

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201805019



双金属复合管混凝土轴拉性能有限元分析

郭浩¹, 叶勇^{1,2}, 高毅超^{1,2}, 张世江¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 选择合理的材料本构模型、单元类型、网格划分技术和边界条件, 建立双金属复合管混凝土构件在轴拉荷载作用下的有限元分析模型, 并利用双金属复合管混凝土(CFBT)轴压试验和钢管混凝土(CFST)轴拉试验的结果对模型的可靠性进行验证。基于验证后的有限元模型, 对 CFBT 轴拉构件的受力机理和破坏形态进行研究, 分析不同参数对构件轴拉承载力的影响规律。研究表明: 核心混凝土可有效限制双金属复合管在拉伸过程中的内缩变形, 使钢管处于复合受力状态; CFBT 构件的轴拉承载力比双金属复合管提高 15% 左右; 随着不锈钢厚度的增大, 构件的轴拉承载力逐渐提高; 核心混凝土的强度对构件承载力的影响不明显。

关键词: 双金属复合管混凝土; 轴拉性能; 有限元分析; 受力机理; 组合作用

中图分类号: TU 398.9; TU 311.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0041-07

Finite Element Analysis of Concrete-Filled Bimetallic Tubes Subjected to Axial Tension

GUO Hao¹, YE Yong^{1,2}, GAO Yichao^{1,2}, ZHANG Shijiang¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on proper material constitutive models, element types, meshing technology, and boundary conditions, a finite element (FE) model was established for the concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) subjected to axial tension. The FE model was verified against experimental results of CFBT under axial compression and concrete-filled steel tubes (CFST) under axial tension. The mechanical performance and failure modes of CFBT tensile member were investigated by this FE model, and the influence of different parameters on the tensile strength of members is analyzed. Numerical results show: the concrete core could effectively confine the lateral shrinkage of the bimetallic tube during tension, CFBT is in three-directional stress state. The filled concrete increases the axial tensile strength of bimetallic tubes by approximately 15%. As the thickness of the stainless steel tube layer increases, the tensile strength increases accordingly. The concrete strength influences slightly on the tensile behavior of CFBT members.

收稿日期: 2018-05-09

通信作者: 叶勇(1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: qzyeyong@126.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2015J01208); 福建省高校青年自然科学基金重点资助项目(JZ160410); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611304008)

Keywords: concrete-filled bimetallic tube; axial tensile behavior; finite element analysis; mechanical mechanism; composite action

钢管混凝土(CFST)结构具有良好的力学和施工性能,在高层建筑和大跨桥梁中得到广泛应用. 目前,CFST 结构中钢管的主要材质为碳素钢,在恶劣环境及防护不当的情况下,存在易锈蚀的缺陷,可能会严重影响整体结构的正常使用和服役年限^[1]. 为克服上述不足,近年来国内外学者采用防锈耐久的不锈钢替代碳素钢作为 CFST 结构的管材,并进行了一系列的研究^[2-5],验证了这类不锈钢管混凝土(CF-SST)结构力学性能的优越性. 然而,目前不锈钢的价格远高于碳素钢,使 CFSST 结构在工程中的应用受到极大限制. 基于以上背景,Ye 等^[6]提出了双金属复合管混凝土(CFBT)结构构件,双金属复合管的外层为不锈钢、内层为碳素钢. 外层不锈钢较薄,在承受外荷载的同时,更主要的作用是保护内层碳素钢免受锈蚀作用;内层碳素钢较厚,主要起承受外荷载和约束核心混凝土的作用. 由于外层不锈钢的用量较少,双金属复合管的造价可低于相同规格的不锈钢管,使 CFBT 构件具有在现阶段可被接受的经济性. 为研究 CFBT 构件的力学性能,Ye 等^[6-7]、Patel 等^[8]采用模型试验和数值分析的方法探索了 CFBT 短柱在轴压荷载作用下的破坏形态和荷载-变形全过程工作性能,验证了 CFBT 不同部件间的组合作用和良好的整体力学性能. 目前,CFBT 的研究以轴压性能为主,有关 CFBT 构件受拉性能的研究还尚未开展,而在工程结构中仍存在受拉构件,如桁架的下弦杆. 因此,本文基于有限元分析模型,考虑双金属复合管不同金属之间及钢管与混凝土之间的相互作用,分析 CFBT 轴拉构件的全过程受力性能.

