

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.05.016

SRC-RC 转换柱型钢延伸高度的试验与研究

伍 凯¹, 薛建阳², 赵鸿铁²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘 要:完成了 12 根 SRC-RC 转换柱试件和 1 根钢筋混凝土柱对比试件的低周反复荷载试验, 对具有不同型钢延伸高度转换柱试件的抗震性能进行了研究。对比研究了不同型钢延伸高度转换柱试件的骨架曲线, 分析了延性、承载能力、耗能能力及强度退化率随型钢延伸高度的变化情况。转换柱试件的位移延性系数随着型钢延伸高度的增加呈现出先升后降的规律, 型钢延伸高度达到 3/5 倍的柱高时位移延性系数达到最大值; 型钢的延伸高度对承载能力影响不大; 影响转换柱试件耗能能力的因素较多, 且各因素之间尚有耦合关系, 3/5 倍的柱高是较为合理的型钢延伸高度, 此时试件的耗能能力较好且刚度和强度均保持了一定的稳定性; 随着型钢延伸高度的增加, 型钢与混凝土之间的粘结问题越突出, 粘结裂缝的不稳定发展不但导致粘结破坏, 而且使强度的稳定性越来越差, 试件的强度退化率越来越小。

关键词:型钢混凝土; 转换层; 延性; 耗能能力

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)05-0102-07

Experimental Analysis of Extension Length of Shape Steel in SRC-RC Transfer Column

WU Kai¹, XUE Jianyang², ZHAO Hongtie²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Seismic performance of SRC-RC transfer column was analyzed based on experiment of 12 specimens of transfer columns and 1 RC specimen under low cyclic reversed loading, which mainly focused on the extension length of shape steel. Analysis and comparison on skeleton curves of specimens was carried out. Analysis was completed for ductility, bearing capacity, energy dissipation capacity and degeneration ratio of strength. Displacement ductility changes with the increase of extension length of shape steel, enhancing at first, then reducing, and reaching peak value when extension length is close to three fifths of column height. Extension length of shape steel has little effect on bearing capacity. Energy dissipation capacity of transfer columns has relationship with many factors. Three fifths of column height is rational for extension length of shape steel, and specimens have not only advanced performance of energy dissipation but also good stability of stiffness and strength in this condition. The bond performance between concrete and shape steel decreases with the increment of extension length of shape steel, and hence stability of strength decreases.

收稿日期: 2011-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51208175, 50978217); 中国博士后基金资助(2012M511186); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2011B07714); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20096120110005); 教育部留学回国人员科研基金(教外司留[1108]号); 陕西省重点学科建设专项基金(E01003)

作者简介: 伍凯(1980-), 男, 博士, 主要从事钢与混凝土组合结构及混合结构性能研究, (E-mail) wukai19811240@yahoo.com.cn。

Key words: steel reinforced concrete; transfer story; displacement ductility; energy dissipation capacity

SRC-RC 竖向混合结构是底部楼层采用型钢混凝土(SRC)结构,上部楼层采用钢筋混凝土(RC)结构的特殊转换结构形式。SRC-RC 竖向混合结构在充分利用型钢混凝土柱良好的承载能力和变形能力、充分发挥其良好抗震性能的同时,可以避免在建筑物底部楼层出现短柱,并且不会大幅度增加建设投资,较完全采用 SRC 结构具有更好的经济效益,是一种具有较大发展和应用前景的新型结构形式^[1-6]。SRC-RC 竖向混合结构本质上属于竖向不规则结构,为了更好地衔接下部的 SRC 柱和上部的 RC 柱,减小强度和刚度的突变,避免出现明显的薄弱层,可以将最上面一层 SRC 柱的型钢向相邻上层延伸一定高度,形成一种特殊的转换构件,即 SRC-RC 转换柱,也可简称为转换柱。转换柱具有较强的实用性,在日本已有学者对其进行试验研究^[7-12],这对于分析和理解转换柱的抗震性能起到了积极的推动作用,但是由于每次试验的试件数量有限,仅侧重于个别参数对受力性能的影响,因此全面的试验研究和深入的理论分析亟待进行。由于型钢仅局部存在于转换柱的中下部,这种特殊的型钢存在方式对构件的抗震性能存在怎样的影响是众多学者普遍关心的问题,型钢在转换柱中的延伸高度成为了研究与分析的核心和重点。

笔者通过 12 根 1/3 比例的转换柱试件的低周反复荷载试验,对转换柱的基本力学行为进行了研究,分析了型钢延伸高度对转换柱破坏形态,以及位移延性系数、承载力、强度退化率、等效粘滞阻尼系数等基本抗震性能的影响。并以 1 根钢筋混凝土柱作为对比试件,用于对比分析钢筋混凝土柱与转换

