

翼缘削弱的型钢混凝土框架试验与有限元分析

张雪松^{1,2}

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100055; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:通过对一榀两跨三层型钢混凝土框架模型的低周反复荷载试验,研究了翼缘狗骨式削弱的型钢混凝土框架的抗震性能。框架按“强柱弱梁”的原则设计,且对节点核心区附近梁端工字形型钢的上、下翼缘采取狗骨式削弱,并适当增加了梁端根部到型钢翼缘最大削弱部位纵向钢筋的配筋量。试验结果表明:框架的变形能力、承载能力、延性、耗能能力等受力性能均满足延性框架的抗震要求;这种构造措施能将塑性铰从梁端根部转移到翼缘削弱部位从而有利于型钢混凝土框架形成梁铰耗能机构,增强其耗能能力。采用 ANSYS 参数化程序设计语言 (APDL) 编制了命令流,对模型框架在低周反复荷载作用下的抗震性能进行了非线性有限元分析。计算结果与模型试验结果吻合较好,验证了基于分离模量理论计算的翼缘削弱的型钢混凝土框架结构全过程分析方法的可行性。

关键词:型钢混凝土;框架;狗骨式削弱;抗震性能;塑性铰;有限元分析

中图分类号: TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-0300(2010)01-0011-06

型钢混凝土 (Steel Reinforced Concrete, 简称 SRC) 结构,是钢筋混凝土内含型钢的一种新型组合结构形式。近年来,国内外对型钢混凝土结构在反复荷载作用下的延性、耗能等抗震性能进行了较为深入的研究。Jerome F. Hajjar^[1]研究了 SRC 框架的抗震性能, El-Tawil 和 Deierlein^[2-3]研究了模拟 SRC 框架地震反应的梁柱单元和分析模型。王连广^[4]通过对不同地震波作用下的型钢高强混凝土框架结构顶层位移反应研究了型钢高强混凝土框架结构薄弱层的位置。白国良^[5]对型钢混凝土框架静力非线性分析塑性铰参数进行了研究。

在地震作用下,型钢混凝土框架的塑性铰可能出现在框架梁的端部,塑性铰区的非线性变形会造成梁柱连接焊缝的初始缺陷部位产生应力集中从而诱发焊缝发生断裂^[6]。另外,塑性铰区的非线性变形还会渗透到节点核心区,造成节点核心区混凝土开裂,降低混凝土的抗剪性能。为了从根本上克服 SRC 框架结构的上述缺陷,借鉴钢结构^[7]中的构造方式对 SRC 框架梁端型钢的上、下翼缘采取了狗骨式削弱并增加了梁端到型钢翼缘最大削弱处纵向钢筋的配筋量。Tamboll A R^[7]给出了梁型钢翼缘狗骨式削弱的设计参数。 a 为削弱部位距柱的距离, $a = 0.5b_f$, 可根据削弱部位塑性铰区对梁柱连接焊缝的影响程度来确定, b_f 为梁型钢翼缘的宽度; b 为削弱长度, $b = 0.75h_b$, 主要是为了控制塑性铰区变形的程度, 其中 h_b 为型钢截面的高度; c 为削弱的深度, $c \leq 0.25b_f$, 主要是控制塑性铰在梁中的位置和向节点核心区域传递的弯矩大小; l_b 为削弱中心距柱的距离, $l_b = a + b/2$ 。

应用分离模量理论并考虑材料非线性和刚度退化等因素的影响,采用 ANSYS 的参数化程序设计语言对型钢混凝土框架在低周反复荷载作用下的滞回特性进行非线性有限元全过程分析,以验证基于分离模量理论的翼缘削弱的型钢混凝土框架结构全过程分析方法的可行性。

1 模型与加载设计

(1) 模型设计。框架模型设计为两跨三层框架,其跨度为 1.5 m,底层层高为 1.2 m,顶层和中间层为

收稿日期:2009-11-21

作者简介:张雪松 男 1971 年出生 工程师

基金项目:国家杰出青年科学基金(50425824)

