

溯源冲刷实验观测分析

陈树群 陈联光

(中兴大学水土保持学系 台湾台中)

摘要 溯源冲刷在土壤冲刷过程常常扮演着重要的角色,为加强推估土壤冲蚀量之精确度,对于溯源速度与溯源冲刷量之估算即为主要课题。本研究对于均匀砂以固定流量下进行溯源冲刷实验分析,由溯源冲刷形态与演变的观测,进而分析溯源速度和溯源冲刷量。结果显示,溯源冲刷速度与冲刷量和时间呈 $1/2$ 指数关系,由此结果将可供水利工程规划设计参考用。

关键词 溯源冲刷 土壤冲蚀 溯源形态

Study on Headcutting Test

Su-Chin Chen Lien-Kuan Chen

(Department of Soil and Water Conservation, Chung-Hsing University Taichung Taiwan)

Abstract Headcutting was noted as being a significant contributor to the soil erosion. Estimate of the migration of headcutting and erosion are criterion to assess the soil erosion. This research of laboratory measurements of headcutting migration on uniform sand. The resulting equation for headcutting model in $1/2$ power of t is favorably compared with experimental data.

Key words headcutting soil erosion headcutting form

1 前言

溯源冲刷常是河工构造物损毁的主要原因之一(林, 1998), 溯源速度与溯源量之估算即是河工构造物风险评估的重要指标。反之溯源冲刷亦是解决水库淤积与沉砂池清淤的有效途径, 它是依靠降低坝前或池下方水位, 增加水流势能, 迫使于积面下切, 继而向上游扩展。对于河相演变中, 溯源冲刷之速度与冲刷量在地形演化中亦扮演相当重要的角色(陈, 陈, 1996)。因此本研究针对溯源冲刷进行室内实验分析, 探讨溯源纵断面形态演变及侵蚀切割区与堆积区之特性, 溯源速度分布、溯源冲刷量与时间及流量之关系演变, 以期能由以上各形态特性之观测与分析, 进而对溯源冲刷与地形演化形态之机制能更深一层的认识。

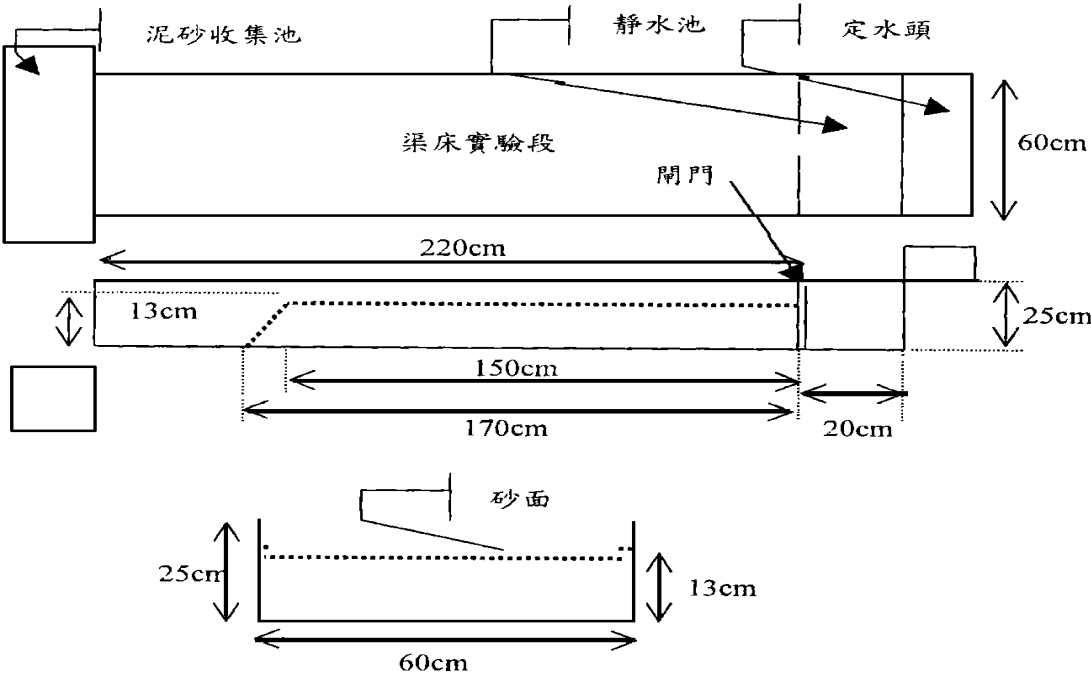


图 1 渠槽铺砂上视、侧视及断面布置图

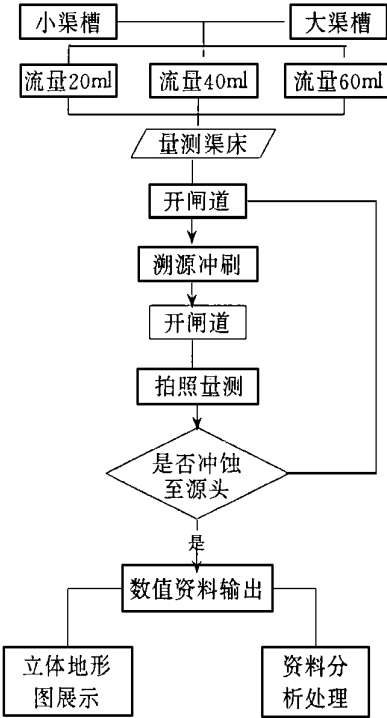


图2 溯源冲刷实验流程图

2 实验设计

2.1 溯源冲刷渠槽

其实验布置如图 1 所示, 小渠槽实验段为一长 110 cm, 宽 12 cm 及高 13 cm 之矩形渠槽, 渠床铺一 11 cm 厚度的砂。大渠槽实验段为一长 220 cm, 宽 60 cm 及高 25 cm 之矩形渠槽, 渠床分为铺砂高 13 cm 之水平坡面段(0~ 150 cm)和坡度为 65% 之倾斜坡面段(150~ 170 cm)两部分, 而 170~ 220 cm 段则不铺砂; 因此, 在大渠槽溯源实验中可区分成冲蚀段及堆积段探讨。

