

压力隧洞预应力素混凝土衬砌设计与施工

艾家驹

(水电部珠江水利委员会)

提 要

本文从设计理论与实践探讨了水工隧洞预应力素混凝土衬砌的计算方法,并提出了灌浆式预应力若能结合喷锚技术,则可达到扩大“压密区”(Ⅱ区),缩小“松弛区”(Ⅰ区),又使其应力逐渐得到恢复以提高预应力效果,减少灌浆工作量,从而达到较高的经济效益。

一、设计理论探讨

(一)设计理论

预应力衬砌技术,在实际工程上使用较早,但由于效果欠佳,发展缓慢。应用于洞径8米以上的只有三个,均系70年代末和80年代初期带试验性目的修建的,还没有形成一套完整的设计理论。

灌浆式预应力是用高压把浆液灌注到衬砌背后的岩体和岩体与衬砌的缝隙中,使松弛围岩岩体有效固结的同时,浆液压力将缝隙胀开,充填缝隙并形成结石,从而形成素混凝土衬砌的预应力。设计的目的是使这个预应力值,保持大于由内水压力产生的拉应力值,使衬砌混凝土永远处于受压工作状态,不致产生裂缝或破损。

基于上述理论认识产生的施工方法取得了初步成果:

1. 向预留缝灌浆形成预应力的吉捷尔方法〔4〕,已应用于法国罗兹兰电站($D=4.4$ 米)。但由于衬砌内外圈和预应力灌浆缝(缝隙3~5厘米)的施工难度大,且要求岩石条件高,故适应性较差。我国50年代曾在古田试验但没有采用。

2. 英国艾罗赫吉隧洞($D=4.85$ 米),曾用浅孔低压灌浆和深孔高压灌浆交替进行形成预应力的方法,可用于Ⅲ、Ⅳ类围岩的地质条件,适应面广且施工方便,预应力效果好。苏联英古里($D=9.5$ 米)也采用此法〔4〕。

3. 澳大利亚戈尔登河电站隧洞($D=8.2$ 米)采用的空隙灌注法〔4〕,是在浇筑混凝土衬砌的同时,预埋灌浆软管,并在开挖面上喷一层石灰乳剂,使之与衬砌分开,然后向环形软管内灌浆,通过环形软管向围岩及围岩与衬砌间的接触缝内灌浆,施工更为简便,预应力效果较佳,但要求围岩条件较好(Ⅰ类以上)。

4. 我国白山电站1号引水隧洞($D=8.6$ 米)采用深孔高压一次灌浆法〔1〕,先进行拱顶50度范围内的回填灌浆,然后分段进行预应力灌浆,使衬砌能获得平均预应力达68~75公斤/厘米²的良好效果,满足了设计要求。南斯拉夫拉马电站隧洞($D=5$ 米)和西德雷扎赫隧洞($D=4.9$ 米)也是采用深孔高压灌浆方法,同样获得了良好的预应力效果。

目前, 由于对灌浆式预应力衬砌还未形成一套成熟的理论, 如何使衬砌达到预应力的设计原则, 认识上也不完全一致, 其设计参数的选取, 还只能凭借工程类比和现场试验的方法解决。

(二) 计算方法

由于上述原因, 随之而来的计算方法、计算公式所考虑的因素也是不全面的, 作者认为可以从以下几方面进行探讨:

1. 衬砌厚度 不考虑预应力时素混凝土衬砌厚度的计算, 是按弹性厚壁圆管推导出的公式进行的。虽然它也考虑了衬砌与岩体密贴时围岩的抗力作用, 但在承受较高水头、内水压力较大的情况下, 即使衬砌厚度很大, 其所产生的弹性变形, 仍可使衬砌混凝土的变形超过其极限拉伸而出现裂缝。施加预应力以后, 在较高的灌浆压力下, 与衬砌获得预应力的同时, 围岩也被压缩(预变形)和固结, 二次应力恢复一部分, 形成衬砌预应力的约束圈。在二次应力足够大的情况下, 衬砌内外的压力梯度很小。因此, 衬砌可近似地按无内水压力的情况来设计其厚度, 如果围岩是连续介质, 即可用连续介质力学来建立衬砌厚度的理论计算公式。但由于围岩本身基本上不是连续介质, 兼以隧洞开挖时又破坏了岩体内部的连续性, 且此种情况下的应力状态了解很少, 所以问题更为复杂。

