

FRP管-混凝土-钢管组合短柱轴压性能试验及有限元分析

任慧韬*, 郭星, 王苏岩

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了研究 FRP 管-混凝土-钢管组合短柱的轴压性能,进行了 3 个实心组合短柱的轴压试验.基于非线性有限元分析软件 ANSYS,通过选择合适的单元类型以及材料的本构关系,对实心组合短柱进行了数值仿真分析,并与试验结果进行对比,证明了所采用的非线性有限元分析模型可以较好地模拟实心组合短柱的受力过程.结合已建立的有限元模型,开展了参数的敏感性分析,探讨了 FRP 管厚度、钢管厚度和强度、核心混凝土强度等参数对实心组合短柱轴压性能的影响.模拟结果表明:FRP 管厚度对实心组合短柱的轴压性能有显著影响,钢管厚度和强度对实心组合短柱的影响规律较相似,对第二线性阶段斜率均无影响,其中钢管厚度对实心组合短柱的初始刚度略有影响,核心混凝土强度变化对极限承载力有较大影响.

关键词: FRP 管;组合短柱;轴压性能;非线性有限元

中图分类号: TU398.9 **文献标识码:** A **doi:**10.7511/dllgxb201506008

0 引言

FRP 管-混凝土-钢管组合短柱是一种由外部纤维复合材料管(FRP 管)、内部钢管、混凝土 3 种材料组成的新型组合构件^[1-4].该新型组合构件中 FRP 管的主要作用是提供环向约束力,从而提高组合构件承载力和耐久性,FRP 管与钢管填充混凝土后可作为施工模板,便于施工.内部钢管和外部 FRP 管使得组合短柱中核心混凝土处于三向受力状态,其极限强度和极限应变均得到很大提高,试验表明该组合短柱具有更高的承载能力和抗震性能.

目前,已有学者对 FRP 管-钢管新型组合柱开展了研究工作.滕锦光等^[4]通过 FRP 管-混凝土-钢管组合柱的轴心受压试验,分析了 FRP 外包层数的变化对组合柱轴压性能的影响;钱稼茹等^[5-6]对该 FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱和长柱分别进行了轴心受压试验,得到了组合短柱 3 种典型的破坏形态和与之相应的约束混凝土的应力-应变关系,并提出了考虑长细比的适用于组合长柱的轴心受压承载力计算公式;张冰^[7]对 10 个 FRP 管-高强混凝土-钢管组合短柱进行了轴压试

验,提出了同时适用于普通混凝土和高强混凝土组合柱的混凝土强度设计模型;余小伍等^[8]利用非线性有限元分析软件 ABAQUS 对 CFRP-混凝土-钢管组合柱的轴压性能进行研究,结果表明该新型组合柱具有较高的强度和较好的延性.

以上研究主要是针对 FRP 管-混凝土-钢管空心组合短柱进行的,由于实心组合短柱内部混凝土具有可防止内部钢管的向内屈曲并可增大整体承载力等优点,王俊等^[9]对 2 根 GFRP 管-混凝土-钢管实心组合短柱进行了轴压试验研究,并给出了该组合柱的轴压承载力计算公式.本文利用非线性有限元分析软件 ANSYS 对 FRP 管-混凝土-钢管实心组合短柱进行数值仿真分析,并与试验结果对比.在已建立的有限元模型的基础上,对实心组合短柱开展参数的敏感性分析,研究 FRP 管厚度、钢管厚度和强度、核心混凝土强度等对实心组合短柱轴压性能的影响.

1 试验概况

1.1 试件的设计

实心组合短柱试验共设计 3 个试件,试件断面图如图 1 所示.试件参数主要考虑夹层混凝土

种类和夹层混凝土厚度对组合柱的轴压性能的影响。钢管内部核心混凝土均采用普通混凝土材料，而夹层混凝土采用自密实混凝土和普通混凝土两种类型，夹层混凝土厚度分别采用 40 mm 和 20 mm 两种厚度。具体的实心组合短柱试件设计参数见表 1。试件的 FRP 管厚度为 5 mm，外直径为 210 mm，环向抗拉强度为 430 MPa，环向弹性模量为 24.61 GPa，纤维铺设角度 $\pm 57.5^\circ$ 。钢管采用厚度为 2 mm，强度为 Q235 的钢板卷制焊接而成，外直径为 120 mm，屈服强度为 204 MPa，弹性模量为 204 GPa。核心混凝土采用 C30 的普通混凝土，其标准立方体抗压强度试验值为 33.7 MPa。夹层混凝土强度等级为 C40，其中普通混凝土材料的标准立方体抗压强度试验值为 38.6 MPa，自密实混凝土材料的标准立方体抗压强度试验值为 40 MPa，柱高为 600 mm。

