

· 护岸结构 ·



门架式护岸结构的承载特性透明土模型试验*

顾宽海¹, 顾悦洋^{1,2}, 梁泽龙², 谢立全²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 同济大学 水利工程系, 上海 200092)

摘要: 某航道拓宽工程采用了一种新型装配式门架式护岸结构。针对该结构在岸侧竖向荷载作用下的工况, 开展了基于透明土粒子图像测速(PIV)分析技术的模型加载试验, 通过全程动态观测的方式, 揭示新型结构的工作机理及土体响应特征, 为工程设计和计算提供技术支持。试验结果表明: 竖向荷载作用下装配式护岸结构的工作机理较为复杂。首先, 由于连系梁的存在使得板桩与方桩形成较为稳定的空间结构体系, 两者共同变形产生协调作用, 有效地限制了结构水平位移。其次, 该结构能否有效充分发挥后排桩的作用, 与板桩和方桩的抗弯截面模量匹配性相关, 板桩抗弯截面模量宜稍大于方桩。最后, 试验的板桩和方桩产生的弯矩、位移变形与工程设计采用 m 法的计算结果基本一致, 进一步验证了 m 法的合理性, 但应注意 m 取值, 否则结果偏差较大, 影响工程的安全性和经济性。

关键词: 护岸; 装配门架式; 竖向荷载; 透明土; 加载试验; 工作机理

中图分类号: U 651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0080-07

Transparent soil model test on the bearing capacity of gantry type bank protection structure

GU Kuanhai¹, GU Yueyang^{1,2}, LIANG Zelong², XIE Liqun²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In a channel widening project, a new type of prefabricated gantry revetment structure was adopted. Aiming at the working condition of the structure under the vertical load on the shore, a model loading test based on the transparent soil PIV (particle image velocimetry) analysis technology is carried out. Through the whole dynamic observation method, the working mechanism and soil response characteristics of the new structure are revealed, which provided a basis for engineering design, and computing to provide technical support. The test results show that the working mechanism of the prefabricated bank revetment structure under the action of vertical load is relatively complicated. First of all, due to the existence of the connecting beam, the sheet pile and the square pile form a relatively stable spatial structural system, which can deform together to produce a coordinated effect, effectively to limit the horizontal displacement of the structure. Secondly, in engineering design, in order to give full play to the performance of each component of the front sheet pile and the rear pile portal structure, the matching of the flexural section modulus of the sheet pile and the square pile is very important. The amount should be larger. Finally, the bending moment, displacement and deformation of the sheet pile and square pile in the test are basically consistent with the calculation results of the engineering design using the m method, which verifies that the m method is suitable for the design and calculation of the structure, but attention should be paid to the value of m . Otherwise, the result will be greatly affected.

Keywords: revetment; prefabricated gantry type; vertical load; transparent soil; loading test; working mechanism

收稿日期: 2022-11-15

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (11172213)

作者简介: 顾宽海 (1973—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为水工结构与近海岩土工程。

通讯作者: 谢立全 (1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为近海工程。E-mail: xie_liqun@tongji.edu.cn

随着国家对节能减排、生态环保越来越受到重视,内河航运作为国家综合运输体系和水资源综合利用的重要组成部分,以其运能大、占地少、能耗低、污染小的特点受到了各界的关注。但在整治过程中发现,部分航道两岸的企业为充分利用土地和空间,将建筑物布置在未整治的航道边,若直接搬迁这些构筑物,将付出巨大的经济代价;若在相对狭小的航道边缘采用传统的大开挖方案建设护岸,将影响已建重要构筑物结构稳定和安全,难以满足设计要求。为此,既不搬迁构筑物又不用大开挖的门架式护岸结构应运而生。

