

# 丁坝水流及冲刷

—— 可视化与三维数值模拟

彭 静 著



黄河水利出版社

# 丁坝水流及冲刷

——可视化与三维数值模拟

彭 静 著

黄河水利出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

丁坝水流及冲刷:可视化与三维数值模拟 / 彭静著.  
郑州:黄河水利出版社, 2004.11  
ISBN 7-80621-859-9

I.丁… II.彭… III.丁坝-数值模拟 IV.TV863

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 115034 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真: 0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 mm × 1 168 mm 1 / 32

印张:4.375

字数:121 千字

印数:1—1 000

版次:2004 年 11 月第 1 版

印次:2004 年 11 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-859-9 / TV · 380

定价:15.00 元

# 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 1 概 述                         | (1)  |
| 1.1 丁坝水流特征                    | (1)  |
| 1.2 本书内容                      | (4)  |
| 2 丁坝水流流动的试验研究                 | (6)  |
| 2.1 概述                        | (6)  |
| 2.2 试验装置                      | (6)  |
| 2.3 试验条件                      | (8)  |
| 2.4 水流流动结构                    | (9)  |
| 2.5 小结                        | (22) |
| 3 紊流及其基本方程                    | (24) |
| 3.1 概述                        | (24) |
| 3.2 基本方程及紊流模型                 | (24) |
| 3.3 线性及非线性 $k-\varepsilon$ 模型 | (29) |
| 3.4 边界条件                      | (34) |
| 3.5 小结                        | (35) |
| 4 数值方法                        | (36) |
| 4.1 概述                        | (36) |
| 4.2 有限体积法离散方程                 | (37) |
| 4.3 SIMPLE 算法                 | (42) |
| 4.4 对流项的高精度算法                 | (44) |
| 4.5 小结                        | (50) |
| 5 丁坝定床流动的三维数值分析               | (52) |
| 5.1 概述                        | (52) |
| 5.2 模型验证                      | (53) |
| 5.3 不同紊流模型之间的比较               | (68) |
| 5.4 三维流动结构与发生机制               | (71) |

|     |                  |       |
|-----|------------------|-------|
| 5.5 | 丁坝尺寸对近坝水流流动特征的影响 | (78)  |
| 5.6 | 小结               | (84)  |
| 6   | 丁坝动床流动的三维数值分析    | (86)  |
| 6.1 | 引言               | (86)  |
| 6.2 | $\sigma$ 坐标变换    | (87)  |
| 6.3 | 泥沙输运的模拟          | (99)  |
| 6.4 | 模型验证             | (104) |
| 6.5 | 丁坝局部冲刷特性分析       | (112) |
| 6.6 | 小结               | (116) |
| 7   | 设计丁坝的若干考虑        | (117) |
| 7.1 | 丁坝的水力特性          | (117) |
| 7.2 | 最大冲刷深度           | (120) |
| 7.3 | 小结               | (123) |
| 8   | 结 语              | (125) |
| 8.1 | 丁坝水流流动特征         | (125) |
| 8.2 | 紊流模型及其应用         | (125) |
| 8.3 | 对流项的高精度求解        | (126) |
| 8.4 | 丁坝近体的三维流动结构      | (126) |
| 8.5 | 局部冲刷和淤积          | (126) |
|     | 参考文献             | (127) |

# 1 概 述

## 1.1 丁坝水流特征

丁坝是水利工程中广泛使用的护岸建筑物。丁坝可以保护堤岸免于冲蚀，维持航道水深，保持河道原有形态。近年来，随着对河道生态环境问题的逐渐重视，丁坝也开始用于改善河道的生境条件，增强河道的形态多样性。图 1-1 为实际河道中建造的丁坝。



图 1-1 实际河道中建造的丁坝

设置丁坝的主要作用可以归纳如下：

- (1) 改变水流方向，降低近岸水流流速，保护河岸及河床免于冲刷。
- (2) 保持正常的河宽及水深，维持航道。
- (3) 调整局部冲淤，诱导河滩堆积物，建立新河岸。
- (4) 增强水流及地形的多样性，改善河道的局部生境条件。

