

文章编号:1673-2049(2007)02-0059-04

高强混凝土自收缩对钢管混凝土 轴压力学性能的影响

宋 兵¹, 王 湛²

(1. 广州市建筑科学研究院, 广东 广州 510440; 2. 汕头大学 土木工程系, 广东 汕头 515063)

摘要:采用非线性有限元法,以钢管与混凝土之间的黏结初应力代表核芯混凝土的收缩作用,通过计算得出钢管高强混凝土轴压构件在不同程度自收缩作用影响下的压力-应变全过程曲线。通过对这些曲线的分析,总结了核芯混凝土纵向收缩单独作用、径向收缩单独作用及2个方向同时收缩作用时对钢管高强混凝土轴压构件压力-应变全过程曲线的影响。结果表明,自收缩会降低钢管混凝土构件的比例极限和屈服强度,同时会降低构件的模量,对构件的极限承载力有不利的影响。

关键词:钢管混凝土;高强混凝土;自收缩;轴压;力学性能;有限元法

中图分类号:TU528.31

文献标志码:A

Influences of Autogenous Shrinkage of High-strength Concrete on Axial Compression Mechanics Behavior of Concrete-filled Steel Tube

SONG Bing¹, WANG Zhan²

(1. Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou 510440, Guangdong, China;

2. Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China)

Abstract: Authors used nonlinear finite element method to calculate and produce the compression-strain relationship of concrete-filled steel tube specimens under different shrinkage function influence. The initial adhesive stress between concrete and steel tube was substituted for the influence of shrinkage function. Influences of lengthways shrinkage function, radial shrinkage function and both directions' shrinkage function on the compression-strain relationship of concrete-filled steel tube were summarized by analyzing the calculation curves. The results show that the shrinkage functions of concrete will decrease the proportion limit, yield strength and modulus of elasticity of high-strength concrete-filled steel tube specimen, and have a bad influence on the ultimate bearing capacity of concrete-filled steel tube.

Key words: concrete-filled steel tube; high-strength concrete; autogenous shrinkage; axial compression; mechanics behavior; finite element method

0 引言

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的

构件。该构件充分利用了钢材的抗拉性能及混凝土的抗压性能,其组合受力形式非常合理,因此有着广泛的应用前景。钢管中的核芯混凝土是在密封条件

收稿日期:2007-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(59978084)

作者简介:宋 兵(1975-),男,山东烟台人,工程师,工学博士,E-mail:seros0497@sina.com。

下成型的,其变形规律与露天的混凝土有所不同,尤其是当核芯混凝土为高强混凝土时,由于自收缩的作用,将可能在钢管与混凝土之间产生初始应力^[1-2]。自收缩是指由于混凝土中的胶凝材料在水化过程中消耗了存在于胶体和晶体表面的自由水及毛细管中的水造成混凝土内部自干燥而引起的宏观体积收缩^[3],因此混凝土的水胶比越小,其自收缩越大。对于钢管普通混凝土来说,由于水胶比较大,且没有水分散失,混凝土一般会有所膨胀,因此观测不到自收缩的情况;但对于钢管高强混凝土来说,在低水胶比的情况下,其变形将会表现为一定量的自收缩,其应变可达 400×10^{-6} ^[4],这将对钢管与混凝土界面间的黏结及钢管与混凝土在受压后紧箍力产生不利的影响,从而会影响到钢管混凝土构件的力学性能,因此,有必要研究钢管高强混凝土的自收缩对其轴压构件力学性能的影响。

1 钢管混凝土轴压构件应力-应变全过程曲线

1.1 典型的应力-应变全过程曲线

由于钢管混凝土是由钢管和内部的核芯混凝土复合而成,在受力过程中互相约束而共同工作,与单一的均质材料有较大的区别。钢管混凝土受压的应力-应变($\bar{\sigma}$ - ϵ)曲线如图 1 所示,其大体可分为 3 个阶段^[5]。

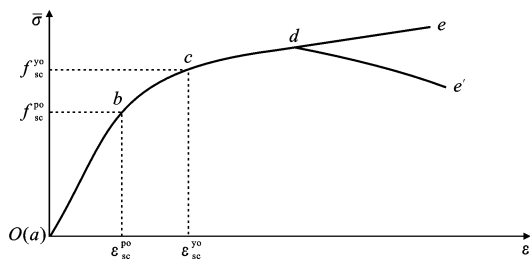


图 1 典型的钢管混凝土轴压构件应力-应变曲线
Fig. 1 Typical Stress and Strain Curve of Axial Compression CFST Specimen

