

文章编号: 1000-4750(2009)04-0098-07

# 反复荷载下型钢混凝土柱粘结滑移性能试验研究

\*李俊华<sup>1</sup>, 薛建阳<sup>2</sup>, 王新堂<sup>1</sup>, 赵鸿铁<sup>2</sup>

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江, 宁波 315211; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

**摘 要:** 通过在型钢翼缘外侧布置电阻应变片和滑移传感器, 对轴力和反复水平荷载作用下型钢混凝土柱的粘结滑移性能进行了试验研究。由试验得到了水平荷载-滑移滞回曲线和骨架曲线、粘结应力和滑移沿柱高的分布规律; 分析了荷载循环次数对粘结应力和滑移量的影响, 提出了粘结应力退化率的计算公式。试验结果表明, 型钢混凝土的荷载-滑移滞回曲线比较丰满, 在整个加载过程中没有明显的“捏拢”现象。水平荷载的上升阶段, 粘结应力的最大值位于柱的中部, 由中部向两端递减, 沿柱高呈典型的抛物线状分布; 最大荷载后的荷载下降阶段, 粘结应力的最大值向柱顶偏移, 柱根处由于型钢翼缘的屈服, 粘结应力减小为零, 沿柱高出现一定范围的“无粘结区”。在整个加载过程中, 柱根处的滑移量最大, 由柱根向柱顶逐渐递减, 沿柱高大致呈指数分布。随着荷载循环次数的增加, 粘结应力不断减小, 滑移量不断增大, 出现明显的粘结退化现象。

**关键词:** 型钢混凝土柱; 反复荷载; 粘结应力; 滑移; 粘结退化

中图分类号: TU398 文献标识码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON BOND SLIP BEHAVIOR BETWEEN SHAPE STEEL AND CONCRETE IN SRC COLUMNS UNDER CYCLIC REVERSED LOADING

LI Jun-hua<sup>1</sup>, XUE Jian-yang<sup>2</sup>, WANG Xin-tang<sup>1</sup>, ZHAO Hong-tie<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China ;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** This paper studies bond slip behavior of steel reinforced concrete (SRC) columns under constant axial load and cyclic reversed horizontal load. With strain gauges and slip transfers embedded on flanges of the shape steels, the test generates hysteretic and skeleton curves of slip against horizontal load. The distribution of bond stress and slip along columns are also obtained. Influence of load cycle number on bond stresses and slips are analyzed, and calculating formula for bond degeneration is presented. Test results show that the hysteretic curve of slip against horizontal load is chubbiness without pinching. At the stage before ultimate horizontal load, bond stress is distributed in parabola along columns. At load-descending stage, the maximum bond stress occurs at the top of columns, and bond stress at the bottom of columns decreases to zero due to the yielding of steel flanges, leading to the occurrence of zero-bone zone along columns. In the whole stage of loading, the interior slip between shape steel and concrete is exponentially distributed along columns. With the increase of load cycle number, bond stresses along columns gradually decrease, but slips gradually increase, demonstrating bond degeneration.

**Key words:** steel reinforced concrete (SRC) column; cyclic reversed load; bond stress; slip; bond degeneration

收稿日期: 2007-11-20; 修改日期: 2008-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478044); 宁波市自然科学基金项目(2006A610096); 宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: \*李俊华(1977—), 男, 湖南安仁人, 副教授, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: lijunhua@nbu.edu.cn);

薛建阳(1970—), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事组合结构研究(E-mail: jianyang\_xue@163.com);

王新堂(1963—), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构与组合结构研究(E-mail: Wangxintang@nbu.edu.cn);

赵鸿铁(1939—), 男, 江苏人, 教授, 硕士, 博导, 主要从事组合结构及古建木结构研究(E-mail: luckylijh@163.com).

型钢混凝土结构在高层和超高层建筑中具有显著优越性,其应用日趋广泛。但是型钢与混凝土之间的粘结力小,荷载作用下容易在其界面上产生相对滑移,这种滑移的存在将降低型钢混凝土的共同工作性能并直接影响构件的承载力、变形和裂缝宽度计算。因此,型钢混凝土的粘结滑移性能长期以来倍受学术界和工程界重视。

