

止水帷幕对基坑环境效应影响的有限元分析

丁洲祥¹, 龚晓南¹, 俞建霖¹, 金小荣¹, 祝哨晨²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 杭州市城市基础设施开发总公司, 杭州 310001)

摘 要: 采用 Biot 固结理论分析了止水帷幕对基坑工程环境效应的影响, 包括止水帷幕不同打设深度的效果, 以及两种封闭式止水帷幕发生漏水意外时对地下水位和坑外土体位移的影响等。在有限元编程中, 将开挖土体置为空气单元可以简化处理过程。算例分析结果表明, 深厚透水地基中增加竖向止水帷幕的深度并不能有效减小对周围环境的影响; 漏水部位周围土体的渗流等势线较为密集, 渗流速度较大, 容易诱发扩大破坏; 竖向封闭式止水帷幕漏水引起的坑边土体的沉降和地表土体的侧移相对较大, 水位下降迅速等。其结果可供基坑工程漏水事故环境效应的评价和对策研究时参考。

关 键 词: Biot 固结理论; 止水帷幕; 基坑; 有限元法; 地表沉降

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Finite element analysis of environmental effects of waterproof wall on foundation pit

DING Zhou-xiang¹, GONG Xiao-nan¹, YU Jian-lin¹, JIN Xiao-rong¹, ZHU Shao-chen²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Municipal Infrastructure Development Corporation, Hangzhou 310001, China)

Abstract: Based on Biot's consolidation theory, the effects of the performance of waterproof-wall in deep foundation-pit on surrounding environment are analyzed. The subject investigated deals with the effectiveness of the burying depth of waterproof-wall, the influence of water leakage in enclosed structures of waterproof-wall on ground water table and foundation displacement, etc. For purpose of convenience, the excavated soil is treated as the idealized air element in FEM programming. The results show that in the case of thick pervious subsoil, the increase of the burying depth of waterproof-wall can hardly decrease the effects of foundation-pit on surrounding environment. The dense contours of seepage potential around the location of leakage are found with high seepage velocity, liable to induce expanded destruction. The water leakage occurred in the perpendicularly enclosed waterproof-wall will lead to the outstanding increase of the magnitude of foundation settlement around pit margin and ground lateral-displacement, as well as the rapid drawdown, etc. The conclusions could be provided for the appraisal and solution strategies for the effects of water leakage on surrounding environment.

Key words: Biot's consolidation theory; waterproof wall; deep foundation pit; finite element method; ground settlement

1 前 言

为保证土方开挖和地下室施工的顺利进行, 通常需要降低地下水位或配以设置止水帷幕使地下水位在基坑底面 0.5 ~ 1.0 m 以下。降低地下水位也有利于基坑围护结果的稳定性, 防止流土、管涌、坑底隆起引起破坏。但是大规模降低地下水位可能引起坑外地面的较大沉降, 对环境造成不良影响, 尤以深井降水影响最大。而性能良好的止水帷幕可以

有效阻止坑外地下水位的下降, 从而减小对周围环境的影响。

止水帷幕有竖向止水帷幕和水平止水帷幕之分^[1]。竖向止水帷幕设置在坑壁的外缘, 用以阻止坑外透水层在坑内外水位差的作用下向坑内的渗流, 并防止由此而产生的流砂等的渗透破坏; 水平止水帷幕设置在基坑地面下, 其作用有两种: 一种是因基坑以下有深厚的透水层, 阻止坑外地下水绕过墙趾向坑内渗流, 另一种是因承压水的存在, 防止承压水

的顶托力使基坑底面以内的土层被冲溃而发生突涌破坏。

工程实践早已表明，基坑工程具有很强的时空效应。其中，时间效应主要由土体蠕变和固结等两种机理引起。本文侧重于从固结机理的角度，采用流固耦合机理较为严格的 Biot 固结理论分析止水帷幕对环境效应的影响，主要针对深厚透水地基中竖向止水帷幕不同插入深度的影响，设置水平止水帷幕的效果，以及两种封闭式止水帷幕渗漏水等异常情况下的环境效应问题。

