

UDC

中华人民共和国国家标准

SL

P

SL 279-2002

# 水工隧洞设计规范

Specification for design of hydraulic tunnel

2002 - 12 - 10 发布

2003 - 03 - 01 实施

中华人民共和国水利部

发布

**中华人民共和国水利部**  
**关于批准发布《水工隧洞设计规范》**  
**SL279—2002 的通知**

水国科 [2002] 539 号

部直属各单位，各省、自治区、直辖市水利（水务）厅（局），各计划单列市水利（水务）局，新疆生产建设兵团水利局：

经审查，批准《水工隧洞设计规范》为水利行业标准，并予发布。标准编号为 SL279—2002，代替原 SD134—84。

本标准自 2003 年 3 月 1 日起实施。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

二〇〇二年十二月十日

## 前 言

本规范根据水利部水电规划设计局水规局字〔1997〕号文和 SL01—1997《水利水电技术标准编写规定》，在原水利电力部 1985 年发布试行的 SD134—84《水工隧洞设计规范》（试行）基础上进行修编。

本规范共 11 章和 4 个附录，其主要内容包括：水工隧洞设计的总原则，设计所需的基本资料，与隧洞布置、断面、支护、衬砌、水力计算、灌浆、防渗、排水、安全监测、运行、维修有关的设计原则和规定，以及不良地质洞段设计和土洞设计。

对 SD134—84 进行修订的主要内容如下：

- 水工隧洞的级别与洪水标准；
- 围岩及土质分类的依据；
- 高地应力区水工隧洞进行地应力测验的要求；
- 水工隧洞遇有较大地质构造、不良地质洞段等不同地质问题时的布置原则；
- 对最小厚度覆盖抵抗水力劈裂和保持围岩渗透稳定的要求，引入地应力准则和挪威准则；
- 去掉了有关进水口设计的部分内容；
- 混凝土和钢筋混凝土衬砌结构不作为有严格防渗要求的抗裂结构；
- 按围岩自稳定能力确定支护形式的设计原则；
- 衬砌结构与围岩联合承受内水压力的设计原则；
- 按照对衬砌结构的防渗要求确定衬砌结构进行抗裂、限裂、不限裂设计的结构设计原则，以及确定防渗要求的原则；
- 考虑结构的防渗要求、围岩承担内水压力的能力、围岩分类及最小覆盖厚度等因素，确定衬砌型式的原则；

——有关选择衬砌结构静力计算方法的某些内容，并推荐了有限元计算的力学模型；

——锚喷结构设计的部分参数；

——部分附录。

与 SD134—84 相比增加的内容如下：

——本规范适用于土洞设计；

——环境保护和水土保持的要求；

——洞内和出口消能的条款；

——隧洞充、放水的规定；

——施工和安全监测中反馈设计的要求；

——土洞、预应力混凝土灌浆设计的要求。

具体增加如下章节：

“7 不良地质洞段设计”

“8 土洞设计”

“6.4 预应力混凝土衬砌”

“6.6 埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计”

“6.8 封堵体设计”

“附录 C 灌浆式预应力衬砌的结构计算”

本规范的强制性条款有：2.0.5、3.2.9 第 1 款、3.3.3、4.1.2、4.1.3、5.2.1、6.5.1、6.6.2、6.6.6、6.7.4、6.8.5、8.2.3、9.1.1、9.1.9 共 14 条款，用黑体字表示。

**本规范解释单位：水利部水利水电规划设计总院**

**本规范主编单位：水利部东北勘测设计研究院**

**本规范主要起草人：林玉枢 刘世煌 金正浩 孙荣博  
仝壮信 宋守平 顾一新 郑太然  
赵玉玺**

## 目 次

1	总则	( 1 )
2	基本资料	( 2 )
3	隧洞布置	( 4 )
3.1	洞线选择	( 4 )
3.2	进、出口布置	( 7 )
3.3	多用途隧洞的布置	( 9 )
4	隧洞压力状态及洞型尺寸	(10)
4.1	压力状态选择	(10)
4.2	横断面形状	(10)
4.3	横断面尺寸	(11)
5	隧洞水力计算	(13)
5.1	计算原则	(13)
5.2	高流速的防空蚀设计	(14)
6	隧洞支护与衬砌	(15)
6.1	一般规定	(15)
6.2	荷载和荷载组合	(17)
6.3	混凝土和钢筋混凝土衬砌	(20)
6.4	预应力混凝土衬砌	(21)
6.5	不衬砌与锚喷衬砌隧洞	(22)
6.6	埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计	(25)
6.7	衬砌的分缝	(26)
6.8	封堵体设计	(27)
7	不良地质洞段设计	(29)
8	土洞设计	(32)
8.1	土洞支护与衬砌	(32)

8.2 土洞衬砌分缝及防渗止水 .....	(33)
9 隧洞灌浆、防渗和排水 .....	(34)
9.1 灌浆 .....	(34)
9.2 防渗和排水 .....	(35)
10 隧洞安全监测 .....	(37)
11 隧洞运行和维修 .....	(38)
附录 A 高流速防空蚀设计 .....	(39)
附录 B 圆形有压隧洞衬砌结构计算（弹性力学方法） ...	(41)
附录 C 灌浆式预应力衬砌的结构计算 .....	(43)
附录 D 混凝土衬砌裂缝及其防止措施 .....	(47)
本规范用词和用语说明 .....	(48)
条文说明 .....	(49)

[www.shuigong.com](http://www.shuigong.com)  
 水利工程网  
 网易 NetEase 企业应用事业部 (IVP) ivpinfo@service.netease.com

# 1 总 则

**1.0.1** 为统一水工隧洞设计标准，保证设计质量，做到因地制宜、安全适用、技术先进、经济合理，特制定本规范。

**1.0.2** 水工隧洞是以输水为目的，在岩、土体中通过开挖形成的隧洞，不包括埋管和回填管。

本规范适用于水利水电工程 1、2、3 级水工隧洞设计，但不适用于岩、土体中有钢板衬砌的水工隧洞设计。

**1.0.3** 水工隧洞的级别按现行 GB50201—1994《防洪标准》和 SL252—2000《水利水电枢纽工程等级划分及洪水标准》的规定执行。对于下列情况，经论证可予提高或降低：

1 地质条件特别复杂、水头和流速特别高以及失事后将会造成严重损失的隧洞，可提高一级（最高不高于 1 级隧洞）；

2 低水头低流速失事后不致造成严重损失的隧洞，可降低一级。

**1.0.4** 水工隧洞设计应满足工程总体规划和环境及水土保持要求。

**1.0.5** 凡本规范未包括的问题，或由于新技术的发展某些条文不尽适宜时，设计单位应通过充分论证，提出专题报告，报设计审批单位批准执行。

**1.0.6** 水工隧洞的设计除符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 基本资料

**2.0.1** 水工隧洞设计应根据隧洞用途和不同设计阶段的要求，搜集下列基本资料：

1 流域规划、工程任务、枢纽布置、水库（河道）特征水位、隧洞引用流量、隧洞泄洪或导流标准、水库调度运行方式、河道取（用）水原则等；

2 区域地质资料，地震基本烈度，隧洞进、出口及沿线的地形、工程地质和水文地质资料；

3 有关的水文、气象资料及水文设计成果，建筑材料及施工组织设计成果，机电设备以及调压（减泄压）设施、压力钢管、闸门（阀）设置等；

4 隧洞区的环保要求。

**2.0.2** 水工隧洞的进、出口及隧洞沿线的地质勘察工作，应根据地形、地质条件的复杂程度，枢纽及水工隧洞级别，不同的设计阶段，按照有关规范执行。

对 1、2 级水工隧洞和洞线区有不良地质问题的水工隧洞，应根据各设计阶段的不同要求，在现场选择有代表性的地段进行有关的试验、测试工作。设计人员应根据设计需要及有关标准会同地质人员共同提出试验、测试要求。

**2.0.3** 水工隧洞开工前，设计人员应掌握隧洞地区下列基本地质情况：

1 进、出口及沿线的岩层分界、产状、岩性和主要地质构造，围岩的分类及主要物理、力学参数；

2 进、出口及沿线的水文地质情况；

3 进、出口成洞条件及洞脸边坡的稳定性；

4 对不良工程地质问题的预测。

**2.0.4** 开挖后，设计人员应及时掌握隧洞各部位的实际地质情

况，及时校核、补充或修改设计。对可能危及施工和运行安全的不良地质问题应进行专门研究。

**2.0.5 水工隧洞的围岩分类，岩洞应按 GB50287—1999《水利水电工程地质勘察规范》的规定执行，土洞应按 SL237—1999《土工试验规程》的规定执行。**

**2.0.6 对高地应力区 1、2 级水工隧洞的重要洞段，设计人员应在初设阶段掌握地应力测验成果，并作出评价。施工阶段应根据地应力的现场复核成果，对设计进行校核、补充或修改。**

网易 NetEase  
WWW.SHUIGONG.COM

## 3 隧洞布置

### 3.1 洞线选择

**3.1.1** 水工隧洞的线路应根据隧洞的用途，综合考虑地形、地质、水力学、施工、运行、沿线建筑物、枢纽总布置及对周围环境的影响等因素，通过技术经济比较选定。

**3.1.2** 在满足枢纽总布置要求的条件下，洞线应选在线路短、沿线地质构造简单、岩体完整稳定、上覆岩层厚度适中、水文地质条件有利及施工方便的地区。

**3.1.3** 洞线布置宜避免相邻建筑物的不利影响。当水工隧洞与其他建筑物交叉、穿越或跨越时，应符合本规范 3.1.9 的规定。

**3.1.4** 洞线布置应根据隧洞区岩层及主要地质构造的分布特性，满足下列要求：

1 洞线与岩层、构造断裂面及主要软弱带走向宜有较大的交角。对整体块状结构岩体及厚层并胶结紧密、岩石坚硬完整的岩体，交角不宜小于  $30^\circ$ ；对薄层岩体，特别是层间结合疏松的陡倾角薄岩层，交角不宜小于  $45^\circ$ 。

2 隧洞所通过地段有较大地质构造（断层及其影响带、裂隙卸荷带、软弱构造、不整合带）时，洞线布置应根据不利构造及其组合对隧洞围岩稳定的影响程度，并考虑施工、运行、工期、投资等各种因素，通过可行方案的技术经济比较后决定。

3 选择洞线时应对不同洞段可能出现的局部不稳定岩体进行分析、预测，采取适宜的工程措施，保证所选洞线顺利实施。

**3.1.5** 隧洞沿线遇有断裂构造、不利构造面、软弱带、蚀变带、膨胀岩等时，应充分考虑地下水活动的影响，注意围岩的稳定条件。洞线宜避开可能造成地表水强补给的冲沟。

**3.1.6** 在高地应力区，水工隧洞的轴线方向宜与最大水平地应力方向有较小交角。

**3.1.7 水工隧洞垂直和侧向最小覆盖厚度**，应根据地质条件、隧洞断面形状及尺寸、施工成洞条件、内水压力、支护（衬砌）型式、围岩渗透特性等因素，按下列要求综合分析决定。

1 隧洞（有压、无压）进、出口和无压隧洞洞身，在采取了合理的施工方法和工程措施可保证施工期及运行期安全时，对垂直及侧向最小覆盖厚度不作具体规定；

2 有压隧洞洞身的垂直和侧向覆盖厚度（不包括覆盖层），当围岩较完整无不利结构面、采用混凝土或钢筋混凝土衬砌时，可按不小于 0.4 倍内水压力水头控制；无衬砌或采用锚喷衬砌时，可按不小于 1.0 倍内水压力水头控制。

有山谷、边坡影响时，可采用有限元分析或按式（3.1.7）判断：

$$\gamma_r D \cos \alpha > K \gamma_w H \quad (3.1.7)$$

式中  $\gamma_w$ ——水的重度， $\text{kN/m}^3$ ；

$\gamma_r$ ——岩体重度， $\text{kN/m}^3$ ；

$D$ ——最小覆盖厚度， $\text{m}$ ；

$H$ ——最大内水压力水头， $\text{m}$ ；

$K$ ——经验系数， $K=1.1$ ；

$\alpha$ ——坡面倾角， $\alpha > 45^\circ$  时取  $45^\circ$ 。

3 有压隧洞洞身的垂直及侧向最小覆盖厚度应保证围岩不产生渗透失稳和水力劈裂。对高水头有压隧洞洞身，在初步设计和技施设计阶段宜通过工程类比和有限元分析，复核垂直及侧向最小覆盖厚度，满足不发生渗透失稳和水力劈裂的要求。

**3.1.8 相邻两隧洞间的岩体厚度**，应根据布置需要、地质条件、围岩承受的内水压力、围岩的应力和变形、隧洞横断面尺寸和形状、施工方法和运行情况（如一洞有水邻洞无水）等因素综合分析决定。岩体厚度不宜小于 2.0 倍开挖洞径（或洞宽）。岩体较好时，经分析岩体厚度可适当减小，但不应小于 1.0 倍开挖洞径（或洞宽）。应保证运行期围岩不发生渗透失稳和水力劈裂。

**3.1.9 经论证必须穿过坝基、坝肩或其他建筑物基础的水工隧**

洞，与建筑物基础之间的围岩应有足够的厚度，满足建筑物基础和隧洞对应力、应变、稳定和渗透的要求。不能满足要求时，应采取必要的工程措施，保证施工运行安全。

**3.1.10** 洞线遇有沟谷时，应根据地形、地质、水文及施工条件进行绕沟或跨沟方案的技术经济比较。当采用跨沟方案时，应合理选择跨沟位置。对跨沟建筑物基础、隧洞的连接部位及洞脸边坡，应加强工程措施。

**3.1.11** 沿河傍山地段的土洞，洞线应向山里侧内移，避免产生偏压，防止水流冲刷山体影响洞身稳定。

**3.1.12** 洞线在平面上宜布置为直线。如需要设置弯段时，应符合下列要求：

- 1 对于流速小于 20m/s 的无压隧洞，弯曲半径不宜小于 5.0 倍洞径（或洞宽），转角不宜大于 60°。对于流速小于 20 m/s 的有压隧洞，可适当降低要求，但弯曲半径不应小于 3.0 倍洞径（或洞宽），转角不宜大于 60°。

- 2 高流速无压隧洞不应设置曲线段。高流速有压隧洞设置曲线段时，其弯曲半径和转角宜通过试验确定。

- 3 应在弯段的首尾设置直线段，其长度不宜小于 5.0 倍洞径（或洞宽）。

**3.1.13** 洞身段设置竖向曲线时，对高流速隧洞（有压或无压），其型式和竖向曲线半径应通过试验确定。低流速无压隧洞的竖向曲线半径不宜小于 5.0 倍的洞径（或洞宽），低流速有压隧洞可适当降低要求。

**3.1.14** 水工隧洞设置平面或竖向曲线时，其弯曲半径尚应考虑施工方法和大型施工设备的要求。

**3.1.15** 洞身段的纵坡应根据运用要求、上下游衔接、沿线建筑物的底部高程以及施工和检修条件等综合分析决定。

水工隧洞纵坡应满足不淤流速的要求，沿程纵坡不宜变化过多，不宜设置平坡和反坡。长输水隧洞（灌溉隧洞和供水隧洞）的纵坡应考虑沿程分水（取水）设施的布置要求。

**3.1.16** 布置在多泥沙河流上的排沙隧洞，其平面和竖向的转弯曲线、转弯角度、纵坡坡度均应通过水工模型试验确定。

**3.1.17** 长隧洞需设置施工支洞时，支洞的数目及长度应根据隧洞沿线地形地质条件、施工方法、对外交通情况，并有利于均衡各段隧洞的工程量及工期的要求分析决定。地质条件较差时，应研究施工支洞对主洞的影响。

**3.1.18** 布置水工隧洞时应考虑临时占地、永久占地、植被破坏和恢复、施工污染、运行期地下水位变化等对环境的影响和水土保持的要求。宜使原自然环境较少破坏，较易恢复，环境投资最小。

## 3.2 进、出口布置

**3.2.1** 进、出口布置，应根据枢纽总体布置要求、地形地质条件，使水流顺畅，进流均匀，出流平稳，满足使用功能和运行安全的要求，并应考虑闸门、拦污清淤设备的设置及对外交通。

**3.2.2** 进、出口宜选在地质构造简单，岩体完整，风化覆盖层较浅的地区，避开不良地质构造和容易发生崩塌、冲沟、危崖、滑坡的地区。

**3.2.3** 进、出口布置应充分考虑水工隧洞的布置。在地形地质条件较复杂地区，应通过技术经济论证，选择最佳布置方案。

**3.2.4** 进、出口洞脸和两侧边坡宜避免高边坡开挖。无法避免时，应分析开挖后的稳定性，采取相应的加固措施。

**3.2.5** 进、出口应有必要的清坡范围，并采取适当的工程措施，防止覆盖层、坡积物、松动岩块等在风力、地面径流、水位变化等自然因素作用下滚落，影响其正常运行。

**3.2.6** 土洞洞口应选在山坡稳定、土质条件较好处，不宜布置在卸荷带上。土洞洞口的设计边坡，应视土质和开挖高度通过边坡稳定分析确定。

**3.2.7** 土洞洞口与渡槽、岩洞等建筑物连接处应设永久缝。在寒冷地区，应结合防冻要求加深洞口基础埋深，基底标高应符合

SL211—1998《水工建筑物抗冻设计规范》的规定。

**3.2.8** 有压泄水隧洞的出口洞段体形设计应符合下列要求：

1 若隧洞沿程体形无急剧变化，出口段断面面积宜收缩为洞身断面的85%~90%。若沿程体形变化较大，洞内水流条件差，宜收缩为洞身断面的80%~85%。收缩方式宜采用洞顶压坡的形式，对重要的隧洞工程宜进行水工模型试验验证。

2 出口洞段的底坡宜平缓，侧向扩散宜平顺，应与下游水流良好衔接。采用突扩或底部跌落的出口时，应经过水工模型试验验证。当出口邻近主河道（主流）时，宜采用适当的出流导向措施，防止与主流对冲。

**3.2.9** 泄水隧洞的出口，应根据地形地质和水力学条件，运行方式，下游水深和变幅，下游河床的抗冲能力，水流衔接、消能防冲要求以及对相邻建筑物的影响，通过技术经济比较选择适宜的消能防冲措施。消能防冲措施应遵守下列规定：

1 消能防冲建筑物的洪水标准按SL252—2000执行。

2 消能防冲建筑物的布置、结构型式、水力学计算及消能防冲要求应符合SL253—2000《溢洪道设计规范》的规定。防空蚀设计应符合本规范5.2的规定。

3 泄洪洞出口宜采用挑流或底流消能，当条件允许时也可采用其他消能方式。采用挑流消能时，应注意减少泄水产生的雾化、泥化、溅水对其他建筑物的影响。

**3.2.10** 布置泄水隧洞时，应根据可能出现的泄洪运行工况，充分研究泄水隧洞出口的位置、水流流态、冲淤范围和对相邻建筑物的影响，并宜通过技术经济比较和水工模型试验验证确定合理方案。

**3.2.11** 对有压隧洞排水补气、充水排气和无压隧洞水面线以上的通气以及其他需要通气的洞段，应估算通气面积，并留有余地。通气面积计算方法应按SL74—1995《水利水电工程钢闸门设计规范》规定执行。

**3.2.12** 进水口布置和设计除应符合本规范外，尚应符合行业标

准 SD303—88《水电站进水口设计规范》的规定。

### 3.3 多用途隧洞的布置

**3.3.1** 选择隧洞布置方案时，应根据隧洞的用途、使用和施工条件，在保证隧洞可靠运行的前提下，研究临时与永久相结合以及一洞多用的合理性。

**3.3.2** 临时与永久相结合的隧洞，应对洞线、纵坡、支护及衬砌型式、进出口高程及位置、运行及检修条件等进行综合比较论证。

**3.3.3** 泄洪与发电共用一条主洞布置时，必须保证各自的运行要求和较好的水力条件，安全泄洪规定的泄洪流量，保证发电隧洞的压力状态及发电时的最小水头，并采取适当的措施，防止机组振动和分岔附近空蚀破坏。泄洪洞宜布置在主洞上，发电洞宜布置在支洞上。

**3.3.4** 主、支洞的分岔角宜在  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$  范围内选取，在满足布置和结构要求的条件下，应采用较小的分岔角度。

**3.3.5** 泄洪、发电共用一条主洞时，分岔型式宜根据水头、流量以及分流比确定，必要时应进行水工模型试验验证。分岔后发电洞的长度不宜小于 10 倍洞径或洞宽（若泄洪时不发电或发电引水系统有稳压设施，则长度可适当减小）。泄洪洞出口断面面积，如主洞泄洪，不宜大于 85% 的泄洪洞洞身断面面积；如支洞泄洪，不宜大于 70% 的支洞洞身断面面积。

当发电洞设置调压（减压）设施时，其分岔位置、型式、分流比等，都应经过整体水工模型试验验证。

**3.3.6** 永久泄洪洞与导流洞结合时，除采用常规的外部消能外，可结合工程条件进行内部消能（如孔板消能、漩渦消能）或内、外结合消能的方案比选。采用内部消能或内、外结合消能时，必须经过试验验证。

## 4 隧洞压力状态及洞型尺寸

### 4.1 压力状态选择

**4.1.1** 发电引水隧洞宜采用有压隧洞。当上游水位变化不大、引用流量比较稳定时，可采用无压隧洞。

发电尾水隧洞宜采用无压隧洞。在下游水位变化大，或者机组安装高程较低时，可采用有压隧洞。采用有压尾水隧洞时，应研究是否需要设置尾水调压室。

与调压室连接的有压尾水隧洞，应满足调压室涌浪和稳定运行的要求。

**4.1.2** 有压隧洞严禁出现明满流交替运行的运行方式，在最不利运行条件下，洞顶以上应有不小于 2.0m 的压力水头。

**4.1.3** 高流速的泄水隧洞，严禁采用明满流交替运行方式。

低流速泄水隧洞，正常情况下按明流方式运行者，可在校核洪水位时出现明满流交替的运行方式。

无压隧洞出口段允许在汛期有短时间的明满流交替运行方式。

**4.1.4** 导流隧洞经论证在设计过流条件下水流流态不致造成洞身破坏时，可采用明满流交替的运行方式。

**4.1.5** 土洞宜采用无压隧洞。采用有压隧洞时，应根据土体抗力、内水压力、土体的渗流变形等情况，选定适宜的衬砌型式。

### 4.2 横断面形状

**4.2.1** 隧洞的横断面形状应根据隧洞的用途、水力学、工程地质与水文地质、衬砌工作条件以及地应力情况、施工方法等因素，通过技术经济分析确定。

**4.2.2** 有压隧洞宜采用圆形断面。在围岩稳定性较好，内、外水压力不大时，可采用便于施工的其他断面形状。

无压隧洞地质条件较好时宜采用圆拱直墙式断面，圆拱中心角为 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。当需要加大拱端推力时，也可选用小于 $90^{\circ}$ 的中心角。断面的高宽比应根据水力学条件、地质条件选用，宜为 $1.0\sim 1.5$ ，洞内水位变化较大时宜采用大的比值。

无压隧洞地质条件较差时，可选用圆形或马蹄形断面。

**4.2.3** 高地应力区采用非圆形断面时，断面的高宽比应与地应力条件相适应，若水平地应力大于垂直地应力时，宜采用高度较小而宽度较大的断面；若垂直地应力大于水平地应力时，宜采用高度较大而宽度较小的断面。

**4.2.4** 对发电与泄洪、导流与发电或导流与泄洪等共用的多用途隧洞，断面形状应经技术经济比较后确定，必要时宜通过水工模型试验验证。

**4.2.5** 较长隧洞可采用多种断面形状和衬砌型式，但不宜过多过密。不同断面或衬砌型式之间应设置过渡段，过渡段的边界应采用平缓曲线，并便于施工。

有压隧洞过渡段的圆锥角宜采用 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，对承受双向水流的过渡段应取小值。过渡段的长度不应小于 $1.5$ 倍洞径（或洞宽）。

高流速无压隧洞过渡段的体形应通过试验选定。

### 4.3 横断面尺寸

**4.3.1** 水电站、抽水蓄能电站或泵站输水隧洞（引水及尾水洞）的横断面尺寸，应进行经济断面论证。

**4.3.2** 灌溉隧洞的横断面尺寸，应根据隧洞的进、出口高程和加大流量确定。

**4.3.3** 泄洪隧洞的横断面尺寸，应在各种可能运行条件下均能满足规定的过流能力要求。并通过技术经济比较确定。

**4.3.4** 导流隧洞的横断面尺寸，应根据导流流量的要求，结合进口高程、围堰的高度、出口水流衔接以及过木、通航、过冰、施工要求等，通过技术经济比较确定。

**4.3.5** 多用途隧洞的横断面尺寸，除应满足各自的运行要求外，

共用部分应通过技术经济比较确定。

**4.3.6** 横断面的最小尺寸除应满足运行要求外，还应符合施工要求。圆形断面的内径不宜小于 1.8m；非圆形断面的高度不宜小于 1.8m，宽度不宜小于 1.5m。采用掘进机、架钻台车、钢模台车等较大型设备施工时，断面尺寸应通过技术经济分析确定。

**4.3.7** 在低流速无压隧洞中，若通气条件良好，在恒定流情况下，洞内水面线以上的空间不宜小于隧洞断面面积的 15%，且高度不应小于 400mm；在非恒定流条件下，若计算中已考虑了涌波时，上述数值允许适当减小。对较长的隧洞和不衬砌或锚喷衬砌的隧洞，上述数值可适当增加。

有过木或通航要求的隧洞，弯曲半径和转角、过水断面尺寸和水面线以上的空间应符合有关标准的规定。

**4.3.8** 高流速无压隧洞的横断面尺寸宜通过试验确定，并宜考虑掺气的影响。在掺气水面线以上的空间，宜为断面面积的 15%~25%。当采用圆拱直墙形断面时，水面线不宜超过直墙范围。当水流有冲击波时，应将冲击波波峰限制在直墙范围内。

## 5 隧洞水力计算

### 5.1 计算原则

5.1.1 水工隧洞水力计算应根据隧洞用途和不同设计阶段在下列项目中选择：

- 1 过流能力；
- 2 上、下游水流衔接；
- 3 水头损失；
- 4 压坡线；
- 5 水面线；
- 6 掺气、充放水方式及其他水力现象。

5.1.2 水工隧洞的沿程水头损失和局部水头损失应分别进行计算，并应符合下列规定：

1 沿程水头损失计算中的粗糙系数  $n$  值，应根据衬砌型式和施工方法及运行后可能的变化，参照已有工程综合分析选用。

2 局部水头损失计算中采用的局部阻力系数，可参照水力学资料分析决定，必要时可通过试验确定。

3 无压隧洞洞身的过流能力，对长洞按均匀流计算；对短洞可按非均匀流计算。

5.1.3 水工隧洞的过流能力计算应符合下列规定：

1 有压隧洞按管流计算。

2 无压隧洞，对开敞式进口按堰流情况计算；对深式进口按管流计算。

5.1.4 计算无压隧洞的水面线，首先应判别水面线的类型，在选定控制断面后，可按分段求和法或其他方法计算。

5.1.5 对高流速、大流量、水流条件复杂的水工隧洞，应进行整体或局部水工模型试验，验证水力计算和建筑物布置的合理性。

## 5.2 高流速的防空蚀设计

**5.2.1** 高流速的水工隧洞，应根据试验选定各部位的体形，并使选定体形最低压力点（或可疑点）的“初生空化数”小于该处的“水流空化数”，否则必须采取相应的措施。空蚀可能性的判别方法参见附录 A。

**5.2.2** 高流速的水工隧洞应特别重视下列容易发生空蚀的部位：

1 有压隧洞的进口、闸门槽、过渡段、分岔段、弯曲段、出口及水流边壁突变的部位。

2 无压洞的陡坡泄流曲线段、反弧段、扩散或收缩段、闸墩、门槽及其出口段等部位。

3 出口消能部位。

**5.2.3** 对易于发生空蚀的部位，可采用下列防空蚀措施：

1 选择合适的体形。

2 控制水流边壁表面的局部不平整度，其标准可按附录 A 采用。

3 向水流中掺气。掺气设施的型式、尺寸和位置，可通过局部模型试验或参照已建工程的原型观测资料决定。

4 采用抗蚀材料。

5 选用合理的运行方式。

**5.2.4** 对多泥沙河流泄水建筑物的过水部位，应选用抗磨损能力较强的材料。

## 6 隧洞支护与衬砌

### 6.1 一般规定

- 6.1.1** 隧洞支护应保持围岩稳定或提供必要的稳定时间。
- 6.1.2** 隧洞衬砌应符合下列规定：
- 1 保持围岩稳定；
  - 2 满足运行所要求的水力学条件；
  - 3 满足防渗要求；
  - 4 防止水流冲刷以及温度、湿度、大气等因素对围岩的破坏作用；
  - 5 满足环境保护要求。
- 6.1.3** 隧洞支护和衬砌设计应充分发挥围岩的自承和承载能力，支护结构宜按围岩自承能力确定，衬砌结构宜按围岩与衬砌联合承受作用设计。
- 6.1.4** 支护型式应根据工程地质、水文地质、断面大小、施工方法等，通过分析计算或工程类比决定。
- 6.1.5** 隧洞衬砌型式应综合考虑断面形状和尺寸、运行条件及内水压力、围岩条件（覆盖厚度、围岩分类、承担内水压力能力、地下水分布及连通情况、地质构造及影响程度）、防渗要求、支护效果、施工方法等因素，经过技术经济比较确定。
- 6.1.6** 隧洞的衬砌型式包括锚喷衬砌、混凝土衬砌、钢筋混凝土衬砌和预应力混凝土衬砌（机械式或灌浆式）。
- 6.1.7** 根据防渗要求，隧洞衬砌结构设计原则可分为抗裂设计、限制裂缝开展宽度设计和不限制裂缝开展宽度设计。按不同防渗要求，衬砌结构的设计原则见表 6.1.7。
- 6.1.8** 隧洞衬砌结构的防渗应符合下列规定：
- 1 围岩抗渗能力差，内水外渗造成的危害（围岩、边坡、相邻建筑物的渗透失稳或环境破坏），处理费用大或很难处理时，应