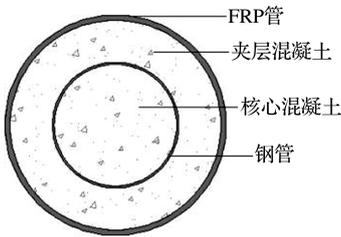


图 1 实心组合短柱横截面
Fig. 1 Cross-section of short solid composite columns

表 1 实心组合短柱试件设计参数

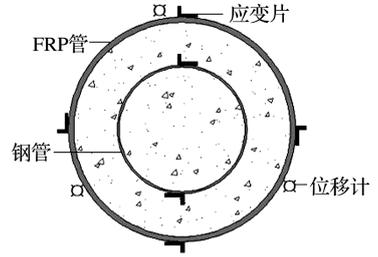
Tab. 1 Design parameters of short solid composite column specimens

试件编号	夹层混凝土种类	夹层混凝土厚度/mm
PT-40-全	普通混凝土	40
ZMS-40-全	自密实混凝土	40
ZMS-20-全	自密实混凝土	20

注：试件编号中的大写字母代表夹层混凝土材料的种类，数字代表夹层混凝土厚度，文字“全”代表加载方式为全截面加载

1.2 测点布置和加载装置

试件制作时在 FRP 管柱中位置的外壁间隔 90°、钢管相应位置间隔 180°分别粘贴一对沿轴向和环向的应变片。将钢管和 FRP 管用玻璃胶同心固定在预先找平木板上，待玻璃胶完全凝固后浇筑混凝土，实验室标准养护 28 d，采用分级加载制度，当外部 FRP 管纤维断裂时，立即终止试验。试件测点布置和加载装置如图 2 所示。



(a) 测点布置



(b) 加载装置

图 2 实心组合短柱测点布置和加载装置

Fig. 2 Measuring points arrangement and test set-up of short solid composite columns

1.3 试验现象

试验在大连理工大学结构实验室 500 t 压力试验机上进行，试件加载过程中均有不同程度的爆鸣声产生，当荷载达到极限荷载约 90% 时，柱中附近形成明显的白纹断裂区域，并不断向柱顶和柱底部分延伸，达到极限荷载时，随着 FRP 管巨大的断裂声，组合柱发生破坏，组合柱最终的破坏形态是除柱端外的柱高范围内 FRP 管环向纤维发生断裂，其中柱中位置最严重。

1.4 试验结果

图 3 为试验得到的实心组合短柱试件荷载-轴向应变曲线，从中可以看出在夹层厚度相同、全

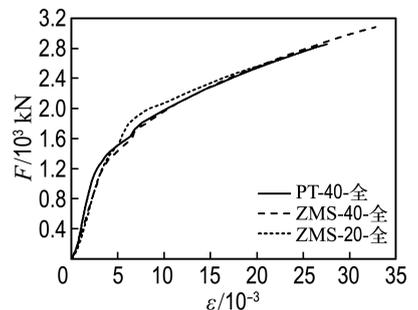


图 3 实心组合短柱试件荷载-轴向应变曲线

Fig. 3 Load-axial strain curves of short solid composite columns

截面加载方式下,PT-40-全试件、ZMS-40-全试件的荷载-轴向应变曲线基本上重合,二者轴向极限应变比值约为 1.19,承载力比值约为 1.08.由此可见,这两种夹层混凝土材料对实心组合短柱轴压性能的影响并不大.由图中 ZMS-40-全试件和 ZMS-20-全试件的荷载-轴向应变曲线对比可以看出,在夹层材料相同、全截面加载方式下,二者的曲线基本上重合,且轴向极限应变比值约为 1.41,承载力比值约为 1.15.

