

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.032

# 深厚覆盖层潜蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟

吴梦喜<sup>1,2</sup>, 余 挺<sup>3</sup>, 张 琦<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国电建集团成都水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 深厚覆盖层坝基潜蚀不一定导致坝基的渗透破坏。但坝基砂砾石土内部细颗粒的流失, 一方面会增大土体的渗透性; 另一方面可降低土体的强度和变形模量。前者导致坝基坝体渗流场的变化, 从而引起坝体变形和应力变化, 后者变形模量衰化, 导致坝基坝体变形和应力调整。潜蚀造成的坝基和坝体应力变形对大坝的正常使用和安全性带来一定负面影响, 定量评估这种影响是内部不稳定砂砾石深厚覆盖层坝基采用悬挂式防渗墙处理方案设计和该类大坝运行管理的迫切需求。提出了潜蚀对大坝应力变形影响的模拟方法, 对一个典型大坝设计方案进行了计算分析, 该设计方案中潜蚀造成应力变形变化的两种机制中, 渗流场变化机制对坝基坝体的应力变形改变远大于模量衰化造成的影响。总体上该方案潜蚀造成的坝体变形和应力变化并未显著降低坝体的安全性。

**关 键 词:** 管涌; 潜蚀; 有限元; 砂砾石; 应力变形

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 07-2087-09

## Finite element simulation of influence of deep overburden suffusion on dam stress and deformation

WU Meng-xi<sup>1,2</sup>, YU Ting<sup>3</sup>, ZHANG Qi<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** Although suffusion in the deep sandy gravel foundation probably cannot lead to seepage failure of the dam, fine grains inside the sandy gravel are lost. It results in increasing the permeability of the soil, but decreasing its strength and deformation modulus. The former causes the change of the seepage field of the foundation dam, which further induces the changes of deformation and stress of the dam body. While the latter reduces the deformation modulus and leads to the deformation and stress adjustment of the dam foundation. Since the stress and deformation of a dam and its foundation caused by suffusion bring some negative impact on the normal use and dam safety, quantitative assessment of the impact is urgently required for both of the design and operation management of such dams built on a deep internal instability sandy gravel foundation with a suspended cutoff wall. Therefore, a simulation method was proposed to investigate the effect of suffusion within the foundation on stress and deformation of the dam. A dam design with a typical suffusion suffered foundation was calculated and analyzed. It is found that in these two schemes, the effect of seepage fields on the stress and deformation of the dam foundation is much greater than that caused by the modulus decay. In general, the safety of the dam is not significantly reduced by the deformation and stress changes of the dam caused by suffusion.

**Keywords:** piping; suffusion; finite elements; sandy gravel; stress and deformation

## 1 引 言

潜蚀 (suffusion) 是一种管涌现象, 是指粗颗粒构成骨架的内部不稳定土体, 在渗流作用下细颗粒通过粗颗粒之间的孔隙移动的渗透变形现象, 可以造成堤坝的破坏。美国蒙大拿州豪瑟 (Hauser)

湖大坝 1908 年垮塌于初次蓄水一年之后, 是典型的潜蚀导致的大坝失事<sup>[1]</sup>。我国已经有大量的堆石坝直接修建于覆盖层上<sup>[2]</sup>。相当多的坝址覆盖层特别深厚, 由于技术经济原因不能采用全封闭式防渗墙, 而采用悬挂式防渗墙。悬挂式防渗墙底端土体内渗透坡降一般较大。潜蚀的临界渗透坡降处于 0.13~

收稿日期: 2015-08-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(No. 2013CB035903); 国家科技支撑计划课题(No. 2014BAB03B04)。

This work was supported by the National Basic Research Development Program of China (2013CB035903) and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAB03B04).

第一作者简介: 吴梦喜, 男, 1967 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水工结构与岩土工程数值方法的研究工作。E-mail: wumx@imech.ac.cn

0.30 之间<sup>[3]</sup>。当坝基为内部不稳定的砂砾石层时, 容易发生潜蚀。当潜蚀尚未出露于坝基外部时难以发现, 被发现时往往侵蚀已经十分严重。虽然文献中很少报道, 但我国确已经有深厚覆盖层坝基观察到了严重的内部侵蚀现象, 其内部侵蚀类型推测为潜蚀, 处理难度很大、费用很高。潜蚀增大土体的孔隙通道和渗透性, 改变坝基的渗流场, 增大坝基的渗流量, 是大坝安全运行的隐患。坝基渗流场的改变和土体因潜蚀造成的压缩性增大对防渗墙及其上部结构的变形产生影响, 已经有对这种影响进行试验研究的尝试<sup>[4]</sup>。潜蚀的微观机制及泥沙运动过程已有离散元颗粒流方法模拟<sup>[5]</sup>, 但该法由于计算规模的限制, 尚难于对坝基潜蚀进行直接模拟。潜蚀是否会在坝基内部持续发展、其发展是否会最终造成坝基的渗透破坏、一定程度和范围的潜蚀对大坝结构不利影响有多大等是亟需回答的现实共性工程问题, 也是砂砾石深厚覆盖层坝基上的重大工程设计研究所必须回答。有限元法是复杂问题工程分析的有效手段, 基于对复杂渗流问题成熟的有限元方法<sup>[6-7]</sup>, 作者已经实现了潜蚀的有限元动态模拟, 能给出坝基潜蚀侵蚀过程中的渗流场和侵蚀量及其随时间发展的过程, 将另文发表。在此基础上, 本文基于姊妹篇《细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究》<sup>[8]</sup>中包含颗粒流失描述的本构模型, 发展了潜蚀对坝基和坝体应力变形的有限元计算方法, 实现了坝基潜蚀后坝基和坝体的应力变形的定量评估。

