

文章编号:1671-6833(2013)06-0090-04

# 基于性能的构造柱-芯柱墙体抗震水准研究

刘伟<sup>1</sup>, 王娱<sup>2</sup>, 许鹏<sup>2</sup>, 李雨<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450002; 3. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为实现构造柱-芯柱体系砌块结构的基于性能的抗震设计,选取构造柱-芯柱体系砌块墙体为研究对象,以位移角作为性能水准的评价指标,根据大量抗震性能试验和数值分析结果,对构造柱-芯柱体系砌块墙体的抗震性能水准进行定量划分,即:充分运行对应于 $[\theta] < 1/2049$ ;损伤运行对应于 $1/2049 \leq [\theta] < 1/323$ ;生命安全对应于 $1/323 \leq [\theta] < 1/191$ ;接近倒塌对应于 $[\theta] \geq 1/191$ 。研究成果为震后砌块墙体损伤程度的宏观判定提供了帮助,并为实现砌块结构“多级设防”提供了参考。

**关键词:**构造柱-芯柱体系砌块墙体;抗震性能水准;位移角;保证率

**中图分类号:** TU 375 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.022

## 0 引言

当前,国内外专家学者对构造柱-芯柱体系砌块墙体抗震性能方面进行了大量的研究,并取得了很多研究成果,然而影响砌块墙体抗震性能的因素众多,比如:材料强度、配筋率、灌芯率、高宽比、轴压比等等,对于综合考虑这些影响因素的研究却十分少见。更重要的是,基于性能的抗震设计理论是未来抗震设计理论发展的必然趋势,所以,用基于性能的抗震设计理论对构造柱-芯柱体系砌块墙体进行抗震性能分析意义重大。但因涉及内容广泛,需要解决的问题很多,因此,笔者对基于性能的抗震设计理论的核心内容——构造柱-芯柱体系砌块墙体抗震性能水准进行研究,以位移角为量化指标对墙体进行性能水准的多级量化,为震后砌块墙体损伤程度的宏观判定提供帮助,为实现砌块结构“多级设防”提供参考。

## 1 墙体抗震性能试验总结和分析

笔者搜集了构造柱-芯柱体系砌块墙体大量的抗震性能试验<sup>[1-7]</sup>,发现其典型破坏具有明显的相同点,即:在弹性阶段,微小裂缝多数首先出现在构造柱与芯柱之间的砌块位置;在弹塑性阶

段,裂缝进一步发展,墙体中间的芯柱抑制了裂缝的发展,在芯柱周边砌块部分被压碎,进入塑性破坏阶段后,主裂缝彻底贯通,构造柱和芯柱钢筋进入强化阶段或已经被剪断,砌块破碎严重,发生严重的掉落现象,承载力下降,位移迅速增大。同时,对砌块墙体破坏过程中各阶段位移角进行统计,列于表1。

**表1 构造柱-芯柱体系砌块墙体试验位移角**  
**Tab.1 Experimental displacement angles of concrete block walls with tie columns and core columns at each stage**

试件 编号	初裂位 移角 $\theta_c$	极限位 移角 $\theta_u$	破坏位 移角 $\theta_d$
14	1/2 500	1/207	1/122
W-2	1/2 308	1/218	1/185
W-1	1/2 264	1/333	1/200
W-5	1/2 142	1/286	1/250
W-4	1/2 033	1/267	1/203
12	1/1 826	1/250	1/146
A-6	1/1 786	1/232	—
4_2	1/1 786	1/232	1/131
17	1/1 696	1/207	1/121
7	1/1 532	1/156	1/78
13	1/1 532	1/158	1/92
A-8	1/1 470	1/245	—
5_2	1/1 470	1/243	1/170

收稿日期:2013-06-18;修订日期:2013-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1204502);河南省重点科技攻关计划项目(132102310447)

作者简介:刘伟(1970-),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事结构新材料和新体系方面的研究, E-mail:liuwei@zzu.edu.cn.

