

文章编号:1009-3087(2013)01-0049-06

SRC-RC 竖向混合结构转换柱截面配钢分析

伍凯¹, 薛建阳², 赵鸿铁²

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

摘要:以 16 根试件的低周反复荷载试验为基础,对 SRC-RC 竖向混合结构中的转换柱进行了截面配钢分析。结果表明:型钢的配钢率对转换柱抗震性能与基本力学行为存在较大影响,配钢率较大试件的位移延性系数较小,而承载力相对较大;配钢率越大,型钢分配到的剪力越大,转换柱的内力畸变越严重,变形能力越差;随着配钢率的增大,混凝土的损伤加快,转换柱的强度衰减更显著;型钢增强了截面的抗弯刚度,提升了试件的弹性侧移刚度,但对试件加载中后期的侧移刚度影响较小。通过理论分析与试验研究相结合的方式,确定了转换柱合理型钢截面的最大抗弯承载力,避免转换柱发生严重的剪切破坏,保证其具有可应用于工程建设的力学性能。试验数据与分析结果可为 SRC-RC 竖向混合结构的抗震设计与工程建设提供参考。

关键词:型钢混凝土;抗震性能;刚度;延性

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Analysis on Cross Section Arrangement of Shape Steel in Transfer Column of SRC-RC Hybrid Structure

WU Kai¹, XUE Jian-yang², ZHAO Hong-tie²

(1. College of Civil and Transportation Eng., Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Architecture & Technol., Xi'an 710055, China)

Abstract: The cross section arrangement of shape steel in transfer columns of SRC-RC hybrid structure was analyzed based on low cyclic reversed loading test of 16 specimens. The results showed that area ratio of shape steel has serious effect on seismic behavior of transfer columns. Displacement ductility decreases along with the increment of shape steel arrangement, but carry capacity increases at the same time. Partially existed shape steel makes the aberrance of internal stress and hence leads serious shear effect to transfer columns, so deformation ability and postpeak behavior degenerate when area ratio of shape steel promotes. Shape steel not only makes the flexural stiffness of cross section advanced but also postpones the appearance of cracks, and hence increases elastic lateral stiffness of specimens, but lateral stiffness at yielding point has little effect by shape steel arrangement. Through test and theoretical calculation, maximum of bending capacity in rational range of shape steel arrangement was confirmed which can be used to prohibit serious shear effect and insure deformation ability against brittle failure. Test data and the analysis results could provide references to seismic design and construction of hybrid structure.

Key words: steel reinforced concrete (SRC); seismic performance; stiffness; ductility

SRC-RC 竖向混合结构是上部采用钢筋混凝土 (RC)、下部采用型钢混凝土 (SRC) 的结构体系,具

有较好的耐震性和经济性^[1-2]。SRC-RC 转换柱,也可简称为转换柱,是 SRC-RC 竖向混合结构中的过渡构件,用于连接上部的 RC 柱与下部的 SRC 柱,保证混合结构不存在明显的刚度和强度突变,地震中不会出现明显的薄弱层,型钢局部存在于转换柱构件的中下部^[3-4]。

SRC 构件的配钢率是指型钢截面面积与构件截面面积的比值,是影响 SRC 柱抗震性能的主要因素^[5-6]。转换柱自身的构造特点决定了配钢率对其抗震性能的影响将不同于 SRC 柱。转换柱的合理配钢率需要通过平衡一对矛盾来确定:用钢量过小,

收稿日期:2012-09-04

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

作者简介:伍凯(1980—),男,讲师,博士. 研究方向:钢结构; 钢与混凝土组合结构。

型钢约束混凝土的面积较小,对混凝土脆性性质改善的作用有限,体现不出 SRC 延性好的特点,配钢率较小的柱承载能力有限,体现不出 SRC 构件承载能力高的优势;配钢率过大,造成 SRC 与 RC 这 2 部分性能差异过大,型钢不连续位置的合理过渡难以实现。较大的配钢率同样会造成混凝土浇注困难。而且由于型钢截面尺寸过大造成混凝土保护层较小,影响型钢与混凝土的黏结作用与共同工作。

文献[7]初探性地分析了型钢配钢率对转换柱抗震性能的影响,但由于试件数量较少,无法得出一般性规律。作者通过 16 根试件的低周反复荷载试验,分析型钢的配钢率对转换柱破坏过程和基本抗震性能指标的影响,并对截面配钢进行分析。