## 2 坝基潜蚀的有限元动态模拟简介

依据潜蚀过程中泥沙输运的连续性方程和含沙水渗流的连续性方程, 采用有限元法, 通过顺序非线性耦合迭代, 求解泥沙侵蚀过程中的渗流场和浓度场, 并记录各时间步有限元节点的孔隙水压力、高斯点的泥沙浓度和体积侵蚀(淤积)率, 可获得潜蚀的动态过程。下面对此进行简介。

### 2.1 潜蚀过程中泥沙输运的连续性方程

根据质量守恒定律, 容易推导出泥沙输运的连续性微分(质量守恒)方程为

$$\frac{\partial(s_v \phi)}{\partial t} + s_v v_{i,i} = q \quad (1)$$

式中:  $s_v$  为孔隙水中泥沙的体积浓度;  $\phi$  为土体的孔隙率;  $v_i$  为渗流速度向量;  $q$  为源汇项, 即单位时间内单位体积中泥沙的启动或沉积体积, 其量纲为  $t^{-1}$ 。

不考虑骨架压缩变形时,  $\partial \phi / \partial t = q$ , 泥沙输运

的连续性(质量守恒)微分方程可表示为

$$\phi \frac{\partial s_v}{\partial t} + s_v v_{i,i} = (1 - s_v) q \quad (2)$$

假设泥沙的侵蚀速率与作用在土体上的渗透坡降之间满足线性关系, 用如下表达式:

$$q = \begin{cases} k_d(J - J_c) & J \geq J_c \\ 0 & J < J_c \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $J$  为土体上的渗透坡降;  $J_c$  为砂颗粒启动时所需的临界坡降;  $k_d$  为土体侵蚀系数, 量纲为  $t^{-1}$ 。

当渗流中的泥沙浓度超过渗流最大携沙浓度, 则泥沙瞬时淤积于土体中, 在  $\Delta t$  时段内的平均淤积速度等于

$$q = -(s_v - s_v^*) \phi / \Delta t \quad (4)$$

式中:  $s_v^*$  为最大挟沙浓度, 其计算详见作者要发表的另文。

### 2.2 含沙水渗流的连续性方程

含沙水流的连续性微分方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (1 - s_v) v_{i,i} = 0 \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为单位体积土体的孔隙体积含水率。

土体的非饱和含沙水含水率可以表示为

$$\theta = s(1 - s_v) \phi \quad (6)$$

式中:  $s$  为饱和度。

不同孔隙水饱和度和含沙浓度时的渗流仍然采用达西定律描述, 可以用下式表示:

$$v_i = -K_{ij}(\beta, s_v) k_r(s) (\psi + z)_{,j} \quad (7)$$

式中:  $v_i$  为渗流速度向量;  $K_{ij}$  为饱和介质的渗透张量, 是土体泥沙体积侵蚀率  $\beta$  和含沙浓度  $s_v$  的函数;  $k_r(s)$  为相对渗透系数,  $\psi$  为具有长度量纲的压力水头;  $z$  为基于一个参考平面的高程。

潜蚀过程中渗透系数  $k$  可以按照下式计算:

$$k = k_0 [(\phi' / \phi_0)^3 (d'_{20} / d_{20})^2]^\lambda \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为孔隙特征放大指数, 暂时取 2.0;  $\phi'$ 、 $d'_{20}$  分别为潜蚀动态发展过程中的土体的孔隙率和颗粒重量含量 20% 所对应的颗粒粒径。根据潜蚀土体初始颗粒级配曲线、计算过程中记录的当前时步中土体的泥沙颗粒体积侵蚀(淤积)量和可侵蚀流失泥沙的最大粒径, 从而可得到侵蚀土体当前时步末的  $d'_{20}$  粒径。动态孔隙率则等于初始孔隙率和当前体积侵蚀量之和。

含水率和孔隙水压力混合表达的含沙水渗流微

分方程可表示为

$$\frac{1}{(1-s_v)} \frac{\partial \theta}{\partial t} - [K_{ij} k_i(\psi)(\psi+z)_{,j}]_{,i} = 0 \quad (9)$$

含沙水与清水的渗流微分方程相比，第 1 项受到含沙浓度影响，第 2 项中渗透系数受到泥沙侵蚀和浓度影响。

### 2.3 坝基潜蚀过程的有限元求解方法

作者在另文中给出了式 (1) 和式 (9) 的有限元公式，联立求解可获得管涌过程中坝基每一个时刻的渗流场和浓度场，从而据此求出各个时刻各高斯点潜蚀体积率。每个时步渗流场和浓度场两部分顺序耦合迭代求解，直至结果收敛。

## 3 含颗粒流失的土体本构模型

文献[8]对不同潜蚀程度的砂砾石土进行了三轴试验和侧限压缩试验，基于邓肯 E-B 模型提出了包含颗粒流失量影响的本构模型，建立了砂砾石土细颗粒流失过程中的应力-应变关系。

### 3.1 包含颗粒流失影响的邓肯 E-B 模型

邓肯模型定义土体的切线弹性模量  $E_t$  的表达式为

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 E_i \quad (10)$$

式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  为最大、最小主应力； $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为土体破坏时的主应力差； $R_f$  为破坏比参数； $E_i$  为初始切线模量。

根据摩尔-库仑破坏准则：

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

式中： $c$ 、 $\varphi$  分别为土的凝聚力和内摩擦角。

$E_i$  与  $\sigma_3$  的关系为

$$E_i = KP_a(\sigma_3 / P_a)^n \quad (12)$$

式中： $K$  为弹性模量数； $n$  为弹性模量指数； $P_a$  为大气压力。

邓肯模型切线弹性模量计算公式共有 5 个参数，即  $K$ 、 $n$ 、 $R_f$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 。

