

考虑渗流影响的基坑土钉支护整体稳定性分析中水压力的估算

郭红仙, 程晓辉, 李 静

(清华大学, 北京 100084)

摘要: 本文重点介绍在典型工程水文地质条件下, 基坑土钉支护整体稳定性分析中, 所涉及的水压力的计算机辅助流网法估算, 并进行了算例分析。

关键词: 地下水渗流; 基坑土钉支护; 整体稳定性分析; 计算机辅助流网法; 水压力

中图分类号: TU46⁺3

文献标识码: A

Abstract: Appraisal of water pressure in the stability analysis of earth nail bracing for foundation pit under typical hydrogeologic condition by method of computer-aided flow net is introduced herein. A case history is also given.

Key words: groundwater seepage; earth nail bracing for foundation pit; analysis on the entire stability; method of computer-aided flow net; water pressure

1 问题的提出

在深基坑开挖中, 土钉支护现已成为继桩、墙、撑、锚支护之后又一项较为成熟的支护技术。地下水渗流对基坑支护, 尤其是土钉支护影响极大, 有时甚至起决定性的作用。这种影响主要表现在: (1) 由于开挖和降水引起的渗透压力对基坑边坡整体稳定性的削弱; (2) 渗流可能引起的局部稳定性破坏, 如流土、土钉黏结破坏等。

中国工程建设标准化协会批准的协会标准《基坑土钉支护技术规程》(CECS96: 97) (以下简称《规程》) 中, 在基坑支护整体稳定性分析方法即考虑土钉贡献的圆弧滑移面法中, 提到了当有地下水时, 应计入水压力的作用, 但并未具体说明究竟应如何计入地下水的影响。同时, 在根据挡土墙理论, 进行外部整体稳定性验算时, 也未给出墙后水

压力的计算。

本文将针对《规程》中的支护整体稳定性计算方法, 考虑几种典型的工程水文地质条件和降水措施, 提供其所需水压力的工程估算方法。

2 水压力估算的原则

2.1 相关的基坑土钉支护稳定性计算方法 (《规程》的有关条文)

内部整体稳定性计算采用圆弧滑移面普通条分法, 考虑土钉受拉作用, 取单位长度支护 (平面应变假定) 进行分析计算。当有地下水时, 假定 μ_i 是土条 i 在圆弧破坏面上的水压力标准值, 在计入地下水压力的作用及其对土体强度的影响后, 安全系数 F_s 的计算公式 (式 (1) 及图 1) 如下:

$$F_s = \frac{\sum [(W_i + Q_i) \cos \alpha + (R_k / s_{hk}) \sin \beta_k - \mu_i] \tan \varphi_j + c_j (\Delta_j / \cos \alpha_i) + (R_k / s_{hk}) \cos \beta_k}{\sum [(W_i + Q_i) \sin \alpha_i]} \quad (1)$$

式中 W_i 、 Q_i ——作用于土条 i 的自重和地面、地下荷载; α_i ——土条 i 圆弧破坏面切线与水平面的夹角; Δ_i ——土条 i 的宽度; φ_j ——土条 i 圆弧破坏面所处第 j 层土的内摩擦角; c_j ——土条 i 圆弧破坏面所处第 j 层土的粘聚力; R_k ——破坏面上第 k 排土钉的最大抗力, 按《规程》5.4.5 条确定; β_k ——第 k 排土钉轴线与该处破坏面切线之间的夹角; s_{hk} ——第 k 排土钉的水平间距。

