

# 土体渗流-切向水流相互作用机理分析

谢立全, 刘曙光

(同济大学 水利工程系, 上海 200092)

**摘要:** 在切向水流-土体渗流相互作用试验基础上, 结合 Fluent 软件数值模拟, 对比验证和分析了切向水流-土体渗流相互作用规律和内在机理. 结果表明, 数值模拟与试验结果吻合良好, 切向水流对土体渗流的影响明显; 切向水流条件不变时, 渗流通道出口的压力场与流态随着渗流速度的变化而改变, 且渗流速度越大, 土体透水系数越大.

**关键词:** 渗流; 切向水流; 相互作用; 机理

**中图分类号:** TV 139.16

**文献标识码:** A

恶劣环境条件下的渗流, 到目前为止, 计算方法仍然采用达西定律<sup>[8]</sup>, 均未考虑底部水流的直接影响. 达西定律可描述线性的渗流规律, 渗流边界条件需近似为静水条件, 所以, 用于描述含有切向水流动水边界条件的渗流, 会产生一定的误差<sup>[9]</sup>. 笔者结合试验结果, 应用 Fluent 软件进行数值模拟, 重点分析土体渗流-切向水流相互作用的内在机理.

## Mechanism Analysis of Interactions Between Seepage and Tangential Flow

XIE Liqun, LIU Shuguang

(Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on experimental results and simulations with software Fluent, the interactions between seepage and tangential flow were investigated, and the results of experiments and simulations agreed well. Results show that the flow obviously affects the seepage in the sand soil. For the same tangential flow, the pressure fields and streamlines change with the seepage velocity, and the seepage conductivity increases with the increasing seepage velocity.

**Key words:** seepage; tangential flow; interaction; mechanism

## 1 试验及分析

为研究发生于土体之中的渗流与土体之外的水流耦合关系, 必须设计专门的试验设备. 试验中, 要求土体渗流强度能够连续可调, 切向水流的流速也能多级调节, 以实现土体渗流、切向水流进行单因素研究. 经多方面比较, 将土体试样设计为圆环柱状, 以圆环柱内的管流反映切向水流条件, 以圆环柱内外压力差形成渗流水头, 可方便研究土体渗流-切向水流相互作用问题. 设备原理如图 1. 为达到试验效果, 试验设备应包括两流(渗流和切向水流)作用室、供水池、水流循环管路和循环池等<sup>[9]</sup>.

通常意义上的土体渗流断面平均渗透速度  $v_s$ , 是指在整个断面积上(含土粒骨架所占面积)的平均流速, 为平均意义的假想渗流速度<sup>[8]</sup>. 对于土体渗流-切向水流相互作用试验来说, 该渗流速度可按下式计算<sup>[9]</sup>:

$$v_s = q/2\pi r \quad (1)$$

式中:  $r$  为试验土柱内腔半径, m;  $q$  为稳定渗流强度, 即单位时间内透过单位长度土柱进入内腔的渗水量,  $\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ . 为研究渗流-水流相互作用机理, 有必要采用土孔隙中水的实际平均流速  $v_r$ . 然而, 水在土中沿孔隙流动的实际路径十分复杂,  $v_r$  很

切向水流往往使得渗流复杂多变. 此类现象广泛存在于近海、海洋工程的海床泥沙土体中. 比如, 受强烈潮汐影响的滩岸、受风暴潮影响的海床, 其渗流与床面切向水流相互影响、共同作用于床沙土体, 对床面泥沙输移产生重要影响<sup>[1]</sup>. 对渗流的准确描述, 有助于正确分析海床泥沙中的孔隙水压力累积、消散过程和泥沙液化现象<sup>[2]</sup>, 有效预测与评估海底斜坡稳定<sup>[3]</sup>、滩岸稳定<sup>[4-5]</sup>以及相应泥沙输移<sup>[6-7]</sup>等. 对这些

收稿日期: 2009-04-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大资助项目(2008BAJ08B14); 科技部科技基础性工作专项重点资助项目(2007FY110300-03); 国家自然科学基金资助项目(50979071); 同济大学光华基金资助项目

作者简介: 谢立全(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为近海、海洋岩土工程及深水建筑物安全防护.

