

文章编号: 1001-7372(2004)04-0050-05

钢管混凝土轴压与纯弯荷载—变形关系 曲线实用计算方法研究

尧国皇, 韩林海

(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要:在数值计算和试验研究成果的基础上,探讨了钢管混凝土轴压强度承载力和抗弯承载力指标取值问题。在大范围参数分析的基础上,通过分析荷载—变形全过程关系各阶段的力学性能和特点,提出了钢管混凝土轴压 σ_c - 关系和纯弯 M - 关系全过程曲线的实用计算公式,实用计算公式的计算结果与数值计算结果、试验结果吻合较好。最后提出了钢管混凝土轴压强度、抗弯承载力和抗弯刚度的简化计算公式,简化计算公式的计算结果与大量试验结果吻合较好。

关键词:桥梁工程;钢管混凝土;数值计算方法;轴压;纯弯;承载力;抗弯刚度

中图分类号: U441 **文献标志码:** A

Research on applied calculation method of load versus deformation relation curve of CFST subjected to axial compression and pure bending

YAO Guo-huang, HAN Lin-hai

(School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Based on theoretical method and test results, the indexes of bearing capacity of concrete filled steel tube subjected to axial compression and pure bending are discussed. Based on the large range parametric analysis, the simplified models of stress versus strain relations curves and moment versus curvature relations curves are presented. Then, the simplified formula of axial bearing capacity, bending bearing capacity and flexural rigidity are provided by regression. Comparisons of calculation results using simplified method show a good agreement with test results. The conclusions in this paper may be referred to practical engineering.

Key words: bridge engineering; concrete filled steel tube; theoretical method; axial compression; pure bending; bearing capacity; flexural rigidity

0 引言

钢管混凝土由于具有承载力高、抗震性能好和施工方便等优点,越来越受到研究者的关注和工程界的青睐^[1,2]。以往对钢管混凝土轴压和抗弯力学性能进行了一系列的试验研究,但是,对钢管混凝土轴压 σ_c - 关系和纯弯 M - 关系全过程曲线实用计算方法的报道并不多见,文献[3]建议了圆钢管混凝

土轴压应力—应变关系的计算公式,计算结果与试验结果吻合较好。笔者拟采用数值计算方法,探讨钢管混凝土轴压强度承载力和抗弯承载力指标取值方法,并在参数分析的基础上,通过分析荷载—变形全过程各阶段的力学性能和特点,给出了不同截面形式,包括圆形、方形和矩形钢管混凝土轴压 σ_c - 关系和纯弯 M - 关系全过程曲线的实用计算方法,

收稿日期: 2004-01-15

基金项目: 建设部科学计划项目(04-2-151);福建省重大科技项目(2002H007)

作者简介: 尧国皇(1980-),男,江西临川人,工学博士研究生. E-mail: yaoguohuang@fzu.edu.cn

为进行钢管混凝土结构分析提供参考。最后笔者建议了钢管混凝土轴压强度承载力、抗弯承载力和抗弯刚度的简化计算公式,并将简化计算结果与大量试验结果进行了比较。

1 轴压荷载—变形关系曲线实用计算方法

1.1 轴压强度承载力指标

近年来,钢管混凝土的研究与应用出现了以下趋势:钢管薄壁化、钢材和混凝土强度高强化等。根据钢管混凝土结构发展的需要,进一步扩大了研究范围,对参数 $f_y = 235500 \text{ MPa}$ 、 $f_{cu} = 20120 \text{ MPa}$ 、 $\xi = 0.030.2$ 的钢管混凝土轴压荷载—变形关系曲线进行了大量的计算和分析。分析结果进一步表明:影响钢管混凝土轴压 f_{sc} - 关系曲线的主要因素是约束效应系数 ξ ,且对应不同的 ξ 值, f_{sc} - 关系曲线总体呈上升、平缓或下降趋势。采用文献[1]中的钢材和核心混凝土的应力—应变关系模型,可方便地计算出钢管混凝土轴压荷载—变形关系曲线。图 1 给出了对应不同的 ξ 值的典型轴压 f_{sc} - 关系曲线。由图 1 可知:当 $\xi > 0$ 时,曲线具有强化段;当 $\xi = 0$ 时,曲线基本趋于平缓;当 $\xi < 0$ 时,曲线在达到某一峰值点后进入下降段。 ξ 的大小与钢管混凝土的截面形状有关:对于圆钢管混凝土 $\xi_0 = 1.1$;对于方、矩形钢管混凝土 $\xi_0 = 4.5$ 。由于 f_{sc} - 关系曲线总体呈上升、平缓或下降趋势,因此,存在轴压强度承载力指标的定义问题。

