

文章编号:1671-8879(2009)02-0042-04

## 公路排水跌坎急流槽新型消力池出流冲刷试验

沈 波<sup>1,2</sup>, 艾翠玲<sup>3</sup>, 吕宏兴<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西北农林科技大学  
水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:**为增加公路排水跌坎急流槽安全稳定性,对公路排水跌坎急流槽常规跌水消力池及 3 种新型跌坎消力池出流冲刷模型进行试验。结果表明:跌坎高度、水流相同时,跌坎急流槽消力池后冲坑最大冲深从小到大依次为跌水台入流消力池、副消力池出流消力池、台阶出流消力池和常规跌水消力池;跌坎急流槽消力池跌水台入流消力池构造深度越深,出流后冲坑最大冲深越小,而常规消力池构造深度越深,出流后冲坑最大冲深越大;从工程安全与经济考虑,跌水台入流、台阶出流消力池结构形式可大大减少消力池工程开挖量,消能设施稳定性明显增加;3 种新型消力池可大大缩短出流后加固铺砌长度,综合使用后减冲防灾效果更为显著。

**关键词:**道路工程;路基排水;急流槽;新型消力池;最大冲深

**中图分类号:**U417.3; TU457

**文献标志码:**A

### New type of eliminating energy pool out-flow scouring experiments of rapid chamfer falling guttery for highway

SHEN Bo<sup>1,2</sup>, AI Cui-ling<sup>3</sup>, LU Hong-xing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** In order to increase the safety of rapid chamfer falling guttery for highway, this paper has done 3 new types of eliminating energy pool out-flow scouring experiments of rapid chamfer falling guttery for highway (the convention pool, falling water platform pool, sidestep out-flowing pool, and convention pool joining subsidiary pool). The results show that under the same flow conditions and rapid chamfer height, the falling platform pool outflow scouring maximal depth is the smallest among the four eliminating energy pool types, the convention pool joining subsidiary pool belongs to the second, decreasing of sidestep out-flowing pool scouring maximal depth is comparatively smaller than the convention eliminating pool, the convention pool scouring pit depth is the greatest one; the souring maximal depth decreases with increase of the falling platform pool depth, but the ordinary rush falling rapid chamfer convention pool depth increases with increase of the souring maximal depth. By considering of safety and economy of engineering, falling water platform pool and sidestep out-flowing pool can decrease the great deal of excavate

收稿日期:2008-03-26

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2001 318 812 34)

作者简介:沈 波(1966-),男,陕西汉阴人,长安大学副教授,西北农林科技大学博士后,E-mail:shenboca@163.com.

soil, and increase the eliminating pool stability. The falling water platform pool, sidestep out-flowing pool, and convention pool joining subsidiary pool can decrease the preventive scouring pavement length of eliminating energy pool. Using three new types convention pool construct together, the effect of damages preventing will be improved obviously. 3 tabs, 4 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; roadbed drainage; rush falling rapids chamfer; new type eliminating energy pool; maximal scouring depth

## 0 引言

在降雨排水时,山区公路路基边坡急流槽或陡涵与山坡自然汇流冲沟平顺连接必不可少。由于急流槽坡陡流急,砌体基础条件差,重力稳定弱,遭遇特大暴雨时,集中排水一旦出口支撑或消力池发生水毁问题,极易上溯逐级坍塌,引起整体失稳,严重时,洪水冲切拉沟,冲蚀路基内外坡体,造成大的路基水毁灾害。

急流槽下接消力池,一般能使高速来流绝大部分动能在池内得到消耗,但如果消力池结构不合理,水历经消能后仍存在较大的动能或紊动动能,则会在消力池出水口产生较严重的冲刷坑。当消力池出口处泥沙(或土体)冲坑最大冲深超过消力池的基础埋置深度或铺砌基础埋置深度时,会引起急流槽支撑不稳,产生水毁问题。在对中国西南地区多雨土石山区公路排水调查时发现,山区公路排水急流槽水毁频繁,现行急流槽出口消力池设计存在一定的冲刷水毁问题<sup>[1-6]</sup>。为此,本文对山区公路排水急流槽跌坎消力池不同的入流、出流最大冲深模型进行试验,确定其消能池出流冲刷效果,以便从结构方面来改善跌坎消力池消能效果,增强急流槽安全稳定性能。

## 1 试验条件

模型为矩形断面钢槽,净宽 10 cm,高 8 cm,长 600 cm。槽体用活动铰,坡度通过槽体进口高度变化来调节,急流跌坎高度为 6~11 cm,消力池模型比例近似为 1:4,消力池及其出口下游段与有机玻璃渠槽同宽,有机玻璃渠槽长 370 cm,宽 10 cm,高 25 cm,除衔接段外槽内铺模型沙。

