DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.01.003
文章编号:1671-2579(2026)01-0030-07

PC工法桩刚度折减效应数值模拟分析

陈翔逸[1],王艳华[2],周德泉[1*],王创业[1],胡汉卿[1]
(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011)

摘要:为研究PC工法桩抗弯刚度的折减效应机理,采用Abaqus软件建立考虑锁扣间相互作用的数值分析有限元模型,对比分析了锁扣摩擦因数、桩顶约束条件和组合方式等因素对PC工法桩抗弯刚度变化规律的影响,并通过理论推导分析了中性轴变化对PC工法桩刚度的影响。结果表明:增加锁扣间摩擦力可有效抑制PC工法桩的抗弯刚度折减效应,当锁扣完全焊接时,PC工法桩刚度折减系数可提高至0.83;设置桩顶横向支撑可以显著降低桩身侧移,从而减弱刚度折减效应;PC工法桩抗弯刚度随钢管桩间插入的钢板桩数量增多而降低,刚度折减系数也减小。工程应用中,建议将钢板桩对向排列、将锁扣焊接、设置横向支撑,并采用1根钢管桩匹配1根钢板桩或仅匹配C9型、C-T型、L-T型锁扣,在满足挡土隔水需求的同时,确保基坑安全。

关键词:基坑工程;PC工法桩;刚度折减效应;数值模拟
中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Numerical Simulation Analysis of Stiffness Reduction Effect for Pipe-Combination Piles

CHEN Xiangyi[1], WANG Yanhua[2], ZHOU Dequan[1*], WANG Chuangye[1], HU Hanqing[1]
(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of bending stiffness reduction in the pipe-combination (PC) piles, Abaqus was employed to establish a numerical finite element model considering the interaction between lock joints. The variation in bending stiffness of PC piles was analyzed under different factors such as lock joint friction coefficient, pile head constraints, and combination methods, and the influence of neutral axis displacement on the stiffness of PC piles was analyzed through theoretical derivation. The results show that increasing the friction force between lock joints can effectively mitigate the bending stiffness reduction effect of PC piles. When the lock joints are fully welded, the stiffness reduction coefficient of PC piles increases to 0.83. The presence of lateral support at the pile head can significantly reduce the pile's lateral displacement and the stiffness reduction effect. The bending stiffness of PC piles decreases with an increase in the number of steel sheet piles inserted between the pipe piles, resulting in a smaller stiffness reduction coefficient. For engineering applications, it is suggested that the steel sheet piles should be arranged in opposite directions; the lock joints should be welded, and lateral support should be provided. Furthermore, it is recommended to match one steel pipe pile with one steel sheet pile, or use C9, C-T, or L-T type lock joints to satisfy soil retaining and water isolation requirements while ensuring foundation pit safety.

Keywords: foundation pit engineering; PC pile; stiffness reduction effect; numerical simulation

0 引言

近年来,中国工程建设持续发展,地下空间和地上高层建筑日益增多,基坑工程向深大长发展[1]。高水位场地选择水平承载力大、阻水挡土能力强的支护结构形式非常关键。作为基坑工程或围堰的新型

收稿日期:2024-05-29 **修回日期:**2025-12-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技项目(编号:202019,202247);长沙理工大学研究生科研创新项目(编号:CXCLY2022042,CX20220875)
作者简介:陈翔逸,男,硕士研究生. E-mail: chenxiangyi1102@163.com
***通信作者:**周德泉,男,博士(后),教授.E-mail:zhoudequan28@163.com

支护桩，PC（Pipe-Combination）工法桩是钢管桩[2]与拉森钢板桩[3]通过锁扣相连形成的组合桩，既具有钢管桩良好的抗弯刚度，又具有拉森钢板桩优越的止水效果，且便于回收循环利用，具备低碳环保特征[4]。在长沙暮坪湘江特大桥[5]、长沙香炉洲大桥主墩基础围堰工程、香港国际机场东区车辆隧道工程深基坑工程等围堰工程和深基坑工程中广泛应用。

