

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.007

接触面单元计算土石坝渗流逸出点的效果分析

介玉新¹, 郭政豪¹, 赵雪莹^{2,3}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
2. 中国水利水电科学研究院 北京 100038; 3. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 为研究利用接触面单元方法计算渗流逸出点的处理技巧及其效果, 针对 2 个渗流算例进行计算, 其中对浸润线穿越的单元用蒙特卡罗积分方法计算其复合渗透系数。在渗透系数相差较大的材料之间设置 2 层接触面单元, 利用接触面的渗流矩阵建立材料间的水力联系, 通过迭代得到浸润线位置。选择较薄的接触面单元厚度(比如相邻单元厚度的 1/4), 把计算误差控制在局部范围内, 而对整体没有太大影响。分析结果表明, 选择合适的接触面渗透系数或透水率, 能够得到接近于常规方法的计算结果。

关键词: 渗流; 逸出点; 接触面单元; 蒙特卡罗积分; 浸润线; 心墙坝; 土石坝

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)04-0329-08

Effect of interface elements on calculating the release point of earth-rock dam

JIE Yuxin¹, GUO Zhenghao¹, ZHAO Xueying^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: In the calculation of seepage or consolidation, if there is a large difference in seepage coefficient of two adjacent materials, the release point, as well as the phreatic line, should be determined by iterations. However, if we set interface elements between two materials, reasonable results of release point can be captured without iterations. In this paper, two seepage cases are investigated, and the composite seepage coefficient of the elements, which are intersected by the phreatic line, is calculated with the Monte Carlo integration method. Two interface elements are set between two materials with great difference in seepage coefficient. The hydraulic relationship between two materials is built based on the seepage matrices of the interface elements, while the location of the phreatic line is then calculated by iterations. Choosing a thin thickness for the interface element (e. g., 1/4 of the thickness of the adjacent element) could localize the error of calculation, which has little impact to the whole area at the same time. By choosing an appropriate seepage coefficient or permeability rate of the interface element, results close to those obtained through the traditional methods can be acquired, which shows the applicability of the proposed method.

Key words: seepage; release point; interface element; Monte Carlo integration; phreatic line; core wall dam; earth-rock dam

在堤坝渗流或固结计算中, 都会涉及浸润线和逸出点的计算问题。这种计算一般要进行多次迭代, 可以采用变动网格法或固定网格法。变动网格法需要根据每次迭代得到的浸润线和逸出点位置重新剖分有限元网格。也可以用无网格方法, 如无网格伽辽金法^[1-2]、自然单元法^[3]等随浸润线变动来调整节点。变动网格

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFC1502602); 国家自然科学基金(51525901)

作者简介: 介玉新(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事土工数值分析、基础工程、土工合成材料等研究。E-mail: jieyx@tsinghua.edu.cn

引用本文: 介玉新, 郭政豪, 赵雪莹. 接触面单元计算土石坝渗流逸出点的效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 329-336.

JIE Yuxin, GUO Zhenghao, ZHAO Xueying. Effect of interface elements on calculating the release point of earth-rock dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(4): 329-336.

法的缺陷主要是除了要重新生成网格外,还在于这种方法难以与应力应变或固结计算相耦合。所以更常用的方法是固定网格法。

固定网格法对浸润线的计算可以采用饱和渗流的方法,或者采用饱和-非饱和渗流方法。在饱和渗流方法中,初流量法和单元传导矩阵调整法是比较有效的方法^[4-5]。初流量法相当于通过迭代把浸润线以上的流量置 0,使得渗流仅发生在浸润线以下的区域。单元渗透矩阵调整法则是通过把浸润线以上的渗透系数取小值来实现此目的,这种方法相当于基于简化了渗透系数-吸力(孔压)关系曲线的饱和-非饱和计算方法。不管是单元渗透矩阵调整法还是饱和-非饱和渗流计算方法,都需要对浸润线穿越单元的复合渗透系数进行计算。对高斯积分来说,需要对高斯点加密或利用水上和水下的体积(三维)或面积(二维)对渗透系数进行修正^[6-8]。文献[9]提出用 Monte Carlo 方法计算复合渗透系数,迭代收敛效果很好,且应用起来相当方便。除了上述方法外,围绕着自由面的计算问题,近年来也发展了不少新的方法^[10-11]。

