

文章编号: 1006-6780(2001)02-0006-06

香港地区钢筋混凝土框架柱的 抗震性能试验研究

王震宇¹, 吴波¹, 林少书², 李惠¹, 黄玉龙²

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 香港理工大学 土木与结构工程系, 香港)

摘要: 通过6个框架柱模型的伪静力试验, 研究了香港地区未考虑抗震设防的钢筋混凝土框架柱的抗震性能。根据试验结果, 讨论了轴压比、配箍率、剪跨比等参数对其抗震性能的影响, 分析了水平荷载作用时塑性铰区的弯曲变形、剪切变形和纵向钢筋粘结滑移变形所产生的位移在框架柱总水平侧移中所占的比例及其变化规律。

关键词: 钢筋混凝土; 框架柱; 抗震; 塑性铰; 弯曲变形; 剪切变形; 节点; 滑移

中图分类号: TU375.4 文献标识码: A

Seismic performance of reinforced concrete frame columns in Hong Kong

WANG Zhen-yu¹, WU Bo¹, LIN Shao-shu², LI Hui¹, HUANG Yu-long²

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Civil & Structure Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract: Studies from experimental results obtained with six reinforced concrete columns tested under reciprocating load. The influence of such parameters as axial load index, aspect ratio and percentages of lateral reinforcement, on seismic performance of reinforced concrete frame column in Hong Kong and analyses the distribution relationships of flexural deformation, shear deformation and slippage of longitudinal reinforcement in joint zone.

Key words: reinforced concrete; frame column; seismic; plastic hinge; flexural deformation; shear deformation; joint; slippage

香港地区不处于亚欧板块和太平洋板块的交界处, 不属于地震多发地区, 长期以来对地震所带来的灾害考虑较少, 在大量的工程结构设计中不考虑抗震设防。近年来, 随着台湾(1999)、云南(1996)、神户(1995)和洛杉矶(1994)等地频繁发生地震, 香港公众及越来越多的结构设计人员已开始认识到地震所造成的危害。虽然香港发生强烈地震的危险性很小, 却存在遭受中等强度地震影响的可能。本文所涉及内容是香港理工大学与哈尔滨工业大学合作研究计划的一部分, 主要考察香港地区未设防钢筋混凝土框架柱的抗震性能, 探讨轴压比、配箍率、剪跨比等参数的影响, 以期为今后香港地区钢筋混凝土框架柱的抗震设计提供建议。

1 试验概况

1.1 试件制作

试验采用伪静力试验方法。模型柱的配箍率和箍筋形状、纵筋配筋率、剪跨比等均参照目前香港的常用做法, 模型柱按剪跨比大小分为A、B两类, 试件详细尺寸及配筋见图1。混凝土的配制采用哈水525R普通硅酸盐水泥、中粗河砂、黑龙江冷山花岗岩碎石(粒径5~20mm)。试验中采用直径为 $\phi 4$ 的8

收稿日期: 2000-10-24

作者简介: 王震宇(1971-), 男, 哈尔滨工业大学博士生。

号铁线模拟一级钢筋做为箍筋, 其屈服强度为273MPa, 与一级钢吻合较好。II级 $\phi 12$ 与 $\phi 16$ 纵筋屈服强度分别为370MPa和395MPa, 混凝土的实测立方体强度 f_{cu} 为42MPa, 模型柱混凝土保护层厚度为8mm。

试验考察的主要参数有剪跨比、轴压比和配箍率, 各参数的取值见表1。表中 $A_{sh}/s_t h_c$ 为国际上常用的衡量配箍特性的物理量, 其作用类似国内的配箍率, 其中 A_{sh} 为同一横截面处沿纵向剖开后所截箍筋面积的总和, h_c 为同一横截面处最外围箍筋中心到中心的距离, s_t 为箍筋间距。