1 试验概况

图 1 给出了转换柱的构造特点。

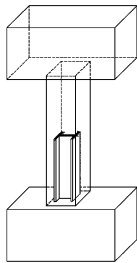


图 1 转换柱

Fig. 1 Transfer column in SRC-RC hybrid structure

此次抗震性能试验对转换柱采用了 2 种不同的配钢率。配钢率 ρ_{ss} 为 6.11% 的试件用于研究从 SRC

到 RC 的转换柱。在 SRC 柱已经得到普遍认识的情况下,国内外不同学者对具有较小型钢截面的 SRC 柱进行了抗震性能研究,此类 SRC 柱也可称为核心型钢混凝土(CSRC)柱^[8-9],并将其应用于工程实践。因此设计了配钢率为 4.08%、配钢高度不及截面高度一半的试件,用于研究从 CSRC 到 RC 的转换柱。

共设计了 16 根转换柱,剪跨比 2.5,表 1 给出了试件的设计参数与位移延性系数 μ 。型钢延伸高度 L_{ss} 与转换柱高度 L 的比值定义为 ξ ,分别取 0.4、0.6 和 0.8;轴压比与 RC 柱具有相同的计算方式, $n = N/(f_c \cdot A)$,其中, n 为轴压比, f_c 为混凝土轴心抗压强度, A 为截面面积; ρ_s 与 ρ_{sv} 分别为纵筋的配筋率和箍筋的体积配箍率。采用了 3 种不同的箍筋设置方式:常规的箍筋配置, $\Phi 6.5@96$;柱全高箍筋加密, $\Phi 6.5@48$;型钢不连续区域局部 $\Phi 6.5@48$ 的箍筋加密,其余区域为 $\Phi 6.5@96$ 。采用建研式的低周反复加载方式,构件的受力模型见图 2。

2 基本力学行为

2.1 短柱型剪切破坏过程

型钢的局部存在导致了箍筋设置较少的转换柱试件产生严重的剪切破坏,破坏形态类似于 RC 短柱的剪切破坏,因此可称为短柱型剪切破坏^[10]。型钢局部存在于试件的中下部导致转换柱的内力畸变,混凝土承受了钢与混凝土共同工作产生的拉应力,导致混凝土的抗剪强度降低,即使剪跨比较大的

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	ξ	n	纵筋配置		箍筋配置		型钢截断位置 局部箍筋加密	型钢配置		μ
			纵筋	$\rho_s / \%$	箍筋	$\rho_{sv} / \%$		型钢	$\rho_{ss} / \%$	
SRC4-2-N	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	—	I 14	6.11	1.97
S4-2-N	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	—	I 10	4.08	4.24
SRC4-2	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 14	6.11	2.68
SRC4-4	0.4	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 14	6.11	2.75
S4-2	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 10	4.08	3.28
S4-4	0.4	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 10	4.08	3.10
SRC4-2-JM	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@48$	1.92	—	I 14	6.11	4.65
SRC4-4-JM	0.4	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@48$	1.92	—	I 14	6.11	3.39
S4-2-JM	0.4	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@48$	1.92	—	I 10	4.08	5.99
S4-4-JM	0.4	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@48$	1.92	—	I 10	4.08	3.98
SRC6-2	0.6	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 14	6.11	3.78
S6-4	0.6	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 10	4.08	3.33
SRC8-2	0.8	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 14	6.11	3.63
SRC8-4	0.8	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 14	6.11	3.54
S8-2	0.8	0.2	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 10	4.08	3.85
S8-4	0.8	0.4	4 Φ 16	2.28	$\Phi 6.5@96$	0.96	$\Phi 6.5@48$	I 10	4.08	3.23

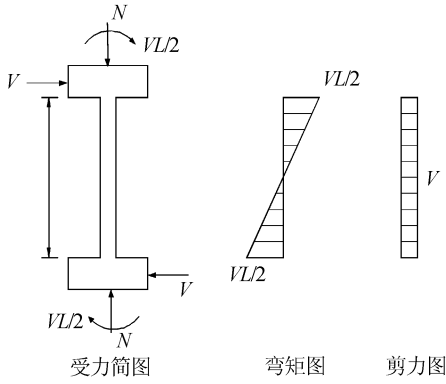


图2 试件的受力模型

Fig.2 Mechanics of tested specimen

情况下试件依然产生严重的剪切破坏^[11]。截面的配钢率是影响剪切破坏过程的主要因素。图3给出了试件 SRC4-2-N 和 S4-2-N 在不同柱顶侧移下的损伤和破坏状态。