PC工法桩锁扣间竖向滑动常引起桩间剪应力损失，形成刚度折减效应，即：荷载作用下，桩体弯曲产生变形导致桩身截面受力分布发生变化，抗弯刚度降低[6]。1934年，Lohmyer[7]首次提出了“RMA”（Reduced Modulus Action）效应，研究了不完全剪力传递对U形钢板桩抗弯刚度的影响，并提出了将U形钢板桩简化为完全弹性梁的力学模型，认为实际工程中钢板桩是处于部分剪应力传递状态。Schillings[8]、Crawford等[9]、Byfield等[10]、Schmieg等[11]通过试验研究RMA效应，分析U形钢板桩锁口间的填充物、锁扣形式、加载过程及锁扣间相对滑移等多因素对锁扣剪切力的影响规律，认为提高锁扣间摩擦力与施加端部纵向约束等方法可以有效提高结构抗弯刚度，降低RMA效应；薛政群等[12-13]通过试验分析U形钢板桩锁口联结度与其强度关系，比较4种锁扣焊接情况下钢板桩最大应力位置及大小，认为将锁扣焊接或部分焊接可以有效增加抗弯刚度；陈彬[14]、麦桂林[15]、何远威等[16]、刘震宇[17]将数值模拟结果与试验数据对比，研究U形钢板桩抗弯力学特性，获得U形钢板桩刚度折减系数在不同锁扣摩擦因数下的取值，认为被动土压力作用高度对U形钢板桩刚度折减系数没有影响；王硕等[18]采用有限元法对CT型锁扣钢管桩进行了研究，发现该桩型截面对称，即使发生剪应力传导损失，截面惯性矩也不会降低；因此，锁扣连接处摩擦力的变化不会对锁扣钢管桩的抗弯刚度折减产生影响。

以上研究主要采用模型试验[8-13]、模型试验与数值模拟相结合[14-17]的方法，研究U形钢板桩RMA效应，但对PC工法桩RMA效应[18]研究较少。钢管桩和钢板桩组成的PC工法桩，其截面特性和抗弯能力与单独的钢管桩或钢板桩结构存在明显差异，相关抗弯变形机理尚不明确。为此，本文基于欧洲钢板桩设计规范[6]，采用Abaqus数值模拟软件，建立考虑锁扣间相互作用的PC工法桩有限元模型。通过该模型，探究不同锁扣摩擦因数、桩顶约束条件和组合方式等因素对PC工法桩抗弯刚度折减效应的影响，揭示PC工法桩桩身侧移和弯矩变化特征。研究成果可为PC工法桩工程应用提供依据。

1　数值模拟设计

1.1　工程背景

香港国际机场东区车辆隧道工程隶属于新旅客捷运系统工程，连接新客运廊与扩建后的二号客运大楼。东区隧道工程进行箱涵导流临时改道、隧道段开挖及横向支护，基坑大小约20 m×30 m（高×宽），属于深大基坑。采用预先焊接C9型锁扣钢管桩挡土挡水（图1），采用明挖法施工，边挖边撑，共设置4道支撑。地层以粉砂和黏土为主，−20 m以上含水量约为18%，−20 m以下含水量高达30%，需要进行钢管桩与锁扣或者带锁扣钢板桩的组合设计。

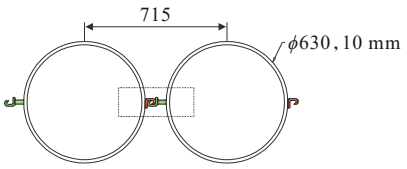


图1　香港国际机场东区隧道段基坑PC工法桩示意图（单位：mm）

Figure 1 Schematic diagram of PC pile in foundation pit in eastern tunnel section of Hong Kong International Airport (unit: mm)

1.2　模型设置

选取常用的12 m钢管桩和拉森Ⅳ型钢板桩作为PC工法桩，如图2所示。钢管桩直径ϕ630 mm，厚度10 mm，拉森Ⅳ型钢板桩宽度400 mm，高度170 mm。材料均选择Q345材质，弹性模量$E=206$ GPa，泊松比为0.3。截面参数见表1。

