

文章编号:1673-2049(2006)01-0034-05

恒高温后圆钢管混凝土轴压短柱弹塑性分析

丁发兴,余志武

(中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075)

摘要:在已有恒高温后混凝土单轴受压和钢材单轴拉伸力学性能研究的基础上,建立了恒高温后混凝土轴对称三轴受压应力-应变关系和复杂受力下的钢材多轴应力-应变关系。应用连续介质力学,建立了恒高温后钢管混凝土同时受压的同心圆柱体计算模型,采用弹塑性全过程分析理论,建立了恒高温后钢管混凝土轴压组合弹性模量理论计算公式和组合应力-应变关系全曲线的理论表达式,并编制相应的计算程序对恒高温后钢管混凝土轴压短柱受力性能进行弹塑性全过程分析,计算结果与试验结果吻合较好。

关键词:钢管混凝土;应力-应变关系;弹塑性分析;恒高温

中图分类号:TU528.59

文献标志码:A

Elasto-Plastic Analysis of Concrete-Filled Circular Steel Tube Stub Columns After Constant High Temperature

DING Fa-xing, YU Zhi-wu

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: Based on the research of the mechanical properties of concrete at uniaxial compression and steel at uniaxial tension after constant high temperature, the axisymmetric triaxial compressive stress-strain relationships of concrete and multiaxial stress-strain relationships of steel after constant high temperatures were suggested. Based on continuum mechanics, the mechanical model of concentric cylinders of circular steel tube with concrete core of entire section loaded after constant high temperature was determined. Applying elasto-plastic analysis method, theoretical calculation formulas for composite elastic modulus and composite stress-strain relationships of concrete-filled circular steel tube (CFST) stub columns were proposed and a FORTRAN program was developed, and the load-axial strain relationships of CFST stub columns after constant high temperatures were analyzed. The analysis results are in reasonable agreement with the experiment ones.

Key words: concrete-filled steel tube; stress-strain relationship; elasto-plastic analysis; constant high temperature

0 引言

随着城市人口的增多,现代建筑的火灾发生频

率和火灾危险性不断增加,由于火灾(高温)后钢材和混凝土的力学性能劣化,导致钢管混凝土结构的安全性降低,需要对这类结构进行火灾后的损伤评

收稿日期:2005-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50578162);湖南省自然科学基金项目(03JJY3089)

作者简介:丁发兴(1979-),男,浙江瑞安人,工学博士研究生,E-mail:dinfaxin@mail.csu.edu.cn。

估,以制定相应的修复措施。火灾中的实际结构,钢材和混凝土的应力状态、火场升温路径、火灾持续时间和火场降温路径对建筑的变形都有不同程度影响,并且火灾时和火灾后钢材和混凝土的各力学性能指标均会有不同程度的变化,因此要准确模拟此状态下钢材和混凝土的力学性能是相当困难的。

目前,国际上一些结构抗火设计规范对高温下钢材和混凝土的力学性能试验建议采用恒温加载和恒载升温两种路径,而对高温后的钢材和混凝土的材料性能试验尚未作具体规定。为满足火灾后钢管混凝土结构剩余承载力评估的要求,许多学者在试验研究时^[1-5],首先采用恒温后加载试验路径,掌握温度对恒高温后钢管混凝土轴压短柱受力性能及其组成材料各力学指标和应力-应变关系的影响。

笔者在对常温下钢管混凝土轴压短柱弹塑性全过程分析理论^[6-7],以及不同强度等级混凝土单轴受压力学性能统一计算方法^[8]和高温后混凝土单轴受压力学性能和钢材单轴拉伸力学性能研究的基础上,建立了恒高温后混凝土轴对称三轴受压本构模型和钢材多轴弹塑性本构模型,采用弹塑性全过程分析理论对恒高温后钢管混凝土轴压短柱受力性能进行全过程分析,并得到了已有试验成果的验证,该研究结果可为火灾后钢管混凝土柱非线性有限元分析奠定基础。