根据国内外文献和我国白山试验研究实践, 衬砌厚度一般为隧洞内径的 $\frac{1}{12} \sim \frac{1}{18}$ (洞径小时用大值, 反之用小值)。一般情况下, 衬砌较薄, 预应力效果较显著。

(1) 据加列尔金及拉梅公式推导的h公式

由苏联Б·Г·加列尔金院士关于内水压力对衬砌内缘产生的拉应力公式:

$$\sigma_B = P \frac{1 - N + t^2(1 + N(1 - 2\mu))}{t^2 - 1 + N(t^2(1 - 2\mu) + 1)} \quad (1)$$

式中 $N = K_0 \cdot \gamma_H (1 + \mu) / E$;

E, μ ——混凝土的弹模、泊桑比;

K_0 ——围岩弹性抗力系数。

以及拉梅(G. Lame)关于衬砌承受灌浆压力时, 混凝土产生压应力的公式:

$$\sigma'_B = -2q \frac{\gamma_H^2}{\gamma_H^2 - \gamma_B^2} = -2q \frac{t^2}{t^2 - 1} \quad (2)$$

式中 $t = \gamma_H / \gamma_B$; P ——内水压力强度;

γ_H ——衬砌外半径; γ_B ——衬砌内半径。

按 $|\sigma_B| \leq |\sigma'_B|$ 的条件, 求得所需灌浆压力

$$q \geq P \frac{(t^2 - 1) \{ 1 - N + t^2(1 + N(1 - 2\mu)) \}}{2t^2 \{ t^2 - 1 + N(t^2(1 - 2\mu) + 1) \}} \quad (3)$$

考虑压力损失, 采用实际灌浆压力:

$$q_0 = \beta q \quad (4)$$

式中 $\beta = 1.25 \sim 1.5$ (压力灌浆系数)。

衬砌受外压时, 最大压应力不应超过混凝土允许抗压强度 $[\sigma_m]$, 即:

$$2q_0 = \frac{\gamma_H^2}{\gamma_H^2 - \gamma_B^2} \leq [\sigma_m] \quad (5)$$

取 $\gamma_H = \gamma_B + h$

从而求得衬砌厚度 h 的公式为:

$$h = \gamma_B \left[-1 + \sqrt{\frac{[\sigma_m]}{[\sigma_m] - 2q_0}} \right] \quad (6)$$

(2) 由衬砌环拉应力公式直接求得的 h 计算公式为〔5〕:

$$h = \frac{P_z - \gamma_H}{2S_K} \quad (7)$$

式中 $P_z = 1.5P$ (P ——内水压力强度, 1.5——安全系数);

$S_K = 0.8W_{28}$ (W_{28} ——混凝土28天抗压强度;

S_K ——混凝土允许抗压强度)。

笔者认为: 理论公式(6)、(7)可以作为设计参考, 但仍需用无内水压力、仅有二次应力及外水压力作用的计算情况进行校核。

算例: 高压引水隧洞 $\gamma_B = 3.2$ 米, 最大内水压力 15.7 公斤/厘米², 为缝隙预应力灌浆结构型式, 内圈用400号和300号、外圈用200号混凝土, 用(6)式计算结果: $h = 35$ 厘米; 用(7)式计算: $h = 25$ 厘米, 均符合目前的一般采用值: $30 \sim 50$ 厘米。

2. 灌浆压力 灌浆前为了使衬砌与围岩脱开, 应通过试验确定开环压力。白山电站试验结果为 $12 \sim 16$ 公斤/厘米², 并总结出估算开环压力公式〔4〕为:

$$q_c = 50K_{ic} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (8)$$

式中 q_c ——开环压力 (公斤/厘米²);

