

泵闸工程折线形底板基底应力分布特性分析

任华春¹, 陈在连²

(1.上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海市 200061; 2.上海市长宁区河道管理所, 上海市 200335)

摘要:选取上海市已建成运行规模最大的排涝泵闸为例,采用材料力学法、材料力学与刚体平衡结合算法、有限单元法计算,研究了软土地区折线形底板基底应力在折点处的应力集中现象,分析得出折线形底板基底应力分布特性;通过对基底应力在不同上部荷载、折线倾角、地基弹模等影响因素下的敏感性分析,总结变化规律,为类似工程结构优化设计提供参考。

关键词:排涝泵闸;折线形底板;基底应力;公式法;弹塑性有限元

中图分类号:TV675

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2022)03-0097-04

0 引言

水利工程中的闸坝基底应力分析是判定地基基础是否满足强度要求的关键内容。一直以来,根据长期工程实践经验,为了简化基底应力理论计算过程,工程界广泛采用基于平截面假定的材料力学法,针对较复杂的建筑物,则辅以相对严格、精确的弹(塑)性理论数值解析法。当建筑物底面为单一平面时,按材料力学偏心受压公式计算得出结果基本能满足工程设计需求;但实际工程中,因结构布置经济合理需要,不少闸坝工程基底面为折线形,其基底应力不满足线性分布这一假定特性,规范中推荐的材料力学法计算结果与实际受力情况相差较大,且目前国内外针对该问题开展的研究不多,可供参考的资料相对较少,因此,折线形底板基底应力的确定成为工程设计难点之一。前苏联 B.H.布哈儿采夫^[1]、杜德进^[2]最早于上世纪 90 年代进行了一些探索,将水工结构作为在外荷载作用下绕某点微小转动的刚体,通过基础接触面的变形及力的平衡求得接触面位移和应力;刘耀芳^[3]基于材料力学和土力学,假定基底为刚性体、平面变形后仍为平面,分段推导出了折线底板基底应力计算公式;郭树华^[4]、徐镇凯^[5]等专家学者通过实际监测数据分析、有限元分析法等得出折线底板基底应力分布规律。本文以上海市目前建成运行规模最大的排涝泵闸为例,采用两种简化公式和弹塑性有限元分析法,研究折线形底板基底应力分

布特征及相关影响因素,为结构设计提供技术支撑。

1 计算原理及方法

1.1 材料力学法

根据相关规范^[6],当建筑物基础底部为水平面时,基底应力计算采用基于平截面假定的材料力学偏心受压公式,即:

$$P_{\max,\min} = \frac{\sum G}{A} + \frac{\sum M_x}{W_x} + \frac{\sum M_y}{W_y} \quad (1)$$

式中: $P_{\max,\min}$ 为基底应力最大、最小值; $\sum G$ 为作用在基础底面上的所有竖向荷载; $\sum M_x$ 、 $\sum M_y$ 为作用在泵闸主体结构上所有荷载对于基底面形心轴 x 、 y 的力矩; A 为泵闸主体结构基底面面积; W_x 、 W_y 为基底面形心轴 x 、 y 的截面距。

1.2 材料力学与土力学结合法

刘耀芳^[3]提出了一种基于材料力学和刚体平衡的基底应力简便计算公式,该公式取垂直水流向单位宽度地基为研究对象,假定基底面为刚性体,每个折线面为平面,其上正应力均按直线分布,切应力按二次抛物线分布。先按直线分布算出 AB 平面基底正应力、切应力,再用应力值反算 CD、DB 分段荷载,将荷载分别施加至 T1、T2 两部分底板上,折线面受力按倾角 θ 进行力的坐标系换算(忽略不平衡剪力影响),最终根据力的平衡,算出 CD'、D'B' 基底应力分布,本文在对公式进行局部修正基础上做了全面应用,具体公式不再赘列。

1.3 有限单元法

有限单元法属于力学分析中的数值法,近些年因其能够很好地反映材料的非线性、各向异性等特性以

收稿日期:2021-05-19

作者简介:任华春(1985—),女,硕士,高级工程师,主要从事水工结构工程设计工作。

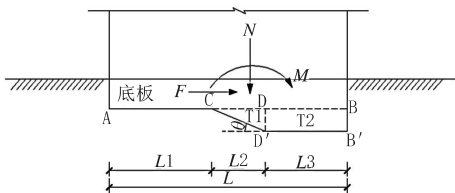


图1 折线底板基底受力示意图

及复杂边界条件而被工程界广泛应用。其基本思想是把一个连续的介质离散为有限个单元,并在各单元内假定位移和应力分布模式,各单元间通过节点相连接,以此实现应力的传递,各单元之间的交接面要求位移协调,通过力的平衡条件,建立一套线性方程组,从而求解方程组得到各单元和结点的位移、应力,相关公式不再赘述。

