

文章编号: 1000-4750(2009)01-0037-06

钢梁-钢筋混凝土柱梁柱中节点非线性有限元模拟

*申红侠¹, 顾 强²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 苏州科技学院土木工程系, 江苏, 苏州 215011)

摘 要: 借助 ANSYS 有限元分析软件, 对 5 个“梁贯通”式 RCS 梁柱中节点进行三维非线性有限元分析, 并和试验结果相比较。分析中考虑材料非线性以及混凝土的开裂与压碎。对单元类型的选取、钢和混凝土材料模型的定义、整体有限元模型的建立、施加荷载、设置求解选项并求解等数值模拟技术进行了深入的研究。研究表明, 通过合理设置参数, ANSYS 有限元软件能够模拟 RCS 梁柱节点在静力荷载作用下的性能, 并和试验结果吻合较好。

关键词: 组合结构; RCS 框架; 梁柱中节点; 钢梁; 钢筋混凝土柱; 非线性有限元

中图分类号: TU311 **文献标识码:** A

NONLINEAR FINITE ELEMENT MODELING OF INTERIOR RCS BEAM-COLUMN CONNECTIONS

*SHEN Hong-xia¹, GU Qiang²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Suzhou University of Science & Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China)

Abstract: The nonlinear three-dimensional finite element analysis of five through-beam-type interior RCS beam-column connections is performed by the finite element software ANSYS and the analytical results are compared with experimental results. The effect of material nonlinear constitutive relations and concrete cracking and crushing is all taken into account. A series of numerical simulation technologies is studied, such as selecting element type, defining material model of steel and concrete, establishing global finite element model with discrete reinforced bars elements and stirrups elements, applying loads to the specimens, and setting solution controls option and solving. The investigation shows that ANSYS finite element software may simulate the behavior of RCS beam-column connections under static loading through reasonably selecting parameters, and the analytical results agree well with experimental ones.

Key words: composite structures; RCS frames; interior beam-column connections; steel beams; reinforced concrete columns; nonlinear finite element

近年来, 在组合结构中出现一种新型的结构形式, 即由钢筋混凝土柱和钢梁(RCS)组成的框架结构。柱子为压弯构件, 采用钢筋混凝土柱, 可利用混凝土受压性能好, 易于就地取材, 以及钢筋混凝土构件刚度大、耐久性和耐火性好的优点, 从而节

约钢材, 降低成本, 增加结构的稳定性。梁为受弯构件, 采用钢梁, 可利用钢材强度高, 以及钢结构构件质量轻、施工速度快的优点, 从而减小构件截面尺寸, 减轻结构自重, 降低房屋高度, 增大有效使用空间, 降低基础造价, 加快施工进度。工程应

收稿日期: 2007-06-06; 修改日期: 2008-07-23

基金项目: 校人才基金项目(RC0813)

作者简介: *申红侠(1969—), 女, 陕西人, 副教授, 博士, 从事钢结构和组合结构的研究(E-mail: shenhongxia88@126.com);

顾 强(1953—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 从事钢结构和组合结构的研究(E-mail: guqiang383@163.com).

用实践也表明,梁柱采用两种不同的材料,充分发挥了材料各自的优点,从选材上具有合理性和经济性。作为主要传力部件的 RCS 梁柱节点是 RCS 框架研究的关键问题。

美国、日本对 RCS 节点做了大量研究,并制定和完善了各自的“设计指南”^[1-15]。而我国对 RCS 节点的研究则很少^[16-17]。据文献报道^[9],在美日合作之前,美国做了 35 个节点试验,日本做了 400 多个节点试验。这些试验中,只有少数用于研究中柱节点的受力机理,大部分为对某一结构或某一种节点构造的检验性试验。因此,限制了对 RCS 梁柱节点性能的研究。考虑到此种情况,1993 年美日合作项目又做了 70 多个节点试验,主要研究在循环荷载作用下节点的构造、受力机理,以及设计模型的建立。这些研究有中节点、边节点,也有顶层中节点。有平面节点,也有空间节点。有单向受力,也有双向受力。有研究混凝土板作用,也有研究柱轴力作用。

