

型钢再生混凝土框架—填充墙结构抗震 性态水平和容许变形值研究

薛建阳, 戚亮杰, 罗 峥, 高 亮

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 进行了2个1/2.5比例的型钢再生混凝土框架-填充墙结构的低周反复加载试验,主要研究轴压系数对型钢再生混凝土框架-填充墙结构破坏形态的影响和该结构在不同抗震性态水平的变形指标.结合现阶段国内外对钢筋混凝土结构划分性能水平的标准,将其划分为正常使用、暂时使用、生命安全和接近倒塌四个阶段;通过试验结果分析了型钢再生混凝土柱和型钢再生混凝土框架-填充墙结构的主要破坏形态、受力模式及特点,提出了上述四个性能水平划分的判别参数及标准;在总结国内外型钢再生混凝土柱和型钢再生混凝土框架-填充墙结构试验研究资料的基础上,得出型钢再生混凝土柱和型钢再生混凝土框架-填充墙结构各性能水平极限状态对应的层间位移角容许变形值.

关键词: 型钢再生混凝土框架-填充墙结构;破坏形态;性能水平;容许变形值

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0015-06

Study on seismic performance levels and allowable deformation values of steel reinforced recycled concrete frame structure with infilled wall

XUE Jianyang, QI Liangjie, LUO Zheng, GAO Liang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the experimental study of two 1/2.5-scaled model of steel reinforced recycled concrete frames with infilled wall under low cyclic reversed loading, the effects of the axial compression ratio on the failure mode of the structure and the seismic performance parameters under different performance levels of steel reinforced recycled concrete columns and steel reinforced recycled concrete frames with infilled wall were investigated. Combining with standard of performance level of reinforced concrete structures at home and abroad at the present stage, the performance of steel reinforced recycled concrete columns and steel reinforced recycled concrete frames with infilled wall structure level is divided into four stages: regular employ, temporary employ, life safety and approaching collapse. According to the test results, the failure pattern of frame, main force pattern and characteristics were analyzed, and four failure criteria and parameters of performance levels were put forward. In the summing-up of the framework on the basis of experimental research data at home and abroad, steel reinforced recycled concrete columns and the steel reinforced recycled concrete frames with infilled wall's interlayer displacement angle of tolerant deformation value range are obtained corresponding to each performance level limit state.

Key words: steel reinforced recycled concrete frames with infilled wall; failure mode; performance levels; tolerant deformation value

框架-填充墙结构是目前我国应用最为广泛的结构形式之一.在承受地震等水平作用时,填充墙与框架之间相互影响,框架对填充墙变形具有约束作用,当框架结构受到地震力效应时,填充墙与框架共同起到抵抗外力的作用.但是在进行该种结构的抗震设计中,填充墙部分常被视为“非结构”构件,在结构设计时通常仅通过对纯框架部分的基本周期进行折减来考虑填充墙部分对整个结构刚度的影响,也就是说,目前对该种结构的设计在本质上仍是按纯框架进行的.

目前关于型钢再生混凝土框架-填充墙结构的研究尚不多见,且大多数研究主要只针对于型钢再

生混凝土梁柱的研究^[1-3],而对结构整体层面的研究尚未深入开展.实现其基于性能抗震设计理论的核心问题即是确定这种结构在各个不同性能水平下的容许变形值,结构性能水平可以用这些主要的参数来划分,但目前对此方面的研究还比较欠缺,在上述的研究意义和研究背景下,笔者通过2榀1/2.5比例单层单跨型钢再生混凝土框架-填充墙试件的拟静力加载试验,研究此种结构功能失效的判别参数和容许变形值大小.

1 试验概述

1.1 试件设计及参数

收稿日期: 2014-01-22

修改稿日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(51178384),住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K2-12),陕西省留学人员科技活动择优资助项目(陕外专发[2010]26号),陕西省教育厅科研计划项目(12JK0902)

作者简介: 薛建阳(1970-),男,博士,教授,博导,主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构抗震研究.E-mail: jianyang_xue@163.com