对于门架式护岸结构已有一定程度的研究。田学运^[1]指出在工程中开挖深度较大的条件下,门架式双排桩经济效益优于大直径单排悬臂抗滑桩。沈波等^[2]发现采用矩形门架式护岸将减小主体结构施工量,施工工期短且无需开挖,应用在河道护岸可在河道汛期通航期前完成施工。吴刚等^[3]结合滑移引起的前后桩桩间土压力差异,通过研究土压力的空间效应和冠梁的变形协调作用改进计算方法。荣玲^[4]进行了不等长门架式双排桩物理模型试验,对比分析同等长度后排桩的情况下,不同长度前排桩和不同排距对整体结构受力的影响。

装配式门架式护岸结构是在门架式护岸以及装配式结构^[5-7]基础上发展形成的一种新型护岸结构,是由预应力U形混凝土板桩与混凝土方桩以及在桩顶的连系梁组成的空间组合结构。其设计满足了施工空间相对狭小、生态环保、美化环境等要求^[8]。本试验研究了装配式门架式护岸结构在岸侧竖向荷载作用下的受力及破坏机理,通过观察土体位移及测量数据与工程计算结果比较,验证 m 法(计算弹性桩水平位移及作用效应的方法)的合理性等。

1 门架式护岸结构与试验方案

1.1 工程概况

上海市某航道工程新建护岸受施工空间及相

邻构筑物的限制无法进行大开挖,设计采用截面抗弯、抗剪强度高的U形预应力钢筋混凝土板桩(450 mm)作为前排桩,连续布置;后排采用400 mm×400 mm 钢筋混凝土方桩,桩长均为14 m,后排桩基间距1.8 m,排距3.5 m。U形钢筋混凝土板桩相比于传统板桩具有节约混凝土用量、减轻自身重力、桩截面积小、减少沉桩的桩端阻力等优势^[9];后排混凝土方桩起到锚固作用,同时上部设置连梁,与方桩、U形混凝土板桩形成一体式门架稳固土体^[10]。新建门架式护岸为装配式结构,见图1。

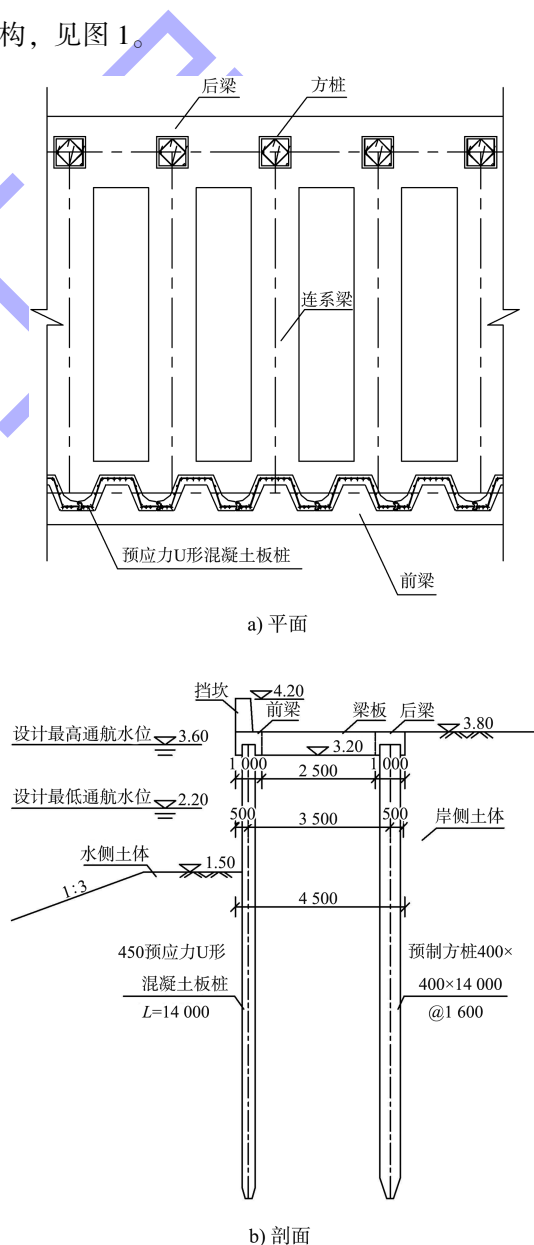


图1 门架式护岸结构布置(高程:m;尺寸:mm)

