

水工隧洞的 设计理论和计算

水利电力出版社

水工隧洞的 设计理论和计算

河北水利水电学院 汪胡桢

水利电力出版社

内 容 提 要

本书比较全面和系统地介绍了水工隧洞设计的基本原理和计算方法,其中包括隧洞的线路和断面选择,隧洞的类型及其衬砌材料,各种形式隧洞的应力计算等。鉴于新近发展起来的有限单元法和电子计算机在工程设计中日益广泛的应用,本书专设一章,阐述有关的理论和应用技术。为了便于读者掌握本书所述内容并在实践中运用,书中列举了大量的例题,以便在具体工程设计和计算时参考。

本书深入浅出,比较易懂,可供从事水工隧洞设计的工农兵同志和工程技术人员阅读,亦可供水利水电专业院校的工农兵学员和教师参考。

封面题字: 郭沫若

水工隧洞的设计理论和计算

河北水利水电学院 汪胡桢

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

1977年9月北京第一版

1977年9月北京第一次印刷

印数 00001—10920册 每册 1.55元

书号 15143·3261

毛主席语录

水利是农业的命脉

农业学大寨

抓革命，促生产，促工作，促战备。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

在毛主席无产阶级革命路线指引下，在无产阶级文化大革命的强劲东风推动下，我国水利水电战线的革命和生产形势一派大好。特别是无产阶级文化大革命以来，工农兵开始占领水利水电工程设计阵地，他们坚持以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，坚持无产阶级专政下的继续革命，使设计工作出现了一个生气勃勃的新局面。

为了适应从事水利水电工程设计的工农兵同志和青年工程技术人员的需要，我们经过广泛地搜集资料和调查研究，编写了这本《水工隧洞的设计理论和计算》。为了使读者易于理解和掌握本书的内容，我们在阐述一些有关的基本原理时，力求深入浅出，通俗易懂；在推导一些算式时，力求条理分明，便于掌握。同时，为了便于在实践中应用，本书列举了大量的计算例题，以更加具体的方式说明水工隧洞设计计算的方法和步骤。

本书内容较多，对于面临设计任务的读者，建议先读有关水工隧洞总论的第一、二、三、十六等章，然后再根据本单位工程所采用的衬砌形式，选读有关的章节。

有限单元法，是本世纪中叶新发展起来的力学计算方法，是与同时期发展起来的电子计算机相辅而行的。应用这种方法，使得水工隧洞的设计计算更加科学合理，并使精密度很高的计算，可以利用电子计算机迅速地完成。随着我国国民经济的迅速发展，电子计算机在水利水电方面的应用已日益广泛。为此，本书专设一章，比较详细而系统地介绍了有限单元法和电子计算机的应用知识。

由于作者理论水平较低，实践经验不多，书中必然会有一些缺点和错误，热诚地欢迎读者批评、指正。

作 者

1976年9月

目 录

前 言

第一章 水工隧洞的路线与断面	1
第一节 水工隧洞的路线	1
第二节 水工隧洞的分类	6
第三节 水工隧洞的进口段	7
第四节 水工隧洞的渐变段	12
第五节 水工隧洞的洞身段	13
第六节 水工隧洞的出口段	25
第七节 水工隧洞的局部水头损失	26
第八节 水工隧洞的水面曲线	28
第九节 高流速泄水隧洞的掺气	34
第二章 衬砌的形式和材料	35
第一节 引言	35
第二节 衬砌的形式	36
第三节 衬砌的厚度	38
第四节 素混凝土衬砌的设计数据	40
第五节 素混凝土衬砌的强度计算	42
第六节 钢筋混凝土衬砌的设计数据	44
第七节 钢筋混凝土衬砌的配筋	46
第八节 钢筋混凝土裂缝计算	50
第九节 钢筋混凝土衬砌的构造	51
第十节 砖石衬砌的设计	53
第十一节 衬砌的细部结构	56
第三章 水工隧洞的荷载	60
第一节 引言	60
第二节 山岩压力	61
第三节 地层弹性抗力	64
第四节 地层摩擦力	67
第五节 衬砌自重	68