柱力学性能的差异。试验结果与分析研究可为转换柱的合理设计及 SRC-RC 竖向混合结构的推广与应用提供数据与参考。

1 试验概况

完成了 12 根转换柱试件和 1 根 RC 柱对比试件的低周反复荷载试验,研究并分析了具有不同型钢延伸高度转换柱试件的抗震性能。试件截面尺寸为 220 mm×160 mm,剪跨比 $\lambda = L/(2h_0) = 2.5$, L 为试件高度, h_0 为截面的有效高度。图 1 给出了转换柱试件的钢骨架图:纵筋采用 4 根 16 mm 的 HRB 335 纵筋,配筋率为 2.28%;转换柱试件分别配置了 10 号或 14 号 Q235 工字型钢,配钢率分别为 4.08% 和 6.11%;箍筋为 6.5 mm 的 HPB 235 光圆钢筋,箍筋间距为 96 mm(体积配箍率为 0.96%),箍筋加密区的箍筋间距为 48 mm(体积配箍率为 1.92%)。采用商品混凝土进行试件浇筑,实测混凝土 150 mm 立方体抗压强度平均值为 59.1 MPa。

通过分析与研究国外研究资料,型钢延伸高度达到 2/5 倍的柱高时型钢基本可以达到受弯屈服的状态,笔者试验以此值作为转换柱中型钢延伸高度的最小值。为了研究型钢延伸高度对转换柱抗震性能的影响,12 根转换柱试件的型钢延伸高度分别取为 2/5、3/5、4/5 倍的柱高。表 1 给出了各试件的设计参数。轴压比 $n = N / (f_c \cdot A)$, f_c 为混凝土轴心抗压强度, N 为轴向压力, A 为截面面积。轴压比为 0.4 的试件,柱顶施加的轴压力约为 460 kN;轴压比为 0.2 的试件,柱顶施加的轴压力约为 230 kN。更详尽的试验信息可参看文献[13]。

表 1 试件设计参数汇总

试件编号	型钢延伸高度系数 ξ	轴压比 n	箍筋设置	型钢截断位置局部箍筋加密	型钢配钢率/%	破坏形态	位移延性系数	破坏荷载/kN	等效粘滞阻尼系数最大值
SRC4-2	0.4	0.2	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	6.11	剪切破坏	2.68	129.9	0.130
SRC4-4	0.4	0.4	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	6.11	剪切破坏	2.75	152.3	0.167
S4-2	0.4	0.2	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	4.08	剪切破坏	3.28	125.2	0.147
S4-4	0.4	0.4	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	4.08	剪切破坏	3.10	139.0	0.144
SRC6-2	0.6	0.2	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	6.11	剪切破坏	3.78	127.7	0.171
S6-4	0.6	0.4	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	4.08	弯曲破坏	3.33	135.8	0.184
SRC8-2	0.8	0.2	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	6.11	粘结破坏	3.63	133.2	0.223
SRC8-4	0.8	0.4	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	6.11	剪切破坏	3.54	146.3	0.189
S8-2	0.8	0.2	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	4.08	弯曲破坏	3.85	115.1	0.269

续表 1

试件编号	型钢延伸高度系数 ξ	轴压比 n	箍筋设置	型钢截断位置局部箍筋加密	型钢配钢率/%	破坏形态	位移延性系数	破坏荷载/kN	等效粘滞阻尼系数最大值
S8-4	0.8	0.4	$\Phi 6.5@96$	$\Phi 6.5@48$	4.08	粘结破坏	3.23	131.7	0.307
SRC4-2-N	0.4	0.2	$\Phi 6.5@96$	—	6.11	剪切破坏	1.97	124.0	0.111
S4-2-N	0.4	0.2	$\Phi 6.5@96$	—	4.08	剪切破坏	4.24	115.5	0.230
RC	—	0.2	$\Phi 6.5@96$	—	—	弯曲破坏	4.19	101.9	0.167