2 有限元分析

2.1 单元类型和材料模型选取

研究已表明,采用在混凝土表面外包 FRP 布形成 FRP 管和预制的 FRP 管,二者在组合柱中受压性能差异可忽略不计^[1].因此,对于本文研究的实心组合短柱,忽略 FRP 管的轴向承载力作用,假定 FRP 管为仅环向受拉的线弹性材料^[10],采用 4 节点壳单元 shell41 模拟 FRP 管,通过设置其关键选项 KEYOPT(1)=1 来实现仅环向受拉.

采用 ANSYS 软件中针对混凝土的 8 节点实体单元 solid65 来模拟混凝土,普通混凝土不需设置实常数,选用多线性等向强化模型(MISO)输入混凝土的材料属性,泊松比取为 0.2.对于混凝土材料本构关系采用吴刚等的 FRP 约束混凝土无软化段时的应力-应变关系模型^[11].

混凝土采用 William-Warnke 五参数破坏准则,张开裂缝的剪力传递系数取 0.5,闭合裂缝的剪力传递系数取 0.9.关闭混凝土的压碎功能,即设置混凝土单轴抗压强度值为-1.

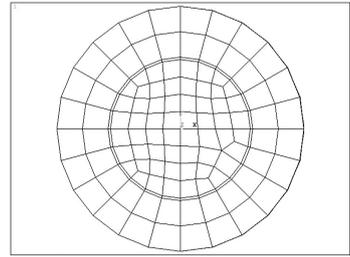
利用 8 节点实体单元 solid45 模拟内部钢管,假定钢管为各向同性材料,应力-应变关系采用理想弹塑性本构关系^[10,12].本文选用 ANSYS 软件中的双线性等向强化模型(BISO)输入钢管材料属性,其中泊松比取 0.3.

2.2 有限元模型

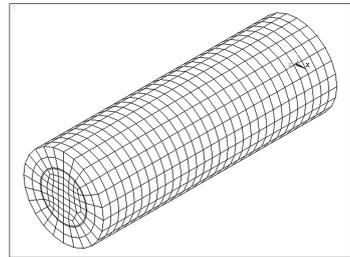
试验研究表明:实心组合短柱中 FRP 管、混凝土、钢管三者之间共同变形情况良好,并未出现明显的相对位移,因此本文忽略 3 种材料之间的相对滑移,假设它们相互之间变形协调^[1,13-14].在 ANSYS 软件中通过 GLUE 命令以及直接将夹层混凝土的外表面赋予 FRP 管属性的操作来实现这一设置. ANSYS 有限元模型网格划分如图 4 所示.

结合试验中实心组合短柱实际约束情况,有

限元模型中采用一端施加固定端约束、一端施加轴向荷载的约束方式.



(a) 横截面网格划分



(b) 整体网格划分

图 4 ANSYS 有限元模型网格划分

Fig. 4 Meshing of ANSYS finite element model

为了便于加载控制和提高计算的收敛性,采用位移加载和整体建模方式.设置总荷载步为 1,荷载子步取为 50,输出每一子步的计算结果.打开自动时间步长和线性搜索选项,采用 Newton-Raphson 平衡迭代法则.采用位移收敛准则,用位移的无穷范数控制收敛,本文收敛精度取为 3%.

2.3 有限元结果

实心组合短柱试件的荷载-轴向应变曲线对比如图 5 所示.从中可以看出 FRP 管-混凝土-钢管实心组合短柱在全截面轴心受压时随着荷载的增加表现出明显的强化段,试验和计算曲线大体上均表现出近似的双线性特征.表 2 给出了极限承载力和轴向极限应变的计算值与试验值以及二者的比较.极限应变计算值与试验值最大相差 16%,极限承载力最大相差 4%,说明一方面该组合柱具有承载力高、延性好的特点,另一方面计算值与试验值比较接近,模拟效果较好.总体来看,数值模拟得到的实心组合短柱的荷载-轴向应变曲线与试验曲线吻合得较好,由此说明,利用 ANSYS 软件,通过选择合适的单元类型、材料属性和网格划分等操作,可以较好地模拟 FRP 管-混凝土-钢管实心组合短柱的轴心受压性能.

