

GFRP管-配筋空心高强混凝土 轴压短柱有限元分析

杨志坚,徐 聪

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 为提高 PHC 管柱在海洋环境中的耐腐蚀性和承载力,将 PHC 管柱置入 GFRP 管混凝土截面中,形成 GFRP 管-配筋空心高强混凝土柱,并研究其短柱的轴压性能。**方法** 利用 ABAQUS 软件建立组合柱的有限元模型,验证模型可靠性,对典型构件的荷载-位移曲线、各组成部分的内力分担比例、纵向应力变化进行分析;研究 GFRP 管壁厚度、夹层混凝土抗压强度、普通钢筋直径对构件承载力与提高系数的影响。**结果** 随着 GFRP 管壁厚度、夹层混凝土强度及普通钢筋直径的增加,构件的轴压承载力提高率分别在 17.4%~44.7%、3.3%~9.7% 以及 3.8%~7.6%,极限轴向位移提高率分别在 145.2%~182.8%、-1.2%~-8.4% 以及 3.3%~1.4%;构件提高系数随 GFRP 管壁厚度增加显著提高。**结论** GFRP 管-配筋空心高强混凝土柱有较高的轴压承载力和轴向变形能力;在三种参数中,GFRP 管壁厚度是影响构件的轴压承载力、轴向变形能力以及构件各组成部件间组合作用的重要参数。

关键词 预应力高强混凝土管柱;GFRP 管;空心混凝土柱;轴压性能;有限元

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Axial Compression Behavior of GFRP Tube-Reinforced Hollow High-strength Concrete Short Column

YANG Zhijian, XU Cong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to improve the corrosion resistance and load bearing capacity of PHC pipe columns in marine environment, PHC pipe columns are placed into GFRP tubes to form GFRP tube-reinforced hollow high-strength concrete columns. The finite element model of the combined column is established by ABAQUS software, and to verify the reliability of the model and to study

收稿日期:2022-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52178148,51808353);辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10);辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0598)

作者简介:杨志坚(1984—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

the axial compression behavior of the short column. The load-displacement curves, internal force sharing ratio of each member and longitudinal stress variation of typical components are analyzed. The effects of GFRP tube thickness, compressive strength of sandwich concrete, and diameter of ordinary steel reinforcement on the bearing capacity and improvement factor of the components are investigated. It is found that the proposed composite column has high axial compressive bearing capacity and axial deformation capacity; as the GFRP tube thickness, sandwich concrete strength and ordinary reinforcement diameter increase, the compressive bearing capacity improvement rates of the components range from 17.4% to 44.7%, 3.3% to 9.7% and 3.8% to 7.6%, respectively, and the ultimate axial displacement improvement rates range from 145.2% to 182.8%, -1.2% to -8.4% and 3.3% to 1.4%, respectively. The component enhancement factor increases significantly with the GFRP tube thickness; among the three parameters, the GFRP tube thickness is the main parameter that affects the bearing capacity, axial deformation capacity and the combination effect.

Key words: PHC pipe column; GFRP tube; hollow concrete columns; axial compression strength; finite element method

预应力高强度混凝土 (Prestressed High-strength Concrete, PHC) 管桩以其强度高、经济性好、施工便捷等优点常被运用在港口码头、跨海大桥、海洋石油平台和海洋风力发电平台等海洋工程的基础结构中^[1-2]。高氯离子浓度环境是导致 PHC 管桩结构腐蚀、耐久性降低的主要原因之一^[3]。纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 因其耐腐蚀、轻质高强、施工便捷等优点,正逐渐被应用于海洋工程领域中^[4-5]。

T. Ozbakkaloglu 等^[6]进行了 83 个圆形 FRP 约束混凝土柱的轴压试验,研究表明在侧向围压的临界值内,FRP 约束高强混凝土柱表现出良好的延性行为,而在相同的约束比下,FRP 约束混凝土的轴压性能随着混凝土强度的增加而退化。Q. G. Xiao 等^[7]提出了一个适用于高强混凝土和普通混凝土的统一的 FRP 约束混凝土模型。J. J. Liao 等^[8]对大量 FRP 约束超高强混凝土柱进行轴压试验,提出了面向设计的应力-应变模型。为了节约材料、减轻结构自重, Y. Kusumawardaningsiha 等^[9]通过试验发现 FRP 的约束提高了空心钢筋混凝土柱的承载力与延性,并且圆空心柱的力学性能要优于方空心柱。张霓等^[10]对 GFRP 管钢筋混凝土

