

不衬砌岩石隧洞摩阻特性的探讨

丁 灼 仪

(水工研究所)

摘 要 收集了国内外41个实际工程不衬砌隧洞的各种参数,包括糙率系数和摩阻系数的实测值等;分析研究了不衬砌岩石隧洞摩阻的各种影响因素;提供了以往5种不衬砌岩石隧洞摩阻的估算方法以及笔者根据试验数据获得的新的估算方法。经实际工程实测数据验证表明,该估算方法更符合实际,可供设计选用。

关键词 不衬砌隧洞 摩阻 糙率

0 引 言

国内外有许多水利水电工程的岩石隧洞,在地质条件允许的情况下,采用不衬砌或部分衬砌的型式。早在1895年,美国的Duch-Reach工程的引水隧洞即采用不衬砌隧洞并运行了60年,至1955年才被另一条隧洞所代替^[1]。又如在挪威,水头在50~70m的隧洞,一般均采用不衬砌或部分衬砌^[2]。我国亦有不少水利水电工程的岩石隧洞采用不衬砌型式(见表1)。

不衬砌隧洞省掉了洞内的混凝土浇筑,从而节约大量的水泥、钢材和木材并可缩短工期,既简化了施工又有较大的经济效益。但是,采用不衬砌隧洞,在设计中正确地估算其摩阻损失是至关重要的。例如,我国柘溪水电站不衬砌导流隧洞,在设计时采用曼宁糙率系数 $n=0.03$,但竣工后实测 $n=0.038$,比原设计采用值大27%,所以在隧洞运行后,不能满足渲泄设计流量的要求^[2]。

表1提供了国内外水利水电工程41个不衬砌隧洞实例的主要参数,可供设计参考。本文则着重研究不衬砌岩石隧洞的摩阻特性。首先综合分析了影响不衬砌岩石隧洞摩阻的诸因素,而后介绍了前人提出的5种估算不衬砌岩石隧洞摩阻的方法并根据影响因素分别对该5种方法进行初步评述。最后,笔者在考虑了多种影响不衬砌岩石隧洞摩阻的因素之后,根据有关试验资料,提出了一种新的估算方法,并引用流溪河工程不衬砌引水隧洞的原型观测数据进行验证,证明本文提出的估算方法更符合实际。

1 不衬砌岩石隧洞的糙率及其影响因素

1.1 通常计算隧洞沿程水头损失的公式

1.1.1 达西公式

$$h_f = f \frac{LV^2}{d2g} \quad (1)$$

式中: h_f 为沿程水头损失; f 为摩阻系数; V 为断面平均流速; L 为洞长; d 为洞径; g 为重力加速度。

1.1.2 谢才公式

$$h_f = \frac{L}{C^2 R} V^2 \quad (2)$$

式中: R 为水力半径; C 为谢才系数;根据曼宁公式 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$,其中 n 为曼宁糙率系数;其它符号含义同前。

根据(1),(2)式可得到摩阻系数 f 同曼宁糙率系数 n 的关系为

$$f = \frac{8g}{R^{1/3}} n^2 \quad (3)$$

1.1.3 普兰特-尼古拉池公式

适用于流动处于阻力平方区时:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \lg \left(3.71 \frac{d}{\Delta} \right) \quad (4)$$

