

文章编号: 1000-4750(2010)05-0106-09

钢管混凝土柱-梁连接节点弯矩-转角关系计算方法

曲 慧¹, *王文达²

(1. 烟台大学土木工程学院, 山东, 烟台 264005; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃, 兰州 730050)

摘 要: 分别建立了钢管混凝土柱-外环板式钢梁和钢筋环绕式钢筋混凝土梁连接节点的有限元数值分析模型, 理论计算得到了试验结果的验证。基于理论模型, 分别对影响此两类节点力学性能的主要因素进行了系统参数分析, 明晰了各主要参数对节点弯矩-梁柱相对转角关系的影响规律, 提出了此两类节点的节点弯矩-转角关系的实用计算模型, 结果表明: 实用模型和数值模拟结果总体上吻合良好。

关键词: 钢管混凝土柱; 钢梁; 钢筋混凝土梁; 节点; 数值模拟; 参数分析; 弯矩-转角模型

中图分类号: TU318 文献标识码: A

CALCULATIONS FOR MOMENT VERSUS ROTATION RELATIONSHIP OF THE JOINT OF BEAM AND CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMN

QU Hui¹, *WANG Wen-da²

(1. College of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China;

2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: A finite element model (FEM) is developed for the connections between a concrete-filled steel tubular column and a steel beam as well as a reinforced concrete beam by the base of experimental research. The results from the FEM model are match well with the test results. Parametric study is performed for those two kinds of composite joints based on the FEM model. Some useful conclusions were developed from the parametric analysis for the two kinds of joints. A simplified model for the calculation of the relationship between the bending moment and its corresponding rotation at a joint connecting a beam and a column was proposed based on the parametric study. The proposed model has similar precision with the numerical results by FEM, but a very simpler expression to determine the moment-rotation relationship.

Key words: concrete-filled steel tubular column; steel beam; reinforced concrete beam; joint; numerical simulation; parametric analysis; moment versus rotation model

钢管混凝土近年来在多高层建筑中得到了广泛应用。梁柱节点作为钢管混凝土框架结构的主要传力枢纽, 在整个框架结构的受力性能中具有关键作用。根据框架梁材料的不同, 节点主要有钢管混凝土柱-钢梁连接节点和钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点两类。

工程中钢管混凝土柱与钢梁的刚性连接常采

用加强环板式节点, 该类节点具有传力明确、节点区应力分布较均匀、刚度大、塑性性能好、承载力高等优点。规程 CECS159: 2004^[1]和 DBJ13-51-2003^[2]中均推荐了此类节点。以往对该类节点的试验研究较多, 如 Elremaily 等(2001)^[3]; 陈娟和王湛(2004)^[4]; 张大旭等(2001)^[5]; 周天华等(2004)^[6]; 王文达等(2006)^[7]等。钢管混凝土柱与钢筋环绕式钢

收稿日期: 2008-12-25; 修改日期: 2009-05-12

基金项目: 甘肃省高等学校科研基本业务费专项(0904ZTB147)

作者简介: 曲 慧(1976—), 女, 山东人, 讲师, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: quhuiyu@gmail.com);

*王文达(1976—), 男, 甘肃人, 副教授, 博士后, 从事组合结构及结构抗火研究(E-mail: wangwd@lut.cn).

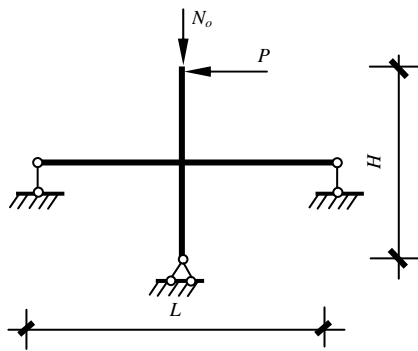
钢筋混凝土梁节点也是工程应用中的典型形式之一，已在不少工程中应用，试验研究也较多，如曲慧(2007)^[8]；方小丹等(2002)^[9]；吕西林等(2002)^[10]；韩林海等(2007)^[11]对钢管混凝土结构节点的主要类型等进行了较为详细的归纳。

建立能反映梁柱连接节点非线性受力特征的弯矩-转角($M_j-\theta_r$)关系对于节点设计非常必要。目前对钢管混凝土结构梁柱节点 $M_j-\theta_r$ 关系实用计算模型的研究则少见报道。

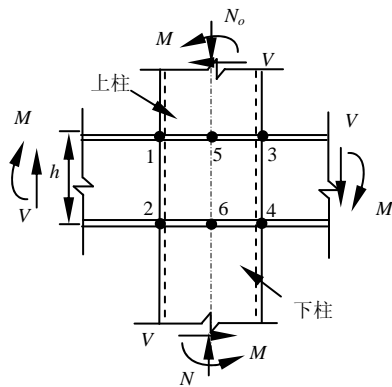
本文在对钢管混凝土柱-外加强环式钢梁节点和钢筋环绕式钢筋混凝土梁节点力学性能分析的基础上，基于 ABAQUS 分别建立了其力学性能全过程分析的有限元模型，并通过参数分析提出了此两类节点的 $M_j-\theta_r$ 关系模型的实用计算方法，可供有关研究者进行钢管混凝土结构整体分析时的节点模型选取时参考。

1 节点弯矩和初始刚度的确定

本文研究有侧移框架中的中柱节点的 $M_j-\theta_r$ 关系。具体研究对象的边界和荷载条件如图 1(a)所示，节点核心区几何参数和内力如图 1(b)所示。