2 Biot 固结有限元方程

采用 Biot 固结理论进行有限元分析时，不仅可以同时得到地基土体的沉降、侧移和孔压等物理量，还能分析其时间发展过程。Biot 固结有限元方程组的增量形式为^[2]

$$K\Delta U^e = \Delta R^e, K\Delta U^e = \Delta R^e \quad (1)$$

式中 K 为单元固结矩阵； ΔU^e 为单元节点未知量增量列阵； ΔR^e 为单元等效节点荷载和流量增量列阵。

将式(1)所示的单元固结增量有限元方程按单元编号进行集成，即得到系统固结增量有限元方程。其形式与式(1)基本相同，此处不再赘述。

由于孔压与应力相当，亦即与位移的一阶导数相当，故对位移和孔压均取同次插值模式似不合理。在国内，沈珠江^[3]较早地提出和使用同次插值模式。计算经验表明，只要时段和网格划分合理，对位移和孔压均取同一插值模式仍可获得满意的精度^[2]。同时考虑到编程方便，本文对位移和孔压均取一次插值模式。

Biot 固结有限元方程在推导过程中还涉及到时间域上的离散，在进行差分处理时需要引入时间差分系数 θ 。当 $1/2 \leq \theta \leq 1$ 时，差分格式是稳定的。本文取全隐式差分，即 $\theta = 1$ 。

3 数值模型

为便于分析，掌握基本规律，采用平面应变模型，这对模拟跨中部位的流固耦合情况较为合适。基坑开挖深度为 5 m，半宽为 30 m，如图 1 中的斜线区域所示。竖向止水帷幕设在坑壁外侧，厚度为 1 m，打设深度为 10 m。计算区域深 40 m，宽 130 m，其有限元网格划分如图 1 所示。坑壁外侧土体的网格划分相对密一些，以提高该区域的计算精度。总单元数 1 450，总节点数 1 534。

工程背景主要针对杭州钱塘江两岸广泛分布的粉细砂地基。根据吴林高等的试验研究结果，在抽、灌水过程中，砂样都主要处于弹性变形阶段^[4]。因此本文采用线弹性本构关系，同时假设：

- (1) 土体饱和，渗流服从 Darcy 定律；
- (2) 由于坑外土体变形的量级通常较小，采用小应变 Biot 理论；
- (3) 土层均匀分布，为深厚透水性地基，开挖前处于正常固结状态；
- (4) 采用“空气单元”模拟被开挖的土体，将被开挖单元的参数乘以很小的数 10^{-6} ；
- (5) 侧重考虑最终开挖状态下渗流场应力场的耦合性状，而不细分具体开挖过程以及与围护结构的共同作用。

止水帷幕的弹性模量为 15 MPa，泊松比为 0.2，渗透系数为 10^{-9} cm/s。粉砂土地基的弹性模量为 13.8 MPa，泊松比为 0.3，渗透系数为 2×10^{-4} cm/s。渗流势的“0 势参考面”取地表处，单位采用容积势，即 kPa。

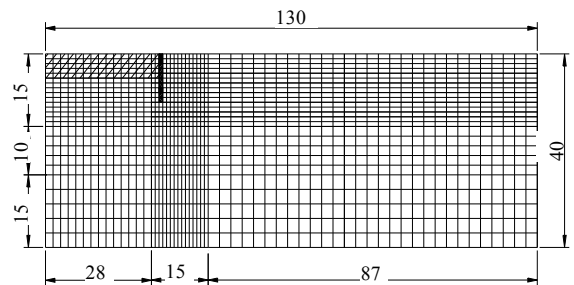


图 1 基坑有限元网格划分(单位: m)
Fig.1 FEM mesh of foundation pit (unit: m)

初边值条件为：对称面内无水平位移，不透水；底面固定，不透水；外侧边界固定，常水头，透水；地表为自由边界。初始时刻的坑外地下水位在地表，坑内水位在坑底以下 1 m 处。

