

深基坑降水的双层结构模型及有限元计算

周志芳¹ 郭耿新¹ 汪北华¹ 钟建驰² 吉 林² 冯兆祥²

(1. 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 江苏省长江公路大桥建设指挥部 江苏 南京 210001)

摘要 基于不同水文地质层水流运动特征的差异 , 考虑到土层降水-固结过程中渗透系数和贮水系数随土层物理力学参数的非线性变化 , 对基坑降水过程中的地下水流计算 , 提出了可同时求出各分层地下水位的双层结构数学模型及有限元计算方法 . 润扬长江公路大桥南锚基坑工程降水计算表明 , 双层结构模型为深基坑降水与沉降的非线性耦合计算 , 基坑土体变形预测、控制 , 工程施工和设计提供了新的计算分析途径 .

关键词 基坑降水 ; 有限元 ; 双层结构模型 ; 地层沉降

中图分类号 : TU46⁺3 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2004)02-0179-05

我国长江中下游沿江城市大多位于长江一级阶地上 , 地基呈典型的双层结构 , 上部由透水性弱、力学强度低的粘性土层组成 , 下部由强度相对高、透水性强的砂、砾、卵石层构成 . 1943 年 , 前苏联著名水文地质学家卡明斯基^[1]指出 , 在层状结构的水平含水层中 , 当上层渗透系数比下层的渗透系数小得多时 , 上层为潜水流 , 下层为承压水流 , 两层水流具有统一的地下水头(见图 1(a)). 这一双层结构理论^[2]一直沿用至今 , 许多基坑降水设计也基于了这一理论 .

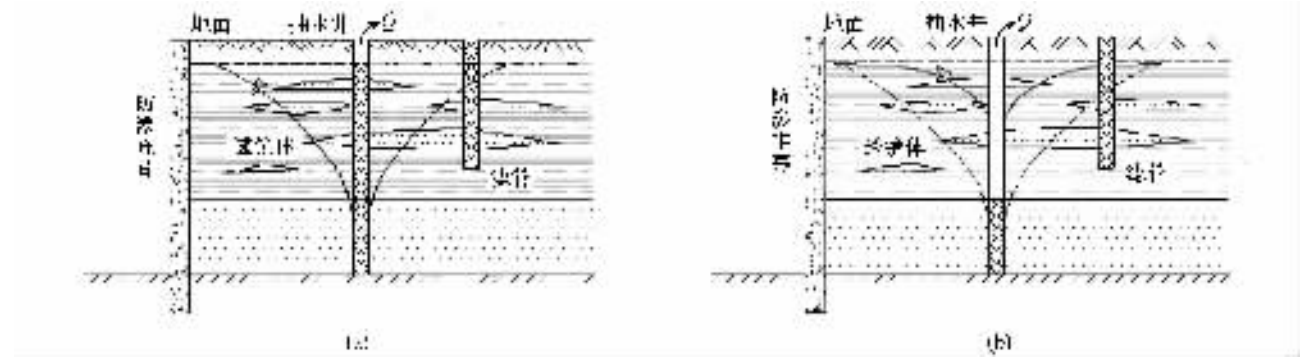


图 1 双层结构含水系统

Fig.1 Water-bearing system of double-layer structure

深基坑工程降水有 2 个显著特点 : 其一 , 降水强度大 , 单井水位降深大 ; 其二 , 单井结构上大多在下部强透水层设置过滤器 , 上部相对弱透层则布设死管 . 这样一来 , 在双层结构的含水层中很难形成层状水平地下水流和统一的地下水头 , 而是 , 下层承压水流主要以水平流动为主 , 而上层潜水流主要以垂直流动为主 , 下层承压水流和上层潜水流有各自独立的地下水头(见图 1(b)). 针对这一问题 , 本文结合润扬长江公路大桥南锚基坑工程 , 基于不同水文地质层水流运动特征的差异 , 考虑到土层降水-固结过程中渗透系数和贮水系数随土层物理力学参数的非线性变化 , 对基坑降水过程中的地下水流计算 , 提出了双层结构数学模型及有限元计算方法 .

1 场地基本情况

润扬长江公路大桥南锚基坑工程 , 锚碇基础长 × 宽 × 深为 69 m × 51 m × 29 m , 相应设计基底标高为

收稿日期 2003-08-05
基金项目 国家自然科学基金重点基金资助项目(50239070)
作者简介 周志芳(1962—) , 男 , 江苏丹阳人 , 教授 , 博士 , 博士生导师 , 主要从事地下水科学与工程方面的研究 .