式中 Δ 为洞壁绝对糙度(或称突起度)。

从式(3)可知, f 与 n^2 成正比,故在工程上也常用曼宁糙率系数 n 来描述隧洞的摩阻。

1.2 不衬砌岩石隧洞糙率的影响因素

对于采用混凝土衬砌的隧洞,其曼宁糙率系数

表 1 国内外一些不衬砌隧洞参数汇总

序号	国名	工程名称	隧洞用途	洞身岩石情况	隧洞总长度/m	不衬砌段主要参数			洞壁处理情况
						长度/m	糙率系数 n	摩阻系数 f	
1	中国	渔子溪一级	发电	花岗闪长岩	8 460	2 815	0.032 6		底部浇混凝土
2		流溪河	发电	中粒花岗岩	1 928	823	0.026 [*] 0.031 3	0.058	底部浇混凝土,部分喷浆
3		柘溪	导流	长石英砂岩	436	408	0.030 [*] 0.038	0.062	局部喷浆
4		刘家峡	导流	石英云母片岩	683	243	0.035 [*] 0.037		底板浇混凝土,其他喷浆
5		建溪	导流	花岗岩	489	344	0.030 [*]		局部喷浆及混凝土贴补
6		龙亭	发电	流纹岩	5 241	2 000	0.028 [*]		钢丝网喷浆
7	日本	佐久间电站 1 号洞	导流	花岗岩	779	360	0.035 [*]		局部喷浆
8		佐久间电站 2 号洞	导流	花岗岩	658	375	0.039 [*]		局部喷浆
9	澳大利亚	幼客门本内-土姆特	取水	花岗岩、变质沉积岩	22 200	15 894	0.033	0.054	底板铺平
10		土马-土姆特	取水	花岗岩	14 300	11 125	0.036	0.075	底板混凝土铺平
11	瑞典	阿尔福太		花岗片麻岩	3 025	3 025		0.086	无处理
12		比亚斯用		云母片麻岩	5 620	5 620		0.064	底板铺沥青
13		东雅		片麻岩	4 700	4 330		0.051	无处理
14		赫尔斯郎盖脱		花岗岩	2 430	2 430		0.052	无处理
15		雅尔帕斯托门		板岩	4 520	4 520		0.048	无处理
16		克斯克隆托门		长石花岗岩	2 196	2 196		0.048	无处理
17		波利尤斯 I		花岗片麻岩	1 194	1 194		0.072	无处理
18		波利尤斯 II		花岗片麻岩	1 032	1 032		0.055	无处理
19		虽尔斯福		花岗黑板岩	629	629		0.114	无处理
20		西尔		片麻岩	1 829	1 829		0.102	无处理
21	美国	塔森		片麻岩	6 698	6 698		0.081	无处理
22		尼萨斯罗门		花岗片麻岩	1 465	1 172		0.101	无处理
23		东加丁纳	发电	粗玄武岩	788	788	0.033 [*]		底部铲平
24		大古力(2)	发电	花岗岩		6 630	0.037		
25		大古力(3)	发电	花岗岩		8 580	0.035		
26		大古力(4)	发电	花岗岩		3 210	0.030		
27		大古力(8)	发电	花岗岩		976	0.038		
28		熊星	发电	花岗岩		1 380	0.038		
29		蒙诺	发电	花岗岩		1 200	0.043		
30		乌阿德上段	发电	花岗岩		6 060	0.038		
31	挪威	乌阿德支洞	发电	花岗岩		3 612	0.039		
32		乌阿德下段	发电	花岗岩		10 280	0.036		
33		曼摩斯-布尔	发电	花岗岩		11 990	0.029		
34		阿帕拉其亚	发电	花岗岩	9 000	1 830		0.093	
35		隆塞特						0.061	
36		托克						0.052	
37		东斯佐						0.065	
38		东斯佐多尔						0.060	喷浆
39		土萨						0.095	
40		朴梯阿斯基						0.081	
41	芬兰	西佛拉(1)						0.085	

注：(1)糙率系数 n 值中，带*者为设计值，其余为实测值；(2)摩阻系数 f 均为实测值。

n 值一般仅与洞壁糙度有关，而不衬砌隧洞的洞壁糙度是极不均匀的粗糙岩壁，故其曼宁糙率系数的影响因素是很复杂的。根据以往的研究成果^[3,4,5]，可归纳为如下 4 个因素：

(1) 洞壁绝对糙度 Δ 的大小。

(2) 开挖时，每次钻孔爆破所形成的“锯齿”

(或称波状纵剖面)形状和大小。

(3) 沿隧洞纵向,断面的形状和面积的大小变化(即超挖和欠挖)。

(4) 岩石本身表面糙度(结晶糙度)的大小。

从以上诸因素可知,不衬砌隧洞的 n 值,不仅同洞壁糙度有关,而且还同开挖技术有关。因此,各国在设计不衬砌隧洞时,均根据本国的实践经验及开挖技术等因素来估算 n 值^[2,6]。例如,我国柘溪水电站,在岩石较完整的地带,开挖后洞壁经过修整,则取 $n=0.03\sim0.032$;在节理裂隙发育地带,则取 $n=0.035\sim0.040$ 。瑞典通常取 $n=0.03\sim0.04$,挪威通常取 $n=0.025\sim0.030$,前苏联则取 $n=0.03\sim0.045$ 。

从表1中所列的资料可看出 n 值的变化幅度是很大的,最小者为0.029,最大者达0.043。所以,在设计中选取 n 值,虽可用类比法根据实际工程经验进行估计,但很难得到切实的、正确的结果。因此,必须根据上述诸影响因素去寻求较为切合实际、较为正确的估算方法。

