

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200417.001

玻璃纤维增强树脂复合材料管-钢筋/混凝土
空心构件抗弯性能

张霓^{*1}, 郑晨阳¹, 姜丽娜¹, 王连广²

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 阜新 123000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110000)

摘 要: 为研究玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 管-钢筋/混凝土空心构件的抗弯性能, 编制了受弯构件的非线性分析程序, 系统地分析了空心率、配筋率、GFRP 管管壁厚度及混凝土强度等级等主要参数对其抗弯性能的影响, 并通过试验对所编制的程序进行验证, 最后建立适用于 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件的抗弯承载力计算公式。结果表明: 利用编制的受弯构件非线性分析程序与建立的抗弯承载力公式, 计算结果与试验结果均吻合较好, 抗弯承载力随空心率的减小、配筋率的提高、GFRP 管管壁厚度的增加及混凝土强度的增大而增加, 空心率对构件抗弯承载力影响最大, 其次是配筋率和 GFRP 管管壁厚度, 最后是混凝土强度等级, 空心部分半径比在 0.25~0.5 为宜, 可以适当提高配筋率、GFRP 管管壁厚度或混凝土强度等级来弥补该空心构件抗弯承载力, 研究结论可为该结构在实际应用中提供参考依据。

关键词: 玻璃纤维增强树脂复合材料管-钢筋/混凝土; 空心构件; 抗弯性能; 非线性分析程序; 承载力公式
中图分类号: TU 398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)12-3052-12

Flexural behavior of glass fiber reinforced polymer tube filled with
steel bars/concrete hollow members

ZHANG Ni^{*1}, ZHENG Chenyang¹, XIAN Li'na¹, WANG Lianguang²

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Resources of Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to study the flexural performance of glass fiber reinforced polymer (GFRP) tube filled with steel bars/concrete hollow members, a nonlinear analysis program was developed. The effects of main parameters such as hollow rate, reinforcement ratio, GFRP tube wall thickness and strength grade of concrete were analyzed systematically. The program was verified by test. The calculation formula of the bearing capacity of GFRP tube filled with reinforced hollow concrete members was established. The results show that the calculation results are in good agreement with the test results by using the nonlinear analysis program and the established bearing capacity formula. The flexural bearing capacity increases with the decrease of the hollow rate and the increase of the reinforcement ratio, the GFRP tube wall thickness and the concrete strength grade. The hollow rate has the greatest influence on the flexural bearing capacity, followed by the reinforcement ratio and the thickness of GFRP tube wall thickness, and the concrete strength grade has relatively less influence on the flexural bearing capacity. The radius ratio of hollow part should be 0.25-0.5. The flexural bearing capacity of the hollow members can be compensated by properly increasing the reinforcement ratio, GFRP tube wall thickness or concrete strength grade. The research conclusion can provide reference for the practical application of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow member structure.

收稿日期: 2020-03-02; 录用日期: 2020-04-02; 网络首发时间: 2020-04-18 13:52:28
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200417.001>
基金项目: 辽宁省自然科学基金 (201705403030); 辽宁省教育厅基础项目 (LJ2019JL018)
通信作者: 张霓, 博士, 讲师, 研究方向为玻璃纤维管混凝土组合结构 E-mail: 418688814@qq.com

引用格式: 张霓, 郑晨阳, 姜丽娜, 等. 玻璃纤维增强树脂复合材料管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3052-3063.
ZHANG Ni, ZHENG Chenyang, XIAN Li'na, et al. Flexural behavior of glass fiber reinforced polymer tube filled with steel bars/concrete hollow members[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 3052-3063(in Chinese).

Keywords: glass fiber reinforced polymer tube filled with steel bars/concrete; hollow members; flexural behavior; nonlinear analysis program; bearing capacity formula

纤维增强树脂复合材料因具有质量轻、强度高及耐腐蚀等优点,近几年来受到了国内外许多专家、学者的关注。其中玻璃纤维增强树脂复合材料(GFRP)缠绕的管材,特别是在其中浇筑混凝土形成的GFRP-混凝土结构,可以部分替代钢材应用于高层建筑、桥梁墩柱等土木工程中^[1-13]。GFRP管-钢筋/混凝土空心结构是结合GFRP管-实心混凝土结构和钢筋/混凝土空心结构两种结构特点形成的一种新型结构形式。该结构是在GFRP管内设置模具(非受力组件),在GFRP管与模具之间设置带有箍筋的纵向钢筋(钢筋笼),然后在GFRP管与模具之间浇筑混凝土形成的一种结构。该新型结构典型的截面形式见图1。这种结构除了具有GFRP管-钢筋/混凝土结构的特点外,还具有自重轻、刚度大、便于运输及施工安装等优点,更能适应当代建筑的发展需要。

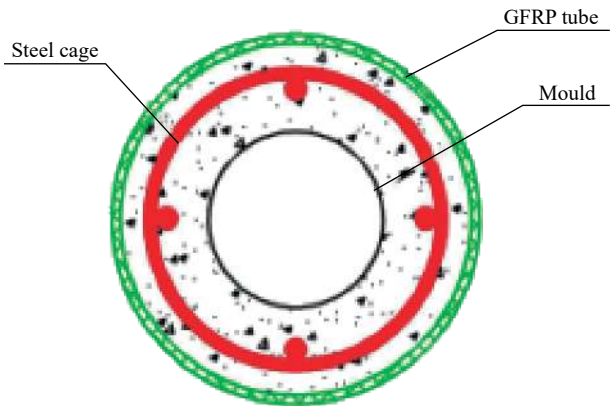


图1 玻璃纤维增强树脂复合材料(GFRP)管-钢筋/混凝土空心结构截面形式

Fig. 1 Section form of glass fiber reinforced polymer (GFRP) tube filled with steel bars/concrete hollow structure

GFRP管-钢筋/混凝土空心结构最理想的受力状态是轴心受压,但是在实际工程中,由于施工偏差、材料缺陷或荷载作用位置的不确定性,使结构常处于偏心受压、压弯,甚至处于纯弯状态,因此,对该结构进行抗弯性能的研究是十分必要的。目前,国内外专家、学者对于GFRP管-钢筋/混凝土实心结构及空心结构的轴心受压、偏心受压的研究较多^[14-18],而对于GFRP管-钢筋/混凝土空心结构抗弯性能的研究相对较少^[19-20]。本文通过编制GFRP管-钢筋/混凝土空心构件抗弯非线性分析程序,对其抗弯力学性能进行系统地研究,并通过试验对编制的抗弯非线性分析程序进行验

证,最后,提出适用于GFRP管-钢筋/混凝土空心构件抗弯承载力的计算公式,进一步为该结构在实际应用中提供参考依据。

1 计算分析

1.1 基本假定与本构模型

编制GFRP管-钢筋/混凝土空心受弯构件的非线性分析程序,计算分析空心率、配筋率、GFRP管管壁厚度及混凝土强度等级等参数对其抗弯性能的影响。

1.1.1 基本假定

根据GFRP管-钢筋/混凝土空心构件的受力特点,做如下基本假定:(1)GFRP管与混凝土之间无相对滑移;(2)加载过程中受弯构件符合平截面假定;(3)忽略混凝土收缩及徐变的时随效应;(4)GFRP管、钢筋及混凝土的本构模型均已知。