2.2 实验材料与流程

本研究实验材料之渠床铺设采用通过 10 号筛即 2 mm 以下的砂, 其中值粒径 D_{50} 为 0.6 mm, 粒径分选度为 1.74, 整个渠床之砂粒径视为均匀砂。本实验之大小渠槽溯源冲刷之流程如图 2 所示; 对于渠床铺砂厚度部分小渠槽实验之渠床铺设宽为 12 cm 及水平高为 11 cm 砂。大渠槽实验之渠床可分为 0~ 150 cm 之水平段与 150~ 170 cm 坡度为 65% 之倾斜坡面段; 从 0~ 150 cm 处铺一宽为 60 cm 及等高约 13 cm 砂之渠床, 随

斜坡延伸至 170 cm 处, 其后至 220 cm 处皆不铺砂(图 1)。为了方便量测溯源冲刷之几何形态, 渠槽每 5 cm 设定一个量测断面, 即将小渠槽分成 24 个断面, 大渠槽为 44 个断面。

3 溯源冲刷实验观测

溯源冲刷试验配合渠槽宽, 试验在以不漫滩情况设计下采用清水 20 m l/s、40 m l/s 及 60 m l/s 组固定流量, 各别进行溯源形态演变冲蚀试验。在完成铺砂之后, 打开溢流控制闸门, 直接让水流进入渠槽冲蚀段进行试验, 随渠槽冲蚀之进行, 随时记录渠槽冲蚀之形态与演变(图 3), 将资料数值化以便进行溯源速度、溯源冲刷量及渠床几何特性进一步之研究分析。

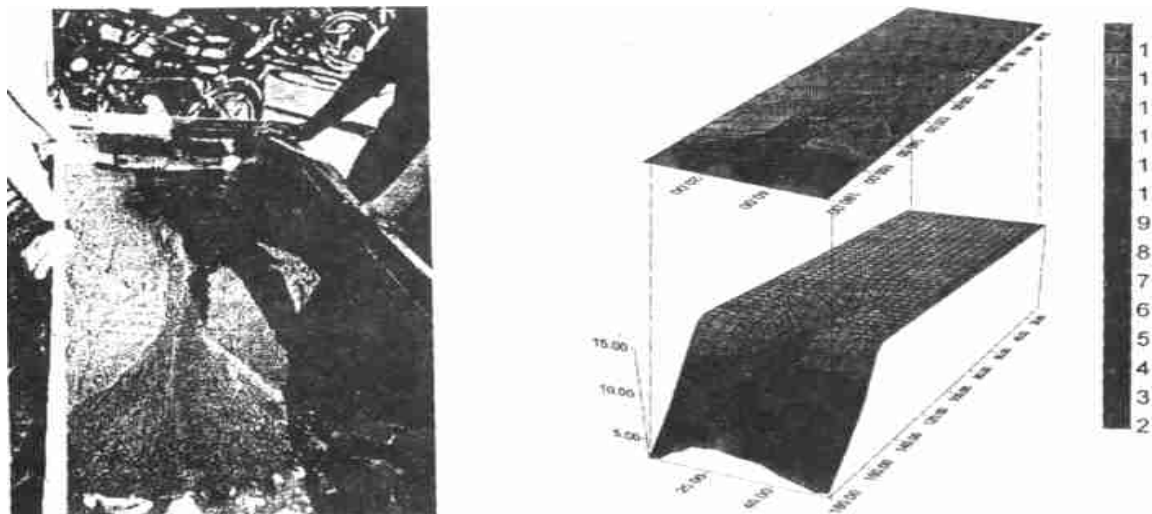


图3 渠槽冲刷过程照片及数位等高线及3D形态图

溯源冲刷大渠槽试验中, 试验渠道演变之形态可区分成两部分: 第一部分为溯源冲刷段, 第二部分为堆积段; 大渠槽之溯源冲刷形态与小渠槽之溯源冲刷不同, 乃因大渠槽可供溯源之方向任意摆动, 不局限于小渠槽之固定方向。对于大渠槽部分其溯源冲刷与堆积特性和形态演化之观测说明如下(图 4, 5)所示。

