

河流冲刷作用下堤岸稳定性研究进展

张芳枝^{1,2}, 陈晓平¹

(1. 暨南大学理工学院, 广东 广州 510632; 2. 广东水利电力职业技术学院水利工程系, 广东 广州 510635)

摘要 分析河流冲刷作用下堤岸土体起动时的受力特点和冲刷破坏机理, 概括国内外近岸水流冲刷力的分布与计算、堤岸土体抗冲力确定、河岸土体横向冲刷计算方法等研究成果, 分析和评价河流冲刷作用下堤岸边坡稳定性研究进展。指出进一步研究的问题和研究方法: 必须将堤岸边坡稳定分析与河流冲刷作用同时考虑, 建立包含河流冲刷力的堤岸稳定分析力学模型, 开展堤岸稳定分析的三维数值模拟, 利用有限元法预测堤岸边坡破坏发展过程, 分析变形与稳定的内在联系; 将水上岸坡、水下岸坡以及坡脚和河床作为一个整体, 进行堤防稳定的渗流场与应力场耦合分析。

关键词 冲刷作用; 冲刷力; 抗冲力; 冲刷破坏机理; 堤岸稳定性

中图分类号: TV87 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)04-0084-05

Research progress on stability analysis of embankment under effects of river scouring//ZHANG Fang-zhi^{1,2}, CHEN Xiaoping¹(1. College of Science and Engineering, Ji 'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The stress characteristics and failure mechanism of soil mass under the effects of river scouring are analyzed. Progress both at home and abroad in the calculation of scouring force and its distribution along the near shore, the calculation of anti-scouring force of the embankment, and the computation of transverse scouring force on the embankment are summarized. Research progress on the stability analysis of the embankment under the effects of river scouring is analyzed and assessed. The problems and methods of further research are pointed out. The stability analysis of the embankment and the scouring should be considered simultaneously. A mechanical model for embankment stability, which includes the scouring force of the river, should be established. A three-dimensional numerical simulation of embankment stability should be set up to understand the effect of erosion on the embankment profile shapes. The process of deformation and failure of the embankment is forecast with the finite element method(FEM), and the internal relations between deformation and stability are analyzed. Considering the bank slope above water, the bank slope underwater, the toe of the slope and the riverbed as a whole, analysis of coupled seepage and stress fields as they affect embankment stability is conducted.

Key words: scouring action; scouring force; anti-scouring force; scouring failure mechanism; embankment stability

江河堤防是我国防洪工程体系的重要组成部分。目前, 我国建有各类堤防 25 万 km, 其中主要堤防 6.57 万 km。我国堤防一般傍河而建, 堤线选择受到河势条件制约, 地基多为第四纪松散沉积物, 其物质组成、分布及厚度变化大, 地质条件复杂, 而且绝大多数堤防就地取材, 用土堆筑而成, 后经历次维修加固, 大多为土石结构, 堤身填筑土组成及密实程度不甚均一, 挡水和受水渗透作用季节性强。我国河流的堤岸冲刷现象十分普遍, 如长江中下游的堤岸冲刷、北江大堤险段的堤脚淘刷等, 堤岸冲刷严重威胁堤防安全。因此, 堤岸冲刷问题, 尤其是河流冲刷作用下的堤防稳定性研究, 越来越受到人们的重视, 成为堤防稳定性研究中的重点问题。

由于堤防的重要性, 随着试验水平和计算水平的发展, 人们对堤防的稳定性研究越来越深入。本文首先分析堤岸在河流冲刷作用下的冲刷机理, 回顾总结国内外河流冲刷力与堤岸抗冲力的计算方法以及堤岸在河流直接冲刷作用下的横向冲刷计算方法, 然后总结分析目前在河流冲刷作用下堤防稳定性研究进展, 最后探讨了河流冲刷作用下堤防稳定性的研究方向。

