

文章编号:1673-2049(2014)04-0029-06

方钢管再生混凝土短柱轴压承载力有限元分析

李 兵,张 齐,孟 爽

(沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:利用有限元软件 ABAQUS 对方钢管再生混凝土短柱轴压承载力进行非线性分析,建立了适用于有限元分析的钢管和再生混凝土本构关系模型;利用极限平衡法推导方钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算公式函数类型;利用计算结果拟合出方钢管再生混凝土短柱轴压承载力的计算公式。研究表明:所提出的材料本构关系模型可以较好地满足对方钢管再生混凝土短柱轴压承载力进行模拟分析的要求,通过模拟获得的计算结果与相关试验结果差异较小,所建立的方钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算公式能够较准确地计算构件极限承载力。

关键词:方钢管再生混凝土短柱;轴压;承载力;有限元分析

中图分类号:TU392.3 **文献标志码:**A

Finite Element Analysis of Bearing Capacity for Recycled Concrete-filled Square Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression

LI Bing, ZHANG Qi, MENG Shuang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Nonlinear analysis of bearing capacity for recycled concrete-filled square steel tubular stub columns under axial compression was carried out using finite element software ABAQUS. The authors put forward the modified model of the constitutive relationship of steel and recycled concrete, and deduced the function relation of ultimate bearing capacity formula of concrete-filled square steel tubular stub columns under axial compression by using ultimate equilibrium method. The finite element calculation results were used to fit the ultimate bearing capacity formulae of recycled concrete-filled square steel tubular stub columns. The study results indicate that the modified formulae of recycled concrete constitutive relationship can meet the requirements of regeneration stub columns under axial bearing capacity well. There are small differences between finite element calculation results and related test results. The established calculation formulae of bearing capacity for recycled concrete-filled square steel tubular stub columns under axial compression can calculate the ultimate bearing capacity of members accurately.

Key words: recycled concrete-filled square steel tubular stub column; axial compression; bearing capacity; finite element analysis

0 引言

再生骨料与天然骨料相比具有孔隙率大、吸水

率大、堆积密度小、表观密度小的特点^[1],这些因素导致再生骨料混凝土在力学性能、耐久性能等方面低于天然骨料混凝土。Buck 等^[2-4]认为用基体混凝

收稿日期:2014-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(10902073)

作者简介:李 兵(1974-),男,辽宁沈阳人,教授,工学博士,E-mail:cebli@sjzu.edu.cn。

土的再生骨料配制的再生混凝土抗压强度与原始混凝土抗压强度的差别不是很明显,降低幅度一般小于 10%。肖建庄等^[5]发现再生混凝土随着再生骨料取代率的增加,其抗压强度总体上呈逐渐降低的趋势,但是当再生骨料取代率 $\gamma=50\%$ 时,出现抗压强度高于天然混凝土的现象。

方钢管再生混凝土结构作为一种结合再生混凝土与钢管的结构形式,充分发挥了二者的优点,具有环境友好、承载力高、塑性和延性好、施工方便的特点^[6-10]。目前,对于方钢管再生混凝土结构的研究还比较少。杨有福等^[11-13]完成了以再生粗骨料取代率、套箍约束系数为主要参数的短柱构件承载力试验,分析了构件受力机理,并获取了荷载-应变全过程曲线,构件在受力下的破坏形态表现为斜压破坏,随着再生混凝土取代率的不断增加,构件承载力整体上呈逐渐下降的趋势。目前利用有限元软件对方钢管再生混凝土结构进行数值模拟分析的相关研究非常少,本文旨在通过建立合理的材料本构模型,利用有限元分析软件 ABAQUS 对方钢管再生混凝土短柱轴压承载力进行非线性分析,为该结构构件进行有限元数值分析做出一些有益的探讨。