体积模量  $B_t$  为

$$B_t = dp / d\varepsilon_v \quad (13)$$

邓肯 E-B 模型体积模量的计算公式为

$$B_t = k_b P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (14)$$

式中： $k_b$  为体积模量数； $m$  为体积模量指数。

E-B 模型的泊松比按照下式计算：

$$\mu_t = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E_t}{3B_t} \right) \quad (15)$$

高堆石坝应力计算时砂砾石土常用非线性强度指标，此时  $c=0$ ， $\varphi$  由下式计算

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg[\max(1, \sigma_3 / P_a)] \quad (16)$$

式中： $\varphi_0$  为初始摩擦角； $\Delta\varphi$  为高压时摩擦角降低率。

邓肯 E-B 模型的参数随侵蚀量的变化公式如下

$$k_b = a_1(1 - \beta)^{b_1} \quad (17)$$

$$m = a_2(1 - \beta)^{b_2} \quad (18)$$

$$K = a_3(1 - \beta)^{b_3} \quad (19)$$

$$n = a_4(1 - \beta)^{b_4} \quad (20)$$

$$R_f = a_5(1 - \beta)^{b_5} \quad (21)$$

其中， $\beta$  是土体泥沙体积侵蚀率， $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $a_3$ 、 $b_3$ 、 $a_4$ 、 $b_4$ 、 $a_5$ 、 $b_5$  为颗粒流失量对邓肯模型变形参数的影响参数。

### 3.2 潜蚀过程中的应力-应变关系

潜蚀过程中土体的应变用以下公式计算：

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^0 + d\varepsilon_{ij}^\sigma \quad (22)$$

式中： $d\varepsilon_{ij}$  为总的应变增量； $d\varepsilon_{ij}^0$  为由于颗粒流失引起模量衰化导致的附加应变； $d\varepsilon_{ij}^\sigma$  为应力增量引起的应变。

模量衰化引起的附加应变的计算，可采用初应变增量法计算。等于时步初始应力状态下，当前土体产生的总应变与初始土体产生的总应变之差。由于本构模型计算的模量是切线模量，可将土体应力分成  $M$  等分，积分计算应变。假定时步初侵蚀单元土体的应力为  $\sigma_{ij}^{t_0}$ ，初始应力状态下因模量变化引起的应变增量计算公式为

$$d\varepsilon_{ij}^0 = \sum_{m=1}^M [D_{ijkl}^{-1} \left( \frac{(m-0.5)}{M} \sigma^{t_0}, \beta_t \right) - D_{ijkl}^{-1} \left( \frac{(m-0.5)}{M} \sigma^{t_0}, \beta_{t_0} \right)] \frac{\sigma_{kl}^{t_0}}{M} \quad (23)$$

式中： $D_{ijkl}$  为切线弹性矩阵； $t_0$  和  $t$  分别表示时步初和时步末， $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、 $l$  表示坐标轴变量，下标重复表示求和。

而应力增量引起的应变为

$$d\varepsilon_{ij}^\sigma = D_{ijkl}^{-1} \left( \frac{\sigma^{i_0} + \sigma^t}{2}, \beta_t \right) d\sigma_{kl} \quad (24)$$

### 3.3 模型参数

表 1 为初始土样(未侵蚀)邓肯 E-B 模型参数。表 2 为细颗粒流失对邓肯模型参数影响的参数。

表 1 砂砾石土邓肯 E-B 模型参数

Table 1 Duncan E-B model parameters of sandy gravel soil

土样	$K$	$n$	$R_f$	$k_b$	$m$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
初始	2017	0.360	0.84	904	0.09	53	9.9

表 2 侵蚀对砂砾石土邓肯 E-B 模型参数影响参数表

Table 2 Duncan E-B model parameters of sandy gravel soil caused by suffusion

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
818.7	0.547	2017	0.36	0.84	5.622	4.111	5.148	12.63	1.294

## 4 潜蚀对大坝变形影响的计算方法

坝体坝基的渗流与应力变形是相互耦合作用的。常规的渗流应力变形耦合计算方法分为双向耦合和单向耦合两种模式。一般情况下，渗流导致的土体孔隙水压力改变对应力变形的影响大，而应力变形导致的土体渗透系数变化或瞬时孔隙水压力的变化对渗流场的影响相对较小。因此，除非关注和评估应力变形对渗流的影响而需要采取双向耦合以外，一般可采取先研究渗流场，再依据渗流场结果研究应力、变形的单向耦合方式。大坝填筑和运用过程中砂砾石坝基的应力变化引起的压缩变形导致的渗透系数和瞬时孔压变化对渗流场的影响，一般是可以忽略不计的。采取单向耦合的方式，可以使潜蚀的计算独立出来，使问题得以简化。

本文的研究，基于作者将发表的另文介绍的方法，首先获得潜蚀过程计算结果，包括各水位或侵蚀时刻下的渗流场、潜蚀各阶段的渗流场、侵蚀量场。

土体在潜蚀中随着土颗粒的流失，孔隙空间增大，渗透性增加，变形模量衰化。土体模量的衰化将使土体在原有应力状态下产生应变，渗透性的改变将引起渗流场的变化，即坝基和坝体内部的孔隙水压力改变，从而导致有效应力的变化而使土体产生应变。将前者看成是一个初应变，参照岩土体湿化变形的初应变法，附加节点荷载的计算公式为

$$F_{iJ} = \sum_e \int_{\Omega_e} D_{ijkl}(\sigma, \beta) N_{J,j} \varepsilon_{kl}^0 d\Omega_e \quad (25)$$

