

基于转动刚度的边柱埋入式柱脚 非线性有限元分析

石 韵¹, 张 航²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西西安 710055; 2. 中国建筑标准设计研究院, 北京 100044)

摘 要:以分离式实体建模方法, 利用面-面接触命令考虑型钢与混凝土之间的滑移影响, 建立了埋入式钢柱脚节点 ABAQUS 有限元模型, 考虑材料非线性和几何非线性, 模拟单调加载全过程并进行了特征值屈曲分析, 有限元结果与试验结果吻合较好. 在此基础上, 研究了边柱埋入式柱脚 U 形钢筋设置, 埋入深度, 栓钉设置对柱脚转动刚度的影响, 给出钢柱脚合理构造要求.

关键词:埋入式柱脚; 有限元; 埋入深度; 栓钉; 转动刚度

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0480-06

《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)^[1]的诸多规定, 是以柱脚刚性连接为基础的. 规程中对于埋入式钢柱脚节点如何才能满足刚性节点的设计要求也提出了一系列构造条件. 然而对边柱与中柱柱脚未区别对待, 国内对边柱柱脚的研究也相对较少. 在实际工程中, 由于现场条件限制, 当边柱型钢埋入基础梁的端部时, 在钢柱埋入部分侧向压力作用下, 基础梁端部过早发生剪切破坏, 从而造成节点转动刚度不足. 影响边柱柱脚节点转动刚度的参数包括: U 形钢筋设置, 柱脚埋入深度、栓钉设置. 通过有限元软件建立边柱埋入式柱脚非线性模型, 给出各参数对钢柱脚转动刚度的影响.

1 试验概况

对文献[2]的埋入式钢柱脚 1:1 模型单调加载试验结果进行有限元数值模拟. 混凝土材料等级为 C40, 钢材材料等级为 Q235B, 钢筋材料等级为 HRB335, 型钢柱采用热轧 H 型钢 H150×150×7×10, 水平荷载的施加位于柱端, 通过 MTS 电液伺服系统作动器提供, 为了防止加载点处的应力集中, 在加载点设置刚性垫块. 在试件顶部加载端安装量程为 100 mm 的位移计, 用于测量型钢柱顶加载处的水平位移. 具体加载装置见图 1、图 2 及表 1 为试件细部构造及配筋图.

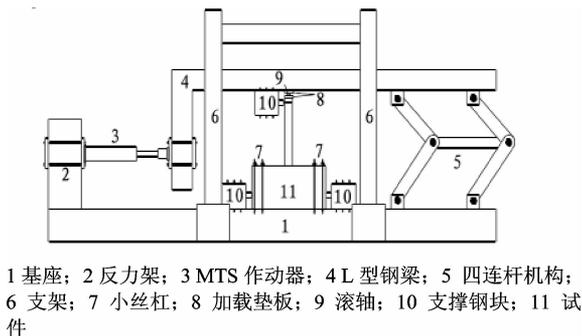


图 1 试件加载装置

Fig. 1 Schematic view of test setup

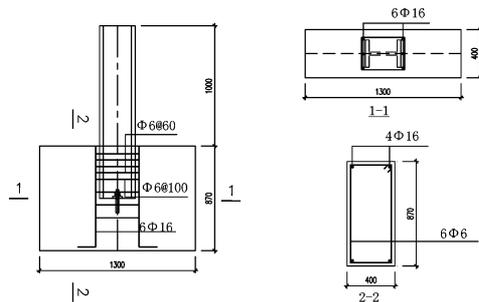


图 2 试件尺寸与配筋/mm

Fig. 2 Size and reinforcement of test /mm

收稿日期: 2012-02-13 修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 科研院所技术开发研究专项资金资助(2008EG131252)

作者简介: 石 韵(1986-), 女, 陕西西安人, 博士生, 主要从事钢结构与混合结构研究.

试验采用力-位移混合控制加载. 加载初期为荷载控制, 每级增加 10 kN, 加载至 60 kN 时, 采用位移加载方式. 加载初期, 试件的混凝土未见裂缝, 直至钢柱翼缘接近屈服时, 钢柱根部在与钢柱翼缘端部平行的方向现短小裂缝, 随着荷载的增加, 裂缝逐渐向基础侧面发展. 当钢柱屈服时, 钢柱根部会出现典型的反冲切裂缝, 随着荷载的继续增加, 反冲切裂缝继续延伸, 且裂缝宽度不断扩大, 并会在的另一侧出现冲切裂缝. 直至型钢柱出现明显的屈曲, 结束试验.