-26 m.工程地质勘查表明,锚碇场区第四系覆盖层总厚度为27.8~29.4 m,具有明显的双层结构特点,上部弱透水层由杂填土、亚粘土、淤泥质亚粘土和亚粘土与粉砂互层组成,厚度为20.0~22.0 m;下部由粉细砂组成的强透水层,层厚7.8~9.1 m.基坑周边采用1500 mm 钻孔灌注排桩加1.30 m 冻结止水帷幕,灌注排桩及冻结止水帷幕深入基岩.坑内施行管井加轻型井点的降水方案,12 眼管井南北向成3列布设,每列4眼井,全部管井揭穿松散覆盖层,每眼井径350 mm.其中西列南侧3眼井和中间一列北侧2眼井为加深井.轻型井主要抽排上层弱透水层的地下水,含水层地下水则主要由12 眼管井抽排,在坑外布设了14 眼群井辅助降水预案.如图2所示.

自2002年1月6日开始进行基坑内降水及基坑开挖,至1月23日,历时18 d.1月24日因冻结帷幕局部渗漏而停止降水和基坑开挖,至3月8日,历时44 d.期间,对冻结帷幕进行了防渗加固并提出了基坑外井群辅助降水方案.自2002年3月9日重新开始进行基坑内降水及基坑开挖,同时,坑外降水井施工,至4月中旬坑外14眼井完成并部分坑外井开始辅助降水,直至2002年7月4日基坑见底,历时112 d.

2 双层结构模型与计算方法

2.1 水流计算模型

对于地下水流计算,采用双层结构数学模型.据润扬长江公路大桥南锚碇基坑降水单井结构设计,在降水方案实施时,下层承压水流主要以水平流动为主,而上层潜水流主要以垂向流动为主,上下层有各自独立的地下水头(见图1(b)).如果以基岩面为基准面, xOy 为平面直角坐标,则下层承压水流地下水运动的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(KM\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(KM\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\omega=\mu^*\frac{\partial H}{\partial t}\qquad t>0\;(x,y)\in D\tag{1}$$

对应定解条件为

初始条件 $H(x,y,t)=H_0\qquad t=0\;(x,y)\in D\tag{2}$

$\omega(x,y,t)=0.0\qquad t=0\;(x,y)\in D\tag{3}$

边界条件 $H(x,y,t)=H_0\qquad t>0\;(x,y)\rightarrow\infty\tag{4}$

$\omega(x,y,t)=Q\qquad t>0\;(x,y)\in(x_0,y_0)\tag{5}$

$\omega(x,y,t)=\frac{h-H}{h-M}K'\qquad t>0\;(x,y)\in D\tag{6}$

式中: K ——承压层渗透系数; M ——承压层厚度; H ——承压层地下水头; ω ——承压层单位时间单位面积的垂直补给量; μ^* ——承压层贮水系数,无压情况下为给水度 μ ; t ——时间; D ——研究的区域范围; H_0 ——天然地下水头; Q ——降水井流量; h ——潜水层地下水头; K' ——潜水层渗透系数.

上层潜水流的控制方程为

$$\frac{H-h}{h-M}K'=\mu'\frac{\partial h}{\partial t}\qquad t>0\;(x,y)\in D\tag{7}$$

对应定解条件为

初始条件 $H(x,y,t)=H_0\qquad t=0\;(x,y)\in D\tag{8}$

$h(x,y,t)=H_0\qquad t=0\;(x,y)\in D\tag{9}$

边界条件 $H(x,y,t)=H_0\qquad t>0\;(x,y)\rightarrow\infty\tag{10}$

$h(x,y,t)=H_0\qquad t>0\;(x,y)\rightarrow\infty\tag{11}$

式中 μ' 为潜水层给水度.