E-mail: xie\_liquan@tongji.edu.cn

难确定. 渗流通过土中连通的孔隙来实现,但并不是所有孔隙都参与渗流,因此,计算  $v_r$  时,不仅需要考虑到土体孔隙度  $n$ ,还需要合理设定土体孔隙利用率  $\eta$ ,实际渗透速度近似采用下式计算:

$$v_r = v_s / n\eta \quad (2)$$

式中的  $\eta$  是指直接参与渗流的孔隙比例,与渗流水头、土质类型等因素有关. 利用式(1)、式(2)可获得  $v_r$ ,结合文献[9]的水流流速对渗流的影响曲线,可得渗流-切向水流相互作用关系图(图2). 计算中,根据土的物理性质和试验资料,取  $n = 0.32$ ,并设  $\eta = 45\%$ . 实际应用中,往往通过非吸附性离子示踪渗透试验直接确定  $n\eta$  的大小(即有效孔隙度),再结合  $n$  来确定  $\eta$ . 考虑到圆环状土样的渗流特点,将  $\eta$  设为较低的数值. 图2中,  $V$  为试验土柱内腔的平均水流速度,反映了土体渗流边界的切向水流条件. 相对渗透系数为量纲一的变量. 以相同渗流强度下的低流速切向水流工况的渗透系数为基准,其他各切向水流工况所对应的渗透系数与基准值的比值为相对渗透系数<sup>[9]</sup>.

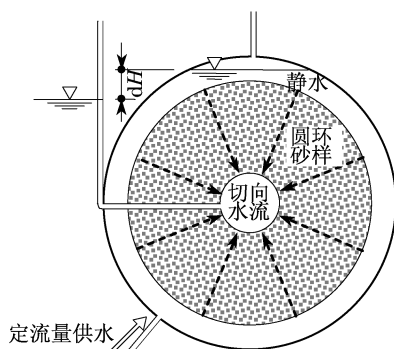


图1 实验原理示意图

Fig.1 Principles of test

图2给出了部分试验结果,即在试验土柱内腔平均水流速度  $V$  分别为  $0.568, 0.600, 0.629 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  三个工况下,其相对渗透系数与实际渗流速度的

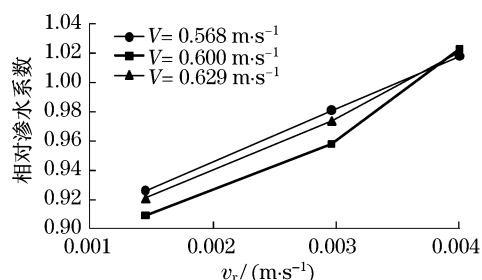


图2 渗流-切向水流相互作用试验结果

Fig.2 Experimental results of the interaction between seepage and tangential flow

相关关系. 比较数据可见,在三个切向流速条件下,其相对渗透系数均呈相同规律性变化,即相对渗透系数随着实际渗流速度的增加而增强. 按传统渗流力学,土体透水能力在两点水压差不变条件下是不会改变的. 因此,在相同切向边界水流条件下,渗流速度对土体渗流性态有着明显影响,其向外渗流-切向水流相互作用情况也将有所变化.

## 2 简化模型及数值模拟

在试验基础上,为充分认识向外渗流-切向水流相互作用机理,利用流体软件 Fluent 对上述试验结果进行数值模拟,并对比、验证与分析,认识渗流-水流相互作用下的流场、流态变化.

