

# 地下洞室工程

谷兆祺 彭守拙 李仲奎

清华大学出版社

## 内 容 简 介

随着国民经济的发展,地下工程的应用也将越来越广泛。水电站、仓库、城市地铁、公路、铁路、商场、体育馆、工厂等等许多建筑都可以安排在地下,某种场合还必须置于地下。

本书介绍地下工程的布置、设计、施工等有关问题。内容既包括国内外近几十年来的先进的实践经验、设计原则;也包括常用的数值计算基础、反演分析原理、模型试验方法等。全书始终贯穿着地下工程中新奥法的思想,充分发挥围岩的自承能力,使地下工程能做到经济、安全、快速地完成。

本书不仅对水利水电工程建设十分有用,对市政、铁路、公路工程建设也有参考价值。内容深入浅出,既可供有关专业大学本科或研究生使用,也易为从事地下工程的具有中专水平的工程技术人员使用。

(京)新登字 158 号

### 地 下 洞 室 工 程

谷兆祺 彭守拙 李仲奎

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

开本: 787× 1092 1/16 印张: 14.25 字数: 334 千字

1994 年 5 月第 1 版 1994 年 5 月第 1 次印刷

印数: 0001—1200

ISBN 7-302-01413-2/TU · 84

定价: 10.80 元

# 目 录

前言	
第一章 绪论	1
§ 1-1 地下工程在水利水电工程中的重要性及其前景	1
§ 1-2 地下工程在其他土木工程中的重要性及其前景	1
§ 1-3 水电站地下洞室工程的特点	3
第二章 圆形洞室的解析计算	4
§ 2-1 开洞后洞周应力及变形的弹性解	4
§ 2-2 开洞后洞周应力及变形的弹塑性解	7
§ 2-3 开洞后的形变压力	11
§ 2-4 开洞后的松弛压力	12
参考文献	15
第三章 地下洞室工程设计思想与设计方法的发展	16
§ 3-1 以前常用的普氏理论及其存在的问题	16
§ 3-2 新奥地利隧洞施工法(NATM)	18
参考文献	30
第四章 勘测与试验工作	31
§ 4-1 初步设计的勘测工作	31
§ 4-2 试验研究工作的简化	32
§ 4-3 常做或必做的一些勘测试验工作	33
§ 4-4 点荷载试验	33
§ 4-5 水力劈裂试验	38
§ 4-6 DRI、BWI、CLI 等参数的试验	41
§ 4-7 地应力测量	44
参考文献	52
第五章 隧洞设计	53
§ 5-1 水工隧洞	53
§ 5-2 水电站地下高压管道	56
§ 5-3 交通隧洞及其他隧道	61
参考文献	69
第六章 大型地下洞室的设计	70
§ 6-1 洞室围岩的破坏机理和影响稳定的主要因素	70
§ 6-2 大型地下工程的布置设计	72
§ 6-3 洞群布置及其间距	79
§ 6-4 减小地下厂房跨度的措施——地下厂房吊车梁的设计	87
参考文献	95
第七章 水电站气垫式调压室	97

§ 7-1 气垫式调压室的工作原理、优缺点及适用情况 .....	97
§ 7-2 挪威现有的气垫式调压室 .....	99
§ 7-3 气垫式调压室的设计 .....	101
参考文献 .....	111
第八章 数值分析方法在地下工程中的应用 .....	112
§ 8-1 地下工程分析中的数值方法 .....	112
§ 8-2 地下工程有限元分析中的基本问题 .....	112
§ 8-3 地下工程边界元分析中的若干问题 .....	127
§ 8-4 块体理论在地下工程中的应用 .....	138
参考文献 .....	140
第九章 地下工程的施工 .....	141
§ 9-1 概述 .....	141
§ 9-2 钻爆法施工 .....	142
§ 9-3 TBM 开挖施工 .....	148
§ 9-4 几种特殊的开挖方法 .....	151
§ 9-5 喷锚支护 .....	153
参考文献 .....	166
第十章 地下工程的监测及反馈分析 .....	167
§ 10-1 地下工程监测和信息化设计 .....	167
§ 10-2 地下洞室监测布置和监测方法 .....	168
§ 10-3 监测资料的分析整理 .....	171
§ 10-4 反馈分析 .....	172
§ 10-5 监测和反分析中的几个问题 .....	176
参考文献 .....	178
第十一章 地下洞室结构的模型试验 .....	179
§ 11-1 模型试验原理 .....	179
§ 11-2 地下洞室结构模型试验的模拟技术 .....	185
§ 11-3 地下结构模型试验的实例 .....	199
参考文献 .....	203
附录一 水利水电地下工程围岩工程地质分类 .....	204
附录二 Q 值围岩分类法及锚喷参数选择 .....	207
附录三 我国铁路及公路隧道围岩分类 .....	217