注:型钢延伸高度系数 $\xi = L_{ss}/L, L_{ss}$ 为型钢在转换柱中的延伸高度。

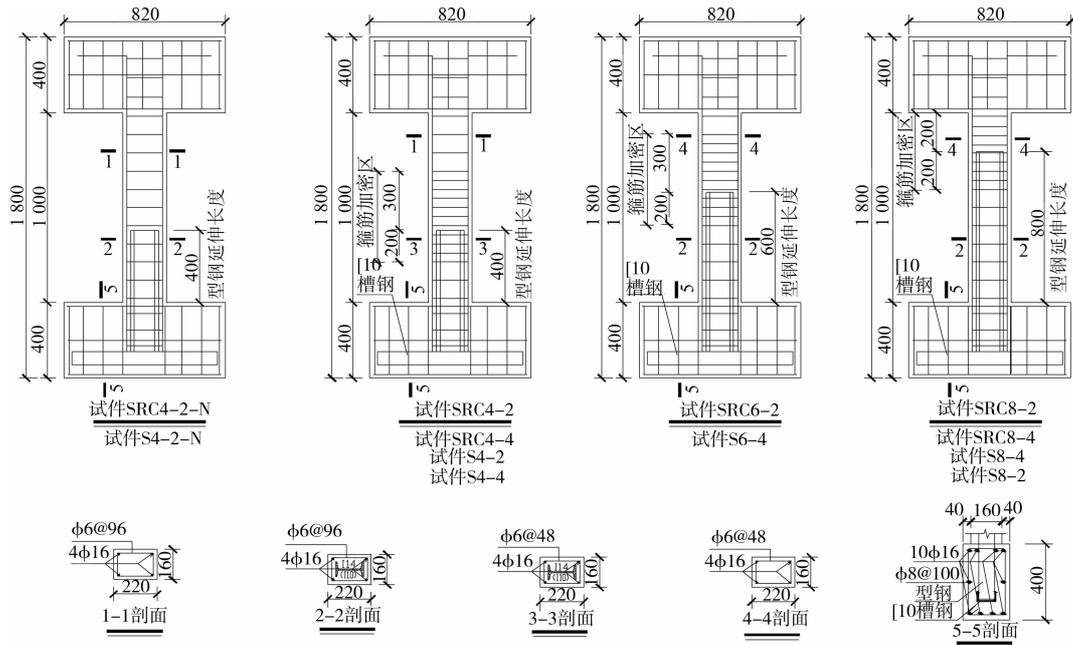


图 1 试件的配钢与配箍(单位:mm)

2 破坏形态与配箍方式

SRC 柱在低周反复荷载作用下,型钢与混凝土存在剪力分配的问题,两者的剪力分配在节点区域基本上已经完成。转换柱由于型钢仅仅局部存在于柱的中下部,型钢与混凝土之间的共同工作必须依靠两者在柱身范围内的相互挤压完成,通过挤压混凝土将部分剪力传递给型钢。型钢与混凝土之间的相互挤压是两者达到共同工作的基础,也是导致转换柱内力传递畸变的诱因。内力传递的畸变导致转换柱出现如图 2(a)、(b)所示、类似于 RC 短柱的剪切破坏。图 3 给出了试件 SRC4-2-N 的箍筋在位移为 Δ_y 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 时的箍筋应变:最大荷载前,各位置箍筋应变较小;达到最大荷载后,临界剪切裂缝出现,钢筋混凝土部分箍筋的应变值突然产生巨幅增涨,箍筋在很短的时间内进入屈服阶段并丧失对裂缝的约束作用,无法起到改善抗震性能和提高耗能能力的作用。

为了防止此类剪切破坏的产生,除试件 SRC4-2-N、试件 S4-2-N,以及钢筋混凝土柱对比试件 RC

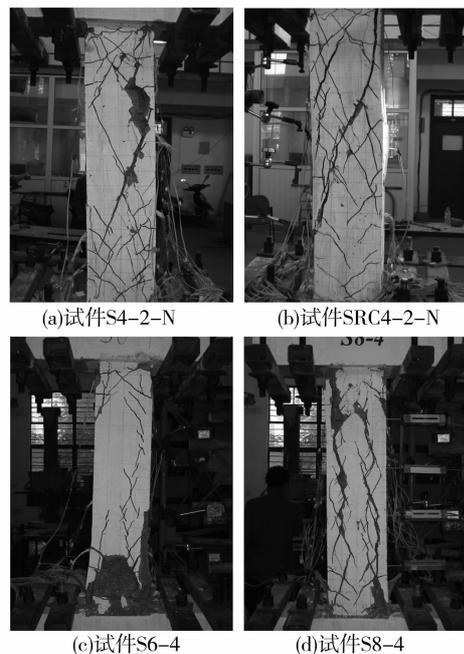


图 2 试件的破坏形态

外,其余试件均在型钢截断位置附近采取了箍筋加密措施: $\xi = 0.4$ 、 0.6 试件的箍筋加密区高度为

500 mm,型钢截断位置以下 200 mm 至型钢截断位置以上 300 mm; $\xi = 0.8$ 试件的加密区高度为 400 mm,型钢截断位置以下 200 mm 至型钢截断位置以上 200 mm。试验结果表明,型钢截断位置处的局部箍筋加密可以有效约束剪切裂缝的发展,试件的抗震性能得到有效改善,破坏方式发生改变,如图 2(c)、(d)所示。

