



承压水基坑突涌的水力劈裂

王军玺, 吴伟雄, 李琼, 陶虎, 李兴田, 石喜, 杨治国

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 突涌是基坑工程施工过程中常遇的主要灾害之一。现有的承压水基坑突涌稳定分析方法均不能反应突涌破坏机理。从水力劈裂的机理入手, 建议承压水基坑突涌问题应考虑应力-渗流场耦合作用。在 Biot 固结理论基础上, 建立了基坑突涌分析水力劈裂耦合模型, 考虑了土体物理力学性质的动态演化。试图通过分析工作面推进过程中基底土体应力场和渗流场的变化, 来判断突涌发生的可能性。研究表明: 突涌始于基底隔水层所发生的张拉破坏, 基底周边是发生突涌的危险位置; 渗透弱面(初始张拉裂缝)的水压楔劈效应所导致的水力劈裂为基坑突涌提供了通道; 高水压力的存在是突涌发生的前提条件, 高水力梯度的产生是基坑突涌的根源。

关键词: 突涌; 渗流-应力耦合; 水力劈裂; 承压水; 基坑工程

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)04-0105-07

Burst in foundation pit on confined water using hydro-fracturing

Wang Junxi, Wu Weixiong, Li Qiong, Tao Hu, Li Xintian, Shi Xi, Yang Zhiguo

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: Burst is one of the main disasters in the foundation pit engineering. However, the current methods for analyzing burst stability of the foundation pit on confined water could not reflect the failure mechanism. According to mechanism of hydro-fracturing, the seepage-stress coupling should be considered when burst is studied. The coupling model for the foundation pit burst in hydro-fracturing process is established based on Biot's consolidation theory, and the dynamic evolution of soils permeability and mechanical characteristic are considered. The possibility of burst is explored by analyzing the change of stress field and seepage field during the excavation process. The results show that burst begins in tension failure in aquiclude of foundation base, whilst the periphery of foundation base is where more likely burst occurs; hydro-fracturing caused by water wedge effect of weak surface infiltration (it is the initial tension crack) provides the channel for burst and a confined bed with high pore water pressure is the precondition for burst, but high hydraulic gradient is the root cause for burst.

Key words: burst; seepage-stress coupling; hydro-fracturing; confined water; foundation pit engineering

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51469012); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1139)

作者简介: 王军玺(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构设计、分析理论与方法研究, (E-mail) wangjunxi080101@126.com。

Received: 2014-12-01

Foundation item: National Natural Sciencal Foundation of China (No. 51469012); Yangtze River Scholars and Innovation Team Development Plan Program Supported by Ministry of Education of P. R. China (No. IRT1139)

Author brief: Wang Junxi (1974-), PhD, associate professor, main research interests: hydraulic structure design, analysis theory and method, (E-mail) wangjunxi080101@126.com.

突涌是基坑开挖过程中常见的地质灾害之一。随着地下空间的大规模开发利用,基坑的深度和广度在不断增加。突涌现象在深大基坑中表现得尤为突出。基坑突涌^[1]是基坑底部的不透水层在其下部承压含水层水压力的作用下隆起并发生突水涌泥的现象。基坑工程中如果发生突涌破坏,不仅造成围护结构倒塌,基坑报废,还会危及周边环境的安全,导致人民生命财产的损失。

关于地下工程突涌问题的研究,目前以关注矿井和岩溶地质隧道突涌较多,对深基坑突涌问题的研究较为少见。规范^[2]规定采用压力平衡理论^[3]对承压水基坑的抗突涌稳定性进行计算分析。基坑设计中也只是简单地将隔水层与下伏承压含水层接触面上的水压力值与单位面积上的土压力相等作为基坑突涌的判断标准。目前,普遍认为由于忽略了隔水层土体的抗剪强度和刚度,所以此方法较为保守。然而,尽管基底隔水层整体满足抗突涌条件,仍然会发生局部失稳破坏^[4]。此外,一些学者探索用其他方法来研究深基坑突涌问题,比如连续梁、板分析法^[5-6],预应力连续梁、板分析法^[7-8],均质连续体法^[9]等。但是,在承压水作用下,基底土体将产生较大的隆起变形,隔水层内会形成裂隙,其受力条件及破坏模式与梁、板存在差异;并且当隔水层厚度与基坑跨度之比较大时,将隔水层简化成固端梁、板并不合理。均质连续体法假设突涌破坏体为均质柱体,这一假定与承压水基坑实际突涌破坏形式相差甚远。而且上述方法均视隔水层为完全不透水的整体,忽略了土体固有的属性,尤其是隔水层土体在承压水作用下的应力-渗流耦合作用的影响。可见,现有承压水基坑突涌稳定分析方法均存在一些不足与缺陷,不能对基坑突涌破坏机理作出合理的解释。明确基底土体发生突涌破坏的力学机理是正确分析、定量判断承压水基坑突涌稳定性的前提。孙玉永^[10]针对现有的基坑突涌稳定性分析方法和成果,提出了借助水力劈裂来揭示基坑突涌发生的内在机理。孙玉永等^[11]针对基坑突涌稳定及破坏模式进行离心模型试验研究表明:基坑突水涌砂破坏是由于地下结构与隔水层接触面发生了水力劈裂所引起的。