外部整体稳定性验算采用挡土墙稳定性计算方

法 (详见《规程》和有关规范), 也未考虑水压力的计算。

2.2 思路的假定

本文提出的问题实际是要针对一些典型工程水文地质条件, 降水措施及特定的基坑支护方法——土钉支护, 确定影响区域内的地下水渗流场。其数

收稿日期: 2000-06-12

作者简介: 郭红仙 (1967-), 女 (汉族), 山西榆次人, 讲师。

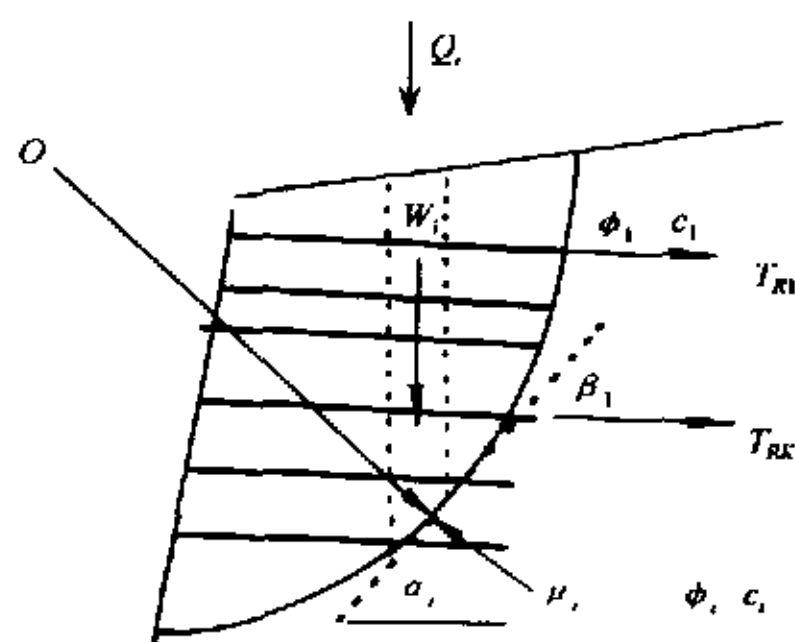


图1 圆弧破坏面的简单条分法

学背景是 Laplace's 方程的三维边值问题，要找解析解和数值解都很困难。我们将从工程实际出发，进行假定，通过对简化的力学模型的解析解和数值解（平面有限元）的分析，归纳一些渗流场的边界条件，应用平面流网和计算机图解法，给出所关心区域中水压力的估算。基本假定如下：

(1) 平面稳定渗流场：这与实际工程，尤其是采用基坑周边井点降水的支护区域（小于 $2H$ ， H 为基坑开挖深度）有一定出入。这一假定一般也会过低估计该区域内水压力的影响，我们用一个系数 ε (≥ 1) 来反映这一影响。

(2) 均匀和各向同性渗流场：支护影响区域内各层土体的渗透系数（考虑各向同性）不同，有时差别很大。本文通过定义一个空间平均渗透系数 K （其定义如式 (2)），使得渗流场的渗透性变为均匀。这仅在考虑支护整体稳定性时适用。在平面渗流条件下 K 可按式 (3) 计算。

$$K = \int_V k(x, y, z) dv / V \quad (2)$$

式中 $k(x, y, z)$ ——场内渗透系数分布函数； V ——体积。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum h_i} \quad (3)$$

式中 k_i 、 h_i 分别是各土层渗透系数和厚度。

2.3 滑移面上水压力的三种计算模型

本文针对潜水和承压水两种地下水形态，考虑两种典型的降水措施：浅层止水帷幕和管井或轻型井点降水（一级或两级），并按渗透性质，区分土层为不透水层（隔水层），透水层和半透水层（可能有泄漏的），提供以下 3 种水压力的估算模型：关键是确定用于工程流网计算的渗流场边界条件和流（势）线的形状。

2.3.1 浅层止水帷幕

图 2 所示为 3 种可能的工程状况。这种状况对应于实际工程中浅层土为透水层，地下水位较高，而第一层不透水层（或半透水层）埋深较浅的情况。

图 2a 情况，水压力 P_i 按静水压力考虑， $P_i = \gamma_w z$ ， γ_w ——地下水的重度； z ——该点在地下水位以下的深度。

图 2b 情况，根据一维渗流理论，可以得到潜水层等势线的边界条件（如图示）。

图 2c 情况，为止水帷幕未到不透水层。通过平面有限元算例分析（如图 2d 所示的止水帷幕离不透水层分别为 1m，0.5m 的渗流场等势线和流线图），可假定其等势线是从椭圆曲线向圆曲线逐渐过渡的一族曲线，如式 (4) 和式 (5)。在进行工程流网分析时，所需边界条件和等势线方程如图 2d 所示。

$$\frac{x^2}{\left(\frac{2H-a}{2H-\gamma_0}\gamma_0\right)^2} + \frac{y^2}{\gamma_0^2} = 1 \quad (4)$$

