

耐久性损伤耦合效应对钢筋混凝土 框架节点抗震性能研究

周静海¹, 张晓赢², 潘美旭², 康天蓓²

(1. 沈阳建筑大学建筑节能研究院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究耐久性损伤耦合效应对钢筋混凝土结构框架节点的抗震性能的影响。方法 考虑非线性粘结滑移, 利用 ABAQUS 有限元分析软件建立钢筋混凝土梁柱节点非线性模型, 分析混凝土保护层碳化、梁纵筋锈蚀、冻融循环三者的耦合效应对钢筋混凝土梁柱节点抗震性能的影响。结果 在三种损伤因素共同作用下, 当钢筋的锈蚀率从 5% 增加到 10% 时, 试件的累积耗能能力和极限位移全部发生急剧衰减, 试件的抗震性能严重退化; 在碳化、冻融及钢筋锈蚀率为 10% 的情况下, 滞回曲线出现弓形, 试件的承载力及延性均急剧下降; 随着混凝土的碳化, 试件承载力提高的同时延性在逐渐降低。结论 无论钢筋锈蚀率、混凝土保护层的碳化或冻融循环次数, 其中任何一种损伤量的增加, 均会导致试件抗震能力的下降; 而当三者同时作用时, 对边节点的抗震性能影响最为严重。

关键词 耐久性; 耦合效应; 钢筋混凝土; 抗震; 有限元分析

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Study on Impact of Coupling Effect of Durable Damages on Seismic Behavior of Joints in Reinforced Concrete Frame Structures

ZHOU Jinghai¹, ZHANG Xiaoying², PAN Meixu², KANG Tianbei²

(1. Construction Energy Conservation Research Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper studied the impact of coupling effect of the durable damages of reinforced concrete structure on seismic performance. Considering the nonlinear bond-slip, the nonlinear finite elements models of the joints of the beams and columns in the reinforced concrete structure were founded by the ABAQUS package. Through the analysis, the impacts of the carbonation of the concrete protective layer, the corrosion of the longitudinal bar in the beam and the coupling effect of the freezing and thawing cycle on the seismic behavior of the joints of the beam and column in the

收稿日期: 2016-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178275)

作者简介: 周静海(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事再生混凝土性能分析与应用研究。

reinforced concrete structure can be investigated. The result shows that under the three factors take effect at the same time, when the steel bar corrosion rate increased from 5% to 10%, the specimen of accumulated energy dissipation capacity and limit displacement attenuation, took place in the degeneration of seismic performance. When the condition of the rebar corrosion rate is 10%, the hysteresis curve appeared bow-shaped, the bearing capacity and ductility of the specimen are falling sharply. As the concrete carbonation, specimen to improve bearing capacity and ductility is gradually reduced. Conclusion is that the increase of any factor can result in the rapid decreasing in the seismic performance of the specimen. Under the three factors take effect at the same time, the worst influence on exterior joint seismic performance.

Key words: durability; coupling effect; reinforced concrete; seismic; finite element

近年来,混凝土结构耐久性退化引起结构抗震性能变化的问题越来越受到学术界的广泛关注. 众多研究表明,混凝土结构由于各种各样的原因而提前失效,更多的是由于结构的耐久性不足导致的^[1]. 钢筋混凝土结构在腐蚀与地震作用下的动力响应,不仅影响居住者的舒适性,而且会直接影响结构的安全性和耐久性^[2]. 陈昉健^[3]等进行了锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的非线性分析,结果表明,钢筋的锈蚀将削弱钢筋混凝土构件的抗震性能、承载力和延性,并且可能改变构件的最终破坏模式. Sudret B^[4]通过概率模型的方法研究了混凝土碳化对钢筋混凝土梁中钢筋腐蚀的程度的影响,结果表明概率峰值是存在的(未损坏的和完全损坏的结构). Adamson M^[5]用砖块来代替天然骨料的方式对混凝土的耐久性进行了试验研究,结果表明,砖块虽可以替代天然骨料,但是并没有显著改变混凝土的耐久性. Josko O^[6]等利用有限元的方法研究了腐蚀产物通过裂缝对钢筋混凝土构件损伤的影响,结果表明腐蚀产物通过裂缝对钢筋混凝土构件的损坏作用明显. 夏玉领^[7]研究了混凝土碳化和钢筋锈蚀等耐久性损伤对柱节点抗震性能的影响,试验表明,碳化没有锈蚀对混凝土破坏显著. Simona C^[8]等研究了腐蚀对钢筋混凝土粘结强度的影响,得到了不同腐蚀程度钢筋混凝土的损伤本构关系.

