

地下洞室的结构计算

汪 胡 桢

电力工业出版社

地下洞室的结构计算

汪 胡 桢

电力工业出版社

内 容 提 要

本书由绪论、荷载、混合法计算圆门形地下结构内力、初参数法计算地下洞室内力、地下洞室温度应力计算、地下洞室内力计算通用程序介绍等六章组成。书中着重介绍封闭式和分离式两种地下洞室的衬砌计算，推导了一系列计算公式，并附有形、载常数表和有关内力系数表，供设计者使用。在有电算条件下，根据所附程序予以电算。

本书可供水利水电、铁道、煤炭系统从事设计人员参考。

21161/24

地下洞室的结构计算

汪 胡 桢

*

电力工业出版社出版

(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

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 18 $\frac{1}{2}$ 印张 482千字

1982年4月第一版 1982年4月北京第一次印刷

印数0001—4310册 定价1.75元

书号 15036·4288

前 言

在我国宏伟的四化建设中，地下洞室必将大量采用。但是地下洞室的力学分析工作素以繁琐见称。要完成一个方案的力学分析常需很长时间。如果要从多种方案中选取一个经济的设计，常因费时过多，甚至无法实现。此外，分析中算式繁复，极易出错，必须逐步校核才不致前功尽弃，凡做过这种工作的同志，都有同感，对初次担任设计工作的同志尤感困难。

作者有鉴于此，特以地下洞室中最常用的圈门式结构为准，推导出力学分析中全部所需公式，及公式中形、载常数的一般算式，并用电子计算机算出上述常数的数值，列成算表。这样，计算者只需从算表中检出数据，代入标准的公式中，就可以很快求出衬砌各截面上的内力以供设计之用。

地下洞室的衬砌结构，大致可分为封闭式及分离式两类。对于建在松软地层中的地下洞室和某些水工隧洞，可采用圆拱直墙与底板结合成整体的封闭式衬砌，而一般开凿于非松软地层中的铁路、公路、水工隧洞及国防用的地下洞室，边墙底脚都固定于岩层中，底板、路面或地面单独建成，形成分离式衬砌。两类衬砌结构的分析原理和应用的常数是一样的，仅具体计算步骤和公式上有些区别。本书对这两种类型的结构分析法都详加阐述，并各举一个算例作为说明。

目前我国电算工作正在推广和普及之中，在有条件进行电算时，自应尽量采用电算以加快计算速度，提高设计质量。本书在征得原编制者马耀堂同志的同意后，选登了一个较为全面的通用程序，并对其应用作了较详细的介绍。

本书中算式很多，曾经贾本琪同志悉心校核，纠正了一些笔误；复请黎展眉同志细心复核了全文。黎展眉同志并为本书增写了“初参数法”与“温度应力计算”的内容，许多算表都由竺珣珏、贾本琪两同志用电子计算机作成，谨此致谢。

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 地下建筑的用途	1
§ 1-2 地下建筑的演变	1
§ 1-3 地下建筑的设计	2
第二章 荷载	4
§ 2-1 引言	4
§ 2-2 山岩压力	4
§ 2-3 衬砌自重	8
§ 2-4 内水压力	9
§ 2-5 地下水压力	9
§ 2-6 灌浆压力	10
§ 2-7 温度荷载	10
§ 2-8 地震力	10
§ 2-9 地层弹性抗力	11
§ 2-10 地层摩擦力	14
第三章 混合法计算圈门形地下结构内力	15
§ 3-1 主要原理及步骤	15
§ 3-2 形常数公式的推导	20
§ 3-3 载常数公式的推导	25
§ 3-4 形常数、载常数及内力系数表	61
§ 3-5 分离式衬砌的计算	71
第四章 初参数法计算地下洞室内力	85
§ 4-1 基础弹性抗力的假定	85
§ 4-2 弹性基础梁的基本微分方程	85
§ 4-3 等截面弹性基础梁的初参数解法	86
§ 4-4 等截面弹性基础圆拱的初参数解法	89
§ 4-5 弹性基础结构内力的解算	96

