

文章编号:1674-2974(2016)09-0001-09

高轴压比作用下型钢超高强 混凝土框架抗震试验研究*

贾金青, 马英超[†], 封 硕

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为了研究型钢超高强混凝土框架结构的抗震性能,进行了3榀单层单跨框架结构拟静力试验分析,研究了框架结构在低周反复荷载作用下结构整体的破坏形式和柱根部的破坏过程,并由此分析了与其相对应的滞回曲线和骨架曲线,梁端和柱底的应变,以及各阶段的荷载值和位移值,并通过应变情况判别整体结构的变形情况.通过实验得到框架结构的延性系数、耗能能力、强度退化和刚度退化.结果表明,型钢超高强混凝土框架具有良好的延性,正向和反向的延性系数相差不大,耗能能力良好,强度和刚度退化比较缓慢,滞回曲线饱满;柱子是框架结构消耗地震能量的主要组成部分,而梁的约束也提高了结构的整体性和耗能能力,使结构在承载力下降到极限荷载的80%之后,仍能保持结构整体的稳定性,同时具有一定的耗能能力,保证了结构在大震作用下,仍拥有一定的承载能力,不至瞬间倒塌.

关键词:超高强混凝土;框架结构;滞回曲线;破坏机制

中图分类号:TU398.2

文献标识码:A

Study of Seismic Performance of Steel Ultra High Strength Concrete Frames Under the Effect of High Axial Compression Ratio

JIA Jin-qing, MA Ying-chao[†], FENG Shuo

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian Univ of Technology, Dalian, Lianoning 116024, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of steel reinforced ultra-high strength concrete frame structure, three quasi-static cyclic tests of steel reinforced super-high strength concrete frames with one-story and one-bay were carried out. The global failure modes as well as the local failure at the bottom column-end under low-cycle reversed load were examined. The hysteretic and skeleton curves were analyzed, and the strain of the beam end and column bottom was evaluated. Meanwhile, the loading and displacement values at different stages were evaluated, and the global deformation of the entire structure was further understood through the development of local strains. Furthermore, the strength, ductility, and energy-dissipation capacity of the frame structures were obtained through the tests. The test results show that the steel reinforced ultra-high strength concrete frames exhibit good ductility and energy dissipation

* 收稿日期:2015-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178078), National Natural Science Foundation of China(51178078)

作者简介:贾金青(1962-),男,河北沧州人,大连理工大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: mayingchao1985@163.com

capacity, showing little discrepancy between forward reverse ductility coefficient, slow degradation of strength and stiffness, and plump hysteretic curve. It is also concluded that most of the earthquake energy is dissipated in columns, while the constraint effect of beams improves the global stability of frame structure as well as energy dissipation capability especially after the load-carrying capacity decreases to 80 percent of the ultimate load, which provides the effective load-carrying capacity in structures under severe earthquakes, and thus sudden collapse of the frame structure can be avoided.

Key words: ultra-high strength concrete; frame structure; hysteretic curve; failure mechanism

型钢超高强高性能混凝土结构目前的研究并不是十分广泛,并且已有的研究仅仅局限在构件的层面,对整体结构的研究仍然很少.本文就是基于此种情况,研究型钢超高强高性能混凝土框架结构的抗震性能.近年来,对型钢混凝土结构在反复荷载作用下的延性、耗能等研究已经取得了一定的成果,如薛伟辰^[1]研究了四层两跨高性能混凝土框架的抗震性能;郑山锁^[2]进行了型钢高强高性能混凝土框架结构地震损伤试验研究;李忠献^[3]研究了翼缘削弱的型钢混凝土框架整体结构的抗震性能;傅传国^[4]进行了预应力和非预应力型钢混凝土框架受力及抗震性能的实验研究;郑文忠^[5]进行了型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架抗震性能试验研究;熊学玉^[6]进行了预应力型钢混凝土框架试验研究和设计理论分析,但这些研究基本局限在普通混凝土层面,对超高强混凝土的研究非常少.在地震作用下,建筑结构的边跨往往破坏得很严重,边节点和边柱都会出现很严重的破坏,严重影响了结构整体性.因此,在构件研究的基础上需要进一步研究型钢超高强混凝土框架结构的整体的抗震性能.本文研究了型钢超高强混凝土框架结构在实验轴压比为0.25,0.38,0.45时,柱和梁在整体结构中的破坏过程,并由此分析了框架的荷载-位移滞回曲线和骨架曲线、刚度退化和破坏机制.破坏过程中梁和柱的破坏对框架结构整体的延性和承载能力的影响.

1 试验概况

本实验依托于国家自然科学基金资助的型钢超高强混凝土结构项目,进行了3榀单层单跨型钢超高强混凝土框架结构在拟静力作用下的抗震试验研究.重点研究在不同轴压比条件下,循环荷载对框架整体的抗震性能影响.

1.1 试件设计

本实验共研究3榀单层单跨框架,其具体结构形式如图1,根据《建筑抗震设计规范》,设计梁柱截面强度比为1.2;柱总高度为1500mm,长细比为7.5,满足规范要求小于8的规定,避免了在加载过程中柱自身出现侧向曲屈现象,而柱子的计算高度为1200mm,长细比等于6;并且梁柱线刚度比小于等于0.45,满足框架结构的整体抗震要求.

其中混凝土柱采用C100超高强混凝土,梁采用C40混凝土.梁的截面尺寸为160mm×200mm.箍筋采用HRB400Φ6的矩形箍.柱子的截面尺寸为200mm×200mm,纵筋采用HRB400三级螺纹钢12Φ10,箍筋采用八字箍和方箍的复合箍筋HRB400Φ6的钢筋,箍筋间距为60mm,梁中纵筋采用HRB335二级钢4Φ16,型钢采用实腹式I10工字钢.柱和梁的箍筋间距均为60mm.此钢筋和型钢的采用和布置与单个柱子的具体构造一致^[7],主要为了研究对整体结构的抗震影响.

