

文章编号: 1006-4710(2015)02-0220-05

混凝土面板堆石坝局部止水缝失效渗透稳定分析

高俊¹, 党发宁¹, 王振华^{1,2}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 中国电力工程顾问集团 西北电力设计院, 陕西 西安 710075)

摘要: 混凝土面板堆石坝的防渗面板很容易失效, 面板一旦失效对大坝的渗透速度、渗透流量以及渗透坡降产生重大影响, 由于坝体工程地质条件往往比较复杂, 需要研究恰当的计算方法。利用计算渗流的专业有限元软件 SEEP-3D, 结合工程实例, 采用传统的数值计算方法, 计算单一垂直缝不同位置失效的水头分布、渗透流量大小以及浸润线位置, 并与解析解进行对比, 结果发现渗透流量不符合渗透规律。鉴于此, 在传统的数值计算方法基础上, 提出一种新的数值计算方法, 即在下游分别施加该失效缝位置处的水头边界, 其计算结果与工程实际和解析解吻合很好。研究成果可以为混凝土面板堆石坝的防渗设计提供参考。

关键词: 面板堆石坝; 垂直缝失效; 渗流稳定分析; 数值计算方法

中图分类号: TV223.4 **文献标志码:** A

Seepage stability analysis of concrete faced rock-fill dam under the cases of local seal seam failure

GAO Jun¹, DANG Fanning¹, WANG Zhenhua^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: The impervious face of concrete faced rock-fill dam is easy to get failed. Once the impervious face fails, it can produce an important effect upon the infiltration rate, flow and slope gradient, accordingly, it is necessary to study an appropriate calculation method, for the dam body engineering geological conditions are rather complicated. The professional finite element software SEEP-3D for computing seepage flow-in combination with engineering real examples is used with the traditional numerical calculation method to calculate the water head distribution seepage flow dimensions and phreatic line position of the single vertical seam failure in different positions and to make the contrast with the analytical solution so that the results have found that the seepage flow is not in coincidence with the seepage laws. For this reason, based on the traditional numerical calculation method, this paper suggests a kind of numerical calculation method (i. e water head boundary should be applied to the failed seam positions downstream respectively) whose calculation results are found to be in very good coincidence with the real engineering examples and analytical solution. Accordingly, the research results can provide the references for the seepage-proof design of concrete faced rock-fill dam.

Key words: rock-fill dam; vertical seam failure; seepage stability analysis; numerical calculation method

混凝土面板堆石坝因其断面小, 安全性好, 施工方便, 可简化导流, 工期短, 造价低, 已建成工程的良好运行性状而使它得到坝工界的日益重视, 其设计和施工技术也日趋成熟, 但由于构造要求混凝土面

板中必然存在垂直缝和周边缝。如果这些分缝的止水效果不满足要求, 轻则引起面板坝的渗漏量过大, 重则导致垫层料、过渡料的渗透破坏, 危及坝体安全。李炎隆等^[1,2]研究建立了面板接缝及面板裂缝

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154); 水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201201053-03)。

作者简介: 高俊, 男, 硕士生, 研究方向为岩土及水利工程数值仿真分析。E-mail: 409938403@qq.com。

通讯作者: 党发宁, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为水工结构数值分析、计算力学与岩土工程数值仿真。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn。

的渗流计算模型,并用实例进行了验证,结果表明将等宽缝隙稳定流运动规律应用到面板接缝止水失效且面板产生裂缝情况下面堆石坝的渗流分析中,获得了在面板产生大量裂缝情况下(非常工况)面板堆石坝的渗透变化规律,结果较为准确。王瑞骏等^[3]基于等宽缝隙稳定流的运动规律,首先建立了单一面板裂缝的渗流模型,在此基础上建立了裂缝密集型面板渗流的等效准连续介质模型,结果表明该模型是一种较为准确实用的面板渗流计算模型。潘少华等^[4]以金川面板堆石坝为例,用有限元方法计算了当面板缝及止水局部失效时各种工况下的渗流场,系统分析了大坝在面板垂直缝及止水局部失效后的稳定渗流场。张晓强等^[5]以班多面板堆石坝为例,采用有限元方法计算模拟了失效缝位置、长度、宽度等因素对浸润线和等势线的影响。陈军强等^[6]以白龙江某水电站混凝土面板堆石坝工程为例,根据“分区模拟,等效组合”思想,建立有限元模型,研究了各渗流要素随失效缝位置、缝长、缝宽和垫层料渗透系数的变化情况。

