

FRP 布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析

陆新征 冯 鹏 叶列平

(清华大学)

摘 要 采用有限元方法对纤维增强材料 (FRP) 布约束混凝土方柱的轴心受压性能进行了分析, 并与试验结果进行了比较。分析结果表明, 通过合理选择有限元分析数值模型, 可较好地预测 FRP 布约束混凝土柱的轴心受压性能。根据数值分析结果对其受力机理进行了探讨, 揭示了 FRP 布与混凝土在轴压下的相互作用, 为今后进行数值试验和影响因素分析奠定了基础。

关键词 纤维增强塑料 约束混凝土 加固 有限元分析

中图分类号: TU528.572 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2003) 02-0046-06

BEHAVIOR OF FRP- CONFINED CONCRETE SQUARE COLUMNS UNDER UNIAXIAL LOADING

Lu Xinzheng Feng Peng Ye Lieping

(Tsinghua University)

Abstract

The behavior of the FRP-confined concrete square columns under uniaxial loading is studied in the paper. The finite element method is used in the study; a computer program is developed. The computing results are compared with test one. The former can simulate the behavior of the columns with proper numerical model. The interaction between FRP material and concrete is discussed based on the numerical results. Some useful conclusions are obtained through the study.

Key words: fiber reinforced polymer, strengthening, finite element analysis, confined concrete

纤维增强材料 (FRP) 布加固混凝土结构技术具有力学性能优良、加固效果明显、施工方便等优点, 目前在国内外得到广泛应用。利用封闭缠绕 FRP 布约束混凝土柱, 提高混凝土的强度和变形能力, 是这种加固技术的一个主要应用形式, 这已在国内外大量的试验研究中得到证实 (Mirmiran, 1997, 1998, 欧阳煜, 2000), 并已在工程中得到较多的应用。为进一步深入了解 FRP 布约束混凝土柱轴心受压性能和受力机理, 本文采用有限元方法对 FRP 布约束混凝土柱进行了分析, 并与试验结果进行了比较。分析结果表明, 有限元方法可较好地预测 FRP 布约束混凝土柱轴心受压性能。论文还根据分析结果对其受力机理进行初步探讨, 为今后进行数值试验和影响因素分析奠定了基础。

1 试验概况

共进行了 5 个 FRP 布约束混凝土方柱的轴心受压性能试验, 如图 1 所示。试件尺寸为 200 mm ×

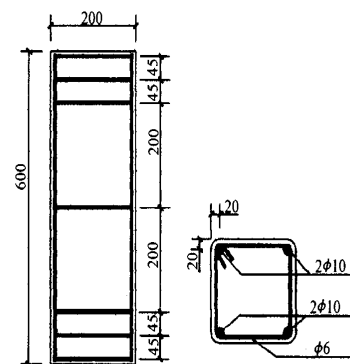


图 1 试件尺寸及配筋 (mm)

Fig. 1 Specimen design and arrangement of fiber strain gauge

200mm × 600mm, 配置 4 φ10 纵筋, 箍筋为 φ6 a 200, 为防止试件端部混凝土局部压坏, 两端加密为 φ6 a 50。为防止 FRP 布在柱角部弯折应力集中, 角部打磨成半径为 20mm 的圆角。

混凝土实测立方体强度为 f_{cu} 为 27.8MPa, 纵筋和箍筋实测抗拉屈服强度分别为 291MPa 和 342MPa。采用玻璃纤维 (GFRP) 和碳纤维 (CFRP) 两种纤维布, 均为单向纤维布, 水平缠绕包裹。根据纤维布材料厂

收稿日期: 2001-06-05

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目, 编号 2001AA336010

家提供的数据, 玻璃纤维布的弹性模量取 60 GPa, 抗拉强度为 $f_{frp} = 900 \text{ MPa}$ 。碳纤维布的弹性模量为 235 GPa, 强度为 $f_{frp} = 3550 \text{ MPa}$ 。试验变化参数为纤维布加固量, 见表 1。

表 1 试件纤维加固量

Table 1 List of fiber confinement amount

试件编号	纤维布类型	包裹层数
C0	不包	不包
CM1	玻璃纤维 (GFRP)	全包 1 层
CM2	玻璃纤维 (GFRP)	全包 2 层
CM3	玻璃纤维 (GFRP)	全包 3 层
CM4	碳纤维 (CFRP)	全包 1 层

