

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.013

GFRP 管混凝土轴压短柱承载力研究

宋志刚, 樊成, 宋力

(大连大学 材料破坏力学数值实验研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为研究 GFRP 管约束混凝土柱在轴心受压时的承载力, 更好的应用于工程实际, 采用有限元软件 ABAQUS 模拟分析不同的 GFRP 管管壁厚度、混凝土强度等级以及钢筋截面形式、钢筋强度等因素对 GFRP 管混凝土组合柱轴压力学性能的影响。研究表明: 数值计算结果与试验结果吻合良好; 增加 GFRP 管厚度、提高混凝土强度等级以及增加钢筋截面面积等能提高组合柱承载力。

关键词: GFRP 管; ABAQUS; 轴心受压; 承载力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0071-05

Bearing Capacity of the GFRP Tube Filled with Concrete Under the Axial Compression

SONG Zhigang, FAN Cheng, SONG Li

(Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: In order to analyze the axial compression performance of GFRP tube composite columns filled with concrete, the influence of different thickness of GFRP tube, concrete strength and the section form and strength of steel are simulated by using finite element analysis software ABAQUS when the column under the axial compression. The results show that the numerical results are in good agreement with the experimental results; increasing the GFRP tube thickness can improve the core concrete strength and increase the strength and the bearing capacity of columns.

Keywords: GFRP tube; ABAQUS; axial compression; bearing capacity

GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)管混凝土组合柱是在 GFRP 管中灌入混凝土形成的组合结构, 对比其他约束混凝土构件^[1-2], 其具有承载力强、整体性好、延性高、抗腐蚀性能优良、易于施工等优点而被广泛应用于土木工程中的桩基础结构、承重柱结构、桥梁墩柱结构等易腐蚀结构。GFRP 管混凝土组合构件最理想的受力状态为轴心受压状态, 目前, 已有大量国内外学者对 GFRP 管约束混凝土短柱在轴向荷载作用下的力学性能^[3-6]进行试验研究, 本文通过利用有限元软件 ABAQUS 对已有的试验成果进行数值模拟, 在数值模拟结果吻合度高的前提下, 进一步研究 GFRP 管的纤维缠绕角度、混凝土强度等级、GFRP 管管壁厚度、钢筋截面面积等因素对 GFRP 管约束混凝土组合构件在轴向荷载作用下的承载力的影响。

1 本构模型选取

1.1 混凝土受压本构关系

常用混凝土受压应力-应变关系模型有于清^[7]四参数双线性模型、吴刚等^[8]三折线模型、刘明学等^[9]模型、鲁国昌等模型^[10], 经大量数值计算结果验证, 本文选用与实验吻合度较好的 Lam 等^[11]抛物线加直线本构模型, 见图 1。

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{co}} \epsilon_c^2, (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t) \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_{co} + E_2 \epsilon_c, (\epsilon_t < \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}) \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \frac{2f_{co}}{E_c - E_2} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\epsilon_{cc}} \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土的初始弹性模量, 取值为 $E_c =$

$4730\sqrt{f_c}$; ϵ_i 为核心混凝土第一与第二阶段的分界点处所对应的应变, f_{co} 和 f_{cc} 分别代表无约束和有约束时混凝土的峰值应力。 E_2 为第二阶段曲线斜率。此时峰值应力和峰值应变的公式为:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.3 \frac{\sigma_{Ru}}{f_{co}} \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1.75 + 5.53 \left(\frac{E_f t}{E_{sec} r} \right) \left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_{co}} \right)^{1.45} \quad (6)$$

式中: E_f 为 GFRP 管弹性模量; t 为 GFRP 管管壁厚度; ϵ_f 为 FRP 材料材性实验中的断裂应变; E_{sec} 为无约束混凝土峰值点的割线模量; ϵ_{co} 和 ϵ_{cu} 分别为无约束混凝土和约束混凝土的峰值应变; r 为构件半径。其中 $\sigma_{Ru} = \frac{E_f t}{r} \epsilon_{f0}$ 。

