

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.020



# 基于剪切破坏的剪力墙构件地震损伤

甘金凤<sup>1</sup>, 陈晓磊<sup>1</sup>, 张彧博<sup>2</sup>, 傅剑平<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 中建三局成都公司 成都 610041)

**摘要:**基于性能的抗震设计特点是使结构抗震设计从宏观定性目标转化为具体量化指标的多重结构性能目标。《建筑抗震设计规范》(GB 50011)给出的是针对整体结构弹性及弹塑性变形的变形指标量,对构件没有量化的损伤指标,为此,进行了 5 片配置 HRB600 级钢筋 T 型截面剪力墙试件的低周反复加载抗震抗剪性能试验,研究配置高强钢筋与普通钢筋剪力墙之间的抗震性能差异;收集剪力墙抗剪试验数据对 Park-Ang 双参数地震损伤模型进行参数修正,得到适用于剪切破坏下剪力墙构件的损伤模型。利用修正的损伤模型来评估发生剪切破坏的剪力墙各个受力阶段的损伤程度,结合剪力墙的变形状态进行损伤评估,给出不同性能状态下与剪力墙构件位移角的量化关系限值。

**关键词:**高强钢筋;剪力墙;抗震设计;剪切破坏;损伤模型

**中图分类号:**TU352.11      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674-4764(2018)04-0142-09

## Shear failure test and seismic damage analysis of shear walls

Gan Jinfeng<sup>1</sup>, Chen Xiaolei<sup>1</sup>, Zhang Yubo<sup>2</sup>, Fu Jianping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area,

Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chengdu Branch, China Construction Third Engineering Bureau, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** The characteristic of performance-based seismic design is that the structural seismic design is transformed from macroscopic goal to specific multiple objectives. At present, the national code 《Building Seismic Design Code》(GB50011) only provides the deformation index of the elastic and elastic-plastic for the whole structure, not for individual components, without quantifying the damage index. Therefore, this paper firstly carried out the reversed cyclic load tests on shear behavior for 5 T-section RC shear walls with HRB600 steel bars, and the aseismic performance differences between high-strength bars and ordinary bars of shear wall was studied. Combined with the experimental results of shear resistance performance worldwide, the modified Park-Ang double-parameter seismic damage model is proposed, which can capture the seismic damage of shear wall under shear failure. The modified damage model can evaluate shear wall's damage degree during different loading phases. Based on the damage assessment of shear wall member, quantization indexes of different performance levels for displacement angles of RC shear wall structure were proposed.

**Keywords:** high-strength bar; shear wall; seismic design; shear failure; damage model

收稿日期:2017-09-23

基金项目:国家自然科学基金(No. 51478063)

作者简介:甘金凤(1993-),女,主要从事钢筋混凝土结构抗震研究,E-mail:798508216@qq.com.

Received:2017-09-23

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51478063)

Author brief:Gan Jinfeng(1993-),main research interest:RC structure,E-mail:798508216@qq.com.

剪力墙是高层结构中的主要抗侧力构件,其变形能力的好坏直接影响结构的整体抗震性能。迄今为止,地震带来的巨大损失促使各国的结构抗震设计从基于宏观抗震设计目标逐步转变为具有多重结构性能目标的抗震设计。损伤指标的选择和性能目标的量化是结构性能抗震设计的主要内容之一,结构损伤程度的量化一定程度上控制了震后的损伤<sup>[1]</sup>。由于中国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011)<sup>[2]</sup>仅给出了结构层次的损伤量化指标,针对构件,仅以文字描述的方式评判其损伤程度,没有量化的损伤指标,这对基于性能的结构抗震设计方法不够全面。而且有研究表明,构件的损伤评判对结构整体抗震性能的评估具有重要意义<sup>[3]</sup>。

到目前为止,许多学者已提出针对构件损伤的计算模型。Park 等<sup>[4]</sup>提出了考虑变形和耗能的双参数地震损伤模型;应勇等<sup>[5]</sup>以理想弹塑性构件恢复力模型为基础,提出了改进的双参数损伤模型;张品乐<sup>[6]</sup>对短肢剪力墙损伤模型考虑了最大塑性变形和累积塑性变形对构件的损伤影响;罗欣等<sup>[7]</sup>采用最大变位处卸载刚度退化和能量耗散系数为损伤破坏参数,提出了适用于高强混凝土剪力墙的双参数地震损伤模型。从研究结果来看,目前已有的剪力墙构件损伤模型主要适用于发生弯曲破坏的剪力墙构件,不适用于发生剪切破坏的剪力墙构件,而剪力墙构件,特别是剪跨比较小的剪力墙发生剪切破坏的可能性较大。因此,有必要对发生剪切破坏剪力墙构件的损伤模型以及损伤程度的评价做进一步的研究。

为此,先进行 5 片配置 HRB600 级高强钢筋 T

形截面剪力墙试件的低周反复加载试验,对高强钢筋剪力墙构件的抗震性能进行评价,再通过收集剪力墙抗剪试验数据,对 Park-Ang 双参数地震损伤模型进行参数修正,基于修正损伤模型给出不同损伤状态下墙肢构件合理的位移角限值。

## 1 低周往复加载试验

### 1.1 试件尺寸及配筋

试验以轴压比、剪跨比、钢筋强度、配筋率等为设计参数,设计 5 片 T 形截面剪力墙试件,其中 4 片为配置 HRB600 级钢筋试件,1 片为按照“等强代换”原则,配置 HRB400 级钢筋试件。试件 HSSW-2、HSSW-5 剪跨比为 1.5,高度为 1 600 mm;试件 HSSW-8、HSSW-11、CSSW-2,剪跨比为 1.0,高度为 1 000 mm,翼缘尺寸均为 600 mm×100 mm(如图 1)。各试件的混凝土强度及具体配筋信息见表 1,钢筋的力学性能见表 2。

