

沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用

张莲花, 孔德坊

(成都理工大学 工程地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要: 针对基坑工程中降水将不可避免对周围环境产生影响的事实, 文中首次提出沉降变形控制的降水最优化问题的概念, 即以周围环境对降水引发沉降的最低要求为约束, 同时满足工程施工和安全需要进行降水设计。这种考虑环境的因素进行优化降水设计的方法, 将改变过去仅从工程施工和安全的角度进行降水设计的传统观点。实际中也取得了较好的效果。

关键词: 基坑工程; 降水引起的沉降; 变形控制理论; 最优化方法

中图分类号: TU 46⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)10-1171-04

作者简介: 张莲花(1974-), 女, 博士, 主要从事环境岩土等方面的教学和研究工作。

Optimum method of dewatering controlled by surrounding settlement and its application

ZHANG Lian-hua, KONG De-fang

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The concept of optimum design of dewatering controlled by surrounding settlement was put forward. This concept would change the traditional idea that focused on the safety and construction conditions to also concern the surrounding capability.

Key words: foundation pit; settlement caused by dewatering; theory controlled by ground settlement; optimum theory

0 引言

基坑的开挖势必引起基坑周围土体内地下水位变化和应力场改变, 导致周围土体的变形, 基坑工程将对周围环境产生不同程度的影响。基坑工程环境效应总的来说包括维护结构、工程桩施工、降低地下水位、土方开挖等对周围环境的影响, 并表现在多方面^[1], 其中基坑开挖引起围护结构变形及降低地下水造成基坑四周地面产生沉降、不均匀沉降和水平位移, 导致影响相邻建筑物及市政管线正常使用, 甚至破坏是最为常见影响。在软土地区围护结构设计中已引入变形控制理论, 即在围护结构满足传统稳定、安全等因素的前提下, 控制围护结构变形对周围环境的影响。同一思路, 降水在满足工程施工和安全的前提下, 也应以周围环境对降水引发沉降的最低要求为约束进行降水设计。

1 问题的提出和降水设计基本步骤

无论做任何一件事, 人们总是希望以最小的代价取得最大的效益。在降水工程中也同样存在这个问题。而最优化问题就是如何在一切可能的方案中选择一个

最好的方案, 使得人们的目的得以实现。基坑降水工程是一项复杂的系统工程, 需要从整体与局部、整体与外部环境的相互联系、相互作用、相互制约的关系中找出一个最好的方案。对于基坑降水工程, 首先应该满足工程施工和工程安全需要, 应该说只要在了解清楚地层情况下设计降水, 是完全可以达到的; 另外, 由于目前人们对环境的重视, 而且许多基坑降水工程是在已有建筑群中, 因此降水还要满足周围环境对降水引发沉降的约束。于是本文提出沉降变形控制的降水最优化设计的概念, 即在保证基坑施工开挖期间底板不发生突涌, 保证基坑安全的前提下, 以周围建筑物的允许沉降量或允许不均匀沉降量为约束, 并且降水工程的成本最低, 来进行降水设计。把环境因素考虑进来的降水设计理念, 将改变过去人们仅从工程施工和安全的角度进行降水设计的传统观念。

在基坑降水工程中, 降水工程过程的基本程序和采用沉降变形控制的最优化法设计降水的基本步骤如下:

(1) 了解拟建工程概况, 收集场地的水文地质和工程地质资料。需要提出是, 对于降水工程应做相应

收稿日期: 2004-12-09

的降水工程勘察, 客观掌握场地的水文地质和工程地质情况, 务必要获取准确的水文地质工程地质参数, 否则会导致降水工程设计和施工的失准、失效、甚至失败, 实际中许多降水工程的失效都与参数取值不准确有关。

