

# 框支短肢剪力墙结构中斜柱转换结构抗震试验研究\*

钟树生<sup>1</sup>, 史世伦<sup>1</sup>, 卢挺<sup>1</sup>, 蒋凡<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 铁道部第四勘察设计院, 武汉 430063)

**摘要:**通过对两榀框支短肢剪力墙斜柱转换结构在竖向荷载及水平低周反复荷载共同作用下的拟静力试验,分析了试件的应力分布状态、破坏形态、荷载传递规律以及转换梁的受力性能和试件的抗震性能。试验结果表明,斜柱式转换结构受力特点类似于一个简单桁架,转换层上层传力梁强度和刚度对转换梁性能有重要的影响,设计合理的框支短肢剪力墙-斜柱转换结构具有较好的延性,可以形成多道抗震防线,从而获得较好的抗震性能。

**关键词:**框支短肢剪力墙;斜柱转换;抗震性能;拟静力试验

**中图分类号:** TU352.1<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)01-0070-05

## Experimental Study on Seismic Behaviors of Transfer Floor from Inclined Column to Framed Short-leg Shear Wall

ZHONG Shu-sheng<sup>1</sup>, SHI Shi-lun<sup>1</sup>, LU Ting<sup>1</sup>, JIANG Fan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. The Forth Survey & Design Institute of China Railways, Wuhan 430063, P. R. China)

**Abstract:** According to the pseudo static tests on two specimens of Transfer floor from inclined column to framed short-leg shear wall, which are subjected to the vertical loads and the horizontal cyclic loads, in this paper the stress distributions, final failure model of the specimens, paths of the load transfer and the mechanical behaviors of the transfer beam are studied in detail, the ductility and energy dissipation of the specimens are also specially studied. The results show that this kind of transfer structure can have good seismic behaviors.

**Keywords:** Framed short-leg shear wall, inclined column transfer structure, seismic behaviors, pseudo static test

斜柱式转换结构作为一种特殊的结构转换形式,具有良好的经济性能、受力模式和建筑用途<sup>[1-3]</sup>,在国内实际工程中已经得到较多的应用<sup>[4,5]</sup>。目前,对斜柱式转换结构的试验研究和理论分析较少,我国规范亦未对此类转换结构作具体的规定。本文通过对两榀框支短肢剪力墙斜柱转换框架的拟静力试验,得出了该类转换结构的受力特点,并评价了其抗震性能。

### 1 试验概况

#### 1.1 试件设计

本次试验结合某实际工程,按 1/3 缩尺确定试件尺寸。两试件依次编号为 W7-2、W7-3。试件 W7-2 的尺寸简图如图 1 所示,试件 W7-3 除斜柱尺寸为 150×150 外,其余尺寸与 W7-2 相同。试件配筋

明细表见表 1。混凝土和钢筋材料力学特性实测值见表 2。

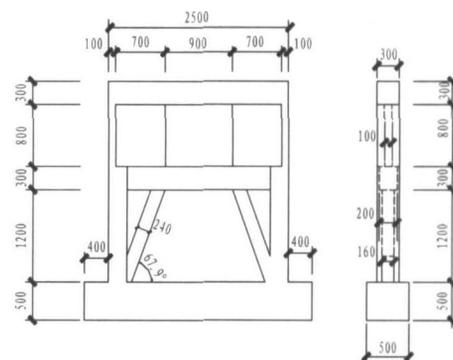


图 1 W7-2 的尺寸简图

#### 1.2 加载装置

试验在重庆大学大型结构实验室进行,装置全貌

\* 收稿日期: 2006-09-05

作者简介:钟树生(1963-),男,四川威远人,副教授,博士,主要从事高层钢筋混凝土结构研究。

如图 2 所示。为确保水平力有效地作用于试件,在试件顶部传力梁中预埋四根 1.5 m 长的锚杆,且在加载端头预埋钢垫板。试件柱脚的两边均设置压梁,确保试件尽量不滑移。

