

泥浆护壁开挖稳定性的影响因素及失稳机理综述

雷国辉¹, 王 轩¹, 雷国刚²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京市水利建筑工程总公司, 江苏 南京 210036)

摘要 : 为提高泥浆护壁条件下开挖稳定性的认识, 在收集和整理现有研究成果的基础上, 分析了泥浆护壁开挖稳定性的影响因素, 包括泥浆性质、地基土质条件、开挖槽段的形状以及施工机械和工艺等。同时, 根据现场试验和理论研究成果, 从土拱效应、时间效应、整体稳定性和局部稳定性等方面分析了泥浆护壁开挖的失稳机理。结果表明, 浅层槽壁失稳是泥浆护壁开挖的主要失稳型式, 开挖槽段的长度和泥浆液面与地下水位面的高差是控制泥浆护壁开挖稳定性的关键参数。

关键词 : 泥浆护壁开挖; 稳定性; 失稳机理; 土拱效应; 膨润土泥浆

中图分类号 : TU753.8 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2006)01-0082-05

Stability influencing factors and instability mechanism of slurry-supported excavations/LEI Guo-hui¹, WANG Xuan¹, LEI Guo-gang²(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Water Conservancy Construction Corporation, Nanjing 210036, China)

Abstract : In order to improve the understanding of excavation stability under slurry supporting condition, an analysis was performed of some influencing factors, including the properties of slurry, the ground condition, the shape of excavated trenches, the operation of excavation equipment, the workmanship of construction, etc. Based on field test and theoretical analysis, the mechanism of instability of slurry-supported excavations was investigated from angles of soil arching effect, time-dependent effect, overall stability, and local stability. The result shows that the trench wall failure at shallow depth is the major failure mode of the slurry-supported excavation, and that the length of the excavated trenches and the difference between the slurry head and the water level are the key parameters controlling the stability of the slurry-supported excavation.

Key words : slurry-supported excavation; stability; mechanism of instability; soil arching effect; bentonite slurry

泥浆护壁成槽技术最早成功应用于石油钻井工程^[1], 随后在水利与卫生填埋工程中的防渗墙, 以及土木建筑工程中的桩基础和地下连续墙等施工领域也得到了广泛的应用和发展。众所周知, 泥浆护壁开挖的稳定性是保证这类施工工程顺利开展的关键。虽然在长期的工程实践中, 泥浆护壁技术在施工工艺、施工机械和设备、施工质量控制等方面已经较为成熟, 但是开挖失稳并导致邻近建筑物损坏或人民生命财产损失的情况仍然时有发生^[2-5]。其主要原因在于, 影响泥浆护壁条件下开挖稳定性的因素众多而且复杂, 工程技术人员对其认知程度还相对不够充分和完备, 导致开挖稳定控制的经验性占优, 而开挖失稳的科学预见性不足。

为提高泥浆护壁条件下开挖稳定性的认识, 本文在收集和整理现有研究成果的基础上, 分析了泥浆护壁开挖稳定性的内在和外界影响因素, 内在因素包括泥浆的性质、地基的土质条件、地下水位以及

开挖的形状和尺寸, 外界因素包括开挖机械、开挖时间、施工顺序以及施工荷载等。同时, 根据现场试验和理论研究的成果, 从土拱效应、时间效应、开挖的整体稳定性和局部稳定性等方面分析了泥浆护壁开挖的失稳机理。

1 泥浆护壁开挖稳定性的影响因素

1.1 泥浆的性质

目前, 泥浆护壁技术中绝大多数采用的是膨润土泥浆, 聚合物泥浆的应用还处于研发阶段^[6]。膨润土主要由晶层间吸附可交换钠离子或钙离子的蒙脱石黏土矿物组成, 它在水中可以水化。在没有添加剂时, 膨润土在咸水中会絮凝。膨润土泥浆具有触变性, 这是由于黏土矿物在水中会形成薄板状颗粒的悬液, 颗粒表面和端头部分别带有负电荷和正电荷, 通过正负电荷间的引力作用, 在颗粒间形成弱胶结, 使得膨润土泥浆在静置时絮凝, 扰动时液

化^[7,8]。膨润土泥浆的这种弱胶结性质在开挖护壁中有两个作用,其一,可以悬浮部分开挖土颗粒,减少槽底浮泥;其二,当泥浆向孔周围土体入渗,土颗粒间的孔隙被黏土颗粒封堵后,很快就可以在槽壁上形成一层类似于不透水薄膜的泥皮,以保证泥浆的静液压力作用在开挖槽壁上,抵抗槽壁周围地基土体的土压力和水压力^[1,8]。

