

邻近水体多层地基深基坑整体稳定分析

蒋泽锋^{1,2}, 朱大勇^{1,2}, 王小金^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对基坑工程中渗流作用下基坑整体稳定性分析这一难点, 在考虑基坑邻近水体水位变化及其非稳定渗流的基础上, 同时考虑连续墙的影响, 对常规边坡临界滑动场法进行改进, 提出邻近水体多层地基深基坑整体稳定分析方法。以合肥地铁1号线大东门站基坑工程为依托, 分析了邻近水体水位变化及其渗流作用下基坑开挖过程中整体稳定性变化, 并与圆弧滑动法计算结果进行比较。结果表明: 该方法可搜索出任意形状危险滑动面, 相比于传统设计方法假定圆弧滑动面更合理, 计算结果也更可靠; 渗流作用是影响邻水基坑整体稳定性的主要因素之一, 渗流场的变化会造成滑动面位置的变化。

关键词: 基坑开挖; 连续墙; 临界滑动场; 邻近水体; 渗流
中图分类号: TU432

文献标志码: A

Integral Stability Analysis of Deep Foundation Pit in Multilayered Formation Close to River

JIANG Zefeng^{1,2}, ZHU Dayong^{1,2}, WANG Xiaojin^{1,2}

(1. School of Civil Eng., Hefei Univ. of Technol., Hefei 230009, China;
2. Anhui Key Lab. of Civil Eng. and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: Considering water level fluctuation, the transient seepage and the diaphragm wall, a method of analyzing the integral stability analysis of foundation pits under seepage was proposed based on the improved critical slip field of slope. Taking the foundation pit of Dadongmen station in metro line 1 of Hefei city as an example, the seepage analysis of the foundation pit with corresponding parameters was carried out and then the obtained pore-water pressure fields were imported into the program of the method to evaluate changes in the factor of safety with changing river water level and excavation depth. In addition, emphases were given to research the influence of seepage on the integral stability of the foundation pit. The results showed that the method can search for the most dangerous slip surface of any shape and the safety factor is more reasonable than the traditional method in calculation of the integral pit stability. Moreover, the seepage have more influence on the integral stability of the foundation pit and the change of pore water pressure field can lead to change the position of slip surface.

Key words: foundation pit excavation; diaphragm wall; critical slip field of slope; close to river; seepage

随着中国经济建设的迅猛发展, 城镇化水平不断提高, 城市人口激增, 交通拥堵问题日益严重。伴随中国地铁建设在北、上、广等一线城市的蓬勃开展, 合肥也迎来了地铁轨道交通建设的黄金期。但合肥地区修建地铁尚属首次, 不可避免地存在地质情况复杂、施工经验不足等问题, 尤其是邻近水体深大复杂基坑开挖过程中整体抗滑稳定性问题。开展此课题的研究具有重大理论意义及广泛的工程应用

价值, 同时能为后续地铁建设提供借鉴和参考。

目前国内外已在渗流作用下深基坑稳定性方面做了大量的研究工作。Benmeharek 等^[1]认为基坑渗透破坏属于塑性剪切破坏, 并通过有限差分法数值模拟分析内摩擦角及剪胀角等参数对渗透破坏的影响。李广信等^[2]认为, 在很多有渗流的情况下, 若有承压水存在, 其作为抗力的被动土压力可能几乎不存在, 故不宜用朗肯土压力计算土压力, 而应采

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 教育部优先发展课题资助项目(2013JYFF0661); 国家自然科学基金资助项目(51179043); 水利部公益项目子课题资助项目(201401063)

作者简介: 蒋泽锋(1986—), 男, 博士生, 研究方向: 岩土体稳定性。E-mail: zjiang_hfut@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

用库仑土压力理论的图解法来搜索最大的可能滑裂面。裴桂红等^[3]建立地下水非稳定渗流的 3 维数学模型,并通过武汉市某基坑开挖过程中渗流-应力耦合数值模拟,分析渗流对基坑开挖稳定性的影响。董诚等^[4]应用国际通用有限元程序 PLAXIS 模拟基坑内降水条件下基坑开挖过程的真实状态,分析渗流作用对深基坑整体稳定性的影响,并与理正软件计算的结果进行比较。丛蔼森^[5]探讨了深基坑设计中的渗流分析问题,并指出深基坑渗流计算的重要性。

目前,工程中通常采用《建筑基坑支护技术规程(JGJ 120—2012)》^[6]中规定的圆弧滑动条分法计算基坑整体稳定安全系数。同时假定基坑内、外水位不变,按静水状态计算孔隙水压力,而未考虑渗流的影响,整体稳定安全系数往往偏大,与实际工程不符。

本文方法基于朱大勇等的临界滑动场理论^[7-9],但在建立边坡临界滑动场方法时未考虑基坑等特殊边坡经地下连续墙支护后的整体稳定性计算,同时也并未考虑邻近河道水体对基坑稳定性的影响。沈银斌等^[10]虽然在朱大勇基础上提出了水位变化过程中的边坡临界滑动场,但其对坡外水采用等效置换的方法,只适用于常规涉水边坡,并不适用于邻近河道的深大基坑整体稳定性计算。鉴于此,对边坡临界滑动场法做出进一步改进,将基坑邻近河道水体以水压力的形式直接加在河道岸坡面,并考虑由非稳定渗流引起的孔隙水压力场变化,以及地下连续墙在基坑整体稳定性中的作用,提出基于临界滑动场理论的邻近水体多层地基深基坑整体稳定分析方法,并且将本文方法计算结果与《建筑基坑支护技术规程(JGJ 120—2012)》中规定的圆弧滑动条分法的计算结果进行比较。