1 基本假定

1.1 恒高温后混凝土轴对称三轴应力-应变关系

目前,高温后混凝土多轴变形缺乏系统研究,为满足高温后钢管混凝土柱非线性分析,高温后核心混凝土轴对称三轴本构模型仍采用与常温下一致的形式,只是将其中混凝土的单轴抗压强度和峰值应变采用相应高温后的表达式,其他参数保持不变,于是得到[图 1(a)]

$$y = \begin{cases} \frac{A_2^T x - x^2}{1 + (A_2^T - 2)x} & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_2^T (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y = \sigma_{L,c}^T / f_c^{*T}$, $\sigma_{L,c}^T$ 为高温后混凝土的轴向应力, f_c^{*T} 为高温后混凝土三轴受压的轴向极限强度; $x = \epsilon_{L,c}^T / \epsilon_f^T$, $\epsilon_{L,c}^T$ 为高温后混凝土的轴向应变, ϵ_f^T 为高温后混凝土轴向峰值应变

$$\epsilon_f^T = \epsilon_0^T (1 + 3.4 \frac{\sigma_{r,c}^T}{f_c^T}) [1 + 4.8(A_1 - 1)(\frac{\sigma_{r,c}^T}{f_c^T})^{0.5}]$$

$$\frac{f_c^{*T}}{f_c^T} = 1 + 3.4 \frac{\sigma_{r,c}^T}{f_c^T}$$

$$A_1 = 9.1 f_{cu}^{-4/9}$$

$$A_2^T = A_1 [1 + 4.8(A_1 - 1)(\frac{\sigma_{r,c}^T}{f_c^T})^{0.5}]$$

$$\alpha_2^T = \alpha_1 \frac{10^{-4} + 1.2 \times 10^4 f_{cu}^{-3} \sigma_{r,c}^T / f_c^T}{10^{-4} + \sigma_{r,c}^T / f_c^T}$$

$$\alpha_1 = 2.5 \times 10^{-5} f_{cu}^3$$

式中: ϵ_0^T 为高温后混凝土峰值应变; $\sigma_{r,c}^T$ 为高温后混凝土的径向应力; A_2^T 为高温后轴对称三轴应力-应变曲线上升段参数; α_2^T 为高温后轴对称三轴应力-应变曲线下下降段参数; f_c^T 为高温后混凝土轴心抗压强度; f_{cu} 为常温下混凝土立方体抗压强度; A_1 、 α_1 为常温下混凝土单轴受压应力-应变曲线表达式中的参数。

高温后混凝土的轴心抗压强度随温度的变化关系为

$$\frac{f_c^T}{f_c} = \frac{1}{1 + 9[(T - 20)/800]^{c_1}} \quad (2)$$

式中: f_c 为常温下混凝土轴心抗压强度;对于普通混凝土, $c_1 = 3.55$,对于高性能混凝土, $c_1 = 6.70$ 。

高温冷却后混凝土单轴峰值应变随温度的变化关系为

$$\epsilon_0^T / \epsilon_0 = 1 + c_4 [(T - 20)/100]^2 \quad (3)$$

式中: ϵ_0 为常温下混凝土单轴峰值应变;对于普通混凝土, $c_4 = 3.7 \times 10^{-2}$,对于高性能混凝土, $c_4 = 1.7 \times 10^{-2}$ 。

高温后混凝土泊松比割线值 ν_c^T 的表达式与常温下的一致,即

$$\nu_c^T = \begin{cases} \nu_0 & x \leq 1, y \leq y_0 \\ \nu_f - (\nu_f - \nu_0) \sqrt{1 - (\frac{y - y_a}{1 - y_a})^2} & x \leq 1, y_a < y \leq 1 \\ \nu_f & x > 1, y < 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ν_0 、 ν_f 分别为初始泊松比值和破坏时泊松比的割线值, $\nu_0 = 0.2$, $\nu_f = 1 - 0.0025(f_{cu} - 20)$; $y_a = 0.3 + 0.002(f_{cu} - 20)$ 。

1.2 高温后复杂受力钢材应力-应变关系

目前,高温后复杂受力钢材应力-应变关系也缺乏系统的研究,一般认为,弹塑性力学的基本理论仍适用于高温后的钢材。为简化计算,高温后钢材应力-应变关系仍采用与常温下一致的形式,只是将其中钢材的屈服强度采用高温后的相应值,其他参数保持不变。

