

第26届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅲ册

**PROCEEDINGS OF THE 26TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. III

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)

模拟砼靶侵入的 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 玮 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 金凌志 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 金凌志 (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)

.....李必雄 李寿科 (607)

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 徐世焱 (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)

.....王 飞 李栋梁 宋 斌 汪长智 张子富 (634)

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)

.....王 玺 陈 斌 (645)

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)

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

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏, 无锡 214122)

摘 要: 本文提出一种损伤可控型钢框架节点(DCSF 节点)。在梁端腹板上设置连接钢板, 通过高强摩擦螺栓将梁、柱拼接在一起, 并在梁内布置预应力筋提供节点的复位能力。小震作用下高强螺栓提供节点的初始刚度和抗弯承载力, 中震作用下利用螺栓杆在螺栓孔壁内的滑移改善节点的耗能, 保护梁、柱主体构件免于损伤。为了研究该类节点的初始刚度、损伤特征、滞回性能和自复位能力, 共设计完成了 4 个足尺试件的低周往复加载试验, 分别考虑了连接钢板的不同接触表面、预应力筋的初张拉值以及高强螺栓预紧力的影响。试验研究发现: 高强螺栓在螺栓孔内的滑动为节点提供了良好的耗能能力; 预应力筋能够减少结构的残余变形提供节点的自复位能力; 当层间位移角达 2.4% 时构件未发现明显损伤, 其损伤主要集中在螺栓杆与孔壁的挤压破坏, 更换连接钢板后节点的承载力和耗能能力基本不变。研究表明, DCSF 节点具有良好的抗震性能, 节点连接无需现场焊接, 施工方便、快捷, 可在地震区推广应用。

关键词: 损伤可控; 钢框架节点; 试验研究; 摩擦耗能螺栓; 自复位性能

EXPERIMENTAL STUDY ON DAMAGE CONTROL STEEL FRAME EXTERIOR JOINT

CAI Xin, ZOU Yun, ZHENG Li-jun, LI Tian-qi, DING Jie, ZHAO Tao-gan, KANG Jin-xin

(School of Environment Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;)

Abstract: This paper presents a damage control steel frame joint (DCSF joint). By setting splice plate on the web of beam end, beam and column are connected by high strength friction bolts, and the prestressed reinforcement in the beam can provide re-centering capacity for the joint. Under small earthquakes, high strength friction bolts provide initial stiffness and flexural bearing capacity of the joint; under medium earthquakes, the slip of bolt rod in bolt hole dissipates energy for the joint, therefore protect main structural members from damage. In order to study the initial stiffness, damage characteristics, hysteretic behavior and re-centering capacity of the joint, four full-size specimens were designed and tested under cyclic loading. Considering the effects of different contact surfaces of the splice plates, pretension of prestressed reinforcement and pre-tightening force of high strength bolts respectively, the experimental study found that: the slip of high strength bolt rod in bolt hole provides a good energy dissipation ability for the joint; the prestressed reinforcement can reduce residual deformation of the structure and provide re-centering capacity for the joint; when inter-story displacement angle reaches 2.4%, the damage was mainly concentrated in bolt rods and the extrusion area of bolt holes on splice plate, no obvious damage was found in main structural members. The bearing capacity and energy dissipation capacity of the joint basically remains unchanged after replacing the splice plate. The results of the study show that having good seismic performance and convenient construction process without site welding, DCSF joint can be

基金项目: 国家自然科学基金课题项目(51378240); 2015 年江苏省建筑节能与建筑产业现代化科技支撑项目; 2016 年江苏省建筑产业现代化示范基金项目

作者简介: *邹 昀(1967—), 女, 安徽人, 教授, 博士, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: zouyun_22@126.com);

蔡 鑫(1992—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: caixin_686@126.com);

李天祺(1979—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震研究(E-mail: ltq_tiger15@126.com)。

popularized and applied in earthquake regions.

Key words: damage control; steel frame joint; experimental study; friction energy-dissipation bolts; re-centering capacity

钢结构具有强度高、塑性韧性好、材质均匀、能够工业化生产、施工速度快、降低污染等优点。而钢结构的节点构造很大程度上决定了钢结构的抗震性能^[1-2]。“损伤可控”的结构抗震设计概念，是指结构在遭遇设防地震或罕遇地震后，仅需很小的成本即可恢复其使用功能，且结构体系易于建造和维修，经济效益较高。“损伤可控”的思想是在研究预制无黏结预应力混凝土框架上发展起来的，目前实现结构损伤可控的方案有增设摇摆墙、摇摆柱梁、设置预应力筋、设置耗能减震阻尼器、设置可更换结构构件或者是多种方案共同采用等方法^[3-7]。国内外对损伤可控型结构的研究^[8-10]不多。2009年 Wolski 和 Ricles^[11]提出在梁腹板附加摩擦耗能装置，并进行了 0.6 比例缩尺的四跨七层钢框架试验。2014 年广州大学周云教授^[12]等提出在预制的梁柱试件连接节点部位安装制作好的扇形阻尼器，以此提高装配式框架结构的耗能减震能力，减少装配式框架因节点的破坏而倒塌的风险。2015 年北京建筑大学张艳霞^[13]针对自复位钢框架结构体系设计了一组长孔螺栓摩擦耗能器，对不同的长孔宽度和接触面进行了往复加载试验，研究发现钢-黄铜接触时耗能能力更优、滞回性能更稳定；并且螺栓长孔宽度的增加，耗能性能的离散程度随之增加。“损伤可控”型结构已成为国际地震工程领域的研究热点，也是工程抗震研究的可持续发展的重要方向之一。

