

中国江河截流的科技进展

肖焕雄¹, 任春秀¹, 孙志禹², 陈先明²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072; 2. 中国长江三峡工程开发总公司 湖北 宜昌 443002)

摘要 : 论述江河截流的发展历程, 具体研讨了流水中截流抛石的稳定性、群体抛投不均匀粒径石块截流的稳定性、深水截流问题、双戗堤截流问题、宽戗堤截流问题等近年来在科学技术领域中的进展。认为我国现在的导截流理论、关键技术、模型试验等的水平已全面跨进国际导截流工程先进行列。

关键词 : 江河截流 ; 戗堤 ; 综述 ; 中国

中图分类号 : TV551.2

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-764X(2006)06-0081-04

Advances in technologies of river closure in China / XIAO Huan-xiong¹, REN Chun-xiu¹, SUN Zhi-yu², CHEN Xian-ming²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract : The development of the technologies of river closure by cofferdam construction is reviewed, with emphasis on the stability of river closure by adoption of ripraps of uniform size and different sizes and river closure in deep-water by construction of double dikes and a wide dike. It is concluded that the theory of river diversion and closure, the key technologies in construction, the model experiment technology, etc. for river closure in China have stepped into the advanced ranks in similar projects in the world.

Key words : river closure; closure dike; summarization; China

中国长江的 3 次截流(长江葛洲坝大江截流、长江三峡大江截流及长江三峡第三期导流明渠截流)成功,已引起世界水电工程界的广泛关注。特别是长江三峡工程的 2 次截流,突破了世界截流史上多项最高指标,被中国科学院及中国工程院全体院士评定为“1997 年中国十大科技进展”中的第 3 项及“2002 年中国十大科技进展”中的第 4 项(见《人民日报》1998 年 1 月 5 日和 2003 年 1 月 26 日报道)。我国的长江 3 次截流在我国水利科技中究竟取得了哪些具体进展呢?笔者就此谈点意见。

1 截流的发展历程

在流水中抛石筑坝的设想,是从自然界塌方拦断了河流而受到启发的^[1]。

我国远在公元前 251 年就在四川省灌县都江堰使用过杗槎截流而壅水形成低堰,但仅用于水深小于 4 m,流速小于 3 m/s 的卵石、沙卵石河床的截流。

1911~1912 年在前苏联辛克河有 7 个由不同沉积岩、石灰岩剧烈坍塌而形成的人工湖,经过多年观测,该人工湖稳定且基本不漏水。1913 年, A·勃烈澳布拉任斯基第一次在《彼得堡工学院学报》(Vol. 19, No. 1)上发表了题为“辛克河上的七个湖”的论文,之

后,前苏联开始在河流中抛石截流筑坝的试验。

在印度,1920 年前也在恒河上用块石拦断河床筑了一些坝,但在度汛时,这些坝就像融雪似地垮塌了。

在美国,1929 年用人工爆破峪谷在维多利亚河截断水流筑了一个近 20 m 高的土石坝,但由于坝基处在 25 m 以上的泥砂覆盖层上,又未进行妥善处理,故在建设期间坝就垮塌了。

总之,20 世纪 30 年代以前的抛石截流筑坝,失败的多,留下的教训不少。

20 世纪 30 年代,特别是在 1930 年,前苏联的 C·B·伊兹巴斯首次为戈尔河做了截流模型试验,接着又在菲克河、杜罗门河成功地进行了抛石筑坝。在此基础上,1932 年伊兹巴斯第一次出版了《流水中抛石筑坝》一书,1936 年在第二次国际大坝会议上,他又系统地发表了截流抛石粒径的计算论文,受到了世界水利工程界的重视。

在 1931~1939 年期间,前苏联的大型著名截流工程约 11 项,都是采用平堵法截流。美国、法国这段时间也是以平堵法截流为主,但从 1932 年开始,荷兰曾多次采用沉箱截流,龙口水深超过了 40 m,这在当时的截流史上是罕见的。

总之 20 世纪 40 年代以前的截流都是以平堵法为主 ,在此期间开始采用截流模型试验 ,实际截流工程的最大流量达到 $2\,200\text{ m}^3/\text{s}$,截流最大落差在 3 m 左右 ,抛石强度达到 $200\text{ m}^3/\text{d}$,并开始采用铁框四面体、石笼、混凝土六面体等抛投材料及沉箱法截流。