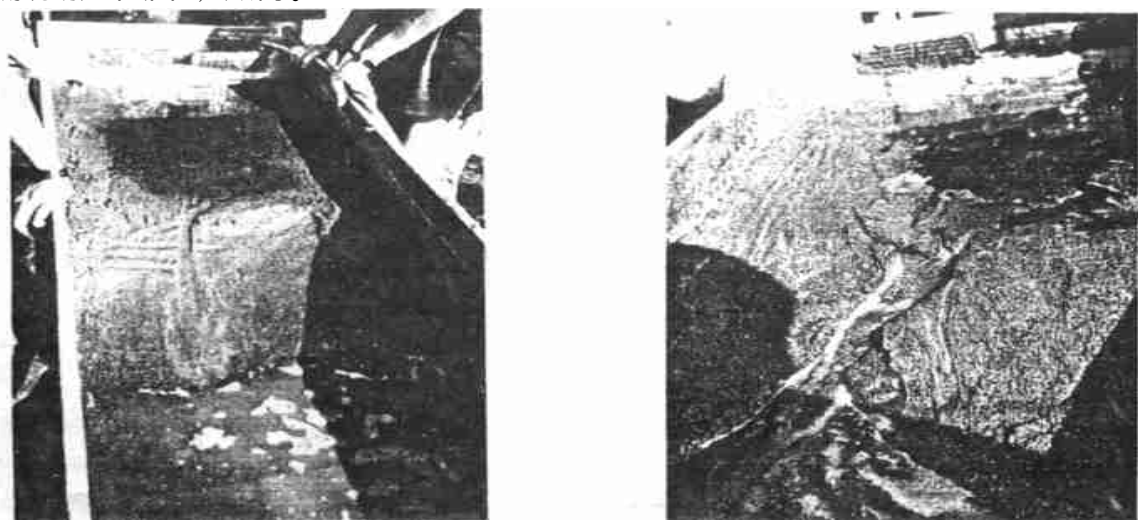


图4 溯源冲刷第一阶段(左)第二阶段(右)试验观测结果

由图 4 第一阶段(左)可知, 在完成渠槽水平铺砂及过水饱和之后, 开始打开溢流闸门,

形成平稳前进的漫地水流, 在此时并不会产生冲蚀现象。当漫地水流抵达斜坡之时, 在斜坡边界线上突破一个出口, 开始产生冲刷现象, 而此斜坡冲蚀即是溯源冲刷的开端。堆积段部分尚未产生堆积。

图4中第二阶段, 原有漫地水流将为溯源冲刷所切割之渠道所汇整, 形成向上游之放射状的冲蚀沟。在此阶段溯源冲刷主导整个渠道之冲蚀与形态的演变, 随漫地水流冲蚀汇整形成微弯、明显的主流。溯源之冲蚀量与溯源速度因溯源向上游前进而递减。在斜坡界线以下开始产生堆积, 形成冲积扇, 水流在冲积扇表面呈向下游之放射状的冲蚀沟, 流路极为散乱不稳定, 无法区别主流与支流。

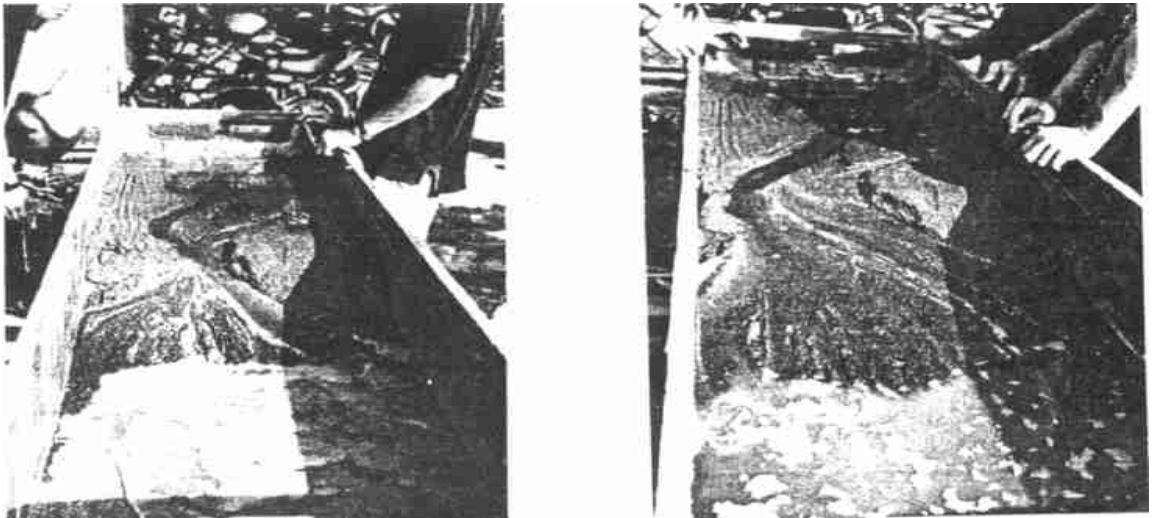


图5 溯源冲刷第三阶段(左)第四阶段(右)试验观测结果

于图5第三阶段中可知, 当溯源冲刷持续前进到达渠槽顶端边界时, 渠道之演变改成局部溯源冲刷和渠道侧向侵蚀, 而局部溯源冲刷发生的主要原因为两岸的崩塌, 造成基准水平面的改变而产生另一波的溯源冲刷。此时之斜坡下游堆积段同图4之形态为向下游放射状之流路。第四阶段中溯源与侧岸侵蚀持续作用下, 直到渠道纵向坡度到达准衡稳定时, 整个渠道的演变乃由渠床的层蚀所主导, 即为全面剥蚀形态。堆积段其堆积形态呈冲积扇, 而水流在冲积扇同样形成放射状的游荡散乱渠道, 而其坡降原与上游段成一跌坎, 坡面在此存在一个转折点, 但因上游冲刷下降, 下游段堆积抬升, 而渐渐与上游冲刷段接近一致成一坡面, 转折点因此而消失。

4 结果分析

4.1 纵断面形态演变分析

经溯源冲刷实验观测分析得知, 砂之溯源形态为全程剥蚀式冲刷, 如图6所示。由溯源冲刷实验观测结果得知, 在实验采用之渠床质中无论是小流量或是大流量之溯源冲刷皆是呈全程剥蚀式冲刷; 全程剥蚀式溯源冲刷的特点是: 冲刷在全程内均有发生, 只是冲刷强度不一样。比降大, 冲刷强度高, 比降小, 冲刷强度低。在冲刷过程中, 水流流线明显存在着坡折点, 坡折点下游坡陡流急, 冲刷强烈, 因而坡折点的位置不断后移; 与此同时, 坡折点上游也在刷深, 但其强度较低。随着坡折点的上移, 坡折点下游段比降逐渐变缓, 而其上游段比降则逐渐变陡, 最后形成一个统一的比降。另外, 溯源冲刷实验观测结果分析如图7得知, 在溯源冲刷至水闸门源头期间, 坡面之形态皆为凸形坡面。