(2) 调查基坑周围重要建筑物、构造物和地下管线的分布情况, 掌握它们对环境的要求, 沉降的允许范围等。

(3) 收集基坑的设计参数, 包括基坑开挖深度、支护形式、开挖时程等, 若有人工挖孔桩, 还要收集人工挖孔桩桩长, 提出降水的降深要求。

(4) 对以上的资料作系统分析, 提出采用回灌等措施保证基坑开挖的施工条件和安全, 同时又满足周围环境要求的降水最优化问题。

(5) 建立最优化数学模型, 确定约束条件和目标函数的数学形式。

(6) 采用数学方法或系统分析方法, 确定最优化数学模型中尚未确定的抽水井深、井数, 回灌井井深、井数等设计参数, 通过验算确定最优化降水方案。

(7) 在实施降水工程的过程中进行降水监测和降水维护, 对降水井和观测井的水位、水量、水质进行同步观测, 并符合有关的规定和要求。

(8) 进行工程环境影响监测, 按有关规定建立时空监测系统, 及时根据监测数据调整降水方案, 直至基坑封底, 在一定保养期后结束降水。

(9) 在降水工程结束后, 尚需对周围建筑物做一段时间持续沉降观测, 至确认不会因基坑降水而产生的滞后地面沉降影响环境安全为止。

2 最优化设计的数学模型

最优化问题的数学模型包含 3 个要素: 设计变量、目标函数和约束条件。根据上面所提出的最优化问题, 可建立下列数学模型。

2.1 设计变量

一个优化设计方案是用一组设计参数的最优组合来表示的。这些设计参数可概括地划分为两类: 一类是可以根据客观规律、具体条件、已有数据等预先给定的参数, 统称为常量; 另一类是在优化过程中经过逐步调整, 最后达到最优值的独立参数, 称为变量。在降水工程中, 需达到的降深、周围建筑物的允许沉降量等都是依据工程要求确定的常量; 而抽水井和回灌井的井数、空间位置等就是设计变量。最优设计方案确定, 就是对这些变量不断调整的结果。

2.2 约束条件

变量间本身也应该遵循一定的限制条件, 其数学

表达式就是约束条件, 或称约束函数。降水工程中一般应满足以下约束:

(1) 基坑施工、安全约束

首先, 基坑降水影响范围内任一点 p 在时刻 t 的水位标高 $[h(t)]_p$, 应根据实际水文地质条件, 选择地下水运动方程计算。对于二维潜水非稳定流应满足

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x(h-ZZ)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y(h-ZZ)\frac{\partial h}{\partial y}) + \varepsilon = \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 k_x, k_y 分别为 x, y 方向上的渗透系数; ε 为垂向补给强度, 即单位时间单位面积上的垂向补给量 (补给为正、排泄为负); μ 为潜水面下降时为重力给水度, 上升时为饱和差, 水和固体骨架的弹性贮存变化忽略不计; ZZ 为含水层底板标高函数。

实际工作中, 由于抽水疏干等原因, 承压含水层会出现无压状态, 即水头值低于隔水顶板标高, 这种无压水的流动也可用式 (1) 描述。若隔水底板顶面水平, 且水头函数 $h(x, y, t)$ 的基准面取在隔水底板顶面处, 则式 (1) 可写为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y h \frac{\partial h}{\partial y}) + \varepsilon = \mu \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (2)$$

对于承压水二维非稳定流应满足下述微分方程 (承压含水层为均质和各向同性)

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \varepsilon = \frac{S_s}{T} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

其中 S_s 为贮水系数, 无量纲量; T 为导水系数 ($T = kM$, M 为承压含水层厚度)。

另外, 在设计实际降水能力时, 考虑到基坑开挖施工条件, 应使水头能降低到基坑的开挖深度以下, 即

$$[h(t)]_p < H_0 - h, \quad (4)$$

式中 H_0 为基坑底板标高; h 为水位到坑底距离。

若基坑下存在承压水, 在基坑开挖过程中当基坑底部隔水层的厚度减小到一定程度时, 承压水的水头会冲破基坑底板, 形成突涌现象。因此当基坑底部与承压含水层相距较近时, 应该确定足以防止基坑被水冲破的最小承压水头, 即防止基坑突涌的安全水位 L_0 。那么为保证基坑开挖期间底板的安全, 水头 $[h(t)]_p$, 必须低于基坑的安全水位, 即

$$[h(t)]_p < L_0(t) = \frac{\gamma_s [L(t)]_p}{\gamma_w}, \quad (5)$$

式中 γ_s, γ_w 分别为隔水层的容重和水的容重; $[L(t)]_p$ 是含水层顶板到基坑底板的距离, 它是随基坑开挖深度而变化的。

(2) 沉降变形控制的环境安全约束

为了保证基坑周围的环境安全,在重要建筑物点集 k 处的地面沉降量必须小于其允许沉降量或差异不均匀沉降量,即

$$[S(t)]_k \leq [Sa(t)]_k, \quad (6)$$

式中 $[Sa(t)]_k$ 为环境允许沉降量,可根据建筑物类型及其重要性,参考有关规定确定; $[S(t)]_k$ 为地面沉降量,可依据工程的实际情况,结合水头降,利用分层总和法或固结理论进行计算。