丁坝近体水流流态呈强三维紊流特征，其中包含了许多复杂

的流动现象，如分离流、旋转流、曲线剪切层、高紊动强度以及自由表面变化等。图 1-2 为丁坝近体水流流动结构平面示意(Klingeman et al, 1984)。

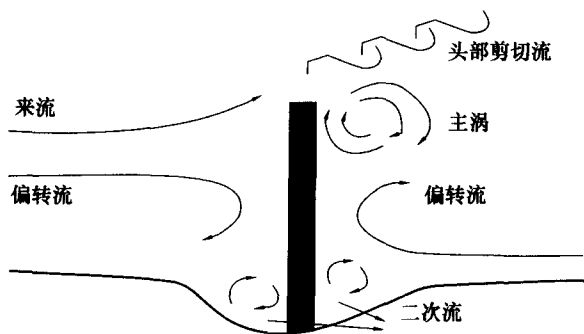


图 1-2 丁坝近体水流的复杂流动形态示意图

丁坝的修建将引起局部河道河床的冲刷和淤积。现场测验表明，丁坝坝头会发生冲刷，而淤积将主要发生在坝后回流区。图 1-3 为某一丁坝附近实测地形等值线图(Klingeman et al, 1984)。

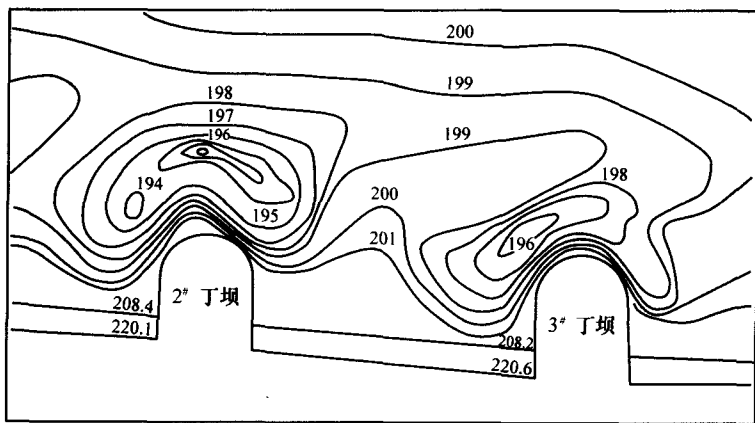


图 1-3 丁坝附近河床地形等值线图

关于丁坝坝头的冲刷深度，目前已有许多研究成果。从丁坝结构设计的角度，丁坝坝头的最大冲刷深度对坝体结构的稳定十

分重要, 坝体基础必须埋设在可能的最大冲刷深度之下, 才能保证丁坝结构的运行安全。

早期关于丁坝的研究主要以试验手段为主。Ahmed (1953) 进行了第一个关于丁坝近体水流流动的试验, 该试验成功记录了丁坝附近水面高度的变化。Garde 等 (1961) 和 Gill (1972) 通过试验, 研究了因丁坝所产生的流动流线缩窄对下游回流区长度和宽度的影响, 从而分析丁坝对水流的扰动现象。Rajaratnam 和 Nawachukwu (1983) 也通过室内试验, 测量了丁坝附近的流速场, 重点分析了回流区长度与丁坝长度的关系。近年来, Muneta、Shimizu (1994)、Fujiwara 等 (1995)、Tominaga 和 Shiba (1996) 陆续进行了淹没丁坝水流流场特性的试验研究, 并开始研究丁坝附近的紊流特性。

随着计算机及数值模拟技术的发展, 采用数值模拟的方法研究丁坝水流流动特性得以迅速发展。从近年的成果来看, Tingsanchali 和 Maheswaran (1990) 应用二维深度平均水流模型和经系数修正的  $k-\epsilon$  模型, 计算了丁坝附近的河床应力分布; Chaudhry 和 Khan (1995) 开发了计算丁坝水流的一、二维模型, 在算法上采用了隐式 ADI 和显式 MacCormack 相结合的模式, 紊流模型采用的是最简单的涡黏系数方法; Mayerle 等 (1995) 应用其三维紊流模型, 在水深方向采用静水压假定, 模拟计算了丁坝附近的流场; 值得一提的还有 Ouillon 和 Dartus (1997) 的工作, 他们采用标准  $k-\epsilon$  模型进行了丁坝水流的三维紊动模拟, 并采用一种假设孔隙介质的方法跟踪移动水面, 替代了原来的水面静水压假定, 从而提高了对丁坝分离流再附着长度的预报精度。