(a) 节点的边界及荷载条件



(b) 节点核心区内力

图 1 节点的边界及荷载条件

Fig.1 Boundary and loading conditions

图 1(a)所示节点在受力过程中主要承受作用于柱顶的水平荷载 P 和竖向力 N_o 。因此，节点弯矩(M_j)可根据下式计算：

$$M_j = P \cdot (H / 2 - h / 2) + N_o \cdot (\delta_u - \delta_m) \quad (1)$$

式中： P 为柱顶水平荷载； N_o 为柱顶轴压力； H 为柱高度； h 为梁高度； δ_u 为柱顶水平位移； δ_m 为节点核心区水平位移。

梁柱相对转角 θ_r 可根据图 1(b) 确定。梁转角 θ_b 取核心区 1 点和 2 点位置左梁或右梁的水平位移 (Δ_1 和 Δ_2 或 Δ_3 和 Δ_4) 差值与梁高的比值，两者中的较大值为梁的转角，即：

$$\theta_b = (\Delta_1 - \Delta_2) / h \quad (2)$$

取柱钢管壁上 5 点和 6 点之间的水平位移差值与梁高的比值为柱的转角 θ_c ，即：

$$\theta_c = (\Delta_5 - \Delta_6) / h \quad (3)$$

节点梁柱相对转角 θ_r 则为梁转角 θ_b 与柱转角 θ_c 的差值，即：

$$\theta_r = \theta_b - \theta_c \quad (4)$$

式(2)－式(4)中转角以顺时针为正，逆时针为负。

参考韩林海(2007)^[12]对纯弯构件刚度的取值方法，暂取节点 $M_j-\theta_r$ 关系曲线上 $0.2M_{uj}$ 所对应的割线刚度为初始刚度 K_i ，具体表达式如下：

$$K_i = \frac{0.2M_{uj}}{\theta_{0.2}} \quad /(\text{kN}\cdot\text{m}) \quad (5)$$

其中： M_{uj} 为节点的极限抗弯承载力； $\theta_{0.2}$ 为 $M_j-\theta_r$ 关系曲线上 $0.2M_{uj}$ 所对应的转角。

2 数值分析模型

2.1 材料模型

韩林海(2007)^[12]给出了适合于 ABAQUS 中进行钢管混凝土理论分析的核心混凝土单轴受压应力-应变关系，表达式如下式所示。本文钢管混凝土梁柱连接节点力学性能分析时钢管内核心混凝土单轴受压应力-应变关系也采用该模型，而材料模型则采用塑性损伤模型。

$$y = \begin{cases} 2 \cdot x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^\eta + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $x = \varepsilon / \varepsilon_0$ ； $y = \sigma / \sigma_0$ ； ε 和 σ 分别为混凝土的压应变和压应力， ε_0 、 σ_0 、 η 、 β_0 等参数详见文献[12]。

钢筋混凝土梁中混凝土采用 Attard 和 Setunge (1996)^[13]提出的单轴受压混凝土应力(σ_c)-应变(ε_c)关系模型,表达式如下:

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (7)$$

式中: $Y = \sigma/f'_c$; $X = \varepsilon/\varepsilon_{co}$; ε 和 σ 分别为混凝土的压应变和压应力, f'_c 和 ε_{co} 分别为混凝土圆柱体强度及对应应变, 其余参数的表达式可见文献[13]。

受拉混凝土应力(σ_c)-应变(ε_c)关系由沈聚敏等 (1993)^[14]给出的表达式确定:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, & \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \frac{x}{0.31\sigma_p(x-1)^{1.7} + x}, & \varepsilon > \varepsilon_p \end{cases} \quad (8)$$

式中: $y = \sigma/\sigma_p$; $x = \varepsilon/\varepsilon_p$; ε 和 σ 分别为混凝土的拉应变和拉应力; σ_p/MPa 为峰值拉应力, $\sigma_p = 0.26(1.25f'_c)^{2/3}$; $\varepsilon_p/\mu\varepsilon$ 为峰值拉应力所对应的应变, $\varepsilon_p = 43.1\sigma_p$; f'_c/MPa 为混凝土圆柱体强度。

钢材采用弹塑性材料模型, 钢材在多轴应力状态下满足 Von Mises 屈服准则和相关流动法则。

2.2 单元选取

节点中钢管和钢梁均采用 4 节点完全积分壳单元(S4), 厚度方向采用 9 点 Simpson 积分。混凝土均采用 8 节点缩减积分三维实体单元(C3D8R)。钢筋混凝土梁内纵筋和箍筋均采用三维杆单元(T3D2)。

2.3 界面模型

钢管和混凝土的界面模型处理是合理模拟钢管混凝土力学性能的关键。本文中钢管与混凝土界面法线方向采用硬接触, 而切线方向采用粘结滑移模型(韩林海, 2007)^[12]。钢管和钢牛腿、加强环板与钢梁之间采用绑定约束(Tie)连接, 以模拟钢管和钢牛腿、加强环板、钢梁之间的焊接。

曲慧(2007)^[8]经过计算分析, 发现考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移与否对钢筋混凝土梁节点的承载力影响不大, 仅对单元中应力分布有轻微影响, 为提高分析效率, 在参数分析过程中, 采用 Embed 将钢牛腿和钢筋埋入钢筋混凝土中。钢筋混凝土梁与钢管混凝土柱之间用接触单元。

2.4 边界条件

根据图 1(a)中节点的荷载和边界条件, 分别建立了钢管混凝土柱-钢梁及钢筋混凝土梁节点的有

限元模型, 其边界条件和荷载如图 2 所示。在钢管混凝土柱底板中线约束 x 、 y 、 z 三方向线位移, 以模拟柱底铰支座。在左右梁端面仅施加 y 、 z 两个方向的位移约束模拟梁端铰支座。在钢管混凝土柱顶的刚性加载板上施加水平位移。根据图 1 在模型梁柱上取相应的位置的位移和反力换算节点的弯矩 M_j 和梁柱相对转角 θ_r 。

