

地下水渗流对基坑稳定性影响

成立芹

河北建筑工程学院数理系

摘 要 论述了基坑开挖过程中常用的降水方法——明沟排水和井点降水以及相应的水流运动;简要阐述了动水压力分析法和管涌(流砂)的产生机理,导出渗流力公式和管涌的安全系数,对影响基坑水力稳定的因素作简要评述;分析了基坑深开挖过程中渗流场的变化规律及对应力场变化的影响,忽略固结效应,将渗流场的水力作用与应力场耦合,力图通过这种分析,以求得地下水渗流对基坑稳定性影响的基本规律的认识。

关键词 动水压力;管涌;渗透力;渗流场;应力场;流固耦合

中图分类号 TU 4

1 基坑降水及动水压力分析

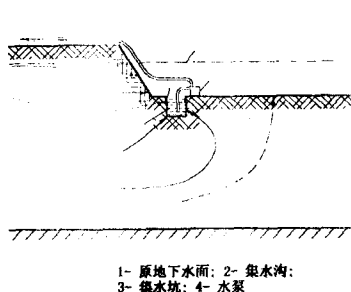
1.1 地下水的运动形式

基坑降水过程的主要研究对象是地下水及其运动的基本规律,因此有必要简要了解一下地下水。地下水是指存在于地表以下岩、土中的孔隙、裂隙或空洞中的水,主要是由渗透和凝结作用形成的。地下水按埋藏条件和含水层空隙的性质可分为上层滞水、潜水、承压裂隙水和岩溶水。地下水的运动有层流和紊流两种形式,层流的流线互不相交,而紊流有流线交错现象。

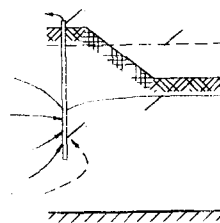
1.2 基坑降水方法

基坑降水方法有明沟排水和井点降水两种。

(1) 明沟排水,又叫表面排水,是利用设置在基坑内(或外)的明沟、集水井和抽水设备把地下水从集水井中不断排走,保持基坑干燥。



1- 原地下水面; 2- 集水沟;
3- 集水井; 4- 水泵



1- 原地下水面; 2- 井管;
3- 井管进水段过滤器; 4- 排水后降低的地下水面

图1表示了明沟排水的水流运动路线。图1 沿边挖沟排水 图2 在基坑周围布置井点降水
此法对于土质好而又不深的基坑时设备和施工比较简单,管理方便,但不易疏干基坑,同时需随着基坑开挖加深而不断修建,对砂土和砂壤土还需防止滑坡或流砂现象的产生。

(2) 井点降水,其原理是在基坑周围按一定间距布置井点从中连续抽水,使井周围的地下水位下降而形成所谓的“地下漏斗”,则井之间的地下水位也将降低,并降低到坑底设计标高以下,从而保证开挖工作可在干燥无水的情况下进行,如图2所示。此法的优点是抽水时水流运动方向向下,土受到动水力的作用而得到压实,同时增加坑壁的稳定性,且施工方便,但其缺点是水位下降后,土的重度有浮重度变为饱和重度,增加了土的自重应力,再加动水力的作用,可能引起周围建筑物过大而不均匀的附加沉降,所以利用井点降水过程中应对附近建筑物及地下水位进行专门观测。

本文收稿日期: 2001-08-27

作者: 女, 1969年生, 讲师, 张家口市, 075024

另外在实际工程中,往往向基坑周围及坑底用一定的方式压入或注入具有一定防渗强度的水泥浆混合物,形成止水屏障,进行隔渗.此法安全性高,防渗性好,但施工质量难以保证,且造价高.因此实际中经常将井点降水与隔渗法结合起来应用.

1.3 动水压力分析方法

边坡中的地下水以多种方式影响边坡的稳定性,地下水压力乃是其中一个重要方面.因为地下水可改变边坡岩土体的应力状态和力学性质,并可急速的变化,以致成为边坡破坏起主导作用的触发因素.所谓地下水压力系指地下水对岩土体的力学作用的总称,包括地下水静水压力和动水压力.动水压力亦称渗透压力,是地下水渗流受到岩土颗粒或隙壁阻碍而施加于岩土体的作用力.它反映了地下渗流在渗透过程中总水头损失的那部分空隙水压力转化为作用在水流方向的有效压力,与水力坡度成正比.渗流速度一定时,渗流的动能与质量成正比,任一给定范围内单位体积渗流的渗透压力为

$$f = -\gamma_w \cdot I \quad (1)$$

式中 γ_w 为水的重度; I 为水力坡度.