1 河流冲刷作用下土体起动时的受力特点和冲刷破坏机理

1.1 堤岸土体起动时的受力特点和运动形式

堤岸土体在水流作用下是否起动, 主要取决于

近岸水流的冲刷能力和堤岸土体的抗冲能力。通常近岸水流剪切力是水流施加于河岸表面土体促使其启动的主要动力,可称为水流的冲刷力。有效重力和颗粒间的黏结力是泥沙颗粒或团粒本身所固有的,是抵抗水流冲刷的主要阻力,可称为堤岸土体的抗冲力。当水流的冲刷力大于堤岸土体的抗冲力时,就可以冲动堤岸边坡表面上的泥沙颗粒或团粒。

对于非黏性土堤岸,当土体被水流冲动时,以单个颗粒的运动形式启动。黏土启动试验表明,对于黏性土堤岸,当土体被水流冲动时,以多颗粒成片或成团的形式启动^[1];另有试验表明^[2],黏性细颗粒泥沙的启动是以大小不等的颗粒或泥块为启动单元,土体的冲刷常以局部“缺陷-扩展-崩溃”的形式出现。

1.2 堤防在河流冲刷作用下的冲刷破坏机理

水流冲刷力与堤岸土抗冲能力相互消长,由不平衡达到暂时平衡,并不断适应演变。对于天然土质河岸,河流冲刷堤岸,使岸坡变陡、岸高增加,结果造成岸坡坍塌,坍塌后的土体在岸坡前淤积,淤积物被水流冲走,又开始新的崩塌和冲刷^[3-4]。对于人工堤岸,河流淘刷堤脚,改变堤脚的几何形状,水流边界条件变化又反过来影响河势,河势的变化再作用于堤防,堤脚受到进一步淘刷,使堤岸高度增加,堤防发生变形,稳定性降低,当稳定性降低到一定程度后,堤岸在河流动水压力、水流冲刷力等因素的综合影响下最终发生滑动破坏,威胁大堤安全。

2 近岸水流的冲刷力与河岸土体的抗冲力

2.1 近岸水流的冲刷力

近岸水流的冲刷力一般可用近岸水流剪切力来表示。对于天然河道,床面及近岸水流剪切力可利用比降确定。Simons 等认为影响河岸冲刷的因素除了水流产生的拖曳力外,还要考虑河岸的几何形态以及水流变化、风浪、船舶浪击等因素^[5]。计算剪切力的另一种方法是根据纵向流速的垂向分布,利用对数流速分布公式决定剪切力^[5]。实测结果表明,用水面比降计算的剪切力,在低水位时比用流速分布计算的剪切力大;而在高水位时,则情况正好相反^[6]。

河岸的剪切力分布直接关系到河岸的侵蚀情况。Rhodes 等^[7]研究了矩形断面光滑边壁的剪切力分布,Ghosh 等^[8]通过实测梯形断面的边界剪切力分布,得到顺直河道的河岸冲刷以及严重淘刷主要发生在岸边中下部或堤脚处的结论。对于弯道河岸,研究表明^[9-10],最大剪切力出现在弯道进口段凸岸一侧及弯道顶点以下的凹岸一侧,这与弯道主流线的变化趋势是一致的。Hooke^[11]在模型中测量的

凹岸边壁剪切力表明,当河底为动床时,最大边壁剪切力出现在水面以下 5 cm 深的范围内(模型最大水深 25 cm),再向下受河床表面沙波的影响,其变化很不规则。许多研究结果也表明,弯道最大剪切力的位置和大小取决于横向环流主流之间的相对强弱^[5,12]。

2.2 河岸土体的抗冲力

河岸土体的抗冲力一般可用土体的启动剪切力来表示。要准确确定河岸土体的启动剪切力相当复杂,目前用的多是一些经验或半经验、半理论的方法。王延贵等^[13]通过分析斜坡上泥沙启动剪切力与平底上泥沙启动剪切力的关系,认为在同水流条件下岸坡泥沙更容易启动。