上海地区为典型平原软土区域,土体的塑性变形对应力的影响较大,因此需采用基于弹塑性理论的本构模型。本文采用商用软件Plaxis中的Hardening Soil Model本构模型(简称HSS模型)模拟地基土体进行数值计算,HSS模型综合了邓肯-张(DC)模型与一般弹塑性模型特点,能较好考虑非线性、压硬性、加卸载模量差异。

2 上海某排涝泵闸概况

本文选取上海某排涝泵闸为例进行分析,该泵闸是目前全市建成运行规模最大的排涝泵闸工程,主要功能、任务为防洪挡潮、排水除涝,保障城市安全。泵闸建设规模为排涝泵站设计流量 $90\text{ m}^3/\text{s}$ (3台泵),节制闸总净宽 24 m (2孔)。

2.1 泵站结构

泵站为堤身式,安装3台斜 30° 轴流泵,泵房为块基型基础,3台机组共一块底板,底板为折线形,泵房上部为排架结构,排架柱固结于墩墙。具体结构设计如图2所示。

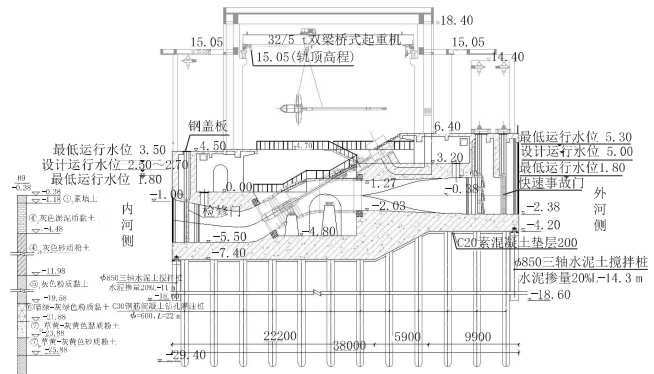


图2 排涝泵闸泵房纵剖视图(单位:mm)

2.2 地质情况

排涝泵闸所在地位置自地表至 50.0 m 深度范围

内所揭露的土层形成于第四纪的全新世(Q_4)及上更新世(Q_3),主要由饱和的黏性土、粉性土和砂土组成。泵房底板以下土层自上而下分别为④_{2b}层灰色砂质粉土、⑤₁层灰色粉质黏土、⑥层暗绿色粉质黏土、⑦_{1a}层黏质粉土、⑦_{1b}层砂质粉土、⑦₂层草黄粉砂。④_{2b}层为地基持力层,平均层厚 5.69 m ,中等压缩性。各土层主要物理力学参数见表1。

表1 地基土层分布及主要物理力学参数表

土层号	土层名称	层底高程/m	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	固结快剪		重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
				黏聚力 C/kPa	$\varphi/(^\circ)$	
④ _{2b} 层	灰色砂质粉土	-11.98	8.84	6	31.5	18.5
⑤ ₁ 层	灰色粉质黏土	-19.58	3.74	15	15.5	17.8
⑥层	暗绿色粉质黏土	-21.88	6.61	37	18	19.4
⑦ _{1a} 层	黏质粉土	-23.88	8.55	5	33	19.0
⑦ _{1b} 层	砂质粉土	-25.88	10.58	4	33	18.6
⑦ ₂ 层	草黄粉砂	-50.38	13.04	1	34	18.9

3 公式法计算

根据前述两种公式分别计算排涝泵闸正常运行工况(外河水位 1.44 m 、内河水位 3.50 m)下的基底应力,计算简图如图3所示,节点基底应力及分布见表2。

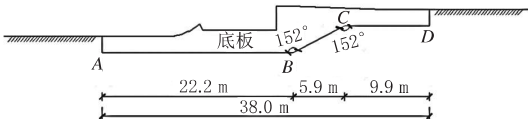


图3 计算简图(单位:m)

表2 节点基底应力公式法计算结果 单位:kPa

节点	基底应力		
	材料力学法		材料力学与土力学结合法
	竖向正应力	垂直基底面正应力	
A	111.90	111.90	117.94
B	115.43	101.92	116.36 175.01
C	116.37	102.75	43.08 140.14
D	117.94	117.94	134.22

