

陡倾阶梯式建基面上重力坝三维抗滑稳定分析的条块法

沈振中¹, 杨凡¹, 赵茜瑶²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 天津市水利勘测设计院, 天津 300204)

摘要: 建基面呈复杂折面阶梯状的重力坝抗滑稳定分析, 目前尚没有统一和完善的方法。基于三维刚体极限平衡理论以及条分法, 将坝体看作由若干刚性滑动体组成的重力坝, 提出了一种抗滑稳定分析方法——三维抗滑稳定条块法, 并设计编制了相应的计算程序。采用 ANSYS 前处理模块的荷载计算方法, 以某重力坝 7 号岸坡坝段为例进行了分析计算, 结果表明: 不同工况下该重力坝 7 号岸坡坝段抗滑稳定安全系数均能满足规范要求。该法计算理论较严谨, 且与现行规范匹配性好, 可供类似工程参考。

关键词: 陡倾阶梯式建基面; 重力坝; 三维抗滑稳定分析; 条分法; 二分法

中图分类号: TV31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0071-04

Slice Method of 3-D Anti-sliding Stability Analysis for Gravity Dam with Steep Stepped Base Face

SHEN Zhenzhong¹, YANG Fan¹, ZHAO Xi Yao²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Tianjin Water Survey and Design Institution, Tianjin 300204, China)

Abstract: There are no common and perfect methods for the anti-sliding stability analysis of gravity dam with the complex multi zigzag plane base surface. Based on the 3-D rigid body limit equilibrium theory and slice method, the dam body can be regarded as the gravity dam composed of many sliding rigid bodies, and a new anti-sliding stability analysis method, named as 3-D anti-sliding stability slice method, was proposed in this paper and its calculation program was also developed. The load calculation method using the preprocess module of ANSYS was applied to analyze the anti-sliding stability of NO.7 bank dam of a hydropower station. The results showed that the anti-sliding safety factor of this dam section can satisfy the requirement of standard. This method has strict computational theory and is compatible with the current standard, and thus it can be used for references for similar projects.

Key words: steep stepped base face; gravity dam; 3-D anti-sliding stability analysis; slice method; bisection method

在深窄河谷中修筑分缝式重力坝时, 岸坡坝段的建基面会十分陡峭, 坡度有时甚至达到 1: 0.2。为了让陡峭岸坡坝段保持稳定, 一般将建基面开挖成台阶状, 从而形成了倾向河床、具复杂折面的阶梯状坝基面。这种情况下, 坝体除在水压力作用下有向下游滑动的趋势外, 在自重作用下还有向河床滑动的趋势^[1], 从而给坝体稳定分析增加了不少难度。当建基面为复杂折面阶梯状时, 传统的材料力学法已不再适用, 尽管可采用数值分析方法, 但设计工作量大, 且所得成果与现行设计规范不配套^[2]。王大胜^[3]基于刚体极限平衡法推导了岸坡坝段坝体抗滑稳定计算公式, 但此计算方法仅限于坝基面为单斜面的情况。目前, 针对坝基面呈折面阶梯状的重力坝, 至今尚无统一的计算方法进行岸坡坝段抗滑

稳定性分析。本文基于三维刚体极限平衡理论, 结合条分法^[4]及重力坝深层抗滑稳定分析方法^[5], 提出了一种重力坝抗滑稳定分析方法——重力坝三维抗滑稳定条块法, 将坝体视为刚体而滑动体由若干刚性块体组成。另外, 考虑到复杂折面阶梯状建基面坝体的荷载计算工作量大且繁琐, 提出了结合有限元计算软件 ANSYS 的前处理模块进行荷载计算。

1 三维抗滑稳定分析条块法的计算原理

1.1 安全系数的定义

采用刚体极限平衡法计算分析重力坝抗滑稳定性时, 通常引入一个系数 K 以对重力坝抗滑稳定安全度进行定量评

收稿日期: 2012-10-15 修回日期: 2012-12-29 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.025.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179062); 江苏高校“青蓝工程”资助