表1 试验主要参数

Table 1 Basic properties of column specimens

试件编号	截面类型	截面尺寸 $B \times H / \text{mm}$	柱净高 mm	剪跨比 m	轴压比 n	$\frac{A_{sh}}{s_t h_c}$	纵筋配筋率 ρ	箍筋间距 s_t, mm
X-1	A	267×267	800	1.5	0.60	0.001	12 $\phi 12$ +4 $\phi 16$ (3.03%)	$\phi 4@164$
X-2	A	267×267	800	1.5	0.40	0.001	12 $\phi 12$ +4 $\phi 16$ (3.03%)	$\phi 4@164$
X-3	A	267×267	800	1.5	0.40	0.003	12 $\phi 12$ +4 $\phi 16$ (3.03%)	$\phi 4@55$
X-4	B	160×160	960	3.0	0.65	0.003	8 $\phi 12$ (3.53%)	$\phi 4@88$
X-5	B	160×160	960	3.0	0.65	0.001	8 $\phi 12$ (3.53%)	$\phi 4@264$
X-6	B	160×160	960	3.0	0.45	0.003	8 $\phi 12$ (3.53%)	$\phi 4@88$

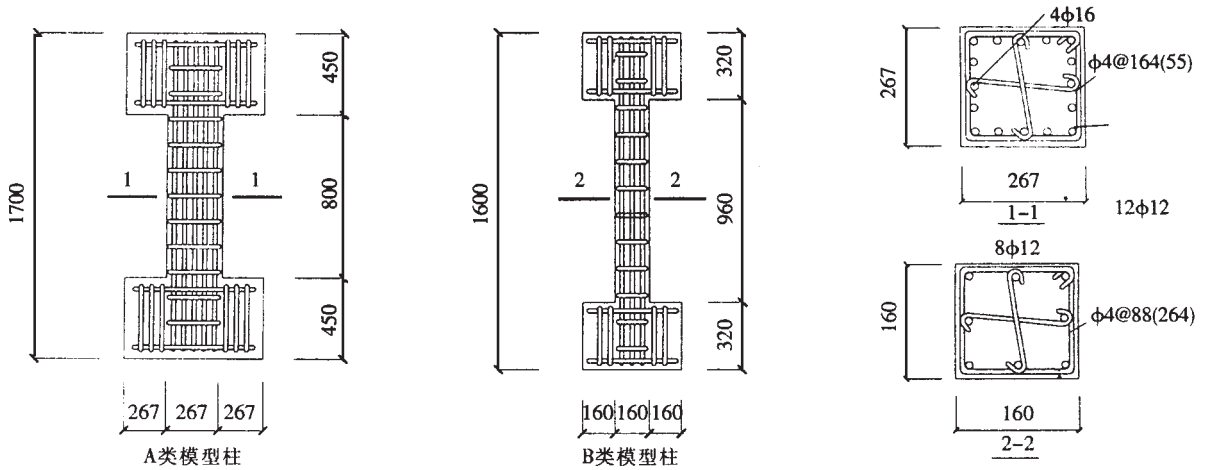


图1 试件配筋图

Fig.1 Geometry and reinforcement details of specimens

1.2 试验方法

采用建研式加载装置, 竖向荷载由液压千斤顶施加, 水平荷载由电液伺服作动器施加, 加载装置见文献[1]。首先施加竖向荷载至预定轴力并使其保持恒定, 然后采用荷载和位移双控制方法施加水平荷载。具体过程如下: 柱子屈服前按荷载控制; 试件屈服后按位移控制, 每次为屈服位移的倍数, 并在相同位移下往复循环两次, 直到试件的水平承载力下降到最大承载力的80%时结束试验^[2]。试验主要测量

