

渗流-应力耦合作用下基坑开挖变形性状分析

孙二小, 赵玉成

(石家庄铁道大学 交通运输工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:大量的基坑事故表明,地下水控制失效是引起事故的重要原因之一。以某基坑开挖为工程背景,借助大型有限元软件 Midas-GTS,研究了基坑降水和开挖施工过程中其变形性状,主要分析了基坑周围渗流场的分布、基坑周围地面的沉降、围护桩的挠曲变形和基坑底部隆起。计算结果表明,与未考虑渗流应力耦合作用相比较,在考虑渗流应力耦合作用下设计的基坑更偏于安全。

关键词:渗流应力耦合;降水开挖;基坑变形;Midas-GTS

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0048-05

0 引言

基坑开挖过程中,如果施工地区的地下水位较高,将涉及地下水对基坑施工的影响这一问题。为保证基坑工程开挖,地下主体结构施工正常进行和地基土强度免遭损失,当开挖面低于地下水位时,需采取降水措施。然而,工程实践中往往很少考虑降水对基坑变形的作用,从而发生了不少由于地下水处理不当而导致的工程事故。例如:地下水控制不当可能引起地层隆起、管涌、流沙、基坑坍塌以及周围建筑物的沉降、倾斜和倒塌。但是现有的相关行业标准的基坑工程的设计方法忽略了土体中地下水在水头差作用下的流动,从而未考虑土体孔隙中渗流场的变化^[1]。而地下水的渗流问题实际上是一个液体渗流与土骨架变形动态耦合作用极强的过程,地下水渗流与开挖应力状态相互影响,即渗流场与应力场的耦合^[2]。大量的研究和实践表明,进行耦合分析的研究是必要的。为此,本文以某基坑为工程背景,借助有限元软件 Midas-GTS,并考虑基坑的降水和开挖工序等因素,建立了基坑降水开挖的二维模型,分析了基坑变形的特征和其周围渗流场的变化,希望能优化和指导受地下水渗流影响的基坑设计施工。

1 渗流场与应力场的耦合关系

地下水的渗流会引起土骨架的变形,而土骨架的变形导致土体孔隙体积的改变,从而反过来影响渗流。这种渗流场和应力场的耦合关系可用以下方程组表示^[2]

$$k = a \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right]^b \quad (1)$$

$$n_{i+1} = n_i + \Delta n_i = n_i + \frac{\Delta S_i}{h_i} \quad (2)$$

$$\Delta S = \int_0^h \epsilon dz = \int_0^h \frac{\Delta \sigma(z)}{E_s} dz \quad (3)$$

式中, k 为土的渗透系数; a 为系数,约为20~30; b 为指数,为1.5~2.0; n_i, n_{i+1} 为*i*和*i+1*计算时段的孔隙率; Δn_i 为*i*时段由于 ΔS_i 沉降而产生的孔隙率的增量,为负值; h_i 为*i*时段初的水位值; $\Delta \sigma$ 为土的附加应力; E_s 为土的压缩模量。

收稿日期:2014-12-15 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.2015.04.09

作者简介:孙二小(1990—),男,硕士研究生,研究方向为城市地下空间开发与利用。E-mail:601555755@qq.com

孙二小,赵玉成.渗流-应力耦合作用下基坑开挖变形性状分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):48-52.

2 Midas-GTS 数值模拟

基坑开挖宽度为 10 m,开挖深度为 5 m。基坑开挖的平面影响区为距基坑边缘 2~3 倍的开挖深度,竖向影响深度为 2~3 倍的开挖深度^[3]。所以模拟模型的尺寸选为宽 40 m,高 12 m,分 4 次开挖,每次开挖深度分别为:1 m,2.5 m,4 m,5 m,每层开挖前采用井点降水,每层降水深度都为低于开挖面 0.5 m。桩采用直径为 0.8 m 的混凝土桩,桩长为 10 m。支撑 H 型钢,采用 3 道支撑,支撑点在开挖面以上 0.5 m 处。具体尺寸如图 1 所示,划分单元与水头位置见图 2,各土层的具体参数见表 1。