作者简介: 沈振中(1968), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 从事水工结构和水利工程安全管理的研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

通讯作者: 杨凡(1989), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究。E-mail: yangfanzi@126.com

价, K 即为安全系数^[6], 通常有以下两种概念。

(1) 超载安全系数。即将荷载乘以 K 倍。对 K 连续取值, 然后分析每一个 K 值, 直到 K 值达到某个临界值。此时的 K 值即为所求的安全系数。

(2) 强度储备安全系数。将材料的强度除以 K , 对 K 连续取值。分析每一个 K 值, 直到 K 值达到某个临界值, 坝体发生滑动失稳为止。这个临界 K 值即为所求的安全系数。

目前在进行重力坝抗滑稳定分析时多采用强度储备安全系数, 本文采用 Bishop^[7] 提出的通用安全系数的定义:

$$K = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

式中: τ_f 为沿滑动面抗剪强度, 根据摩尔-库仑准则, $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$; τ 为滑动面上的剪应力。

1.2 计算公式的推导

将重力坝岸坡坝段两横缝之间的坝体视为刚体, 沿坝面各折面相交线处竖直划分, 将坝体划分成若干刚性块体, 见图 1, 其中 1-2-3-4 和 5-6-7-8 为横缝, 9-10-11-12 和 13-14-15-16 为刚性块体分割面。假设滑动体(坝体)由若干刚性滑动块体组成, 将各滑动面上抗剪强度参数同等程度折减后达到极限平衡状态, 考虑各刚性块体间相互作用力的影响, 建立力的平衡方程, 不考虑力矩平衡条件, 进而计算其抗滑稳定安全系数。取某一刚性块体进行受力分析见图 1, 根据摩尔-库仑准则, 当坝体达到极限平衡状态时, 在刚性块体底面应有:

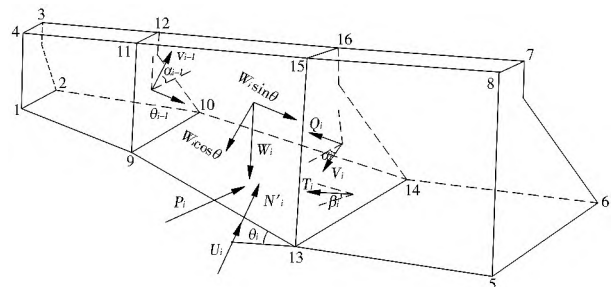


图 1 折面阶梯状建基面岸坡坝段抗滑稳定分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the anti-sliding stability analysis of gravity dam with the complex multi-zigzag plane base surface

$$T_i = c'_{ei} A_i + (N_i - U_i) \tan \phi'_{ei} \quad (2)$$

由每一刚性块体竖直向、顺河向以及坝轴线上力的平衡条件可得:

$$N_i \cos \theta_i + V_{i-1} \sin \alpha_{i-1} + T_i \sin \beta_i \sin \theta_i = W_i + V_i \sin \alpha_i \quad (3)$$

$$P_i + V_{i-1} \cos \alpha_{i-1} = T_i \cos \beta_i + V_i \cos \alpha_i \quad (4)$$

$$Q_{i-1} + N_i \sin \theta_i = T_i \sin \theta_i + Q_i \quad (5)$$

式中: $c'_{ei} = c_i / K$, $\phi'_{ei} = \arctan(\tan \phi_i / K)$, c_i 、 ϕ_i 为基础面的抗剪强度参数, c'_{ei} 、 ϕ'_{ei} 为折减后的抗剪强度参数, K 为强度折减系数; N_i 为基础反力 N'_i 与扬压力 U_i 之和; W_i 为基础面以上的总铅直力; P_i 为基础面以上的总水平力; T_i 为基础面上剪应力; Q_i 、 Q_{i-1} 为刚体相互作用的法向力; V_i 、 V_{i-1} 为刚体相互作用的切向力。