2 有限元模型的建立

2.1 几何模型

使用大型有限元软件 ABAQUS 进行分析, 模型中型钢及混凝土采用三维八节点减缩积分单元 C3D8R, 钢筋采用三维二节点杆单元 T3D2, 利用面-面接触命令引入连接单元, 考虑型钢柱与混凝土基础间的粘结滑移^[3]. 接触面间传递法向力和切向力, 切相采用允许“弹性滑动”的库伦摩擦公式, 临界剪应力 τ_{crit} 与法相接触压力 p 之间有如下关系:

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (1)$$

公式 1 中 μ 为摩擦系数, 取值参考文献[1], 钢柱和混凝土基础间的摩擦系数可取 0.4. 图 3 反映了库伦摩擦模型的行为: 当二者处于粘结状态时(剪应力小于临界剪应力), ABAQUS 自动选择罚刚度(图 3 虚线斜率), 让粘结接触面间发生小量相对运动; 当大于临界剪应力时, 二者处于滑移状态.

接触面法向采用“硬”接触, 当接触面之间的接触压力变为零或负值时, 两个接触面分离, 约束也分开. 图 4 给出了“硬”接触行为示意图. 基础中钢筋与混凝土相互关系采用内置命令处理. 约束条件与加载条件与试验一致.

2.2 混凝土本构模型

混凝土的本构模型选取损伤塑性模型^[4], 该模型分为塑性和损伤两部分: 在塑性部分, 采用 Linbliner 屈服面和双曲线 DP 流动势能面. 在损伤部分, 用损伤因子的定义来反映混凝土在单轴受拉和单轴受压情况下损伤引起的刚度退化. 单轴本构按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[5]附录 C 推荐公式采用.

2.3 钢材本构模型

钢材本构模型采用双线性随动强化模型, 屈服后的弹性模量取 $E' = 0.01E$. 其中 E 为初始弹性模量. 泊松比为 0.3.

3 结果分析

3.1 荷载位移曲线

柱脚顶点位移与外荷载关系如图 5 所示, 图 5 中还给出了文献[6]未考虑型钢与混凝土摩擦时有限元分析模型得到的荷载-位移曲线, 可以看出, 考虑型钢与混凝土粘结滑移后得到的荷载-位移曲线比不考虑摩擦时的荷载-位移曲线更加接近试验结果.

3.2 裂缝分布

图 6 为有限元分析得到的试件基础部分裂缝与试验现象对比, 试件弹塑性阶段在型钢柱周围混凝土出现了明显的冲切裂缝, 通过有限元中的 DAMAGET 选项可以看出在加载后期型钢柱周围混凝土裂缝发展充分, 与试验中观察的裂缝分布形态相同.

3.3 特征值屈曲分析

试验中最终破坏形式为钢柱底部翼缘局部屈曲. 由于屈曲非本文研究重点, 只为得到结构最终破坏

表 1 埋入式钢柱脚试件尺寸 / mm

Tab. 1 Size of embedded column base specimen / mm

埋入深度	埋深比	栓钉直径及长度	栓钉排数	栓钉纵向间距	栓钉横向间距
300	2	16×70	2	120	85

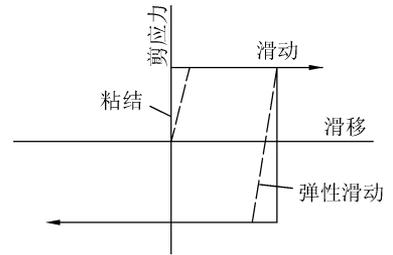


图 3 库伦摩擦模型

Fig. 3 Coulomb friction model

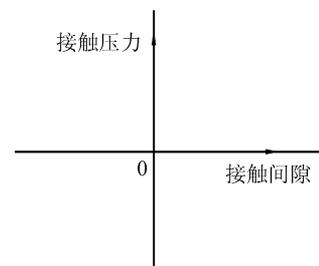


图 4 “硬”接触模型

Fig. 4 Hard contact model

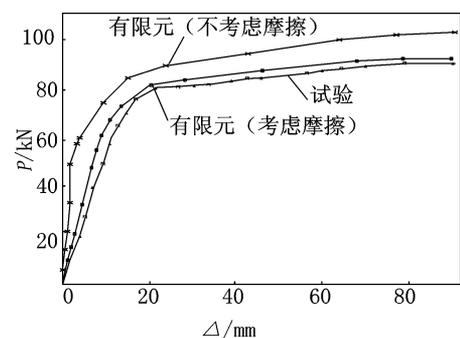
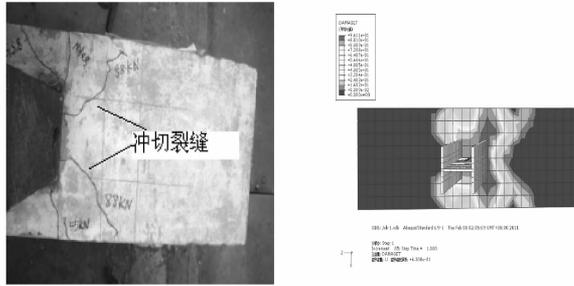