由表2计算结果可知,工程设计中常用的单一材料力学法计算出的基底应力值小于考虑折线影响的结合算法,偏不安全;结合算法在折线角点应力明显增大,体现了应力集中现象,与实际情况较相符;单一材料力学法计算基底应力大小分布规律与结合算法相反,进水池侧基底应力小于出水池侧。

4 有限元模拟计算

4.1 计算模型

考虑泵站垂直水流向为对称结构,因此仅采用

顺水流向二维模型进行计算,取顺河向为 X 轴,竖向为 Y 轴,横向截断边界范围取上下游各 5 倍泵房挡土高度,约 70 m,Y 轴方向由地表至桩底以下 5 m。计算模型及单元划分如图 4 所示。

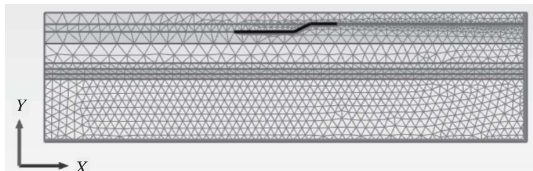


图 4 模型有限元网格图

4.2 基本参数

混凝土底板基本参数：混凝土强度等级 C30,容

重 $\gamma=25\text{ kN/m}^3$;泊松比 $\nu=0.167$;弹性模量 $E=3.00\times 10^4\text{ N/mm}^2$ 。

地基基本参数：泵闸采用钻孔灌注桩进行地基处理,桩基作用通过地基土参数均化处理,根据一般数值模拟经验,主要将每层地基土弹性模量增加 15%,能基本满足计算需求。

结合上海地区软土特征,选用 Hardening Soil Model 本构模型(简称 HSS 模型),能较好考虑非线性、压硬性、加卸载模量差异。HSS 模型相关参数选用见表 3。

表 3 HSS 模型参数表

层号	土层	$\psi/(^{\circ})$	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{S0}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{0}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	ν_{ur}	$P_{\text{ref}}/\text{kPa}$	K_0	m	R_f
②~⑥	黏性土	0	$0.9E_{\text{s1-2}}$	$1.2E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$	$7E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$	$4E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	2.0	0.2	100	$1-\sin\varphi$	0.8	0.9②⑤⑥、 0.6(③④)
⑦	砂土	$\varphi'-30$	$E_{\text{s1-2}}$	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$	$4E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$	$5E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	2.0	0.2	100	$1-\sin\varphi$	0.5	0.9

4.3 计算方案

为了研究折线底板基底应力分布规律及影响因素,将实际工程建设方案作为基础方案,基于相同进出水高程,考虑上部荷载、折线倾角 θ 、地基弹性模量等主要影响因素逐项组合,具体见表 4,形成本文计算方案,为结构优化提供技术支撑。

表 4 计算方案组合表

类别	方案编号	上部平均线荷载/($\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	折线倾角 $\theta/(^{\circ})$	地基弹性模量/MPa
不同上部荷载	方案 1	115	28	8.84
	方案 2	125	28	8.84
	方案 3	135	28	8.84
不同折线倾角 (B 点位置固定)	方案 4	115	15	8.84
	方案 5	115	10	8.84
不同地基弹性 模量	方案 6	115	28	15.00
	方案 7	115	28	20.00

注:1.方案 1 为工程最终设计方案相关参数;2.折线倾角 θ 位置详见图 1 所示。

4.4 计算成果分析

各方案混凝土底板基底应力数值模拟计算结果见表 5。

表 5 各方案混凝土底板基底应力计算结果 单位: kN/m

类别	方案编号	基底正应力					
		节点 A	节点 B	节点 C	节点 D	节点 E	节点 F
不同上部荷载	方案 1	86.67	116.40	84.23	60.36	96.51	115.10
	方案 2	96.74	131.90	89.93	64.16	109.4	123.00
	方案 3	105.10	141.10	94.28	72.53	121.30	139.60
不同折线倾角 (B 点位置固定)	方案 4	86.27	114.80	88.73	64.01	95.64	114.40
	方案 5	85.52	109.90	101.40	89.33	94.49	107.60
不同地基弹性 模量	方案 6	80.88	118.6	90.65	69.33	86.09	119.20
	方案 7	80.52	120.7	92.25	71.62	80.12	110.50

由图 5 可知,三种不同计算方法中,单一材料力学法未考虑应力集中问题,折点处计算基底应力偏不安全;有限元法计算值最小,结合算法计算结果相对保守。由图 6~图 8 可知,上部荷载越大基底应力越大,应力集中特性变化不大;折线倾角越小,折点处基底应力越小,但两侧 A、B 端点基底应力差异不大;折线倾角越大,折点应力集中现象增强,当折角超过 15° 时,折点处应力超出底板边缘点最大应力;地基弹模越大,折点 B 基底应力越大,折点 C 基底应力越小,两侧 A、B 端点基底应力差异不大;采用结合算法和有限元法时,应力集中现象主要体现在 B 点(结构阴角)位置。