### 2.1 简化几何模型

计算几何模型采用二维模型,且针对一根渗水通道进行研究,如图3. 水流通分主管流和微管流,其中主管流反映试验中的内腔切向水流,微管流反映土中渗流. 主管长度为  $3 \text{ m}$ ,直径为  $47 \text{ mm}$ ;微管长度  $0.2 \text{ m}$ ,直径  $1.0 \text{ mm}$ ,与主管  $2 \text{ m}$  位置垂直连通. 主管内水流方向为从左向右,这里只研究微管水流流入主管的情形. 以主管起始端为坐标原点,坐标系如图3.

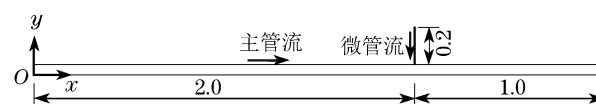


图3 计算简化模型(单位:m)

Fig.3 Geometric model in computation(unit:m)

### 2.2 数值模拟

为反映泥沙颗粒边界形状对切向水流、渗水的影响,在微管出口两侧设置凸向主管内腔的等腰直角三角形边界,突出高度与微管直径相同(如图4). 选用标准  $\kappa-\epsilon$  湍流模型计算.  $\kappa$  为湍动能,  $\epsilon$  为湍能耗散率. 该模型适用范围广,是从实验现象中总结出来的半经验公式.

#### 2.2.1 标准 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型与控制方程

对于二维不可压缩流,引入标准  $\kappa-\epsilon$  湍流模型后,连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(u) + \frac{\partial}{\partial y}(v) = 0 \quad (3)$$

式中:  $u$  为  $x$  方向流速;  $v$  为  $y$  方向流速.

$x$  方向动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}\right) -$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中,  $p$  为水压力.

$y$  方向动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} (uv) + \frac{\partial}{\partial y} (v^2) = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

湍动能方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} (u\kappa) + \frac{\partial}{\partial y} (v\kappa) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right] + G - \epsilon \quad (6)$$

湍能耗散率方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} (u\epsilon) + \frac{\partial}{\partial y} (v\epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + (C_{\epsilon_1} G - C_{\epsilon_2}) \frac{\epsilon}{\kappa} \quad (7)$$

其中

$$v_{\text{eff}} = v + v_t = v + C_\mu \kappa / \epsilon$$

$$G = v_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

式中的各模型参数取常用推荐值:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\epsilon_1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon_2} = 1.92$ ,  $\sigma_\kappa = 1.00$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.30$ .

### 2.2.2 计算区域与网格生成

计算区域包括主管流和微管流. 利用 Fluent 软件中的前处理程序 gambit 生成计算区域几何体, 再划分网格, 得到如图 4 所示的四边形结构网格单元, 图中给出了主管-微管交叉位置的网格.

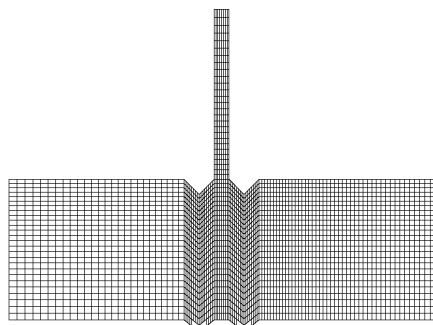


图4 主管-微管交叉位置网格  
Fig.4 Meshes at the intersect of main tube and micro tube

### 2.2.3 边界条件

进口条件: 主管左端均匀来流速度为  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 方向垂直于入口截面; 出口条件: 出口压力为零; 固体壁面条件: 无滑移; 微管入口端边界条件: 压力入口. 计算工况分 7 个: 200, 209, 210, 212, 220,

240, 260 Pa.

## 2.3 计算结果与分析

为研究渗流-水流相互作用, 重点分析微管-主管交叉口的压力场、流态.

