

文章编号:1673-2049(2007)04-0012-09

# 钢筋混凝土短肢剪力墙结构试验

李 杰, 李奎明

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**为了从试验角度研究混凝土随机性对结构反应的影响,以4片相同的4层1:3比例缩尺模型的短肢剪力墙结构为研究对象,进行了拟静力试验研究,得到了荷载-位移曲线、混凝土和钢筋的应变曲线及墙体局部相对位移曲线。从水平承载力、侧向刚度、位移延性3个方面对比分析了各片墙体的反应,并对4片墙体的实测数据进行了统计分析,给出了不同顶点位移下的3个典型横截面受力状态的变化过程,最后研究了各试件在破坏特征上的差异性。研究结果表明:混凝土材料随机性的本质特征,使得混凝土结构在非线性发展阶段具有明显的损伤随机演化特性,因此,混凝土非线性与随机性的耦合效应对结构反应所造成的影响不可忽视。

**关键词:**混凝土;非线性;随机性;短肢剪力墙;重分布

**中图分类号:**TU398.2

**文献标志码:**A

## Experiment on RC Short-leg Shear Wall Structure

LI Jie, LI Kui-ming

(Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to investigate how randomness of concrete had effects on structural responses by means of experiments, authors carried out a pseudo static experiment on the same four-story 1:3 scaled model of short-leg shear wall structure. Load and displacement curves, strain curves of reinforced concrete and partial relative displacement curves were obtained. Moreover, the horizontal bearing capacity, lateral stiffness, as well as displacement and ductility were discussed, and measured data of four walls were analyzed, then, redistributed processes of inner forces behaviors were given in three typical cross-sections under different vertex displacements. Finally, the failure characteristics of different specimens were contrasted. The results show that the structural nonlinear damage stochastic evolution is formed due to concrete material stochastic characteristic. So coupling effect of concrete non-linearity and randomness has notable influence on structural responses.

**Key words:** concrete; nonlinear; randomness; short-leg shear wall; redistribution

## 0 引言

混凝土是一种由水泥、粗骨料、细骨料及各种外加掺和料混合在一起,并在水的作用下发生一定化学反应集结而成的多相复合材料。它的各组分分布

不均匀,浇筑成型后内部又存在很多初始微孔洞和微裂缝,这使得同批同配比的混凝土试件破坏形态迥然不同。事实上,实测混凝土的弹性模量、强度物理参数以及本构关系都存在着较大的离散性<sup>[1-2]</sup>,因此,结构非线性行为的演化不是一个确定性的过程,

收稿日期:2007-11-03

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062);“十五”国家科技攻关项目(2002BA806B05)

作者简介:李 杰(1957-),男,河南沈丘人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:lijie@mail.tongji.edu.cn。

而是一个随机过程,回避这一点,就无法全面把握混凝土结构的非线性行为。

在混凝土随机性与非线性的相互作用下,混凝土结构反应具有损伤随机演化的特性<sup>[3]</sup>,这必然导致混凝土结构内力发生随机重分布现象<sup>[4]</sup>。只有考虑二者的耦合,才能真正把握结构的反应行为,进而实现结构精细化设计与性能控制。短肢剪力墙是指墙肢截面肢厚比在5~8之间的一种剪力墙结构,是吸取了框架和剪力墙结构的双重优点而发展起来的一种新型结构形式<sup>[5-6]</sup>。由于短肢剪力墙灵活的布置和相对经济的特点,已在中国高层住宅中获得了广泛的应用。本文中笔者以短肢剪力墙结构为研究对象,设计了4片相同的短肢剪力墙结构,并进行了拟静力试验研究,其目的在于考察分析混凝土材料非线性与随机性对结构受力行为的影响。

## 1 模型设计

针对同批混凝土棱柱试件的破坏(图1)进行了试验研究。为了较好地完成试验,在材料配比、结构设计、模型施工、试验设备以及加载制度等方面都进行了严格控制。

试验设计了4片1:3比例缩尺的4层短肢剪力

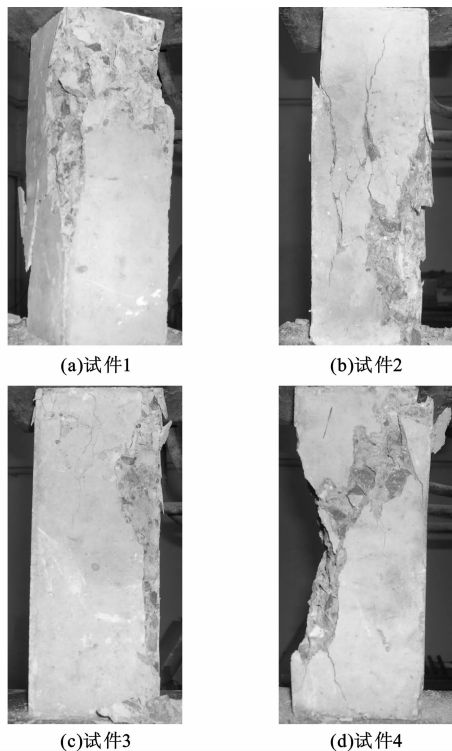
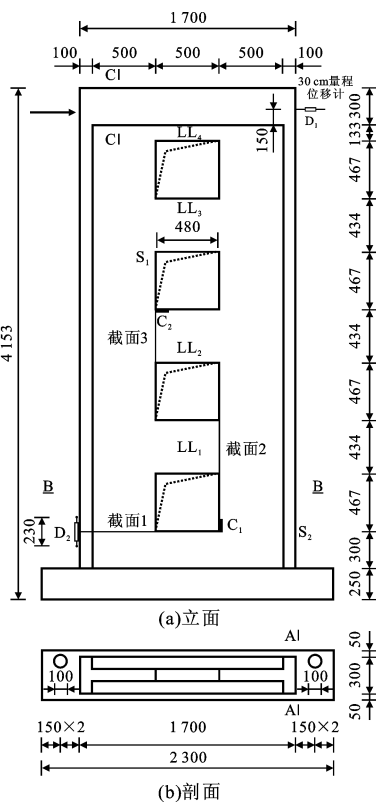