**表 6.1.7 按防渗要求衬砌结构的设计原则**

衬砌的防渗要求	计算控制条件	衬砌的设计原则
严格	衬砌结构中拉应力不应超过混凝土允许拉应力	抗裂设计
一般	衬砌结构裂缝宽度不应超过允许值	限制裂缝宽度设计
无	不计算裂缝宽度和间距，钢筋应力不应超过钢筋允许拉应力	不限制裂缝宽度设计

提出严格的防渗要求；

2 围岩具有抗渗能力，内水外渗可能造成不良地质段的局部失稳，经处理不会造成危害者，宜提出一般防渗要求；

3 围岩具有较好的抗渗性，内水外渗不存在渗透失稳和环境破坏问题，可不提出防渗要求。

**6.1.9 围岩承担内水压力能力的判别应符合下列规定：**

1 围岩中初始地应力的最小主应力大于隧洞设计的最大内水压力；

2 缺乏实测资料时，可按 3.1.7 的规定以及工程类比，进行综合分析判别。

**6.1.10 根据隧洞衬砌结构的不同设计原则，考虑隧洞的压力状态、围岩最小覆盖厚度、围岩分类、围岩承担内水压力的能力等四项因素，进行岩洞衬砌型式选择时，可按表 6.1.10 并通过工程**

**表 6.1.10 岩洞衬砌型式选择**

压力状态	设计原则	最小覆盖厚度要求	承担内水压能力	围岩分类			备注
				I、II	III	IV、V	
无压	抗裂	—	—	钢筋混凝土并加防渗措施			研究是否采用预应力混凝土
	限裂	—	—	锚喷、钢筋混凝土	钢筋混凝土		—
	非限裂	—	—	不衬砌、混凝土、锚喷	锚喷、钢筋混凝土		—

续表

压力状态	设计原则	最小覆盖厚度要求	承担内水压能力	围岩分类			备注
				I、II	III	IV、V	
有压	抗裂	满足	具备	预应力混凝土、钢筋混凝土并加防渗措施		预应力混凝土、钢板	钢筋混凝土并加防渗措施宜在低压洞使用
			不具备	预应力混凝土、钢板			
		局部不满足	—	预应力混凝土、钢板			
	限裂	满足	具备	锚喷、钢筋混凝土	钢筋混凝土		锚喷宜在低压洞使用
			不具备	钢筋混凝土			
		局部不满足	—	钢筋混凝土、预应力混凝土			
	非限裂	满足	具备	不衬砌、混凝土、锚喷、钢筋混凝土	锚喷、钢筋混凝土		不衬砌隧洞宜在I、II类围岩使用
			不具备	钢筋混凝土			
		局部不满足	—	钢筋混凝土			

类比研究确定。土洞衬砌型式的选择见本规范 8。

6.1.11 混凝土及钢筋混凝土衬砌应控制裂缝及裂缝开展宽度。对超过最大裂缝允许值而引起严重渗漏的裂缝应加以处理。裂缝及其防止措施可参见附录 D。

## 6.2 荷载和荷载组合

6.2.1 作用在衬砌上的荷载，按其作用状况分为基本荷载和特殊荷载两类，两类荷载定义及其内容应符合下列规定：

1 基本荷载：长期或经常作用在衬砌上的荷载。基本荷载包括衬砌自重、围岩压力、预应力、设计条件下的内水压力（包括动水压力）以及稳定渗流情况下的地下水压力等。

2 特殊荷载：出现机遇较少的不经常作用在衬砌上的荷载。特殊荷载包括地震作用、校核水位时的内水压力（包括动水压力）和相应的地下水压力、施工荷载、灌浆压力以及温度作用等。

6.2.2 计算荷载应根据基本荷载和特殊荷载同时存在的可能性，

分别组合为基本荷载组合和特殊荷载组合两类。在衬砌结构计算中应采用各自的最不利组合情况。

**6.2.3** 隧洞的内水压力应根据隧洞进、出口特征水位，结合隧洞各种运行工况，按可能出现的最大内水压力（包括动水压力）确定。对基本组合的内水压力值，特征水位取设计洪水位及其组合；对特殊组合的内水压力值，特征水位取校核洪水位及其组合。

**6.2.4** 围岩作用在衬砌上的荷载，应根据围岩条件、横断面形状和尺寸、施工方法以及支护效果确定。围岩压力的计取应符合下列规定：

1 自稳条件好，开挖后变形很快稳定的围岩，可不计围岩压力。

2 薄层状及碎裂散体结构的围岩，作用在衬砌上的围岩压力可按式（6.2.4-1）、式（6.2.4-2）计算：

$$\text{垂直方向} \quad q_v = (0.2 \sim 0.3) \gamma_r B \quad (6.2.4-1)$$

$$\text{水平方向} \quad q_h = (0.05 \sim 0.10) \gamma_r H \quad (6.2.4-2)$$

式中  $q_v$ ——垂直均布围岩压力， $\text{kN/m}^2$ ；

$q_h$ ——水平均布围岩压力， $\text{kN/m}^2$ ；

$\gamma_r$ ——岩体重度， $\text{kN/m}^3$ ；

$B$ ——隧洞开挖宽度， $\text{m}$ ；

$H$ ——隧洞开挖高度， $\text{m}$ 。

3 不能形成稳定拱的浅埋隧洞，宜按洞室顶拱的上覆岩体重力作用计算围岩压力，再根据施工所采取的支护措施予以修正。

4 块状、中厚层至厚层状结构的围岩，可根据围岩中不稳定块体的作用力来确定围岩压力。

5 采取了支护或加固措施的围岩，根据其稳定状况，可不计或少计围岩压力。

6 采用掘进机开挖的围岩，可适当少计围岩压力。

7 具有流变或膨胀等特殊性质的围岩，可能对衬砌结构产生变形压力时，应对这种作用进行专门研究，并宜采取措施减小其对衬砌的不利作用。

8 地应力在衬砌上产生的作用应进行专门研究。

6.2.5 作用在混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土衬砌结构上的外水压力，可按式 (6.2.5) 估算：

$$P_e = \beta_e \gamma_w H_e \quad (6.2.5)$$

式中  $P_e$ ——作用在衬砌结构外表面的地下水压力， $\text{kN/m}^2$ ；

$\beta_e$ ——外水压力折减系数，可按表 6.2.5 确定；

$\gamma_w$ ——水的重度， $\text{kN/m}^3$ ，一般采用  $9.81 \text{ kN/m}^3$ ；

$H_e$ ——地下水位线至隧洞中心的作用水头， $\text{m}$ ，内水外渗时取内水压力。

表 6.2.5 外水压力折减系数  $\beta_e$  值

级别	地下水活动状态	地下水对围岩稳定的影响	$\beta_e$ 值
1	洞壁干燥或潮湿	无影响	0~0.20
2	沿结构面有渗水或滴水	风化结构面充填物质，地下水降低结构面的抗剪强度，对软弱岩体有软化作用	0.10~0.40
3	沿裂隙或软弱结构面有大量滴水、线状流水或喷水	泥化软弱结构面充填物质，地下水降低结构面的抗剪强度，对中硬岩体有软化作用	0.25~0.60
4	严重滴水，沿软弱结构面有小量涌水	地下水冲刷结构面中充填物质，加速岩体风化，对断层等软弱带软化泥化，并使其膨胀崩解，以及产生机械管涌；有渗透压力，能鼓开较薄的软弱层	0.40~0.80
5	严重股状流水，断层等软弱带有大量涌水	地下水冲刷携带结构面充填物质，分离岩体，有渗透压力，能鼓开一定厚度的断层等软弱带，能导致围岩塌方	0.65~1.00

注：当有内水组合时， $\beta_e$  应取较小值，无内水组合时， $\beta_e$  应取较大值。

对设有排水设施的水工隧洞，可根据排水效果和排水设施的可靠性，对作用在衬砌结构上的外水压力作适当折减，其折减值可通过工程类比或渗流计算分析确定。

对工程地质、水文地质条件复杂及外水压力较大的隧洞，应

进行专门研究。

**6.2.6** 温度变化、混凝土干缩和膨胀所产生的应力及非预应力灌浆等对衬砌的不利影响，应通过施工措施及构造措施解决。对于高地温地区产生的温度应力应进行专门研究。

**6.2.7** 设计烈度为 9 度的水工隧洞，设计烈度为 8 度的一级水工隧洞，均应验算建筑物（进、出口及洞身）和围岩的抗震强度和稳定性；设计烈度大于 7 度（包括 7 度）的水工隧洞，当进、出口部位岩体破碎和节理裂隙发育时，应验算进、出口部位岩体的抗震稳定性。

抗震强度和稳定性验算应按 SL203—1997《水工建筑物抗震设计规范》规定执行。

### 6.3 混凝土和钢筋混凝土衬砌

**6.3.1** 混凝土和钢筋混凝土衬砌厚度（不包括围岩超挖部分），应根据强度、抗渗和构造要求等，结合施工方法分析确定。

单层钢筋混凝土衬砌厚度不宜小于 250mm，双层钢筋混凝土衬砌厚度不宜小于 300mm。

**6.3.2** 混凝土和钢筋混凝土衬砌，应根据需要提出混凝土的强度、抗渗、抗冻、抗磨和抗侵蚀等要求，其强度标号不应低于 R150，采用 28d 龄期，经论证可采用后期强度。对平整围岩表面设置的混凝土衬砌，可不提抗渗要求。

**6.3.3** 混凝土和钢筋混凝土衬砌的强度计算仍按 SDJ20—78《水工钢筋混凝土结构设计规范（试行）》的规定执行。

受内水压力控制的圆形有压隧洞混凝土衬砌，混凝土的抗拉安全系数按表 6.3.3 确定。

**表 6.3.3 混凝土的抗拉安全系数**

隧洞级别	1		2、3	
	基本	特殊	基本	特殊
混凝土达到设计抗拉强度时的安全系数	2.1	1.8	1.8	1.6

**6.3.4 隧洞衬砌结构计算**可根据衬砌结构特点、荷载作用形式、围岩条件和施工方法及各设计阶段的要求等，选取合适的计算方法和计算模型，并应符合下列规定：

**1** 将围岩作为承载结构的隧洞可采用有限元法进行围岩和衬砌的分析计算。计算时应根据围岩特性选取适宜的力学模型，并应模拟围岩中的主要构造。

- 1) 硬质岩或高地应力区隧洞可采用弹性力学模型；
- 2) 较软岩宜采用弹塑性力学模型；
- 3) 软岩及有流变性的围岩宜采用粘弹塑性力学模型；
- 4) 重要工程、大型隧洞和洞室交叉部位宜模拟隧洞的形成过程和承受作用过程；
- 5) 对围岩变形稳定后施工的衬砌，在进行围岩二次应力（场）分析时不应考虑衬砌结构的作用；
- 6) 高压隧洞或有高地下水作用的隧洞，可通过渗流场分析进行应力耦合计算。

**2** 以内水压力为主要荷载，围岩为Ⅰ、Ⅱ类的圆形有压隧洞，可采用弹性力学解析方法计算，参见附录B。

**3** 对于Ⅳ、Ⅴ类围岩中的洞段可采用结构力学方法计算。

**4** 无压洞可采用结构力学方法计算。

**6.3.5 衬砌按结构力学方法计算时**，围岩抗力的大小和分布，可根据实测变形数据、工程类比或理论公式分析确定。

**6.3.6 装配式混凝土衬砌的结构计算**，应考虑预制块间的拼装缝型式和连接型式。在软弱、稳定性差的围岩中不宜采用无螺栓的连接型式。

**6.3.7 当隧洞衬砌承受明显的不对称荷载时**，宜根据产生偏压的地质、地形等条件进行专门研究。

## **6.4 预应力混凝土衬砌**

**6.4.1 水工隧洞预应力混凝土衬砌型式**，宜根据具体地质条件和运行要求选择。机械式预应力混凝土衬砌可用于各种围岩条件，高

压灌浆式预应力混凝土衬砌适用于岩性较坚硬或经过处理能承受预应力灌浆压力的围岩。

**6.4.2** 预应力衬砌应采用圆形断面，衬砌结构应符合下列要求：

1 在内水压力、预应力与其他荷载组合作用下，衬砌中的拉应力小于混凝土的允许拉应力；

2 无内水压力作用时，在预应力与其他荷载组合作用下，衬砌中的压应力小于混凝土的允许压应力。

**6.4.3** 预应力衬砌的混凝土强度标号，机械式衬砌应不低于 R300，灌浆式衬砌应不低于 R250。

预应力衬砌结构的强度安全系数和抗裂安全系数，机械式衬砌应按 SDJ20—78 中附录一的规定取值；对灌浆式衬砌应按 SDJ20—78 中第二节及本规范 6.3.3 的规定取值。

**6.4.4** 机械式后张预应力衬砌，锚索宜布置在衬砌中心线外缘，应采取措施减小锚索与孔道间的摩阻系数。

**6.4.5** 机械式后张预应力衬砌的钢索应力损失计算可按 SL/T191—1996《水工混凝土结构设计规范》进行。

**6.4.6** 预应力灌浆的压力及预应力损失应通过现场试验确定。灌浆式预应力衬砌结构计算可参照附录 C 进行。

**6.4.7** 预应力衬砌隧洞宜采用光面爆破。当开挖断面有较大超挖时，宜先进行回填修复。

**6.4.8** 对于灌浆式预应力衬砌，当围岩裂隙较多时，应在预应力灌浆前先对围岩进行固结灌浆。

**6.4.9** 对于机械式预应力衬砌，当地质条件较差时，应采取加强支护措施减少预应力衬砌上的围岩压力。

## 6.5 不衬砌与锚喷衬砌隧洞

**6.5.1** 不衬砌长隧洞的开挖，宜采用掘进机。若用钻爆法施工，必须采用光面爆破（或预裂爆破）的方法，且宜逆水流方向开挖。

爆破质量应符合 GB50086—2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》的规定。

**6.5.2** 不衬砌和锚喷衬砌隧洞的底部应用现浇混凝土找平，厚度不宜小于 100mm。

**6.5.3** 不衬砌和锚喷衬砌隧洞水电站的输水隧洞应设置集渣坑，其位置、深度和数目，根据洞段的长度、地质条件和水力学条件以及清理方式研究决定。

**6.5.4** 不衬砌隧洞应根据地质条件分析围岩的稳定性。对重要洞段宜采用有限元方法，并辅以工程类比法分析判断。

**6.5.5** 锚喷衬砌隧洞，可根据围岩条件、隧洞运行要求、锚喷衬砌的作用和要求，选择下列类型的衬砌：

- 1 喷射混凝土（普通混凝土或钢纤维混凝土）衬砌；
- 2 喷射混凝土与锚杆组合式衬砌；
- 3 喷射混凝土、锚杆、钢筋网组合式衬砌；
- 4 锚喷与混凝土或钢筋混凝土组合式衬砌。

**6.5.6** 锚喷衬砌隧洞的允许流速不宜大于 8m/s；锚喷衬砌的临时过水隧洞允许流速不宜超过 12m/s。经论证超过上述规定流速的锚喷衬砌隧洞，应采取有效的防空蚀抗冲磨措施。

**6.5.7** 喷混凝土厚度，无钢筋网时宜为 80mm~200mm，有钢筋网时宜为 100mm~250mm。

**6.5.8** 喷混凝土的指标应符合下列要求：

- 1 混凝土标号不小于 R200；
- 2 喷混凝土与围岩的粘结力，Ⅰ、Ⅱ类围岩不低于 1.2MPa，Ⅲ类围岩不低于 0.8 MPa；

3 符合 GB50086—2001 和 SDJ57—85《水利水电工程锚喷支护施工技术规范》的规定。

**6.5.9** 承受内、外水压力作用的圆形隧洞，混凝土喷层中的应力可按 GB50086—2001 的规定计算，处于复杂地质条件下的非圆形隧洞，可用有限元法估算。

**6.5.10** 局部不稳定岩块可采用悬吊式砂浆锚杆加固。锚杆应按最优方向布置。锚入稳定围岩的长度宜为 40~50 倍锚杆直径。锚杆直径可按 GB50086—2001 规定计算，但不宜小于 16mm。

**6.5.11** 整体稳定性较差的围岩宜采用系统锚杆。锚杆直径不宜小于16mm，锚杆长度应根据地质条件和隧洞开挖断面尺寸分析确定，并应符合下列要求：

1 锚杆宜垂直主结构面布置，若主结构面不明显时，可与洞周边轮廓线垂直布置；

2 在岩面上锚杆宜呈菱形布置；

3 锚杆间距不宜大于其长度的1/2，Ⅳ、Ⅴ类围岩中的锚杆间距宜为0.5m~1.0m，并不得大于1.5m。

**6.5.12** 钢筋网的布置应符合下列要求：

1 纵向钢筋直径宜为6mm~10mm；环向钢筋直径宜为6mm~12mm；

2 网格间距宜为150mm~300mm；

3 喷射混凝土保护层厚度不宜小于50mm；

4 宜与锚杆焊接固定；

5 交叉点应连接牢固，连接宜采用隔点相焊或隔点相绑的方法。

**6.5.13** 采用锚喷支护时，隧洞开挖方法及质量要求应符合本规范6.5.1的规定。喷射混凝土后，洞壁相邻表面的起伏差应控制在150mm以内。

**6.5.14** 采用锚喷与混凝土或锚喷与钢筋混凝土组合式衬砌时，其设计应符合下列要求：

1 锚喷衬砌，可按GB50086—2001的规定通过计算并结合工程类比确定设计参数。

2 锚喷衬砌如与临时支护结合时，宜紧接开挖面进行，并进行施工期监测，必要时还应根据监测成果修改设计参数。

3 混凝土或钢筋混凝土衬砌宜适时施工。

**6.5.15** 采用钢纤维喷射混凝土应符合SDJ57—85的规定。

**6.5.16** 应做好喷射混凝土与混凝土或钢筋混凝土衬砌的接缝处理。

**6.5.17** 不衬砌隧洞及锚喷衬砌隧洞的进、出口，闸室前后均应

采用混凝土或钢筋混凝土衬砌，其长度应根据工程地质条件决定，但不宜小于 2~3 倍洞径（或洞宽）。

**6.5.18** 锚喷衬砌隧洞的设计和施工除满足本规范的规定外，尚应符合 GB50086—2001 和 SDJ57—85 的规定。

## 6.6 埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计

**6.6.1** 埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计应包括下列内容：

1 岔管的布置、岔管尺寸和体型选择以及岔管的结构设计；

2 围岩的应力分析、渗透稳定分析，必要时还需研究降低外水压力的排水措施；

3 回填灌浆和固结灌浆设计以及围岩的其他加固措施设计；

4 施工期围岩的监测设计和运行期岔管及围岩的安全监测设计。

**6.6.2** 高压钢筋混凝土岔管宜布置在 I、II 类围岩地段。III 类围岩地段需经论证后方可布置钢筋混凝土岔管。IV、V 类围岩地段不得布置钢筋混凝土岔管。

钢筋混凝土岔管及其前后一定范围的洞段，必须满足最小覆盖厚度、水力劈裂、渗透稳定的要求。施工中应进行地应力测验以及必要的围岩现场物理、力学测验。

**6.6.3** 高压钢筋混凝土岔管的分岔型式、体型、尺寸应根据运行要求、水力学条件、施工方法等进行综合分析论证后确定。

分岔角宜为  $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，岔管体型应平顺过渡，进行修圆，避免折线连接。

**6.6.4** 高压钢筋混凝土岔管的结构设计和围岩的应力、应变分析，宜考虑下列原则，通过计算分析并结合工程类比确定：

1 岔管结构可按限裂设计，裂缝开展宽度应按 SDJ20—78 的规定执行；

2 应进行岔管开裂后的渗流量估算；

3 岔管结构设计时，对钢筋和混凝土的应力、应变可用有限

元数值计算进行复核；

4 根据工程地质和水文地质情况并参照类似工程对衬砌结构、围岩应力应变进行设计计算时，尚应考虑下列因素：

1) 围岩的初始地应力(场)以及施工和运行期地应力(场)的重分布；

2) 地下水的分布以及施工和运行期渗流场的变化；

3) 地质勘测成果以及围岩的现场和实验室测试数据；

4) 防渗及排水设施对地下水的影响；

5) 固结灌浆对围岩物理力学参数及渗透性的影响。

**6.6.5** 岔管的厚度不宜过大，应根据地质条件、内外水压力、洞径及施工条件，经结构计算并结合工程类比确定。应力集中区(岔档尖角和腰梁区)可采取修圆、修角、加强配筋、局部加厚衬砌等措施。

**6.6.6** 高压钢筋混凝土岔管的混凝土强度标号不宜低于 R250。岔管部位及其前后一定范围的洞段必须作好回填灌浆。对围岩应进行固结灌浆。固结灌浆和回填灌浆均应符合本规范 9.1 的要求，必要时宜进行专门的灌浆设计。

**6.6.7** 高压钢筋混凝土岔管应进行施工期围岩和结构的监测设计，应根据监测成果进行确认或调整、修改设计参数，并应进行与监测设计相结合的运行期安全监测设计。

## 6.7 衬砌的分缝

**6.7.1** 混凝土和钢筋混凝土衬砌，在地质条件明显变化处和井、洞交汇处，进、出口处或其他可能产生较大相对变位处，应设置永久缝，并采取相应的防渗措施。

围岩地质条件比较均一的洞身段，可只设置施工缝。

**6.7.2** 沿洞线的浇筑分段长度，应根据浇筑能力和温度收缩等因素分析确定。浇筑分段长度可采用 6m~12m。衬砌结构的环向缝不得错开。

**6.7.3** 无防渗要求的无压隧洞，分布筋可不穿过衬砌环向施工

缝，混凝土可不凿毛处理，可不设止水。

对有压隧洞和有防渗要求的无压隧洞，衬砌的环向施工缝应根据具体情况采取必要的接缝处理措施。

**6.7.4 衬砌的纵向施工缝应设置在衬砌结构拉应力及剪应力均较小的部位，必须进行凿毛处理。当施工需要先衬砌顶拱时，对拱底反缝缝面必须进行妥善处理。**

**6.7.5 钢筋混凝土衬砌和钢板衬砌的连接段，应按水头大小决定搭接长度，最小不应小于 1.0m。**

**6.7.6 土洞的衬砌分缝及防渗止水见本规范 8.2 的规定。**

## 6.8 封堵体设计

**6.8.1 封堵体位置应根据围岩的工程地质和水文地质条件、已有的支护或衬砌情况、相邻建筑物的布置及运行要求分析决定。**

**6.8.2 封堵体的体型和长度应根据承受内水压力的大小、地质条件、施工方法、封堵材料、运行要求，并考虑到施工工期，综合各种因素分析研究决定。**

**6.8.3 等断面封堵体长度可按式 (6.8.3) 计算：**

$$L \geq \frac{P}{[\tau]A} \quad (6.8.3)$$

式中  $L$ ——封堵体长度，m；

$P$ ——封堵体迎水面承受的总水压，MN；

$[\tau]$ ——容许剪应力，取 0.2MPa~0.3MPa；

$A$ ——封堵体剪切面周长，m。

**6.8.4 在封堵体设计和施工中应考虑温控措施。封堵混凝土可采用低热水泥、掺用粉煤灰等，必要时可考虑采用微膨胀水泥。选用微膨胀水泥的封堵体，应进行微膨胀水泥的物理力学试验、混凝土配比试验，根据试验成果研究封堵体的分层分块和回填及接缝灌浆问题。采用微膨胀水泥的封堵体宜进行专门设计。**

采取了必要的温控措施后可不计温度应力。高地温区封堵体的温度应力问题应进行专门研究。

**6.8.5 封堵体必须做好回填灌浆，必要时应进行二次回填灌浆。封堵体的回填灌浆和固结灌浆应符合本规范 9.1 和 SL62—94《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》的规定。**

网易 NetEase  
水利工程网 WWW.SHUIGONG.COM

## 7 不良地质洞段设计

### 7.0.1 不良地质洞段应符合下列规定：

- 1 与较大地质构造交叉，需采取特殊施工、支护措施才可保证围岩稳定的洞段；
- 2 通过高地应力区出现岩爆的洞段；
- 3 通过有害气体赋存区的洞段；
- 4 通过喀斯特洞穴发育区或地下暗河的洞段；
- 5 通过土层、沙层、流沙层、滑坡堆积层、塑性流变岩、高膨胀性岩层的洞段；
- 6 位于高压地下水或地表水强补给区，出现较大涌水的洞段。

### 7.0.2 不良地质洞段的支护设计应符合下列规定：

- 1 根据地质预报（预测）或超前勘探成果，通过工程类比和必要的计算分析，进行支护方案或开挖前的围岩加固设计。可能出现意外情况时，还应提出应急方案设计。
- 2 根据施工过程中揭露出的地质情况和现场监测、测验（试验）数据，及时确认、调整、修改支护参数或变更支护方案，控制围岩失稳的发生或扩大。
- 3 及时分析一次支护的效果，根据围岩稳定情况，研究加强支护或多次支护的必要性，以及衬砌施工的适宜时机。
- 4 锚喷支护设计应按本规范 6.5 的规定进行，对其他支护类型的结构计算可采用结构力学方法。

### 7.0.3 不良地质洞段的衬砌设计应符合下列规定：

- 1 根据地质条件、衬砌前所采取的各种处理措施的效果、围岩变形（位移）的稳定情况，通过工程类比和必要的计算分析，确定衬砌结构可能承担的外荷载；
- 2 通过必要的物理力学指标测验和工程类比，确定设计所采

用的围岩物理力学指标和承担内水压力的能力；

3 根据地质条件，并考虑便于施工，经技术经济比较选择有利于结构受力和围岩稳定的隧洞横断面形状和衬砌结构型式；

4 不良地质洞段的衬砌结构计算不考虑围岩承担内水压力时可用结构力学方法；考虑围岩承担内水压力时，可用有限元方法，并通过工程类比确定。

**7.0.4** 对预测（预报）可能出现围岩坍塌失稳的不良地质洞段，应严格按新奥法进行施工，并应符合下列规定：

1 进行专门的施工组织设计；

2 提出明确的施工技术要求，包括爆破参数、进尺、程序、变形监测、现场测验、支护工艺等；

3 做好地下水的引排设计；

4 根据信息反馈及时判定围岩的稳定情况，确定应采取的后续施工措施。

**7.0.5** 有较大涌水的不良地质洞段，应根据地质情况、涌水来源、涌水量大小，按截断水源、引排涌水、降低围岩透水性的原则，进行防止或控制涌水造成围岩失稳的工程措施设计。设计内容应包括防止涌水或引排的措施、支护措施、施工监测、衬砌结构和安全监测。

**7.0.6** 高地应力区出现岩爆的不良地质洞段，应根据地应力的大小、方向，围岩的结构、岩性，岩爆发生的频度、强度和范围，研究洞段的走向、断面形状、开挖程序、支护方式、预泄围岩应力等措施，防止岩爆发展，保证施工安全。

岩爆地区第一次支护宜采用锚喷支护，并密切监测其支护效果。应在围岩变形（位移）基本稳定后进行衬砌施工。

**7.0.7** 通过有害气体赋存区的洞段，宜根据有害气体的来源、分布、连通情况，研究隔离、封闭、引排等措施，控制和减少有害气体的影响。对较长或浓度超标的隧洞可设专门的通风、换气设施。有害气体赋存区不宜用锚喷结构做永久衬砌结构。

**7.0.8** 通过喀斯特区的隧洞，应根据溶洞的位置、分布、大小，

溶洞的充填状况，围岩（岩壁）的稳定状况及水量大小，按下列原则进行处理措施设计：

1 对岩壁渗水滴水、溶洞中的流水（暗河）、充填物中的地下水，宜根据水量大小、类型和来源，采用“排”、“截”、“堵”、“防”相结合，以排为主的原则进行综合处理；

2 对规模较小或未与隧洞连通的较小溶洞，可采取回填混凝土、回填灌浆、固结灌浆等处理措施；

3 对规模较大、充填物多、水量大的溶洞，可根据溶洞的位置和分布，采取设隔离体、设支撑结构跨越、设专门基础、局部改线等处理措施。

**7.0.9** 对通过流变岩层、高膨胀岩层的洞段，应根据地质勘探和试验成果，研究流变岩的时效性和应力、应变关系，膨胀岩的膨胀率和膨胀压力，通过工程类比和必要的计算分析，选择合适的支护措施、封闭断面方式和封闭时间，以及适宜的衬砌结构、衬砌时间。

**7.0.10** 对遇水易泥化、崩解、膨胀、软化的不良地质洞段，或在渗流作用下易于蚀变、渗透变形（失稳）的较大断层、卸荷带、破碎带、节理（裂隙）密集带等不良地质洞段，设计级别可提高一级（最高不超过1级），并应加强衬砌的防渗、止水措施，必要时进行专门设计。

