

# 小断面排水减压沟的渗流计算

吴世余

(安徽省·水利部淮委水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:**应用正、反对称流叠加法计算减压沟渗流,需先求出相应于正、反对称流减压沟的附加渗径长度  $d_p$  和  $d_n$ .先用数值积分法求出其理论解,然后从此理论解整理出关于小断面沟  $d_p$  和  $d_n$  的经验计算式.该经验公式适用于沟深和半沟顶宽分别小于 0.3 倍砂层厚度的常见沟型(这类沟型通常已能满足排水减压工程的要求).算例表明,用本文公式计算的  $d_p$  的相对误差平均为  $\pm 2\%$ ,最大为  $\pm 7\%$ ;  $d_n$  的相对误差为  $\pm 2\%$ ,最大为  $\pm 9\%$ .

**关键词:**堤防;渗流计算;双地层;减压沟

**中图分类号:**TV139.14

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-7647(2002)04-0004-03

江河两岸常为双地层,即上面为弱透水性的粘性土覆盖层,下面为强透水性的砂层.汛期江河水位上滩,堤背水侧下卧砂层的承压水位随之升高,常使地表发生管涌和流土,影响堤防安全.如下卧砂层均质,无连续的淤质隔水层,且垂直向和水平向的渗透性差别不大,则通常可用小断面排水减压沟处理.

本文涉及的小断面沟型,包括浅沟、窄沟、浅窄组合沟、矩形沟、三角形沟、梯形沟和半圆形沟.设砂层的厚度为  $T$ ,那么小断面的定义为:沟半顶宽  $b \leq 0.3T$ ,沟深  $s \leq 0.3T$ .对于前述的工程地质条件,这样尺寸的沟型,已完全满足排水减压的要求.

对于减压沟附加渗径长度的计算,浅沟、窄沟和半圆形沟已有比较简易的计算式;矩形沟的解需用椭圆积分,计算比较繁复,如利用计算图表,则又感精度不足;三角形沟和梯形沟的解涉及超越几何函数,计算更为不便.据此,本文提出半理论-半经验的计算式.该计算式要求:①适用于上述的常见沟型;②须有足够的精度;③计算比较简便.

## 1 计算方法

减压沟渗流的正对称流态和反对称流态叠加(图 1),并使其符合边界条件,即得出实际流态.图 1 中,砂层底板不透水,粘性土覆盖层也暂设不透水,那么砂层无越层补给,除沟附近的渗流急变区外,均属均匀流,砂层水头呈直线变化.

图 1 中,  $J_p$ ,  $J_n$  分别为正、反对称流的水力坡降.绘出正、反对称流水头分布直线段的延长线和沟

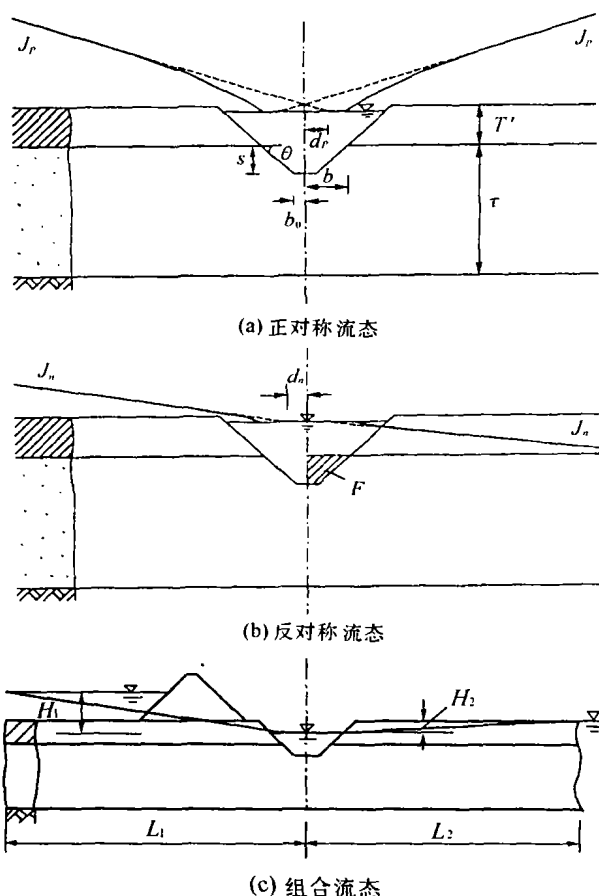


图 1 减压沟的正、反对称流态及组合流态示意图  
水位的交点,交点至沟中心的距离相应为正、反对称流的附加渗径长度  $d_p$  和  $d_n$ ,交点位于沟中心后的附加渗径长度为正值,位于沟中心前的为负值.  $d_p$  可