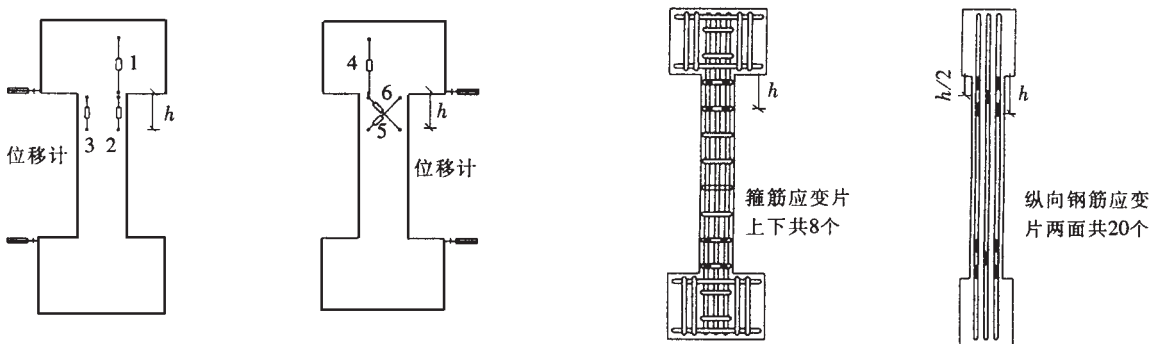


图2 应变片和位移计的布置

Fig.2 Distribution of strain gages and displacement transducer

以下几项内容：(1)用电子位移计测量试件上、下柱头的位移；(2)用电子位移计测量塑性铰区域的弯曲变形、剪切变形及节点区钢筋的滑移变形；(3)用电阻应变片测量试件关键受力区纵向钢筋及箍筋的应变。对试件施加的每级水平荷载直接由电液伺服作动器测出。位移计和测点布置详见图2，图中 h 为柱截面高度。

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程

综合分析各试件加载过程中的裂缝开展情况和纵筋、箍筋应变片读数的变化规律，模型柱的最终破坏形式可归纳为两种，最终剪切破坏和最终弯曲破坏。试件X-1、X-2、X-3和X-5的破坏形式为剪切破坏，试件X-4和X-6则属于弯曲破坏。

1. 试件X-1和X-2的剪跨比较小，配箍率又很低，所以试件一旦开裂即告破坏。在柱高的对角线方向出现一条宽度很大的剪切斜裂缝，试件最终破坏前无明显预兆，破坏十分突然。裂缝处抗剪箍筋被拉断，纵筋屈服且有明显的横向错动。试件X-3首先出现一条剪切斜裂缝和水平裂缝。随循环次数增加，已有的剪切斜裂缝和水平裂缝逐步扩展，同时有新的剪切斜裂缝出现，在柱高两个对角线方向形成许多细而密的交叉斜裂缝，此时没有新水平裂缝出现。试件最终破坏时裂缝处混凝土大面积剥落，箍筋拉断，纵筋外露且有明显的横向错动。X-5的剪跨比中等，但配箍稀疏。首先出现了一条水平裂缝，在反向加载时也有水平裂缝出现。随循环次数增加，已产生的水平裂缝扩展，并伴有混凝土竖向裂缝的产生。接近破坏时水平裂缝开始向受压区角部倾斜延伸。由于试件配箍很少，所以刚出现剪切斜裂缝试件就突然破坏，形成了一条宽度较大的主剪切裂缝，裂缝处纵筋明显向外屈服。

2. 试件X-4和X-6的剪跨比中等，配箍率较试件X-5要高。它们在纵筋屈服后随循环次数的增加，约束箍筋屈服，混凝土压坏剥落加剧，表现出弯曲破坏的特征。试件X-4在柱根部首先出现一条水平裂缝，之后的反向加载中亦有水平裂缝出现。随着荷载的逐步施加，受拉纵筋和约束箍筋屈服，塑性铰区域开始出现斜向延伸的剪切裂缝和竖向裂缝，但整个试验过程中没有在柱腹处发现剪切斜裂缝。试件X-6首先出现一条水平裂缝，反向加载亦有水平裂缝出现，位置与正向时大致对称。继续加