1.1.2 本构关系

(1) GFRP管约束混凝土本构关系

①受压本构关系

采用Lam等^[21]提出的GFRP约束混凝土应力-应变关系,见图2。其表达式为

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}} \varepsilon_c^2 & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t) \\ \frac{f'_{co} + E_2 \varepsilon_c}{f'_{co} + E_2 \varepsilon_c} & (\varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \end{cases} \quad (1)$$
$$\varepsilon_t = \frac{2f'_{co}}{E_c - E_2}, E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cc}}, \sigma_{Ru} = \frac{E_f}{R} \varepsilon_f$$
$$\begin{cases} \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \frac{\sigma_{Ru}}{f'_{co}}, & \frac{\sigma_{Ru}}{f'_{co}} \geq 0.07 \\ \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1, & \frac{\sigma_{Ru}}{f'_{co}} \leq 0.07 \end{cases}$$

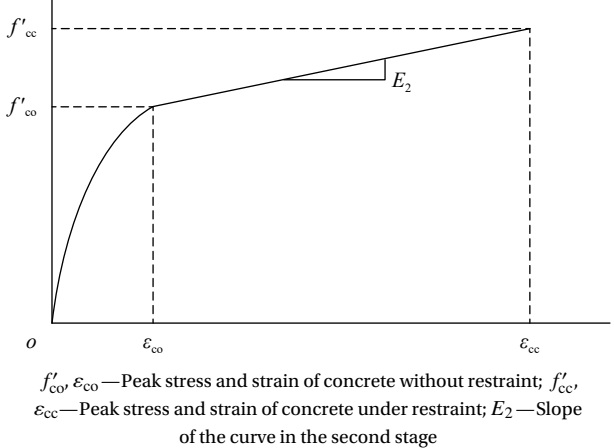


图2 GFRP约束混凝土应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of GFRP confined concrete

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12 \left(\frac{\sigma_{Ru}}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{h, rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45}$$
式中： E_c —混凝土的初始弹性模量； E_2 —曲线在第二阶段的斜率； ε_t —第一和第二阶段分界点处对应的应变值； $f'_{cc}, \varepsilon_{cc}$ —混凝土受约束时的峰值应力和峰值应变； $f'_{co}, \varepsilon_{co}$ —混凝土无约束时的峰值应力和峰值应变； σ_{Ru} —极限环向约束力； $\varepsilon_{h, rup}$ —玻璃纤维材性试验中的断裂应变。

②受拉本构关系

采用 Collins 等^[22]提出的混凝土应力-应变关系，如下：

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c^t \varepsilon_c (\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cr}) \\ \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500(\varepsilon_c - \varepsilon_{cr})}} (\varepsilon_c > \varepsilon_{cr}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： E_c^t —混凝土的切线弹性模量， $E_c^t = 5\,000 \sqrt{f_{ck}}$ ； f_{ck} —混凝土的抗压强度； α_1 —混凝土受压放大系数， $\alpha_1 = 1.2$ ； α_2 —混凝土受拉放大系数， $\alpha_2 = 0.7$ ； f_{cr} —混凝土的开裂应力， $f_{cr} = 0.6 \sqrt{f_{ck}}$ ； ε_{cr} —混凝土开裂应力对应的应变， $\varepsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c^t}$ 。

(2) 内部浇筑混凝土的 GFRP 管本构关系

采用 Fam 等^[23]提出的 GFRP 管的应力-应变关系，如下：

$$\sigma_f = \frac{u_c - u_f}{\frac{R_c}{E_f t_f} + \frac{1 - u_c}{E_c}} \varepsilon_c \quad (3)$$

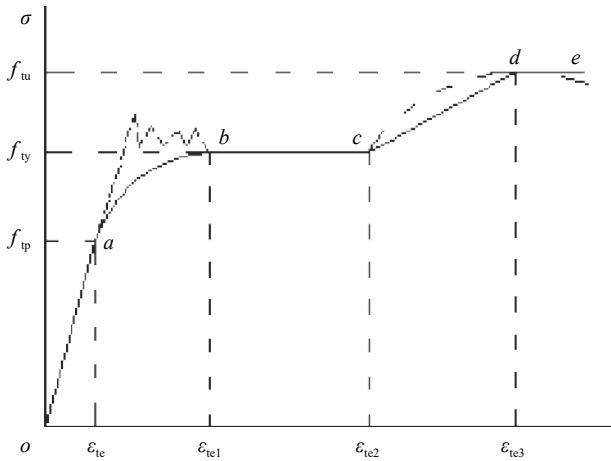
式中： u_c ， E_c —混凝土的泊松比和弹性模量； t_f —GFRP 管管壁厚度； u_f ， E_f —GFRP 管的泊松比和弹性模量； R_c —混凝土截面半径。式中混凝土的参数按照 GFRP 管内浇筑的混凝土的参数选取。

(3) 钢筋本构关系

采用钟善桐^[24]提出的钢筋的应力-应变曲线，见图 3，分为弹性、弹塑性、塑流、强化和二次塑流五个阶段。其应力-应变关系表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} E_t \varepsilon_t, & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{te} \\ -A \varepsilon_t^2 + B \varepsilon_t + C, & \varepsilon_{te} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{te1} \\ f_{ty}, & \varepsilon_{te1} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{te2} \\ f_{ty} \left(1 + 0.6 \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{te2}}{\varepsilon_{te3} - \varepsilon_{te2}} \right), & \varepsilon_{te2} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{te3} \\ 1.6 f_{ty}, & \varepsilon_t > \varepsilon_{te3} \end{cases} \quad (4)$$

式中： f_{ty} —钢材的屈服强度； E_t —钢材的弹性模量； $A = \frac{0.2 f_{ty}}{(\varepsilon_{te1} - \varepsilon_t)^2}$ ； $B = 2A \varepsilon_{te1}$ ； $C = 0.8 f_{ty} + A \varepsilon_{te}^2 - B \varepsilon_{te}$ ； $\varepsilon_{te} = \frac{0.8 f_{ty}}{E_t}$ ； $\varepsilon_{te1} = 1.5 \varepsilon_{te}$ ； $\varepsilon_{te2} = 10 \varepsilon_{te}$ ； $\varepsilon_{te3} = 100 \varepsilon_{te}$ 。



a—Proportional limit; b—Yield lower limit; c—Flow amplitude; d—Ultimate strength; e—Steel failure; f_{tu} —Ultimate strength of steel; f_{ty} —Yield strength of steel; f_{tp} —Strength corresponding to proportional limit of steel; $\varepsilon_{te}, \varepsilon_{te1}, \varepsilon_{te2}, \varepsilon_{te3}$ —Strain corresponding to a, b, c and d, respectively

图 3 钢材的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of steel

1.2 计算原理及步骤

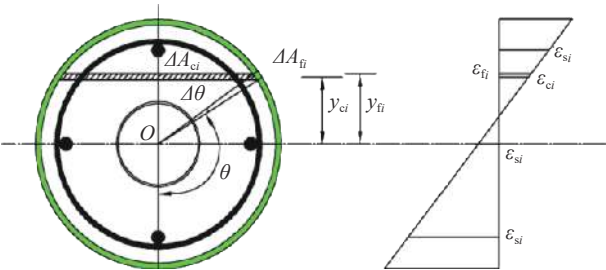
1.2.1 计算原理

采用纤维模型法，分别将 GFRP 管和混凝土截面沿高度方向划分成有限个条带，假设应力在每一条带上均匀分布，截面的平均应变沿截面高度方向成线性分布，截面划分方法见图 4。