上述研究的手段主要是试验,试验本身有一定的局限性。和试验相比较,有限单元法可节约经费,能更多地变换参数以达到充分研究 RCS 节点的目的;还可得到试验测不到的重要数据。本文借助 ANSYS 有限元分析软件,对 RCS 中柱节点进行三维非线性有限元分析,并和试验结果相比较。分析中考虑材料非线性以及混凝土的开裂与压碎。但运用 ANSYS 有限元软件计算 RCS 梁柱节点的极限承载力时,由于涉及到混凝土材料,再加上梁柱节点受力的复杂性,使得有限元的计算存在一定的难度。网格尺寸的确定、荷载子步的大小、材料模型的选取等都会影响计算结果的精度;混凝土的开裂和压碎使得计算难以收敛;单元类型的选取、网格尺寸的大小等又会影响计算速度。本文在此方面做点尝试。

1 RCS 中柱节点试验资料

文献[1]和文献[3]对 9 个 RCS 梁柱中节点进行了试验研究,试件被分为两组:试件 1—试件 2 为一组,试件 3—试件 9 为另一组。在第二组试验中,由于试件 4 和试件 5 只是面承板(FBP)厚度不同,试件 6、试件 8 和试件 9 为非典型节点构造,所以本文仅模拟试件 1—试件 2 和试件 3、试件 4、试件 7。

第一组试验主要确定 FBP 的潜能,试验结果用来设计其余试件。试件尺寸如图 1,柱子为 15in×

15in(380mm×380mm)的方柱,柱段长 8ft22in(3m)。梁为 W12×22(H305×102mm×6mm×13mm)型钢梁,梁段长 8ft12in(2.74m)。柱下端为固定铰,上端为可移动铰。采用梁端加载,加载点间距为 2.44m。柱中均配 8 根#9(直径 $\phi=28\text{mm}$)纵筋和#3($\phi=10\text{mm}$)箍筋。其中,节点域为两个 U 型箍,穿过钢梁腹板,间距 5in(125mm);其他为矩形闭合箍,间距 4in(100mm)。节点构造为:试件 1 仅钢梁穿过混凝土柱,无其他传力措施。试件 2 沿柱外边缘,在钢梁腹板上焊有 Gr50 7/16in×4in×11in(11mm×102mm×279mm)的 FBP 以调节点域内混凝土。