准确预报丁坝近体流场的困难在于丁坝近体水流流动结构的复杂性。丁坝的修建会引起水流流线缩窄及局部水流流动结构的剧烈改变。坝头分离流、坝尾脱离流和坝后回旋流的共同影响, 使丁坝近体水流流态呈强三维紊动特性, 加之局部泥沙冲淤平衡重新调整, 从而引发新的冲淤发展过程, 使丁坝结构体周围水流流动及泥沙输运过程变得十分复杂。就其流动特征而言, 必须采



用三维紊流模型来描述丁坝近体水流流动结构。但要将分离流、回旋流等流动特征以及自由表面和河床地形的变化同时在三维模型中加以考虑,并非一件容易的事情。

本书是作者三年多有关丁坝的试验及数值模拟工作的总结,主要从以下几个方面做了分析:

- (1) 丁坝附近流场的可视化试验研究。
- (2) 丁坝近体水流流动的三维数值模拟方法。
- (3) 丁坝近体河床冲淤变化数值模拟方法。
- (4) 丁坝近体水流流动结构,包括平均流动特征、紊流特征及冲淤变化分析。
- (5) 从技术支撑丁坝结构设计的角度,分析丁坝的主要设计参数与流场特性之间的关系。

## 1.2 本书内容

本书包括丁坝试验研究和数值模拟研究两方面的成果,全书共分为 8 章。

第一章,概述,介绍研究背景及全书主要内容。

第二章,丁坝近体水流流动的可视化试验研究。介绍可视化试验的测量方法,应用颜料示踪法及油膜法试验研究了丁坝近体及近床面的回流结构,用点测速仪测量了丁坝附近的三维流场。

第三章,介绍三维紊流模型的控制方程及模型方法,总结了多种紊流模型的主要特点,重点分析了标准  $k-\epsilon$  模型、Zhu-Shih  $k-\epsilon$  模型、Speziale-Thangam 的 RNG 模型、Launder-Kato 的  $k-\epsilon$  模型以及 Shih 等发展的非线性模型对丁坝分离流动的预报特性。

第四章,介绍了三维紊流模型的数值离散方法及其求解。详细介绍了采用有限体积法(FVM)对三维紊流方程的离散过程,其中对对流项的处理采用了改进的 QUICK 模式。离散方程中的速度—压力耦合关系采用经典的 SIMPLE 格式求解,离散后的代数方程组具有系数矩阵三对角特征,可用迭代法求解。

第五章,建立了丁坝附近水流流动模拟的三维紊流模型。用

第二章中试验获取的三维流场数据，进行了数值模型的详细率定和验证计算，应用模型模拟分析了丁坝附近的流场特性。并从三维平均流速、紊动能量、床底剪切应力、水面压力等不同水动力特征方面，对丁坝近体水流流动结构及其发生机制进行了深入分析，同时还研究了水深、丁坝长度、群丁坝之间的间距等参数对水流结构的影响关系。

第六章，建立了丁坝近体河床冲淤变形模拟分析的泥沙模型。将 $\sigma$ 坐标变换技术引入到三维紊流模型中，使模型能模拟动床的冲淤以及自由水面的波动变化，对河床冲淤的泥沙模型用试验数据进行了率定和验证计算。将三维紊流模型与河床冲淤的泥沙模型耦合，模拟分析了动态条件下丁坝附近的冲淤变化过程，获得了丁坝附近的计算河床等高线。

第七章，概述丁坝水流的一般流动特征以及丁坝设计时有关参数与水流特征的关系，重点分析了丁坝长度、群丁坝之间的间距、淹没深度等参数与水流特性之间的关系，同时也简单介绍了近年来丁坝作为一种河流整治的生态工程措施，用于改善鱼类栖息地，提供多样化水流条件的作用。从技术支持丁坝设计和管理角度，还介绍了一些用于估算丁坝坝头冲深的经验和半经验公式，并将这些公式的计算结果与第六章建立的冲淤模型计算结果进行了比较。

