

水工隧洞设计规范

条文说明

目 录

3	总则	3
5	基本资料	5
6	隧洞布置	6
7	断面形状及尺寸	18
8	水力设计	23
9	结构设计基本原则	26
10	不衬砌与锚喷隧洞	28
11	混凝土和钢筋混凝土衬砌	36
12	预应力混凝土衬砌	41
13	高压钢筋混凝土衬砌岔洞	44
14	封堵体设计	47
15	灌浆、防渗和排水	49
16	观测、运行和维修	51

3 总 则

3.0.1 本标准根据 GB50199（简称水工统标）的规定，对 SD134—1984（简称原规范）进行修订，并结合近十多年科学研究成果及工程实践经验增补了有关内容。为规范水工隧洞的设计，贯彻国家的有关政策提供了依据。

3.0.4 对围岩进行稳定分析是目前围岩加固设计中的一种方法，通常采用工程类比法和块体平衡法，对软弱破碎围岩、特殊地质条件下的大跨度隧洞，还需配合有限元法分析计算。

3.0.5 本标准对水工隧洞结构设计的基本规定，是根据 GB50199 规定的极限状态设计原则及其方法制定的。

水工隧洞支护设计计算的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

极限状态表达式采用作用（荷载）标准值及其分项系数、材料性能标准值及其分项系数、设计状况系数、结构重要性系数和结构系数表示。

3.0.7 本条规定与原规范 7.1.3 条规定基本相同，补充了掘进机施工的技术要求。

原规范该条文列于不衬砌与锚喷章节中。工程实践证明，开挖方法不仅对不衬砌、锚喷隧洞有影响，而且对混凝土、钢筋混凝土衬砌的隧洞也有影响，故将本条加以补充列于本标准总则中。

采用钻爆法开挖时，本标准规定必须采用光面爆破。光面爆破的优点是：隧洞开挖造形好，岩面平整，起伏差小，对围岩扰动轻微，岩壁上明显的延伸较长的爆震裂隙较小。工程实践证明，岩面起伏差可控制在 11cm 以内，光面爆破引起的围岩松动圈深度仅为普通爆破法的 $P_3 \sim P_2$ ，一般都在几厘米到 1.0m 左右，

DL T 5195—2004

对围岩稳定和维护原有围岩的强度具有明显的作用。对减小糙率系数，减少水头损失有利。对光面爆破的质量要求，应符合 DL T 5099 的有关规定。

5 基本资料

5.0.1 本条规定与原规范 2.0.1 条的规定基本相同。增加了对动能指标和生态环境资料的要求。

5.0.2 本条规定与原规范 2.0.2 条规定基本相同。1 级高压水工隧洞和高压岔洞，工程规模大，投资多，在国民经济中的重要性也高，设计依据的地质资料必须切实可靠，故应根据各设计阶段的规定，在现场进行试验，以落实设计数据，保证设计质量。

5.0.3 本条规定与原规范 2.0.3 条规定基本相同。地质资料的重要性及条文中提出的在开工前要掌握的地质情况，是从长期工程实践的经验教训中得来的，设计时应予以重视。对不同设计阶段，可根据其要求，由粗到细，逐步摸清，达到条文中所规定的要求。

5.0.4 本条规定与原规范 2.0.4 条规定基本相同，在开挖施工中，尤其是在工程地质、水文地质情况较复杂的洞段，应加强观测，做好地质编录，收集地质资料。随着施工开挖的进展，摸清实际地质情况，及时修改设计，保证施工安全，加快施工进度，使设计更加符合实际情况，是非常必要的，不应忽视。

6 隧洞布置

6.1 一般规定

6.1.1 水工隧洞洞线的选择，是隧洞设计中的重要环节之一，也是其后水力计算、结构设计的基础。选线失误，造成的事故和遗留的隐患不在少数，主要表现在：

(1) 忽视地质条件，造成施工期重大工程事故，或给运行期留下重大隐患。

(2) 选择洞线时强调洞线最短，而忽视其他方面的因素，酿成事故。

我国已建隧洞工程，由于洞线布置上的不合理和施工方法上的欠妥，而发生的事故不少。其原因：一是基本资料，特别是地质资料掌握不足，造成隧洞布置失误；二是忽视水力学因素，造成不良水力条件。实践证明，布置上的缺陷是不易弥补的，因此，本条规定，隧洞布置时，应经过可能方案的技术经济比较选定。

6.2 洞线选择

6.2.1 本条规定与原规范 3.1.3 条规定基本相同。

(1) 在洞线选择中都非常重视遵循洞线垂直于地质构造线或与构造线保持有足够角度的原则。实践证明这一原则是正确的。一般与构造线夹角大于 30° 时基本无塌方事故； $20^\circ\sim 30^\circ$ 时会出现塌方；小于 20° 时大多出现塌方事故。

(2) 层状岩体是典型的各向异性介质。在层状岩体中布置隧洞，为保证围岩稳定和获得最大的承载能力，关键是洞轴线与岩层走向要有较大的夹角，理想的夹角是 90° ，但在工程实践中，理想的条件是很少能够办到的，在 SD134—1984 规范编修中，曾

以碧口水电站为例，对这一问题进行了调查、分析研究。碧口水电站在陡倾角较疏松的薄层千枚岩中开挖了4条隧洞、3条压力管道和其他各种洞室。洞室轴线与岩层的夹角变化幅度较大，具有一定的代表性。从这些洞室的开挖情况看，洞轴线与岩层的夹角 $0^\circ\sim 25^\circ$ 时，洞壁发生严重外鼓和倾倒；夹角 $25^\circ\sim 30^\circ$ 时，发生较轻微外鼓和倾倒；夹角大于 45° 时，围岩基本稳定。根据上列情况，提出本条规定。

(3) 洞线布置应考虑地应力方向，例如，二滩水电站，2号、4号探洞三维地应力实测资料分析，最大主应力方向为北东 30° 左右，如选取北东 30° 方向为 x 轴，北西 60° 方向为 y 轴， z 轴铅直向上，根据实测值算出这种位置的各种地应力参数，列于表1中。

表1 NE 30° 方向地应力参数表

测点6	σ_x MPa/cm ²	σ_y MPa/cm ²	σ_z MPa/cm ²	$\sigma_x^2 \sigma_z$	$\sigma_y^2 \sigma_z$	$\sigma_x^2 \sigma_y$
2-6-1	23.2	6.4	8.0	2.9	0.80	3.63
2-6-2	9.4	5.4	9.6	0.98	0.56	1.74
2-6-3	9.9	6.3	15.6	0.63	0.40	1.57
2-6-4	21.2	9.3	15.1	1.40	0.62	2.28
2-6-1	23.9	13.9	20.9	2.19	1.28	1.71
2-6-2	32.8	17.9	15.7	2.19	1.12	1.86

从表1中数据可以看出，两个水平应力分量都不相等，而且相差很大，如果洞轴线选在 x 轴方向，边墙将受到小的侧向压力，若选在 y 轴上，边墙上将受到大的侧向压力，两者相比，后者边墙上单位面积所受的侧向压力，为前者的1.57~3.63倍，显然洞轴线选在接近 x 轴向，边墙所受侧压较小。据此分析，并结合考虑了地质构造线方向进行了厂区洞群布置。结果开挖施工进行顺利。有关专家一致评价，二滩水电站厂区洞群布置是成功的。

由上列分析，隧洞轴线的布置，从地质构造角度考虑，仅仅

遵守洞线垂直地质构造线或与地质构造线保持一定角度的原则是不很全面的，还应注意与地应力场中最大水平主应力方向的关系。

6.2.3 隧洞在岩体中埋设的深度，即洞顶以上岩体的覆盖厚度和山体岸边一侧的岩体厚度，一般统称为围岩的覆盖厚度。隧洞围岩的覆盖厚度涉及到围岩的稳定性、围岩的抗力及围岩的防渗能力等。因为岩体是一种特殊的各向异性材料，其物理力学参数不仅随不同方向而变化，而且往往在有限范围内即有突然的改变。故在设计中应结合具体情况，综合分析确定。

1 隧洞的进、出口洞段及无压隧洞的围岩覆盖厚度。近年来在这个问题上有很大的突破，在规范的编写中调查了 19 个工程的进出口，其最小覆盖厚度均不足 1.0 倍的洞径，其中碧口水电站右岸泄洪洞出口围岩覆盖厚度仅为洞宽的 1/10。覆盖厚度小，洞口围岩仍能维持稳定，这里的关键是采取了合理的施工程序和工程措施，其结果是减少了明挖，争取了工期。

表 2 部分水电站进出口围岩厚度开挖洞跨工程实例

序号	工程名称	洞顶围岩厚度 开挖洞宽	序号	工程名称	洞顶围岩厚度 开挖洞宽
1	碧口右岸泄洪洞出口	0.1	11	花凉亭泄洪洞进、出口	0.5~0.7
2	碧口左岸泄洪洞出口	0.6	12	响洪甸泄洪洞进口	0.8
3	石头河泄洪洞出口	0.5	13	丰满 1 号泄洪洞出口	0.6
4	乌江渡左、右泄洪洞出口	0.5	14	丰满 2 号泄洪洞出口	0.7
5	乌江渡放空洞进口	0.9	15	映秀湾引水洞进口	0.9
6	毛家村泄洪洞进口	0.2	16	潭岭引水洞进口	0.8
7	绿水河泄洪洞进、出口	0.6	17	古田溪三级引水洞进口	0.3
8	陆浑泄洪洞进出口	0.8~0.5	18	湖南镇引水洞进口	0.7
9	新丰江泄洪洞出口	0.7	19	太平哨引水洞进口	0.9
10	松涛泄洪洞口	0.3			

根据上列情况，本条提出对有压隧洞进出口段、无压隧洞及进出口洞段的围岩覆盖度不做具体的规定。

2 对于有压隧洞，特别是高压隧洞，欲利用围岩的承载能力，则围岩覆盖厚度是设计中应该注意的重要问题之一。原规范 3.1.4 条规定一般按洞内静水压力小于洞顶以上围岩重量的要求确定。在本次规范的修改中，对此问题进行调查和专门的研究。现国际通用准则有覆盖范围的垂直向准则、雪山准则及挪威准则。