经过大量数值计算发现传统的数值方法,即上游施加上游水头边界,下游施加下游水头边界,其余位置均加不透水边界,其计算结果存在一些矛盾,面板失效缝在不同位置处的渗透流量相差不大,甚至失效缝越靠近坝基,其渗透流量越小,这与对实际工程的认识和解析法计算结果不符。鉴于此,本文提出一种新的数值计算方法,即在面板上游仍然施加上游水头边界,但在下游分别施加该失效缝位置处的水头边界,其余位置均加不透水边界,其计算结果与工程实际和解析方法的计算结果吻合比较好,因此新的数值计算方法是合理可取的。

1 面板坝局部垂直缝失效的渗流分析

关于面板失效产生的渗流量的计算方法,目前

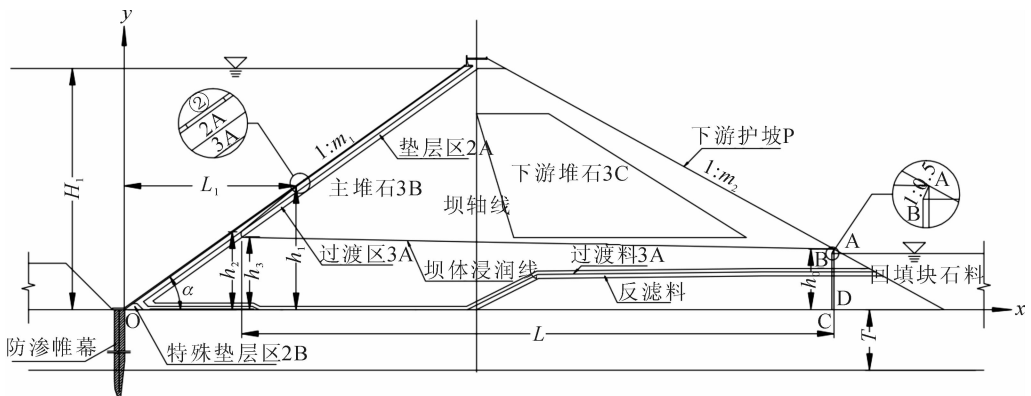


图1 渗流计算简图

Fig. 1 Seepage calculation diagram

国内外的研究相对较少,亦不够成熟。

对于混凝土面板堆石坝,通常面板厚度 t 与失效缝的宽度 b 之比 $(t/b) > 3 \sim 4$, 所以失效缝上的水头损失不可忽略,失效缝的几何尺寸,位置以及相对粗糙度对渗透流量起控制作用。

对失效缝的渗透流量的求解通常有两种方法^[7-8], 第一种方法称为表面渗透性法;第二种方法称为裂隙渗流法。

根据王瑞骏等^[9]的研究,提出了用等效渗透系数的方法来研究面板失效缝的渗透系数 K_0 (m/s), 具体表达式如下:

$$K_0 = \frac{n^3 b^2 \gamma}{12 \nu} \quad (1)$$

式中, n 为面板失效缝充填介质的空隙率, γ 为水的容重 (N/m^3), ν 为水的运动粘滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), b 为裂隙宽度 (m)。

当通过面板失效缝水流为层流时,根据达西定律得到通过失效缝的渗透流量为:

$$q = K_0 i A = \sum K_0 l_p b_p i \quad (2)$$

其中, A 为垂直于渗流方向面板失效缝的过流面积。 i 可按式^[7]取值:

$$i = \begin{cases} \frac{H_1 - h_1}{t_{px}} & (x \leq L_1) \\ \frac{H_1 - x \tan \alpha}{t_{px}} & (x > L_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, H_1 , h_1 分别为面板失效缝上、下游水头高度, α 为面板坡角, t_{px} 为坐标 $(x, x \tan \alpha)$ 处的面板厚度, L_1 为失效缝处到坐标原点的水平距离。