续表 1

试件 编号	初裂位 移角 $\theta_c$	极限位 移角 $\theta_u$	破坏位 移角 $\theta_d$
18	1/1 439	1/211	1/109
A-7	1/1 429	1/212	—
O-10	1/1 333	1/135	1/117
5_1	1/1 429	1/212	1/131
11	1/1 397	1/164	1/96
9	1/1 188	1/211	1/110
6	1/1 159	1/251	1/148
O-11	1/1 412	1/235	1/111
15	1/1 131	1/173	1/87
19	1/1 695	1/446	1/238
20	1/1 786	1/232	1/131

对上表数据进行统计,发现初裂位移角位于 1/2 500 ~ 1/950 之间,变异系数为 0.24;极限位移角位于 1/446 ~ 1/135 之间,变异系数达到 0.25;破坏位移角位于 1/250 ~ 1/78 之间,变异系数达到 0.31。由此说明,整理得到的试验数据分布范围广泛,离散性大,且缺少滞回曲线的下降段,样本数量不足以从概率的角度统计出墙体破坏各阶段具有较高保证率的位移角安全特征值。

### 2 砌块墙体数值模型的验证

当前所统计到的试验数据不够完善,笔者利用有限元程序建立多类砌块墙体进行抗震性能分析,以丰富研究样本。首先对笔者建议的数值建模方法进行验证,选取熊立红<sup>[8]</sup>所进行的构造柱-芯柱体系砌块墙体 W-4 的拟静力试验为模拟对象,采用 Solid45 单元模拟空心砌块、灌芯砌块、构造柱,Link8 单元模拟钢筋从而建立模型 1-1,以位移循环加载,牛顿-拉普森法求解得到了具有下降段的滞回曲线(见图 1),并对试验数据和数值模拟结果进行对比(见表 2)。

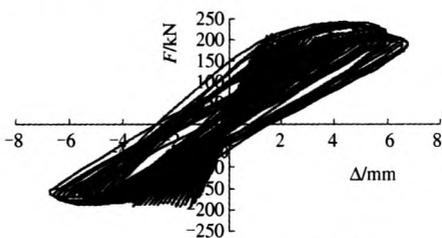


图 1 模型 1-1 滞回曲线

Fig. 1 The hysteretic curve of 1-1

表 2 的对比结果表明:砌块墙体的数值模型计算结果与试验数据比较接近,误差多数保持在 10% 左右,个别误差达到 16.4%,但也控制在误

差的允许范围内。说明按照笔者建议的砌块墙体数值建模过程是正确可行的,能够很好地模拟砌块墙体在循环荷载作用下的破坏全过程。

表 2 试件 W-4 试验数据与有限元计算结果比较

Tab. 2 Comparison of W-4 experimental data and its finite element results

试件	$F_c$ /kN	$F_u$ /kN	$F_d$ /kN	$\Delta_c$ /mm	$\Delta_u$ /mm	$\Delta_d$ /mm
试件 W-4	153	190	152	0.59	4.50	5.90
模型 1-1	139	216	177	0.65	4.20	6.30
误差/%	9.15	13.68	16.40	10.20	6.70	6.70

### 3 砌块墙体抗震性能水准划分

影响砌块墙体抗震性能的因素复杂多样,选择对砌块墙体抗震性能水准影响最大的 3 个因素建立数值模型,即:轴压比、高宽比、灌芯率。

#### 3.1 建立砌块墙体数值模型

将轴压比划分为 4 个水平:0.1,0.3,0.4,0.6,因为常见砌块结构房屋顶层的轴压比通常在 0.1 以内,而 0.6 为砌体规范规定的上限值<sup>[9]</sup>;对于高宽比,以低砌块墙体为主,以中高砌块墙体为辅进行数值模拟,将高宽比划分为 4 个水平:0.5,0.8,1.0,1.5;对于灌芯率,以规范要求的最小灌芯率 33% 为下限值<sup>[9]</sup>,对灌芯率划分为 4 个水平:33%、60%、80%、100%。

前期建立的墙体模型 1-1 的轴压比约为 0.1,高宽比为 1,灌芯率为 33%,以 1-1 为基础模型,每次仅改变一个参数构建新的模型,并计算出新模型破坏各阶段位移角,列于表 3。

表 3 第一组构造柱-芯柱体系砌块墙体模型参数及数值计算结果

Tab. 3 Model parameters and finite element results of the first group of block walls