节点在框架连接中处于最关键的部位,

对于结构的稳定性和整体性均起着至关重要的作用^[9-10]. 导致钢筋混凝土结构耐久性破坏原因主要有三个:侵蚀环境的理学作用、钢筋锈蚀以及冻融破坏^[11]. 以上学者研究的影响因素仅为一种或两种,基于此,笔者选取冻融循环、碳化和钢筋锈蚀三种作用因素,分析在低周反复荷载作用下三种因素耦合效应共同作用时对钢筋混凝土框架节点性能的影响,进而为该类节点的工程应用提供参考.

1 本构关系

1.1 无损钢筋混凝土局部粘结应力-滑移本构关系

钢筋与混凝土的粘结滑移本构曲线表达式可以分为分段折线型和连续曲线型两种. 然而分段式有一定的缺陷:特征点处导数不连续,在有限元分析中收敛困难. 连续型 $\tau-s$ 曲线较为典型的有 Nilson 模型、Houdle 和 Mirza 模型、清华大学滕志明等建议的模型. 清华大学土木系在滕志明的指导下进行了 92 个短埋拔出式试件和 12 个轴拉混凝土试件的试验研究,考虑保护层厚度 c 、粘结力分布 $F(x)$ 、钢筋直径 d 等因素,在试验的基础上,得出局部粘结滑移表达式^[12]:

$$\tau = (61.5s - 693s^2 + 3.14 \times 10^3 s^3 - 0.478 \times 10^4 s^4) \cdot f_{ts} \sqrt{c/d} \cdot F(x). \quad (1)$$

式中: τ 为钢筋与混凝土之间的局部粘结应力, MPa; s 为局部滑移, mm; f_{ts} 为混凝土抗拉强度, MPa, 取 $f_{ts} = 0.19f_{cu}^{0.75}$; c/d 为混凝土保

护层和钢筋直径比; $F(x)$ 为粘结刚度分布函数, $F(x)=\sqrt{4\frac{x}{l}(1-\frac{x}{l})}$,其中 x 为计算位置到最近裂缝的横向距离, l 为裂缝间距,最大取300 mm; $F(x)$ 表示沿裂缝间距 L 粘结刚度的变化情况,越接近试件端部粘结刚度越小.

1.2 锈蚀钢筋混凝土粘结滑移本构关系

众多试验研究表明^[13-15],钢筋在锈蚀的初期,粘结的界面会形成一层钢筋锈蚀物,这层锈蚀物会导致钢筋的化学胶着力产生破坏,但也是因为锈蚀产物的出现,在增加钢筋表面的粗糙度的同时可以使钢筋周围的混凝土

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.5625\eta - 0.3375\eta^2 + 0.05562\eta^3 - 0.003\eta^4, & \eta \leq 0.07; \\ 2.0786\eta^{-1.0369}, & \eta > 0.07. \end{cases} \tag{3}$$

式中: τ_0 为锈蚀钢筋与混凝土的粘结应力,MPa; β 为强度折减系数; η 为钢筋锈蚀率.

1.3 锈蚀钢筋的本构关系

采用文献[17]给出的锈蚀钢筋本构关系,公式如下.

当 $\rho \leq 5\%$ 时:

$$f_{y,c} = f_{y0}(1 - 0.029\rho), \tag{4}$$

$$f_{u,c} = f_{u0}(1 - 0.026\rho), \tag{5}$$

$$E_{s,c} = E_{y0}(1 - 0.052\rho), \tag{6}$$

$$\delta_{sc} = \delta_{y0}(1 - 0.0575\rho). \tag{7}$$

当 $\rho > 5\%$ 时:

$$f_{y,c} = f_{y0}(1.175 - 0.064\rho), \tag{8}$$

$$f_{u,c} = f_{u0}(1.18 - 0.062\rho), \tag{9}$$

$$E_{s,c} = E_{y0}(0.895 - 0.031\rho), \tag{10}$$

$$\delta_{sc} = \delta_{y0}(1 - 0.0575\rho). \tag{11}$$

式中: ρ 为锈蚀率,%; δ_{sc} 为锈蚀变形钢筋相对伸长率,%; δ_{y0} 为未锈蚀变形钢筋相对伸长率,%; $E_{s,c}$ 为锈蚀钢筋的弹性模量; E_{y0} 为未锈蚀钢筋的弹性模量; $f_{y,c}$ 、 $f_{u,c}$ 为锈蚀钢筋的屈服强度和极限强度; $f_{y,0}$ 、 $f_{u,0}$ 为未锈蚀钢筋的屈服强度和极限强度.

