

基于 OpenSees 的锈蚀 RC 结构底部节点性能研究

欧晓英*, 林 迟, 张沛洲, 何 政, 欧进萍

(大连理工大学 建设工程学部, 大连 116024)

摘 要: 为了分析节点钢筋粘结性能变化对钢筋混凝土构件性能的影响, 本文以框架底部节点为研究对象, 对不同锈蚀率的节点性能进行分析。运用 OpenSees 中的 Bond_SP01 材料模型并结合零长度截面单元模拟节点钢筋的粘结滑移, 不同锈蚀率下的 Bond_SP01 模型参数通过有限元建模的方法进行修正。对底部节点的数值模拟结果表明: 锈蚀严重时, 底部节点钢筋粘结滑移对构件性能的影响不容忽视; 同时考虑节点钢筋粘结滑移和上部柱体钢筋截面损失两个因素时, 钢筋屈服前构件性能主要受节点粘结性能变化影响, 钢筋屈服后构件上部纵筋的截面损失对构件性能的影响开始显现, 两者对构件整体性能的影响程度相当。所以, 在进行锈蚀构件或结构性能分析时, 有必要考虑节点性能的影响。

关键词: 纤维模型; Bond_SP01 材料; 锈蚀; 底部节点; 钢筋混凝土

中图分类号: TU352.1⁺1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7511/jslx201303019

1 引 言

混凝土中钢筋锈蚀是十分普遍的现象, 受钢筋锈蚀的影响, 钢筋与混凝土的粘结性能将发生变化^[1]; 此外, 在地震等反复荷载作用下, 钢筋与混凝土的粘结性能也会产生损伤, 并直接影响到钢筋的锚固性能和混凝土裂缝的开展。目前, 常见的可以考虑粘结滑移的有限元模型有旋转弹簧模型、一维弹簧模型和分离式模型^[2]。弹簧模型^[3]的材料本构需同时考虑钢筋和混凝土的贡献, 而构件截面形式和配筋率的多样性决定了此方法的局限性; 分离式模型则需要将钢筋和混凝土作为不同的单元来处理, 同时在钢筋与混凝土之间插入联结单元来模拟两者之间的粘结滑移, 该方法因单元划分数量过多, 计算量过大, 难以用于结构整体的数值模拟。纤维模型^[4,5]由于其本身的优势受到越来越多研究者的青睐和关注, 然而该模型是建立在钢筋和混凝土充分粘结这一假定的基础上(即满足平截面假定), 忽略了粘结滑移对结构性能的影响。整体框架的低周反复加载试验表明^[6], 节点内梁纵筋粘结滑移和结构底部节点纵筋粘结滑移引起的附加变

形可占总变形的 30% 以上, 所以, 钢筋混凝土节点作为主要的耗能构件, 并且是钢筋发生粘结滑移的主要部位之一, 研究构件节点区纵筋的粘结滑移变形对整个结构性能的影响具有重要的意义。

目前, 许多学者对锈蚀钢筋混凝土构件进行了大量的研究^[7], Fang 等^[1]对不同锈蚀率的光圆钢筋和螺纹钢筋进行了拉拔试验研究; Chen 等^[8]对钢筋混凝土板在氯离子作用下的性能退化进行了有限元模拟; Casanova 等^[9]提出新的有限元模型对钢筋与混凝土的粘结滑移性能进行模拟。但目前研究多集中于锈蚀构件静力性能实验研究方面, 对锈蚀构件抗震性能的研究还不成熟, 尤其是对锈蚀钢筋混凝土框架结构抗震薄弱部位底部节点性能的研究则更少。基于结构全寿命设计对结构性能退化分析的需求, 本文从钢筋混凝土结构底部节点入手, 采用 OpenSees 软件同时结合纤维模型和零长度截面单元来模拟底部节点处纵筋的滑移, 以此来研究锈蚀作用下节点性能变化对构件或结构性能的影响。

2 考虑钢筋粘结滑移的底部节点建模

已有科研人员对框架节点的纵筋滑移进行过试验研究^[6,7], 而对钢筋锈蚀后框架底部节点的纵筋滑移研究却较少, 本文着重研究框架结构底部节点粘结性能变化对构件或结构性能的影响。中间节点的纵筋受柱宽度的影响, 锚固长度一般较短, 滑移现象通常贯穿整个锚固长度; 而框架底部节点的

收稿日期: 2012-03-01; 修改稿收到日期: 2012-06-03.

基金项目: 中国博士后科学基金(2011M500555); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAJ09B00); 国家自然科学基金(50908030; 90915005); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120041110001)资助项目。

作者简介: 欧晓英* (1982-), 女, 博士生
(E-mail: ou_xiaoying@163.com).