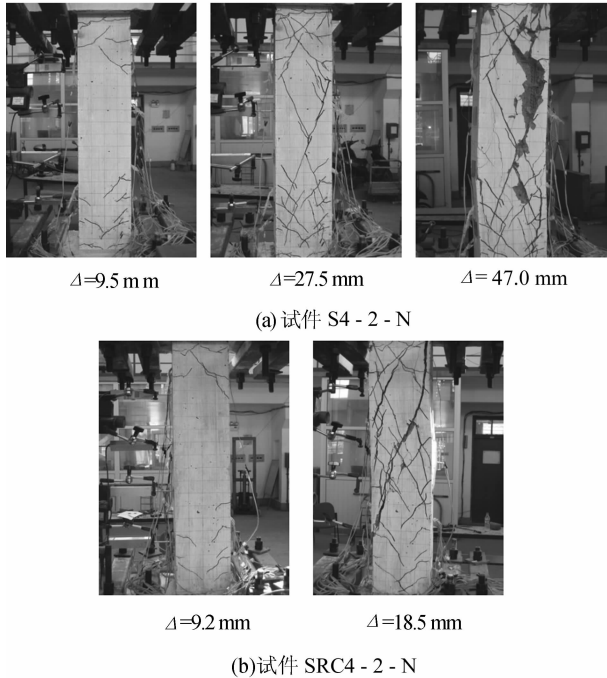


图3 短柱型剪切破坏过程

Fig.3 Process of shear failure

从图3可见,配钢率较小的试件 S4-2-N 在柱顶侧移 Δ 达到 27.5 mm 时,型钢截断位置处出现了较大范围的剪切裂缝,此时箍筋能较好地控制剪切裂缝的发展。当 Δ 达到 47.0 mm 时,由于混凝土损伤严重,试件丧失继续承载的能力,试验结束。对于配置 14 号工字钢的试件 SRC4-2-N,试件的损伤异常迅速,混凝土在 $\Delta = 18.5$ mm 时,出现了自型钢截断位置直至柱顶的大范围剪切裂缝。由于箍筋缺乏对裂缝的足够约束,此裂缝的宽度随着推、拉荷载的反复而不断增大,并很快形成临界剪切裂缝使试件丧失继续承载的能力。

2 根试件剪切破坏过程的差异反映了型钢配钢率对转换柱抗震性能与基本力学行为存在较大影响。配钢率越大,破坏过程越迅速,试件屈服后变形能力越差。试件 S4-2-N 的位移延性系数为 4.24,而 SRC4-2-N 的仅为 1.97。箍筋沿转换柱全高加密后,配钢率对试件变形能力的影响相对较小,试件 S4-2-JM 的位移延性系数为 5.99,而 SRC4-2-JM 的为 4.65。

2.2 位移延性系数与承载力

图4给出了由试验得出的配钢率与转换柱位移延性系数 μ 、承载力 V 的关系,转换柱的变形能力随着配钢率的增加而降低。位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, Δ_y 为试件达到屈服状态时的柱顶侧移;当试验荷载降低至极限值的 85% 时,认为试件达到极限状态,此时的柱顶侧移定义为 Δ_u 。8 个配钢率为 4.08% 的转换柱试件的位移延性系数均满足 $\mu \geq 3$ 的抗震要求;而 8 个配钢率为 6.11% 的转换柱试件中,有 3 个未能满足位移延性系数的抗震要求,说明配钢率较大试件的抗震性能无法得到保证。为了使转换柱具有足够的抗震延性,应控制截面配钢。另一方面,增大配钢率可在一定程度上提升转换柱的承载力(见图4(b))。

