



基于潮汐影响的人工岛内河常水位确定

谢先坤

(上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要: 针对人工岛四周砂质堤透水性强、内河水位受外海潮位影响显著的问题, 为避免人工引排须选定合理的人工岛内河常水位。通过建立非稳定渗流模型, 研究渗流场与渗流量随潮位变化的关系。选取近海典型潮位, 采用分段求和法计算在一个潮汐周期内各种拟定的内河水位的净渗流量。对应净渗流量为零的内河水位即为最佳河道常水位, 该水位为确定内河河道规模及岛内吹填地面高程提供了基础。

关键词: 潮汐; 人工岛; 常水位; 非稳定渗流; 渗流量; 分段求和法

中图分类号: U 656.3; P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0008-05

Determination of inland river constant water level in artificial island based on tidal influence

XIE Xian-kun

(Shanghai Water Conservancy Engineering Design & Research Institute,

Shanghai Beach and Coastal Engineering Technology Research Center, Shanghai 200061, China)

Abstract: Aiming at the strong permeability of sandy embankment around the artificial island and the obvious influence of sea tide level on the water level of the inner river, a reasonable water level of the inner river on the artificial island should be selected to avoid artificial drainage. Through the establishment of unsteady seepage model, the relationship between seepage field and seepage flow changes with tidal level is studied. The typical tide level of the offshore sea is selected, and the net seepage discharge of various proposed inland river levels within a tidal cycle is calculated by subsection summation method. The water level corresponding to zero net seepage discharge is the optimal normal water level of the river channel, which provides a basis for determination of the scale of the inland river channel and the elevation of dredging ground in the island.

Keywords: tides; artificial island; constant water level; unsteady seepage; seepage flow; subsection summation method

为加强滩涂资源开发利用与保护, 科学合理利用深水航道治理疏浚土, 对大型江河入海口高滩进行围护与滩地抬升形成生态人工岛。考虑人工岛内防汛排涝及生态景观用水, 需在岛内布置相应河道, 通常在围堤内侧设置随塘河。河道水位直接影响滩涂地下水位及滩地填筑高程, 进而影响工程投资及后期的农业生产与建筑物建设安全。

随塘河隔着围堤与外海相邻, 由于围堤基础表面多为粉砂土, 堤身由吹填袋装砂和堤芯砂构成, 渗透性强, 海堤工程受潮汐涨落作用明显。

海水在一次潮汐中会发生快速上升或下降, 相比于一般堤防工程与内河水库大坝的渗流规律不同^[1-2], 且围堤一般不设防渗墙, 内河与外海连通, 内外水位联系密切^[3]。内外水位差与堤身水体渗流大小及方向随外海潮起潮落呈周期性变化, 围堤渗流是典型的非稳定渗流。

内河河道水位除与河道规模、引排水口门建筑物规模、吹填后围区地面高程等相关外, 还受外海潮汐制约, 因此须根据外海潮位通过非稳定渗流分析确定合理的内河常水位, 以使一个典型

潮位周期内河道渗出与渗入的水量基本平衡, 避免人为的引排水, 减少工程运行费用。根据即定的常水位确定河道规模, 按照地下水位毛细高度及安全超高确定滩地吹填高程。

本文以上海某滩涂治理水系工程为例, 根据运行期典型潮位, 初拟几种内河水位, 按照非稳定渗流模型, 采用分时段求和法进行渗流量分析, 找出渗入渗出量基本平衡的一种内河水位, 即可作为内河设计常水位。

1 工程概况

上海某滩涂整治工程新的新成陆面积约 87.9 km², 用地性质为农业与高端服务业, 区域南、北、东 3 个方向均为长江, 是典型的人工江心岛。为保证区域防洪除涝安全, 成陆区设置“三横十纵骨干河道、四湖及五水(泵)闸”的总体水系布局, 见图 1。内河与外海通过 5 座水(泵)闸进行水体交换, 达到防洪排涝、引淡等水资源调度的目的。