针对非黏性土河岸,Schoklitsch,Indri,Kramer 以及 Yun 等都分别提出了不同的启动剪切力公式,应用最广泛的是 Shields 曲线^[14],Shields 根据自己的试验成果绘制了临界相对拖曳力 θ_{cr} 与沙粒雷诺数 Re 的关系曲线, θ_{cr} 亦称为 Shields 数,后人在他的基础上又进行了大量的补充试验^[15],Van Rijn^[16]对此作了改进,建立了 θ_{cr} 与泥沙粒径参数 D_* 之间的函数关系。

对黏性土河岸,人们从不同的角度及影响因素出发,采用不同模式建立了黏性土的启动剪切力关系式。唐存本^[17]将颗粒重力、黏结力以及水流上举力和拖曳力统一考虑,根据力的平衡方程式得出黏性土的启动剪切力公式,并考虑了黏性土固结程度的影响。华景生等^[18]从水流脉动的机理出发,以黏性土的宾汉应力作参数,建立黏性土的启动剪切力与浆体宾汉剪切力之间的关系式。黄岁梁等^[19]利用黏性土启动冲刷与黏性土滑动破坏的相似性,建立了启动剪切力 τ_c 与土体抗剪强度 τ_f 之间的关系。Osman 等^[20]根据试验成果,分析表明黏性土河岸的启动剪切力与土体中含盐量及电解质扩散系数等因素有关,在已知这些参数的情况下建立了确定启动剪切力的方法。有的学者考虑了黏性土固结度的影响,建立了启动剪切力与黏性土干密度的关系^[21],还有学者考虑黏粒含量的影响,建立了启动剪切力与塑性指数和分散度的关系^[22]等。

以上各种河岸抗冲力计算模式存在不同程度的缺陷,各模式只考虑了某些局部的影响因素,很难完全真实地反映各种土体的冲刷特性,由于试验所采用的土样千差万别,各研究成果间缺乏可比性。对非黏性土河岸,Shields 曲线是经过大量试验建立的经验关系曲线,考虑非黏性土抗冲刷因素较为全面,后又经其他学者的改进,使用方便,目前应用较广泛;对黏性土河岸,唐存本^[17]模式基于力的平衡原

理 物理概念较明确 ;华景生等^[18]采用黏性土的宾汉应力作参数 ,理论上成立 ,但由于涉及水流拖曳力发生的概率 ,实际应用比较困难 ;黄岁梁等^[19]采用黏性土抗剪强度的抗冲力模式 ,将黏性土河岸冲刷方式限定在滑动破坏的形式范围内 ,与实际冲刷破坏方式不完全相符 ;其他的经验关系式由于考虑的抗冲刷影响因素较为片面 ,应用时需注意其应用范围。

3 堤岸土体横向冲刷计算方法

堤岸土体在河流冲刷作用下的冲刷程度直接影响堤岸稳定。目前 ,堤岸土体冲刷的计算方法还不成熟 ,多是根据河岸土体抗冲力与水流冲刷力的关系确定堤岸冲刷量。

3.1 许炯心法

许炯心^[23]通过野外考察和室内模型试验 ,采用回归分析方法 ,得到河道的展宽率是河岸抗冲性指标 M 与作用于岸壁的水流剪切力比值的函数 ,并根据实测资料得到

$$\frac{\Delta B}{B} = C_1 - C_2 \ln\left(\frac{M}{0.76\tau}\right) \tag{1}$$

式中 $\frac{\Delta B}{B}$ 为河道的展宽率 ; τ 为断面平均的水流剪切力 ; C_1, C_2 为参数 ,与河段中的卵石是否露出有关 ; M 为抗冲性指标。

