

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.026

# 临江地下结构抗浮计算方法研究

曹洪<sup>1,2</sup>, 朱东风<sup>1,2</sup>, 骆冠勇<sup>1,2</sup>, 潘泓<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 临江地下结构进行浮力计算时, 其抗浮设计水位直接采用地面高程或江河水位是不合理的, 需要对场地进行渗流分析才能确定。在沿用本奈特假定的前提下, 推导出一种简化算法用于临江二元地层的渗流分析, 可得到强透水层中的水头分布。在此基础上, 提出地下结构物底板水压力的实用计算方法为抗浮设计提供依据。其方法适用于堤前、堤后覆盖层有不同的厚度和渗透系数, 以及宽度为有限或无限的边界情况。该法计算简便, 结果足够精确。经过算例验证和比较, 堤后小型结构物对强透水层中的水头分布影响不大, 但大型结构物和堤后宽度收窄将会显著抬高水头。位于覆盖层中的地下室底板浮力呈中部大、四周小的分布形态, 但位于强透水层中时则呈线性分布。

**关键词:** 地下结构; 二元地层; 水头分布; 浮力

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 10-2973-08

## Study of anti-buoyancy calculation method for underground structures near riverside

CAO Hong<sup>1,2</sup>, ZHU Dong-feng<sup>1,2</sup>, LUO Guan-yong<sup>1,2</sup>, PAN Hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** It is unreasonable to calculate the buoyancy force value of underground structures near riverside directly using ground elevation or river level as anti-buoyancy water level. Seepage analysis of the field is necessary for anti-buoyancy design. Based on Bennett hypothesis, a simplified algorithm for seepage analysis of double strata near riverside is presented to calculate the hydraulic head distribution in high-permeable layer. A practical method is followed to calculate the buoyancy force on the bottom slab of underground structures for anti-buoyancy design. This method can be applied for different boundary conditions, e.g., the blankets with different thicknesses and permeability on the upstream and downstream of levee, or the blanket with finite or infinite width. This algorithm only requires simple calculation parameters, but the results are accurate enough for using. After verification and comparison, a conclusion can be drawn that downstream small-scale structures in high-permeable layer have little influence on hydraulic head distribution, but the large-scale structures or the narrow-width blanket downstream will rise the head dramatically. The buoyancy in the middle of bottom slab is greater than the surrounding area when the bottom slab of basement locates in the blanket. But it changes to linear distribution when the bottom slab of basement intrudes into high-permeable layer.

**Keywords:** underground structures; double strata; hydraulic head distribution; buoyancy

## 1 引言

因城市建设需要, 在临江、临河等滩涂地区兴建地下结构物已经比较常见。这种临江地形一般可概化为二元地层, 也叫双层地基。当位于这些区域的地下结构需要进行抗浮设计时, 其地下水位的取

值将会存在一定的不确定性。如图1所示, 双层地基中的地下水通过强透水层与江河水直接连通, 江河水位往往在洪水位、正常水位和枯水位之间变动, 造成结构物处的地下水位也存在变化。而强透水层中的地下水常带有承压性, 若抗浮水位取地表高程或江河正常水位时, 具有抗浮失效的风险, 若直接

收稿日期: 2016-05-27

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(No. Z015013); 华南理工大学中央高校基本科研业务费(No. 20152M024)。

This work was supported by the Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Z015013) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of SCUT (20152M024).

第一作者简介: 曹洪, 男, 1954年生, 博士, 教授, 主要从事堤防渗流和岩土工程方面的研究。E-mail: caohsuct@126.com

通讯作者: 骆冠勇, 男, 1979年生, 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土方面的教学与研究工作。E-mail: luogy@scut.edu.cn

取江河洪水位进行抗浮设计, 则太过保守, 造成很大浪费。

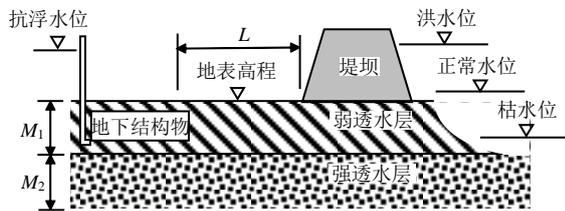


图1 临江水位示意图

Fig.1 Schematic diagram of water lever near riverside

要保证临江地下结构物抗浮水位取值合理, 应根据以往水文资料, 查明在结构物设计使用寿命期内江河可能出现的最高水位, 然后考虑结构物距江河的距离、覆盖层及透水层的渗透性、土层厚度等因素的综合影响, 若采用有限元法对整个场地进行渗流分析往往可以获得较好的解答, 但一般设计人员较难掌握, 而通过对使用条件作一定假设, 采用简化解析算法进行渗流分析也能获得足够精确的结果, 可以用来指导抗浮设计。