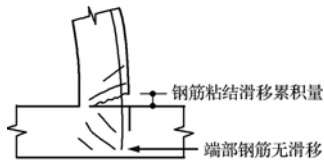


图1 长锚固钢筋屈服渗透现象

Fig. 1 Bond-slip due to strain penetration of fully anchored bar at yield

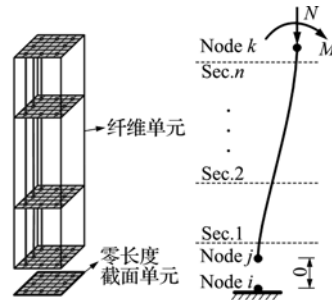


图2 零长度截面单元与纤维单元
Fig. 2 Zero-length section element and fiber-based element

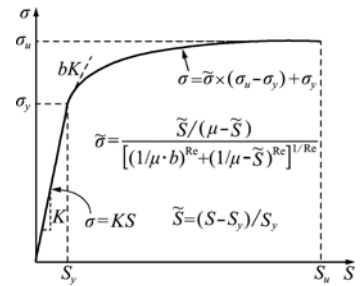


图3 加载端钢筋应力-滑移骨架曲线
Fig. 3 Envelope curve for bar stress versus loaded-end slip relationship

纵筋锚固长度通常足够长,随着荷载的增加,柱纵筋所受拉力逐渐增大,从而先在节点边缘产生屈服,随着柱端位移及塑性铰区域的增加,钢筋的屈服段变长,并向节点内渗透,产生钢筋屈服渗透现象^[10],如图1所示。锚固钢筋的屈服渗透使节点粘结力降低,导致有效锚固段缩短,即钢筋只在局部锚固长度内发生滑移,锚固端部不发生滑移。

构件变形由弯曲变形和节点钢筋滑移引起的端部转角组成,为模拟构件端部节点纵筋的粘结滑移,本文引入零长度截面单元,如图2所示。该截面单元可模拟构件端部截面的弯矩-曲率关系,假设其长度为一个单位^[11],则其变形即为构件端部的转角。图2中的杆单元和零长度截面单元都是基于纤维模型的单元,且具有相同纤维划分,区别在于后者的钢筋纤维的本构为钢筋应力-滑移关系,而杆单元截面的钢筋纤维的本构为钢筋应力-应变关系。

Zhao等^[10]提出的Bond_SP01就是用于模拟具有足够锚固长度的节点处钢筋的粘结滑移的模型,加载端钢筋应力-滑移骨架曲线如图3所示。图3中延性系数 $\mu = (s_u - s_y) / s_y$, b 为钢筋的刚度退化系数, σ_y 和 σ_u 分别为钢筋的屈服强度和极限强度, s_y 和 s_u 分别对应于加载端钢筋强度为 σ_y 和 σ_u 时的加载端纵筋滑移量,其中 s_y 由具有足够锚固长度的拉拔试验数据拟合而得。Zhao等利用Bond_SP01材料结合零长度截面单元对矩形柱节点、圆形柱节点和桥梁T型节点进行分析,对比了考虑和不考虑粘结滑移影响的节点耗能情况,表明考虑粘结滑移影响的有限元模拟结果更接近试验结果。从本质上来看,引入零长度截面单元和Bond_SP01材料模型相当于给原模型添加了一个转角,通过该转角来考虑节点处钢筋粘结滑移引起的构件性能的衰减。由于本文研究的框架底层柱

底节点可视为锚固良好,或由于端部弯钩的作用,其端部钢筋处不会产生滑移,为此,本文结合OpenSees中的Bond_SP01材料和零长度截面单元,对不同钢筋锈蚀率的框架底层柱底节点的钢筋粘结滑移问题进行分析。

3 不同锈蚀率下 Bond_SP01 参数修正

现有拉拔试验尤其是锈蚀钢筋的拉拔试验,多以获取钢筋的局部粘结应力为目的^[12],锚固长度一般较短,而Bond_SP01的材料参数是由满足最低锚固长度要求的拉拔试验结果拟合得出的。由于短锚固拉拔试验的钢筋与底柱底节点钢筋的实际受力状态明显不同,故其试验结果不能用于Bond_SP01参数的退化规律研究。为此,本文采用分离式建模方法来模拟锈蚀钢筋的长锚固拉拔试验。

