

· 中文核心期刊 ·

工程抗震

5

2021

第43卷 第5期 Vol.43 No.5

加固改造

EARTHQUAKE RESISTANT ENGINEERING AND RETROFITTING

SAUSG®
— 专注非线性 —

助力非线性仿真新方向

2021 增强版 SAUSG
— 正式上市 —

- 支持自定义荷载
- 工程输入
- 支持MOSES及壳单元
- 任意截面模型输入
- 新增截面定义及
- 多种方式定义功能
- 双向截面模型层板模拟
- 新增模态反应谱分析
- FNA方法-快速进行深
- 电算结构性能分析
- 模型后处理效率提升
- 新增超长工程
- 重要修改

* 新增自定义荷载
 * 增加双向截面模型层板模拟
 * 增加模态反应谱分析
 * 新增截面定义及多种定义功能
 * 增加任意截面模型输入
 * 增加电算结构性能分析
 * 增加超长工程
 * 增加自定义荷载

SAUSG® 广州建研数力建筑科技有限公司

技术支持: 010-64518394, 010-64518492 (工作时间)

传 真: 010-64518395

邮 箱: SAUSAGE@sausg.cn

网 址: www.sausg.cn

技术交流QQ群: 156399085 (已满)、456729748 (已满)、830150301 (已满)
319658485

了解详情请致电

400 690 9600



ISSN 1002-8412



主管: 中华人民共和国住房和城乡建设部

主办: 中国建筑学会

中国建筑科学研究院

本刊编委会 (第 3 届)

顾问: 周福霖 欧进萍 吕西林 徐建
主任委员: 黄世敏
副主任委员: 周云 刘伯权 李爱群 杜修力
杜宏彪 苏三庆 滕军
委员: 巴振宁 包超 蔡健 陈龙珠
种永迅 丁永君 杜宏彪 杜修力
杜永峰 樊水荣 郭彤 郭子雄
韩建平 韩森 黄世敏 江韩
姜健 蒋欢军 李爱群 李钢
李宁 李小军 李祥华 刘保东
刘伯权 刘建新 刘文锋 刘文光
刘阳 龙晓鸿 姜宇 陆新征
吕大刚 马恩成 潘鹏 潘文
潘毅 祁彪 屈俊童 瞿力
任文杰 史庆轩 苏三庆 谭平
唐曹明 滕军 汪梦甫 王曙光
王松帆 王毅红 王东升 温四清
吴波 吴辉琴 吴涛 吴小宾
邢国华 徐龙河 徐赵东 姚大鹏
袁涌 曾德民 张广泰 张敬书
张瑞甫 张耀 赵宝成 赵密
周乾 周铁钢 周新刚 周云

主办: 中国建筑学会
中国建筑科学研究院
编辑出版: 本刊编辑部
地址: 北京北三环东路 30 号
邮编: 100013
电话: (010)64517383
传真: (010)84278009
电子信箱: gckz@vip.163.com
主编: 黄世敏
执行主编: 樊水荣
英文编辑: 王允红
主任: 安东
印刷: 北京时捷印刷有限公司
国内发行: 北京报刊发行局
国外发行: 中国国际图书贸易公司 (北京 399 信箱)
国内订阅: 全国各地邮局
邮发代号: 2-386
零售: 本刊发行组
国内统一刊号: CN 11-5260/P
国际标准刊号: ISSN 1002-8412
广告经营号: 京朝工商广字第 0209 号

目次

带钢板暗支撑混凝土核心筒恢复力模型研究 汪梦甫 岳建莹 (1)
基于 FEMA P-58 方法的既有高层剪力墙结构抗震性能评估 崔明哲 王翠坤 陈才华 潘玉华 熊羽豪 任重翠 (10)
混凝土砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究 沈萍 唐兴荣 皮淑萍 (18)
方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙抗震性能研究 李帅 贾九荣 阎玉茜 李鑫 齐海鹏 (29)
新型十字形钢管混凝土柱-钢梁节点设计与抗震性能研究 赵毅 闫梦辉 (36)
高层剪力墙结构层间有害位移计算方法 陈博文 任文杰 张松毅 (43)
山区多层脱开式接坡掉层砌体结构抗震性能研究 林拥军 陈皓 周畅 杨敏润 罗展 (49)
双向地震作用下新型性能可恢复摇摆柱抗震性能研究 阮杰 刘阳 张世江 张艺欣 任或 (58)
柔性连接连体结构 STMD 减震机理及最优参数分析 律清 黄强 (64)
自复位阻尼器及被动控制结构的数值模拟 马宏伟 韦增挺 刘维亚 黎少峰 (71)
腹板开孔耗能支撑稳定承载力研究 沈婷悦 赵宝成 (79)
设置黏滞阻尼器大跨度桥梁附加阻尼比的计算分析研究 郑成成 陈永祁 郑久建 马良喆 (88)
地震作用下大跨连续梁桥隔震支座研究 台玉吉 孙呈凯 许贺淇 (96)
桥梁板式橡胶支座运营病害及影响研究综述 吴宜峰 徐泓 李爱群 张琰 (104)
长周期地震动下高层框架-核心筒层间隔震结构地震响应分析 张亚飞 刘德稳 李旭平 李利平 房思彤 赵龙庆 (114)
锚杆静压钢管桩桥梁基础加固方案试验研究 孔令元 巩健 (121)
既有简支 C 型钢檩条连续化加固后性能影响因素分析 冯方涛 孙留洋 王鹏 黄炳生 (129)
平和坊功能提升中的结构加固研究 童敏 温四清 (138)
抗震设防烈度提升对地下车站抗震性能的影响 林广东 何军 白雅伟 李国伟 (143)
软弱地基中地下结构地震可靠性分析 程学磊 刘彦 海然 李岩 张瑞敏 (149)
近断层地震动作用下地震波输入方法分析研究 韩流涛 葛楠 苏幼坡 巴颖 王闻 (157)
夏河 5.7 级地震村镇木构架房屋震害分析及重建对策 袁宁 夏广录 吴建刚 贾军国 王勇 杨全全 (162)

