

地下洞室的锚喷支护

水利电力部东北勘测设计院锚喷组主编

水利电力出版社

TV 223.34

1

地下洞室的锚喷支护

水利电力部东北勘测设计院锚喷组主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书汇集了水利水电工程应用锚喷支护和大型预应力锚索加固的大量工程实例,比较全面地介绍了高大洞室、水工隧洞锚喷支护的设计和大型预应力锚索的设计、施工;同时介绍了光爆锚喷施工与锚喷支护在不良地质条件下的应用以及锚杆和喷混凝土的性能及其施工质量检查方法;还介绍了有关方面所取得的科研成果和经验。

本书可供水利、电力、铁道、冶金、煤炭、石油、军工等部门从事地下建筑设计、施工和科研工作的技术人员以及有关专业的大专院校师生参考。

地下洞室的锚喷支护

水利电力部东北勘测设计院

锚 喷 组 主 编

(根据水利出版社纸型重印)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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

*

787×1092毫米 16开本 15.25印张 345千字

1981年4月第一版

1985年1月新一版 1985年1月北京第一次印刷

印数 0001—4500册 定价 2.70元

书号 15143·5586



前 言

国内外的大量工程实践证明，锚喷支护是一项行之有效的先进技术，它施工速度快、安全可靠、节省原材料，对多快好省地进行地下工程建设具有重大的现实意义。为了使这项技术更好地为实现“四个现代化”服务，电力工业部委托我们编写此书，以便供从事这方面工作的同志们参考。

锚喷技术的历史发展还很短，加之地质条件的复杂性，因此对许多问题还缺乏全面和深刻的认识，也未形成完整而系统的设计理论，在实际的工程设计中还是依靠“工程类比法”。本书汇集的主要工程资料，都尽量就其地质条件、围岩特性、工程规模、设计和施工程序、观测试验以及实际运行情况等方面，作了比较详细的叙述，以便于读者应用。在编写过程中，为了避免重复，对于各工程所共同使用的设计和施工方法，只以某一工程为例，其余一概从简；对于选入的典型材料，也删节了文中某些冗长的叙述，但仍力求保持原有的主要观点和结论；对于某些不很成熟或仍有争议的设计方法，我们也本着“百家争鸣”的精神，按其原有的本来面目予以列出，不作评论，以便共同讨论。

本书的编写工作，以电力工业部东北勘测设计院为主，由水利部第五工程局、电力工业部第五工程局、安徽省水利勘测设计院、吉林省水利勘测设计院以及武汉水利电力学院等单位组成编写小组。第一章由严克强同志编写；第二章由田玉甲、李绪、孙国纬等同志编写，王广福同志参加了部分工作；第三章由严克强、王鸿志同志编写，邹纪元同志参加了部分工作；第四章由孙国纬、贾耀先同志编写；第五章由王冲同志编写，严克强同志参加了部分工作；第六章由杨寿昌同志编写，严克强同志参加了部分工作。全书由严克强同志进行统一整理和修改。

由于我们的理论水平有限，实践经验也不多，因此尽管作了很大的努力，但书中仍可能有片面、遗漏和错误之处，敬请读者多加批评指正。

编 者

一九八〇年三月

目 录

前 言	1
第一章 概述	13
第二章 高大洞室锚喷支护的设计	13
第一节 根据山岩压力验算锚喷支护后围岩受“压剪破坏”时的安全度	13
第二节 根据“固端拱”强度验算和加载试验结果检验锚喷支护的可靠性	17
第三节 根据“类比法”初定锚喷支护参数并用松散岩石荷载进行核算	21
第四节 根据“塑性区”的分布情况确定锚喷支护方案	26
第五节 根据“块体平衡”分析结果进行锚喷支护设计	38
第六节 根据拉应力区和坍滑体的大小选择锚喷支护参数	45
第三章 水工隧洞锚喷衬砌的设计	57
第一节 水工隧洞的围岩分类	57
第二节 水工隧洞锚喷衬砌参数的选择	63
第三节 锚喷衬砌的糙率系数	83
第四节 水工隧洞锚喷衬砌的几个其他问题	88
第五节 锚喷衬砌隧洞的加载试验	91
第六节 四次大型锚喷衬砌隧洞水压试验的主要成果	114
第七节 水工隧洞锚喷衬砌与围岩性质的关系	132
第四章 光爆锚喷施工及锚喷支护在不良地质条件下的应用	136
第一节 光面爆破的理论与实践	136
第二节 锚杆的结构形式和施工方法	141
第三节 喷射混凝土施工	146
第四节 锚喷支护的施工程序、场地布置和施工组织	151
第五节 锚喷支护的经济效果分析	155
第六节 锚喷支护在不良地质条件下的应用	157
第五章 大型预应力锚索的设计和施工	170
第一节 大型预应力锚索的结构形式	170
第二节 大型预应力锚索的施工	174
第三节 大型预应力锚索在岩体加固工程中的应用	177
第四节 大型预应力锚索在大坝和其他加固工程中的应用	188
第五节 结束语	199
第六章 锚杆和喷混凝土的性能及其施工质量检验方法	202
第一节 锚杆的基本性能及其测定方法	202
第二节 喷射混凝土的基本性能	208
第三节 改善喷混凝土性能的途径	225
第四节 锚喷支护施工的质量检验	229
参考资料	237