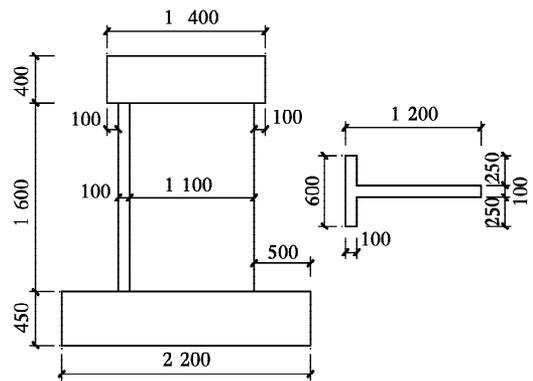


图 1 试件外形尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Details of test specimens

表 1 试件试验设计参数

Table 1 Test parameters of specimens

| 试件名称    | 剪跨比 | 轴压比  | 约束边缘构件配筋                  |               | 墙板分布筋         |               | $f_{cu}/\text{MPa}$ | $E_c/\text{MPa}$ |
|---------|-----|------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|------------------|
|         |     |      | 纵筋                        | 箍筋            | 水平分布筋         | 竖向分布筋         |                     |                  |
| HSSW-2  | 1.5 | 0.20 | 14D8(6D8)                 | D6.5@100      | D6.5@250      | D6.5@250      | 39.3                | 32 436.4         |
| HSSW-5  | 1.5 | 0.20 | 6D16+4D8(6D16)            | D8@100        | D8@250        | D8@250        | 33.1                | 30 785.0         |
| HSSW-8  | 1.0 | 0.20 | 4D14+6D8(4D14+2D8)        | D8@100        | D8@150        | D8@175        | 50.5                | 34 636.5         |
| HSSW-11 | 1.0 | 0.13 | 4D14+6D8(4D14+2D8)        | D8@100        | D8@150        | D8@175        | 32.6                | 30 633.3         |
| CSSW-2  | 1.0 | 0.20 | 10 $\Phi$ 14(6 $\Phi$ 14) | $\Phi$ 10@100 | $\Phi$ 10@150 | $\Phi$ 10@175 | 45.9                | 33 829.6         |

注:目前,规范暂时没有 HRB600 级钢筋的符号,因此,本文暂用符号  $D$  表示 HRB600 级钢筋直径。混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$  为实测值。弹性模量参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)得,  $E_c = 10^5 / (2.2 + 34.7 / f_{cu,k})$ 。

### 1.2 试验方法

试验加载制度全程采用位移加载,每级位移下加载循环两次,加载制度见图 2,试验加载装置见图 3。试验过程中,首先对试件分级施加轴向压力,加

至目标轴力后进行水平加载。加载过程中,如果试件承载力降低到峰值承载力的 85% 以下或承载力尚未降低到峰值承载力的 85% 以下时,试件突然发生破坏,则认为试件失效。此外,为得到更多的试验

后期状态下试件的受力情况,当试件承载力降低至峰值承载力的 40%~50%时停止试验。

表 2 钢筋各项性能参数

Table 2 Various performance parameters of reinforcing bars

| 钢筋类型   | 直径/mm | 弹性模量/MPa  | 屈服强度/MPa | 屈服应变/% |
|--------|-------|-----------|----------|--------|
| HRB600 | 8.0   | 181 891.3 | 638      | 0.55   |
|        | 6.5   | 183 976.1 | 567      | 0.52   |
|        | 14.0  | 201 906.4 | 662      | 0.53   |
|        | 16.0  | 190 015.0 | 622      | 0.53   |
| HRB400 | 10.0  | 205 814.0 | 478      | 0.43   |
|        | 14.0  | 178 246.2 | 497      | 0.48   |

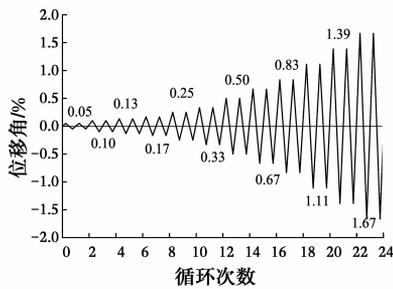


图 2 水平加载制度

Fig. 2 Horizontal loading system

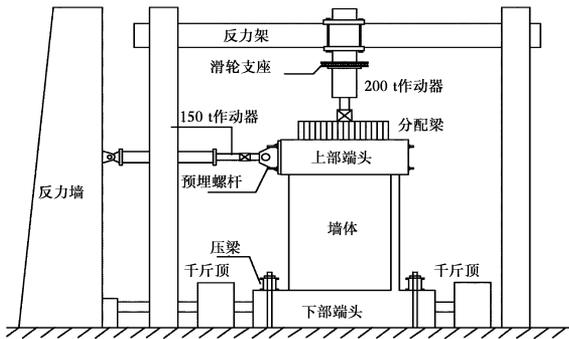


图 3 试验加载装置图

Fig. 3 Test setup

1.3 试验结果及分析

通过低周反复加载试验,可得到 5 片 T 形截面剪力墙试件的滞回曲线,如图 4 所示。试验结果表明:

1)所有试件均发生剪切破坏。加载前期,由于按照“等强代换”,高强钢筋试件的配筋率低,开裂后高强钢筋试件的裂缝更宽。普通钢筋试件前期的承载力和刚度都比高强钢筋试件大,变形恢复能力强,因此,残余变形小于高强钢筋试件。加载后期,随着塑性变形的发展,普通钢筋试件中的钢筋进入屈服较早,试件进入塑性程度更深,对角主斜裂缝宽度发展得更宽,损伤更为严重,因此,残余变形增大。对高强钢筋试件,由于钢筋强度还未充分发挥,其最大

抗剪承载能力略小于普通钢筋试件,但极限变形能力接近。总体看来,高强钢筋试件与普通钢筋试件的抗震性能较为接近。

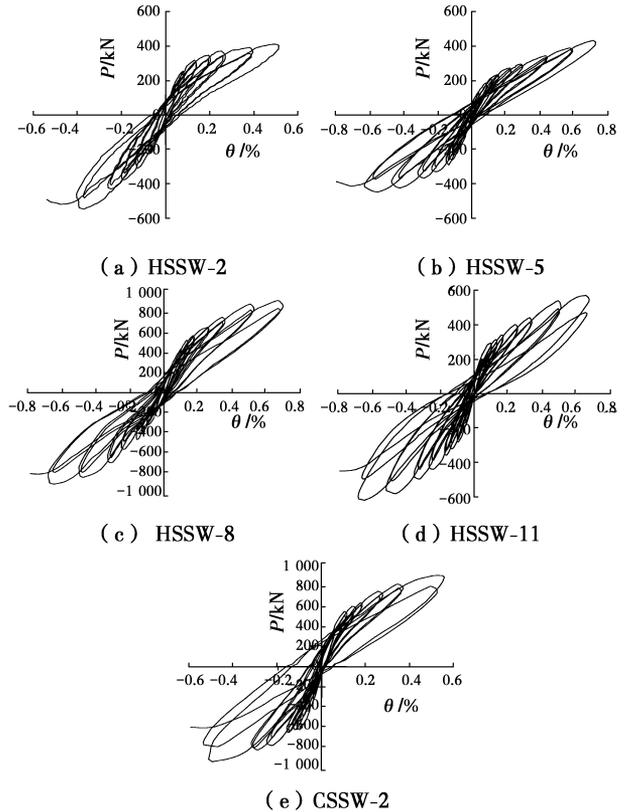


图 4 试件荷载-位移曲线

Fig. 4 The load-displacement curves of specimens

2)配置高强钢筋试件的抗震性能:剪跨比为 1.5 的试件,墙体无翼缘一侧混凝土被压溃,配筋率低的有钢筋屈曲现象,而配筋率高的试件滞回曲线更为饱满,承载力和极限变形能力更大;剪跨比为 1.0 的试件,交叉裂缝比高剪跨比的更为密集,剪切变形更明显。由于轴压比的变化范围不太大,导致承载力、刚度和极限变形比较接近,但高轴压试件的耗能性能略好。

2 损伤模型的修正

评价混凝土构件的损伤,如今被外界公认的且应用最普遍的是 Park-Ang 模型<sup>[4]</sup>,该模型基于大量梁柱破坏试验数据,形成考虑变形和累积耗能的双参数地震损伤模型,见式(1)。

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{Q_y \delta_u} \quad (1)$$

式中: $\delta_m$  为地震作用下构件的最大变形; $\delta_u$  为单调荷载作用下构件的极限变形; $Q_y$  为构件的屈服强度; $\int dE$  为构件的累积滞回耗能; $\beta$  为组合系数,按

式(2)计算。

$$\beta = (-0.447 + 0.073L/d + 0.24n_0 + 0.314\rho_t) \cdot 0.7^{\rho_w} \quad (2)$$

式中: $L/d$ 为剪跨比; $n_0$ 为轴压比; $\rho_t$ 为受拉纵向钢筋配筋率; $\rho_w$ 为体积配箍率。

目前,该模型对于剪力墙的损伤程度判别主要集中在以弯曲破坏的剪力墙构件上,对于剪切破坏研究较少。此外, Park-Ang 模型参数主要是针对梁、柱试验数据拟合而成,不具备通用性,因此,将通过剪力墙抗剪试验数据对其进行参数修正,分别修正单调加载下的极限位移角  $\theta_u$  以及位移项和能量项的组合系数  $\beta$ 。

### 2.1 极限位移角 $\theta_u$ 的确定

Perus 等<sup>[8]</sup>为了能较好地预测剪力墙极限变形能力,收集了 262 片剪力墙试件,得到剪力墙极限位移角的计算式。

$$\theta_u = 0.1027\lambda^{0.92}\rho_h^{0.56}(2\rho_{be})^{-0.05}\rho_{vt}^{0.3}n^{0.09}(f'_c)^{0.85} \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为剪跨比; $\rho_h$ 为墙体水平分布筋配筋率; $\rho_{be}$ 为边缘纵筋配筋率; $\rho_{vt}$ 为整个墙体竖向筋配筋率; $n$ 为轴压比; $f'_c$ 为混凝土圆柱体抗压强度。

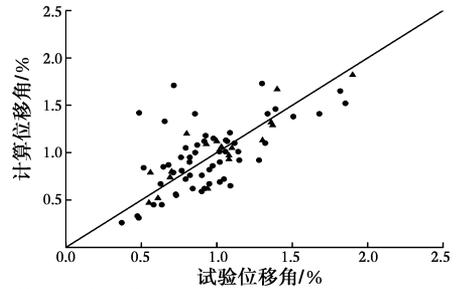
式(3)是基于大量剪力墙试件的试验数据得出的,考虑的因素多,具有一定的参考性。本文根据研究目的,将对其进行修正,具体修正为:1)选取最终剪切破坏的剪力墙试件数据对其进行修正,忽略单调加载和低周往复加载下对试验结果的影响差异;2)考虑零轴压比的情况;3)考虑边缘纵筋强度来进行归一化处理。

