

意大利瓦洋特水库诱发滑坡的地质力学思考

沈新普, 范 军

(沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110023)

摘 要: 意大利瓦洋特(Vajont)水库是一个用穿山隧洞将相邻的若干个峡谷河流联接起来的集成型大型水电工程. 结合工程地质资料介绍了发生在 1963 年的这一起水库诱发大规模山体滑坡事件, 并通过对水库边坡和大坝在事件中的表现及事件本身的地质力学思考, 总结得出了若干结论, 主要有: 水库边坡山体滑坡是由于边坡受到长时间的库水浸泡造成的; 工程施工初期对工程地质研究的忽视是造成事故的主要原因; 缺少水库边坡位移监测系统, 没能及时发出预警是滑坡事件遇难者数目巨大的主要原因; 具有向库内凸起的表面形状的混凝土拱坝能有效地抵抗滑坡土石方作用于库水而产生的涌浪作用; 当滑坡土方量特别巨大时, 即使大坝不被破坏也不能避免灾难性的后果, 因此特别需要针对涌浪的防灾措施.

关 键 词: 水库; 滑坡; 大坝; 瓦洋特; 工程地质

中图分类号: O 342 文献标识码: A

Notes on the landslide of italy vajont reservoir

SHEN Xin-pu, FAN Jun

(School of Architectural Engineering, Shenyang University of Techenology, Shenyang 110023)

Abstract: With the engineering geological data, this article introduced the landslide of Vajont Reservoir, Italy, occurred in 1963. The principal conclusions are: the cause of the landslide is the long-term action of the capillary and seepage of water in the reservoir; The lack of studies on the geological information at the start of the Vajont engineering is a principal factor of the landslide; the lack of monitoring and lack of alarming system are the two main factors that resulting in the so many victims; the arc-dam of inner-ward convex profile can stand up with the action of a powerful wave; a dam can not protect its down stream from disaster although it could stand against the wave, if the amount of landslide is huge.

Key words: reservoir; landslide; dam; Vajont; engineering geology

意大利瓦洋特水库滑坡发生在 1963 年. 其后至今的 40 多年里很多人从各自不同的角度一直在阐述各自对事件的见解^[1~7]. 上述文章主要讨论了事件的力学机制等, 但是并没有提供足够翔实的整个水库系统工程的资料. 而对整个水库系统全面的工程资料的研究分析是正确认识事件发生原因的必要条件. 因此作者曾专程前往瓦洋特水库现场进行实地考察, 并研究了相关资料. 下面首先介绍工程背景, 之后结合工程地质资料给出分析结论.

意大利位于亚平宁半岛, 其东北部的阿尔卑斯山区由于有良好的森林覆盖和得天独厚的气候条件, 春夏秋三季雨量充沛, 每一个山谷都有一条河, 有着丰富的水利资源. 而皮阿卫(Piave)河则是这个地区的一条区域干流. 自 20 世纪 30 年代以来, 意大利国际能源电力公司(ENEL)就计划在这里建立水电站^[8]. 但是, 鉴于单独一个山谷溪流的水力发电量较小、而可以用于发电的山谷又相距很近的情况, 聪明的工程师便在 1939 年提出了

收稿日期: 2005 - 06 - 05

基金项目: 辽宁省教育厅重大基础研究计划项目(2004C035)

作者简介: 沈新普(1963 -), 男, 河北清河县人, 教授, 博士生导师, 主要从事固体塑性损伤本构理论与应用研究.

“修建穿山隧洞,将相邻的若干个峡谷湖泊(溪流)联接起来,集中水量和落差,建立一个大型水电站”的工程构想.1939年的水库系统工程构想共包括3个山谷和一个干流的4个已有水库.而瓦洋特山谷独特的地理外形条件使之成为建立一个大型水库的最理想地点:瓦洋特山谷呈葫芦型,谷口狭窄便于修建大坝;山谷内腹宽阔、深度大,能储存数亿立方米的水量.

但是,瓦洋特山谷的地质情况却不那么令人鼓舞.数千万年前,这里是一片海洋,这里的岩石属于水成岩.山坡体的材料构成为石灰岩和粘土

的互层结构.石灰岩层间的粘土薄层在受水浸润的情况下极易水化崩解成泥浆而使岩层的层间界面失去承载力,严重时能导致滑坡.尽管如此,水库工程还是在20世纪30年代就开始设计了.