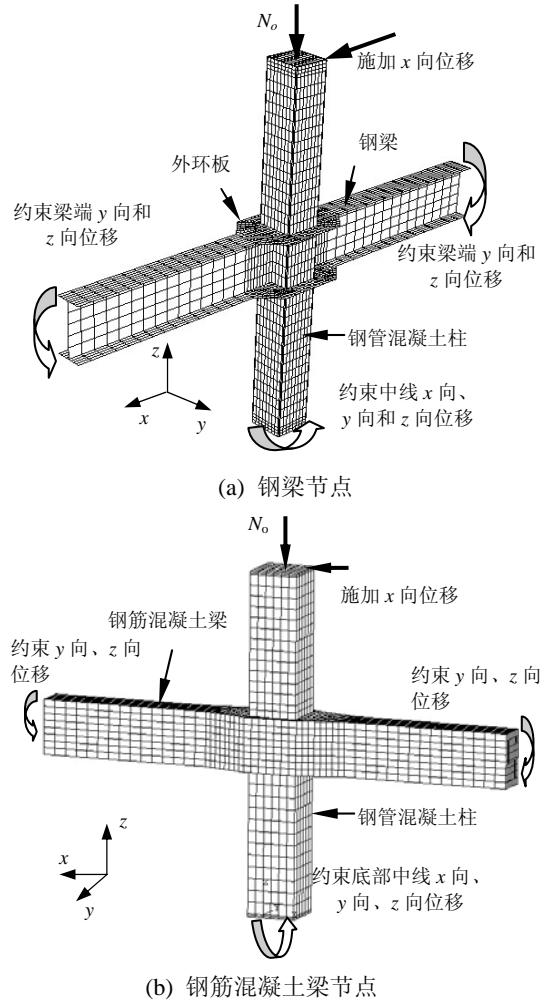
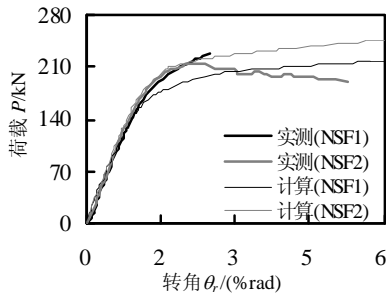


图2 梁柱节点有限元模型

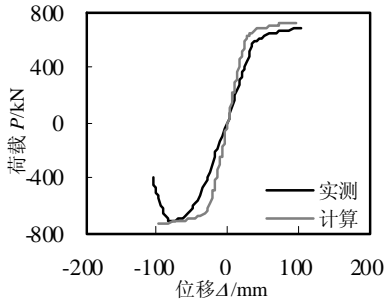
Fig.2 FEM model of the CFST joints

2.5 有限元模型的验证

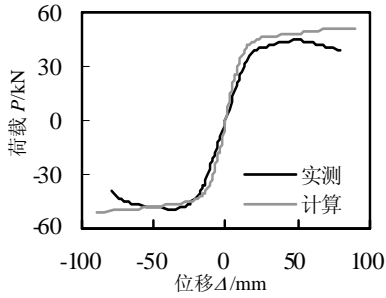
为验证有限元模型, 对不同研究者进行的钢管混凝土柱-钢梁及钢筋混凝土梁节点在单调和往复加载情况下的试验结果进行了计算。图 3(1)和图 3(2)分别给出部分钢梁节点及钢筋混凝土梁节点有限元计算结果与单调加载情况下的实测结果和往复加载情况下滞回关系曲线骨架线的比较情况, 其中 θ_r 为梁端相对转角。可见计算结果和实测结果总体上较为吻合。



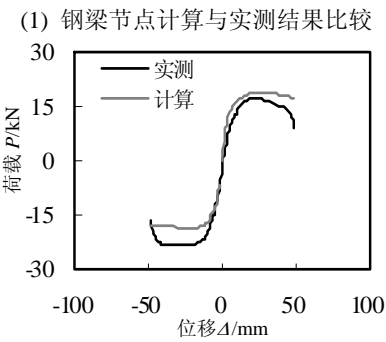
(a) NSF1 和 NSF2(Elremaily 等, 2001^[3])



(b) JD-3B(周天华等, 2004^[6])

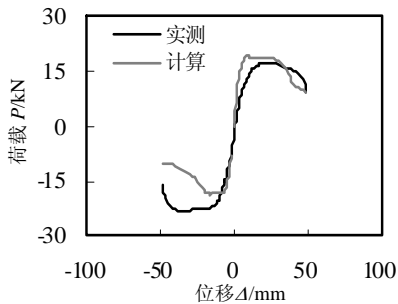


(c) SJ-21(王文达等, 2006^[7])

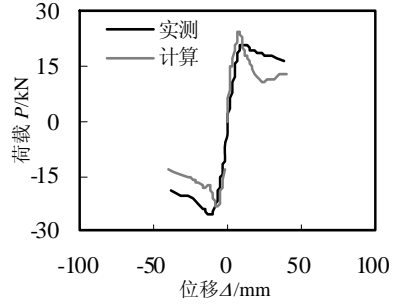


(1) 钢梁节点计算与实测结果比较

(a) C-1



(b) C-2



(c) S-2

(2) 钢筋混凝土梁节点计算与实测结果比较(曲慧, 2007^[8])

图3 有限元计算结果与实测结果的比较

Fig.3 Comparisons between the FEA results and tested results

3 节点弯矩-转角关系参数分析

分别从材料参数、几何参数、荷载参数等几方面,对影响钢管混凝土柱-钢梁节点、钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 $M_j-\theta_r$ 关系的主要因素分别进行参数分析,以了解各主要参数对每类节点 $M_j-\theta_r$ 关系的影响规律。

3.1 钢梁节点影响参数分析

对钢管混凝土柱-钢梁节点弯矩-转角($M_j-\theta_r$)关系曲线参数分析时选取的参数及其范围如下:

1) 材料参数: 钢管强度(f_s): 235MPa—420MPa; 混凝土强度(f_{cu}): 30MPa—90MPa。

2) 几何参数: 柱截面含钢率($a=A_s/A_c$, 其中 A_s 和 A_c 分别为钢管和核心混凝土面积): 0.05—0.2; 梁柱线刚度比($k=(EI)_bH/((EI)_cL)$, 其中 $(EI)_b$ 为钢梁的抗弯刚度; $(EI)_c$ 为钢管混凝土柱抗弯刚度,依据 DBJ13-51-2003^[2]取值; H 为柱高, L 为梁跨度): 0.25—2; 梁柱强度比($k_m=M_{ub}/M_{uc}$, 其中 M_{ub} 为梁抗弯强度,依据现行《钢结构设计规范》确定; M_{uc} 为柱抗弯强度,依据 DBJ13-51-2003^[2]确定): $k_m=0.4-k_m=0.8$; 柱长细比(λ): 25—45。

3) 荷载参数: 柱轴压比(定义 $n=N_o/N_u$, 即为柱上施加的轴向荷载 N_o 与柱极限承载力标准值 N_u 之比, N_u 依据 DBJ13-51-2003^[2]确定): 0—0.8。