正可负,但对于小断面沟型,通常为正值; $d_n$ 必为负值。 $d_p$ 和 $d_n$ 与沟型和沟的尺寸,以及砂层的厚度有关,需经专门计算分析得出。

分下列两种情况论述减压沟渗流的计算方法。

### 1.1 覆盖层不透水或渗透系数甚小的情况

根据边界条件可得式(1)<sup>[1]</sup>,据以求出 $J_p$ 和 $J_n$ :

$$\begin{cases} J_p(L_1 + d_p) + J_n(L_1 + d_n) = H_1 \\ J_p(L_2 + d_p) - J_n(L_2 + d_n) = H_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J_p, J_n$ 分别为正、反对称流的水力坡降; $d_p, d_n$ 分别为正、反对称流的附加渗径长度; $L_1, L_2$ 分别为沟中心至上、下游边界的距离; $H_1, H_2$ 分别为上、下游边界的水头(选沟水位为水位零点)。再据式(1)求出的 $J_p$ 和 $J_n$ ,按式(2)计算流量:

$$\begin{cases} q_1 = (J_p + J_n)kT \\ q_2 = (J_p - J_n)kT \\ q = q_1 + q_2 = 2J_p kT \end{cases} \quad (2)$$

式中: $q_1$ 为上游入沟的单宽流量; $q_2$ 为下游入沟的单宽流量; $q$ 为总入沟的单宽流量; $k$ 为砂层的渗透系数, $T$ 为砂层厚度。再按式(3)计算砂层的水头分布:

$$\begin{cases} h_1 = J_p(x + d_p) + J_n(x + d_n) \\ h_2 = J_p(x + d_p) - J_n(x + d_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h_1, h_2$ 分别为沟上、下游砂层的水头分布; $x$ 为离沟中心的距离。式(3)为砂层顶板与底板间平均的水头分布。对于砂层顶板的水头分布,式(3)的计算结果仅适用于离沟边距离大于 $T$ 的区域;以内区域需加以修正。修正方法为:离沟边距离 $T$ 处的水头和沟侧边零水头之间,可绘一斜率渐变的连接曲线,即为砂层顶板的水头分布。

如下游无限延伸, $L_2 \rightarrow \infty$ ,或沟下游离沟边距离大于 $T$ 的区域砂层尖灭封闭,那么 $J_p = J_n, q_1 = q, q_2 = 0$ ,这时正、反对称流的水力坡降和沟下游砂层的剩余水头 $h_e$ 分别为

$$\begin{cases} J_p = J_n = \frac{H_1}{2L_1 + d_p + d_n} \\ h_e = H_2 = \frac{d_p - d_n}{2L_1 + d_p + d_n} H_1 \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 覆盖层透水的情况

实际上覆盖层均有一定的透水性。如减压沟紧靠堤后,离沟中心 $\frac{2}{A}$ ( $A$ 为越流系数)距离内砂层不尖灭封闭,雨季覆盖层水位接近地表,沟水位和下游水位低于地表不多,那么可用式(5)将 $x$ 换算为 $x'$ ,仍按式(1)~(3)计算。流量沿程渐变,计算出的 $q_1, q_2$ 为紧靠沟侧的流量。按 $x'$ 计算出水头分布后,将 $x'$ 换为相应的 $x$ ,即为实际的砂层水头分布。

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{A} [\text{th}AL(1 - \text{ch}Ax) + \text{sh}Ax] \\ x = L - \frac{1}{A} \text{arsh}(\text{sh}AL - Ax' \text{ch}AL) \\ x' = \frac{1}{A} (1 - e^{-Ax}), \quad L \rightarrow \infty \\ x = \frac{1}{A} \ln \frac{1}{1 - Ax'}, \quad L \rightarrow \infty \\ A = \left( \frac{k'}{kTT'} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x$ 为离沟中心的距离; $x'$ 为换算后相应的等效距离; $L$ 为沟中心至上游或下游边界的距离; $A$ 为越流系数; $k, k'$ 和 $T, T'$ 分别为砂层和覆盖层的渗透系数和层厚。