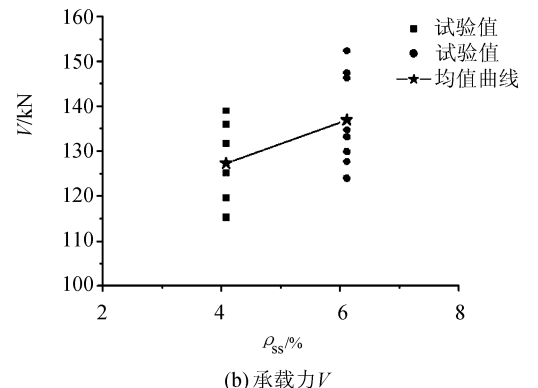
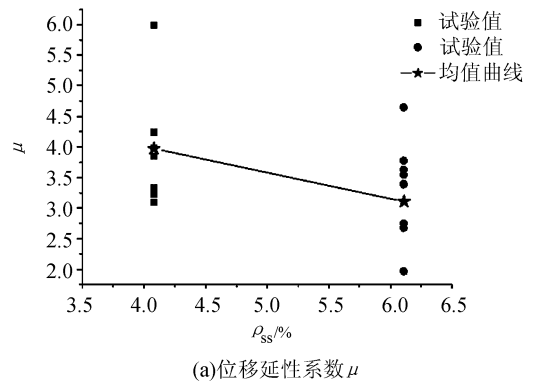


图4 不同配钢率 ρ_{ss} 下的位移延性系数与承载力
 Fig.4 Displacement ductility and carrying capacity with the different ρ_{ss}

2.3 型钢的剪力分配

混凝土通过与型钢的相互挤压与共同工作将部分剪力传递至型钢,使剪力在两者之间进行合理分配。图5给出了型钢的配钢率与型钢剪力分配系数 ω 的相关性, ω 为试件达到极限承载力时型钢分配到的剪力与试件极限承载力的比值。随着配钢率的增加, ω 变大,型钢分配到的剪力增大。

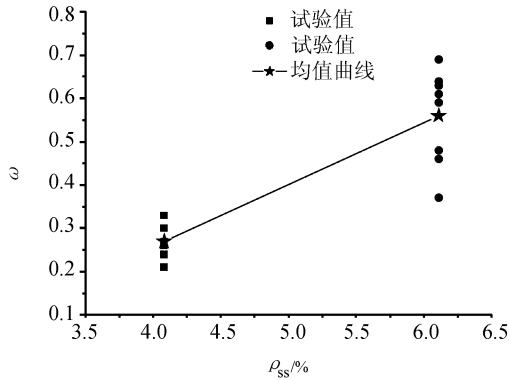


图5 型钢剪力分配系数

Fig. 5 Distribution coefficient of shear force in shape steel

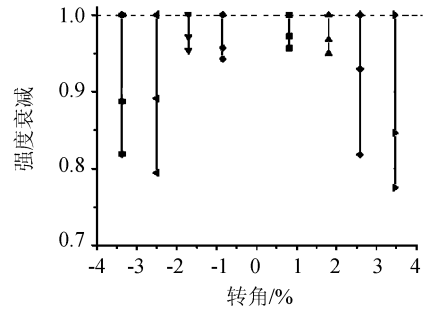
使型钢受剪的挤压作用导致转换柱的内力产生畸变,试件因此剪切破坏严重,并可能发生短柱型剪切破坏,而内力畸变的程度与型钢分配到的剪力大小有关。配钢率越大,内力畸变越严重,试件的位移延性系数越小,因此 ω 与位移延性系数随配钢率的增加表现出不同的变化规律。

转换柱的损伤随着水平外荷载的增加与反复而不断积累,混凝土的抗剪能力持续降低,其承担的剪力呈逐渐减小的趋势,而型钢剪力则相应增大。因此,试件S4-2-N在加载前期并未产生大范围的临界剪切缝,而在加载中后期由于混凝土抗剪能力的降低导致型钢负担的剪力增大,转换柱的内力畸变更严重,临界剪切缝出现。

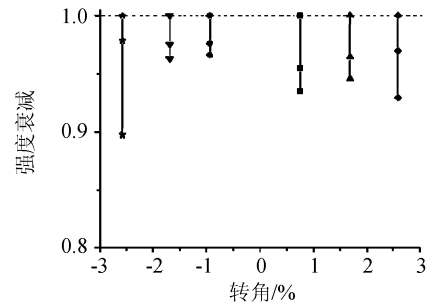
2.4 强度衰减

图6给出了个别试件的强度衰减,试件的强度衰减现象在整个加载过程中随侧移角的增大而加剧。侧移角较大时,轴向压力的二阶效应较严重,而裂缝发展导致混凝土实际承载面积的不断减小,因此混凝土的损伤速度加快,强度衰减现象更显著。