共收集了 70 片剪切破坏的剪力墙试验数据,作为后续修正参数的数据库(18 片单调加载试验数据来源于 Gulec 等<sup>[9]</sup>、Mickleborough 等<sup>[10]</sup>;52 片低周往复加载试验数据来源于 Greifenhagen 等<sup>[11]</sup>、Park 等<sup>[12]</sup>、Hidalgo 等<sup>[13]</sup>、Li 等<sup>[14]</sup>、孙仲翰<sup>[15]</sup>、孔慧<sup>[16]</sup>、章红梅<sup>[17]</sup>、李照林<sup>[18]</sup>以及本课题组所做的 15 片剪力墙试件)。

应用统计软件 1stOpt 对各个参数进行多元非线性回归拟合,得到剪切破坏的剪力墙试件的极限位移角计算式。

$$\theta_u = 0.93\lambda^{1.23}\rho_h^{0.2}(2\rho_{be})^{0.21}\rho_{vt}^{-0.3}(1.95 + 3.14n)^{-1.23}\left(\frac{f_{ybe}}{f_c}\right)^{0.5} \quad (4)$$

将收集的剪力墙试件的试验实测极限位移角与采用式(4)计算得到的极限位移角进行对比,如图 5 所示。可以看出,各试件的试验结果与式(4)计算结果整体吻合较好。



注: • 低周往复加载 ▲ 单调加载  
图 5 收集试件的试验极限位移角与计算值对比  
Fig. 5 Comparison of ultimate drift angle between test and calculation

### 2.2 组合系数 $\beta$ 的确定

有研究表明,组合系数  $\beta$  的取值跟轴压比、剪跨比、配筋率、钢筋强度和混凝土强度等因素都有关系,在 Park 等<sup>[2]</sup>的基础上还考虑了钢筋强度的影响,故将  $f_{ybe}/f_c$  的比值作为参数对组合系数  $\beta$  进行修正。根据式(5)试件破坏时对应的损伤指标等于 1 反算系数  $\beta$ ,单调加载下的极限位移角由式(4)计算得出,研究各种因素对组合系数  $\beta$  值的影响,分布趋势如图 6 所示。

$$\beta = \frac{\left(1 - \frac{\delta_m}{\delta_u}\right) \cdot Q_y \delta_{\mu}}{\int dE} \quad (5)$$

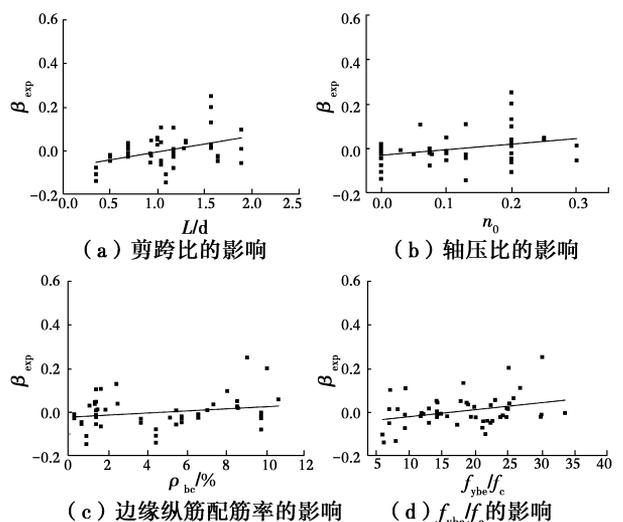


图 6 各参数对系数  $\beta$  的影响  
Fig. 6 The effect of parameters on experimental combination coefficient  $\beta$

根据上述各参数对组合系数  $\beta$  的影响规律可以看出, $\beta$  与剪跨比、轴压比、边缘纵筋配筋率以及参数  $f_{ybe}/f_c$  基本上都呈正比关系,因此,在保持 Park 等<sup>[12]</sup>得出的组合系数  $\beta$  的形式基本不变的情况下,根据组合系数  $\beta$  与各试件相应特征参数的取值进行多元非线性回归分析,得出表达式(6)。

$$\beta = (0.1L/d + 0.12n_0^{0.42} + 0.4\rho_{bc}) \cdot 1.05 \frac{f_{ybc}}{f_c} - 0.13 \quad (6)$$

将式(6)计算的  $\beta$  值与通过试验数据反推的  $\beta$  值进行对比,如图 7 所示,吻合效果较好,该公式为计算剪切破坏的剪力墙构件不同性能状态下的损伤