土空心柱进行轴压试验和有限元分析,研究表明 GFRP 管钢筋混凝土空心柱的承载力与空心率呈负相关,与管壁厚度、混凝土强度和配筋率呈正相关,其中空心率影响最大。G. P. Lignola 等^[11-12]提出了适用于 FRP 约束方、圆空心混凝土柱的应力-应变分析模型。A. Cascardi 等^[13]根据更新几何参数的迭代方法提出了一种适用于 FRP 约束圆形和方形空心混凝土柱的应力-应变分析模型。R. Jamatia 等^[14]采用有限元软件分析 FRP 约束刚度对中空柱强度的影响和破坏模式进行研究,研究表明低围压下,混凝土呈脆性破坏,而在高围压下,混凝土呈延性破坏。B. Feng 等^[15]通过 GFRP 管约束离心混凝土柱压缩试验确定了约束系数。

综上,为防止 PHC 管柱在设计使用年限内受到海洋环境严重腐蚀,笔者结合 FRP 材料的优点与已有 FRP 约束混凝土的研究成果,提出将 PHC 管柱置于 GFRP 管中,组合形成一种新型的 GFRP 管-配筋空心高强混凝土构件,通过 ABAQUS 有限元软件对组合柱的轴压受力全过程进行分析,并研究 GFRP 管壁厚度、夹层混凝土抗压强度、配置普通钢筋直径对构件轴压性能的影响,该结构不仅可以增强 PHC 管柱在海洋环境下的

耐腐蚀性,而且还可以提高其轴压承载力与轴向变形能力。

1 有限元模型建立

1.1 构件设计

共建立 13 个构件的有限元分析模型,构件高度为 1 200 mm;PHC 管柱内部配置 6 根直径为 7.1 mm 的预应力钢棒(6 ϕ 7.1);螺旋箍筋配置为 ϕ 4@45,箍筋约束范围直径为 230 mm,屈服强度为 650 MPa。主要变量:GFRP 管壁厚度(4 mm,6 mm,8 mm);PHC 管柱内配置(6 Φ 14,6 Φ 16,6 Φ 18,6 Φ 20 或未配置普通钢筋);夹层混凝土强度等级(C60,C70,C80,C90),构件各组成部分及截面详细尺寸见图 1。试件编号为“外管厚度-普通钢筋直径-混凝土强度等级”,如 T6-S16-C80,为 GFRP 管厚度为 6 mm-配置 6 根 HRB400 级且直径为 16 mm 的普通钢筋-夹层混凝土强度等级为 C80 的试件。

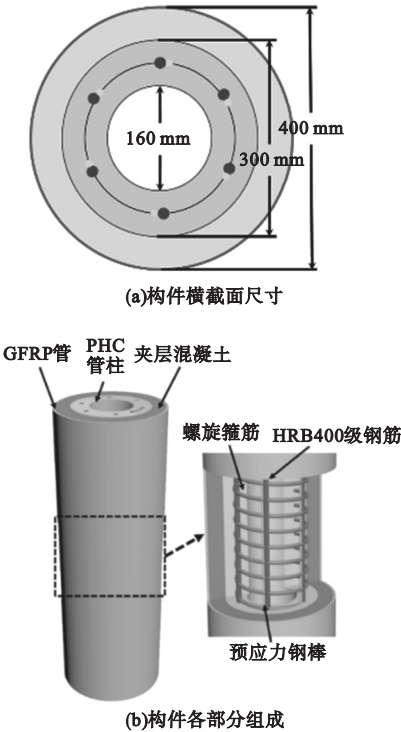


图 1 GFRP 管-配筋空心高强混凝土短柱

Fig. 1 GFRP tube-reinforced hollow high-strength concrete column

1.2 材料本构关系

混凝土选用塑性损伤模型,混凝土受压本构模型采用 J. G. Teng^[16]提出的 FRP 约束混凝土应力-应变模型,混凝土塑性损伤模型中五个参数的定义:膨胀角 ψ 为 $30^{\circ} \sim 36^{\circ}$, $f_{b0}/f_{c0}=1.16$, 偏心率 $\theta=0.1$, 第二应力不变量比值 $K_c=0.725$, 黏滞系数 $\mu=0.0001$ 。混凝土受拉属性采用断裂能 G_F 确定^[17],具体公式如下:

$$f_t=1.4\left(\frac{f_{co}^{\prime}-8}{10}\right)^{2/3}$$

(1)

$$G_F=(0.0469d_a^2-0.5d_a+26)\left(\frac{f_{co}^{\prime}}{10}\right)^{0.7}$$

(2)

