

圆钢管混凝土桥墩弯矩-曲率关系分析

臧博¹, 朱东生¹, 冯长友², 向中富¹

(1. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 依据2个常用的钢管混凝土材料本构模型, 采用纤维模型法编制了MATLAB计算程序, 以分析钢管混凝土桥墩的截面弯矩-曲率关系。理论计算得到的弯矩-曲率关系曲线与国外学者进行的实验结果吻合较好, 表明程序具有良好的适用性。并进一步分析了套箍系数、轴压比对钢管混凝土桥墩弯矩-曲率关系的影响。

关键词: 钢管混凝土桥墩; 纤维模型法; 弯矩-曲率关系

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1647-0696-(2011)01-0013-06

Moment-Curvature Relationship of Circular CFST Piers

ZANG Bo¹, ZHU Dong-sheng¹, FENG Chang-you², XIANG Zhong-fu¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Gansu Provincial Changda Expressway Co. Ltd, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: According to two commonly used constitutive models of concrete-filled steel tube (CFST), a MATLAB program is coded by fiber model method in order to calculate the moment-curvature relationship of concrete-filled steel tube piers. It is proved that the program is serviceable through comparing theoretical calculations with experiment data. Based on the above summarizations, the effect of confining coefficients and axial load ratio on moment-curvature relation is analyzed.

Key words: concrete-filled steel tube piers; fiber model method; moment-curvature relation

钢管内填充混凝土可以显著提高构件的强度和延性; 钢管对核心混凝土提供约束作用, 可提高其承载能力, 同时混凝土可以延缓钢管的局部屈曲。2种材料相互作用弥补了彼此的弱点, 从而使钢管混凝土的承载力高于钢管和核心混凝土单独承载力之和。此外, 钢管混凝土还有用料省、自重轻、施工方便等优点, 因此在工程中的应用越来越广泛。在桥梁工程中, 钢管混凝土结构目前主要用于拱桥拱圈的施工。

随着钢管混凝土结构的应用推广, 近年来, 国内外学者对钢管混凝土结构性能进行了大量的研究工作。Michel Bruneau^[1]等比较了AISC LRFD、CAN/CSA-S16和Eurocode4设计规范在计算钢管混凝土压弯构件承载力时的区别, 并将计算值与试验结果进行了对比。结果表明: 上述3种设计规范偏于保守, 因此笔者提出了一个更为合理的承载力计算公式, 该公式已被AISC LRFD、CAN/CSA-S16的修订版采纳。

George D. H.^[2]根据其完成的钢管混凝土短柱

在轴压、纯弯以及压弯组合作用下的承载力试验结果, 发现Eurocode 4的推荐公式比较适用, 而由ACI、AISC、CECS设计规范计算得到的结果与试验结果相差较大。并在试验结果的基础上, 采用回归分析法提出了圆钢管混凝土极限轴力计算公式和N-M曲线的函数关系式。

Yong Bong Kwon^[3]等进行了方钢管混凝土在轴力作用下的水平往复荷载试验, 试件包括6个方钢管混凝土短柱、13个长柱以及8个方形空钢管。研究结果表明: 方形钢管混凝土有着较好的延性和较高的承载力, 构件的屈服弯矩主要受轴压比和宽厚比的影响。

潘友光^[4]采用纤维模型法研究钢管混凝土的轴压荷载-变形关系, 并提出了简化的承载力计算公式。谭克峰^[5]对18个圆钢管高强混凝土试件的试验结果表明圆钢管混凝土短柱具有较好的延性和较高的承载力。

上述研究多数是关于钢管混凝土常规设计承载力的试验, 而在抗震设计中, 除了需要了解构件的最

收稿日期: 2010-11-10; 修订日期: 2010-12-20

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BA6028); 甘肃省交通厅交通建设科技项目(GJR200806)

作者简介: 臧博(1986-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: zangbocque@163.com。