关于临江二元地层渗流分析的解析算法问题, 前苏联学者波罗巴里诺娃-柯钦娜<sup>[1-2]</sup>应用复变函数线性微分方程的解析延拓理论, 求出了等厚双层地基中浅坝底环流和板桩环流的严格解; 本奈特和乌根斯<sup>[3]</sup>假定上覆弱透水层的流线基本呈垂直向, 下部强透水层的流线基本呈水平向(以下简称本奈特假定), 使得平面二维渗流问题降为一维问题; 波若兹<sup>[3]</sup>假定上覆弱透水层中的流线方向基本垂直, 而对强透水层中的流线方向不加任何限制, 以级数形式求出了双层地基的平面解。

吴世余<sup>[3-4]</sup>提出了双层地基解题的等效距离法, 推导了等厚覆盖层双层地基条件下的渗流方程, 应用保角变换法对堤身渗流单独进行了探讨; 曹敦侣<sup>[5]</sup>在假定堤后段为无限宽的条件下, 给出了堤后

强透水层中水头计算公式; 丁留谦等<sup>[6]</sup>对下游为不透水边界双层地基上盖重的渗流计算进行了推导; 刘杰等<sup>[7]</sup>经有限元计算验证后认为, 堤前覆盖层缺失后, 河床深泓下切, 对堤后透水砂层中的水头分布影响不大, 堤前存在一定长度覆盖层时, 可起铺盖防渗作用, 当二元地层的渗透系数比值越大时, 堤后强透水层中的剩余水头越大。

本文拟给出一种应用于临江二元地层的简化渗流计算方法, 适应堤前、堤后覆盖层宽度或渗透系数不同以及堤前、堤后为有限或无限宽度的情形。在解决了堤后渗流计算的基础上, 给出地下结构物底板浮力的实用计算方法。

## 2 临江二元地层渗流方程

### 2.1 计算模型

这里继续沿用本奈特假定, 并作如下补充假设来进行简化渗流分析:

(1) 因堤身土体渗透系数远小于强透水层且通过堤身的渗水不会影响堤后段的地下结构物, 故忽略堤身对下方强透水层的越流补给。

(2) 强透水层将在堤后较远处尖灭, 取堤后端点处水平方向的流量为 0, 即强透水层中的水流全部通过覆盖层向上溢出。

临江二元地层渗流计算模型如图 2 所示, 以两个堤脚为界将计算区域分为堤前段、堤底段和堤后段,  $x$  轴原点位于堤身中线,  $z$  轴为高程系统。其中,  $H_1$  为堤前河道水头,  $H_2$ 、 $H_3$  分别为堤前堤脚、堤后堤脚下方强透水层中的水头, 即  $B$  点和  $C$  点水头,  $H_4$  为堤后段覆盖层顶面的水头, 当堤后地面有水时取水面高程, 无水时可取地面高程;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别为堤前覆盖层、强透水层、堤后覆盖层的厚度;  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为堤前覆盖层、强透水层、堤后覆盖层的渗透系数;  $B_1$ 、 $B_2$  分别为堤前、堤后覆盖层的宽度;  $L$  为堤底宽度的  $1/2$ 。

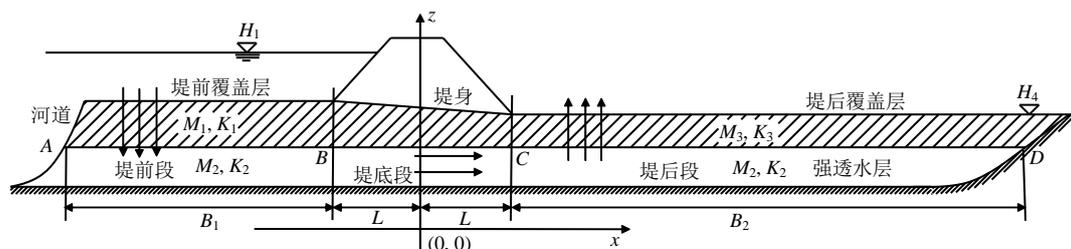


图2 临江二元地层渗流模型

Fig.2 Seepage model of double strata near riverside

堤后宽度一般随地形而变化, 如北江大堤石角段堤后为阶地, 宽约 500~800 m, 而荆江大堤地处

江汉平原, 堤后宽约数公里, 这相当于  $B_2$  分别取有限值和无限大的情况; 堤后有减压设施等出口时,

堤后水头必定小于公式计算值，但减压设施不一定长年有效，仅可作为安全储备；堤后出现渊塘，其作用应视江河水位变化而定，这里不作详细讨论。本文仅用于堤后段的一般情形，复杂边界条件应专门分析。