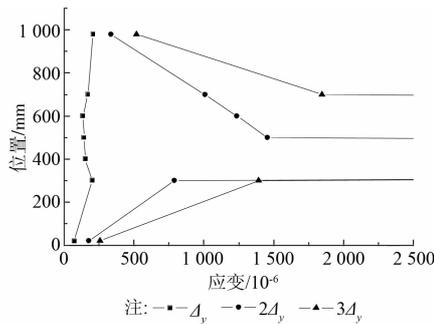


图 3 试件 SRC4-2-N 箍筋应变

3 基本抗震性能分析

3.1 无量纲骨架曲线

图 4 为具有不同型钢延伸高度转换柱的无量纲骨架曲线,横轴为柱顶水平侧移与屈服侧移的比值,纵轴为水平荷载与屈服荷载的比值。通过对比分析可以发现:

1)最大荷载与屈服荷载的比值约为 1.2,最大荷载对应的位移约为屈服位移的 2 倍。

2)在弹性阶段,型钢延伸高度对侧移刚度影响甚微。

3)延伸高度系数为 0.6 的试件具有最佳的屈服后变形能力,骨架曲线的下降段最为平缓。

4)轴压比越高、型钢在转换柱中延伸的越高,骨架曲线的下降段越陡峭。

3.2 延性

图 5 给出了转换柱试件位移延性系数 μ 随型钢延伸高度的变化情况:随着型钢延伸高度的增加,转换柱的位移延性系数呈现出先升后降的规律,型钢延伸高度系数 $\xi = 0.6$ 时位移延性系数达到最大值,这种规律不受轴压比、型钢配钢率等因素的影响。与 SRC 柱及 RC 柱一样,轴压比依然是影响转换柱延性的重要因素,轴压比较大的试件延性较差^[14-17]。型钢延伸高度对位移延性系数的影响程度受到轴压比的影响:轴压比较小时,型钢延伸高度的影响较为明显;随着轴压比的增大,型钢延伸高度的影响逐渐减弱,位移延性系数相对稳定。

中国目前正在使用的行业标准《型钢混凝土组

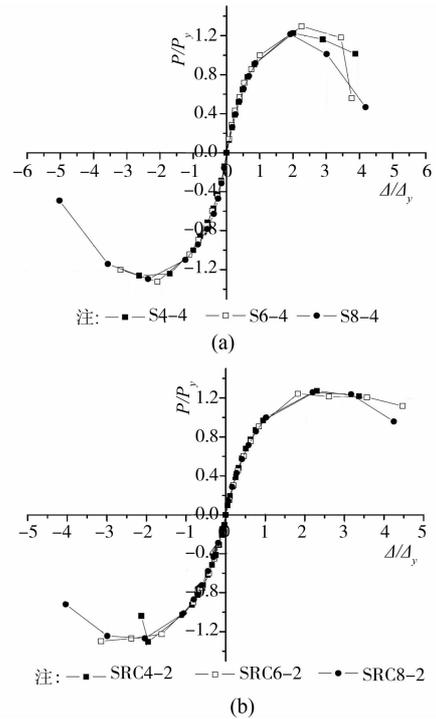


图 4 无量纲骨架曲线

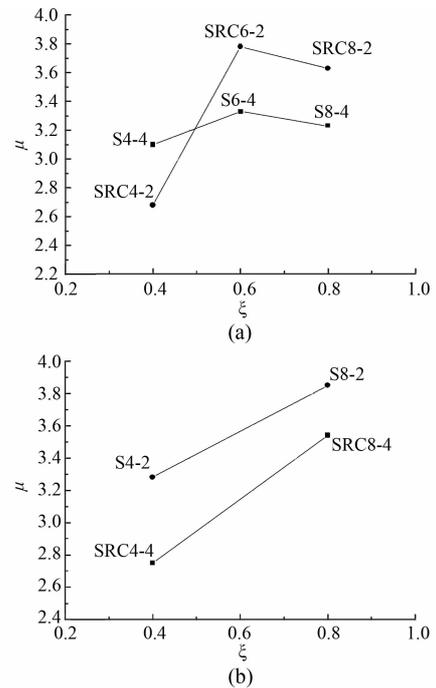


图 5 位移延性系数与型钢延伸高度

合结构技术规程》(JGJ 138—2001)^[18]中强调了 SRC-RC 竖向混合结构中应设置竖向过渡层,以减小上、下层的强度和刚度的突变,并给出了如下规定:

1)从设计计算上确定某层柱可由型钢混凝土柱改为钢筋混凝土柱时,下部型钢混凝土柱中的型钢应向上延伸 1 层或 2 层作为过渡层,过渡层柱中的型钢截面尺寸可根据梁的具体配筋情况适当变化,

过渡层柱的纵向钢筋配置应按钢筋混凝土柱计算且箍筋应沿柱全高加密。

2) 结构过渡层内的型钢应设置栓钉, 栓钉的直径不应小于 19 mm, 栓钉的水平及竖向间距不宜大于 200 mm, 栓钉至型钢钢板边缘距离不宜小于 50 mm。

从此次试验的结果分析, 如此规定值得商榷: 首先, 上述过渡方式无异于增加 1 层或 2 层 SRC 层, 在增加建设成本的同时, 还可能导致薄弱层向上转移, 并没有解决此类转换结构的根本问题; 其次, 试验结果显示型钢的延伸高度并非“越高越好”, 应该存在一个最佳的合理延伸高度, 保证转换柱具有更好的延性和变形能力, 实现刚度和强度的合理过渡。从受力的角度分析, 型钢的截断位置应选择在受力较小的部位, 反弯点是合理的位置。由于型钢局部存在于转换柱的中下部, 因此反弯点大约位于 0.6 倍的柱高处。故 3/5 倍的柱高应为型钢的合理延伸高度, 试验结果表明此时试件的位移延性系数达到最大值。

3.3 承载能力

图 6 给出了型钢延伸高度对承载能力的影响, 图 6(a) 反映了本次试验结果, 图 6(b) 为文献[6]与文献[9]的试验结果(构件 S1200 的延伸高度系数 $\xi = 1.0$, 指型钢延伸至梁的底面, 并非型钢混凝土柱对比试件), 试验结果表明型钢延伸高度对承载能力影响甚微。对于剪跨比较大的转换柱构件, 型钢参与工作的程度和型钢抗弯能力发挥的程度是决定承载力的主要因素之一, 型钢延伸高度达到 2/5 倍的柱高就可以保证柱底型钢达到屈服, 因此型钢高度的继续增加对承载能力影响不大; 对于剪跨比较小的构件, 型钢的延伸高度对承载能力的影响同样有限, $\lambda = 1.5$ 与 $\lambda = 2.0$ 试件中延伸高度最小试件与延伸高度最大试件的承载能力相差仅为 10% 左右。

3.4 强度退化率

强度退化率是指位移控制阶段中, 每级位移下强度的退化速率, 反映了构件在一定的变形下, 强度随荷载反复次数增加的降低特性。在位移控制阶段, 每级加载中位移保持恒定, 因此割线刚度和强度具有相同的退化率。

表 2 给出了所有试件在位移控制阶段各级位移下的退化率, 退化率的大小按式(1)计算。强度退化率越小, 试件承受反复荷载的能力越差, 强度损失的越多。

$$k_j = \frac{|P_{+j}^3| + |P_{-j}^3|}{|P_{+j}^1| + |P_{-j}^1|} \quad (1)$$

式中, k_j 为 j 倍屈服位移的强度退化率; P_{+j}^3 、 P_{-j}^3

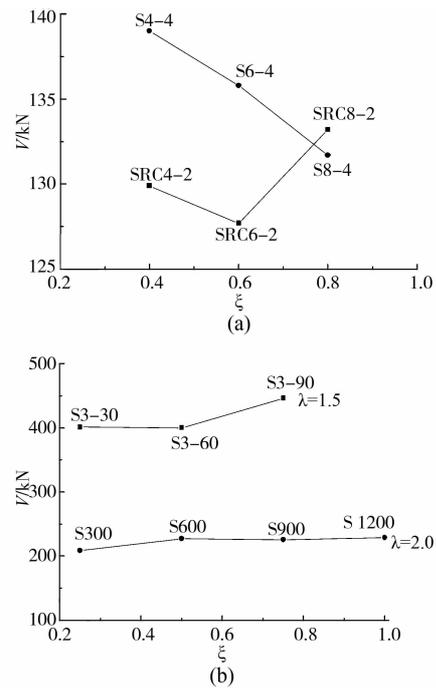


图 6 承载能力与型钢延伸高度

分别为 j 倍屈服位移加载阶段第 3 次加载循环推拉两方向的峰值荷载; P_{+j}^1 、 P_{-j}^1 分别为 j 倍屈服位移加载阶段第 1 次加载循环推拉两方向的峰值荷载。