式中: f_t 为混凝土受拉屈服应力; f_{co}^{\prime} 为混凝土轴心抗压强度; d_a 为混凝土粗骨料直径,取 20 mm。

普通钢筋采用五折线钢材本构模型,预应力钢筋与箍筋采用双线性随动强化模型。GFRP 材料的弹性段属性通过“Lamina”属性定义,具体参数见表 1。

表 1 GFRP 的弹性属性

Table 1 The GFRP elastic properties

| E_1/MPa | E_2/MPa | n_{u12} | G_{12}/MPa | G_{13}/MPa | G_{23}/MPa |
|------------------|------------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 42 100 | 12 600 | 0.3 | 3 600 | 3 600 | 1 000 |

注: n_{u12} 为泊松比; E_1 、 E_2 为材料两个方向的弹性模量; G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 为材料的三个方向的剪切模量。

材料断裂失效采用 Hashin Damage 准则定义(见表 2);基于 F. Nunes^[18]所提出损伤参数的计算方法定义 Hashin 损伤准则所需输入参数(见表 3);GFRP 采用分层交替铺设方式,每层厚度为 0.4 mm,缠绕角度为 $\pm 60^{\circ}$ 。

表 2 GFRP 的 Hashin 准则损伤参数

Table 2 Hashin damage parameters of GFRP MPa

| $f_{L,t}$ | $f_{L,c}$ | $f_{T,t}$ | $f_{T,c}$ | $f_{L,s}$ | $f_{T,s}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 765 | 588 | 100 | 100 | 50 | 50 |

注: $f_{L,t}$ 、 $f_{L,c}$ 、 $f_{L,s}$ 分别为纵向拉伸、压缩、剪切强度; $f_{T,t}$ 、 $f_{T,c}$ 、 $f_{T,s}$ 为横向拉伸、压缩、剪切强度。

表3 GFRP 的 Hashin 准则损伤演化参数

| Table 3 Hashin damage evolution of GFRP N/m | | | |
|---|------------|------------|------------|
| $G_{F,Lt}$ | $G_{F,Lc}$ | $G_{F,Tt}$ | $G_{F,Tc}$ |
| 6.9 | 5.2 | 0.1 | 3.6 |

注: $G_{F,Lt}$ 、 $G_{F,Lc}$ 分别为纵向拉伸断裂能、压缩断裂能;
 $G_{F,Tt}$ 、 $G_{F,Tc}$ 分别为横向拉伸断裂能、压缩断裂能。

1.3 单元选取与网格划分

混凝土采用 C3D8R 实体单元,普通钢筋、预应力钢筋、箍筋采用 Truss 桁架单元, GFRP 管采用 S4R 壳单元。网格划分采用结构化网格划分模型,为了保证收敛性,使混凝土与 GFRP 的网格最大程度对齐,具体的单元选取与网格划分见图2。

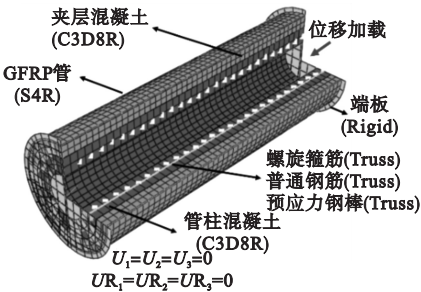


图2 有限元模型网格划分
Fig. 2 FEM model meshing

1.4 接触与边界条件

假设混凝土与预应力管柱之间无相对滑移,两者之间采用 Tie 连接; GFRP 管采用 Tie 连接,与 GFRP 管与夹层混凝土之间法向方向采用硬接触,切线方向采用库

仑摩擦模型,摩擦系数为 0.6;普通钢筋、预应力钢筋、箍筋嵌入混凝土中;端板与混凝土、GFRP 管采用硬接触。模型分析共设置两个分析步:①采用降温法对预应力钢筋施加预应力^[19];②在底部平面设置为固定约束,采用施加位移的方式加载。

2 有限元模型验证

通过 3 个试件的轴压试验验证有限元分析模型的准确性,其主要参数为 GFRP 管壁厚度(4.1 mm,6.1 mm,8.4 mm),各试件具体尺寸参数与有限元模型相同。