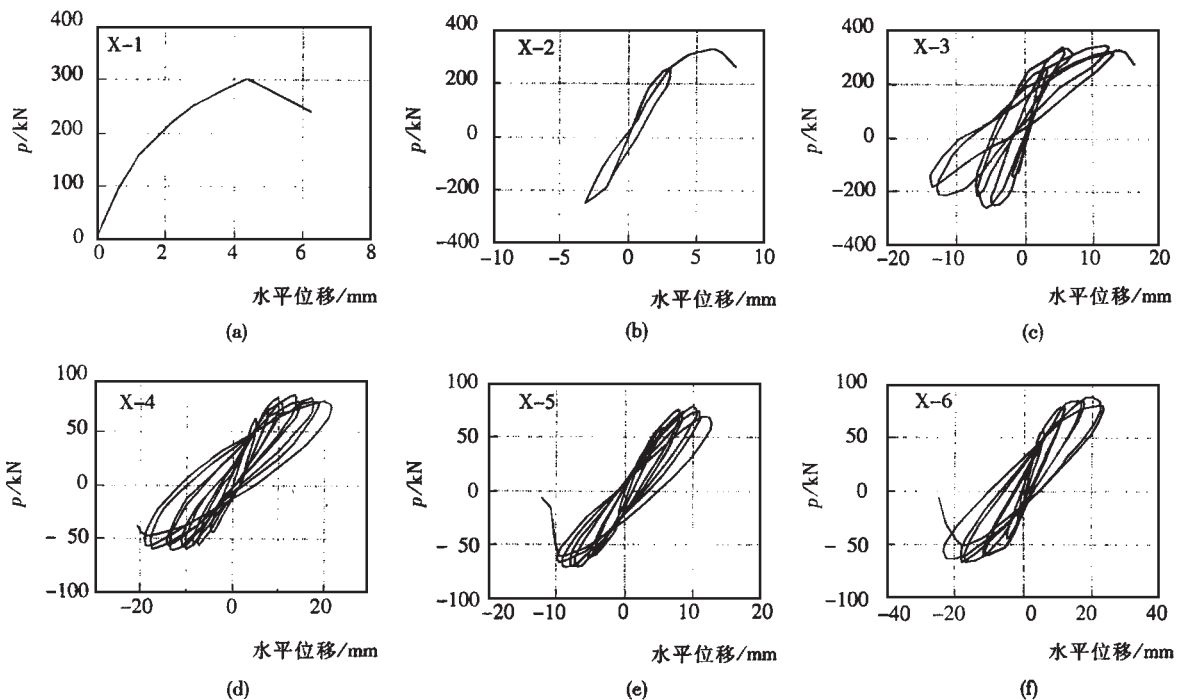


图3 各试件滞回曲线

Fig.3 Hysteresis loops of lateral load against displacement

载时, 已有裂缝扩展且有新水平裂缝出现。加载后期靠近柱腹处开始有斜裂缝出现, 斜裂缝在靠近柱腹处宽度较大, 沿45°向柱脚延伸。临近破坏时, 塑性铰区的混凝土压碎且大面积剥落, 纵筋压屈成灯笼状。