图1 相同配比的棱柱体受压破坏特征

Fig. 1 Compressive Failure Characteristics of Prisms with Same Mixture Ratio

墙结构。墙肢肢厚比为6,整个墙体厚为100 mm,高为3 603 mm,宽为1 700 mm;连梁长500 mm,高为434 mm;洞口高为467 mm,试件的结构形式与尺寸见图2。

在墙肢竖直方向上布置了双层 $\Phi 6@133$ 的分布钢筋,在水平方向布置了双层 $\Phi 6@150$ 的分布钢筋;墙肢翼缘布置了10 $\Phi 8$ 纵向钢筋, $\Phi 4@50$ 箍筋;洞口暗柱布置了4 $\Phi 6$ 纵向钢筋, $\Phi 4@50$ 箍筋;连梁布置了4 $\Phi 8$ 纵向钢筋, $\Phi 4@30$ 箍筋,墙体结构配筋见图3。



洞口右下角,  $C_2$  位于连梁  $LL_2$  左上角; 钢筋应变片  $S_1$  位于  $LL_3$  连梁左下角底部纵筋上,  $S_2$  位于受压墙肢翼缘下部纵筋上。考虑到受拉区应变片容易损坏, 在受拉墙肢下部的翼缘外侧布置了位移计  $D_2$ , 用于测量局部相对位移, 这样可以测量到较长的一段反应过程, 在一定程度上弥补了应变片损坏的不足。为了得到截面在不同荷载下的受力状态, 在受拉墙肢下部截面, 沿水平方向均匀布置 5 片应变片, 连梁  $LL_1$  右端部和  $LL_2$  左端部分别沿高度方向均匀布置 2 片应变片。应变片、位移计和 3 个截面的位置如图 2 所示。

试验设备采用同济大学建筑工程系实验室 10 000 kN 大型多功能结构试验机系统。该系统主机采用双门式框架结构, 10 000 kN 垂向加载油缸通过直线导轨与横梁连接, 1 500、3 000 kN 水平加载油缸通过直线导轨与一侧立柱连接, 以上 3 个加载缸均有独立的主动伺服跟动系统, 既可在加载过程中实现主动跟动, 也可在固定位置加载。图 4 为大型多功能结构试验机系统。

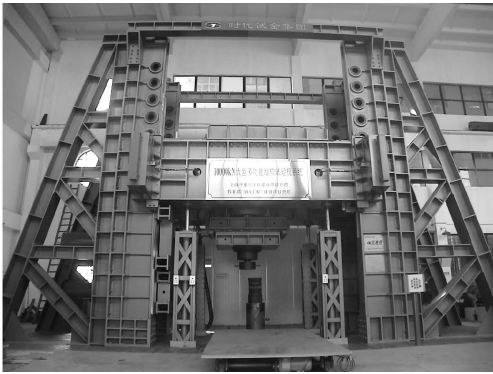


图 4 大型多功能结构试验机系统

Fig. 4 Large-scale Multifunction Structure Testing Machine System

4 片短肢剪力墙均采用普通混凝土浇筑, 并对所有墙体的混凝土进行严格控制和施工。首先是混凝土配合比完全相同, 水、水泥、中砂、碎石的配合比为 190 : 368 : 606 : 1 000, 水灰比为 0.516, 砂率为 0.377, 所使用的材料均为同批次的配料, 且混凝土的搅拌设备与搅拌时间相同。同时, 为了消除由于人员不同所造成的影响, 施工人员也保持相同。墙体和预留试块在实验室中进行了同条件养护, 养护时间均为 80 d, 养护平均温度为 29 ℃。钢筋分别采用同批次的  $\Phi 4$  铁丝及  $\Phi 6$ 、 $\Phi 8$  的一级钢筋。

材性试验中混凝土分别进行了 24 组 100 mm × 100 mm × 300 mm 非标准棱柱体试件的混凝土轴心抗压强度试验, 24 组 150 mm × 150 mm × 150 mm

标准立方体试件的混凝土劈裂抗拉强度试验和 12 组静力受压弹性模量试验。对绑扎用钢筋分别进行了  $\Phi 4$ 、 $\Phi 6$ 、 $\Phi 8$  的 12 组钢筋拉伸试验。试验测得的混凝土和钢筋的力学性能指标见表 1、2。

表 1 混凝土力学性能指标

Tab. 1 Indexes of Mechanical Properties of Concrete

指 标	抗压强度	弹性模量	劈拉强度
均值/MPa	34.95	38 030.00	3.840 00
标准差/MPa	5.57	1 490.25	0.356 38
变异系数/%	15.94	3.92	9.28

表 2 钢筋力学性能指标

Tab. 2 Indexes of Mechanical Properties of Rebar

指 标	$\Phi 4$	$\Phi 6$	$\Phi 8$
弹性模量/MPa	199 516.67	240 890.00	206 221.67
屈服强度/MPa	351.50	465.83	324.00