1) 垂直向准则 (如图 1 所示)：

$$C_{RV} \gamma_R \leq F h_S \gamma_W \quad (1)$$

式中：

C_{RV} ——围岩覆盖厚度，m；

γ_R ——岩体重度， N m^{-3} ；

h_S ——洞内静水压力水头，m；

γ_W ——水的重度， N m^{-3} ；

F ——经验系数。

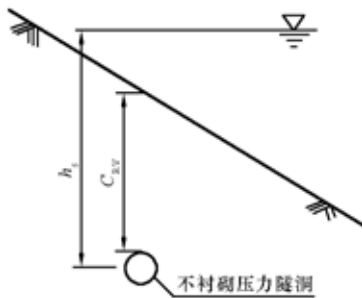


图 1 压力隧洞覆盖范围的垂直向准则

2) 雪山准则 (如图 2 所示)：

对于比较陡峭的地形，侧向覆盖常起着控制作用。据此产生了澳大利亚的雪山准则[Dann et al, 1964]。

$$C_{RH} = ZC_{RV} \quad (2)$$

$$C_{RV} = h_s \gamma_w / \gamma_R \quad (3)$$

式中：

C_{RH} ——水平覆盖厚度，m；

C_{RV} ——垂直覆盖厚度，m；

h_s ——洞内静水压力水头，m；

γ_w ——水的重度， N/m^3 ；

γ_R ——岩体重度， N/m^3 。

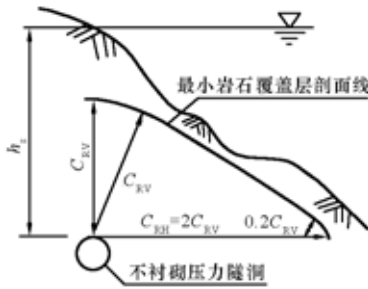


图2 不衬砌压力隧洞覆盖范围的雪山准则

3) 挪威准则 (如图3所示)：

早年，在挪威当压力隧洞地表岩体坡度变陡时，设计者只是简单地把所需的围岩覆盖厚度从静水头的0.6倍增加到1.0倍。结果导致一些工程的失败。根据工程的失败情况进一步研究，从而产生了挪威准则[1971]。关于经验系数 F 的取值问题，宜根据围岩情况确定。

$$C_{RM} = \frac{h_s \gamma_w F}{\gamma_R \cos \alpha} \quad (4)$$

式中：

C_{RM} ——岩体最小覆盖厚度 (不包括全强风化厚度)，m；

h_s ——洞内部水压力水头，m；

- γ_w ——水的重度， N m^{-3} ；
 γ_R ——岩体重度， N m^{-3} ；
 α ——地表岩体坡角， $\alpha > 60^\circ$ 时取 $\alpha = 60^\circ$ ；
 F ——经验系数。

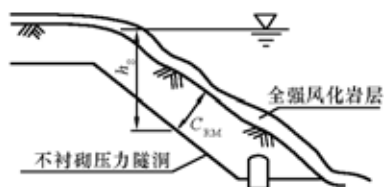


图3 不衬砌压力隧洞覆盖范围的挪威准则

对岩体坡角从 $0^\circ \sim 70^\circ$ 的不同情况使用垂直向准则、雪山准则和挪威准则进行计算比较，雪山准则和挪威准则相当吻合，它随着坡角的增加而覆盖厚度增加，垂直向准则覆盖厚度则随着岩体坡角的增大而减少。显然挪威和雪山准则均更合理。根据国内工程的经验，本标准推荐采用挪威准则。

3 足够的覆盖范围指的是岩体有承受有压隧洞内部压力的能力。高压隧洞和岔洞虽满足了覆盖厚度的要求，有时在完好的岩体中仍会发生水力劈裂，所以本条也提出对地应力的渗流稳定的要求。

6.2.6 在选择水工隧洞的线路时，不允许隧洞与其附近的建筑物相互影响。如隧洞线路穿过坝基或坝肩时，不允许隧洞对坝的基础应力、浮托力……等产生影响；在水工隧洞与铁路隧洞交叉时，不允许影响水工隧洞的围岩稳定，或造成铁路隧洞内发生渗漏水等现象；又如施工导流隧洞的布置，应避免在导流时冲刷围堰。另外隧洞的开挖爆破，不允许影响或削弱附近建筑物的地基，要求隧洞与建筑物间留有足够的厚度。具体厚度建议用有限元计算分析决定。当隧洞与建筑间厚度不能满足要求时，应设法避开或加大厚度，否则必须采取工程措施。

6.2.7 洞线穿过河谷时,应根据具体地形、地质条件,进行绕沟和跨沟方案的技术经济比较确定。

6.2.8 水工隧洞的线路宜布置为直线,若采用曲线布置时,弯道的缓急影响隧洞的流态、压力分布和水头损失,影响的程度取决于流速的大小。反映弯道几何特征的是洞线转角和曲率半径。在本标准的修订过程中,从水力学因素考虑,对一些资料进行了分析研究,资料显示有压隧洞在低流速情况下,曲率半径大于或等于5倍洞径时,其损失系数较小。对于洞线转角,则显示转角越小,其损失系数越小。另据工程调查,转角采用不大于 60° ,曲率半径不小于5倍洞径,运行中未发现异常现象。故低流速无压隧洞转弯仍然采用这一数据。低流速的有压隧洞可适当降低要求。

高流速无压隧洞设置平面弯道是极少的,原因是弯道内流态很差。例如我国陕西省石头河水库左岸明流泄洪洞,属导流洞改建,在设计泄量下断面余幅较大。为节约出口开挖量,适应布置要求,洞内利用了原导流洞的弯道。弯道转角 41° ,半径150m和300m,洞宽7.2m。从模型试验观测到,当流速 27m/s 时,断面左右最大水面差达5m~6m;弯道末端直段40m(大于 $5D$),这时挑坎水流仍受弯道影响而不均匀。故对于高流速的无压隧洞,应力求避免在平面上设置曲线段。

弯道对高流速有压隧洞也有影响,据碧口水电站左岸泄洪隧洞模型试验资料,转角 $56^\circ 05'$,曲率半径80m,大于5倍洞径,在流速 21m/s 的情况下,弯道压力分布不均,两侧压差达4m,至弯道后直段上5倍洞径处,两侧压差尚有1.5m,10倍洞径处还有0.5m,至孔口水流仍不对称,流速分布亦不均匀。故对高流速有压隧洞也应注意弯道问题,但要求可比无压洞适当降低。

6.2.10 在选择水工隧洞线路的纵坡时,使选取的纵坡应满足水力条件、运行和维修的要求,并应考虑施工的方便。在水力条件方面,隧洞坡度主要涉及到无压流的计算,它影响隧洞泄流能

力、压力分布、过水断面、工程量、空蚀特性和工程安全。

关于压力分布，特别在陡坡段反映较为敏感，对高流速无压隧洞极为不利。在有压隧洞中若有平坡或反坡，在平、反坡末端将有可能出现压力余幅不足。此外反坡还会造成洞内淤沙积水，给维修增加困难。故本条规定在洞身段内不宜设置平坡，避免设置反坡。出口段如设置反坡时，应注意做好检修期的排水措施。

6.2.12 在长隧洞中为了便于施工，加快施工进度和均衡各段的工程量，必须设一些施工支洞。根据我国施工情况调查，每个掌子面距支洞口的最大距离，大约控制在 2000m 左右。施工支洞的合理布置与主洞线路布置关系密切，故本条强调应进行技术经济比较确定。

6.3 进出口布置

6.3.1、6.3.2、6.3.3 及 6.3.5 进出口布置系隧洞工程的一个主要组成部分，在布置中应重视以下几个方面：

- 1 满足洞口的主要功能：
 - 1) 在电站各种功能、各种运行水位下，必须满足过水流量的要求。
 - 2) 在水道系统、发电厂房发生事故或检修时，可及时下闸截断水流。
 - 3) 应具有拦截泥沙和污物的功能。
- 2 一般应考虑的地形条件：
 - 1) 洞口地段地形要陡，地面坡度最好要大些。
 - 2) 正地形较负地形好，山体雄厚较山体单薄好，山沟里较沟口好，但一般不宜在冲沟处布设洞口，因为该处除常有地面径流汇集外，也常为构造破碎的软弱地带。
 - 3) 洞口段应尽量垂直地形等高线，交角不宜小于 30°。

- 4) 洞口选在悬崖陡壁下，要特别注意风化、卸荷作用所造成岩体的坍塌，以及坡面的危石处理。
 - 5) 当地形陡、边坡高的地区布设洞口时，一般应尽量不要削坡或少削坡，必要时可作人工洞口先行进洞，以保证边坡的稳定。根据当前先进的支护水平，在Ⅳ、Ⅴ类围岩中，可以超前对岩体加固然后进洞，贯彻“早进晚出”的原则，避免开挖高边坡，破坏原生坡度和地表植被。
- 3 一般考虑的地质条件：
- 1) 洞口应布置在岩体新鲜、完整、出露完好，且有足够厚度的陡坡地段。
 - 2) 岩体产状对洞口边坡稳定影响较大，反倾向的岩体对洞口稳定有利，可不考虑倾角大小。顺倾向岩体的洞口，若倾角在 $20^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间时，易产生沿软弱结构面滑动。
 - 3) 岩脉、破碎带、岩体风化破碎地段，一般不宜布设洞口。
 - 4) 洞口应避免不良物理地质现象的地段，如滑坡、崩塌、危石、乱石堆、泥石流及岩溶等。

根据上列条件，提出了标准的有关条文。

6.3.6 水工隧洞的进口种类。按其用途可分为发电、灌溉、供水、泄洪、排沙、放空及施工导流等；按其工作性质，可归纳为引水及泄水两类；按其水流形态，又可分为开敞式和深水式两种。鉴于已建进水口，在水力学上出现的问题较多，故本条采用按水流形态进行分类。

1 开敞式进水口，多用于拦河闸（坝）拦截引用河道径流的隧洞工程。进口后直接连接明流隧洞，或后接一段明渠再与隧洞衔接。

开敞式进水口的布置，除保证各种情况下的必要引用流量，

以及拦污等一般要求外，由于水库、水文等特点，进水口必须设置有效的防沙、排沙措施，除在布置上应选取有利的地形条件，如将进水口布置在河弯的凹侧，或利用横向环流原理设置一些导流设施外，通常在进口段都设置有冲沙闸、拦沙坎、沉沙池、冲沙道等水工建筑物。

