

求解非饱和土堤初始浸润线的一种解析法

朱 伟,秦建设,高玉峰

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 土堤的非饱和和非稳定渗流计算分析中,堤内初始的浸润线位置对计算结果影响很大.分析土堤受到降雨、蒸发、径流及入渗影响作用,引入平均渗透强度的概念,建立了土堤的水收支平衡模型.将前阶段土体内部的渗流场视为一个暂态稳定渗流场,推导了土堤由于长期水分运动特征引起的初始浸润线的解析解.通过对日本江户川堤防的浸润线实测值与解析解计算结果进行比较分析,得出较为合理的结果.并对长江永安堤防初始浸润线进行了计算分析.

关键词 非饱和和非稳定渗流 水收支模型 长江堤防

中图分类号 :TU441+.33

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2003)03-0314-04

在进行土堤的非饱和和非稳定渗流计算时,与计算模型和土质参数相同,初始条件也会对计算结果产生重大的影响.因此如果没有较为统一、合理的初始条件,非饱和和非稳定渗流的计算结果就难以具有合理性、比较性和实用性.

虽然非饱和和非稳定渗流的初始条件问题在很早就为一些学者^[1,2]提出,但到目前为止仍无简单实用的确定方法.朱伟^[3]在对堤防内水分量和浸润线进行了长期观测后,提出了经验性的推测方法.但这一方法仍然是以有限元计算为基础,存在确定方法较为复杂的问题.

初始条件中存在初始浸润线和水分量两个问题.本文首先建立土堤的水收支模型,通过确定土堤内的平均渗透强度,对土堤内初始浸润线的位置进行了理论求解.

1 水收支模型和平均渗透强度

初始浸润线的位置一般指洪水、暴雨渗透前土堤内浸润线的状态.这一状态与这些集中渗流作用前相当长时段内(以后称为前阶段)的降雨、蒸发密切相关.在前阶段中,虽然降雨和蒸发交互进行,但这一发生在土堤表面的交互作用只会导致土堤表层 1 m 左右土体发生湿润和干燥的交替,在更深的土堤内部则会形成一个相对稳定的渗流场^[3],其特征是水分缓慢的由上向下移动.而初始浸润线主要受这一渗流场的影响而决定其高低位置.

为了求解初始浸润线的位置,我们使用水收支模型研究前阶段渗流场的水分运移,根据其规律采用平均渗透强度来定量反映其特征.

土堤内的水收支模型是与降雨、蒸发、地表径流、孔隙水、地下水位等因素相关的.根据前阶段水循环的规律,可将其考虑为图 1 的模型.

其中堤防整体的水收支可以表达为

$$R + G_i = E + R_o + F_o + G_o \quad (1)$$

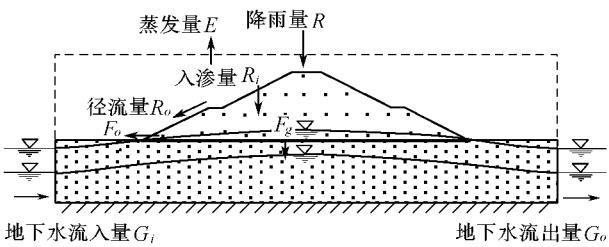
当地基为不透水层时, $F_g = 0$, 土堤水收支为

$$R = E + R_o + F_o \quad \text{或} \quad R_i = F_o \quad (2)$$

当地基为相对透水层时, $F_g \neq 0$, 此时

$$R = E + R_o + F_o + F_g \quad \text{或} \quad R_i = F_o + F_g \quad (3)$$

如果将水分干湿交替变化比较频繁的表层土除外的话,可将前阶段土体内部的渗流场视为一个暂态稳



注： F_i —向地基内的流入量； F_o —堤脚的流出量

图 1 土堤内的水收支模型

Fig.1 Water balance model for embankment

定渗流场来考虑.用平均渗透强度 I_a 来表达这一暂态稳定渗流场的入渗强度.以年平均渗透强度作为前阶段暂态稳定渗流场的入渗强度为例,此时

$$I_a = R_i/365$$
$$R_i = R - E - R_o$$

(4)

式中： R_i ——年入渗量，mm/d. 采用式(4)对几个城市计算的结果见表 1.

除使用年平均渗透强度外,还可结合地区水文、地质及堤型情况采用更能代表前阶段暂态稳定渗流场的平均渗透强度(如季平均渗透强度).

表 1 几个地区年平均渗透强度 I_a 的推测值

Table 1 Predicted values of annual average seepage intensity of several areas

地区	R/mm	R_o/mm	E/mm	$I_a/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$
东京	1600	320	700	1.60
合肥	900	180	450	0.80
南京	1100	220	500	1.05
广州	1700	340	600	2.10

2 几何对称土堤的初始浸润线

根据土堤内的水收支模型和平均渗透强度的概念,可将土堤的暂态稳定渗流场表达为图 2,然后对浸润线进行求解.