除了浸润线外,还存在逸出点的迭代计算问题,也有很多关于逸出点的迭代方法^[12-13]。如果不进行逸出点迭代,可以在外侧用渗透系数较大的 1 层单元或 2 层单元来近似处理,有的文献称为空气单元^[14-15]。逸出点不仅存在于整个坝体的下游,也应当存在于心墙下游侧与透水性较大的材料接触位置。也就是说,在材料渗透系数相差较大的位置都可能存在类似的逸出点问题^[16-20]。鉴于此,对于心墙土石坝的渗流分析,一般建议将心墙单独拿出来计算。

在很多情况下,为了与应力应变或固结计算相耦合,心墙单独拿出来是不合适的,此时在渗透系数变化较大处如果不予处理,就会使浸润线计算失真。类似于应力应变和固结分析中的接触面,设置渗流的接触面会改善其效果,这种接触面可以直接引用应力应变分析中常用的无厚度单元或有厚度的接触面单元。针对一维、二维和三维的渗流接触面,文献[21-22]给出了有限元计算中相应的渗流计算方法。

本文主要研究在不对逸出点进行专门迭代的情况下,采用接触面方法计算逸出点的处理技巧及其效果。其中浸润线迭代中复合渗透系数的计算采用 Monte Carlo 方法,计算软件采用笔者编写的程序 NM2dc。

1 计算方法简介

1.1 复合渗透系数计算

在用单元渗透矩阵调整法或饱和-非饱和渗流理论进行浸润线迭代计算时,需要计算浸润线穿越单元的复合渗透系数。文献[9]推荐了 2 种方法:方法 1 是直接采用 Monte Carlo 积分代替高斯积分进行积分计算;方法 2 仍然采用高斯积分进行有限元计算,但浸润线穿越单元的复合渗透系数则用 Monte Carlo 方法,也就是用 Monte Carlo 积分分别计算浸润线穿越单元水上(图 1 中 V_1)和水下(图 1 中 V_2)部分的体积(三维)或面积(二维),由此计算复合渗透系数。样本点落在水上还是水下只要根据该点的孔压就可以判断,无需具体计算浸润线位置。对于饱和-非饱和渗流,渗透系数随负孔压(吸力)而变化,仍然可以根据样本点位置所对应的渗透系数逐点加权平均就可以得到复合渗透系数,应用起来很方便。计算表明,2 种方法效果是相同的,在水上、水下渗透系数差别达 10^{10} 量级时仍然可以收敛,而一般方法在渗透系数超过 10^3 倍时就很难收敛了。在本文的计算中,采用后一种方法,即方法 2。

1.2 接触面设置

文献[21-22]给出了有限元计算中接触面相应的渗流矩阵计算方法。对于一维情况(如塑料排水板),对应的渗流矩阵为

$$K_s = \frac{\delta}{L} k_x \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{k'_x}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: K_s ——渗流矩阵; δ ——接触面厚度; L ——单元长度; k_x —— x 方向的渗透系数; k'_x —— x 方向的导水率, $k'_x = k_x \delta$ 。

二维情况下,渗流矩阵为

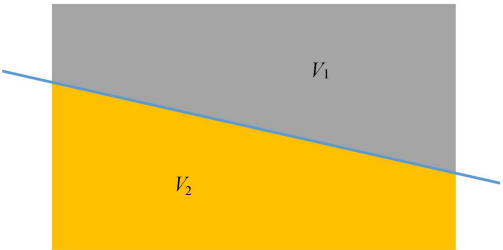


图 1 浸润线穿越单元示意
Fig.1 Schematic graph of the phreatic line across elements

$$\mathbf{K}_s = \frac{\delta}{3L} k_x \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1/2 & 1/2 \\ -1 & 1 & 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 & 1 & -1 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{L}{3\delta} k_y \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 & -1 \\ 1/2 & 1 & -1 & -1/2 \\ -1/2 & -1 & 1 & 1/2 \\ -1 & -1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

或
$$\mathbf{K}_s = \frac{k'_x}{3L} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1/2 & 1/2 \\ -1 & 1 & 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 & 1 & -1 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{L}{3} k'_y \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 & -1 \\ 1/2 & 1 & -1 & -1/2 \\ -1/2 & -1 & 1 & 1/2 \\ -1 & -1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: k_y —— y 方向的渗透系数; k'_y —— y 方向的透水率, $k'_y=k_y/\delta$ 。

从式(1)~(3)可以看出,只要导水率和透水率相等,不同厚度的接触面就会具有相同的渗流矩阵。因此,在单元划分时可以采用无厚度或任意厚度的接触面单元,只要保持导水率和透水率相等即可达到类似的计算效果。这种性质使得在三维计算时,能够用虚拟厚度代替实际厚度划分三维单元并进行计算,应用起来相当方便^[22]。