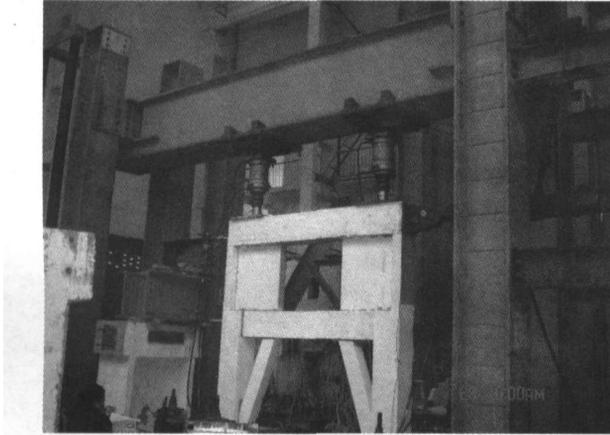


图 2 试验装置全貌图

竖向荷载的加载点设在短肢剪力墙的形心位置。竖向加载液压千斤顶通过滚动滑车与固定的钢梁连接,使试件在水平荷载作用下能自由移动。

表 1 试件配筋明细表

项 目		W7 - 2	W7 - 3
墙	竖向	8@100	8@100
	横向	8@100	8@100
暗柱	纵筋	4 8	4 8
	箍筋	6@100	6@100
转换梁	纵筋	3 12, 3 12	3 12, 3 12
	箍筋	10@80	10@80
方柱	纵筋	8 25	4 22+4 20
	箍筋	10@100	10@100
斜柱	纵筋	4 18	4 16
	箍筋	8@100	8@130
传力梁	纵筋	8 25	8 22+2 25
	箍筋	10@100	10@80

表 2 混凝土和钢筋材料力学特性实测值

钢筋类型	弹性模量 $E$	屈服应变 $\epsilon_y$	屈服强度 $f_y$	极限强度 $f_u$
	MPa	/‰	MPa	MPa
6	240 819	1.9	396.85	582.43
8	212 369	2.2	416.74	505.35
10	244 913	1.9	312.64	417.35
12	197 172	2.2	396.81	551.13
14	199 781	2.0	338.77	568.98
22	202 041	1.9	375.09	564.20
25	199 056	1.9	383.96	
混凝土强度指标	试件编号	$f_{cu,k}$ /MPa	$f_{c,k}$ /MPa	$f_{t,k}$ /MPa
	W7 - 1	19.91	15.13	1.91
	W7 - 2	24.32	18.48	2.18

1.3 测试内容

为掌握试件转换梁在整个受力过程中的应力变化情况,分别在转换梁净跨范围内上、下排纵筋均匀布置了 15 个电阻应变片。采用了 2 个量程均为 10 cm 的电子位移计来测定传力梁和转换梁的位移,所采集的

钢筋应变值及电子位移计数据通过平衡箱接入 7V14 型 Data logger 数据采集系统采集和储存。同时,试件的水平位移在传力梁和转换梁处各用一个 50 cm 的大量程位移计来测定,所测数据输入 X - Y 函数记录仪,用于绘制试件的 P - 曲线,以控制加载。

1.4 加载制度

试验采用的加载程序为:先对试件施加 40% 的竖向荷载,后加至 100% 的竖向荷载设计值,并在整个加载过程中维持不变。然后在顶层施加水平方向的低周反复荷载。水平荷载采用分级加载制度,在梁的纵筋屈服前,加载采用荷载控制,每 20 kN 增加一级,寻找开裂级屈服荷载时,荷载增加幅度减小,每一级荷载循环一次,直至试件屈服。在转换梁的纵筋屈服后,加载改为以顶部传力梁中心线水平屈服位移的整倍数控制加载,每级加载循环两次,直至水平荷载下降至最大承载力的 85% 以下时,即认为试件失效,试验终止。屈服位移  $y$  的寻找是通过数据采集系统追踪转换梁控制截面处的纵筋应变,只要其值达到钢筋的屈服应变,此时转换梁位移计位移就是试件的屈服位移  $y$ 。试件 W7 - 2 所施加的恒定竖向荷载按剪力墙 0.3 倍试验轴压比确定,即 452 kN,试件 W7 - 3 所施加的恒定竖向荷载按剪力墙 0.2 倍试验轴压比确定,即 288 kN。