为了减少进口损失，避免在进口前产生漩涡和回流，布置上必须圆滑平顺。

2 深式短管进水口后接明流隧洞，这时水头损失主要考虑压力洞段的形状阻力，其沿程损失忽略不计。工作闸门前的压力洞段是由入口段、事故检修门槽和压坡段三部分组成。

3 深式长管进水口，这种型式的进水口用于泄洪隧洞，有些布置是从进口到出口皆为有压流的单一式，有些在平面弯道以前为有压流，其后为明流的混合式，两者的布置要求基本相同。已建引水式电站大都采用这种布置，基本上都是三面收缩的进水口，上唇和侧墙大多采用椭圆曲线，少数为圆曲线。进口顶板应在水库最低运行水位以下，并有一定的淹没水深。合理的淹没深度应在最低水位运行时进口不产生漏斗状漩涡，以免吸入空气、引起振动、减少流量、降低水轮机出力。

在设计短管进水口时，应能满足防空蚀和出流流态好等要求。由于进口压力洞段较短，检修门槽宽，故孔口流态对进口地形和孔口体形反应十分敏感，若进口来流不平顺、不对称，或体型曲线稍不合理，就会使孔口水流紊乱，以致造成出口水流飞溅，检修门槽中水流剧烈跳动，以及在进口顶板末端形成负压区等不利的水力现象。故这类进水口对地形条件和孔口体形轮廓要求十分严格，如进口地形较复杂，应通过模型试验验证。

6.3.7 根据抽水蓄能电站洞口的进流与出流方式，其型式一般分为侧式（卧式）与井式（立式）两种。

侧式洞口为目前国内采用的主要型式，由于多布置在岸边，故所需隧洞相对较短。其水流沿水平方向或与水平方向有一定的

夹角流动。进流一般比较平顺，出流则易发生流速分布不均甚至出现顶部负流速。侧式洞口有地面式、地下式，也有半地面半地下式的。从水力学方面要求，对其体型设计，要求进水时要逐渐收缩，出流时逐渐扩散，全断面上流速均匀，不发生回流、脱离。

为了改善弯道带来的流速分布不均现象，隧洞中的弯道与洞口之间应有足够长的直线距离（整流距离），同时应尽量减小转折角、加大转弯半径，或将弯道做成渐缩型。存在平面转弯时，整流距离以不小于隧洞直径为宜；立面弯段对出流在平面上的对称性影响较小，整流距离可相对较短。

井式洞口可分为盖板式、开敞式。目前多采用盖板式。盖板式的组成为：①扩散段，该段由盖板、径向分流墩、底板及喇叭口组成，根据流量的大小，用径向分流墩在圆周方向分成数个孔口，该段是井式洞口设计的关键之一；②竖井段，它是扩散段与弯段间的连接段，一般应有适当的高度；③弯段，这也是井式洞口设计的关键之一，进流时它将水流输入水道内，出流时将水流输入竖井段，经扩散段流入上库；④盖板式洞口的其他组成部分主要为隧洞段、闸门段、渐变段、闸门启闭机排架及启闭机房，这些建筑物与侧式洞口完全相同。开敞式除无扩散段的盖板外，其余与盖板式相同。

6.3.8 该条规定是根据水力学试验及已建工程经验归纳编写的。

6.3.9 这里所指通气问题与掺气减蚀不同。其目的有两点：①为适应无压隧洞中，高速水流水面的自然掺气和水面以上余幅中的空气随水流被带至洞外的需要；②在有压隧洞中，排水时需补气，充水时需排气。如果通气设施安排不当，在无压隧洞内将造成流态不稳。在有压隧洞内，当洞内气压积聚达一定程度时，可能会出现爆炸性的喷发，因而影响结构和周围人员的安全。故当通气考虑不周，不仅要破坏正常泄流，而且会在一切可能的通道内抽气，影响闸门启闭机室或其他交通廊道等的正常操作活动，

同时会增加作用在结构上的意外荷载。为减少通气时的阻力损失，布置通气管路时应尽量减少突变、弯头……等。通气孔应自成系统，且与人孔、物孔、交通洞、井、闸门启闭机室等隔开，以保证值班工作人员的正常操作活动。在通气孔的进气口附近，应设网罩和拦栅等防护设施，以保证周围行人免受强大气流吸力的伤害。总之，通气设施是隧洞中不可缺少的重要组成部分，过去由于缺乏经验，对通气问题估计不足而造成各种事故的工程实例还不少，今后应该重视。

6.4 多用途隧洞

6.4.1 为了紧凑枢纽布置，减少枢纽的单项工程，降低造价，加快施工进度，特提出本条规定。

不同用途的隧洞，其特点及要求各不相同，合而为一必然会产生矛盾，故一洞多用途隧洞的布置，应根据工程地质条件，施工方法，通过试验研究并进行技术经济比较确定。

6.4.2、6.4.3、6.4.4 不同用途的隧洞，其要求和特点各不相同，如利用导流隧洞改建为泄洪隧洞时，应注意研究高流速、防蚀抗磨和防渗问题，故在这几条中明确提出应根据工程的具体条件及其可能性研究临时与永久相结合应该研究解决的问题。

6.4.5 由于地形地质条件的限制，近年来我国有许多利用导流洞改建为泄洪洞的工程。在泄洪隧洞消能方式上采用了多种形式，例如，重庆鱼跳水利枢纽，由于地形条件的限制，采用了地面开启式溢洪道和地下泄洪隧洞联合泄洪，在其建筑物的末端，溢洪道和泄洪洞重叠布置，泄洪时二者水流在空中碰撞消能，减少了对下游的冲刷；再如小浪底水利枢纽，由于消力池处的地形地质条件限制，研究采用了泄洪洞孔板消能，运行效果很好；沙牌、冶勒、仁中海工程均采用漩流竖井消能，目前溪洛渡工程也在研究泄洪洞内采用漩流竖井消能的方式。消能方式，各具有其特点，故本条规定采用时必须结合其特点和要求，进行试验论证。

7 断面形状及尺寸

7.1 一般规定

7.1.1 高压隧洞对于围岩稳定、防渗及水力劈裂等问题要求较高，在岩体的覆盖厚度及其他措施设计方面应予以特别注意；高流速带来的空蚀、磨蚀和冲击波等问题，在体形设计、材料应用上，是不可忽视的。

近年来由于对围岩认识的提高，在工程实践中隧洞承受的压力愈来愈高。国外有内压水头达 1000m 的有压隧洞采用不衬砌的实例。国内也有 600m~700m 的地下岔洞采用钢筋混凝土衬砌代替钢板衬砌的实例。从抗裂设计的观点，衬砌混凝土的允许拉应力小于等于内水压力 ($[\sigma] \leq p$) 时，不论衬砌厚度多大，均无法承受内压力，据此 p 约在 50m~60m 时可满足 $[\sigma] > p$ 的要求，另根据工程实践，10m 左右的洞径，内水压力水头不小于 80m 时，衬砌中布设钢筋过多，钢筋间距特密，浇筑混凝土非常困难，质量不易保证。

据国内外统计资料分析，高、低压界限大都采用 80m~100m，本标准规定采用 100m。

关于高、低流速的界限问题，早期国外规范规定为 10m/s ，我国 1966 暂行规范中提出流速在 10m/s 以上时即有掺气现象。在低压情况下，过水流速大于 $(16\sim 20)\text{m/s}$ 时就有可能发生空蚀，如取 $(16\sim 20)\text{m/s}$ ，当体形选择合适，也有可能避免发生空蚀，据此资料，又请专家咨询，在原规范中取 $(16\sim 20)\text{m/s}$ 作为高、低流速的分界。本次规范修订过程中，收集了近年来的资料表明小于 20m/s 流速的隧洞发生空蚀的实例较少，大于 20m/s 流速的隧洞大多有空蚀破坏情况，故本标准对高、低流速界限的

规定为 20m/s 。

7.1.3~7.1.4 总是希望水工隧洞内的水流保持一种型式，不变的流态。即有压流或无压流。如果隧洞内出现明满流交替，且时间较长时，一般将出现空蚀、造成磨损和产生较大的动水压力，这对隧洞的过流能力、洞壁的受力状况、隧洞及其周围建筑物将产生不利影响。从国内外已建隧洞工程的运行情况看，由于发生明满流交替造成的危害实例不少，如，印度巴克拉坝右岸导流隧洞在施工期发生了明满流交替，水流冲毁了闸门控制室及底部隔墙等处，造成厂房被冲，10人死亡，损失37.5万英镑。在国内，如盐锅峡导流底孔，在水头31.08m时，发生明满流转换，将3m厚的混凝土墩洞穿，对工程造成严重影响。但国内也有少数隧洞如乌江渡、石头河等工程的导流隧洞，曾发生过明满流过渡的工作情况，也未导致破坏。

据上列情况，形成本条规定。

7.2 横断面形状

7.2.1~7.2.2 圆形面水力学条件好，衬砌受力均匀，不易产生应力集中，且计算简单。但衬砌施工不便。高内、外水压力的隧洞都宜优先选用圆断面。若内、外水压力不大，拐角处产生的应力集中也不大时，为便于运输出渣，亦可采用圆拱直墙式断面。

在外压力较大，地质条件较差的洞段（如Ⅳ、Ⅴ类围岩），为了避免局部应力集中，采用圆形或马蹄形断面较好。

无压隧洞一般都采用圆拱直墙式断面，便于施工。

在隧洞的轴线选择中，如果由于某种原因洞轴线不能与最大主应力方向平行或接近平行时，也可改变隧洞的断面几何形状或者控制其开挖顺序，以达到围岩自身的稳定。

隧洞围岩的稳定，是围岩应力重分布与围岩强度之间相对关系的反映，当围岩应力大于围岩的屈服强度时，围岩就要发生塑性变形，当围岩应力大于围岩的极限强度时，围岩就要发生破坏。

为了保持围岩的稳定性，则必须调整和控制围岩应力重分布与围岩强度之间的关系。但围岩的强度性能是客观存在的，难以对它调整，只能调整围岩应力。而围岩应力主要取决于岩体地应力状态和隧洞的断面形状和尺寸，这两者中地应力又是客观存在的。因此，唯一可以调整的只是隧洞的断面形状和几何尺寸。故在特定的地应力场中，选择一个合理的断面形状和几何尺寸，对于降低围岩应力集中，改善围岩受力条件，保持围岩稳定，具有重要的意义。这就是说可以用调整隧洞横断面的高宽比，来改善围岩的受力。