将式(3)代入式(2)中,有:

$$q = K_0 i A = \sum K_0 l_p b_p \frac{H_1 - h_1}{t_{px}} \quad (4)$$

现取坝轴线方向单位长度为研究对象,对坝体各区域建立渗流方程,计算简图如图1所示。

通过垫层的渗透流量的计算公式^[10]如下:

$$q = \frac{k_1 \sqrt{1+m_1^2}(h_1^2 - h_2^2 - b_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha)}{2b_1 \sin \alpha} \quad (5)$$

式中, k_1 为垫层的渗透系数, m_1 为上游坡比, h_1 为面板下游面水头高度, h_2 为垫层下游水头高度, b_1 为渗流方向上垫层的厚度。

通过过渡料层的渗透流量的计算公式^[10]如下:

$$q = \frac{k_2 \sqrt{1+m_1^2}(h_2^2 - h_3^2 - b_2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha)}{2b_2 \sin \alpha} \quad (6)$$

式中, k_2 为过渡料的渗透系数, h_3 为过渡料下游的水头高度, b_2 为渗流方向上过渡料的厚度。

因为水在坝体内的流动属于层流, 因此符合达西定律, 利用成层土体的等效渗透系数将坝体转化成各向同性均质的土体并且假设坝体中的浸润面为自由表面, 符合裘布依假设, 故通过坝体的渗流量, 根据渗流计算分析与控制^[11], 计算公式如下:

$$q = \frac{k(h_3 - H_2)^2}{L - m_2 H_2 + \sqrt{(L - m_2 H_2)^2 - m_2^2 (h_3 - H_2)^2}} + \frac{k(h_3 - H_2)H_2}{L - 0.5m_2 H_2} + \frac{k_0(h_3 - H_2)T}{L + m_1 h_3 + 0.88T} \quad (7)$$

联立求解公式(4)~(7)可分别求得 q , h_1 , h_2 和 h_3 。

当下游坡脚处没有贴坡排水设备时, 出逸点的高度 h_0 可由下式^[11]计算。

当 $k > k_0$ 时, 假定通过浸润线出逸点的等水头线如图 1 中的 ABC 线, 则有:

$$q = \frac{k(h_0 - H_2)}{m_2 + 0.5} + \frac{k(h_0 - H_2)H_2}{(h_0 - H_2)(m_2 + 0.5) + \frac{m_2 H_2}{2m_2 + 1}} + \frac{k_0 T (h_0 - H_2)}{m_2 h_0 + 0.5(h_0 - H_2) + 0.44T} \quad (8)$$

由上式可得求解 h_0 的方程式为:

$$h_0 = q / \left\{ \frac{k}{m_2 + 0.5} \left[1 + \frac{(m_2 + 0.5)H_2}{(m_2 + 0.5)(h_0 - H_2) + \frac{m_2 H_2}{2(m_2 + 0.5)}} \right] + \frac{k_0 T}{(m_2 + 0.5)(h_0 - H_2) + m_2 H_2 + 0.44T} \right\} + H_2 \quad (9)$$

当 $k \leq k_0$ 时, 假定通过浸润线出逸点的等水头线如图 1 中的 AD 线, 该假定从流网分析较符合地基较强透水情况, 则有:

$$q = \frac{k(h_0 - H_2)}{m_2} + \frac{k_0(h_0 - H_2)H_2}{m_2(h_0 - H_2) + \frac{m_2 H_2}{2m_2 + 1}} +$$

$$\frac{k_0 T (h_0 - H_2)}{m_2 h_0 + 0.44T} \quad (10)$$

由上式可解得 h_0 的方程式为:

$$h_0 = q / \left\{ \frac{k}{m_2} \left[1 + \frac{(m_2 + 0.5)H_2}{(m_2 + 0.5)(h_0 - H_2)} \right] + \frac{k_0 T}{m_2 h_0 + 0.44T} \right\} + H_2 \quad (11)$$