(3) 井容约束

每个拟建的抽水井或回灌井点集的设计抽水量或回灌量,必须小于该在实际水文地质条件下的允许最大抽水量或灌水量,即

$$[Q(t)]_w \leq [Q_a(t)]_w, \quad (7)$$

式中 $[Q_a(t)]_w$ 为允许最大抽水(或灌水)量,可利用法国水力学家裘布依(Dupuit)提出的理论单井涌水量计算;基坑总涌水量可用利用“大井法”计算。

(4) 基坑围护结构不均匀沉降约束

若基坑采用的支护形式对不均匀沉降有严格要求时,在降水过程中还需考虑其对降水引发的沉降的约束。如上海人民广场地下变电站采用地下连续墙施工技术,就要求降水引发的基坑筒体边周差异沉降不大于 30 mm。

2.3 目标函数

反映变量间相互关系的数学表达式就是目标函数。在深基坑降水工程中,设计变量包括抽水井的数量 n 及其位置 $(X_i, Y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 回灌井的数量 m 及其位置 $(x_j, y_j) (j=1, 2, \dots, m)$ 各井的抽水量或回灌量 Q_i 或 Q_j 等。每一个设计变量的组合可以看作是多维向量空间的一个点 x 。满足前述约束条件的解向量,即为允许解。所有这些允许解所构成的多维向量空间就是允许解的解区域,记为 I 。最优化问题就是要确定设计向量 x^* , 使目标函数 $f(x)$ 取得极小值(对于追求目标函数最大值的问题,按照规范化的形式,都可以归结为求目标函数的最小问题)。基坑降水工程的目标函数应该是在保证基坑施工、安全和环境安全的前提下,降水工程的造价及其运行费用最低。也就是说,要在满足约束前提下,使抽水井的数目 n 和回灌井的数目 m 的和最小,抽水量 Q_i 和回灌量 Q_j 的总量最小。用公式表示为

$$\min_{x \in I} \left\{ \sum_{i=1}^n [1 - \delta(Q_i)] + \sum_{j=1}^m [1 - \delta(Q_j)] \right\}$$

$$\min_{x \in I} \left\{ \sum_{i=1}^n |Q_i| + \sum_{j=1}^m |Q_j| \right\}$$

$$\text{其中 } \delta(Q) = \begin{cases} 1, & \text{当 } Q=0 \text{ 时;} \\ 0, & \text{当 } Q \neq 0 \text{ 时。} \end{cases}$$

2.4 最优化问题的解法

在工程设计中,最优化问题的解法可分两类:一类是采用严格的数学分析,建立包括设计变量的满约束条件和目标函数的数学方程,对目标函数和约束条件都采用最优化数学方法(如拟牛顿法、单纯形法、共扼方向法和构造“罚函数”的外点、内点、混合法、坐标轮换法等)求解设计变量,得到最优化设计参数,这类方法适用于设计变量较少的简单最优化问题;另一类是通过分析工程的实际资料,逐步缩小设计变量的选择范围,通过试算或试验,寻找最优化问题的解答。基坑降水最优化问题是复杂的约束优化问题,很难找到严格的数学方法,较适合采用后一种方法。图 1 是对降水问题优化的试算过程框图。