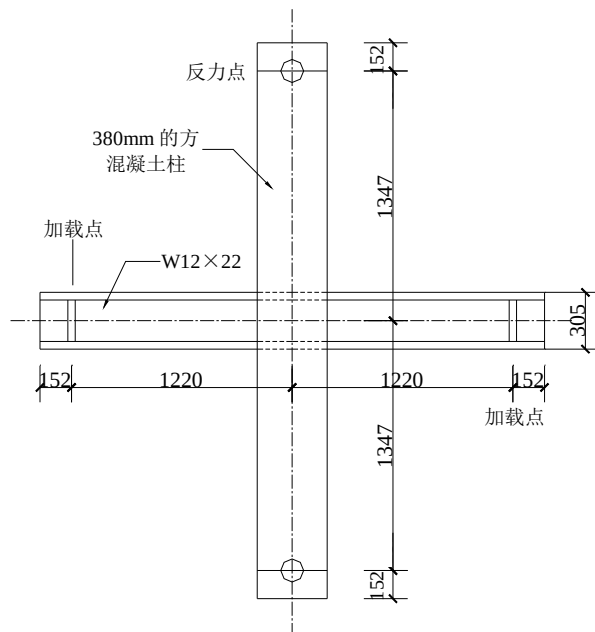


图 1 试件 1—试件 2 几何尺寸

Fig.1 Geometry dimensions of specimens 1-2

第二组试验主要研究 FBP 的厚度、宽度、构造,以及钢梁腹板厚度对节点承载力的影响。柱子为 20in×20in(508mm×508mm)的方柱,柱段长 12ft14in(4.01m)。梁为焊接工字形截面,翼缘为 3/4in×8in(19×203mm),钢材 Gr50,腹板为 1/4in×16in(6×406mm),钢材 A36。梁段长 16ft12in(5.18m),仍为梁端加载。柱中配有 12 根#10(直径 $\phi=32\text{mm}$)纵筋,箍筋节点域内为两个#3($\phi=10\text{mm}$)U 型箍筋和两个#3槽型箍筋,间距 4in(100mm)。其中,U 型箍筋穿过钢梁腹板。节点域附近为两个#3矩形箍筋,其余为 1 个#4 矩形箍筋和 1 个#3 矩形箍筋,间距 8in(200mm)。试件 3 为参考试件,无 FBP。试件 4 焊有 A363/8in×8in×16in(9.5mm×203mm×406mm)的 FBP。试件 7 研究 FBP 板宽的影响,设有 7/8in×12in×16in(22mm×305mm×406mm)FBP。限于篇幅,详细

的柱子配筋、节点构造,以及材料性质见文献[1]和文献[3]。

2 RCS 中柱节点有限元分析基本假定

在用 ANSYS 进行有限元模拟分析时,作如下基本假定。

1) 小变形。

虽然钢梁的刚度较小,变形较大,但本文的研究对象是“梁贯通”式 RCS 梁柱节点。钢梁包裹在混凝土之内,和混凝土形成了一个整体(即节点),刚度增大,变形减小。另外,在 ANSYS 软件中,大变形和混凝土压碎不能同时考虑,而 RCS 梁柱节点的破坏过程一般都是节点域混凝土先开裂,后钢梁屈服,最后混凝土被压碎而破坏。不考虑混凝土的压碎将会使计算结果偏高,故采用小变形假定。

2) 忽略钢筋、型钢和混凝土之间的粘结滑移影响。

由于在节点域内,沿柱外边缘设有 FBP。FBP 和梁的上翼缘、下翼缘、腹板焊接在一起,对中间混凝土形成很好的约束作用,使节点区滑移很小。试验证明,直至破坏,节点混凝土与型钢能较好的共同工作^[3-5]。文献[5]研究表明对于节点承压破坏,具有典型构造的节点,外部混凝土通常由剪切破坏起控制作用;对于节点剪切破坏,只有少数试件的外部混凝土强度是由纵筋的粘结滑移破坏起控制作用,大部分由剪切破坏起控制作用。并且认为文献[3]由于假定纵筋的粘结强度为 0(即完全发生粘结破坏)而使得强度设计公式很保守。因此,忽略节点区粘结滑移的影响。

3) 忽略纵筋的销栓作用。

纵筋的销栓作用对节点抗剪影响较小,故忽略不计。

4) 不考虑混凝土与时间有关的非线性,如徐变、收缩的影响。

3 建立有限元模型

3.1 单元类型

混凝土采用 Solid 65 单元^[18],钢筋采用 Link 8 单元。试件 1 和试件 2(1/2 比例)钢梁采用 Solid 45^[18]单元模拟,试件 3、试件 4、试件 7 则采用 Shell 181^[18]单元模拟。由于这些试件比例较大(2/3 比例),钢梁较长,而腹板又较薄,采用 Solid 45 单元,网格尺寸划分不能太大,致使单元数量较多,计算速度非

常缓慢,故改用 Shell 181 单元。

3.2 材料模型

混凝土本构关系采用非线性弹性理论模型^[19],破坏准则采用 Willam-Warnke 五参数破坏准则。运用 ANSYS 有限元软件定义混凝土材料,需输入混凝土的弹性模量 E_c 、泊松比 ν_c ,以定义混凝土材料在弹性阶段的本构关系;需输入单轴受压的应力-应变关系,以定义混凝土材料在非线性弹性阶段的本构关系;需输入裂缝张开时的剪力传递系数 β_t 、裂缝闭合时的剪力传递系数 β_c 、混凝土单轴抗拉强度 f_t 、混凝土单轴抗压强度 f_c ,以定义混凝土的破坏准则。输入参数见表 1。按美国规范, $E_c = 4733\sqrt{f_c}$ MPa, $f_t = 0.623\sqrt{f_c}$ MPa。 f_c 取实测值。

