

岩石地下建筑技术座谈会资料选编

土 建 设 计

中国建筑工程出版社

岩石地下建筑技术座谈会资料选编

土 建 设 计

国家建委建筑科学研究院选编

·内 部 发 行·

中国建筑工业出版社

本书系岩石地下建筑技术座谈会资料选编的土建设计部分。内容主要为衬砌结构设计和喷锚支护的应用，共选入资料十三篇，可供有关设计、施工和科研人员参考。

岩石地下建筑技术座谈会资料选编

土 建 设 计

国家建委建筑科学研究院选编

· 内 部 发 行 ·

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）

新华书店北京发行所发行，各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：11 1/4 字数：270 千字

1977年9月第一版 1977年9月第一次印刷

印数：1—6,800册 定价：0.85元

统一书号：15040·3357

毛主席语录

备战、备荒、为人民。

深挖洞，广积粮，不称霸。

独立自主、自力更生。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前 言

在伟大领袖毛主席的“备战、备荒、为人民”的伟大战略方针指引下，近十几年来，岩石地下建筑有了很大发展，在勘测、设计、施工及科研方面积累了很多经验。为了系统地总结和交流这方面的经验，推动地下建筑科学技术的发展，国家建委责成我院于一九七四年十月在广西桂林召开了“岩石地下建筑技术座谈会”。根据会议介绍和收到的技术资料，我们组织选编了《岩石地下建筑技术座谈会资料选编》。在选编过程中，对已有大量出版的资料，不再列入本选编。所选编的资料，均请原编写单位作了审查和修改。

本资料选编分工程地质勘测、土建设计、通风技术、施工技术四个分册出版，介绍了某些工程实践的经验和科学试验成果。本着在学术上“百家争鸣”的方针，选编时将一些目前看法尚不一致的技术问题一并选入，供有关勘测、科研、设计、施工人员参考。

由于我们水平有限，经验不足，一定会存在不少问题，请读者批评指正。

国家建委建筑科学研究院

一九七六年一月

目 录

普氏地压理论在地下工程应用中存在的问题.....	中国人民解放军总字 305 部队 (1)
大力发展喷锚支护技术	冶金工业部建筑研究院喷锚支护组 (11)
喷混凝土强度性能的试验研究报告	
.....	水利电力部第六工程局 四川省电建三公司 (24) 铁道部铁道科学研究院西南研究所
在铁路隧道中积极推广锚杆-喷混凝土衬砌的意见	
.....	铁道部第三设计院标准处桥隧科 (40)
预应力大锚杆在大跨度坑道中应用的探讨	岩固 (52)
大型预应力锚杆的研制、施工与测量	岩固等 (58)
喷锚支护在某工程的应用	水利电力部东北勘测设计院 (73)
某工程的锚杆-喷混凝土支护	水利电力部西南电力设计院 (81)
锚杆的试验与应用.....	辽宁工业建筑设计院一室 (91)
广东省水电站地下厂房技术总结	广东省水利电力局勘测设计院 (110)
预制装配钢筋混凝土衬砌设计、施工和试验	
.....	七 〇 〇 三 三 工 程 处 四川省第四建筑公司 (144) 原西南建筑科学研究所 四川省工业建筑设计院
马蹄形洞室装配式混凝土衬砌的构造设计	河南省建委设计院 (158)
离壁式衬砌拱部冲击荷载试验小结	国家建委建筑科学研究院建筑设计研究所 (170)

普氏地压理论在地下工程应用中存在的问题

中国人民解放军总字 305 部队

五十年代初期,我国在地下工程设计中引进了苏联的普氏地压理论。从铁路隧道规范、水工隧洞规范到学校的教科书,均推荐了普氏地压理论。二十余年来,普氏地压理论在我们地下工程建设中有着广泛的影响。毛主席教导我们:“人类认识的历史告诉我们,许多理论的真理性的不完全性,经过实践的检验而纠正了它们的不完全性。许多理论是错误的,经过实践的检验而纠正其错误。”随着建设的发展,我们越来越感到普氏地压理论存在不少问题;根据普氏地压理论计算,有的衬砌过厚,带来了人力物力的浪费,有的衬砌不安全,产生裂缝和拉裂现象,甚至坍塌,给地下工程带来不应有的损失。因而,需要结合我国实际情况,经过试验研究,搞出我们的坑道工程围岩分类、围岩压力和衬砌类型。下面对普氏地压理论在坑道工程应用中存在的问题谈几点看法。

一、什么是普氏地压理论

建国以来,我们在地下工程设计中,确定地压力时,一直沿用苏联 M·M·普洛托加柯诺夫(1874年9月~1930年4月)的计算方法,简称普氏地压理论。这个地压理论是普氏1907年提出的。

普氏地压理论有下述三个假定:

普氏地压理论的第一假定认为,由于地层中有很多节理、裂隙以及各种夹层等软弱面,破坏了地层的整体性。因此,整个岩体在一定程度上可视为松散体。

普氏地压理论的第二假定认为,在坚硬岩层中岩层颗粒之间实际存在着粘着力,因此,采用加大岩石颗粒间摩擦系数来考虑粘着力的影响,并给这种系数起了一个名字叫“似摩擦系数”。普氏把所有地层(包括坚硬的、塑性的和松散的地层在内)都视为具有似摩擦系数“ f ”的松散体介质。“ f ”也就是普氏坚固系数。