表1　PC工法桩截面参数

Table 1　Section parameters of PC pile

截面类型	截面惯性矩/mm^4	截面面积/mm^2
钢管桩	19.36×10^8	1.95×10^2
拉森Ⅳ型钢板桩	4.67×10^7	9.70×10^2

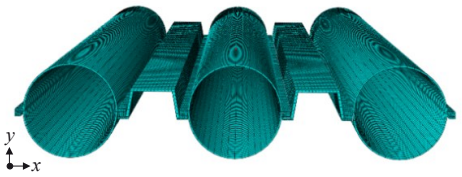


图2　PC工法桩模型

Figure 2　Model of PC pile

1.3　锁扣接触设置与摩擦因数定义

参考Mawar等[19]和陈彬[14]对钢板桩锁扣摩擦因

数的定义，PC工法桩的锁扣随着时间推移会有一定程度的锈蚀，最终形成完全密封状态，锁扣摩擦因数可近似为一定值。定义正常PC工法桩锁扣间摩擦因数为0.3；锈蚀状态下锁扣摩擦因数为0.5；锁扣连接处填充未分级砂时摩擦因数为0.8。为模拟锁扣间相互作用，表面接触采用离散化方法选择表面-表面接触，接触公式采用有限滑移，摩擦公式选择摩尔-库仑罚函数；模拟锁扣焊接时则采用Tie绑定以约束锁扣界面。

1.4 加载过程及边界条件

模拟实际基坑支护中支护桩受力，在PC工法桩两侧分别作用三角形分布荷载，以模拟土压力荷载。假定土层均匀分布，密度$\rho=1\ 800\ \mathrm{kg/m^3}$，侧向土压力系数$K=0.5$。主动土压力作用范围为全桩长，被动土压力作用范围为桩顶下6 m至桩脚处，如图3所示。

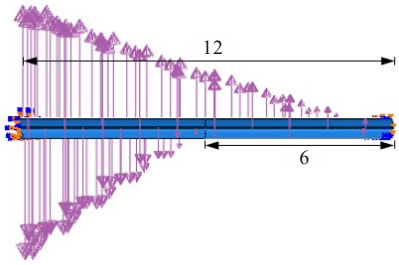


图3 PC工法桩加载示意（单位：m）

Figure 3 Schematic diagram of PC pile loading（unit：m）

为研究不同桩顶约束条件对PC工法桩刚度折减效应的影响，通过设置PC工法桩的边界约束条件以模拟桩顶条件：

（1）内支撑式PC工法桩：底端固支，顶端简支约束y方向位移以模拟桩墙顶部的支撑。

（2）悬臂式PC工法桩：底端固支，顶端悬臂。

根据Lohmeyer[7]的模型（图4）以及王硕等[18]对刚度折减效应的研究可知：U形钢板桩截面关于中性轴是非对称的，当抗弯发生端部滑移使剪应力传导出现损失，U形钢板桩截面惯性矩降低，出现刚度折减。钢管桩与钢板桩组成的PC工法桩截面也是非对称的，在理想情况下，桩身之间不发生竖向相对位移，且截面惯性矩保持不变，不会发生抗弯刚度折减效应。常用的材料力学刚度计算方法也是基于截面惯性矩保持不变的理想前提。为模拟理想情况下的PC工法桩，限制组合桩桩身x轴方向位移，以保证其截面惯性矩稳定，由此得到理想情况下内支撑式PC工法桩的侧移云图如图5所示。由图5可知：桩身最大侧移为7.6 mm，发生在桩顶下4 m左右，与实际中基坑支护结构变形接近。

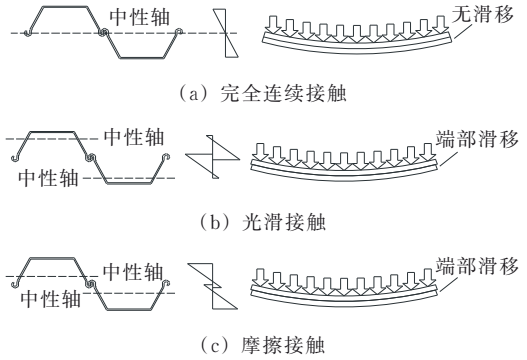


图4 U形钢板桩剪应力传导模型[7]

Figure 4 Shear stress transfer model of U-shaped steel sheet pile[7]