瓦洋特水库的设计和施工过程也不是那么顺利.1939年正式开始设计,由于种种原因,直到1959年才形成最终方案.这期间曾数次更换工程总设计师.工程规模越来越大,大坝的高度也从初始的230 m增加到最后的264.6 m,264.6 m的高度使瓦洋特水库成为世界上第二高的大坝.1963年初步建成的水库见图1所示^[1].

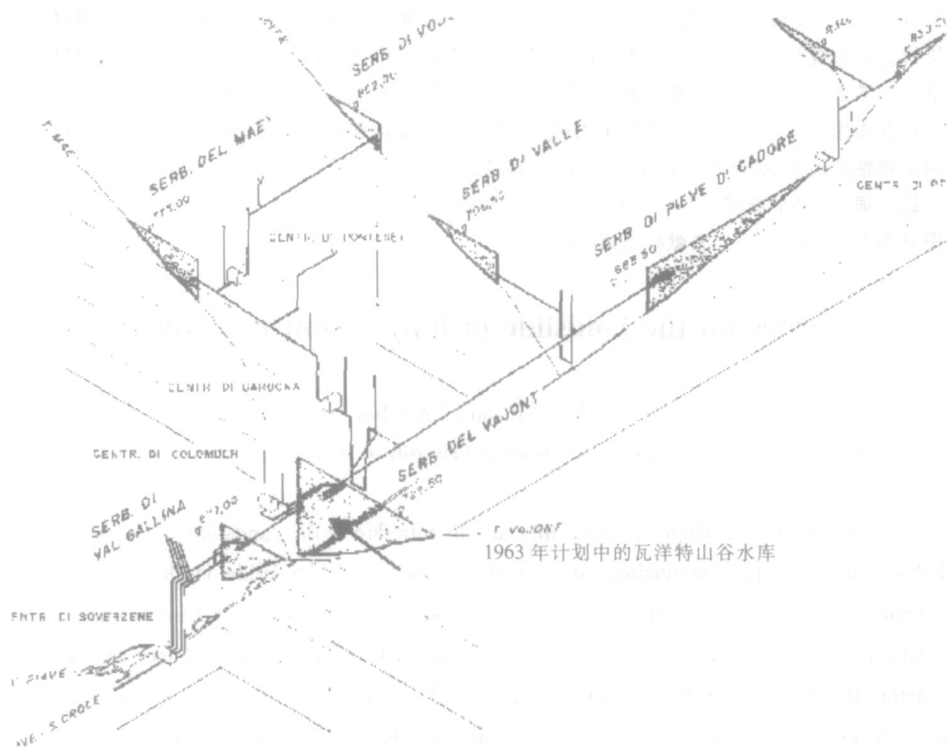


图1 1963年的水库建设示意图(图中阴影为水库)

Fig. 1 Illustration of the reservoir system constructed in 1963

最初的设计师也考虑到了水库可能发生各种灾害,比如可能的大坝坝体破坏、可能的滑坡引起的各种问题等,并在水库大坝下游以及与居民点相近的地点很有针对性地设置了一系列的人工防洪减灾措施(如消能墙等抵御洪水冲击的措施等);大坝的初始设计高度(比最终高度低34.6 m)被认为是考虑了边坡地质条件确定的.但是,最终的大坝264.6 m的高度,以及始料未及的山体滑坡的规模,都使得所有的人工防范措施失去意义.

1 滑坡介绍

瓦洋特水库诱发滑坡发生在1963年10月9号22点39分.那是一个晴朗的夜晚.大滑坡发生

时,水库刚开始蓄水不到3个月,水力发电机还没有开始正式运转,大坝坝址处的水库蓄水深度为240 m,蓄水量仅达水库总容量的三分之一.

滑坡发生的过程十分短暂,只持续了约5 min.在这个时间里,南北宽超过500 m、东西长约2 000 m、平均厚度约250 m的巨大山体从水库南坡迅速向北滑下,超过 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^2$ 的岩石及砂砾以 100 km/h^2 的加速度一路呼啸着涌入水库,并在数秒钟内冲上对面山坡,达到数百米的高度(参见图2)^[1].滑坡体滑动时岩体节理面的表面间在巨大压力下摩擦而发出的刺耳的次声波听起来令人心骇.