第八章，全书内容总结以及对进一步研究的建议。

## 2 丁坝水流流动的试验研究

### 2.1 概述

顺直河道中定床的丁坝绕流运动是一种理想的状态。虽然在 实际河流中不存在这样的理想流动状态,但室内试验时仍采用这样简化的方式,以避免河流复杂形态对测量的影响。试验研究的目的,是为了观测丁坝绕流流态,直观了解绕流流场结构,同时测量近区绕流流场,为建立数学模型提供基本资料。

过去几十年间,研究者陆续开展了关于丁坝绕流运动试验研究。Akikusa 等 (1960) 采用 Pitot 管测量了丁坝断面处的水流流速和流向,其试验水槽宽度 1.5 m,丁坝长度 0.5 m。Muneta 和 Shimizu (1994) 用 Laser-Doppler 流速仪测量了丁坝水槽流动的纵向及横向流速。Tominaga 等 (1994)、Fujiwara 等 (1995)、Tominaga 和 Shiba (1996) 分别采用电子流速仪测量了丁坝近区的三维流速分量和紊动强度,并研究了丁坝不同的布置间距对流场的影响。

通过试验研究,初步揭示了丁坝近体的水流流动形态。根据相应的流动条件,丁坝流可以分为淹没流和非淹没流两种类型。淹没流即水深相对较大,丁坝高度小于水深,丁坝被淹没在水下;非淹没流即水深相对较小,丁坝高度大于水深,丁坝露在水面之上。对于不同的水流流动类型,丁坝的水流流动结构各不相同,尤其是沿水深方向。图 2-1 示意性地表示了丁坝淹没流的基本流动模式。本书重点讨论丁坝水流淹没流动这一类型。

在本章的试验研究中,应用了可视化技术定性观测并定量记录淹没丁坝的近区水流流动情况。同时将丁坝布设为不同的间距,以观测间距变化对流动结构的影响。

### 2.2 试验装置

试验用水槽长 10 m,宽 0.6 m,高 0.3 m,水槽纵向坡度为

1 / 750。图 2-2 为试验水槽装置示意。

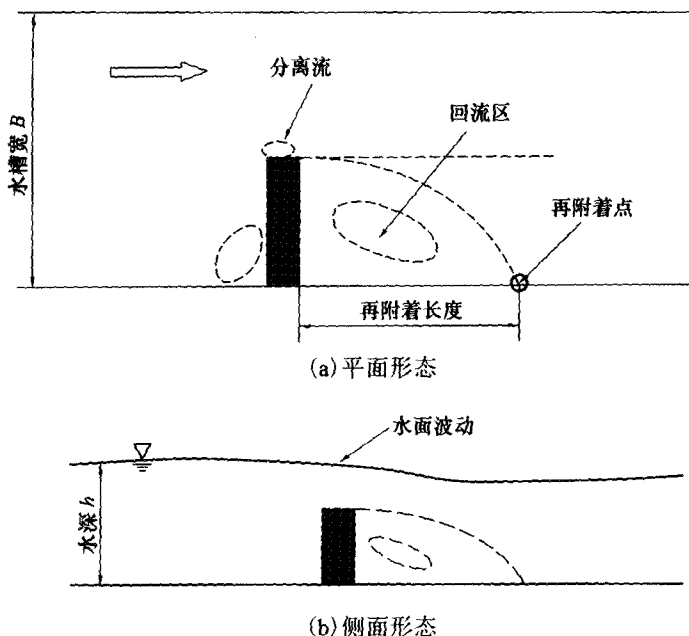


图 2-1 丁坝淹没流的基本流动模式

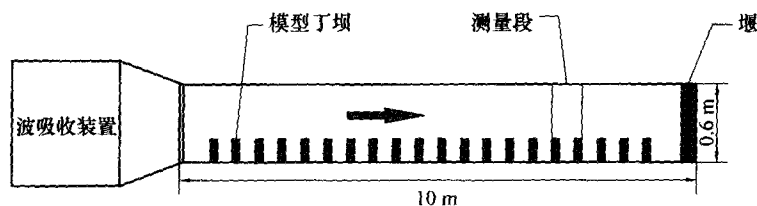


图 2-2 试验水槽

模型丁坝安装在水槽的右侧（沿流动方向）。丁坝尺寸为  $3\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ，此处定义丁坝间距为两个相邻丁坝迎流面之间的距离，如图 2-3 所示，图中坐标系也是后面测量数据分析时所采用的坐标系。试验时丁坝布设的数量需根据试验的具体情况选取，使水流通过足够数量的丁坝之后，在测量段的绕流呈现为

