

DOI: 10.11779/CJGE20230357

大直径双层配筋管桩接头抗弯性能试验研究

戚玉亮^{1,3}, 唐孟雄², 黄柯柯^{1,3}, 梁伟键¹

(1. 广州建筑产业研究院有限公司, 广东 广州 510663; 2. 广州建筑股份有限公司, 广东 广州 510030; 3. 广州建筑产业开发有限公司,
广东 广州 510663)

摘要: 传统的抗侧力管桩焊接接头部位存在抗弯承载力不足而出现破坏, 成为影响其安全和使用的关键问题。本论文基于大直径内外双层配筋管桩接头进行了足尺模型抗弯试验, 研究了优化双层配筋构造、改进钢筋锚固方式、提高混凝土强度等级、添加钢纤维等增强措施, 对管桩接头抗弯性能、变形破坏特征、裂纹分布特点的影响。研究结果表明, 焊接管桩接头极限弯矩达不到整桩的规范值, 其主要失效模式是两端板上部被挤压变形下部呈鼓形张开, 桩箍上边缘的混凝土压碎, 桩身下部混凝土变形拉裂。采取的增强措施仅在一定程度上提升了两节管桩接头开裂弯矩的阈值, 随着端板开洞数量的增加, 管桩接头的抗弯承载力随之降低。最后提出了新型抗弯管桩接头, 其采用套箍和端板处设置加劲肋接头构造形式, 并在桩接头处换用钢纤维混凝土桩身, 该种接头有效提高了管桩接头的抗弯性能, 使管桩具有良好的韧性与延性。

关键词: 大直径管桩; 抗弯承载力; 足尺模型试验; 新型抗弯管桩接头; 钢纤维混凝土

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)07-1553-08

作者简介: 戚玉亮(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地基基础和装配式建筑等方面的研究工作。E-mail:
cupid.7@163.com。

Experimental study on bending resistance of joints of large-diameter double-layer-reinforced pipe piles

QI Yuliang^{1,3}, TANG Mengxiong², HUANG Keke^{1,3}, LIANG Weijian¹

(1. Guangzhou Research Institute of Construction Industry Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Guangzhou Construction Engineering
Co., Ltd., Guangzhou 510030, China; 3. Guangzhou Construction Industry Development Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The failure of welded joint of the traditional lateral force pipe piles due to insufficient bending capacity has become a key problem affecting its safety and use. In this study, the full-scale model tests are carried out based on the joints of large-diameter double-layer-reinforced pipe piles, and the influences of reinforcement measures such as optimizing double-reinforced structure, improving reinforcement anchorage mode, improving concrete strength grade, adding steel fiber on the flexural performance, deformation and failure characteristics, crack distribution characteristics of joints of pipe piles are studied. The results show that the ultimate bending moment of joints of a welded pipe pile can not reach the standard value of the whole pile, and the main failure mode is that the upper part of the two ends of the plate is squeezed and deformed, the lower part of the pile is opened in a drum shape, the concrete on the upper edge of the pile hoop is crushed, and the concrete under the pile body is deformed and cracked. The strengthening measures only raise the threshold of cracking moment of joints of two pipe piles to a certain extent, and the bending capacity of joints of pipe piles decreases with the increase of the number of holes in the end plates. Finally, a new type of joint of bending resistant pipe piles is proposed, which adopts the structural form of stiffener joint at the sleeve and end plate, and replaces the steel fiber-reinforced concrete pile body at the pile joint. This kind of joint effectively improves the flexural performance of the joints of pipe piles, and makes the pipe piles have good toughness and ductility.

Key words: large-diameter pipe pile; bending capacity; full-scale model test; new type of bending resistant pipe pile joint; steel fiber-reinforced concrete

基金项目: 国家自然基金面上项目(52378332); 广州市建筑集团有限公司科技计划项目([2022]-KJ014, [2020]-KJ017) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China - General Program (Grant No. 52378332) and the Guangzhou Municipal Construction Group Co., Ltd. Technology Project (Grant Nos. [2022]-KJ014, [2020]-KJ017).

收稿日期(Received): 2023-04-24 修回日期(Revised): 2024-12-30 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

0 引言

预应力高强混凝土桩(简称 PHC 管桩)以其高强度、快速施工、经济性好、成桩质量可靠及环保施工等优点^[1-4], 在近年来随着大基建和房地产的蓬勃发展, 得到了广泛的应用^[5-6]。特别是在基坑支护、建筑抗震基础、港口码头、边坡和隧道等工程中, PHC 管桩不仅承担了主要的竖向荷载, 还越来越多地用于承担水平荷载和弯矩作用, 展现了其在抗侧力控制工况下的卓越性能^[7-13]。近年来, 科研人员进一步研发了混合配筋预应力混凝土管桩(PRC 管桩), 通过在 PHC 管桩中加入一定量的非预应力筋, 进一步提升了其综合性能和应用范围^[14]。