2 以往估算不衬砌岩石隧洞摩阻的方法

2.1 A. M. Mazyp 建议的方法

Mazyp 认为可以用下式估算不衬砌岩石隧洞的曼宁糙率系数^[7]:

$$\frac{1}{n} = 19.8 \lg \left(\frac{9.5}{\Delta} \right) \quad (5)$$

式中符号含义同前。

根据式(5),Mazyp 建议的 n 值见表2。

表2 Mazyp 建议的 n 值

Δ/cm	15	25	42
n	0.028~0.03	0.03~0.035	0.035~0.04

由于不衬砌隧洞的 n 值并非仅取决于洞壁糙度 Δ ,况且其洞壁糙度是极不均匀的,所以也就无法取一个固定的 Δ 值来决定 n 值,这就使得式(5)及表2很难在实际中应用。

2.2 陶君裘建议的方法

陶君裘认为,对于大直径高流速的不衬砌隧洞,可取下式计算摩阻系数^[7]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\Delta}{3.7d} \right) \quad (6)$$

式中: Re 为雷诺数; d 为洞径; Δ 为洞壁糙度。

式(6)实际上是均匀粗糙管道或一般工业管道流动处于过渡区的摩阻系数计算公式,它是普兰特-尼古拉池糙管阻力平方区的摩阻系数公式和光管区摩阻系数公式的简单叠加。前苏联的柯里布鲁克-乌阿姆(Коллбрук-Уам)曾建议将式(6)做为计算粗糙管的过渡区和阻力平方区摩阻系数的通用公式^[8]。因此,将式(6)直接用于计算不衬砌隧洞的摩阻系数是不太合适的。

2.3 L. Rahm 的估算方法

Rahm 收集了瑞典的12个不衬砌隧洞摩阻系数的原型观测资料,然后找出与断面积变化的关系,从而得出计算摩阻系数的经验公式^[1]。其具体做法是:在隧洞开挖完工后,实测出若干个断面积,将每一个实测断面积与设计断面积的比值进行统计,求出其概率分布绘于概率纸上,然后用一直线来代替曲线,以取其正态概率分布。由此直线可得到断面积的相对变化率为

$$\delta = \frac{A_{99} - A_1}{A_1} \% \quad (7)$$

式中: A_{99} 为正态分布直线上,概率为99%的断面积; A_1 为正态分布直线上,概率为1%的断面积。

将每一个隧洞都按上述方法算出相对断面积变化率 δ 并测得它们的摩阻系数 f ,然后将每一组 δ , f 值绘于坐标纸上,可以近似地得到一条直线(见图1)。其方程为

$$f = 2.75 \times 10^{-3} \delta \quad (8)$$

式(8)即为 Rahm 建议的计算摩阻系数的经验公式。Rahm 的方法在瑞典已被应用。

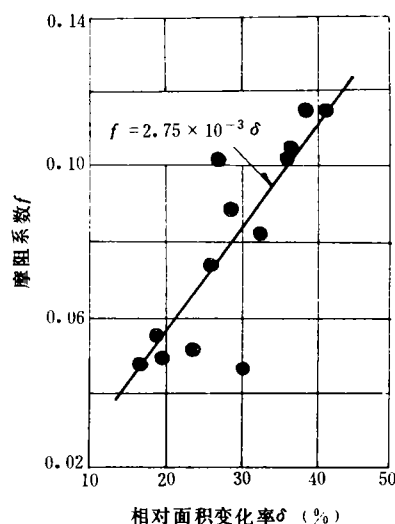


图1 摩阻系数 f 与相对断面积变化率 δ 的关系

从图1可看出,式(8)所代表的直线同实测点

密合得不好。实测点越多就会越分散,这是因为 δ 仅反映了隧洞的断面积变化,而未能全面地反映不衬砌隧洞的摩阻因素。此外, δ 值必须在隧洞开挖完成后经实测方能算出。所以,在设计阶段,无法用此法估算摩阻系数。

2.4 E. Reinius 建议的方法^[5]

Reinius 一方面进行了一些模型试验,获得一些资料(但他未能从试验结果得出估算摩阻系数的方法);另一方面,他收集了更多的原型观测资料,完全按照 Rahm 的方法整理成 $f \sim \delta$ 的关系曲线(图 2)。从图 2 可见,实测点很分散。Reinius 认为,实测点分散同开挖技术有关。于是,他建议按精细钻孔爆破和粗放钻孔爆破加以区别,并分别绘出两条直线(虚线),其方程分别为

