

水文学的研究方法与理论创新

芮孝芳

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:回顾了水文学在其 300 余年的形成和发展中曾出现过的若干引人入胜、富有启发性、对学科发展起着重要推动作用的研究成果, 论述了“假设”、“猜想”、“推理”、“比拟”、“综合”和“实验”等研究方法的运用在水文学理论创新中的重要作用。

关键词:水文学; 产流; 汇流; 水文模型; 研究方法

中图分类号: P33

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)02-0046-05

科学研究旨在对新知识进行探求, 科学上的发现即创新, 是科学发展和学科进步的灵魂, 科学创新固然与科学家的聪明才智和勇气分不开, 但更重要的是取决于巧妙的研究方法的运用。“科学就在于用理性方法去整理感性材料”, 所谓理性方法即指科学研究方法。水文学作为地球物理科学的分支之一, 自 17 世纪形成以来, 已成为一门内容丰富、有重要应用价值的学科, 在其 300 余年的发展过程中, 科学研究方法起的作用是十分重要的, 也的确出现过许多引人入胜、富有启发性的研究事例。对这些事例加以归纳总结, 不仅能起到弘扬自然辩证法的作用, 而且对启发人们的科学创新精神具有一定的意义。

本文将通过举例方式来回顾与评论“假设”、“猜想”、“推理”、“比拟”、“综合”和“实验”等研究方法在水文学理论创新中的作用。

1 “假设”与创新

“假设”的主要作用是设想出解决问题的方案或方法, 合理的“假设”可使面临的难题迎刃而解。反复被实践证明是正确的“假设”一般存在一定的理论基础, 寻找这一理论基础将有力地推动学科的进步。

1.1 Sherman 单位线的提出

1932 年, Sherman^[1]为解决由降落在流域上的净雨过程线推求流域出口断面流量过程线的问题, 提出了单位线的概念。他假设单位线服从倍比、叠加原理和总历时不变。自那以后, 该法在世界范围内的许多流域的流域汇流计算中获得了好的精度。直到现在, 该法仍是极具生命力的流域汇流计算方法。这就是说, 实践反复证明, Sherman 提出的单位线概念及

三项“假设”在一定范围内无疑是正确的。1967 年, Dooge 建立了“系统水文学”的科学体系^[2]。按照系统理论, 自然界的系统有线性与非线性之分, 凡满足倍比和叠加原理的系统称为线性系统; 凡不满足倍比原理而满足叠加原理, 或既不满足倍比原理, 也不满足叠加原理的系统称为非线性系统。因此, 一个流域的流域汇流系统只要属于线性系统, 那么使用单位线推流就是符合事物的客观规律的, 并且对于线性时不变流域汇流系统, 单位线的三项假设也不再是“假设”了。但为什么有的流域的流域汇流系统属于线性系统, 而有的则属于非线性系统呢? 这又促使人们进一步去探求流域汇流的物理机理^[3]。

1.2 Muskingum 法的建立

1934 ~ 1935 年间, MaCarthy^[4]在研究美国 Muskingum 河的洪水运动规律时, 为了解决由河段上断面洪水过程线推求河段下断面洪水过程线的问题, 提出了一个假设: t 时刻的河段槽蓄量 $W(t)$ 与 t 时刻河段上、下断面的流量 $I(t)$ 和 $O(t)$ 呈如下线性关系:

$$W(t) = K[xI(t) + (1-x)O(t)] \quad (1)$$

式中: x 称为流量比重因子; K 称为具有时间因次的常数。这样, 将式(1)与有限差分形式的河段水量平衡方程式联立求解, 就很容易通过简单的代数运算解决由河段上断面洪水过程线推求河段下断面洪水过程线的问题, 而且取得了令人满意的精度。这种洪水演算法被后人称为 Muskingum 法。自那以后, Muskingum 法在世界上许多河流的洪水演算中得到成功的应用。这就必然引起人们的进一步思考: 由式(1)表达的“假设”, 如果不是揭示了某种条件下的洪水波运动的基本规律, 怎么可能有这样广泛的适

应性呢? 水文学家早在 20 世纪 60 年代就开始探讨这个问题, 直至现在, 人们已能根据水力学及洪水波运动理论证明^[5], Muskingum 法实际上是具有自由下边界的扩散波方程的二阶精度的数值解; 式(1)实际上就是近似的扩散波运动的动力方程, 而扩散波则是大多数河流经常发生的一种洪水波. 业已证明^[5,6] x 与特征河长 l 或扩散波的波速 C , 扩散系数 D 之间有如下理论关系:

$$x = \frac{1}{2} - \frac{l}{2\Delta x} = \frac{1}{2} - \frac{D}{C\Delta x} \quad (2)$$

式中: Δx 为演算河段的长度.