膨润土泥浆是一种宾汉流体,即泥浆必须克服其剪切屈服应力 τ_s 才能流动。工程中,新鲜膨润土泥浆通常是按照占总质量4%~8%的膨润土与水配置而成的, τ_s 一般小于 7×10^{-3} kPa,容重 γ_s 介于 $10.0 \sim 10.3$ kN/m³之间,黏滞度 μ_s 小于 3×10^{-5} kPa·s^[9]。要达到相同的 τ_s ,采用钙基膨润土比钠基膨润土所需的配比要高^[2]。

在成槽过程中,泥浆容重和泥浆液面与地下水位面的相对高差对开挖稳定性的影响效果是显而易见的。由于泥浆能够悬浮开挖土体中的细颗粒,从而可以增加泥浆的容重^[9],有利于提高开挖的稳定性,这一点在现场实测结果中已得到了验证^[1,2]。

1.2 地基土质条件

毫无疑问,地基土的抗剪强度指标是影响开挖稳定性的主要因素之一。此外,土的密实度对稳定也有影响。文献[10]根据90个样本的统计分析结果显示,深度在1~4 m以内无泥浆护壁开挖的浅槽当中,有约84%的失稳发生在人工回填土层。泥浆护壁条件下,土的级配和粒径会影响泥浆的容重、泥浆向槽壁周围土体的渗透、泥皮的形成及其厚度,从而影响开挖稳定性。

泥浆可以悬浮土颗粒的最大粒径为^[2]

$$d = \frac{6\tau_s}{\gamma - \gamma_s} \quad (1)$$

式中: γ 为土颗粒的容重, kN/m³。对于4%配比的泥浆, $\tau_s < 2 \times 10^{-3}$ kPa^[2,7,9],它所能悬浮的最大土颗粒粒径约为2 mm,因此,在砾类土中采用泥浆护壁开挖时,泥浆的容重因土颗粒的悬浮而增加的程度不大,对提高稳定性的作用不大。此时应增加新鲜泥浆的配比以提高泥浆自身的容重,满足稳定所需要的护壁压力。

室内试验表明^[9],当小于某粒径的土粒含量为15%的土粒粒径 $d_{15} \leq 0.4$ mm时,槽壁周围地基土体能够对膨润土泥浆有效反滤,泥皮只能在开挖槽壁上形成,而入渗困难。土颗粒粒径和孔隙比越大,泥浆入渗的距离也越长。在开挖槽壁两侧泥浆压力与水压力差 Δp 作用下,泥浆渗入到地基土体中达到最大距离 l 时的滞流临界水力梯度为^[9]

$$i_0 = \frac{\Delta p}{\gamma_w l} = \frac{9.3\tau_s}{\gamma_w d_{5e}} \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的容重, kN/m³; e 为土体的孔隙比; d_5 为小于该粒径的土粒含量为5%的土粒粒径, μm 。根据式(2)也可以估算出泥浆的最大入渗距离。滞流临界水力梯度可以用于槽壁局部稳定性的分析。

泥浆的渗入使得槽壁周围土体变成为土与膨润土的混合物,土中的孔隙被泥浆充填,这将影响土的抗剪强度指标。文献[11]认为,对于天然沉积的密实粒状土,它在剪切应变作用下会产生剪胀,体积增加会引起孔隙中的泥浆向剪切区流动,然而,泥浆的流动只有在克服了需要的临界水力梯度或剪切屈服应力后才会发生,由此产生的负孔压将提高土体的抗剪强度。不过,砂与膨润土混合物的室内试验结果却显示,膨润土的存在能够削弱剪胀特性^[12],并不会提高土的抗剪强度^[12,13],甚至会降低土的抗剪强度^[1,3]。膨润土对砂土抗剪强度的影响还有待进一步的研究。

1.3 地下水位

从力学角度看,泥浆压力必须大于地下水压力并平衡掉部分土压力,护壁作用才能有效发挥。泥浆液面与地下水位面之间的相对高差因此成为工程实施的控制条件之一。一般都要求泥浆液面高出地下水位1 m或1.5 m以上。许多研究泥浆护壁开挖槽段稳定性的室内模型^[3,11,14]、离心模型^[15,16]和现场试验^[17-20]就是按照抬高地下水位面增加地面超载^[3,11,14],或降低泥浆液面高度^[15-19],或采用水或油置换泥浆降低其容重^[20]等方法而开展的。一些失稳的实例有时是由于地下断层、裂隙或岩溶发育造成漏浆或跑浆引起泥浆液面下降到地下水位以下导致的^[4,5],或者是由于突发洪水引起地下水位上升高于泥浆液面而产生的^[2]。因此,提高对地基的水文地质条件的认识,可以提高泥浆护壁失稳的科学预见性,提前或及时采取有效措施,预防突发失稳事件的发生。