# 前 言

随着我国国民经济的发展,水电、铁路、公路、城市地铁、国防建设都有很大的发展,因此,隧洞、地下洞室等地下工程也越来越多。目前我国地下工程的设计、施工水平与世界先进水平相比,尚有一段差距。

本书的主要目的是介绍与说明下列诸方面:

1. 介绍地下工程设计施工的新概念,主要是解释与介绍新奥法。现今世界上先进的新奥地利隧洞施工方法,把围岩看作承载结构的一部分,而不象传统办法那样把岩石仅作为荷载。由于概念的不同,在岩石较好的情况下,勘测、设计工作均可大为简化,节约大量人力、物力。我国近一、二十年来虽已接受新奥法的概念,但仍有人半信半疑,因而工程遇到一些困难,甚至造成损失。本书第二、第三两章将试图从理论上及实践上对此加以阐述探讨。

2. 说明地下工程与建造大坝相比,各有特点,在充分发挥与利用围岩的自承能力的基础上,对于开挖尺寸不太大的隧道工程,应根据实际情况简化勘测设计工作,以加快工程进度。

3. 介绍隧洞、地下洞室的设计与施工方法,包括喷锚支护,全断面掘进机等。这些介绍都考虑到新奥法的基本原理,尽量做到简捷、节省、安全、可靠。

4. 介绍数值计算分析及物理模型试验的基本原理,为上述设计与施工提供必要的依据。

本书是在清华大学水电系编写的《水电站地下洞室工程》的基础上改编而成的,原教材曾先后用过八届。获学校优秀研究生教材奖,改编中加入了大量反映目前国际先进水平的新材料,其中有一些做法目前尚未被我国工程界广泛接受。

当前地下工程的应用范围越来越广,地下工程的规模越来越大。我国近年来在地下工程建设上取得了许多重大的成就,但在某些方面与世界先进水平相比,还有较大的差距。而地下工程的设计、施工先进与否,对节约造价,加快进度以及工程的安全可靠性均有十分重要的影响。如何提高我国地下工程的技术水平,还有很多工作要做。本书的作者们愿将数十年来在国内外从事这方面工作所取得的一些经验与知识奉献给我国的同行们。

本书第一至第五、第七、九章由谷兆祺编写,第六、十一章由彭守拙编写,第八、十章由李仲奎编写。刚从国外归来的陈敏中,参加了最后的修改补充。全书由谷兆祺统编。由于水平有限,错误在所难免,望读者批评指正。

本书在编写过程中得到贾秀梅、李叔义、林贵昌等大力协助,特此致谢。

编者

1993年10月



# 第一章 绪 论

## § 1-1 地下工程在水利水电工程中的重要性及其前景

水电站建设中常会遇到地下洞室工程。在引水道式水电站中,常需建造引水隧洞、调压井、地下厂房、以及泄洪、导流隧洞。这些建筑物的工程量及造价在整个电站中占很大的比例。在坝式水电站中,也常需建造导流隧洞、泄洪隧洞等工程。

我国大多数水电资源都在高山峡谷地区,尤其是西南、西北地区,河谷狭窄,流量又较大,选择地下厂房往往是最佳方案。在本世纪末以前,按规划还要建造总容量达4000万千瓦以上的水电站,其中40%以上将为地下水电站。

在华北和东南沿海地区,水电资源相对少些,这些地区的主力电站多半是火电,调峰能力较差,电网运行不甚经济。因此,抽水蓄能电站的建设已提到议事日程上。广东、北京正在建造大型地下式抽水蓄能电站,今后肯定还要建造更多的同类电站。这些大型地下式抽水蓄能电站则以庞大复杂的地下洞室群为其土建工程的主体。

日本、美国、西欧这些科技经济发达的国家,水电资源开发率已经很高,现在已建造了不少核电站,为了与核电站配合运行,近几十年来已建造了许多抽水蓄能电站,今后还要不断增加抽水蓄能电站的容量。这些抽水蓄能电站,多半将选择在水头极高、岩石较好的地区,建成地下式,因为这样是最为经济的布置方式。

