DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.004

梅世昂, 霍家平, 钟启明. 均质土坝漫顶溃决"陡坎"移动参数确定[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 24-31. (MEI Shi-ang, HUO Jia-ping, ZHONG Qi-ming. Determination of headcut migration parameters for homogeneous earth dam due to overtopping failure [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 24-31.)

均质土坝漫顶溃决"陡坎"移动参数确定

梅世昂^{1,2},霍家平^{1,3},钟启明^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 水利 部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:"陡坎"冲蚀是均质土坝漫顶溃决时的主要破坏模式,"陡坎"移动的速度与坝料的物理力学指标具有内在联系,而目前国外给出各类"陡坎"移动模型很少考虑这些联系,且参数选取方法误差较大。基于水流能量耗散原理的"陡坎"移动速度模型,考虑坝料的黏粒含量、含水率、干密度等因素,参考国内外具有实测"陡坎"移动速度资料的水槽模型试验成果,拟合出"陡坎"移动参数的表达式,并结合水槽模型试验不同坝料的特点,给出了拟合"陡坎"移动参数的上下包线。参考美国农业部农业研究中心开展的7组均质土坝漫顶溃决试验的"陡坎"移动速度实测资料,验证了建议参数的合理性,并与国外典型的"陡坎"移动参数模型计算结果进行比较,给出了参数取值的参考方法;对"陡坎"移动参数中涉及的黏粒含量、含水率、干密度等指标进行参数敏感性分析,分析研究3个指标对"陡坎"移动规律的影响,为均质土坝漫顶溃决模型"陡坎"运移参数的选取和进一步研究"陡坎"抗冲蚀能力内在机理提供参考依据。

关 键 词:均质土坝;漫顶;陡坎;移动参数;敏感性分析
 中图分类号:TV641.2⁺2
 文献标志码:A
 文章编号:1009-640X(2016)02-0024-08

根据《第一次全国水利普查公报》^[1],截至 2011 年底,我国拥有水库 98 002 座。1954—2014 年,我国有 3 530 座水库大坝发生溃决,其中均质土坝占 85%,而漫顶溃坝数占溃坝总数的 50%以上^[2]。因此深入研究 均质土坝的漫顶溃决机理,建立能合理模拟其漫顶溃决过程的数学模型显得尤为重要。

大坝溃决时一般很少有目击者,也鲜有溃决过程的测量数据,只能通过溃口的最终形态和下游淹没的痕迹来推测坝体的溃决过程。为了研究均质土坝的漫顶溃决机理和溃决过程,国内外学者开展了大量的原型观测和模型试验工作,取得了一系列的研究成果^[3]。

20世纪80年代, D. C. Ralston 等^[4-5]在对历史上溃坝案例观测资料分析研究中最早提出了均质土坝溃 决过程中有"陡坎"冲蚀现象的存在。20世纪90年代以来,随着均质土坝溃决问题研究的深入,欧美各国将 溃坝研究重点逐渐转移到溃坝机理的研究分析上,包括美国国家大坝安全计划(NDSP)^[6]、欧盟 1998年支 持启动的 CADAM 项目^[7]和 2004年支持启动的 FLOODsite 项目^[8]等,其中最具有代表性的是欧盟 IMPACT 项目^[9]、美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)^[10]和南京水利科学研究院^[11]开展的现场大比尺均质土坝 漫顶溃决试验。模型试验显示,水流对均质土坝的侵蚀方式以"陡坎"冲蚀为主,由于坝料黏粒含量、含水 率、密实度等因素的影响,"陡坎"的移动速度差异较大,因此"陡坎"移动规律的研究对于均质土坝漫顶溃坝 过程的研究具有至关重要的作用。目前国内外多采用经验公式或某一假定值来确定"陡坎"移动参数,对于 坝料的物理力学指标缺乏深入研究。

收稿日期:2015-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379129,51539006,51109141)

作者简介:梅世昂(1990—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要从事土石坝坝料特性基础理论研究。 E-mail:670938267@qq.com

本文选择具有详细实测"陡坎"移动过程数据的水槽模型试验成果,研究坝料黏粒含量、含水率、密实度 等因素对"陡坎"移动规律的影响,进而提出可合理考虑坝料物理力学指标的"陡坎"移动参数。选择现场大 比尺模型试验成果验证参数的合理性,并与目前常用的"陡坎"移动参数模型进行比较,研究各参数计算公 式的优劣。