阶段 1:弹性阶段(ab 段),该段终点所对应的应力为钢管混凝土构件的组合比例极限 f_{sc}^{po} 。其 $\bar{\sigma}$ - ϵ 曲线接近钢管和混凝土 2 种材料单独作用的代数和,呈直线关系。

阶段 2:弹塑性阶段(bc 段),该段中点所对应的应力为钢管混凝土构件的组合屈服点 f_{sc}^{yo} 。在此阶段钢管对核芯混凝土的紧箍力逐渐发挥作用。该阶段作用结束时钢管开始进入塑性状态,核芯混凝土的应力接近其轴心抗压标准强度 f_{ck} 。

阶段 3:强化阶段(cde 段或 cde' 段)。钢管已进入塑流状态,核芯混凝土所承受的压应力已达到轴心抗压标准强度 f_{ck} ,但试件仍能继续承受不断增加的外荷载。造成这种现象的原因是:混凝土受持续增大的钢管紧箍力的作用而处于三向受力状态,这使得混凝土的强度得以进一步提高,承受了不断增大的外荷载。

1.2 考虑自收缩作用引起的初应力时的钢管混凝土应力-应变全过程曲线

利用有限元程序可以完整地模拟出考虑自收缩影响后的轴压构件 $\bar{\sigma}$ - ϵ 全过程曲线。根据对钢管高强混凝土构件的试验曲线分析结果^[6]及笔者的有限元分析成果,可以总结出其典型的 $\bar{\sigma}$ - ϵ 全过程曲线,如图 2 所示。

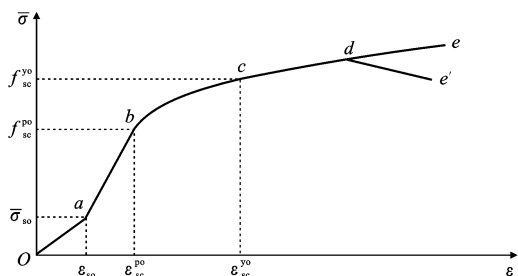


图 2 考虑初应力时钢管混凝土轴压构件的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress and Strain Curve of Axial Compression CFST Specimen After Considering Initial Stress

由图 2 可以看出,考虑自收缩影响后的应力-应变曲线与没有考虑自收缩影响的曲线形状基本一致,只是在弹性阶段多出了一个 Oa 段。

Oa 段可通过在钢管与混凝土之间施加纵向初应力时获得,并可在钢管高强混凝土轴压构件的试验曲线中观察到,说明钢管高强混凝土的自收缩确实会对轴压构件的受力产生影响。 Oa 段的产生的物理意义是纵向收缩时混凝土的上表面低于钢管的上表面而使钢管在初始段单独受压。

2 钢管混凝土有限元分析程序

本文中采用的计算分析程序是查晓雄编译的针对钢管混凝土轴压构件压力-应变全过程分析的有限元程序^[7]。该程序对钢材和混凝土分别划分单元,利用两者接触面的变形协调条件对两者的受力及变形共同进行分析。对钢材按弹性、弹塑性及塑性强化不同阶段采用不同的本构关系;对混凝土按边界面理论建立三维本构关系,从而使计算中充分考虑紧箍力的作用,较准确地模拟构件的压力-变形全过程。

笔者根据实际需要对上述有限元程序进行了调整,将纵向及径向初应力项引入到该程序中,使其可以在计算中考虑纵向初应力及径向初应力的影响。通过 3 组测试纵向和径向初应力的钢管高强混凝土轴压构件的抗压试验对该调整后的分析程序进行了验证,试验结果与程序计算结果比较吻合,表明该程序可进行有初应力的钢管高强混凝土轴压构件的模拟分析。有限元程序建立过程及试验对比情况见文献[6]。

