

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.012



高强钢筋高韧性混凝土框架中节点 抗震性能试验研究

李艳艳^{1,2}, 李明炀¹, 苏恒博¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:对 4 个高强钢筋高韧性混凝土框架中节点进行低周往复加载试验, 对比不同范围采用高韧性混凝土进行增强的节点与同条件下未增强的节点的承载能力、变形能力、滞回特性、刚度退化、耗能能力等抗震性能指标。结果表明, 在节点中采用高韧性混凝土进行增强, 可以改善节点破坏形态, 提高试件的承载能力和变形能力, 提高构件的抗震性能, 由节点核心区延伸至 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强的节点对变形性能、刚度退化、延性和耗能能力增强效果最佳。

关键词:中节点; 高强钢筋; 高韧性混凝土; 抗震性能

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)01-0086-07

Experimental analysis of seismic behavior of interior joints with high-strength reinforcement and high-toughness concrete

Li Yanyan^{1,2}, Li Mingyang¹, Su Hengbo¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Four interior joints with high-strength reinforcement and high-toughness concrete were investigated with low cyclic loading. Joints under different range of high-toughness concrete and those without were compared in terms of seismic behavior indexes such as bearing capacity, deformability, hysteretic characteristics, stiffness degradation and energy dissipation capacity. The failure patterns, bearing capacity, deformability and seismic behavior of those frame interior joints with high-toughness concrete were improved, and the effective range of high-toughness concrete was from core area of joint to the one time adjacent height of beam to improve deformability and stiffness degradation.

Keywords: interior joints; high-strength reinforcement; high-toughness concrete; seismic behavior

节点区域是框架结构主要传力枢纽, 由于其承受和传递左右梁端弯矩、剪力以及柱子的轴力, 使其处于最不利的受力状态, 成为框架最薄弱的环

节^[1-2]。改善框架结构节点的抗震性能已引起许多学者的关注。高韧性混凝土具有比普通混凝土更强的韧性、更大的延性、更高的抗拉强度和更好的耐久

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 河北省自然科学基金(E2015202035); 天津建委科技项目(2015-2)

作者简介: 李艳艳(1979-), 女, 教授, 博士, 主要从事工程抗震研究, (E-mail)nicole_820@163.com。

Received: 2016-03-04

Foundation item: Hebei Province Nature Found (No. E2015202035); Science and Technology Project of Tianjin Construction (No. 2015-2)

Author brief: Li Yanyan(1979-), professor, PhD, main research interest: engineering seismology, (E-mail)nicole_820@163.com.

服;在试件屈服之后采用位移控制,每一级加载循环 3 次,直至加载至曾达到的最大荷载的 85% 时,宣告试件破坏。

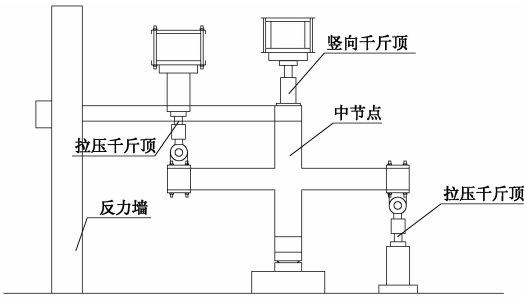


图 2 加载装置

Fig. 2 Test loading device

2 破坏特征

4 个节点的破坏特征如图 3 所示,通过对比其破坏特征可以发现:节点 JZ-P1 梁柱端以及节点核心区裂缝出现较早,裂缝数量较少,但裂缝宽度较大。当加载至试件破坏时,梁柱交界处和节点核心区大部分混凝土脱落,核心区出现交叉的 X 形混凝土脱落缝,且箍筋全部外露。而采用高韧性混凝土进行增强的节点 JZ-Q1、JZ-Q2 和 JZ-Q3,节点核心区裂缝出现较晚,裂缝数量多,但其裂缝宽度较小,与 JZ-P1 相比,减缓了斜裂缝的开展,直至加载至试件破坏时,梁柱交界处混凝土保护层裂而不碎,节点核心区出现交叉多条 X 形斜裂缝,几乎没有混凝土脱落。通过分析可知,采用高韧性混凝土进行增强的节点可以减小节点裂缝宽度,减缓裂缝发展速度,改善节点破坏形态。对比 JZ-Q1、JZ-Q2 和 JZ-Q3, JZ-Q2 节点核心区最大裂缝宽度最小,且其梁柱交界处破坏最轻,表明由节点核心区延伸至 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强对节点的改善能力最佳。