据统计,目前全世界共有400余座地下式电站,而我国只有40余座。可以想象,在今后几十年内,我国不仅要建造许多地下水电站,而且在其勘测、设计、施工、运行管理水平上都会有很大的提高。

## § 1-2 地下工程在其他土木工程中的重要性及其前景

铁路、公路、矿冶、国防、城市地铁、城市建设等许多领域,都有大量的地下工程。这些地下工程各有一些特殊要求,但有很多地方是共同的。

我国目前的铁路分布多集中在东部比较发达的地区,随着国民经济的不断发展,铁路网必定要逐步向西南、西北等山区延伸。著名的成昆铁路穿越川滇边境的山区,几乎是桥隧相连,数万铁道建设者为之付出了极大的代价。目前正在建造的大秦铁路、南昆(南宁至昆明)铁路,也有许多穿越山岭的隧道,工程十分艰巨。可以肯定,今后的铁道建设中还要遇到更多更艰巨的隧道工程。如何快速、经济、安全地完成这些隧道工程,必然是一个重要的课题。

公路交通的隧道工程也会越来越多。目前我国山区公路大多采用盘山道,不仅线路较长,油耗,车辆损耗均很大,而且破坏环境植被。例如由昆明至西双版纳,直线距离只有四百多公里,而公路里程却有八百多公里。川、滇、黔、桂、很多公路都是这个状况,更不用讲

通向世界屋脊——西藏的公路了。如果地下工程技术不断发展,象世界先进国家那样,不但可以开凿较长的隧洞,经济而高速地改善已有的交通状况,而且在丘陵浅山区也可修建一些高速公路,大大促进内地的经济发展。这个领域必然也有很多工作要做。

矿冶工业当然有很多地下工程,露天开采的矿山虽然甚多,地下开采的矿山肯定更多。采矿行业某些地下工程更具有特殊性,但其巷道建设,地下选矿工程等和一般地下洞室工程也是相近的。

国防建设中也有许多地下工程。仓库、地下掩体、指挥中心、飞机库、甚至舰艇库都可以设置在地下。重要的军事工业、导弹基地当然也有设置在地下的。这些地下设施除了满足地下工程的一般要求外,往往还要能承担极大的爆破荷载,难度更大。

我国人口众多,居民超过百万以上的大城市已有 30 多个,随着国民经济的发展,更多的人口将转入城市。现有的大城市将变得更大,不少中等城市也将升格成为大城市。众所周知,目前大城市中交通拥挤已成为一大难题,今后人更集中,车辆更多,出路何在?一是修建立交桥,高架路,二是发展地铁。纵观世界各国大城市,都有四通八达的地铁网,可以大量、快速地将乘客输送到四面八方。而我国目前因经济实力有限,只有很少的几个城市有一两条地下铁道,远远不能满足需要。但是,从长远来看,这方面的工作肯定会有极大的发展。城市地铁也有不少特点,常常要在软土地层中开挖大跨度地下洞室,而不扰动地下水位,以免引起地表沉降,破坏已有建筑物。甚至有的城市江河交错,施工的难度就更大了。

世界上有一些国家城市建设也向地下发展。例如修建地下商场、地下冷藏库、地下仓库、地下体育馆、地下游泳池、地下污水处理厂等等。修建地下商场可以更加充分地利用城市面积。修建地下冷藏库有其明显的优点,可以将一、二十米厚的地层均冷冻起来,即使停电半个月,冷藏库中的温度仍可保持在零度以下。地下体育馆、地下游泳池等等都是因其保温性能好而受到人们的青睐。我国地少人多,每年由于城市发展,工业交通的发展要多占去几千万亩的耕地,城市建设尽可能转入地下,迟早会被提上议事日程。

随着石油、天然气工业的发展,需要建造更多的油库、气库。目前我国都在地面建造这些油、气库,既占地又不安全,且要消耗大量钢材。某些工业发达国家,建造了不少地下油库、地下气库,最大的容量超过三百万立方米。利用高压水幕密封油或气,效果极好。可以预言,若干年后,我国也会考虑建造一些地下油气库。

我国目前刚开始发展核电站,但从长远来看,沿海地区,甚至某些干旱地区,以后还要大量建造核电站,因此核废料必然越来越多,核废料的处理也会成为一个严重的难题。现在某些发达国家,如瑞典、美国等认为将核废料密闭储藏几百米深的地下洞库中是比较理想的办法,可以做到几百年甚至几千年内不向周围地区泄漏渗透。我国迟早也会遇到类似的问题,也要走这一条路。