1.4 开挖槽段的形状

泥浆护壁开挖工程中槽段的形状主要有圆形(比如灌注桩)和矩形(比如地下连续墙),有时也有“T”形开挖^[21]。显而易见,轴对称的圆形槽的开挖稳定性要高于矩形和其他形状的槽段。这是因为轴对称情况下,槽壁上土体径向应力的释放大部分会转移到环向应力当中,形成封闭的应力拱。对于矩形槽,其长度则是影响开挖稳定性的主要因素^[22]。有限的整体失稳^[2-5]和局部失稳^[23,24]实例都发生在槽长大于5 m的情况。这可能是由于槽段越长,开挖引起的应力重分布更接近于平面应变情况,土拱效应减弱的缘故。相比而言,开挖深度(通常都在

20 m 以上)似乎对稳定性的影响并不显著。

1.5 开挖机械

显然,开挖机械的重量和施工振动对泥浆护壁开挖的稳定性是不利的。因此开挖前通常需埋设深度为 1~2 m 的钢护筒或混凝土导墙,一方面提高表层临空面土体的稳定性,另一方面控制开挖的垂直度。在开挖过程中,挖斗的形状、循环往复的提升和下降速度会影响挖槽中泥浆的流动,使槽壁周围地基土体的孔隙水应力上升^[25],当泥浆的流动从层流过渡为湍流时,槽壁上的泥皮或土颗粒将会受到冲刷,增加局部破坏甚至可能整体失稳的风险。文献[26]分析了挖斗的操作速度 v_w 对稳定性的影响。根据开挖槽口的面积 A_k 和挖斗所占面积 A_w 的大小,可以计算出挖斗提升或下放时泥浆的流速:

$$v_s = \frac{A_w v_w}{A_k - A_w} \quad (3)$$

泥浆流动的等效水力直径为

$$D = \frac{4(A_k - A_w)}{p_{kw}} \quad (4)$$

式中: $A_k - A_w$ 为泥浆流的断面面积; p_{kw} 为泥浆流的湿润周长,即泥浆与槽壁和挖斗接触的边界线周长。

由此,可以计算出赫斯特罗姆数为

$$H_e = \frac{\tau_s D^2 \rho_s}{\mu_s^2} \quad (5)$$

式中: ρ_s 为泥浆的密度, t/m^3 。

雷诺数为

$$Re = \frac{v_s D \rho_s}{\mu_s} \quad (6)$$

通过宾汉流体的摩擦系数、赫斯特罗姆数与雷诺数之间的关系,就可以判断泥浆的流动是属于层流或湍流,以此确定合理的挖斗操作速度。比如,对于直径为 1 m 的挖斗,通常其开挖孔口的直径可达 1.2 m。若挖斗以 1 m/s 的速度下放则由式(3)和式(4)可分别计算得到泥浆的流速为 2.27 m/s,等效水力直径为 0.2 m,对于按 5% 配比的泥浆,如果 $\tau_s = 6.7 \times 10^{-3}$ kPa, $\mu_s = 8 \times 10^{-6}$ kPa·s, $\rho_s = 1.03 t/m^3$,由式(5)和式(6)可计算得到赫斯特罗姆数和雷诺数分别为 4.32×10^6 和 5.8×10^4 。而与计算的赫斯特罗姆数相对应的从层流向湍流开始过渡的雷诺数为 5.0×10^4 ,这说明挖斗的操作速度如果超过 1 m/s,湍流就有可能发生^[26]。因此,挖斗的操作速度应控制在合理的水平,以免危及开挖的局部甚至整体稳定性。

1.6 施工工艺

施工的顺序对槽壁的稳定性也有一定的影响。对于地下连续墙或防渗墙工程,采取间隔施工比顺序施工更有利于地基土拱效应的发挥,提高开挖的稳

定性。此外,开挖时间或槽孔的静置时间如果过长,泥浆会发生絮凝和沉淀,泥浆的容重将减小,降低开挖的稳定性。因此,泥浆护壁开挖成槽后应及时下放钢筋笼、浇注混凝土或防渗材料。