精细钻孔爆破:

$$f = 0.03 + 0.85 \times 10^{-3} \delta \quad (9)$$

粗放钻孔爆破:

$$f = 0.01 + 2.7 \times 10^{-3} \delta \quad (10)$$

图 2 中另两条实线分别代表 Rahm 和 Priha 建议采用的方法。虽 Reinius 方法的两条虚线将所有实测点均包括在内,但因“精细”与“粗放”的标准很难确定,二者的 f 值又相差较大,故 Reinius 建议的方法在实际应用中仍有困难。

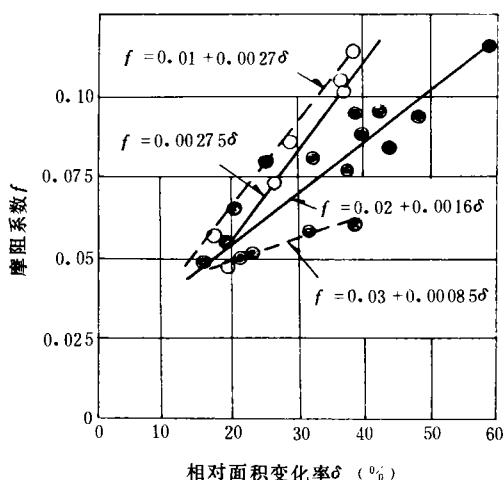


图 2 $f \sim \delta$ 关系曲线

2.5 周胜建议的估算方法

鉴于 Rahm 方法存在上述问题,周胜提出用糙率指数 K 来表示不衬砌隧洞的摩阻系数。糙率指数 K 按下式计算^[3]:

$$K = \frac{\Delta A}{A} \quad (11)$$

$$\Delta A = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (A - A_i)^2} \quad (12)$$

式中: A 为整个洞线实测断面积的算术平均值(一般每 5m 洞长量测一个断面); A_i 为对应于某一概率 i 的实测断面积; ΔA 为实测断面积变化的均方根。

周胜将所收集的 12 个原型观测资料及国内两个工程的观测资料按上法得出 $f \sim K$ 关系,如图 3 所示。将各测点近似地连成一条直线,其方程为

$$f = 0.015 + 1.2K \quad (13)$$

式中符号含义同前。

周胜的方法虽比 Rahm 方法有很大改善,但其基本出发点仍仅考虑摩阻同沿洞线断面积变化的关系。所以,同 Rahm 方法一样,当实测点增多时,就会偏离式(13)所表示的直线。此外, K 值也要在隧洞开挖完工后方能测得,故在设计阶段也难以用此法来估算摩阻系数。

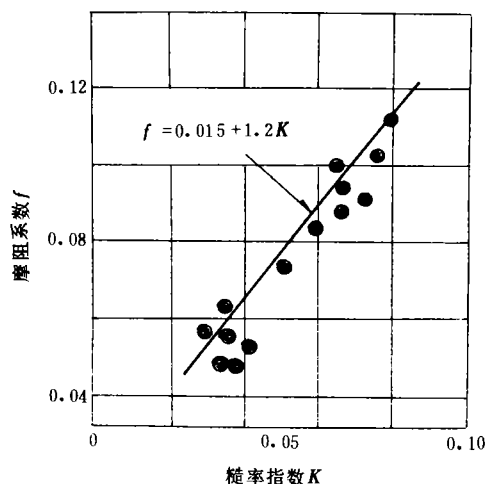


图 3 摩阻系数 f 与糙率指数 K 的关系

3 考虑多种影响因素的不衬砌岩石隧洞摩阻的估算方法

鉴于上述各个估算不衬砌隧洞摩阻的方法存在着各自的不足之处,笔者在 Reinius 较全面地考虑不衬砌隧洞摩阻影响因素的试验资料^[5]的基础上,探求一种新的摩阻系数的估算方法。

3.1 Reinius 的模型试验

Reinius 认为,隧洞开挖时,每钻孔爆破一次,洞壁便形成一个“锯齿”。精细钻孔时,“锯齿”高度一般为 0.2~0.3m,粗放钻孔时为 0.5m,每次钻孔深度为 3~5m。于是,沿整个洞线便形成一个所谓“波状纵剖面”,见图 4。