2 “猜想”与创新

“猜想”与“假设”之区别在于前者主要是指思维上的符合逻辑的奇想, 而后者主要是指所设想的用于解决问题的具体办法. “猜想”是一种比“假设”更高层次的科学思维, 它表现了研究者的想像力, 因而更能体现科学研究的创造性. “猜想”一经实践或实验证实, 就可能成为一种原创性的科学理论.

2.1 Horton 产流理论的创立

1935 年, Horton 发表了著名论文《地表径流现象》^[7], 文中提出了一个“猜想”: 从降雨落到地面到产生径流, 将经历着两次再分配作用. 其一为地面的“筛子”作用. 由于包气带由多孔介质组成, 故地表像一面“筛子”, 其筛孔大小用地面下渗能力 f_p 表示. 当降雨强度 i 小于 f_p 时, 地面实际出现的下渗率为 $f = i$, 而地面径流率为 $r = 0$; 当 $i = f_p$ 时, 则 $f = f_p$, $r = 0$; 当 $i > f_p$ 时, 则 $f = f_p$, $r = i - f_p$. 这就是说, 降雨经过地表这面“筛子”的作用就分成下渗水量和地面径流量两部分. 其二为包气带的“门槛”作用. 按 f 在降雨历时 T 内下渗到包气带中的水量 $I = \int_0^T f dt$, 还将经历第二次分配, 其中一部分提供给包气带的蒸散发量 E , 余下的还要补充给包气带的缺水量 D (D 为包气带田间持水量 W_f 与其初始含水量 W_0 之差). 如果 $I - E \leq D$, 即包气带没“蓄满”或刚好“蓄满”, 则不产生地下径流; 如果 $I - E > D$, 即包气带“蓄满”且有余水, 则产生地下径流. 从产生地下径流的角度看, 包气带田间持水量 W_f 则起着一个“门槛”作用. 根据这一“猜想”, Horton 认为均质包气带的产流机制取决于 i 与 f_p 的对比关系和 $(I - E)$ 与 D 的对比关系. 这一“猜想”后来得到了许多水文观测和实验资料的证实, 上述 Horton 关于均匀包气带产流机制的“猜想”已成为极具影响力的产流理论, 即后人所称的 Horton 产流理论. 该理论对现行实用的降雨产流计算方法的形成起到了十分关键的作用.

2.2 流域汇流机理的揭示

流域汇流是一种比河道洪水运动更为复杂的水流运动. 从 1921 年 Ross^[8] 提出面积-时间曲线到 1979 ~ 1980 年间 Rodriguez-Iturbe^[9] 和 Gupta 等^[3] 提出的地貌瞬时单位线理论, 人们关于流域汇流机理的探索实际上都使用了水体可看作由大量水滴组成的这一“猜想”. 由于降雨注入到流域中是呈散布状的, 所以同时刻降落到流域上的雨水水滴将散布在流域的各处. 这样就可以猜想每个水滴不仅到达流域出口断面的路径及其长度不同, 而且运动速度也各异, 因此, 只有能在某一时刻到达流域出口断面的水滴才能组成该时刻流域出口断面的流量; 或者说, 各水滴流速虽相同, 但由于到流域出口断面的距离不等, 故水滴即使是同时注入流域的, 它们也不可能在同一时刻到达流域出口断面. 当然也有这样的情况, 有些水滴虽然它们到流域出口断面的距离相同, 但由于速度不同, 这些水滴即使是同时注入流域的, 也不可能在同一时刻到达流域出口断面. 基于前一种解释, Rodriguez-Iturbe^[9] 和 Gupta 等^[3] 借助统计物理学的理论和方法证明: 当各水滴之间存在弱相互作用时, 流域瞬时单位线 $u(t)$ 即为水滴流达流域出口断面时间的概率密度函数 $f_B(t)$, 即

$$u(t) = f_B(t) \quad (3)$$

基于后一种理解, Rinaldo^[10] 得出了流域汇流是地貌扩散和水动力扩散共同作用所引起的结论. 若地貌扩散和水动力扩散作用分别用 $u_g(t)$ 和 $u_h(t)$ 表示, 且两者之间互为独立, 则流域瞬时单位线 $u(t)$ 又可表达为

$$u(t) = u_g(t) * u_h(t) \quad (4)$$

式中: “*” 号表示卷积运算. 在这里, 地貌扩散作用是由水滴路径及其长度不同而引起的, 水动力扩散作用则是由于水滴流速空间分布不均匀引起的. 上述关于流域汇流机理的“猜想”的正确性已被许多实际资料证实, 而且已经预示^[3], 建立在这种“猜想”基础上的流域汇流理论, 将能为人们进一步揭示流域汇流系统的线性或非线性特性提供有力的工具.