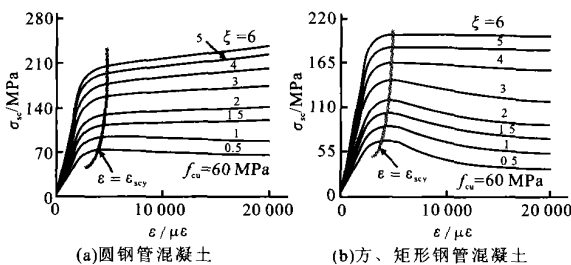


图 1 典型的 f_{sc} - 关系

Fig. 1 Typical stress-strain curves

为了合理确定钢管混凝土的轴压强度承载力指标,对圆形和方、矩形钢管混凝土的 f_{sc} - 关系曲线进行了大量的计算分析,计算参数范围为: $f_y = 235\text{--}500 \text{ MPa}$ 、 $f_{cu} = 20120 \text{ MPa}$ 、 $\xi = 0.030.2$,最后确定出钢管混凝土 f_{sc} - 关系曲线上的轴压强度承载力指标,如图 1 所示。笔者确定 f_{sc} 时的依据如下: f_{sc} - 关系曲线的弹塑性阶段基本上在应变为 ξ 左右结

束;钢管和核心混凝土在 ξ 时基本都达到了极限状态,即钢材应力达到 f_y ,混凝土应力达到了 σ_c ; f_{sc} - 关系曲线在 ξ 之前,应力增加很快,应变增加相对缓慢;在此之后,应力增加缓慢,应变增加相对较快,对于 ξ 较小的情况, f_{sc} - 关系曲线甚至会出现下降段。 f_{sc} 的计算式为

对于圆钢管混凝土

$$f_{sc} = 1\ 300 + 10f_{cu} + (600 + 26.8f_{cu})^{0.2} \quad (1)$$

对于方、矩形钢管混凝土

$$f_{sc} = 1\ 300 + 10f_{cu} + (570 + 25.5f_{cu})^{0.2} \quad (2)$$

1.2 轴压强度承载力简化计算

在确定了 f_{sc} 取值以后,可以方便地确定轴压 f_{sc} - 关系曲线上 ξ 对应的应力,定义为钢管混凝土轴压强度承载力指标 f_{sc} 。图 2 给出了工程常用参数范围内钢管混凝土 (f_{sc}/f_{ck}) - 关系,发现可用直线来近似描述 f_{sc}/f_{ck} 与 ξ 之间的关系,这样可导出 f_{sc} 表达式为

对于圆钢管混凝土

$$f_{sc} = (1.14 + 1.02 \xi) f_{ck} \quad (3)$$

对于方、矩形钢管混凝土

$$f_{sc} = (1.18 + 0.85 \xi) f_{ck} \quad (4)$$

式中: f_{ck} 为混凝土立方抗压强度标准值,对于普通强度混凝土, $f_{ck} = 0.67f_{cu}$ 。

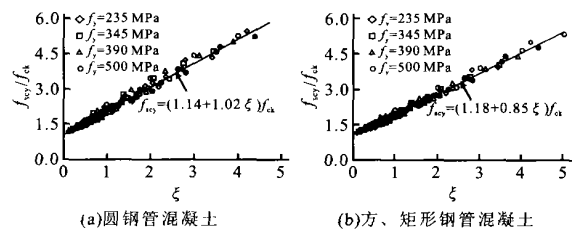


图 2 (f_{sc}/f_{ck}) - 关系

Fig. 2 f_{sc}/f_{ck} versus ξ relations

式(3)、(4)的应用范围为: $f_y = 235500 \text{ MPa}$ 、 $f_{cu} = 30120 \text{ MPa}$ 、 $\xi = 0.030.2$ 、 $\xi_0 = 5$ 。由式(3)、(4)确定了钢管混凝土轴压强度指标 f_{sc} 后,即可导出钢管混凝土轴压强度承载力计算式为

$$N_u = f_{sc} A_{sc} \quad (5)$$

式(5)与收集到的 251 个圆钢管混凝土和 198 个方、矩形钢管混凝土轴压试验结果进行了比较,对于圆试件,所有试件计算结果与试验结果比值的平均值为 0.914,均方差为 0.121;对于方、矩形试件,所有试件计算结果与试验结果比值的平均值为 0.972,均方差为 0.103,简化计算结果与试验结果吻合较好,且总体上稍偏于安全。