1 邻近水体基坑整体稳定分析方法

1.1 临界滑动场基本理论

边坡临界滑动场法的最基本核心思想是不直接确定安全系数最小的滑面,而是找一定安全系数下剩余推力最大的滑面。圈定边坡计算范围,划分条快线并在条快线上设置离散状态点后,在给定的安全系数下,条块线上任意状态点都存在最危险滑动方向 α 和最不利推力 P 。临界滑动场数值模拟的基本点即试图确定坡体众多离散点的危险滑动方向及最不利推力,这些方向矢量构成边坡危险滑动方向场,然后在这个危险滑动方向场的基础上,顺着出口

点的危险滑动方向出发,向坡体后缘追踪出相应出口的危險滑动面。

1.2 地下连续墙的处理及基坑土体状态点设置

大东门站基坑支护采用钢筋混凝土连续墙,将连续墙当作 c 、 φ 值特别大的岩石考虑,并将其当作特殊土条考虑进基坑中,防止危险滑动面穿过连续墙。在划分条块时,连续墙条块的宽度不受其他条块宽度的影响,而是根据连续墙本身的宽度设置(图 1)。但为了方便编程,除连续墙所在条块外,所有其他条块宽度都取相同的值,同时在每一条块线上布设状态点,其间距为条块宽度的 $1/4$ 。由于将连续墙当作岩石考虑时,土与岩石分属 2 种不同介质,势必会受到竖向摩擦力的作用,此时因为已将连续墙当作特殊土条考虑,连续墙与其接触土体的摩擦力作用统一考虑成土条的侧向力。

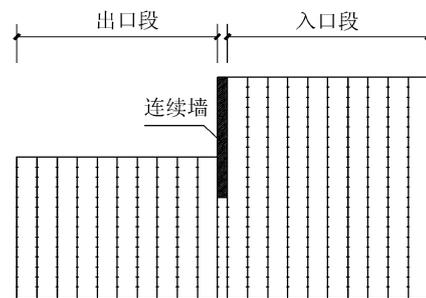


图 1 基坑土体的离散

Fig. 1 Discretization of the foundation pit

1.3 渗流条件下土条受力分析对象的选择

目前在渗流条件下的边坡稳定计算中,存在两种分析方法:一是选择土骨架作为研究对象,用土体的有效容重及渗透力来考虑渗流对边坡稳定的影响;二是选择土体为研究对象(总应力法),取土骨架与水为整体当作隔离体,考虑滑裂面上的孔压与坡面水压力(坡面有水的情况)进行力的平衡分析。

Taylor^[11]早年已在论著中通过例子说明了这两种方法的等效性。同时,陈祖煜^[12]也指出并证明这两种方法本质上是一致的,若在各环节处理上都一致的话,会得到相同的安全系数。但大多数人都会选择土体作为研究对象,这是因为当将土、水混合作为研究对象时,水对土的浮力及渗透力将视为内力不再考虑,此种方法不仅概念清晰,计算简单,且符合大多数人的习惯,因此选择以浸水土体作为研究对象。

1.4 邻近水体的处理

由于受邻近河道的影响,基坑整体稳定计算范围内将具有稳定的渗流场,水对土的浮力及渗透力将视为内力不再考虑,如图 2 所示,在进行受力分析

时, 将土条 k 两侧的水压力 P_k^w 和 P_{k-1}^w 统一考虑成土条两侧的法向应力, 故不再单独考虑。综上所述, 在考虑邻近水体及渗流过程时, 只需分别计算条块顶部的水压力 Q_k 及条块底部所受到的孔隙水压力 U_k 。

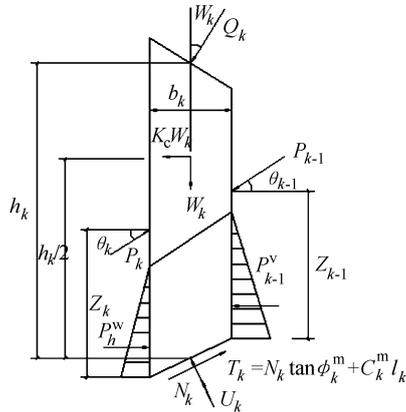


图 2 条块受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forces on slices

本文计算方法基于边坡临界滑动场理论, 限于篇幅, 边坡临界滑动场法详见文献 [7-8]。邻河涉水条块的受力如图 2 所示, 作用方式与文献 [8] 不同, 因此任意状态点剩余推力 P_k 计算公式为:

$$P_k = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \phi_k^m)} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \phi_k^m) P_{k-1} + \sin(\alpha_k - \phi_k^m) W_k + \cos(\alpha_k - \phi_k^m) K_c W_k + \sin(\alpha_k + \omega_k - \phi_k^m) Q_k + U_k \sin \phi_k^m - c_k^m l_k \cos \phi_k^m] \quad (1)$$

式中 P_k, P_{k-1} 为条块间最大剩余推力, θ_k, θ_{k-1} 为最大剩余推力与水平方向倾角, Z_k, Z_{k-1} 为条块间最大剩余推力作用点高度, W_k 为条块重量, $K_c W_k$ 为地震力, K_c 为地震影响系数, ϕ_k^m 和 c_k^m 分别为极限平衡状态时调用的内摩擦角和黏聚力, Q_k 为坡面外力, U_k 为条底水压力合力, N_k' 为条底有效正应力合力, l_k 为条块底边长度, α_k 为条块底面倾角, h_k 为条块高度, b_k 为条宽。

