

# 先张法预应力 U 形板桩在大湾区内河航道 堤岸挡墙中的应用\*

徐立强<sup>1,2</sup>, 戴 维<sup>1</sup>, 王逢武<sup>1</sup>, 田广宇<sup>3</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082;

2. 哈尔滨工业大学, 广东 深圳 518055;

3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:**以大湾区东莞内河航道万江堤岸挡墙工程为例,介绍了先张法预应力 U 形板桩作为堤岸挡墙的工程应用。首先,通过方案比选得出, U 形板桩方案具有施工速度快、对河道影响小且工程造价低的优点。然后,通过理论计算分析得出了 U 形板桩作为悬臂支挡结构的最大适用高度。最后,对水平位移产生的因素进行分析,并提出预设位移、事先进行墙后地基加固的措施减少水平位移。现场实测数据表明,水平变形主要产生在前 45 d,后期变形较小。挡墙工程运营数据显示适用情况良好,可为类似内河航道工程提供参考。

**关键词:** U 形板桩; 水平位移; 等效代换; 堤岸挡墙

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0165-07

## Application of tension prestressed U-shaped plate pile in embankment retaining wall of river channel embankment in China Great Bay Area

XU Li-qiang<sup>1,2</sup>, DAI Wei<sup>1</sup>, WANG Feng-wu<sup>1</sup>, TIAN Guang-yu<sup>3</sup>

(1. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China;

2. Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518000, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Taking Wanjiang embankment retaining wall project of Dongguan inland waterway in China Great Bay Area as an example, this paper introduces the engineering application of prestressed U-shaped sheet pile as embankment retaining wall. Firstly, the scheme comparison shows that the U-shaped sheet pile scheme has the advantages of fast construction speed, little influence on the river and low project cost. Then, the maximum applicable height of U-shaped sheet pile as cantilever retaining structure is obtained through theoretical calculation and analysis. Finally, the factors of horizontal displacement are analyzed, and the measures of presetting displacement and reinforcing the foundation behind the wall in advance are put forward to reduce the horizontal displacement. The field measured data show that the horizontal deformation mainly occurs in the first 45 days, and the later deformation is small. The operation data of retaining wall project show that the application is good, which can provide reference for similar inland waterway projects.

**Keywords:** U-shaped plate pile; horizontal displacement; equivalent replacement; embankment retaining wall

收稿日期: 2022-02-17

\*基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020B1515120083)

作者简介: 徐立强(1983—),男,博士,高级工程师,研究方向为隧道及岩土工程等。

堤岸挡墙用于穿越市区的航道项目，可有效节约土地资源，其常见形式有重力式挡土墙、悬臂式挡土墙及扶壁式挡土墙等<sup>[1-4]</sup>。传统挡墙施工存在围堰等措施费用高、施工速度慢、土方工程量以及环境污染严重等缺点。先张法预应力 U 形板桩(简称“U 形板桩”)在国内外的堤岸、内河航道、城市河道、流域治理、挡土墙及边坡加固等工程中已有大量应用<sup>[5-8]</sup>。20 世纪 90 年代 U 形板桩开始在国外应用<sup>[9]</sup>，上官京灵等<sup>[10-11]</sup>对 U 形板桩理论计算及施工进行了初步研究，对截面的等效代换、先张法预应力等因素进行了理论研究，并对 U-CS-450 及 U-CS-600 型构件的抗弯承载力进行了试验研究。刘汉中等<sup>[12]</sup>对波浪荷载下 U 形混凝土板桩促淤坝动力响应数值进行分析，结果表明，U 形板桩应用于促淤坝时，具有良好的整体稳定性和力学性能。

本文对大湾区东莞内河航道万江的河道堤岸改造项目中的 U 形板桩应用的相应力学理论和顶部位移产生因素进行分析，并通过施工顺序的调

整降低其影响。通过现场监测数据的对比得出，该技术在类似项目中有较强的适用性。

1 工程概况

项目位于东莞市，主要涉及内河航道万江河道及沿江东路改造。万江河每日水位变化受潮汐作用明显，涨潮水位较常水位高 1.5 m 左右，每月初一、十五时，涨潮水位较常水位高 2.0 m 左右，流域面积约为 6.37 km<sup>2</sup>。万江河靠沿江东路一侧现状为石砌挡墙(破损严重)、建筑垃圾堤岸等。沿江东路呈西向东走向，起点接现状道路，终现状沿江东路，道路长度约 1.4 km，涉及新建堤岸挡墙约 1.0 km。现场较为空旷，地形属冲积地貌单元，人工填土平整，地形地貌中等复杂，建设条件良好。根据钻探揭露情况，按地层成因类型和岩土层性质，场区内地层自上而下分为：第四系人工填土层(Q<sub>4</sub><sup>ml</sup>)、第四系冲积层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、上第三系(N)(泥岩、泥质粉砂岩)，拟建场地地勘剖面见图 1。