根据《公路排水设计规范》,选取试验参数如下。

(1)坡度  $i$  为 0.16、0.35、0.4、0.6。

(2)单宽流量为  $6/(0.1 \times 3\ 600)\text{ m}^2/\text{s}$ ,水流由静水池和喇叭形收缩段稳定均匀进入急流槽;流量大小由进水管电磁阀调控,并用电磁流量计检测。

(3)泥沙粒径。模型砂均匀粒径分别为 1.5

mm 和 4.0 mm。

(4)急流槽下游渠道水深由下游较短渠道自由跌水自行调节,  $h_k = \sqrt[3]{q^2/g}$ , 其中:  $q$  为渠道单宽流量;  $h_k$  为临界水深;  $g$  为重力加速度。

(5)消能设施基本尺寸。试验前充分考虑急流槽跌水射流长度及常规消力池深度和长度设计,综合确定试验铺砌长度为 25~70 cm,消力池的深度为 5 cm、10 cm。

急流槽模型在安装、流量及预定坡度调节后,进行出口衔接消能设施安装及下游段槽内铺沙,放水冲刷,2 h 后达冲刷平衡后停水,试验结束,测量冲坑形状及最大冲深。

## 2 试验结果分析

### 2.1 最大冲深经验公式

急流槽消力池出流后冲刷坑底在冲刷各阶段沙床界面直接受水流淘刷,冲坑达冲刷平衡时,水面基本不变,坑底最深点泥沙处于临界起动状态。冲坑水流变化如图 1 所示。

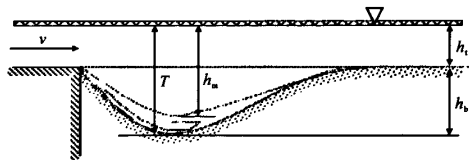


图1 局部冲坑

设图 1 中冲坑紊动流速产生的最大冲刷水深为  $T$ ,冲坑最大冲深为  $h_b$ ,急流槽下游水深为  $h_t$ 。由流量连续方程得

$$q = h_m v_c \quad (1)$$

式中:  $q$  为冲刷坑内单宽流量,本文消力池宽度与急流槽宽度一致,即为急流槽单宽流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $h_m$  为冲刷坑最深点泥沙临界起动均匀流速水深(m),  $h_m = \sqrt[1.14]{q/(5.385d^{0.36})}$ ,  $d$  为粒径(mm);  $v_c$  为天然河床泥沙起动流速( $\text{m/s}$ ),  $v_c \approx 5.385h_m^{0.14}d^{0.36}$ 。

$$h_b = T - h_t = \psi h_m - h_t = \psi \sqrt[1.14]{q/(5.385d^{0.36})} - h_t \quad (2)$$

式中： $\psi$  为冲刷坑底存在的流速脉动影响系数。

由于水跃共轭水深近似与跃前单宽动量 0.5 次方成正比关系,急流槽消力池出口冲坑内水流结构与之相似,考虑消力池出口单宽动量难以确定,同时在消力池结构一定的条件下,急流槽消力池出口单宽动量与入口急流槽内单宽动量有确定的相关关系,因此, $\psi = K_0(qv)^n$ 。其中: $K_0$  为消力池结构形式对出流冲坑冲深影响系数; $(qv)^n$  为冲深水流动量影响系数; $(qv)$  为急流槽均匀水流单宽动量; $v$  为急流槽均匀水流流速; $n$  为幂指数,由文献[2]急流槽直接铺砌衔接后冲刷试验可得, $n = -0.242$ 。由于急流槽水流动量影响系数与下游消力池形式无关,本文直接引用,所以有

$$h_b = K_0(qv)^{-0.242} \sqrt[1.14]{q/(5.385 \times d^{0.36})} - h_t \quad (3)$$

本文控制试验条件为  $h_t = h_k = \sqrt[3]{q^2/g}$ 。

2.2 常规跌坎消力池出流最大冲深

急流槽跌坎消力池出流冲刷消力池的跌坎高  $\Delta y = 11\text{ cm}$ ,消力池内、外长度分别为  $L_0 = 70\text{ cm}$ 、 $L = 75\text{ cm}$ ,消力池槛宽  $b = 5\text{ cm}$ ,消力池槛顶与下游河床高程齐平,结构形式如图 2 所示。在图 2 结构形式下,水流经过急流槽跌坎直接俯冲消力池底,水流流出消力池前,在消力池末强迫水流沿坎壁面垂直转向竖直向上,上冲水流在重力的作用下分为两部分:一部分反向回流,在消力池内形成大的涡流水流结构;另一部分水流流出消力池槛,在消力池槛后回落下潜直接冲刷河床泥沙,形成大的冲坑。在不同的消力坎高度下,造成的上冲水流转向回落,在消力池槛后冲刷强度也不同;在相同水流条件下,单宽流量  $q = 6/(0.1 \times 3\ 600)\text{ m}^2/\text{s}$ ,消力池槛高(10 cm)的冲坑最大深度大于消力池槛低(5 cm)的冲坑最大深度,试验结果如表 1 所示。