研究表明, 对于任意形状滑动面, 只有严格满足平衡条件的严格条分法才能给出最合理的安全系数。因此从实用出发, 计算先采用基于非严格法的 CSF 中的临界滑动面位置, 再按严格法重新计算安全系数。本文严格法采用朱大勇等改进的 Morgenstern-Price 法^[13]。如图 2 所示, 由于需要考虑邻近河道水体的水压力对基坑整体稳定的影响, 本文对文献 [13] 中的计算公式重新进行推导。

朱大勇等在提出改进的 Morgenstern-Price 法时, 利用了常规边坡上施加点荷载的计算模型推导

出相关计算公式, 本文计算模型为邻近水体的深大复杂基坑, 邻近河道水体以水压力的形式加在河道岸坡面, 且考虑了基质吸力的作用, 需重新推导相关公式。首先考察第 k 个受邻近水体作用的条块的受力平衡, 并将土条 k 两侧的水压力 P_k^w 和 P_{k-1}^w 统一考虑成土条两侧的法向力, 即 $E_k = E_k' + P_k^w, E_{k-1} = E_{k-1}' + P_{k-1}^w$ 。其中 E_k 和 E_{k-1} 为条块两侧法向力, E_k' 和 E_{k-1}' 为考虑条块两侧水压力后的总法向应力。分别将力沿平行及垂直滑面方向进行分解, 得:

$$\begin{aligned} (N_k' \tan \phi_k' + c_k' b_k \sec \alpha_k) / F_s = & \\ (W_k + \lambda f_{k-1} E_{k-1} - \lambda f_k E_k + Q_k \cos \omega_k) \cdot \sin \alpha_k - & \\ (-K_c W_k + E_k - E_{k-1} - Q_k \sin \omega_k) \cdot \cos \alpha_k & \quad (2) \\ N_k' = (W_k + \lambda f_{k-1} E_{k-1} - \lambda f_k E_k + Q_k \cos \omega_k) \cdot \cos \alpha_k + & \\ (-K_c W_k + E_k - E_{k-1} - Q_k \sin \omega_k) \cdot \sin \alpha_k - U_k & \quad (3) \end{aligned}$$

将式 (2) 代入式 (3), 整理后可得:

$$E_k \Phi_k = \psi_{k-1} E_{k-1} \Phi_{k-1} + F_s T_k - R_k \quad (4)$$

其中:

$$\Phi_k = (\sin \alpha_k - \lambda f_k \cos \alpha_k) \tan \phi_k' + (\cos \alpha_k + \lambda f_k \sin \alpha_k) F_s \quad (5)$$

$$\Phi_{k-1} = (\sin \alpha_{k-1} - \lambda f_{k-1} \cos \alpha_{k-1}) \tan \phi_{k-1}' + (\cos \alpha_{k-1} + \lambda f_{k-1} \sin \alpha_{k-1}) F_s \quad (6)$$

$$\psi_{k-1} = \frac{(\sin \alpha_k - \lambda f_k \cos \alpha_k) \tan \phi_k' + (\cos \alpha_k + \lambda f_k \sin \alpha_k) F_s}{\Phi_{k-1}} \quad (7)$$

改进后, 第 k 个条块除条间力之外的条块上所有力提供的抗剪力之和 R_k 及所有力产生的下滑力之和 T_k 应改为:

$$R_k = [W_k \cos \alpha_k - K_c W_k \sin \alpha_k + Q_k \cos(\omega_k + \alpha_k) - U_k] \tan \phi_k' + c_k' b_k \sec \alpha_k \quad (8)$$

$$T_k = W_k \sin \alpha_k + K_c W_k \cos \alpha_k + Q_k \sin(\omega_k + \alpha_k) \quad (9)$$

根据端部条件 $E_0 = 0$ 及 $E_n = 0$, 由式 (3) 推导安全系数 F_s 表达式为:

$$F_s = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (R_k \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{k=1}^{n-1} (T_k \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (10)$$

现考虑第 k 个条块的力矩平衡。如图 3 所示, 作用于条块上的水压力可用一个合力等效代替, 但当压力为梯形分布时, 合力作用点并不在条块中点上, 压力中心离条块下端点的距离 e 为:

$$e = \frac{L(2h_1 + h_2)}{3(h_1 + h_2)} \quad (11)$$

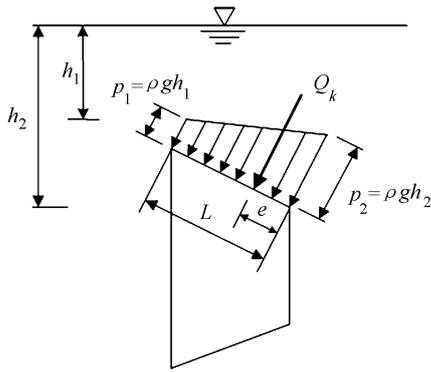


图 3 条块所受水压力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of water pressure on slices

如图 2 所示, 设条间力矩 $M_k = E_k Z_k$, 并将土条 k 两侧的水压力 P_k^w 和 P_{k-1}^w 统一考虑成土条两侧的法向应力, 对条块基底中心取力矩可得:

$$M_k = M_{k-1} - \lambda \frac{b_k}{2} (f_k E_k + f_{k-1} E_{k-1}) + \frac{b_k}{2} (E_k + E_{k-1}) \cdot \tan \alpha_k + K_c W_k \frac{h_k}{2} + Q_k d_k \quad (12)$$

其中,

$$d_k = h_k \sin \alpha_k - \frac{L_k}{2} + e_k \quad (13)$$

同样地, 有端部条件 $M_0 = 0$ 及 $M_n = 0$, 根据力矩平衡方程可以得出比例系数 λ :