将截面划分为 $2n$ 等份，每一份对应圆心角 $\Delta\theta = \pi/n$ ，由平截面假定，可知截面任意一点的应变为 $\varepsilon_i = \varepsilon_o + \varphi y_i$

$$\varphi = \pi^2 u_m / l^2$$

式中： y_i —任意一条带中心和截面形心的距离；



$\Delta\theta$ —Center of each circle corresponds to one corner; θ —Angle; O—Center of a circle; ΔA_{ci} —Center angle $\Delta\theta_i$ corresponding concrete partition unit area; ΔA_{fi} —Center angle $\Delta\theta_i$ corresponding GFRP tube unit area; y_{ci} —Distance from the height center of the i -th strip of concrete to the centroid of the section; y_{fi} —Distance from the height center of the i -th strip of GFRP tube to the centroid of the section; ε_{fi} —Strain of GFRP tube in unit i ; ε_{ci} —Strain of concrete in unit i ; ε_{si} —Strain of steel bar in unit i

图 4 GFRP 管-钢筋/混凝土空心结构截面划分方法及应变图

Fig. 4 Section division method and strain diagram of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow structure

ε_o —截面形心应变; ε_i —第 i 单元应变。

每个单元对应的圆心角:

$\theta_i = i\Delta\theta$

GFRP 管单元面积:

$\Delta A_{fi} = \left(r_c + \frac{t_f}{2}\right)t_f\Delta\theta$

钢筋单元面积:

$\Delta A_{si} = n_s A_s$

混凝土单元面积:

$\Delta A_{ci} = r_c^2 \cos^2(\theta_i - 0.5\Delta\theta)\Delta\theta$

混凝土空心部分单元面积:

$\Delta A_{chi} = r_{ch}^2 \cos^2(\theta_i - 0.5\Delta\theta)\Delta\theta$

由力的平衡条件, 可得到微元划分后的基本迭代方程:

$$N = 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} \Delta A_{fi} + 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \Delta A_{ci} - 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{chi} \Delta A_{chi} + 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{si} \Delta A_{si} \tag{5}$$

$$M = 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} \Delta A_{fi} y_{fi} + 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \Delta A_{ci} y_{ci} - 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{chi} \Delta A_{chi} y_{chi} + 2 \sum_{i=1}^n \sigma_{si} \Delta A_{si} y_{si} \tag{6}$$

式中: N —截面中心轴的轴向力; M —截面中心轴的弯矩; n —GFRP 管和混凝土划分的条带单元的数量; σ_{fi} —GFRP 管划分单元的应力; ΔA_{fi} —圆心角 $\Delta\theta_i$ 所对应的 GFRP 管划分单元面积; σ_{ci} —混凝土划分单元的应力; ΔA_{ci} —圆心角 $\Delta\theta_i$ 所对应的混凝土划分单元面积; σ_{chi} —混凝土空心部分划分单元的应力; ΔA_{chi} —圆心角 $\Delta\theta_i$ 所对应的混凝土空心部分划分单元面积; σ_{si} —钢筋划分单元的应力; ΔA_{si} —圆心角 $\Delta\theta_i$ 所对应的钢筋划分单元面积; y_{fi} —GFRP 管第 i 条带单元高度中心到截面形心的距离; y_{ci} —混凝土第 i 条带单元高度中心到截面形心的距离; y_{chi} —混凝土空心部分第 i 条带单元高度中心到截面形心的距离; y_{si} —钢筋第 i 条带单元

高度中心到截面形心的距离; n_s —在分布有钢筋的单元处的钢筋数量, 取值为 0、1 或 2; A_s —钢筋的截面面积。

1.2.2 计算步骤

利用式 (5) 和式 (6), 采用分级加变形的方法计算弯矩 M 和曲率 φ 的关系曲线, 当达到以下三个失效条件之一: ① GFRP 管底部拉断; ② 混凝土顶部压坏; ③ GFRP 管顶部压坏时, 则停止计算。具体计算步骤如下: (1) 曲率取 $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$; (2) 假设受弯构件截面形心处应变为 ε_c ; (3) 求 GFRP 管、混凝土、混凝土空心部分及钢筋各条带单元的应变; (4) 按 GFRP 管、混凝土、混凝土空心部分及钢筋的应力-应变关系求相应的应力; (5) 计算内力总和, 判断是否满足平衡条件; (6) 若满足内力平衡条件, 则计算内力弯矩, 得出曲率 φ 对应的弯矩 M ; 若不满足平衡条件, 则改变应变 ε_c , 并重复步骤 (3)~(5); (7) 跨中弯矩 M 由弯矩最大截面处的曲率 φ_m 确定, 并计算荷载 P ; (8) 由荷载 P 计算各截面弯矩 M_i , 并计算各分段处的曲率 φ_i ; (9) 由 φ_i 计算变形 δ_i ; (10) 重复步骤 (7)~(9), 直至受弯构件的跨中变形达到预定值为止, 即跨中最大挠度值, 本文取预定值为 40 mm。

2 试验验证

2.1 构件设计

为验证编制的非线性分析程序的正确性, 进行了 7 根受弯构件的试验, 包括 6 根 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件和 1 根 GFRP 管-钢筋/混凝土实心构件。受弯构件示意图见图 5。试验构件 GFRP 管内径为 200 mm, 长度为 1 400 mm, 计算长度为 1 250 mm, 纤维缠绕角度为 80°, 纵筋采用 HRB335 级 (二级) 钢, 直径为 14 mm, 箍筋采用 HPB235 级 (一级) 钢, 直径为 8 mm, 箍筋间距为 150 mm, 主要试验参数见表 1, 材料参数见表 2 和表 3。

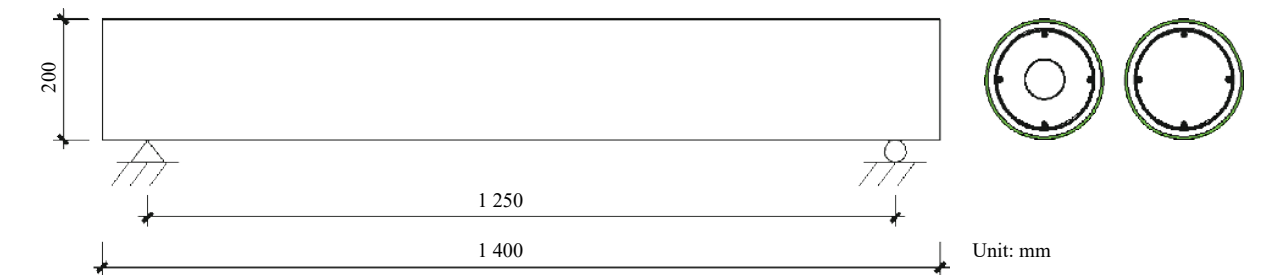


图 5 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件示意图

Fig. 5 Sketch diagram of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending member

