



UNLINED TUNNEL HYDRAULICS

衬砌隧洞中的水力学问题

[挪威] Øivind Solvik 著 曾兼权 编译

成都科技大学出版社

975022

不衬砌隧洞中的水力学问题

[挪威] Øivind Solvik 著

(挪威 SINTEF 研究院水力技术试验室)

曾兼权 编译

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑 宗 年

封面设计 光 光

不衬砌隧洞中的水力学问题

[挪威] Øivind Solvik 著

曾兼权 编译

成都科技大学出版社出版、发行

四川省新华书店 经销

成都市金川彩印厂 印刷

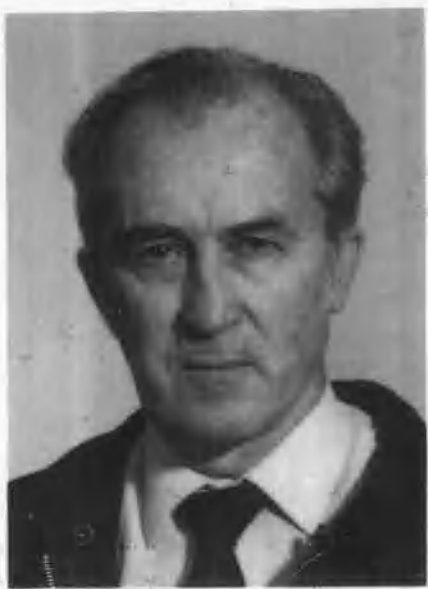
787×1092 毫米 1/32 印张:1.875

1994 年 8 月第一版 1994 年 8 月第一次印刷

印数:1-2000 字数:40.0 千字

ISBN7-5616-2889-7/TV · 24

定价:2.80 元



Arvid Solvik

Øivind Solvik 简历

Øivind Solvik, 挪威 SINTEF 研究院水力技术试验室高级研究工程师, 1951 年毕业于挪威技术大学特隆汉姆分校。在挪威和其它国家从事水电建设工作四十余年。当过六年顾问工程师, 负责 Sira Kvina 水电站设计五年。后在 SINTEF 国家水力试验室作水电研究工作三十余年, 专长为不衬砌隧洞水力学、脉动压力和溢洪道, 大坝安全和水下隧道爆破等。

Sohiho (Solvik) 方法简介

这是用于分析不衬砌隧洞糙度的方法, 至少有以下用途:

- 1) 复核已建的不衬砌隧洞的综合糙率。
- 2) 复核不衬砌隧洞的糙度并由此评定开挖质量。这就提供了一个在施工过程中校正和改进开挖质量的方法。
- 3) 可作为承包商签约的一部份, 以便根据开挖质量高于或低于预估水平进行奖励或惩罚。

译者序

挪威的水利水电建设有许多成功的经验,其中,大量地采用不衬砌的压力水道技术可以说是独具特色。这一技术为该国的水利水电建设节约了大量投资,并对加快该国的水利水电建设起到了极为重要的作用。

笔者在访问挪威期间,有幸与挪威国家水力技术实验室的高级研究工程师 Øivind Solvik 先生在同一幢楼内办公,蒙他主动送来多篇论文供我学习,这些论文是:

Unlined Tunnel Hydraulics,

Unlined Tunnel Problems.

Asphalt Flooring in Water Tunnels,

Roughness and Roughness Analysis of Unlined Blasted and TBM-Bored Hydro-power Tunnels in Norway,

Friction Factors in Unlined Tunnels (Presentation of a roughness analysis method based on area variations).

这些论文的最大特点是,数据皆从数十年来挪威已建的不衬砌隧洞的现场试验获得,并经过科学方法整理分析得出计算公式或方法,其可信程度自非一般闭门造车的数字游戏可比。其中对不同的施工方法的影响也作了分析,这一点对我国特别有用。各地各单位的科技工作者可以根据自己的实际情况加以选用。

为了把这套计算方法介绍给我国工程界、学校和科研单

位,并便于读者阅读.译者把上述各篇论文译出之后,删去了若干重复的内容,参考了一些有关资料作了少量必要的补充,纠正了某些明显的笔误,并按照中国人的习惯编排章节。

在这本小册子编译完成之后,经 Øivind Solvik 先生派人审定认可,并同意在中国用中文出版。

曾兼权

一九九三·十二

前 言

挪威地处北欧北部,部分领土在北极圈内,领土面积不超过 40 万平方公里,人口总数约 420 万。这样一个处于地球边陲的小国,其水电建设成就却令人刮目相看,据 1983 年统计,其人均用电量已达二万五千度以上,世界排名雄居榜首。