求得逸出点渗流水深后, 浸润线的计算公式^[11]如下:

$$x = k_0 T \frac{y - h_0}{q'} + k \frac{y^2 - h_0^2}{2q'} \quad (12)$$

式中

$$q' = k \frac{h_3^2 - h_0^2}{2(L + \frac{m_1}{2m_1 + 1}h_3 - m_2 h_0)} + k_0 T \frac{h_3 - h_0}{L + m_1 h_3 - m_2 h_0} \quad (13)$$

式中, H_2 为下游水头高度, m_2 为下游坡比, T 为坝基覆盖层厚度, L 为坝体内浸润线的长度, k 为堆石区的渗透系数, k_0 为河床覆盖层渗透系数。

2 实例运用

某面板坝位于青海省玉树县境内的澜沧江干流(扎曲)的一级支流子曲河上, 距玉树州州府结古镇 97 公里, 距省会西宁 940 公里。

该工程的主要任务是发电。枢纽建筑物主要由混凝土面板堆石坝、右岸泄洪洞、左岸溢洪洞、引水发电洞及坝后厂房等组成。电站上游正常蓄水位 3 992 m, 下游水位 3 902.5 m, 总装机容量 49.5 MW, 水库总库容 3.91 亿 m^3 。工程规模属二等大(2)型, 主要建筑物为 2 级, 次要建筑物为 3 级, 但由于面板坝坝高 122 m 大于 90m, 将面板坝级别由 2 级提高到 1 级, 上、下游坡比 m_1 、 m_2 分别为 1.4、1.35, 面板、垫层、过渡料的厚度分别为 0.5 m、4 m、4 m; 河床覆盖层厚度 $T = 29.5$ m。

2.1 计算工况

防渗帷幕取优化深度。模型横河向取坝体标准断面 4 块面板宽度(共 28 m), 上游边界由趾板向上游延伸 400 m(约 1 倍坝底宽度), 下游边界由下游坝脚向下游延伸 400 m, 基岩底边界自灌浆帷幕底向下延伸 150 m。模型中坝体材料分区、覆盖层等均按设计情况建立。在坝高(从坝基算起)95 m(①号缝)、60 m(②号缝)、20 m(③号缝)处面板有 5 m 长, 分别对应 1 mm, 10 mm, 30 mm 宽的垂直缝局部失效, 计算大坝面板失效缝处的渗漏量以及渗透坡降, 面板下游面、垫层下游面及过渡料下游面的水头, 研究失效缝面板、垫层及过渡层的渗透稳定性, 论证大坝局部止水失效的危害性。

2.2 数值模型与网格划分

利用三维渗流有限元计算软件 SEEP-3D 进行数值建模,计算中采用六面体等参数单元网格,为保证计算的精度,网格的长宽比控制在 2:1 之内。对面板及失效缝区等细部结构处的网格进行加密。对地层及结构的尖角处进行适当钝化。对其它区域的