K_{ic} ——衬砌和围岩粘接开裂韧性 (公斤/厘米², 一般 $K_{ic} < 1$);

a ——灌浆孔半径。

灌浆压力可采用(4)式, 即:

$$q_0 = \beta q$$

采用的压力灌浆系数, 法、意、瑞士等国 $\beta = 1.25 \sim 1.5$; 德国 $\beta = 2$; 苏联 $\beta > 2$; 我国 $\beta = 1 \sim 3.7$ (古田、西洱河一级 $\beta = 1 \sim 2$; 湖南镇 $\beta = 1.3 \sim 3.7$)。

目前, 国外灌浆压力多采用 $30 \sim 40$ 公斤/厘米², 最高达 80 公斤/厘米², 约为内水压力的 $2 \sim 3$ 倍, 最大为 5 倍。

所求灌浆压力小于开环压力时, 应采用稍大于开环压力的值, 否则会使灌浆失效。

灌浆过程中, 除了应考虑地下水作用及随灌浆孔深的加大相应增加灌浆压力外, 还应考虑围岩二次应力效应的影响。

3. 预应力计算 预应力的大小与灌浆压力直接相关, 由(2)式计算即:

$$\sigma_B' = -2q_0 \frac{t^2}{t^2 - 1}$$

当计算衬砌内任意一点的预应力大小时, 可将上述拉梅公式改写为:

$$\sigma_B' = -q \frac{t^2}{t^2 - 1} \left(1 + \frac{\gamma r^2}{\gamma^2} \right) \quad (2')$$

式中 γ ——预应力计算点半径(厘米)。

因围岩渗透性大小不一等复杂因素, 沿周边的预应力分布是不均匀的, 甚至个别地方还可能会出现拉应力, 但白山电站的试验结果〔1〕表明: 预应力分布比较均匀(表1)

表 1 白山试验成果表

| 灌浆压力(公斤/厘米 ²) | | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 闭浆 |
|---------------------------|-----|------------|------------|------|------|------|------|
| 切向应变(με) | 1号洞 | 内缘 -70 | 外缘 -146 | | | | |
| | 2号洞 | 内缘 -207 | 外缘 -163 | -412 | -512 | -579 | -564 |

(三) 新的设想

预应力效果差、松弛损失大, 是自50年代开始研究灌浆式预应力以来, 一直视为严重影响着灌浆式预应力发展的桎梏。笔者认为: 可以根据岩石力学原理和采用锚喷新技术来解决。

初始应力的分布, 直接与设计预应力相关。举例来说: 一个承受20公斤/厘米²内水压力的隧洞, 处于 $\sigma > 20$ 公斤/厘米² 的初始应力场中, 即或不灌浆(取 $q_0 = 0$) 也可满足设计预应力的要求。 $\sigma < 20$ 公斤/厘米² 时, 则只需补充不足的部分, 从而求得最经济的灌浆压力值。按连续介质力学假说建立的初始应力场, 主要由自重应力场和地质构造应力场组成。根据国内外许多观测资料, 由于种种原因, 有垂直应力与水平应力相同的; 也有因地形、地质构造力而产生高水平应力的。所以初始应力场有均一的, 也有不均一的, 详见表2。

实测统计资料还说明〔2〕: 最大水平应力大于垂直应力是普遍现象, 其比值一般在0.5~5.5, 大部分在0.9~1.2之间。据此, 在设计时为了使衬砌中的应力标准化, 可以采用平均初始应力等于 $(\sigma_h + \sigma_v) / 2$ 的概念, 初始应力场场强, 在一般情况下, 只要设计合理, 是很容易满足设计内水压力要求的。