第一章 概 述

锚喷支护亦称锚喷衬砌,是锚杆和喷混凝土支护的统称。根据不同的情况,有时它们单独使用,有时联合使用,有时还要加钢筋网或钢拱架等。

锚喷支护是五十年代从国外引进的一项技术,但是到近十多年来才得到比较迅速的发展。

1953年,在镜泊湖水电站(老厂)的引水隧洞中采用加钢筋($\phi 16 \sim \phi 19$)喷砂浆的方法,成功地修复了遭到严重破坏的混凝土(浇筑)衬砌。1963年,由原水利电力部上海勘测设计院设计并制成了HP-1型混凝土喷射机,1965年前后,太平湖等输水洞就开始应用了喷射混凝土衬砌。1959年和1964年,先后在龙亭和陆浑水库的泄洪洞中进行了锚杆支护的试验研究和应用,接着在三门峡和云峰水电站工程中也得到了应用。1959年,水利电力部门的有关技术刊物就开始介绍了光面爆破技术,1964年在二龙山水库输水洞中对此进行了比较全面的试验研究,并在实际应用中取得了较好的效果。

七十年代初期以来,锚喷技术得到了新的发展,它的应用进入了一个新的阶段:从作为一种临时性的支护手段,发展为一种永久性的衬砌形式;开始只在不过水的洞室中应用,而今已在有内水压力作用下的隧洞中应用(大约有20个工程实例);过去,只在尺寸较小的洞室中应用,现在可在最大跨度为25米,边墙最大开挖高度为79.2米的洞室中应用;此外,在破碎、软弱、松散岩层等不良的地质条件下也得到了成功的应用。根据1978年8月的不完全统计,在水利电力工程的各类洞室中,应用锚喷支护的总面积约有32万 m^2 ,若换算为50 m^2 断面的隧洞,其长度相当于12.7公里。这个数值,在实际建成的地下工程总量中只占有很小的比重,可见它的潜力很大,具有广阔的发展前景。

水利电力工程地下建筑物中锚喷支护的应用情况见表1-1和表1-2。

一、水工隧洞锚喷衬砌设计中的有关问题

据初步统计,水电地下工程中的锚喷支护与模浇衬砌相比较,可以节约水泥三分之一到二分之一,而且几乎不用木材。节省劳动力和投资一半以上,缩短工期二分之一到三分之二,增产节约效果非常显著。对于多快好省地修建地下建筑物具有重大的现实意义。但是,就全国目前的情况来说,应用得还不够普遍,主要是因为这项技术尚未发展到相当成熟的阶段,还没有可供使用的统一的设计方法,许多重大的技术问题有待于研究解决。

1. 锚喷衬砌的承载能力和内水外渗的影响问题

目前,锚喷衬砌的实际应用,大都只限于作用水头为30米左右(最大的为50米)的引水隧洞和尾水隧洞。在高压隧洞中以及隧洞进口和出口等薄弱部位都还没有使用,其主要原因是耽心衬砌开裂或者通过衬砌外渗的水流过多而造成对邻近建筑物的不良影响,甚至由此而导致所在山体的失稳破坏。因此,人们对锚喷衬砌的承载和抗渗能力都很关心。事实上,承载能力和内水外渗问题,分属于两个不同范畴的问题,但因其所造成的不良后

