

隔板贯通式方钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点 抗震性能

李明,刘栩邑,郝艳婷

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究隔板贯通式方钢管混凝土柱-钢蜂窝梁(DTSCFSTC-SCB)节点的抗震性能,为工程应用提供设计依据。方法 应用有限元分析软件 ABAQUS 对比 DTSCFSTC-SCB 节点与隔板贯通式方钢管混凝土柱-钢梁(DTSCFSTC-SB)节点的抗震性能,分析不同参数对其抗震性能的影响。结果 DTSCFSTC-SCB 节点的承载力较 DTSCFSTC-SB 节点的承载力降低 10%,延性系数提高 6.8%;钢材强度、梁柱线刚度比对其抗震性能影响较大(25%~138%);隔板内(外)伸宽度仅在一定范围内对其延性影响较明显(13%~18%),隔板厚度仅在一定范围内对其承载力影响较明显(7%~8%),开孔率对其最大承载力、耗能能力影响较明显(4%~12%);轴压比、混凝土强度等级、含钢率、孔间距、孔壁距离对其抗震性能影响很小(1%~5%)。结论 该节点具有工程可行性,钢材强度、梁柱线刚度比是影响其抗震性能的主要因素。

关键词 方钢管混凝土柱;钢蜂窝梁;隔板贯通式节点;抗震性能

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Seismic Behavior of Diaphragm-through Type Square Concrete Filled Steel Tubular Column-Steel Castellated Beam Joint

LI Ming, LIU Xuyi, HAO Yanting

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To study the seismic behavior of the diaphragm-through type square concrete-filled steel tube column-steel castellated beam (DTSCFSTC-SCB) joint and provide design basis for engineering applications, FEM was applied to compare the seismic behavior of DTSCFSTC-SCB with the diaphragm-through type square concrete filled steel tubular column-steel beam (DTSCFSTC-SB) joint. Its seismic behavior influencing factors were analyzed. The results show that the bearing capacity of DTSCFSTC-SCB joint is 10% lower and the ductility coefficient is

收稿日期:2022-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅基金面上项目(LJKZ0561);住房和城乡建设部科研开发项目(2019-K-080)

作者简介:李明(1979—),男,副教授,博士,主要从事装配式混凝土结构等方面研究。

6.8% higher than that of DTSCFSTC-SB joint. The steel strength and beam-column's linear stiffness ratio has a greater influence (25% ~ 138%) on its seismic behavior. The inner and extension widths of the diaphragm has a significant influence (13% ~ 18%) on its ductility within a certain range. The thickness of the diaphragm has an obvious influence (7% ~ 8%) on its bearing capacity. The opening rate has an obvious influence (4% ~ 12%) on its bearing capacity and energy dissipation capacity. The axial compression ratio, concrete grade, steel ratio, hole pitch and hole wall distance has less influence (1% ~ 5%) on its seismic behavior. DTSCFSTC-SCB joint is practical in engineering, and the steel strength, beam-column's linear stiffness ratio and opening rate are the main factors affecting its seismic behavior.

Key words: square concrete filled steel tubular column (SCFSTC); steel castellated beam; diaphragm-through type joint; seismic behavior

钢管混凝土柱 (Concrete Filled Steel Tubular Column, CFSTC), 即钢管内灌注混凝土形成的组合柱, 具有承载力高, 刚度大等优点; 钢蜂窝梁 (Steel Castellated Beam, SCB), 即实腹工字型钢梁 (Steel Beam, SB) 按一定形式折线切割后换位焊接形成的梁, 具有自重轻, 易穿管等优点。两种构件均在建筑中广泛应用^[1-2], 当二者应用于同一结构时, 梁柱连接节点的可靠程度成为决定结构整体性能的重要因素。因此, 开展 CFSTC-SCB 节点的抗震性能研究具有重要意义。关于此方面的研究一般是参照 CFSTC-SB 节点, CFSTC-SB 节点包括内加强环、外加加强环、隔板贯通三种形式。文献[3-6]研究了内(外)加强环式方(圆)CFSTC-SCB 节点的抗震性能, 笔者将延续上述工作, 开展隔板贯通式方钢管混凝土柱-钢蜂窝梁 (DTSCFSTC-SCB) 节点的抗震性能研究。