假设沿建基面各折线竖直划分有 n 个刚性块体, 考虑到分缝式重力坝各坝段独立工作的特性, 则坝段之间不存在拉、压、剪应力, 那么有 $Q_0 = Q_n = V_0 = V_n = 0$ 。求解安全系数

时, 先假定一强度折减系数 K 值, 沿滑动趋势方向, 从第一个刚性块体开始, 依次计算刚性块体间的相互作用力 Q_i 和 $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 直至最后一个刚性块体, 若 $Q_n = 0$ 且 $V_n = 0$, 则表示封闭, 满足力的平衡要求, 所假定的 K 值即为安全系数 K_s 。否则, 修正 K 值直至封闭条件满足为止。计算流程见图 2。

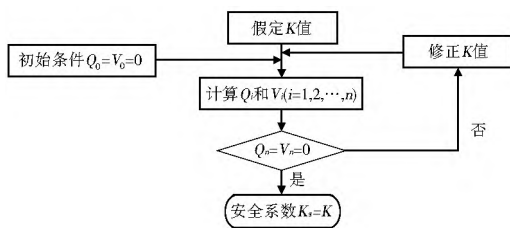


图 2 复杂建基面坝体抗滑稳定分析流程图

Fig. 2 Flow chart of the anti-sliding stability analysis of gravity dam with the complex base surface

1.3 求解方法

在上述抗滑稳定分析的刚体系统中, 当划分有 n 个刚性块体时, 每个刚性块体建基面未知物理量为 3 个, 每两个刚体接触面上未知物理量也是 3 个, 加上待求的抗滑稳定安全系数 K_s , 该体系总的未知物理量为 $6n - 2$ 个。对于每个刚性块体, 根据建基面极限平衡条件以及三向力的平衡条件, 已知的计算条件共有 $4n$ 个, 故该计算问题属于超静定问题, 缺少的计算条件有 $2n - 2$ 个, 故需引入 $2n - 2$ 个计算条件的假定。

对于重力坝折面阶梯状建基面岸坡坝段, 考虑其整体稳定性。首先, 坝体由于受到上游水压力和重力作用有向下游及河床滑动的趋势, n 个刚性块体建基面上顺河向及坝轴线的剪应力不能同时为零, 即图 1 中 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 及 T_1, T_2, \dots, T_n 不能同时为零。其次, 坝体分块后, 台阶段块体与陡倾段块体主滑动方向是不同的, 故各块体滑动面上 β_i 是不相同的, 即条件 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n$ 不成立。考虑以上因素, 借鉴三维极限平衡法中有关抗滑稳定计算的条件假定, 可考虑以下两种假定方法: (1) 忽略块体之间的剪力; (2) 忽略块体之间水平推力以及竖直向的剪力。对于第一种假定方法, 即假定块体接触面上的 V_i 和 α_i 为 0, 那么共增加的计算条件正好为 $2n - 2$ 个。对于第二种假定方法, 即假定块体接触面上 V_i 和 α_i 为 0, 增加的计算条件亦为 $2n - 2$ 个。那么采用这两种假定方法均可将该超静定问题转化为静定问题, 从而实现其求解。但是当某个刚体建基面坡度较大时, 刚体所受到的扬压力相对重力较大, 对建基面强度参数进行折减时, 会遇到建基面抗剪强度 $T_i < 0$, 这是不符合情况的。综合考虑以上因素, 最终采用上述第一种假定, 即忽略各块体之间的剪力来实现求解。

2 三维抗滑稳定分析条块法的理论验证

由式(2) - 式(5)及假定的 $V_i = 0, \alpha_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n - 1)$, 得出 Q_i 和 Q_{i-1} 的计算关系如下:

$$Q_i = Q_{i-1} + W_i \tan \beta_i - P_i \tan \beta_i \sec \theta_i \quad (6)$$

其中: $\tan \beta_i$ 可由下式求得:

$$\frac{c_i}{K} A_i \cos \beta_i + (W_i \sec \theta_i \cos \beta_i - P_i \sin \beta_i \tan \theta_i - U_i \cos \beta_i) \cdot \frac{\tan \phi_i}{K} - P_i = 0 \quad (7)$$