高温后复杂受力钢材的应力-应变关系曲线按式(5)确定[图 1(b)]

$$\sigma_i^T = \begin{cases} E_s^T \epsilon_i^T & \epsilon_i^T \leq \epsilon_y^T \\ f_s^T & \epsilon_y^T < \epsilon_i^T \leq \epsilon_{st}^T \\ f_s^T + \xi E_s^T (\epsilon_i^T - \epsilon_{st}^T) & \epsilon_{st}^T < \epsilon_i^T \leq \epsilon_u^T \\ f_u^T & \epsilon_i^T > \epsilon_u^T \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_i^T 、 f_s^T 、 f_u^T 分别为高温后钢材的等效应力、屈服强度和极限强度, 取 $f_u^T = 1.5 f_s^T$; E_s^T 、 E_{st}^T 分别为高温后钢材弹性模量和强化模量, 取 $E_s^T = E_s = 2.06 \times 10^5$, 令 $E_{st}^T = \zeta E_s^T$; ϵ_i^T 、 ϵ_y^T 、 ϵ_{st}^T 、 ϵ_u^T 分别为高温后钢材的等效应变、屈服应变、强化应变和极限应变, $\epsilon_u^T = \epsilon_{st}^T + 0.5 f_s^T / (\zeta E_s^T)$, 其中 ζ 、 ϵ_{st}^T 为待定系数, 当保持与常温下的一致时, 取 $\epsilon_{st}^T = 12 \epsilon_y^T$, $\epsilon_u^T = 120 \epsilon_y^T$, 此时 $\zeta = 1/216$ 。

高温后钢材屈服强度随温度的变化关系为

$$\frac{f_s^T}{f_s} = 1 - 6.4 \times 10^{-6} \left(\frac{T-20}{100} \right)^5 \quad T \leq 1000^\circ \text{C} \quad (6)$$

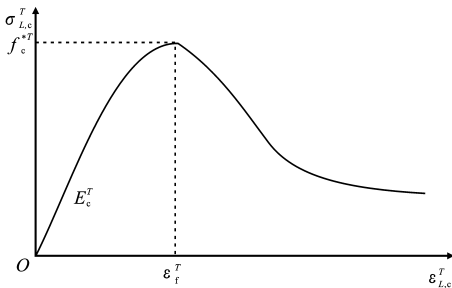
式中: f_s 为常温下钢材屈服强度。

高温后复杂受力钢材的泊松比仍假定为

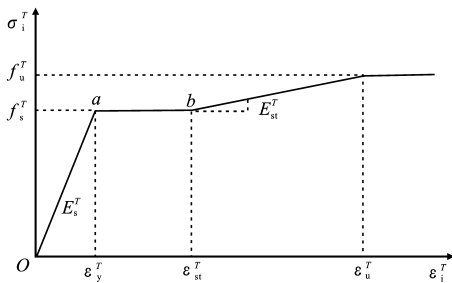
$$\nu_s^T = \begin{cases} 0.285 & \epsilon_i^T \leq 0.8 \epsilon_y^T \\ 1.075 (\sigma_i^T / f_s^T - 0.8) + 0.285 & 0.8 \epsilon_y^T < \epsilon_i^T \leq \epsilon_y^T \\ 0.5 & \epsilon_i^T > \epsilon_y^T \end{cases} \quad (7)$$

1.3 变形协调假定

认为恒高温后钢管与混凝土之间共同工作性能良好, 变形协调, 界面连续。



(a) 混凝土



(b) 钢材

图1 高温后材料的应力-应变关系

Fig. 1 Relation of Stress and Strain of Materials After High Temperature

2 理论分析模型

恒高温后钢管混凝土轴压短柱的计算模型和相

应的弹塑性全过程分析理论与常温下的一致, 同样应用连续介质力学, 可建立高温后钢管混凝土同时受压的同心圆柱体计算模型(图2)。常温下的具体理论推导见文献[5], 以下简单给出高温后钢管混凝土轴压短柱的组合应力、各内力与各应变的表达式。

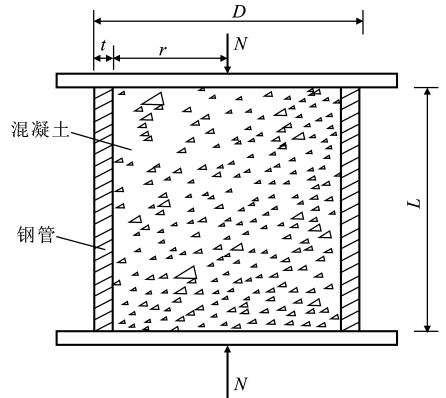


图2 计算模型

Fig. 2 Calculation Model

高温后钢管混凝土轴压短柱弹性阶段的组合应力-应变关系为

$$f_{sc}^T = E_{sc}^T \epsilon_L^T \quad (8)$$

式中: E_{sc}^T 为高温后钢管混凝土轴压组合弹性模量, 按式(9)计算

$$E_{sc}^T = (1 - \rho) E_c^T + \rho E_s^T + 2(\nu_c^T - \nu_s^T)^2 (1 - \rho) \rho Q^T E_s^T \quad (9)$$

