

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.028

水中围堰封底混凝土厚度的理论分析与验证

徐立生¹, 黄继辉², 陈小羊³, 张浩¹

(1. 中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350015; 2. 福建船政交通职业学院, 福建 福州 350007;

3. 中建七局 交通建设有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要: 水中围堰施工中, 封底混凝土厚度是保证施工安全的重要参数, 依据坑底水头高度确定。坑底水头高度取决于初始水头高度及渗流过程中产生的水头损失, 水头损失与土体物理性质及渗流路径等因素密切相关。文中从渗流基本理论出发, 结合伯努利方程, 推导水头损失计算方法, 确定水头损失系数与初始水头高度、渗流经过的土体高度及渗透系数之间的表达式, 并分析 3 个参数对水头损失的影响; 通过常水头土体渗透试验验证计算方法的合理性, 并将计算方法应用于福建武荣大桥工程中, 从理论角度确定该桥水中围堰封底混凝土厚度。

关键词: 桥梁; 围堰; 封底混凝土; 混凝土厚度; 水头损失

中图分类号: U445.556

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0128-04

水中建(构)筑物施工中, 为保证安全和施工的顺利进行, 一般先修筑围堰, 待围堰修筑完成后再进行下一步作业。钢板桩围堰以其强度高、施工简单、可重复使用等优点在工程建设中得到广泛应用。钢板桩打设完成、抽水完成后进行封底作业。

封底作业作为围堰施工的一道重要工序, 如何确定封底混凝土厚度是工程实践中的难点。方诗圣等通过建立三维有限元模型, 分析了桩基间距及钢护筒直径对钢围堰封底混凝土与桩基钢护筒之间黏结力的影响^[1]。王明慧等对大水位差下钢吊箱围堰封底混凝土厚度进行优化设计, 根据需要同步满足抗浮和抗沉的需求对封底混凝土厚度进行理论计算, 确定了合理厚度值^[2]。黄铮通过对比不同模型下围堰整体应力与位移、封底混凝土的应力与位移, 确定了最佳封底混凝土厚度, 提出了矩形单壁钢套型围堰封底混凝土经验公式^[3]。赫宏伟以银西(银川—西安)高速铁路黄河机场特大桥主墩围堰施工为例, 分析封底混凝土应力分布, 并进行混凝土扩展度试验, 得到了混凝土的最大拉应力^[4]。郭成刚以沪昆(上海—昆明)客运专线沅江大桥深水基础大直径双壁钢围堰施工为例, 介绍了围堰封底混凝土厚度计算和封底混凝土的施工组织^[5]。张静结合某桥梁的特点, 从理论和有限元角度分析了围堰封底混凝土厚度计算方法^[6]。文献[7-11]也对封底混凝土厚度进行了研究。目前的研究基本上是从克服混凝土的上浮及混凝土板应力满足要求等角度确定封

底混凝土厚度, 较少考虑水头损失对封底混凝土厚度的影响。本文从水土压力统一计算理论出发, 通过理论分析确定水头损失计算方法, 分析土体参数对水头损失的影响, 并进行工程实例应用, 分析封底混凝土所需厚度。

1 土层水头损失理论分析

1.1 理论分析

借鉴文献[12]设计的理想模型试验, 并引申到渗透试验中。如图 1 所示, 点 C 为开设的一个小孔, 该小孔足够小, 土颗粒无法流出; 假定土层顶面水位高度为 h_1 , 饱和土体高度为 $1+e$, 宽度为 1, 土体竖向渗透系数为 k_y 。

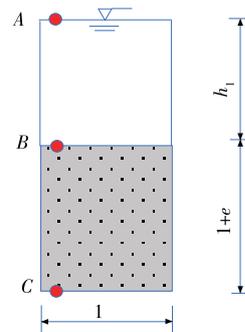


图 1 理想模型试验示意图

假定从点 B 到点 C 的土体水头损失为 Δh_{BC} , 单位长度的水头损失系数为 ξ , 则 Δh_{BC} 可表示为:

$$\Delta h_{BC} = \xi(1+e) \quad (1)$$

考虑土体水头损失,点 C 的水流速度可表示为:

$$v = k_y \frac{\Delta h_{BC}}{1+e} = k_y \frac{\xi(1+e)}{1+e} = k_y \xi \quad (2)$$