国外最早探寻型钢混凝土粘结滑移特性的是日本的坪井善胜和若林实,他们通过钢板的拉拔试验,得出型钢混凝土粘结强度很低,大约只相当于混凝土与光圆钢筋之间粘结力的 30% 的结论<sup>[1]</sup>。在欧洲, Bryson 和 Mathey<sup>[2]</sup>、Hawkins<sup>[3]</sup>、Roeder<sup>[4]</sup>、Hamdan 和 Hunaiti<sup>[5]</sup>、Wium 和 Lebet<sup>[6]</sup>、Charles 和 Robert<sup>[7]</sup>等先后通过推出和短柱试验,研究了型钢混凝土的粘结强度和端部滑移性能,其中 Roeder<sup>[4]</sup>在 1984 年所进行的试验中,首次考虑了粘结应力沿型钢锚固长度上的变化,并通过在型钢翼缘密布电阻应变片的方法,得出了粘结应力沿构件不同截面位置的分布规律。同时,为了考察型钢混凝土在风荷载和地震荷载作用下的粘结滑移性能, Roeder 还对两个自由端已经发生滑移的试件进行了重复加载,得出重复加载的粘结强度比首次加载时所达到的粘结强度低 28%—45% 的结论。在国内,郑州工学院<sup>[8]</sup>、重庆大学<sup>[9]</sup>、同济大学<sup>[10]</sup>、西安建筑科技大学<sup>[11-12]</sup>等单位也先后对型钢混凝土的粘结滑移性能进行了研究。

从研究方法来看,国内外所有这些试验几乎都是基于推出和短柱加载方式。推出和短柱加载时,荷载直接作用在型钢端部,通过型钢与混凝土的粘结作用,将荷载传给混凝土,因此具有构件受荷简单,荷载传递单一的优点,能直接确定构件的平均粘结强度和滑移刚度。但是在推出和短柱试验中,试件的受力与工程中型钢混凝土梁柱的真实受荷情况存在较大差异,因此由推出和短柱试验得出结论是否和实际情况相符,还需要进一步验证。另一方面,除 Roeder 曾进行过两个型钢混凝土试件的重复加载外,对反复荷载下型钢混凝土的粘结滑移性能,到目前为止国内外都未见报道。由于反复荷载下型钢混凝土的粘结滑移对型钢混凝土柱在地震作用下的受力性能及锚固措施有重要影响,笔者因此设计了若干型钢混凝土柱在轴力和低周反复水平荷载共同作用下的试验,以此研究地震作用下型钢混凝土柱的粘结强度、滑移分布、以及粘结滑移

退化规律。

## 1 试验概况

### 1.1 粘结应力测试方案

由力的平衡条件可知,型钢与混凝土界面上某一点的粘结应力与该位置处型钢或混凝土的应力变化有关,粘结应力与型钢或混凝土的应力满足一阶导数关系。试验中,首先通过在型钢翼缘密布电阻应变片测得型钢的应力分布,然后对应力分布函数求导确定粘结应力<sup>[13]</sup>。

### 1.2 滑移测试方案

钢与混凝土界面上的相对滑移是粘结滑移性能研究的一个关键问题,但是国内外长期以来一直没有找到合适的试验测试方法。为此,课题组专门研制开发一个内置式钢-混凝土电子滑移传感器,利用该传感器测试型钢与混凝土之间的相对滑移。传感器及其在型钢表面的布置如图 1 所示,传感器的内部构造详见文献<sup>[12]</sup>。

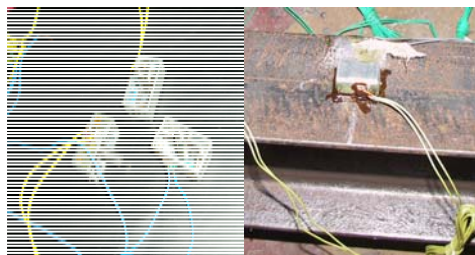


图 1 滑移传感器及其在型钢表面的布置

Fig.1 Slip transfers and its establishment on the steel surface

### 1.3 试件和参数设计

试验中共有 20 个试件,从抗震性能出发,考虑剪跨比、轴压比、体积配箍率、混凝土强度四个参数的影响<sup>[14]</sup>,各试件的参数设计见表 1。柱截面尺寸为 220mm×160mm;型钢采用普通热轧工字钢,工字钢的截面高度为 140mm,翼缘宽 80mm,截面设计详见图 2。