表 1-1

水利电力工程地下建筑物的锚喷衬砌应用情况一览表

工程名称	断面规格 (宽×高×长, 米)	地质条件	支护类型	锚 喷		参 照	施 工 日 期
				锚	杆	喷混凝土	
回龙山水电站 主厂房	17.2×37×66	安山角砾岩, 坚硬致密, 有三组节理不发育, 方解石充填胶结较好, 局部有危石, 地下水受季节影响明显	锚喷网永久支护特殊部位, 顶拱设肋形钢筋混凝土拱梁	拱: 螺旋 $\phi 16$, $L 250$, @100 墙: 螺旋 $\phi 16 \sim 19$, $L 150 \sim 200$ @100×100		拱: $\delta = 15 \sim 20$ 墙: $\delta = 5 \sim 10$ 用 $\phi 9 @ 30$	1968年~ 1972年
回龙山水电站 调压井	圆形直径20, 井深40	安山角砾岩, 有三组较发育节理, 方解石充填	锚喷网永久支护, 从井底向上, 21米为钢筋混凝土永久衬砌	拱: 螺旋 $\phi 20$, $L 150 \sim 200$ @150×150 壁: 螺旋 $\phi 16$, 20, $L 150 \sim 200$ @150×150		拱: $\delta = 10 \sim 15$ 壁: $\delta = 5 \sim 10$	1969年~ 1971年
503 火电厂主 厂房	23.6×45×120	花岗岩, 新鲜、坚硬, 裂隙一般, 不发育, $F = 8 \sim 10$	锚喷网永久支护	拱: $\phi 25$, $L 120$ @100×100 墙: $\phi 25$, $L 150 \sim 300$ @250×250		拱: $\delta = 10 \sim 15$ 墙: $\delta = 10$	
211 火电厂主 厂房	21.2×37×42	主要为前震旦纪花岗岩片麻岩, 少量云母片岩, 岩石坚硬完整, $F = 6$	锚喷网永久支护	拱: $\phi 18$, $L 250$ @100×100 墙: $\phi 20 \sim 25$, $L 250 \sim 500$ @150×150		拱: $\delta = 15$ 墙: $\delta = 10$	1970年
镜泊湖水电站 主厂房	18×27×62	闪长岩, 中粗粒花岗岩为主, 间有斑状花岗岩、细晶岩等侵入, 岩石新鲜完整	锚喷网永久支护, 顶拱有钢筋混凝土肋形拱梁	$\phi 16$, 22, $L 250$ $\phi 22$, $L 300 \sim 400$		拱: $\delta = 15$ 墙: $\delta = 10$	1969年~ 1977年
镜泊湖水电站 变电站	13.5×13.6×58.3	闪长岩, 中粗粒花岗岩为主, 间有斑状花岗岩、细晶岩等侵入, 岩石新鲜完整	锚喷网永久支护	螺旋 $\phi 16$, $L 250 \sim 350$ 螺旋 $\phi 18$, $L 500$		$\delta = 15$	1969年~ 1977年
511 火电厂主 厂房	20×21×172	下侏罗纪砂岩、粘土岩互层, 产状近于水平, 比较完整, 地下水不发育	顶拱为锚喷网永久支护, 边墙为锚浇联合衬砌	$\phi 28$, 30, $L 350 \sim 400$ @120×200		$\delta = 10$	
碧口水电站调 压井	12×79.25×46.7	变质凝灰岩和绢云母石英千枚岩, 断层裂隙发育, 结构面分四组, 地下水不发育	锚喷临时支护	螺旋 $\phi 25$, $L 250 \sim 400$ @100×100		局部喷混凝土 $\delta = 7 \sim 15$	1973年
白山水电站主 厂房	25.4×54×148.5	古老的混合岩, 新鲜、坚硬较完整, 节理裂隙分四组	锚喷网永久支护局 部, 加预应力锚索	拱: $\phi 22$, $L 350$ @150×150 墙: $\phi 22$, $L 250 \sim 350$, 350 ~450 @150×150		$\delta = 15$	正在施工

备 注

1) 锚杆和钢筋网的钢筋直径以毫米计, 间距、长度、网格尺寸等, 均以厘米计, L 表示长度, @ 表示间距, ϕ 表示直径,
2) 喷混凝土厚度 δ 以厘米计。

我国水工隧洞应用锚喷射衬砌情况一览表

表 1-2

工程名称	断面形式	隧洞类型	地质概况	作用水头 H (米)		锚 喷 衬 砌 形 式		建成时间、 地点和运行 情况	锚 喷 段 长 (米)
				流速 V (米/秒)	喷射混凝土 厚度 (厘米)	锚 杆	钢 筋 网		
南芬矿	$D3.2$ 米 $D2.0$ 米 (支洞)	泄 洪	泥质、炭质、钙质页岩与夹有石英岩的 泥灰岩，数十条断层，裂隙发育，局部很 破碎，并有滴水 and 淋帮水， $F=1\sim4$		5~10	$\phi 16 L 150\sim 180@100$	$\phi 4 @10\times 10$	1966年辽宁	1083
					15~20	$\phi 16 L 150\sim 180@100$			826
朱家包包	5.1×6.6 米	泄 洪	石灰岩		3~5			1971年	980
回龙山电站	11×11 米 城门洞	引 水	中等硬度结晶灰岩，火山碎屑岩，断层 层外，裂隙开度一般为1~3毫米，地下水 不发育	$H=15$ $V=3$	10~15	$\phi 16 L 150@150$ (局部)	$\phi 9 @30\times 30$ (局部)	1971年， 辽宁，几次 检查情况良 好	635
渔子溪电站	$D5.7$ 米	引 水	花岗岩闪长岩，闪长岩及花岗岩中等以上 坚硬岩石 $F=4\sim 5$ ， $K_0\geq 350$ 的地段	$H=30$ $V=2.47$	15~20			1972年12 月，四川， 运行后检查 四次，基本 良好	590
弄弄沟	4.4×6.5 米	泄 洪	细质砂岩		3~5			1972年	
星星哨电站	$D3.5\sim 3.8$ 米	输 水	花岗岩	$H=16$ $V=5\sim 7$	15			1973年， 吉林，未达 设计流速， 情况良好	192
鹤泊湖电站	$D7.9$ 米	尾 水	闪长岩、花岗岩，节理不甚发育，出 口段40余米穿过第三纪地层围岩，稳定性 很差	$H=30\sim 40$ $V=3\sim 4$	7 10 15 25	螺旋 $\phi 16 L 260@125$ 螺旋 $\phi 16 L 210\sim 310@125$ 螺旋 $\phi 16 L 210\sim 310@125$	$\phi 6\sim 9@20\times 20$ $\phi 6\sim 9@20\times 20$ (两层)	1977年 黑龙江	1568
冯家山水库	9×12.5 米 城门洞	溢 洪	大理岩，钙质板岩，泥质片岩，地下水 活跃，泥质和绿泥石片(板)岩及破碎带稳 定性很差		5~7 10~15 20	螺旋 $\phi 18\sim 22 L 200\sim 300$ 螺旋 $\phi 18\sim 22 L 200\sim 300$ 拱脚 $L 350$	$\phi 6 @30\times 30$	1977年陕西	624