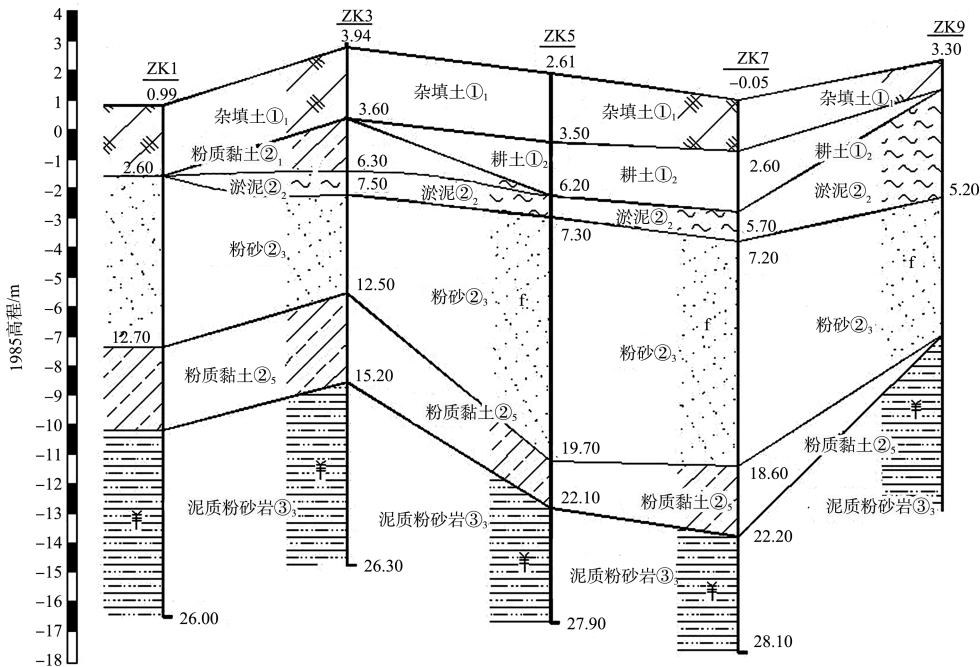


图 1 万江街道沿江东路治堵及碧道工程地质剖面

护岸工程拟建场地的地层主要为：①杂填土、②淤泥、③粉砂、④全风化泥质岩和⑤强

风化泥质岩。各土层主要设计参数见表 1。

表 1 各土层主要设计参数

土层	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	天然密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力/ kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	承载力 $f_{ak}/\text{kPa}$
① <sub>1</sub> 杂填土	4.4	1.83	15	0.20	70
① <sub>2</sub> 耕土	4.3	1.82	15	0.25	70
② <sub>1</sub> 粉质黏土	4.3	1.82	20	0.25	100
② <sub>2</sub> 淤泥	1.4	1.60	10	0.20	55
② <sub>3</sub> 粉砂	-	1.72	25	0.35	90
② <sub>4</sub> 淤泥	1.5	1.61	10	0.20	55
② <sub>4</sub> 粉质黏土	3.8	1.79	20	0.25	100
③ <sub>1</sub> 全风化泥质岩	8.1	1.98	50	-	300
③ <sub>2</sub> 全风化泥岩	7.7	1.97	50	-	450
③ <sub>3</sub> 强风化泥质岩	10.5	2.20	70	-	450
③ <sub>4</sub> 强风化泥岩	12.8	2.50	80	-	470

2 工程方案比选

2.1 工程特点

工程位于内河航道万江河东侧, 现状为碎石、建筑垃圾边坡以及破损严重的老旧砌体结构挡土

墙, 当地汛期主要集中在 5—11 月, 因此应采用快速施工工艺, 避免在汛期施工; 另外万江河水质较好, 当地行政管理部门对环保要求较高, 现场施工不能对水质产生过多影响。基于以上特点, 结合当地堤岸常见工程做法, 并考虑到堤岸高差普遍在 4 m 左右, 分别对扶壁式挡土墙、灌注排桩以及 U 形板桩方案进行比选。