20 世纪 40 年代 ,世界各国逐渐采用立堵法截流 ,采用大型自卸汽车运料或皮带机运料。如前苏联在 1940 年 10 月首次在舍克纳斯河采用 5 线皮带机运料立堵截流法 ,最大抛投强度达 $12\,000\text{ m}^3/\text{d}$,时平均抛投强度也达到 $500\text{ m}^3/\text{h}$ 。20 世纪 40 年代的截流工程 ,截流流量最大的已接近 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差仍与 20 世纪 30 年代相近 ,即 3 m 左右。但值得一提的有两点 :①普遍开展了截流模型试验及现场原型观测工作 ;②世界上第一本《施工水力学》在莫斯科正式出版 ,作者是施工水力学奠基人伊兹巴斯教授。

20 世纪 50 年代 ,立堵法截流已普遍推广应用。罗马尼亚与前南斯拉夫合作进行的多瑙河铁门水电站截流时还采用了立堵法进占到龙口设置段 ,之后再平堵法(龙口段架桥)合龙的综合法截流。1951~1960 年 ,截流流量最大已达 $3\,660\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差达 3.72 m ,最大表面流速达 7.4 m/s ,抛投最大单个块体质量达 25 t 。学术方面 ,伊兹巴斯教授又出版了一本《截流水力学》(莫斯科水电出版社 ,1959 年) ,但遗憾的是 ,此书主要研究成果是平堵法截流 ,而对广泛采用的立堵法截流尚来不及研究。

20 世纪 60 年代 ,立堵法发展很快 ,双戗堤立堵、宽戗堤立堵等截流方法也有一些应用 ,但理论和计算方面的成果尚不多见。这一时期截流流量已突破 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差已突破 6.5 m ,最大龙口平均流速已突破 5 m/s ,最大表面流速已超过 10 m/s ,抛石强度已达 $4\,600\text{ m}^3/\text{d}$,这些指标标志着 20 世纪 60 年代截流技术已进入一个较成熟的发展阶段。

20 世纪 70 年代 ,截流流量突破了 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差达到了 7 m ,普遍采用了块石串截流、石笼截流。但理论上的成果仍不够丰硕 ,截流施工仍靠经验及以水力学模型试验为主要参考。

20 世纪 80 年代 ,截流流量又有增长 ,1989 年巴拉那河的雅西里塔工程 ,截流流量达 $8\,400\text{ m}^3/\text{s}$,这一时期截流工程的最大落差、最大流速仍与 70 年代大致相当。但值得一提的是 ,将习惯上安排在枯水期(甚

至最枯季节)截流的惯例 ,更新为大汛之后即可考虑安排截流的实施 ,这对截流后的围堰抢修及围堰防渗体的施工工期与质量保证更具积极意义 ,是一件建立在截流技术水平提高基础上的革新事件。

进入 20 世纪 90 年代以来 ,大江大河截流的理论与实践水平 ,进入了一个新的高峰时期 ,集中体现在中国长江三峡工程 2 次截流的光辉业绩中。这 2 次截流突破了 3 项世界截流的最高指标 ,即截流流量首次突破 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$,龙口水深首次突破 60 m ,截流抛石强度首次突破 $194\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。在三峡导流明渠截流中 ,首次解决了世界双戗堤截流中的三大难题 :两个戗堤之间的合理间距 ;上下戗堤合理进占的配合 ;下戗堤壅水到上戗堤的时间计算与控制。这是三峡工程导流明渠双戗堤截流提供的宝贵经验与贡献。在这一时期 ,我国首次出版了第一本《施工水力学》(世界第二本) ,这本书为解决水电工程施工过程中常见的水力学问题提供了基础理论及实用计算方法^[2]。