对于微小切片 dx ,雨水的入渗量 dq 为

$$dq/dx = I_a$$

(5)

当地基为不透水层时土堤内的水收支为式(2),也就是入渗量与堤脚流出量相等.土堤饱和和域内(浸润线以下部分)的渗流主要表现为水平流,其流量为

$$q = -k_e h (dh/dx)$$

(6)

式中： k_e ——土堤透水系数； h ——浸润线高度.

由土堤的几何对称性及堤脚出渗情况可建立边界条件：

$$x = 0 \quad dh/dx = 0$$

(7)

$$x = L_1 \quad h_0 = NI_a L_1/k_e$$

(8)

由式(5)(6)(7)(8)可得不透水层时的初始浸润线方程：

$$h = \sqrt{-\frac{I_a}{k_e}x^2 + \frac{I_a L^2}{k_e + I_a N^2}}$$

(9)

当地基为相对透水层时土堤内的水收支为式(3),同理可得初始浸润线方程：

$$h = \sqrt{-\frac{I_a - k_g}{k_e}x^2 + \frac{(I_a - k_g)L^2}{k_e + (I_a - k_g)N^2}}$$

(10)

3 几何不对称土堤的初始浸润线

当土堤两侧坡面不对称时,可将土堤的暂态稳定渗流场表达为图 3,然后对浸润线进行求解.

坡面不对称时的微分方程与对称时相同,但边界条件不同.从理论上分析,堤防内部饱和区域存在雨水

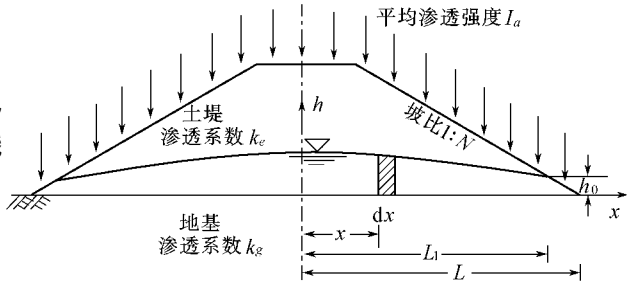


图 2 几何对称土堤的计算模型

Fig.2 Analysis model for symmetrical embankment

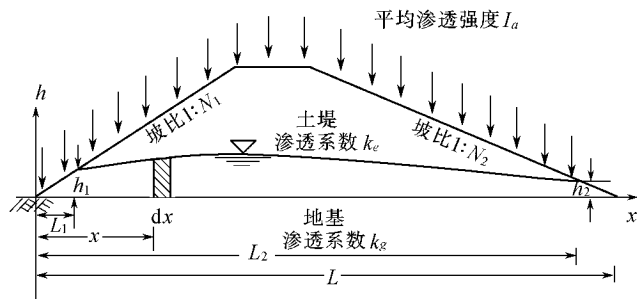


图 3 几何不对称土堤的计算模型

Fig.3 Analysis model for asymmetric embankment

流向分界线,此处流量为零,设其位置坐标为 x_0 ,建立边界条件:

$$x = x_0 \quad dh/dx = 0 \tag{11}$$

根据左右侧坡角出渗条件,同理可得非对称土堤的浸润线方程为

$$h = \sqrt{-\frac{I_a}{k_e}x^2 + \frac{2I_a}{k_e}x_0x + \frac{-I_a^2N_1^2}{k_e(k_e + I_aN_1^2)}x_0^2} \tag{12}$$
$$x_0 = \frac{-L(k_e + I_aN_1^2) \pm L\sqrt{(I_aN_1^2 + k_e)(I_aN_2^2 + k_e)}}{I_a(N_2^2 - N_1^2)}$$

式(12)适用于地基为不透水地层的条件,对于相对不透水地层可用 $I_a - k_g$ 代替 I_a 进行计算.

4 浸润线的计算结果

使用浸润线方程对两种土堤进行试算并与实测结果进行比较.

4.1 江户川试验堤浸润线实测值和计算值

对日本江户川堤防进行了一系列的现场实测试验,该堤防是用粉土筑造,其详细情况见图 4. 浸润线是通过堤底的水位计进行计测,由于堤底铺设了不透水粘土层,可以作为不透水地基计算. 计算结果见图 5. 随着平均渗透强度的增加,堤防内的浸润线增高. 当 I_a 为 2.0 mm/d 时,计算浸润线接近于较湿润的 10 月 4 日的实测值. 当 I_a 为 0.5 mm/d 时,计算浸润线接近于较干燥的 1 月 13 日的实测值. 因此可以认为,只要对于一个地区建立恰当的水收支模型,使用合理的平均渗透强度,就可利用浸润线方程计算出前阶段的初始浸润线.

