

文章编号: 1000-4750(2011)09-0115-07

钢管钢纤维高强混凝土轴压短柱的受力分析

陈 娟, *卢亦焱, 李 杉

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 为了研究钢纤维对钢管高强混凝土短柱轴压力学性能的影响, 对 7 根钢管钢纤维高强混凝土短柱和 3 根钢管高强混凝土短柱进行了轴心受压试验。根据试验中测得的钢管横向应变和纵向应变结果, 采用内力分解法分析了钢管与钢纤维高强混凝土的应力变化以及两者之间的相互关系。结果表明: 钢纤维对钢管高强混凝土短柱的横向变形影响较大, 掺入钢纤维能有效提高核心混凝土的抗压强度提高系数, 进而提高钢管钢纤维高强混凝土短柱的极限承载力。

关键词: 钢管混凝土; 钢纤维; 轴心受压; 极限承载力; 变形

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A

THEORETICAL ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE FILLED STEEL TUBE UNDER AXIAL COMPRESSION

CHEN Juan, *LU Yi-yan, LI Shan

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A total of 7 short steel fiber reinforced high strength concrete filled steel tube columns and 3 short high strength concrete filled steel tube columns are tested under axial compression load to analyze the influence of steel fiber on the compression behavior of the high strength concrete filled steel tubes. Based on results of the transverse stress and strain of steel tube, the relationship between steel tube and steel fiber reinforced concrete stress is analyzed. The results show that the raising coefficient of core concrete strength is increased due to the reinforcement effect of steel fiber, giving raise to the ultimate capacity of steel fiber reinforced high concrete filled steel tube. Moreover, steel fiber has great effect on the transverse deformation of high strength concrete filled steel tube short columns.

Key words: concrete filled steel tube; axial compression; steel fiber reinforced concrete; ultimate capacity; deformation

钢管高强混凝土在土木工程界得到了日益广泛的应用。主要由于外包钢管能有效约束了核心混凝土受压的侧向变形, 使得核心混凝土处于三向受压状态, 从而提高混凝土的抗压强度、极限应变、承载力和延性等。试验研究发现: 钢管高强混凝土在轴压和反复压弯荷载下, 当柱子的套箍指标较低

或混凝土的强度较高时, 钢管柱中的混凝土在构件达到极限荷载时破坏呈脆性, 延性并不理想^[1-4]。在套箍系数相近的情况下, 由于高强混凝土自身的特性使得钢管高强混凝土与钢管普通强度混凝土的力学性能和破坏形态有较大差异^[5], 试件延性和破坏模式主要受套箍系数和核心混凝土强度的影

收稿日期: 2010-01-19; 修改日期: 2010-04-06

基金项目: 湖北省杰出青年人才基金项目(2004ABB014); 湖北省建设科技重点研究项目(K2005112005)

作者简介: 陈 娟(1980—), 女, 武汉人, 讲师, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: chenjuan9876@163.com);

*卢亦焱(1965—), 男, 福建人, 教授, 博士, 从事结构加固、组合结构研究(E-mail: yylu901@163.com);

李 杉(1979—), 男, 昆明人, 博士, 从事结构加固以及耐久性研究(E-mail: Lsdlut@yahoo.com.cn).

响。针对以上情况，本文提出了钢管钢纤维高强混凝土，其原理是通过钢纤维对核心高强混凝土性能改善来提高钢管高强混凝土的整体性能。

近年来，钢管钢纤维混凝土已在一些工程中应用^[6]，但国内外关于钢管钢纤维混凝土力学性能的相关研究较少，Gopal 开展了钢管钢纤维混凝土柱的轴心受压试验研究，结果表明钢纤维掺入对短柱承载力的影响不明显^[7]。Gopal 后续的研究表明钢管混凝土柱中掺入钢纤维能显著提高柱的抗震性能^[8]。Campione 研究了钢管钢纤维混凝土轴压短柱的力学性能，结果表明钢纤维混凝土作为填充材料能显著提高短柱的延性，延迟钢管局部屈曲^[9]。Kodur 研究了火灾作用下钢管钢纤维混凝土柱的力学性能，结果表明钢管钢纤维混凝土柱具有较好的火灾抵抗能力^[10]。高文博的研究表明钢管混凝土柱中掺入钢纤维显著提高短柱的承载力^[11]。目前，关于钢管钢纤维混凝土柱的研究还不充分，对钢管钢纤维高强混凝土短柱的研究还没有涉及。因此有必要对钢管钢纤维混凝土进行大量试验研究和理论分析。

