

唐家山堰塞坝散粒堆积体开槽泄流的冲刷过程分析

许 萍,邵生俊,余芳涛,马 林

(西安理工大学 岩土工程研究所,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】为避免溃堤形成洪峰危害下游,对唐家山堰塞湖进行开槽泄流,并预测泄流槽的冲刷演变和下泄洪峰流量及出现时间,以便提出一种分析方法,对今后震后堰塞湖抢险工程起到指导作用。【方法】依据唐家山堰塞坝的土性条件、开槽断面,以及不同粒径散粒体的冲刷运动特性,确定堰塞坝不同粒径松散体的冲刷起动流速和冲刷速度。基于堰塞湖区产流和库水位曲线,应用宽顶堰流基本理论,综合考虑土性材料冲刷性能与堰流之间的相互关系,进行了开槽泄流、水流计算、冲刷下切、库水位确定的迭代计算分析。【结果】合理确定了唐家山堰塞坝不同土层随着泄流变化的冲刷速率和泄流槽断面的变化;计算得到 2008-06-10 T 12:00 下泄最大洪峰流量为 $6\,601\text{ m}^3/\text{s}$,与实际洪峰流量基本一致。【结论】提出了一种预测堰塞体开槽泄流下切冲刷分析及洪峰形成时间和确定最大洪峰流量的简化方法。

【关键词】 堰塞坝;散粒体;开槽泄流;水力冲刷;洪峰流量

【中图分类号】 P315.9

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)09-0167-06

Analysis of hydraulic washing granule mass and discharging water flow of trench in Tangjiashan Barrier Lake

XU Ping, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao, MA Lin

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 An analysis method was applied to guide the emergency work of barrier lake after earthquake in future, to avoid the flood peak caused by bursting to damage downstream, form the Tangjiashan Barrier Lake for slotting discharge, and forecast the discharge groove of scour evolution and the release of the peak flow and the time. 【Method】 Based on the soil properties, section of trench and washing movement characteristics of slide slope mass composing of different size particles, the start-up velocity and scouring velocity were determined by the results of washing experiment. According to producing flow and hydrograph in barrier lake area and the relationship between the scouring character of soil and weir flow, the iteration calculation of slotting discharge, hydraulic calculation, hydraulic washing and the determination of water were carried out by the theory of broad crest weir flow. 【Result】 The scouring development of discharging water channel and the occurrence of flood peak time and its maximum flux can be predicted by the iteration calculation. For Tangjiashan Barrier Lake, the maximum discharge flow equals to $6\,601\text{ m}^3/\text{s}$ at 12:00 on June 10th, 2008. The result is consistent with the facts. 【Conclusion】 The article comes up a simplified method to predict the slotting discharge analysis and to determine the formation time and the flow of the flood peak.

* [收稿日期] 2010-05-24

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50779054, 10872161); 陕西省黄土力学与工程重点实验室基金项目(220533)

[作者简介] 许 萍(1986—), 女, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: xpmmmmm@sina.com

[通信作者] 邵生俊(1964—), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn

Key words: barrier lake dam; granule mass; hydraulic washing; floor flux; peak discharge

2008-05-12,我国四川省汶川县发生了 8 级强烈地震。地震诱发的山体滑坡在河道中形成堰塞坝,阻断河道,在上游形成了规模巨大的堰塞湖。据有关方面统计,“5·12”汶川大地震共形成 34 座堰塞湖。其中,位于北川县城上游约 4 km 处的唐家山堰塞湖是堰塞体体积最大、蓄水量最大、威胁最严重的一座^[1]。灾后震中区普遍降雨,堰塞湖的水位迅速上涨,严重威胁到堰塞体的稳定。经武警水电部队日夜连续拼搏,于 06-01 凌晨提前超额完成了泄流渠的开挖工作,有利于降低因堰塞湖水位上升漫顶引起的溃坝危险,进而解除了唐家山堰塞湖可能造成的险情。