3 “推理”与创新

如果说“猜想”是由“因”求“果”的话, 那么“推理”的科学思维方式则主要是根据所获得的“结果”, 反过来推测其“成因”. 这是科学研究中比较直观的一种思维方法.

3.1 径流的组成成分问题

水文学家在对所观测到的大量的洪水过程线的消退部分即退水曲线的形状进行考察时发现, 该曲线并非为处处连续可微的光滑曲线, 它常常呈现出

一个或多个转折点.如果将退水曲线绘在单对数纸或双对数纸上,则得到的通常不是单一直线或光滑曲线,而是一条带有一个或多个转折点的折线.由于这种折线的不同坡度代表了不同的退水速度,因此,由一个或多个转折点组成的折线显然可以“推理”出洪水过程线应当是由具有不同速度的径流成分组成的,其中退水最快的一般为地面径流,而最慢的一般为地下水径流,壤中水径流的退水速度则在两者之间.这一“推理”结果已得到了许多实验的证实,其中国外部分可参见《Hillslope Hydrology》^[11]一书,国内部分可参见浙江省姜湾径流试验站、水利部南京水文水资源研究所滁县径流试验站和安徽省五道沟水文实验室的分析报告.这一“推理”也完全符合迄今为止人们所建立的产流理论.在实用上,这一“推理”的合理性还促使人们创立了按径流成分进行流域汇流计算的概念,这无疑是有利于提高流域汇流计算精度的.

3.2 蓄满产流计算方法的建立

20世纪60年代,赵人俊等^[12]在分析制作中国南方湿润地区的降雨径流相关图时发现:影响这些地区径流量的因素中最主要的因素是降雨量、初始流域蓄水量和雨期流域蒸发量,而与降雨强度几乎无关;当降雨量较小时,降雨-径流关系为曲线,表明径流系数是变化的,且小于1;当降雨量较大时,降雨-径流关系为直线,径流系数保持为常数,且为1;降雨-径流关系的曲线部分的点据比较散乱,且多偏于径流量大的方向,而在直线部分点据分布趋势则和线比较吻合.根据这样的观察结果,赵人俊等做了如下“推理”:在中国南方湿润地区,由于气候湿润,包气带含水量一般较小,一场降雨很容易使包气带达到田间持水量;另一方面,这些地区植被良好,表土疏松,地面下渗能力一般很大,出现降雨强度超过地面下渗能力的情况十分罕见.因此,在中国南方湿润地区,产流的主要机制是降雨量超过包气带含水量,这种产流机制必然表现为:当包气带含水量和雨期蒸散发量得到满足后,降雨量的增量必然等于产流量的增量,即径流系数等于1.此外,由于这种降雨-径流相关图是针对一个流域来制作的,而在一个流域上,包气带含水量并非处处相同,而是在空间上呈不均匀分布的,因此,即使降雨在流域上分布均匀,也不可能出现一旦开始产流就是全流域产流的情况,而必然是包气带含水量小的地方先产流,缺水量大的地方后产流.这就是说,随着降雨量的增加,产流面积将越来越大,当降雨量达到一定值时必然出现全流域产流.同样,径流系数也经历着一个由小于1增加到1的发展过程.所以,流域降雨-径流相

关图的曲线部分表示了局部流域产流的情况,而直线部分表示了全流域产流的情况.当然,降雨的空间分布一般也是不均匀的,如果考虑到这一点,则由于建立流域降雨-径流相关图时,降雨量采用流域平均值(显然这是一个空间均化值),而径流深采用实测径流量按全流域平均,故在流域降雨-径流相关图上就会出现两种不合理的情况:一是按流域平均降雨量应为不产流,而实际实测径流量则不为零;二是实际上只是局部产流,但却按全流域来求平均径流量.不难理解,这就是流域降雨-径流相关图点据散乱的主要原因.针对这一现象,赵人俊等^[13]提出了流域蓄水曲线的概念和按雨量站控制面积进行产流计算的方法.这样就可以避免以上两种不合理情况,进一步完善蓄满产流计算方法,提高了蓄满产流的计算精度,也为新安江流域水文模型的建立奠定了坚实基础.