2.2 扶壁式挡土墙方案(方案 1)

主体结构采用 C30 混凝土, 设置肋板, 靠近万江河一侧为 800 mm 厚抛石护砌。地基处理采用直径 600 mm 的 PHC 预应力管桩, 并设置 800 mm 厚碎石垫层, 挡土墙后回填中粗砂。本方案需要在靠近沿江东路侧开挖土方, 并在万江河道内增设围堰, 拟采用双排 12 m 拉森钢板桩并内置黏土编织袋围堰方式, 方案剖面见图 2。

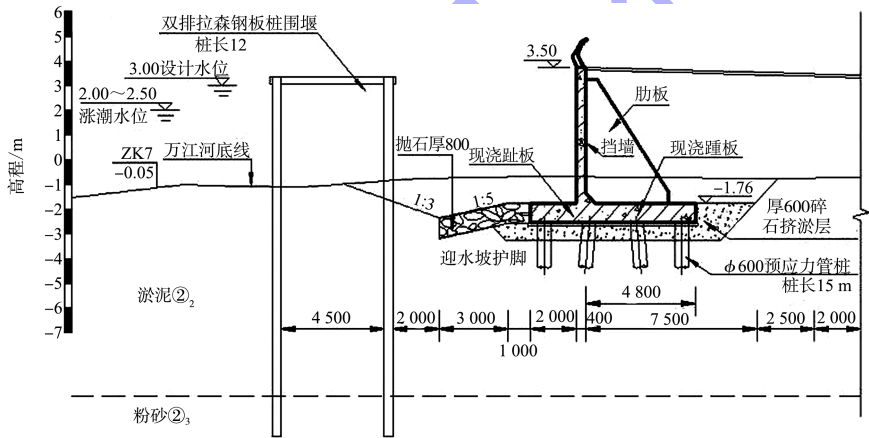


图 2 扶壁式挡土墙方案横断面 (尺寸: mm)

2.3 钻孔灌注桩排桩方案(方案 2)

采用直径 1.0 m 钻孔灌注桩作为支挡结构, 间距为 1.2 m, 靠近万江河一侧采用植筋后设置钢筋混凝土抹面, 灌注排桩顶部需设置 1.2 m×1.0 m 冠梁, 增强纵向刚度。施工顺序为: 1) 堆土设置施工平台; 2) 钻孔灌注桩施工; 3) 开挖万江河侧多余土方, 并根据需要设置抛石护砌。本方案不需要在沿江东路侧开挖土方, 项目整体土方量较小, 灌注排桩方案剖面见图 3。

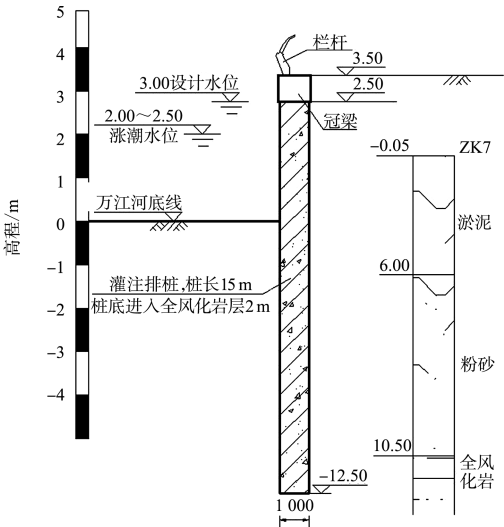


图 3 钻孔灌注桩排桩方案横断面

2.4 U形板桩方案(方案3)

首先采用预制先张法预应力 U 形板桩打入堤岸土体,然后在顶部设置纵向冠梁,最后在靠近万江河侧开挖多余土体并做抛石护砌。采用 800 mm 高 U 形板,震动锤施工,持力层为粉质黏土。工厂预制施工效率高,且不需要设置围堰,施工作业面小,工程造价较低,对于不同高度的弯矩和剪力 U 形板桩均有与之相对应的规格型号, U 形板桩方案剖面见图 4。