2.1 荷载-轴向位移曲线对比

有限元分析与试验得到的峰值承载力如表4所示。计算可得,两者的平均误差为 2.3%,方差为 0.021。图3为试验与有限元结果的荷载-位移曲线对比,其中, $f_{co,o}$ 、 $f_{co,i}$ 分别为夹层混凝土、预应力高强混凝土管柱混凝土的圆柱体抗压强度。从图中可以看出,有限元曲线与试验曲线基本吻合,表明有限元模型比较准确,可以用作进一步分析。

表4 试验值与有限元模拟值对比

| Table 4 Comparison of experimental and FEM results | | | |
|--|----------------|-----------------|------------------------|
| 试件编号 | $N_{u,FEA}/kN$ | $N_{u,test}/kN$ | $N_{u,FEA}/N_{u,test}$ |
| T4 | 7 353.0 | 7 279.0 | 1.010 |
| T6 | 8 652.0 | 8 619.5 | 1.004 |
| T8 | 9 825.5 | 9 551.0 | 1.029 |

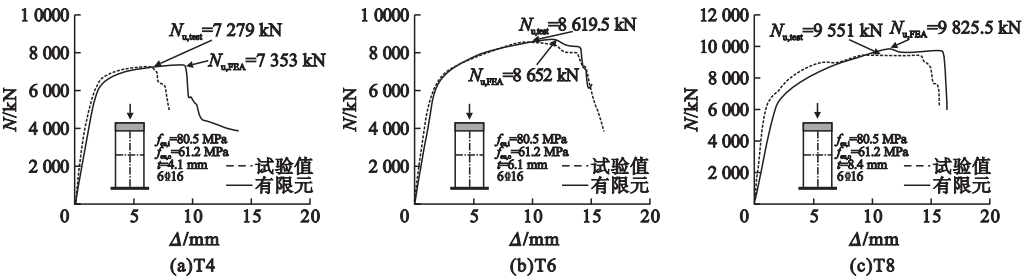


图3 试验与有限元结果的荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of test load-displacement curves with FEM results

2.2 试件破坏形态对比

图4为 T6 试件试验破坏形态与有限元模拟结果的对比。试件在中截面位置处 GFRP 管

延斜向约 60°角撕裂失效,此处夹层混凝土发生受压破坏并出现竖向裂缝;靠近 PHC 管柱下部 1/3 位置处的混凝土发生压溃破坏。

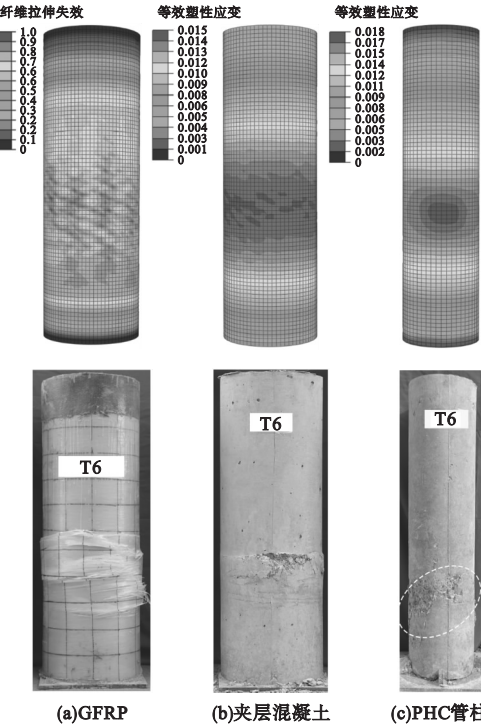


图4 试件T6的试验破坏形态与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental failure modes and FEA results for T6

将有限元结果与试验结果对比可得,GFRP管的纤维受拉损伤处主要集中在构件中部,且沿纤维绕角度分布;夹层混凝土和PHC管柱的等效塑性应变最大值都位于GFRP管破坏位置,与试验结果基本吻合。

2.3 受力全过程分析

图5为典型试件T8-S16-C80的荷载-位移曲线,可将曲线划分为4个阶段:弹性段(OA段)、弹塑性段(AB段)、强化段(BC段)、下降段(CD段)。表5为各特征点下构件各组成部分分担内力比例。