锈蚀钢筋局部粘结性能的退化规律已有较成熟的研究成果,通过有限元建模便可以得到各种锚固长度的锈蚀钢筋拉拔试验结果。由于这种小试件的模型简单,划分单元数量少,计算量也相对较小,其模拟结果可以为确定材料参数的退化规律提供依据,且可通过有针对性的试验加以修正。本文利用ANSYS通用计算软件,结合现有钢筋局部粘结性能退化规律^[13],对 s_y 和 s_u 等Bond_SP01参数的变化规律进行了研究,为下一步分析锈蚀引起的节点粘结性能变化对构件整体性能的影响提供依据。研究表明^[14],当钢筋锈蚀率超过6.0%~9.0%时,钢筋与混凝土之间的粘结强度基本丧失,所以本文选择锈蚀率为8%以下的工况来分析节点的粘结性能。

本文利用Saatcioglu等的矩形悬臂柱U6的实验数据,分析钢筋混凝土节点的性能,构件尺寸如图4所示^[15]。拉拔试件模拟时,为与实际试验相对应,截面尺寸取为150mm×150mm^[16-18],长

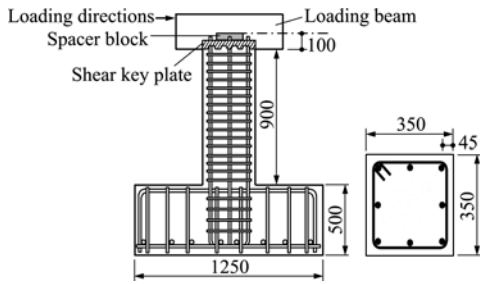


图4 试件几何参数(单位:mm)

Fig. 4 Geometry dimension of specimen(unit:mm)

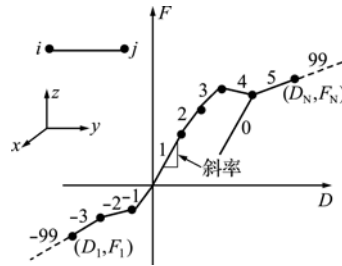


图5 Combin 39 单元几何模型

Fig. 5 Combin 39 geometry

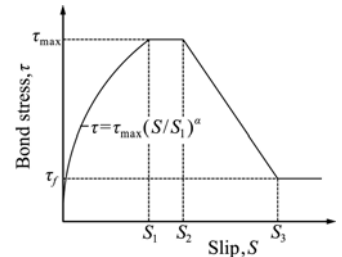


图6 钢筋局部粘结滑移模型

Fig. 6 Local bond slip model of steel

表1 有限元模型材料参数取值

Tab. 1 Material parameters of finite element model

| 混凝土抗压强度 | 钢筋屈服强度 | 钢筋直径 | 钢筋粘结力/ τ_{max} | 滑移 s_1 |
|----------|---------|-------|---------------------|----------|
| 37.3 MPa | 400 MPa | 25 mm | 12.2 MPa | 0.6 mm |

表2 不同锈蚀率所对应的粘结滑移 s_y

Tab. 2 Steel bond slip s_y with different

corrosion rates

| 钢筋锈蚀率 | 0% | 2% | 4% | 6% | 8% |
|-----------|------|------|------|------|------|
| s_y /mm | 0.55 | 0.51 | 0.64 | 0.75 | 0.82 |

度取为 500 mm(长度与悬臂柱钢筋在节点中的锚固长度对应,故有限元模型的长度取为 500 mm),分别模拟锈蚀率为 0%、2%、4%、6% 和 8% 时 Bond_SP01 材料的性能。由于随着钢筋与混凝土之间粘结性能的下降,节点端部弯钩开始发挥锚固作用,因此为与实际吻合,有限元模拟时将钢筋端部固定。

在有限元模拟中,混凝土单元采用 Soild65,钢筋采用 Link8 单元,钢筋与混凝土之间的粘结滑移用 Combin39 单元模拟,如图 5 所示。钢筋的局部粘结应力关系选用 CEB-FIP1990^[19]中推荐的钢筋粘结性能曲线,如图 6 所示。试件的有限元模型如图 7 所示,与矩形柱试验相对应,有限元模型的材料参数取值列入表 1,钢筋与混凝土之间粘结性能的退化规律参考文献[13]。通过有限元建模,可以得到不同锈蚀率下模型受拉端钢筋应力与滑移的对应关系,如图 8 所示,各锈蚀率钢筋屈服时所对