普氏的似摩擦系数,表示如下:

$$f = \frac{\sigma \operatorname{tg} \varphi + C}{\sigma} = \frac{\tau}{\sigma} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{C}{\sigma}$$

也即岩石抗剪强度(τ)除以法向应力(σ)。

式中 f ——普氏坚固系数,也就是岩石似摩擦系数;

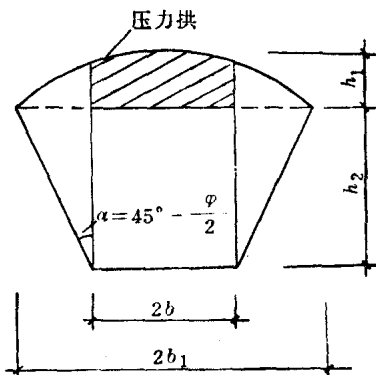
C ——岩石颗粒间粘着力;

φ ——岩石内摩擦角;

$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C$ ——有粘着力的岩石抗剪强度;

σ ——剪切面上的法向应力,是变数不是定值。

普氏地压理论的第三假定认为,坑道开挖后,由于围岩(毛洞)应力的重分布,在坑道上方形成抛物线的岩石压力拱,又叫平衡拱(图1),拱内土石重量就是作用在衬砌或支撑上的岩石压力。压力拱高度见下式



$$h_1 = \frac{b_1}{f} \text{ (米)} \quad (1)$$

式中 h_1 ——普氏压力拱高度(米);

b_1 ——压力拱半跨(米);

f ——普氏坚固系数,根据岩石的性质和抗压强度的不同在0.3~20之间。

普氏假设由于岩石引起的垂直压力是均匀分布的,作用在坑道上的岩(土)压力为

$$q = \gamma \cdot h_1 \text{ (吨/米}^2\text{)} \quad (2)$$

式中 γ ——岩层单位重量(吨/米³)。

图1 普氏压力拱高度计算简图

从上式来看,普氏地压与地层厚度无关。普氏地压理论在1907年发表时,在采矿业起了积极的作用。它比当时认为地压力和地层厚度成正比的理论(计算时考虑全岩石柱重量)前进了一大步,节约了支撑和衬砌材料,应用起来比较简单方便。但在使用过程中也发现它与实际情况有些出入,不少科学工作者及技术人员曾提出了不同的看法,并几经修改。在五十年代我国的坑道工程设计中,采用了这个理论,现在看来,按这个理论设计的坑道工程除个别出现拱部侧墙裂缝外,绝大部分坑道的衬砌,特别是构筑在普氏坚固系数 $f = 4$ 以上地层的衬砌都是安全的,但从很多工程实践中反映衬砌偏厚、偏保守。所以,1970年以后有些单位在所发的标准图上或实际应用中结合了地质条件,将衬砌的厚度减薄了,且经实践证明是成功的。可见,普氏地压理论已经不能很好地适应我国地下工程发展的需要,特别是喷锚结构在地下工程应用以来更是如此。

二、普氏地压理论在地下工程应用中存在的问题

(一) 普氏坚固系数“ f ”存在的问题。

普氏地压理论的代表是普氏坚固系数“ f ”,即按岩石坚固性的分类,它实质上是单纯以岩块强度指标为基础进行的分类。在长期工程实践中发现,这种分类用在地下工程中存在着严重的缺陷。

1. 普氏理论“似摩擦系数 f ”也就是通常所说的普氏坚固系数“ f ”值,即岩石抗剪强度(τ)除以剪切面上的法向应力(σ)。因为岩石是各向异性体, $f = \tau/\sigma$ 是变数。也就是说,在具体的地下工程中对“ f ”求不出固定值。普氏为了实际应用,就取岩石抗压强度除以100来决定岩石坚固系数,即

$$f = \frac{R_R}{100}$$

式中 R_R ——岩石极限抗压强度(公斤/厘米²)。

上式中的100,是普氏根据经验假定的,没有理论推导基础,任意性很大。在实际工程中真正根据普氏的理论求不出符合他假定的“ f ”值。所以,“似摩擦系数 f ”客观上

是不存在的。这样，一个客观上不存在的、实际应用中又得不到证实的 f 值，就在普氏地压理论中占着很重要的位置，并且成了坑道工程地压力计算中重要的基本参数。就我们所能查到的有关普氏地压理论的资料来看，竟没有一分是说明怎样通过 $(f = \frac{C}{\sigma} + \lg \varphi)$

式来求坚固系数的，就连该公式的发明人，普氏本人也不用它来求 f 值。普氏地压理论中实际求“ f ”值的方法，和它的理论本身是不一致的。毛主席教导我们，许多自然科学理论之所以被称为真理，不但在于自然科学家们创立这些学说的时候，而且在于为尔后的科学实践所证实的时候。实践是检验真理的唯一标准。理论必须建立在实践基础上。普氏地压理论就没有得到实践的验证。