式中: ρ 为钢管混凝土截面钢的体积分数, $\rho = A_s / A_{sc} \approx 4t / D$, A_s 、 A_{sc} 分别为钢管截面面积和钢管混凝土总截面面积, t 、 D 分别为钢管壁厚和钢管外径; $Q^T = \{ [1 - \nu_c^T - 2(\nu_c^T)^2] n^T \rho + [2 - (\nu_s^T)^2 - \rho + \rho \nu_s^T + \rho(\nu_s^T)^2] \}^{-1}$, $n^T = E_s^T / E_s$ 。

高温后核心混凝土的径向应力 $\sigma_{r,c}^T$ 、环向应力 $\sigma_{\theta,c}^T$ 和纵向应力 $\sigma_{L,c}^T$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r,c}^T &= \sigma_{\theta,c}^T = \rho(\nu_c^T - \nu_s^T) Q^T E_s^T \epsilon_L^T \\ \sigma_{L,c}^T &= [E_c^T + 2\rho \nu_c^T (\nu_c^T - \nu_s^T) Q^T E_s^T] \epsilon_L^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

高温后核心混凝土的径向应变 $\epsilon_{r,c}^T$ 和环向应变 $\epsilon_{\theta,c}^T$ 为

$$\epsilon_{r,c}^T = \epsilon_{\theta,c}^T = \{ \rho [1 - \nu_c^T - 2(\nu_c^T)^2] (\nu_c^T - \nu_s^T) Q^T n^T - \nu_c^T \} \epsilon_L^T \quad (11)$$

高温后钢管的径向应力 $\sigma_{r,s}^T$ 、环向应力 $\sigma_{\theta,s}^T$ 和纵向应力 $\sigma_{L,s}^T$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r,s}^T &= [(D/2r)^2 - 1] (\nu_c^T - \nu_s^T) (1 - \rho) Q^T E_s^T \epsilon_L^T \\ \sigma_{\theta,s}^T &= -[(D/2r)^2 + 1] (\nu_c^T - \nu_s^T) (1 - \rho) Q^T E_s^T \epsilon_L^T \\ \sigma_{L,s}^T &= [1 - 2\nu_s^T (\nu_c^T - \nu_s^T) (1 - \rho) Q^T] E_s^T \epsilon_L^T \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

高温后钢管的径向应变 $\epsilon_{r,s}^T$ 和环向应变 $\epsilon_{\theta,s}^T$ 为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{r,s}^T &= \{ (D/2r)^2 (1+\nu_s^T) - [1-\nu_s^T - (\nu_s^T)^2] \} (1-\rho) (\nu_c^T - \nu_s^T) Q_t^T \epsilon_L^T - \nu_s^T \epsilon_L^T \\ \epsilon_{\theta,s}^T &= - \{ (D/2r)^2 (1+\nu_s^T) + [1-\nu_s^T - (\nu_s^T)^2] \} (1-\rho) (\nu_c^T - \nu_s^T) Q_t^T \epsilon_L^T - \nu_s^T \epsilon_L^T \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{r,s}^T &= \{ (1+\nu_s^T) / (1-\rho/4) - [1-\nu_s^T - (\nu_s^T)^2] \} (1-\rho) (\nu_c^T - \nu_s^T) Q_t^T \epsilon_L^T - \nu_s^T \epsilon_L^T \\ \epsilon_{\theta,s}^T &= - \{ (1+\nu_s^T) / (1-\rho/4) + [1-\nu_s^T - (\nu_s^T)^2] \} (1-\rho) (\nu_c^T - \nu_s^T) Q_t^T \epsilon_L^T - \nu_s^T \epsilon_L^T \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

高温后钢管混凝土轴压短柱弹塑性阶段的组合应力-应变关系为

$$\left. \begin{aligned} f_{sc}^T &= E_{sc}^T \epsilon_L^T \\ E_{sc}^T &= (1-\rho) E_c^T + \rho E_s^T + 2(\nu_c^T - \nu_s^T)^2 \cdot (1-\rho) \rho Q_t^T E_s^T \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