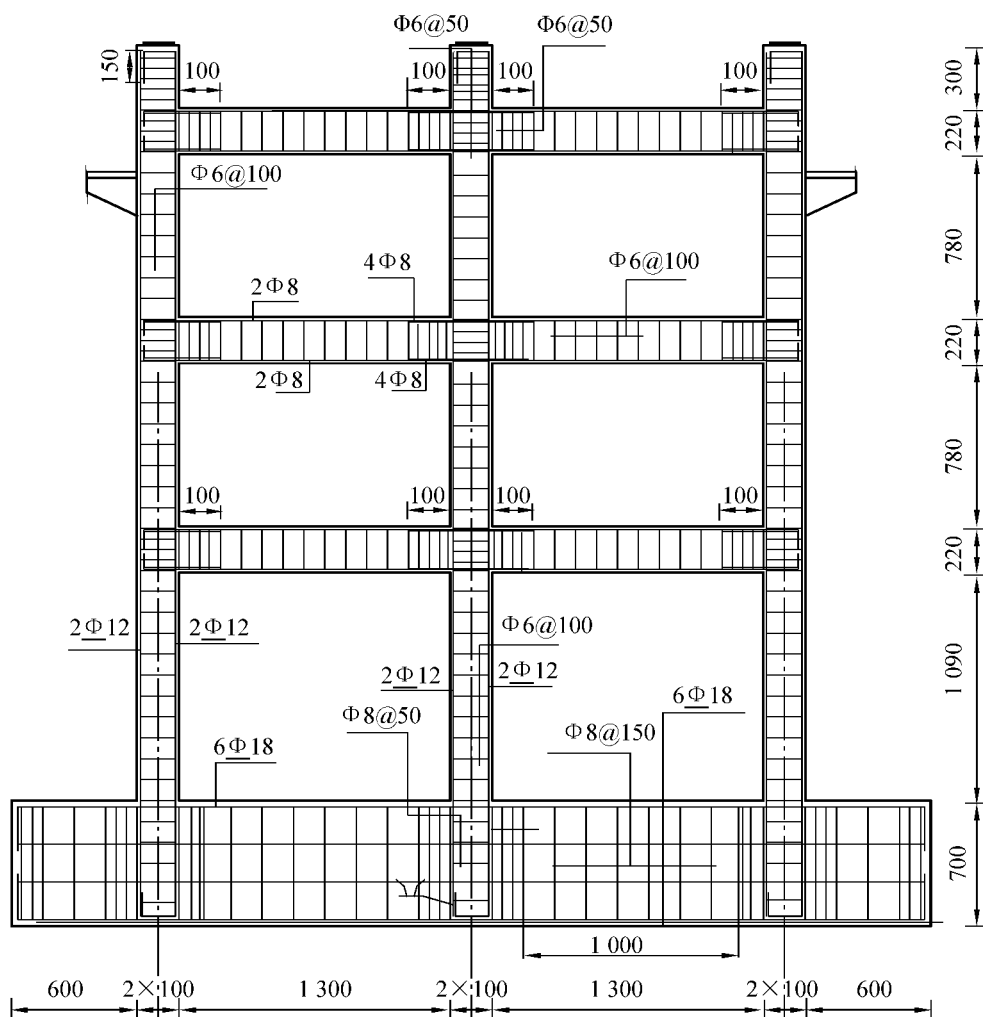


图 1 型钢混凝土框架设计示意(单位:mm)

1 m;其尺寸取实际框架的 1/3(如图 1 所示)。为了把塑性铰从梁端转移出来,对节点核心区附近的梁端型钢翼缘采取了狗骨式削弱,并增加了梁端到型钢翼缘最大削弱处纵向钢筋的配筋量。试件型钢翼缘到混凝土表面的距离为 30 mm,箍筋到混凝土保护层的厚度为 15 mm。框架柱试验轴压比分别为:中柱 0.35,边柱 0.21。框架柱钢筋的配置为:纵向受力钢筋为 4Φ12,箍筋为 Φ6@100。框架梁钢筋的配置为:从梁端根部到梁型钢削弱部位的纵向受力钢筋为 8Φ8,箍筋为 6@50;框架梁其它部位的纵向受力钢筋为 4Φ8,箍筋为 Φ6@100。实测 6 mm 厚钢板的屈服强度为 $312 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, 8 mm 厚钢板的屈服强度为 $306 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,钢板的弹性模量为 2.06×10^5 ;直径为 8 mm 一级钢筋的屈服强度为 $461 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,直径为 12 mm 二级钢筋的屈服强度为 $548 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,混凝土的极限抗压强度为 $21 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,混凝土的弹性模量为 $1.49 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