材料属性通过具体材料试验测得,见表1和表2,详细设计参数见表3.

表1 钢材材料性能
Tab.1 Steel material properties

钢材	型号	屈服强度 f_u /MPa	极限强度 f_y /MPa
型钢	I10	254	368
箍筋	Φ6.5	500	718
纵筋	Φ10	424	620
纵筋	Φ16	360	570

表2 混凝土材料性能
Tab.2 Concrete material properties

混凝土试块	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	轴心抗压强度 f_c /MPa	弹性模量 E /GPa
C40	52	46	33.5
C100	118	105.52	47.4

表 3 试件设计参数
Tab. 3 The design parameters of specimens

试件编号	型钢规格	柱含钢率 / %	剪跨比	实验轴压比
SHRC-SRC-N25	I10	0.3	3	0.25
SHRC-SRC-N38	I10	0.3	3	0.38
SHRC-SRC-N45	I10	0.3	3	0.45

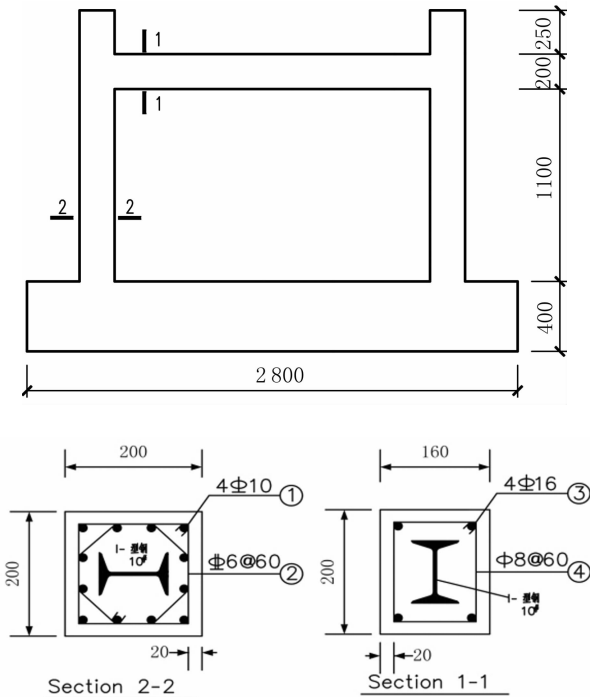


图 1 型钢超高强混凝土框架结构及截面配筋图
Fig. 1 Steel ultra high strength concrete frame structure and the section reinforcement figure

1.2 试验加载制度

1.2.1 加载装置

本实验加载原理与单个柱构件的加载原理相近,两反力钢梁主要起承担柱顶反力的作用,液压千斤顶施力的最大量程为 2 000 kN,而千斤顶底座与反力钢梁之间的滚轴能更好地协调柱顶的水平位移变化,并保证柱顶受力方向保持不变.水平作动器起到施加水平力的作用,在梁的两端用两根丝杆与作动器相连.为了实现往复加载,地面钢梁和机械千斤顶主要起到约束基础移动的作用.框架加载装置和照片如图 2 和图 3.

1.2.2 加载制度

由于本实验是型钢超高强混凝土实验,并且涉及到的实验轴压比含有高轴压比, N 分别为 0.25, 0.38, 0.45(相当于设计轴压比 0.5, 0.75, 0.9),柱顶施加轴力大小分别为 1 050 kN, 1 600 kN, 1 920 kN,参数见表 3.故在实验开始时,首先要在柱顶施加目标轴力值的 40%,然后持载一段时间后再继续加载至目标值,并在整个实验过程中保持竖向轴力大小不发生变化.施加水平往复力.实验以位移转角($\theta = \Delta/L$)为机制, Δ 代表梁端位移, L 代表柱的计算高度,采用拟静力位移控制加载,前 3 个循环以 0.25% 为增量,每级幅值循环一次,第四级幅值开始以 0.5% 位移转角为增量,每个幅值循环 3 次.具体循环加载见图 4.

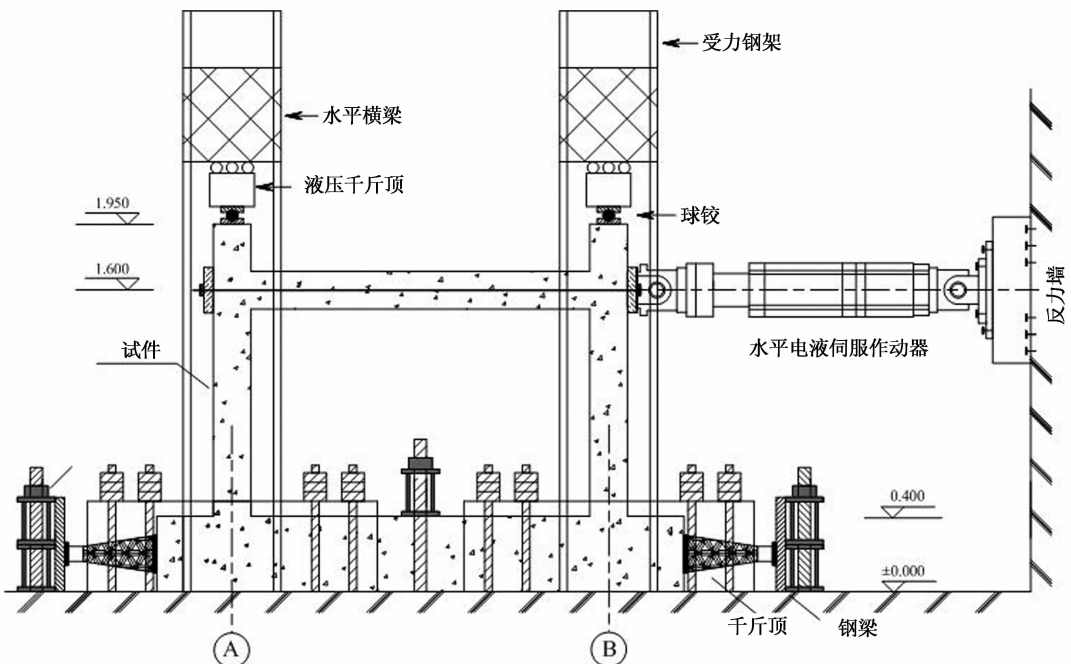


图 2 加载装置
Fig. 2 Loading device



图3 加载照片
Fig. 3 Loading photo

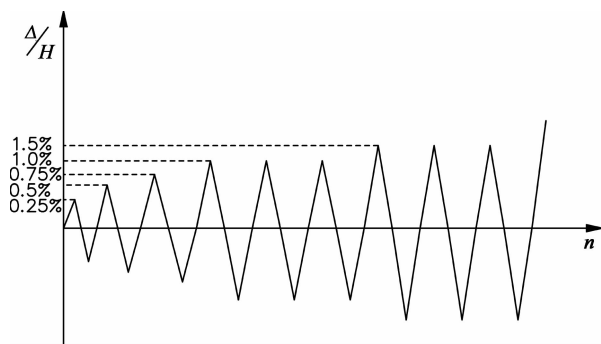


图4 循环加载图
Fig. 4 Cyclic loading spectrum

1.3 测试内容和方案

试验主要测试框架结构的水平位移和相对应的力;梁端塑性铰区纵筋、箍筋的应变,型钢翼缘的应变;柱脚复合箍筋、纵筋的应变,柱脚位移转角。

实验数据是通过串联两台 imc 64 通道仪器采集的. 并且通过连接 imc 与 FCS 控制柜,使北京佛力加载系统所施加的力与 imc 采集的其他数据保持同步,这样便于后期的数据对比和处理。

2 试验破坏过程和破坏形态

2.1 SHRC-SRC-N25

实验在轴力加载到目标值的过程中,试件整体并没有发生任何变化,水平作动器位移控制加载,依据 Δ/L 位移转角为加载方式,待加载到 0.5% 的位移转角时,梁的左端上部和右端下部同时出现细小的竖直裂缝,到 0.75% 的位移转角时,梁的裂缝没有明显的发展迹象. 继续加载到 1% 位移转角时,梁的左端上部和右端下部的裂缝明显增多,此时两柱脚 30 mm 范围内,柱脚混凝土保护层开裂出现裂缝,并伴随着清脆响声. 继续加载到 1.5%~2.5%

区间,梁端 100 mm 范围内混凝土裂缝加宽,节点核心区出现细小斜向裂缝. 柱脚局部区域混凝土保护层压碎;当位移转角达到 3% 时,柱脚推拉两侧混凝土保护层脱落,裂缝主要集中在柱底 20 mm~250 mm 范围,并在柱底 200 mm 范围内出现许多斜向裂缝,框架柱发生弯剪破坏. 进一步加载到 3.5% 位移转角,梁端 100 mm 范围内混凝土压碎脱落,节点核心区 45° 方向出现斜裂缝. 当达到 4% 位移转角时,梁端没有大的变化,但柱底混凝土竖向裂缝增多. 此时,试验承载力已经达到了极限承载力的 85%,但本实验并没有就此停止,而是待极限承载力下降到了 50% 时才停止实验,以便更细致地观察整体框架结构的整体性能。

2.2 SHRC-SRC-N38

与 SHRC-SRC-N25 相比,1% 位移转角前,破坏过程相似,但在达到 1% 位移转角时,柱脚下部出现竖向裂缝. 在同幅值下进行比较,水平裂缝减少,且裂缝的分布范围要比 SHRC-SRC-N25 的分布更加集中,裂缝总体靠近柱的底部. 当到达 3% 位移转角时,柱根部混凝土表面翘曲,竖向裂缝向上延伸更快,破坏情况严重. 柱底截面核心区 30 mm 范围没有发生破坏,同时,梁柱节点核心区出现了微小裂缝. 在同幅值下轴压比增大,柱脚破坏更加严重,梁端竖向裂缝更加分散. 并且在随后的每个循环中,混凝土破坏的程度都要比 SHRC-SRC-N25 严重,同时伴随部分碎块的崩出,混凝土破坏的响声更加清脆。

2.3 SHRC-SRC-N45

与 SHRC-SRC-N25 和 SHRC-SRC-N38 相比,当实验轴压比达到 0.45 时,框架整体结构的破坏主要是框架柱的破坏,且梁端的破坏程度小,裂缝开裂程度很低,分布比较分散,节点核心区没有裂缝出现. 幅值很小时结构就破坏了. 柱的裂缝和破坏都更加严重,整体破坏的面积也更大. 柱端先形成塑性铰,梁端混凝土开裂,但没有严重的破坏,没有形成塑性铰. 上述柱脚和梁端的具体破坏形式见图 5。

3 试验结果及分析

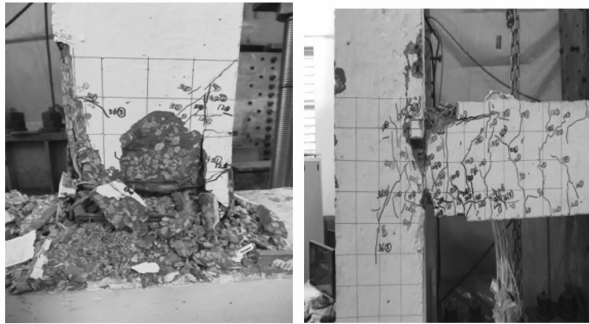
3.1 滞回曲线

三榀框架的 $P-\Delta$ 滞回曲线如图 6,在加载初期,框架结构处于弹性变形阶段,每次加载位移很小,变化后几乎没有残余变形. 继续加载后应力-应变曲线逐渐弯曲,卸载后存在残余变形,且曲线变形加快。

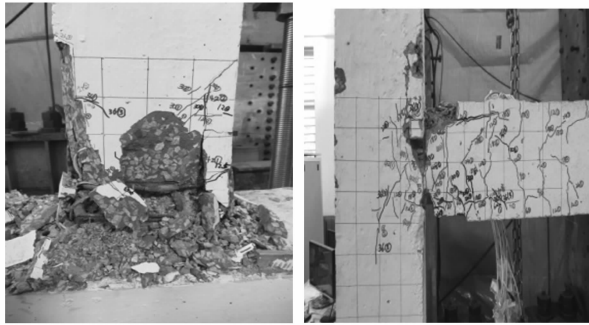
当位移增大到一定值,完成一次加载循环后,应力-应变曲线形成一个环,伴随着加载过程发展,滞回环面积增大,形成一个饱满的梭形.当承载力达到峰值点后,同一幅值承载力下降趋势不明显.同时,伴随发生的是框架结构整体刚度的退化,强度的衰减,粘滞阻尼系数的降低.



(a) $N=0.25$



(b) $N=0.38$

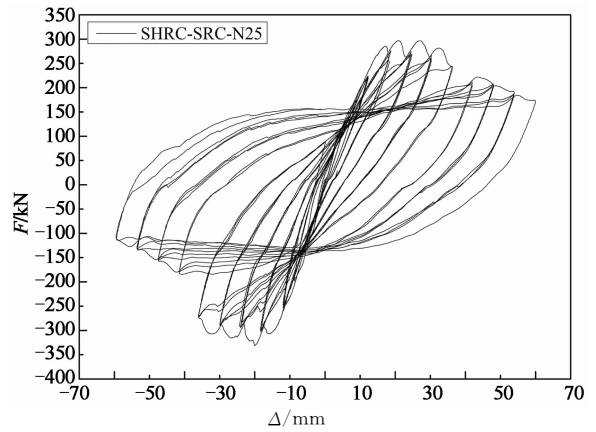


(c) $N=0.45$

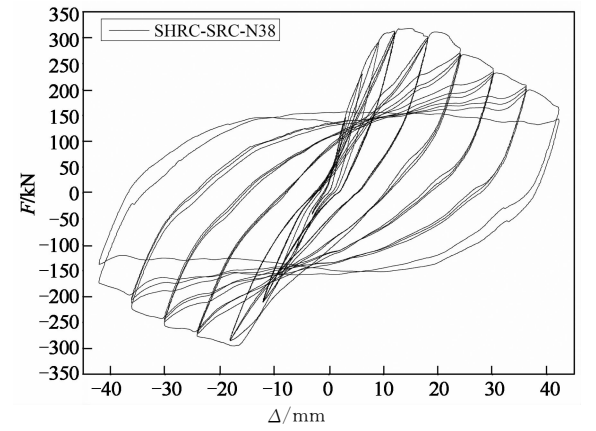
图 5 柱和节点破坏

Fig. 5 Column and joint destroy

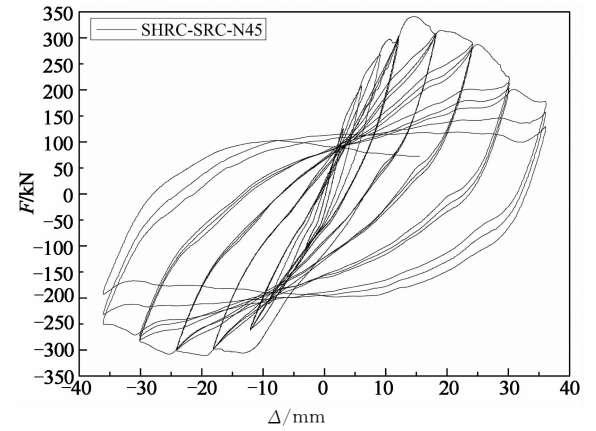
不同之处主要是随着轴压比的升高,柱根部裂缝的出现形式和破坏准则发生了变化.在 0.25 轴压比时,弯曲破坏产生的水平裂缝成为结构破坏的主要原因.当轴压比为 0.38 时,斜裂缝、水平裂缝共同作用,水平裂缝是主要的破坏裂缝,截面的破坏形式从弯曲破坏变成了压弯剪破坏.当轴压比为 0.45 时,竖向裂缝、斜裂缝和水平裂缝共同作用,并且竖向裂缝开裂要快于前两个结构,从破坏形式可看出结构属于压弯破坏.



(a) SHRC-SRC-N25



(b) SHRC-SRC-N38



(c) SHRC-SRC-N45

图 6 三榀框架的滞回曲线

Fig. 6 The three hysteretic curve of frame

3.2 骨架曲线

型钢超高强混凝土框架的骨架曲线分别是框架结构在不同的实验轴压比 0.25, 0.38, 0.45 的情况下,滞回曲线各个循环加载第一次达到的水平力最大峰值点,并依次相连得到的包络曲线,见图 7.对于 SHRC-SRC-N25 结构的曲线,初始阶段稳步上升,达到最大载荷时,保持一段平稳的耗能阶段,然后缓慢地下降,下降段光滑平稳,没有明显的拐点,说明结构不会突然发生承载力急剧下降的情况,保

证了结构的整体稳定性;对于 SHRC-SRC-N38 结构曲线,相同位移幅值下,峰值荷载略有增加,承载力拐点明显;而对于 SHRC-SRC-N45 结构曲线,与前者相比承载力拐点更明显,下降段陡峭.表明试件失去承载力更迅速,整体稳定性也变得很差.说明承载力的提高,对框架整体结构稳定性影响很明显.

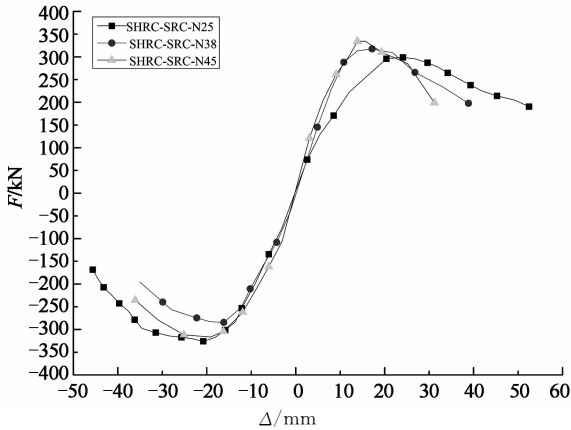


图7 三榀框架的骨架曲线

Fig. 7 The skeleton curve of the three frame

上述骨架曲线根据能量等效面积方法计算^[7]和取点,具体见图8和表4.

屈服位移计算公式见式(1).图8中梯形 $OEC\Delta_m$ 与曲边形 $OABC\Delta_m$ 面积相等,推导得

$$\Delta_y = 2(\Delta_u - A/P_m) \quad (1)$$

式中, A 为曲边形 $OABC\Delta_m$ 面积.

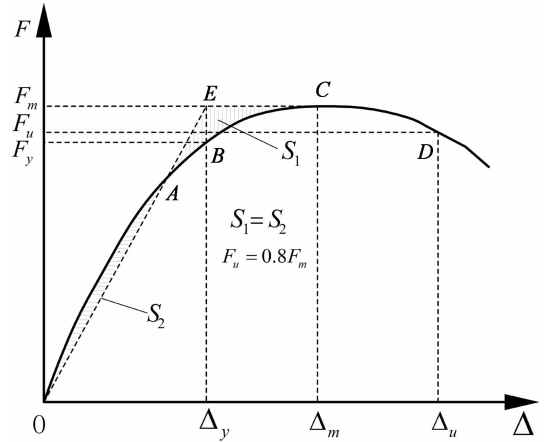


图8 框架骨架曲线特征点

Fig. 8 Characteristic points of frame's skeleton curve

表4 框架骨架曲线特征值
Tab. 4 The skeleton curve

试件	加载方向	结构屈服点		最大荷载点		极限荷载点	
		F_y /kN	Δ_y /mm	F_m /kN	Δ_m /mm	F_u /kN	Δ_u /mm
SHRC-SRC-N25	正向	280.71	16.72	300.38	23.26	240.3	39.1
	反向	-300.2	-15.38	-326.22	-20.56	-261	-37.47
SHRC-SRC-N38	正向	293.74	11.5	317.28	17.18	253.8	29.29
	反向	-260	-13.25	-284.37	-16.16	-227.5	-31.37
SHRC-SRC-N45	正向	292.6	11.34	332.6	13.89	266.1	27.3
	反向	-279.74	-13.7	-318	-19.15	-254.4	-33.86

3.3 强度衰减

强度退化是在位移幅值不变的条件下,结构承载力随荷载反复循环次数的增加而降低的现象.通常用强度退化系数 λ_i 表示,表达式为: $\lambda_i = F_{j,\max}^i / F_{j,\max}^1$, 其中 $F_{j,\max}^i$ 是位移为第 i 倍屈服位移时,第3次循环峰点荷载值; $F_{j,\max}^1$ 是第 i 倍屈服位移时,第1次循环峰点荷载值.图9为框架强度退化系数对比曲线.

从图9中可以看出,N25的试件强度退化相对稳定,在 $\pm(10 \sim 30 \text{ mm})$ 的范围内,强度迅速衰减,是因为结构达到屈服位移,试件本身产生了一定的破坏,随着循环次数的增加,破坏程度也在进一步加剧,同时伴有整体能量的耗散.在达到一定位移之后,同幅值下各循环退化整体稳定,幅值的增长并没有使强度衰减加快,而是处于一个相对稳定的区域变化,说明结构在破坏后整体稳定性很好.N38试件的破坏整体呈下降趋势,强度退化速率加快.N45的

退化速率加快,结构达到极限位移之后,每次循环过程中其自身的损伤都非常严重.上述现象可以说明,

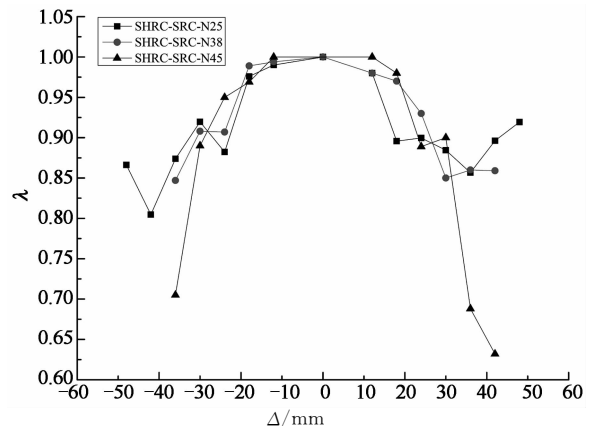


图9 框架强度退化系数比较

Fig. 9 The comparison of the strength degradation coefficient of frame

轴压比的变化直接影响着框架结构的稳定性,在一定变形条件下,结构强度退化与其承载力随反复加载次数增加而降低的特性有关。

3.4 刚度退化

刚度退化是加载过程中,随着位移幅值和循环次数的增加,试件刚度逐渐退化,最终达到试件的刚度无法抵抗地震的作用. 本文根据文献[8]主要研究了框架在不同轴压比的作用下,结构正、反向最大荷载的绝对值与对应的位移绝对值和的比值. 采用平均割线刚度 K_i 表示,公式如(2).

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: $+F_i$, $-F_i$ 为在某一幅值循环往复第 i 次时,正、反向最大荷载值; $+\Delta_i$, $-\Delta_i$ 是与其相对应的位移; i 是循环的次数。

从图 10 可以看出,3 个试件的初始刚度不同,下降后的刚度也不同,只有在 15~25 mm 位移范围内,三者的割线刚度接近,近似交于一点. 此段是 3 个框架都达到了最大荷载点的范围. 图 10 曲线的变化说明,达到最大荷载时,不同轴压比的试件曲线会交于极限割线刚度点,然后曲线彼此分开;轴压比越大,刚度的初始值也越大,并且 3 条刚度退化曲线都接近于线性变化,轴压比越大,刚度退化越明显,曲线的斜率越大;在高轴压比下,试件相同幅值每次循环的刚度退化较为明显,没有明显的踏步段,低轴压比的试件第 1 次和第 2 次循环刚度退化较快,2,3 次循环刚度没有明显的退化。

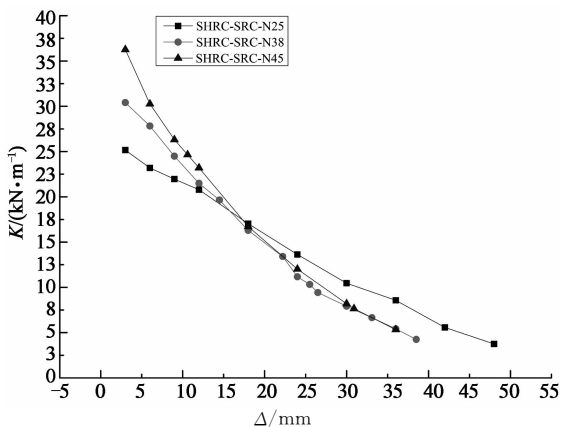


图 10 割线刚度退化曲线

Fig. 10 The secant stiffness degradation curve

3.5 能量耗散

根据文献[9]的能量耗散准则依据图 11,结构整体耗散能量的能力随反复加载逐渐加强,加-卸载循环一次所形成的滞回环面积不断增大,这与结构屈服后整体结构的破坏有密切关系. 从图 12 观察,轴压比高的试件在达到屈服荷载前整体的耗能能力

非常相近. 而轴压比 N25 试件变化相对较平稳. 框架结构的能量耗散能力与单个型钢混凝土柱子的能量耗散正好吻合[7].

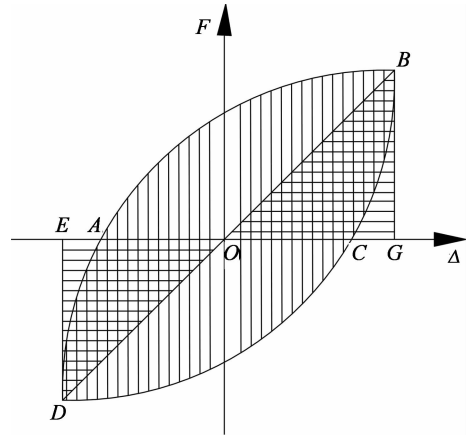


图 11 能量耗散准则

Fig. 11 Energy dissipation criterion

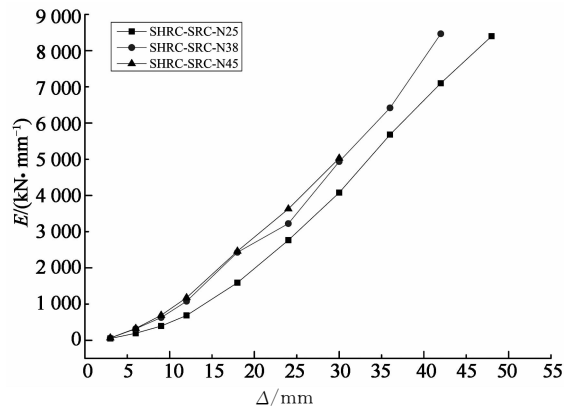


图 12 能量耗散曲线

Fig. 12 Energy dissipation curve

结构的延性是通过实际的极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 的比值求得,公式为 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$,三榀框架的延性系数见表 5.

表 5 位移延性系数

Tab. 5 The displacement ductility coefficient

	SHRC-SRC-N25		SHRC-SRC-N38		SHRC-SRC-N45	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向
极限位移	39.1	-37.47	29.29	31.37	27.3	-33.86
屈服位移	16.72	-15.38	11.5	-13.25	11.34	-13.7
延性系数	2.34	2.44	2.55	2.37	2.41	2.47

三榀框架在不同轴压比的情况下,延性系数相差不大,但总体的延性系数都比较小,和型钢混凝土柱子[10-12]比较相差很大. 主要是由于超高强混凝土结构的延性系数很小,并且根据《建筑抗震设计规范》的规定,随着混凝土标号的增加,结构的轴压比限值逐渐下降. 本试验的试验轴压比分别为 0.25,0.38,0.45,换算

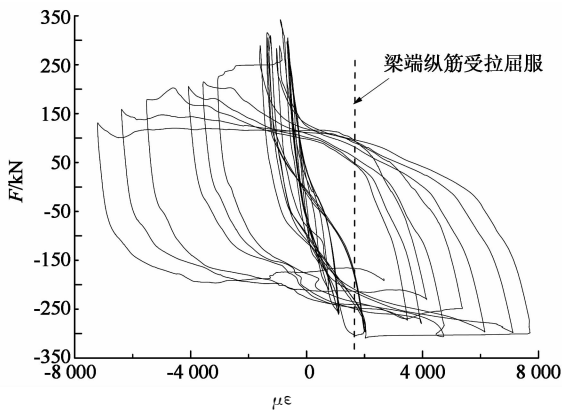
成设计轴压比已经远远超过普通混凝土规范的限值。但又因为超高强混凝土主要是在高压下工作,并且高轴压比框架在屈服时出现压屈的现象,屈服位移可能有所降低,而轴压比增大到一定程度对结构的影响就不够明显,结构的极限位移没有大的变化。因此,高轴压比结构的延性系数可能会比低轴压比的延性系数大一些,但往往不会高出太多。

3.6 应变分析

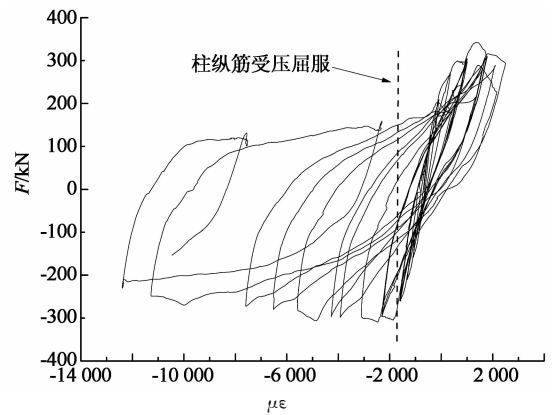
在试验过程中,梁端总是先出现裂缝,但到试验后期,整个试验的结束又是以柱子的承载力为判别依据。故型钢、纵筋、复合箍筋的应变对判断结构的破坏情况有着重要的意义。通过试验观察,随轴压比

的升高,梁端的破坏逐渐减弱,裂缝间距增大,而柱底部的破坏加剧,裂缝发展的速度加快。本文取 SHRC-SRC-N45 作为研究对象,如图 13。

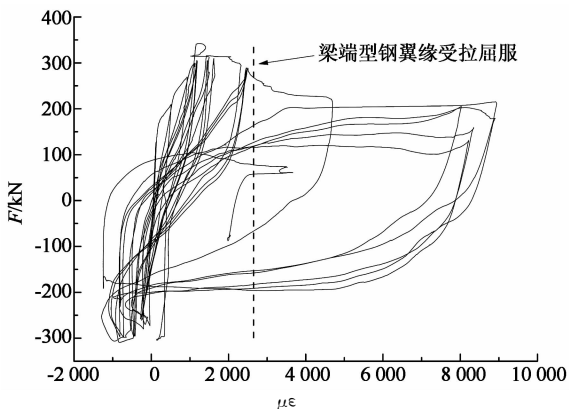
通过应变情况可以看出,梁端比柱根部先进入屈服状态,即梁端塑性铰先于柱根部出现,满足强柱弱梁的设计要求。进一步分析破坏形式,梁端的破坏属于受拉破坏,而柱子的型钢和纵筋属于受压破坏,复合箍筋在加载前期变形较小;在加载后期,短时间内应变很大,说明柱底部混凝土破坏加剧,同时在极限破坏前八字箍筋所约束部分整体性较好,而方箍先于八字箍屈服,说明方箍所受的混凝土侧向挤压和纵筋屈曲向外的张力大于八字箍筋。