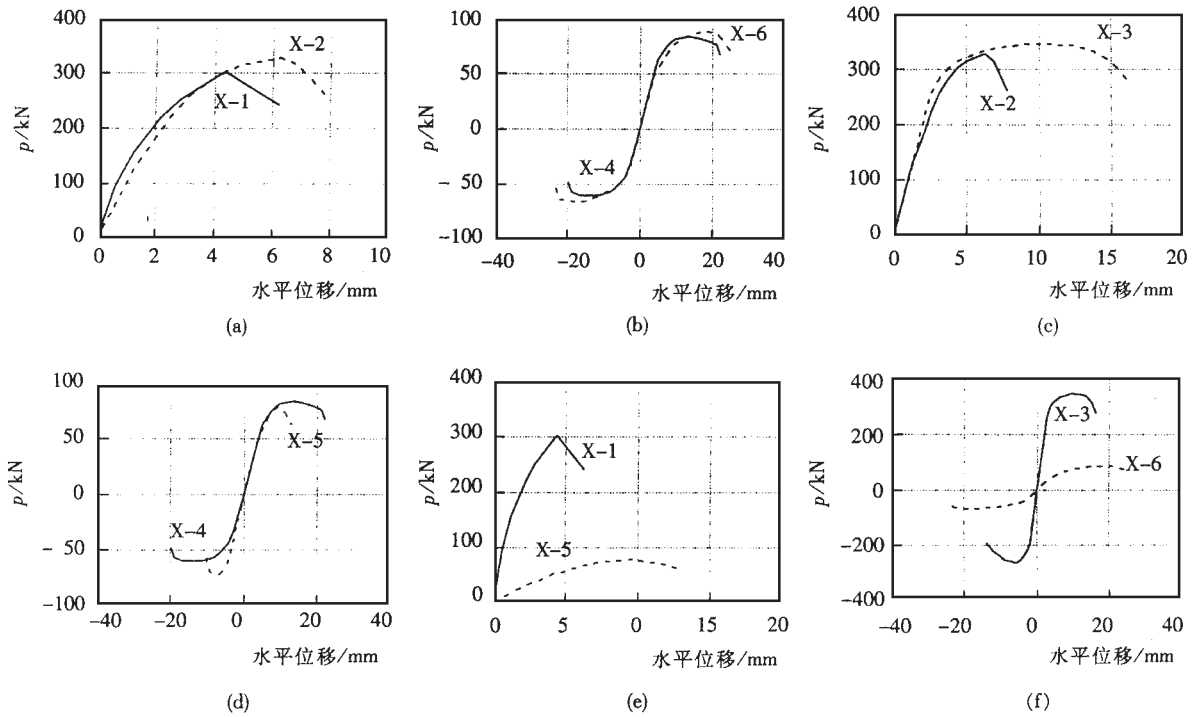


图4 各试件骨架曲线的比较

Fig.4 Envelopes of lateral load against displacement

表2 主要试验结果

Table 2 Principal data of column specimens

试验结果	试件编号					
	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6
屈服荷载/kN	—	—	269.38	62.61	68.38	67.36
屈服位移/mm	—	—	3.66	7.62	5.99	9.67
极限荷载/kN	302.4	327.6	305.6	71.82	75.6	77.18
极限位移/mm	4.38	6.25	7.50	13.61	8.45	17.50
破坏荷载/kN	241.9	262.1	245.0	57.46	60.48	61.74
破坏位移/mm	6.25	7.813	14.33	20.91	11.48	24.05
破坏位移角	1/128	1/102.4	1/55.8	1/45.9	1/84	1/40

注: 表中特征参数值均为骨架曲线正负两个方向的平均值。屈服点以能量法确定, 破坏荷载及破坏位移指骨架曲线下降段对应极限荷载80%时的水平力和位移。破坏位移角为破坏位移与框架柱净高之比。

2.2 各参数对框架柱抗震性能的影响

本文主要讨论轴压比、配箍率和剪跨比对框架柱抗震性能的影响, 各试件的滞回曲线和骨架曲线如图3、4所示。骨架曲线特征参数 (如屈服荷载、屈服位移等) 及主要试验结果见表2。

1. 轴压比的影响。由图3、图4和表2可知, 随轴压比增大, 试件的极限位移、破坏位移减小, 抗震性能下降。本次试验中随轴压比增大, 试件承载力减小, 这主要因为试件的实际轴压比0.6和0.65取值很大, 换算成规范的设计轴压比已接近或超过1.0, 因此当轴压比增加时, 试件的水平承载力不但不提高反而有所下降。

2. 配箍率的影响。无论对小剪跨比或中等剪跨比来说, 增大配箍率都可以对框架柱的延性起到明显的改善作用, 使得试件的滞回曲线饱满, 提高了试件的极限承载力和破坏位移角。对于小剪跨比,

提高配箍率对框架柱延性的改善尤为明显，破坏形式也由一出现斜裂缝就发生突然剪切破坏过渡到斜裂缝充分发展后的剪切破坏。

3. 剪跨比的影响。剪跨比对试件的极限承载力和延性均有很大影响，剪跨比小，则水平承载力高，延性差，反之则承载力低，延性好。可见剪跨比是影响框架柱抗震性能的一个重要参数。