大承载力外,还需要考虑构件的非线性变形能力,目前针对这方面的研究相对较少。日本学者较早地开展了钢管混凝土结构的抗震性能的研究工作。1995年阪神地震中,许多钢桥墩发生了局部屈曲破坏,为防止此类破坏现象的再次发生,提高钢桥墩的抗震性能,日本在此后的加固工作中采用了在既有钢桥墩内填充混凝土的加固方法。研究发现,钢管混凝土桥墩具有良好的抗震性能。Ge H. B. [6] 等对比了钢管部分填充混凝土桥墩非线性动力分析的2种方法:①单自由度体系法(SDOF),在分析过程中将桥墩简化为没有质量的非线性弯曲弹簧,弹簧采用双线性或三线性的力-位移滞回模型;②纤维模型分析法,分析过程中钢材、混凝土分别使用各自在往复荷载作用下的应力-应变关系。并将计算值与拟动力试验值进行了比较,结果表明:在最大位移需求方面,采用三线性滞回模型的单自由度体系法和采用纤维模型分析法计算得到的结果与试验结果吻合较好。此后,日本在震后桥梁抗震加固工作中,除了钢桥墩内填混凝土外,许多混凝土桥墩也采用了外套钢管加固技术[7-8]。

1 材料的应力-应变关系

为了分析钢管混凝土构件的弯矩-曲率关系,首先应该确定钢材和核心混凝土的应力-应变关系模型。钢管混凝土力学性能的复杂之处主要在于难以准确描述钢和核心混凝土之间的相互作用,不同学者分析的角度不同,因而采取的计算参数也不同。国内学者多采用套箍系数,国外多采用径厚比。

笔者选取了2个常用的圆钢管混凝土本构模型,分别是由韩林海[9]和George D. H. [10]首先提出来的。这2个圆钢管混凝土材料本构模型的主要特点如下所述。

1.1 韩林海提出的材料本构模型[9]

1.1.1 混凝土本构关系(图1)

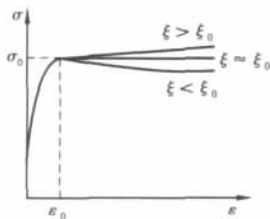


图1 混凝土本构关系曲线

Fig.1 Concrete constitutive relation curves

核心混凝土达到峰值应力之前,曲线形式为上升抛物线;达到峰值应力之后,下降段的应力-应变关系曲线随着套箍系数的增大逐渐抬升,趋于平缓甚至成为上升段。

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (1)$$

$$y = \begin{cases} 1 + q(x^{0.1\xi} - 1) \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x} \end{cases} \quad \begin{matrix} (\xi \geq 1.12) \\ (\xi < 1.12) \end{matrix} \quad (x > 1) \quad (2)$$

其中:无量纲参数 x, y 分别为:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (4)$$

峰值应力 σ_0 、峰值应力处的应变 ε_0 分别为:

$$\sigma_0 = \left[1 + (-0.054\xi^2 + 0.4\xi) \left(\frac{24}{f_c} \right)^{0.45} \right] f_c \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \left(\frac{f_c}{24} - 1 \right) \right] \xi^{0.2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5f_c \quad (7)$$

套箍系数 ξ 为:

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (8)$$

式中: A_s 为钢管面积; A_c 为核心混凝土面积; f_y 为钢材屈服强度; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值。

$$q = \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi} \quad (9)$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{1.025 + (\xi - 0.5)^{0.7}} f_c^2 \times 3.51 \times 10^{-4} \quad (10)$$

1.1.2 钢材本构关系

对于钢材,采用双折线模型,其中强化段的模量可以取 $0.01E_s$, E_s 为钢材的弹性模量(图2)。

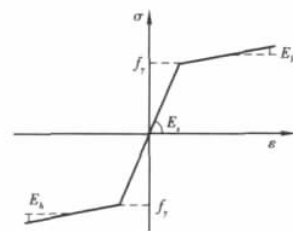


图2 钢材本构关系曲线

Fig.2 Steel constitutive relation curves

1.2 George D. H. 提出的材料本构模型[10]

1.2.1 混凝土本构关系(图3)