当 $\gamma_0 = a$ 时，椭圆曲线变为圆曲线：

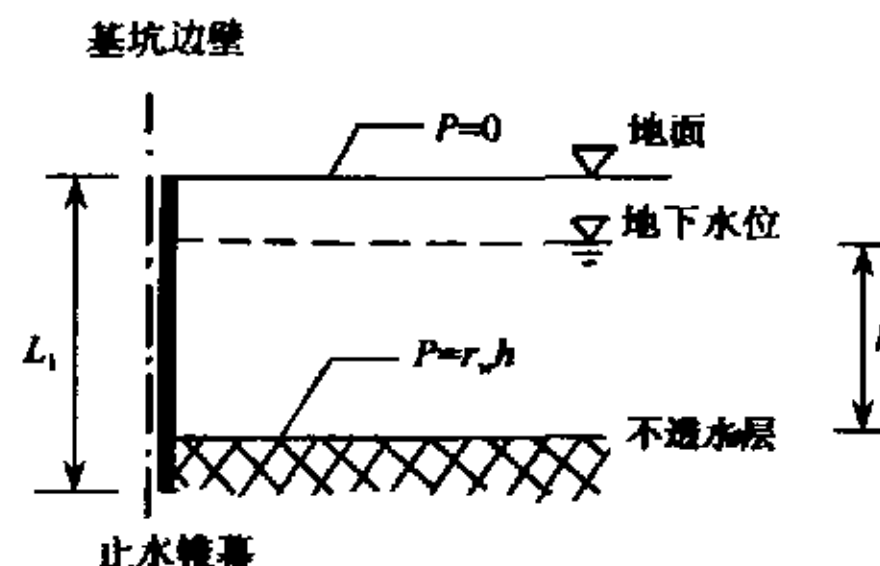


图 2a

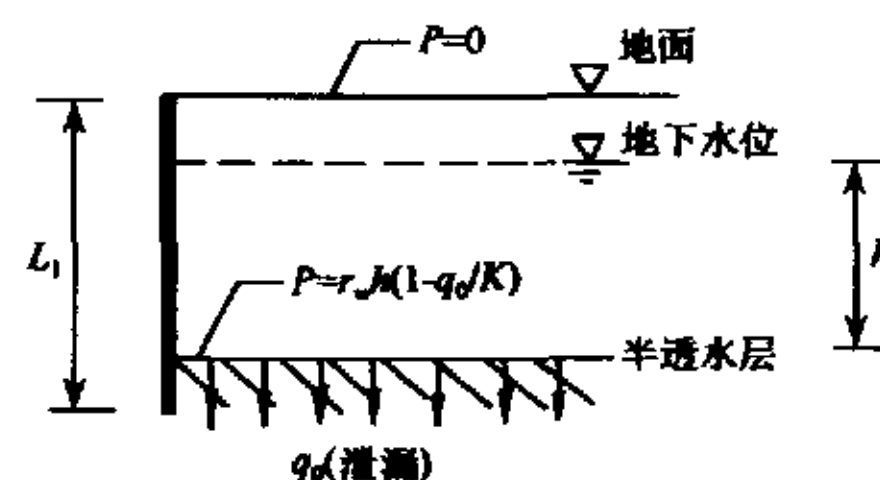


图 2b

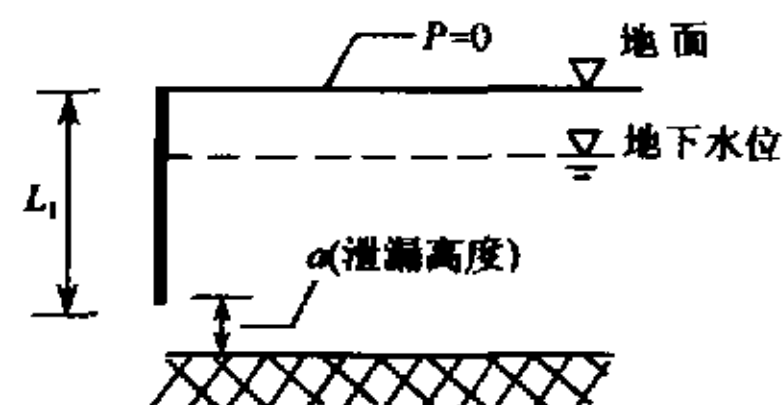


图 2c

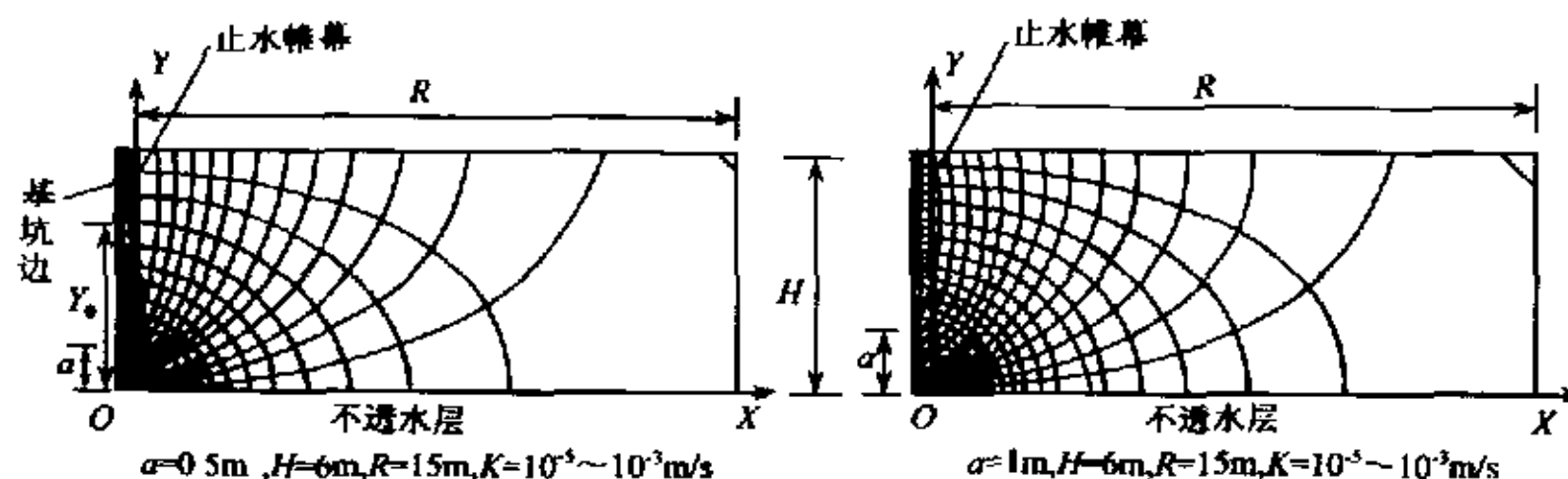


图 2d 止水帷幕离不透水层的渗流场等势线和流线 (MSEEP 有限元程序的结果)

$$x^2 + y^2 = a^2 \quad (5)$$

式中 y_0 ——等势线与止水帷幕交点的纵坐标;
 a ——泄漏高度; H ——静止地下水位高度。

2.3.2 无压井点降水

潜水层采用管井和一级轻型井点降水 (包括明沟排水)。依据前文假定, 这种情况在基坑边坡支护区域内形成的渗流场是一个平面无压渗流场, 由平面渗流方程得到其降水曲线方程为抛物线方程 (式 (8))。如果在基坑开挖和降水施工过程中 (或对永久性支护), 考虑地表水 (大气降水、生活或施工用水) 渗透, 或可能的临近水源补给 (如周边河流等), 通过将这些影响简化为一个垂直于静止地下水面的渗漏量 N (m^3/s), 如图 3 所示, 根据渗流方程, 式 (6) 变为式 (7)。

