

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.020

引用格式:明德江,陈勉,姚德波,等.基于弹性地基梁法的钢围堰计算分析[J].公路与汽运,2025,41(2):92-97.

Citation: MING Dejiang, CHEN Mian, YAO Debo, et al. Computational analysis of steel cofferdam based on elastic foundation beam method[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 92-97.

基于弹性地基梁法的钢围堰计算分析*

明德江¹, 陈勉¹, 姚德波¹, 殷新锋²

(1.四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610093; 2.沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以某桥22#墩钢板桩围堰为工程背景,利用有限元软件MIDAS/Civil建立钢围堰模型,对钢板桩、内撑杆、封底混凝土的强度进行校核;采用竖向弹性地基梁模型,分析钢板桩围堰的受力及变形特性,并根据规范确定土的水平反力系数及支撑刚度。结果表明,该桥22#墩钢板桩围堰各部件应力及位移、基坑底抗隆起验算结果、封底混凝土强度验算结果均符合规范要求,钢围堰在施工过程中具有较好的稳定性。

关键词:桥梁;钢围堰;弹性地基梁法;应力;位移;基坑底抗隆起;封底混凝土强度

中图分类号:U443.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0092-06

随着桥梁建设的飞速发展,对桥梁下部结构施工提出了更高的要求。作为一种临时施工,基坑开挖的成败对整个工程的安全性和经济效益都有很大影响,须根据不同工程结构和环境条件选择适当的围堰结构进行承台施工。钢板桩围堰是桥梁下部结构施工中广泛采用的一种支护体系,具有高强度和防水性能优异等优点^[1-2],能根据设计需求形成不同的形状,且可重复使用。同时,钢板桩围堰可缩短工期,降低施工难度,提高经济效益。钢板桩围堰一般为大型支护结构,须进行力学和稳定性分析,以保证结构的安全性和施工时的承载力^[3-5]。

弹性地基梁法是在计算支护结构变形的同时,综合考虑支护工程与土体之间应力与变形的协调关系,反映基坑开挖过程中土压力变化的一种基坑支护设计方法。它将基坑工程等效为平面应变问题,将单位宽度的土钉墙和支护排桩等效为垂直的弹性地基梁、支撑层等效为二力杆弹簧,采用土弹簧对坑内土进行模拟,同时将坑外土等效为土压力。此外,弹性地基梁法考虑了基坑开挖过程中支护安装、锚杆设施及支护预应力等因素对支护性能的影响。因此,该方法被广泛应用于基坑开挖过程的受力和变形计算^[6-10]。本文利用MIDAS/Civil有限元软件建立某桥22#墩钢板桩围堰三维整体模型,考虑钢管内撑的稳定性、围堰的稳定性、钢板桩入土深度、基

坑底部抗隆起等因素,对钢板桩围堰的变形和强度进行计算。

1 工程概况

某桥主桥采用(75+2×120+75)m变高预应力混凝土连续梁,引桥采用不等长预应力混凝土连续箱梁,全长1501.2m。按公路标准建设,配有双向机动车道、非机动车道及人行道。

该桥22#墩基础采用高桩承台支撑,承台为矩形,平面尺寸为44.80m×13.75m,高8.0m,顶面标高40.6m,底面标高36.1m。下封底混凝土厚度1.0m,底面标高35.1m,顶面标高36.1m,混凝土强度等级为C30。其他设计参数如下:施工水位最大标高46.5m;卵石土重度18.5kN/m³;混凝土干重度24kN/m³;混凝土浮重度14kN/m³。

2 钢板桩围堰的结构布置

为便于22#墩施工,根据工程实际情况,结合工程实践,确定钢板桩围堰支护方案。钢板桩围堰由拉森钢板桩、工字钢围堰、钢管内撑等组合而成,以拉森钢板桩为主要承载结构。图1为拉森钢板桩围堰的平面布置。

22#墩承台施工选用拉森钢板桩围堰结构形式,围堰支护桩采用拉森SP-IVw钢板桩,每延米钢板

* 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30044)

