



钢套筒灌浆段桩基抗弯力学性能研究

王光健¹, 卓杨¹, 沈思程², 苏静波²

(1. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对海洋环境下高桩码头桩基易损问题, 钢套筒灌浆技术虽具加固潜力, 但抗弯设计缺乏理论支持。通过试验与理论建模, 旨在揭示其力学性能与破坏机制, 提出量化计算方法, 以提升工程安全性。试验采用4组不同参数的钢套筒灌浆加固预应力高强混凝土 (prestressed high-strength concrete, PHC) 管桩试件, 关键变量包括灌浆料厚度 (40、50、60 mm) 和钢套筒厚度 (5、8 mm)。通过分级加载并监测荷载-应变响应, 研究结果表明, 灌浆料和钢套筒厚度增加均可提升抗弯性能, 其中钢套筒厚度的增强效果更为显著。进一步通过平截面假定推导出抗弯承载力计算公式, 经试验验证误差仅 2.16%~6.58%, 具有良好的可靠性。研究成果为钢套筒灌浆技术在桩基抗弯设计中的应用提供了理论依据和量化计算方法, 对提升高桩码头及类似工程结构的修复加固安全性和准确性具有参考价值。

关键词: 高桩码头; 钢套筒; 灌浆段; 桩基; 抗弯性能; 力学性能

中图分类号: U656.1+13; TV698.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0064-08

Research on flexural mechanical properties of pile foundation with steel sleeve grouting section

WANG Guangjian¹, ZHUO Yang¹, SHEN Sicheng², SU Jingbo²

(1. CCCC Shanghai Harbour Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In response to the vulnerable problem of high-piled wharf pile foundations in marine environments, although steel sleeve grouting technology has the potential for reinforcement, the bending design lacks theoretical support. Through experiments and theoretical modeling, the research aims to reveal its mechanical properties and failure mechanisms, propose quantitative calculation methods, and support the improvement of engineering safety. The experiment used four different parameters of steel sleeve grouting reinforcement PHC pipe pile specimens, with key variables including grouting material thickness (40, 50, 60 mm) and steel sleeve thickness (5, 8 mm). Through graded loading and monitoring of the load-strain response, the results indicate that increasing the thickness of both the grouting material and the steel sleeve can improve the flexural performance, and the strengthening effect of the steel sleeve thickness is more significant. Furthermore, the calculation formula for flexural bearing capacity is derived based on the plane section assumption. Experimental verification shows that the error is only 2.16%~6.58%, indicating satisfactory reliability. The research results provide a theoretical basis and quantitative calculation method for the application of steel sleeve grouting technology in the flexural design of pile foundations, which has important reference value for improving the safety and accuracy of the repair and reinforcement of high-piled wharves and similar engineering structures.

Keywords: high-piled wharf; steel sleeve; grouting section; pile foundation; flexural performance; mechanical properties

收稿日期: 2025-09-11 录用日期: 2025-10-27

作者简介: 王光健 (1979—), 男, 高级工程师, 从事港口工程、桩基工程技术研发及管理工作。

高桩码头长期遭受水流冲刷、船舶靠泊、海水腐蚀等因素影响,极易造成桩基混凝土表面脱落、开裂,进而导致内部钢筋外露腐蚀,这些损坏会导致承重能力下降,严重时对码头的安全构成威胁^[1-3]。目前码头桩基加固修复技术措施主要有玻纤套筒法^[4]、增大截面法^[5]、复合材料粘贴法^[6]等。玻纤套筒法存在耐冲磨性能较差、施工不易固定等劣势,这些因素易导致施工质量不佳。增大截面法加固周期较长,需要一系列混凝土施工工序,繁琐复杂。复合材料粘贴法对桩基承载力的提升作用较小。然而港口码头吞吐量,连续作业强度高,又快又好的修复码头桩基是一项关键技术问题。

钢套筒灌浆加固是有效修复加强码头桩基损伤的新型加固方法^[7],通过高强度灌浆料使钢套筒与原有预应力高强混凝土 (prestressed high-strength concrete, PHC) 桩有效连接为整体,结构受力性能显著提升^[8-9]。杨仁浩^[10]介绍了钢套筒灌浆修复受损基桩的设计方法。宋俊霖等^[11]对比了3种灌浆效果下的桩基承载性能。赵洋等^[12]提出了一种从套筒出浆口进行修复的补灌修复装置和补灌方法,并通过试验研究和实际工程应用对修复效果进行了验证。王子恒等^[13]通过高强灌浆料加固既有钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁柱的偏心受压试验,发现随着加固层厚度的增大,加固效果愈加明显。陈俊岭等^[14]建立灌浆加固数模模型,发现采用该灌浆材料加固后承载能力明显增强且应力分布较为均匀。冷玉坤等^[15]发现采用高强灌浆料加固 RC 梁可以有效提高抗弯承载力、截面刚度并抑制裂缝的产生和发展。