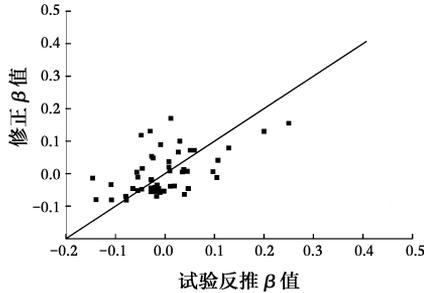


图 7 系数  $\beta$  回归值与试验值比较

Fig. 7 Comparison of regression and experiment value of coefficient  $\beta$ s

指标提供一定参考。

### 2.3 修正损伤模型的验证

从试验结果分析来看,高强钢筋剪力墙与普通钢筋剪力墙的抗震性能基本接近,而且模型修正所采用的试验数据包含不同强度的钢筋,因此,修正的损伤模型均适用于发生剪切破坏的高强钢筋和普通钢筋剪力墙的损伤评估。为验证修正的双参数地震损伤模型的准确性,选取了来自收集文献中的 20 组剪力墙剪切破坏试验数据进行验证,各数据均来自不同的研究者,剪跨比分布范围在 0.69~1.89,试验轴压比范围在 0~0.3,水平分布钢筋配筋率范围在 0.13%~1.05%,属于工程常见的发生剪切破坏的剪力墙,截面形式包括一字型、工字型和带端柱的截面。此外,另外收集了来自其他文献的 6 片剪力墙试件来验证修正的损伤模型,发现修正的损伤模型适用性较好,各试件损伤指数计算结果见表 3。

表 3 各试件损伤指数

Table 3 Damage index of specimens

| 损伤指数 | 本课题组试验              |         |                    |         |                     | Greifenha gen C <sup>[11]</sup> |                     | H G Park <sup>[12]</sup> |                    | PedroA. Hidalgo <sup>[13]</sup> |                     |       | Bing Li <sup>[14]</sup> |       |
|------|---------------------|---------|--------------------|---------|---------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|-------|-------------------------|-------|
|      | HSSW-4              | HSSW-10 | HSSW-5             | HSSW-11 | CSSW-2              | M3                              | M4                  | S4                       | S6                 | 1                               | 8                   | 23    | Lw3                     | Lw4   |
| D1   | 0.034               | 0.071   | 0.033              | 0.062   | 0.09                | 0.156                           | 0.141               | 0.194                    | 0.565              | 0.115                           | 0.111               | 0.075 | 0.055                   | 0.101 |
| D2   | 0.069               | 0.143   | 0.065              | 0.124   | 0.18                | 0.304                           | 0.24                | 0.284                    | 0.723              | 0.229                           | 0.173               | 0.136 | 0.104                   | 0.157 |
| D3   | 0.092               | 0.191   | 0.087              | 0.166   | 0.24                | 0.525                           | 0.339               | 0.432                    | 0.937              | 0.379                           | 0.28                | 0.211 | 0.168                   | 0.283 |
| D4   | 0.115               | 0.238   | 0.109              | 0.207   | 0.301               | 0.803                           | 0.455               | 0.585                    | 1.169              | 0.529                           | 0.475               | 0.294 | 0.262                   | 0.411 |
| D5   | 0.172               | 0.357   | 0.163              | 0.311   | 0.451               | 0.968                           | 0.579               | 0.779                    | 1.251              | 0.659                           | 0.641               | 0.35  | 0.338                   | 0.487 |
| D6   | 0.229               | 0.477   | 0.218              | 0.415   | 0.601               | 1.14                            | 0.694               | 1.138                    |                    | 0.825                           | 0.864               | 0.553 | 0.505                   | 0.651 |
| D7   | 0.344               | 0.715   | 0.326              | 0.622   | 0.924               |                                 | 0.818               |                          |                    | 0.966                           | 1.165               | 0.756 | 0.681                   | 0.976 |
| D8   | 0.459               | 0.953   | 0.468              | 0.816   |                     |                                 | 1.124               |                          |                    |                                 |                     | 0.817 |                         |       |
| D9   | 0.575               | 1.135   |                    |         |                     |                                 | 1.283               |                          |                    |                                 |                     | 0.926 |                         |       |
| D10  | 0.958               |         |                    |         |                     |                                 | 1.463               |                          |                    |                                 |                     |       |                         |       |
| D11  |                     |         |                    |         |                     |                                 |                     |                          |                    |                                 |                     |       |                         |       |
| D12  |                     |         |                    |         |                     |                                 |                     |                          |                    |                                 |                     |       |                         |       |
| D13  |                     |         |                    |         |                     |                                 |                     |                          |                    |                                 |                     |       |                         |       |
| 破坏值  | 0.958               | 1.135   | 0.468              | 0.816   | 0.924               | 1.14                            | 1.463               | 1.138                    | 1.251              | 0.966                           | 1.165               | 0.926 | 0.681                   | 0.976 |
| 损伤指数 | 孙仲翰 <sup>[15]</sup> |         | 孔慧 <sup>[16]</sup> |         | 章红梅 <sup>[17]</sup> |                                 | 李照林 <sup>[18]</sup> |                          | 韦宏 <sup>[19]</sup> |                                 | 吴雁江 <sup>[20]</sup> |       | 孙建超 <sup>[21]</sup>     |       |
|      | SW-7                | SW2-B   | SW4-A              | SW2-1   | HPCSW-3             | HPCSW-4                         | SPW1                | W-1                      | W-2                | SRCW1                           | SRCW5               | SRCW6 |                         |       |
| D1   | 0.191               | 0.184   | 0.16               | 0.048   | 0.199               | 0.343                           | 0.16                | 0.181                    | 0.152              | 0.119                           | 0.106               | 0.109 |                         |       |
| D2   | 0.382               | 0.258   | 0.234              | 0.146   | 0.324               | 0.491                           | 0.287               | 0.497                    | 0.265              | 0.171                           | 0.175               | 0.171 |                         |       |
| D3   | 0.618               | 0.335   | 0.316              | 0.233   | 0.453               | 0.628                           | 0.464               | 0.847                    | 0.531              | 0.225                           | 0.236               | 0.233 |                         |       |
| D4   | 0.776               | 0.406   | 0.454              | 0.32    | 0.679               | 0.955                           | 0.664               | 1.232                    | 0.888              | 0.293                           | 0.315               | 0.296 |                         |       |
| D5   | 0.928               | 0.483   | 0.585              | 0.424   | 0.976               | 1.287                           | 0.879               | 1.507                    |                    | 0.36                            | 0.389               | 0.361 |                         |       |
| D6   |                     | 0.553   | 0.68               | 0.565   |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.459                           | 0.428               | 0.423 |                         |       |
| D7   |                     | 0.62    | 0.779              | 0.73    |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.551                           | 0.571               | 0.505 |                         |       |
| D8   |                     | 0.697   | 0.944              | 0.875   |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.638                           | 0.655               | 0.592 |                         |       |
| D9   |                     | 0.777   | 1.084              | 1.029   |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.766                           | 0.768               | 0.686 |                         |       |
| D10  |                     | 0.921   | 1.236              | 1.204   |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.854                           | 0.844               | 0.828 |                         |       |
| D11  |                     | 1.065   | 1.442              |         |                     |                                 |                     |                          |                    | 0.942                           | 0.943               |       |                         |       |
| D12  |                     | 1.215   | 1.618              |         |                     |                                 |                     |                          |                    | 1.047                           | 1.051               |       |                         |       |
| D13  |                     |         |                    |         |                     |                                 |                     |                          |                    | 1.157                           | 1.152               |       |                         |       |
| 破坏值  | 0.928               | 1.215   | 1.618              | 1.204   | 0.976               | 1.287                           | 0.879               | 1.507                    | 0.888              | 1.157                           | 1.152               | 0.828 |                         |       |