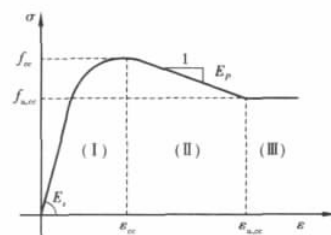


图3 混凝土本构关系曲线

Fig.3 Concrete constitutive relation curves

1) 曲线 I 采用 3 次多项式

$$\sigma = A\varepsilon + B\varepsilon^2 + C\varepsilon^3 \quad (11)$$

其中: $A = E_c$ (12)

$$B = \frac{3f_{cc} - 2E_c\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cc}^2} \quad (13)$$

$$C = \frac{E_c\varepsilon_{cc} - 2f_{cc}}{\varepsilon_{cc}^3} \quad (14)$$

E_c 为混凝土的初始模量,采用 Eurocode 推荐的公式计算:

$$E_c = 600f_c \quad (15)$$

$$\text{峰值应力 } f_{cc} \text{ 处的应变 } \varepsilon_{cc} = 0.002 \cdot 2 \frac{f_{cc}}{f_c} \quad (16)$$

式中: f_c 为无约束混凝土的抗压强度; f_{cc} 为约束混凝土的峰值应力,采用 Richart 等得出的经验公式:

$$f_{cc} = f_c + kf_{rp} \quad (17)$$

f_{rp} 为约束应力,可由平衡关系导出(图 4):

$$f_{rp} = \frac{2\sigma_h t}{D - 2t} \quad (18)$$

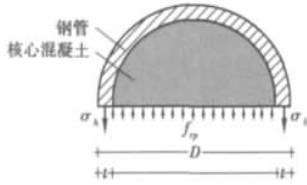


图 4 约束应力与套箍应力

Fig. 4 Diagram of confining stress and hoop stress

σ_h 为钢管套箍应力,与钢材的屈服应力 f_y 有如下的关系:

$$\frac{\sigma_h}{f_y} = \exp [\ln(D/t) + \ln(f_y) - 11] \leq 1.0 \quad (19)$$

2) 曲线 II 采用下降直线的形式,斜率 E_p 为混凝土的塑性模量。

$$E_p = -1500 \left\{ 1 - \left[1 + \exp \left(\frac{Df_c}{t f_y} - 6 \right) \right]^{-1} \right\} \quad (20)$$

3) 曲线 III 为水平直线。

$$f_{u,cc} = f_{cc} + E_p (\varepsilon_{u,cc} - \varepsilon_{cc}) \quad (21)$$

$$\varepsilon_{u,cc} = 0.06f_c^{-0.7} + 0.003f_{rp} \quad (22)$$

1.2.2 钢材的本构关系

采用线性硬化弹塑性模型,并考虑 Von Mises 屈服条件(图 5 ~ 图 6)。

$$E_h = 0.0025E_s \quad (23)$$

$$f_{su} = 1.25f_y \quad (24)$$

由 Von Mises 屈服准则可得:

$$f_{yt} = 0.5(\sigma_h + \sqrt{4f_y^2 - 3\sigma_h^2}) \quad (25)$$

$$f_{yc} = 0.5(\sigma_h - \sqrt{4f_y^2 - 3\sigma_h^2}) \quad (26)$$

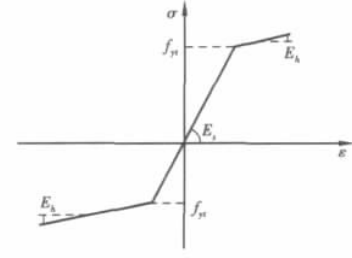


图 5 钢材本构关系曲线

Fig. 5 Steel constitutive relation curves

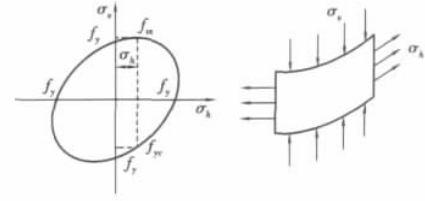


图 6 Mises 屈服面

Fig. 6 Von Mises yield surface

2 基于纤维模型法的弯矩-曲率关系

2.1 计算方法简介

纤维模型法是计算构件截面弯矩-曲率关系的一种常用方法,其基本思想是将构件截面划分为若干小的长条或方块,假定各条块上的应变在条块内是相同的,由截面曲率得到各条块的应变,根据本构关系可以得到各条块的轴力,进而得到整个截面的轴力及弯矩。本文在计算时采用了如下假定:

- 1) 在变形过程中平截面假设始终成立。
- 2) 钢和混凝土之间无相对滑移。
- 3) 忽略剪力对变形的影响。

将截面合理划分条块后,按照下述过程计算就可得到截面的弯矩曲率关系:

- 1) 给定轴力 N ,并设定截面底端的参考应变 ε : 从 0 开始,每一级加 $\Delta\varepsilon$ 。
- 2) 假设中和轴高度 h 。
- 3) 确定截面曲率 $\phi = \varepsilon/h$ 。
- 4) 计算各纤维条块中心处的应变。
- 5) 由材料本构关系,计算得到各纤维条块的应力。

6) 计算纤维条块内力,计算 M_{in} ,并输出 M_{in} 和相应的 ϕ 值;否则调整受压区高度: $N_{in} > N$,降低受压区高度;反之,则增大受压区高度。

- 7) 重复 1) ~ 6),直至满足如下任何一个破坏条件: ①混凝土超过极限应变; ②钢材超过极限应变; ③弯矩值下降至最大弯矩的 80%。

2.2 算例对比

根据上述过程,笔者利用 MATLAB 编写了计算

程序,程序数据输入简单,使用方便。为验证程序的正确性,选择文献[11-12]中的试件作为计算对

象。图7是采用作者编写的程序计算得到的结果与试验结果的比较。

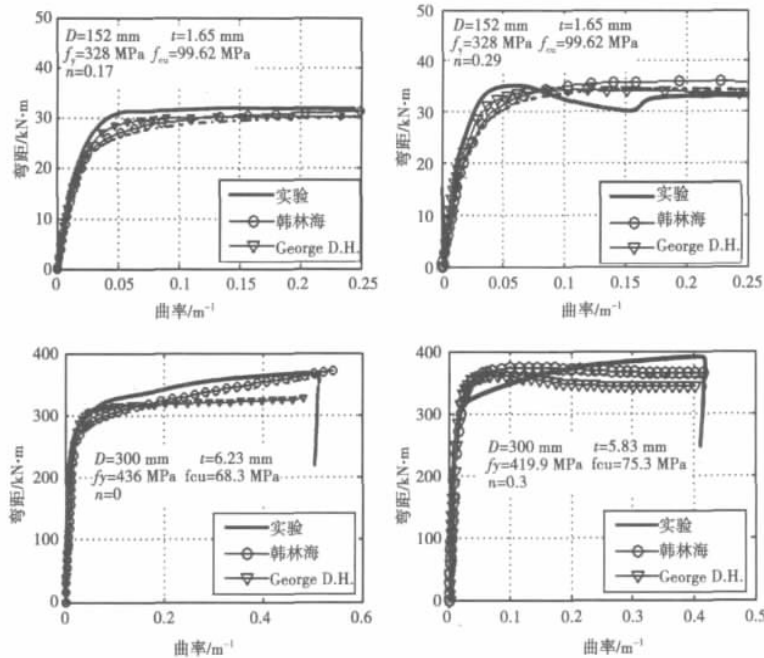


图7 圆钢管混凝土 $M-\phi$ 关系曲线

Fig.7 Moment-curvature relation curve of circular CFST

图中 D 为钢管直径; t 为钢管壁厚; f_y 为钢材屈服强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; n 为轴压比,粗实线表示实验得到的弯矩-曲率关系曲线“o”表示采用韩林海提出的材料模型计算出来的弯矩-曲率关系曲线“▽”表示采用 George D. H. 提出的材料模型计算出来的弯矩-曲率关系曲线。对比结果表明:在实验条件下,2个计算模型并无较大差别。理论计算得到的弯矩-曲率关系曲线与实验结果总体上吻合较好,各试件的极限承载力、极限曲率的试验值和计算值基本吻合,计算结果较准确的反映了构件的刚度、屈服弯矩等基本信息。

3 弯矩-曲率关系的影响因素

国内外学者结合各自的研究分析了各种因素对弯矩-曲率关系的影响。文献[13]认为影响弯矩-曲率关系的因素主要有径厚比(D/t)、钢材屈服强度(f_y)、混凝土抗压强度(f_c)、轴压比(n),并采用纤维模型法编制了基于性能的分析程序(PBA Program),通过该程序计算上述因素对弯矩-曲率关系的影响,得到以下结论:提高钢材和混凝土的强度可以增大构件的承载力,但降低了构件的延性;增大径厚比、轴压比会降低构件的承载力、刚度、延性。文献[14]研究了含钢率(α)、钢材屈服强度(f_y)、混凝土抗压强度(f_c)、轴压比(n)对弯矩-曲率关系的影响,得到了类似的结论,但认为钢材、混凝土强度