2 失稳机理

2.1 土拱效应与时间效应

文献[17]采用有限元法分析了槽段开挖周围地基土体在水平面上的主应力分布,形象地描述了土拱效应对应力重分布的影响。由于土拱效应,部分槽段中部的土压力会向端部土体转移,减小失稳压力。显然,土拱效应对于提高开挖的稳定性是有利的。

此外,由于开挖卸荷引起的地基土体超静孔隙水应力随时间的消散会导致槽壁周围地基土体的位移持续发展^[18,20,27],因而会降低开挖的稳定性^[27,28]。渗透性高的砂性土与黏性土相比,这种时间效应更短暂^[28],因此,在这种地层中,施工速度应尽量快捷以保证开挖的稳定性。

2.2 整体稳定性

对泥浆护壁开挖工程实践中失稳事件的调查以及模型和现场试验研究的结果可以发现,虽然槽孔的开挖深度通常都大于 20 m,但失稳往往发生在表层^[2]或深度约 5~15 m 内的浅层土中^[14,17,19,20,29],在导墙正下方的土体可以观察到有鼓出现象^[29],失稳破坏面在地表平面上会沿整个槽长展布^[2,4,5],基本呈椭圆形^[4,5],失稳通常发生在当泥浆高度降到地下水位以下约 1 m 的时候^[17]。失稳时地基的变形速率约在 0.1 mm/h 的量级^[20]。泥浆护壁开挖槽段稳定性的二维和三维对比分析也显示^[29],平面应变情况下,深层土体的稳定性最差,而三维情况下,在接近地表位置土体的稳定性最差。离心试验还显示^[16],地面有超载情况下,浅层失稳更容易发生。因此,表层或浅层失稳是泥浆护壁开挖的主要失稳型式。

三维数值分析发现,正常施工条件下,导墙或护筒对整体稳定性的影响非常小^[15,30],泥浆液面与地下水位的相对高差恒定时,地下水位越低,开挖的整体稳定性越差^[31];在各种因素中,泥浆液面与地下水位的高差对开挖稳定性的影响最敏感^[32]。另外,采用基于塑性上下限理论的三维有限单元分析表明,相同条件下,方形孔比圆形孔的稳定数(即 $N = \gamma h / c_u$,其中 γ 和 c_u 分别为土的容重和不排水强度, h 为开挖槽的深度)要小^[33],开挖的整体稳定性主要受槽壁而非槽底的稳定性所支配^[34]。

2.3 局部稳定性

当地基土体有软弱夹层时,开挖的局部稳定性

将受到威胁,常常会引起超挖现象^[23,24],导致后续灌注混凝土或防渗材料的充盈系数增大,增加施工成本和难度。除了受土体的剪切强度影响外,泥浆护壁开挖的局部稳定性还受泥浆向槽壁周围地基入渗的影响。在泥皮形成以前,泥浆入渗将产生渗透力,以维持新鲜开挖面即槽壁上土体的局部稳定。根据受力平衡分析,文献[9]将抗槽壁塌落的局部稳定安全系数定义为由入渗方向(即水平向)渗透力作用产生的槽壁面上(即竖向)土粒间的摩擦力与土粒有效重量的比值,即

$$F_{\text{local}} = \frac{\gamma_w i_0 \tan \varphi_f}{\gamma_f - \gamma_s} \quad (7)$$

式中: φ_f 为有泥浆渗入的土体的内摩擦角($^\circ$); γ_f 为有泥浆渗入的土体容重, kN/m^3 ; γ_w 和 i_0 的含义参见式(2)。

式(7)的应用结果表明^[9], d_5 对泥浆护壁开挖槽壁局部稳定性的影响非常敏感。从式(2)和式(7)可以看出,在细粒土中开挖的局部稳定性要比粗粒土高。

3 结 论

从泥浆护壁开挖稳定性影响因素和失稳机理的分析中,可以得到以下结论:①开挖槽段的长度和泥浆液面与地下水位面的高差是控制泥浆护壁开挖稳定性的关键控制参数;②开挖的整体稳定性主要受槽壁而非槽底的稳定性所支配,浅层失稳是泥浆护壁开挖的主要失稳型式;③挖斗的操作速度和土粒粒径对泥浆护壁开挖槽壁局部稳定性的影响非常敏感;④在细粒土中开挖的局部稳定性和整体稳定性要比粗粒土高;⑤提高对地基的水文地质条件、土拱效应和时间效应的认识,可以提高泥浆护壁失稳的科学预见性,预防失稳的发生。