由于生产、运输及施工等原因, 单根大直径预应力混凝土管桩的桩长往往不能一次满足设计深度要求, 从而必须在打桩时进行现场接桩, 其连接以采用端板焊接方式最为普遍^[15]。在众多工程案例中管桩出现侧弯失效的一个重要原因就是由于焊接管桩接头部位发生破坏。抗侧力管桩焊接接头部位能否满足桩身设计抗弯承载力要求成为影响安全和使用的关键问题。

尽管预应力混凝土管桩的应用已较为广泛, 但以往对 PHC、PRC 管桩的抗弯性能的研究主要针对的是整桩, 而对其接头抗弯性能及失效破坏模式的研究较少。黄广龙等^[16]通过对小直径 PHC 管桩焊接接头进行了足尺试验, 研究了其在弯矩作用下桩身形变与破坏形态, 并且深入分析了焊接接头破坏的主要原因。研究发现: 极限承载状态下破坏形态为端板与混凝土连接处开裂及主筋墩头断裂, 具有明显脆性破坏的特征, 必须在接头处采取进一步的加强措施, 以满足水平荷载作用下管桩的抗弯承载性能。《先张法预应力混凝土管桩: GB 13476—2023》规定: 管桩接头处极限弯矩不得低于桩身的极限弯矩。根据以往试验研究结果^[16-17], 传统的管桩焊接接头要达到此要求有一定的难度。这是由于传统的管桩焊接接头在在焊接施工时由于受到人为因素、焊接设备和天气条件的影响, 往往导致接头焊接质量不能得到很好的保证。

本文以自主研发的大直径内外双层混合配筋管桩为研究对象, 对整桩和两桩焊接接头进行足尺模型抗弯性能试验, 研究双层配筋方式、锚固方式、桩身混凝土强度等级、钢纤维等不同影响因素, 对整桩和管桩接头抗弯承载力的影响。在此基础上, 通过原型试验和理论分析, 研究发明了一种新型大直径管桩抗弯接头方式。

1 试验管桩制作

试验桩共分 7 组, #1 试验桩为通长 52.0 m 的整桩(管桩配筋截面图见图 1(a)), 其余#2~#7 试验桩 6 组带接头的管桩, 单节管桩长 20.0 m, 详见表 1。#2

桩为标准试验桩, #3 桩的非预应力钢筋直径从 $\phi 10$ mm 加大到 $\phi 25$ mm, 管桩配筋截面图见图 1(b)。#1~#3 试验桩接头的非预应力筋与预应力筋布置在同一半径的圆圈上, 非预应力筋与端板焊接。#4 桩接头的非预应力筋孔圈比预应力筋孔圈的半径小 27.5 mm, 是在端板上进行间隔开孔攻丝后, 将 22 根直径为 25 mm 螺纹钢端头攻丝锚固在端板上, 配筋截面见图 1(c), 接头构造详见图 2(a), 加工实物见图 3(a)。#5、#6 桩接头的非预应力筋孔圈比预应力筋孔圈的半径大 35.0 mm, 同样在端板上进行间隔开孔攻丝后, 将 22 根直径为 12.6 mm 的预应力钢棒端头攻丝锚固在端板上。不同的是#6 桩身混凝土强度等级提高为 C100, 配筋截面图见图 1(d), 接头构造详图见图 2(b), 加工实物见图 3(b)。#7 桩是本文发明的一种新型承弯管桩接头方式, 即在接头端板与裙板间焊接了 11 根 16 mm 厚的 Q345B 的加劲肋, 并且在接头桩身 5 m 范围换用钢纤维混凝土一体离心成型, 钢纤维掺量为 30 kg/m³ 混凝土, 钢纤维的抗拉强度为 1137 MPa, 配筋截面图见图 1(e), 接头构造详图见图 2(c), 加工实物见图 3(c)。管桩具体试验参数见表 1。在管桩制作时对混凝土的质量进行了检测, 管桩桩身和端板处混凝土已达到设计要求, 各项性能指标均达标。