4 “比拟”与创新

“比拟”俗称“比喻”,就是使用一些看上去与所研究的问题无本质联系的概念和方法,来处理人们所面临的问题.当所研究的问题比较抽象时,“比拟”方法可以给人以比较直观的感觉.

4.1 概念性汇流模型问题

这里所讨论的“汇流”包括河道汇流和流域汇流.如果对比一下无区间入流河段上、下断面的洪水过程线,或流域净雨过程线与流域出口断面洪水过程线,则不难发现:河段下断面洪水过程线或流域出口断面洪水过程线上同位相的流量将滞后于河段上断面洪水过程线或流域净雨过程线;河段下断面的洪峰或流域出口断面洪水过程线峰值通常小于河段上断面的洪峰或流域净雨过程线峰值,而且过程线形状也会发生变形.前一个现象称为“推移”作用;后一个现象称为“坦化”作用.这就是说,河段下断面洪水过程线可看作是河段上断面洪水过程线经由河段的推移和坦化作用演变而来的,而流域出口断面洪水过程线可看作是流域净雨过程线经由流域的推移和坦化作用演变而来的.水文学家的研究表明,这种“推移”作用可用“渠道”来比拟,而“坦化”作用则可用“水库”来比拟.无论是“渠道”还是“水库”,又都有线性和非线性之分.采用若干个大小不等的“渠道”和“水库”,按串联、并联或混联的组合方式,就可以构成一个可用于模拟河段或流域汇流过程的模型.“渠道”和“水库”称为概念性元素,由它们组成的汇流模型称为概念性汇流模型.现在,概念性汇流模型已成为汇流计算中重要的一类方法^[14],它以使用简便、对资料要求不高、适用性强而受到水文工作者的青睐,有些概念性模型还找到了相应的理论上的解

释,如线性水库串联模型在河道汇流中就是特征河长连续演算;线性水库并联模型则与地下水汇流的动力学解析解十分一致等。

4.2 三水源新安江流域水文模型的水源划分问题

按《Hillslope Hydrology》^[11]一书所提出的产流机制,湿润地区分层包气带产生的总径流一般由饱和和地面径流、壤中水径流和地下水径流等三种径流成分组成。“山坡水文学”产流机制是 Horton 产流理论的新发展。如何将这三种水源区分出来,是新安江流域水文模型必须处理的一项重要工作。赵人俊^[15]认为,可将湿润地区的产流比拟为蓄水体出流,利用一个具有有限容积和侧孔、底孔的蓄水体就可以比拟饱和和地面径流、壤中水径流和地下水径流等三水源的生成。当蓄水体的蓄量超过其有限容积时,超过部分的水量将从蓄水体顶部溢出,成为饱和和地面径流;而从底孔流出的为地下水径流,从侧孔流出的为壤中水径流。实践证明,应用这种新方法划分三水源显然提高了新安江流域水文模型的模拟和预测精度,其合理性是毋庸置疑的。

5 “综合”与创新

“综合”属于一种统计研究方法。人们探索自然规律总是从感性开始,即从观察现象、量测数据开始,而从大量的观测数据中寻找规律性最易使用的方法通常就是“综合”方法。通过对大量观测数据的综合分析,就可确定主要的影响因素,建立研究变量与其影响因素之间的经验关系,如经验公式、相关图等。

5.1 综合单位线的提出

确定 Sherman 单位线必须具备足够多的实测降雨和径流资料。为了解决缺乏实测降雨、径流资料情况下流域的 Sherman 单位线的推求问题,早在 20 世纪 30 年代, Snyder^[16]通过大量资料的分析,发现单位线的形状与降雨特性和流域地形地貌特征有关。因此,他提出可以根据若干有资料流域分析出的单位线,建立单位线要素如峰值、峰值滞时、单位线底长等与降雨强度、流域面积、干流河长、流域坡度、河网密度等影响因素之间的经验关系,然后移用到有关的无资料流域。这种经验关系可用公式形式表示,也可用相关图形式表示。综合单位线在许多情况下能成功地应用增强了人们从机理上探求流域汇流与降雨特性和流域地形地貌特征之间理论关系的信心。1979 年, Rodriguez-Iturbe 等^[9]所建立的地貌瞬时单位线理论就是受到了综合单位线思想的启迪的。