图 5 荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of load-displacement curves

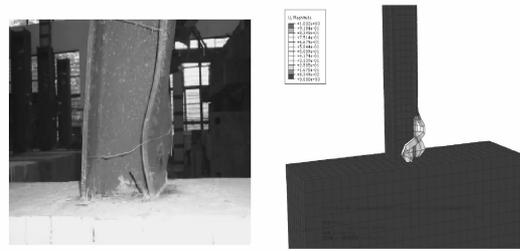
形式,鉴于时间限制,本文对上述模型进行了特征值屈曲分析,加载位置和约束条件与试验条件一致,在柱顶施加单位1的单调水平荷载,利用 ABAQUS 线性摄动求解模块,采用 Lanczos 特征值求解器,求出前 9 阶屈曲模态,与试验时的试件破坏结果进行了对比,见图 7。



(a)试验混凝土裂缝分布 (b)电算混凝土裂缝分布

图 6 裂缝分布对比

Fig. 6 Comparison of fracture distribution



(a)试验钢柱屈曲形态 (b)电算破坏形态

图 7 破坏形态对比

Fig. 7 Comparison of failure modes

图 7 (b)为电算得到的第一阶模态,电算分析结果表明,当荷载加载至 91.194 kN 时,会在柱底翼缘处发生局部屈曲.电算的破坏形态与试验现象相吻合.破坏荷载略大于试验得到的破坏荷载,这是因为屈曲模态分析未考虑构件的初始缺陷,是一种理想状态的破坏形态,但这种误差在可接受范围内。

通过荷载一位移曲线和破坏模式的对比可以看出有限元模型具有一定精确性。

4 不同参数对柱脚转动刚度的影响

在上述有限元模型验证基础上,建立边柱柱脚模型,将钢柱设置在基础梁端部,对影响边柱柱脚刚度的主要参数进行分析,分析的基本试件为箱型截面,截面尺寸为 $\square 300 \times 300 \times 16$,混凝土距钢柱边缘的厚度取 150 mm.加载方式为柱端施加单调水平荷载.图 8 为有限元模型尺寸,混凝土立方体抗压强度为 40 MPa,钢筋为 HRB335 级钢筋,型钢采用 Q235B 级钢.有限元模型如图 9 所示.具体构造措施见表 2,命名为 ZJ-1.

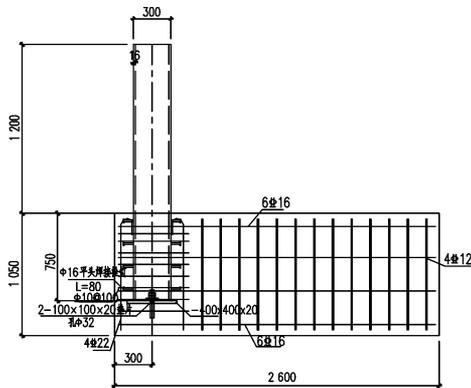
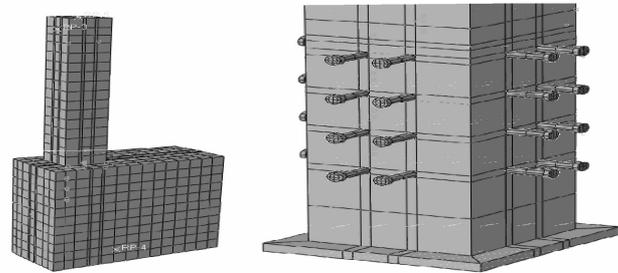


图 8 边柱柱脚有限元模型尺寸

Fig. 8 FEM size of edge embedded column base



(a)整体模型

(b)栓钉

图 9 边柱柱脚有限元模型

Fig. 9 FEM of edge embedded column base

考虑的主要参数包括 U 形钢筋设置,柱脚埋置深度,栓钉布置.通过参数分析从承载力及刚度两方面评价钢柱脚的整体性能.节点 $M-\varphi$ 曲线能够直观的反映钢柱脚节点处转动刚度的变化过程,也即各影响因素下柱脚对上部结构的约束程度, M 表示节点处的弯矩, φ 表示节点处的相对转角。