### 2.2 微分方程及其解

#### 2.2.1 堤前段(-L-B<sub>1</sub> ≤ x ≤ -L)

水流通过堤前段覆盖层补给进入强透水层，应用达西定律建立方程为

$$\frac{d^2 H_x}{dx^2} + A^2(H_1 - H_x) = 0 \quad (1)$$

$$A = \sqrt{\frac{K_1}{M_1 M_2 K_2}} \quad (2)$$

式中：H<sub>x</sub>、Q<sub>x</sub>分别为强透水层中距 z 轴为 x 处的水头和流量；A 为堤前段越流系数（1/m）。

堤前段边界条件如下：x = -L - B<sub>1</sub>, H<sub>x</sub> = H<sub>1</sub>；  
x = -L, H<sub>x</sub> = H<sub>2</sub>。

#### 2.2.2 堤底段(-L < x < L)

堤底段近似按承压水层考虑，覆盖层底水头呈线性分布，有

$$H_x = H_2 - \frac{H_2 - H_3}{2L}(x + L) \quad (3)$$

且有流量连续条件：

$$Q_x = Q_B = Q_C = K_2 M_2 \frac{H_2 - H_3}{2L} \quad (4)$$

式中：Q<sub>B</sub>、Q<sub>C</sub>分别为强透水层中 B、C 点的流量。

#### 2.2.3 堤后段(L ≤ x ≤ L + B<sub>2</sub>)

水流从堤后强透水层穿过覆盖层溢出地面，应用达西定律建立如下方程：

$$\frac{d^2 H_x}{dx^2} + A'^2(H_4 - H_x) = 0 \quad (5)$$

$$A' = \sqrt{\frac{K_3}{M_2 M_3 K_2}} \quad (6)$$

式中：A'为堤后段越流系数（1/m）。

堤后段边界条件如下：x = L, H<sub>x</sub> = H<sub>3</sub>；x = L + B<sub>2</sub>, Q<sub>x</sub> = 0。

这里需要注意，当 x = L + B<sub>2</sub> 时，强透水层中水头不等于 H<sub>4</sub>，而应由下文中水头方程式（7）中的第 3 式求出。

将边界条件代入微分方程后求得各段强透水层中的水头和流量分布为

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_1 - (H_1 - H_2) \frac{\text{sh}[A(L+x) + \alpha]}{\text{sh} \alpha} \\ &(-L - B_1 \leq x \leq -L) \\ H_x &= H_2 - \frac{H_2 - H_3}{2L}(x + L) \\ &(-L < x < L) \\ H_x &= H_4 + (H_3 - H_4) \frac{\text{ch}[A'(L-x) + \beta]}{\text{ch} \beta} \\ &(L \leq x \leq L + B_2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= AK_2 M_2 (H_1 - H_2) \frac{\text{ch}[A(L+x) + \alpha]}{\text{sh} \alpha} \\ &(-L - B_1 \leq x \leq -L) \\ Q_x &= K_2 M_2 \frac{H_2 - H_3}{2L} \\ &(-L < x < L) \\ Q_x &= A' K_2 M_2 (H_3 - H_4) \frac{\text{sh}[A'(L-x) + \beta]}{\text{ch} \beta} \\ &(L \leq x \leq L + B_2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中：α = AB<sub>1</sub>；β = A'B<sub>2</sub>。

### 2.3 坡脚水头求解

因式（7）、（8）中含有的坡脚水头 H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub> 仍是未知量，而堤底段两个坡脚处流量相同，可采用阻力系数法<sup>[8]</sup>求解，将 x = ±L 代入式（8）中的第 1 式和第 3 式求得堤前堤脚、堤后堤脚和堤底段的水头差表达式为

$$\left. \begin{aligned} H_1 - H_2 &= \frac{\text{th} \alpha}{AM_2 K_2} Q_B \\ H_2 - H_3 &= \frac{2L}{M_2 K_2} Q_B \\ H_3 - H_4 &= \frac{1}{A'M_2 \text{th} \beta K_2} Q_C \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