**7.0.11** 应根据地质条件和衬砌型式做好回填灌浆、固结灌浆设计，防水排水设计，施工缝和结构缝的止水设计，以及与施工监测设计相结合的安全监测设计。

## 8 土 洞 设 计

### 8.1 土洞支护与衬砌

#### 8.1.1 土洞设计应遵循以下原则：

- 1 较长隧洞宜进行常规法施工和盾构法施工的技术经济比较；
- 2 土洞宜采用喷射混凝土（或锚杆喷射混凝土）与钢筋混凝土组合式衬砌；
- 3 土洞横断面宜采用圆形或马蹄形，避免采用矩形、圆拱直墙形；
- 4 土洞与岩洞衔接时，土洞的支护和衬砌应深入岩洞有足够长度，岩洞过渡段洞顶以上的有效岩层厚度应不小于1倍洞径；
- 5 土洞衬砌应采取防止内水外渗的可靠措施；
- 6 应做好地表水和洞内施工用水的引排处理。

#### 8.1.2 作用在土洞衬砌结构上的围岩压力（荷载）应按下述原则确定：

- 1 能形成塌落拱的土洞，可按松动介质平衡理论估算围岩压力。
- 2 不能形成塌落拱的浅埋土洞，围岩压力宜按顶拱的上覆土体重力计算围岩压力，并根据地形条件、施工所采取的稳定措施予以修正。
- 3 不能形成塌落拱的深埋土洞，围岩压力宜作专门研究。
- 4 膨胀土应考虑膨胀压力，其压力值可通过取样试验或现场测验成果研究确定。
- 5 有地下水作用的洞段，应按土压和水压共同作用确定衬砌结构承受的荷载。位于高外水压力的洞段，若采用一期支护后不能维持土体稳定，宜优先采取排水措施并采取适宜的加强支护或加固土体的措施，减少衬砌结构承受的荷载。

**6** 应考虑运行期由于内水外渗或其他原因使土的含水量增加而导致的土压力增大。

**8.1.3** 土洞衬砌计算按以下原则进行：

**1** 喷射混凝土（或锚喷）与钢筋混凝土组合衬砌计算时，钢筋混凝土衬砌可按承载结构设计，可采用结构力学方法计算；锚喷支护可采用 GB50086—2001 给出的方法或有限元法估算，并结合工程类比和施工监测成果进行修正。

**2** 土洞的喷射混凝土（或锚喷）衬砌，其周边允许相对收敛值及顶拱下沉允许值，应根据地下水分布、土质条件和施工监测成果，经结构分析决定。无实测资料时可按 SDJ57—85 的规定执行。

**3** 钢筋混凝土衬砌计算时，可不计土体的联合作用，内水压力均由钢筋混凝土衬砌承担。

## **8.2 土洞衬砌分缝及防渗止水**

**8.2.1** 土洞衬砌分缝除满足本规范 6.7 的要求外，尚应符合本节 8.2.2~8.2.5 的规定。

**8.2.2** 土洞宜沿洞线每隔 6m~12m 设一道环向变形缝，其底拱和边、顶拱的环向缝不得错开。变形缝应采取可靠的防渗措施，宜采用明、暗两道止水。

**8.2.3** 衬砌的纵向施工缝必须进行凿毛处理，并设止水。应采用先衬砌底拱，后衬砌边、顶拱的施工顺序，不应设置反缝。

**8.2.4** 土洞纵向施工缝与环向变形缝的止水应做成可靠的封闭式。

**8.2.5** 对湿陷性黄土洞除满足 8.2.4 的要求外，尚应在土洞支护与衬砌之间或衬砌结构内设置整体密封式柔性止水，其衬砌结构的混凝土抗渗标号不宜低于 S8。

湿陷性黄土洞段若与岩洞交界时，设柔性止水的土洞段除伸入岩洞的长度应符合本规范 8.1.1 第 4 款的规定外，尚应在交界段设阻水防渗帷幕。

## 9 隧洞灌浆、防渗和排水

### 9.1 灌 浆

**9.1.1 混凝土及钢筋混凝土衬砌的顶部（顶拱），必须进行回填灌浆。**

**9.1.2 回填灌浆的范围、孔距、排距、灌浆压力及浆液浓度等，应根据隧洞的衬砌结构型式、运行条件及施工方法等分析决定。**

回填灌浆的范围宜在顶部或顶拱中心角  $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$  以内，孔距和排距宜为  $2\text{m}\sim 6\text{m}$ ，灌浆压力应视混凝土衬砌厚度和配筋情况确定；对混凝土衬砌可采用  $0.2\text{MPa}\sim 0.3\text{MPa}$ ；对钢筋混凝土衬砌可采用  $0.3\text{MPa}\sim 0.5\text{MPa}$ 。灌浆孔应深入围岩  $50\text{mm}$  以上。

隧洞衬砌遇有围岩塌陷、溶洞、较大超挖等情况时，应在该部位顶部（顶拱）预埋灌浆管及排气管，其数量和位置应根据现场情况确定。

**9.1.3 土洞的回填灌浆宜采用低压灌浆。当支护与衬砌间设有柔性止水时，衬砌浇筑时应预埋灌浆管，灌浆管不得损坏柔性止水和穿透支护。**

**9.1.4 回填灌浆形成的水泥结石应满足设计要求。水泥结石的弹性模量、填充率、密实度、透水性等设计指标，宜根据围岩的工程地质和水文地质条件、衬砌结构的性质、围岩开挖成形情况以及隧洞的运行要求通过灌浆试验综合分析确定。**

**9.1.5 围岩的固结灌浆应根据隧洞工程地质和水文地质条件、衬砌型式、施工对围岩的影响程度以及运行要求，通过技术经济比较确定。**

固结灌浆孔的排距宜采用  $2\text{m}\sim 4\text{m}$ ，每排不宜少于 6 孔，孔位宜作对称布置；灌浆深度应根据围岩情况分析确定，可取 0.5 倍隧洞直径（或洞宽）；灌浆压力可采用 1.0~2.0 倍内水压力。

对有特殊要求的固结灌浆可通过工程类比和现场试验确定其

各项参数。

高水头压力隧洞，固结灌浆压力宜小于 1.5 倍内水压力，并应小于围岩最小主应力。

**9.1.6** 隧洞衬砌采用灌浆式预应力结构时，灌浆程序应遵循下列规定：

- 1 对围岩进行固结灌浆；
- 2 在围岩与衬砌间灌注高压水，直至两者完全脱开；
- 3 在围岩与衬砌间进行高压灌浆。

**9.1.7** 灌浆式预应力衬砌的灌浆参数，应根据设计要求通过现场试验确定。

**9.1.8** 对于粘结后张式预应力衬砌，锚索张拉完毕应及时进行孔道灌浆和张拉槽回填。

机械式预应力衬砌隧洞，应对衬砌与围岩间进行全断面接触灌浆。

**9.1.9** 隧洞封堵体顶部必须进行回填灌浆，封堵体其他周边与围岩间以及由于各种原因张开的缝隙均应做接触灌浆。封堵段围岩的固结灌浆，可根据围岩条件、作用水头大小以及封堵体型式研究决定。

封堵体的灌浆布置、灌浆压力、浆液浓度等灌浆参数，应根据工程地质及水文地质条件、封堵体型式、封堵体工作条件以及施工方法分析决定。

**9.1.10** 灌浆材料应根据围岩工程地质、水文地质和隧洞的工作条件选定。当地下水具有侵蚀性时，应采用抗侵蚀作用的水泥。

## 9.2 防渗和排水

**9.2.1** 应根据隧洞沿线的工程、水文地质条件和环保要求、隧洞衬砌的设计条件、运行要求，通过技术经济比较决定隧洞（洞段）的防渗和排水设计。

隧洞的防渗和排水设计宜遵照“堵”、“截”、“排”的原则，选择单独或综合处理措施。

**9.2.2** 在无压洞中，宜在水面以上设置排水孔。排水孔的间距、排距、孔深应根据地质条件分析决定。排水孔的间距、排距可采用2m~4m，孔深可深入岩石2m~4m，应保证底板和侧墙的抗浮稳定。

**9.2.3** 由外水压力控制的有压隧洞，宜研究设置合适的排水措施，减低外水压力强度。

**9.2.4** 水工隧洞的下列部位应采取保证围岩及山坡的渗透稳定的有效防渗措施：

- 1 有压隧洞的出口；
- 2 不良地质洞段及Ⅳ、Ⅴ类围岩洞段；
- 3 局部不满足3.1.7所规定的覆盖厚度要求的洞段。

**9.2.5** 高压隧洞钢筋混凝土衬砌与钢板衬护的连接段，应在钢筋混凝土衬砌的末端设置环状防渗帷幕，并应在衬护钢板的首端设止水环。

**9.2.6** 隧洞洞口边坡及其周围，应根据地形、地质条件设截水沟及排水孔，形成可靠的排水系统。洞口边坡应采取防止地面径流冲蚀破坏的措施。

## 10 隧洞安全监测

**10.0.1** 凡符合下列情况之一的水工隧洞，宜在有代表性的洞段设置原型安全监测：

- 1 1级水工隧洞；
- 2 大洞径、高水头、高流速的水工隧洞；
- 3 不良地质洞段；
- 4 土洞；
- 5 采用新技术的洞段。

**10.0.2** 隧洞安全监测分洞内监测和洞外监测，其监测内容应符合下列规定：

1 洞内监测主要监测洞内流态和建筑物及围岩的工作状态，包括水力学和结构力学内容；

2 洞外监测主要监测沿洞线的洞外工作状态，包括进、出口建筑物、地表及山坡的变化；

3 具体监测项目应根据隧洞用途和围岩条件决定。

**10.0.3** 土洞的监测内容除常规监测项目外，尚应满足下列监测要求：

1 应加强支护的施工监测和施工时的地表监测；

2 洞口应设置与施工监测相结合的位移安全监测点，监测地面下沉及边坡稳定情况；

3 浅埋土洞及稳定性较差（或极差）洞段，施工时应进行沿洞线（洞段）的地表下沉量量测；

4 湿陷性黄土洞段，应进行渗漏安全监测；

5 对湿陷性黄土、膨胀土、软粘土洞段中的混凝土（或钢筋混凝土）衬砌，应设永久性安全监测断面，并进行放空时的断面收敛量测。

**10.0.4** 不良地质洞段应进行施工监测设计，并及时收集监测信息、成果，研究分析监测数据。

## 11 隧洞运行和维修

**11.0.1** 设计单位应根据工程运用要求，结合自然条件、建筑物设计条件和试验（测试）研究资料，提出水工隧洞的运行、检修要求。

**11.0.2** 拟定运行要求时，应使隧洞能定时放空，便于检修，并应作出放空与充水设计。

**11.0.3** 设计应根据工程管理和维修要求，设置必要的设施和标志。

网易 NetEase  
WWW.SHUIGONG.COM

## 附录 A 高流速防空蚀设计

**A.0.1** 空蚀可能性的判别应符合以下规定：

高流速水工隧洞设计时，应使水流空化数  $\sigma$  大于初生空化数  $\sigma_i$ 。技施设计阶段高流速水工隧洞重要部位的  $\sigma_i$  值应通过试验测定。各类不经常使用的水工隧洞（除导流洞门槽外）以及易于检修的洞身段可采用  $\sigma \geq 0.85\sigma_i$ 。

高流速水工隧洞应按下式进行沿程水流空化数计算：

$$\sigma = \frac{P_0 + P_a - P_v}{\frac{1}{2}\rho_w v_0^2} \quad (\text{A.0.1-1})$$

$$P_a = \gamma_w(10.33 - \nabla/900) \quad (\text{A.0.1-2})$$

$$\rho_w = \frac{\gamma_w}{g} \quad (\text{A.0.1-3})$$

式中  $P_0$ ——计算断面处的时均动水压力，kPa；当水流流速大于 30m/s 时，应计脉动压力的影响；

$P_a$ ——计算断面处的大气压力，kPa；对不同高程按式 (A.0.1-2) 估算；

$\gamma_w$ ——水的重度，kN/m<sup>3</sup>；

$\nabla$ ——海平面以上高度，m；

$P_v$ ——水的汽化压力，kPa，按表 A.0.1 采用；

$\rho_w$ ——水的密度，kN；

$g$ ——重力加速度，m/s<sup>2</sup>；

$v_0$ ——计算断面处的水的流速，m/s，可按实测流速分布图取断面平均流速。

**表 A.0.1 水的汽化压力与水温的关系表**

水温 (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40
$P_v$ (kPa)	0.6	0.9	1.3	1.7	2.4	3.2	4.3	7.5

**A.0.2** 过流表面的不平整度控制和处理要求应根据水流空化数的大小确定，见表 A.0.2。

**表 A.0.2 表面不平整度控制和处理标准**

水流空化数 $\sigma$	>1.70	1.70 ~ 0.61	0.60 ~ 0.36	0.35 ~ 0.31	0.30 ~ 0.21	0.20 ~ 0.16	0.15 ~ 0.10	<0.10			
掺气设施	—	—	—	—	不设	设	不设	设	不设	设	修改设计
突体高度控制 (mm)	≤30	≤25	≤12	≤8	<6	<25	<3	<10	修改设计	<6	
磨成 坡度	正面坡	不处理	1/5	1/10	1/15	1/30	1/5	1/50	1/8		1/10
	侧面坡	不处理	1/4	1/5	1/10	1/20	1/4	1/30	1/5		1/8

**A.0.3** 水工隧洞及出口消能防冲建筑物水流空化数小于 0.30 时，应按下列原则设置掺气减蚀设施：

- 1 选用合理的掺气型式，并进行大比尺模型试验论证；
- 2 近壁层掺气浓度应大于 4%；
- 3 掺气保护长度根据泄水曲线型式和掺气结构型式确定，曲线段可采用 70m~100m，直线段可采用 100m~150m，对长泄水道应考虑设置多级掺气减蚀设施。

**A.0.4** I、I 级泄水建筑物高流速区应进行原型空化空蚀监测设计。

## 附录 B 圆形有压隧洞衬砌结构计算 (弹性力学方法)

**B.0.1** 本附录仅适用于以内水压力为主要荷载，围岩为 I、II 类直径小于或等于 6m 的圆形有压隧洞。计算中所用“结构最小配筋率”按 SDJ20—78 的规定采用。

混凝土和钢筋混凝土的衬砌结构不作为有严格防渗要求的结构，本附录只列出允许出现裂缝的钢筋混凝土衬砌的计算公式。

在计算中衬砌厚度应按构造要求确定。必须进行衬砌的裂缝开展宽度计算时，其计算方法见 SDJ20—78。

**B.0.2** 双层钢筋混凝土衬砌设计计算应符合下列规定：

1 可采用对称配筋。钢筋面积按式 (B.0.2-1) 计算，但不得小于最小配筋率：

$$f_i = f_o = \frac{pr_i + k_0 \left( m - \frac{r_i [\sigma_g]}{E_g} \right)}{\left( 1 + \frac{r_i}{r_o} \right) [\sigma_g] - E_g \frac{m}{r_o}} \quad (\text{B.0.2-1})$$

式中  $r_i$ ——隧洞衬砌内半径，m；

$r_o$ ——隧洞衬砌外半径，m；

$p$ ——均匀内水压力，kPa；

$k_0$ ——围岩的单位弹性抗力系数，kN/m<sup>3</sup>；

$E_g$ ——钢筋的弹性模量，kPa；

$[\sigma_g]$ ——钢筋的允许应力，kPa；

$f_i$ ——单位长度 (m) 内圈钢筋的断面面积，m<sup>2</sup>；

$f_o$ ——单位长度 (m) 外圈钢筋的断面面积，m<sup>2</sup>；

$m$ ——系数。

2 内、外圈钢筋应力校核按式 (B.0.2-2) 进行：

$$\sigma_g = \frac{pr_i - \left(E_g \frac{f_0}{r_0} + k_0\right)m}{\left(f_i + f_0 \frac{r_i}{r_0}\right) + \frac{k_0 r_i}{E_g}} \leq [\sigma_g] \quad (\text{B. 0. 2-2})$$

$$\sigma_{g0} = \frac{(pr_i^2 - E_g f_i m) \frac{1}{r_0}}{\left(f_i + f_0 \frac{r_i}{r_0}\right) + \frac{k_0 r_i}{E_g}} \leq [\sigma_g] \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

$$[\sigma_g] = \frac{R_g}{K} \quad (\text{B. 0. 2-4})$$

$$m = \frac{pr_i}{0.85E_b} \ln \frac{r_0}{r_i} \quad (\text{B. 0. 2-5})$$

以上式中  $\sigma_g$ ——衬砌内圈的钢筋应力，kPa；

$\sigma_{g0}$ ——衬砌外圈的钢筋应力，kPa；

$K$ ——钢筋混凝土结构强度安全系数；

$E_b$ ——混凝土的弹性模量，kPa；

$R_g$ ——钢筋受拉设计强度，kPa。

**B. 0. 3** 单层钢筋混凝土衬砌设计计算应符合下列规定：

1 钢筋面积可按式 (B. 0. 3-1) 计算，但不得小于衬砌结构的最小配筋率：

$$f_i = \frac{1}{[\sigma_g]} (pr_i + k_0 m) - \frac{k_0 r_i}{E_g} \quad (\text{B. 0. 3-1})$$

2 钢筋应力校核按式 (B. 0. 3-2) 进行：

$$\sigma_g = \frac{pr_i + k_0 m}{f_i + \frac{k_0 r_i}{E_g}} \leq [\sigma_g] \quad (\text{B. 0. 3-2})$$

以上式中符号意义同 B. 0. 2。

## 附录 C 灌浆式预应力衬砌的结构计算

### C.1 设计原则及强度条件

C.1.1 灌浆式预应力衬砌结构的设计应遵守下列规定：

- 1 混凝土衬砌结构应按不允许出现裂缝设计；
- 2 衬砌结构设计中可不计混凝土干缩和湿胀影响；
- 3 衬砌计算时可不计衬砌结构的自重；
- 4 衬砌结构的厚度，一般可取隧洞内径的  $1/2 \sim 1/18$ ，洞径小时取大值，洞径大时取小值，衬砌结构愈薄，预应力效果愈显著；
- 5 衬砌结构强度计算应计及不利荷载组合，并应切向应力迭加。

C.1.2 灌浆式预应力衬砌结构的强度应符合下列规定：

- 1 当不计围岩温度影响时，衬砌结构应在受压状态下工作，应满足式 (C.1.2-1) 的要求：

$$\sigma_{ip} + \sigma_{iq} \leq 0 \quad (\text{C.1.2-1})$$

式中  $\sigma_{ip}$ ——内水压力使衬砌结构产生的切向拉应力，kPa；  
 $\sigma_{iq}$ ——灌浆压力使衬砌结构产生的切向压应力，kPa。

- 2 当计入围岩温度影响后，衬砌结构允许有不大于混凝土许可抗拉强度的拉应力，应满足式 (C.1.2-2)：

$$\sigma_{ip} + \sigma_{iq} + \sigma_{tt} \leq \frac{R_t}{K} \quad (\text{C.1.2-2})$$

式中  $R_t$ ——混凝土抗拉设计强度，kPa；  
 $K$ ——混凝土达到极限抗拉强度时的安全系数， $K$ 按表 6.3.3 取值；

$\sigma_{tt}$ ——围岩温降使衬砌结构产生的切向拉应力，kPa。

- 3 通过高压灌浆使衬砌结构得到的预压应力应计及灌浆时的压力损失和混凝土的徐变、灌浆浆液结石收缩、围岩的流变等

因素引起的压应力降低。

4 灌浆过程中衬砌结构的内缘切向压应力应小于混凝土轴心抗压设计强度的 0.8 倍，如式 (C.1.2-3) 所示：

$$\sigma_{tq} < 0.8R_a \quad (\text{C.1.2-3})$$

式中  $R_a$ ——混凝土轴心抗压设计强度，kPa。

## C.2 灌浆式预应力衬砌结构切向应力计算

C.2.1 灌浆压力作用下产生的切向应力计算应符合下列规定：

1 衬砌结构计算点切向应力按式 (C.2.1-1) 计算：

$$\sigma_{tq} = -q_0 \frac{t^2}{t^2 - 1} \left( 1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (\text{C.2.1-1})$$

$$t = \frac{r_0}{r_i}$$

式中  $r$ ——衬砌结构计算点半径，m；

$q_0$ ——有效灌浆压力，kPa；

$r_0$ ——衬砌结构外半径，m；

$r_i$ ——衬砌结构内半径，m。

2 对衬砌结构内缘，切向应力按式 (C.2.1-2) 计算：

$$\sigma_{tq} = -q_0 \frac{2t^2}{t^2 - 1} \quad (\text{C.2.1-2})$$

C.2.2 内水压力作用下衬砌内缘切向拉应力应按式 (C.2.2) 计算：

$$\sigma_{tp} = P \frac{t^2 + A}{t^2 - A} \quad (\text{C.2.2})$$

$$A = \frac{E_c - (1 + \mu_c)k_0}{E_c + (1 + \mu_c)(1 - 2\mu_c)k_0}$$

式中  $A$ ——弹性特征因素；

$P$ ——设计内水压力（考虑外水压力迭加），kPa；

$E_c$ ——混凝土弹性模量，kPa；

$\mu_c$ ——混凝土泊松比；

$k_0$ ——围岩单位弹性抗力系数， $\text{kN/m}^3$ 。

C.2.3 有效灌浆压力的降低值应按式 (C.2.3) 计算：

$$P_r = \frac{[\Delta r_0]}{r_0 \left[ \frac{1}{E_c} \left( \frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} - \mu_c \right) + \frac{1}{E_r} (1 + \mu_r) \right]} \quad (\text{C.2.3})$$

式中  $E_r$ ——围岩的弹性模量， $\text{kPa}$ ；

$\mu_r$ ——围岩泊松比；

$[\Delta r_0]$ ——温降时衬砌与围岩的总变位， $\text{m}$ 。

C.2.4 衬砌内缘切向温度应力值应按式 (C.2.4) 计算：

$$\sigma_{\theta} = P_r \frac{2t^2}{t^2 - 1} \quad (\text{C.2.4})$$

$$[\Delta r_0] = \Delta r_{c0} - \Delta r_{r0}$$

$$\Delta r_{c0} = \alpha_c \Delta T r_0$$

$$\Delta r_{r0} = \frac{2r_0^2}{R^2 - r_0^2} \alpha_r (T_r - t_0) \left[ \frac{M - 1}{\ln M} - 1 \right]$$

$$M = \frac{R}{r_0} = f \left( \frac{2C\tau}{\beta r_0^2} \right) \left[ \text{函数值 } f \left( \frac{2C\tau}{\beta r_0^2} \right) \text{ 见表 C2.4} \right]$$

式中  $\Delta r_{r0}$ ——围岩受到温度下降后，开挖面半径增加值， $\text{m}$ ；

$\Delta r_{c0}$ ——温度降低使衬砌外半径减少值， $\text{m}$ ；

$\alpha_c$ ——混凝土的线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$\Delta T$ ——混凝土衬砌计算温差， $^\circ\text{C}$ ；

$\alpha_r$ ——围岩的线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$T_r$ ——半径为  $R$  处常年不变的岩石温度， $^\circ\text{C}$ ；

$t_0$ ——衬砌外缘温度， $^\circ\text{C}$ ；

$R$ ——围岩的温降半径， $\text{m}$ 。

$C$ ——围岩的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ；

$\tau$ ——年内最低温度持续时间， $\text{h}$ ；

$\beta$ ——围岩的单位体积比热， $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{k})$ 。

表 C. 2. 4 函数  $f\left(\frac{2Cr}{\beta r_0^2}\right)$  的值

$\frac{R}{r_0}$	$\frac{2Cr}{\beta r_0^2}$	$\frac{R}{r_0}$	$\frac{2Cr}{\beta r_0^2}$	$\frac{R}{r_0}$	$\frac{2Cr}{\beta r_0^2}$
1.6	0.35	6.5	15.53	10.5	43.32
2.5	1.61	7.5	21.19	11.5	52.51
3.5	3.77	8.5	27.66	12.5	62.49
4.5	6.81	9.5	35.25	13.5	73.21
5.5	10.76				

网易 NetEase  
WWW.SHUIGONG.COM  
水利工程网

## 附录 D 混凝土衬砌裂缝及其防止措施

### D.0.1 防止裂缝的措施应符合下列规定：

1 加强混凝土衬砌施工期的养护工作，拆模时间不宜过早，减少温度突变影响，必要时控制混凝土的入仓温度。

2 选择合理的混凝土配合比和原材料，宜使用早期强度较高、析水率和干缩较小及水化热较低的水泥。合理降低混凝土的塌落度，正确使用外加剂和掺合料。

3 钢筋混凝土的配筋，应结合施工条件，宜采用细筋。

4 合理分缝分块，环向缝应在同一平面内，避免错缝浇筑。

5 同一浇筑块要均匀连续，加强震捣，防止产生冷缝。

6 地下水丰富地段，混凝土浇筑前应采取妥善的排水或封堵措施。

7 隧洞衬砌浇筑程序应先衬砌底拱，后衬砌边、顶拱，否则对反缝缝面必须进行妥善处理。

8 对开挖出现大超挖或塌方部位应妥善处理，避免出现衬砌应力集中，薄弱处应进行应力复核，采取必要的工程措施。

9 衬砌与开挖掌子面保持一定安全距离。

10 在寒冷地区施工，洞口采取保温措施。

D.0.2 当隧洞衬砌产生裂缝和渗漏时，应先查明产生裂缝的原因，再决定处理措施。

处理方法，可采用水泥灌浆或加钢筋网喷浆。有防渗要求时，可选用磨细水泥灌浆、化学灌浆、环氧树脂合成物堵塞裂缝或低温环氧砂浆填充裂缝等措施。

D.0.3 应不断总结工程实践经验，对防止混凝土衬砌产生裂缝的设计方法、措施和处理方案进一步完善和提高。

## 本规范用词和用语说明

为便于执行本标准，对要求严格程度不同的用词说明如下：

——表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

——表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

——表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

本标准用语说明如下：

标准条文中，“条”、“款”之间承上启下的连接用语写法，采用“符合下列规定”、“遵守下列规定”或“符合下列要求”等。

在标准条文中引用本标准中的其他表、公式时，采用“按本标准表×.×.×的规定取值”或“按本标准公式(×.×.×)计算”等典型用语。

相关标准应采用“……，除应符合本标准(规范或规程)外，尚应符合国家现行的有关标准的规定”典型用语。

**中华人民共和国水利行业标准**

**水工隧洞设计规范**

**SL279—2002**

**条文说明**

网易 NetEase  
水利工程网 WWW.SHUIGONG.COM

**2003 北京**

## 目 次

1	总则	(52)
2	基本资料	(54)
3	隧洞布置	(57)
3.1	洞线选择	(57)
3.2	进、出口布置	(68)
3.3	多用途隧洞的布置	(73)
4	隧洞压力状态及洞型尺寸	(75)
4.1	压力状态选择	(75)
4.2	横断面形状	(76)
4.3	横断面尺寸	(78)
5	隧洞水力计算	(80)
5.1	计算原则	(80)
5.2	高流速的防空蚀设计	(81)
6	隧洞支护与衬砌	(83)
6.1	一般规定	(83)
6.2	荷载和荷载组合	(90)
6.3	混凝土和钢筋混凝土衬砌	(93)
6.4	预应力混凝土衬砌	(96)
6.5	不衬砌与锚喷衬砌隧洞	(99)
6.6	埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计	(102)
6.7	衬砌的分缝	(104)
6.8	封堵体设计	(106)
7	不良地质洞段设计	(109)
8	土洞设计	(116)
8.1	土洞支护与衬砌	(116)
8.2	土洞衬砌分缝及防渗止水	(121)

9	隧洞灌浆、防渗和排水 .....	(122)
9.1	灌浆 .....	(122)
9.2	防渗和排水 .....	(130)
10	隧洞安全监测 .....	(134)
11	隧洞运行和维修 .....	(137)

网易 NetEase  
水利工程网 WWW.SHUIGONG.COM

# 1 总 则

**1.0.1** SD134—84《水工隧洞设计规范》已执行十多年，实践证明 SD134—84 的大多数条文是合适的，为水利水电工程的水工隧洞设计和实施起到了重要的指导作用。十多年来，随着水利水电事业的发展，特别是一大批高水头抽水蓄能电站、跨流域引水工程、长距离输水工程、大型水电站中高压、高流速、大直径引水水工隧洞的成功建设，水工隧洞设计、施工、运行、管理、科研等各方面积累了很多成功经验，也促使水工隧洞在设计思想、设计原则、计算理论上取得了长足的进步。依据水工隧洞几十年的建设成就，在原 SD134—84 的基础上将那些成熟的经验和科技进步纳入规范中，形成正式规范，有利于水工隧洞设计水平的提高。

受自然条件的影响，水工隧洞的工作条件比较复杂，设计条件千差万别，制定“水工隧洞设计规范”目的是统一水工隧洞的设计标准，使水工隧洞设计有法可依，更有利于水工隧洞设计水平的提高，使之做到因地制宜，安全适用，技术先进，经济合理。

**1.0.2** 本规范从水工隧洞的共性给出了水工隧洞的定义。该定义可以包容以用途定名和以结构特点、工作条件定名的水工隧洞。埋管和回填管的工作条件、结构特点与岩（土）体中开挖而成的水工隧洞有很大差别，故本规范特别指出不包括埋管和回填管。

水工隧洞设计，应根据隧洞级别、自然条件、技术条件等区别对待。大中型工程需要考虑的问题多、自然条件复杂、失事后造成的损失也将较大，所以本条规定适用 1、2、3 级水工隧洞设计。对于 4、5 级水工隧洞可简化设计，适当降低要求。