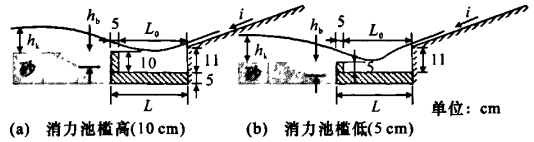


图 2 急流槽跌坎消力池出流冲刷

2.3 跌水台入流消力池出流最大冲深

跌坎急流槽下部跌水台入流消力池,如图 3 所示。跌坎高 6 cm,跌水台长 25 cm、高 5 cm,消力池长  $L_0 = 45\text{ cm}$ , $L = 75\text{ cm}$ ,消力池槛宽  $b = 5\text{ cm}$ 。出流冲刷结果如表 2 所示。在水流从急流槽跌落在跌水平台上时,经冲击碰撞转向为水平后,水流经平台后再在消力池产生双水跃,即表面临界水跃,下部扩散

型水跃。双水跃水流湍滚紊动比单水跃更剧烈,消能效果更明显。经由消力槛前双水跃消能,出流水流流速明显减弱。且消力池的出流消力槛越高,消能效果越好,出流冲坑最大冲深越小。在实际工程中,跌水台入流形式可减少消力池开挖土方量,对急流槽体起到一定的支撑作用,增加跌落坎壁稳定性,同时有利于保护消力池底,避免大的冲刷。

表 1 跌坎消力池出流最大冲深误差

消能 设施 特点	消力池 槛高度/ cm	坡度 <i>i</i>	泥砂 粒径 <i>d</i> /mm	冲坑最 大冲深 <i>h<sub>b</sub></i> /cm	$\psi_a$	$\psi_b$	$\frac{\psi_b - \psi_a}{\psi_a}$ /%
常规 矩 形 消 力 池	10	0.16	1.5	4.88	1.617	1.809	-10.614
		0.16	1.5	4.91	1.623	1.809	10.282
		0.35	1.5	5.18	1.678	1.709	1.814
		0.16	4.0	4.36	2.059	1.809	-13.820
		0.35	4.0	3.66	1.865	1.709	-9.128
	5	0.16	1.5	4.9	1.621	1.563	-3.711
		0.35	1.5	4.15	1.468	1.477	0.609
		0.60	1.5	4.65	1.570	1.420	-10.563
		0.16	4.0	2.35	1.501	1.563	3.967
		0.35	4.0	1.61	1.295	1.477	12.322
		0.60	4.0	2.20	1.459	1.420	-2.746

注: $\psi_a$  为实测冲刷系数影响系数, $\psi_a = T/h_m = (h_b + h_t)/h_m$ ;  $\psi_b$  为经验计算冲刷系数影响系数, $\psi_b = K_0(qv)^{-0.242}$ 。试验得结构形式系数  $K_0$ :消力池槛高(10 cm), $K_0 = 0.791$ ;消力池槛低(5 cm), $K_0 = 0.684$ 。

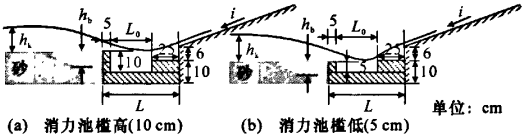


图 3 跌水台消力池出流冲刷

表 2 跌水台消力池出流最大冲刷水深误差

消能 设施 特点	消力池 槛高度/ cm	坡度 <i>i</i>	泥砂 粒径 <i>d</i> /mm	冲坑最 大冲深 <i>h<sub>b</sub></i> /cm	$\psi_a$	$\psi_b$	$\frac{\psi_b - \psi_a}{\psi_a}$ /%
跌 水 台 消 力 池	10	0.16	1.5	4.80	1.600	1.384	-15.620
		0.35	1.5	3.89	1.415	1.308	-8.195
		0.16	4.0	0.90	1.098	1.384	20.709
		0.35	4.0	1.51	1.267	1.308	3.106
	5	0.16	1.5	3.75	1.386	1.623	14.592
		0.35	1.5	6.02	1.849	1.533	-20.588
		0.60	1.5	3.15	1.264	1.475	14.283
		0.16	4.0	2.72	1.603	1.623	1.220
		0.35	4.0	2.74	1.609	1.533	-4.921
		0.60	4.0	2.50	1.542	1.476	-4.587