稳定状态。

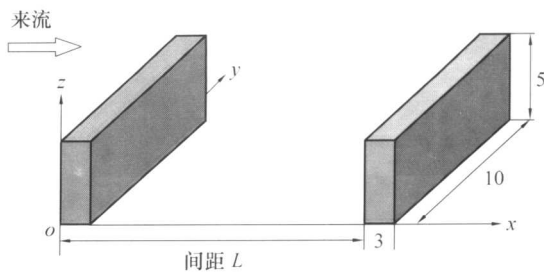


图 2-3 模型丁坝及其间距(单位: cm)

测量区位于水槽的下游段, 该区水槽由透明材料制成, 以保证可视化拍照的需要。该段位于丁坝群绕流后充分发展段, 但还没有受到下游尾流的影响。采用电子流速仪测量三个方向的流速分量, 流速仪探头直径为 4 mm, 长度 18 mm。用 I 型流速仪测量纵向及横向流速分量( $u, v$ ), 用 L 型流速仪测量纵向及垂向方向的流速分量( $u, w$ )。流速仪的取样时间为 0.05 s, 同时用水位计测量水位。

2.3 试验条件

试验安排了三种不同的工况条件, 主要是改变丁坝的间距  $L$ 。三种试验工况具体参数如表 2-1 所示。

表 2-1 试验工况

| 工况   | 水槽流量<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 水深<br>(cm) | 丁坝间距<br>(cm) | 丁坝间距与<br>长度比值 |
|------|-----------------------------------|------------|--------------|---------------|
| 工况-1 | 0.021 3                           | 7.6        | 10           | 1             |
| 工况-2 | 0.021 3                           | 8.2        | 20           | 2             |
| 工况-3 | 0.021 3                           | 8.0        | 40           | 4             |

在水平面上, 测量流速分量的网格点布置如图 2-4 所示, 考虑到流速仪探头的直径为 4 mm, 将两个测量点之间的间距取为 1 cm。沿深度方向, 从 1 cm 到 5 cm, 以  $\Delta z = 1 \text{ cm}$  的垂向间距, 布设 5 层相同的水平网格点。在  $z = 6 \text{ cm}$  的平面上, 丁坝已经被水淹没, 则在丁坝的顶部, 补充 1 cm 间隔的测量点。

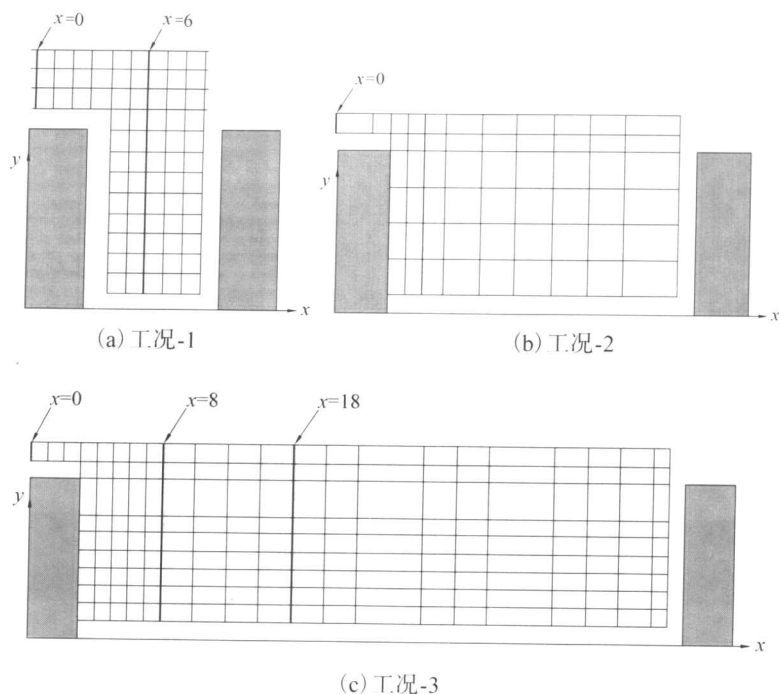


图 2-4 测量网格点的平面布置示意(单位: cm)