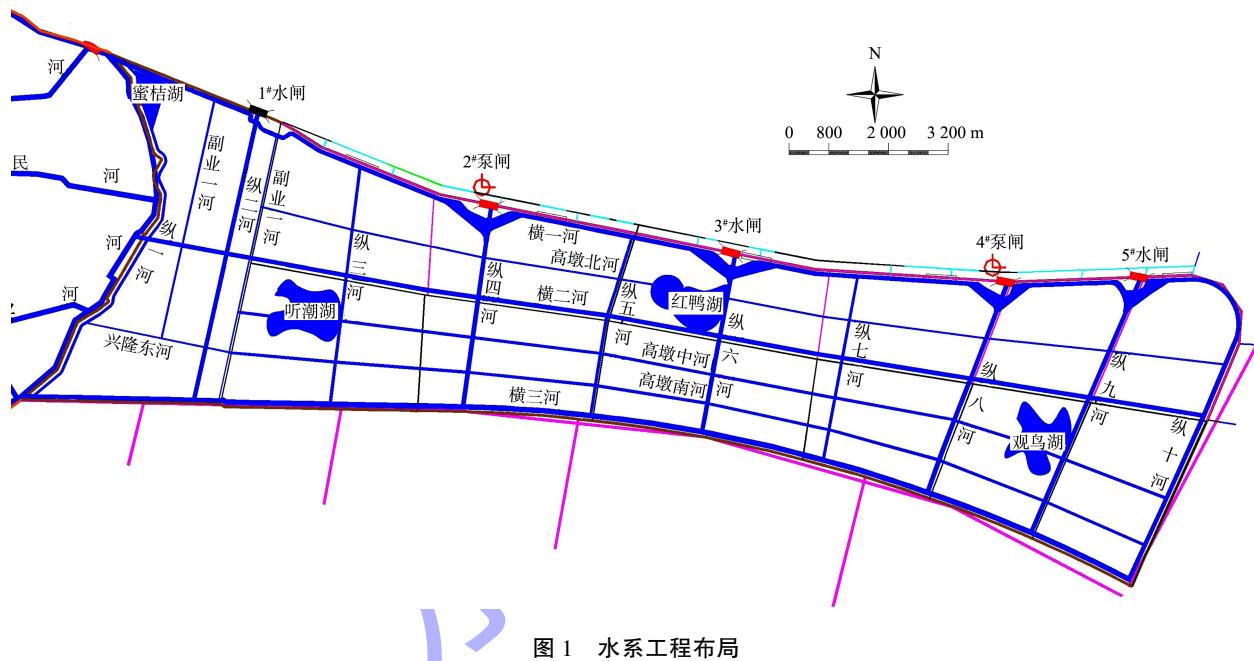


图 1 水系工程布局

工程外围均为充泥管袋加堤芯吹填砂构筑大堤, 堤基为沉积粉砂, 具有较强的透水性, 渗透系数基本在 10⁻³ cm/s, 大堤内侧均沿堤分布随塘河。江心岛外侧为长江口, 潮位大致按正弦曲线呈周期性变化, 由于堤身堤基透水性强, 在内外海水位差作用下产生非稳定渗流, 高潮位期间外海渗向内河, 低潮位期间内河渗向外海, 堤身内水形成反复流向。

2 计算方法

2.1 非稳定渗流计算理论

围堤沿堤轴线方向尺寸远大于断面方向尺寸, 属于平面问题。土体渗流须满足达西定律、水量平衡方程、初始条件和边界条件; 在交变水位作用下的饱和非稳定渗流情况下, 土体渗流须满足

以下方程^[4-9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = (C + S_w S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为总水头; k_x 、 k_z 分别为土体 x 、 z 方向的渗透系数; C 为容水度; S_w 为饱和度; S_s 为单位贮水量; t 为时间。

相应的定解条件为:

初始条件:

$$h|_{t=0} = h_0(x, z, t_0) \quad (2)$$

水头边界条件:

$$h|_{\Gamma_1} = h(x, z, t) \quad (3)$$

流量边界条件:

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, z, t) \quad (4)$$

式中: Γ_1 为水头边界; Γ_2 为已知流量边界(包括

自由面边界和不透水边界); n 为边界外法线方向; q 为边界流量; t_0 为初始时刻。

采用有限元离散得渗流有限元基本方程:

$$\mathbf{K}\mathbf{H} + \mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \mathbf{Q} \quad (5)$$