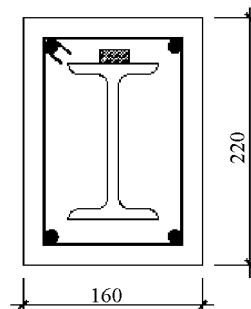


图 2 试件截面设计

Fig.2 Section of specimens

表 1 试件参数汇总表  
Table 1 Parameters of test specimens

试件 编号	混凝土 强度/MPa	剪跨比 $\lambda$	试验 轴压比	配箍率 $\rho_v/(%)$
SRC-1	66.4	1.0	0.36	0.8
SRC-2	67.3	1.0	0.36	1.2
SRC-3	70.4	1.0	0.36	1.6
SRC-4	66.4	1.5	0.36	0.8
SRC-5	67.3	1.5	0.36	1.2
SRC-6	70.4	1.5	0.36	1.6
SRC-7	66.4	2.5	0.36	0.8
SRC-8	65.3	2.5	0.36	1.2
SRC-9	73.1	2.5	0.36	1.6
SRC-10	81.8	2.0	0.20	0.8
SRC-11	81.8	2.0	0.20	1.2
SRC-12	83.1	2.0	0.20	1.6
SRC-13	83.1	2.0	0.28	0.8
SRC-14	81.8	2.0	0.28	1.2
SRC-15	84.9	2.0	0.28	1.6
SRC-16	84.9	2.0	0.36	0.8
SRC-17	84.4	2.0	0.36	1.2
SRC-18	84.4	2.0	0.36	1.6
SRC-19	84.4	1.0	0.36	1.2
SRC-20	84.9	1.5	0.36	1.6

#### 1.4 试验加载方案

试验加载按照抗震性能试验方法进行, 首先通过千斤顶及荷载传感器施加轴向荷载到恒定值, 然后保持该轴向压力不变, 由水平作动器往复推拉施加水平荷载, 试验加载装置如图 3 所示。

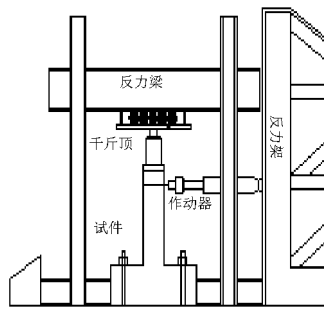


图 3 试验加载装置  
Fig.3 Test setup

#### 1.5 传感器布置

试验中, 传感器在型钢的一侧翼缘特定位置(柱根部、中部以及柱顶)布置, 这是考虑低周反复加载试验中, 型钢两侧翼缘在作动器的每次推拉过程中都要分别经历压状态、拉(水平荷载较小时也为压, 与轴力和水平荷载的相对大小有关)状态, 因此将传感器布置在一侧翼缘就可以测得不同应力状态下的滑移。

## 2 滑移的试验研究结果

### 2.1 荷载-滑移滞回曲线

由布置在型钢翼缘上的电子滑移传感器, 可以测得型钢混凝土柱在轴力和水平荷载共同作用下的荷载-滑移滞回曲线, 典型的荷载-滑移滞回曲线如图 4 所示, 从图 4 中可以看出以下几个方面特点:

1) 水平荷载小于 60% 极限荷载之前, 滑移量很小, 荷载滑移的加载、卸载曲线为直线, 卸载至零时, 滑移基本恢复。60% 的极限荷载以后, 滑移开始加大, 加载曲线逐渐偏离直线, 卸载至零时, 由于反向摩擦阻力的存在, 滑移不能完全恢复, 反向加载至一定值后, 滑移才回到零点。继续增加荷载, 滑移朝相反方向发展并不断增大, 反向卸载曲线与滞回环的前半循环相似, 卸载至零时也存在残余滑移。极限荷载过后, 荷载-滑移曲线的加载、卸载规律与前一阶段没有太大的变化, 但滑移量急剧增加, 滑移刚度不断减小, 此时极小的荷载波动会导致滑移的成倍增长。

2) 荷载循环次数对滑移性能具有显著影响, 在同一水平位移下循环加载三次时, 第二和第三次循环的加载、卸载规律与第一次相似, 但滑移量更大, 滑移刚度有明显衰减的趋势。

3) 翼缘在拉应力、压应力状态下的滑移规律基本相同, 但受压时(水平荷载为正时, 对应作动器水平推)的滑移略大于受拉时(水平荷载为负时, 对应于作动器水平拉)的滑移, 这与受拉和受压时型钢翼缘的应力水平以及裂缝的开展状况有关。

4) 随着滑移量的增加, 荷载-滑移滞回曲线越来越丰满, 整个加载过程中, 滞回曲线未出现明显的“捏拢现象”。这与钢筋混凝土构件在反复荷载下的荷载-滑移曲线有明显的不同<sup>[15]</sup>, 产生这一变化的原因主要是由于型钢混凝土构件与钢筋混凝土构件粘结机理的不同而造成的。在钢筋混凝土构件中, 由于钢筋横肋的存在, 加载产生滑移时, 肋前挤压混凝土, 而肋后则留有一定的空隙, 卸载时由于反向摩擦的阻滞作用, 滑移不能完全恢复, 空隙依然存在; 反向加载时, 克服摩擦阻力以后, 滑移由于空隙的存在有一个迅速发展的阶段, 此时滑移刚度很小, 荷载基本稳定而滑移剧增, 形成荷载-滑移曲线上的水平段, 并使滞回环产生明显的“捏拢现象”。