除测量流速分量外,还采用颜料示踪及油膜可视化技术,记录并分析了丁坝近体的水流流动结构。

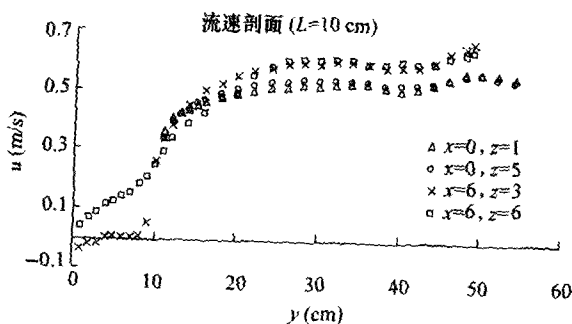
## 2.4 水流流动结构

### 2.4.1 水流平均流速分布

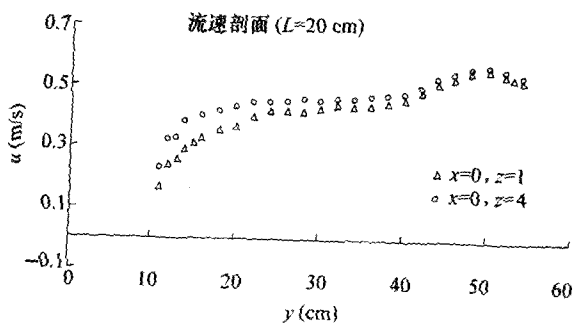
#### 2.4.1.1 水流纵向流速剖面

三种试验工况下,水流流速  $u$  沿横向  $y$  的剖面如图 2-5 所示,图中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的位置如图 2-4 中坐标所示。

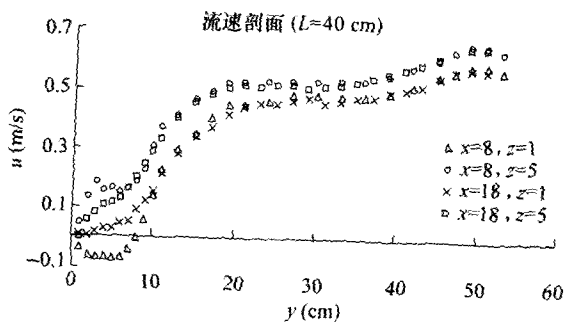
试验结果表明,由于丁坝的干扰,近坝水流沿横断面方向,纵向流速分布发生变化。在丁坝遮挡的区域( $y=0 \sim 10$  cm),纵向流速急剧减小,使得在丁坝的尖端部位(从  $y=10 \sim 20$  cm)成为高流速梯度区域。在水槽中间部位( $y=20 \sim 40$  cm),流速基本保持不变,



(a) 工况-1



(b) 工况-2



(c) 工况-3

图 2-5 纵向流速 ( $u$ ) 剖面

流速剖面形状平缓。在接近水槽的对岸，流速值又有所抬升。这一现象说明，在本试验条件下，丁坝对水流的扰动长度较大，可能已到对岸区域。在丁坝下游侧，测量到明显的反向流，表明该区域内环流的存在。

#### 2.4.1.2 流速矢量

整合网格点上的测量数据，得到水平面及垂直面上的流速矢量图( $x$ - $y$ 平面的  $u$ - $v$  矢量图,  $x$ - $z$  垂直面上的  $u$ - $w$  矢量图)，通过矢量图，分析丁坝附近的分离流和旋转流流态。水平面( $H$ )和垂直面( $V$ )的位置如图 2-6 所示。