横向滑落的滑坡体的冲击在水库的东、西两个方向上产生了两个涌浪冲击波.东面的冲击波

沿山谷冲向水库上游,将水库上游 10 km 以内的沿岸村庄淹没、桥梁摧毁。西面的冲击波产生的巨浪冲向水库大坝,按照‘无拉应力设计’准则设计的大坝十分坚固,表面具有一定斜度的拱形的坝体将巨大的水平冲击力化解成向上的冲击波,从而保证了混凝土坝体能够幸存下来,并继续行使蓄水拦洪作用。

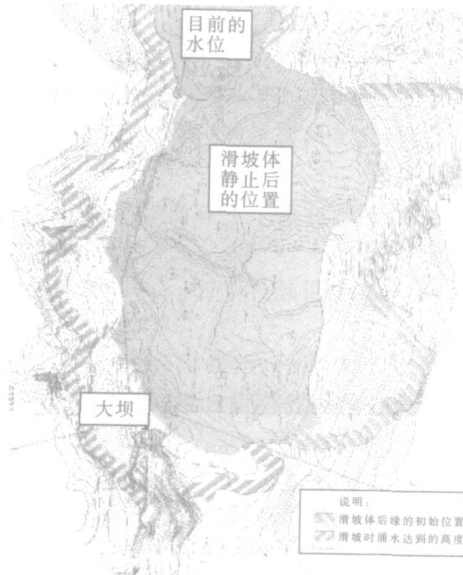


图2 滑坡体的位置示意图

Fig. 2 Illustration of the landslide

然而在大坝处向上飞起 100 多米高的水和泥石流的巨浪在越过大坝后依然具有巨大的能量,落入山谷后沿山谷飞速而下,冲向水库下游,沿途摧毁了一切人工防灾设施,并摧毁了山谷外皮阿卫河对岸的龙戈卢内(Longarone)居民区。

2 滑坡后果

这场滑坡灾难的遇难者总数为 1 909 人,为意大利历史上遇难者总数最多的一次滑坡灾难。虽然滑坡灾难发生的地点为人烟相对稀少的深山峡谷,但是由于滑坡规模大、涉及范围广,遇难者总数也就多到令人震惊。

滑坡发生后的第二天,水库内能看到的主要的景致是一个巨大的土丘以及泥浆。大坝处泥浆的深度很大,对大坝产生的压力很大,使大坝处于危险境地。因此,灾后的一件大事就是在紧急救援灾民的同时,紧急疏水,直到抽空水库的蓄水。并且,由于瓦洋特水库是由若干穿山引水隧洞与另外的水库相连的、处于下游的水库,必须紧急建立另外的穿山水道,将奔流而来的水流引开,使之绕

过瓦洋特水库后流入皮阿卫河。这样的工程持续了一年多。

现在的瓦洋特水库依然存在,只是不再是原来的规模,只保留了一个很小很小的供观赏并具有改善环境作用的人工湖。滑坡落下的山体巨大,填满了山谷,因此 264.6 m 高的大坝两侧都没有水,不再起‘坝’的作用,实际上成了一个‘大墙’。山谷中的溪流除了允许一部分流入人工湖外,多余的水则通过隧洞绕过水库,在大坝的外侧,流入山谷,再流入皮阿卫河。

滑坡发生后很长一个时期内,瓦洋特山谷失去了昔日的山清水秀,到处是裸露的岩石及荒凉的土丘。只是在近几年,随着幸存者们几十年来不懈的努力,以及大自然的自我调整及再生能力,松数的绿色又开始逐渐遮住大部分的荒凉的地表,虽然光滑的岩石表面是永远寸草不生的,如图 3 所示。

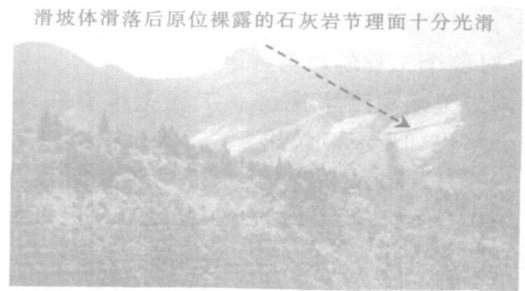


图3 裸露出来的滑坡体原来位置下部的节理面示意图

Fig. 3 Illustration of the joint surface after landslide

3 滑坡后的思考

3.1 滑坡成因

瓦洋特水库诱发滑坡是此类工程灾难的一个典型。滑坡发生时是晴天,没有下雨。另外,由于岩石层间的粘土水化崩解后形成的‘泥’的短期渗透性能不是十分好,短时间(最多数日)的雨水的毛细力和渗透作用只能使离地表一个较小深度内的粘土层软化,但不能进入岩石间粘土层的致命的深部。因此,水库蓄水以前的数百万年间,尽管有种种不利的地质因素和雨水的浸泡,陡峭的瓦洋特山谷仍然纹丝不动。因此,水库蓄水对边坡的长期浸泡是滑坡的唯一外因。