令

$$\xi_1 = \frac{\text{th} \alpha}{AM_2}, \xi_2 = \frac{2L}{M_2}, \xi_3 = \frac{1}{A'M_2 \text{th} \beta} \quad (10)$$

式中：ξ<sub>1</sub>、ξ<sub>2</sub>、ξ<sub>3</sub>分别为堤前段、堤底段和堤后段的阻力系数。

式（9）等号两边相加后整理可得：

$$\frac{Q_B}{K_2} = \frac{Q_C}{K_2} = \frac{H_1 - H_4}{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3} \quad (11)$$

利用式（11）即可求得 Q<sub>B</sub> 或 Q<sub>C</sub>，代回式（9）即可求得 H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>。

### 2.4 特例分析

以下根据式（7）、（8）分析几种特殊情况。

(1) 当河床具有无限宽度, 即堤前段覆盖层无限宽, 相当于  $B_1 \rightarrow \infty$ , 由式(7)中的第1式变形可得堤前段水头分布为

$$H_x = H_1 - (H_1 - H_2)e^{A(x+L)} \frac{1 - e^{-2A(L+x+B_1)}}{1 - e^{-2AB_1}} \quad (12)$$

$$\lim_{B_1 \rightarrow \infty} H_x = H_1 - (H_1 - H_2)e^{A(x+L)} \quad (13)$$

同理可得堤前段强透水层中流量为

$$\lim_{B_1 \rightarrow \infty} Q_x = AK_2 M_2 (H_1 - H_2) \quad (14)$$

(2) 当堤后覆盖层延伸到较远处, 如上文提到的荆江大堤, 堤后可视作无限宽, 相当于  $B_2 \rightarrow \infty$ , 由方程式(7)中的第3式变形可得堤后水头分布为

$$H_x = H_4 + (H_3 - H_4)e^{A'(L-x)} \frac{1 + e^{-2A'(L-x+B_2)}}{1 + e^{-2A'B_2}} \quad (15)$$

$$\lim_{B_2 \rightarrow \infty} H_x = H_4 + (H_3 - H_4)e^{A'(L-x)} \quad (16)$$

(3) 当堤前段河床覆盖层渗透系数很小, 即  $K_1 \rightarrow 0$ , 若  $B_1$  为一有限值, 此时  $A \rightarrow 0$ , 则堤前段强透水层中水头分布和流量为

$$H_x = H_1 - (H_1 - H_2) \lim_{A \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-2A(L+x+B_1)}}{1 - e^{-2AB_1}} = \quad (17)$$

$$H_1 - (H_1 - H_2) \frac{(L + B_1 + x)}{B_1}$$

$$Q_x = \lim_{A \rightarrow 0} Q_x = K_2 M_2 \frac{(H_1 - H_2)}{B_1} \quad (18)$$

此时堤前段强透水层中的水头呈线性分布, 流量为一常数, 若令  $B_1 \rightarrow \infty$ , 则  $H=H_2$ ,  $Q=0$ , 表明河床很宽且堤前段覆盖层渗透系数很小时, 强透水层中的地下水与江河水没有直接的水力联系。

由3个特例可知, 式(7)、(8)既能适应堤前、堤后段分别为有限和无限宽的情形, 也能用于解释江水和强透水层的水力联系情况。

### 3 算例验证

#### 3.1 对比公式简介

这里对吴世余<sup>[3]</sup>、曹敦侣<sup>[5]</sup>两位学者的计算公式进行简单介绍, 并以此为参照与本文公式进行比较, 以明确各自的使用范围。

吴世余<sup>[3]</sup>公式:

堤后段为

$$\left. \begin{aligned} h &= C_1 e^{Ax} + C_2 e^{-Ax} \\ h &= C_1 \operatorname{sh} Ax + C_2 \operatorname{ch} Ax \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

堤前段为

$$\left. \begin{aligned} h' &= C_3 e^{Ax} + C_4 e^{-Ax} \\ h' &= C_3 \operatorname{sh} Ax + C_4 \operatorname{ch} Ax \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

堤底段为

$$h = C_5 \operatorname{sh} Ax + C_6 \operatorname{ch} Ax + \frac{H_r}{L_0} x \quad (21)$$

式中:  $C_1 \sim C_6$  为待定系数;  $h$  为强透水层中的水头;  $h'$  为堤前段水头损失;  $H_r$  为江水位;  $A$  为堤前、堤后段越流系数, 取相同值;  $L_0$  为堤底宽度。双曲函数解用于堤前、堤后段有限宽, 坐标原点位于堤前段的左端点; 指数函数解用于堤前、堤后段为无限宽, 坐标原点可位于两个坡脚中的任一个, 水头基准面位于覆盖层顶面。