由上可知,地下洞室工程不仅是常见于水利水电工程,其他土建工程中也是经常会遇到的。

## § 1-3 水电站地下洞室工程的特点

水电站地下洞室和其他部门的洞室有共同之处,也有不同之处,在设计施工中有下列一些特点:

1. 水电站的地下洞室除了要求围岩稳定之外,还有不少压力隧洞、调压室、高压水道等建筑物,都应能承受较大的内水压力,这在其它工程部门是较少的。因此,这种水电站洞室要求衬砌与围岩共同承受内水压力,这就是所谓的联合作用。设计及施工中均应充分发挥围岩的承载能力,以大大减少这些建筑物的造价。同时,这些承压结构都比较重要,万一失事后果严重,因此要慎重对待。

2. 水电站地下洞室大小不一,隧洞直径小的仅 2~3m,大的可到 10m、20m 以上。地下厂房跨度可达 20~30m,高度甚至可达 60~70m。因此,尺寸变化幅度很大。断面形状也是各种各样的,有简单的圆形,也有马蹄形,城门洞形、卵形。有单一洞室,也有多洞并列或纵横交错。各水电站的地质地形条件、建筑物参数指标也很少是雷同的。由于水电站的地下洞室很难有一个统一的规格,很难制定一个标准设计。因此设计工作量常较大。

3. 水电站地下洞室的埋深,除个别情况下,一般不超过 400~500m。因此,通常不会遇到地下高温或十分强烈的岩爆情况。这和某些采矿部门相比,地下洞室围岩稳定问题及施工问题可能稍为容易一些。但是,水电站洞室常沿山坡布置,位于深陡的峡谷之中,最大地应力与最小地应力的差值较大,也会产生岩爆,因此在勘测设计中要加以注意。

4. 水电站的地下洞室一般只承受静荷载。即使象高压管道这类结构,有水击压力造成的动荷载,但其比例不大,仍可按静荷载考虑。这和一些人防工程相比,有较大的区别。因此,水电站地下洞室投入运行之后,一般不会再增加很大的荷载,围岩若不是具有较显著的蠕变性质,只要施工完成投入运行后围岩能够稳定,则以后基本上也是安全的。

5. 水电站地下洞室多半是永久性建筑物,各种支护措施应有较好的耐久性。各建筑物常受到水的荷载,常有防渗的要求,要注意渗透水是否会使围岩稳定恶化,是否会使山坡滑动。对于地下厂房来说,更要采取措施减少地下水渗入厂房,勿使厂房过于潮湿,影响电站正常运行。

6. 水电站的引水隧洞和导流、泄洪、尾水隧洞均为过水建筑物,常常要求洞壁平整光滑,以减少水头损失,免除其他不良后果。因此,开挖时要控制质量,或者开挖后要做光滑平整的衬砌。

7. 水电站地下洞室工程多半在山区,人烟稀少,不象城市中的地下工程那样不允许对居民生活与建筑有较大的干扰。因此,水电站的地下工程常可采用钻爆法施工,也不必顾虑施工期间对地下水的影响,这就省掉了大量额外的开支。

8. 水电站地下洞室应尽量选择在岩石坚固完整的地区,使施工时安全方便,开挖后尽量少做支护,减少工程量。水电站地下工程附近常伴有其他混凝土工程或土石坝工程,应尽量利用开挖出来的石料作为混凝土骨料或用来筑坝,以节约造价。

## 第二章 圆形洞室的解析计算

为了研究围岩稳定及围岩承受内压的问题,必须先了解孔洞周围岩体应力与变形的情况。

洞周应力与变形只是在少数很简单的条件下,才有可能用解析法求解,例如:洞室形状为圆形,地质情况为均匀等向的无限体,施工方式为一次全断面开挖等。然而,在实际工程中,洞室形状、地质条件、施工方法等,都是非常复杂的。

本章的讨论,只是提供一些基本概念,使读者了解围岩自承和变形、应力的基本关系。

### § 2-1 开洞后洞周应力及变形的弹性解

#### 一、洞周围岩应力

均匀等向弹性材料中一个小孔周围的应力可用 G. Kirsh 解。

若洞周围岩的自重相对于整个原始应力来说是较小的,则可忽略自重。围岩在垂直原始应力  $p$ , 水平原始应力  $q$  的作用下,圆洞周围各处的应力如图 2-1 所示。