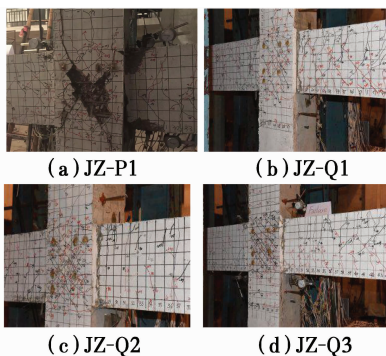


图 3 节点破坏特征

Fig. 3 Failure characteristics of joints

3 试验结果分析

3.1 荷载-位移滞回曲线

为实现梁两端同步加载,通过三通将两根油管分别连接在左右梁千斤顶上,由于导管与千斤顶的封闭性不同,无法使左右梁端实现完全同步,数据存在一定偏差,试验规定左右梁端同时施加推力为正向加载,同时施加拉力为反向加载,4 个构件的荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。

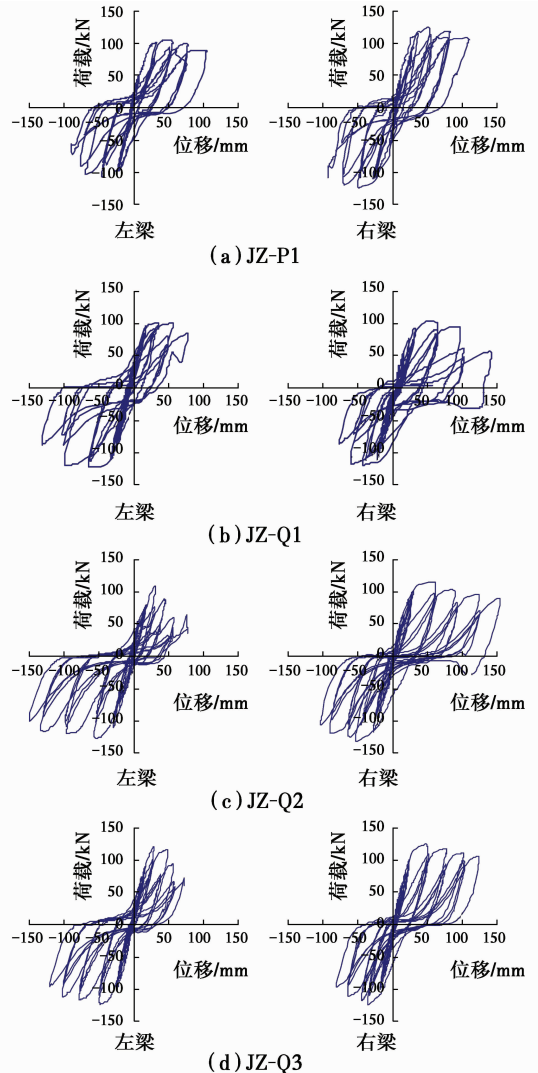


图 4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Loading-displacement curves

由图 4 可知,滞回曲线由开始的梭形逐渐转变为弓形,破坏时呈反 S 形。试件屈服后,随着循环次数增加,试件梁端变形不断增大,但是试件梁端承载力提高效果并不显著,加载曲线的斜率随荷载增大而减小,表明试件屈服后,构件刚度随着控制位移的增大而减小。同位移控制下的 3 次循环加载曲线斜率在不断减小,这是因为往复加载作用下结构的累

积损伤。在卸载初期,滞回曲线斜率较大,卸载刚度较大。随着荷载的不断减小,曲线逐渐趋于平缓,在接近于 0 时,构件有一定的不能恢复的残余变形,且残余变形随着循环次数的增加而增加。