此外,过去的研究还表明,当掘进方向与水流

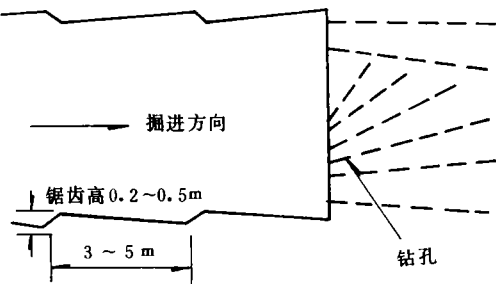


图 4 开挖锯齿示意图

方向一致时的摩阻系数要比方向相反时为大。现将掘进方向与水流方向一致时的摩阻称为正向摩阻，方向相反时的摩阻称为负向摩阻。据此，Reinius 做成如表 3 所示的 6 种模型以模拟不同的洞壁进行模型试验。其中 I，II，III，IV 型系模拟精细开挖的洞壁，V，VI 型的“锯齿”较高用以模拟粗放钻孔开挖洞壁。模型的开挖长度为 310mm，模型试验段长为 6m。

每一种洞壁模型均经不同雷诺数进行若干次试验，获得摩阻系数 f 同雷诺数 Re 的关系如图 5a,b 所示。

表 3 模型试验的洞壁型式

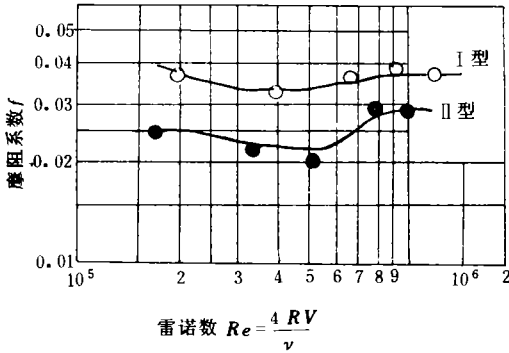
编号	洞壁型式	简图	锯齿高 $\Delta h/\text{mm}$	摩阻 方向
I	光滑波状壁		15	正向
II	光滑波状壁		15	负向
III, V	粗糙波状壁		15 (III) 30 (V)	正向
IV, VI	粗糙波状壁		15 (IV) 30 (VI)	负向

3.2 水流阻力平方区摩阻系数的推求

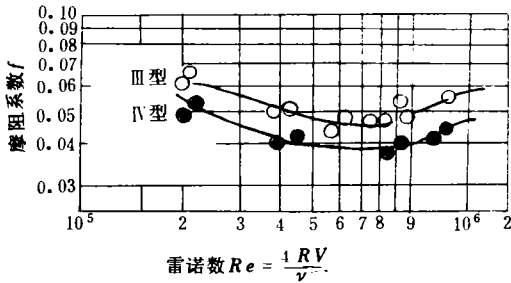
一般说来，水工隧洞的水流雷诺数很大，均已达到阻力平方区。从图 5a,b 可看出：

- (1) $f \sim Re$ 的关系曲线同尼古拉池人工均匀加糙管道试验结果的变化曲线相似，但具体数值相差较大。
- (2) 摩阻系数的变化规律是：粗糙波状壁大于光滑波状壁；开挖“锯齿”高的大于开挖“锯齿”低的；正向摩阻大于负向摩阻。

(3) 大致当水流雷诺数 $Re > 1.5 \times 10^6$ 时，各型洞壁模型的 f 值均为常数，即此时水流已达阻力平方区。各型洞壁在水流阻力平方区的摩阻系数列于表 4 中。



(a)



(b)

图 5 $f \sim Re$ 关系

表 4 模型试验摩阻系数值

洞壁类型 编 号	洞壁型式	波状锯齿高 $\Delta h/\text{mm}$	摩阻 方向	摩阻系数 f
I	光滑波状壁	15	正向	0.036
II	光滑波状壁	15	负向	0.029
III	粗糙波状壁	15	正向	0.055
IV	粗糙波状壁	15	负向	0.017
V	粗糙波状壁	30	正向	0.088
VI	粗糙波状壁	30	负向	0.086

根据上述分析及表 4 的数据，对于不计及波状“锯齿”，仅计入洞壁糙度时的水流阻力平方区的不衬砌隧洞的摩阻系数，可参照普兰特-尼古拉池的摩阻系数公式〔即式(4)〕进行推导，经推算得

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = 2\lg \frac{R}{\Delta_{50}} + 4$$

(1.1)

式中： f_1 为仅计入洞壁糙度的摩阻系数； Δ_{50} 为相当于模拟粗糙波状壁用小石子级配中，大于 Δ_{50} 的石子占总体积的 50%。

在设计阶段，可用开挖时要求达到的洞壁平均突起度 $\bar{\Delta}$ 来代替 Δ_{50} 。

根据表 4 的数据，当计入波状“锯齿”影响时，可得到正向摩阻系数为

$$f_{\text{正}} = f_1 + 0.036$$

(15)