桩的截面面积为 225.5 cm^2 , 惯性矩为 $56\ 700 \text{ cm}^4$, 断面系数为 $27\ 000 \text{ cm}^3$ 。围堰平面尺寸为 $44.80 \text{ m} \times 13.75 \text{ m}$, 横向每侧布置 77 根钢板桩, 竖向每侧布置 25 根钢板桩, 均呈矩形布置。每根钢板桩的设计长度为 15.00 m , 桩顶标高为 47.35 m , 桩底标高为 32.35 m , 钢板桩深入岩层以下 2.75 m ; 围檩采用 $2\text{HW}400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$ H 型钢工字钢; 内支撑采用 $\phi 630 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 钢管, 斜支撑采用 $2\text{HW}400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$ H 型钢工字钢。22# 墩的水平支撑形式见图 2。

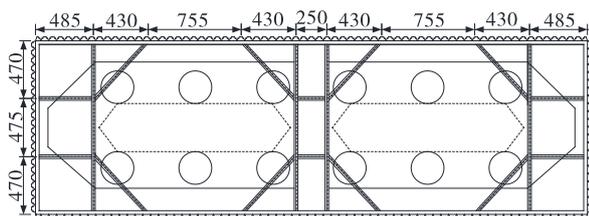


图 1 钢板桩围堰的平面布置(单位:cm)

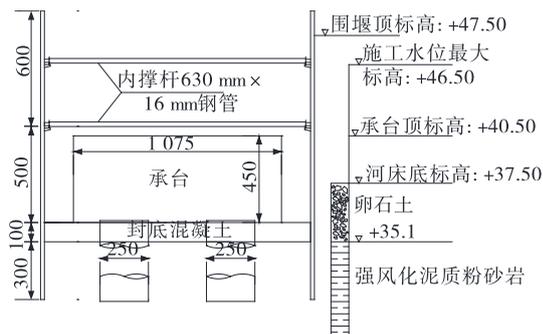


图 2 22# 墩水平支撑剖面图(单位:标高为 m, 其他为 cm)

3 基本参数及受力计算

3.1 工程地质

22# 墩的地质参数根据现场地质勘察报告和类似项目经验确定, 参数值见表 1。

表 1 22# 墩的地质参数

土层	厚度/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)
杂填土	9.0	10.0	0	0
卵石土	2.4	18.5	1	30
强风化泥 质粉砂岩	3.0	20.0	30	25

3.2 土压力计算

该工程钢板桩施工范围内地层包括卵石土和强

风化泥质粉砂岩。为准确计算土压力, 采用水土分算方法, 分别计算水压力和土压力。采用朗肯土压力公式进行土压力计算:

$$p_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$p_b = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

式中: p_a 、 p_b 分别为主动土压力和被动土压力; γ 为土的天然重度; z 为计算点至地面的距离; φ 为土的内摩擦角; c 为土的黏聚力。

3.3 静水压力

围堰最大设计水位 h_{\max} 为 46.5 m , 封底混凝土标高为 35.1 m , 围堰结构底最大静水压力 $p_{w\max}$ 为:

$$p_{w\max} = \rho g h_{\max} = 465 \text{ kPa}$$

式中: ρ 为水的密度, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$; g 为重力加速度, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

由围堰顶部至封底混凝土顶部所受静水压力呈倒三角形分布。

3.4 流水压力

施工区域流水的设计速度 v 为 160 m/s 。根据《公路桥涵设计通用规范》计算流水压力 p_L , 公式如下:

$$p_L = \frac{k_L \rho v^2}{2g} = 166.4 \text{ kPa} \quad (3)$$

式中: k_L 为流水压力系数, $k_L = 1.3$ 。

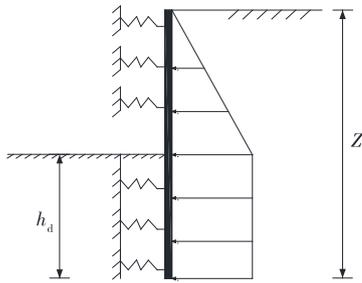
4 初步设计阶段结构及强度计算

4.1 弹性地基梁法

弹性地基梁法是一种工程结构分析常用方法, 可用于模拟基坑开挖过程中围堰结构与土体之间的相互作用。在该方法中, 桩被视为弹性梁, 土体被简化为一系列弹簧和阻尼器, 代表地基的弹性和阻尼特性。采用弹性地基梁法可更准确地预测桩与土之间的相对位移、变形和受力情况^[7]。采用弹性地基梁 m 法计算弹簧的刚度^[8]。