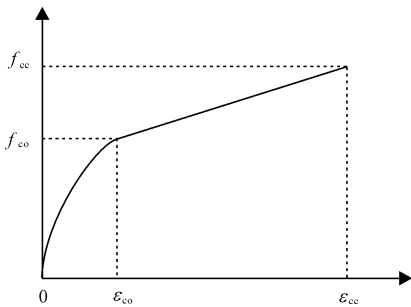


图 1 混凝土受压区本构关系模型

1.2 混凝土受拉本构关系

GFRP 约束混凝土结构受拉区本构关系采用 ABAQUS 中自带的定义混凝土受拉软化行为: 混凝土应力 - 断裂能关系。通过混凝土的能量破坏准则来考虑混凝土受拉软化性能在计算中具有较好的模拟分析准确性, 较容易收敛。混凝土受拉软化模型如图 2 所示。

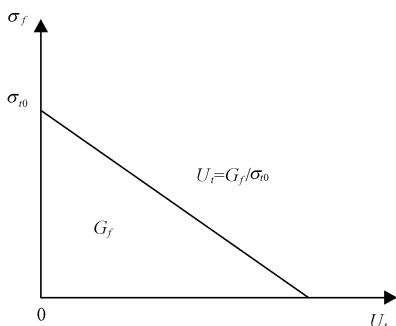


图 2 混凝土受拉软化模型

$$G_f = a \times \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.7} \times 10^{-3} (\text{N/mm}) \quad (7)$$

式中: G_f 为混凝土的断裂能, 它的物理意义是混凝土在每单位面积上产生一条连续裂缝时所需要的能量。 f_c 为混凝土圆柱体抗压强度, σ_{i0} 为混凝土峰值

拉应力, σ_{i0} 的计算公式为: $\sigma_{i0} = 0.26(1.25f_c)^{2/3}$ 。

1.3 型钢本构模型

钢骨本构模型采用 ABAQUS 提供的各向同性弹塑性模型, 服从 Von - Mises 屈服准则, 应力 - 应变关系采用型钢的四折线模型, 如下式:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon_s & (\epsilon_s \leq \epsilon_{s1}) \\ f_{sy} & (\epsilon_{s1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{s2}) \\ f_{sy} + E'_s (\epsilon_s - \epsilon_{s1}) & (\epsilon_{s2} < \epsilon_s \leq \epsilon_{s3}) \\ f_s & (\epsilon_s > \epsilon_{s3}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\epsilon_{s1} = f_{sy}/E_s$; $\epsilon_{s2} = 10\epsilon_{s1}$; $\epsilon_{s3} = 10\epsilon_{s2}$; $E'_s = (f_s - f_{sy})/(\epsilon_{s3} - \epsilon_{s2})$; E_s 为钢骨弹性段的弹性模量, 取 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa; 泊松比为 0.3, f_{sy} 为钢骨的屈服强度, f_s 为钢骨的极限强度。

1.4 GFRP 管本构模型

GFRP 管采用 ABAQUS 中的单层板模型来模拟弹性段力学性能, ABAQUS 定义复合材料的损伤采用 Hashin^[12] 破坏准则, 来近似模拟复合材料的损伤演化过程, 单层板的相关参数利用复合材料细观力学^[13] 中的分析方法, 由文献[14]中提供的材料参数计算各参数, 并对 GFRP 管进行铺层设计。

2 数值模型的建立与计算

2.1 有限元模型建立

对于数值模拟情况下, 混凝土和垫块采用八节点六面体减缩积分单元 (C3D8R), 型钢和 GFRP 管采用壳单元 S4R (四节点减缩积分) 模拟, 在厚度方向上, 则是均采用 3 个积分点的泊松积分, 各部分有限元模型见图 3。