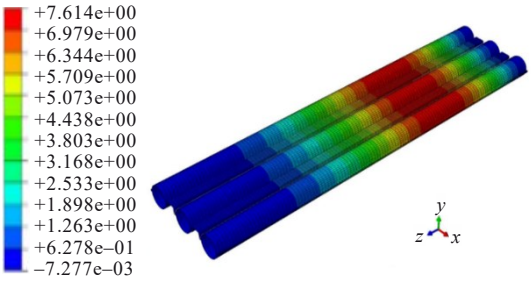


图5 PC工法桩桩身侧移云图（单位：mm）

Figure 5 Lateral displacement contour of PC pile（unit：mm）

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟与试验实测对比

为验证模型可靠性，将数值模拟得到的理想情况下PC工法桩桩身侧移结果与基坑开挖模型试验[20]得到的锁扣钢管桩桩身侧移结果进行对比分析。

图6为悬臂式和内支撑式PC工法桩和锁扣钢管桩桩身侧移随深度变化的对比曲线。

由图6可知：悬臂式支护桩与内支撑式支护桩在模拟三角形土压力荷载下的桩身侧移随深度变化曲线特征截然不同。对于悬臂式支护，PC工法桩与锁扣钢管桩的变形模式相似，其最大侧移均发生在桩顶（悬臂端），这与已有模型试验的结论一致；对于内支撑式支护，PC工法桩的桩身侧移沿深度呈先增大后减小的趋势，桩身最大侧移接近开挖位置，与实测结果[20]吻合，验证了本文模型的合理性，可进行PC工法桩的相关研究。

2.2 锁扣摩擦因数及约束对PC工法桩刚度的影响

图7为不同桩顶约束条件及不同锁口摩擦因数条件下PC工法桩水平侧移随深度的变化曲线。

由图7可知：

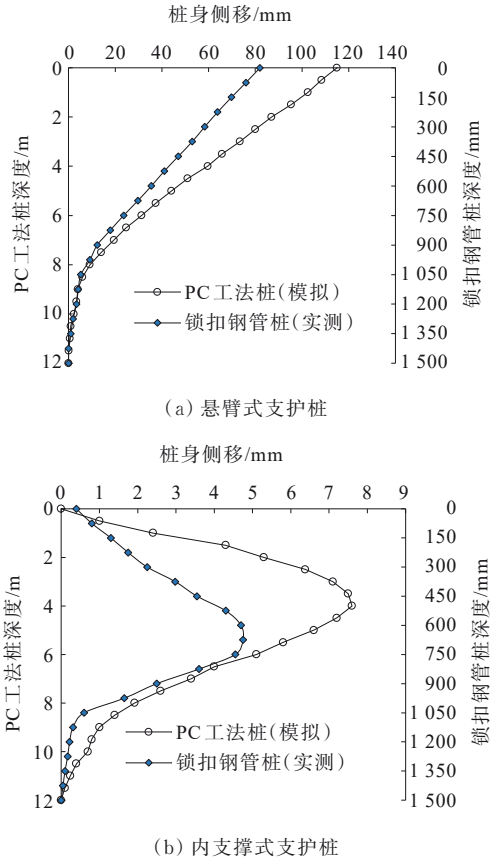


图6　悬臂式和内支撑式支护桩侧移随深度变化曲线对比

Figure 6　Comparison of variation of lateral displacement for cantilever and internally braced retaining piles with depth

(1) 两种约束条件下，PC工法桩桩身最大侧移都随着锁扣摩擦因数增大而减小，桩身侧移随桩长的变化规律并不因锁扣的摩擦因数而发生变化。

(2) 相同荷载下，施加内支撑能有效减小PC工法桩的桩身侧移，与悬臂式工况相比，内支撑式PC工法桩的最大侧移降低93.8%；不同锁扣摩擦因数下，最大侧移均降低90%～94%。说明在桩顶设置横向支撑能有效增加PC工法桩抗弯刚度，减少桩身最大侧移。

为分析两种因素的影响，图8给出了悬臂式和内支撑式PC工法桩在不同锁扣摩擦因数下的刚度折减系数β柱状图。其中：刚度折减系数β为PC工法桩的实际抗弯刚度与PC工法桩的理想情况抗弯刚度之比。

由图8可知：

(1) 当锁扣摩擦因数为0.3时，悬臂式与内支撑式PC工法桩的抗弯刚度分别约为理想情况下的64%和71%。工程中，建议设置横向支撑，可以减轻PC工法桩的抗弯刚度折减效应。