试验模型为两榀按1:2.5缩尺的单层单跨型钢再生混凝土平面框架,具体参数见表1. 框架层高1440 mm, 跨度2280 mm. 框架梁截面为 $b\times h=150\text{ mm}\times 240\text{ mm}$, 其中纵筋采用 $\Phi 14$ 带肋钢筋, 箍筋采用 $\phi 6$ 光圆钢筋, 在梁端500 mm加密区布置形式为 $\phi 6@40$, 其余非加密区布置形式为 $\phi 6@80$; 框架柱截面尺寸为 $b\times h=180\text{ mm}\times 240\text{ mm}$, 配钢率为4.98%, 采用Q235B级14号薄壁工字钢; 配筋率为1.43%, 纵向钢筋和箍筋分别采用 $\Phi 14$ 钢筋与 $\phi 8$ 带肋钢筋, 在节点核心区以及柱端450 mm加密区范围内布置为 $\phi 8@50$, 非加密区布置为 $\phi 8@100$; 实测28 d再生混凝土立方体试块的抗压强度平均值为52.02 MPa. 试件的几何尺寸及构件的配筋、配钢形式如图1所示, 试验所用混凝土为100%再生骨料取代率的再生混凝土.

表1 试件参数
Tab.1 Parameter of specimens

编号	轴压比	砌块种类	砌块抗压强度/MPa	砂浆强度/MPa	拉筋间距/mm
S1	0.4	再生混凝土空心砌块	5.62	10.11	400
S2	0.6	再生混凝土空心砌块	5.62	10.11	400

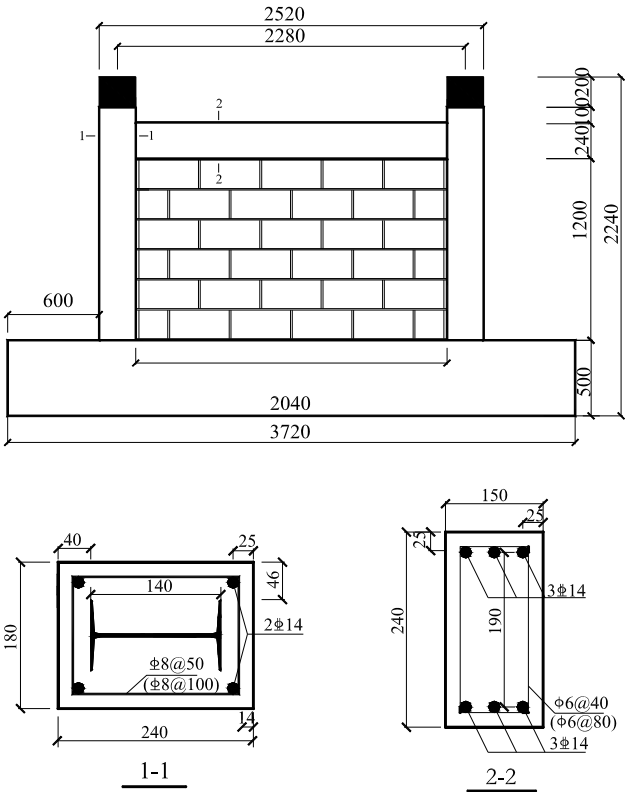


图 1 试件几何尺寸与梁柱截面形式
Fig.1 Geometry and form of column-beam

1. 2试验加载方案

本试验在西安建筑科技大学结构工程抗震试验室进行, 加载装置如图 2 所示.

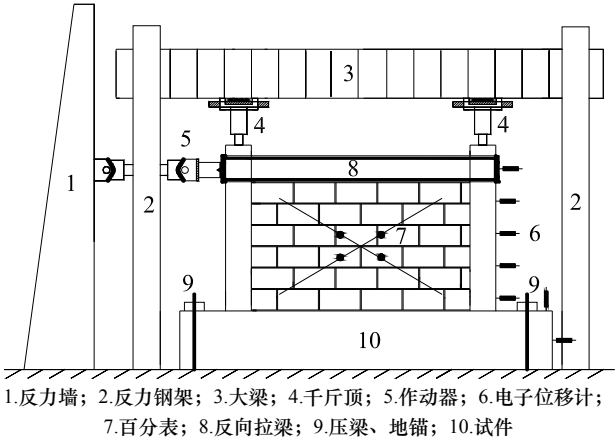


图 2 加载装置
Fig.2 Test setup

试验时采用力-位移混合控制加载制度, 首先在两个框架柱的柱顶施加竖向荷载, 然后在梁端分级施加水平荷载. 在试件屈服前按力加载, 每级增加30kN; 试件屈服后按位移控制, 每级增加的位移为屈服位移的倍数. 最后, 当荷载下降到极限荷载的85%以下, 加载结束. 在框架梁端、柱端的纵筋、箍筋及型钢翼缘上布置应变片, 节点核心区型钢腹板上布置应变花, 以测量相应位置处型钢及钢筋应变值; 在基础梁端、框架梁端设置电子位移计, 用以量测相应位置变形.