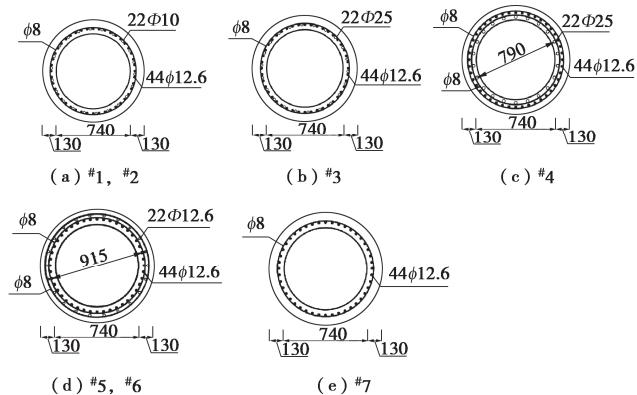


图 1 管桩配筋截面图

Fig. 1 Cross section of pipe pile

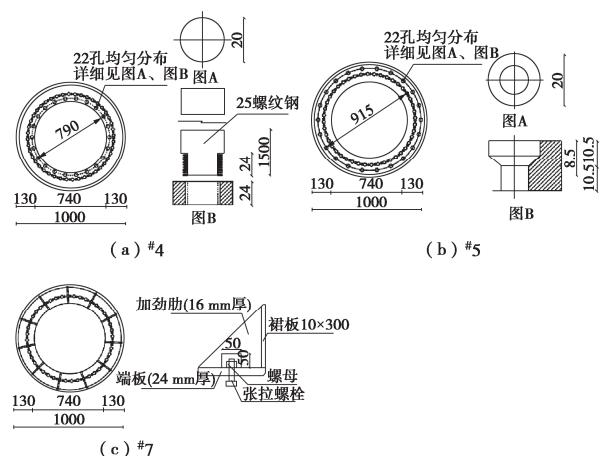


图 2 管桩接头构造详图

Fig. 2 Detailed drawing of joint structure of pipe pile

表1 抗弯试验管桩参数

Table 1 Parameters of bending tests on piles

编号	管桩外径/mm	壁厚/mm	桩长/m	预应力筋	非预应力筋	混凝土强度等级	螺旋筋直径/mm
#1	1000	130	52	44Φ12.6	22Φ10	C80	8
#2	1000	130	20+20	44Φ12.6	22Φ10	C80	8
#3	1000	130	20+20	44Φ12.6	22Φ25	C80	8
#4	1000	130	20+20	44Φ12.6	22Φ25	C80	8
#5	1000	130	20+20	44Φ12.6	22Φ12.6	C80	8
#6	1000	130	20+20	44Φ12.6	22Φ12.6	C100	8
#7	1000	130	20+20	44Φ12.6	—	C80	8



(a) #4螺纹钢攻丝锚固加工实物图



(b) #5刚棒锚固加工实物图



(c) #6C100管桩加工实物图

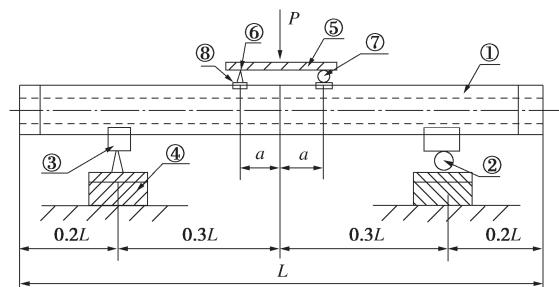


(d) #7接头焊接受了一圈板加工实物图

图3 管桩加工实物图
Fig. 3 Photos of pipe pile processing

2 管桩抗弯试验方案

试验加载装置如图4所示, 现场试验见图5。本次试验采用千斤顶加载, 通过荷载传感器、荷载测试仪控制加载等级, 分别在跨中和支座截面设置千分表、百分表测每级荷载作用下管桩的挠曲变形。



①-管桩; ②-滚动铰支座; ③-固定铰支座; ④-支墩; ⑤-分配梁; ⑥-分配梁固定铰支座; ⑦-分配梁滚动铰支座; ⑧-U型垫板; L 为试验桩桩长; a 为试件加载作用点到跨中距离, 本试验 a 为1 m。

图4 管桩接头抗弯能力试验

Fig. 4 Bending resistance tests on joints of pipe piles



图5 加载装置现场图

Fig. 5 Photo of loading devices

试验加载方法、抗裂荷载和极限荷载的确定参考国家标准《先张法预应力混凝土管桩: GB 13476—2023》。试验中管桩实测弯矩计算公式为

$$M = \frac{P}{4} \left(\frac{3}{5} l - 2a \right) + \frac{1}{40} Wl \quad . \quad (1)$$

式中: W 为管桩试件自重(kN); P 为试验机荷载值

(kN); l 为管桩试件长度 (m); a 为试件加载作用点到跨中距离, 本试验中 a 为 1 m。每个试件布置 14 个应变测点, 分别布置在跨中底部两侧 2 m 范围的混凝土表面和跨中焊缝表面上, 位移计和应变片张贴位置如图 6 所示。

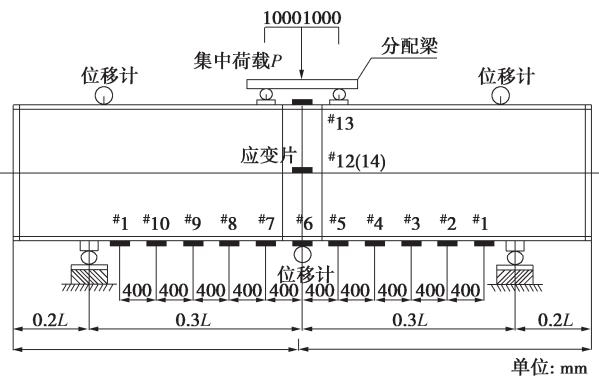


图 6 应变片及千分表布置示意图

Fig. 6 Layout of strain gauges and dial indicators

通过式 (1) 可知, 计算管桩受弯弯矩时, 不仅要考虑施加外部荷载产生的管桩弯矩, 同时还要考虑管桩自重下产生的弯矩。故当未对管桩施加荷载时, 管桩弯矩并不为零。