在渗流过程中,若水自下而上流动,则动水力的方向与重力方向相反,减小了土粒之间的压力.当动水力等于土的浮重度 γ' 时,即: $f = (1-n)(d_s-1) \gamma_w$ (2)

此时土粒之间毫无压力,理论上处于悬浮状态,它将随渗流水一起流动,这就是渗流破坏产生的原因.动水力使土开始产生渗流破坏时的水力坡度称为临界水力坡度(i_{cr}).渗流破坏的发生形式不仅决定于动水力的大小,同时还与土的颗粒级配、密度、透水性等条件有关.

2 抗渗透(管涌)稳定分析方法述评

深度较大的基坑在动水压力的作用下,比较容易发生管涌现象.所谓管涌是指在渗流水的作用下,土中的细小颗粒被冲走,土的空隙扩大,逐渐形成管状渗流通道的现象.地基开挖过程中,由于降水使得基坑内外形成较大的水力梯度,产生较大的渗流力,如不加处理则可能在坑底或坑壁产生流砂或管涌现象,造成基坑破坏或临近建筑物的毁坏.因此实际工程中通常在基坑的周围设置止水帷幕,来抵抗渗流.

2.1 几类典型的基坑防渗

深基坑周围的地下水渗流特征与场地的水文地质条件,防渗帷幕的埋入深度,基坑抽水反灌的层位等有关,具体分为以下几类:第一类基坑:基坑防渗帷幕打入不透水岩层中,防渗帷幕的止水效果良好,井点降水以疏干基坑内的地下水为目的,抽出的水反灌到潜水含水层里面(图3).这种情况基坑内外无水力联系,坑内降水不影响坑外地下水位.这种基坑深度一般小于10~15m.

第二类基坑:地层结构如图4,基坑的防渗帷幕打入弱透水层,井点降水以维持基坑开挖为目的.这种情况当水力坡度较大时,地下水可透过弱透水层由防渗帷幕下端流向基坑底部,基坑内外有水力联系.抽出的水只能反灌到深层的承压含水层,否则基坑内外的水头差更大,渗流加快,对基坑稳定不利.

第三类基坑:防渗帷幕打入承压含水层,井点降水以前期降低承压含水层水头,后

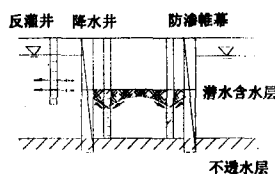


图3 第一类基坑

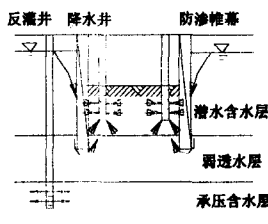


图4 第二类基坑

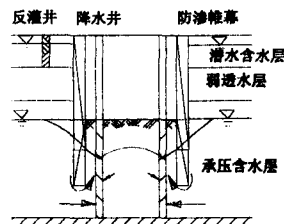


图5 第三类基坑

为目的. 基坑内外的含水层仅在底部未被隔开. 由于防渗帷幕阻挡, 上部地下水不连续, 而底部含水

层连续相通。抽水过程中,坑内外水位降相差增大,地下水绕过防渗帷幕进入降水井,抽出的地下水反灌到潜水层使之水位上升,但不会产生渗流力作用在基坑底部。

2.2 渗流力对坑底流砂的影响

第一类基坑底部不存在渗流力,因此不会出现涌砂现象。

第二类基坑最易出现涌砂现象,因为由(1)式知,基坑内外水头差 dH 越大,渗流路径 d 越短,渗流力越大。帷幕四周的地下水平面渗流,根据二维渗流方程,防渗帷幕、基坑中轴线、基岩面均作为不

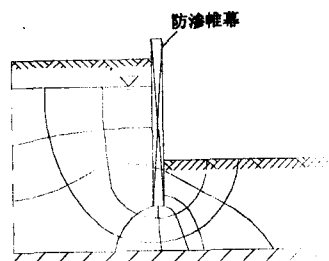


图6 基坑防渗帷幕周围流网

透水面,渗流区外缘与基坑地面作为定水头边界,用数值法可确定帷幕四周任一点的水头值,绘制成流网(图6)。由图可看出等势线与防渗帷幕垂直,说明流线与防渗帷幕平行;基坑底部流线基本垂直向上,帷幕下端附近等势线变密,流网方块变小,说明地下水在此有较高的流速,水头损失较大。因此,基坑中易出现涌砂的部位是在防渗帷幕下端附近。