1.2 试件设计与制作

根据静力相似及几何相似原则,确定模型几何相似比 C_l 为 1:80;弹性模量相似比 C_E 为 1:54.5;应力比 C_σ 为 1:54.5;应变比 C_ϵ 为 1:1。试验要求对门架式护岸结构试件实施竖向加载,以模拟周围施工荷载、地面使用荷载等。

如图 2 所示,板桩桩长 L_u 、排距 H (板桩与方桩的间距) 为 45 mm,连系板长度 a 为 60 mm、宽度 b 为 180 mm,板桩为聚碳酸酯(PC)塑料。方桩桩长 L 为 180 mm、桩距 h 为 20 mm、边长为 5 mm,方桩为聚乙烯(PE)塑料。连系梁同样采用 PE 塑料,材料的相似性设计主要考虑模型的抗弯变形,即弹性模量的相似性。

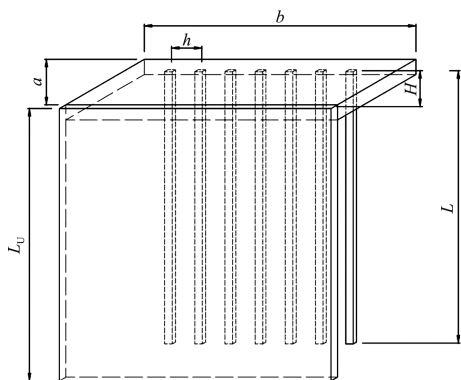


图 2 门架式护岸基础模型设计尺寸

本次试验透明土材料选用 0.2~0.5 mm 熔融石英砂作为透明固体颗粒,干密度为 1.288 t/m^3 ,孔隙比为 0.6~0.7,黏聚力为 8.3 kPa,内摩擦角为 32.8° ,固结快剪正应力为 100、200、300 kPa 时,抗剪强度对应为 82.4、156.9、247.1 kPa,3 号白油与 15 号白油混合溶液作为孔隙液体,混合溶液密度为 0.850 t/m^3 ,该材料可用于模拟工程中土体为粉质砂土的情况。

1.3 试验装置

试验采用自行研发的透明土试验观测系统,见图 3。模型箱、透明土体、孔隙混合液组成了试验模型的主要部分,加载装置由伺服电缸、拉压传感器和反力架构成。透明土模型试验装置实物见图 4。