(2)加载设计。试验时,先按照轴压比的要求施加竖向荷载,并保持稳定不变,然后采用控制力和控制位移的混合加载法施加低周反复水平荷载(如图 3 所示)。在框架屈服位移以前,采用控制力的方法逐级施加水平荷载,每级荷载循环一次;在框架屈服以后,按照屈服位移的倍数控制逐级加载,每级加载循环三次,直至某级加载的第一循环荷载低于最大荷载值的 85%。

2 试验过程及结果

2.1 试验过程

在整个试验过程中,框架在竖直恒定荷载和水平低周反复荷载的作用下,经历了弹性、屈服、最高荷

载和极限荷载而破坏。当水平加载为 ± 40 kN 和 ± 80 kN 时,模型框架处于弹性状态,刚度基本保持不变。当水平加载到 ± 100 kN 时,骨架曲线略有偏转,刚度略有下降,框架开始进入弹塑性工作阶段。当水平加载到 $+128$ kN 时,框架模型的 $P-\Delta$ 骨架曲线出现明显的拐点,说明模型框架已经屈服,屈服位移为 Δ_y ,屈服荷载为 P_y 。模型框架屈服后,刚度明显下降,继续加载,荷载增长较慢,但变形增长迅速。当模型框架顶层水平位移达到 $\pm 2\Delta_y$ 时,框架绝大部分梁端型钢翼缘最大削弱的位置都出现了塑性铰。当模型框架顶层水平位移达到 $\pm 3\Delta_y$ 时,框架的 $P-\Delta$ 骨架曲线达到最高点;对应的最大荷载正向为 $P_{\max} = 218$ kN、负向为 $P_{\max} = -197$ kN,相应的位移延性系数正向为 $\mu_\Delta = 2.90$,负向为 $\mu_\Delta = 3.33$ 。此时,框架边柱柱脚已经屈服,形成了塑性铰。此后,随荷载反复循环,变形迅速增加而荷载开始缓慢下降。当框架水平位移达到 $\pm 7\Delta_y$ 时,荷载下降到最大荷载的 80% ~ 85%,框架的 $P-\Delta$ 骨架曲线达到破坏点,此时认为模型框架已经破坏,延性系数正向为 $\mu_\Delta = 7.34$,负向为 $\mu_\Delta = 7.40$,此值作为衡量框架延性的重要指标。

在加载过程中在框架梁端型钢翼缘狗骨式最大削弱的部位集中出现了竖向和斜向的弯曲裂缝。由此可见:对节点核心区附近梁端型钢翼缘采取狗骨式削弱并适当增加梁端根部到型钢翼缘最大削弱部位纵向钢筋配筋量的构造措施可以把塑性铰从梁端根部转移到梁型钢翼缘削弱的位置(如图 2 所示)。从图 2 中还可以看出:在加载过程中梁铰先于柱铰出现,框架破坏时,节点核心区基本完好;说明这种构造措施能够在不增大柱截面的条件下提高柱与梁的抗弯强度比,从而有利于框架形成梁铰耗能机构。

2.2 主要试验结果

由试验得出的框架顶层 $P-\Delta$ 滞回曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,在框架屈服之前,框架总体变形很小,加载曲线斜率变化小,卸载后的残余变形也很小。在整体框架屈服之后,随着反复荷载的逐级增大,框架变形进一步加大,其变形速度也随之变快,所形成的滞回环也愈加丰满,其承载力也有部分提高。到达最大荷载之后,框架承载能力逐渐下降而框架的变形迅速增加。从整体上来看,框架滞回曲线呈饱满的梭形,没有明显的捏缩现象,说明框架具有较好的耗能能力。表 1 给出了试验各个阶段的主要试验结果。

表 1 主要试验结果

加荷 方向	屈服点			最高荷载点			极限荷载点		
	P_y /kN	Δ_y /mm	Δ_y/H	$P_{\max}$ /kN	Δ_m /mm	Δ_m/H	P_u /kN	Δ_u /mm	Δ_u/H
正向	128	14.4	1/222	215	41.9	1/76	181	106.1	1/30
反向	-115	-14.7	-1/219	-197	-48.8	-1/66	-168	-108.5	-1/29