### 2.3.1 微管流量与微管入口压力的关系

经过不同工况的数值模拟, 可以获得不同微管入口压力  $p$  作用下的微管二维渗水流量  $q$  (如图 5). 从微管渗水流量变化曲线可见, 入口压力  $p$  越大, 微管渗水流速越大. 当  $p$  较低 (如 200 Pa) 时, 微管渗水方向为负, 即水从主管经微管向外排出. 从微管渗水流量变化曲线还可以获得, 无渗水时的  $p = 206.5 \text{ Pa}$ . 当  $p > 206.5 \text{ Pa}$  时, 会向主管汇入渗水, 流量随着压力的增加而加大.

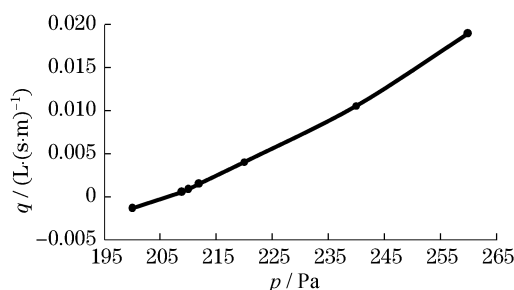


图5 微管入口压力与流量关系

Fig.5 Relation between inlet pressure and flow rate for micro tube

### 2.3.2 微管-主管交叉口压力分布

图 6 为微管-主管交叉口的压力分布, 分别为微管入口为 210, 220, 260 Pa 时的结果. 从图可以看出, 位于交叉口上游侧的压力分布变化很小, 可以忽略; 而位于交叉口下游侧的压力分布变化明显, 但 210 Pa 与 220 Pa 的情况几乎相同, 260 Pa 时的压力分布变化较大, 压力总体上是减小了. 也正是压力场发生了改变, 使得土体渗流不再满足达西公式, 呈非线性. 同时, 压力场的压力分布还不能完全解释土体渗流偏离达西公式的内在机理, 因为入口压力 210 Pa 与 220 Pa 所对应的压力场几乎是相同的.

### 2.3.3 微管-主管交叉口水流的流线

图 7 为微管-主管交叉口的流线图, 分别为微管入口压力 210, 220 和 260 Pa 时的结果. 从图可以看出, 三个工况下的流线均呈现不同的特点: 压力 210 Pa 工况, 微管出口段存在两个漩涡, 一个位于口部 (逆时针方向), 一个位于里面 (顺时针方向), 二者间距约 1 倍微管直径; 压力 220 Pa 工况, 随着压力加大, 渗水流速增大, 将位于微管里面的漩涡“推出”微管, 并与位于口部的漩涡合并后变为一个小漩涡 (逆

时针方向);压力 260 Pa 时,渗水速度更大,从微管渗出的水流与主管流合并后直接流向下游,不产生漩涡.可见,尽管入口压力 210 Pa 与 220 Pa 所对应的

压力场几乎相同,但是流线有着明显不同的特点.这表明,渗流出口处的流态变化也是使得土体渗流偏离达西公式的重要因素之一.

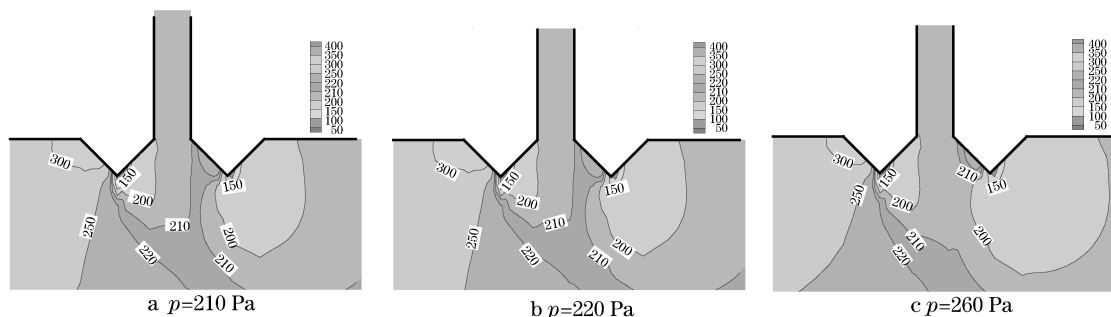


图6 微管-主管交叉口压力分布(单位:Pa)