2.2 土层参数的非线性耦合

在多层越流含水系统中,降水土层水头下降的同时,弱透水层、相邻含水层的水头也随之发生变化,各层

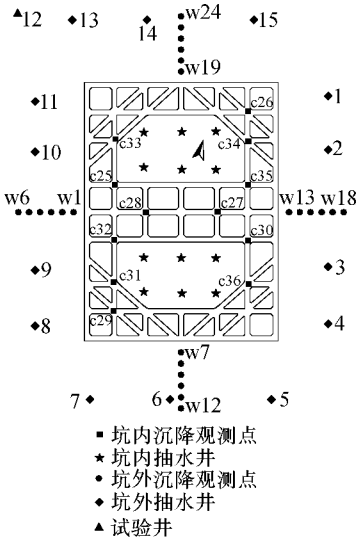


图2 基坑排水系统
Fig.2 Drainage system for foundation pit

的沉降也同时产生. 因此, 由降水引起的固结问题包含在地下水流动问题式(1)~(11)中, 式(1)地下水流动微分方程右端项中的贮水系数 μ^* 定义是^[2]

$$\mu^* = \mu_s M = \rho_w g (\alpha + n_i \beta_w) M$$

(12)

式中: μ_s ——贮水率; ρ_w ——水的密度; n ——孔隙度; β_w ——水的体积压缩系数; α ——土的体积压缩系数; g ——重力加速度.

在土层固结过程中, 土层被压密, 孔隙度和孔隙比减小, 因而土的渗透系数 K 和贮水率 μ_s 会改变. 如果把 K 和 μ_s 视为常量, 则属于线性固结问题. 若随着固结过程参数 K 和 μ_s 是变量, 则是非线性固结问题^[3,4]. 在非线性固结过程中, 土层物理力学参数与水文地质参数的变化存在着内在的非线性耦合关系. 据 Kozeny-Carman 方程, 渗透系数的变化可表达为^[4]

$$K = K_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{1 - n_0}{1 - n} \right)^2$$

(13)

式中: n_0 , n ——初始孔隙度和固结过程中的孔隙度; K_0 , K ——初始渗透系数和对应孔隙度为 n 的渗透系数.

设某土层厚度为 M_i , 由于降水引起的垂直沉降量为 S_i , 假定不考虑土层的侧向变形, 则固结过程中的孔隙度 n 和孔隙比 e 为

$$n = n_0 - \frac{S_i}{M_i - S_i} \approx n_0 - \frac{S_i}{M_i} \qquad e = \frac{n}{1 - n}$$

(14)

根据固结试验曲线 e - $\lg \sigma'$ 的斜率 C_c (压缩指数), 可得

$$\alpha = 0.434 \frac{C_c}{(1 + e) \sigma'}$$

(15)

将式(14)代入式(11)得贮水系数 μ^* 随 e 变化的关系式

$$\mu^* = \mu_s M = \rho_w g \left[0.434 \frac{C_c}{(1 + e) \sigma'} + n_i \beta_w \right] M$$

(16)

至此, 即可用式(13)和式(16)表示 K 和 μ^* (或 μ_s) 随 e (或 n) 的变化关系, 处理非线性固结引起的参数变化问题.

2.3 土层初始参数的确定

根据润扬长江公路大桥南锚基坑工程各阶段的地质、水文地质和岩土力学的勘测、试验资料的综合分析, 得到计算中土层水文地质、岩土物理力学的初始参数, 如表 1 所示. 其他相关参数, 如孔隙比 e 、贮水系数 μ^* 、体积压缩系数 α , 则可解析求得.

表 1 土层水文地质、岩土物理力学初始参数的取值

Table 1 Initial values of hydrogeologic and physical-mechanical parameters of soil and rocks

层位	渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	水的体积压缩系数 $\beta_w/(\text{kPa})^{-1}$	孔隙度 n	浮密度 $\rho'/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	天然密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩指数 C_c	压缩模量 E_s/MPa
弱透水层	0.00143	4.6×10^{-7}	0.52	0.84	1.38	0.2720	3.25
含水层	4.70000	4.6×10^{-7}	0.39	0.82	1.38	0.0996	6.68

3 计算成果与分析

3.1 渗流场计算成果

根据数学模型式(1)~(11), 研究区计算范围选取以基坑中心为轴心、半径为 600.0 m 的区域. 双层结构含水层采用三角形单元剖分, 每层剖分成 1736 个节点、3400 个单元. 这样研究区节点总数为 3472, 单元总数为 6800. 对于冻结帷幕, 剖分时做了专门处理, 即单独划分单元, 其渗透系数取值为 $3.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. 基坑内 12 眼管井全部启用. 基坑外共有成井 15 眼 (见图 2), 降水时主要启用 6、7、8、10 号井辅助降水.