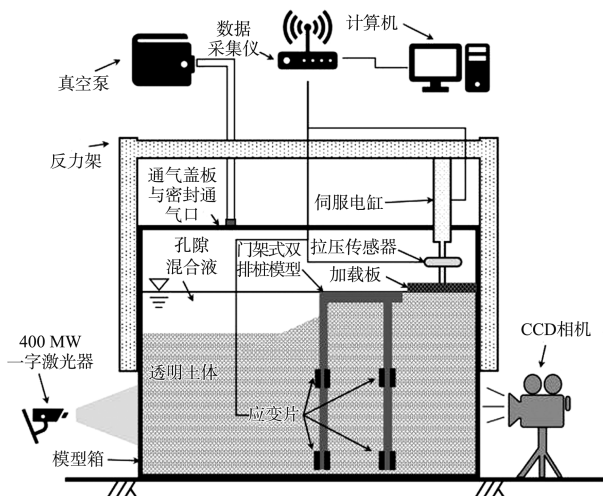


图 3 透明土试验观测系统

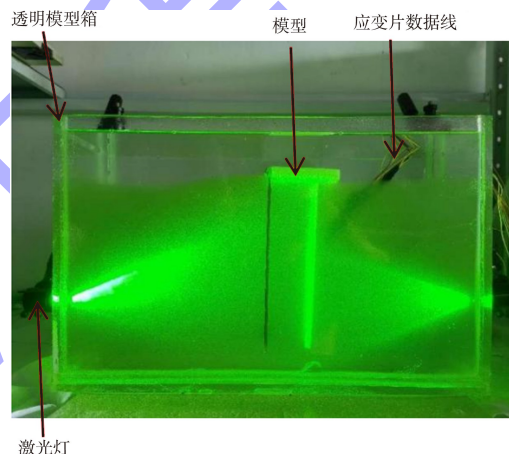


图 4 透明土模型试验装置

1.4 加载方案

通过伺服电机接触加载板的方式分级加载,加载板长 180 mm、宽 75 mm,初始接触力为 10 N 用于伺服电缸和加载板接触,随后加大至 50 N,之后每一级加大 50 N,最大至 500 N 后停止,换算为压强最大为 37.037 kPa,见图 5。

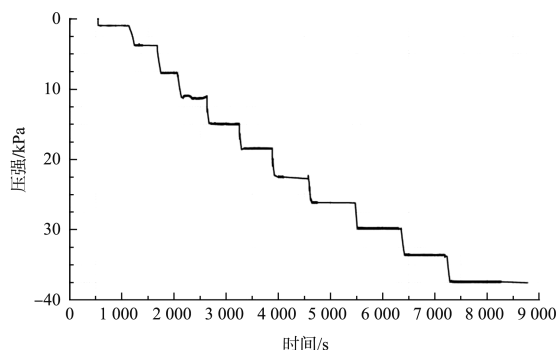


图 5 加载方案

1.5 测点布置

为得到试件的荷载-应变变形规律，试验中除利用伺服电缸伸缩杆自带荷载传感器来测量荷载数据之外，还另外架设了 4 组应变片监测应变变形，见图 6。

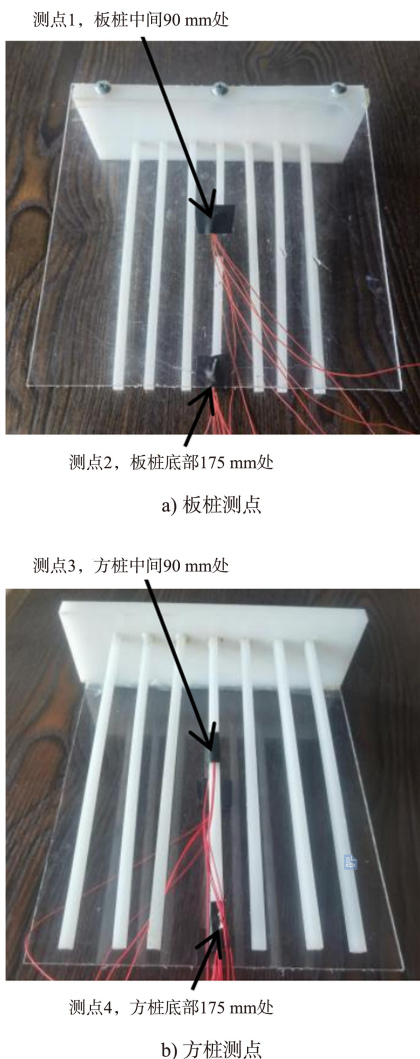


图 6 测点布置方案

1.6 数据采集

1) 本试验采用粒子图像测速 (PIV) 分析和伸缩杆所带位移传感器相结合的方式采集门架式护岸结构柱顶位移及土体沉降位移。其中 PIV 分析技术原理见图 7，最终通过不同帧的多组图片进行对比和相关性分析，从而获得土体的位移和流速矢量图。