$$z^2 - h^2 = \frac{H^2 - h^2}{R} x \quad (6)$$

$$z^2 - h^2 = \frac{H^2 - h^2}{R} x + \frac{N}{K} x (R - x) \quad (7)$$

式中 z ——降水曲线上的水头高度; N ——地表渗透量; K ——平均渗透系数; H ——潜水含水层厚度; h ——井中水深; R ——降水曲线影响半径。

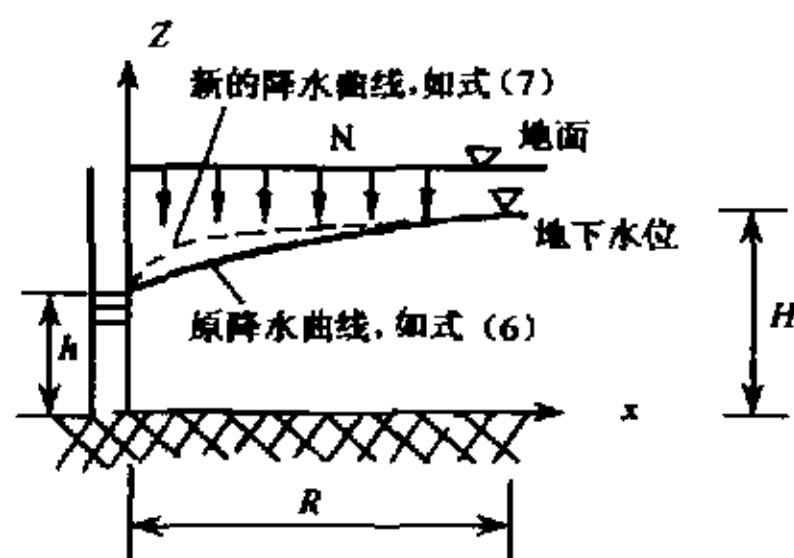


图 3 无压井点降水曲线

这样, 用于工程流网法的渗流场边界条件可确定为: 排水井壁或基坑边壁为最边上的一条等势线, 整个渗流场的流线为一族抛物线, 这族抛物线从最上的降水曲线 (抛物线) 逐渐地过渡到最下的不透水层表面 (直线)。

需要指出的是, 当降水采用二级井点降水或采

用基坑周边和中心联合降水时, 支护区域内的渗流场变化不会很大 (基坑底会有较大影响), 仍可将按式 (6) 和式 (7) 估计渗流场边界条件。

2.3.3 承压层井点降水

承压层降水由于有承压水头的存在, 形成的渗流场会更复杂一些。本文针对图 4 所示典型水文地质条件和计算简图, 假设井中的水位降到承压层以下, 来确定渗流场边界条件。

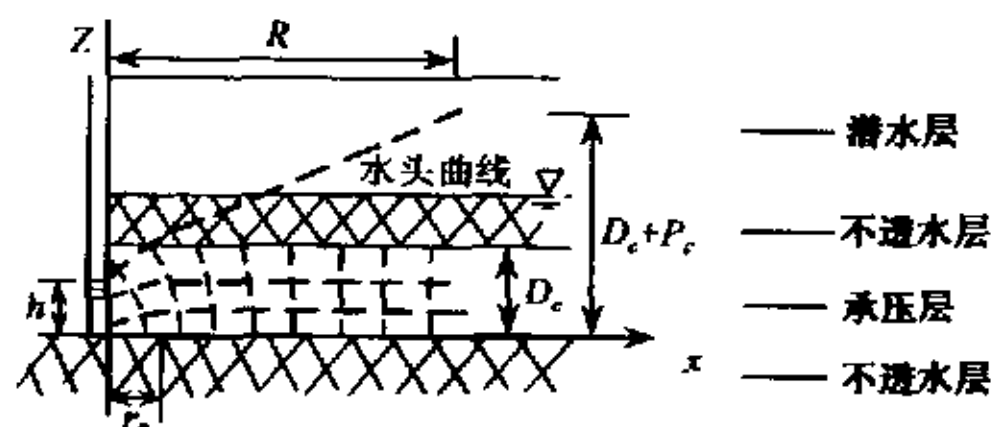


图 4 承压层降水的等势线和流线

图中, D_c 为承压层的厚度, P_c 为承压层承压水头, R 为降水井影响半径, h 为井中水深, r_0 为无压降水曲线与上层隔水层交点的横坐标。

由于空气的渗入, 井点附近 ($0 \sim r_0$ 段) 的渗流场就是一个无压渗流场, 其降水曲线 (即水头曲线) 为一抛物线方程; 而当 $x > r_0$ 时, 渗流场就应该是一个有压平面渗流场, 水头曲线为一斜线 (如图 4)。由 Dupuit 公式和在 $x = r_0$ 处渗流量连续的条件, 得到:

当 $x \leq r_0$ 时, 水头曲线方程为:

$$z^2 - h^2 = \frac{2D_c P_c}{R - r_0} x \quad (8)$$

当 $x > r_0$ 时, 水头曲线方程为:

$$z = \frac{P_c}{R - r_0} (x - r_0) + D_c \quad (9)$$

其中,

$$r_0 = \frac{(D_c - h^2) R}{D_c^2 - h^2 + 2D_c P_c} \quad (10)$$

2.4 水压力的计算

一般流网法给出的是渗流场中任意一点的总水头高度 H_i ，那么该点的孔隙水压力 $P_i = (H_i - Z_i) / \gamma_w$ ，其中， Z_i 是该点的位置高度， γ_w 为地下水重度。考虑本文的基本假定，我们建议用《规程》中的公式计算整体稳定性安全系数时，当土条 i 的圆弧滑移面在渗流场中时，水压力标准值 $\mu_i = \xi P_i$ （否则等于 0）。 ξ 主要反映计算方法的假定和不足，和安全系数的概念稍有不同。针对本文的 3 个计算模型， ξ 取值如表 1 所示。

表 1			
ξ 的取值			
模型	浅层止水帷幕	无压井点降水	承压层井点降水
ξ	1.0	1.1	1.2

3 计算机辅助工程流网法

可以肯定地说，流网法虽原理简单（3 个条件：流线和等势线必须正交；流线和等势线构成的各个网格的长宽比应为常数；满足边界条件），但只要正确地绘制流网，几乎所有的工程平面渗流问题，包括非均匀渗流场，都可以得到足够精度的解。渗流问题的有限元或有限差分程序，有时是复杂和耗时的。我们针对基坑开挖，尤其是土钉支护可能遇到的地下水渗流问题，已经和正在采用计算机辅助绘制工程流网的方法，编制有关程序，争取形成一个小软件包，加挂在已有的基坑土钉支护辅助设计软件 SNCAD 之上。

图 5 是针对一个基坑边井点降水的无压渗流场，按相邻两条等势线之间的势差 $dh = 0.1\text{m}$ 和适当的算法（篇幅的限制，不再给出具体算法），所编制了相应的程序，绘出的一个渗流网。

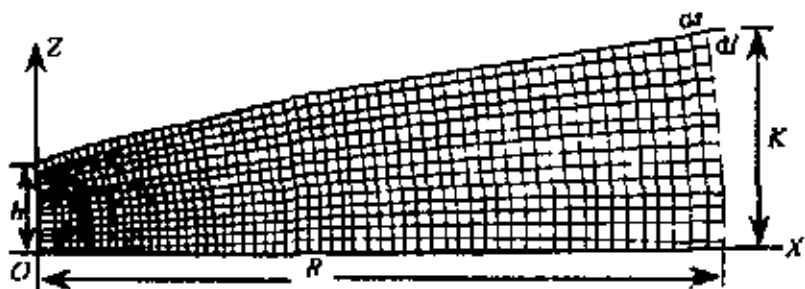


图 5 用于计算水压力的辅助流网

4 算例分析

基坑深 11.42m，放坡为 1:0.18；现场土体分 4 层，如表 2 所示。设置了 7 排土钉，土钉的水平间距为 2m，竖向间距为 1.5m，第 2、3 排土钉采用 $\phi 25$ 的螺纹钢筋，第 1、4、5、6、7 排土钉采用 $\phi 20$ 的螺纹钢筋；第 1 排土钉长 8m，第 2、3 排土钉长 12m，第 4、5 排土钉长 6m，第 6 排土钉长 5m，第 7 排土钉长 3m，土钉向下倾角 10~15°（下述计算中