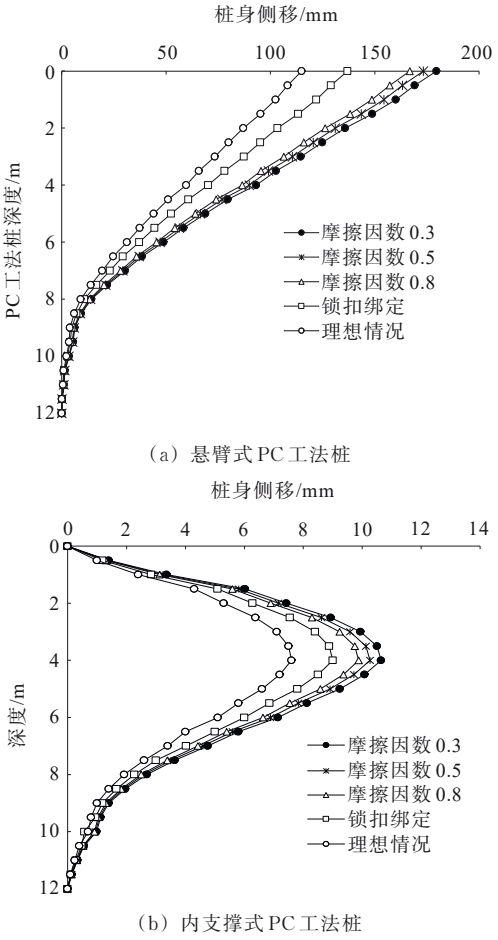


图7　不同摩擦因数下的桩身侧移分布曲线

Figure 7　Lateral displacement distribution curves of PC piles under different friction coefficients

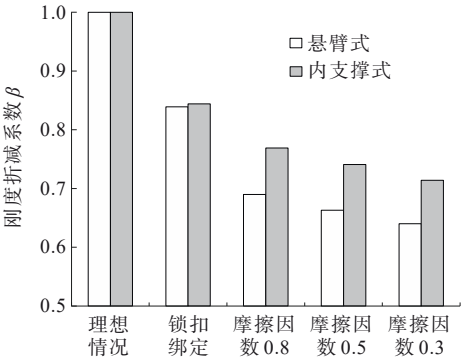


图8　不同摩擦因数下PC工法桩刚度折减系数β

Figure 8　Stiffness reduction coefficient β of PC piles with different friction coefficients

(2) 相较于正常锁扣，将摩擦因数增至0.8时，抗弯刚度提升约8%；而将锁扣焊接，提升幅度可达30%左右。可见，将锁扣焊接可以进一步降低PC工法桩抗弯刚度折减效应。

2.3　不同组合形式对PC工法桩刚度的影响

采用PC工法桩时，钢管桩之间可依据设计要求

插入1～3支拉森钢板桩[21]。选择几组常见PC工法桩的组合形式进行装配，如图9所示。设置组合Ⅰ～组合Ⅴ共5种组合，组合Ⅰ～组合Ⅲ根据钢管桩之间钢板桩的数量不同，定义为“1+1”型、“1+2”型、“1+3”型；组合Ⅳ、组合Ⅴ则根据PC工法桩中钢管桩两侧钢板桩的朝向分为钢板桩同向和钢板桩对向。如果仅利用钢板桩的锁扣，则形成锁扣钢管桩，即钢管桩两侧对称焊接C9型、C-T型、L-T型锁扣（图10）。

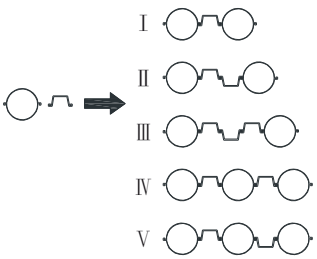
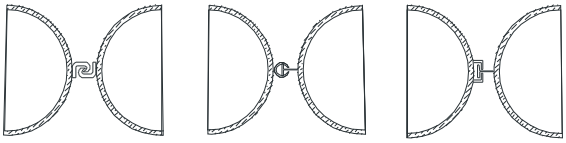


图9 PC工法桩组合形式

Figure 9 Combination forms of PC piles



（a）C9型 （b）C-T型 （c）L-T型

图10 钢管桩锁扣连接形式

Figure 10 Types of lock joint connection in steel pipe piles

PC工法桩在不同组合形式及约束条件下的最大桩身侧移和刚度折减系数β见表2。

表2 不同组合形式PC工法桩最大桩身侧移与刚度折减系数β

Table 2 Maximum lateral displacement and stiffness reduction coefficient β of PC piles with different combination forms

