

丁坝紊动场及其工程意义*

吴 楨 样 吴 建 平

(郑州工学院水利及环境工程系)

摘 要: 丁坝诱发的紊动场水流明显不同于一般水流, 大尺度涡发展剧烈并存在一强冲刷带, 制约着丁坝水流分区和回流问题研究。坝头涡的近距离效应受坝头几何型体的影响, 表现为两种不同的冲坑形态, 对坝头结构、丁坝回流和坝距确定的研究产生重要影响。

关键词: 丁坝, 紊动, 强冲刷带, 回流

中国分类号: TV135

丁坝水流问题的研究是河流力学的基本问题。我国各主要河流上均建有大量不同类别的丁坝。以黄河为例, 仅下游河段丁坝即达数千条之多, 对它的研究颇具意义。丁坝改变了其周围的水流结构, 出现新的流速场与紊动场, 产生新的冲淤问题, 必须认真对待。据资料记载, 长江下游丁坝坝头冲深达 40~50 米, 黄河下游丁坝坝头冲深也有“够不够, 三丈六”的说法。对防洪护岸丁坝来说, 一旦工程出险, 后果将十分严重。不少学者致力于丁坝问题的研究取得不少成果, 然而, 由于丁坝问题的复杂性, 目前的研究深度和认识水平还很不够。本文不可能涉及丁坝的所有问题, 而是仅就丁坝附近的流速场与紊动场以及丁坝回流与护岸效果等问题进行简要的论述。致于丁坝坝头的冲刷和最优体型的选择问题留待另文论述。

1 水流分区及冲坑新概念

根据丁坝定床试验所观察到的丁坝绕流状况, 按照水流的平均特征, 一般文献中将其分成以下七区: 上游壅水区 (A)、主流压缩区 (B)、主流扩散区 (C)、水流恢复区 (D)、上游角涡区 (E)、下游角涡区 (F)、下游回流区 (G), 如图 1 所示。以往对丁坝回流的研究大多集中在 G 区, 即以经验的或半经验的方法, 力图准确地提出一个满意的回流长度计算公式。

然而, 若注意到了丁坝对水流作用所产生的两种影响: 对主流时均运动的影响和坝头涡系的扩散传播对紊动场的影响, 上述分区方法就显得不够全面, 它仅考虑了前者而忽视了后者, 即没有考虑坝头涡在其传播过程中对水流的重大影响。

* 收稿日期: 1994-01-18

本文作者以宽 1.5 米，长 20m 的矩形水槽进行了丁坝定床水流的大量试验。以加沙和施放示踪剂的方法对水流结构进行观察，发现丁坝坝头诱发的剪切涡带在其向下游传播过程中与时均主流叠加，构成复杂的水流结构。伴随大尺度涡的发展，形成明显的摆动水流，其结构已完全不同于未扰动的主流。在此涡系扩散区中存在一条狭长的高能量强冲刷带向下游延伸，该强冲刷带是不封闭的（如图 2 图 3 所示）。大尺度涡运动的结果，使得通常所说的时均回流区的尺度具有明显的随机性。

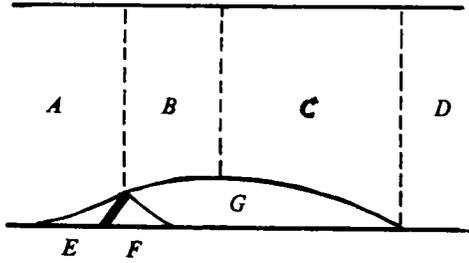


图1 流动分区

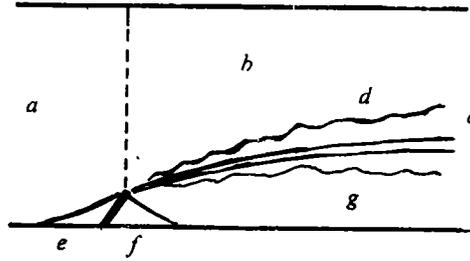


图2 流动分区

根据以上分析，丁坝水流又可进行如图 2 的新分区：即上游壅水区_(a)、主流压缩区_(b)、强冲刷带区_(c)、涡动扩散区_(d)、上下游死水区_(e、f)（角涡区）、坝后回流滞水区_(g)。坝后回流滞水区的长度随边界条件变化，岸边回流流速可达来流的百分之二十，对丁坝防护问题具有重大意义。

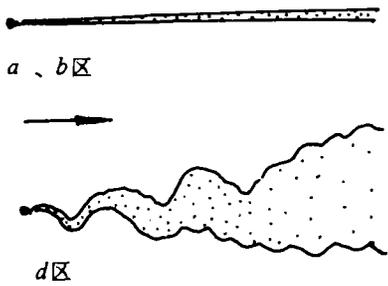


图3 示踪剂显示的水流结构

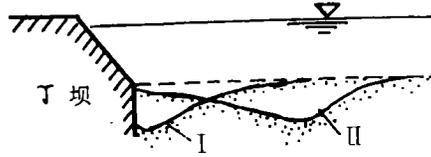


图4 两类冲坑型态

坝头涡的近距离效应集中反映于冲刷现象。引起坝头冲刷的原因还有单宽流量集中和下沉水流的出现。据观测，坝头冲刷首先在上夸脚开始，然后刷槽、加深形成冲坑。冲刷过程一经开始，坝头涡系随之加强，冲刷加速。待冲坑形成一定规模，涡流在冲坑中衰减，消耗能量，逐渐减弱其强度，最后趋于冲淤平衡状态。

以往的研究只着眼于冲坑深度，其经验与半经验公式甚多，计算结果也相差甚巨。尤其重要的是，研究均忽视了一个重要的工程问题，即冲坑型态问题。不同的坝头结构形成形状各一的冲坑，仅用一个物理量——冲深值，难于全面地描述复杂的冲坑问题。图 4 为两种冲坑形体，它对工程的影响截然不同。冲坑 1 为近深远浅型，冲坑 2 为近浅远深型，从工程安全出发，人们总是希望坝头出现 1 型冲坑，这就需要深入研究坝头涡动的近距离效应，提出最优坝头体型问题。

2 丁坝附近的流速场与紊动场

丁坝使原有河道的紊动水流受到新的边界扰动，大尺度涡发生、发展，在所及范围内，任一点流速脉动强烈。图5为坝头附近水流中两点的流速脉动图形，脉动具有低频特性。

为施测坝头流速场和紊动场，以单丁坝为例，进行光电流速仪的连续读数，采样时间为1秒，紊动强度按下式计算：

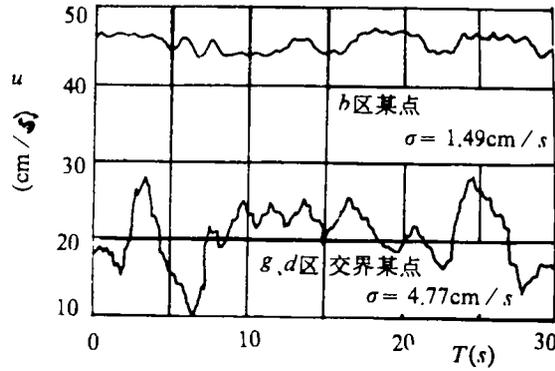


图5 流速脉动图

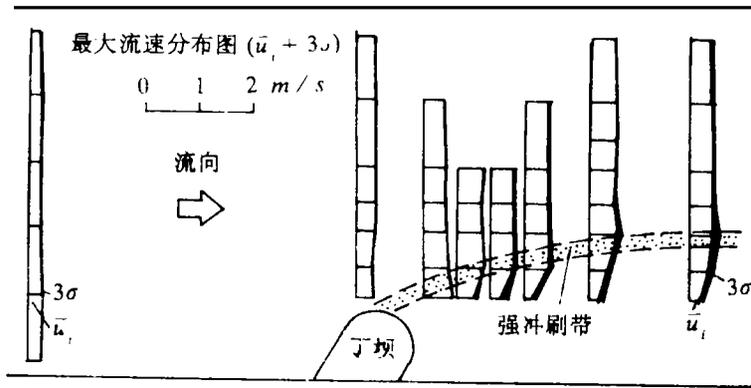


图6 坝头流速与紊动场

$$T = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}_i)^2 \right)^{0.5} / \bar{u}_i = (u_i^2 - \bar{u}_i^2)^{0.5} / \bar{u}_i = \frac{\sigma}{\bar{u}_i}$$

式中： u_i ——某点第*i*次瞬时流速 \bar{u}_i ——时均流速 $\bar{u}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$
 N ——读数次数 σ ——脉动流速均方根值

典型的丁坝流速场与紊动场示于图6

丁坝坝头附近流速急剧变化。从反映水流涡动强烈程度的脉动流速均方根分布状况来看，涡的扩散状况是十分明显的。在水流压缩区，水流的紊动强度与上游来流情况几乎相同。随着坝头涡系的传播，主流逐渐受到影响，紊动加剧，而衰减极慢。直到8倍坝长处，水流的紊动强度达正常上游来流的三倍，反映丁坝对水流大尺度涡的影响是在一个很大范围内发生发展和衰减。如以 $\bar{u}_i + 3\sigma$ 表示点最大流速，则从其分布图发现，坝头以下存在一最大流速值连接而成的强冲刷带（线）。这一成果与试验观察结果非常一致。可以肯定，在定床情况下，丁坝的强冲区是沿一条接近抛物线形的不封闭的带状范围上发生的。该强冲刷带对研究丁坝水力学问题十分重要。

3 丁坝的回流滞水区特征

丁坝回流滞水区,可简称丁坝回流, 它的研究应该是一个河流力学的基本问题, 中外学者进行了大量的工作, 或以试验数据为基础导出经验公式, 或在一定的假设下给出简化的二维结果, 所得成果相差较多, 说明丁坝回流的研究还不充分, 有必要进行新的探索。

3.1 定床情况下丁坝回流长度的特征

大量试验和工程经验可知, 多种因素影响丁坝回流长度, 这些因素有:

①河道糙率的影响: 回流区糙率越大, 回流长度越小, 河床本身的糙率对回流长度影响较小。

②非恒定水流的影响: 涨水过程的回流长度小于落水过程的回流长度。

③水深影响: 回流长度对水深非常敏感, 水深越大, 回流长度也越大。

④来流不对称因素影响: 丁坝一侧流速偏大, 则回流长度增大, 反之回流长度减小。

⑤河道边界变化的影响: 一般情况下, 凸岸丁坝的回流长度较大。

⑥坝头体型与挑角的影响: 一般上游边坡越大, 回流长度越小。挑角的影响不够明确。

⑦大尺度涡运动的影响: 不影响回流的平均尺度, 但涡运动使瞬时回流长度呈低频变化。

上述分析说明, 给出一个普遍的回流滞水区长度公式异常困难。

3.2 丁坝回流滞区现有成果与试验研究

现有研究成果只是一种十分简化了的情况的描述, 一般是取上述七因素中的 1、3、5 项, 在某些理论假定下导出回流长度的公式, 这方面有窦国仁公式, 程年生李昌华公式, 贝可夫公式等。这些公式虽都基于一定的理论和一定数量的资料, 有一定的适用范围, 但有许多问题尚须探明。如程年生李昌华公式在短丁坝情况将会得出回流长度为零的结论, 贝可夫公式则得出一个基本不变的相对回流长度。窦国仁公式对短丁坝可简化为:

$$L = \frac{C_o^2 H}{1 + \frac{C_o^2 H}{12D}}$$

说明回流长度取决于糙率与水深。然而, 试验观察表明, 糙率的影响甚微, 且糙率选择也不易准确。该公式与笔者的试验成果仍有较大差异。

本文通过因素分析, 认为糙率的影响可以忽略, 因此, 回流滞水区长度 L 只与水深 H , 坝长 D , 渠宽 B 有关:

$$L = f_1(H, D, B)$$

该式经量纲分析, 可写成相对回流滞流区长 $\frac{L}{D}$ 、相对水深 $\frac{H}{D}$ 、相对坝长 $\frac{D}{B}$ 之间的函

数式:
$$\frac{L}{D} = f_2\left(\frac{H}{D}, \frac{B}{D}\right)$$

对常见的护岸短丁坝, 因子 $\frac{D}{B}$ 的影响又可暂且忽略, 则丁坝回流问题就变成确定函

数
$$\frac{L}{D} = f\left(\frac{H}{D}\right)$$
 的具体形式的问题。

本文以 20 米长, 1.5 米宽的宽浅砂水槽的丁坝回流试验为基础, 得出丁坝回流区长度的经验公式为 (如图 7 所示)

$$\frac{L}{D} = 4 + 48.8 \left(\frac{H}{D} \right)$$

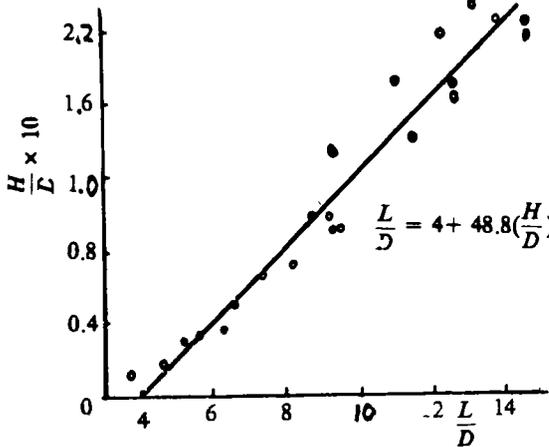


图 7 回流滞水区长度

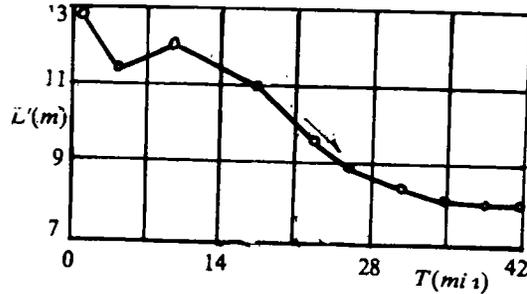


图 8 回流末端部位随时间变化(动床)

该式较一般公式结构简单, 使用方便, 可根据相对水深直接估算回流滞流区长度。根据上式, 对相对水深为 0.01、0.05、0.1、0.2 等情况, 得出相对回流长度约为 4.5、6.4、8.9、13.8。应用十分方便。

3.3 动床情况下的回流滞流区

实际工程中丁坝坝头冲刷几乎是不可避免的。冲刷过程一经开始, 原来坝头的绕流结构受到干扰, 水流在冲刷坑中急剧分散, 以泡状水和飞溅状向岸边挤压, 扼制了回流滞流区的发展, 回流长度随即变化。冲坑越深, 回流长度越短。图 8 给出一种典型的回流长度变化图。可以发现, 随着时间的延续, 冲坑趋于稳定, 回流长度也趋于一最小值。这一最小回流长度, 非常接近前面所提到的坝后角涡区 F。可以说, 在动床情况下, 原来的 G 区有可能部分消失或完全消失, 这一结论具有重要的工程意义。即, 虽然丁坝回流滞流区长度可达坝长的拾数倍, 但工程上的坝距大多是坝长的 2-4 倍, 黄河上则干脆采用坝长的一倍。这正是实际工程考虑动床冲刷对回流长度影响的一项措施。

4 关于丁坝间距问题

综上所述, 丁坝在定床与动床情况下的水流结构差别巨大, 两种情况下, 丁坝所能掩护的范围也相差甚大。两种情况下, 丁坝所能掩护的范围也相差甚大。对丁坝群, 坝距的选择涉及工程的经济与安全。丁坝回流滞流区的长度与丁坝间距问题是两个不同的概念。丁坝间距完全是一个工程概念。虽然从减弱沿岸边溯源回流强度方面, 坝距越小越好, 但又不符合经济原则。现有的坝距确定常基于一些粗糙假设, 如坝田回流假设, 要求丁坝的间距能使下游丁坝处壅高的水位高于上游丁坝坝头下侧的水位, 以形成坝田回流, 这时西坝间距 L_1 应满足:

$$\frac{2gL_1}{C^2H} < \beta$$

式中: C ——谢才系数

H ——水深

β ——小于1的系数

确定坝距的水流扩散理论则认为水流绕过上一丁坝后形成的扩散水流边界线正达下一丁坝的有效长度的末端最合适, 从而据几何关系确定坝距。

这些方法常涉及一些未知的物理量, 如扩散角, 有效长和 β 值, 极不易确定, 另外, 重要的是, 这些方法均未有效地考虑动床冲坑形成对绕坝头水流结构的影响, 实用上并不现实。实际上, 大量试验说明, 当坝头冲坑充分发展, 回流区 G 可能完全消失, 最后只剩下小角涡区 F , 这一区域约为坝长的 1-2 倍, 因此, 丁坝群的可靠坝距应为坝长的 1-2 倍, 这应该是丁坝的安全坝距。

丁坝回流与河势变迁的复杂性, 使得根据具体情况确定坝距十分必要。黄河控导工程中的丁坝, 以其防护的重要性以及防止斜河、横河“扭劲水”对坝根和连坝的冲刷, 丁坝间距采用了一倍坝长。而某地区河道弯段护岸丁坝, 由于考虑到天然河势和筑坝处地形特点, 丁坝间距做到了 5~7 倍的坝长。在这种情况下, 只要加强坝间抗回措施, 同样可以满足工程要求。天然河势, 溜向和丁坝附近的滩区地形、河岸边界状况等对丁坝工作条件有重要影响。在选择丁坝间距时, 除考虑一般研究结果外, 更多地考虑当地具体条件才更合理。

参 考 文 献

- 1 吴桢祥, 吴建平. 丁坝防护问题及坝头最优体型研究. 郑州工学院. 1993.8
- 2 窦国仁. 丁坝回流及其相似律研究. 水利水电科技情报. 1978.3
- 3 吴桢祥. 泌阳河弯道险工整治水工模型试验研究. 郑州工学院. 1989

Turbulent Field around Spur-dike and

Its Engineering Meaning

Wu Zhengxiang Wu Jianping

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: This paper describes the effect of spur-dike with side slopes on flow characteristics and turbulent field. On the basis of experimental data of spur-dike in a rectangular flume an empirical formula which can be use to calculate the length of recirculating flow is given. Several important problems are discussed, such as, the form of scour hole, the influence of scouring effect on the length of recirculating flow, etc.

Keywords: Spur-dike, Turbulent field, Recirculating Flow.