1 均质土坝漫顶溃决"陡坎"冲蚀机理与移动参数确定

1.1 "陡坎"冲蚀机理

20世纪80年代以来,各国学者^[4-5,12-17]进行了大量 溃坝试验,在对试验及溃坝实例的观察基础上,提出了一 种新的土坝漫顶溃决机理——"陡坎"冲蚀。"陡坎"是指 地面(河床面)在高程上突降,类似于瀑布状的地貌形态 (如图1)。水流流过"陡坎"时,溢流水舌向下冲击床面 并产生反向漩流。漩流在垂直或者近似垂直的跌水面上 施加剪应力,掏蚀垂直跌水面的基础,造成跌水面失稳坍 塌,整个"陡坎"就不断向上游发展^[16]。



美国农业部农业研究中心 G. J. Hanson 等^[10,16]在7 目大比尺漫顶溃坝模型试验以及前人研究成果的基础上 将

组大比尺漫顶溃坝模型试验以及前人研究成果的基础上,将均质土坝的溃坝过程分为以下发展阶段:①漫顶 水流通过初始溃口;②在漫顶水流作用下下游坡面上出现细冲沟;③在水流作用下,细冲沟逐步发展成为包 含多级梯状的沟壑;④冲刷不断发展,沟壑合并成一个不断向上游侵蚀的"陡坎";⑤"陡坎"逐渐向上游发 展,直到坝顶上游边缘,此后"陡坎"继续向上游发展引起溃口处坝顶高程的降低;⑥溃口水流流量迅速增 加,最终导致大坝完全溃决。

从发现"陡坎"冲蚀机理开始,各国学者即考虑建立描述这一物理现象的数学模型,一般将"陡坎"产生的初始阶段即细冲沟侵蚀及"陡坎"塑造阶段予以简化,研究重点集中在"陡坎"移动速度的模拟上。J. De Ploey 等^[17]率先提出了预测"陡坎"冲蚀速率的模型,尔后,美国农业部农业研究中心、美国内政部垦务局等 多家机构开展了大量试验研究,目前关于"陡坎"冲蚀速度的预测模型,主要可分为2类:一类是基于水流牵 引力的冲蚀模型,如G. J. Hanson 等^[18-21]的模型;另一类是基于水流能量耗散原理的冲蚀模型,如D. M. Temple 等^[22-24]的模型。以上2类预测模型主要涉及的参数有"陡坎"的形状及尺寸、水流特性(流速、水深 等)及坝体材料特性(内摩擦角、重度、抗冲蚀能力等)。而考虑坝料特性的"陡坎"移动参数的确定是模型计 算的难点和核心。

本文以水流能量耗散原理的冲蚀模型为基础,研究"陡坎"移动参数的确定方法。

1.2 常用的基于水流能量耗散原理的"陡坎"移动速度公式

1.2.1 J. De Ploey 公式 1989 年, J. De Ploey 等^[17]将水流在"陡坎"垂直面处的动能与"陡坎"的移动速度 联系起来,提出了以下"陡坎"移动速度公式:

$$dx/dt = E_r q(g + u^2/(2h))$$
(1)

式中: dx/dt为"陡坎"移动速度;E,为与坝料特性相关的"陡坎"移动参数,其单位为 s²/m²;q 为单宽流量;g 为重力加速度;u 为垂直面边缘处的水流平均流速;h 为"陡坎"高度。

1.2.2 Temple 公式 1992 年, D. M. Temple^[22]基于水流能量耗散原理提出了"陡坎"移动速度公式:

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = Cq^m h^n \tag{2}$$

式中: C 为与坝料特性相关的"陡坎"移动参数,其单位与指数 m 和 n 相关; m 一般取 1/3; n 取 0~1。

1.3 基于水流能量耗散原理的"陡坎"移动参数确定

以 Temple 推导的"陡坎"移动速度公式为基础,本次模拟选择的"陡坎"移动速度公式如下:

 $dx/dt = C_{\rm h}(qh)^{\frac{1}{3}}$

(3)

式中: $C_{\rm h}$ 的单位为 s^{-2/3}。

以 K. M. Robinson 等^[25-26]开展的 16 组砂质黏土(CL)和 2 组粉质砂土(SM)"陡坎"移动规律模型试验 和朱勇辉等^[26]开展的 2 组(T2 和 T4)均质土坝溃决试验的"陡坎"移动监测资料为依据,研究"陡坎"移动参数 *C*_b的确定方法。

考虑到坝料的黏粒含量、含水率、密实度等因素对"陡坎"移动会产生影响,采用拟合的数值计算方法, 将坝料干密度、黏粒含量、含水率3个参数运用到拟合公式中。通过对文献[24],[25]和[26]中数据资料的 整理,可得如下计算参数,见表1。