3 试验现象和破坏特征分析

3.1 抗弯承载力

表 2 列出了所有管桩试件的试验结果, 从表 2 中数据分析及计算可知: ①#1 整桩的开裂弯矩和极限弯矩实测值均超过规范理论计算值, 说明管桩制作工艺质量达标; ②#2~#6 管桩接头的开裂弯矩实测值均大于规范设计值, 与#1 整桩的开裂弯矩相比, #3~#6 管桩接头的开裂弯矩分别提升 2.59%, 4.86%, 4.12%, 9.68%; ③#2~#6 两节管桩接头的极限弯矩实测值均小于规范设计值, #2~#6 桩分别是设计值的 87.0%, 63.1%, 57.5%, 68.2%, 58.3%, #2~#6 管桩接头极限弯矩约为#1 整桩极限弯矩实测值的 72.37%~86.65%, 未达到整桩的抗弯承载力要求; ④#7 管桩接头的开裂弯矩和极限弯矩实测值均大于整桩的规范设计值, 满足设计使用要求。

因此, 可得出以下两点结论: ①采用螺纹钢攻丝锚固、预应力钢棒锚固, 提高混凝土强度等级可在一定程度上提高 PRC 管桩接头的开裂弯矩, 减小变形量, 但对极限弯矩的贡献有限, 这些措施均不能有效提高管桩接头的抗弯承载力。②在端板接头处增设肋板, 且在接头两侧 5 m 范围采用钢纤维混凝土桩身, 能明显提高管桩接头极限抗弯承载力。

表 2 管桩抗弯试验实测值与计算值的对比分析

Table 2 Comparative analysis of measured and calculated values of bending tests on piles

编号	计算开裂弯矩/(kN·m)	计算极限弯矩/(kN·m)	实测开裂弯矩/(kN·m)	实测极限弯矩/(kN·m)
#1	1285	2760	1503.11	2892.21
#2	1285	2760	1477.75	2400.34
#3	1285	3726	1542.00	2298.43
#4	1285	3640	1576.15	2093.15
#5	1285	3675	1564.99	2505.65
#6	1343	3931	1648.64	2292.47
#7	1287	2450	1455.44	2700.86

6 条管桩接头 (#2~#7) 的受力变化趋势类似, 在弯矩作用下的受力性能可分为弹性、裂缝开展及破坏 3 个受力阶段^[18]。荷载施加初期, 构件处于弹性阶段, 跨中挠度随着荷载的增加线性增大, 暂未出现裂缝。随着荷载的增加, 裂缝不断向上延伸, 新裂缝不断产生, 跨中挠度增加速率加快。继续增加荷载, 裂缝宽度急剧增加, 受压区混凝土压应变急剧增大, 表现出明显的塑性变形特征。图 7 为#2~#7 管桩接头的跨中荷载-挠度曲线, 可以看出: 所有管桩试件加载初期由于荷载水平较低, 试验管桩处于弹性状态, 桩身跨中位移呈现明显线性增长趋势。随着荷载不断增加, 试件进入弹塑性状态, 当试件出现第一条裂缝后, 荷载-位移曲线斜率呈现减小趋势, 变形明显加快。临近破坏时, 跨中位移随着荷载增加不断增加, 达到极限荷载后, 桩身发生蠕变现象, 继续加压荷载不增反降, 跨中位移持续增长, 说明管桩主体结构已经失效破坏, 后续仅剩桩身钢筋的屈服变形。详细分析如下: 在原有 44 条 PC 钢棒基础上, 增加 22 条螺纹钢就是为了管桩受弯时, 进一步提高其变形性能, #2~#4 桩是同层布置, #5~#6 桩是内外侧双层布置。#3、#4 桩较#2 桩的钢筋直径从 $\phi 10$ mm 加粗到 $\phi 25$ mm, 从图 7 两条曲线对比可知, 后半段#3 桩的抗弯性能较#2 桩进一步提高, 然其形变提升效果并不明显。#4 桩的螺纹钢与端头板攻丝机械连接后, 其极限抗弯荷载较#3 桩低, 研究认为端板攻丝开洞 (22 个 $\phi 25$ mm 的圆孔) 后大大降低了接头刚度, 导致管桩接头部位抗弯性能反而较#2 桩降低。#5 桩改用 $\phi 12.6$ mm 的 PC 钢棒, 减小了孔洞直径, 并将其布置于箍筋外侧, 以便管桩受弯剪时, 更早的受力, 更好的保护管桩外壁混凝土, 提高其开裂性能, 试验效果较#2~#4 桩好。#6 桩与#5 桩的不同是桩身采用 C100 混凝土替代 C80 混凝土, 端板采用 Q345 钢, 厚度由 24 mm 增加到 30 mm, 使得端板的刚度和强度均得到加强, 可是由图 7 可知, 实际结果并不理想。因此, #7 桩采用套箍和端板处设置加劲肋接头构造形式, 并在桩接头处换用钢纤维混凝

土桩身的管桩接头, 试验验证分析认为, 此接头可将端板焊接界面受力, 通过裙板、肋板、PC钢棒和端头纤维混凝土段的相互作用, 在保证整条管桩桩体抗弯性能的同时, 有效增强接头处延展韧性能力, 可较好地防止管桩做支护桩受到周围堆载或动载冲击的突然脆断。