将基坑支护结构视为一种与基坑地表垂直的弹性地基梁, 并采用弹簧模型代替基坑开挖面以下的土体, 以考虑土体变形和变量对支护结构的影响, 同时考虑支护结构外部所受土压、水压等因素, 综合分析支护结构的稳定性。图 3 为基于弹性基础梁法的支护结构稳定性分析简图。

将长度为 b_0 的支护结构作为分析对象, 弹性地基梁的变形微分方程可表示为^[9]:



Z 为总深度; h_d 为开挖深度

图 3 基于弹性地基梁法的支护结构稳定性分析简图

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} - q(z) = 0 \quad (z < h_d) \quad (4)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} - mb_0 zy - q(z) = 0 \quad (z \geq h_d) \quad (5)$$

式中: EI 为桩横截面的弯曲刚度; y 为桩的横向位移; $q(z)$ 为梁上荷载强度, 包括主动土压力和其他外荷载; m 为土的水平反力系数。

取桩身一个微元体进行分析, 令 $q(z) = 0$, 代入式(5), 得:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \alpha^5 yz = 0 \quad (6)$$

式中: α 为桩的变形系数, $\alpha = \sqrt[5]{mb_0/(EI)}$ 。

采用幂级数法, 设位移 y 、剪力 H 、基础反力的方向与 y 轴的正向相同的情况为正, 钢板桩的右端受拉时弯矩 M 为正、反方向为负, 转角 φ_0 以逆时针方向为负、顺时针方向为正, 得到深度 z 处的横向位移、转角、弯矩、剪力^[11]。横向位移为:

$$y = y_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1 \quad (7)$$

转角为:

$$\varphi = \alpha y_0 A_2 + \varphi_0 B_2 + \frac{M_0}{\alpha EI} C_2 + \frac{H_0}{\alpha^2 EI} D_2 \quad (8)$$

弯矩为:

$$M = \alpha EI (\alpha y_0 A_3 + \varphi_0 B_3) + M_0 C_3 + \frac{H_0}{\alpha} D_3 \quad (9)$$

剪力为:

$$H = \alpha^2 EI (\alpha y_0 A_4 + \varphi_0 B_4) + \alpha M_0 C_4 + H_0 D_4 \quad (10)$$

式中: y_0 、 φ_0 分别为地面处桩的位移和转角; M_0 、 H_0 为作用在桩上的荷载; $D_1 \sim D_4$ 为无量纲常数。

4.2 弹性地基梁法计算结果

图 4 为弹性地基梁法计算简图。

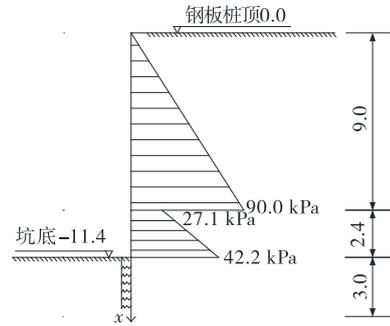


图 4 弹性地基梁法计算简图(单位:m)