模型	轴压比	高宽比	灌芯率/%	初裂位 移角 $\theta_c$	极限位 移角 $\theta_u$	破坏位 移角 $\theta_d$
1-1	0.1	1.0	33	1/2 449	1/375	1/197
1-2	0.3	1.0	33	1/2 449	1/375	1/197
1-3	0.4	1.0	33	1/2 449	1/400	1/218
1-4	0.6	1.0	33	1/2 727	1/462	1/250
1-5	0.1	0.5	33	1/2 069	1/429	1/207
1-6	0.1	0.8	33	1/1 961	1/323	1/189
1-7	0.1	1.5	33	1/1 500	1/237	1/137
1-8	0.1	1.0	60	1/1 579	1/211	1/160
1-9	0.1	1.0	80	1/1 364	1/203	1/150
1-10	0.1	1.0	100	1/1 000	1/187	1/136

各阶段性能水准对应的位移角应当是个具有

较高保证率的安全特征值,位移角的样本数量应当充足和完善.表1所列试验数据来源于诸多学者的论文,论文中墙体试件的诸多参数语言不详,为样本的广泛性埋下了隐患;以1-1为基础模型建立的新模型并不全面,比如:高宽比为0.5,0.8,1.5对应的模型的灌芯率仅有33%,轴压比仅有0.1.

为了使研究样本更具代表性,应建立第二组数值模型,本节对轴压比、高宽比、灌芯率分别划分为3各水平,即轴压比:0.1,0.3,0.6;高宽比:0.5,1,1.5;灌芯率:33%、60%、100%,并选用 $L_9(3)^4$ 进行正交试验,在降低试验成本的同时确保试验精度,并对第二组模型进行求解列于表4.

表4 第二组构造柱-芯柱体系砌块墙体模型参数及数值计算结果

Tab.4 Model parameters and finite element results of the second group of block walls

模型	轴压比	高宽比	灌芯率/%	初裂位移角 $\theta_c$	极限位移角 $\theta_u$	破坏位移角 $\theta_d$
2-1	0.1	0.5	33	1/1 600	1/266	1/157
2-2	0.3	1.0	60	1/1 454	1/308	1/121
2-3	0.6	1.5	100	1/1 101	1/182	1/115
2-4	0.3	0.5	100	1/1 212	1/160	1/140
2-5	0.6	1.0	33	1/1 667	1/276	1/147
2-6	0.1	1.5	60	1/1 231	1/293	1/130
2-7	0.6	0.5	60	1/1 509	1/258	1/145
2-8	0.1	1.0	100	1/1 000	1/239	1/125
2-9	0.3	0.5	33	1/1 600	1/333	1/167

3.2 性能水准划分

表1、表3、表4共同组成了构造柱-芯柱墙体的研究样本,共43例,破坏位移角40例.

对上述3个统计表进行分析,发现初裂位移角主要集中于1/1 700~1/1 300之间;极限位移角主要集中于1/270~1/200之间;破坏位移角主

要集中于1/170~1/120之间.

分析表明,砌块墙体的位移角在分布广泛的同时,都具有一定的集中度,各位移角有可能满足某种概率分布,并可能通过这种概率分布规律求解出其对应的具有一定保证率的置信区间,从而设定该保证率对应的位移角作为墙体各性能水准划分的安全特征值.研究表明,各位移角普遍近似符合正态分布规律.图2绘制了构造柱-芯柱体系砌块墙体的各位移角的频率分布直方图,图中曲线表示为正态分布密度函数曲线.将砌块墙体的统计结果列于表5.

表5 构造柱-芯柱体系砌块墙体各位移角统计结果  
Tab.5 Statistical results of displacement angles of block walls with tie columns and core columns

统计参数	初裂位移角 $\theta_c$	极限位移角 $\theta_u$	破坏位移角 $\theta_d$
平均值	1/1 524	1/233	1/137
标准差	1/5 940	1/838	1/489

各位移角分布近似服从正态分布,以平均值减去1倍标准差能够获得具有84.2%保证率的位移角限值.笔者以此为划分依据,并认为84.2%的保证率是可行的.因为保证率并不适宜过高,保证率越高,其结果必然越保守,并且在建造过程中无疑会造成投入的浪费;另一方面,就砌块墙体本身而言,因其计算结果离散型很大,若采取更高的保证率,其位移角将覆盖更广的范围,使性能水准的定量划分失去意义.