第三类基坑的渗流力相对较小,因为潜水含水层被防水帷幕阻挡,只有承压含水层的水向基坑渗流,水力坡度较小,因此渗流力较小。

2.3 管涌安全系数及防渗帷幕埋入深度的确定

若采用单位体积渗流力法,可用绘制流网的方法求得渗流力。作法是先绘制基坑防渗帷幕周围的

流网,求防渗帷幕下端中点到基坑范围平均单位体积的渗流力: $\bar{J} = r_w \frac{h_1 - h_2}{S} \cdot \frac{n_i}{n_p}$ (3)

式中 h_1 是帷幕外侧水头; h_2 是基坑底部水头; S 是帷幕下端至基坑底部的距离; n_i 是帷幕下端至基底范围内等势线的数目; n_p 是流网等势线的分段数目。产生流砂的条件是:

$$\bar{J} > \gamma' \quad (\gamma' \text{ 为基底以下土的浮重度}). \text{ 流砂的安全系数: } F_s = \frac{r'}{\bar{J}} = \frac{r' \cdot S \cdot n_p}{r_w (h_1 - h_2) n_i} \quad (4)$$

$$\text{若采用临界水力坡度法,则得流砂安全系数为: } F_s = \frac{i_c - \frac{d_s - 1}{1 + e} \cdot \frac{S}{mH}}{i_c} \quad (5)$$

防渗帷幕埋入深度可以采用反算法求得,一般安全系数取2~2.5。

3 影响基坑水力稳定的因素分析

基坑的破坏原因,总体上可分为两种:

第一种破坏主要决定于局部地质条件的变化及施工情况等偶然因素。如地层的变化、基坑的坡度、自然降水造成地下水位上升以及防渗帷幕的止水效果等。实践经验表明,具备下列性质的土在一定的动水压力下易发生流砂现象:颗粒级配中,土的不均匀系数小于5;土颗粒组成中,粘粒含量小于10%,粉粒含量大于75%;土的天然孔隙比大于0.75;土的天然含水量大于30%。

第二种破坏也是最主要的破坏则是由于地下水的影响造成的。一是孔隙水压力对基坑稳定性的影响:在饱和的软粘土地基中,凡是应力场的微小变化,首先就引起孔隙水压力的变化。根据有效应力原理其变化关系可由下式表示:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma' + \mu \\ \Delta \mu = B [\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \end{cases}$$

式中 σ 是总应力, σ' 是有效应力, $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_3$ 分别是大小总主应力的增量。应力场发生变化后可产生正的孔隙水压力,也可产生负的孔隙水压力。因为土骨架上有效法向应力等于总应力与孔隙压力两者之差,所以在不排水条件下孔隙压力的变化主要影响骨架上有效法向应力的变化,而对作用在骨架上的剪应力大小无影响。二就是前面所述的渗流力对基坑稳定的影响,此不再赘述。此外还有一种基坑抗承压水层的基坑稳定,如果基坑底部的不透水层较薄,而且在不透水层的下面具有较大

水压的滞水层或承压水层时,当上覆土重不足以抵挡下部的水压时,基底就会破坏,墙体就会失稳.

4 基坑渗流场有限元分析的若干主要问题分析

存在于土体孔隙中的水,影响到土颗粒之间的平衡状态.在力学现象与水力现象之间有十分密切的相互作用:水流影响到应力状态,应力状态的变化又使孔隙介质中水的渗透空间变化导致其水力特征的改变.解决深基坑开挖稳定性问题就应对地下水流对孔隙介质产生的渗透体积力给予高度重视.它反映出地下水渗流与开挖应力状态的相互影响,即渗流场与应力场的相互耦合.进行这种耦合分析,目的是了解控制地下水流体力学作用规律,并把这种力学作用反映到模拟土力学性质的模型中去.数值分析中的有限元法(FEM)可将水力模型和力学模型集合起来,分析其耦合作用对基坑稳定的影响规律.

4.1 渗流连续微分方程

$$\text{平面坐标}(x,z)\text{内渗流连续微分方程为: } \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

式中 $S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$ —单位贮水量或贮水率,它表示单位饱和土体的体积内,当降落1个单位水头时,土体的压密和水的膨胀所释放的贮存水量,当忽略水体的压缩性时 $S_s = \rho g\alpha$; n 为土体的孔隙率; k_x, k_z 分别为 x, z 方向的渗透系数.若渗流场水头变化很小,即 $\frac{\partial H}{\partial t} \rightarrow 0$,可作为稳定渗流来研究,式(6)为拉普拉斯方程;结合自由面的补给边界条件时可解非稳定流问题.