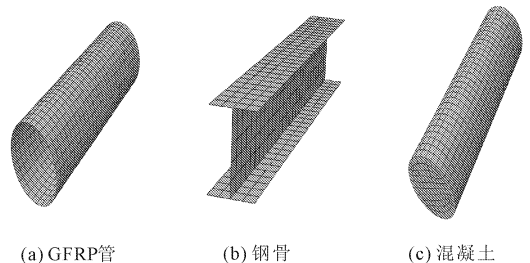


图 3 各部分构件模型

混凝土和 GFRP 管之间的接触在切向部分采用 ABAQUS 中自带的库仑摩擦模型, 见图 4。GFRP 管与核心混凝土通过粘结作用使得它们之间的相对运动为零, 只有两者间的剪应力达到临界值 τ_{crit} 时, 才产生相对位移, 临界剪应力的计算如下

$$\tau_{crit} = \mu \times p \quad (9)$$

式(9)中, 摩擦系数 $\mu = 0.6$, p 为 GFRP 管与核心混

凝土之间的接触压力。

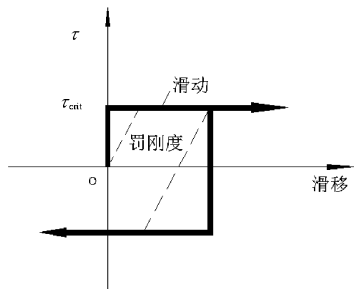


图 4 库仑摩擦模型

将钢筋使用 Embed 命令实现与核心混凝土的作用,GFRP 管与端板采用 Shell to solid coupling 命令接触,用 Tie 命令将混凝土与端板进行绑定,最后在端板上设置参考点并与端板进行耦合。

轴压短柱两侧设置加载端板,其弹性模量 $E_s = 1 \times 10^{20}$ MPa,泊松比为 0.001,边界条件施加在参考点上,一侧为固定约束,即 $U_1 = U_2 = U_3 = U_{R_1} = U_{R_2} = U_{R_3} = 0$ 另一侧施加计算收敛性较好的位移荷载,边界及荷载情况见图 5。

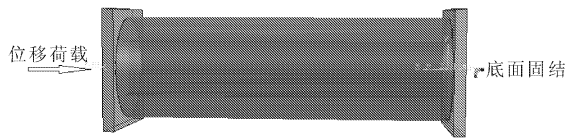


图 5 受力及边界情况

2.2 模拟结果验证

为验证数值模型的准确性,通过有限元软件模拟 GFRP 管轴压短柱的荷载应变曲线,本文采用参考文献[15-17]中实验数据,详细数据见表 1。

表 1 实验构件参数

编号	缠绕角度/(°)	t/mm	有无钢筋	L/mm	F_c/MPa	F_s/MPa	N^{exp}/kN	N^{cal}/kN	$N^{\text{exp}}/N^{\text{cal}}$
GC2	60	3	无	600	38.6	—	2572	3176	0.81
GC5	60	5	无	600	38.6	—	2473	2362	1.05
GC6	80	3	无	600	48.6	—	3596	3565	1.01
GC1-6	80	3	无	600	38.6	—	3138	3186	0.98
GSC1	60	3	有	600	48.6	355	2482	2315	1.07
GSC5	80	3	有	600	48.6	355	2886	2852	1.01

注: T 为 GFRP 管厚度, L 为试件长度, F_c 为混凝土轴心抗压强度, F_s 为钢筋极限强度, N^{exp} 为同等级位移下实验构件的轴压承载力, N^{cal} 为数值模拟结果。

ABAQUS 模拟 GFRP 管约束混凝土轴压短柱受力过程,将实验结果与数模拟计算的荷载-应变($N-\epsilon$)曲线进行对比,实验与模拟 $N-\epsilon$ 曲线对比见图 6,计算结果与实验结果具有较高的吻合度,数值模型的准确度可以保证。

2.3 参数对比分析

GFRP 管约束混凝土组合构件轴压力学性能的影响因素有 GFRP 管管壁厚度、混凝土强度等级、钢筋截面积、钢筋强度。以 GSC5 为参考构件,分别改变各参数,利用有限元模拟以上各参数对荷载-应变曲线产生的影响。