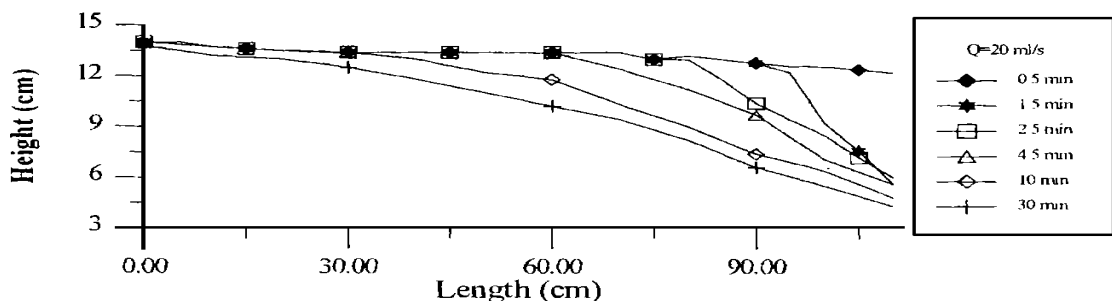


图6 全程剥蚀式溯源冲刷

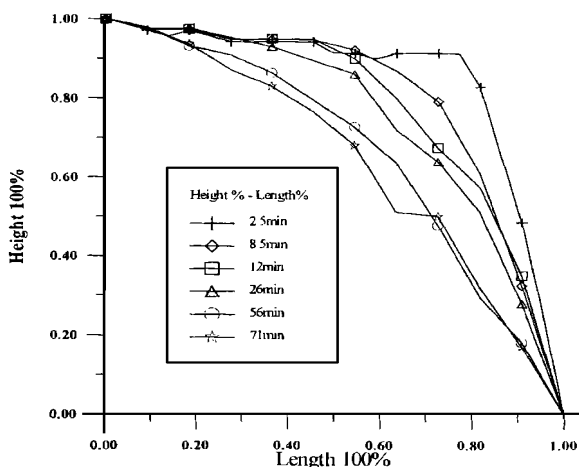


图7 溯源冲刷高程与距离百分比比例图

不变的条件下河床纵剖面调整的全部过程: 当 $t > 0$ 且为某一定值时, 冲刷深度 Δz 从出口 z_0 向上游渐减直至无穷远处为 0; 在冲刷河段 ($0 < x < \quad$) 的任一位置, 冲刷深度随着时间的增加而增加; 当 $t \quad$ 时 $\Delta z \quad z_0$, 最终河床床面下切至以出口控制的稳定的基准面。

对于溯源冲刷之纵断面形态演变过程之模拟可从应用河床变形方程式及输砂方程式联合求解, 河床变形方程式 (即泥砂连续方程式) 具有如下的形式。

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

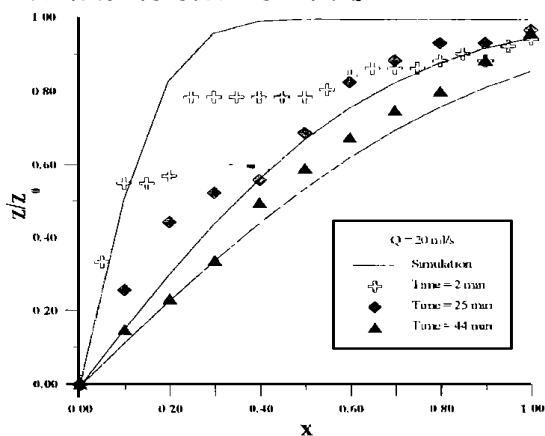
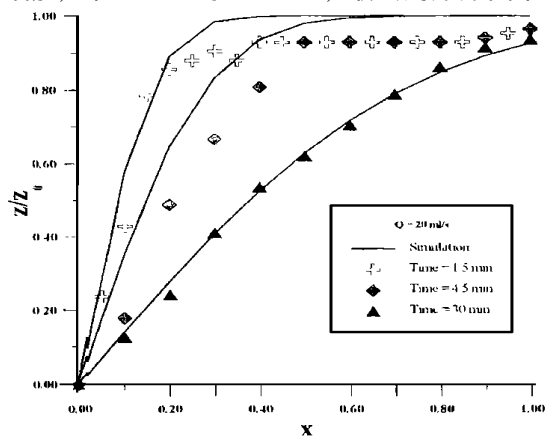
式中: q_s ——单宽输砂率; z ——床面高程; x ——距出口之距离; t ——时间。

Begin 等人 (1980a, b) 导出溯源方程式, 此方程式采用误差函数 (error function) 的形式

$$\frac{\Delta z}{z_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{at^{0.5}} \quad (2)$$

式中: erf ——误差函数; a ——冲刷系数。

式 (2) 反映了在流量固定、冲刷系数沿程

图8 20 ml 流量溯源冲刷纵剖面模拟图 ($a = 9 \times 10^{-5}$)

由以上之 (2) 式推导结果配合误差函数表, 小渠槽溯源冲刷以每秒 20 ml、40 ml 及 60 ml 三组流量, 每组流量进行 3~4 次溯源冲刷实验, 分析实验之差异性, 并改进其误差来源。经分析

$\Delta z/z_0$ 与距离 x 之关系与 (2) 式结果分别作图, 配合溯源冲刷初期纵剖面与冲刷到达源头终止时之纵剖面之实验资料, 经数值分析结果, 得知每秒 20 ml 之冲刷系数 a 约在 $9 \times 10^{-5} \sim 1.12 \times 10^{-4}$ 之间, 其关系如图 8 所示。每秒 40 ml 之冲刷系数 a 约在 $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ 之间, 其关系如图 9 所示。每秒 60 ml 之冲刷系数 a 约在 $3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ 之间, 其关系如图 10 所示。由不同流量之冲刷系数之比例关系, 得知冲刷系数与流量成比例关系。