鉴于此，本文在对钢管钢纤维高强混凝土轴压短柱的试验研究基础上，采用分解法分析钢管和钢纤维高强混凝土的应力-应变变化，钢管钢纤维混凝土柱承载力提高的原因。

1 试验概况

本次试验共进行了 7 根钢管钢纤维高强混凝土短柱和 3 根钢管高强混凝土短柱的轴心受压试验，各柱的参数详见表 1。钢管均为无缝钢管，其截面为 $\phi 131\text{mm}\times 4\text{mm}$ 、 $\phi 127\text{mm}\times 2\text{mm}$ 、 $\phi 129\text{mm}\times 3\text{mm}$ 三种，均由截面尺寸为 $\phi 133\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的无缝钢管在车床上加工而成。钢材的屈服强度为 300MPa，抗拉强度为 416.9MPa。混凝土设计强度为 C50、C60、C70 三个等级。试件分组情况和试验结果见表 1，其中，延性系数 μ 根据下式确定：

$$\mu = \frac{\Delta_{85\%}}{\Delta_u} \tag{1}$$

式中： Δ_u 为峰值荷载对应的位移； $\Delta_{85\%}$ 为荷载值下降到 85%峰值荷载时对应的位移。

短柱的轴压试验研究参见文献[12]。图 1 和图 2 分别给出了钢纤维掺量对柱应变以及荷载-位移关系的影响曲线。

表 1 轴压短柱试件试验结果

Table 1 Test results of specimens

试件编号	钢管尺寸 $D\times t\times L/\text{mm}$	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	N_u/kN	μ
C60-4-0	131×4×393	300	60	1320.3	2.45
C60-4-0.6	131×4×393	300	61.6	1389.6	3.85
C60-4-0.9	131×4×393	300	63	1430.0	5.76
C60-4-1.2	131×4×393	300	60.1	1452.0	—
C50-4-0	131×4×393	300	54.6	1280.1	—
C50-4-0.9	131×4×393	300	54.9	1403.6	—
C70-4-0	131×4×393	300	70.3	1469.8	2.13
C70-4-0.9	131×4×393	300	72.4	1496.6	3.59
C60-2-0.9	127×2×393	300	63	946.2	3.67
C60-3-0.9	129×3×393	300	63	1147.2	3.70

注：试件编号的第一个“-”前面表示混凝土强度等级，第二个“-”后面的数字表示纤维体积掺量，中间数字表示钢管壁厚，例如，C60-4-0.6 表示混凝土强度等级为 C60，管壁厚为 4mm，纤维体积掺量为 0.6%的试件； D 、 t 和 L 分别是钢管的外径、管壁厚度和长度； f_y 为钢管钢材的实测屈服强度； f_{cu} 为混凝土的 150mm 立方体抗压强度； N_u 为试验所得柱的极限承载力； μ 为延性系数。

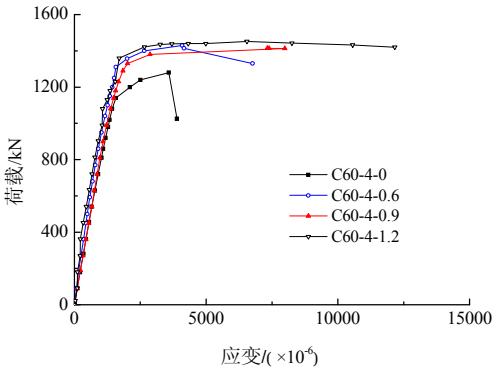


图 1 钢纤维掺量对柱应变的影响

Fig.1 Effect of Steel fiber on strain of specimens

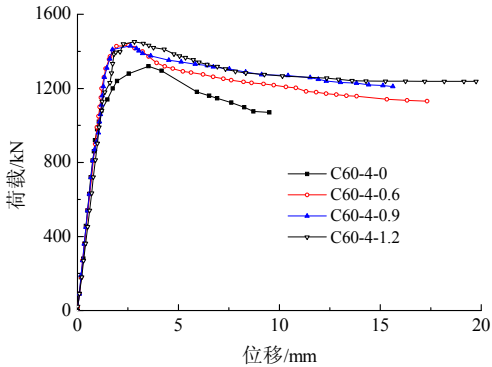


图 2 钢纤维掺量对柱荷载-位移关系的影响

Fig.2 Effect of Steel fiber on Load-displacement relation

试验结果表明：钢纤维的掺入能提高钢管钢纤维高强混凝土的承载力，其承载力随钢纤维掺量的增大而增大，最大提高幅度为 9.9%。在钢管高强混凝土短柱中掺入钢纤维显著改善了短柱延性，随钢纤维掺量的增加，短柱的延性大幅度提高。