均取 15°）。原天然水位为地面埋深 -2.42m，潜土层厚 13.7m。采用了基坑周边井点降水，井点距基坑顶点 1m，计算中取地面荷载为 10kN/m^2 ，场地平均渗透系数取 $6 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 。

土质参数			
表 2			
土 层	厚度 (m)	重度 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)
①杂填土	1.1	19	15
②黄土状粉质粘土	2.1	19.8	23
③黄土状粉质粘土	2.9	19.8	31
④粉质粘土	2.4	20.2	39
⑤粘土	5.3	20.1	34

采用由我们自行开发的 SNCAD（基坑土钉支护计算机辅助系统——施工现场用）软件进行计算分析，内部整体稳定性安全系数 K 的计算结果如表 3 所示，表中 F_1 到 F_7 是各步开挖的安全系数， F_d 为破坏面过基趾点的内部整体稳定性系数， F_b 为破坏面过坑底的内部整体稳定性系数。图 6 为由 SNCAD 得到的土钉位置和降水曲线位置的比较图。

降水对基坑土钉支护内部稳定性的影响				
表 3				
K	不考虑地下水	按原天然水位	排水井中水位较原天然水位	
			下降 3m	下降 6m
F_1	1.77	1.77	1.77	1.77
F_2	1.82	1.79	1.82	1.82
F_3	1.64	1.56	1.64	1.64
F_4	1.48	1.36	1.47	1.48
F_5	1.42	1.26	1.38	1.42
F_6	1.33	1.09	1.24	1.32
F_7	1.24	0.96	1.12	1.21
F_d	1.48	0.71	1.22	1.35
F_b	1.26	0.97	1.12	1.21

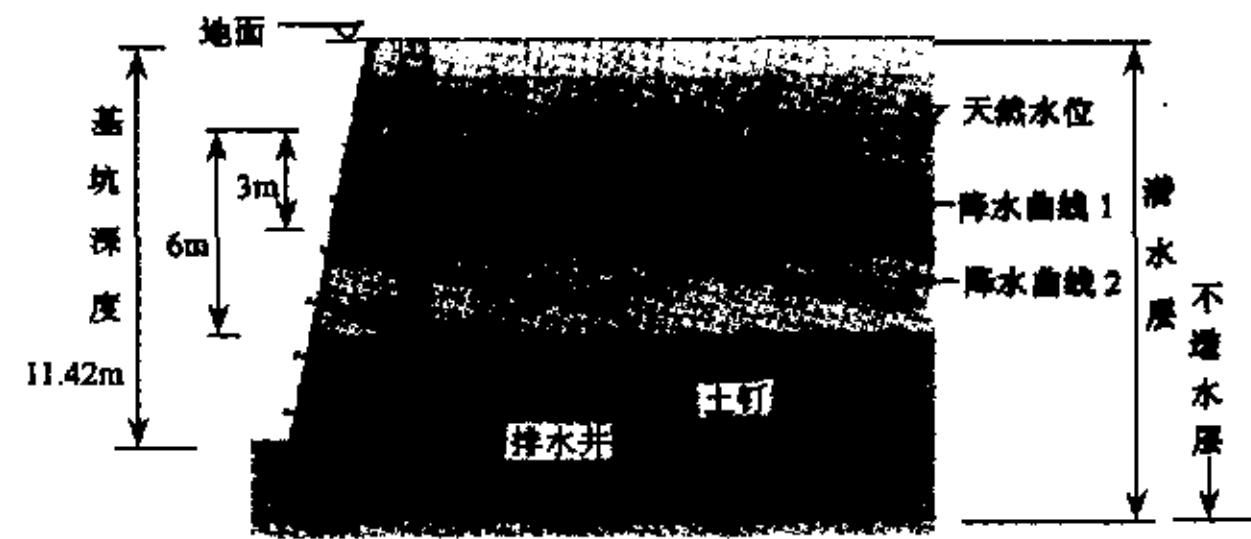


图 6 由 SNCAD 得到的土钉位置和降水曲线

几点讨论：
 (1) 水压力对内部整体稳定性系数的影响：如果按原天然水位的情况进行计算，从第 6 步开挖之后各步开挖的安全系数都未能达到 1.2，根据《规程》，必须修改支护方案。而考虑了降水的影响后，对于本算例，为了保证地下水位下降到坑底以下，