表 1 2002 年底以前世界截流工程几项最高指标

指 标	指标值
截流实际最大流量	$11\,600\sim 8\,480\text{ m}^3/\text{s}$ (中国三峡大江合龙结束时) $10\,300\sim 8\,600\text{ m}^3/\text{s}$ (中国三峡导流明渠合龙结束时)
截流戗堤轴线最大水深	60 m (中国三峡工程)
截流龙口最大落差	10.5 m (前苏联上杜罗马)
截流龙口最大平均流速	8.56 m/s (前苏联托克托古里)
截流最大抛石强度	$194\,000\text{ m}^3/\text{d}$ (中国三峡工程)
截流混凝土四面体串	$2\sim 4$ 块一串 ,每块 25 t ,每串 $50\sim 100\text{ t}$, 仅在最关键时刻用过几串(中国葛洲坝工程)

2 截流的前沿科技进展

2.1 流水中截流抛石的稳定性研究

迄今为止 ,世界各国大多采用伊兹巴斯教授的起动流速公式来计算截流抛投材料所需粒径^[3]。但截流抛投材料是从岸上抛入河底的 ,其稳定过程很复杂。从水力学模型试验中可以清楚地观察到石块从岸上抛入河底后的 3 种现象(表 2)。

由上可见 ,截流抛投材料必须在抛入河底后立即止动 ,或移动一定距离(不超过截流戗堤范围)后止动 ,并且不再起动、流失到戗堤外去 ,方可称为截流的有效抛石。世界各国习惯用伊兹巴斯起动流速公式计算截流抛石稳定^[2] ,这是不符合截流抛石稳

表 2 石块从岸上抛入河底后的 3 种现象

- ①立即停下来(止动 ,即停止运动) ,即石块在河底移动(或滚动)的距离 $\rightarrow 0\begin{cases} (a) \text{一直稳定不动} \\ (b) \text{过一段时间又起动} \rightarrow \text{再止动} \rightarrow \text{一直稳定} \end{cases}$
- ②移动一段距离后才止动(在截流戗堤范围内) $\begin{cases} (a) \text{一直稳定不动} \\ (b) \text{过一段时间又起动} \rightarrow \text{再止动} \rightarrow \text{一直稳定} \end{cases}$
- ③连续或间断移动(或连滚带滑) ,一直移动到截流戗堤范围以外去了

定过程的。我国自 20 世纪 70 年代后期开始集中研究了截流抛石的止动稳定机理及稳定计算方法,并校核了起动稳定性要求,形成了一套计算方法,经过 3 次长江截流及一系列其他大江大河截流实践考验,证明基本符合实际。这是我国在截流抛石稳定过程理论方面的新贡献和新进展。

2.2 群体抛投混合石碴料截流的稳定性研究

世界上任何一次截流,基本截流材料都是一车一车的群体抛投(特大石及人工大块体是单个抛投)非均匀混合石碴料,但截流设计计算又是按均匀粒径石块,取一个单粒作稳定计算,因此设计单位建议的截流块石粒径对施工单位很难处理。我国自 20 世纪 70 年代开始进行过系统的研究,特别针对葛洲坝大江截流的需要进行了长达 7 年有余的试验研究,并经过葛洲坝、三峡等一系列截流实践的总结,取得了一定的进展。解决问题的思路是混合粒径的平均值(质量平均),按理论计算公式中的代表粒径去备料。当粒径从小到大较连续时,可合理分组,每组代表粒径按建议的理论公式计算,作为备料的依据^[4]。

2.3 深水截流研究

国外对截流龙口水深的影响问题,至今没有任何成果公开发表。我国长江三峡工程大江截流时水深达 60 m,乃截流史上水深之最。由于水太深,截流戗堤头部容易塌滑,严重威胁到截流施工安全,为此,中国长江三峡工程开发总公司组织有关单位做了系统的分析研究,并进行了大规模的试验研究^[5],获得了许多宝贵的资料,理论上也获得了较大的进展。

理论和实践成果证明,截流龙口水深一般超过 30 m 后即为深水截流。有时水深超过 25 m 左右,也有一些堤头出现塌滑(堤头坍塌面积在 5 m² 以上)。通过系统研究和三峡工程截流实践,我国一些单位分别建立了不同的计算模型,例如原武汉水利电力大学建立了截流戗堤堆石体孔隙的微结构模型,用静态分叉理论分别证明了堆石体应力状态变化及截流块石浸水湿化是截流戗堤坍塌的两种主要原因;并用突变论推导了在应力状态变化和材料浸水湿化综合作用下,堆石体突然失稳的一般判别式。成果还解释了模型与原型坍塌差异的原因^[6-7]。这些深水截流研究成果,是我国对截流水深影响做出的新贡献。