注:表中 D1、D2 分别表示为第 1 级目标位移循环和第 2 级目标位移循环对应的损伤指数,以此类推。

结果表明:随着循环次数的增加,加载位移不断增大,各试件损伤指数增大,说明结构的损伤程度不断加重。除了本文所做的 T 型截面剪力墙损伤指标尚未达到 1 而提前破坏外,其余试件最终破坏时刻损伤指数接近 1,与试验结果比较吻合。差异的原因是由于本次修正模型所采用的试验数据均来自对称试件,而 T 型截面试件正反向受力性能差异较大,造成一字端损伤不断加重,试件较早发生剪切破坏,说明 T 型截面剪力墙在地震作用下的损伤更为严重。

### 3 以构件位移角指标评价不同性能阶段低矮剪力墙

#### 3.1 损伤状态与性能指标的确定

结构的性能水平反映的是结构或构件在某一特定水准地震作用下,达到预期破坏的程度。针对性能水准的划分,目前,各个国家都有自己明确的划分标准。SEAOC Vision 2000 及 FEMA-273 提出以完全运行、运行、生命安全、接近倒塌、倒塌来划分结构的性能;ATC-40 则划分为 4 个等级,即立即居住、损伤控制、生命安全、结构倒塌。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)将结构的性能划分为 5 个等级,基本完好、轻微损坏、中等破坏、严重破坏、倒塌。

上述性能水平的划分标准为对结构或构件的定性描述,并没有实际的量化指标。目前,研究者大多以描述结构和构件受损程度的损伤指标来量化结构或构件的性能水平,现将目前几种被广泛接受的损伤指标限值与性能水平划分汇于表 4。由于本文的损伤模型在 Park-Ang 模型的基础上进行修正,因此,采用 Park-Ang 的损伤划分标准来确定不同性能状态下低矮剪力墙构件的位移角限值。

表 4 损伤指标及其相应的损伤状态  
Table 4 Damage index and its corresponding damaged conditions

| 损伤状态 | Park-Ang  | Ghobarah  | 欧进萍       | 牛荻涛       | 刘伯权       | 胡聿贤       |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 基本完好 | 0~0.10    | 0~0.15    | 0~0.10    | 0~0.20    | 0~0.10    | 0~0.20    |
| 轻微破坏 | 0.10~0.25 | 0~0.15    | 0.10~0.25 | 0.20~0.40 | 0.10~0.30 | 0.20~0.40 |
| 中等破坏 | 0.25~0.40 | 0.15~0.30 | 0.25~0.45 | 0.40~0.65 | 0.30~0.60 | 0.40~0.60 |

续表 4

| 损伤状态 | Park-Ang  | Ghobarah  | 欧进萍       | 牛荻涛       | 刘伯权       | 胡聿贤     |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 严重破坏 | 0.40~1.00 | 0.30~0.80 | 0.45~0.65 | 0.65~0.90 | 0.60~0.85 | 0.8~1.0 |
| 倒塌   | ≥1.00     | ≥0.80     | ≥0.90     | ≥0.90     | ≥0.85     |         |

#### 3.2 不同性能状态下位移角量化

对收集到的剪力墙抗剪试验数据进行整理,利用修正的损伤模型分别计算各个试件在不同加载循环下的损伤值,再根据 Park-Ang 损伤等级的划分标准来统计分析不同受损程度的位移角范围,从而确定各性能水平下低矮剪力墙位移角限值。利用 Minitab 对整个阶段位移角的分布进行检验,拟合过程如图 8 所示。其中,AD 值表示测量数据服从特定分布的程度,AD 值越小,分布与数据拟合越好。最终以 Weibull 分布拟合效果最优,位移角的分布如图 9 所示。

