

海南某临海地区潮汐作用下地下水水位变化特征研究

冯明伟

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 结合海南三亚某基地临海地区地层地下水水位在潮汐作用下的长期观测资料,根据地下水流动规律,采用地下水一维流动的布辛奈斯克方程,研究临海地下水潜水含水层地下水水位在潮汐作用下的波动规律,并进行主要影响因素的识别与分析。分析发现,临海地区地下水水位波动主要受潮汐作用幅值大小和距离海岸远近的影响,当距离海岸超过100 m时,潮汐作用对地层地下水水位的影响可忽略。研究结果对临海地区土岩质基坑的土质边坡稳定性分析以及基坑围护设计、施工都有着重要的指导作用。

关键词: 潮汐作用;地下水水位;土岩质基坑;土质边坡

中图分类号: U442.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)05-0268-04

0 引言

近年来,海南临海地区基坑工程日益增多且多为土-岩质相结合的深基坑。因此,临海地区在波浪潮汐作用下的基坑边坡稳定性主要取决于基岩面以上的土质边坡稳定性。与内陆地区基坑工程不同,临海地区由于其自身固有的地形、地貌和土层组成特征,特别是临海基坑工程,所在场地地下水直接与海水发生水力联系,海水的潮汐波动会直接导致临海基岩面以上含水层地下水水位发生波动,使得基坑基岩面以上土质边坡围护结构所承受的水土压力发生变化,基坑土质边坡稳定性也随之发生波动。

目前对临海基坑工程问题的研究主要考虑坑外地下水水位稳定补给情况,对动水边界下基坑渗流问题的研究较少,水位波动下的渗流机理及其对基坑稳定性的影响尚不明晰。应宏伟等^[1-3]将基坑渗流场分区,假设土体总应力不变,将固结方程解耦,利用Laplace、Fourier变换推导了浅层含水层内地下水水位波动时板式支护基坑周围地基土孔压响应的二维近似半解析解;聂文峰^[4]提出了滨海浅层含水层地下水水位波动和临海水位波动2种情况下的基坑渗流简化分析模型,利用PLAXIS软件,基于Biot固结理论,建立相应的有限元数值分析模型,分析了浅

层含水层地下水水位波动与水位在海床面以上波动2种条件下基坑及周围地基的水土压力响应,并讨论相关参数对基坑渗流性状的影响;钟佳玉等^[5]采用波流水槽模型试验方法,研究了规则波和不规则波作用下砂质海床的孔隙水压力响应问题,其中主要考虑不同深度、波高及周期对孔隙水压力的影响,从而得出孔压变化规律。

可以发现,当前对临海受潮汐作用下场地孔隙水压力变化的分析,主要集中在孔压变化的微观现象、渗流路径的特定变化模式等确定性情况。本文主要从地下水流动规律入手,采用地下水一维流动的布辛奈斯克方程,研究临海地下水潜水含水层水位波动的影响因素;根据海南三亚某基地临海地区地层地下水水位在潮汐作用下的长期观测资料^[6],进行主要影响因素的识别与分析,研究临海地区地下水水位在潮汐作用下的主要影响因素。

1 潮汐及地下水监测网的建立

现场通过钻孔埋设3条剖面共15个土压力观测孔,剖面线间距30 m、孔间距15 m。其中北侧2条剖面每孔埋设土压力计3件,南侧1条剖面每孔埋设土压力计4件。在15个孔隙水压力监测孔中选取5个孔,每孔埋设1只孔隙水压力计进行地下水位监测。为监测海水水位随潮汐作用的变化,在与3条剖面线相应的范围内沿海岸线布设3点海水水位监测点,每点埋设1只孔隙水压力计。地下水水位、潮汐水位监测点平面布置见图1。