CONTENTS

Study on restoring force model of concrete core walls with steel plate concealed
bracings Wang Meng-fu, Yue Jian-ying(1)

Seismic performance assessment of existing high-rise shear-wall structure based
on FEMA P-58 methodology Cui Ming-zhe,
Wang Cui-kun, Chen Cai-hua, Pan Yu-hua, Xiong Yu-hao, Ren Chong-cui(10)

Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete frames infilled
with concrete blocks Shen Ping, Tang Xing-rong, Pi Shu-ping(18)

Study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-steel plate
shear walls with frame joints connections
..... Li Shuai, Jia Jiu-rong, Yan Yu-han, Li Xin, Qi Hai-peng(29)

Design and seismic behavior of new cross shaped concrete filled steel tubular column
steel beam joints Zhao Yi, Yan Meng-Hui(36)

Calculation method of harmful inter-story drift of high-rise shear wall structure
..... Chen Bo-wen, Ren Wen-jie, Zhang Song-yi(43)

Study on seismic performance of multi-layer falling masonry structure with breakaway
connection-slope in mountain region
..... Lin Yong-jun, Chen Hao, Zhou Chang, Yang Min-run, Luo Zhan(49)

Analysis on seismic performance of an innovative resilient rocking column under
biaxial loading
..... Ruan Jie, Liu Yang, Zhang Shi-jiang, Zhang Yi-xin, Ren Yu(58)

Seismic reduction mechanism and optimal parameter analysis of flexible
connected structures with shared tuned mass dampers
..... Lv Qing, Huang Qiang(64)

Numerical simulation of self-centring damper and passive controlled structure
..... Ma Hong-wei, Wei Zeng-ting, Liu Wei-ya, Li Shao-feng(71)

Study on stability bearing capacity of perforated energy dissipation brace
..... Shen Ting-yue, Zhao Bao-cheng(79)

Calculation and analysis of additional damping ratio of long-span bridges with
viscous dampers
..... Zheng Cheng-cheng, Chen Yong-qi, Zheng Jiu-jian, Ma Liang-zhe(88)

Study on isolation bearing of long span continuous beam bridge under earthquake
action Tai Yu-ji, Sun Cheng-kai, Xu He-qi(96)

Review on operating disease and effects of bridge plate rubber bearing
..... Wu Yi-feng, Xu Hong, Li Ai-qun, Zhang Yan(104)

Seismic response analysis of tall RC frame core tube mid-story isolation structure
under long period ground motion Zhang Ya-fei,
Liu De-wen, Li Xu-ping, Li Li-ping, Fang Si-tong, Zhao Long-qing(114)

Experimental study on reinforcement scheme of bridge foundation with anchor
bolt static steel pipe pile Kong Ling-yuan, Gong Jian(121)

Analysis of factors influencing the performance of existing simply supported
C-section steel purlin after continuous reinforcement
..... Feng Fang-tao, Sun Liu-yang, Wang Peng, Huang Bing-sheng(129)

Study on structural strengthening in pinghe lane function improvement
..... Tong Min, Wen Si-qing(138)

Influence of seismic fortification intensity enhancement on seismic performance
of underground stations
..... Lin Guan-dong, He Jun, Bai Ya-wei, Li Guo-wei(143)

Dynamic Reliability Analysis of Underground Structure Embedded in Soft Ground
..... Cheng Xue-lei, Liu Yan, Hai Ran, Li Yan, Zhang Rui-min(149)

Analysis of seismic wave input method for near-fault ground motion
..... Han Liu-tao, Ge Nan, Su You-po, Ba Ying, Wang Wen(157)

Seismic damage analysis and reconstruction countermeasures of timber frame houses
in villages and towns in Xiahe Ms5.7 earthquake Yuan Ning,
Xia Guang-lu, Wu Jian-gang, Jia Jun-guo, Wang Yong, Yang Quan-quan(162)

特别声明:

1.本刊已加入《中国知网》《万方数据》等国内外知名数据库,如有作者论文不希望加入这些数据库,请事先声明,本刊将做相应处理,否则视为同意加入。

2.本刊严格执行“文责自负”原则,严厉禁止抄袭、剽窃等学术不端行为,并反对一稿多投行为。

本刊编辑部

Sponsored by:

The Architectural Society of China;
China Academy of Building Research

Edited & Published by:

Editorial Office of the Journal
Address: No.30 Bei San Huan Dong Lu,
Beijing 100013, P.R.China

Tel.: (8610) 64517383

Fax: (8610) 84278009

E-mail: gckz@vip.163.com

Chief Editor: Huang Shi-min

Executive Editor: Fan Shui-rong

Distributor in China:

Local Post Offices in China
Subscription Code: 2-386

Distributor Abroad:

China International Book Trading
Corporation (GUO JI SHU DIAN)
P.O.Box 399, Beijing, P.R.China
Subscription Code: Q900

方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙 抗震性能研究

李 帅, 贾九荣, 阎玉蕊, 李 鑫, 齐海鹏(陕西机电职业技术学院, 陕西 宝鸡 721001)

[提 要] 为研究方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙的抗震性能,重点考虑材料的本构模型及计算平台的影响,利用非线性有限元软件 ABAQUS 建立数值分析验证模型,验证了有限元计算的可靠性。在此基础上,对方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙模型分别进行单调加载及循环加载,并与四边连接形式及两边连接形式的方钢管混凝土框架-钢板剪力墙模型进行了对比。结果表明:四角连接模型抗侧承载力介于四边连接模型和两边连接模型之间,四角连接模型的剪力分配在框架与钢板墙之间更为均衡,既能有效降低对框架柱刚度的要求,又能对钢板墙起到较好的锚固效果;四角连接模型与两边连接模型相比具有更高的承载力、刚度及耗能能力,而与四边连接模型相比又具有更好的延性;钢板墙的连接方式对墙体的等效塑性应变数值大小及破坏区域分布有较为明显的影响,且钢板墙所受到的锚固作用越强,破坏时柱子的弯曲变形越大,柱脚屈曲现象也越为严重。

[关键词] 方钢管混凝土框架;钢板剪力墙;抗震性能;有限元

[中图分类号] TU398.2 [文献标识码] A

Study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-steel plate shear walls with frame joints connections

Li Shuai, Jia Jiu-rong, Yan Yu-han, Li Xin, Qi Hai-peng
(Shaanxi Institute of Mechatronic Technology, Baoji 721001, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of concrete-filled square steel tubular frame-steel plate shear wall connected to frame joints, the influence of the material constitutive model and the calculation platform is mainly considered, and the numerical analysis verification model is established by using the nonlinear finite element software ABAQUS, which verifies the reliability of the finite element calculation. On this basis, the models of concrete-filled square steel tubular frame-steel plate shear wall with frame joints connections are subjected to monotone loading and cyclic loading respectively, and are compared with the models of concrete-filled steel tubular frame-steel plate shear walls with four-side connections and two-side connections. The results show that the lateral bearing capacity of the beam-column joints connections model is between the four-side connections model and the two-side connections model, and the shear distribution of the beam-column joints connections model is more balanced between the frame and the steel plate wall, which can not only effectively reduce the rigidity requirements of the column, but also play a better anchoring effect on the steel plate wall; the frame joints connections model has higher bearing capacity, stiffness and energy dissipation capacity than the two-side connections model, and has better ductility than the four-side connections model; The connection form of steel plate wall has an obvious influence on the equivalent plastic strain value of the wall and the distribution of the failure area. Moreover, the stronger the anchoring effect of steel plate wall is, the greater the bending deformation of the column and the more serious the buckling phenomenon of the column foot is.

Keywords: concrete-filled square steel tubular frame; steel plate shear wall; seismic behavior; finite element

E-mail: lishuai@sxjdzzy.cn

我国地震带分布广,震灾频繁,强震作用下传统的结构体系往往较易发生破坏。采用框架-支撑双

重抗侧力体系能使结构的受力性能得到很好的改善,其中支撑体系可以是剪力墙或支撑桁架体系^[1]。钢板剪力墙结构具有较大的初始刚度、较高的抗侧承载力、良好的延性及耗能能力,它一般由边缘框架柱、边缘框架梁及内嵌钢板墙组成,利用钢板

[收稿日期] 2020-08-18

[基金项目] 陕西省教育厅科研计划项目(19JK0107)