3 钢管混凝土轴压构件压力-应变全过程曲线

计算中选用的钢管为圆形截面钢管,长度为 324 mm,内径为 100 mm,钢管壁厚为 4 mm。钢材取为 Q235,混凝土强度等级取为 C80,含钢率 $\alpha = 0.166 (\alpha = A_s / A_c, A_s$ 为钢面积, A_c 为混凝土面积)。当核芯混凝土的自收缩 Δ 值为 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 时,按钢管与混凝土未分离的假定可计算得出相应的黏结初应力。将上述各初始数据代入调整后的程序中可得出不同初应力情况下的压力-应变全过程曲线。收缩变形包括纵向收缩和径向收缩。为了方便地分析两者对构件的不同影响规律,分别做了仅考虑纵向收缩变形和仅考虑径向收缩变形的构件压力-应变全过程曲线系列图,如图 3 所示。

3.1 纵向收缩

根据图 3 并参考图 2 中的曲线标志,纵向收缩对于钢管混凝土受压构件的压力-应变关系有以下影响:

(1) 当纵向初应力较大时,钢管混凝土压力-应变曲线的弹性阶段多出一个 Oa 段。

(2) ab 段纵向收缩对构件进入弹塑性阶段时对应的应力即比例极限有较大的影响,其收缩值越大,比例极限越小。

(3) bc 段构件的屈服强度有所降低,但降低的幅度很小。这是由于钢管受到的纵向初应力先于混凝土的承受压力,使构件的前期变形较大;而钢管混凝土构件达到屈服强度时所对应的纵向应变是比较稳定的,大约为 3×10^{-3} ,因此,当构件整体达到这一变形量时,其承受的压力较小,即构件的屈服强度较低。

(4) cde 段曲线走向趋同,说明在强化阶段纵向初应力的影响已不明显。

3.2 径向收缩

根据图 3 并参考图 2 中的曲线标志,径向收缩

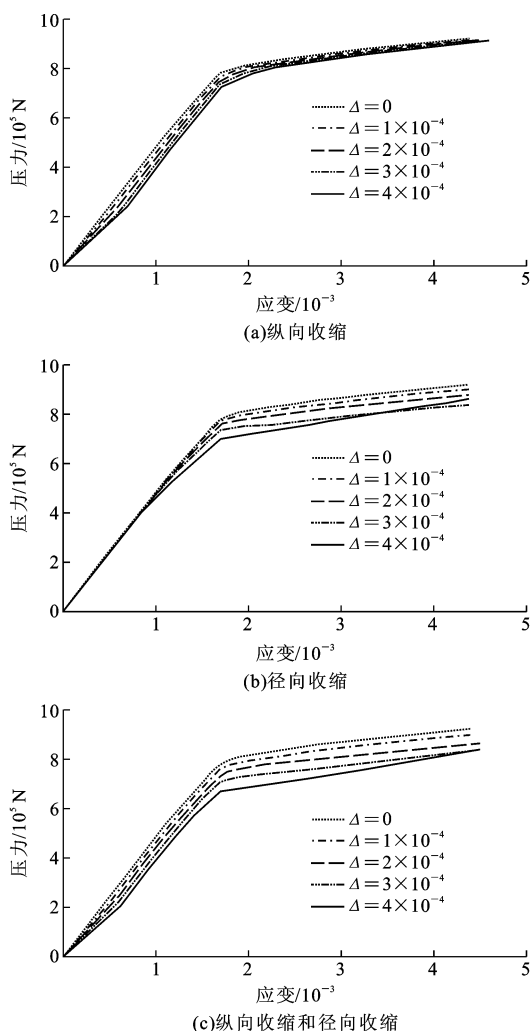


图 3 考虑收缩影响时的钢管混凝土压力-应变曲线

Fig. 3 Compression and Strain Curves of CFST After Considering Shrinkage

对钢管混凝土受压构件有如下影响:

(1) ab 段前面部分径向收缩对构件的影响较小,但其后面部分对构件的影响较大,构件的比例极限有所减小。

(2) bc 段径向收缩对构件的影响较大,径向收缩使构件的屈服强度降低,且使弹塑性阶段组合构件的弹性模量减小。这是因为弹塑性阶段是紧箍力开始产生并逐渐增大的阶段,而钢管混凝土构件达到屈服强度时所对应的纵向应变是比较稳定的,在这段变形范围内收缩作用会延缓紧箍力的出现,使钢管达到屈服强度时对混凝土的紧箍力较小,从而降低了核芯混凝土的承载力,并降低了组合构件的承载力,即构件的屈服强度。