收稿日期: 2020-12-02

作者简介: 冯明伟(1987—),男,硕士,工程师,从事岩土工程设计工作。

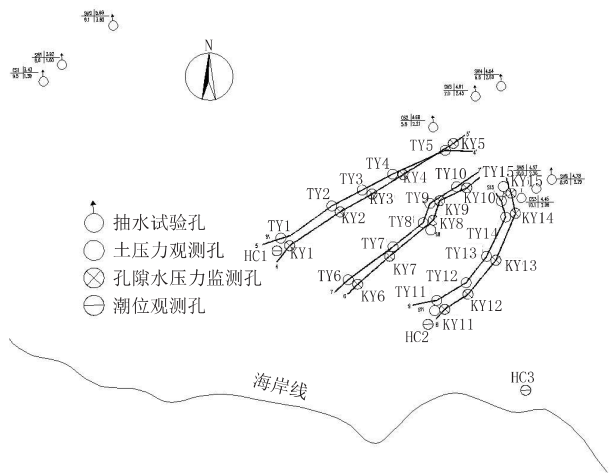


图1 地下水水位、潮汐水位监测点平面布置图

2 潮汐及地下水观测成果分析

通过监测发现:在农历每月初一、十五前后,各要发生1次潮差最大的大潮;在每月初八、二十三前后,各要出现1次潮差最小的小潮。在出现大潮时,必定为全日潮;在大潮过后,潮差逐渐变小,潮汐类型由全日潮逐渐变为不规则全日潮,最后变成不规则半日潮,如图2所示。

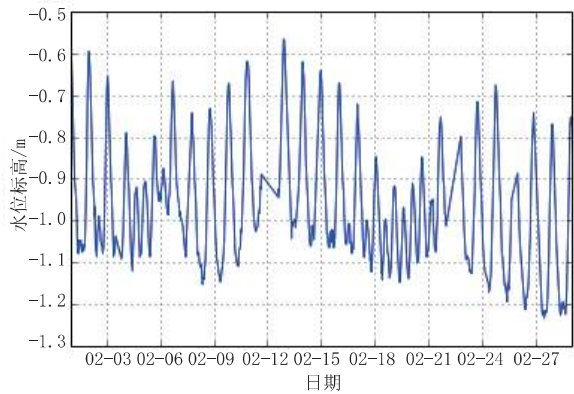


图2 潮汐引起的地下水水位周期波动

海水的涨落周期对于全日潮来说,每天有1个高潮,高潮时间一般能维持1h左右;对于不正规半日潮,一般在凌晨和下午各1次,且2次高潮不相等。潮汐的涨落时间每天各不相同,15d为1个周期,因此,1次高潮发生后,下次高潮时间为次日的同一时间向后推迟0.8h,具体见图3、图4。