环板宽度是影响节点刚性和承载力的重要因素。计算表明,当环板宽度大于某一数值时,节点抗弯承载力随环板宽度的增加不再变化,因此,经过理论计算,本文参数分析时,圆形柱节点环板宽度取为 35mm, 方形柱节点取为 45mm。

算例的基本条件为: 圆形柱采用 $D \times t=400\text{mm} \times 9.3\text{mm}$, $\alpha=0.1$, Q345 钢材, C60 混凝土, 柱高 $H=3.6\text{m}$; 钢梁 $H450\text{mm} \times 200\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$,

Q345 钢, 跨度 $L=6\text{m}$; $n=0.3$, $k=0.386$, $k_m=0.68$, 环板厚度同钢梁, 宽度 $b=35\text{mm}$ 。

方形柱节点: 柱采用 $B \times t=400\text{mm} \times 10\text{mm}$, $\alpha=0.1$, Q345 钢, C60 混凝土, 柱高 $H=3.6\text{m}$; 钢梁 $H450\text{mm} \times 200\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$, Q345 钢, 跨度 $L=6\text{m}$ 。 $n=0.3$, $k=0.270$, $k_m=0.447$, 环板厚度同钢梁, 宽度 $b=45\text{mm}$ 。

分析结果表明, 方形截面柱节点与圆形截面柱节点规律相似。下面以圆形柱节点为例, 分析上述各参数的影响规律。

1) 柱钢材屈服强度(f_y)。

图 4(a)给出了柱钢材强度对 $M_j-\theta_j$ 关系的影响规律。可见随着 f_y 提高, 节点抗弯承载力提高, 初始刚度略有变化。

2) 混凝土强度(f_{cu})。

图 4(b)为混凝土强度对 $M_j-\theta_j$ 关系的影响规律。随着 f_{cu} 提高, 节点的抗弯承载力和初始刚度均有所提高, 但总体上对曲线形状影响不明显。

3) 柱截面含钢率(α)。

图 4(c)为柱含钢率的影响规律。随着 α 增加, 节点的初始刚度和抗弯承载力均明显提高, 强化刚度也有所提高。

4) 梁柱线刚度比(k)。

图 4(d)为梁柱线刚度比的影响规律。随 k 增大, 节点初始刚度和抗弯承载力均有所提高。

5) 轴压比(n)。

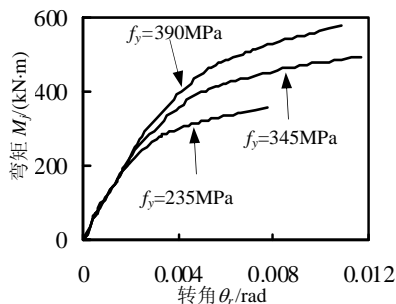
图 4(e)为柱轴压比的影响规律。可见随 n 增大节点初始刚度变化不是很明显。 $n < 0.3$ 时, 随着 n 的增加极限承载力略有提高。

6) 梁柱强度比(k_m)。

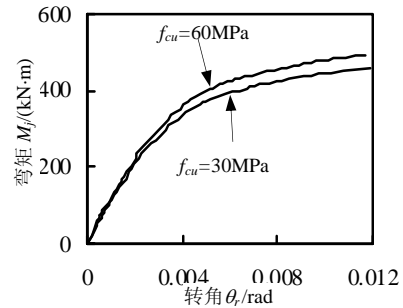
图 4(f)为梁柱强度比的影响。可见节点初始刚度随 k_m 增大而增大。当 k_m 较大的时候, 曲线会出现明显的强化段, 但曲线形状变化不大。

7) 柱长细比(λ)。

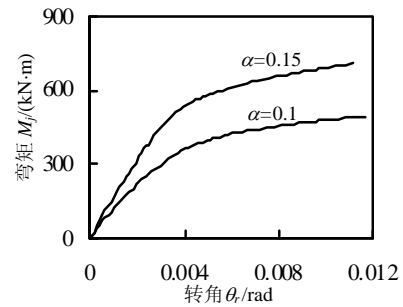
图 4(g)为柱长细比的影响。随 λ 增加, 节点抗弯承载力变化不明显, 初始刚度则略有下降。



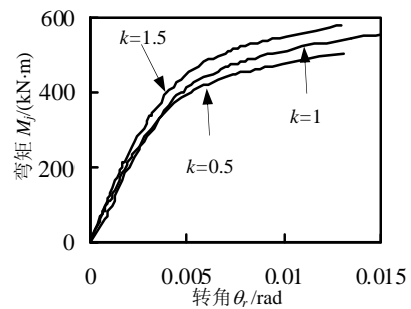
(a) 柱钢材强度(f_y)



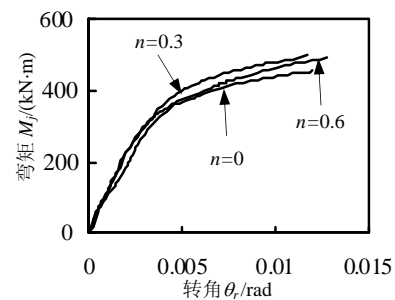
(b) 混凝土强度(f_{cu})



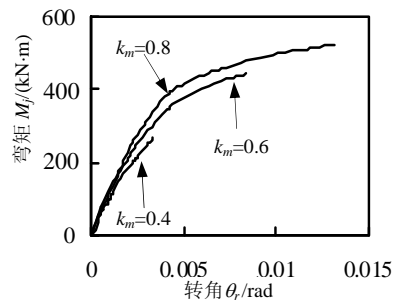
(c) 含钢率(α)



(d) 梁柱线刚度比(k)



(e) 轴压比(n)



(f) 梁柱强度比(k_m)

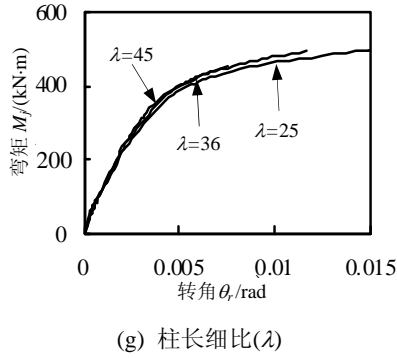


图4 各主要参数对钢管混凝土柱-钢梁节点 $M_j-\theta_r$ 曲线的影响

Fig.4 Influence of various parameters on the relationship of $M_j-\theta_r$ for steel beam to CFST column joints