2 结构性能水平及抗震性能目标

2.1 四个性能水平及其极限状态

我国抗震规范将结构性能分为不受损坏继续使用、可能损坏但经一般修理或不需修理仍可使用、不发生危及生命及不倒塌的严重破坏, 即“小震不坏、中震可修、大震不倒”3个性能水平; 美国FEMA356规范将主体结构性能分为正常运行、立即使用、生命安全和防止倒塌4个水平; 美国加州工程师学会基于性能抗震设计的4个性能水平为充分运行、正常运行、生命安全和接近倒塌.

本文按照我国抗震设计的需要和建筑损伤的程度, 对型钢再生混凝土结构采用正常使用、暂时使用、生命安全和接近倒塌四个性能水平^[4].

2.2 性能目标

我国抗震规范规定: 结构的性能不能低于“小震不坏、中震可修、大震不倒”的基本抗震设防目标, 同时规范还给出“性能1~性能4”的四种性能目标供结构构件抗震性能设计时选择应用. 本文按照四个性能水平和三个设防水准, 根据型钢再生混凝土

土框架-填充墙结构实际可能出现的情况和抗震级别的高低性,建立了4个抗震性能目标,如表2所示.

表2 抗震性能目标
Tab.2 Seismic performance objectives

地震水平	结构性能目标			
	正常使用	暂时使用	生命安全	接近倒塌
多遇地震	1	/	/	/
设防地震	3	1 或 2	1	/
罕遇地震	4	3	1 或 2	1

注:1为基本目标,指一般建筑应具备的最基本性能目标;2为较重要目标,即地震后有一定危害性但尚不过大的性能目标;3为重要目标,指地震后危险性比较大或重要性相对很高的性能目标;4为十分重要目标,指对结构有十分危险影响的性能目标.

3 型钢再生混凝土柱的性能指标量化

由上述试验结果可知,型钢再生混凝土框架的变形能力主要取决于型钢再生混凝土柱的变形能力,因此,本文首先给出型钢再生混凝土柱在不同性能水平时的变形容许值,在此基础上进一步研究型钢再生混凝土框架的性能指标.

3.1 型钢再生混凝土柱的破坏形态

课题组前期的试验结果表明^[5],低周反复荷载作用下型钢再生混凝土柱有三种破坏形态,分别为剪切斜压破坏、弯剪破坏和弯曲破坏.

小剪跨比($\lambda=1.40<1.50$,即短柱)试件发生剪切斜压破坏.首先试件中部再生混凝土出现斜裂缝,当反复水平荷载增加至一定数值时,在试件中部位置出现较为明显的交叉斜裂缝,且随着水平荷载的增加,交叉斜裂缝逐渐增多,与此同时,柱根处也相应地出现水平弯曲裂缝,进入屈服状态以后,试件中部再生混凝土逐渐被交叉主斜裂缝分割为若干个斜向棱柱体;箍筋外围再生混凝土首先被压碎脱落,而后逐渐向柱核心部位延伸扩展,直至斜向棱柱体被压碎脱落,试件破坏.

剪跨比 $\lambda=1.85$ ($1.5\leq\lambda\leq2$)的试件发生弯剪破坏.首先水平弯曲裂缝出现在试件柱根处,随后,水平弯曲裂缝由于受到型钢翼缘约束作用而逐渐发展为斜裂缝;当试件达到屈服后,斜裂缝的发展速度较水平弯曲裂缝慢,水平裂缝长度不断延伸且变宽;随着加载的进一步进行,型钢翼缘外侧再生混凝土开始压碎剥落,且逐渐向柱中部扩散,最后型钢翼缘压屈外鼓,试件丧失承载力而发生破坏.

当剪跨比较大时,型钢再生混凝土柱发生弯曲破坏形态.首先在试件的柱根处出现水平弯曲裂缝,随着加载的继续,沿试件高度出现少许斜裂缝,其发展较为缓慢,而水平弯曲裂缝则陆续增多,且原有水平弯曲裂缝逐渐延伸扩展;随着荷载的增大,原有水平弯曲裂缝延伸扩展迅速,水平弯曲裂缝最终相互贯通,柱根处混凝土被压碎剥落;在位移加载循环作用下,再生混凝土大量脱落,型钢压屈,箍筋外鼓,最终导致试件发生破坏.