1 材料的本构模型

1.1 钢材的本构关系

实际建筑工程中钢筋混凝土结构常用的钢材为低碳钢,并且这些钢筋多为具有屈服点的热轧钢筋。钢材的应力-应变曲线一般分为 5 个阶段:弹性变形阶段,弹塑性阶段,屈服阶段,强化阶段,局部破坏阶段。钢材作为弹塑性材料,其强度理论采用 Von Mises 屈服准则。钢材的应力-应变关系采用简化的弹性-强化线性模型,可以较准确地逼近真实的材料应力-应变关系,其数学表达式为

$$\sigma_i = \begin{cases} E_s \varepsilon_i & \varepsilon_i < \varepsilon_{e0} \\ f_y & \varepsilon_{e0} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y (1 + 0.6 \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{e1}}{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}}) & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_i \leq \varepsilon_{e2} \\ 1.6 f_y & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_y 为屈服强度; σ_i 为钢筋服从 Von Mises 屈服准则的等效应力; E_s 为弹性模量; ε_i 为钢筋应变; ε_{e0} 为屈服时的应变, $\varepsilon_{e0} = f_y / E_s$; ε_{e1} 为强化开始时的应变, $\varepsilon_{e1} = 10\varepsilon_{e0}$; ε_{e2} 为极限抗拉强度时的应变, $\varepsilon_{e2} = 100\varepsilon_{e0}$ 。

1.2 核心再生混凝土的本构关系

许多试验结果表明,再生混凝土与普通混凝土

相比,再生混凝土在单轴状态下的应力-应变曲线的上升段与普通混凝土的应力-应变曲线几乎吻合,故该阶段采用普通混凝土单轴状态下的应力-应变关系曲线表达式。对于曲线下降段,由于再生混凝土的弹性模量降低,明显表现为脆性破坏,曲线较普通混凝土陡峭。本文对方钢管再生混凝土进行有限元分析,核心混凝土的受力为三向受压状态,方钢管对核心混凝土提供被动约束力,限制核心混凝土的横向变形扩展。为了满足 ABAQUS 软件分析再生混凝土本构关系的适用条件,笔者根据前人对再生混凝土性能的研究成果,考虑再生骨料取代率对再生混凝土性能的影响,对刘威^[14]提出的混凝土应力-应变关系数学公式进行修正,修正后的数学表达式如下

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\Psi\beta(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$x = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = f_c$$

$$\varepsilon_0 = [(1\ 300 + 12.5 f_c) \times 10^{-6} + 8 \times 10^{-4} \xi^{0.2}] \cdot (1 + 0.105 \gamma)$$

$$\xi = A_s f_y / (A_c f_{ck})$$

$$\eta = \begin{cases} 2 & \text{圆钢管混凝土} \\ 1.6 + \frac{1.5}{x} & \text{方钢管混凝土} \end{cases}$$

$$\Psi = 1.75 + 1.15 \gamma$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{f_c^{0.5}}{1.2\sqrt{1+\xi}} & x \leq 3 \\ \frac{f_c^{0.5}}{1.2\sqrt{1+\xi(\xi-2)^2}} & x > 3 \end{cases}$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; A_c 、 A_s 分别为混凝土和钢管的横截面面积; σ_0 为混凝土单轴受压应力峰值; ε_0 为 σ_0 对应的应变; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; Ψ 为再生骨料取代率影响曲率系数; f_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ξ 为约束效应系数。

2 有限元计算模型

2.1 钢管与核心混凝土界面的粘结与滑移

钢管与混凝土的接触界面采用库仑摩擦模型。在法向方向上,混凝土由于横向变形对钢管产生压力;在切向方向上,存在着粘结力及界面剪应力。核

心混凝土与上、下端垫板不考虑切向接触,仅考虑法向接触。在法向界面接触中,接触单元传递全部界面压力,压力与缝隙之间的关系选择“硬”接触。由于在纵向、横向发生变形,切向方向界面剪应力达到摩擦应力临界值,界面之间产生相对滑动,钢管与核心混凝土界面摩擦因数的取值为 0.56。

2.2 单元类型选取与网格划分

核心混凝土与上端垫板采用 8 节点线性缩减积分三维八面体实体单元 C3D8R,外包钢管采用线性 4 节点减缩积分壳体单元 S4R。在实际有限元仿真分析中,网格划分在保证网格划分质量较好的情况下,尽量降低计算成本,提高计算效率。核心混凝土与钢管模型均采用扫掠网格划分。钢管混凝土短柱构件的有限元单元网格划分如图 1 所示。