4 计算结果与分析

分别考察 3 种情况：竖向止水帷幕不同打设深度的影响、采用竖向封闭式或双向封闭式止水帷幕的效果和两种封闭式止水帷幕漏水时的环境效应。

4.1 竖向止水帷幕

打设深度分别取 $H = 10, 28, 40$ m (打入不透水层) 3 种情况。对于打设深度 $H = 10$ m 的竖向止水帷幕，第 1 d 时的渗流势等值线、渗流速度场和孔压等值线，分别如图 2~4 所示。由图 2 可见，在坑底以下一定范围内，渗流势等值线接近于水平，

反映出该区域土体中的渗流以向上为主；坑底边旁约在距止水帷幕的插入深度（5 m）一半的范围内，渗流势等值线较为密集，说明该区域中的渗流速度变化较大。图 3 所示的渗流速度场分布规律更直观地说明了这一点。在图 3 中，开挖区（由空气单元组成）内的渗流速度接近于 0，而渗流速度最大的区域发生在：竖直方向上从止水帷幕底端至坑底附近，水平方向上从止水帷幕至内侧约 0.5 倍插入深度的范围。因此，该区域较容易发生流土等不利现象。这一结果与工程实践经验是相符的。

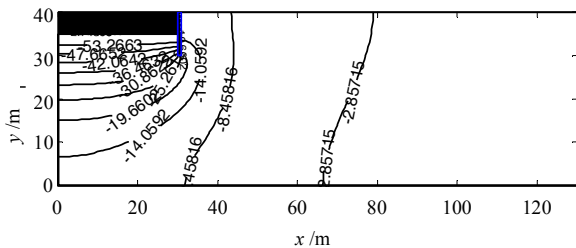


图 2 渗流势等值线 ($H=10\text{ m}$, $t=1\text{ d}$)

Fig.2 Contours of seepage potential ($H=10\text{ m}$, $t=1\text{ d}$)

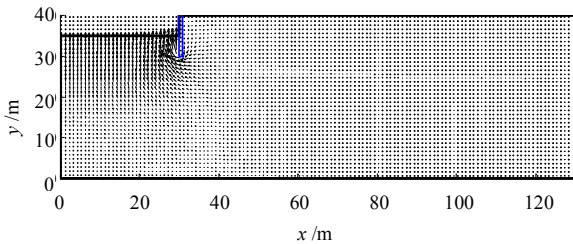


图 3 渗流速度场 ($t=1\text{ d}$)

Fig.3 Seepage velocity field ($H=10\text{ m}$, $t=1\text{ d}$)

由图 4 的孔压等值线分布规律可见，坑外地下水位(即 0 压线)在第 1 d 有所下降，其中靠近坑边的水位下降较明显，而对远离坑边的外部土体和较深的土体，孔压变化并不明显。开挖范围内的土体为空气单元，计算的孔压应当接近为 0。图 4 的结果正表明了这点，也说明将开挖单元按空气单元处理是可行的。

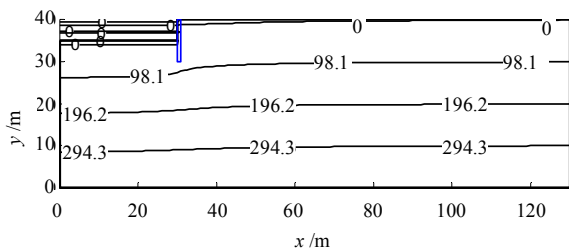


图 4 孔压(kPa)等值线 ($H=10\text{ m}$, $t=1\text{ d}$)

Fig.4 Contours of pore water pressure ($H=10\text{ m}$, $t=1\text{ d}$)

进一步的数据分析还表明，随着时间发展，坑外水位在不断下降，由此导致地面沉降不断增大。这说明仅 10 m 打设深度的止水帷幕，对深厚透水层的地基而言，难以阻止坑外水位的不断下降。笔者将打设深度增加到 28 m，发现坑外水位下降有所减小，但效果并不明显。