随钢筋锈蚀率的增加,钢筋的屈服平台会缩短且变得越来越不明显,有脆性破坏的可能.文献[18]指出,锈蚀钢筋屈服平台退

土的握裹力变强,对粘结力有利;随着钢筋锈蚀量的逐渐增加,钢筋表面的混凝土保护层也逐渐发生胀裂,严重的部位甚至产生剥落现象,导致钢筋表面的握裹力降低的同时,界面的摩擦系数也会减小;在钢筋锈蚀后期,对于变形的钢筋,横肋会发生大部分的锈损,最主要的机械咬合力也会随之消失,粘结性能发生衰退,严重影响了钢筋混凝土结构的承载力.

笔者选用文献[16]建议的锈蚀钢筋混凝土粘结滑移本构,考虑到钢筋锈蚀引起的粘结强度的降低,在式(1)的基础上,通过回归分析,引入强度折减系数 β ,表达式如下:

$$\tau = \beta \cdot \tau_0, \tag{2}$$

化时的锈蚀率临界点为20%,所以对于小锈蚀率钢筋可以忽略锈蚀对屈服平台的影响.基于上述本构模型,计算得HRB335钢筋锈蚀5%、10%后的本构曲线,并与未锈蚀钢筋作对比(见图1).

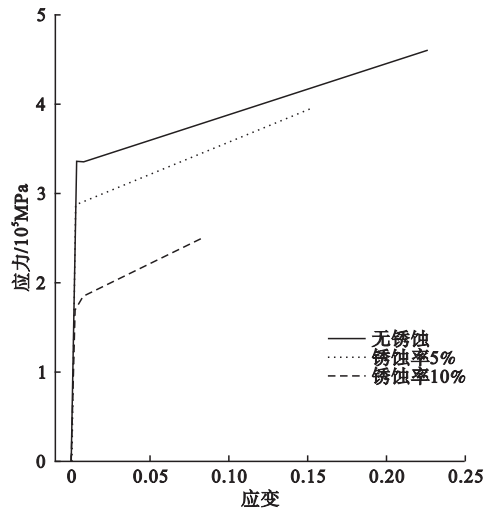


图1 不同锈蚀率钢筋本构

Fig. 1 Reinforcement constitutive of different corrosion rate

2 有限元模型的建立

2.1 模拟方案

笔者选取7度区一个多层多跨钢筋混凝

土框架中间层梁柱边节点为研究对象. 为消除尺寸效应,设计梁柱尺寸尽量符合实际工程尺寸. 按照文献[19]设计,梁截面长宽 250 mm×400 mm,柱子截面长宽 300 mm×300 mm,梁长取跨中到梁端的距离 1 500 mm,上下柱高取反弯点到柱端的距离 1 200 mm,混凝土强度取 C30,梁柱纵向钢筋取二级带肋钢 HRB335,梁、柱、节点箍筋选一级光圆钢 HPB300,梁纵筋弯起 90°锚固勾,勾长 15*d*(*d*为梁纵筋直径),试件尺寸及配筋如图 2 所示,试件参数见表 1,方案参数见表 2.

在制定模拟方案时,拟定钢筋锈蚀的前提是混凝土碳化. 具体方案见表 2.

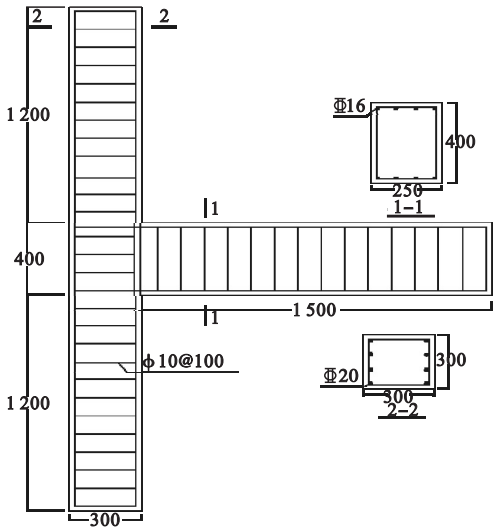


图 2 边节点尺寸及配筋

Fig. 2 The size and reinforcement of exterior joint

表 1 试件参数

Table 1 Specimen data

试件	梁单侧配筋	柱单侧配筋	梁、柱端配筋	剪压比	轴压比	节点箍筋	相对配箍率 / %
BJD	4Φ16	4Φ20	Φ10@100	0.162	0.14	3Φ10	5.6

