文章编号: 1000-6869 (2008) 06-0075-09

钢管混凝土框架结构力学性能非线性有限元分析

王文达[1,2], 韩林海[2]
(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:在考虑材料非线性和几何非线性的基础上进行了钢管混凝土柱 钢梁平面框架结构力学性能的非线性有限元分析,核心混凝土采用考虑钢管约束效应的应力 应变关系,钢材采用二次塑流模型或线性强化模型,通过在有限元公式中引入几何刚度矩阵,并在荷载步中更新坐标描述二阶效应来反映框架结构的几何非线性效应。基于近似修正的拉格朗日表述来反映框架结构变形前后位形之间的关系,利用虚功原理建立相应的增量平衡方程,并采用位移增量法求解非线性有限元方程,理论计算结果得到试验结果的验证。分析表明,基于非线性纤维梁 柱单元理论的分析方法可以反映钢管混凝土框架在受力过程中构件屈服和塑性分别沿截面和杆长两个方向扩展的分布塑性特征,并考虑初始缺陷、残余应力等,因此可较好地反映钢管混凝土框架的力学性能。在此基础上对影响钢管混凝土框架力学性能的主要因素进行了参数分析,分析的具体结果可供有关研究或工程应用参考。

关键词:钢管混凝土结构; 框架结构; 材料非线性; 几何非线性; 有限元; 参数分析
中图分类号: TU528. 59 **文献标识码**: A

Nonlinear finite element analysis on mechanical performance of concrete filled steel tubular frame structure

WANG Wenda[1,2], HAN Linhai[2]
(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The nonlinear finite element analysis (FEA) on mechanical behaviour of composite frame which composed of concrete filled steel tubular (CFST) columns and steel beam under sustaining axial load and lateral loads was carried out. The material and geometric nonlinearities were considered. The stress-strain relationship of core concrete was given under confinement effect by the outside steel tubes. The stress-strain curves was second-order elastic-plastic model or linear aggrandizement model. The geometric stiffness matrix and updated coordinate strategy were adopted to describe the geometric nonlinearity of the frame. The relationship between displacements of the CFST frame before and after deformation was based on Approximate Updated Lagrange (AUL) description. The increment equilibrium equations were found on virtual work principle. The nonlinear equations were solved by displacement increment method. The calculated results agree well with the tested results. The results show that the finite element analysis based on fiber beam-column elements was reasonable to predict the performance of CFST frames because the method can consider the yield and plastic extending within the sections and along the elements. The initial imperfect and residual stress can be included too. Parametric study was performed based on the FEA model and some useful conclusions were obtained for correlative researcher and designer.

Keywords: concrete filled steel tubular (CFST); frame structure; material nonlinear; geometric nonlinear; finite element analysis (FEA); parametric study

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20070003087),中国博士后基金资助项目 (20080430404)。
作者简介:王文达 (1976—),男,甘肃清水人,工学博士,副教授。
收稿日期: 2007年 3月

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引言

钢管混凝土结构由于其承载力高、塑性韧性好、耐火性能较好、施工速度快、综合效益好等工程特点而在高层、超高层建筑和多高层住宅中得到广泛应用。钢管混凝土柱与钢梁(或钢-混凝土组合梁)组成的框架结构是钢管混凝土结构中最常用的结构形式之一。以往对钢管混凝土构件的研究较多,而对钢管混凝土柱-钢梁组成的框架体系整体性能的研究并不多,作为钢管混凝土框架结构中的框架柱,其力学性能要受到体系中其他构件的约束和影响,因此要合理地了解钢管混凝土构件在结构体系中的力学性能,进行结构体系的试验研究和理论分析十分必要。

钢管混凝土柱-钢梁框架结构的低周往复荷载试验研究主要有:Matsui[1]、Morino等[2]、Kawaguchi等[3]、张文福[4]及李斌等[5]分别进行了单层单跨钢管混凝土柱-工字钢梁平面框架的试验研究;王来等[6]和许成祥[7]分别进行了1榀两跨三层方形和圆形钢管混凝土柱-钢梁平面框架只在顶层施加水平往复荷载的试验研究;王文达等[8]完成了12榀单层单跨圆形和方形截面钢管混凝土柱-钢梁平面框架的试验研究;孙修礼[9]完成了1榀单跨两层的钢筋混凝土梁-钢管混凝土柱外加强环板节点连接的1/4框架模型试件的试验研究。

对钢管混凝土框架结构力学性能的理论分析相对较少。张文福[4]采用切线刚度矩阵方法,进行了单层钢管混凝土框架荷载-位移全过程分析。丁阳等[10]用有限元程序ANSYS对文献[7]中的钢管混凝土框架试验进行了非线性有限元模拟。王铁成等[11]在王来等[6]试验结果的基础上,用ANSYS软件考察了轴压比对方钢管混凝土框架延性的影响。聂建国等[12]用SAP2000软件对某10层方钢管混凝土框架结构进行了pushover分析。

为了获取更大参数范围内钢管混凝土框架结构的力学性能特点和参数影响规律,建立合理有效的钢管混凝土框架的理论计算模型和实用计算方法是必要的。本文基于非线性纤维梁-柱理论,建立了考虑材料非线性和几何非线性的有限元模型,对钢管混凝土框架的荷载-位移全过程进行了数值模拟,理论模型得到了试验结果的验证。基于理论模型在较大参数范围内进行了参数分析,获得了钢管混凝土框架的力学性能特点和参数影响规律,可为相关研究和工程设计提供参考。