然而,目前研究大都局限于单个结构的性能变化,对于钢套筒、灌浆料共同加固 PHC 桩结构在抗弯性能方面的研究还不充分。本文通过钢套筒灌浆加固管桩抗弯试验,研究受弯破坏过程中的破坏形式和极限抗弯承载力,分析灌浆料厚度与钢套筒厚度对管桩抗弯性能的影响,建立钢套筒灌浆段承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 材料性能

试验共设计4根试件,为钢套筒灌浆外包在PHC桩外形成的组合结构,PHC桩型号为PHC300AB70,桩内混凝土强度等级为C80,试件参数见表1。钢套筒材质采用Q235,PHC桩和钢套筒中间通过超高性能灌浆料连接。在钢套筒内壁纵向焊接钢筋作为剪力键,以增强灌浆料和钢套筒黏结性能。剪力键宽度为18 mm,剪力键高度为6 mm,剪力键距离为120 mm。试件断面见图1。

表1 试件参数
Tab.1 Parameters of test specimens

试件编号	跨度/mm	灌浆料厚度/mm	钢套筒外径/mm	钢套筒壁厚/mm
A-1	8 000	40	390	5
A-2	8 000	50	410	5
A-3	8 000	60	430	5
B-1	8 000	40	396	8

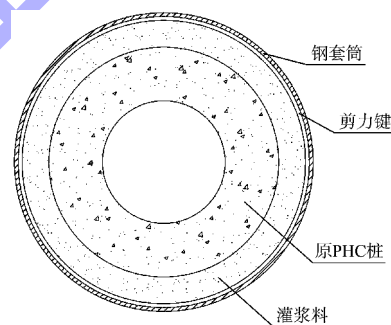


图1 试件断面
Fig.1 Section of the specimen

试验使用的钢套筒由国标 Q235 钢材制作而成,厚度最大为 8 mm,最小为 5 mm。PHC 桩内均匀分布 6 根直径 9 mm 钢筋,钢材的力学性能参数见表 2。试验使用的超高性能灌浆料实测立方体抗压强度值 105.1 MPa,PHC 桩内混凝土强度等级为 C80。灌浆料和 PHC 桩内混凝土力学性能参数见表 3。

表2 钢材力学性能参数
Tab.2 Mechanical property parameters of steel

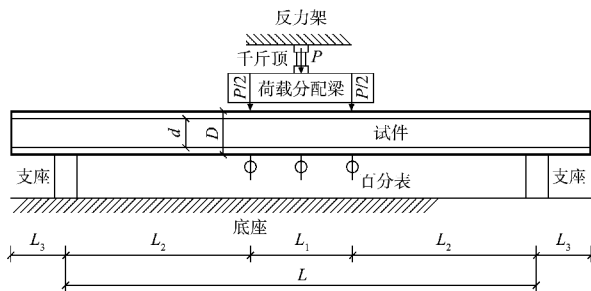
材料名称	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	泊松比
钢套筒	206	235	370	0.3
钢筋	200	1 005	1 420	0.3

表 3 灌浆料和混凝土力学性能参数
Tab. 3 Mechanical property parameters of grouting material and concrete

材料种类	弹性模量/ GPa	轴心抗压强度/ MPa	轴心抗拉强度/ MPa	立方体抗压强度/ MPa	泊松比
灌浆料	38	43.9	2.35	105.1	0.2
PHC 桩内混凝土	40	35.9	2.22	80.0	0.2

1.2 加载设备及测点布置

试验的加载装置由油压千斤顶、刚性荷载分配梁、反力架和两侧支座组成，加载装置见图 2。两侧支座约束试件水平方向位移，不约束转动，试件两支座间有效跨度为 6 000 mm，支座外侧设置 1 000 mm 长悬挑段。



