

# 暴雨与河流水位涨落耦合作用基坑稳定性分析

王祥秋<sup>1</sup>, 刘文添<sup>2</sup>, 周治国<sup>3</sup>

(1. 佛山大学 环境与土木建筑学院, 广东 佛山 528000; 2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广州 510006;  
3. 广州市建筑科学研究院, 广州 510440)

**摘要:**雨季施工时基坑工程受暴雨入渗以及邻近河流水位涨落耦合作用, 容易发生渗透破坏事故。基于裘布依(Dupuit)假定建立分层地基地下水耦合渗流方程, 以此确定在暴雨入渗以及河流水位涨落耦合作用下基坑周边地下水位。同时基于渗流-应力耦合分析理论与 Midas 分析软件, 以某基坑工程实例为研究对象, 建立基坑工程渗流-应力耦合分析模型, 对基坑工程渗流破坏现象进行分析研究, 由此得出了对其它工程有重要参考价值的结论。

**关键词:**暴雨入渗; 渗流-应力耦合分析; 地下水; 基坑工程

**中图分类号:** TU452. 2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0066-05

## Stability Analysis for the Excavation Engineering Under Coupling Effect of Seepage from Heavy Rain and River Fluctuation

WANG Xiang-qiu<sup>1</sup>, LIU Wen-tian<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-guo<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, P. R. China;  
2. Faculty of Civil and Transportation, Guangdong University of Technology, Guanzhou 510006, P. R. China;  
3. Institute of Building Science in Guanzhou, Guanzhou 510440, P. R. China)

**Abstract:** The seepage accident is very easily occurred, when the excavation engineering has been constructed in rainy season and it is very easily influenced by the coupling effect of seepage duo to heavy rain and water level fluctuation of neighboring river. So a coupling seepage equation that based on the theory of Dupuit has been established for the ground water in the layered foundation. And then, the water table surrounding the excavation engineering has been determined on the consideration of the coupling effect of seepage duo to heavy rain and water level fluctuation of river. In the meantime, by means of the theory of coupling analysis of stress and seepage and the software of Midas, a model of coupling analysis of stress and seepage has been built for the specific excavation engineering and the seepage destroy characteristics of this project has been researched.

**Key words:** the seepage duo to heavy rain; coupling analysis of stress and seepage; groundwater; excavation engineering

随着中国基础设施建设水平的逐步提高, 基坑工程已广泛应用于房屋建筑、市政工程、水利工程、道路交通以及港口航道等建设领域。同时也涌现出了大量的基坑工程灾害事故, 其中地下水是引起基坑工程灾害的重要原因之一, 通过对中国 522 宗基

坑事故原因分析<sup>[1]</sup>, 其中由于地下水作用引起的基坑工程安全事故有 69 宗, 占整个工程事故的 13.2%。尤其在沿海软土地区, 如: 长三角、珠三角、天津地区因地下水影响造成的基坑工程事故率高达到 35% 以上。其主要原因在于沿海软土地区大部

收稿日期: 2011-03-25

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(5300512)

作者简介: 王祥秋(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下结构工程研究, (E-mail) fsu\_wxq@163.com。

分属于淤泥质粉质粘土、粉细砂、中砂等软弱或透水性极强的土层,在高地下水水位作用下容易发生流土、管涌等渗流破坏现象。这一现象已经引起了学术界与工程界的广泛关注,国内外学者就此做了大量有益的探索<sup>[2-13]</sup>,为有效降低地下水造成的工程事故起到了良好的作用。但由于软土渗流特性复杂,以及各地区水文地质与工程地质条件的差异较大,因地下水作用造成的事故与灾难尚未得到很好地解决。当前,关于基坑渗流问题的研究主要集中在基坑周边局部范围,较少考虑邻近河流水位变化以及基坑开挖期间暴雨入渗等原因造成基坑周边地下水位升高所引发的基坑安全事故。本文基于裘布依(Dupuit)假定,建立成层土渗流场地下水耦合渗流方程,重点研究地表降水入渗与河流水位涨落耦合作用对基坑渗流稳定性的影响。