- 1) 应用借喷衬砌的水工隧洞还有大渡寨(安徽)、鼓楼铺(湖南)、大绥河(吉林)等工程;
- 2) 锚杆、钢筋网、喷混凝土的尺寸单位与表1-1同。

果，可能是一样的，所以人们经常把它们联系在一起考虑。

大家都知道，喷射混凝土衬砌层的厚度一般只有模浇衬砌的三分之一左右，有时甚至尚不及四分之一。因此就喷层本身而言，无论抗裂或抗渗能力都远小于模浇衬砌层。但是，由于喷混凝土衬砌能够以较高的强度全面的与围岩粘结在一起，两者共同工作，因此极大地提高了它的抗裂和抗渗能力。这是喷混凝土衬砌的一种非常可贵的性质，人们应该充分加以利用。

一些试验结果证明，喷混凝土衬砌的抗裂能力还是比较高的，因为三分之二以上的内水压力都由围岩来承担，当围岩比较完整时，这个数值还会增大。经分析研究证明，喷混凝土衬砌的抗裂强度主要取决于围岩的变形性质，它随着围岩弹性模量值的提高而增大。因此，对于比较破碎的围岩，假若采取工程措施（如灌浆……等）后能提高其弹性模量，那么，锚喷衬砌的应用也不是不可能的。

在许多情况下，隧洞的洞体是允许渗水的。所以，有的工程（如渔子溪一级、太平哨……等）只在隧洞的某些区段采用了喷混凝土衬砌，而其余区段则不加衬砌。对这种使用条件而言，喷混凝土衬砌层的要求，实际上只是使它起到“保护”作用，用以防止围岩的进一步风化；或者，只是用来“填平补齐”，以提高隧洞壁面的平整程度。当然，此时在抗裂和抗渗等方面，是不应该再提出更高的要求。

在不允许产生大量渗水的场合，喷混凝土衬砌是不应该开裂的，此时可按抗裂要求进行设计。有些同志耽心，这样做可能是不经济的，有时甚至是不可行的。但实测资料和分析结果证明，只要正确地考虑围岩的抗力作用，它的抗裂能力还是相当可观的。还应当指出的是，在某些情况下，即使是模浇衬砌也还需要对围岩进行固结灌浆，此时假若采用喷混凝土衬砌，则可望收到更好的经济效果：因为灌浆后能明显提高围岩的弹性模量，从而也就提高了其抗裂能力；灌浆后，随着岩石缝隙的被堵塞，喷层——围岩结合体的抗渗性能也明显提高；此外，在形成5~7厘米喷混凝土衬砌层的几天之后就可开始进行4公斤/厘米²的固结灌浆，这种施工速度之快是模浇衬砌所无法达到的。

由于喷混凝土衬砌层较薄，在较高的水压力作用下可能形成很大的水力坡降使渗漏量增大，因此人们对于沿岩体结构面可能产生的渗透破坏问题和由此而引起的围岩失稳现象是非常关心的。但是，对于这类问题目前也有不同看法，其理由是：

（1）只要注意施工质量，喷混凝土的抗渗指标一般可达8公斤/厘米²以上，因此，通过喷层向外渗的水量并不大。如湖南镇电站和察尔森水库喷混凝土衬砌隧洞的现场水压试验中发现，在衬砌开裂以前，大部分渗水集中地发生在未处理好的部位，完整衬砌所产生的渗漏很小。

（2）完整的岩石，其渗透系数远远小于喷混凝土层的渗透系数。在这样的部位，只简单地用作用水头与衬砌厚度之比，来计算水力坡降的做法是不合理的。其实际值远远小于上述的计算值。事实上，这种计算方法只在岩石裂隙的部位适用。

（3）近年来，国内外都在大量地发展薄衬砌结构，而且运行情况良好。事实说明，所谓“过大的水力坡降”并非是十分可怕的。

有的工程，由于施工控制不严，喷混凝土层曾出现过许多细微裂缝，这对衬砌的抗裂

和抗渗能力都是很不利的一种因素。但实践证明,只要加强施工管理,及时认真地做好养护工作,这种现象是可以避免的。因此,对水工隧洞喷射混凝土的施工应该提出更高的要求。

2. 锚喷衬砌隧洞的糙率系数问题

由于取消了模板,锚喷衬砌隧洞的壁面平整度往往受到人为因素的影响,而且糙度也比较大。同时,还由于实际观测的资料不够多,人们对它的数值范围还深感心中无数。这种情况,在很大程度上影响了这项技术的推广应用。

