水　利　学　报
2017年5月　　SHUILI　XUEBAO　　第48卷　第5期

文章编号：0559-9350(2017)05-0545-06

丁坝局部冲刷坑形态演变及冲刷平衡临界条件

张　立，孙忠克，徐东坡
（华北水利水电大学 水利水电学院，河南 郑州　450046）

摘要：丁坝局部冲刷坑垂向冲深、平面宽度及上下游边坡构成了冲刷坑几何形态的三维特征。局部冲刷达到平衡状态时，冲刷坑上下游边坡保持相对稳定的斜率。其与泥沙颗粒水下休止角大小及冲刷平衡临界条件的关系仍不太明确。一系列清水冲刷试验表明，不同来流强度条件下冲深与展宽速率存在非对称特征，坝体上下游边坡斜率随时间演变振荡衰减至相对稳定坡度。坝体上游坡度均较下游陡，比值近似常量为0.5。边坡斜率略小于泥沙颗粒水下休止角，比值下限近似为常量0.7。

关键词：丁坝局部冲刷；冲深与展宽；冲刷坑形态；冲刷平衡临界条件；泥沙颗粒水下休止角
中图分类号：TV143　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb. 20160381

1　概述

丁坝属浅基型涉水建筑物，广泛应用于治河、防洪、航道整治及改善生物栖息环境等。丁坝的干扰改变了河流原有的平衡状态，如坝体上游壅水、坝体附近局部冲刷及下游河床一般冲刷等现象。丁坝局部冲刷问题被长时间关注；现场查勘、理论分析、水槽试验及数值计算等技术手段或方法常被采用，获得了丰富的研究成果。鉴于丁坝局部冲刷产生机理较为复杂，丁坝冲刷问题的研究常涉及丁坝局部冲刷形成机理的讨论，局部冲深随时间演变规律及冲刷坑形态特征等课题。对于丁坝冲刷机理的研究可概括为四种学说[1-2]，而局部最大冲深预测往往是工程技术或研究人员最为关心的问题。相较而言，对冲刷坑形态的关注显得举足轻重。如局部冲刷坑平面展宽及边坡调整规律等。局部冲刷演变过程中，局部冲深与展宽并非单向演变，即冲深发展必伴随展宽演变，冲刷坑上、下游边坡随时间演变呈现规律性调整，而这一调整过程往往被忽略。目前，常以泥沙颗粒水下休止角为参数代替讨论冲刷坑坝体上、下游边坡陡缓程度(以角度表示)，继而进一步讨论冲刷坑边坡形态及涡流发展规律等。不同介质及受力环境下泥沙颗粒休止角大小区别仍存争论；局部冲刷达到平衡状态，冲刷坑边坡陡缓程度与泥沙颗粒水下休止角大小关系亦无定论。因此，有必要针对上述相关问题开展试验研究，而这些问题的讨论也必然涉及冲刷平衡临界条件的判别。相关研究成果为河道整治设计、防灾减灾等工程应用方面提供参考。

2　研究进展

无论是桥墩还是丁坝局部冲深随时间演变过程都具有重要的意义，特别是洪水期预报冲刷深度[3]。清水冲刷条件下，局部冲刷演变过程分为三个或四个阶段[4]，持续冲刷历时是讨论冲刷演变特性的重要参数。有学者认为若持续历时小于12 h就失去研究冲刷平衡问题的意义[5]。而最短仅持续3 h[6]，最

收稿日期：2016-04-17；网络出版日期：2017-05-17
网络出版地址：http：//kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170517.1004.003.html
基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(51039004，51579103)
作者简介：张立(1982-)，男，河南淮阳人，讲师，主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail：zhangli1234@ncwu.edu.cn