径向应力  $\sigma_r$ , 切向应力  $\sigma_\theta$ , 及剪应力  $\tau_{r\theta}$  可用下列各式表示:

$$\sigma_r = \frac{p+q}{2} \left( 1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) - \frac{p-q}{2} \left( 1 + \frac{3R_0^4}{r^4} - \frac{4R_0^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (2-1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p+q}{2} \left( 1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \frac{p-q}{2} \left( 1 + \frac{3R_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2-2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p-q}{2} \left( 1 - \frac{3R_0^4}{r^4} + \frac{2R_0^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad (2-3)$$

$q/p = \mu$ , 称为侧压系数。当  $q = p$  时, 即  $\mu = 1$ , 式(2-1)、(2-2)、(2-3)简化为

$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) \quad (2-4)$$

$$\sigma_\theta = p \left( 1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) \quad (2-5)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2-6)$$

由式(2-4) ~ (2-6)可知, 当  $\mu = 1$  时, 洞周应力与  $\theta$  角无关。当洞半径  $R_0$  一定时,  $\sigma_r$  随距离的增大而增大, 并接近  $p$ ;  $\sigma_\theta$  随距离的增大而减小, 也逐渐趋近于  $p$ 。如图 2-2。

由(2-1) ~ (2-3)式可知, 当  $r = R_0$ , 即洞室周边处, 应力为:

$$\sigma_r = 0 \quad (2-7)$$

$$\sigma_\theta = p(1 + 2\cos 2\theta) + q(1 - 2\cos 2\theta) \quad (2-8)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2-9)$$

(2-8)式也可改写为:

$$\sigma_\theta = p(1 + \mu) + 2p(1 - \mu)\cos 2\theta \quad (2-10)$$

图 2-1 圆洞周围应力分布

图 2-2  $p = q$  时的洞周应力

当  $\mu$ 、 $\nu$  不同时, 洞周边切向应力如表 2-1 所示。表中所列数字为  $p$  的倍数, 即切向应力集中系数。由于上下左右是对称的, 因此只需算出  $\frac{1}{4}$  圆周上的应力分布即可。表 2-1 数值可绘成图 2-3。

表 2-1 圆洞周边切向应力集中系数

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	3.0	2.732	2.0	1.0	0	-0.732	-1.0
0.25	2.75	2.549	2.0	1.25	0.5	-0.049	-0.25
0.5	2.5	2.366	2.0	1.5	1.0	0.634	0.5
0.75	2.25	2.183	2.0	1.75	1.5	1.317	1.25
1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

由表 2-1 及图 2-3 中可见:

1. 当  $\mu = 1$  时, 洞应力状况最好, 切向均匀受压。当  $\mu = 0$  时应力最差, 顶拱切向拉应力最大, 边拱切向压应力最大。

2. 当  $\mu < 1/3$  时, 洞周切向应力均为压力。  $\mu$  越小, 拉应力区域越大。

3. 可以推论, 当  $\mu > 1.0$  时, 即侧向压力大于竖向压力时, 边拱的压应力将减小, 当  $\mu > 3$  之后, 边拱将产生切向拉应力。也就是当  $\frac{1}{3} < \mu < 3$  时, 洞室周围无切向拉应力。

4. 洞周边上最大切向应力不超过较大的地应力的三倍, 最大切向拉应力不超过较大的地应力的一倍。这个范围是很有意义的, 当知道地应力的数值后, 立刻可以估计到圆形洞室周边上可能达到的应力水平。这将有助于估计洞室围岩是否会受到破坏。

当围岩完整均匀, 强度较高, 而原始地应力不太高时, 洞周围岩处于弹性状态, 则

图 2-3 圆洞周边切向应力集中系数

上述解答将是接近实际的。

## 二、洞周围岩变形

当地应力  $p = q = p_0$  时, 洞壁周围的变形比较容易求得。

上面已知应力分布情况,对于平面应变问题,径向应变为:

$$\epsilon_r = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (2-11)$$

式中  $E$  为围岩弹模,  $\mu$  为泊桑比。

洞壁周边径向总位移  $u$  为:

$$u = \int_{r_0}^r \epsilon_r dr$$

这个位移包含有初始地应力引起的  $u_0$ , 应予以扣除, 则开洞后位移  $u$  为:

$$\begin{aligned} u &= u - u_0 \\ &= \int_{r_0}^r \epsilon_r dr - \int_{r_0}^{r_0} \epsilon_r dr \\ &= \int_{r_0}^r (\epsilon_r - \epsilon_{r_0}) dr \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中:  $(\epsilon_r - \epsilon_{r_0}) = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)(\sigma_r - \sigma_{r_0}) - \mu(\sigma_\theta - \sigma_{\theta_0})]$