1 有限元模型的建立与求解

框架结构的理论分析主要考虑几何非线性和材料非线性。几何非线性将使得框架中产生P-Δ效应,这种效应可通过二阶分析来反应,可在有限元公式中利用几何刚度矩阵的变化来考虑,并在荷载步中更新坐标以使增量荷载变形响应能充分描述二阶效应(Yang等[13])。材料非线性主要是材料应力-应变呈非线性的情况。对于钢管混凝土框架而言,材料的非线性主要来自于当截面弯矩从初始屈服弯矩增加到塑性弯矩时,屈服沿截面扩展(塑性化)和沿杆件长度扩展(塑性区)。框架结构的材料非线性分析,根据所要求的精度和计算成本,主要有两种材料非线性模型(Chen等[14]):第一类模型称为集中塑性模型(塑性铰模型),这种模型忽略了截面和杆件长度方向产生屈服的扩展过程,规定杆件只在特定的截面产生塑性铰,而在其余部分仍处于弹性范围,即为弹性-塑性铰法;第二类模型为更为精确的分布塑性模型(塑性区模型),考虑了材料屈服沿截面和沿杆长两个方向扩展的情况,并且考虑材料的实际弹塑性性能,包括屈服后的硬化等特性,这种方法即为塑性区分析方法。显然,第二类模型的分析成本要远高于第一类模型。

为了精确了解钢管混凝土框架的力学性能,钢管混凝土框架的非线性分析须采用考虑几何非线性和材料非线性的二阶塑性区方法,考虑杆件截面上和长度上的分布塑性的效应。二阶塑性区模型主要包括两种方法[14]:一种是基于非线性纤维梁-柱理论,将结构构件沿长度方向离散为单元,并把截面划分成纤维单元,构件结点处的变形通过数值积分获得,在每一荷载步更新坐标以使增量荷载变形响应能充分描述二阶效应。由于纤维划分很小,单元内的残余应力可假定为常数,因此可以直接跟踪纤维单元内的应力状态以反映塑性的渐变发展。当任一单元形心处的正应力达到材料单轴应力强度,即认为此单元屈服,分析结果的精度与杆件和截面上划分的单元数目多少有关。另一种是基于塑性变形理论的三维单元模型,当单元屈服时,在增量应力-应变关系中用弹塑性本构关系矩阵取代弹性矩阵,可以同时考虑单元多向应力状态对塑性发展的影响、几何缺陷及残余应力等,但需要采用大量的三维单元来模拟,并运用复杂的数值积分来计算弹塑性刚度矩阵,计算量大。由于塑性区模型分析中直接包含了分布塑性、残余应力、初始几何缺陷及二阶效应等,因此得到的是结构或构件的真实承载力,可不必对结构构件进行承载力验算。

本文基于非线性纤维梁-柱单元理论,选用相应的钢材和核心混凝土的本构关系,建立了考虑分布塑性特性的有限元模型,在此基础上进行钢管混凝土框架结构单调加载时荷载-位移曲线全过程分析。

1.1 基本假定

对钢管混凝土框架结构进行非线性分析时的基本假定如下:

(1) 截面的应变状态符合平截面假定;

(2) 核心混凝土与钢管之间应变协调;

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) 剪切变形很小,可以忽略不计;

(4) 不考虑出平面外的荷载与位移;

(5) 方 (矩)形钢管,考虑钢管的局部屈曲影响,具体参见文献[15];

(6) 对于拼焊而成的方 (矩)形钢管,需考虑焊接残余应力影响,残余应力分布模型见文献[15]。

1.2 材料本构关系的选取

在钢管混凝土中,由于钢管对混凝土的约束作用,核心混凝土力学性能要发生相应的变化,从而使得钢管混凝土中核心混凝土的受力更加复杂。本文核心混凝土的单轴受压应力 (σ)-应变 (ε)关系采用文献[15]中的考虑钢管约束效应的核心混凝土模型,如图 1a所示,其中 ξ为约束效应系数 (图 1a中的 ξ_0 的取值,圆钢管混凝土约为 1.12,方 (矩)形钢管混凝土约为 4.5),具体表达式如下

对于圆钢管混凝土

$$y = 2x - x^2 \qquad (x \le 1) \qquad (1a)$$

$$y = \begin{cases} 1 + q\,(x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \ge 1.12) \\ \dfrac{x}{\beta(x-1)^2 + x} & (\xi < 1.12) \end{cases} \qquad (x > 1) \qquad (1b)$$

对于方钢管混凝土

$$y = 2x - x^2 \qquad (x \le 1) \qquad (2a)$$

$$y = \frac{x}{\beta\,(x-1)^{\eta} + x} \qquad (x > 1) \qquad (2b)$$

式中, $x = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, $y = \dfrac{\sigma}{\sigma_0}$, ε和 σ分别为混凝土的应变和应力, ε_0、σ_0、q、β、η均为计算参数, 具体表达式可参见文献[15]。

对于在单调荷载作用下的受拉混凝土,其应力 (σ_c)-应变 (ε_c)关系采用沈聚敏等[16]提供的下列应力-应变关系

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & (\varepsilon \le \varepsilon_p) \\ \dfrac{x}{0.31\sigma_p\,(x-1)^{1.7} + x} & (\varepsilon > \varepsilon_p) \end{cases} \qquad (3)$$

式中, $y = \sigma_c/\sigma_p$; $x = \varepsilon_c/\varepsilon_p$; σ_p 为峰值拉应力, $\sigma_p = 0.26\,(1.25 f_c')^{2/3}$; ε_p 为峰值拉应力所对应的应变, $\varepsilon_p = 43.1\delta_p$, f_c'为混凝土圆柱体抗压强度。

