

暴雨情形下含裂隙土质边坡的瞬态稳定性

王晓磊¹,王旭春¹,管晓明²,张 鹏³

(1. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044;
3. 中国矿业大学力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:以山西省安太堡露天煤矿某地质剖面为例,采用 Slide 软件对暴雨情形下含裂隙土质边坡的稳定性进行分析,确定边坡潜在滑动面的位置,合理布置促使边坡发生推移式滑坡和牵引式滑坡的裂隙,应用 MIDAS/GTS 软件模拟分析降雨条件下的坡体应变规律和边坡稳定情况。结果表明:随着降雨入渗,边坡塑性区自坡脚向上部不断发展,直至形成贯通的塑性区;在持续降雨 1.5 d 时,边坡的稳定性最差,存在表层滑动可能;所提出的边坡裂隙布置方式更能反映含裂隙土质边坡在暴雨情形下的实际情况。

关键词:土质边坡;暴雨;裂隙;稳定系数;降雨入渗;滑动面;塑性区

中图分类号:TU413.6⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)06-0022-05

Transient stability of soil slopes with fissures under rainstorm condition//WANG Xiaolei¹, WANG Xuchun¹, GUAN Xiaoming², ZHANG Peng³(1. College of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. College of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking a geological profile of Antaibao Coal Mine in Shanxi Province as an example, the stability of the soil slope with fissures is analyzed by using the software Slide. The position of potential sliding surface is determined, and then the slope fissures that lead to trust landslide and tractive landslide are reasonably arranged. The strain rules and stability of the slope under rainstorm condition are simulated by means of the software MIDAS/GTS. The results show that with the infiltration of rainfall, the plastic zone of the slope develops continuously from the toe of the slope upward until the formation of the coalescent plastic zone. The stability of the slope is the worst when the rainfall infiltration lasts for 1.5 days, and shallow sliding may occur. The proposed arrangement mode of fissures for slopes can better reflect the actual situation of soil slopes with fissures under rainstorm cases.

Key words: soil slope; rainstorm; fissure; stability coefficient; rainfall infiltration; sliding surface; plastic zone

降雨诱发边坡失稳占据了滑坡灾害相当的比重,造成了大量的人员伤亡与财产损失。《中国重大地质灾害实例分析》^[1]列举了 27 个国家重大地质灾害,其中有 15 个就是由于降雨所引发。《中国典型滑坡》^[2]一书中实录了 90 多例滑坡,90% 以上发生在雨中和雨后。降雨诱发边坡失稳在我国广泛存在,造成了大量的人员伤亡与财产损失^[3-4]。

以往的研究中,膨胀土、杂填土和裂隙黏土等含裂隙土质边坡的稳定分析大多采用传统的静力平衡法和统计比较判别法等,坡体统一按饱和状态进行计算,并且忽略了裂隙的作用^[5-6],这与现场实际情况差别较大。近年来,人们逐渐认识到土体的非饱和状态以及边坡裂隙对边坡稳定性的影响,并做了大量的研究工作,结果表明考虑裂隙和边坡降雨入渗影响的稳定性分析方法较为合理和实用^[7-10]。殷宗泽等^[11]提出了一种以条分法为基础,近似反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,将膨胀土坡划分成 3 个不同强度指标的亚层。阙云等^[12]对受降雨入渗影响的裂隙性黏土边坡进行了研究,分析了降雨条件下不同裂隙深度和开口宽度等因素对裂隙性黏土边坡渗流场的影响。以上研究对含裂隙土质边坡稳定性分析理论的发展起到了极大的促进作用,为后续研究工作奠定了基础。目前研究中多采用在整个边坡均匀布置裂隙的方式,未考虑边坡裂隙的出现形式,并且对降雨条件下坡体存在裂隙时的应变情况研究较少。

本文采用边坡稳定性分析及治理软件 Slide 对暴雨情形下含裂隙土质边坡的稳定性进行分析,确定边坡潜在滑动面的位置。根据分析结果布置促使边坡发生推移式滑坡和牵引式滑坡的裂隙,最后应用 MIDAS/GTS 软件模拟分析降雨条件下的坡体应变规律和边坡稳定情况。计算过程中考虑降雨边界条件、体积含水率、渗透系数与孔隙压力之间的关系。

