

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.002

临江工程抗浮水位计算方法分析

黄建华^{1,2}, 李瑞¹

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 临江工程场地因其土层渗透性较强, 且江水在汛期内水位变化加剧对场区内地下水带来很大影响, 不宜直接采用地面高程或洪水位作为建筑抗浮水位。对此, 以福州地区某一临江工程为例, 提出根据规范法、基于地下水渗流理论的半经验公式法和数值模拟法来预测抗浮水位, 3 种方法得到的建议抗浮水位分别为 10.00、9.78、9.08 m。并通过统计周边场地水位资料, 发现勘察期间历史最高水位和洪水位高程普遍低于以上 3 种方法的计算结果。验证了临江建筑抗浮水位直接采用地面高程或江水洪水位的不足和片面, 为今后类似建设项目抗浮水位的选取和抗浮设计施工提供参考和依据。

关键词: 抗浮水位; 半经验公式法; 临江工程; 基底浮力; 地下水渗流

中图分类号: TU46 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2022)06-0520-07

Analysis of calculation method of anti-floating water level in riverside projects

HUANG Jianhua^{1,2}, LI Rui¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Key Laboratory of Underground Engineering for Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Due to the strong permeability of the soil layer and the intensified water level change of the river water during the flood season, the underground water in the site is greatly affected. Therefore, the ground elevation or flood level should not be directly used as the anti-floating water level of the building. In this regard, with a riverside project in Fuzhou as an example, it was proposed to predict the anti-floating water level according to the standard method, the semi empirical formula method based on the groundwater seepage theory and the numerical simulation method. The recommended anti floating water levels obtained by the three methods are 10.00m, 9.78m and 9.08m respectively. Through the statistics of water level data of surrounding sites, it was found that the historical highest water level and flood level elevation during the survey were generally lower than the calculation results of the above three methods. The research verifies the inadequacy and one-sidedness of directly using the ground elevation or river flood level of riverside buildings, and provides reference and basis for the selection of safe anti-floating water level and anti-floating design and construction of similar construction projects in the future.

Keywords: anti-floating water level; semi empirical formula method; riverside projects; base buoyancy; groundwater seepage

收稿日期: 2022-10-26
基金项目: 国家自然科学基金(51678153); 福建省自然科学基金(2021J011064)
第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下结构工程、特殊土力学等。

随着经济的迅猛发展,城市工程建设中出现越来越多深大基坑,对于地下含水丰富的城市,在进行基坑设计时需要及时解决地下水产生的危害问题,如地下水造成的抗浮失效问题。长沙和杭州的某建筑皆因抗浮失效导致地下室底板上浮,结构破损^[1-2]。分析上述事故原因可能是施工阶段现有建筑自重小于水浮力而造成抗浮失效事故,故应全面考虑地下室自施工到完工后投入使用这一全寿命周期的抗浮水位的确定。国内对地下结构抗浮水位确定的相关规范有:JGJ 72-2017《高层建筑岩土工程勘察标准》、GB 50021-2001《岩土工程勘察规范》、JGJ 476-2019《建筑工程抗浮技术标准》、DBJ 13-07-2006《福建省工程建设地方标准建筑地基基础技术规范》等。对于长期水位较低、汛期水位极高的临江地下结构来说,仅通过常规勘察手段就获得抗浮水位是不太准确的。若仅根据规范,抗浮水位选取地表高程或者江水位,在汛期不安全,易造成抗浮事故;而抗浮水位的选取需要综合考虑水文、地质、气象等数据,故开展基础数据积累和建立地下水水流模型等方法综合考虑抗浮水位值得关注。

在地下水数值模拟中,有限单元法和有限差分法运用较多^[3]。基于有限差分法 Mehl^[4]提出了局部网格细化的二维空间模型。随着计算机科学的日渐成熟国内外学者 Ismail^[5]和王宇博^[6]通过专业模拟软件预测地下水位变化。本文在滨海一临江工程勘察基础上,采用数值模拟法预测地下水位,通过勘察规范取值、解析求解地下水渗流理论和了解周边项目地下水位情况等,选取合理抗浮水位。