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^n [b_k (E_k + E_{k-1}) \tan \alpha_k + K_c W_k h_k + 2Q_k d_k]}{\sum_{k=1}^n [b_k (f_k E_k + f_{k-1} E_{k-1})]} \quad (14)$$

1.5 邻水基坑开挖过程中整体稳定性计算步骤

邻水基坑开挖过程中稳定性计算步骤如下:

1) 邻近水体在一定水位下, 采用 Geostudio 软件的 seep 模块对基坑整体稳定计算范围进行渗流有限元计算, 将孔隙水压力计算结果导入本文方法计算程序。

2) 圈定计算范围, 将混凝土连续墙作为独立的特殊土条处理, 其余条块的宽度都取为 b , 划分垂直条块并设定离散点。

3) 初设安全系数及条间力函数形状系数 F_{s0} 和 λ_0 , 取 $F_{s0} = 1$, $\lambda_0 = 0$ 。根据试算滑面中点坐标所在位置提取每一个试算滑面底部孔隙水压力值, 根据相应公式计算所有状态点的最危险滑动方向和最大剩余推力值, 追踪出相应出口的最危险滑面。

4) 根据第 3) 步追踪出的最危险滑面, 用进一步改进后的 Morgenster-Price 法计算滑面的安全系

数 F_{s1} 和条间力函数形状系数 λ_1 。

5) 将步骤 4) 求出的 F_{s1} 、 λ_1 取代步骤 3) 中的 F_{s0} 和 λ_0 , 重新计算所有状态点的最危险滑动方向和最大剩余推力值, 追踪出相应出口的最危险滑面。重复步骤 4)、5), 直至相邻 2 次计算的安全系数 F_s 值小于给定的精度。

6) 选定下一出口, 初始的 F_{s0} 和 λ_0 值可选择上一出口所对应的计算值, 以减少迭代次数, 重复步骤 3) ~ 6), 计算出对应的局部临界滑动场, 直到滑动面无法绕过地下连续墙为止。

2 合肥大东门基坑整体稳定分析

2.1 工程概况

合肥市轨道交通 1 号线 1、2 期沿线地貌单元可划分为南淝河河床与河漫滩、1 级阶地、2 级阶地。作为 1、2 号线交汇的大东门中转站属于南淝河河床与河漫滩地层, 即工程地质 II 单元, 如图 4 所示。本段线路地形基本平坦, 自然地面标高在 14.00 ~ 16.00 m 之间。1 号线车站标准段结构底板埋深约为 32 m (底板所在土层为中风化泥质砂岩层), 基坑侧壁土层自上而下主要为杂填土层、粉质黏土层、粉土层、粉细砂层、强风化泥质砂岩层、中风化泥质砂岩层。拟建场地分布的地表水体主要为车站西侧和南侧的南淝河, 两岸堤防高程约为 13.0 ~ 16.2 m, 河底高程约为 4.8 ~ 6.0 m, 100 年一遇洪水水位约为 14.92 m。地表水主要接受大气降水补给, 主要以蒸发方式排泄, 随季节性变化明显。



图 4 大东门站平面布置图

Fig. 4 Plane layout of Dadongmen station

2.2 计算模型及参数

该交叉型基坑尺寸为: 1 号线主体结构长度 140 m (南北走向), 宽度为 23.3 m; 2 号线主体结构全长约 160 m, 宽度为 23.3 m。但因研究重点为 1 号线围护结构, 计算断面从岩土工程勘察报告中选取了延拟建车站主体结构长度方向且离南淝河较近的 2-2 断面, 如图 4 所示。计算时在主体结构长度方向只截取约 80 m 长, 如图 5 所示。

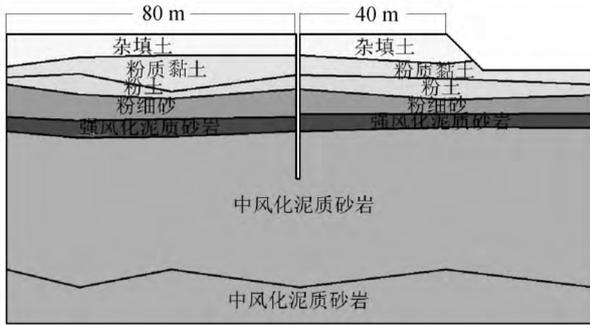


图 5 基坑剖面示意图

Fig.5 Cross-section of a deep foundation pit

由于基坑在实际开挖过程中,每隔 3 m 会加一道横向支撑,维护墙体变形较小;同时所研究的为深大复杂基坑的整体稳定分析,因此在计算时暂不考虑深基坑的其他破坏模式。计算过程中作为底板所在岩层(中风化泥质砂岩)采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,参数取值来自于本工程地质勘查报告,见表 1。

表 1 物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters

地层	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 $C/$ kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 $K/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
杂填土	19.0	10	8	0.70
粉质黏土	19.8	37	13	0.05
粉土	20.2	20	14	0.50
粉细砂	20.5	0	25	2.00
强风化泥质砂岩	21.0	35	30	0.20
中风化泥质砂岩	22.0	150	30	0.05
混凝土地下连续墙	30.0	11 000	55	0