表3为#1~#7管桩抗弯试验跨中位移表。#1~#6桩分别加载到206.96, 118.58, 127.38, 200.96, 198.96, 233.9 kN时, 加载点处桩身下部开裂; #1~#6桩施加的最大荷载分别是471.96, 244.96, 231.96, 294.96, 369.96, 350.96 kN, 跨中位移为195.0~238.0 mm。#7桩的开裂载荷为127.07 kN, 极限载荷为304.99 kN, 管桩接头跨中极限位移为348.0 mm, 与#1~#6相比, #7新型管桩未增加非预应力筋的管桩在相同荷载作用下挠度较大, 其挠度远大于其他管桩, 变形量提高了46.21%~78.46%, 说明其变形柔韧性较好, 在工程应用中不容易发生破坏。

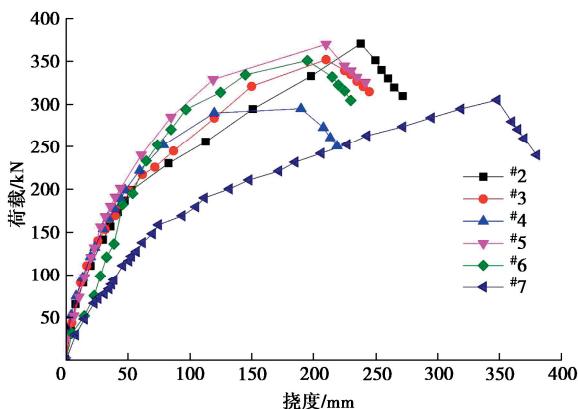


图7 管桩接头的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-midspan deflection curves of joints of pipe piles

表3 管桩抗弯试验跨中位移表

Table 3 Mid-span displacements of bending tests on pipe piles

编号	极限载荷/kN	跨中位移/mm
#1	471.96	216.36
#2	244.96	238.00
#3	231.96	210.00
#4	294.96	190.00
#5	369.96	210.00
#6	350.96	195.00
#7	304.99	348.00

3.2 试件破坏和裂缝分布情况

#2~#6管桩接头破坏时, 全部表现为受压区混凝土被压碎, 桩套箍裙板和端板均与管桩桩身明显分离, 桩箍上边缘的混凝土被压碎, 切开后发现两焊接端板位于桩身上部的端板间被挤压变形, 下部两端板呈鼓形拉开, 见图8。

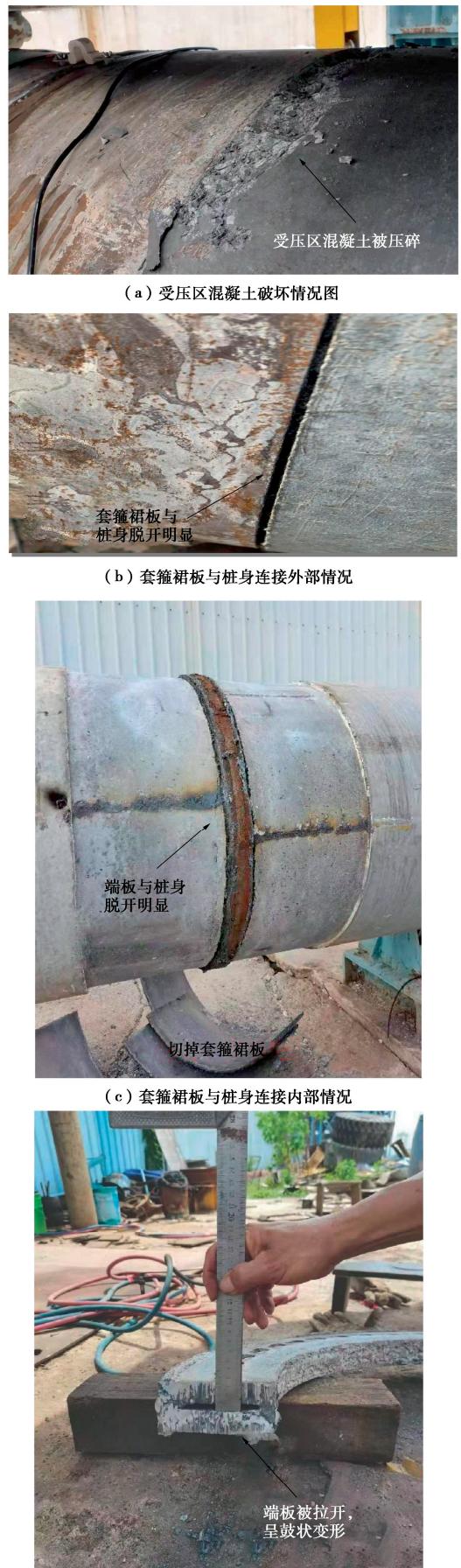


图8 #2~#6管桩接头破坏

Fig. 8 Photos of #2~#6 pipe pile joint failure

在极限荷载下, 端板和桩在现场试验中, 桩头混凝土被拉开 4.6~11.0 mm, 桩箍的下边缘与管桩脱离 3.0~8.0 mm。#7 管桩接头受弯破坏时, 与#2~#6 管桩相比, 受压区混凝土稍微被压碎, 裙板与桩身混凝土脱开不明显, 管桩弯曲非常明显, 挠度较大, 见图 9。