(1) GFRP 管管壁厚度的影响。比较不同厚度的 GFRP 管轴压短柱。由荷载应变曲线图 7(a)对比可知,荷载作用初期,GFRP 管对核心混凝土的约束作用不明显,管壁厚度对承载力的影响不大,随着荷载增加,由于 GFRP 管壁厚度越大时在承受荷载作用时其应变越小,此时 GFRP 对核心混凝土的约束能力越强,构件承载力随之增高,故 GFRP 管管壁厚度的增加时轴压短柱的承载力随之而增大。

(2) 不同混凝土强度等级的影响。由图 7(b)可知,在荷载作用早期,混凝土横向应变较小,GFRP 管对混凝土的约束作用不明显,实验构件荷载应变曲线基本一致,随着荷载增加,荷载应变曲线曲率都变小,但是应变增长变快,混凝土侧向膨胀,GFRP 管的约束加强,当混凝土强度等级提高时,随着混凝土抗压强度的提高而构件承载力也随之提高,且变化幅度明显,因此混凝土强度是影响 GFRP 组合构件的主要因素。

(3) 钢筋截面形式的影响。模拟工字钢型号为 110,114,116 下的组合结构的受力,改变组合构件的钢筋截面积,由图 7(c)可知,随着钢筋截面积的增大组合结构的承载力随之增强。

(4) 钢筋强度的影响。由荷载应变曲线图 7(d)可知,钢筋强度对 GFRP 构件承载力作用不明显,主要是钢筋位于混凝土内,而混凝土在 GFRP 管的裹握作用下,承担构件轴向压力,因此钢筋强度对组合构件的承载力影响不大。