表 2 边节点数值模拟方案

Table 2 Exterior joint numerical simulation scheme

试件编号	碳化深度/mm	锈蚀率/%	冻融循环次数
BJD-0	0	0	0
BJD-1	0	0	90
BJD-2	0	0	180
BJD-3	25	0	0
BJD-4	25	0	90
BJD-5	25	0	180
BJD-6	25	5	0
BJD-7	25	5	90
BJD-8	25	5	180
BJD-9	25	10	0
BJD-10	25	10	90
BJD-11	25	10	180

2.2 网格划分及单元选取

本次研究的重点为节点破坏,故先将节点切割出来. 在混凝土节点局部细化的网格尺寸为 25 mm,然后梁和柱顶端到节点网格划分从

25 ~ 150 mm 进行网格的具体细致划分 (见图 3).

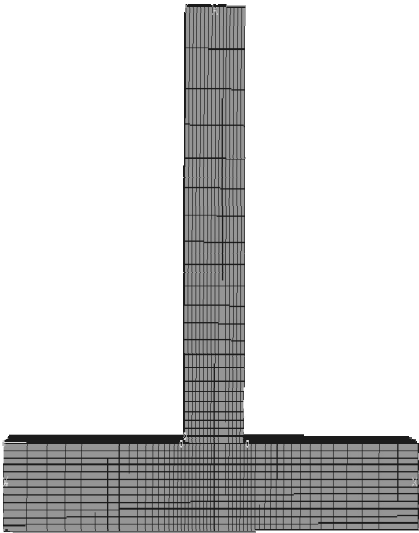


图 3 梁柱节点网格划分

Fig. 3 Finite element mesh of beam-column joint

在 ABAQUS 有限元软件的分析模型中,混凝土选取较容易收敛的缩减积分单元 C3D8R,钢筋单元选取 T3D2 桁架单元,在钢

筋与混凝土单元共同节点上选用弹簧单元 Spring2 进行连接. 同时在沿钢筋的方向上, 钢筋单元节点和混凝土单元节点之间设置为非线性弹簧, 在垂直钢筋的两个方向上, 设置为较大刚度的线性弹簧.

2.3 模型参数

选取文献[20]推荐的模型作为未损伤混凝土的本构关系, 计算出 C30 混凝土的碳化本构. 梁柱及节点外表面混凝土全部碳化, 并且碳化深度为试件保护层厚度 25 mm. 梁柱及节点碳化区域如图 4 所示.

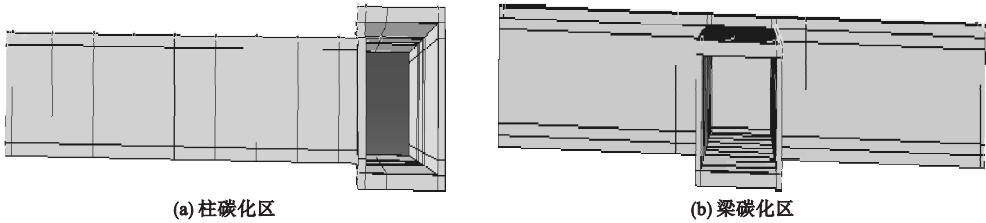


图 4 边节点碳化区

Fig. 4 Carbonation zone of exterior joint

钢筋本构选用三折线模型, 选择上文提到的锈蚀钢筋本构计算公式, 计算得到锈蚀率分别为 0、5%、10% 的 HRB335 钢筋的本构. 低周反复荷载加载点在梁上, 同时梁在往复加载中随着位移的加大必定会引起梁纵筋与混凝土之间的粘结滑移, 因此笔者将重点研究梁上纵筋与混凝土之间的粘结滑移(见图 5). 梁纵筋与混凝土之间的粘结滑移弹簧单元选用 Spring2, 弹簧单元的非线性粘结滑移本构采用式(1)~式(3)计算.