3.2 钢筋混凝土梁节点参数分析

应用有限元模型, 同样可方便地对影响钢管混凝土柱-RC 梁节点的 $M_j-\theta_r$ 关系的主要因素进行参数分析。本文研究了以下参数对节点 $M_j-\theta_r$ 关系曲线的影响, 其中各参数含义同前:

1) 材料参数: 钢管屈服强度 $f_y=235\text{MPa}$ — $f_y=420\text{MPa}$; 柱核心混凝土强度 $f_{cu}=30\text{MPa}$ — $f_{cu}=90\text{MPa}$; 梁混凝土强度 $f_{cub}=25\text{MPa}$ — $f_{cub}=40\text{MPa}$ 。

2) 几何参数: $\alpha=0.05$ — $\alpha=0.2$; $k=0.25$ — $k=1$; $k_m=0.4$ — $k_m=0.8$; $\lambda=25$ — $\lambda=45$ 。

3) 荷载参数: $n=0$ — $n=0.8$ 。

钢牛腿在节点受力过程中主要传递节点区剪力。当牛腿高度满足节点抗剪要求后, 变化牛腿会改变节点过渡区的刚度。经分析, 取钢牛腿长度为节点过渡区 2/3 长度为典型算例的牛腿长度较为合适(曲慧, 2007)^[8]。

各参数的影响规律概述如下: 1) 柱钢材屈服强度(f_y): 随着 f_y 提高, 节点的抗弯承载力有所提高, 初始刚度略有变化。2) 核心混凝土强度(f_{cu}): 随 f_{cu} 提高, 节点的初始刚度和抗弯承载力有所提高, 但曲线形状变化并不明显。3) 钢筋混凝土梁混凝土强度(f_{cub}): 随着 f_{cub} 提高, 节点的初始刚度和抗弯承载力变化不明显。4) 柱截面含钢率(α): 随着 α 增加, 节点的初始刚度和抗弯承载力均明显提高, 曲线的强化刚度也显著提高。5) 梁柱线刚度比(k): 可见随 k 增大, 节点的初始刚度和抗弯承载力均有所提高。6) 轴压比(n): 随 n 增大节点初始刚度变化不明显, 但节点抗弯承载力随 n 增大有所增加, 且曲线形状受 n 影响不明显。7) 梁柱强度比(k_m): 节点的初始刚度和曲线形状随着 k_m 的增大变化并不明显。8) 柱长细比(λ): 随 λ 增加, 节点初始刚度和曲

线形状基本不变, 抗弯承载力略有增大。

4 弯矩-转角($M_j-\theta_r$)关系模型

4.1 钢管混凝土柱-钢梁节点 $M_j-\theta_r$ 模型

由参数分析结果可见, 钢管混凝土柱-外环板式钢梁节点 $M_j-\theta_r$ 关系曲线基本上呈幂函数特征。经分析, 可参考现有钢结构节点的模型(Chen 等, 1996^[15]), 采用三参数幂函数模型来模拟, 但需按照钢管混凝土梁柱节点的特征确定其中的参数。模型表达式如下:

$$\theta_r = n_s \cdot \theta_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{M_j}{n_s M_{uj}}\right) - 1 \right) \quad (9a)$$

$$\text{或 } M_j = n_s \cdot M_{uj} \cdot \ln\left(1 + \frac{\theta_r}{n_s \cdot \theta_0}\right) \quad (9b)$$

式中: M_{uj} 为节点的极限抗弯承载力; θ_0 为参照转角, $\theta_0=M_{uj}/K_i$, 当 M_{uj} 和 K_i 单位相同时, θ_0 为弧度; K_i 为节点初始刚度; n_s 为与 $M_j-\theta_r$ 关系曲线形状有关的参数。下面给出 K_i 、 M_{uj} 、 n_s 确定方法。

1) 初始刚度 K_i 。

分析表明, 当环板尺寸确定后, 影响节点初始刚度的主要因素有: 核心混凝土强度 f_{cu} 、柱截面含钢率 α 、梁柱线刚度比 k 和梁柱强度比 k_m 。

为便于分析, 定义节点的相对刚度 K_r 如下:

$$K_r = \frac{K_i}{k_c} = \frac{K_i H}{E_{sc} I_{sc}} \quad (10)$$

其中: k_c 为钢管混凝土柱线刚度($k_c=E_{sc}I_{sc}/H$), $E_{sc}I_{sc}$ 为钢管混凝土柱名义抗弯刚度, $E_{sc}I_{sc}=E_s I_s + E_c I_c$; H 为柱高度, E_s 和 E_c 分别为钢管和混凝土弹性模量, I_s 和 I_c 分别为钢管和混凝土截面惯性矩。

选择工程常用的参数范围内进行分析, 并对各参数无量纲化, 即定义 $s=f_{cu}/60=0.667-1.5$, $\rho=\alpha/0.1=0.5-2$, 取 $k=0.25-k=1$, $k_m=0.4-k_m=0.8$ 。

对 K_r 的数值计算结果进行分析, 得出:

$$K_r = R \cdot f(s) \cdot f(\rho) \cdot f(k) \cdot f(k_m) \quad (11)$$

其中, R 为系数, 对圆形柱节点取 1.41×10^{15} , 方形柱节点取 4.5×10^{15} , $f(s)$ 为 K_r 与 f_{cu} 的关系表达式, $f(\rho)$ 为 K_r 与 α 的关系表达式, $f(k)$ 为 K_r 与 k 的表达式, $f(k_m)$ 为 K_r 与 k_m 关系的表达式。各参数可由式(12)及式(13)确定, 对于圆钢管混凝土柱节点:

$$f(s) = 0.51(0.69s + 1) \times 10^{-5} \quad (12a)$$

$$f(\rho) = -1.26(0.17\rho^3 - 0.69\rho^2 + 0.82\rho - 1) \times 10^{-5} \quad (12b)$$

$$f(k) = 1.09(0.34k^2 - 0.52k + 1) \times 10^{-5} \quad (12c)$$

$$f(k_m) = -0.53(1.26k_m^2 - 2.07k_m - 1) \times 10^{-5} \quad (12d)$$

对于方钢管混凝土柱节点:

$$f(s) = -0.1(3.48s^2 - 8.76s - 1) \times 10^{-5} \quad (13a)$$

$$f(\rho) = -0.88(0.17\rho^3 - 0.66\rho^2 + 0.83\rho - 1) \times 10^{-5} \quad (13b)$$

$$f(k) = 0.35(1.8k^2 + 1.92k + 1) \times 10^{-5} \quad (13c)$$

$$f(k_m) = 0.58e^{0.27k_m} \times 10^{-5} \quad (13d)$$

将式(12)和式(13)代入式(10), 可得到圆形及方形截面钢管混凝土柱节点的初始刚度 K_i 分别为:

$$K_i = \frac{5.23 \times 10^{-6} E_{sc} I_{sc}}{H} (1.26k_m^2 - 2.07k_m - 1) \cdot (0.69s + 1)(0.34k^2 - 0.52k + 1)(0.17\rho^3 - 0.69\rho^2 + 0.82\rho - 1) \quad (14)$$

$$K_i = -\frac{0.8 \times 10^{-6} E_{sc} I_{sc}}{H} (3.48s^2 - 8.76s - 1)(1.8k^2 + 1.92k + 1)(0.17\rho^3 - 0.66\rho^2 + 0.83\rho - 1)e^{0.27k_m} \quad (15)$$

K_i 的计算公式中, $E_{sc}I_{sc}/H$ 单位以 $N \cdot mm$ 计, K_i 的单位为 $kN \cdot m$ 。

式(14)及式(15)适用范围为: 柱核心混凝土强度 C30—C90, $\alpha=0.05 - \alpha=0.2$, $k=0.25 - k=1$, $k_m=0.4 - k_m=0.8$ 的方形和圆形钢管混凝土柱-钢梁外加加强环式平面节点。

2) 极限抗弯承载力 M_{uj} 确定。

节点中梁的抗弯承载力往往会成为节点各部件中承载力的较低值, 因此节点 $M_f - \theta_r$ 模型中 M_{uj} 可暂取钢梁的极限抗弯承载力, 按照现行《钢结构设计规范 GB50017》计算公式如下:

$$M_{uj} = \gamma W_{nx} f_y \quad (16)$$

其中: γ 为钢梁截面塑性发展系数; W_{nx} 为钢梁净截面抗弯抵抗模量; f_y 为钢梁强度。

3) 系数 n_s 的确定。

在确定了 K_i 和 M_{uj} 之后, 通过回归分析, 给出 n_s 关于 θ_0 的表达式如式(17a)和式(17b)所示。

① 对于圆钢管混凝土柱节点:

$$0.62 \leq n_s = 10.09 \cdot \theta_0^{0.32} \leq 0.75 \quad (17a)$$

其中当 $n_s > 0.75$ 时取 0.75; 当 $n_s < 0.62$ 时取 0.62。

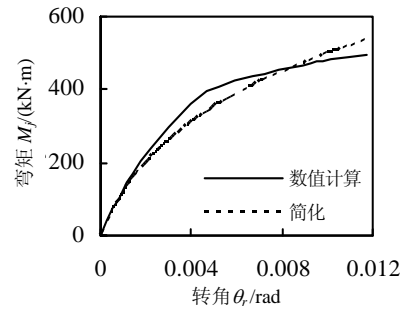
② 对于方钢管混凝土柱节点:

$$0.2 \leq n_s = 0.12 \cdot \ln(\theta_0) + 1.27 \leq 0.36 \quad (17b)$$

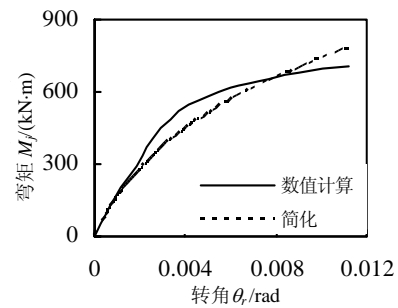
式中当 $n_s > 0.36$ 时取 0.36; 当 $n_s < 0.2$ 时取 0.2。

式(17a)和式(17b)中, θ_0 的单位为 rad。

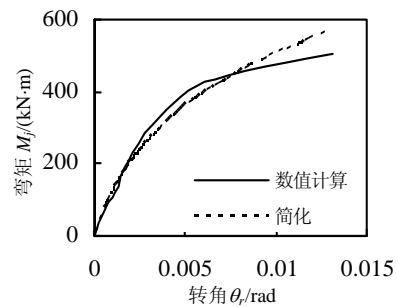
图 5 给出了部分参数对应的圆形柱节点简化计算公式和采用有限元模型计算结果的比较。算例基



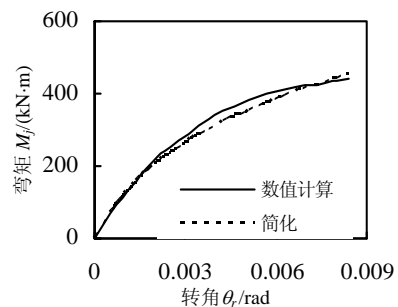
(a) $f_y=345\text{MPa}$



(b) $\alpha=0.15$



(c) $k=0.5$



(d) $k_m=0.6$

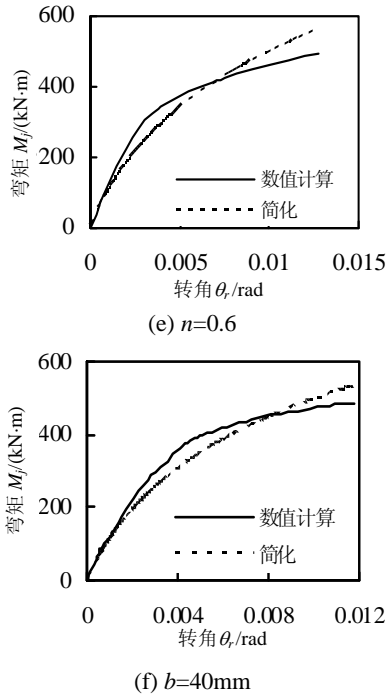


图5 钢管混凝土柱-钢梁节点数值计算与简化计算 $M_j-\theta_r$ 关系曲线比较

Fig.5 Comparison of $M_j-\theta_r$ relationship between simplified and numerical results for steel beam joints