式中: \mathbf{K} 为透水系数矩阵; \mathbf{H} 为总水头向量; \mathbf{M} 为贮水量矩阵; \mathbf{Q} 为流量向量。

式(5)对时间进行差分, 推导出不可压缩性土颗粒非稳定渗流有限元方程:

$$(\omega \Delta t \mathbf{K} + \mathbf{M}) \mathbf{H}_{t+\Delta t} = \Delta t (1-\omega) \mathbf{Q}_t + \omega \mathbf{Q}_{t+\Delta t} + [\mathbf{M} - (1-\omega) \Delta t \mathbf{K}] \mathbf{H}_t \quad (6)$$

式中: Δt 为时间增量; ω 为 $0 \sim 1$ 之间的一个系数; \mathbf{H}_t 为 t 时刻的总水头向量; $\mathbf{H}_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻

的总水头向量; \mathbf{Q}_t 为 t 时刻的流量向量; $\mathbf{Q}_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的流量向量。

求解此方程组, 由 t 时刻总水头分布得到时刻 $t+\Delta t$ 的总水头分布。根据渗流场, 得到各点的水力比降及流速分布, 以堤顶中心线为基准, 取通过该线的单宽流量为断面渗入、渗出量。

2.2 渗流模型的建立

围堤基面高程约 -1.0 m, 两侧为 $1:3.0$ 的斜坡, 堤顶宽 8.0 m, 外侧在 0.0 及 5.5 m 高程设置镇压平台及消浪平台, 内侧在 4.5 及 1.5 m 高程设置内青坎及河道亲水平台, 堤身总宽 132 m、总高 10.8 m。计算模型地基土深度取 80 m, 两侧宽度各取 150 m, 其渗流计算断面及有限元模型见图 2、3。

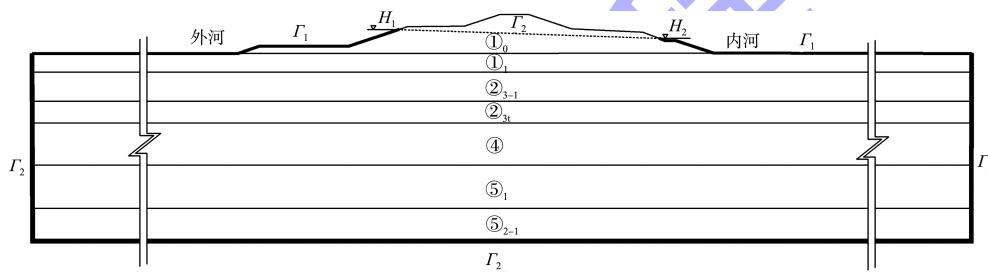


图 2 渗流计算断面

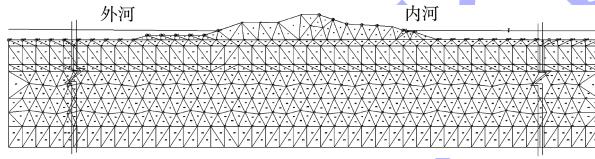


图 3 渗流计算有限元网格

2.3 渗流计算参数

2.3.1 土体渗透参数

根据地质条件, 堤基各层土基本平行, 为简化计算, 按等厚土层分布计算, 各层土主要渗透物理参数见表 1。

表 1 各土层渗透参数

土层	K_x ($m \cdot d^{-1}$)	K_y ($m \cdot d^{-1}$)	孔隙率 n	饱和度最小值	单位贮水量 ($10^{-3} m^{-1}$)
① ₀ 堤身土	2.350 0	2.010 0	0.425	0.78	0.60
① ₁ 粉砂	1.300 0	1.040 0	0.444	0.80	0.70
② ₃₋₁ 粉砂	1.320 0	0.860 0	0.521	0.92	0.75
② _{3t} 粉质黏土夹砂	0.003 5	0.006 0	0.561	0.95	4.00
④淤泥质黏土	0.000 6	0.004 2	0.506	0.91	7.00
⑤ ₁ 黏土	0.001 7	0.000 4	0.461	0.73	0.60
⑤ ₂₋₁ 粉砂	0.432 0	0.260 0	0.470	0.73	0.50

2.3.2 初始条件

内河河道常水位变化较小, 可设为常量; 外海潮位虽变动, 但基本上呈周期性变化。堤防内水头基本上在内外水头分别为内河常水位及外海侧平均潮位组成的渗流场上下波动, 故