为了考察结构混凝土与试件混凝土的一致性, 笔者根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2001), 对试验时的墙体进行了 640 组回弹试验, 其统计结果为: 均值 34.39 MPa, 标准差 8.35 MPa, 变异系数 24.28%。由此可见, 结构混凝土强度与试件混凝土强度均值相同, 结构混凝土变异性稍大, 应与回弹试验技术有关。

由表 2 可知, 各钢筋的力学性能指标均很稳定, 因此, 在加载制度一致的条件下, 结构反应的随机性主要来源于混凝土本身。

2 试验分析

2.1 曲线分析

2.1.1 荷载-位移曲线

在宏观层次上, 试验获得了整个过程的顶部荷载-位移曲线, 水平位移全部达到 190 mm, 试验与统计结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 达到极限强度后, 承载力下降缓慢, 这类墙体的延性很好。在统计结果中, 标准差的变化平缓, 在相同水平位移下, 墙体的水平承载力变异系数为 5% 左右。然而, 在相同承载力下, 各片墙体的水平位移差异很大, 最大变异系数达到 25%。通常的结构设计, 都是在给定外荷载下进行配筋来满足一定的承载力, 将顶点位移作为验算条件, 由于在结构承载力一定的情况下, 顶点位移具有较大的变异性, 因此, 用顶点位移对结构设计进行校核时应考虑材料变异性的影响。

2.1.2 承载力

试验过程中, 以底部受拉侧钢筋屈服作为判定

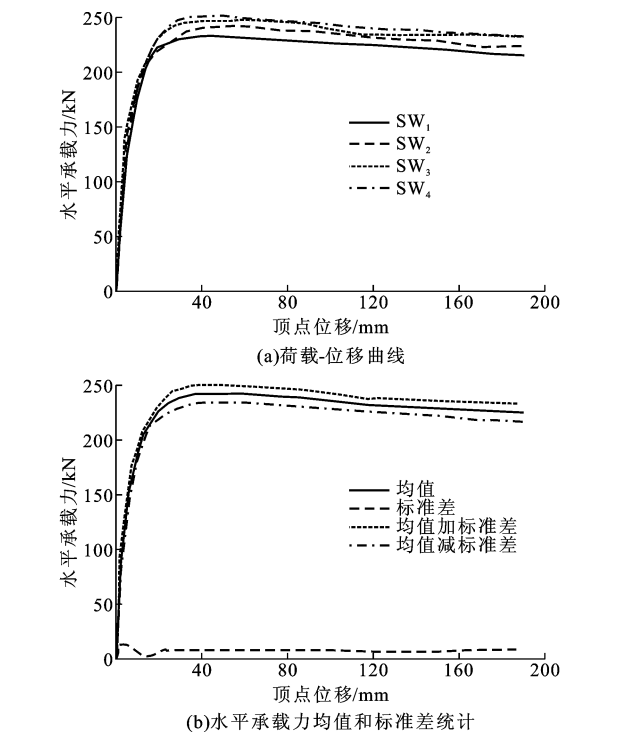


图 5 荷载-位移曲线与统计结果

Fig. 5 Load and Displacement Curves and Statistical Results

屈服的依据,各试件屈服强度为  $F_y$ , 极限荷载为  $F_u$ 。各试件承载力的实测值见表 3。由表 3 可见,屈服荷载的变异性较大,而极限荷载的变异性较小。

表 3 试件承载力实测值

Tab. 3 Measured Values of Bearing Capacity of Specimens		
试件编号	$F_y/\text{kN}$	$F_u/\text{kN}$
SW <sub>1</sub>	208.76	232.64
SW <sub>2</sub>	227.07	242.55
SW <sub>3</sub>	237.78	247.61
SW <sub>4</sub>	247.88	251.17
均值	230.37	243.49
标准差	16.73	8.05
变异系数/%	7.26	3.31

### 2.1.3 刚 度

以结构的结构屈服、极限荷载、破坏点为对象,对这些重要特征点处的刚度进行了对比分析。表 4 为各试件不同反应阶段刚度的试验分析结果。从表 4 可知,结构的初始刚度变异性较小,结构进入非线性状态后,各特征点的刚度及刚度衰减的变异性显著增大,这表明混凝土非线性增强了结构刚度的随机性。进一步观察实测数据,发现结构在由屈服、极限承载力直至破坏的过程中,随着非线性的不断增大,刚度和刚度衰减的变异性不是一直增大,而是先增大而后减小,这种宏观刚度变异性特征涨落现象

表 4 试件不同反应阶段的刚度变化

Tab. 4 Stiffness Changes of Specimens in Different Stages

试件 编号	$K_0/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_y/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_u/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_d/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$D_{y0}/\%$	$D_{u0}/\%$	$D_{d0}/\%$
SW <sub>1</sub>	25.29	9.96	5.97	1.51	39.38	23.61	5.97
SW <sub>2</sub>	28.68	8.91	4.15	1.97	31.07	14.47	6.87
SW <sub>3</sub>	25.36	11.78	4.26	2.09	46.45	16.80	8.24
SW <sub>4</sub>	26.79	9.11	5.73	1.75	34.01	21.39	6.53
均值	26.53	9.94	5.03	1.83	37.73	19.07	6.90
标准差	1.59	1.31	0.96	0.26	6.73	4.18	0.97
变异系 数/%	5.99	13.18	19.1	14.21	17.84	21.92	14.06

注: $K_0$  为初始刚度; $K_y$  为屈服刚度; $K_u$  为达到极限荷载时刚度; $K_d$  为破坏点刚度; $D_{y0}$ 、 $D_{u0}$ 、 $D_{d0}$  分别为各刚度占初始刚度  $K_0$  的百分比,用以表示刚度衰减情况。