的变化对构件刚度影响不大,提高钢材屈服强度可以增大构件的屈服弯矩。

笔者针对2个对钢管混凝土桥墩弯矩-曲率关系曲线影响比较大的因素:套箍系数和轴压比进行分析。计算采用如下基本条件: $D = 1\,000\text{ mm}$, HRB335 钢, C40 混凝土。

3.1 套箍系数 ξ

在截面尺寸一定的情况下($D = 1\,000\text{ mm}$),通过改变钢管厚度可以调整套箍系数。固定轴压比的同时($n = 0.2$),取不同的套箍系数,采用本文第2.1节所述的自编程序,可以计算得到不同套箍系数下的截面弯矩-曲率关系曲线,图8是部分计算结果。

从图8可以看出,在其他条件相同的情况下,随着套箍系数的不断增大,构件在弹性阶段的刚度逐渐提高,而构件进入弹塑性阶段后,2个模型计算出来的弯矩-曲率关系曲线有一定差距。这主要是由于2个模型对核心混凝土本构关系定义不同造成的:在钢管厚度 t 较小时(如图8中的 $\xi = 0.51$,此时 $t = 10\text{ mm}$, $D/t = 100$),George D. H. 模型中钢管对混凝土的约束效应不明显,在这种情况下2个模型在弹塑性阶段的弯矩-曲率关系曲线差别较大。随着钢管厚度 t 不断增大,在韩林海模型中,套箍系数 ξ 逐渐增大,由公式(2)可知,混凝土本构关系中的下降段不断抬升,甚至当 $\xi > 1.12$ 时成为上升段;而在

George D. H. 模型中,径厚比 D/t 不断减小,由公式 20 可知,斜率 E_p 逐渐趋近于 0,混凝土本构关系中的下降段不断抬升逐渐趋近水平,但不会出现上升段。

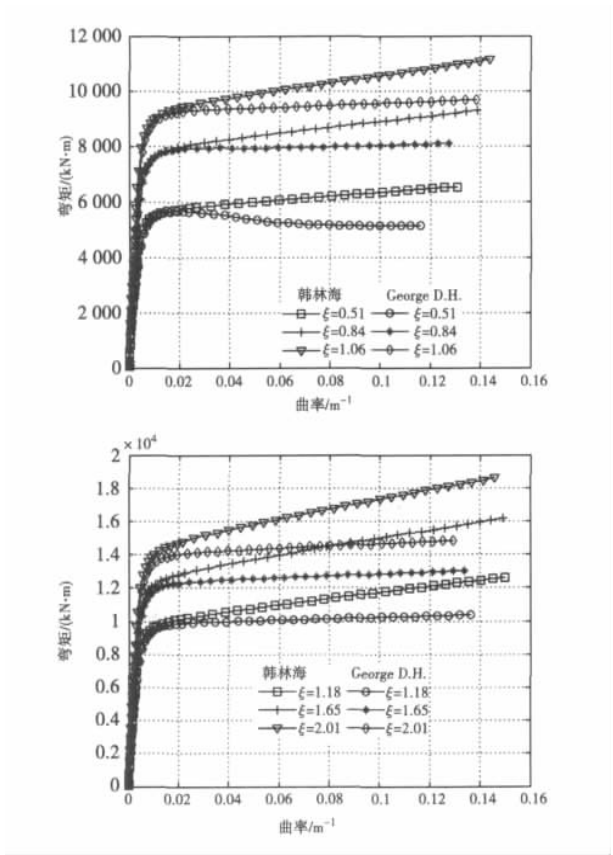


图 8 套箍系数对 $M-\phi$ 关系曲线的影响
Fig.8 The effect of confining coefficient on moment-curvature relation