采用该法对图 3(a) 所示的重力坝建基面为单斜面的典型岸坡坝段进行分析, 图中 1-2-3-4 和 5-6-7-8 为横缝, 沿坝轴线向将坝体垂直划分为两个刚性块体, 9-10-11-12 为刚性块体分割面, 根据式(6)和式(7), 有:

$$(W_1 + W_2) \sin \theta - (P_1 \tan \beta_1 + P_2 \tan \beta_2) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{c}{K} A_1 \cos \beta_1 + (W_1 \sec \theta \cos \beta_1 - P_1 \sin \beta_1 \tan \theta - U_1 \cos \beta_1) \cdot \frac{\tan \phi}{K} - P_1 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{c}{K} A_2 \cos \beta_2 + (W_2 \sec \theta \cos \beta_2 - P_2 \sin \beta_2 \tan \theta - U_2 \cos \beta_2) \cdot \frac{\tan \phi}{K} - P_2 = 0 \quad (10)$$

联立求解式(8)、式(9)、式(10)得安全系数 K 有:

$$K = \frac{c'(A_1 + A_2) + \tan \phi [(W_1 + W_2) \cos \theta - (U_1 + U_2)]}{\sqrt{(P_1 + P_2)^2 + (W_1 + W_2)^2 \sin^2 \theta}} \quad (11)$$

根据文献[3], 如图 3(b) 中所示, 该重力坝岸坡坝段的抗滑稳定安全系数为:

$$K_s = \frac{\sum (W \cos \theta - U) + c' A}{\sqrt{P^2 + (W \sin \theta)^2}} \quad (12)$$

将式(11)同式(12)比较, 显然有 $K = K_s$, 即所求得的安全系数相等。由此可见, 采用重力坝三维抗滑稳定条块法进行重力坝抗滑稳定计算的成果是合理可靠的。

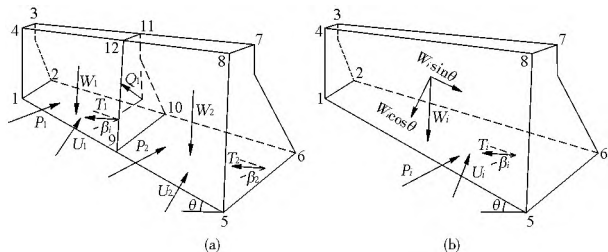


图 3 重力坝建基面为单斜面的岸坡坝段示意图
Fig.3 Schematic diagram of the bank dam with the simple inclined base surface

3 荷载计算方法

由于重力坝折面阶梯状建基面坝段体型复杂, 坝体建基面高程及剖面形状沿坝轴线变化较为明显, 进行三维抗滑稳定计算时, 计算荷载的工作量大。这里提出一种利用有限元计算软件来准确计算荷载的简易方法。其具体实现过程如下: (1) 利用 ANSYS 前处理模块, 建立坝段三维实体模型; (2) 根据荷载分布情况建立三维荷载实体, 通过查询实体体积来获得坝体自重以及上下游水压力、扬压力等荷载的大小; (3) 通过查询实体模型获得坝基面面积以及与水平面夹角。这样便可将繁杂的空间荷载计算通过可视化三维实体特性查询出来。

4 三维抗滑稳定分析条块法的计算流程

采用重力坝三维抗滑稳定条块法计算重力坝岸坡坝段

抗滑稳定安全系数时, 根据式(6)和式(7)及图 2 计算流程, 需先假定不同的 K 值, 反复试算以达到封闭条件, 从而求得安全系数。从数值计算的角度来讲, 对于此类给定边界条件和初始计算条件、强度参数确定的折线形滑动面安全系数求解的静定问题, 解是唯一的, 其实现过程本质上即为方程单一解的数值求解。采用“二分法”求解此类问题, 不仅可简化求解过程, 加快求解效率, 且可获得较高的满足工程要求的求解精度。