长持续近一个月[7-9]，但均认为冲刷达到了平衡。因此，对于冲刷历时的选取差别较大，不甚统一。其一是受水流紊动影响，造成局部冲深不存在绝对的平衡，其二仅通过冲深随时间演变规律讨论冲刷平衡状态，差别往往较大，难以界定。但参考各研究成果，清水条件下冲刷持续历时不应低于35 h均是合理的。从工程应用角度考虑，有学者以d_{max}=0.632 d_{se}作为局部冲深d_{max}的参考标准[10]，式中d_{se}为清水冲刷条件下所观测的最大局部冲深；或以最大观测值的97 %为局部冲深参考标准[11]；或以冲刷达到峰值的特征时间(t_p)判定局部冲刷深度，具有重要的工程应用价值。局部最大冲深与时间呈对数关系[12]或呈指数关系[13]，已形成共识。

冲刷平衡状态下，坝体上下游边坡保持相对稳定的斜率，斜率的大小近似为泥沙颗粒水下休止角[14]。泥沙水下休止角与沙粒粒径成正比，并随颗粒形状而变化[15-18]。詹义正等[19]通过理论分析建立了动水条件下的泥沙颗粒水下休止角计算公式。石雨亮等[20]等利用泥沙干容重推导了泥沙颗粒水下休止角计算式。吕亭豫等[21]采用概率论及力学理论分析法，讨论了泥沙颗粒水下休止角，并考虑沙波运动，建立泥沙颗粒水下休止角表达式。孟震等[22]通过试验获得了均匀沙颗粒水下休止角，粒径范围2 ~ 10 mm，并认为泥沙颗粒水上休止角大于水下休止角。黄长伟等[23]讨论了黏性散粒体均匀沙的动水休止角，基于楔入堆积模式，考虑黏结力及动水作用等影响，建立力学平衡方程，得到均匀沙动水休止角计算公式。已有的研究成果表明，受水流的润滑作用，无黏性泥沙颗粒的水上休止角一般大于水下休止角[16,18]；但也有相关试验成果认为泥沙颗粒水下休止角偏大[24-25]。因此，通过试验分析讨论泥沙颗粒水下休止角与冲刷平衡状态下冲刷坑边坡斜率大小关系，及对冲刷平衡临界判别条件的提出就显得尤为重要了。

3　丁坝冲刷试验

3.1　实验条件及过程　试验在玻璃水槽中进行，水槽长50 m，宽0.8 m。通过双向轴流泵与槽身形成闭合的循环系统，利于水流稳定。水槽进口采用变频器控制水泵转速，电磁流量计量测进口流量；水槽尾部设有竖向百叶窗式自动控制尾门，调节下游水深。为保证试验数据量测的稳定性，水槽上方架设有可移动的滑轨，轨道上方安装测针用以测量水深及冲刷坑平面几何尺寸等。试验区长30 m，床沙为天然沙，容重γ_s=2.65 kg/m^3；泥沙中值粒d_{50}分别为0.9 mm、0.4 mm；$\sigma_g=\sqrt{d_{84}/d_{16}}$分别为1.38、1.25。丁坝位于试验区中部，坝长0.2 m，圆形坝头；垂直水流方向布置，非淹没型。坝体采用有机玻璃材料制成，并在坝体内部布置测尺。

采用清水冲刷，上游来流强度按U/Uc控制，式中U丁坝上游行进流速，采用Sontek ADV量测。Uc床沙起动流速，Fr为水流弗劳德数。试验各工况统计见表1。

表1　丁坝局部冲深试验设计工况

工况	U/(m/s)	U/Uc	Fr	d_{50}/mm	T/h
C1	0.278	0.90	0.22	0.9	168
C2	0.278	0.90	0.22	0.9	72
C3	0.251	0.81	0.21	0.9	110
C4	0.231	0.75	0.19	0.9	72
C5	0.179	0.58	0.14	0.9	72
C6	0.232	0.90	0.22	0.4	72
C7	0.194	0.75	0.19	0.4	72

3.2　试验结果　试验过程中同步观测不同演变时刻局部冲深及展宽，冲刷坑上下游边坡概化为直线，并按三角函数关系式推算边坡斜率，见图1。图中φ_u、φ_d分别为冲刷平衡状态上下游边坡斜率；d_{se}、W_e分别为冲刷平衡状态下局部冲深及平面宽度。