表 1 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件试验参数与试验结果

Table 1 Experimental parameters and results of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members				
Serial number	Hollow part diameter/mm	GFRP tube wall thickness/mm	Steel bars	Ultimate bearing capacity/kN
GRCHB1	75	5	4	124
GRCHB2	75	7	4	138
GRCHB3	75	3	4	93
GRCHB4	50	5	4	127
GRCB5	—	5	4	129
GRCHB6	75	5	8	173
GRCHB7	75	5	6	147

表 2 GFRP 管材料性能参数

Table 2 Material properties of GFRP tubes			
Longitudinal direction		Circumferential direction	
Elastic modulus /MPa	Strength/MPa	Elastic modulus /MPa	Strength /MPa
16 680	174	27 210	467

表 3 钢筋性能参数

Table 3 Material properties of steel bars				
Variety	Model	Yield strength/MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%
HPB235	Diameter 8 mm	271.1	361.2	20.9
HRB335	Diameter 14 mm	379.8	494.6	18.6

2.2 试验构件制作

先将 GFRP 管、PVC 管(非受力组件, 作为模板)、纵向钢筋和箍筋按照设计尺寸制作好, 再将纵向钢筋和箍筋绑扎好形成钢筋笼, 为了将 PVC 管固定在钢筋笼中间, 用 3 根长度相等的钢筋焊在箍筋上, 然后把钢筋笼和 PVC 管放入 GFRP 管中, 最后在 GFRP 管和 PVC 管内浇筑混凝土, GFRP 管内浇筑混凝土的厚度由不同管径的 PVC 内管确定(见图 6(b)). 在浇筑混凝土时, 制作 150 mm 混凝土立方体试块, 测得的 28 天混凝土立方体抗压强度为 46.1 MPa。制作过程见图 6。

2.3 测量内容与方法

2.3.1 测量内容

(1) 受弯构件的荷载; (2)GFRP 管的环向应变和纵向应变; (3) 纵向钢筋的应变; (4) 受弯构件的跨中变形。

2.3.2 测量方法

在受弯构件的中部 GFRP 管底部和顶部截面及同一截面纵向钢筋上分别粘贴应变片, 用来测量加载过程中 GFRP 管和纵向钢筋的应变值。在受弯构件的跨中布置位移计测量受弯构件的变形。应变片及位移计的布置见图 7(a)。

试验在 5 000 kN 的压力机上进行, 采用分级加载制, 在加载初期, 每级加的荷载为极限荷载计算值的 1/15, 当荷载达到极限荷载计算值的 70% 左右时, 每级加的荷载为极限荷载计算值的 1/30, 当临近构件破坏时连续缓慢加载, 直到受弯构件破坏。试验装置图见图 7(b)。

2.4 试验现象

由于试验现象大致相似, 因此以试件 GRCHB1 为例, 详细介绍试验现象。在荷载作用初期, 受弯构件表面无明显变化, 受弯构件处于弹性工作阶段, GFRP 管及混凝土各自独立工作, GFRP 管对混凝土无约束作用; 当荷载达到 51% P_u 时, 受弯构件下部受拉侧 GFRP 管表面开始出现白色条纹, 并伴随有轻微的响声, 受弯构件跨中变形增长速度相对于荷载增长速度加大; 随着荷载的增加, 白色条纹范围扩大, 并沿环向向上部延伸; 当荷载达到 89% P_u 时, GFRP 管下部受拉侧跨中纤维颜色变浅, 下部纤维受拉开裂, 裂纹沿环向向上部受压区发展; 加载到极限荷载时, 受弯构件维持平衡状态, 作用在受弯构件上的荷载不断下降, 但变形仍继续增长, 上部受压区 GFRP 管表面出现几道裂纹。由于 GFRP 管管壁厚度越厚其约束作用越大, 故管壁厚度较厚的试件底部受拉

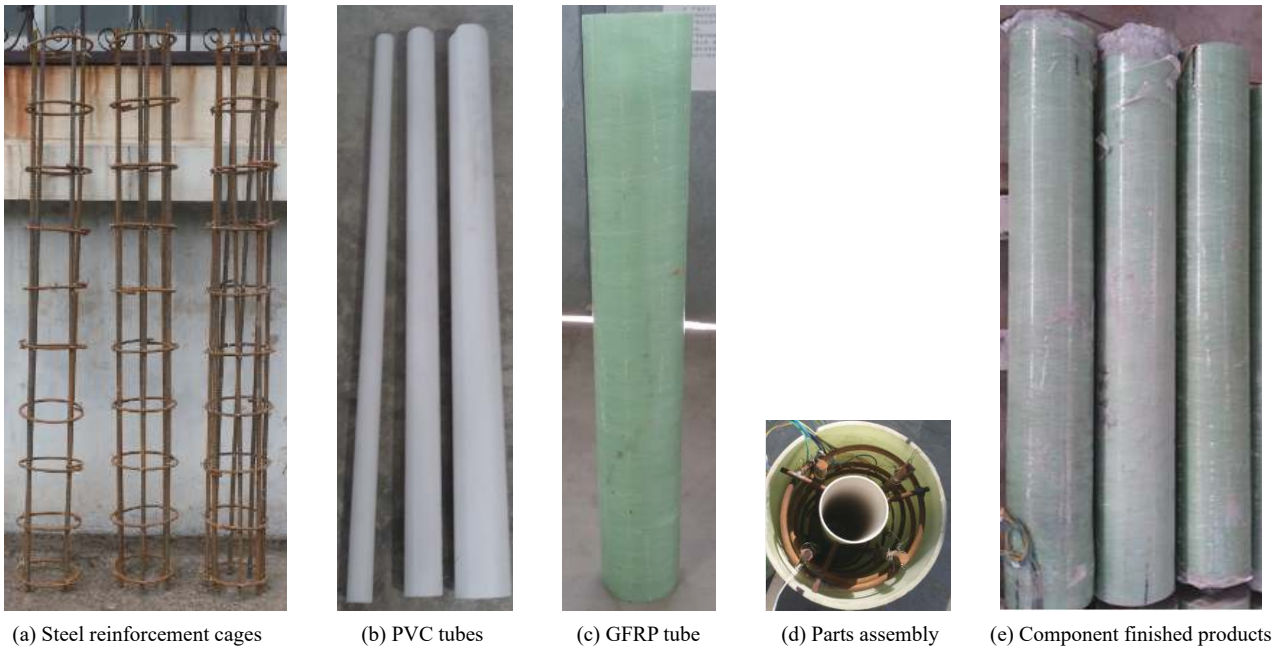
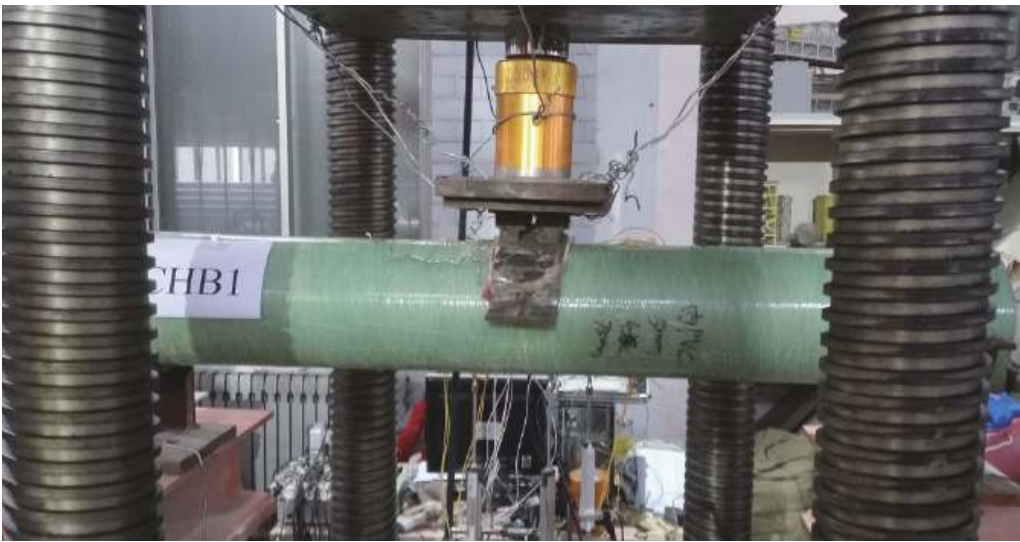
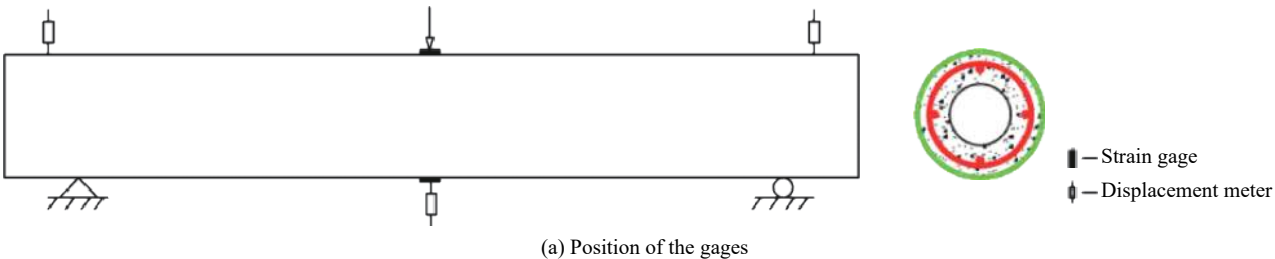