对于低碳软钢,钢材的应力-应变关系曲线采用二次塑流模型,如图 1b所示,高强钢材选用图 1c所示的双线性强化模型,强化段的模量可取为 $0.01\,E_s$, E_s为钢材的弹性模量。

1.3 非线性有限元方程的建立

钢管混凝土框架的非线性分析可在截面层次和单元纵轴层次分别建立有限元表达式求解。当为等截面时,在截面层次上将构件长度方向上各积分控制点处截面分割为若干微单元,并将单元分为若干离散的截面,这些截面均位于单元列式的数值积分控制点上,框架结构的离散如图 2a所示。

为考虑框架单元内材料非线性特征,截面又被进一步划分为一系列的材料单元。每一个材料单元的几何特性由它的面积和 y坐标 (即距形心轴的距离)定义。假定在每一个材料单元内 (如果面积足够小)的应力均匀分布,大小与材料单元中心的应力相同,方向沿杆件轴线,这样材料单元内的应力-应变全曲线即可采用图 1所示的材料本构关系来描述。确定了微单元形心的几何特性和相应的材料切线模量,然后利用求得的材料切线模量和相应的单元几何特性确定各个单元的贡献,最后将各单元的贡献迭加,从而获得截面切线刚度矩阵 $[D_t]$。当钢管混凝土构件为对称截面时,可选取一半截面进行。钢管混凝土柱及钢梁截面的单元划分分别如图 2b～2d所示。

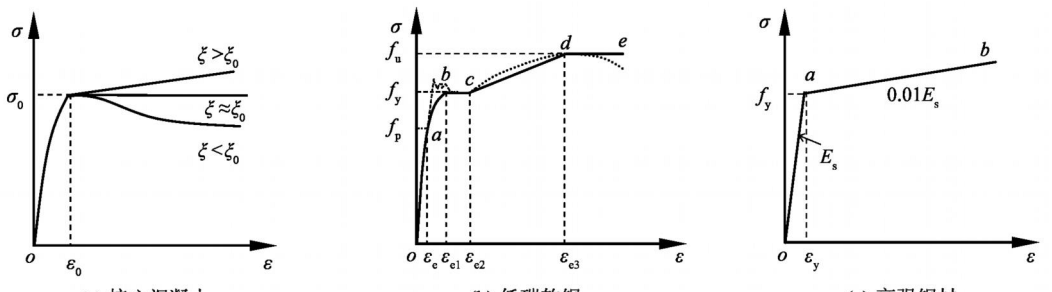
钢管混凝土中的混凝土和钢材当处于弹性状态时,截面中任意点的轴向应变 (假设轴向为 x方向时)可表达为

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \phi_y z - \phi_z y \qquad (4)$$

式中, $\varepsilon(y, z)$ 是截面中任意点的应变; ε_0 是坐标原点处的应变; ϕ_y 和 ϕ_z 分别为绕 y轴和 z轴的曲率。

上式表示成矩阵形式

$$\varepsilon(y, z) = \begin{bmatrix} 1 & z & -y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} = \{\vec{y}\}^T \{\vec{\varepsilon}\} \qquad (5)$$



(a) 核心混凝土　(b) 低碳软钢　(c) 高强钢材

图 1 钢材和核心混凝土的 σ-ε关系

Fig 1 Stress-strain relationship curves of steel and core concrete

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

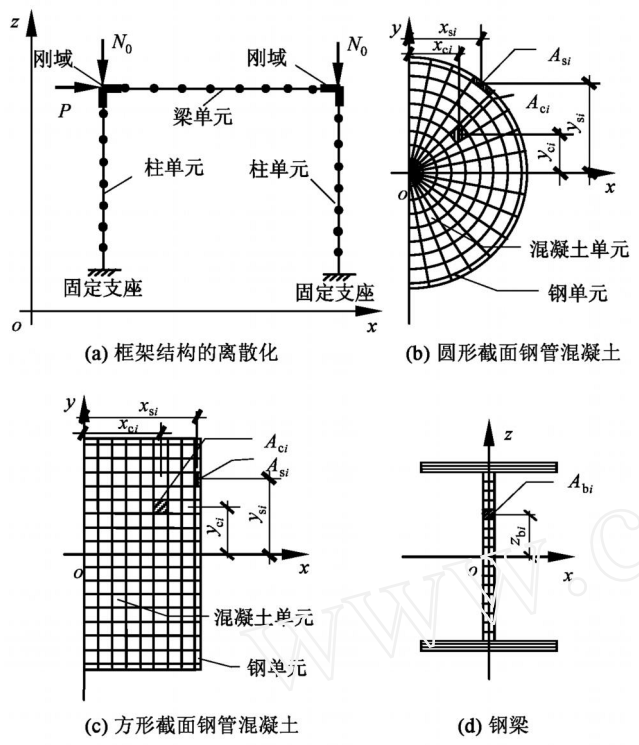


图 2 框架离散及纤维梁-柱单元截面划分示意

Fig 2 Cross-section discretization of fiber beam-column element and CFST frame

对于弹性材料,据虎克定律,应力与应变的关系为

$$\sigma(y,z) = E\cdot\varepsilon(y,z) = E\cdot\{\vec{y}\}^{T}\{\vec{\varepsilon}\} \tag{6}$$