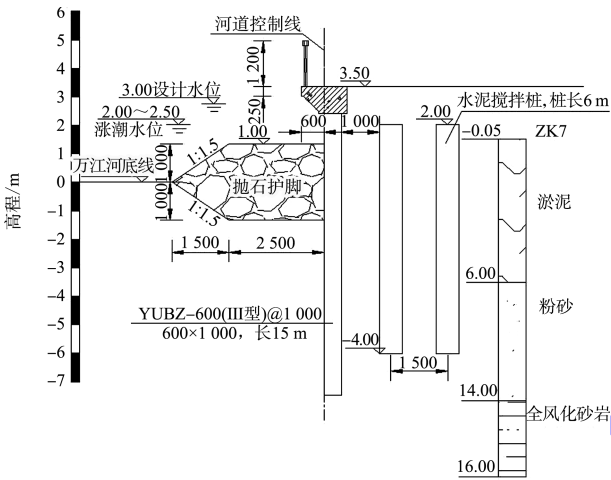


图 4 U 形板桩方案横断面 (尺寸: mm)

2.5 方案综合比选

3 种方案优缺点比选情况见表 2。

表 2 各方案优缺点比选

方案名称	优点	缺点
扶壁式挡土墙	1. 结构整体性好; 2. 对于软土等可以采用复合地基,适用性强; 3. 结构体积小,质量轻	1. 需要在万江河内围堰,对河道水质污染; 2. 施工工期长; 3. 工程造价高; 4. 开挖土方量过大
钻孔灌注排桩	1. 基本无需专门围堰; 2. 无需开挖基坑,对现状道路影响小; 3. 工程造价较方案 1 低	1. 施工设备较大,对施工操作空间要求高; 2. 涉及现场浇筑、检测等,施工周期长
U 形板桩	1. 预制拼装,施工工期快; 2. 外形美观,根据需要可以进行装饰; 3. 构件在厂内预制,质量有保证; 4. 无需开挖土方,工程造价低	1. 对现场运输条件要求高; 2. 根据当地经验,不适用于 5 m 以上挡墙

综合比选上述 3 种堤岸支挡方案得出, U 形板桩方案具有施工周期短、难度小、造价低以及对万江河影响较小等优点, 推荐采用。

3 理论计算

3.1 计算取值

在堤岸挡墙中, U 形板桩结构主要考虑抗弯、抗剪承载力和顶部水平位移; 建模考虑经典土力学计算荷载; 弹性支点法考虑约束; 岩土计算主要考虑抗倾覆、抗滑移等整体稳定性, 可采用理正或启明星软件进行计算。目前软件中不支持 U 形板桩截面数据, 需要进行截面等效代换, 可以等效为工字形截面或者矩形截面等。参考文献[11]给出了等效工字形断面的计算方法。如果重点考察应力, 可以考虑等截面系数、等面积代换; 如果重点考虑变形, 则可以考虑等刚度、等面积代换, 等效为圆形或者矩形。结合实际情况。本项目考虑等刚度、等面积代换。相关参数计算公式:

$$A_U = \sum_{i=1}^9 A_i \tag{1}$$

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^9 y_i A_i}{A_U} \tag{2}$$

$$I_U = \sum_{i=1}^9 I_i \tag{3}$$

式中:  $A_U$  为 U 形板桩面积;  $A_i$  为 U 形截面各部分计算面积;  $y_o$  为 U 形截面水平形心轴至截面底板底边距离;  $y_i$  为 U 形截面各部分水平形心轴至底板底边的距离;  $I_U$  为 U 形截面惯性矩;  $I_i$  为 U 形截面各部分对 U 形截面中心的惯性矩。

矩形截面面积  $A$  和惯性矩  $I$  为:

$$\begin{cases} A=bh \\ I=\frac{1}{12}bh^3 \end{cases} \tag{4}$$

变换可得:

$$\begin{cases} h=\sqrt{\frac{12I}{A}} \\ b=\frac{A}{h} \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $b$  为等效矩形断面宽度;  $h$  为等效矩形断面高度。U 形板桩截面特性计算结果见表 3。

表 3 U 形板桩截面特性

板桩型号	$A_0/\text{cm}^2$	$y_o/\text{cm}$	$I_0/\text{cm}^4$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$
U-CS-450	172 4. 99	22. 47	346 857	491	351
U-CS-600	211 1. 03	29. 53	777 850	665	317