水力劈裂最基本的表述是水压力超过土中应力而将土体劈开的现象^[12]。承压水是充满两个隔水层之间的含水层中的地下水,具有承压性;而基坑开挖是竖向卸载过程。承压水基坑开挖到一定深度,

基底隔水层与其下伏承压含水层的界面邻域水压力有可能超过土应力,隔水层发生水力劈裂,引起基坑突涌。

水力劈裂是指由于水压力的作用在土体中引起裂缝的发生与扩展的一种物理现象^[13],反映了水压力作用下土体的力学响应;反之,土体应力状态的改变导致其渗透特性的变化以及渗流场的改变,从而为水力劈裂的产生创造了条件。周健等^[14]结合深基坑突涌问题进行了室内模型试验,研究发现突涌破坏发生前后基底土体物理力学性质发生了较大的变化。因此,水力劈裂是应力-渗流耦合作用的表现。基坑的开挖打破了土体原平衡状态,引起土体应力场与渗流场的变化。在基坑突涌的灾变演化过程中,开挖卸荷条件下基底土体的应力-渗流耦合效应是突涌通道(即水力劈裂)形成的关键科学问题。

本文基于水力劈裂基本理论,以基坑突涌现象为研究背景,建立基底劈裂过程中的渗流-应力耦合模型,试图模拟随开挖面推进,基底土体的应力变形以及孔隙水压力场的发展变化过程,从而判断基坑突涌与否,为类似基坑工程施工过程中是否需要采取紧急防突措施提供参考依据。

1 水力劈裂耦合分析模型

水力劈裂耦合分析模型包括孔隙水运动与土体变形耦合模型以及土体水力劈裂模型。

1.1 渗流-应力耦合模型

1.1.1 渗流与应力场耦合控制方程 基坑开挖过程中的突涌现象涉及渗流与应力耦合问题。渗流-应力耦合问题的基本方程包括土体变形方程和孔隙水流动方程。根据 Biot 固结理论^[15],渗流-应力耦合方程为

$$-G\nabla^2 u_i - \frac{G}{1-2\nu} u_{i,jj} + p_{,i} + F_i = 0$$

$$i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\dot{u}_{i,i} - \frac{1}{\gamma_w} \nabla(k\nabla \cdot p) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: G 为剪切模量; ν 为泊松比; u_i 为位移分量; p 为孔隙水压力; k 为渗透系数; F_i 为土的单位体积力; γ_w 为水的重度。

先采用 Galerkin 加权余量法对流-固耦合方程进行空间域离散,再采用有限差分法进行时间域离散^[16],可以得到增量形式的流-固耦合有限元方程组为

$$\begin{bmatrix} [K_e] \\ [K_c]^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{p\}_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta R_F\} \\ \{\Delta R_p\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中:[K_e]为弹性刚度矩阵; [K_c]为渗流与变形耦合矩阵; [K_s]为渗流矩阵; $\{\Delta K_F\}$ 为结点力增量向量; $\{\Delta K_p\}$ 为结点流量增量向量; θ 为积分常数; Δt 为时段; t 为时刻。

1.1.2 模型中有关物理力学参数的处理 基坑开挖过程中的突涌现象所涉及的渗流与应力耦合作用主要体现在两个方面:一方面,孔隙水压力的改变不仅改变了土体的应力状态,还引起土体力学性质的变化;另一方面,土体的变形改变了孔隙水的流动空间,从而引起其渗透性能的改变、以及孔隙水压力发生改变。