2 计算算例

针对文献[9]矩形断面的渗流域进行计算。二维计算域长度 4 m,高度 6 m,上游水位(左侧)6 m,下游(右侧)水位 1 m。在计算中需要二层迭代,内层是关于浸润线的迭代,外层是关于逸出点的迭代。采用 0.2 m×0.2 m 的单元网格,计算得到下游逸出点在高度 3.2 m 处(图 2)。如果不考虑逸出点迭代,只对浸润线进行迭代,则会得到不合理的结果,如图 3 所示。

为了避免对逸出点进行迭代,又想得到合理的逸出点计算结果,变通的方法是在下游侧加上 1 层透水性较大的单元^[14]。这样能够使图 3 的浸润线降低到合理的位置。这里采用文献[21-22]中的接触面单元,以检验接触面的计算效果。

图 4 是在下游外侧增加 1 层渗透性很强的无厚度接触面渗流单元得到的浸润线。可以看出,虽然在最右侧一排单元的浸润线很不合理,但在其上游的浸润线还是比较合理的。该结果表明,增加 1 层无厚度的接触面单元,可以在不进行逸出点迭代的情况下把浸润线不合理的范围限制在局部单元里,而对整体没有太大影响。

为了进一步改善计算效果,即把浸润线不合理的范围局限在尽量小的区间内,在上述计算基础上采用 2 层接触面:在内侧采用 1 层有厚度的接触面,其渗透系数取与土的渗透系数相同,在外侧仍然采用上述无厚度接触面。图 5 是内侧接触面厚度分别取 $d=0.001\text{ m}$ 、 0.01 m 、 0.05 m 、 0.1 m 、 0.2 m 、 0.6 m 等得到的结果。为了便于反映问题,图中也显示了接触面的单元(即横坐标大于 4 m 的部分,实际应用中在图形处理时可以把附加的接触面单元隐去)。

可以看出,增加 1 层新的接触面后,浸润线的计算效果相比只有 1 层接触面有了较大的改善。随着内侧接触面厚度 d 的增加,逸出点高程($x=4\text{ m}$ 处)逐渐升高,从无内侧接触面时的约 1 m 上升到 $d=0.6\text{ m}$ 时的 3.8 m。其中, $d=0.05\text{ m}$ (即约 1/4 土单元厚度),对应的浸润线最光滑,计算得到的逸出