应的滑移量 s_y 列入表 2。研究结果表明,除锈蚀率为 2% 时钢筋滑移量 s_y 相比未锈蚀时略有降低外,其他都随锈蚀率的增加而变大,且因端部锚固,钢筋滑移量对钢筋局部粘结力的依赖性逐渐减小;而 s_u 受钢筋端部弯钩锚固的影响变化不大,分析时取为定值。由于现有拉拔试验尤其是锈蚀钢筋的拉拔试验,多以获取钢筋的局部粘结应力为目的,锚固长度一般较短,长锚固的试验很少,因此无法将模拟结果与试验数据相比较,这也是本文进行有限元模拟的原因。考虑本文的模型尺寸,在粘结力完全丧失的情况下 s_y 为 1 mm(500 mm \times 0.002);在粘结完好即钢筋未锈蚀的情况下, s_y 的试验值约为 0.54 mm。本文数值模拟结果显示,不同锈蚀率下 s_y 的变化范围为 0.55 mm(无锈蚀)~0.82 mm(锈蚀率 8%),满足实际情况的要求。从钢筋受拉模型模拟结果图 8 可以看出,钢筋屈服前后的模拟结果也较为稳定。

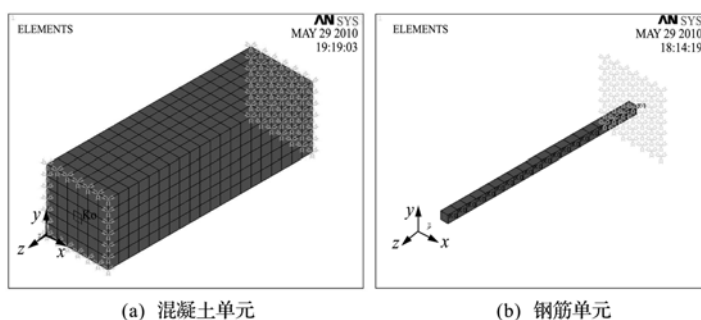


图7 钢筋拉拔试验有限元模型

Fig. 7 FEM of the bar pullout test

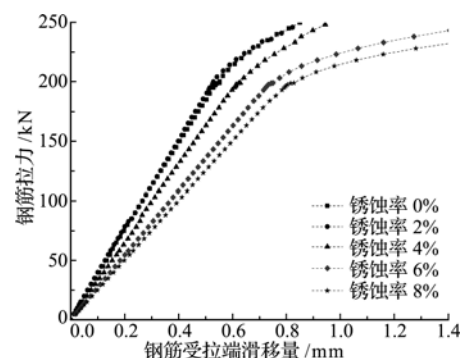


图8 钢筋受拉模型模拟结果

Fig. 8 Simulation results of pull model of steel

4 锈蚀钢筋混凝土节点性能分析

由于钢筋混凝土粘结性能模拟在通用有限元软件中较难实现,因此现有钢筋混凝土结构分析较少考虑粘结性能。然而,节点性能对整体结构的耗效率具有重大影响,且钢筋粘结滑移又多发生在节点处。目前,关于混凝土结构底柱节点的有限元模拟较少考虑钢筋粘结滑移的影响,也就无法分析锈蚀作用下粘结性能变化对节点性能的影响。因此,本文基于 OpenSees 分析软件^[20],利用零长度截面单元与 Bond_SP01 材料,研究钢筋锈蚀引起的节点性能的变化对构件性能的影响。

4.1 有限元模型

本文利用 Saatcioglu 等^[15]的矩形悬臂柱 U6 的实验数据(构件尺寸如图 4 所示),对钢筋混凝土节点的性能展开分析。采用 OpenSees 中的纤维模型,并结合零长度截面单元和 Bond_SP01 材料进行建模。

4.2 材料参数

(1) 混凝土本构模型

本文在柱底端考虑纵筋的粘结滑移,由于杆单元和零长度截面单元所采用的钢筋本构不同,若考虑混凝土的拉伸强化,则两单元的变形很难协调。所以,混凝土采用 OpenSees 中的 Concrete01 材料,它可以考虑箍筋约束对混凝土强度和延性的提高。

(2) 锈蚀钢筋本构模型

钢筋锈蚀时其实际强度并未发生太大变化^[21],因此本文不同锈蚀率钢筋的实际强度均取为未锈蚀时的钢筋强度,通过锈蚀纵筋截面面积的减小来反映钢筋材料性能的退化。采用 OpenSees 中的 Steel02 材料,它能够反映 Bauschinger 效应。

(3) 锈蚀钢筋滑移本构模型

锈蚀钢筋粘结滑移模型采用 Bond_SP01 材料模型。根据上文的分析结果,不同锈蚀率下材料参数 S_y 的取值列入表 2。

4.3 锈蚀作用下节点性能分析

针对锈蚀引起的钢筋与混凝土粘结性能的变化,目前还没有定量评估其对构件性能影响的方法,常见的做法是通过粘结退化系数来近似估计,但是此种方法过于粗略。本文分为不考虑和考虑