图 6 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件制作过程
Fig. 6 Component production of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members



(b) Test device
图 7 试验装置及测点布置示意图
Fig. 7 Test device and test point arrangement for bending specimens

区裂缝宽度较小，但是延性相对较差。受弯构件的破坏现象见图 8。

2.5 模型验证

利用编制的 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件受



(a) Failure diagram of flexural member



(b) Top pressure area



(c) Bottom tension area

图8 GFRP管-钢筋/混凝土空心受弯构件破坏模式

Fig. 8 Failure patterns of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

弯非线性分析程序, 将计算得到的荷载-变形关系曲线与试验得到的荷载-变形关系曲线进行对比, 见图9。可以看出, 荷载-变形关系曲线随着荷载的增加, 呈现出三阶段的变化规律: 初始阶段的直线段、弹塑性微弯曲段及强化直线段。在荷载作用初期, 受弯构件的变形呈线性增长, 此时构件处于弹性受力阶段, 在这一阶段 GFRP 管和混凝土均单独受力; 当荷载达到 $50\%P_u \sim 55\%P_u$ 时, 变形增长速度开始明显大于荷载增长速度, 此时变形增长较快, 呈非线性增长, 荷载-变形曲线斜率逐渐减小, 受弯构件进入弹塑性工作阶段; 当荷载达到 $80\%P_u \sim 85\%P_u$ 时, 荷载-变形曲线基本呈线性增长。从图9还可以看出, 计算曲线与试验曲线吻合较好, 说明采用纤维模型法编制的程序对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能进行分析是可行的。

3 设计参数对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响

基于编制程序的正确性, 利用该程序对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件的主要影响因素进行分析。设定基本参数: GFRP 管内径为 200 mm, 壁厚为 5 mm, 混凝土 C50, 配筋率为 2.3%, 空心部分半径为 50 mm。计算在其他参数不变的情况下, 分别改变空心率、配筋率、GFRP 管壁厚度和混凝土强度等级, 分别研究这些参数对受弯构件荷载-变形关系曲线的影响。

3.1 空心率对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响

通过编制的程序, 分别计算空心部分混凝土

半径为 0 mm、25 mm、50 mm 和 75 mm 时 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件的荷载-变形关系见图10。可以看出, 在荷载作用初期, 不同空心率的荷载-变形关系曲线基本一致; 当荷载达到 $15\%P_u \sim 20\%P_u$ (75 mm: $22\%P_u$; 50 mm: $17\%P_u$; 25 mm: $15\%P_u$; 0 mm: $15\%P_u$) 时, 空心率的变化开始对荷载-变形曲线产生影响, 空心率小的受弯构件曲线斜率大于空心率大的构件曲线斜率, 说明受弯构件的刚度随着空心率的减小而增大。在相同的变形处, 空心率小的构件荷载大于空心率大的构件。混凝土空心部分半径为 0 mm、25 mm 和 50 mm 的极限承载力比空心部分半径为 75 mm 的极限承载力分别提高了 52.6%、48.1% 和 34.7%, 说明受弯构件的承载力随着空心率的减小而增大。考虑到 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件既要考虑空心部分降低自重, 又要保证承载力不应太低, 因此取空心部分半径在 25~50 mm, 即空心部分半径比在 0.25~0.5 为宜。

3.2 配筋率对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响

通过编制的程序, 分别计算配筋率为 1.17%、1.69%、2.30%、3.00% 和 3.80% 时的荷载-变形关系见图11。可以看出, 在荷载作用初期, 不同配筋率的荷载-变形关系曲线基本一致; 当荷载达到 $15\%P_u \sim 25\%P_u$ (1.17%: $23\%P_u$; 1.69%: $21\%P_u$; 2.30%: $19\%P_u$; 3.00%: $17\%P_u$; 3.80%: $16\%P_u$) 时, 配筋率的变化开始对荷载-变形曲线产生影响, 配筋率较高的受弯构件曲线斜率大于配筋率较低的构件, 说明受弯构件的刚度随着配筋率的增加而增大。在相同的变形处, 配筋率较高的构件荷载大于配筋率较低的构件。配筋率为 1.69%、2.30%、3.00% 和 3.80% 的极限承载力比 1.17% 的极限承载力分别提高了 9.9%、19.8%、30.6% 和 42.5%, 说明受弯构件的承载力随着配筋率的增加而增大。

3.3 GFRP 管壁厚对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响

通过编制的程序, 分别计算 GFRP 管壁厚为 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm 时的荷载-变形关系, 见图12。可以看出, 在荷载作用初期, 不同 GFRP 管壁厚度的荷载-变形关系曲线基本一致; 当荷载达到 $30\%P_u \sim 40\%P_u$ (3 mm: $39\%P_u$; 4 mm: $36\%P_u$; 5 mm: $34\%P_u$; 6 mm: $32\%P_u$; 7 mm: $30\%P_u$) 时, GFRP 管壁厚度的变化开始对荷载-变形曲线产生影响, 管壁较厚的受弯构件