比较后发现, 吴世余公式是本文公式中堤前、堤后覆盖层参数相同、 $H_4$  取地面高程时的特例, 不同之处在于吴世余公式考虑了堤身对强透水层的越流补给, 但这对强透水层的水头分布影响并不大, 当堤前、堤后覆盖层参数不同时需要采用分段法求解。

曹敦侣<sup>[5]</sup>公式为

$$h = \Delta H \frac{L_2}{L_1 + L_2 + B} \quad (22)$$

$$h_x = h e^{-A'x} \quad (23)$$

$$L_1 = \frac{1}{A'} \operatorname{th}(A'B'), L_2 = \frac{1}{A'} \quad (24)$$

式中:  $h$  为堤后堤脚处强透水层中的水头;  $h_x$  为强透水层中距堤后堤脚为  $x$  处的承压水头;  $\Delta H$  为堤前、堤后总水头差;  $A'$  为堤后段越流系数;  $B$  为堤底宽度;  $B'$  为堤前覆盖层实际宽度;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为堤前、堤后段强透水层的等效渗径长度。

曹敦侣公式水头基准面取覆盖层顶面, 坐标原点位于堤后坡脚, 假定堤后覆盖层等厚无限长。由本文2.4节特例(2)知, 当  $H_4=0$ ,  $x$  轴坐标原点位于堤后坡脚时, 曹敦侣公式将与本文公式相同。

#### 3.2 算例结果对比

这里为方便与吴世余公式、曹敦侣公式进行比较, 堤前、堤后覆盖层厚度及渗透系数均取相同, 覆盖层厚为3 m, 渗透系数为  $1 \times 10^{-5}$  cm/s, 强透水砂层厚为8 m, 渗透系数为  $1 \times 10^{-3}$  cm/s, 堤前段宽

为 50 m，堤后段宽为 150 m，堤顶宽为 10 m，堤底宽为 50 m，河道水位为 10.00 m，堤后覆盖层顶面水位为 0.00 m，以堤身中线和覆盖层顶面交点为原点建立坐标系，以二维有限元程序计算结果为参照对比各式结果。

如图 3 所示，本文公式结果在比较关注的堤后段与有限元结果最为接近；曹敦侣公式计算结果在距堤脚较远处比有限元值低，是由于假定了堤后段为无限宽，拉长了渗径，工程应用偏于危险；吴世

余公式在堤底段和堤后段前部的计算值小于有限元值，是由于考虑了堤身越流补给的作用。就工程建设来说，这几种方式的计算精度均可接受，差值在 5% 以内，说明在覆盖层等厚且渗透系数相同的条件下，三者均有较好的精度，但当堤前、堤后覆盖层厚度及渗透系数不同时，吴世余公式需采用分段法求解，曹敦侣公式不能反映堤后段覆盖层宽度的影响，当堤后收窄时，其结果有较大误差，而应用本文公式不存在上述局限，且计算过程较为简便。