弹性段,GFRP管未发挥约束作用,试件中混凝土、钢筋、GFRP管均处于弹性状态,到达A点时,荷载为峰值荷载的59%,试件处于极限弹性状态,中截面的夹层混凝土分担纵向荷载比例为55.4%,夹层混凝土承担主要纵向荷载。

弹塑性段,曲线到达A点后,管柱混凝土进入塑性阶段,混凝土与GFRP管产生相

互作用,夹层混凝土强度提升,夹层混凝土仍处于弹性状态。荷载在B点时达到峰值荷载的71%,夹层混凝土进入塑性阶段。

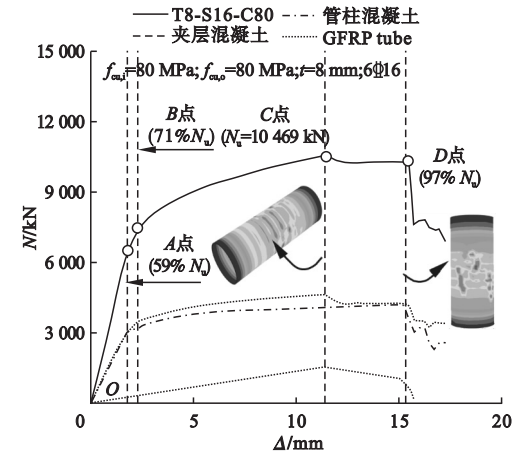


图5 试件T8-S16-C80受力全过程分析

Fig. 5 Full force analysis of the T8-S16-C80

表5 不同特征点下各组成部分内力分担比例

Table 5 The internal force distribution for each component at different characteristic points

| 特征点 | 各组成部分 | 内力分担比例/% | | |
|-----|-------|----------|------|------|
| | | 1/3H | 1/2H | 2/3H |
| A | 管柱混凝土 | 46.5 | 48.8 | 47.0 |
| | 夹层混凝土 | 56.1 | 55.4 | 55.8 |
| | GFRP管 | 2.3 | 2.6 | 2.6 |
| B | 管柱混凝土 | 42.6 | 42.4 | 42.1 |
| | 夹层混凝土 | 46.1 | 45.8 | 45.6 |
| | GFRP管 | 3.4 | 3.2 | 3.1 |
| C | 管柱混凝土 | 38.9 | 38.7 | 38.5 |
| | 夹层混凝土 | 44.4 | 44.0 | 44.1 |
| | GFRP管 | 14.3 | 14.1 | 14.1 |
| D | 管柱混凝土 | 41.0 | 40.4 | 41.5 |
| | 夹层混凝土 | 38.8 | 40.9 | 39.1 |
| | GFRP管 | 9.7 | 9.9 | 9.5 |

强化段,试件在此阶段刚度小于弹性段,轴向变形加快,荷载呈线性增长。GFRP管的约束作用充分发挥,使混凝土的轴向抗压强度提升。在C点时,试件荷载达到峰值,夹层混凝土与PHC管柱混凝土共同承担主要荷载,中截面的GFRP管分担纵向荷载比

例达到 14.1%。

下降段,峰值点 C 后,GFRP 管开始出现损伤,GFRP 管、夹层混凝土纵向荷载分担比例降低,PHC 管柱混凝土纵向荷载分担比例提高,试件承载力下降至峰值承载力的 97%。当到达 D 后,GFRP 管中截面处撕裂失效,承载力陡降。

图 6 为试件 T8-S16-C80 中特征点 A 、 B 、 C 、 D 中截面夹层混凝土与预应力管柱混凝土的纵向压应力分布。由图 6(a)所示,在特征点 A 时,试件中管柱混凝土内边缘的应力达到 $0.84 f_{cu,i}$,此时管柱混凝土开始进入塑性阶段。从图 6(b)中发现,达到 B 点后,夹层混凝土的最大纵向应力分布在内边缘处,由 $0.80 f_{cu,o}$ 增长到 $0.83 f_{cu,o}$,此时夹层混凝土进入塑性阶段。