1 场地工程概况及抗浮设计条件

1.1 场地气象、水文地质概况

项目场地位于东南沿海,西北部分别为中低山地,东南部为盆地和沿海冲击平原。该地区多年平均降雨量 1 359.6 mm,年最大降雨量 2 074.6 mm,日最大降雨量 170.9 mm,年平均蒸发量 935.5 mm。

场地土层自上而下可分为:①层杂填土主要由黏性土及生活和建筑垃圾组成,平均厚度为 7.62 m;②层中细砂主要由中粒石英颗粒组成,填充少量的黏粉粒,平均厚度为 20.00 m;③层为淤泥质土主要由黏粉粒组成,平均厚度为 3.50 m;④

层为中粗砂,主要由中粗粒石英砂组成,平均厚度为 6.71 m;⑤层为圆砾,主要以卵石和砾石为主,平均厚度为 7.45 m。具体工程地质见图 1 部分钻孔剖面图。地下水类型主要是孔隙潜水和孔隙承压水,二者分别在②层中砂和④层中砂、⑤层圆砾中,上述两个水层的水位和水量受季节性气候影响,变化较大。位于③层淤泥质土中的隔水层使得潜水含水层和承压含水层水力联系较差。

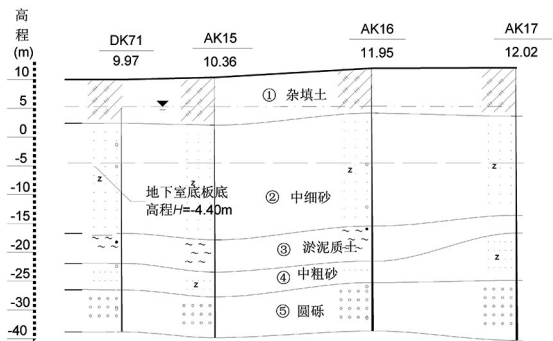


图 1 拟建场地工程地质剖面图
Fig.1 Engineering geological section drawing of the proposed site

1.2 抗浮设计条件

场地建筑结构抗浮水位选取时的浮力验算:

$$\frac{G_K}{N_{w,K}} \geq K_w \tag{1}$$

$$N_{w,K} = \gamma_0 \times H \times A \tag{2}$$

式中, G_K 为结构自重及压重之和(在施工期间,上部荷载并不是整体完成的荷载而应是在允许停止抽水时的建筑物实际荷载), kN; $N_{w,K}$ 为浮力, kN; K_w 为抗浮安全系数,取 1.05; A 为承受地下水浮力作用的地下室柱网面积, m^2 ; 水容重 γ_0 一般取 $9.8 \text{ kN}/m^3$; H 为地下水抗浮水位与地下室底板标高的差, m。

2 数值模拟法

通过模拟软件^[7]构建地下水渗流计算模型,将模拟结果与场地观测水位对比分析,验证模型的适用性,用验证过的模型预测在百年一遇降水最不利情况下的抗浮水位。

2.1 场地模型概化

拟建场地西侧和南侧是在建的 12#、45#与 46#楼及其附属商业楼,距离约 15~30 m,地下室边线北侧约 10 m 邻大桥辅路,东侧距离路堤约

35 m。地下建筑面积约 18 391.8 m²。
工程 3 层地下室高度约 14.40 m,底板底面高程约-4.40 m。

(1)含水层概化

根据水文地质勘察将模型概化为 3 层,①②为潜水位,④⑤为承压水层,③⑦为弱透水层。

(2)边界条件概化

场地东侧范围边界处有一条江作为河流自然边界,南侧、西侧与北侧有一排钻孔且都有监测的水位故可概化为定水头边界,如图 2。

场地潜水含水层上部接受大气降水等入渗补给,下部是透水性较差的淤泥质土,将其概化为隔水边界。

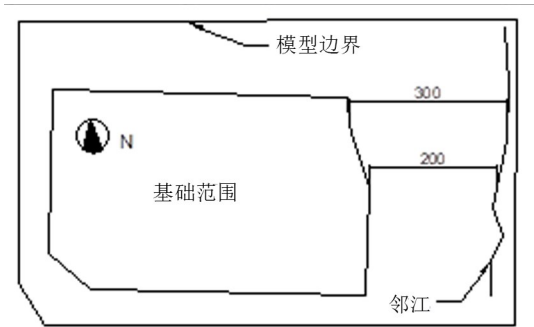


图 2 边界条件概化(单位:m)