目前, 国外对隔板贯通式 CFSTC-SB 节点的研究较少^[7-8], 国内研究较多。苗纪奎等^[9]通过低周反复加载试验, 研究了十字型隔板贯通式节点中钢梁翼缘与隔板采用圆弧倒角型、倒角放坡型、直接焊接型和侧板加强型 4 种连接形式的抗震性能, 结果表明, 采用前两种连接方式的节点承载力和延性最佳。Qin Ying 等^[10-14]通过低周反复加载试验, 研究了 T 字型 and 十字型隔板贯通式 CFSTC-SB 的抗剪和抗震性能, 结果表明, 两种节点抗震性能均良好, 且后者抗剪强度更高。鉴于上述分析, 笔者基于有限元软件 ABAQUS, 分

析 DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能, 探讨隔板内(外)伸宽度、厚度、钢蜂窝梁开孔率等因素对其抗震性能的影响, 为该种节点的应用提供设计依据。

1 DTSCFSTC-SCB 节点简介

DTSCFSTC-SCB 节点见图 1。制作时, 首先将各段方钢管焊接于隔板两侧, 然后在柱内灌注混凝土, 最后将 SCB 焊接于柱外壁和隔板。梁端剪力及弯矩产生的拉应力分别通过梁腹板处焊缝和隔板传至柱。贯通式隔板可有效减小钢管平面外屈曲变形, 节点具有刚度大、延性好等优点。

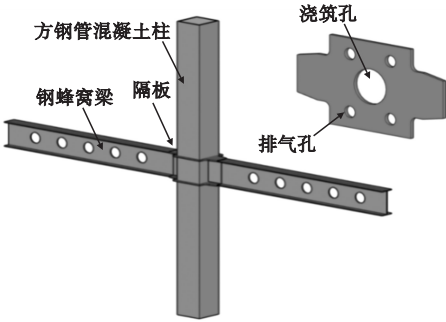


图 1 DTSCFSTC-SCB 节点

Fig. 1 The joint of DTSCFSTC-SCB

2 建模方法及验证

采用文献[9]中的隔板贯通式方钢管混凝土柱-H 型钢梁节点试验验证有限元模拟方法。试验试件编号 CS1, 方钢管混凝土柱高 × 宽 × 钢管壁厚为 3 000 mm × 250 mm ×

10 mm;钢梁长×高为 2 005 mm×250 mm;翼缘宽×厚为 125 mm×9 mm;腹板厚为 6 mm;隔板厚为 12 mm,平面尺寸见图 2。

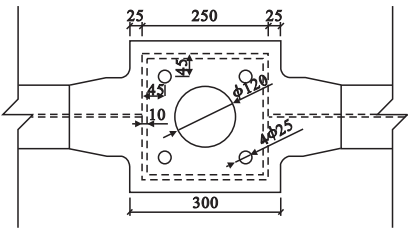


图 2 隔板平面尺寸

Fig. 2 The plane size of diaphragm

根据试验建立有限元模型,混凝土采用塑性损伤模型和 C3D8R 单元,钢材采用三折线简化模型和 S4R 单元。材料参数均根据材性试验设置。方钢管混凝土柱与隔板、隔板与钢蜂窝梁、钢蜂窝梁与方钢管混凝土柱间均采用绑定(Tie)连接,方钢管与核心混凝土接触设置为摩擦接触,摩擦系数为 0.6。加载方式同试验,即在柱、梁两端设置刚性加载板,在柱顶施加轴向荷载,梁两端施加反对称的低周反复荷载。边界条件为约束柱底各

向和柱顶 X、Y 向平动。为防止梁侧向失稳,在距离梁加载端 200 mm 范围内,约束上下翼缘 Y 向平动。

试验及模拟骨架曲线见图 3。从图 3 可看出,两曲线整体趋势一致,吻合较好,最大误差在 5% 内。模拟破坏时,Mises 应力云图与试验对比见图 4。从图中可看出,二者均在梁端翼缘处发生明显屈曲,破坏形态接近。由此说明该有限元建模方法可靠。