表 1 混凝土材料输入参数

Table 1 Import parameters of concrete material

试件	E_c /MPa	ν_c	β_t	β_c	f_t /MPa	f_c /MPa
1	23427	0.2	0.125	0.7	3.08	24.5
2	23427	0.2	0.125	0.7	3.08	24.5
3	26352	0.2	0.125	0.7	3.47	31
4	25763	0.2	0.125	0.7	3.39	29.63
7	24847	0.2	0.125	0.7	3.27	27.56

混凝土材料的本构关系对节点有限元分析结果有重大影响,如果所选用的本构关系不能很好地反映材料的各项力学性能指标,那么,其他计算再精确也无法反映节点的实际受力性能^[20]。因此,选择混凝土的本构关系成为有限元建模的关键问题。根据文献[21]的研究结果:节点域混凝土的主应力-等效单轴应变关系在主压应力达到峰值后,应力-应变关系基本为水平线。考虑到文中研究节点构造的特殊性,本文单轴受压的应力-应变关系采用 Hognestad 模型,上升段为抛物线,下降段为斜直线,如图 2。其方程^[20]为:

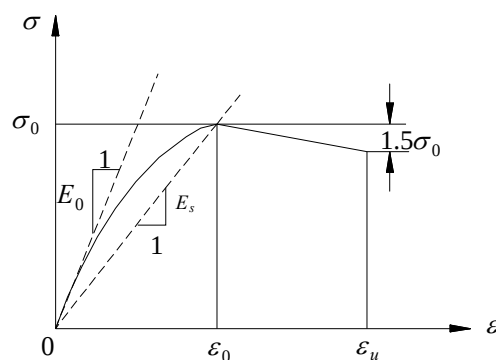


图 2 混凝土单轴受压的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve for concrete under axial compression force

$$\left\{\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma &= \sigma_0 \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \right], & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u\end{aligned}\right. \quad (1)$$

其中： $\varepsilon_0=0.002$ ， $\varepsilon_u=0.0038$ 。

但是，上述方程是基于混凝土圆柱体(或棱柱体)试件的轴心受压结果而获得的，在程序调试中发现直接应用到 RCS 梁柱节点荷载-位移关系的模拟分析中往往会使理论结果偏高，特别是进入非弹性阶段，如图 3。

