文章编号:1000-582X(2010)10-070-06

方钢管混凝土压弯构件塑性屈服面的简化确定方法

刘阳冰[1]，刘晶波[2]，韩　强[3]，郑妮娜[1]

(1. 重庆大学 土木工程学院，山地城镇与新技术教育部重点实验室，重庆 400045；
2. 清华大学 土木工程系，北京 100084；3. 北京工业大学 建筑工程学院，北京 100124)

摘　要:采用塑性铰方法模拟钢管混凝土结构的弹塑性工作性能时，常需要定义钢管混凝土柱截面的塑性屈服面。纤维模型法虽然可以较好的应用于钢管混凝土截面的塑性屈服面分析，但从实际应用的角度考虑，数值方法还是显得较为复杂，不便于工程应用。因此文中在已有方钢管混凝土(concrete-filled square steel tubular，CFST)构件试验研究和理论研究的基础上，首先给出弹性单元参数的确定方法；然后通过理论分析和大量的参数分析，提出了一种方钢管混凝土柱截面轴力-弯矩相关塑性屈服面的快速确定方法。并对纤维模型法与文中建议方法的计算结果进行比较，两者吻合较好，验证了文中方法的正确性。

关键词:方钢管混凝土；极限破坏面；塑性屈服面；参数分析

中图分类号:TU398. 9　　**文献标志码:**A

A simplified approach to define the yield surface of concrete-filled square steel tubes subjected to compression-bending

LIU Yang-bing[1]，*LIU Jing-bo*[2]，*HAN Qiang*[3]，*ZHENG Ni-na*[1]

(1. Key Laboratory of New Technique for Construction of Cities in Mountain Area，College of Civil Engineering，Ministry of Education，Chongqing University，Chongqing 400045，P. R. China；
2. Department of Civil Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084，P. R. China；
3. College of Architutral Engineering Beijing University of Technology，Beijing 100124，P. R. China)

Abstract：When the plastic hinge method is used to simulate the elasto-plastic properties of concrete-filled steel tubular structures，the plastic interactive yield surfaces of concrete-filled steel tubular column sections need to be defined. Although the fiber model approach can be well applied to the yield surface analysis，the numerical method is still complicated for the real applications. Therefore based on the experimental and theoretical researches on concrete-filled square steel tubular (CFST) members，this paper develops one method to determine the elastic element parameters. Then a simplified approach to quickly define the axial force-moment interactive plastic yield surface of concrete-filled square steel tubular columns is developed through theoretical analysis and a large number of parametric analyses. Finally，the fiber model method is adopted to verify the feasibility and validity of the proposed method. Results of the two methods are in good agreement，which indicates that the proposed method is reliable.

Key words：concrete-filled square steel tubular (CFST)；ultimate damage surface；plastic yield surface；parametric analysis

---

收稿日期:2010-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(50978141)；中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10 20 00 25)；城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目、北京市重点实验室开放基金项目(EESR2009-02)

作者简介:刘阳冰(1979-)，女，清华大学博士，主要从事结构抗震研究，(E-mail) sunice@cqu. edu. cn。

在柱的弹塑性模型中，常采用梁单元和轴力-弯矩相互作用的塑性铰来模拟其弹塑性性能[1-5]；这就需要确定柱截面的塑性屈服面。对于钢筋混凝土构件，一般采用基于平截面假定的纤维模型法[6]确定截面的轴力-弯矩塑性屈服面和极限面，现有的许多截面分析工具都可以实现这个功能，如Response2000、Xtract 等。对于钢管混凝土构件，钢管屈服后，钢管和内部混凝土之间存在着较大的滑移，平截面假定不再适用，因此不能采用这些截面分析工具计算钢管混凝土柱的轴力-弯矩相互作用的极限面。采用试验方法和能反映粘结滑移的细分有限元法可以较好的对钢管混凝土构件的破坏过程进行研究，基于大量试验研究和有限元数值模拟确定的钢管混凝土构件极限破坏相关面是比较可靠的。目前国内外许多规范、规程以及专著均已经给出了钢管混凝土构件轴力-弯矩相互作用的极限面经验公式[7-10]，可以简便而且可靠的确定钢管混凝土柱的极限破坏面。而对于钢管混凝土柱的塑性屈服面，原则上可以采用纤维模型法进行分析计算，获得屈服面，但需要进行额外的分析计算。如果能提出一种类似于确定极限面的方法，根据简单的经验公式来确定塑性屈服面，则可以有效简化截面分析方法，节省计算工作量。