(3) cde 段由于本文中所采用的有限元程序中使用了钢管与混凝土协同变形的假设,没有在钢管

与混凝土之间设置接触单元来模拟其界面的相对滑移情况,因此不能反映构件出现下降段(de' 段)的情况。事实上,由于高强混凝土的脆性及收缩作用使钢管对混凝土的约束降低,收缩大的构件更易出现下降段,这在实际的抗压试验中有所反映。

由图 3(c)可以看出,综合考虑纵向收缩和径向收缩的影响,混凝土的收缩会全面减小钢管混凝土构件的比例极限和屈服强度,同时降低构件的模量,对轴压构件的极限承载力有不利的影响。

本文中计算程序是根据大量长径比约为 3:1 的构件轴压试验结果确定了若干计算参数而获得的,在此长径比条件下材料发生强度破坏而不是失稳破坏,因此本文中采用有限元程序分析时构件的长径比取为 3:1 左右。因细长钢管混凝土构件需考虑压杆稳定,根据细长压杆临界力的欧拉公式 $p_{cr} = \pi^2 E / \lambda$ 可知,其临界力与材料的弹性模量有关。自收缩会降低材料的弹性模量,而在自收缩幅度相同的情况下,长构件是否比短构件的弹性模量有更大程度的降低还有待进一步研究。

4 结 语

(1)纵向收缩或纵向初应力对钢管混凝土构件的整体屈服强度的影响不大,即对轴压构件的极限承载力影响不大,但纵向初应力使曲线的弹性模量有所减小,从而会减小细长构件的临界力,对细长构件的稳定有不利的影响。

(2)径向收缩或径向初应力对钢管混凝土的不利影响更明显,因为它会延缓紧箍力的产生,对脆性大的高强混凝土来说这种延缓作用更会减小构件整体的极限承载力和弹性模量,其无论是对短柱的受压承载力还是对长柱的稳定径向收缩或径向初应力的影响都要比纵向收缩或纵向初应力的影响大得多,应加以预防。此外,钢管与混凝土之间的黏结力有限,实际中其影响并不一定表现为初应力,也可能表现为初位移,但考虑径向初应力或径向初位移在对紧箍力的推迟作用方面是等效的,因此仅以初应力对问题进行讨论不会影响最终结果。

(3)在进行钢管高强混凝土设计时,尤其是对细长的钢管高强混凝土构件,应考虑不同水胶比及不同掺和料对核芯混凝土自收缩量的影响,尽量减小核芯高强混凝土的自收缩作用。

参考文献:

References:

[1] 陈宝春,肖泽荣,韦建刚. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注

混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报,2005,18(1):73-76.

CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong, WEI Jian-gang. Analysis on Stresses of Dumbbell-shaped Cross-section of CFST Arch Rib During Concrete Pouring Construction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1):73-76.

[2] 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.

[3] 韩冰,王元丰. 圆钢管混凝土轴心受压构件徐变分析的比较[J]. 中国公路学报,2007,20(2):83-86.

HAN Bing, WANG Yuan-feng. Creep Analysis Comparison of Circular Axially Compressed Concrete-filled Steel Tubular Members [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2):83-86.

[4] 赵均海,郭红香,魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):50-54.

ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):50-54.

[5] 张建民,郑皆连,肖汝诚. 钢管混凝土拱桥吊装过程的最优化计算分析 [J]. 中国公路学报,2005,18(2):40-44.

ZHANG Jian-min, ZHENG Jie-lian, XIAO Ru-cheng. Calculation Method for Optimizing the Installation Process of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):40-44.

[6] 宋兵. 考虑自收缩作用时钢管高强混凝土的有限元法分析[J]. 广州建筑,2003,27(5):13-16.

SONG Bing. An Analysis with Finite Element Theory of High Strength Concrete Filled Steel Tube Considering the Influence of Autogenous Shrinkage [J]. Guangzhou Architecture, 2003, 27(5):13-16.

[7] 查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土压弯扭构件工作性能影响的理论分析和试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1996.

ZHA Xiao-xiong. Theoretical Analysis and Testing Research on the Influence of Initial Stress of Steel Tube on the Work Performance of Specimens Under Compression and Twist [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996.