1 暴雨情形下裂隙对非饱和土质边坡稳定性的影响

降雨尤其是暴雨是滑坡活动最重要的触发因素,而边坡裂隙的存在为降雨入渗提供了进入内部的通道,改变了降雨的入渗路径,使得降雨这一危险因素对灾害的触发能力得到充分的发挥,可以归纳为以下几点:

a. 裂隙增加了入渗能力。边坡裂隙增大了雨水与坡体的接触面积,在降雨过程中,地表径流的雨水大量涌入裂隙之中,增加了雨水入渗量。随着裂隙的发展,接触范围越来越大,并且在裂隙水头的作用下,雨水的入渗能力大幅度增强,裂隙周围土体的含水量迅速增大,边坡土体基质吸力下降,自重增加。基质吸力的下降改变了非饱和土体的应力状态,使土体产生应变,其外在表现为坡体的宏观位移。而土体在饱和之后,自重的增加导致下滑力变大,同时岩土体黏聚力、内摩擦角及基质吸力减小,导致抗剪强度降低。

b. 静水压力作用。强降雨下裂隙中充满积水,对边坡产生静水压力,压力 P 可分解为平行和垂直于滑动面的分力,在此压力作用下边坡将产生向临空面的位移,促使裂隙的发展。同时平行于滑动面的分力增大了边坡的下滑力,而平行于滑移线的分力使坡体正压力减小,降低边坡局部稳定性。裂隙开裂越深,裂隙积水的静水压力越大,静水压力作用越强。

c. 裂隙积水渗流作用。裂隙积水使裂隙处存在水头差,水体在裂隙周围土体孔隙中流动,产生动水压力,沿流线方向的单位体积渗透力为

$$f_s = -\rho_w g \frac{dh}{dL} = \rho_w g i \tag{1}$$

式中: ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; i 为渗流坡降; L 为渗流长度, m ; h 为水头损失, m 。动水压力对土体骨架产生拖曳力,导致土体中的应力与变形发生变化。一旦边坡渗流通道形成,土体在此渗透力的作用下,边坡松散土体中的土颗粒被冲蚀,加剧边坡的不稳定性。

2 实例分析

2.1 计算模型、初始条件和边界条件

2010 年雨季期间,由于几次强降雨,山西省安太堡露天煤矿东北角发生滑坡。本文以该煤矿周边

陡帮边坡一勘探剖面为研究对象,具体地层尺寸及分布状况见图 1。

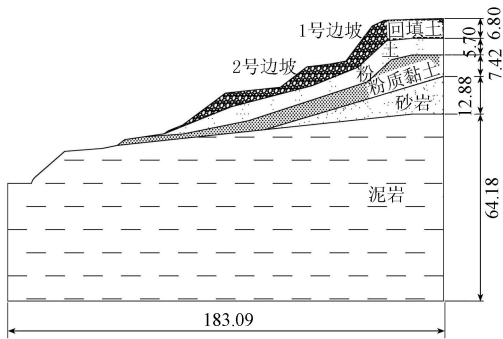


图 1 安太堡露天煤矿剖面(单位:m)

坡体在计算范围内没有地下水位,所以在计算过程中,初始状态不考虑边坡两侧土体渗流情况。Mein 等^[13]提出:当降雨量小于土体的入渗能力时,雨水全部入渗,当降雨量超过土体的入渗能力时产生地表径流。降雨过程中,由于考虑的是暴雨情况,降雨强度超过土体的入渗能力,边坡裂隙很快被地表径流充满,因此在降雨过程中,始终认为裂隙处的压力水头为裂隙内水的深度,坡面不考虑积水情况。

本文的降雨入渗模型以土体体积含水率作为控制变量,通过在坡面施加节点流量的方式实现降雨,运用土壤水动力学的基本理论,求解给定降雨条件下的边坡土体瞬态体积含水率的数值解,并将降雨计算结果应用于下一步边坡稳定性的计算之中。边坡土体非稳态渗流控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + Q = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \tag{2}$$

式中: Q 为流量边界; h 为节点水头; m_w 为比水容量; k_x 和 k_y 分别为水平和竖直方向的渗透系数; $\frac{\partial h}{\partial t}$ 为水头变化率。