1 有限元模型建立与验证

1.1 材料本构模型

碳素钢的本构关系采用韩林海^[9]提出的五阶段应力(σ)-应变(ϵ)本构关系模型. 不锈钢的本构关系采用经修正后的 Rasmussen 模型^[10]为

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & 0 \leq \sigma \leq \sigma_{0.2}; \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \epsilon_{0.2}, & \sigma > \sigma_{0.2}. \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中: E_0 为初始弹性模量; n 为应变硬化指数, $n = (\ln 20) / \ln(\sigma_{0.2} / \sigma_{0.01})$, $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{0.01}$ 分别为不锈钢残余应变为 0.2%和 0.01%时对应的应力; $E_{0.2} = E_0 / (1 + 0.002n/e)$, $e = \sigma_{0.2} / E_0$; $\sigma_{0.2} / \sigma_u = (0.2 + 185e) / [1 - 0.0375(n - 5)]$; $\epsilon_u = 1 - \sigma_{0.2} / \sigma_u$; $m = 1 + 3.5\sigma_{0.2} / \sigma_u$; $\epsilon_{0.2} = \sigma_{0.2} / E_0 + 0.002$.

混凝土采用塑性损伤模型,该模型能较好地模拟混凝土的塑性性能和在往复应力作用下的刚度退化. 混凝土的本构关系采用在钢管约束作用下的混凝土 σ - ϵ 模型^[9]. 受拉行为通过断裂能(G_F)描述, G_F 的计算公式参考文献[11],即 $G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18}$, f_{cm} 为混凝土的平均抗压强度. 开裂应力(σ_{to})参考沈聚敏等^[12]提出的混凝土抗拉强度公式,即 $\sigma_{to} = 0.26 \times (1.25 \cdot f'_c)^{2/3}$, f'_c 为混凝土的圆柱体抗压强度.

1.2 界面条件

在有限元模型中,双金属复合管的内外层金属之间及复合管与核心混凝土之间接触界面的法向采用硬接触,允许压应力在垂直界面方向上自由传递;切向接触采用 Coulomb 摩擦模型,允许剪应力沿界面切向传递. 碳素钢和混凝土之间的摩擦系数取 0.6^[13-14],不锈钢和碳素钢之间的摩擦系数取 0.8^[15]. 该界面模型可行性已在 CFST 受拉构件和 CFBT 受压构件的有限元模拟中得到验证^[7,13]. 各部件均为绑定连接,两端设置刚度较大的端板,一侧固定,另一侧约束除沿构件轴向平动以外的自由度.

1.3 单元类型和网格划分

钢管和加劲肋采用四节点壳单元(S4R)模拟;核心混凝土和端板采用三维八节点实体单元(C3D8R)模拟. 通过细化网格法确定各个单元的最适网格尺寸^[16],为确保有限元模型具有较好的收敛性和计算精度,不锈钢管层、碳素钢管层和核心混凝土的网格尺寸大致相等,如图 1 所示.

1.4 模型验证

基于上述方法,建立 CFBT 构件在轴拉作用下的有限元模型,如图 2 所示. 图 2 中: F 为荷载.