2.3 渗流对基坑整体稳定性及滑动面位置的影响

大东门站混凝土连续墙围护结构深约 40 m,车站结构底板高程约为 32 m,断面稳定性计算从基坑开挖至 20 m 起,分别计算基坑开挖至 20、23、27、30、32 m 时的稳定性。计算主要考虑以下 2 种工况:考虑混凝土连续墙围护后基坑整体稳定计算范围内土体的自重(工况 1);考虑混凝土连续墙围护后基坑整体稳定计算范围内土体的自重及南淝河汛期最高水位下渗流引起的孔隙水压力场(工况 2)。在工况 2 条件下,初始渗流模拟的孔隙水压力场是南淝河枯水位时(约 6.92 m)产生的稳定孔隙水压力场;计算南淝河汛期最高水位下(100 年一遇洪水水位约 14.92 m)渗流引起的孔隙水压力场时,南淝河区域为定水头边界,基坑内为压力水头为 0 的自由表面。

在工况 1 条件下,由图 6 可以看出,随着基坑的

开挖,安全系数不断减小。从开挖至 20 m 时的 6.861 下降到开挖至 32 m 时的 2.851,相应全局临界滑动场如图 7 所示。

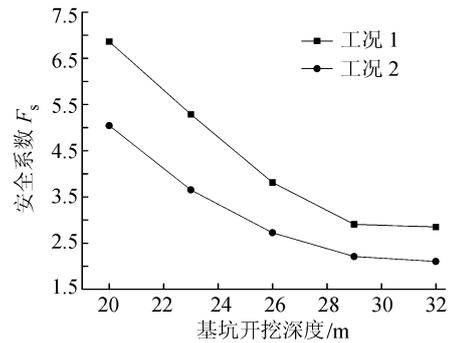


图 6 开挖过程中基坑整体稳定性变化曲线

Fig.6 Curves of integral stability change of foundation pit during excavation

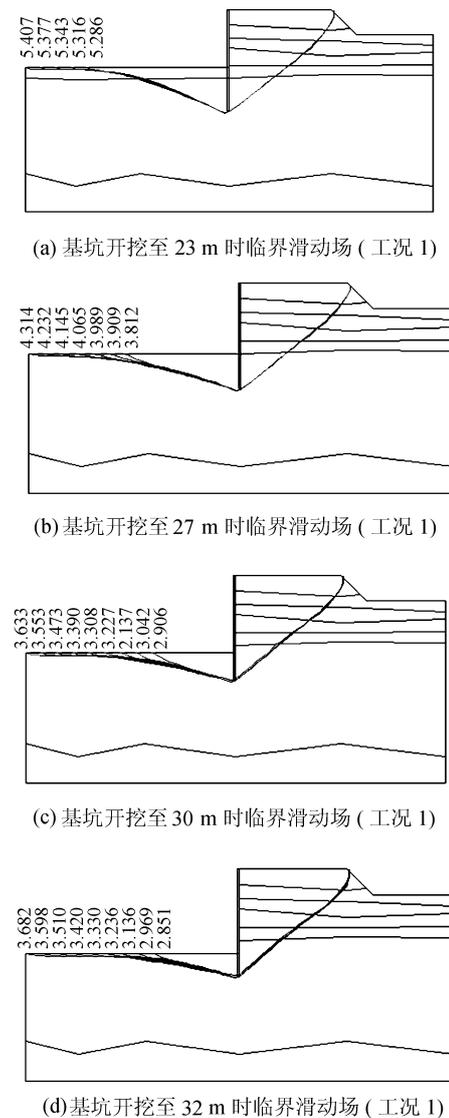


图 7 基坑开挖过程中全局临界滑动场

Fig.7 GCSF of foundation pit during excavation

在工况 2 条件下,由图 6 可以看出,随着基坑的开挖,由南淝河渗流引起的孔隙水压力场不断变化,直接影响了基坑的稳定性。当基坑开挖至 20 m 深度时安全系数为 5.043,而当基坑开挖至 32 m 时,渗流场如图 8 所示,此时安全系数降为 2.103,全局临界滑动场如图 9 所示。由此可知,即使考虑渗流时,基坑开挖过程中安全系数 F_s 也都大于 2.0,是稳定、安全的。

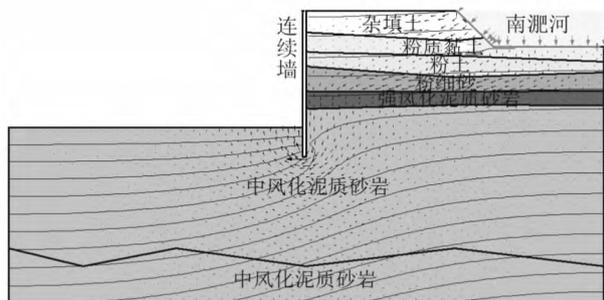
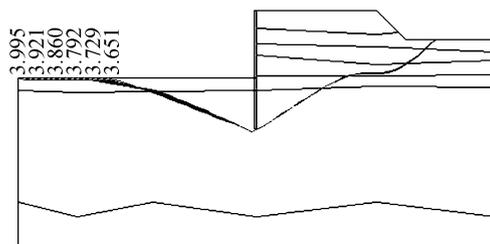


图 8 基坑开挖至 32 m 时渗流场示意图

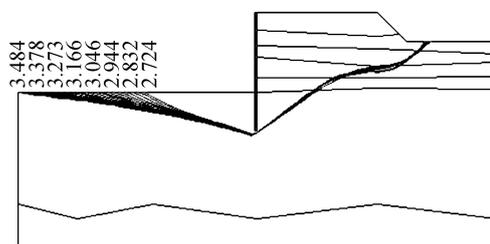
Fig.8 Flow field of foundation pit when excavation depth was 32 m