2 内力分解分析

钢管钢纤维高强混凝土是钢管和钢纤维高强混两种材料的组合结构,其分解分析法仍可采用钢管混凝土的分解分析法^[13-14],基本假设:假设环向应力沿壁厚均匀分布;忽略径向应力,钢管按平面应力状态计算。

首先确定钢管屈服点 f_y 、比例极限 f_p 、弹性模量 E_s 和泊松比 μ_s 。钢管在平面应力状态时的应力强度与应变强度的关系曲线如图 3 所示。

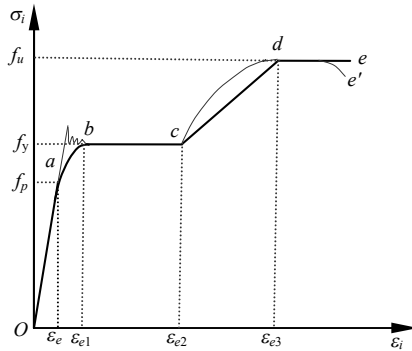


图 3 钢材的应力-应变

Fig.3 Stress-strain relation curves of steel

1) 弹性阶段。

在此阶段,钢材的应力-应变关系符合虎克定律:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E_s}{1-\mu_s^2}(\varepsilon_1 + \mu_s \varepsilon_3) \\ \sigma_3 = \frac{E_s}{1-\mu_s^2}(\varepsilon_3 + \mu_s \varepsilon_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为钢管的环向应力和纵向应力; ε_1 、 ε_3 分别为钢管的环向应变和纵向应变; μ_s 为钢材弹性阶段的泊松比。

应力强度:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_3} \quad (3)$$

弹性阶段和弹塑性阶段的分界点是 $\bar{\sigma} = f_p$, 当 $\bar{\sigma} > f_p$ 后钢管进入弹塑性阶段。

2) 弹塑性阶段。

此阶段采用弹性增量理论公式:

$$\begin{cases} d\sigma_1 = \frac{E_s^t}{1-\mu_{sp}^2}(d\varepsilon_1 + \mu_{sp} d\varepsilon_3) \\ d\sigma_3 = \frac{E_s^t}{1-\mu_{sp}^2}(d\varepsilon_3 + \mu_{sp} d\varepsilon_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_s^t 为切线模量; μ_{sp} 为弹塑性阶段的泊松比; 按下式确定:

$$E_s^t = \frac{(f_y - \bar{\sigma})\bar{\sigma}}{(f_y - f_p)} E_s \quad (5)$$

$$\mu_{sp} = 0.217 \frac{\bar{\sigma} - f_p}{f_y - f_p} + 0.283 \quad (6)$$

将试件试验曲线上的 ab 段分成 n 级加载, 根据每级荷载下测定的应变增量 $d\varepsilon_1$ 和 $d\varepsilon_3$, 按式(3)计算应力增量, 确定弹塑性阶段钢管的纵向和环向应力值:

$$\sigma_1 = \sigma_{1t} + \sum_{i=k+1}^j \Delta \sigma_{1i} = \sigma_{1t} + \sum_{i=k+1}^j \frac{E_s^t}{1-\mu_{sp}^2}(\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i} + \mu_{sp}(\varepsilon_{3(i+1)} - \varepsilon_{3i})) \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{3t} + \sum_{i=k+1}^j \Delta \sigma_{3i} = \sigma_{3t} + \sum_{i=k+1}^j \frac{E_s^t}{1-\mu_{sp}^2}(\varepsilon_{3(i+1)} - \varepsilon_{3i} + \mu_{sp}(\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i})) \quad (8)$$