本条件为：钢管强度 $f_y=235\text{MPa}-f_y=420\text{MPa}$ ； $f_{cu}=30\text{MPa}-f_{cu}=90\text{MPa}$ ； $\alpha=0.05-\alpha=0.2$ ； $k=0.25-k=1$ ； $k_m=0.4-k_m=0.8$ ； $\lambda=25-\lambda=45$ ； $n=0-n=0.8$ 。可见简化计算与数值计算结果总体上吻合较好。方形柱-钢梁节点也有类似规律。

4.2 钢筋混凝土梁节点 $M_j-\theta_r$ 简化计算

根据试验及理论分析得到的钢管混凝土柱-钢筋环绕式钢筋混凝土梁节点的 $M_j-\theta_r$ 关系曲线的特征，其 $M_j-\theta_r$ 关系也可采用式(9)的表达式来模拟，其中 K_i 、 M_{uj} 、 n_s 含义同前。

1) 初始刚度 K_i 。

计算结果表明，当钢牛腿长度确定后，影响节点初始刚度 K_i 的主要因素有柱核心混凝土强度 f_{cu} 、柱截面含钢率 α 和梁柱线刚度比 k 。

对上述影响参数无量纲化后进行参数分析，定义 $s=f_{cu}/60=0.5-1.5$ ， $\rho=\alpha/0.1=0.5-2$ ，取 $k=0.25-k=1$ 。节点的相对刚度 K_r 同式(11)。

对 K_r 数值计算结果进行分析，得到：

$$K_r = R \cdot f(s) \cdot f(\rho) \cdot f(k) \quad (18)$$

其中： R 为系数，对圆形柱节点取 3.3×10^8 ，方形柱节点取 8.8×10^8 ； $f(s)$ 、 $f(\rho)$ 、 $f(k)$ 分别为 K_r 与 f_{cu} 、 α 、 k 关系的表达式。各参数可由式(19)和式(20)确定。

对于圆钢管混凝土柱节点：

$$f(s) = 1.78(1 + 2.14s) \times 10^{-5} \quad (19a)$$

$$f(\rho) = 3.08(1.57\rho^3 - 6.06\rho^2 + 7.27\rho - 1) \times 10^{-5} \quad (19b)$$

$$f(k) = 0.92(59.85k^3 - 90.94k^2 + 40.60k + 1) \times 10^{-5} \quad (19c)$$

对方钢管混凝土柱节点：

$$f(s) = 0.50 \times 10^{-5} e^{1.89s} \quad (20a)$$

$$f(\rho) = 1.71(1.5\rho^3 - 6.2\rho^2 + 7.7\rho - 1) \times 10^{-5} \quad (20b)$$

$$f(k) = 5.89(0.62 \ln(k) + 1) \times 10^{-5} \quad (20c)$$

将式(19)和式(20)代入式(18)，可得圆形及方形截面钢管混凝土柱节点的初始刚度 K_i 分别为：

$$K_i = \frac{1.67 \times 10^{-6} E_{sc} I_{sc}}{H} (1.57\rho^3 - 6.06\rho^2 + 7.27\rho - 1) \cdot (2.14s + 1)(59.85k^3 - 90.94k^2 + 40.6k + 1) \quad (21)$$

$$K_i = \frac{4.41 \times 10^{-6} E_{sc} I_{sc}}{H} (1.50\rho^3 - 6.20\rho^2 + 7.70\rho - 1) \cdot (0.62 \ln(k) + 1) e^{1.89s} \quad (22)$$

K_i 的计算公式中， $E_{sc} I_{sc}/H$ 单位以 $\text{N}\cdot\text{mm}$ 计， K_i 的单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

式(21)及式(22)适用范围为：柱核心混凝土强度 C30-C90， $\alpha=0.05-\alpha=0.2$ ， $k=0.25-k=1$ 的方形和圆形钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点。

2) 极限抗弯承载力 M_{uj} 。

与钢管混凝土柱-钢梁节点类似，节点 $M_j-\theta_r$ 关系中 M_{uj} 暂取钢筋混凝土梁的极限抗弯承载力，可由《混凝土结构设计规范》中相关公式确定，计算时材料强度指标均取标准值。

3) 系数 n_s 的确定。

确定了 K_i 和 M_{uj} 之后，可通过回归得到 n_s 关于 θ_0 的表达式如下：

圆钢管混凝土柱节点：

$$0.6 \leq n_s = 204436\theta_0^2 - 1079.9\theta_0 + 2.05 \leq 0.85 \quad (23a)$$

其中当 $n_s > 0.85$ 时取 0.85；当 $n_s < 0.6$ 时取 0.6。

方钢管混凝土柱节点：

$$0.2 \leq n_s = -49730\theta_0^2 + 237.39\theta_0 + 0.0417 \leq 0.33 \quad (23b)$$

其中当 $n_s > 0.33$ 时取 0.33；当 $n_s < 0.2$ 时取 0.2。

式(23a)和式(23b)中， θ_0 的单位为 rad 。

采用式(9)所示的简化模型对部分算例中所对应的圆形柱及方形柱节点 $M_j-\theta_r$ 关系曲线进行了计算，发现简化计算结果与数值计算结果总体上较为吻合，圆形截面柱-RC 梁节点与方形截面柱-RC 梁节点规律类似，图 6 给出方形钢管混凝土柱-RC 梁