(1) 确定水平力 H_0 和弯矩 M_0 :

$$H_0 = 0.5 \times 90 \times 9 + 0.5 \times (27.1 + 42.2) \times$$

$$2.4 = 488.16 \text{ kN}$$

$$M_0 = 405 \times (3 + 2.4) + 83.16 \times$$

$$\left(\frac{1}{3} \times \frac{27.1 \times 2 + 42.2}{27.1 + 42.2} \right) = 2 \ 225.56 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 确定桩变形系数 α 。根据 JGJ 120—2012 《建筑基坑支护技术规程》^[12], 查表得拉森 SP-IV w 钢板桩每延米惯性矩 $I = 5.67 \times 10^{-4} \text{ m}^4$, 桩身计算宽度 $b_0 = 1 \text{ m}$, 则:

$$\alpha = \sqrt[5]{mb_0/(EI)} = 0.25$$

(3) 确定 y_0 、 φ_0 。参考文献[13], 计算得:

$$y_0 = 0.411 \text{ m}, \varphi_0 = -0.018 \ 4$$

(4) 各深度处 σ_x 按式(11)计算, 计算结果见表 2。

$$\sigma_x = mzy = mzy_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1 \quad (11)$$

根据表 2 所示计算结果, 得到图 5 所示钢板桩反力图。

表 2 各深度处 σ_x 计算结果

换算深度/m	深度/m	A_1	B_1	C_1	D_1	σ_x/kPa
0.1	0.2	1.000	0.100	0.005	0.017	85.92
0.3	0.5	0.962	0.315	0.045	0.045	213.10
0.5	0.9	0.795	1.823	1.924	1.308	48.64
0.8	1.5	-0.984	1.036	3.224	3.858	-13.58
1.0	1.9	-2.923	-1.271	2.463	4.979	-36.58
1.5	2.4	-5.853	-5.941	0.926	4.547	-22.78
2.0	3.0	-9.482	-8.371	1.538	4.135	-12.37

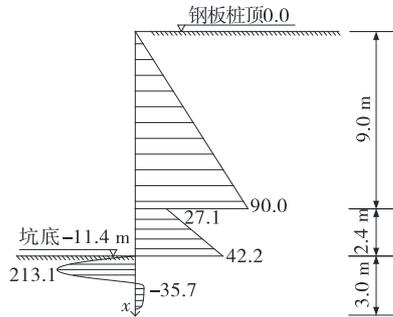


图 5 弹性地基梁法计算的钢板桩反力(单位:kPa)

5 基于弹性地基梁法的有限元分析

5.1 计算工况

根据施工工序,该围堰分为 6 种计算工况:工况 1 为钢板桩施打完成,水位为 46.5 m;工况 2 为水位抽至 45.5 m,安装第一道内支撑;工况 3 为水下吸泥至封底混凝土底标高;工况 4 为浇筑封底混凝土;工况 5 为底部混凝土浇筑完成后,将围堰的水抽到 40.5 m 处,设置第二道内支撑;工况 6 为抽干围堰内的水。

5.2 有限元模型

根据具体情况设定适当的边界条件,采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立钢围堰模型(见图 6),考虑静水、动水和土压力的作用,进行拉森钢板桩、围檩、内支撑结构验算。

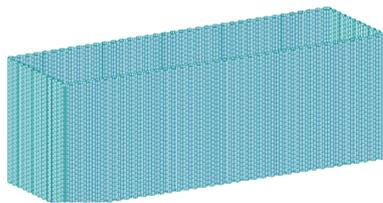


图 6 钢板桩围堰有限元计算模型

5.3 m 法计算土弹簧刚度

根据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》确定土的水平反力系数 m ,计算公式如下^[14]:

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b} \quad (12)$$

式中: v_b 为挡土构件在坑底处的水平位移量,取 10 mm。

钢板桩围堰土弹簧的模拟见图 7。土弹簧刚度 $k = mz$,计算结果见表 3。

5.4 主墩围堰计算结果

工况 1 为钢板桩施打完成,水位为 46.5 m,此时还未安装内支撑。该工况下钢板桩的应力和变形

见图 8。

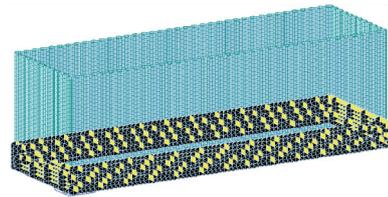


图 7 钢板桩围堰土弹簧的模拟

表 3 各点处土弹簧刚度

点号	土层厚度/m	比例系数/ (MN·m ⁻⁴)	计算点距地面深度 z/m	土弹簧刚度 k
1	0.5	15 100	0.25	3 775
2	0.5	15 100	0.75	11 325
3	0.5	15 100	1.25	18 875
4	0.5	15 100	1.75	26 425
5	0.5	15 100	2.25	33 975
6	0.5	15 100	2.75	41 525