5.2 Horton 下渗公式的建立

通过供水充分条件下的下渗试验可以得到一组表达下渗能力与时间关系的试验数据。1933 年, Horton^[17]根据这样的数据,通过“综合”提出了以下下渗公式:

$$f_p = f_0 + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (5)$$

式中: f_p 为下渗容量; f_0 为初始下渗能力,相当于土壤含水量为零时的下渗能力; f_c 为稳定下渗率; k 为经验参数。Horton 下渗公式的提出与 Sherman 单位线一样,也是水文学发展史上一个代表性事件。在世界上许多地方,式(5)都有较好的适用性,这就促使人们去寻找其理论根源。事实上,现在已经证明,式(5)是垂向一维 Richards 方程式^[18]的一种解析解,而垂向一维 Richards 方程是一种描写下渗物理过程的数学物理方程。“综合”所获得的结论一般只具有经验性,但也有可能揭示出现象的规律性来,上述关于 Horton 下渗公式就是垂向一维 Richards 方程的解析解即为一例。

6 “实验”与创新——非饱和产流机制的揭示

在自然科学研究中,“实验”是最基础的研究方法。广义的水文实验包括在流域上布设站网进行水文观测、代表性流域和实验性流域实验,以及室内实验室实验等。这里仅涉及代表性流域和实验性流域实验,以及实验室实验两种实验研究方法。

按 Horton 产流理论,只有当包气带含水量达到田间持水量时才具备产生地下水径流的条件。这种理论的适用性如何?自然界是否存在其他的产生地下水径流的机制?为此, Hewlett 和 Zaslauskys 分别于 1963 年和 1970 年在室内和野外进行了水文实验。Hewlett^[19]在实验室内取一长 13.71 m,宽和高均为 0.9144 m 的倾斜水泥槽,槽中充填均质沙土,利用人工降雨灌水至槽中土壤含水量达到田间持水量,然后在槽的顶部加盖塑料膜,以防止蒸发,并在槽的坡脚处观测槽内出流情况,结果表明,在 150 d 内可明显地观测到槽内有水排出。Zaslauskys^[20]在野外选一边长为 21.33 m 的正方形实验区,区内土质均一,地下无不透水隔板。试验时用人工降雨器保持降雨空间分布均匀,并将降雨强度控制在不发生地面径流现象的程度。雨止后 10 d 发现区内 0.2 m 和 0.4 m 土深处的土壤水量与地形的曲率有密切的关系,地形凹处的土壤水量明显大于凸处。这两个实验的一致结论是存在非饱和产流机制,它是一种 Horton 产流理论不能解释的地下水或壤中水径流形成机制。Hewlett 甚至断言:“陡峻流域土层中的非饱和流是维持河流中基流的主要机制”,不过在自然条件下,由于蒸散发不可避免,该断言的科学性就值得进一步讨论了。

参考文献:

- [1] Sherman L K. Stream flow from rainfall by the unit graph method [J]. Engineering News-Record, 1932, 108: 501 ~ 505.
- [2] Dooge J C I. Linear theory of hydrologic systems [M]. Washington D C: Department of Agriculture, Agricultural Research Ser-

vice, 1973.

- [3] Gupta V K, Waymire E, Wang C T. A representation of IUH from geomorphology[J]. Water Resources Research, 1980, 16(5): 855 ~ 862.
- [4] McCarthy G T. The unit hydrograph and flood routing[R]. Presented at Conf North Atl Div U S Crops Eng, 1938.
- [5] Cunge J A. On the subject of a flood propagation method(Mask- ingum Method)[J]. J of Hydraul Res, 1967, 7(2): 205 ~ 230.
- [6] 芮孝芳. Muskingum 法及其分段连续演算的若干理论探讨[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 682 ~ 688.
- [7] Horton R E. Surface runoff phenomena, part I: analysis of the hydrograph[M]. Voorheesville: Publication 101 Horton Hydro- logical Laboratory, 1935.
- [8] Ross C N. The calculation of flood discharges by a time contour plan[J]. Transactions of the Institution of Engineer(Australia), 1921(2): 85.
- [9] Rodriguez-Iturbe I, Valdes J B. The geomorphological structure of hydrologic response[J]. Water Resources Research, 1979, 15(5): 1409 ~ 1420.
- [10] Rinaldo A, Marani A, Rigon R. Geomorphological dispersion [J]. Water Resources Research, 1991, 27(4): 513 ~ 525.
- [11] Kirkby M J. Millslope hydrology[M]. New York: John Wiley &

Sons, 1978.