将表 4 所列的正向摩阻系数和负向摩阻系数的

数值绘于图 6 中, 二者的对应关系为一直线, 其方程为

$$f_{\text{负}} = 1.094f_{\text{正}} - 0.012 \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)得

$$f_{\text{负}} = 1.094f_1 + 0.027 \quad (17)$$

式(14)、式(15)及式(17)即为笔者建议用来计算不衬砌隧洞水流处于阻力平方区($Re > 10^6$)时的摩阻系数公式。应用时, 计算步骤为: (1) 根据洞壁开挖的平均突起度 $\bar{\Delta}$ 及水力半径 R 代入式(14)算出 f_1 ; (2) 若水流方向与掘进方向一致, 则将 f_1 代入式(15)计算 $f_{\text{正}}$, 若二者方向相反, 则将 f_1 代入式(17)计算 $f_{\text{负}}$; (3) 若需计算曼宁糙率系数 n 值, 可将 $f_{\text{正}}$ 或 $f_{\text{负}}$ 代入式(3)即可求得。

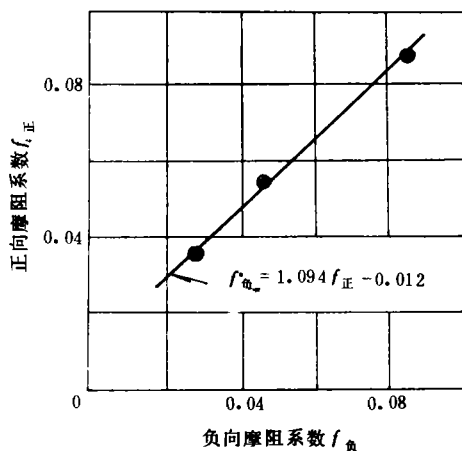


图 6 正、负向摩阻系数的关系

现以我国流溪河水电站引水隧洞为例来验证一下本文所提出的计算公式的可靠性。

流溪河引水隧洞不衬砌段的水力半径 $R=1.5$ m, 平均突起度 $\bar{\Delta}=0.25$ m, 算出 $R/\bar{\Delta}=6.0$, 代入式(14)得 $f_1=0.0324$ 。因该隧洞掘进方向与水流方向一致, 故将 f_1 代入式(15)得 $f_{\text{正}}=0.064$, 再将 $f_{\text{正}}$ 及 R 代入式(3), 算出 $n=0.0316$ 。由原型观测得到 $n=0.0313^{[9]}$, 这说明按本文推荐的公式计算的结果与实际值相比, 是很接近的。所以, 利用本文推荐的公式, 就可以在设计不衬砌隧洞时, 能较正确地估算其摩阻系数或糙率系数。

参 考 文 献

- 1 Spencer R W. Unlined Tunnels of Southern California Edison Company. Proc. ASCE, Vol. 90, P03, 1961
- 2 曹长福. 施工导流隧洞设计中的几个问题的探讨. 水利水电技术, 1963(4)
- 3 周胜. 不衬砌岩石隧洞的摩阻损失. 水利水电科学研究院论文集(水工部分第3集), 1963
- 4 Rahm L. Friction Losses in Swedish Rock Tunnels. Water Power, 1958, No. 12
- 5 Reinius E. Head Losses in Unlined Rock Tunnels. Water Power, 1970, No. 7, 8
- 6 郭宗彦. 苏联水电站水工隧洞设计与施工的一些情况. 水利水电技术, 1963(4)
- 7 陶君裘. 大直径高流速不衬砌隧洞的设计. 水利水电建设, 1960(8)
- 8 Шенсисль Ф А 著, 徐在庸译. 管内紊流运动主要水力规律的研究. 北京: 建筑工业出版社, 1957
- 9 广东水利厅设计院. 流溪河水电站不衬砌隧洞的设计与观测. 水利水电技术报导(水利水电部分), 1962(2)

Studies on Characteristics of Friction in Unlined Rock Tunnel

Ding zhuoyi

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract This paper reviews former five formulas for estimating friction in the unlined rock tunnel. Studying affecting factors on friction in the unlined rock tunnel and using experimental data from 41 hydroprojects at home and abroad, new estimating formulas are given in the paper. Verification of data obtained from prototype observation indicates that the new formulas are better agreeable to practice than former formulas.

keywords unlined tunnel; friction; roughness