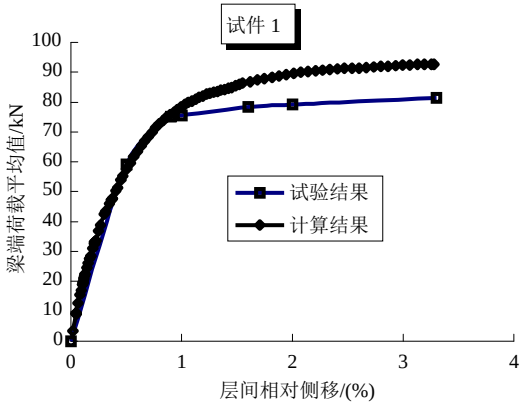


图 3 文中计算结果和试验结果比较
Fig.3 Comparison between calculated and experimental results

根据文献[3]、文献[22-24]的研究结果：节点域混凝土考虑约束对混凝土强度的影响，引入放大系数 k_c ；同时考虑开裂面对混凝土强度的影响，引入软化系数 β 。文献[24]建议，对内部混凝土(指节点区内钢梁上下翼缘之间的混凝土，以下相同)：当无横梁时， $k_c=2.0$ ；当有横梁时， $k_c=1.15$ 。对外部混凝土(指节点区钢梁上下翼缘之外的混凝土，以下相同)：约束由箍筋提供， k_c 按配有矩形箍筋的混凝土柱子计算。根据文献[21]，对中节点，由于受FBP的约束作用，软化系数 β 随着等效单轴压应变的增大，趋向于某一常数。该常数大致在 0.3-0.425 之间变化。二者同时考虑，节点域混凝土最大强度($k_c\beta f'_c$)的变化情况：无横梁时，对内部混凝土，在 $0.85f'_c - f'_c$ 之间变化；对外部混凝土，在 $0.6f'_c - f'_c$ 之间变化。本文计算中，对试件 1 和试件 3，内部混凝土取 $0.85 f'_c$ ，外部混凝土取 $0.7 f'_c$ ；对试件 2、试件 4 和试件 7，内部混凝土取 $1.1 f'_c$ ，外部混凝土取 $0.85 f'_c$ 。

钢材材料性质和试验实测材料性质相同，钢梁

腹板采用多线性随动强化模型(MKIN)，翼缘、FBP、纵筋和箍筋都采用双线性随动强化模型(BKIN)。单轴应力状态下的应力-应变关系如图 4。在 ANSYS 有限元软件中定义钢材材料性质，需输入钢材的弹性模量 E_1 、泊松比 ν_s ，以定义钢材在弹性阶段的本构关系；需输入屈服强度 f_y 和切线模量 E_2 ，以定义钢材在非弹性阶段的本构关系。钢材的弹性模量 $E_1=200000\text{MPa}$ 、泊松比 $\nu_s=0.3$ ，其他输入参数见表 2。

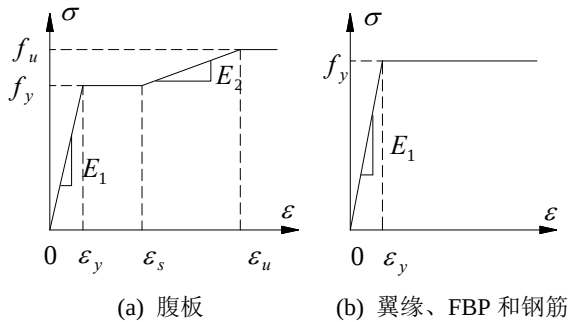


图 4 钢材单轴应力-应变关系

Fig.4 Stress-strain curve for steel

表 2 钢材材料输入参数

Table 2 Import parameters of steel

试件	材性	切线	特征应变值			钢材强度	
		模量/MPa	$\varepsilon_y/(‰)$	$\varepsilon_s/(‰)$	$\varepsilon_u/(‰)$	f_y	f_u
1-2	翼缘,FBP	0	1.8			360.6	
	腹板	1843.1	1.9	2.2	7.5	385.5	493.3
	#9 纵筋	0	2.1			428.5	
	#3 箍筋	0	2.1			428.5	
3,4,7	翼缘	0	1.7			348.6	
	腹板	2082.7	1.2	2.1	8.75	249.4	387.9
	试 4 FBP	0	1.5			299.0	
	试 7 FBP	0	2.0			405.8	
	#10 纵筋	0	2.3			452.7	
	#3 箍筋	0	2.2			447.9	
	#4 箍筋	0	2.1			424.4	

3.3 建立模型

- 1) 定义工作文件名(Jobname)、标题(Title)。
- 2) 在前处理器(PREP7)中定义单元类型、单元实常数和材料性质。
- 3) 创建几何实体模型并划分网格得到有限元模型。利用对称性，取 1/2 模型。先建立钢梁的实体模型，后建立混凝土柱的实体模型。在配有纵筋和箍筋的位置用工作平面切割混凝土柱实体，以便对钢筋进行单元划分。同时，切割钢梁翼缘、腹板和 FBP，以便和混凝土单元划分相一致。定义箍筋和纵筋单元尺寸并划分单元。根据箍筋和纵筋单元

尺寸划分混凝土单元。最后设置钢梁单元尺寸并映射划分网格。设置节点区钢梁单元数,以保持和节点区混凝土单元数相一致,而远离节点区单元尺寸设置较大,以加快计算速度。图5是典型的有限单元模型。