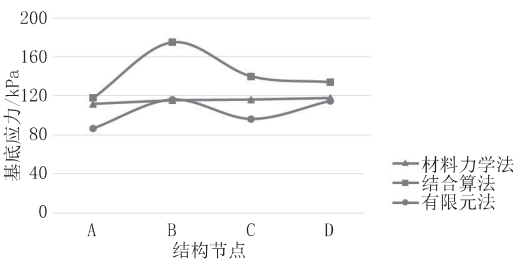


图 5 不同计算方法基底应力对比

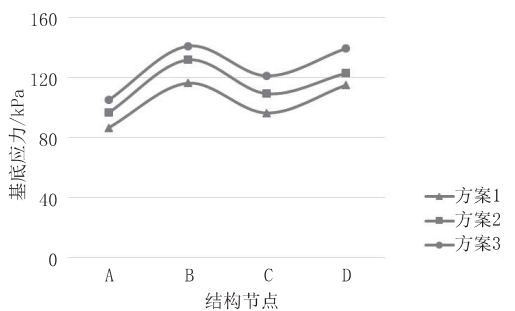


图 6 不同上部荷载基底应力对比

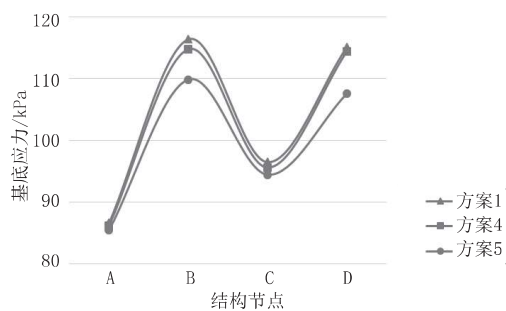


图7 不同折线倾角基底应力对比

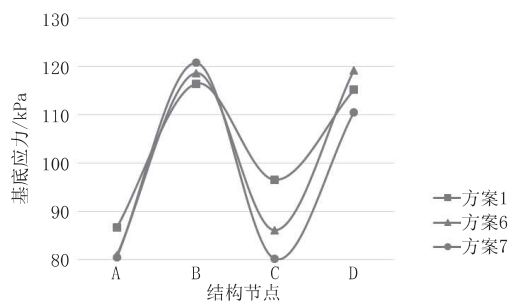


图8 不同地基弹模基底应力对比

5 结 语

本文主要研究了软土地区闸坝工程折线形底板基底应力分布特性及影响因素,主要结论如下。

(1)文中采用的三种计算方法中,仅材料力学法无法考虑底板折点处应力集中问题,结合算法、有限元法计算结果可体现该特性,与实际情况相符;采用结合算法和有限元法计算时,能体现应力集中现象,

应力集中主要体现在结构阴角位置。

(2)由于材料力学法未考虑折点处应力集中问题,导致结构角点及其相邻区域基底应力计算结果偏不安全,存在一定隐患;有限元法计算值最小,结合算法计算结果相对保守,均可用于结构辅助设计,以保障大型闸站结构安全稳定性。

(3)结构上部荷载越大基底应力越大,应力集中特性变化相对不大;结构折线倾角越大,折点处基底应力越大,当超过某固定角度时(本文计算实例为15°),折点处应力超出底板边缘点最大应力,该状态应在设计中加以重视;地基弹模越大,结构阴角折点基底应力越大,阳角折点基底应力越小;结构设计过程中,可运用以上规律特性进行优化。

参考文献:

- [1] B.H.M 布哈儿采夫.非岩石地基与建筑物不平整底部接触面应力的确定[M].北京:水工建设(俄刊中译本),1992:41-44.
- [2] 杜德进.折线形坝基面的应力分析[J].华东水电技术,1996,(4):35-39.
- [3] 刘耀芳,刘发全.建筑折线面基底应力分布计算方法[J].水利水电科技进展,2005,25(增1):50-56.
- [4] 郭树华,陈崑.浅析“折线式底板”地基反力分布规律[J].陕西水利,2010(1):73-74.
- [5] 徐镇凯,韩志宇,马连军.混凝土折线式基础板地基反力非线性有限元分析[J].南昌大学学报(工科版),2009,31(4):372-375.
- [6] SL265—2016,水闸设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com