轴压比为 0.14, 计算得到柱顶施加的轴力是 378 kN, 柱底固结, 加载简图如图 6 所示. 在柱恒定轴力的前提下, 在梁端施加低周往复荷载, 以屈服位移的倍数作为控制值, 并借助 ABAQUS 有限元软件分析软件中的幅值控制子程序 Amplitude 实现对边节点梁端的往复加载^[21], 加载制度如图 7 所示.

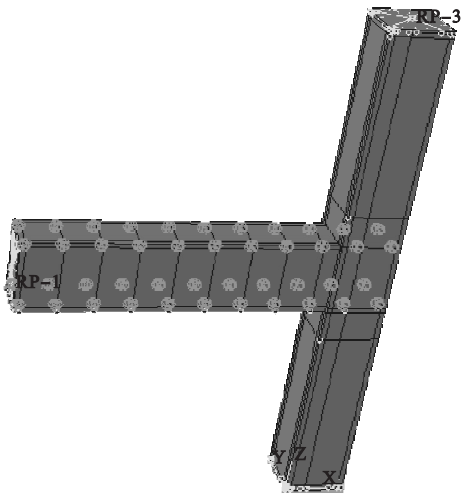


图 5 弹簧单元

Fig. 5 Spring elements

2.4 加载方式和边界条件

在柱顶施加恒定的轴力, 笔者设计的

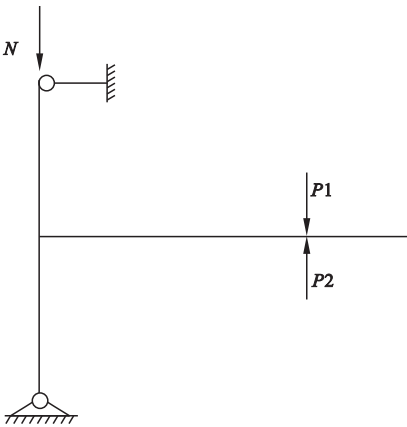


图 6 加载简图

Fig. 6 Loading diagram

笔者以温度应力引起的混凝土的冻融损伤为切入点, 通过 ABAQUS 顺序热力耦合来实现对梁柱节点冻融循环条件的施加. 不同的是根据实际工程情况, 边节点柱侧面更趋向于大气环境, 仅在柱侧面施加冻融边界条件(见图 8).

