

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.02.002

大型水库三维水质模型研究

刘中峰,李 然,陈明千,黄 翔,曹玲玲

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘要 :针对大型水库水质要素分布呈现明显三维效应的特点,建立了一种考虑温度分层影响的 DO , COD_{Cr} ,TP ,TN 三维水质预测模型。采用二滩鳊鱼河支库原型观测资料对模型进行验证,并分析了模型误差产生的原因及模型的适用性。分析结果表明,所建模型可以用于对 DO ,COD_{Cr} ,TP ,TN 等水质要素的数值模拟,模拟成果可为大型水库修建的环境影响评价提供科学依据。将该模型应用于某在建大型水库,成功模拟预测了该水库水质要素的三维分布特性。

关键词 :大型水库;水质要素;三维水质模型;温度分层;二滩鳊鱼河支库

中图分类号 :TV697 ;TV13 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)02-0005-05

Three-dimensional model for water quality of large reservoirs//LIU Zhong-feng ,LI Ran ,CHEN Ming-qian ,HUANG Xiang ,CAO Ling-ling (*State Key Laboratory of Hydraulics & Mountain River Engineering of Sichuan University , Chengdu 610065 , China*)

Abstract : Based on the obvious three-dimensional characteristics of water quality distribution of large reservoirs , a three-dimensional water quality model for DO , COD_{Cr} , TP and TN considering the effects of stratified temperature structure was established . The model was verified by use of the observed data of Ganyuhe Reservoir of Ertan Hydropower Station . The causes for error and the applicability of the model were analyzed . The results show that the proposed model can be employed to simulate the water quality elements of DO , COD_{Cr} , TP and TN in large reservoirs . It can provide scientific basis for environmental impact assessment of development of large reservoirs . A case study of a large reservoir indicates that the above model successfully predicts the three-dimensional distribution features of its water quality elements .

Key words : large reservoir ; water quality element ; three-dimensional model for water quality ; stratified temperature ; Ganyuhe Reservoir of Ertan Hydropower Station

近年来,二滩、溪洛渡、白鹤滩等一大批高坝工程已建、在建或待建。这些工程在带来巨大经济效益和社会效益的同时,不可避免地对河流水质产生了一定的影响。因此,对大型水库的水质预测模拟具有重大的理论和工程意义。

大型水库的水质要素分布有着与天然河道不同的特点^[1]。与天然河道相比,水库水深显著增大,流速明显减小,水体水环境条件发生改变,同时由于地形、流场等的三维效应,温度、水质要素可能出现垂向分层现象。目前,一、二维水质预测模型已经比较成熟,三维模型的研究也正逐渐开展。聂磊^[2]根据质量守恒定律和 Fick 定律,推导出水库水体总磷三维迁移转化生态数学模型,并将其应用到密云水库,取得了较好的模拟结果;MAO 等^[3]建立了一种物理过程和生化过程耦合的三维模型,用来模拟太湖中

营养物质的年变化情况;George 等^[4,5]针对 Lake Washington 提出了一个复杂的三维富营养化模型,成功分析了浮游植物的动力学特征。

以上模型能够较好地模拟水体中水质要素的基本分布规律,但它们大多针对特定的研究对象,且都没有考虑温度分层的影响,而在大型水库中温度分层对水质要素的分布有较大的影响^[6]。另外,上述模型都是非稳态模型,这在提高模型预测精度的同时,却很大程度上提高了计算代价,尤其是大型水库的计算区域非常大,采用非稳态模型计算所花费的时间非常长。在实际工程中,大型水库在一个水文周期(丰、平、枯)内,水文条件和污染负荷往往变化不大,采用稳态模型就能满足工程要求。因此,笔者建立了一种考虑温度分层影响的大型水库稳态三维水质预测模型,并用二滩鳊鱼河支库的实测资料对

基金项目 :国家自然科学基金(50579043)

作者简介 :刘中峰(1985—),男,河北冀州人,硕士,从事环境水力学研究。E-mail :lzfeng555@126.com

通讯作者 :李然(1968—),女,河北无极人,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail :liran@china.com

水利水电科技进展 2010 30(2) Tel :025-83786335 E-mail :jz@hhu.edu.cn http://hkb.hhu.edu.cn