注：P 为荷载。

图 2 加载装置
Fig. 2 Loading device

试件应变片、位移计位置分布见图 3。在试件纯弯段均匀划分出 5 个截面 A、B、C、D、E。为测量试件在纯弯段受拉区、受压区的应变，将 3 组应变片分别布置在纯弯段 3 个截面 B、C、D，每组应变片分别粘贴在 PHC 桩外表面、灌浆料中间、钢套筒外表面。灌浆料中间的应变片先粘贴在钢筋段上，后焊接于钢套筒内壁。在试件跨中纯弯段 A、C、E 截面下方分别放置 3 个位移计，用于测量试件挠度。

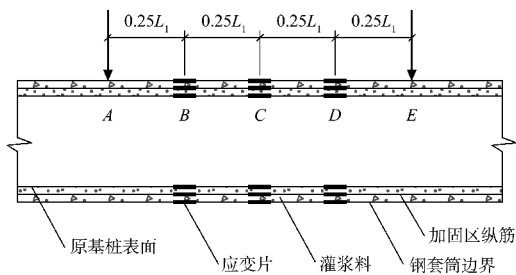


图 3 应变片布置

Fig. 3 Strain gauge layout

1.3 加载方案

1) 预估试验管桩的极限抗弯承载力，通过查阅相关规范后估算得到各组钢套筒灌浆段管桩抗弯承载力，试验管桩参数见表 4。

表 4 试验管桩参数
Tab. 4 Parameters of test pipe piles

试件名称	剪力键高度/ mm	剪力键距离/ mm	钢套筒厚度/ mm	灌浆料厚度/ mm	抗弯承载力估值/ (kN·m)	极限荷载估值/ kN
A-1			5	40	360	288
A-2	6	120	5	50	400	320
A-3			5	60	440	352
B-1			8	40	560	448

2) 采用分级加载并控制荷载加载速度。加载前，先对试件预加载，加载到极限荷载的 10%，以检查并测试各项测试仪器是否正常工作，并减小试件和试验装置之间的微小空隙。确认仪器正常后卸去预先加载的荷载，等待后续正式的加载工作。

3) 正式加载时每级施加极限荷载的 10%，当荷载达到 80%以后，每级荷载取预估极限荷载的 5%。每级加载保持在 5 min 左右完成，待 3 个百分表读数稳定 1 min 后记录挠度的大小和与应变片相连的测试仪读数的大小，读完之后进行下一级的试验加载工作。

4) 随着荷载的不断增加，只要百分表指针不出现大幅度不规则波动，即可按既定速度加载直到试件破坏，但当出现以下情况之一时表明试件到达极限状态：①受压区钢管鼓曲或混凝土破坏时；②继续增加荷载时但荷载值不再增加或者受拉区钢管开裂时；③试验加荷时后一级荷载的应变值大于前一级荷载的应变值的 5 倍时。

2 试验现象及破坏形态

2.1 加载试验现象

4 组试件加载时的破坏过程基本一致，开始加载后，首先，出现管桩内部混凝土碎裂产生声，并随着荷载的增加破碎声音愈发明显。然后，应变采集仪显示 PHC 管桩下部中间的应变片最先出现断裂。接着，应变采集仪显示 PHC 管桩下部两边的应变片出现断裂，据此可以推断 PHC 管桩纯弯段已经处于破碎的状态，也符合抗弯试验中纯

弯段最先破坏的规律。最后, 伴随明显响声, 应变采集仪显示此时的灌浆料下部的应变片也出现断裂, 位移计同时出现较大变化, 综合表明纯弯段的灌浆料已经破碎, 外部钢套筒已经处于屈服状态, PHC 管桩内部预应力纵筋并未被拉断。

2.2 试件破坏形态

对试验包含的 4 组试件分别进行四点弯试验后, 得到管桩极限抗弯承载力结果, 见表 5。

表 5 灌浆段管桩试验结果

试件名称	极限荷载/kN	跨中挠度/mm
A-1	334	67.89
A-2	389	69.11
A-3	428	68.98
B-1	486	70.83

加载结束后, 将外部钢套筒剥离以观察内部灌浆料以及 PHC 桩破坏情况。内部灌浆料和混凝土破坏情况见图 4。虽然试件外部没有产生明显破坏, 但试件内部 PHC 桩混凝土已经完全开裂, 桩内钢筋完全断裂。断裂发生在弯矩最大的纯弯段。纯弯段及其附近高强混凝土灌浆料完全剥离钢套筒, 并呈现压碎状态。