本文提出一种损伤可控型钢框架节点(DCSF 节点)，梁、柱通过梁端的腹板的高强摩擦螺栓连接一起，梁内布置预应力筋提供节点的复位能力。共设计完成了 4 个足尺试件的低周往复加载试验，分别考虑了拼接钢板的不同接触表面、预应力筋的初张拉值以及高强螺栓预紧力的影响。考虑了不同连接钢板的接触面、预应力初始值以及高强螺栓的预紧力，设计了 4 个足尺的钢框架边节点试件。梁、柱在梁端通过梁腹板处的高强螺栓连接，螺栓孔径比杆径大 1.5mm，以便螺栓杆可在圆形孔内滑动耗能。梁腹板两侧设置预应力筋以实现自复位，降低残余变形。

1 节点低周反复荷载试验

1.1 节点试件设计

试件梁柱截面采用焊接工字型钢，分别采用 H450×160×8×16 和 H380×380×8×16。梁的顶部封板为—450×160×40，梁底部封板为—450×380×10，柱两侧端头封板为—380×380×30。在梁柱腹板位置分别布置多道加劲肋，试验节点的构造图见图 1，连接钢板构造见图 2，试件的设计参数见表 1。

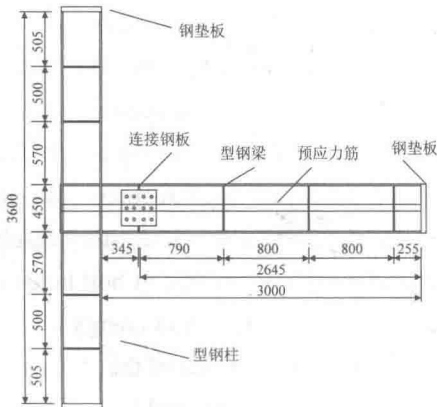


图 1 试验节点构造图
Fig.1 Joint Specimen

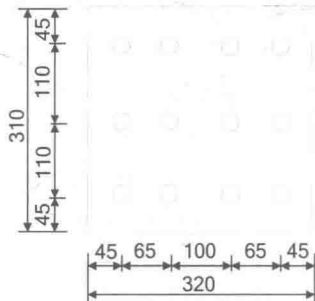


图 2 连接钢板构造图
Fig.2 Splice plate

试件钢材为 Q345B，实测屈服强度为 350MPa，抗拉强度为 470MPa。钢绞线采用低松弛高强预应力钢绞线，实测抗拉强度为 1930MPa。梁张拉端放置压力环(YBY-600KN 型)以测预应力值的变化。

1.2 加载装置及加载方式

试验采用 100 吨电液伺服作动器对试件进行加载。采用“横柱竖梁”的模式进行加载。按照 0.2 的轴压比，用千斤顶施加轴力，加载装置如图 3，试验以位移控制，每级水平位移下循环反复 3 周，加载制度如图 4 所示，试验现场如图 5。

表 1 试件的设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

节点编号	连接钢板接触面处理方式	单根预应力筋初张拉的预应力/kN	对高强螺栓施加的扭矩/(kN·m)
DCSF1	普通接触面	76.33	155
DCSF2	普通接触面	84.25	155
DCSF3	喷砂接触面	89.50	155
DCSF4	抛丸接触面	72.75	300

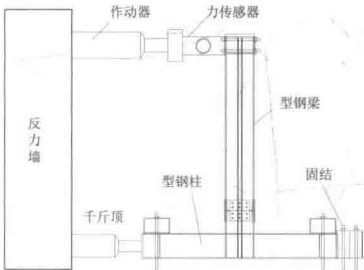


图3 节点加载装置
Fig.3 Loading device of the joint

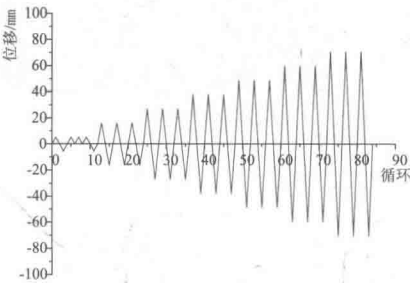


图4 试验加载制度
Fig.4 Loading system of the tests



图5 现场试验加载图
Fig.5 Photo of the loading device

1.3 测点布置

在梁的左右翼缘靠近拼接缝处分别布置2个竖向位移计，在梁底左右翼缘分别布置2个竖向位移计；在距离拼接缝上方1000mm的梁的右侧翼缘处布置一个水平位移计，在柱底封板处布置1个水平位移计。应变片布置在梁的翼缘和腹板位置，以及连接钢板上。位移计应变片布置如图6所示。