Fig.2 Generalization of boundary conditions(unit:m)

2.2 地下水水流数学模型

拟建场地地下水流场较为平缓符合达西定律,将拟建场地地下水数学模型定义为非均质各向同性、三维非稳定流^[8]。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial H}{\partial z}\right) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t}(x,y,z) & (x,y,z \in \Omega) \\ H(x,y,z,0) = H_0(x,y,z) & (x,y,z \in \Omega) \\ H(x,y,z,t)|_{\Gamma_1} = H_s(x,y,z) & (x,y,z \in \Gamma_1) \\ K(H-B)\frac{\partial H}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = q(x,y,z) & (x,y,z \in \Gamma_2) \end{cases}$$

(3)

式中, H 为地下水头标高, m; K 为渗透系数, m/d; W 为源汇项, m³/d; t 为时间, d; x, y, z 为坐标量, m; μ_s 为释水率, 1/m; H_s 为给定水位标高, m; Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界; Ω 为三维模

型计算域。若 $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ 则公式(3)为非均质各向同性、三维稳定流地下水数学模型。

2.3 场地地下水流模型建立

将场地内 29 个钻孔数据输入模型中,通过创建面的方式生成各层顶底板面层,再由面生成三维水文地质实体(图 3)。

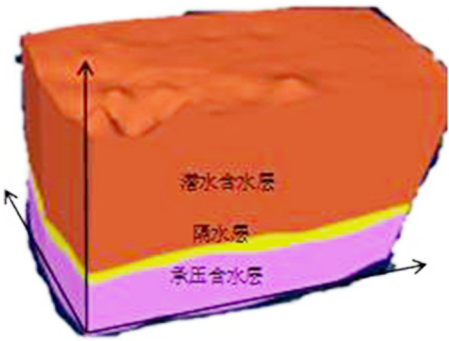


图 3 计算场地三维水文地质实体

Fig.3 3D hydrogeological entity of the area calculated

(1)水文地质参数初值选取

根据勘察资料和相关文献,参数初值取值见表 1。

表 1 水文地质参数表
Tab.1 Hydrogeological parameters

分层号	地层分类	渗透系数/ (m · d ⁻¹)	给水度	贮水系数
1	中细砂	18.318 0	0.48	/
2	淤泥质土	0.001 6	0.10	0.000 1
3	中粗砂	28.600 0	/	0.005 8

(2)边界条件

拟建场地东侧邻江,查阅相关水文资料,水位取洪水位 7.14 m,河床底 -6.00 m,河床厚度 1.00 m,江面宽 2 210.00 m,河床渗透系数 3.4 m/d。根据西、南、北三侧钻孔观测显示,地层赋存的地下水水位稳定,故三侧定水头边界分别为 5.60, 4.50, 5.70 m。

(3)空间离散

模型南北长 405 m,东西宽 101 m,共剖分网格 10 000 个(见图 4)。

(4)源汇项分析(如表 2)

大气降水入渗补给量:

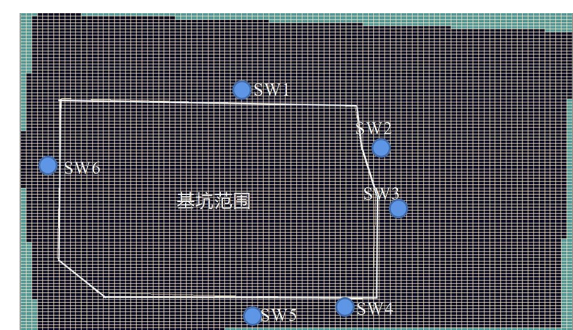


图 4 模型网格剖分图
Fig.4 Model grid section

$$Q_{pr} = 0.1 \times \alpha \times P \times F \tag{4}$$

式中, Q_{pr} 为降水入渗补给量, m^3/d ; P 为有效降水量, m ; F 为计算面积, m^2 ; α 为降水入渗补给系数, 即降水入渗补给量与降水量的比值^[9], 根据经验值取 0.1。