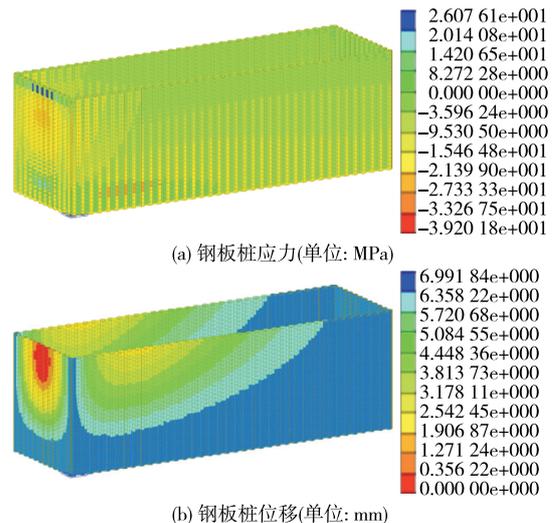


图 8 工况 1 下主墩围堰计算结果

工况 2 为水位抽至 45.5 m,安装第一道内支撑。该工况下钢板桩和内支撑的应力、变形分别见图 9、图 10。

其他工况的计算方法与工况 1、工况 2 相似,不再赘述。不同工况下钢板桩围堰计算结果见表 4。

由表 4 可知:1) 22# 墩钢板桩围堰施工时,钢板桩的最大组合应力为-157.87 MPa,内支撑最大组合应力为-153.48 MPa,满足 GB 50017—2017《钢结构设计标准》中 Q345 钢最大容许应力为 295 MPa、Q235 钢最大容许应力为 215 MPa 的要

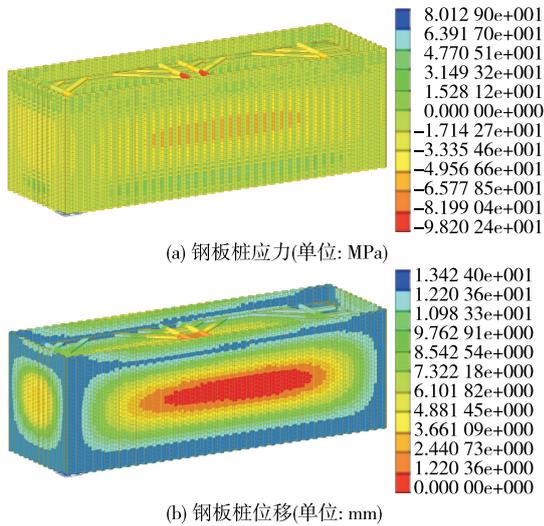


图 9 工况 2 下钢板桩应力和位移计算结果

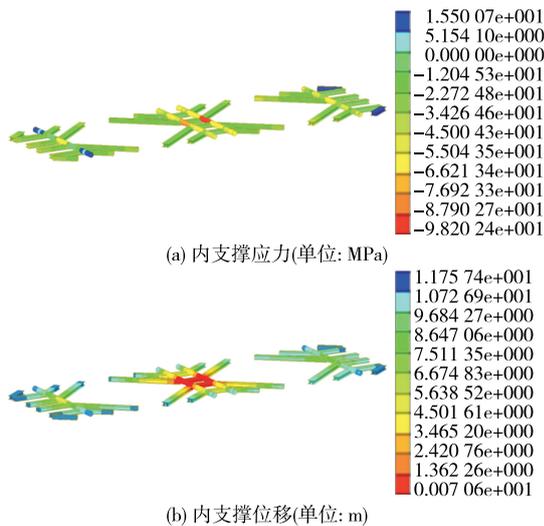


图 10 工况 2 下内支撑应力和位移计算结果

表 4 各工况下钢板桩围堰计算结果

工况编号	钢板桩应力/MPa	钢板桩位移/mm	内支撑应力/MPa	内支撑位移/mm
工况 1	39.20	6.99	0.00	0.00
工况 2	-98.20	13.42	-98.20	11.76
工况 3	-128.90	20.81	-128.90	20.22
工况 4	-131.80	21.44	-128.60	21.08
工况 5	-125.36	8.81	-122.40	8.50
工况 6	-157.87	12.87	-153.48	12.61