(1)U 形钢筋设置.表 3 为 U 形钢筋系列试件参数设计.U 形钢筋的设置参照《钢骨混凝土结构设

表 2 边柱埋入式钢柱脚尺寸/mm

Tab. 2 Size of edge embedded column base/mm

埋入深度	埋深比	栓钉直径及长度	栓钉排数	栓钉纵向间距	栓钉横向间距
750	2.5	16×70	4	120	85

计规程》(YB9082-2006)^[7]中构造要求完成,锚固长度及直径满足规范要求.图 10 给出了 U 形钢筋设置示意图.

表 3 U 形钢筋系列试件参数比较

Tab.3 Comparison summary table of U-bar series

试件编号	U 形筋设置	加载方式	备注
ZJ-1	无	由外向内	试件尺寸及其余配筋均相同
UJ-2-W	上下均设置	由外向内	
ZJ-1	无	由内向外	
UJ-2-N	上下均设置	由内向外	

规定基础梁端部方向为外,因此图 10 中箭头所示加载方向为由内向外加载,与之相反方向为由外向内加载,其主要目的是防止边柱基础由于柱脚距基础边缘混凝土保护层较小而过早发生剪切破坏.图 11(a)(b)为节点 $M-\phi$ 曲线比较,加载初期, $M-\phi$ 曲线非常接近,初始刚度均很大,按表格顺序依次分别为 $42.4EI_c/L_c$ 、 $45.3EI_c/L_c$ 、 $42.3EI_c/L_c$ 、 $44.6EI_c/L_c$,其中 EI_c/L_c 为上部柱子的线刚度,欧盟钢结构设计规范 EC3 对于刚性节点提出了刚度准则,EC3 要求:

$$R \geq 25EI_c/L_c \quad (2)$$

其中, R 为连接节点的连接刚度,以欧盟规范为衡量标准,均达到欧盟规范对刚节点的要求,在弯矩

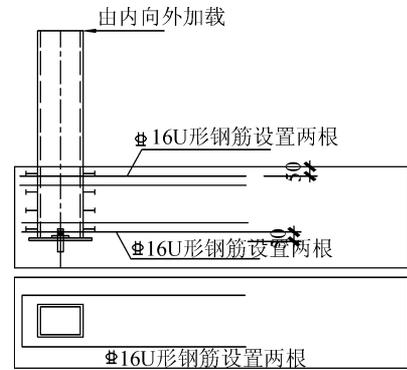
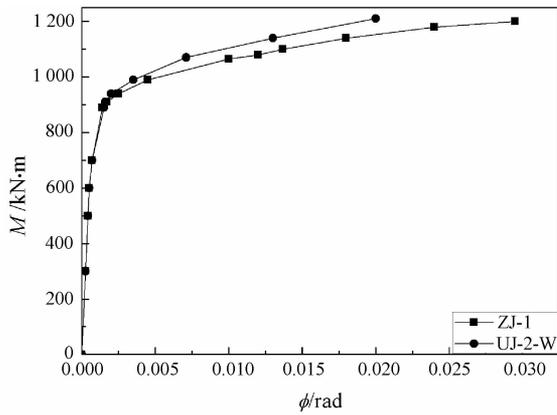
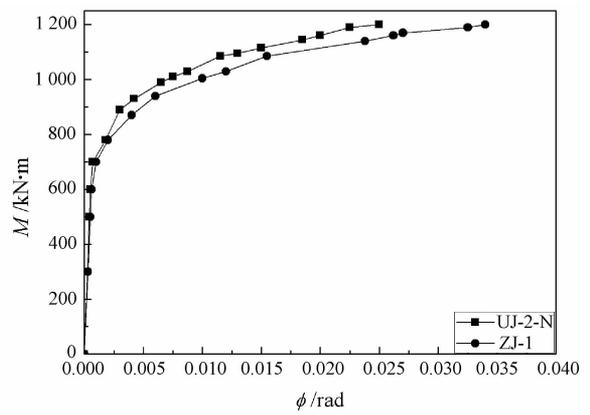