因为已经有专门的钢管设计规范，故本规范的条文未列出有关该种水工隧洞的设计规定。

**1.0.3** 对地质条件特别复杂、水头和流速特别高的水工隧洞，设计条件很复杂，需要进行专门的研究。由于边界条件的复杂，设

计参数难于确定，为保证运行安全，应该留有较大的安全裕度。对失事后将会造成严重损失的隧洞，也有同样的安全裕度问题。故本条文作出可提高一级的规定。

对低水头、低流速并且失事后不致造成严重损失的隧洞，从节省投资出发，可降一级设计级别。

**1.0.4** 对灌溉隧洞、跨流域引水隧洞、下游有通航、过鱼、过木、环境用水等要求的水工隧洞，由于规划不周造成用水矛盾，环境恶化，影响经济效益的事例不少。特别是地方工程，缺少流域规划，过量和不合理引水，造成新的社会问题。大中型工程也存在规划失误造成下游河段不同时间段的断流，致使环境恶化，甚至影响下游的工农业生产。为防止和避免上述问题的发生，规定了满足流域总体规划和环境、水土保持的要求。

**1.0.5** 我国幅员广大，各地自然条件千差万别，水工隧洞又是建在岩土体中的输水建筑物，工作条件复杂。虽然几十年来设计水平有了较大提高，解决了许多技术难题，取得了很大成就，如：将围岩作为承载结构的设计思想和设计理论；混凝土衬砌和钢筋混凝土衬砌不作为有严格防渗要求的抗裂结构的设计原则；以及高压钢筋混凝土岔管和洞内孔板消能；预应力混凝土衬砌结构等等，规范对其中业已成熟的经验加以总结，但实践证明无论在理论和实践中尚有许多问题还没真正解决，如在高地应力、高地温、高地震、高寒冻土地区，以及跨活动性断层、大直径、深埋、高流速、特长隧洞的勘测设计施工问题等，还需要我们逐步认识，另外随着新技术、新材料的涌现，也会提出许多新问题。因此，本条提出了对本规范未包括的问题，应进行充分论证，提出专题报告，报审批单位批准执行，这样既有利于技术进步，又不影响技术成果的应用。

## 2 基本资料

**2.0.1** 不同用途的水工隧洞对各项基本资料所要求的内容不同，不同设计阶段对资料要求的范围和深度也不相同，本条给出归纳性的内容，由设计人员按需要进行选择。

泵站、抽水蓄能电站、有加压站的跨流域引水长隧洞、有调压室的长引水电站，在输水隧洞设计时必须考虑可能出现的最危险运行工况（如：一洞多机的水力过渡过程、单母线出现解列的可能性、泵站和加压站的突然断电等）；对多台机组，运行安全、检修方便已经成为隧洞布置方案选择时必须考虑的重要因素，因此在条文中列入了机电资料的要求。

环境问题的重要性已经越来越被人们所认识，保护环境也是隧洞设计应遵循的原则，本条列出了有关环保要求的条文。

**2.0.2** 地质资料是水工隧洞设计的最重要基本资料之一，是设计依据。

1、2级水工隧洞，工程规模较大、投资多；在国民经济中的重要性也高，设计依据必须切实可靠。故条文规定对1、2级水工隧洞应根据具体工程的实际，在现场选择有代表性的地段进行试验、测试工作，以保证设计质量。试验、测试的项目内容、范围、精度应根据实际地质情况和设计所需参数，会同地质人员共同提出要求。

分析近年来我国水工隧洞的成功经验和出现的问题都说明，水工隧洞能否安全施工、安全运行，关键是对围岩稳定性（应力、变形、渗透）的判断和处理，特别是对不良地质问题是否了解清楚，处理得当。而不良地质问题开挖前和施工中的预报（预测），必要的试验、测验数据是选择支护或衬砌措施，防止围岩失稳的发生和扩大所必须的依据，也是节省投资、保证工期、保证安全的有效途径。故条文中规定了对有不良地质问题的水工隧洞应选

择有代表性的地段进行试验、测试。

**2.0.3** 开工前应掌握的地质情况是从长期实践的经验、教训中总结出来的，设计人员必须予以重视。这些内容也是 GB50287—1999 规范规定的内容。

设计人员应掌握隧洞区不良地质问题，对地质预测做出正确的判断，才能采取适宜的处理措施，这是保证施工安全和设计顺利实施的关键。

**2.0.4** 由于勘测精度、前期费用、施工准备等各种因素的影响，复杂多变的隧洞区地质情况，不可能在隧洞施工前了解清楚。实际上真实的地质条件大都是在施工中逐渐揭露出来的，往往与开挖前的隧洞设计条件有出入。在开挖期间，尤其在地质情况较复杂洞段和不良地质洞段，应加强观测，摸清实际情况，及时修改设计是非常必要的，不应忽视。

对可能危及施工和运行安全的不良地质问题，只有进行必要的现场测试、试验和计算分析，即进行有针对性的专门研究，才能使设计更符合实际，保证施工顺利实施。

**2.0.5** 隧洞的围岩分类是隧洞设计的重要依据，由于地质条件的复杂性，很需要有一个统一的标准，目前国家标准 GB50287—1999 已经颁布实施，该规范给出了围岩分类标准，在一定程度上考虑了围岩本身的物理力学特性与围岩自身稳定的关系，为充分利用围岩做承载结构创造了基本条件，符合水工隧洞的实际情况。故条文规定水工隧洞的围岩分类按该规范执行。

本规范适用岩土洞，并规定了有关土洞的设计内容，因此给出土质的分类标准，即按 SL237—1999《土工试验规程》的规定执行。

**2.0.6** 高地应力地区岩体初始地应力状态，隧洞开挖后围岩应力重分布特点，围岩的应力、变形与围岩物理特性之间的关系，在承受内水压力作用下围岩应力状态的改变，这些都关系到水工隧洞的布置、断面形状、支护或衬砌类型的选择、施工期和运行期的安全。因此，本条规定了应在初设阶段掌握地应力测验成果，并

做出评价以用于设计。考虑到施工阶段围岩性状的变化，实测数据的离散性，特别是初设阶段实测数据的数量有限，代表性不足，在技施阶段应根据现场复核成果校验原采用数据的合理性，以复核或修改设计。

地应力测验费用较大，技术要求和测点布置较严格，一般工程往往受到各种条件的限制，难以大规模地开展地应力（场）实测工作，而地应力又很重要，故条文规定对高地应力区 1、2 级水工隧洞的重要洞段，如高压岔管部位、高压下水平段，设计人员应掌握地应力测验成果，作出评价，以便设计使用。

网易 NetEase  
水利工程网 WWW.SHUIGONG.COM

## 3 隧洞布置

### 3.1 洞线选择

**3.1.1 水工隧洞线路选择是水工隧洞设计最重要的一环，是其后续水力计算、结构设计的基础，关系到围岩稳定、施工工期、工程造价和运行安全。由于洞线选择不当造成重大损失的工程事例不乏报道，如：×××电站斜管段附近有一条10多米宽的大断层，勘探时没发现，斜管段布置在断层处，其走向、倾角几乎与断层重合，开挖导洞时发生严重坍方，延误工期数月；×××引水工程中的某段隧洞长约5000m，有近60m洞段处于冲沟沟底，开挖过程中出现坍方，几经处理后仍控制不住坍方扩大，造成地面下沉，形成直径约9m、深11m的通天坍方漏斗，处理近半年时间，造成巨大损失；×××电站发电洞布置于大坝左岸，该大坝为定向爆破成坝，爆破烈度达7度~9度，爆破促使坝址区岩体震碎，卸荷裂隙张开。1973年建成后经多年风化，致使原已张开的裂隙进一步风化、松弛，卸荷带宽达20m~30m。1985年开凿的发电引水隧洞出口段位于卸荷带中，1991年5月充水出现多处渗水射流。放空检查发现洞内岩体变形、钢管下移，衬砌混凝土多处拉裂，岔管混凝土开裂，钢筋外露，为此不得不另建一条发电隧洞。以上几个实例都是由于对地质条件了解不清，洞线选择不当造成的。××电站由于忽视地形条件也造成了不应有的损失。该电站引水隧洞跨越沟谷，采用管桥方案，开挖后发现两岸岩体破碎，不得不加长两桥头的钢衬长度，加大了固结灌浆范围，施工难度加大，工程投资增加较多，如果采用大弯段绕沟方案，虽然洞长增加一些，但可回避穿沟问题，安全性有所提高。洞线布置片面强调洞线短，而忽视其他方面的要求，酿成事故的实例也发生过。如××水电站泄洪洞方案比选时曾进行过左右岸方案比较，最后因右岸泄洪洞较长而被放弃，结果选定的左岸泄洪洞因地质构造的**

不利组合造成大坍方，地面坍塌面积达  $1000\text{m}^2$ ，坍方段长  $18\text{m}$ ，坍方量约  $5000\text{m}^3$ ，工程停工处理达数年之久。另外洞线选择必须考虑进出口水力学条件，如×××电站引水洞进水口位置选择不当，进水不均匀，低水头运行时进水口产生涡流，空气吸入洞内，影响出力，进入孔喷水。

总之，洞线选择是一个综合分析、比较的过程，布置上的欠缺是不易弥补的，不能在情况不明的情况下搞布置，不能片面强调某一方面因素，忽视全局。应通过可行方案的细致比较，合理选定。

**3.1.2 水工隧洞是枢纽工程的组成部分，每个枢纽工程的任务、作用都不相同，对枢纽工程中各种水工隧洞的要求也不相同。因此，各水工隧洞的布置应满足枢纽总布置的要求，综合各种影响因素，按各自的运行条件合理布置，才能发挥枢纽工程的总体效益。**

总结近年来高水头电站和长引水隧洞的设计经验(如广蓄、引大入秦、引滦入津、十三陵)，水工隧洞的上覆岩体厚度应该适中，而不是越厚越好。因为，随着水工隧洞埋深的加大，不仅增加了施工支洞布置的难度，也在施工条件(排烟、排水、坡度、通风)、临时工程、对外交通、检修条件、地应力等方面带来新的问题，有的工程甚至影响工期，增加工程投资。因此，只要隧洞能满足上覆岩体厚度和其他布置要求，不一定越深埋越好。

**3.1.3 避免相邻建筑物的不利影响是水工隧洞设计实践中多年来遵循的原则。不利影响包括相互间应力、变形、渗流、稳定、施工、运行、检修等方面的影响。由于水工隧洞的布置不当，产生上述这些问题不仅增加工程措施，也可能给运行留下安全隐患。所以，从布置上避免相互不利影响是最好的选择。**

由于地形地质条件的限制，或由于其他原因，经过技术经济比较，必须与其他建筑物交叉时，应采取可靠的工程措施，满足本规范 3.1.9 的规定。

**3.1.4 较大地质构造、软弱带、层面等对围岩稳定的影响，既包**

括这些结构面对围岩稳定的直接影响，也包括这些结构面的组合对围岩稳定的影响。

为了保证围岩稳定，发挥围岩的自稳能力和获得围岩的最大承载能力，在布置上，关键是洞线走向与围岩结构面及围岩最大主应力的交角。对中低地应力区，主要是洞线走向与围岩结构面的夹角，规范 SD134—84 在修订过程中对交角问题进行了专门的调研和分析研究，特别是对碧口四条隧洞、三条压力管道的稳定性和承载能力分析后，在条文中规定“在整体块状结构的岩体中，其夹角一般不小于  $30^\circ$ 。在层状岩体中，特别是层间结合疏松的陡倾角薄岩层，其夹角一般不宜小于  $45^\circ$ ”。十多年来的工程实践证明该规定是合适的。对整体块状岩体交角按  $30^\circ$  控制，对层状岩体按  $45^\circ$  控制已经成为水工隧洞布置的一个共识，故本次修编仍保留了这种规定。

隧洞通过较大地质构造时，造成失稳的几率较大，除控制洞线与较大构造断裂面、主要软弱构造面夹角问题外，还应采取合理的施工方法、开挖程序、选择适宜的支护（衬砌）型式、研究受力条件更好的断面形状、控制运行方式等，甚至采取特殊的施工手段和围岩加固措施。无论采用什么样的方法、措施，都涉及到工程工期、工程投资和工程效益，故应该通过多种方案的技术经济比较，选定合理、经济、安全的方案。

施工中水工隧洞都会遇到局部围岩不稳定问题，有些局部不稳定问题在隧洞布置阶段可以预测，但大多数是在开挖过程中逐渐揭露出来的。近年来国内在处理局部不稳定问题上积累了很多成功的经验，总体来说，处理局部不稳定问题关键是地质预报（预测）和及时采取工程处理措施，而很少采用改变洞线的作法。因为一条合适的洞线是经过对各种因素综合分析比较后确定的，由于局部不稳定而改变洞线将会带来许多新的布置问题，是否要改变应经过慎重的技术经济比较。

**3.1.5 地下水造成围岩稳定条件恶化，甚至引起局部失稳是近年来水工隧洞设计、施工人员的共识。国内几项较大规模围岩坍塌**

失稳或连续失稳的事例，多数由于有强渗透的含水层、裂隙水、强地表水补给、有强渗透通道等情况。如××电站炭质页岩段隧洞，施工中遇到地下水，岩体软化，围岩失稳，冒顶大坍方。总结近年来一些围岩失稳教训，对条文中给出的几种不利地质结构、地质构造，在地下水活动的影响下，将更容易造成围岩失稳，应引起设计人员的高度重视。

对有地表水强补给的冲沟，一是容易造成围岩失稳，二是施工期外水内渗，工程上处理很困难，运行期的外水压力可能较大。最好的方法宜在布置时避开这种冲沟。

**3.1.6 岩体的初始地应力状态**，是目前地下工程设计和施工中应考虑的主要因素之一。理论与实验研究表明，岩体应力与围岩稳定关系十分密切，洞轴线应垂直地质构造线或与地质构造线保持较大角度，高地应力地区还应注意与最大水平地应力方向。SD134—84 修订时结合二滩电站的地应力资料进行了分析研究。结果表明，由于水平方向两个地应力分量差别较大，如果洞轴选在最大主应力方向，边墙将受到小的侧向压力，若选在垂直最大主应力方向，边墙受到的侧压力大，两者相比，后者边墙上单位面积所受的侧压力为前者的 1.57~3.63 倍。SD134—84 规范修订说明中还例举了中国科学院湖北岩土所调查 87 处矿山巷道的变形破坏情况，这些巷道的轴向，与最大主应力方向的夹角都较大，绝大多数都大于 60°或接近垂直，属于侧压力破坏的占 56%，属于顶部受压破坏的只占 11%，很有说服力的说明，高地应力地区洞轴线应与最大水平地应力方向呈较小夹角。

**3.1.7 规范 SD134—84 在修订中针对水工隧洞的进出口最小覆盖厚度问题**统计了 20 个工程的资料，其洞顶围岩厚度与开挖洞跨的比值，最小为 0.1，最大为 0.9，由于采取了合理的施工程序和工程措施，这 20 座进出口不仅都成功建设，而且多年来运行正常。实践证明，对进、出口覆盖厚度不做具体规定是合适的，既有利于节省明挖工程量，又便于采取合适的工程措施，以保证施工和运行安全。

有压隧洞，作为承担内水压力的结构统一体，应同时满足覆盖层不上抬、不发生水力劈裂和渗透失稳破坏。作为一个宏观的控制概念，最小覆盖厚度可以含有上述三层意思，但却不能完全替代上述三方面要求。

SD134—84 规定的“上抬理论”，及近年来应用挪威准则、雪山准则确定覆盖厚度，其实质都是抗抬理论，即内水压力与垂直向岩体重力的比值。“上抬理论”与挪威准则、雪山准则的不同之处在于采用了不同的安全系数和是否计及山谷、边坡影响。尽管用抗抬理论确定围岩覆盖厚度存在不少问题，但它却能给出一个具体指标，使用比较方便，故国内外仍然用该理论确定围岩厚度。按抗抬理论，几个国家对有压隧洞覆盖厚度的取值规定列于表 1 中。

表 1 几个国家对有压隧洞覆盖厚度的规定值

国家	工程名称	围岩厚度		适用条件
		垂直向	水平向	
美国	哈斯及奈恩太哈拉隧洞	$D=1.0H$		不衬砌有压隧洞
加拿大	某隧洞	$D=0.6H$	$1.5H$	要求钢筋混凝土衬砌
澳大利亚	雪山电站	$D>H$		可不衬砌
奥地利		$D>(0.6\sim0.64)H$	$>2H$	岩石坚硬且不透水时可不衬砌
挪威		$D>(0.4\sim0.6)H$		可不衬砌
中国	古田二级	$D>0.7H$		岩石完整时可不衬砌
	云南、广东地区	$D>H$		

注： $H$  为隧洞内最大内水压力水头 (m)。

由表 1 看出各国的标准不同，使用条件也不相同。考虑到我国地域广大，区域性地质条件差异较大，以及不同衬砌型式对围岩的抗渗能力和应力重分布的影响，本规范给出对不同衬砌型式有压隧洞覆盖厚度的要求值。对围岩较完整无不利结构面的地质

条件，采用混凝土或钢筋混凝土衬砌时，规定覆盖厚度不小于 0.4 倍内水头，此值相当于原 SD134--84 按“上抬理论”的控制值。当无衬砌或锚喷衬砌时，考虑到防止发生水力劈裂和渗透失稳的要求，考虑到地质条件的复杂性，特别是岩层结构对稳定条件的影响，将最小覆盖厚度的规定提高到不小于 1.0 倍内水头，留有安全裕度。

应用挪威准则式 (3.1.7) 进行最小覆盖厚度判断时涉及到边坡角高限角度的取值问题，在挪威该角取  $60^\circ$ ，我国有些工程也延用过。该准则是挪威用以判断不衬砌隧洞的经验准则，挪威为典型的硬岩地区，坡角陡于  $60^\circ$  的高岸边坡在挪威是少见的，岩体表面风化层的厚度不大，一般来说地形地质条件比我国好些。考虑到我国地形地质条件的复杂性，从使用条件上讲，作为经验判断准则，取边坡高限角为  $45^\circ$  是合适的。即若不计安全系数，取岩石容重为  $25\text{kN/m}^3$ ，最小覆盖厚度应大于 0.56 倍内水头，此值接近表 1 中的挪威规定值。

挪威准则 1971 年修正公式中没有安全系数 ( $K$  值)，近年来国内外不同工程在应用该经验准则时都增加了  $K$  值，但由于地形地质条件的差异，取值也各不相同。作为宏观控制的简单判断公式，系数  $K$  还不是真正意义上的安全系数，故本次修编时定名为经验系数。考虑取  $\gamma_r = 25\text{kN/m}^3$ ， $\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$ ， $K = 1.1$  时， $D > 0.616H$ ，略大于挪威规定值，且与其他国家相近（见表 1），故取  $K = 1.1$ 。

不发生水力劈裂和渗透失稳是水工隧洞的设计原则之一，在水工隧洞布置阶段可用上抬理论确定最小覆盖厚度，但该最小覆盖厚度不能保证不发生水力劈裂和渗透失稳。如  $\times\times$  电站发电引水隧洞在 80m 水头时，高压水沿衬砌和围岩裂隙冲出，形成泥石流，冲毁开关站，淹没厂房。因此，条文规定高水头隧洞应在确定覆盖厚度时保证围岩不产生水力劈裂和渗透失稳。

高压水工隧洞按不上抬覆盖层、不发生水力劈裂和不发生渗流破坏来确定覆盖厚度时，用有限元数值分析可以考虑复杂的边

界条件，不同的岩性、物理力学参数、主要构造的影响和初始地应力分布，还可计及不同衬砌结构的作用，故宜采用有限元数值分析来复核最小覆盖厚度。但考虑到各使用单位的条件和计算工作量，仅给出在初设和技施设计阶段进行有限元分析。

**3.1.8 确定相邻两隧洞间岩体最小厚度是个复杂的问题，目前还没有成熟的分析方法，也没有绝对标准。只能根据地质条件、布置要求、内水压力大小、围岩的应力状态、隧洞的断面形状和尺寸、施工方法和运行条件等因素，并参照已有工程的经验，综合分析确定。规范SD134—84修订时统计了国内部分工程的岩体厚度，大都在1倍开挖洞径以上，故规定“岩体的厚度不宜小于2倍开挖洞径，经分析岩体较好时可适当减小，但不应小于1倍的开挖洞径”。十多年来按此规定，国内的水工隧洞还没见因岩壁厚度不够产生失稳的报道。**

随着高水头、大直径水工隧洞的发展，岩壁厚度问题越来越引起人们的重视，一般都通过不同力学模型的有限元分析，以岩壁间的岩柱应力在最不利工况下不超过该处岩石的允许应力和不产生过大或不收敛变形为限定条件。

有关水力劈裂和渗透失稳的要求是近年来水工隧洞设计、施工、运行经验的总结，相对来说相邻隧洞洞间岩壁的工作条件不如单洞，发生水力劈裂和渗透失稳的几率更大，在布置和工程措施上应引起重视，留有足够的安全裕度。受条件限制时应采取必要的工程措施，以保证施工和运行安全。

**3.1.9 对由于布置或其他原因必须穿越坝基、坝肩或其他建筑物（如路基、已有建筑物、铁路或公路隧洞、渠道基础、河堤等）基础的水工隧洞，规定围岩有足够厚度，这里既包含被穿越的建筑物和水工隧洞的结构问题，又包括隧洞与建筑物之间的围岩稳定。因此，应通过必要的分析、计算，留有足够的厚度，如果因地形、地质或其他原因满足不了要求时，应采取妥善的工程措施。**

**3.1.11 规定沿河傍山地段的土洞向山里侧内移主要考虑三种影响：其一，防止土洞渗水引起山体滑坡，也防止山体滑坡造成土**

洞破坏；其二，防止出现偏压，偏压易使土洞在施工和运行中出现不易控制的危险；其三，由于土岸河谷易受洪水冲刷，以至产生一些塌岸、深切、滑坡等不利地质现象，影响土洞的稳定和安全，甚至造成危害。因此在土洞布置时宜使洞身离岸有较为可靠的距离，由其他原因内移受到限制时应采取可靠的工程措施。

内移距离因受地形、地质、地下水等多种因素影响，很难有明确规定，宜视具体情况经分析计算和工程类比确定。

**3.1.12 隧洞平面布置应力求直线**，这样洞线最短、工程量最小，对洞内水流条件有利，且施工方便。但由于种种原因不可能都布置成直线，如：实际工程中出于总体布置的需要，为增加埋深，为避开不良地质条件，为便于设置施工支洞或满足检修要求等洞线都可能出现弯段。水工隧洞平面布置采用曲线时，其弯道的缓急对隧洞的流态、压力分布、水头损失和施工难易都有影响，具体表现为弯道的几何特性，即弯道的转角和弯道的半径。目前国内外的规范大都规定，在低流速隧洞内弯道的转角不大于 $60^\circ$ ，弯曲半径不小于5倍洞径（或洞宽）。原规范SD134—84在修订过程中，从水力学角度对一些资料进行了分析研究，了解到无压隧洞在低流速时，有的资料反映曲率半径等于5倍洞径时，其损失系数较小。而洞线转角越小其损失系数越小。资料还显示，转角采用不大于 $60^\circ$ ，曲线半径不小于5倍洞径（或洞宽），运行中未发现异常现象。由此，规范SD134—84中规定低流速无压隧洞转弯曲线的几何参数限定为“转角不大于 $60^\circ$ ，半径不小于5倍洞径（或洞宽）”。对低流速有压隧洞可适当降低要求。这些规定一直沿用至今为隧洞设计者所遵守。

规范SD134—84在修订过程中对高流速无压洞设置平面弯的问题进行了研究，通过工程调查发现高流速无压洞极少设置平面弯，否则将出现许多水力学问题。如石头河水库左岸明流泄洪洞（具体参数见表2），由模型试验观测到，当流速为 $27\text{m/s}$ 时，断面左右最大水面差达 $5\text{m}\sim 6\text{m}$ ，弯道末端虽设有 $40\text{m}$ 直线段，其挑坎水流仍受弯道影响而不均匀。

对高流速有压洞弯道不仅使弯道压力分布不均，如碧口电站左岸泄洪洞试验给出，在流速  $21\text{m/s}$  情况下两侧压差达  $4\text{m}$ ，至弯道末端 5 倍洞径处仍有  $1.5\text{m}$  压差，而且由于在弯道的凸、凹弧侧均存在涡流和弯道全弧段的二次环流（涡对），使水流条件更加复杂，水损更大。故规定高流速有压洞设置平面曲线时，其转角和弯曲半径宜通过试验确定。

对高流速的界定，SD134—84 给出  $16\text{m/s} \sim 20\text{m/s}$ ，是在统计资料的基础上给出的，国外多以大于  $10\text{m/s}$  为高流速隧洞的界定值。考虑到高流速隧洞主要涉及泄洪洞、导流洞、放空洞的冲刷问题，虽然近年来由于技术进步（如掘进机施工、控制爆破、钢纤维喷射混凝土、钢模台车等）使隧洞的起伏差有所降低，提高了抗冲蚀能力，故本次修编时仅将 SD134—84 规定中的范围取为上限  $20\text{m/s}$ ，使规范有延续性，又可引起设计重视。

表 2 给出了国内部分工程水工隧洞平面弯道几何特性值。

表 2 隧洞平面弯道几何特性值

序号	工程名称	洞内流态	洞径 (或洞宽) (m)	洞内流速 (m/s)	弯道转角 $\theta$	弯道曲 率半径 $R(\text{m})$
1	石头河泄洪洞	无压	$7.2 \times 8.36$	$30 \sim 37$	$40^{\circ}00'00''$	150; 300
2	碧口水电站左岸泄洪洞	有压 无压	$D=10.5$ $10 \times 12$	19.7534	$56^{\circ}05'00''$	80
3	碧口水电站排沙泄洪洞	有压 无压	$D=4.4$ $5 \times 4.8$	24	$55^{\circ}00'00''$	200
4	冯家山水电站右岸泄洪洞	有压	$D=5.6$	$23 \sim 27$	$25^{\circ}00'18''$ $06^{\circ}10'32''$	60
5	绿水河泄洪隧洞	无压	$3 \times 4.5$		$54^{\circ}00'00''$	80; 160
6	猫跳河四级泄洪隧洞	有压	$D=5.5$		$30^{\circ}00'00''$	80

续表

序号	工程名称	洞内 流态	洞径 (或洞宽) (m)	洞内流速 (m/s)	弯道转角 $\theta$	弯道曲 率半径 R(m)
7	三门峡水库排 沙泄洪隧洞	有压 无压	D=11 9×12	22.4	75°00'00"	65
8	新丰江水库泄 洪隧洞	有压 无压	D=10 10×12	21.65	60°30'00"	150
9	南水泄洪隧洞	有压	D=5.4	21.79	66°04'00"	100
10	松涛泄洪隧洞	有压	D=5~5.6		27°40'00"	45
11	花凉亭泄洪隧洞	有压	D=8	10.84	30°55'18"	50
12	丰满水电站 2 号泄洪隧洞	有压 无压	D=9.2~10.2 8.5×10.5		61°35'35"	120
13	丰满水电站 1 号泄洪隧洞	有压 无压	D=9.2~10.2 8.5×10.5		53°23'28"	100
14	渔子溪一级发 电引水洞	有压	D=5;6.4	3.52	16°30'00" 45°00'00"	50;60
15	映秀湾水电站 发电引水隧洞	有压	D=8.0 9.2×9.2	6.35	13°06'31" 14°35'21"	40
16	小江水电站发 电引水隧洞	有压	3.4×3.904 D=3.0	4.1	45°27'46.3"	17
17	六郎洞水电站 发电引水隧洞	有压	D=3.5	3.36	26°30'00"	
18	南水水电站发 电引水隧洞	有压	D=5.5	3.47	08°47'52" 66°04'00"	104;6.6
19	潭岭水电站发 电引水隧洞	有压	D=2~2.6	1	27°43'23" 16°42'12"	150

续表

序号	工程名称	洞内流态	洞径 (或洞宽) (m)	洞内流速 (m/s)	弯道转角 $\theta$	弯道曲率半径 $R(m)$
20	古田二级发电引水隧洞	有压	$D=6.4\sim 6.9$	1	$46^{\circ}35'0.683''$	100
21	安砂水电站发电引水隧洞	有压	$D=7.5$	4.85	$59^{\circ}39'16''$	40
22	湖南镇水电站发电引水隧洞	有压	$D=7.8$	3.77	$30^{\circ}00'00''$ $36^{\circ}00'00''$	150
23	花凉亭水库发电引水隧洞	有压	$D=7.5$	2.72	$00^{\circ}55'18.5''$	50
24	太平哨水电站发电引水隧洞	有压	$10\times 10.2$	5.24	$28^{\circ}32'11''$ $21^{\circ}00'08''$	50
25	尼什峡水电站发电引水隧洞	无压	$4.4\times 4.35$	$1.61\sim 1.97$	$46^{\circ}30'00''$ $59^{\circ}57'00''$	20
26	莲花水电站发电引水隧洞	有压	$D=13.7$	4.49	$22^{\circ}00'00''$ $32^{\circ}00'00''$	50,100
27	小山水电站发电引水隧洞	有压	$D=8.1$	4.04	$36^{\circ}42'41.2''$ $20^{\circ}23'28.8''$	35,50

**3.1.15** 水工隧洞的纵坡坡度涉及到水力学条件、施工方法、施工运输、施工排水、运行和检修要求，应进行综合各种因素分析决定。

对无压洞纵坡坡度直接影响过流能力、压力分布、断面选择、空蚀特性，特别是陡坡对高流速无压洞不利，应引起注意。

在有压洞中设置平坡，若隧洞自由出流，则在平坡末端会出现压力余幅不足，且平坡对施工和检修排水都造成困难。故设计中最好不设平坡。

隧洞无论是有压还是无压，设置反坡时不但影响过水水流，还存在淤积和排水问题，尤其对水中泥沙含量较大和存在遇水易软

化的岩层时影响更大，故不宜设置反坡。

考虑到高水头地下电站、大型泵站、抽水蓄能电站的安装高程都比较低，不可避免地使尾水洞出现反坡，将规范 SD134—84 中规定“避免设置反坡”，改为“不宜设置平坡和反坡”。