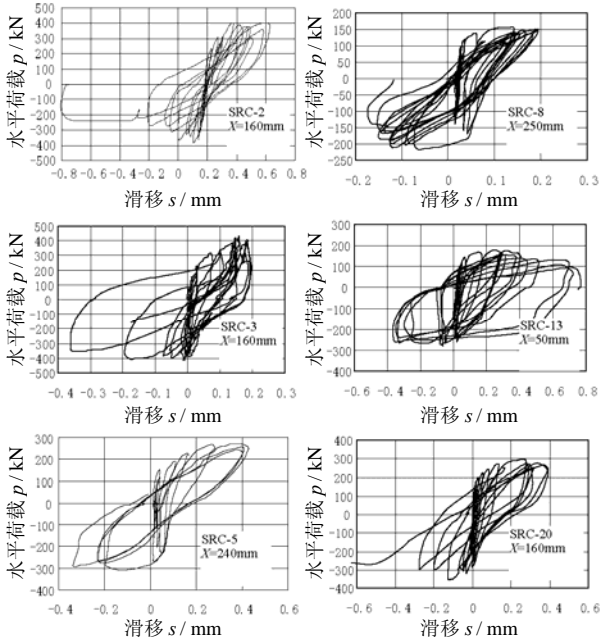


图4 水平荷载-滑移滞回曲线

Fig.4 Hysteretic curves of horizontal load against slip

2.2 荷载-滑移骨架曲线

根据水平荷载-滑移滞回曲线可以得到其骨架曲线，图5为试件在翼缘上沿柱高不同位置处的荷载-滑移骨架曲线，从图5中可以看出，在30%极限荷载以前，沿柱高各个截面基本不产生滑移；30%极限荷载后，柱根位置( $X=50\text{mm}$ 处， $X$ 为测试点到柱底的高度)首先产生滑移，但是在60%的极限荷载之前，滑移增加缓慢，且与荷载基本成线性关系；

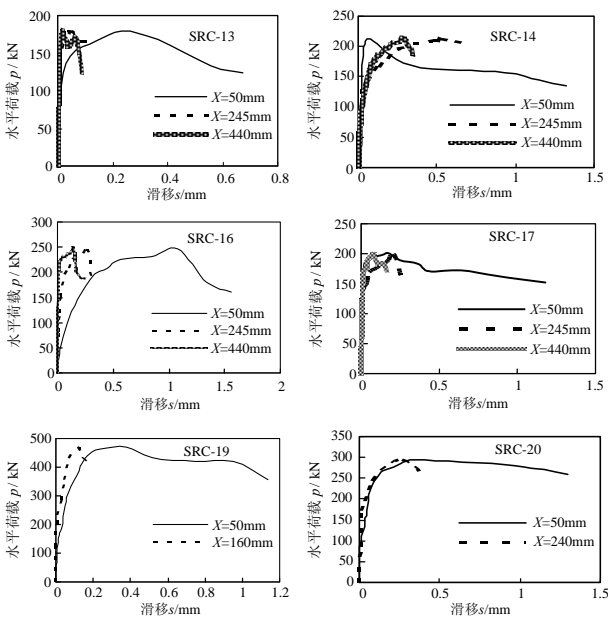


图5 水平荷载-滑移骨架曲线

Fig.5 Skeleton curves of horizontal load against slip

60%的极限荷载后，不同位置处的滑移增长都明显加快，滑移刚度不断降低；最大水平荷载后，由于柱根部塑性铰的形成，构件的变形集中于该处，导致柱根的滑移急剧增大，形成滑移的集中发展区域，而远离柱根的位置则由于滑移缓慢而出现“荷载跌落”现象(荷载下降很快而滑移几乎不变)。

2.3 滑移沿柱高的分布规律

将构件在不同荷载级别下沿柱高不同位置处的滑移分布绘制在同一个图中，得到滑移沿柱高的分布规律如图6所示。从图6中可以看出，在轴力和水平荷载共同作用下，型钢混凝土柱的滑移沿柱高大致成指数分布，柱根位置的滑移量最大，从柱根向柱顶滑移呈递减的趋势。