堤内初始水头 $h|_{t=0}$ 取该内外水位差作用下的稳定渗流场的水头。

2.3.3 边界条件

内侧河道水面率较大, 渗入、渗出水量对内河水位变幅相对较小, 因此内河水位线以下边界

条件 Γ_1 为固定水头边界。外海潮汐属浅海正规半日潮, 每次涨潮和落潮大约为 6 h, 外海多年平均高潮位 3.30 m、多年平均低潮位 0.84 m, 其对应的潮型见图 4。因此外侧水头边界条件 Γ_1 随时间变动, 按照 1 h 为一时间段, 对应的边界条件见图 4。

考虑到地基土两侧及底部有足够的宽度和深度, 其流量边界条件 Γ_2 按照不透水处理。

自由面随着外侧潮位变化而变化, 采用迭代法求解。该边界除满足计算出的水头边界外, 还满足从自由边界流入或流出的边界条件:

$$\Gamma_2 = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \cos \theta \quad (7)$$

式中: μ 为土体的给水度; θ 为自由面外法线与垂线的夹角。

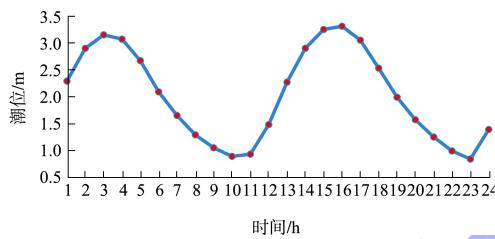


图 4 运行期典型潮位(外海侧边界条件)

3 计算结果分析

3.1 非稳定渗流场分布特征

3.1.1 外海落潮期

外海水位较内河高时, 渗流方向总体为外海到内河, 逸出点基本上在内河水面处。随着外海水位降低, 外海侧浸润线逐渐降低, 堤内浸润线最高点大于外海与内河水位, 浸润线向上凸起, 说明堤身内水有向内外两侧渗出趋势。随着外海水位进一步降落, 堤身浸润线最高点低于内河水位, 内河向外海渗透, 最后浸润线基本上呈直线。由于堤身渗透系数大、堤身较宽, 浸润线从外海到内河变化梯度较小。浸润线变化见图 5。



图 5 落潮时堤身内浸润线变化趋势

3.1.2 外海涨潮期

外海水位较内河低时, 渗流方向总体为内河到外海, 起初浸润线基本呈直线。随着外海水位升高, 当外海水位大于内河时, 渗流方向为外海到内河, 近外海处浸润线下凹, 但内河侧基本上呈直线。浸润线变化见图 6。

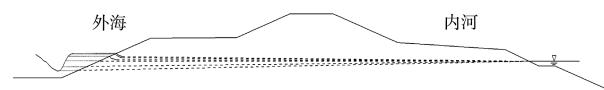


图 6 涨潮时堤身内浸润线变化趋势

3.1.3 渗流量与潮位关系

堤身渗流量与潮位形状基本相同, 但相位落后于潮位。外海潮位大于内河水位时, 外海向内河渗漏(渗流量为正), 随着潮位升高, 向内河渗流量增加; 外海潮位低于内河水位时, 内河向外海渗漏(渗流量为负), 随着潮位降低, 向外海渗流量增加(图 7)。