基于现有的钢管混凝土柱极限破坏面的研究成果，通过对方钢管混凝土(CFST)柱截面力学性能的参数分析，提出了一种由现有 CFST 柱的极限破坏面直接确定塑性屈服面的简化方法。弹性单元参数的正确定义是弹塑性分析的基础，下面首先给出 CFST 柱弹性参数的确定方法。

1　弹性单元参数的确定方法

结构弹性性能分析时，关键是构件截面刚度和材料质量密度的确定。钢管混凝土柱截面存在 3 种刚度，即轴压刚度、弯曲刚度和剪切刚度。有限元分析中，往往采用折算刚度法，按侧向刚度相等的原则[11]，仅考虑其中的弯曲刚度，将钢管混凝土柱简化成单一材料的柱进行建模，这种处理方法会造成一定的误差[12]。如何在模型中准确反映钢管混凝土的这 3 种刚度，是弹性分析准确与否的关键。下面介绍边长为 l，钢管壁厚为 t(后面采用 $l\times t$ 表示 CFST 柱的截面)的 CFST 柱等效为边长为 l 的方形截面柱的方法，目标是等效柱与原钢管混凝土柱刚度和质量相等。

首先给出一种实现等效柱单元截面与原钢管混凝土截面刚度等效的方法，该方法能实现轴压、弯曲和剪切 3 种刚度的同时等效。根据两种单元截面等轴压刚度、等抗弯刚度和等剪切刚度的原则确定钢管混凝土柱等效为单一材料后的等效轴压弹性模量 E_{eq}，等效抗弯刚度弹性模量 E_{eqI} 和等效剪切刚度 G_{eq}。3 种刚度的等效原则应同时满足以下 3 个公式：

$$E_{eq}\cdot A_{sc}=E_c\cdot A_c+E_s\cdot A_s, \tag{1}$$

$$E_{eqI}\cdot I_{eq}=E_s\cdot I_s+0.6\cdot E_c\cdot I_c, \tag{2}$$

$$G_{eq}\cdot A_{sc}=G_s\cdot A_s+G_c\cdot A_c。 \tag{3}$$

式中，E_s、E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量；A_{sc} 为 CFST 组合横截面面积，$A_{sc}=l^2$；A_s、A_c 分别为钢管和混凝土面积；I_s、I_c 分别为钢管和混凝土的截面惯性矩；$I_{eq}=l^4/12$ 为等效柱截面的截面惯性矩；G_s、G_c 分别为钢材和混凝土的剪切模量。式(1)～(3)即为保证轴压刚度、抗弯刚度和剪切刚度等效的方程。

采用等效轴压弹性模量 E_{eq} 作为 CFST 柱材料的弹性模量，可以实现等效后的单元截面与原 CFST 柱截面的轴压刚度相等，但截面的抗弯刚度和剪切刚度与原 CFST 柱截面的并不相等。此时再通过截面的抗弯刚度修正系数 κ_I 实现与原 CFST 柱截面抗弯刚度相等。当前，柱的抗弯刚度为 $E_{eq}\cdot I_{eq}$，因此为保证式(2)成立，需要对 $E_{eq}\cdot I_{eq}$ 进行修正，抗弯刚度修正系数 κ_I 应满足 $E_{eqI}\cdot I_{eq}=\kappa_I E_{eq}\cdot I_{eq}$。由此得到修正系数 κ_I 为

$$\kappa_I=E_{eqI}/E_{eq}, \tag{4}$$

根据材料剪切模量与弹性模量的关系可知：

$$G_{eq}=\frac{E_{eq}}{2(1+\nu_{eq})}, \tag{5}$$

式中，ν_{eq} 为材料的等效泊松比；根据截面剪切刚度相等，由式(1)、(3)和式(5)可以得到等效泊松比为

$$\nu_{eq}=\frac{E_s\cdot A_s+E_c\cdot A_c}{2(G_s\cdot A_s+G_c\cdot A_c)}-1。 \tag{6}$$

采用上述方法，对于截面为 $l\times t$ 的 CFST 柱，采用公式(1)、(4)和(6)确定其等效轴压弹性模量、抗弯刚度修正系数和等效泊松比后，就实现了与边长为 l 的方形截面柱轴压刚度、抗弯刚度和剪切刚度相等，正确反映了钢管混凝土柱的 3 种刚度，且容易编程和在现有有限元程序中实现。