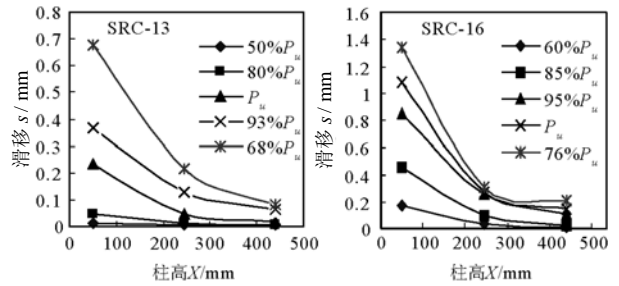


图6 滑移沿柱高的分布规律

Fig.6 Slip distribution law along columns

2.4 滑移的统计分析

为了定量的了解型钢混凝土柱在地震作用下的滑移大小，将60%的极限荷载、极限荷载以及构件破坏时(水平荷载下降到75%的极限荷载)所对应的滑移量列入表2中。统计结果显示，柱根位置(沿柱高50mm处)在60%极限荷载、极限荷载以及破坏荷载时，滑移量分别在0.0051mm—0.2011mm、0.1571mm—1.2828mm、0.9251mm—2.2780之间，均值分别为0.0939mm、0.5334mm、1.5654mm。在相同荷载水平下，柱中部位位置处(对剪跨比 $\lambda$ 为1.0、1.5、2.0、2.5构件，分别为柱高160mm、240mm、245mm、250mm)的滑移量分别在0.003mm—0.0665mm、0.0965mm—0.5541mm、0.1879mm—0.5604mm之间，均值分别为0.0256mm、0.2505mm、0.2996mm。柱根位置的滑移远远大于柱中部位置的滑移。

2.5 试验参数对滑移量的影响

表2中的数据总体上反映这样一个趋势，即滑移量随剪跨比和轴压比的增大而增大，随配箍率与混凝土强度的提高而减小。

表 2 特定荷载下不同位置处的滑移

Table 2 Slips on various stations in characteristic loads

试件 编号	柱根位置的滑移量/mm			柱中部位置的滑移量/mm		
	$60\%P_u$	$P_u$	$75\%P_u$	$60\%P_u$	$P_u$	$75\%P_u$
SRC-1	0.1924	0.5371	1.7949	0.0152	0.0966	0.2434
SRC-2	0.1232	0.9996	1.4610	0.0665	0.5345	/
SRC-4	0.2011	0.9467	2.2780	/	/	/
SRC-5	0.0931	0.3708	1.4513	/	/	/
SRC-6	0.1077	0.4204	2.1039	0.0256	0.1939	0.2143
SRC-8	0.0611	0.3599	1.1755	0.0125	0.114	0.1879
SRC-9	0.0729	0.5326	1.5846	0.0123	0.1435	0.2174
SRC-10	0.1084	0.5521	1.7194	0.0385	0.3596	0.4753
SRC-12	0.0671	0.3745	/	/	/	/
SRC-13	0.1278	0.8343	1.872	0.0093	0.1447	0.5604
SRC-14	0.0248	0.1571	0.9251	0.0362	0.5541	/
SRC-15	0.0319	0.2592	1.1726	/	/	/
SRC-16	0.1771	1.2828	2.0619	0.0344	0.2704	0.3084
SRC-17	0.0051	0.1750	1.1783	0.003	0.2057	0.2631
SRC-19	0.0617	0.3800	1.1382	0.0331	0.1263	0.2314
SRC-20	0.0471	0.3506	/	0.0203	0.2623	0.2947
平均值	0.0939	0.5334	1.5654	0.0256	0.2505	0.2996

### 3 粘结应力的试验研究结果

#### 3.1 荷载上升阶段粘结应力的分布

根据粘贴在型钢上翼缘、下翼缘的应变片测得不同荷载水平下的型钢应变, 然后由统计回归得出型钢应变的分布函数, 再对应变分布函数求导就可以得到了粘结应力的分布规律<sup>[13]</sup>, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 在轴力和水平荷载共同作用下, 型钢与混凝土之间的粘结应力具有以下几个方面的特点:

1) 随着水平荷载的增大, 试件的粘结应力(绝对值)随之增加; 但有个别试件当水平荷载达到 60%—75% 的极限荷载时, 粘结应力即达到最大值, 随后随着水平荷载的增大, 粘结应力减小。

2) 水平荷载作用下, 粘结应力最大处位于柱的中部, 由中部向两端递减, 沿柱高呈典型的抛物线状分布。这种分布规律与推出试验结果不同, 在推出试验中, 粘结应力沿锚固长度大致成指数分布<sup>[12]</sup>。这表明受力状态直接影响型钢混凝土构件的粘结应力分布, 不同受力的受力状态, 粘结应力的分布规律不同。