2.3 塑性铰区的变形组成及其对框架柱总水平侧移的影响

为量测塑性铰区的弯曲变形、剪切变形以及纵筋的粘结滑移，在塑性铰区及梁柱节点内通过焊接于纵筋上的钢筋棒在试件正反面布置了6个电子位移计，位移计布置详见图2。试件正面沿纵向布置2#、3#位移计用来测量塑性铰区内的平均曲率，在试件反面沿对角布置5#、6#位移计用来测量该区域内的剪切变形，在节点内沿纵向钢筋布置1#、4#位移计用来测量纵筋在塑性铰区内的粘结滑移。需要指出的是，节点内靠近塑性铰区预埋的钢筋棒与周围混凝土是完全脱开的，同时在位移计量测标距内还粘贴了数个混凝土应变片。由混凝土应变片的平均读值得塑性铰区纵筋所在位置的混凝土变形，然后与位移计读数进行比较，其差值即为塑性铰区纵向钢筋的粘结滑移量。

钢筋混凝土框架柱的侧移主要由两部分构成^[3]，分别为：(1)非塑性铰区的变形；(2)塑性铰区的弯曲变形、剪切变形和纵筋的粘结滑移变形。其中，塑性铰区变形所产生的侧移在柱的总水平侧移中占有相当大的比重。一般来说，可以把塑性铰区变形所产生的水平位移分解为以下三部分：弯曲位移 Δ_{fp} 、剪切位移 Δ_s 和纵筋的粘结滑移位移 Δ_{slp} ，其简化计算和分析详见文献 [4]。根据试验过程中所量测的各位移计伸长及压缩量，可求得 Δ_{fp} 、 Δ_s 和 Δ_{slp} 在正向循环加载过程中占框架柱总水平侧移的比例变化，具体如图5所示。图中 Δ 表示不同阶段模型柱的总水平侧移。

由图5(a)、(b)中可以看出：(1)在小剪跨比情况下，剪切位移所占的比例随位移幅值的增大而增大，而弯曲位移所占的比例则随位移幅值的增大而减小，尤其是接近最后破坏时，试件X-2的剪切位移所占的比例甚至超过了弯曲位移；(2)虽然试件X-3的配箍率是试件X-2的3倍，但接近最后破坏时，二者剪切位移在各自总水平侧移中所占的比例均为40%左右，这表明在剪跨比和配箍率较小时，配箍率的相对增加并不会改变剪切位移在总水平侧移中所占的比例；(3)试件X-2与试件X-3的粘结滑移位移所占的比例随位移幅值的增大基本保持不变，约为20%和18%左右。