模型边界条件:底部完全约束,两侧边界水平位移约束,顶部为自由边界。

2.2 岩土计算参数

计算中所用岩土计算参数来自现场的勘测资料,同一地层取试验平均值,具体见表 1。研究区域土体为非饱和土,其体积含水率的变化取决于应力状态的变化和土体特性的变化。体积含水率是孔隙水压力的函数,渗透系数又是体积含水率的函数,所以渗透系数也是孔隙水压力的函数。渗透系数和压力水头之间的关系用渗透系数曲线表示,体积含水率和孔隙水压力之间的土水特征曲线采用 Van Genuchten 模型。降雨过程中体积含水率的变化对土体的强度影响采用毕肖普提出的非饱和土的强度公式^[9]:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \tag{3}$$

式中: σ' 为有效应力; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力;
 u_w 为孔隙水压力; χ 为反映土中气相影响的系数。

表 1 岩土计算参数

地 层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($10^{-6} \text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
填 土	1810	0.150	5.0	27.0	4800.00
粉 土	1850	0.379	28.8	24.6	3600.00
粉质黏土	1820	0.202	44.7	21.3	260.00
细砂岩	2830	460.000	5436.0	46.0	0.20
泥 岩	2710	280.000	1824.0	41.0	0.27

由于滑坡下部为岩质边坡,本文的研究对象主要为发生滑坡的上层土质边坡,限于篇幅只给出粉土的渗透系数曲线和土水特征曲线,见图 2 和图 3。

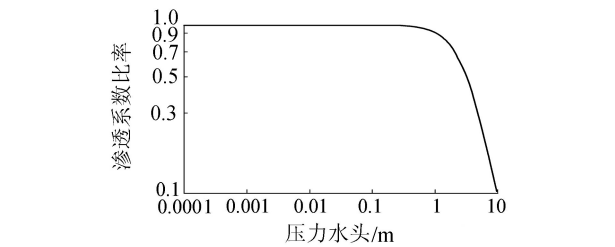


图 2 粉土渗透系数和压力水头的关系

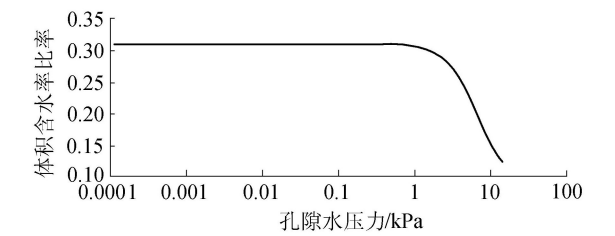


图 3 粉土体积含水率和孔隙水压力的关系

2.3 数值模拟方案

针对安太堡矿区露天边坡几次不同程度滑坡均出现在暴雨之后的情况,本次模拟暴雨量为 120 mm/d,分析不同降雨持续时间对边坡应变和稳定性的影响规律。为了使边坡裂隙位置更符合实际状态,首先采用 Slide 软件对边坡进行分析,确定边坡滑移线位置。然后根据模拟结论将裂隙布置如下:①潜在滑体的上部滑移线位置布置裂隙,模拟边坡上部滑移线附近土体进水软化,发生推移式滑坡;②边坡中下部布置裂隙,模拟雨水进入下部土体,下部滑移线区域土体软化,发生牵引式滑坡,详细模拟方案见表 2。

表 2 数值模拟方案

方案	裂隙宽度/mm		裂隙深度/m		降雨历时/d
	坡顶	坡中	坡顶	坡中	
1	5		0.5		0.5,1,1.5,2,2.5,3
2	10		0.5		0.5,1,1.5,2,2.5,3
3	50		0.5		1,1.5,2,2.5,3
4	100		1.0		0.5,1,1.5,2,2.5,3
5	150		1.5		0.5,1,1.5,2,2.5,3
6	200		2.0		0.5,1,1.5,2,2.5,3
7	200	5	2.0	1.0	1,2,3
8	200	20	2.0	2.5	1,2,3