图 9 列出了不同套箍系数下的屈服弯矩,可以看出,随着套箍系数的增大,屈服弯矩也越来越大,二者之间有比较明显的线性关系。

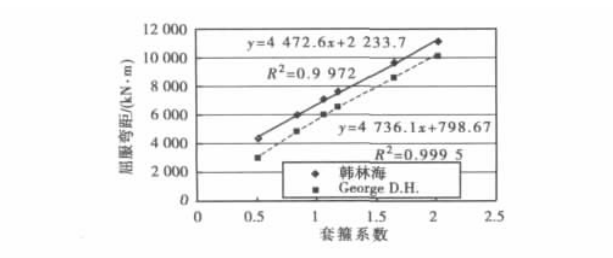


图 9 屈服弯矩与套箍系数的关系
Fig.9 Relationship between yield moment and confining coefficient

3.2 轴压比 n

在截面尺寸及钢管厚度一定的情况下 ($t = 16\text{ mm}$, $D = 1\text{ }000\text{ mm}$, 此时 $\xi = 0.84$), 采用前述的自编程序,取不同的轴向压力,可以计算得到不同轴压比下的截面弯矩-曲率关系曲线,图 10 列出了部

分计算结果。

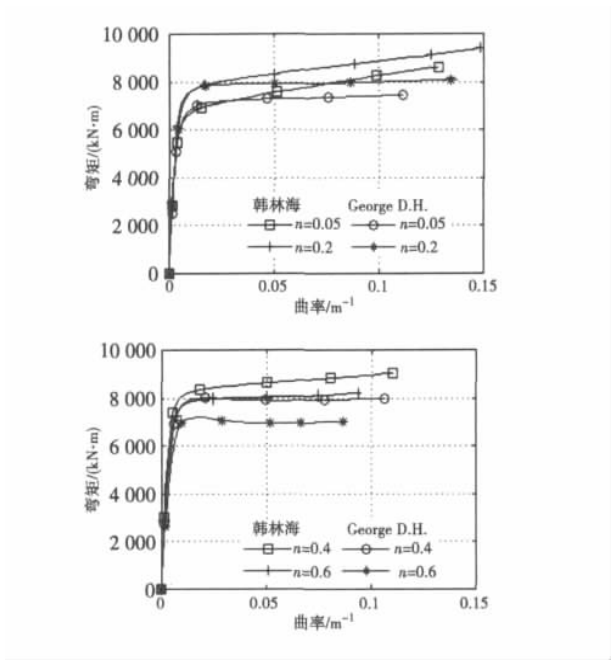


图 10 轴压比对 $M-\phi$ 关系曲线的影响
Fig.10 The effect of axial load ratio on moment-curvature relation

从图 10 可以看出,在其他条件相同的情况下,轴压比 n 对构件弹性阶段的刚度影响不大。

图 11 列出了不同轴压比下的屈服弯矩,可以看出,屈服弯矩与轴压比有着较好的二次相关性。在 n 较小时,屈服弯矩随轴压比增大而增大;当 n 增大到一定程度后,屈服弯矩反而随着轴压比增大而减小。同时,2 个模型计算得到的屈服弯矩开始出现一定差距,并且随着 n 的增大而增大。这是因为在轴压比较大的情况下,压弯构件一般处于全截面受压状态,构件的屈服弯矩主要受材料的抗压屈服强度控制。而在 George D. H. 模型中,钢材应力-应变关系考虑了 Mises 屈服条件,由公式 (26) 可知,George D. H. 模型中钢材的抗压屈服强度小于韩林海模型中钢材的抗压屈服强度。

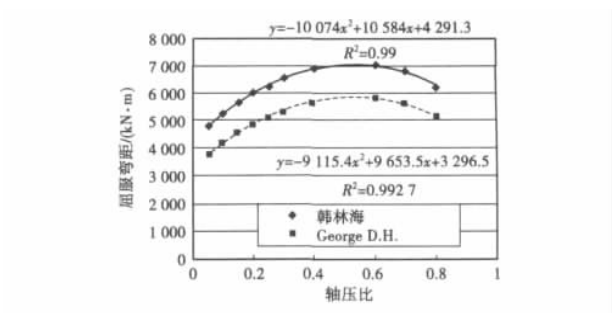


图 11 屈服弯矩与轴压比的关系
Fig.11 Relationship between yield moment and axial load ratio

4 结 论

采用纤维模型法编制了圆钢管混凝土桥墩的弯矩-曲率关系分析程序,程序中包括了国内外常用的2种钢管混凝土本构模型,笔者运用该程序计算了圆钢管混凝土构件的弯矩曲率关系,计算结果与国外学者的试验结果吻合良好,表明本文编制的程序是可靠的,并且采用该程序研究分析了圆钢管混凝土桥墩的弯矩-曲率关系,通过研究,得到如下结论:

1) 选用的2个钢管混凝土本构模型在分析实验构件(小尺寸、低轴压)的弯矩-曲率关系时,二者计算结果较为相符。而在分析实际构件时,小轴压比时二者较为接近,大轴压比时二者相差较大。这表明,基于小构件试验得到的钢管混凝土本构模型还不能完全反映实际钢管混凝土结构的本构关系,特别是大轴压比情况下。因此,对于大尺寸、高轴压比情况下的钢管混凝土的本构模型还需要进一步研究。

2) 钢管混凝土结构用于桥墩是可行的,特别是在强震区。这种桥墩不仅施工方便,而且具有良好的延性。分析表明:在常用的轴压比条件下,钢管混凝土桥墩的曲率延性系数可以达到40。

3) 对钢管混凝土桥墩的分析表明,在一定范围内,其它条件不变时,随着套箍系数的增大,钢管混凝土桥墩的屈服弯矩基本上呈现出线性增加的趋势。

4) 轴压比对构件的刚度影响不大。其它条件不变时,随着轴压比的增大,钢管混凝土桥墩的屈服弯矩先增大后减小,在轴压比为0.5左右时,其屈服弯矩达到最大值。

参考文献(References):

- [1] Michel B, Julia M. Seismic design of concrete-filled circular steel bridge piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1): 24-34.
- [2] George D H. Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, part II: verification and extension [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 1579-1589.
- [3] Kwon Y B, Song J Y, Kon K S. The Structure Behavior of Concrete-Filled Steel Piers [C]//16th Congress of IABSE, 2000.
- [4] 潘友光. 钢管混凝土中核心混凝土本构关系的确定 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1989, 22(1): 37-47.
PAN You-guang. The constitutive relationship of the core concrete in concrete filled steel tubes [J]. Journal of Harbin Architect & Civil Engineering Institute, 1989, 22(1): 37-47.
- [5] 谭克峰, 蒲心诚, 蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载力的研究 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(1): 10-15.
TAN Ke-feng, PU Xin-cheng, CAI Shao-huai. Study on the mechanical properties of steel extra-high strength concrete encased in steel tubes [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(1): 10-15.
- [6] Ge H B, Susantha K A S, Satake Y, et al. Seismic demand predictions of concrete-filled steel box columns [J]. Engineering Structures, 2003, 25: 337-345.
- [7] Kitada T. Ultimate strength and ductility of state-of-art concrete-filled steel bridge piers in Japan [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 347-354.
- [8] Shinichi Tamai, Tsutomu Sato, Masaru Okmoto. Hysteresis Model of Steel Jacketed RC Columns for Railway Viaducts [C]//16th Congress of IABSE. SWISS: LUCERNE, 2000.
- [9] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [10] George D H. Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, part I: theory [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 1573-1578.
- [11] Prion H G L, Boehme J. Beam-column behavior of steel tubes filled with high strength concrete [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21: 207-218.
- [12] Ichinohe Y, Matsutani T, Nakajima M, Takada K. Elasto-plastic Behavior of Concrete Filled Circular Columns [C]// Proceedings of 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures. Japan: ASCCS, 1991: 131-136.
- [13] Qing Q L. Performance-based analysis of concrete-filled steel tubular beam-columns, Part II: Verification and applications [J]. Journal of Construction Steel Research, 2009, 65(2): 351-362.
- [14] 韩林海, 陶忠, 闫维波. 圆钢管混凝土构件弯矩-曲率滞回特性研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2000(3): 50-54.
HAN Lin-hai, TAO Zhong, YAN Wei-bo. Research on moment-curvature hysteretic behaviors of concrete filled circular steel tubes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000(3): 50-54.