1) Duncan-Chang 非线性弹性 $E-\nu$ 模型

采用 Duncan-Chang 非线性弹性模型,将土体的应力-应变关系推广到非线性,则 $\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\epsilon\}$ 中矩阵 $[D]$ 中的弹性模量 E 和泊松比 ν 不再为常量,随应力状态而改变。切线弹性模量 E_t 和切线泊松比 ν_t 分别为^[17]

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \right\}^2} \quad (5)$$

式中: c 、 φ 为强度指标; p_a 为大气压强; K 、 n 、 R_f 、 G 、 F 、 D 均为试验参数。

2) 渗透系数 k 演化方程

根据 Biot 固结理论,可得到渗透系数 k 的演化方程为

$$k = k_0 \exp \left[-\beta \frac{\frac{\sigma'_{ii}}{3} + (1 - \alpha)p}{H} \right] \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中: k_0 为土体固有渗透系数; σ'_{ii} 为平均有效应力; H 为 Biot 常数, $1/H$ 表示由于孔隙水压力变化所引起的土体体积的变化,是孔隙水压力完全消散时,排出的孔隙水量与土体体积应变之比; α 为孔隙水压力系数; β 为耦合系数,表征应力对渗透性的影响程度。

1.2 水力劈裂的控制方程

土体水力劈裂常用的分析判断方法有总应力法和有效应力法。沈珠江等^[18]认为总应力法高估了水力劈裂的可能性。有效应力法认为当土体的有效

主应力为负值且超过其抗拉强度时,水力劈裂发生,即

$$\sigma' = \sigma - p_w \leq -\sigma_t \quad (6)$$

式中: σ' 为有效应力; σ 为总应力; p 为孔隙水压力; σ_t 为抗拉强度。

有效应力分析判断方法符合土体水力劈裂破坏的力学机理。黄文熙^[13]指出:“心墙中任何一点处的孔隙水压力如果使该点处的最小主应力的有效值降低至心墙土料的抗拉强度,心墙就会沿着这个最小主应力面产生水力劈裂”。在此基础上,孙亚平^[19]利用自制的水力劈裂装置,对击实粘土厚壁圆筒试件进行了系列试验,证明了土体中的有效小主应力达到其抗拉强度是水力劈裂发生的必要条件。目前,这一结论已经得到公认^[20]。牛富俊等^[21]应用自行设计的基坑突涌失稳装置进行试验,认为基坑突涌是隔水层在下伏承压水作用下发生的拉伸破坏。

2 算例

计算模拟随开挖面的推进,基底隔水层土体在开挖卸载及其下伏承压含水层水压力作用下的应力应变状态,分析基坑突涌稳定性。

2.1 算例描述

图 1 为基坑平面、剖面图,地下承压含水层层厚为 20 m,埋深为 25 m。潜水位与地面平齐。承压水的初始水位在地面以下 10 m 处。承压含水层及上覆隔水层物理性质指标取值见表 1。

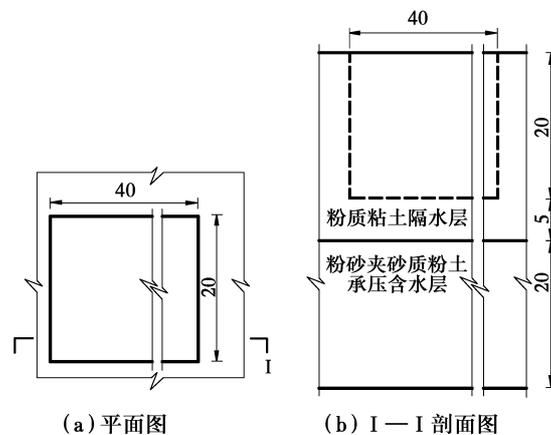


图 1 基坑平面、剖面图(单位:m)

Fig. 1 Plan view and cross section drawing of the pit (unit: m)