该国水电建设能够取得如此辉煌的成就,应首先归功于其得天独厚的自然条件。即地质年代老(主要系寒武纪地层),地质构造相对稳定,岩体完整坚硬,节理裂隙不发育,岩石的物理力学指标高,且地震烈度不大,表层土薄同时气候温和(冬季平均温度为零下 3℃,夏季平均温度为 15℃),雨量丰沛(年平均降雨量为 1415 毫米),蒸发量小(只有降雨量的 15% 左右),故迳流量大,河道年内流量分配均匀,最大最小之比一般仅为 10~20,全国多年平均迳流量约为 3830 亿立方米;水力发电资源十分丰富,总蕴藏量约为 3800 万千瓦,1720 亿度。加之高原湖泊众多,开发方式以高水头引水式电站为主。常利用高原湖泊加筑一些不太高的坝作为水库,再用长隧洞将其连通,形成水库群,使电站的调节能力和水量利用程度大为提高,然后在河流出海口附近选择地质条件良好的厂址建造地下厂房,其利用水头一般在 300~1100 米之间。

其次是该国水电开发的历史较长,水电技术在工程实践中不断得以发展和运用,使工程成本不断降低,建设速度不断加快,现在挪威修建一座水头超过 400 米、装机 100 万千瓦的

水电站,单位千瓦的造价只有欧洲其他国家常规造价的 $1/7 \sim 1/10$,且土建部分的投资一般仅占总投资的 $30\% \sim 40\%$,与火电相比优势十分明显,故水电开发在挪威电力系统中占绝对的优势。以 1984 年为例,全国电力系统总装机为 2301.4 万千瓦,其中 99.8% 为水电。在挪威水电发展的势头迅猛,一直持续到 80 年代末,因用电需求增长速度降低,才减缓下来(见表 1)。

挪威水电装机及发电量增长情况 表 1

年代	水电总装机 (万千瓦)	发电量 (亿度)	人均电量
1946	220.0	131	
1950	299.6	169	
1955	409.5	226	
1960	644.3	311	
1965	978.3	488	
1970	1278.3	573	
1975	1676.6	774	17956
1979	2000.0	840	20228
1983	2005.0	1062	25500

挪威水电建设成本如此之低,与其地下洞室包括压力水道绝大多数不作衬砌,从而节约大量的投资有很大的关系。在挪威修建不衬砌压力水道有很长的历史。早在 1919 年就建成了 Herlandsfoss 压力隧洞,在 1920~1921 年又修建了三条(即 Skar, Svelgen 和 Toklev)压力水道,其中前两条发生水力劈裂、第三条漏水。但他们正确地吸取了经验教训,使设计不

衬砌压力水道的理论不断提高。此后病害工程所占比重逐渐减小,说明技术不断发展进步。

挪威在当时修建不衬砌隧洞是因为 20 年代初正值第一次世界大战之后,钢材极端匮乏,不得已而为之。其中 Skar 隧洞完全失败,其余三条取得成功或部份成功。从 50 年代末期开始,挪威大规模地建造不衬砌压力水道。在 1958~1969 年间,共建造了 21 条,平均静水压力为 233 米,投入运行后发现问题需要处理的四条,占总数的 19%;1970~1979 年间,共建造了 35 条,平均静水压力为 291 米,投入运行后发现问题需要处理的有三条,占总数 8.57%;1980~1983 年间又建了 16 条,平均静水压力为 372 米,运行后没有发现需要处理的重大问题。从以上统计可以看出,在这段时期内建造的不衬砌压力水道逐年增加,平均静水压头亦在逐渐提高,出现的病害却越来越少,说明不衬砌隧洞技术日臻成熟,值得借鉴和研究。

挪威的水电隧洞总长度已接近 3000 公里,一个公司每年可开挖隧洞 40 公里以上。目前,挪威已修建的容积最大的地下硐室尺寸为 18 米宽,33 米高,500 米长,地下厂房最大跨度为 20 米,最大隧洞断面面积为 370 平方米,最长的隧洞为 32 公里,隧洞进尺每周(15 个班)可达 150 米。

挪威的水电工程技术人员很注意利用其地质条件良好的这一优势,95% 以上的发电隧洞是不衬砌的,仅在局部地质上有缺陷的地段,如断层带、裂隙带和软弱带等地段才采用岩石锚杆、喷混凝土或灌浆等措施来加固围岩,很少采用混凝土或钢筋混凝土的全断面衬砌。