式中： $F_{iJ}$  为有限元节点荷载； $e$  为单元； $\Omega_e$  为单元的区域； $N$  为单元的形函数； $J$  为单元的节点编号。

将附加节点荷载加入到常规的单向渗流应力耦合有限元方程之中，可以得到包含颗粒流失影响的位移有限元方程。

进行有限元计算获得节点的位移增量后，依据应变增量求应力增量中，在应变中要扣除初应变，即

$$\Delta\sigma_{ij} = D_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^0) \quad (26)$$

潜蚀对大坝应力变形的影响从机制上可分为渗流场的改变造成的坝体荷载条件变化引起的应力变形与土体变形模量的衰化引起的坝体应力调整和迁移产生的应力变形两个部分。将渗流场变化和模量衰化导致的荷载增量作为 2 个增量步，则可以比较两种机制对变形的影响程度。

本文第 1 作者开发的 LinkFEA 有限元软件系统能够进行大坝的渗流和应力变形耦合计算（包含双向耦合和单向耦合），已经应用于坝高为 240 m、覆盖层厚度约为 70 m 的大渡河长河坝心墙堆石坝的应力、变形双向耦合和单向耦合计算，计算中考虑了大坝填筑和蓄水过程。本文在此软件中，将潜蚀计算结果，包括潜蚀前和潜蚀过程中单元节点的孔隙水压力、侵蚀中单元高斯点单位体积的颗粒流失量读入进来，实现上述考虑潜蚀的附加应力的计算功能。无管涌时的渗流计算结果，既可以在本程序中进行计算，也可以直接读入进来，这就实现了包含潜蚀侵蚀的大坝应力变形有限元计算。

有限元计算网格中，混凝土与土体之间设置接触面，接触面单元采用 Goodman 单元。接触面单元的法向劲度在受压时取一个大值，如  $10^8$  kPa，受拉时取一个小值，如 10 kPa。切线模量的计算采用邓肯-克拉夫模型：

$$k_{st} = k_1 \gamma_w \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \left( 1 - \frac{R_f \tau_s}{c + \sigma_n \tan \varphi} \right) \quad (27)$$

式中： $k_{st}$  为切线劲度模量； $k_1$  为剪切模量数； $n$  为剪切模量指数； $\gamma_w$  为水的重度； $\sigma_n$  为接触面法向压应力； $R_f$  为破坏比参数； $\tau_s$  为接触面上的剪应力。

## 5 潜蚀对大坝应力变形影响分析

本文的研究是因某工程等工程的设计和运行管理需了解潜蚀对大坝应力、变形的影响而开展的。高 150 m 的心墙堆石坝位于深厚覆盖层上，采用悬

挂式防渗墙设计方案。计算拟定的大坝横剖面如图 1 所示。覆盖层下基岩面高程为 2 730 m，防渗墙底部延伸至 2 830、2 805、2 780 m 3 个方案。本文计算的有限元网格与潜蚀计算的网格相同，如图 2 所示。防渗墙两侧设置了接触面单元。由于防渗墙顶部土体受防渗墙的顶托，其必将被防渗墙刺破，而沿着防渗墙两侧滑动，因而沿着防渗墙上、下游面在其顶部土体内也设置了接触面，模拟其中的位移不连续。

岩土材料的本构模型均采用邓肯 E-B。材料参数如表 3 所示。邓肯 E-B 模型的卸载模量  $K_{ur}$  取弹性模量数  $K$  的 2 倍。表 3 中心墙的材料强度按线性模式计算，黏聚力  $c$  等于 66 kPa。表中的重度为填筑时重度，堆石料、过渡料、反滤料和心墙料饱和时的重度分别增加 2.2、1.5、2.2 和 1.1 kN/m<sup>3</sup>。覆盖层砂砾石的饱和重度为 23.1 kN/m<sup>3</sup>，其他参数见表 1、2。混凝土防渗墙的重度为 24 kN/m<sup>3</sup>，本构模型采用线弹性，弹性模量为  $3.0 \times 10^7$  kPa，泊松比为 0.17。

接触面材料参数如表 4 所示。其中防渗墙与覆盖层的接触面因泥皮的影响强度较低，变形参数低于其他部位接触面。

表 3 坝体材料邓肯 E-B 模型参数  
Table 3 Duncan E-B model parameters of dam body materials

材料	重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	$K$	$n$	$R_f$	$k_b$	$m$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
堆石料	21.8	1335	0.24	0.77	480	0.21	51	9.4
过渡料	22.5	1319	0.24	0.77	494	0.22	51.5	8.5
反滤料	21.8	1078	0.23	0.73	377	0.21	48.5	7.4
心墙料	21.9	419	0.37	0.89	203	0.38	25.5	/

表 4 接触面材料邓肯 E-B 模型参数表  
Table 4 Duncan E-B model parameters of contact interface materials

接触面	$\varphi / (^\circ)$	$c / \text{kPa}$	$K_f$	$n$	$R_f$
防渗墙与心墙	15.0	1.0	2 000	0.50	0.9
防渗墙与覆盖层	11.0	10.5	757	0.80	0.9
防渗墙顶部土体	25.5	1.0	6 500	0.52	0.9

水库的正常高水位为 3 070.0 m，下游水位为 2 934.17 m。大坝在填筑完成后，其上游水位逐步抬高到正常高水位。文献[8]已经指出，在达到正常蓄水位以前，潜蚀就已经发生。为了简化问题，假定水位达到正常高水位后侵蚀才发生。本文介绍防渗墙底高程为 2 830 m 方案潜蚀对大坝应力变形的影响。