参考文献:

- [1] NASH K L. Stability of trenches filled with fluid[J]. Journal of the Construction Division, 1974, 100(4): 533-542.
- [2] MORGENSTERN N, AMIR-TAHMASSEB I. The stability of a slurry trench in cohesionless soils[J]. Géotechnique, 1965, 15(4): 387-395. (discussions in 1966, 16(2): 175-178; 16(3): 263-264).
- [3] HAJNAL I, MÁRTON J, REGELE Z. Construction of diaphragm wall[M]. Translated by SIMON A B. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1984.
- [4] 李广诚. 黄庄水库副坝防渗墙施工地面塌陷原因分析[J]. 水利技术监督, 2003(2): 43-47.
- [5] 刘杰. 黄庄水库副坝塌陷原因分析[J]. 水利水电工程学报, 2003(4): 20-24.
- [6] MAJANO R E, O'NEILL M W, HASSAN K M. Perimeter load

- transfer in model drilled shafts formed under slurry[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2136-2154.
- [7] JONES G K. Chemistry and flow properties of bentonite grouts [G]//ICE. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. London: Butterworths, 1963: 22-28.
- [8] REESE L C, TUCKER K L. Bentonitic slurry in constructing drilled piers[G]//BAKER C N. Drilled Piers and Caissons II. New York: ASCE, 1985: 1-15.
- [9] FILZ G M, BOYER R D, DAVIDSON R R. Bentonite-water slurry rheology and cutoff wall trench stability[G]//EVANS J C. In Situ Remediation of the Geoenvironment, Geotechnical Special Publication No. 71. New York: ASCE, 1997: 139-153.
- [10] TOYOSAWA Y, HORII N, TAMATE S. Analysis of fatal accidents caused by trench failure[G]//PRAKASH S. Proceedings of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Vol. 2. St. Louis, Missouri [s. n.], 1993: 751-758.
- [11] ELSON W K. An experimental investigation of the stability of slurry trenches[J]. Géotechnique, 1968, 18(3): 37-49.
- [12] TEKLE M. The stress-strain behavior of sand-bentonite mixtures[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [13] FILZ G M, ADAMS T, DAVIDSON R R. Stability of long trenches in sand supported by bentonite-water slurry[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 915-921.
- [14] 李会民, 王士川. 地下连续墙槽壁稳定模型试验及极限平衡状态的研究[J]. 陕西建筑, 1993(3): 27-31.
- [15] OBLOZINSKY P, UGAI K, KATAGIRI M, et al. A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elasto-plastic FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(2): 145-159.
- [16] KATAGIRI M, SAITOH K, MASUDA T, et al. Shape effect on deformation behaviour and stability of slurry trench walls constructed in sandy ground[G]//ASAOKA A, ADACHI T, OKA F. Deformation and Progressive Failure in Geomechanics. Oxford: Pergamon, 1997: 665-670.
- [17] WONG G C Y. Stability analysis of slurry trenches[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(11): 1577-1590.
- [18] TAMANO T, FUKUI S, SUZUKI H, et al. Stability of slurry trench excavation in soft clay[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(2): 101-110.
- [19] TSAI J S, JOU L D, HSIEH H S. A full-scale stability experiment on a diaphragm wall trench[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 379-392.
- [20] AAS G. Stability of slurry trench excavations in soft clay[G]//ISSMFE. Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Vol. 1. Vienna [s. n.], 1976: 103-110.
- [21] BERTERO M, MARCELLINO P. Stability of trenches under bentonite suspension[G]//ISSMFE. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation

Engineering :Vol.1. Stockholm [s.n.] ,1981 41-46.

[22] BOLTON M D ,ENGLISH R ,HIRD C C ,et al. Ground displacements in centrifugal models[C]//ISSMFE. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering :Vol.1. Moscow [s.n.] ,1973 65-70.

[23] TSAI J S. Stability of weak sublayers in a slurry supported trench[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1997 ,34(2) :189-196.

[24] TSAI J S ,CHANG C C ,JOU L D. Lateral extrusion analysis of sandwiched weak soil in slurry trench[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,1998 ,124(11) :1082-1090.

[25] HOSOI T. Increase in pore water pressure during excavation [G]//BALASUBRAMANISA A S ,BERGADO D T. Proceedings of Geotech-Year 2000 ,Developments in Geotechnical Engineering :Vol.1. Bangkok ,Thailand [s.n.] 2000 243-252.