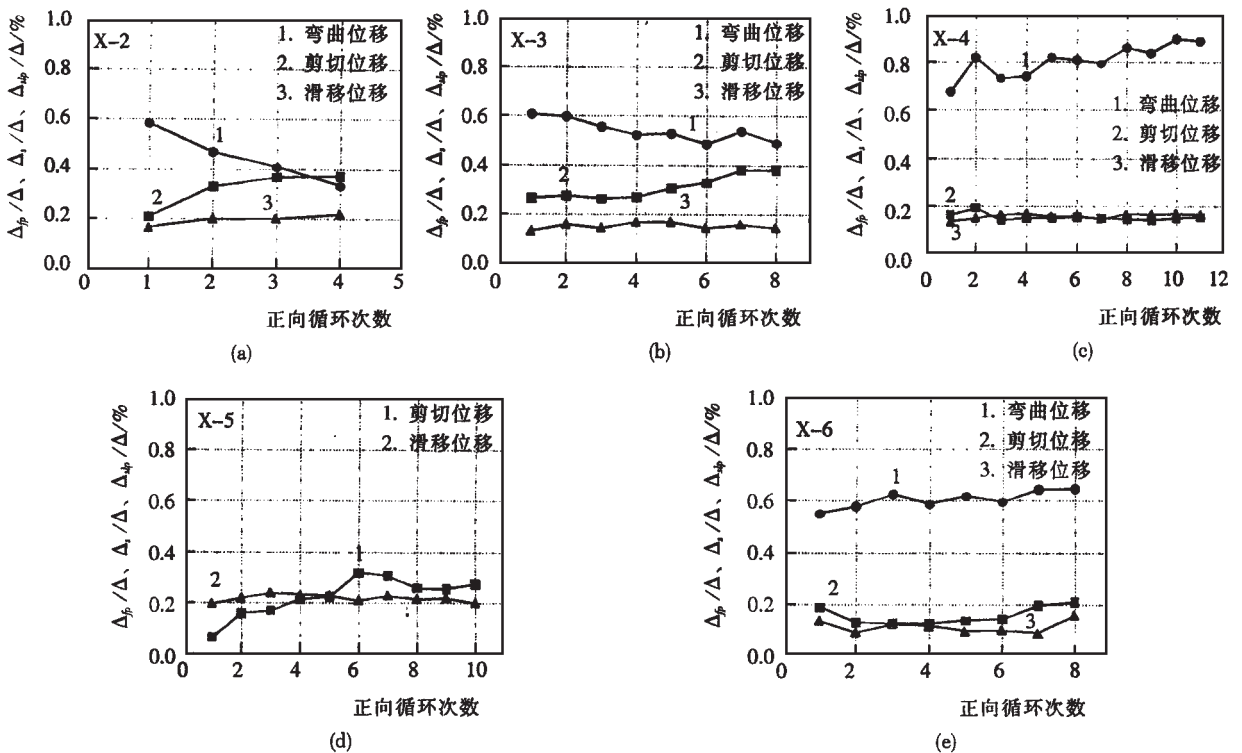


图5 三种位移成分在总水平侧移中所占的比例

Fig.5 Variation of components of deformation against number of positive cycles

由图5(c)、(d)中可知:(1)试件X-5的剪切位移所占的比例随位移幅值的增大有显著的增加,而试件X-4的剪切位移所占的比例变化较小,这表明在中等剪跨比情况下,增大箍筋用量可以明显避免框架柱发生脆性的剪切破坏;(2)试件X-4和X-5的节点区纵筋粘结滑移产生的水平位移在总侧向位移中所占的比例很小,分别为18%和21%。

由图5(b)、(e)可以看出:(1)试件弯曲变形产生的位移在总水平侧移中所占的比例随剪跨比的增大由下降改为上升的趋势,并且增大的幅度随着位移幅值的增加而增大;(2)试件剪切位移在总水平侧移中所占的比例则随剪跨比的增大由上升趋势转为基本不变,这表明增大剪跨比对框架柱的破坏形式有很大的影响,使柱由脆性的剪切破坏形式过渡到了延性的弯曲破坏形式;(3)试件X-3与试件X-6的纵筋粘结滑移位移所占的比例随位移幅值的增大均基本保持不变,前者平均约占总水平位移的18%,后者大致维持在13%左右,说明增大剪跨比可以在一定程度上减小纵筋的粘结滑移位移在总水平侧移中的比例。

3 结论

通过6个框架柱模型的伪静力试验,可得到以下主要结论:

1. 中等剪跨比且配箍率相对较高的试件在多次往复加载时具有较好的变形能力,其破坏位移角也能满足我国抗震规范的要求(大于 $1/50$)。而配箍率较低的试件最终发生脆性的剪切破坏,其延性及抗震性能较差。

2. 框架柱的变形绝大部分集中在塑性铰区域。小剪跨比时,塑性铰区三种变形引起的水平位移之和占总水平侧移的比例接近1,表明小剪跨比时框架柱的弹性弯曲变形及弹性剪切变形均可忽略不计。中等剪跨比时,三种变形所引起的水平位移之和占总水平侧移的比例平均为0.9左右。

3. 剪跨比小于等于3时,塑性铰区域的剪切变形与纵筋的粘结滑移变形在柱的总变形中占有很大的比例,在进行结构计算分析时不应忽略。

参 考 文 献:

- [1] 李惠,王震宇,吴波. 钢管高强混凝土叠合柱抗震性能与受力机理的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999,(3): 27-33.
- [2] Yan Xiao, Armen Martirosyan. Seismic performance of high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, March, 1998, 241-251.
- [3] Frank J Vecchio, Michael P Collins. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI JOURNAL, March-April, 1986, 219-231.
- [4] 徐贱云,吴健生. 多次循环荷载作用下钢筋混凝土柱的性能[J]. 土木工程学报, 1991, (4): 57-70.