试验中用力传感器量测试件所受压力。在柱子的两侧对称安装位移计, 量测柱中部 400mm 标距内的平均轴向变形。在纤维布表面贴 10 个应变片, 量测纤维的应变。

2 有限元分析

2.1 分析模型

本文采用有限元软件 Ansys 弹塑性计算功能进行 FRP 布约束混凝土柱的轴心受压性能的全过程分析。混凝土采用该软件的 Solid 65 空间混凝土单元, 该单元可以综合考虑包括塑性和徐变引起的材料非线性、大位移引起的几何非线性、混凝土开裂和压碎引起的非线性等多种混凝土的材料特性。混凝土的强度准则采用 William - Warnke 5 参数模型 (江见鲸, 1994)。无约束混凝土的单轴受压应力 - 应变关系采用过镇海建议 (过镇海, 1999), 并取轴心抗压强度 (即峰值应力) 为 $f_c = 22 \text{ MPa}$, 初始弹性模量 $E_c = 30 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.2, 上升段参数 $a = 2.0$, 下降段参数 $b = 0.8$, 峰值应变 $\epsilon_0 = 0.002$ 。

钢筋单元采用 Ansys 的 Link 8 空间一维链杆单元, 其应力-应变关系取理想弹塑性, 弹性模量 $E_s = 210 \text{ GPa}$, 屈服强度 $f_y = 290 \text{ MPa}$ 。

外包 FRP 布单元采用 Ansys 的 Shell 41 膜单元, 该单元只能承受拉力作用, 没有抗弯、抗压能力, 符合 FRP 布在约束混凝土中的受力状况。纤维材料设为各项异性, 在垂直纤维方向材料没有强度 (实际计算中取为纤维方向强度的 $1/10^6$)。诸多试验均证明, FRP 材料的应力-应变关系接近理想弹性。因此, 在本次有限元分析中, 设定 FRP 材料为理想弹性材料, 且若纤维应力超过其抗拉强度, 则认为纤维断裂, 计

算终止。

2.2 单元划分和边界条件

假设所有的单元的节点位移协调。由于柱自身的对称性, 取 $1/8$ 柱体计算。柱两端假设为固定端, 自由度被完全约束, 以等位移方式施加荷载。

计算中若出现以下两种情况之一, 则认为达到破坏极限状态, 计算终止: (1) FRP 纤维达到极限抗拉强度而拉断, 计算终止; (2) 在计算过程中, 当迭代超过 25 次不收敛, 则将加载步长折半, 如重复折半超过 1000 次仍不收敛, 则认为已产生很大的塑性变形而达到破坏极限状态, 计算结束。

在本次分析中, 所有算例均因纤维达到其抗拉强度而计算终止。

3 与试验结果对比

表 2 给出了最大轴向平均应力计算值与试验值的对比及相对误差, 可见误差均小于 10%。有限元计算得到的轴向应力-应变关系全曲线与试验结果对比如图 2 所示, 其中计算轴向应力为柱水平截面上的平均压应力 (下同)。由图可见, 计算曲线与试验曲线总体吻合一致, 峰值应变和极限压应变也有较好的一致性, 计算与试验结果的偏差可认为是混凝土和纤维布自身材料性能离散性引起的。

表 2 最大平均轴向应力

Table 2 Maximal average vertical stress (MPa)

最大平均轴向应力	C0	CM1	CM2	CM3	CM4
试验结果 (MPa)	20.72	26.93	27.04	28.99	26.26
有限元 (MPa)	22.43	27.67	27.72	28.60	28.22
相对误差	8.25 %	2.75 %	2.51 %	- 1.96 %	7.46 %

图 3 为轴向压应变-纤维布拉应变计算曲线与试验曲线的对比, 由图可见:

(1) 在轴向压应变不是很大时 ($< 5 \sim 10 \times 10^{-3}$), 计算曲线与试验曲线吻合较好; 而在轴向应变很大时, 试验实测纤维应变波动较大, 这可能是由于目前对大应变测量技术还不是十分成熟, 导致量测误差较大, 也可能是应变片在大应变时发生脱落或纤维布局部发生破坏影响测量结果。