将式(4)代入单元截面的内力平衡方程,并代入式(5)、(6),经整理得

$$\{\vec{\sigma}\} = \left(E_s\iint_A \{\vec{y}\}\cdot\{\vec{y}\}^{T}\mathrm{d}A_s + E_c\iint_A \{\vec{y}\}\cdot\{\vec{y}\}^{T}\mathrm{d}A_c\right)\{\vec{\varepsilon}\} \tag{7}$$

式中,$\{\vec{y}\}^{T} = [1\quad z\quad -y]$,$\{\vec{\varepsilon}\} = [\varepsilon_0\quad \phi_y\quad \phi_z]^{T}$,$\{\vec{\sigma}\} = [N\quad M_y\quad M_z]^{T}$,$\{\vec{\varepsilon}\}$ 为截面的广义应变向量;$\{\vec{\sigma}\}$ 为截面的广义应力向量;E_s、E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量。

由于钢管混凝土结构截面由钢管和混凝土两部分组成,式(7)中截面内力平衡方程中分别包括钢管单元和混凝土单元的贡献。

对于线性情况,式(7)还可以表达为如下简明的形式

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_c\right)\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \tag{8}$$

表示成矩阵形式为

$$\{\vec{\sigma}\} = [D]\{\vec{\varepsilon}\} \tag{9}$$

式中,A为材料截面的面积;E为材料的弹性模量;S_y、S_z 分别为材料截面对 y、z轴的面积矩;J_{yy}、J_{zz} 分别为材料截面对 y、z轴的惯性矩;J_{yz} 为材料截面的极惯性矩;$[D]$ 为钢管混凝土截面线性刚度矩阵。

当钢管和混凝土进入非线性阶段时,材料本构方程和相应的截面刚度矩阵比线性时复杂。本文采用切线刚度矩阵方式表达钢管混凝土截面的非线性刚度矩阵,首先建立截面增量平衡方程,然后推导截面切线刚度矩阵的表达式。

由线性分析可知,钢管混凝土截面的内力可以表达为

$$\{\vec{\sigma}\} = \iint_A \{\vec{y}\}\,\sigma(y,z)\,\mathrm{d}A \tag{10}$$

根据切线刚度矩阵的定义,有

$$\delta\{\vec{\sigma}\} = \iint_A \{\vec{y}\}\cdot\delta\sigma(y,z)\,\mathrm{d}A \tag{11}$$

各参数代入并化简,可用矩阵表示如下

$$\delta\{\vec{\sigma}\} = [D_t]\,\delta\{\vec{\varepsilon}\} \tag{12}$$

其中,$[D_t]$为钢管混凝土截面的非线性切线刚度矩阵,它由钢管和核心混凝土两部分组成。

式(12)即为钢管混凝土截面的非弹性刚度方程,也是以矩阵形式表达的截面增量平衡方程,它表达了截面应力(轴力和弯矩)微小增量与应变(轴向应变和曲率)微小增量之间应有的刚度关系。

根据式(5),截面任意点应变的增量为

$$\delta\varepsilon(y,z) = \{\vec{y}\}^{T}\cdot\delta\{\vec{\varepsilon}\} \tag{13}$$

如果材料的切线模量 $E_t(y,z)$ 已知,则截面任意点应力增量可以表达为

$$\delta\sigma(y,z) = E_t(y,z)\cdot\delta\varepsilon(y,z) \tag{14}$$

将式(13)和式(14)代入式(12)可得

$$\delta\{\vec{\sigma}\} = \iint_A \{\vec{y}\}\cdot\delta\sigma(y,z)\,\mathrm{d}A = \left(\iint_A E_t(y,z)\cdot\{\vec{y}\}\cdot\{\vec{y}\}^{T}\cdot\mathrm{d}A\right)\cdot\delta\{\vec{\varepsilon}\} \tag{15}$$

对比式(15)和式(12),可见

$$[D_t] = \iint_A E_t(y,z)\cdot\{\vec{y}\}\cdot\{\vec{y}\}^{T}\cdot\mathrm{d}A \tag{16}$$

式(16)可参照线性情况改写为(同样为钢管与混凝土两部分的叠加)

$$[D_t] = \begin{bmatrix} E_t(y,z)A & E_t(y,z)S_y & -E_t(y,z)S_z \\ E_t(y,z)S_y & E_t(y,z)J_{yy} & -E_t(y,z)J_{yz} \\ E_t(y,z)S_y & -E_t(y,z)J_{yz} & E_t(y,z)J_{zz} \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} E_t(y,z)A & E_t(y,z)S_y & -E_t(y,z)S_z \\ E_t(y,z)S_y & E_t(y,z)J_{yy} & -E_t(y,z)J_{yz} \\ E_t(y,z)S_y & -E_t(y,z)J_{yz} & E_t(y,z)J_{zz} \end{bmatrix}_c \tag{17}$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中，A、S_y、S_z、J_{yy}、J_{zz}、J_{yz}含义同前，$E_t(y, z)$是反映材料非线性的切线模量。

式(17)即为钢管混凝土截面非线性切线刚度矩阵，它是进行钢管混凝土截面非线性分析的基本矩阵。可见，当 $E_t(y, z) = E$，即为常数时，式(15)与式(9)完全一致，即变为线性分析情况。当 $E_t(y, z)$ 不是常数时，切线刚度矩阵为非线性，式(17)中的各个系数必须采用数值积分的方法获得。