根据质量相等的原则，求得等效后材料的等效质量密度 ρ_{eq} 为

$$\rho_{eqv}=\frac{\rho_c\cdot A_c+\rho_s\cdot A_s}{A_{sc}}, \tag{7}$$

式中，ρ_s，ρ_c 分别为钢材和混凝土的质量密度。这样就实现了等效柱与原钢管混凝土柱的质量相等。

2 CFST 截面轴力-弯矩极限破坏面

对于方钢管混凝土压弯构件，目前国内外有很多建议公式和计算方法，文中采用文献[7]中建议的极限面。该极限面为最常用的极限面方程之一，是采用大量试验和数值分析获得的，并与许多国内外试验进行了对比，结果吻合较好；与国内外许多规范、规程进行了对比，计算结果基本介于这些规范之间，比较合理。下面给出轴力 N_u、弯矩 M_{ux}、弯矩 M_{uy} 共同作用下双向压弯构件的相关极限破坏面方程（下标字符“u”代表极限面上的点）。

N_u 为压力，当 $N_u/N_{u0} \geqslant 2\eta_0$ 时：

$$\frac{N_u}{N_{u0}} + a \cdot {}^{1.8}\sqrt{\left(\frac{M_{ux}}{M_{u0}}\right)^{1.8} + \left(\frac{M_{uy}}{M_{u0}}\right)^{1.8}} = 1, \quad (8)$$

N_u 为压力，当 $N_u/N_{u0} < 2\eta_0$ 时：

$$-b \cdot \left(\frac{N_u}{N_{u0}}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N_u}{N_{u0}}\right) + {}^{1.8}\sqrt{\left(\frac{M_{ux}}{M_{u0}}\right)^{1.8} + \left(\frac{M_{uy}}{M_{u0}}\right)^{1.8}} = 1, \quad (9)$$

当 N_u 为拉力时：

$$\frac{N_u}{N_{ut0}} + {}^{1.8}\sqrt{\left(\frac{M_{ux}}{M_{u0}}\right)^{1.8} + \left(\frac{M_{uy}}{M_{u0}}\right)^{1.8}} = 1, \quad (10)$$

式中，N_{u0}、N_{ut0} 分别为极限轴压和轴拉承载力，M_{u0} 为纯弯 X 或 Y 向的极限抗弯承载力。a、b、c、η_0 为与截面约束效应有关的系数。公式(8)～(10)中极限承载力和参数的具体计算公式参见文献[7]。

3 CFST 截面轴力-弯矩塑性屈服面

纤维模型法可以较好的应用于钢管混凝土截面的屈服面(线)分析，Xtract 等很多截面计算工具均可以实现这一功能。但从实际应用的角度考虑，数值方法还是显得较为复杂，不便于工程应用。因此，本节对影响 CFST 压弯性能的钢材和混凝土强度、含钢率等主要参数进行了系统的分析，考察了参数变化对截面屈服承载力的影响规律，对所得大量计算结果进行统计分析，并与已有 CFST 截面极限面进行对比，从而提出了一种简化的方法，用以确定 CFST 截面的屈服面。

3.1 CFST 压弯截面屈服承载力的参数分析

首先以单向拉/压弯受力截面为研究对象进行了分析，然后扩展到双向受力截面。图 1 给出典型的单向受力截面的轴力 N-弯矩 M 极限相关曲线和屈服相关曲线，轴力以受压为正。

图 1 中下标含“r”的字符代表截面实际的屈服承载力。极限相关曲线由公式(8)～(10)计算得到，图中虚线由纤维模型法计算得到的实际屈服相关曲线。从图 1 中可以清楚的看出截面的极限相关线和屈服相关曲线形状相似。因此屈服相关线可以通过对极限相关线的折减来确定，图 1 也给出折减极限相关线后得到的屈服相关线示意。