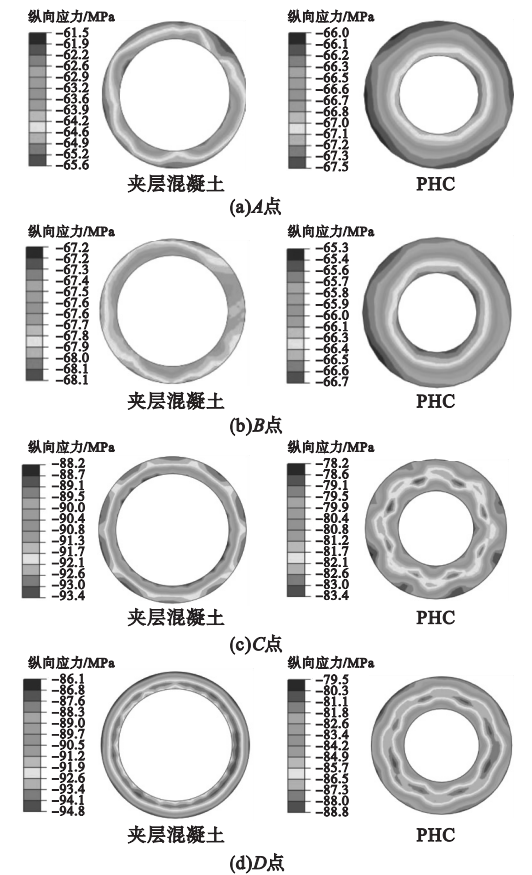


图 6 试件 T8-S16-C80 中混凝土截面纵向应力分布

Fig. 6 Distributions of longitudinal stresses in concrete of medium section T8-S16-C80

对比图 6(b)、图 6(c)可见,因 GFRP 管对混凝土的约束作用,夹层混凝土与管柱混凝土的纵向应力分别增加至 $1.17 f_{cu,o}$, $1.04 f_{cu,i}$ 。在 D 点处,夹层混凝土外边缘应力由 $1.17 f_{cu,o}$ 下降至 $1.08 f_{cu,o}$,其最大纵向应力由外边缘发展至内边缘;管柱混凝土最大纵向应力由 $1.04 f_{cu,o}$ 提高至 $1.11 f_{cu,o}$,且应力集中处由内边缘发展至截面中部。

3 影响因素分析

采用提高系数 SI 表征不同参数对轴压承载力和构件中 GFRP 管、混凝土、钢筋之间组合作用的影响,其表达式为

$$SI = N_{u,FEA} / N_0 \tag{3}$$

$$N_0 = f_{co,o} A_o + f_{co,i} A_i + f_{py} A_p + f_{sy} A_s + f_{frp,a} A_{frp} \tag{4}$$

式中: N_0 为构件名义承载力,kN; A_o 、 A_i 分别为夹层混凝土、预应力高强混凝土管柱混凝土的截面面积, m^2 ; A_{py} 、 A_s 为预应力钢筋、普通钢筋的截面面积, m^2 ; f_{py} 、 f_{sy} 分别为预应力钢筋、普通钢筋的屈服强度,MPa。

3.1 GFRP 管壁厚度

图 7(a)为 GFRP 壁厚度对试件荷载-位移关系的影响。由图 7(a)可看出,增大 GFRP 管壁厚可显著提高试件的承载力和轴向变形能力,与 T4-S16-C80 试件相比 T6-S16-C80、T8-S16-C80、T10-S16-C80 试件的轴压承载力分别提高了 17.4%、32.6%、44.7%,极限轴向位移分别增加了 145.2%、166.7%、182.8%。由图 8(a)看出,试件管壁厚度从 4 mm 增至 10 mm,构件的提高系数 SI 值依次提高了 12%、3.8%、6.5%,说明对于 GFRP 管壁厚较小的试件,GFRP 管、混凝土及钢筋之间只存在较小组合作用;提高 GFRP 管壁厚度,GFRP 管与试件其他各部分的组合作用显著增强。

3.2 夹层混凝土强度

图 7(b)为夹层混凝土强度对试件荷载-位移关系的影响。由图 7(b)可看出,与夹层

混凝土强度为 60 MPa 的试件相比,70 MPa、80 MPa、90 MPa 试件轴压承载力分别提高了 3.3%、6.7%、9.7%,而极限轴向位移分别减小了 1.2%、5.1%、8.4%。说明随夹层混凝土强度增加试件的轴压承载力提高,轴向变形能力减小。从图 8(b)可以看出,随夹层混凝土强度提高,构件的提高系数 SI 由 1.11 减小至 1.05,说明混凝土强度增加,试件中各部分的组合作用减小。