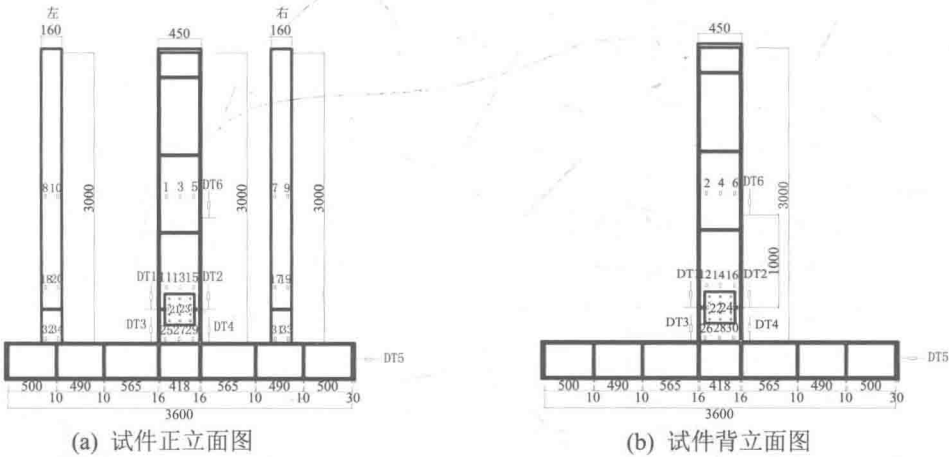


图 6 位移计、应变片布置
Fig.6 Arrangement of displacement meters and strain gauges

2 试验结果

2.1 试验现象

加载过程中观察到的现象如下：

- 1) DCSF1节点试件在加载初期节点荷载位移呈线性关系, 节点表现出较好的强度和刚度。当节点加载到层间位移角为2.2%时, 腹板接触, 有点轻微鼓曲。当加载到层间位移角为2.6%时, 梁的右侧腹板开始挤压。当加载到层间位移角为3.4%时, 腹板挤压比较严重, 同时在连接钢板的外表面垫片旁出现滑痕。
- 2) DCSF2节点试件在加载到层间位移角为2.0%时, 在第2个循环时出现轻微声响, 在加载到层间位移角为2.4%时, 出现连续声响, 且声响较大, 同时观测到螺栓杆发生了轻微滑移。
- 3) DCSF3、DCSF4节点试件加载到层间位移角为2.8%时, 出现连续的声响, 由于螺杆与连接钢板发生挤压, 滞回曲线的尾部出现上翘的趋势。
- 4) 试验结束拆除连接钢板, 发现梁的腹板有轻微鼓凸, 连接钢板与梁腹板的螺栓孔壁有一定的挤压破坏现象, 并且外侧两列的孔壁变形比较明显, 如图7所示。

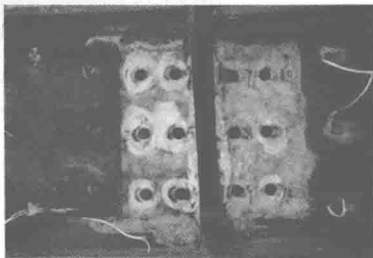


图7 腹板上螺栓孔的变形

Fig.7 Deformation of bolt holes on web

2.2 试验数据分析

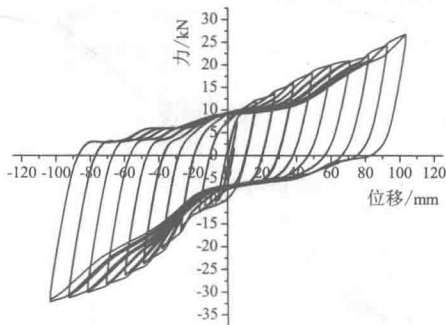
2.2.1 滞回曲线

4个试件的滞回曲线见图8, 在加载初期当加载位移为27.2mm(层间位移角为1%)时, 4个试件的滞回曲线对比关系如图9所示。加载后期加载位移为59.84mm(层间位移角为2.2%)时, 4个试件的滞回曲线对比关系如图10所示。从图可看出:

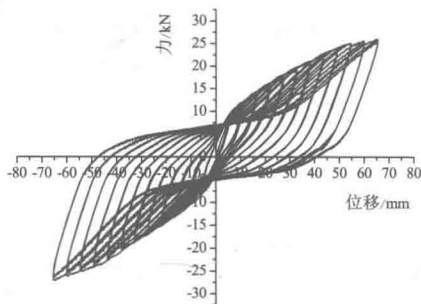
- 1) 在加载初期, 各试件基本呈线弹性, 随着施加的位移逐步加大, 连接钢板与梁腹板产生细微滑动, 位移进一步增大后, 连接钢板、高强螺栓以及梁腹板之间滑动更加明显, 同时伴随着螺栓杆与孔壁的挤压, 试件进入非线性, 滞回曲线更加饱满, 其原因是连接钢板处的摩擦滑移挤压变形增大, 耗能也随之增大。
- 2) 各节点的滞回曲线出现一定程度的捏拢现象, 表明预应力钢筋有一定的回弹作用, 可以提供节点的自复位能力。
- 3) DCSF2、DCSF4的滞回曲线比DCSF3饱满, 即节能的耗能能力更强, DCSF4节点的抛丸接触面以及较大的预紧力高强螺栓, 增大了界面的摩擦力, 增强了节点的耗能能力。