潜水蒸发排泄量:

$$Q_{ed} = 0.1 \times C \times E_0 \times F \tag{5}$$

式中, Q_{ed} 为潜水蒸发排泄量, m^3/d ; C 为潜水蒸发系数, 根据经验数据, 蒸发与入渗比为 10%^[10], 则潜水蒸发系数取 0.01; E_0 为 E_{601} 型蒸发皿监测水面蒸发量, 取 3.5 mm; F 为计算面积, m^2 。

表 2 源汇项计算表

Tab.2 Source sink item calculation

($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
补给与排泄	取值
降水入渗量 Q_{pr}	10.33
蒸发排泄量 Q_{ed}	-0.45
抽水试验井抽水量	-900.00
均衡结果	-890.12

2.4 模型识别与校正

模型识别就是对各参数优化的过程, 优化参数见表 3。因无长期观测水位故采用三维稳定流模型进行识别, 模型拟合度见图 5, 可看出观测水位与计算水位平均误差 -0.014, 平均绝对误差 0.087, 均方差 0.11, 标准均方根 8.71%, 相关系数 0.97。模型验证结果显示校正后的模型精度高, 可以用来预测。模型水位观测拟合结果见图 6。通过模拟结果可看出, 离江越近地下水位越高, 场地水位高程在 4.78~5.70 m, 与勘察的场地高程

5.13~5.81 m 近似, 再次验证了该模型参数的准确性。

表 3 参数优化
Tab.3 Parameter optimization

分层号	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度	贮水系数
1	18.600	0.45	/
2	0.001	0.12	0.000 1
3	32.000	/	0.005 0

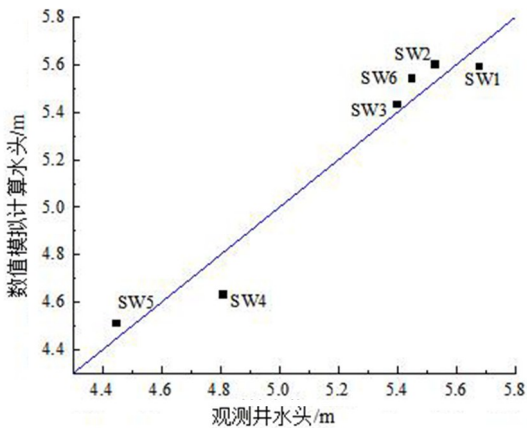


图 5 观测与计算水位图
Fig.5 Observation and calculation of the water level

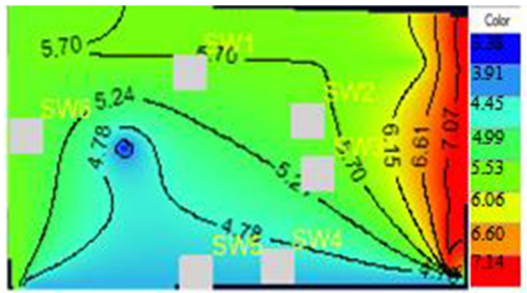


图 6 2019 年 8 月场地水位观测孔拟合结果
Fig.6 Fitting results of site water level observation holes in August 2019

2.5 数值模拟预测抗浮水位

选择 2019 年 8 月地下水位作为即将预测时段的初始水位。预测时间段为 2019 年 9 月~2029 年 8 月, 历时 10 a。预测期间将边界条件设置为水头边界和河流边界, 源汇项指大气降水入渗补给和蒸发排泄量, 并且不考虑抽水井的影响, 从最恶劣的气象组合条件考虑, 即预测的 10 a 都为丰水年, 而且将西侧、南侧和北侧在察期最高水

位作为定水头水位。模拟结果见图 7 和图 8。

对比图 7 和图 8 可看出,从 2019 年 9 月到 2029 年 9 月水位变幅 2.00~3.00 m,与地勘报告给出的地下水位变幅在 2.00~4.00 m 相吻合,从图 8 和图 9 可看出,在百年一遇最不利气象组合方案下,预测的地下水位数值为场地在预测年间的最高水位 9.08 m。