式中: σ_{1t} 、 σ_{3t} 分别为弹性阶段末钢管的环向应力和纵向应力。弹塑性阶段和塑性阶段的分界点是: $\bar{\sigma} > f_y$ 。

3) 塑性强化阶段。

钢管进入塑性阶段后体积不变, $\mu_s=0.5$, 钢材服从 Von-Mises 屈服准则和 Prandtl-Reuss 流动准则的本构关系, 在平面应力状态下, 刚度矩阵为^[15]:

$$[D] = \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} \sigma_1'^2 + 2p & \text{对称} \\ -\sigma_1'\sigma_3' + 2\mu p & \sigma_1'^2 + 2p \\ -\frac{\sigma_1' + \mu\sigma_3'}{1+\mu}\tau_{13} & -\frac{\sigma_3' + \mu\sigma_1'}{1+\mu}\tau_{13} & \frac{R}{2(1+\mu)} + \frac{2H'}{9E}(1-\mu)\bar{\sigma}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:

$$p = \frac{2H'}{9E}\bar{\sigma}^2 + \frac{\tau_{13}^2}{1+\mu};$$

$$Q = \sigma_1'^2 + \sigma_3'^2 + 2\mu\sigma_1'\sigma_3' + 2(1-\mu)\tau_{13}^2 + \frac{2H'(1-\mu)\bar{\sigma}^2}{9G};$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3(\sigma_1'^2 + \sigma_1'\sigma_3' + \sigma_3'^2 + \tau_{13}^2)};$$

$$R = \sigma_1'^2 + 2\mu\sigma_1'\sigma_3' + \sigma_3'^2; \quad \sigma_1' = \sigma_1 - \sigma_m;$$

$$\sigma_3' = \sigma_3 - \sigma_m; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{3}; \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

其中: σ_1' 为钢材的横向应力偏量; σ_3' 为钢材的纵向应力偏量; σ_m 为平均应力; p 为计算参数,

$$p = \frac{2H'}{9E}\bar{\sigma}^2; \quad H' \text{ 为计算参数, } H' = \frac{10^{-3}}{1-10^{-3}} E_s.$$

在塑性强化阶段, 钢材的切向模量和泊松比分别为 $E_s^p = 0.001E_s$, $\mu_s^p = 0.5$, 则有:

$$\begin{cases} d\sigma_1 = \frac{E_s^p}{Q}[(\sigma_3'^2 + 2p)d\varepsilon_1 + (-\sigma_1'\sigma_3' + 2\mu_s^p p)d\varepsilon_3] \\ d\sigma_3 = \frac{E_s^p}{Q}[(\sigma_1'^2 + 2p)d\varepsilon_3 + (-\sigma_1'\sigma_3' + 2\mu_s^p p)d\varepsilon_1] \end{cases} \quad (10)$$

将塑性强化阶段测得的钢管每级应变分成 n 级加载, 则钢管的纵向和横向应力分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1pt} + \sum_{i=j+1}^m \Delta\sigma_1 = \\ &\sigma_{1pt} + \frac{E_s^p}{Q} \sum_{i=j+1}^m [(\sigma_3'^2 + 2p)(\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i})] + \\ &\frac{E_s^p}{Q} \sum_{i=j+1}^m [(\sigma_1'\sigma_3' + 2\mu_s^p p)(\varepsilon_{3(i+1)} - \varepsilon_{3i})] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \sigma_{3pt} + \sum_{i=j+1}^m \Delta\sigma_3 = \\ &\sigma_{3pt} + \frac{E_s^p}{Q} \sum_{i=j+1}^m [(\sigma_1'^2 + 2p)(\varepsilon_{3(i+1)} - \varepsilon_{3i})] + \\ &\frac{E_s^p}{Q} \sum_{i=j+1}^m [(\sigma_1'\sigma_3' + 2\mu_s^p p)(\varepsilon_{1(i+1)} - \varepsilon_{1i})] \end{aligned} \quad (12)$$

式中: σ_{1pt} 、 σ_{3pt} 分别为弹塑性阶段末钢管的环向应力和纵向应力。

根据钢管钢纤维高强混凝土轴压试验过程中钢管外表面测得的纵向和横向应变片的数值, 采用 matlab 编制数值计算程序分别计算在各级荷载作用下钢管纵向应力 σ_3 、横向应力 σ_1 以及应力强度 $\bar{\sigma}$ 。

钢管的纵向内力为:

$$N_s = \sigma_3 A_s \quad (13)$$

混凝土承担的纵向力为:

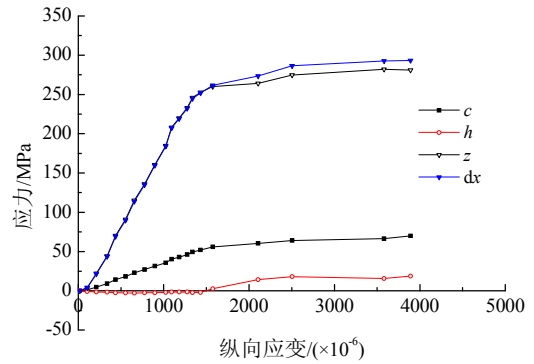
$$N_c = N - N_s = N - \sigma_3 A_s \quad (14)$$

试验中所有试件均发生剪切破坏, 发生剪切破坏的试件, 当钢管进入弹塑性阶段后, 同级荷载下, 受应变片位置和核心混凝土破坏面位置的影响, 各测点的纵向和横向应变变化出现明显差异, 因此计算时不能先将所有纵横向应变片的测值分别平均后计算, 而是应该先分别求得同级荷载下各个测点处钢管纵向应力 σ_3 、横向应力 σ_1 和应力强度 $\bar{\sigma}$, 然后由各测点的应力求得平均应力。进而求得钢管和核心混凝土在轴压荷载下的应力-应变关系。

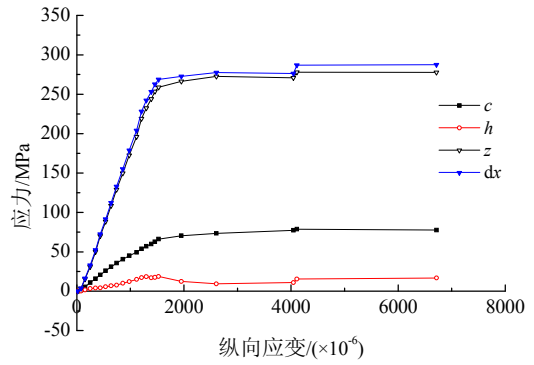
3 结果分析

计算所得钢管的横向应力-应变曲线、纵向应力-应变曲线、应力强度-应变曲线以及混凝土的应

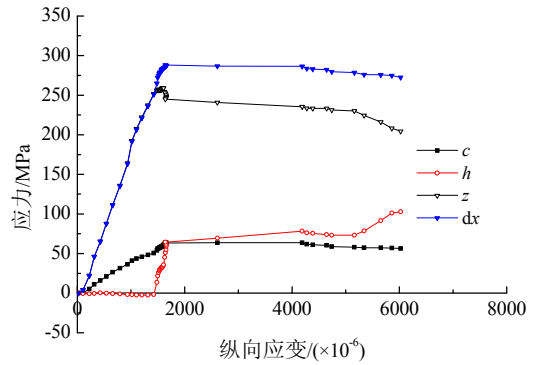
力-应变曲线见图 4 所示(图 4 中 z 、 h 、 dx 、 c 分别代表钢管的纵向应力-应变、横向应力-应变、应力强度-应变和混凝土的应力-应变)。