2.2.2 骨架曲线

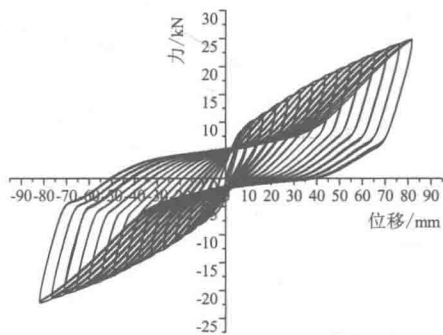
4个试件的骨架曲线如图11所示, 可以看出DCSF3节点的刚度较DCSF1节点大, DCSF4节点的承载力较DCSF3节点大。分析原因, 可知DCSF3节点的预应力筋的初张拉值分别为34.4%, 较DCSF1节点的29.3%大, 所施加的预应力可增强试件的刚度和承载力。由于DCSF4节点采用抛丸处理的接触面, 并且对高强螺栓施加了较大的预紧力, 增强了拼接触面的摩擦力, 提高了节点的承载力。



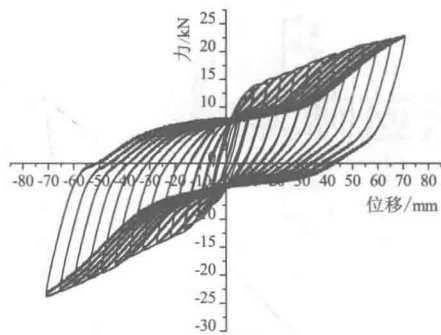
(a) DCSF1节点的滞回曲线



(b) DCSF2节点的滞回曲线



(c) DCSF3节点的滞回曲线



(d) DCSF4节点的滞回曲线

图8 节点的滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of joints

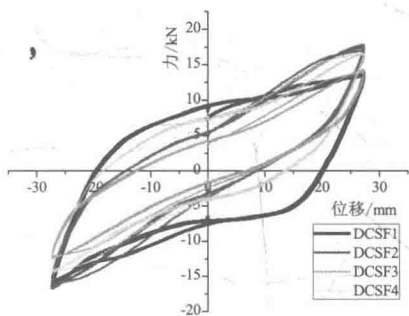


图9 节点加载初期的滞回曲线

Fig.9 Hysteresis curves of joints at initial stage of loading

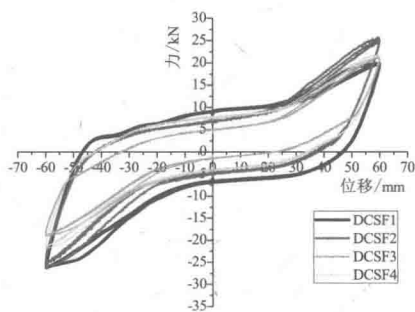


图10 节点加载后期的滞回曲线

Fig.10 Hysteresis curves of joints at late stage of loading

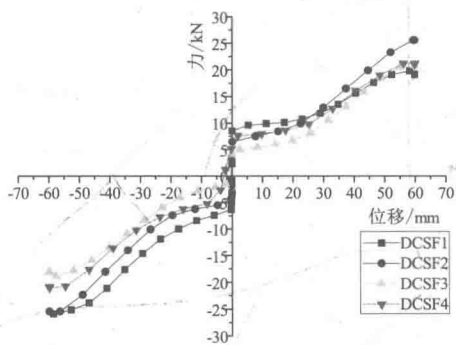
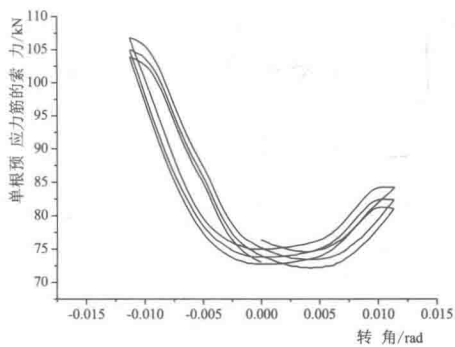
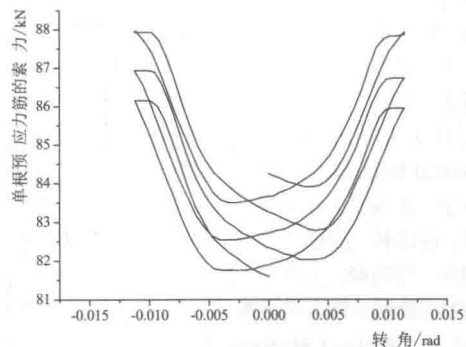