配钢率主要从2个方面影响了试件的强度衰减现象:配钢率大的试件内力畸变严重,剪切作用明显,混凝土的损伤加速,强度衰减更严重;钢与混凝土之间的接触面黏结作用较弱,容易产生黏结裂缝,配钢率较大试件的黏结裂缝出现较多、发展更充分,钢与混凝土的共同工作性能较差,强度衰减因此更为显著。



(a)试件SRC8-2



(b)试件S8-2

图6 强度衰减

Fig. 6 Strength degeneration

2.5 侧移刚度

通过试件的骨架曲线和滞回曲线可确定出转换柱对应混凝土开裂点、试件屈服点和承载力极值点这3个特征点的侧移刚度。

由于试件剪跨比较大,试件首先出现弯曲裂缝,开裂荷载由截面的抗弯刚度控制。转换柱的核心型钢能够有效增强截面的抗弯刚度,延缓弯曲裂缝的出现,在一定程度上提高了试件的开裂荷载与弹性侧移刚度。随着荷载的增大,型钢依然能表现出较好的加强作用,能够有效约束转换柱下部SRC部分的裂缝发展。与此同时,型钢局部存在产生的内力畸变却降低了混凝土抗剪性能,转换柱上部RC部分的剪切裂缝发展较充分。这2个方面对试件的损伤破坏发展呈现孑然相反的影响特征,试件在加载中后期的侧移刚度受配钢率的影响较小,图7给出了屈服点侧移刚度 D_y 与配钢率 ρ_{ss} 的关系。

3 截面配钢分析

为了保证转换柱具有可靠的抗震性能,应避免短柱型剪切破坏的发生,具体可以通过2个途径来避免:降低转换柱的配钢率,增加箍筋数量。

短柱型剪切破坏中,临界剪切裂缝的产生是钢与混凝土共同工作的结果,而两者的共同工作是以相互挤压为基础,挤压作用产生的水平拉力由型钢截断位置附近一定区域内的箍筋平衡。所提到的2种措施其本质一是降低挤压作用,二是增加抵抗力。

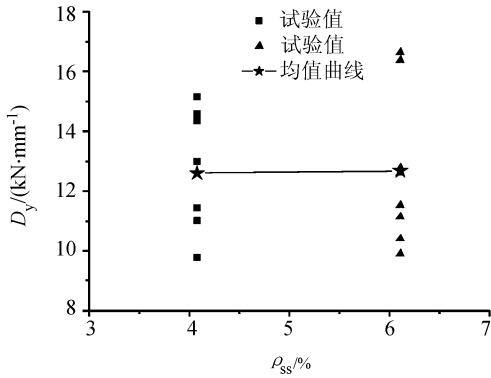


图7 配钢率与侧移刚度的关系

Fig.7 Lateral stiffness vs. area ratio of shape steel

图8给出了试件 SRC4-2、SRC6-2、SRC8-2 在破坏前的箍筋应变。

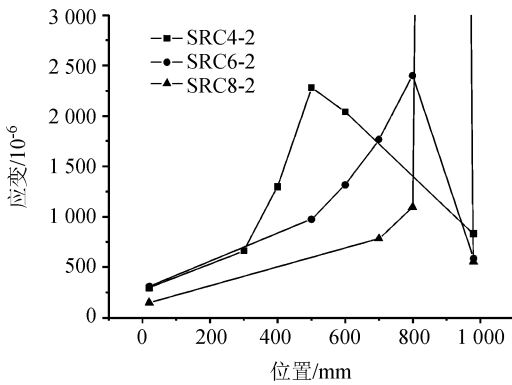


图8 SRC-RC 转换柱箍筋应变分布

Fig.8 Strain distribution of stirrups

由图8可知,型钢截断位置附近承担拉力的箍筋分布范围有限,拉力主要由型钢截断位置起,至其上部约200 mm(近似等于截面高度)范围内的箍筋承担。

偏于安全的假定短柱型剪切破坏的临界剪切裂缝从型钢顶部翼缘位置呈45°角发展,如图9所示。

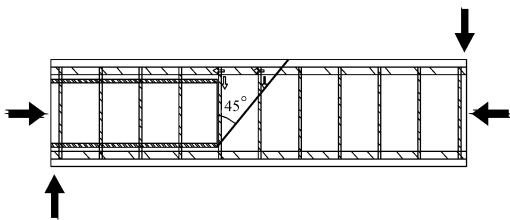


图9 短柱型剪切破坏的临界剪切裂缝

Fig.9 Critical shear crack of shear failure

约束临界剪切裂缝的箍筋提供的拉力 V_{yv} 可由式(1)计算:

$$V_{yv} = f_{sv} \frac{A_{sv}}{s} (h - c_{ss}) \quad (1)$$

式中, s 为型钢截断位置附近的箍筋间距, c_{ss} 为型钢翼缘的混凝土保护层厚度, h 为试件的横截面高度,

f_{sv} 为箍筋的抗拉强度, A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积。

型钢承担的剪力 V_{sc} 可由型钢截面的抗弯承载力 M_{ss} 与型钢剪力作用点至柱根部塑性铰距离的比值确定,即可由式(2)计算:

$$V_{sc} = \frac{M_{ss}}{L_v - \varphi h} \quad (2)$$

式中, L_v 为剪应力作用点高度, φ 为考虑底座约束而导致柱根部塑性铰位置上移的影响系数。文献[12]通过型钢高强混凝土柱的低周反复荷载试验确定 φ 取值介于0.2~0.5之间,并近似取值0.35。

由试验数值可知,当型钢延伸高度较小时,型钢剪力的作用点高度 L_v 大致位于型钢的上端部。随型钢延伸高度的增加, L_v 呈现先升后降的趋势,当 $L_{ss} = 0.6L$ 时达到最大值。为了便于计算,当 $L_{ss} < 0.5L$ 时,取 $L_v = L_{ss}$; 当 $L_{ss} \geq 0.5L$, 偏于安全的统一取 $L_v = 0.5L$ 。表2给出了式(1)的计算结果 V_{yv} , 以及当 $\varphi = 0.35$ 时的型钢剪力计算值 V_{sc} 。

表2 型钢剪力与箍筋拉力计算结果

Tab.2 Calculated results of specimens

试件编号	V_{yv}/kN	V_{ss}/kN	V_{sc}/kN	$V_{sc} : V_{ss}$	备注
SRC4-2-N	43.6	85.9	82.2	0.96	短柱型剪切破坏
S4-2-N	40.7	50.7	39.5	0.78	短柱型剪切破坏
SRC4-2	87.2	81.6	82.2	1.01	—
SRC4-4	91.6	92.2	93.0	1.01	—
S4-2	77.4	32.8	41.0	1.25	—
S4-4	81.4	41.2	39.5	0.96	—
SRC6-2	87.2	47.6	66.2	1.39	—
S6-4	81.4	28.3	30.1	1.06	—
SRC8-2	87.2	61.8	62.6	1.01	—
SRC8-4	91.6	69.5	70.8	1.02	—
S8-2	77.4	27.2	31.2	1.15	—
S8-4	81.4	32.2	30.1	0.93	—
SRC4-2-JM	87.2	86.3	82.2	0.95	—
SRC4-4-JM	91.6	86.5	93.0	1.08	—
S4-2-JM	77.4	35.3	41.0	1.16	—
S4-4-JM	81.4	45.4	39.5	0.87	—

由试验加载过程中的实测应变可获得型钢实际分配的剪力 V_{ss} , 表2中, 对于产生短柱型剪切破坏的转换柱试件, V_{ss} 取值临界剪切裂缝出现时的型钢剪力, 其余试件取最大荷载时的型钢剪力。 V_{sc} 与 V_{ss} 比值的平均值为1.037, 方差为0.148, 利用式(2)估算转换柱中型钢分配到的剪力具有较高的可靠性。

为了避免短柱型剪切破坏的发生, 型钢的截面设置应满足:

$$V_{sc} \leq V_{yv} \quad (3)$$

以限制型钢的抗弯承载力 M_{ss} , 避免短柱型剪切破坏。将式(1)和(2)代入式(3), 可得:

$$M_{ss} \leq f_{sv} A_{sv} \frac{(h - c_{ss})}{s} (L_{ss} - \varphi h) \quad (4)$$