第五章 地下洞室温度应力计算	99
§ 5-1 直杆因温度变化所引起的固端力	99
§ 5-2 圆拱因温度变化所引起的固端力	102
§ 5-3 地下结构的温度应力	103
第六章 地下洞室内力计算通用程序介绍	105
§ 6-1 程序功能	105
§ 6-2 原始数据填写	106
§ 6-3 源程序	107
附录 1 形常数表	133
附录 2 载常数表	149
1. 垂直山岩压力的载常数	149
2. 均匀侧向压力的载常数	162
3. 三角形侧向压力的载常数	174
4. 衬砌自重的载常数	187
5. 齐墙顶液位液体压力的载常数	200
6. 满洞水压力的载常数	213
7. 灌浆压力的载常数	225
8. 弹性抗力的载常数	237
9. 摩擦力的载常数	248
10. φ 、 ψ 、 θ 及 ξ 的函数值	259
附录 3 圆拱直墙各截面内力系数表	262
1. 圆拱各截面的内力系数	262
2. 三角形侧压力在圆拱各截面 M_p 的系数	271
3. 三角形侧压力在圆拱各截面 N_p 的系数	280
4. 三角形侧压力在圆拱各截面 Q_p 的系数	289
5. 直墙各截面内力 M_p 系数	298
6. 直墙各截面内力 N_p 系数	425
7. 直墙各截面内力 Q_p 系数	464
参考资料	573

第一章 绪 论

§ 1-1 地下建筑的用途

为了把我国逐步建设成为工业、农业、国防、科学技术现代化的社会主义强国，地下建筑必将成为一种重要的基本建设类型。

地下建筑在现代都市建设、交通、水利、水电以及国防、民防等领域里都有极其广泛的用途。大都市发展到一定阶段，地面建设势必难以满足市民在交通和居住方面的需要，将某些都市建设，如机关、商场、快速交通线、停车场和特殊工厂等移到地下，是个解决矛盾的办法。在战时，这些设施又可供民防之用。

我国地形复杂，许多地区山岭重迭，高差悬殊，今后在这些地区兴建铁路时，采用隧道；在水利水电建设中输水隧洞和地下厂房，等等，无不利用地下建筑结构。此外，对于现代化的国防建设，地下建筑尤其需要。

§ 1-2 地下建筑的演变

隧洞和地下室的断面形式是多种多样的，其中上部为圆拱、两侧为直墙、底部为平底的圈门形断面应用较为广泛。

在我国，圈门形地下建筑有着比较悠久的历史渊源。在黄土高原地区供住用的窑洞即取圈门形式，直到现在仍在采用。这是因为黄土挖空后顶部自然坍落成为圆形的窟窿，两侧自然形成直立的岩壁，虽不加衬砌也能维持稳定。

早期在软弱地层中兴建的地下建筑，因为垂直和侧向山岩压力的存在，必须修筑砖石衬砌以资抵抗。由于砖石结构的抗拉能力差，除顶部作成圆拱形外，侧墙及底板改为弧形。因此，地下建筑的断面乃演变为马蹄形，高壁拱形、蛋形、圆形等多种形式。

这些形式的地下建筑后来改用混凝土浇筑时，在模板制作方面带来了困难。后来钢筋混凝土问世，因为钢筋能抵抗拉力，即使衬砌体承受较大的弯矩，也完全能够维持稳定。这时除上部仍保留圆拱形式外，侧墙及底板一般没有再取弧形的必要。由于此故，圈门形断面又见风行。

圈门形三字的取义是因为我国习称圆拱为发圈之故。在我国有关地下建筑的书籍中，又可称它为城门洞形、圆拱直墙式、上圆下方式等。

§ 1-3 地下建筑的设计

早期的地下建筑都未经力学分析和设计而直接施工。古代劳动人民在实践中不断总结经验教训使地下建筑的技术得以逐步完善。直到近代结构力学原理逐步阐明后，地下建筑才被看作一种力学结构，和地上建筑一样，进行力学分析，以求达到合理使用建筑材料，保证建筑物的稳定与安全的目的。