a) PHC 桩断裂



b) 纯弯段灌浆料剥离

图 4 试件内部破坏形态

Fig. 4 Internal failure morphology of test specimens

3 试验结果及分析

3.1 荷载-跨中挠度曲线分析

管桩的荷载-跨中挠度曲线见图 5, 通过分析可知, 整个管桩在荷载作用下受力过程可以分为 3 个阶段, 分别为弹性工作阶段、伴随裂缝工作阶段、破坏阶段。

1) 弹性工作阶段: 钢套筒灌浆管桩在荷载的作用下, 各部分能够保持整体全截面工作, 管桩破坏程度较小, 跨中挠度随着荷载的均匀增加出现近乎线性的增长且增长速率相对较小。荷载相同条件下, 钢套筒厚度与灌浆厚度越大, 相对应的跨中挠度越小, 跨中挠度增加速率也越小。

2) 伴随裂缝工作阶段: 钢套筒灌浆管桩在荷载作用下开始出现混凝土开裂, 并随着荷载增大裂缝逐渐增大、增多, 导致整体管桩的刚度下降。在此过程中, 相同荷载增加量下, 跨中挠度增加量也越来越大并出现非线性增长, 这一过程持续至达到屈服强度。

3) 破坏阶段: 随着荷载的增加 PHC 管桩及灌浆料裂缝不断增大区域逐渐发展, 相同荷载下跨中挠度的增加量更大, 非线性趋势也更加明显。最终在 PHC 管桩及灌浆料的纯弯段受拉区混凝土完全破坏时, 达到管桩的极限强度, 试件完全破坏。

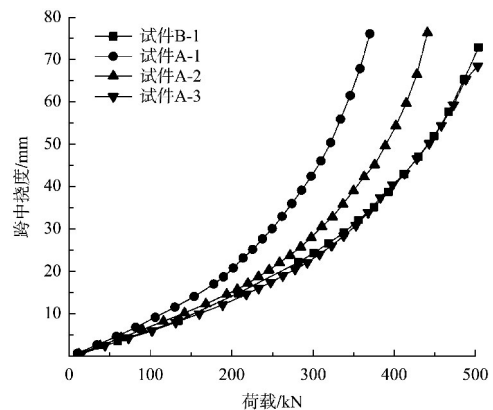


图 5 试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-midspan deflection curves of test specimens

结合图 5 中的 4 组管桩数据可知: A-1、A-2、A-3 管桩套筒厚度相同, 灌浆厚度逐渐增大, 弹性工作阶段 3 组曲线斜率较为接近, 开裂后预应

力纵筋的作用使曲线没有出现较大变化，极限荷载及跨中挠度随灌浆厚度小幅度变化。A-1 与 B-1 管桩灌浆厚度相同，钢套筒厚度不同，相同荷载值下 A-1 管桩的跨中挠度明显大于 B-1 管桩，且极限荷载及跨中挠度随钢套筒厚度大幅度变化。综上，灌浆厚度的增大会使极限荷载及跨中挠度小幅度减少，钢套筒厚度的增加会使极限荷载大幅度增加、跨中挠度大幅度减少。这一差别出现的原因在于钢套筒灌浆管桩的承载能力绝大部分是由钢套筒结构所承担的。

3.2 截面应变分析

试验包含 4 根钢套筒灌浆管桩，每根管桩内按应变片所在截面区分，分别设置 3 组，每组 6 个。试件荷载-应变曲线见图 6，图中包含了 4 组管桩中的各测点荷载-应变曲线，因为应变片在受拉状态下超过该标准会导致数据失真，在绘制该曲线时舍去了受拉区微应变超过 1 500 部分的相关数据。