墙与边缘框架组成双重抗侧力体系,近年来在国内实际工程中逐渐得到推广^[2-4]。对于普通支撑钢框架,用钢量与钢板墙相同时,其所能提供的抗侧刚度最多与钢板墙持平,且在支撑屈曲后会产生拉压不对称现象,进而会造成结构的承载力与耗能能力陡降^[5]。采用方钢管混凝土柱作为钢板墙的竖向边缘构件,可将钢管混凝土承载力高、延性好与薄钢板墙抗侧移刚度大、耗能能力高的优点结合,是充分发挥二者结构性能的最佳组合^[6-7]。但是传统的钢板剪力墙与边缘框架的连接形式均为四边连接,研究发现^[8-9]:在水平荷载作用下,四边连接形式虽然会对钢板墙形成较好的锚固作用,但也会使柱子承受较大的附加弯矩,不利于柱子的受力,更不利于后期水电管线的布置。杨航东^[10]将内嵌钢板与竖向方钢管柱分开,形成两边连接的形式,虽然满足了建筑使用功能,但是显著降低了结构的侧向承载力、刚度及耗能能力。傅学怡等^[11]通过研究型钢框架-钢板剪力墙的力学性能时发现将内嵌钢板仅与钢框架的角部连接,钢板四边中部与边框架脱开,形成四角连接形式,能降低内嵌钢板对边框架抗弯刚度的要求,且不会明显影响结构的抗侧承载力、滞回性能及耗能能力。

为深入研究钢板墙采用四角连接形式对方钢管混凝土框架-钢板剪力墙抗震性能的影响,利用有限元软件 ABAQUS 对方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙有限元模型进行单调加载及循环加载,分析模型的抗侧性能及滞回性能,并与四边连接形式及两边连接形式的方钢管混凝土框架-钢板剪力墙进行了对比。

1 有限元模型

1.1 模型概况

根据文献[12]试件确定模型边框尺寸,建立了三个方钢管混凝土框架-钢板剪力墙有限元模型,均为单跨两层结构,其中跨度为 1350mm,高度为 3480mm,柱子方钢管截面尺寸为 $\square 200 \times 6$,底梁和顶梁截面均为 H300 \times 150 \times 10 \times 12,中梁截面为 H200 \times 100 \times 10 \times 12,钢板墙厚度为 3mm。框架柱轴压比为 0.2,方钢管内填混凝土等级为 C40,钢板墙为 Q235 级钢,屈服强度为 235N/mm²,梁柱钢材均为 Q345 级钢,屈服强度为 345N/mm²,所有钢材弹性模量均取 $E=206000\text{N/mm}^2$,泊松比为 0.3。三榀框架模型的编号分别为 SBLJ、SJLJ、LBLJ,对应的钢板墙与周边框架的连接形式分别为四边连接、四角连接、两边连接。其中,钢板与边框架采用四角连接时,角部连接长度为钢板对应边长的四分之一,四边中部二分

之一的非连接区域参考文献[13]设计成弧形开口,以满足建筑使用功能,如图1所示。

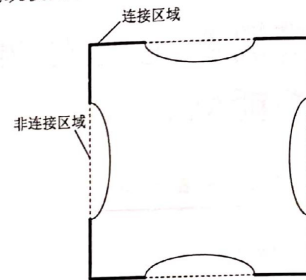


图1 钢板剪力墙

Fig.1 Steel plate shear wall

1.2 本构模型

模型共包含钢材和混凝土两种材料。根据材料的特点,考虑混凝土的塑性损伤及外包钢管的约束作用,采用韩林海^[14]提出的约束混凝土应力-应变关系作为钢管混凝土的本构关系模型,混凝土弹性模量根据美国规范 AISC318^[15]计算确定;由于钢材在循环荷载及单调荷载作用下的本构关系会有所不同,循环荷载作用下钢材会产生较为明显的循环强化及累积损伤,利用传统的单调加载曲线作为本构模型不能很好地反映材料的受力性能,本文采用 ABAQUS 中参数化的混合强化模型,以 Chaboche^[16]提出的循环本构关系进行模拟,该模型能同时考虑各向同性和随动强化的特征,避免出现类似于两折线模型滞回曲线过于饱满的情况,循环强化参数按文献[17]拟合的结果进行取值。

1.3 建模

合理的单元类型及网格划分对计算结果影响较大,本文有限元模型的所有钢材均采用 SR4 单元模拟,混凝土部分采用 C3D8R 单元来模拟,内嵌钢板网格近似全局尺寸取为 50mm。混凝土与钢管之间的法向作用采用硬接触,切向作用则通过设置界面摩擦系数来考虑^[18];钢板与边框架之间的焊接通过定义 Tie 来模拟。约束框架柱脚处所有自由度来模拟嵌固情况,考虑到实际结构中钢梁上部存在刚性楼板,相当于对钢梁设置了平面外支撑,故在分析中需要对钢梁上翼缘的面外平动设置约束^[19]。荷载的施加通过建立分析步来实现,第一个分析步在柱顶参考点施加竖向集中荷载,第二个分析步在顶梁上翼缘参考点施加水平位移荷载,SJLJ 有限元分析模型如图2所示。此外,钢板在加工、运输等过程中,均可能会产生一些初始变形,在有限元计算时应对外嵌钢板的初始缺陷加以考虑,通过对钢板进行