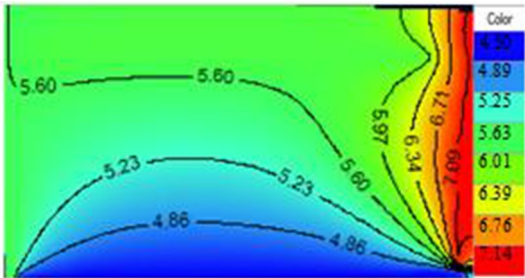


图 7 不考虑抽水井勘察期水位(2019 年 9 月)
Fig.7 Water level without considering the pumping well (September 2019)

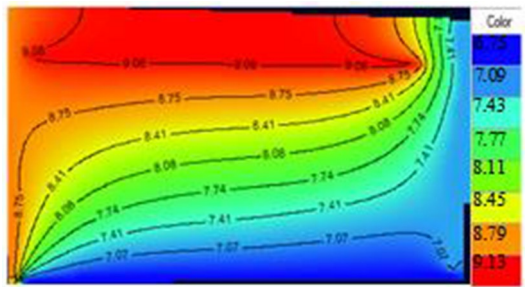


图 8 2029 年 9 月预报地下水流场
Fig.8 Groundwater flow field forecast in September 2029

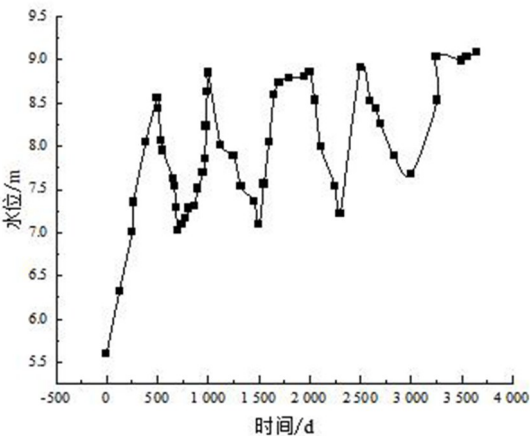


图 9 拟建场地水位变化情况(2019 年 9 月到 2029 年 9 月)
Fig.9 Water level changes of the proposed site (September 2019 to September 2029)

数值模拟法综合考虑了各种不利的因素,但该方法对现场实测勘察和水文地质数据有较高的要求,本次源汇项分析中大气降水、降水蒸发数据不够充足,对模拟结果有一定影响。

3 半经验公式法

文献[11]提出地下水位确定常用下列经验公式:

地下水最高水位=勘察期间该含水层地下稳定水位+该含水层在相当于勘察时期的年变幅+可能的意外补给造成的该层水位上升值。

临江区域意外补给主要是降雨、地表水入渗和邻近的江水水位上涨。

(1) 年变幅

由勘察资料可知,本地区地下水位变化幅度约为 2.00~4.00 m,由于江水上涨引起的水位上升也考虑了部分季节变化,所以年变幅取最小值 2.00 m。

(2) 临江区域意外补给项

大气降水或地表水渗入补给。施工结束后,降雨或者地表水入渗引起地下结构四周水位的变化近似公式如下^[12]:

$$\Delta h = \frac{i \times t \times (1 + 10\%) \times A + q}{n \times c \times l} \quad (6)$$

式中, Δh 为水位变化值, m; i 为降雨强度, m/h; t 为降雨持续时间, h; n 为室外回填土的孔隙率, %; A 为基坑有效面积, m^2 ; b 为基坑上边线短边长, m; q 为地表管渠渗漏水, m^3 ; c 为地下室挡土墙距基坑边坡的平均距离, m; l 为基坑边线周长, m; 10% 为考虑坑外汇水的面积增大系数。公式中 n 较难获得, 刘涛^[13]建议将抗浮水位直接提高 0.50 m。