一条输水隧洞究竟是衬砌或是不衬砌更为经济,涉及到影响工程经济的诸多因素,不可一概而论。但如果水流速度不

是很高,岩石不太差不需要对围岩进行大量的处理,或不衬砌也能保证安全时,对隧洞不加衬砌通常是比较经济的,运行也是安全可靠的。这一点已被七十余年来在挪威、瑞典、澳大利亚,美国和芬兰等国家所修建的大批水电工程和积累的经验所证明。

当然,不衬砌隧洞中的小块岩石坠落可能会导致水轮机的磨损和压力管道的擦伤,这的确需要增加检查工作量,特别是在建成后的最初几年。挪威工程师认为,允许围岩有少量掉块,是保证降低水电工程造价所必需的,也是一种技术进步。只要在隧洞末端设置一个集石坑,小的掉块将随水流带至集石坑内,在检查时予以清除即可,不会发生什么严重的问题。80年代以后,挪威发展了一种新型的集石坑,几乎可以捕捉到全部的输移物质,对水轮机有很好的保护作用。

目 录

前言

第一章	不衬砌输水隧洞的水头损失.....	1
一	沿程水头损失.....	1
二	输水隧洞的综合糙率.....	6
三	局部水头损失.....	9
第二章	水力发电隧洞的经济直径与糙率控制	14
一	经济直径的确定	14
二	糙率控制方法——Solvik 方法	16
三	影响糙率的其它因素	27
四	理想的超挖面积	28
第三章	不衬砌输水隧洞的底板处理	31
一	底板处理的几种标准	31
二	不同处理方法的水头损失	32
三	沥青混凝土底板的厚度与构造	34
四	集石坑(砂井)设计	40
五	尾水隧洞	42
第四章	用全断面掘进机开挖的隧洞	44
一	TBM 隧洞中的糙率	44
二	掉块对 TBM 隧洞综合糙率的影响	45

第一章 不衬砌隧洞的水头损失

在围岩的稳定可以确保的条件下,采用不衬砌隧洞无疑是可以节约投资的,但是如果洞径不变,则多半会导致水头损失增加.这就为动能经济计算提出了一个课题,即在投资——效益分析计算中,如何预先定出不衬砌隧洞的粗糙度,怎样在隧洞竣工过水之前知道该隧洞的粗糙度,以及如何控制正在施工中的隧洞粗糙度?

在对几十年已建水力发电隧洞进行实测和分析研究之后,Øivind Solvik 提出了自己的方法,经过几年的工程实践证明,作者的方法是有前途的,可行的。

一 沿程水头损失计算

1 常用的隧洞断面

最常用的隧洞断面为圆形和直墙马蹄形。由于地下硐室稳定性的要求,隧洞的顶部通常呈圆弧形,而洞底为平底或近于平底,以节约隧洞爆破和清碴的工作量,同时也便于运输工具行驶。为此,许多承包单位宁可优先选用直墙马蹄形(城门洞形)。采用圆形或近似圆形,虽在水力学方面为水力最佳断面,但常难以抵偿由此而引起的因开挖更加复杂造成的费用增加。在已建的不衬砌隧洞中,绝大多数是采用的直墙马蹄形或略加修改后的马蹄形断面。但如果采用的是全断面掘进机

(TBM)开挖隧洞时,则通常采用圆形断面。

当采用直墙马蹄形断面时,其尺寸通常与施工方法、承包单位的设备型号(如卡车、通风设备)和布置有关。在一般的情况下,其最可取的水力断面形状即相应于最小水头损失的最大水力半径断面,为隧洞的底宽与高度相等的断面。见图 1。

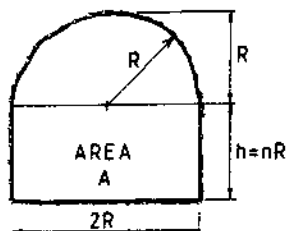


图 1 优化的隧洞横断面形状

其证明如下:

$$(1) \quad A = \frac{1}{2}\pi R^2 + 2nR^2 \quad (\text{面积})$$

$$(2) \quad P = \pi R + (2n+2)R \quad (\text{湿周})$$

$$(3) \quad R_h = \frac{A}{P} = \frac{\frac{1}{2}\pi + 2n}{\pi + 2n + 2} R \quad (\text{水力半径})$$

(4) 将(1)式用 R 表示并代入(3)式

$$R = \sqrt{\frac{A}{\frac{1}{2}\pi + 2n}}$$

得

$$R_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}\pi + 2n}}{\pi + 2n + 2} \sqrt{A}$$