编号	约束条件	理想情况下最大侧移/mm	摩擦因数0.3时最大侧移/mm	β
Ⅰ	悬臂式	99.24	154.69	0.64
Ⅱ		125.56	208.52	0.60
Ⅲ		141.23	243.97	0.58
Ⅳ		115.56	179.63	0.64
Ⅴ		110.45	165.66	0.66
Ⅰ	内支撑式	7.02	10.91	0.71
Ⅱ		7.22	11.33	0.64
Ⅲ		8.09	13.12	0.62
Ⅳ		7.79	10.91	0.71
Ⅴ		7.01	9.47	0.74

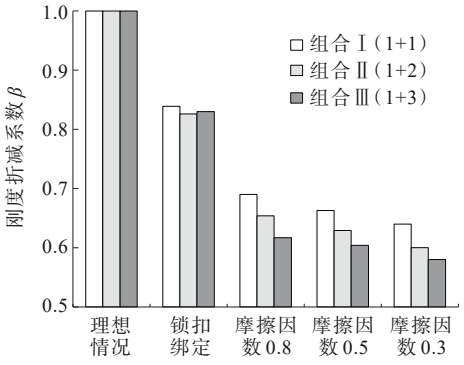
由表2可知：

（1）顶部设置横向支撑可有效降低PC工法桩最大侧移和刚度折减效应。

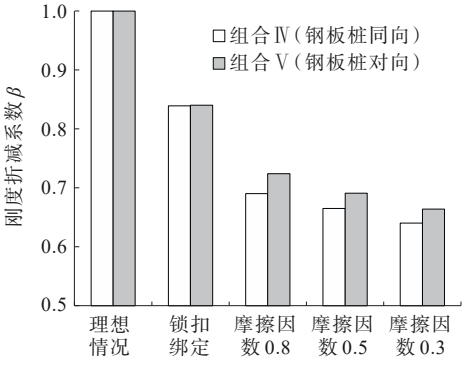
（2）PC工法桩抗弯刚度随钢管桩之间插入的钢板桩数量减少而增大。“1+1”组合比“1+2”组合刚度提升约21%。当锁扣不做处理时，PC工法桩最大侧移增量随钢管桩之间插入的钢板桩数量增加而减小，刚度折减系数β也随之增大。

（3）钢板桩采用对向组合，相较于同向组合可有效减小PC工法桩桩身侧移，最大侧移可有效减少4%～9%。相较于理想情况，最大侧移增量亦减小，抗弯刚度折减效应降低。

以悬臂式PC工法桩为研究对象，对钢板桩朝向和数量两种因素分别进行分析，其在不同组合形式下的刚度折减系数柱状图如图11所示。



（a）钢板桩数量



（b）钢板桩朝向

图11 不同组合形式下PC桩刚度折减系数β

Figure 11 Stiffness reduction coefficient β of PC piles with different combination forms

由图11分析可知：

（1）PC工法桩刚度折减系数随钢板桩数量增加而降低，将钢板桩对向排列，刚度折减系数增加。

（2）PC工法桩刚度折减系数随着摩擦因数提高

而增大，在不同的组合形式下增幅为6%～10%。锁扣焊接能有效降低PC工法桩抗弯刚度折减效应，使刚度折减系数提高至约0.83，与图8中折减系数一致。

2.4　中性轴变化对PC工法桩刚度折减效应影响

剪应力传导损失使中性轴发生变化，导致抗弯刚度折减效应产生。组合Ⅳ、组合Ⅴ两组PC工法桩仅钢板桩朝向发生改变，使得整体结构抗弯刚度性能出现差异。为进一步分析验证PC工法桩的抗弯刚度折减效应原理，对组合Ⅳ、组合Ⅴ分别进行抗弯刚度计算。假设PC工法桩受弯变形时截面惯性矩保持不变，根据材料力学原理，选取PC工法桩的一个单元进行简化计算。