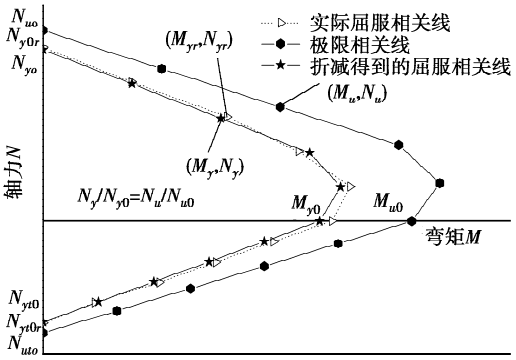

图 1 截面相关曲线示意图

对于拉弯段，极限相关线和屈服相关线都是直线，如图 1 所示。因此拉弯段的屈服相关线方程比较容易确定。只需求得单向受拉时折减得到的屈服拉力 N_{yt0} 和单向受弯时折减得到的屈服弯矩 M_{y0}，然后用直线相连。

对于压弯段，屈服相关线可以通过对极限相关线的弯矩和轴力同时进行折减来求得，即令：

$$M_y = A \cdot M_u$$
$$N_y = B \cdot N_u, \quad (11)$$

式中，A、B 分别为屈服弯矩和轴力的折减系数。而 (M_u, N_u) 和 (M_y, N_y) 分别为极限相关线和折减得到的屈服相关线上对应的两点。

对于压弯段，除了纯弯点和纯压点外，弯矩和轴力需要同时进行折减，此时对于任一极限点其相应屈服点的弯矩和轴力都是变化的，极限点和相应的屈服点难确定。从图 1 可以看出，取极限相关线上任一点轴力 N_u 与单轴受压时的极限轴力 N_{u0} 的比值等于实际屈服面(或折减屈服面)上任一点轴力 $N_{yr}(N_y)$ 与单轴受压时的屈服轴力 $N_{y0r}(N_{y0})$ 的比值，即令 $n = N_{yr}/N_{y0r} = N_y/N_{y0} = N_u/N_{u0}$ 时，当 n 从 0 到 1 变化时，极限相关线上的点和屈服相关线上的点是一一对应的。这样就确定了极限相关线与屈服相关线上一一对应的点。

关键问题就是折减系数 A 和 B 的确定。下面采用基于纤维模型法的 Xtract 截面分析工具对实际工程中常用的 CFST 柱截面的屈服承载力进行参数分析，并与公式(8)和(9)给出的极限承载力进行比较，最后对所得结果进行统计和分析，从而确定系

数 A 和 B。

分别选用 78 个不同 CFST 构件截面，每个截面分别选取对应的 5 对数据，共计 390 对数据，如表 1 所示。截面边长的变化范围为 140～1 500 mm，含钢率 α($\alpha = A_s/A_c$)的变化范围为 0.03～0.19，约束效应系数标准值 ξ($\xi=\alpha(f_y/f_{ck})$变化范围为 0.35～3.1，钢材屈服强度变化值 200～420 MPa，混凝土强度等级 C30～C80。实际工程应用中，为更充分发挥钢管和混凝土的性能，相关规程[8-9]和文献[7]中均建议了合理的钢管和混凝土材料的组合。一般情况下，钢管混凝土的约束效应系数标准值不宜大于 4，也不宜小于 0.3。因此所选取用于分析的截面样本具有一般代表性。

表 1　CFST 压弯截面屈服承载力与极限承载力的比值

序号	边长 /mm	壁厚 /mm	含钢率	ξ	f_y /MPa	f_{cu} /MPa	截面数量	数据对的数量
1	140	2～5	0.06～0.16	0.48～3.10	215～390	30～50	9	45
2	250	2～10	0.03～0.18	0.35～2.80	215～420	30～50	9	45
3	400	5～15	0.08～0.17	0.87～2.60	215～380	30～60	12	60
4	600	15～25	0.10～0.19	0.87～2.79	205～360	30～60	9	45
6	800	10～34	0.05～0.17	0.80～3.02	310～420	30～80	9	45
7	1 000	15～35	0.04～0.16	0.44～1.95	215～360	30～60	9	45
8	1 200	10～50	0.03～0.19	0.40～1.69	200～340	30～70	9	45
9	1 500	20～60	0.06～0.18	0.53～1.98	310～420	30～80	12	60
总计	140～1 500	2～60	0.03～0.19	0.35～3.10	200～420	30～80	78	390