## 1 计算理论

### 1.1 地下水耦合渗流方程

为建立基坑地下水耦合渗流方程,在地下水渗流场中任取一底面积为  $dx dy$ ,高度为  $h$ (对应于潜水面至底部隔水层顶面的距离)的微元体(如图 1 所示)。假设某一时刻  $x$ 、 $y$  方向的渗流速度分别为  $u_x$ 、 $u_y$ ;考虑到  $z$  方向的渗流速度相对  $x$ 、 $y$  方向少许多,为简便起见,取  $u_z \approx 0$ ,即将地下水渗流简化为二维问题进行处理。假设单位时间内因暴雨产生的地表入渗量为  $\varepsilon$ 。对于由单一土层构成的地下水渗流场,根据裘布依(Dupuit)假定<sup>[14]</sup>可得地表降水入渗与河流水位涨落耦合作用条件下,地下水渗流运动的连续性方程。

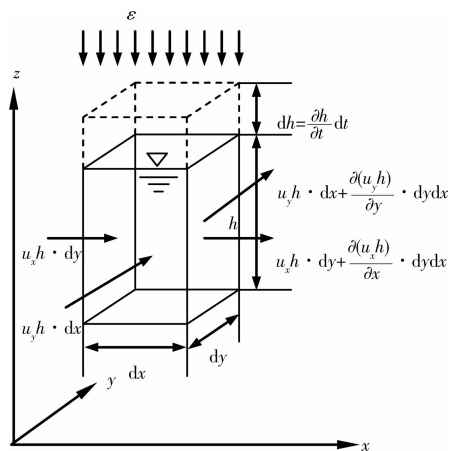


图 1 地下水耦合渗流计算模型

假设某一时刻单位时间内,从  $x$ 、 $y$  方向流入微元体的水量分别为:

$$V_{0x} = u_x h \cdot dy \quad (1)$$

$$V_{0y} = u_y h \cdot dx \quad (2)$$

经过时间  $dt$  后,从  $x$ 、 $y$  方向流出微元体的水量分别为:

$$V_{1x} = u_x h \cdot dy + \frac{\partial(u_x h)}{\partial x} \cdot dy dx \quad (3)$$

$$V_{1y} = u_y h \cdot dx + \frac{\partial(u_y h)}{\partial y} \cdot dy dx \quad (4)$$

则在  $dt$  时段内,流入流出微元体的水体增量为:

$$V_1 = [(V_{1x} - V_{0x}) + (V_{1y} - V_{0y})] dt = - \left[ \frac{\partial(u_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y h)}{\partial y} \right] dx dy dt \quad (5)$$

而在  $dt$  时段内因暴雨由地表渗入微元体的水量为:

$$V_2 = \varepsilon dx dy dt \quad (6)$$

假设在  $dt$  时段内因上述 2 种原因造成的潜水位变化增量为  $dh = \frac{\partial h}{\partial t} dt$ ,则贮存在  $dh$  高度微元体内的水量为:

$$V_3 = \lambda_w \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt \quad (7)$$

式中:  $\lambda_w$  为含水层的给水度, %。

由质量守恒原理可知:  $V_3 = V_1 + V_2$ ,由此可得:

$$- \frac{\partial(u_x h)}{\partial x} - \frac{\partial(u_y h)}{\partial y} + \varepsilon = \lambda_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

由达西定律可知:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ u_y &= -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式可得地表降水入渗与河流水位涨落耦合作用条件下,地下水渗流运动的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \varepsilon = \lambda_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

式中:  $k_x$  为土层  $x$  方向的渗透系数, mm/d;  $k_y$  为土层  $y$  方向的渗透系数, mm/d;  $\lambda_w$  为土层的给水度。

对于由若干土层组成的分层地基地下水渗流场,可将其近似转化为单一土层渗流场进行解答,根据达西定律,对于多层水平渗流可按等效原理求解土层的等效渗透系数,即:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n k_{xi} h_i \\ k_y &= \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n k_{yi} h_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $k_{xi}$  为第  $i$  层土  $x$  方向的渗透系数, mm/d;  $k_{yi}$  为第  $i$  层土  $y$  方向的渗透系数, mm/d。