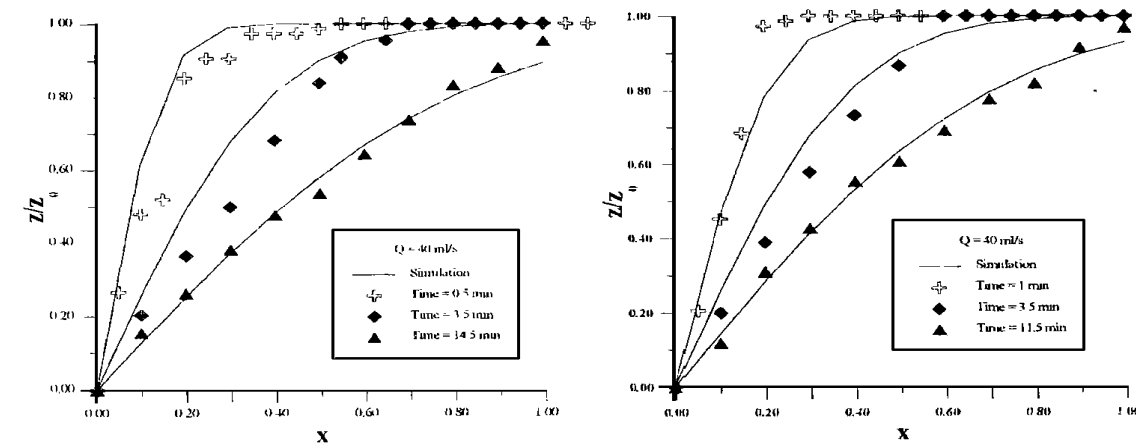


图 9 40 ml 流量溯源冲刷纵剖面模拟图 ($a = 2.2 \times 10^{-4}$)

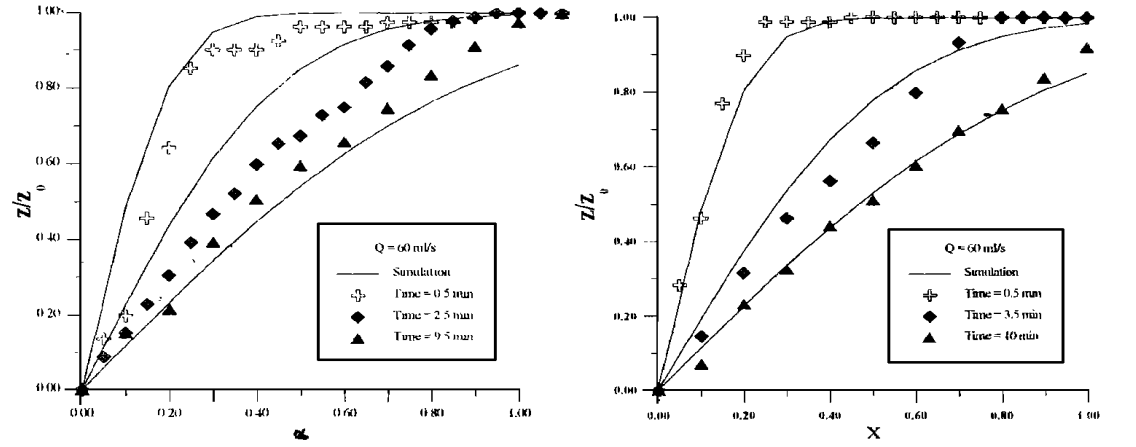


图 10 60 ml 流量溯源冲刷纵剖面模拟图 ($a = 4 \times 10^{-4}$)

由此图 8~ 10 三组流量溯源冲刷纵剖面图之结果可知, 冲刷模拟对于初始冲刷纵剖面与溯源冲刷到达源头之纵剖面较为接近, 至于其间溯源冲刷纵剖面之描述与实验观测结果差距较大; 另外流量愈大, 模拟之纵剖面形态愈符合实验观测结果。因此, 由溯源冲刷到达源头之时间与其纵剖面形态的模拟, 将可供水库或沉砂池清淤时溯源冲刷作用到源头所需之时间及预测其冲刷纵剖面形态之预测。

4.2 冲刷与堆积区之纵断面形态

由大渠床之实验观测结果得知, 溯源冲刷下切段与堆积抬升段之间存在着相互之关系, 由图 11 及 12 中可知, 溯源冲刷下切段与堆积段之转折点上下游之坡度成一直线时, 皆大约在初始斜坡中点位置, 即 160 cm 处附近, 而堆积高度大约皆为 7.6 处, 流量为 20 ml 时上下段成一直线之坡度大约在 8%, 流量为 40 ml 时约为 7.7%, 流量为 60 ml 时约为 7.4%。

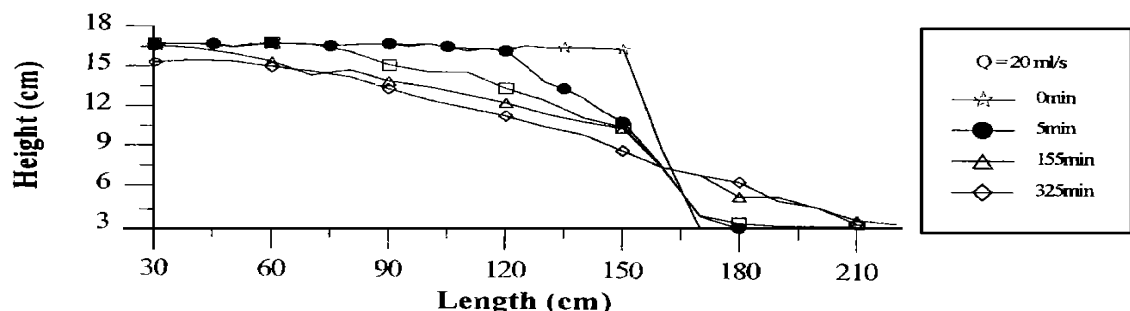


图 11 20 ml 溯源冲刷段与堆积段形态示意图

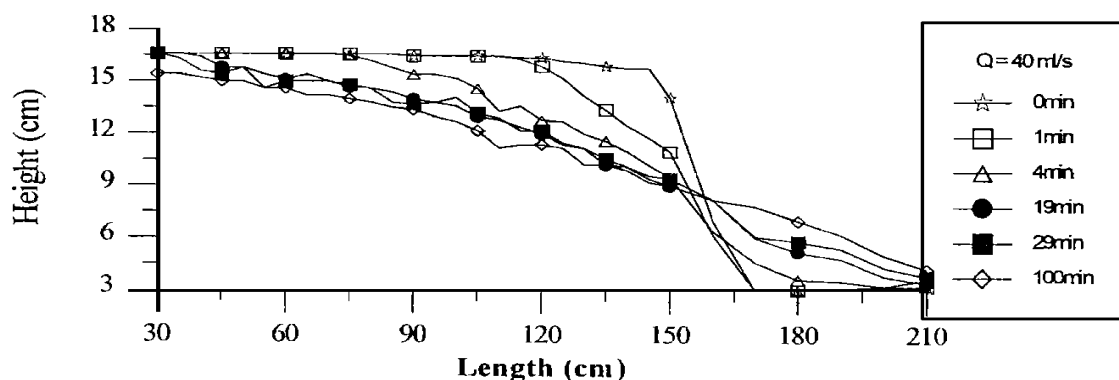


图 12 40 ml 溯源冲刷段与堆积段形态示意图

根据溯源冲刷下切段与堆积段之反曲点位于斜坡中点, 因此, 我们即可应用前一小节推求冲刷段纵剖面演变特性之(2)式推广至堆积段; 以斜坡中点为 2 维坐标原点, 中点左侧为上游段, 其溯源冲刷剖面形态即按(2)式推演可得; 而中点右侧为下游堆积段, 其堆积形态为扇形向外扩张, 不受边界影响情况下, 以一常数减去(2)式即可推得溯源冲刷出口下游段之堆积纵剖面之形态。以流量为 40 ml 之溯源冲刷剖面图 12 为例, 经误差函数方程式运算, 溯源冲刷出口上游段与下游段之纵剖面模拟形态如图 13 所示。

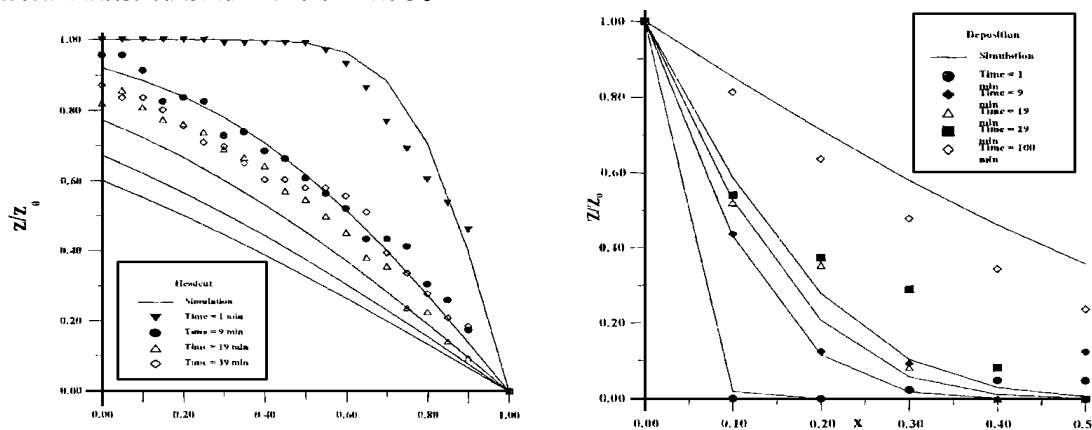


图 13 溯源冲刷段(左)与堆积段(右)纵剖面之模拟

图 13 中上游溯源冲刷段之冲刷系数为 3×10^{-4} , 而下游段堆积区之堆积系数为 1.5×10^{-5} ,

是上游冲蚀段的 $1/2Q$ 。由此一特性将可应用推广于推估溯源冲刷所造成之堆积区其纵剖面的形态演变与分布。

图 13 中可明显看出, 溯源冲刷上游段与下游段纵剖面之模拟在初期 $1\sim 9\text{ min}$ 以内皆属合理, 当溯源冲刷作用时间达 19 min 之后误差增大, 计算结果不合理, 其主要原因我们可由图 12 中获得答案: 由于溯源冲刷作用 19 min 之后, 原来上下游渠床与堆积段之突涨跌坎已消失, 形成渠床纵剖面之坡降和下游之堆积段不再有落差, 上下游成为一平缓坡面。因此, 造成溯源冲刷出口原有基准水平不再存在, 而往下游堆积区发展变成堆积段出口处, 形成较长之新一坡面; 因此即不满足原有初始条件设计, 故再继续叠代演算, 其计算结果不合理是可预期的。