2 试验现象及分析

2.1 试件的破坏过程分析

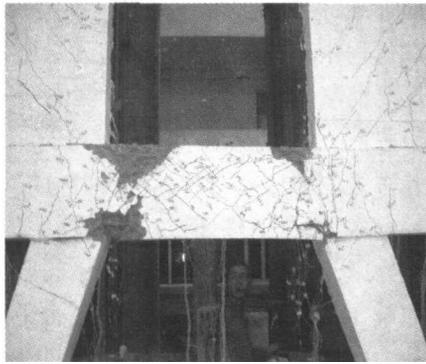
二试件的破坏过程如下:试件 W7 - 2:加载到约 100 kN 时,在转换梁左部下缘处及右部与斜柱相交上缘分别出现一条与转换梁垂直的细裂缝。进一步加大荷载,这两条裂缝向梁腹继续发展。达到正向屈服时,转换梁左上部形成漏斗状的裂缝群,右下部形成倒漏斗状的裂缝群。施加水平反向荷载后,约 200 kN 时,在转换梁的两侧逐渐形成正反漏斗状裂缝群。2  $y$  时,转换梁中形成交叉斜裂缝,且一些原有裂缝继续延伸,并且漏斗裂缝群中的主裂缝开展得较宽。3  $y$  时,在转换梁和两侧剪力墙、斜柱相交的角部开始有少量混凝土脱落,且原有裂缝继续延伸和变宽。4  $y$  时,转换梁右下部角落处混凝土脱落严重,构件的承载力急剧下降,而传力梁由于裂缝开展得很宽也不宜加载,试件破坏。

试件 W7 - 3:加载到约 100 kN 时,在转换梁左上缘及右部与斜柱相交下缘处开始出现与转换梁垂直的细裂缝。与 W7 - 2 相似,随着荷载的进一步加大,这几条裂缝向梁腹继续发展。达到正向屈服时,转换梁左上部形成漏斗状的裂缝群,而右下部形成倒漏斗

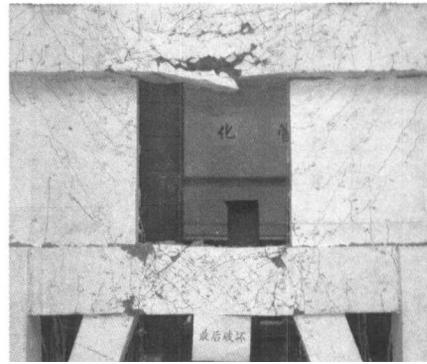
状的裂缝群。施加反向荷载后至反向屈服前,在转换梁的两侧逐渐形成正反漏斗状裂缝群,同时,在左柱和左斜柱之间的转换梁部分下缘亦出现垂直拉裂缝。随着试验的进行,转换梁两斜柱上方的斜裂缝逐渐向梁中部发展,转换梁中部出现交叉斜裂缝并逐渐贯通,斜柱上方有混凝土剥落。在 4 y 第一循环时,转换梁中部的上方出现平行于转换梁方向的撕裂裂缝。在 -

4 y 第一循环时,转换梁出现了左低右高现象,说明塑性铰已经完全形成。至 6 y 时,转换梁已经不能承受水平荷载,构件水平荷载全靠传力梁传递,剪力墙水平剪力骤增,发生剪切破坏。至此,试件破坏。

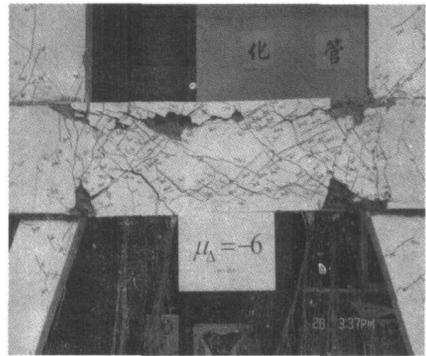
试件 W7 - 2、W7 - 3 破坏形态见图 3,试验结果明细见表 3。



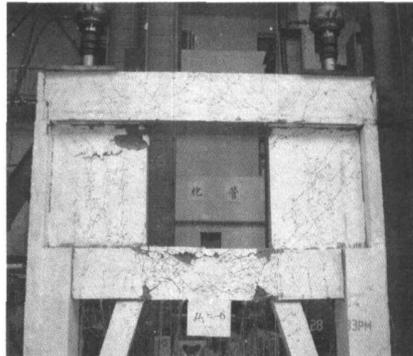
a) W7 - 2 转换梁最后破坏形态



b) 试件 W7 - 2 最后破坏形态



c) W7 - 3 转换梁最后破坏形态



d) 试件 W7 - 3 最后破坏形态

图 3 试件的最后破坏形态

表 3 试验结果明细

荷载项目	W7 - 2	W7 - 3
开裂荷载 /kN	100	100
屈服荷载 /kN	480	310
极限荷载 /kN	586	441
最终破坏位置	传力梁中部	左剪力墙上部