3.3 普通钢筋直径

图 7(c)为夹层混凝土强度对试件荷载-

位移关系的影响,由图 7(c)可见,与在 PHC 管柱内未配置 HRB400 级普通钢筋的试件相比,配置 6 Φ 14、6 Φ 16、6 Φ 18、6 Φ 20 试件的轴压承载力分别提高了 3.8%、5.0%、6.2%、7.6%,极限轴向位移分别提高了 3.3%、2.7%、1.4%、1.4%。由图 8(c)可见,提高系数 SI 由 1.06 增加至 1.07。随着普通钢筋直径的增加,钢筋截面面积增大,试件轴压承载力与 SI 值都有小幅提高,但轴向变形量无明显提升。与另两个参数相比,增大普通钢筋直径对试件轴压性能的影响较小。

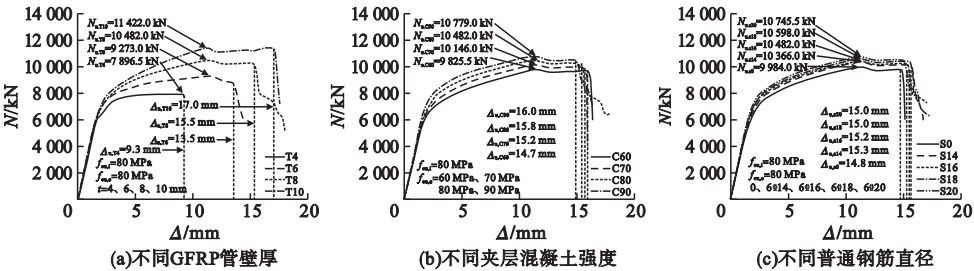


图 7 各参数对荷载-位移曲线影响

Fig. 7 Effect of GFRP tube thickness, sandwich concrete strength and ordinary reinforcement diameter on load-displacement curves

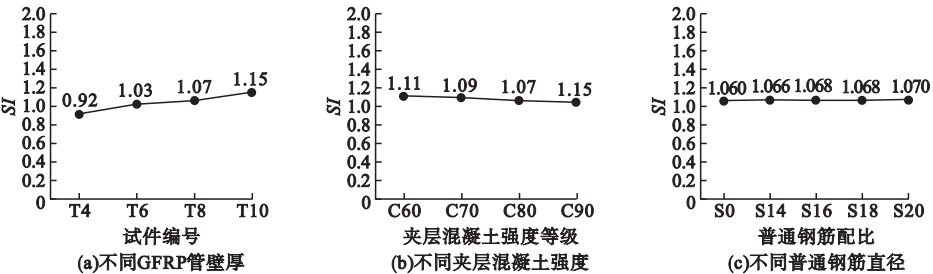


图 8 各参数对 SI 系数的影响

Fig. 8 Effect of GFRP tube thickness, sandwich concrete strength and ordinary reinforcement diameter on SI

4 结 论

(1) 基于典型试件的荷载-位移曲线,可将构件受力全过程划分为 4 个阶段:弹性段、弹塑性段、强化段、下降段。在弹性段,各组成部分处于弹性状态;在弹塑性段时,管柱混凝土首先进入塑性状态,混凝土的纵向压应力集中在截面外边缘,此时 GFRP 管发挥约束作用;在强化段,由于 GFRP 管的约束作用混凝土的纵向应力已超过自身的轴心抗压强

度;峰值点后试件进入下降段,此时 GFRP 管在中截面处开始出现损伤,构件承载力小幅下降;当达到 GFRP 的极限拉伸应力后纤维断裂失效,构件承载力陡降。

(2) 试件的内力分担比例沿高度方向分布较均匀;受力全过程中,管柱混凝土与夹层混凝土承担主要荷载,所承担荷载超过 81% 以上;在特征点 B 至特征点 C 时,GFRP 管的内力分担比例快速增加,由 3.2% 提升至 14.2%。

(3)在3种参数中,GFRP管壁厚度对构件的轴压承载力与轴向变形能力提高影响最大。随着GFRP管壁厚度、夹层混凝土强度及普通钢筋直径的增加,构件的轴压承载力提高率分别在17.4%~44.7%、3.3%~9.7%以及3.8%~7.6%,极限轴向位移提高率分别在145.2%~182.8%、-1.2%~-8.4%以及1.4%~3.3%。此外,构件中各部件的组合作用随GFRP管壁厚度增加而增加,随夹层混凝土强度提高而减小,而普通钢筋直径对构件的组合作用影响较小。