如果用 $\sigma_H/\sigma_V = \lambda$ (σ_H —水平地应力； σ_V —垂直地应力) 来表示岩体中地应力比值系数，并根据 λ 值的大小把地应力场划分为 $\lambda=0$ 、 $0 < \lambda < 1$ 和 $\lambda > 1$ 三种类型，当隧洞轴线平行于两水平地应力轴线之一时，由理论计算，模型试验可知，如在 $\lambda > 1$ 的地应力场中，即水平地应力大的地应力场中，各种断面形状的宽度可以选得大一些，而高度可以低一些。反之，在 $\lambda=0$ 的地应力场中，即垂直地应力大的地应力场中，宽度要尽量小一些，而高度要大一些。因此在选择断面形状时，应注意与地应力场相适应的关系。据此列出本条规定。

7.2.3 水工隧洞中，在不同断面之间应设置渐变段。渐变段一般分扩散段与收缩段两种型式。当扩散段前后两端断面的面积比一定时，扩散长度增加，就可减少其扩散角，因此就减少了水流与洞壁分离的程度，这样由于水流与洞壁分离造成水流紊乱而引起的局部水头损失可大大降低，故扩散段的圆锥角越小越好。相反，在收缩段，水流始终充满整个洞段，水流不会与洞壁分离，在断面比不变情况下，增加收缩段长度，对局部水头损失的影响较小，尤其在收缩角较小的情况下，其影响更小。

渐变段的角度，据调查，美国垦务局规定最大收缩或扩散角限制不大于 7° 左右。我们在修编工作中，对不同的角度，用可能收集到的方法，进行了水头损失比较计算，从计算结果看，当角

度在 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内时，水头损失系数小。

据调查，我国对渐变段一般采用直线规律变化的布置，将边界的最大收缩率或扩散率限制在 1:8 以内，其长度以洞身直径或洞高的 1.5~2.0 倍为宜，由工程运用情况看，效果很好。

分析上列情况，本标准中选用有压隧洞圆锥角控制在 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 为宜，渐变段长度不宜小于 1.5~2.0 倍的洞径（或洞宽）。

在长隧洞中，若采用了多种断面或衬砌型式，每种断面或衬砌型式的洞段要有一定的长度，不同断面或衬砌型式间的接头渐变段不宜过多，否则会加大隧洞的局部水头损失。

7.3 横断面尺寸

7.3.1 水工隧洞的直径选择，是由动能经济比较决定。在同样地质条件和过水流量一定的情况下，洞径小而流速大，则水头损失就大，电站出力减小；反之洞径大而流速小，则水头损失少，电站出力相应较大，故选择合适洞径应经过经济比较确定。

7.3.5 隧洞横断面的最小尺寸，圆形断面的直径由原规范规定的 1.8m，提高为 2.0m；非圆形断面的高度由原规范规定的 1.8m 提高为 2.0m，宽度由 1.5m 提高为 1.8m，这是根据我国生活水平的提高，人们的健康水平的改善，人的身体增高，根据有关方面的统计，对隧洞的最小尺寸进行了修改。

7.3.6~7.3.7 本条规定与原规范 4.3.6、4.3.7 相同。隧洞按无压明流工作状态设计时，为了防止发生满流工作状态，水面以上需留有足够的空间余幅，它可以根据掺气水深标准确定，也可根据清水水深标准确定。

1 据了解，目前最大允许清水水深，有三种规定：

- 1) 洞高的 85%。
 - 2) 洞高的 78%。
 - 3) 过水断面占隧洞断面的 85%。
- 1)、3) 两种都引用于以往的几次规范中。

2 掺气后水面线上的余幅问题：

- 1) 洞高的 15%~25%。
- 2) 隧洞断面积的 15%~25%。

如，美国一般采用 0.15 洞高，法国一般采用 0.2 洞高，日本一般采用 $A_w/A_0 = 3/4 \sim 7/8$ (A_w 为设计洪水流量的过水断面积， A_0 为隧洞断面积)。

根据上列资料，并据调查情况，本次规范的编修中仍然采用了原规范的规定。

8 水力设计

8.1 水力计算原则

8.1.1 本条规定水力计算的内容与原规范规定基本相同，由于本标准增加了抽水蓄能电站输水洞的内容，故在本条中增加了水力过渡过程计算。

8.1.2 在水工隧洞水力学计算中，水头损失计算是一个重要问题，尤其在多种衬砌型式的长隧洞中更为突出。水头损失包括两部分，即沿程损失和局部损失，其关键问题是如何确定不同衬砌型式的糙率系数及各种类型的局部损失系数，可按附录 C 采用。

在不衬砌或喷混凝土支护的隧洞中，常常遇到局部衬砌，尤其在底板采用混凝土衬砌就更普遍，这样原隧洞的糙率系数 n 值就相应降低了，设这一糙率系数为综合糙率系数，综合糙率系数 n_0 值推荐按下列公式计算。

$$n_0 = n_1 \left[\frac{S_1 + S_2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{3/2}}{S_1 + S_2} \right]^{2/3} \quad (5)$$

式中：

n_0 ——综合糙率系数；

n_1 ——不衬砌糙率系数；

n_2 ——混凝土衬砌糙率系数；

S_1 ——不衬砌周边长；

S_2 ——混凝土衬砌周边长。

8.1.4 水面线的计算方法很多，经调查分析，分段求和法较为简单，实际工作中采用者也较多，故本条推荐采用该方法，但也

不排除应用其他方法。

8.1.5 本条规定是根据工程实践而列出的，其规定与原规范 5.1.5 条相同。

8.2 高流速过水边界的防蚀设计

8.2.1 空化是高流速隧洞设计中的一个经常遇到的问题。从已建高流速泄洪隧洞发生事故的实例中分析，由于空化破坏的占大多数，因此，在高流速隧洞中如何防止或减轻空化引起的破坏，具有重要意义，应按本条规定进行判别计算。

本条中提出的空蚀现象，其概念为：空化是液体特有的一种现象，当由于各种原因使水流流体中某一点的压力降低到水的蒸汽压力时，水流内部便出现蒸汽空泡，这样形成的空泡称为“空穴”。含有空穴的水流称为“空穴流”。空泡随水流移动至下游压力较高的地区，由于周围水体的压缩，空泡溃灭，空泡的发生和溃灭过程称“空化现象”。如空化现象发生在水流的边壁附近，由于空泡溃灭时释放巨大能量并直接轰击边壁表面，在长时间的强烈高频冲击下，最终会使边壁遭受破坏，这就是“空化”。所以空化是产生空蚀的前提，而空化的产生又与水流内绝对压力降低至与水的蒸汽压力接近的程度有关。一般引用一个无因次参数——空化系数 σ 作为衡量水流发生空化可能性大小的指标。

8.2.2 在易于发生空蚀部位或区域，建议采用下列防蚀、减蚀措施：

1 体形是指水流边壁轮廓的造型，设计合理的体型需满足阻力小、磨损少、免空蚀以及不出现有害的水流形态等条件。为了防蚀所设计的体型，其初生空化系数 σ 应当越小越好，应小于在实际工程运用中可能出现的最小水流空化系数 σ 。

2 空蚀现象与隧洞表面不平整度有关，施工时如果不注意使水流边壁的表面光滑平整，在高速水流作用下，将可能产生局部空蚀，甚至可以进一步发展扩大。过去有不少由于空蚀破坏的

泄水建筑物，多是由局部表面不平整引起的。从一些调查资料中看出，当水流边壁表面有显著急剧凹凸不平，流速大于（15~20） m/s 时，就有可能发生空蚀。

3 对防蚀采用的一些措施，目前常用的有掺气减蚀，衬砌采用防蚀、抗磨材料等。若采用以收缩出口断面积的方法，来消除有压洞内可能的空蚀破坏时，一般应经由水工模型试验确定，在洞内可疑或有潜在危险的地段，使其水流空化系数大于该处的初生空化系数，并留有足够的余地。

8.2.3 一般在高速水流作用下的泄水建筑物，其过水边壁应选用防蚀能力较强的材料。多泥沙河流应考虑采用抗磨损的材料。有些还需考虑采用抗冲击的材料。有关抗蚀、抗磨材料在附录 D 中已作介绍。

9 结构设计基本原则

9.0.1~9.0.4 这几条的内容均系按 GB50199 的规定给出的。对支护的计算和验算内容与原规范基本相同，设计时应根据不同设计状况，考虑不同的加固体系及相应的作用（荷载）效应组合，进行一种或二种极限状态设计。

9.0.5~9.0.6 计算中的各分项系数是根据结构功能函数中基本变量的统计参数和概率分布类型，经可靠度分析，并结合工程经验确定的。对缺乏统计资料的部分，则凭工程经验确定。

(1) 结构重要性系数，是用来考虑水工隧洞的重要性和失事后果，分别采用不同的结构重要性系数，该值由 GB50199 规定。

(2) 设计状况系数，是用来反映不同设计状况应有不同的目标可靠指标，对应于持久状况、短暂状况、偶然状况，应分别取用不同的设计状况系数，取值与 DL T5057 一致。

(3) 作用（荷载）分项系数，是用来考虑作用（荷载）对其标准值的不利变异，有超载系数的概念，其值由 DL5077 或 DL T5057 给出。

(4) 材料性能分项系数，是用来反映材料实际强度对所采用的材料强度标准值的不利变异，其值取用于 DL T5057。

(5) 结构系数，是用来反映作用（荷载）效应计算模式的不定性和抗力计算模式的不定性，并考虑上述作用（荷载）分项系数和材料强度分项系数未能反映的其他不定性。

- 1) 利用厚壁圆筒公式计算时的结构系数，是在各种不同材料尺寸和不同作用（荷载）效应组合下，同时考虑到地下工程的复杂性和作用（荷载）的不定性，计算得出。
- 2) 除上列有压圆形断面计算外，其他断面（圆形无压、城门洞形、马蹄形等），以往均采用混凝土设计规范所给出

的方法和标准，隧洞衬砌本身没有另作规定，故本标准仍然采用了传统的规定，即衬砌的承载能力极限状态设计采用了 DL T5057 的方法和标准，据此结构系数的取值按该规范的规定取用。