4.2 基坑渗流场的定解条件

渗流连续微分方程的定解条件如图7:

$$\text{初始条件: } H(x, z, t)|_{t=0} = \phi_0(x, z)|_{(x, z)} \quad (7)$$

边界条件:

$$\text{水头边界: } H(x, z)|_{\Gamma_1} = \phi(x, z)|_{(x, z)} \quad (8)$$

$$\text{流量边界: } K \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2} = q(x, z)|_{(x, z)} \quad (9)$$

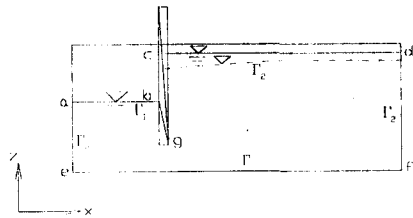


图7 计算基坑排水渗流的边界条件

$$\text{对于自由面作为流量补给边界属于第二类边界条件: } q = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \cos \theta \quad (10)$$

式中 μ 为土体的给水度.自由面上的结点水头值还必须满足 $H^* = z$.

4.3 有限元数值模拟

采用任意四边形等参单元,渗流场离散,对所有单元进行耦合,写成矩阵形式,并用差分表示时间项,有:

$$([K] \frac{1}{\Delta t} [S]) \{H\}_t + \frac{1}{\Delta t} [P] \{H\}_t - \frac{1}{\Delta t} [S] \{H\}_{t-\Delta t} - \frac{1}{\Delta t} [P] \{H\}_{t-\Delta t} = [F] \quad (11)$$

式中 $K_i = \sum_{j=1}^n K_{ij}$; $S_i = \sum_{j=1}^n S_{ij}$; $[P] = \sum_{j=1}^n P_{ij}$; $[F] = \sum_{j=1}^n f_{ij}$; H^* 表示自由面的水头.

以应力场初始单元网格信息绝对不变,求解渗流域将是自由面下的初始单元与自由面穿过初始单元形成局部区域构成,自由面切割初始单元形成的渗流区域称为子单元,相应的被自由面穿过的初始单元称为母单元.则新的渗流域由自由面以下的初始单元和子单元构成.初始单元信息已知,根据子单元与其相应的母单元的关系可以确定子单元信息.计算中反复修改自由面位置,丢弃上一次的子单元,产生新的子单元,子单元及其结点编号仍在初始单元及其结点编号的基础上产生.

由(1)式知渗透力可表示为: $D = -\gamma_w J$, 其中 $J = \left\{ \frac{\partial H}{\partial n} \right\}$ —水头梯度.

$$(1) \text{ 自由面以下渗透力在初始单元上的等效结点力为: } \{R\} = -r_w \iint_{\Omega} [N]^T \left\{ \frac{\partial H}{\partial n} \right\} dx dz \quad (12)$$

$$(2) \text{ 自由面处子单元渗透力在初始单元上的等效结点力为: } \{R\} = -r_w \iint_{\Omega} [N]^T \zeta_{i,n} [N]^T \left\{ \frac{\partial H}{\partial n} \right\} dx dz \quad (13)$$

式中 $[N]^T \zeta_{i,n}$ 为母单元形函数在子单元对应的高斯点 (ξ_i, η_i) 上的值.

应力场分析的本构关系为:

$$(1) \text{ 切线模量: } E_t = K \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \left[1 - \frac{R(1-\sin\theta)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C\cos\theta + 2\sigma_3\sin\theta} \right]^2 \quad (14)$$

$$(2) \text{ 体积模量: } B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (15)$$

$$(3) \text{ 卸荷一再加荷弹性模量: } E_w = K_w P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (16)$$

$$(4) \text{ 加卸荷准则: 由应力水平 } S, \text{ 当 } S > S_c \text{ 为加荷, } E \text{ 按式 (14) 计算; 当 } \frac{3}{4} S_c < S < S_c \text{ 属于部分卸}$$

$$\text{荷, 切线变形模量为: } E_t = E_i + \frac{S_c - S}{S_c - 0.755} (E_w - E_i) \quad (17)$$

当 $S \leq \frac{3}{4} S_c$ 为全卸荷, $E_t = E_w$, 按式 (16) 计算.

4.4 开挖过程的分析

(1) 基本假设. 1) 应力场按平面应变问题分析. 利用对称性取半截面进行渗流与应力的耦合分析; 2) 土体初始应力状态按静止土压力计算; 3) 支护结构具有良好的防水性能, 构成渗流场的防水边界; 4) 应力场非线性问题按中点增量法求解; 5) 支护结构抽象为弹性梁单元, 分析中不考虑土体与支护结构之间可能发生的脱离与滑动; 6) 基坑降水假定为与开挖同步的坑内排水.

$$(2) \text{ 初始应力状态场的确定: } \begin{cases} \sigma'_{x0} = rh \\ \sigma'_{z0} = K_0 \sigma'_{x0} = K_0 rh \\ \tau_{x0} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 σ'_{x0} —初始有效竖向应力; σ'_{z0} —初始有效水平向应力; τ_{x0} —初始剪应力; r —土的重度; h —计算点深度; K_0 —静止土压力系数, $K_0 = 1 - \sin\theta'$, θ' 是有效内摩擦角.

