

# 大型地下涵洞三维渗流场有限元分析

陈海宽<sup>1</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 孟 颖<sup>2</sup>, 程正飞<sup>2\*</sup>

(1. 淮安市水利工程建设管理服务中心, 江苏 淮安 223000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:**因工程规模庞大、结构复杂以及运行条件影响因素多等特点,大型地下涵洞渗流场分布难以预测,因而对其开展渗流场有限元分析具有重要意义。以六塘河地下涵洞为例,建立较为精细的三维整体计算模型,采用有限元渗流模型对其接缝止水完好和出现不同程度透水情况下的渗流场分别进行了数值模拟,并重点分析了接缝止水防渗性能改变对渗流场的影响。结果表明:当接缝止水透水性增大时,六塘河地下涵洞渗流性态发生明显改变;当接缝止水达到强透水时,渗流量接近接缝完好时的3倍,接缝处最大水力坡降达到3.82,易引起渗透破坏,影响工程安全运行。

**关键词:**地下涵洞; 三维渗流场; 有限元分析; 敏感性分析; 接缝止水

**中图分类号:**TV672;TV139.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2020)12-0056-05

## Finite element analysis of 3D seepage field in large underground culvert

CHEN Haikuan<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, MENG Ying<sup>2</sup>, CHENG Zhengfei<sup>2\*</sup>

(1. Huai'an Water Conservancy Construction Management Service Center, Huai'an 223000, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** It is difficult to predict the distribution of seepage field in large underground culverts due to the large scale, complex structure and many influencing factors of operation conditions, so it is of great significance to carry out finite element analysis of seepage field in large underground culverts. Taking the underground culvert of Liutang River as an example, a more detailed three-dimensional integral calculation model was established. The finite element seepage model was used to numerically simulate the seepage field under conditions of good joint water-stop and different degrees of permeability, and the influence of changes in anti-seepage performance of joint water-stop on the seepage field was emphatically analyzed. The results showed that the seepage behavior of the underground culvert of Liutang River changed obviously when the joint water-stop permeability increased. When the joint water-stop reached strong permeability, the seepage flow was close to 3 times of good joint water-stop, and the maximum hydraulic gradient at the joint reached 3.82, which was easy to cause seepage damage and affected the safe operation of the project.

**Key words:** underground culvert; 3D seepage field; finite element analysis; sensitivity analysis; joint water-stop

收稿日期:2020-07-02

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2018YFC1508603);国家自然科学基金面上项目(51679151);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y718007, Y719006)

**作者简介:**陈海宽(1969—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设与管理工作。E-mail: 2577480366@qq.com

**通信作者:**程正飞(1988—),男,博士,主要从事水工渗流分析与控制研究工作。E-mail: 552011512@qq.com

六塘河地下涵洞于 1959 年建成, 上洞首位于淮安市淮阴区西宋集镇, 下洞首位于徐溜镇境内。工程按高低水分开排涝设计, 排高水位的涵洞为 3 孔(高 3 孔), 设计流量为  $67 \text{ m}^3/\text{s}$ , 担负淮泗河涝水的排泄任务; 排低水位的涵洞为 9 孔(低 9 孔), 设计流量为  $156 \text{ m}^3/\text{s}$ , 担负渠西河涝水排泄任务。地涵洞身总宽  $59.26 \text{ m}$ , 全长  $500.6 \text{ m}$ , 共 12 孔, 单孔净宽  $3.4 \text{ m}$ , 3 孔 1 联; 涵洞每孔共 34 节。

渗流是影响六塘河地涵安全运行的重要因素<sup>[1-2]</sup>。六塘河地涵规模庞大, 并且穿过淮沭河河床, 分别有淮泗河和跃进河流经六塘河地涵, 洞身相当于受到 3 条河流形成的多向渗流场作用, 运行工况十分复杂; 此外, 根据检测结果显示, 洞身分缝处止水存在隐患。由于地质条件和工程结构的复杂性以及渗流的隐蔽性, 使得六塘河地涵渗流场分布极其复杂, 难以采用监测手段全面掌握其真实渗流性态<sup>[3-4]</sup>。