(2) 中部纤维应变计算结果和试验结果的吻合度均优于角部, 且在大应变水平下, 角部应变的计算值基本上始终大于试验结果。其原因可能是因为角部纤

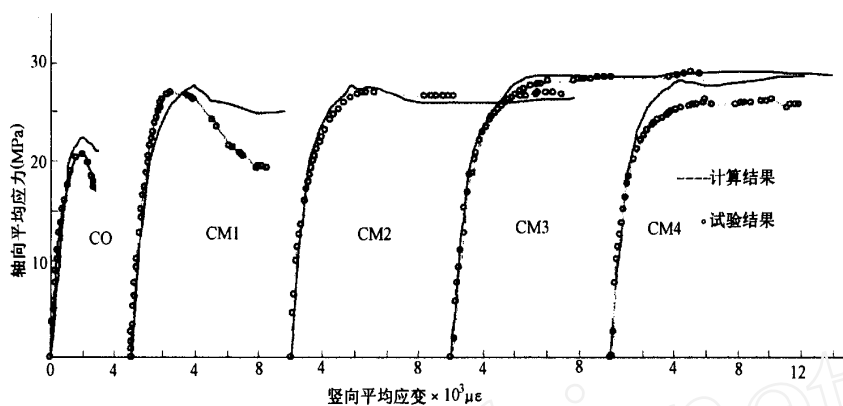


图2 竖轴向应力-应变关系对比

Fig. 2 Compare of vertical stress-strain relationship

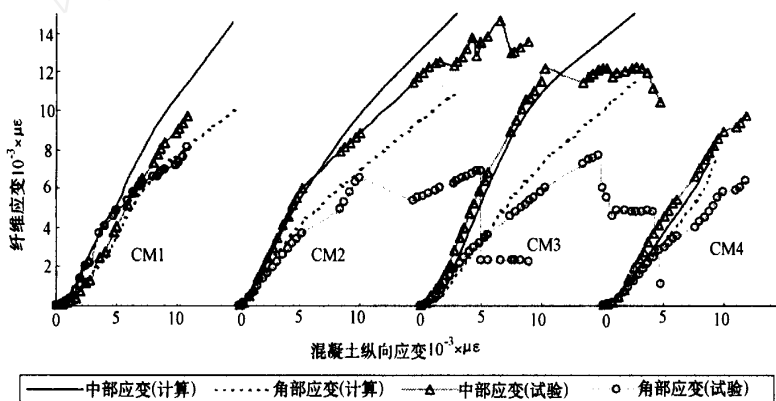


图3 轴向压应变-纤维布拉应变计算曲线与试验曲线的对比

Fig. 3 Compare of numerical results and test results for vertical compression strain vs. fiber tensile strain

维和混凝土之间，或纤维和应变片之间，在大应变的情况下出现了剥离造成测量数值偏小。

4 纤维布约束混凝土受力机理分析

通过比较纤维布约束混凝土轴向应力-应变关系和纤维应变的发展，说明所选择有限元计算模型是合理的，计算结果与试验结果有较好的一致性，可较好地再现纤维布约束混凝土柱的受力状况和性能，进而可利用有限元分析结果对纤维布约束混凝土柱的受力性能和机理进行深入分析，并进行数值试验以便研究有关参数对受力性能的影响。以下根据有限元分析结果对纤维布约束混凝土的受力机理作进一步分析。

4.1 纤维布应变的竖向分布

在低应力水平下，纤维拉应变沿柱纵向分布比较均匀，但在接近破坏时，在破坏面附近纤维拉应变急

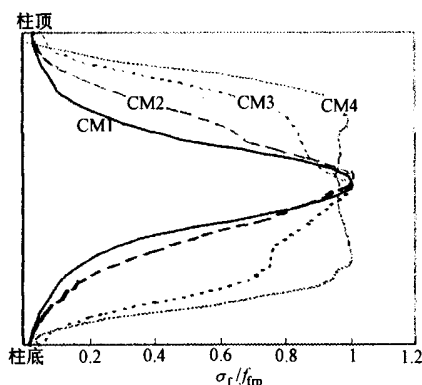


图4 破坏时纤维应变纵向分布

Fig. 4 Fiber strain vertical distribution at failure point

剧增加。图4为破坏前纤维布在截面中部沿纤维方向的应变（纤维方向与轴压力方向垂直）的竖向分布。根据分析结果可以得到以下规律：

(1) 柱上、下两端由于存在较强的横向约束(有限元计算时假设柱体两端为固接),纤维布拉应力较小;而在柱中间部分,由于混凝土随轴向压力增大而增大的横向膨胀变形,使纤维布产生很大的拉应变,直到达到纤维的极限拉应变;