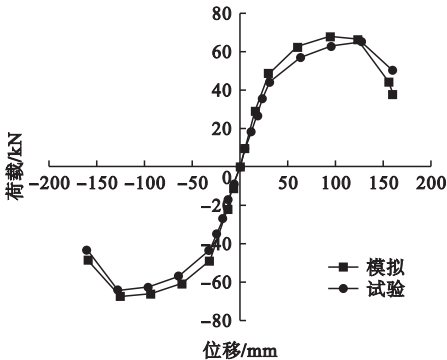
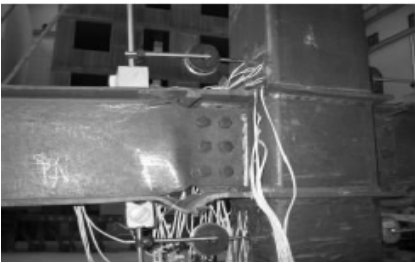
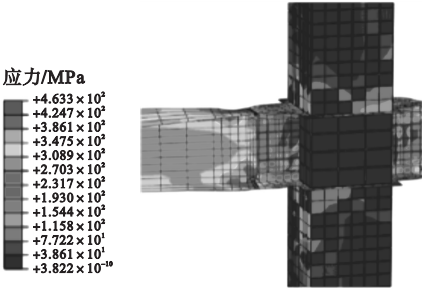


图 3 模拟与试验骨架曲线对比

Fig. 3 The skeleton curves comparison between simulation and test results



(a)试验



(b)模拟

图 4 试验和模拟的破坏特征对比

Fig. 4 The failure features comparison between simulation and test results

3 DTSCFSTC-SCB 节点抗震性能

3.1 试件的设计

为探讨 DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能,笔者设计了两个试件,分别为隔板贯通式 SCFSTC-SB 节点(编号 C-SB)和隔板贯通式 SCFSTC-SCB 节点(编号 C-SCB)。二者几何尺寸同试件 CS1,混凝土强度等级均为 C40,钢材牌号均为 Q235,材料强度均取标

准值。试件 C-SCB 蜂窝梁的孔半径为 55 mm,孔间距为 300 mm,第一个开孔中心至柱壁的距离,即孔壁距离为300 mm。

3.2 滞回曲线对比

试件 C-SB 与试件 C-SCB 的滞回曲线对比见图 5。由图 5 可知,试件 C-SB 与 C-SCB 滞回环饱满,滞回曲线无明显捏缩,二者差别较小,说明 DTSCFSTC-SCB 节点的总耗能也较高。