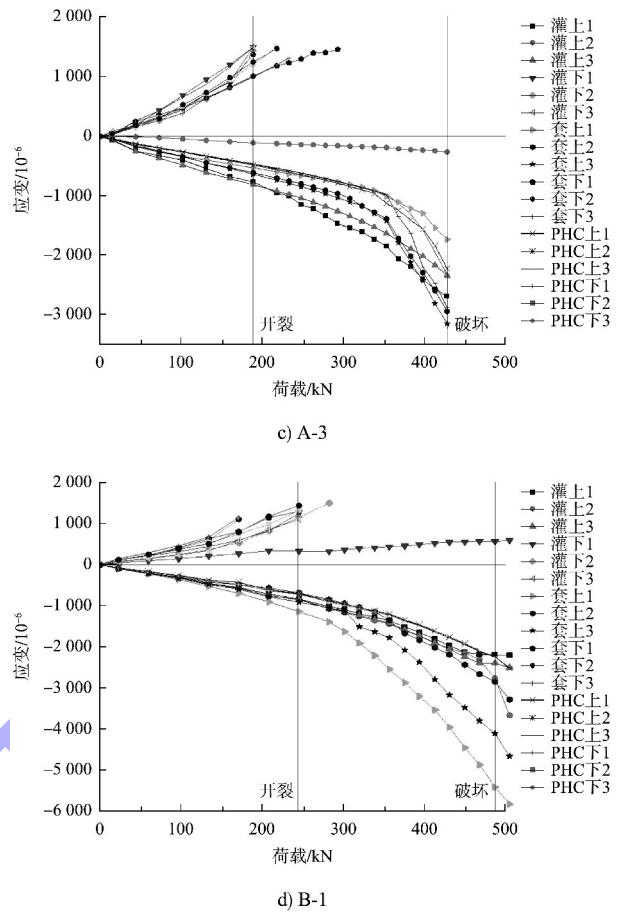
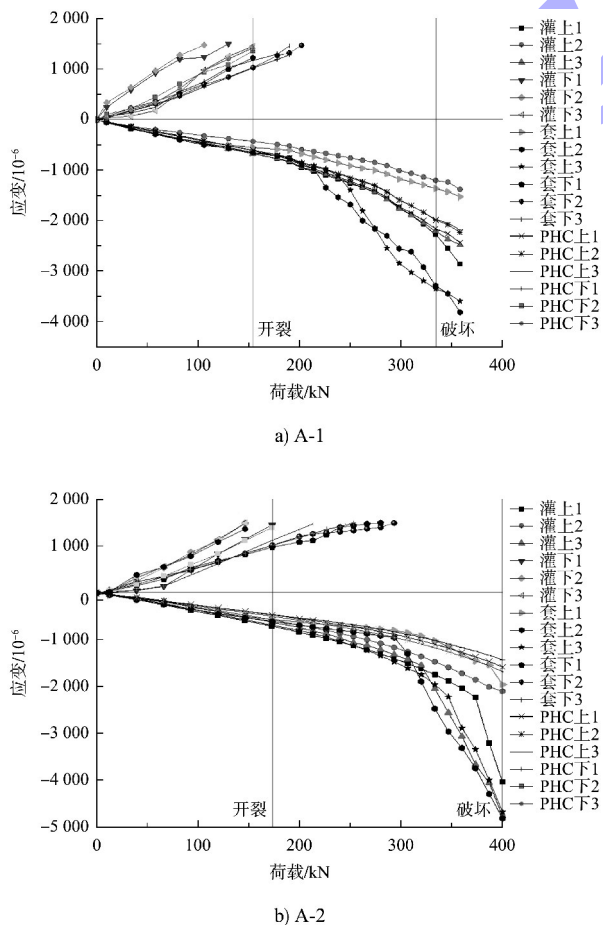


图 6 试件荷载-应变曲线
Fig. 6 Load-strain curves of test specimens

由图 6 可知，受拉区的应变片数值均为正值，受压区的应变片数值均为负值，符合抗弯试验应变片数据变化规律。在管桩开裂之前绝大多数应变片在荷载作用下，应变大小呈线性增长且增长速率较小，此时管桩未破坏各部分保持整体协同工作。

在到达开裂荷载之后，部分应变大小变化速率增大，其中 A-1 管桩套上 2、3 点位与 A-2 管桩套上 1、3 应变片大小变化最为明显，而根据平截面假定规律钢套筒位于管桩最外层，应变也应最大，也可以与此相印证。对于如 A-3 管桩的 PHC 下 3 与灌上 1 在荷载增加过程中应变增加幅度较小且保持线性增长，原因可能在于该位置的应变片未能粘贴牢固使其与被粘贴部分不能保持协同应变或者该应变片本身存在一定质量问题。对于开裂后受拉区大部分应变片失真的原因可能在于应变片处于裂缝所在位置，开裂后其应变数据会出现突变，一旦超出应变片的承受能力便会出现应变片断裂即失真。