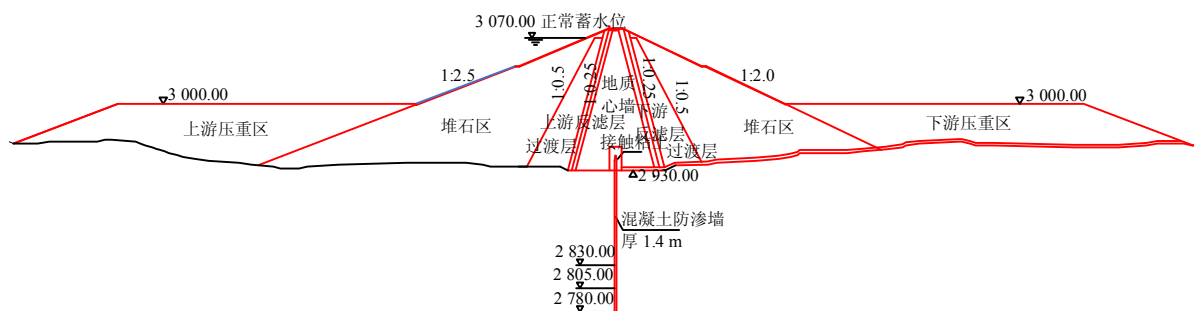


图 1 大坝几何剖面  
Fig.1 Geometry of the dam section

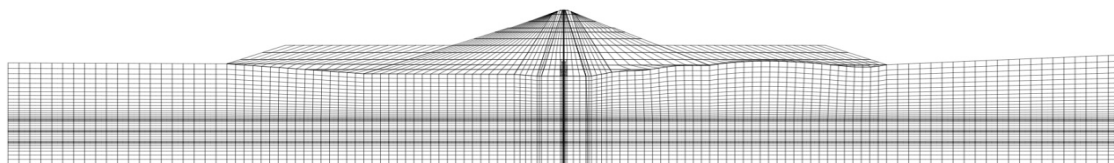


图 2 有限元网格  
Fig2 Finite element meshes of the dam section

采用仿真计算方法，考虑大坝填筑和蓄水过程。对于填筑体，其网格生成与自重荷载施加发生在同一个加载步，且填筑表面位移在自重荷载步计算完成后处理为 0。正常高水位下潜蚀发生前坝体坝基

(不含防渗墙)的位移如图 3 所示，最大沉降位于心墙底部。由于坝基存在较大的压缩变形，与直接修建于基岩上的堆石坝最大沉降通常位于坝体中部的情况不同。坝体和坝基的水平向正应力如

图 4 所示，防渗墙下游坝基和坝体的应力显著大于上游侧。

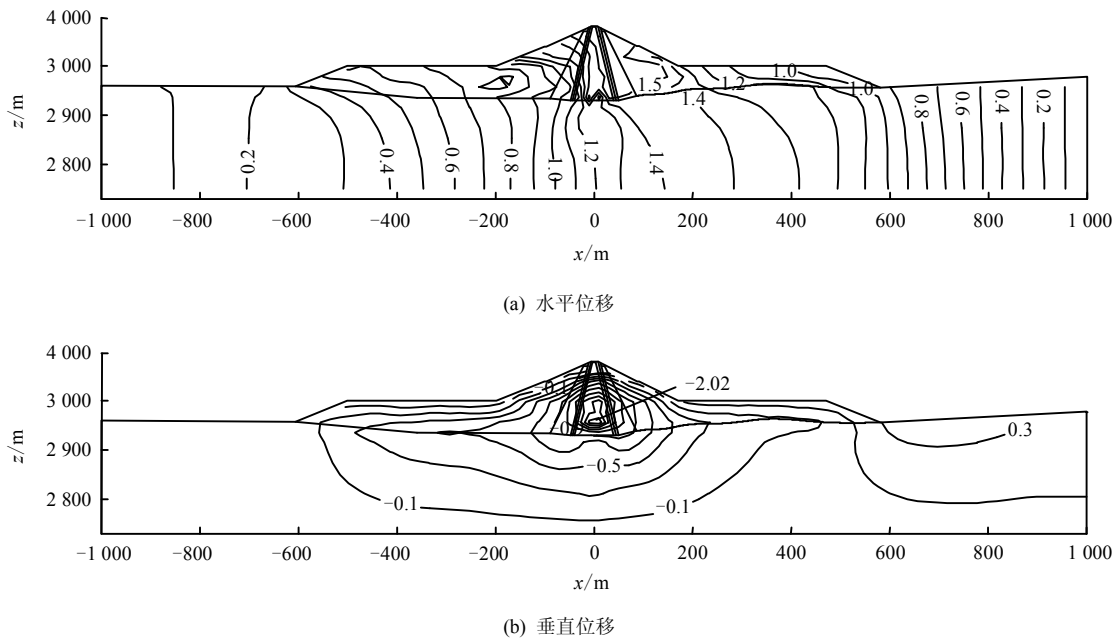


图 3 潜蚀前大坝的位移 (单位: m)  
Fig.3 Displacement distributions of dam before suffusion (unit: m)

