

基坑渗流稳定分析

位俊俊¹, 张利伟², 孔德志¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004;

2. 新乡高新技术产业开发区管理委员会交通城建局, 河南 新乡 453000)

摘要: 在透水性较强的地层中, 基坑渗流稳定是保证基坑安全的重要因素之一。结合清明上河园地下停车场基坑工程, 研究渗流对基坑安全稳定的影响, 及渗流情况下基坑稳定的判别、分析计算方法。对影响基坑渗流的一些因素进行了探讨, 提出了基坑渗流稳定分析的控制原则, 提出了控制基坑渗流稳定的工程措施和建议。

关键词: 基坑; 渗流; 稳定; 安全; 流网

中图分类号: TU761.11

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)03—0079—04

Analysis on Seepage Stability of Foundation Pit

WEI Jun-jun¹, ZHANG Li-wei², KONG De-zhi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China;

2. Transportation and Urban Construction Bureau, Administration Committee of Xinxiang
HI-TECH Industrial Development Zone, Xinxiang, He'nan 453000, China)

Abstract: The seepage stability is an important factor to insure the safety of the foundation in a strong permeability formation. Combined with the foundation pit engineering of Qingming River Park's underground parking area, the effect of seepage to the safety and stability of the foundation pit is studied, and the discrimination and analysis methods for the stability of the foundation pit are studied with the consideration of seepage effect. Simultaneously, the factors effecting the foundation pit seepage are discussed, and the control principle for the analysis of foundation pit seepage stability is put forward. At last, the engineering measures and suggestions to control the seepage stability of foundation pit are proposed combined with engineering projects.

Keywords: foundation pit; seepage; stability; safety; drift

随着城市建设的高速发展, 城市三维开发的要求日益迫切, 人们开始向空中和地下寻求发展空间。目前各类用途的地下空间已经在世界各大城市中得到开发利用, 如高层建筑多层地下室、地下铁道及地下车站、地下停车库、地下街道、地下商场等。开发地下工程的共同特点是要进行土体开挖, 导致大量基坑的产生^[1-2]。在基坑设计计算中不仅要考虑基坑的安全稳定性, 同时还应考虑其止水性及渗流稳定性。渗流在基坑工程中会带来流砂、流土、管涌等现象, 给基坑工程本身及周围建筑物和管线的安全造成极大威胁。本文结合清明上河园地下停车场基坑工程, 就基坑渗流计算和基坑渗流稳定进行分析探讨。

1 分析方法

1.1 渗流计算方法及其特点

解决基坑渗流问题, 主要是求解渗流场, 并进一步求解地基内任意一点处的渗流水头、渗流压力、渗流梯度、渗流速度、压力以及通过任意截面的渗流量等渗流要素。目前渗流计算的方法很多, 归纳起来分理论分析方法和试验分析方法两大类, 其中理论分析法又可分为解析法、数值方法和图解法^[3]。本文采用图解法——流网法, 进行二维渗流计算。

1.2 流网的性质及绘制方法

1.2.1 流网的性质

对于二维渗流, 可用下式来描述:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial y^2} = 0 \tag{1}$$

式中： $\varphi(x, y)$ 为渗流水头函数。

式(1) 的解答为两组互相正交曲线, 通常称为等势线和流线。其中流线反映的是水流的方向, 流线上任一点的切线方向即为流速矢量方向, 二者具有正交性^[3]。等势线是水头相等的各点的连线, 因此等势线上各点之间的水头差 $\Delta H = 0$ 。

如图 1, 由流网的定义及达西定律有

$$\Delta Q_1 = k \frac{\Delta H_1}{l_1} \cdot b_1 \times 1 = k \frac{\Delta H_2}{l_2} \cdot b_2 \times 1 \tag{2}$$

$$\Delta Q_2 = k \frac{\Delta H_3}{l_3} \cdot b_3 \times 1 \tag{3}$$

当 $\frac{b_1}{l_1} = \frac{b_2}{l_2} = \dots = \frac{b_i}{l_i}$ 时, 由公式(2)(3) 得

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = \dots \Delta H_i \tag{4}$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \dots \Delta Q_i \tag{5}$$