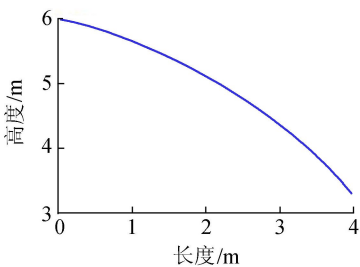


图 2 矩形坝的浸润线

Fig. 2 Phreatic line of a rectangular dam

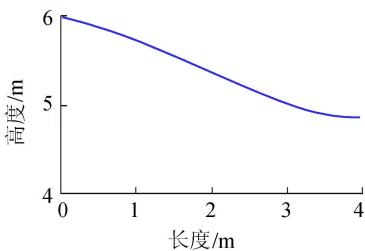


图 3 不进行逸出点迭代得到的浸润线

Fig. 3 Calculated phreatic line without iteration of the release point

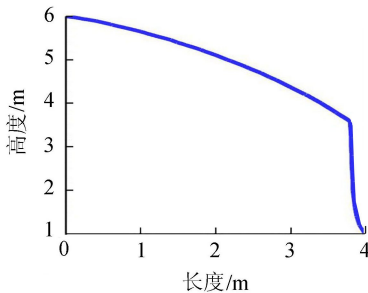


图 4 采用 1 层无厚度接触面单元得到的浸润线

Fig. 4 Phreatic line with one layer of non-thickness interface elements

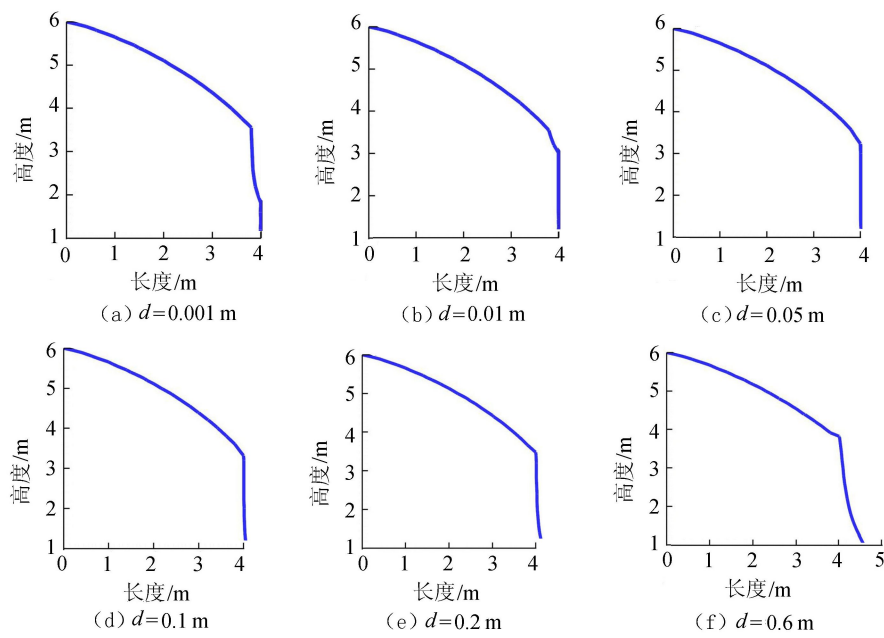


图 5 采用 2 层接触面单元得到的浸润线
Fig.5 Phreatic line with two layers of interface elements

点高程为 3.2 m,与图 2 显示的计算结果最接近。

从图 5 中还可以看出,在 $d \leq 0.1$ m (土单元宽度的 1/2) 时,接触面厚度的变化虽然对逸出点浸润线有影响,但影响仅局限在最外侧的一层单元,在 $x=3.8$ m 位置的浸润线高度均为 3.6 m,在 $d>0.1$ m 之后逸出点计算位置的升高才引起了浸润线整体的变化。所以,在缺乏经验时建议选择较薄的接触面厚度,这样能够把未知的计算误差限制在局部范围内,而不致对整体造成影响。

3 土石坝渗流分析

图 6 为一高心墙坝的有限元网格。这里主要关注对计算方法的研究,所以只取了下游水面以上的部分进行计算。网格底部高程 142 m,顶部高程 283 m。上游水位 278 m,下游水位 142 m(位于图 6 中网格底部位置)。

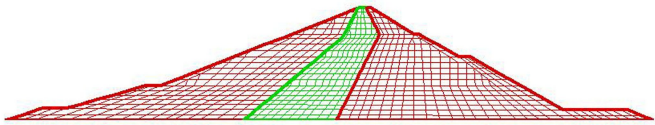


图 6 心墙坝计算有限元网格
Fig.6 Finite element mesh for a core wall dam

心墙渗透系数取为 $k_1 = 8.64 \times 10^{-5}$ m/d (1.0×10^{-7} cm/s)。心墙两侧堆石料的渗透系数取为 $k_2 = 86.4$ m/d (0.1 cm/s)。本文主要研究不同处理方法对计算结果的影响,因此没有考虑心墙与堆石之间的反滤层和过渡层。

将心墙单独拿出来进行渗流计算,且逸出点用常规迭代方法求解,采用蒙特卡罗方法计算浸润线穿越单元的渗透系数,可以得到心墙内的孔压分布,见图 7。

在心墙上、下游两侧与堆石接触位置分别设置 2 层厚度均为 0.01 m 的接触面,靠近心墙一侧的接触面渗透系数取心墙の数値,靠近堆石一侧的渗透系数取堆石の数値。不对逸出点进行迭代,浸润线和孔压的计算结果见图 8。

可以看出上游等孔压线基本上是直线,表明没有水头损失。下游孔压基本上为 0。心墙中有较大的孔压降幅,表明水头损失主要发生在心墙中。

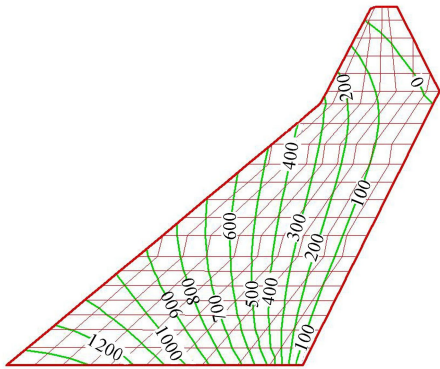


图 7 心墙单独计算时的浸润线和孔压等值线(单位:kPa)
Fig.7 Phreatic line and contour of the pore pressure for the core wall (units: kPa)