10 不衬砌与锚喷隧洞

10.1 一般规定

10.1.1~10.1.2 在水工隧洞的设计和施工中，为充分利用围岩的自稳能力、承载能力和抗渗能力，减少投资，目前国内外的成功经验是采用不衬砌及锚喷隧洞。如我国广西天湖水电站引水隧洞的最大内水压力 6.17MPa，采用了不衬砌隧洞，运行很好；国外有 10MPa 左右的有压隧洞采用了不衬砌。锚喷在处理不良围岩中发挥着巨大的作用。在 I、II、III 类围岩中，已有许多工程利用锚喷作为永久支护，这些工程运行均较良好。不衬砌和锚喷隧洞在现代隧洞工程建设中已被广泛应用，故根据实践经验提出本条规定。

10.1.4~10.1.5 目前锚喷支护设计，主要有工程类比法、理论计算法和监控量测法三种，其中工程类比法是根据国内外大量的工程实践总结出来的，具有广泛的实用性，所以应用最普遍，在锚喷支护设计中占主导地位。因此，本标准规定“不衬砌与锚喷隧洞的设计，一般宜按工程类比法，对于 1 级隧洞、直径（跨度）大于 10m 的隧洞，尚应辅以理论计算和监控量测”。

由于岩体变化复杂，地质和岩体力学参数难以准确地确定，而且在计算模式方面还存在一些问题，因而计算通常只是工程设计的一种辅助手段。但对于重要工程或大直径（跨度）洞室，为确保施工和运行安全，还要通过理论分析对围岩的稳定性进行验算。

有限元法引入岩石力学后，在地下工程中得到广泛应用。它可以把隧洞加固措施与围岩看做成一个整体进行分析，扬弃了许多传统的计算假设，开创了力学分析的新阶段。这种方法能够分

析复杂的地质问题，其数学模型可以反映岩体的连续性、各向异性、非均质性和非线性等特征，根据几何外形和力的作用方式等条件，把岩体分成一些有限多、有限大的单元体，经过一定处理程序，以线性代数方程组的形式，表达应力——应变——破坏——时间的内在连系，定量地评价隧洞周边应力集中和破坏现象的规律。根据所计算岩体各点的应力状态与该点力学强度对比，就可确定岩体破坏与否，就可确定需要加固的部位和加固参数，计算结果近似可靠。因此，推荐采用有限元法进行分析计算。但限于当前岩石力学测试手段，岩体结构面参数的测定尚难完全反映真实情况，有限元法的应用也还存在一定的局限性，故本标准强调采用多种手段综合分析。

近几年来，设计者利用极限平衡法，抓住结构面的组合方式进行围岩稳定分析，也取得了一定的效果，故本标准建议对于局部易于失稳的围岩宜采用极限平衡法对围岩进行分析，找出不稳定块体，并据此拟定加固参数。

监控量测法是近几年发展起来的一种较为科学的设计方法。这种方法的核心是以综合反映各种地质因素和工程因素的围岩位移和位移速率作为围岩是否稳定的判据。该方法简单易行。对恶劣地质条件的工程更是不可缺少的设计方法。故在本条中一并列出，以引起设计者注意。

10.1.6 表 F.1 是按不同地质条件、不同开挖跨度给出的永久性工程的锚、喷支护设计参数。该表中规定的参数是通过上百个工程的实践资料统计分析而获得的，已列入 GB50086，为使用方便，将此表移于本标准。根据预可研阶段的设计深度要求，可依此表选用支护类型和支护参数。对于地质条件较差的断层带、断层影响带、节理裂隙密集带、严重卸荷带、只能按 V 类围岩选定支护参数。但在 IV 类围岩中，开挖直径（跨度）大于 15m，在 V 类围岩中，开挖直径（跨度）大于 10m 时，锚喷支护只能作为第一次（施工安全）支护。对于采用锚喷作第一次支护时，支护

参数可对附表 F.1 中给定的数做适当减小，监测结果需要加强支护时，再适当增大。

地质环境复杂多变，人们对地质条件的认识需要逐步深化。大跨度，长洞线的地下工程，在预可研阶段很难查清所有的地质问题，在可研阶段可能会遇到更多的地质问题，所以宜根据 GB50287 对地质工作专门进行研究，根据出现的新问题修正围岩分类、调整支护参数，此乃锚喷设计中的重要工作，故在本条中也予以规定。

10.1.7 隧洞的进、出口部位靠近地表，一般都有风化、卸荷作用，间或有地表水、地下水的作用，该部位围岩完整性差，防渗性能较低，故对进、出口应采用加固措施。

10.1.9 根据工程实践经验，不衬砌及锚喷隧洞浇筑混凝土底板，可减少糙率，并利于检修。近几年来，在清除底部时，有些工程将松动块石也加以清除，清底工程量加大，无必要，仅将弃渣、污物加以清除，并用水冲洗干净即可。

10.1.10 不衬砌隧洞，在长期的运行中，局部掉块，难以避免，喷混凝土局部掉块是有可能的，为了使其不致进入水轮机，保证电站正常运行，特提出本条规定。

10.1.11 本条是根据工程实践经验而规定的。

10.1.12 洞内长期大面积淋水，不利于喷层与围岩紧密黏结，难以充分发挥喷混凝土的作用，甚至给喷混凝土带来不利影响。洞内地下水具有侵蚀性的洞段，易造成衬砌腐蚀，由于喷层厚度较薄，受腐蚀的危害甚于模筑混凝土衬砌。黏土质胶结的砂岩、粉砂岩、泥质板岩、泥质及砂质泥岩等岩性较软的岩层，开挖后极易风化潮解，亲水性很强，遇水泥化、软化、膨胀，围岩压力大，严重者发生淤泥状流淌，稳定性极差，喷混凝土支护难以阻止其迅速的变形；喷混凝土支护抗冰胀性能较差，严寒和寒冷地区，冻冰地段，不宜采用喷混凝土支护，至于其他特殊要求的隧洞是否采用喷混凝土支护，应根据具体情况确定。

10.2 喷射混凝土支护

10.2.1 喷混凝土的设计强度是决定力学性质和耐久性的重要指标。目前随着喷混凝土工艺水平的提高，新材料、高效减水剂、增黏剂、早强剂的引用，对喷混凝土的力学性质有很大的改善，本标准规定其设计强度等级不应低于 C20。

喷混凝土是依靠同岩面的黏结强度传递应力，所以它同岩面的黏结力至关重要，也是喷层和围岩共同工作的保证。喷混凝土与围岩的黏结强度不仅与喷层有关，还与围岩的强度有关，因此本标准规定：取 I、II 类围岩黏结力不低于 1.0MPa，III 类不低于 0.8MPa。

10.2.2 工程实践证明，当喷层厚度在 0.05m 以下时易收缩、开裂，从而降低喷层的整体性。据此本标准规定喷层的最小厚度不应低于 0.05m。

由于适应围岩变形的需要，要求喷层应具有一定的柔性，喷层过厚增加其刚度，适应变形能力小，而且一次喷层过厚，回弹量大，易于发生喷层脱落，经济上损失大，据此本标准规定喷层最大厚度不宜大于 0.20m。

10.2.3 关于锚喷衬砌的允许流速问题，提出以下工程实例，供参考：我国已建锚喷衬砌隧洞中的流速一般为 3m/s；南芬尾矿坝的泄洪洞和星星哨水库泄洪洞，洞内最大流速为 7m/s，经过多年运行，未发现破坏；丰满水电站 2 号泄水洞，在闸后 121m 的不衬砌段中，沿断层处采用了锚喷加固，洞径为 10.2m，洞内流速为 13.5m/s，进水口采用水下岩塞爆破开通后，经短期过水，未见破坏；国外墨西哥奇森水电站两条导流隧洞使用喷混凝土衬砌，洞内流速约为 12m/s，运行 2 年后，其中一条底部出现少量的局部冲蚀，其他情况均好；前苏联莫斯科夫 (B.M. MOCKOB) 建议，当采用喷混凝土做平整衬砌时，其厚度不能小于 0.05m，不平整度不能大于 0.15m，流速不能超过 10m/s。锚喷衬砌的允

许流速，目前国内资料较少，考虑到高速水流问题，故本标准规定允许流速不宜大于 8m/s 。

10.3 喷钢纤维混凝土支护

10.3.1~10.3.5 在流变性较大的岩体中，为适应较大变形的需要，在喷混凝土中掺入 3%~6% 的钢纤维是有效的措施。实测资料表明，在喷混凝土中掺入适量直径 (0.3~0.5) mm，长度 (20~25) mm、强度不低于 380MPa 的钢纤维，喷混凝土的抗拉强度可提高 30%~60%，抗弯强度可提高 30%~90%。

但由于钢纤维的加入，在喷层中往往有部分垂直层面的钢纤维露出层面，平行于层面的钢纤维也有部分附于喷层表面，易于锈蚀，因此需要在其喷层表面再喷 0.03m~0.05m 混凝土加以保护。

10.4 锚杆（锚束）支护

大量工程实例证明，局部松动岩块，或局部的软弱岩体，往往是围岩的薄弱环节，对围岩稳定性影响很大，围岩失稳多由这些部位发生破坏引起。因此，对于整体坚硬完整，但有局部松动块的围岩，宜采用锚杆加固，若松动范围较大且较深，可采用锚束加固；对于局部软弱的岩体（如断层，节理密集带等），可采用锚杆（锚束）加固，还可布设钢筋网，必要时还宜进行固结灌浆加固。

10.4.1~10.4.2 在洞室围岩中易于发生失稳的部位，可归纳如下：

(1) 当结构面和洞壁切线方向平行或交角较小时，沿这一结构面容易发生剪切破坏；对于层面水平的岩体，顶拱易于失稳，边墙比较稳定；倾斜的岩层，层面与洞壁相贯的部位易于失稳；当夹角接近正交时，一般比较稳定。

(2) 洞室边墙与倾斜的结构面相交，若倾斜角大于结构面的

摩擦角，结构面向洞室一侧倾斜的洞壁是很难自稳的，必须予以加固；另一侧洞壁，虽然也可能产生剪切破坏，但坍塌的危险要小些。对于拱座，结构面与拱座的斜切面平行的部位，剪切破坏范围很大，工程中遇有这样情况，围岩几乎都要失稳；结构面与拱座斜切面基本正交的一侧，剪切破坏区很小，只要下部边墙没有滑移破坏，则这一部位的顶拱一般较易稳定。