2.4 计算结果分析

2.4.1 降雨过程中坡体应变规律

研究区域回填土边坡结构松散,孔隙性和透水性较强,使其更易受到降雨的影响,表层土体可以产生较大的塑性变形和显著的流变变形。以下针对 1 号边坡顶部平台布置裂隙与顶部平台和坡面中部同时布置裂隙两种情况,对暴雨影响下的坡体应变进行分析:

a. 1 号边坡顶部平台布置裂隙坡体应变规律。以方案 6 为例,仅在 1 号边坡顶部平台出现张拉裂隙时,坡体内部剪应变见图 4。随着雨水入渗,降雨持续 1 d 时,1 号边坡整个回填土区域出现较大的剪应变,最大值出现在 1 号边坡坡脚位置。由于土体自重作用,坡脚位置区域存在应力集中现象。随着雨水的不断入渗,降雨持续 2 d 时,1 号边坡回填土层和下层粉土接触面附近区域也出现了较大的剪应变,且塑性区不断向下部平台扩展。到降雨持续 3 d 时,回填土与粉土接触区域的剪应变范围变大,这是由于雨水入渗使非饱和土含水量增加,基质吸力下降,而基质吸力的降低又使得边坡非饱和物料产生应变,同时滑移线的轮廓变得非常明显。

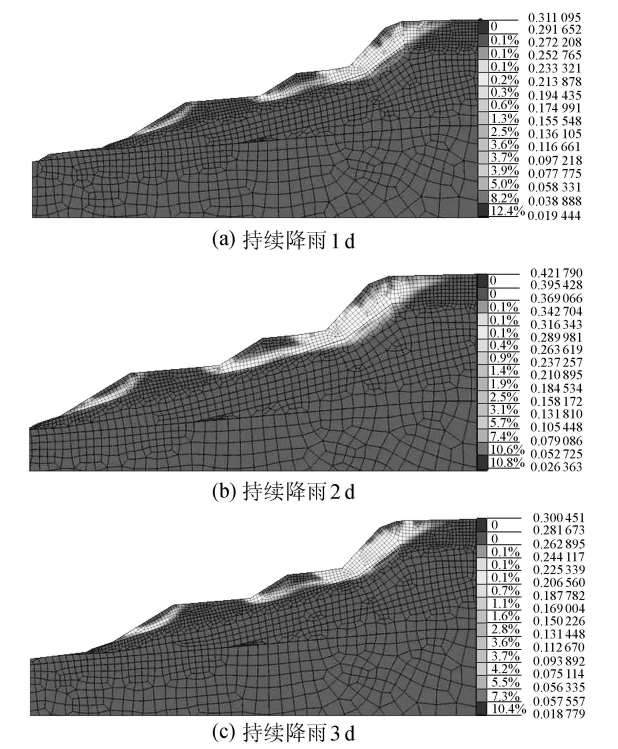


图 4 方案 6 坡体剪应变

b. 1 号边坡顶部平台和坡面中部布置裂隙坡体应变规律。以方案 8 为例,1 号边坡顶部平台和坡面中部同时布置裂隙时,坡体剪应变见图 5。降雨持续 1 d 时,1 号边坡整个回填土层发生较大的剪应变,并且 1 号边坡坡脚以及回填土与粉土接触区域都出

现剪应变极值。下方2号边坡回填土与粉土接触区域也形成了连贯的剪应变带。随着降雨的持续,剪应变区域缩小,极值只出现在1号边坡坡脚下方回填土与粉土接触区域。降雨持续3d时,随着渗流的进行水分在坡体内部运移,剪应变极值区几乎消失。