同理,可得土层的平均给水度

$$\bar{\lambda}_w = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n \lambda_{wi} h_i \quad (12)$$

式中:  $\lambda_{ui}$  为第  $i$  层土的给水度。

### 1.2 基坑周边潜水位解答

考虑到冲积平原内河流水位涨落的影响范围大,基坑工程几何尺寸相对于河流影响范围而言甚少。为简化分析起见,在考虑河流水位涨落对其周边地下水渗流运动的影响时,忽略基坑开挖对河流补给区域渗流场的影响。假设河流边界至其最远影响边界的水平距离为  $D_c$  (如图2所示),单位时间内因暴雨产生的地表入渗量为  $\epsilon$ ,河流水位上涨后一段时间内水位保持稳定,即该问题可简化为一维渗流问题进行解答。

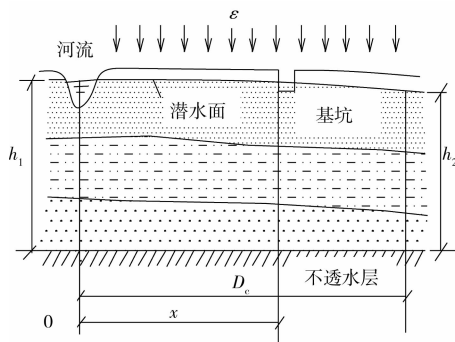


图2 基坑周边潜水补给关系图

则(10)式可简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \epsilon = 0 \quad (13)$$

其渗流边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} h(x) \Big|_{x=0} &= h_1 \\ h(x) \Big|_{x=D_c} &= h_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

基于渗流边界条件,解答(14)式偏微分方程可得潜水面曲线方程为:

$$h^2 = h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{D_c} x + \frac{\epsilon}{k_x} x (D_c - x) \quad (15)$$

式中:  $h_1$  为河流表面测管水头高度, m;  $h_2$  为河流影响范围边界处测管水头高度, m;  $h$  为地下水渗流场任意点测管水头高度, m;  $\epsilon$  为降水入渗量, mm/d;  $\epsilon = p_0 \cdot \eta$ ;  $p_0$  为降雨量, mm/d;  $\eta$  为降水入渗系数, 取决于土层的性质。

由式(15)可求解地下水渗流场中任意点的测管水头,从而为地表降水入渗与河流水位涨落耦合作用下基坑渗流稳定性分析提供依据。

### 1.3 基坑渗流-应力耦合分析原理

现代渗流力学理论认为基坑渗流与土体介质应力场存在相互影响、相互作用的关系,基于已有的研究成果<sup>[6]</sup>,根据伽辽金有限元法,可得渗流-耦合有限元法的增量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} [K_e] \{ \Delta \delta \}^e + [L_e] \{ \Delta \beta \}^e &= \{ \Delta R_F \}^e \\ [K_e]^T \{ \Delta \delta \}^e - (\theta \Delta [L_s] + [L_T]) \{ \Delta \beta \}^e &= \{ \Delta R_Q \}^e \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中:  $[K_e]$  为单元刚度矩阵;  $[L_e]$  为单元耦合矩阵,表示与单元节点孔隙水压力相对应的节点力,体现固结过程孔隙水压力对节点位移的贡献;  $(\theta \Delta [L_s] + [L_T])$  为单元渗流导水矩阵;  $\{ \Delta \delta \}^e$  为单元位移增量;  $\{ \Delta R_F \}^e$  为节点力增量;  $\{ \Delta R_Q \}^e$  为节点流量增量。