表 2 强度退化率

件编号	k_1	k_2	k_3	k_4
SRC4-2	0.99	0.94		
SRC4-4	0.98	0.96	0.93	
S4-2	0.97	0.95	0.78	
S4-4	0.99	0.95	0.93	
SRC6-2	0.99	0.96	0.96	0.96
S6-4	0.97	0.93	0.79	
SRC8-2	0.95	0.95	0.81	0.80
SRC8-4	0.97	0.94	0.81	
S8-2	0.95	0.95	0.91	
S8-4	0.95	0.91	0.54	
SRC4-2-N	0.98	0.57		
S4-2-N	0.96	0.96	0.95	0.71
RC	0.99	0.98	0.97	

型钢延伸高度的增加使试件最后一级位移的强度退化率减小, 说明在加载过程中强度的损失速率越来越迅速, 强度的稳定性越来越差。粘结裂缝及剪切斜裂缝的出现及发展是造成强度退化的主要因素。随着型钢延伸高度的增加, 型钢与混凝土之间的粘结问题越来越突出, 粘结裂缝的发展更为充分。

当延伸高度达到 4/5 倍的柱高时,试件的破坏方式已经以粘结破坏为主。粘结裂缝的不稳定发展不但导致粘结破坏,而且使强度的稳定性越来越差,试件的强度退化率越来越小。对于箍筋设置较少的试件 SRC4-2-N 及 S4-2-N,虽然型钢延伸高度较小,但由于箍筋数量稀少、无法有效限制剪切斜裂缝的发展,因此大范围剪切裂缝的出现与扩展依然使试件的强度退化现象非常严重,同级位移的 3 个循环中强度损失可高达 46%。

3.5 耗能能力

耗能能力是衡量构件抗震性能的主要指标之一,常采用等效粘滞阻尼系数 h_e 表示,图 7 给出了 h_e 与型钢延伸高度相关曲线, h_e 随型钢延伸高度增长而增大。转换柱的耗能能力主要来自 3 个方面:混凝土剪切裂缝的出现与发展;钢与混凝土之间粘结裂缝的出现与发展;横截面转动及混凝土、钢筋、型钢的损伤与塑性发展。由于剪切裂缝与粘结裂缝的发展会导致强度和刚度迅速衰减、“捏拢”现象增强,影响了试件承受反复荷载的能力,因此横截面及塑性铰的转动是较合理的耗能方式。

随着型钢延伸高度的增大,上述 3 个方面所产生的能量消耗呈动态的平衡关系。型钢延伸高度较小时,型钢与混凝土之间的粘结作用较为可靠,粘结裂缝较少,由粘结裂缝的出现与发展而导致的能量消耗非常有限,此时剪切裂缝发展较为充分,是能量消耗的主要方式之一,而横截面转动产生的能量消耗与试件的极限侧移有关,侧移越大、耗能越多。因此对于箍筋数量稀少、剪切裂缝发展较充分,而型钢延伸高度较小的试件 SRC4-2-N,耗能主要依靠剪切裂缝的发展,等效粘滞阻尼系数较小。当型钢延伸高度较大时,型钢与混凝土之间的粘结裂缝发展较为充分,由此产生的能量消耗是耗能的主要方式,此时剪切裂缝的分布较为集中,发展相对有限。

除了型钢延伸高度以外,配钢率与轴压比也是影响耗能能力的主要因素。轴压比较大的试件,由于轴向压应力较大,剪切裂缝的出现与发展受到一定的约束,于此同时较大的轴压力限制了塑性铰的转动,耗能主要依靠粘结裂缝的发展及由此产生的混凝土损伤。由试验可知,配钢率较小试件剪切裂缝与粘结裂缝的发展有限,耗能主要依靠柱顶部和底部截面塑性铰的转动。对于具有较小型钢截面的转换柱试件,下部的 SRC 截面可以较早的进入屈服状态,截面的塑性转动更为充分,相关试件表现出了更好的耗能能力。

综合而言,影响转换柱试件耗能能力的因素较

多,且各因素之间尚有耦合关系。仅从型钢延伸高度方面研究,3/5 倍的柱高较为合理,此时试件的耗能能力较好且刚度和强度均保持了一定的稳定性。型钢延伸高度过大时,虽然等效粘滞阻尼系数较大,但由于刚度和强度已有大幅度的退化,构件的适用性已经相对较低,此时的耗能能力可利用率较小。