据南斯拉夫拉马电站〔6〕(石灰岩等)实测结果: 松弛破坏区的弹性波速为3500米/秒,

表 2

| 工程名称 | 试验位置 | 覆盖厚度(米) | 实测初始应力(公斤/厘米) ² | | 侧压力系数 $N = \sigma_H / \sigma_V$ | 备 注 |
|-----------------|--------|---------|----------------------------|------------------------|------------------------------------|-------|
| | | | 垂直应力 (σ_V) | 水平应力 (σ_H) | | |
| 雪山水电站 (澳大利亚) | 测点1 | 393 | 126.0 | 105.0 | 0.83 | |
| | 测点2 | 197 | 105.0 | 133.0 | 1.30 | |
| | 测点3 | 360 | 79.8 | 189.5 | 2.60 | |
| 戈尔登河(澳) | | | 100.0 | 200.0 | 2.00 | 坚硬石灰岩 |
| | 岩石试验洞 | 65 | 22.8 | 19.8 | 0.89 | 玄武岩 |
| 某地下水电站 (中国) | 1号高压平洞 | 60 | 9.54 | 8.16 | 0.86 | |
| | 2号斜井 | 100 | 23.8 | 19.9 | 0.84 | |
| | 总 岔 管 | 220 | 79.2 | 88.7 | 1.12 | |

承载圈为5300米/秒，弹性区为4500米/秒。破坏区深度为0.8~1.0米。这些数据说明：

隧洞开挖后，围岩应力解除主要发生在松弛区内。因此，如何利用应力重分布的岩石力学原理，有效地控制松弛区的发展、缩小松弛带的深度，以提高预应力效果并减少灌浆工作量，就成为本文设想的理论根据；也是今后进一步解决灌浆式预应力效果差、实际应用少，使灌浆式预应力技术得以加速发展的一个新的研究方向；为灌浆式预应力素混凝土衬砌在大洞径（ $D > 8$ 米）、高水头工程上的应用，开创一个新的局面。

应用喷锚技术，就能以最短的时间，紧跟工作面进行预应力施工（一般距工作面15~20米），大大缩短了围岩暴露时间（一般为10~15天），围岩的风化、潮解和应力松弛等不致有大的发展。

例如在加拿大曾观测到：开挖10天后安置的理想刚性衬砌，压力上升很快，并且这种衬砌压力接近初始应力水平。1973年我国310工程：泥质胶结砂砾岩，毛洞与喷混凝土关系（喷层厚5~8厘米）比较结果如图1。

从上图可知：毛洞初期倒拱处的切向应力高度集中，而且发展很快，开洞15天左右，拱顶深部（170厘米）岩体变形虽已逐渐减缓，但靠近表部（100厘米左右），有破坏趋势。而在及时喷衬混凝土地段，无论是径向变形还是切向变形的发展速度都较低，且很快趋于稳定。喷与不喷，两者相比，径向应力变化减少了50%，切向应力也减少了40%左右，这些测试成果说明，喷混凝土是避免“压剪破坏”的有效方法。

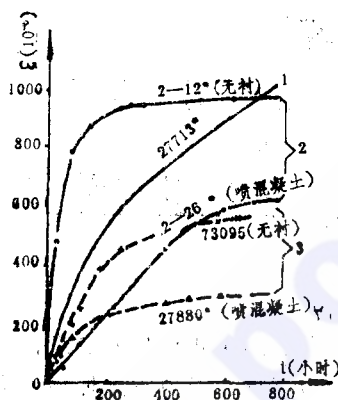


图1 310工程 $\epsilon-t$ 曲线(3)

注：1—无衬砌段拱冠测点（距洞壁约100厘米）

2—拱座部位切向应变（测点距洞壁50厘米）

3—拱冠部位径向应变（测点距洞壁170厘米）

普济铁路隧道埋深40米，围岩为侏罗系砂岩、泥岩互层，喷混凝土5厘米厚，其形变——电阻率法实测结果如图2。

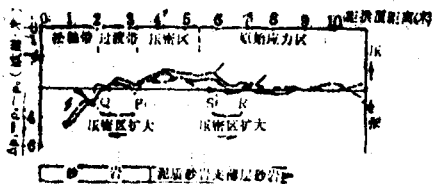


图3 开挖前后不同时间隧道拱部 Δp_s 变化曲线

注： p_0 —开挖前(77.7.6)观测值
 ○—开挖并喷混凝土后在不同时间：
 1—1977.6.23 } 观测值
 2—1977.8.2 }
 3—1978.1.24 }