(2) 随轴向压力的增大,纤维布拉应变在柱中部变得更为集中,当接近极限轴压力时,柱中部纤维布拉应变集中尤其显著,最终导致柱中部纤维布拉断,这与试验最终观测到破坏状况是一致的(见图 5);

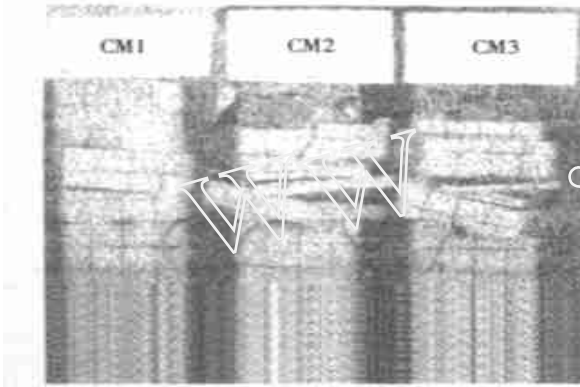


图 5 不同加固量试件最终破坏形态

Fig.5 Failure models of various specimens

(3) 随着纤维布加固量的增加,纤维布对混凝土的约束增强,纤维布应变的竖向分布趋于均匀,即内部混凝土受到约束的体积更大,最终纤维布拉断的范围也更大(见图 4)。

(4) CM4 试件采用的碳纤维布,其弹性模量比玻璃纤维大很多,故对混凝土横向变形约束更为有效,纤维布应变的竖向分布更为均匀。

4.2 纤维布应变沿环向分布

在低应力水平下,整个试件纤维布拉应变沿柱环向分布也比较均匀,并且在接近破坏荷载时,非破坏截面纤维布拉应变沿环向仍保持相对均匀的分布。但在破坏截面,即柱中间截面,混凝土膨胀最大,纤维布拉应变沿柱环向分布情况如图 6 所示,根据分析结果可以得出以下规律:

(1) 由于纤维布采用膜单元,本身没有抗弯刚度,因此只有当内部混凝土产生侧向变形,向外膨胀,纤维布才能对内部混凝土提供有效的侧向约束。

(2) 在达到极限压力(轴向峰值应力)以前,各个试件边长中部的纤维布拉应变均高于角部,这是因为中部混凝土受到的侧向约束较小,侧向膨胀较大,使得纤维布拉应力相应也比较大。

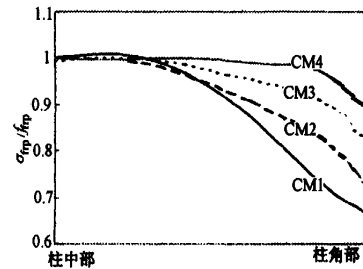


图 6 破坏前纤维应变沿环向分布

Fig.6 Fiber strain circumferential distribution before failure

(3) 在接近破坏时,(极限轴向压应变),纤维布拉应变沿环向的分布随加固量(约束程度)不同而不同。当加固量较小时,纤维布抵抗局部膨胀变形能力差,纤维布拉应变集中于边长中部,最后因为中部纤维达到其极限拉应变而破坏;当加固量较大时,纤维布可限制局部变形发展过大,使得纤维布沿环向拉应力分布相对比较均匀,最后可能因在角部应力集中而导致纤维布拉断破坏。

(4) 由纤维布拉应力环向分布分析知,当加固量大于 2 层玻璃纤维,试件的破坏将主要由角部纤维的应力集中引起。因此,要进一步提高约束效果,采取措施改善角部应力集中的作用要大于简单增加纤维厚度的作用。

4.3 水平截面混凝土应力分布

图 7 和图 8 为柱中间水平截面混凝土应力分布的计算结果(由于对称性,取 1/4 截面,负值代表压力)。从图中可以得到如下纤维布约束混凝土受力规律:

(1) 侧向约束最强位置在角部,而后沿对角线方向逐渐减小,有效约束区在对角线两侧,约束最小时位置在边长中部附近;

(2) 纤维布加固量对混凝土应力分布有一定影响,但影响主要集中于角部。当纤维约束量从一层玻璃纤维增加到三层时,虽然角部混凝土最大竖向压应力可从约 30MPa 提高到超过 40MPa。但由于受强约束的角部区域较小,增加加固量对整个竖向总承载力影响有限,如三层玻璃纤维约束柱的平均峰值应力为 28.60MPa,比一层约束柱的 27.72MPa 仅提高 3.2%。