由于两个试件在配筋、斜柱刚度的不同以及竖向荷载轴压比的差异,造成其破坏过程和破坏形态也有一定的差别。具体表现如下:

1)与试件 W7 - 2 不同,试件 W7 - 3 在 4 y 时,转换梁中部沿平行方向在转换梁上侧逐渐被撕裂,到试件破坏时,转换梁中部上侧被撕裂,出现分离。

2)二个试件的剪力墙底部与转换梁的连接处都出现了垂直的竖向裂缝,但试件 W7 - 3 剪力墙的竖向的裂缝发展得更充分,几乎达到了剪力墙的顶端,而试件 W7 - 2 的左右墙仅仅只有少量几根竖向垂直裂缝,且长度不长。这说明了试件 W7 - 3 转换梁延性得到了充分的发展,剪力墙因受压产生的竖向裂缝在反复

荷载下也得到了充分的发展。

3)试件 W7 - 2 在转换梁成铰后,最终传力梁因裂缝发育,承载力降低,不能承受水平反复荷载而被压溃或剪坏,而试件 W7 - 3 则是左侧剪力墙被剪坏,最终破坏部位不同。其原因可能有三:第一,试件 W7 - 2 柱的纵筋配筋明显大于 W7 - 3,这导致其屈服荷载远大于 W7 - 3,这样,试件 W7 - 2 的传力梁要承受更大的水平荷载,在反复拉压下,传力梁出现斜向裂缝,最后导致压溃;而试件 W7 - 3 传力梁直到试件破坏,其刚度降低都不多。第二,传力梁作为连接左右剪力墙的连接,受很大的剪力,在试件 W7 - 3 中,特地在剪力墙间的传力梁中增加了 4 根交叉的弯起纵筋,明显的提高了中部传力梁的抗剪能力,防止传力梁中部过早因拉压和剪力出现大的斜裂缝而在试件破坏前先破坏。试件 W7 - 2 在屈服后斜裂缝开展很迅速,导致在转换梁的延性未得到充分利用前,传力梁在剪力和拉压作用下先行破坏。第三,左剪力墙的右上角、右剪力

墙的左上角在反复荷载下局部受拉受压都非常利害,二试件在 3 y 时都已经出现不同程度的损坏,而试件 W7-3 到 -5 y 时候,左剪力墙的右上角部分经过反复拉裂和压溃,剪力墙与传力梁的连接部分被损坏的长度达到了 30 cm 甚至更长,这大大的降低了剪力墙的承载能力,当左墙上部刚度降低到不足以承受水平剪力时而被剪坏。

### 2.2 转换梁钢筋应变发展过程分析

在竖向荷载下,未施加水平荷载前,两剪力墙下的转换梁部分则基本上表现为偏心受拉,而墙间转换梁即转换梁中间部分也表现为受拉,但相对应应变非常小。

在施加水平荷载后,加载初期,试件处于弹性阶段,上排和下排纵筋一端受拉,一端受压,且反弯点也大致位于跨中位置,中排纵筋全长受拉,峰值点在墙中转换梁靠近两斜柱点。随着加载的进行,转换梁钢筋首先在墙中转换梁靠近两墙和斜柱的两端处屈服,在正向荷载下,左端截面的上部和右端截面的下部都相继屈服,在反向荷载下,则右端截面上部和左端截面下部屈服。之后,转换梁纵筋的屈服区域向梁中部发展,到试件破坏前,中部纵筋上测点相当部分屈服;而墙下转换梁应变增大幅度相对较小,到截面破坏前大部分没有屈服。