2. 单纯的岩块抗压强度是不能全面反映坑道围岩稳定状态的，如坚石但被节理切割成块状或碎裂状，其岩体稳定就大不相同。另外岩块试件强度与岩体强度之间，因地质构造和岩石裂隙的影响，彼此差异很大，在大多数情况下，都不能代替岩体的强度。因此，把 f 值视为坑道工程围岩分类的主要指标是有问题的。

以岩块强度为基础的分类法，主要是在土石方工程中应用，或作为确定施工定额、劳动力和材料消耗的依据。普氏本人在1921年起就采用了岩石坚固系数“ f ”值来编制采矿工程定额的。但由于科学技术发展，劳动生产率不断提高，二十世纪初期的施工定额和二十世纪七十年代的施工定额相差很悬殊。以“ f ”值作为岩石的万能指标的时代已经过去了。因为 f 值对坑道围岩的地质构造特征以及毛洞的稳定性考虑得较少，特别是它并不能代表整个岩体的强度。如湖南某工程实测资料证实，岩块和岩体抗压强度相差即达4倍之多，该工程花岗斑岩的岩块抗压强度 $R_{\text{块}} = 1579$ 公斤/厘米²，而岩体抗压强度为366公斤/厘米²（差4.3倍）。若按岩块定“ f ”值是15，按岩体定“ f ”值是3，两者相差太大，不能作为设计的依据。因此，应该以坑道围岩稳定性为基础的新分类来代替。

应该指出，“ f ”值在苏联主要是为确定矿山掘进中施工定额服务的，直到目前仍然如此。从我们所知道的普氏确定“ f ”值的六种方法中，就有五种是考虑作为制定施工定额用的，它以炸药消耗量、凿速（用合金钻头凿一米所需的时间）、凿岩机破碎岩石所需功的比耗，以及每凿一米眼消耗合金钻头的个数等指标来确定。目的是考虑用多大的机械外力（钻眼、爆破……等）去破碎岩石，而很少考虑怎样确定毛洞围岩的稳定性，以便采用相应的支护措施，节约建造成本和安全生产，因此，把服务目的不同的“ f ”值用来解决坑道衬砌问题显然是不合理的。

3. 由于服务对象和目的不同，普氏将岩石“ f ”值分为15级，这对坑道衬砌的设计施工来说，分类等级偏多，应用上极为不便，有的也难分辨。例如：“ $f = 5$ 和 6”，以及“ $f = 4$ 和 5”就不易准确判断。就地下工程来说，一般需要用到的只三、四级足够，如 $f > 8$ 、 $f = 4 \sim 6$ 、 $f = 2 \sim 3$ ，或更详细些， $f = 2$ 、 $f = 3$ 也可以。从工程使用角度来看，分15级是没有必要的。在实际工程中 $f = 15 \sim 20$ 就用得少。将这种分类法用在地下工程建筑中，即使经过一些非本质的改变，也没有实际意义。如普氏分类表中最高一级是 $f = 20$ ，而在实际工程中最坚硬岩石的抗压强度达3000公斤/厘米²，以普氏坚硬系数代表式 $f = \frac{R_{\text{块}}}{100}$ 来计算， $f = 30$ 分类中就根本没有考虑进去。又如较软的页岩，普氏将页岩坚固系数定为 $f = 3 \sim 5$ ，而有时较完整的页岩抗压强度 $R_{\text{块}} = 100 \sim 200$ 公斤/厘米²，普氏分类

的15级也代表不了。

4.对坑道工程来说,围岩分类的目的主要是为了正确解决坑道支护问题。大量实践证明,与解决支护问题直接有关的是围岩压力、变形性质、稳定特征等因素。这些因素是不能用单一的强度指标来表达的,而“ f ”值仅仅是岩石抗压强度指标的一个反映。如调查中得知,在江西、福建一带的红砂岩和四川的砾岩,抗压强度一般都在300公斤/厘米²左右, f 值较低。但由于岩体完整稳定,开挖跨度较大时都能直立不垮。在四川的钙质胶结砾岩中构筑毛洞跨度14米的坑道不需支撑,施工安全支护工作量小。这样的实例很多,单用“ f ”值是不能将这种情况反映出来的。

5.广大工人和技术人员在长期的斗争实践中,逐渐认识到普氏坚硬系数“ f ”值脱离实际,随意性很大。有的地区反映,勘察用的 f 值,施工用的 f 值和设计人员用的 f 值都不一样,一个人说一样。看来,甩掉 f 值创造自己的围岩分类方法,是一致的迫切愿望。