因为砌块墙体破坏过程中,起控制作用的是初裂位移角、极限位移角和破坏位移角3个关键点,以此将抗震性能水准划分为4个阶段<sup>[10]</sup>:充分运行、损伤运行、生命安全、接近倒塌,并在前文试验现象总结的基础上,对各阶段破坏现象进行定性描述,将性能水准的定量划分列于表6.

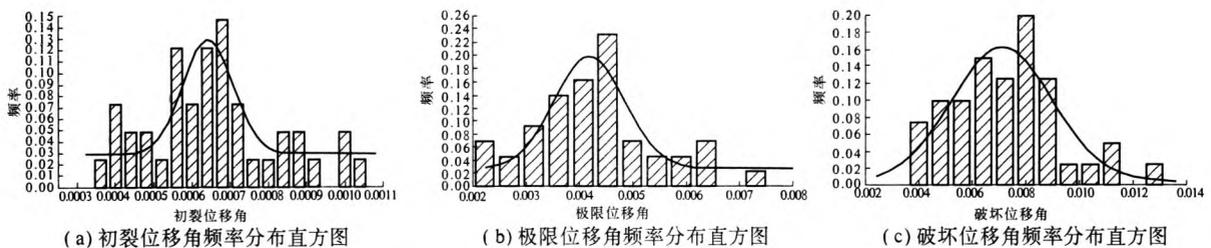


图2 构造柱-芯柱体系砌块墙体位移角频率分布直方图

Fig.2 Frequency distribution histograms of displacement angles of block walls with tie columns and core columns

表6 构造柱-芯柱体系砌块墙体性能水准的定量划分  
Tab.6 Quantitative classification in each performance level of block wall with tie columns and core columns

性能水准	位移角 $[\theta]$
充分运行	$[\theta] < 1/2049$
损伤运行	$1/2049 \leq [\theta] < 1/323$
生命安全	$1/323 \leq [\theta] < 1/191$
接近倒塌	$[\theta] \geq 1/191$

上表中,在充分运行阶段,砌块墙体完好,墙体中部或下部沿灰缝出现细小裂缝,墙体基本处于弹性阶段,几乎无残余变形;在损伤运行阶段,砌块墙体裂缝沿灰缝进一步发展,无芯柱的部位裂缝变多、变宽,有芯柱的部位,芯柱周边砌块被压碎,主裂缝尚未贯通,构造柱和芯柱出现少许裂缝,砌块出现少量脱落;在生命安全阶段,主裂缝(斜向交叉或水平贯通裂缝)贯通,砌块脱落明显,构造柱和芯柱裂缝变大、变多,少量芯柱被剪断,构造柱和芯柱纵筋普遍发生较大变形;在接近倒塌阶段,芯柱多数被剪断,构造柱几乎被剪断砌块脱落严重,接近倒塌状态。

### 3.3 砌块墙体震害分析

目前,关于砌块结构的震害情况调查大多停留在震害现象的分析上,即最常见的震害现象是由于砌体抗剪能力不足造成的斜裂缝或X形裂缝,对于震害的定量划分十分罕见。刘岸雄<sup>[11]</sup>在对汶川地震后都江堰市砌体结构震害进行调查后,根据墙体的最大裂缝宽度可将墙体划分为基本完好、轻微损伤、中等破坏、严重破坏四个等级。基本完好无可见裂缝;轻微破坏:小于1.5 mm;中等破坏:1.5~5.0 mm;严重破坏:5.0 mm以上。这样的研究结论与笔者搜集的构造柱-芯柱体系砌块墙体大量的抗震性能试验的典型破坏现象是接近的,所以笔者所建议的砌块墙体性能水准的宏观描述和定量划分方式是可行的。

## 4 结论

(1) 构造柱-芯柱体系砌块墙体的各阶段位移角的频率分布都近似服从正态分布,以位移角平均值减去1倍标准差的方式,能够得到具有84.2%保证率的各阶段位移角安全特征值。