4 抗弯承载力分析及设计建议

4.1 抗弯承载力计算方法

在钢筋混凝土构件的抗弯承载力计算过程中, 需要满足平截面假定这一必要条件, 即钢筋混凝土构件的各个部分在进行抗弯试验的过程中能够保持协同作用, 共同抵抗荷载作用。因此, 钢套筒灌浆段承载力计算公式得出的前提是平截面假定的成立, 需要进行平截面假定分析, 选取了试验 A-1、A-2、A-3、B-1 共 4 组钢套筒灌浆管桩不同高度处的应变数据进行验证, 见图 7。

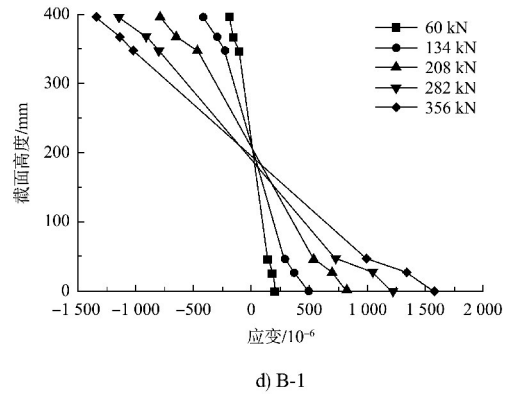
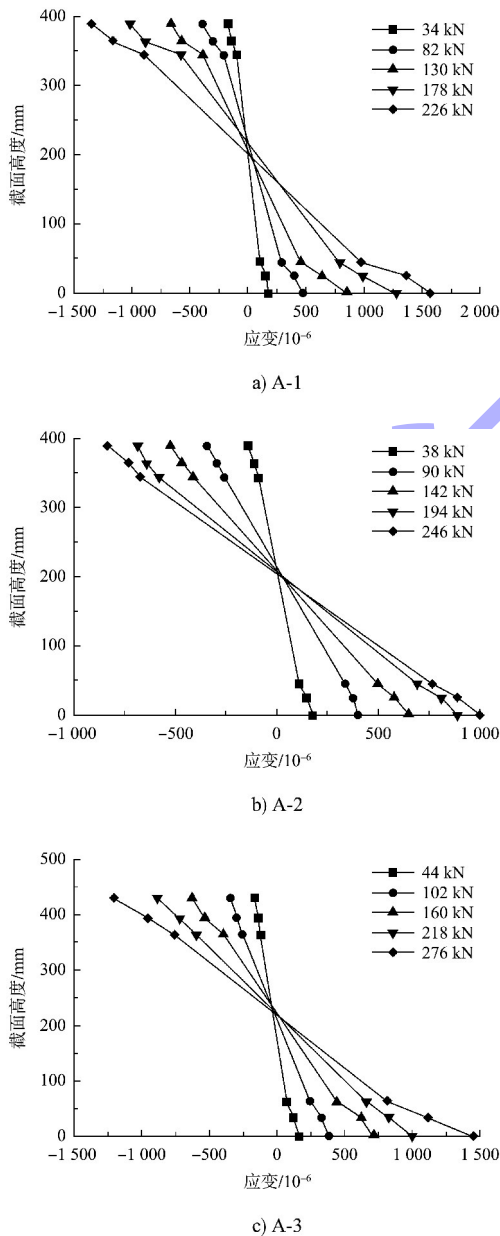


图 7 跨中截面应变分布曲线

Fig. 7 Strain distribution curves of midspan section

将试验得到的各组不同高度下应变随荷载的变化关系绘制于上述 4 组图表中, 通过对比分析可知, 开始阶段不同高度下各处应变数值均较小, 随着荷载的增加应变数值也随之增大, 管桩中心处的应变大小接近于 0, 受拉区的应变大小增长速度略大于受压区, 中和轴随之上升。图中 X 轴左侧的 3 个点从上到下分别对应试验中跨中位置的钢套筒上表面、灌浆料层上部中间位置、PHC 管桩上表面的 3 组应变测点, X 轴右侧的 3 个点从上到下分别对应试验跨中位置的 PHC 管桩下表面、灌浆料下部中间层位置、钢套筒下表面的 3 组应变测点。上半部分处于受压状态, 下半部分处于受拉状态, 各组不同荷载下的应变-高度曲线相交的位置基本与管桩中心部分位置重合, 且应变-高度曲线接近直线, 表明试验各组在荷载的作用下各位置均能保持良好的协同作用, 符合平截面假定原理。