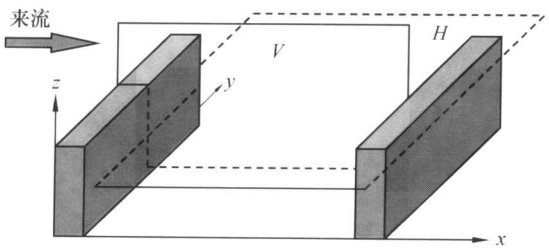


图 2-6 流速矢量的水平面( $H$ )和垂直面( $V$ )的位置示意

图 2-7(a)、图 2-7(b)所示为工况-1 在水平面  $z=1\text{ cm}$  和  $z=3\text{ cm}$  的  $u$ - $v$  流速矢量图。由图可见，在两个丁坝之间的区域，水流流速减缓，出现回流；在丁坝外侧的主流区，水流流速增加，形成在主流和丁坝之间的交界区域的流速剪切层。在不同的水深高度，从  $z=1\text{ cm}$

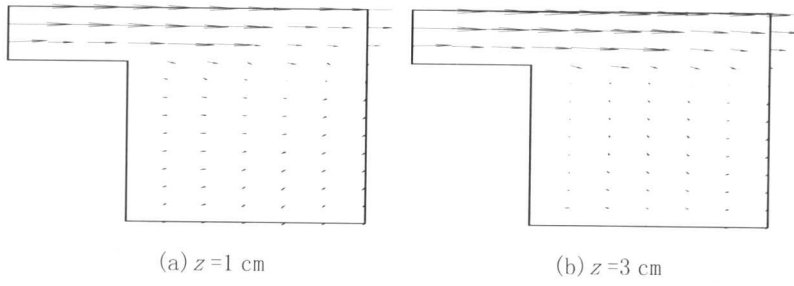


图 2-7 平面流速矢量  $u$ - $v$  分布图 (工况-1)



到  $z = 3 \text{ cm}$ ，平面流速矢量的变化并不十分明显。在坝头点，分离流也不十分明显。在  $z = 3 \text{ cm}$  平面上可以观测到两个丁坝之间有一个较弱的旋转流。

垂直面上，工况-1  $u$ - $w$  流速矢量 ( $y = 1 \text{ cm}$ 、 $y = 5 \text{ cm}$  和  $y = 9 \text{ cm}$ ) 如图 2-8 所示。图中所记录的旋转流形态已经比较明显，在靠近丁坝的垂直面上 ( $y = 1 \text{ cm}$ )，丁坝间水流流动为完全旋转流形式，流动分离之后的再附着点不在床底，而在下游丁坝的迎流面上。在  $y = 5 \text{ cm}$  垂直面上，旋转流的区域有所减小，旋转流的中心点向上游侧移动。在  $y = 9 \text{ cm}$  的垂直面上，旋转流流态基本消失，坝头的分离流也比较弱。

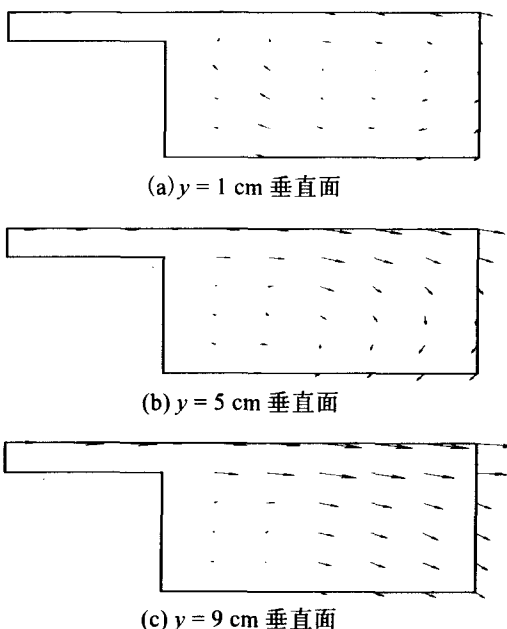


图 2-8 垂直面上的  $u$ - $w$  流速矢量图 (工况-1)

图 2-9、图 2-10 为工况-2 的流速矢量分布图。在平面图和垂直面图上都可以看到明显的分离流流态。和工况-1 比较，工况-2 条件下，坝间区域的流速量级有所增加，表明丁坝间距增加之后，群丁坝对水流流动的阻碍作用相对减弱。单一丁坝后的旋转流也