最早是利用荷载合力线的作图法来作力学分析的。只要合力线位于衬砌各截面的三分中部以内，便可判断当时所用的砖石衬砌不会因砌缝发生拉力而失去稳定。其后才发展为用结构力学的力法或变位法进行分析，这些分析方法虽然理论性很强，但计算起来繁琐无比。本书主要提供的是力法及位移法的混合法分析，因为利用了电子计算机，使计算工作得以简便可行。

在现阶段某些结构力学的分析方法中，对山岩压力与弹性抗力的假定及取值大都未臻完善，这主要是受现代岩土力学及地质勘探技术水平限制的影响，填补这些空白有待于我们今后的努力。

有限元法的问世，为地下建筑的力学分析开辟了新的途径。用有限元法分析，不但可求出衬砌中的内力，还可求得存在于围岩中的应力。它是以围岩及衬砌的弹性模量和泊松比为物理指标的。围岩中如存在软弱夹层、断层、裂隙、层面、溶洞等地质方

面弱点，也可变化其物理指标以反映这些弱点，这是结构力学方法所不能及的，也是今后地下建筑设计者可运用的一个强有力的工具。对于地震力、爆炸力及傍岩隧洞的山岩压力等非对称的荷载，用有限元法都可求出衬砌中的内力。但另一方面，因有限元法主要将围岩的弹性模量及泊松比作为计算所依据的原始参数，对于这两个物理量的准确性要求较高。

本书内容以计算对称条件下的圈门形地下建筑衬砌中的内力为主。对于圆拱与直墙等厚的结构，列有若干常用尺度范围内的一些形常数、载常数的数表，供读者查用，以简化计算、提高运算速度。

本书对于其他形式的地下洞室结构（包括非对称的条件），给出了弹性地基框架结构初参数法解算内力的一般解答形式，供读者参考。考虑到温度应力对地下洞室的影响一般不可忽视，另列一章给出简要解算方法。电算是解决地下结构计算繁琐问题的强有力的工具，专列一章介绍，并附源程序及应用的方法。为使读者了解圈门形地下建筑衬砌内力计算的全过程及交代有关数表的查用方法，第三章举一算例，进行了详细的介绍及演算。

第二章 荷 载

§ 2-1 引 言

在进行地下建筑衬砌的力学分析之前，必须确定作用于其上的荷载。准确可靠的荷载数据是求得正确的衬砌内力的前提。

作用于地下建筑的荷载，有左右对称的，如山岩压力、衬砌自重、地下水压力、内水压力、灌浆压力、温度荷载等；有左右不对称的，如地震力、爆炸力及傍崖隧洞的山岩压力等。一般地下建筑不一定同时受这些荷载作用，而且往往有些所作用的荷载中，有的影响微小，可以忽略。如何考虑与确定地下建筑所承受的荷载，须作具体分析。

本书将主要介绍圈门形地下建筑承受对称荷载作用的情况，现将各种荷载的计算方法分述于后。

§ 2-2 山 岩 压 力

衬砌体所承受的山岩压力形成的原因非常复杂，属于地质方面的为地层的构造应力与地史残余应力，属于地形的为地形构造应力。地下建筑开挖后的临空面被地质构造面切割成锥状岩体，其中有的存在着向外滑坍力，就是山岩压力形成的主要原因。关于前三者只有通过钻孔或导洞里的仪器观测才能确定，关于后者可用赤平投影法计算而得。