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

某建筑基坑开挖深度为 8.5 m,占地面积约为 6 000 m<sup>2</sup>;呈南北间距 65 m,东西间距 98 m 的近似矩形分布。基坑北侧距离 325 国道约 12 m,西侧距离城市主干道路约 25 m,但均缺乏放坡开挖条件,设计采用喷锚支护;东侧 2.5 m 以外为 4—6 层居民楼,南侧距离市政道路约 3.5 m,设计采用  $\varphi 800$  mm 钻孔灌注加一道预应力锚索支护,设计桩长为 18 m,间距 1.2 m,桩顶设置高 500 mm,宽 1 000 mm 的压顶圈梁一道,桩端持力层为中砂层。锚索采用 4×7 $\varphi 5$  钢绞线,水平间距 1.5 m,设计长度为 34.0 m,锚固体直径 150 mm,预应力锁定值取 150 kN。考虑到地下水位较高,地层属于透水性强的素填土以及中细砂、粉砂层,且受邻近河流水位涨落的影响,设计采用双排直径为 550 mm,间距为 350 mm 的深层搅拌止水帷幕方案,搅拌桩设计长度为 13 m,桩端伸入中砂层,属于悬挂式止水帷幕。

### 2.2 工程地质条件

该基坑地处珠江三角洲冲积平原,属河口三角洲堆积地貌。地质条件主要由:1)填土:由砂性素填土和耕植土组成,主要以石英质中砂以及粉质粘土为主,平均厚度为 4.2 m;2)冲积土:由砂土及淤质土组成,分为 4 个亚层:2)-1 细砂:石英质,松散,饱和,局部夹粉砂,平均厚度 5.1 m。2)-2 中砂:石英质,稍密,饱和,平均厚度为 10.2 m。2)-3 粉砂:石英质,中密,饱和,平均厚度为 11.8 m。2)-4:淤泥质粉质粘土:流塑状,局部夹淤泥和粉砂,平均厚度为 6.7 m;3)基岩:中风化砂岩。其中:填土的降水入渗系数为 0.2,中细砂、粉砂取为 0.25。

场地地下水属于孔隙潜水,主要赋存于填土层及冲积砂土孔隙中,由大气降水补给及含水层侧向补给,场地地下水稳定埋深为 1.5 m,但受北侧河流水位涨落影响场地地下水位会出现波动。因基坑施工期处于雨季,受暴雨影响,基坑开挖期间,河流水位

最大涨幅达到 2.0 m,最大单日降水量达到 210 mm。

### 2.3 基坑渗流稳定性分析

#### 1) 基坑周边地下水位确定

考虑到基坑东南侧距离居民楼以及市政道路很近,其安全稳定对整个基坑起控制作用,因此建立二维有限元渗流-应力耦合分析模型时,以东南侧边界为研究对象,利用 Midas 软件对基坑应力与渗流耦合作用进行分析。模型尺寸取为 90 m×38 m,共设置 1 340 个单元,其中土层与基坑止水帷幕采用平面四边形单元,围护桩采用梁单元进行模拟,考虑到软土地层中施工预应力锚索,其锚固力变化规律比较复杂,有限分析软件无法真实模拟锚固力的变化过程,为此,尝试在锚头作用点施加方向与锚索受力方向一致、大小随时间变化的集中力取代锚索的锚固效应,集中力变化规律通过基坑施工过程中锚索锚固力现场监测资料分析得出。

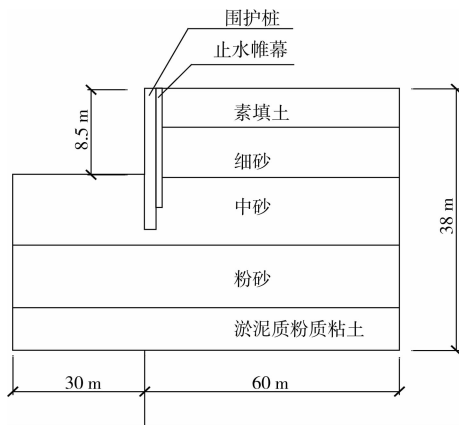


图 3 基坑渗流-应力耦合分析模型

表 1 土层主要物理力学指标

岩土名称	状态	天然密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	凝聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	渗透系数/( $m \cdot d^{-1}$ )	
					垂直	水平
素填土	松散	1.70	4.2	25.0	3.48	3.48
淤泥质粘土	流塑	1.76	8.1	6.0	0.002 08	0.002 16
细砂	松散	1.88	5.2	26.0	2.58	2.08
中砂	稍密	1.95	3.1	30.0	2.40	2.19
粉砂	中密	1.92	5.4	25.0	1.23	1.23
止水帷幕	密实	2.10	125	30.0	0.001 03	0.001 03