如沟离堤线较远,或离沟不远处砂层尖灭封闭,或沟水位和下游水位低于地面较多,那么精确的计算可参考文献[1,2]。

## 2 减压沟附加渗径长度的经验计算式

经和理论解比较,提出 $d_p$ 和 $d_n$ 的经验计算式如下:

$$\begin{cases} d_p = \frac{T}{\pi} \ln \frac{1}{2.5[\bar{b}^2 + \bar{s}^2 + 3.5 \frac{1 + \bar{b}^2 - \bar{s}^2}{(\bar{b}\bar{s})^{1.4}} \bar{F}^{2.4}]} \\ d_n = -T \frac{\pi}{4} [\bar{b}(1 - 0.2\bar{b}^2)]^2 - \frac{1.4\bar{F}\sin\theta}{\bar{b}\bar{s}} \\ \bar{b} = \frac{b}{T}, \quad \bar{s} = \frac{s}{T}, \quad \bar{F} = \frac{F}{T^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $b$ 为沟顶宽的 $1/2$ ; $s$ 为沟深; $T$ 为砂层厚度; $F$ 为砂层顶板以下沟断面面积的 $1/2$ ; $\theta$ 为边坡倾角(图1)。如边坡为曲线,那么可按 $b, s, F$ 不变的等效梯形沟计算倾角 $\theta$ 。对于浅沟、窄沟和浅窄组合沟, $F=0$ ,那么式(6)中含 $\bar{F}$ 的项也为零(因 $F$ 的方次高于分母 $b, s$ 等的方次)。

式(6)中的 $d_p$ 以浅窄组合沟的理论解为基础,并经沟宽、沟深和沟断面面积等因数的校正得出;式(6)中的 $d_n$ 以矩形沟的理论解为基础,并经沟宽、沟深、沟断面面积和沟边坡倾角等因数的校正得出。式(6)的适用范围为: $\frac{b}{T} \leq 0.3, \frac{s}{T} \leq 0.3$ 。

式(6)结果与理论解的比较见表1。三角形沟和梯形沟的理论解,采用数值积分法求出,精度略低。从比较结果可知, $d_p$ 的相对误差平均为 $\pm 2\%$ ,最大为 $\pm 7\%$ ,绝对值差最大为 $0.03T$ ; $d_n$ 的相对误差为 $\pm 2\%$ ,最大为 $\pm 9\%$ ,绝对值差最大为 $0.01T$ 。