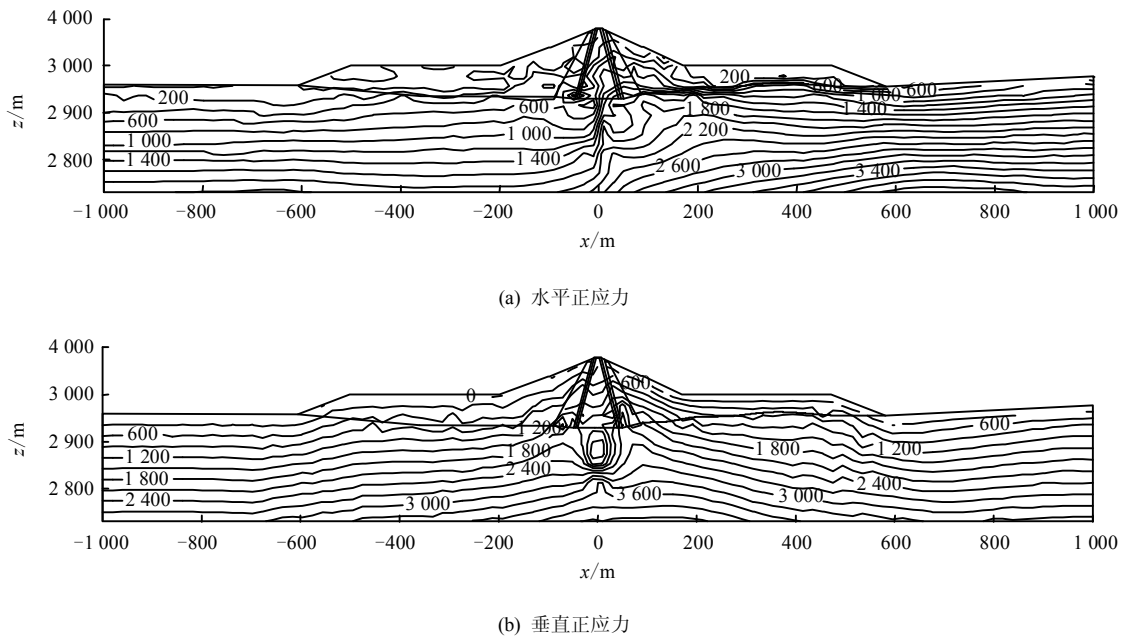


图 4 潜蚀前大坝应力分布 (单位: kPa)  
Fig.4 Stress distributions of dam before suffusion (unit: kPa)

正常高水位潜蚀停止后与潜蚀前坝体和坝基的体积侵蚀率和水头变化量分别见图 5、6。主要侵蚀区域为防渗墙前及防渗墙底部，体积侵蚀率的最大值为 0.132，位于防渗墙底部，达到该坝基砂砾石土的最大可侵蚀颗粒体积比率。侵蚀后与潜蚀前的水头变化量在-2.9 m 至 15.1 m 之间。防渗墙底部及后

部影响较大，防渗墙前影响较小。

渗流场变化机制（采用侵蚀前的变形参数）引起的位移变化见图 7，水平位移增量以偏向上游侧占优势，最大水平位移增量在 0.2 m 左右，位于心墙内底部。垂直位移为上抬变形，最大值为 0.25 m，位于心墙中、下部的下游侧。

图 8 为土体模量衰化引起的位移增量。覆盖层土体中的最大位移变化量小于 0.2 mm。而防渗墙的位移最大，底部沉降增量也仅仅是 2.6 mm，而顶部则减小到 0.1 mm。从变形的规律性来看，水平位移增量防渗墙底以上向防渗墙位移，防渗墙底以下向防渗墙以外位移，垂直位移均为沉降变形，防渗墙墙身底部及其底部的土体下沉最大，往上逐步减小，规律性合理。虽然位移增量的量级小得出乎意料，但仔细分析来看，虽然有大范围的潜蚀发生，但潜蚀量较大的局限于防渗墙底部，由于潜蚀土体构成骨架，土体模量衰化较大的区域又仅仅局限于防渗墙底部的局部，而其他侵蚀部位模量衰化很小，因此，这一个结果在情理之中。