图11 试件骨架曲线

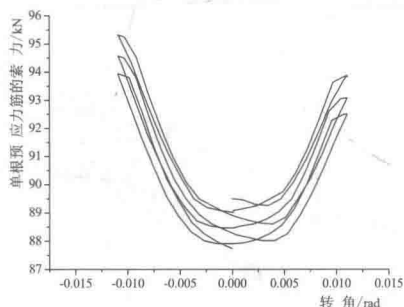
Fig.11 Skeleton curves of joints



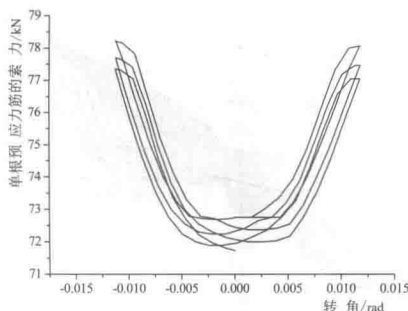
(a) DCSF2 节点上预应力筋的索力-转角



(b) DCSF2 节点上预应力筋的索力-转角



(c) DCSF3节点上预应力筋的索力-转角



(d) DCSF4节点上预应力筋的索力-转角

图12 节点上预应力筋钢绞线索力-转角曲线

Fig.12 Cable force -rotation curves of the prestressed strands

2.2.3 预应力筋索力变化曲线

在位移施加到59.84mm (层间位移角为2.2%)时, 4个试件的钢绞线索力-节点转角关系曲线如图12所示。钢绞线的索力由压力环的实测值读出。从图中可看出: 1) 当试件转角较小时, 预应力钢绞线的索力较小, 当转角增大时, 预应力筋上的索力增大。预应力筋被拉长, 所以索力增大, 卸载过程, 转角变小, 因此索力减小。钢绞线上的索力在往复荷载作用下基本上呈对称关系。2) DCSF1~ DCSF4试件的初张力分别为29.3%、32.4%、34.4%和27.9%, 均处于钢绞线抗拉强度的70%以内, 加载过程中索力增量与施加的位移呈正比。3) 预应力筋对结构自复位能力有一定的作用, 且预应力筋的初张力越大, 对自复位的作用也越大。

3 结论

本文通过4个足尺钢节点低周往复试验, 得到以下结论:

- (1) 试件的破坏主要在发生在连接钢板处, 试件主体没有明显破坏, 可实现损伤可控。
- (2) 高强螺栓起滑后有一定的滑移变形, 所得的滞回曲线更加饱满; 更换连接钢板后试件的承载力略有降低, 但滞回曲线形状基本一致, 骨架曲线也基本相似, 说明该类节点具有可更换性。
- (3) 预应力筋的设置, 使试件具有一定的自复位, 降低了残余变形; 随着钢绞线初始张拉力的提高, 试件的残余变形减小, 预应力筋的自复位能力增强。
- (4) 提高拼接处高强螺栓上的预紧力, 节点的承载力在一定程度上有所提高。
- (5) 加大螺栓孔的孔径可进一步提高试件的转动变形能力, 减轻螺栓孔壁的挤压破坏, 提高试件的耗能能力, 从而改善节点的抗震性能。

参考文献:

- [1] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 47—50.
- [2] 邹昀, 林晖, 马卫强. 具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析[J]. 工程力学, 2015, 2(S2): 72—77.
- [3] 李波, 杨庆山, 茹继平, 等. 梁腹板开圆化的钢框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 64—73.
- [4] 李启才, 刘刚, 胡安吉, 等. 钢框架中钢梁高强螺栓拼接摩擦耗能的试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(5): 78—81.
- [5] 郁有升, 王燕. 钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 168—175.
- [6] Kim H J, Christopoulos C. Friction damped post tensioned self-centering steel moment-resisting frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134 (11): 1768—1779.
- [7] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架边节点组件受力性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 160—167.
- [8] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1—10.
- [9] 纪晓东, 马琦峰, 王彦栋, 等. 钢连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 1—11.
- [10] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (1): 27—36.
- [11] Wolski M, Ricles J M, Sause R. Experimental study of a self-centering beam-column connection with bottom flange friction device [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (5): 479—488.
- [12] 吴从晓, 周云, 等. 扇形铅黏弹性阻尼器滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 199—207.
- [13] 张艳霞, 赵文占, 等. 长孔螺栓摩擦阻尼器试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 90—95.