$\sigma_{r_0}$  及  $\sigma_{\theta_0}$  为开洞前原有地应力, 由于两向等压, 有:

$$\sigma_{r_0} = \sigma_{\theta_0} = p_0 \quad (2-13)$$

将(2-4) ~ (2-6)式及(2-13)式代入(2-12)式, 化简得:

$$\begin{aligned} u &= \int_{r_0}^r \frac{1+\mu}{E} (-a^2 p_0) dr \\ &= - \frac{1+\mu}{E} R_0 p_0 \end{aligned}$$

式中:  $a = R_0 / r_0$ 。

当支护提供反力  $p_i$  时,

$$u = - \frac{1+\mu}{E} R_0 (p_0 - p_i) \quad (2-14)$$

上式负号代表位移指向洞室内部。若定义向内的位移为正, 则可取消这个负号。

由(2-14)式可见:  $p_i$  越大,  $u$  越小;  $p_0$  越大,  $u$  越大。如果  $p_0 = p_i$ , 则  $u = 0$ 。无支护时  $p_i = 0$ , 洞周围岩若仍处在弹性状态, 围岩实际上也不会坍塌。

一般地应力  $p_0$  是较大的, 可达几十或上百 MPa。而支护所能提供的抗力是有限的, 一般只有 0.1—0.5MPa, 因此采用支护后, 并不能大大地减少洞壁围岩的变形, 也不应期望能达到此目的。

## § 2-2 开洞后洞周应力及变形的弹塑性解

当地应力较高, 岩石强度较低时, 开洞后洞周将形成一个塑性区。塑性区范围内岩石中的应力将降低, 变形将增大。

对于均匀等向围岩中开挖圆形隧洞的情况, 可以有弹塑性解析解。

## 一、塑性准则

对于岩石来说,莫尔-库仑准则比较合适,也比较简单。其关系如图 2-4。

图 2-4 莫尔-库仑准则应力关系图

当应力圆低于包线 ab 时为弹性,与 ab 相切时则将进入塑性。  
从三角形 abd 中可见:

$$\frac{\sigma_r^-}{2} = \frac{\sigma_r^+}{2} + c \cdot \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha \quad (2-15)$$

(2-15) 式即塑性判据,它也可以变换成下列各种形式:

$$\sigma_r^- = \frac{2 \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \sigma_r^+ + \frac{2c \cdot \alpha \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} \quad (2-16)$$

$$\frac{\sigma_r^-}{\sigma_r^+ + 2c \cdot \alpha \operatorname{ctg} \alpha} = \sin \alpha \quad (2-17)$$

$$\sigma_r^- = \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \sigma_r^+ - 1 (c \cdot \alpha \operatorname{ctg} \alpha) \quad (2-18)$$

## 二、均匀地应力场时的洞周应力状况

如果开洞前垂直地应力与水平地应力相等,均为  $p_0$ ,则洞周应力将为轴对称的,无剪应力。沿  $r$  方向可以写出下列平衡方程:

$$\sigma_r \times rd - (r + dr)d(\sigma_r + d\sigma_r) + 2 dr \frac{d\sigma_r}{2} = 0$$

忽略高次项,整理后可得

$$\frac{\sigma_r^-}{r} = \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (2-19)$$

在塑性区内,应力状况应满足(2-16)式,代入(2-19)式,得:

$$\sigma_r \left( \frac{2 \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} + \frac{2c \cdot \alpha \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} \frac{1}{r} \right) - \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

整理后得:

$$\frac{d_r}{r + c_j \alpha \text{ctg}} = \frac{2 \sin}{1 - \sin} \frac{dr}{r} \quad (2-20)$$

积分得:

$$\ln(r + c_j \alpha \text{ctg}) = \frac{2 \sin}{1 - \sin} \ln r + C_1 \quad (2-21)$$

$C_1$  为积分常数, 当  $r = R_0$  时,  $r = p_i$ , 以此式代入(2-21)式, 得

$$\ln(p_i + c_j \alpha \text{ctg}) = \frac{2 \sin}{1 - \sin} \ln R_0 + C_1 \quad (2-22)$$

图 2-5 洞周应力

将  $C_1$  值代回(2-21)式, 得

$$r = -c_j \alpha \text{ctg} + (p_i + c_j \alpha \text{ctg}) \frac{r}{R_0}^{\frac{2 \sin}{1 - \sin}} \quad (2-23)$$