定义等效刚度 $\bar{K} = P/\Delta$ (P 为荷载, Δ 为与荷载相对应的位移),可得到框架等效刚度随位移的变化曲线图(如图 4 所示)。从图 4 中可以看出:框架的刚度随着位移及循环次数的增加而降低,但框架的刚度退化总体来说是比较缓慢的,从而说明该框架具有较强的抗侧移能力。

3 有限元分析

基于分离模量理论通过 ANSYS 参数化程序设计语言 APDL 对翼缘削弱的型钢混凝土框架结构的抗震性能进行了分析。

3.1 单元类型及网格划分

型钢混凝土框架采用 ANSYS 中的 Beam188 梁单元,这种单元每个节点有 6 个自由度,即沿 X 、 Y 和 Z

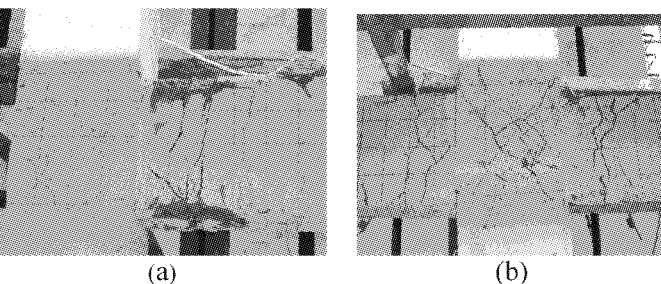


图 2 框架的破坏形态

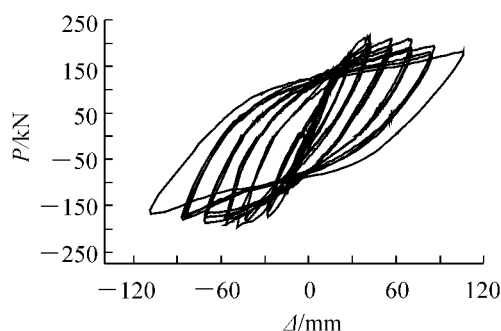


图 3 框架的滞回曲线

轴的平移和绕三个轴的转动。Beam188 单元可以自定义截面形状,同一截面上用不同材料特性。型钢混凝土框架模型网格划分如图 5(a)所示;梁端型钢狗骨式变截面可在截面类型中用 TAPER 命令近似定义(如图 5(b)所示),这种变截面梁的定义首先需要定义两个梁截面,然后根据拟定义的变截面梁再定义各个梁截面 ID 所在的空间位置,同时须保证两端的两个截面具有相同的拓扑关系。

3.2 材料的本构关系

混凝土的应力-应变采用 Kent-Park 模型^[8],滞回规则采用 Blakeley 滞回准则^[9](如图 6 所示),在 Blakeley 模型中,考虑了卸载至混凝土受拉。当应变小于 ε_0 时,卸载和再加载曲线都是以初始弹性模量 E_c 为斜率的直线。当应变大于 ε_0 时,由开始卸载点

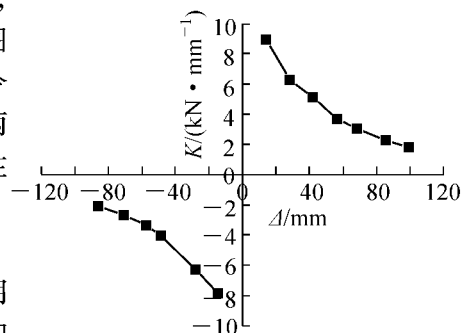
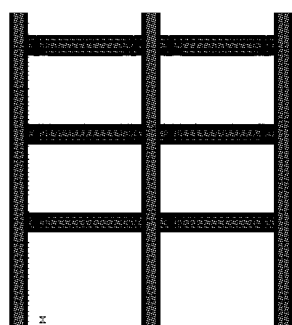
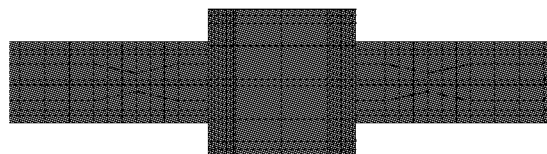