模型进行了验证。将模型应用到某大型水库,成功模拟出水质要素的三维分布特性。

1 数学模型

1.1 数学模型方程

数学模型方程包括连续方程、动量方程、 k 方程、 ϵ 方程及污染物输移方程。

连续方程

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial X_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial X_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] \tag{2}$$

k 方程

$$\frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right] + G - \rho \epsilon \tag{3}$$

ϵ 方程

$$\frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

污染物输移方程

$$\frac{\partial(\rho U_i \varphi)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_C} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial X_i} \right] + \rho S_\varphi \tag{5}$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$
$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$$

式中: i 为坐标方向, $i = 1, 2, 3$; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; U_i 为 i 方向的水流速度值, m/s ; P 为压强, Pa ; μ 为动力黏性系数, m^2/s ; μ_t 为紊动涡黏系数, m^2/s ; k 为紊动动能, m^2/s^2 ; ϵ 为紊动动能的耗散率, m^2/s^3 ; σ_k , σ_ϵ 和 σ_C 分别为紊动动能、紊动动能的耗散率和水质要素的 Prandtl 数,对应值分别为 1.0, 1.3 和 1.0; φ 为 DO, COD_{Cr} , TP, TN 等水质要素的质量浓度, mg/L ; C_μ , $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为模型常数,取值由基本实验确定^[7],分别为 0.09, 1.44 和 1.92; S_φ 为污染物输移方程的源项,具体形式见第 1.2 节。

1.2 污染物输移方程源项表达式

污染物输移方程源项表达式分为 2 种形式。

a. DO 方程源项。DO 方程源项分表层水体和底层水体 2 部分区别考虑。对于表层水体,DO 方程源项包括表面复氧和降解耗氧 2 部分;对于底层水体,DO 方程源项只有降解耗氧,而溶解氧的补充依靠输移扩散过程。表层水体和底层水体的 DO 方程源项 $S_{\varphi\text{表}}$ 及 $S_{\varphi\text{下}}$ 的表达式分别为

$$S_{\varphi\text{表}} = k_{\chi T} (C_S - C_{\text{DO}}) - k_{\chi T} L_C \tag{6}$$

$$S_{\varphi\text{下}} = -k_{\chi T} L_C \tag{7}$$

其中

$$C_S = 14.61 - 0.3493T + 7.314 \times 10^{-3}T^2 - 6.46 \times 10^{-5}T^3$$
$$k_{\chi T} = k_{\chi 20} \theta^{T-20}$$
$$k_{\chi 20} = \frac{176}{200 - 60\sqrt{U_{10}}} \frac{1}{h}$$

式中: $k_{\chi T}$ 为温度 T 时 COD_{Cr} 的降解系数, s^{-1} ; $k_{\chi T}$ 为温度 T 时的复氧系数, s^{-1} ; C_S 为水体中饱和溶解氧质量浓度(计算公式来源于文献[8]), mg/L ; C_{DO} 为水体 DO 质量浓度, mg/L ; L_C 为水体 COD_{Cr} 质量浓度, mg/L ; θ 为温度修正系数; $k_{\chi 20}$ 为温度在 20℃ 时的复氧系数(计算公式来源于文献[8]), s^{-1} ; U_{10} 为水面上 10 m 处的风速, m/s ; h 为表层水体厚度,计算中取 0.5 m。

b. 一般污染物输移方程源项。假定污染物随时间变化为一阶动力学反应,源项表达式为

$$S_\varphi = -k_{\chi T} L \tag{8}$$

其中

$$k_{\chi T} = k_{\chi 20} \theta^{T-20}$$

式中: $k_{\chi T}$ 为温度 T 时水质要素的降解(衰减)系数, s^{-1} ; $k_{\chi 20}$ 为温度在 20℃ 时相应水质要素的降解(衰减)系数, s^{-1} 。

1.3 模型求解

控制方程组的离散采用有限体积法。离散后的代数方程组采用 SIMPLEX 算法求解。

2 参数率定与模型验证

采用二滩鳊鱼河支库原型观测资料对模型进行参数率定与验证。

2.1 二滩水库概况

二滩水库位于金沙江支流雅砻江上。最大坝高 240 m,回水长度约 140 km。鳊鱼河支库是二滩库区右岸的主要支库,回水长度约 30 km。2008 年 7 月对鳊鱼河支库水温和 DO 分布进行了原型观测,同时收集整理了有关部门的鳊鱼河支库水文资料、TP 与 TN 定点取样监测资料及相关污染源资料,用于对三维水质模型进行验证。