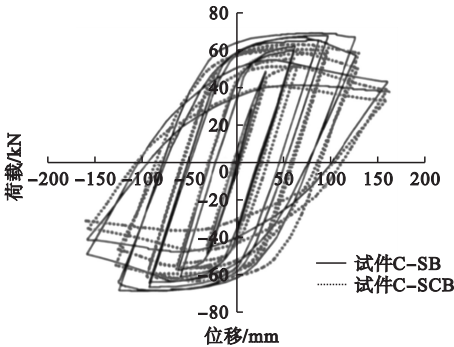


图5 试件 C-SB 与 C-SCB 滞回曲线对比

Fig. 5 The hysteresis curves comparison between specimen C-SB and C-SCB

3.3 骨架曲线对比

试件 C-SB 与试件 C-SCB 的骨架曲线对比见图 6。图中屈服荷载通过“等效弹塑性屈服法”计算,屈服荷载对应的位移为屈服位移。

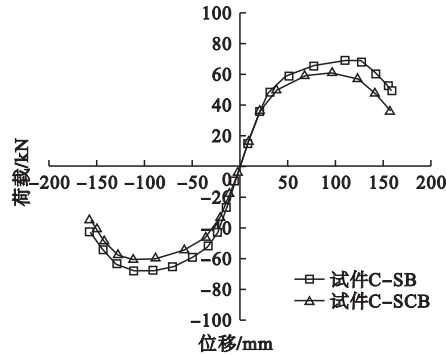


图6 试件 C-SB 与 C-SCB 骨架曲线对比

Fig. 6 The skeleton curves comparison between specimen C-SB and C-SCB

由图 6 可知,两条曲线总体趋势相近,弹性段基本吻合,非弹性段差别明显。试件 C-SCB 进入塑性较早,与试件 C-SB 的屈服位移分别为 29.7 mm 和 34.5 mm,相差 13.9%;试件 C-SCB 承载力偏低,与试件 C-SB 的屈服荷载分别为 52 kN 和 47 kN,相差 9.6%,峰值荷载分别为 68 kN 和 62 kN,相差 8.8%。原因在于蜂窝孔洞对净截面模量影响较小,对净截面塑性模量影响略大,但二者总体相差较小,承载力相差最大不足 10%。由此说明,DTSCFSTC-SCB 节点也具有较高的承载力,且在承载力满足要求时,可

更早地进入塑性,更易实现“强柱弱梁”。

3.4 耗能能力及延性对比

试件 C-SCB 与 C-SB 的耗能能力通过能量耗散系数 E 对比。 E 为一个滞回环的总能量和弹性能比值^[15]。二者的 E 值分别为 1.98 和 2.01,前者低于后者,但相差不足 2%。由此说明,DTSCFSTC-SCB 节点也具有良好的耗能能力。

试件 C-SCB 与 C-SB 的延性通过延性系数 μ 对比。其中, μ 为试件极限与屈服位移的比值,二者的延性系数分别为 4.1 和 3.8,相差 7.3%。由此说明,DTSCFSTC-SCB 节点的延性更好。

3.5 C-SCB 中 SCB 的破坏形态分析

为探讨 SCB 的破坏形态对 C-SCB 抗震性能的影响,提取 SCB 破坏荷载时的 Mises 应力云图,如图 7 所示。由图可知,破坏时,SCB 靠近柱侧的翼缘发生了屈曲,破坏从翼缘向腹板发展至孔洞边缘,由此说明,孔洞对节点的抗震性能有一定影响,其可使梁端更早地进入塑性。

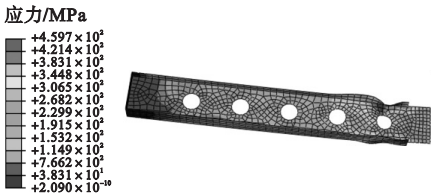


图7 破坏荷载时 SCB 的 Mises 应力云图

Fig. 7 The Mises stress nephogram of SCB to the point of failure load

4 抗震性能影响因素分析

为研究不同参数对 DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能影响,基于试件 C-SCB 设计了标准试件 BZJ 及对比试件。变化参数包括:隔板内/外伸宽度 (B/b) 及厚度 t ,蜂窝梁的开孔率 r 、孔间距 s 及孔壁距离 d ,轴压比 n ,柱截面含钢率 α ,梁柱线刚度比 i ,混凝土强度等级 C 和钢材屈服强度 Q ,BZJ 参数见表 1。

表 1 试件 BZJ 参数

Table 1 The parameters of BZJ

<i>B</i> /mm	<i>b</i> /mm	<i>t</i> /mm	<i>n</i>	<i>C</i> /MPa	α	<i>Q</i> /MPa	<i>i</i>	<i>r</i>	<i>s</i> /mm	<i>d</i> /mm
65	25	10	0.6	40	0.181	235	0.26	0.44	300	300

对比试件通过改变 BZJ 的某一参数设计,其编号中的字母和数值分别表示变化的参数及参数取值。改变 α 时,为保证 i 不变,同时调整了钢管壁厚和柱高,试件 $\alpha-0.141$ 、BZJ、 $\alpha-0.224$ 和 $\alpha-0.268$ 对应的钢管壁厚和柱高分别为8 mm和2 585 mm、10 mm和3 000 mm、12 mm和3 394 mm、14 mm和3 768 mm。通过调整梁长改变参数 i ,试件 $i-0.2$ 、BZJ、 $i-0.32$ 和 $i-0.38$ 的梁长分别为5 217 mm、2 000 mm、3 260 mm和2 746 mm。各试件其余尺寸均同 C-SCB。 r 、 s 和 d 取值符合《钢结构设计标准》(GB50017—2017)中的腹板开孔要求。模拟时,混凝土和钢材本构模型同文中第2节,材料强度均取标准值。计算的各试件特征指标值见表2。