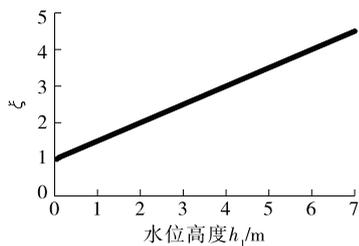
依据伯努利方程,考虑水头损失,点 C 的速度可表示为:

$$v = \sqrt{2gh_C} = \sqrt{2g(h_1+1+e-\Delta h_{BC})} = \sqrt{2g[h_1+(1-\xi)(1+e)]} \quad (3)$$

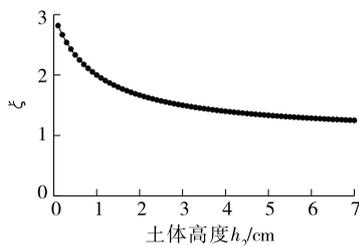
联合式(2)和式(3),得:

$$\xi = \frac{-2g(1+e) + \sqrt{4g^2(1+e)^2 + 8k_y^2g(h_1+1+e)}}{2k_y^2} \quad (4)$$

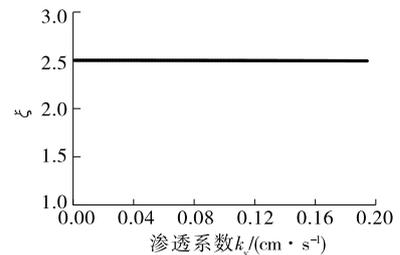
令 $g = 10 \text{ N/kg}$, 式(4)变为:



(a) $\xi-h_1$ 关系图($h_2=2 \text{ m}$, $k_y=0.001 \text{ cm/s}$)



(b) $\xi-h_2$ 关系图($h_1=2 \text{ m}$, $k_y=0.001 \text{ cm/s}$)



(c) $\xi-k_y$ 关系图($h_1=2 \text{ m}$, $h_2=2 \text{ m}$)

图 2 ξ 与 h_1 、 h_2 及 k_y 的关系示意图

1.2 合理性验证

通过常水头土体渗透试验验证上述水头损失系数 ξ 计算方法的合理性。试验采用 TST-70 型渗透仪,试样土体参数见表 1。试验结果见表 2。

将 k_y 、 h_1 、 e 的值代入式(5),得:

$$\xi = \frac{10[\sqrt{(1+e)^2 + k_y^2(h_1+1+e)/5} - (1+e)]}{k_y^2} = \frac{10[\sqrt{(1+0.523)^2 + (4.21 \times 10^{-6})^2(3+1+0.523)/5} - (1+0.523)]}{(4.21 \times 10^{-6})^2} = 2.97 \quad (7)$$

从式(7)来看,试验结果与分析结果之间吻合较好,上述水头损失系数 ξ 计算方法合理。

表 1 试样土体参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
风干土质量/g	4 000	水位高度 h_1 /m	3.0
试样高度/cm	29.5	孔隙比 e	0.523
试样面积/cm ²	78.5		

表 2 常水头土体渗透试验结果

试验次数	试验时间/s	测压管水位/cm			I管、III管水位差/cm	水力坡度	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
		I管	II管	III管			
1	60	269.0	239.0	210.0	59.0	2.95	4.21×10^{-6}
2	60	269.0	241.0	213.0	56.0	2.80	4.36×10^{-6}

2 工程应用实例

武荣大桥位于福建南安市霞美镇和丰州镇,总长约 2.23 km。主桥长度约 1.29 km,设计速度为 60 km/h;引桥长度为 0.94 km,设计速度为 40 km/h。

桥面总宽为 54.50 m,采用双幅桥布置。主桥上部结构为 $3 \times 60 \text{ m} + 3 \times 60 \text{ m}$ 等截面预应力混凝土现浇箱梁,截面为单箱三室,高度为 3.60 m;顶板厚度为 28.00 cm,底板厚度为 22.00 cm,采用 C50 混凝土。下部结构中,桥墩为 Y 字形墩,采用 C40 混凝土。

土;承台高度为 4.00 m,采用 C40 混凝土;基础为 C30 水下混凝土钻孔灌注桩,桩径为 1 800 mm。引桥段上部结构为预应力混凝土连续箱梁,单跨为 30 m;桥墩为 Y 字形墩,采用 C40 混凝土;桥墩承台高度为 4.00 m;基础为 $\phi 1\ 800$ mm 钻孔灌注桩,采用 C30 水下混凝土。

桩基全部为水下桩基,水位深度为 7.00 m。水中围堰长和宽均为 10.50 m(见图 3),围护结构为 18 m 拉森钢板桩,插入土层以下 11.00 m。围堰结构共分 3 层,围堰之间的间距及型号见图 3。