第六节	均匀内水压力	69
第七节	满洞水压力	70
第八节	外水压力	71
第九节	灌浆压力	72
第十节	温度应力	73
第十一节	地震力	79

第四章 无压隧洞——洞顶拱衬砌 85

第一节	引言	85
第二节	弹性中心	86
第三节	变位的平衡	87
第四节	拱座变位的影响	89
第五节	拱座的变位	90
第六节	拱座地层反力和变位	91
第七节	由 X_1 和 X_2 对拱座引起的变位	92
第八节	由荷载对拱座引起的变位	93
第九节	刚臂的长度	93
第十节	未知力 X_1 和 X_2	94
第十一节	形变位的计算	95
第十二节	载变位的计算	96
第十三节	拱断面中由荷载引起的弯矩和轴向力	97
第十四节	衬砌强度的校核	98
第十五节	计算例题	99
第十六节	等厚度的洞顶拱	114
第十七节	厚度按余弦规则变化的洞顶拱	115

第五章 无压隧洞——圈门形衬砌 116

第一节	引言	116
第二节	圈门形衬砌的变位法分析	117
第三节	杆件的形常数	119
第四节	杆件的载常数	126
第五节	结点的变位	131
第六节	杆端的弯矩和切力	133
第七节	杆件的内力	134

第 八 节 计算例题·····	135
第六章 无压隧洞——马蹄形衬砌·····	153
第 一 节 引言·····	153
第 二 节 变位平衡方程·····	153
第 三 节 拱座变位的影响·····	154
第 四 节 拱座的变位·····	155
第 五 节 由 X_1 、 X_2 对拱座引起的变位·····	157
第 六 节 由荷载 P 对拱座引起的变位·····	157
第 七 节 刚臂的长度·····	158
第 八 节 未知力 X_1 和 X_2 ·····	159
第 九 节 形变位的计算·····	159
第 十 节 载变位的计算·····	159
第十一节 由荷载引起的弯矩·····	160
第十二节 由地层弹性抗力和摩擦力引起的变位·····	160
第十三节 δ_h 的计算·····	163
第十四节 高壁拱的内力·····	164
第十五节 底拱的内力·····	165
第十六节 计算例题·····	165
第七章 无压隧洞——重力墙式衬砌·····	194
第 一 节 引言·····	194
第 二 节 边墙上的荷载·····	195
第 三 节 边墙底的倾角·····	197
第 四 节 拱座的角变位·····	198
第 五 节 拱圈的静力分析·····	199
第 六 节 拱圈计算的校核·····	200
第 七 节 拱圈的内力·····	200
第 八 节 边墙的内力·····	201
第 九 节 边墙底部校核·····	201
第 十 节 底板的内力·····	202
第十一节 计算例题·····	202
第八章 无压隧洞——偏压衬砌·····	216
第 一 节 引言·····	216

第二节	边墙上的荷载	217
第三节	边墙的角变位	220
第四节	拱座受单位力作用时的变位	221
第五节	临空边墙受力后的角变位	223
第六节	拱顶的内力	224
第七节	拱圈的内力	227
第八节	校核计算	228
第九节	边墙底的压强	228
第十节	底板的内力	228
第十一节	计算例题	229
第九章	无压隧洞——定型衬砌	256
第一节	引言	256
第二节	计算公式	257
第三节	计算例题	268
第四节	完建时期衬砌的计算	269
第五节	通水时期衬砌的计算	275
第十章	无压隧洞——半圆拱等厚度的圈门形衬砌	281
第一节	引言	281
第二节	未知作用力 X_1 与 X_2	282
第三节	衬砌的内力	283
第四节	校核公式	283
第五节	刚臂长度	284
第六节	形常数	285
第七节	边墙顶点的单位变位	286
第八节	载常数	287
第九节	拱座处的角、线变位	313
第十节	衬砌各断面的内力	314
第十一节	底板的内力	322
第十二节	计算例题	322
第十一章	有压圆隧洞——钢筋混凝土衬砌	336
第一节	引言	336
第二节	在内水压力作用下的钢筋应力	337