2) 采用电阻式应变计检测门架式护岸结构体应变，以及静态电压式应变采集系统进行信号采集。

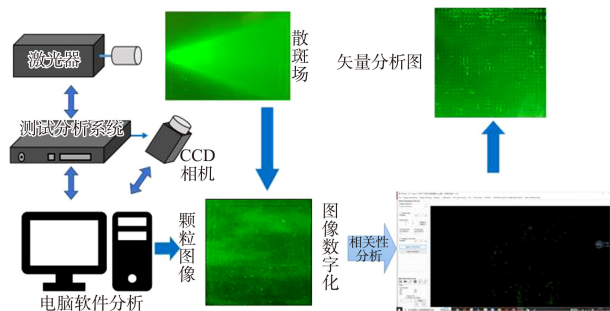


图 7 PIV 技术原理

2 试验结果与分析

2.1 试验现象与加载过程土体 PIV 速度场

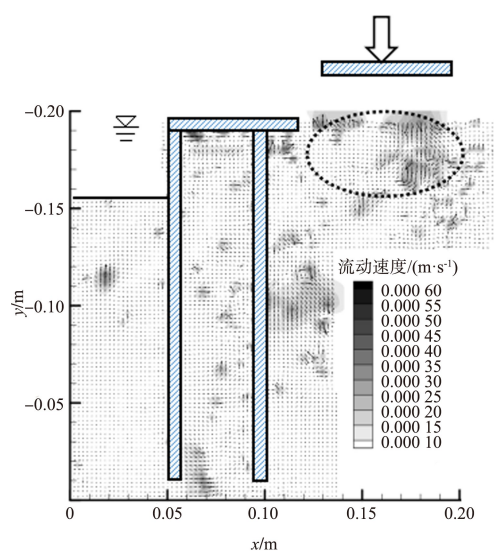
选取典型断面对门架式基础整体受力分析，承载过程中发现桩周土体流动性较小。当伺服电缸加载达到 500 N，倾斜率未达到 1%，未形成破坏。图 8 为加载过程土颗粒移动的速度场及 PIV 速度云图，由图可知：

1) 加载板将压强传递至岸侧土体，形成以水平方向的向板桩墙前位移为主和少量竖向压缩沉降的岸侧土体位移，加载至 20% 总压力时，流动速度最大达 0.445 mm/s，方桩及周围土体出现少量位移，见图 8a)，此时结构上部受力产生变形。

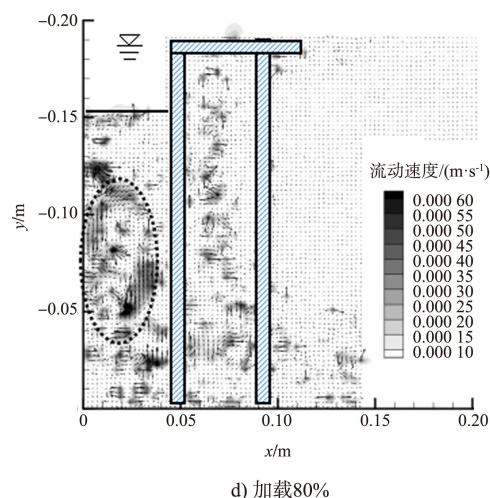
2) 加载至 35% 总压力时，主要为结构上部产生变形，土体流动变形主要在桩间土，并集中在 $y = -0.11$ m 以下土体，流动速度最大达 0.67 mm/s，同时板桩墙前土体存在较大扰动，见图 8b)，此时中下部桩体开始变形和受力，板桩墙前土体受板桩变形影响产生较大流动变形。

3) 加载至 65% 总压力时，即加载至设计荷载值，岸侧土体逐渐稳固，土体流动速度逐渐下降，水平速度集中在 x 为 $-0.12 \sim -0.06$ m 处，竖向速度集中在 y 为 $-0.04 \sim -0.02$ m 处，见图 8c)。由于板桩变形，桩间土体流动至板桩底部后转移至板桩墙前土体，此时板桩墙前土体受挤压并产生更大的被动土压力(向岸侧)。