采用 Fortran 语言编程, 并利用“二分法”算法^[8]求解安全系数。程序中实现该法时, 需初步定义解所在区间, 即定义初始的上、下限值, 该值合理与否直接影响计算程序的执行效率。故进行程序设计时, 需先通过循环搜索解所在的区间 $[i, i+1]$ (i 为整数), 然后在该区间内采用二分法进行求解。计算程序的流程图见图 4。

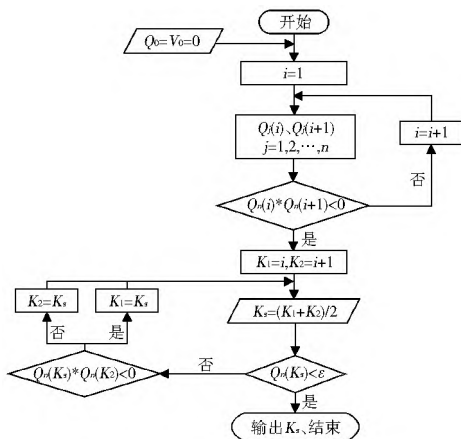


图 4 岸坡坝段抗滑稳定安全系数计算流程图
Fig.4 Flow chart for calculating the anti-sliding stability safety factor of bank dam

5 工程算例

某水电站位于乌江南岸芙蓉江下游, 其拦河大坝为碾压混凝土重力坝。右岸 7 号坝段为岸坡非溢流坝段, 与溢流坝段相邻。该坝段坝顶高程为 356.5 m, 坝体上游面 295.0 m 以上铅直, 以下为斜坡, 坡比 1:0.2, 下游面坡比 1:0.7; 其沿坝轴线方向为 25.5 m, 但从岸坡断面(坝横 ZH0+171.38)到河床断面(坝横 ZH0+145.88)建基面高程由 315 m 变为 270 m, 因而该坝段建基面异常陡峭倾向河床。该重力坝右岸 7 号坝段建基面形状及坝体三维实体模型见图 5。

5.1 计算参数及工况

该坝段坝基岩体为 $P_1 m^2$ 、 $P_1 q^3$ 、 $P_1 q^1$ 灰岩, 其与坝体混凝土接触面上抗剪断黏聚力为 $c' = 0.80$ MPa, 抗剪断摩擦系数 $\mu' = 1.0$ 。坝体混凝土重度 $\gamma = 24$ kN/m³。计算考虑以下两种工况: (1) 上游正常蓄水位(设计洪水位) 352.00 m, 相应下游水位 303.30 m; (2) 上游校核洪水位 355.00 m, 相应下游水位 330.08 m。坝基排水孔处扬压力折减系数取为 0.35。

5.2 计算结果分析

采用以上计算方法和程序分别计算了正常蓄水位工况

和校核洪水工况下该重力坝右岸 7 号岸坡坝段的抗滑稳定安全系数, 计算结果见表 1。由表可知: 坝体在不同工况下抗滑稳定安全系数均满足规范^[9]要求。采用该方法计算重力坝陡倾岸坡坝段的抗滑稳定安全系数是可行的, 与现行规范匹配性好, 计算结果可靠。

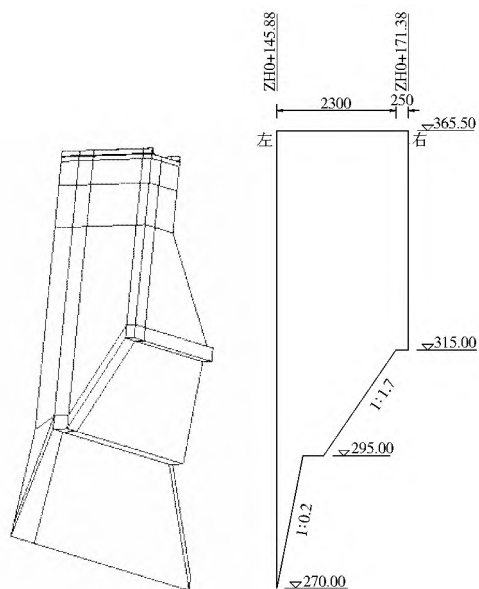


图 5 某重力坝右岸 7 号坝段建基面形状及坝体三维实体模型
Fig. 5 3D solid model and base shape of No. 7 dam in the right bank of a gravity dam