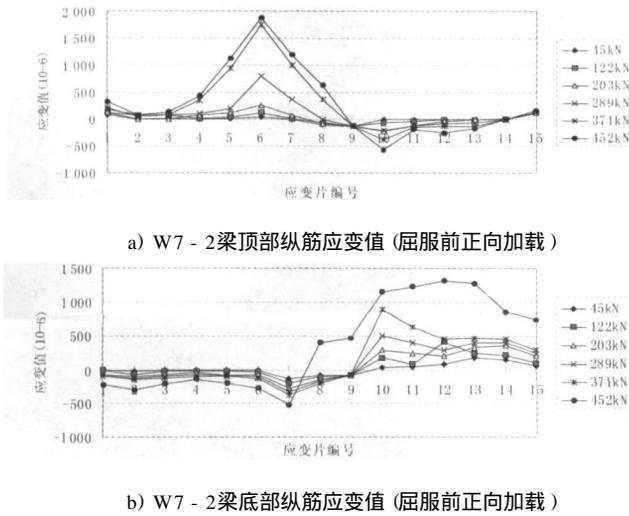


图 4 W7-2 梁纵筋应变值

在竖向和反复水平荷载同时作用下,剪力墙下转换梁和剪力墙间的转换梁应力有着明显的差别。剪力墙间转换梁由于两端与剪力墙和斜柱相连,相当于连续梁的中间跨,在两端受弯矩、剪力和拉力同时作用,这样,靠近两端处表现为大偏心受拉和受弯特征,而其中部则主要表现为偏心受拉特征。在低周反复荷载作用下,墙间转换梁两端在拉、弯、剪的共同作用下双向屈服后成铰,在两端也形成从上下出发向两端收缩的交错裂缝。剪力墙下转换梁也表现为偏心受拉,但由于与剪力墙、柱还有斜柱相连,具有比墙间转换梁大得

多的刚度,因此其应变值相对墙间转换梁较小,在试件屈服前,在受拉侧主要是梁下部也受拉开裂,不过,试件屈服后,应变增长不大,仅有个别测点屈服,裂缝也开展得不多。

### 2.3 试件的抗震性能分析

表 4 列出了试件各加载循环下的承载力降低系数,可以看出,随着位移延性系数的增加,承载能力的降低系数降低,试件的承载能力衰减的越严重。试件 W7-2 在 2 y 时承载力降低系数大于 0.9,明显高于试件 W7-3,这说明加大柱纵筋的配置,对提高试件整体抗侧刚度是有作用的。

表 4 各个加载等级下试件的承载力降低系数

位移延性	W7-2		W7-3	
	正向	反向	正向	反向
1 y	0.959 091	0.975	0.974 194	0.992 857
2 y	0.921 502	0.873 874	0.837 379	0.894 057
3 y	0.741 348	0.721 174	0.861 678	0.887 324
4 y	—	—	0.880 282	0.891 041
5 y	—	—	0.866 337	0.892 031

图 5 为试件的 P - 滞回曲线,从图 5(a)中可以看出,曲线在试件开裂前近似于直线,试件处于弹性阶段,开裂后,滞回曲线的斜率降低。在 3 y 时,滞回曲线出现明显的捏缩现象,呈反“S”型,表明试件的刚度开始大幅降低,但此时试件的承载力降低不多,在 4 y 第一循环时,试件的承载力才开始明显的下降,此时试件已经破坏。

与试件 W7-2 滞回曲线相比,试件 W7-3 滞回环比较丰满,具有较好的延性位移和耗能能力,在 6 y 的时候,试件才失去承载力。同时,W7-2、W7-3 的屈服位移都约为 7 mm,而破坏前的极限位移 W7-3 稍大,但相差不多。W7-2 耗能性能明显低于滞回曲线饱满的试件 W7-3。

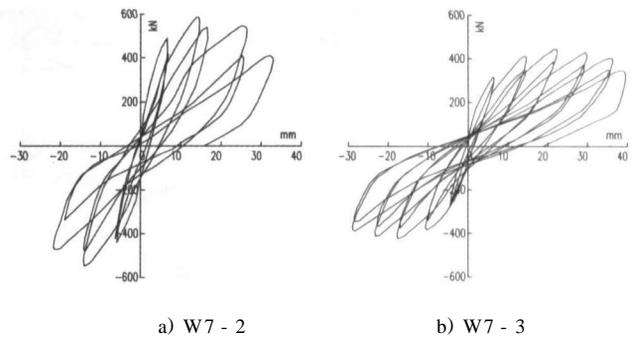


图 5 试件转换梁的 P - 滞回曲线

各试件的刚度退化见图 6, W7-3 的初始刚度较小,随着位移延性系数的增加,曲线下降的趋势逐渐变得平缓,这表明试件在初期的刚度降低的比后期要严重一些。W7-2 刚度降低速度较快,从其走势可以看出,刚度的降低还没有达到比较平缓的阶段,但是由于