求。考虑 1.35 倍安全系数,钢板桩最大组合应力为 213.12 MPa,内支撑最大组合应力为 207.20 MPa,仍然低于规范容许应力,该围堰结构的强度满足规

范要求。2) 钢板桩的最大位移为 21.44 mm,内支撑的最大位移为 21.08 mm,均小于钢板桩的最大容许挠度 37.5 mm,该围堰的刚度满足规范要求。

5.5 钢管内支撑稳定性验算

钢管内支撑 $\phi 630 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的材料特性如下:面积 $A=16\ 034 \text{ mm}^2$, $w_x=w_y=2\ 526\ 257 \text{ mm}$; $E=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,回转半径 $i=0.22 \text{ m}$,长细比 $\lambda=68.2$ 。根据有限元计算结果(见图 11、图 12),内支撑的最不利轴心压力 $N=1\ 052.58 \text{ kN}$,最大弯矩为 $89.56 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

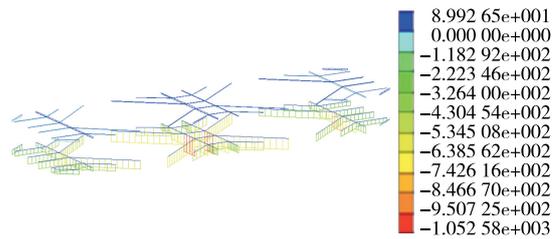


图 11 钢管内支撑轴力云图(单位:kN)

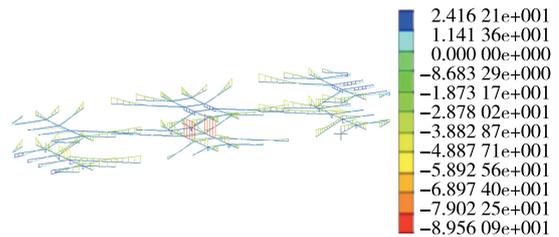


图 12 钢管内支撑弯矩云图(单位:kN·m)

按下式对钢管内支撑弯曲作用平面的稳定性进行验算:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_y A} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_y \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ey}}\right)}$$

$$121.05 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa}$$

验算结果表明钢管内支撑的稳定性满足规范要求。

5.6 基坑底抗隆起验算

基坑底抗隆起验算是基坑稳定性验算的重要步骤^[15],其主要计算方法是基于普朗德尔(Prandtl)、太沙基(Terzaghi)等基础承载力计算方法确定相应承载力安全系数,验算公式如下:

$$K_s = \frac{N_c + N_q \gamma t}{\gamma(h+t) + q} = 1.6 \geq 1.1 \sim 1.2 \quad (13)$$

式中: $N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi$; $N_q = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \cdot e^{\pi \tan \varphi}$; t 为板桩入土深度,取钢板桩入土深度; h 为基坑开挖深度; q 为基坑周边地面荷载。

验算结果表明基坑底抗隆起稳定性满足规范要求。

5.7 封底混凝土板强度验算

抽水后封底混凝土所受荷载 q 为:

$$q = \gamma_{\text{水}} h_{\text{水}} - \gamma_{\text{混凝土}} h_{\text{混凝土}} = 10 \times 10.5 - 24 \times 1.4 = 71.4 \text{ kN/m}^2$$

按照四点支撑矩形板计算,板在 x 轴的长度 $L_x = 4\ 500 \text{ mm}$,板在 y 轴的长度 $L_y = 4\ 500 \text{ mm}$, $L_x/L_y = 1$,参考文献[16], $\alpha = 0.041\ 7$ 。图 13 为封底混凝土板强度验算简图。