第 三 节	由山岩压力对衬砌引起的内力	338
第 四 节	由衬砌自重对衬砌引起的内力	339
第 五 节	由满洞水重对衬砌引起的内力	340
第 六 节	由地下水压力对衬砌引起的内力	340
第 七 节	钢筋混凝土衬砌对其他荷载的校核	341
第 八 节	计算例题	341
第十二章	有压圆隧洞——特征因素法	345
第 一 节	引言	345
第 二 节	素混凝土衬砌	345
第 三 节	素混凝土衬砌的计算例题	349
第 四 节	钢筋混凝土衬砌	350
第 五 节	钢筋混凝土衬砌的计算例题	355
第十三章	有压圆隧洞——组合衬砌	357
第 一 节	引言	357
第 二 节	组合衬砌的材料与其性能	359
第 三 节	组合衬砌的计算原理	362
第 四 节	计算例题	365
第 五 节	钢板衬砌近似设计法	367
第 六 节	围岩里的应力	373
第十四章	水工隧洞的分叉段衬砌	378
第 一 节	引言	378
第 二 节	力法方程	379
第 三 节	圆弧梁的单位变位	380
第 四 节	地基梁的单位变位	383
第 五 节	其它荷载引起的内力	385
第 六 节	计算例题	386
第十五章	水工隧洞渐变段的内力计算	396
第 一 节	引言	396
第 二 节	在均布荷载作用下的静力分析	398
第 三 节	在内水压力和主动侧压力作用下的静力分析	409
第 四 节	计算例题	412
第十六章	水工隧洞的有限单元分析法	426

第一节	引言	426
第二节	连续体的离散化	427
第三节	结点力和结点变位的关系	430
第四节	变位与坐标的关系	432
第五节	单元里任意点的应变和变位的关系	434
第六节	单元里任意点的应力和应变的关系	436
第七节	单元里任意点的应力和变位的关系	437
第八节	结点力和结点变位的关系	438
第九节	结点荷载	442
第十节	结点力与结点荷载的平衡方程	445
第十一节	单元中点的应力	447
第十二节	电子计算机的计算程序	450
第十三节	计算例题 I —— 无压隧洞	456
第十四节	计算例题 II —— 有压隧洞	485
附录 A	数值积分	506
附录 B	弹性地基梁	508
附录 C	弹性地基圆弧梁	525
附录 D	线性方程和矩阵代数	532
附录 E	似柱法	568
附录 F	工程费的计算	570
附录 G	附表	585
表 G-1	$F_1 \sim F_4$ 函数值表	585
表 G-2	$G_1 \sim G_6$ 和 C 、 D 函数值表	594
表 G-3	$\phi_1 \sim \phi_6$ 函数值表	606
表 G-4	ϕ_{11} 和 ϕ_{12} 函数值表	607
表 G-5	$\phi_{22} \sim \phi_{25}$ 函数值表	608
表 G-6	光面圆钢筋的断面积	609
表 G-7	α 、 r_0 、 A_0 、 γ_0 系数表	610
表 G-8	A_0 与 α 值计算表	611
附录 H	铁摩辛柯弹性地基梁公式	613
参考文献		617

第 一 章

水工隧洞的路线与断面

第一节 水工隧洞的路线

水工隧洞在水利枢纽中路线的选择和断面尺寸的决定，是设计中首先要确定的问题。

水工隧洞是水利枢纽中一个重要组成部分，它的路线（包括高程）必须与水利枢纽的建设任务协调一致，同时还必须和环境自然条件（如地形、地质、水文、水文地质、施工条件等）充分配合。由设计人员拟出几个初步方案，和领导干部、工人同志共同研究确定。