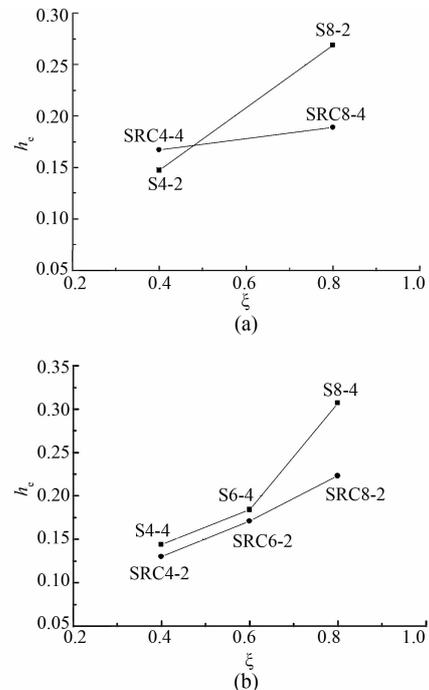


图7 等效粘滞阻尼系数与型钢延伸高度

4 结论

1)完成了 12 根转换柱试件和 1 根 RC 柱对比试件的低周反复荷载试验,研究并分析了具有不同型钢延伸高度转换柱试件的抗震性能。转换柱的最大荷载与屈服荷载的比值约为 1.2,最大荷载对应的位移约为屈服位移的 2 倍。延伸高度系数为 0.6 的试件具有最佳的屈服后变形能力,骨架曲线的下降段最为平缓。

2)随着型钢延伸高度的增加,转换柱的位移延性系数呈现出先升后降的规律,型钢延伸高度系数 $\xi = 0.6$ 时位移延性系数达到最大值。型钢延伸高度对位移延性系数的影响程度受到轴压比的影响:轴压比较小时,型钢延伸高度的影响较为明显;随着轴压比的增大,型钢延伸高度的影响逐渐减弱,位移延性系数相对稳定。而型钢延伸高度对转换柱承载能力影响甚微。

3)随着型钢延伸高度的增加,转换柱在加载过

程中强度的损失越来越迅速,强度的稳定性越来越差。粘结裂缝及剪切斜裂缝的出现及发展是造成强度退化的主要因素。

4)转换柱的耗能能力主要来自3个方面:混凝土剪切裂缝的出现与发展;钢与混凝土之间粘结裂缝的出现与发展;横截面转动及混凝土、钢筋、型钢的损伤与塑性发展。随着型钢延伸高度的增大,这3个方面所产生的能量消耗呈动态的平衡关系。3/5倍的柱高是较为合理的型钢延伸高度,此时试件的耗能能力较好且刚度和强度均保持了一定的稳定性。

参考文献:

- [1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [2] 薛建阳. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [3] 王培军, 李国强. 火灾下轴心受压 H 型截面约束钢柱整体稳定设计[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 31-36.
WANG Peijun, LI Guoqiang. Overall stability design of restrained H-section steel columns under axial load in fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(4): 31-36.
- [4] 杨涛, 张喜德. T 形截面钢管混凝土异形柱框架抗震性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 33-37.
YANG Tao, ZHANG Xide. Research on seismic behavior of frame with T-shaped SRC columns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 33-37.
- [5] 戴国亮, 蒋永生, 傅传国, 等. 高层型钢混凝土底部大空间转换层结构性能研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 24-32.
DAI Guoliang, JIANG Yongsheng, FU Chuanguo, et al. Experimental study on aseismic behaviors of transfer story with steel reinforced concrete in low stories of large space [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 25-32.
- [6] 李红, 马洪宝, 潘皓. T 型钢与混凝土粘结强度的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(3): 307-311.
LI Hong, MA Hongbao, PAN Hao. Investigation on the bond strength between steel and concrete in SRC structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition, 2008, 40(3): 307-311.
- [7] 西村泰志, 岡本昌泰, 馬場望. RC 部材とSRC 部材が直列的に結合される接合部の応力伝達(その2)[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 1999: 1063-1064.
Okamoto M, Baba N, Nishimura Y. Stress transfer from reinforced concrete member to steel reinforced concrete member (Part 2) [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 1063-1064.
- [8] 岡本昌泰, 馬場望, 西村泰志. RC 部材とSRC 部材が直列的に結合される接合部の応力伝達(その3)[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 1999: 1065-1066.
Okamoto M, Baba N, Nishimura Y. Stress transfer from reinforced concrete member to steel reinforced concrete member (Part 3) [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 1065-1066.
- [9] 鈴木英之, 西原寛, 松崎育弘. 柱高さの途中まで存在する鉄骨がRC 柱のせん断性状に及ぼす影響[J]. コンクリート工学年次論文報告集, 1999, 21(3): 577-582.
Suzuki H, Nishihara H, Matsuzaki Y. Shear performance of RC columns effected by the shape steel truncated in the midway of the columns [J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1999, 21(3): 577-582.
- [10] 鈴木英之, 西原寛, 松崎育弘. SRC 造からRC 造へ構造形式が切り替わる柱のせん断性状[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 1999: 1069-1070.
Suzuki H, Nishihara H, Matsuzaki Y. Shear performance of the column where structural form changes from SRC to RC [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 1069-1070.
- [11] 山口美有希, 木村潤一, 鄭真安, 等. SRC-RC 混合柱部材の骨格曲線モデル[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 2004: 1177-1178.
Yamaguchi M, Kimura J, Chung J, et al. Skeleton curve model of SRC-RC mixed columns [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 1177-1178.
- [12] 今野修, 今泉隆之, 山本憲一郎, 等. 超高層建築物における下層階へのSRC 構造適用に関する実験的研究, その1 SRC 柱の靱性性能に関する実験計画[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 九州, 1998: 1029-1030.