(二)应用普氏地压理论进行衬砌设计,有的偏保守,有的偏危险。

建国以来,我们坑道工程设计所用的地压力计算公式,是在普氏松散体理论假定条件下推导出来的。它将坑道外荷载分为均匀分布的垂直压力和按梯形分布的侧压力。

所有岩体并不是松散体,而是千差万别的。有的岩层很完整,整体性相当好,挖掘坑道的跨度达十几米以至几十米的已是熟见不鲜。

毛主席教导我们:“事物发展的根本原因,不是在事物的外部而是在事物的内部,在于事物内部的矛盾性。”“唯物辩证法认为外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用。”对坑道地压来说,内因是岩体自身的特殊性,如岩石结构面(节理面、层理面)的性质和产状、矿物成分、风化程度、地质构造等;开挖坑道的毛洞尺寸、形状和施工方法以及衬砌结构类型等等则是外因。根据普氏岩体均是散粒体的假定,只要开挖坑道,就会在坑道的周围出现一个松动圈,山体压力应由此决定。但大量事实说明,在中等以上坚硬岩体内开挖坑道时并非如此;常见的情况是局部岩石掉块,有的将断面挖成马蹄形、圆形,避免人为造成的张口裂隙时,岩石掉块就很少,毛洞基本是稳定的。文化大革命期间,在河北满城县出土的二千年前的汉墓是当时劳动人民用手工在石灰岩中开凿的穹窿式洞室,直径为14米,高7.9米,两侧耳房开挖成马蹄形,断面跨度4.1米,高4.3米,虽经多次大地震,现在仍很完整,很稳定,没有掉块现象。近几年来在中等以上坚硬岩石(即普氏坚固系数 $f=4\sim6$ 的地层)中构筑坑道时,没有根据普氏地压理论设计,而减薄了衬砌,经实践证明,百分之九十九以上是成功的;另一方面,按普氏地压理论进行设计计算的陇海路13座黄土隧道衬砌,普遍都产生了纵向裂缝,其位置多在起拱线以上1~2.5米处(约1/4拱跨处);根据那里工务段的统计,裂缝总长达4810.5米,占隧道总长7682米的68%。这些隧道都不同程度地进行了加固,有的作了钢筋混凝土套拱,充分说明普氏地压理论脱离实际。

根据普氏地压理论设计的坑道衬砌,有的在拱圈1/4跨度附近出现裂缝,有的在拱顶外缘出现裂缝,甚至某些大跨度的工程在1/4跨度处发生混凝土压碎,钢筋鼓出等现象。对照应力分布情况,这种破坏现象不符合普氏地压理论的预想,可以说理论与实际相反,因为根据普氏地压理论计算,拱圈1/4跨度附近内缘受压,而拱顶内缘受拉。有的隧道为了防止变形开裂曾将衬砌加厚,甚至在衬砌内加入钢筋或钢轨,但仍不能完全避免在拱部出现裂纹和裂缝。我们认为,产生这种情况的原因之一,是由于设计中采用的普氏地压理论和它

的衬砌计算方法不合理引起的，当然还与荷载图形选择和衬砌型式有关，所以它的安全度得不到保证。

通过实际调查，应用普氏地压理论进行坑道衬砌计算，有的偏于危险，有的保守浪费。

1. 普氏地压理论用在碎裂不稳定岩层中偏于危险

从普氏理论推导可知（如图2），压力拱在垂直岩石压力 q 的作用下，拱脚处的水平推力为 H

$$H = \frac{q \cdot b_1^2}{2h_1} \quad (3)$$

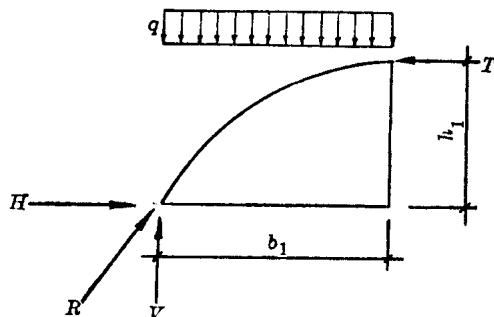


图2 计算简图

因压力拱受力是均匀对称的，故取压力拱的一半进行计算。在拱顶处因结构对称，剪力等于0。又因拱为散粒结构，不能承受弯矩，故沿拱轴线所有截面的弯矩皆等于0。根据拱的极限平衡条件，如果拱顶推力 T 有所增加，大于拱脚处摩擦力 $f \cdot q \cdot b_1$ ，则压力拱即丧失稳定性。要保持压力拱为平衡拱，必须取水平稳定安全系数 K ：

$$K = \frac{f \cdot q \cdot b_1}{\frac{q \cdot b_1^2}{2h_1}} = \frac{2h_1 f}{b_1} \text{ 或 } h_1 = \frac{b_1}{2f} \cdot K \quad (4)$$

若 $K=2$ 时， $h_1 = \frac{b_1}{f}$ ，即普氏地压标准式。也就是说，在普氏地压公式中安全系数 $K=2$ 为一常数。这里不管岩石性质的变化，岩石的好坏，而把安全系数均视为常数，显然是不适宜的。根据工程实践经验，这个系数在中等硬岩或侧压较小的软岩石（ $f=3$ ）中尚可应用，但对侧压力较大的碎裂松软岩层来说显然偏低，因而求得地压力偏小。

如浙江某水库工程隧道，开挖洞径4米，进口段岩石为薄层灰页岩，洞身及出口段岩石为凝灰砂岩，岩层产状近水平。经鉴定，进口段 $f=1\sim2$ 。按普氏公式计算，压力拱高度 $h_1=1\sim2$ 米。隧洞于1958年打通，施工中在进口段曾发生坍塌，坍塌高度达4~5米左右，比普氏压力拱大2倍。又如某水工隧洞，按普氏公式计算，压力拱高度为3.5~4米，实际塌落拱高为8~9米。又如某水库泄洪洞按普氏公式计算，压力拱高度4米，而实际坍塌至地表。