4) 随着总压力增大至 80%，此时竖向荷载已超过设计荷载，岸侧土体较为稳定，而板桩中下部位移进一步加大并导致板桩墙前土体流动加剧，见图 8d)。



a) 加载20%



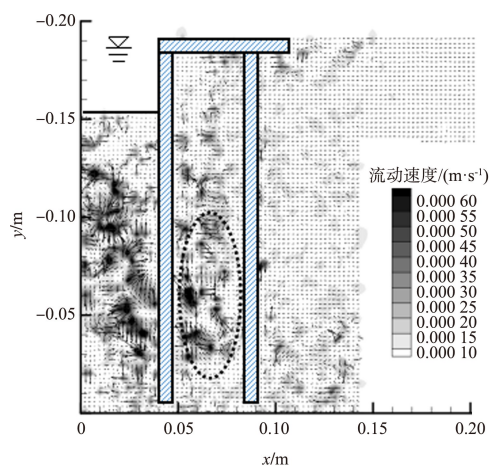
d) 加载80%

图8 总压力时速度场及云图

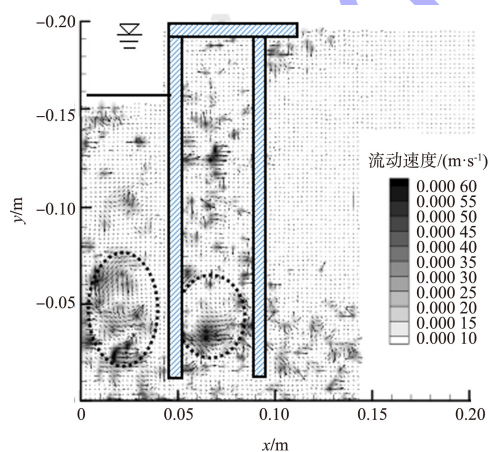
综上,土体流动从加载面开始,流动至中间部分桩间土,受两侧桩体挤压向下流动,最后绕过板桩底部流动至板桩墙前土体。顶部土体无明显速度场。

2.2 土体变形特性

由图9可知,顶部结构受连系梁限制,顶部结构未发生较大位移,在方桩中间高度位置因侧向水平荷载而与板桩靠得更近,墙前土体位移较小,且位于表层,墙后地面变形不明显,加载后期的变形主要发生于中下部土体。因此,门架式结构总体水平抵御变形能力较强。