对薄层单元来说,影响渗透特性的主要因素是薄层法向的透水率 k/δ 。也就是说,增大单元厚度与减小

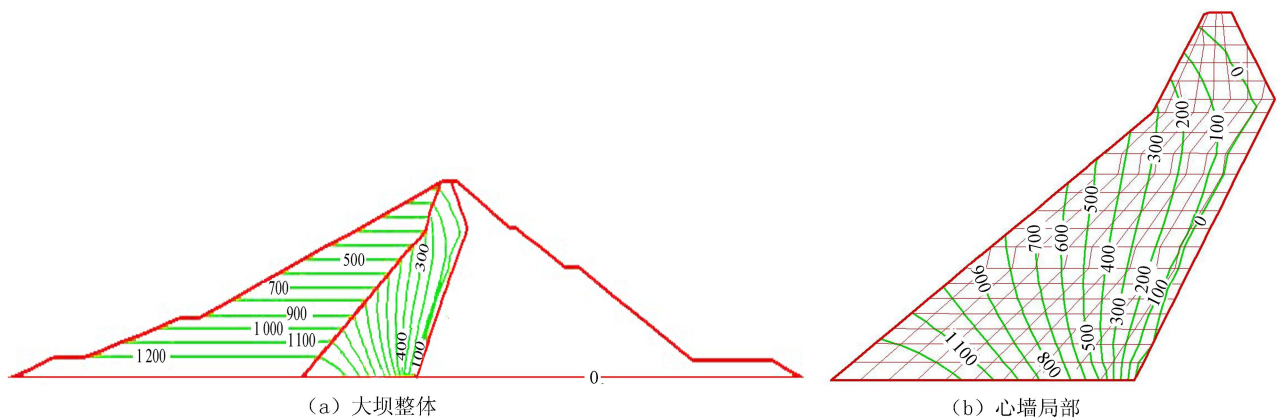


图 8 浸润线和孔压计算结果 (单位:kPa, $k_2=86.4\text{ m/d}$)

Fig.8 Phreatic line and contour of the pore pressure (units: kPa, $k_2=86.4\text{ m/d}$)

渗透系数在这方面是等价的。该算例中,在接触面厚度不变的情况下,可以通过减小渗透系数来得到较好的计算效果。由于把水头降落局限在接触面这一狭小区域内,对整体的渗流分析不会有大的影响,对固结计算中应力应变的计算也不会有大的影响。

针对上述情况,将心墙下游一侧邻近心墙的接触面渗透系数取为 $k_3=8.64\times10^{-7}\text{ m/d}$ (即 $k_1/100$),其他均不变,这里记为方法 A。计算得到的浸润线和孔压见图 9,可以看出计算结果大幅度改善,与图 7 的结果极为接近。可见通过设置 2 层接触面和合适的接触面渗透系数(或透水率)可以基本实现不对逸出点进行迭代而得到合适的计算结果。

下面考察另外一种处理方法(这里记为方法 B):心墙与堆石的接触面性质不变,即仍取厚度皆为 0.01 m,靠近心墙的接触面取心墙的渗透系数,减小心墙两侧堆石的整体渗透系数,分别取堆石的渗透系数 $k_2=8.64\text{ m/d}$ 、 0.864 m/d 、 0.0864 m/d 、 0.00864 m/d ,靠近堆石的接触面渗透系数也随堆石的渗透系数而同步变化,取相同的值。方法 B 大坝整体渗流计算结果见图 10,心墙浸润线和孔压分布计算结果见图 11。

从计算结果可以看出,随着堆石渗透系数的减小,计算所得下游侧浸润线的位置逐渐上升。如果堆石与心墙渗透系数相差在 10^2 量级以内,整体计算效果就会大幅度改善。有鉴于此,如果主要关注心墙内的浸润线情况,可以人为调整其两侧土体的渗透系数,这会使心墙渗流的计算结果更符合实际,但后果是对下游土体中浸润线的计算结果失真。所以,相对而言,方法 A 能够兼顾渗透系数相差较大的心墙和周围土体的浸润线和逸出点计算效果,是一种可取的方法。

4 结 语

应力应变计算中,在材料变化较大处如果不用接触面单元或用接触算法进行处理,就会使局部应力过于集中,导致应力和变形计算失真。渗流分析中也存在类似问题。在材料变化剧烈处存在浸润线急剧变化和逸出点的迭代问题。把空气作为一种介质,大坝下游也可以认为是与空气的接触问题。

通过设置有厚度或无厚度的接触面单元,使 2 种材料不必直接关联,而是通过接触面的渗流矩阵发生水力联系,这样可以把计算所得浸润线变化剧烈的位置限制在尽量小的范围内,避免影响整体结果,从而可以在不进行逸出点迭代的情况下得到比较满意的结果。根据本文的计算分析,主要得到以下结论:

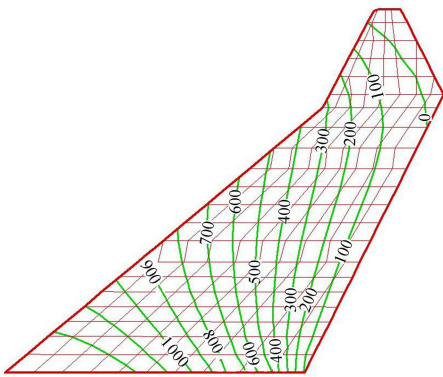


图 9 方法 A 心墙浸润线和孔压计算结果
(单位:kPa, $k_2=86.4\text{ m/d}$,
 $k_3=8.64\times10^{-7}\text{ m/d}$)

Fig.9 Phreatic line and contour of the pore pressure for the core wall by Approach A
(units: kPa, $k_2=86.4\text{ m/d}$, $k_3=8.64\times10^{-7}\text{ m/d}$)

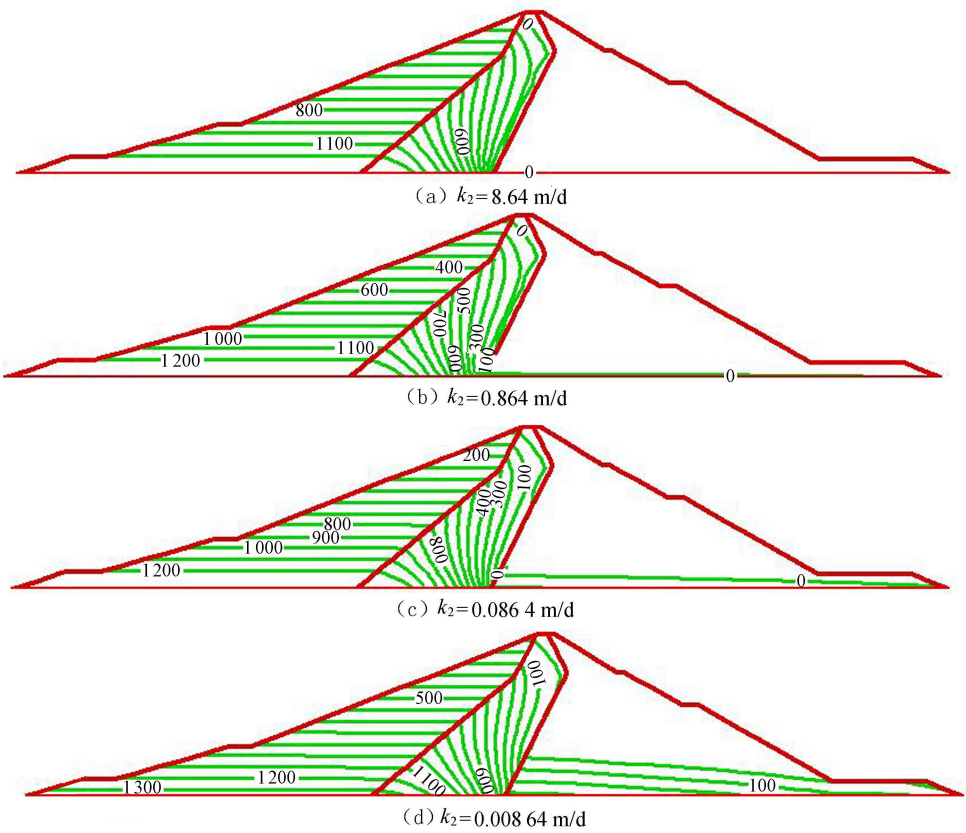


图 10 方法 B 大坝整体渗流计算结果 (单位: kPa)

Fig. 10 Seepage calculation result of the dam by Approach B (units: kPa)