节点的部分比较结果。

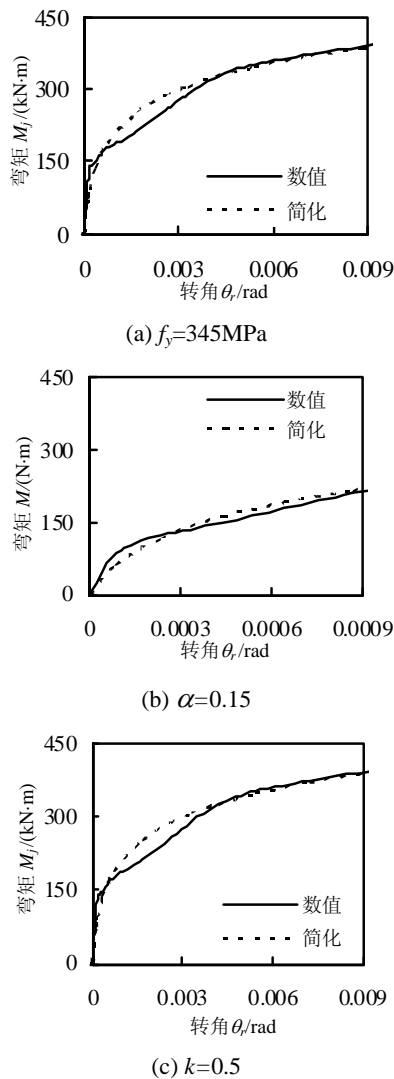


图6 方形钢管混凝土柱-RC梁节点简化模型和数值计算 $M_j-\theta_r$ 关系比较

Fig.6 Comparison of $M_j-\theta_r$ relationship between simplified and numerical results for RC beam joints

5 结论

基于本文的研究,有以下结论可供参考:

(1) 本文建立的钢管混凝土梁柱连接节点数值分析模型总体上与试验结果吻合。

(2) 钢管混凝土柱-外环板式钢梁节点和钢筋环绕式钢筋混凝土梁节点的节点弯矩-转角关系模型类似,均可采用三参数模型描述。

(3) 本文提供的两类钢管混凝土梁柱节点的 $M_j-\theta_r$ 关系计算方便,总体上计算结果与数值计算结果吻合较好。

参考文献:

[1] CECS159: 2004, 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].

2004.

CECS159: 2004, Technical specification of concrete filled rectangle steel tubular structures [S]. 2004. (in Chinese)

- [2] DBJ13-51-2003, 钢管混凝土结构技术规程[S]. 2003. DBJ13-51-2003, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. 2003. (in Chinese)
- [3] Elremaily A, Azizinamini A. Experimental behavior of steel beam to CFT column connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(10): 1099—1119.
- [4] 陈鹏, 王湛. 加强环式钢管混凝土柱-钢梁节点的刚性研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 43—54. Chen Juan, Wang Zhan. Research on the stiffness of concrete filled tubular column and steel beam joint with stiffening ring [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4): 43—54. (in Chinese)
- [5] 张大旭, 张素梅. 钢管混凝土梁柱节点动力性能试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 21—27. Zhang Daxu, Zhang Sumei. Dynamic behavior of joints between concrete-filled steel tubes and beams [J]. Journal of Harbin University of Architecture, 2001, 34(1): 21—27. (in Chinese)
- [6] 周天华, 何保康, 陈国津, 魏潮文, 单银木. 方钢管混凝土柱与钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 9—16. Zhou Tianhua, He Baokang, Chen Guojin, Wei Chaowen, Shan Yinmu. Experimental studies on seismic behavior of concrete-filled steel square tubular column and steel beam joints under cyclic loading [J]. Journal of Building Structure, 2004, 25(1): 9—16. (in Chinese)
- [7] 王文达, 韩林海, 游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能的实验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 17—25. Wang Wenda, Han Linhai, You Jingtuan. Experimental studies on hysteretic behavior s of steel beam to concrete filled SHS column connections with stiffening ring [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 17—25. (in Chinese)
- [8] 曲慧. 钢管混凝土结构梁-柱连接节点的力学性能和计算方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2007. Qu Hui. Behaviours and calculations on the beam-column connections of concrete-filled steel tubular column structures [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2007. (in Chinese)
- [9] 方小丹, 李少云, 钱稼茹, 杨润强. 钢管混凝土柱-环梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 10—18. Fang Xiaodan, Li Shaoyun, Qian Jiuru, Yang Runqiang. Experimental research on seismic behavior of concrete filled steel tubular column-ring beam joint under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 10—18. (in Chinese)

(参考文献[10]—[15]转第146页)

- ions Press, 2008: 393—400. (in Chinese)
- [7] 罗喜恒. 复杂悬索桥施工过程中精细化分析研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2004: 9—84.
Luo Xiheng. Fine analysis of complicated suspension bridge during construction process [D]. Shanghai: Bridge Engineering of Tongji University, 2004: 9—84. (in Chinese)
- [8] 栗怀广, 郑凯锋, 文署东, 李杰. 自锚式悬索桥空间主缆线形精确计算方法及其应用研究[C]// 中国土木工程学会桥梁与结构工程分会. 第十七届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006: 1060—1065.
Li Huaiguang, Zheng Kaifeng, Wen Shudong, Li Jie. Accurate method to calculate the shape of spatial main cable of self-anchored suspension bridge and its application [C]// China Civil Engineering Society of Bridge and Structural Engineering Branch. Proceeding of the 17th Symposium of Bridges. Beijing: People's Communications Press, 2006: 1060—1065. (in Chinese)
- [9] 李传习, 夏桂云. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 59—67.
Li Chuanxi, Xia Guiyun. Computation theory of bridge with large span [M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 59—67. (in Chinese)
- [10] 李传习, 刘光栋, 柯红军. 悬索桥主缆系统数值解析法计算的一种收敛算法[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 66—73.
Li Chuanxi, Liu Guangdong, Ke Hongjun. A convergent algorithm for numerical-analytic method of calculating main cable system of suspension bridge [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 66—73. (in Chinese)
- [11] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2003, 6: 24—25.
Tang Maolin. 3D geometric nonlinear analysis of longspan suspension bridge and its software development [J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003, 6: 24—25. (in Chinese)

(上接第 114 页)

- [10] 吕西林, 李学平. 方钢管混凝土柱外置式环梁节点的试验及设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 7—13.
Lu Xilin, Li Xueping. Experimental study on ring beam connections located outside the concrete filled rectangular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 7—13. (in Chinese)
- [11] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Han Linhai, Yang Youfu. Modern concrete-filled steel tubular structure technology [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2007.
Han Linhai. Concrete-filled steel tubular structures- theory and application [M]. 2nd ed. Beijing: China Science Press, 2007. (in Chinese)
- [13] Attard M M, Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 432—442.
- [14] 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. Finite element analysis of reinforced concrete and limited analysis of shell [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [15] Chen W F, Goto Y, Liew J Y R. Stability design of semi-rigid frame [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996.