试验编号	$q / (\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1})$	<i>H</i> ∕ m	$(dx/dt) / (m \cdot s^{-1})$	w	$ ho_{\rm d}/({ m kg}\cdot{ m m}^{-3})$	c/%	$C_{\rm h}/({\rm s}^{-2/3})$
CL1	1.722	1.20	0.005 167	0.092	1 540	25.0	0.004 06
CL2	1.722	1.20	0.001 494	0.092	1 680	25.0	0.001 17
CL3	1.722	1.20	0.001 875	0.116	1 590	25.0	0.001 47
CL4	1.722	1.20	0.000 042	0.144	1 790	25.0	0.000 03
CL5	1.722	1.20	0.000 094	0.144	1 790	25.0	0.000 07
CL6	1.722	1.20	0.000 258	0.143	1 710	25.0	0.000 20
CL7	1.833	0.93	0.000 261	0.137	1 790	25.0	0.000 22
CL8	1.811	1.58	0.000 372	0.144	1 790	25.0	0.000 26
CL9	0.867	1.48	0.000 117	0.135	1 760	25.0	0.000 11
CL10	0.800	1.24	0.000 411	0.134	1 800	25.0	0.000 41
CL11	0.833	0.91	0.000 439	0.126	1 750	25.0	0.000 48
CL12	1.778	1.23	0.000 356	0.137	1 800	25.0	0.000 27
CL13	2.667	1.28	0.000 353	0.146	1 780	25.0	0.000 23
CL14	2.689	1.01	0.000 236	0.159	1 780	25.0	0.000 17
CL15	2.700	1.24	0.000 417	0.134	1 730	25.0	0.000 28
CL16	0.856	1.48	0.000 231	0.128	1 730	25.0	0.000 21
SM1	1.722	1.20	0.000 347	0. 121	1 860	13.0	0.000 27
SM2	1.722	1.20	0.001 006	0.120	1 760	13.0	0.00079
T2	0.140	0.65	0.000 075	0.167	1 659	10.2	0.000 17
T4	0.056	0.75	0.000 083	0.154	1 688	10.2	0.000 24

表1 不同坝料模型试验计算参数统计

Tab. 1 Parametric statistics of different dam materials for model tests

注:w为含水率, ρ_d 为坝料干密度,c为黏粒含量。

通过拟合,可得如下"陡坎"移动参数计算公式:

 $C_{\rm h} = 0.057 \ 85c^{-0.2} \exp(-13.67w(\rho_{\rm d}/\rho_{\rm w})^{2.1}) \tag{4}$

考虑到坝料特性的复杂,本次拟合分别给出了"陡 坎"移动参数的上下包线。上包线可用以模拟具有相同 黏粒含量、含水率、密实度,但抗冲蚀能力较弱的坝料,下 包线可用以模拟具有相同黏粒含量、含水率、密实度,但 抗冲蚀能力较强的坝料(如图2)。

上包线的表达式为:

$$C_{\rm h} = 0.03c^{-0.2} \exp(-10w(\rho_{\rm d}/\rho_{\rm w})^{2.1})$$
(5)
下包线的表达式为:

$$C_{\rm h} = 0.08c^{-0.2} \exp(-17w(\rho_{\rm d}/\rho_{\rm w})^{2.1})$$
(6)





"陡坎"移动参数计算公式验证 2

选择美国农业部农业研究中心 G. J. Hanson 等^[10]进行的 7 组现场大比尺均质土坝漫顶溃坝模型试验和 南京水利科学研究院张建云等[11]在滁州大洼水库开展的现场大比尺均质土坝漫顶溃坝模型试验的结果验 证模型的合理性,并与W.Wu等^[27]基于J. De Ploey模型和 Temple模型拟合出的"陡坎"移动参数及G.J. Hanson 等^[28]提出的"陡坎"移动参数相比较,分析不同"陡坎"移动参数在模拟现场大比尺溃坝模型试验时 的合理性。

W. Wu 等^[27]利用 K. M. Robinson 和 S. J. Bennett 等^[29-30]试验成果,分别基于 J. De Ploey 模型和 Temple 模型的"陡坎"移动公式,其中 J. De Ploey 模型"陡坎"移动公式见式(1),Temple 模型"陡坎"移动公式如下:

$$dx/dt = Cq^{\frac{1}{3}}h^{\frac{1}{2}}$$
(7)