(5) 求 R_h 的极值

$$\frac{dR_h}{dn} = 0$$

解得

$$n = 1$$

由此得出优化的隧洞横截面形状如图 1。

2 计算公式的选用

众所周知的曼宁(Manning)公式一直广泛地应用于不衬砌输水隧洞的水头损失计算,应该指出的是,达西—伊兹巴斯(Darcy-Weisbach)公式才是计算总水头损失的普遍公式,而曼宁公式只能在一定糙率范围内近似地替代普遍公式,而不宜超出这一范围。因为曼宁糙率系数和绝对糙率之间并不能总是保持良好的关系。此两公式的表达式如下所示:

达西—伊兹巴斯公式

$$h_L = f \cdot \frac{L}{4R_h} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

式中:阻力系数 f 由尼库拉兹经验公式计

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(3.72 \frac{R_h}{ds})$$

或

$$f = \frac{1}{[2 \log(3.72 \frac{4R_h}{ds})]^2}$$

曼宁公式

$$h_L = \frac{V^2 L}{M^2 R_h^{4/3}}$$

其中 $M = \frac{25.4}{ds^{1/6}} \quad (M = \frac{1}{n})$

式中:

L ——隧洞长度(米)

V ——平均流速(米/秒)

R_h ——水力半径(米)

g ——重力加速度(米/秒²)

f ——摩阻系数或达西阻力系数

ds ——当量粗糙度或砂粒糙度(米)

$M = \frac{1}{n}$ ——曼宁糙率系数(米^{1/3}/秒)

n ——隧洞糙率

图2示出了用简单的指数方程表示的曼宁公式,如何替代用较为复杂的对数方程表示的达西公式的过程。

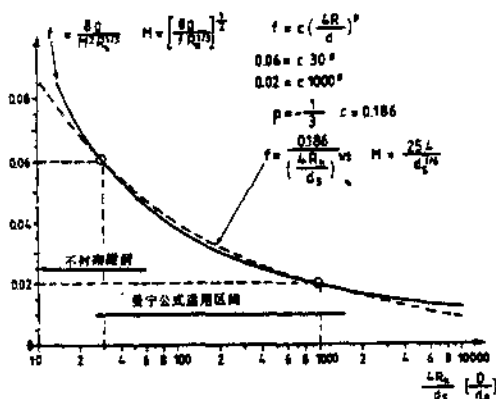


图2 曼宁公式与达西公式比较

由图2可以看出,曼宁公式并非是对达西公式在改进意义上的替代,恰好相反,它更为粗糙。因此,在运用它时,要注意限定的糙率范围,否则会导致较大的误差。如果提交设计采用的糙率系数是绝对糙率且又超出了应用曼宁公式的允许区间,则计算出的水头损失也就不会正确。不过,如果提交设计的糙率资料是由水头损失量测值推算得出的曼宁糙率系数,则设计人员可以安全地应用它们和曼宁公式去计算可能的的水头损失。

在现代袖珍计算器问世之前的许多年,曼宁公式已在许多国家流行,对当时常用的计算工具而言,它是一个很适用的公式。现在由于常用的计算工具已经改进,用袖珍计算器计算达西公式已无困难,但考虑到为了便于交流以及与过去的工程实践资料相对照,我们只能逐步地过渡到完全采用达西公式。在此之前保持对曼宁公式的理解也还是必要的。

3 摩阻系数 f 和曼宁糙率系数 M

在不衬砌的输水隧洞中,摩阻损失与许多因素有关。在诸多的因素之中,岩石的质量(它与岩石的种类、断层破碎带、层理面等因素有关)和所采用的开挖方法,以及施工人员的训练水平等影响因素起重要作用。

图 3_a 及 3_b 中示出了在 1950~1970 年间,在挪威开挖出来的隧洞中,实测到的摩阻系数和曼宁糙率系数与隧道平均开挖断面的关系。

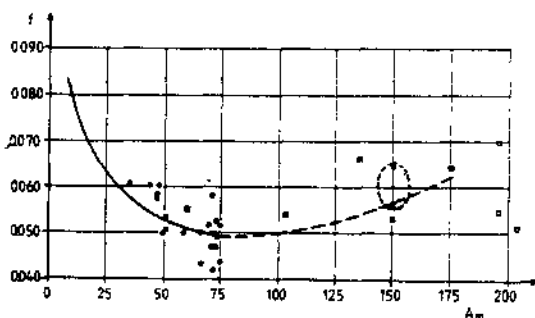


图 3a 1950~1970 年开挖的隧洞中实测的 $f \sim A_m$ 的关系