b) 加载35%



c) 加载65%

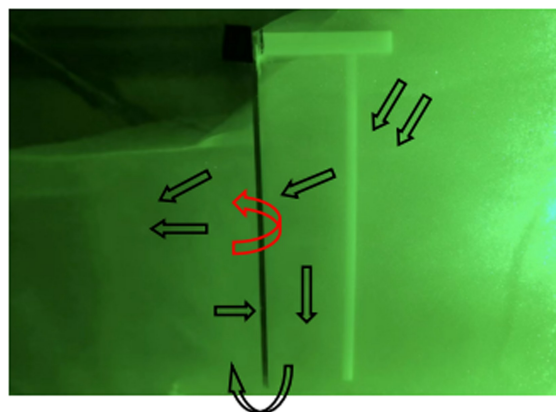


图9 加载结束时的土体变形特征

2.3 结构应变特征

应变片所测得的测点应变量及计算弯矩见图 10，板桩受到的弯矩较大，约为方桩的 2 倍，主要受力点在中间部位。

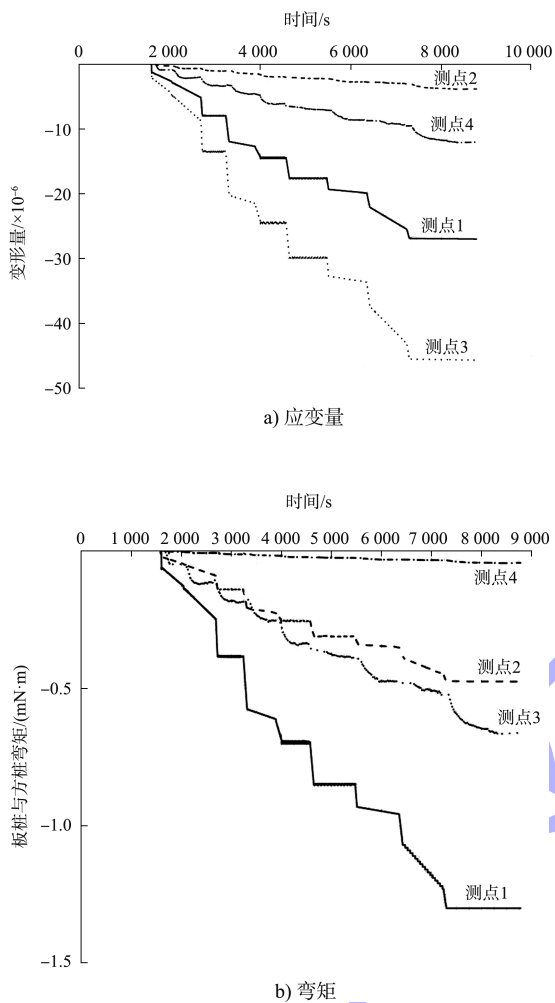


图 10 测点板桩与方桩应变量及弯矩

应变变形最大值出现在方桩中间部位，板桩与方桩的中间部位应变量相差较大，在竖向荷载逐级增加的情况下，板桩与方桩应变量逐渐增大，受上部连系梁的约束，两者整体应变变化趋势几乎相同。通过 PIV 像素分析测得顶部板桩与方桩位移相同且在 20 μm 以下，方桩、板桩、连系梁的整体结构很大程度上限制了板桩桩顶的变形和位移。

方桩与板桩中间部位应变量的不同也导致土体进一步流动变形，因此工程设计时需考虑方桩与板桩的抗弯截面模量之间的关系，板桩抗弯截面模量过小则无法达到设计要求；过大则不够经济。且板桩抗弯截面模量应稍大于方桩，桩基协调变形使方桩承受更多弯矩，有效发挥板桩与方桩抗弯性能。

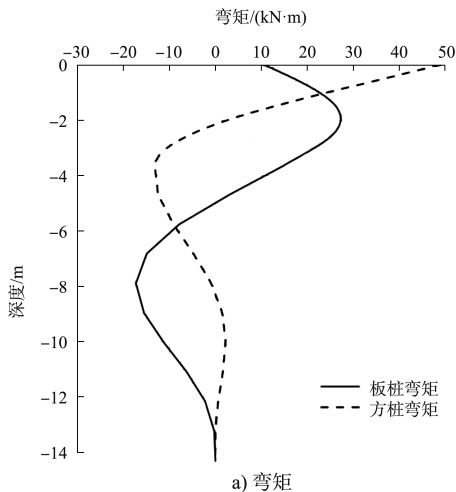
2.4 工程实际计算结果

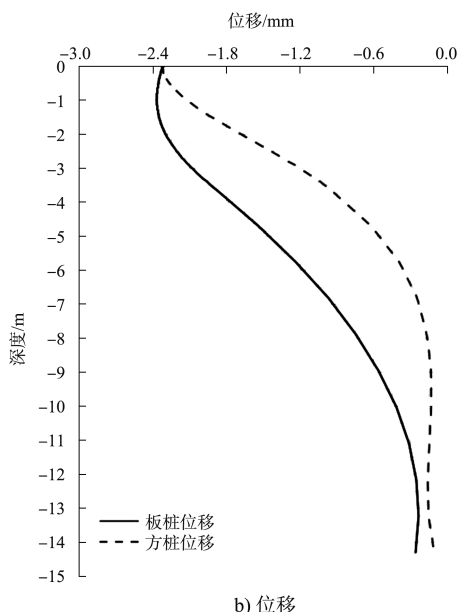
将工程实际中土体换为透明土，根据 m 法计算桩基弯矩与位移，假设土的水平地基抗力系数随深度呈线性增加， m 值按 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[11]进行取值计算，见表 1。

表 1 预制混凝土桩在不同土层中的 m 值

土层类别	m 值/ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)	单桩在地面处 水平位移/mm
淤泥、淤泥质黏土	2.0~4.5	10
流塑、软塑状黏性土、松散粉细砂、松散填土	4.5~6.0	10
可塑状黏性土、粉土、稍密填土	6.0~10.0	10
硬塑、坚硬状黏性土、中粗砂	10.0~22.0	10
中密、密实沙砾、碎石类土	-	-