式中: C 的单位为 m^{-1/6}s^{-2/3}。

对于 J. De Ploey 模型, W. Wu 等^[27] 以坝料湿密度和黏粒含量为拟合参数, 拟合得出"陡坎"移动参数 为:

$$\log E_{\rm r} = -0.005\ 75\rho_{\rm b}c^{0.1} + 5.187\tag{8}$$

式中: ρ_{λ} 为坝料密度。

对于 Temple 模型, W.Wu 等^[27]以坝料湿密度和黏粒含量为拟合参数, 拟合得出"陡坎"移动参数为:

$$\log C = -0.004\ 51\rho_{\rm b}c^{0.1} + 4.184\tag{9}$$

G. J. Hanson 等^[28]基于 Temple 推导的"陡坎"移动速度公式(见式(3)),分析总结现场大比尺模型试验 的实测资料, 拟合得出的"陡坎"移动参数可表示为: C_b = 0.25k_d (10)式中: $C_{\rm h}$ 的单位为(cm/h)/(cm/s^{1/3}),可通过量纲转化为 $C_{\rm h}$ = 6.95×10⁻⁵ $k_{\rm d}$,此时 $C_{\rm h}$ 的单位为s^{-2/3}; $k_{\rm d}$ 为坝料 冲蚀系数,可通过射流试验获取,单位为(cm³/(N·s))。

选择美国农业部农业研究中心7组(分别为 E1S1, E1S2, E1S3, E2S1, E2S2, E2S3 和 E3S2)现场大比尺 漫顶溃坝模型试验,通过对文献[10]中数据资料的整理,可得坝体特征与水流特性的计算参数和坝料计算 参数,见表2和3。

数

Га	b. 2	2	Dam	feature	and	flow	characteristic	parameters
----	------	---	-----	---------	-----	------	----------------	------------

试验 坝高/	初始溃口		平均单宽流量/	初始漫顶	试验	坝高/	htt: 니/	初始溃口		平均单宽流量/	初始漫顶		
编号	m	圾比	宽/m	深/m	$(m^2 \cdot s^{-1})$	水深/m	编号	m	収比	宽/m	深/m	$(m^2 \cdot s^{-1})$	水深/m
E1S1	2.29	1:3	1.83	0.46	0. 27	0.46	E2S2	1.52	1:3	1.22	0.3	0.14	0.30
E1S2	2.29	1:3	1.83	0.46	0.26	0.46	E2S3	1.52	1:3	1.22	0.3	0.13	0.30
E1S3	2.29	1:3	1.83	0.46	0. 24	0.46	E3S2	2.29	1:3	8.23	0.46	0. 23	0.30
E2S1	1.52	1:3	1.22	0.3	0. 28	0.30							

注:考虑到溃坝过程中溃口宽度增加,采用积分方法,本次平均单宽流量计算公式为q=Q/(W,-W_0)[ln(W,)-ln(W_0)],式中W_0为初始溃口 宽度,W,为溃坝结束后溃口宽度。

Tab. 3 Dam material parameters of large scale dam-break model tests													
试验	. /01		$P_{\rm d}$ /	$ ho_{ m b}$	$k_{\rm d}/({\rm cm^3}$ ·	$C_{\rm h}$	试验	. /01		$P_{\rm d}$ /	$ ho_{ m b}/$	$k_{\rm d}/({\rm cm}^3$ ·	$C_{\rm h}$
编号	⇒ c/% w	w	$(kg\boldsymbol{\cdot}m^{-3})$	$(kg\boldsymbol{\cdot}m^3)$	$(N \cdot s)^{-1})$	$(s^{-2/3})$	编号	c/% w	w	$(kg\boldsymbol{\cdot}m^{-3})$	$(kg\boldsymbol{\cdot}m^3)$	$(N \cdot s)^{-1})$	$(s^{-2/3})$
E1S1	5	0. 087	1 720	1 870	10.3	2. 50×10 ⁻³	E2S2	6	0. 145	1 740	1 992	8.0	1.71×10 ⁻⁴
E1S2	6	0. 121	1 730	1 939	2.0	5.26×10 ⁻⁴	E2S3	26	0.178	1 670	1 967	0.038	5.71×10 ⁻⁵
E1S3	26	0. 164	1 650	1 921	0.039	1.19×10 ⁻⁴	E3S2	6	0.115	1 770	1 974	2.4	5.34×10 ⁻⁴
E2S1	5	0.115	1 730	1 929	14.2	7.08×10 ⁻⁴							

表 3 现场大比尺溃坝模型试验坝料参数

3. 61×10⁻⁴

(-55.40%)

通过表2和表3的计算参数,结合拟合得出的"陡坎"移动参数,可计算得出"陡坎"移动速率。分别选 择 J. De Ploey 及 Temple" 陡坎"移动速率模型,结合 W. Wu 和 G. J. Hanson 等及本文推导的"陡坎"移动参 数,分别计算"陡坎"的移动速率,并与模型试验实测的"陡坎"移动速率进行比较,计算结果见表4。