目前,许多设计单位在确定喷混凝土衬砌隧洞的糙率系数时,一般的做法是:首先把它当作不衬砌的隧洞,规定出岩面“起伏差”的平均值,然后按尼古拉兹或其他类似的公式来进行计算。应该认为,这种处理方法在过去的某一历史时期内,在某种程度上近似地反映了客观实际。因为糙率系数的大小主要取决于隧洞壁面凸起高度,而过去开挖的隧洞,其岩面起伏差都比较大(一般30~40厘米,大者达60~80厘米,甚至达100厘米以上)。在这种情况下,很薄的喷混凝土衬砌层只能随着岩面的起伏情况来敷设,不可能有效地改变开挖断面的形状和平整度。但在开挖技术不断提高的今天,情况就发生了巨变,采用光面爆破或预裂爆破法开挖的隧洞,不仅成型条件好,岩面的平整度也好(岩面的“起伏差”可控制在10~15厘米,或者更小)。这样,在喷射混凝土施工中,适当地采取“填平补齐”的办法就可以大大地改善衬砌表面的平整度。因此,假若再按上述办法来确定糙率系数显然是欠妥当的。

此外,隧洞衬砌表面的糙度实际上是不均匀的,而人们却习惯于应用均匀糙度的概念(如尼古拉兹公式)去处理,因此所得结果往往与实测值有较大的出入,很有必要改变这种状态。

意大利的伯窝-拉果斯(Piavo-Lagos)工程,在原有的混凝土衬砌上又敷设了喷浆层,实测得的糙率系数为0.016。瑞士的吐特曼威科(Turtmanwerk)隧洞,在不平整的岩石面上进行喷浆,其实测糙率系数则在0.019~0.025的范围内变动。上述资料说明,用喷浆法施工的隧洞衬砌的糙率系数与“基底面”的平整度有很大关系。可见,喷射混凝土衬砌的糙率系数偏大,并非是这种施工方法本身所造成的,只要提高开挖技术,就有可能大幅度地降低糙率系数值。因此,在水工隧洞的开挖工程中,应当更加积极地推广光面爆破和预裂爆破技术。

3. 锚喷衬砌的抗冲刷能力

由于锚喷衬砌的厚度较薄,而且实际运行经验不多,因此人们对它的抗冲刷能力都甚为关切。

目前,国内已投入运行的锚喷衬砌的过水隧洞,实际流速一般为3~5米/秒,个别为7米/秒,有的工程设计最大流速虽然达到12米/秒,但至今还没有过流。在国外资料中也很少见到有关这方面的介绍,只是苏联有“以10米/秒为限”之说。由于缺乏大量实际运行资料为据,对锚喷衬砌的实际抗冲刷能力还难作出确切的估计。

一般认为,就喷混凝土的强度标号来说(一般可在200公斤/厘米²以上),抗御10米/秒流速的冲刷作用是不成问题的。但因喷混凝土层较薄,而且考虑到施工质量的不均匀

性,应采取适当的结构处理方法来提高衬砌层的整体作用,如设置钢筋网,或再增设锚杆并将它与钢筋网焊接成整体等。此外,由于喷混凝土衬砌层表面比较粗糙,同时也不够平整,在高速的水流通过时,有可能产生气蚀破坏,因此有人认为其工作流速应控制在15米/秒以内。

二、无压洞室锚喷支护设计的有关问题

俗称的“无压洞室”,包括地下厂房、地下变电站、出线洞、交通洞……等等一些不过水的洞室。此外,就其工作条件而言,过水前或放空后的水工隧洞也属此类。这类洞室的锚喷支护的目的,主要是维持围岩的稳定。因此,锚喷支护设计的一项很重要的工作就是对围岩的稳定状况进行切合实际的分析和评价。当然,对于高大的地下洞室来说,这项工作就更加重要了。

围岩稳定性的评价问题是一个老课题。然而,由于影响因素的众多和地质情况的复杂,所以尽管人们进行过长期的和大量的研究,但迄今也没有得到令人满意的解决。因此,实际工程中所采用的锚喷支护的设计方法是很不相同的,概括起来大致有以下几种:

1. 普氏理论与加载试验相结合的方法

传统的支护设计,通常是先按普氏理论估算出围岩可能产生破坏的范围,然后以塌落的岩石作为外载进而确定支护结构的断面尺寸。锚喷支护与传统的支护形式不同,由于它可以与围岩共同工作,有利于改善围岩的应力和变形状况,因此人们对于那种只靠经验的牢固系数(亦称坚硬系数或普氏系数)来确定外载的做法提出了异议。看法很多,众说纷纭。但是由于目前还没能确立一种公认的理论 and 计算方法,许多工程仍然是按老办法来进行锚喷支护的设计:把锚杆深入到“塌落拱”的范围以外,同时按塌落的岩石荷载来验算锚喷支护结构的安全度。然而,不仅由于喷混凝土层较薄,而且其实际厚度的分布又可能是很不均匀的,人们对它的承载能力尚缺乏足够的信任,因此作为一种补偿措施就进行了“加载试验”,借以论证与它一起工作的围岩范围及其所具有的安全程度(通常用“超载系数”的大小来衡量)。可见,这种做法实际上是一种普氏理论与“共同工作”理论相结合的“过渡性”的方法。