2.4 双戗堤截流研究

国内外大江大河截流中,当截流最大落差超过 5 m 且流速超过龙口平均流速(4~5 m/s)时,一般多采用双戗堤截流。但根据笔者收集到的 18 个双戗堤截流的实例分析,效果确实比单戗堤明显的仅

占 1/3 左右,其余的双戗堤截流效果并未显示出较大的优越性。究其原因有 3 个国内外都未解决好的难题:双戗堤之间的适宜间距;上、下戗堤进占的协调配合;下戗堤壅水到上戗堤的历时计算和控制等。我国在解决三峡工程导流明渠双戗堤截流专项研究中,合理解释了双戗堤截流的机理,提出了解决上述三大难题的计算方法,研究成果经过三峡导流明渠双戗堤截流的检验是成功的,从而在双戗堤截流的理论与关键技术方面取得了新的进展^[2,8]。

2.5 宽戗堤截流研究

国内外一般立堵截流的戗堤顶宽多在 20~25 m 范围内,因此习惯上称顶宽超过 30 m 的截流戗堤为宽戗堤。戗堤加宽后,增加了龙口水流沿程摩阻损失,可以降低龙口水流流速,对截流抛石稳定有利。例如,美国杜勒斯工程截流试验证实,当戗堤顶宽为 9 m 时,龙口轴线底部最大流速为 6.4 m/s(这时龙口流量为 5 662 m³/s),逐渐加宽戗堤,原来实测点流速也相应下降,当戗堤宽达 76 m 时,同点流速已降为 5.18 m/s,减速效果是明显的。

戗堤加宽后,不仅可以适当改善截流水力条件,而且可以提高截流抛石强度,有利于抑制截流抛石料的流失。例如,美国奥阿西土石坝工程截流时(截流戗堤就是土石坝的组成部分),在戗堤宽度由 182 m 增加到 200 m 以上的过程中,不仅抛石强度由原来的 2 450 m³/h 提高到 2 920 m³/h,而且抑制了原来的抛石严重流失现象(最大流失量达 35%),效果也是明显的。

宽戗堤截流是否顶部愈宽愈好?宽度效应何时开始显现?宽戗堤截流过程水力条件变化特点、规律及其计算方法为何?此类问题的研究成果至今国内外很少见到,仅英国山道夫教授及我国肖焕雄教授课题组发表过论著,特别后者对宽戗堤的水力特性、宽度效应、流速及落差计算、淹没与非淹没流界限等等作过一些系统研究,取得初步进展^[9]。但从设计与施工的需要来看,还有大量的问题值得进一步探讨。

3 结 语

回顾我国江河截流的历程,不能不提到 20 世纪 50 年代的一次关键性截流,那就是黄河三门峡水利枢纽工程截流。由于当时我国无大型截流的经验,模型试验也做得不多,故委托前苏联列宁格勒水工设计院为我国进行工程设计及模型试验,所提交的建议是平堵法截流,但实际采用的是立堵法截流。1958 年 11 月 23 日 22 点开始进行三门峡神门岛泄流道合龙,在黄河实际来流量为 1 720 m³/s 的条件

下,于 25 日下午胜利合龙,最大落差为 4.37 m,最大平均流速为 5.5 m/s(表面最大流速为 6.5 m/s),创造了当时国内外截流的先进水平。从三门峡截流到今天已有 48 年,我国现在的导截流理论、关键技术、模型试验等的水平已全面跨进国际导截流工程先进行列^[10]。展望未来,再上一个台阶,在我国“十一五”规划之末,交出满意答案是有充分把握的!