为真实反映六塘河地涵洞身及其周围土体渗流性态, 本文建立了较为精细的六塘河地下涵洞三维整体计算模型, 采用有限元渗流模型分别对其接缝止水完好和出现不同程度透水情况下的渗流场进行数值模拟, 并重点分析接缝止水防渗性能改变对渗流场的影响, 以期工程的渗流安全评价与控制提供科学依据。

## 1 有限元渗流模型

渗流为低雷诺数层流运动时, 符合达西线性渗透定律<sup>[5]</sup>, 即水的流速在数值上与其水力坡度成正比, 其数学表达式为

$$v = kJ \quad (1)$$

式中,  $v$  为(平均)渗流速度;  $k$  为介质的渗透系数;  $J$  为水力坡度。

在实际的地下水流中, 水力坡度往往是各处不同的<sup>[6]</sup>, 此时达西定律的一般性表达式为

$$v = -k \frac{dH}{ds} \quad (2)$$

式中,  $-\frac{dH}{ds}$  为水力坡降。

在多孔岩土介质中, 渗流的连续性方程写成张量形式表示为:

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) + S = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n S_w) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为水的密度;  $v_i$  为达西流速;  $n$  为岩土介质孔隙率;  $S$  为汇源项。

在非饱和渗流中, 非饱和渗流问题的连续性方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = -\frac{\partial}{\partial t}(\rho n S_w) + S \quad (4)$$

式中:  $v_x, v_y, v_z$  分别为非饱和渗流场中达西流速在  $x, y, z$  3 个方向上的分量;  $S_w$  为饱和度,  $0 \leq S_w \leq 1$ 。

饱和土体中水的流动常用达西定律来表达, 达西定律同样也适用于非饱和土体中水的流动, 然而, 在非饱和土体中渗透系数一般不能假定为常数, 相反, 渗透系数的变化很大, 是非饱和土孔隙比和含水量活基质吸力的函数<sup>[7-8]</sup>, 在非饱和渗流中达西定律的表达式为:

$$v_i = -k_{ij} k_r(\theta) \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

式中:  $k_{ij}$  为饱和渗透系数张量;  $k_r$  为非饱和渗透系数相对于饱和渗透系数  $k_s$  的比值, 是饱和度或压力水头的函数。在非饱和区,  $0 \leq k_r \leq 1$ , 在饱和区,  $k_r = 1$ ;  $\theta$  为岩土介质的体积含水量  $\theta = n S_w$ ;  $H$  为总水头,  $H = h + z$ ,  $h$  为压力水头,  $z$  为位置水头。

非稳定渗流的饱和-非饱和微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{ij} k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] + S = (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中:  $C$  为容水度,  $C = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ , 在饱和区为 0;  $\beta$  为水的体积压缩系数, 为水的体积压缩模量  $E_w$  的倒数, 即  $\beta = \frac{1}{E_w}$ , 在饱和区  $\beta = 1$ ;  $S_s$  为贮水率, 对非饱和土体来说, 其值为 0, 对饱和土体其值大小为一常数。

非稳定渗流的饱和-非饱和微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_w \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial k_w}{\partial z} + S = (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

式中:  $k_w$  为非饱和渗透系数,  $k_w = k_s k_r$ ,  $k_s$  为饱和时各向同性的渗透系数。

稳定渗流的饱和-非饱和微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{ij} k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] + S = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

## 2 计算模型与计算条件

### 2.1 有限元模型

有限元模型取整个洞身段和一定范围的河床及基础作为研究对象,如图 2 所示。其中基础范围为:顺淮沭河方向,自洞身段向上下游各延伸 100 m;顺洞身长度方向,自洞身进出口断面向上下游各延伸 150 m;竖直方向,从堵洞体底面向下延伸 150 m。共计划分节点数量 225 406 个,单元总数 1 168 777 个。