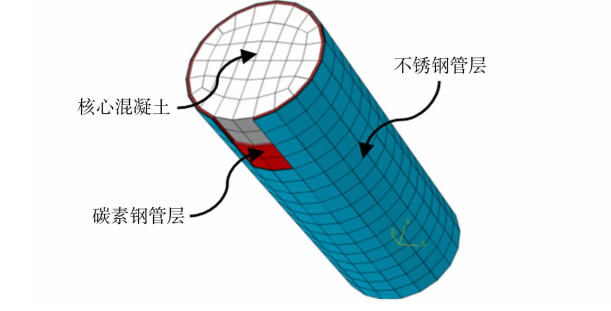


图 1 CFBT 构件网格划分
Fig. 1 Mesh of CFBT member

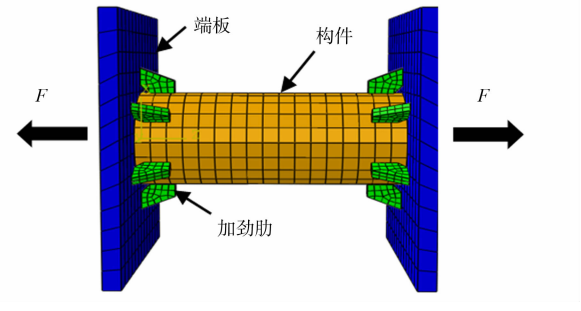


图 2 CFBT 轴拉构件有限元模型
Fig. 2 Finite element model of CFBT tensile member

传统 CFST 构件和 CFBT 构件在结构形式和受力特性上具有较好的相似性和可比性,而 CFBT 轴拉性能的研究尚未进行,因此,采用相关的试验结果^[6,13]对上述模型进行验证. CFST 试件参数及轴拉试验结果^[13],如表 1 所示. CFBT 试件参数及轴压试验结果^[6],如表 2 所示. 表 1,2 中:承载力均为构件轴向应变 $\epsilon=5.0\times 10^{-3}$ 时的荷载值; D 为钢管外径; t 为钢管厚度; L 为钢管长度; α 为含钢率; $N_{u,e}$ 为试验值; $N_{u,FE}$ 为有限元计算值; t_{sc} 为碳素钢管层厚度; t_{ss} 为碳素钢管层厚度; $\sigma_{0.2}$ 为不锈钢名义屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度. 有限元计算结果与试验研究得到的荷载(F)-轴向应变(ϵ)曲线,如图 3 所示. 图 3 中: $\epsilon=\Delta/L$, Δ 为轴向变形. 由表 1,2 和图 3 可知:有限元计算结果与试验结果吻合良好,表明建立的有限元模型具有较好的计算精度,可进一步用于 CFBT 受拉构件的全过程力学性能模拟.

表 1 CFST 试件参数及轴拉试验结果

Tab. 1 Test parameters and experimental results of CFST tensile members								
试件编号	D/mm	t/mm	L/mm	α	界面性状	$N_{u,e}/\text{kN}$	$N_{u,FE}/\text{kN}$	$N_{u,FE}/N_{u,e}$
sb1-2	140	3.80	490	0.118	粘结	588	596	1.01
su1-1	140	3.80	490	0.118	未粘结	579	596	1.03
sb2-2	180	3.85	630	0.091	粘结	781	816	1.04
su2-1	180	3.85	630	0.091	未粘结	762	810	1.06

表 2 CFBT 试件参数及轴压试验结果

Tab. 2 Test parameters and experimental results of CFBT compressive members								
试件编号	t_{ss}/mm	t_{sc}/mm	D/mm	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	f_{cu}/MPa	$N_{u,e}/\text{kN}$	$N_{u,FE}/\text{kN}$	$N_{u,FE}/N_{u,e}$
t1c2-1	0.52	2.37	166.04	283.3	30.2	1 118	1 127	1.01
t2c2-2	0.80	2.37	166.60	274.6	30.2	1 238	1 239	1.00
t3c2-1	1.36	2.37	167.72	275.8	30.2	1 345	1 386	1.03