图 10 U 形钢筋设置示意图

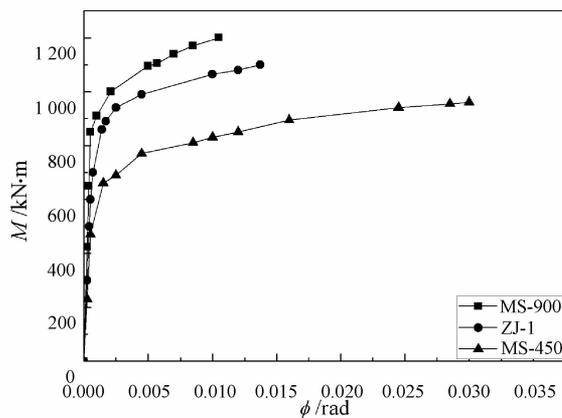
Fig.10 Schematic diagram of U-bar setting



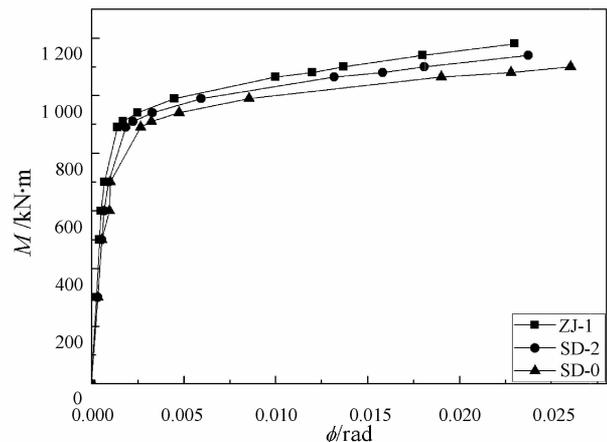
(a) U形钢筋设置 (由外向内加载)



(b) U形钢筋设置 (由内向外加载)



(c) 埋置深度



(d) 栓钉设置

图 11 $M-\phi$ 曲线对比

Fig.11 Comparison of $M-\phi$ curves

达到 $650\text{kN}\cdot\text{m}$ 后,差别逐渐开始明显,加 U 形筋的试件刚度明显高于不加 U 形筋的试件刚度. 设置 U 形筋后对初始刚度的提高为 2%,对后期刚度有较大提高. 这是因为在加载初期,边缘混凝土尚未开裂,具有一定的承压力. 在加载后期,一旦边柱柱脚混凝土保护层开裂,U 形筋的作用得以发挥. 因此应在边柱边缘适当配置 U 形钢筋,防止基础过早发生剪切破坏.

(2)柱脚埋置深度. 柱脚埋置深度分别取为 $750\text{mm}(2.5D)$, $450\text{mm}(1.5D)$ 和 $900\text{mm}(3.0D)$ 进行分析,命名为 ZJ-1, MS-450, MS-900. 图 11(c)为不同埋深时节点 $M-\varphi$ 曲线比较,随着埋入深度的增加承载能力有较大提高,且初始转动刚度、屈服时转动刚度和后期转动刚度均有较大提高. 相比于 ZJ-1 试件(埋入深度 750mm),埋入深度为 900mm 时,初始转动刚度,屈服时的转动刚度及后期转动刚度分别提高了 28.0%,34.3%,63%. 埋深 $1.5D$, $2.5D$, $3.0D$ 的后期刚度分别为 $7.76EI_c/L_c$ 、 $19.5EI_c/L_c$ 和 $31.9EI_c/L_c$. 参考而 EC3 准则,埋深小于等于 $2.5D$ 时,后期刚度损失较大,已经不能满足刚性柱脚要求.

(3)栓钉的设置. 栓钉设置分别取 4 排栓钉、两排栓钉和无栓钉进行分析,命名为 ZJ-1, SD-2, SD-0. 根据图 11(d)可以看出,栓钉的设置对提高钢柱脚锚固端的刚度有一定效果,未设置栓钉的试件为节点域最弱的一个钢柱脚节点. 在加载前期,型钢与混凝土具有良好的粘结能力,因此,栓钉设置与否对初始转动刚度和承载力影响不大,三者的 $M-\varphi$ 曲线基本重合,型钢柱脚的剪力和弯矩可以通过柱侧面混凝土的承压力来承担. 但是当应力较大时,由于柱脚与混凝土产生了相对滑移,共同工作能力受到影响,此时,未设置栓钉的试件 SD-0 在弯矩为 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,柱脚节点域的转角已经达到 0.008 弧度,占到整个连接转角的 30%,而设置了四排栓钉的柱脚节点域的转角仅为 0.005 弧度,占到整个连接转角的 5%. 可见设置了栓钉的型钢柱脚仍然能够通过栓钉把剪力及弯矩传递给基础,在一定程度上提高了柱脚的后期刚度.