1.3 轴压 σ_c - ϵ_c 关系曲线实用计算方法

在对钢管混凝土轴压 σ_c - ϵ_c 关系曲线各阶段特点分析的基础上,通过对计算结果进行拟合,对文献[1]中 σ_c - ϵ_c 关系曲线简化模型进行补充和修正,可得钢管混凝土 σ_c - ϵ_c 关系曲线的数学表达式为

$$(1) \text{弹性阶段} (0 < \epsilon_c < \epsilon_{sc}) \\ \sigma_c = E_{sc} \epsilon_c \quad (6)$$

$$E_{sc} = f_{sc} / \epsilon_{sc} \quad (7)$$

式中: E_{sc} 为钢管混凝土名义轴压弹性模量; f_{sc} 、 ϵ_{sc} 分别为名义轴压比例极限及其对应的应变。其确定方法为:

对圆钢管混凝土

$$f_{sc} = [0.192(f_y/235) + 0.488] f_{scy} \quad (8)$$

$$\epsilon_{sc} = 3.25 \times 10^{-6} f_y \quad (9)$$

对于方、矩形钢管混凝土

$$f_{sc} = [0.263(f_y/235) + 0.365(30/f_{cu}) + 0.104] f_{scy} \quad (10)$$

$$\epsilon_{sc} = 3.01 \times 10^{-6} f_y \quad (11)$$

式(8)(11)中, f_y 以MPa计。

$$(2) \text{弹塑性阶段} (\epsilon_{sc} < \epsilon_{sy}) \\ \sigma_c^2 + a\sigma_c + b\epsilon_c + c = 0 \quad (12)$$

$$\text{式中: } a = \frac{-(f_{scy} - f_{sc})^2 - 2E_{sc}(f_{scy} - f_{sc})}{(f_{scy}^2 - f_{sc}^2) - 2f_{sc}E_{sc}(f_{scy} - f_{sc}) + (2f_{scy}k - 2f_{sc}E_{sc})e^e} \\ = \frac{(f_{scy} - f_{sc}) - E_{sc}(f_{scy} - f_{sc})}{E_{sc} - k}; b = -2\epsilon_{sc} - 2f_{sc}E_{sc} - cE_{sc}; c = \frac{2(f_{scy} - f_{sc}) + (2f_{scy}k - 2f_{sc}E_{sc})a}{E_{sc} - k}; d = -\frac{2}{\epsilon_{sc}} - d_{sc}^2 - b\epsilon_{sc} - f_{sc}$$

其中,当 $\epsilon_c < \epsilon_{sc}$ 时, $k=0$;当 $\epsilon_c > \epsilon_{sc}$ 时, $k = E_{sch}$ 。 E_{sch} 定义为强化阶段模量,对于圆钢管混凝土, $\epsilon_{sc} = 1.1$ 、 $E_{sch} = 270 - 100$;对于方、矩形钢管混凝土, $\epsilon_{sc} = 4.5$ 、 $E_{sch} = 30 - 40$ 。

由式(12)可得弹塑性阶段的切线模量,即 E_{sct}

$$E_{sct} = \frac{-b - 2}{2a + c}$$

$$(3) \text{强化阶段或下降段} (\epsilon_c > \epsilon_{sy})$$

对圆钢管混凝土

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{scy} + E_{sch}(\epsilon_c - \epsilon_{sy}) & (1.1) \\ \frac{f_{scy}}{D(\epsilon_c - \epsilon_{sy})^2 + 1} & (13) \end{cases}$$

式中: $D = p^2 + q + r$ 。 $p = 0.52 \epsilon_c^2 + 5.6 \epsilon_c - 5.85$; $q = -1.36 \epsilon_c^2 - 10.2 \epsilon_c + 7.3$; $r = 0.44 \epsilon_c^2 + 9.4 \epsilon_c - 4.8$, $\epsilon_c = f_{cu}/30$; f_{cu} 以MPa单位代入。

对于方、矩形钢管混凝土

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{scy} + E_{sch}(\epsilon_c - \epsilon_{sy}) & (4.5) \\ f_{scy} [1 - \exp(-\frac{\epsilon_c - \epsilon_{sy}}{m})] & (14) \end{cases}$$