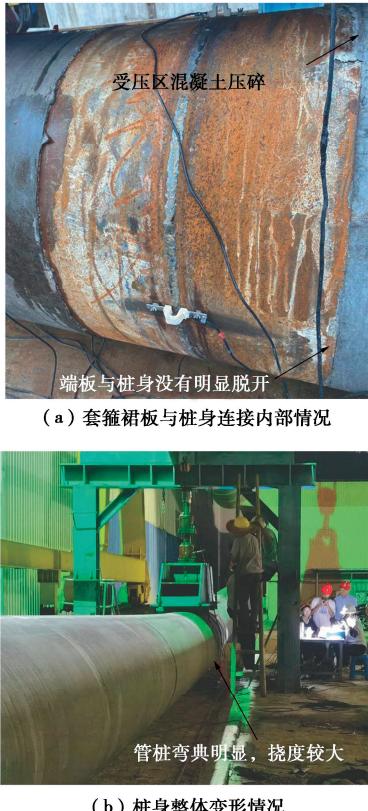


图 9 #7 管桩接头破坏

Fig. 9 Photos of joint failure pipe pile of No. 7

图 10 为 6 条管桩接头 (#2~#7) 的破坏后裂缝分布示意图, 从图 10 中可以看出: #2、#3 和 #6 裂缝主要分布在跨中两侧约 3 m 范围内, 跨中受拉区桩身出现约 20 条裂缝, 管桩跨中中部和顶部受压区混凝土明显被压碎, 桩身混凝土与保护性套箍明显脱开。#4 和 #5 裂缝主要分布在跨中两侧约 1.5 m 范围内, 跨中受拉区桩身出现约 10 多条裂缝。#7 裂缝分布范围明显变宽, 约在跨中两侧约 5 m 范围内, 跨中受拉区桩身出现的裂缝数高达 40 条, 跨中位移达到 348.0 mm, 说明管桩接头的韧性明显提高。

因此, 得出以下结论: 采用钢筋加粗 (#3) 和提升混凝土强度等级 (#6) 均不能有效提升管桩接头抗弯性能; 采用接头加肋和桩身采用钢纤维混凝土措施可以明显改善管桩接头抗弯性能; 采用螺纹钢攻丝锚固 (#4) 和预应力钢棒锚固 (#5) 的措施反而降低了管桩接头的抗弯性能。#7 管桩接头采用在端板接头焊接肋板, 且在接头两侧 5 m 范围采用钢纤维混凝土桩身的措施, 实测极限弯矩相比计算极限弯矩明显提高,

并且能使其极限弯矩可达到 2#管桩的计算极限弯矩, 表明采用上述措施, 能明显提升焊接管桩接头极限抗弯承载力。

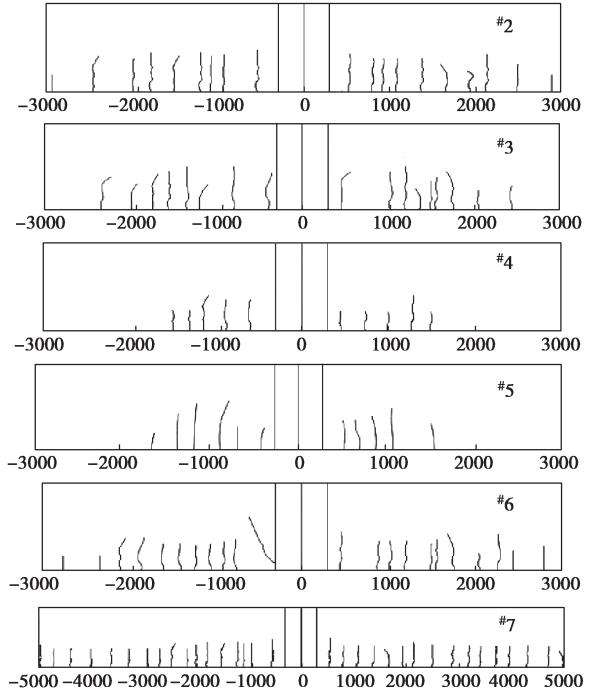


图 10 裂缝分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of crack distributions