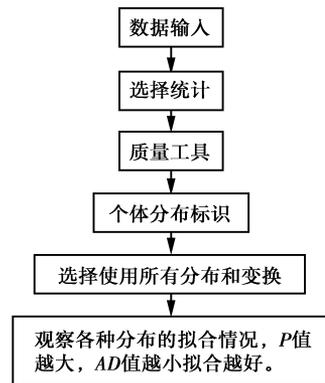


图 8 位移角拟合过程

Fig. 8 Fitting process of displacement angle

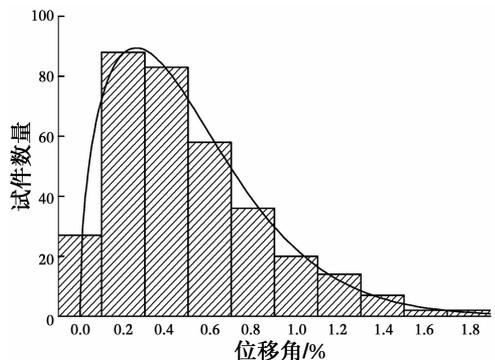


图 9 位移角的分布

Fig. 9 Distribution of displacement angle

由于剪切破坏表现出明显的脆性,延性储备不足,因此,性能指标控制应该更严格。考虑到“基本完好”、“轻微破坏”、“中等破坏”这 3 个阶段的破坏并不严重,不需要太高的保证率,对初步统计的每个

损伤阶段的范围建议以具有 84% 保证率下剪力墙的位移角作为各阶段的损伤评估指标,而对于“严重破坏”、“倒塌”两个阶段,由于处于该范围构件已发生严重破坏,为保证结构的安全,建议取保证率为 90%。按照以上原则,本文定义的发生剪切破坏剪力墙各个损伤阶段位移角的限值分别为:1/2 000、1/800、1/450、1/300、1/150,由此可以得出剪力墙在各个性能阶段的位移角范围,见表 5。各损伤阶段位移角的分布如图 10 所示。

表 5 各个性能水平的位移角界限值

Table 5 The displacement angle limit of each performance level

| 损伤状态 | 位移角 $\theta$  |
|------|---------------|
| 基本完好 | 1/2 000~1/800 |
| 轻微破坏 | 1/800~1/450   |
| 中等破坏 | 1/450~1/300   |
| 严重破坏 | 1/300~1/150   |
| 倒塌   | $\geq 1/150$  |

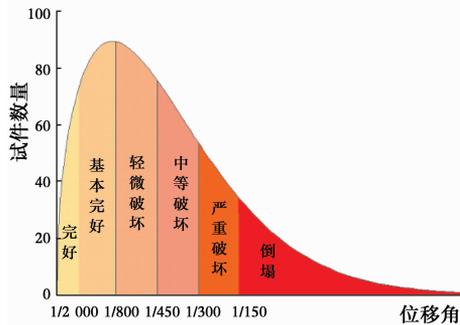


图 10 各损伤阶段位移角的分布

Fig. 10 The distribution of displacement angle at each damage stage

根据所划分的位移角范围,结合试验宏观现象描述来说明剪力墙构件在不同性能阶段的损伤程度如图 11 所示。

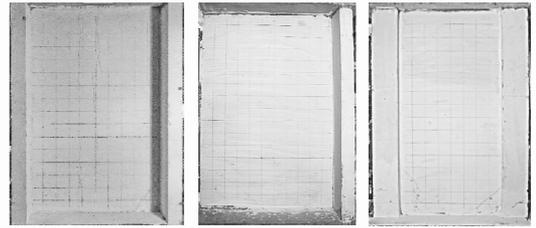
1)基本完好阶段:剪力墙损伤并不明显,只在墙肢底部出现一些不贯通的细小斜裂缝。

2)轻微破坏阶段:剪力墙裂缝不断发展延伸,在墙肢底部形成交叉裂缝,但对角斜裂缝并未贯通,同时,一些局部出现很多细小斜裂缝。

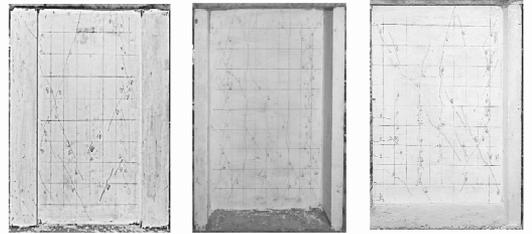
3)中等破坏阶段:墙肢裂缝延伸较长,宽度加大,试件出现贯通的对角斜裂缝,交叉裂缝将整个墙体分为细小的菱形块体。

4)严重破坏阶段:本阶段裂缝已基本发育完全,墙体局部出现混凝土剥落,墙肢端部受压区混凝土被压碎。

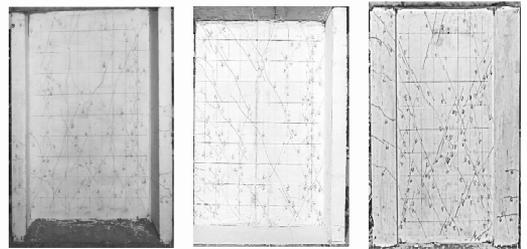
5)倒塌阶段:剪力墙已发生严重破坏,混凝土大面积掉落,墙肢端部被压溃或腹板剪切破坏,已完全丧失承载能力。