高温后钢管屈服后的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta,s}^T &= -2(\nu_c^T - \nu_s^T) (1-\rho) Q_t^T E_s^T \epsilon_L^T \\ \sigma_{L,s}^T &= [1-2\nu_s^T (\nu_c^T - \nu_s^T) (1-\rho) Q_t^T] E_s^T \epsilon_L^T \\ Q_t^T &= \{ [1-\nu_c^T - 2(\nu_c^T)^2] n_t^T \rho + [2 - (\nu_s^T)^2 - \rho + \rho \nu_s^T + \rho (\nu_s^T)^2] \}^{-1} \\ n_t^T &= E_s^T / E_c^T \\ E_c^T &= E_t^T - 2\rho \nu_c^T (\nu_c^T - \nu_s^T) Q_t^T E_s^T \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: E_t^T 为按式(1)求得的割线模量。

高温后钢管屈服后的应变(取钢管中面)为

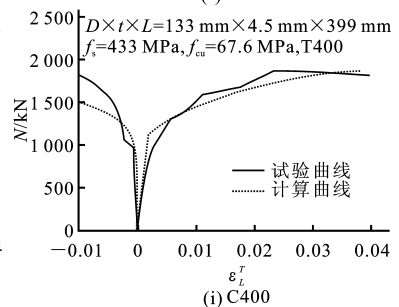
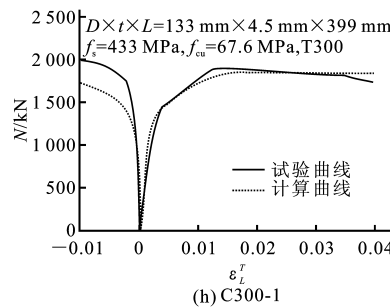
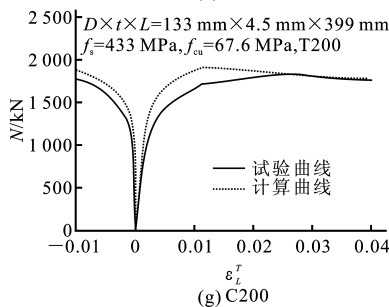
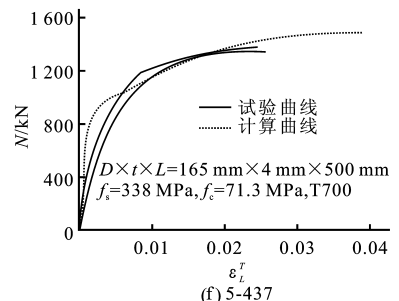
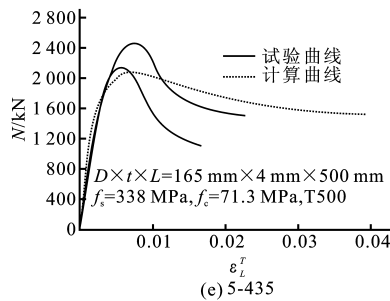
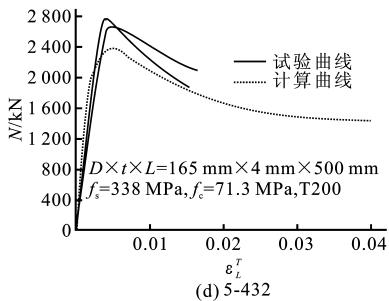
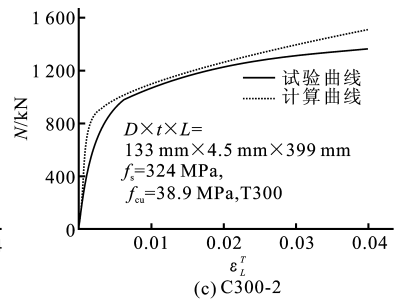
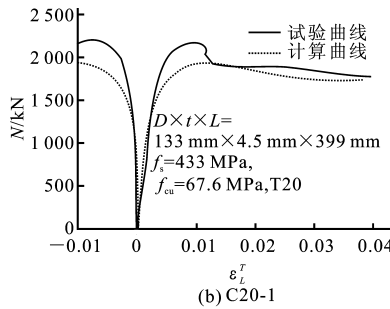
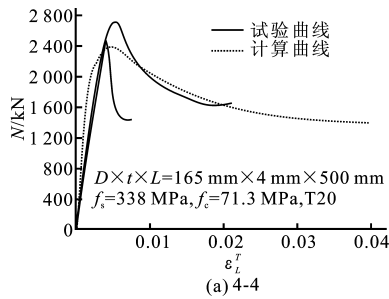