节点钢筋截面损失两种情况进行研究,以突出考虑钢筋与混凝土之间粘结性能变化的重要性,并研究节点性能变化对构件性能的影响;同时,将节点性能变化对构件的影响与构件纵筋截面减小引起的构件性能变化进行对比分析。

4.3.1 只考虑节点粘结性能的变化

为了讨论锈蚀钢筋混凝土结构底部节点粘结性能变化对构件或结构性能的影响,假设只考虑节点处钢筋与混凝土粘结力的变化,忽略钢筋力学性能的改变等因素。所以,在原未发生锈蚀的有限元模型上,除了对 Bond_SP01 材料参数做相应的修改外,其他的有限元模型参数均不需修改,分析结果如图 9 所示。图 9 给出了构件未发生锈蚀及锈蚀率分别为 2%、4%、6% 和 8% 五种工况下构件的力-位移关系。可以看出,当构件处于弹性阶段时,锈蚀对构件刚度影响较小;除锈蚀率为 2% 时构件的承载力略有提高外,其余构件屈服时的承载力随着粘结性能的退化而减小。其主要原因:在钢筋锈蚀初期,锈蚀所引起的钢筋体积膨胀使钢筋与混凝土之间的握裹力增加,造成它们之间的粘结力有轻微的增强;故在仅考虑节点处锈蚀钢筋粘结性能时,锈蚀率很小反而会使构件的承载力略微提高。

4.3.2 同时考虑节点粘结性能变化和钢筋截面损失

在节点处同时考虑粘结性能变化和钢筋截面损失时,除了 Bond_SP01 材料模型参数应该做相应调整外,钢筋截面尺寸也做了相应的修改,其结果列入表 3 和如图 10 所示。可以看出,受节点钢筋锈蚀影响,构件屈服时的承载力随着锈蚀率的增大而减小。其中,锈蚀率为 2% 时由于钢筋粘结性能略有提升,抵消了钢筋截面损失对构件承载力的影响,构件性能变化不大。对比只考虑节点粘结性能变化的情况,构件性能退化更加明显。

4.3.3 节点性能变化对构件性能的影响

参照上述分析结果,锈蚀引起的节点性能的变化对构件的性能有明显的影 响,有必要对其进行详细分析。表 3 给出了不同锈蚀率下只考虑节点粘结性能和同时考虑节点粘结性能及钢筋截面损失两种情况下构件的承载力,表 4 为该两种情况分别造成的构件承载力退化占总承载力的百分比。可

表3 考虑不同影响因素锈蚀构件的承载力(单位:kN)
Tab.3 Bearing capacity of corroded component with different influencing factors considered(unit:kN)

| 影响因素 | 0% | 2% | 4% | 6% | 8% |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 粘结力变化 | 310.1 | 312.8 | 304.8 | 296.6 | 291.4 |
| 粘结力变化+截面损失 | 310.1 | 310.1 | 297.8 | 285.8 | 277.8 |

表4 不同锈蚀率节点性能对构件承载力的影响
Tab.4 Effect of performance of joint to bearing capacity of component with different corrosion rates

| 影响因素 | 4% | 6% | 8% |
|------------|------|------|-------|
| 粘结力变化 | 1.7% | 4.6% | 6.4% |
| 粘结力变化+截面损失 | 4.1% | 8.5% | 11.6% |