式中: $\epsilon_c = -0.194 \ln \epsilon_c + 0.445$; $m = 10^{-3}(\epsilon_c + 1)$, $n = 0.5 \epsilon_c + 0.18$, $l = 0.8 \epsilon_c + 3.74$, $\epsilon_c = f_{cu}/30$, f_{cu} 以MPa单位代入。

图3给出了轴压 σ_c - ϵ_c 关系曲线简化计算公式计算结果与数值计算的比较,可知简化计算结果与数值计算结果吻合良好。

简化模型计算结果与大量试验结果进行了比较,总体上吻合良好。图4给出了部分简化计算模型、数值计算与试验结果的对比情况,三者吻合的情况令人满意。

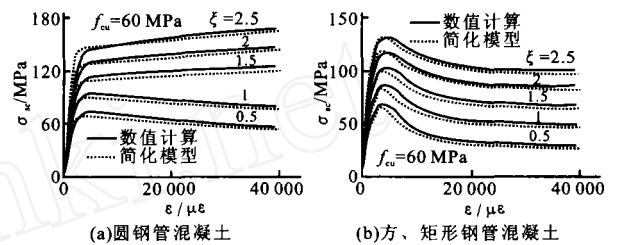


图3 轴压 σ_c - ϵ_c 关系曲线简化计算与数值计算的对比

Fig.3 Comparison of σ_c versus ϵ_c curves between simplified model and numerical results

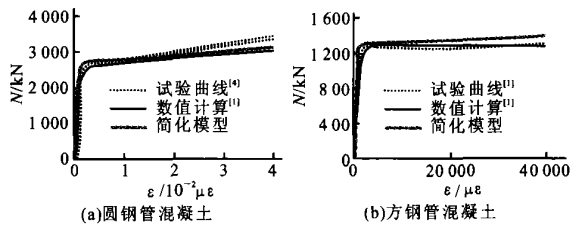


图4 荷载—变形关系曲线试验结果与计算结果的比较

Fig.4 Comparison of calculated load versus deformation curves and test results

2 纯弯荷载—变形关系曲线实用计算方法

2.1 抗弯强度承载力指标

采用文献[1]中的钢材和核心混凝土的应力—应变关系模型,利用数值计算方法对钢管混凝土在不同钢材和混凝土强度及不同约束效应系数情况下的 $(M/W_{scm}) - \epsilon_{max}$ (ϵ_{max} 为构件截面纤维的最大拉应变) 关系曲线进行了计算(计算参数范围为: $f_y = 235500$ MPa、 $f_{cu} = 20120$ MPa、 $\xi = 0.03 \sim 0.2$), W_{scm} 为钢管混凝土截面抗弯模量:对于圆钢管混凝土 $W_{scm} = D^3/32$;对于方钢管混凝土 $W_{scm} = B^3/6$;对于矩形钢管混凝土,绕强轴弯曲时 $W_{scm} = D^2B/6$,绕弱轴弯曲时 $W_{scm} = DB^2/6$ 。典型关系曲线如图5所示。

由图5可知:在 ϵ_{max} 很大时,弯矩仍有继续增加

的趋势,钢管混凝土受弯构件表现出很好的塑性。为了便于实际应用,有必要提供钢管混凝土抗弯承载力的简化计算公式。考虑到构件受力状态正常使用的要求,建议取钢管最大纤维应变达 10 000 μ 的弯矩为极限弯矩(抗弯强度承载力)。

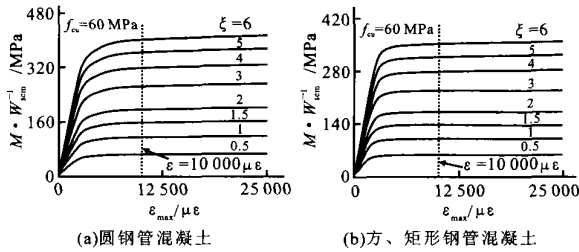


图 5 典型的 (M/Wscm)-max 关系

Fig. 5 Typical M/Wscm versus max relation

2.2 抗弯强度承载力简化计算

根据上述定义,计算了参数为 $f_y = 200500 \text{ MPa}$ 、 $f_{cu} = 20120 \text{ MPa}$ 、 $\xi = 0.03 \sim 0.2$ 的钢管混凝土构件的抗弯强度承载力 M_u 。对计算结果进行分析后发现, M_u 主要和构件截面抗弯模量 W_{scm} 、约束效应系数 ξ 及轴压强度承载力指标 f_{scy} 有关,如果令 $m = M_u / (W_{scm} f_{scy})$, 定义为抗弯承载力计算系数,可绘出 m 的关系,如图 6 所示。通过回归分析,可得系数 m 的表达式为

$$m = \begin{cases} 1.1 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1.04 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) & (\text{方、矩形钢管混凝土}) \end{cases} \quad (15)$$