2. 根据围岩应力和围岩强度来确定锚喷参数

锚喷支护设计的另一种方法是,首先对围岩强度与其实际作用的应力值进行比较,用以评定岩体的稳定性和可能产生破坏的范围,进而确定锚喷支护的结构参数。

大家都知道,实际的岩体经常被各种组合的节理裂隙(统称结构面)所切割,所以它的实际强度总是比用标准试件测得的强度(俗称“岩块强度”)要小,因此人们引进了“岩体强度”的概念,并用岩块强度乘以某种小于1的“折减系数”来求得。目前一些工程所采用的折减系数值的变动范围很大($\frac{1}{5} \sim \frac{1}{15}$),这种情况显然与使用者的主观认识有很大关系。

关于围岩的应力分布,过去除了圆形以外的各种异形洞室,主要是借助于模型(光弹或脆性材料模型)试验。近年来,由于电子计算机的推广应用,应力分析的工作已简便得多了。因此某些大型工程采用了以计算为主,计算与模型试验相结合的方法。但是,由于

很难搞清岩体中结构面的实际分布情况和这些结构面的力学性质, 计算或试验结果都只能认为是近似的。

在这里遇到的一个主要问题, 就是如何认识和处理地应力影响的问题。对此, 虽然目前还没有统一的看法, 但较为常用的做法是: 采用现场试验的实测值, 并把它加到计算模型的边界上, 而不是直接作用在衬砌的边界面上。

在搞清围岩应力分布之后, 采用下述方法来选择支护形式和结构参数:

1) 一般都认为岩体是不能承受拉应力的, 因此在围岩中的拉应力区, 都需要用预应力锚杆或锚索来加固;

2) 在“压、剪”破坏区, 若喷混凝土层不足以维持其稳定时, 还需要增设锚杆(或锚索);

3) 高大的地下洞室, 围岩可能产生较大的变形(由计算或模型试验结果推算), 在变形超过允许值的那些部位都需要用锚杆或锚索来进行加固。

现时在学术范围内讨论得比较多的是所谓腊布希维兹(或称“新奥法”)等理论, 虽然有些单位对此作了大量的分析工作, 有的工程也以此进行了一定的验算, 但因还没有成熟到可以用来进行工程设计的程度。

3. “块体平衡”分析法

水利电力工程地下建筑物(特别是高大洞室)的所在部位, 通常都是经过详细的地质调查之后才加以确定的。所以地质条件一般都比较良好, 产生大范围“压剪破坏”的可能性很小。常见的围岩破坏, 只限于局部的范围, 并且大多沿着软弱结构面发生。因此, 关于围岩稳定性的分析, 关键是找出有破坏危险的部位、范围和方向。为此, 有的单位应用了“全空间赤平投影分析法”, 有的则根据实地的岩体结构面组合情况来判断。

这种针对个别岩块或局部围岩所进行的稳定性分析方法, 通常统称为“块体平衡”分析法。但是, 在具体做法上各单位稍有不同: 在进行力的分析上, 有的只考虑岩块的自重, 有的则把围岩应力的分布情况也包括进去。

在这种情况下, 锚杆或喷混凝土的支护形式, 也主要考虑为局部支护的形式。顶拱锚杆, 常用的是“悬吊理论”。边拱或边墙上的锚杆, 通常都将锚杆预应力的影响以及滑动面的抗剪强度考虑在内。对于喷混凝土层, 主要采用冲切或粘结破坏的方法来进行验算。

4. “工程类比”法

上述情况表明, 地下洞室锚喷支护的设计方法还不够成熟, 因此实际工作中大都采用“工程类比法”, 或者在此基础上再选用前述的某种方法来进行验算。

所谓工程类比, 就是在工程用途、规模和重要性, 以及地质条件(包括地下水、岩体性质和构造……)等几个方面进行分析比较, 借助于既成工程的经验来选择锚喷支护的结构参数。这种做法, 主要存在这样两个问题:

第一, 目前的地质工作, 仍然是定性的多, 定量的少。所以“类比”时主要是依据“分类表”, 主观性和灵活性都比较大。

第二, 过去建成的工程, 大都缺乏完整的实际运行观测资料, 很难鉴定原设计的合理性。

鉴于这些情况,人们对原型观测的问题已普遍引起重视,并且正力图使地质工作从定性逐步向定量过渡。其中的一种方法是采用声测法。但是,究竟用什么作指标,如何布置测试工作,资料如何分析和应用等等?一系列问题上都还有待于作进一步的研究。

综上所述可以看出,由于工程条件和地质情况非常复杂,要建立一种“放之四海皆准”的设计理论几乎是办不到的。目前研究工作的趋势是“因地制宜和区别对待”,亦即针对不同的工程条件和岩体结构给出不同的设计计算方法。作为一种过渡,半经验半理论的方法可能还是现实可行的。其中一种很重要的手段,就是进行实地量测工作。国外对此非常重视,应用得很广泛。国内,由于目前的测试手段还不够完善,与施工安排也常常发生干扰,因此这方面的工作还搞得不多。应该认为,现场量测不仅是发展设计理论的一项重要内容,而且也是安全施工监视的一种重要工具,各有关方面都应该予以足够的重视。