降水深度差不多要有 6m，这时每一步开挖的整体稳定性系数 K 基本达到了规范的要求，就不需要再加强支护措施。如果不计入地下水的影响（即假定地下水位于基坑底部），则与实际情况差别很大，也和考虑地下水渗流影响计算出来的结果有一定差别，如果此时认为安全系数偏大，而降低原支护设计的方案的要求，则是有危险的，甚至可能导致支护的失败。由此可见，考虑地下水对基坑支护稳定性的影响时不可粗略的看待，应该根据实际情况比较适当的考虑地下水对基坑支护稳定性的影响。

(2) 降水参数的敏感性分析：实际工程提供的一些工程水文参数精确度不会很高，所以有必要分析一下内部整体稳定性系数 F 对各项参数的敏感性。以潜水层井点降水为例，对上述算例进行降水参数（含水层的厚度 H 、排水井中的水深 h （间接反映了降水的降度）、影响半径 R ）的敏感性分析如表 4。通过固定其他参数，变换要分析参数的取值的办法，得到内部整体稳定性系数 K 在各参数允许的误差范围内，对各项参数的敏感性不大。

参数敏感性分析								表 4			
对含水层厚度 H (m) 的敏感性分析 ($R = 30\text{m}$, $h = 2\text{m}$)				对井点降水影响半径 R (m) 的敏感性分析 ($H = 13.7\text{m}$, $h = 2\text{m}$)				对井点降水井中水深 h (m) 的敏感性分析 ($H = 13.7\text{m}$, $R = 30\text{m}$)			
$R/H/h$	6.1	8.5	13.7	15	30	50	100	2	3	4	5
K											
F_1	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
F_2	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82
F_3	1.63	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
F_4	1.45	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
F_5	1.4	1.41	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
F_6	1.3	1.3	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.32
F_7	1.19	1.21	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.22
F_8	1.37	1.43	1.45	1.39	1.45	1.47	1.48	1.45	1.46	1.43	1.4
F_9	1.2	1.23	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.25	1.23

(3) 基坑坑底部位的水压力估算：本文提供的水压力估算方法主要针对基坑支护边坡部份的渗流场，坑底的水压力计算需另行考虑，它主要与基坑坡址渗透破坏和坑底抗浮破坏有关。

(4) 数值计算问题：公式 (1) 实质是考虑了圆弧滑移面上水压力作用的滑移体整体力平衡的极限平衡公式，因而有数值计算问题，有时会比较严重，在工程实践中应该注意。

5 结论

本文提供了一个考虑地下水渗流对基坑土钉支护整体稳定性分析影响的思路，并针对几种典型的工程状况，给出了渗流场中水压力的估算方法。算例分析说明计算方法是合理的。

算例分析还表明如果不考虑降水对基坑稳定性的贡献，而按原天然水位计算其整体稳定性系数，使得实际的安全储备过大，造成了一种浪费。或者

在计算时不考虑地下水的影响，与实际情况差别很大，使得实际的整体稳定性系数没有达到《规程》的要求，这样又可能造成基坑支护的失败。

本文的工作得到了陈肇元教授、宋二祥教授、王际芝教授和王德怀博士的帮助，在此一并表示深深的谢意。

参 考 文 献

[1] 中国工程建设标准协会标准. 基坑土钉支护技术规程 (CECS96: 97). 1997.

[2] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[3] 西南交通大学水力学校验室. 水力学. 高等教育出版社, 1993.

[4] 李静. 基坑土钉支护工作性能研究. 清华大学土木工程系学士学位论文, 1999.

[5] A. Verruijt, Theory of Groundwater flow, MacMillan, 1982.

[6] 程晓辉, 郭红仙, 陈肇元. 基坑土钉支护计算机辅助系统的开发与应用. 建筑技术 (增刊), 1998.