在堰塞体上开挖的泄流渠全长 475 m,呈梯形断面,坡比 1:1.5。平缓段进口底高程为 740.0 m,出口底高程为 739 m,渠底宽为 7~10 m,两侧边坡比为 1:1.5^[2]。开挖泄流渠后,湖水下泄的具体情况是:2008-06-07 T 07:00 湖水通过泄流渠开始下泄,库水位为 741.6 m;06-10 T 0 2:15 水位达到最高,为 743.23 m;06-10 T 12:30 下泄流量最大为 6 500 m³/s;06-11 堰塞湖水位从最高 743.23 m 降至 715 m 以下,相应地蓄水量从 2.466 亿 m³ 降至

0.861 亿 m³^[3]。洪峰流量小于河道 200 年一遇的泄洪能力,从而解除了当时唐家山堰塞湖的险情。本研究针对此实际排险工程,分析了开槽泄流、水力冲刷及洪峰形成的过程,从而提出一种预测方法,以期今后震后堰塞湖抢险工程起到指导作用。

1 唐家山堰塞湖堰塞体不同松散材料的水力冲刷特性参数

1.1 唐家山堰塞湖坝体土层材料

堰塞坝体由原山坡上部残坡堆积的碎石土和寒武系下统清平组上部基岩经下滑、挤压、破碎形成的碎裂岩组成,其中碎石土约占 14%,碎裂岩约占 86%。碎石土呈土黄色,由粉质壤土、块碎石组成,其中粉质壤土占 60%左右,碎石占 30%~35%,块石(粒径 5~20 cm)占 5%~10%。碎裂岩组成物质不均匀,由软质岩形成的碎裂岩主要为碎石,粒径多小于 20 cm;由硬质岩形成的碎裂岩主要为块石,粒径多为 1.0~3.0 m,个别巨石粒径可达数米。部分岩体未解体,仍保留原岩的层状结构。经原位调查揭示,堰塞体不同松散堆积体的分区如图 1 所示。

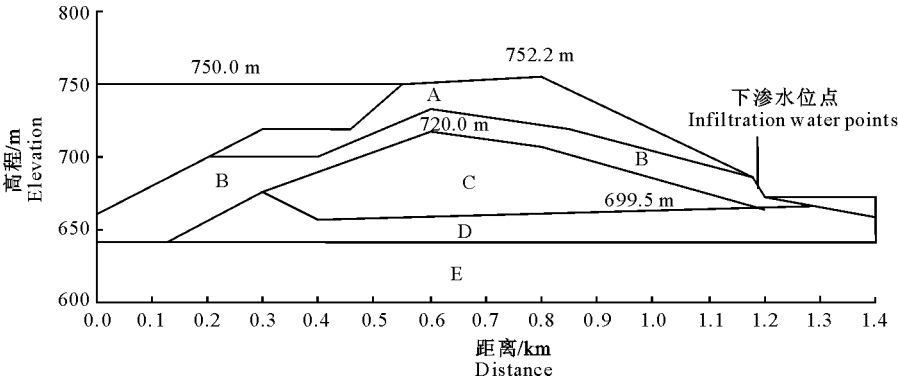


图 1 唐家山堰塞湖坝体典型断面示意图^[1]

- A. 滑坡碎石土;B. 块碎石土层;C. 似层状碎裂岩体;D. 灰黑色砾石粉细砂层;E. 寒武系下统清平组基岩
- Fig. 1 Typical section sketch of Tangjiashan Barrier Lake
- A. Landslide crushed gravel;B. Block layer of crushed gravel;C. Layered cataclastic rockl;D. Dark gray fine sad layer of gravel;E. Cambrian bedrock under the group system Qinping

1.2 唐家山堰塞湖不同散粒材料的起动流速与冲刷速率

在水流冲刷侵蚀作用下,泄流槽的发展演变是由水力作用和散粒材料的抗冲蚀特性等共同决定的。松散材料的粗细程度也不同,其冲刷侵蚀的起动流速和冲刷速率不同。对于岩土材料的冲刷侵蚀

特性,国内外学者都曾做过研究,得到了一些定量分析成果。文献[4]通过室内水力冲刷试验,测试分析了不同粒径散粒体的起动流速和冲刷速率。依据唐家山堰塞湖坝体不同土的粗细程度,确定了各层土的平均起动流速(表 1)。根据文献[4]的研究结果还可确定各层土随着泄流速度的冲刷速率。