表 2 各试件的特征指标值

Table 2 Characteristic index values of the specimens

试件 编号	荷载/kN		μ	<i>E</i>
	屈服	峰值		
BZJ	45.4	66.2	5.2	2.2
<i>B</i> -25	45.8	68.9	6.3	2.1
<i>B</i> -45	45.4	65.7	5.2	2.2
<i>B</i> -85	45.4	66.7	5.2	2.1
<i>b</i> -45	45.8	65.6	6.1	2.2
<i>b</i> -65	46.3	68.9	5.1	2.2
<i>b</i> -85	46.2	69.1	5.3	2.1
<i>t</i> -8	42.0	61.3	4.9	2.1
<i>t</i> -12	45.5	66.6	4.9	2.2
<i>t</i> -14	45.1	66.1	4.8	2.1
<i>n</i> -0.2	46.2	65.8	4.9	1.7
<i>n</i> -0.4	45.4	66.2	5.2	2.2
<i>n</i> -0.8	45.8	66.0	5.1	2.2
<i>C</i> -30	45.4	66.2	5.1	2.2
<i>C</i> -50	45.6	66.2	5.1	2.2

续表 2

试件 编号	荷载/kN		μ	<i>E</i>
	屈服	峰值		
<i>C</i> -60	46.1	68.1	5.3	2.2
α -0.141	45.2	66.2	5.1	2.2
α -0.224	45.4	66.2	5.1	2.2
α -0.268	45.3	66.2	5.2	2.2
<i>Q</i> -345	56.7	78.0	4.5	1.9
<i>Q</i> -390	72.2	91.7	4.2	1.7
<i>Q</i> -420	75.3	98.4	3.9	1.4
<i>i</i> -0.2	39.0	51.3	4.1	2.6
<i>i</i> -0.32	64.0	82.3	6.2	1.6
<i>i</i> -0.38	89.0	122.3	7.2	1.1
<i>r</i> -0.36	46.6	69.5	5.5	2.3
<i>r</i> -0.52	45.4	66.2	5.2	2.2
<i>r</i> -0.60	45.3	65.8	5.3	2.0
<i>s</i> -250	45.4	66.2	5.1	2.0
<i>s</i> -350	45.5	67.0	5.2	2.3
<i>s</i> -400	45.4	66.3	5.3	2.1
<i>d</i> -250	45.4	66.2	5.2	2.2
<i>d</i> -350	46.6	68.1	5.2	2.1
<i>d</i> -400	45.3	65.8	5.3	2.1

模拟结果表明,参数 α 、 n 、 C 、 d 、 s 对节点各特征指标值影响均小于5%,骨架曲线几乎重合,说明柱截面含钢率、轴压比、混凝土强度等级、孔间距、孔壁距离对 DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能影响很小。笔者主要对影响明显的因素进行分析。

4.1 隔板内伸宽度 *B*

图8为试件 BZJ、*B*-25、*B*-45、*B*-85 的荷载-位移骨架曲线。从图8和表2可看出, B 仅对节点延性影响明显,其由25 mm增加到45 mm,延性系数减少18.1%,其余特征指标值变化小于5%; B 继续增加,骨架曲线几乎

重合,各特征指标值几乎无变化。分析原因在于节点破坏出现于梁端, B 增大使梁端约束增强,趋于固结,节点延性反而降低,而当 B 增加到一定程度后再继续增加,对梁的约束作用几乎不变,各特征指标值不再变化。由此说明,隔板内伸宽度仅对 DTSCFSTC-SCB 的延性影响较大,随其增加延性降低。