三、锚喷支护的施工技术

无论是从工程的规模和重要性,还是从工程运行条件的复杂性来看,水利电力工程锚喷支护的施工都应该有更高的要求。

1. 高大地下洞室锚喷支护的施工

一般来说,水利电力工程中的高大地下洞室都选在地质条件比较好的地方。但是,跨度过大和边墙过高都是容易造成围岩坍塌破坏的客观因素。因此,洞室开挖的程序、锚喷时机的选择等等,都是值得重视的问题。碧口水电站的调压井,边墙高达近80米,岩石强度虽然比较高,但有许多不利结构面的组合,对岩体的稳定很不利,然而在采用了分部开挖、边挖边锚的方法以后,没有出现任何塌方,保证了施工安全。250工程隧洞岩塞爆破口的集碴坑,在高度近41米的边墙上,有倾向洞内的断层出露,危及边墙的稳定,采用分层施加预应力锚索和分层开挖的方法,保证了边墙的稳定。310工程引水洞的进口,存在着可能产生大体积滑坍的岩体,经采用大型预应力锚索加固后再进行开挖,取得了成功。这些,都是成功的实例。但也有的工程,由于忽视了这方面的工作,出现过不应有的坍方事故,给工程建设造成了损失。这些经验和教训都是值得吸取的。

水利电力部门常用的锚杆,大多是一般砂浆锚杆,但不少工程也采用了预应力锚杆。常用的锚头形式主要有倒楔式和楔缝式两种。一般来说,前者比后者具有更高的锚固力。但作为永久性的支护,无论是那一种形式的预应力锚杆,都应对锚孔充填砂浆,以保持其长期工作而不发生锈蚀。可见,注浆工作的关键是提高锚孔中砂浆的饱满程度。有的单位采用了“抽真空注浆”法;和“排气管注浆法”,在这方面收到了较好的效果。

高大地下洞室围岩的破坏,往往涉及到较大的范围,因此大型预应力锚索的加固效果最为显著,目前国外用得较多,国内的某些工程(如前述的310、250和碧口等)也开始应用,但是应用得比较多的场合,是一些很难或无法采用其他方法进行加固的部位,如隧洞进出口的洞脸(如龙羊峡水电站的导流洞),大坝坝基(如梅山和双牌水库)等。在锚索结构方面,较多的作法是:对于需要及时施加预应力的情况,采用机械式(如胀壳式……等)锚头;对于不需要及时施加预应力的情况,大都采用砂浆(锚固段由砂浆固结)锚头。从实际使用的情况来看,只要注意施工质量,它们都可以取得较好的效果。

QPS-II型汽车式喷混凝土机械手的研制成功,为大洞室喷混凝土施工提供了方便。

但是,在多工序同时作业的条件下,搞好开挖和支护工作的有机配合,是一个需要妥善解决的问题。当前,锚杆(特别是长大锚杆或锚索)的造孔和安装技术还是一个比较薄弱的环节,需要加强研究和认真解决的问题。

2. 水工隧洞喷射混凝土的施工

由于水工隧洞一般都有过水要求,锚喷衬砌多以喷混凝土为主,但也视地质条件的好坏,分别选用喷混凝土加锚杆或喷混凝土加锚杆再加钢筋网等不同的形式,统称为锚喷衬砌。

水工隧洞喷混凝土衬砌的工作条件与其他的洞室不同,在内水压力的作用下,它基本上处于受拉状态,同时为了防止内水的大量外渗,对它还提出了防渗要求。因此,提高喷混凝土层的抗拉强度和抗渗标号是有重要意义的。有的单位正在作试验,力图通过掺入某些“外加剂”的办法来改善上述这两个方面的性能。国外采取的做法是在喷混凝土中加入钢纤维,使它在保持弹模基本不变的前提下大幅度地提高其抗拉强度。

由于水工隧洞的工作特点,过多地强调提高喷混凝土的抗压强度指标也许是没有必要的。但是,考虑到它与其他指标(如抗拉、抗渗、抗冻、抗冲……等)存在着某种关系,而且检验方法也简单易行,因此习惯上仍以此作为施工质量的控制指标。起初,人们认为增大骨料的粒径可以提高喷混凝土的抗压强度,但由于施工作业中不可避免的回弹(粗骨料占绝大部分)现象,在所形成的喷混凝土层中,粗骨料所占的比重很小,因此不仅没有达到预期目的,反而给施工造成了不必要的麻烦和浪费。国外近期施工的工程,粗骨料的粒径和含量都比以往的要小。实践证明,只要适当地调整骨料级配,粗骨料粒径的减小也不会造成强度标号的下降,在一般情况下取得200号的强度是不困难的。因此,为提高施工质量和施工效果,应该迅速改变过去那种只顾配比(水泥:砂:石=1:2:2)不问级配的做法。

目前,水利电力部门的喷混凝土施工,还停留在一般水平上。尽管已研制成功了大型机械手,但其他机械还不够配套,机械化和自动化的程度上也不高;在施工工艺方面,过去虽然作过一些改进,但既不够彻底也不够普及。因此施工现场粉尘较多,回弹量也较大。由于存在这些问题,在很大程度上影响了这项技术的推广应用,因此对这些问题不可等闲视之,应组织适当力量去研究解决。

