N-S 曲线)由四段组成。OA 接近直线, 为弹性段($N \leq (0.45 \sim 0.55)N_u$), 钢管与核心混凝土相对滑移很小, 约为 $0.15 \sim 0.20S_u$; AB 为弹塑性段($(0.45 \sim 0.55)N_u < N \leq N_u$), 滑移增长速率加快, 直至荷载峰值点 N_u (673.3~1356.9 kN), 极限滑移 S_u 达到 6.01~11.76mm。伴随着明显的栓钉剪断声响, 荷载-滑移曲线进入下降段 BC, 荷载快速下降至 $0.8 \sim 0.85N_u$ 。此后进入荷载残余阶段 CD, 由于栓钉剪断后, 栓钉根部的残余段与核心混凝土的相互作用, 荷载-滑移曲线略有上升, 荷载稳定在一定范围, 相对滑移不断增大。

无栓钉试件 S4-1(图 5(a)), 钢管与混凝土之间仅有隔离处理后残余的粘结力与界面机械咬合力, 最大推出荷载 N_u 仅 85.7 kN, 远低于有栓钉试件的 673.3~1356.9 kN。极限滑移 S_u 为 2.67 mm, 仅为有栓钉试件 (6.01~11.76 mm) 的 22.7%~44.4%。由此可见, 栓钉能极大改善脱粘后钢管混凝土构件的共同工作性能。

组合梁推出试件的 N-S 曲线由两个阶段组成(图 5(d))。OA 弹性阶段($N \leq (0.55 \sim 0.65)N_u$), 钢梁与混凝土板相对滑移很小, 约为 $0.10 \sim 0.25S_u$; 弹塑性段 AB($(0.55 \sim 0.65)N_u < N \leq N_u$), 钢梁与混凝土板相对滑移速率加快, 钢梁与混凝土板出现明显的相对分离趋势。栓钉破坏时, 荷载峰值点 N_u 为 404.4~634.4 kN, 极限滑移 S_u 为 5.18~8.08mm, 均小于有栓钉的钢管混凝土试件。栓钉破坏后, 钢梁与混凝土板脱开, 无法继续加载, 试验停止, 没有像钢管混凝土试件那样测到下降段和荷载残余段。

具体到相同参数的试件, 在 C55 混凝土中, 钢管混凝土试件 $\Phi 16$ mm 和 $\Phi 22$ mm 栓钉抗剪承载力 Q_u 和极限滑移 S_u 分别是组合梁的 1.72、1.71 和 1.16、1.10 倍; 在 C35 混凝土中, $\Phi 16$ mm 和 $\Phi 22$ mm 栓钉抗剪承载力 Q_u 和极限滑移 S_u 分别是组合梁的 1.73、1.69 和 1.41、1.46 倍。显然, 在钢管混凝土中设置栓钉的效果, 要好于组合梁。其主要原因在于, 钢管混凝土试件推出过程中, 处于管内的核心混凝土不会出现与钢管分离的现象, 栓钉的作用得到较充分的发挥。

2.2 有栓钉钢管混凝土试件破坏机理

2.2.1 破坏形态

图 6 为试验结束后栓钉在核心混凝土中的照片, 剪断部位处于靠近焊缝的钉杆根部。可以看到, 由于钉杆受力弯曲变形, 使得钉杆(A 面)挤压混凝土(A'区), 钉杆(B 面)与混凝土(B'区)分离, 产生约 2.5mm 的空隙。

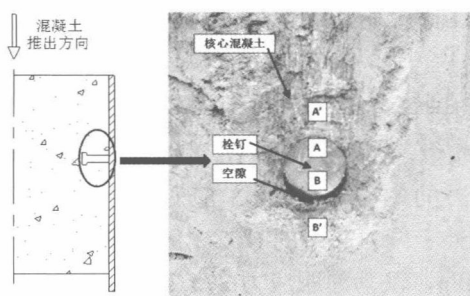


图6 核心混凝土一侧典型破坏形态

Fig.6 Typical failure view on the side of core concrete

为进一步观察栓钉及其周围混凝土的破坏形态,采用铁钎子和电锤,对栓钉周围混凝土进行敲击破碎后取出栓钉,如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,栓钉钉杆与周围混凝土仍然是接触良好的。从图 7(b)可知栓钉除了在根部约为 10.0mm 区域发生弯曲变形,其他部分都没有明显的变形。