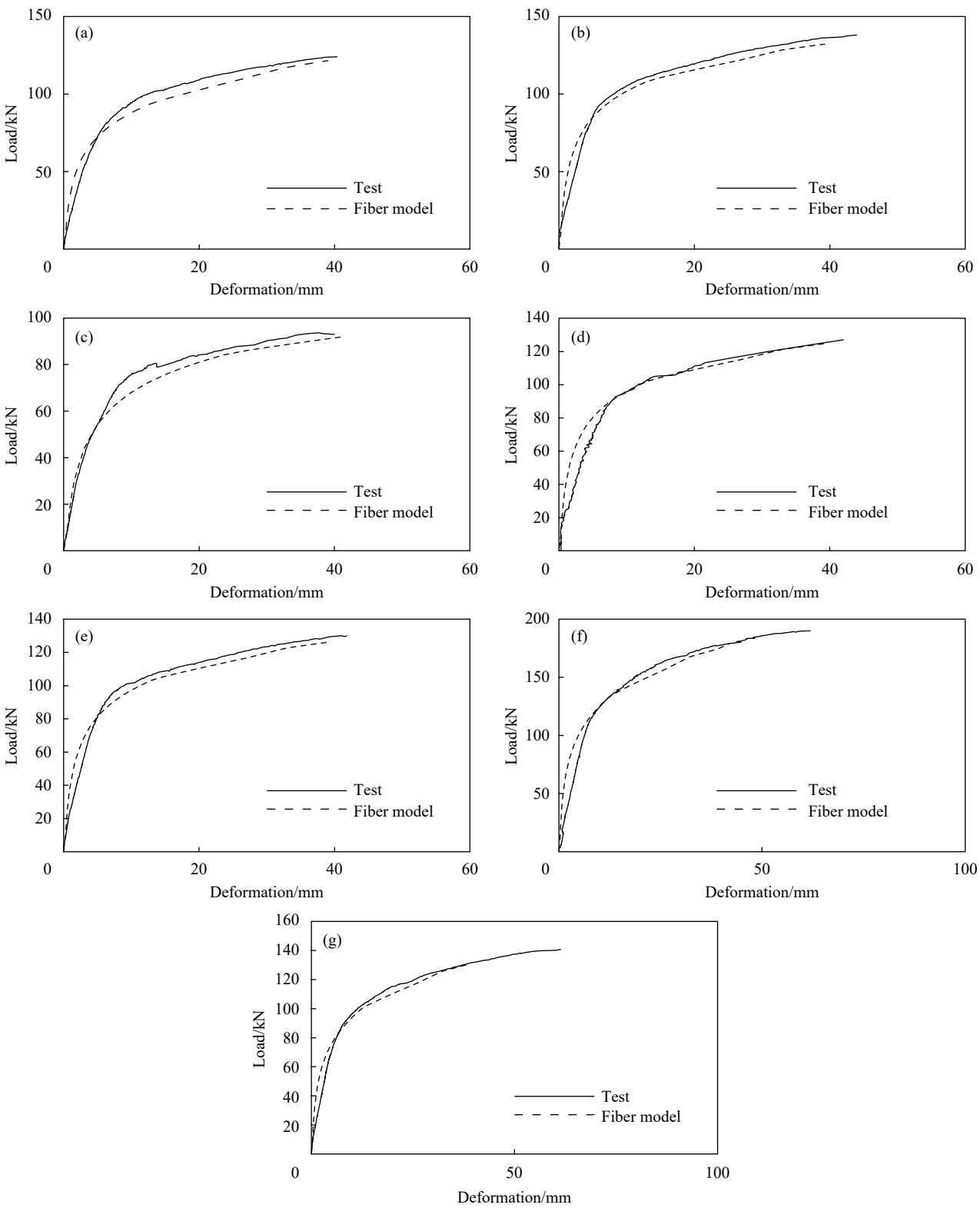


图9 GFRP管-钢筋/混凝土空心受弯构件计算结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison between calculation and experimental results of the GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

曲线斜率大于管壁较薄的构件，说明受弯构件的刚度随着 GFRP 管管壁厚度的增大而增大。在相同的变形处，管壁厚度较厚的构件荷载大于厚度

较薄的构件。GFRP 管管壁厚度为 4、5、6 和 7 mm 的极限承载力比 3 mm 的极限承载力分别提高了 8.6%、19.3%、29.7% 和 41.8%，说明受弯构件的承

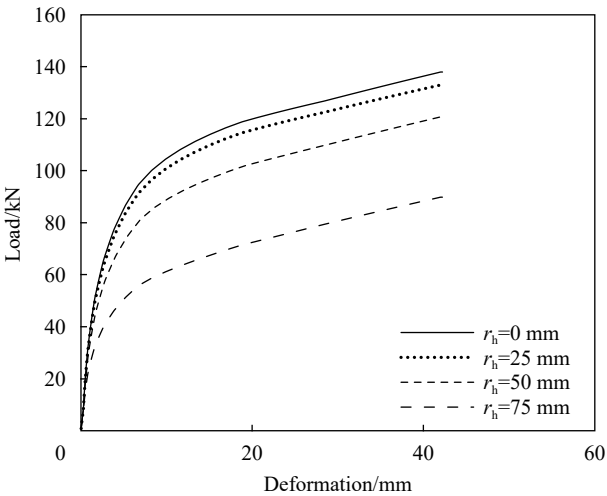


图 10 空心率对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响
Fig. 10 Effect of hollow ratio on flexural behavior of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

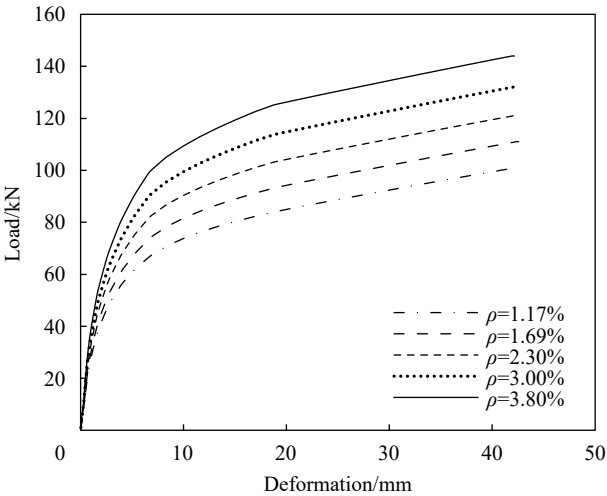


图 11 配筋率对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响
Fig. 11 Effect of reinforcement ratio on flexural behavior of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

载力随着 GFRP 管管壁厚度的增大而增大。

3.4 混凝土强度对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响

通过编制的程序，分别计算混凝土强度为 C30、C35、C40、C45 和 C50 的荷载-变形关系，见图 13。可以看出，在荷载作用初期，不同混凝土强度的荷载-变形关系曲线基本一致；当荷载达到 $15P_u \sim 20P_u$ (C30: $21P_u$; C35: $20P_u$; C40: $19P_u$; C45: $18P_u$; C50: $17P_u$) 时，混凝土强度的变化开始对荷载-变形曲线产生影响，混凝土强度较高的受弯构件曲线斜率大于混凝土强度较低的构件，说明受弯构件的刚度随着混凝土强