的出现,说明混凝土非线性与结构刚度的随机性之间存在着复杂的相互作用。

### 2.1.4 延 性

表 5 为试验结构具体的位移延性值,其中,延性指标的变异系数高达 18.77%,因此,通常的确定性延性结果不能全面描述结构真实的延性情况。

表 5 结构延性比较

Tab. 5 Ductility Comparison of Structure

试件编号	$U_y/\text{mm}$	$U_u/\text{mm}$	$U_u \cdot U_y^{-1}$
SW <sub>1</sub>	20.96	146.15	6.97
SW <sub>2</sub>	25.48	116.92	4.59
SW <sub>3</sub>	20.18	112.45	5.57
SW <sub>4</sub>	27.20	136.41	5.02
均值	23.46	127.98	5.54
标准差	3.42	15.97	1.04
变异系数/%	14.58	12.48	18.77

注: $U_y$  为结构屈服时的位移; $U_u$  为结构破坏时的位移。

从表 4、5 可知:

(1) 结构承载力的变异性不大,但在承载力相同的情况下,顶点位移的变异性较大,这直接导致了结构位移延性的较大变异性。

(2) 结构进入非线性以后,混凝土材料随机性对结构反应的影响变得明显,结构刚度的随机性明显被放大。

(3) 结构刚度指标的变异性不单单随着非线性的增大而增大,而是出现了变异性特征涨落的现象。

## 2.2 应变重分布

本文中从混凝土拉压应变、钢筋拉压应变、局部相对位移以及截面受力特征来分析试验结果。

### 2.2.1 混凝土应变

(1) 混凝土受拉

图 2 中的 C<sub>1</sub> 位置为典型的墙肢受拉部位,其试

验结果如图 6 所示。其中,正应变表示受拉,负应变表示受压,所有应变值均为微应变。由图 6 可知,不同试件的应变反应具有显著的随机性。随着结构反应的不断加大, $C_1$  应变均值和标准差都在逐渐增大,然而标准差增加的速率小于均值增加的速率。从变异系数上看,顶点位移在 4.5 mm 以前,由于应变值本身较小,变异系数意义不大;顶点位移在 4.5 mm 以后,随着非线性的不断增大,变异系数从 68% 逐渐减小至 20%。

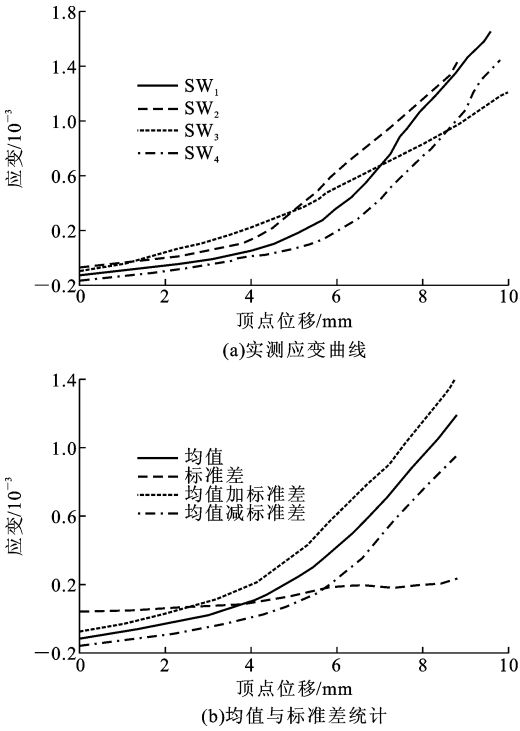


图 6  $C_1$  实测应变与统计结果

Fig. 6 Measured Strains and Statistical Results of  $C_1$

(2)混凝土受压

图 2 中的  $C_2$  为连梁受压部位,图 7 为其应变的实测和统计结果。由图 7 可以看出,在混凝土受力超过线弹性阶段后,应变反应离散型显著增加。随着顶点位移的增大,混凝土受压应变增大的同时应变标准差曲线也逐渐上升。随着非线性的逐渐增大,变异系数从 5% 逐渐增大至 15%,然后又平稳减小至 12%。

2.2.2 钢筋应变

(1)钢筋受拉

连梁受拉纵筋  $S_1$  的试验结果如图 8 所示。从图 8 可见,纵筋  $S_1$  应变曲线都是随着顶点位移的增加而增大,变化趋势较为曲折。 $S_1$  均值和标准差均随着顶点位移的增加而增大,标准差后期增长速度小于均值的增长速度。变异系数从 75% 下降至