**3.1.16** 泥沙问题是个复杂的问题。二维计算成果还不能很准确地反映实际冲淤分布，故多沙河流上排沙洞的布置不使用计算解决，有关布置问题规定用水工模型试验确定。

**3.1.17** 施工支洞多为临时工程，其地质条件往往不如主洞，设计和施工中施工支洞对主洞的影响问题容易被忽略。工程中由于主支洞交叉口的施工措施不当、支护（衬砌）结构设计不周、支洞封堵不严造成后期处理，甚至影响主洞正常运行的事例都有报道。由此，在该条文中增加了“地质条件较差时，应研究施工支洞对主洞的影响”的规定，以引起重视。

## 3.2 进、出口布置

**3.2.1** 进、出口布置包括位置和型式选择，是隧洞布置的重要一环。进、出口布置应做到以下几点：

1 满足枢纽总体布置的需要，处理好与相邻建筑物的关系，避免相互不利影响；

2 根据地形地质条件，选择适宜的位置和适宜的结构型式，保证施工和运行期工程安全；

3 满足隧洞运行对进、出口的要求，注意进水出流的平顺，进、出口与上、下游水流的衔接，避免或减少淤积、冰凌、泥沙、污物、冲刷等对进、出水口，水工隧洞，相邻建筑物的影响；

4 便于进、出水口结构、边坡、设备的施工和运行管理，便于设备安装、检修，便于结构及边坡的维护；

5 方便施工、节省投资、节省运行和维护费用。

**3.2.2** 本条给出布置进、出口较适宜的地质条件，应注意如下几点：

1 进、出口选在有基岩出露，地质条件较简单，风化较浅、

覆盖厚度较小、无顺坡不利结构、岩石新鲜完整部位，对进口边坡和隧洞进口段有利；

2 岩体产状对进口边坡影响较大，反倾向岩体对洞口稳定有利，但需注意局部崩塌问题，顺坡岩体应分析能否产生不稳定滑坡体；

3 在岩脉、断层、破碎带、软弱卸荷带且风化较深碎裂岩体和不良地质地段，不宜布置进、出口；

4 在崩塌、冲沟、危崖、滑坡等地区不宜布置进、出口。

3.2.3 当地形地质条件比较复杂，在布置上不能全部满足进、出口及隧洞布置要求时，考虑到隧洞受地形地质条件限制较多，不宜有较多的平、剖面变化，不宜采用过多的断面型式，相对来说，改变进、出口的布置比改变隧洞布置方便。因此要求进、出口布置时应充分考虑与其连接的水工隧洞在布置上的要求，既不是先定洞线后选进、出口，也不是先定进、出口后选洞线。应经过综合论证和技术经济比较后确定。

国内已建工程中不少例子说明改变进、出口布置，以适应地形地质条件，同时满足进、出口和水工隧洞的要求是可行的。小浪底多进口布置就是最成功的一例。

3.2.4 进、出口边坡给工程带来的很多问题中，主要是高边坡稳定问题。高边坡处理措施复杂，工程投资大，影响进、出口施工，甚至影响工期。虽然近年来岩锚加固技术有了很大进步，但保持自然稳定状态，少开挖边坡，不造成高开挖边坡应该是最好的方案。

3.2.5 对进、出口除开挖边坡外，应有必要的清坡范围，特别是存在较厚覆盖层和全风化层的边坡，其下部或侧部经过开挖扰动，在自然因素作用下其覆盖层、坡积物、松动岩块很容易滚落到进、出口影响进、出口的正常运行。

一般进、出口洞顶和两侧的分水岭范围都较大，在分水岭范围内全部清坡工程量较大，故通常采取设挡墙、挖马道式平台、设网格式植被保护带、喷射护坡混凝土等工程措施与部分清坡相结

合的方式处理，以保证进、出口运行的要求。

**3.2.6 土洞洞口地形及土质条件对洞脸及两侧边坡的稳定和减少进口部位工程投资影响较大，一般宜“早进洞，晚出洞”，这是多年来土洞建设的总结。一些统计资料表明，土洞边坡的开挖高度不大于10m时较易稳定，超过这一高度的边坡，特别是高边坡，应特别注意，一旦发生滑坡或坍塌，不仅处理困难，也将影响运行，故要通过边坡稳定分析决定边坡高度和所采取的工程处理措施。**

土洞洞口如果布置在卸荷带上，即使没有水库形成后的浸泡，仅施工干扰、新临空面的出现、支撑体的破坏就极易引发崩塌和滑动，工程处理难度很大，故土洞洞口应避开卸荷带布置。

**3.2.7 与土洞相接的渡槽、岩洞等建筑物，其衔接处基础多为硬软基础分界，易受不均匀沉降、洪水冲刷及冻胀等作用造成破坏，故应在此部位设永久缝（沉降缝和伸缩缝），以保证相连建筑物的正常运行。在寒冷地区洞口基础有冻胀破坏问题，基础埋深应适当加深，应满足SL211—98《水工建筑物抗冰冻设计规范》的规定。**

**3.2.8 有压泄水隧洞的出口段体形对隧洞的压力状态起控制作用，规范SD134—84修订时，对有压泄水隧洞出口段的体形作过较深入的研究。理论和试验均证明，为不使隧洞洞身出现负压，隧洞出口段需采用收缩型。较长有压泄水洞，或者洞身沿程体形变化较多的有压泄水洞，因洞内水头损失较大，出口断面应多收缩。但过大的收缩将影响泄流能力，故对出口段的设计应遵循既要保持洞身的有压状态，又不致过大降低泄流能力的原则。本条中给出的收缩数值是根据工程经验和试验成果提出的，与规范SD134—84规定相同，该规范执行至今还没有出现不适宜的报道。**

出口洞段的底坡如果加大或作成跌坎，出口洞段的边墙突然扩散或扩散角过大，都将造成急流跌落或急流脱壁，使洞顶、洞底、边墙出现负压区，易产生气蚀破坏，对高流速有压洞产生气蚀破坏的可能性更大。故要求出口洞段的底坡宜平缓，侧向扩散

宜平顺，注意与下游水流的良好衔接。由于布置或其他原因，必须采取突扩或跌落时（如小浪底枢纽的排沙洞出口），应经过水工模型试验验证。

当泄洪洞出口邻近主河道或主流时，若两股水流发生对冲，不仅影响泄洪能力，而且对冲刷、岸边稳定都不利，应通过适宜的导向措施防止水流对冲。

**3.2.9 泄水隧洞主要涉及泄洪洞、导流洞、冲沙洞、放空洞，出口消能防冲建筑物的设计原则与溢洪道消能防冲设计是相同的。但泄水隧洞出口消能防冲问题也有本身的特点，如：泄水隧洞出口消能上的共同点是单宽流量大，能量集中，对下游河床或河岸的冲刷力大；泄水隧洞一般都与河道有一定的夹角，下泄水流不可避免地存在回流和折冲问题；受出口高程限制泄出水流的入水角度都比较小。因此，泄水隧洞出口消能防冲建筑物布置时应考虑本身的特点并仔细研究地形、地质条件，相对来说对地形条件的适应性比溢洪道更重要。**

总结国内的工程实践，由于泄水隧洞出口高程一般较低，以及下游河道的水位变化较大，消能防冲型式多采用挑流消能和底流消能。挑流消能多用于高水头隧洞，底流消能多用于中低水头隧洞，隧洞出口一般都进行扩散，以减小单宽流量，削减水流的冲击力。采用底流消能对地基条件的适应性较广，但工程投资较高。挑流消能结构简单，工程费用较少，但对下游基岩要求较高，且在出口高程选择时有一定的要求，以免下游高水位时水流挑不出去。如果下游水位比较稳定，水深比较适宜时，采用适当的护岸工程后，也可采用面流消能。

国内近年来重视和研究挑流消能的泄洪水流雾化、溅水、泥化等对下游相邻建筑物的影响问题，泄水隧洞出口采用挑流消能时也存在同样问题，只是程度不同。从目前的研究成果看，关键是在消能设施布置阶段即注意这些问题，从源头抓起比后期处理要好得多。

SL253—2000《溢洪道设计规范》中对消能防冲建筑物在布

置、型式、结构、防冲要求及对下游建筑物影响等诸方面都有较详细的规定，这些规定均适合泄水隧洞的出口消能设计，故本规范不再引用，仅规定执行该规范。

**3.2.10** 强调泄水洞出口位置选择，主要考虑两个方面问题：其一是泄水隧洞出口泄水消能对基础、岸边及其他建筑物的影响，以及泄水隧洞本身的运行条件能否满足；其二是当枢纽设置其他溢流泄洪设施或采用其他度汛措施时，若泄水隧洞出口位置选择不当，当泄水隧洞与其他泄洪设施同时泄流时，可能出现两股或多股水流遭遇、冲淤范围重叠、冲坑与折冲淘刷并存等，这些都将使下泄水流流态复杂，基岩和岸边稳定条件恶化，有些还会对相邻建筑物产生重大影响。因此，泄水建筑物的出口位置应通过技术经济比较确定。

由于地形地质条件、布置和水力学问题很难用工程类比和计算解决，国内对同时布置泄水隧洞和其他泄洪设施的枢纽，一般都对布置方案、泄水能力、消能方式进行水工模型试验验证。

**3.2.11** 在无压洞中高速水流水面以上的空气会随同水流下泄，表现为强烈的气流运动。水面以上的空气不断被带走，必须有足够的空气补充，否则水面以上的空间将会出现不稳定的或脉动的负压状态，不仅使水流流态不稳，也可能使结构产生振动。在有压洞中，隧洞充水时洞内水流由明流（无压）变为有压流，隧洞逐渐充满，洞内气体需要排除，如果排气不畅会造成压缩气团，甚至引起爆炸性水体喷发，影响结构、设备、人员安全；有压洞排水时补气不足会造成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的正常运行，甚至对结构造成影响。故水工隧洞应估算必须的通气面积，并留有余地。

规范 SL74—95 对通气、补气的规定是具体的，通气面积计算应按该规范进行。

**3.2.12** SD303—88 包括了水利水电工程各种进水口的设计，故本规范中将重复内容删掉，设计中对有关进水口的规定除本规范外应执行该规范。

### 3.3 多用途隧洞的布置

3.3.1、3.3.2 临时与永久结合，一洞多用是减少单项工程、降低工程造价的有效途径。但是，不同用途的隧洞，其工作特点、水力学特性、设计条件都不相同，合二而一或一洞多用必然会出现矛盾，如何兼顾，需要对其合理性进行技术经济论证。如导流洞与发电洞结合是经常采用的临时与永久相结合的形式，从技术条件看，若不布置龙抬头，则进水口底板高程由导流要求控制，使发电洞的引水低压洞段设计水头有较大改变，特别是死水位与截流水位相差较大时，将使引水低压洞段的设计水头提高，影响进水口启闭设备、检修闸门、低压洞段的运行条件和工程投资，同时围堰拆除的残渣会增加初期发电的过机泥沙含量。从经济条件看，导流洞与发电洞分开布置一般为平行工期，相结合则占直线工期，若采用龙抬头方式又往往使蓄水后发电洞的工期很紧张，甚至延长总工期。与此同时，为满足导流和发电的不同运行要求，相结合洞的衬砌结构通常是按发电要求设计，而断面尺寸又由导流要求决定，由此往往增加隧洞的前期投资，对还贷不利。总之，随着市场经济的发展和投资来源的变化，临时与永久相结合，一洞多用隧洞的技术经济比较尤为重要，宜经过合理性论证后采用，并非结合就好、一洞多用就好。

3.3.3 20世纪50~60年代，在泄洪期较短、发电容量不大的中小型水利水电工程中，泄洪与发电相结合的隧洞采用的较多。发电与泄洪结合存在的主要问题是：泄洪流速大、水头损失多、使发电有效水头减少；分岔处水流紊乱，常出现负压区，容易出现气蚀破坏。若采取主洞泄洪、支洞发电、改善分岔段角度和体型、发电洞有足够的稳压或调整洞段、泄洪洞出口适当收缩等工程措施，可适当减少泄洪对发电的影响，发电洞宜布置在支洞上。泄洪流量大、泄洪时间长、泄洪频繁、洞线较短、对发电有严格要求的电站，即使采取较多工程措施，也较难平衡各自要求，不易保证各自的稳定运行条件，故大型工程不宜采用泄洪与发电共用

隧洞。

**3.3.4** 在布置主、支洞时应选择合适的分岔角。从水力学上看，分岔角越小，则流态越好，岔管处水流分离区小，水头损失小。但从结构上看，过小的分岔角使岔尖过窄，二洞间所留岩壁较薄，不仅施工困难，很难保留岩体的完整，而且对结构强度不利。目前已建工程中分岔角多在  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$  之间，绝大部分小于  $50^{\circ}$ ，设计时应满足布置和结构要求的条件下采用较小的分岔角。

**3.3.5** 在主洞与支洞分岔部位，由于边界的突然变化及水流本身的惯性作用，引起水流紊乱，流态比较复杂。一些工程的模型试验表明，在单独泄洪时，无论主洞泄洪还是支洞泄洪，都需要在发电洞与分岔段之间有 10 倍以上的调整洞段，才能使发电洞有个较稳定的水区。当发电洞上设有稳压设施（调压室、减压阀、泄水阀等）时，由于设施的稳压作用（如穿井压力或稳压水体），岔管部位的瞬变流特性与一般不设稳压设施时有很大不同，但其稳压作用的大小、水力学条件目前尚难通过数值计算解决，分岔段局部水工模型试验也难反映稳压设施的作用，故根据国内的工程经验提出应通过整体水工模型试验确定分岔位置、型式、分流比的要求。

泄洪洞出口收缩是控制洞内流速和提高分岔段岔档处压力的有效措施。规范 SD134—84 在分析工程原型观测和试验资料的基础上提出泄洪洞出口断面收缩面积的百分数，即主洞泄洪时出口断面面积小于洞身面积 85%，若支洞泄洪出口断面面积小于洞身面积的 70%。该规定一直被设计遵守，没见不良运行的报道。

**3.3.6** 旋涡消能在 20 世纪 50~60 年代有所应用，比较适合中小水电站的内部消能。目前我国已经开展较大流量旋涡消能的研究，模型试验已经达到泄量  $1000\text{m}^3/\text{s}\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$ ，四川泯江上的沙牌电站正在建设泄量  $256\text{m}^3/\text{s}$  的旋涡消能工程。

近年来，孔板消能在我国开始研究和采用，黄河小浪底枢纽的试验和应用证明效果是好的。但该种消能工需进行水工模型试验（包括减压箱试验），在有条件的工程中可通过试验和论证采用。

## 4 隧洞压力状态及洞型尺寸

### 4.1 压力状态选择

4.1.1 水电站的引水隧洞位于机组进水侧，采用有压洞可以有效地减弱水流振动、水压脉动、水流掺气涌波等不良水力学现象的影响；结构受力状态比较稳定，有利于机组稳定引水，故建议采用有压洞。水电站的尾水隧洞位于机组出水侧，从防止机组上抬和尾水管气蚀角度，尾水隧洞采用无压洞对机组运行有利，且尾水洞的结构简单、造价低，故建议在可能的条件下采用无压洞。

发电洞是否采用调压（减压）设施取决于发电输水系统的水力学特性，应按 DL/T5058—96《水电站调压室设计规范》的规定进行判断和设计。强调有压尾水洞考虑是否设置尾水洞压室，是因为当尾水洞为有压时，设置调压室的水力学条件应包括引水、机组、尾水全长计算，而尾水为无压洞时仅包括引水和机组两部分。两者计算边界不同，成果差异较大，应引起注意。

4.1.2~4.1.4 水工隧洞的洞内压力状态总是希望呈现一种型式，即有压流或无压流。如果在正常运行中隧洞内出现明满流交替，一般将要出现振动、空蚀、掺气和脉动压力等作用，对隧洞的过流能力、结构的受力状态、隧洞周围建筑物都会产生不利影响。盐锅峡导流底孔明满流过渡，将 3m 厚混凝土墩穿透；印度巴克拉坝右岸导流洞明满流过渡，冲毁闸门室和隔墙，造成厂房被冲，10 人死亡。有压洞留有 2.0m 水柱的压力余幅是几十年来我国设计一直沿用的标准，也是保证这一要求的重要措施。

高流速泄水隧洞的水力学条件比较复杂，气蚀问题是工程设计中较难解决的问题之一，明满流过渡或明满流交替运行产生的负压造成气蚀破坏的可能性更大，工程上很难处理，故高流速泄水洞严禁采用明满流交替运行。

低流速的泄水隧洞在校核洪水位时允许出现明满流交替运行

状态，无压洞的出口在汛期也允许出现明满流交替运行状态，主要是因为运行时间短，出现的几率较少，都属非经常性运行。设计时考虑这种工况，采取了工程措施，不会对工程结构造成危害。实际工程中也有成功运行的实例。但是在可能的条件下还应采用单一压力状态。

导流洞为临时建筑物，在设计过流能力下明满流过渡以及明满流交替运行不致使隧洞破坏、不影响过流能力时，可采用明满流交替运行。设计时应注意交替运行及过渡时掺气、负压、振动、涌浪等水力现象对过流能力、隧洞洞壁结构的影响。

**4.1.5** 因土的弹抗值低，且隧洞渗漏会引起周围土质恶化，土洞宜做无压隧洞。但因总体布置要求需建有压洞时，应视内水压力的大小、土质情况选择合适的衬砌型式，如有防渗措施的钢筋混凝土衬砌、钢板衬砌、预应力混凝土（或钢筋混凝土）衬砌，防止内水外渗造成土体物理力学性质的恶化，甚至洞周土体的渗透失稳。

## 4.2 横断面形状

**4.2.1** 通常选择隧洞横断面形状与洞线布置同步进行。隧洞的用途、地质条件、施工方法、衬砌结构的工作条件等各种因素都影响断面型式的选择，因此也是个综合比较的过程。比如圆形断面衬砌结构的工作条件较好，对地质条件适应性强，但对施工运输有影响，需要垫底或改变开挖断面，对无压洞圆形断面其涌浪、涌波、水面衔接等水力学特性不如方圆形断面。方圆形断面对地质条件的适应性不如圆形断面，在有压的情况下衬砌结构的工作条件不如圆形断面，但方圆形断面比圆形断面方便施工，无压情况下洞内水力学条件容易满足。因此，横断面形状和尺寸的选择应考虑各方面因素通过技术经济分析决定。

**4.2.2** 有压隧洞采用圆形断面，施工期围岩二次应力调整后应力状态较有利于发挥围岩的自稳能力；运行期圆形断面有压隧洞可更好地发挥衬砌结构与围岩联合承受内水压力作用，衬砌结构的

应力状态比较均匀，工作条件较好，故建议有压隧洞在可能的条件下采用圆形断面。对围岩条件较好的低压发电隧洞，外水压力较小时也可采用方便施工的方圆形断面。

建议地质条件较好时无压洞采用方圆形断面，主要是因为方圆形断面易于满足水力学条件和方便施工。所建议的断面高宽比是从多年来无压洞的设计和工程实践中总结出来的，原“66规范”规定沿用至今一直为工程所采用，未见因此失事的报道。

无压隧洞地质条件较差时采用方圆形断面可能出现底板或边墙的稳定问题，改为圆形或马蹄形对围岩稳定有利。如引大入秦工程中对围岩遇水膨胀的洞段，为防止边墙底脚和底拱变形过大引起失稳，将方圆形断面改为底拱为反拱的马蹄形断面，施工和运行情况良好。

**4.2.3** 实践和计算表明，在高地应力地区洞轴方向确定后，横断面形状对调整围岩在施工及运行期间的应力重分布，控制应力重分布与围岩强度之间的关系，即降低围岩应力集中，改善围岩受力条件，保持围岩稳定具有很明显的作用。仅就断面形态而言，垂直地应力大的地应力场中，断面形状的宽度可以选小一些，而高度可以选大一些。反之，垂直地应力小，水平地应力大的地应力场中，高度应小些，宽度应大些。

**4.2.4** 不同用途隧洞的水力学条件、运行要求、结构应力条件、施工要求都有较大差异，对共用段的断面型式不进行细致的比较论证，可能由于偏于某种要求而给工程带来技术上的隐患或者经济上的损失。如导流与泄洪相结合，导流受控于天然河道水位，泄洪受控于库水位，两者水头差较大，由此断面选择时就涉及到洞内的压力状态、洞内流速和泄量、闸门控制方式、不同工况下的水流流态、明满流过渡、防止气蚀、衬砌结构的应力、施工条件等问题。导流洞为临时工程，泄洪洞是永久工程，若完全按泄洪条件设计，则导流时的标准较高，前期投入大，占用直线工期较长，影响截流时间。若完全按导流条件设计，则泄洪时的水力学、结构应力、控制调度等问题不易解决，如何较好地满足各自运行

要求应进行综合比较分析。

**4.2.5** 由水力学和结构应力上的要求，水工隧洞不同断面之间应设置过渡段，为保证水流平顺，过渡段应采用平缓过渡。当过渡段前后两端断面的面积比一定时，对扩散型，过渡段越长扩散角则越小，越可减少水流与洞壁的分度程度，降低由水流紊乱造成的局部水头损失；对收缩型，水流不会与洞壁分离，过渡段加长对局部水头损失影响较少，所以收缩型过渡段长度不宜过长。规范 SD134—84 修订时对过渡段的收缩角进行了对比计算，由计算结果，其角度在  $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$  范围内水头损失系数小。由工程调查，将边界的最大收缩率或扩散率限制在  $1:8$  以内，过渡段长度以洞身直径或洞高的  $1.5\sim 2.0$  倍为宜，由工程运用情况看效果较好。故有压洞过渡段的圆锥角和其长度的规定仍沿用 SD134—84 的规定。

对高流速无压隧洞，除局部损失外，过渡段的体型直接影响水流流态和局部气蚀问题，不易以工程类比或一般分析确定，故提出由试验确定。

### 4.3 横断面尺寸

**4.3.1** 常规水电站、抽水蓄能电站、泵站等输水隧洞（引水洞、尾水洞）的洞径涉及到投入产出比和电站（泵站）的经济效益，应进行经济洞径论证。其原则和方法按 DL/T5015—1996《水利水电工程动能设计规范》的规定进行。

**4.3.2** 按现行灌渠设计规范 GB50288—1999《灌溉与排水工程设计规范》的规定，灌溉隧洞的断面应按加大流量设计。

**4.3.3** 计算泄洪洞横断面尺寸时应考虑各种可能出现的工况，即不同调度运行方式、控制闸门的开度、不同的上下游水位、是否与其他泄流（过流）遭遇等，保证泄放要求流量并使泄洪洞不出现不利的水力现象（如洞内出现负压、明满流交替、明流洞的涌波及涌浪漫顶、出现不稳定流等）。因此，确定横断面尺寸时为满足运行要求、水力学条件，并考虑施工和检修应进行技术经济

比较。

**4.3.4** 确定导流隧洞的横断面时，应考虑是否有其他的输送要求和水流条件的要求，如过木、通航、出口水流与天然河道的连接水位等，是通过导流洞输送，还是采用其他工程设施，都关系到临时工程的投资和施工工期，应通过技术经济比较确定。对过冰的要求，在寒冷地区有文、武开江两种方式，不同的开江方式对导流洞的泄流能力有不同影响，所要求的进口型式、断面尺寸都有不同。

**4.3.5** 多用途隧洞共用段的横断面尺寸，若要满足各种不同用途的要求，应该有一个控制性断面尺寸，该尺寸既不是各自要求的最大断面尺寸，也不是各自要求的最小断面尺寸，而应该通过技术经济论证确定。如临时与永久结合的隧洞，除技术、运行、施工等条件外，在前期投资、正常运行效益、总工期、贷款偿还等方面对断面尺寸都有影响。

**4.3.6** 最小断面尺寸应考虑施工要求。随着施工机械的发展，施工技术的进步，缩短了施工工期，减少了建设期利息，经济效益明显，故在断面尺寸确定时应考虑这种影响，通过技术经济分析决定断面尺寸的合理性。

**4.3.7~4.3.8** 无压洞水面以上的净空关系到泄水过程中是否发生明满流过渡问题，为防止出现满流状态、水面线以上都留有足够的空间余幅。规范 SD134—84 修订时，对空间余幅进行了工程调研和专门试验，并由国内外的统计资料给出了空间余幅的建议值。该规定一直沿用至今，工程效果良好。

高流速无压洞的水面以上空间余幅不仅关系到明满流过渡问题，还有水面掺气和水面以上空气被高速流带到洞外的问题，故比低流速无压洞复杂得多。由于布置不同、水流边界条件不同、初生空化数不同，仅通过工程类比和建议值还不足以保证断面尺寸及其空间余幅的可靠性，故建议高流速无压洞断面尺寸采用模型试验确定。

## 5 隧洞水力计算

### 5.1 计算原则

**5.1.2** 沿程损失计算中糙率系数如何选取是水工隧洞设计人员和运行人员最为关心的问题之一。混凝土和钢筋混凝土衬砌结构的糙率系数，经长期实践较为成熟，取值比较一致，但对不衬砌和锚喷衬砌隧洞，糙率系数的取值有不同意见。规范 SD134—84 修订时，对不衬砌和锚喷衬砌隧洞的糙率系数进行了统计分析，并利用半理论半经验公式进行了对比计算，推荐使用尼古拉池公式计算，同时建议采用美国陆军工程兵团和澳大利亚一些水电工程所采用的公式计算复合衬砌断面的综合糙率。但是规范 SD134—84 中所列举的国内外一些工程的设计值和实测值都比 DL/T5058—1996《水电站调压室设计规范》附录 A 的参考值小。需要强调的是，在地质条件允许时，不衬砌和锚喷衬砌应是积极推广的结构型式，但往往因为糙率系数取值较大，计算的水头损失、开挖支护衬砌量较大而不被采用，影响了不衬砌及锚喷衬砌隧洞的推广应用。因此，设计人员对不衬砌和锚喷衬砌隧洞的糙率系数取值应慎重研究后确定。除用半理论半经验公式估算外，主要还是参照已有工程进行类比分析确定。随着施工水平的提高，管理手段的完善，先进施工机械和施工方法的应用，设计人员应不断总结和分析糙率系数的变化，使其取值更符合实际。

较长水工隧洞多以沿程损失为主，较短隧洞局部损失所占比重较大，尤其是一洞多机的引水发电洞，多以局部损失为主，故对布置较复杂而局部损失所占比重较大或局部损失系数不易确定的隧洞，局部损失系数宜通过水工模型试验确定。

**5.1.3** 无压洞可分为长洞和短洞，对短洞其过流能力不受洞长影响，仅取决于进口型式，开敞式进口按堰流计算，深式有压进口按管流计算。无压长洞，泄流能力受洞长影响，应通过推求控制

断面的水面线后，计算过流能力。

**5.1.4** 水面线的计算方法很多，经调查分析，分段求和法计算较简单，设计中采用的较多，与实测值比较吻合，国内的计算机程序也多用此法，故仍推荐该法。

**5.1.5** 高流速、大流量、水流条件复杂的水工隧洞设计条件和运行条件都很复杂，很难用工程类比和计算分析确定设计参数和工程措施，而一旦失事或设计失误将造成较大甚至不易弥补的损失，故应通过局部或整体水工模型试验验证设计的合理性。

## 5.2 高流速的防空蚀设计

**5.2.1** 高流速泄水隧洞的空蚀现象比较复杂，主要与流速和边界条件有关，当过水边界遇有突变、突体、陡坎等断面急骤变化时，水流在边界将发生局部涡流和分离，使流速加大、压力降低，压力降到相应水温的汽化压力时，水流中形成空腔（空穴）或气泡，由压力降低至形成气泡的过程叫“空化”。空穴泡不断随水流运动，在下游较高压力区，由于水体的压缩使气泡突然溃灭，在瞬间以极大的压力冲击过水边界表面，造成破坏，即为“空蚀”。多年的研究和工程实践证明控制“空蚀”的关键是控制“空化”，一般用“初生空化数” $\sigma_i$ 判断。当水流流经的边壁几何形状（体型）一定时，就有一个空化的临界初始发生点，此时的水流空化数叫做“初生空化数”。对高流速的水工隧洞应通过水工模型试验确定体型，使水流空化数 $\sigma$ 大于初生空化数 $\sigma_i$ 。需要强调的是设计人员应注意沿程空化数的计算（附录A给出了空化数的计算方法），不能仅依靠模型试验确定的体型，需通过对比 $\sigma$ 与 $\sigma_i$ 值选择合适的工程措施，达到既控制空蚀，又节省投资的效果。

**5.2.3** 提出的五条防空蚀措施是多年来工程上行之有效的措施。

(1) 体型的合理性主要使水流边界满足阻力小、磨损少、不出现有害水流流态。从指标看，应使初生空化数 $\sigma_i$ 越小越好。

(2) 空蚀现象与隧洞边壁的不平整度有关，如果不注意边壁的光滑平整，在高流速水流作用下，即使体型合适也仍将可能产

生局部空蚀，甚至可能进一步发展扩大。不少发生空蚀破坏的泄水建筑物，多是由局部表面不平整引起的。规范 SD134--84 修订时的调查资料表明，在低压过水，流速大于  $15\text{m/s}\sim 20\text{m/s}$  时，当水流边壁表面有明显的凸凹不平，就可能发生空蚀，流速大于  $30\text{m/s}$  时，即使仅有  $3\text{mm}$  的不平整度，也应当防止空蚀。此外，升坎比跌坎、陡坡比缓坡更易发生空蚀。近年来的工程调查和水工模型试验表明应根据水流空化数的大小确定过流表面的不平整度和处理措施，其标准已列入在编的《水工混凝土抗冲磨防空蚀技术规范》中。