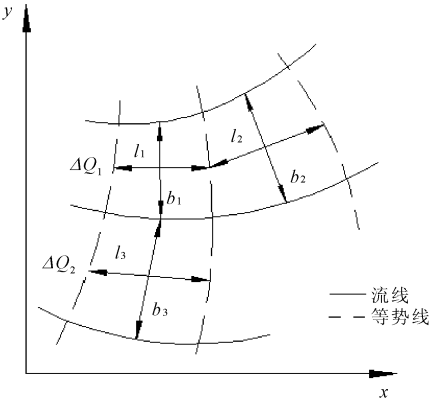


图 1 流网中流线与等势线关系

1.2.2 流网的绘制

流网的绘制有试验法、手绘法和计算法三种, 其中手绘法较为简单、直接, 常被采用。本文简要介绍流网的手绘方法。

由流网性质可知, 当 $\frac{b_i}{l_i} = 1$, 流网中各流区为“方块”, 即曲边正方形, 这种情况下便于流网的绘制及流网质量的检查。流网绘制方法: 首先按照流水的流动趋势画出流线, 然后根据流网正交性画出等势线, 形成流网。如发现所画的流网不成曲边正方形时, 需反复修改流线和等势线, 直至使绝大多数网格形成曲边正方形。

2 渗流计算及渗流稳定的判断方法

2.1 渗流计算

渗流计算所用流网见图 2。

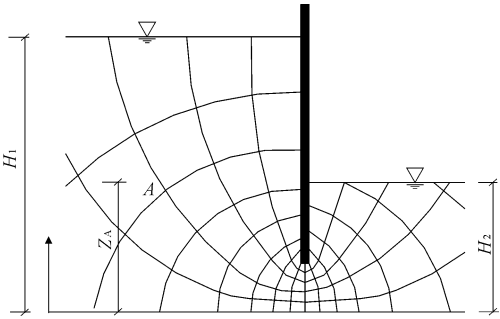


图 2 流网图

设整个流网的流线数量为 m (包括边界流线), 等势线的数量为 n (包括边界等势线), 则上下游总水头差 H

$$H = H_1 - H_2 \tag{6}$$

任意两等势线间的水头差 ΔH

$$\Delta H = \frac{H}{n - 1} \tag{7}$$

任意网格的平均渗流速度 v

$$v = kJ_i = k \frac{\Delta H}{l_i} = \frac{kH}{(n - 1)l_i} \tag{8}$$

任意两相邻流线间的单位渗流量 ΔQ

$$\Delta Q = vb_i = \frac{kHb_i}{(n - 1)l_i} \tag{9}$$

单位宽度内总的渗流量 Q

$$Q = (m - 1) \cdot \Delta Q = \frac{(m - 1)kHb_i}{(n - 1)l_i} \tag{10}$$

任意一点 A 的水头损失 H_f

$$H_f = (n_A - 1) \cdot \Delta H \tag{11}$$

任意一点 A 的水头高度 H_A

$$H_A = H_1 - (n_A - 1) \cdot \Delta H \tag{12}$$

测压管水柱高度 h_A

$$h_A = H_A - Z_A = H_1 - (n_A - 1) \cdot \Delta H - Z_A \tag{13}$$

任意一点 A 的孔隙水压 u_A

$$u_A = \gamma_w \cdot h_A \tag{14}$$

式中: m 为整个流网的流线数量 (包括边界流线); n 为整个流网的等势线数量 (包括边界流线); n_A 为 A 点所在等势线的位置, 从上游算起; b_i 为任意网格沿等势线方向的长度; l_i 为任意网格沿流线方向的长度; J_i 为任意网格的水力梯度, $J_i = \frac{\Delta H}{l_i}$ 。