未增强的试件 JZ-P1 在加载前期滞回性能较好,但其在加载后期出现明显的“捏缩”现象,且刚度退化较快。反观采用高韧性混凝土进行增强的试件 JZ-Q1、JZ-Q2 和 JZ-Q3,刚度退化更加缓慢,后期变形能力更大,可见采用高韧性混凝土进行增强可提高试件的耗能能力,改善试件的滞回性能。

3.2 承载能力和变形能力

4 个试件的骨架曲线如图 5 所示。采用高韧性混凝土进行增强的试件与未增强的试件相比,其屈服后强化幅度更长,变形能力更好,曲线包围面积更大,有效的改善了节点强度、刚度等脆性特征。

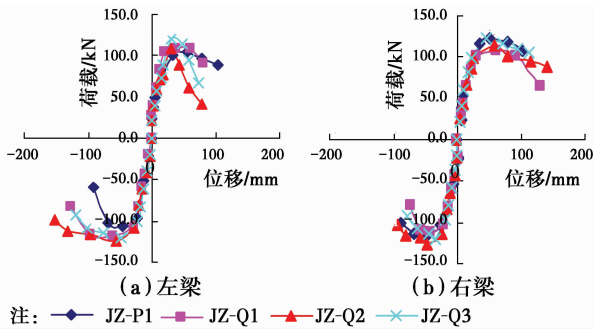


图 5 骨架曲线
Fig. 5 Skeleton curves

由表 3 可得出,中节点试件 JZ-Q1、JZ-Q2、JZ-Q3 分别比未增强中节点试件 JZ-P1 的开裂荷载均值提高 0%~4.52%,屈服荷载均值提高 1.9%~

4%,极限荷载均值高 1%~7%,表明采用高韧性混凝土增强的中节点在一定程度上可提高试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载,但提高效果不显著。

试件 JZ-Q1、JZ-Q2、JZ-Q3 的开裂位移平均值比试件 JZ-P1 分别提高 37%、46%、29%,可见高韧性混凝土增强对加载初期变形能力具有很好的改善作用。加载后期提高幅度有所下降,JZ-Q1、JZ-Q2 与 JZ-Q3 破坏位移较 JZ-P1 提高 0%~10.8%,其中 JZ-Q2 提高了 10.8%,说明采用高韧性混凝土增强的中节点可提高试件的变形能力,试件 JZ-Q2 增强效果最佳。

构件的延性性能一般用位移延性系数来评价。位移延性系数是试件破坏位移与试件屈服位移之比,其数学表达式如式(1)所示。

$$\mu_u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: μ_u 为位移延性系数; Δ_u 为破坏位移,即试件承载力下降到极限荷载 85%时所对应的位移; Δ_y 为屈服位移,试件屈服时所对应的位移。

为保证试件具有较高的曲率延性,位移延性系数取为 3~5,表中所有试件的位移延性都大于 3.5,且采用高韧性混凝土进行增强试件较未增强的试件提高幅度为 1.3%~4.4%,JZ-Q2 提高幅度最大,表明所有参加高韧性混凝土试件具有较好的延性,主要原因是由于高韧性混凝土提高了混凝土的致密性,改善了节点脆性破坏特征。综合节点承载能力、变形能力、位移延性、强度和刚度可以看出,由节点延伸至梁中 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强效果最佳。