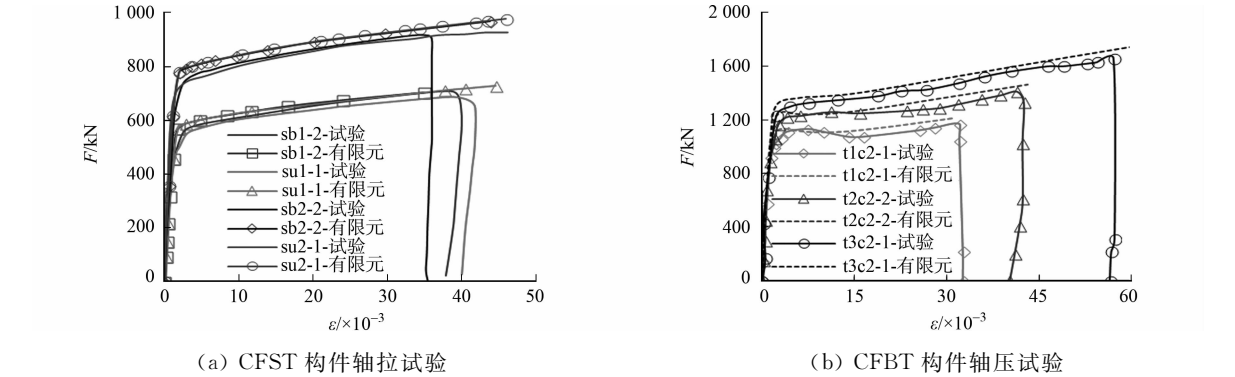


图 3 有限元计算结果与已有试验结果的对比
Fig. 3 Comparison between calculation results and existed experimental results

2 CFBT 构件轴拉性能分析

2.1 参数设计

设计的 CFBT,CFST,CFSST 模型的钢管外径均为 116 mm,长度均为 308 mm,总壁厚均为 3.0

mm. 相关文献的研究表明^[17-18],圆钢管混凝土构件承载力的尺寸效应不明显. 因此,钢管的外径只设置一种规格. 其中,CFBT 构件的不锈钢厚度(t_s)包括 0.5,1.0,1.5 mm. 核心混凝土的强度等级包括 C30, C50, C70,对应的弹性模量分别为 30.0,34.5,37.0 GPa,泊松比取 0.2. 钢材类型选用 Q235 碳素钢和 316 奥氏体不锈钢,其弹性模量分别为 206,190 GPa;碳素钢的屈服强度(f_y)取 235 MPa;不锈钢的名义屈服强度($\sigma_{0.2}$)取 275 MPa;钢材的泊松比为 0.3.

设计的构件参数和计算结果,如表 3 所示. 表 3 中: t_c 为碳素钢厚度; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值;试件编号中,t1,t2,t3 分别对应不锈钢的厚度为 0.5,1.0,1.5 mm,C30,C50,C70 表示核心混凝土的强度等级,CFST 和 CFSST 分别表示作为对比件的碳素钢管混凝土构件和不锈钢管混凝土构件. 为研究内填混凝土的作用,设置了双金属复合管试件(t2)作为对比.

表 3 受拉构件设计参数和计算结果

Tab. 3 Parameters and calculation results of tensile members

试件编号	t_c /mm	t_s /mm	f_{tk} /MPa	$N_{u,FE}$ /kN	F /kN		
					碳素钢	不锈钢	混凝土
t2	2.0	1.0	—	268	162	106	—
t1-C30	2.5	0.5	2.01	326	230	58	38
t2-C30	2.0	1.0	2.01	347	186	118	43
t3-C30	1.5	1.5	2.01	348	136	173	39
t2-C50	2.0	1.0	2.64	356	186	118	52
t2-C70	2.0	1.0	2.99	365	186	118	61
CFST	3.0	—	2.01	318	277	—	41
CFSST	—	3.0	2.01	358	—	340	18

2.2 变形形态

当平均轴向应变(ϵ)达到 40×10^{-3} 时,双金属复合管构件(t2)和组合结构构件(t2-C30)的钢管变形形态对比,如图 4 所示. 由图 4 可知:双金属复合管管身除了被拉长以外,还出现了明显的内缩现象(图 4(a));而内填混凝土后,复合管的内缩程度得到有效减缓(图 4(b)).