Fig.6 Pressure distribution at the intersect of main tube and micro tube(unit:Pa)

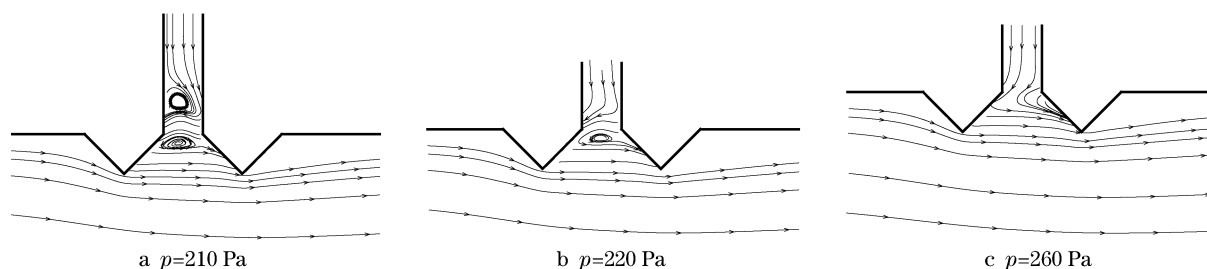


图7 微管-主管交叉口流线

Fig.7 Streamlines at the intersect of main tube and micro tube

#### 2.3.4 微管流的流速与渗水系数关系曲线

若采用达西公式表达微管渗水的流量,则流量与渗水通道面积、渗水系数和渗透比降成正比

$$q = Av_r = Aki \quad (9)$$

$$i = (p - p_0) / \gamma_w l \quad (10)$$

式中: $A$  为微管直径,  $m$ ;  $v_r$  为微管流速;  $i$  为渗透比(水力高度与通道长度  $l$  的比值);  $k$  为渗水系数,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $p_0$  为无渗水发生时的微管入口压力,为 206.5 Pa;  $\gamma_w$  为水的重度,  $kN \cdot m^{-3}$ . 不同微管入口压力工况的微管渗水系数采用式(9)计算,并绘制微管流速与渗水系数的变化关系图(图8). 从图可见,随着微管流速的加大,微管渗水系数不断增加. 这与试验结果(图2)趋势是一致的. 同时,对计算数据进行拟合,可获得二者关系曲线的表达式为

$$k = 0.074 \ln v_r + 0.997 \quad (11)$$

### 3 结论

(1) 土体渗流受切向水流的影响明显,且与土中水的实际渗透速度息息相关.

(2) 切向水流条件不变时,渗流通道出口处的

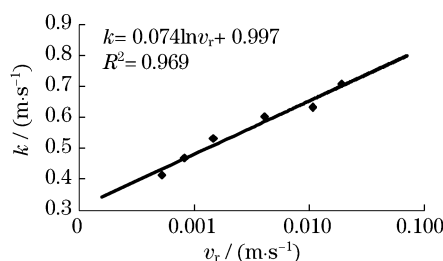


图8 渗水系数与微管流速关系图

Fig.8 Relation between seepage capacity and velocity for micro tube

压力场与流态随着渗流速度的变化而改变. 当渗流速度增加时,渗出水流可将位于渗流通道内及口部的漩涡向外推出,甚至漩涡消失,与切向水流合并后流向下游.

(3) 切向水流条件不变时,渗透比降(或实际渗透速度)越大,则土体渗水系数越大.

本文仅就单个微管的砂粒间隙渗流出口处的微水流结构进行了数值模拟,并与试验结果进行验证,一定程度上反映了渗流-切向水流相互作用机理. 但这与复杂的土体渗流-切向水流相互作用体系尚有一定距离,还需进一步的研究. (下转第 1022 页)