屈曲分析,提取其一阶屈曲模态,并取钢板跨度的 1/500 作为初始缺陷^[20]。

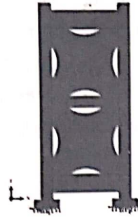


图 2 SJLJ 有限元分析模型

Fig.2 Finite element analysis mode of SJLJ

1.4 计算平台

由于结构在循环荷载作用下具有很强的非线性特征,采用常用的 ABAQUS/Standard 作为计算平台可能会导致计算耗时且不易收敛^[21],为提高计算效率,解决收敛困难的问题,本文采用 ABAQUS/Explicit 作为计算平台,在提交运算时须设置分析过程为双精度,防止程序将给定的位移量忽略。

1.5 有限元模型验证

为验证有限元方法的准确性,对文献[12]中的试件进行有限元模拟分析,并将计算结果与试验结果进行对比,材料参数及加载制度均以参照试验。图 3 为有限元计算与试验的滞回曲线对比。对比曲线可知,有限元计算与试验加载均在 3.5Δ_s 处达到了峰值荷载,有限元计算推、拉向的峰值荷载分别为 729.6kN、742.9kN,试验的推、拉向峰值荷载分别为 724.8kN、734.6kN,可见有限元计算对于特征荷载及位移值计算较为准确。总体来看,有限元计算曲线与试验曲线吻合良好,能够较准确地计算曲线捏拢效应,模拟结构的刚度及承载力退化行为,但较试验曲线更为饱满,这主要与有限元模拟的边界条件相对理想有关。

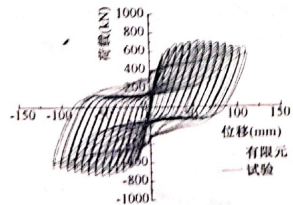


图 3 滞回曲线对比

Fig.3 Comparison of hysteresis curve

图 4 为有限元模型与试验试件的破坏形态对比。由图 4(a)可知,试件加载结束后钢板墙形成了

较为明显的双向拉力带和面外变形,在双向拉力带交汇处被撕裂,且柱脚处鼓曲明显。等效塑性应变 (PEEQ) 是一种塑性应变累积表征量,其数值大小反映了钢材局部的延性以及断裂倾向^[22],图 4(b) 为有限元模型等效塑性应变,可见钢板双向拉力带上及柱脚处等效塑性应变较大,尤其在拉力带交汇处更为明显,达到了 3.089,这与试验时钢板在拉力带交汇处被撕裂一致。图 4(c) 反映了有限元模型的面外变形情况,与试验结果类似,有限元模型钢板墙在拉力带交汇处面外变形较为明显。

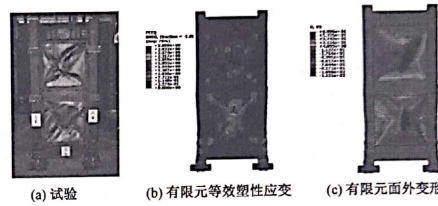


图 4 破坏形态对比

Fig.4 Comparison of failure modes

2 抗侧承载力分析

分别对编号为 SBLJ、SJLJ、LBLJ 的三个方钢管混凝土框架-钢板剪力墙模型进行 Push-over 分析。图 5 为各模型的荷载-位移曲线对比。加载初期,模型均处于弹性阶段,三个模型的抗侧承载力均增加较快,受周边框架对钢板墙锚固作用强弱的影响,三条曲线并未重合,初始刚度的大小关系表现为 SBLJ>SJLJ>LBLJ。随着加载的进行,各模型进入弹塑性阶段,此时钢板墙受到的锚固作用越大,钢板的受力性能发挥的越充分,抗侧承载力增加的越明显。加载后期,各模型进入塑性阶段,抗侧承载力增加趋于平缓。在整个加载过程中,SJLJ 模型的抗侧承载力介于 SBLJ 模型和 LBLJ 之间,可见 SJLJ 模型钢板受到周边框架的锚固作用要强于 LBLJ 模型。

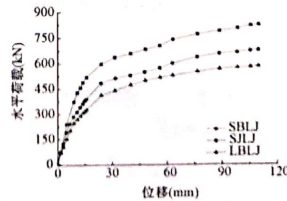


图 5 水平荷载-位移曲线对比

Fig.5 Comparison of horizontal load-displacement curves

图 6、图 7 分别为各模型的钢板墙与框架的荷载-位移曲线及剪力分配曲线。由图可知,当侧向

荷载较小时,周边框架的锚固作用越强,钢板墙抗侧刚度越大,在相同的位移增量下抗侧承载力增加更为明显,剪力分配比例越大,在钢板墙拉力带开始形成之前,SBLJ、SJLJ、LBLJ三个模型剪力墙剪力分配比例分别为79%、76%、67%。当侧向荷载不断增大,钢板墙拉力带逐渐形成,钢板墙抗侧刚度逐渐退化,结构抗侧承载逐渐向框架转移,钢板墙较好的起到了“第一道防线”的作用。至框架柱形成塑性铰时,SBLJ、SJLJ、LBLJ三个模型框架的剪力分配比例

达到最大,分别为44%、58%、64%,SBLJ模型由于框架和钢板墙的相互作用更为明显,导致框架柱的塑性铰会相对较早出现。此后继续加载,随着框架的抗侧承载力逐渐退化,钢板墙的抗侧承载力虽也有所增加但不明显,直至剪力分配趋于稳定。总的来说,SJLJ模型的剪力分配在框架与钢板墙之间更为均衡,既能有效降低对框架柱刚度的要求,又能对钢板墙起到较好的锚固效果。