2.3 荷载-变形关系曲线

3 种不同组合结构构件(CFST,CFSST,t2-C30)的荷载-应变曲线,如图 5 所示. 图 5 中,构件的尺寸相同,且内填相同强度等级的混凝土. 由图 5 可知:不同组合结构构件的 F - ϵ 曲线形状相近.

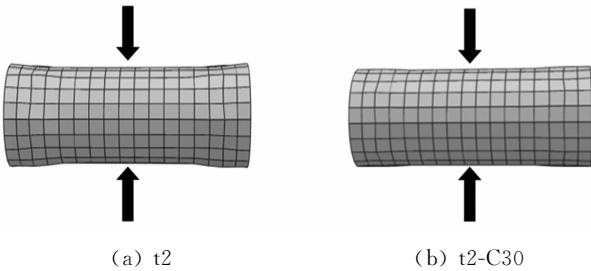


图 4 BT 构件和 CFBT 构件的轴拉变形形态

Fig. 4 Deformation characteristic of BT member and CFBT member under axial tension

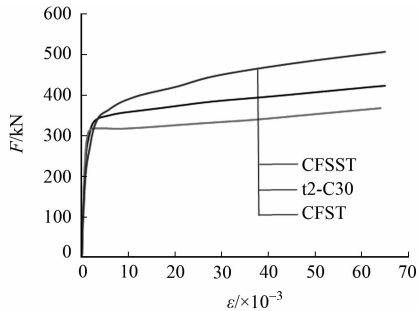
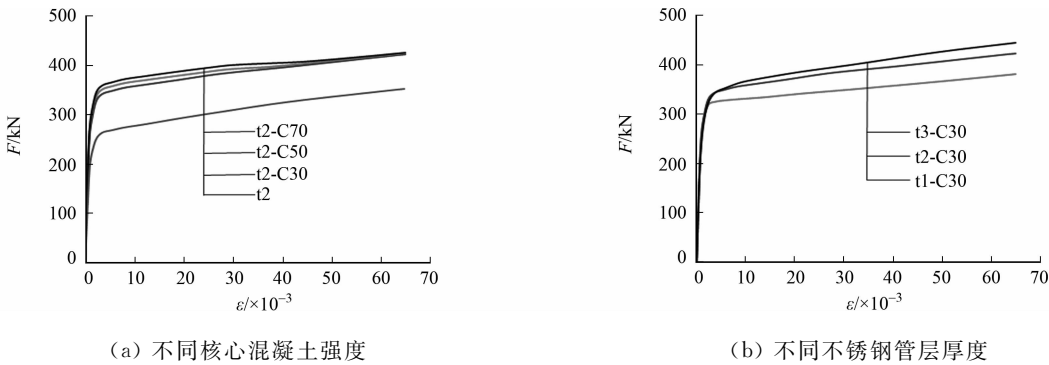


图 5 3 种组合结构构件的荷载-应变曲线

Fig. 5 Load versus strain curves of three composite structures

不同参数条件下,CFBT 构件的荷载-应变曲线,如图 6 表示. 由图 6(a)可知:核心混凝土的强度对 CFBT 构件受拉性能的影响不显著. 这主要是由于混凝土的抗拉强度较低,CFBT 受拉构件的荷载主要由外部钢管承担,核心混凝土的作用更多体现在对于钢管的支撑作用. 故配置不同强度混凝土的 CFBT 受拉构件具有相近的力学性能. 此外,组合结构构件的承载力显著高于空管构件(t2),提高幅度约为 15%. 主要原因是核心混凝土的支撑作用使钢管处于三向受力状态,从而提高了钢管的轴向受拉强度. 由图 6(b)可知:在保持双金属复合管总壁厚(t)不变的情况下,增大不锈钢的比例可使 CFBT 受拉构件具有更高的受拉强度.