图 4 框架的等效刚度的退化



(a) 框架



(b) 梁型钢翼缘削弱位置

图 5 有限元模型网格划分

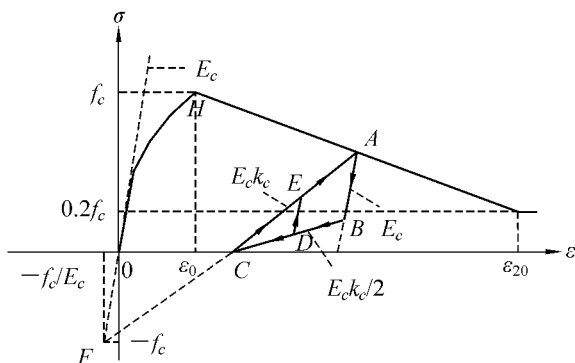


图 6 Blakeley 滞回准则

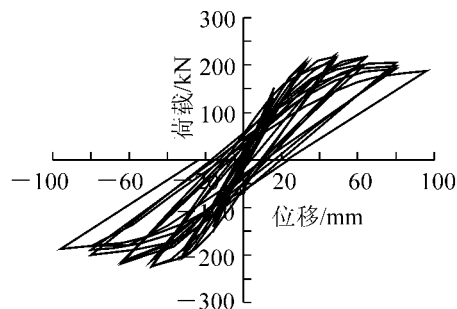


图 7 框架顶层滞回曲线

$A(\sigma_A, \varepsilon_A)$ 以初始弹性模量 E_c 为斜率确定卸载直线 AB ; B 点的坐标为 $B(0.5\sigma_A, \varepsilon_B)$; 而直线 BC 的 C 点为焦点 $F(-f_c, -f_c/E_c)$ 与卸载点 A 的连线与应变轴的交点。对于在完全加(卸)载过程中发生中途卸(加)载的情形,按直线加卸载考虑。图 6 中系数 k_e 与卸载点坐标有关

$$k_e = 0.8 - \frac{0.7(\varepsilon_u - \varepsilon_0)}{\varepsilon_{20} - \varepsilon_0} \geq 0.1 \quad (1)$$

钢筋和型钢应力-应变关系采用双线性模型^[10],取钢筋、型钢和混凝土本构方程上的特征值点,作为应力-应变关系的输入数据。

3.3 滞回特性分析

对实测的滞回曲线进行了刚度分析,拟合了型钢混凝土框架刚度在往复荷载作用下近似按自然指数分布的退化规律

$$y = e^{-0.2613(x-1)} \quad (2)$$

式中, y 为刚度退化率; x 为屈服位移的循环倍数。宏观的刚度退化规律是材料的弹性模量不断减小的结

果。通过对钢材和混凝土按上面的自然指数分布规律模拟其弹性模量的退化规律,可以得到考虑刚度退化规律的滞回曲线(如图 7 所示)。

根据图 7 模型框架的位移延性系数值为 $\mu = \Delta_y/\Delta_u = 7.16$, 与模型试验得到的位移延性系数值(正向 $\mu = 7.67$, 负向 $\mu = 7.54$) 比较接近。表 2 和表 3 分别给出了模型框架在不同加载阶段试验结果与有限元分析结果, 两种结果除了屈服荷载有一定的差别外, 在各个阶段的荷载和位移都比较接近。这说明这种基于分离模量理论对翼缘削弱的型钢混凝土框架进行非线性有限元全过程分析的方法是合理的。

表 2 试验结果

加荷	屈服荷载阶段		最大荷载阶段		极限荷载阶段	
方向	P_y /kN	Δ_y /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	P_u /kN	Δ_u /mm
正向	128	14.4	215	41.9	181	106.1
反向	115	14.7	197	48.8	168	108.5

表 3 有限元分析结果

加荷	屈服荷载阶段		最大荷载阶段		极限荷载阶段	
方向	P_y /kN	Δ_y /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	P_u /kN	Δ_u /mm
正向	150	16	220	48	187	96
反向	150	16	220	48	187	96

4 结论

(1) 在低周反复荷载下, 翼缘狗骨式削弱的型钢混凝土框架承载力较高, 变形能力较强; 框架的滞回曲线比较饱满, 没有明显的捏缩现象, 框架具有良好的延性和耗能能力。正向和反向的延性系数相差不大, 延性系数大于 7, 满足一般框架的抗震要求。框架的水平刚度随着位移循环次数的增加而降低, 但框架的刚度退化总体来说是比较缓慢的, 说明了该框架具有较强的抗侧移能力。