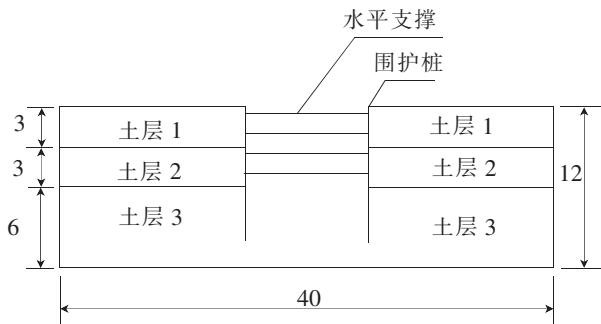


图 1 基坑平面尺寸图(单位:m)

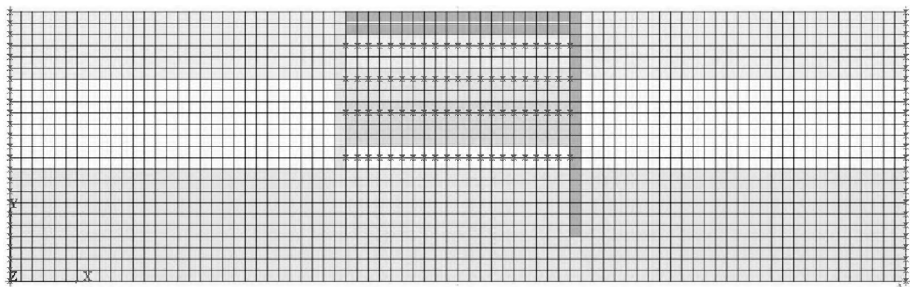


图 2 划分单及水头位置

表 1 各土层的具体参数

土层	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN · m ³)	渗流系数/(m · d ⁻¹)	粘聚力/(kN · m ²)	内摩擦角/(°)
1	9	0.35	18	0.1	12	26
2	29	0.33	19	1	2	31
3	300	0.3	20	0.05	55	35

3 基坑开挖变形及其周围渗流场分析

基坑开挖变形主要包括 3 部分:基坑周围地面沉降、支挡结构水平位移和基坑底部隆起。以下依次介绍其变形性状。

3.1 基坑周围地面沉降

各层开挖后基坑周围地面沉降曲线如图 3 所示。由图 3 可得以下结论:

(1)基坑周围土体沉降曲线均呈两头小,中间大的下凹的形状,且最大沉降量并非在基坑边缘,而是在距基坑边缘 3~4 m 的位置。

(2)随着土层的开挖,最大沉降量增大,且最大沉降的位置向外移动。主要原因是随着基坑开挖面的下降,对地表的影响范围也相应增大,带动最大沉降位置外移。

(3)在距基坑边缘 2 倍的开挖深度距离以外,地表的沉降量很小,可知基坑开挖主要

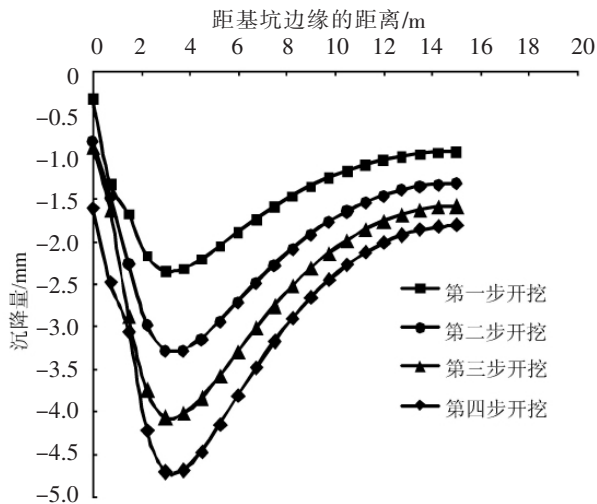


图 3 各层开挖后基坑周围地面沉降

影响区为距基坑边缘 2~3 倍的开挖深度范围内。

图 4 为考虑与未考虑渗流应力耦合作用地面沉降曲线以及工程实际监测数据,由图 4 可得:

(1)考虑与未考虑渗流应力耦合作用地面沉降曲线形状类似,但是考虑渗流应力耦合作用的地面最大沉降值比不考虑渗流应力耦合作用的大 30%左右。主要原因是基坑开挖会引起地下水的流动,土体在渗流力的作用下会发生沉降。

(2)考虑渗流应力耦合作用的地面最大沉降位置比不考虑渗流应力耦合作用的位置距基坑边缘近。分析主要原因是基坑降水会与周围地下水形成水头差,从而基坑周围的地下水会流向基坑,而在止水帷幕的阻挡下会在基坑边缘附近形成较大的竖向渗透力,从而引起较大的沉降。

(3)与实际监测数据相比较,考虑渗流应力耦合作用情况下的地面沉降更接近于实际,设计时更偏于安全。

3.2 围护桩的水平位移

各层开挖后围护桩的水平位移曲线图如图 5 所示。由图 5 可知:

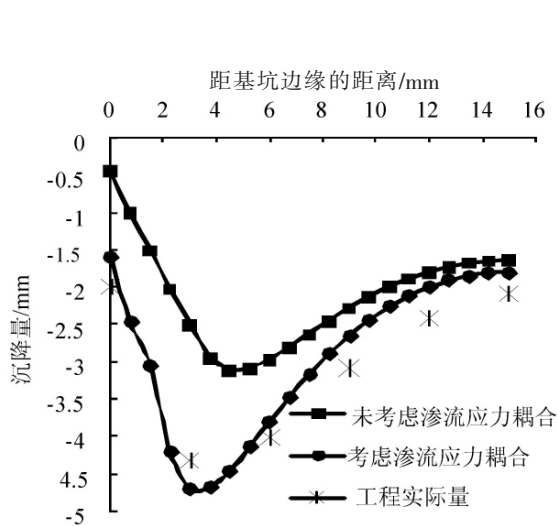


图 4 不同工况下地面沉降

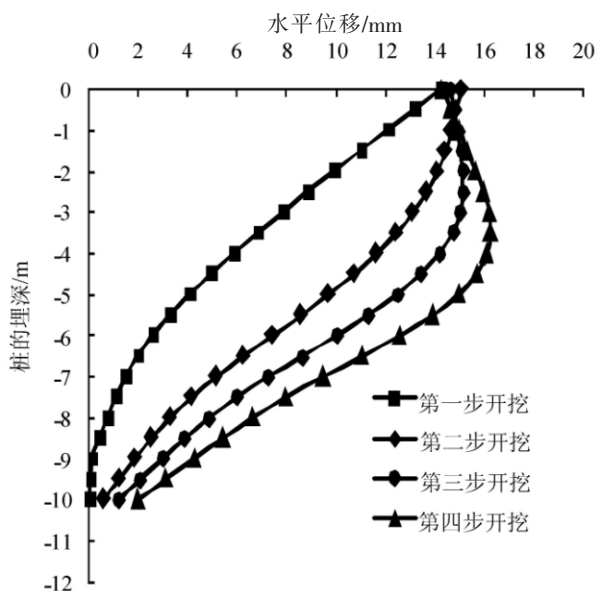


图 5 各层开挖后围护桩的水平位移

(1)除第 1 层开挖外,每层开挖后围护桩的变形曲均呈两头小,中间大的形状,主要原因是存在支撑作用。而第 1 层开挖完成后,围护桩的最大位移是在桩顶处,这是由于此时围护桩呈悬臂状态,即使开挖深度小,也会引起较大的桩顶位移。