由此可见,每次潮汐过程都会造成临海地下工程场地地下水位的大幅上升,增加水土压力,使施工过程中止水帷幕成桩难、成桩质量差,给基坑的设计施工带来较大的风险。

3 潮汐作用下的地下水水位波动方程推导

3.1 控制方程

在一定范围内,临海含水层系统受到海水潮汐

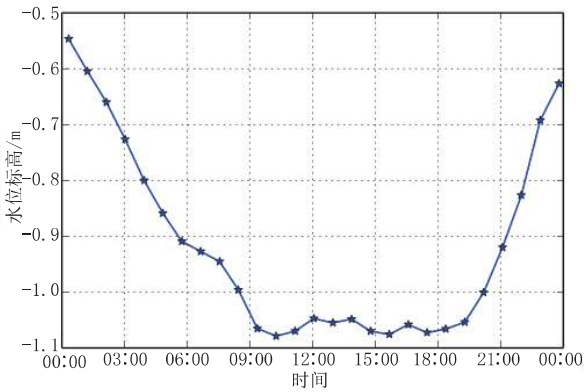


图3 全日型潮

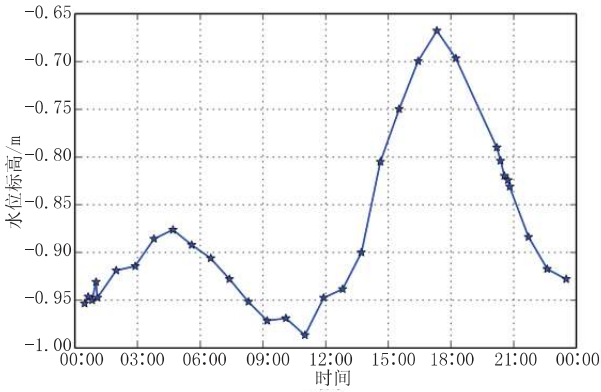


图4 半日型潮

运动影响,产生水位波动。为简化计算,依据场地条件,作如下假设:

- (1)含水层均值各向同性,底部隔水层水平,忽略外部降雨入渗补给。
- (2)地下水与向海水的流动可以看作一维流,地下水流动方向与海岸线垂直。
- (3)潜水流初始状态为稳定流。
- (4)海平面变化使得潜水含水层发生瞬时回水,如图5所示。

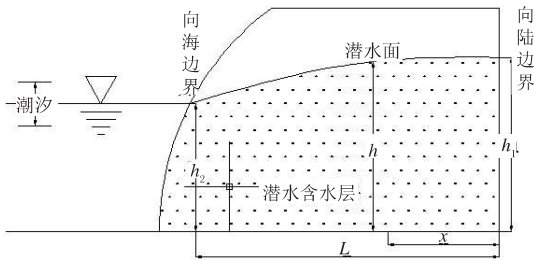


图5 滨海地下水系统

3.2 边界条件

边界条件为向陆边界和向海边界,其中向陆边界假定为足够远处,地下水水位不受潮汐变化影响,取为定水头边界(h_1)。在上述情况下,地下水的运动可以用 Boussinesq 方程来描述:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\mu}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为地下水水位(以底部为基准面); μ 为给水度; K 为渗透系数; t 为时间; x 为横向坐标。

3.3 解析表达式

当忽略潮汐作用的影响时,地下水水位不随时间变化。取垂直于大海的单位宽度来研究,初始条件为:

$$\begin{cases} h|_{x=0} = h_2 \\ h|_{x=L} = h_1 \end{cases} \quad (2)$$

与式(1)联立,得:

$$h^2 = h_2^2 + \frac{h_1^2 - h_2^2}{L}x \quad (3)$$

根据假设,潜水流初始状态为稳定流,水位可用式(4)表示,即:

$$h_{x,0}^2 = h_{0,0}^2 + \frac{h_{L,0}^2 - h_{0,0}^2}{L}x \quad (4)$$

在上述情况下,地下水的运动仍可以用式(1)表示,当潜水含水层厚度变化不大时,可以用其平均值 h_m 来代替 h ,则式(1)经过变量代换和线性化,根据相应的定解条件,得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ u(x,0) = 0 \\ u(0,t) = \frac{1}{2}(h_{0,t}^2 - h_{0,0}^2) = \frac{1}{2}\nabla(h_{0,t}^2) \\ u(L,t) = \frac{1}{2}(h_{L,t}^2 - h_{L,0}^2) = \frac{1}{2}\nabla(h_{L,t}^2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha = \frac{Kh_m}{\mu}$; $u = \frac{1}{2}[h^2(x,t) - h^2(x,0)]$ 。

求解得到:

$$u = \frac{1}{2} \left[\nabla(h_{0,t}^2) \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L}x + \nabla(h_{L,t}^2) \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (-1)^{n+1} \sin \frac{n\pi}{L}x \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}} \right) \quad (6)$$

利用下列展开式:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{x}{L} &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L}x, \\ \frac{x}{L} &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (-1)^{n+1} \sin \frac{n\pi}{L}x, \text{ 并设:} \\ \bar{x} &= \frac{x}{L}, \quad \bar{t} = \frac{\alpha t}{L^2} \end{aligned}$$