各试验工况局部冲深、展宽观测结果，见表2。

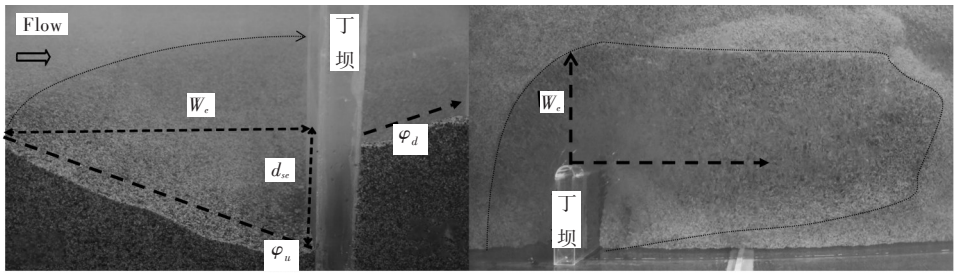


图1　冲刷坑坝体上游坡度斜率计算简图

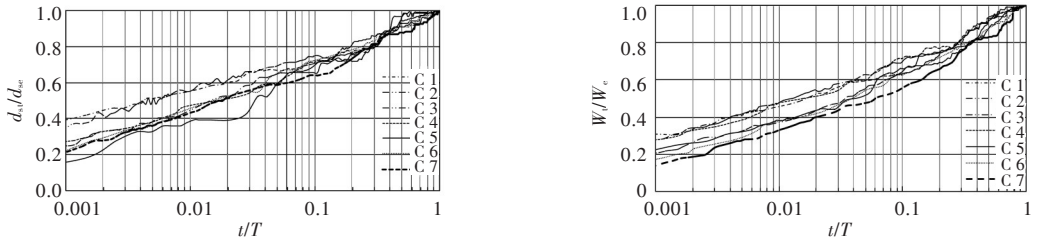
表2　试验观测及计算结果

工况	U/Uc	φ_u/°	φ_d/°	φ_d/φ_u	d_{se}/W_e	d_{se}/L
C1	0.9	30.6	15	0.49	0.602	1.05
C2	0.9	32.8	16	0.48	0.645	0.65
C3	0.81	32.4	17	0.49	0.636	0.53
C4	0.75	35.0	15	0.43	0.705	0.47
C5	0.58	36.2	17	0.47	0.732	0.30
C6	0.90	31.7	17.6	0.55	0.618	0.78
C7	0.75	34.6	15.9	0.46	0.689	0.55

表中φ_u、φ_d分别为平衡时丁坝上游和下游冲刷坑边坡斜率

根据表2中试验成果，冲刷平衡状态下，来流强度越大，局部冲刷坑边坡越缓。不同泥沙粒径条件下，冲刷坑上游坡度均较下游陡峭，两者比值介于0.43～0.55。

试验过程中关注了不同演变阶段局部冲深及展宽过程，根据试验观测成果，采用无量纲参数讨论局部冲深、展宽速率随时间演变过程，见图2。



（a）冲深演变速率　　（b）展宽演变速率

图2　局部冲刷冲深、展宽速率随时间演变过程

依上述不同演变阶段局部冲深与展宽速率演变特点，讨论各工况条件下冲刷坑上游边坡斜率随时间调整规律，见图3。可看出，冲刷坑上游边坡斜率随时间演变呈振荡衰减调整。演变初始阶段振幅调整范围大，周期短，冲深与展宽调整剧烈；稳定及平衡阶段，振幅进一步减小，周期增长，冲深与展宽调整缓慢。

试验过程中，固定相机机位，采用EOS Utility软件控制单反相机光圈、快门等参数，采用延迟摄影技术，获取冲刷坑坝体上游泥沙颗粒运动图片，经后期处理形成坡面泥沙运动轨迹图像，见图4。图中泥沙颗粒白化程度与运动强度成正比。