从图 7、9 还可以看出,基坑开挖过程中,在相同开挖深度下,工况 1 与工况 2 计算的滑动面位置发生了变化。这主要是由于考虑渗流的情况下,在计算状态点最危险滑动方向和最不利推力时,条块底面需考虑孔隙水压力的影响。在加入孔隙水压力项后,由式(1)计算最不利推力时所得状态点最危险滑动方向的斜率相比不考虑渗流时所求得最不利方向的斜率要小,这在抗剪强度较小的粉细砂层附近体现的尤为明显。且因考虑渗流作用影响时,各状态点最危险滑动方向的斜率较不考虑渗流时要小,这使得整个危险滑动方向场较不考虑渗流影响时要缓,导致从出口开始向坡体后缘追踪出的危险滑动面要缓于不考虑渗流影响时的危险滑动面,从而使得临河部分滑动区域的增大。由此可知,基坑开挖过程中,只有考虑渗流作用的影响,才能得到更合理的滑动面位置及更准确的整体稳定系数。

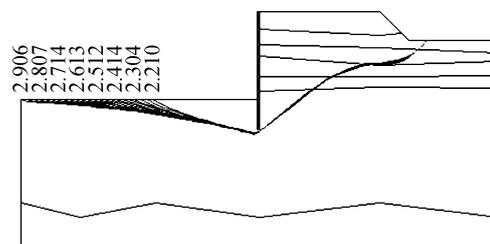
此外,如图 7、9 所示,结果只显示了局部的临界滑动场,这是因为当危险滑动面搜索到一定范围后,滑动面无法从连续墙底部通过,此时滑动面或穿过连续墙或无法收敛,已非需要的最危险滑面。且危险滑动场显示了各安全系数所对应的出口位置,若整体稳定安全系数小于相应工程的安全等级,本文方法计算结果还可提供一个需加固区域的空间分布情况。



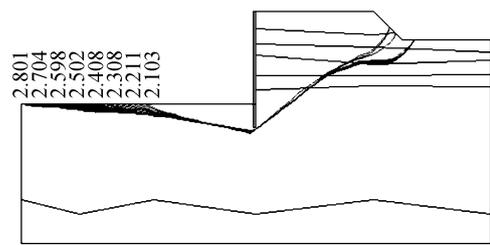
(a) 基坑开挖至 23 m 时临界滑动场 (工况 2)



(b) 基坑开挖至 27 m 时临界滑动场 (工况 2)



(c) 基坑开挖至 30 m 时临界滑动场 (工况 2)



(d) 基坑开挖至 32 m 时临界滑动场 (工况 2)

图 9 考虑渗流时基坑开挖过程中全局临界滑动场

Fig.9 GCSF of foundation pit during excavation with seepage

2.4 与 SLOPE/W 计算结果的比较

为验证本文方法计算结果的可靠性,采用 SLOPE/W 软件来验算基坑整体稳定性。首先利用 SEEP/W 模块计算南淝河汛期最高水位时的渗流场(初始条件与边界条件同第 2.3 节),然后由 SLOPE/W 提取 SEEP/W 模块计算的孔隙水压力场,从而计算开挖过程中基坑整体稳定性。

由图 10 可知,SLOPE/W(Morgenster-Price 法条间力假设)自动搜索圆弧滑面计算得到的安全系数较本文方法计算结果偏大,表明软件自动搜索的圆弧滑面并非最危险滑面。相关研究也表明^[4,14-15],

对于特殊情况的基坑边坡而言,滑动面的形状均近似于直线,圆弧滑动面往往不适用。因此由图 9 (d)、图 11 可看出, SLOPE/W 计算结果偏大的主要原因是圆弧滑动面较长,总体抵抗作用较复合滑动面大。同时,本文方法不但可考虑渗流作用的影响,而且可考虑软弱层的影响,从而可搜索出任意形状临界滑动面,计算结果将更合理,更可靠。

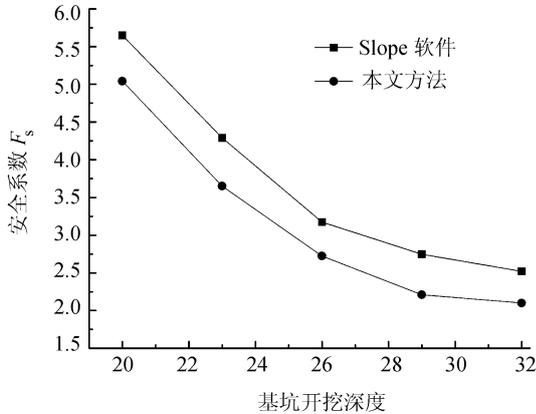


图 10 开挖过程中基坑整体稳定性变化曲线

Fig. 10 Curves of integral stability change of foundation pit during excavation

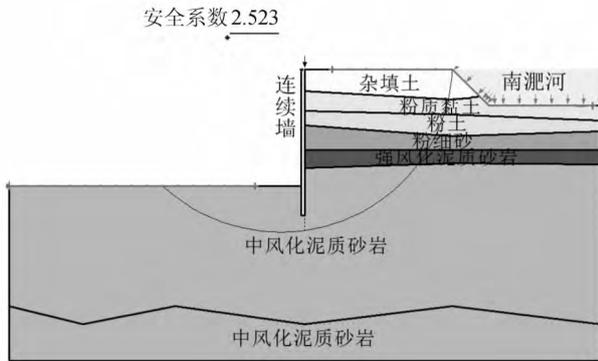


图 11 基坑开挖至 32 m SLOPE/W 计算结果

Fig. 11 Results of SLOPE/W when excavation depth was 32 m

2.5 南淝河水位变化对基坑整体稳定性的影响

南淝河两岸堤防高程约为 13.0~16.2 m,河底高程约为 4.8~6.0 m,100 年一遇洪水位约为 14.92 m。计算从枯水位约 6.92 m(水深约 2 m)开始,水位在 30 d 内以 2 m 逐渐升至 100 年一遇洪水位约 14.92 m(水深 10 m),分别计算不同水位下邻近基坑整体稳定性。计算初始渗流模拟的孔隙水压力场是南淝河枯水位时产生的稳定孔隙水压力场,计算南淝河枯水期及汛期最高水位下渗流引起的孔隙水压力场时,南淝河区域为定水头边界,当河水水位在此高程间变化时为变水头条件,基坑内是压力水头为 0 的自由表面。计算结果如图 12 所示。