图 9 为潜蚀对坝体坝基正应力的影响。与图 6 对照来看，正应力的减小量大体上等于孔隙水压力

的增量。

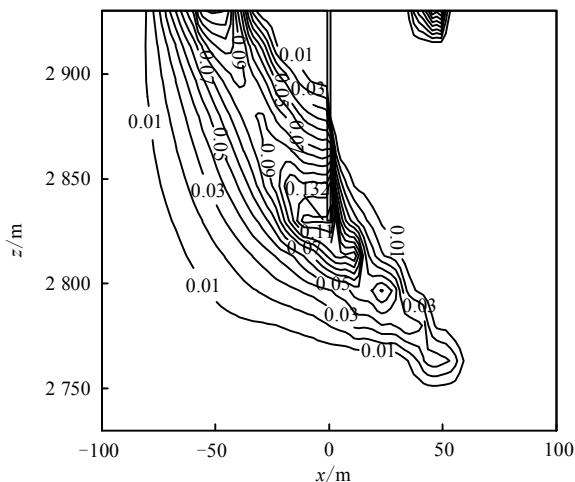


图 5 潜蚀后坝基覆盖层体积侵蚀量  
Fig.5 Erosion volume of dam foundation after suffusion

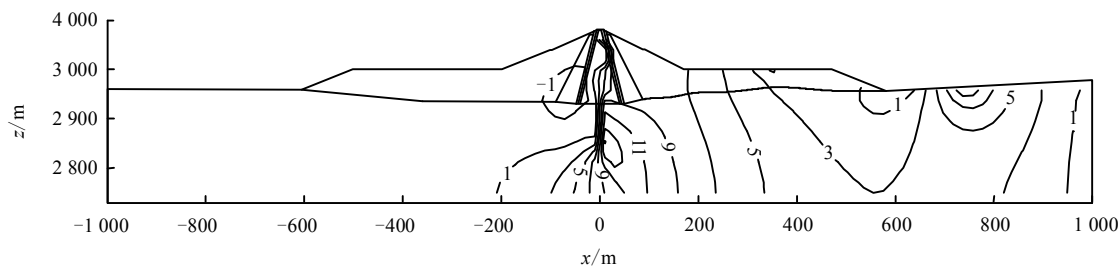
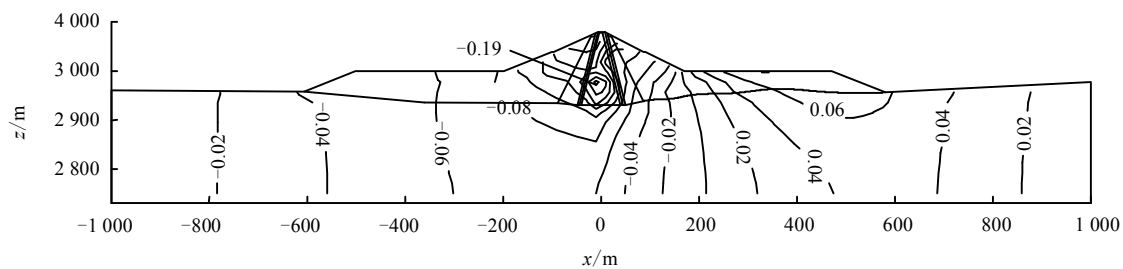
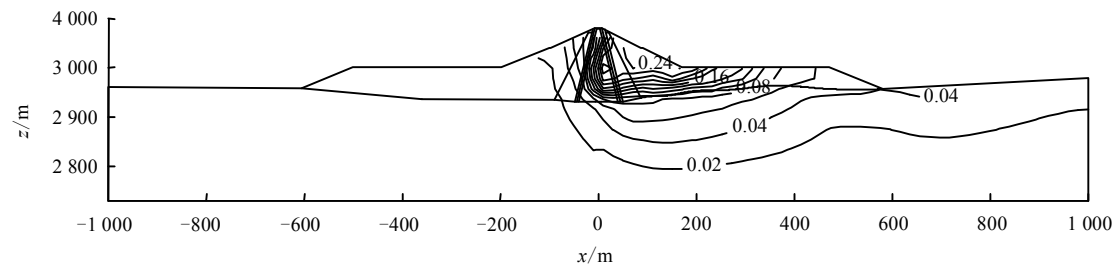


图 6 潜蚀后坝基坝体水头增加量 (单位: m)  
Fig.6 Increment in water head of dam after suffusion (unit: m)



(a) 水平位移增量



(b) 垂直位移增量

图 7 潜蚀渗流场变化引起的位移增量 (单位: m)  
Fig.7 Displacement increment due to changes in flow field (unit: m)

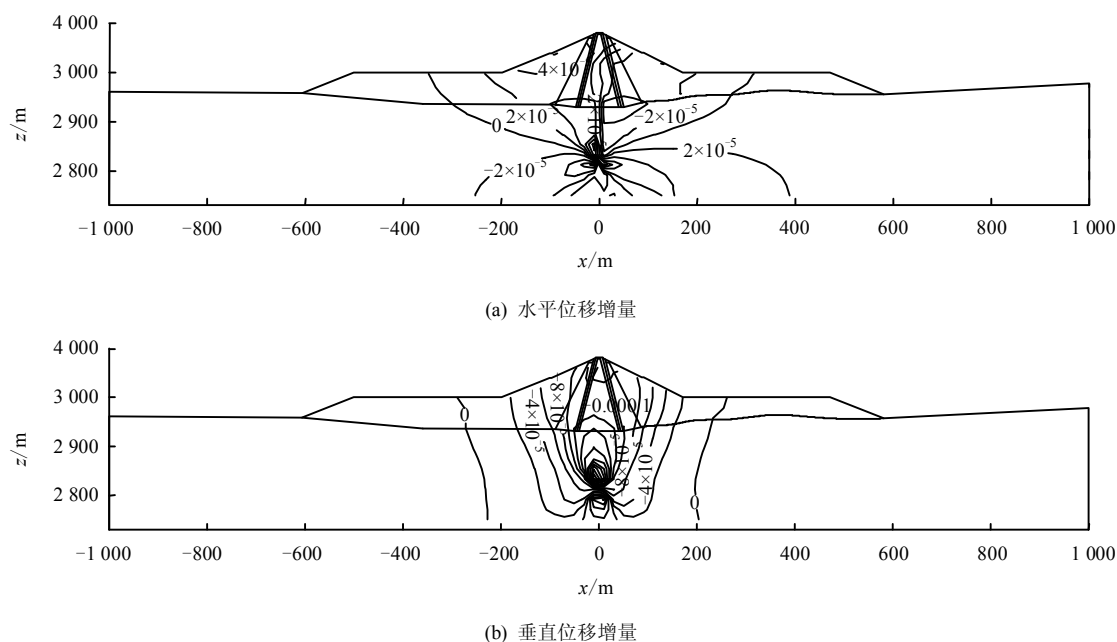


图8 潜蚀土体模量衰化引起的位移增量 (单位: m)

Fig.8 Displacement increment due to modulus degradation of submerged soil (unit: m)