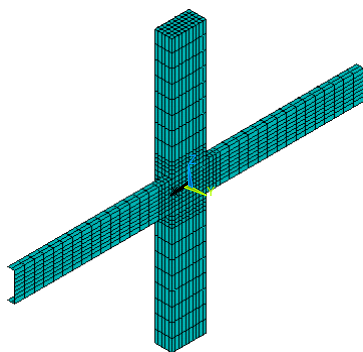


图5 典型的有限单元模型

Fig.5 Typical finite element model

3.4 施加荷载并求解

1) 进入 ANSYS 求解器。

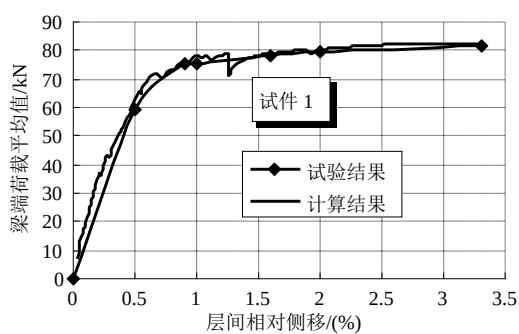
2) 定义分析的类型,并对求解选项进行设置。选取小变形静力分析,打开自动时间步,设定荷载步、子步数和保存的结果及频率。打开线性搜索,设置最大平衡迭代数,采用完全牛顿-拉斐逊迭代法。设置收敛准则。由于钢梁的刚度较小,位移较大,采用位移收敛准则很难收敛,故采用力收敛准则。选取力的二泛数,收敛容限为5%。

3) 施加荷载。和试验相同,在梁的两端采用位移加载。柱子上端约束 X 方向和 Y 方向的位移,下端约束 X 方向、 Y 方向和 Z 方向的位移。在对称平面内施加对称约束($UY=0$)。在钢梁和混凝土界面处耦合 X 、 Y 和 Z 三个方向的平移自由度。

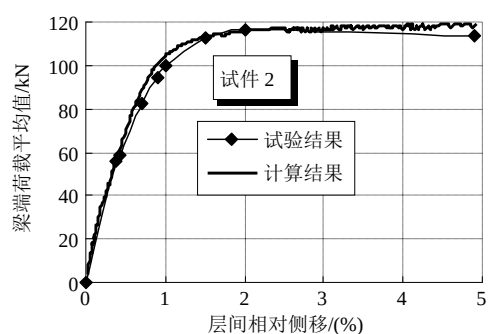
4) 保存数据文件,开始求解。

4 有限元计算结果和试验结果比较

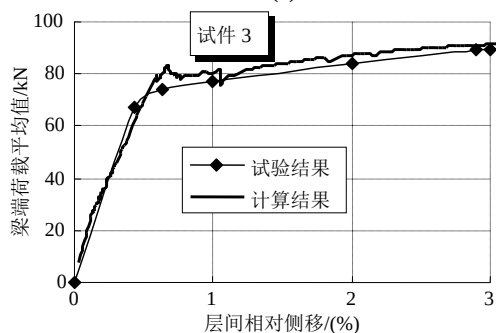
图6是各试件层间相对侧移和梁端荷载平均值的关系曲线。图6中层间相对侧移为柱子两端相对侧移与柱段长度之比,对梁端加载的情况,它等于梁两端加载点之间相对竖向位移与两加载点之间距离之比。由图可以看出,有限元计算结果普遍高于试验结果。但相差不是很大,二者吻合很好。由于未设FBP,试件1和试件3在腹板屈服以后刚度很低,致使计算很难收敛,此时关闭混凝土压碎,计算仍可以继续,所得荷载-变形曲线和试验结果也吻合很好,但不如试验曲线光滑。试件2、试件4、试件7都设有FBP,使内部混凝土受到约束,在腹板屈服以后混凝土仍具有较高的强度,计算收敛相对较容易,所得荷载-变形曲线也很光滑。在程序调试过程中,试件都分考虑混凝土压碎和不考虑混凝土压碎两种情况。计算结果表明,对试件1—试件4,不考虑混凝土压碎计算结果(图中未画出)比试验要高出很多。而对试件7(图6(e)),考虑混凝土