注:消力池槛高(10 cm), $K_0 = 0.582$ ;消力池槛低(5 cm), $K_0 = 0.683$ 。

2.4 消力池附台阶及副消力池出流最大冲深

试验单宽流量  $q = 6 / (0.1 \times 3\,600) \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L_0 = 40 \text{ cm}$ ,  $L = 75 \text{ cm}$ , 衔接跌坎高度  $\Delta y = 11 \text{ cm}$ , 槛宽  $b = 5 \text{ cm}$ ; 消力池出流形式如图 4 所示。

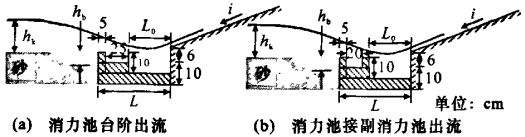


图 4 台阶及副消力池出流冲刷

(1) 消力池台阶出流。水流直接跌入消力池产生下潜底流, 为了避免出槛转向过快, 导致槛后产生过大的冲刷坑深度, 槛前采用了台阶, 使下潜的底流渐次在槛前转向, 从而达到减小出流冲刷坑深度的目的。工程实践表明: 减少了消力池开挖土方量, 减小了水流对消力坎过大冲击与冲刷, 同时保证消力槛不至于过高, 而产生消力槛自身不稳定性。由表 3 与表 1 比较可知, 在同样条件下, 冲刷深度较同样消力池槛高的矩形消力池冲刷深度小。

(2) 消力池接副消力池出流。这种出流基于消力槛后流速较大因素考虑, 为进一步减小消力池出流后流速, 减小冲刷坑最大冲刷深度, 使急流槽跌落水流在消力池内经过强迫水跃后, 使出流经过二次消力池的扩散水跃消能, 再出流与渠道衔接。试验表明: 消力池结合副消力池减冲的效果远比消力池结合台阶消力槛减冲效果更好, 衔接出流冲刷坑明显变浅。

表 3 消力池附台阶及副消力池出流最大冲深误差

消能 设施 结构	坡度 $i$	泥砂 粒径 $d/\text{mm}$	冲坑最 大冲深 / $\text{cm}$	$\psi_0$	$\psi$	$\frac{\psi - \psi_0}{\psi_0}$ %
消力池 台阶 出流	0.16	1.5	4.70	1.580	1.757	10.077
	0.35	1.5	5.18	1.678	1.660	-1.080
	0.16	4.0	3.20	1.737	1.757	1.155
	0.35	4.0	3.53	1.828	1.660	-10.152
消力池 接副消 力池 出流	0.16	1.5	4.25	1.488	1.658	10.225
	0.35	1.5	4.73	1.586	1.566	-1.276
	0.16	4.0	1.90	1.375	1.658	17.029
	0.35	4.0	4.05	1.973	1.566	-25.979

注: 消力池台阶出流,  $K_0 = 0.739$ ; 消力池接副消力池出流,  $K_0 = 0.697$ 。

3 结 语

(1) 消力池在同样长度、深度的条件下, 跌水台人流消力池冲坑深度最小, 其次是消力池接副消力池, 台阶出流消力池更次之, 常规跌水消力池冲刷最

为严重。

(2) 跌坎急流槽消力池跌水台人流消力池构造深度越深, 出流后冲坑深度越小; 而常规消力池构造深度越深, 出流后冲坑最大冲深越大。

(3) 跌水台、副消力池和出槛台阶对减少冲刷皆有效果, 在工程中, 如各种措施联合应用, 将会产生更好的减冲效果。

(4) 跌水台、出槛台阶可减少工程开挖量, 增加消能设施的稳定性; 跌水台、副消力池和出槛台阶 3 种消能结构形式, 实际工程可大大减少消力池出流后所需铺砌长度, 维护急流槽消能结构安全, 在工程中可广泛地推广使用。

参考文献:  
References:

[1] 沈 波. 山区公路排水系统灾害评价方法及指标研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.

[2] 沈 波, 艾翠玲, 徐 岳, 等. 山区公路排水急流槽冲刷试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 30-34.

SHEN Bo, AI Cui-ling, XU Yue, et al. Scouring test on the drainage rapid gutter of mountain road [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 30-34.

[3] 沈 波, 艾翠玲, 田伟平, 等. 小桥涵自由式出流冲刷试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(3): 61-66.

SHEN Bo, AI Cui-ling, TIAN Wei-ping, et al. Freedom outlet scour test of bridge and culvert [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(3): 61-66.

[4] 谈至明. 公路排水系统设计参数研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 7-11.

TAN Zhi-ming. Research on design parameters of highway drainage system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 7-11.

[5] 姚祖康. 公路排水设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[6] 沈 波, 艾翠玲. 山区公路排水系统抗水灾评价指标[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 11-16.

SHEN Bo, AI Cui-ling. Evaluation indices of anti-flood for mountain highway drainage system [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 11-16.