表 1 唐家山堰塞坝体不同堆积散粒体的起动流速
Table 1 Start-up velocity of different granule mass in Tangjiashan Barrier Lake

编号 Serial number	土层名称 The name of layers	平均粒径/mm Average particle size	起动流速/(m·s ⁻¹) Start-up velocity	平均起动流速/(m·s ⁻¹) Average start-up velocity
1	碎石土 Crushed gravel	200~0.05	0.09~3.80	1.94
2	块碎砾石土 The block of crushed gravel	200~500	3.80~5.74	4.77
3	似层状碎裂岩 Layered catalectic rock	200~1 500	5.74~9.40	7.57
4	灰黑色砾石粉砂 Dark gray fine sand of gravel	2~0.075	0.01~0.47	0.24

2 唐家山堰塞湖泄流槽断面的冲刷过程分析

唐家山堰塞坝的坝顶高程约为 752.2 m,开挖泄流槽底高程为 742.0 m。其泄流的发展演变过程为:1)当库水位升高且超过槽底高程时,才可发生泄流。2)随着库水位的进一步抬升,泄流流速随之增大,当流速高于槽底土的冲刷临界流速时,则发生冲刷侵蚀。3)随着泄流槽被侵蚀下切,槽底高程降低,泄流量继续增大;当泄流量增大到来水量时库水位不再升高。4)随着槽底下切,过流断面扩大,泄流量将继续增大,直至达到最大泄流量。5)当泄流量大于来水量时,库水位即出现下降。伴随着过流断面扩大,泄流流速降低,泄流量会出现下降。因此,需依据产流量和库容水位曲线(图 2),计算确定库水位的上升发展过程;依据水力学计算方法确定符合实际的泄流量;依据泄流流速、冲刷起动临界流速和冲刷速率确定泄流槽下切、扩大的发展过程;依据泄流槽断面的变化,计算确定泄流量的增长变化过程及洪峰流量。依据泄流冲刷发展过程的认识,确定库水位抬升、泄流开始冲刷、泄流槽底面下降和断面扩大、槽底面上泄流作用水头增大、泄流量和流速增大、冲刷增强、泄流量和流速稳定、冲刷作用稳定的

表 2 唐家山堰塞湖以上流域多年平均日降水量
Table 2 Daily average rainfall process of the upper basin of Tangjiashan Barrier Lake for many years mm

日期 Date	每旬日次 Once per day in a period of ten days										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5 月下旬 In late May	—	—	—	—	—	—	2.1	2.7	2.8	4.2	3.9
6 月上旬 In early June	3.2	2.4	3.2	2.3	3.8	2.9	2.5	2.7	3.9	3.1	—
6 月中旬 In middle June	2.6	4.5	4.5	3.4	4.7	2.8	4.6	3.8	4.4	5.1	—
6 月下旬 In late June	3.6	5.6	4.5	4.2	4.2	4.0	5.4	4.9	4.5	4.6	—

2.2 唐家山堰塞湖开槽泄流计算分析

依据唐家山堰塞坝断面及开挖泄流槽断面可知,缓坡段的槽底长度约为 326 m,槽底面与上游坝坡上平台之间的高差约 45 m。尽管泄流槽上游作用水头随着库水位上升和泄流槽底冲刷下切而不断变化,但为了便于计算下泄流量,将泄流槽简化为一个宽顶堰,堰顶宽为 326 m,堰高为 45 m。唐家山堰

分析方法。

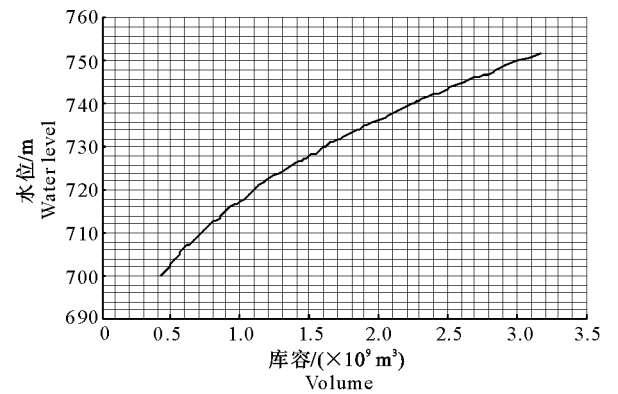


图 2 唐家山堰塞湖实测水位-库容曲线^[7-9]
Fig.2 Relation of storage capacity and water level in Tangjiashan Barrier Lake^[7-9]