1548.
FANG Xiangwei, SUN Shuguo, CHEN Zhenghan, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [7] Carlson K, Sariosseiri F, Muhunthan B. Engineering properties of cement kiln dust-modified soils in Western Washington State [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29: 1-8.
- [8] Saboundjian S. Subbase treatment using EMC2 soil stabilizer-final report 1997-2001 [R]. Juneau: Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, 2002.
- [9] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 1996-2000.
FAN Henghui, GAO Jianen, WU Pute, et al. Analysis of influence factors for soilidified soil strength based on change of physicochemical properties of loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 1996-2000.
- [10] 刘清秉,项伟,崔德山,等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4): 648-654.
LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Mechanism of expansive soil improved by ionic soil stabilizer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(4): 648-654.
- [11] Qu Q, Zhang X G, Yi N P. The experimental study on strength of subgrade soil treated with liquid stabilizer [J]. *Advanced Materials Research*, 2011 (194/195/196): 985-988.
- [12] Liu J K, Wang T L, Tian Y H. Experimental study of the dynamic properties of cement-and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61(1): 29-33.
- [13] Heath D L, Shenton M J, Sparrow, R W, et al. Design of conventional rail track foundation [C]// *Proceedings of the Institute of Civil Engineering*, 1972. [S. l. s. n], 1972: 251-267.
- [14] Li D, Selig E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1994, 120(6): 939-957.
- [15] Wang D Y, Ma W, Niu Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48: 34-43.

(编辑 薛婧媛)

(上接第108页)

- Kon-no S, Imaizumi T, Yamamoto K, et al. Experimental study on high-rise building with lower floor composed of SRC structure. Part1: Outline of the tests about deformation capacity of SRC columns [C]// *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Kyushu*, 1998. [s. l. s. n.], 1998: 1029-1030.
- [13] 伍凯. 低周反复荷载下 SRC-RC 转换柱基本力学行为与抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
- [14] Li J H, Xue J Y, Zhao H T. Experimental study on slip behavior between shaped steel and concrete in SRC columns under cyclic reversed loading [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition*, 2008, 40(3): 348-353.
- [15] 李晓莉,常玉珍,吴敏哲. 异形柱和短肢剪力墙的轴压比限值比较分析[J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 2010, 42(4): 504-508.
LI Xiaoli, CHANG Yuzhen, WU Minzhe. Comparative analysis on the axial compression ratio limit of the special - shape column and the short - shear wall [J] .
Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition, 2010, 42(4): 504-508.
- [16] 郑文忠,王琨. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(3): 49-60.
ZHENG Wenzhong, WANG Kun. Study of seismic performance of frame structures of steel reinforced concrete beams and angle-steel concrete columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(3): 49-60.
- [17] 刘阳,郭子雄,欧阳文俊,等. 核心型钢混凝土柱抗震性能及轴压比限值试验研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(6): 47-66.
LIU Yang, GUO Zixiong, OUYANG Wenjun, et al. Experimental study of the seismic behavior and axial compression ratio limit of CSRC columns [J]. *China Civil Engineering Journal*. 2010, 43(6): 47-66.
- [18] JGJ 138-2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

(编辑 郭飞)