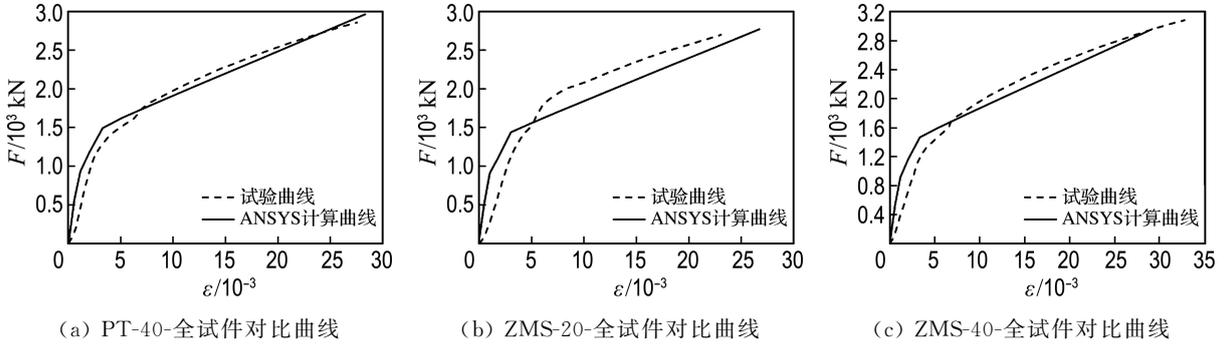


图 5 实心组合短柱的荷载-轴向应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of load-axial strain curves of short solid composite columns

表 2 极限承载力和轴向极限应变计算值与试验值的比较

Tab. 2 The comparison of experimental and calculated values for ultimate capacity and axial ultimate strain

试件	极限承载力/kN		极限承载力计算值/ 极限承载力试验值	轴向极限应变		轴向极限应变计算值/ 轴向极限应变试验值
	试验值	计算值		试验值	计算值	
PT-40-全	2 857	2 963	1.04	0.027 6	0.028 3	1.03
ZMS-40-全	3 084	2 959	0.96	0.032 8	0.029 7	0.91
ZMS-20-全	2 685	2 755	1.03	0.023 0	0.026 7	1.16

3 组合柱的轴压性能影响因素分析

基于以上有限元分析,本文设计 12 个试件,分析 FRP 厚度、钢管厚度和强度、核心混凝土强度等因素对试件轴压性能的影响.各试件的 FRP 管内直径为 200 mm、柱高为 600 mm,FRP 管的物理参数、钢管弹性模量以及夹层混凝土的强度和弹性模量均参照 PT-40-全试件取值.各组试件的几何参数和物理参数见表 3.

表 3 各组试件的几何参数和物理参数

Tab. 3 Geometric and physical parameters of all specimens

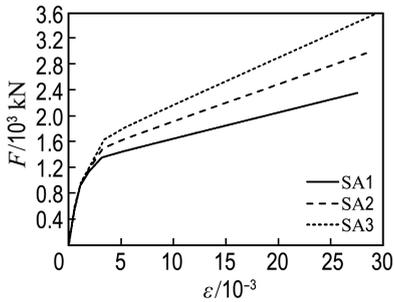
试件 编号	分组	FRP 管厚 度/mm	钢管厚 度/mm	钢管强 度/MPa	核心混凝土 强度/MPa
SA1	A 组	3	2	204	27.2
SA2		5	2	204	27.2
SA3		7	2	204	27.2
SB1	B 组	5	2	204	27.2
SB2		5	4	204	27.2
SB3		5	6	204	27.2
SC1	C 组	5	2	204	27.2
SC2		5	2	335	27.2
SC3		5	2	400	27.2
SD1	D 组	5	2	204	27.2
SD2		5	2	204	33.8
SD3		5	2	204	41.0