江水水位上涨补给。根据文献[14],推导出一种简化算法用于临江二元地层的渗流分析,模型如图 10 所示。

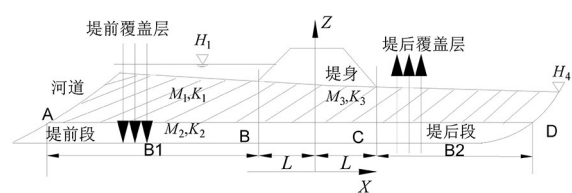


图 10 临江二元地层渗流模型
Fig.10 Seepage model of riverside binary formation

拟建场地东侧邻江与路堤距离约 35.00 m,地面高程 11.00 m,勘察期稳定水位埋深 0.60~6.80 m,高程 5.13~5.81 m。

$$H_x = H_4 + (H_c - H_4) \frac{\text{ch}(A'(L - x) + \beta)}{\text{ch}\beta} \quad (7)$$
$$(L \leq x \leq L + B_2)$$

其中, $H_c \approx H_1$, 则式(7)可简化为:

$$H_x = H_4 + (H_1 - H_4) \exp\left(\sqrt{\frac{K_3}{M_2 M_3 K_2}}(L - x)\right) \quad (8)$$

式中: H_x 为距堤身 x 处的水头, m; H_1 为乌龙江 100 a 设计洪水位 7.14 m, 勘察期间正常水位 5.08 m; H_b 为堤前堤脚下方强透水层中的水头, m; H_c 为堤后堤脚下方强透水层中的水头, m; H_4 为堤后地面有水时的水面高程, 无水时的地面高程, 本工程可取地面高程 11.00 m; M_2 为强透水层厚度, 取值 55.00 m; M_3 为堤后覆盖层厚度, 此处取场地表层填土及黏性土平均厚度约 3.50 m; L 为堤底宽度的 1/2, 取值 0.25 m; K_2 为强透水层渗透系数, 取值 32 m/d; K_3 为堤后覆盖层渗透系数, 取 0.001 m/d。

$H_{35} = 8.61$; $H'_{35} = 7.33$; $H_{35} - H'_{35} = 1.28$
其中, H_{35} 为洪水位条件下堤后 35.00 m 处渗流水位标高, m; H'_{35} 为常水位条件下堤后 35.00 m 处渗流水位标高, m。

通过解析法得到该场地大气降水或地表渗入补给 0.50 m, 江水水位上涨补给 1.28 m, 结合勘察期间场地稳定水位和地下水位年变幅分别为 6.00 和 2.00 m, 综上, 拟建场地最高地下水位取 9.78 m。

半经验公式法全面考虑了临江区域意外补给项, 其中江水位的补给考虑了结构离江的距离、覆盖层厚度和渗透系数等, 使得应用范围更广, 且经验公式中意外补给引起的水位变化值容易确定。

4 规范法

DBJ 13-07-2006《福建省工程建设地方标准建筑地基基础技术规范》对场地抗浮水位做出明确规定: 滨海港口城镇, 软土可取场地整体提高或降低 0.50 m 考虑。故本工程根据现场勘察资料, 场地整平高程为 11.00 m, 历史最高地下水水位标高 9.05 m, 在做好相应截水、排水措施如排水盲沟的情况下, 本工程场地的抗浮水位按 10.00 m

考虑。
规范法比较保守, 不够经济, 不能全面考虑地下水位的季节性动态变化。

5 抗浮水位的选取

通过勘察场地地理位置和收集周边场地地下水位资料可为本项目抗浮水位的选取提供参考, 具体详见表 4 项目周边工程地下水位的统计。

表 4 项目周边工程地下水位统计表

Tab.4 Groundwater level statistics around the project

项目名称	与场区距离/m	水位标高/m	监测时间
拟建项目场地区	项目区内	4.20~6.30	2014 年 4 月
		4.80~5.90	2016 年 8 月
		5.00~5.90	2018 年 6 月
拟建规划路	邻近东侧 30~45	4.86~5.34	2014 年 4 月
某大桥辅路	邻近北侧 10	5.03~5.33	2015 年 6 月
12#楼	南侧 13~20	8.28~9.92	2016 年 7 月
46#楼	南侧 15~30	7.16~8.73	2018 年 4 月
45#楼	西侧紧邻	3.84~4.54	2018 年 3 月