开挖荷载是开挖边界上的卸载结点荷载, 等效于该边界上的初应力:

$$\{F\} = \left[\sum_{i=1}^M [B]^T \{ \sigma'_0 \} dV + \sum_{i=1}^M [N]^T r_w dV \right] + \{R\} \quad (19)$$

式中 M —某开挖阶段被挖去的单元数; $\{R\}$ —应力场内渗透等效结点力.

(3) 单元破坏的修正. 设土的抗拉强度为 σ_p , $\sigma_3 < \sigma_p$ 时, 把 σ_3 修正为零, 即拉裂后单元不再承受拉应力. 剪切破坏时假定只改变土体形状, 而不改变体积, 则修正后的应力分量为:

$$\tau'_{xz} = \tau_{xz} \left[\frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sin\theta + C\cos\theta}{2} \right] / \sqrt{\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right]^2 + \tau_{xz}^2} \quad (20)$$

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3 + \sigma_1 + \sigma_3}{2} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \frac{\tau'_{xz}}{\tau_{xz}} \quad (21)$$

将不平衡应力 $\{\Delta\sigma\} = \{\sigma\} - \{\sigma'\}$ 化为相应的等效结点荷载进行迭代计算.

(4) 耦合效应. 渗流场与应力场相互影响和相互制约, 渗流所产生的静水压力和动水压力而改变渗透介质的应力状态, 渗透介质的透水性也将随应力场的变化而变化, 即介质应力状态的改变, 将导致其渗透张量的变化, 即 $K_t = G(\sigma_u)$, 计算公式为: $K = K_0 \left[\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_{oct0}} \right]^{2n}$ (22)

式中 K_0 —初始渗透系数; C_c —压缩系数; σ_{oct} —当前八面体有效应力; σ_{oct0} —初始八面体有效

应力.

5 结语

1) 基坑开挖过程中须根据实际情况采用合理的降水方法,或几种降水方法结合使用,以达到基坑顺利开挖的目的. 2) 渗流作用的强度与开挖过程中人们对渗流场的干预程度有关. 渗透力大小在土体中沿流线方向呈三角形分布. 3) 渗透力的大小与渗流场水力梯度的分布成正比,即渗流场流网形态反应了渗透力的分布形状. 4) 为防止管涌现象的发生,必须根据计算得的安全系数使防渗帷幕具有足够的埋入深度. 5) 基坑的水力稳定不仅取决于土体本身的性质,还与周围的环境变化及施工方法等因素有关. 6) 实现耦合分析时应力场采用有效应力原理,渗流场产生的渗透力以外力的形式作用于土体骨架上. 7) 深基坑开挖土体中产生塑性区包括拉裂破坏和剪切破坏. 拉裂破坏分布于墙后,随开挖深度的增加发展很快;剪切破坏开始分布于墙前,随开挖深度的增加,逐渐向墙底部并向墙背扩展.

参 考 文 献

- 1 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算. 水利水电出版社,第2版
- 2 顾晓鲁. 地基与基础. 中国建筑工业出版社,第2版, pp.598~607
- 3 天津市建委. 天津市深基坑工程技术交流会论文集, 1992
- 4 岩土工程师编辑部. 深基坑开挖中的岩土工程问题会议论文集, 1992
- 5 Das, B.M.(ed.): Advanced Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Co
- 6 Réthati, L.(ed.): Groundwater in Civil Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983

The Influence on the Stability of Foundation Pit by Groundwater Seepage

Cheng Liqin

Department of Basic Courses, Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering

Abstract Methods of dewatering often being used during the excavation of deep foundation pits. Open draining off water and dewatering by well point are firstly discussed in this paper. Dynamic water pressure analytic methods and formation mechanism of piping are then proposed, and formula of seepage force and safety factor of piping are achieved. Finally, the variation law of seepage area during excavation and its influence on stress field are analyzed in detail. Water force of seepage area and stress field are coupled by neglecting the consolidation effect and an understanding of the basic law of influence on the stability of foundation pit by groundwater seepage through this analysis is thus obtained.

Key words dynamic water pressure; piping; seepage force; seepage area; stress field; fluid-solid coupling