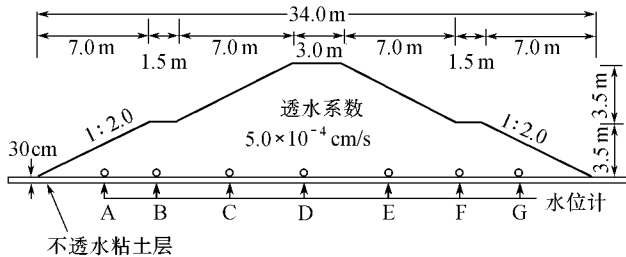


图 4 江户川实测堤防断面

Fig.4 Measured section of EDO River embankment

4.2 长江永安堤初始浸润线计算

长江永安堤防位于九江市上游,长度为 16.6 km,属 II 级堤防. 永安堤的断面见图 6,地基是典型的二元结构,1998 年洪水时发生喷砂冒水现象,堤身也发生了渗水等现象. 使用不对称土堤浸润线计算方程对初始浸润线进行计算. 由于地基是粘土或淤泥质粘土,可视作不透水地基计算,得到的计算结果见图 6.

与江户川堤防相比,在同等渗透强度下永安堤的浸润线要高出很多. 这主要是由两个条件的不同所引起,其一,永安堤的宽度是江户川堤防的 1.7 倍;其二,永安堤的透水系数是江户川堤防的 0.2 倍. 由此反映

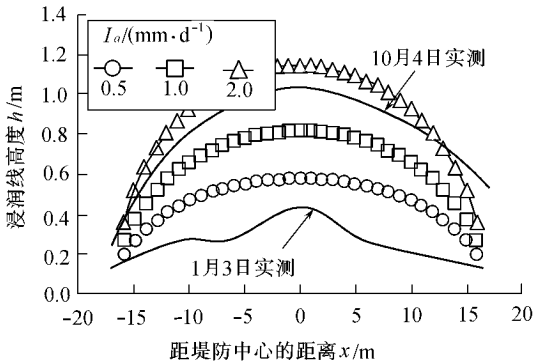


图 5 江户川堤防浸润线的实测值和计算值

Fig.5 Measured and calculated values of phreatic level of EDO River embankment

出堤防宽度越大,透水系数越小,初始浸润线越高的规律.

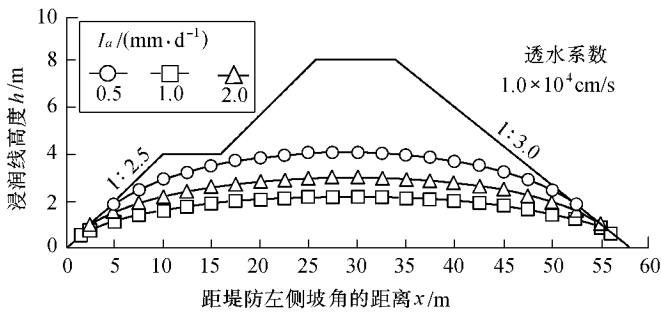


图 6 堤长江永安堤初始浸润线的计算值

Fig. 6 Calculated phreatic level of Yangtze River Yong'an embankment

5 结 论

通过建立土堤水收支模型、提出平均渗透强度的概念,推导了初始浸润线的解析解.通过对日本江戸川堤防计算结果与实测资料的对比,并对长江永安堤进行了试算,从中可知:(a) 土堤在接受豪雨、洪水渗透前的渗流场,可以视作一个暂态稳定渗流场,用这一渗流场的平均渗透强度来表达其特征.(b) 通过求解微分方程,可以得到这一暂态稳定渗流场在土堤内形成的浸润线的位置.所得到的浸润线方程形式简单,适用于具有各种形状和地基的土堤.(c) 通过与实测值的比较可以认为浸润线方程所计算的结果较为合理,能够反映土堤某一阶段的浸润线特征,可为非饱和非稳定渗流提供初始浸润线条件.

参考文献:

[1] PHILIP J R. The theory of infiltration 1 the infiltration equation and its solution[J]. Soil Sci, 1957, 83: 345—357.
[2] PHILIP J R. The theory of infiltration 2 the profile at infinity[J]. Soil Sci, 1957, 83: 435—448.
[3] 朱伟,山村和也. 堤防の長期的な水分量の變動[A]. 日本土木學會論文集[C]. 日本東京: 日本土木學會, 1997, 41 (582): 99—108.

Analytic method to solve initial phreatic level for unsaturated embankments

ZHU Wei, QIN Jian-she, GAO Yu-feng

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In calculation of unsaturated unsteady seepage through embankments, the initial phreatic level affects the calculated result significantly. In this paper, an analysis is made of the effects of precipitation, evaporation, runoff, and infiltration, and a water balance model is developed for embankments by introduction of the concept of average infiltration intensity. Furthermore, an analytic solution to the initial phreatic level caused by long-term moisture movement is derived for embankments with the seepage field in the embankment taken as a transient steady flow field. The model is applied to the calculation of the phreatic level of the EDO River embankment and the Yong'an embankment, and some reasonable conclusions are drawn from a comparison of the calculated results with the measured data.

Key words: unsaturated unsteady seepage; water input-output balance model; Yangtze River embankment