(2)围护桩的水平位移随着开挖深度的增大而增大,最大位移位置也相应的下移,且最大位移点均在开挖面附近。

图 6 为考虑与未考虑渗流应力耦合作用围护桩的水平位移曲线以及工程实际监测数据,由图 6 可得:考虑渗流应力耦合作用围护桩的水平位移比不考虑渗流应力耦合作用的值要大。主要是因为止水帷幕不透水,坑内外水头差产生的渗透力作用在止水帷幕上,并且一部分传给围护桩而增大了桩的位移。由图 6 还可得出考虑渗流应力耦合作用下围护桩的水平位移更接近于实际

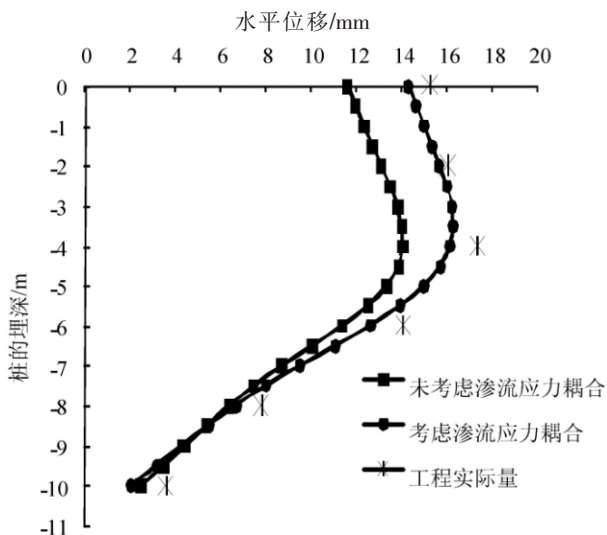


图 6 不同工况下围护桩的水平位移

位移。

3.3 基坑坑底隆起变形

基坑底部的隆起应包括3大部分:开挖释放荷载的土体卸载回弹、支护结构侧向位移对基坑坑底土体的挤压和向上作用的渗透力^[4]。考虑与未考虑渗流应力耦合作用坑底隆起曲线以及工程实际监测数据如图7所示,可得以下结论:

(1)考虑渗流应力耦合作用基坑坑底隆起量比不考虑渗流应力耦合作用的值要大。分析主要原因是基坑内外水头差引起基坑内部向上的渗透力,从而引起较大的坑底隆起。

(2)在未考虑渗流应力耦合作用情况下,基坑中心的隆起量最大,而在考虑渗流应力耦合作用情况下,坑底最大隆起量不再在中心,而是在靠近围护桩附近。主要原因是此处渗透力的影响较大。

(3)考虑渗流应力耦合作用基坑坑底隆起与实际监测数据较为接近,按此设计更偏于安全。

3.4 基坑周围渗流场的分布

图8 基坑纵断面渗流场分布。由图8可知:

在靠近围护桩附近,由于止水帷幕不透水,使得基坑周围渗流主要沿竖向方向,且在桩底处渗流速度最大,而当渗透力足够大时有可能引起渗透破坏。因此基坑施工时应采取适当的措施降低此处的渗流速度。例如较深围护桩的入土深度。