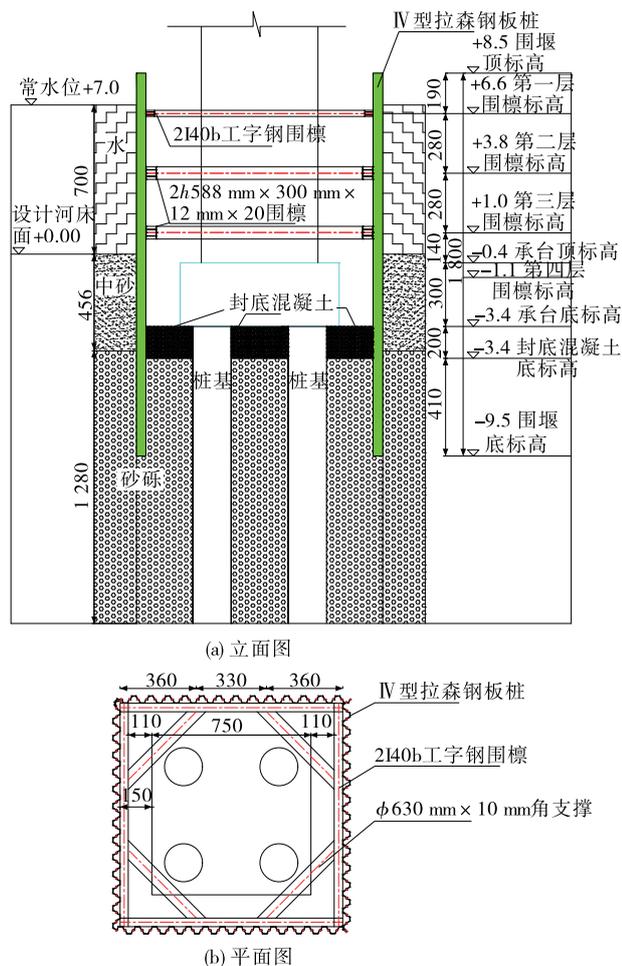


图 3 围堰示意图(单位:标高为 m,其他为 cm)

拉森钢板桩从上往下穿越土层依次为中砂层及砂砾层,土层的物理、力学参数见表 3。

表 3 土体的物理、力学参数

土层类型	水面高度 h_1/m	渗透系数 $k_y/$ ($m \cdot s^{-1}$)	土体高度 h_2/m
中砂	7.00	6.0×10^{-5}	4.56
砂砾	7.00	2.5×10^{-4}	4.10

考虑最危险状况,只考虑中砂层对水头的减损作用,将参数值代入式(6),得:

$$\xi = \frac{10[\sqrt{h_2^2 + k_y^2 (h_1 + h_2)/5} - h_2]}{k_y^2} =$$

$$10[\sqrt{4.56^2 + (6.0 \times 10^{-5})^2 \times (7 + 4.56)/5} - 4.56] / (6.0 \times 10^{-5})^2 = 2.54 \quad (8)$$

基坑底部冒出的水体水头高度为:

$$H = 7.00 + 5.40 - 2.54 \times 4.56 = 0.82 \text{ m} \quad (9)$$

实际施工中,考虑到基坑水体无法彻底抽干及混凝土浇筑完成后不再抽水会对混凝土产生浮力,为安全起见,混凝土密度采用浮密度,其值为 $1\ 400 \text{ kg/m}^3$,封底混凝土高度取 2 m,安全系数为:

$$K = \frac{14 \times 2}{0.82 \times 10} = 3.41 \quad (10)$$

安全系数大于 1,说明如果将围堰里的水抽干后再进行混凝土封底,2 m 厚度封底混凝土能满足相关要求。原施工方案采用水下灌注施工方式,考虑到施工中既要保证施工过程的安全,防止涌水造成坑底破坏,又要考虑施工成本,采用水下灌注和抽干水后灌注相结合的方式,两种灌注方式的高度均为 1 m,在保证安全的同时,保证灌注表面的平整度,取得了良好效果。

为验证上述方案的适用性,收集部分水中围堰所处地层的土体参数及围护结构的几何参数等数据,按式(8)计算水头损失系数,据此计算基坑底部的水头高度,进而得出封底混凝土厚度(见表 4)。

表 4 计算封底混凝土厚度与实际封底混凝土厚度对比

项目名称	土层性质			计算封底混凝土厚度/m	实际封底混凝土厚度/m
	土层分类	水位高度 h_1/m	土层高度 h_2/m		
府河特大桥 ^[13-14]	淤泥质土		5.12	1.0×10^{-6}	
	黏性土	10.79	5.10	2.0×10^{-6}	0.61
	粉砂		5.50	2.0×10^{-5}	