(2) 在型钢混凝土框架中采用梁端型钢翼缘狗骨式削弱并增加梁端根部到梁型钢翼缘最大削弱部位配筋量的构造措施, 可以把塑性铰从梁端根部转移到梁型钢翼缘最大削弱的部, 减少塑性铰区的非线性变形对节点核心区的侵害。此外, 这种构造措施能够在不增大柱截面的条件下提高柱与梁的抗弯强度比, 从而满足框架强柱弱梁的抗震要求, 有利于框架形成梁铰耗能机构。

(3) 有限元分析结果与试验实测结果均吻合较好, 这说明这种基于分离模量理论对翼缘削弱的型钢混凝土框架进行非线性有限元全过程分析的方法是合理的。

参 考 文 献

- [1] Jerome F Hajjar. Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58 (1): 703-723.
- [2] El-Tawil S, Deierlein GG. Nonlinear analysis of steel-concrete frames[J]. I: Element formulation Journal of Constructional Steel Research, 2001, 127(6): 647-655.
- [3] El-Tawil S, Deierlein G G. Nonlinear analysis of Steel-concrete frames[J] II: Implementation and verification Journal of Constructional Steel Research, 2001, 127(6): 656-665.
- [4] 王连广, 张海霞, 吴利权. 钢骨高强混凝土框架结构非线性地震反应分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 247-249.
- [5] 白国良, 楚留声, 朱丽华. 型钢混凝土框架静力非线性分析塑性铰参数研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(6): 757-761.
- [6] Duane K Miller. Lessons learned from the northridge earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 249-260.
- [7] Tamboll A R, Fasce P E. Handbook of structural steel connection design and details[M]. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [8] Kent, Park. Flexural members with confined concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(ST7): 1969-1990.
- [9] Roger W G Blakely, Robert Park. Prestressed concrete sections with cyclic flexure[J]. Journal of the Structural Division, 1973, 99(8): 1717-1742.
- [10] 任重. ANSYS 实用分析教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.

(下转第 50 页)

Design of Stepping Pedestal for TBM Based on ANSYS

Wang Qiang

(The Second Construction Company, Ltd, of the Eleventh China Railway Bureau Group, Shiyao 442013, China)

Abstract: The reliability and economical efficiency of stepping pedestal is the prerequisite for the full section tunnel construction with the tunnel boring machine. In order to ensure safe passage of TBM, the appropriate and reliable stepping pedestal is presented based on the stepping plan of Robbins TBM. A finite element model is established with the software ANSYS to determine concrete grade and quantity, and whether reinforcing bar is required in order to achieve the economical efficiency and convenience in construction.

Key words: TBM; full section tunnel boring machine; stepping pedestal; ANSYS

~~~~~

(上接第 15 页)

## Experimental Study and Finite Element Analysis of SRC Frame with Dog-bone Type Reduced Beam Sections

Zhang Xuesong<sup>1,2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The seismic SRC frame with dog-bone type reduced beam sections has been investigated based on the experiment and analysis of a 2 bays, 3-stories model of SRC frame under cyclic loading. The frame designed as “strong column-weak beam” is treated with dog-bone style weakening on the upper and below flanges of the H-type steel at the beam end near the joint core, and the ratio of reinforcement which distribute from the root of beam end to the maximum weakened flanges of the H-type steel is increased. The test results show that deformation capacity, bearing capacity, ductility and energy dissipation of the frame may meet the requirement for seismic design of ductile frames and the constitution may not only transfer a plastic hinge from the root of beam end to the reduced beam section, but also help the frame form the energy dissipation mechanism with plastic hinges at beam ends so as to increase the integral energy dissipation capability of the frame. A command stream is edited with the ANSYS Parametric Design Language (APDL), and the nonlinear finite element analysis on the seismic behavior of the model frame under lateral cyclic loads is completed. The calculated results are much coincided with the tested results, which further proves the rationality of the design method of the SRC frames based on the separated modulus theory of SRC.

**Key words:** steel reinforced concrete; frame; dog-bone style weakening; seismic behavior; plastic hinge; finite element analysis