3) 作动器水平拉和水平推时粘结应力的方向相反。同时, 由于柱根部受到支座梁的约束, 在根

部一定范围, 存在一定“反粘结应力”区域, 即该区域粘结应力的方向与其他部位粘结应力的方向相反。

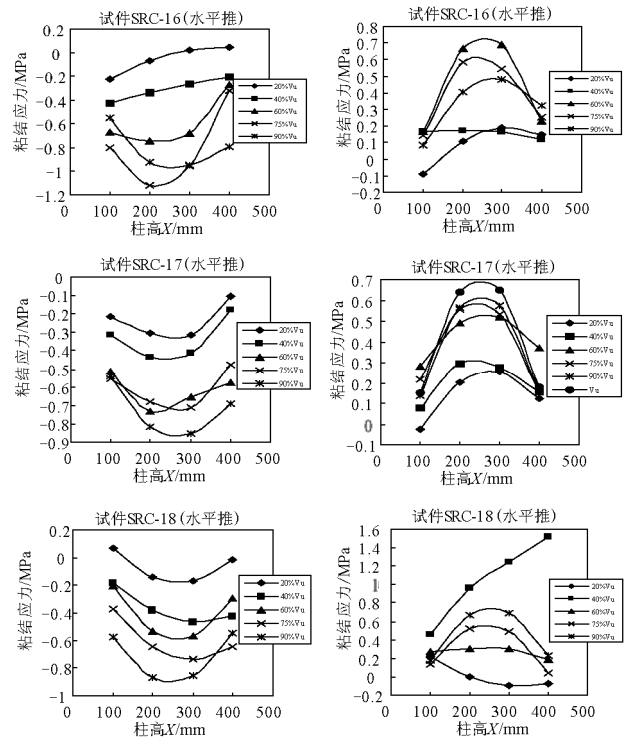
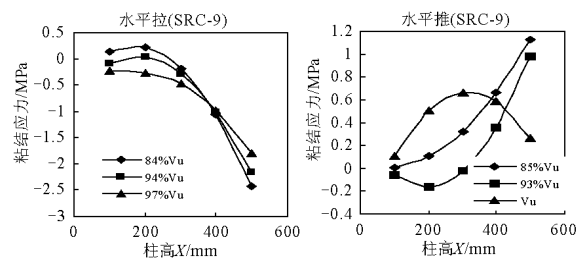


图 7 荷载上升阶段粘结应力沿柱高的分布

Fig.7 Bond stress distribution along column at load-ascending stage

#### 3.2 荷载下降阶段粘结应力的分布

按照上述同样的原则, 由应变测试结果求得型钢应力的分布曲线, 然后找到分布曲线的数学描述并对其求导, 就得到水平荷载下降阶段型钢翼缘粘结应力的分布规律。图 8 为具有代表性的 SRC-9 和 SRC-11 两试件在荷载下降段的粘结应力分布图。由图 8 中可以看出, 荷载上升阶段和荷载下降阶段型钢翼缘粘结应力的分布规律明显不同。在水平荷载的上升阶段, 柱中部的粘结应力(绝对值)最大, 沿柱根和柱顶粘结应力逐渐减小, 呈典型的抛物线分布; 而在荷载的下降阶段, 粘结应力的最大值(绝对值)向柱顶偏移, 同时在柱根一定高度内, 由于拉翼缘、压翼缘的屈服, 粘结应力减小为零, 沿柱高出现一定高度的“无粘结区域”。



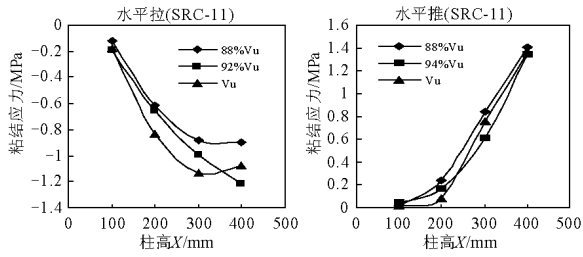


图8 荷载下降阶段粘结应力沿柱高的分布  
Fig.8 Bond stress distribution along column at load-descending stage

## 4 反复荷载下粘结应力的退化

### 4.1 荷载循环次数对粘结应力的影响

钢筋混凝土粘结性能的试验表明<sup>[15-16]</sup>, 钢筋与混凝土之间的粘结锚固, 随拉荷载、压荷载的重复或反复作用而逐渐退化, 即随着拉力和压力的重复和反复作用, 粘结强度不断减小, 粘结刚度不断降低。在型钢混凝土柱中, 同样存这一现象。图9为试验中沿柱高不同位置处的粘结应力与荷载循环次数的关系图, 图9中粘结应力的大小用绝对值表示。从图9中可以清楚看到, 随着荷载循环次数的增加, 柱各个截面的粘结应力不断减小, 表现出明显的粘结退化现象。

