

文章编号:1673-2049(2018)02-0079-09

不同分布筋间距下型钢混凝土剪力墙抗震性能试验

王玉镯¹, 高 英², 王慧敏³, 傅传国¹

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东协和学院 建筑工程学院, 山东 济南 250107;
3. 山东职业学院 铁道工程与土木工程系, 山东 济南 250104)

摘要:为研究分布筋间距对型钢混凝土剪力墙抗震性能的影响,设计了 4 个矩形截面型钢混凝土剪力墙试件(其中 1 个为不带暗撑的普通剪力墙对比试件,3 个为带 X 形暗撑的型钢混凝土剪力墙试件),进行了低周反复荷载试验。结果表明:型钢混凝土剪力墙试件的承载力随着分布筋间距的增大而减小,其分布筋间距为 100,150,200 mm 的试件承载力较对比试件分别提高了 66.8%, 45.9% 和 41%;型钢混凝土剪力墙试件的延性随着分布筋间距的增大而呈线性降低趋势,其分布筋间距为 100,150,200 mm 的试件延性系数较对比试件分别提高了 27.8%, 29.2% 和 11.3%;试件的分布筋间距越小其裂缝越细密,沿暗支撑走向分布越明显,塑性铰范围越大,耗能能力越高,抗震性能越好。

关键词:型钢混凝土剪力墙;分布筋间距;抗震性能;低周反复加载

中图分类号:TU392 **文献标志码:**A

Experiment on Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Shear Wall with Different Distributed Reinforcement Spacing

WANG Yu-zhuo¹, GAO Ying², WANG Hui-min³, FU Chuan-guo¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Architectural Engineering, Shandong Xiehe University, Jinan 250107, Shandong, China; 3. Department of Civil Engineering, Shandong Polytechnic, Jinan 250104, Shandong, China)

Abstract: In order to study the impact law of distributed reinforcement spacing on the seismic behavior of steel reinforced concrete shear wall, four rectangular section steel reinforced concrete shear wall specimens (one of them was a common shear wall specimen without profile steel for comparison, the remaining three were test shear wall specimens with X-shaped steel concealed bracing) were designed for experimental study under low frequency cyclic loading. The results show that the bearing capacities of specimens decrease as the distributed reinforcement spacing increases, when the distributed reinforcement spacing is 100,150 and 200 mm, compared with the contrast specimen, the corresponding bearing capacity improves by 66.8%, 45.9% and 41%, respectively. When the distributed reinforcement spacing increases, the ductility of steel reinforced concrete shear wall specimens decreases linearly. Compared with the contrast specimen, when the distributed reinforcement spacing is 100,150 and 200 mm, the corresponding ductility improves by 27.8%, 29.2% and 11.3%, respectively. When the distributed reinforcement spacing is smaller, the cracks appear more and denser, the range of plastic hinge is

收稿日期:2017-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51378302)

作者简介:王玉镯(1973-),男,山东武城人,副教授,工学博士,E-mail:yuzhuowang@163.com。

wider, the earthquake energy dissipation capacity is higher and the seismic performance is better.

Key words: steel reinforced concrete shear wall; distributed reinforcement spacing; seismic behavior; low frequency cyclic loading

0 引言

地震是严重危害人类生命安全和社会发展的自然灾害之一。虽然人类对地震和抗震等方面进行了大量的研究,取得了令人瞩目的成果,但新型抗震结构体系仍然是当今工程结构领域关注的热点。型钢混凝土剪力墙因具有强度高、刚度大、稳定性好等优点,被广泛地应用于高层建筑结构中^[1-2]。目前型钢混凝土剪力墙抗震性能方面的研究也越来越多^[3-8],孙建超等^[9]对 13 片混凝土剪力墙试件(高宽比为 1.5,轴压比为 0.5)进行了抗震性能试验研究,通过考虑配筋方式、分布筋配筋率(0.35%~1.96%)等因素,得到墙体分布筋配筋率的增加可提高剪力墙的受剪承载力,但配筋率过高,其延性反而很差。梁兴文等^[10]对不同剪跨比型钢高性能混凝土剪力墙(其端部约束边缘构件的含钢率分别为 8.4%和 6.9%)进行了低周反复荷载下的试验研究,结果表明:型钢高性能混凝土剪力墙的破坏形态与水平分布钢筋的相对数量有关,水平分布钢筋相对数量越多,试件延性越好。方小丹等^[11]对 7 个不同形式的高配筋率边缘约束构件高强混凝土剪力墙试件(边缘约束构件内的纵筋配筋率为 5%~8%)和 1 个普通配筋率(配筋率为 1.58%)的高强混凝土剪力墙试件进行了低周反复荷载试验,结果表明:在一定条件下,适当提高分布钢筋配筋率,可以显著提高高强混凝土剪力墙的抗震性能。

综上所述,现有研究主要考虑了配筋方式、配筋率等因素对型钢混凝土剪力墙试件抗震性能的影响。为了研究分布筋间距对型钢混凝土剪力墙抗震性能的影响,本文设计了 4 个具有不同分布筋间距的型钢混凝土剪力墙试件,进行了低周反复加载下的试验研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文试验共设计了 4 个矩形截面(800 mm×200 mm)剪力墙试件,其剪跨比均为 1.75,试件编号分别为 JLQ-1, JLQ-2, JLQ-3 和 JLQ-4,其中 JLQ-1 为普通无暗撑对比试件, JLQ-2, JLQ-3, JLQ-4 为带 X 形暗撑且具有不同分布筋间距的试件。试

件采用 C50 商品混凝土,分布筋及主筋全部采用 HPB300 钢筋,拉筋用 $\phi 6.5$ 的钢筋梅花型布置。试件配筋及具体参数情况如图 1 和表 1 所示。

1.2 材性试验

试件的制作是在工地中进行的,按照放置型钢、绑扎钢筋、支护模板、浇筑、养护、拆模的顺序进行。浇筑混凝土时制作了 1 组(共 3 块)混凝土立方体标准试块^[12],自然养护 28 d,取其强度平均值,结果如表 2 所示。对钢筋及型钢进行力学性能测试,结果如表 3、4 所示。

1.3 试验装置及加载制度

1.3.1 试验装置

伺服液压加载系统(MTS)可较精确地模拟实际荷载,常用来进行试件抗震性能试验研究。本文利用伺服液压加载装置进行了低周反复加载试验^[13-15]。试验装置主要由竖向加载装置(由竖向液压千斤顶和分配梁组成)和水平加载装置(主要由水平作动器和水平连接装置组成)两部分组成,如图 2 所示。

1.3.2 加载制度

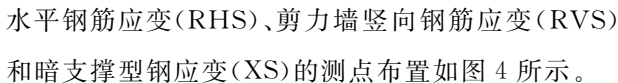
为了模拟构件在结构中的实际受力条件及构件在遭受地震时的情况,试验采用如下加载制度。

竖向加载:试件轴压比控制为 0.18。试验开始前,竖向荷载由千斤顶通过分配梁施加在试件上,分 2 级加载,加载至荷载 $F=550$ kN,整个试验过程中保持不变,其作用线通过试件截面竖向中心线。

水平加载:距离基础顶面 1 400 mm 高度处用 MTS 施加反复水平荷载,首先施加 $F=80$ kN 的水平力,然后逐级(每一个循环增加 10 kN)加载直至试件表面出现裂纹,进入位移控制加载。在开裂荷载所对应的试件水平位移基础上,以 2 mm 为级差进行位移控制加载,每级位移循环 2 次。当试件水平承载力降至极限承载力的 85%时,加载结束。加载制度见图 3。

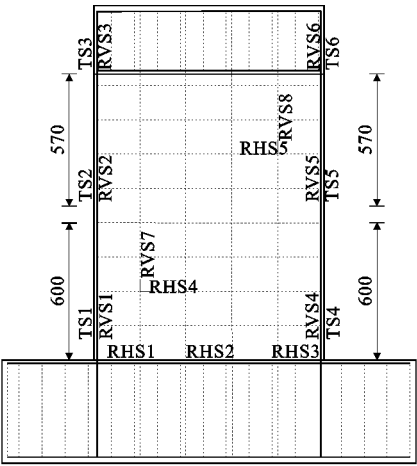
1.4 测试内容及测点布置

针对不同的测量目的,在试件不同位置布置不同间距的应变片或应变花,用联机数据采集系统采集与水平力相应高度处剪力墙的水平位移、水平荷载值,用 X-Y 函数记录仪记录构件内部的钢筋应变以及型钢应变等。剪力墙混凝土应变(TS)、剪力墙

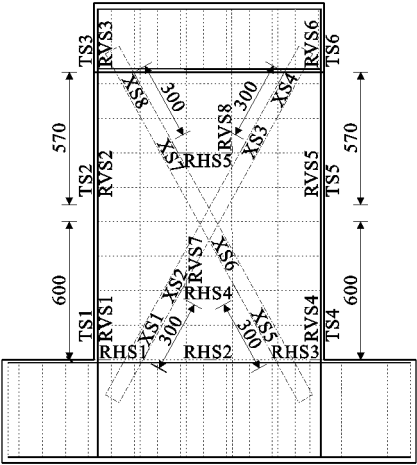


注:工字钢尺寸为 100 mm×68 mm×4.5 mm×7.6 mm。

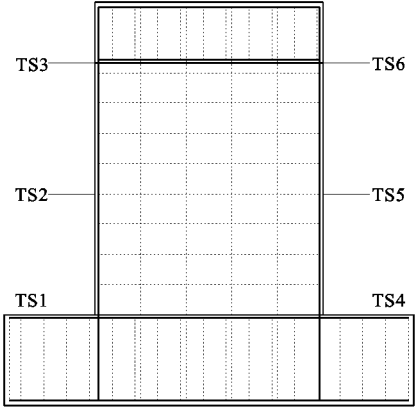




(a) 竖向及水平钢筋应变片布置



(b) 型钢应变片布置



(c) 试验混凝土应变片布置

图 4 应变测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of Strain Measuring Points (Unit:mm)

2 试验现象分析

本文试验是在山东建筑大学工程结构与防灾减灾实验室中进行。试件的位移-力关系由 MTS 在试验过程中自动记录。

2.1 试件 JLQ-1

当位移 $\Delta=2\text{ mm}$ 时,距离 A 端底部 33 cm 处

出现第 1 条裂缝并呈水平状发展趋势;当位移 $\Delta=-6\text{ mm}$ 时,在距离 B 端底部 33 cm 处出现第 2 条裂缝;当位移 $\Delta=8\text{ mm}$ 时,墙体底部开始出现水平裂缝;当位移 $\Delta=14\text{ mm}$ 时,墙体 A 端底部受压区混凝土压坏并开始剥落;当位移 $\Delta=-26\text{ mm}$ 时,墙体中部混凝土开始剥落;当位移 $\Delta=28\text{ mm}$ 时,水平承载力下降至极限承载力的 85%,试验终止。试件破坏形态如图 5(a)所示。

2.2 试件 JLQ-2

当位移 $\Delta=4\text{ mm}$ 时,距 A 端底部 48 cm 处出现第 1 条裂缝;当位移 $\Delta=-6\text{ mm}$ 时,距 B 端底部 48 cm 处出现第 2 条裂缝,且裂缝末端有小裂缝出现;当位移 $\Delta=22\text{ mm}$ 时,距 B 端根部混凝土压碎并有少许剥落;当位移 $\Delta=36\text{ mm}$ 时,B 端混凝土破坏严重;当位移 $\Delta=-36\text{ mm}$ 时,A 端混凝土出现较严重的剥落现象;当位移 $\Delta=46\text{ mm}$ 时,A,B 两端均破坏严重,水平承载力下降至极限承载力的 85%,试验终止。试件破坏形态如图 5(b)所示。

2.3 试件 JLQ-3

当位移 $\Delta=4\text{ mm}$ 时,距 A 端根部 41 cm 处出现第 1 条裂缝;当位移 $\Delta=-6\text{ mm}$ 时,距 B 端根部 37 cm 处出现第 2 条裂缝;当位移 $\Delta=10\text{ mm}$ 时,距 A 端底部 21 cm 处出现新的裂缝;当位移 $\Delta=22\text{ mm}$ 时,A 端原有裂缝继续发展且 B 端部分混凝土出现剥落现象;当位移 $\Delta=34\text{ mm}$ 时,A 端裂缝迅速发展,发展成主裂缝;当位移 $\Delta=36\text{ mm}$ 时,水平承载力下降至极限承载力的 85%,试验终止。试件破坏形态如图 5(c)所示。

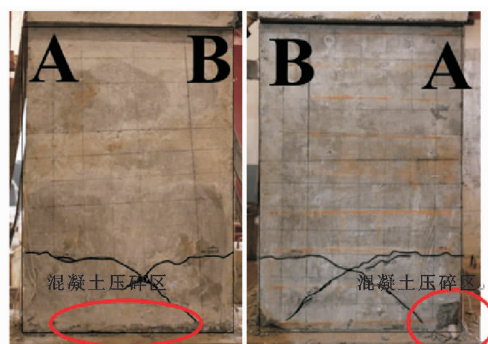
2.4 试件 JLQ-4

当位移 $\Delta=4\text{ mm}$ 时,距 A 端底部 18 mm 处出现第 1 条裂缝并呈水平状发展趋势;当位移 $\Delta=-6\text{ mm}$ 时,距 B 端底部 40 cm 处出现第 2 条裂缝并呈水平状发展趋势;当位移 $\Delta=-20\text{ mm}$ 时,B 端根部裂缝迅速发展并与 A 端裂缝相贯通;当位移 $\Delta=-22\text{ mm}$ 时,B 端混凝土剥落严重,钢筋裸露;当位移 $\Delta=28\text{ mm}$ 时,B 端混凝土剥落严重;当位移 $\Delta=34\text{ mm}$ 时,两端混凝土均被压碎,水平承载力下降至极限承载力的 85%,试验终止。试件破坏形态如图 5(c)所示。

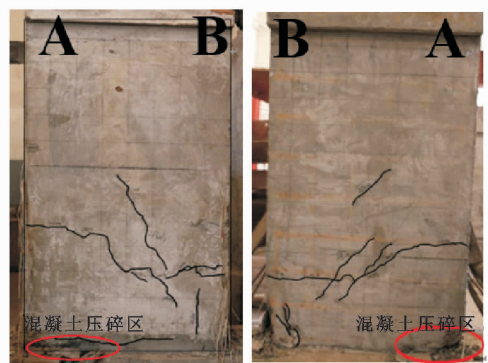
2.5 破坏形态分析

通过对比分析上述 4 个试件的破坏形态,可得如下结论:

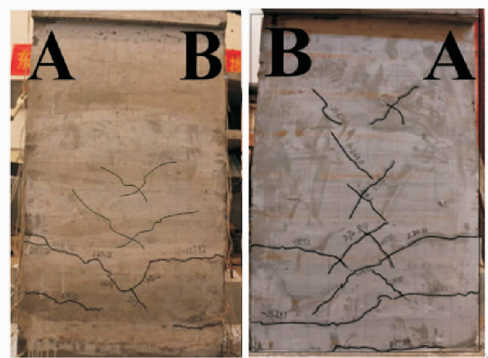
(1)对比试件 JLQ-1 的主裂缝呈现剪切破坏,试件 JLQ-2,JLQ-3,JLQ-4 的主裂缝呈现弯曲破坏。



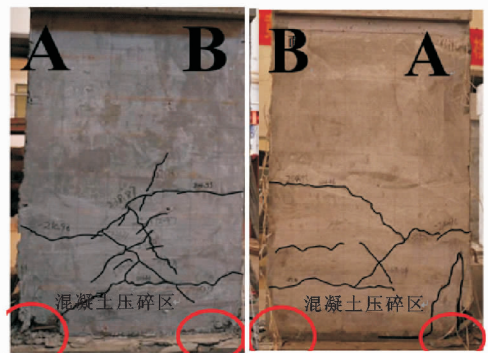
(a) 试件JLQ-1



(b) 试件JLQ-2



(c) 试件JLQ-3



(d) 试件JLQ-4

图 5 各试件破坏形态

Fig. 5 Failure Modes of Specimens

(2)相对于对比试件 JLQ-1,试件 JLQ-2 的裂缝宽度变小,裂缝数量明显增多,塑性铰范围扩大,耗能能力明显提高,说明型钢暗撑有利于提高试件的耗能能力。

(3)试件 JLQ-2,JLQ-3,JLQ-4 中,试件 JLQ-3 裂缝最多,分布最广,且沿暗撑走向分布明显,塑性铰范围最大,这表明 JLQ-3 的耗能能力最好。同时从各试件破坏形态中发现,试件 JLQ-3 受压区混凝土被压碎剥落的程度最轻,说明试件 JLQ-3 的抗震性能最好。

2.6 应变分析

钢筋和型钢的应变可以进一步说明试件的受力机理,本文选取型钢应变测点 XS2、水平钢筋应变测点 RHS1 和竖向钢筋应变测点 RVS1 的应变值进行分析,结果如图 6 所示。图 6 中设定型钢和钢筋应变值,当应变测点处型钢或钢筋受拉时应变值为正,受压时应变值为负。

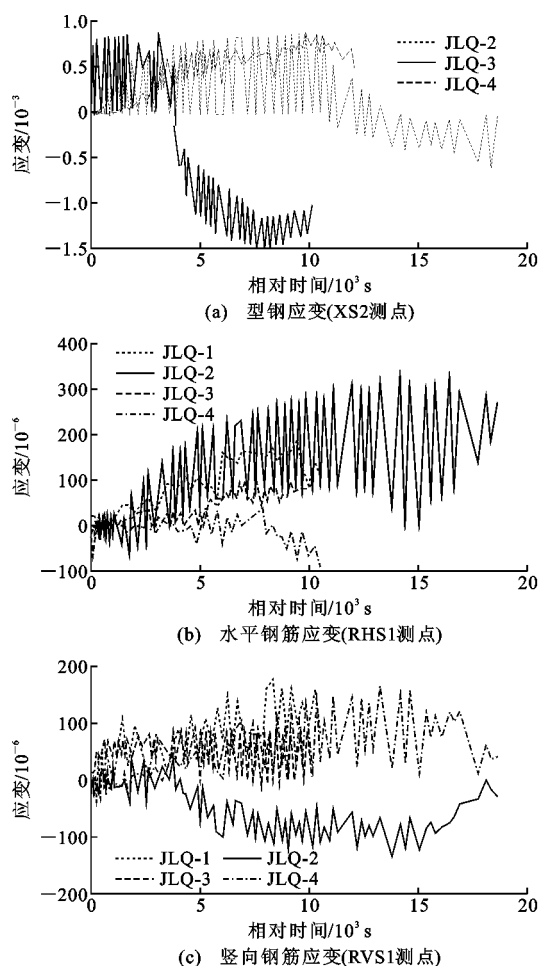


图 6 试件应变分析结果

Fig. 6 Strain Analysis Results of Specimens

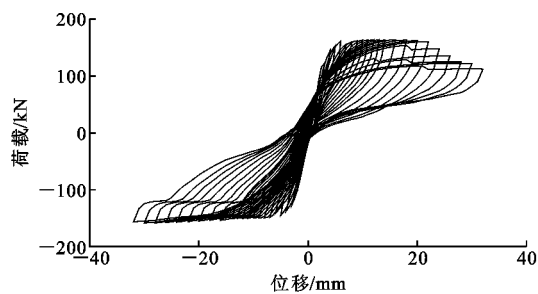
由图 6 可知:整体上试件内的型钢应变水平要大于钢筋应变水平;试件 JLQ-3 的型钢应变水平最大,波动性也大,试件 JLQ-2 的应变水平其次,试件 JLQ-4 的应变水平最小,这表明试件内分布筋越密,内部型钢应变越大;总体上,试件的竖向钢筋应变水

平较水平钢筋应变水平小,且无论竖向钢筋应变还是水平钢筋应变,试件 JLQ-3 的应变水平最低,即试件 JLQ-3 的抗变形能力最好。

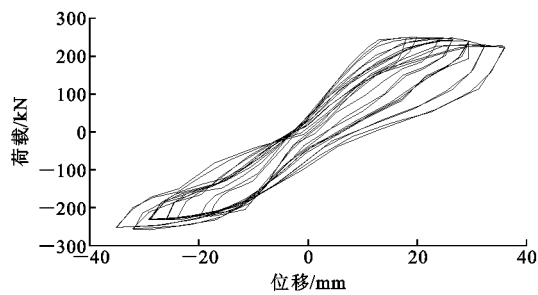
3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

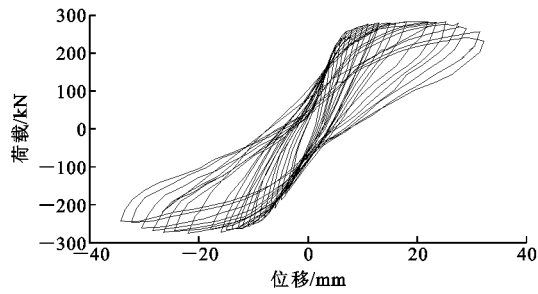
滞回曲线是试件水平反复荷载与水平位移的直接体现,其数据由 MTS 直接采集并记录。各试件滞回曲线如图 7 所示。



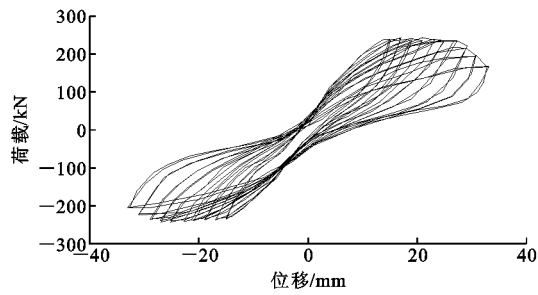
(a) 试件 JLQ-1



(b) 试件 JLQ-2



(c) 试件 JLQ-3



(d) 试件 JLQ-4

图 7 各试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic Curves of Specimens

由图 7 可知:

(1)随着位移的增大,试件滞回环逐渐变饱满,

所围面积增大,滞回曲线开始向位移轴倾斜,刚度退化逐渐明显,残余变形不断积累直至加载结束。

(2)相对于对比试件 JLQ-1,试件 JLQ-2 的滞回环相对饱满,所围面积变更大,说明其耗能能力明显提高。

(3)试件 JLQ-4 的滞回曲线有明显的捏缩现象,黏结滑移相对严重;试件 JLQ-2 的滞回曲线捏缩现象最不明显,黏结滑移相对较轻。说明分布筋间距对试件内部的黏结滑移有影响,分布筋间距越大,黏结滑移相对越大。

(4)相对于对比试件 JLQ-1,试件 JLQ-2, JLQ-3 及 JLQ-4 的滞回环面积明显增大,表明型钢暗撑提高了试件的耗能能力。

3.2 骨架曲线

骨架曲线是每次循环加载达到水平承载力最大值的轨迹,反映了构件受力与变形的不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等)。各试件正负向骨架曲线趋势相同,整体发展形势基本一致(图 8)。

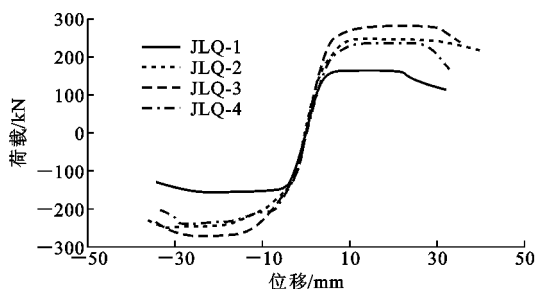


图 8 各试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curves of Specimens

由图 8 可知:

(1)各试件初始刚度基本一致,说明暗撑及分布筋间距对试件的初始刚度无显著影响,试件初始刚度只与试件的截面尺寸以及混凝土的强度等级有关。

(2)试件 JLQ-3 的承载能力最大;试件 JLQ-2 的承载能力次之;试件 JLQ-4 的承载能力最小。

(3)试件 JLQ-3 的屈服段最长,试件 JLQ-2 的屈服段次之,试件 JLQ-4 的屈服段最短,表明分布筋对试件的耗能有显著影响,且分布筋间距越小,试件的耗能越大,分布筋间距越大,试件的耗能越低,试件的耗能随分布筋间距的增大而减小。

(4)试件 JLQ-2 骨架曲线的下降段下降最缓慢,表明试件 JLQ-2 在加载后期有较好的塑性变形能力。

3.3 承载力分析

各试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载及其比值如表 5 所示,同时将各荷载值与分布筋间距的关系整理成图 10。表 5 中 F_{cr} 为开裂荷载, F_y 为屈服荷载, F_u 为极限荷载, μ_{cu} 为开裂荷载与极限荷载的比值, μ_{yu} 为屈服荷载与极限荷载的比值, $\mu_{yu}=F_y/F_u$, F_{cr} , F_y , F_u 均取正负两向加载均值。屈服荷载采用通用弯矩屈服法^[14]确定。通用弯矩屈服法如图 9 所示。图 9 中,过原点的弹性理论值 OA 线与过极限荷载点的水平线相交于 A 点,过 A 点作垂线与骨架曲线相交于 B 点,连接 OB 并延长,与过极限荷载点的水平线交于 C 点,过 C 点作垂线与骨架曲线相交于 D 点, D 点即为屈服荷载点, Δ_y 为屈服位移。

表 5 试件开裂荷载、屈服荷载、极限荷载试验值
Tab. 5 Test Values of Cracking Load,
Yield Load and Ultimate Load

试件编号	F_{cr}/kN	F_y/kN	F_u/kN	μ_{cu}	μ_{yu}
JLQ-1	121.98	150.13	166.76	0.731	0.900
JLQ-2	201.92	221.93	252.68	0.799	0.878
JLQ-3	224.07	256.45	278.70	0.804	0.920
JLQ-4	159.55	211.29	241.13	0.662	0.876

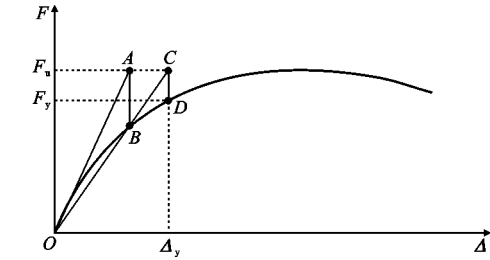


图 9 通用弯矩屈服法

Fig. 9 Universal Moment Yield Method

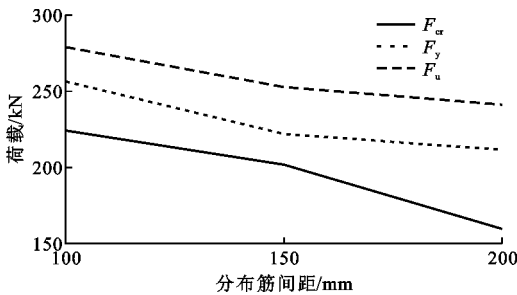


图 10 承载力-分布筋间距关系

Fig. 10 Relation of Bear Capacity and Distributed Reinforcement Spacing

由表 5 及图 10 可以看出:

(1)与试件 JLQ-1 相比,试件 JLQ-2, JLQ-3, JLQ-4 的极限承载力分别提高了 45.9%,66.8%和

41.0%,说明型钢剪力墙试件的承载能力较对比试件有显著提高。

(2)试件 JLQ-3 的 F_{cr} , F_y , F_u 三个值均最大,试件 JLQ-4 的 F_{cr} , F_y , F_u 三个值均最小。这说明分布筋间距越小,试件的 F_{cr} , F_y , F_u 越大,分布筋间距越大,试件的 F_{cr} , F_y , F_u 越小。

3.4 刚度退化分析

本文采用同级变形下的割线刚度^[14]表示试件的刚度。割线刚度的计算方法如图 11 所示,即采用每个位移循环中的荷载最大值与对应位移之比作为割线刚度,每个循环的割线刚度取正向加载刚度 K_1 和负向加载刚度 K_2 的平均值 K ,最终的割线刚度取所有同级加载循环割线刚度的平均值。通过上述方法计算的割线刚度退化曲线如图 12 所示。

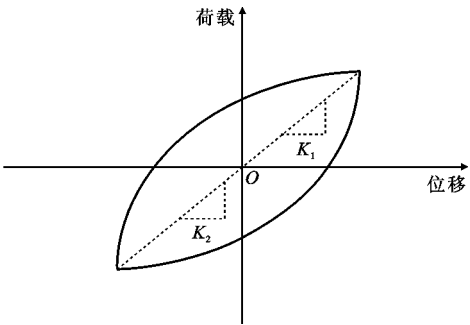


图 11 割线刚度计算方法

Fig. 11 Secant Stiffness Calculation Method

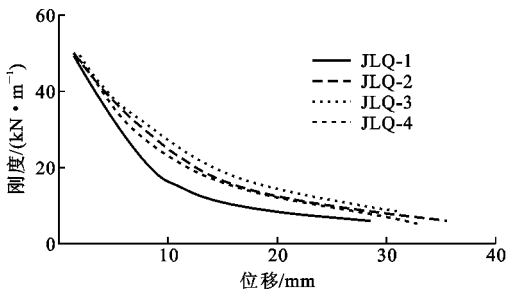


图 12 试件刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness Degradation Curves of Specimens

由图 12 可知:

(1)加载初期,随着位移的不断增大,各试件刚度退化较快;加载后期,尤其进入屈服阶段后,各试件刚度的退化速度随位移的增大而渐趋缓慢。

(2)加载初期,各试件的刚度退化曲线基本重合,表明初始刚度基本一致。随加载的不断进行,刚度退化曲线不再一致,出现分化,具体表现在:对比试件 JLQ-1 的刚度退化曲线随位移的增大下降最快,处于所有曲线最下方。这说明普通剪力墙试件的刚度退化现象最严重。

(3)试件 JLQ-3 的后期刚度最大,试件 JLQ-4 的后期刚度最小。这表明分布筋间距对试件后期刚度有明显的影响,分布筋间距越小,试件的后期刚度越大。

3.5 延性分析

延性系数反映结构构件的变形能力,是评价结构抗震性能的主要指标之一。目前有关延性系数定义有很多种,本文选用以下定义:结构破坏时的极限位移 Δ_u 和屈服时的屈服位移 Δ_y 之比,即

$$u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

采用基于荷载峰值的确定方法确定极限位移,采用弯矩屈服法确定屈服位移和屈服荷载,各试件的延性系数见表 6。

表 6 试件延性系数

Tab. 6 Ductility Coefficients of Specimens

试件编号	极限位移/ mm	屈服位移/ mm	延性系数	延性系数相对值
JLQ-1	19.03	5.68	3.35	1.000
JLQ-2	26.34	6.16	4.28	1.278
JLQ-3	30.02	6.93	4.33	1.292
JLQ-4	25.12	6.73	3.73	1.113

由表 6 可以得出以下结论:

(1)相对于对比试件 JLQ-1,试件 JLQ-2,JLQ-3,JLQ-4 的延性分别提高了 27.8%,29.2%,11.3%。

(2)试件 JLQ-2,JLQ-3,JLQ-4 中,试件 JLQ-3 的延性系数最大,试件 JLQ-4 的延性系数最小。这说明分布筋间距越小,试件延性越好,分布筋间距越大试件延性越差,且试件延性随分布筋间距的增大呈线性降低关系。

4 讨 论

考虑到普通钢筋混凝土构件存在超筋、适筋和少筋现象,即存在最佳配筋问题,因而提出假设:对于型钢混凝土构件,其分布筋也可能存在最佳间距(最佳配筋率),即分布筋间距越小,试件的抗震性能、耗能能力、延性等未必越好。后续会通过开展大量试验来验证上述假设,并找到最佳分布筋间距。

5 结 语

(1)各试件均发生弯剪破坏,其中普通剪力墙对比试件的主裂缝呈现剪切破坏,型钢混凝土剪力墙试件在剪切破坏的同时弯曲破坏更加明显,而且分布筋间距越小的试件出现的裂缝越细密,分布范围越广。

(2)当分布筋间距相同时,型钢剪力墙试件的滞回环较普通剪力墙试件饱满,耗能能力明显提高,同时延性系数较大,延性提高显著,由此可见型钢混凝土剪力墙试件在耗能和延性方面的抗震性能明显优于普通剪力墙试件。

(3)分布筋间距对试件的承载力有较大影响,分布筋间距越小,试件承载力越大;反之,分布筋间距越大,试件的承载力越小。

(4)分布筋间距对试件的初始刚度几乎无影响,但对试件的后期刚度影响较大。试件的后期刚度随着试件分布筋间距的增大而减小。试件的后期刚度均大于对比试件的后期刚度。

参考文献:

References:

[1] HAJJAR J F. Composite Construction for Wind and Seismic Engineering [C] // Structural Stability Research Council. Proceedings of 2001 Annual Technical Session and Meeting. Bethlehem: Structural Stability Research Council, 2001: 209-228.

[2] 董宏英,蒋 峰,曹万林. 钢-混凝土组合剪力墙抗震研究与发展[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 54-61.

DONG Hong-ying, JIANG Feng, CAO Wan-lin. Development and Research in Seismic Performance of Steel-concrete Composite Shear Wall [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1): 54-61.

[3] 曹万林,胡国振,周明杰,等. 带暗支撑抗震墙研究 [J]. 世界地震工程, 1998, 14(4): 76-80.

CAO Wan-lin, HU Guo-zhen, ZHOU Ming-jie, et al. Study on Aseismic Wall with Concealed Bracings [J]. World Earthquake Engineering, 1998, 14(4): 76-80.

[4] 曹万林,董宏英,胡国振,等. 不同暗支撑型式的带暗支撑双肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 18-25.

CAO Wan-lin, DONG Hong-ying, HU Guo-zhen, et al. An Experimental Study on the Seismic Behavior of RC Coupled Shear Walls with Concealed Bracings of Different Styles [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 18-25.

[5] 曹万林,张建伟,常卫华,等. 带暗支撑双肢短肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2006, 26(1): 64-70.

CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei, CHANG Wei-hua, et al. Experiment Study on Seismic Behavior of RC Coupled Short-pier Shear Wall with Concealed Brac-

- ings[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 26(1): 64-70.
- [6] 曹万林, 杨兴民, 黄选明, 等. 带钢筋及钢骨暗支撑剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 1-6.
- CAO Wan-lin, YANG Xing-min, HUANG Xuan-ming, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of RC shear Walls with Concealed SRC Bracings[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 1-6.
- [7] 白亮. 型钢高性能混凝土剪力墙抗震性能及性能设计理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- BAI Liang. Research on Seismic Behavior and Performance-based Seismic Design Theory of Steel High Performance Concrete Structural Walls [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [8] 梁兴文, 杨鹏辉, 崔晓玲, 等. 带端柱高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 23-32.
- LIANG Xing-wen, YANG Peng-hui, CUI Xiao-ling, et al. Experimental Studies on Seismic Behavior of High Strength Concrete Shear Wall with Boundary Columns[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 23-32.
- [9] 孙建超, 徐培福, 肖从真, 等. 不同配筋形式混凝土剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 6-10.
- SUN Jian-chao, XU Pei-fu, XIAO Cong-zhen, et al. Experimental Study on Shear Behavior of Concrete Wall with Different Types of Reinforcement [J]. Building Structure, 2008, 38(6): 6-10.
- [10] 梁兴文, 白亮, 杨红楼, 等. 型钢高性能混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 131-138.
- LIANG Xing-wen, BAI Liang, YAGN Hong-lou, et al. Experimental Study on the Seismic Behavior of High Performance Steel-concrete Shear Walls[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 131-138.
- [11] 方小丹, 李照林, 韦宏, 等. 高配筋率边缘约束构件高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 145-153.
- FANG Xiao-dan, LI Zhao-lin, WEI Hong, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High Performance Concrete Shear Wall with High Reinforcement Ratio Boundary Elements[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 145-153.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [13] 黄建军. 不同型式暗支撑型钢高强混凝土中高剪力墙抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- HUANG Jian-jun. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Reinforced High-strength Concrete Medium-high Wall with Different Types of Concealed Bracings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [14] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [15] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- TANG Jiu-ru. Aseismic of Reinforced Concrete Frame Joints [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.