图 10 给出了数据统计结果,此方法可以较好地预估构件是否会产生短柱型剪切破坏。

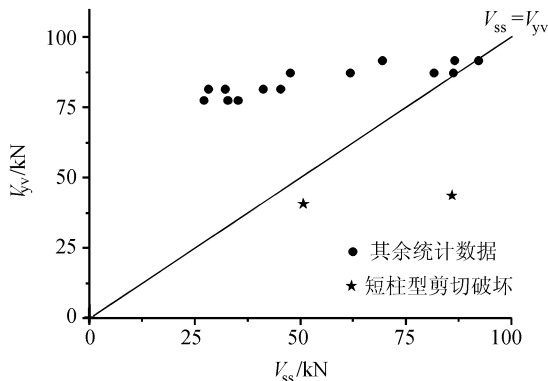


图 10 计算结果统计

Fig. 10 Statistic of calculated results

4 结 论

1) 型钢的配钢率对转换柱抗震性能与基本力学行为存在较大影响。型钢的局部存在导致部分转换柱试件的破坏形态类似于 RC 短柱的剪切破坏。配钢率较大试件的剪切破坏过程迅速,临界裂缝出现较早,强度丧失较迅速。

2) 8 个配钢率为 4.08% 的转换柱试件的位移延性系数均满足 $\mu \geq 3$ 的抗震要求;而 8 个配钢率为 6.11% 的转换柱试件中,有 3 个未能满足位移延性系数的抗震要求,说明配钢率较大试件的抗震性能无法得到保证。随着配钢率的增加,型钢分配到的剪力增大,内力畸变严重,试件的位移延性系数较小。转换柱加载中后期的侧移刚度受配钢率的影响较小。

3) 配钢率是影响试件强度衰减现象的主要因素之一。配钢率越大的试件内力畸变越严重,剪切作用越明显,混凝土的损伤越迅速,强度衰减更严重。钢与混凝土之间的接触面黏结作用较弱,容易产生黏结裂缝,配钢率较大试件的黏结裂缝出现较多、发展更充分,钢与混凝土的共同工作性能较差,强度衰减因此更为显著。

4) 为了保证转换柱具有可靠的抗震性能,可以通过限制型钢截面抗弯承载力的方式避免发生短柱型剪切破坏,保证转换柱具有可靠的耗能能力与变形能力。通过理论与试验相结合的方式分析确定了转换柱合理配钢截面的最大抗弯承载力。

参考文献:

[1] Yang Yong, Guo Zixiong, Nie Jianguo, et al. Study on seismic design of transmission story of SRC-RC vertical hybrid struc-

tures[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(4): 60 - 65. [杨勇,郭子雄,聂建国,等. SRC-RC 竖向混合结构过渡层抗震设计方法探讨[J]. 世界地震工程, 2005, 21(4): 60 - 65.]

[2] Yang Yong, Zhang Zhiwei, Nie Jianguo. Design of transition story of steel reinforced concrete (SRC) vertical hybrid structures[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2006, 34(3): 399 - 404. [杨勇,张志伟,聂建国. 型钢混凝土竖向混合结构过渡层设计方法[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2006, 34(3): 399 - 404.]

[3] 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, Architectural Institute of Japan. Chyugoku, 1999: 1065 - 1066.

[4] 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: 1029 - 1030.

[6] 赵鸿铁. 组合结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[7] 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, Architectural Institute of Japan. Chyugoku, 1999: 1069 - 1070.

[8] Liu Yang, Guo Zixiong, Zhang Zhiwei. Limit value of axial compression ratio for CSRC column[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(3): 82 - 86. [刘阳,郭子雄,张志伟. 核心型钢混凝土柱的轴压比限值试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(3): 82 - 86.]

[9] Sakai J, Matsui C, Minami K. Earthquake resistant properties of core steel composite [C]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, 2000.

[10] Xue Jianyang, Wu Kai, Zhao Hongtie, et al. Experimental study on seismic behavior of SRC-RC transfer column[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 102 - 110. [薛建阳,伍凯,赵鸿铁,等. SRC-RC 转换柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 102 - 110.]

[11] Wu Kai, Xue Jianyang, Zhao Hongtie. Study on shear performance of SRC-RC transfer column with short column failure pattern[J]. Industrial Construction, 2010, 40(11): 51 - 54. [伍凯,薛建阳,赵鸿铁. 短柱型破坏的型钢混凝土-混凝土转换柱剪切受力性能研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(11): 51 - 54.]

[12] Li Junhua. Study on performance of steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic reversed loading[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2005. [李俊华. 低周反复荷载作用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.]

(编辑 张津徐)