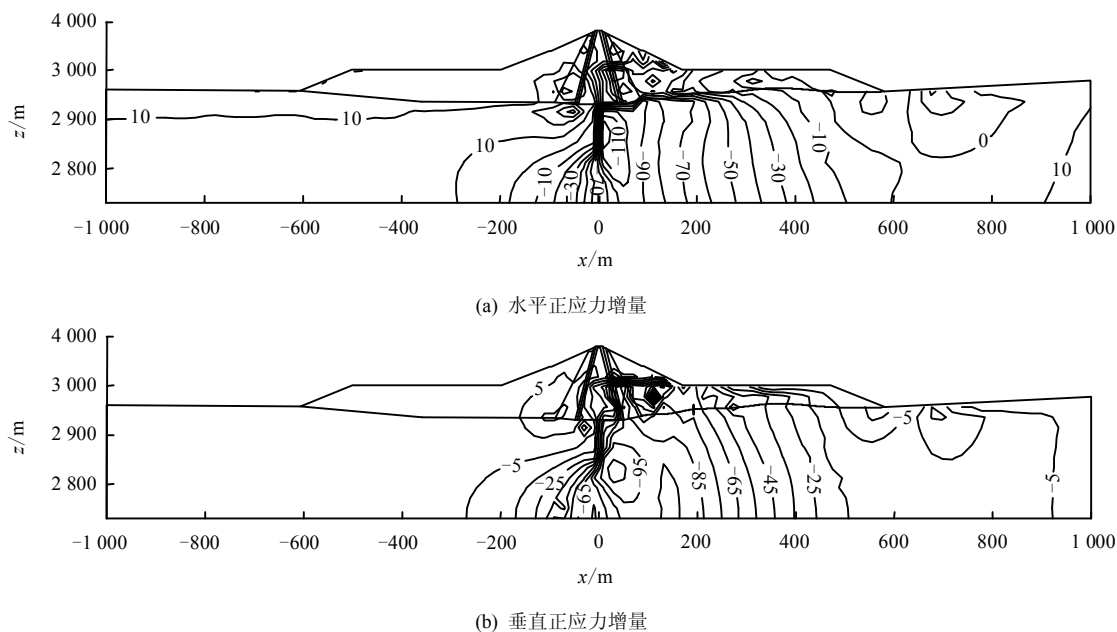


图9 潜蚀渗流场变化后大坝正应力增量 (单位: kPa)

Fig.9 Normal stress increment of dam due to the variation of eroded seepage field

## 6 结论

本文基于作者将发表的另文所述的潜蚀的有限元方法与对某工程拟定的计算条件所得的潜蚀计算结果,利用文献[8]中描述包含砂砾石土细颗粒流失量在内的本构模型及其参数,提出了潜蚀对坝基、坝体应力变形影响的有限元方法,并计算分析了典型坝潜蚀侵蚀后坝体、坝基的位移和应力增量。得出以下结论:

(1) 深厚覆盖层悬挂式防渗墙坝基发生内部侵蚀后,渗流场的变化和土体强度与变形模量的衰化将导致坝基与坝体的变形和应力调整;

(2) 在本文的侵蚀情况下,内部侵蚀导致的渗流场改变产生的坝体应力变形远超过砂砾石模量衰化引起的应力变形;

(3) 本文的情况下,侵蚀对坝体和坝基的应力、变形造成一定的影响,但并未显著降低坝体和坝基的安全性。



## 参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice (third edition)[M]. New York, Chichester, Brisbane, Toronto Singapore: A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [2] 周建平, 陈观福. 深厚覆盖层坝基防渗处理及混凝土防渗墙设计[C]//2004水力发电国际研讨会论文集(上册). 宜昌: 中国水力发电工程学会, 2004.  
ZHOU Jian-ping, CHEN Guan-fu. Seepage prevention treatment of deep dam foundation and design of concrete cut-off wall[C]//Proceedings of International Symposium on Hydropower. Yichang: China Society for Hydropower Engineering, 2004.
- [3] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. *Geotechnique*, 1994, 44(3): 449—460.
- [4] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界比降试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊 1): 73—78.  
LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp. 1): 73—78.
- [5] 张刚, 周健, 姚志雄. 堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 2007(6): 83—86.  
ZHANG Gang, ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC<sup>2D</sup>[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, (6): 83—86.
- [6] WU M. A finite-element algorithm for modeling variably saturated flows[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3—4): 315—323.
- [7] WU Meng-xi, YANG Lian-zhi, YU Ting. Simulation procedure of unconfined seepage in a heterogeneous field[J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, 56(6): 1139—1147.
- [8] 吴梦喜, 叶发明, 张琦. 细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(6): 1550—1556.  
WU Meng-xi, YE Fa-ming, ZHANG Qi. Effect of fine grain loss on the stress-strain relationship of sand and gravel soils[J]. *Soil and Rock Mechanics*, 2017, 38(6): 1550—1556.

## 2017 第五届中国（上海）地下空间开发大会

**会议名称:** 2017 第五届中国（上海）地下空间开发大会

**会议时间:** 2017-11-01

**会议地点:** 上海市

**联系人:** 王钦; **联系电话:** 021-51757707; **电子邮件:** xiang.wang@wintimechina.com

**会议主题:** 地下空间与城市发展

**组织机构:**

**指导单位:** 上海市住房和城乡建设管理委员会; **主办单位:** 上海市土木工程学会、同济大学土木工程学院、上海市民防协会

**协办单位:** 上海世界城市日事务协调中心; **承办单位:** 上海闻鼎信息科技有限公司

**官方网站:** www.ifuschina.com

## 大会主旨报告

城市地下空间产权及方针政策解读; 中国城市地下空间开发机遇与挑战; 地下空间统一规划、设计、建设与管理; 深层地下空间开发; 智慧地下空间建设探索; 地下物流发展机遇与重点; BIM 技术在地下空间开发中的综合应用; 地下空间人防工程信息化; 地下空间绿色开发与可持续发展; 地下工程新技术、新工艺、新机械与新材料; 城市地下空间开发建设与管理; 地下综合管廊与地下空间互联互通; 地铁车站与地下综合体一体化建设; 地下空间商业地产开发与地下停车库技术; 城市地下空间智慧防灾; 地下空间既有结构的改扩建与生态修复; 国内外地下空间重大工程项目案例分享。

摘自 上海市土木工程学会