(3) 对于倾斜产状的节理体系，浅埋洞室比中等埋深洞室的破坏范围要大。

(4) 当结构面有许多组并且都是倾斜产状时，顶拱及边墙都容易失稳破坏，顶拱易于塌落，两边墙易于滑移破坏。当两侧边墙滑移后，将使顶拱塌落破坏范围加大。

分析上列情况，易于破坏的位置不同，其锚杆对不稳定岩体的抗力亦不同，故分为拱腰以上的锚杆及拱腰以下边墙上的锚杆分别进行计算，计算方法与原规范相同，但采用了分项系数的原则。

另外，采用的锚杆类型不同，其计算方法略有出入，在本条中亦单独列出。锚杆的布置方向与岩层走向、结构面的组合情况密切相关，在设置锚杆时应引起注意。

10.4.3 锚杆（锚束）是防止岩块塌落、滑动等不稳定岩体的加固措施。在设计时应根据结构面的位置、产状及其组合情况，确定塌落体范围和滑动力大小，计算锚杆的数量和长度，计算方法见 10.4.1 条。锚杆长度宜不等长，但都应伸入到稳定的岩层中，锚杆在稳定岩层中的长度，应根据需要提供的阻滑力大小计算决定。计算时应充分考虑结构面的产状、结构面的力学性质、锚杆的受力特点，并充分考虑结构面的组合关系和阻滑作用，经济合理地确定其长度。锚杆的间距应根据滑动范围和需要提供的总锚固力大小确定。

10.4.4 系统锚杆是根据岩体稳定要求，在整个开挖面上，按一定间距和规律均匀布置的锚杆，是解决围岩整体稳定的加固措

施。锚杆长度要穿越围岩的松弛区，并在稳定的围岩中有 1.0m 以上锚固长度，间距不大于锚杆长度的 $\frac{1}{2}$ ，采用等距离的梅花型、矩形或菱形布置，其目的是使锚杆提供均匀的支护抗力，使一定深度的围岩形成拱形承载体。在Ⅲ类以上围岩中，节理裂隙发育较差，规定锚杆间距不大于锚杆长度的 $\frac{1}{2}$ ，可保证一根锚杆穿越若干条节理裂隙，锚杆使各个结构面联成整体，可保证整体的加固效果。Ⅳ、Ⅴ类围岩，节理裂隙比较发育，围岩结构块体较小，锚杆间距大时就不能完全保证将围岩中的各个结构面用锚杆咬合连接，因此本标准规定在不良围岩中，无论采用多长的锚杆，其间距不宜大于 1.0m。

10.5 锚喷挂网支护

10.5.1~10.5.3 在喷混凝土层中布设钢筋网，可以提高喷混凝土的抗剪切能力、支护抗力及增强支护的整体性。钢筋网与锚杆连接后还可以扩大支护范围，使锚杆、钢筋网、喷混凝土及一定深度的围岩形成范围较大的承载圈。钢筋网与锚杆应连接牢固。钢筋网如布置不当也会影响喷混凝土质量，如钢筋网的直径过大，间距过小将影响喷混凝土与围岩的结合，甚至发生喷混凝土被钢筋网挡住、使喷层与岩面脱离的现象。据此分析提出本条规定。

为了保证钢筋网不锈蚀，钢筋网应有一定的保护层厚度，本标准按照混凝土构件的要求，规定不宜小于 0.05m。

10.5.4 v类围岩、断层带、断层影响带、卸荷带及节理密集带，由于岩体软弱破碎，再加上构造影响，开挖后变形发展迅速，仅靠钢筋网、锚杆及喷混凝土支护不足以抵抗围岩有害变形的发展，需要采取刚性较大的综合性支护措施，才能抑制有害变形的发展。联合支护包括钢拱架、锚杆、钢筋网喷混凝土支护，这是目前我国在不良围岩开挖施工中常用的方法。

采用钢拱架、锚杆、钢筋网喷混凝土支护时，钢拱架间距不

宜过大，而且应与围岩紧密结合，其底脚应埋入岩体中，这样可以使钢拱架迅速起到承载作用，有效的抑制变形的发展。

10.6 组合式支护

10.6.1 我国传统的施工方法认为：第一次支护为施工安全支护，第二次支护为永久性支护，二者分工明确，互不干扰。根据新奥法的观点，为了节约投资，加快施工进度，可考虑一、二次支护相结合，施工安全支护与永久支护联合工作，故在本标准中予以明确规定。

10.6.2 在支护措施中施工安全支护与永久性支护要统一安排，考虑其共同承担荷载。如根据监控量测资料分析，第一次支护能够满足围岩稳定要求，二次支护时，可不计或少计围岩的压力。

11 混凝土和钢筋混凝土衬砌

11.1 一般规定

11.1.1~11.1.3 混凝土和钢筋混凝土衬砌的作用，有不承载和承载两种，不承载主要是为了保护围岩表面和减少水头损失，承载是为了加固围岩，单独、或与围岩、或与第一次支护共同承担荷载。

11.1.4 本条所提最小厚度是从施工要求出发，使施工质量得以保证。原规范规定，单筋混凝土厚度不宜小于 0.25m，双筋不宜少于 0.30m。在本标准修改中，据有关专家的意见，认为该厚度偏少，施工困难，不宜保证质量，根据工程实际，将最小厚度调整为 0.30m、0.40m。

根据国内已建水工隧洞统计资料，各类隧洞所采用的混凝土标号：低压引水隧洞绝大多数采用 150 号；高压引水隧洞采用 200 号；泄洪隧洞几乎都是采用 200 号以上，有的采用 300 号；对于高流速泄洪隧洞的过水部位，还要求提出抗磨耐蚀的规定，这是原规范的标准。本标准修改中仍然采用了这一数据，但根据现行 DLT 5057 规定，将原规范标号的名称改为混凝土强度等级，在确定等级时作了两点重大修改：

(1) 混凝土试件标准尺寸，由边长 200mm 的立方体改为边长 150mm 立方体；

(2) 混凝土强度等级确定原则由原规范规定的强度总体分布的平均值减去 1.27 倍标准差（保证率 90%），改为强度总体分布的平均值减去 1.645 倍标准差（保证率 95%）。混凝土标号 R (kg cm^2) 与混凝土强度等级 C（计算值）的关系及本标准用值如下表所示：

表3 R与C关系表

原规范混凝土标号 R	150	200	250	300	400
对应 DL5108 混凝土强度等级 C	C14	C19	C24	C29.5	C40
本标准取值	C15	C20	C25	C30	C40

11.1.5~11.1.7 原规范规定“若隧洞衬砌开裂后，内水外渗将危及围岩和相邻建筑物的安全时，应按抗裂设计，否则可按限裂设计。”但根据工程实际和大量试验资料表明，按抗裂设计由于混凝土抗拉强度设计值较低，即使衬砌设计得很厚，仍然控制不了裂缝的出现。鉴于在防渗上还有其他更有效的措施，如固结灌浆、预应力混凝土衬砌，钢板衬护等，故在本标准修改中，取消了抗裂设计，推荐按允许开裂设计。

11.2 作用（荷载）和作用（荷载）效应组合

11.2.2 围岩岩体的结构特征是影响围岩作用的主要因素，因此，水工隧洞支护结构设计时，应根据围岩岩体的结构类型分别确定其围岩作用。其中对于整体块状结构的围岩，如Ⅰ、Ⅱ类及部分Ⅲ类围岩，可不考虑其作用（荷载），当有不利裂隙切割时，应考虑局部不稳定块的掉落和滑移作用。对于这类岩体，必要时应考虑其地应力作用。

围岩压力和地应力的取值及其分项系数按 DL5077 确定。

11.2.3 流变及膨胀性围岩，开挖后变形量大，且延续时间较长，常出现有较大侧压力和底压力，有时侧压力还大于垂直压力，从而导致边墙变形大和底鼓现象，不宜一次完成永久支护，因此宜采用复合式支护，并宜采用圆形断面或马蹄形断面。初期支护可及时提供一定的支护抗力，使围岩不致发生松散，同时又允许围岩的塑性变形有一定发展，以充分发挥围岩的自承作用；二次衬砌作为永久结构，可保证隧洞长期稳定，并注意采取必要的防水措施。

这类围岩的地质条件比较复杂，遇有这类围岩时应加强观测，结合具体情况，采取具体的措施，故本条强调进行专门研究确定。

11.2.4 隧洞不同部位内水压力标准值的选用，由于水文资料已进行了概率分析，故在此沿用传统的水工结构计算原则和方法，其值由特征水位确定。

11.2.5 地下水压力是设计和各类水工设计标准编写中最关注的一个重要问题。几十年来国内外专家、设计和科研部门都作了大量工作，亦提出些成果在工程中试用，但由于这一问题的复杂性，难以提出新的规定纳入规范，故在本标准修改中遵照 DL5077 的有关规定。

当为抵御高地下水压力而需要增加衬砌厚度时，我国的经验是在满足 6.2.3 条第二款有关覆盖厚度规定的条件下，可采用排水措施降低外水压力，但对于不良地质洞段应予以慎重对待。

对于水文地质条件复杂的重要隧洞，建议进行专门研究，确定外水压力。

11.2.6 温度变化、混凝土收缩、膨胀和灌浆压力等对衬砌的影响，我国传统的办法是采用施工措施和构造措施来解决。

11.2.7 施工荷载按实际情况决定。

11.3 衬 砌 计 算

11.3.1 隧洞衬砌的应力计算，是确定衬砌断面尺寸的重要依据之一，由于隧洞衬砌是埋在岩体中的结构物，它在受力变形过程中与围岩相互约束地工作，这种共同作用，使衬砌结构计算复杂化，虽进行大量的计算，也不一定能够得出完全切合实际的结果。衬砌的计算也应与围岩类别相适应，不同的类别，应当采用不同的计算理论。根据实践经验，提出本条规定。

我国传统采用的计算原理是将衬砌与围岩相互分开，以研究衬砌本身为主，适当考虑围岩的作用。以往设计中主要采用这一

原理。此原理作为一种简化计算还是可行的，从力学分析观点上来看，力系比较明确，且容易理解，在多年应用过程中形成了一套比较完整的体系，许多书籍上都有所介绍，可参照使用。

若将衬砌与围岩当作一个整体来研究，这是以研究围岩为主的方法。本标准中规定按具体情况运用有限元方法进行计算。岩体千变万化十分复杂，加上断层、节理、层面等地质构造的存在，使其更加复杂，而对这些构造面又必须加以重视，有限元对这些复杂情况基本上能模拟，可得出较为符合实际的分析结果，因而成为水工隧洞应力分析的工具。因此本条规定的隧洞尺寸较大，地质条件复杂时，可采用有限元法计算。