PGV/PGA 影响活断层区轻轨高架桥地震响应注记

陈令坤^{1,2,3}, *蒋丽忠³, 冯玉林³, 张清华¹, 余志武³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川, 成都 610031; 2. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏, 扬州 225127;

3. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南, 长沙 410075)

摘要: 以城市轻轨钢筋混凝土高架桥为研究对象, 建立高烈度区地震作用下的非线性全桥模型, 计算了水平及竖向地震作用下的桥梁的弹塑性响应; 分别输入脉冲型近断层地震动、无脉冲型近断层地震动和远断层地震动三种不同类型的地震动进行时程分析, 并对比其作用下城市轻轨高架桥梁结构的动力响应。研究表明, 对于短周期桥梁, 随着 PGV/PGA(峰值地震动速度与峰值地震动加速度之比)的增大, 桥梁跨中横向位移及内力响应均呈现增加的趋势, 且非脉冲型近断层地震动和远断层地震动作用下响应变化趋势基本趋同, 脉冲型近断层地震动应表现出不同的特点。由于水平向和竖向加速度不互相耦合, 横向作用的脉冲特点对竖向轴力影响不明显。

关键词: 近断层地震动; 城市轻轨高架桥梁; 非线性地震响应; 脉冲型地震动; 频率内容

NOTE ON PGV/PGA SPECIFIC SEISMIC RESPONSE OF URBAN LIGHT RAIL TRANSIT VIADUCT IN ACTIVE FAULT ZONE

CHEN Ling-kun^{1,2,3}, JIANG Li-zhong³, FENG Yu-lin³, ZHANG Qing-hua¹, YU Zhi-wu³

(1. Southwest Jiaotong University School of Civil Engineering, Chengdu 610031, China;

2. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Jiangsu, Yangzhou 225127, China;

3. National Engineering Laboratory for High-Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In present study, the global nonlinear finite element calculation model of the five-span simply supported bridge of Beijing Subway FANGSHAN Line in a high seismic region is set up, the elastic-plastic seismic responses of urban light rail transit viaduct (ULRTV) subjected to the combined effect of vertical and horizontal earthquakes are calculated, the time-history response analyses under pulse-typed near-fault ground motions, pulse-typed near-fault ground motions and far-field ground motions have been carried out. Results demonstrate the internal force at base of the pier and lateral displacement at the mid-span of ULRTV increase the increasing of PGV/PGA, and the tendency of responses of ULRTV under no-pulse-typed near-fault ground motions and far-field ground motions is similar, at the same time, the tendency of responses of ULRTV under pulse-typed near-fault ground motions having obvious difference. For the horizontal acceleration does not couple with the vertical one, the pulse effect of the horizontal ground motions on the axial force at pier base is not obvious.

Key words: near-fault ground motions; urban light rail transit viaduct; nonlinear seismic response; pulse-type ground motions; frequency content

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题(2013G002-A); 江苏省自然科学基金(BK20161337); 中国博士后科学基金资助(2016M592695)

作者简介: 陈令坤(1974—), 男, 安徽临涣人, 副教授, 博士后, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: lingkunc@buffalo.edu);

*蒋丽忠(1971—), 男, 湖南衡山人, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: lzjiang@mail.csu.edu.cn);

冯玉林(1990—), 男, 吉林柳河人, 博士生, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: fylin119@csu.edu.cn);

张清华(1975—), 男, 河南虞城人, 教授, 博士, 主要从事桥梁结构损伤识别(E-mail: swjtuzqh@126.com);

余志武(1955—), 男, 湖南临湘人, 教授, 硕士, 实验室主任, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: zhwyu@mail.csu.edu.cn).

近年来,近断层地震如 1995 Kobe (Japan) 地震、1999 Chi-Chi (Taiwan) 地震、以及 1999 Kocaeli (Turkey) 等地震,其不同于近场地震的震害日益引起了研究者的关注。一方面近断层地震由于多普勒(Doppler)效应带来的速度脉冲对桥梁结构带来严重震害^[1-2];另一方面近断层地震较大的滑冲位移将会引起桥梁较大的位错,或许桥墩本身受到的破坏并不严重,但由于残余位移过大而必须拆除^[3]。针对近断层地震不同远场地震的致震机理, Saïidi et al^[4]、Choi et al^[5]、Antonellis & Panagiotou^[7]、Jine et al^[9]及丁幼亮等人^[10]研究了近断层地震下桥梁结构的抗震性能。既有研究多是基于公路桥梁的地震性能研究,对铁路桥梁的研究较少涉及。随着高速铁路及城市轻轨的快速组网,如何描述近断层地震下铁路桥梁动力响应规律并应用于抗震设计中去仍是待解决的关键问题。

本文建立高烈度区地震作用下城市轻轨钢筋混凝土高架桥非线性全桥模型,计算了水平及竖向地震作用下的桥梁的弹塑性响应。分别输入脉冲型近断层地震动、无脉冲型近断层地震动和远断层地震动三种不同类型的地震动进行时程分析,并对比其作用下城市轻轨高架桥梁结构的动力响应,分析了反映地震动频率内容的重要参数 PGV/PGA 对桥梁地震响应的影响。研究可以为城市轻轨桥梁抗震设计提供参考。

1 近断层地震动特征及地震动选取

本文采用 ATC-63 项目 FEMA-P695 建议,根据地表以下 30m 内平均剪切波速(V_{s30})的不同,依照 USGS 规范,以平均剪切波速 360m/s 为界,选取剪切波速大于 360m/s 的 A B 类场地地震动,脉冲型近断层地震动、无脉冲型近断层地震动和远断层地震动各 6 组,每组包括一条水平地震动与一条竖向地震动。表 1-3 分别列出各地震动的相关特征参数信息。