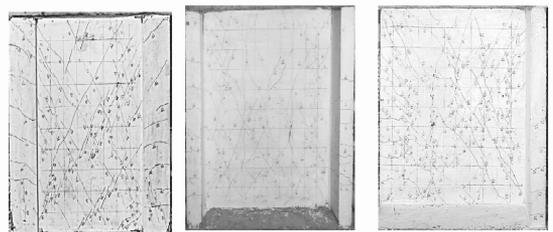
(a) 基本完好阶段试验现象



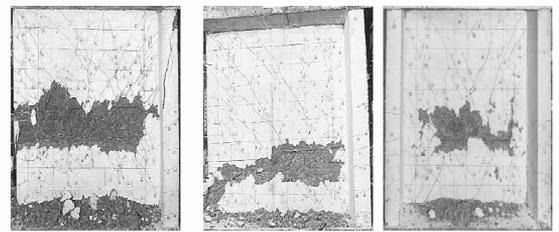
(b) 轻微破坏阶段试验现象



(c) 中等破坏阶段试验现象



(d) 严重破坏阶段试验现象



(e) 倒塌阶段试验现象

图 11 各损伤阶段试验现象

Fig. 11 Experimental phenomena at each damage stage

## 4 结论

1) T形截面剪力墙的低周反复加载试验表明, 高强钢筋剪力墙的承载力略微降低, 但普通钢筋剪力墙进入塑性程度更深, 损伤更为严重, 总体配置高强钢筋与普通钢筋的剪力墙抗震性能差异不大。

2) 对 Park-Ang 双参数地震损伤模型中极限位移角  $\theta_u$  和组合系数  $\beta$  进行了参数修正, 得到了适用于剪切破坏的剪力墙损伤评价模型, 并进行验证, 结果表明修正的损伤模型与试验结果吻合较好, 适用性强。

3) 根据本文修正损伤模型, 给出了剪切破坏的剪力墙在“基本完好”、“轻微破坏”、“中等破坏”、“严重破坏”、“倒塌”5个性能阶段的位移角建议范围, 为剪力墙基于性能的抗震设计提供一定的参考。

### 参考文献:

[1] 李来军. 结构抗震设计中基于性能的设计理论和方法[J]. 建材世界, 2015(4): 80-82.  
LI L J. Performance-based seismic design method on structural seismic design [J]. The World of Building Materials, 2015(4): 80-82. (in Chinese)

[2] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[3] 沈雪龙. 基于构件变形的剪力墙结构抗震性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
SHEN X L. Research on the seismic performance of shear wall structures on the basis of member deformation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)

[4] PARK Y J, ANG H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(4): 722-739.

[5] 应勇, 蒋欢军, 王斌, 等. 钢筋混凝土剪力墙构件双参数地震损伤模型研究[J]. 结构工程师, 2010(5): 61-65.  
YING Y, JIANG H J, WANG B, et al. Study on seismic damage model with double variables for reinforced concrete shear walls [J]. Structural Engineers, 2010(5): 61-65. (in Chinese)

[6] 张品乐. 短肢剪力墙抗震性能试验研究及损伤分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.  
ZHANG P L. Experimental research and damage analysis of seismic performance of the short-leg shear wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and

Technology, 2009. (in Chinese)

[7] 罗欣, 梁兴文, 邓明科. 高强混凝土剪力墙地震损伤模型分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 145-151.  
LUO X, LIANG X W, DENG M K. Analysis of seismic damage model for high strength concrete shear wall [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(4): 145-151. (in Chinese)

[8] PERUŠ I, FAJFAR P, GRABEC I. Prediction of the seismic capacity of RC structural walls by non-parametric multidimensional regression [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(10): 1139-1155.

[9] GULEC K. Performance-based assessment and design of squat reinforced concrete shear walls [D]. State University of New York at Buffalo, 2009.

[10] MICKLEBOROUGH N C, NING F, CHAN C M. Prediction of stiffness of reinforced concrete shearwalls under service loads [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(6): 1018-1026.

[11] GREIFENHAGEN C, LESTUZZI P. Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls [J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1703-1712.

[12] PARK H G, BAEK J W, LEE J H, et al. Cyclic loading tests for shear strength of low-rise reinforced concrete walls with grade 550 MPa bars [J]. ACI Structural Journal, 2015, 112(3): 299-310.

[13] HIDALGO P A, LEDEZMA C A, JORDAN R M. Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls [J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(2): 287-308.

[14] LI B, PAN Z, XIANG W. Experimental evaluation of seismic performance of squat RC structural walls with limited ductility reinforcing details [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(2): 313-331.

[15] 孙仲翰. 配有高延性冷轧带肋钢筋焊接网一字型截面剪力墙抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
SUN Z H. Study on seismic behavior of straight shear walls with ductile cold-rolled ribbed welded steel fabric [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

[16] 孔慧. 配筋率对混凝土剪力墙结构性能影响的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.  
KONG H. Experimental research on the influence of the structural behaviors of the RC shear walls with different reinforcement ratio [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2010. (in Chinese)

[17] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
ZHANG H M. Study on performance-based seismic

- design method for shear wall structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [18] 李照林. 高配筋率边缘约束构件高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
LI Z L. Experiment study on seismic behavior of high performance concrete shear wall with high reinforcement ratio boundary elements [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 韦宏, 龚正为, 方小丹, 等. 一字形短肢剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010(3): 71-74.  
WEI H, GONG Z W, FANG X D, et al. Experimental research on seismic performance of short-pier shear wall structure with rectangular section [J]. Building Structure, 2010(3): 71-74. (in Chinese)
- [20] 吴雁江. 工字型截面钢筋混凝土剪力墙抗震抗剪性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.  
WU Y J. Research on seismic shear capacity of I-shape reinforced concrete structural walls [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [21] 孙建超, 徐培福, 肖从真, 等. 不同配筋形式混凝土剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008(6): 6-10.  
SUN J C, XU P F, XIAO C Z, et al. Experimental study on shear behavior of concrete wall with different types of reinforcement [J]. Building Structure, 2008(6): 6-10. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)