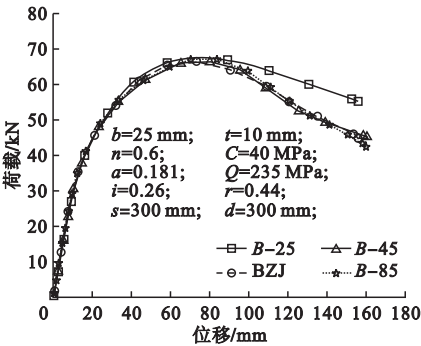


图 8 BZJ、B-25、B-45、B-85 的骨架曲线
Fig. 8 The skeleton curves of BZJ, B-25, B-45, B-85

4.2 隔板外伸宽度 b

图 9 为试件 BZJ、 b -45、 b -65、 b -85 的荷载-位移骨架曲线。从图 9 和表 2 可看出,各骨架曲线相差较小, b 变化仅对节点延性影响明显,其由 25 mm 增加到 45 mm,延性系数增加 17.9%,继续增加至 85 mm,延性系数降低 13%;其余特征指标值变化小于 6%。出现该现象的原因与隔板内伸宽度相似。由此说明,隔板外伸宽度仅对 DTSCFSTC-SCB 的延性影响较大,随其增加延性先增加后降低。

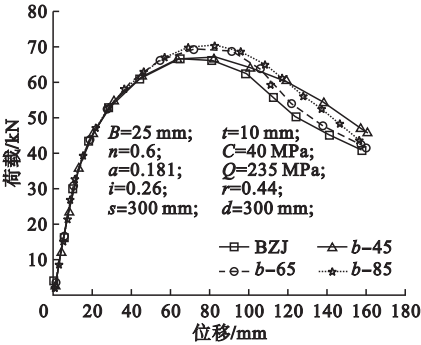


图 9 BZJ、 b -45、 b -65、 b -85 的骨架曲线
Fig. 9 The skeleton curves of BZJ, b -45, b -65, b -85

4.3 隔板厚度 t

图 10 为试件 BZJ、 t -8、 t -12、 t -14 的荷载-

位移骨架曲线。从图 10 和表 2 可看出, t 变化对节点承载力、延性影响明显,其由 8 mm 增加到 10 mm,屈服、峰值荷载分别提高 8.1%、7.9%,延性系数提高 4.3%;继续增加 t ,延性系数减少 6%,承载力减小不足 1%。分析原因在于 t 增加,节点刚度提高,梁端趋于固结,同时梁端弯矩最大控制截面处截面面积增加,因此节点延性和承载力均提高,而当 t 继续增加,节点刚度进一步增大,破坏向梁内侧偏移,因此延性系数和承载力反而降低,但对承载力影响很小。由此说明,隔板厚度在一定范围内增加,DTSCFSTC-SCB 的承载力和延性提高,超出该范围,其增加仅使延性降低。

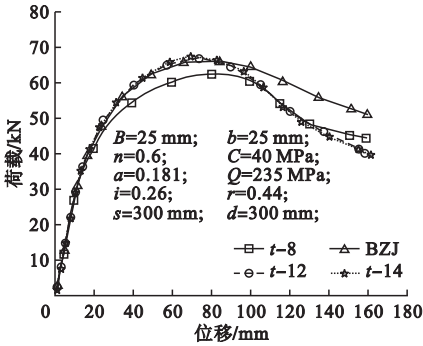


图 10 BZJ、 t -8、 t -12、 t -14 的骨架曲线
Fig. 10 The skeleton curves of BZJ, t -8, t -12, t -14

4.4 钢材强度 Q

图 11 为试件 BZJ、 Q -345、 Q -390、 Q -420 的荷载-位移骨架曲线。从图 11 和表 2 可看出,各骨架曲线差别较大, Q 变化对节点抗震性能影响显著,其由 235 MPa 增加到 420 MPa,屈服、峰值荷载分别提高 66.1%、48.8%,延性系数、能量耗散系数分别降低 25%、35%。分析原因在于钢材强度的增加能够显著提高钢蜂窝梁的强度,但屈服强度的提高,使得相同荷载作用下,节点位移减小,因此随 Q 增加,节点承载力提高,但延性和耗能能力降低。由此说明,钢材强度增加,DTSCFSTC-SCB 的承载力显著提高,而延性和耗能能力显著降低。