3.2 Osman 和 Thorne 法

Osman 等^[20]和 Thorne 等^[24]根据试验得到冲刷变化率与土体起动剪切力的关系 ,并提出估算黏性土河岸在 Δt 时间内直接横向冲刷后退的距离为

$$\Delta B = \frac{c\Delta t(\tau - \tau_c)e^{k\tau_c}}{\rho_s g} \tag{2}$$

式中 ΔB 为 Δt 时间内河岸因水流横向冲刷而后退的距离 ; Δt 为河岸冲刷的持续时间 ; τ_c 为河岸土体的起动剪切力 ,Pa ; c 和 k 为横向冲刷系数 ,取决于河岸土体的物理化学特性 ,由实测资料率定 ; ρ_s 为河岸土体的密度 , kg/m^3 ; g 为重力加速度。

3.3 剩余剪切力法

周建军等^[25]认为河岸冲刷速率与近岸水流剪切力、剩余剪切力(τ 与 τ_c 之差)有关 ,他们根据长江三峡物理模型观测发现非均匀沙在侧向冲刷条件下 ,其冲刷面几乎为垂直状态。因此 ,假设在河岸冲刷过程中冲刷面为铅直面 ,水流侧向冲刷河岸的速率为

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{C_l}{\rho_s \rho g^2}(\tau - \tau_c)\tau \tag{3}$$

式中 : C_l 为河岸冲刷系数 ,取 $C_l = 11.27 \times$

$10^4 D_{50}^{-0.7386}$; ρ 为水的密度。

通过河岸土体抗冲力与水流冲刷力的关系确定河岸冲刷 ,这些方法比较简单 ,能够模拟河岸冲刷过程 ,但也有一定的局限性 ,这些方法只能在资料来源的范围内使用 ,并没有考虑河岸的几何形态对河岸冲刷过程的影响。

4 冲刷作用下堤岸稳定分析模型

随着人们对河流冲刷过程的认识 ,河流冲刷作用下堤岸稳定性研究取得了一定的进展。在堤岸稳定性研究中 ,人们普遍采用极限平衡方法 ,其基本特点是只考虑静力平衡条件和土的摩尔 - 库仑破坏准则。下面介绍在河流冲刷作用下堤岸稳定性研究发展过程以及有代表性的模型。

4.1 侵蚀堤岸的简单土坡稳定分析模型

Thorne^[26]总结了早期侵蚀堤岸的简单土坡稳定分析。假定一个通过坡脚的滑动面 ,通过定义滑动面上的抗滑力与滑动力之比来判定侵蚀堤岸的稳定性。堤岸几何剖面如图 1 所示。Darby 等^[27]认为简单土坡的几何剖面与自然侵蚀堤岸的几何剖面不同 ,侵蚀堤岸的几何剖面与河床底部的淤积或冲刷深度以及堤岸的横向冲刷宽度有关。

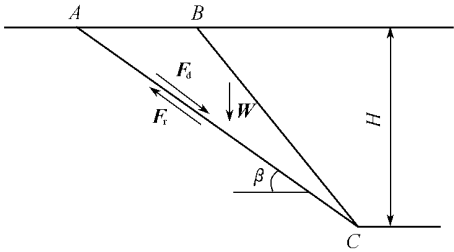


图 1 简单土坡稳定分析几何剖面

4.2 Osman 和 Thorne 模型

Osman 等^[20]和 Thorne 等^[24]根据堤岸发生冲刷后的几何剖面 ,建立了河流冲刷作用下堤岸稳定分析模型 ,侵蚀堤岸剖面如图 2 所示。图中 $ABCD$ 为冲刷前堤岸剖面线 , $FBCD$ 为冲刷后堤岸剖面线 , ΔZ 为河床冲深 , DE 为堤岸边坡拉张裂隙 , β 为临界破坏面与水平面夹角 , F_d 为下滑力 , F_r 为抗滑力 , W 为破坏土体产生的重力。