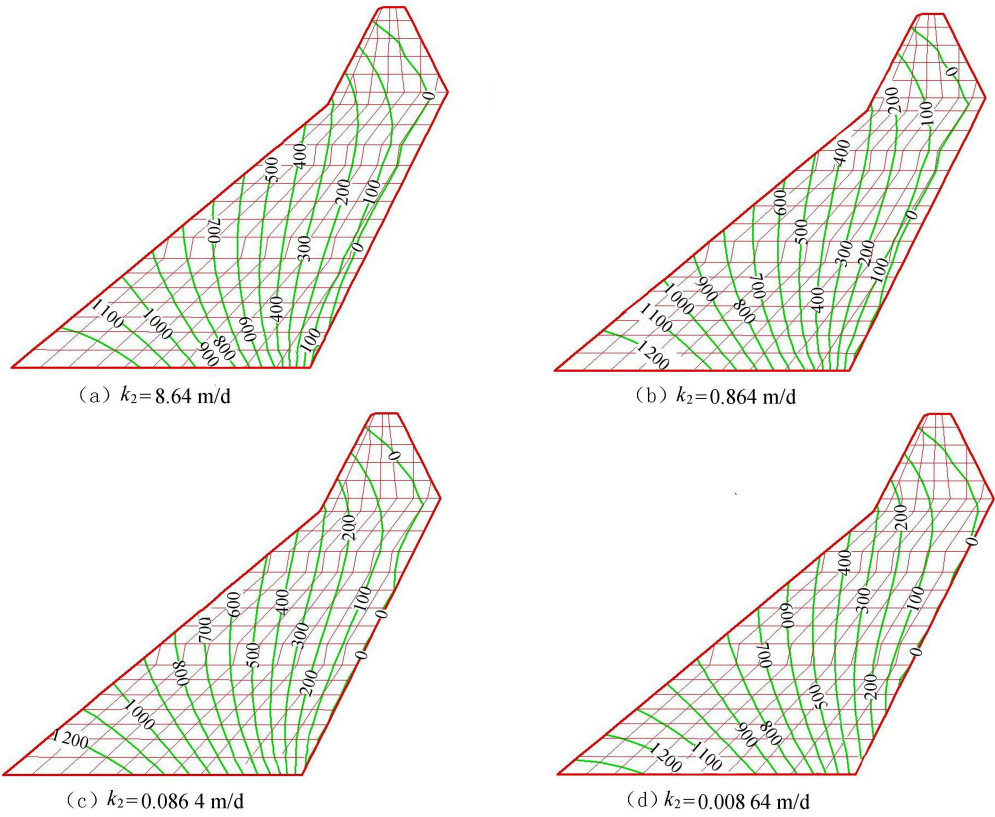


图 11 方法 B 心墙浸润线和孔压计算结果 (单位: kPa)

Fig. 11 Phreatic line and contour of the pore pressure in the core wall obtained by Approach B (units: kPa)

a. 对于心墙堆石坝等心墙与周围土体渗透系数相差较大的情况,最好采用常规方法(即对浸润线和逸出点都进行迭代计算)将心墙单独拿出来进行渗流分析,这样得到的浸润线会更合理。

b. 在不能对逸出点进行迭代的情况下(比如为了与应力应变计算共用有限元网格,或固结计算中涉及浸润线和逸出点问题时),或所用的软件没有该功能,可以在渗透系数变化较大的 2 种土料之间设置 2 层接触面单元(无厚度或薄层接触面单元),能够改善计算效果,通过指定合适的接触面渗透系数,能够使计算结果相当接近于常规方法的结果。但这种渗透系数的选择还需要试算确定。算例计算表明,如果 2 种材料渗透系数相差在 10^2 量级以内,不予特殊处理也有望得到比较满意的结果。

需要说明的是,本文建议的处理方法只是一种权宜之计,是对一些没有逸出点迭代功能的程序(包括商业软件)的一种暂时的补救措施。但它还没有解决根本问题。最终的解决需要在理论上进行更严密的探究,而不仅是建立在试算的基础之上。

参考文献:

[1] LI Guangxin, GE Jinhong, JIE Yuxin. Free surface seepage analysis based on the element-free method[J]. Mechanics Research Communications, 2003,30(1):9-19.

[2] 介玉新,刘岩. 基于蒙特卡罗积分的无网格伽辽金法及其在渗流分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007,29(12):1794-1799. (JIE Yuxin, LIU Yan. Element-free Galerkin method based on Monte Carlo integration and its application in seepage analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(12):1794-1799. (in Chinese))

[3] JIE Yuxin, LIU Lizhen, XU Wenjie, et al. Application of NEM in seepage analysis with a free surface[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2013,89:23-37.

[4] 张有天,陈平,王镭. 有自由面渗流分析的初流量法[J]. 水利学报, 1988,19(8):18-26. (ZHANG Youtian, CHEN Ping, WANG Lei. Initial flow method for seepage analysis with free surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988,19(8):18-26. (in Chinese))

[5] BATHE K J, KHOSHGOFTAAR M R. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1979,3(1):13-22.