将上式代回(2-16)式, 整理后得:

$$= -c_j \alpha \text{ctg} + (p_i + c_j \alpha \text{ctg}) \frac{1 + \sin}{1 - \sin} \frac{r}{R_0}^{\frac{2 \sin}{1 - \sin}} \quad (2-24)$$

(2-23)、(2-24)式即为塑性区内应力表达式。

图 2-6 为洞周弹塑性应力分布的示意图。其中图 2-6a 为  $p_i = 0$ , 即无支护时的应力分布。图 2-6b 为有支护时的应力分布。

图 2-6 洞周应力分布示意

从图中可以看到塑性区内有明显的降低。而当有支护抗力  $p_i$  时, 可以略为提高。在弹性区内, 及  $r$  均逐渐趋近于原有地应力数值  $p_0$ 。开洞后应力释放, 对原有地应力场产生的干扰局限于洞周围岩, 离洞边越远, 干扰就越小了。

需要强调的是: 图 2-6 只是代表垂直地应力与水平地应力均为  $p_0$ , 且忽略岩体自重时的应力分布, 因此, 沿洞壁四周的应力分布都是轴对称的。而实际情况要比这复杂得多。

### 三、塑性区半径 $R_p$ 的推求

当  $r = R_p$  时, 岩体处于弹性区与塑性区的交界面上, 应力数值应同时满足弹性及塑性状况。

在弹性状况下, 根据拉梅公式应力为:

$$\begin{aligned} r &= (1 - a^2)p_0 + p_i a^2 \\ &= (1 + a^2)p_0 - p_i a^2 \end{aligned} \quad (2-25)$$

式中  $a = \frac{R_0}{r}$ 。

由(2-25)式, 可得

$$r + \frac{R_0^2}{r} = 2p_0 \quad (2-26)$$

(2-26)要同时满足塑性判断, 将其代入(2-17)得:

$$r = \frac{1 - \sin \phi}{2} (2p_0 + 2c \cot \phi) \quad (2-27)$$

将(2-27)及(2-26)式联立求解, 得塑性界面上的应力:

$$p_r = p_0(1 + \sin \phi) + c \cot \phi \cos \phi \quad (2-28)$$

$$p_t = p_0(1 - \sin \phi) - c \cot \phi \cos \phi \quad (2-29)$$

以  $p_r|_{r=R_p} = p_0(1 - \sin \phi) - c \cot \phi \cos \phi$  代入(2-23)式, 整理后得:

$$R_p = R_0 (1 - \sin \phi) \frac{p_0 + c \cot \phi \cos \phi}{p_i + c \cot \phi \cos \phi} \frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi} \quad (2-30)$$

上式也可写成:

$$p_i = c \cot \phi \cos \phi + (p_0 + c \cot \phi \cos \phi) (1 - \sin \phi) \frac{R_0}{R_p} \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2-31)$$

(2-31)式即为卡斯特纳(kastner)公式。

(2-30), (2-31)式代表塑性范围和  $p_0$ 、 $p_i$  及岩石性质的关系。由式中可知,  $p_i$  越大,  $R_p$  越小;  $p_0$  越大,  $R_p$  越大;  $\phi$  越大,  $R_p$  越小。反之, 塑性区越大, 则支护抗力  $p_i$  也就越小。

### 四、洞壁位移与 $R_p$ 的关系

在弹塑性区交界面上的径向位移为:

$$u_{R_p} = (p_0 - p_{r_{R_p}}) \frac{1 + \mu}{E} R_p \quad (2-32)$$

式中  $p_{r_{R_p}}$  为弹塑性交界面上的  $p_r$ 。

将(2-30)中的  $R_p$  及(2-29)中的  $p_r$  代入(2-32)式, 得:

$$u_{R_p} = \frac{1 + \mu}{E} \sin \phi (p_0 + c \cot \phi \cos \phi) R_0 (1 - \sin \phi) \frac{p_0 + c \cot \phi \cos \phi}{p_i + c \cot \phi \cos \phi} \frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi} \quad (2-33)$$

假定塑性区内岩体在变形过程中体积保持不变, 即:

$$\begin{aligned} (R_p^2 - R_0^2) &= [(R_p - u_{R_p})^2 - (R_0 - u_{R_0})^2] \\ 2R_0 u_{R_0} - u_{R_0}^2 &= 2R_p u_{R_p} - u_{R_p}^2 \end{aligned}$$