(3) 防空蚀措施除体型合理、控制初生空化数外，常用的还有掺气减蚀、采用防蚀和抗磨材料。当流速大于  $30\text{m/s}$  时，视时均压力大小决定是否采取掺气措施；当流速大于  $35\text{m/s}$  时，就必须掺气。防蚀和抗磨材料最近发展很快，也进行了大量试验研究。在编的《水工混凝土抗冲磨防空蚀技术规范》中对掺气和防空蚀材料都有较详细的规定，高流速泄水隧洞采用掺气和防空蚀材料时应按该规范执行。

(4) 合理的运行方式主要是控制泄水隧洞内的流态和负压，对明流洞防止发生涌浪、水击、潜水跃等不利水力现象，对有压洞防止过流初期的负压、脉动和正常泄流后由于调控闸门的操作不当造成水击和水流紊乱。对有出口收缩断面的有压泄水洞，应防止洞内可疑和潜在危险地段出现水流空化数不满足初生空化数的要求。

**5.2.4** 试验表明，含沙水流对混凝土表面的磨蚀率随流速、含沙浓度及浑水密度的加大而加大，随材料强度和掺气浓度加大而减小，故对多泥沙河流除正常的防空蚀设计外，过水表面应采用抗磨损材料。

## 6 隧洞支护与衬砌

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 本规范将支护与衬砌分开，明确支护设计作为隧洞的设计内容之一。支护即通常所称的施工期临时支护。支护的目的是加固围岩，提高围岩的自承能力，保证施工期的围岩稳定。一些不良地质洞段，开挖后围岩的变形速率大，出现失稳倾向或已经发生局部失稳，临时支护的措施应起到防止失稳扩大的作用，保证后续工作有足够的施工时间。

考虑到处理不良地质条件和不利构造组合时所采用的临时支护措施，可作为永久支护的一部分或全部，临时支护和永久支护既有区别又不能完全分开，为便于规范使用，对为施工期服务的支护采用“支护”用语，对保证隧洞围岩稳定及洞内良好水流条件的洞壁衬砌支护结构均采用“衬砌”用语。衬砌包括作为运行期使用的临时支护和为永久运行所采用的专门衬护结构。

**6.1.2** 衬砌结构满足水力学要求不单是减少糙率降低水头损失，还包括通过衬砌结构满足流态和压力等方面的要求，如不同断面型式的过渡要求，无压洞竖曲线的流态衔接要求，岔管的分流、压力、水损要求，过水边壁的空蚀要求，泄水隧洞的负压要求等。

环境保护要求是越来越被人们认识和重视的问题，作为枢纽工程的单项建筑物，水工隧洞设计时不仅要符合整个枢纽的环境保护条件，还应考虑水工隧洞本身的特点，如泄水洞泄水水流对周围环境的影响、水工隧洞施工期作为排水边界对天然地下水位的影响、施工期对环境的破坏和恢复等。此外，还要考虑内水外渗对环境的影响，其一是渗透稳定问题，不能造成滑坡、坍塌等环境破坏；其二是内水外渗使地下水位抬高，不能造成沼泽、浸没、浸润线过高等破坏原有动植物的生存环境。总之，环境问题

是设计人员应不断加深认识，妥善处理的问题，需要积累经验。

**6.1.3 理论和实践都证明稳定及基本稳定围岩具有自承和承载能力，自承和承载能力的大小取决于岩体结构和物理力学特性、地质构造及其影响程度、地应力大小和分布、地下水分布及连通情况等岩体本身的自然特性，以及施工方法、施工程序和对围岩的加固措施、加固效果。选择支护结构就要根据围岩的稳定情况进行，自稳性强的围岩可不进行支护；较短时间可达到变形稳定的围岩宜作柔性支护，使支护参与围岩应力调整；变形时效长的围岩应进行分期支护，选择不同的支护刚度和时间，有利于围岩达到变形稳定，充分发挥其自稳能力，防止失稳的发生和扩大，为后续施工创造条件。**

围岩具有自承和承载能力已经是水工隧洞设计、施工、运行人员的共识，将围岩作为与衬砌结构联合工作的承载体，是水工隧洞设计理论的进步，设计中应充分发挥这种能力，以节省工程投资。

**6.1.4 支护的型式很多，由于工程地质、水文地质条件的差别，施工方法和施工程序的不同，断面型式、尺寸的不同，可采用不同的支护手段和措施，即使同一工程在不同洞段出现的问题其处理方式也不尽相同。因此，支护的型式应根据具体情况，在满足施工期围岩稳定或给后续工作留有足够稳定时间的前提下，通过方案比选确定。如果拟将支护作永久衬砌，或必须留作永久衬砌，在支护方式选择时需要考虑运行要求。**

支护方案比选一般有两种情况：其一为隧洞开挖前根据掌握的地质资料和预测，提出备用方案，隧洞开挖后根据实际情况实施或修正；其二为在隧洞开挖过程中或永久衬砌没完成前围岩失稳，对失稳围岩进行处理方案比选。前一种比选涉及到布置问题、施工方法及施工程序选择、爆破参数的选择或试验、施工监测、支护型式和时间及后续衔接；后一种主要是防止失稳扩大和恢复正常施工，自然也有与永久衬砌的关系。由于地质条件的千差万别，

支护型式的选择不论是哪种情况，都要进行必要的计算（或估算）、分析，以确定支护结构所承受的荷载，支护可能达到的效果和安全程度。工程类比是选择支护型式的有效方法，按照某些规范、设计手册、指南中的参数进行支护设计是一种类比方法，参照类似工程的实例，结合本工程的实际情况进行支护设计更是常用的类比方法。近年来我国在隧洞施工中积累了很多成功经验，包括不同的地质条件、断面型式、施工方法等基本因素，也包括不同的失稳类型和规模，工程处理措施各有特点，都是工程类比的很好例子。

**6.1.5 隧洞衬砌型式选择**是一个综合分析比较过程，条文中给出了选择隧洞衬砌型式时应考虑的主要问题。这些都是几十年来我国水工隧洞设计经验的总结，包括了地质地形条件、施工条件、运行要求、环境要求，在SD134—84的基础上，根据本规范的规定，对影响衬砌型式选择的某些因素提出了更明确的要求。

**6.1.6 本条**是对国内水工隧洞所采用型式的归纳，四种衬砌型式适应不同的设计条件，因为有专门的钢管设计规范，故衬砌型式中不包括有钢衬的衬砌。

四种衬砌型式应用条件见本规范 6.1.10，其中锚喷衬砌包括：喷混凝土、锚杆、喷混凝土加锚杆、锚杆加钢筋网加喷混凝土、钢筋网加喷混凝土等五种型式。

**6.1.7 不发生渗透破坏**是水工隧洞安全运行的要求之一，包括两个方面的内容：一是围岩不发生渗透失稳；二是内水外渗后不给周围环境带来破坏。围岩是否发生渗透破坏取决于围岩的抗渗流破坏能力和衬砌结构的防渗能力，即对具有不同抗渗流破坏能力的围岩，其衬砌结构的防渗有不同的要求。衬砌结构的防渗能力，就是衬砌结构在内水压作用下防止内水外渗的能力。由水工隧洞的实际运行情况，可归纳为三种：一是衬砌结构按抗裂设计，即衬砌结构不开裂，不产生明显的透水通道；二是衬砌结构有限制的开裂，即限制裂缝宽度，允许有限制的内水外渗；三是不限制衬砌结构开裂，允许内水外渗。

**6.1.8** 表 6.1.7 给出了对衬砌结构的三种防渗要求，本条即为三种要求的应用条件。

(1) 围岩的抗渗流破坏能力是个综合性概念，包括岩性、岩体结构、地质构造、透水性、地下水的分布和连通情况、自然透水通道的展布和内水外渗后透水通道的形成和发展，透水通道内充填物性质及冲蚀破坏的可能性，以及在内水压作用下地下渗流场的变化。如何判定围岩的抗渗流破坏能力，目前还没有统一的标准，已有的地质手段也只具有一定的代表性。所以，工程上多以地质勘察成果和地质专业的判定为基础，通过分析内水外渗所产生的可能危害以及工程类比确定。

(2) 三种情况是以区分整体性破坏或局部性破坏为基础的。对有严格防渗要求的水工隧洞，即内水外渗会造成整体性失稳或环境破坏、工程处理费用很大或很难处理，需采用特殊衬砌结构防渗（如预应力混凝土或预应力钢筋混凝土或钢板）；一般防渗要求的水工隧洞，指内水外渗后仅会造成局部地段的失稳和局部环境破坏，采用常规工程措施可处理解决。

(3) 每两种情况之间没有严格的界限，应该视具体工程情况并通过技术经济比较和工程类比确定。比如山西万家寨引黄工程中对衬砌防渗问题的设计原则就是根据不同设计条件提出的。引黄隧洞工程线路长，地质条件复杂，总干中 8.8% 的黄土中洞段，为防止内水外渗造成湿陷性破坏，按抗裂原则对衬砌结构采用了严格的防渗措施（如混凝土中掺 5% TMS 防水剂，在支护喷层内设 HDPE 土工膜，施工缝和结构缝设 GB 嵌缝止水）。对一般 IV、V 类围岩无压洞，除有特殊要求（如膨胀性围岩、遇水软化围岩、喀斯特地区）均采用限裂设计。总干中某些无压岩洞洞段，虽然位于地下水水位以上，但考虑到内水外渗可能恶化岩石条件和损失水量的问题，其衬砌结构也按抗裂原则采用了掺加 TMS 防水剂、纵环缝设双层内外止水等严格防渗措施。总干的防渗处理说明，具体工程或同一工程的不同洞段都有不同的要求和环境条件，提出那种防渗要求应通过分析论证，综合各种因素确定，不易也

不应有一个固定的或定量的标准。

(4) 本规范不适用于压力钢管和调压室设计，故对有关调压室和压力钢管设计的防渗要求见相应规范。

**6.1.9** 将围岩作为承载结构是近年来水工隧洞设计理论的重要进步，有压隧洞运行期围岩不发生水力劈裂是围岩承担内水压力的前提，也是衬砌结构与围岩联合承载的必要条件。判断是否发生水力劈裂，国内外都引用最小主应力准则，即围岩初始地应力中的最小主应力大于隧洞设计的最大内水压力。最大内水压力包括瞬时最大动水压力，其数值与压力隧洞的布置、运行工况以及洞段的位置有关。运行工况包括最不利危险工况，如水电站突甩负荷造成压力管道的压力上升，抽水蓄能电站泵工况的突然断电，水电站或泵站机电运行事故造成的压力波叠加等。

采用设计的最大内水压力有三个原因：其一，由于现有的技术能力的限制，目前地应力测量精度还不很高，从这种意义上讲取地应力中的最小主应力作为控制值，是留有一定安全裕度的，用此与隧洞设计的最大内水压力进行比较是合适的。其二，围岩承担内水压力的权重，一是取决于围岩与衬砌结构的变形相容条件，如不衬砌隧洞和锚喷衬砌隧洞，围岩承担全部内水压力，普通混凝土和钢筋混凝土衬砌结构决定于回填灌浆效果，预应力混凝土和钢筋混凝土结构由预应力大小和松弛效果决定，即变形相容条件越好围岩承担内水压力的权重越大；二是取决于围岩变形模量与衬砌结构的弹性模量之比，比值越大即围岩的变形模量越大，围岩承担内水压力的权重越大，计算分析和工程实测资料都证明了这一规律。如广蓄的实验洞和岔管部位的实测数据、天荒坪蓄能电站的计算分析、挪威 36 个电站的统计资料，都表明硬岩具有较大的承担内水压力能力，有的可以达到承担 70%~80%。因此，对同一种衬砌结构，地质条件和施工质量决定了围岩承担内水压力的权重，在变形相容条件一致以及岩体完整坚硬条件下，围岩可能承担更大比重的内水压力，甚至全部内水压力，这样按设计的最大内水压与围岩最小主应力进行比较是安全的。其三，工程

上有压隧洞较多采用混凝土和钢筋混凝土衬砌结构，这种衬砌结构存在裂缝是必然的，运行期某些裂缝已经构成了洞内与围岩的内外水贯通，同时混凝土和钢筋混凝土结构本身也是透水结构，运行一定时段以后围岩已经形成稳定的渗流场。因此，按设计最大内水压控制是必要的。总之，用初始地应力中最小主应力与设计最大的内水压比较是个简便又留有安全裕度的方法。

考虑到规范的普遍适用性，在不具备或没有条件进行地应力测验时，按 3.1.7 覆盖厚度和工程类比判断围岩是否具有承担内水压力的能力是可行的。但对高压隧洞或压力隧洞的重要部位宜在施工期进行地应力测验，以保证运行安全，具体要求见本规范 2.0.6。

**6.1.10** 本条是将本规范中与衬砌型式选择有关的条文、国内衬砌型式选择中沿用的作法、影响衬砌型式选择的主要因素归纳整理后提出的，主要指导思想说明如下：

(1) 有压隧洞和无压隧洞分开，对无压洞不要求满足最小覆盖厚度和具有围岩承担内水压力能力。

(2) 无压洞应考虑内水外渗问题，即按 6.1.7 要求控制衬砌结构的设计原则。对有严格防渗要求的无压洞可采用钢筋混凝土结构并加防渗措施，如掺加防水剂的防渗混凝土、衬砌结构外设置防渗膜、衬砌结构内涂防渗涂料、结构中部夹设防渗膜的复合结构等等。对一些特殊的地质条件，如遇水易软化的泥岩、遇水膨胀的软岩、宽大的断层或卸荷带等，采用钢筋混凝土加防渗措施的衬砌结构可能投资较大或影响施工工期，可研究采用机械式预应力混凝土结构，通过技术经济比较研究确定。

(3) 有一般防渗要求的无压洞，一般都采用锚喷结构和钢筋混凝土结构。对 I、II 类围岩多采用锚喷结构，但考虑内水外渗会恶化围岩条件时，为安全计也常采用钢筋混凝土衬砌，以减少渗漏量并更有效地保持围岩稳定。是否采用钢筋混凝土衬砌宜进行技术经济比较后确定。当围岩为 III、IV、V 类时宜采用钢筋混凝土衬砌结构，主要是保证围岩稳定，满足安全运行要求。III 类

围岩是否采用局部构造锚杆、加设钢筋网、加厚喷层等措施，还是采用钢筋混凝土衬砌，主要取决于围岩的稳定条件，以及考虑施工工期、投资等因素，宜进行技术经济比较后确定。

(4) 无防渗要求的无压洞，应以维护围岩稳定为条件来决定衬砌型式。Ⅳ、Ⅴ类围岩的衬砌型式多采用锚喷结构或钢筋混凝土结构，锚喷结构包含 6.1.6 第 1 款的各种单独或组合型式（见 6.1.6 条文说明）。采用哪种结构主要取决于地质条件，宜经过技术经济比较确定。

(5) 工程实践证明，水工隧洞采用普通（非预应力）混凝土和钢筋混凝土的衬砌结构，由于各种原因都存在裂缝而起不到抗裂作用，因此非预应力混凝土和钢筋混凝土不能单独作为水工隧洞的抗裂衬砌结构。对有严格防渗要求的水工隧洞，若采用非预应力混凝土和钢筋混凝土结构作为抗裂衬砌时，应与防渗措施联合使用，无论是无压洞还是有压洞，都应采用这种复合衬砌结构或者采用预应力混凝土衬砌、钢板衬砌。

(6) 满足最小覆盖厚度要求是有压水工隧洞布置和衬砌型式选择的前提条件，是安全、稳定运行的基础。考虑到工程中由于地形地质条件的限制，往往出现局部洞段不满足最小覆盖厚度的情况。表 6.1.10 给出这种局部洞段（或部位）不满足要求时，有压隧洞衬砌型式选择的可用型式。如水工隧洞穿越沟谷或河道造成局部洞段浅埋，与较宽大地质构造交叉或在Ⅳ、Ⅴ类围岩中通过其覆盖厚度有较大折减的洞段，通过松散、软弱岩层的洞段等等。这些供选择的可用型式应按防渗要求确定的设计原则进行衬砌结构设计，通常都不再或很少考虑围岩承担内水压力，即使围岩通过内部加固处理（如固结灌浆）提高了变形模量，进而具有一定的承担内水压力能力，也多作为衬砌结构的安全裕度处理。

(7) 围岩是否具备承担内水压力能力按 6.1.9 的规定判断。围岩能满足覆盖厚度要求而又不具备承担内水压力能力是由地质条件造成的，如断层影响带及卸荷带、软岩及松散岩、软弱夹层、薄层岩体、软硬岩互层等，水工隧洞局部洞段遇到此类地质条件

是不可避免的，衬砌结构型式选择中应根据地质预测（预报）和围岩的物理力学参数，按防渗要求确定的设计原则进行衬砌结构设计，并应根据施工中揭露出来的实际地质条件进行确认和修正。

(8) 有抗裂要求的有压水工隧洞，采用钢筋混凝土并加防渗措施的复合结构时，考虑到防渗措施的施工质量保证率、防渗材料（如防渗涂料、防渗膜）的老化等问题，建议在低压洞使用，以保证安全、稳定运行。

(9) 有压隧洞按非限裂原则（无防渗要求）采用不衬砌时，考虑到Ⅱ类以上围岩本身就存在局部稳定性差的问题，故建议在Ⅰ、Ⅱ类围岩中使用。

(10) 表 6.1.10 中给出的可供选择衬砌型式中，凡两种以上的型式都应进行技术经济比较后选用。

(11) 位于完整、坚硬、渗透性小的岩体中的隧洞，当洞内水流不致冲刷破坏岩石，内水外渗不致影响相邻建筑物、围岩和山坡的稳定时，通过技术经济比较，可不作衬砌。导流洞应优先研究不衬砌的可能性。

**6.1.11** 采用混凝土和钢筋混凝土衬砌的水工隧洞，不可避免地都会出现裂缝，对有严格防渗要求的隧洞，必须采用其他防渗措施，或者采用预应力混凝土（钢筋混凝土）衬砌或钢板衬砌。对有一般防渗要求及无防渗要求的隧洞，也应尽量防止产生或减少裂缝并控制裂缝宽度。大量的内水外渗不仅损失水量，而且恶化围岩条件，也改变衬砌结构的工作条件，对安全运行不利，故条文明确规定对引起严重渗漏的裂缝应加以处理。

## 6.2 荷载和荷载组合

**6.2.1** 本规范仍采用 SDJ20—78，与之对应荷载仍按基本荷载和特殊荷载分类。

**6.2.2** 荷载组合应切合实际，如作为特殊荷载的地震荷载不应与其他特殊荷载组合，列入组合后有抵消其他荷载作用时，该荷载

应选择较小值。对不同控制工况应认真分析和选用不同的荷载组合，如发电引水隧洞检修工况的外水压力应考虑内水外渗对围岩渗流场的影响，即地下水位的变化，按运行后最高地下水位计算。对不同的荷载组合应考虑最不利的组合情况，以保证衬砌结构在各种工况下的安全。

**6.2.3** 可能出现的最大内水压力包括各种运行工况都有可能出现的情况，如水电站误操作引起的冲击波叠加、水电站或泵站出线解列造成的压力上升，有调压（泄压）设施的输水系统出现的最大压力等等。最大压力与输水隧洞的布置、所计算断面的位置、运行工况等有关，应仔细研究分析后确定。

**6.2.4** 本条所列围岩压力系指围岩对衬砌产生的主动作用力，要准确地确定围岩压力数值是困难的，DL5077—1997《水工建筑物荷载设计规范》在编制过程中进行了大量的调研和分析工作，对松散岩体、浅埋隧洞、块状、中厚层至厚层状围岩、支护对围岩压力取值的影响、施工方法对围岩压力取值的影响等等，都做了原则规定或给出可供选择的计算方法。根据该规范并参考国家标准 GB50086—2000《锚杆喷射混凝土支护技术规范》和行业标准 SDJ57—1985《水利水电工程喷锚支护施工技术规范》，本条列出了 8 款围岩压力的取值方法和取值原则。

围岩变形（位移）基本稳定的判别标准参见国家标准 GB50086—2000 和《岩土工程监测手册》（中国水利水电出版社 1998 年版）。由统计规律看，一般在变形小于 0.2mm/d 时可认为基本稳定。在有长期观测（大于 3 个月）成果时，观测后期全月平均小于 0.1 mm/d 即认为是稳定的。

不能形成稳定拱的浅埋隧洞，上覆岩体重力直接作用在衬砌结构上，重力作用大小取决于地质条件、开挖断面、施工方法和支护的措施和效果。具体工程应结合实际进行分析，通常按地质预报和施工中揭露的地质条件取全部上覆坍塌岩体重力计算，并按支护效果进行修正。不能形成坍塌拱的浅埋隧洞并非单纯指隧洞的覆盖厚度，而是指由于地质条件、地下水、断面型式尺寸、施

工方法等综合因素造成的全部坍塌的上覆岩体，对土洞除上述情况外，还包括均质粘土和极软粘土发生蠕变后土压力增大至全部覆盖压力的情况。

水工隧洞不能形成坍塌拱的浅埋隧洞多出现在无压洞，特别是无压土洞中，有压洞和岩洞中多是由特殊地质条件（如贯通性较大断层、较宽的松散卸荷带、不整合层、沉陷性喀斯特地层、大型溶洞等）造成的，要严格地确定深浅埋的界限很困难。因此在土洞中多用荷载等效高度来判断，在岩洞中多用工程类比、地质预报和实际地质情况来分析确定。

围岩压力除与地质条件、隧洞开挖尺寸有关外，与施工方法、支护措施、支护时间有很大关系。采用掘进机开挖、光面爆破、控制爆破可减少了对围岩的扰动和破坏，可增加围岩的自承能力，使围岩在衬砌上形成的压力减少；采用紧跟掌子面的喷射混凝土，或根据变形监测成果采取及时锚喷支护，可控制围岩变形，即使在地质条件较差的围岩中，也可大大减少围岩变形造成的压力，但是，围岩压力究竟减多少，目前还只能靠工程经验和对变形监测的分析采用类比法决定。

有些围岩的特殊性（如流变、膨胀等），以及开挖后地应力的调整，也都可能在衬砌上产生主动作用。对这类变形压力现在还很难总结出普遍认同的计算方法，只能根据工程具体情况通过专门研究确定。

**6.2.5 隧洞的外水压力作用一般也是很难准确确定的。**根据围岩的渗透系数、岩层结构、地质构造、渗流类型、衬砌型式、补给水源、排水或出水点等条件，通过渗流计算来确定作用在衬砌上的外水压力可能比较准确。但是，由于计算工作量较大，计算参数确定的难度，这种计算对重要工程或重要洞段是必要的，对所有水工隧洞就不现实。而用结构力学法计算衬砌结构时就需先确定作用在衬砌外表面上的外水压力，然后按面力进行计算。鉴于上述原因 DL5077—1997《水工建筑物荷载设计规范》仍选用外水压力折减系数的方法。

本规范对外水压力的估算采用 DL5077—1997 的规定。有关排水设施的折减问题，考虑到其排水效果的保证率或可靠度主要取决于施工质量，因此在衬砌结构设计时只能通过工程类比或渗流计算分析决定。

对工程地质、水文地质条件复杂的隧洞，如在含承压水透镜体中建造的隧洞、穿越有地下暗河的岩溶地区的隧洞、穿河隧洞、建在互层性且有强透水层岩体中的隧洞等等，都可能出现外水压力大于地下水位的情况，对外水压力应进行专门研究。

**6.2.6** 由于温度的变化、混凝土收缩和膨胀所产生的应力，以及灌浆压力等荷载比较难以确定，单纯依靠改变结构尺寸常常不足以消除其不利作用或者不够合理。因此，对于这类荷载一般不应只按计算结果决定衬砌尺寸，设计时可根据需要和可能作必要的计算或分析，通过采取适宜的施工措施和结构措施防止或减少其不利影响。

高地温地区的温度应力问题应进行专门的研究，宜包括施工期、运行期和检修期不同的设计边界条件。

### 6.3 混凝土和钢筋混凝土衬砌

**6.3.1** 衬砌的厚度在满足强度和构造要求的前提下应采用较薄衬砌。理论分析和工程实践表明，用增加衬砌厚度提高结构的抗弯曲破坏能力是有限的，甚至是不合理的。充分利用围岩的承载能力，发挥衬砌结构与围岩的联合承载作用，使衬砌结构减薄是水工隧洞设计的一个发展方向。

本条给出的最小厚度系从施工要求出发的，从 SD134—84 执行至今，经多年实践可以保证施工质量的厚度。

**6.3.2** 水工隧洞都有不同的用途和不同的工作条件，应根据具体工程提出强度、抗渗、抗冻、抗磨和抗侵蚀的要求。根据国内水工隧洞的资料显示：衬砌结构的强度标号都大于 R150（28d 龄期）；发电引水隧洞低压段大多数采用 R150；高压岔管多采用 R200 以上；钢筋混凝土衬砌的导流洞多采用 R150 以上；泄洪洞

大多采用 R200 以上，有的采用 R300；高流速泄水隧洞还提出抗磨蚀要求。故本条仍沿用 SD134—84 的规定，强度标号不小于 R150。

**6.3.3** 本规范未按结构可靠度进行编制，即混凝土和钢筋混凝土结构设计仍执行 SDJ20—78，结构强度设计中涉及的控制标准均按该规范取值。

考虑到水工隧洞中混凝土受拉结构的工作条件与地表混凝土受拉结构工作条件有较大差异，如围岩约束、围岩承载、沿洞轴的纵向应力、衬砌结构的环向应力、应变问题等，仍采用地表混凝土受拉结构的安全系数，将使断面不必要的加大。规范 SD134—84 经过调查分析后提出降低安全系数的规定，多年来设计实践证明该规定是合理的，本规范仍予延用。

**6.3.4** 几十年来我国建成了大量的混凝土、钢筋混凝土衬砌结构的水工隧洞，其衬砌结构的应力计算方法各有所不同，如结构力学方法（包括衬砌边值法、假定反力图形、封闭框架、刚构）、弹性力学方法、边界元法、有限元法等等。尽管方法各异，但这些隧洞绝大多数运行正常，说明衬砌计算的设计条件较接近实际情况，有一定的安全裕度。分析国内一些水工隧洞衬砌计算所使用的计算方法、计算模型，本条给出可供选择的计算方法及其适用条件，采用哪种方法应根据具体工程的围岩条件，综合各种因素选用，以更接近衬砌结构的设计条件，保证运行安全，节省工程投资。

(1) 近年来国内许多水工隧洞都成功地进行了有限元法联合承载的分析计算，包括软质岩、硬质岩、高压洞、低压洞、线性或非线性变形、有无构造影响、不同渗流场、不同开挖程序等，其成果较为接近实际。实践证明用有限元方法进行围岩与衬砌结构整体计算分析，是一种有效的方法。

(2) 广蓄、天荒坪、荒沟、二滩等工程的计算分析成果表明，硬质岩和高应力地区隧洞控制性荷载作用是内水压力，围岩呈弹性变形状态，采用弹性力学模型可简化计算且与实际出入不大。对

软质岩、较软岩、有流变性质的围岩，应考虑在内水压力或其他荷载组合作用下围岩的塑性变形或蠕变，计算模型宜选用弹塑性力学模型（较软岩）或粘弹塑性力学模型（软岩及有流变性的围岩）。

(3) 大直径隧洞、洞室交叉部位施工一般都不能一次成型，施工程序和施工时序都将影响围岩变形。故对重要工程、大直径隧洞、洞室交叉部位建议模拟隧洞的形成过程和承受作用过程，以保证合理的选择支护及衬砌结构，满足施工、运行、检修各时期的安全稳定要求。

(4) 二次应力（场）分析中有两种基本情况：一是衬砌结构承受围岩的变形荷载，即围岩变形没达到稳定前已完成的衬砌结构，如采用新奥法施工的锚喷结构，采用双护盾施工的软质岩衬砌结构（超过预留变形量时），兼作衬砌结构的支护结构等，在这种情况下衬砌结构参与围岩的二次应力调整；另一情况是围岩变形稳定后施工的衬砌结构，该衬砌结构不参与围岩的二次调整，故对此种情况进行围岩二次应力分析时不应考虑衬砌结构的作用。

(5) 以内水压力为主要荷载的 I、II 类围岩的圆形隧洞，考虑围岩为联合承载结构可采用弹性力学法进行计算，附录 B 给出了计算方法。

(6) 以衬砌为承载结构的传统结构力学方法在我国隧洞设计中运用了几十年，已经形成一套完整的计算体系，设计实践证明，对 IV、V 类围岩隧洞和无压洞的衬砌结构设计，只要荷载作用分析合理、计算边界清楚，采用结构力学方法则力学概念明确、计算简单、经验较成熟，工程中多在应用并运行良好。

(7) 考虑到有关结构力学的计算机程序已经普遍使用，附录中不宜再列出结构力学计算公式。此外，国内在隧洞设计中采用不同力学模型的有限元程序很多，各有特点，不同工程都有应用，但还没有经过鉴定的水工隧洞计算专用程序，故也不在附录中推荐。

**6.3.5 用结构力学法进行衬砌结构内力计算时，应根据围岩的实**

际情况考虑围岩的弹性抗力，如对Ⅳ、Ⅴ类围岩是否采用了围岩内部加固措施，加固效果如何；对无压洞圆形断面可采用假定反力图形的方法；对非圆形断面可采用衬砌边值法中的弹性抗力系数等等。总之，围岩抗力的大小和分布，可根据现场实测或试验数据，通过工程类比和必要的分析研究确定。