(2) 根据砌块墙体的破坏特征,砌块墙体的性能水准可以划分为4个阶段:充分运行、损伤运

行、生命安全、接近倒塌。

(3) 砌块墙体各性能水准的宏观破坏特征的描述及定量划分,为震后砌块墙体损伤程度的判定提供参考依据,即:充分运行对应于 $[\theta] < 1/2049$ ;损伤运行对应于 $1/2049 \leq [\theta] < 1/323$ ;生命安全对应于 $1/323 \leq [\theta] < 1/191$ ;接近倒塌对应于 $[\theta] \geq 1/191$ 。研究成果为震后砌块墙体损伤程度的宏观判定提供了帮助,并为实现砌块结构“多级设防”提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 周宏宇.带构造柱混凝土小型空心砌块承重墙抗震性能的试验研究[D].北京:北京工业大学土木工程学院,2004.
- [2] 葛玉琦.蕊柱式构造柱约束墙体抗震性能试验研究[D].重庆:重庆大学土木工程学院,2010.
- [3] 杨德健,高永孚,孙锦鏢.构造柱-芯柱体系混凝土砌块墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2000,21(4):22-27.
- [4] 房良,张敏.约束混凝土小型空心砌块开孔砌体抗震性能的试验研究[J].建筑技术,2005,36(7):516-518.
- [5] 成全喜,杨德健,孙锦鏢.带芯柱混凝土小型空心砌块墙体抗剪承载力试验研究[J].天津城市建设学院学报,2000,6(1):46-49.
- [6] 熊立红,张敏政.设置芯柱-构造柱混凝土砌块墙体抗震剪切承载力计算[J].地震工程与工程振动,2004,24(2):82-87.
- [7] 龚进,周鲁敏.带芯柱的新型砌体结构抗震墙抗侧力试验研究[J].建筑技术,2010,41(5):446-450.
- [8] 熊立红,刁寅午.约束混凝土小型空心砌块墙体抗震性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2010,32(2):616-617.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50003-2011.砌体结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] 中国工程建设标准化协会. CECS160:2004.建筑抗震工程性能设计通则(试用)[S].北京:中国计划出版社,2004.
- [11] 刘岸雄,苗启松,李文峰,等.汶川地震后都江堰市砌体结构震害调查及修复建议[C]//2008年汶川地震建筑震害分析与重建研讨会.北京:中国建筑工业出版社,2008:109-115.

(下转第124页)

- [6] 曾小华, 王庆年. 正向仿真模型与反向软件 ADVISOR 的集成开发[J]. 汽车工程, 2007, 29(10): 851-854.
- [7] 曾小华, 王庆年. 基于 ADVISOR2002 混合动力汽车控制策略模块开发[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 394-396.
- [8] 张翔, 赵韩. 混合动力轿车的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 233-23.

## Powertrain Simulation for Coaxial Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Based on Advisor

QIN Dong-chen, PEI Dong-jie, CHEN Jiang-yi, LIU Zhu-li

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Using the coaxial series-parallel hybrid electric vehicle as the object and on the basis of the power train structure analysis, the operating mode and control strategy are introduced. The basic parameters of power components are calculated and the power train simulation system is established based on the secondary development of Advisor. Then the simulation of the vehicle dynamic performance and fuel economy are completed under the selected urban cycle condition. The result analysis of SOC value change and power unit torque relations verifies the feasibility of the power train and the accuracy of the simulation system, and provides the technical support for the coaxial series-parallel hybrid electric vehicle development.

**Key words:** hybrid electric vehicle; coaxial; series-parallel; simulation; advisor

(上接第 93 页)

## Study of Performance Levels of Concrete Block Walls with Tie Columns and Core Columns Based on Performance-Based Seismic Design

LIU Wei<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, XU Peng<sup>2</sup>, LI Yu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Synthetically Design and Research Academy Co. Ltd., Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** For the implementation of performance based seismic design of block structures with tie columns and core columns, and according to the seismic performance of the experimental and numerical results, four performance (Sufficient operation, Damage operation, Life safety, Near collapse) are divided quantitatively with three displacement angles, i. e. 1/2049, 1/323, 1/191. The results of this research provide help for structure design and the macroscopic decision on damage degree of concrete block walls after earthquake, promote the multi-performance levels seismic design, and have vast importance to the concrete block structures of the performance-based seismic design.

**Key words:** wall with tie columns and core columns; seismic performance level; displacement angle; guarantee rate