2.2 计算区域及网格划分

二滩鳊鱼河支库上游由永兴河、惠民河和新坪河交汇而成。计算区域上游至永兴河汇口,下游至鳊鱼河入二滩主库的汇口,全长约 30 km。计算区域上表面水位与水库正常蓄水位一致,为 1200 m。计算区域垂向最大水深为 150 m,横向最大水面宽度为 1165 m。计算区域平面如图 1 所示。

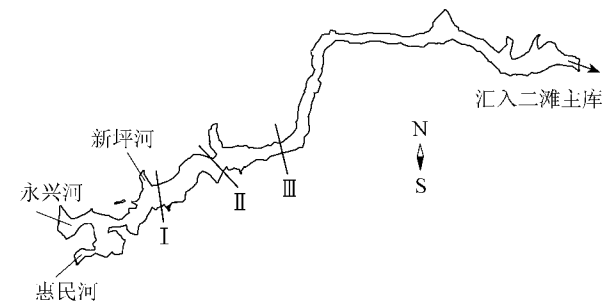


图1 计算区域平面示意图

计算区域共划分 163 740 个网格,其中横向最大网格间距为 55 m,纵向最大网格间距为 55 m,垂向最大网格间距为 10 m。网格划分情况如图 2 所示。

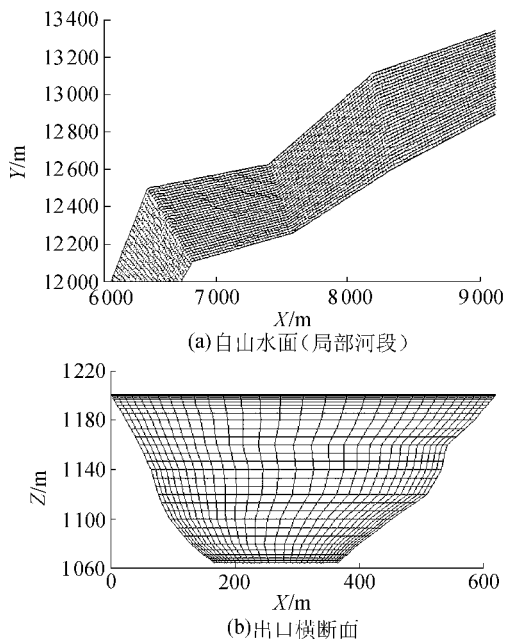


图2 鳊鱼河支库网格划分示意图

2.3 污染源

鳊鱼河支库的点源污染主要来自渔门镇的生活污水排放。该点源的污水排放量为 24.97 万 t/a,污水中各污染物的质量浓度分别为: $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) = 363 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 4.05 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TN}) = 61.6 \text{ mg/L}$ 。

经调查,库区所在位置为山区,耕地稀少,工农业很不发达,面源污染主要来自库区内的网箱养鱼。收集了库区渔业产量、饲料用量等渔业养殖资料,并根据文献调研成果^[9-10],计算得到鳊鱼河支库面源污染物排放量。在计算中,面源污染物随沿程汇流(末断面流量与起始断面流量之差,认为从两岸沿程均匀汇入)从两岸进入水体。面源污染排放特征值见表 1,其中质量浓度值为污染物排放量与沿程汇流量之比。

2.4 边界条件

入流边界包括永兴河、惠民河和新坪河 3 条支流入口、渔门镇生活污水排放口及两岸沿程汇流,设

表 1 鳊鱼河支库面源污染排放特征值

水质要素	排放量/(t·a ⁻¹)	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
DO		8.25
COD _{Cr}	1 176	6.99
TP	91.19	0.51
TN	393.775	2.22

置为速度入口。在入流边界给定速度分布和水质要素浓度分布,紊动特征量(紊动动能 k 和紊动能耗散率 ϵ)根据入口流速 u_0 和入口水深 H_0 按下述经验公式确定^[11]:

$$k = 0.00375 u_0^2 \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{0.4 H_0} \quad (10)$$