**6.3.6 掘进机施工的新技术在我国引大入秦和万家寨引黄工程中都已成功应用。鉴于其效率和质量，将在我国有较快的发展。由于预制管片装配式结构，管片之间的连接对整体稳定性和承载能力起着非常重要的作用。因此，在设计时对拼装缝的型式和连接方式应认真考虑，既要便于施工，又要有可靠的保证。**

对管片间无螺栓连接的装配式结构，整体上实际是种多绞拱结构，在软弱、稳定性差的围岩中较难保证运行安全，宜慎重采用这种无螺栓的连接方式。

**6.3.7 隧洞衬砌结构受明显不对称荷载时，其变形、应力比较复杂，宜根据具体情况进行专门研究。如对由于围岩局部坍塌造成的偏压，可按松散体的重力确定荷载作用后进行分析计算；对由于岩层结构造成的偏压可用有限元分析计算，计算中宜考虑结构面的物理特性；对无压洞可参考 TB10003—1999《铁路隧道设计规范》或 JTJ026—1990《公路隧道设计规范》进行分析计算。**

## 6.4 预应力混凝土衬砌

**6.4.1 根据水工隧洞几十年的设计、运行经验，本规范取消了混凝土和钢筋混凝土衬砌结构单独抗裂的设计原则，对有严格抗渗要求的水工隧洞，即衬砌结构按抗裂原则设计时，表 6.1.10 给出了可供选择的衬砌型式，其中预应力混凝土衬砌是种较合适的抗裂衬砌型式。**

目前，国内外水工隧洞所应用的预应力混凝土衬砌，按预应力形成的方式分成两类，即机械式和灌浆式。按加力方法，机械式又可分为钢索式、钢箍式、拉筋式、挤压式等多种；灌浆式又可分为内圈环形灌浆式、环形管灌浆式、钻孔灌浆式等多种。我

国采用的机械式预应力衬砌主要是钢索式，属后张式预应力，灌浆式预应力衬砌多是钻孔式。

机械式预应力衬砌的应用不受围岩条件限制，在围岩不具备承担内水压力能力或局部不满足覆盖厚度要求的河段都可应用，即衬砌施工前围岩属暂时稳定能满足机械式预应力管片安装时间的要求，都可实施。而灌浆式预应力衬砌，由于预应力的产生和保持都要通过围岩作用来实现，因此对围岩有较高的要求，即围岩能够承受灌浆压力或围岩经工程处理后能承受灌浆压力的隧洞才能应用。

**6.4.2** 目前不论机械式还是灌浆式预应力衬砌结构都是圆形断面，其他型式的断面还不具备工程应用条件。预应力衬砌结构的厚度是通过结构强度计算后确定，即满足两种强度条件。按运行工况的荷载组合计算混凝土的抗拉强度；按检修（或施工）工况的荷载组合计算混凝土的抗压强度。故条文中明确了混凝土的抗拉控制条件和抗压控制条件。

**6.4.3** 本规范的衬砌结构设计仍使用规范 SDJ20—78，故有关的标准、参数仍按该规范取值，并根据国内已成功运行的预应力衬砌结构经验，对预应力混凝土强度等级做了规定。

**6.4.4** 后张钢索式预应力衬砌中，钢索位置对预应力的分布有较大影响。在钢索内侧，衬砌上的径向预应力是压应力；在钢索外侧，径向预应力为拉应力，钢索越靠近外侧布置，在衬砌上产生的径向拉应力越小，故钢索不宜布置在衬砌中心线以内。

钢索与孔道间的摩阻系数越大，使预应力损失越多，减小摩阻系数是提高预应力效果的有效措施。

**6.4.5** 规范 SDJ20—78 没给出有关预应力结构的计算方法，故建议对钢索损失按 SL/T191—1996 计算。

目前对张拉后产生的预应力有不同计算方法，如弹性中心法、有限元法、连杆法等，各种方法的计算边界和设计假定都有不同。实际上预应力计算只是设计的一个方面，诸如开挖轮廓线对结构厚度的影响、张拉索道的平整度、包角的变化，以及钢索的松弛

度、混凝土的徐变和收缩等因素都将影响预应力效果，但这些因素到目前为止还不能较准确地反映在计算中。有鉴于此，设计人员宜结合工程实际情况进行分析研究，选择适宜的计算方法和设计假定。

**6.4.6** 造成灌浆式预应力衬砌的预应力损失有很多因素，如混凝土和围岩的徐变、灌浆水泥的干缩、施工及围岩温变影响、施工工艺等等，这些都不是工程类比或数值计算所能确定的。同样，不同的岩性、不同的岩体结构、不同的灌浆工艺将影响开环压力和灌浆压力，这些都应由现场试验确定，才能保证预应力效果。

根据国内已成功运行的预应力衬砌设计经验，附录 C 给出了灌浆式预应力衬砌结构设计的计算方法。

**6.4.7** 预应力衬砌的预应力效果（如有效预压应力大小、预压应力分布的均匀程度、预应力的施加条件等）与衬砌圆环的断面是否规则、施加预应力时能否使圆环与围岩脱开等有直接关系。若衬砌圆环厚度不匀，预应力分布则不均匀；施加预应力时若圆环与围岩未能脱开，对机械式预应力衬砌不仅为克服径向应力而降低预应力效果，并且将使外侧环向拉应力增加，对结构不利；对灌浆式预应力结构则施加不了预压应力。因此，条文规定预应力衬砌隧洞宜采用光面爆破，当开挖断面有较大超挖时宜对断面进行修圆。

**6.4.8** 灌浆式预应力衬砌的预应力施加、形成和保持都与围岩的变形（包括徐变）有直接关系，裂隙较多的围岩其变形模量、应力松弛、徐变度都在很大程度上影响预应力效果，进行固结灌浆后围岩的完整性得到加强，可提高其变形模量，提高承受灌浆压力的能力，减少预应力损失。

**6.4.9** 围岩压力是一种较难准确确定的荷载，它在衬砌断面的不同位置产生的应力往往是不同的，当围岩压力（主动压力和变形压力）很大时，若用预应力衬砌结构来承担，不仅使结构各断面出现应力差异，而且可能使衬砌结构不易满足强度条件。因此，为保证衬砌结构的应力状态尽量一致，应提高围岩的承载能力，对

不良地质条件采用机械式预应力衬砌，最有效的办法是用支护措施来消除围岩压力。

## 6.5 不衬砌与锚喷衬砌隧洞

**6.5.1** 采用不衬砌的隧洞，围岩的自承和承载能力是隧洞稳定运行的关键，在施工中使围岩较少受到干扰，提高围岩的自承和承载能力是不衬砌隧洞施工中应解决的重要问题。对长隧洞采用掘进机施工有明显的优点，如对围岩干扰小，有利于围岩稳定；起伏差小，有利于减小水头损失；有利于施工的排烟、通风、排水；长隧洞可充分发挥掘进机效率高的优势。故对长隧洞推荐采用掘进机施工，考虑到掘进机的价格较高，运行成本较大，对短隧洞采用掘进机施工有个经济比较问题。

不衬砌隧洞采用钻爆法施工时，为控制爆破对围岩的影响，必须采用光面爆破（或预裂爆破），以减少爆破松动圈的范围（光面爆破或预裂爆破松动圈的范围仅为普通爆破的  $1/2 \sim 1/3$ ），提高围岩的自承和承载能力。从水力学角度看，光面爆破可大大减少洞壁的起伏差，而逆向开挖可使留碴台阶造成的边界层水流较平顺。因此，采用光面爆破和逆向开挖都可使水头损失减少。故条文规定采用光面爆破（或预裂爆破）和建议逆向开挖。

爆破质量控制标准执行 GB50086—2001 的规定。

**6.5.2** 对不衬砌和锚喷衬砌隧洞，底板通常都用现浇混凝土找平以减少糙率和便于检修。为保证找平层的结构强度和施工质量提出最小厚度不宜小于 100mm。

国内有些锚喷或不衬砌隧洞底板采用浮碴混凝土的找平方法（如太平湾、太平哨电站引水洞的部分洞段），运行效果也一直很好。该方法的特点是开挖后不清底板，在保证过水断面要求的前提下，直接在浮碴上浇筑 100mm~200mm 厚混凝土找平层，设置锚筋和排水孔。其优点是免除了清理底板的工序，即节省了投资也加快了施工进度。但该方法对底板开挖的起伏差要求比较严格，对底板浮碴的固结密度和找平层厚度的均匀性有一定要求。

故使用单位宜据具体工程的实际研究分析后选用。

**6.5.4** 不衬砌隧洞的主要问题就是在各种荷载作用下的围岩稳定问题，该问题实际上是个场力作用下的应力应变分析问题，有限元法可较接近实际的模拟各种边界条件，故推荐用有限元进行稳定分析计算。由于计算参数和计算模型的限制，尤其是计算假定还不能准确地反映围岩特性，故应通过工程类比和计算分析综合分析后确定。

**6.5.5** 总结国内外锚喷衬砌的类型，依照国标 GB50086—2001 和部标 SDJ57—85 提出四种锚喷型式。

钢纤维喷射混凝土有表面和延深锈蚀问题，使用中应注意地下水和过洞水流的水质影响。

**6.5.6** 有关允许流速问题主要是防空蚀破坏和冲刷破坏，近年来施工机械、施工方法、建筑材料都有很大进步，使锚喷衬砌隧洞的起伏差、糙率、不平整度以及喷混凝土层的粘结强度等都有明显提高，为防空蚀破坏创造了条件，同样也提高了锚喷衬砌隧洞的抗冲能力。有关不冲流速的允许值，按国家标准 GB50086—2001 执行。

**6.5.7** 本条引用国家标准 GB50086—2001。

**6.5.8** 根据 SD134—84 的使用情况和国家标准 GB50086—2001 及行业标准 SDJ57—85 的规定，提出本条的具体要求。

**6.5.9** 复杂地质条件下非圆形断面的锚喷衬砌还没有比较公认的计算公式，故建议用有限元进行分析计算，可更好地模拟地质条件。

**6.5.10~6.5.18** 这些条文都是根据 SD134—84 的多年使用情况和国家标准 GB50086—2001、行业标准 SDJ57—85 的规定编制的。针对多年来水工隧洞使用锚喷支护和衬砌的经验，对设计人员所关心的某些问题说明如下：

(1) 大量工程实践证明，局部松动岩块或局部的软弱岩体，往往是围岩的薄弱环节，对围岩稳定有较大影响，围岩失稳多由此引起。因此，对于不同岩体应采取不同的锚喷措施。如在坚硬整

体围岩或厚层、中厚层围岩中，对局部松动块体宜采用悬吊式锚杆加固，锚杆应穿过可能失稳的结构面，起到悬吊和抗剪作用；对局部软弱岩体（如断层、节理密集带），宜采用系统锚杆加固，视围岩情况加设钢筋网，必要时还可进行固结灌浆。

(2) 整体稳定性较差的围岩采用系统锚杆是为了加固围岩，以控制围岩的变形，减少围岩压力，防止围岩破坏。锚杆长度应超过应力释放区，并留有一定的安全裕度。

(3) 软弱围岩往往都有塑性变形的特点，甚至有流变性变形的特点，即围岩开挖后变形量大，变形时间长，在这种情况下锚杆支护（或锚杆喷混凝土支护）将与围岩共同承担围岩的应力调整。如果锚喷结构作为支护和衬砌结合型式，即锚喷结构既为初期支护结构，又留作永久衬砌结构，锚喷结构应紧跟开挖面适时进行，使锚喷结构及时提供一定的抗力，避免围岩变形速率过大，以致引起围岩失稳，同时还应使围岩变形有一定发展，形成岩石拱，以充分发挥围岩的自承作用。经过初期支护后，应通过围岩的变形监测判定围岩是否达到最大变形，变形是否趋于稳定，是否需要二期支护（或加强支护），并选择合适的后续衬砌时间和衬砌型式。这一切都应在现场变形监测数据的基础上，通过必要的分析计算依工程经验确定。

(4) 锚喷结构与刚性结构（混凝土或钢筋混凝土）结合作为永久衬砌结构时，刚性结构的刚度和衬砌时间应仔细选择。对围岩开挖后较快趋于基本稳定或稳定的块状岩体、厚层或中厚层围岩，衬砌结构基本上不承受围岩的变形荷载，即衬砌结构不参与围岩的二次应力调整，此时衬砌结构的刚度由运行条件控制，衬砌时间由施工进度控制；但对变形尚未稳定的围岩，在不同的时间段，岩体的应力—变形曲线是不同的，变形速率大时宜首先考虑采用锚喷一类的柔性支护，此时若采用混凝土或钢筋混凝土衬砌，则衬砌结构将承受很大的变形压力，甚至使衬砌受到破坏，当锚喷支护不能使围岩趋于稳定时，必须适时地采用刚性支护承受变形荷载，限制变形发展，防止围岩松散以至破坏。总之，何时进行

刚性支护，支护的刚度多大，都应通过变形监测，并根据监测结果进行必要的分析计算，再结合工程经验、工程类比研究决定。

(5) 锚喷隧洞的进出口部位，因为多了一个临空面，施工爆破和围岩卸荷影响都比洞内严重，往往施工过程中出现洞口、洞脸岩体的裂隙、节理张开，大大降低了围岩的完整性。工程实践证明该部位应采用混凝土或钢筋混凝土锁口衬砌。

(6) 各条文中的参数都根据 SD134—84 的使用情况，国家标准 GB50086—2001 及行业标准 SDJ57—85 确定的。

## 6.6 埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计

近年来，随着高水头引水式电站，特别是抽水蓄能电站的发展，埋藏式高压钢筋混凝土岔管应用得越来越多，积累了不少成功经验。实践证明，只要设计合理、工程措施得当、施工质量可靠，这种岔管型式有明显的优越性，是值得推广的。

通过调研和查阅广蓄、天荒坪、宝泉、二琅洞、蒲石河、荒沟等工程的资料，将比较成熟的共性的经验归纳成条文，有利于推广应用。

**6.6.2 高压钢筋混凝土岔管所在的位置距钢管和厂房都较近，所以对围岩的要求较高。国内外的工程实践都说明，高压钢筋混凝土岔管及其前后一定长度的洞段必须满足覆盖厚度要求、水力劈裂要求和渗透稳定要求。为保证围岩承受高内水压力，不因局部地质构造处理不当造成渗透失稳，高压钢筋混凝土岔管宜布置于 I、II 类围岩洞段。对 III 类围岩，应通过论证且有可靠的工程措施才可采用。而 IV、V 类围岩洞段即使采用高代价的工程处理措施，也可能由于施工原因留有隐患，故不得布置钢筋混凝土岔管。**

**6.6.3 高压钢筋混凝土岔管的体型、分岔型式、分岔角度将直接影响水力学条件、结构的应力分布（包括岔档处的应力集中）、施工难度和对质量的保证率。因此，应通过综合分析后决定。**

由天荒坪、宝泉、蒲石河等工程的计算分析成果可见，岔管的分岔角度不宜过小。过小的角度不仅为岔档部位开挖造成困难，容易引起局部围岩松动，甚至失稳，而且易引起应力集中。广蓄电站的经验以  $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$  为宜，过大的角度对水流流态不利，也将造成开挖跨度增大，对围岩稳定不利。

**6.6.4 高压钢筋混凝土岔管设计时应进行围岩和结构的应力分析**，以确定采用钢筋混凝土岔管的可行性和合理性，确定在具体条件下使用的可靠性，明确为保证安全运行所必须采取的工程措施。由于受基本资料精度的限制〔如地应力（场）、围岩的岩层结构、围岩渗流场等〕以及施工质量的不确定性、数值计算方法的差异等因素的影响，故条文中提出可通过计算分析和工程类比确定。

实际上钢筋混凝土岔管由于各种原因都会出现裂缝，对高  $DH$  值的岔管进行抗裂设计，即使用预应力灌浆也很难达到要求（广蓄电站实测资料表明，由于裂缝的存在，高压岔管内外水压力差明显减少）。但是，也必须控制渗流量，过大的渗水会给其连接的高压钢管、后部的厂房带来许多问题。渗流量的估算可通过渗流分析进行。

关于裂缝的计算公式，我国现行行业标准 SDJ20—78 和 SL/T191—96 中都给出了明确算法，也便于应用。广蓄、天荒坪、宝泉等电站在高压钢筋混凝土岔管计算时采用了美国混凝土协会 AC122·4R 的裂缝计算公式。我国公式与美国公式的共同点为限裂钢筋允许应力都与钢筋的布置（钢筋间距、钢筋中心至衬砌边缘距离）有关。不同点是我国公式中限裂钢筋允许应力还与钢筋直径有关，而美国公式中的限裂钢筋允许应力与钢筋直径是无关的。工程实践和研究试验表明，钢筋直径与裂缝开展是有关的，即小直径、密分布的钢筋有利于控制裂缝发展。此外，美国公式计算的限裂钢筋允许应力比我国公式计算值要大。从设计的安全性和规范使用的统一性考虑，建议仍用我国公式，并用不同公式相互印证。

从广蓄、天荒坪、蒲石河、荒沟等工程的结构应力分析看出，在内水作用时由围岩承担大部分荷载，结构应力分布比较均匀，岔档处应力集中系数不大。为简化计算可采用平面元，主要控制腰梁、U形梁、岔档和最大开挖跨度剖面的应力、应变；在外水和其他外部荷载作用下，上述控制部位的应力分布及变形值受岔管体型、分岔角度、边界轮廓的影响很明显，平面计算则简化太多，宜用空间元计算。

**6.6.5、6.6.6** 为了使混凝土和钢筋的应力分布更协调，并提高混凝土的抗拉能力，国内已有设计和运行的高压岔管，混凝土强度标号均不小于 R250。

从应力分析和围岩承担率看，岔管结构越薄越有利。但是，承担外水压和其他外荷载还需要结构有一定的刚度，施工期和检修期结构具有必要的厚度就显得更为重要。因此，结构厚度宜通过必要的计算分析和工程类比（主要是施工条件）决定。结构厚度确定之后，对应力集中区宜采用修圆、修角、加强配筋或局部加厚来满足要求。同时，从水力学条件看，修圆、修角是合适的措施。

做好高压岔管所在部位和前后一定长度洞段的回填灌浆，是使结构与围岩共同承载的保障。广蓄和天荒坪的经验证明，由于开挖轮廓的不规则性，通过回填灌浆才能保证结构和围岩成为很好的联合体。固结灌浆是提高围岩整体性和弥补局部缺欠的有效措施。从内水压的角度看，围岩越完整其承受能力越大，围岩的稳定性越好。

**6.6.7** 高压钢筋混凝土岔管在我国的应用尚在发展阶段，还有许多问题有待研究。因此，无论从岔管的重要性还是从保证安全运行上，都应对高压钢筋混凝土岔管进行设计和监测，根据监测成果修改设计，验证设计的正确性，积累经验和教训。

## 6.7 衬砌的分缝

**6.7.1** 设置永久变形缝的主要原因是避免不同刚度联结部位、不

同地质条件变化部位、变形复杂（如洞室交叉处）部位、进出口有临空面、约束条件变化较大部位等不会因温度、混凝土收缩、沉降、外荷载变化及约束条件等的较大差异引起联结断面脱开、较大变形、应力集中等危害隧洞正常运行的情况发生。故条文中给出可能发生上述问题的部位应设置永久缝。

施工缝是由环境温度、地质条件、施工进度等条件控制，故对地质条件较均一的洞段建议只设施工缝。

**6.7.2** 近年来的隧洞施工分段有加长的趋势。考虑施工缝处理不好会造成透水通道，成为结构的薄弱环节，在地质条件均一性较差的洞段不宜过长分缝，而对地质条件较好的洞段，可适当加长分缝长度。故分段长度应结合围岩情况、具体工程条件、施工能力等研究确定。

本条建议的 6m~12m 是根据多数工程的常用分段确定的，当混凝土标号大于 R200 时，分段长度不宜大于 12m，当采用高标号混凝土时，即使分段长度小于 6m 也会出现裂缝。隧洞裂缝产生的原因很复杂，如与混凝土标号（水泥含量）、水泥特性、施工环境温度（包括入仓温度）、地质条件、围岩的平整度、围岩的约束情况、浇筑工艺等许多因素有关，故应在施工中不断总结归纳，使之更趋合理。

严格规定底拱和边顶拱的环向缝不得错开，是因为错开后衬砌结构的完整性受到了破坏，衬砌结构很可能变成环向不连续体。同时，环向缝错开给止水布设造成很大困难，可能人为造成不封闭止水。故严格要求底拱和边、顶拱的环向缝不得错开。

**6.7.3** 对有压隧洞和有防渗要求（严格和一般）的无压洞，衬砌的环向施工缝应根据地质条件、防渗要求的级别、内水压的大小、衬砌结构的防渗措施等具体情况，采用凿毛、接缝钢筋（或穿缝钢筋）、设止水结构等措施，防止内水外渗造成影响。

**6.7.4** 施工缝所处位置是结构整体性较薄弱部位，要求在拉应力和剪应力均较小的部位设置纵向缝。

衬砌结构混凝土浇筑通常都是先浇底板、边墙，再浇顶拱，这

样可避免出现施工造成的结构反缝。由于混凝土收缩使反缝成为透水通道，该缝与环境温度、水泥用量、龄期、施工方法等因素有关。结构反缝一般处理上都比较困难，一旦造成反缝，必须严格处理，如采用压浆混凝土、微膨胀混凝土、局部灌浆、预留二期混凝土并灌浆等。即使这样处理，反缝面止水也极易造成振捣死角，甚至因空气排不出而形成空穴、孔洞。故条文要求当造成反缝时，必须对缝面进行妥善处理，以至进行专门设计。

**6.7.5** 钢筋混凝土衬砌结构与钢板衬砌连接时，由于两种衬砌结构的抗渗条件不同（包括外水作用），必须有一个过渡段，即连接段，用以设置钢板衬砌前端的止、排水设施。该连接段长度取决于内水压力大小，以及运行期围岩的渗流场变化，按我国已建工程经验，对中低压洞一般都大于 1.0m，故条文规定不小于 1.0m。

## 6.8 封堵体设计

几乎每个长水工隧洞、导流洞都有封堵问题，我国工程实例较多，计算方法多种多样，还没有一个统一的原则。鉴于此，本规范给出封堵体设计的一般原则，并推荐了按刚体静态剪切原理计算封堵长度的方法。

**6.8.1** 封堵体布置应注意地质条件、前期支护、相邻建筑物的布置。封堵前应对支护进行认真的清理、检查，以保证封堵的安全运行。封堵体与相邻建筑物的防渗应有较好联系，以保证枢纽防渗要求。

**6.8.3** 关于封堵体设计说明如下：

(1) 以往我国确定堵头长度多采用如下几种方法：

- a. 按封堵洞径的倍数；
- b. 经验公式；
- c. 套用混凝土重力坝的抗滑稳定理论；
- d. 用“圆柱面冲压剪切原则”。

随着有限元等数值计算的发展，我国一些大中型工程，如鲁

布革、二滩、莲花、东风等电站都采用了三维有限元计算来校验封堵体的型式和长度。三维有限元计算不仅能考虑正常设计水头下封堵体及其围岩的应力、应变状态，而且可对破坏极限及安全系数进行论证。三维有限元计算中可计及隧洞的二次应力、灌浆残余压力、不良地质构造等，有弹性、弹塑性等力学模型，是选择封堵长度的较好方法。考虑到三维有限元计算成果与以往常用方法选择的堵头长度差别较大，不易被接受，本规范推荐与三维计算成果拟合比较好、又易接受的冲压剪切计算方法。

(2)“冲压剪切计算方法”认为，堵头在水推力作用下存在沿周界发生剪切破坏的趋势，堵头的安全条件是周界上的平均剪应力小于混凝土与岩石间的容许剪应力。将封堵体视为静水作用下的刚体，剪应力沿周界均匀分布。

图1绘出了一些堵头按平均剪应力统计的工程实例。

由图1看出国外工程 $[\tau]$ 值多为0.1MPa~0.3MPa，国内值比国外值偏小。在一定封堵长度内，有限元计算也表明沿周边的剪应力分布是均匀的，与按式(6.8.3)的计算结果比较吻合。关键是 $[\tau]$ 值的选取，若取0.2MPa~0.3MPa，相当于安全系数为2.5~3.0。

**6.8.4** 封堵体属大体积混凝土，应采取有效的温控措施，如控制入仓温度、低温浇筑、合理分层分块、减少水泥用量、采用低热水泥、掺粉煤灰、设循环水降温等。必要时可采用微膨胀水泥，即可控制温度，又能减少接缝灌浆（或回填灌浆）工作量。但由于该种水泥各生产单位标准不统一，有的还是施工单位自己配制，故应做试验后采用，并应做专门的设计。

**6.8.5** 沿顶部和周边缝漏水是封堵体失败或失事的主要原因之一，故必须做好回填灌浆，必要时应根据环境温度、施工工艺、封堵材料、封堵体的体积和体形等具体情况，进行封堵体变形（收缩）稳定后的二次回填灌浆。在灌浆设计时宜考虑二次灌浆问题，留好灌浆条件。

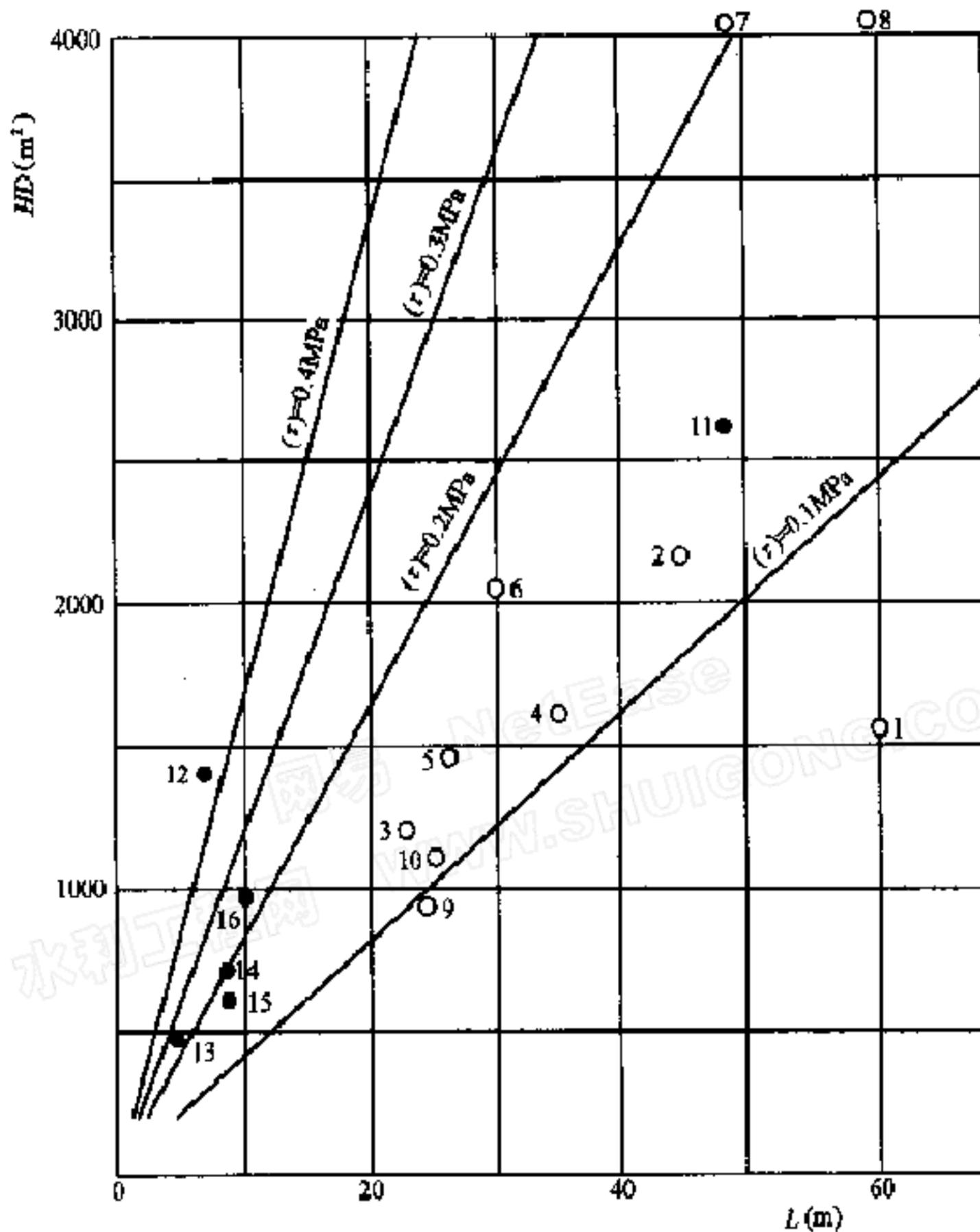


图1  $HD \sim L$  关系实例图

○中国工程；●外国工程

- 1—刘家峡（堵头施工1968年），2—龙羊峡（1986年），  
 3—鲁布革（1988年），4—漫湾1（1998年），5—漫湾2（1993年），  
 6—东风（1994年），7—二滩1，8—二滩2，9—莲花（1998年），  
 10—小山（1997年），11—Mica（1973年），12—Gordon（1974年），  
 13—Machintosh（1980年），14—Murchison（1982年），  
 15—Bastyan（1983年），16—Reece（1986年）

## 7 不良地质洞段设计

不良地质洞段是水工隧洞设计和施工中常遇到的问题，能否处理好不良地质洞段问题，不仅为设计、施工、运行人员最关心，而且往往直接影响工期、前期投入和运行安全。有鉴于此，在总结成功经验和失败教训的基础上，将某些需要工程特殊处理的内容归纳成原则性条文，推荐给设计人员参考。