2. 普氏地压理论用在坚硬完整岩石中偏于保守

普氏地压理论将整体性岩石说成是松散体，并引用一个岩石的“似摩擦系数”来加以概括。普氏认为，岩石似摩擦系数的大小可反映岩石坚固性程度。因此，普氏把似摩擦系数与岩石坚固性系数联系在一起，并用来计算坑道上岩石压力的数值。首先，将最坚硬的花岗岩、石英岩等都视为松散介质，这显然是不合理的。实践证明，影响地压力值大小和地压分布规律的因素很多，如坑道的跨度、岩层的层理和节理、岩层的裂隙构造（即岩层破碎程度）、岩层中地下水量的大小等，都有显著的影响。在同一岩层中由于破碎程度不同，压力值有很大的不同；例如，严重破碎与节理发达的岩石，较中等破碎与轻度节理的岩层地压力值就增加40~200%。就是同样破碎程度的岩层中，压力值的变化幅度也是很大的。

若干实测结果已证实,坑道的地层压力无论沿坑道纵向或沿衬砌周边(横向)的分布都是不均匀的,而且相差很大,从下表的实测结果即可看出。

地 层 情 况	纵 向 (吨/米 ²)		横 向 (吨/米 ²)	
	最 大 值	最 小 值	最 大 值	最 小 值
中等强度石灰岩	5.7	1.5	8.2	0.9
中等强度的页岩	6.2	3.2	8.8	1.5
破碎的石灰岩	10.7	6.3	17.3	3.7
侏罗纪的粘土	24.5	18.4	34.9	9.1
寒武纪的粘土	10.3	5.4	17.7	3.5
密实而含水的砂	12.1	7.8	13.9	4.1

注:本表摘自“铁路标准设计通讯”1964年第4期第25页。

地压分布不均匀除同岩层地质构造的特征有关外,还同岩层与坑道被覆的接触程度有关。

某水电勘测设计院通过30多个水工隧洞调查的结果证明,以普氏公式计算的山岩压力与实际情况是不相符合的。如某水库泄洪隧洞,开挖洞径5~6米,岩石为石英云母片麻岩及部分石英岩。经鉴定,普氏坚固系数为 $f=5\sim6$,按普氏公式计算洞顶压力拱高度 $h_1=0.4\sim0.5$ 米,该隧洞于1960年打通未进行支撑,至1961年才进行衬砌间隔1年时间,经过一次泄洪考验,未发现有坍塌现象。又如某水库发电隧洞(长约300米),岩石为花岗岩,新鲜坚硬,一般地段为 $f=8\sim10$,部分地段定为 $f=6$ 。根据普氏公式计算,洞顶压力拱高度 $h_1=0.2\sim0.25$ 米,部分地段 $h_1=0.33$ 米。该隧洞于1959年打通,除进口约20米一段已衬砌外,其余地段未衬砌,经6年时间考验(中间经过数次泄洪),未发生任何坍塌现象,出入口地段洞顶岩石厚度不足三倍洞径,亦未发生坍塌现象。又如东北某市的地下工程在石英岩中开挖毛洞跨度18米,高度9米,地层厚度最薄处为8米,喷浆防风化处理后进行离壁衬砌,使用三年,未发生任何情况。实践证明,坚硬完整的岩石可不考虑围岩压力。

某水电站地下厂房跨度28米,高度50米,地质为石英片岩,岩石整体性较好,没有发生张开裂隙,也没有掉块、坍方及岩层滑动等情况。按普氏理论和它的计算公式,坚固系数为 $f=6$,山岩压力 $q=4.36$ 吨/米²。通过二、三年的实测可知山岩压力最大值为1吨/米²(1960年9月28日测得),一般为0.66吨/米²左右,临时支撑也未受力;这比按普氏公式计算的小得多。

从上述工程实例可以看出,对于坚硬完整的岩石,按普氏公式计算出的隧洞(坑道)压力拱高度一般偏大,再好的岩石也有压力。但实践证明很多隧洞掘通后未设支撑,有的经过二、三年时间的考验,有的达五、六年之久时间考验,有的水工隧洞并经过10~15米/秒流速的冲刷,也未发生任何坍塌现象。

三、几个问题的探讨

我们在坑道的设计和施工中深切体会到重点工程一定要搞科学试验,并进行深入的调查研究 and 科学分析,不断地总结经验,以便提高。现就我们在坑道设计施工中体会的问题

提出如下:

1. 要充分利用围岩岩石拱的承载能力。

要充分利用围岩岩石拱的承载能力, 处理好围岩, 使它自己可以完全承受山体压力, 将不利因素转换为有利因素。具体作法可喷一定厚度的混凝土使它和砂浆锚杆一起把周围岩石联结起来, 形成一个几米厚的岩石拱; 长的砂浆锚杆或其它类型锚杆可形成十几米厚的岩石拱(国外工程实例较多)。围岩经砂浆锚杆固结后, 岩体整体强度比现浇混凝土拱强度大得多。因为岩石拱一般是在抗压强度 600 公斤/厘米²以上的岩石中选择的, 抗压能力、抗震能力都比现浇混凝土拱好得多。目前的混凝土衬砌抗压强度一般为 200~300 公斤/厘米²。如发电厂, 跨度16米, 高度21米, 构筑在砂岩中(中等强度岩石), 采用楔缝式砂浆锚杆, 将砂岩裂隙固结成整体。灌浆压力为16公斤/厘米², 有些砂浆锚杆灌水泥100公斤, 锚杆长度2.5~3米, 等于形成2.5~3米厚的砂岩拱, 钢筋网喷混凝土厚度10厘米。这样就代替了原设计拱顶厚90厘米、拱脚 1.4 米厚的现浇钢筋混凝土整体式衬砌, 节约衬砌材料。