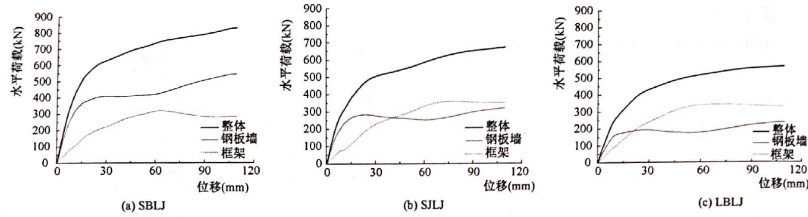


图6 钢板墙与框架的荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of steel plate walls and frames

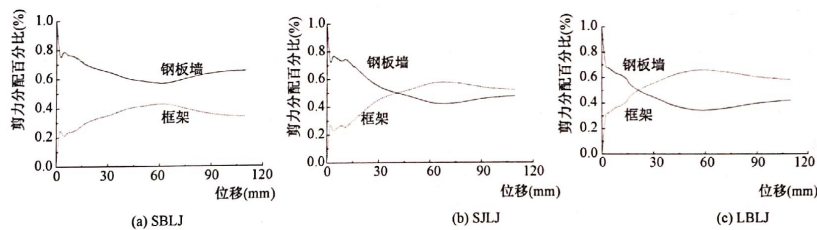


图7 钢板墙与框架的剪力分配曲线

Fig.7 Shear distribution curve of steel plate walls and frames

3 滞回性能分析

对编号为SBLJ、SJLJ、LBLJ的三个方钢管混凝土框架-钢板剪力墙模型进行循环加载,通过对比滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力及破坏形态,分析方钢管混凝土框架-四角连接钢板剪力墙的抗震性能。

3.1 滞回曲线

图8为三个方钢管混凝土框架-钢板剪力墙模型的滞回曲线。由图可知,各模型滞回曲线均呈现出一定的“捏缩”效应,LBLJ模型由于钢板墙与周边框架锚固能力最弱,钢板墙的作用不显著,其滞回曲线样式也更接近钢管混凝土。当加载位移较小时,

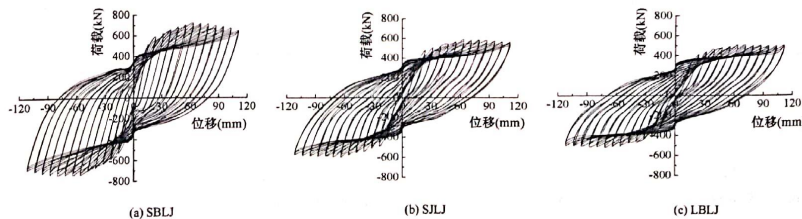


图8 滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves

各模型均近似处于弹性阶段,滞回曲线面积较小,卸载后残余变形不明显。随着加载的进行,滞回环面积增大,模型逐渐进入弹塑性阶段,结构卸载后残余变形增大,承载力不断提高。此后继续加载,模型进入塑性状态,承载力逐渐降低。

3.2 骨架曲线

图 9 为三个模型的骨架曲线对比。SBLJ 模型推拉向的峰值承载力分别为 730.1kN、-745.0kN, SJLJ 模型推拉向的峰值承载力分别为 595.1kN、-602.6kN, LBLJ 模型推拉向的峰值承载力分别为 506.5kN、-527.4kN。由此可见,在循环荷载作用下,各模型的峰值承载力表现为 SBLJ>SJLJ>LBLJ。SBLJ 模型由于框架对钢板墙的锚固作用较强,框架柱的塑性铰形成较早,循环荷载作用下承载力退化较快,导致模型的整体延性较差。

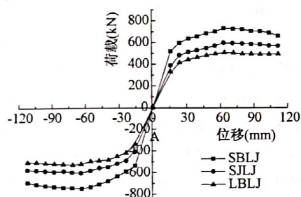


图 9 骨架曲线
Fig.9 Skeleton curves of models

3.3 刚度曲线

采用割线刚度来分析模型的刚度退化过程。图 10 为三个模型的刚度退化曲线。由图可知,当加载位移为 16mm 时, SBLJ 模型刚度为 33.0kN/mm, SJLJ 模型刚度为 24.8kN/mm, LBLJ 模型刚度为 20.9kN/mm,可见在循环荷载作用下,各模型的初始刚度表现为 SBLJ>SJLJ>LBLJ。当位移增大到 56mm 时, SBLJ 模型的刚度为 12.8kN/mm, SJLJ 模型的刚度为 10.4kN/mm, LBLJ 模型的刚度为 8.9kN/mm,可知不同的模型在进入弹塑性阶段后,