考虑弹抗作用的有压圆形隧洞，我国传统的计算是采用厚壁圆筒原理推导的公式，力学观点明确，计算方法简单，成果切合实际，在工程设计中得到广泛的应用，本次标准修订中仍保留了该方法，列入附录。

对其他断面形状的有压、无压隧洞衬砌静力计算，二十余年来采用边值数值解法，得到广大设计人员的信任，故本标准仍予以推荐使用。

11.3.2 据工程实践，洞口段偏压属地形影响产生的，洞身段偏压属地质构造产生的。两种情况形成的偏压，难以归纳成一定的规律性，情况变化复杂，故本条规定根据实际情况研究决定。

11.3.3 在平行布置多条隧洞时，施工开挖将引起岩体及衬砌受力状态及衬砌强度的变化，各条隧洞互相之间会有影响，故必须予以考虑。

11.4 衬 砌 分 缝

11.4.1 不同的建筑物如进、出口等，由于其承受作用（荷载）的不同，对衬砌结构的影响是有区别的。又如穿过大断层、软弱破碎带等洞段与其连接的洞段受其围岩的影响也是不同的，故要求在其间应设置变形缝，这是我国传统采用的有效措施。根据近

年的工程实践，也可采用波纹补偿器以适应不同地质条件、不同建筑物的互相影响。

11.4.2 据调查，围岩条件均一的洞段，接缝段的长度有的仍然采用 6m~10m，有的采用 20m~30m，亦有采用 50m 以上的情况。采用钢模台车浇筑时，一般为 9m~12m，采用拉模浇筑时一般分段长度都较长，DL T5057 规定对于地下涵管为 20m~25m，并提出经温度作用计算、沉降计算或采用其他可靠技术措施后，伸缩缝间距可不受 20m~25m 规定的限制。事实上衬砌与围岩密贴，且结合牢固，它与地面结构不同，其伸缩缝间的长度不能按地面结构规定，以计算确定。但工程实践亦反映，当采用高标号混凝土时，分段长度即使是少于 6m，衬砌开裂情况亦很严重，故分段长度应结合围岩条件、工程情况、施工方法和施工能力等综合分析确定，一般仍宜采用 6m~12m。希望在工程实践中不断总结归纳，提出更合适的规定。

11.4.3 衬砌浇筑一般应先浇筑底板，后浇筑边墙、顶拱。但习惯上常采用先顶拱，后边墙、底拱的浇筑程序。采用这样程序施工时，应对反缝处理作专门设计，加强缝面结合。在反缝中设置止水，但止水易有死角，造成混凝土浇筑不满，形成漏水通道。工程实践证明，反缝面都是衬砌结构中的薄弱面，应予注意。

11.4.4 为了保持结构的完整性，防止内水外渗，特提出本条规定。

12 预应力混凝土衬砌

12.1 一般规定

自 20 世纪 40 年代以来，在德国、前南斯拉夫、法国、意大利、奥地利和瑞士等国，相继在许多工程中采用了预应力混凝土技术，形成了一套较成熟的技术和施工机具。在国外实践经验基础上，我国在近年也进行了一系列的研究和应用。其中白山工程采用了压浆式混凝土衬砌，小浪底工程采用了后张法无黏结预应力混凝土衬砌，清江隔河岩和天生桥采用后张法有黏结预应力衬砌，通过工程实践，使我国应用预应力混凝土衬砌已达实用推广阶段。

标准中的规定是根据国外资料及我国白山、隔河岩和小浪底工程的实践经验归纳整理列出。

12.1.1 有压引水隧洞衬砌的主要作用是承受内水压力和防止内水外渗，对于防渗要求较高的隧洞，钢筋混凝土衬砌难以满足防渗要求或虽能满足防渗要求但不经济（如小浪底工程），为充分利用围岩的承载能力和混凝土的抗压能力，提出本条规定。

12.1.2 预应力混凝土衬砌的种类很多，归纳起来，根据产生预应力的方法不同，可分为两大类：一为依靠围岩约束，用灌浆方法来产生预应力的混凝土衬砌，我国白山工程采用的就是这一种；另一类是配置加载装置，用机械方法产生预应力，我国小浪底工程和隔河岩工程采用的是这一种。

12.1.3~12.1.5 本条内容是根据 DL T 5057 有关规定，经整理纳入本标准。

12.2 压浆式预应力混凝土衬砌

12.2.1 混凝土衬砌厚度一般采用隧洞直径的 P 18~P 12，该数据是根据国内外一些资料统计分析得到的。国内外部分压浆式预应力混凝土衬砌厚度统计见表 4。

表 4 衬砌厚度统计表

工程名称	内 径 m	衬 厚 m	内径衬厚
前苏联英古里	9.5	0.5	19
前南斯拉夫拉耳	5.0	0.3~0.4	16.7~12.5
澳大利亚戈尔登	8.2	0.6	13.7
德国瓦因别尔格	3.5	0.4	8.75
德国雷扎赫	4.9	0.4	12.25
英国费斯捷尼奥格	3.25	0.6	5.4
中国白山原型试验	8.6	0.6	14.3
中国白山 1 号引水洞	8.6	0.6	14.3

12.2.2 为了保证衬砌的抗裂功能，在确定预应力的数值时应有一定的安全裕度，以使衬砌在承受运行期间作用（荷载）的情况下不致发生拉应力。考虑到预知压应力值会因混凝土和岩层徐变而降低，其数值必须大于衬砌中由于内水压力而产生的拉应力。初估时灌浆压力不宜小于最大内水压力的 1.5~3 倍，标准中归纳为 2 倍。

本条推荐数值，是参照白山工程引用数据，确定这一数据时应通过计算和实验确定。

12.2.3 注浆孔布置主要依据围岩的结构特征，围岩的应力状态和可灌性，以及隧洞直径的大小。本条是根据白山工程试验和工程实践经验拟订的。

12.3 环锚式预应力混凝土衬砌

12.3.2 后张预应力混凝土衬砌分有黏结预应力混凝土衬砌和无黏结预应力混凝土衬砌两类。有黏结预应力混凝土衬砌设计中，必须考虑由于摩擦引起的应力降低，早期的设计，国内外大都采用了有黏结预应力混凝土衬砌，并相继投入运行。

根据我国工程实践经验，采用有黏结后张预应力技术，预埋波纹管堵塞现象严重，张拉时断丝和滑丝时有发生，施工程序复杂，结构应力不均匀，易引起混凝土裂缝。小浪底工程采用无黏结预应力技术，钢绞线分别放入充满油脂的 PE 套管内，并逐根均匀分布在隧洞衬砌内。与有黏结预应力技术相比，不仅减少了张拉前穿绞线的工序，而且可在混凝土衬砌内形成更加均匀的环向压应力场；由于摩擦系数的减小，大大提高了预应力的效率，且有效地减少了锚具槽附近小圆弧处的应力集中和减少了工程量。就小浪底工程实践而言，采用无黏结预应力系统较原有黏结预应力设计可节省约 50% 的锚具和相应的工程量。在 4320 束锚束张拉中仅有 3 股钢丝由于液压千斤顶中的工具锚夹片受力不均而断裂，断丝率仅 0.0012%。总之，无黏结预应力混凝土衬砌具有经济合理、可靠性高，施工简便等特点，故本条提出采用预应力混凝土衬砌时，宜优先选用无黏结后张预应力混凝土衬砌。

12.3.3~12.3.5 这几条的内容是根据 DL T5057 有关规定及我国工程实践经验而归纳列出。

13 高压钢筋混凝土衬砌岔洞

13.0.1 根据国内外 13 个高压钢筋混凝土衬砌岔洞的实践经验(见表 5), 最高静压力水头为 690m, 主洞最大尺寸为 10.7m, 支洞最大尺寸为 5.8m。高压钢筋混凝土衬砌岔洞已达实用阶段, 故本条规定经技术经济论证, 允许采用该型式的岔洞。

表 5 国内外已建成高内压大尺寸岔洞混凝土衬砌有关工程特性

序号	工程名称	国家	装机容量 MW	分岔 段静 水头 m	分岔 方式	主支洞 内径 m	衬砌厚 m	围岩特征			
								岩石	埋深 m	变形 模量 GPa	最小 主应力 MPa
1	Dinorwic	英国	6×300	590	1→6	9.5 3.8	1.0	板岩	400	50	9.0
2	Kvildal	挪威	4×300	465		13.11		片麻岩			
3	Montezic	法国	4×225	400	2×1→2	5.3 3.8	0.4 0.75	花岗岩	400	30	14~20
4	Conan Mt	美国	6×280	289		11.3		片麻岩		42	5.5
5	helms	美国	3×350	573	1→3	8.2 3.8	0.69	花岗岩	350	27.6	3.4
6	Bath County	美国	6×350	410	3×1→2	8.6 5.5	0.6	砂页岩	315		
7	Raccoon Mt	美国	4×350	310	1→2→4	11.7 4.3	0.45		270		
8	Northfield Mt	美国	4×250	248		9.45			200		
9	Bear sramp	美国	2×300	235	1→2	7.62					
10	Bad Creek	美国		365		9.0	0.3 0.45	片麻岩			
11	Rocky Mt	美国		690	1→3	10.7 5.8					
12	广州	中国	8×300	542	2×1→4	8.0 3.5	0.6	花岗岩	465	25~40	6.2~6.6
13	天荒坪	中国	6×300	610	2×1→3	7.0 3.2	0.6	凝灰岩	500	59	9.5~11.1