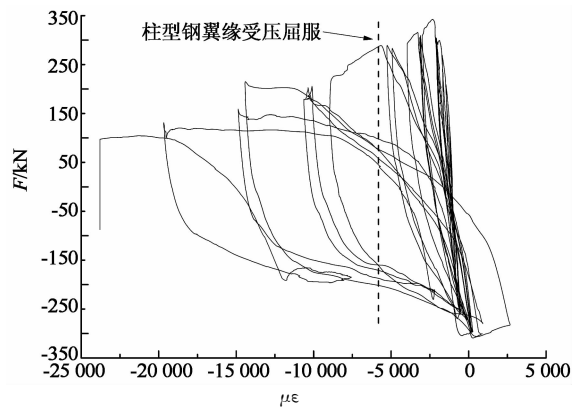
(a) 梁纵筋



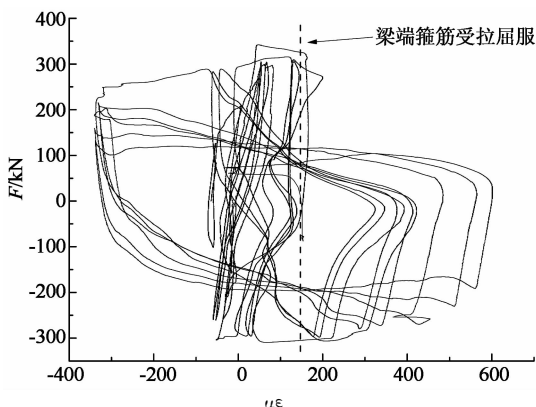
(b) 柱纵筋



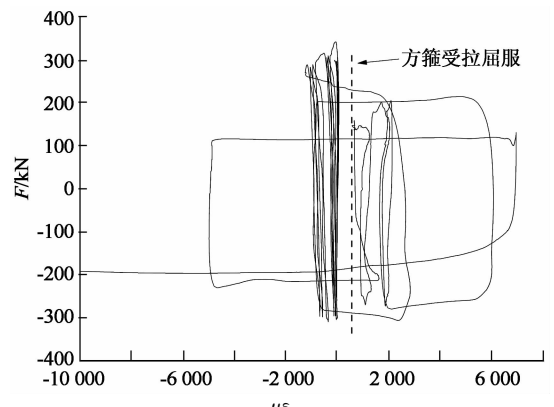
(c) 梁型钢翼缘



(d) 柱型钢翼缘



(e) 梁箍筋



(f) 柱方箍筋

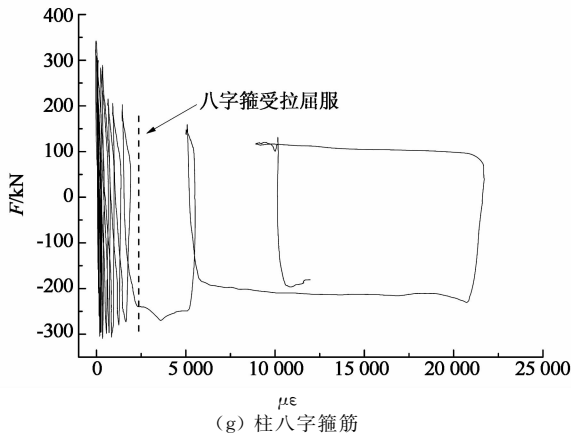


图13 梁柱塑性铰区荷载-应变滞回曲线
Fig. 13 The load-strain hysteretic curves of beam and column in plastic hinge zone

4 结论

通过对三榀型钢超高强混凝土框架结构的研究,分析了结构在高轴压比条件下的抗震性能,得到以下结论:

1)低轴压比试件的滞回性能要比高轴压比的好,滞回环饱满,屈服位移后有着较为平缓的下降段.高轴压比试件在屈服位移后,滞回环较为饱满,但其承载力下降得快.滞回曲线峰值点处变化与柱子的滞回曲线有所不同,这反映了框架结构的受力不同于单个型钢混凝土柱子.

2)轴压比越高,位移幅值越小,往复加载过程中强度的衰减越明显.

3)在不同轴压比作用下,轴压比越高,试件的初始刚度越大,加载过程刚度退化也越严重.并且在同一幅值下,2,3次循环的刚度退化也非常明显,没有显著的平台段.

4)结构在每级幅值下,完成一次完整的滞回后,能量耗散总体呈下降趋势,说明在实验过程中,结构本身能量耗散的能力减弱.

5)位移延性系数,在不同轴压比下相差不大,与同种条件的型钢混凝土柱子相比,位移延性系数减少30%~60%.型钢超高强混凝土框架结构轴压比的大小对整体结构的位移延性系数影响相对稳定.

6)随着轴压比的增加,梁端和柱根部的塑性铰从梁端转移到了柱根部,并且轴压比越大,梁端部的破坏就越小.相反,柱根部破坏的就越严重.

7)梁端先于柱底部屈服,结构满足“强柱弱梁”的抗震设计要求.

参考文献

[1] 薛伟辰,胡翔. 四层两跨高性能混凝土框架的抗震性能[J]. 建筑结

构学报, 2007, 28(5): 69-79.

XUE Wei-chen, HU Xiang. Seismic performance of four-story two-bay HPC frame[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 69-79. (In Chinese)

[2] 郑山锁,侯丕吉,张宏仁,等. SRHSHPC 框架结构地震损伤试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 84-92.

ZHENG Shan-suo, HOU Pi-ji, ZHANG Hong-ren, et al. Experimental study on seismic damage of SRHSHPC framed structure[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 84-92. (In Chinese)

[3] 李忠献,张雪松,丁阳. 翼缘削弱的型钢混凝土框架抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 18-24.

LI Zhong-xian, ZHANG Xue-song, DING Yang. Seismic behavior of steel reinforced concrete frames with reduced beam sections[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 18-24. (In Chinese)

[4] 傅传国,李玉莹,孙晓波,等. 预应力及非预应力型钢混凝土框架受力及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 15-21.

FU Chuan-guo, LI Yu-ying, SUN Xiao-bo, et al. Experimental study on seismic performance of prestressed and non-prestressed steel reinforced concrete frames[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 15-21. (In Chinese)

[5] 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 Wen-zhong, 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. (In Chinese)

[6] 熊学玉,高峰,苏小卒. 预应力型钢混凝土框架试验研究和设计理论[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(8): 19-26.

XIONG Xue-yu, GAO Feng, SU Xiao-zu. Experimental investigation and design theories on prestressed steel reinforced concrete frame[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(8): 19-26. (In Chinese)

[7] 朱伟庆. 型钢超高强混凝土柱受力性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014: 79-81.

ZHU wei-qing. Behavior of steel reinforced high strength concrete columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 79-81. (In Chinese)

[8] MA Hui, XUE Jian-yang, ZHANG Xi-cheng. Seismic performance of steel-reinforced recycled concrete columns under low cyclic loads[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 229-237.

[9] 齐岳,郑文忠. 低周反复荷载下核心高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(12): 6-12.

QI Yue, ZHENG wen-zhong. Experimental study of the seismic behavior of concrete columns with high strength core under low cyclic loading[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(12): 6-12. (In Chinese)

[10] 王斌,郑山锁,国贤发,等. 循环荷载作用下型钢高强高性能混凝土框架柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 117-126.

WANG bin, ZHENG Shan-suo, GUO Xia-fa, et al. Experimental research on mechanical behavior of SRHSHPC frame columns under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 117-126. (In Chinese)

[11] 郑山锁,王斌,侯丕吉,等. 低周反复荷载作用下型钢高强高性能混凝土框架柱损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 1-10.

ZHENG Shan-suo, WANG Bin, HOU Pi-ji, et al. Experimental study of the damage of SRHSHPC frame columns under low cycle reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 1-10. (In Chinese)

[12] 郭子雄,吕西林. 高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 32-38.

GUO Zi-xiong, LV Xi-lin. Experimental study on the hysteretic model of RC columns with high axial compressive ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 32-38. (In Chinese)