3. 锚喷施工的质量检验工作

水利电力工程的地下建筑物在投入运行后,检查和维修的周期一般都比较长,因此更应该加强施工期的质量检验工作。

直到目前为止,针对锚喷施工所需进行质量检验的项目内容、抽样数量、试件制备、仪器设备、检验方法和操作步骤等,各个方面都还没有一个统一的规定。各有关单位是根据自己的看法和需要而进行的。有些单位甚至全然忽视了这方面的工作。可见,为了制定出统一的规程规范和促进这项技术的健康发展,很有必要加强这个方面的试验研究工作。根据水利电力工程的特点,尤其更应该注意以下几个方面的问题:

(1) 均匀性的检验:包括结构尺寸和各种物理力学性指标的变化情况。

(2) 整体性的检验:包括喷混凝土层的龟裂情况(分布、开度、深度……等),喷

层与围岩的粘结情况、锚孔砂浆的充实程度等等。

(3) 大力发展现场的无损检验技术, 在保持结构完整性的前提下, 争取能在早期发现问题, 及时补救。

4. 洞室开挖的光面爆破和预裂爆破技术

洞室开挖的好坏, 直接影响到锚喷施工的质量、进度和工程的运行效果。因此在国内有关工程的施工中都很重视“开挖”这个环节。从而控制爆破(即光面爆破或预裂爆破)技术得到了大力推广。

许多实测资料说明, 按一般钻爆法开挖, 爆破引起的围岩松动(包括爆破破坏、原生节理面的张开……等)在0.6~1.0米左右, 有的甚至更大。而比较成功的控制爆破则可控制在0.2米左右。可见, 推广应用控制爆破技术, 无论是对于施工安全, 还是减小岩石荷载以及改善支护体系的受力条件都是有利的。

采用一般钻爆法开挖, 超欠挖的现象比较严重, 因此洞壁表面高低不平, 起伏差一般为0.5~0.8米, 较大的在1.0米以上。假若在这个基础上进行水工隧洞的锚喷施工, 就可能引起过大的水头损失或泄流能力的降低, 影响工程效益。因此, 应该强调控制爆破和锚喷支护的配套使用。

实行控制爆破法, 隧洞周边的钻孔要适当加密一些, 比一般钻爆法增加了一定的钻孔工作量。但是, 由于它保证了开挖轮廓, 减少了超欠挖的处理, 而且也减小了爆下岩块的尺寸, 这些都是有利于施工作业的因素。据一些施工单位统计, 光面爆破法开挖的超挖量约为8%, 而一般钻爆法则为15%~30%, 甚至更大, 并且处理欠挖费时费工, 因此在采用光面爆破之后, 施工进度反而加快了。

在水利电力部门推广控制爆破技术所遇到的最大障碍不是技术问题, 而是施工安排问题。大部分的施工单位, 开挖和衬砌(或支护)是“分家”的。在施工安排时, 不是以成洞速度为目标, 而是过分地强调开挖进尺, 从而出现了“放大炮、多出碴”不顾客观实际效果的现象, 给以后的衬砌工程造成了不应有的困难。因此, 应该改善施工管理, 把开挖和衬砌(或支护)有机的结合起来。

从客观因素来看, 目前的造孔速度较慢, 也是限制了控制爆破技术推广应用的一个原因, 这是需要努力解决的一个技术问题。近来, 电力工业部第四工程局研制成功了大型的多臂钻孔台车, 为解决这些问题创造了良好的条件。

四、结束语

从上述情况不难看出, 锚喷支护技术在当前仍处于发展阶段。在过去的一段时间里, 在施工技术上虽然取得了较多的成效, 但还不够完备; 在设计理论上, 特别是对于锚喷支护工作机理的认识方面, 还有更多的探索性工作急待去做。很明显, 这些问题只有通过不断的实践才能获得解决。

针对当前设计理论远远落后于工程建设需要的这种情况, 为使这项技术得到更好的推广应用, 原水利电力部于1977年9月在吉林省察尔森水库召开的“锚喷支护现场经验交流会”上, 总结了前阶段的工作经验之后提出: “对于临时支护, 可以普遍推广锚喷支护。实践证明它比钢木支撑更为安全可靠; 对于仅在施工期起作用的临时性工程或附属建筑,

如施工支洞、导流洞等，也可普遍推广；对地下厂房、交通洞、出线洞等主体工程中没有过水要求的洞室，原则上可以采用锚喷作永久衬砌，但要根据工程规模、地质情况和施工条件，具体确定；对无压或水头不大的水工隧洞，流速小的部分，可以根据围岩情况，优先选用锚喷衬砌，而对于内水压力和流速较高的部分，由于目前还缺乏经验，必须慎重对待，需要根据围岩和工程的具体情况，通过试验论证方可使用”。那次会议以来的两年多时间里，各有关单位又进行了大量的工程实践和试验研究工作，结果证明上述结论基本上是正确的，各有关工程仍可参照使用。我们深信，随着工程实践经验的不断增多以及前述问题的逐步解决，锚喷支护技术的发展将会出现一个更大的飞跃。