在选择路线与高程时，必须考虑到下列事项：

一、充分利用地形条件，在平面上要使路线最短最直，在纵剖面上要使隧洞洞顶以上有足够的岩体厚度即埋深度，一般应不小于洞宽的三倍，这样才能利用岩体减压拱的作用，减少山岩压力，并能充分利用围岩的弹性抗力，达到减小衬砌厚度的目的。

二、充分利用地质条件，水工隧洞穿过的山体，最好为坚固系数较高、节理间距较大的岩体，路线最好与地层层面、构造断裂面、主要节理面等有较大的夹角，最好避免严重的断层破碎带，避开地下水丰富的地区，避开旧矿洞与软弱的矿脉，以减少施工中的困难。地质方面的缺点无法避免时，可以通过结构设计或施工措施来加以克服，但这就使建设所需的费用增加和时间延长。

三、隧洞路线在平面上不能是直线时，则应使插入的曲线段越少越好。曲线段的曲率半径必须超过洞宽的五倍，转角不宜超过 60° 。曲线段的首尾部分应设置直线段，其长度如果可能，应不少于洞宽的十倍，如果是高流速的施工导流或泄水隧洞，当

流速超过10米/秒时，曲率半径还应增大，并应做水工模型试验加以验证，以免产生气蚀。

压力隧洞在立面上应使洞顶全部保持在水力坡降线以下1～2米。如果不得已必须插入反坡段，则应在马锅底设排水廊道和排水阀，以便修理泄放积水。在马鞍顶设通气孔及阀，以便泄放积在该处的空气。

四、隧洞的进口处需布置闸门，出口处需布置调压井、消能设备等。故在选择进出口的位置时，对地形、地质条件，必须作周密考虑。进口最好放置于水库库面宽广的山包凸出的岸边，以免进水时在水面造成落差。进口最好选择在悬崖、陡坡的岸边覆盖土不会大量滑坍之处，以便施工时很快能够安全进洞；避免选在山体及山麓堆积物不稳定容易滑坡的地区。如果进口处是缓坡地形，则进口后很长一段隧洞的埋深度势必小于三倍洞宽，衬砌因受力过大而造价增高。尤其应避免把这段建成明渠，致使两侧必须采用高峻的岸坡或挡土墙，经常受到坠石、坍塌的威胁。为了选择较为有利的进洞地形地质条件，宁可延长一些洞线。进出口方向以与山坡方向交角较大为宜。

五、隧洞的底坡应大于1%，以便施工或检修时排出积水。隧洞有时可做成水平的底坡，但不可做成倒坡，以免施工时和检修时洞内积水。斜井坡度，从施工方面着想不宜大于45°；如果再陡，可考虑建成竖井。斜井应设在坚固的岩体里，有足够的覆盖层，以免因渗漏而造成滑坡事故。

六、隧洞的进口高程应根据水源的水位变化情形来确定（将在第三节里详述）。隧洞的进出口应与水利枢纽中其它建筑物保持一定的距离，以防止用爆破方法开挖时其它建筑物受到损害，以及施工场地互相干扰。如果水库所建的坝是土坝或堆石坝，则进口应距离坝坡50米以上，出口应距离坝坡100米以上，以免水流冲刷坝坡。隧洞进出口水流是否对环境产生影响最好在事前做水工模型试验加以验证。

七、对于长隧洞，每隔500米左右应设置直井或旁洞，以便

增加工作面加快施工进度，并便利出碴。直井应利用山顶低洼的地方，旁洞应利用接近山坡的地方。

八、如流量很大需要洞宽超过10~15米或更大，以及地质条件不利难以开挖大断面的隧洞时，须采用两个或两个以上的平行隧洞。隧洞间应保留一定的距离，此距离叫岩柱宽度。岩柱宽度应按岩体性状、隧洞的压力水头以及施工爆破产生的影响而定，最好用有限单元法或光弹性试验求出岩柱中的岩石应力，据此而确定。在分析时应考虑到邻洞的爆破力。平行隧洞可按需用水量的逐步扩大分期兴建。有条件时最好采用隧洞挖掘机进行施工，以免岩体被爆破所损害。