基坑分 4 个步骤完成开挖,各步开挖深度均为 5 m,各步开挖时间及开挖后间歇期均为 5 d。

基坑围护结构采用内撑式地下连续墙,墙深

25 m,沿深度方向设 4 道钢筋混凝土支撑,混凝土强度等级为 C30,支撑中心距地表依次为 1、6、11 和 16 m。

2.2 计算方案

应用有限元程序 PLAXIS^[22] 建立平面应变模型,如图 2 所示。

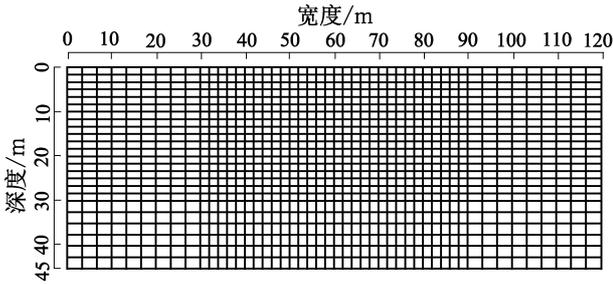


图 2 基坑模型有限元网格
Fig. 2 Finite element mesh of the pit model

模型的左上角为坐标原点。地下连续墙采用梁单元,抗拉刚度 $E_A = 3.0 \times 10^7$ kN/m,抗弯刚度 $E_I = 2.5 \times 10^6$ kN·m;支撑采用杆单元,刚度 $E = 3.5 \times 10^6$ kN。计算域左边和右边为水平向位移约束;底边为竖直、水平向位移约束;上边及开挖过程中基底面为自由边界。

基坑土层的潜水位与地面平齐,计算中,将水位改变到相应的开挖面标高,模拟潜水层土体的疏干。开挖过程中基底面的孔隙水压力为 0,为已知水头边界。除基底面外,其余均为不透水边界。

首先计算土体初始状态,即原始应力场和孔隙水压力场。然后用分步卸载来近似模拟开挖面的推进。

2.3 计算结果及分析

图 3~5 为 3 个代表性开挖面位置的基坑周围的应力场、位移场和压力水头场,其中位移向下为正。

由图 3~5 总体来看:开挖过程中基底表面隆

起,基底低渗透性粉质粘土相对隔水层内周边的水平向水力梯度较大,隔水层内应力状态变化较大,粉砂夹砂质粉土承压含水层与上覆隔水层接触面上应力分布很不均匀。

由图 3(a)、4(a)、5(a)可见:随着开挖面的下移,基底下伏承压含水层内水压力逐渐变小;隔水层内水压力梯度逐渐变大,在隔水层内周边存在较大的水平向水力梯度。纪佑军等^[23]采用应力场和渗流场耦合模型,通过有限元法模拟了基坑开挖过程,计算结果同样表明在基坑角落处水力梯度较大。

由图 3(b)、4(b)、5(b)来看:在逐步开挖卸荷和下伏承压含水层高水压力作用下,隔水层表面隆起变形量逐渐变大,从中部向周边则逐渐变小。这一变化趋势与李镜培等^[24]采用离心模型试验技术以及有限元数值模拟结果相同。但是,当开挖达到基坑设计深度后(图 5(b)),隔水层表面中部隆起变形量反而减小,承压含水层发生了沉降。

由图 3(c)、4(c)、5(c)可以看出:在逐步开挖卸荷条件下,隔水层内上部中间、下部左右两侧水平向的压应力逐渐变小;承压含水层与隔水层接触面上应力分布很不均匀。当开挖达到基坑设计深度后(图 5(c)),隔水层内以上 3 个部位的水平向土压力进一步减小;隔水层与下伏含水层接触面附近区域从中间向两边水平向有效应力逐渐减小,靠近边缘处有效应力为 0,相反,隔水层上部从两侧向中间水平向有效应力逐渐变小,中间有效应力为 0。孙玉永等^[11]研究结果表明承压含水层与隔水层的界面处体积应变较大,形成有效应力为 0 的区域,并认为产生了水压楔劈效应。