3.2 型钢再生混凝土柱不同性能水平的失效判别标准

不管是剪切斜压破坏,还是弯曲破坏,型钢再生混凝土柱的混凝土被压碎脱落后,承载力都不会立即下降,这和钢筋混凝土构件区别较大.原因是混凝土退出工作后,截面内力还可由型钢承担,而钢材是延性很好的材料,因此型钢再生混凝土柱的承载力衰减缓慢,表现出良好的延性,在建立其不同性能水平的失效判别标准时需要考虑该特点^[6].判别标准如表3所示.

3.3 型钢再生混凝土柱不同性能水平的变形容许值

通过对数据进行统计分析^[5],不同破坏形式的型钢再生混凝土柱在各个性能水平对应的侧移角分布比如表4和表5所示.

表3 不同性能水平下型钢再生混凝土柱的性能描述及失效判别标准

Tab.3 Performance description and failure criteria of different performance levels

性能水平	性能描述	
	剪切斜压破坏	弯曲破坏
正常使用	腹部出现第一条剪切斜裂缝	端部出现第一条弯曲水平裂缝
暂时使用	腹部形成主斜裂缝,表面混凝土被划分成几个斜向小柱	端部出现多条水平裂缝,混凝土开始被压碎
生命安全	腹部箍筋外围混凝土压碎脱落,箍筋和型钢腹板区域较大,纵向型钢(腹杆)屈服	端部混凝土被压碎,钢和钢筋屈服
接近倒塌	腹板箍筋内核心混凝土压碎,型钢腹板(腹杆)压屈凸出,承载力下降到预定值	端部几乎全截面箍筋外围混凝土被压碎剥落,纵向钢筋压屈,承载力下降到预定值

表4 剪切斜压破坏柱对应的侧移角分布比
Tab.4 Distribution proportion of displacement angle of shear baroclinic destruction

性能水平	正常使用			暂时使用			生命安全			接近倒塌		
侧移角分布比/%	<1/350	1/350~1/250	>1/250	<1/90	1/90~1/75	>1/75	<1/45	1/45~1/40	>1/40	<1/40	1/40~1/30	>1/20
	25	63	12	25	63	12	25	50	25	24	63	13

表5 弯曲破坏柱对应的侧移角分布比

Tab.5 Distribution proportion of displacement angle of bending destruction

性能水平	正常使用			暂时使用			生命安全			接近倒塌		
侧移角	<1/550	1/550~1/450	>1/450	<1/170	1/170~1/140	>1/140	<1/90	1/90~1/70	>1/70	<1/60	1/60~1/40	>1/40
分布比/%	12	86	12	12	50	38	12	50	38	12	76	12

尽管所统计型钢再生混凝土柱构件的设计参数不尽相同,但其侧移角在各个性能水平的分布仍然呈现出良好的规律性.综上所述,将型钢混凝土柱正常使用、暂时使用、生命安全及接近倒塌四个性能水平对应的侧移角容许值列于表6中.

表6 型钢再生混凝土柱不同性能水平对应的侧移角容许值

Tab.6 Limit value of displacement angle of different performance level

性能水平	正常 使用	暂时 使用	生命 安全	接近 倒塌
剪切斜压破坏 侧移角容许值	1/325	1/85	1/45	1/40
弯曲破坏 侧移角容许值	1/500	1/160	1/75	1/50

4 型钢再生混凝土框架—填充墙结构的性能指标的量化

4.1 型钢再生混凝土框架—填充墙结构的破坏形态

型钢再生混凝土框架—填充墙结构经历了填充墙开裂、梁柱开裂、梁柱混凝土压溃剥落,受压纵筋和型钢受压翼缘屈服,承载力上升至峰值的各个阶段,最终框架承载力降低至峰值的85%.为了与上述四个性能水平一致,将该种结构整个受力过程划分为弹性工作阶段、裂缝开展工作阶段、弹塑性工作阶段以及破坏阶段^[7].

对于型钢再生混凝土框架—填充墙结构,从开始加载到填充墙出现微小裂缝(0.05-0.1 mm)为正常使用阶段,但是不会形成贯通斜裂缝,梁柱均未出现损伤,结构从使用和安全角度来看不需要任何修复,结构处于弹性阶段,无任何残留变形;从混凝土梁柱开始出现裂缝到填充墙裂缝贯通为暂时使用阶段,此阶段是带裂缝工作阶段,破坏在可修范围内,不影响结构所有基本功能的运行,以梁柱部分受拉纵筋屈服为暂时使用性能极限状态,此时残留变形可以忽略;从梁柱纵筋出现屈服到混凝土脱落,荷载达到峰值作为生命安全阶段,此为弹塑性工作阶段,此时结构丧失了部分刚度和强度,填充墙体已基本完全破坏,以水平荷载达到峰值为生命安全性能的标志;从结构承载力达到极值持续到混凝土保护层压溃严重剥落、梁柱端部纵筋箍筋完全裸露且承载力严重下降为接近倒塌性能阶段,此阶段为塑

性阶段,结构丧失大部分刚度和强度,修复已经不可能,以梁端柱端混凝土发生大面积破碎为接近倒塌极限状态.