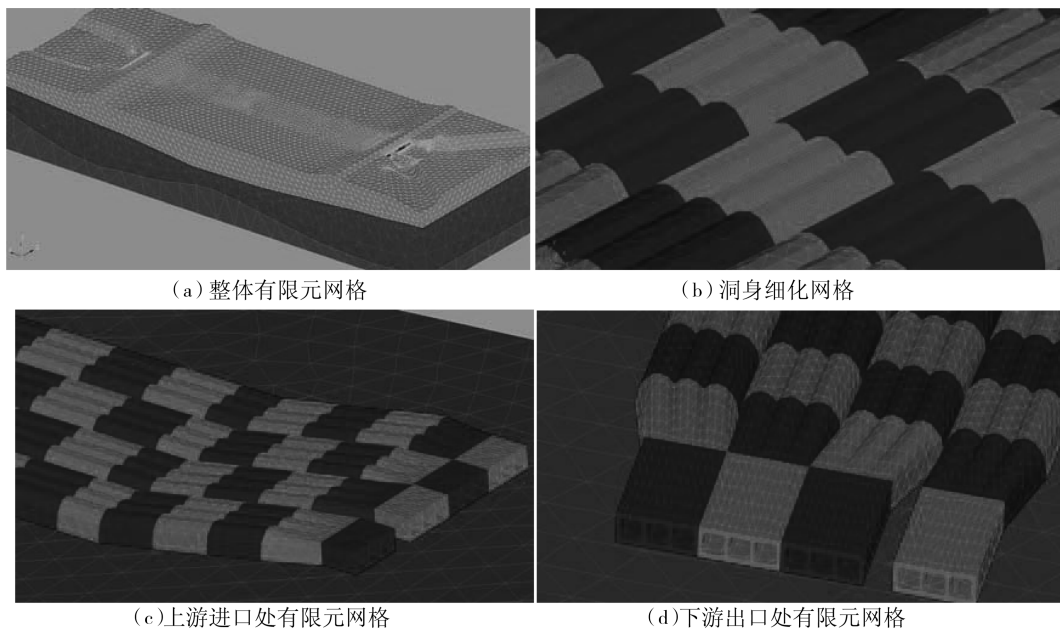


图 2 三维有限元网格图

### 2.2 计算参数

根据本次地质勘察现场确定的场地地基各土层渗透系数选取计算参数,详见表 1。

表 1 场地地基土层渗透系数取值

土层号	土层描述	渗透系数/(cm · s <sup>-1</sup> )
1	填土	$3.68 \times 10^{-4}$
3	重粉质砂壤土	$7.22 \times 10^{-4}$
4	粉质黏土	$5.30 \times 10^{-7}$
5	重粉质壤土	$7.27 \times 10^{-6}$

混凝土和砌石材料渗透系数根据工程经验取为  $1.0 \times 10^{-8}$  cm/s,接缝材料渗透系数根据模拟工况不同确定,详见表 2。

### 2.3 计算工况

根据工程调度运行方式,选定外水内渗工况

(控制工况)为计算工况,运行条件如下:

上游侧 12 孔闸门关闭,下游水位(洞内)为下游钱集闸常水位 3.30 m,上部淮沭河行洪  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  流量水位 13.44 m。

考虑涵洞接缝不透水、细缝弱透水、弱透水、中等透水、强透水等 5 种条件,共计算 5 个计算工况,如表 2 所示。

### 2.4 渗流场边界条件

定解条件包括初始条件和边界条件。对于饱和和非饱和的渗流场,整个渗流区域可以分为饱和

区域和非饱和区域;边界条件包括水头边界、已知流量边界和渗出面边界。因为整体考虑饱和-非饱和的渗流问题,无需将自由面作为一种流量补给边界处理<sup>[9]</sup>。

初始条件是坐标的函数,可以写成:

$$h(x, y, z, t_0) = h_0(x, y, z, t_0) \quad (9)$$

边界条件包括流量边界和水头边界,可以写成:

$$h(x, y, z, t) = h_1(x, y, z, t), (x, y, z) \in S_1 \quad (10)$$

$$-\left[k_{ij}k_r(h)\frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{ij}k_r(h)\right]n_i = q_n, \quad (x, y, z) \in S_2 \quad (11)$$

$$-\left[k_{ij}k_r(h)\frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{ij}k_r(h)\right]n_i \geq 0 \quad \text{且 } h(x, y, z, t) = 0, (x, y, z) \in S_3 \quad (12)$$

表 2 渗流有限元分析计算工况

工况	水位组合	接缝透水性	接缝计算宽度/cm	接缝渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
外水 内渗	考虑上游侧 12 孔闸门关闭,下游水位(洞内)为下游钱集闸常水位 3.30 m,上部淮沭河行洪 4 000 $\text{m}^3/\text{s}$ 流量水位 13.44 m	不透水	0	0
		细缝弱透水	1	$1 \times 10^{-6}$
		弱透水	2	$1 \times 10^{-6}$
		中等透水	2	$1 \times 10^{-5}$
		强透水	2	$1 \times 10^{-4}$