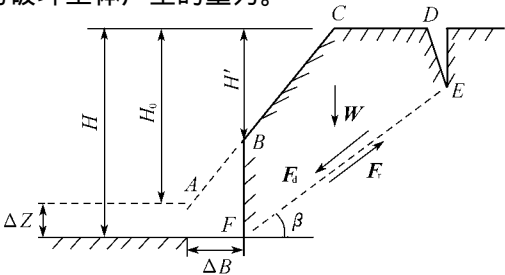


图 2 侵蚀堤岸稳定分析示意图

Osman 等^[20]和 Thorne 等^[24]将堤岸在河流冲刷作用下的堤岸稳定分析划分为 2 个步骤。第一步, 比较河流冲刷力和堤岸抗冲力, 若河流冲刷力大于堤岸抗冲力, 则堤岸发生冲刷, 在 Δt 时间内的 ΔB 可通过式 (2) 计算, ΔZ 可通过水动力学模型计算, 形成冲刷后堤岸剖面线 $FBCD$ 。第二步, 分析冲刷后堤岸的稳定性, 假设河岸边坡为均质土体, 临界破坏面通过坡脚, 破坏体 $FBCDE$ 仅受重力作用, 安全系数 F_s 定义为临界破坏面 EF 上的抗滑力和下滑力之比, 当 $F_s > 1$ 时边坡土体稳定, 则进入下一个时段的河流冲刷计算和边坡稳定分析; 当 $F_s < 1$ 时表明边坡已发生破坏, 在这种情况下计算得到的 ΔB 和 ΔZ 偏大, 此时通过减小时间步长进行调整。不过, 在分析中 Osman 等和 Thorne 等将 F_s 的判别转化为对临界高度 (H/H') 的判别。

该堤岸稳定分析模型考虑了河流冲刷对堤岸几何形状改变的影响, 包括河流对河岸的侧向侵蚀和对河床的刷深, 然后分析堤岸在几何形状改变后的稳定性, 将河流冲刷对堤岸的影响和堤岸边坡稳定分析进行了较好的结合。但该模型存在较大的不足: ①没有考虑静水压力、动水压力以及孔隙水压力的影响, 而水压力在堤岸边坡的稳定分析中是一个重要的因素; ②没有考虑渗流的影响, 许多研究实例表明, 渗流有时对堤岸的稳定性起着决定性的作用; ③堤岸破坏时的滑动面通过坡脚, 而且仅限于平面滑动, 这与堤岸边坡实际破坏面可能不相符。

4.3 Darby 和 Thorne 模型

Darby 等^[27]在 Osman 等和 Thorne 等堤岸稳定分析模型的基础上作了一些改进。堤岸稳定分析剖面如图 3 所示 (图中 $ABCDE$ 为堤岸剖面线, AF 为堤岸边坡拉张裂隙, FG 为临界滑动面)。假设河岸边坡为均质土体, F_s 定义为临界破坏面 FG 上的抗滑力和下滑力之比。 F_d 与 F_r 分别为

$$F_d = W \sin \beta - F_{cp} \sin \alpha \quad (4)$$

$$F_r = cL + [(W - U_w) \cos \beta + F_{cp} \cos \alpha] \tan \varphi \quad (5)$$

式中: F_{cp} 为作用在破坏面上的静水压力; U_w 为作用

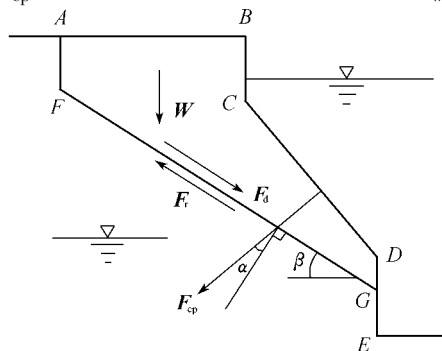


图 3 改进后堤岸稳定分析示意图

在破坏面上的总孔隙水压力; α 为静水压力与破坏面法线方向的夹角; c 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角; L 为破坏面长度。