则上式简化为:

$$h_{x,t}^2 = h_{0,0}^2 + \nabla(h_{0,t}^2)F(\bar{x}, \bar{t}) + \nabla(h_{L,t}^2)F'(\bar{x}, \bar{t}) \quad (7)$$

其中:

$$F(\bar{x}, \bar{t}) = 1 - \bar{x} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi\bar{x}) e^{-n^2 \pi^2 \bar{t}}$$

$$F'(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{x} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (-1)^{n+1} \sin(n\pi\bar{x}) e^{-n^2 \pi^2 \bar{t}}。$$

4 潮汐作用下地下水水位波动分析

4.1 影响地下水波动的主要因素

根据海南三亚某场地的具体工程地质条件,取渗透系数 $K=7 \times 10^{-5}$ m/s,给水度 $\mu=0.4$,潜水含水层平均厚度 $h_m=10$ m,向陆边界处水头 $h_1=2$ m,向海边界处低潮位水头(初始水头) $h_2(0,0)=0 \sim 2$ m,向陆边界与向海边界的距离 $L=100$ m,潮汐波动周期 $T=24$ h。将这些参数代入式(7),得到结果见图6、图7。

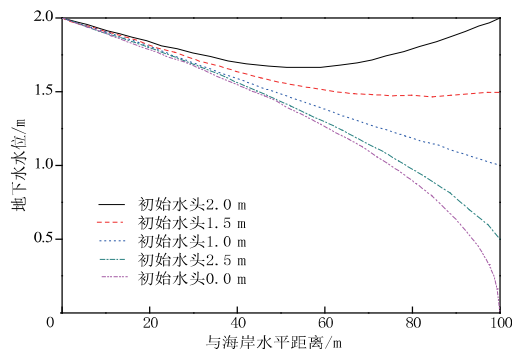


图6 地下水水位与潮高关系

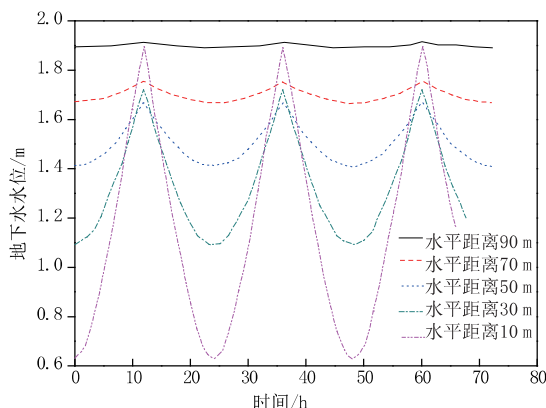


图7 不同水平距离处地下水水位随时间变化

由于潮汐作用引起海平面增高,临海潜水含水层受影响范围增大,在影响范围内地下水水位随着潮高的增大而升高。随着计算地点与海岸距离的增大,潮汐波动对地下水水位产生的影响随之减小,距离海岸100 m处地下水水位基本不受潮汐作用的影响。

4.2 与实测结果对比

在本次监测范围内,潜水含水层孔隙水压力受到潮汐的影响,呈现有规律的波动趋势。在 $K1 \sim K5$ 剖面,随着传感器与海岸边界距离的增大,孔隙水水头每日变幅明显变小(见表1)。对其进行拟合分析后发现,随着与海岸边界距离的增大,孔隙水压力波动幅值有指数衰减趋势,与解析解计算结果大体符合。如图8所示,在同一水平位置监测值普遍小于计算值,分析原因可能为:在构建控制方程时,对场地条

件进行了简化,没有考虑含水层底板起伏和参数空间变异性的影响。

表 1 潜水含水层水头变化与水平距离关系

传感器编号	与海岸水平距离 /m	水头日最大变幅 /m
K1-3	20.0	0.60
K2-3	38.0	0.20
K3-3	52.4	0.08
K4-3	68.6	0.03
K5-3	90.1	0.02