综合上述分析资料, 场地地下水介于 3.84~9.92 m。归纳上述 3 种预测方法并结合场地周边工程地下水位分析可得表 5。

表 5 拟建工程抗浮水位统计结果

Tab.5 Statistical results of anti-floating water level of the proposed project

水位名称	水位值
勘察期平均水位	5.13~5.81
勘察期历史最高水位	9.05
周边场区水位范围	3.84~9.92
数值模拟法抗浮水位	9.08
规范法抗浮水位	10.00
解析公式法抗浮水位	9.78

结合地勘资料和表 5 可看出, 勘察期平均水位 5.13~5.81 m, 且场地勘察时期水位变幅 2.00~4.00 m, 本次项目按最高变幅 4.00 m 考虑, 相应水位标高在 9.13~9.81 m 之间, 符合前期收集资

料得到场区水位在 3.84~9.92 m 之间。通过表 5 还可看出,勘察期间历史最高水位和洪水位高程普遍低于以上 3 种方法的计算结果,若直接采用地面高程或洪水位作为抗浮水位进行抗浮设计显得比较冒进且依据性不足。

6 结论

1)数值模拟法可直接对局部水文地质条件变化引起的地下水水位变化进行预测,简化边界条件,增加预测结果的准确性,该方法考虑了外界与系统间的排泄与补给关系,模拟结果显示离江越远,场地最高水位越低,受江水位变化影响越小,建议针对不同地质和水文条件的区域采用不同的抗浮水位标准,同时也发现拟建场地在丰水

年水位相比历史水位抬升了 2.00~3.00 m,可取最高水位 9.08 m,作为抗浮水位取值的参考依据。分析所得的优化渗透系数也可为区域项目岩土与地下工程提供参考。

2)半经验公式法采用临江二元地层的渗流分析法算出场地的抗浮水位与有限差分数值模拟的结果相近,克服了经验公式因大气降水或地表入渗补给以及江水水位上涨补给导致地下水位变化引发的计算难题,也验证临江二元地层渗流模型的准确性与适用性。

3)规范法得到的抗浮水位比其他两种方法要高一些,取值更保守,安全性更高,经济性略差,在工程应用中有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 王海东, 罗雨佳. 超大大地下室施工期抗浮破坏机理分析与应对思考[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10):2538-2546.
- [2] 赵宇. 地下室上浮破坏原因分析及处理措施研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [3] 王军辉, 陶连金, 韩煊, 等. 我国结构抗浮水位研究现状与展望[J]. 水利水运工程学报, 2017(3):124-132.
- [4] MEHL S, HILL M C. Development and evaluation of a local grid refinement method for block-centered finite-difference groundwater models using shared nodes[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(5):497-511.
- [5] ISMAIL W M Z W, YUSOFF I, RAHIM B E E A. Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(4):1119-1126.
- [6] 王宇博. 抗浮水位确定方法的对比分析研究:以长春地铁 2 号线东延三道村东站为例[J]. 西北地质, 2020, 53(4):207-215.
- [7] KHADRI S F R, PANDE C. Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2016, 2(1):39.
- [8] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京:地质出版社, 1986.
- [9] 安振东, 刘贯群, 张焘, 等. 建筑物场区地下水位预测与抗浮水位确定:以青岛啤酒城改造为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(4):103-109.
- [10] 王宇博, 徐永亮, 周玉凤, 等. 基于 GMS 模型的保利未来城抗浮设防水位研究[J]. 河北地质大学学报, 2019, 42(5):56-62.
- [11] 张旷成, 丘建金. 关于抗浮设防水位及浮力计算问题的分析讨论[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1):15-20.
- [12] 余良刚. 岩体基坑地下室抗浮设计水头合理取值研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2013.
- [13] 刘涛. 成都地铁临河地下车站抗浮设防水位取值探讨[J]. 智能城市, 2021, 7(2):45-46.
- [14] 曹洪, 朱东风, 骆冠勇, 等. 临江地下结构抗浮计算方法研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10):2973-2979, 2988.

(责任编辑:陈雯)