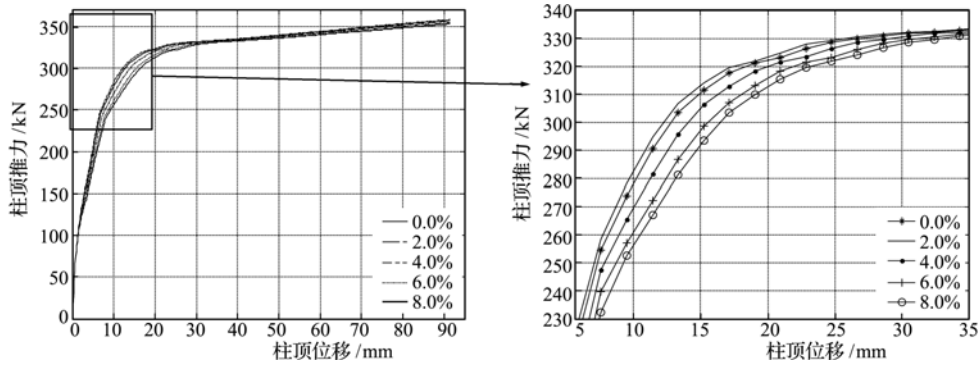


图9 只考虑节点钢筋粘结性能变化
Fig.9 Only the variation of steel bond behavior be considered

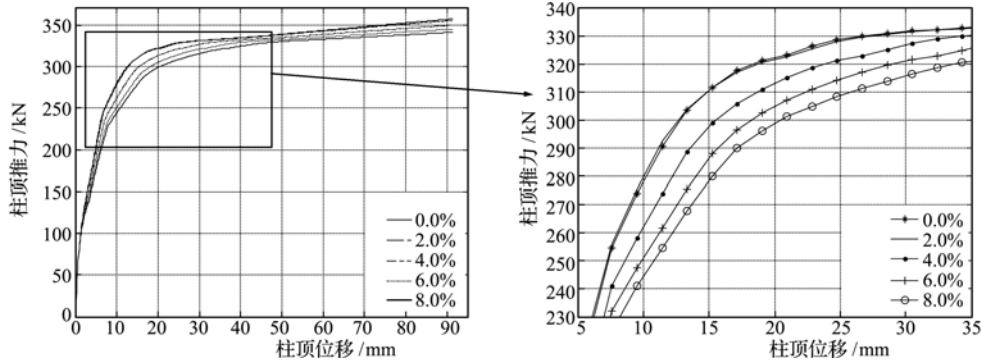


图10 同时考虑节点钢筋粘结性能变化和截面损失
Fig.10 Both variation of steel bond behavior and loss of section be considered

见,随着锈蚀率的增加,节点粘结性能对构件承载力的影响较大;另外,选取钢筋锈蚀量4%和8%两种工况,图11和图12为这两种工况考虑不同因素时构件的力-位移关系,图中“well”表示构件完好未发生锈蚀,“just s_y ”表示仅考虑节点粘结性能变化,“both s_y and d ”表示同时考虑节点粘结性能变化和节点钢筋截面减小。由图11和图12可以看出,节点粘结力和节点处钢筋力学性能的变化都将影响到构件的性能,随着钢筋锈蚀率的增加其影响越发明显;所以在锈蚀率较大时,由锈蚀引起的结构底部节点性能的变化不应被忽视。

4.3.4 钢筋锈蚀对构件抗力衰减的影响

常见的有限元分析只能对构件钢筋截面的衰减进行模拟,难以考虑节点粘结性能的影响。为

此,本文对钢筋锈蚀率为8%工况下构件的抗力性能进行分析,分为构件未发生锈蚀、只考虑节点性能变化和同时考虑节点性能变化及上部纵筋力学性能退化三种情况进行对比分析,图13为构件承载力与位移曲线图。图中“well”表示构件未发生锈蚀,“joint”表示仅考虑节点性能变化,“all column”表示同时考虑节点性能变化和构件纵筋截面减小。可以看出,在纵筋屈服前,构件抗力衰减主要受节点性能变化影响,构件性能较未发生锈蚀时有明显的退化,此时构件纵筋力学性能的退化对构件承载力的影响可以忽略;纵筋屈服后,构件纵筋截面损失对构件性能的影响才开始显现出来。因此,在进行锈蚀框架结构性能分析时,有必要考虑结构底部节点性能的变化。

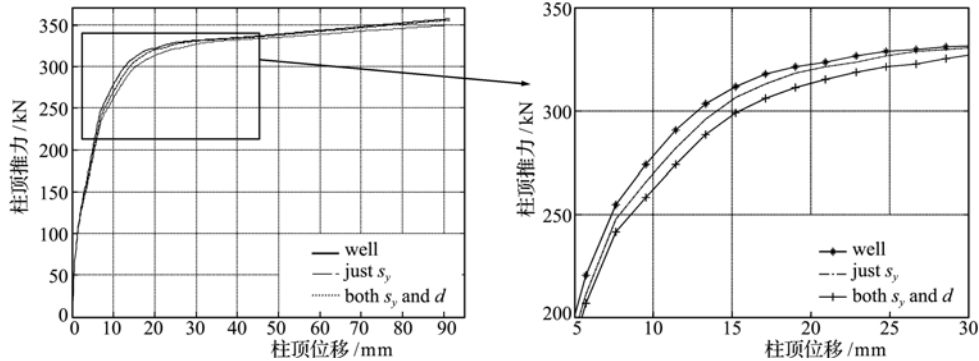


图 11 钢筋锈蚀率 4% 时不同影响因素下的节点性能
Fig. 11 Joint performance effected by different factors with a steel corrosion rate 4%