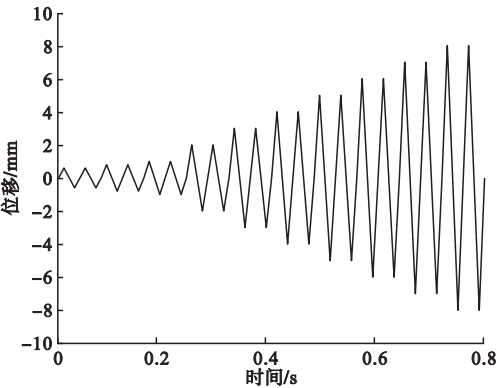


图 7 加载制度

Fig. 7 Loading regime

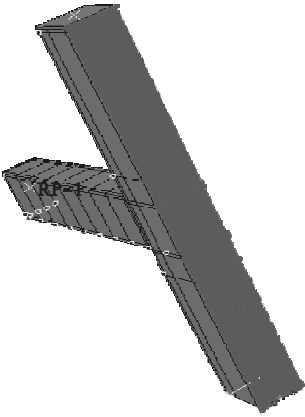


图 8 温度场施加面

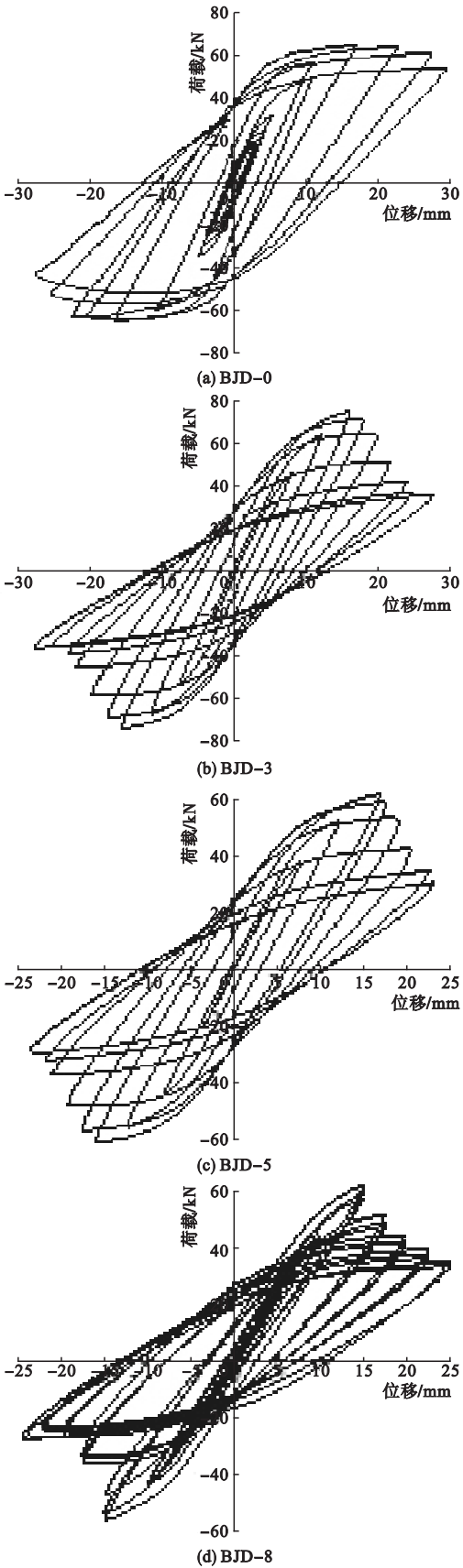
Fig. 8 Applying surface of temperature field

3 结果分析

3.1 滞回曲线分析

滞回曲线是结构在受力的循环往复作用下,得到的荷载 - 变形曲线. 它反映结构在反复受力过程中的变形特征、能量消耗及刚度退化,是确定恢复力模型和结构试件抗震性能的综合体现. 图 9 为混凝土碳化、钢筋锈蚀及冻融共同作用下边节点的滞回曲线.

由图 9 可以看出,在加载循环初期,试件在弹性工作阶段,荷载 - 位移曲线基本上呈直线循环,卸载后变形恢复的充分. 进入弹塑性工作阶段,试件的变形逐渐加大,滞回环的面积也逐渐加大,随着损伤因素的不断增加,每次得到的滞回环均有变化,滞回曲线越来越倒向位移轴,边节点滞回曲线由饱满的梭



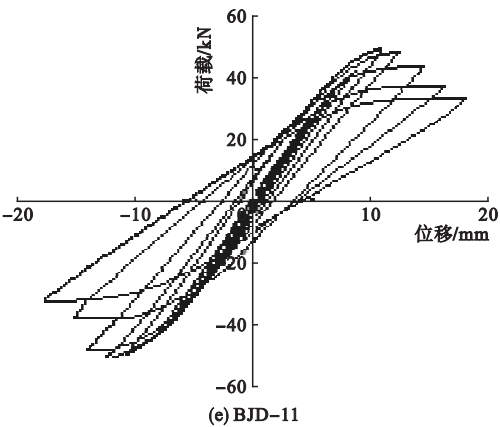


图9 混凝土碳化、钢筋锈蚀及冻融共同作用下边节点的滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of exterior joint under concrete carbonation, steel corrosion, freezing and thawing

形逐渐变得细窄,有向弓形慢慢转变的趋势,反映出试件产生了一定的滑移. BJD-11 的滞回曲线出现弓形,说明随着时间的增加损伤会逐步累积,钢筋粘结滑移现象明显,时间裂缝也逐步显现,在位移加载后期具有更大的耗能能力,承载力及延性均急剧下降.

3.2 骨架曲线分析

骨架曲线能够反映试件的强度与变形性能问题,延性和承载力是评价构件抗震性的重要指标. 试件的骨架曲线如图 10 所示. 从图中可以看出,试件开裂前,骨架曲线开始阶段比较陡,此时各试件处于弹性工作状态,屈服荷载和屈服位移相差不大. 开裂后,试件骨架曲线斜率减小,曲线出现第一个微小转

折点(即为开裂荷载),随着荷载增大,曲线斜率逐渐变缓,说明此时试件的延性较好. 逐渐出现了第二个拐点(即为屈服荷载),随着混凝土的不断碳化,位移变化加剧,试件曲线的走向趋势开始变陡,说明试件变形能力变弱,承载力提高的同时延性降低. 随着冻融以及锈蚀的出现,曲线提前进入下降阶段,而且试件的承载力急剧下降. 结果表明,耐久性损伤耦合效应对边节点的抗震性能影响严重.