表 4 其干不同"陆坎" 移动参数的各模型"陆坎" 移动速率

				J WHITE A					
Tab. 4 Headcut migration velocities of different models									
试验 编号	J. De Ploey 模型 (Wu 等"陡坎" 移动参数)	Temple 模型 (Wu 等"陡坎" 移动参数)	Temple 模型 (Hanson 等"陡坎" 移动参数)	Temple 模型 (本文"陡坎" 移动参数)	Temple 模型 (本文"陡坎"移动 参数上包线值)	Temple 模型 (本文"陡坎"移动 参数下包线值)	实测 速率		
E1S1	4. 47×10 ⁻³ (+116. 70%)	7. 54×10 ⁻³ (+266. 02%)	5. 68×10 ⁻⁴ (-72. 43%)	1.99×10 ⁻³ (-3.41%)	2. 86×10 ⁻³ (+39. 15%)	1. 14×10 ⁻³ (-44. 62%)	2. 06×10 ⁻³		
E1S2	1. 51×10 ⁻³ (+698. 94%)	3. 29×10 ⁻⁴ (+74. 07%)	1. 08×10 ⁻⁴ (-42. 86%)	4. 09×10 ⁻⁴ (+116. 76%)	8.95×10 ⁻⁴ (+373.67%)	1. 64×10 ⁻⁴ (-13. 21%)	1.89×10 ⁻⁴		
E1S3	8. 26×10 ⁻⁴ (+2 023. 39%)	3. 47×10 ⁻⁴ (+792. 03%)	2. 07×10 ⁻⁶ (-94. 68%)	9.06×10 ⁻⁵ (+132.90%)	2. 75×10 ⁻⁴ (+606. 94%)	2. 74×10 ⁻⁵ (-29. 56%)	3. 89×10 ⁻⁵		
E2S1	2. 65×10 ⁻³ (+25. 59%)	3. 95×10 ⁻³ (+87. 20%)	6.91×10 ⁻⁴ (-67.25%)	4.96×10 ⁻⁴ (-76.51%)	1. 01×10 ⁻³ (-52. 21%)	2. 11×10 ⁻⁴ (-90. 00%)	2. 11×10 ⁻³		
E2S2	4.71×10 ⁻⁴ (+637.09%)	1. 44×10 ⁻³ (+2 153. 52%)	3. 06×10 ⁻⁴ (+378. 87%)	9.44×10 ⁻⁵ (+47.79%)	2. 80×10 ⁻⁴ (+338. 70%)	2.90×10 ⁻⁵ (-54.55%)	6. 39×10 ⁻⁵		
E2S3	2. 52×10 ⁻⁵ (+127. 03%)	1. 50×10 ⁻⁴ (+1 251. 35%)	1.42×10 ⁻⁶ (-87.21%)	3. 07×10 ⁻⁵ (+176. 58%)	1. 14×10 ⁻⁴ (+927. 03%)	7.82×10 ⁻⁶ (-29.55%)	1. 11×10 ⁻⁵		
	9.70×10 ⁻⁴	2. 43×10 ⁻³	1.25×10^{-4}	4. 01×10^{-4}	8.73×10 ⁻⁴	1.61×10^{-4}	1		

(-65.37%)

注:括号中数值为各模型计算速率与实测速率相比的偏差。

(+573.13%)

(+168.70%)

E3S2

由表4可以看出,对于美国农业部农业研究中心的7组现场大比尺均质土坝漫顶溃坝模型试验,W.Wu 等基于 J. De Ploey 模型的"陡坎"移动参数计算结果均比实测值偏大,最大计算偏差量达到+2 023.39%;W. Wu 等基于 Temple 模型的"陡坎"移动参数计算结果均比实测值偏大,最大计算偏差量达到+2 153.52%;G. J. Hanson 等基于 Temple 模型的"陡坎"移动参数计算结果大多比实测值偏小,仅 E2S2 组次的计算值偏大, 最大计算偏差量达+378.87%;本文基于 Temple 模型的"陡坎"移动参数计算结果大多比实测值偏大,仅 E1S1 和 E2S1 组次的计算值偏小,最大计算偏差量达到+132.90%。对于本文建议的参数计算模型,其中 E1S1, E1S3, E2S2, E3S2 组次试验拟合效果最佳, E1S2, E2S3 组次试验与最佳拟合结果相差不大, 仅 E2S1 拟 合效果较差。考虑到此试验结果难免会存在一定随机性,各种水流条件、填筑条件有一定差异性,本文给出 了上下包线公式,也即给出了"陡坎"移动参数的取值范围,可以根据不同条件,在范围内选取合适的数值。

(+11.08%)