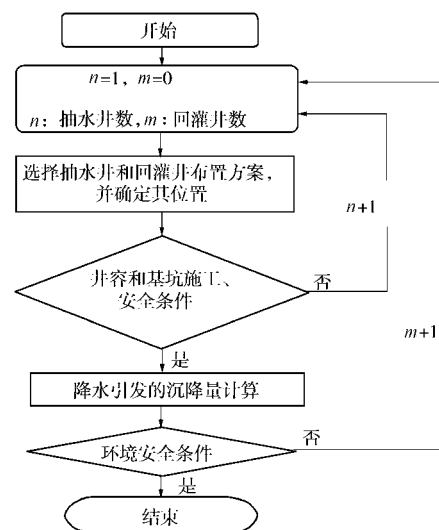


图 1 基坑降水工程最优化问题解法框图

Fig. 1 Optimization of pit dewatering

3 工程应用

某工程拟建主楼为地上为 10~15 层、地下为一层人防地下室,西、北两侧为道路,东、西两侧为四层办公楼,距拟建主楼边线最小净距为 12.8 m,基础尺寸为 $42.64 \times 14.2 \text{ m}^2$ 。基坑宽 19.0 m,长 43.0 m,原地下水埋深 0.9 m,场地埋深 10.5 m 以下为不透水的淤泥质粘土,上部多为带状结构夹 4~5 cm 厚粉土、粉砂的粉质粘土,渗透系数厚度加权平均值为 2.66 m/d。要求轴线水位降低到坑底以下 1.0 m。

首先假设一个抽水井 ($n=1$), 没有回灌井 ($m=0$), 由于降水要达到 $5+1-0.9=5.1 \text{ m}$, 总涌水量 $Q=69.2 \text{ m}^3/\text{d}$, 而根据井容约束条件, 单井抽水量 $q=5.89 \text{ m}^3/\text{d}$, 不满足井容和基坑施工、安全条件, 必须增加抽水井的数目。当计算到 $n=12$ 时, 已满足降水要求, 但考虑到施工过程中可能出现的不确定因素(如死井、机械故障泵等), 实际井点数为 14 个。

井点采用均匀布置,东西方向取 8.6 m、南北 9.5 m 的间距,见图 2。

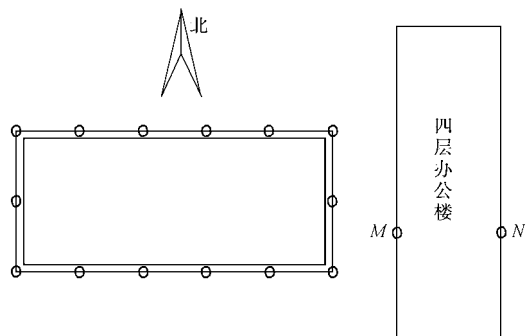


图 2 井点布置示意图

Fig. 2 The arrangement of dewatering wells

支护采用单锚护坡桩,不存在围护结构不均匀沉降约束。但由于场地施工条件复杂,周围建筑物在降水影响半径 26.3 m 的范围内,必须进行降水引发沉降量的计算,判断环境安全约束。东侧四层办公楼垂直于基坑边方向上 M、N 两点的沉降分别为 56 mm 和 18 mm,两点的沉降差为 38 mm,降水产生的局部倾

斜为 0.0027。依据简直地基基础设计规范要求的基础的局部倾斜小于 0.002,降水对四层办公楼的影响较大,必须采用防护措施。防护措施可以是回灌井或止水、隔水帷幕等。该工程采用了在降水井和四层办公楼之间加设进入不透水层的钢板桩,深度达 12.0 m。从工程实际施工情况来看,工程顺利,降、止水效果良好。

参考文献:

- [1] 龚晓南.深基坑工程设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [2] 薛禹群.地下水动力学原理[M].北京:地质出版社,1989.
- [3] 陈文华,许爱国,马丽丽,王璋群.最优化法在深基坑降水工程中的应用[J].岩土工程学报,1993,15(3): 37-45.
- [4] 吴昌瑜,李思慎,谢红.深基坑开挖中降水设计问题[J].岩土工程学报,1999,21(3):348-350.
- [5] 郭科,胥泽银.最优化方法及其程序设计[M].成都:四川科学技术出版社,1998.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由冶金勘察研究总院主办的学术-技术类双月刊,是中国科技论文统计源期刊、中国地质文摘引用期刊,中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网和万方数据科技期刊群全文收录期刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技

术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大 16 开本,双月 20 日出版。每期定价 5.0 元,全年 30 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址:河北省保定市东风中路 13 号《勘察科学技术》编辑部;邮编:071069;Tel:0312-3020887,3094054;Fax:0312-3034561;E-mail:kckxjs@126.com,kckxjs@163.com。

(《勘察科学技术》编辑部)