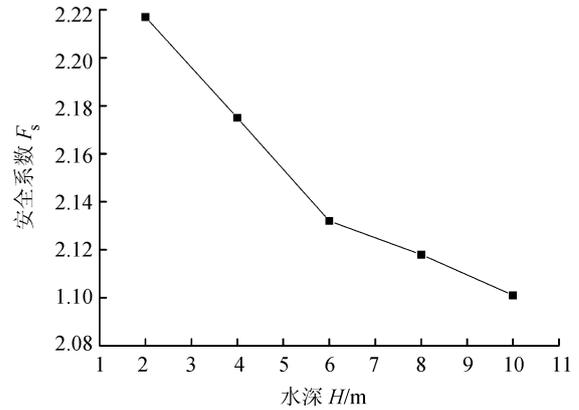


图 12 邻近水体水位下降过程中基坑整体稳定变化曲线
Fig. 12 Curve of integral stability change of foundation pit during water level drawdown

如图 12 所示,总体而言,基坑整体稳定性随邻近水体水位上升而减小。这是因为随邻近水体水位上升,条底水压力合力及静水压力对基坑的不利作用增大,故邻近水体深大基坑整体稳定性随邻近水体水位上升而减小。但当邻近河道水位达到 100 年一遇洪水位时,基坑整体稳定安全系数却只比在枯水位时只减小了 5% 左右。这是因为相比深基坑而言,邻近河道水深相对较小,枯水期时稳定的渗流场已大面积的分布于计算区域内;当水位上升到 100 年一遇洪水位时,渗流区域也随之增大,但增大的渗流区域对于整个计算区域来说并不明显,从而安全系数减小的并不多。虽然水位上升会降低基坑的整体稳定性,但归根结底水位变化改变的是基坑内的渗流场,对深基坑稳定性起决定作用的是渗流作用。除此之外,由图 9(d) 与图 13 相比可知,当水位变化时,渗流场随之变化,最终会造成基坑整体滑动面的变化。因此,邻近河道水体的渗流作用才是影响深基坑整体稳定性的主要因素。

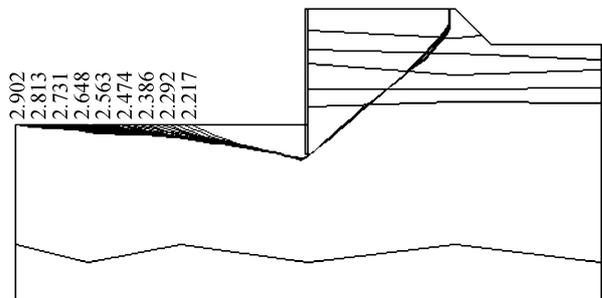


图 13 邻近水体水深为 2 m 时全局临界滑动场
Fig. 13 GCSF of foundation pit close to river when water depth was 2 m

3 关于最危险滑面的讨论

对于多层地基深基坑而言,由本文方法计算结

果可知,搜索的最危险滑动面并非圆弧滑动面。工程经验也证明,对于简单的常规均质边坡,采用圆弧滑动面假定的传统设计方法是可行的。但对于某些特殊情况的基坑边坡而言,就目前现场资料而言,尚不能确定采用哪种滑动面假定更合理。圆弧滑动面的假定往往并不适用,计算的安全系数会偏大。除此之外,对于土体结构复杂的地基,通常的做法是将滑动面范围内土层的抗剪强度指标按土层厚度加权平均,将非均质土等效为均质土地基计算。这样的计算结果并不合理。而本文方法基于临界滑动场理论,并不需要提前假定滑面形状,能快速、准确搜索出任意形状滑面,适用于土体结构复杂的基坑稳定计算,结果也更加合理,可避免造成偏于不安全的设计。

4 结 论

结合算例,对常规边坡临界滑动场法进行改进,提出可考虑非稳定渗流作用及地下连续墙影响的邻水多层地基深基坑整体稳定分析方法,并以合肥地铁 1 号线大东门站基坑工程为依托,分析了邻近河道水位变化及其渗流作用对基坑开挖过程中整体稳定性的影响,得到如下结论:

1) 本文方法不但可考虑基坑邻近河道水体水位变化及渗流作用的影响,还可考虑地下连续墙在基坑整体稳定性中的作用。同时本文方法还继承了常规边坡临界滑动场的突出优点,在不提前假定滑面形状的前提下,能准确、快速计算基坑整体最小安全系数及搜索出任意形状危险滑面位置,适用于土体结构复杂的深大基坑,计算结果更合理,更可靠。

2) 邻近水体渗流作用对基坑整体稳定性影响较大,且在考虑水位变化及渗流条件下,滑动面位置会产生一定变化。而邻近水体的水位变化直接影响渗流场的变化,因此渗流作用是影响邻水基坑整体稳定性的主要因素。

3) 对于某些特殊情况的基坑边坡而言,基坑圆弧滑面,而是任意形状的复合滑动面,在工程上若仍采用圆弧滑动法进行基坑整体稳定性分析,计算所得的安全系数会相对偏大。

4) 全局临界滑动场显示了各安全系数所对应的出口位置,当实际工程整体稳定安全系数小于相应工程的安全等级,本文方法计算结果可提供一个需加固区域的空间分布情况。

参考文献:

[1] Benmebarek N, Benmebarek S, Kastner R. Numerical stud-

ies of seepage failure of sand within a cofferdam [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 264 - 273.