(+141.83%)

对于 W. Wu 等拟合得出的"陡坎"移动参数,仅考虑坝料湿密度和黏粒含量,未定量考虑含水率和密实 度等因素的影响;对于 G. J. Hanson 等拟合得出的"陡坎"移动参数,由于仅考虑坝料冲蚀系数,且冲蚀系数 需由射流试验获取,因此也无法全面合理反映不同坝料的物理力学特性。对于本文拟合得出的"陡坎"移动 参数,由于公式考虑了坝料黏粒含量、含水率和干密度的影响,且结果偏差相对较小,因此可用于确定"陡 坎"移动参数。

由表4亦可看出,对于美国农业部农业研究中心开展的7组均质土坝漫顶溃坝模型试验,各模型计算结 果普遍偏大,仅G.J. Hanson 模型计算结果偏小,究其原因,应为现场大比尺溃坝模型的几何尺寸较室内小 比尺试验明显增加,小比尺模型试验受尺寸效应的影响较为明显,试验中水流条件也会受尺寸效应的影响。 对于现场填筑质量较高的均质土坝或固结时间较久的均质土坝,其抗冲蚀能力都较强,选择参数时应予以考 虑。因此,建议对于填筑质量高且年代久远的均质土坝,溃坝模拟时可选取本文提出的下包线公式计算"陡 坎"移动参数:对于填筑质量较低或有安全隐患的病险均质土坝,建议可选取本文提出的上包线公式计算 "陡坎"移动参数。

3 参数敏感性分析

为了研究黏粒含量、含水率和干密度对于"陡坎"移动规律的影响,对此 3 项指标进行参数敏感性分析。 选择本文提出"陡坎"移动参数公式(4),分别将美国农业部开展的 7 组均质土坝漫顶溃决试验中坝料的黏 粒含量和含水率各增大 1 倍或减小一半,干密度取土体最大干密度(7 组试验最大干密度按照组次为: $\rho_{E1S1} =$ 1 830 kg/m³, $\rho_{E1S2} = 1$ 850 kg/m³, $\rho_{E1S3} = 1$ 780 kg/m³, $\rho_{E2S1} = 1$ 830 kg/m³, $\rho_{E2S2} = 1$ 850 kg/m³, $\rho_{E2S3} =$ 1 780 kg/m³, $\rho_{E1S2} = 1$ 850 kg/m³),分别比较分析"陡坎"移动参数 C_h 的变化,计算结果见表 5。

	rab. 5 Constructy analysis of dam materials										
		黏粒含量			含水率	干密度					
-	实测值×0.5	实测值×1.0	实测值×2.0	实测值×0.5	实测值×1.0	实测值×2.0	实测值	最大值			
F161	2.88×10 ⁻³	2.50×10^{-3}	2. 18×10 ⁻³	1.62×10 ⁻²	2.50×10^{-3}	5.96×10 ⁻⁵	2.50×10^{-3}	1. 49×10 ⁻³			
LISI	(+14.87%)	2. 50×10	(-12.94%)	(+548.48%)	2. 50×10	(-97.62%)	2. 50×10	(-40.54%)			
F182	6. 04×10 ⁻⁴	5 26×10^{-4}	4.58×10 ⁻⁴	7. 31×10 ⁻³	5.26×10^{-4}	2.72×10 ⁻⁶	5 26×10 ⁻⁴	2. 37×10 ⁻⁴			
E152	(+14.87%)	5. 20×10	(-12.94%)	$(+1\ 290.\ 03\%)$	5.26×10	(-99.48%)	5. 20×10	(-54.89%)			
E162	E1S3 $\frac{1.36 \times 10^{-4}}{(+14.87\%)}$	1. 19×10 ⁻⁴	1.03×10^{-4}	3. 00×10^{-3}	1.19×10 ⁻⁴	1.86×10^{-7}	1 10×10 ⁻⁴	3. 89×10^{-5}			
E155			(-12.94%)	(+2 426.95%)		(-99.84%)	1. 19×10	(-67.21%)			
E2S1	8. 13×10 ⁻⁴	7.08×10 ⁻⁴	6. 16×10 ⁻⁴	8.63×10 ⁻³	7.08×10 ⁻⁴	4.75×10 ⁻⁶	7 00×10=4	3. 78×10^{-4}			
E231	(+14.87%)		(-12.94%)	(+1 119.96%)		(-99.33%)	7.08×10	(-46.56%)			
Easa	1.97×10 ⁻⁴	1 71 × 10 - 4	1.49×10 ⁻⁴	4. 17×10 ⁻³	1 71 10-4	2.89×10 ⁻⁷	1 71 × 10 - 4	7. 13×10 ⁻⁵			
E252	(+14.87%)	1. /1×10	(-12.94%)	(+2 334.55%)	1. /1×10	(-99.83%)	1. /1×10	(-58.40%)			
Faca	6. 56×10 ⁻⁵	5 7110-5	4.97×10 ⁻⁵	2.08×10 ⁻³	5 7110-5	4.30×10 ⁻⁸	5 71.10-5	2. 04×10^{-5}			
E283 (-	(+14.87%)	5. /1×10	(-12.94%)	(+3542.00%)	5. 71×10 ⁻⁵	(-99.92%)	5. /1×10	(-64.32%)			
Faca	6. 13×10 ⁻⁴	5 24.10-4	4.64×10 ⁻⁴	7.36×10 ⁻³	5 24.10-4	2.80×10 ⁻⁶	5 24.10-4	3. 20×10^{-4}			
L352	(+14.87%)	5. 54×10	(-12.94%)	(+1 279.63%)	5. 54×10	(-99.47%)	5. 34×10	(-39.99%)			