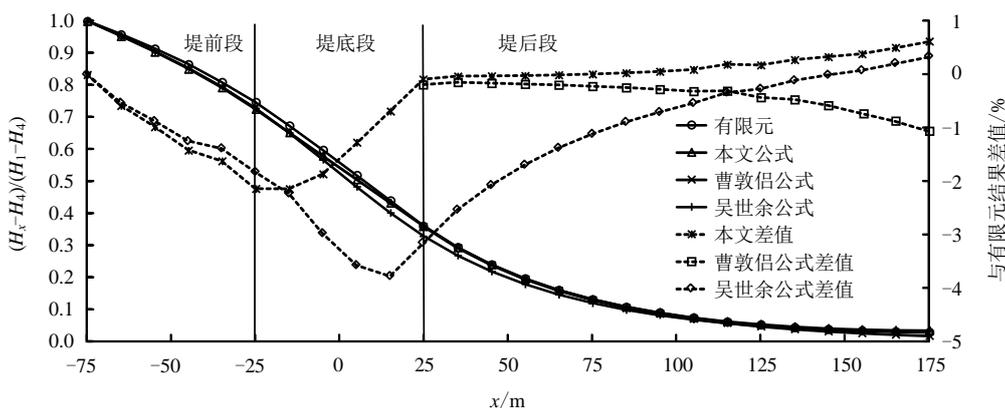


图 3 强透水层水头分布  
Fig.3 Hydraulic head distribution in high-permeable layer

### 4 水头分布的影响因素

堤后段易受工程活动、土层厚度、渗透系数及宽度等因素的影响。现按照 3.2 节算例中的计算参数，依次减小堤后段覆盖层的渗透系数  $K_3$ ，即降低越流系数  $A'$ ，水头分布结果见图 4，由图可见，因堤后强透水层水头消散受阻，水头明显抬高，而当仅增加堤后覆盖层厚度  $M_3$  时（见图 5），水头抬升并不明显，这是因为土层厚度及其渗透系数的变化往往不在一个数量级上，渗透系数降低才是引起水头抬升的主因，一般较厚的覆盖层对结构抗浮也是有利的。

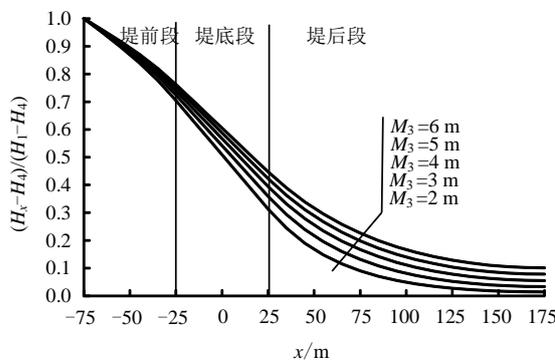


图 5  $H_x$ - $M_3$  关系曲线  
Fig.5 Relationships between  $H_x$  and  $M_3$

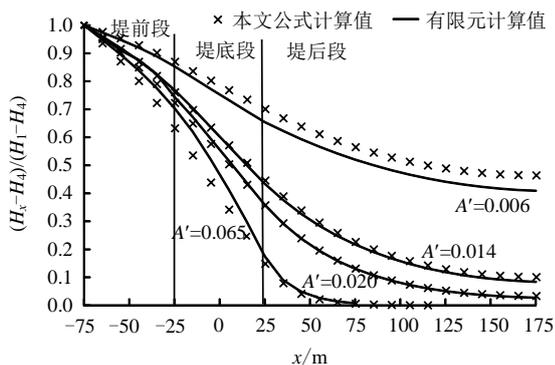


图 4  $H_x$ - $A'$  关系曲线  
Fig.4 Relationships between  $H_x$  and  $A'$

当逐渐减小堤后段覆盖层宽度  $B_2$  时，水头分布见图 6，当堤后覆盖层宽广，有助于强透水层中水头消散，超过一定宽度后这种有益作用不再明显，本算例条件下约为 150 m，而当堤后宽度收窄时，将会引起强透水层中水头明显抬升。

若堤后存在结构物，对水流溢出有一定阻碍作用，但堤后一般较宽广，结构物两侧存在绕流现象，缓解了水头升高。为讨论这种绕流现象，建立三维渗流有限元模型（见图 7），土层厚度及渗透系数同 3.2 节算例，结构物位于堤后覆盖层正中，进入覆盖层 1.5 m，模型最左端为定水头边界，其余各面均

可自由出水，结构物按不透水考虑。

当结构物尺寸由 15 m×15 m 逐渐增大到 200 m×200 m 时，结构物中心平面的沿程水头分布如图 8 所示，由图可见，此时若仍按本文公式计算水头分布，不考虑结构物的影响，将产生计算偏差，总体水头计算偏小，不安全。为消除偏差，按式 (25) 对堤后段覆盖层渗透系数进行调整，表达式为

$$K'_3 = \left( 1 - \frac{S}{\mu B_2 b} \right) K_3 \quad (25)$$

式中： $K'_3$  为考虑结构物影响的堤后段覆盖层渗透系数； $S$  为堤后结构物总占地面积； $b$  为堤后结构物沿堤防方向的宽度，当为结构群时，应取群体的总宽度； $\mu$  为考虑绕流的面积放大系数，可取 1.25~1.5，对小面积地下室取大值，对大面积地下室取小值。