表 1 抗滑稳定安全系数

Table 1 The antisliding stability safety factor

计算工况	安全系数	允许值
正常蓄水位工况	3.238	3.0
校核洪水水位工况	2.513	2.3

6 结论

(1) 针对重力坝岸坡坝段建基面是陡倾阶梯状的实际情况, 提出视重力坝岸坡坝段坝体由若干刚性滑动块体组成的重力坝三维抗滑稳定条块法。该法与现行规范匹配性好, 计算相对简便, 结果可靠。

(2) 提出运用有限元分析软件 ANSYS 的前处理模块进

行荷载计算的方法, 能有效减少复杂坝体坝基情况下重力坝荷载计算的工作量, 且计算精度高, 速度快, 适应性强。

(3) 对于重力坝深层双滑面、多滑面以及坝基面沿顺河向成折线状的抗滑稳定问题, 本文方法亦适用。

参考文献(References):

[1] 左东启, 王世夏, 林益才. 水工建筑物[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995. (ZUO Dong qi, WANG Shi xia, LIN Yi cai. Hydraulic Structure[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1995. (in Chinese))

[2] 李东辉, 于跃, 陈宗荣, 等. 折线台阶状基础面重力坝的抗滑稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1), 5F53. (LI Dong hui, YU Yue, CHEN Zong rong, et al. Antisliding Stability Analysis of Gravity Dam with Polyline Stepped Foundation[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1), 5F53. (in Chinese))

[3] 王大胜. 复杂层状地基重力坝仿真分析理论和抗滑稳定研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (WANG Da sheng. Simulation Calculation and Antisliding Stability of Gravity dam With Complex Layered Foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))

[4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理方法程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu yu. Stability Analysis of Soil Slope Theory, Methods and Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[5] 袁林娟. 重力坝坝基深层抗滑稳定及控制标准研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003. (YUAN Lin juan. Stability Analysis Against Deep Sliding and Its Control Standards of Gravity Dam[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese))

[6] 朱婷. 基于三维刚体极限平衡法的岩质边坡参数敏感性分析和工程应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010. (ZHU Ting. Sensitivity Analysis of Rock Slope Parameters and Its Engineering Applications By 3-D Limit Equilibrium Method[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2010. (in Chinese))

[7] A. W. Bishop. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.

[8] 彭国伦. Fortran 95 程序设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. (PENG Guo lun. Program Design of Fortran 95[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese))

[9] SL 319-2005, 混凝土重力坝设计规范[S]. (SL 319-2005, Design of Concrete Gravity Dams[S]. (in Chinese))

(上接第 54 页)

[11] 李永华, 高阳华, 廖良兵. 重庆地区年可利用降水资源的变化分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 422-428. (LI Yong hua, GAO Yang hua, LIAO Liang bing. Analysis of Annual Utilizable Precipitation Changes in Chongqing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(3): 422-428. (in Chinese))

[12] 彭兆亮, 何斌, 王国利, 等. 碧流河流域气候变化对水资源量的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 76-79. (PENG Zhao liang, HE Bing, WANG Guo li, et al. A Study on

Characteristics of Climate Change and its Influence on Water Resources in Resent 30 Years in Biliuhe River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 76-79. (in Chinese))

[13] 魏永霞, 王丽学. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (WEI Yong xia, WANG Li xue. Hydrology Engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electricity Press, 2005. (in Chinese))