表1 减压沟  $d_p, d_n$  经验式和理论解的对比

| 沟型    | $\bar{b}$ | $\bar{b}_0$ | $\bar{s}$ | $\bar{F}$ | $\theta/(^\circ)$ | $d_p/T$ |         | $d_n/T$  |          |
|-------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------------|---------|---------|----------|----------|
|       |           |             |           |           |                   | 理论解     | 经验式     | 理论解      | 经验式      |
| 浅沟    | 0.025     | 0           | 0         | 0         | —                 | 2.0608  | 2.0567  | -0.00049 | -0.00049 |
|       | 0.05      | 0           | 0         | 0         | —                 | 1.6190  | 1.6155  | -0.00196 | -0.00196 |
|       | 0.10      | 0           | 0         | 0         | —                 | 1.1758  | 1.1742  | -0.00782 | -0.00782 |
|       | 0.15      | 0           | 0         | 0         | —                 | 0.9144  | 0.9161  | -0.01751 | -0.01751 |
|       | 0.20      | 0           | 0         | 0         | —                 | 0.7267  | 0.7329  | -0.03091 | -0.03092 |
|       | 0.30      | 0           | 0         | 0         | —                 | 0.4556  | 0.4748  | -0.06821 | -0.06816 |
| 窄沟    | 0         | 0           | 0.025     | 0         | —                 | 2.0611  | 2.0567  | 0        | 0        |
|       | 0         | 0           | 0.05      | 0         | —                 | 1.6203  | 1.6155  | 0        | 0        |
|       | 0         | 0           | 0.10      | 0         | —                 | 1.1810  | 1.1742  | 0        | 0        |
|       | 0         | 0           | 0.15      | 0         | —                 | 0.9262  | 0.9161  | 0        | 0        |
|       | 0         | 0           | 0.20      | 0         | —                 | 0.7476  | 0.7329  | 0        | 0        |
|       | 0         | 0           | 0.30      | 0         | —                 | 0.5027  | 0.4748  | 0        | 0        |
| 浅窄组合沟 | 0.10      | 0           | 0.10      | 0         | —                 | 0.9577  | 0.9536  | -0.0078  | -0.0078  |
|       | 0.10      | 0           | 0.20      | 0         | —                 | 0.6739  | 0.6619  | -0.0078  | -0.0078  |
|       | 0.10      | 0           | 0.30      | 0         | —                 | 0.4665  | 0.4413  | -0.0078  | -0.0078  |
|       | 0.20      | 0           | 0.10      | 0         | —                 | 0.6582  | 0.6619  | -0.0309  | -0.0309  |
|       | 0.20      | 0           | 0.20      | 0         | —                 | 0.5163  | 0.5123  | -0.0309  | -0.0309  |
|       | 0.20      | 0           | 0.30      | 0         | —                 | 0.3748  | 0.3578  | -0.0309  | -0.0309  |
|       | 0.30      | 0           | 0.10      | 0         | —                 | 0.4246  | 0.4413  | -0.0682  | -0.0682  |
|       | 0.30      | 0           | 0.20      | 0         | —                 | 0.3486  | 0.3578  | -0.0682  | -0.0682  |
|       | 0.30      | 0           | 0.30      | 0         | —                 | 0.2577  | 0.2542  | -0.0682  | -0.0682  |
| 矩形沟   | 0.0263    | 0.0263      | 0.10      | 0.00263   | 90                | 0.9510  | 0.9566  | -0.0029  | -0.0027  |
|       | 0.0768    | 0.0768      | 0.10      | 0.00768   | 90                | 0.7180  | 0.7126  | -0.0148  | -0.0144  |
|       | 0.1560    | 0.1560      | 0.10      | 0.01560   | 90                | 0.4710  | 0.4758  | -0.0410  | -0.0432  |
|       | 0.2280    | 0.2280      | 0.10      | 0.02280   | 90                | 0.3100  | 0.3227  | -0.0730  | -0.0773  |
|       | 0.0618    | 0.0618      | 0.20      | 0.01236   | 90                | 0.4930  | 0.4912  | -0.0188  | -0.0171  |
|       | 0.1250    | 0.1250      | 0.20      | 0.02500   | 90                | 0.3390  | 0.3319  | -0.0440  | -0.0449  |
|       | 0.2520    | 0.2520      | 0.20      | 0.05040   | 90                | 0.1050  | 0.1090  | -0.1160  | -0.1162  |
|       | 0.0405    | 0.0405      | 0.30      | 0.01215   | 90                | 0.3687  | 0.3568  | -0.0145  | -0.0151  |
|       | 0.1495    | 0.1495      | 0.30      | 0.04485   | 90                | 0.1485  | 0.1387  | -0.0725  | -0.0750  |
|       | 0.2920    | 0.2920      | 0.30      | 0.08760   | 90                | -0.0574 | -0.0583 | -0.1709  | -0.1685  |
| 三角形沟  | 0.1620    | 0           | 0.2807    | 0.02274   | 60                | 0.3466  | 0.3490  | -0.0367  | -0.0367  |
|       | 0.2277    | 0           | 0.2277    | 0.02592   | 45                | 0.3270  | 0.3386  | -0.0562  | -0.0567  |
|       | 0.2862    | 0           | 0.1652    | 0.02364   | 30                | 0.3093  | 0.3290  | -0.0740  | -0.0745  |
| 梯形沟   | 0.2113    | 0.1140      | 0.0972    | 0.01581   | 45                | 0.4661  | 0.4616  | -0.0462  | -0.0499  |
|       | 0.2786    | 0.1974      | 0.0264    | 0.00628   | 18                | 0.4486  | 0.4499  | -0.0637  | -0.0639  |
|       | 0.3157    | 0.1813      | 0.0776    | 0.01928   | 30                | 0.2949  | 0.2947  | -0.0883  | -0.0900  |
| 半圆形沟  | 0.025     | 0           | 0.025     | 0.00049   | 66.8              | 1.6917  | 1.6187  | -0.0001  | -0.0001  |
|       | 0.05      | 0           | 0.05      | 0.00196   | 66.8              | 1.1784  | 1.1774  | -0.0039  | -0.0039  |
|       | 0.10      | 0           | 0.10      | 0.00785   | 66.8              | 0.7371  | 0.7361  | -0.0156  | -0.0163  |
|       | 0.15      | 0           | 0.15      | 0.01767   | 66.8              | 0.4790  | 0.4780  | -0.0347  | -0.0369  |
|       | 0.20      | 0           | 0.20      | 0.03142   | 66.8              | 0.2958  | 0.2949  | -0.0608  | -0.0642  |
|       | 0.30      | 0           | 0.30      | 0.07069   | 66.8              | 0.0377  | 0.0367  | -0.1312  | -0.1341  |