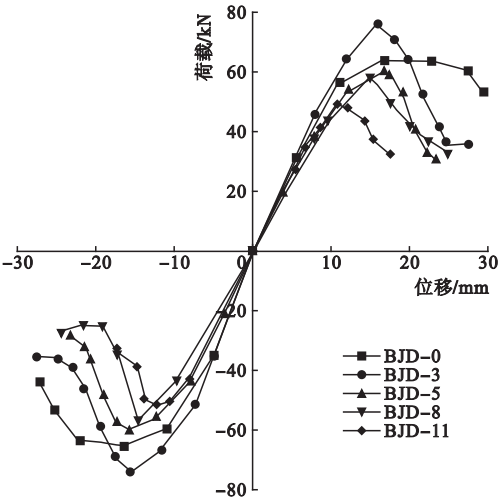


图10 试件骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of specimens

3.3 位移延性分析

将图 10 中各试件的骨架曲线数据进行整理,得到混凝土碳化和冻融共同作用下各试件的位移延性计算结果(见表 3).

表3 计算结果

Table 3 The results

试件	碳化深度/mm	锈蚀率/%	冻融循环次数	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性系数
BJD-0	0	0	0	11.30	29.00	2.57
BJD-3	25	0	0	11.00	19.62	1.78
BJD-5	25	0	100	10.81	18.70	1.73
BJD-8	25	5	100	10.50	16.60	1.58
BJD-11	25	10	100	10.10	14.20	1.41

节点试件的延性是指结构在一定承载力的条件下能够承受变形大小的能力,一般衡量延性的参数是位移延性系数. 从表 3 中的

数据可以得出,耐久性损伤对边节点极限位移影响较大. 随着耐久性损伤因素的增加,其耦合作用导致各试件的极限位移严重减小,

即位移延性系数衰减严重。BJD-11 的位移延性系数较 BJD-0 减小 45.1%,即试件相对发生了严重的破坏。

3.4 耗能退化性能分析

理想状态下,良好的抗震性能是指其耗能能力很大,相应的强度和刚度退化较小的情况。试件耗能能力可以通过滞回曲线的面积来确定,试件在不同因素作用下的累计耗能曲线见图 11。

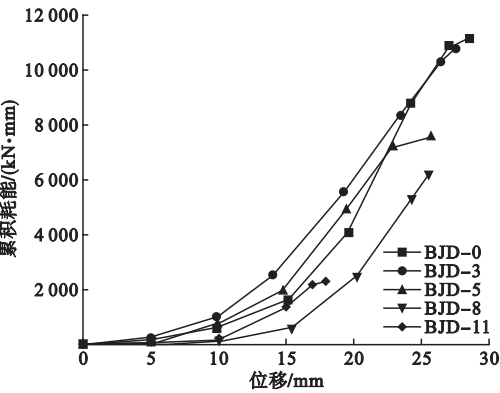


图 11 试件的累积耗能曲线

Fig. 11 Accumulated energy dissipation curves of specimens

综合滞回曲线、骨架曲线、位移延性分析可知,当三种损伤因素共同作用时,钢筋锈蚀率从 5% 增加到 10%,试件 BJD-11 的累积耗能能力和极限位移均急剧衰减,尤其是累积耗能能力,没有达到无损构件 BJD-0 累计耗能能力的一半,BJD-11 累积耗能能力下降约 58%,呈脆性破坏,此时试件抗震性能开始发生急剧退化。

4 结 论

(1)在三种损伤因素的共同作用下,钢筋混凝土结构节点抗震性能降低,具体表现在开裂较早,裂缝发展较为集中,钢筋与混凝土之间的粘结滑移破坏较为严重。

(2)在三种损伤因素共同作用下,当钢筋的锈蚀率从 5% 增加到 10% 时,试件的累积耗能能力和极限位移全部发生急剧衰减,试件的抗震性能严重退化;在碳化、冻融及钢

筋锈蚀率为 10% 的情况下,滞回曲线捏缩显著,试件的承载力及延性均急剧下降;随着混凝土的碳化,试件承载力提高的同时延性在逐渐降低。

(3)当混凝土碳化、冻融循环和钢筋锈蚀三种损伤共同作用时,不论混凝土碳化、冻融循环次数还是钢筋锈蚀率,任何一种损伤量的增加,均会导致试件抗震能力急剧退化。

参考文献

[1] 孙伟. 现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(SUN Wei. Durability evaluation and service life prediction of modern concrete [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015.)