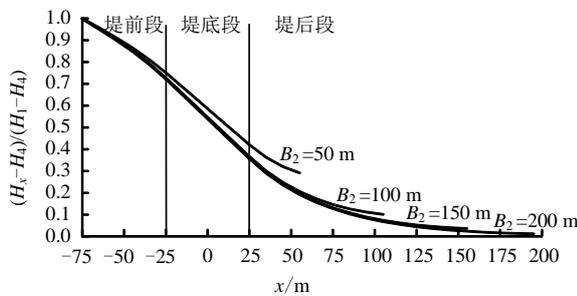


图 6  $H_x - B_2$  关系曲线  
Fig.6 Relationships between  $H_x$  and  $B_2$

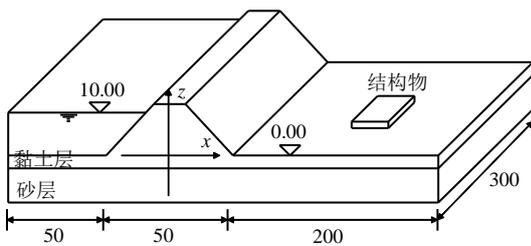


图 7 三维渗流模型 (单位: m)  
Fig.7 Three-dimensional seepage model (unit: m)

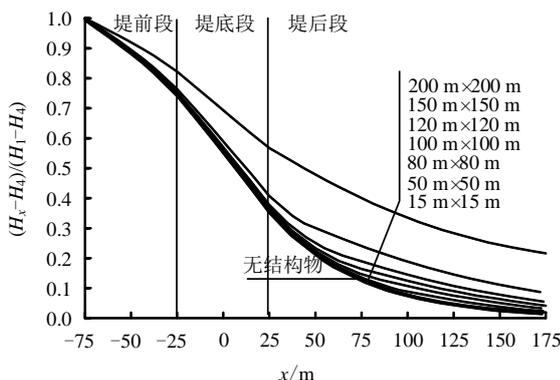


图 8 不同结构物的水头分布  
Fig.8 Hydraulic head distributions of different structures

表 1 计算水头偏差

| 结构物尺寸/(m×m) | $K_3$ 计算偏差/m | $K'_3$ 计算偏差/m |
|-------------|--------------|---------------|
| 15×15       | -0.03~-0.01  | -0.029~-0.019 |
| 50×50       | -0.13~-0.08  | -0.071~-0.013 |
| 80×80       | -0.29~-0.15  | -0.117~-0.044 |
| 100×100     | -0.45~-0.22  | -0.146~-0.101 |
| 120×120     | -0.66~-0.29  | -0.167~-0.129 |
| 150×150     | -1.11~-0.48  | -0.268~-0.187 |
| 200×200     | -2.70~-1.91  | -0.352~-0.220 |

由图 8 和表 1 可以看出，堤后小型结构物对水头分布影响不大，偏差在可接受的范围，如本例中 80 m×80 m 及以下的结构物可不考虑其影响，但大型结构物对出溢的阻碍作用不可忽视，需对覆盖层的渗透系数进行调整后方可使用本文公式，调整后大幅削减计算偏差。本例中当堤后全部被结构物覆盖时，水头最大可抬高约 2.7 m，由此可见，堤后段在建设过程中，应保留足够的出水通道，否则下游结构物将承受较大的浮力。

总体看来，堤后覆盖层渗透系数和宽度是影响强透水层水头分布的主要因素，大型结构物也会抬高水头。

当然，因防洪需要，在堤后一定范围内进行建设活动是受管控和限制的，这个限制范围因自然历史条件和土地利用不同而有所差异，比如河南省取堤后堤脚外 3~5 m，江苏省取堤后堤脚外 100~200 m<sup>[9]</sup>，该范围内一般也是承受较高水头的区域，在此范围内的结构物应具备足够的抗浮措施。

### 5 浮力计算

在进行结构物浮力计算时，尚应确定河道水位  $H_1$  的值，该值可通过查阅历年水文资料，取结构物设计寿命期内可能出现的最高水位，代入本文公式求得强透水层中的水头分布，进而计算结构物浮力，结构物底板下的水压力分布并不均匀，见图 9(a)，可分为边跨和中跨讨论。

(1) 边跨范围内的底板，浮力按照式 (26) 计算，边跨范围内的浮力比中跨小，是由于中部出水受阻，水头抬高，这个范围约为  $T/2$  宽度。

$$p_1 = \gamma_w \left[ H - \frac{T}{d+T} (H - H_4) - Z_b \right] \quad (26)$$

式中： $p_1$  为边跨底板水压力； $\gamma_w$  为水的重度； $d$  为地下室进入覆盖层深度； $T$  为底板底面以下覆盖层的厚度； $H$  为地下室中心所在位置处的强透水层中的水头。