2.2 渗流稳定的判断

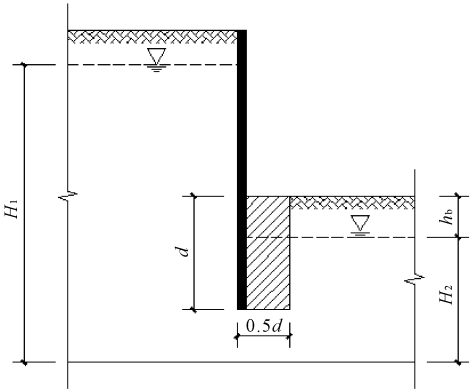
2.2.1 基坑渗流稳定问题的分类

根据基坑内水位状况不同, 将基坑渗流问题分为两类:

(1) 当基坑内水位位于基坑底以下时 (图

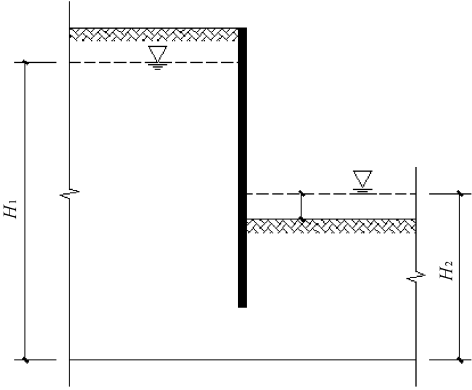
3(a)),渗流作用下,渗流水可能冲破基坑底,引发基坑突涌,并引发更大的次生灾害。

(2) 当基坑内水位位于基坑底以上时(图



(a) 第一类渗流

3(b)),渗流作用下,可能会引发流砂、流土现象,严重时会造成基坑局部乃至整体失稳。



(b) 第二类渗流

图 3 基坑渗流分类

2.2.2 基坑渗流稳定的判别

对于第一类渗流,应进行基坑突涌验算。

目前基坑抗突涌计算常用的方法用上覆土层的重力来平衡水压力,按下式计算

$$K_1 = \frac{W}{P} \tag{15}$$

式中: K_1 为安全系数; W 为上覆土层自重应力(kPa); P 为作用在上覆土层底面上的水压力(kPa)。

对于上覆土层整体性好、渗透性差的情况(如水泥搅拌桩复合地基),可以将其作为一个整体来抵抗水压力来考虑,当上覆土层受到的水压力大于上覆层总重,则上覆层就会发生突涌破坏,反之,不会发生突涌破坏。实际工程中,往往取大于 1 的安全系数,当安全计算值 K_1 大于该安全系数时,基坑不会发生突涌破坏,反之,基坑会发生突涌破坏。

对于上覆层整体性差、渗透性大的情况,土体会发生渗流,式(15)已不在适用,这种情况下判别准则为:当上覆层最薄弱处的渗透力大于其有效重力时,上覆层会发生破坏,反之安全。当支护结构深入基坑底部以下深度太浅时,可能在宽度为 0.5 倍入土深度范围内发生土体的渗透破坏^[4]。靠近止水带,宽度 0.5 倍止水带线贯入深度范围内,水流基本上沿竖直方向渗流,因此该部分土体最容易发生破坏,选择该部分土体作为分析对象(图 3(a))。分析时沿岸有考虑隔离体侧面与周围土体的摩擦,作为安全储备。按下式计算。

$$K_2 = \frac{W'}{G_D} \tag{16}$$

$$W' = \frac{(\gamma h_b + \gamma' d) d}{2} \tag{17}$$

$$G_D = \frac{\gamma_w \cdot J \cdot d^2}{2} \tag{18}$$

$$J = \frac{h_B - h_A}{d} \tag{19}$$

式中: K_2 为安全系数; W' 上覆土层单位宽度有效重力(kN/m); G_D 为作用在上覆土层单位宽度动水压力(kN/m); h_b 为基坑内水面以上覆土厚度; γ 、 γ' 分别为土的重度、有效重度; H_A 、 H_B 为 A、B 点的水头高度; J 为水力梯度。