大型地下建筑设计，应采用上述方法以确定山岩压力，对于一般中小型衬砌设计，可采用经验公式计算山岩压力。

原水利电力部所颁《水工隧洞设计暂行规范（1966年）》中关于山岩压力计算有简单明了的介绍，兹述于下：

在深埋的地下建筑中可假定垂直山岩压力是均匀分布的，它的压强 q 与坑道宽度及岩石容重成正比，侧向山岩压力的压强 e

与坑道高度及岩石容重成正比。比例系数根据岩石坚固系数及内摩擦角而酌定。设垂直山岩压强 q 和两侧的水平山岩压强 e 可用下式求算：

$$q = S_y \gamma_r B \quad (2-2-1)$$

$$e = S_x \gamma_r H \quad (2-2-2)$$

式中 q, e ——分别代表垂直山岩压力和侧向水平山岩压力的压强，单位吨/米²。垂直山岩压力为均布荷载。对于深埋的地下建筑，侧向水平山岩压力为均布荷载；对于浅埋的地下建筑，则为梯形分布荷载；

S_x, S_y ——分别为水平和垂直的山岩压力系数；

γ_r ——围岩的容重（吨/米³）；

B, H ——分别为坑道的净宽与净高（米）。

山岩压力系数 S_x, S_y ，是和围岩坚固系数有关的系数，可从下式求算：

$$S_y = \frac{1}{2f_{jk}} \quad (2-2-3)$$

$$S_x = \left[\frac{2}{3} \left(\frac{B}{H} + m \right) + 0.5 \right] m^2 \quad (2-2-4)$$

其中 $m = \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$

ϕ ——内摩擦角。

山岩压力系数 S_y 与 S_x 的参考值见表2-1，岩体容重的参考值也附于表中。

f_{jk} 为岩石坚固系数，一般采用棱柱体抗压强度（公斤/厘米²）的百分之一，但对于完整性较差的岩体应酌情打折扣。

对于浅埋的地下建筑，垂直山岩压力的压强可由下式求算：

$$\begin{aligned} q &= \gamma_r h - \frac{\gamma_r h^2}{2(B_0 + B)} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \operatorname{tg} \phi \\ &= \gamma_r h \left(1 - \frac{nh}{2B_1} \right) \\ &= K \gamma_r h \end{aligned} \quad (2-2-5)$$

式中 γ_r ——地层单位体积重量（吨/米³）；

ϕ —— 地层物质的内摩擦角；

$$n = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \operatorname{tg} \phi$$

$$K \text{ —— 缩减系数, } K = \left(1 - \frac{nh}{2B_1} \right);$$

其余符号见图2-1。

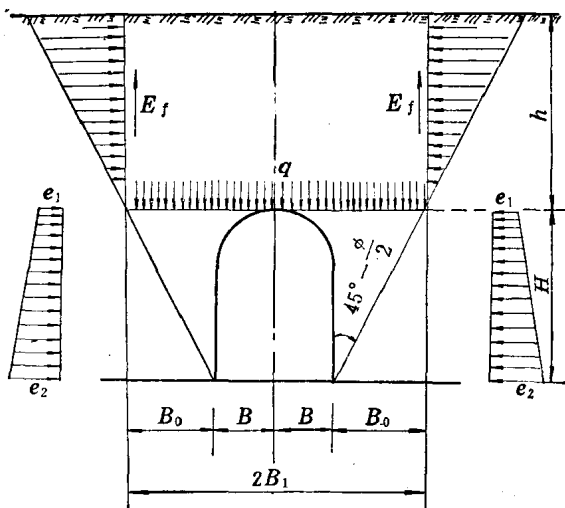


图 2-1 浅埋地下建筑的山岩压力

式 (2-2-5) 适用于

$$h \leq \frac{B_1}{n} \text{ 时}$$

当 $h \geq \frac{B_1}{n}$ 时, 垂直山岩压力与埋的深度无关, 即

$$q = \frac{\gamma_r B_1}{2n} \quad (2-2-6)$$

在浅埋的地下建筑中, 侧向山岩压力为梯形分布 (见图2-1), 可用下式计算:

$$e_1 = \gamma_r h \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-2-7)$$

表 2-1 山 岩 压 力 系 数 表

岩石坚固系数 f_{jk}	代表性岩石	节理间距 (厘米)	山 岩 压 力 系 数		容 (吨/米 ³)	重
			铅 直 的 S_y	水 平 的 S_x		
坚 硬	石英岩、花岗岩	30 以上	0~0.05	0	2.6~2.7	1.6~1.7
	流纹岩、安山岩	5~30	0.05~0.1	0	2.5~2.6	1.5~1.6
	玄武岩、硅质石灰岩	5 以下	0.1~0.2	0	2.5	1.5
中等坚硬	砂岩、石灰岩	30以上	0.05~0.1	0	2.5~2.6	1.5~1.6
	白云岩、砾岩	5~30	0.1~0.2	0	2.5	1.5
		5 以下	0.2~0.3	0~0.05	2.5	1.5
较 软	砂页岩互层	30以上	0.1~0.2	0	2.5	1.5
	粘土质页岩	5~30	0.2~0.3	0~0.05	2.5	1.5
	泥灰岩	5 以下	0.3~0.5	0.05~0.1	2.4	1.4
松 软	风化页岩、风化 泥灰岩、粘土、黄 土、山麓堆积物严 重风化破碎的粘土 层及破碎带		0.3~0.5 或更大	0.05~0.3 或更大	2.0~2.4 或更低	1.0~1.4 或更低

$$e_2 = \gamma_r(h+H) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-2-8)$$

§ 2-3 衬砌自重

地下建筑的衬砌各段多采取等截面形式，如常见的圈门形衬砌，其圆拱、直墙、平底多各为等截面构件，故各段衬砌自重计算比较简单，可用下式计算：

$$g = \gamma h_0 l_0$$

式中 γ —— 衬砌容重（吨/米³）；

h_0 —— 衬砌厚度（米）；

l_0 —— 中线长度（米）；

g —— 单位长度衬砌自重（吨/米）。

在作衬砌的力学分析之前须设定衬砌厚度方可计算自重及应力。当围岩坚固系数及坑道跨度已知时，顶拱厚度可按图 2-2 经验曲线求出，以作为初步假定值。设计计算后如发现厚度过大或过小则进行修改。

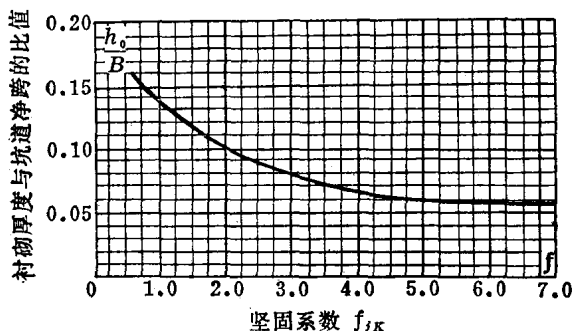


图 2-2 衬砌顶拱厚度经验曲线

侧墙的厚度一般采取与顶拱厚度相等，仅侧向山岩压力较大或为砖石结构时，才酌量增加侧墙的厚度。

底板的厚度随围岩坚固程度和使用上的要求而定，一般可取为顶拱厚度的60~80%。因施工方式不同，底板与侧墙的连接可

以固结为封闭式的，也可以设缝从结构上分开，本书主要讨论封闭式圈门型地下建筑的计算。

§ 2-4 内 水 压 力

如果建筑无压引水隧洞，洞内将受到内水压力的荷载作用。当地下建筑是供存贮油料等物质时，则相应荷载为液体压力。

无压引水隧洞最高水位的选取在设计中一般有两种考虑，其一为与洞顶齐平；另一为拱脚齐平，视使用时可能出现的情况而定。对于存贮液体物质的地下建筑，一般取最高液面与墙顶相齐。