[2] Li Guangxin, Liu Zaoyun, Wen Qingbo. Influence of seepage on water and earth pressure in foundation pit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 32(5): 75 - 80.

[李广信,刘早云,温庆博. 渗透对基坑水土压力的影响 [J]. 水利学报, 2002, 32(5): 75 - 80.]

[3] Pei Guihong, Wu Jun, Liu Jianjun et al. Numerical modeling of seepage-stress coupling of deep foundation pit excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4975 - 4978. [裴桂红,吴军,刘建军,等. 深基坑开挖过程中渗流-应力耦合数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增2): 4975 - 4978.]

[4] Dong Cheng, Zheng Yingren, Tang Xiaosong. Integral stability analysis of foundation pits under seepage by using FEM strength reduction [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 105 - 110. [董诚,郑颖人,唐晓松. 利用有限元强度折减法进行渗流条件下的基坑整体稳定性分析 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 105 - 110.]

[5] Cong Aisen. Discussion on several issues of seepage stability of deep foundation pit in multilayered formation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2018 - 2023. [丛蔼森. 多层地基深基坑的渗流稳定问题探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2018 - 2023.]

[6] 杨斌,黄强,杨志银,等. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[7] Zhu Dayong. Critical slip field of slope and its numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 9(1): 63 - 69. [朱大勇. 边坡临界滑动场及其数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 1997, 9(1): 63 - 69.]

[8] Zhu Dayong, Zhou Zaosheng. Theory of globally critical slip field of slopes and its application to practical engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 66 - 72. [朱大勇,周早生. 边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 66 - 72.]

- [9] Zhu D Y. A method for locating critical slip surfaces in slope stability analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal 2001 38(2): 328 - 337.
- [10] Shen Yinbin, Zhu Dayong, Yao Huayan, et al. Critical slip field of slope in process of reservoir water level fluctuations [J]. Rock and Soil Mechanics 2010 31(S2): 179 - 183. [沈银斌, 朱大勇, 姚华彦, 等. 水位变化过程中边坡临界滑动场 [J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 179 - 183.]
- [11] Taylor D W. Fundamentals of Soil Mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons, 1948.
- [12] Chen Zuyu. The first discussion about the finite element calculations of circular sliding in slope under seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2002, 24(3): 394 - 396. [陈祖煜. 关于“渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算”的讨论之一 [J]. 岩土工程学报 2002, 24(3): 394 - 396.]
- [13] Zhu Dayong, Li Zhuofen, Qian Qihu, et al. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-price method [J]. Canadian Geotechnical Journal 2005 42(1): 272 - 278.
- [14] Zhang Lei, Wen Qian, Yao Haiming. Checking the stability of foundation pit by rupture searching [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 867 - 869. [张雷, 文谦, 姚海明. 通过搜索破裂面法验算基坑的稳定性 [J]. 地下空间与工程学报 2005, 1(6): 867 - 869.]
- [15] Wang Hongxin. Influence of excavation width on enclosure-structure stability of foundation pits [J]. China Civil Engineering Journal 2011 44(6): 120 - 126. [王洪新. 基坑宽度对围护结构稳定性的影响 [J]. 土木工程学报, 2011 44(6): 120 - 126.]

(编辑 李轶楠)

(上接第37页)

- [8] Ouyang Shuo, Zhou Jianzhong, Zhang Rui, et al. Study on optimal scheduling of multi-objective joint flood control for lower Jinsha River cascade reservoirs and Three Gorges reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013 32(6): 43 - 49. [欧阳硕, 周建中, 张睿, 等. 金沙江下游梯级与三峡梯级多目标联合防洪优化调度研究 [J]. 水力发电学报 2013 32(6): 43 - 49.]
- [9] Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Kong Fanzhe, et al. Multi-objective optimization for hydrological models using surrogate modeling [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2014 46(2): 36 - 45. [宋晓猛, 张建业, 孔凡哲, 等. 基于代理模型的水文模型参数多目标优化 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014 46(2): 36 - 45.]
- [10] Ouyang Shuo, Xu Gaohong, Dai Minglong, et al. Study on parameter multi-objective calibration and parameter combination forecast of conceptual hydrological model [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014 46(6): 63 - 70. [欧阳硕, 徐高洪, 戴明龙, 等. 概念性水文模型参数多目标率定及参数组合预报 [J]. 四川大学学报: 工程科学版 2014 46(6): 63 - 70.]
- [11] Zhang Rui, Zhou Jianzhong, Wang Yongqiang. Multi-objective optimization of hydrothermal energy system considering economic and environmental aspects [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012 42(1): 384 - 395.
- [12] Gao Shichun, Wan Biao, Mei Yadong, et al. Cooperating dispatch of hydropower station groups of Three Gorges cascade and Qingjiang cascade [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006 37(4): 504 - 510. [高仕春, 万飙, 梅亚东, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究 [J]. 水利学报 2006 37(4): 504 - 510.]

(编辑 张琼)