因基坑开挖处于雨季,为确保基坑施工安全,以开挖期间可能出现的最高地下水位作为基坑应力与渗流耦合计算的依据。根据提供的基础资料,利用(15)式计算可得在地表降水与河流水位涨落耦合作用下基坑周边地下水位涨幅  $\Delta h = 1.21 m$ 。

2) 应力-渗流耦合分析模型考虑到渗流分析的要求,模型下部边界取至淤泥质粉质粘土层底,两侧设置节点总水头边界,总水头基准面设置于淤泥

质粉质粘土层的顶部,并以稳态渗流模拟基坑开挖之前的初始渗流场,以瞬态渗流模拟开挖过程基坑内部降水所引起的渗流固结行为,施工过程基坑开挖面水头边界随降水施工而变化。为了真实模拟基坑降水渗流与施工应力耦合效应,在确定施工阶段时按初始渗流计算——初始应力场计算——第 1 次降水与渗流固结——第 1 步开挖施工——预应力锚索施加——第 2 次降水与渗流固结——第 2 步开挖施工等顺序设置施工开挖步。

#### 3) 模拟成果与原因分析

通过分析可得基坑开挖结束时,基坑水平位移、竖向位移以及基坑渗流场总水头与渗流速度等值线如图 4(a)-(d)所示。由图 4(a)、(b)可知,基坑围护结构水平位移主要分布于桩底部位,最大值可达 66.6 mm,桩顶部位位移仅为 8.33 mm;基坑底部竖向位移高达 228.6 mm,且主要集中在邻近围护桩 10 m 左右的坑底部位。同时,由图 4(c)、(d)可知,止水帷幕以下,中砂层以内最大渗流速度高达 1.685 m/d,粉砂层以内最大渗流速度达到 1.26 m/d,取粉砂与中砂层的临界水力坡降  $i_{cr} = 1$ ,计算可得中砂层抗渗流安全系数  $k_{f1} = 1.42$ ,粉砂层抗渗流安全系数  $k_{f2} = 0.976$ 。按照国内相关技术规程,如:《深圳地区建筑深基坑支护技术规范》规定,对于 1、2、3 级支护工程抗渗流安全系数分别应取 3.00、2.75、2.50;上海市《基坑工程设计规程》规定,当墙底土为砂土、砂质粉土或有明显的砂性土夹层时取 3.0,其它土层取 2.0。显然该工程抗渗流稳定性安全系数不符合要求,而设计中按传统方法仅考虑坑外稳定水位(未考虑暴雨入参与邻近河流水位涨落影响)时基坑抗渗流稳定性安全系数基本符合相关规范要求。

而计算结果与基坑工程施工实践表明,该基坑工程的止水帷幕以及桩锚式支护设计方案的确存在问题。当基坑开挖至 4.5 m 时,基坑底部靠近围护桩部位便出现多处涌沙现象,造成基坑无法正常开挖施工,同时,基坑监测数据显示预应力锚索锚固力随时间迅速衰减。基坑因大量抽水造成东南侧市政管道出现不均匀沉降与路面开裂,表明本文提出的分析方法客观地反映了基坑工程的实际。为确保基坑施工与周边建筑物安全,该基坑最终只能采用回填、更改设计方案重新开挖施工等安全措施,造成了严重的经济损失。

基于数值分析结果以及基坑工程施工实践,归纳该基坑主要存在如下几方面问题:1)设计问题:该基坑工程设计采用悬挂式止水帷幕,围护桩以及深层搅拌桩桩端均处于透水性极强的中砂层,其下