2.1 唐家山堰塞湖库水位变化分析

根据历史日降雨量资料^[5],可得 05-27—06-30 唐家山堰塞湖以上流域多年平均日降水量如表 2 所示。若将 05-27 T 08:00 的唐家山堰塞湖库水位实测值 726.95 m 作为起调水位,进行产汇流计算,如有 2 mm 降水,坝前水位就会上涨 1 m^[6]。根据实测水位-库容曲线(图 2)^[7-9],计算日平均入库流量 Q,结果如表 3 所示。在无泄流情况下,计算确定了库水位的上升发展过程。

塞坝泄流槽流量计算简化模型如图 3 所示。
根据水力学^[10]中宽顶堰泄流流量计算方法,泄流量的计算表达式如下:
$$Q=mb(2g)^{1/2}H_0^{3/2}。$$

(1)
式中: m 为流量系数, b 为断面宽度, g 为重力加速度, H_0 为堰顶全水头。
 m 、 b 、 H_0 的确定方法如下:

(1)流量系数 m 的确定。依据上游坝坡平台上水域确定堰上游宽度为 160 m,初始堰宽为 13 m,翼

壁夹角为 90° ,查阅宽顶堰的流量系数表^[10],可知流量系数为 0.32。

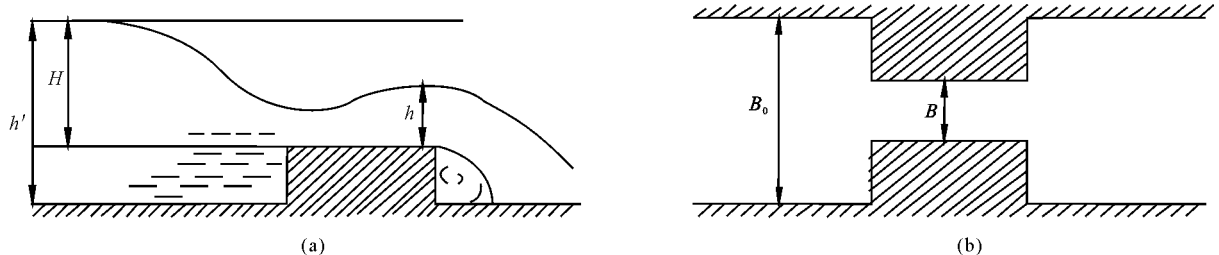


图 3 唐家山堰塞坝泄流槽流量计算的模型(宽顶堰)

H , 堰上水头; h , 堰顶水深; h' , 堰前水深; B_0 , 堰前水域宽; B , 堰宽

Fig. 3 Flow calculation model of Tangjiashan Barrier Lake (broad crested weir)

H , Height of water on weir; h , Depth of water on top of weir; h' , Depth of waters before weir;

B_0 , Width of waters before weir; B , Width of weir

(2)断面宽度 b 的确定。泄流槽初始为梯形断面,底高程为 740.0 m,底宽为 10 m,边坡比为 1 : 1.5,槽高为 12.2 m。由此确定梯形断面的平均宽度为 19.8 m。当发生冲刷时,假定泄流水面以下的槽底和槽壁发生均匀冲刷,且水面以上的槽壁仍产生边坡比为 1 : 1.5 的塌落;塌落松散体平铺于槽底,将抑制槽底被冲刷下切。

的方法是以给定时刻确定的库水位、过流断面、堰顶高程为依据,在此基础上叠加,由表 3 给出下一个时段的来水量,以确定库水位和堰顶全水头;进行泄流计算,确定水流流速和泄流量;由来水量和泄流量之差调整给定时段的库内蓄水增量,重新确定库水位,再进行泄流计算,如此循环直到确定得到满足一定误差的泄流量。然后,将泄流流速与槽底土层的起动临界流速进行比较,判断是否引起冲刷。当引起冲刷时,由冲刷速率确定扩大的断面。再进行泄流计算,重新计算库水位和堰上水头,分析冲刷断面确定的准确与否。当泄流量和冲刷断面变化误差满足要求时,一个时段的泄流计算分析结束,方可进行下一时段的计算。