表 1 脉冲型近断层地震动
Table 1 Pulse-typed near-fault ground motions

地震名称	时间	震级	台站	断层距/km	分量	PGA/g	PGV/PGA	Vs30/(m/s)
Irpinia Italy	1980	6.9	Sturno (STN)	10.84	STU270	0.321	0.224	382
					STU-UP	0.235		
Loma Prieta	1989	6.93	Saratoga-Aloha Ave	8.5	STG000	0.514	0.081	380
					STG-UP	0.396		
Cape Mendocino	1992	7.01	Petrolia	8.18	PET090	0.662	0.134	422
					PET-UP	0.165		
Landers	1992	7.28	Lucerne	2.19	LCN260	0.725	0.184	369
					LCN-UP	0.823		
Northridge	1994	6.69	Sylmar-Olive View Med FF	5.3	SYL360	0.843	0.153	440
					SYL-UP	0.536		
Kocaeli Turkey	1999	7.51	Izmit	7.21	IZT090	0.230	0.166	811
					IZT-UP	0.145		

表 2 非脉冲型近断层地震动
Table 2 Non-pulse-typed near-fault ground motions

地震名称	时间	震级	台站	断层距/km	分量	PGA/g	PGV/PGA	Vs30/(m/s)
Loma Prieta	1989	6.93	BRAN	10.72	BRN000	0.456	0.113	476
					BRN-UP	0.506		
Loma Prieta	1989	6.93	Corralitos	3.85	CLS090	0.483	0.098	462
					CLS-UP	0.458		
Cape Mendocino	1992	7.01	Cape Mendocino	6.96	CPM090	1.039	0.041	567
					CPM-UP	0.739		
Northridge-01	1994	6.69	LA-Sepulveda VA Hospital	8.44	SVP360	0.932	0.082	380
					SVP-UP	0.318		
Chi-Chi_ Taiwan	1999	7.62	TCU067	0.62	TCU067-N	0.319	0.161	433
					TCU067-V	0.235		

(续表)

地震名称	时间	震级	台站	断层距/km	分量	PGA/g	PGV/PGA	Vs30/(m/s)
Chi-Chi_Taiwan	1999	7.62	TCU084	11.48	TCU084-E	1.009	0.128	665
					TCU084-V	0.320		

表 3 远断层普通地震动

Table 3 Far-field ground motions

地震名称	时间	震级	台站	断层距/km	分量	PGA/g	PGV/PGA	Vs30/(m/s)
Friuli Italy-01	1976	6.5	Tolmezzo	15.82	TMZ270	0.315	0.097	505
					TMZ-UP	0.277		
Cape Mendocino	1992	7.01	Shelter Cove Airport	28.78	SHL000	0.229	0.030	518
					SHL-UP	0.0543		
Northridge-01	1994	6.69	Featherly Park-Main	82.32	FEA000	0.101	0.076	367
					FEA-UP	0.0243		
Kobe_Japan	1995	6.9	Chimayo	49.91	CHY000	0.0921	0.058	609
					CHY-UP	0.0752		
Kocaeli Turkey	1999	7.51	Iznik	30.73	IZN090	0.124	0.204	467
					IZN-UP	0.0754		
Hector Mine	1999	7.13	Barsto	61.2	BRS090	0.0589	0.132	370
					BRS-UP	0.0445		

2 列车-桥梁有限元建模

2.1 桥梁基本资料和技术标准

本文采用《北京轨道交通房山线工程长阳镇站~稻田站桥梁设计》图纸，建立 5×30m 单线简支箱梁桥计算模型。设计参数如下：30m 跨长 C50 混凝土简支小箱梁，箱梁截面尺寸见图 1；2.2×2.3m² 矩形截面独柱墩，墩身采用 C45 现浇混凝土，墩高设计为 18m，桥墩截面尺寸见图 2。桥址为 II 类场地，按《抗规》抗震设防烈度为Ⅷ度。特征值分析计算出桥梁第一阶自振频率为 1.5345Hz。

本文桥址位于华北地台燕山台褶带西山坳褶的东边部，沿线附近主要分布有良乡-顺义断裂带和永定河断裂带，历史上唐山地震曾造成重大损失。因此须充分考虑该地区强震、断裂对高架桥梁结构的不利影响。