理想的薄衬砌型式是喷混凝土。国内有地下厂房跨度18米, 高度40米, 构筑在花岗岩中, 采用喷混凝土15厘米厚, 该厂房已投产使用, 效果较好, 喷混凝土标号高达 300 号以上。又某工程侧墙高60米, 采用喷混凝土也是成功的。这充分说明围岩岩石拱有一定的承载能力。

2. 坑道衬砌设计应充分发挥岩帮的作用。

目前的坑道衬砌是有相当大潜力的, 因为大都没有充分利用围岩的作用。通过试验得知, 坑道两侧岩帮的压切强度是很大的。如中等坚硬完整岩体所得压切强度达 68~200 吨/米², 因此, 在拱脚处的岩体可以承受拱部传来的相当大的一部分力。工程实践证明, 修建大跨度地下工程中采用半衬砌是成功的。由于以往修建的坑道拱脚与墙等厚, 有的拱脚处未紧密回填, 因而压切强度的力量没有充分利用。一般采用薄衬砌在拱脚上下 1 米左右用浆砌块石密实回填, 或用同标号混凝土浇筑密实, 以确保拱脚稳定。根据实测资料, 在起拱线以上1.5米范围内用同级混凝土密实满灌, 则每一延米拱圈上可有12~42吨粘着力。侧墙顶端 1 米用同标号混凝土密实回填, 则每一延米侧墙上有 40~140 吨粘着力。在铁路隧道采用先拱后墙法施工, 有的连续开挖几十米马口, 拱圈也没有掉下来, 因此, 在拱脚墙顶处必须回填紧密。若采用大拱脚(一般先拱后墙法施工)薄边墙衬砌型式时, 就一定要设法确保大拱脚的稳定性, 如采用加大拱脚厚度20~40厘米、打锚杆或设托梁等措施。

大跨度的地下建筑物, 一般都修建在较好的地层中。这些地层的岩石强度比较高, 整体性好, 承载能力较大。因此, 如果把拱脚的一部分或大部分直接支撑在侧墙岩帮上面, 让拱圈传至拱脚的力主要由拱脚处的岩石来承担, 而只有小部分由竖直侧墙来承担。这样就改善了侧墙的受力条件。侧墙不超挖或少超挖, 并满灌混凝土, 以充分利用侧墙背后粘着力, 也可大大减薄侧墙厚度, 节省混凝土, 降低造价。

如某地下工程跨度40米, 构筑在中等强度的石灰岩中, 采用半衬砌拱顶混凝土厚90厘米, 拱脚厚 2 米, 侧墙高3.2米, 用薄边墙混凝土厚度10厘米, 混凝土与侧壁岩石密贴(亦可喷砂浆3~5厘米或喷混凝土 5 厘米)作为防风化层, 以防岩石掉块。这样可使拱部传来的力主要由侧帮岩体承受。

更经济的办法可采用花边墙衬砌, 即间隔设置边墙, 一段有边墙, 一段没有边墙, 不

设混凝土侧墙处可喷砂浆3~5厘米,或喷混凝土5~10厘米,以防岩石风化。如某隧道是通过煤系地层的,对长达20多米的拱脚压力量测证明,侧墙先挖马口段落受力过大,后挖马口的段落几乎没有受力。实践证明,做了花边墙衬砌后的隧道几年来非常完好。又如某水电站的公路隧道,是中等硬度石灰岩,采用间段衬砌,使用8年相当完好,围岩没有掉块,若喷浆或喷混凝土更没有什么问题了。

3. 应充分注意地下水对地层压力的影响。

对于难软化的岩石(软化系数0.85以上的岩石),地下水的作用对围岩压力影响很小。但对于泥质、炭质组成的岩体,或风化破碎易于软化的岩体,则影响甚大。因为坑道开挖以后,地下水改变了原来的活动方向,逐渐向坑道汇集。同时在爆破震动和地下水软化岩体(有时还有动水压力)的共同作用下,坑道周围可能形成一个软弱带,降低了岩体的强度和围岩的稳定性,从而增大了山体压力。所以,易于软化的岩层在有地下水作用下的山体压力较没有地下水时为大。如某工程西通道跨度2米,高度3.5米,钢筋混凝土衬砌厚35厘米。原设计要求在雨季(7~8月份)以前进行压浆固结岩石,因种种原因没有进行,到9月份,侧墙岩体滑动,引起地层压力增大,致使起拱线以下50~100厘米处横向裂缝宽5毫米,有的竟达10毫米,长达25米左右。最后采取了加强措施,缩小跨度(从2米改为1.5米),再衬砌25厘米钢筋混凝土内套,衬砌后又压浆。有的隧道在雨季测出山体压力较干旱季节为大,如某隧道虽地下水不发育,在雨季(6~8月)测得拱部压力为4吨/米²左右,较在旱季测得的压力2吨/米²大一倍左右。在坑道掘进中常常是有地下水的地方容易坍方,而且支撑排架所受的力也比较大。往往毛洞在刚挖时是稳定的,若长时间有地下水作用,不衬砌就要坍塌了。据调查统计,很多隧道事故都是地下水活动的影响造成的,可见地下水对地压力影响之大。

4. 坑道几何尺寸和断面型式对地压力是有影响的。

如坑道的跨度10米、高5米和坑道的跨度5米、高10米的地压力,显然是不一样的。有的坑道断面挖成马蹄形、圆形就不容易坍方。据某铁路工程局对已施工的几百座隧道进行初步统计,一般直墙式隧道衬砌的裂缝或变形相对较大,曲墙式衬砌的裂缝和变形则相对较小。甚至有的曲墙式衬砌比直墙式衬砌还薄,但并未产生裂缝,而直墙式衬砌则已经开裂了。在我们的工程中也有类似情况,较大的裂缝一般发生在直墙式衬砌地段。此外,在东北及其它地方调查中也发现,曲墙式衬砌对冻胀压力以及可能出现的不对称压力具有较大的抵抗能力。由此看出,曲墙式衬砌比直墙式衬砌对外界复杂的因素有较好的适应性。从结构强度来说,在同样垂直压力及侧压力的作用下,同样衬砌厚度,曲墙式衬砌较直墙式衬砌拱顶安全系数要大6~13%左右。从结构内力的均匀性来说,在普氏均布垂直压力作用下,曲墙式衬砌各截面安全系数的变化幅度比直墙式衬砌要小,约差50%左右。

某黄土双线隧道调查报告中提出,“土压力和衬砌应力实测表明,现有的衬砌形式(三心圆尖拱)与受力状态不适应,使混凝土受拉过大,不能充分发挥混凝土的抗压性能,因此应改进衬砌拱轴型式以适应实际受力状态。”据调查,有的在1931年修建的马蹄形断面单线隧道到现在还是完好的,有的在五十年前修建的半圆砖拱隧道衬砌50厘米厚,侧墙用料石砌的单线隧道,至今也完好,而现在所采用尖拱型式混凝土衬砌虽然厚得多,但还有裂缝,有的甚至要采取加强措施,在衬砌外加钢筋混凝土套拱。这充分证明坑道几何尺寸和断面型式对地压力是有影响的。

对已往毛洞开挖后长时间未衬砌的坑道、陕北老黄土窑洞以及山岭隧道等进行调查发现, 梯形或矩形导洞两侧上角附近多半容易发生坍塌。这个位置是开挖导洞后地应力集中的地方。所以, 开挖毛洞时(一次成洞)一般推荐用马蹄形, 如使用联合掘进机时, 用圆形断面最好(如水下隧道), 它没有应力集中, 不易产生张口裂缝。从国内外大量工程实践来看, 这一点已得到充分的证实。

5. 衬砌设计要充分利用一切有利因素, 减少地压力。

如开挖毛洞时, 临时支撑用砂浆楔缝式锚杆, 永久支撑用砂浆锚杆, 可担负一定地层压力; 用整体混凝土衬砌时可减薄衬砌, 岩石地压力可取较小值。如衬砌壁后进行回填压浆和固结压浆时, 有关弹性抗力系数 K 和弹性模数 E 可取较高值, 并可减薄衬砌厚度。

十年前国外某地下工程对衬砌进行灌浆试验, 在衬砌背后4米深处(如水下隧道固结灌浆)压浆, 用30公斤/厘米²压力压入一定数量水泥浆, 平均每平米洞壁耗水泥175公斤。灌浆前后用千斤顶在洞内测量弹性模量, 其值如下表:

相对岩石倾向的 测量方向	岩石弹性模量 (公斤/厘米 ²)				
	灌 浆 前 (千斤顶试验)			灌 浆 以 后	
	初始弹性模量 E_0	最终弹性模量 E_1	洞内试验 E_2	千斤顶试验 E_0	洞内试验 E_1
垂 直	10000	47000	25000	100000	97000
平 行	12500	43500	不能测得	200000	236000

从上表可以看出, 灌浆后的岩石弹性模量 E 比灌浆前要增加3.8倍到5.4倍, 弹性抗力系数 K 值也可相应提高。

6. 施工方法对地压力的影响。

若施工方法得当, 可将不利的影响限制在最小范围内; 否则会使地压力增大。如某隧道衬砌产生的裂缝, 经三结合研究就认为, 多半是爆破炸药量过大引起的。坑道开挖后, 特别是属于易风化岩石(如页岩)的坑道, 如衬砌不及时, 拱脚上下1米左右回填不密实等, 均可引起围岩的松弛和坍塌, 造成较大的地压力, 威胁坑道的安全, 甚至引起坑道的开裂和变形, 这些例子是不少的。反之, 就是土质坑道, 若工序跟的紧, 衬砌背后回填密实, 施工质量较好, 土体压力就会相应减少。如在西北老黄土中构筑的6.27米跨度的拱形结构仓库, 采用“L”形拼装预制构件衬砌的厚度只有5厘米, 结果是安全无恙。