与 Osman 等和 Thorne 等的堤岸稳定分析模型相比, 该模型放宽了破坏面通过坡脚的限制, 临界破坏面在坡面上的位置可通过搜索最小安全系数得到, 在破坏面受力分析中考虑了静水压力和孔隙水压力的作用。此外, Darby 等^[28-29]在对顺直河段河床变形模拟时, 考虑了平面滑动和圆弧滑动 2 种破坏情况。

4.4 Amiri-Tokaldany 模型

Amiri-Tokaldany 等^[30-31]在 Darby 等^[28-29]模型的基础上, 进一步考虑了多种土层堤岸的情况, F_d 与 F_r 分别为

$$F_d = W \sin \beta - F_{cp} \sin \alpha + F_{tc} \cos \beta \quad (6)$$

$$F_r = \bar{c}L + F_{np} + (W \cos \beta + F_{cp} \cos \alpha - F_u - F_{tc} \sin \beta) \tan \bar{\varphi} \quad (7)$$

式中: F_{tc} 为在拉张裂隙上的静水压力; F_{np} 为负孔隙水压力; F_u 为扬压力; $\bar{c}$ 为各层土黏聚力的加权平均值; $\bar{\varphi}$ 为各层土内摩擦角的加权平均值。

上述模型在堤岸稳定分析中采用的方法都局限于极限平衡方法, 没有考虑堤岸破坏的内在变形过程和变形机理, 也没有考虑渗流因素, 而且这些模型均将堤防看作二维问题。

5 有待进一步深入研究的问题和研究方法

从上面的分析可知, 堤岸冲刷过程的影响因素众多, 冲刷后堤岸剖面线也千差万别^[32]。河流冲刷作用下堤岸稳定性研究取得了一定的进展, 初步将河流冲刷作用与堤岸的稳定分析进行结合, 从堤防内在的力学机理来研究堤防稳定性, 从而对堤防的安全运行做出评估和预测。由于冲刷过程和堤岸稳定分析问题十分复杂, 还有一些问题有待进一步研究。

a. 目前的研究中, 将河流冲刷与堤岸的稳定分析分为 2 个步骤, 未将河流冲刷的作用与堤岸边坡稳定分析直接结合, 河流冲刷作用是直接作用于堤岸边坡的, 应在堤岸边坡稳定分析中考虑河流冲刷力的作用, 建立包含河流冲刷力的堤岸稳定分析力学模型。

b. 目前的研究基本上将河流冲刷作用下的堤岸稳定性问题假设成二维问题, 由于水流流态、河流冲刷力、堤岸剖面形态等因素的影响, 实际上河流冲刷堤岸稳定问题没有严格意义上的二维问题, 所以, 必须研究河流冲刷作用下的堤岸三维稳定问题。

c. 以往的堤岸稳定方法都局限于极限平衡方法, 极限平衡方法无法考虑堤岸破坏的变形过程和变形机理, 以及边坡变形与稳定的内在联系, 有限元法则能克服这些不足, 很好地探求边坡应力、应变和强度三者之间的关系, 从堤防内在的变形过程和机理来探讨堤岸稳定性。

d. 根据堤防的特点, 将水上岸坡、水下岸坡以及坡脚和河床作为一个整体, 在考虑河势变化的同时, 建立堤防渗流场与应力场的耦合模型, 进行堤防渗流场与应力场的耦合分析, 应是今后研究的一个重点方向。

参考文献：

[1] 韩其为, 何明民. 细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究 [J]. 湖泊科学, 1997 (4) : 307-316.

[2] 夏军强, 王光谦, 吴保生. 游荡型河流演变及其数值模拟 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005 : 103-107.

[3] NAGATA N, HOSODA T, MURAMOTO Y. Numerical analysis of river channel processes with bank erosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000, 126 (4) : 243-252.

[4] PIZZUTO J E. Numerical simulation of gravel river widening [J]. Water Resource Research, 1990, 26 (9) : 1971-1980.