参考文献

- [1] 高文生,刘金砺,赵晓光,等.关于预应力混凝土管桩工程应用中的几点认识[J].岩土力学,2015,36(增刊2):610-616.
(GAO Wensheng, LIU Jinli, ZHAO Xiaoguang, et al. Some understanding of prestressed concrete pipe pile in engineering application [J]. Rock and soil mechanics 2015,36(S2):610-616.)
- [2] 杨志坚,李帼昌,王琦.轴力作用下预应力高强混凝土管桩抗弯性能研究[J].工程力学,2017,34(增刊1):185-191.
(YANG Zhijian, LI Guochang, WANG Qi. Nonlinear bending behavior of prestressed high strength concrete pile under axial and lateral loading [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(S1):185-191.)
- [3] 李镜培,李林,陈浩华,等.腐蚀环境中混凝土桩基耐久性研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):1-15.
(LI Jingpei, LI Lin, CHEN Haohua, et al. Advances in concrete pile durability in corrosive environment [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017, 49(12):1-15.)
- [4] 王彬,李荣.碳纤维增强复合材料在国家重大基础设施建设领域的应用与发展[J].科技导报,2018,36(19):64-72.
(WANG Bin, LI Rong. Development and application of CFRP in the field of national major infrastructure construction [J]. Science & technology review, 2018, 36(19):64-72.)
- [5] 冯鹏,王杰,张泉,等.FRP与海砂混凝土组合应用的发展与创新[J].玻璃钢/复合材料,2014(12):13-18.
(FENG Peng, WANG Jie, ZHANG Xiao, et al. Development and innovation on combining FRP and sea sand concrete for structures [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2014, (12):13-18.)
- [6] OZBAKKALOGLU T, VINCENT T. Axial compressive behavior of circular high-strength concrete-filled FRP tubes [J]. Journal of composites for construction, 2014, 18(2):04013037.
- [7] XIAO Q G, TENG J G, YU T. Behavior and modeling of confined high-strength concrete [J]. Journal of composites for construction, 2010, 14(3):249-259.
- [8] LIAO J J, ZENG J J, GONG Q M, et al. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and building materials, 2022, 318:126200.
- [9] KUSUMAWARDANINGSIHA Y, HADIB M N S. Comparative behaviour of hollow columns confined with FRP composites [J]. Composite structures, 2010, 93(1):198-205.
- [10] 张霓,郑晨阳,姜丽娜,等.玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱轴心的受压性能[J].材料科学与工程学报,2021,39(6):968-974.
(ZHANG Ni, ZHENG Chenyang, XIAN Li'na, et al. Behavior of glass fiber reinforced composite tube filled with reinforced hollow concrete columns under axial compression [J]. Journal of materials science & engineering, 2021, 39(6):968-974.)
- [11] LIGNOLA G P, PROTA A, MANFREDI G, et al. Experimental performance of RC hollow columns confined with CFRP [J]. Journal of composites for construction, 2007, 11(1):42-49.
- [12] LIGNOLA G P, PROTA A, MANFREDI G, et al. Non-linear modeling of RC rectangular hollow piers confined with CFRP [J]. Composite structures, 2009, 88(1):56-64.
- [13] CASCARDI A, MICELLI F, AIELLO M A. Unified model for hollow columns externally confined by FRP [J]. Engineering structures, 2016(111):119-130.
- [14] JAMATIA R, DEB A. FRP confined hollow concrete columns under axial compression: A comparative assessment [J]. Composite structures, 2020, 236:111857.
- [15] FENG B, ZHU Y H, XIE F, et al. Experimental investigation and design of hollow section, centrifugal concrete-filled GFRP tube columns [J]. Buildings, 2021, 11(12):1-17.
- [16] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. Journal of composites for construction, 2007, 11(2):201-210.
- [17] CEB-FIP. Design of concrete structures [S]. London: Thomas Telford, 1993.
- [18] NUNES F, SILVESTRE N, CORREIA J R. Structural behaviour of hybrid FRP pultruded columns. Part 2: numerical study [J]. Composite structures, 2016, 139:304-319.
- [19] 杨志坚,雷岳强.预应力高强混凝土管桩的抗剪性能有限元分析[J].工程力学,2020,37(增刊1):200-207.
(YANG Zhijian, LEI Yuexiang. Finite element analysis of the shear behavior of prestressed high-strength concrete piles [J]. Engineering mechanics, 2020, 37(S1):200-207.)
(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)