如果止水帷幕的深度达到不透水层（对应算例中 $H=40\text{ m}$ ），此时构成竖向封闭式止水帷幕，坑外才几乎为常水位。从图 5 中第 60 d 时坑内外的水位情况可清楚地看到这一点。然而，深厚透水层中止水帷幕的打设深度太大时，不仅提高了工程造价，也增加了施工难度。但当周围环境中存在高层建筑物及重要市政设施，或邻近建筑物为浅埋基础，对地面沉降需要严格控制，采用降低水位的方案时，不允许大范围大量抽水，这种情况下又往往需要封闭式止水帷幕。

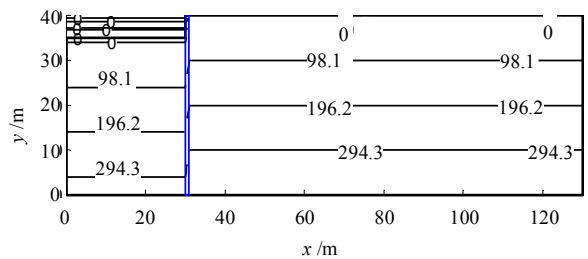


图 5 孔压(kPa)等值线 ($H=40\text{ m}$, $t=60\text{ d}$)

Fig.5 Contours of pore water pressure ($H=40\text{ m}$, $t=60\text{ d}$)

4.2 竖向封闭式止水帷幕漏水时的异常分析

基坑止水帷幕渗漏的内因是止水帷幕本身存在缺陷，例如地下连续墙接缝不吻合或在透水层处有蜂窝空洞；旋喷止水桩在水下成型不佳等。产生渗漏的外因是场地的水文工程地质条件不好等。

这里探讨竖向封闭式止水帷幕在漏水异常情况下对周围环境的影响。不妨设漏水部位位于地面以下 4 m，坑底以上 1 m 处。

计算结果表明，当竖向止水帷幕发生漏水等异常情况时，坑外水位在初期下降很快。例如，在漏水后第 6 个小时，坑外水位最大下降值达 1.61 m。漏水后第 12 个小时，坑外水位的最大下降值达 2.05 m 左右，此时的孔压等值线如图 6 所示。漏水后第 1 d，第 2 d 和第 5 d 时，坑外水位的最大下降值分别达到 2.33，2.54 m 和 2.89 m。漏水第 9 d 以后，坑外水位的变化幅度已很小，可认为已经达到

稳定渗流状态。

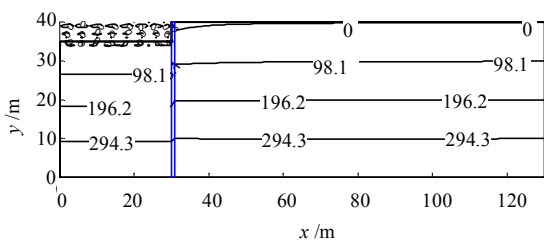


图 6 漏水 12 h 的孔压等值线(单位: kPa)

Fig.6 Contours of PWP (12 hours after leakage, unit: kPa)

4.3 双向封闭式止水帷幕漏水的异常分析

双向封闭式止水帷幕在坑底设置水平止水帷幕,与坑外的竖向止水帷幕组成一个立体隔水帷幕。计算结果表明,当双向封闭式止水帷幕工作性状良好时,坑外水位几乎不受影响。但是,当发生漏水事故时,坑外水位以及地表沉降等将呈现何种变化规律?不妨设水平止水帷幕埋在坑底水位线以下2 m,厚度为1 m,与竖向止水帷幕构成封闭式结构。漏水部位在水平帷幕上,位于坑边内侧1~2 m处。