(a) 不同核心混凝土强度 (b) 不同不锈钢管层厚度

图 6 不同参数下 CFBT 构件的荷载-应变曲线

Fig. 6 Load versus strain curves for CFBT members with different parameters

2.4 内力分配

不同构件的有限元计算结果,如表 3 所示.表 3 中,受拉承载力 $N_{u,FE}$ 为构件轴向应变为 5.0×10^{-3} 时的荷载^[13],同时,给出各部件承担的荷载. CFBT 构件(t2-C30)和空管构件(t2)在受拉过程中,各组成部分的内力分布,如图 7 所示. t2-C30 中,碳素钢管层、不锈钢管层和核心混凝土承担的荷载比例分别为 53.6%,34.0%和 12.4%;t2 中,碳素钢管层和不锈钢管层承担的荷载比例分别为 60.4%,39.6%.对比图 7(a),(b)可知:双金属复合管内部填充混凝土可明显提高复合管的受拉承载力,其中,碳素钢管层的承载力提高了 14.8%,不锈钢管层的承载力提高了 11.3%. t2-C30 构件和 t2 构件中,各部件承担的荷载比例在受力全过程中的变化情况,如图 8 所示.图 8 中: $N_u/(f_y A_s)$ 表示部件承担荷载与荷载总和的比值.由图 8 可知:碳素钢屈服后,不锈钢承担的荷载比例逐渐提高,材料得到充分地利用.

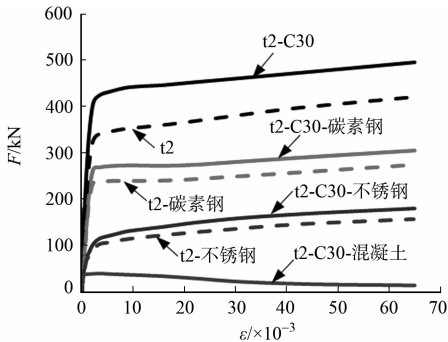


图 7 不同部件间的内力分布

Fig. 7 Internal force distribution among different components

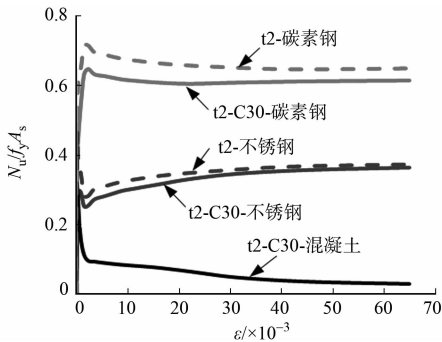


图 8 $N_u/(f_y A_s)$ - ϵ 关系曲线

Fig. 8 Curves of $N_u/(f_y A_s)$ versus ϵ

在达到极限承载力($\epsilon=5.0 \times 10^{-3}$)和最终变形($\epsilon=40 \times 10^{-3}$)时,构件各组成部分的应力分布情况,如图 9,10 所示.当构件达到极限承载力时,碳素钢管层和不锈钢管层的 Mises 屈服应力相近,主要原因是不锈钢与碳素钢的弹性模量相近.同时,由于文中采用基于断裂能的混凝土受拉模型,核心混凝土

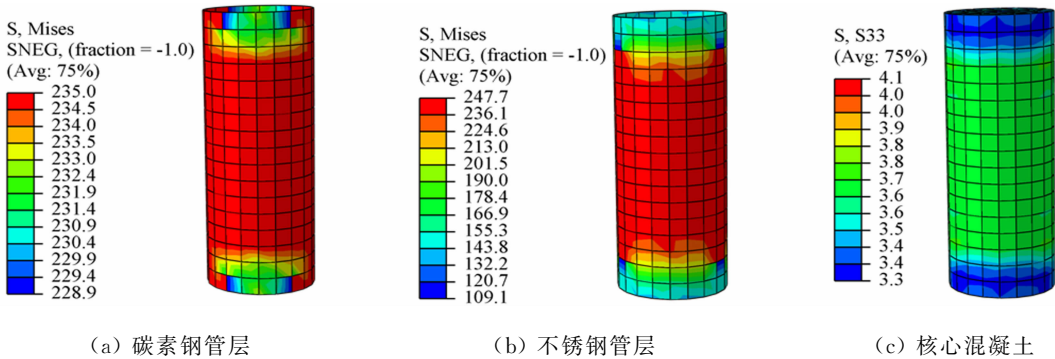


图 9 t2-C30 的应力分布($\epsilon=5.0 \times 10^{-3}$)

Fig. 9 Stress distribution of t2-C30 ($\epsilon=5.0 \times 10^{-3}$)

土具有超过实际的峰值后残余应力. 当构件达到极限承载力时, 不锈钢的 Mises 应力超过碳素钢, 归因于不锈钢材料具有更高的应变强化性能.