4.3 溯源速度分析

溯源冲刷之长度可由方程式(2)得知, 对于给定的时间 t , 溯源冲刷形成与之对应的剖面形状, 且高程沿上游逐渐减小。因此, 可定义相对冲刷深度小到一定程度的断面位置为冲刷末端, 溯源冲刷时间序列之平面分布如图 14 所示, 其冲刷长度与冲刷系数及时间存在着(3)式之关系

$$l \propto t^n \quad (3)$$

根据此关系式与溯源冲刷速度之实验数值回归分析所得之结果形式相同。若以指数方程式代表。

$$l = K \cdot t^n \quad (4)$$

上式中之 K, n 为常数, 各组实验之 K 与 n 值之分布结果如图 15 ~ 17 及表 1 所示。

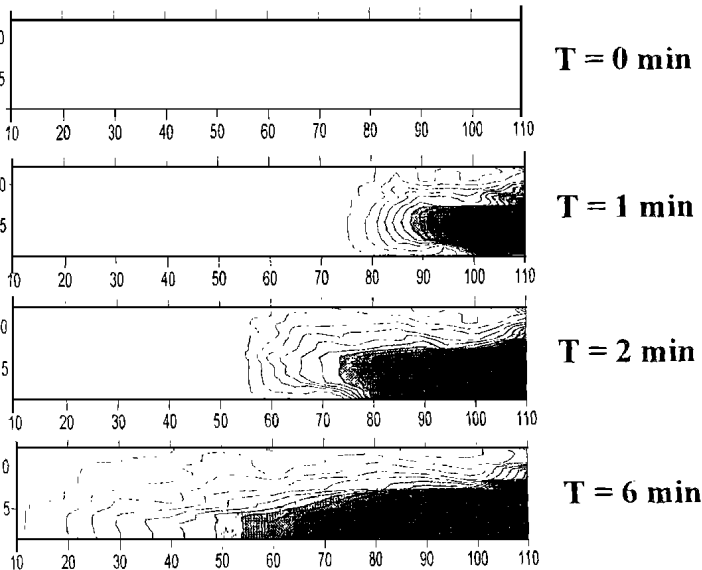


图 14 溯源冲刷时间序列平面图

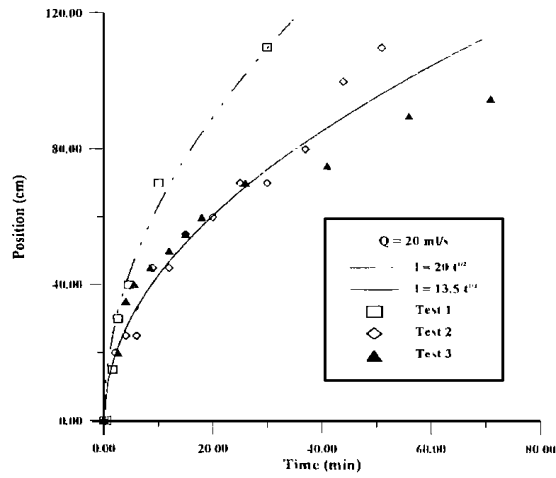


图 15 20 ml 溯源冲刷速度分布图

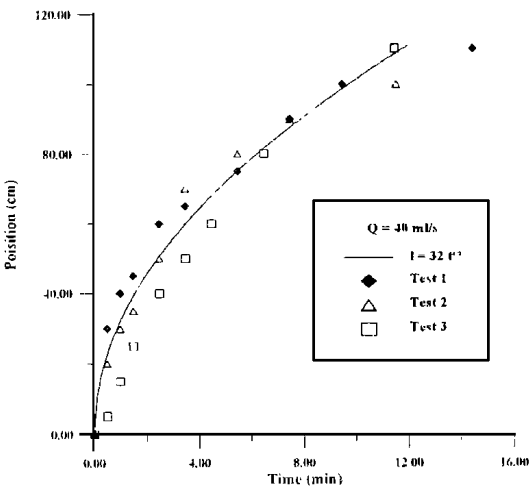


图 16 40 ml 溯源冲刷速度分布图

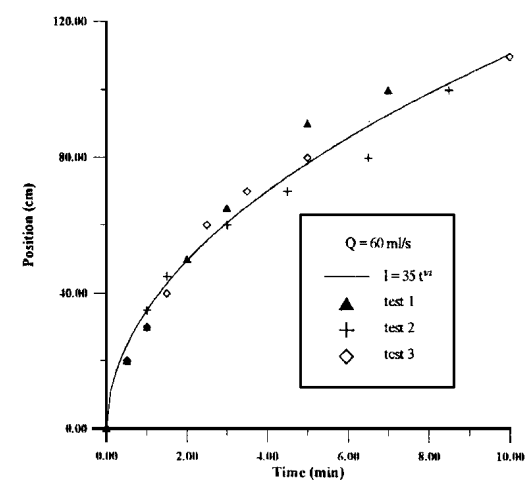


图 17 60 ml 溯源冲刷速度分布图

4.4 溯源冲刷量与时间分析

侵蚀基准面高程与河床纵剖面变化息息相关,它作为控制方程式的下边界条件,直接影响着河床形状和冲刷强度的发展过程,设任一 t 时刻 l 距离之总冲刷量为 $Q_s(t)$,根据砂量平衡原理,则冲刷量即出口断面输砂量具有以下之关系

$$Q_s(t) \propto t^{0.5} \quad (5)$$

上式表明随着时间的推进,冲刷强度逐渐减弱,出口输沙率越来越低,即单位清淤量的耗水量增加。如同溯源速度理论分析结果(5)式,冲刷量与时间之关系同样具有 0.5 次方之关系(图 18~20)。