漏水后第 6 h 的渗流速度场如图 7 所示。可见, 漏水部位附近土体中的渗流速度相对较大, 此处也很容易发生大量漏水、漏砂等现象。

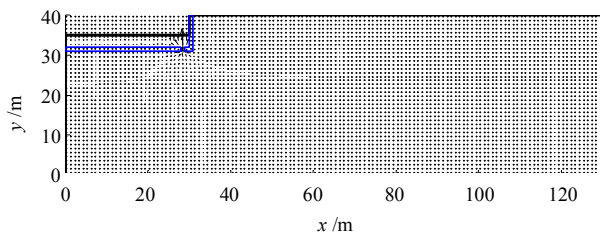


图 7 漏水后第 6 h 的渗流速度场

Fig.7 Field of seepage velocity at 6th hour after leakage

漏水后第 5 d 的渗流势等值线如图 8 所示。漏水部位的渗流势等值线密度较大, 反映出该处水力梯度较大; 而越远离漏水部位的地方, 等值线就越稀疏。相应的孔压等值线如图 9 所示, 从中可明显看到坑外水位有明显下降。

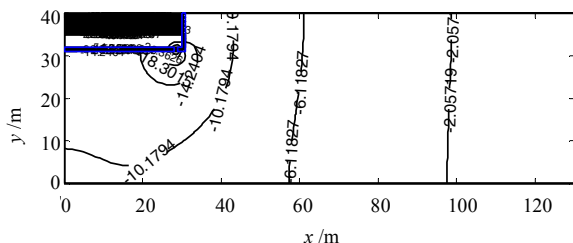


图 8 漏水后第 5 d 的渗流势等值线 (单位: kPa)

Fig.8 Contours of seepage potential at 5th day after leakage

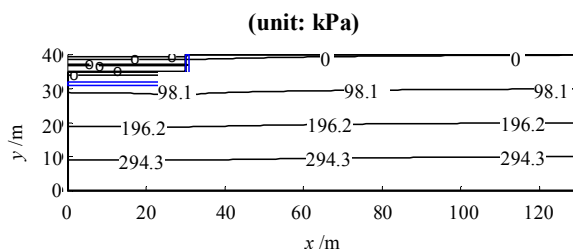


图 9 漏水后第 5 d 的孔压等值线(单位: kPa)

Fig.9 Contours of PWP at 5th day after leakage(unit: kPa)

4.4 止水帷幕漏水对沉降和侧移性状的影响

再分析止水帷幕在以上两种漏水情况下，坑外土体的沉降和侧向位移变化规律。

图 10 所示的为开始漏水后第 51 d 时坑外地表的沉降分布规律。可见, 不同漏水情况对应的地表沉降形态是有差别的。竖向封闭式帷幕漏水引起的“漏斗”状地表沉降曲线尤为显著, 相应的差异沉降也最大。在距离坑边约 20 m 的范围内, 两者之间的差别较为明显; 但对远离坑边超过 20 m 的范围, 两者的差别较小。从定量的角度看, 竖向封闭式止水帷幕漏水引起坑边附近土体的沉降量要偏大一些 (可达 38.9%); 而对远离坑边 20 m 以外的土体, 竖向封闭式帷幕漏水引起的沉降量要稍小一些。

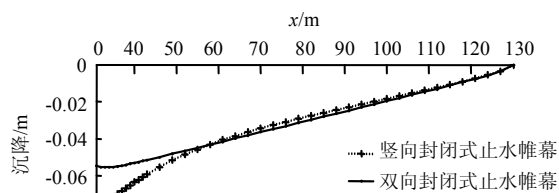
图 10 漏水情况下坑外地表沉降分布 ($t=51 \text{ d}$)

Fig.10 Ground settlement outside pit for leakage ($t=51$ d)

以坑边地表处的点为典型点,考察该点的沉降量随时间的发展规律,结果如图 11 所示。可见,两种漏水情况引起的典型点的沉降在初期发展迅速,但随着时间发展,沉降速率都逐渐变小。其中,竖向止水帷幕漏水引起典型点的沉降很快就完成(15 d 左右),而水平帷幕漏水对应的沉降需要更长时间(约 30 d)才趋于稳定。从图 11 亦可看到,在整个过程中,竖向帷幕漏水引起的典型点沉降量一直偏大于水平帷幕漏水情况下的相应值。