表 3 节点承载力、位移及延性系数

Table 3 Bearing capacity, displacement and ductility coefficient of joints

| 试件 编号 | 加载 方向 | 荷载/kN | | | | 位移/mm | | | | 延性 系数 |
|----------|----------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| | | 开裂 | 屈服 | 极限 | 破坏 | 开裂 | 屈服 | 极限 | 破坏 | |
| JZ-P1 | 正向 | 61.36 | 97.85 | 114.98 | 96.82 | 8.92 | 26.86 | 53.66 | 107.42 | 4.00 |
| JZ-P1 | 反向 | 62.38 | 101.07 | 112.6 | 95.71 | 8.05 | 22.14 | 47.79 | 79.28 | 3.58 |
| JZ-P1 | 平均 | 61.87 | 99.46 | 113.79 | 96.27 | 8.48 | 24.50 | 50.73 | 93.35 | 3.79 |
| JZ-Q1 | 正向 | 62.69 | 96.54 | 113.67 | 92.51 | 11.95 | 24.31 | 52.81 | 101.27 | 4.17 |
| JZ-Q1 | 反向 | 66.65 | 106.14 | 116.20 | 98.77 | 11.22 | 25.22 | 51.23 | 88.67 | 3.52 |
| JZ-Q1 | 平均 | 64.67 | 101.34 | 114.94 | 95.64 | 11.58 | 24.27 | 52.02 | 94.97 | 3.84 |
| JZ-Q2 | 正向 | 64.57 | 93.79 | 111.59 | 94.85 | 12.25 | 26.38 | 46.11 | 90.72 | 3.44 |
| JZ-Q2 | 反向 | 63.58 | 112.53 | 126.62 | 107.83 | 12.50 | 25.90 | 51.50 | 116.20 | 4.49 |
| JZ-Q2 | 平均 | 64.07 | 103.16 | 119.11 | 101.34 | 12.38 | 28.64 | 48.81 | 103.46 | 3.96 |
| JZ-Q3 | 正向 | 63.30 | 103.71 | 122.01 | 96.63 | 10.40 | 26.76 | 39.36 | 94.25 | 3.52 |
| JZ-Q3 | 反向 | 60.13 | 103.14 | 121.14 | 102.97 | 11.42 | 24.44 | 41.16 | 89.29 | 3.65 |
| JZ-Q3 | 平均 | 61.72 | 103.43 | 121.58 | 99.80 | 10.91 | 25.60 | 40.26 | 91.77 | 3.59 |

3.3 刚度退化

框架中节点刚度指的是等效刚度,是骨架曲线原点与滞回环顶点连线的斜率。刚度退化率指试件在第*i*次循环加载时的刚度与初始刚度之比。具体试件正反向平均位移与平均刚度退化率曲线见图 6。试件总体上在加载前期刚度退化较快,在加载后期曲线趋于平缓,刚度退化较慢。采用高韧性混凝土增强的试件在各工况下的刚度均大于同条件下未增强的试件,且增强的节点刚度退化曲线较为平缓,这是由于高韧性混凝土的加入能够很好地减缓混凝土裂缝的发展,在裂缝出现以后还能保持较好的整体性,表明节点中采用高韧性混凝土进行增强可降低刚度退化速率,提高节点抵抗变形的能力,且试件 JZ-Q2 曲线最为平缓,减缓刚度退化效果最佳。

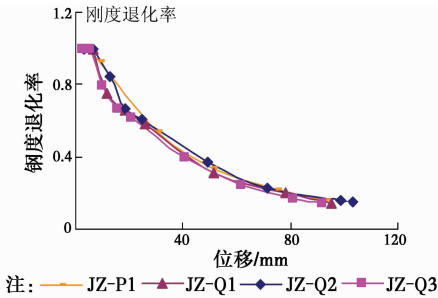


图 6 刚度退化曲线
Fig. 6 Curves of stiffness degradation

3.4 耗能能力

一般用等效粘滞阻尼系数 h_e 来评定试件耗能能力大小, h_e 越大,耗能能力越大,结构或构件的延性越好。 h_e 定义为

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{ABCD}}{S_{OCF} + S_{OAE}} \quad (2)$$

式中: S_{ABCD} 为滞回环 ABCD 的面积; S_{OCF} 、 S_{OAE} 为理想状况下弹性阶段达到相同位移 OF、OE 时所吸收的能量。

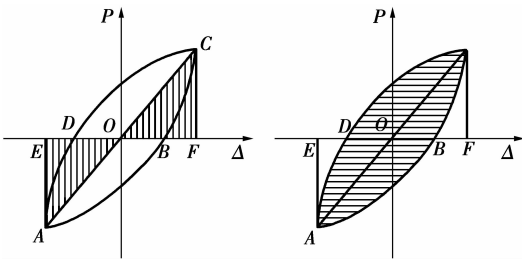
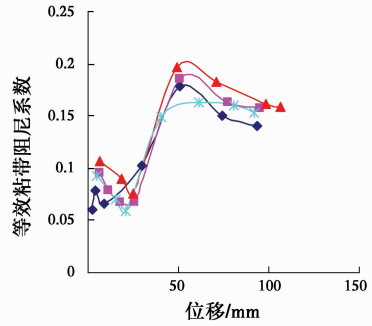