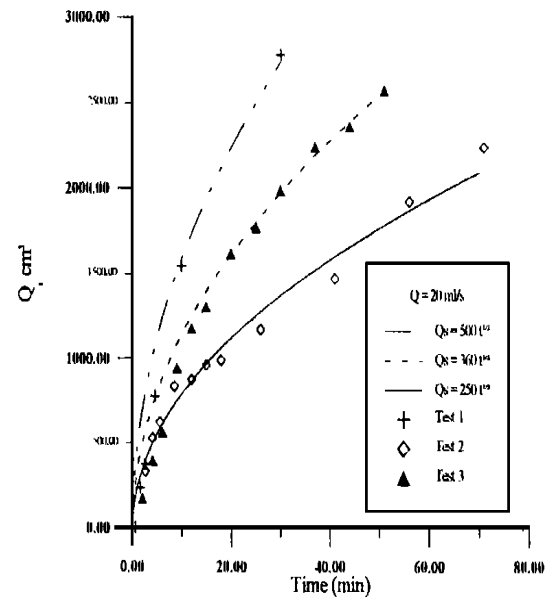


图 18 20 ml 流量溯源冲刷量之时间分布特性

表 1 溯源速度实验回归与理论值资料分析表

实验组别	K	n	R^2
20 ml	1	17.81	0.407
	2	14.36	0.635
	3	12.10	0.540
	理论	13.5	0.50
40 ml	1	34.06	0.547
	2	29.75	0.579
	3	30.11	0.542
	理论	32	0.50
60 ml	1	31.37	0.585
	2	31.75	0.572
	3	32.55	0.523
	理论	35	0.50

注:回归方程为 $l = K t^n$; l 的单位为 cm, t 单位为 min。

表 2 溯源冲刷总量实验回归资料与理论值分析表

实验组别	K	n	R^2
20 ml	1	45.36	1.49
	理论	500	0.50
	2	130.08	0.80
	理论	360	0.50
40 ml	3	243.0	0.507
	理论	250	0.50
60 ml	1	786.80	0.511
	2	556.30	0.718
	3	610.05	0.741
	理论	840	0.50

回归方程式为 $Q_s = K t^n$; Q_s 单位为 cm^3 , t 单位为 min。

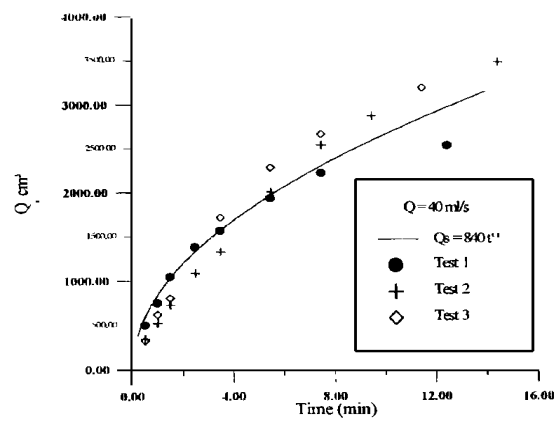


图 19 40 ml 流量溯源冲刷量之时间分布特性

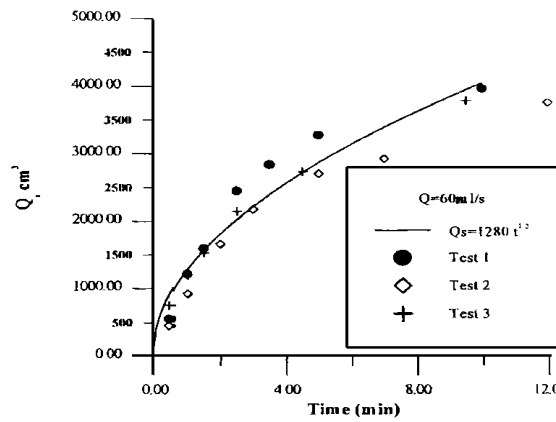


图 20 60 ml 流量溯源冲刷量之时间分布特性

若对每组实验结果各别回归分析其结果如表 2 所示。由表中得知, 20 ml 之第三组实验与理论值最接近; 40 ml 之第一组实验与理论值最接近; 60 ml 之第三组实验与理论值最接近。因此, 在初始条件与自然情况相似时, 可应用表中之与理论解相似之各组回归结果。由溯源冲刷总量与时间之关系, 可推广至溯源冲刷总量与总径流量之关系; 因为在固定流量下只要再乘上累积时间即为总径流量, 由此可知溯源冲刷量与总径流量之关系特性, 由此实验结果说明进而可供水利工程规划设计参考。

5 结 论

- (1) 溯源冲刷实验分析结果显示, 非黏性均匀砂溯源冲刷形态为全程剥蚀型。
- (2) 溯源冲刷实验结果符合理论推导泥砂连续方程式解为误差函数(error function)之形式。

式中 Δz 为高程差, z_0 为初始落差, x 为距出口距离, a 为冲刷系数, t 为时间 $\frac{\Delta z}{z_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{at^{0.5}}$

- (3) 溯源纵向距离与冲刷量和时间皆与时间成指数 1/2 之关系, 流量愈大其冲刷系数愈大。
- (4) 由溯源冲刷实验与理论分析结果, 将可应用于分析水库或沉砂池清淤之效率分析, 亦可应用于河道采砂对河工构造物风险之评估。

参考文献

1 陈树群, 陈联光 随机地形演化模拟 台湾水利季刊 1996, 45(1), 87~ 98

2 Begin, Z B. ,D. F Meyer and S A. Schumm, Sediment Production of A lluvial Channels in Response to Base Level Lowering, Trans ASAE, 1980a, 23(5), 1 183~ 1 188

3 Begin, Z B. ,D. F Meyer and S A. Schumm, Knickpoint M igration Due to Base Level Lowering, J. Water , Port, Coastal, Ocean Div. ASCE, 1986b, (106) (WW 3), 369~ 389

作者简介

陈树群: 中兴大学水土保持学系副教授。

陈联光: 中兴大学水土保持学系博士班研究生。