表 2　数据统计结果

边长/mm		140	250	400	600	800	1 000	1 200	1 500	样本总计	
										均值	标准差
弯矩比 $\frac{M_{yr}}{M_u}$	均值	0.818	0.823	0.826	0.805	0.835	0.824	0.825	0.824	0.823	0.042 5
	均方差	0.045	0.050	0.046	0.034	0.031	0.045	0.047	0.035		
轴力比 $\frac{N_{yr}}{N_u}$	均值	0.903	0.910	0.910	0.896	0.924	0.925	0.907	0.906	0.910	0.028 5
	均方差	0.042	0.033	0.028	0.020	0.021	0.025	0.027	0.017		

表 2 给出了 78 个样本截面分析得到的数据统计结果，分别采用实际屈服承载力与极限承载力比值：弯矩比 M_{yr}/M_u 和轴力比 N_{yr}/N_u 来表示。根据表 2 中样本的均值和标准差求得弯矩比和轴力比数据的变异系数分别为 0.052 和 0.031，可知样本的标准差和变异系数均较小，数据点分布比较集中，离散程度小。

为了解弯矩比和轴力比数据点的分布情况，给出了弯矩比和轴力比的直方图，其中弯矩比的变化区间为[0.678，0.950]，轴力比的变化区间为[0.807，0.964]。图 2 为弯矩比和轴力比的直方图。

直方图的外廓曲线基本接近于总体的概率密度曲线，从图 2 中可以看出，直方图的外廓线有一个峰，中间高，两端低，基本上比较对称，因此假设弯矩比和轴力比分别为表 2 给出的总体均值和标准差的正态分布 $N(0.823,0.042\ 5)$和 $N(0.910,0.028\ 5)$。对弯矩比和轴力比分别采用“χ^2 检验法”和“偏度、峰度检验法”[13]两种方法进行分布拟合检验。

经检验认为弯矩比和轴力比数据来自正态分布总体。因此：

$$\begin{aligned}\frac{M_{yr}}{M_u} &\sim N(0.823,0.042\ 5),\\ \frac{N_{yr}}{N_u} &\sim N(0.91,0.028\ 5),\end{aligned} \tag{12}$$

对于折减系数 A 和 B，取弯矩比和轴力比随机变量的均值，为简化取弯矩折减系数 A 为 0.8，轴压

力折减系数 B 为 0.9。

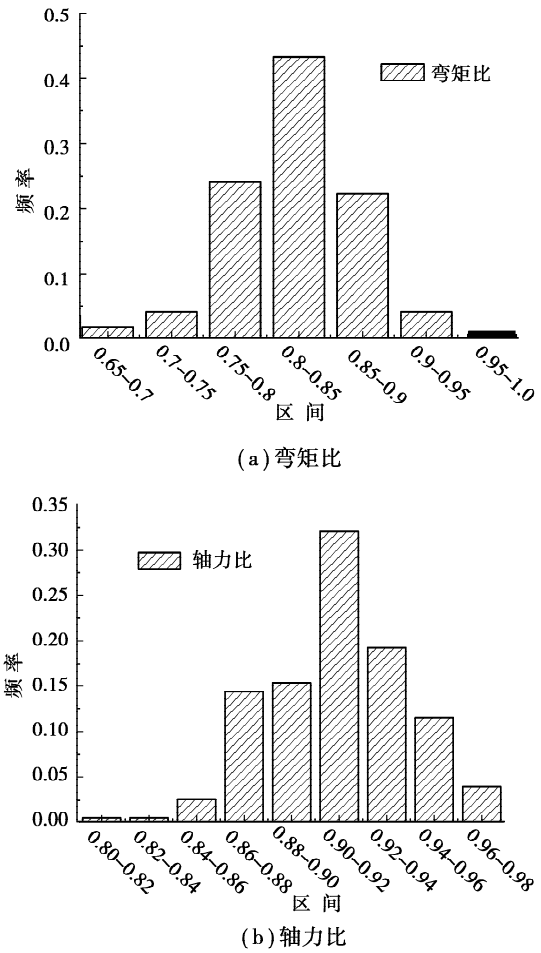

图 2 数据分布直方图

在拉弯段中，CFST 构件轴心受拉，钢管受拉屈服时，其受拉屈服承载力近似为 $N_{yt0}=f_yA_s$，受拉极限承载力 $N_{ut0}=1.1\ f_yA_s$，因此 $N_{yt0}=0.909\ N_{ut0}$，与轴压力的折减系数 0.9 比较相近。因此轴向力折减系数统一取为 0.9。拉弯段的极限相关线和屈服相关线均为直线，纯弯点和轴心受拉点的弯矩和轴力的折减系数即为其相应的弯矩折减系数和轴力折减系数。由以上的分析可知，轴力折减系数为 0.9，弯矩折减系数为 0.8 和压弯段的轴力折减系数和弯矩折减系数相同。