续表2

项目名称	土层性质				计算封底混凝土厚度/m	实际封底混凝土厚度/m
	土层分类	水位高度 h_1 /m	土层高度 h_2 /m	渗透系数 $k_y/(m \cdot s^{-1})$		
颍河特大桥 ^[15]	粉砂	11.50	5.50	2.0×10^{-5}	2.62	3.00
	粉质黏土		12.50	1.5×10^{-6}		
	淤泥质土	1.80	1.0×10^{-6}			
海河特大桥 ^[16]	粉土	2.32	7.30	2.0×10^{-6}	0.62	0.80
	淤泥质土		13.0	1.0×10^{-6}		

3 结语

水中围堰施工中,封底混凝土厚度与水头密切相关,目前采用的计算方法较少考虑水头损失。本文通过理论分析得到水头损失系数可以表示为水位高度、土体高度和渗透系数的函数,其值随着水位高度的增加而增加,渗透系数对水头损失的影响不大。实际工程应用中,须考虑基坑中水位不能全部抽干及底板完成后要进行回灌等实际情况综合确定相关参数的取值。

参考文献:

[1] 方诗圣,丁仕洪.钢围堰封底混凝土与桩基钢护筒间的粘结力研究[J].合肥工业大学学报,2009,32(2):241-244.

[2] 王明慧,陈永亮,李开兰,等.大水位差下钢吊箱围堰封底混凝土厚度优化设计[J].世界桥梁,2020,48(5):6-9.

[3] 黄铮.基于单壁钢套箱围堰封底混凝土厚度的研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.

[4] 赫宏伟.黄河机场特大桥基础钢板桩围堰水下封底混凝土设计及施工[J].中外公路,2019,39(1):121-125.

[5] 郭成刚.深水大直径双壁钢围堰封底混凝土厚度设计与施工技术[J].铁道建筑技术,2015(3):63-66.

[6] 张静.围堰封底混凝土厚度设计[J].铁道建筑技术,

2012(8):34-36.

[7] 陈俊生,莫海鸿,刘叔灼,等.坑内降水过程中模袋砂围堰变形规律研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(4):1122-1128.

[8] 梁居翔,曹洪.临江高水头深厚砂层基坑盲沟排水渗流分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):871-877.

[9] 陈健.某临江超深基坑工程降水计算与设计分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1355-1360.

[10] 李光明,李明生.悬挂式止水帷幕基坑降水控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):921-932.

[11] 李飞,徐劲,张飞,等.渗流作用下深基坑开挖抗隆起破坏数值模拟[J].地下空间与工程学报,2017,13(4):1088-1097.

[12] 王洪新.水土压力统一计算理论的证明及水土共同作用下的压力计算[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):392-398.

[13] 孙博文.超长拉森钢板桩在桥梁主墩承台深基坑支护中的应用[D].武汉:华中科技大学,2019.

[14] 毛昶熙.堤防工程手册[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[15] 陈华实.颍河特大桥深水基础钢板桩围堰设计[J].安徽建筑,2013,20(2):123-125.

[16] 杜闯,丁红岩,张浦阳,等.钢板桩围堰有限元分析[J].岩土工程学报,2014,36(S2):159-164.

收稿日期:2022-07-27

 (上接第 127 页)

[3] 俞先林,张媛媛.预应力混凝土连续梁桥悬臂施工模糊控制技术[J].中外公路,2003,23(2):43-45.

[4] 杨磊.铁路特大桥预应力连续梁桥悬臂施工控制研究[J].智能城市,2021,7(24):143-144.

[5] 贺铁飞.多跨预应力混凝土连续梁桥施工控制关键问题研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[6] 宋福春,张兴,陈冲,等.大跨预应力混凝土连续梁桥悬臂施工结构控制分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):226-234.

学版),2017,33(2):226-234.

[7] 窦文林,安康月.高速公路特大桥预应力连续梁桥悬臂施工控制研究[J].公路工程,2019,44(3):112-116.

[8] 董旭,蔚龙祥,路军,等.预应力混凝土连续梁桥温度一挠度试验研究[J].公路工程,2016,41(3):198-202.

[9] 肖勇刚,彭江.斜拉桥施工过程中温度对主梁的影响效应分析[J].公路与汽运,2022(6):91-94.

收稿日期:2022-12-08