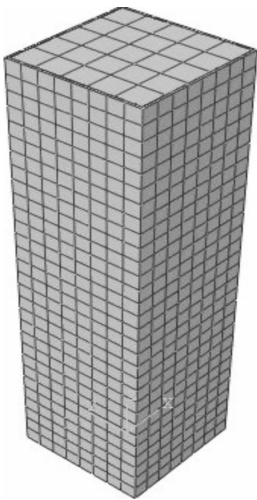


图 1 有限元单元网格的划分

Fig. 1 Division of Finite Element Meshes

2.3 荷载与边界条件

本文中 方钢管混凝土柱为三轴对称结构,在短柱的一端施加固定约束;另一端为自由端,在自由端处施加位移荷载,利用 AMPLITUDE 创建表格来描述

荷载的加载规律,每次位移加载时幅值不宜过大。荷载与边界条件如图 2 所示。

3 有限元模型验证

3.1 算例模型

本文模型具体参数采用与文献[12],[13],[15]相同的试验几何尺寸和材料参数,对 8 组方钢管再生混凝土短柱进行非线性有限元模拟分析,具体试件几何尺寸、材料参数及数值模拟结果如表 1 所示。试件模拟与试验结果的轴压荷载-应变($P-\epsilon$)关系比较见图 3。

3.2 计算结果与分析

从表 1 及图 3 可以看出,模拟结果与试验结果吻合较好,表明本文中所建立的有限元模型能较好地 完成方钢管再生混凝土短柱轴压承载力的有限元模拟分析。从试验结果与模拟结果来看,方钢管再生混凝土短柱轴压承载力随着再生骨料取代率的增加而降低。所有试件的 $P-\epsilon$ 曲线都有 3 个基本变形过程:上升段,曲线呈线性关系;弹塑性阶段,承载力增长缓慢,变形急剧增大;下降段,承载力下降的速率小于变形增大的速率。尽管模拟曲线与试验曲线

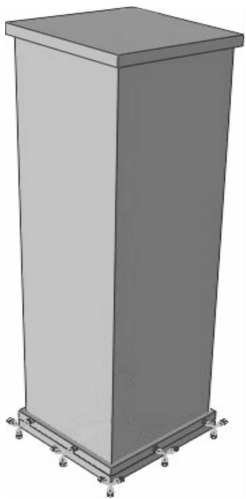


图 2 荷载与边界条件
Fig. 2 Loads and Boundary Condition

表 1 试件几何尺寸、材料参数及数值模拟结果

Tab. 1 Geometric Sizes, Material Parameters and Numerical Simulation Results of Specimens

试件编号	$\gamma/\%$	D/mm	t/mm	L/mm	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	E_s/GPa	ξ	p_u/kN	p'_u/kN	数据来源
A1	0	100	1.74	401	42.6	335.5	193.3	0.779	569	581	文献[9]
A2	100	100	1.80	398	35.9	335.5	193.3	1.101	512	534	
A3	30	121	3.06	363	36.7	340.0	206.0	1.510	960	916	文献[10]
A4	50	121	3.20	356	35.7	340.0	206.0	1.630	945	908	
A5	80	121	3.15	359	41.9	340.0	206.0	1.370	956	976	
A6	100	121	3.08	359	43.6	340.0	206.0	1.280	972	991	
A7	0	100	1.94	300	42.7	388.1	193.3	1.118	666	642	文献[12]
A8	25	100	1.94	300	41.8	388.1	193.3	1.142	653	639	

注: D 为方钢管的边长; L 为柱的长度; t 为钢管厚度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; p_u 为参考文献中的极限荷载试验值; p'_u 为本文中模拟获得的极限荷载计算值。