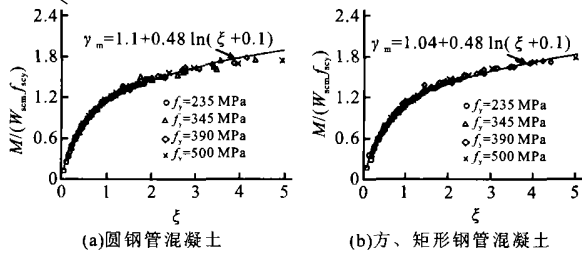


图 6 m-ξ 关系

Fig. 6 m versus ξ relation

确定了 m 后,可得抗弯强度承载力 M_u 的计算公式为

$$M_u = m W_{scm} f_{scy} \quad (16)$$

式(16)计算结果与收集到的 21 个圆构件和 53 个方、矩形构件纯弯试验结果进行了比较:对于圆构件,所有计算值与试验值比值的平均值为 0.886,均方差为 0.113;对于方、矩形构件,平均值为 0.902,均方差为 0.076。可见,简化计算结果与试验结果基本吻合且偏于安全。

2.3 纯弯 M-φ 关系曲线实用计算方法

对钢管混凝土纯弯 M-φ 全过程关系曲线进一步进行分析,通过对大量计算结果进行拟合,发现可近似把 M-φ 关系曲线分为 3 段。

对于圆钢管混凝土

$$M = \begin{cases} 0.2 M_u & (\xi \leq \xi_0) \\ [1.8(\frac{M}{M_u}) - 0.9(\frac{M}{M_u})^2] M_u & (\xi_0 < \xi < \xi_1) \\ [0.882 + 0.018(\frac{M}{M_u})] M_u & (\xi \geq \xi_1) \end{cases} \quad (17)$$

对于方、矩形钢管混凝土

$$M = \begin{cases} 0.2 M_u & (\xi \leq \xi_0) \\ [1.9(\frac{M}{M_u}) - 0.95(\frac{M}{M_u})^2] M_u & (\xi_0 < \xi < \xi_1) \\ [0.94 + 0.01(\frac{M}{M_u})] M_u & (\xi \geq \xi_1) \end{cases} \quad (18)$$

ξ_0 的确定方法为:对于圆钢管混凝土, $\xi_0 = [4.25 \xi_c + 100.14 + (15.8 \xi_c + 3.65) J_s^{0.82} / (E_s D)]$; 对方、矩形钢管混凝土,当绕强轴弯曲时, $\xi_0 = [10.64 \xi_c + 91.18 + (8.66 \xi_c + 5.93) J_s^{0.82} / (E_s D)]$; 当绕弱轴弯曲时, $\xi_0 = [10.64 \xi_c + 91.18 + (8.66 \xi_c + 5.93) J_s^{0.82} / (E_s B)]$ 。其中 $\xi_c = f_{cu} / 30$ 、 $J_s = f_y / 345$ 、 f_{cu} 和 f_y 需以 MPa 为单位代入; ξ_0 为 M-φ 关系曲线上弹性阶段结束时对应的曲率,对于圆钢管混凝土, $\xi_0 = 8.48 \xi_1$,对于方、矩形钢管混凝土, $\xi_0 = 8.93 \xi_1$ 。

图 7 给出了 M-φ 关系曲线简化计算(虚线)与数值计算结果的比较,图 7 中算例的计算条件为 D 或 B 为 400 mm,可见简化模型与数值计算结果吻合较好。M-φ 关系曲线简化模型计算结果与大量试验结果进行了比较,吻合较好。图 8 给出了简化计算结果与部分试验结果的对比情况,可见二者吻合较好。

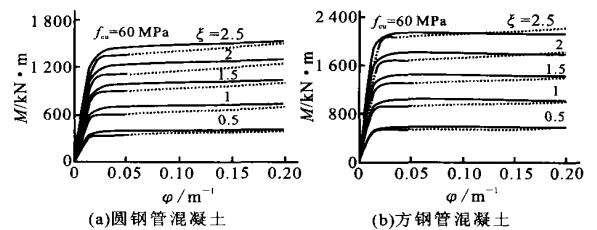


图 7 M-φ 曲线简化计算结果与数值计算结果的对比
Fig. 7 Comparison of M versus φ curves between simplified model and numerical results