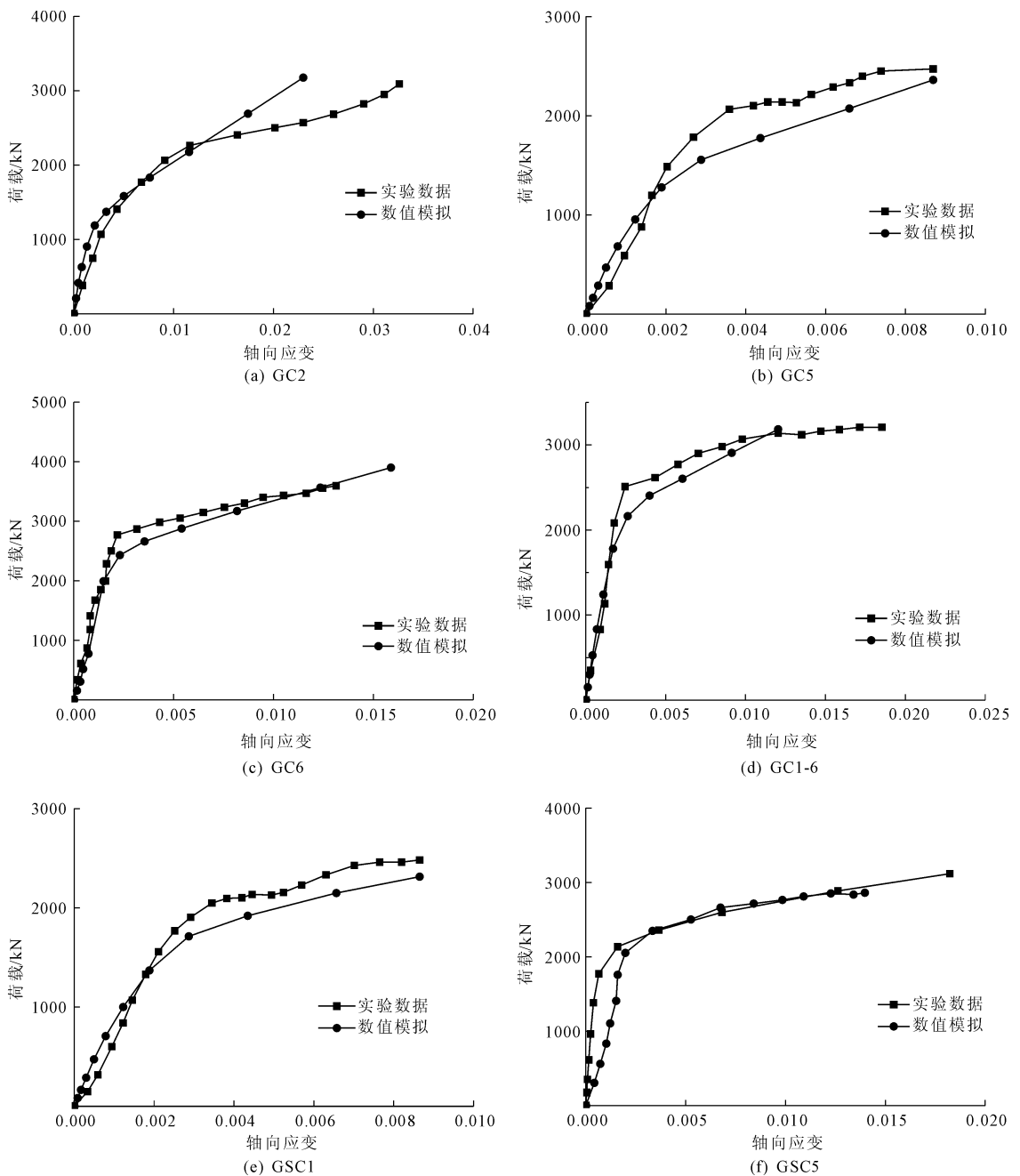


图 6 实验 $N-\epsilon$ 曲线与数值模拟曲线对比

3 结 论

通过有限元软件 ABAQUS 对已知实验的数值模拟,对其荷载应变曲线对比分析,可得出以下结论:

(1) 建立的关于组合结构的 ABAQUS 有限元模型可较好的应用于 GFRP 管约束混凝土轴压短柱的数值模拟,数值模拟的荷载-应变曲线与实验结果较为吻合。

(2) 通过对影响组合柱轴压力学性能的因素分

析可知,GFRP 管的厚度、混凝土强度等级以及钢骨型号等因素对 GFRP 组合短柱在承受轴向荷载时的力学性能影响程度不一,其中,增加钢骨截面、增加 GFRP 管管壁厚度和提高混凝土强度等级等因素可明显提高组合柱的抗压承载力,尤其混凝土强度增加能显著提高组合柱的承载力和延性。