5 结 论

(1) ABAQUS 有限元分析表明,考虑接触关系后建立的埋入式钢柱脚模型具有一定准确性. 在一定程度上可以代替试验用于变参数分析;

(2) U 形钢筋的设置能够减缓边柱埋入式钢柱脚的剪切破坏,因而提高后期转动刚度和承载力,建议对位于地梁端部的边柱柱脚建议按文献[7]要求设置 U 形钢筋;

(3)埋置深度对柱脚的刚性连接影响最大,当埋置深度小于等于 $2.5D$ 后,连接刚度有较大损失,不满足 EC3 中对刚性连接的要求,建议埋置深度为 $3.0D$ 以上;

(4)栓钉对结构前期刚度影响不大,经过合理设计的钢柱脚均能在前期获得较大刚度,但增加栓钉后对提高结构后期刚度有较大作用. 建议设计时考虑栓钉的影响.

参考文献 References

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
CHINA Academy of Building Research. JGJ99-98 Technical specification for steel structure of tall buildings) [S]. Beijing: China architecture and building press, 1998.
- [2] 杨 建, 殷志文, 陈忠汉. 埋入式钢柱脚单调加载试验研究[J]. 苏州科技学院学报, 2009, 22(2): 8-12.
YANG Jian, YIN Zhi-wen, CHEN Zhong-han. Experimental study on the behavior of embedded column base joint under monotonic loading [J]. Suzhou University of Science and Technology, 2009, 22(2): 8-12.
- [3] 潘建荣, 王 湛, 张 吉. 框架组合梁柱节点的非线性有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 21(5): 655-662.
PAN Jian-rong, WANG Zhan, ZHANG Ji. Nonlinear finite element analysis of frame composite joints[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 21(5): 655-662.
- [4] 张 劲, 王庆杨. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J], 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
ZHANG Jin, WANG Qing-yang. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Building structure, 2008, 38(8): 127-130.

decision, public transportation network grey relevancy optimization model is put up on the basis of cumulative Prospect Theory after elaborating objective function and constraints of public transportation network. Firstly, the $[-1, 1]$ linear transformation operator is used to standardize the original decision-making information and get the positive and negative ideal schemes which are taken as the reference points of priority by the way of TOPSIS. Secondly, the positive and negative grey relevancy matrixes are established for taking the positive and negative ideal schemes as reference sequence and taking decision-making programs as compared sequence on the base of grey system theory. Thirdly, the positive and negative prospect value matrixes and the nonlinear planning model for the maximum of comprehensive prospect value are put up on the basis of cumulative prospect theory and its prospect value functions, the optimum weight vector is solved, and the best program is derived. Finally, the case of Xi'an shows that the method can help adjust the public transportation network better and the optimization solution is quite reasonable to meet the actual needs.

Key words: *traffic engineering; public transportation network; prospect theory; grey relevancy; decision-making*

Biography: LI Xiao-wei, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991235157, E-mail: 185381729@qq.com.

(上接第 484 页)

- [5] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
CHINA Academy of Building Research. GB50010-2002 Code for design of concrete structures[S] Beijing: China architecture and building press, 2002.
- [6] 张 航. 埋入式钢柱脚节点单调加载非线性有限元研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHANG Hang. Finite element analysis on the behavior of embedded column base joint under monotonic loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2011.
- [7] 中冶集团建筑研究总院. YB9082-2006 钢骨混凝土结构设计规程[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
CHINA Academy of Metallurgical Research. YB9082-2006 Technical specification of steel-reinforced concrete structures[S]. Beijing: Metallurgical industry press, 2007.

Nonlinear finite element analysis on the behavior of edge embedded column base joint based on rotational stiffness

SHI Yun¹, ZHANG Hang²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. China Institute of Building Standard Design & Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the face-to-face contact and slip of steel and concrete, nonlinear finite element analysis was performed using 3D solid separate model to simulate the complete process and linear buckling under monotonic loading, geometric and material nonlinear was taken into account in the models. The results of analysis are compared with the test ones. Based on the proposed model, parametric analysis was carried out to study the effect of U-type reinforcement, embedded depth, the distribution of studs, in looking for the reasonable structural requirements.

Key words: *embedded column base; FEM; embedded depth; studs; rotational stiffness*

Biography: SHI Yun, Ph. D. Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 029-84218089, Email: shiyun0305@163.com.