[2] 梁岩, 罗小勇. 耐久性损伤钢筋混凝土结构抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 113-119.
(LIANG Yan, LUO Xiaoyong. Research progress in seismic behavior of durability decrease RC structures[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2014, 34(2): 113-119.)

[3] 陈昉健, 易伟健. 锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的非线性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 77-83.
(CHEN Fangjian, YI Weijian. Nonlinear analysis of corroded reinforced concrete columns under seismic loading[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2014, 34(3): 77-83.)

[4] SUDRET B. Probabilistic models for the extent of damage in degrading reinforced concrete structures[J]. Reliability engineering and system safety, 2008, 93(3): 410-422.

[5] ADAMSON M, RAZMJOO A, POURSAEE A. Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate[J]. Construction and building materials, 2015(94): 426-432.

[6] JOSKO O, FILIP O, GOJKO B, et al. Modeling damage in concrete caused by corrosion of reinforcement: coupled 3D FE model[J]. International journal of fracture, 2012, 178(1/2): 233-244.

[7] 夏玉领. 耐久性损伤钢筋混凝土柱节点反复荷载试验研究[D]. 湖南: 中南大学, 2014.
(XIA Yuling. Experimental study under cyclic loading on durably damaged reinforced con-

- crete column joint [D]. Hunan: Central South University, 2014.)
- [8] SIMONA C, STEFANIA I, ZILA R. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete [J]. *Materials and structures*, 2016, 49(1/2): 537 - 551.
- [9] 闻洋, 管丽佩, 张宝峰. 不同形式钢管混凝土框架节点抗震性能对比试验 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(5): 821 - 828.
(WEN Yang, GUAN Lipai, ZHANG Baofeng. Contrast experiments on seismic performances of different concrete-filled steel tube beam joints [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2015, 31(5): 821 - 828.)
- [10] TOSHIYUKI F, KOJI M. Elastoplastic behavior of panel zone in steel beam-to-concrete filled steel tube column moment connections [J]. *Journal of structural engineering*, 2009, 131(12): 1841 - 1851.
- [11] TANG S W, YAO Y, ANDRADE C, et al. Recent durability studies on concrete structure [J]. *Cement and concrete research*, 2015, 78 (Part A): 143 - 154.
- [12] 张欢欢, 吕振利, 刘阳. 钢纤维高强陶粒混凝土与钢筋的粘结性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(4): 79 - 84.
(ZHANG Huanhuan, Lü Zhenli, LIU Yang. Experimental research on bond behavior between steel fiber reinforced high-strength ceramsite concrete and rebar [J]. *Journal of building structures*, 2016, 46(4): 79 - 84.)
- [13] DIMITRI V V, LEONID C. Serviceability reliability of reinforced concrete beams with corroded reinforcement [J]. *Journal of structural engineering*, 2009, 135(8): 896 - 905.
- [14] RANIA A H, SOUDKI K, TOPPER T. Fatigue flexural behavior of corroded reinforced concrete beams repaired with CFRP sheets [J]. *Journal of composites for construction*, 2011, 15(1): 42 - 51.
- [15] CAVACO E S, CASASJR T, NEVES L A, et al. Robustness of corroded reinforced concrete structures-a structural performance approach [J]. *Structure and infrastructure engineering*, 2013, 9(1): 42 - 58.
- [16] 张永利. 锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能及承载性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
(ZHANG Yongli. Bond properties and bearing capacity of corroded reinforced concrete members [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.)
- [17] 吴庆. 基于钢筋锈蚀的混凝土构件性能退化预计模型 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
(WU Qing. The prediction model based on the reinforcement corrosion of concrete building performance degradation [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2011)
- [18] 欧娅. 低周反复荷载作用下损伤钢筋混凝土受弯构件全过程分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
(OU Ya. Full-range analysis of corroded reinforced concrete flexural members under low cyclic loadings [D]. Changsha: Central South University, 2014.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋混凝土设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of reinforced concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011.)
- [20] 朱文治. 碳化混凝土单调及重复荷载作用下本构关系试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
(ZHU Wenzhi. Experimental study on constitutive relationship of carbonized concrete under monotonous and repeated load [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.)
- [21] PENG Xinlai, ROUECHE D, PREVATT D, et al. An engineering-based approach to predict tornado-induced damage [J]. *Multi-hazard approaches to civil infrastructure engineering*, 2016(1): 311 - 335.