九、当隧洞路线经过山坡时，如果岩层走向与山坡相似，并且岩层破碎，则隧洞衬砌将因受到偏压作用而增加造价。如有这种情形，应尽量把隧洞路线向山体深处移动。建筑在山坡里的隧洞衬砌应保证不漏水，以免地层被水浸透造成滑坡事故。

每一个初步方案均应用平面图和纵剖面图来表示，并作出费用估计。平面图中要表示出地形、隧洞与其它建筑物的关系、进出口位置、闸门位置、施工旁洞或直井、堆碴地点等；纵剖面图中应表示出地质构造、断层、破碎带及其他地质特点，以及进出口和闸门等位置、底坡的坡率。应当用说明表按隧洞纵长度列出逐段的岩体坚固系数、弹性抗力系数（根据钻孔资料或导坑试验结果）、洞底高程、衬砌形式等。图1-1所示为实际工程所制的隧洞设计图。

在费用估计中，工程数量可按拟定的坑道和衬砌断面进行估计，工程单价可参考附录 P 进行估计。各方案中共同的工程项目，如闸门等，可酌定费用的近似数目，列入费用估计中。

岩块坚固系数应根据当地或试验室试验结果来确定。一般岩体的物理和力学性质变化范围，可参考表1-1。

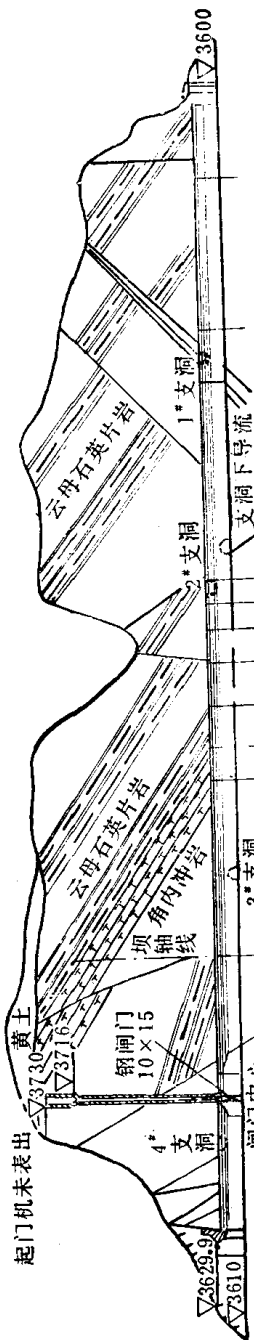


图 1-1 某水库导流隧洞布置图

岩 块 的 物 理 力 学 性 质

表 1-1

组成岩体的 岩 石	容 重 (吨/米 ³)	吸 水 量 (%)	坚固系数 f_{jk}	弹性模量 E (千公斤/厘米 ²)	泊 松 比 ν	抗压强度 (公斤/厘米 ²)	抗拉强度 (公斤/厘米 ²)	弯 曲 时 抗拉强度 (公斤/厘米 ²)	抗剪强度 (公斤/厘米 ²)	内摩擦角 ϕ (度)
火 山 岩	花岗岩	2.50~2.75	0.1~2.0	12~25	0.2~0.125	1200~2500	40~70	100~200	50~80	45~60
	辉长岩	2.92~3.05	2~5	15~20	0.2~0.125	1500~2000	50~80	100~220	40~85	
	流纹岩	2.45~2.60	0.4~4.0	8~16	0.2~0.1	800~1600	50~90	100~220	40~110	
	安山岩	2.30~2.75	0.2~8.0	4~32	0.2~0.11	400~3200	50~110	130~250	50~120	50~55
	玄武岩	2.75~3.00	0.2~1.5	8~42	0.2~0.14	800~4200	60~120	140~260	50~130	
	辉绿岩	2.90~3.10	0.3~0.7	12~25	0.2~0.125	1200~2500	60~130	120~260	60~100	
	粗晶玄武岩	3.00~3.05	0.1~0.5	20~25	0.25	2000~2500	150~350	90~200	250~600	55~60
	英安岩	2.50~2.75	0.5~5.0	8~16	0.2~0.09	800~1600	30~80	30~100	30~100	
	凝灰岩	1.30~2.20	8~35	0.5~6	0.2~0.1	50~600	5~45	30~80	10~40	
	闪长岩			700~1000	0.25	1800~3000	150~300			