[6] 朱军,刘光廷. 改进的单元渗透矩阵调整法求解无压渗流场[J]. 水利学报, 2001,26(8):49-52. (ZHU Jun, LIU Guangting. An improved method for calculating unconfined seepage with changing element conductivity matrix[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,26(8):49-52. (in Chinese))

[7] 舒仲英,邓建霞,李龙国. 加密 Gauss 点单元传导矩阵调整法在有自由面渗流分析中的应用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007,39(1):48-52. (SHU Zhongying, DENG Jianxia, LI Longguo. Application of element conduct matrix regulative method by encrypting Gauss point in seepage analysis with free surface[J]. Journal of Sichuan University (Science and Technology), 2007,39(1):48-52. (in Chinese))

[8] 周创兵,熊文林,梁业国. 求解无压渗流场的一种新方法[J]. 水动力学研究与进展, 1996,11(5):528-534. (ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin, LIANG Yeguo. A new method for the solution of unconfined seepage field[J]. Journal of Hydrodynamics, 1996,11(5):528-534. (in Chinese))

[9] 介玉新. 引用 Monte Carlo 法的自由面渗流分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009,49(12):1944-1947. (JIE Yuxin. Seepage analysis with free surface using a Monte Carlo model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009,49(12):1944-1947. (in Chinese))

[10] JIANG Bin. A priori error analysis of the mortar finite element method for variational inequalities[J]. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2008, 24(2):476-503.

[11] FUKUCHI T. Numerical analyses of steady-state seepage problems using the interpolation finite difference method[J]. Soils and Foundations, 2016, 56(4):608-626.

[12] 吴梦喜,张雪勤. 有自由面渗流分析的虚单元法[J]. 水利学报, 1994,34(8):67-71. (WU Mengxi, ZHANG Xueqin. Imaginary element method for numerical analysis of seepage with free surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994,34(8):67-71. (in Chinese))

[13] 侯兴民,孙伟建. 基于实域总势能计算渗流溢出点位置[J]. 岩土工程学报, 2018,40(4):612-617. (HOU Xingmin, SUN Weijian. Calculation of seepage spill point position based on total potential energy in real domain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(4):612-617. (in Chinese))

[14] 侯晓萍,徐青,陈胜宏. 用空气单元法求解渗流场的逸出边界问题[J]. 岩土力学, 2015,36(8):2345-2351. (HOU

Xiaoping, XU Qing, CHEN Shenghong. An air element method for overflow boundary problem in seepage analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(8):2345-2351. (in Chinese))

[15] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学, 2003,24(2):281-284. (HU Jing, CHEN Shenghong. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(2):281-284. (in Chinese))

[16] WU Mengxi, YANG Lianzhi, YU Ting. Simulation procedure of unconfined seepage with an inner seepage face in a heterogeneous field[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013,56(6):1139-1147.

[17] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect-induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1):36-44. (in Chinese))

[18] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3):61-65. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(3):61-65. (in Chinese))

[19] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58. (BAI Guangming, ZHANG Shoujie, LU Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):52-58. (in Chinese))

[20] 李明远,周志芳,杨蕴,等. 新干航电枢纽工程右岸浸没评价与控制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):203-210. (LI Mingyuan, ZHOU Zhifang, YANG Yun, et al. Immersion assessment and control of the right bank of Xingan Navigation and Power Junction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(3):203-210. (in Chinese))

[21] 介玉新,许延春,李广信. 固结计算中接触面渗流问题的模拟[J]. 工程力学, 2007,24(增刊1):104-107. (JIE Yuxin, XU Yanchun, LI Guangxin. Simulating seepage through interface in consolidation analysis[J]. Engineering Mechanics, 2007,24(Sup1):104-107. (in Chinese))

[22] 介玉新,李广信. 有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J]. 水利水电科技进展, 2009,29(6):42-43,62. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009,29(6):42-43,62. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-10 编辑:高建群)

• 简讯 •

河海大学获 2018 年度江苏省科学技术奖一等奖

2019 年 5 月 10 日,江苏省科学技术奖励大会在南京举行,大会对 2018 年度江苏省科学技术奖获得者进行表彰。河海大学环境学院王沛芳教授主持,河海大学、南京农业大学、南京大学共同完成的“复杂河网水质改善能力提升理论技术及应用”项目获一等奖。该项目开展了复杂河网多水源多目标联合水力调控、水域微生物附着载体构建、河流滨水湿地系统创建、沿河污染源治理和生态截污廊道构建的理论技术研究及工程实践,为河网水质有效改善提供重要科技支撑。此外,河海大学王环玲教授主持的“工程岩石渗流力学关键技术及应用”项目和韩光洁教授主持的“传感器网络信息传输与安全相关技术研究”项目分获二等奖和三等奖。

(本刊编辑部供稿)