刚度随着位移的增大而逐渐退化,且差距越来越小。

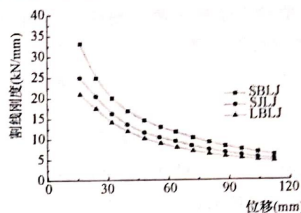


图 10 刚度退化
Fig.10 Stiffness degradation curves

3.4 耗能能力

耗能能力是评价结构抗震性能优劣的重要指标之一,本文综合等效黏滞阻尼系数及滞回环面积来衡量不同模型在循环荷载作用下的耗能能力。各模型的等效黏滞阻尼系数如图 11(a)所示,由图可知,加载初期,由于加载位移较小,各模型的等效黏滞阻尼系数差距不大,耗能效率较为接近,随着加载的进行,钢板剪力墙所受锚固作用越强的模型,其等效黏滞阻尼系数越大,耗能效率越高,加载后期,柱子塑性铰形成,钢板墙所受到的锚固作用减弱, SBLJ 模型与 SJLJ 模型的等效黏滞阻尼系数增加变慢,破坏时各模型的等效黏滞阻尼系数基本接近,大致都在 0.28 左右。由图 11(b)可知,当加载位移增大时,各模型的滞回环面积均出现增加,且在整个加载过程中滞回环面积的大小关系表现为 SBLJ>SJLJ>LBLJ,说明 SJLJ 模型的耗能能力低于 SBLJ 模型,但优于 LBLJ 模型。

3.5 破坏形态

图 12 为各模型的等效塑性应变。由图可知, SBLJ、SJLJ、LBLJ 三个模型破坏时的等效塑性应变最大值分别为 4.532、2.319、1.887,说明钢板墙所受到的锚固作用越强,模型破坏时墙体的塑性变形明显。SBLJ 模型钢板墙的等效塑性应变较大值主

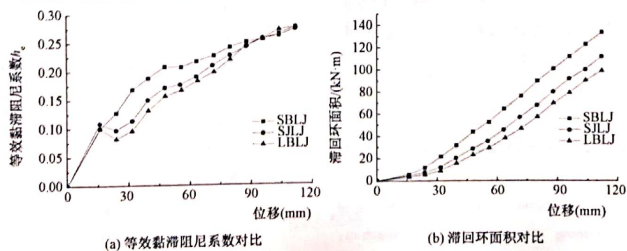


图 11 耗能能力
Fig.11 Energy dissipation

要分布在对角拉力带及其相交区域, S1J1 模型钢板墙的等效塑性应变较大值主要分布在四角连接处, LBLJ 模型钢板墙的等效塑性应变较大值主要分布上下连接处, 可见连接方式不同时钢板墙的撕裂位置也有所不同。在循环荷载的作用下, 三个模型在柱脚处均形成了较为明显的塑性铰, 其中 SBLJ 模型由于受到钢板墙拉力较大, 破坏时柱子的弯曲变形越大, 柱脚屈曲现象也越为严重。

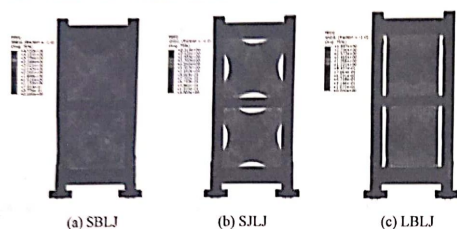


图 12 等效塑性应变

Fig.12 The equivalent plastic strain distribution

4 结论

(1) 基于非线性有限元软件 ABAQUS, 重点考虑材料的本构模型及计算平台, 对方钢管混凝土框架-钢板剪力墙的滞回曲线及破坏形态进行了验证, 有限元计算结果与试验结果较为接近。

(2) 四角连接模型的抗侧承载力介于四边连接模型和两边连接模型之间, 四角连接模型钢板剪力墙受到锚固作用要强于两边连接模型。四角连接模型的剪力分配在框架与钢板墙之间更为均衡, 既能有效降低对框架柱刚度的要求, 又能对钢板墙起到较好的锚固效果。

(3) 在循环荷载作用下, 四角连接模型表现出良好的抗震性能, 其与两边连接模型相比具有更高的承载力、刚度、耗能能力, 而与四边连接模型相比又具有更好的延性。

(4) 钢板墙的连接方式对墙体的塑性应变数值大小及破坏区域分布具有较为明显的影响, 且钢板墙所受到的锚固作用越强, 破坏时柱子的弯曲变形越大, 柱脚屈曲现象也越为严重。

参考文献 (References):