表 5 坝料参数敏感性分析 Tab. 5 Sensitivity analysis of dam materials

通过参数敏感性分析可以发现,黏粒含量越高,"陡坎"移动速度越小,对于我国常见的均质土坝,其黏 粒含量一般为10%~30%,因此本指标对"陡坎"移动速度的影响较小;含水率对于"陡坎"移动速度具有重 要影响,当含水率逐渐增大时,坝体"陡坎"移动速度越来越小,此结论也可以通过 Hanson 等开展的现场溃 坝模型试验的实测结果得到验证;土体干密度对于"陡坎"移动速度也具有较大影响,随着坝体密实度的增 加,"陡坎"移动速度减小。

4 结 语

本文通过对国内外 20 组小比尺均质土坝"陡坎"移动规律试验的研究成果,充分考虑影响"陡坎"移动 规律的坝料物理力学指标——黏粒含量、含水率和干密度,基于 Temple 提出的基于水流能量耗散原理的"陡 坎"移动速度模型,拟合出考虑坝料特性的"陡坎"移动参数公式,并给出了该参数的上、下包线公式及公式 选择依据。选择美国农业部开展的 7 组均质土坝漫顶溃决试验的"陡坎"移动速度实测资料,验证了建议参 数的合理性,并与其他模型"陡坎"移动参数的计算成果进行比较,分析各模型参数的优劣。通过上下包线 给出了"陡坎"移动参数的参考取值范围,可以针对实际条件选择合适的计算参数。对坝料黏粒含量、含水 率和干密度等 3 项指标进行参数敏感性分析,研究各参数对"陡坎"移动速度的影响,为均质土坝漫顶溃决 模型"陡坎"运移参数的选取和进一步研究"陡坎"抗冲蚀能力内在机理提供参考依据。 由于国内外开展的相关"陡坎"移动规律的研究试验较少,因此本次模拟的样本数较少,得出的"陡坎" 移动参数能否广泛运用于我国大量存在的均质土坝漫顶溃坝模拟还值得深入研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[R].北京:中国水利水电出版社, 2013. (Ministry of Water Resources of PRC, National Bureau of Statistics of PRC. Bulletin of first national census for water[R]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册[R]. 南京:水利部大坝安全管理中心, 2014. (Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources. The national register of reservoir dam[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, 2014. (in Chinese))
- [3] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Sheng-shui. The simulation process and the failure mechanism of earth rock dam break [M]. Beijing; China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [4] RALSTON D C. Mechanics of embankment erosion during overflow [C] // Proc 1987 National Conf on Hydraulic Eng, Reston, 1987.
- [5] DE PLOEY J. A model for headcut retreat in rills and gullies [M]. Cremlingen: CATENA Supplement 14, 1989.
- [6] FEMA. The National Dam Safety Program Research Needs Workshop: Embankment dam failure analysis[EB/OL]. http://www.fema.gov./library/viewRecord. do? id=1454.
- [7] MORRIS M W, GALLAND J C. CADAM: Dambreak modelling guidelines & best practice [R]. Munich: HR Wallingford Ltd, 1998.
- [8] MORRIS M W. FLOODsite: Modelling breach initiation and growth [R]. Munich: HR Wallingford Ltd, 2009.
- [9] MORRIS M W, HASSAN M A A M, VASKINN K A. Conclusions and recommendations from the IMPACT Project WP2: Breach formation [R]. Munich: HR Wallingford Ltd, 2004.
- [10] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments [J]. Trans ASAE, 2005, 48(5): 1783-1794.
- [11] ZHANG J Y, LI Y, XUAN G X, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. Science in China(SerE), 2009, 52(10): 3024-3029.
- [12] AL-QASER G, RUFF J F. Progressive failure of an overtopped embankment [C] // Hyd Eng Proc of the 1993 National Conf on Hyd Eng. New York, 1993: 1957-1962.
- [13] WAHL T L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment [M]. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, 1998.
- [14] HANSON G J. Preliminary results of earthen embankment breach tests [C] // ASAE Annual International Meeting. Milwaukee, 2000.
- [15] ROBINSON K M, HANSON G J. Headcut erosion research [C] // Proc 7th Federal Interagency Sedimentation Conf Reno, 2001.
- [16] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 土坝溃决模型及其发展[J]. 水力发电学报, 2003(2): 31-38. (ZHU Yong-hui, LIAO Hongzhi, WU Zhong-ru. The earth-dam-break model and its development[J]. Journal of Hydroelectric Generation, 2003(2): 31-38. (in Chinese))
- [17] DE PLOEY J. A model for headcut retreat in rills and gullies[J]. Catena Supplement, 1989(4): 81-86.
- [18] HANSON G J, ROBINSON K M, COOK K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach [J]. Transactions of the ASABE, 2001, 44(3): 525-531.
- [19] ALONSO C V, BENNETT S J, STEIN O R. Predicting headcut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 1303.
- [20] ZHU Y H. Breach growth in clay-dikes [D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [21] DEY A K, TSUJIMOTO T, KITAMUTA T. Experimental investigation on different modes of headcut migration [J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(3): 333-346.
- [22] TEMPLE D M. Estimating flood damage to vegetated deep soil spillway[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(2): 237-242.
- [23] PRASAD S N, RÖMKENS M J M. Energy formulations of headcut dynamics [J]. Catena Supplement, 2003, 50(2/4): 469-