由图 3~5 中,孔隙水压力、小主应力以及基坑底面隆起三者变化总体趋势来看,开挖达到基坑设计深度后,基底发生了突涌现象。

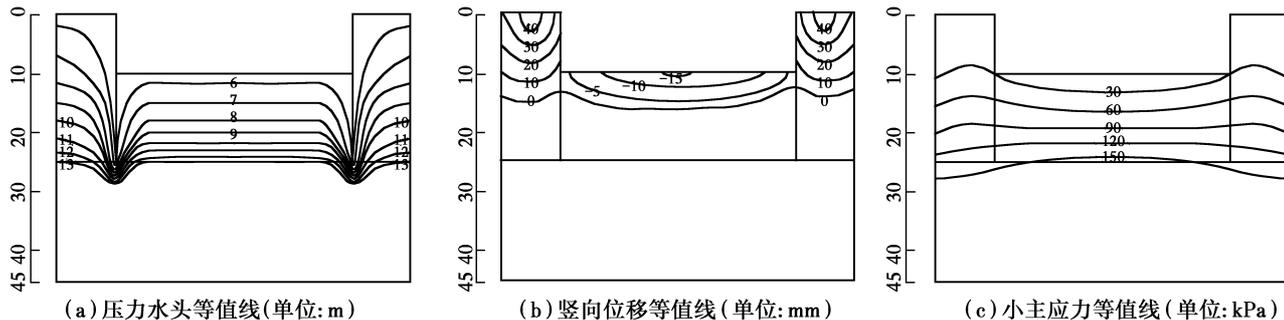


图 3 2 级开挖应力场、位移场与压力水头场

Fig. 3 Contour map of stress field, displacement field and pressure field at excavation 2

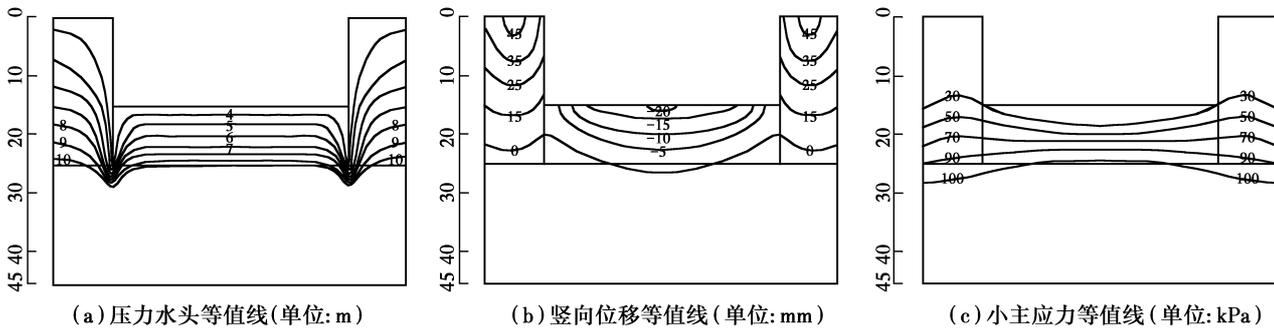


图 4 3 级开挖应力场、位移场与压力水头场

Fig. 4 Contour map of stress field, displacement field and pressure field at excavation 3

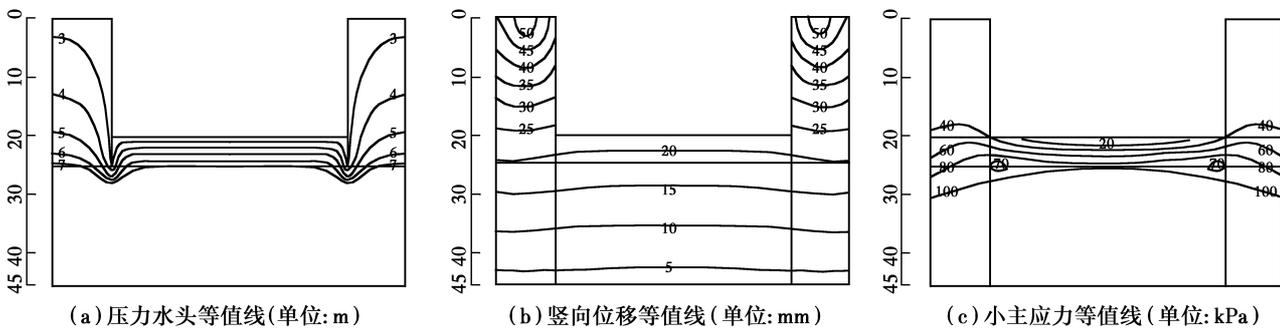


图 5 4 级开挖应力场、位移场与压力水头场

Fig. 5 Contour map of stress field, displacement field and pressure field at excavation 4