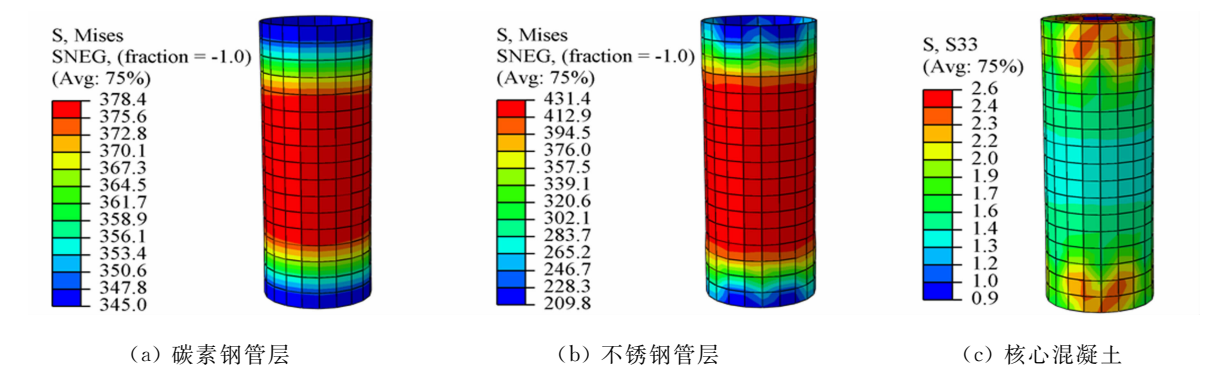


图 10 t2-C30 的应力分布($\epsilon=40\times10^{-3}$)

Fig. 10 Stress distribution of t2-C30 ($\epsilon=40\times10^{-3}$)

2.5 界面接触应力

CFBT 构件在轴拉作用下, 各组成部分之间的相互挤压作用使不同材料界面间产生接触压力, 如图 11 所示. 图 11 中: P_{s-s} 为碳素钢管层与不锈钢管层之间的接触应力; P_{s-c} 为双金属复合管与核心混凝土之间的接触应力.

为进一步说明 CFBT 受拉构件不同组成部分的接触应力, 对 CFBT 有限元模型中点处的接触应力进行分析. 具有不同不锈钢管层厚度的 CFBT 构件的接触应力(P)-应变关系曲线, 如图 12 所示. 由图 12 可知: 当达到受拉承载力($\epsilon=5.0\times10^{-3}$)时, 钢管混凝土的界面接触应力(P_{s-c})大小约为 4.2 MPa; 增加不锈钢的厚度可显著提高两层金属之间的接触应力(P_{s-s}).

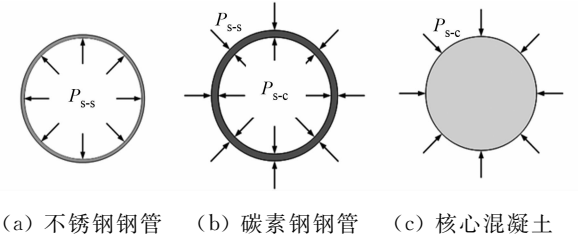


图 11 不同部件的接触压力

Fig. 11 Contact pressures among different components

3 结论

建立双金属复合管混凝土(CFBT)构件在轴向拉伸作用下的有限元分析模型, 利用已有的相关试验结果, 验证了模型的可靠性. 然后, 利用有限元模型对 CFBT 受拉构件的力学性能进行分析, 并与双金属复合管构件及其他组合构件的性能进行对比. 在研究参数范围内, 得到以下 3 个主要结论.