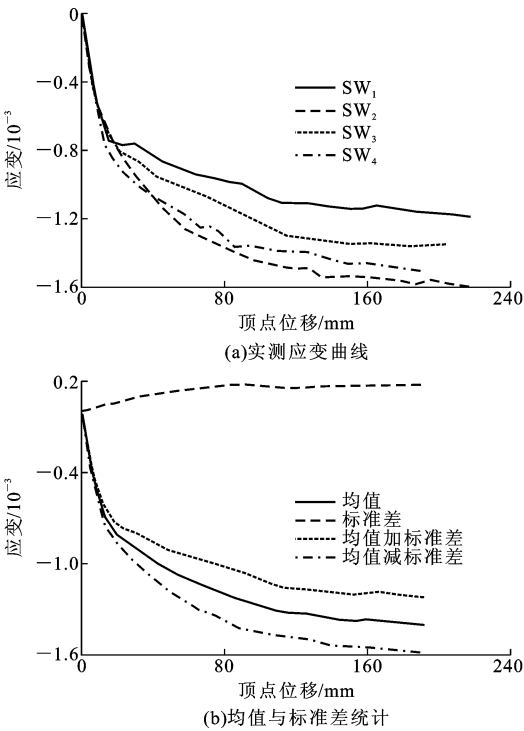


图 7  $C_2$  实测应变与统计结果

Fig. 7 Measured Strains and Statistical Results of  $C_2$

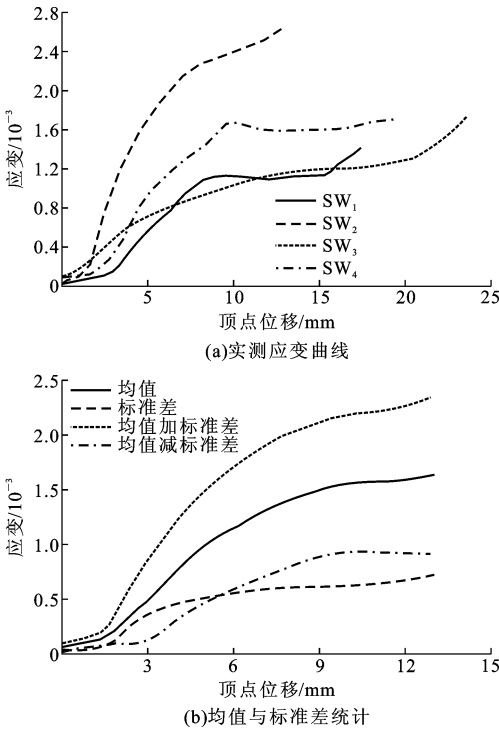


图 8  $S_1$  实测应变与统计结果

Fig. 8 Measured Strains and Statistical Results of  $S_1$

40% 以后,接着又小幅度上升至 45%。

(2)钢筋受压

受压墙肢翼缘下部纵筋  $S_2$  为受压钢筋, $S_2$  实测应变与统计结果如图 9 所示。随着顶点位移的增

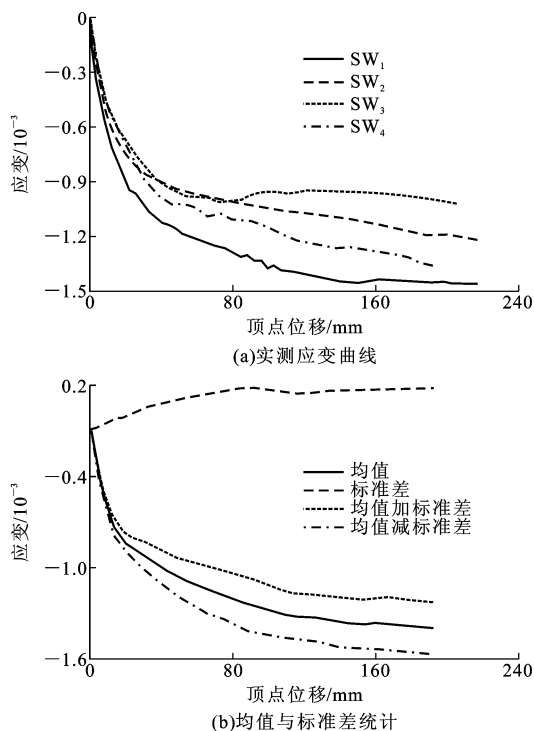


图 9 S<sub>2</sub> 实测应变与统计结果

Fig. 9 Measured Strains and Statistical Results of S<sub>2</sub>

大,钢筋受压程度也明显越来越大,标准差缓慢地增大,变异系数由 12% 减小至 9%,然后又逐渐增大至 18%。

### 2.2.3 局部相对位移

图 2 所示的位移计 D<sub>2</sub> 用来测量两点之间的相对位移。采用 50 mm 量程的位移计,两个固定端之间的标距为 230 mm,和应变片不同的是,D<sub>2</sub> 可以获得较长的一段试验结果(图 10)。由图 10 可见,在经历短暂的线弹性阶段后,相对位移开始表现出显著离散型。均值和标准差随着顶点位移的增大而增大,在顶点位移为 50 mm 以后的稳定发展阶段,随着顶点位移的不断增大(非线性逐渐增大),局部相对位移的变异系数由 35% 逐渐减小至 15%。

通过对混凝土和钢筋应变、局部相对位移的分析,可以得出以下 4 点结论:

(1) 钢筋是一种均质材料,其本身的离散型可以忽略不计,因此,钢筋试验结果的随机性主要来源于混凝土。

(2) 由于材料受随机损伤的影响,结构混凝土细观表现出显著的变异性,实测混凝土和钢筋受拉应变的变异性稍大于受压应变的变异性。

(3) 整个结构或结构的某区域进入非线性以后,结构行为变异性较弹性阶段显著增大,但在整个非线性反应过程中,局部相对位移和应变的变异性并

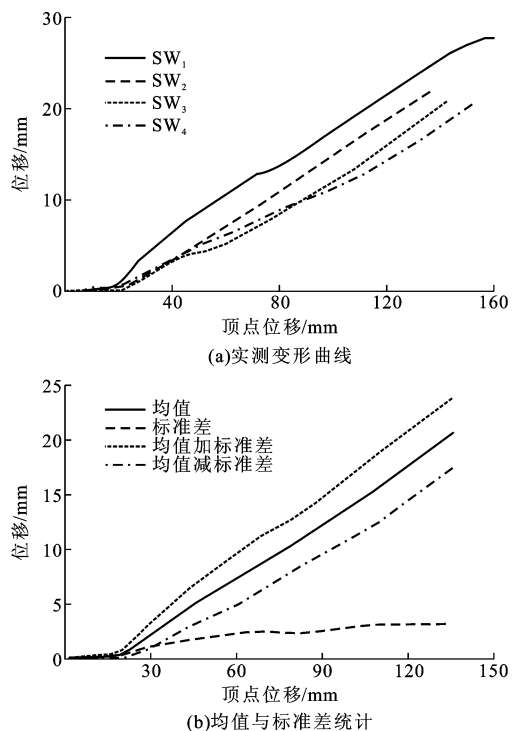


图 10 D<sub>2</sub> 实测变形与统计结果

Fig. 10 Measured Distortions and Statistical Results of D<sub>2</sub>

不完全随着非线性的增大而变大,而是出现了增大或减小的随机涨落现象。

(4) 从试验结果可以发现,按照水平承载力、受压应变、局部相对位移、受拉应变的顺序,变异性逐渐增大,由此可见,结构在不同层次和不同的受力状态下反应的变异性不尽相同。

根据钢筋混凝土本构关系,由应变可以求得应力,再经过积分运算可以得到截面的内力,因此,应变的随机演化必然会使内力随机重分布。

### 2.2.4 截面受力特征

图 11、12 分别为 3 个典型截面在不同顶点位移下的实测应变分布。需要说明的是,这里给出的是试验中应变片损坏前一段时间内的应变信息。

#### (1) 截面 1

如图 2 所示,截面 1 位于受拉墙肢底部,与底部洞口下边缘在同一水平线。图 11 为 4 片墙体在不同顶点位移下的整个截面应变分布状态,其中,“+”表示受拉应变,“-”表示受压应变。在这个变化过程中,可以清晰地看出,随着顶点位移的不断增大,截面的拉压应变也在不断增大,中和轴明显地从左向右移动,符合非线性变形的一般规律。但值得注意的是,4 个截面的应变分布具有明显的变异性,这将导致各截面轴力、弯矩的变异性。

根据文献[7]、[8]中的一维全曲线本构关系,同

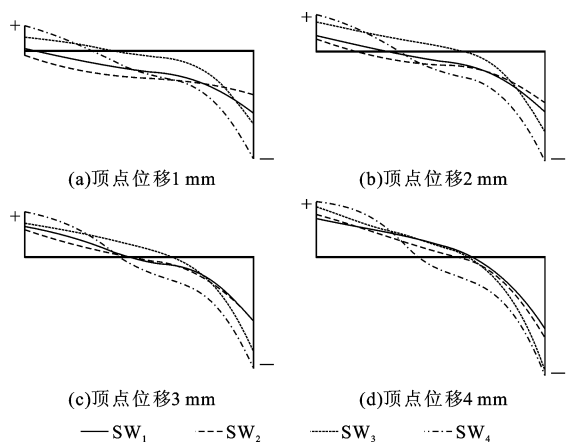


图 11 截面 1 应变重分布

Fig. 11 Strain Redistribution of Cross-section 1

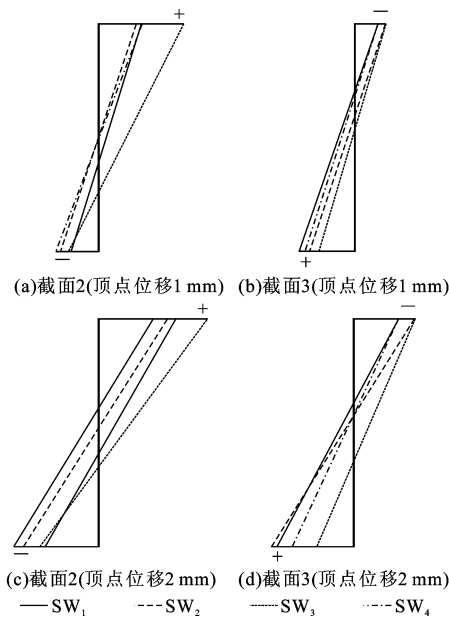


图 12 截面 2、截面 3 应变重分布

Fig. 12 Strain Redistribution of Cross-section 2 and 3

时叠加钢筋计算结果,对图 11 中的截面应变进行了近似的应力计算,积分得到了截面的轴力和弯矩,并最终给出了截面 1 的内力,如表 6 所示。

定义轴向受压为正,弯矩逆时针为正。从表 6 可见,截面 1 在不同顶点的水平位移下,轴力和弯矩均具有较大的变异性,变异系数为 31%~38%。这表明混凝土物理参数的随机性对截面内力影响显著。这与文献[4]中关于混凝土框架的静力随机模拟结果较为相近。

(2)截面 2、截面 3

截面 2 为连梁 LL<sub>1</sub> 的左端部截面,截面 3 为连梁 LL<sub>2</sub> 的右端部截面,两者具有一定的代表性,具体位置如图 2 所示。图 12 为顶点位移在 1、2 mm 时实测截面 2、截面 3 的应变分布。从图 12 可见,无

表 6 截面 1 内力统计

Tab. 6 Statistical Inner Forces of Cross-section 1

顶点位移/mm	1	2	3	4
轴力均值/kN	140.6	97.0	90.4	91.7
轴力标准差/kN	45.2	37.0	34.1	34.8
轴力变异系数/%	32	38	38	38
弯矩均值/(kN·m)	25.1	24.8	25.1	26.5
弯矩标准差/(kN·m)	9.3	8.5	8.0	8.3
弯矩变异系数/%	37	34	32	31