参考文献:

[1]肖焕雄.世界水电工程大江大河截流现状报告[R].武汉:武汉水利电力大学,1998.
[2]肖焕雄.施工水力学[M].北京:水利电力出版社,1992.
[3]肖焕雄.截流抛石的粒径计算研究[J].水电站设计,2000(1):1-7.
[4]肖焕雄,唐晓阳.江河截流中混合粒径群体抛投石料稳

定性研究[J].水利学报,1994(3):10-18.
[5]长江科学院.三峡大江截流试验阶段报告[R].武汉:长江科学院,1994.
[6]肖焕雄,周克己.深水截流研究[J].长江科学院院报,1997(4):16-21.
[7]贺昌海,肖焕雄.立堵截流戗堤堆石分叉特性研究[J].中国工程科学,2001(6):69-74.
[8]肖焕雄,刘发全.双戗堤立堵截流水力控制条件研究[J].水利学报,1988(10):61-66.
[9]肖焕雄,夏明跃,王年云.宽戗堤截流的宽度效应研究[J].水利学报,1983(4):60-65.
[10]XIAO Huan-xiong. River diversion for high earth-Rockfull dams in China[C]//Proceedings International Symposium on High Earth-Rockfull Dams. Beijing, 1993.
(收稿日期:2006-05-31 编辑:马敏峰)

(上接第 39)最小裂缝分辨率仅达到我国水利技术标准规定的 1/6,要满足大坝裂缝监测灵敏性的要求,对于基于瑞利散射的光纤裂缝传感,应将光纤布置在与预期的裂缝面成交角小于 60°的范围内。基于此,结合小湾拱坝裂缝光纤监测研究,初步提出高拱坝裂缝光纤监测网络的优化构型。

b. 正交失效使基于瑞利散射的光纤裂缝传感失去了最优方式的工程应用,导致需在工程内部构建复杂的特定构型的光纤监测网络。这种复杂的网络构型既增加了光纤传感工程应用的困难,同时还会进一步降低传感光纤的工程存活率和缝宽量程,因而需进一步探索研究结构简单、工程实用的新型混凝土大坝裂缝光纤监测技术。

c. 混凝土坝裂缝光纤传感的研究目前还主要停留在原理性和方法性的探索性研究阶段,光纤裂缝传感的工程应用还缺乏充分、可靠的试验模拟和工程试用这一前提条件,具有工程实用化直接参照意义的研究方法和结论还有待探索。

d. 大坝裂缝监测是久悬难决的复杂工程技术问题,解决这一难题绝非任何一种技术手段一蹴而就之

事。分布式光纤裂缝传感技术还不成熟,处在不断发展的探索性研究阶段。基于瑞利散射的光纤传感只是较早用于裂缝检测研究的一种辅助性技术,由于其自身固有的技术局限,一直没有得到大规模的工程应用(包括试用)。混凝土高坝裂缝的光纤分布式监测还远非一种成型可靠的工程技术系统,目前不宜进行系统化集成开发研究及商业性应用推广。

参考文献:

[1]吴永红.光纤光栅水工渗压传感器封装的结构分析与实验[D].成都:四川大学,2003.
[2]王惠文.光纤传感技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2001:85.
[3]江毅,LEUNG K Y C.光纤裂缝传感器中裂缝宽度与光纤损耗关系分析[J].北京理工大学学报,2003,23(4):492-495.
[4]中华人民共和国水利部国际合作与科技司.水利技术标准汇编(水利水电卷·仪器)[Z].北京:中国水利水电出版社,2002:144.
(收稿日期:2005-12-30 编辑:高建群)

·简讯·

中国水利学会勘测专业委员会 2006 年年会暨学术研讨会在石家庄举行

中国水利学会勘测专业委员会 2006 年年会暨学术研讨会于 2006 年 10 月 27~31 日在河北省石家庄市举行。河北省水利厅副厅长、河北省水利学会常务副理事长刘凯军、中国水利学会李赞堂秘书长到会并作了讲话。中国水利学会勘测专业委员会原主任委员金德濂教授给大会发来贺信。来自全国各地 50 多个教学、研究、设计单位的 100 多位代表参加了会议。会议的主要议题是:引水工程的地质问题。研讨会共收到 60 多篇学术论文,有 7 位教授、专家为大会作了学术报告,10 多篇论文进行了大会交流。会议期间,代表们还考察了黄壁庄水库及南水北调中线古运河枢纽和漕河渡槽工程。
(张勤供稿)