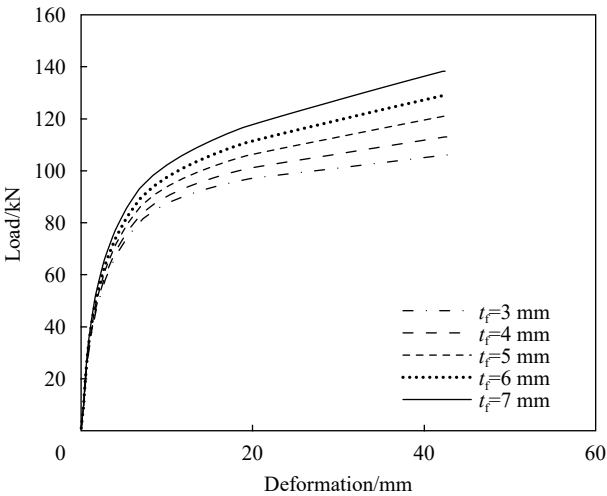


图 12 GFRP 管管壁厚度对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响
Fig. 12 Effect of thickness of GFRP tubes on flexural behavior of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

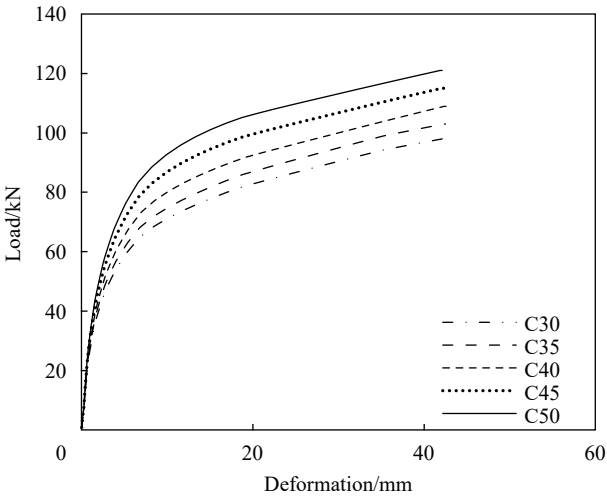


图 13 混凝土强度对 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的影响
Fig. 13 Effect of concrete strength on flexural behavior of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members

度的提高而增大。在相同的变形处，混凝土强度较高的构件荷载大于混凝土强度较低的构件。混凝土强度为 C35、C40、C45 和 C50 的极限承载力比 C30 的极限承载力分别提高了 5.0%、11.1%、16.9% 和 22.8%，说明受弯构件的承载力随着混凝土强度的提高而增大。

由以上分析可知，GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件的承载力随空心率的减小而增大，当空心部分混凝土半径从 75 mm 变为 0 mm 时，承载力提高约 53%；承载力随配筋率的增大而增加，当配筋率从 1.17% 变为 3.80% 时，承载力提高约

43%; 承载力随 GFRP 管壁厚度的增加而增大, 当壁厚从 3 mm 变为 7 mm 时, 承载力提高约 42%; 承载力随混凝土强度的提高而增大, 当混凝土强度从 C30 变为 C50, 承载力提高约 23%。对受弯构件承载力影响较大的是空心率, 其次是配筋率和 GFRP 管管壁厚度, 最后是混凝土强度等级。考虑到 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件既要考虑空心部分降低自重, 又要保证承载力不应太低, 因此空心部分半径比在 0.25~0.5 为宜, 可以适当提高配筋率、GFRP 管管壁厚度或混凝土强度等级以弥补空心构件的抗弯承载力。

4 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯承载力计算

根据 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件的结构特点和抗弯性能, 本文采用极限平衡法, 给出 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件的抗弯承载力计算公式。

4.1 极限平衡法

根据 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件的结构特点, 做基本假定见 1.1.1 节。

中和轴通过 GFRP 管, 混凝土上部受压区边缘达到极限压应变, 同时下部受拉区 GFRP 管边缘纤维断裂, 底部受拉钢筋屈服。受弯构件正截面抗弯承载力计算见图 14。

受压区混凝土合力:

$$C_c = f_{cc} \left[r_f^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]$$

受压区混凝土空心部分合力:

$$C_{ch} = f_{cc} \left[r_h^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]$$

受压区 GFRP 管合力:

$$C_f = t_f r_f (\pi - 2\alpha) f_{fc} / 2$$

受压区钢筋合力:

$$C_{rt} = f_r A_r$$

受拉区 GFRP 管合力:

$$T_f = t_f r_f (\pi + 2\alpha) f_{ft} / 2$$

底部受拉钢筋合力:

$$T_{rb} = f_r A_r$$

中部受拉钢筋合力:

$$T_{rm} = 2 f_r A_r \frac{x}{x + r_f - a_{rb}}$$

受压区混凝土截面面积:

$$A_c = r_f^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)$$

受压区混凝土截面面积矩:

$$S_c = \int_{r_f \sin \alpha}^{r_f} y \left(2 \sqrt{r_f^2 - y^2} \right) dy = \frac{2}{3} r_f^3 \cos^2 \alpha$$

混凝土形心到中和轴的距离:

$$d_c = \frac{S_c}{A_c} = \frac{2 r_f \cos^3 \alpha}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)}$$

混凝土空心部分形心到中和轴的距离:

$$d_{ch} = \frac{S_{ch}}{A_{ch}} = \frac{2 r_h \cos^3 \alpha}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)}$$

受压区 GFRP 管形心到中和轴的距离:

$$d_{fc} = \frac{2 r_f \cos \alpha}{\pi - 2\alpha}$$

受拉区 GFRP 管形心到中和轴的距离:

$$d_{ft} = \frac{2 r_f \cos \alpha}{\pi + 2\alpha}$$

由力的平衡条件得

$$(C_c - C_{ch}) + C_f + C_{rt} = T_f + T_{rm} + T_{rb} \tag{7}$$

受弯构件极限弯矩为

$$M_u = M_f + M_c + M_r = (C_f d_{fc} + T_f d_{ft}) + (C_c d_c - C_{ch} d_{ch}) + [C_{rt} Z + T_{rm} (x - a_{rt}) + T_{rb} (r_f + x - a_{rb})] \tag{8}$$

式中: ϵ_{fu} —GFRP 管极限拉应变; ϵ_{cu} —混凝土极限压应变; ϵ_{rt} —受压区钢筋的应变; ϵ_{rm} —受拉区中部钢筋的应变; ϵ_{rb} —受拉区底部钢筋的应变; t_f —GFRP 管壁厚; r_f —GFRP 管半径; f_{fc} —GFRP 管抗压强度; f_{ft} —GFRP 管抗拉强度; r_h —混凝土空心部分半径; f_{cc} —混凝土极限压应力; f_r —钢筋的抗拉强度设计值; f_y —钢筋的屈服强度; $\alpha =$

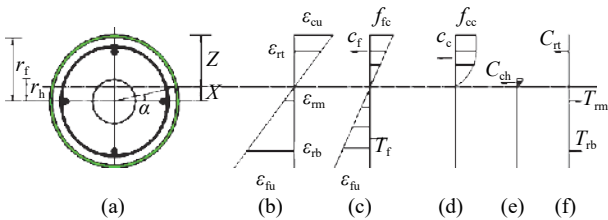


图 14 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件正截面抗弯承载力计算简图
Fig. 14 Calculation diagram of flexural capacity of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members
(a) Section geometry; (b) Section strain; (c) Internal force of GFRP tube;
(d) Internal force of concrete; (e) Internal force of hollow concrete;
(f) Internal force of steel bars)