图 6 为各组试件的荷载-轴向应变关系曲线,从图 6(a)可以看出,FRP 管的厚度对实心组合短

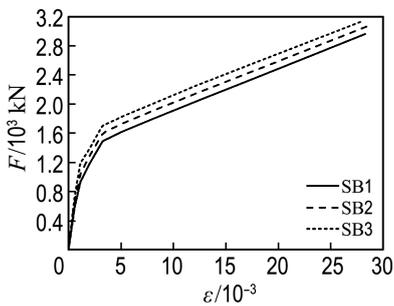
柱轴压性能具有显著的影响,随着 FRP 管厚度的增加,实心组合短柱的极限承载力有很大程度的提高,但是极限应变却变化不大,这与空心组合短柱变化规律稍有不同^[12];图 6(b)给出了钢管厚度的变化对实心组合短柱轴压性能的影响,曲线第一线性阶段斜率和组合柱的弹性阶段承载力均随着钢管厚度的增加而略有增加,原因是钢管弹性模量比核心混凝土的大很多,钢管厚度增加使得组合柱的整体弹性模量增加.同时可以看出,钢管厚度的变化并不影响实心组合短柱荷载-轴向应变曲线第二线性阶段的斜率,对实心组合短柱极限应变的影响也不大.从图 6(c)可以看出钢管强度对实心组合短柱轴压性能的影响与钢管厚度对其影响是相似的.随着钢管强度的增加,实心组合短柱弹性阶段承载力增加,第二线性阶段斜率和极限应变并无明显变化.不同之处在于,钢管强度的改变不会对实心组合短柱的初始刚度产生影响.从图 6(d)可以看出,核心混凝土强度的增加会导致实心组合短柱弹性阶段承载力的增大,但对第二线性阶段的斜率影响不大.

综上所述,所有试件的荷载-轴向应变曲线均表现出连续的近似双线性特征,并且除 B 组试件外,其他各组试件第一线性阶段基本上重合,即短柱的初始轴压刚度基本相同.对于第二线性阶段,各参数的影响并不相同.FRP 管厚度的增加会导致试件第二线性阶段斜率的增大,即表现出强化

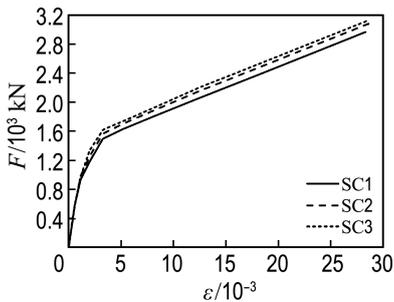
的线性特征. 而钢管强度和厚度的增加对实心组合短柱的影响规律大致相同, 都不会影响第二线性性阶段的斜率.



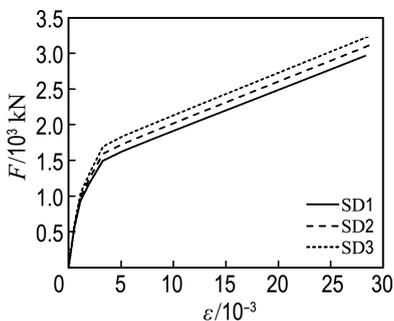
(a) A组试件



(b) B组试件



(c) C组试件



(d) D组试件

图6 各组试件的荷载-轴向应变关系曲线

Fig. 6 Load-axial strain curves of all specimens

4 结论

(1)通过合理选择单元类型和材料参数,建立

FRP管-混凝土-钢管实心组合短柱有限元模型,并将计算结果与试验结果对比,验证了模型的准确性和有效性.

(2)通过参数的敏感性分析发现,FRP管厚度对实心组合短柱的轴压性能影响显著,特别是第二线性阶段的斜率和极限承载力,而钢管厚度和强度对实心组合短柱的影响规律比较相似,对第二线性阶段斜率均无影响,其中钢管厚度对实心组合短柱的初始刚度略有影响,核心混凝土强度对极限承载力有较大影响.