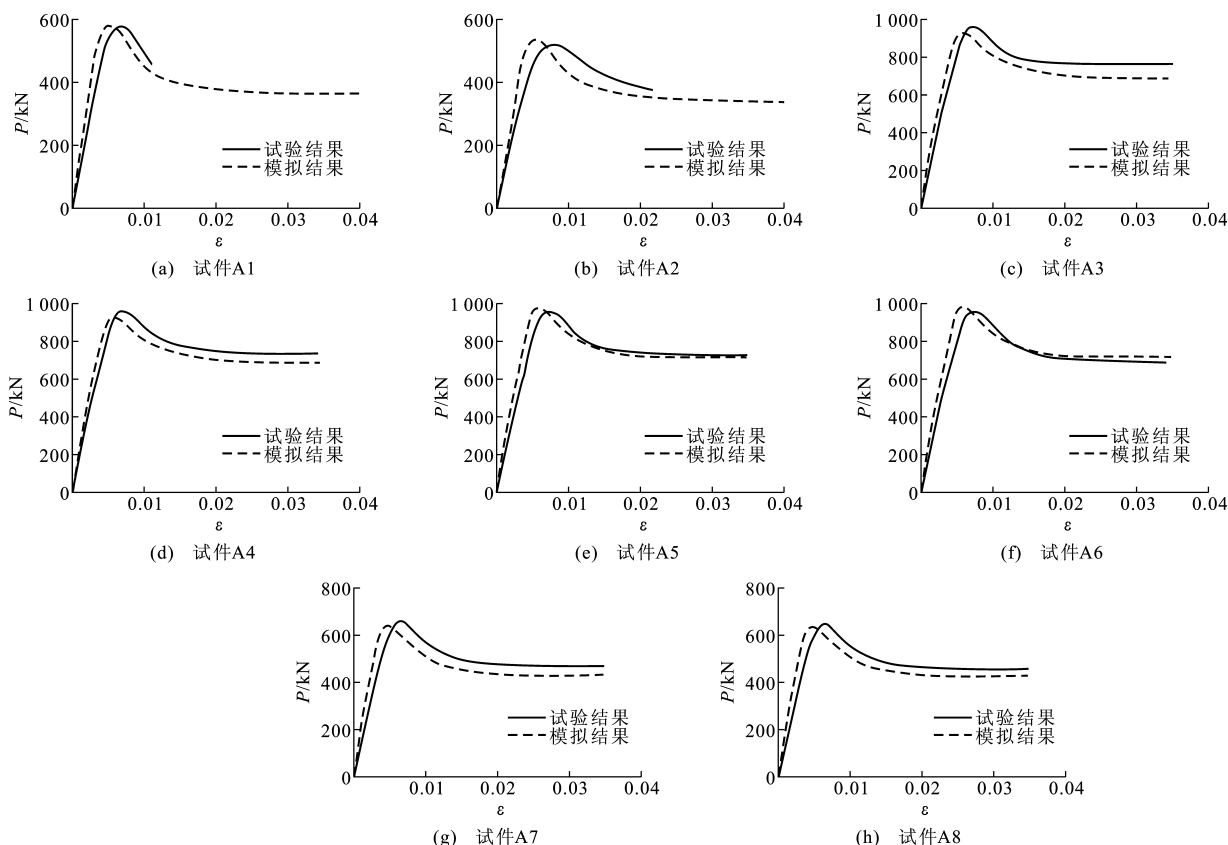
具有一定的差异,主要表现在纵向应变方面,极限应变均低于相关试验结果,但是对于分析构件的极限承载力的影响比较小。因此,本文中所提出的本构关系及相关计算模型可以较好地满足利用 ABAQUS 对方钢管再生混凝土柱构件进行轴压承

载力的模拟分析要求。

4 轴压承载力分析

4.1 混凝土三向受压下的强度

图4为方钢管与核心混凝土受力,其中, σ_1 为

图3 试件模拟结果与试验结果的 $P-\varepsilon$ 曲线比较Fig. 3 Comparisons of $P-\varepsilon$ Curves Between Simulation Results and Test Results of Specimens

钢管纵向应力, σ_2 为钢管环向应力, σ_3 为钢管径向应力, p 为侧压力, d 为方形截面混凝土的边长。核心混凝土受到的方钢管约束压力不是等压约束, 通过将不均匀侧压强度转化为等效等侧压强度, 使复杂的混凝土受侧压力状态转化为静水压力状态, 为推导方钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算公式提供便利条件。三向受压下的混凝土强度由于受到多种因素的影响, 因此获得的强度计算公式各异, 对于均匀侧压力作用下的混凝土强度, 由于作用极限条件较为简单, 混凝土强度与侧压力的关系较容易确立, 目前学者比较认同经验公式(3), 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= f_{ck} + Kp \\ K &= A + B/\sqrt{p/f_{ck}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: f_{ck} 为在等侧压力 p 下三向受压混凝土的抗压强度; σ_c 为混凝土在无侧压力时的抗压强度; A, B 均为系数。

4.2 基本假设

利用极限平衡法求解方钢管再生混凝土短柱轴压极限承载力, 优点在于极限承载力不受构件在外力作用下产生变形的影响。结构需要满足以下 3 个方面的基本假设: ①轴心受压短柱构件的应变场是