对于第二类渗流(图 3(b)),水面位于基底以上,渗流作用下极易产生流砂、流土现象,应对其进行判别。当水流在水头差的作用下对土颗粒产生向上压力时,动水压力不但使土颗粒受到水的浮力,而且还使土粒受到向上的压力,当动水压力等于或大于土颗粒的有效重度 γ' 时,则土颗粒处于悬浮状态,土体的抗剪强度等于零,土颗粒随着渗流水一起流动,产生流砂现象^[5]。发生流砂、流土现象的临界条件为:

$$G_D = \gamma_w \cdot J = \gamma' \tag{20}$$

式中: G_D 为作用在上覆土颗粒上的动水压力(kN/m³); γ_w 为水重度(kN/m³); γ' 为基坑底面处土的有效重度(kN/m³); J 为基坑底面处水力梯度。

应用时取大于 1 的安全系数 K_3

$$K_3 = \frac{\gamma_w \cdot J}{\gamma'} \tag{21}$$

2.2.3 影响基坑渗流因素的分析及预防基坑渗流措施

由上述内容可知,影响基坑渗流及稳定的关键因素主要是基坑内外水头差、渗流路径长短、渗透系数及坑底岩土の强度。结合影响基坑渗流稳定的因素,可以采取以下主要措施。

- (1) 基坑内外同时降水,以减小基坑内外水头差。
- (2) 增加止水帷幕嵌入基坑底以下的长度,以增长渗流路径。
- (3) 加固基坑底,减小其渗透系数并增大其强度。

3 工程实例

3.1 工程概况

该工程名称为清明上河园地下停车场基坑工程,位于河南省开封市,基坑长 96.3 m,宽 64.0 m,深 10.5 m,地下水位于地表 2.0 m,北临龙亭湖,地下水系发达,泥土搅拌桩止水(桩长 16 m),坑内采用深井降水,降至基坑底面 0.5 m。不透水层位于地下 19 m 处,基坑底以下爲粉土夹粉砂,渗透系数综合取 3.25 m/d(3.76×10^{-3} cm/s)。

3.2 渗流稳定计算

计算用渗流流网划分图见图 4。根据文中 2.1 节渗流计算公式得单位宽度内总的渗流量

$$Q = 1.13 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s} = 9.75 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$$

各点渗流要素,见表 1。

渗流稳定验算

由公式(17)和(18)

$$W' = 149.88 \text{ kN/m}$$

$$G_D = 66 \text{ kN/m} > W'$$

$$K = \frac{W'}{G_D} = \frac{149.88}{66} = 2.27$$

渗流稳定验算满足。
FLAC^{3D}模拟计算云图见图 5。

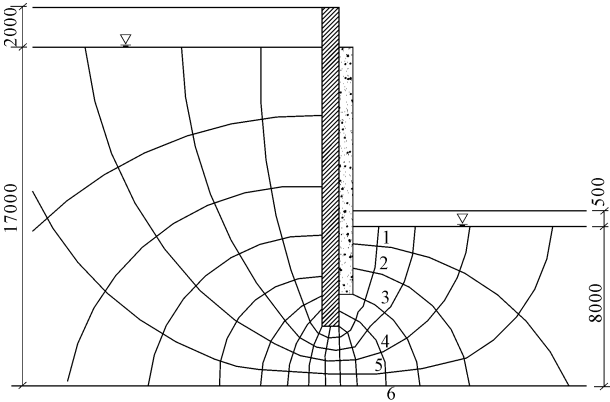


图 4 流网划分图

表 1 流网中各点渗流要素

点号	距基底 距离/m	水头高 度/m	测压管 高度/m	孔隙水 压/kPa	FLAC ^{3D} 计 算结果/kPa
1	0.5	8.0	0	0	0
2	1.4	8.6	1.5	15	0 ~ 20
3	2.8	9.2	3.5	35	20 ~ 40
4	4.8	9.8	6.1	61	40 ~ 60
5	5.7	10.4	7.6	76	60 ~ 80
6	6.8	10.4	8.7	87	80 ~ 100
7	7.8	10.4	9.7	97	80 ~ 100
8	8.5	10.4	10.4	104	100 ~ 120