试验研究发现,各试件填充墙体部分均出现了非常明显的斜向交叉裂缝,大致沿斜向上60°与斜向下60°方向开展,随着荷载的增加,填充墙的破坏逐渐严重,裂缝宽度加大,直至脱落,剪切作用相当明显.试验中各梁端及柱底小范围内出现弯曲裂缝,斜向剪切裂缝出现很少,梁端纵筋最先达到屈服,其次柱中纵筋及型钢屈服,柱根处型钢及纵筋屈服时间较晚.框架除填充墙主体外均发生弯曲破坏,表明梁塑性较先于柱出现,符合“梁铰机制”形成过程,同时填充砌块强度等级较低,所砌墙体对框架主体柱的约束效应不强,不会出现剪切斜压破坏.试件的破坏形态如图3所示.



(a) 试件 S1



(b) 试件 S2

图3 破坏形态

Fig.3 Failure modes

4.2 型钢再生混凝土框架—填充墙结构不同性能水平的失效判别标准

根据试验现象,将各性能水平下整体结构的现

象描述列于表 7 中。

表7 型钢再生混凝土框架-填充墙结构性能水平描述
Tab.7 Performance level description of SRRC frame structure with infilled wall

性能水平	现象描述	破坏程度	易修复程度
正常使用	梁柱结构基本不损坏;填充墙结构基本不出现裂缝,肉眼几乎看不出与未受损结构差别,整体框架刚度未降低,尚处于弹性工作阶段,对正常使用不存在任何问题;	基本完好	完好
暂时使用	填充墙部分形成主裂缝,裂缝加粗并贯通,需要少量修整,框架主体梁柱仍未发生大规模破坏,几乎仍可保持固有刚度,近似处于弹性工作阶段末期;	轻微破坏	较易修复
生命安全	填充墙部分与框架脱落,主体框架结构破坏比较严重,新产生裂缝较多,且裂缝宽度均加大,整体结构已经进入屈服阶段。梁端柱端混凝土保护层出现轻微剥落,承载力达到最大值;	严重破坏	尚可修复
接近倒塌	绝大多数承重构件发生破坏,但结构尚未倒塌;框架梁柱混凝土大多压溃脱落,丧失大部分刚度,各柱端钢筋及型钢局部压屈,混凝土保护层逐渐剥落,构件已完全进入塑性工作阶段,不适宜人类继续居住;	临近坍塌	不可修复

4.3 型钢再生混凝土框架-填充墙结构不同性能水平的容许变形值

整体结构的变形是梁、柱及其节点变形的综合结果,因此,前面分析得出的型钢再生混凝土柱在四个性能水平的侧移角限值不能作为型钢再生混凝土框架-填充墙结构的层间位移角限值。但由于框架的变形能力主要取决于柱的变形能力,故确定型钢再生混凝土框架-填充墙结构在四个性能水平的层间位移角限值时应考虑型钢再生混凝土柱的侧移角限值。

本文对国内外可查得的型钢混凝土纯框架和钢筋混凝土框架-填充墙结构^[8-10]试验结果进行了统计分析,试件在初始弹性阶段的层间位移角分布范围为1/2 800~1/5 280,其中1/5 280对应的型钢再生混凝土柱轴压比较高,表明增大轴压比,结构开裂时对应的顶点水平位移减小。大部分试件的弹性阶段末期位移角主要处于1/320~1/590范围内;通过对试验结果筛查发现,型钢混凝土柱底型钢腹板或

受拉钢筋屈服的层间位移角分布在1/120~1/220的范围内,其中1/120对应的是所有统计数据中轴压比最大的试件,表明随着轴压比的增大,结构所受 $P-\Delta$ 二阶效应更加显著,使层间位移角有增大的趋势,不利于结构抗震^[11];所有试件在加载末期临近破坏阶段的层间位移角分布均在1/85附近。综合以上数据,并考虑型钢再生混凝土柱的四个性能水平的位移角限值,将型钢再生混凝土框架-填充墙结构的正常使用、暂时使用、生命安全及接近倒塌四个性能水平对应的侧移角容许值列于表8中。