网格尺寸进行了适当的放大。共划分出 285632 个单元,302214 个节点,该计算模型以及模型单元的划分情况见图 2 所示。

2.3 计算参数的选取

根据工程区地质勘察报告所提供的参数资料,采用如下 11 种材料。

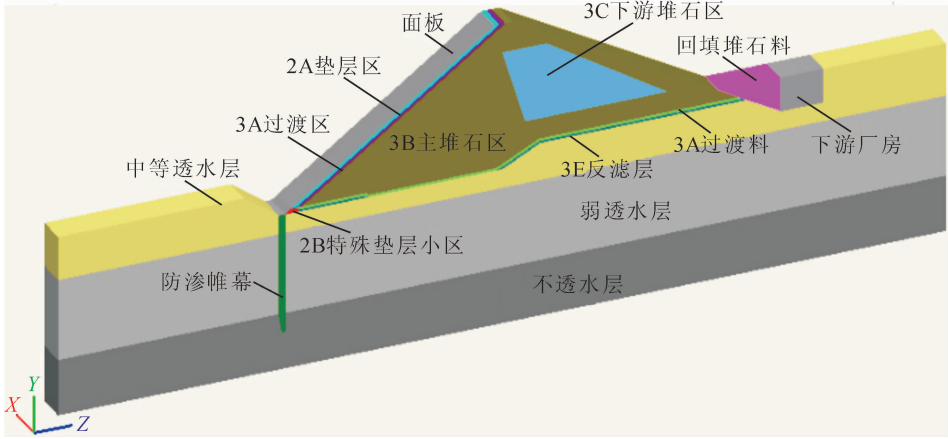


图 2 局部计算模型与坐标系

Fig. 2 Local computation model and coordinate system

表 1 各材料渗透系数

Tab. 1 Material permeability coefficient

材料	面板	2A 垫层区	2B 特殊垫层区	3A 过渡区	3B,3C 堆石区	中等透水层	3E 反滤层	弱透水层	防渗帷幕	回填堆石料	下游厂房	不透水层
渗透系数/(cm/s)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}

3 计算结果及其分析

分别采用不同计算方法,求①、②、③号失效缝透过面板、垫层、过渡料以及坝身的渗透流量 q 、面板下游面的水头高度 h_1 、垫层下游面的水头高度 h_2 、过渡料下游面水头高度 h_3 ,具体结果如下。

3.1 等效渗透系数法的解析解

采用等效渗透系数法联立求解公式(4)~(7),并根据质量守恒定律,计算结果见表 2。

表 2 等效渗透系数法下 10 mm 缝宽在不同位置处失效的渗透结果

Tab. 2 The penetration results of 10 mm seam width in failure at different locations under the equivalent permeability coefficient method

失效缝位置	$q/(10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$	h_1/m	h_2/m	h_3/m
①号缝	1.93	3 972.73	3 970.02	3 970.00
②号缝	4.71	3 944.91	3 935.11	3 935.00
③号缝	6.63	3 925.66	3 902.83	3 902.50

由表 2 可知,①、②、③号失效缝的渗透流量分

别为 $1.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.71 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,失效缝位置越靠近坝基渗流量越大,因为越靠近坝基上游水头与失效缝位置处下游水头差越大,这与渗流理论和工程实际是相符的。

3.2 传统数值方法的计算结果

按传统的数值方法,上游施加上游水头边界(3 992.00 m),下游施加下游水头边界(3 902.50 m),其余位置均加不透水边界,计算结果见表 3。

由表 3 可知,①、②、③号失效缝的渗透流量分别为 $8.14 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.28 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,其值相差不大,甚至略微有减小的趋势,这种现象与解析解 $1.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.71 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 和对工程实际的认知以及渗流理论中水头差越大渗流量越大相矛盾,造成这种矛盾现象的原因有两点:一是失效缝的厚度并没有改变,即渗透路径没有发生改变;二是,尽管面板在不同位置失效,但是失效缝处的上、下游水头差几乎没有变化,不能够反应不同位置水头差不同的特性。正是以上两种原因造成失效缝处的水力坡降没有明显变化,所以由达西定律知渗透流量变化也不大。

表3 传统数值方法下10 mm缝宽在不同位置处失效的渗透结果

Tab.3 The penetration results of 10mm seam width in failure at different locations under the traditional numerical method

失效缝位置	$q/(10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$	h_1/m	h_2/m	h_3/m
①号缝	8.14	3 970.77	3 903.87	3 902.98
②号缝	8.28	3 972.12	3 905.51	3 903.31
③号缝	8.25	3 981.63	3 906.46	3 903.80

以②缝失效为例,比较表2和表3可知,传统的数值计算方法求得 h_1 、 h_2 、 h_3 分别为3 972.12 m、3 905.51 m、3 903.31 m 与解析解 3 944.90 m、3 935.11 m、3 935.00 m相差非常大,不符合 Darcy 定律规律也不符合工程实际,因此进一步说明传统的数值求解方法是存在问题的。

3.3 新数值方法的计算结果

为了改变传统数值方法产生的矛盾结果,根据渗流理论研究以及对实际工程的常理判断,揭示止水缝在不同位置失效的渗透特性,在面板上游仍然施加上游水头边界(3 992 m),下游分别施加该失效缝位置处的水头边界(3 970 m、3 935 m、3 902.5 m),即施加改进后的边界条件,计算结果见表4。

表4 新数值方法下10 mm缝宽在不同位置处失效的渗透结果

Tab.4 The penetration results of 10 mm seam width in failure at different locations under the new numerical method