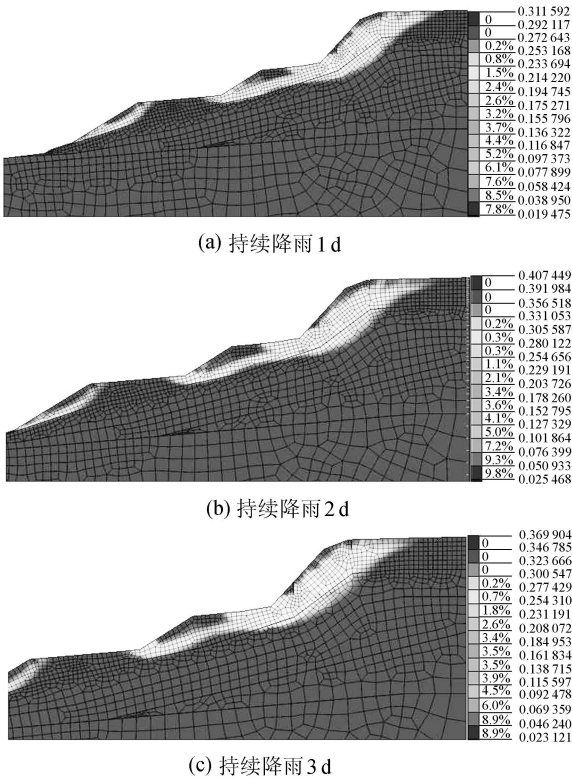


图5 方案8坡体剪应变

对比以上两种裂隙布置情况,后者降雨入渗影响的速度更快,且影响范围较前者大。降雨持续1d时,后者的塑性区已经扩展到2号边坡上方区域。而前者始终对1号边坡存在较大的影响。降雨持续3d后,后者的塑性区从2号边坡一直贯通到1号边坡的坡顶。

2.4.2 降雨过程中稳定系数的变化规律

通过降雨渗流计算,将得到的瞬态孔隙水压力作为荷载应用于边坡的稳定性分析中。采用有限元法的强度折减法,计算边坡稳定性。

a. 1号边坡顶部平台布置裂隙稳定性计算。在1号边坡顶部布置深度为0.5m的裂隙,随着降雨的入渗,不同开口宽度的裂隙所对应的稳定系数如图6所示。可以看出,裂隙的宽度对于安全系数的影响不大,这是因为开口宽度和裂隙充满积水的速度有关,本文设定裂隙瞬间被雨水充满,因而裂隙的开口宽度对边坡稳定性未有较强的影响;裂隙深度不同时,降雨影响下边坡稳定性变化见图7。随着裂隙深度的开展,稳定系数逐步降低,在1~1.5d之间稳定系数降低速率最大,且在1.5d左右边坡

最不稳定,随后稳定系数又出现反弹的趋势。这是由于当雨水入渗到一定程度时土体达到饱和则入渗速度降到很低,此时随着坡体内部水体的运移,边坡稳定性出现回升。

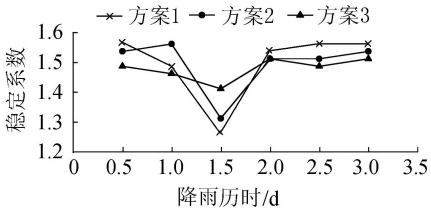


图6 边坡顶部布置0.5 m裂隙时降雨稳定系数

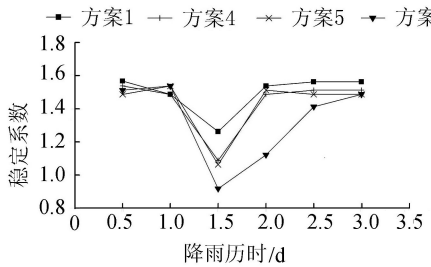


图7 边坡顶部不同裂隙深度时降雨稳定系数

b. 1号边坡顶部平台和坡面中部同时布置裂隙时稳定性计算。考虑1号边坡顶部平台和坡面中部同时布置裂隙,当坡面裂隙开裂较浅时,降雨产生的裂隙积水未能影响到重力荷载作用下坡体最危险滑移线的位置,此时随着雨水的入渗,其稳定系数的降低程度相比于只在坡顶布置裂隙时变化不大,如图8所示;但当裂隙开裂达到能够影响到潜在滑动面位置深度时,边坡潜在滑动面区域土体遇水软化,强度降低,稳定系数急剧下降。由图5(c)可以看出坡体塑性变形向上延伸,坡体产生牵引式滑坡。

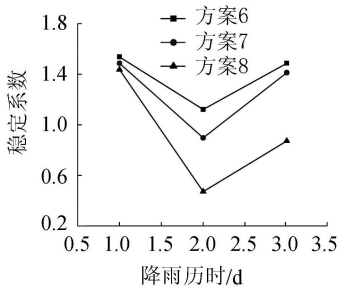


图8 边坡顶部和坡面中部布置裂隙时降雨稳定系数

3 结 论

a. 降雨过程中边坡塑性区首先在坡脚位置出现,随着降雨的不断进行,塑性区自坡脚位置向上部不断发展,直到形成贯通的塑性区。

b. 降雨过程中稳定系数并不是持续降低。当裂隙周围土体完全饱和之后,土体的渗透系数变得很小,此时降雨入渗变得极为缓慢,坡体内部的水体发生了运移,边坡的稳定性又得到了回升。

c. 模拟结果表明在持续降雨 1.5 d 左右边坡的稳定系数最小。当裂隙开裂较深时,边坡稳定系数降低到 1 以下,存在发生滑坡危险。但分析结果表明,滑坡的发生存在于边坡的表层土体。

d. 本文提出的边坡裂隙布置方法体现了边坡实际情况下裂隙的产生以及发展,相比以往坡体均布裂隙的布置方法更接近边坡裂隙的真实情况。

参考文献:

[1] 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,1999,10(3):1-7.
[2] 殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京:中国大地出版社,2007.
[3] 张先发,李明华,张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理,1995(3):102-106.
[4] 杨文东. 降雨型滑坡特征及其稳定稳定分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
[5] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
[6] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建

筑工业出版社,1997.
[7] 姚海林,郑少河,李文斌,等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(7):1034-1039.
[8] 姚海林,郑少河,陈守义,等. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(5):606-609.
[9] 陈铁林,邓刚,陈生水,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215.
[10] 李焕强,孙红月,孙新民,等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):589-594.
[11] 殷宗泽,徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(3):454-459.
[12] 阙云,胡昌斌,姚晓琴. 降雨入渗对裂隙性黏土边坡稳定性作用机理的分析[J]. 福州大学学报,2009,37(3):423-429.
[13] MEIN R G, LARSON C L. Modelling infiltration during a steady rain[J]. Water Resource Research, 1973, 9(2):384-393.

(收稿日期:2012-03-01 编辑:周红梅)

(上接第 21 页)

4 结 语

以冰盖破裂机理为基础,引入顺直河道边壁的约束条件,提出了以流量表示的、顺直河道中弯曲冰块的输移条件,并应用黄河河曲段的原型观测数据对该输移条件进行了验证,结果表明:河曲段顺直河道中,弯曲冰块输移所需的最小流量 Q_{cr} 的计算值与观测值差别不大。采用该输移条件可以达到判断冰块输移与否的目的。

参考文献:

[1] ASHTON G D. River and lake engineering [M]. Littleton, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1986.
[2] BELTAOS S. River ice jams [M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995.
[3] ZUFELT J E, ETTEMA R. Fully coupled model of ice-jam dynamics [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(1):24-41.
[4] 茅泽育,吴剑疆,张磊,等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展,2003,14(6):700-705.
[5] 茅泽育,许昕,王爱民,等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展,2008,19(2):214-223.
[6] SHE Y. Numerical and field studies of river ice jam dynamics [D]. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta, 2008.
[7] SHEN H T, GAO L, KOLERSKI T. Dynamics of ice jam

formation. [C]//Proc. of 19th IAHR Ice Symposium. Vancouver, Canada: [s. n.], 2008:317-326.
[8] BELTAOS S. River ice breakup [M]. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications, 2008.
[9] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62:3-13.
[10] 茅泽育,吴剑疆,余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报,2002(1):153-161.
[11] 张磊. 江河春季开河机理及冰坝形成和演变研究[D]. 北京:清华大学,2004.
[12] 赵雪峰. 开河期冰盖体断裂机理及开河判别准则研究[D]. 北京:清华大学,2008.
[13] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 武开河的边界约束判别准则[J]. 水利水电科技进展,2009,29(2):1-4.
[14] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 武开河的边壁阻力判别准则[J]. 冰川冻土,2008,30(3):508-513.
[15] 茅泽育,许昕,王爱民,等. 开河期冰坝预测方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):76-94.
[16] 茅泽育,赵雪峰,王爱民,等. 开河期冰盖纵向冰缝形成机理[J]. 水科学进展,2009,20(3):434-437.
[17] 茅泽育,赵雪峰,胡应均,等. 开河期冰盖横向冰缝形成机理[J]. 水科学进展,2009,20(4):572-577.
[18] 茅泽育,高亮,马壮,等. 春季河道武开河与文开河的判别准则初探[J], 水利水电科技进展,2010,30(6):1-3.
[19] 山西省河曲县防汛抗旱指挥部. 黄河河曲冰塞观测资料汇编:四-1,四-2[R]. 河曲:山西省河曲县防汛抗旱指挥部,1995.

(收稿日期:2012-03-13 编辑:熊水斌)