注:  $\bar{b}_0 = \frac{b_0}{T}$ , 其中  $b_0$  为梯形沟底宽的  $\frac{1}{2}$ .

### 3 算例

a. 算例 1: 覆盖层不透水. 地质剖面、浅沟尺寸以及水文地质参数分别为  $T = 10\text{m}$ ,  $k = 20\text{m/d}$ ,  $T' = 2\text{m}$ ,  $k' \rightarrow 0$ ,  $L_1 = 100\text{m}$ ,  $H_1 = 5\text{m}$ ,  $L_2 = 200\text{m}$ ,  $H_2 = 0.5\text{m}$ ,  $b = 2\text{m}$ ,  $s = 0$ . 代入上述各式可计算出:  $d_p = 7.33\text{m}$ ,  $d_n = -0.31\text{m}$ ;  $J_p = 0.02490$ ,  $J_n = 0.02335$ ;  $q_1 = 9.65\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ,  $q_2 = 0.31\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ,  $q =$

$9.96\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ . 砂层顶板的水头分布见表 2.

b. 算例 2: 砂层于沟下游离沟中心  $200\text{m}$  处尖灭封闭, 其他情况同算例 1. 计算结果为  $J_p = J_n = 0.02415$ ;  $q = q_1 = 9.66\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ;  $h_e = 0.18\text{m}$ . 砂层顶板的水头分布见表 2.

c. 算例 3: 覆盖层透水. 地质剖面、梯形沟尺寸以及水文地质参数分别为  $T = 10\text{m}$ ,  $k = 20\text{m/d}$ ,  $T' = 2.5\text{m}$ ,  $k' = 1.25 \times 10^{-2}\text{m/d}$ ,  $L_1 = 100\text{m}$ , (下转第 11 页)

资源问题是额济纳绿洲生态问题的关键.上游超量引水、下游超采地下水是绿洲生态恶化的主要因素.因此,解决额济纳绿洲生态问题的根本出路在于开源、节流,合理利用水资源.应尽快实施国务院黑河分水方案,明确水权,并修建正义峡调蓄水库及内蒙古输水干渠.以流域为单元,按照统筹兼顾、综合治理、合理利用、讲求实效、发挥水的多功能特性的原则,进行水资源合理配置,以满足人民生活、经济社会发展和维护生态环境的要求,以期达到最佳的社会、经济和生态效益.

b. 加强节水,发展节水灌溉农业,提高水资源利用率.在黑河流域,农业灌溉是最大的用水部门,应完善工程配套设施、采取渠道防渗措施,合理灌溉,减少水资源浪费,因地制宜地发展先进灌溉技术,以降低毛灌溉定额和提高渠系利用系数.严格用水管理,建立合理的水价和收费体系,用经济手段来提高水资源的利用效益.调整产业结构和农作物种植结构,以水定地,合理调配水资源,并将节约用水作为一项重大措施来抓.

c. 搞好生态环境建设及水源保护.保护和改善额济纳绿洲生态环境建设是黑河流域生态环境建设的关键和重点.额济纳绿洲的生态环境建设不仅关系到流域的可持续发展,关系到民族团结、社会安定、国防建设、经济发展,而且影响西部大开发战略的顺利实施,必须从战略高度认识黑河流域生态环境问题,把生态环境建设及水资源保护作为流域综合治理的根本.额济纳绿洲生态环境十分脆弱,应开展以水利建设为中心,以林草植被建设为重点的生

态环境保护建设,发展半人工绿洲,并严禁超载放牧和垦荒,禁止乱采滥挖.重点保护东河胡杨红柳生态保护区、西河沙枣胡杨林生态保护区和古日乃湖滩周边梭梭林生态保护区.

d. 搞好流域规划,加强水资源管理和基础研究工作.依照区域水资源特点和区域经济发展与生态环境建设需水要求,搞好流域水资源规划,实施流域取水许可制度,加强流域水资源统一管理,并建立多元化的投入保障机制和完善流域法规体系,严格执法,依法管理水资源.加强地表水与地下水联合运用,合理开发利用地下水资源,防治水质盐化和污染.加强和完善哨马营、狼心山水文站的建设和管理,建立水资源监测信息系统,以便依据翔实的数据,为甘蒙分水和下游用水提供科学依据.