式中: $S_1$  为水头分布规律已知的边界; $S_2$  为流量情况已知的边界; $q_n$  为法向流量; $n_i$  为边界的单位外法向的方向余弦; $S_3$  为饱和渗出面边界。

3 结果分析

3.1 渗流场分析

3.1.1 接缝完好情况

图 3 为接缝完好情况下涵洞水头分布云图。由图 3 可知,自涵洞进口至涵洞出口,水头分布呈递减趋势,并且分别与上游水位 13.44 m 和下游水位 3.30 m 相近。

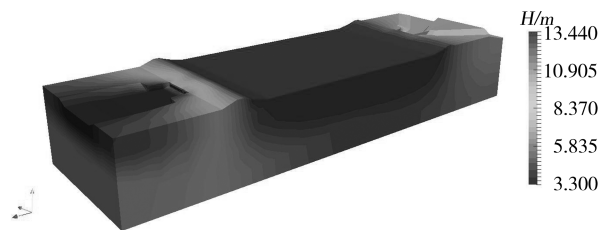


图 3 接缝完好情况下涵洞水头分布云图

图 4 为接缝完好情况下涵洞内部水力坡降云图。由图 4 可知,最大水力坡降为 0.587,出现在涵洞上游进口处。

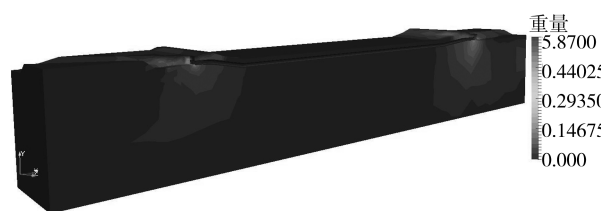


图 4 接缝完好情况下涵洞内部水力坡降云图

图 5 为接缝完好情况下涵洞流线图。由图 5 可知,大部分入渗流量汇集到地涵下游出口护坦,少数流线从上游低 6 孔逸出。

3.1.2 接缝透水情况

图 6 为接缝强透水情况下涵洞水头分布云图。

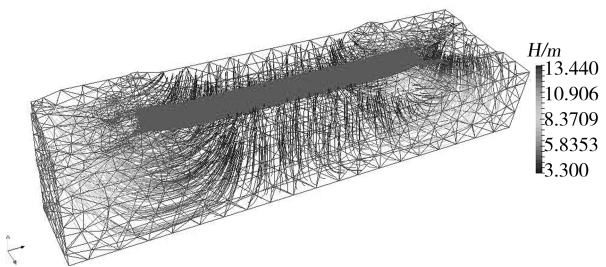


图 5 接缝完好情况下涵洞流线图

由图 6 可知,接缝强透水情况下水头分布与接缝完好时分布规律相近,上游最高水头 13.44 m,下游最低水头 3.30 m。

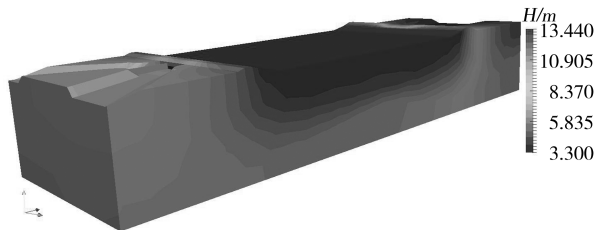


图 6 接缝强透水情况下涵洞水头云图

图 7 为接缝强透水情况下涵洞水力坡降云图。由图 7 可知,接缝透水情况下涵洞上方水力坡降较大,顺缝向呈条形分布,最大值约为 3.82。

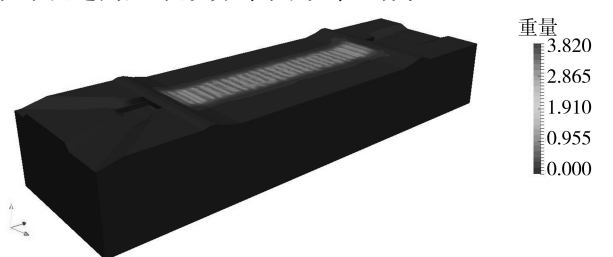


图 7 接缝强透水情况下涵洞水力坡降云图

图 8 为接缝强透水情况下涵洞流线图。由图 8 可知,渗流场流线主要分为 3 类:①从淮沭河底渗入,从地涵进口河底逸出;②从淮沭河底渗入,从地涵出口河底逸出;③从淮沭河底渗入,从洞身接缝