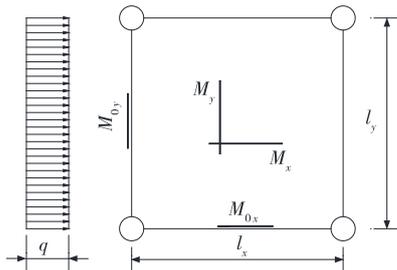


图 13 封底混凝土强度验算简图

$$M = \xi q l^2 = 0.041\ 7 \times 71.4 \times 4.5^2 = 60.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

取 $b = 1 \text{ m}$ 单宽进行验算:

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = 0.33 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} = \frac{60.3}{0.33 \times 1\ 000} =$$

$$0.18 \text{ MPa} < [\sigma] = 0.93 \text{ MPa}$$

验算结果表明封底混凝土板的强度满足要求。

6 结语

本文以某桥 22# 墩基坑开挖中采用的钢板桩围堰为研究对象,采用 MIDAS/Civil 建立钢围堰模型,考虑钢管内支撑的稳定性、围檩的稳定性、钢板桩入土深度、基坑底抗隆起等因素,基于弹性地基梁法进行钢板桩围堰计算。在已有钢板桩受力分析理论的基础上,充分考虑荷载作用过程中荷载增量对结构内力及变形的作用,提出钢板桩弹性地基梁分析方法,构建基于弹性地基梁 m 法的非线性弹性地基挠曲线微分方程,分析钢板桩的受力及变形特性。基坑底抗隆起验算结果 ($K_s = 1.6$) 和封底混凝土强度验算结果 ($\sigma_{\max} = 0.18 \text{ MPa}$) 表明该桥 22# 墩钢围堰在施工过程中具有较好的稳定性。采用基于弹性地基梁 m 法的计算方法相较于传统方法能准确模

拟基坑开挖过程中围堰结构与土体的相互作用,且计算结果更准确。

受受力状态、边界条件等因素的影响,建立有限元模型时进行了简化,与工程实际存在较大差别。施工过程中要针对具体条件,采取有效、合理的控制措施,最大程度地规避风险。

参考文献:

- [1] 丁巍,金乾明.基于有限元法的钢板桩围堰结构分析[J].中外公路,2021,41(4):225-229.
- [2] 徐霞飞.模块式无封底双壁钢围堰施工方法探讨[J].公路与汽运,2024,40(5):119-123.
- [3] 王达,严伟飞,刘旺,等.黄河上游超大型双壁钢围堰结构受力分析[J].公路与汽运,2021(4):135-139+145.
- [4] 邱燕红,林敏,刘亚君.某大桥软基钢围堰支护设计及稳定性分析[J].公路与汽运,2018(2):128-132.
- [5] 田仲初,谢彬,蒋田勇,等.基于等值梁法的单层钢板桩围堰有限元分析[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(2):193-198.
- [6] 张敬弦,杨晴,冯志杰.深基坑支护结构考虑桩-土相互作用的弹性地基梁法[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(3):140-142.
- [7] 罗万录.深水基础用钢板桩围堰计算分析[J].铁道标准设计,2009,53(4):74-77.
- [8] 杨学祥,张瑜.弹性地基梁法与经典土压力法计算支护桩内力的对比分析[J].工程建设,2010,42(2):36-39+44.
- [9] 周绍源,李其林,蒋文字,等.弹性地基梁法在基坑支护中的应用[J].土工基础,2013,27(4):117-120.
- [10] 张军,吴仁辉,张志超.圆形地连墙空间效应影响因素分析[J].交通科学与工程,2022,38(1):27-36.
- [11] 陈松,黄雄.弹性地基梁法在桩锚支护结构设计中的应用[J].铁道建筑,2007,47(12):77-79.
- [12] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 陈忠汉,程丽萍.深基坑工程[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [14] 沈健,王建华,高绍武.基于“m”法的深基坑支护结构三维分析方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):530-533.
- [15] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [16] 《建筑结构静力计算手册》编写组.建筑结构静力计算手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,1998.

收稿日期:2023-04-24