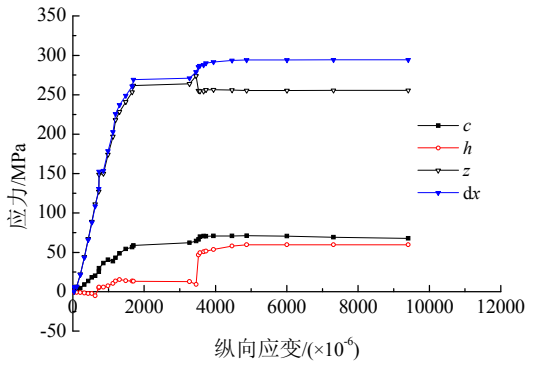
(a) 试件 C60-4-0



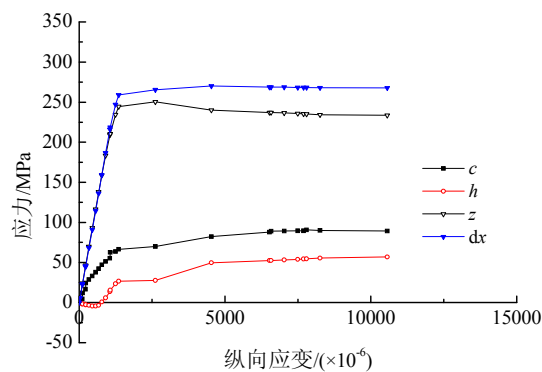
(b) 试件 C60-4-0.6



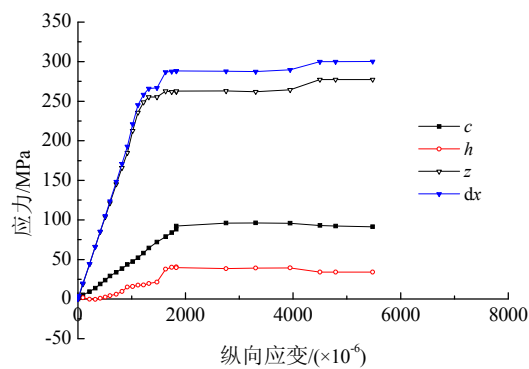
(c) 试件 C60-2-0.9



(d) 试件 C60-3-0.9



(e) 试件 C60-4-1.2



(i) 试件 C70-4-0.9

图4 钢管、核心混凝土应力-应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain relation curves of steel and core concrete

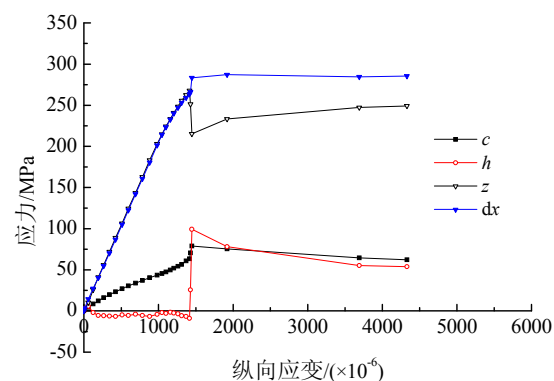
3.1 钢管应力分析

分析图 4 中钢管的纵向应力-应变关系曲线可得到其典型的纵向应力-应变关系曲线, 如图 5 所示, 可分为 3 个阶段:

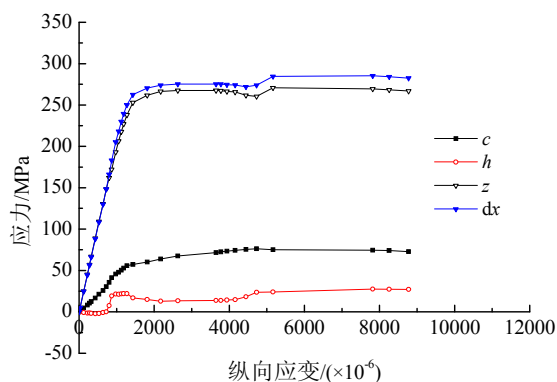
1) 弹性阶段(OA 段)。在受压初始, 钢材处于弹性阶段, 钢材的横向应力小, 其纵向应力-纵向应变关系曲线和应力强度-纵向应变关系曲线基本重合。

2) 弹塑性阶段(AB 段)。随着荷载的增加, 钢材进入弹塑性受力状态, 钢材的纵向应力比应力强度小, 此时环向应力还不是很大。到达 B 点时钢管的纵向应力达到最大值。

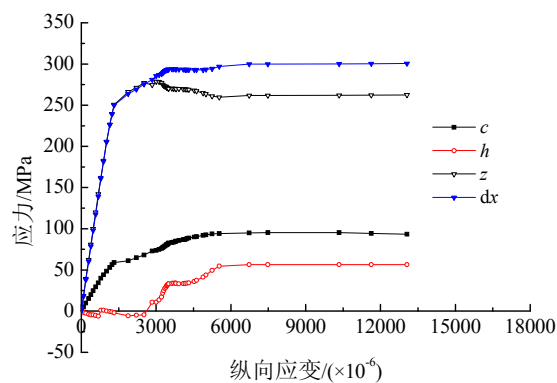
3) 软化阶段(BD 段)。超过 B 点后, 钢管出现应力软化。当核心混凝土的受压刚度开始降低时, 混凝土的横向变形迅速增大, 导致钢管提供的约束力增大, 而纵向承载力降低。到达 C 点时, 试件达到极限承载力。