(3) 由于 ABAQUS 数值模拟的局限性,未能对不同荷载作用形式下的 GFRP 约束混凝土柱以及混凝土环向应变影响因素进行进一步分析研究。

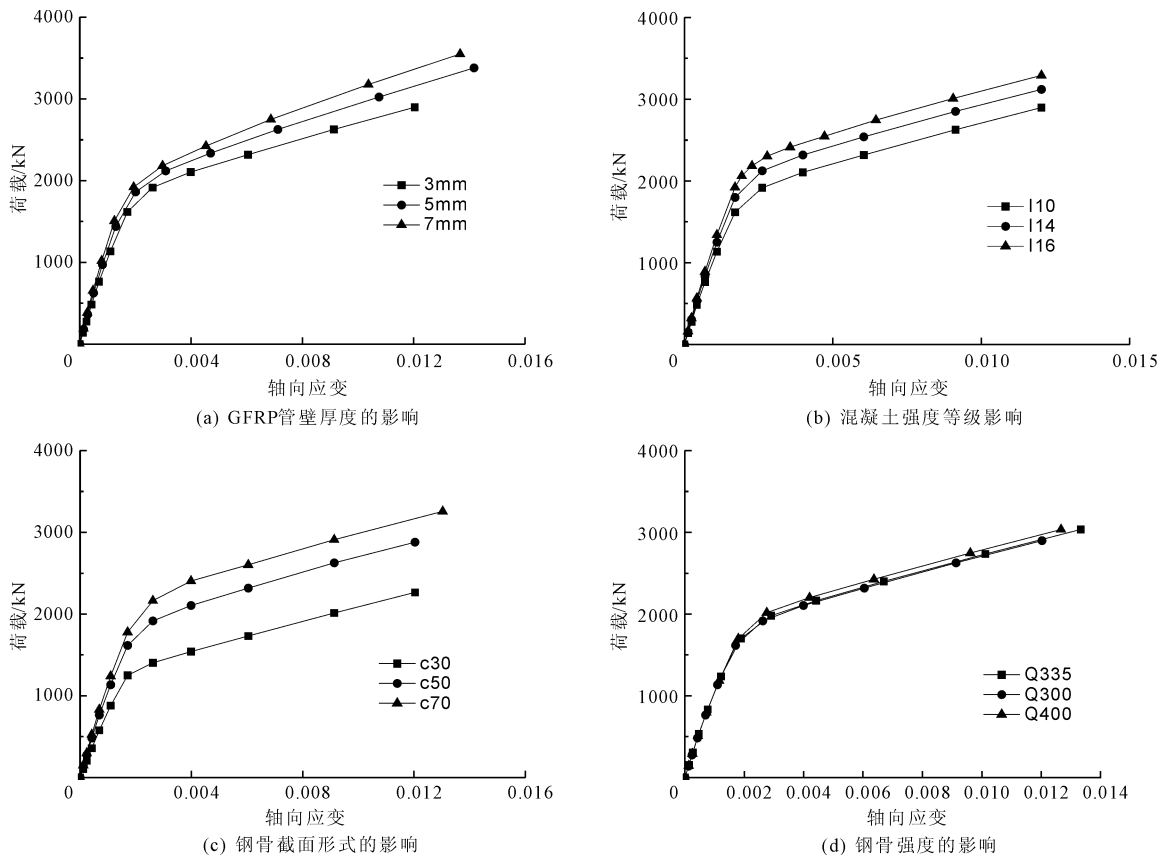


图 7 数值模拟荷载 - 应变曲线

参考文献:

- [1] 丁慧,陈兰响,樊成. 双层高强螺旋箍筋约束混凝土轴压短柱强度和延性的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 60-65.
- [2] 陈兰响,关萍,刘晴晴. 基于 ABAQUS 分析型钢 - 圆钢管混凝土的力学性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 15-19.
- [3] 刘玉雷. GFRP 管-混凝土-钢管混凝土组合柱轴压性能试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [4] 杨刻亚,刘庆洋. GFRP 管混凝土圆形管柱抗震性能试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2008, 9(1): 29-31.
- [5] Hu Y M, Yu T, Teng J G. FRP - confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(5): 850-860.
- [6] 张霓,王连广,温建萍. GFRP 管高强混凝土空心柱轴压试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(7): 1049-1052.
- [7] 于清. 轴心受压 FRP 约束混凝土的应力 - 应变关系研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 5-8.
- [8] 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.
- [9] 刘明学,钱稼茹. FRP 约束圆柱混凝土受压应力 - 应变关系模型[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 1-6.
- [10] 鲁国昌,叶列平,杨才干,等. FRP 管约束混凝土的轴压应力 - 应变关系研究[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 98-103.
- [11] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress - strain model for FRP - confined concrete[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 471-489.
- [12] 周乐,王连广,白云皓,等. FRP 管钢管高强混凝土柱受压承载力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(5): 786-793.
- [13] 王连广,秦国鹏,周乐. GFRP 管钢管高强混凝土组合柱轴心受压试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 170-175, 185.
- [14] 秦国鹏. GFRP 管钢筋混凝土构件力学性能研究[D]. 沈阳:东北大学, 2010.
- [15] 秦国鹏,王连广,周乐. GFRP 管混凝土组合柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(10): 72-75.
- [16] 陈百玲,秦国鹏,王连广. GFRP 管钢管混凝土轴压短柱承载力研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 1035-1038.
- [17] 王强稳. FRP 管钢管高强混凝土轴心受压组合柱试验研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008.