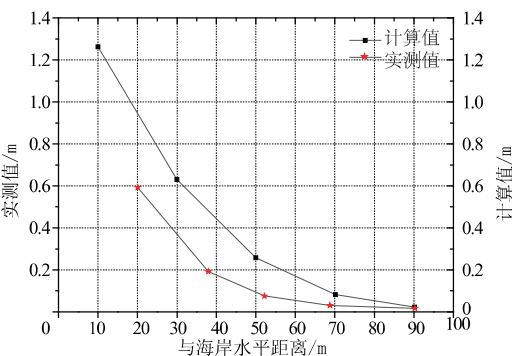


图 8 监测结果与计算值对比

在一维潜水含水层地下水流动方程的解析表达式基础上,研究了滨海地区潜水含水层地下水水位受潮汐影响的变化特点,得到了影响地下水水位的主要影响因素为潮汐变化幅值、与海岸水平距离。通过对滨海场地长期监测数据的整理分析,验证了这一结论。并且,在此次研究中,与海岸水平距离超过 100 m 时,由潮汐引起的地下水波动已经可以忽略不计,不会对工程活动产生影响。

4.3 对土岩质基坑设计与施工的指导意义

海南临海地区土岩质深基坑的边坡稳定性取决于基岩面以上土质边坡的稳定性。因基岩面以上土层渗透性在 10^{-2} cm/s 左右,其渗透性较强,受潮汐作用影响较大,主要影响因素为距离海岸远近和潮汐作用幅值的大小。为此,必须做到:

(1)在分析土岩质基坑边坡稳定性时,必须考虑潮汐作用的影响,而且视基坑周边距离海岸远近和方位可分段设计与验算基坑边坡稳定性,这样既取值合理,又能确保基坑边坡安全。土体与基岩交接面附近为一薄弱面,基坑边坡稳定性验算的重点是基

岩面以上土质边坡的稳定性。

(2)在基坑围护设计时,地下水压力可分段取值,这样可分段设计防渗止水帷幕体的强弱,做到基坑边坡围护设计既经济合理,又能确保土质边坡安全。

(3)在基坑围护施工时,施工工艺要考虑潮汐作用的影响,必要时应采取一定技术措施,在施工前要有针对性地制定施工技术方案,分析潮汐作用所产生的施工质量风险,制定应对措施。

5 结 语

(1)在一维潜水含水层地下水流动方程的解析表达式基础上,研究了临海地区潜水含水层地下水水位受潮汐影响的变化特征,得到了影响地下水水位的主要因素为潮汐变化幅值、与海岸水平距离。通过对海南三亚某临海场地地下水水位长期监测数据的整理分析,验证了这一结论。同时发现,与海岸水平距离超过 100 m 时,由潮汐引起的地下水波动可以忽略不计,不会对工程活动产生影响。

(2)地下水水位波动主要受到监测点与海岸距离位置的影响,土层自身渗透性能和厚度变化情况不会对地下水水位波动产生明显影响。

(3)临海地区潮汐作用下的地下水水位波动特征研究,可有针对性地指导土岩质基坑边坡稳定性分析,特别是对基坑围护设计与施工有重要的参考价值 and 设计依据。

参考文献:

[1] 应宏伟, 聂文峰, 黄大中. 地下水位波动引起重力式挡墙基坑周围地基土孔压变化及对挡墙稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11):2370-2376.

[2] 应宏伟, 聂文峰, 黄大中. 地下水位波动下基坑周围地基土的孔压响应半解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):1012-1019.

[3] 应宏伟, 聂文峰, 王敬铜, 等. 水位波动对临海重力式挡墙基坑稳定性的影响[J]. 海洋工程, 2013, 31(4):48-54.

[4] 聂文峰. 水位波动条件下基坑周围地基土的孔压响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[5] 钟佳玉, 郑永来, 倪寅. 波浪作用下砂质海床孔隙水压力的响应规律实验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3188-3193.

[6] 阳吉宝, 段存俊. 海南三亚某基地水文地质勘察(抽水试验)报告[R]. 上海: 上海市建筑设计研究院有限公司, 2013.