3.2 计算结论

U 形板桩顶部水平位移是衡量方案是否成功的重要因素, 以不利钻孔 ZK7 为研究对象, 假定挡墙高度为 5 m, 分别对 U-CS-450 和 U-CS-600 两种型号桩进行计算, 结果见图 5。从图中可以看出, 在悬臂高度大于 4.5 m 时, 水平位移增长幅度过大, 在车载作用下水平位移超过 30 mm 的规范限值, 因此项目最大适用高度为 4 m。U-CS-600 桩型对控制变形明显较好, 因此选用该桩型。

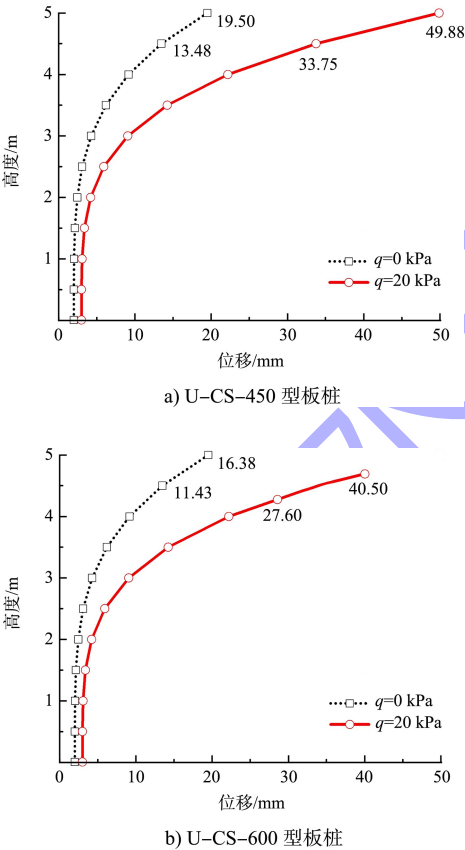


图 5 U 形板桩水平位移

以高度为 3.50~3.78 m 堤岸挡墙为例, 其整体稳定性和抗倾覆稳定性计算结果见表 4。从表中可以看出, U 形板桩顶水平位移小于控制值 30 mm, 但墙顶水平变形仍较大, 影响后期使用, 应对变形产生的因素进行分析, 并采取相应措施降低影响。

表 4 典型断面计算结果

钻孔编号	整体稳定性系数	抗倾覆稳定性系数	U 形板桩顶水平位移/mm
ZK3	1. 798	1. 362	18. 34
ZK5	1. 851	1. 289	21. 92
ZK7	1. 735	1. 261	25. 58
ZK9	1. 652	1. 297	18. 56
ZK11	1. 708	1. 302	17. 16

3.3 水平位移理论计算

影响 U 形板桩顶部水平位移的因素复杂, 涉及静载和动载, 同时还有 m 法计算的桩底位移。本项目土层分布较为均匀, 且河内侧设有护砌, 因此重点考虑静载作用下的水平位移。假定 U 形板桩底部为固结, 由静力学公式推导, 目前仅考虑土压力产生的水平位移以及顶部偏角位移, 不考虑自重作用下竖向力产生的位移及弹性支点法在底部的位移。

根据主动土压力理论, 可得出传统土力学公式:

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$
(6)

$$q = \rho g z k_a - 2c \sqrt{k_a}$$
(7)

$$q = 0 \text{ 时, } z_0 = \frac{2c}{\rho g \sqrt{k_a}}$$

$$f_1 = \frac{q(z-z_0)^4}{30EI}$$
(8)

$$f_2 = \tan\theta(z-z_0) \approx \theta(z-z_0) = \frac{q(z-z_0)^3}{24EI}(z-z_0) = \frac{q(z-z_0)^4}{24EI}$$
(9)

总水平位移为:

$$f_1 + f_2 = \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{30}\right) \cdot \frac{q(z-z_0)^4}{EI} = \frac{3}{40} \cdot \frac{q(z-z_0)^4}{EI} = \frac{3}{40} (\rho g z k_a - 2c \sqrt{k_a}) \cdot \left(z - \frac{2c}{\rho g \sqrt{k_a}}\right)^4$$
(10)