失效缝位置	$q/(10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$	h_1/m	h_2/m	h_3/m
①号缝	2.03	3 981.33	3 970.33	3 970.08
②号缝	5.32	3 962.71	3 936.81	3 935.40
③号缝	8.24	3 948.47	3 909.40	3 903.84

由表4可知,①、②、③号失效缝的渗透流量分别为 $2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.32 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 与解析解 $1.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.71 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 和实际工程吻合的非常好,并且满足 Darcy 定律规律,尽管在③号缝位置处的渗流量有一定差值,但是这是因为③号缝位置处于下游水位3 902.5 m以下,较为符合工程实际情况。

以②缝失效为例,比较表2和表4可知,改进后的数值计算方法求得 h_1 、 h_2 、 h_3 分别为3 962.71 m、3 936.81 m、3 935.40 m 与解析解 3 944.90 m、3 935.11 m、3 935 m吻合较好,虽然面板下游面水头 h_1 与解析解算出的 h_1 相差较大,这是因为在数值计算中面板缝失效,它的抗渗能力弱化导致其水头 h_1 较高,这也是符合实际情况和 Darcy 定律规律的,

而在解析求解的过程中,失效缝只赋予其等效渗透系数,并不能考虑计算过程中面板失效缝抗渗能力的弱化,因此解析解的结果偏小,所以总体来说经过改进后的数值解与解析解的计算结果吻合较好,也符合工程实际情况。

利用改进后的数值方法,分别计算1 mm、10 mm、30 mm缝宽在①、②、③号缝失效情况下的渗透流量,结果见图3。

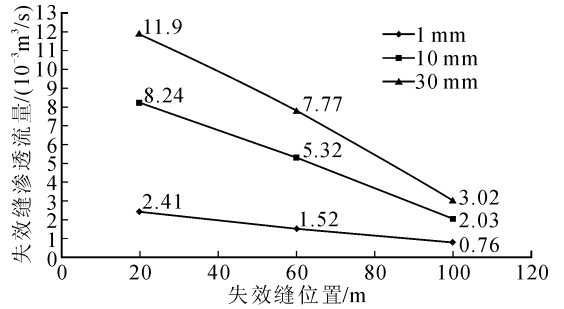


图3 不同失效缝宽渗透流量随位置变化图
Fig.3 The change chart of seepage flow of different failure seam width with the position

由图3可以得出,同一位置处不同缝宽的渗透流量不同,并且失效缝越宽渗透流量越大,由 Darcy 定律知水力坡降、流速也越大,但并不是成比例的增加,这是因为边界效应的影响,对于相同缝宽,不同位置的渗流量不相同,失效缝位置越靠近坝基(上下游水头差越大),渗透流量、水力坡降、流速也越大。

采用改进后的数值方法计算10 mm缝宽仅②号缝失效时,水头等值线沿顺河向的分布,结果见图4。

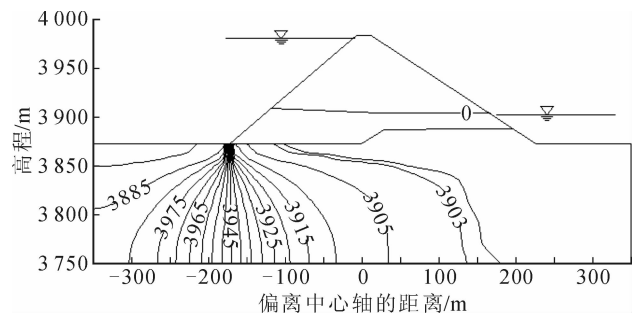


图4 10mm缝宽仅②号缝失效时河床中心处沿顺河向剖面水头等值线图

Fig.4 The head contour map along river direction only ② joint failure of 10 mm seam width the at the center of river bed

由图4可知,总体等水头线为以防渗帷幕的底端为中心的扇形对称分布,越接近帷幕水头等值线分布越密,远离帷幕水头等值线分布越稀疏,坝体内的浸润线分布比较平缓,出逸点略微高于坝下游水位,因此单一垂直止水缝局部失效对坝体浸润线的影响不明显。