$\arcsin \frac{x}{r_f}$; a_{rt} —受压区钢筋合力点到 GFRP 管外壁的垂直距离; a_{rb} —受拉区钢筋合力点到 GFRP 管外壁的垂直距离。

4.2 公式验证

为了验证极限平衡法建立的 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯承载力计算公式的正确性, 将计算结果与试验结果进行比较, 如表 4 所示。可知, 极限平衡法计算结果与试验值相比, 平均误差为 1.028, 均方差为 0.042, 在理想范围内。可见, 计算结果与试验结果吻合较好, 说明建立的 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯承载力计算公式是合理的。

表 4 GFRP 管-钢筋/混凝土空心受弯构件试验结果与计算结果

Table 4 Calculated results and tested results of GFRP tube filled with steel bars/concrete hollow bending members			
Specimen	M^{exp}/kN	M^{cal}/kN	M^{exp}/M^{cal}
GRCHB1	38.75	37.39	1.036
GRCHB2	43.13	42.99	1.003
GRCHB3	29.06	27.54	1.055
GRCHB4	39.69	37.57	1.056
GRCB5	40.31	37.80	1.066
GRCHB6	54.06	55.83	0.968
GRCHB7	45.94	45.89	1.001
BRCS(T)-5 ^[1]	25.50	24.18	1.055
GRCB-3 ^[14]	51.30	50.91	1.008

Notes: M^{exp} —Tested bending moment; M^{cal} —Calculated bending moment.

5 结论

通过编制非线性分析程序、试验验证及理论分析相结合的方法, 对玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 管-钢筋/混凝土空心构件的抗弯性能进行研究。

(1) 利用编制的 GFRP 管-钢筋/混凝土空心构件抗弯非线性计算程序, 计算结果与试验结果吻合较好, 说明利用该程序对该构件进行抗弯性能分析是可行的。受弯构件荷载-变形关系曲线随着荷载的增加, 呈现出三阶段的变化规律: 初始阶段的直线段、弹塑性微弯曲段及强化直线段。

(2) 抗弯承载力随空心率的减小、配筋率的提高、GFRP 管管壁厚度的增加及混凝土强度的增大而增大, 空心率对构件抗弯承载力影响最大, 其次是配筋率和 GFRP 管管壁厚度, 最后是混凝土强度等级, 空心部分半径比在 0.25~0.5 为宜, 可以适当提高配筋率、GFRP 管管壁厚度或混凝土

土强度等级以弥补空心构件抗弯承载力。

(3) 采用极限平衡法建立抗弯承载力计算公式, 计算结果与试验结果吻合较好, 可以为该结构在实际应用中提供参考依据。

参考文献:

[1] 王连广, 陈百玲. GFRP管及钢管型钢混凝土结构[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.
WANG Lianguang, CHEN Bailing. Steel reinforced concrete-filled glass fiber reinforced polymer or steel tubular structures[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2013(in Chinese).

[2] 田会文, 周臻, 陆纪平, 等. 纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1629-1638
TIAN Huiwen, ZHOU Zhen, LU Jiping, et al. Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer-confined ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1629-1638.

[3] 韩振宇, 张鹏, 郑天宇, 等. 纤维增强树脂复合材料网络结构成型工艺研究进展[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 845-858.
HAN Zhenyu, ZHANG Peng, ZHENG Tianyu, et al. Research poogress of forming proming process of fiber reinforced polymer composite grid structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 845-858(in Chinese).

[4] 厉嘉鑫. GFRP管约束型钢再生混凝土组合柱轴压性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LI Jiaxin. Research on axial compression performance of GFRP tube filled with steel reinforced recycled concrete composite columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019(in Chinese).

[5] 李峰, 刘加顺, 张东东, 等. GFRP管-铝合金管纤维缠绕齿连接接头拉伸试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2678-2688.
LI F, LIU J S, ZHANG D D, et al. Tensile experiments on the tooth connections with filament winding between GFRP tube and aluminum alloy tube[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 2678-2688(in Chinese).

[6] IDRIS Y, OZBAKKALOGGLY T. Flexural behavior of FRP-HSC-steel double skin tubular beams under reversed-cyclic loading[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 87(2): 89-101.

[7] 樊彬彬, 单鲁阳, 章雪峰. GFRP管约束混凝土短柱滞回性能的有限元分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(2): 567-570.
FAN Binbin, SHAN Luyang, ZHANG Xuefeng. Finite element analysis of hysteretic behavior of concrete short columns confined with GFRP tube[J]. Building Structure, 2018, 48(2): 567-570(in Chinese).

[8] SUN H P, JIA M M, ZHANG S M. Study of buckling-re-

- strained braces with concrete infilled GFRP tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 136(3): 16-33.
- [9] HUANG Liang, ZHANG Chen, YAN Libo. Flexural behavior of U-shape FRP profile-RC composite beams with inner GFRP tube confinement at concrete compression zone[J]. *Composite Structures*, 2018, 184(1): 674-687.
- [10] HASSAN W M, HODHOD O A, HILAL M S, et al. Behavior of eccentrically loaded high strength concrete columns jacketed with FRP laminates[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138(5): 508-527.
- [11] REALFONSO R, NAPOLI A. Confining concrete members with FRP systems: predictive vs design models[J]. *Composite Structures*, 2013, 104(5): 304-319.
- [12] YEH F Y, CHANG K C. Size and shape effects on strength and ultimate strain in FRP confined rectangular concrete columns[J]. *Journal of Mechanics*, 2012, 28(4): 677-690.
- [13] WEI Y Y, WU Y F. Unified stress-strain model of concrete for FRP-confined columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1): 381-392.
- [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, 2009.
- QIN Guopeng. Mechanical behaviors study on GFRP tube filled with reinforced concrete members[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009(in Chinese).
- [15] WANG L G, HAN H F, LIU P. Behavior of reinforced concrete-filled tube GFRP tubes under eccentric compression loading[J]. *Materials and Structures*, 2016, 7(9): 2819-2827.
- [16] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Unified stress-strain model for FRP and actively confined normal-strength and high-strength concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 19(4): 1-13.
- [17] CASCARDI Alessio, MICELLI Francesco, AIELLO Antonietta. Unified model for hollow columns externally confined by FRP[J]. *Engineering Structures*, 2016, 1(111): 119-130.
- [18] ABDALLAH Hussein, SHAZLY Maha, MOHAMED Mostafa, et al. Nonlinear finite element analysis of short and long reinforced concrete columns confined with GFRP tubes[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(13): 972-987.
- [19] CHEN B L, WANG L G. Experimental study of flexural behavior of splicing concrete-filled GFRP tubular composite members connected with steel bars[J]. *Steel and Composite Structures*, 2015, 18(5): 1129-1144.
- [20] 李阳. GFRP管钢筋混凝土梁受力性能分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- LI Yang. Research on mechanical properties of the reinforced concrete filled GFRP tube beam[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013(in Chinese).
- [21] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6): 471-489.
- [22] COLLINS M P, MITCHELL D. Prestressed concrete structures[M]. Canada: Response Publications, 1997.
- [23] FAM A Z, RIZKALLA S H. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 451-461.
- [24] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994.
- ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1994(in Chinese).