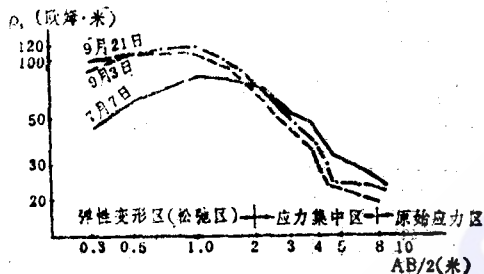


图2 普济隧道拱顶电测成果〔3〕

图2说明：喷射混凝土层初期，围岩变形仍在继续发展，但约经一个月后，就基本趋于稳定。而且喷层对围岩变形的影响，不仅限于围岩的表部，它还涉及相当大的范围。观测结果表明：在喷混凝土以后，随着时间的推移，原来业已松弛了的一部分围岩，其应力逐渐得到了恢复，扩大了“压密区”(Ⅰ区)，缩小了“松驰区”(Ⅱ区)。

实测拱顶“松驰区”由原来的2.6米缩小到2.2米，边墙的“松驰带”由5米缩小到3米(图3)。

上述三个工程观测资料〔3〕说明：与围岩紧密粘贴的高压喷层，在它和围岩同步变形的过程中，产生了一个指向围岩的反力，在喷层不遭破坏的情况下，这个反力将随着围岩变形的发展而不断增大。据国外的资料报导，这个反力一般为1~3公斤/厘米²，甚至可达5公斤/厘米²，对提高围岩承载力的效果相当显著。

综上所述，灌浆式预应力，若能结合喷锚技术，可达到既扩大“压密区”(Ⅰ区)缩小“松驰区”(Ⅱ区)，又可使其应力逐渐得到恢复，大大提高二次应力的双重目的，这将提高预应力效果和减少灌浆工作量，使经济效益更加显著，这就是本文设想的实质。

二、施工实践探讨

(一) 地形地质条件与施工方法的研究

一个工程的地质条件是复杂多变的，整条压力隧洞能不能全部做成预应力素混凝土衬砌，当前在国内外均无实例。已有的工程实践都是在围岩条件比较好时才采用灌浆式预应力衬砌；围岩条件差的仍然采用钢筋混凝土衬砌或钢板衬砌；临近厂房或山体比较薄的地段仍多采用钢板衬砌。这种多类型的衬砌，给施工带来很多不便，而且使先进的灌浆式预应力衬砌，在整个工程中的经济效益不能充分发挥。

黄河小浪底隧洞地质条件极其复杂,笔者为简化其施工,采用全洞预应力素混凝土衬砌,以充分显示预应力素混凝土衬砌在整个工程中良好的经济效益。在超大型隧洞工程中,为了更好地发挥预应力的优势,特此提出以下初步设想,可作施工组织设计时参考。

1. 围岩地质条件良好:采用接触缝隙灌浆方法进行预应力灌浆。不打孔、不专门进行固结灌浆,既能满足设计要求,又可简化施工方法。例如渔子溪水电站引水隧洞为花岗闪长岩, $f \geq 4$, 喷混凝土层厚15~20厘米(实测最小5厘米);回龙山水电站引水隧洞为结晶灰岩、安山岩、角砾岩,岩质坚硬,喷混凝土层厚10~15厘米,两工程已安全运行十余年。

2. 一般地质条件:可根据围岩实际情况和预应力设计要求,先进行浅孔(中等岩石)或深孔(较差岩石)固结灌浆,最后进行预应力缝隙高压灌浆。

3. 在靠近地面厂房山体较薄地段(垂直向岩体厚, $\delta_v < 0.6H$; 水平向岩体厚 $\delta_h < 1.6H$), 国内外一般惯例仍采用钢板衬砌;地下厂房考虑到围岩受爆破影响,在接近厂房一段(约等于厂房的开挖跨度),为安全计按明管设计,不考虑岩石作用,可采用钢板衬砌,同时校核放空时管道在外水压力作用下的结构稳定。从加拿大六个工程统计结果,所保留钢衬长度占整个高压管道长度的31.7%~10.4%。因此,笔者认为亦可采用锚索预应力素混凝土衬砌的施工方法进行设计和施工,这不仅可以免去繁重而复杂的工作,简化施工、缩短工期,而且可以节省大量钢材和10%~30%的投资。

