

DOI: 10.11779/CJGE20221359

基于基坑支护工程的区段复式配筋预应力管桩 抗弯试验及数值模拟

刘永超^{1,2,4}, 刘岩¹, 李兵兵³, 张国平³, 胡智鑫¹, 刘建志²

(1. 天津城建大学, 天津 300384; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040;
4. 天津建城基业集团有限公司, 天津 300301)

摘要: 复式配筋预应力混凝土管桩 (PRC 管桩) 作为基坑支护桩使用时, 为提高非预应力钢筋的利用效率, 提出将区段配置非预应力钢筋的管桩作为基坑支护桩。通过对天津地区 80 个基坑工程中的支护桩弯矩分布情况统计分析, 并对区段复式配筋预应力混凝土管桩 (PR-PHC 管桩) 进行足尺抗弯试验及有限元分析, 研究区段配筋的可行性和 PR-PHC 管桩的抗弯性能。研究表明, 单支撑排桩、倾斜桩及悬臂桩的桩身弯矩区间分布具有规律性。PR-PHC 管桩区段配置的非预应力筋, 可以提高其抗弯极限承载力及其抗弯刚度, 并有效改善桩身裂缝的展开情况, 构建的数值模型可以较好地反映试验的实际情况。并对 PR-PHC 管桩在实际应用中可能遇到的不利工况做了影响分析。研究结果表明可以在基坑工程中使用 PR-PHC 管桩替代 PRC 管桩, 减少钢筋使用量, 促进碳减排。

关键词: 有限元模拟; 预应力混凝土; 抗弯试验; 区段配筋; 基坑支护

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)02-0406-09

作者简介: 刘永超(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计与施工技术方面的研究与管理工作。E-mail: chao96521@vip.sina.com。

Flexural tests and numerical simulations of prestressed concrete pipe piles with partial hybrid reinforcement based on support of foundation pits

LIU Yongchao^{1, 2, 4}, LIU Yan¹, LI Bingbing³, ZHANG Guoping³, HU Zhixin¹, LIU Jianzhi²

(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin University School of Civil Engineering, Tianjin 300072, China;

3. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China; 4. Tianjin Jiancheng Foundation Industry Group Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: When the prestressed concrete pipe piles with hybrid reinforcement (PRC pipe pile) are used as the supporting piles of foundation pits, in order to improve the utilization efficiency of non-prestressed reinforcement, it is proposed to use the pipe pile with non-prestressed reinforcement in the section as the supporting piles. Through the statistical analysis of the moment distribution of the supporting piles in 80 foundation pit projects in Tianjin, the full-scale bending tests and finite element analyses of the prestressed high-strength concrete pipe piles with partial hybrid reinforcement (PR-PHC pipe piles), the feasibility of the sectional reinforcement and the bending resistance of the PR-PHC pipe piles are studied. The research results show that the interval distribution of the bending moment of the pile shaft of single support row piles, inclined piles and cantilever piles has regularity. The non-prestressed reinforcement configured in the section of PR-PHC pipe piles can improve its ultimate bending bearing capacity and bending stiffness, and effectively improve the spread of pile cracks. The proposed numerical model can better reflect the actual situation of the tests. In addition, the adverse working conditions that may be encountered in the practical application of PR-PHC pipe piles are analyzed. It is proved that the PR-PHC pipe piles can be used to replace the PRC ones in foundation pit engineering, which reduces the use of reinforcement and promotes the carbon emission reduction.

Key words: finite element simulation; prestressed concrete; bending resistance test; partial reinforcement; support of foundation pit

0 引言

随着经济、社会的发展, 中国提出了碳达峰、碳

收稿日期: 2022-11-03

中和的战略目标, 而在建筑行业中广泛使用预制化构件是实现节能减排、降低损耗的重要途径。其中, 预制化的预应力高强混凝土管桩 (PHC 管桩) 已经在基坑支护工程中被广泛使用, 其具有施工快速, 效率高, 现场环境好等优点^[1-3]。但由于 PHC 管桩的极限抗弯承载力较小, 在基坑支护工程中使用时依然具有一定的局限性, 有学者提出增加了非预应力钢筋的复式配筋预应力混凝土管桩 (PRC 管桩)^[4-5]。试验表明, 配置非预应力钢筋可以有效改善管桩的受弯和受剪性能, 提高管桩的结构承载性能^[6-8]。PRC 管桩凭借其良好的承载性能, 在基坑支护工程中得到更广泛的应用^[9-11]。

当复式配筋预应力桩作为支护桩在基坑工程中使用时支护形式一般为单支撑排桩、斜桩及悬臂桩, 其桩身弯矩包络图为一条有峰值的曲线。常规复式配筋预应力桩是采用通长配置非预应力筋的方式来提高桩身抗弯承载性能, 但是这种方式会造成非预应力筋的浪费, 即在弯矩较大的区间, 非预应力筋被充分利用, 在弯矩较小的区间, 非预应力筋提供的抗弯承载性能则未被充分利用。本文提出一种仅在弯矩较大区间区段配置非预应力钢筋的预应力支护桩, 收集天津地区 80 个基坑工程案例, 计算其在不同工程情况下的桩身弯矩包络图, 探究其桩身弯矩的分布规律; 并进行区段配筋预应力桩的足尺抗弯试验及有限元分析, 来进行区段配筋预应力混凝土桩用作基坑支护桩的应用研究。

1 支护桩弯矩计算概况

1.1 基坑案例工程概况

计算所选取的基坑工程案例地点均位于天津地区, 囊括了市内六区在内的十多个辖区, 所选取的工程地质参数对天津的土质情况有极强的代表性。为保证案例设计计算后统计的规律具有良好的代表性, 在基坑设计中, 选取采用预应力混凝土桩作为支护桩最多的单支撑排桩、倾斜桩和悬臂桩 3 种支护类型, 以及 5, 6, 7, 8 m4 种基坑深度。设计时采用的预制桩型号为外径 500~800 mm 的 AB 型 PHC 管桩; 同时保证抗倾覆安全系数为 1.2~1.3, 单支撑排桩的最大变形位移控制在 50 mm 以内, 以满足常用的基坑支护结构设计要求。

1.2 计算数据内容概述

基坑设计计算结果统计分析所选择的数据为桩长和最大弯矩点距离地表的距离, 以最大弯矩点距离地表的位置作为最大弯矩点位置, 并计算最大弯矩点位置与桩长的比值数据, 来分析预应力桩作为支护桩在

不同工程情况下最大弯矩点分布情况, 探讨其分布规律。同时, 计算了不同工况下 50%, 60%, 70%, 80% 倍最大弯矩值区域长度与桩身长度的比值, 来探讨不同弯矩区间的区域分布规律, 为设计区段配置非预应力钢筋的预应力桩提供参考。

2 支护桩弯矩统计及分析

2.1 最大弯矩点位置

图 1 为采用单支撑排桩、倾斜桩及悬臂桩作为基坑的支护体系时, 在 5 m 开挖深度情况下, 各工程支护桩桩身最大弯矩点位置沿基坑开挖深度的分布情况。从图 1 中可以看出, 3 种支护体系下的桩身最大弯矩点位置均会集中在一定范围内, 表明在不同基坑支护体系下, 桩身最大弯矩点位置的分布均呈现出一定规律性。

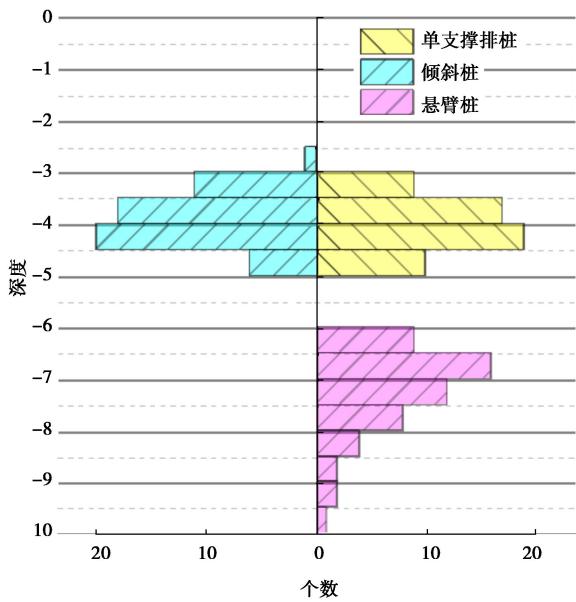


图 1 3 种支护桩型最大弯矩点分布图

Fig. 1 Distribution of maximum bending moment of three types of retaining piles

在基坑设计案例统计中发现, 3 种支护桩型在 6, 7, 8 m 基坑开挖深度下, 桩身最大弯矩点距地表位置的分布仍呈现与 5 m 基坑开挖深度一致的规律性, 即桩身最大弯矩点位置均会集中在一定范围内。如图 2 所示, 单支撑排桩和倾斜桩的最大弯矩点平均深度均出现在开挖面以上, 而悬臂桩的最大弯矩点平均深度则位于开挖面以下。其中, 由于倾斜桩所提供的水平支撑力小于单支撑排桩, 导致在不同基坑开挖深度下, 倾斜桩最大弯矩点平均深度均大于单支撑排桩情况。并且发现图 2 中悬臂桩支护体系的最大弯矩点平均深度随坑深增加而下降的速率快, 表明悬臂桩支护体系受力情况对开挖深度的变化更敏感。

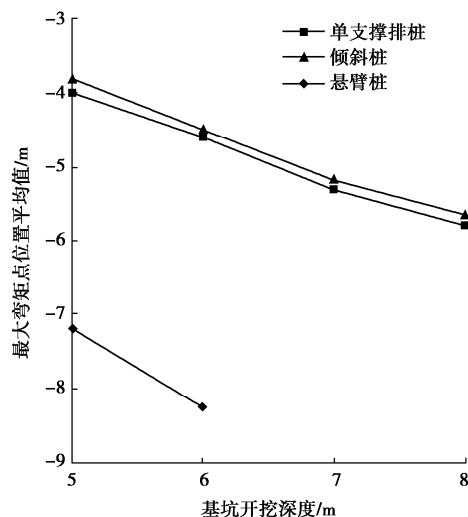


图 2 最大弯矩点随坑深变化图

Fig. 2 Variation of maximum bending moment with pit depth

表 1 列举了 3 种支护桩型在不同基坑深度下最大弯矩点距地表位置与地表至桩底深度比值的平均数。3 种支护桩型该比值均随基坑深度的增大而减小, 表明桩身最大弯矩点随基坑深度下移的幅度小于桩身长度增加的幅度。

表 1 最大弯矩点位置与地表至桩底深度比值表

Table 1 Ratios between position of maximum bending moment and depth from surface to pile bottom

基坑深度/m	单支撑排桩/%	倾斜桩/%	悬臂桩/%
5	38.53	36.73	43.40
6	36.16	35.34	40.91
7	35.84	34.85	
8	34.41	33.56	

2.2 不同弯矩区间所占桩身范围

图 3 中列举了单支撑排桩在深度为 5, 6, 7, 8 m 的基坑中使用时, 70% 最大弯矩区域所占桩身长度比值的分布情况。从图 3 中可以看出, 单支撑排桩支护体系在基坑深度不同的情况下, 桩身 70% 最大弯矩区域所占桩身长度的比值呈现出一定的分布规律, 这一分布规律类似于正态分布。同时, 单支撑排桩支护体系桩身 50%, 60%, 80% 最大弯矩区域所占桩身长度比值的分布也呈现出类似正态分布。

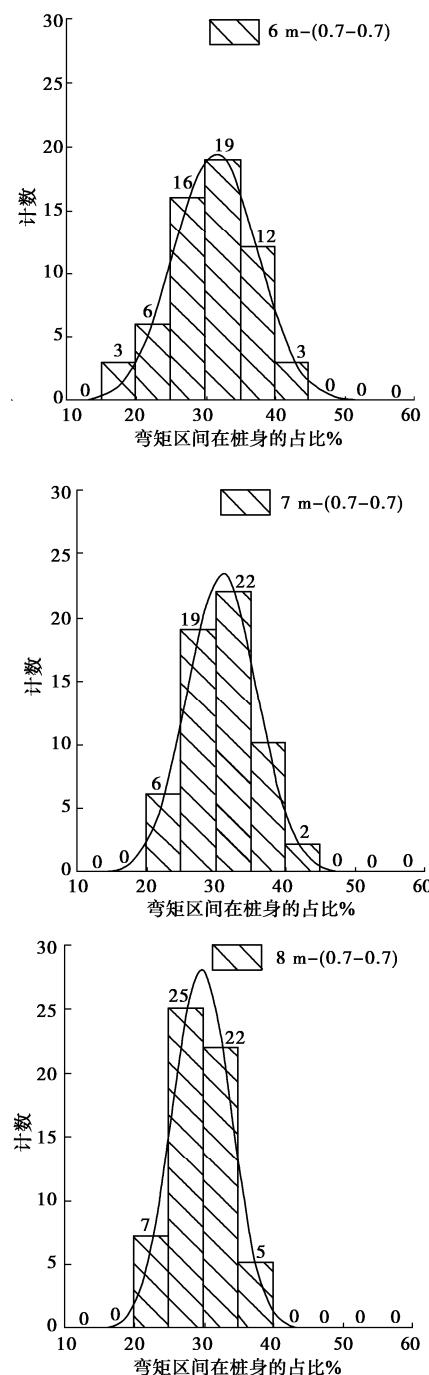
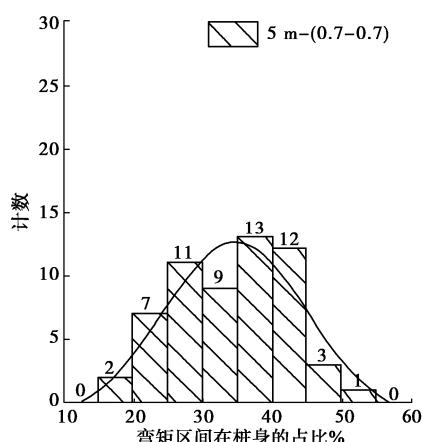


图 3 单支撑排桩弯矩区间分布图

Fig. 3 Interval distribution of bending moment of single support row pile

图 4 为悬臂桩及倾斜桩在深度为 6 m 基坑中, 70% 最大弯矩区域所占桩身长度比值的分布情况。可以发现悬臂桩及倾斜桩的弯矩区域所占桩身长度比值的分布同样呈现正态分布的形式。

从图 5 可以看出, 随着基坑深度的增加, 单支撑排桩不同弯矩区域所占桩身长度的比值均呈现下降的趋势。表明, 由于基坑深度增加, 导致单支撑排桩桩身的最大弯矩、不同弯矩区域及桩身长度均随之增加, 但是桩身长度的增加幅度更大, 导致了弯矩区域与桩

身长度的比值呈现了下降的趋势。同时, 倾斜桩与悬臂桩支护型式也符合这一规律。

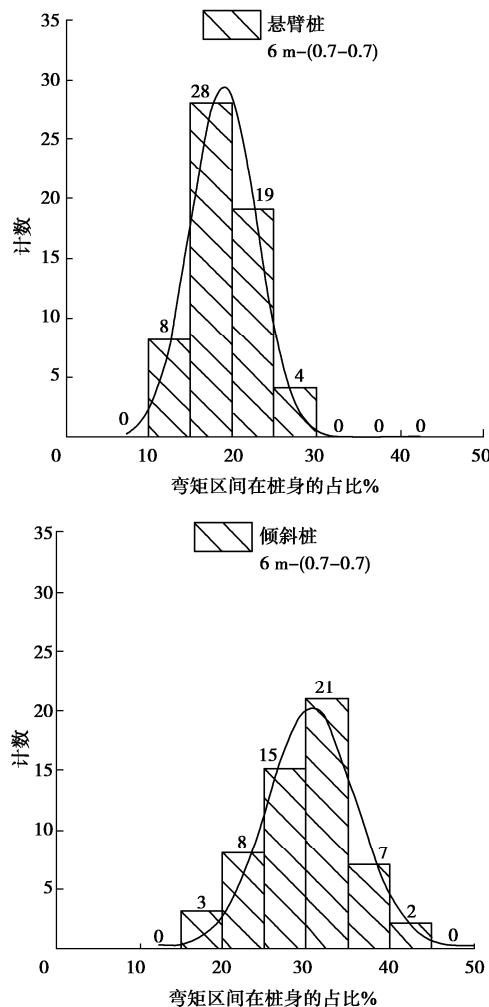


图 4 悬臂桩和倾斜桩弯矩区间分布图

Fig. 4 Interval distribution of bending moment of cantilever pile and inclined pile

由表 2 可知, 单支撑排桩、倾斜桩及悬臂桩在基坑开挖深度相同的情况下, 各弯矩区域与桩身长度的比值依次减小。这是由于在基坑深度相同的情况下, 倾斜桩设计桩长与单支撑排桩相同, 但倾斜桩各弯矩区域小于单支撑排桩; 对于悬臂桩支护, 虽然悬臂桩的各弯矩区域较大, 但该种支护形式的桩身长度也更长, 导致不同弯矩区域所占桩身比值最较小。

表 2 3 种支护桩型不同弯矩区域所占桩身比值的平均数
Table 2 Average values of ratio of three types of retaining pile to different bending moment areas

支护类型	坑深/m	0.5M _{max} 区域/%	0.6M _{max} 区域/%	0.7M _{max} 区域/%	0.8M _{max} 区域/%
单支撑排桩	5	44.58	39.41	33.60	27.07
	6	41.34	36.33	30.95	24.69
	7	40.77	36.03	30.87	25.05
	8	38.63	34.28	29.50	23.84
倾斜桩	5	42.53	37.58	32.13	26.19
	6	39.46	35.13	29.68	24.32
	7	38.82	34.23	29.44	23.81
	8	37.00	32.88	28.18	22.89
悬臂桩	5	30.17	25.61	21.28	16.74
	6	26.76	22.65	18.97	15.00

综上所述, 使用单支撑排桩、倾斜桩及悬臂桩作为基坑支护形式时, 在不同基坑深度情况下, 不同弯矩区域所占桩身长度比值均会出现在一定范围之内, 表明基坑设计时根据计算配置复式配筋的长度是可以提前预知的。

3 区段配筋预应力桩抗弯承载力试验及验证

3.1 试验概况

本次试验采用 PHC AB 400(95)型管桩(10G409)、PRC AB 400(95)型管桩(JGJ/T 406—2017)及区段复式配筋预应力混凝土管桩(PR-PHC 管桩), 试验桩配筋参数见表 3, 各型号管桩桩长均为 8 m, 采用 C80 混凝土。

本次试验采用简支梁对称加载装置, 两支座间距 4.8 m, 跨中纯弯段为 1.0 m。加载方式为分级加载, 直至试件达到极限状态。试验方法具体参照《先张法预应力混凝土管桩: GB 13476—2009/XG1—2014》中管桩抗弯试验方法。本试验重点研究区段复式配筋预应力混凝土管桩的抗弯承载力与裂缝发展情况, 以及与传统的 PHC、PRC 管桩桩型进行对比, 并根据试验结果设计了验证组试验。

3.2 试验结果

本试验设计了两侧非预应力筋均为区段配置和桩身一侧非预应力筋为区段配置两种区段复式配筋预应力混凝土管桩。

从表 4 中可知, 在试验组一中, 在 80%, 70%,

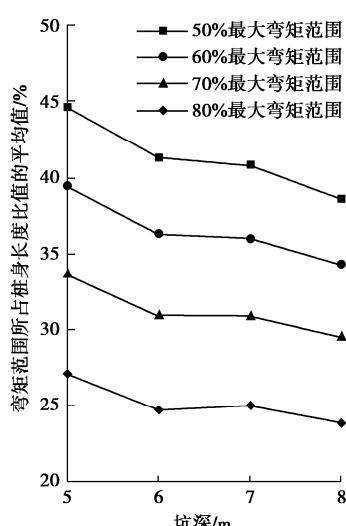


图 5 单支撑排桩各弯矩区域占桩身范围随坑深的变化情况

Fig. 5 Variation of proportion of each bending moment area of single support row pile to pit depth

表 3 试验桩纵筋钢筋配置表
Table 3 Longitudinal reinforcement of test piles

试验柱型		预应力筋配置	HRB400 非预应力筋配置		备注
组	照 对	PHC AB 400 PRC AB 400	配置数量	配置位置/m	
		7Φ ^D 10.7 7Φ ^D 10.7	— 7Φ12	— 0~8	全长配非预应力筋
试 验 组 一	PR-PHC AB 400(0.6~0.6)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	2.74~5.26	60%最大弯矩区域配非预应力筋
	PR-PHC AB 400(0.7~0.7)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	2.93~5.07	70%最大弯矩区域配非预应力筋
	PR-PHC AB 400(0.8~0.8)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	3.12~4.88	80%最大弯矩区域配非预应力筋
试 验 组 二	PR-PHC AB 400(0~0.6)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	0~5.26	桩端至 60%弯矩配非预应力筋
	PR-PHC AB 400(0~0.7)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	0~5.07	桩端至 70%弯矩配非预应力筋
	PR-PHC AB 400(0~0.8)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	0~4.88	桩端至 80%弯矩配非预应力筋
验 证 组	PR-PHC AB 400(0.5~0.5)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	2.55~5.45	50%最大弯矩区域配非预应力筋
	PR-PHC AB 400(0~0.5)	7Φ ^D 10.7	7Φ12	0~5.45	桩端至 50%弯矩配非预应力筋

60%最大弯矩区域内配置了非预应力钢筋的 PR-PHC 管桩，其开裂弯矩值与极限弯矩值均大于 PHC 管桩，并且随着配筋区域的增加，其开裂弯矩值与极限弯矩值均随之提高。试验组一表明在某一最大弯矩区间内配非预应力筋会提高管桩的抗弯承载性能，并且配非预应力筋的区间范围越大，管桩的抗弯承载性能提高越多。

表 4 各试件受弯试验结果
Table 4 Flexural test results of specimens

柱型	抗裂弯矩		极限弯矩		备注
	弯矩值/ (kN·m)	弯矩值/ (kN·m)	裂缝平均 数量	裂缝平均 间距/mm	
对照组	PHC AB 400	63.66	115.34	6	354
	PRC AB 400	83.15	188.68	20	144
试验组一	PR-PHC AB 400 (0.8~0.8)	65.37	150.96	13	183
	PR-PHC AB 400(0.7~0.7)	72.59	158.47	15	183
	PR-PHC AB 400(0.6~0.6)	72.59	173.57	14	196
试验组二	PR-PHC AB 400(0~0.8)	72.59	158.47	14	196
	PR-PHC AB 400(0~0.7)	65.37	188.68	18	146
	PR-PHC AB 400(0~0.6)	76.29	196.28	18	160
验证组	PR-PHC AB 400(0.5~0.5)	76.29	188.68	19	151
	PR-PHC AB 400(0~0.5)	76.29	188.68	19	164

在试验组二中，桩身一侧非预应力筋为区段配置的 PR-PHC 管桩，其极限弯矩值均大于各自对应弯矩区间的两侧非预应力筋均为区段配置的 PR-PHC 管桩，并且 PR-PHC AB 400(0~0.7) 柱型的极限弯矩值就已经等同于全长配非预应力筋的 PRC AB 400 柱型。表明该种设计形式可在同弯矩区域值内更好的提高管

桩的抗弯承载性能，但非预应力筋配置长度较长。

而从根据试验组一、二的试验结果设计的验证组试验的结果中可以发现，PR-PHC AB 400(0.5~0.5) 柱型同样达到了全长配非预应力筋的 PRC AB 400 柱型的极限弯矩值，这不仅验证了试验组一所得结论，而且证明了两侧区段配置非预应力筋可以达到通长配非预应力筋的效果。并且，PR-PHC AB 400(0~0.7) 柱型的非预应力筋配置范围为 63.38%，而 PR-PHC AB 400(0.5~0.5) 柱型为 36.25%，表明两侧区段配置非预应力筋的 PR-PHC 管桩在达到同等效果时更加节省钢筋。

综上所述，区段配置的非预应力筋可以提高管桩的抗弯承载性能并改善桩身裂缝的展开情况，证明了根据计算结果在桩身某一特定区域内区段配置非预应力筋可以达到全长配筋需求的效果，表明 PR-PHC 管桩构件的抗弯承载性能可以达到在基坑支护工程中使用的要求。

4 ABAQUS 有限元模拟

4.1 模型建立

(1) 混凝土本构模型

本模型采用的混凝土本构关系为混凝土塑性损伤模型 (CDP 模型)，CDP 模型可以较好地反映混凝土在受拉及受压状态下的应力应变关系。在受压状态下，混凝土先经历弹性阶段，随后进入强化阶段，在到达极限压应力后进入软化阶段。在受拉状态下，混凝土先经历弹性阶段，到达极限拉应力后进入软化阶段。

混凝土受压状态下应力-应变曲线方程如下：

$$y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 \quad (x \leq 1), \quad (1)$$

$$y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} \quad (x > 1). \quad (2)$$

式中: $y = \frac{\sigma}{f_c^*}$, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$, f_c^* 为混凝土的即轴心抗压强度 (N/mm^2)。

混凝土受拉状态下应力-应变曲线方程如下:

$$y = 1.2x - 0.2x^6 \quad (x \leq 1) , \quad (3)$$

$$y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} \quad (x > 1) . \quad (4)$$

式中: $y = \frac{\sigma}{f_{tk}}$, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$, f_{tk} 为混凝土的即轴心抗拉强度 (N/mm^2)。

数值模型混凝土材料本构参数见表 5。

表 5 混凝土本构参数表

Table 5 Constitutive parameters of concrete

弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角/°	偏心率	$\frac{f_{bo}}{f_{c0}}$	屈服常数	黏性系数
38000	0.2	30	0.1	1.16	0.6667	0.001

(2) 钢筋本构模型

预应力混凝土管桩中配置了预应力钢棒及非预应力钢筋。为了能充分反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象, 钢筋本构模型采用了 Esmacaily-Xiao 模型。钢筋应力-应变表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y & (\varepsilon_y < \varepsilon \leq k_1 \varepsilon_y) \\ k_4 f_y + \frac{E_s(1-k_4)}{\varepsilon_y(k_2 - k_1)^2} (\varepsilon - k_2 \varepsilon_y)^2 & (\varepsilon > k_1 \varepsilon_y) \end{cases} \quad (5)$$

钢筋应力-应变曲线如图 6, 钢筋材料参数见表 6。

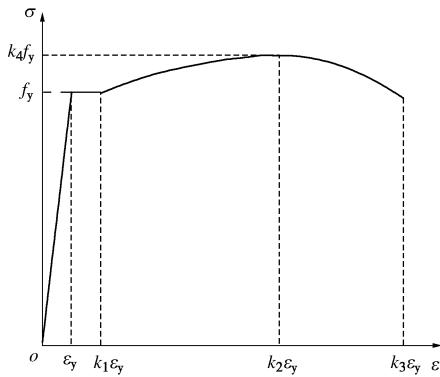


图 6 钢筋应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of rebar

表 6 钢筋材料参数表

Table 6 Parameters of rebar materials

钢筋种类	E_s / MPa	f_y / MPa	ε_y	k_1	k_2	k_3	k_4
预应力钢棒	200000	1342	0.0069	1	4.9	5.1	1.09
非预应力筋	195000	484	0.0024	10.2	48.3	56.8	1.21

(3) 有限元模型

按照管桩几何参数建立管桩混凝土桩身、螺旋箍筋、预应力钢棒、非预应力钢筋及钢垫片部件。之后, 建立 C80 混凝土、预应力钢棒、螺旋箍筋、非预应力钢筋及钢垫片材料属性并赋予部件。再将钢筋采用 Embedded region 接触内置于桩身混凝土中; 管桩与跨中夹具、支座垫块采用 Tie 约束模拟; 在跨中夹具上端及支座设置参考点 RP1、RP2、RP3 及 RP4, 通过 Coupling 约束与接触面进行耦合, 方便对参考点施加位移及约束。采用降温法对预应力钢棒施加预应力, 达到对混凝土桩身施加预应力的效果。桩身混凝土和钢垫片采用三维实体单元 C3D8R, 预应力钢筋、非预应力钢筋和螺旋箍筋采用桁架单元 T3D2。网格划分为桩身环向等分 36 份, 沿轴向网格单元尺寸为 50, 如图 7 所示。

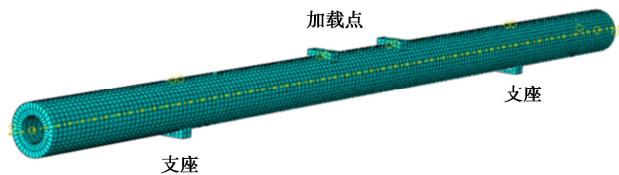


图 7 有限元模型示意图

Fig. 7 Finite element model

4.2 有限元模型验证

依据 4.1 节内容建立各型号试验桩的抗弯承载力试验模型, 如图 8 所示, 对比分析 PRC 型管桩与 PHC 型管桩的模拟及实测荷载-位移图可以发现, 两种型号管桩的模拟值与实测值吻合情况较好, 均表现为在加载初期的弹性阶段, $P-f$ 曲线呈线性增长; 在桩身出现裂缝后, 管桩抗弯刚度开始减小, 位移增量变化速度加快, 直至桩身破坏。

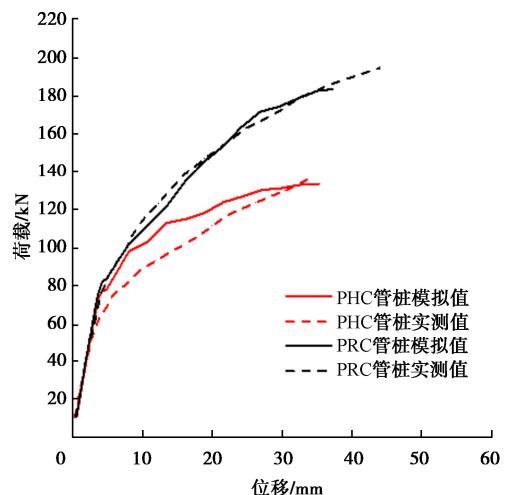


图 8 PHC 和 PRC 管桩模拟及实测荷载-位移图

Fig. 8 Simulated and measured load-displacement of PHC and PRC pipe piles diagrams

表 7 管桩极限弯矩模拟值与实测值对比

Table 7 Comparison between simulated and measured ultimate bending moments of pipe piles

管桩型号	极限弯矩实 测值/(kN·m)	极限弯矩模 拟值/(kN·m)	实测值/模拟 值
PRC-400-AB	188.68	174.39	1.08
PR-PHC-400- AB (0~0.5)	188.68	164.50	1.15
PR-PHC-400- AB (0.5~0.5)	188.68	168.82	1.12
PR-PHC-400- AB (0.6~0.6)	173.60	164.88	1.05
PR-PHC-400- AB (0.7~0.7)	158.47	163.03	0.97
PR-PHC-400- AB (0.8~0.8)	150.96	157.34	0.96
PHC-400-AB	126.59	123.00	1.03

如表 7 所示, 各型号试验管桩的极限弯矩实测值与模拟值相差幅度在 15% 之内, 表明该有限元模型可以较好反映各型管桩抗弯承载力试验的实际情况。

4.3 有限元分析

在有限元模拟中, 各型号管桩在加载至极限状态时, 均表现为受压区混凝土应力达到轴心抗压强度标准值, 桩身底部的预应力钢棒及非预应力筋应力达到屈服强度, 与现场试验中试验桩加载至极限状态时出现受压区混凝土破坏的现象相吻合。

如图 9 所示, 在加载初期, 各型号试验管桩的 $P-f$ 曲线几乎重合, 表明在管桩中配置非预应力钢筋对在其弹性阶段的抗弯刚度及开裂荷载影响很小; 在开裂后的弹塑性阶段, 各型号试验管桩的 $P-f$ 曲线开始出现分歧, 表明随着区段配置非预应力筋区域的增加, 管桩的抗弯刚度逐渐增加; 当加载至极限状态时, 管桩区段配置非预应力筋区域越大, 其极限荷载值越大。因此, 区段配置非预应力钢筋可以明显提高管桩的抗弯承载性能及其抗弯刚度。

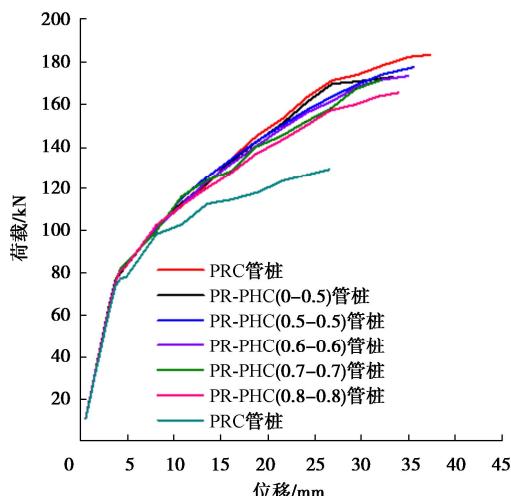


图 9 各试验管桩荷载-位移曲线模拟值对比

Fig. 9 Comparison of simulated values of load-displacement curves of pipe piles

并且, PR-PHC-400-AB (0~0.5) 桩型与 PR-PHC-400-AB (0.5~0.5) 桩型的模拟 $P-f$ 曲线与 PRC-400-AB 桩型贴合度较高, 从有限元模拟角度验证了 PR-PHC 桩型可以达到 PRC 桩型的抗弯承载性能。

5 区段配筋预应力支护桩工程应用的可靠性分析

在基坑开挖过程中必然会存在改变支护桩弯矩分布状态的不利工况, 本节采用 Plaxis 3D 软件建立斜直交替支护桩基坑剖面模型, 针对坑外堆载、坑内超挖、降雨 3 种不利工况, 分析其可能对区段配筋支护桩在工程应用中产生的不利影响。

图 10 为不同坑外堆载工况对直、斜支护桩的弯矩区间范围产生的影响变化, 图中弯矩区间取值为 70% 最大弯矩区间。如图 10 所示, 当坑外堆载值由无堆载加至 60 kPa 时, 直桩及倾斜桩桩身 70% 最大弯矩区间会向下方移动, 区间范围也随之增加。所以坑外堆载工况的出现不仅会使支护桩所受弯矩变大, 而且会导致弯矩区间分布产生变化, 因此应对采用区段配筋支护桩的基坑施工进程做好合理规划, 防止基坑周边产生较大堆载。

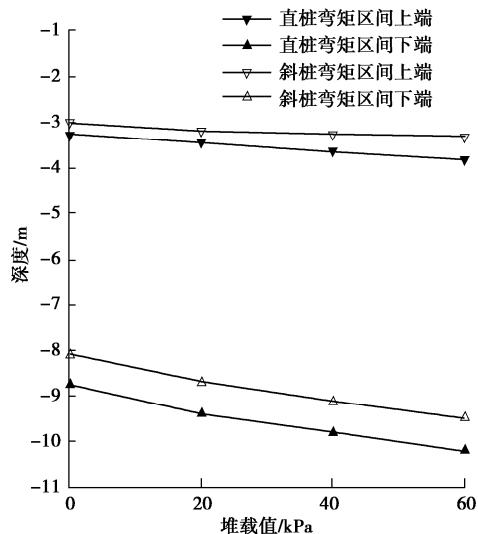


图 10 直、斜桩 70%最大弯矩区间随堆载值变化图

Fig. 10 Variation of maximum bending moment interval of 0.7 times with load value of straight and inclined piles

图 11 为不同坑内超挖工况对直、斜支护桩的弯矩区间范围产生的影响变化, 图中弯矩区间取值为 70% 最大弯矩区间。如图 11 所示, 当坑内超挖深度由 0 m 加至 2 m 时, 直桩及倾斜桩桩身 70% 最大弯矩区间变化范围均较小, 且变化呈现出离散性。分析发现, 尽管坑内超挖对弯矩区间范围变化影响较小, 但是会大幅增加桩身所受弯矩值, 因此应禁止在采用区段配筋支护桩的基坑施工进程中出现超挖工况。

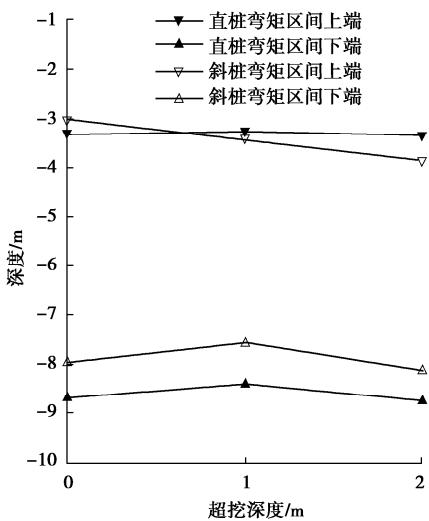


图 11 直、斜桩 70%最大弯矩区间随超挖深度变化图

Fig. 11 Variation of maximum bending moment interval of 0.7 times with over excavation depth of straight and inclined piles

图 12 为降雨前后对直、斜支护桩的弯矩区间范围产生的影响变化, 图中弯矩区间取值为 70%最大弯矩区间。如图 12 所示, 当出现降雨工况后, 直桩及倾斜桩桩身 70%最大弯矩区间呈现出扩张的变化情况, 但是扩张程度较小。考虑到降雨这种对支护桩弯矩区间范围影响较小, 且无法人为控制的不利工况, 可以将区段配置的非预应力筋上端及下端各增设 $35d$ (d 为非预应力钢筋的直径) 的安全保护长度, 来预防降雨带来的不利影响。

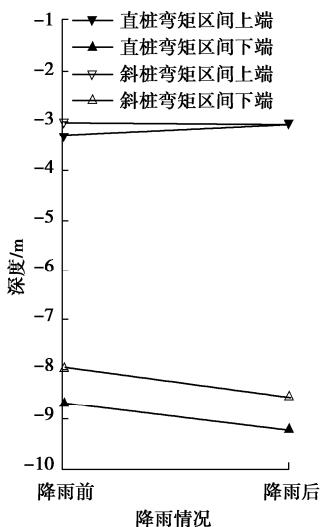


图 12 直、斜桩 70%最大弯矩区间降雨前后变化图

Fig. 12 Variation of straight and inclined piles before and after rainfall at interval of 0.7 times maximum bending moment

6 结 论

通过对天津地区约 80 个基坑工程中的支护桩弯矩分布情况进行统计分析, 并对区段复式配筋预应力

混凝土管桩进行足尺抗弯试验及有限元模拟, 得到以下 6 点结论。

(1) 采用单支撑排桩、倾斜桩及悬臂桩作为基坑的支护体系时, 各形式支护桩的桩身最大弯矩出现的位置均会有一个特定范围。同时, 不同弯矩区域所占桩身长度比值均会呈现出类似正态分布的分布形式, 表明各形式支护桩的桩身弯矩区间分布是有规律的。

(2) 通过管桩抗弯承载力试验与验证, 发现区段配置的非预应力筋可以提高管桩的抗弯承载力以及改善桩身裂缝的展开情况, 证明 PR-PHC 管桩构件的抗弯承载性能可以等同于 PRC 管桩, 达到在基坑支护工程中使用的要求。

(3) 建立了可以较好模拟试验桩抗弯试验全过程的数值模型, 其极限弯矩模拟值与试验值相差在 15% 以内。

(4) 在混凝土开裂前的线弹性阶段, 管桩区段配置的非预应力钢筋对抗弯刚度没有显著影响, 但到达弹塑性阶段后, 管桩区段配置的非预应力钢筋会显著增加管桩的抗弯刚度。

(5) PR-PHC 管桩在实际应用中面对不利工况时, 可以采用控制堆载、禁止超挖及增设非预应力筋保护长度来规避可能受到的不利影响。

(6) 根据本文研究成果, 证明了可以在基坑工程中使用 PR-PHC 管桩替代 PRC 管桩, 从而减少钢筋使用量, 达到促进碳减排的目的。

参 考 文 献:

- [1] 何永福, 朱进军. 管桩在连云港地区基坑支护中的应用及实测分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 57-59. (HE Yongfu, ZHU Jinjun. Application and observational analysis of pipe-pile for excavation support system in Lianyungang district[J]. Building Structure, 2009, 39(7): 57-59. (in Chinese))
- [2] 李绥林, 刘合伍, 陈昌文. PHC 管桩在某基坑支护工程中的设计与施工[J]. 施工技术, 2010, 39(增刊 1): 13-16. (LI Suilin, LIU Hewu, CHEN Changwen. The design and construction of PHC pipe pile technique in one deep foundation pit supporting engineering[J]. Construction Technology, 2010, 39(S1): 13-16. (in Chinese))
- [3] 沈晞, 周建凡, 夏亮. PHC 管桩在基坑支护工程中的应用研究[J]. 国外建材科技, 2007, 28(1): 70-73. (SHEN Xi, ZHOU Jianfan, XIA Liang. Research on application of PHC piles in foundation pit supporting[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2007, 28(1): 70-73. (in Chinese))

- [4] 张忠苗, 刘俊伟, 邹健, 等. 加强型预应力混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[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), 2011, **45**(6): 1074-1080. (in Chinese))
- [5] 王新玲, 高会宗, 周同和, 等. 新型混合配筋预应力混凝土管桩抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, **42**(8): 64-68. (WANG Xinling, GAO Huizong, ZHOU Tonghe, et al. Experimental studies of flexural behavior of new type prestressed concrete pipe pile with compound unprestressed reinforcement[J]. Industrial Construction, 2012, **42**(8): 64-68. (in Chinese))
- [6] 杜新喜, 胡锐, 袁焕鑫, 等. 混合配筋预应力混凝土管桩抗弯承载性能研究[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(1): 44-52. (DU Xinxì, HU Rui, YUAN Huanxin, et al. Study on flexural behavior of prestressed concrete pipe pile with hybrid reinforcement[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(1): 44-52. (in Chinese))
- [7] 徐金, 何晶. 增加非预应力筋的混凝土管桩抗弯抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2016, **46**(10): 109-112, 130. (XU Jin, HE Jing. Research on flexural and shear behavior of prestressed concrete pipe pile with non prestressed reinforcement[J]. Industrial Construction, 2016, **46**(10): 109-112, 130. (in Chinese))
- [8] 张忠苗, 刘俊伟, 谢志专, 等. 新型混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 271-277. (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**(S2): 271-277. (in Chinese))
- [9] 黄汉林, 卢玉南. 混合配筋预应力混凝土管桩在深基坑支护工程中的应用[J]. 工程勘察, 2022, **50**(8): 13-16, 27. (HUANG Hanlin, LU Yunan. Application of prestressed reinforced concrete pipe piles in retaining of deep foundation pit[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, **50**(8): 13-16, 27. (in Chinese))
- [10] 蔡磊, 梁世德, 顾明, 等. 预制高性能混合配筋预应力混凝土管桩在某深基坑支护中的应用[J]. 工程勘察, 2018, **46**(12): 25-29. (CAI Lei, LIANG Shide, GU Ming, et al. Application of high reinforced prestressed concrete compounded pipe piles in deep foundation pit[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, **46**(12): 25-29. (in Chinese))
- [11] 常玉军, 刘毅, 张吉庆, 等. PRC 管桩在基坑支护工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, **44**(6): 78-83. (CHANG Yujun, LIU Yi, ZHANG Jiqing, et al. Application of PRC pipe pile in foundation pit support engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, **44**(6): 78-83. (in Chinese))