水库蓄水以后,水对岩石间粘土层的浸润是连续长时间进行的,并且库水压力给渗透作用提供了更高的驱动力。这样,水的毛细力和渗透作用不仅能使离地表一定深度内的粘土层软化,而且

还能进入岩石间粘土层的深部,从而危及坡体的稳定,甚至引起滑坡。

3.2 大坝的力学性能和作用

在速度较高的压缩载荷作用下,混凝土及岩石等“类脆性”材料的动态抗压强度是很高的。这就是大坝只在肩部受损(见图4)^[11]、而主体得以幸存的原因之一。当然这是建立在优秀的、“无拉应力设计”坝形的基础之上的。幸存的大坝拦住了部分的速度较低的砾石泥石流,减少了沿山谷下泻的洪水及泥石流的总量,大大降低了灾害程度,使得龙戈卢内居民区的部分居民得以幸免于难。

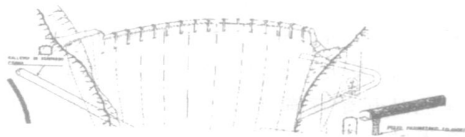


图4 涌浪冲击仅使坝体顶部右侧坝肩受损

Fig. 4 Illustration of the damage situation on the shoulder of the dam caused by wave

3.3 对整个工程的思考

回过头来重新审视这一工程灾难事件,可以从中总结出如下8点结论:

1) 在瓦洋特山谷修建水库的工程计划无疑是正确的。但是,除了地质条件因素以外,问题的关键在于水库的规模。如果大坝的高度不是后来增加到达的264.6 m,而是最初设计的230 m,那么,蓄水的高度可能就会低于节理层,从而库水对边坡的浸泡就不会有后来那么严重的灾难后果。至少,滑坡的规模会大幅下降。因此,工程施工初期对工程地质研究的忽视是造成事故的主要原因。

2) 文献没有记录水库管理者对边坡的位移监测,因此,估计当时没有实施边坡位移监测。如果实施边坡位移监测,即使提前5 min发出预警,灾难的遇难者人数也会大幅下降。

3) 工程设计者对滑坡灾难的严重性预料不足,从而,设计的人工减灾设施形同虚设。

4) 有时候,工程灾难的威力是人工措施无法抗拒的。唯一的办法就是避免形成或者提前消除这种巨大灾难发生的条件。以瓦洋特水库为例,设计者可以采取降低蓄水深度的办法来消除灾难的可能性。

5) 但是,无论如何,对瓦洋特水库边坡的加固是无济于事的。因为鉴于目前的施工深度,加固边坡的措施并不能绝对排除库水渗入节理层的可能性。而节理层遇水软化后形成的大规模滑坡动

力又是加固措施无法抵御的。

6) 在瓦洋特山谷修建“集成大型水库”的工程计划是十分优秀的,不能因为最终工程对地质条件考虑不周导致的最终失败而连优秀的工程计划也一起批判。在我国青藏高原,那儿有数不清的深山峡谷溪流,都具有修建水库和电站工程的可能性。如果在青藏高原确实有相邻的数条溪流,能仿照瓦洋特水库系统,修建穿山隧洞,建立一个高效的大型水力发电系统,则将是一个很令人高兴的事。只是有一点:要对最后的“集成大型水库”的边坡进行细致的稳定性分析和计算,同时加强位移实时监测,完善预警系统。预警信号的发出的决策系统要高效。

事实上,目前在意大利东北部皮阿卫河流域就有好几个“集成大型水库”和水力发电网络正在运营中,年总发电量超过2 259 GWh(即:100 × 10⁶ kW/h)。

7) 目前的大坝,包括拱坝和重力坝,都是按静力载荷及地震动载荷设计的。对于大坝抵抗涌浪冲击的能力一般不予考虑,或者说还没有考虑,因为有关的计算是复杂的,有关的数学理论还不完善。然而,这也是很危险的。因为有文献记录的历史上的几起大坝溃塌事件^[9,10]的背后,都被怀疑有滑坡引起的库水涌浪的作用。有意思的是,文献[11,12]仔细研究了战争中人为爆破(轰炸)对大坝的破坏作用,结果发现仓促的人为爆破(飞机轰炸)很少能成功摧毁一座大型重力坝。