钢梁为单一材料，因此其非线性刚度矩阵形式相对较为简单，在上述方程中只需考虑相应的钢单元即可。

1.4 非线性有限元方程的求解

采用近似修正的拉格朗日表述来描述结构变形前后的位形之间的对应关系[13]。同时，为了反映应变和位移间的非线性关系，采用 Green应变张量表述，对于应力的描述则采用第二类 Piola-Kirchhoff应力[13]。

非线性单元特性矩阵和节点力向量须通过数值积分来获得，在求解时采用了两个层次上不同的数值积分方法，在截面上采用合成法，在杆件长度上采用 6点 Gauss积分法。采用位移增量法求解非线性有限元方程组。

钢管混凝土框架的梁柱构件通过节点连接，分析时应考虑框架梁-柱节点连接形式对框架刚度和强度的影响。对于工程中常用的加强环式刚性节点可按照结构分析中的“刚域”来处理(图 2a)，参考吕西林等[17]的方法，考虑节点刚域对框架结构变形和内力的影响，将净跨的单元刚度矩阵移向刚域端部处，形成带刚域梁-柱单元刚度矩阵代入有限元方程中求解即可。

2 算例分析

钢管混凝土柱-钢梁框架结构荷载-变形关系的计算过程可归纳如下：

(1) 对钢管混凝土框架离散化，并输入总体控制信息、几何及材料信息等；

(2) 求解钢管混凝土截面的线性刚度矩阵，建立其线性刚度方程；

(3) 求解钢管混凝土截面的非线性刚度矩阵，采用数值积分方法确定其参数并建立其非线性刚度方程；

(4) 采用位移增量法求解非线性方程。

基于上述理论模型，编制了进行钢管混凝土框架结构荷载-位移曲线全过程分析的非线性有限元程序，利用此程序分别对文献[3]和文献[5]中单层单跨方形及圆形钢管混凝土柱-钢梁框架试件进行了分析。试件详细参数见表 1。理论计算单调加载曲线与试验滞回曲线的骨架线的比较分别如图 3a、3b所示。可见，理论计算曲线和试验结果总体上吻合较好。

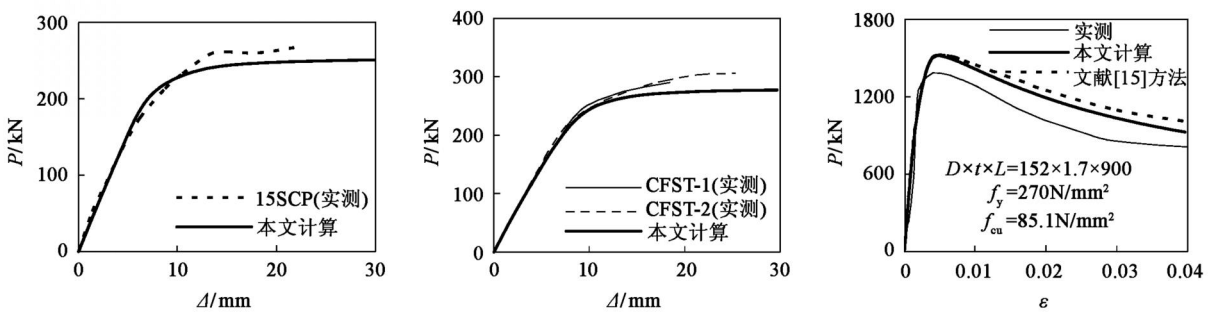
本文程序还可计算钢管混凝土构件的荷载-变形全曲线，图 3c还给出了文献[18]中钢管混凝土轴压短柱的比较，可以看出计算结果与文献[15]中纤维模型法吻合良好，且与试验结果总体上吻合较好。

利用本文程序对文献[8]中钢管混凝土框架试验试件进行了荷载-位移全过程模拟，部分理论计算单调加载曲线与试验实测骨架线的对比如图 4所示，可见理论计算与试验结果总体上吻合较好。

表 1 文献[3]和文献[5]中试件参数

Table 1 Specimen information of references [3] and [5]

试件来源	框架跨度×高度 m	柱截面 mm	工字形钢梁截面 $H\times B\times t_w\times t_f$ /mm	柱钢材强度 f_y /MPa	混凝土强度 f_c /MPa	梁钢材强度 f_y /MPa	柱轴压力 N_0 /kN
文献[3]	1.5×1.0	□125×5.8	125×150×16×25	403.3	18.55	400.0	200
文献[5]	1.8×1.2	Φ219×8.0	140×80×5.5×9.1	331.6	24.06	331.6	400



(a) 文献[3]中框架　(b) 文献[5]中框架　(c) 文献[18]轴压短柱

图 3 钢管混凝土框架及轴压短柱荷载-变形曲线计算结果与试验结果比较

Fig 3 Comparison of calculated load versus displacement theoretical curves with tested curves