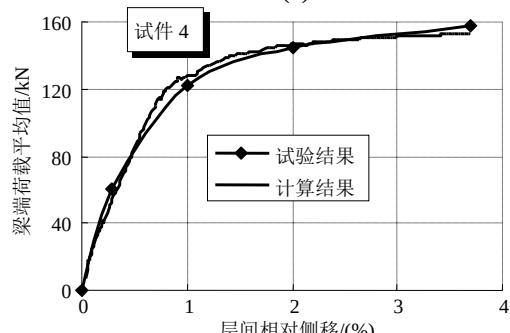
(a)



(b)



(c)



(d)

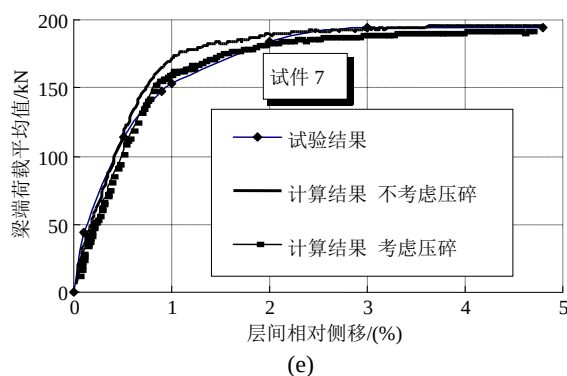


图 6 各试件荷载-变形曲线的比较

Fig.6 Comparison of load-deformation response for all specimens

土压碎和不考虑混凝土压碎, 计算结果相差不是太大。和试验结果相比, 在侧移为 0.7%—2%时, 不考虑混凝土压碎计算结果比试验高出较多, 其他吻合较好; 考虑混凝土压碎更接近试验结果。可能的原因是试件 7 设有宽的 FBP, 对内部混凝土的约束作用较大, 混凝土的实际强度较高, 破坏时压碎单元相对较少的缘故。另外, 试件 1—试件 2 钢梁采用 Solid 45 单元, 其他试件采用 Shell 181 单元, 两种单元都和试验吻合较好。

5 结论

分析结果表明: 通过合理设置参数, ANSYS 有限元软件能够模拟钢梁-钢筋混凝土柱梁柱节点在静力荷载作用下的性能, 并和试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] Shiekh T M, Deierlein G G. Beam-column moment connection for composite frames: Part 1 [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 2858—2876.
- [2] Deierlein G G, Shiekh T M. Beam-column moment connection for composite frames: Part 2 [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 2877—2896.
- [3] Shiekh T M. Moment connections between steel beams and concrete columns [D]. Austin: The University of Texas, 1987.
- [4] Deierlein Gregory Gerard. Design of moment connections for composite framed structures [D]. Austin: The University of Texas, 1988.
- [5] Ryoichi Kanno. Strength, deformation, and seismic resistance of joints between steel beams and reinforced concrete columns [D]. New York: Cornell University, 1993.
- [6] The ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. Guidelines for design of joints between steel beam and reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2330—2357.
- [7] Parra-Montesinos G, Weight J K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1113—1121.
- [8] Parra-Montesinos G, Weight J K. Modeling shear behavior of hybrid RCS beam-column connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(1): 3—11.
- [9] Gregory G Deierlein, Hiroshi Noguchi. Research on RC/SRC column systems [C]. 12WCEE, Auckland: 1AEE, 2000.
- [10] Gregory G Deierlein, Hiroshi Noguchi. Overview of U.S.-Japan research on seismic design of composite reinforced concrete and steel moment frame [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 361—367.
- [11] Joseph M Bracci, Walter P Moore Jr, Michael N Bugeja. Seismic design and constructability of RCS special moment frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 385—392.
- [12] Michael N Bugeja, Joseph M Bracci, Walter P Moore Jr. Seismic behavior of composite RCS frame systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(4): 429—435.
- [13] Lang Xuemei, Parra-Montesinos. Seismic behavior of reinforced concrete column-steel beam subassemblies and frame systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 310—319.
- [14] Hiroshi Kuramoto, Isao Nishiyama. Seismic performance and stress transferring mechanism of through-column-type joints for composite reinforced concrete and steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 352—360.
- [15] Luis B Fargier-Gabaldon, Gustavo J Parra-Montesinos. Behavior of reinforced concrete column-steel beam roof level T-connections under displacement reversals [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(7): 1041—1051.