结合试验现象分析可知: 在接头受弯条件下, 管桩混凝土在受拉侧首先出现拉伸裂缝, 随着端板和受拉钢筋的屈服变形, 接头变形显著增加; 由于桩箍与管桩之间的弹性模量存在明显差异, 在管桩接头的受压区域容易产生应力集中, 导致管桩接头上边缘的混凝土达到极限压缩应变, 接头被局部压碎并破坏。分析可知: #3~#6 管桩接头由于预应力钢筋、螺纹钢攻丝锚固在接头端板上, 在加载过程中, 端板的张紧侧受到显著拉力, 以及应力集中, 最终导致呈现出鼓形张开屈服的现象。一方面, 由于桩套箍和桩身, 端板和桩身混凝土的粘结强度有限, 桩套箍、端板和桩身混凝土在开裂载荷后逐渐脱离, 从而在端板与混凝土连接处产生很宽的主裂缝, 造成管桩过早压碎。另一方面, 由于端板与混凝土之间的弹性模量相差一个数量级, 二者的抗弯刚度不一致, 在端板与混凝土连接处容易产生应力集中, 从而造成管桩产生局部压碎破坏。此外, #2~#6 的构造可能属于过度配筋设计, 在管桩生产离心成型过程中, 较大的配筋率不利于混凝土的混合均匀, 容易对桩的质量产生不利的影响^[19]。可以看出, #3~#6 管桩接头构造的变形很大, 进而削弱了其弯曲强度。结合焊接接头构造和试验结果分析, 除了上述原因外, 端板开孔也是影响管桩接头部位抗弯承载力降低的重要因素。

#7管桩接头采用在端板接头焊接肋板,不仅可以增强端板的抗弯承载能力,另一方面可以增加端板、套箍与桩身混凝土更好地形成一个整体,可以在一定程度上抵消不同金属(端板、套箍)、非金属(桩身混凝土)界面不协调的现象。研究表明:纤维的掺加对混凝土可起到增强、增韧和阻裂作用,将钢纤维其引入到管桩混凝土中不仅能提高混凝土强度,而且能阻止混凝土裂缝及延展时间,能够克服机体中的微观裂缝,克服混凝土缺陷所产生的应力集中而造成其过早开裂,使管桩具有良好的韧性与延性^[20-21]。试验结果也表明在接头两侧5 m范围采用钢纤维混凝土桩身的措施能明显提升焊接管桩接头极限抗弯承载力。

对各种形式接头的性能总体排序为:#7接头性能最好,其次是#5和#6接头,再次#3接头,#2又优于#4接头。

4 结 论

通过对7种不同大直径管桩接头进行抗弯性能进行足尺模型试验和理论分析研究,得到以下4点结论。

(1)传统的管桩焊接接头的抗弯试验结果表明其抗弯承载力实测值普遍较规范计算值小,主要失效破坏模式是桩套箍下部与桩身明显张开分离,桩箍上边缘的混凝土被挤压破坏,桩箍下部的混凝土出现明显的裂缝,桩身上部两端板被挤压变形,下部两焊接端板呈鼓形拉开。

(2)采取增大钢筋直径,螺纹钢攻丝锚固、预应力钢棒锚固、提升混凝土强度等级等措施均不能有效提高管桩接头的极限弯矩,端板开洞数量增多会明显降低管桩接头的抗弯承载能力。通过混凝土加钢纤维可较好的控制管桩的裂纹变形破坏,增加其柔韧性。

(3)在原有端板加工工艺不变的情况下,本文提出采用套箍和端板处设置加劲肋接头构造形式,并在桩接头处换用钢纤维混凝土桩身,该种接头有效提高了管桩接头的抗弯性能,使管桩具有良好的韧性与延性。

(4)本文的研究成果对大直径管桩在基坑、边坡、港口码头等抗侧力支护结构体系抗侧力工程中的推广应用,具有重要的理论意义和实际价值。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 戚玉亮和唐孟雄参与实验设计;黄柯柯、梁伟键完成实验操作;戚玉亮、唐孟雄、黄柯柯、梁伟键参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by QI Yuliang and TANG Mengxiong. The experimental operation was completed by HUANG Keke and LIANG Weijian. The manuscript was drafted and revised by QI Yuliang, TANG Mengxiong, HUANG Keke and

LIANG Weijian. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 侯振坤, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 随钻跟管桩竖向承载性能原位试验与室内物理模拟试验对比研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 419-429. (HOU Zhenkun, TANG Mengxiong, HU Hesong, et al. Comparative study on the vertical load-bearing capacity of the drilling with pre-stressed concrete pipe cased pile based on in situ and physical simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 419-429. (in Chinese))
- [2] 刘春林, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 考虑桩底沉渣的随钻跟管桩竖向承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 177-185. (LIU Chunlin, TANG Mengxiong, HU Hesong, et al. An experimental study of vertical bearing capacity of DPC piles considering sediment effect at pile bottom[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 177-185. (in Chinese))
- [3] HUANG F Y, WU S W, LUO X Y, et al. Pseudo-static low cycle test on the mechanical behavior of PHC pipe piles with consideration of soil-pile interaction[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 992-1006.
- [4] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 填芯PHC管桩桩身抗压承载力试验与理论计算方法研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 67-71, 86. (TANG Mengxiong, QI Yuliang, ZHOU Zhiguo, et al. Study on experiment and theoretical calculation method of compressive bearing capacity of filled PHC pipe piles[J]. Building Structure, 2015, 45(1): 67-71, 86. (in Chinese))
- [5] 唐孟雄, 戚玉亮, 胡贺松. 大直径随钻跟管桩套箍对桩头质量的影响分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 791-794. (TANG Mengxiong, QI Yuliang, HU Hesong. Analysis on the influence of large diameter pipe pile hoop while drilling on the quality of pile head[J]. Building Structure, 2016, 46(S1): 791-794. (in Chinese))
- [6] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 空心与填芯PHC管桩抗弯试验及其理论计算研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 1075-1080. (TANG Mengxiong, QI Yuliang, ZHOU Zhiguo, et al. Bending test and theoretical calculation of hollow and core-filled PHC pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1075-1080. (in Chinese))
- [7] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y. Field study of set-up effect in open-ended PHC pipe piles[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(2): 208-215.
- [8] 郭杨, 吴平. 复合配筋预应力混凝土管桩受弯与受剪性能试验研究[J]. 施工技术, 2021, 50(2): 95-101. (GUO