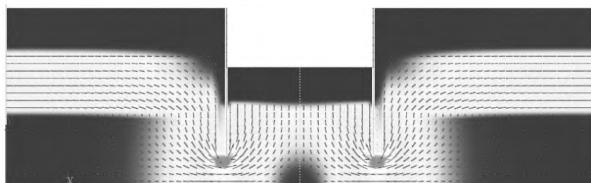


图8 基坑纵断面渗流场分布

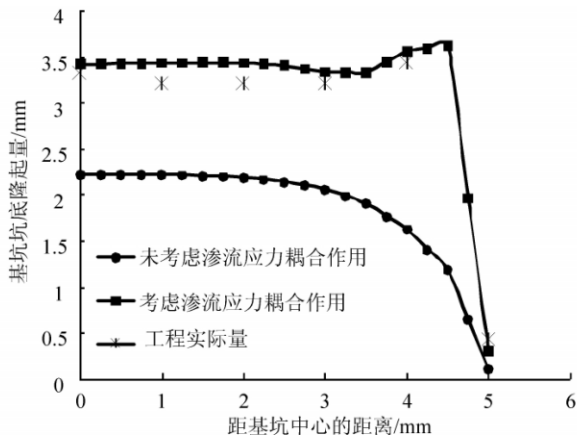


图7 不同工况下坑底隆起曲线

4 结论

(1)基于渗流应力耦合理论,对基坑降水开挖的流固耦合效应进行了研究。以某基坑开挖为背景,借助有限元软件 Midas-GTS 对其降水开挖过程进行了数值模拟计算。

(2)主要分析了在考虑渗流应力耦合作用下基坑的变形性状。总结了随着基坑的降水开挖,基坑周围土体沉降的变化规律、围护桩的水平位移的变化规律、基坑坑底隆起的规律和基坑周围渗流场的分布规律。具有为基坑的设计施工提供参考的价值。

(3)考虑渗流应力耦合作用得到的基坑变形值较不考虑基坑渗流应力耦合作用得到的大。因此,考虑渗流应力耦合作用设计的基坑是偏于安全的,设计时不应忽略地下水渗流对基坑变形和周围环境的影响。

参 考 文 献

- [1] 张小伟,姚笑青. 基坑工程变形的渗透应力耦合有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 339-344.
- [2] 颜勇. 地铁深基坑渗流应力耦合研究[J]. 铁道工程学报, 2011(6): 92-97.
- [3] 熊智彪. 建筑基坑支护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [4] 平阳,白世伟,徐燕萍. 深基坑工程渗流-应力耦合分析数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2001, 3(1): 37-41.

Numerical Analysis of Deep Foundation Pit Deformation Considering Coupled Hydromechanical Effects

Sun Erxiao, Zhao Yucheng

(Traffic Engineering School, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A large number of pit accidents show that failing in controlling groundwater is one of the important causes of the accidents. Combining with an engineering background, with the large-scale finite element software Midas-GTS, this paper mainly discusses the deformations by considering rainfall and excavation of foundation pit, including the distribution of Seepage field around the pit, ground subsidence around the pit, the deflection of piles and the uplift of excavation face. The results show that the design of foundation pit is safer when considering coupled hydromechanical effects.

Key words: Coupled hydromechanical effects; precipitation excavation; deformation

~~~~~

(上接第 15 页)

[11]李延强,杜彦良,符强. 基于实测索力的模型斜拉桥有限元模型修正研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 91-95.

[12]李延强,赵世英. 斜拉桥结构模型试验索力测试方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2013, 26(4): 7-10.

## Research on the Influence of Girder Damage of Cable-stayed Bridge to Cable Force Responses Under the Action of Moving Vehicle Load

Peng Chenbin, Li Yanqiang

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to detect the damage of the cable-stayed bridge, the cable force ratio index is presented in this paper. The cable force ratio indexes are studied while the main girder of cable-stayed bridge is damaged under the action of moving vehicle load. Taking a single-tower cable-stayed bridge test model as research object, a space plate shell finite element model is established by ANSYS. The damage of main girder is simulated by the stiffness reduction. Numerical simulation is done to research the change of cable force ratio index when the girder has different damage locations and different damage extent under vehicle excitation. It is shown that the cable force ratio index is closely connection with damage location and extent of girder when the vehicle load across the bridge. The research presented in this paper provides some theoretical reference for damage detection based on cable force response index under vehicle load excitation.

**Key words:** cable-stayed bridge; damage detection; cable force ratio index; vehicle-bridge coupling effect