- [12] 赵人俊, 庄一岭. 降雨径流关系的区域规律[J]. 华东水利学院学报(现为《河海大学学报(自然科学版)》), 1963(1): 52 ~ 58.
- [13] 华东水利学院. 中国湿润地区洪水预报方法[M]. 北京: 水利出版社, 1978.
- [14] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [15] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [16] Snyder F F. Synthetic unit-graphs[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1938(19): 447 ~ 454.
- [17] Horton R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1933(14): 446 ~ 460.
- [18] 希勒尔 D. 土壤和水[M]. 华孟等译. 北京: 农业出版社, 1981.
- [19] Hewlett J D, Hibbert A R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage[J]. J of Geophysical Research, 1963, 68(4): 1081 ~ 1087.
- [20] Zaslavsky D, Sinai G. Surface hydrology[J]. J of the Hy- draulics Division, 1981, 107(HY1): 1 ~ 93.

(收稿日期: 2002-10-09 编辑: 熊水斌)

(上接第 38 页)

为了保证导流洞一期混凝土与孔板洞改建二期混凝土之间的结合, 在导流洞施工期间在一期混凝土中预埋了钢筋连接螺栓套, 这样改建部分的钢筋安装可以通过螺栓套与导流洞钢筋连接, 不需要焊接, 减小了混凝土凿除的深度, 缩短了工期。

施工中首先用气镐和小型液压锤凿除需要改建部位的混凝土, 凿除深度一般为 20 ~ 90 cm, 由于导流洞混凝土为 70 MPa 高标号混凝土, 因此凿除工作非常困难, 特别是顶板部位液压锤无法作业, 全部用人工凿除, 凿除工作大约占中闸室改建时间的 1/3。

钢筋、模板的安装、调整主要依靠中闸室启闭机房提前安装的桥机和 50 t 吊车配合完成, 一个用 DOKA 支柱标准制造的工作平台锚固安装在边墙上, 以便进行顶拱的钢筋、模板安装并支撑顶拱浇筑过程中的混凝土。除了在浇筑顶拱混凝土的过程中, 该平台下面的通道应该是可以使用的, 二期改建混凝土为 70 MPa 高标号混凝土, 一、二期混凝土的接缝均预埋有接缝灌浆管。

中闸室改建中土建、金结安装相互交叉, 且精度要求高, 所以施工中要求有精确的测量控制点, 先进的观测仪器, 测量人员必须随时辅助施工。

2.5 缺陷处理

由于采用的 70 MPa 高标号混凝土, 水泥用量大, 水化热高, 为了防止混凝土出现温度裂缝, 虽然

采取了一些相应的措施, 如加粉煤灰(9 kg/m^3), 骨料冷却 5 度 ~ 9 度, 加冰($40 \sim 50\text{ kg/m}^3$)拌和、混凝土浇筑后洒水养护等, 但还是不可避免地出现了少量的混凝土裂缝。处理这些混凝土裂缝的方法是首先用 Sika731 环氧砂浆封闭裂缝表面, 然后沿裂缝两边相距 30 cm 钻灌浆孔, 孔径 $\varnothing 20\text{ mm}$, 间距 1 ~ 1.2 m, 孔深 65 ~ 75 cm, 倾角 60° , 灌注 Sika752 环氧树脂。对于个别渗水裂缝灌注超细水泥或聚氨酯, 超细水泥 28 d 抗压强度 60 MPa, 聚氨酯粘结强度 2.4 MPa, Sika752 环氧树脂 14 d 抗压强度 60 ~ 70 MPa, 灌浆压力 4 MPa。

3 结 语

小浪底水利枢纽孔板泄洪洞改建工程于 2000 年 6 月完工, 为了检验孔板洞的实际效果和运行工况, 在汛期进行了两次过流试验, 过流后根据观测成果表明, 孔板环没有异常的变形, 压力段内时均压强和脉动压力值均在设计指标范围内, 说明孔板洞的改建达到了预期的效果。孔板洞改建的实施, 不仅解决了枢纽泄洪所遇到的高水头、高流速问题, 而且对于今后在高土石坝施工中如何合理地重复利用施工导流洞提供了值得借鉴的经验。

本文承蒙黄委设计院教授级高级工程师潘家铨先生的大力指导, 在此表示衷心的感谢。

(收稿日期: 2002-05-20 编辑: 张志琴)