出流边界为鳊鱼河支库进入二滩库区的汇口断面,设置为充分发展的紊流边界,即所有标量(k, ϵ, φ)法向梯度为零,平面的法向速度分量梯度为零。在水面上给定对称面边界条件,即没有垂向的速度分量。水底为固壁边界,水动力学条件按标准壁函数法处理,并认为通过壁面的污染物通量为零。计算中,水温采用鳊鱼河支库 2008 年 7 月的实测数据。

2.5 验证结果与分析

模型中各水质要素的 $k_{(20)}$ 及 θ 初值参照已有的研究成果^[12-13]取值,见表 2。

表 2 各水质要素 $k_{(20)}$ 及 θ 取值

水质要素	$k_{(20)}/\text{d}^{-1}$	θ
DO		1.047
COD _{Cr}	0.0720	1.047
TP	0.0018	1.083
TN	0.0018	1.083

采用表 2 中模型参数初值,模拟得到二滩水库各水质要素的空间分布。表 3 给出了 I 断面(新坪河汇口)、II 断面(新坪河汇口下游 3 000 m)、III 断面(新坪河汇口下游 6 000 m)自由水面中间点上 TP 和 TN 模拟结果与实测结果的比较。由表中数据可以看出,数值模拟结果与实测结果吻合较好。

表 3 自由水面中间点 TP 和 TN 模拟结果与实测结果对比

水质要素	断面	实测结果 $c/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	模拟结果 $c'/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	c 误差/%
TP	I	0.080	0.082	2.50
	II	0.050	0.065	30.00
	III	0.090	0.087	-3.33
TN	I	0.460	0.442	-3.91
	II	0.450	0.444	-1.33
	III	0.450	0.464	3.11

$$\text{注: } c \text{ 误差} = \frac{c' - c}{c} \times 100\%$$

图 3 给出了惠民河汇口断面和新坪河汇口断面中垂线水面下 15 m 范围内 DO 模拟结果与实测结果的比较。从图 3 可以看出,模拟结果与实测结果总

体趋势接近 ,呈现上大下小的趋势。计算可得 2 个断面中垂线 DO 质量浓度的计算值和测量值的均方根误差分别为 0.78 mg/L 和 0.31 mg/L ,表明两者吻合较好。

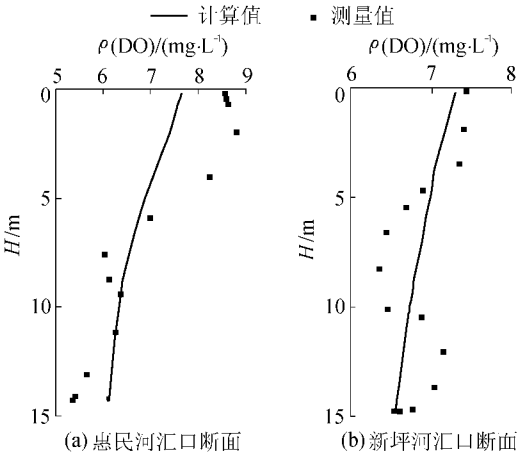


图 3 断面中垂线 DO 质量浓度模拟结果与实测结果对比

综合分析认为 ,基于上述模型参数的预测结果与监测结果误差较小 ,能够满足实际要求 ,可以用于对 TP ,TN ,COD_{Cr} 等污染物的数值模拟。

3 模型误差与适用性分析

在二滩鳊鱼河支库水质模拟中 ,基于对网箱养鱼规模的调查以及国内关于网箱养鱼污染的研究成果 ,进行了面源计算。由于目前关于网箱养鱼污染物排放特征的研究资料 and 水平有限 ,因此面源污染负荷水平的计算误差可能直接影响到水质模型预测结果的精度。

分析 DO 模拟结果与观测结果的差别 ,认为除本模型中考虑的污染物耗氧和表面复氧过程外 ,实际水库中还存在底泥耗氧、光合作用产氧等过程。这些过程的综合作用可能造成 DO 沿水深的非线性变化 ,而笔者建立的模型中忽略了这些作用 ,因此存在一定误差。另外 ,本模型没有考虑风力作用对水库垂向混合的影响 ,因此造成表面 DO 浓度较观测值偏低。模型仅考虑了温度分层对模型中降解系数、复氧系数的影响 ,没有考虑秋、冬季节由温度差引起的垂向混合作用 ,因此模型对秋、冬季节 DO 模拟误差可能较大。