[26] WASHBOURNE J. The stability of vertical shaft excavations [J]. Ground Engineering ,the Magazine of the British Geotechnical Association ,1985 ,18(5) :16 ,18-19.

[27] TAMANO T ,NGUYEN H Q ,KANAOKA M ,et al. Deformation and failure of slurry trench in reclaimed soft clay :numerical analysis[C]//LEUNG C F ,PHOON K K ,CHOW Y K ,et al. Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering :Vol. 1. Singapore : World Scientific Publishing 2003 825-828.

[28] 姜朋明 ,胡中雄 ,刘建航. 地下连续墙槽壁稳定性的时空效应分析[J]. 岩土工程学报 ,1999 21(3) 338-342.

[29] WASHBOURNE J. The three-dimensional stability analysis of diaphragm wall excavations[J]. Ground Engineering ,the Magazine of the British Geotechnical Association ,1984 ,17(4) 24-26 28-29.

[30] OBLOZINSKY P ,UGAI K ,KATAGIRI M ,et al. 3D FE analysis on slurry trench stability and active earth pressure[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema 2001 :1527-1530.

[31] ISHII T ,KATAGIRI M ,SAITOH K ,et al. Modeling of sandy ground for the stability analysis of slurry trench[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema 2001 :1579-1582.

[32] TSAI J S ,CHANG J C. Three-dimensional stability analysis for slurry-filled trench wall in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1996 ,33(5) 798-808.

[33] LYAMIN A V ,SLOAN S W. Stability analysis of circular and square excavations[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema ,2001 :1583-1587.

[34] BRITTO A M ,KUSAKABE O. On the stability of supported excavations[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1984 ,21(2) :338-348.

(收稿日期 2004-10-08 编辑 熊水斌)

(上接第 76 页)

[9] HAYES D F ,LABADIE J W ,SANDERS T G. Enhancing water quality in hydropower system operations[J]. Water Resources Research ,1998 ,34(3) 471-483.

[10] 张玉新 ,冯尚友. 水库水沙联调的多目标规划模型及其应用研究[J]. 水利学报 ,1988(9) :19-26.

[11] AVOGADRO E ,MINCIARDI R ,PAOLUCCI M. A decisional procedure for water resources planning taking into account water quality constraints[J]. European Journal of Operational Research ,1997 ,102 320-334.

[12] CAI Ximing ,MCKINNEY D C ,LASDON L S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management 2003 ,129(1) 4-17.

[13] 李大勇 ,刘凌 ,董增川 ,等. 改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J]. 水利水电科技进展 ,2004 ,24(6) :17-20.

[14] 尹明万 ,谢新民 ,王浩 ,等. 基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置[J]. 水利水电科技进展 ,2004 ,24(2) 5-8.

[15] 李考真 ,任淑梅. 地表水水量水质联合调度研究 :以徒骇河聊城段为例[J]. 聊城师院学报 ,1999 ,18(2) 72-76.

[16] CAMPBELL S G ,HANNA R B ,SCOTT J F. Modeling Klamath river system operations for quantity and quality[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2001 ,127(5) :284-294.

[17] AZEVEDO L G T ,FONTANE D G ,LABADIE J W. Integration of water resource quantity and quality in strategic river basin planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management 2000 ,126(2) 85-97.

[18] CAMPBELL J E ,BRIGGS D A ,DETON R A. Water quality operation with a blending reservoir and variable sources[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2002 ,128(4) 288-302.

[19] LOFTIS B ,LABADIE J W ,FONTANE D G. Optimal operation of a system of lakes for quality and quantity[G]//TORNO H C. Computer Applications in Water Resources. New York : ASCE ,1989 693-702.

[20] DAI Twei ,LABADIE J W. River basin network model for integrated water quantity/quality management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2001 ,127(5) :295-305.

[21] PINGRY D E ,SHAFTEL T L ,BOLES K E. Role for decision-support systems in water-delivery design[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,1990 ,116(6) 629-644.

[22] 施光燕 ,董加礼. 最优化方法[M]. 北京 :高等教育出版社 2003.

[23] HAIMES Y Y. 水资源系统分析[M]. 陈益秋 ,译. 北京 :中国环境问题研究会 ,1981.

[24] 杨志峰 ,崔保山 ,刘静玲 ,等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京 :科学出版社 2003.

[25] 杨志峰 ,曾勇. 跨边界区域水资源冲突与协调模型与应用(I) 模型体系[J]. 环境科学学报 2004 ,24(1) 71-76.

(收稿日期 2005-01-13 编辑 熊水斌)