13.0.2 岔洞是水工建筑物的主要部分, 其设计等级应与高压

隧洞一致，故在本条中予以明确规定。

13.0.3 分岔段的布置、型式和尺寸，在现行 DL T5141 中已有详细的规定，故在本标准中不再重复，应按现行 DL T5141 有关规定执行。

13.0.4~13.0.5 根据工程实践，高压岔洞处的围岩条件有以下特点：

(1) 分岔洞岩质坚硬，为新鲜岩石，其变形模量大于或等于衬砌混凝土的弹性模量，在高内水压力作用下，围岩径向变位较小，衬砌出现裂缝的宽度将受到围岩的约束限制。

(2) 围岩透水性微弱。钻孔压水试验的渗透率宜小于 1Lu，或者通过灌浆后能达到小于 1Lu 要求。

(3) 岔洞段范围内无断层或大裂隙穿过。若有断层，其规模不大，且无夹泥充填。

(4) 岔洞段范围内无节理密集带，裂隙不发育。

(5) 具有足够的覆盖厚度，围岩应具有一定的初始地应力以抵抗水力劈裂。

(6) 围岩裂隙、节理或岩脉中的充填物质能够保证渗透稳定性，水力梯度小于允许值，在渗流水作用下不产生溶出性侵蚀。

根据上述分析，总结归纳提出了本条规定。

13.0.6 为了保证岔洞的岩体稳定，充分利用围岩的自稳和承载能力，而对施工提出了该条规定。

13.0.7 钢筋混凝土不是抗裂材料，高内水压力的钢筋混凝土衬砌，其作用除减糙、限制裂缝的宽度外，最主要的是传递荷载，承担荷载不是依靠衬砌本身，而是依靠围岩。

13.0.8 工程实践证明，对围岩进行固结灌浆，可以减小灌浆圈内围岩的渗透性，提高围岩的整体性和密度，可限制衬砌变形的发展，也可以减少内水外渗，减少水量损失。

13.0.9 关于固结灌浆压力的规定，工程实践中有不同的作法和意见，有人认为在高压隧洞中若取值过高，如 1.5~2.0 倍内水

压力水头，可能会人为造成围岩劈裂；也有人认为，为了保证使衬砌与岩体成为一个整体，则灌浆压力至少需要等于或大于内水压力静水头。广州抽水蓄能电站固结灌浆最大压力 6.5MPa（广州抽水蓄能电站分岔段静水头为 5.42MPa）。为了防止围岩人为劈裂，固结灌浆压力以小于围岩初始应力场的最小主应力为宜，本标准规定固结灌浆压力等于内水压力的 1.2 倍。

14 封堵体设计

14.1 一般规定

14.1.1~14.1.3 根据我国几十年来的水电建设经验，大部分主洞封堵体是水工结构的组成部分，均设在地质条件较好的洞段，其标准按永久建筑物设计。施工支洞的封堵体按其功能设计，主要由运行情况决定。引水发电洞和泄洪洞等永久建筑物的施工支洞封堵体主要充当围岩作用，应按永久建筑物设计。导流隧洞的施工支洞封堵体主要起临时挡水作用，应按临时建筑物设计。

14.1.4 封堵体作为水工建筑物的组成部分，对其进行合理选型及定位是各个设计阶段的任务之一。封堵体的型式以圆柱形、楔形居多，但也有个别工程选用了工程量相对较小的板壳形封堵体。一般来讲，对于设计水头较高的工程，可选用受力条件较好的楔式体型，楔式封堵体超载能力很强，龙羊峡和二滩工程导流洞封堵体的地质力学模型试验表明，当水压达到6到7倍设计水头时，封堵体周边才出现塑性破坏。

14.1.5 当洞轴线穿过坝体防渗帷幕线时，封堵体应设置在防渗帷幕线上，与其成为整体。若导流洞改建成龙抬头泄洪洞时，封堵体可与其反弧的回填混凝土结合布置，对节省材料缩短工期有利。

14.2 设计计算

14.2.2 封堵体一般都为实体结构，按承载能力极限状态进行设计。

14.2.3~14.2.4 对封堵体进行计算时，目前，主要有两种较简单的计算方法。一是对封堵体基础面进行剪磨计算，计算时计

入基础面的摩擦力和除顶部以外的混凝土与围岩间的粘滞力。二是对封堵体底部及两侧进行抗冲切计算。在实际设计工作中，多采用第一种计算方法，故本标准推荐该方法。

14.2.5 对于高压隧洞的封堵体，用有限元法进行计算，通过计算可掌握围岩的应力变化规律。

14.3 构造要求

14.3.1 主要目的是不破坏岩体、简化施工、加快进度。

14.3.2 主要目的是增加封堵体的安全储备。

14.3.4 对封堵体周边进行固结及回填灌浆、接缝灌浆是确保封堵体安全运行的重要手段。一般来讲，封堵体顶部必须回填灌浆。固结灌浆主要针对Ⅲ类围岩以下的洞段。封堵体首部的高压深孔固结灌浆主要适宜于水头较高且裂隙发育的洞段。封堵体两侧的接缝（触）灌浆应在混凝土达到稳定温度后进行。

14.3.5 主要针对主洞封堵体而言。有了2m的搭接长度，封堵体首部的原衬砌结构就形成一种防渗面板，这对控制渗流有帮助。

14.3.7 主要目的是改善水流条件，减小局部水头损失，提高泄流能力。

15 灌浆、防渗和排水

15.1 灌 浆

15.1.1 对于承受内水压力的衬砌与围岩之间的缝隙，必须进行灌浆，才能发挥围岩的承载作用，改善衬砌的受力条件。

15.1.2 回填灌浆范围一般在顶拱 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，这是根据工程实践提出的，灌浆孔深入围岩 0.1m，这是为了钻透衬砌，确保回填灌浆质量。

据近期一些工程事故资料，发现在边底拱处也有空腔现象，因此，其他部位是否要进行回填灌浆，应视衬砌混凝土浇筑质量确定。

15.1.3 隧洞衬砌设计中，围岩提供的抗力，是由水泥结石来传递的，如果水泥结石松软，就不能传递抗力，势将产生较大的变形，使衬砌破坏。故水泥结石的弹性模量必须保证水泥结石能够起到传递抗力的作用。

15.1.4 有些已建成隧洞的围岩只是部分作固结灌浆，说明固结灌浆应该根据实际条件分析其必要性。

固结灌浆是加固围岩，提高围岩承载能力和减少渗漏的重要措施，特别是对围岩裂隙较发育的洞段进行固结灌浆，对于围岩稳定、保证隧洞安全运行、延长隧洞使用年限起着显著作用。

15.1.5 目前广泛应用于灌浆工程的材料是普通硅酸盐水泥。为了防止地下水的侵蚀，使用火山灰质硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥也还不少。工程实践证明，后两种水泥的后加填料易分离，结石不具备强度，在稀于 1:1 的浆液尤其如此。因此，建议当地下水具有侵蚀性时，可针对水的侵蚀性质，选用抗酸水泥等特种水泥，不得采用火山灰质硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥。

15.2 防渗和排水

15.2.1 渗透水流具有破坏作用，设计人员应对隧洞全线的地质条件、水文地质条件作全面分析，确定防渗和排水的合理措施。

15.2.2 工程实践证明，在埋深满足 6.2.3 规定时，为了减少外水压力，在衬砌中设置排水孔，可得到良好的效果。据此提出本条规定。

15.2.3 有压隧洞多采用圆形断面，它有较强的抗外压稳定的能力，所以在低压隧洞中，很少设置排水措施减少外水压力。当外水压力是控制性作用（荷载）时，可以在防渗圈以外设置排水管、排水廊道。近来也有在工程衬砌中打排水孔以减少外水压力，效果比较好，但要求围岩覆盖厚度必须满足 6.2.3 规定。为了阻止围岩中岩屑随水带出，恶化围岩，可在排水孔中设置软式透水管。

当围岩中软弱面充填物有被水溶解和带走的可能时，为保持围岩稳定，则不允许设置排水措施。

16 观测、运行和维修

16.1 观 测

16.1.1、16.1.2、16.1.4 几十年以来，我国建成了大量水工隧洞，在各方面得到了许多宝贵经验。但在我们为修订本标准进行调查过程中，感到可资应用的原型观测成果甚少。原因是多方面的：有的隧洞工程虽布置有观测设备，但对埋设的仪器和线路保护不当，致使工程完工后，因线路故障或设备损失而无法进行观测。有的没有组织好观测工作。有的积累了大量原始观测记录，没有进行整理分析，归纳总结。

原型观测资料反映运行期的实际工作状态，对运行管理、预报事故、及时检修、充分发挥工程效益、检验设计成果、总结经验，不断提高设计水平，都有着十分重要的意义。因此，应结合工程特点，精心拟定观测项目和布置埋设仪器设备。各有关部门都要重视观测设备的埋设，并把观测作为隧洞工程的设计、施工和运行管理的重要任务之一来完成。

对观测设备也和其他设计项目一样，没有充分的论证和审批单位的同意，不得任意修改或取消。故本条规定，工程竣工后，将观测设计说明书及竣工报告全部移交运行管理单位，立卷归档，组织力量进行观测。

16.1.3 当今已进入信息时代，在支护设计中，应用监控量测的数据（信息）进行支护设计，是锚喷支护设计的重要方法之一。监测资料可反映各种自然因素和人为因素对隧洞工程的影响。通过对监测资料的分析，可评价围岩稳定状态、了解工程地质、水文地质变化趋势、检验支护参数是否合理，是进一步优化设计和保证施工安全的重要依据。近年来我国监控量测受到普遍重视，

近期建设的大中型水利水电工程几乎都开展了监控设计工作。

由于 V 类围岩地质条件复杂，围岩稳定程度差，支护对围岩有害变形制约作用明显，采用监控设计法进行设计支护效果更为突出，所以在不良围岩，大洞室的地下工程中，采用监控量测更为重要。

表 16.1.3 给出的允许变形控制标准，在收集了国内实测资料基础上，由煤碳、冶金、铁道、水电、国防等部门通过统计分析提出的。通过工程实践，证明实用性较强，已列入 GB50086，故本标准亦引用了这一判定标准。

关于本条的规定，主要来源于 GB50086，细节问题，按该标准的规定进行。

16.2 运行和维修

16.2.1~16.2.2 为保证隧洞工程安全运行，发挥工程效益，应结合观测所得资料和运行中工程损坏情况，及时对工程进行维修。设计应考虑工程投入运行后的维修工作，为工程运行管理和维修工作创造条件，设计应会同运行管理部门结合自然条件和隧洞设计条件，试验研究资料等，制定隧洞运行方案。如确定运行水位、泄放流量和闸阀控制设备的启闭方式等。拟定为了隧洞全面维修而定期放空全面检查的方案。

16.2.3 为隧洞投入运行后的日常工程管理和放空检修的方便起见，设计应根据维修、管理的工作需要，结合工程布置条件，设置交通洞、进人孔，预埋钢筋爬梯、检修起重挂钩等。在设计这些维修工程结构和设备时，应重视维修人员和维修所需物资运输的安全因素，结合工程长期运行因素，考虑较大的设计安全余幅。以保证工程和维修工作的安全。