(二) 预应力效果的研究

当前,国内外预应力学术界对灌浆式预应力效果的分析与评价的共同点,是今后灌浆式预应力工作中如何发展和运用一般规律解释新出现的一些特殊现象,笔者对此提出如下粗浅认识。

据国外资料,由于混凝土徐变及岩石流变等种种原因,灌浆时形成的预应力,一般只能保存40%~70%,我国白山电站也是这个规律。但为什么会相差这么多?还能不能比70%更提高一些?仅就这两个问题而言,其原因也是复杂的。例如岩石好坏、施工工艺水平的高低等,都直接影响预应力效果。

研究预应力松弛的规律:

(1) 松弛与时间关系,苏联模型试验成果表明预应力松弛,绝大部分发生在最初10天内,三个月后达到稳定;南斯拉夫对石英绢云母片岩施加预应力结果也表明,经一个多月的松弛,预应力渐趋于稳定。笔者认为这些现象说明缝隙虽被浆液填满,但是,由于松弛圈内岩块本身的应力释放后,经过高压灌浆必然要出现一个短暂的流变恢复过程。

(2) 从围岩流变与预应力关系来分析,当侧压系数为1时:

$$W = \frac{2P_0}{q_0' + P_w \frac{\gamma_p}{\gamma_H}} \quad (9)$$

式中 P_0 ——围岩初始应力 (公斤/厘米²);

$P \cdot \frac{\gamma_B}{\gamma_H}$ ——围岩承受所分担的内水压力 (公斤/厘米²);

q_0' ——衬砌背后实际平均有效灌浆压力 (公斤/厘米²)。

在初始应力比较小而灌浆压力及内水压力很大的情况下 ($W < 1$), 围岩流变指向围岩内部, 预应力松弛直接与压密层的应力及 I、II 区的应力重分布相关, 而松弛达到稳定的时间相应较长; 若 $W > 1$ 时, 围岩流变方向指向洞内, 预应力不仅不因松弛而损失, 相反会出现逐渐增加的现象。如在我国白山 2 号试验洞观测了 95 天, 灌浆时获得的预应力值全部保持并略有增加, 也许就是这个原因。

综上所述, 如何提高预应力效果的问题还应从岩石力学原理分析、研究。单纯提高灌浆压力应该具体情况具体分析。

四、结 束 语

本文对灌浆式预应力混凝土衬砌, 从岩石力学原理出发提出了灌浆结合喷衬的设想。用岩石力学原理与实验数据就喷衬对缩短松弛时间、减少松弛圈范围、利用应力重分布的规律及时恢复一部分地应力、提高松弛圈二次应力、扩大“压密区”、缩小“松弛区”进行了初步探讨。由于喷衬技术应用于灌浆式预应力混凝土衬砌所带来的预应力效果的提高, 亦将反映到灌浆式预应力的经济效果上来, 将使灌浆式预应力素混凝土衬砌技术有一个更大的发展和提高, 从而更加广泛地推广使用, 对降低工程造价, 缩短建设周期会起到积极的作用。

参 考 文 献

- 〔1〕水电部东北勘测设计院: 白山水电站压力隧洞灌浆式预应力衬砌的试验研究, 《水力发电》, 1981年1期
- 〔2〕李智毅、潘别桐: 岩石力学中的地质因素, 《岩石力学理论与实践》, 水利出版社, 1981年3月
- 〔3〕严克强: 岩体的工程加固, 《岩石力学理论与实践》, 水利出版社, 1981年3月
- 〔4〕水电部东北勘测设计院: 水电工程施工组织设计, 地下工程分册, 附录五, 压力隧洞预应力素混凝土衬砌, 1983年3月
- 〔5〕闽江水电局: 水工隧洞灌浆式预应力素混凝土衬砌试验, 1959年11月
- 〔6〕陶振宇: 《水工建设中的岩石力学问题》, 水利电力出版社, 1976年8月