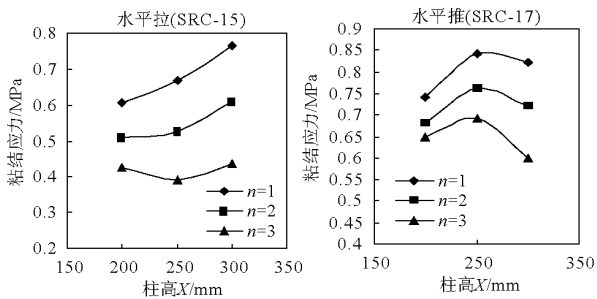


图9 荷载循环次数对粘结应力的影响  
Fig.9 Influence of load reversed times on bond stress

### 4.2 粘结应力退化系数

定义骨架曲线上水平荷载相对应的粘结应力和单调加载下粘结应力的比值为粘结应力退化系数  $\lambda_{cf}$ , 即:

$$\lambda_{cf} = \tau_f^d / \tau_f \quad (1)$$

式中:  $\tau_f^d$  为反复荷载下的粘结应力;  $\tau_f$  为单调加载下的粘结应力。

由本次试验得到各试件最大粘结应力的平均值和静力单调加载下得到的粘结强度平均值的对比分析<sup>[17]</sup>, 得反复荷载下混凝土的粘结应力退化系数大约为 0.76。而付恒箐和徐有邻的研究表明<sup>[15]</sup>,

反复荷载下, 钢筋混凝土构件的粘结退化系数大致为 0.86。这表明反复荷载下型钢混凝土的粘结退化更为显著, 反复荷载下型钢混凝土的粘结滑移性能更应引起工程界重视。

### 4.3 粘结应力退化率

定义一定水平位移下第  $n$  次加载时的粘结应力与首次加载时粘结应力的比值为粘结应力退化率  $\lambda_n$ , 即:

$$\lambda_n = \tau_{f,1}^d / \tau_{f,n}^d \quad (2)$$

式中:  $\tau_{f,n}^d$  为第  $n$  次加载时的粘结应力;  $\tau_{f,1}^d$  为首次加载时的粘结应力。

图10为试验得到的粘结退化率与荷载循环次数的关系曲线, 由图10中可以看出,  $\lambda_n - n$  之间的关系大致呈指数分布, 可用负指数曲线对其进行拟合。

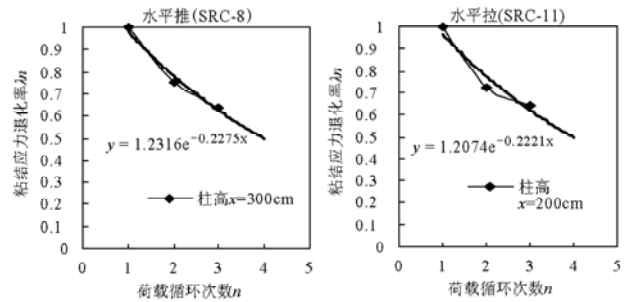


图10 粘结退化与荷载循环次数的关系

Fig.10 Relationship between bond degeneration and load cycle number

令:

$$\lambda_n = \alpha e^{-\beta n} \quad (3)$$

通过对试验结果的回归分析, 得到水平拉时  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  和水平推时  $\alpha_2$ 、 $\beta_2$  统计平值分别为 1.31、-0.26、1.29、-0.22。由于  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的统计均值相差不大, 可分别取其平均值。由此得到水平拉和水平推时的粘结应力退化率为:

$$\lambda_n = 1.30e^{-0.24n} \quad (4)$$

考虑到粘结应力退化系数  $\lambda_{cf}$  的影响, 相对于一次单调加载下的粘结应力而言, 反复加载下粘结应力的退化率  $\lambda_{cf,n}$  为:

$$\lambda_{cf,n} = \lambda_{cf} \cdot \lambda_n = 0.99e^{-0.24n} \quad (5)$$

### 4.4 考虑退化的粘结强度计算

型钢与混凝土界面上某一点的最大粘结应力即该点的粘结强度。由以上分析得知, 反复荷载下型钢混凝土柱的粘结强度可以用以下公式计算:

$$\tau_u = \lambda_{cf,n} \bar{\tau}_u \quad (6)$$

式中,  $\bar{\tau}_u$  为单调加载时型钢混凝土柱的基本粘结强

度,可由试验确定,这部分的研究工作有待下一步进行。

## 5 结论

通过本文的试验研究,可以得到如下结论:

(1) 型钢混凝土柱在轴力和水平荷载共同作用下,滑移沿柱高大致呈指数分布,柱根处的滑移量最大,由柱根向柱顶逐渐减小。与钢筋混凝土构件相比,型钢混凝土的荷载-滑移滞回曲线更为丰满,整个加载过程不明显的“捏拢”现象。