- Yang, WU Ping. Experimental study on flexural and shear behaviors of pre-stressed concrete pipe with hybrid reinforcement[J]. Construction Technology, 2021, **50**(2): 95-101. (in Chinese))
- [9] 戚玉亮, 大塚久哲. ABAQUS 动力无限元人工边界研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(10): 3007-3012. (QI Yuliang, HISANORI O. Study of ABAQUS dynamic infinite element artificial boundary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(10): 3007-3012. (in Chinese))
- [10] 戚玉亮, 大塚久哲. 考虑土-桩-结构相互作用的群桩振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 1024-1027. (QI Yuliang, HISANORI O. Shaking table test of pile groups considering soil-pile-structure interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1024-1027. (in Chinese))
- [11] 戚玉亮, 冯紫良, 余俊, 等. 泰州大桥北塔群桩基础三维动力非线性抗震计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3071-3081. (QI Yuliang, FENG Ziliang, YU Jun, et al. Three-dimensional dynamic nonlinear seismic calculation of pile foundation of North Tower Group of Taizhou Bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3071-3081. (in Chinese))
- [12] 戚玉亮, 王同旭, 赵斌. 车集矿深部三维初始地应力测量研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 1005-1010. (QI Yuliang, WANG Tongxu, ZHAO Bin. 3D initial ground stress measurement at deep position of Juji Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 1005-1010. (in Chinese))
- [13] 孙钧, 戚玉亮. 隧道围岩稳定性正算反演分析研究: 以厦门海底隧道穿越风化深槽施工安全监控为例介绍[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2353-2360. (SUN Jun, QI Yuliang. Normal calculation-back analysis of surrounding rock stability of subsee tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2353-2360. (in Chinese))
- [14] 王清, 匡红杰, 路瞳, 等. 混合配筋预应力混凝土管桩(PRC 桩)受弯承载力计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(8): 41-44. (WANG Qing, KUANG Hongjie, LU Tong, et al. Calculation of flexural bearing capacity of prestressed and reinforced concrete piles(PRC piles)[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(8): 41-44. (in Chinese))
- [15] 王清, 匡红杰, 路瞳, 等. 混合配筋预应力混凝土管桩(PRC 桩)受弯承载力计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(8): 41-44. (WANG Qing, KUANG Hongjie, LU Tong, et al. Calculation of flexural bearing capacity of prestressed and reinforced concrete piles(PRC piles)[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(8): 41-44. (in Chinese))
- [16] 黄广龙, 颜荣华, 周文苑, 等. 预应力混凝土管桩接头抗弯承载力试验[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2011, **25**(10): 209-212. (HUANG Guang-long, YANG Rong-hua, ZHOU Wen-yuan, et al. Experimental study on flexural bearing capacity of prestressed concrete pipe pile joints[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2011, **25**(10): 209-212. (in Chinese))
- [17] TANG M X, LING Z, QI Y L. Bending strength of connection joints of prestressed reinforced concrete pipe piles[J]. Buildings, 2023, **13**(1): 119.
- [18] 沈琳, 蔡红明, 曾超峰, 等. PHC 管桩抗弯承载力研究 [J]. 建筑结构, 2018, **48**(增刊 2): 845-849. (SHEN Lin, CAI Hongming, ZENG Chaofeng, et al. Study on flexural capacity of PHC pipe pile[J]. Building Structure, 2018, **48**(S2): 845-849. (in Chinese))
- [19] 刘岩, 谭宇胜. 钢筋混凝土受弯构件纵向配筋率的研究 [J]. 建筑技术, 2006, **37**(5): 389-390. (LIU Yan, TAN Yusheng. Studies on longitudinal reinforcement ratio of flexural rc member[J]. Architecture Technology, 2006, **37**(5): 389-390. (in Chinese))
- [20] 魏宏超. 钢纤维高强混凝土的配制及其在先张法预应力高强混凝土管桩中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(3): 28-30. (WEI Hongchao. Preparation of high-strength steel fiber reinforced concrete and the application of it in prestressed concrete piles[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(3): 28-30. (in Chinese))
- [21] 戎贤, 王旭月, 李艳艳. 掺入钢纤维的 PHC 管桩抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, **44**(8): 10-14. (RONG Xian, WANG Xuyue, LI Yanyan. Experimental study on seismic behavior of PHC pipe piles with steel fibers[J]. Building Structure, 2014, **44**(8): 10-14. (in Chinese))