式中:  $k_a$  为主动土压力系数;  $q$  为底板荷载;  $f_1$  为土压力荷载作用下顶部水平位移;  $f_2$  为变形三角区内竖向荷载产生变形转换的水平位移;  $EI$  为刚度;  $E$  为弹性模量;  $I$  为惯性矩。  $\rho$  为土体密度;  $z$  为 U 形板桩悬臂高度;  $c$  为土的黏聚力;  $\varphi$  为土的内摩擦角;  $\theta$  为 U 形板桩在水平荷载作用下根部倾角。



由公式(10)可知,随着土的内摩擦角和内聚力的提升,水平位移成4次方指数变化。因此,路基可采用高压旋喷桩进行地基处理以提高土力学参数,降低土压力的影响。

4 工程实施及监测

4.1 预设变形

U形板桩挡墙的顶部位移主要受墙高、土力学参数等影响,尤其是道路运营后,存在着位移进一步扩大的可能。在部分段位移较大的情况下,由于竖向荷载的弹性二阶效应,位移会进一步加大,挡墙根部有因剪切或者弯曲承载力不足导致破坏的可能。为减少上述影响,在施工过程中,考虑预设反向变形的措施,经复核计算,预设反向位移统一设置为120 mm。

4.2 施工重点

1)施工过程中U形板桩正下方遇到卵石层时,为保证顺利沉桩,现场可采取如下措施:卵石层厚度小于2 m时,利用长臂挖机配合U形板桩沉桩机进行挖石处理,为防止开挖产生滑坡,施工时每隔20 m分段开挖,后续U形板桩沉桩跟进以保证土体稳定;如卵石层厚度大于2 m,采用钢针锤击方式,将厚度较大的卵石挤出,以满足U形板桩施工平面空间。

2)受施工场地局限,现场施工所需吊装设备距离完工后的U形板桩较近,与U形板桩结构建模计算所用堆积荷载出入较大,会对水平位移和抗倾覆稳定性造成较大影响。因此,现场施工时应严格控制吊装位置,使地面超载远离U形板桩边线。

3)为减少淤泥土层对U形板桩水平位移和整体稳定性的影响,首先进行施工路基处理,28 d后完成高压旋喷桩检测,再进行U形板桩施工。

4.3 监测数据分析

现场对施工完毕后15、45、90 d时U形板桩位移分别进行对比,见图6、7,从图中可以看出:1)15 d后变形仍在持续,至45 d时变形区域收敛,90 d时变化不大。2)加固土体力学参数中内摩擦角和内聚力均提升,实测值比理论计算值小

得多。因此采用U形板桩方案安全可靠。

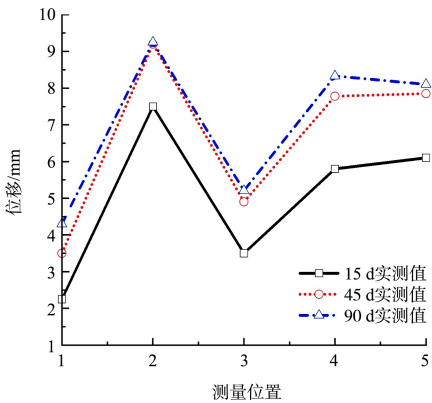


图6 不同时间段U形板桩监测数据

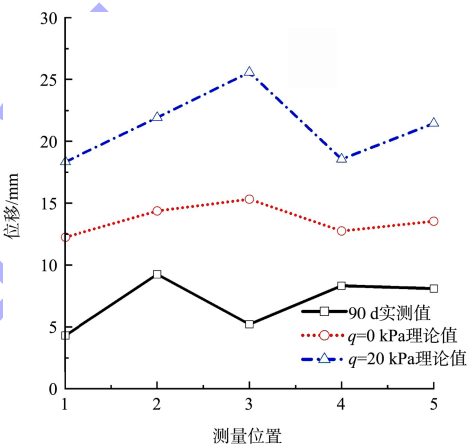


图7 现场实测值与理论值对比

5 结论

1)先张法预应力U形板桩采用预制拼装工艺,施工速度快、造价低、对地层适用性较强。在堤岸挡墙工程中可不设置围堰,符合绿色环保理念。

2)U形板桩理论计算可以通过等刚度、等面积的方法进行简化。对于常规堤岸挡墙,U形板桩最大适用高度建议为4 m。同时,堤岸挡墙建设往往结合市政道路协同实施,设计中需考虑汽车荷载,但路基会进行相应处理,土力学参数会提高。因此,水平位移理论计算值一般大于实际位移值,U形板桩水平变形可以通过预设变形的方式预留后期位移,此方案可有效降低竖向荷载对结构的弹性二阶效应,增大安全储备。