(3)堰顶全水头 H_0 的确定。

$$H_0 = H + \alpha_0 v_0 / 2g. \quad (2)$$

堰顶全水头包括堰上水头 H 和行进流速水头 $\alpha_0 v_0 / 2g$ 两部分。前者可由库水位与堰顶高差确定,后者由上游来水在库区形成的流速确定。堰上水头由来水量和下泄量之差补给的库容增长而确定;行进流速水头需要合理确定库内水流速度,动能修正系数 α_0 取 1.0。堰塞湖实际集水面积约 3 550 km²,开始泄流时水位需大于堰底高程 740.0 m,堰前水域宽 B_0 为 160~990 m,回水长度 45 km,堰前水深 h' 约 78 m。假设库内水流沿水深呈三角形分布,则依据日平均来水量 $\bar{Q}$ 可确定泄流槽上游的行进流速 v_0 为:

$$v_0 = 2\bar{Q} / (B_0 \times h'). \quad (3)$$

式中:堰前水域宽 B_0 取 160.0 m,堰前水深 h' 取 78 m。

2008-06-07 T 07:00 开始泄流,起始泄流库水位高程为 741.6 m,渠底高程为 740.0 m,底宽为 10 m,两侧边坡比为 1 : 1.5。泄流计算从 06-07 T 07:00 开始,每 2 h 为 1 个时段,依据该日入库流量、起始过流断面、无泄流条件下的库水位增长量,进行迭代计算;前一个时段迭代计算完成后,依据确定的库水位、冲刷形成的新断面,进行下一个时段计算;将每日 12 个时段计算结束时,即完成一日计算。计算可知,06-07 的平均库水位为 742.2 m,平均泄流流速为 2.84 m/s,平均泄流量为 104.5 m³/s,泄流渠底累计冲刷深度为 0.54 m;06-08 的平均库水位为 743.4 m,平均泄流流速为 4.50 m/s,平均泄流量为 592.6 m³/s,泄流渠底累计冲刷深度为 4.62 m;06-09 的平均库水位为 742.6 m,平均泄流流速为 6.46 m/s,平均泄流量为 3 211.0 m³/s,泄流渠底累计冲刷深度为 14.08 m;06-10 的平均库水位为 735.9 m,平均泄流流速为 6.59 m/s,平均泄流量为 5 676.8 m³/s,泄流渠底累计冲刷深度为 19.52 m;

综上所述可知,堰上水头 H 和断面宽度 b 随着泄流量和水力冲刷作用而在不断变化。依据表 3 可知,当无泄流时,2008-06-07—06-12 的库水位在不断升高,依据库内补给水量确定了每日库水位的升高幅度。当出现泄流时,依据每日来水量和泄流量之差补给的水量也可以确定当日库水位的升高幅度。同时,还要考虑到水力冲刷导致泄流槽断面扩大引起的泄流量变化。可见,泄流量的确定与堰上水头、泄流流速、冲刷形成的断面密切相关,且它们之间彼此关联,需通过迭代的方法进行计算。具体

06-11 的平均库水位为 729.6 m,平均泄流流速为 4.79 m/s,平均泄流量为 3 029.3 m³/s,泄流渠底累计冲刷深度为 19.52 m(表 4)。

表 3 年平均来水条件下唐家山堰塞湖堰前水位(无泄流情况下)

Table 3 Water level of Tangjiashan Barrier Lake in the condition of average annual water supplied (without discharging)							
日期 Date	降雨量/mm Rainfall	入库流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Inflow	水位/m Water level	日期 Date	降雨量/mm Rainfall	入库流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Inflow	水位/m Water level
05-27	2.1	694	726.95	06-05	3.8	1 273	740.35
05-28	2.7	810	728.00	06-06	2.9	1 169	742.25
05-29	2.8	1 042	729.35	06-07	2.5	1 088	743.70
05-30	4.2	1 273	730.75	06-08	2.7	1 042	744.95
05-31	3.9	1 215	732.85	06-09	3.9	1 273	746.30
06-01	3.2	1 100	734.80	06-10	3.1	1 100	748.25
06-02	2.4	984	736.40	06-11	2.6	984	749.80
06-03	3.2	1 099	737.60	06-12	4.5	—	751.10
06-04	2.3	984	739.20				