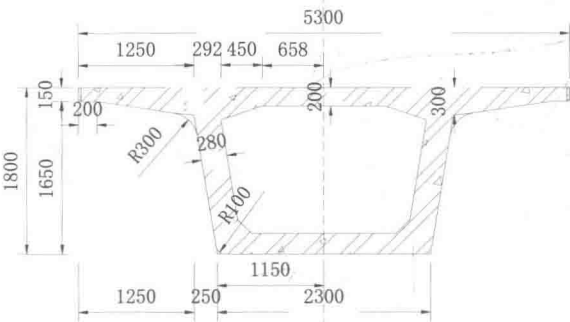


图 1 箱梁截面尺寸 /mm
Fig.1 Cross-section of box girder

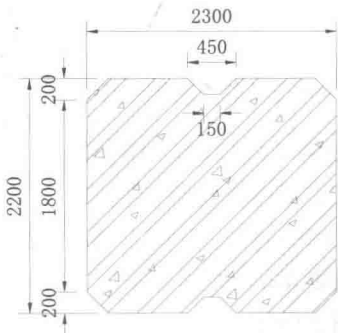


图 2 桥墩截面尺寸 /mm
Fig.2 Cross-section of pier

2.2 移动荷载模型及轨道不平顺

采用 BD24 型列车活载作为城市轨道交通运营列车活载，每列车 4 动 2 拖 6 辆编组：TC-MP-M-M-MP-TC，重车轴重为 140kN，空车轴重为 80kN，最高运行速 100km/h，所采用的荷载形式为四轴荷载，列车编组图及活载计算简图式如图 3。

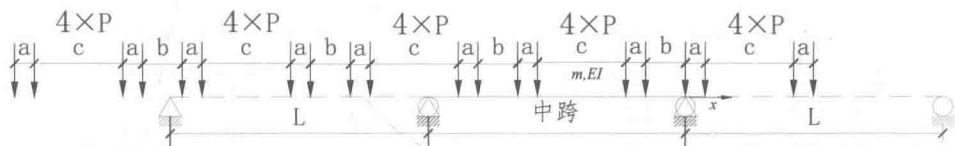
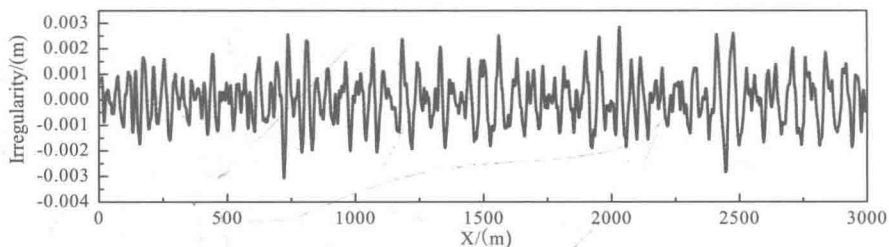
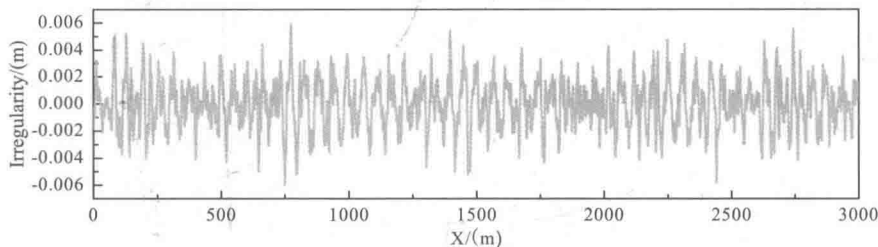


图 3 四轴列车荷载列
Fig.3 Loading list of four-axle Urban Light Rail

建模时候根据单元长度及列车运行速度确定每个荷载步的最终求解时间，根据地震动数据采集频率，可以采用 NINT(X)函数或者线性内插法将地震加到桥梁节点上，以此实现列车经过桥梁的时间与地震发生时间藕合。考虑到模型的完整性，本文建立有车全桥模型，研究近断层地震效应的影响，列车荷载列作用主要是通过 APDL 参数化语言实现算法的藕合。基于梁轨法考虑轨道不平顺的影响。横竖向轨道不平顺样本见图 4。



(a). 竖向轨道不平顺



(b). 横向轨道不平顺

图 4 轨道不平顺
Fig.4 Track irregularity samples

3 桥梁弹塑性分析

3.1 地震下的桥梁动力性能

本文经过大量的参数计算，取 9 度设防水平向+竖向组合罕遇地震作用，应用 XTRACT 软件进行截面弯曲-曲率分析。列车以 100km/h 的车速行驶过墩高为 18m 的桥梁结构，计算出桥梁的弹塑性地震响应峰值，见表 4-6。并以近断层脉冲/近断层非脉冲/远断层普通地震 Irpinia Italy-01 地震为例，墩底弯矩-转角关系如图 5 所示。

表 4 脉冲型近断层地震作用下桥梁地震响应

Table 4 Seismic response of the bridge subjected to the pulse-typed near-fault ground motions

地震类型	地震动	跨中横向 位移/m	跨中竖向 位移/m	墩顶横向 位移/m	墩底剪力/ ($\times 10^6$ N)	墩底弯矩/ ($\times 10^7$ N·m)	墩底轴力/ ($\times 10^6$ N)
脉冲型 近断层 地震动	Irpinia Italy-01 1980 Sturmo (STN)	0.617	0.027	0.528	1.929	2.084	5.073
	Loma Prieta 1989 Saratoga-Aloha Ave	0.303	0.021	0.253	1.728	2.069	5.222
	Landers 1992 Lucerne	0.470	0.047	0.398	1.527	2.030	6.104
	Northridge-01 1994 Sylmar-Olive	0.487	0.049	0.417	1.520	2.115	4.615