(f) 试件 C50-4-0



(g) 试件 C50-4-0.9



(h) 试件 C70-4-0

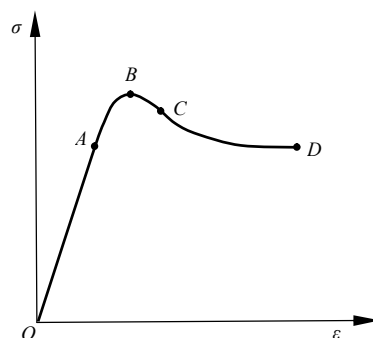


图5 钢管典型纵向应力-应变关系曲线

Fig.5 Longitudinal stress-strain relation curves of steel tube

钢管的横向应力-应变关系曲线可以分为 3 个阶段:

1) 波动段。在加载初期, 钢管的环向应力一直为压应力, 且上下波动, 此阶段应力不大。

2) 上升段。此阶段钢管的环向应力由压应力转变为为拉应力，由于混凝土裂缝的不断发生和发展，使得钢管混凝土横向扩张，钢管的横向应力迅速上升。

3) 平稳段。曲线经过上升段以后，钢管的环向应力基本保持不变，环向应力-应变关系曲线呈直线。

对比掺加与不掺加钢纤维试件的钢管纵向应力-应变关系曲线和横向应力-应变关系曲线可知，各组其它参数相同仅钢纤维掺量不同的试件(C50-4-0 和 C50-4-0.9, C60-4-0、C60-4-0.6 和 C60-4-1.2, C70-4-0 和 C70-4-0.9)，掺有钢纤维的试件的横向应力-应变关系曲线中的波动段相比未掺钢纤维试件的要短，未掺钢纤维的试件在纵向应变变为 0.0014 以上时其横向应力-应变曲线才进入上升段，除试件 C60-2-0.9 之外，掺了钢纤维的试件在纵向应变达到 0.0008 之前其横向应力-应变曲线就进入了上升段；掺有钢纤维的试件的横向应力-应变关系曲线平稳段时的应力比未掺钢纤维的试件的稍低，这是由于钢纤维对混凝土的约束作用所致。

3.2 混凝土应力分析

在受荷初期，核心混凝土处于弹性工作阶段，随着荷载的加大，核心混凝土的应力-应变关系曲线逐渐偏离直线，由于受到钢管紧箍力的作用，混凝土的应力随应变的增大而逐渐增大，刚度逐渐降低，最后混凝土的应力-应变曲线近似成一条水平直线，刚度趋向于零。

表 2 列出了各试件达到极限承载力时核心混凝土的应力，分析表中结果可知，在钢管的约束下，各试件中核心混凝土的抗压强度都得到了不同程度的提高，除试件 C70-4-0.9 外，其他掺有钢纤维的短柱试件与未掺钢纤维的试件相比，其混凝土强度提高系数 k 都有增大，且随着钢纤维体积掺量的增加 k 值增大。试件 C60-4-0 的混凝土强度提高系数 k 为 1.38，钢纤维体积掺量分别为 0.6%和 1.2%的 C60-4-0.6 和试件 C60-4-1.2 的 k 值分别为 1.57 和 1.88；试件 C50-4-0 和试件 C50-4-0.9 的混凝土强度提高系数 k 分别为 1.81 和 1.86。随着试件含钢量的增加，核心混凝土的强度提高系数 k 也增大，壁厚为 2mm 的试件 C60-2-0.9 的 k 值为 1.25，壁厚为 3mm 的试件 C60-3-0.9 的 k 值为 1.41。由以上分析可知，钢纤维的掺入提高了试件达极限荷载时钢管中核心混凝土的强度，因此在其它参数相同的情况

下，在钢管高强混凝土短柱中掺入钢纤维能提高短柱的轴心抗压强度。

表 2 核心混凝土计算结果
Table 2 Calculation results of core concrete

试件编号	f_c /MPa	f_c^u /MPa	k
C60-4-0	48.00	66.47	1.38
C60-4-0.6	49.28	77.25	1.57
C60-4-0.9	50.40	—	—
C60-4-1.2	48.08	90.59	1.88
C50-4-0	43.68	78.94	1.81
C50-4-0.9	43.92	81.72	1.86
C70-4-0	56.24	95.38	1.70
C70-4-0.9	57.92	96.05	1.66
C60-2-0.9	50.40	62.99	1.25
C60-3-0.9	50.40	70.88	1.41