(参考文献[16]—[24]转第 48 页)

- 数及其实现方法[J]. 工业建筑, 2003, 33(6): 10—13.
- Zhang Qin, Lou Wenjuan, Chen Yong. Objective functions and their implementing method of location optimum of viscoelastic dampers [J]. Industrial Construction, 2003, 33 (6): 10—13. (in Chinese)
- [12] 郑伟, 阎石, 莫巨华. 基于遗传算法的高层建筑MR阻尼器优化布置[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(6): 606—611.
- Zheng Wei, Yan Shi, Mo Juhua. Optimum installation of the MR dampers for the high-rise structures by genetic algorithm [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21(6): 606—611. (in Chinese)
- [13] 贝伟明, 李宏男. 磁流变阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(3): 73—78.
- Bei Weiming, Li Hongnan. Study on the optimal placement of magnetorheological dampers In structural control [J]. Earthquake Resistant engineering and Retrofitting, 2006, 28(3): 73—78. (in Chinese)
- [14] 冼巧玲, 周福霖, 成文山. 框架结构消能支撑的减震优化方法[J]. 世界地震工程, 1999, 15(2): 49—55.
- Xian Qiaoling, Zhou Fulin, Cheng Wenshan. Optimization of energy dissipation braces in frame structures [J]. World Information of Earthquake Engineering, 1999, 15(2): 49—55. (in Chinese)
- (上接第 42 页)
- [16] 杨建江, 郝志军. 钢梁-钢筋混凝土柱节点在低周反复荷载作用下受力性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 35—42.
- Yang Jianjiang, Hao Zhijun. Experimental study on behavior of steel beam-RC column joint under the reversed load [J]. Building Structure, 2001, 31(7): 35—42. (in Chinese)
- [17] 毛炜烽, 伍云天, 肖岩. 高强螺栓连接钢梁-混凝土柱组合节点的抗震性能[J]. 工业建筑, 2005, 35(11): 1—4.
- Mao Weifeng, Wu Yuntian, Xiao Yan. Experimental research on seismic behavior of bolted steel beam to RC column connections [J]. Industrial Construction, 2005, 35(11): 1—4. (in Chinese)
- [18] ANSYS Element Reference. Electronic release [M]. SAS IP, Inc., 1998.
- [19] ANSYS Theory Reference. Electronic release [M]. SAS IP, Inc., 1998.
- [20] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- Jiang Jianjing, Lu Xinzhen, Ye Lieping. Finite element analysis of concrete structure [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [21] Hiroshi Noguchi, Kazuhiro Uchida. Finite element method analysis of hybrid structural frames with reinforced concrete columns and steel beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 328—335.
- [22] 顾祥林, 孙飞飞. 混凝土结构的计算机仿真[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- Gu Xianglin, Sun Feifei. Calculator model of concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese)
- [23] 张大长, 韩丽婷, 孙伟民, 野口博. 节点加强后钢筋混凝土梁柱节点剪切性能的二维有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 98—106.
- Zhang Dachang, Han Liting, Sun Weimin, Ye Koubo. Studies on shear performance of reinforced concrete beam-column joint strengthened by a new method with two-dimensional finite element analysis [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 98—106. (in Chinese)
- [24] Liang Xuemei. Seismic behavior of RCS beam-column subassemblies and frame systems designed following a joint deformation-based capacity design approach [D]. Michigan: The University of Michigan, 2003.