两试件传力梁在转换梁成铰丧失部分承载力后,水平荷载主要由传力梁承担,在反复荷载下,传力梁随着裂缝的发育而发生脆性破坏,试件也随之破坏。试件 W7-3 的柱和斜柱的配筋率较 W7-2 小,而在传力梁上增配了 4 20 的斜筋,这样,一方面减少了试件的总体抗侧刚度,同时,也保证了在转换梁屈服成铰后,传力梁不致突然脆性破坏,转换梁的延性得到了充分的利用。

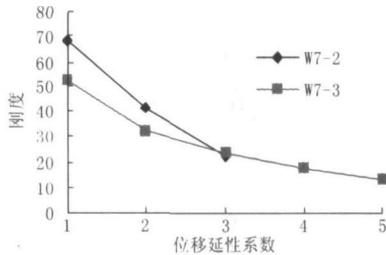


图 6 试件的刚度退化

经计算, W7-2 的延性系数为 4.0。W7-3 的延性系数达 5.7。W7-3 由于柱和斜柱纵筋配筋率的减少,其屈服荷载远低于 W7-2,同时,增配的传力梁的斜向钢筋又保证了转换梁在屈服后水平荷载的传递,使转换梁的承载能力得到了充分的利用,试件的延性系数也相对较大。

### 3 结论

1) 斜柱式转换结构受力特点类似于一个简单桁架,转换梁相当于桁架的上弦杆,斜柱相当于桁架的腹杆。斜柱把整根转换梁分成三段,转换梁可看作中间两个支座有下沉的三跨连续梁。

2) 转换层上层传力梁强度和刚度对转换梁性能有重要的影响。实际工程设计中,应该加强斜柱转换层的上层楼板的设计,以保证转换层的性能得到充分的利用。

3) 在水平反复荷载下,剪力墙与转换梁和传力梁相连的内四角局部受拉受压严重。因此,对剪力墙的设计,剪力墙的内侧暗柱纵筋应加强,以保证与上下层相连处不致因变形过大而局部拉裂或压溃。

4) 斜柱在竖向荷载下为轴心受压试件,而在竖向和水平荷载同时作用下,受力较为复杂,在斜柱中部为小偏心受拉或者受压,在斜柱两端同时有剪力、弯矩和轴力作用,特别是斜柱底部,剪力和弯矩作用更大,因此,对斜柱的设计,应以斜柱底部作为控制截面进行设计。

5) 框支短肢剪力墙 - 斜柱转换结构可以具有较好的延性。由前文分析可知,试件首先在墙间转换梁内侧屈服后出铰,而在试件破坏前,柱和斜柱底部两侧纵筋屈服,此时柱和斜柱底部出铰,这符合多道防线的抗震概念设计。

### 参考文献:

- [1] 蒋凡. 框支 - 短肢剪力墙结构中斜柱转换结构的抗震试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [2] 杨超策, 钟树生, 凌焕文. 钢筋混凝土斜柱 - 剪力墙局部转换节点在竖向荷载作用下的受力性能的试验研究 [J]. 重庆建筑, 2005, 3: 57 - 63.
- [3] 钟树生, 曹林, 鲁瑛. 竖向荷载作用下钢筋混凝土斜柱 - 短肢剪力墙局部转换节点的试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(1): 38 - 42.
- [4] 李豪邦. 高层建筑中结构转换层的新形式 - 斜柱转换 [J]. 建筑结构学报, 1997, 18(2): 41 - 45.
- [5] 曹秀萍, 马耀庭. 斜柱在深圳 2000 大厦高位转换中的应用 [J]. 建筑结构, 2002, 32(8): 15 - 19.
- [6] GB50010 - 2002, 混凝土结构设计规范 [S].
- [7] JGJ 101 - 96, 建筑抗震试验方法规程 [S].