

改进的溢洪道底板抗浮稳定计算公式及其应用

蔡勇斌¹, 刘四方², 蔡勇平², 蔡晓鸿¹

(1.江西省吉安市水利局, 江西 吉安 343000; 2.江西省吉安市水利水电规划设计院, 江西 吉安 343000)

摘要: 通过工程实例, 从理论上分析了溢洪道底板发生失稳揭底破坏的原因与机理, 阐述了现行规范消力池护坦抗浮稳定计算公式的适用条件, 给出了陡槽底板与消力池护坦分缝止水破坏工况下的抗浮稳定计算式。

关键词: 陡槽; 消力池; 板块; 脉动上举力; 稳定计算

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2015)01-0027-03

0 引言

某重点小(1)型水库总库容 774.4 万 m^3 , 设计洪水标准 50 年一遇, 相应设计洪水位 117.04 m, 溢洪道泄洪流量 250 m^3/s ; 校核洪水标准 1 000 年一遇, 相应校核洪水位 118.84 m, 溢洪道泄洪流量 464 m^3/s ; 消能防冲建筑物设计洪水标准 20 年一遇, 相应洪水位 116.38 m, 溢洪道泄洪流量 184 m^3/s 。该水库于 2009 年实施除险加固处理, 溢洪道控制堰为宽顶堰, 设计堰顶高程 113.30 m, 溢流净宽 20 m; 控制堰后接等底宽陡槽, 陡槽长 30.92 m (水平长 30 m), 边坡 1:4, 陡槽底板为 C20 砼结构, 板块按 10 m×10 m 设置纵、横缝, 板块厚 0.4 m, 布设有温度钢筋; 陡槽末端接消力池, 消力池长 23 m, 宽 20 m, 消力池护坦为 C20 砼结构, 护坦按 11.5 m×10 m (长×宽) 设置分缝, 护坦厚 0.6 m, 布设有温度钢筋。陡槽底板和消力池护坦分缝均未设置止水, 板块与基岩间未布设锚筋。

2010 年 6 月中旬, 库区连降大到暴雨, 溢洪道堰顶过水深达 2.1 m, 相应库水位 115.4 m, 溢洪道泄洪流量 102 m^3/s , 收缩断面水深 $h_1=0.4$ m, 跃后水深 3.45 m, 消力池出口下游水深 1.42 m, 消力池出口水面跌落 0.60 m。水库管理人员检查发现陡槽末段板块发生沿砼垫层接触面的失稳揭底破坏。是什么原因使重达近 100 t 的板块在远小于设计标准洪水工况下, 被水流揭底掀起呢? 如不从理论上对溢洪道陡槽底板与消力池护坦失稳揭底破坏的机理进行分析, 则有可能在后续溢洪道加固

处理设计中重蹈覆辙, 屡修屡毁。

一维和二维瞬变流模型理论分析与工程模型试验及大量工程失事调查结果表明, 溢洪道板块发生失稳揭底破坏大体经历以下 3 个过程。首先, 板块间分缝止水在高速水流与来流夹砂石颗粒、杂物磨损碰撞及脉动压力水流长期、反复交变作用下, 部分或全部遭受破坏失效。随后, 脉动压力水通过板块接缝、裂缝、孔洞进入板块底面缝隙层并迅速传播, 由于板块顶面、底面的脉动压力波传播差异显著, 板块底面脉动压力波波速往往较顶面压力波波速大 1 至 2 个数量级 (m/s), 于是板块顶面与底面的随机紊流脉动压力差产生的振动就形成长期、反复作用于板块底面的强大脉动上举力, 从而导致板块与基岩接触面间缝隙层不断扩展和贯穿, 板块与基岩接触面间的粘结力释放, 并迅速降低、消减, 以致板块与基岩分离, 锚筋与所锚固基岩松动失去作用, 锚筋甚至被剪断或拉断。继而, 与基岩分离的板块, 在高速水流强大的变频变幅随机脉动上举力作用下起动出穴, 并发生掀起、冲移、失稳揭底破坏。

1 脉动上举力

前面对溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块发生失稳揭底破坏的原因、机理进行了定性探讨, 下面进行定量计算分析。溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块的稳定性设计, 主要是确定板块的厚度及板块与基岩间的锚筋配设。对中、小型水库溢洪道工程, 设计人员往往不考虑作用于板块上的脉动荷载, 没有认识到这一设计简

化,仅适用于溢洪道上下游水头小、流速小、脉动荷载小的工程,当板块上作用有较强脉动荷载或脉动荷载起主要控制作用时,这一设计上的概化有可能导致严重后果,甚至造成工程灾难。

荷载分析表明,作用于板块的力有^[1]:板块自重 P_1 ;

板块顶面上的时均压力(可近似采用计算断面的静水压力) P_2 ;板块与基岩间的锚固力 P_3 ;板块顶面上的脉动压力 Q_1 ;板块底面上的扬压力 Q_2 ,于是溢洪道陡槽板块的抗浮稳定条件见式(1)。见图 1(a)。

$$(P_2 \cos \theta - Q_1) + P_1 \cos \theta + P_3 \cos \theta - Q_2 \geq 0 \quad (1)$$

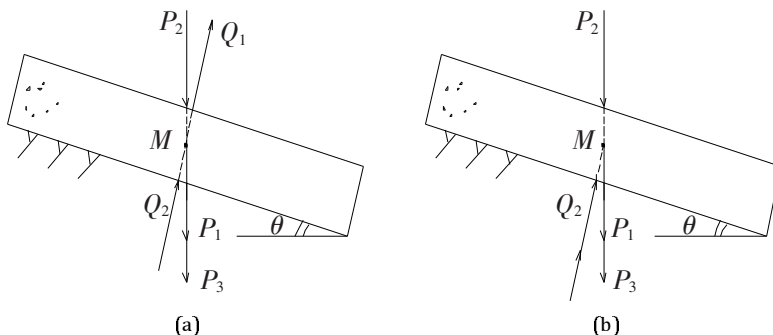


图 1 溢洪道陡槽板块受力简图

将式(1)改写成:

$$K_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{Q_1 + Q_2} \cos \theta \quad (2)$$

式中: K_f —安全系数,对于设计工况取 1.2,校核工况取 1.0;

θ —板块底面与水平面的夹角。

特别对于消力池水平护坦,式(2)简化为

$$K_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{Q_1 + Q_2} \quad (3)$$

式(3)即规范^[1]公式。

需要注意的是:式(2)、式(3)是在溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块间止水完好条件下的抗浮稳定计算式。若板块间止水被破坏,则式(2)、式(3)不再适用。此时,据前面的分析,作用于板块上的力有:板块自重 P_1 ;板块顶面上的时均压力 P_2 ;板块与基岩间的锚固力 P_3 ;板块底面上的脉动上举力 F ;板块底面上的扬压力 Q_2 ,于是板块的抗浮稳定条件为(见图 1(b)):

$$P_1 \cos \theta + P_2 \cos \theta + P_3 \cos \theta - F - Q_2 \geq 0 \quad (4)$$

类似于式(2),可得止水破坏条件下溢洪道陡槽板块抗浮稳定计算式:

$$K_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{F + Q_2} \cos \theta \quad (5)$$

特别对于消力池水平护坦, $\theta = 0^\circ$ 式(5)简化为

$$K_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{F + Q_2} \quad (6)$$

比较式(2)、式(5),溢洪道陡槽段与消力池护坦板块止水破坏工况下的抗浮稳定计算,只需将止水完好条

件下的作用于板块顶面上的脉动压力 Q_1 用作用于板块底面上的脉动上举力 F 替代则可。由此可见,《溢洪道设计规范》(SL253-2000) 陡槽底板与消力池护坦板块的抗浮稳定计算是建立在板块止水完好条件上的,即板块止水完好是规范中板块抗浮稳定计算式成立的必要条件。

2 脉动上举力的计算

板块间分缝止水破坏失效,计算确定作用于板块底面上的脉动上举力,便成了验算这类溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块抗浮稳定的关键,下面将推求作用于板块底面的脉动上举力计算式。

据脉动压强均方根 σ_p 计算式^[2]:

$$\sigma_p = C_p \rho_w \frac{V^2}{2} \quad (7)$$

式中: C_p —脉动压强系数; ρ_w —水的密度(kg/m^3); V —设计工况下水流计算断面的平均流速(m/s);对于陡槽水流,可取计算断面的平均流速;对于消力池水流,可取跌首收缩断面的平均流速。

实验资料表明^[3],溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块在水流冲击下的点脉动压力基本符合正态分布,其中偏态系数 $C_s \rightarrow 0$,峰态系数 $C_e \rightarrow 3.0$,又虑及脉动压强的均化效应,则作用于板块底面的脉动压强(N/m^2)可按下式计算:

$$P_p = 3 \xi \sigma_p \quad (8)$$

式中: ξ —点、面脉动压强转换系数;

σ_p —板块接缝入口处脉动压强的均方根值。

将式(7)代入式(8),并令 $K_p = \xi C_p$, 则得

$$P_{fr} = 3 \xi C_p \rho_\omega \frac{V^2}{2} = 3K_p \frac{\rho_\omega V^2}{2} \quad (9)$$

式中: K_p —脉动压强系数;

于是作用于溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块上的脉动上举力计算式为:

$$F = P_{fr} A \quad (10)$$

式中: A —脉动压力作用面积(m^2)。

3 工程实例计算分析

采用“引言”中工程实例进行计算分析。由于溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块分缝均未设止水,可视作溢洪道分缝止水完全破坏工况。因此,应计算作用于陡槽末段底板底面的脉动上举力,并采用式(5)对其进行抗浮稳定分析。

据《溢洪道设计规范》(SL253-2000),在脉动压强 P_{fr} 的计算中,取 $K_p = 0.025$ 。经计算得:

$$P_{fr} = 3K_p \frac{\rho_\omega V^2}{2} = 6.10 \text{ kN/m}^2$$

$$V = 12.75 \text{ m/s},$$

$$F = P_{fr} A = 610 \text{ kN}; P_1 = 960 \text{ kN}; P_2 = 392 \text{ kN}; P_3 = 0 \text{ kN}; Q_2 = 809.33 \text{ kN}; \theta = 14^\circ 2' 10.48''。$$

将以上计算所得陡槽末段底板板块所受诸力代入式(5),得其在溢洪道堰顶过水深 2.1 m 时的抗浮稳定安全系数(规范规定的安全系数为 1.0):

$$K_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{F + Q_2} \cos \theta = 0.92 < 1.0$$

由此可见,当陡槽底板分缝未设止水或止水破坏后,其末端底板板块抗浮稳定不满足要求。即此工况下,陡槽末段底板发生失稳揭底破坏是必然的。

若采用规范 SL253—2000 中公式进行计算,则 $Q_1 = 61 \text{ kN}$,相应抗浮稳定安全系数 $k_f = 1.51 > 1.2$ (规范规定的安全系数),即陡槽末段底板抗浮稳定满足要求。这一计算结果,显然与溢洪道陡槽末段底板所发生的失稳揭底破坏现象相悖,即规范抗浮稳定计算公式不适用于溢洪道陡槽底板和消力池护坦分缝止水被破坏工况。

进一步的计算分析指出,溢洪道陡槽底板与消力池护坦板块所受脉动上举力随着作用水头的增大而增大,随着计算断面平均流速的增大而加大。

4 结语

溢洪道陡槽底板与消力池护坦发生失稳揭底破坏的主要原因是板块间伸缩缝止水、底部排水、贯穿性裂缝与浇筑面处理不良,导致脉动压力水进入板块底面缝隙层,产生强大的脉动上举力所致。因此,溢洪道陡槽、消力池结构设计应验算止水失效工况下的板块抗浮稳定安全性,并采取相应工程防护措施。

参考文献:

- [1] SL253—2000 溢洪道设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2001,22-23.
- [2] 水利水电泄水工程与高速水流信息网、水利部东北勘测设计研究院科学研究院.泄水工程水力学[M].长春:吉林科学技术出版社,2002,305-307.
- [3] 王宏硕主编.水工建筑物(专题部分)[M].北京:水利电力出版社,1994,2-4.

The improved calculation formula of spillway floor anti-floating stability and its application

CAI Yong-bin¹, LIU Si-fang², CAI Yong-ping², CAI Xiao-hong¹

(1.Jian Municipal Water Resources Bureau of Jiangxi Province, Jian 343000, China;

2.Jian Municipal Hydraulic and Hydropower Planning and Designing Institute of Jiangxi Province, Jian 343000, China)

Abstract: By the engineering example, the cause and mechanism on the spillway floor failure are analyzed from the theory. The suitable condition of the anti-floating stability calculation formula of cushion pool apron on the present specification is introduced. And the anti-floating stability calculation formula in the operating duty of sealing destruction on the joint between chute floor and cushion pool apron is proposed.

Key words: Chute; Cushion; Floor; Fluctuating uplift force; Stability calculation

编辑:张绍付