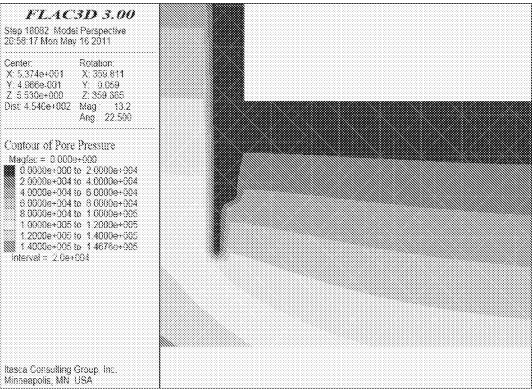
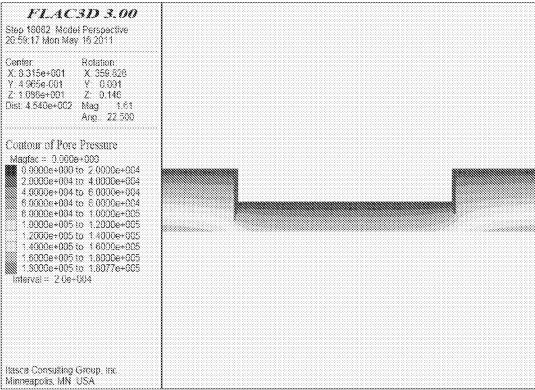


图 5 FLAC^{3D}模拟计算结果云图

3.3 工程施工情况

本工程于 2010 年 4 月开始施工并正常投入使用。在基坑开挖过程中经监测和观察^[6],基坑侧壁

出现渗水现象,坑外水位急剧降低,但坑底未出现相应的冒水和冒砂现象。立即停止了开挖并对渗漏侧壁采用水泥封堵。
(下转第 87 页)

(上接第 82 页)

经分析,由于基坑开挖较深,水泥土搅拌桩较长,水泥土搅拌桩施工过程中垂直偏差超出控制范围,造成桩末端交接不完整,地下水直接从搅拌桩间隙流过,从而出现了局部渗流破坏现象。根据本工程出现的实际问题,本工程采取补桩和注浆措施,即在出现问题该部位的桩外侧进行补桩,并在交接不严的桩间进行注浆的措施。采取措施后,流砂现象得到了控制,基坑外水位得到了恢复,工程继续安全进行。工程现已竣工。

4 结 论

(1) 渗流会对基坑稳定构成威胁,深大基坑必需进行专门的渗流计算,以确保基坑安全。

(2) 流网法计算基坑渗流问题,求解简单,且具有一定精度,能够满足工程要求。

(3) 渗透破坏在透水性较强的基坑中也会发生,

特别是在挡墙(板、桩)附近,流线密集,渗流严重。

(4) 对基坑工程,施工与设计应密切结合。施工中应确保止水帷幕的连续搭接,才能保证相应的止水效果。

参考文献:

- [1] 侯学渊,刘国彬,黄院雄.城市基坑工程发展的几点看法[J].施工技术,2000,29(1):5-7.
- [2] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [3] 顾慰慈.渗流计算原理及应用[M].北京:中国建材工业出版社,2000.
- [4] 柯 华,李 明,朱时华,等.浅谈深基坑渗流分析问题[J].中华建设,2009,(8):78-79.
- [5] 赵志缙,应惠清.简明深基坑设计手册[M].北京:中国建材工业出版社,2000.
- [6] 瞿鸿飞,田 谷,续若楠.基坑工程支护施工和监测策略研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(4):73-75.