总之,必须认识到水资源是额济纳绿洲经济、社会可持续发展和生态环境建设的生命线,额济纳绿洲的经济社会发展要充分考虑水资源承载能力.黑河流域生态环境保护和建设的关键是加强流域水资源统一管理,同时应加强水利建设和人工绿洲建设,调整工程布局,并高度重视科学技术的支撑作用.为从根本上解决省、自治区之间的水事矛盾,有必要调整黑河流域的行政区划.

#### 参考文献:

- [1] 内蒙古自治区统计局.辉煌的五十年[M].北京:中国统计出版社,1997.23~41.
- [2] 内蒙古自治区统计局.辉煌的内蒙古[M].北京:中国统计出版社,1999.121~157.

(收稿日期:2001-06-22 编辑:马敏峰)

(上接第6页)

表2 算例砂层顶板的水头分布

m

| 算 例 1 |       |       |       | 算 例 2 |       |       |       | 算 例 3 |        |       |          |        |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|--------|-------|
| $x_1$ | $h_1$ | $x_2$ | $h_2$ | $x_1$ | $h_1$ | $x_2$ | $h_2$ | $x_1$ | $x_1'$ | $h_1$ | $x_2$    | $x_2'$ | $h_2$ |
| 100   | 5.00  | 0     | 0     | 100   | 5.00  | 0     | 0     | 100   | 92.42  | 5.00  | 0        | 0      | 0     |
| 80    | 4.04  | 2     | 0     | 80    | 4.03  | 2     | 0     | 80    | 74.66  | 4.07  | 2.01     | 2      | 0     |
| 60    | 3.07  | 12    | 0.21  | 60    | 3.07  | 12    | 0.18  | 60    | 56.71  | 3.13  | 12.38    | 12     | 0.20  |
| 40    | 2.11  | 20    | 0.22  | 40    | 2.10  | 20    | 0.18  | 40    | 38.41  | 2.17  | 50       | 48.98  | 0.26  |
| 20    | 1.14  | 50    | 0.27  | 20    | 1.14  | 50    | 0.18  | 20    | 19.57  | 1.19  | 100      | 92.42  | 0.33  |
| 12    | 0.75  | 100   | 0.35  | 12    | 0.75  | 100   | 0.18  | 12.16 | 12.00  | 0.79  | 200      | 152.32 | 0.42  |
| 2     | 0     | 150   | 0.42  | 2     | 0     | 150   | 0.18  | 2     | 2      | 0     | 400      | 192.81 | 0.49  |
| 0     | 0     | 200   | 0.50  | 0     | 0     | 200   | 0.18  | 0     | 0      | 0     | $\infty$ | 200    | 0.50  |

注: $x_1, x_2$ 分别为上、下游离沟中心的距离; $x_1', x_2'$ 为按式(5)换算的等效距离; $h_1, h_2$ 分别为沟上、下游砂层的水头分布.

$H_1 = 5\text{ m}, L_2 \rightarrow \infty, H_2 = 0.5\text{ m}, b = 2\text{ m}, b_0 = 0.5\text{ m}, s = 0.5\text{ m}, \theta = 18.5^\circ$ . 代入上述各式可计算出:  $d_p = 6.36\text{ m}, d_n = -0.34\text{ m}; A = 0.005\text{ m}^{-1}; L_1' = 92.42\text{ m}, L_2' = 200\text{ m}; J_p = 0.02697, J_n = 0.02537; q_1 = 10.47\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}), q_2 = 0.32\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}), q = 10.79\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ . 砂层顶板的水头分布见表2.

#### 参考文献:

- [1] 安徽省水利科学研究所.多层地基和减压沟井的渗流计算理论[M].北京:水利出版社,1980.131~266.
- [2] GB50286-98,堤防工程设计规范[S].

(收稿日期:2002-04-26 编辑:张志琴)