表8 型钢再生混凝土框架-填充墙结构不同性能水平对应的侧移角容许值

Tab.8 Limit value of displacement angle of different performance level of the whole structure				
性能水平	正常使用	暂时使用	生命安全	接近倒塌
位移角容许值	1/3 000	1/500	1/160	1/85

5 结论及建议

(1)填充墙体部分均出现了较为明显的交叉裂缝,裂缝大致沿墙体角部斜向上60°方向或斜向下60°方向开展,填充墙破坏严重,框架梁、柱斜向剪切裂缝较少,均发生弯曲破坏,柱底型钢及纵筋屈时间较晚,柱底晚于梁端形成塑性铰,符合“梁铰机制”。

(2)将型钢再生混凝土-填充墙结构的性能水平划分为正常使用、暂时使用、生命安全和接近倒塌四个等级,并给出了各个水平的现象描述;

(3)总结了型钢再生混凝土柱和型钢再生混凝土框架-填充墙结构在不同性能水平的破坏形态,提出了四个性能水平对应的失效判别标准和具体参数,建议剪切斜压破坏的型钢再生混凝土柱在不同性能水平对应的侧移角容许值分别取为:1/325,1/85,1/45,1/40;弯曲破坏的分别取为:1/500,1/160,1/75,1/50;型钢再生混凝土框架-填充墙结构各自的侧移角分别取1/3 000、1/500、1/160和1/85。

(4)由于试验条件的限制,本文所提出的四个性能水平的容许变形值所对应的试验样本还不够丰富,还需要考虑诸如拉筋间距、填充墙砌块强度等影响因素;并应通过数值模拟的方式,将试验结果与其对应起来,从理论推导上建立该种结构容许变形值的计算公式;同时,笔者论述的型钢再生混凝土结构仅仅针对框架,局限性较强,仍需要进行型钢再生混凝土剪力墙及其他结构的试验研究与理论推导,从而全面的为型钢再生混凝土结构性能水平设计提供理论标准,应用于实际工程当中。

参考文献 References

- [1] 薛建阳, 王秀振, 马辉, 等. 型钢再生混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 69-72.
XUE Jianyang, WANG Xiuzhen, MA Hui, et al. Experimental study on shear performance of steel reinforced recycled aggregate concrete beams[J]. Building Structure, 2013, 43(7): 69-72.
- [2] 薛建阳, 崔卫光, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 73-76.
XUE Jianyang, CUI Weiguang, CHEN Zongping, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns [J]. Building Structure, 2013, 43(7): 73-76.
- [3] 薛建阳, 林建鹏, 马辉. 型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2013, 45(5): 615-621.
XUE Jianyang, Lin Jianpeng, MA Hui, et al. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled aggregate concrete columns [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2013, 45(5): 615-621.
- [4] 王秋维, 史庆轩, 杨 坤. 型钢混凝土结构抗震性能水平和容许变形值的研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(1): 82-87.
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, YANG Kun, et al. Study on seismic performance levels and tolerant deformation values about SRC structures [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(1): 82-87.
- [5] 马辉. 型钢再生混凝土柱抗震性能及设计计算理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
MA Hui. Research on seismic performance and design calculation theories of steel reinforced recycled concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [6] 刘祖强. 型钢混凝土异形柱框架抗震性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
LIU Zuqiang. Research on seismic performance and design method of steel reinforced concrete frame with special-shaped columns [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [7] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 填充墙不规则布置对RC框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 46-54.
GUO Zixiong, HUANG Qunxian, WEI Rongfeng, et al. Experimental study on seismic behavior of irregularly brick infilled RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 46-54.
- [8] AL-CHAAR G, ISSA M, SWENEY S. Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(8): 1055-1063.
- [9] 雷健. 型钢混凝土框架结构基于位移的抗震设计理论和方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
LEI Jian. Displacement-Based design theory and method of steel reinforced concrete frame structure [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [10] 王妙芳. SRC框架结构不同性能水平变形容许值研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2006.
WANG Miaofang. Study on drift limits of SRC frame for four different performance levels [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2006.
- [11] 薛建阳, 高亮, 罗峥, 等. 再生混凝土空心砌块填充墙-型钢再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 77-84.
XUE Jianyang, GAO Liang, LUO Zheng, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete frame infilled with recycled aggregate concrete hollow blocks [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 77-84.

(本文编辑 吴海西)