衬砌内表面上所受内水压力强度等于水头与水的容重的乘积，其作用方向与内表面正交。受到其他液体压力时，其压强等于液体容重和液体深度的乘积。

§ 2-5 地 下 水 压 力

地下建筑的位置，应尽可能选在干燥的地层中。但这点不是通常都可满足的，如果地层中存在地下水，则衬砌上将受到地下水压力。

水工隧洞穿过的山岭，虽在施工时可能不存在地下水，但如地层透水性强，则在水库充水后地下水位有可能迅速上升。

存在地下水的山岭，采取适当的排水措施后，可使地下水位降低。

地下水压力的强度等于衬砌顶部以上的水头高度和水的容重的乘积。由于地下水的水头常随雨旱季节、排水情况、水源补给等条件而变化，应多方论证，合理确定变化的极限值作为设计的依据。

《水利电力部水工隧洞暂行规范》(1966年)曾规定：“外水压力一般指直接作用在衬砌外边的水压力。外水压的大小可以用计算水位线以下的水头表示。这个计算水

位线和沿地下水位线不同。计算水位线以下至隧洞底板的水柱高等于地下水位线以下的水柱高乘以相应的折减系数 β 。 β 值是一个综合指标，主要考虑地下水渗流过程的水头损失以及其他排水、补水条件等影响。此值可由地下水动力学原理粗略估算，但主要是根据经验分析确定。总结我国隧洞设计实际采用的 β 值一般在 0.25 到 1.0 之间。在有内水压力的荷载组合计算时， β 值应进一步降低”。

§ 2-6 灌 浆 压 力

为了保证衬砌与围岩接触面的紧密结合，常在衬砌完成后进行压力灌浆，这就引起灌浆压力。灌浆压力以灌注时为最大，随着水泥凝固逐渐减小。

灌浆压力的实际分布规律目前尚未深入研究清楚。通常假定沿衬砌表面均匀分布，并与之正交，其最大压力强度和灌浆时压力计读数相等，以后逐渐减少到压力计读数的三分之一。

§ 2-7 温 度 荷 载

地下建筑物进行衬砌施工中会产生温度变化。例如，混凝土的水化热将引起衬砌的温度变化。衬砌浇筑温度与围岩温度之差也会引起衬砌的温度变化。

在运用时期，衬砌内部水温 and 气温的变化也会引起衬砌的温度变化。由于温度变化而产生的应力称为温度应力，引起温度应力的温差称为温度荷载。

§ 2-8 地 震 力

衬砌所受地震力按下式计算：

$$P = W \frac{a}{g} = k_e W$$

式中 W ——衬砌分段的重量；

a ——地震加速度；

g ——重力加速度, $\frac{W}{g}$ 即为衬砌分段的质量;

k_c ——地震系数, $k_c = \frac{a}{g}$, 随地震烈度而定, 如表2-2。

表 2-2 地 震 系 数 表

地 震 烈 度	地 震 系 数 k_c	地 震 加 速 度 a (米/秒 ²)
6	$\frac{1}{80} (= 0.0125)$	$\frac{1}{80} g (\approx 0.125)$
7	$\frac{1}{40} (= 0.025)$	$\frac{1}{40} g (\approx 0.25)$
8	$\frac{1}{20} (= 0.05)$	$\frac{1}{20} g (\approx 0.5)$
9	$\frac{1}{10} (= 0.1)$	$\frac{1}{10} g (\approx 1)$

地震力的方向与地震波传递的方向相同, 作用于衬砌分段的重心。

如在地下建筑内部放置物品, 地震时这些物品也受到地震力作用, 其值为它的质量与地震加速度的乘积。

§ 2-9 地 层 弹 性 抗 力

上文所述的作用于衬砌上的荷载都是主动性质的荷载, 还有一种荷载是被动性质的, 如因衬砌变形所引起的地层弹性抗力。

衬砌受到主动荷载的作用将产生变形, 有的变形使衬砌脱离围岩, 有的使衬砌更靠紧围岩。作用于衬砌的弹性抗力, 是因围岩对衬砌变形的抵抗所产生的, 在前一种变形的情况下, 衬砌与围岩脱离后便不会产生弹性抗力。

地层弹性抗力的大小与围岩的坚固性及变形大小有关, 可用下式表示:

$$p = k\delta \quad (2-9-1)$$