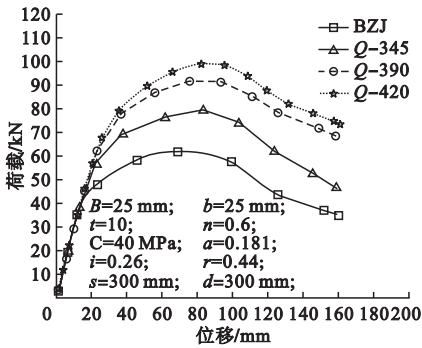


图 11 BZJ、Q-345、Q-390、Q-420 的骨架曲线

Fig. 11 The skeleton curves of BZJ, Q-345, Q-390, Q-420

4.5 梁柱线刚度比 i

图 12 为试件 BZJ、 i -0.2、 i -0.32、 i -0.38 的荷载-位移骨架曲线。从图 12 和表 2 可看出,各骨架曲线差别较大, i 变化对节点抗震性能影响显著,其由 0.2 增加到 0.38,屈服、峰值荷载分别提高 127.9%、138.6%,延性系数提高 75.1%,能量耗散系数降低 59.0%。分析原因在于 i 增大,使节点破坏由梁端向柱转移,但转移的过程也使破坏区域缩小,耗能区域减小,因此随 i 增加节点承载力和延性提高,耗能能力反而降低。由此说明,梁柱线刚度比增加,DTSCFSTC-SCB 节点的承载力和延性显著提高,耗能能力显著降低。

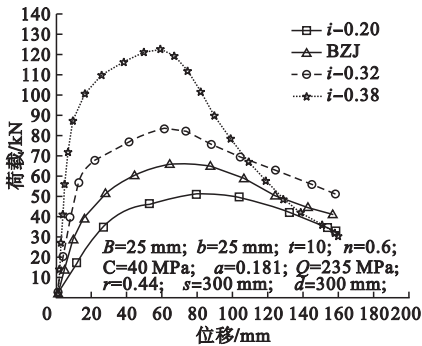


图 12 BZJ、 i -0.2、 i -0.32、 i -0.38 的骨架曲线

Fig. 12 The skeleton curves of BZJ, i -0.2, i -0.32, i -0.38

4.6 开孔率 r

图 13 为试件 BZJ、 r -0.36、 r -0.52、 r -0.60 的骨架曲线。从图 13 和表 2 可看出,各骨架

曲线相差较小, r 变化仅对节点峰值荷载、能量耗散系数影响明显,其由 0.36 增加到 0.60,峰值荷载降低 9.06%,能量耗散系数降低 12.4%,其余特征指标值变化小于 5%。分析原因在于 r 增加,即开孔半径增加,梁净截面弹性和塑性模量降低,破坏区域缩小,因此随 r 增加,节点最大承载力、耗能能力降低。由此说明,开孔率增加,DTSCFSTC-SCB 的最大承载力、耗能能力降低明显。

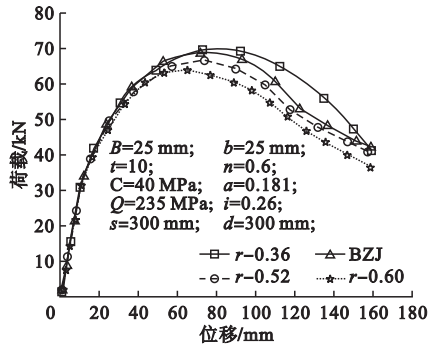


图 13 BZJ、 r -0.36、 r -0.52、 r -0.60 的骨架曲线

Fig. 13 The skeleton curves of BZJ, r -0.36, r -0.52, r -0.60

5 结 论

(1)DTSCFSTC-SCB 节点具有较高的承载力,良好的延性和耗能能力,因蜂窝孔洞的存在,使其较隔板贯通式方钢管混凝土柱-钢梁节点的梁端更早地进入塑性阶段,更易实现“强柱弱梁”的设计原则,具有可行性。