将灌浆料与钢套筒对于抗弯的贡献分开考虑, 得出抗弯承载力的计算公式, 形成钢套筒灌浆段承载力的设计方法, 计算公式基本形式如下:

$$N'_c + N'_{s1} + N'_t + N'_{s2} + N'_{pc} + N_{s1} + N_{s2} + N_{t1} + N_{t2} = 0 \quad (1)$$

$$M = M'_c + M'_{pc} + \gamma_m (M'_{s1} + M'_{s2} + M_{s1} + M'_t + M_{s2} + M_{t1} + M_{t2}) \quad (2)$$

式中： M 为抗弯承载力； N'_c 和 M'_c 为受压区灌浆料内力和弯矩； N'_{s1} 和 M'_{s1} 为受压区钢套筒矩形分布内力和弯矩； N'_i 和 M'_i 为受压区预应力钢筋等效钢环内力和弯矩； N'_{s2} 和 M'_{s2} 为受压区钢套筒三角分布内力和弯矩； N'_{pc} 和 M'_{pc} 为受压区混凝土内力和弯矩； N_{s1} 和 M_{s1} 为受拉区钢套筒矩形分布内力和弯矩； N_{s2} 和 M_{s2} 为受拉区钢套筒三角分布内力和弯矩； N_{i1} 和 M_{i1} 为受拉区预应力钢筋等效钢环矩形分布内力和弯矩； N_{i2} 和 M_{i2} 为受拉区预应力钢筋等效钢环三角分布内力和弯矩； γ_m 为截面塑性发展系数，依据 GB 50017—2017《钢结构设计规范》8.1.1 中的相关规定，对于钢管桩构件，其大小取值为 1.15。

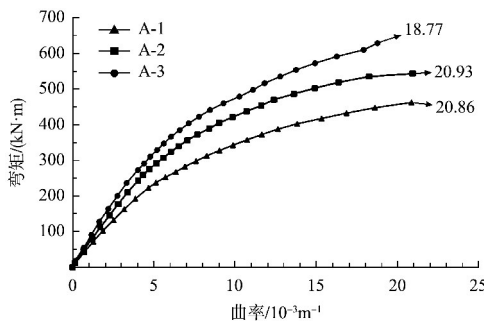
本章所给公式与试验得到的极限弯矩结果对比见表 6，最大误差为 6.58%，最小误差为 2.16%，均在误差允许的范围内，说明所给公式在钢套筒灌浆段极限弯矩的计算中具有可靠性。

表 6 计算极限弯矩与试验极限弯矩对比
Tab. 6 Comparison between calculated and test ultimate bending moment

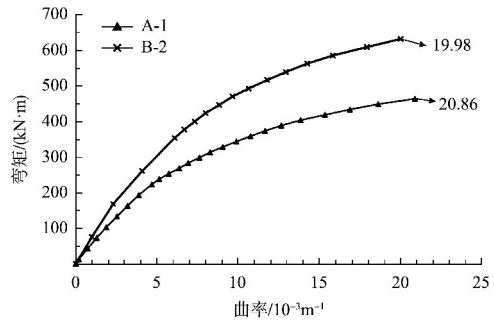
试件名称	试验极限弯矩/ (kN·m)	计算极限弯矩/ (kN·m)	相对误差/%
A-1	417	408	2.16
A-2	486	454	6.58
A-3	535	500	6.54
B-1	607	638	5.11

4.2 设计建议

弯矩-曲率曲线对比见图 8。试件 A-1、A-2、A-3 灌浆料厚度分别为 40、50、60 mm，试件 A-1、试件 B-1 钢套筒壁厚分别为 5、8 mm。



a) 灌浆料厚度影响



b) 钢套筒壁厚影响

图 8 弯矩-曲率曲线

Fig. 8 Moment-curvature curves

试件 A-2 和试件 A-3 的抗弯承载力与试件 A-1 相比分别提高了 16.5% 和 28.3%，钢套筒灌浆加固段抗弯承载力随灌浆料厚度的增大而提高，试件 B-1 的抗弯承载力与试件 A-1 相比提高了 53.0%，钢套筒灌浆加固段的抗弯承载力随钢套筒壁厚的增大有明显提高。综上，钢套筒厚的提升可以更好地增加加固段的抗弯性能。

5 结论

1) 4 组试件加载时的破坏过程基本一致。在加载初期，试件并未产生可见的弯曲变形。随着荷载的逐级增加，出现明显弯曲变形。加载至极限荷载时，钢套筒弯曲，未表现出明显的外部破坏，试件内部 PHC 桩混凝土已经完全开裂，桩内钢筋完全断裂，纯弯段及其附近高强混凝土灌浆料完全剥离钢套筒，并呈现压碎状态。