抗弯刚度K计算公式如式(1)所示：

$$K = EI \tag{1}$$

式中：E为钢材弹性模量，取206 GPa；I为单元截面惯性矩。

将组合Ⅳ进行简化，如图12(a)所示。y_c、y_1、y_2分别为整体PC工法桩形心轴、钢管桩中性轴和钢板桩中性轴。当钢板桩同向排列时，以y_1为基准轴计算得到PC工法桩中性轴的距离Z_c，见式(2)：

$$Z_c = \frac{A_1 Z_1 + A_2 Z_2}{A_1 + A_2} \tag{2}$$

式中：A_1、A_2分别为钢管桩截面面积和钢板桩截面面积；Z_1、Z_2分别为钢管桩和钢板桩形心轴到y_1的距离。

得到$Z_c = 0.038$ m，将形心确定后，利用平行移轴定理，计算得出整个组合体系对形心轴的惯性矩，见式(3)：

$$I_{y_c} = I_1 + A_1 Z_c^{\ 2} + I_2 + A_2 (Z_1 - Z_c)^2 \tag{3}$$

式中：I_1、I_2分别为钢管桩、钢板桩截面惯性矩。再由式(1)得到PC工法桩的抗弯刚度。

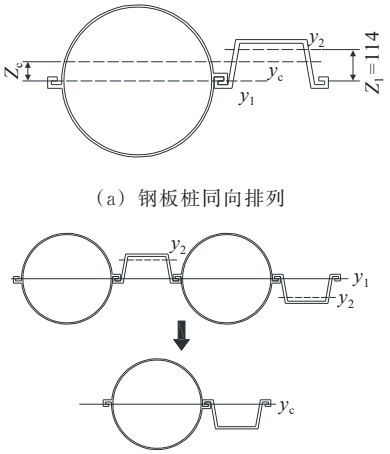
$$K = E[I_1 + A_1 Z_c^{\ 2} + I_2 + A_2 (Z_1 - Z_c)^2] \tag{4}$$

钢板桩同向排列时的PC工法桩抗弯刚度计算值为$K_1 = 2.198 \times 10^{-8}\ \mathrm{N \cdot m^4}$。

当钢板桩对向排列时，由于两组对向钢板桩中性轴的影响，可将PC工法桩两组简化为一组，如图12(b)所示，此时PC工法桩中性轴到y_1的距离$Z_c = 0$。

钢板桩对向排列时的PC工法桩抗弯刚度计算值为$K_2 = 2.287 \times 10^{-8}\ \mathrm{N \cdot m^4}$。

计算结果相较于钢板桩同向排列下的PC工法桩抗弯刚度提升约4%，与模拟结果相似，符合结构刚度增大、桩身侧移变小的规律。说明改变PC工法桩组合方式使中性轴发生变化，会导致整体抗弯刚度性能出现差异。



(a) 钢板桩同向排列

(b) 钢板桩对向排列

图12　PC工法桩截面惯性矩计算简化

Figure 12　Simplified calculation of sectional moment of inertia for PC piles

3　结论

本文采用Abaqus软件建立PC工法桩数值模型，研究PC工法桩抗弯刚度折减效应，主要结论如下：

(1) 增加锁扣间摩擦力可以削减PC工法桩的抗弯刚度折减效应。通过设置横向支撑或对锁扣进行焊接，可以有效降低抗弯刚度折减效应，提高整体刚度。在锁扣完全焊接条件下，PC工法桩的刚度折减系数可提升至0.83。

(2) PC工法桩的组合形式对PC工法桩的抗弯刚度具有显著影响。随着钢管桩间插入的钢板桩数量增加，抗弯刚度降低，刚度折减系数也随之减小。与常见的钢板桩同向排列方式相比，采用对向排列时，可改善PC工法桩刚度性能。

(3) 在实际工程中，建议采取钢板桩对向排列、锁扣焊接及设置横向支撑等措施。在配桩方面，可采用1根钢管桩匹配1根钢板桩，或选用C9型、C-T型、L-T型等锁扣PC工法桩，以满足挡土隔水需求，确保基坑安全。

参考文献：

References：

[1] 郑刚，朱合华，刘新荣，等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报，2016，49(6)：1-24.
ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment

[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24.

[2] 周毅,张宁,王艳华,等.斜直组合型双排锁扣钢管桩支护性能数值模拟分析[J].中外公路,2025,45(6):10-16.
ZHOU Yi, ZHANG Ning, WANG Yanhua, et al. Numerical simulation analysis on support performance of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(6): 10-16.

[3] 杨琴, 方忠强, 刘毅, 等. 不同工况下双排钢板桩围堰内力变形研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 158-164.
YANG Qin, FANG Zhongqiang, LIU Yi, et al. Analysis of internal force and deformation of double-row steel sheet pile cofferdam in different working conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 158-164.