对于水库中 TP 和 TN 等污染物的模拟 ,由于它们在水库中的垂向分层效果不明显 ,同时相对于 DO 来说 ,它们受表层复氧过程的影响较小 ,因此忽略风力混合作用和温度差产生的误差相对于 DO 来说要小得多。另外 ,水质取样中的随机性以及测点代表性也可能影响到对模型精度的判断。

4 模型应用

将上述模型应用于国内某在建大型水库的水质

预测研究 ,成功模拟出该水库 BOD ,DO ,COD_{Cr} 等水质要素的三维分布情况。受篇幅所限 ,在此仅给出该水库某库湾段丰水期 COD_{Cr} 的模拟结果。该库湾长约 11 km ,共划分 190 × 31 × 27(纵向 × 横向 × 垂向) 个网格。

图 4 给出了自由水面 COD_{Cr} 质量浓度分布的模拟结果。可以看出 ,受污水排放影响 ,石灰窑沟汇口出现污染带 ,污染带横向宽度最大达到 70 m ,纵向延伸至库湾出口。污染带横向影响范围较小 ,这主要是由于沟口下游河道束窄而形成回流区 ,抑制了 COD_{Cr} 在横向的扩散。

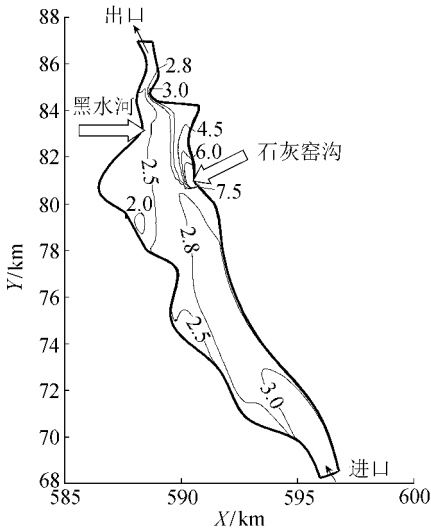


图 4 丰水期自由水面 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 分布示意图(单位 :mg/L)

图 5 给出了黑水河汇口上游断面 COD_{Cr} 质量浓度分布的模拟结果。从图 5 中可以看出 ,COD_{Cr} 质量浓度分布在垂向没有出现明显的分层现象。但是由于石灰窑沟污水汇入的影响 ,右岸 COD_{Cr} 质量浓度比左岸高。

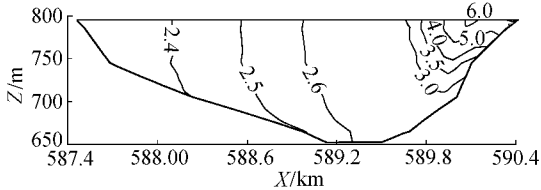


图 5 丰水期黑水河汇口上游断面 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 分布示意图(单位 :mg/L)

5 结论与展望

建立了大型水库三维水质预测模型 ,并在污染物输移方程中采用了考虑温度分层影响的源项表达式。采用二滩鳊鱼河支库原型观测资料对模型进行验证 ,模拟结果和监测数据吻合较好 ,表明该模型是可靠的。将模型应用于某在建大型水库的水质预测 ,成功模拟出水质三维分布特性 ,模拟结果对于开展水环境影响的定量预测评价、制定水库水污染防治规划、保

护库区水环境具有一定的理论意义和应用价值。

需要指出的是,本文工作是对三维水质预测模型研究的初步探索。模型在污染源特别是面源估算、水温分布引起的密度流影响、水库底泥及光合作用影响等方面尚存不足。此外,没有模拟水温,而是将水温数据作为边界条件输入模型。因此,在深入污染源研究基础上,综合考虑各种影响因素,建立水温、水质耦合求解的三维水质预测模型值得进一步研究和探索。

参考文献:

[1] LI Ran, FU Xiao-ying, LI Jia, et al. Three-dimensional numerical simulation of BOD-DO for large reservoir[J]. Journal of Hydrodynamics : Ser B 2002 3 50-53.

[2] 聂晶. 水库水体总磷三维数学模型及其应用[D]. 长春: 吉林大学 2004.

[3] MAO Jing-qiao, CHEN Qiu-wen, CHEN Yong-can. Three-dimensional eutrophication model and application to taihu lake, China[J]. Journal of Environmental Sciences 2008 20 (3) 278-284.