(2) 试验结果表明,在水平荷载的上升阶段,粘结应力沿柱高呈典型抛物线状分布,柱中部的粘结应力最大,沿柱根和柱顶逐渐减小;在荷载的下降阶段,粘结应力的最大值由柱中部向柱顶偏移,同时在柱根一定高度内,由于拉翼缘、压翼缘的屈服,粘结应力减小为零,沿柱高出现一定高度的“无粘结区域”。

(3) 随着荷载循环次数的增多,型钢与混凝土之间的粘结应力不断减小,滑移不断加大,表现出明显的粘结退化现象;粘结退化率与荷载循环次数的关系曲线满足负指数的分布。

(4) 型钢混凝土柱的粘结退化系数大致为0.76,比钢筋混凝土构件的粘结退化系数小,型钢混凝土构件的粘结退化更为显著,反复荷载下型钢混凝土的粘结滑移性能更应引起工程界重视。

### 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, 2000.  
Zhao Hongtie. Steel and concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [2] Bryson J O, Mathey R G. Surface condition effect on bond strength of steel beams in concrete [J]. Journal of ACI, 1962, 59(3): 397—406.
- [3] Hawkins N M. Strength of concrete encased steel beams [J]. Civil Engineering Transaction of the Institution of Australia Engineer, 1973, CE15(1): 39—46.
- [4] Roeder C W. Composite and mixed construction [C]. New York: ASCE, 1984.
- [5] Hamdan M, Hunaiti Y. Factors effecting bond Strength in mposite columns [C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures. Fukuoka, Japan. 1991: 213—218.
- [6] Wium J A, Lebet J P. Simplified calculation method for force transfer in composite columns [J]. Proceeding of ASCE, Journal of Structural Division, 1992, 120(3): 728—745.
- [7] Charles W R, Robert C. Shear connector requirements for embedded steel sections [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(2): 142—151.
- [8] 孙国良, 王英杰. 劲性混凝土柱断部轴力传递性能的试验研究与计算[J]. 建筑结构学报, 1989, 10(6): 40—49.  
Sun Guoliang, Wang Yingjie. Experimental study and calculation of axial load transmission in the top section of encased columns [J]. Journal of Building Structures, 1989, 10(6): 40—49. (in Chinese)
- [9] 肖季秋, 钟树生, 邹良明. 劲性钢筋混凝土粘结性能的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 1992, 68(4): 2—6.  
Xiao Jiqiu, Zhong Shusheng, Zou Liangming. Experimental study on the bond behavior of steel reinforced concrete [J]. Building Science Research of Sichuan, 1992, 68(4): 2—6. (in Chinese)
- [10] 张誉, 李向民, 李辉, 陈宗梁. 钢骨高强混凝土结构的粘结性能研究[J]. 建筑结构, 1999, 29(7): 3—5  
Zhang Yu, Li Xiangmin, Li Hui, Chen Zongliang. Study on the bond behavior of steel reinforced high-strength concrete [J]. Building Structures, 1999, 29(7): 3—5. (in Chinese)
- [11] 赵鸿铁, 杨勇, 薛建阳, 王彦宏, 林艺勇. 型钢混凝土粘结滑移力学性能研究及基本问题[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 71—86.  
Zhao Hongtie, Yang Yong, Xue Jianyang, Wang Yanhong, Lin Yiyong. A review on the bond-slip echanical behaviors of SRC structures [J]. Advance in Mechanics, 2003, 33(1): 71—86. (in Chinese)
- [12] 杨勇, 郭子雄, 薛建阳, 赵鸿铁, 聂建国. 型钢混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 1—9.  
Yang Yong, Guo Zixiong, Xue Jianyang, Zhao Hongtie, Nie Jianguo. Experiment study on bond slip behavior between section steel and concrete in SRC structures [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 1—9. (in Chinese)
- [13] 李俊华. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.  
Li Junhua. Study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. (in Chinese)
- [14] 李俊华, 王新堂, 薛建阳, 赵鸿铁. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 11—18.  
Li Junhua, Wang Xintang, Xue Jianyang, Zhao Hongtie. Experimental research on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 40(7): 11—18. (in Chinese)
- [15] 付恒箐, 徐有邻. 低周反复荷载下钢筋混凝土粘结性能的退化[J]. 建筑结构, 1987, 17(2): 14—17.  
Fu Hengqin, Xu Youlin. Bond degeneration of reinforced concrete under low cyclic reversed loading [J]. Building Structures, 1987, 17(2): 14—17. (in Chinese)
- [16] Ismail M A, Jirsa J O. Bond deterioration in reinforced concrete subject to low cycle loads [J]. Journal of ACI, 1972, 69(7): 334—343.
- [17] 王彦宏. 型钢混凝土偏压柱粘结滑移性能及应用研究[J]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.  
Wang Yanhong. Study on the bond-slip properties of steel reinforced concrete eccentric loading columns and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese)