

复合配筋预应力混凝土管桩抗弯性能试验和数值分析*

郭杨^{1,2}, 吴平^{2,3}, 韩磊⁴, 张振华⁴, 韩支叶⁵

(1. 安徽省建筑科学研究设计院, 合肥 230031; 2. 绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230001; 5. 建华建材(安徽)有限公司, 安徽 芜湖 241202)

摘要: 开发研制了复合配筋(GFRP筋)预应力混凝土管桩(以下简称PRC-G桩), 并进行了抗弯性能的现场抗弯试验和数值分析。试验研究结果表明, GFRP筋可以明显改善常规管桩的抗弯性能, 其开裂荷载和极限荷载均有显著的提高, 破坏时PRC-G桩均是受压区混凝土破碎而PRC桩的预应力筋被拉断; 数值分析结果表明, PRC桩破坏时, 预应力钢筋达到屈服强度1 420 MPa, PRC桩受压区混凝土未达到标准抗压强度, 桩身未被破坏; PRC-G桩破坏时, 受压区混凝土最大压应力为52.03 MPa, 受压区混凝土破碎, 管桩破坏。抗弯数值模拟和抗弯试验的结果表明, 两者的荷载-挠度曲线的规律基本一致。研究成果可为复合配筋(GFRP筋)预应力混凝土管桩在工程中的推广应用提供理论依据。

关键词: 复合配筋; GFRP筋; 管桩; 抗弯承载力; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0481-08

Experimental Study and Numerical Analysis on Bending Capability of Compositely Reinforced (GFRP) Prestressed Concrete Pipe Pile

Guo Yang^{1,2}, Wu Ping^{2,3}, Han Lei⁴, Zhang Zhenhua⁴, Han Zhiye⁵

(1. Anhui Institute of Building Research & Design, Hefei 230031, P.R. China; 2. Anhui Key Laboratory of Green Building and Assembly Construction, Hefei 230031, P.R. China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P.R. China; 4. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230001, P.R. China; 5. Jianhua Construction Materials Co. Ltd. (Anhui), Wuhu, Anhui 241202, P.R. China)

Abstract: The flexural capacity of compositely reinforced (GFRP) pre-stressed concrete pipe pile are studied through test and numerical analysis. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) has some properties such as lightweight, high tensile strength and strong in corrosion resistance, which can be exerted the high strength properties through joining with concrete by the common power mechanisms. The bending test shows that GFRP evidently improves the flexural properties, the cracking load and the ultimate load of PRC-G piles all increase to different extent. Concrete compression zone of PRC-G piles is broken and tendons of PRC piles are pulled off. In addition, based on the data from numerical analysis, the pre-stressed reinforcement reaches the yield strength (1 420 MPa) when PRC piles are damaged, and the compressive strength of concrete does not meet the standard compressive strength, while the pile body is not damaged. However, the maximum compressive stress of compressive concrete zone is 52.03 MPa while the pile is damaged. The results of bending numerical simulation and test show that the load deflection curves are consistent. Meanwhile, research results can provide the theory basis for the popularization and application in engineering of composite reinforcement (GFRP) pre-stressed concrete pipe pile.

Keywords: compositely reinforced; GFRP bar; pre-stressed concrete pipe pile; flexural capacity; numerical analysis

* 收稿日期: 2018-10-22(修改稿)

作者简介: 郭杨(1970-), 男, 安徽合肥人, 正高级工程师, 主要从事地下工程等方面的科研。E-mail: ahjkjdj@126.com
基金项目: 安徽省建设行业科学计划项目(2015YF-30)

0 引言

随着我国城市建设的快速发展,预应力混凝土管桩以其工厂化生产、节能环保、承载力高和应用范围广等特点,在工业与民用建筑、市政桥梁、高速公路等基本建设的重点领域中得到广泛应用^[1-3]。近年来,由于预应力混凝土管桩抗弯承载力不足,引起工程质量事故的频发,如安庆市立医院管桩整体倾斜、上海莲花湖畔管桩整体倒塌等。目前提高预应力混凝土管桩抗水平承载能力的措施已有许多种,如填芯混凝土^[4-5]、大直径钢管混凝土管桩^[6]、配置螺纹钢筋^[7-8]及管桩锚杆复合技术^[9]等,但施工过程费时费力,效果并不理想。

此外,预应力混凝土管桩基础工程在地下水、富含氯离子等地区的钢筋锈蚀问题严重,导致基础承载力下降,影响到结构的正常使用和寿命,甚至导致安全和工程事故的发生^[10]。

为提高预应力混凝土管桩抗水平承载力和耐久性,本文设计在预应力混凝土管桩中加入玻璃纤维增强复合筋(GFRP),形成预应力筋与玻璃纤维筋复合配筋截面,即为复合配筋(GFRP筋)预应力混凝土管桩(PRC-G)(发明专利:ZL201510020857.4),以提高预应力混凝土管桩的抗弯性能。通过原型桩室内抗弯试验和有限元数值模拟,对复合配筋(GFRP)预应力混凝土管桩的抗弯性能进行研究。

1 试验概况

试验共采用2根长12 m、桩径600 mm和壁厚110 mm的原型试验桩,桩身截面配筋采用按圆截面均匀布置,桩身配筋横剖面如图1所示。原型试验桩为PRC-G-600-110-12型复合配筋预应力混凝土管桩(以下简称PRC-G桩),1根。其生产采用现有流水作业的工艺流程及技术要求,考虑温度对GFRP筋影响,采用免蒸压养护。对比试验桩PRC桩1根,参照河南图集《混合配筋预应力混凝土管桩》相关参数生产制作。试验桩的截面和配筋如表1所示。

表1 试验桩参数表

Table 1 Parameters of test pipe piles

型号	外径 D/mm	预应力 钢筋	GFRP 筋	非预应力 力钢筋	数量 /根
PRC-G-600-AB	600	16Φ10.7	16Φ12	/	2
PRC-600-AB	600	16Φ10.7		16Φ12	2

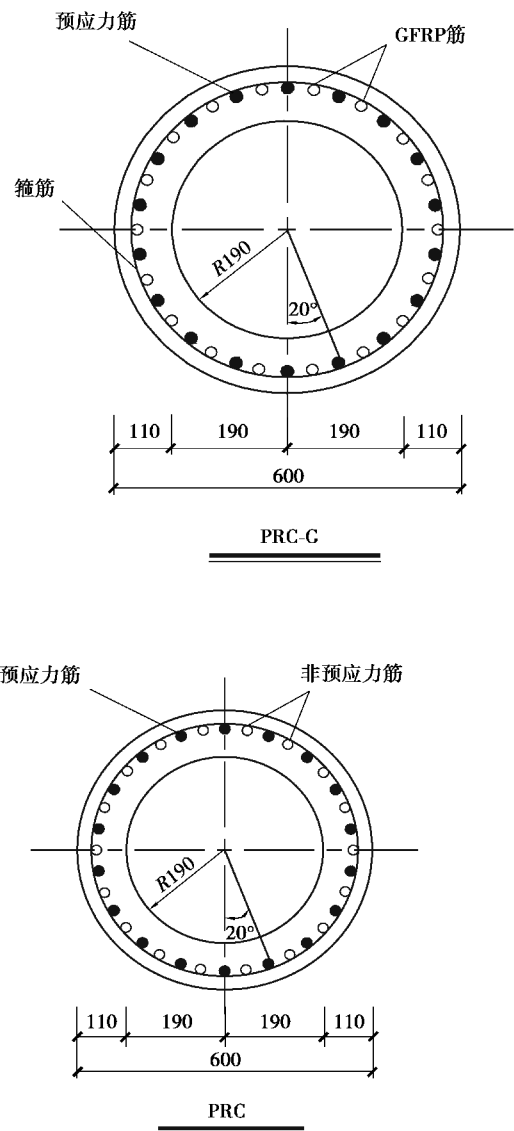


图1 管桩断面尺寸及配筋

Fig. 1 The details of pipe piles

试验所用玻璃纤维增强复合材料筋(简称GFRP筋)具有抗拉强度高、质量轻(1/4钢筋)、便于设计和耐腐蚀性好等特性。GFRP筋的抗拉强度标准值为650 MPa,剪切强度为110 MPa,极限拉应变为1.2%,弹性模量为40 GPa^[11],实物如图2所示。



图2 玻璃纤维增强复合筋(GFRP筋)

Fig. 2 Glass fiber reinforced composite bar

抗弯试验装置如图 3 所示。试验加载方式根据《先张法预应力混凝土管桩》(GB 13479—2009)^[12]确定。试验步骤为:①根据理论公式计算理论抗裂弯矩和极限弯矩。②按极差为理论抗裂弯矩的 20% 进行加载,由零加载至抗裂弯矩的 80%,每级荷载的持续时间为 3 min。③按极差为抗裂弯矩的 10% 继续加载,至抗裂弯矩的 100%。

每级荷载的持续时间为 3 min。每级加载过程中观察是否有裂缝出现,若有裂缝出现测定并记录裂缝宽度。④出现裂缝后,按极差为极限弯矩 5% 继续加载,至试验桩破坏,并测定和记录每级荷载下的裂缝宽度。⑤试验停止条件具体表现为出现裂缝达 1.5 mm,受拉钢筋拉断或受压区混凝土被压碎。

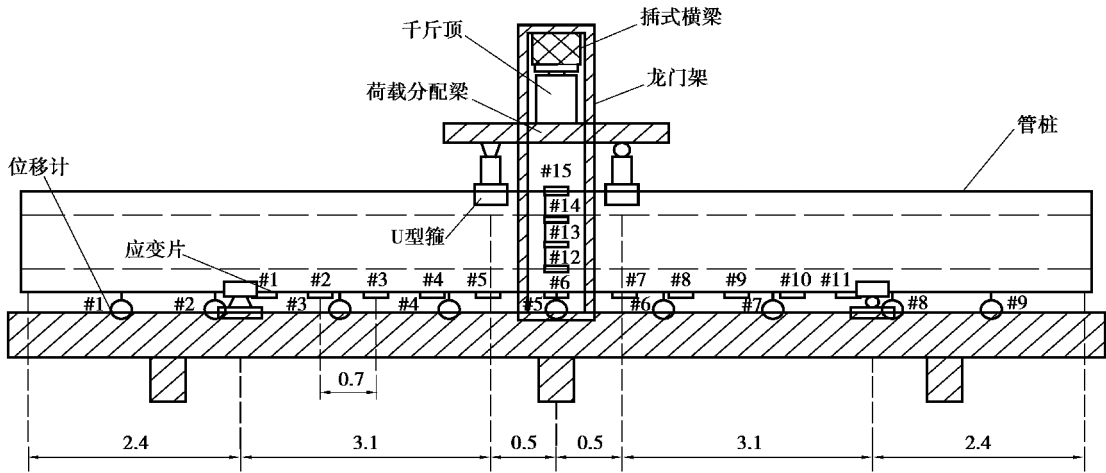


图 3 抗弯试验装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the bending test device

2 试验结果

2.1 试验结果对比分析

表 2 列出了直径为 600 mm 的 PRC-G 与 PRC 桩的试验结果汇总。由表 2 可以看出:配置相同预应力钢筋的 PRC-G-600-AB 和 PRC-600-AB 桩的裂缝数有较大的差别,PRC-G 桩破坏时有 13 条裂缝,而 PRC 桩破坏时有 19 条裂缝;但两根桩破坏时的裂缝宽度基本一致,最大裂缝宽度均达到 1.6 mm。试验终止时(即两根桩达到极限状态),PRC-G 桩因受压区混凝土被压碎而破坏,出现明显的破坏征兆;而 PRC 桩因受拉区钢筋被拉断而桩突然发生破坏(试验现场听到清脆的预应力筋被拉断的声音)。

从表 2 可看出,对于 PRC-600-AB 桩,在加载至 215.6 kN 时,跨中位置出现裂缝,跨中挠度为 8.70 mm;加载至 446.8 kN 时,预应力钢筋被拉断而破坏,此时跨中挠度为 44.14 mm。但 PRC-G 600 AB 桩在以上两级荷载下的跨中挠度仅为 6.26 mm 和 24.58 mm,分别为前者的 54% 和 44%。此外,PRC 桩的开裂荷载和极限荷载均是 PRC-G 桩的 0.74 倍,破坏时跨中最大挠度是 PRC-G 桩的 1.25 倍。

表 2 抗弯试验数据汇总表
Table 2 Data of the bending test

桩型	开裂时 跨中挠 度/mm	跨中最 大挠度 /mm	开裂 荷载 /kN	极限 荷载 /kN	裂缝 数	裂缝 宽度 /mm	破坏 特征
PRC-G -600-AB	8.68	42.50	272.1	563.8	13	1.6	受压区 混凝土 破碎
PRC-600- AB	11.66	56.02	215.6	446.8	19	1.7	内部钢 筋断裂

2.2 荷载-跨中挠度曲线分析

PRC-G-600-AB 桩和 PRC-600-AB 桩抗弯试验挠度变化情况如图 4 和图 5 所示。由图可见,在构件开裂之前,两根桩的荷载-跨中挠度曲线均呈线性关系,两根桩的挠度值均较小,PRC-G 桩荷载-跨中挠度曲线的斜率大于 PRC 桩曲线。构件开裂后,两根桩的曲线斜率均减小,变形增长速度加快。对于 PRC-G 桩,荷载增至 563.8 kN 时,构件的受压区混凝土压碎而破坏,而 PRC 桩(荷载增至 446.8 kN 时)的内部钢筋突然被拉断而破坏。

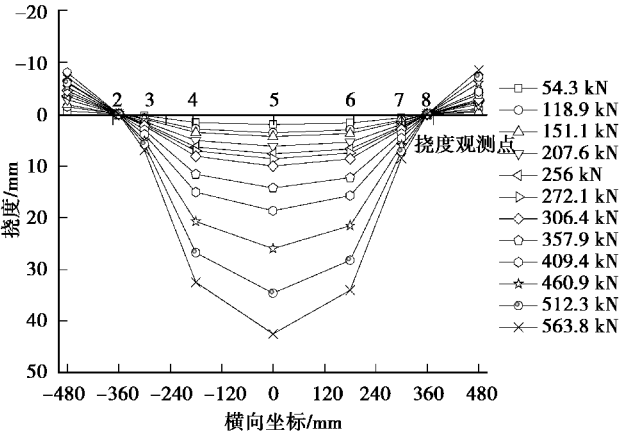


图 4 PRC-G-600-AB 桩抗弯试验挠度发展图
Fig. 4 The deflection development figure of PRC-G-600-AB pipe piles in the bending test

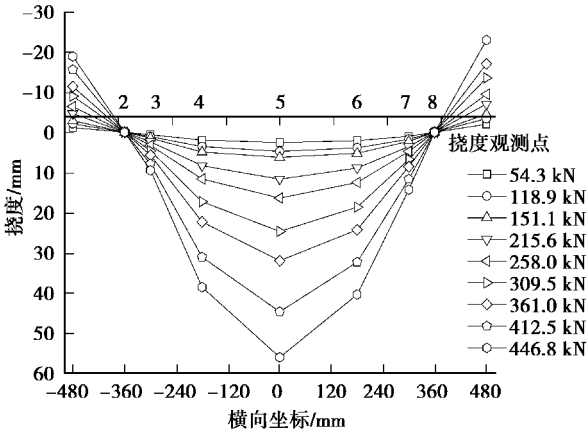


图 5 PRC-600-AB 桩抗弯试验挠度发展图
Fig. 5 The deflection development figure of PRC-600-AB pipe piles in the bending test

3 数值模拟

基于上述 PRC-G 桩和 PRC 桩两种桩型抗弯性能的现场试验,本文采用大型通用有限元计算软件 ANSYS,分别对 PRC-G 桩和 PRC 桩在集中荷载作用下的开裂荷载和极限荷载进行数值分析计算,以进一步研究复合配筋(GFRP)预应力混凝土管桩的抗弯性能。

3.1 有限元模型

3.1.1 网格模型

本次模拟中,预应力混凝土管桩采用整体式(Smeared)模型,将混凝土与钢筋的作用一起考虑。混凝土采用适用于钢筋混凝土结构的 SOLID65 八节点六面体单元进行模拟,其可以反映混凝土的开裂和压碎;采用 LINK8 单元模拟内部

钢筋。管桩模型采用映射网络进行单元划分,共 62 208 个节点,54 208 个单元。管桩网格模型具体如图 6 所示。

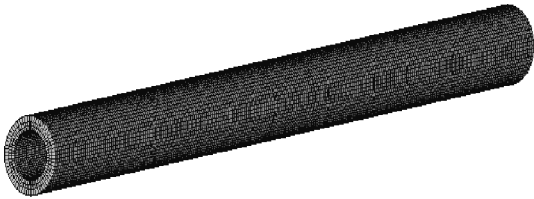


图 6 管桩网格模型
Fig. 6 Grid model of pipe piles

3.1.2 材料属性

PRC-G 桩和 PRC 桩桩身均采用 C60 混凝土,C60 混凝土的力学参数具体见表 3。

表 3 C60 混凝土力学参数表

Table 3 Mechanical parameters of C60 concrete

强度等级	$f_t/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_c/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$E_c/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	ν
C60	3.11	50.22	4.68×10^4	0.2

注: f_t 为抗拉强度标准值; f_c 为抗压强度标准值; E_c 为弹性模量; ν 为泊松比。

模拟的 PRC-G 桩主要有 GFRP 筋和预应力钢筋的复合配筋;PRC 桩采用的是非预应力钢筋(HRB400 钢筋)、预应力钢筋复合配筋和非预应力筋 3 种钢筋。其中预应力筋采用预应力钢棒,非预应力钢筋采用 HRB400 钢筋。GFRP 筋的抗拉强度标准值为 650 MPa,剪切强度为 110 MPa,极限拉应变为 1.2%和弹性模量为 40 GPa,预应力钢棒的力学参数具体如表 4 所示。

表 4 预应力钢棒力学参数表

Table 4 Mechanical parameters of the prestressed steel bar

$\sigma/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_{ptk}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$\Phi/$ %	$E_c/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
$\geq 1\ 275$	$\geq 1\ 420$	5	2×10^5

注: σ 为非比例伸长应力; f_{ptk} 为抗拉强度标准值; E_c 为弹性模量; Φ 为伸长率。

3.1.3 本构关系

采用弹塑性本构模型对钢筋和混凝土进行

分析。

(1)混凝土的应力-应变关系如图 7 所示。

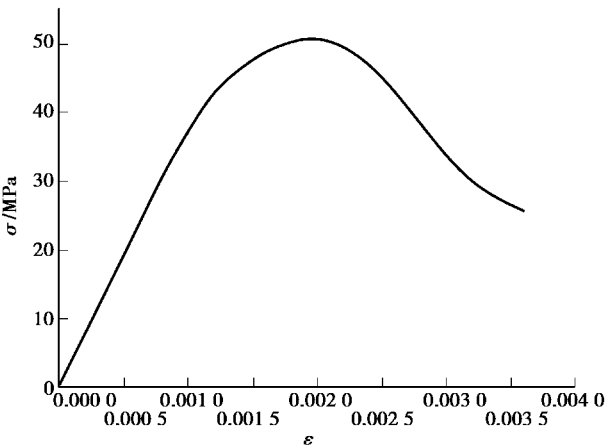


图 7 混凝土应力应变关系

Fig. 7 The stress-strain relationship of concrete

(2)钢筋的应力应变关系如图 8 所示:屈服前假设是完全弹性的,屈服后简化为一条水平直线。

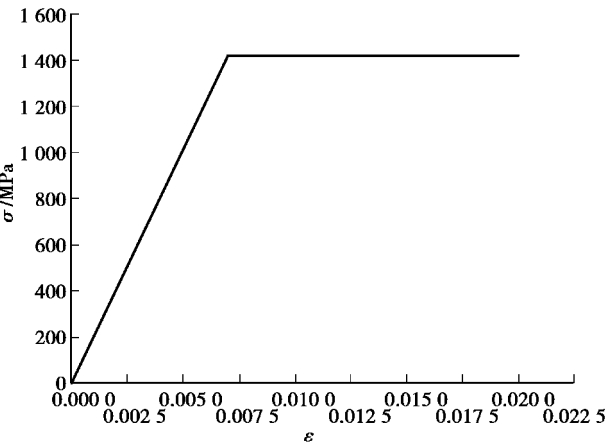


图 8 预应力钢筋应力应变关系

Fig. 8 The stress-strain relationship of prestressed steel bar

3.1.3 约束与荷载的施加

有限元模型建立完毕后,首先通过对 LINK8 单元赋予初应变进行预应力钢筋预应力荷载的模拟计算,然后依据图 3,在有限元模型的相应位置添加荷载和约束,如图 9 所示。

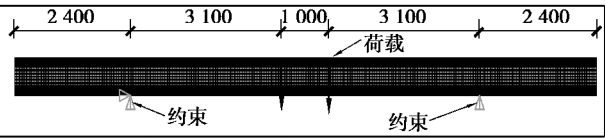


图 9 约束和荷载示意图(单位:mm)

Fig. 9 Schematic diagram of constraint and load(unit: mm)

3.2 有限元模拟结果

有限元模型建立完成后,依据上述现场试验的加载方式,分别对 PRC-G 桩和 PRC 桩进行逐级加载,直至受拉钢筋屈服或受压区混凝土破碎,计算终止。通过依次提取各级荷载作用下管桩的跨中挠度值,可绘制两种桩型的荷载-跨中挠度曲线。加载计算过程中,混凝土开始出现裂缝时所对应的荷载值即为管桩的开裂荷载,可通过 CRACKS AND CRUSHING 图查看混凝土是否出现裂缝;计算终止时,预应力钢筋受拉屈服或受压区混凝土破碎,管桩达到极限状态,此时的荷载值即为管桩的极限荷载。

3.2.1 荷载-跨中挠度曲线

PRC-G-600-AB 桩和 PRC-600-AB 桩模拟后得到荷载-跨中挠度曲线,如图 10 所示,数值模拟结果见表 5。

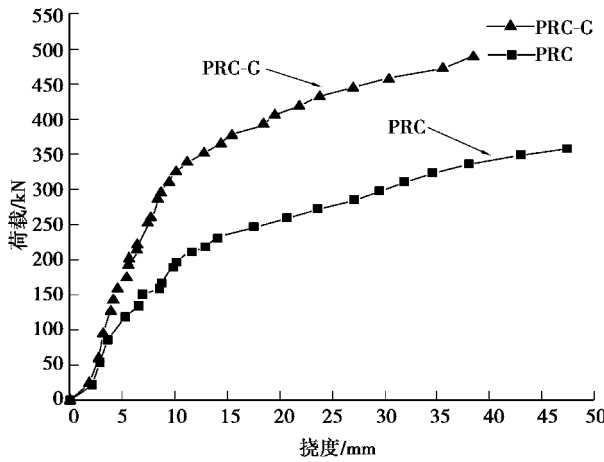


图 10 荷载-跨中挠度曲线对比图

Fig. 10 The deflection curves of load-midspan

表 5 数值模拟结果汇总表

Table 5 The results of numerical simulation

桩型	数值模拟结果			
	开裂时跨中挠度/mm	开裂荷载/kN	跨中最大挠度/mm	极限荷载/kN
PRC-G-600-AB	7.97	239.4	39.76	479.2
PRC-600-AB	11.29	191.5	48.25	396

从图 10 可以看出, PRC-G 桩的荷载-跨中挠度曲线的斜率大于 PRC 桩;两根桩在开裂后,曲线斜率均减小,变形随着荷载的增加而迅速增加;对

于 PRC-G 桩,加载至 479.2 kN 时,模拟桩的受压区混凝土破碎,而 PRC 桩在加载至 396.0 kN 时,因预应力钢筋屈服而破坏。以上与抗弯试验结果的规律一致。

3.2.2 开裂荷载

PRC-600-AB 型桩开裂模拟结果见图 11 和图 12。由图可知,PRC-600-AB 型桩混凝土开裂时最大拉应力为 6.96 MPa,此时的总荷载 $P=191.5$ kN。

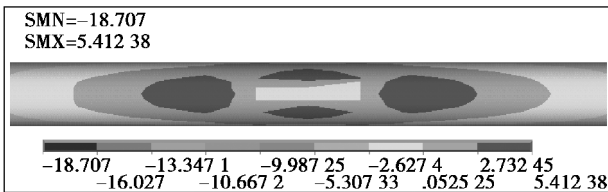


图 11 PRC-600-AB 型桩应力图(单位:MPa)

Fig. 11 The stress sketch of PRC-600-AB pipe pile (unit: MPa)

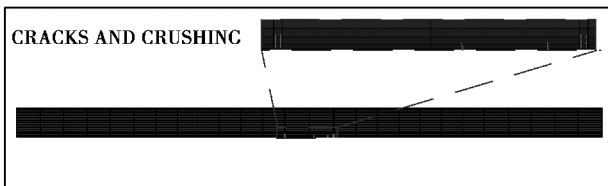


图 12 PRC-600-AB 型桩裂缝图

Fig. 12 The crack sketch of PRC-600-AB pipe pile

PRC-G-600-AB 型桩开裂模拟结果如图 13 和图 14 所示。PRC-G-600-AB 型桩混凝土开裂,最大拉应力为 5.97 MPa,此时的总荷载 $P=239.4$ kN。

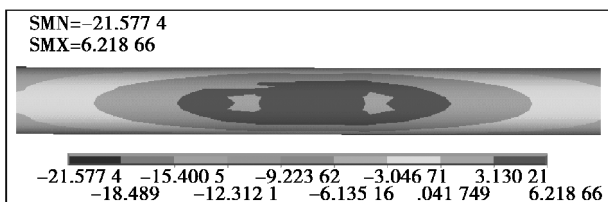


图 13 PRC-G-600-AB 型桩应力图(单位:MPa)

Fig. 13 The stress sketch of PRC-G-600-AB pipe pile (unit: MPa)

3.2.3 极限荷载

对于 PRC-600-AB 型桩,输入的荷载 $P=396$ kN,预应力钢筋应力最大值为 1 420 MPa(如

图 15),预应力钢筋屈服,此时管桩达到了极限状态。由此求得 PRC-600-AB 型桩达到极限状态时的总荷载 $P=396$ kN(如图 16)。

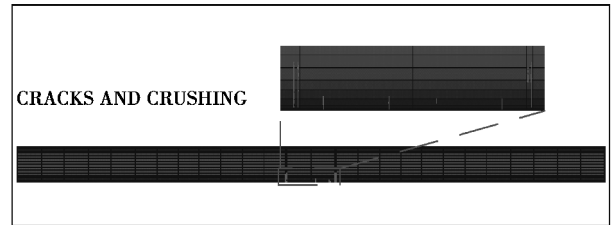


图 14 PRC-G-600-AB 型桩裂缝图

Fig. 14 The crack sketch of PRC-G-600-AB pipe pile

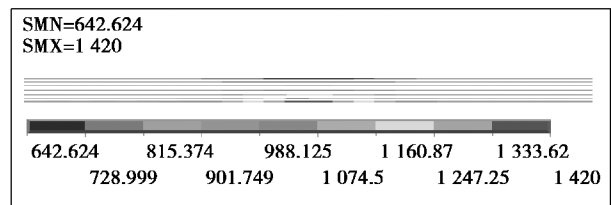


图 15 PRC-600-AB 型桩钢筋应力图

Fig. 15 The reinforced stress sketch of PRC-600-AB pipe piles

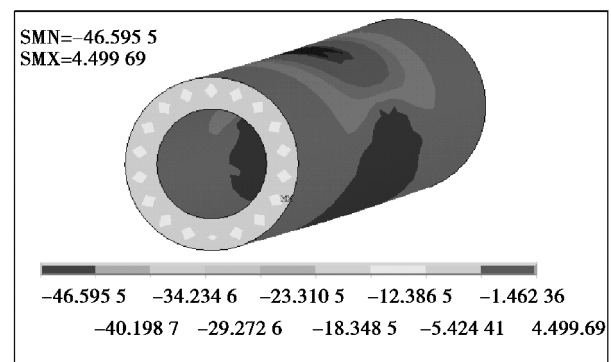


图 16 PRC-600-AB 型桩混凝土应力图(单位:MPa)

Fig. 16 The concrete stress sketch of PRC-600-AB pipe piles (unit: MPa)

对于 PRC-G-600-AB 型桩,输入荷载 $P=479.2$ kN,混凝土最大压应力为 52.03 MPa(如图 17),管桩受压区混凝土破碎(如图 18),此时管桩达到了极限状态。由此求得 PRC-G-600-AB 型桩达到极限状态时的总荷载 $P=479.2$ kN。

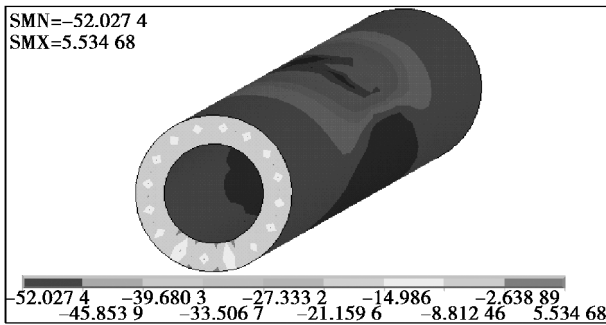


图 17 PRC-G-600-AB 型桩混凝土应力图(单位: MPa)

Fig. 17 The concrete stress sketch of
PRC-G-600-AB pipe piles (unit: MPa)

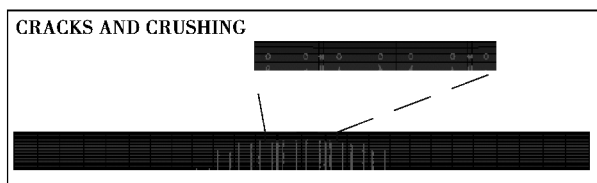


图 18 PRC-G-600-AB 型桩裂缝图

Fig. 18 The crack sketch of PRC-G-600-AB pipe pile

4 实验结果与模拟结果的对比

从开裂荷载和极限荷载两个方面对试验和数值模拟的结果进行对比分析,开裂荷载的试验值与模拟值对比分析见表 6,极限荷载的试验值与模拟值对比分析见表 7。

表 6 开裂荷载试验与模拟结果对比

Table 6 Comparison between test and simulation results of cracking load

桩型	开裂荷载/kN		
	试验值	模拟值	模拟值/试验值
PRC-600-AB	215.6	191.5	0.89
PRC-G-600-AB	272.1	239.4	0.88

表 7 极限荷载试验与模拟结果对比

Table 7 Comparison between test and simulation results of ultimate load

桩型	极限荷载/kN		
	试验值	模拟值	模拟值/试验值
PRC-600-AB	446.8	396	0.89
PRC-G-600-AB	563.8	479.2	0.85

从表 6 和表 7 可以看出,试验和模拟的结果有一定的差别,其主要原因在于:数值模拟中,钢筋的本构模型是理想弹塑性模型,认为钢筋达到屈服强度时管桩即已发生破坏。而试验中,钢筋达到屈服强度后会进入强化阶段,此时钢筋仍然具有一定抵抗变形的能力,这是数值模拟没有考虑的。

5 结论

通过对复合配筋预应力混凝土管桩(PRC-G)进行现场抗弯试验和数值分析计算,可以得出:

(1) GFRP 筋与混凝土(C80)可以共同作用, GFRP 筋的配置较大幅度地改善了预应力混凝土管桩的抗弯性能。PRC-600-AB 桩的开裂荷载和极限荷载均仅是 PRC-G-600-AB 桩的 0.84 倍。