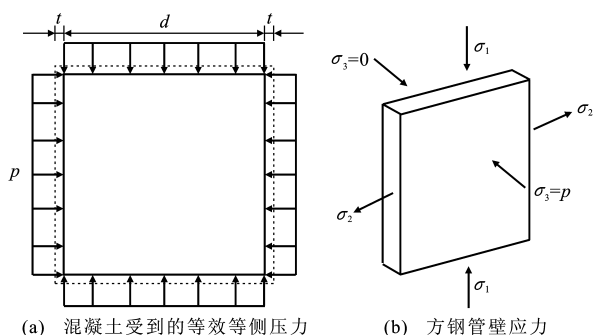


图4 方钢管与核心混凝土受力

Fig. 4 Forces of Square Tube and Core Concrete

对称的, 钢管混凝土可以看作是由钢管与混凝土 2 种元件构成的结构; ②混凝土与钢管 2 种元件的屈服条件都是稳定的, 均服从各自的屈服条件; ③对于 $D/t \geq 20$ 的薄壁钢管, 在极限状态下, 其径向应力 σ_3 与环向应力 σ_2 相比可以忽略不计, 此时钢管可以简化为受到 σ_1, σ_2 的双向受压模型, 并在钢管壁上均匀分布。

4.3 轴压承载力计算公式的推导

由静力平衡条件可建立以下 2 个方程, 即

$$N = A_c \sigma_c + A_s \sigma_1 \quad (4)$$

$$\sigma_2 t = dp/2 \quad (5)$$

式中: N 为外荷载。

由钢管与核心混凝土各自的屈服条件可分别建立以下 2 个方程,即

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1 \sigma_2 = f_y^2 \tag{6}$$

$$\sigma_c = f_{ck} (1 + B \sqrt{\frac{p}{f_{ck}}} + A \frac{p}{f_{ck}}) \tag{7}$$

由式(4)联立式(5),并考虑钢管厚度较薄,可取

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{\pi dt}{\pi d^2/4} = \frac{4t}{d}, \text{得}$$

$$\sigma_1 = [\sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} (\frac{p}{f_{ck}})^2} - \frac{1}{\xi} \frac{p}{f_{ck}}] f_y \tag{8}$$

将式(7)与式(8)代入式(4),得

$$N = A_c \sigma_c + A_s \sigma_1 = A_c f_{ck} (1 + B \sqrt{\frac{p}{f_{ck}}} + A \frac{p}{f_{ck}}) +$$

$$A_s f_y [\sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} (\frac{p}{f_{ck}})^2} - \frac{1}{\xi} \frac{p}{f_{ck}}] =$$
$$A_c f_{ck} [1 + (\sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} (\frac{p}{f_{ck}})^2} + \frac{B}{\xi} \sqrt{\frac{p}{f_{ck}}} +$$
$$\frac{A-1}{\xi} \frac{p}{f_{ck}}) \xi] \tag{9}$$

由式(9)可知,外荷载 N 为侧压力 p 的函数。对 p 求导数,由极值条件知, $dN/dp = 0$, 求得最大荷载 N_{max} 时对应的侧压力 p^* , 得

$$\frac{3p^*/f_{ck}}{\sqrt{\xi^2 - 3(p^*/f_{ck})^2}} - \frac{B}{2\sqrt{p^*/f_{ck}}} - A + 1 = 0 \tag{10}$$

将式(10)中的 p^*/f_{ck} 代入式(9),得

$$N_u = A_c f_{ck} (1 + C\sqrt{\xi} + D\xi) \tag{11}$$

式中: N_u 为轴压极限承载力; C, D 均为关于 A, B 的系数。

为了考虑到再生骨料对钢管再生混凝土承载力的影响,引入一个再生骨料取代率影响系数 μ , 最后可得

$$N_u = A_c f_{ck} \mu (1 + C\xi + D\sqrt{\xi}) \left. \begin{aligned} \mu = -0.025\gamma + 1 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

将表 1 中模拟计算结果代入公式(12)进行拟合回归,最终获得方钢管再生混凝土短柱轴压极限承载力的经验公式,即

$$N_u = A_c f_{ck} \mu (1 + 0.25\sqrt{\xi} + 1.05\xi) \left. \begin{aligned} \mu = -0.025\gamma + 1 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

表 2 为承载力计算结果与试验结果的比较。由表 2 可知:计算结果与试验结果差值均小于 5%,表明基于极限平衡法推导并由模拟计算结果拟合回归而成的方钢管再生混凝土短柱的极限承载力经验公式,其计算值与试验值吻合良好。