[5] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989 : 137-141.

[6] BRIDGE J S, JARVIS J. Flow and sedimentary processes in the meandering river south esk, glen clova, scotland [J]. Earth Surface Processes, 1976, 1 : 303-306.

[7] RHODES D G, KNIGHT D W. Distribution of shear force on boundary of smooth rectangular duct [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120 (1) : 787-807.

[8] GHOSH S N, ROY N. Boundary shear distribution in open channel flow [J]. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96 (4) : 966-994.

[9] ASCE Task Committee on Hydraulic, Bank Mechanics, and Modeling of Riverbank Width Adjustment. River width adjustment I: processes and mechanisms [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124 (9) : 881-902.

[10] IPPEN A T, DRINKER P A. Boundary shear stress in curved trapezoidal channels [J]. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1962, 88 (5) : 143-179.

[11] HOOKER L. Distribution of sediment transport and shear stress in a meander [J]. Journal of Geology, 1975, 83 : 543-565.

[12] BATHURST J C. Distribution of boundary shear stress in river [C] // RHODES D D, WILLIAMS G P. Adjustments of the Fluvial System. Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Pub Co, 1979 : 95-116.

[13] 王延贵, 匡尚富. 河岸淘刷及其对河岸崩塌的影响 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3 (4) : 251-257.

[14] 段红东, 何华松, 朱辰华. 河流输沙力学 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001 : 53-56.

[15] 张瑞瑾. 河流输沙动力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998 : 73-76.

[16] Van RIJN L C. Sediment transport, part I: bed load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1984, 110 (10) : 431-455.

[17] 唐存本. 泥沙起动规律 [J]. 水利学报, 1963 (2) : 1-12.

[18] 华景生, 万兆惠. 黏性土及黏性土夹沙的起动规律研究 [J]. 水科学进展, 1993 (4) : 271-278.

[19] 黄岁梁, 陈亚聪, 府仁寿. 黏性类土的起动模式研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1997, 12 (1) : 1-7.

[20] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis I: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114 (2) : 134-150.

[21] 徐伦. 水库黏性淤积体溯源冲刷试验研究 [C] // 中国水利水电科学研究院. 中国水利水电科学研究院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1990 : 121-130.

[22] SMERDON E F, BEASLEY R P. Tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils [R]. [S. l.]: Univ Missouri, 1959 : 60-68.

[23] 许炯心. 边界条件对水库下游河床演变的影响 [J]. 地理研究, 1983 (4) : 60-71.

[24] THORNE C R, OSMAN A M. Riverbank stability analysis II: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114 (2) : 151-172.

[25] 周建军, 林秉南, 王连祥. 平面二维泥沙数学模型研究及其应用 [J]. 水利学报, 1993 (11) : 10-19.

[26] THORNE C R. " Processes and mechanisms of river bank erosion " gravel-bed rivers [M]. England: John Wiley and Sons Inc, 1982 : 227-259.

[27] DARBY S E, THORNE C R. Development and testing of riverbank-stability analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122 (8) : 443-454.

[28] DARBY S E, THORNE C R. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers I: model development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122 (4) : 184-193.

[29] DARBY S E, THORNE C R. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers II: model evaluation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122 (4) : 194-202.

[30] AMIRI-TOKALDANY E, DARBY S E, TOSSWELL P. Bank stability analysis for predicting reach-scale land loss and sediment yield [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39 (4) : 897-909.

[31] AMIRI-TOKALDANY E, ASCE M, DARBY S E, et al. Coupling bank stability and bed deformation models to predict equilibrium bed topography in river bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2007, 133 (10) : 1167-1170.

[32] DARBY S E, THORNE C R. Closure of discussion of " Development and testing of riverbank-stability analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1997, 123 (11) : 1052-1053.

(收稿日期: 2008-07-03 编辑: 方宇彤)