3.2 CFST 截面轴力-弯矩相关屈服面的简化确定方法

对于单轴受力截面，取式(8)～(10)中 M_{ux} 或 M_{uy} 为 0，得到以 M_u 和 N_u 表示的极限相关曲线以后，将 $M_y=0.8\ M_u$，$N_y=0.9\ N_u$ 代入极限相关线，经化简就可以得到 CFST 截面轴力—弯矩相关屈服曲线：

轴力为压力时：

1)当 $N_y/N_{u0}\geqslant 1.8\eta_0$ 时：

$$\frac{M_y}{M_{u0}}=\frac{1}{\alpha}(0.8-0.889\frac{N_y}{N_{u0}}),\tag{13}$$

2)当 $N_y/N_{u0}<1.8\eta_0$ 时：

$$\frac{M_y}{M_{u0}}=0.8+0.889c\cdot(\frac{N_y}{N_{u0}})+0.988b\cdot(\frac{N_y}{N_{u0}})^2,\tag{14}$$

轴力为拉力时：

$$\frac{M_y}{M_{u0}}=0.8-0.889\frac{N_y}{N_{ut0}},\tag{15}$$

式中，下标字符“y”代表屈服面上的点。其他参数取值均同极限破坏面方程式(8)～(10)的取值。

将 M_y/M_{u0} 以 $[(M_{yx}/M_{u0})^{1.8}+(M_{yx}/M_{u0})^{1.8}]^{-1.8}$ 代入式(13)～(15)即可得到双向受力截面的塑性屈服面(M_{yx}、M_{yy} 分别表示双向弯曲下 X 向和 Y 向的屈服弯矩，下标第一个字符“y”表示屈服)[7]。实际应用中，屈服面是由空间相关的屈服曲线生成的，为了使公式便于使用和编程实现，令 $M_{yy}=kM_{yx}$，得到以简化形式表示的轴力—弯矩屈服相关面。

轴力为压力时：

1)当 $N_y/N_{u0}\geqslant 1.8\eta_0$ 时：

$$\frac{M_{yx}}{M_{u0}}=\frac{d}{\alpha}(0.8-0.889\frac{N_y}{N_{u0}}),\tag{16}$$

2)当 $N_y/N_{u0}<1.8\eta_0$ 时：

$$\frac{M_{yx}}{M_{u0}}=d[0.8+0.889c\cdot(\frac{N_y}{N_{u0}})+0.988b\cdot(\frac{N_y}{N_{u0}})^2],\tag{17}$$

轴力为拉力时：

$$\frac{M_{yx}}{M_{u0}}=d(0.8-0.889\frac{N_y}{N_{ut0}}),\tag{18}$$

式中 $d=1/^{1.8}\sqrt{1+k^{1.8}}$。由式(16)～(18)求得给定轴力作用下的 M_{yx} 后，乘以系数 k 即可求得 M_{yy}。

3.3 方法验证

为了验证简化方法的正确性，以文献[14]中截面为 250 mm × 10 mm 和文献[15]中截面为 140 mm×4 mm 单轴压弯的 CFST 柱为例，采用本文建议方法和截面纤维单元软件 Xtract，计算截面的单向压弯作用下轴力—弯矩屈服相关曲线。钢材及混凝土的材料性能参数如表 3 和 4 所示。

表 3 钢材力学性能指标

截面编号	截面尺寸/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa
S1	250×10	242.2	390	169.6E+3
S2	140×4	361	433.8	206.2E+3

表 4　混凝土的材料强度

截面编号	截面尺寸/mm	f_{cu}/MPa	f_{ck}/MPa	E_c/MPa
S1	250×10	41.0	27.5	32.8E+3
S2	140×4	52.6	34.0	33.8E+3