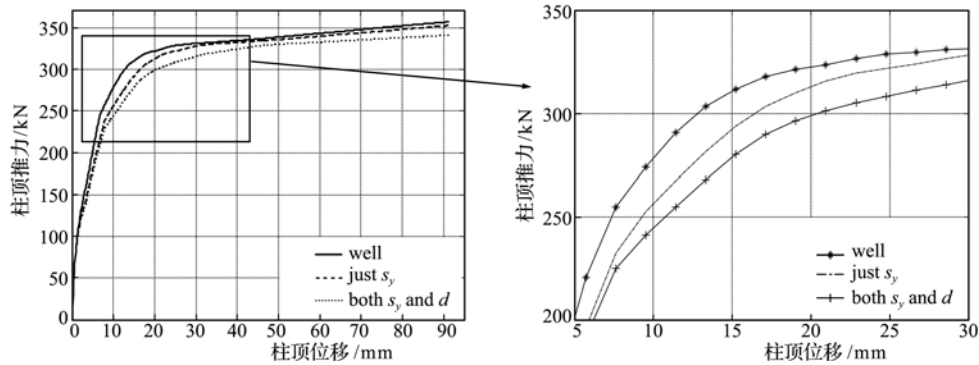


图 12 钢筋锈蚀率 8% 时不同影响因素下的节点性能
Fig. 12 Performance of joint effected by different factors with a steel corrosion rate 8%

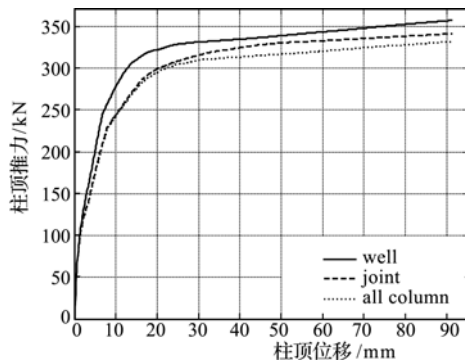


图 13 钢筋锈蚀率 8% 时节点性能退化对构件的影响
Fig. 13 Effect of performance deterioration of joint to component with a steel corrosion rate 8%

5 结 语

本文采用纤维模型,利用 OpenSees 程序中的零长度截面单元和 Bond_SP01 材料,分析了锈蚀钢筋混凝土结构底部节点性能对构件或结构的影响,得出以下结论。

(1) 框架结构底部节点钢筋粘结滑移对构件性能有较大影响,分析时应予以考虑,通过 Bond_SP01 材料和零长度截面单元建模可以解决该问题。

(2) 通过 ANSYS 精细化建模结合现有钢筋局部粘结滑移性能的研究成果,可对具有足够锚固长度的锈蚀钢筋拉拔试验进行模拟,从而修正不同锈蚀率下 Bond_SP01 材料的相关参数。

(3) 对节点性能变化和上部柱体纵筋截面损失引起的构件性能退化程度进行了对比分析,在钢筋屈服前,构件抗力衰减主要受节点性能的影响,钢筋屈服后,上部柱体纵筋的截面损失对构件性能的影响开始显现。所以,由于底部节点锚固条件区别于一般的梁柱节点,在进行锈蚀构件或结构性能分析时,应该考虑节点性能的影响。

参考文献(References):

- [1] Fang C Q, Lundgrenb K, Chen L G, Zhu C Y. Corrosion influence on bond in reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, **34**: 2159-2167.
- [2] Lowes L N, Moehle J P, Govindjee S. Concrete-steel bond model for use in finite element modeling of reinforced concrete structures [J]. *ACI Struct J*, 2004, **101**: 501-511.