论是应变大小还是中和轴位置,均存在较大的差异性,因此,截面内力必然也有较大的不同,这进一步说明了截面内力具有随机重分布的特征。

按照截面 1 内力计算的方法,根据图 12 的应变截面分布,同样得到了截面 2、截面 3 的近似截面内力统计结果。从表 7、8 可见,截面 2、截面 3 的内力变异系数仍在 30% 上下变动。与截面 1 一样,混凝土随机性对截面 2、截面 3 内力的影响显著。

表 7 截面 2 内力统计

Tab. 7 Statistical Inner Forces of Cross-section 2

顶点位移/mm	1	2
轴力均值/kN	36.52	84.52
轴力标准差/kN	12.76	18.85
轴力变异系数/%	35	22
弯矩均值/(kN·m)	-5.08	-10.95
弯矩标准差/(kN·m)	1.56	2.30
弯矩变异系数/%	31	21

表 8 截面 3 内力统计

Tab. 8 Statistical Inner Forces of Cross-section 3

顶点位移/mm	1	2
轴力均值/kN	23.79	61.24
轴力标准差/kN	9.46	16.52
轴力变异系数/%	40	27
弯矩均值/(kN·m)	-3.48	-8.16
弯矩标准差/(kN·m)	1.11	1.85
弯矩变异系数/%	32	23

3 破坏特征

4 片墙体在开裂、屈服特征以及破坏现象 3 个方面表现出很大的差异性。

3.1 开裂特征

从试验的观测结果来看,墙体第 1 条裂缝的出现位置及开裂荷载均存在差异。从表 9 可见,除 SW<sub>2</sub> 外,第 1 条裂缝都在连梁端部产生,但具体的位置差异很大。开裂时所对应的荷载变异系数为 32%,此时顶点水平位移的变异系数高达 74%,这

表 9 试件第 1 条裂缝统计结果

Tab. 9 Statistical Results of the First Crack of Specimens

试件编号	开裂荷载/kN	开裂位移/mm	首先开裂位置
SW <sub>1</sub>	151.00	5.7	LL <sub>3</sub> 连梁左下角和右上角
SW <sub>2</sub>	73.00	1.2	最上面洞口左上角
SW <sub>3</sub>	95.00	1.3	LL <sub>3</sub> 连梁右上角
SW <sub>4</sub>	98.00	2.7	LL <sub>1</sub> 连梁右上角
均值	104.25	2.7	
标准差	33.10	2.0	
变异系数/%	32	74	

也再一次说明了位移的变异性要远远大于承载力的变异性。

试验中所观测到的混凝土开裂顺序在一些部位明显不同,如图 13 所示。图 13 中每个破坏区域有 4 个数字,从左到右依次表示墙体 SW<sub>1</sub>、SW<sub>2</sub>、SW<sub>3</sub>、SW<sub>4</sub> 在各自试验中的开裂顺序编号,同一墙体中编号相同则表示 2 个位置同时开裂。从图 13 中的整体开裂顺序来看,各片墙体之间存在着较大的差异。

综上所述,使用确定性分析中结构开裂荷载的计算方法,不可能做出准确的预测,甚至还会出现较大的偏差。结构开裂特征上的差异来源于混凝土内部初始状态的不同。

3.2 屈服特征

结构进入非线性以后,各部位逐渐屈服形成塑性铰。各墙体塑性铰出现顺序如图 14 所示,其中,每个塑性铰有 4 个数字,从左到右依次表示墙体 SW<sub>1</sub>、SW<sub>2</sub>、SW<sub>3</sub>、SW<sub>4</sub> 在各自试验中塑性铰出现的顺序编号,没有数字的表示没有形成塑性铰。从屈服顺序上看,4 片墙体在各相同区域形成塑性区的顺序差异较大,这说明结构进入非线性阶段以后,混凝土材料的随机性对塑性铰出现顺序有直接的影响,这也进一步表明结构反应的内力演化路径具有随机性。

3.3 破坏现象

从各片墙体的整体破坏现象看,破坏区域的位置基本相同,严重的破坏区域发生在受拉和受压墙肢的下部,受拉墙肢破坏尤为严重。各连梁端部都有受拉竖向裂缝出现,其中,最上部连梁 LL<sub>3</sub> 出现了斜向裂缝,然而,相同区域在具体的破坏现象上存在着较大的差异。以下给出受拉墙肢下部受拉区域局部破坏现象的对比描述。

受拉墙肢下部为典型受拉破坏区,受拉裂缝沿翼缘侧面分布,并部分延伸进入受拉墙肢。4 片墙体裂缝统计和裂缝分布情况见表 10 和图 15。这些

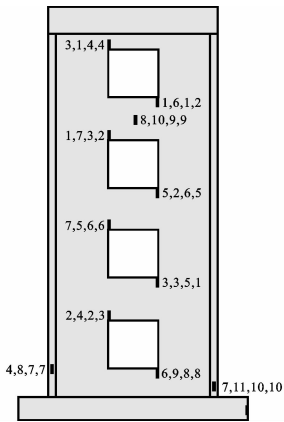


图 13 墙体破坏  
区域开裂顺序  
Fig. 13 Cracking  
Sequence in Damage  
Zone of Wall

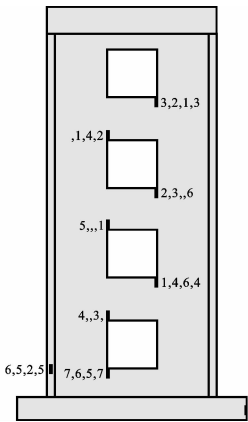


图 14 墙体塑性铰  
形成顺序  
Fig. 14 Plastic  
Hinge Sequence  
of Wall

裂缝的分布位置各不尽相同,SW<sub>1</sub> 在距离底梁顶面 20、37、48、63、76、94、117、125、132、142、157、176、223 cm 处分布着宽窄不同的水平裂缝;SW<sub>2</sub> 在距离底梁顶面 10、24、38、56、64、82、97、110、125、140、150、159、171、183 cm 处分布着宽窄不同的水平裂缝;SW<sub>3</sub> 在距离底梁顶面 3.3、18、35、47、50、62、84、88、100、110、115、123、137、147 cm 处分布着宽窄不同的水平裂缝;SW<sub>4</sub> 在距离底梁顶面 20、30、40、45、62、87、108、127 cm 处分布着宽窄不同的水平裂缝。