试验中土体属于粉质砂土，可塑性较强， m 值取 6.5 MN/m^4 。采用易工板状码头 CAD 子程序进行有限单元法计算，桩基弯矩与位移计算结果见图 11。



图 11 m 法计算板桩与方桩弯矩与位移

将 m 法计算结果与试验结果进行比较, 见表 2。试验结果根据静力相似及几何相似原则进行放大, 模型位移比为 1:80, 模型弯矩相似比为 $1:2.790\ 4\times 10^7$, 竖向荷载为 26.5 kPa (相当于试验中 65%总压力)。

表 2 m 法计算结果与试验结果

结果对比	顶部位移/mm	板桩中部弯矩/(kN·m)	方桩中部弯矩/(kN·m)	板桩底部弯矩/(kN·m)	方桩底部弯矩/(kN·m)
试验值	2.00	18.60	7.30	3.98	1.26
计算值	2.32	14.96	4.79	2.26	0.58
试验值/计算值	0.86	1.24	1.52	1.76	2.19

由表 2 可知, 试验板桩和方桩产生的弯距、位移变形与 m 法的计算结果基本一致, 说明 m 法合理。经比较, 计算结果相比试验结果位移较大而弯矩较小, 主要由于工程计算中采用的 m 值偏小, 此偏差可严重影响工程的安全性和经济性, 因此在设计中应注意选取合适的 m 值。

3 结论

1) 基于 PIV 技术分析门架式护岸结构的受力土体, 研究土体的流动情况, 发现了门架式护岸结构中土体的运动机理, 并与桩基的变形对应分析,

更好地研究了门架式护岸结构的受力方式。

2) 在岸侧施加竖向荷载, 分析门架式护岸结构的受力变形情况和土体变形特征, 发现装配式门架式护岸结构利用连系梁将方桩与预应力 U 形混凝土板桩结合, 限制顶部水平位移, 使结构受力更均匀, 提高了结构整体性。对工程设计中方桩和板桩的抗弯截面模量匹配性提出了建议, 以便在工程中充分发挥后方桩的构件性能。

3) 将工程实际土体换成试验相同土体进行验算, 试验结果根据静力相似及几何相似原则进行放大并与工程计算结果对比分析, 结果表明采用 m 法合适, 但应注意 m 取值, 否则结果偏差较大, 影响工程安全性和经济性。

参考文献:

- [1] 田学运. 门架式双排桩在阿尔及利亚东西高速公路边坡整治工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2009(6): 66-69.
- [2] 沈波, 陈能成. 门架式永临结合结构在基坑围护中的应用[J]. 陕西水利, 2016(5): 114-117.
- [3] 吴刚, 白冰, 聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2753-2758.
- [4] 荣玲. 门架式不等长双排桩模型试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [5] 顾宽海, 陈浩群, 张逸帆, 等. 装配式低桩承台护岸结构设计[J]. 水运工程, 2018(12): 186-192.
- [6] 顾宽海, 汪涛, 陈明阳, 等. 装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工[J]. 水运工程, 2021(6): 6-12, 19.
- [7] 顾宽海, 周松泽, 宋凡. 平原地区某内河生态航道整治工程设计要点[J]. 水运工程, 2020(12): 147-154.
- [8] 吕彩霞. “绿色智造·和谐发展”装配式技术在水利工程建设中的应用[J]. 中国水利, 2020(1): 65-67.
- [9] 吕荣, 钱冠群, 陆丽萍. U 型钢筋混凝土板桩在河道整治中的应用[J]. 江苏水利, 2017(5): 33-36.
- [10] 黄建华, 李龙真. 预应力混凝土板桩-冠梁协同支护作用机理[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(4): 314-321.
- [11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. JTS 167—2018: 码头结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 赵娟)