2) 整个管桩在荷载作用下受力过程可以分为 3 个阶段。弹性工作阶段：各部分能够保持整体全截面工作，管桩破坏程度较小。伴随裂缝工作阶段：开始出现混凝土开裂。破坏阶段：随着荷载的增加 PHC 管桩及灌浆料裂缝不断增大，区域逐渐发展，最终在 PHC 管桩及灌浆料的纯弯段受拉区混凝土完全破坏时，达到管桩的极限强度，试件完全破坏。

3) 在平截面假定基础上推导出管桩极限弯矩计算公式，与试验对比，最大误差为 6.58%，最

小误差为 2.16%, 在误差允许的范围内, 证明所给公式在钢套筒灌浆段极限弯矩的计算中具有可靠性。钢套筒灌浆加固段抗弯承载力随灌浆料厚度和钢套筒厚度的增大而提高, 且钢套筒厚度对抗弯性能的提升效果更为显著。

参考文献:

- [1] 赵敏, 蒋腊梅, 陆敏, 等. 回淤环境高桩码头桩基淤积荷载影响因素及简化计算[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 142-149.
- ZHAO M, JIANG L M, LU M, et al. Influence factors and simplified calculation of sediment load on pile foundations in high-pile wharves under sedimentation conditions[J]. Hydro-science and engineering, 2024(5): 142-149.
- [2] LI P P, LI J P, LI L, et al. Overall structural degradation of a high-piled wharf under chloride invasion and the impact force of ship berthing [J]. Ocean engineering, 2024, 312: 119320.
- [3] SU L, LU J C, ELGAMAL A, et al. Seismic performance of a pile-supported wharf: Three-dimensional finite element simulation[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 95: 167-179.
- [4] 魏明晖, 严锋. 玻纤套筒加固技术在高桩码头维修工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(9): 202-205, 213.
- WEI M H, YAN F. Application of glass fiber sleeve in high-pile wharf repair project [J]. Port & waterway engineering, 2017(9): 202-205, 213.
- [5] 蒋济同, 景思玉, 杜德润, 等. 新增混凝土收缩对增大截面法加固混凝土受弯构件抗弯承载力影响研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(11): 89-96.
- JIANG J T, JING S Y, DU D R, et al. Study on the influence of shrinkage on flexural capacity of RC flexural members strengthened with increasing section method[J]. Building science, 2023, 39(11): 89-96.
- [6] WU F W, MA Y T, CAO J C, et al. Experimental study and analytical model for the bond-critical failure of the CFRP-ECC-NC composite interfaces [J]. Engineering structures, 2025, 335: 120303.
- [7] XIE L L, LIU Q, WANG X Y, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with defective and repaired grouted sleeve [J]. Structures, 2023, 57: 105071.
- [8] 黄宜, 邱文亮, 黄才良, 等. 单节段装配式桥墩抗震性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(5): 481-487.
- HUANG Y, QIU W L, HUANG C L, et al. Experimental study of seismic performance of single segmental precast bridge piers[J]. Journal of Dalian university of technology, 2016, 56(5): 481-487.
- [9] REN X Q, ZHAO Y G, ZHANG C H, et al. Seismic behaviour of prefabricated square reinforced concrete-filled steel tubular pier with a grouting sleeve connection [J]. Engineering structures, 2025, 335: 120414.
- [10] 杨仁浩. 灾后高桩码头桩基础检测评估与修复加固[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(5): 119-125.
- YANG R H. Detection evaluation and restoration of pile foundation of piled wharf after disaster [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2014, 36(5): 119-125.
- [11] 宋俊霖, 刘博, 唐立恒, 等. 不同灌浆效果下黏土海床导管架桩基础的竖向承载特性离心试验[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(1): 38-47.
- SONG J L, LIU B, TANG L H, et al. Centrifuge tests on vertical bearing capacity of jacket pile foundation in clay seabed under different grouting effects[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2025, 59(1): 38-47.
- [12] 赵洋, 毛诗洋, 金庆波, 等. 钢筋套筒灌浆连接饱满度缺陷修复装置及应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1640-1645.
- ZHAO Y, MAO S Y, JIN Q B, et al. Device and application of repairing grout defects on grout sleeve splicing of rebars[J]. Building structure, 2022, 52(S2): 1640-1645.