[4] 韦实, 梁荣柱, 李忠超, 等. 基于3D打印的PC工法桩基坑围护结构变形特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 2): 4320-4332.
WEI Shi, LIANG Rongzhu, LI Zhongchao, et al. Model test study on deformation characteristics of retaining structure of pile foundation pit by PC method based on 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(sup 2): 4320-4332.

[5] 杨金龙, 曾华新, 韩珂. 深水浅覆盖地层桥墩基础PLC工法桩围堰施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(9): 75-79.
YANG Jinlong, ZENG Huaxin, HAN Ke. Construction technology of cofferdam with PLC piles for bridge pier foundation in deep water and shallow overburden stratum [J]. Construction Technology, 2022, 51(9): 75-79.

[6] The Building and Construction Standards Committee. Eurocode 3: Design of steel structures: Part 5: Piling: DIN EN 1993-5/NA: 2010[S]. Singapore: The Building and Construction Standards Committee, 2010.

[7] LOHMEYER E. Discussion to 'Analysis of sheet pile bulkheads' by P.Baumann[J].Proceedings of the American Society of Civil Engineers,1934,61(3):47-55.

[8] SCHILLINGS R, BOERAEVE P. Design rules for steel sheet piles—ECSC Project[R]. Lie' ge: CRIF Department of Steel Construction,1996.

[9] CRAWFORD R J, BYFIELD M P. A numerical model for predicting the bending strength of Larssen steel sheet piles [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58 (10): 1361-1374.

[10] BYFIELD M P, MAWER R W. Analysis of reduced modulus action in U-section steel sheet piles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3/4/5): 401-410.

[11] SCHMIEG H, VIELSACK P. Transmission of shear forces in sheet pile interlocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(4):292-297.

[12] 薛政群, 周旅健. U型钢板桩断面模量与锁口联结度关系的试验研究[J]. 水运工程, 1992(10): 7-11, 13.
XUE Zhengqun, ZHOU Lyujian. Test and study on the relationship between the modulus of section of U-type steel sheet pile and degree of contact of interlock[J]. Port & Waterway Engineering, 1992(10): 7-11, 13.

[13] 薛政群. 复合作用力下U型钢板桩锁口联结度与其强度关系[J]. 海洋工程, 1993, 11(4): 67-73.
XUE Zhengqun. The relationship between U-shaped steel sheet pile's lock connection level and its strength under a compined force[J]. The Ocean Engineering, 1993, 11(4): 67-73

[14] 陈彬. 基于有限元分析的钢板桩间锁口摩擦对其抗弯特性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
CHEN Bin. The studied of frictional influcnce between steel sheet pile lock on their flexural properties based on finite element analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[15] 麦桂林. U型钢板桩墙抗弯刚度试验研究与数值分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
MAI Guilin. Experiments and numerical simulation on bending stiffness of U-shaped steel sheet pile wall[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[16] 何远威, 麦桂林. U型钢板桩抗弯力学特性分析[J]. 粘接, 2022, 49(7):175-179,183.
HE Yuanwei, MAI Guilin. Analysis of bending mechanical characteristics of U-shaped steel sheet pile[J]. Adhesion, 2022, 49(7):175-179,183.

[17] 刘震宇.U型钢板桩锁口抗弯刚度折减效应研究[J].中国水运(下半月),2016,16(3):304-306.
LIU Zhenyu. Study on reduction effect of bending stiffness of U-shaped steel sheet pile lock[J]. China Water Transport, 2016, 16(3): 304-306.

[18] 王硕, 杨彦军, 岳祖润. 锁口钢管桩抗弯刚度折减行为及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1551-1556.
WANG Shuo, YANG Yanjun, YUE Zurun. Analysis of reduced modulus action and influence factors in steel pipe sheet piles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1551-1556.

[19] MAWER R W, BYFIELD M P. Reduced modulus action in U-section steel sheet pile retaining walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(3): 439-444.

[20] 梁荣柱, 韦实, 王新新, 等. 内支撑式和悬臂式锁口钢管桩基坑围护结构变形对比试验分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 172-182.
LIANG Rongzhu, WEI Shi, WANG Xinxin, et al. Comparative test and analysis of the deformation in enclosure structure of internally-braced and cantilevered locked steel-pipe pile foundation pits[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 172-182.

[21] 邓帅. 管廊基坑中PC组合钢管桩受力变形特性及计算方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
DENG Shuai. Study on deformation and stiffness of PC composite steel pile in construction of pipe gallery[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.