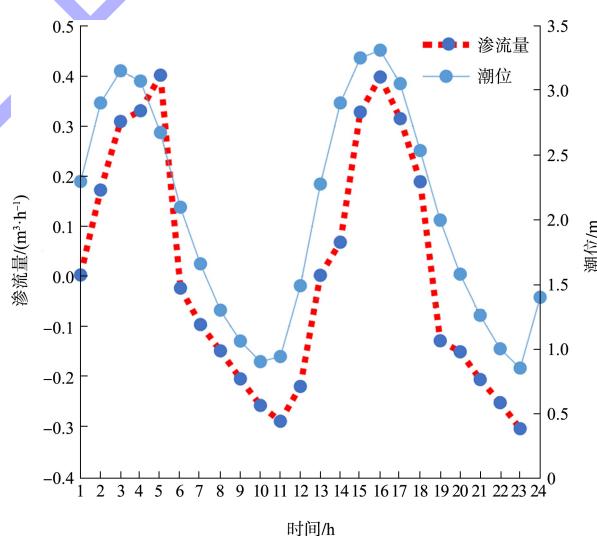


图 7 典型潮汐时段潮位与渗流量关系

3.2 常水位的确定

拟定内河几种常水位(1.9、2.0、2.1、2.2、2.3、2.4、2.5 m), 按照上述方法采用有限元法计算一个典型潮汐期间各时段的渗流量, 计算结果见图 8。对各种内河水位分时段求和得到一个潮汐周期内总的渗流量, 见图 9。当渗出与渗入量基本相同即净渗流量为零时, 对应的内河水位作为河道常水位, 本工程将 2.2 m 作为内河常水位。

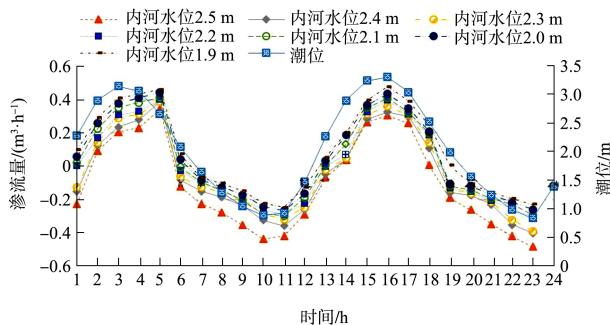


图 8 不同内河水位的渗流量过程线

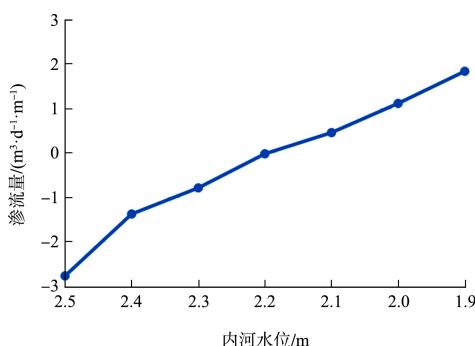


图 9 不同内河水位与 1 个潮汐周期内净渗流量关系

浸没临界地下水位埋深包括土壤毛管水上升带高度和安全超高值, 本区域滩地作为农业用地, 为砂质土地区, 农作物要求最小地下水位埋深0.6~0.9 m, 因此确定本工程围区吹填地面高程为3.1 m。

4 结论

1) 针对外海潮汐涨落提出围堤不稳定渗流计算方法, 总结了潮位涨落流场分布特征: 落潮期堤内浸润线最高点大于外海水位, 近外海处浸润线上凸, 近内河处呈直线; 涨潮期外海潮位低于内河水位时, 浸润线基本呈直线, 当外海潮位高

于内河水位时近外海处浸润线下凹, 内河侧基本上呈直线状。

2) 渗流量与潮位形状基本相同, 在堤内形成反复流, 但相位落后于潮位。

3) 根据拟定的几种内河水位, 分段求和一个典型潮汐周期内净渗流量, 对应净渗流量为零的内河水位作为河道常水位, 进而确定滩地吹填高程, 利于工程运行管理。

参考文献:

- [1] 林奇, 王伟, 王颖, 等. 潮位涨落过程中海堤渗流及稳定性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(3): 83-86.
- [2] 李聪磊, 黄铭. 潮汐影响下的海堤渗流场-应力场耦合分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 39-42.
- [3] 王盛宝, 闫滨. 土石坝饱和渗流逸出面求解方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 67-69.
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [5] 李子阳, 马福恒, 张湛等, 等. 土石坝饱和渗流逸出面求解方法的探讨[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 106-110.
- [6] 鞠程炜, 郝嘉凌, 杨晓松, 等. 台州东部新区围区海水入侵抗渗计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(5): 394-400.
- [7] 江春波, 梁东方. 堤防在交变水位作用下的二维渗流分析[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 9-10.
- [8] 谢潇, 朱文渤, 郭海强, 等. 潮汐与降雨对滨海湿地地下水位的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(6): 801-806.
- [9] FU J F, JIN S. A study on unsteady seepage flow through dam[J]. Journal of hydrodynamics, 2009, 21(4): 499-504.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。