(2) 抗弯试验结果和数值模拟结果均表明, PRC-G 桩均是由于受压区混凝土破碎而破坏,而 PRC 桩则是由于预应力钢筋被拉断而破坏。

本文的研究成果可为复合配筋(GFRP 筋)预应力混凝土管桩在工程中的推广应用提供理论依据。

参考文献(References)

- [1] 郭杨, 杨成斌. 预应力混凝土管桩应用新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Guo Yang, Yang Chengbin. The application of new technology of prestressed concrete pipe pile [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 张学文, 黎夏至, 李维涛, 等. 抗拔预应力管桩地下车库上浮案例检测浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增 1): 1409-1414. (Zhang Xuewen, Li Xiaoshi, Li Weitao, et al. Site testing and analysis on floating upward case of underground garage using up-lift PHC piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (Sup.1): 1409-1414. (in Chinese))
- [3] 吴彤, 许健, 钱文君, 等. 多年冻土区管桩基础抗拔承载性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 145-153. (Wu Tong, Xu Jian, Qian Wenjun, et al. Experimental research on uplift mechanism of pipe pile foundation in permafrost area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1): 145-153. (in Chinese))
- [4] 郭杨, 崔伟. PHC 管桩在老黏土地区应用的试验研

- 究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增2): 108-115. (Guo Yang, Cui Wei. Experimental study on application of PHC piles in paleo-clay area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp. 2): 108-115. (in Chinese))
- [5] 柳炳康, 李建宏, 张星宇, 等. 预应力填芯混凝土管桩抗弯性能与延性特征的试验[J]. 工业建筑, 2007, 37(3): 46-50. (Liu Bingkang, Li Jianhong, Zhang Xingyu. Test of moment bearing capacity and ductility performance of filled prestressed concrete pipe pile[J]. Industrial Construction, 2007, 37(3): 46-50. (in Chinese))
- [6] 卓杨, 曹进捷, 邱松. 大直径离心钢管混凝土管桩抗弯承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增2): 135-138. (Zhuo Yang, Cao Jinjie, Qiu Song. Flexural capacity of large-diameter thin-wall steel and spun concrete composite piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp. 2): 135-138. (in Chinese))
- [7] 张忠苗, 刘俊伟, 邹健, 等. 加强型预应力混凝土管桩抗弯剪试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1074-1080. (Zhang Zhongmiao, Liu Junwei, Zou Jian, et al. Experimental study on flexural and shearing property of reinforced prestressed concrete pipe pile [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2011, 45(6): 1074-1080. (in Chinese))
- [8] 张忠苗, 刘俊伟, 谢志专, 等. 新型混凝土管桩抗弯剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增2): 271-276. (Zhang Zhongmiao, Liu Junwei, Xie Zhizhuan, et al. Experimental study on flexural and shearing properties of modified concrete pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp. 2): 271-276. (in Chinese))
- [9] 张仕, 李欢秋, 王爱勋. 提高 PHC 管桩在深基坑支护中应用的技术途径[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增2): 271-276. (Zhang Shi, Li Huanqiu, Wang Aixun. Technical approaches to improvement of application of PHC pile in deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supp. 2): 1643-1647. (in Chinese))
- [10] 叶列平. 土木工程科学前沿[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. (Ye Lieping. Frontier and development in civil engineering [M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 玻璃纤维复合材料建设工程应用技术规程(GB50608-2010)[S]. 北京:中国计划出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-rural Development of People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites (GB50608-2010) [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese))
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 先张法预应力混凝土管桩(GB13476-2009)[S]. 北京:中国标准出版社, 2009. (Standardization Administration of China. Pretensioned spun concrete piles(GB13476-2009) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese))

(上接第 480 页)

- [11] Markard J, Vollenweider S. Development of ecological standards for hydropower [R]. Überlandstrasse: EAMAG, 2005.
- [12] Volkor R E. Solution for unconfined non-Darcy seepage [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1975, 101(1): 53-65.
- [13] 代群力. 地下水非线性流动模拟[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(2): 50-51, 55. (Dai Qunli. The numerical simulation on nonlinear flow of groundwater [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, 27(2): 50-51, 55. (in Chinese))
- [14] 刘黎. 粗粒料渗透特性及渗透规律试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (Liu Li. Experimental study on permeability characteristics and seepage law of coarse aggregate [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese))
- [15] 杨越. 降雨条件下边坡土石混合体的渗透和力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南工业大学, 2012. (Yang Yue. Study on seepage and mechanical characteristics of soil-rock composite under rainfall[D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2012. (in Chinese))