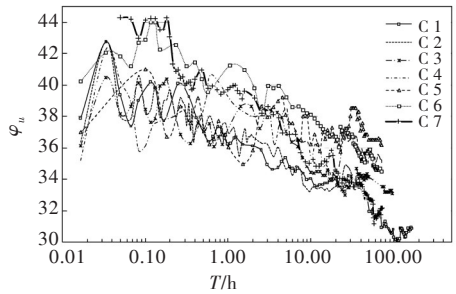


图3　各工况冲刷坑上游坡度随时间演变过程



图4　冲刷坑上游边坡沙粒运动轨迹

试验观察发现：来流强度较大时，初始阶段边坡泥沙以崩岸形式塌落至冲刷坑底部经水流携带至坝后，沙波逐渐形成；稳定及平衡阶段，泥沙颗粒缓慢滑落，颗粒间碰撞强度较弱，受坝体附近涡流影响，部分颗粒从冲刷坑底部经水流挟带至坡面，约在0.1～0.3倍水深处堆积，堆积超过某一坡度后塌落至冲刷坑底部，一部分经水流分拣喷发至下游；一部分稍大颗粒停留在冲刷坑底部再次经水流挟带在坡面堆积，呈现周期性循环，冲深缓慢调整和泥沙粗化形成。

4 讨论

采用无量纲参数φ_u/θ、t/T讨论不同演变阶段冲刷坑边坡斜率与泥沙颗粒水下休止角大小关系，见图5。其中对于泥沙颗粒水下休止角θ取值，参考各研究成果，见图6，d_{50}为0.9 mm、0.4 mm，泥沙休止角θ分别为35.7°，34.3°。

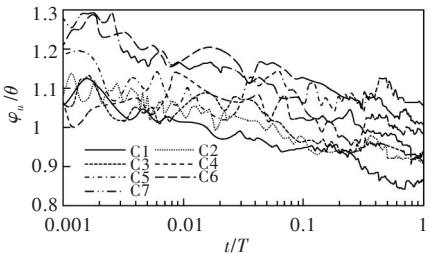


图5 φ_u/θ比值随时间演变过程

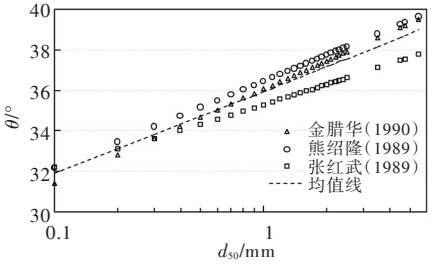


图6 泥沙粒径与休止角关系

从图5中可看出，各试验工况冲刷平衡状态下，φ_u/θ比值较接近于或略小于1，整体呈现接近或略小于泥沙颗粒休止角。

为探索斜坡泥沙起动规律，研究人员进行了大量的研究工作，通过理论分析及水槽试验，讨论了斜坡上泥沙起动公式[7]，定义任意坡度泥沙临界剪切流速与水平床面泥沙剪切流速间关系为：

$$\frac{U_{*c}}{U_{*0}}=\sqrt{\cos\varphi\left(1-\frac{\tan\varphi}{\tan\theta}\right)} \tag{1}$$

式中：U_{*c}为任意坡度泥沙起动临界剪切速度；U_{*0}为水平床面泥沙临界剪切速度；φ为任意床面坡度。

式(1)描述了任意坡度泥沙起动剪切流速与水平床面泥沙剪切流速间关系，表明顺水流或逆水流方向任意斜坡上泥沙颗粒起动的难易程度。同斜坡泥沙起动水流条件相比，丁坝上游冲刷坑内流速分布极其复杂，从工程应用角度考虑，冲刷坑坝体上下游边坡泥沙运动规律等同于斜坡泥沙起动(水平床面等同于未发生冲刷时床面)。

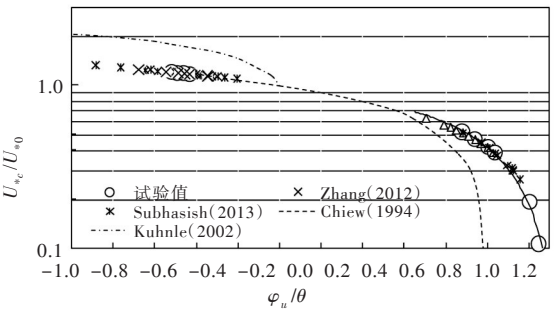


图7 不同坡度下泥沙剪切速度与临界速度比值关系
(坝体下游边坡为逆水流方向为负值)