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

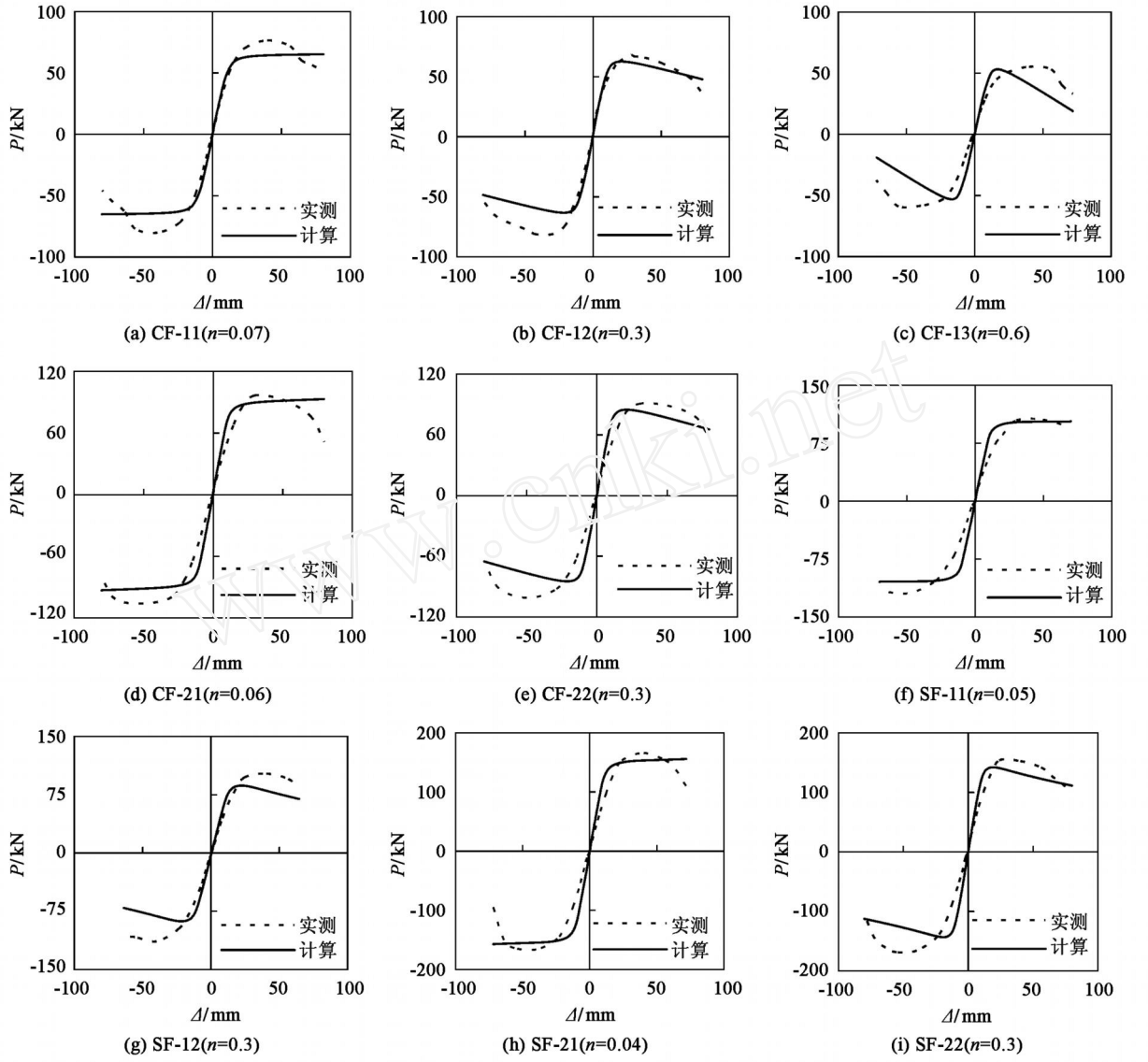


图 4 文献[8]中框架试验试件 P-Δ骨架关系曲线与理论计算曲线对比

Fig 4 Comparisons of P-Δ envelop curves with theoretical and tested results of CFST frames in reference[8]

3 参数分析

基于以上分析,利用本文程序对影响钢管混凝土框架力学性能的主要因素进行参数分析。具体选取参数如下:钢管混凝土柱截面含钢率 α、柱钢材强度 f_y、混凝土强度 f_{cu}、柱轴压比 n、柱长细比 λ、梁柱线刚度比 k、梁柱强度比 k_m。参数分析依据工程常用参数范围进行,即 α = 0.05～0.20, f_y = 235～420N/mm^2, f_{cu} = 30～90N/mm^2, n = 0～0.9, λ = 20～80, k = 0.25～2.00, k_m = 0.4～0.8。

算例基本条件为: D = 400mm(圆柱)或 B = 400mm(方柱),Q345钢材,C60混凝土, n = 0.4, α = 0.1,框架柱高度 H = 3000mm,框架梁跨度 L = 6000mm,框架梁的尺寸需满足局部稳定等相关构造要求,Q345钢材, k_m = 0.8,且依据其抗弯承载力 M_{yb} 和构造要求来确定框架梁几何尺寸。算例的单元离散和截面划分如图 2所示。圆钢管混凝土柱框架与方钢管混凝土柱框架规律类似,因此本文只给出方钢管混凝土框架参数分析结果。

3.1 柱截面含钢率

图 5所示为柱截面含钢率 α对方钢管混凝土框架 P-Δ关系的影响。可见,随着 α的提高,框架弹性阶段刚度和水平承载力都有所提高,下降段的下降幅度也略有减小,但 α总体上主要影响曲线的数值,对 P-Δ曲线的形状影响则很小。

3.2 柱钢材强度

图 6所示为柱钢材强度 f_y 对框架 P-Δ关系的影响。可以看出, f_y 对 P-Δ骨架线的初始阶段和下降段的形状影响不大,但对弹性阶段后期进入弹塑性阶段的刚度有一定的影响,随着 f_y 的增大,钢管混凝土框架柱的约束

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

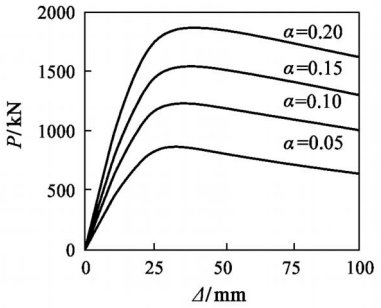


图 5　含钢率对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 5　Influence of steel ratio on P-Δ curves