瓦洋特水库大坝用事实证明:大坝的向库内凸起的弧面,能够极大地化解涌浪冲击产生的作用力,保证了大坝在涌浪冲击下仍然能够起作用。这对本文进行诸如三峡大坝这样的重要大坝时的坝形设计提供了一个重要信息:如果大坝向库内的表面具有凸起的弧面,则大坝将具有很强的抗涌浪冲击的能力,这一涌浪可以是由于滑坡引起,也可以是由于其他原因如水中的爆破引起。另一方面,若是大坝向库内的表面没有凸起的弧面,则大坝将没有很强的抗涌浪冲击的能力,如此将是很危险的。

8) 瓦洋特水库大坝还证明了:在发生大规模滑坡的情况下,即使大坝足以承受所有载荷而巍然挺立,涌浪仍然可能越过大坝并对大坝下游居民的生命财产造成严重损害。因此,预防此类工程灾难不能仅依赖大坝,而是要建立另外的针对涌浪的特别设施。

致 谢

十分感谢意大利科学院院士、意大利国家研

究发展委员会(CNR)委员、米兰工业大学结构工程系 Giulio Maier 教授给作者在本研究中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Müller L. The rock slide in the Vajont valley [J]. Rock Mech. Eng. Geol. 1964, 2(1):148 - 212.
- [2] Broili L. New knowledges on the geomorphology on the Vajont slide surface [J]. Rock Mech. Engn. Geol., 1967, 5(1):38 - 88.
- [3] Kenney T C. Stability of the vajont valley slope [J]. Rock Mech. Engn. Geol. 1967, 5(1):10 - 16.
- [4] Kiersch G A. Vajont reservoir disaster [J]. Civil Engr. ASCE, 1964, 34(2):32 - 40.
- [5] Hendron A J, Patton F D. The vajont slide: a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface [J]. Engineering Geology, 1987, 24(2):475 - 491.
- [6] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides: error correction and affirmation of mechanism for the vaiont landslide [J]. Geotechnique, 1992, 42(3):641 - 643.
- [7] Palmieri N W. Vajont, stava, agent orange: il costo di scelte irresponsabili [M]. Cedam, Padova, 1997.
- [8] Enel. Impianto idroelettrico piave-boite-mae-vajont [Z]. Gugno, Italia, 1984.
- [9] Nathan A. Bowers, St. Francis dam catastrophe a great foundation failure [J]. Engineering News-Record, 1928, 100(12):466 - 472.
- [10] Gillette H P. The cause of the St. Francis dam failure [J]. Engineering and Contracting, 1928, 20(1):173 - 178.
- [11] Nonveiller E, Rupcic J, Sever Z. War damage and reconstruction of peruca dam [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4):280 - 288.
- [12] Charlie W A. Discussion on war damage and reconstruction of Peruca Dam [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(9):854.

(责任编辑:邓美艳 英文审校:沈新普)

【待发表文章摘要预报】

以 Mn、N 代 Ni 奥氏体耐热钢的高温氧化

古可成¹, 蔡春波², 孙东杰³, 邹纳维¹

(1. 沈阳工业大学 材料科学与与工程学院, 沈阳 110023; 2. 哈尔滨理工大学, 哈尔滨 150080;
3. 沈阳航空职业技术学院, 沈阳 110034)

摘要: 锅炉燃烧喷嘴(简称喷嘴)是发电厂锅炉燃烧设备的重要部件,用于把煤粉输送入锅炉的燃烧室内。它与锅炉连接的一端温度高达 1100℃,同时受到煤粉的冲刷磨损。因此,要求喷嘴在高温下具有良好的抗变形、抗氧化性和耐磨性。在 25~20 耐热钢成分的基础上,添加 Mn、N,并减少 Ni 含量,以求达到降低锅炉燃烧器喷嘴材料成本的目的,由此研制出了几种耐热钢。文中将 2520 钢与之在 900、1000、1150℃ 时的氧化做了对比试验,并通过检测及分析,通过高温氧化增重计算及氧化膜的 X 射线衍射分析,对新材料在高温条件下的氧化机理进行了研究和讨论。提出了在不同温度下可能替代 25~20 钢的钢种及依据。