根据试验各工况观测值并参考已有研究成果[7, 12, 14, 26-27]，按式(1)计算丁坝冲刷平衡条件下，相对稳定边坡斜率($\varphi=\varphi_u$)与冲刷平衡临界条件$U_{*0}\leqslant U_{*c}$的关系，见图7。

从图7中可看出，随冲刷坑边坡趋缓，U_{*c}/U_{*0}增大，泥沙不易起动。冲刷达到平衡时，φ_u/θ比值下限值为0.7。

5 结论

丁坝局部冲刷试验表明，局部冲刷冲深与展宽随时间演变具有非对称性特征，局部冲刷坑上游

边坡随水流强度增大而减缓。

冲刷坑下游与上游边坡斜率比值近似为常量0.5。无量纲参数φ_u/θ比值表明，冲刷坑上游边坡斜率略小于泥沙休止角。

局部冲刷达到平衡状态，φ_u/θ比值下限近似为常量0.7。

参 考 文 献：

[1] 周哲宇，等．丁坝局部冲刷研究现状与展望[J]．人民黄河，2010(6)：18-21．

[2] 刘磊，苗润泽，钟德钰，细沙河床丁坝局部冲刷深度计算公式的验证[J]．水力发电学报，2014(2)：122-130．

[3] CARDOSO A H，BETTESS R．Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments[J]．Journal of Hydraulic Engineering，1999，125(4)：388-399．

[4] HOFFMANS G J C M，VERHEIJ H J．Scour Manual[M]．A．A．Balkema：Rotterdam，Brookfield，1997．

[5] 张义青，杜小婷．丁坝的平衡冲刷及冲刷计算[J]．西安公路交通大学学报，1997，17(4)：56-59．

[6] CUNHA L V．Time evolution of local scour[C]//Proc. 16th Conf．Int．Assoc．Hydraulic Research（Delft：IAHR）．1975：285-299．

[7] CHIEW Y M，PARKER G. Incipient motion on non-horizontal slopes[J]．Journal of Hydraulic Research，1994，32(5)：649-660．

[8] OLIVETO G，HAGER W H．Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour[J]．Journal of Hydraulic Engineering，2002，128(9)：811-820．

[9] OLIVETO G，HAGER W H．Further results to time-dependent local scour at bridge elements[J]．Journal of Hydraulic Engineering，2005，131(2)：97-105．

[10] WHITEHOUSE R J S．Scour at marine structures：a manual for engineers and scientists[R]．Res．Rep．SR417，HR Wallingford Limited，Wallingford，UK，1997．

[11] MASJEDI A，BEJESTAN M S，MORADI A．Experimental study on the time development of local scour at a spur dike in a 180 flume bend[J]．Journal of Food，Agriculture & Environment，2010，8(2)：904-907．

[12] ETTEMA R，MELVILLE B W，BARKDOLL B．Scale effect in pier-scour experiments[J]．J．Hydraul．Eng．，1998，124(6)：639-642．

[13] BALLIO F，ORSI E．Time evolution of scour around bridge abutments[J]．Water Engineering Research，2001，2(4)：243-259．

[14] ZHANG H，NAKAGAWA H，KAWAIKE K，et al．Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke[J]．International Journal of Sediment Research，2009，24(1)：33-45．