- [1] 季 渊. 多高层框架-支撑结构的弹塑性稳定性分析及其支撑研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003
Ji Yuan. Plastic stability analysis and bracing research of multi-story frame-bracing structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003 (in Chinese)
- [2] 聂建国, 朱 力, 樊健生, 等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(01): 61-69
Nie Jian-guo, Zhu Li, Fan Jian-sheng, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(01): 61-69 (in Chinese)
- [3] 王先铁, 周绪红, 储召文, 等. 方钢管混凝土框架内设置侧边开洞薄钢板剪力墙的抗侧承载力研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2017, 49(03): 350-359
Wang Xian-tie, Zhou Xu-hong, Chu Zhao-wen, et al. Study on lateral resistance frame-thin steel capacity of concrete-filled square steel tubular plate shear wall with side opening [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(03): 350-359 (in Chinese)
- [4] 王 力, 白连平, 王先铁, 等. 方钢管混凝土框架-薄钢板墙的计算方法研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(05): 15-22
Wang Li, Bai Lian-ping, Wang Xian-tie, et al. Calculation method study of concrete-filled square steel tubular frame thin steel plate shear walls [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(05): 15-22 (in Chinese)
- [5] 郭彦林, 周 明. 钢板剪力墙的分类及性能 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(03): 1-13
Guo Yan-lin, Zhou Ming. Categorization and performance of steel plate shear wall [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(03): 1-13 (in Chinese)
- [6] 郭兰慧, 李 然, 范 峰, 等. 钢管混凝土框架-钢板剪力墙结构滞回性能研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 69-78
Guo Lan-hui, Li Ran, Fan Feng, et al. Study on hysteretic behaviors of composite frame-steel plate shear wall structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 69-78 (in Chinese)
- [7] 金双双, 郭兰慧, 戎 芹, 等. 方钢管混凝土框架-钢板剪力墙结构抗震分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(06): 1145-1156
Jin Shuang-shuang, Guo Lan-hui, Rong Qin, et al. Analysis of concrete filled square steel tubular frame-steel plate shear wall structural systems [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(06): 1145-1156 (in Chinese)
- [8] 张增德, 王静峰, 龚旭东, 等. 两边连接钢板剪力墙-装配式钢管混凝土框架结构抗震性能研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(07): 38-47
Zhang Zeng-de, Wang Jing-feng, Gong Xu-dong et al. Study on seismic performance of prefabricated CFST frames with beam-only-connected SPSWs [J]. China

- Civil Engineering Journal, 2019, 52(07): 38-47 (in Chinese)
- [9] 马欣伯, 郭兰慧, 张素梅, 等. 两边连接开缝钢板剪力墙的弹性屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 130-135
Ma Xin-bo, Guo Lan-hui, Zhang Su-mei, et al. Elastic buckling analysis of two sided connection steel plate shear walls with slits [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1): 130-135 (in Chinese)
- [10] 杨航东. 方钢管混凝土框架-两边连接薄钢板剪力墙的试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015
Yang Hang-dong. Experimental and theoretical study of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with bilateral connections [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese)
- [11] 傅学怡, 魏木旺, 张健. 四角连接约束钢板墙的力学和滞回性能研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015, 32(03): 221-230
Fu Xue-yi, Wei Mu-wang, Zhang Jian. Mechanical and hysteretic behaviors of restrained steel plate walls connected to beam-column joints [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2015, 32(03): 221-230 (in Chinese)
- [12] 马尤苏夫. 方钢管混凝土框架-开洞钢板剪力墙抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014
Ma You-su-fu. Study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-steel plate shear wall with openings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese)
- [13] 陈锦荣. 四角连接半开口钢板剪力墙抗剪与滞回性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018
Chen Jin-rong. Shear resistance and hysteretic behavior of steel plate shear walls connected to beam joints with half-opening [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese)
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007
Han Lin-hai. Concrete-filled steel tube structure: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [15] ACI Committee 318. Building code requirements for reinforced concrete and commentary [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2011
- [16] Chaboche J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2(2): 149-188
- [17] 石永久, 王萌, 王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012(03): 5-12
Shi Yong-jiu, Wang Meng, Wang Yuan-qing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. Journal of Building Materials, 2012(03): 5-12 (in Chinese)
- [18] 倪茜, 吴丹丹, 李帅, 等. 再生混凝土梁柱组合框架抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(03): 7-14
Ni Qian, Wu Dan-dan, Li Shuai, et al. Analysis on influence factors of seismic behavior of recycled concrete-filled square steel tubular frame [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(03): 7-14 (in Chinese)
- [19] 王先铁, 周绪红, 王东石, 等. 方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板剪力墙结构水平承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(09): 1-9
Wang Xian-tie, Zhou Xu-hong, Wang Dong-shi, et al. Research on horizontal load bearing capacity of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls structure with cross stiffeners [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(09): 1-9 (in Chinese)
- [20] 徐建. 非加劲薄钢板剪力墙性能试验与设计方法研究[D]. 重庆大学, 2012
Xu Jian. Study on performance test and design method of unstiffened thin steel plate shear wall [D]. Chongqing University, 2012 (in Chinese)
- [21] 魏木旺. 装配式四角连接防屈曲钢板剪力墙性能与设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
Wei Mu-wang. Analysis and design of fabricated partially connected buckling-restrained steel plate shear walls [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese)
- [22] 王萌, 杨维国. 不同改进形式钢板剪力墙滞回性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(08): 110-121
Wang Meng, Yang Wei-guo. Study on hysteretic performances of the improved steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(08): 110-121 (in Chinese)

[作者简介] 李帅(1990-),男,汉族,硕士,助教,研究方向:工程结构抗震