图 3 恒高温后钢管混凝土轴压短柱计算曲线与试验曲线的比较

Fig. 3 Comparisons of Calculation Curves and Test Ones of Columns After Constant High Temperature

3 算 例

根据以上分析,在文献[5]中提出的常温下钢管混凝土轴压短柱弹塑性全过程分析理论的基础上,进一步编制高温后的弹塑性分析程序,可计算得到恒高温后钢管混凝土轴压短柱轴向荷载(N , $N=f_{sc}^T A_{sc}$)-应变(ϵ_L^T)全曲线,图 3 为恒高温后钢管普通混凝土、钢管高性能混凝土轴压短柱荷载-变形全曲线理论计算结果与文献[3]、[4]中试验结果的比较,计算结果与试验结果吻合较好,图 3 中以 T200 为例,表示短柱构件先升温至 200 °C,并恒温 3 h 后自然冷却至室温(5 °C)。

4 结 语

通过对恒高温后钢管混凝土轴压短柱受力性能

弹塑性分析表明:笔者采用的高温后核心混凝土轴对称三轴受压应力-应变关系模型和复杂受力钢材应力-应变关系模型,以及相应的弹塑性全过程分析理论可较好仿真恒高温后钢管混凝土轴压短柱受力性能,研究结果可为火灾后钢管混凝土柱非线性有限元分析奠定基础。

参考文献:

References:

- [1] 余志武,丁发兴,罗建平. 高温后不同类型混凝土力学性能试验研究[J]. 安全与环境学报,2005,6(5):1-6.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing, LUO Jian-ping. Experimental Research on Mechanical Properties of Different Type of Concrete After High Temperature[J]. Journal of Safety and Environment,2005,6(5):1-6.
- [2] 郭军庆,王雪韵,雷自学,等. 加芯混凝土框架柱轴压比限值试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):45-49.
GUO Jun-qing, WANG Xue-yun, LEI Zi-xue, et al. Experimental Research on Limit Value of Axial Compression Ratio for Concrete Frame Columns with Central Reinforcement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(4):45-49.
- [3] YU Z W, DING F X, WEN H L. Experimental Research on the Mechanical Properties of Steel After High Temperature[C]//SHEN Z Y, LI G Q, CHAN S L. Advances in Steel Structures. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,2005:1 071-1 076.
- [4] 余志武,丁发兴,林 松. 高温后钢管高性能混凝土轴压短柱力学性能研究[J]. 铁道学报,2003,25(4):71-79.

- YU Zhi-wu, DING Fa-xing, LIN Song. Researches on Mechanical Behavior of High-Performance Concrete Filled Tubular Steel Stub Columns After High Temperature[J]. Journal of the China Railway Society, 2003,25(4):71-79.
- [5] 杨 华,韩林海. 高温作用后圆钢管混凝土轴压力学性能研究[J]. 工业建筑,2001,31(11):50-54.
YANG Hua, HAN Lin-hai. Mechanical Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tublar Stub Columns After High Temperatures[J]. Industrial Construction, 2001,31(11):50-54.
- [6] 余志武,唐国庆,丁发兴. 三面受火钢筋混凝土梁温度场非线性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):11-14.
YU Zhi-wu, TANG Guo-qing, DING Fa-xing. Nonlinear Analysis of Temperature Field of Reinforced Concrete Beam with Three Surfaces Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(4):11-14.
- [7] 丁发兴,余志武. 钢管混凝土基本力学性能研究:理论分析[J]. 工程力学,2005,22(1):173-181.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Theoretical Analysis of Mechanical Properties of Concrete-Filled Tublar Steel Stub Columns [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1):173-181.
- [8] 余志武,丁发兴. 混凝土受压力学性能统一计算方法[J]. 建筑结构学报,2003,24(4):41-46.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Unified Calculation Method of Compressive Mechanical Properties of Concrete [J]. Journal of Building Structures,2003,24(4):41-46.

《中国公路学报》2006 年征订通知

《中国公路学报》(双月刊)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: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),2006 年 6 期共 90.00 元。

另外,《中国公路学报》编辑部现有少量往年合订本,100.00 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:中行西安翠华路支行

账号:0104134-34148598091001

联系人:高 炜

电话:(029)82334387