图 7 滞回环示意图
Fig. 7 Hysteresis circle

试件各级位移下最后一次循环时的等效粘滞阻尼系数与位移关系曲线如图 8 所示。



注: ◆ JZ-P1 ▲ JZ-Q1 ● JZ-Q2 ◆ JZ-Q3

图 8 等效粘滞阻尼系数

Fig. 8 Coefficient of equivalent viscous damping

由图 8 可知,采用高韧性混凝土进行增强的试件等效粘滞阻尼系数在各个工况下均大于同条件下未增强的试件,表明采用高韧性混凝土进行增强可提高试件的耗能能力,综合来看,在节点核心区延伸至 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强效果最佳。

3.5 剪力-转角滞回曲线

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定框架梁柱节点核心区剪力设计值计算出中间节点核心区剪力,试验时剪切变形主要通过如图 9 所示的布置在节点核心区对角线上 LVDT 的伸缩量,通过几何关系计算出节点核心区的剪切角。节点核心区剪切变形如图 10 所示,节点剪切变形可近似按式(3)计算,从而得到核心区剪力-转角滞回曲线,如图 11 所示, JZ-P1 试件在加载过程中量测节点核心区变形的 LVDT 损坏未能测出数据。

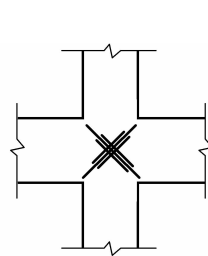


图 9 节点核心区
LVDT 布置
Fig. 9 LVDT arrangement
of joints core area

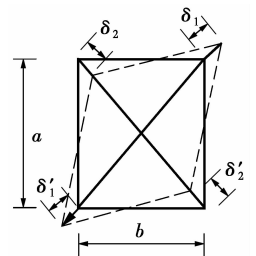


图 10 梁柱节点
剪切变形
Fig. 10 Shear
deformation of joints

$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} \times \frac{|\delta_1 + \delta_1' + \delta_2 + \delta_2'|}{2} \quad (3)$$

式中: γ 为节点核心区剪切变形; b 、 a 为节点区宽度与高度; $\delta_1 + \delta_1'$ 、 $\delta_2 + \delta_2'$ LVDT1 与 LVDT2 变形。

由图 11 可看出,试件 JZ-Q1、JZ-Q2 与 JZ-Q3 均有较大的抗剪承载能力,节点试件抗剪承载能力

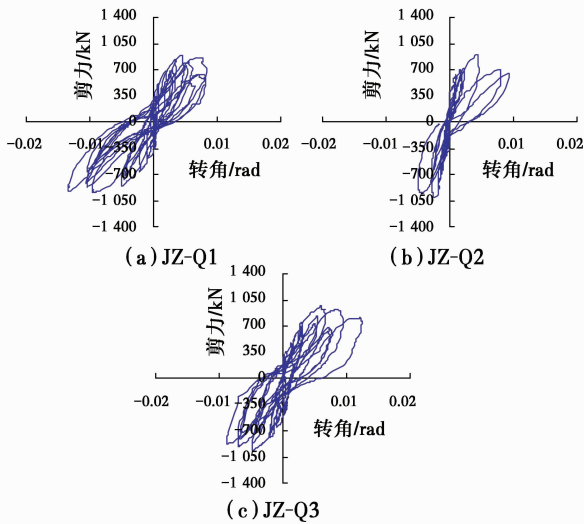


图 11 剪力-转角滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves of shear-rotation

随着高韧性混凝土掺加范围的增大而增大, JZ-Q3 抗剪承载能力最大。JZ-Q1、JZ-Q2 破坏时剪切转角均未超过 0.01 rad, JZ-Q3 剪切转角超过 0.01 rad, 且 JZ-Q3 剪切刚度退化较小。

3.6 节点核心区箍筋应变

为了分析节点核心区箍筋垂直受力方向和平行受力方向箍筋在不同受力阶段的状态, 在箍筋在平行受力方向和垂直受力方向上各取一枝, 每枝中部粘贴应变片, 具体应变片位置见图 12。