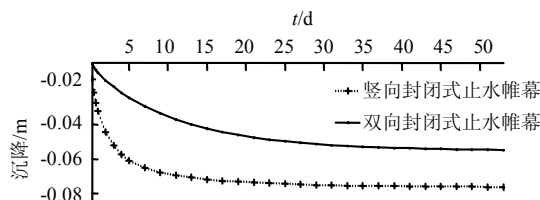


图 11 漏水情况下典型点沉降随时间的变化

Fig.11 Variation of settlements for a typical point with time

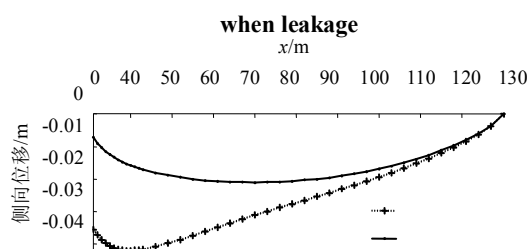


图 12 漏水情况下坑外地表侧移分布 ($t=51\text{ d}$)
Fig.12 Ground lateral displacements outside pit
for leakage ($t=51\text{ d}$)

由前面的分析知,可以将第 51 d 的结果近似为渗流达到稳定状态时的结果。此时,坑外地表的侧移规律如图 12 所示。可见,两种漏水情况下,地表最大侧移值并不发生在坑边,而发生在远离坑边的一定距离内。这一点有别于沉降分布情况。此外,竖向止水帷幕漏水引起的地表“最终”侧移值要偏大水平帷幕漏水的情况。不同漏水情况引起的坑外土体侧移值之间的差别要大于沉降量之间的差别。

5 结 论

深厚透水地基上如果只设置竖向止水帷幕,通过增加打设深度的办法并不能有效减小对周围环境的影响。此时,采用封闭式止水帷幕从理论角度来讲较为合适。算例分析结果表明,两种封闭式止水帷幕一旦发生渗漏的异常情况,将对周围环境产生较大影响。初步得到的具体认识有:

(1) 漏水部位的渗流势等值线较为密集,渗流速度也较大,很容易诱发扩大破坏。

(2) 竖向封闭式止水帷幕发生漏水引起的环境效应总体上要明显一些,尤其对于坑边附近土体的沉降和地表土体的侧移。因此,工程中应注意竖向止水帷幕的质量和性状。

(3) 对双向封闭式止水帷幕,在水平止水帷幕发生漏水事故时,其对环境的影响要相对小一些,但需要将水平止水帷幕埋设在坑底水位以下一定深度的范围内。在研究基坑工程环境效应的对策时,这些结论可提供有益参考。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 28 - 157.
- [2] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 32 - 91.
- [3] 沈珠江. 用有限单元法计算软土地基的固结变形[J]. 水利水运科技情报, 1977, (1): 7 - 23.
- [4] 贺章安. 考虑含水层参数随应力变化的地下水渗流及地面沉降研究[硕士论文 D]. 上海: 同济大学, 1994.
- [5] 丁洲祥, 龚晓南, 俞建霖. 基坑降水引起的地面沉降规律及参数敏感性分析[J]. 地基处理, 2004, 15(2): 3 - 8.
- [6] 龚晓南, 谢康和, 徐日庆, 等. 软土地基基坑工程环境效应和控制方法[R]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [7] 金小荣. 基坑降水对周围环境影响的数值模拟分析[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [8] 黄春娥. 考虑渗流作用的基坑稳定分析[博士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [9] 杨志锡. 各向异性饱和软土的渗流耦合分析及其工程应用[博士论文 D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [10] 叶为民. 软土地层的渗流特征与深基坑开挖的耦合分析研究[博士论文 D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [11] 平扬, 白世伟, 徐燕平. 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, 22(1): 37 - 41.
- [12] 罗晓辉. 深基坑性状的有限变形时空效应研究[博士论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [13] 谢康和, 柳崇敏, 应宏伟, 等. 成层土中基坑开挖降水引起的地表沉降分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(3): 239 - 242, 251.
- [14] Zienkiewicz O C, Taylor R. The Finite Element Method [M]. (5th edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [15] 丁洲祥, 龚晓南, 唐启. 从 Biot 固结理论认识渗透力[J]. 地基处理, 2004, 15(3): 3 - 6.