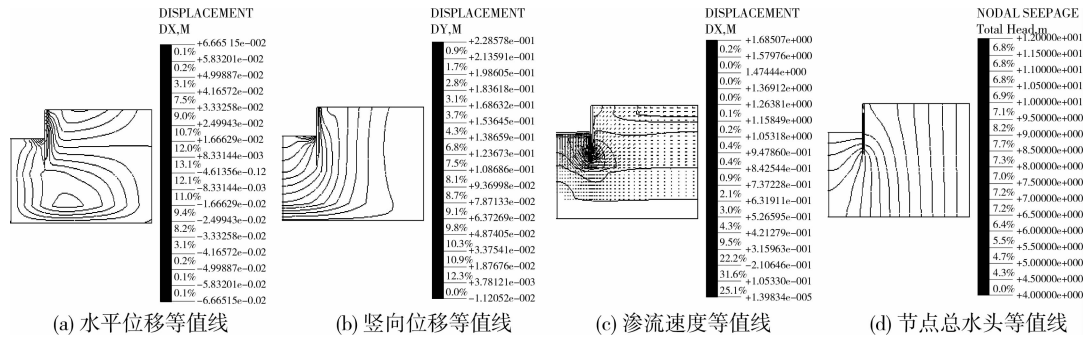


图 4 基坑应力-渗流耦合计算结果

部尚有透水性强的粉砂层,在基坑开挖深度达到 8.5 m 的情况下,搅拌桩长仅为 13 m。按规范公式计算其抗渗流安全系数  $k_f = 2.5$ ,也只能达到中国相关基坑工程技术规范规定的三级基坑抗渗流稳定性安全标准,显然是不符合要求的。同时基坑设计中尚未考虑雨季施工以及邻近河流水位涨落对地下水位的影响,更增加了基坑抗渗不稳定因素。其次,该基坑土质条件较差,对于高水位条件下的软弱土层采用预应力锚索方案不合理,经验表明,在地下水位较高的松软地层中采用预应力锚索方案其锚固效果不可靠,基坑监测成果也充分反映了这一规律。

2) 施工问题:基坑工程施工过程中,受河流水位涨落动水压力影响,出现过深层搅拌桩无法正常钻进的现象,造成深层搅拌搭接不连续,出现局部渗漏,影响止水效果;3) 规范问题:关于基坑渗流稳定性计算国家以及地区规范均提出了具体要求,但大量工程实践表明,受各地工程地质、水文地质条件与基坑周边环境以及基坑围护结构变形,基坑底部的变位和施工扰动等因素影响,地基土的渗透性能会发生很大改变,按常规计算方法确定的基坑抗渗流安全系数未能反映基坑工程应力-应变与渗流耦合作用的实际。设计过程中,采用数值计算方法对基坑渗流稳定进行复核验算对确保基坑安全与稳定十分必要。

### 3 结论

1) 地下水是影响基坑工程安全稳定的关键因素,基于裘布依(Dupuit)假定建立分层地基地下水渗流耦合方程能综合反映暴雨入渗与邻近河流水位涨落对地下潜水位的影响,从而为有效分析基坑渗流稳定性提供重要依据。

2) 基坑工程的渗流稳定性受工程地质、水文地质条件与基坑周边环境以及基坑围护结构变形,基坑底部的变位和施工扰动等因素影响显著,基于应力-渗流耦合效应分析的基坑稳定性分析方法较好地反映基坑工程的实际。

3) 基坑工程是一项复杂的系统工程,必须从设计、施工、监测等多方面入手,加强基坑工程全过程管理,以提高设计与施工工作的科学性与合理性,切实做好施工过程信息化监测工作,及时反馈基坑安全信息,为变更设计与施工方案,确保基坑施工安全奠定基础。

### 参考文献:

- [1] 王曙光. 深基坑支护事故处理经验录[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 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, 2010,42(3):105-110.  
DONG CHENG, ZHENG YING-REN, TANG XIAO-SONG. Integral stability analysis of foundation pits under seepage by using FEM strength reduction[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,42(3):105-110.
- [3] CHEN GUO-XIN. A new method for the slope stability analysis of the foundation pit due to groundwater seepage[C]//Proc. 4th International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver, Canada, 2006.
- [4] DEBASIS ROY, KEITH E ROBINSON. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering [J]. Engineering Geology, 2009,107(3): 109-117.
- [5] 孙志,周援衡,孔伟,等. 地下连续墙条件下基坑渗流场和应力场模拟分析[J]. 水运工程, 2009,434(11):23-28.  
SUN ZHI, ZHOU YUAN-HENG, KONG WEI. Simulation of seepage field and stress field in the foundation pit adopting diaphragm wall[J]. Port & Waterway Engineering, 2009,434(11):23-28.
- [6] 贾彩虹,王翔,王媛. 考虑渗流-应力耦合作用的基坑变形研究[J]. 武汉理工大学报, 2010,32(1):119-122.  
JIA CAI-HONG, WANG XIANG, WANG YUAN. Research on the deformation of foundation pit considering couple effect of seepage and stress[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010,32(1):119-122.