表 10 受拉墙肢下部裂缝分布

Tab. 10 Cracks Distribution of Lower Tension Wall

试件编号	裂缝数目	主裂缝数目	主裂缝距底梁 顶面距离/cm	主裂缝 宽度/cm
SW <sub>1</sub>	13	4	20	1.5
			37	2.2
			94	2.5
			125	0.6
SW <sub>2</sub>	14	6	24	1.0
			38	1.0
			56	0.8
			82	1.1
			97	0.9
			125	0.7
SW <sub>3</sub>	14	3	35	3.5
			88	3.0
			123	4.0
SW <sub>4</sub>	8	4	30	6.0
			62	0.8
			87	3.0
			127	0.4

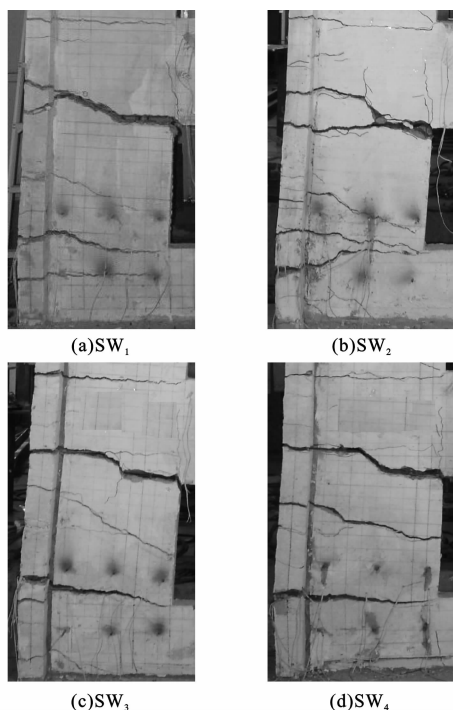


图 15 受拉墙肢下部破坏特征

Fig. 15 Failure Characteristics of Lower Tension Wall

综上所述,各片墙体在受拉区的裂缝分布位置、形态、数目以及主裂缝都存在着较大的差异。这些差异的产生源于混凝土非线性与随机性的耦合<sup>[9]</sup>。

## 4 结 语

整个试验过程中,混凝土材料几乎成为惟一不可完全控制的影响结构反应的要素。本文中对 4 片相同的短肢剪力墙结构受力全过程的试验数据进行了分析,虽然样本较少,但还是能够反映出结构反应过程中的一些本质特征:混凝土非线性使得结构反应的变异性特征出现了随机涨落,而混凝土随机性又使得结构反应的非线性演化路径变得复杂多样,正是这两者的耦合,使得混凝土结构在非线性发展阶段的内力、变形、应力及应变等具有明显的损伤随机演化特征。因此,正确的混凝土结构分析,只有基于非线性与随机性耦合这一物理背景,才能给出正确的结构非线性随机演化行为。

### 参考文献:

### References:

- [1] 李 杰,张其云.混凝土随机损伤本构关系[J].同济大学学报:自然科学版,2001,29(10):1 135-1 141.

LI Jie, ZHANG Qi-yun. Stochastic Damage Constitutive Law for Concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(10): 1 135-1 141.

- [2] 李 杰.混凝土随机损伤本构关系研究新进展[J].东南大学学报:自然科学版,2002,32(5):750-755.

LI Jie. Recent Research Progress on the Stochastic Damage Constitutive Law of Concrete[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(5): 750-755.

- [3] 李 杰.混凝土随机损伤力学的初步研究[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1 270-1 277.

LI Jie. Research on the Stochastic Damage Mechanics for Concrete Materials and Structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1 270-1 277.

- [4] 丁光堂,李 杰.混凝土框架结构非线性静力分析的随机模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(4):389-394.

DING Guang-ying, LI Jie. Random Simulation Study on Nonlinear Static Performance of Reinforced Concrete Frame Structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(4): 389-394.

- [5] 容柏生.高层住宅建筑中的短肢剪力墙结构体系[J].建筑结构学报,1997,18(6):14-19.

RONG Bai-sheng. Short-leg Shear Wall Structural System Used in Tall Residential Buildings[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 14-19.

- [6] JGJ 3—2002,高层建筑混凝土结构技术规程[S].

JGJ 3—2002, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S].

- [7] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].

GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].

- [8] 过镇海,张秀琴,张达成,等.混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J].建筑结构学报,1982,3(1):1-12.

GUO Zhen-hai, ZHANG Xiu-qin, ZHANG Da-cheng, et al. Experimental Investigation of Complete Stress-deformation Curves of Concrete in Tension[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1): 1-12.

- [9] 刘小燕,颜东煌,张 峰,等.预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J].中国公路学报,2006,19(1):58-61.

LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-strength Concrete Beam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 58-61.