从第 174 天水头平面分布 (图 3) 可看出, 承压层水头分布具有明显的不对称性. 这除与地质、水文地质条件的不均匀性有关外, 还与降水井的出水量分布不均匀有关. 为了减少基坑外承压含水层从西南侧通过帷幕向基坑内的渗水, 启用基坑外西南侧的 6、7、8、10 号 4 眼井进行辅助降水. 而上层潜水层 (弱透水层) 水头变化显示出较好的对称性, 这与降水井的结构密切相关. 降水井单井结构仅在下部承压层位置设置过滤器, 其

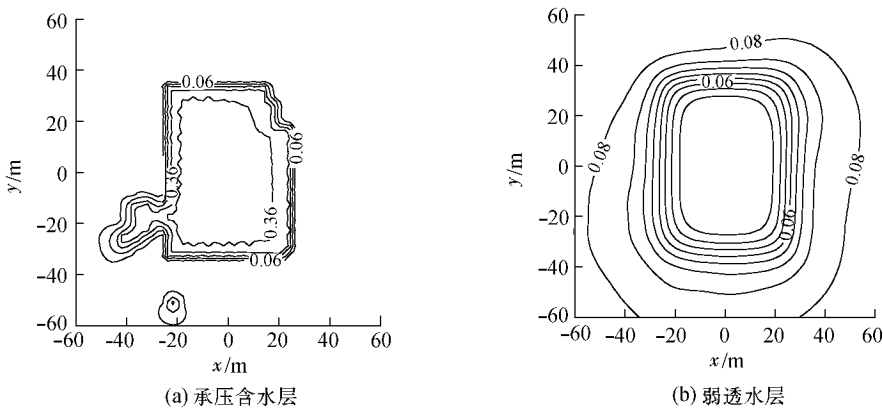


图 6 贮水系数(或给水度)等值线分布

Fig.6 Contour map of storage coefficient (or specific yield)

4 结 论

- a. 针对润扬长江公路大桥南锚场地地质、水文地质条件提出了双层结构地下水运动的数学模型和计算方法.该方法可以实时计算出各分层的地下水位,从而达到各分层沉降计算与控制研究目的.
- b. 建立了土层非线性物理力学参数与水文地质参数之间的内在联系,客观地描述了土层降水-固结过程中孔隙度、渗透系数和贮水率等参数非线性变化过程.计算成果较好地刻画了基坑井群的实施过程中含水层、弱透水层水头、参数的时空变化规律.
- c. 润扬长江公路大桥南锚基坑围护工程及降水方案是合理的,不仅达到了预期的工程目的,而且有效地控制了深基坑周边地面变形的发生和发展.

参考文献：

[1] 卡明斯基. 地下水动力学原理[M]. 北京：地质出版社,1956.20—35.

[2] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 第 2 版. 北京：地质出版社,1997.90—138.

[3] 钱家欢. 土力学[M]. 第 2 版. 南京：河海大学出版社,2000.42—60.

[4] 陈崇希. 地下水开采-地面沉降数值模拟及防治对策研究[M]. 北京：中国地质大学出版社,2001.5—18.

Double-layer structure model and FEM calculation
of dewatering of deep foundation pits

ZHOU Zhi-fang¹, GUO Geng-xin¹, WANG Bei-hua¹, ZHONG Jian-chi², JI Lin², FENG Zhao-xiang²
(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Headquarters, Nanjing 210001, China)

Abstract : In consideration of different characteristics of water flows in different hydrogeological stratum and the non-linear relationships between hydraulic conductivity coefficient, storativity, and physical-mechanical parameters of soil-layers during the dewatering-consolidation process, a double-layer structural numerical model and FEM are put forward to calculate the groundwater flow during the process of foundation pit dewatering. With the model, the groundwater table of each soil layer can also be obtained. As an example, the model is applied to calculation of the dewatering process for the south anchor foundation pit of the Runyang Yangtze River Highway Bridge. The results show that the double-layer structure model provides a new method for nonlinear coupling calculation of the dewatering of deep foundation pits and settlement, for prediction and control of soil deformation of foundation pits, and for engineering construction and design.

Key words : foundation pit dewatering ; FEM ; double-layer structure model ; stratum settlement