[4] ARHONDITSIS G B, BRETT M T. Eutrophication model for Lake Washington(USA) Part I : model description and sensitivity analysis[J]. Ecological Modelling 2005 187(2/ 3) :140-178.

[5] ARHONDITSIS G B, BRETT M T. Eutrophication model for lake washington(USA) Part II : model calibration and system dynamic analysis[J]. Ecological Modelling 2005 187(2/ 3) :179-200.

[6] 王冠, 韩龙喜, 常文婷. 基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J]. 水资源保护 2009 25(2) 59-63.

[7] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京: 河海大学出版社 1989 54.

[8] JEAN-MARC T. Simulation of a mesotrophic reservoir(Lake Pareloup) over a long period(1983-1998) using ASTER2000 biological mode[J]. Water Research 2004 38(2) 393-403.

[9] 陈丁, 郑爱榕. 网箱养殖的氮、磷和有机物的污染及估算[J]. 福建农业学报 2005 20(B12) 57-62.

[10] 陈德春. 投饵式网箱养鱼对水质的影响及保护措施[J]. 水利渔业 1993(2) 23-26.

[11] 邓云. 大型深水库的水温预测研究[D]. 成都: 四川大学 2003.

[12] 饶群. 大型水体富营养化数学模拟的研究[D]. 南京: 河海大学 2002.

[13] 黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 等. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2006 211-221.

(收稿日期 2009-08-21 编辑: 高建群)

(上接第 4 页)

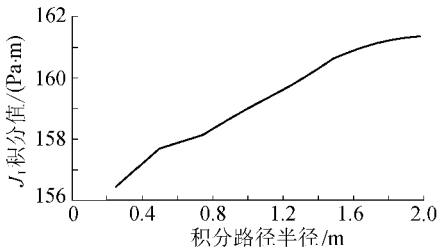


图 7 不同积分路径 J_1 积分计算值

4 小 结

鉴于 J 积分从能量角度对含裂缝物体的应力应变场进行分析, 可以避开裂纹尖端应力应变求解的困难, 将三维 J 积分计算并入有限元计算程序中, 并对计算实现的技术方法进行了讨论, 包括通过建立节点间的邻接矩阵实现积分回路拓扑搜索以及积分计算的离散方法等。实例分析表明其与合理选取外推节点计算的 K_I 具有类似的计算结果。但 J 积分对单元尺寸大小要求不高, 路径依赖性也很小, 作为裂缝稳定性与否的判断依据更有可比性及参考性, 可有效提高对裂缝的分析水平。

参考文献:

[1] 黄耀英, 吴中如, 顾冲时, 等. 缝端应力强度因子对网格尺寸的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报 2007 26 (S2) 41-47.

[2] 李先明, 秦忠国. 闸墩混凝土表面温度裂缝稳定性断裂力学分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版 2007 35(4) : 422-424.

[3] 李子阳, 王建, 金永强. 大坝水平裂缝稳定性分析[J]. 水力发电 2007 33(7) 36-41.

[4] 李同春, 刘晓青, 吕泰仁, 等. 柘溪水电站多联体坝裂缝稳定三维随机分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版 1997 25(增刊) 86-89.

[5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社 1998.

[6] 于晓中, 张彦秋, 曹建国, 等. 混凝土复合型(I、II 型) 裂纹断裂准则的计算和试验研究[J]. 水利学报 1982 (6) 27-37.

[7] RICE J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crack[J]. Appl Mech 1968 35 379-386.

[8] 陈国栋, 吕运冰, 汪冬生. 空间体 J 积分表达式及其守恒性[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版 2007 31(1) :130-132.

[9] 宫本博. 弹塑性断裂力学[M]. 杨秉宪, 王幼复, 编译. 太原: 山西人民出版社 1983.

[10] 李子阳, 谷艳昌, 张磊. 基于 Marc 的高拱坝蓄水期变形分析[J]. 水利水电科技进展 2008 28(4) :15-19.

[11] 沈长松, 陆绍俊, 林益才. 混凝土重力拱坝下游面裂缝断裂稳定性初析[J]. 河海大学学报: 自然科学版 1995 23(1) 22-29.

[12] KANNINEN M V F, POPELAR C H. 高等断裂力学[M]. 洪其麟, 郑光华, 郑祺选, 等, 译. 北京: 北京航空学院出版社 1987.

(收稿日期 2009-06-04 编辑: 高建群)