图 3 给出了采用简化方法和纤维模型法计算得到的截面轴力-弯矩相关屈服相关曲线的比较。

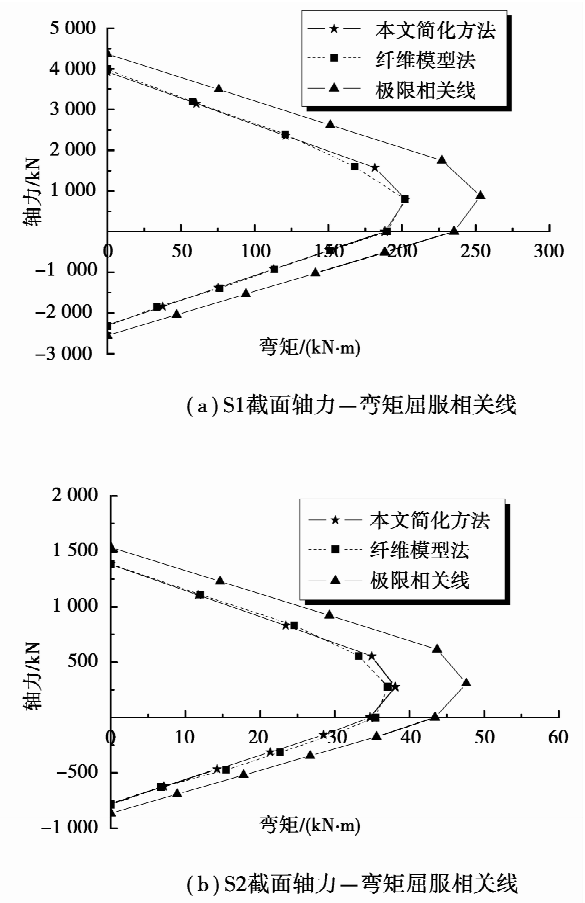

图 3　轴力—弯矩屈服相关线比较

从图 3 中可以看出采用纤维模型法计算得到的屈服相关线与文中的简化方法得到的屈服线比较接近，因此简化计算公式是合理可用的。

3.4　考虑材料变化的屈服面简化确定方法

上节中提出了 CFST 压弯构件屈服面的一种确定方法。基于不同截面的大量参数分析可知，在文中给出的截面参数范围内，不考虑材料和截面本身的变异性，提出的弯矩和轴力折减系数均可以采用。

若需要考虑材料的变异性或者构件截面的参数特征不在文中参数分析的范围内，可以通过确定构件截面纯弯、纯压和纯拉 3 个典型受力状态时屈服承载力和极限承载力的比值，给出弯矩、轴向压力和拉力近似的折减系数，进而通过极限面的折减获得屈服面。

4　结　论

文中给出了实现建立非线性构件单元与原方钢管混凝土构件轴压刚度、弯曲刚度、剪切刚度等效以及质量等效的方法。并根据已有的方钢管混凝土截面轴力-弯矩相关极限破坏面，通过大量方钢管混凝土截面非线性力学性能的数值分析，提出了方钢管混凝土截面轴力-弯矩塑性屈服相关曲面的简化计算公式。该方法可以通过简单的自编程序实现，也可以在现有的大型有限元分析软件中实现。

参考文献：

[1] CHI KIN IU. Inelastic finite element analysis of composite beams on the basis of the plastic hinge approach[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2912-2922.

[2] SCOTT, MICHAEL H, FENVES, GREGORY L. Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(2): 244-252.

[3] KRISHNAN, SWAMINATHAN. Modeling steel frame buildings in three dimensions I: panel zone and plastic hinge beam elements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(4):345-358.

[4] LU, C K, BRADFORD, M A, CHEN, W F. Second-order inelastic analysis of composite framed structures based on the refined plastic hinge method [J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 799-813.

[6] 楚留声，白国良. 型钢混凝土框架 pushover 分析[J]. 地震工程与工程振动，2009，29(2):51-56.
CHU LIU-SHENG, BAI GUO-LIANG. Pushover analysis of steel reinforced concrete frame[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2):51-56.

[6] 缪志伟，吴耀辉，马千里，等. 框架-核心筒高层混合结构的三维空间弹塑性抗震分析[J]. 建筑结构学报，2009，30(4):119-129.
MIAO ZHI-WEI, WU YAO-HUI, MA QIAN-LI, et al. Seismic performance evaluation using nonlinear time history analysis with three-dimensional structural model for a hybrid frame-core tube structure [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4):119-129.

[7] 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.