3)U形板桩施工对地质适用性应提前做现场试验。如遇卵石土层,需进行翻挖回填后方可施

工; 如果没有翻挖条件, 则需要利用水枪配合施工。U 形板桩的施工顺序对工程实施影响较大。挡墙后如有道路路基, 需要先进行处理后方可施工挡墙。

4) 土体加强后土力学参数提高的具体数值缺乏理论依据, 且水平位移会随时间而增大, 因此, 后续需加强相关理论研究和跟踪监测。

参考文献:

[1] 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.

[2] 朱一铭, 张奕. U 型板桩防护膨胀土边坡的性能研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(4): 85-87.

[3] 盛佳珺, 崔磊. 间隔嵌岩板桩结构在越南永安港码头中的应用[J]. 水运工程, 2020(5): 117-121, 127.

[4] 蒋国栋, 张颖, 罗天一. 前板桩后低桩承台结构在板桩码头改造中的应用[J]. 水运工程, 2016(7): 46-50, 53.

[5] 戴龙华, 陈绪义. 先张法 U 型预应力混凝土板桩海上施

工方法初探[J]. 中国水运(航道科技), 2016(2): 15-18.

[6] 李波. 预应力波形桩在临河地基处理施工中的应用[J]. 江苏建筑, 2020(5): 98-100, 112.

[7] 陈亚军, 李金龙, 邹福建, 等. 混凝土 U 型板桩在郑集河护岸工程中的应用[J]. 水利技术监督, 2020(5): 209-212.

[8] 陈绪义. U 型板桩海堤上部结构施工上承式模板支撑系统研究[J]. 中国水运(下半月), 2017(2): 209-210.

[9] 周海斌. 先张法预应力钢筋混凝土 U 型板桩作为支护桩的应用研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.

[10] 上官京灵. U 型预应力混凝土支护板桩抗弯试验研究[J]. 建材与装饰, 2016(31): 41-43.

[11] 上官京灵, 黄广龙, 耿山河. U 型预应力混凝土支护板桩承载力计算方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 100-104.

[12] 刘汉中, 张扬清, 王建华. 波浪荷载下 U 型混凝土板桩促淤坝动力响应数值分析[J]. 水利学报, 2015(S1): 142-147.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 137 页)

5 结论

1) 河道中兴建导流护滩带后, 水面线和流速分布均发生明显变化。护滩带上游水位壅高, 存在水面比降明显减缓和逆坡的现象, 护滩带下游水位下降; 滩带前沿至对岸区域过流量增大, 流速增大, 护滩带侧过流量减小, 护滩带侧上游及护滩带掩护区流速减小。

2) 护滩带对水流起到了较好的调整作用, 护滩带对水流的调整作用表现为水流向护滩带对岸侧偏移, 护滩带对岸侧过流量增大, 调整作用的大小受护滩带阻水程度和淹没程度的影响而变化。

3) 主流偏移相对距离和导流率与护滩带阻水相对面积具有较好的相关性, 均能较好地反映护滩带的导流效果, 可用于评价护滩带的导流功能和效果。

参考文献:

[1] 贾晓, 伍文俊, 吴华林, 等. 长江中下游洲滩守护工程概化模型试验研究[J]. 水运工程, 2012(2): 123-127.

[2] 刘怀汉, 付中敏, 陈婧, 等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究[C]//中国水利学会青年科技委员会. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 300-304.

[3] 张秀芳, 王平义, 王伟峰, 等. 软体排护滩带的护滩效果研究[J]. 水运工程, 2010(12): 98-103.

[4] 张幸农, 陈长英. 长江中游荆江河段航道整治工程太平口水道导流护滩带防冲及导流效果研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2015.

[5] 葛瑶, 张幸农, 陈长英. 坝式治河建筑物附近流场研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2015(9): 160-165.

[6] 李文全, 雷家利, 王伟峰, 等. 长江中下游航道整治软体排护滩带结构优化设计[J]. 水运工程, 2012(1): 88-92.

(本文编辑 王璵)