(3) 通过分析柱体水平应力分布,说明纤维布提供的侧向约束主要集中于柱角部,影响区域与倒角半径密切相关;在小倒角半径情况下,增加纤维布加固量对最大承载力提高的能力是有限的。

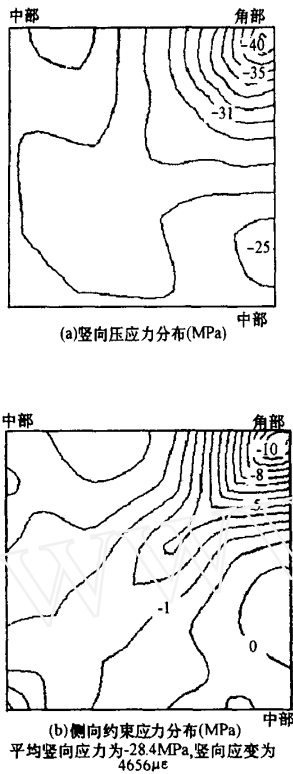


图7 三层玻璃纤维

Fig.7 Section stress distribution for 3 layers GFRP confined specimen

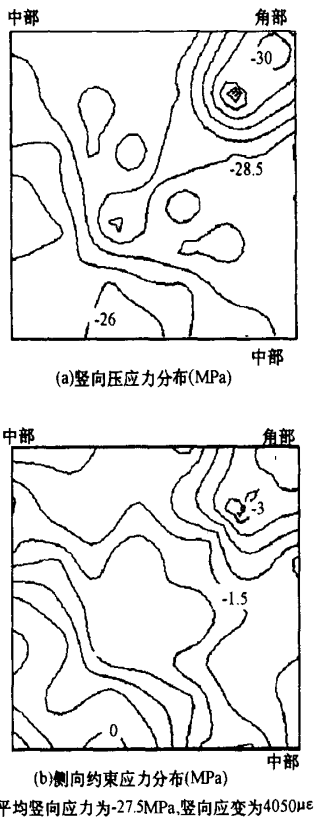


图8 一层玻璃纤维

Fig.8 Section stress distribution for 1 layers GFRP confined specimen

5 纤维约束对极限压应变的影响

从以上分析可知，纤维布约束矩形截面混凝土柱，由于约束区域主要集中在截面角部，因此对柱的平均抗压强度提高是有限的，但对极限压应变的影响则要大多。这是因为，当平均压应力过峰值点后，一方面侧面中部等低约束区的混凝土已进入下降段，轴向压应力减小；另一方面，角部等强约束区的混凝土轴向压应力仍在继续增加，两方面的综合效果使截面平均轴向压应力进入一个相对稳定的阶段，压应变可持续增大，整体表现出较好的变形能力。

对于正方形截面柱，定义纤维约束特征系数为，

$$f = \frac{f_f t (4a)}{f_c a^2} = \frac{4f_f t}{f_c a} \quad (1)$$

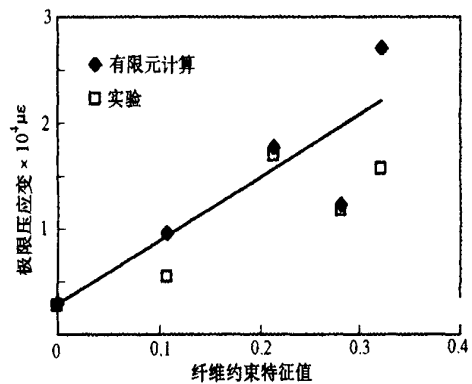


图9 玻璃纤维约束混凝土柱极限应变与约束特征值之间关系

Fig.9 Relationship between the ultimate compression strain and fiber reinforcement characteristic value

式中， f_f 为纤维布极限抗拉强度； f_c 为混凝土轴心抗压强度； a 为正方形柱截面边长； t 为纤维布总厚度。根据试验和有限元分析结果，得到玻璃纤维约束混凝土方柱的极限压应变和纤维约束特征系数的关系如图9所示，经统计回归得到以下关系式，

$$\epsilon_{cu} = 0.059 f + 0.003 \quad (2)$$

6 结论

1. 通过对比试验和有限元分析得到的纤维布约束混凝土轴向受压平均应力-应变关系和纤维应变发展，说明用本文中混凝土模型和纤维模型可以比较有效的模拟纤维布约束混凝土的受力性能。
2. 纤维约束可以在一定程度上提高混凝土方柱的轴