表 4 唐家山堰塞湖泄流的计算结果

Table 4 Discharge flow calculation result of Tangjiashan Barrier Lake											
日期 Date	平均库 水位/m Average water level	来水 流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Runoff	槽底起 始宽度/m Initial width of the slot bottom	平均泄 流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Average discharge	来、泄流量 均值差 ΔQ/ (m ³ ·s ⁻¹) Difference of runoff and discharge	库内补给 水量 ΔV/m ³ Water supply	库水位 增量 ΔH/m Increase the amount of water	平均 水深/m Average water depth	平均 泄流 流速/ (m·s ⁻¹) Average discharge velocity	累积冲刷 深度/m Accumulated scour depth	累积 冲刷 底宽度/m Accumulated scour width
06-07	742.2	1 088	10.00	104.5	983.50	7 081 459	1.27	2.48	2.84	0.54	1.62
06-08	743.4	1 042	13.87	592.6	460.90	3 318 149	0.80	5.40	4.50	4.62	13.86
06-09	742.6	1 273	27.23	3 211.0	-1 995.78	-14 369 597	-3.64	10.89	6.46	14.08	42.24
06-10	735.9	1 100	47.87	5 676.8	-4 533.59	-32 641 877	-8.48	12.84	6.59	19.52	71.76
06-11	729.6	984	63.05	3 029.3	-2 016.25	-14 517 019	-3.62	8.32	4.79	19.52	87.06

2.3 唐家山堰塞湖泄流计算结果的分析与验证

从表 4 可以看出,06-07 和 06-08 的平均泄流量均较小,水力冲刷侵蚀作用也较小,泄流槽断面扩大较少。随着冲刷作用的增强,06-09 的平均泄流量明显增大,已冲刷形成较大的泄流断面,致使 06-10 泄流达到最大洪峰流量,库水位开始大幅度下降。06-10 水力冲刷泄流槽底的累计冲刷深度达到了 19.52 m,泄流槽底宽增大更加突出,增加到了 71.76 m,泄流量达到了峰值。尽管 06-10 的冲刷作用很强,但由于堰顶裸露下伏土层抗冲刷能力增强,堰顶冲刷下切深度远小于槽底宽度的扩大幅度。计算结果中唐家山堰塞湖泄流量的变化曲线见图 4。

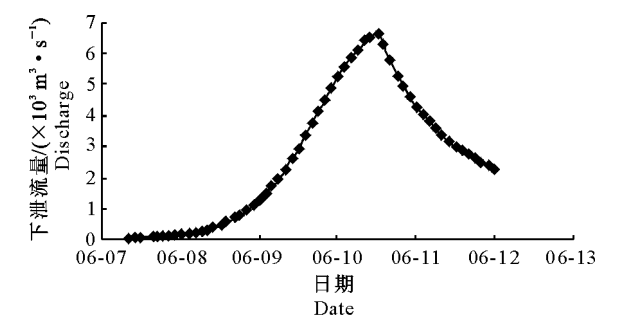


图 4 唐家山堰塞湖泄流量的变化曲线
Fig.4 Discharge flow curve of Tangjiashan Barrier Lake

计算确定 06-10 T 12:00 的洪峰流量为 6 601 m³/s,与唐家山堰塞湖 06-10 的实际洪峰流量(6 500 m³/s)差异较小,从而验证了本研究所用分析方法的准确性。

3 结 语

堰塞湖开槽泄流是抗震时期避免引起次生灾害的一项重要措施,准确地把握泄流过程中流量的增长过程和洪峰流量大小与形成时间是人们关心的关键问题。本研究针对唐家山堰塞湖开槽泄流,维护堰塞坝的稳定安全,避免溃堤形成洪峰危害下游的实际问题开展了分析研究,取得了如下认识:

- 1)基于不同粒径散粒体冲刷运动特性,确定了堰塞坝不同粒径松散体的冲刷启动流速和冲刷速度;基于堰塞湖区产流和库水位曲线,应用宽顶堰水流运动计算理论,综合考虑了土性材料冲刷性能与堰流之间的相互关系,进行了开槽泄流、水流计算、冲刷下切、库水位确定的迭代计算分析,预测了泄流槽的冲刷演变和下泄洪峰流量及出现时间。
- 2)依据对泄流冲刷发展过程的认识,确定了库水位抬升、泄流开始冲刷、泄流槽底面下降和断面扩大、槽底面上泄流作用水头增大、泄流量和流速增

大、冲刷增强、泄流量和流速稳定、冲刷作用稳定的分析途径,从而提出了一种预测堰塞体开槽泄流下切冲刷分析及洪峰形成时间和确定最大洪峰流量的简化方法。

3)对计算结果与实测资料进行比较可知,这种简化计算分析方法能够比较准确地预测堰塞湖开槽泄流洪峰形成时间和最大洪峰流量,对今后震后堰塞湖抢险工程具有一定的指导意义。

[参考文献]

[1] 马贵生,罗小杰.唐家山滑坡形成机制与堰塞坝工程地质特征[J]. 人民长江,2008,39(22):46-47.
Ma G S,Luo X J. Analysis on engineering geological characteristics and discharge stability in Tangjiashan Barrier Lake [J]. Yangtze River,2008,39(22):46-47. (in Chinese)

[2] 朱勇辉,范北林,卢金友,等. 唐家山堰塞湖溃坝洪水分析及泄流冲刷模拟 [J]. 人民长江,2008,39(22):79-82.
Zhu Y H,Fan B L,Lu J Y,et al. Flood analysis and discharge washing simulation of Tangjiashan Barrier Lake [J]. Yangtze River,2008,39(22):79-82. (in Chinese)

[3] 张细兵,卢金友,范北林,等. 唐家山堰塞湖溃坝洪水演进及下泄过程复演 [J]. 人民长江,2008,39(22):76-78.
Zhang X B,Lu J Y,Fan B L,et al. Flood evolution and discharge washing process of Tangjiashan Barrier Lake [J]. Yangtze River,2008,39(22):76-78. (in Chinese)

[4] Briaud J L. Case histories in soil and rock erosion: woodrow wilson bridge,brazos river meander,normandy cliffs,and new orleans levees [J]. Journal of Geotechnical and Geoenviron-

mental Engineering,2008,134(10):1-27.

[5] 四川汶川抗震救灾专题 [R]. 中国水利水电科学研究院《科研简报》特刊,2008.
Topics of earthquake relief about Wenchuan in Sichuan Province [R]. China Water Resources and Hydropower Research Institute 《Scientific Research Briefing》Special Publication,2008. (in Chinese)

[6] 于玉珍. 岩土灾害 [R]. 北京:清华大学岩土工程研究所,2008.
Yu Y Z. Geotechnical disasters [R]. Beijing: Geotechnical Engineering Institute of Qinghua University,2008. (in Chinese)

[7] 陈祖煜,徐文杰,王玉杰. 四川省堰塞湖资料抢救性收集工作汇报 [R]. 成都:四川省水电勘察设计研究院,2008.
Chen Z Y,Xu W J,Wang Y J. The data collecting report about Dammed Lake of Sichuan Province in China [R]. Chengdu:Sichuan Investigation and Design Institute.2008. (in Chinese)

[8] 四川省水利厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册 [M]. 北京:科学出版社,1984.
Water Conservancy Office of Sichuan Province in China. Rain-storm and flood reckoner on middle and small valley in Sichuan Province [M]. Beijing:Publishing Company of Science,1984. (in Chinese)

[9] 陈剑池,范可旭,李中平,等. 唐家山堰塞湖区域水文特性分析 [J]. 人民长江,2008,39(22):26-28.
Chen J C,Fan K X,Li Z P,et al. Analysis of hydrology characteristics in Tangjiashan Barrier Lake [J]. Yangtze River,2008,39(22):26-28. (in Chinese)

[10] 李建中. 水力学 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
Li J Z. Hydraulic mechanics [M]. Xi'an:Shaanxi Publishing Company of Science and Technology,2002. (in Chinese)