2.4 抗弯刚度简化计算

由式(17)、(18)可得弹性阶段初始刚度 K_i 的计算公式为

$$K_i = 0.2 M_u / \epsilon \quad (19)$$

为了便于实际应用,还推导了使用阶段抗弯刚度 K_{sc} 的计算公式。参考文献[6]对水平荷载作用下钢管混凝土压弯构件的研究方法,暂以 $M = 0.6 M_u$ 对应的割线刚度作为钢管混凝土使用阶段抗弯刚度 K_{sc} 。在参数分析结果的基础上,给出了 K_{sc} 的计算公式

$$K_{sc} = 0.6 M_u / \epsilon \quad (20)$$

$\epsilon_{0.6}$ 的确定方法为:对于圆钢管混凝土, $\epsilon_{0.6} =$

$[41.48 \epsilon_c + 343.43 + (17.32 \epsilon_c + 30.39) \cdot J_s^{0.82} / (E_s D)]$; 对于方、矩形钢管混凝土绕强轴弯曲时, $\epsilon_{0.6} = [38.9 \epsilon_c + 319.11 + (12.61 \epsilon_c + 23.1) J_s^{0.82} / (E_s B)]$; 当绕弱轴弯曲时, $\epsilon_{0.6} = [38.9 \epsilon_c + 319.11 + (12.61 \epsilon_c + 23.1) J_s^{0.82} / (E_s B)]$ 。其中, $\epsilon_c = f_{cu} / f_y$, $\epsilon_s = f_y / 345$, f_{cu} 和 f_y 需以 MPa 为单位代入; E_s 为钢材弹性模量; D 为圆截面外直径或矩形截面长边边长; B 为方截面外边长或矩形截面短边边长。以上抗弯刚度简化计算与大量试验结果进行了比较,吻合较好。

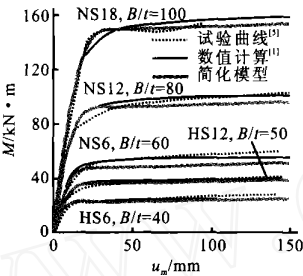


图8 M- ϵ 曲线试验结果与计算结果的对比

Fig.8 Comparison of predicted curves and test results

3 结 语

基于以上的研究,在笔者研究的参数范围内,可

以初步得到以下结论:

(1) 给出了更为合理的钢管混凝土轴压和抗弯强度承载力指标,建议的轴压 ϵ_c - 关系和纯弯 M - 关系全过程曲线实用计算公式、简化计算公式、数值计算与试验结果三者吻合较好,为进行钢管混凝土结构分析创造了良好的条件。

(2) 建议的钢管混凝土轴压强度、抗弯承载力和抗弯刚度的简化计算式与大量试验结果进行了比较,总体吻合较好且偏于安全。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [3] 余志武, 丁发兴, 林松. 钢管高性能混凝土短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 41—47.
- [4] SAKINO K, HAYASHI H. Behavior of concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading[A]. The Third International Conference on Steel-Concrete Composite Structures [C]. Fukoka: The International Association for Steel-Concrete Composite Structures, 1991. 25—30.
- [5] UY B. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(3): 341—352.
- [6] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, LU L W. Seismic behavior and modelling of high strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(58): 725—758.

《中国公路学报》2005 年征订通知

《中国公路学报》(季刊)是中国公路学会主办的公路交通行业最权威的学术性刊物,主要刊载道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济与工程经济等专业应用技术及理论性文章,并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。《中国公路学报》网络版——中国公路网延伸了《中国公路学报》的信息传播功能,为读者提供全方位的公路交通信息服务。中国公路网的网址为: <http://www.highway-china.com>。

《中国公路学报》(大 16 开本)读者对象为:公路交通界的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。《中国公路学报》每期定价 15.00 元(含邮寄费),2005 年 4 期共 60.00 元。

另外,《中国公路学报》编辑部现有少量 2002、2003 年合订本,100 元(含邮寄费)/册。欢迎订阅!

收款单位:长安大学杂志社(西安市南二环路中段)

邮编:710064

开户行:西安市市商行小寨分理处

账号:3700021609014486011

联系人:高 炜

电话:(029) 82334387