注： f_c 为混凝土的轴心抗压强度； f_c^u 为试件达到极限荷载时，用分解分析法计算所得的核心混凝土强度； k 为核心混凝土强度提高系数， $k = f_c^u / f_c$ 。

4 结论

本文对钢管钢纤维高强混凝土轴压短柱试验的基础上，采用分解法分析了钢管和核心混凝土的强度，得到以下主要结论：

- (1) 对于钢管钢纤维高强混凝土柱，钢管的纵向应力-应变关系曲线可划分为弹性阶段、弹塑性阶段和软化 3 个阶段；钢管的横向应力-应变关系曲线可划分为波动段、上升段和平稳段 3 个阶段。
- (2) 钢纤维的掺入对钢管的横向变形影响较大，掺有钢纤维的试件钢管的横向应力-应变关系曲线中的波动段要比未掺钢纤维的试件的短。
- (3) 钢纤维的掺入能提高轴心受压状态下钢管混凝土中核心混凝土的强度提高系数，且随着钢纤维体积掺量的增大而增大；试件中核心混凝土的强度提高系数随含钢率的增大而增大。
- (4) 在钢管高强混凝土柱中掺入钢纤维能改善钢管高强混凝土中核心高强混凝土的脆性，从而改善整个构件的性能。

参考文献：

[1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Cai Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures [M]. China Communications Press, 2003. (in Chinese)

[2] 韩林海. 钢管高强混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(11): 39—44.
Han Linhai. Theoretical analyses and experimental researches for the behaviors of high strength concrete

- filled steel tubes subjected to axial compression [J]. *Industrial Construction*, 1997, 27(11): 39—44. (in Chinese)
- [3] 贺峰, 周绪红, 唐昌辉. 钢管高强混凝土轴压短柱承载力性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2000, 17(4): 61—66.
- He Feng, Zhou Xuhong, Tang Changhui. Experimental research on the bearing behavior of high-strength-concrete-filled steel tube under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(4): 61—66. (in Chinese)
- [4] 汪小勇. 方钢管约束钢筋混凝土压弯构件滞回性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- Wang Xiaoyong. Hysteretic behavior of reinforced concrete beam columns confined by square steel tubes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] 张素梅, 王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱的破坏模式[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(9): 1—10.
- Zhang Sumei, Wang Yuyin. Failure modes of short columns of high-strength concrete-filled steel tubes [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(9): 1—10. (in Chinese)
- [6] 陈国英. 公伯峡黄河大桥钢管拱钢纤维混凝土试验及应用[J]. *铁道建筑技术*, 2001(6): 11—15.
- Chen Guoying. Experiment and application of steel fiber reinforced concrete in steel tube arch of Gong Boxia Bridge [J]. *Railway Construction Technology*, 2001(6): 11—15. (in Chinese)
- [7] Gopal S R. Tests on reinforced concrete filled steel tubular columns [J]. *Steel and Composite Structures*, 2004, 4(1): 37—48.
- [8] Gopal S R, Manoharan P D. Experimental behaviour of eccentrically loaded slender circular hollow steel columns in-filled with fibre reinforced concrete [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(5): 513—520.
- [9] Campione G, Mendola L L, Sanpaolesi L, Scibilia N, Zingone G. Behavior of fiber reinforced concrete-filled tubular columns in compression [J]. *Materials and Structures*, 2002, 35: 332—337.
- [10] Kodur V K R, Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with steel fiber-reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(7): 776—782.
- [11] 高文博, 王晓光, 何正勇. 钢纤维钢管混凝土短柱受压试验研究[J]. *武汉大学学报*, 2002, 35(3): 70—72.
- Gao Wenbo, Wang Xiaoguang, He Zhengyong. Compression test research on short steel-fiber steel-pipe concrete columns [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35(3): 70—72. (in Chinese)
- [12] 陈娟. 钢管钢纤维高强混凝土柱基本力学性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- Chen Juan. Research on the basic mechanical property of steel fiber reinforced high strength concrete-filled steel tube columns [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008. (in Chinese)
- [13] Arorod Azizinamini Ahmed Elremaily. Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(12): 1567—1591.
- [14] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Zhong Shantong. The concrete-filled steel tubular structures [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [15] Guo Lanhui, Zhang Sumei, Ye Zaili. Behavior of steel tube and confined high strength concrete for concrete-filled RHS tubes [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2005, 8(2): 101—116.