抗拉强度有阻碍土体裂缝发生的作用,但其值一般很小,影响不大,当有效应力为 0 时土体就开裂了。从土体的特性看,如果发生裂缝,必定存在拉裂破坏或剪切破坏。从数值计算分析的结果看,基底隔水层与其下伏含水层接触面边缘、隔水层上部中间等部位有效应力为 0。因此,水力劈裂始于土体的张拉破坏。

但是,土体中的有效小主应力达到其抗拉强度只是水力劈裂发生的必要条件,水力劈裂是在水压力作用下土体裂缝的发生、发展、贯通的过程。裂缝的扩展,应该有作用于裂缝表面的扩张力。根据水力劈裂的定义,此扩张力只有水压力,也就是说裂缝的扩展是初始张拉裂缝水压楔劈效应的结果。而对基底隔水层初始张拉裂缝产生水压楔劈效应的水压力只能是其下伏承压含水层的水压力。因此,只有隔水层内下部左右两侧的初始张拉裂缝在承压含水层水压楔劈作用下会逐渐发展,最终贯通,从而形成突涌通道。所以,在下伏承压水作用下基坑突涌始于基底隔水层所发生的张拉破坏,承压含水层水压力是初始张拉裂缝发展成为贯穿裂缝的动力,基底周边是发生突涌的危险位置。

初始张拉裂缝其实就是渗透弱面^[20]。承压水

基坑施工(竖向卸载)过程中,在下伏承压含水层水压力作用下,基底隔水层土体应力应变状态发生了变化,存在有效应力为 0 的区域,产生了初始张拉裂缝,形成了渗透弱面,导致渗透性发生了改变,为水压楔劈效应提供了必要条件,提高了基坑突涌的可能性。所以,承压含水层高水压力的存在是开挖过程中基坑突涌的前提条件。

渗透弱面的楔劈效应,也就是初始张拉裂缝的进一步的发展、贯通,最终造成土体水力劈裂的过程。这一过程取决于水力梯度,即初始张拉裂缝面上存在较大的水压力——扩张力。由基坑开挖过程模拟结果来看,随着开挖的进展,工作面的下移,基底隔水层中的水力梯度逐渐变大,隔水层内周边存在较大的水平向水力梯度,当水力梯度达到临界值,即突涌临界水力梯度,基坑突涌。因此,渗透弱面的楔劈效应导致的水力劈裂为突涌提供了通道,基底周边的突涌破坏是由隔水层发生的水力劈裂所引起的,高水力梯度的产生是基坑突涌的根本原因,突涌临界水力梯度是判断基坑发生突涌的重要特征参数。

3 结 论

承压水基坑的突涌是影响深基坑工程安全的最

重要因素,也是深基坑工程中亟待解决的关键技术问题。本文尝试引入渗流-应力耦合模型及水力劈裂概念研究承压水基坑的突涌问题,得出如下结论:

1)承压水基坑突涌现象始于基底隔水层所发生的张拉破坏,基底周边是发生突涌的危险位置。

2)渗透弱面(初始张拉裂缝)的产生导致隔水层的渗透性发生了改变,提高了基坑突涌的可能性;渗透弱面的水压楔劈效应所导致的水力劈裂为基坑突涌提供了通道。

3)高水压力的存在是基坑突涌的前提条件,高水力梯度的产生是基坑突涌的根源。

基坑突涌是一个复杂的问题,采用水力劈裂的概念对其进行研究是一种尝试,从物理本质上讲本文的研究方法是正确的、研究思路是可行的,对类似地下工程突水问题具有一定借鉴意义,但对其机理的探索还需要在试验研究方面做一些工作。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] Terzaghi K. Simple tests to determine hydrostatic uplift [J]. Engineering News Record, 1936, 116(6): 872-875.
- [4] 潘泓,曹洪,谭泽新,等. 基坑抗突涌计算方法的对比分析及应用探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (Sup2): 3529-3534.
Pan H, Cao H, Tan Z X, et al. Discussion on comparison analysis and application of calculation methods to anti-uprush of foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Sup2): 3529-3534. (in Chinese)
- [5] 梁勇然. 条形基坑的突涌分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 75-79.
Liang Y R. Analysis of strip pit intrushing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 75-79. (in Chinese)
- [6] 李建交,屠厚泽. 关于矩形基坑中突涌问题的分析与探讨[J]. 地质科技情报, 1998, 17(3): 91-94.
Li J J, Tu H Z. Analysis and discussion on the piping problem of rectangular foundation pits [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(3): 91-94. (in Chinese)
- [7] 杜贵成. 改进的条形基坑突涌判别式[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 1998, 17(5): 507-510.
Du G C. Further discussion of judgment in gushing of strip pit of foundations [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 1998, 17(5): 507-510. (in Chinese)
- [8] 马石城,印长俊,邹银生. 抗承压水基坑底板的厚度分析与计算[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 204-208.
Ma S C, Yin C J, Zou Y S. Analysis and calculation of the pit base plate thickness of bearing resistance water foundation [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 204-208. (in Chinese)
- [9] 谭松林. 考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(2): 209-211, 216.
Tan S L. Analyses of abrupt gush problem of soil and water based on strength of soil body in building foundation pit [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 209-211, 216. (in Chinese)
- [10] 孙玉永. 承压水基坑抗突涌定量分析的复杂性和新思路[J]. 铜陵学院学报, 2012(2): 100-103.
Sun Y Y. Complexity and new ideas of the anti-bursting stability of confined water foundation pit [J]. Journal of China College of Tongling, 2012(2): 100-103. (in Chinese)
- [11] 孙玉永,周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2551-2556.
Sun Y Y, Zhou S H. Mode and mechanism of bursting in foundation pit based on centrifugal model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2551-2556. (in Chinese)
- [12] 殷宗泽,朱俊高,袁俊平,等. 心墙堆石坝的水力劈裂分析[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1348-1353.
Yin Z Z, Zhu J G, Yuan J P, et al. Hydraulic fracture analysis of rockfill dam with core wall [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1348-1353. (in Chinese)
- [13] 黄文熙. 对土石坝科研工作的几点看法[J]. 水利水电技术, 1982, (4): 23-27.
Huang W X. Several views on research of embankment dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1982(4): 23-27. (in Chinese)
- [14] 周健,张刚,胡展飞. 软土基坑突水判断方法模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2115-2120.
Zhou J, Zhang G, Hu Z F. Model test research on judgment method of water gushing in pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25

- (10):2115-2120. (in Chinese)
- [15] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12 (2):155-164.
- [16] Habte M A. Numerical and constitutive modelling of monotonic and cyclic loading in variably saturated soils [D]. Sydney: The University of New South Wales, 2006.
- [17] 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 X Y. 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. (in Chinese)
- [18] 沈珠江, 易进栋, 左元明. 土坝水力劈裂的离心模型试验及其分析[J]. *水利学报*, 1994, (9): 67-77.
- Shen Z J, Yi J D, Zuo Y M. Centrifuge model test of hydraulic fracture of earth dam and its analysis [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, (9): 67-78. (in Chinese)
- [19] 孙亚平. 水力劈裂机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 1985.
- Sun Y P. Study on mechanism of hydraulic fracturing [D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese)
- [20] 张丙印, 李娜, 李全明, 等. 土石坝水力劈裂发生机理及模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27 (11): 1277-1281.
- Zhang B Y, Li N, Li Q M, et al. Mechanism analysis and model test of hydraulic fracturing in embankment dams [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(11): 1277-1281. (in Chinese)
- [21] 牛富俊, 刘玉海, 倪万魁. 软土基坑变形失稳形态模拟试验研究[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(1): 93-99.
- Niu F J, Liu Y H, Ni W K. Simulation study of deformation and instability shape of foundation-pit in soft soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9 (1): 93-99. (in Chinese)
- [22] 北京金土木软件技术有限公司. Plaxis 岩土工程软件使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [23] 纪佑军, 刘建军, 薛强. 基坑开挖中渗流-应力耦合模拟 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(Sup): 630-634.
- Ji Y J, Liu J J, Xue Q. Numerical simulation of seepage-stress interaction during foundation ditch excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Sup): 630-634. (in Chinese)
- [24] 李镜培, 张飞, 梁发云, 等. 承压水基坑突涌机制的离心模型试验与数值模拟[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 38(6): 837-842.
- Li J P, Zhang F, Liang F Y, et al. Centrifugal model tests and numerical simulation on hydraulic heave mechanism in excavation with confined water [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 38 (6): 837-842. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)