因  $u_{R_0}^2$  及  $u_{R_p}^2$  均极小, 予以忽略, 有:

$$u_{R_0} = \frac{R_P}{R_0} u_{R_P} \quad (2-34)$$

$$u_{R_0} = \frac{1 + \sin(\varphi)}{E} \sin(\rho_0 + c \cot \varphi) R_P (1 - \sin \varphi) \frac{p_0 + c \cot \varphi}{p_i + c \cot \varphi} \frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}$$

或

$$u_{R_P} = \frac{1 + \sin(\varphi)}{E} \sin(\rho_0 + c \cot \varphi) R_0 (1 - \sin \varphi) \frac{p_0 + c \cot \varphi}{p_i + c \cot \varphi} \frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi} \quad (2-35)$$

为简便计, 洞壁处径向位移  $u_{R_0}$ , 可以  $u$  代表之。

## § 2-3 开洞后的形变压力

上节中, (2-35) 式即为围岩位移与形变压力的关系, 式中  $p_i$  就是围岩位移时作用在衬砌上的形变压力。

根据不同的岩体初始应力  $p_0$ 、岩体特性  $c$ 、 $\varphi$ , 洞室半径  $R_0$ , 假定不同的  $p_i$ , 用(2-30) 式可以求得洞室围岩塑性半径  $R_P$ 。可以用(2-35) 式求出洞边径向位移  $u_0$  并作出  $p_i$  与  $u$  的关系曲线, 如图 2-7。

$p_i$  如果等于  $p_0$ , 则没有应力释放的问题, 洞周围岩位移为零。实际工程中, 一般支护所能提供的抗力, 或者说能够承担的形变压力也就是 0.1 ~ 0.5MPa。如果要求  $p_i$  更大, 那就要做相当厚重的钢筋混凝土衬砌, 这是现代洞室工程所不希望的。

图 2-7a 中, 初始地应力  $p_0$  为 3MPa 图 2-7b 中,  $p_0$  为 10MPa。围岩的粘聚力  $c$  为 0.1、0.5MPa; 摩擦角  $\varphi$  为 20°、30°; 洞室直径 5m; 围岩弹性模量为  $5 \times 10^3$ MPa。

分析图 2-7 及(2-35) 等公式, 可以得到下列结论, 这些结论虽然是在理想化的条件下得到的, 和实际的岩体状况有一定差距, 但它们代表了一定的趋势, 是很有启发性的。

1. 位移和围岩弹性模量成反比, 弹性模量越小, 岩体越软, 位移将越大, 同时位移与洞室半径  $R_0$  成正比。

2. 位移和初始地应力  $p_0$  值成正比,  $p_0$  越大, 位移就越大。当围岩摩擦角较小时,  $\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}$  大于 1.0, 位移  $u_{R_0}$  将与  $p_0$  的高次方相关, 位移增大极快。当  $\varphi = 30^\circ$  时,  $\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi} = 1.0$ ,  $u$  约与  $p_0$  的平方相关; 当  $\varphi > 30^\circ$  时,  $u$  与  $p_0$  的一点几次方相关。这就是说, 当岩性不好时, 地应力的增大将使洞周位移急剧地加大。

3. 岩体粘聚力  $c$ 、摩擦角  $\varphi$  对位移  $u$  的影响也很大。 $c$ 、 $\varphi$  值越大, 位移越小。特别应注意的是, 若无支护, 即  $p_i = 0$ , 而且  $c$  也等于零, 则  $u$  将是无穷大。 $c = 0$ ,  $p_i$  不太大时, 位移  $u$  也是很大的数值。这说明, 若任凭围岩松弛, 不加任何支护, 且岩体之间完全无凝聚力, 这对稳定是很不利的。

4. 若对围岩进行一些支护, 维持岩体  $\varphi$  值能有 20° ~ 30°;  $c$  有 0.1 ~ 0.5MPa, 那么在  $R_0 = 2.5m$ ,  $E = 5 \times 10^3$ MPa, 地应力不很大的情况下, 所需支护抗力不是很大的, 一般喷锚支护是可以满足要求的。

5. 分析(2-30) 式: 初始地应力  $p_0$  越大, 围岩塑性区半径  $R_P$  越大。支护抗力  $p_i$  越小,  $R_P$  越大。当围岩  $\varphi$  值小于 30° 时,  $R_P$  随  $p_0$  的加大而急剧加大。当  $p_i$  为零, 围岩  $c$  为零时,