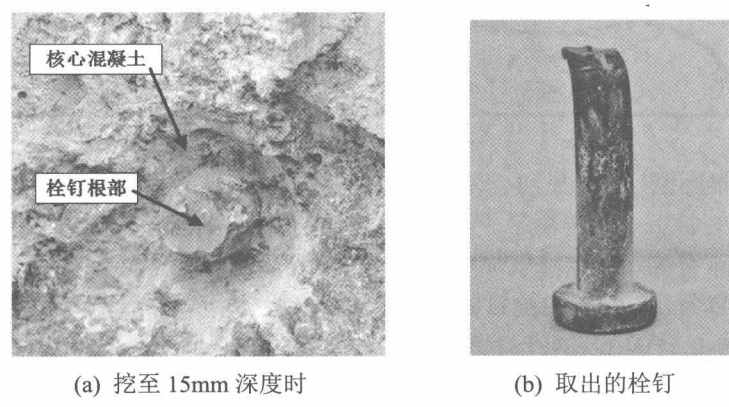


图 7 试验后的栓钉照片
Fig.7 Photographs of headed stud after test

2.2.2 栓钉的荷载-应变曲线

图 8 给出了 S1-C55-D16-L80 的一根栓钉的荷载-应变曲线($N-\epsilon$ 曲线)。其他栓钉的曲线与其相似,限于篇幅,没有示出。从图 8 可知,栓钉上的所有应变均为拉应变,说明其除了受弯外,还受到一定的掀起力作用。靠近钉头的 ST1-2~ST1-3、ST1-5~ST1-6 应变值均较小,最大值仅为 0.00518。根部处的 ST1-1 和 ST1-4 应变值较大,且前者大于后者,悬臂作用相当明显。ST1-1 应变片位于核心混凝土与栓钉挤压一侧,当 N 为 $0.25N_u$ 时,由于挤压而损坏。以 ST1-4 曲线来分析,在 $N < 0.4N_u$ 阶段,荷载-应变曲线呈线性增加,与试件荷载-滑移曲线 OA 弹性段相对应;在 $(0.4N_u < N \leq N_u)$ 阶段,ST1-4 的荷载-应变曲线呈非线性增加,应变增长速率增大,与试件荷载-滑移曲线 AB 弹塑性段相对应。荷载达到 N_u 时,应变达到 0.157。

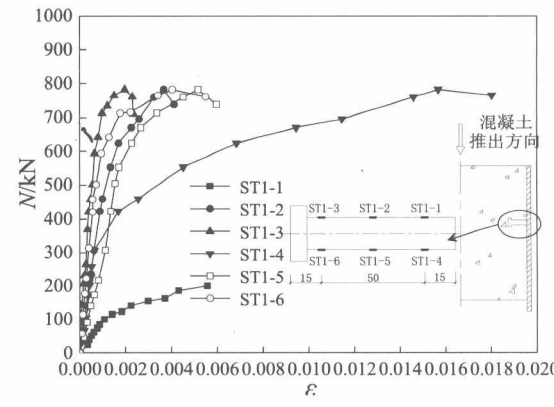


图 8 S1-C55-D16-L80 栓钉荷载-应变曲线
Fig.8 Load-strain curves of headed stud of S1-C55-D16-L80

2.2.3 钢管的荷载-应变曲线

图 9 给出了 S1-C55-D16-L80 的钢管荷载-应变曲线,图 10 给出了钢管在各级荷载作用下应变沿试件高度的分布。其他试件曲线变化规律相似。从图 9 和图 10 可以看出,在背离推出方向栓钉外的 ST2-1、ST2-2 钢管应变值很小;在推出方向栓钉外的 ST2-4、ST2-5 应变值较大,且随着推出过程而不断增大,是承受栓钉传来荷载的主要部分;与栓钉处于同一高度的 ST2-3 应变值介于他们之间,更靠近 ST2-1 和 ST2-2。整个试件钢管的最大应力为 33.7 MPa,仅为屈服应力 275.2 MPa 的 12.3%,应力很小。