- [3] 方明霖,李国强.基于多弹簧模型的空间梁柱单元 I:理论模型[J].计算力学学报,2008,25(1):129-132. (FANG Ming-ji, LI Guo-qiang. Multi-spring model beam element I: theoretical model [J]. *Chinese Journal of Computational mechanics*, 2008, 25(1): 129-132. (in Chinese))
- [4] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fiber beam-column model for non-linear analysis of RC frames; Part I. Formulation [J]. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 1996, 25: 711-725.
- [5] 艾庆华,王东升,向敏.基于纤维单元的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J].计算力学学报,2011,28(5):737-742. (AI Qing-hua, WANG Dong-sheng, XIANG Min. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on fiber elements [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(5): 737-742. (in Chinese))
- [6] 徐云扉,胡庆昌,陈玉峰,等.低周反复荷载下两跨三层钢筋混凝土框架受力性能的试验研究[J].建筑结构学报,1986,7(2):1-15. (XU Yun-fei, HU Qing-chang, CHEN Yu-feng, et al. The experimental study of the behavior of a two-bay three-story RC frame under cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 1986, 7(2): 1-15. (in Chinese))
- [7] 戴靠山,袁迎曙.锈蚀框架边节点抗震性能试验研究[J].中国矿业大学学报,2005,1(34):51-56. (DAI Kao-shan, YUAN Ying-shu. Experimental study on seismic performance of corroded exterior joints in RC frame [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 1(34): 51-56. (in Chinese))
- [8] Chen D, Mahadevan S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(3): 227-238.
- [9] Casanova A, Jason L, Davenne L. Bond slip model for the simulation of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Structures*, 2012, 39: 66-78.
- [10] Zhao J, Sritharan S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(2): 133-141.
- [11] Lowes L, Altoontash A. Modeling reinforced concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(12): 1686-1697.
- [12] 赵羽习,金伟良.锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(4):352-357. (ZHAO Yu-xi, JIN Wei-liang. Test study on bond behavior of corroded steel bars and concrete [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, 36(4): 352-357. (in Chinese))
- [13] 徐善华.混凝土结构退化模型与耐久性评估[D].西安建筑科技大学,2003. (XU Shan-hua. The Models of Deterioration and Durability Evaluation of Reinforced Concrete Structure [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. (in Chinese))
- [14] Sulaimaini G, Kaleemullah M, Basunbul L A, et al. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members [J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(2): 220-231.
- [15] Saatcioglu M, Ozcebe G. Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(6): 3-12.
- [16] 陈静,刘西拉.锈蚀钢筋混凝土构件粘结滑移本构模型[J].四川建筑科学研究,2008,34(4):1-7. (CHEN Jing, LIU Xi-la. Bond-slip constitutive model of corroded reinforced concrete member [J]. *Sichuan Building Science*, 2008, 34(4): 1-7. (in Chinese))
- [17] 范颖芳,黄振国,李健美,等.受腐蚀钢筋混凝土构件中钢筋与混凝土粘结性能研究[J].工业建筑,1999,29(8):49-51. (FAN Ying-fang, HUANG Zhen-guo, LI Jian-mei, et al. Research on cohesive property between reinforcement and concrete of corroded RC member [J]. *Industrial Construction*, 1999, 29(8): 49-51. (in Chinese))
- [18] 金伟良,赵羽习.随不同位置变化的钢筋与混凝土的粘结本构关系[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(1):1-6. (JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Stress-slip relationship variation with the position [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, 36(1): 1-6. (in Chinese))
- [19] CEB-FIP Model Code 1990. Design Code [S].
- [20] Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) [EB]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, <http://OpenSees.berkeley.edu>. (2011).
- [21] 张誉,蒋利学,张伟平,等.混凝土结构耐久性概论[M].上海:上海科学技术出版社,2003. (ZHANG Yu, JIANG Li-xue, ZHANG Wei-ping, et al. *Durability of Concrete Structures* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003. (in Chinese))

Research on properties of bottom column joint of corroded RC structure based on OpenSees

OU Xiao-ying*, LIN Chi, ZHANG Pei-zhou, HE Zheng, OU Jin-ping
(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In this paper, the effect of the bond behavior variation on the behavior of RC structure members was investigated using OpenSees. The bottom column joints with different corrosion rates were studied. The Bond_SP01 material model and zero-length section element in OpenSees were used to simulate the bond behavior between concrete and steel rebar. The parameters of Bond_SP01 for different corrosion rates were verified using the Finite Element Model. From this research it is observed that the bond slip between concrete and steel rebar affects the structure behavior significantly when the rebar suffered serious corrosion. The behavior of bottom column joint is governed by the bond between concrete and steel rebar before the steel rebar yield. After that, the loss of rebar section on the column top affects the behavior, and the affects from the bond variation and rebar section loss are nearly the same. It is recommended to consider the bond deterioration effect in the analysis of corrosion member or structure.

Key words: fiber model; the material of Bond_SP01; corrosion; bottom column joint; reinforced concrete

~~~~~  
(上接第 421 页)

## Determination of intensity factors for interfacial cracks in TIP materials

ZHONG Hong-jun<sup>1</sup>, LEI Jun<sup>\*1</sup>, ZHANG Chuan-zeng<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Department of Civil Engineering, University of Siegen, D-57068 Siegen, Germany)

**Abstract:** An explicit extrapolating formula for a general case of the interfacial crack plane lying with an angle to the poling axis in transversely isotropic piezoelectric (TIP) materials is derived, which is very feasible to determine the crack-tip intensity factors for numerical methods such as FEM or BEM. Additionally, a more concise extrapolating formula for the typical state of the interfacial crack plane lying perpendicular to the poling axis is also presented in this paper.

**Key words:** interfacial crack; intensity factors; transversely isotropic piezoelectric