总之, 坑道围岩压力是一个复杂的多因素的问题, 它不仅与岩石的物理力学性质、岩石结构产状、衬砌结构的跨度和高度以及毛洞形状等有关, 而且还与施工方法、施工进度、衬砌施工区段的长度、施工机具(如用联合掘进机或钻眼爆破), 以及风化、温湿度等物理影响有直接关系, 企图利用一种理论解决所有问题是不可能的。由于目前对于作用在衬砌上主要荷载围岩压力的分布形式(即荷载图形)及大小还不很清楚, 依此算出的衬砌厚度的可靠性很难估计。普氏地压理论是在二十世纪初期(1907年)提出来的, 受历史条件和当时施工条件的限制, 它没有考虑毛洞开挖后周围岩体的应力分布情况, 在岩体物理、力学方面仅考虑了内摩擦角 φ , 而没有考虑洞体稳定性的有关指标, 在几何特征方面仅考虑了毛洞高度和跨度的影响, 而没有考虑毛洞围岩变形或蠕变的影响。因此具体运用普氏地压理论计算围岩压力往往带有很大的任意性。实践证明, 运用普氏地压理论计

算作用在衬砌的垂直围岩压力不是过大就是过小。计算数值往往与实测结果相差成倍。对围岩压力实测结果表明，有的围岩压力成驼峰状（拱顶小两侧大），有的围岩压力仅拱中间有，有的围岩压力在拱中间就没有，有的围岩压力仅一边有，形成偏压等情况。这充分说明地压力并非象普氏所假定的拱部围岩压力是均匀分布的，另外一些问题在现代技术条件下还须进一步摸清规律。因此，今后的坑道工程，特别是较大跨度的重要工程，要注意它的荷载图形问题，要反复对比，确定最合理的拱轴型式。

毛主席教导我们：“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。”对地压力的认识也是这样，我们必须在生产实践基础上，通过总结经验和开展科学研究，逐步提高地压力的理论水平。我们认为：今后应多从地质力学角度进行分析研究，并在综合分析比较的基础上，采用工程类比方法进行设计，以减薄衬砌厚度，多、快、好、省地完成坑道工程的设计和施工任务，更自觉地运用唯物辩证法来指导围岩压力的研究工作。

大力发展喷锚支护技术

冶金工业部建筑研究院喷锚支护组

喷混凝土、锚杆支护是无产阶级文化大革命中发展起来的新技术，是冶金矿山建设战线技术革新的丰硕成果。

1965年以来，喷混凝土、锚杆支护已陆续在五十余个冶金矿山中采用，支护了竖井、斜井、平巷和各种类型的洞室。

实践证明，它是一项行之有效的新技术。它同传统的普通浇筑混凝土支护相比，可以减薄厚度 $1/2 \sim 2/3$ ，节省岩石开挖量 $10 \sim 15\%$ ，加快支护速度 $2 \sim 4$ 倍，节省劳动力 50% ，节约全部模板和 40% 的混凝土，降低支护成本 40% 左右。以一公里双轨巷道为例，可节省木材二百六十多立方米，水泥二百二十多吨，少挖岩石一千八百立方米，节约投资三十五万元。冶金矿山井巷工程量很大，积极推广喷锚支护技术，对于加强战备，加速矿山建设具有较大的意义。

本文拟介绍一些喷锚支护的实践经验，对其当前存在的问题和今后发展的方向提出一些看法，以促使这项新技术能够普遍推广。

一、近年来喷锚支护的实践和成就

近年来，喷锚支护已在更广泛的范围内得到应用和发展。用它来支护大型洞室，不良岩层和受采矿爆破振动影响的巷道获得了新的成效。现将近年来喷锚支护的实践和成就分述如下：

（一）大型洞室喷锚支护迅速发展

最近几年，冶金矿山10米跨以上的粗破碎洞室和卷扬机洞室相继采用喷锚支护（见表1），有的已建成多年，使用情况良好。图1为江苏梅山铁矿用喷锚支护的地下变电所。图2为正在用喷锚支护的某冶金企业大跨度隧洞。

表1列举了冶金矿山大型洞室用喷锚支护的情况。

其它部门在跨度大于20米的洞室中也成功地采用了喷锚支护。

大型洞室的特点是跨度大，边墙高，构筑物往往承受长期机械振动影响，对于结构防潮要求较高。喷锚支护成功地用于

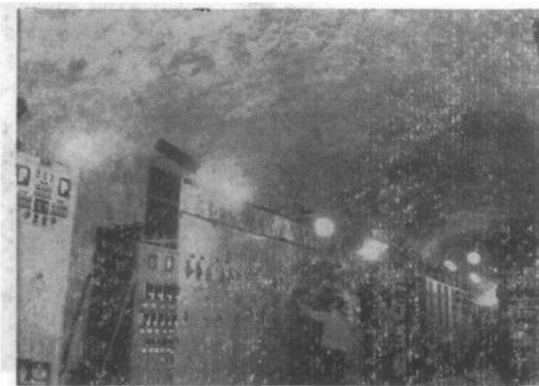


图1 使用中的梅山铁矿地下变电所(喷锚支护)