效应系数提高,框架的水平承载力和接近进入弹塑性状态时的刚度有所提高,但位移延性有减小的趋势。

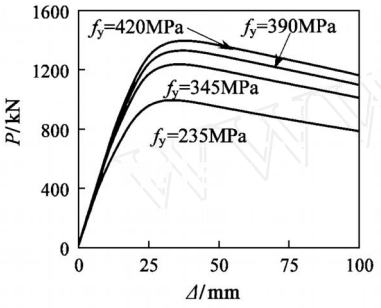


图 6　柱钢材强度对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 6　Influence of steel strength on P-Δ curves

3.3　混凝土强度

图 7所示为混凝土强度 f_{cu} 对框架 P-Δ 关系的影响。可见, f_{cu} 的改变对框架弹性刚度和水平承载力有一定的影响,随着 f_{cu} 的增大,框架的弹性刚度和承载力都增大,但曲线下降趋势变得更为明显,即框架的位移延性有减小的趋势。

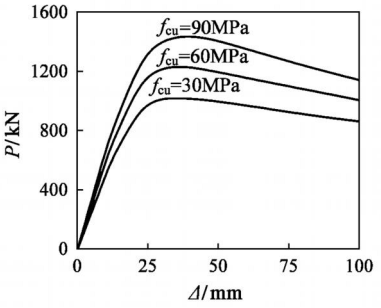


图 7　混凝土强度对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 7　Influence of concrete strength on P-Δ curves

3.4　轴压比

图 8给出了轴压比 n 对框架 P-Δ 关系的影响。可见, n 对曲线的形状影响较大: n 越大,框架水平承载力越小,强化阶段的刚度也越小。当 n 达到一定数值时(如 $n>0.2$ 时),曲线会出现下降段,且下降段的下降幅度随 n 的增加而增大,框架的位移延性则越来越小。当 n 较小时, n 对曲线弹性阶段的刚度几乎没有影响,这是因为在弹性阶段构件的变形很小, P-Δ 效应并不明显,而且随着 n 的增大,核心混凝土开裂面积会减少,这一因素又会使框架的刚度略有增加。但 $n>0.5$ 时,框架的弹性阶段刚度随 n 的增大有明显的下降。

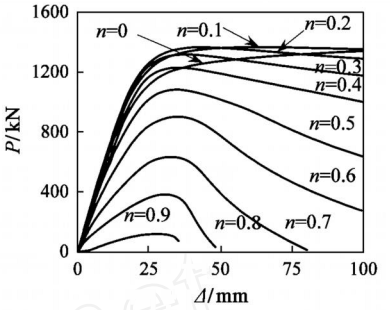


图 8　轴压比对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 8　Influence of axial load level on P-Δ curves

3.5　柱长细比

图 9所示为长细比 λ 对框架 P-Δ 关系的影响,可见, λ 不仅影响曲线的数值,还会影响曲线的形状。随着 λ 增加弹性阶段和强化阶段的刚度越来越小,水平承载力也有较大幅度减小。

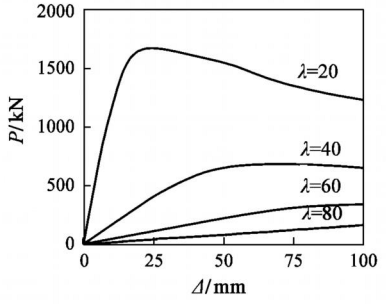


图 9　长细比对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 9　Influence of slendemess ratio on P-Δ curves

3.6　梁柱线刚度比

梁柱线刚度比反映了框架梁对框架柱的约束程度。图 10所示为梁柱线刚度比 k 对框架 P-Δ 关系的影响,可见, k 对框架承载力和刚度有一定的影响,随着 k 的增加,框架的弹性刚度有所提高,但承载力增加并不明显。本文算例中,当 $k>0.5$ 后, k 的增加对框架的承载力和刚度的影响均不明显。

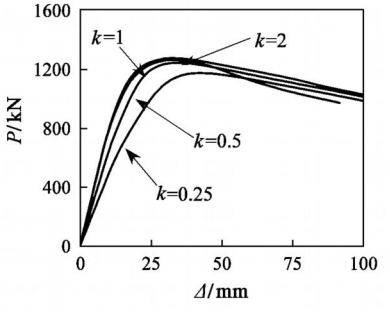


图 10　梁柱线刚度比对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 10　Influence of beam to column linear stiffness ratio on P-Δ curves

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.7 梁柱强度比

梁柱强度比 k_m 反映了梁柱节点处弹塑性的发展及塑性铰的出现顺序。由于一般框架设计中都要求满足强柱弱梁,因此本文参数分析中的梁柱强度比最大到 $k_m=0.8$。本算例中通过改变梁的截面尺寸以改变梁柱强度比。图 11所示为梁柱强度比 k_m 对框架 P-Δ 关系的影响。可见,随着 k_m 的增加,框架的弹性刚度和水平承载力都有较明显地提高,但 k_m 对框架延性没有明显影响。

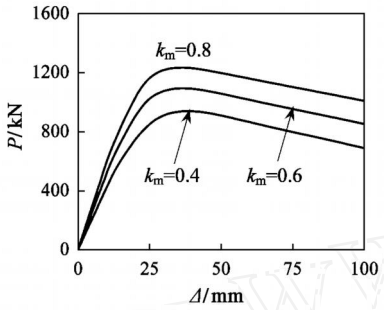


图 11 梁柱强度比对框架 P-Δ 关系的影响

Fig 11 Influence of beam to column strength ratio on P-Δ curves

4 结论

基于本文研究,可初步得到以下结论:

(1)在综合考虑结构几何非线性和材料非线性的基础上,基于非线性纤维梁-柱单元理论,进行了钢管混凝土框架荷载-位移非线性全过程数值模拟,理论计算结果得到了试验的验证。

(2)钢管混凝土框架的水平承载力随着柱截面含钢率、钢管的屈服极限、混凝土强度的提高而提高。

(3)框架柱轴压比和长细比对框架的水平承载能力有明显的影响。轴压比越大框架水平承载力越小,强化阶段刚度也越小。长细比越大,框架的水平承载力越小,强化阶段的刚度也越小,弹性刚度也有明显降低。

(4)随着梁柱线刚度比增加,框架的水平承载力也有相应提高,但提高幅度不大,同时弹性阶段的刚度也有提高。随着梁柱强度比的增加,框架的极限承载力和弹性刚度均有明显提高。

参 考 文 献

[1] Matsui C. Strength and behavior of frames with concrete filled square steel tubular columns under earthquake loading [C]// Proceeding of 1st International Specialty Conference on CFST. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1985: 143-146.

[2] Morino S, Kawaguchi J, Yasuzaki C, Kanazawa S. Behavior of concrete filled steel tubular three-dimensional subassemblages [C]// Proceeding of the Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete II. Potosi, USA: ASCE, 1993: 726-741.

[3] Kawaguchi J, Morino S, Sugimoto T. Elasto-plastic behavior of concrete-filled steel tubular frames [C]// Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Steel and Concrete Composite Construction III. New York, USA: ASCE, 1997: 272-281.

[4] 张文福. 单层钢管混凝土框架恢复力特性研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2000. (Zhang Wenfu. Research on resilience performance of single floor concrete-filled steel tubular frame [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2000. (in Chinese))

[5] 李斌,薛刚,张园. 钢管混凝土框架结构抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 53-56. (Li Bin, Xue Gang, Zhang Yuan. Experimental study on behaviors of concrete filled steel tubular frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(5): 53-56. (in Chinese))

[6] 王来,王铁成,陈倩. 低周反复荷载下方钢管混凝土框架抗震性能的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 113-117. (Wang Lai, Wang Tiecheng, Chen Qian. Experimental research on seismic performances of joint reinforced with inner ring stiffener of concrete-filled square tubular frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 113-117. (in Chinese))

[7] 许成祥. 钢管混凝土框架结构抗震性能的试验与理论研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003. (Xu Chengxiang. Experimental and theoretical research on seismic behavior of concrete-filled steel tubular frames[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese))

[8] 王文达,韩林海,陶忠. 钢管混凝土柱-钢梁平面框架抗震性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 48-58. (WANG Wenda, HAN Linhai, TAO Zhong. Experimental research on seismic behaviour of concrete-filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 48-58. (in Chinese))

[9] 孙修礼. 高层钢管混凝土结构体系设计方法及试验研究 [D]. 南京:东南大学, 2006. (Sun Xiuli. Design method research and experimental research on tall bulidings with concrete-filled steel tubular structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese))

[10] 丁阳,许成祥,戴学新等. 钢管混凝土框架结构抗震性能的非线性有限元分析 [J]. 建筑结构, 2004, 34(1): 7-10. (Ding Yang, Xu Chengxiang, Dai Xuexin, et al. Nonlinear finite element analysis on the seismic behavior of concrete-filled steel tubular frame[J]. Building Structure, 2004, 34(1): 7-10. (in Chinese))

[11] 王铁成,卢明奇. 轴压比对方钢管混凝土框架延性影响的有限元分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2005, 35(1): 70-75. (Wang Tiecheng, Lu Mingqi. Finite element analysis of effect of axial load level on ductility of CFRT frames[J]. Journal of Jilin University (Engineering and

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Technology Edition), 2005, 35(1): 70-75. (in Chinese))

[12] 聂建国,秦凯,肖岩. 方钢管混凝土框架结构的 push-over 分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35(3): 68-70. (Nie Jianguo, Qin Kai, Xiao Yan. Push-over analysis on the seismic behavior of a concrete-filled rectangular tubular frame structure[J]. Industrial Construction, 2005, 35(3): 68-70. (in Chinese))

[13] Yang Y B, Kuo S R. Theory and analysis of nonlinear framed structures [M]. Singapore/New York: Prentice Hall, 1994.

[14] Chen W F, Toma S. Advanced analysis for steel frames: theory, software and applications [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994.

[15] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 (第二版) [M]. 北京:科学出版社, 2007. (Han Linhai. Concrete-filled steel tubular structures——theory and application (2nd Edition) [M]. Beijing: China Science Press, 2007. (in Chinese))

[16] 沈聚敏,王传志,江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 1993. (Shen Jumin, Wang Chuanzhi, Jiang Jianjing. Limit analysis of plate and shell and reinforced concrete finite element model. Peking: Tsinghua University Press, 1993. (in Chinese))

[17] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用 [M]. 上海:同济大学出版社, 1997. (Lu Xilin, Jin Guofang, Wu Xiaohan. Theory and application on nonlinear finite element of RC structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))

[18] Prion H G L, Boehme J. Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete[C]// Proceeding of the 4th International Colloquium North American Session. New York: Structural Stability Research Council, 1989, 439-448.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net