表 2 承载力计算结果与试验结果的比较

Tab. 2 Comparison of Calculation Results and Test Results of Bearing Capacity

试件编号		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
承载力/kN	试验结果	569	512	960	945	956	972	666	653
	计算结果	542	527	932	941	993	986	644	634

5 结 语

(1)提出了核心再生混凝土本构关系的修正数学表达式及相关模型,通过有限元软件 ABAQUS 模拟方钢管再生混凝土短柱轴压极限承载力,获得的模拟计算结果与试验结果吻合较好,表明建立的模型可较好地满足利用 ABAQUS 对方钢管再生混凝土短柱构件进行轴压承载力的模拟分析要求。

(2)从模拟结果来看,方钢管再生混凝土短柱轴压承载力随着再生骨料取代率的增加而降低。试件的 $P-\epsilon$ 曲线有 3 个基本变形过程:上升段,曲线呈线性关系;弹塑性阶段,承载力增长缓慢,而变形快速增大;下降段,承载力快速下降,而变形急剧增大。

(3)基于极限平衡法所推导的方钢管再生混凝土短柱轴压极限承载力计算公式,经拟合回归获得经验公式,由公式计算值与试验值的比较可知,其差值均小于 5%,表明获得的计算值与试验值吻合良好。

参考文献:

References:

[1] 李秋义,全洪珠,秦 原. 混凝土再生骨料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
LI Qiu-yi, QUAN Hong-zhu, QIN Yuan. Recycled Concrete Aggregate[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[2] BUCK A D. Recycled Concrete as a Source of Aggregate[J]. ACI Journal, 1977, 74(5): 212-219.

[3] RAVINDRARAJAH R S, LOO Y H, TAM C T. Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1987, 39(141): 204-224.

[4] AJDUKIEWICZ A, KLISZCZEWICZ A. Influence of Recycled Aggregate on Mechanical Properties of HS/HPC[J]. Cement & Concrete Composites, 2002, 24(2): 269-279.

[5] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, SUN Zhen-ping, et al.

- Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(12): 1558-1561.
- [6] HAN L H, LIN X K. Tests on Cyclic Behavior of Concrete-filled Hollow Structural Steel Columns After Exposure to the ISO 2834 Standard Fire[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1807-1819.
- [7] HAN L H, HUO J S, WANG Y C. Compressive and Flexural Behaviour of Concrete Filled Steel Tubes After Exposure to Standard Fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7): 882-901.
- [8] 谷利雄, 丁发兴, 付磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 57-63.
- GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.
- [9] 杨有福, 曹凯, 杨志泉, 等. 冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱力学性能[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 51-58.
- YANG You-fu, CAO Kai, YANG Zhi-quan, et al. Mechanical Properties of Concrete-filled Steel Tubular Stubs After Freezing and Thawing Cycles Under Axial Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 51-58.
- [10] 李小伟, 赵均海, 朱铁栋, 等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 77-81.
- LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, ZHU Tie-dong, et al. Mechanics Behavior of Axially Loaded Short Columns with Concrete-filled Square Steel Tube[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81.
- [11] 杨有福. 钢管再生混凝土构件力学性能和设计方法若干问题的探讨[J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 1-5, 10.
- YANG You-fu. Discussion on Several Problems of Mechanical Behavior and Design Method of Recycled Concrete-filled Steel Tubular Members[J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 1-5, 10.
- [12] 邱慈长, 王清远, 石膏爽, 等. 薄壁钢管再生混凝土轴压实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(1): 8-15.
- QIU Ci-chang, WANG Qing-yuan, SHI Xiao-shuang, et al. Experimental Investigation on the Behavior of Recycle Concrete-filled Thin-walled Steel Tube Under Axial Compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1): 8-15.
- [13] 陈宗平, 柯晓军, 薛建阳, 等. 钢管约束再生混凝土的受力机理及强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 70-77.
- CHEN Zong-ping, KE Xiao-jun, XUE Jian-yang, et al. Mechanical Performance and Ultimate Bearing Capacity Calculation of Steel Tube Confined Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 70-77.
- [14] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- LIU Wei. Research on Mechanism of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Local Compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [15] 吴凤英, 杨有福. 钢管再生混凝土轴压短柱力学性能初探[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(增1): 305-308, 315.
- WU Feng-ying, YANG You-fu. Preliminary Research on Behaviors of Recycled Concrete-filled Steel Stub Columns[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Sciences, 2005, 33(S1): 305-308, 315.