[15] 张凤崑．散粒体非均匀沙在水流作用下的起动及其试验研究[D]．天津：天津大学，1965．

[16] 金腊华，石秀清．试论模型沙的水下休止角[J]．泥沙研究，1990(3)：87-93．

[17] 熊绍隆．底孔前散体泥沙冲刷漏斗形态研究[J]．泥沙研究，1989(2)：76-83．

[18] 张红武，汪家寅．沙石及模型沙水下休止角试验研究[J]．泥沙研究，1989(3)：90-96．

[19] 詹义正，卢金友，曹志芳，等．论动水水下休止角与理论河岸边坡[C]// 长江护岸工程(第六届)及堤防防渗工程技术经验交流会．2001．

[20] 石雨亮，陆晶，詹义正，等．泥沙的水下休止角与干容重计算[J]．武汉大学学报：工学版，2007，40(3)：14-17．

[21] 吕亭豫，陈贤策．泥沙颗粒水下休止角的研究[J]．价值工程，2012，31(20)：67-68．

[22] 孟震，杨文俊．泥沙颗粒水下休止角与内摩擦角差异化初步探索[J]．泥沙研究，2012(4)：76-80．

[23] 黄长伟，詹义正，卢金友．黏性-散体均匀沙的动水休止角公式[J]．广东水利水电，2008(6)：1-3．

[24] YANG F，LIU X，YANG K，et al．Study on the angle of repose of non-uniform sediment[J]．Journal of Hydrodynamics，Ser．B，2009，21(5)：685-691．

[25] FROEHLICH D C．Mass angle of repose of open-graded rock riprap[J]．Journal of Irrigation and Drainage Engineering，2011，137(7)：454-461．

[26] KUHNLE R，ALONSO C．Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed[J]．International Journal of Sediment Research，2013，28(3)：349-357．

[27] BOSE S K，DEY S．Sediment entrainment probability and threshold of sediment suspension：exponential-based approach[J]．Journal of Hydraulic Engineering，2013，139(10)：1099-1106．

Morphological evolution of spur dike local scour hole and the scour balance critical condition

ZHANG Li, SUN Zhongke, XU Dongpo

(*North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Conservancy, Zhengzhou* 450046, *China*)

Abstract: Roughly several parameters controlled the 3-D characteristics of the scour hole geometry. which were the scour hole depth and width geometry and the side slope of upstream and downstream. The inclinations of the upstream and downstream side-slope kept relatively stable in the stage of scour equilibrium, while the relationship between the wet angle of repose of the sediment particle and the critical condition of scour equilibrium is not clear. A series of clear-water experiments showed that the variation of the scour depth and length possessed asymmetrical characteristic in different flow condition and the angel of inclinations of the upstream and downstream side-slope oscillated damply with time until stability. The scour hole side slope is steeper at upstream than that at downstream, which has a approximate constant of inclination ratio, namely about 0.5. The angel of inclination of side-slope is close to that of repose of the sediment particle, and its lower limit angle ratio approximated to 0.7.

Keywords: the local scour of spur dike; depth and broadening of scour hole; scour hole shape; critical condition of scour balance; the angle of repose for sediment particles

(责任编辑：李福田)

(上接第544页)

Simulated impacts of climate change on evapotranspiration and vegetation in Horqin Sandy Land

WANG Siru[1, 2], LEI Huimin[1], DUAN Limin[3], LIU Tingxi[3], YANG Dawen[1]

(1. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*;

2. *State Key Laboratory of Hydrology and Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*;

3. *College of Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: Vegetation degraded significantly in Horqin Sandy Land over the past three decades. Identifying the variability of the key ecohydrological processes (such as evapotranspiration and vegetation growth) that are closely related to desertification is prerequisite for a better control of desertification processes in the future. Based on an ecohydrological cellular automata model, the Water and Vegetation Interactions-based Eco-hydrological Model (WaVEM) was developed and employed to evaluate the effects of the precipitation and potential evapotranspiration changes on the actual evapotranspiration (E_t) and leaf area index, and to analyze the responses of vegetation to the multi-year precipitation reduction. During 1964—2013, E_t and annual maximum *LAI* (LAI_{max}) had insignificant trends while precipitation changed insignificantly and potential evapotranspiration increased significantly. The precipitation change was the major factor causing the decreases of both E_t and LAI_{max}, while the effect of potential evapotranspiration was the second. Multi-year precipitation reduction during 1999—2011 caused significant vegetation degradation in Horqin sandy land. A short-term drought could lead to a sudden decline in vegetation, however, vegetation recovered quickly after the drought.

Keywords: evapotranspiration; vegetation change; ecohydrological model; Horqin Sandy Land; climate change

(责任编辑：祁 伟)