(下转第 93 页)

复策略，在路径实际失效之前就完成修复工作。通过在 NS-2 平台上的仿真实验表明，和传统的 AODV 协议相比，EEMPR 算法在路由控制开销略有增加的情况下，能够适应拓扑结构的动态变化，尽可能的避免链路断裂，提高了分组平均投递率，降低了数据分组端到端平均时延，同时能够实现网络中的能量高效，延长了网络寿命。

参考文献：

[1] PERKINS C E, MROYER E, DAS S. Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) Routing[S]. RFC 3561, 2003.

[2] JOHNSON D. The dynamic source routing for mobile Ad hoc networks[EB/OL]. [2004208209]. IETF Internet Draft. http://www. ietf. org/internet-drafts/draft-ietf- manet-dsr-10. txt.

[3] SINGH S, WOO M, RAGHAVENDRA C. Power-aware routing in mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of Int'l Conf. on Mobile Computing And Networking, Mobicom' 98. [s. l.]: IEEE, 1998: 181-190.

[4] DONGKYUN K, GARCIA L, ACEVES J J, et al. Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2(2): 161-173, 2003.

[5] KYUNGTAE W, CHANSU Y, DONGMAN L, et al. Non-blocking, localized routing algorithm for balanced energy consumption in mobile ad hoc networks[C]//9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. [s. l.]: IEEE, 2001: 117-124.

[6] TOH C K. Associativity-based routing for Ad-Hoc networks[J]. Wireless Personal Communications, 1997, 4(2): 1-36.

[7] WANG Y H, CHUANG C C. Ad hoc on-demand backup node setup routing protocol[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2003, 20(5): 821-843.

[8] GOFF T N B, GHAZALEH A B, PHATAK D S, et al. Preemptive routing in ad hoc networks[C]//7th Int. Conference on Mobile Computing and Networking. [s. l.]: IEEE, 2001: 43-52.

[9] 于宏毅. 无线移动自组织网[M]. 北京：人民邮电出版社，2005.

[10] SU W, GERLA M. IPv6 flow handoff in ad-hoc wireless networks using mobility prediction[C]. IEEE GLOBECOM. 1999: 271-275.

[11] 肖百龙，郭伟，刘军，等. 移动自组网路由局部修复算法的研究[J]. 计算机研究与发展，2007，44(8)：1383-1389.
XIAO BAI-LONG, GUO WEI, LIU JUN, et al. Research on local route repair algorithm in mobile ad hoc networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(8): 1383-1389.

[12] 胡甜，周颢，赵保华. 无线 Ad hoc 网络中的负载平衡广播路由算法[J]. 通信学报，29(7)：129-134，2008.
HU TIAN, ZHOU HAO, ZHAO BAO-HUA. Load-balanced broadcast routing in wireless Ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(7): 129-134.

[13] Network Simulator-NS2 [EB/OL]. [2007-05-20]. http:// www. isi. edu /nsnam/ns/.

（编辑　侯　湘）

（上接第 75 页）

[8] 中国工程建设标准化协会. CECS 159：2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京：中国标准出版社，2004.

[9] 福建省建设厅. DBJ13-51-2003 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州：福建省建设标准，2003.

[10] Eurocode 4, 1994. Design of composite steel and concrete structures, Part. 1: General rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document)[S]. DD ENV 1994-1-1: 1994, British Standard Institution, London W1A2BS.

[11] 李珠，郭秀华，张文芳，等. 中国国家大剧院分析中钢管混凝土柱的简化分析[J]. 工程力学，2004，21(4)：34-38.
LI ZHU, GUO XIU-HUA, ZHANG WEN-FANG, et al. Simplified analysis of concrete filled tubular columns in the structural analysis of national grand theatre of China[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 34-38.

[12] 陈麟，张素梅，陈洪涛，等. 钢管混凝土空间框架的刚度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报，2001，34(2)：22-26.
CHEN LIN, ZHANG SU-MEI, CHEN HONG-TAO, et al. Stiffness analysis for concrete-filled steel tubular space frame[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture 2001, 34(2): 22-26.

[13] 盛骤，谢式千，潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京：高等教育出版社，1997.

[14] 张建辉. 方钢管混凝土框架柱的抗震性能分析[D]. 天津：天津大学，2004.
ZHANG JIAN-HUI. Study on seismic behaviors of concrete filled square steel tubular frame columns[D]. TianJin: Tianjin University, 2004.

[15] 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 WEN-DA, HAN LIN-HAI, TAO ZHONG. Experimental research on seismic behavior of concrete filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 48-58.

（编辑　陈移峰）