积 岩	砾岩	2.10~2.50	1~8	0.1~1.2	0.2~0.07	100~1200	15~60	40~160	20~60	35~50
	石灰岩	2.6~2.85	0.1~0.8	0.5~20	0.2~0.1	500~2000	40~70	50~150	30~70	
	灰岩	2.20~2.60				300~2000				
	伟晶岩	1.55~2.30	2~16	0.4~6	0.125	40~600	10~35	25~70	50~150	
	白云岩	2.20~2.70	0.2~4	0.15~12	0.36	400~840	800~2500	150~250		
	页岩	2.45~2.72	0.2~0.4		0.20~0.26	100~1000	20~100	30~100		15~30
变 质 岩	砂岩	2.0~2.6		50~500		200~170	40~250		80~400	35~50
	大理岩	2.65~2.75	0.1~0.5	5~18	0.2~0.11	500~1800	50~80	80~120	35~80	35~50
变 质 岩	理麻岩	2.60~2.78	1~5	8~25	0.2~0.09	800~2500	40~70	80~200	30~70	50~60
	石英板	2.65				1500~3000	100~300		200~300	
变 质 岩	泥岩	2.60~2.70				1000~2000	70~200			

第二节 水工隧洞的分类

水工隧洞可按其任务与受压状态的不同而分类。

水工隧洞的任务是什么呢？水工隧洞在水利工程上是用来穿过山体引水或泄水的。

比如红旗渠要从漳河引水到渠系里，但是给一座大山挡住去路，引不过去，林县人民就在山体里挖了一个隧洞，水就引过来了，这样的隧洞叫灌溉用的引水隧洞。

有的水力发电站用引水隧洞穿过高山，从水库引水到水轮机里去发电，有的地方用引水隧洞从高山外边的水库中引来水量供工厂用水或城市人民饮水和卫生的需用。

还有一种隧洞设在把航渠阻隔开来的山岭里，使船舶、木筏能够通行，这实际上是引水隧洞的变形。

另外有一种隧洞，它的任务不是引水到用水的地方，而是把多余无用的水输送到水位较低的河道、湖泊或海洋里去，使之废弃掉。这种隧洞叫做泄水隧洞。比如为防洪而建筑的水库要在汛期到来以前用隧洞泄水，放空一部分库容，以备接纳即将到来的洪水。有的水库设置泄水隧洞是为了补助溢洪道放泄洪水，或冲刷掉淤积在库底的泥沙；有的为了在战时预先放低库水位以免堤坝被敌机破坏，使处在下游的人民遭受生命财产上的损失。水力发电站泄放尾水的泄水隧洞，叫尾水隧洞。在兴建水利工程时，需在河流里用围堰把建筑地址围起来，不给河水浸入，以便使地基干涸。这时就要预先开凿泄水隧洞把河水引到下游去。这种泄水隧洞叫做导流隧洞。

水工隧洞可按其不同的受压状态而分类。有的隧洞通水时水流并不充满全洞。而在水流上面保持着和大气相接触的自由水面，这种隧洞叫无压隧洞。还有一种隧洞通水时水流充满全洞，而且洞内还受到一定水头所引起的压力，这种隧洞叫做有压隧洞。也有一种隧洞，由于在中间设置高压闸门，闸门后面设通气