压强度,但提高程度有限。主要是因为纤维水平约束集中于角部,而截面大部分区域的侧向约束相对较小,当倒角半径较小时,角部混凝土强度的提高对整个柱平均强度的贡献有限。

3. 纤维布的破坏形式随纤维厚度的增加而发生变化,随加固量的增加,其破坏从中部纤维受拉破坏转变为角部的应力集中破坏。
4. 纤维布约束可显著提高混凝土的极限压应变,从而可提高构件延性,有利于结构的抗震加固。
5. 由于纤维布约束方柱对其峰值应力提高有限,在实际应用中可偏于安全地不考虑对混凝土强度的提高影响,而玻璃纤维约束混凝土方柱极限压应变可采用式(2)确定。

陆新征 博士研究生。主要从事结构有限元分析和数值仿真研究工作。通讯地址:100084 清华大学土木工程系

冯 鹏 博士研究生。主要从事纤维复合结构研究工作。

叶列平 教授。主要从事结构抗震,劲性混凝土,结构加固,纤维复合结构研究工作。

参 考 文 献

- [1] Amir Mirmiran. Behavior of concrete columns confined by fiber composites [J]. Journal of Structure Engineering, May, 1997
- [2] Amir Mirmiran. Effect of column parameters on FRP-confined concrete [J]. Journal of Composites for Construction, No. 5 1998
- [3] 欧阳煜. 玻璃纤维片材加固混凝土框架结构的性能研究 [D]. 浙江大学, 2000
- [4] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994
- [5] 过镇海. 钢筋混凝土原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [6] Ansys 使用手册. 美国 Ansys 公司驻京办事处

(上接 40 页)

- [5] Wei S, Mau S T, Vipulanandan C, Mantrala S K Performance of new sandwich tube under axial loading: Experiment [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121 (12): 1806 ~ 1814
- [6] Wei S, Mau S T, Vipulanandan C, Mantrala S K Performance of new sandwich tuber under axial loading: Analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12): 1815 ~ 1821
- [7] Zhao X L, Gzebieta R, Elchalakani M Tests of concrete-filled double skin circular hollow sections [A]. First Inter. Confer. on Steel & Composite Structures [C]. Pusan, Korea, June, 2001: 283 ~ 290
- [8] Wright H, Odyemi T, Evans H R, The experimental behavior of double skin composite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, 19: 91 ~ 110
- [9] Zhao X L, Gzebieta R. Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS Inner and SHS Outer) tubes [J]. Thin-Walled Structures. 2002, 40: 199 ~ 233
- [10] Yagishita, Kitoh H, Sugimoto M, Tanihira T, Sonoda K Double

skin composite tubular columns subjected to cyclic horizontal force and constant axial porce [A]. Proc. of 6th Inter. Confer. on Steel and Concrete Composite Structures [C]. USA, Apr. ,2000: 497 ~ 503

- [11] 蔡克铨, 林育详, 林敏郎. 中空双钢管混凝土柱與基础结合之试验行为 [A]. 第二届海峡两岸及香港钢结构技术交流会 [C]. 中国, 台北, 2001: 77 ~ 88
- [12] 蔡绍怀, 焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算 [J]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 20 ~ 25
- [13] 韩林海, 陶忠. 方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 17 ~ 25
- [14] 沈聚敏, 王全志, 江见鲸. 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: 64 ~ 79
- [15] 韩林海, 陶忠, 黄宏. 中空夹层钢管混凝土构件力学性能的研究 [R]. 福州大学科研报告. 2002
- [16] GB 4142-2000 战时军港抢修早强型组合结构设计规程 [S]. 海军总后勤部. 2000
- [17] 韩林海, 陶忠, 尧国皇, 霍静思, 杨有福. 钢管混凝土构件设计理论关键问题的系列研究 [R]. 福州大学科研报告. 2002

陶 忠 工学博士, 副研究员。主要从事组合结构方面的研究工作, 发表论文 20 余篇, 曾获国家军队科技进步三等奖一次。通讯地址: 350002 福建省福州市工业路 523 号福州大学土木建筑工程学院

韩林海 工学博士, 特聘教授, 博士生导师。从事组合结构和建筑结构防火等方面的研究工作, 发表论文 80 多篇。曾获国家教育委员会科技进步一等奖等科技奖励。

黄 宏 硕士研究生, 从事组合结构方面的研究工作。