(2) 中跨范围内的底板，其水头分布接近强透水层中的水头，可按式 (27) 计算，这里上游端水头高于下游端，可分开计算，中间按线性分布考虑。

$$p_2 = \gamma_w(H - Z_b) \quad (27)$$

式中： $p_2$  为底板水压力； $Z_b$  为底板底面位置高程。

当地下室尺寸较小时，可不分边、中跨，全板范围按式 (27) 计算，略偏保守，但保证了安全。当地下室底板下覆盖层很薄或者已全部进入强透水层，见图 9(b)，则地下室不分大小全范围按照式 (27) 计算，上游端浮力要高于下游端。

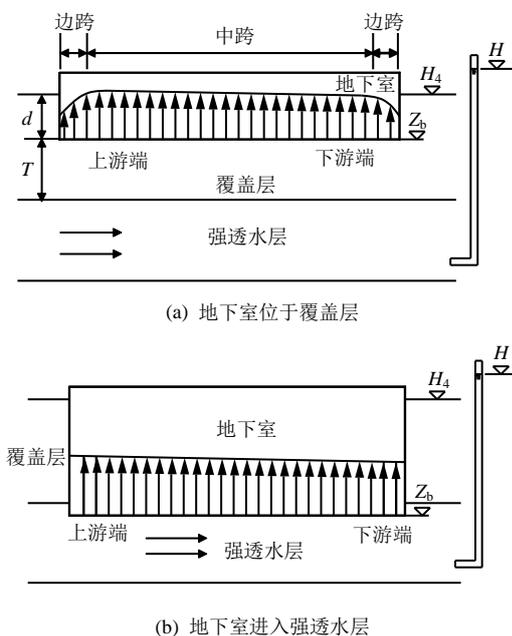


图 9 地下室底板水压力分布

Fig.9 Water pressure distributions on bottom slab of basement

## 6 结 论

(1) 在临江二元地层上，直接采用地面高程或江河水位进行抗浮设计是不合理的，由本文提出的简化算法用于场地渗流分析，进而计算结构物的浮力是非常简便实用的。

(2) 在对场地进行渗流分析时，忽略堤身的越流补给作用，将使渗流方程大为简化，给阻力系数法的使用创造了条件，简化过程对水头分布影响并不大，验证表明，与有限元结果十分接近。

(3) 本文公式考虑堤前、堤后段覆盖层厚度和渗透系数不同，使得应用范围更广，对一些特殊情况也能很好地解释。

(4) 影响堤后段强透水层中水头分布的主要因素是堤后覆盖层的渗透系数和宽度，堤后存在大面

积或群体地下室时需要对堤后段渗透系数进行调整方可使用本文公式，小型结构物对水头分布影响不大，堤后场地突然收窄和建设大型结构物都会显著抬高水头。

(5) 位于堤后覆盖层中的地下室底板所受的浮力分布并不均匀，中跨范围大于四周边跨范围，但穿过覆盖层进入强透水层则呈线性分布。

## 参 考 文 献

- [1] 吴世余, 宋新江. 不透水地基上堤坝渗流计算的理论解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1695—1702.  
WU Shi-yu, SONG Xin-jiang. Analytic solution of seepage calculation for dams and levees on impervious strata[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(11): 1695—1702.
- [2] 波罗巴里诺娃-柯钦娜(П.Я.Полубаринова-кочина). 地下水运动原理[M]. 萧树森, 等译. 北京: 地质出版社, 1957: 404—418.  
POLUBARINOVA-Kochina P Y. Theory of ground water movement[M]. Translated by XIAO Nan-sen, et al. Beijing: Geology Press, 1957: 404—418.
- [3] 安徽省水利科学研究所. 多层地基和减压沟井的渗流计算理论[M]. 北京: 水利出版社, 1980.  
Anhui Water Resources Research Institute. Theory of seepage flow for calculating layered media and relief ditches and relief wells[M]. Beijing: Water Resources Press, 1980.
- [4] 吴世余, 钱财富. 双层地基上堤身的渗流计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1569—1579.  
WU Shi-yu, QIAN Cai-fu. Seepage calculation for levees on foundation with double strata[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1569—1579.
- [5] 曹敦侣. 长江干堤渗流破坏的防治[J]. 人民长江, 1994, 25(1): 25—27.  
CAO Dun-lü. The prevention and cure of Yangtze River levees[J]. *Yangtze River*, 1994, 25(1): 25—27.
- [6] 丁留谦, 何秉顺, 孙东亚, 等. 不透水边界条件下双层堤基上盖重的渗流计算方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 7—12.  
DING Liu-qian, HE Bing-shun, SUN Ya-dong, et al. Seepage computation methods for landside seepage berms on two-stratum dike foundations with impervious boundaries[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(2): 7—12.