- 1) 内填混凝土可使双金属复合管在拉伸时的内缩变形得到缓解, 同时, 有效提高了复合管的轴拉承载力, 提高幅度约为 15%.
- 2) 随着不锈钢管层厚度的增大, CFBT 构件的轴拉承载力随之提高; 核心混凝土对双金属复合管主要起支撑作用, 其强度等级对整体构件的极限承载力影响不明显.
- 3) 增大 CFBT 轴拉构件中不锈钢管层的厚度可有效提高不锈钢管与碳素钢管之间的界面接触应力; 然而, 不锈钢管层的厚度变化对碳素钢管与核心混凝土之间界面接触应力的影响不显著.

参考文献:

[1] HAN Linhai, HOU Chuanchuan, WANG Qingli. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 23-36. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2014. 07. 021.

- [2] TAO Zhong,UY B,LIAO Feiyu,*et al.* Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research,2011,67(11):1719-1732. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.04.012.
- [3] UY B,TAO Zhong,HAN Linhai. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2011,67(3):360-378. DOI:10.1016/j.jcsr.2010.10.004.
- [4] HAN Linhai,CHEN Feng,LIAO Feiyu,*et al.* Fire performance of concrete filled stainless steel tubular columns[J]. Engineering Structures,2013,56:165-181. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.05.005.
- [5] YOUSUF M,UY B,TAO Zhong,*et al.* Transverse impact resistance of hollow and concrete filled stainless steel columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2013,82:177-189. DOI:10.1016/j.jcsr.2013.01.005.
- [6] YE Yong,HAN Linhai,SHEEHAN T,*et al.* Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation[J]. Thin-Walled Structures,2016,108:321-332. DOI:10.1016/j.tws.2016.09.004.
- [7] YE Yong,HAN Linhai,GUO Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) under axial compression: Analytical behavior[J]. Thin-Walled Structures,2017,119:839-850. DOI:10.1016/j.tws.2017.08.007.
- [8] PATEL V I,HASSANEIN M F,THAI H,*et al.* Behaviour of axially loaded circular concrete-filled bimetallic stainless-carbon steel tubular short columns[J]. Engineering Structures,2017,147:583-597. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.05.064.
- [9] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2016.
- [10] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research,2003,59(1):47-61. DOI:10.1016/S0143-974X(02)00018-4.
- [11] LI Wei,HAN Linhai,CHAN T M. Numerical investigation on the performance of concrete-filled double-skin steel tubular members under tension[J]. Thin-Walled Structures,2014,79:108-118. DOI:10.1016/j.tws.2014.02.001.
- [12] 沈聚敏. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [13] HAN Linhai,HE Shanhu,LIAO Feiyu. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension[J]. Journal of Constructional Steel Research,2011,67(11):1699-1709. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.04.005.
- [14] HAN Linhai,HUA Youxing,HOU Chao,*et al.* Circular concrete-filled steel tubes subjected to coupled tension and chloride corrosion[J]. Journal of Structural Engineering,2017,143(10):04017134(1-3). DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001874.
- [15] OBERG E,JONES F D,HORTON H L,*et al.* Machinery's Handbook [M]. 29th Edition. New York:Industrial Press,2012.
- [16] 王兰,叶勇,郭子雄,等. 带脱空的钢管混凝土短柱受剪性能有限元分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(2):179-185. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201710013.
- [17] YAMAMOTO T,KAWAGUCHI J,MORINO S. Experimental study of scale effects on the compressive behavior of short concrete-filled steel tube columns[C]// Composite Construction in Steel and Concrete IV. Banff:ASCE,2000:879-890. DOI:10.1061/40616(281)76.
- [18] 陈彦江,李勇,闫维明,等. 大尺寸钢管混凝土柱承载力试验[J]. 中国公路学报,2011,24(4):33-38. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2011.04.006.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)