(下转第 84 页)

- heat-exchanging pipe in using urban original wastewater as cool and heat source[J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(1): 59-62.
- [8] 崔福义, 李晓明, 周红. 污水换热器污垢热阻特性研究[J]. *煤气与热力*, 2005, 25(6): 9-12.  
CUI FU-YI, LI XIAO-MING, ZHOU HONG. Study on fouling heat resistance performance of sewage heat exchanger[J]. *Gas and Heat*, 2005, 25(6): 9-12.
- [9] EPSTEIN N. Fouling in Heat Exchangers[C]//*Heat Transfer 1978-Pro 6th IHTC*, 1979:235-253.
- [10] KUPPAN T, 钱颂文, 廖景娉, 等. 换热器设计手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [11] KERN D Q, SEATON R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. *Chem. Eng. Prog.*, 1959(4): 258-262.
- [12] ZANDI I. *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application* [M]. Pergamon Press, New York, 1971.
- [13] WU RONG-HUA, ZHANG CHENG-HU, SUN DE-XIN. Research on turbulent flow characteristic of urban wastewater as non-newtonian exponential homogeneous fluid[J]. *Journal of Hydrodynamic*, 2005, 20(6): 708-713.
- [14] 屠大燕. 流体力学与流体机械[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [15] DUDDRIDGE J E, KENT C A, LAWS J F. Effect of surface shear stress on the attachment of pseudomonas fluorescents to stainless steel under defined flow conditions [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1982, 24(1): 153-164.
- [16] 钱伟长, 叶开沅. 弹性力学[M]. 北京: 科学出版社, 1956.
- [17] 张少峰. 三相循环流化床蒸发器防除垢和强化传热的研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [18] 毕海洋. 污水源热泵系统取水换热过程流化除垢与强化换热方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

(编辑 胡英奎)

(上接第70页)

- [7] ROBERT M QUIGLEYF, EDERICOFE RNANDEZA, KERRYR OW N D R. Clayey barrier assessment for impoundment of domestic waste leachate (southern Ontario) including clay-leachate compatibility by hydraulic conductivity testing[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988, 25(2): 574-581.
- [8] CALVELLO M, CASCINI L, SORBINO, G. A numerical procedure for predicting rainfall-induced movements of active landslides along pre-existing slip surfaces [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 32(4): 327-351.
- [9] 廖红建, 姬建. 深基坑开挖中饱和-非饱和土体渗流-沉降的耦合分析[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(4): 637-640.  
LIAO HONG-JIAN, JI JIAN. Coupled analysis of seepage-settlement for saturated-unsaturated soil in deep foundation pit excavation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(4): 637-640.
- [10] DACUNTO B, PARENTE F, URCIUOLI G. Numerical models for 2D free boundary analysis of groundwater in slopes stabilized by drain trenches[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2007, 53(10): 1615-1626.
- [11] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(5): 575-587.
- [12] 骆祖江, 李朗, 姚天强. 松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 1947-1651.  
LUO ZU-JIANG, LI LANG, YAO TIAN-QIANG. Coupling model of three dimensional seepage and land-subsidence for dewatering of deep foundation pit in loose confined aquifers[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1947-1651.
- [13] 李筱艳. 基于位移反分析的深基坑渗流场与应力场完全耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1269-1274.  
LI XIAO-YAN. Fully coupling analysis of seepage and stress for deep foundation pit based on displacement back analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1269-1274.
- [14] 王君连. 工程地下水计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

(编辑 胡玲)