(2)DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能受钢材强度、梁柱线刚度比影响最为显著。增加钢材强度,其承载力显著提高,而延性、耗能能力显著降低;增加梁柱线刚度比,其承载力、延性显著提高,耗能能力显著降低。

(3)在一定范围内,DTSCFSTC-SCB 节点随隔板内伸宽度增加延性明显降低;随隔板外伸宽度增加延性明显提高;随隔板厚度增加承载力明显提高;随开孔率增加最大承载力、耗能能力明显降低;上述参数对节点其他抗震性能指标影响较小。

(4)DTSCFSTC-SCB 节点的抗震性能受柱截面含钢率、轴压比、混凝土强度等级、孔间距、孔壁距离的影响均很小。

参考文献

- [1] 任志刚,徐圣海,李培鹏,等.圆端形钢管混凝土偏压柱截面优化研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):1-12.
(REN Zhigang,XU Shenghai,LI Peipeng,et al. Sectional optimization of round-ended rectangular concrete-filled steel tubular columns under eccentric compression [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38 (4):1-12.)
- [2] 贾连光,李鹏宇,焦禹铭.六边形孔蜂窝组合梁的等效抗剪刚度研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(1):11-18.
(JIA Lianguang,LI Pengyu,JIAO Yuming. Study on equivalent shear stiffness of hexagonal cellular composite beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020,36(1):11-18.)
- [3] 刘勇.圆钢管混凝土柱-蜂窝梁节点抗震性能的研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2013.
(LIU Yong. Seismic performance research on concrete filled steel tube column-steel castellated beam joint [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2013.)
- [4] 袁赫.方钢管混凝土柱-蜂窝梁节点抗震性能的研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2014.
(YUAN He. Study on seismic performance of concrete filled square steel tube column-steel castellated beam joint [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2014.)
- [5] 李明,温玉婷,赵明,等.外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点骨架曲线影响因素分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(6):991-998.
(LI Ming,WEN Yuting,ZHAO Ming,et al. Analysis of influencing factors on skeleton curves of ATCFST-SCBJ [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014,30(6):991-998.)
- [6] 赵明.内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点抗震性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2017.
(ZHAO Ming. Study on seismic performance of concrete filled circular steel tube-steel castellated beam joint with inner stiffening ring [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [7] NISHIYAMA I, FUJIMOTO T, FUKUMOTO T, et al. Inelastic force-deformation response of

- joint shear panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130 (2):244-252.
- [8] CHOI S M, PARK S H, YUN Y S, et al. A study on the seismic performance of concrete-filled square steel tube column-to-beam connections reinforced with asymmetric lower diaphragms [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(7):962-970.
- [9] 苗纪奎.方钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通节点性能研究[D].天津:天津大学,2008.
(MIAO Jikui. Behavior of diaphragm-through connection between concrete-filled square tubular column and steel beam [D]. Tianjin: Tianjin University,2008.)
- [10] QIN Ying, CHEN Zhihua, YANG Qiangyue, et al. Experimental seismic behavior of through diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93:32-43.
- [11] QIN Ying, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun. Elastoplastic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93:88-96.
- [12] QIN Ying, CHEN Zhihua, RONG Bin. Component based mechanical models for axially loaded through diaphragm connections to concrete-filled RHS columns [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 102:150-163.
- [13] 吴辽.CFRT隔板贯通节点抗剪承载力试验与计算方法研究[D].天津:天津大学,2015.
(WU Liao. Shear behavior capacity tests and computing method study of diaphragm-through connection of CFRT [D]. Tianjin: Tianjin University,2015.)
- [14] 荣彬,刘睿,吴辽,等.方钢管柱隔板贯通节点抗剪强度研究[J].建筑结构,2016,46(2):49-53.
(RONG Bin, LIU Rui, WU Liao, et al. Shear strength study on diaphragm-through joint of square steel tubular column [J]. Building structure, 2016, 46(2):49-53.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢管混凝土结构技术规范:GB50936—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB50936—2014 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)