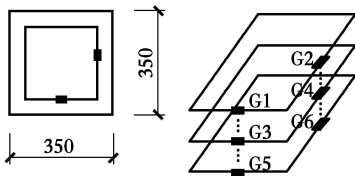


图 12 节点区箍筋应变片的位置

Fig. 12 Location of stirrup strain gauge

为了消除实际混凝土强度不同对试件承载能力的影响, 可以用承载力除以混凝土强度实测值与试件节点核心区面积的乘积来表征, 即单位混凝土的受剪能力剪压比。剪压比定义为

$$\gamma = \frac{V}{f_c b_c h_c} \quad (4)$$

式中: γ 为剪压比; V 为节点核心区剪力; f_c 为混凝土轴心抗压强度; b_c 为验算方向柱截面宽度; h_c 为验算方向柱截面高度。

节点的剪压比-箍筋应变曲线如图 13 所示, 取平行于受力方向的横向箍筋应变片 G3 和垂直于受力方向纵向箍筋应变片 G4 为例进行说明节点核心区箍筋应变片的应变变化情况。

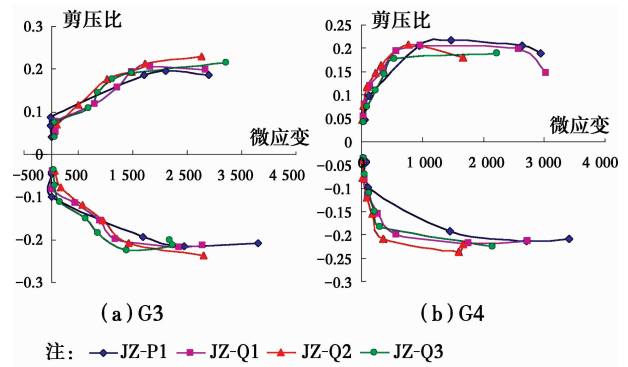


图 13 剪压比-箍筋应变

Fig. 13 Shear compression ratio-stirrup strain

1) 对比节点核心区不同位置箍筋应变变化, 中节点平行于受力方向的箍筋应变片 G3 在加载前期有较大应变, 且其随着剪压比的增大而迅速增大, 表明中节点试件中与剪力平行方向位置的箍筋先承受剪力, 且其承受的拉力较大。相比之下, 与剪力垂直方向的箍筋拉力相对较小, 且与剪力方向平行的箍筋承担的拉力大于与剪力方向垂直的箍筋的拉力。

2) 对比不同试件同一位置处箍筋应变变化, JZ-Q1、JZ-Q2 和 JZ-Q3 核心区箍筋屈服应变发生推迟, 且破坏时最大应变较小, 说明采用高韧性混凝土进行增强可提高核心区混凝土抗剪能力, 且 JZ-Q2 核心区箍筋破坏应变最小, 能承受更大的剪力, 故由节点核心区延伸至梁中 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强效果最为显著。

4 结论

1) 在中节点中采用高韧性混凝土进行加强, 可有效改善节点破坏形态, 减少节点核心区裂缝数量, 减小裂缝宽度。

2) 采用高韧性混凝土增强的中节点可提高试件的承载能力和变形能力, 且框架中节点组合体的位移延性系数处于 3~5 之间, 具有较好的延性。

3) 采用高韧性混凝土进行增强可以减缓试件刚度的退化, 提高试件耗能能力, 增强节点抵抗变形的能力。

4) 采用高韧性混凝土进行增强可提高核心区混凝土抗剪能力, 推迟核心区箍筋屈服, 能够承受更大的剪力, 且 JZ-Q2 增强效果最佳。

5) 综合考虑节点破坏特征、变形能力以及刚度退化等各项指标, 在由节点核心延伸至 1 倍有效梁高范围内采用高韧性混凝土进行增强效果最佳。

参考文献:

- [1] GHOBARAH A, EL-AMOURY T. Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints[J]. Journal of Composites for Construction, 2005(9):408-416.
- [2] MARIA T D R, PAOLO R, GERARDO V, et al. Experimental assessment of unreinforced exterior beam-column joints with deformed bars [J]. Engineering Structures, 2016(112):215-232.
- [3] 管仲国, 黄承逵, 张宏战, 等. 钢纤维混凝土受压极限强度[J]. 建筑结构, 2005, 35(4):56-58.
GUAN Z G, HUANG C K, ZHANG H Z. Study on ultimate compressive strength of steel fiber reinforced concrete [J]. Building Structures, 2005, 35(4):56-58. (in Chinese)
- [4] 汤寄予, 高丹盈, 朱海堂, 等. 钢纤维对高强混凝土弯曲性能影响的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1):85-89.
TANG J Y, GAO D Y, ZHU H T, et al. Influence of steel fiber on flexural property of high strength concrete [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):85-89. (in Chinese)
- [5] ABBASA A, SHARIFAH M, MOHSIN S, et al. Seismic response of steel fiber reinforced concrete beam-column joints [J]. Engineering Structures, 2014(59):261-283.
- [6] MASI A, SANTARSIERO G, LIGNOLAS G P, et al. Study of the seismic behavior of external RC beam-column joints through experimental tests and numerical simulations [J]. Engineering Structures, 2013(52):207-219.
- [7] 戎贤, 张建新, 李艳艳, 等. 钢纤维增强异形柱框架节点受力性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013(5):47-51.
RONG X, ZHANG J X, LI Y J, et al. Experimental research on mechanical behavior of interior joints of specially shaped column frames reinforced by steel fiber [J]. Industrial Construction, 2013(5):47-51. (in Chinese)
- [8] 尤培波, 杨国洲, 王仪. 钢纤维高强混凝土及其在框架节点中的应用分析[J]. 河南城建学院学报, 2014(3):1-4.
YOU P B, YANG G Z, WANG Y. Analysis of steel fiber reinforced high strength concrete and its application in frame joints[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2014(3):1-4. (in Chinese)
- [9] 苏俊省, 王君杰, 王文彪, 等. 配置高强钢筋的混凝土矩形截面柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11):20-27.
SU J S, WANG J J, WANG W B, et al. Comparative experimental research on seismic performance of rectangular concrete columns reinforced with high strength steel [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11):20-27. (in Chinese)
- [10] 王铁成, 张小鹏, 赵海龙, 等. 纤维增强混凝土十字形柱中节点试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(6):92-97.
WANG T C, ZHANG X P, ZHAO H L, et al. Experimental study on seismic behavior of cross-shaped column interior joints reinforced by fiber concrete [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(6):92-97. (in Chinese)
- [11] 高丹盈, 张军伟. 钢筋钢纤维高强混凝土框架边节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(5):84-90.
GAO D Y, ZHANG J W. Experimental investigation on seismic behavior of steel fiber reinforced high-strength concrete frame exterior joints [J]. Industrial Construction, 2012, 42(5):84-90. (in Chinese)
- [12] 赵海龙, 王铁成, 郝津津, 等. 纤维增强钢筋混凝土 T 形柱框架边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35:51-57.
ZHAO H L, WANG T C, HAO J J, et al. Experimental investigation on seismic behavior of fiber reinforced exterior joints with T-shaped column [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35:51-57. (in Chinese)
- [13] 戎贤, 张建新, 李艳艳. 钢骨及纤维增强混凝土异形柱中节点滞回性能[J]. 地震工程与工程震动, 2015, 35(6):207-212.
RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Hysteretic behavior specially shaped column interior joints with steel or fiber [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(6):207-212. (in Chinese)
- [14] 郑七振, 魏林. 钢纤维混凝土框架节点抗剪承载力的试验研究与机理分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9):89-93.
ZHENG Q Z, WEI L. Experimental study analysis of the shear capacity of steel fiber concrete frame joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9):89-93. (in Chinese)
- [15] 高丹盈, 汤寄予, 朱海堂. 钢纤维高强混凝土的配合比及基本性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(3):46-50.
GAO D Y, TANG J Y, ZHU H T. Research on mixing and elementary properties of steel fiber reinforced high-strength concrete [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2004, 25(3):46-50. (in Chinese)