487.

- [24] ROBINSON K M, HANSON G J. Large-scale headcut erosion testing[J]. Transactions of the ASABE, 1995, 38(2): 429-434.
- [25] ROBINSON K M, HANSON G J. Gully headcut advance [J]. Transactions of the ASABE, 1996, 39(1): 33-38.
- [26] 朱勇辉, VISSER P J, VRIJLING J K, 等. 堤坝溃决试验研究[J]. 中国科学(技术科学), 2011, 41(2): 150-157.(ZHU Yong-hui, VISSER P J, VRIJLING J K, et al. Experimental investigation on breaching of embankments[J]. Sci China Tech Sci, 2011, 41(2): 150-157. (in Chinese))
- [27] WU W, WANG S S Y. Empirical-numerical analysis of headcut migration [J]. International Journal of Sediment Research, 2005, 20(3): 233-243.
- [28] HANSON G J, TEMPLE D M, HUNT S L, et al. Development and characterization of soil material parameters for embankment breach[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(4): 587-595.
- [29] ROBINSON K M. Gully erosion and headcut advance[D]. Still water: Oklahoma State University, 1996.
- [30] BENNETT S J, ALONSO C V, PRASAD S N, et al. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas[J]. Water Resource Research, 2000, 36(7): 1911-1922.

Determination of headcut migration parameters for homogeneous earth dam due to overtopping failure

MEI Shi-ang^{1,2}, HUO Jia-ping^{1,3}, ZHONG Qi-ming^{1,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Headcut erosion is a major failure mode of homogeneous earth dam due to overtopping failure, and the velocities of the headcut migration have an internal connection with the physico-mechanical indexes. However, current foreign models studying the headcut migration rarely consider this connection, and may yield a relatively large calculation error. In this paper, based on a model for the headcut migration velocities utilizing the energy dissipation principle, meanwhile, considering the clay ratio, water content, and dry density of the dam materials, the measured water channel model test results of the headcut migration velocities have been chosen to fit the formula of the headcut migration parameters. Owing to the large variation of the dam materials, the upper and lower envelopes of the parameters are also put forward in the study. 7 large scale model tests carried out by USDA-ARS which have the measured headcut migration velocity data are chosen as the representatives to testify the rationality of the suggested parameters. The typical foreign models for the headcut migration parameters are chosen as well to calculate the headcut migration velocities. Through analytical comparison, the advantage of the suggested model is presented, and the reference range of the parameters is given. In order to analyze the impacts of clay ratio, water content and dry density on the rule of the headcut migration, the sensitivity analyses of 3 indexes are carried out. Those model test results can provide the approaches for determining the headcut migration parameters of the homogeneous earth dams, and give a reference for further studies on the mechanism of anti-erosion capability of the headcut.

Key words: homogeneous earth dam; overtopping; headcut; migration parameters; sensitivity analysis