逸出。

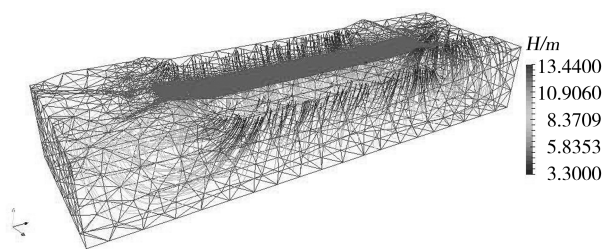


图 8 接缝强透水情况下涵洞流线图

### 3.2 接缝止水防渗性能敏感性分析

接缝不透水、细缝弱透水、弱透水、中等透水、强透水等 5 种涵洞接缝状态下的渗流量和水力坡降计算结果见表 3~4。

表 3 各情况下渗流量计算结果

工况	不透水	细缝弱透水	弱透水	中透水	强透水
渗流量( $\text{m}^3/\text{d}$ )	804	856	1382	1512	3214

表 4 各情况下水力坡降计算结果

工况	不透水	细缝弱透水	弱透水	中透水	强透水
水力坡降	0.587	1.292	1.795	2.701	3.82

由计算结果可知,接缝止水完好时,六塘河地下涵洞渗流场类似于一般堤防工程,渗流从淮沭河河床进入,自两侧堤后连接段逸出。当接缝止水透水性增大时,涵洞渗流性态发生明显改变。当接缝止水达到强透水时,渗流量为接缝完好情况的 3 倍左右,接缝上方局部水力坡降计算值较大,最大值达到 3.82。

六塘河地下涵洞经多年运行,洞身局部接缝止水因材料老化已经失效,易引起接缝渗漏,渗径长度大大缩短,渗流量大幅增加,构成渗流安全隐患,影响工程安全运行。

## 4 结 论

本文对六塘河地下涵洞的复杂渗流场进行了三维有限元分析,评价了接缝止水防渗性能改变对渗流场的影响,结论如下:

(1) 接缝止水完好时,洞身及其周围土体渗流性态正常。

(2) 随着接缝止水透水性增大,涵洞渗流性态逐渐变差;当接缝止水达到强透水时,渗流量接近接缝完好时的 3 倍,接缝处最大水力坡降达到 3.82,易引起渗透破坏。

(3) 六塘河地涵局部接缝止水已接近强透水状态,存在渗流安全隐患。

### 参考文献:

- [1] 马平均,谷换玲. 从古运河枢纽谈大型输水涵洞混凝土施工裂缝防止[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5 (B6):99-101.
- [2] 邓玉华,王红星,陈伯进. 通江涵洞渗漏隐患的处理技术综述[J]. 江苏水利, 2014(7):26-27.
- [3] 张立新,韩仲凯,杨令强. 均质土石坝放水涵洞渗流与稳定分析[J]. 山东水利, 2017(10):42-44.
- [4] 李爱华. 沭阳闸柴米河地下涵洞漏水原因分析及对策探讨[J]. 江苏水利, 2002(12):32-33.
- [5] 张兴胜,宋丽娟,董金玉,等. 土坝渗流侵蚀机制及有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(5):173-180.
- [6] 李远东. 渗流有限元数值计算及其在基坑工程中的应用[D]. 烟台:烟台大学, 2017.
- [7] 朱浩,谭志国,朱春光,等. 隧道穿越段长江堤防渗流原因分析及消险加固方案[J]. 江苏水利, 2018, 258(10):32-37.
- [8] 张丙印,朱京义,王昆泰. 非饱和土水气两相渗流有限元数值模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6):701-705.
- [9] 何佳欢,许增光,柴军瑞,等. 某地下水库在不同降雨条件下非稳定渗流分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3):56-66.