参考文献:

- [1] Teng J G, Yu T, Wong Y L, *et al.* Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: Concept and behavior [J]. **Construction and Building Materials**, 2007, **21**(4):846-854.
- [2] Teng J G, Hu Y M. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression [J]. **Construction and Building Materials**, 2007, **21**(4):827-838.
- [3] Yu T, Wong Y L, Teng J G, *et al.* Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular members [J]. **Journal of Composites for Construction**, 2006, **10**(5):443-452.
- [4] 滕锦光,余涛,黄玉龙,等. FRP管-混凝土-钢管组合柱力学性能的试验研究和理论分析[J]. **建筑结构进展**, 2006, **8**(5):1-7.
TENG Jin-guang, YU Tao, WONG Yu-long, *et al.* Behavior of hybrid FRP-concrete-steel tubular columns; experimental and theoretical studies [J]. **Progress in Steel Building Structures**, 2006, **8**(5):1-7. (in Chinese)
- [5] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. **建筑结构学报**, 2008, **29**(2):104-113.
QIAN Jia-ru, LIU Ming-xue. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading [J]. **Journal of Building Structures**, 2008, **29**(2):104-113. (in Chinese)
- [6] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管长柱轴心受压试验[J]. **混凝土**, 2006(9):31-34.
QIAN Jia-ru, LIU Ming-xue. Experiment of FRP-concrete-steel double-skin tubular long columns under axial compressive load [J]. **Concrete**, 2006(9):31-34. (in Chinese)
- [7] 张冰. FRP管-高强混凝土-钢管组合短柱轴压性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
ZHANG Bing. Hybrid FRP-concrete-steel double-

- skin tubular columns with high strength concrete; stub column tests [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 余小伍, 凡友华. CFRP-混凝土-钢管组合柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2006(Z):240-244. YU Xiao-wu, FAN You-hua. Research on behavior of axially loaded hybrid CFRP-concrete-steel double skin tubular columns with FEA [J]. **Industrial Construction**, 2006(Z):240-244. (in Chinese)
- [9] 王俊, 刘伟庆, 方海, 等. GFRP管-钢管双壁约束混凝土组合柱轴压性能与承载力实用计算方法研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(2):133-138. WANG Jun, LIU Wei-qing, FANG Hai, *et al.*. Experiment and capacity calculation theory research of hybrid GFRP-concrete-steel double skin tubular columns under axial compression [J]. **Building Structures**, 2012, 42(2):133-138. (in Chinese)
- [10] 王娟. FRP管混凝土轴压短柱承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. WANG Juan. The axial ultimate bearing capacity of FRP tubed short concrete columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [11] 吴刚, 吕志涛. FRP约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):1-9. WU Gang, LÜ Zhi-tao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response [J]. **Journal of Building Structures**, 2003, 24(5):1-9. (in Chinese)
- [12] 解卫国, 娄吉宏, 余小伍. CFRP-混凝土-钢管组合柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 广州建筑, 2007(4):3-8. XIE Wei-guo, LOU Ji-hong, YU Xiao-wu. Research on behavior of hybrid CFRP-concrete-steel double skin tubular columns [J]. **Guangzhou Architecture**, 2007(4):3-8. (in Chinese)
- [13] Wong Y L, Yu T, Teng J G, *et al.*. Behavior of FRP-confined concrete in annular section columns [J]. **Composites Part B: Engineering**, 2008, 39(3):451-466.
- [14] 吴殿臣. GFRP管-混凝土-钢管组合短柱承载力分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014. WU Dian-chen. Research on capacity of GFRP-concrete-steel double-skin tubular columns [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014. (in Chinese)

Experiment and finite element analyses for axial compression behavior of FRP-concrete-steel short composite columns

REN Hui-tao*, GUO Xing, WANG Su-yan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the axial compression behavior of FRP-concrete-steel short composite columns, the axial compression experiments on 3 short solid composite columns are conducted. By using nonlinear finite element analysis software ANSYS, the numerical simulation is carried out on short solid composite columns under proper selection of unit types and the constitutive relations of materials. The comparison between the simulation results and the tests results verifies that the proposed nonlinear finite element analysis model can simulate the stress procedure of the short solid composite columns. On the basis of the established finite element models, sensitivity of parameters is analyzed to discuss the influences of the thickness of FRP tube, the strength and thickness of steel tube and the strength of core concrete on axial compression behavior of short solid composite columns. The simulation results show that the thickness of FRP tube has significant impact on the axial compression behavior of short solid composite columns. The strength and thickness of steel tube show similar influence rule, they both have no effect on the slope of the second linear phase. The initial stiffness of short solid composite column is slightly affected by the thickness of steel tube. The change of the strength of core concrete has great influence on the ultimate capacity.

Key words: FRP tube; short composite column; axial compression behavior; nonlinear finite element