**7.0.1** 不良地质洞段虽然是在不良地质条件下产生的，但两者在范围上有所不同。不良地质洞段是针对水工隧洞局部洞段出现的不良地质情况，不良地质条件是更大范围以至就全隧洞而言。不良地质条件的评价和对水工隧洞的影响，应该在水工隧洞布置阶段通过对区域地质、地质构造运动、岩体生成条件和年代的分析研究和必要的勘察工作确定，对重要的或较大的不良地质条件甚至应动用重型勘察手段查明，水工隧洞布置应避免这些不良地质条件。但是，对不良地质洞段，有些在布置阶段可以查明，有一定的预报（预测）时可研究适宜的工程措施（包括施工措施）处理；大多数情况下是在施工中逐渐揭露出来的，是水工隧洞设计和施工中很难避免的。故条文中给出的不良地质洞段仅指局部洞段的不良地质情况，不包括与整条隧洞布置有密切关系的不良地质条件。

不良地质洞段的界定是个复杂的问题，即包括工程地质、水文地质分类，对水工隧洞运行的影响，又直接涉及施工组织设计和支护（衬砌）型式选择，故条文中以局部洞段为出发点，按是否进行特殊处理，提出了水工隧洞常见几种不良地质洞段的设计原则。

**7.0.2** 不良地质洞段支护设计的原则是基于新粤法施工原理，现借鉴几个工程中对不良地质洞段的成功处理经验提出下列意见。

1 实践证明，认真执行新粤法施工的各项原则，大多数情况

都可处理由地质构造引起的坍塌问题，引滦入津工程处理宽达三十几米的涌水断层破碎带即是成功例证。该工程中，按新粤法原则采用在掌子面上喷射混凝土、超前裂缝式锚杆、分断面控制爆破、引排水、全程变形观测、二次锚喷支护及变形趋于稳定时的钢筋混凝土衬砌等一套施工工艺，成功地解决了破碎带和断层造成的围岩失稳问题，没出现较大坍塌，保证了工程进度。

支护型式和支护时间的选择对处理不良地质洞段非常重要。采用新粤法施工时对软岩、松散岩、破碎带、膨胀岩、易泥化岩等，要求开挖后即时紧跟掌子面喷射混凝土一期支护；随后根据变形（位移）速率进行二期支护。一、二期支护都参与围岩的应力调整，要求一、二期支护既能降低围岩的变形速率，又使围岩逐渐形成承载拱，以充分发挥围岩的自承能力。因此选择二期支护的刚度和时间，必须根据围岩的岩性和观测数据确定。刚度过大则支护过多地限制了围岩变形，不利于围岩发挥自承能力，刚度过小则控制不住围岩的变形速率，易导致围岩失稳。同样，二期支护过早则二期支护将承受较大的围岩变形压力，甚至使二期支护本身遭到破坏，而二期支护过晚，即在围岩变形曲线的反弯点以后支护，则围岩已经出现松散破坏，二期支护失去了意义。总之，支护型式和支护时间的选择应根据不良地质洞段的类型、地质预测（预报）、施工监测成果、前一期支护的效果随时进行分析、调整，才能防止围岩失稳的发生和扩大。

2 地质预测（预报）是处理不良地质洞段所必须的手段，也是选择施工方法、处理措施的前提，根据预测（预报）作好预备方案设计，并应考虑意外情况的发生，有备而无患。需要支护处理的不良地质洞段，应通过工程类比和必要的计算分析选择可行的支护方案，计算分析中应留有安全裕度。

提前和尽早发现不良地质情况是不良地质洞段设计、施工的重要一环，超前勘探是行之有效的手段。超前勘探基本上有两种做法：其一，根据初步设计阶段的地勘成果，有针对性地进行施工前的补充勘探；其二，根据施工中临近洞段围岩出现的地质现

象，利用导洞、专门探洞（井）、分段分步开挖、水平钻探等手段，在全断面开挖前进行勘探。为了较好地掌握地质情况，超前勘探中应进行必要的物理力学测验和现场监测，以便为地质评价和预测（预报）提供原始资料。

**3 支护后的围岩变形（位移）监测**是不良地质洞段检查一期支护效果，选择衬砌型式和衬砌时间或其他工程措施所必须的内容。衬砌时间即要求适时衬砌，适时是指在变形（位移）速率趋于平缓时进行衬砌，此时围岩具备了一定自承能力，衬砌结构承受较低的变形压力，是最合适的衬砌时机。适时衬砌既可使衬砌结构承受较小外荷载，又能充分发挥围岩的自承作用，在内水压力作用下围岩可承受较多内荷载。如果各期支护仍不能控制变形（位移）速率，此时围岩还不具备自承能力，需要立即由衬砌结构承受围岩的主动压力，以保证围岩稳定。支护和衬砌结构这两种作用不同的衬砌时机的确定，关键是对围岩的监测和对监测成果的分析判断。

施工监测应根据不良地质洞段的具体情况采用不同的方法和不同的内容，如人工巡视，进行收敛、沉降、围岩中的位移、裂缝宽度、声波等测验，检测锚杆拉应力，支护应力应变，以及对渗水量、渗水压力、地温、有害气体的测验，对膨胀岩的膨胀率、软岩及流变岩的时效应力检测或试验，对围岩的物理力学指标测验或试验等等。

**4 对预测（预报）可能出现坍塌失稳的不良洞段**，除进行上述各项工作外，采用围岩加固措施也是工程中防止坍塌特别是较大规模坍塌的成功经验。开挖前的围岩加固措施，如超前固结灌浆、超前锚杆、超前导管、长管棚、地面砂浆锚杆、地面注浆等，对不同类型的失稳都有较好的作用。

**5 不良地质洞段支护型式的结构计算**，采用锚喷结构时可按本规范 6.5 的规定进行，对其他支护型式的结构计算，由于受力条件比较清楚，推荐采用结构力学方法。

**7.0.3 不良地质洞段的衬砌设计**主要问题是外荷载和围岩经支

护处理后承担内水压力的能力。经过支护后围岩稳定或基本稳定时，围岩的变形压力可不计或少计；而当衬砌结构参与围岩变形应力调整时，衬砌结构就承受较大的变形压力；若围岩始终形成不了承载拱，则衬砌结构将承受全部坍塌体重力。故衬砌结构设计时的外荷载取值除内水压外，应根据变形（位移）监测成果，通过必要的计算分析和工程类比确定，防止出现荷载取值小，给工程安全造成隐患，或者荷载取值大，造成投资浪费。

不良地质洞段经过支护以后即使达到稳定，也不意味围岩一定具有承担内水压力能力（见条文说明 6.1.9）。但通过超前固结灌浆、超前锚杆、地面注浆、地面砂浆锚杆、化学灌浆等开挖前的加固处理，或者衬砌后进行固结灌浆的不良地质洞段，经过以上工程处理后提高了围岩的完整性，使围岩的变形模量有较大提高。可考虑围岩有一定的承担内水压力能力，到底具有多大能力，应结合具体工程分析研究确定。需要指出的是，不宜过高估计不良地质洞段围岩承担内水压力的能力，以免为工程运行留有安全隐患。

**7.0.4** 对预测（预报）可能出现坍塌失稳的不良地质洞段，在开挖前宜进行专门的施工组织设计，包括是否需要围岩加固、预备支护方案、施工程序和方法（如控制爆破的方式和参数、控制进尺、导洞先行、分层分步开挖、一期或后期支护的型式和时间等）、意外情况的预估、超前勘探、施工监测以及工期和预算。

**7.0.5** 伴有地下水活动的不良地质洞段，工程处理上难度更大，对地下水特别是高压水应该以引排为主。引滦入津工程采用的一种由铁板卷成的自涨式开口锚杆是一个比较成功的引排例证，该种锚杆打入围岩后既可通过缝隙和中空排水，又可利用自涨性与围岩贴合，起到局部加固作用。对水源明确、水量不大的涌水，采取截断水源的方法也是有效措施。同样，在围岩有一定厚度时，通过灌浆来封闭涌水通道，提高围岩的抗渗性也是工程中采用的有效方法。总之，先治水是处理不良地质洞段可能出现坍塌的第一环节，是为后序措施的实施创造条件。

**7.0.6** 在广蓄、二滩电站中都出现两组张扭性断层之间的岩爆现象，即局部洞段的高地应力问题。岩爆易造成人员、设备事故。这种集中释放的变形力，刚性结构往往不易承担。为防止围岩破坏向深度和广度上发展，应在了解和基本掌握岩爆（或挤出性变形）强度、频度、范围的基础上，通过必要的现场测试及计算分析确定地应力的方向、大小、方向，预测岩爆（或挤出性变形）的发展，采用改变洞段走向，选择适宜的断面型式，安排合理的开挖程序，施设应力释放洞、喷锚支护及用喷水、灌水、浸泡等措施，达到控制岩爆的作用，以保证施工安全。衬砌结构特别是刚性衬砌结构很难承受岩爆或挤出变形的变形压力，故应在围岩基本稳定后再进行衬砌结构的施工。

**7.0.7** 通过有害气体赋存区的洞段，首先应通过必要的勘测手段查明气体来源，与水工隧洞的连通情况，有害气体的分类、渗漏（涌出）、浓度、赋存区的分布，预测对施工、运行、管理人员的危害。应视实际情况采取隔离、封闭、引排等措施，保证施工人员的安全。对有超标（浓度、含量）洞段或经工程处理后仍可能影响运行安全的部位，在设计中宜考虑永久运行问题，特别是检修期的安全，必要时进行专门设计。考虑到锚喷结构很难起到封闭或隔离有害气体的作用，故条文规定有害气体赋存区不宜用锚喷结构做永久衬砌。

**7.0.8** 喀斯特地区的水工隧洞所遇到的问题很复杂，较大溶洞可能在初设阶段通过地勘有所掌握，但中小型溶洞大多是施工中不断揭露出来的，国内处理方法上也多种多样。根据已有工程较成功的处理经验，将处理原则列成条文，供设计人员参考。

1 对溶洞中的地下水，包括充填物中的地下水，宜采取以排为主，截、堵、防结合的综合处理措施。许多工程实践说明，喀斯特地区的地下水往往连通很广，很难查清，即使暂时截堵效果明显，但往往有新的出水点，易给工程留有隐患。故应视具体情况以排为主，综合处理。

2 从提高围岩整体性考虑，凡可以用回填方法处理的溶洞，

均宜采用回填（回填混凝土、固结灌浆、回填灌浆或其他回填方式）的方法处理。这样既可提高围岩的稳定性，又可避免内水外渗或外水内渗造成新的透水通道，避免溶洞的扩大和失稳。

**3** 大型溶洞既有溶洞本身的稳定问题，也有对水工隧洞的影响问题，既涉及施工期安全，也涉及运行期的安全。条文中列举的几个主要处理措施都是有成功经验的，如××电站就成功采用了跨越的方式；××电站也采用了诸如设专门基础、设隔离体和跨越等多种方式。总之，较大溶洞处理上比较困难，地下水、溶洞本身、运行要求、施工方法等需要全面考虑，是个综合处理问题，应通过技术经济比较确定。

**7.0.9** 具有流变性的围岩主要特点是：围岩本身是较软岩和软岩，其变形时间长、变形速率大，往往运行期仍有变形发生，一旦控制不好，围岩就会失稳。处理流变性围岩关键是搞清此类围岩的时效性和变形过程中的应力应变关系，这样才能在衬砌结构设计时选择合适的衬砌结构、选择适宜的衬砌时间，不给运行留有隐患。膨胀岩大体可分为两类：一是遇水膨胀；二是在临空面上风化性膨胀。不论哪种，都应通过必要的物理力学试验，查清岩体的矿物成分、膨胀原因、膨胀率、膨胀压力，为预留膨胀量和选择衬砌型式提供依据。

上述流变性围岩和膨胀性围岩的共同问题是应根据具体工程特点选择合适的支护方式，确定是否需要封闭断面（包括掌子面）及封闭的时间和方式，确定与之适应的衬砌型式（包括膨胀岩的预留变形量）及衬砌的施工时间。我国对这两种围岩的设计经验还积累不多，设计、施工、运行人员应不断总结，为今后积累资料。

**7.0.10** 对一些在内水外渗时易产生较大变形和渗透失稳的较特殊地质洞段，考虑到地质参数不易准确确定，一旦出现事故可能造成难以处理的后果，从安全角度考虑，设计级别可提高一级。

**7.0.11** 条文中特别强调不良地质洞段的回填灌浆、固结灌浆、防

水排水、止水设计以及施工监测和安全监测，应引起设计、施工、运行人员的重视。实践经验说明不良地质洞段处理好，水工隧洞就基本成功一半。正常洞段设计、施工是精益求精的问题，而不良地质洞段是关系到水工隧洞实施能否成功的问题。

网易 NetEase  
水利工程网 WWW.SHUIGONG.COM

## 8 土洞设计

### 8.1 土洞支护与衬砌

**8.1.1** 根据国内成功实施的土洞设计经验归纳了土洞设计的基本原则，与岩洞设计原则的最大不同是更强调了土洞防渗和土洞设计与施工方法、施工工艺的紧密联系，这是保证土洞设计成功实施的重要环节。

**1** 采用合理的施工方法是较长土洞安全稳定、经济合理的重要因素。盾构法施工对围岩扰动小、施工速度快、配合机械手或预装机构可一次成型，对土洞的稳定、受力条件、排水、通风等都有明显的优越性，但盾构施工机械台班费和设备费较大。故设计时应应对土洞的土质、地下水、埋深、地表下沉要求等作全面分析，对采用常规施工方法和盾构法施工进行比较、选择，使工程既经济合理又安全可靠。

**2** “土洞宜采用喷射混凝土（或锚杆喷射混凝土）与钢筋混凝土组合式衬砌”，主要有两方面原因：一是土洞变形较大，喷射混凝土（或锚杆喷射混凝土）支护适应变形能力较强，必要时还可使用可收缩的钢支撑（钢构）支撑锚喷支护，支护型式选择可更灵活，以适应土洞的较大变形；二是喷射混凝土（或锚杆喷射混凝土）支护可有效保护土洞洞壁不产生泥土剥离或掉落，防止土块落到衬砌施工中的混凝土中造成局部衬砌强度降低和渗漏。

**3** 土洞围岩自稳性差，圆形或马蹄形断面受力条件好，对结构和围岩都有利且较经济。

土洞中的裂隙节理产状与分布对土体稳定影响较大，一旦受到开挖切割易在洞周形成不稳定体，施工中易发生坍塌，危及土洞安全。采用圆形和马蹄形断面对上述情况适应性强，相对来说切割较少，对土体稳定和后续施工有利。

**4** 要求土洞与岩洞衔接的过渡段应设置在岩洞内并要求有

足够长度，是考虑到一般岩土过渡段的岩石岩性较差，很少有完整、厚层或中厚层岩体，通常多为薄层甚至互层岩体。在这样岩体中的过渡段不宜按岩洞设计，而应按土洞的衬砌结构设计，即应有一定长度的土洞结构延伸。该长度应视岩土过渡情况和岩、土体的性状确定，应以采用土洞结构设计的过渡段能满足安全稳定运行要求为原则，不宜也不能提出统一的长度要求，但通常都不小于一个衬砌浇筑段长度。引黄入晋工程采用的过渡段长为8.0m，洞径约为1.1~1.2倍，且为一个浇筑段长度。

要求过渡段的上覆岩体厚度不小于1倍的洞径（洞宽），是因为过渡段是按土洞结构设计的，与其衔接的岩洞是按岩洞结构设计的。为保证两种边界条件衬砌结构的良好过渡，对过渡段岩体厚度应有一定的要求。总结引大入秦和引黄入晋工程的成功经验，提出过渡段的上覆岩体厚度不宜小于1倍洞径（洞宽）。但当岩土过渡段的岩层倾角较缓，即层面较平缓时，将会出现半土半岩段较长的情况，不仅施工较困难，岩层稳定性也较差，此时应注意加强支护措施，以保证岩土稳定。

上述两点，应同时得到满足才能保证过渡段结构安全运行，才能真正起到过渡段的过渡作用。

**5 土体遇水会软化、降低物理力学指标，采取可靠的防止内水外渗措施是隧洞稳定安全运行所必须的。**同样；施工期的地表水和施工用水也会直接影响施工期土体的稳定，要求施工中妥善处理好地表水和施工用水的引排是非常必要的，应避免水渗入到土体中。

在地下水位以下的土洞是较易坍塌的隧洞，设计和施工应引起高度重视。对此类土洞应先处理地下水，降低地下水位，如采用轻型井点、真空井点、深井、超前排水导坑、群井降水等，以保证施工期的土体稳定，并减少衬砌结构的外水压力。对位于高外水位的土洞，采取排水降压后仍不能保证支护的稳定，应采取更可靠的施工措施，如：

(1) 若预计掌子面开挖后洞体自稳时间短、变形速率大、无法

进行一期支护时，应进行超前锚杆、超前管棚等超前支护，并应采用喷射混凝土先行封闭掌子面和顶拱，然后再支护再进行断面开挖。

(2) 对松散堆积层、砂层、流砂层及土质极差的土层，可通过预注水泥浆（水泥砂浆）、化学灌浆、地面灌浆等方法，先行加固，再进行开挖及其支护。

(3) 对饱和粉土和砂土，可采用冻结法加固洞周土体。但对水下砂砾层，含水量在 10% 以下或渗流流速小于  $1\text{ m/d} \sim 5\text{ m/d}$  的土层，以及地温高于  $30^\circ\text{C}$  的土层都不宜采用冻结法。

(4) 对软粘土应使用泥水（或土压）平衡式盾构施工或采用压缩空气法施工。压缩空气的主要作用在于防止涌水、坍塌和土流失，保证开挖面的稳定，且压缩空气可使透水土层脱水疏干，进而提高地层的强度和稳定性。应注意的是，采用压缩空气法施工时，按劳动保护条例，向封闭的施工洞充气气压不宜大于  $0.2\text{ MPa}$ 。

**8.1.2 推荐的土洞围岩压力取值原则**是国内土洞设计常用的，对不同地质条件的土洞或较长土洞的不同洞段，应结合具体的工程地质条件研究确定。

(1) 对土洞洞周主动土压力的计算方法较多，按不同方法计算出的土压力相差较大，并且土压力的大小与施工方法、工程地质和水文地质条件、支护型式和效果、隧洞的断面型式及尺寸、衬砌的时间等多因素有关，一般难以准确确定。故应根据具体工程设计条件采用多种方法对比计算，再结合揭露出的地质条件及工程类比，进行分析后确定较符合实际的主动土压力。

(2) 对能形成坍塌拱的深埋土洞，可按松散介质平衡理论（如普氏理论、太沙基理论）估算土压力。近年来，不少工程通过对土洞开挖后的收敛变形与围岩压力的有限元分析，研究变形—压力关系曲线，进而估算允许变形范围内的土压力值，并以此作为设计土压力值。

(3) 要严格界定深浅埋界线是困难的，目前工程界多采用荷

载等效高度作为判定深浅埋的界线。

按荷载等效高度分界的判定式如式 (1) 和式 (2)：

$$H_p = 2.5H_g \quad (1)$$

$$H_g = q/\gamma \quad (2)$$

式中  $H_p$ ——深浅埋土洞的分界深度，m；

$H_g$ ——荷载等效高度，m；

$q$ ——深埋土洞按松散介质平衡理论计算出的垂直均布土压力，MPa；

$\gamma$ ——土的容重， $10^3\text{kN/m}^3$ 。

(4) 不能形成坍落拱的深埋土洞，衬砌初期其土压力可能较小，随着时间的推移，土体发生蠕变，土压力可能渐渐增大，有时土压力可增至全部上覆土压力。故对此种不能形成坍落拱的深埋土洞，应进行专门研究，不宜一律按全部上覆土压力计算，也不应不考虑其蠕变影响。

(5) 膨胀土中隧洞所受土压力，除正常土压力外，还有膨胀压力。膨胀压力不仅与土体膨胀率有关，而且与土体结构、土粒成分有关。在封闭条件下（隧洞不预留膨胀量）土体膨胀后产生的压力不仅作用在隧洞衬砌上，同时也在挤压周围土体，是一个较复杂的问题。因作用在隧洞衬砌结构上的膨胀压力较难确定，工程中的实测数据和试验数据表明，作用在衬砌结构上的膨胀压力有时可超过全部上覆土压力。鉴于膨胀土的膨胀力主要是因土的含水量增加而产生的，因此应特别注意环境湿度、内水外渗、外水内渗对膨胀力的影响，通常都通过实验室和现场试验确定膨胀作用力。

(6) 对有地下水作用的洞段，衬砌结构同时承受外水和土压力两种作用，衬砌结构设计应注意荷载取值问题。岩洞的外水压力作用一般都是以基岩裂隙的形式出现。外水压力取值应根据开挖后揭露出的洞壁出水情况进行折减，而土洞通常都表现为均匀渗流，外水压力取值的大小取决于水源（包括补给）和出露点。所

以，对高地下水的土洞应尽量采取措施减低外水压力，否则不仅外水压力过大，而且可能给运行留下隐患。

(7) 钢筋混凝土衬砌都是透水的，长期运行后内水外渗（或由于其他原因造成的内水外渗）都将使洞周土体的含水量增大，进而不仅使土体的物理力学指标降低，同时使土压力因容重改变而增大，设计时应考虑这种影响，并注意内水外渗对土体稳定和对环境的影响。

**8.1.3 建议的土洞衬砌计算原则主要是总结引黄工程的经验提出的，现说明如下：**

1 土洞支护主要是限制开挖后有较大的变形，控制变形速率，但应允许洞周有一定的变形量，与一般岩洞相比其变形量较大。支护设计通常采用 GB50086—2001 给出的方法或用有限元进行估算，但都应结合工程类比和施工监测成果进行修正。土洞的衬砌结构计算一般都不考虑支护结构的作用，只是将其作为安全储备，全部荷载均由衬砌结构承担。若支护结构控制住变形，即洞周土体变形达到基本稳定，可视具体情况适当减少衬砌结构所承担的土压力。

衬砌结构的计算目前尚无统一的方法，一般先估算土压力，再用结构力学方法计算内力。

2 洞周支护的允许收敛值及顶拱下沉允许值，因土质的多变性和复杂性，很难规定其准确值，应根据工程的具体情况，考虑土体结构、土体性质、地下水分布和施工监测成果，通过必要的分析计算和工程类比研究确定。没有实测资料时可按行业标准 SDJ57—85 的规定取值。

3 因土的变形模量较小，在内水压力作用下洞周土体给予衬砌结构的弹性抗力较小，衬砌结构设计时不宜考虑洞周土体承担内水压力。对固结较好、物理力学指标较高且地下水位低于洞底高程的土洞，可适当考虑洞周土体的弹性抗力，但应经过认真的研究分析，尤其应注意内水外渗时对地下水位的影响。

## 8.2 土洞衬砌分缝及防渗止水

8.2.1 土洞因本身特点其防渗止水要求比岩洞高，故除满足 6.7 有关分缝的要求外，结合防渗止水要求增加了有关规定。

8.2.2 强调土洞的衬砌结构每 6m~12m 设一道变形缝，是因为衬砌结构受洞周土体的约束小，温度影响对衬砌结构很明显，分缝过长受温度变化的作用易产生环向裂缝。此外，土洞的洞口段（引黄工程定为距洞口长 200m）因受外界气温变化影响大，分缝间距宜取小值，且洞口段的地质条件往往不如洞内，也宜加密分缝。鉴于明止水易检查、易维修，为提高防渗效果，变形缝宜采用明暗两道止水，以防止内水外渗，为安全运行创造了便利条件。

8.2.3 条文明确指出纵向缝必须凿毛。作为强制性条文，是考虑土洞应严格防止内水外渗，应加强衬砌结构的整体性，不给运行留有可能的渗水通道。同样，从防止渗漏考虑禁止出现反缝。反缝本来很难处理，在土洞中用灌浆、压浆混凝土、微膨胀混凝土处理存在的反缝，很难不产生施工冷缝的问题，故条文明确不应设置反缝。

8.2.4 要求纵向与环向止水做成封闭止水体的原因，就是使衬砌结构在运行期不产生或少产生渗水通道，进而防止洞周土体的稳定性受到破坏，保证运行安全。

8.2.5 湿陷性黄土遇水后除物理力学指标降低外，一个重要的问题是当相邻断面或相邻洞段含水量不同时，由于物理指标的较大差异，将出现较大的不均匀沉陷。一旦出现往往造成止水破坏，甚至引起结构破坏。因此，要求设柔性止水。

为防止相邻岩洞段的渗水浸入到湿陷性黄土洞段，避免湿陷性黄土洞段因遇水而恶化土体条件，提出在湿陷性黄土与岩洞的交界面部位设置阻水防渗帷幕。

## 9 隧洞灌浆、防渗和排水

### 9.1 灌 浆

**9.1.1** 要求混凝土和钢筋混凝土衬砌结构的顶部必须做好回填灌浆的原因有如下几点：

(1) 衬砌结构顶部施工中都存在缝隙，这种缝隙是由两个原因造成的：其一，混凝土浇筑和凝结过程中由于自重作用和收缩（或干缩），使混凝土与围岩之间形成缝隙；其二，开挖岩面不平整（在允许平整度范围内）以及局部超挖，正常浇筑很难填满这些空腔、凸凹不平，衬砌结构的顶部与岩面之间形成缝隙或空腔。

(2) 考虑围岩承受内水压的衬砌结构，只有通过回填灌浆充填顶部的缝隙，才能保证围岩能够承担内水压，否则将改变衬砌结构的设计条件，对衬砌结构是危险的。

(3) 洞顶变形空间在内外水的作用下（包括内水外渗），对围岩稳定是不利的，甚至造成新的坍塌失稳，回填灌浆以后可消除或减少这种隐患。

(4) 近年来的施工实践证明，即使做了回填灌浆，但由于回填灌浆不密实或局部超挖没填满，在隧洞运行中内水外渗抬高了地下水位，放空历时不够，也会造成衬砌结构破坏。如×××工程压力钢管与下水平钢筋混凝土衬砌接头部处于断层影响带后部，由于没进行回填灌浆，运行中内水外渗恶化了断层影响带的稳定条件，运行中即出现接头部位顶部的衬砌破坏，放空检查发现顶部混凝土已剥离破碎，钢筋裸露。由于没进行回填灌浆或回填灌浆不密实造成衬砌破坏的例子不乏报道，故从安全运行角度要求必须做好顶部的回填灌浆。

**9.1.2** 条文给出的回填灌浆范围和孔距、排距是根据多年来的工程实践归纳的。考虑到近年来岩洞的回填灌浆压力都超过SD134 84规定的0.2MPa（如××工程采用0.4 MPa，××工程

采用 0.3 MPa，××工程采用 0.5 MPa)、混凝土衬砌与钢筋混凝土衬砌的承载能力差别以及不同衬砌厚度的不同承受能力，条文中提出“灌浆压力应视混凝土衬砌厚度和配筋情况确定”。

条文中建议的混凝土和钢筋混凝土的不同灌浆压力值，是根据已建工程的统计资料确定的，允许根据实际情况采用其他压力值。

水工隧洞开挖施工中不可避免地都存在超挖、局部掉块，受地质构造影响也经常出现局部坍塌。为保证这些部位的灌浆效果，使灌浆时能顺利排气，浆液充满这些部位，条文规定在塌陷、溶洞、较大超挖等部位预埋灌浆管和排气管，其预埋管的数量和位置应据实际情况确定。

**9.1.3** 土洞系指建造在粘土、软粘土、砂、流砂、砂砾等地层中的隧洞，洞周土层的强度指标都小于软岩，甚至为极软岩。因此回填灌浆的压力不应过大，否则可能破坏洞周土层的原始状态。宜采用低压灌浆，已建工程一般多小于 0.2 MPa。

土洞设柔性止水的目的是防止在不均匀沉陷时止水被破坏，而柔性止水又多设在湿陷性黄土洞段，一旦止水破坏将不易修复，故要求预留灌浆孔，并在扫孔和灌浆时不得破坏或穿透柔性止水。

**9.1.4** 回填灌浆形成的水泥结石应满足设计要求，水泥结石的弹性模量宜大于围岩的弹性模量，以起到传递抗力的作用，为此要求进行灌浆试验，合理确定灌浆参数，保证灌浆质量。

**9.1.5** 并非所有水工隧洞都要固结灌浆，国内各已建工程对固结灌浆范围都有不同要求，有全断面固结，有部分顶拱固结，有顶拱、边拱固结，还有不进行固结，这说明应根据具体工程确定固结灌浆的必要性和范围。有些情况可不进行固结灌浆，如当围岩单位吸水率  $\omega < 0.01\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$  时可不进行固结；吃浆量很小时可不进行固结；当裂隙为泥质充填根本不吃浆时也可不进行固结；围岩不承担内水压或没有抗渗要求时也可不进行固结；而遇大型溶洞根本没办法进行固结。固结灌浆的目的即为改善围岩的整体性，提高围岩的变形模量，故应根据具体工程的需要确定

固结灌浆。

根据工程经验提出了固结灌浆参数的建议值，原则是既要达到浆液充分充填，又要防止采用过高的灌浆压力造成衬砌结构破坏，对一般隧洞灌浆压力的上限定为 2.0 倍内水头。

统计我国高水头水工隧洞固结灌浆压力大多都小于 1.5 倍内水头，并小于围岩最小主应力。如天荒坪电站设计水头 680m，固结灌浆压力采用 9.0MPa，广蓄电站设计水头 535m，固结灌浆压力取 6.5 MPa，两电站灌浆压力约为设计水头的 1.32 倍。故条文给出高水头电站的倍比上限为 1.5。

**9.1.6** 采用灌浆式预应力衬砌结构的隧洞，其预应力的形成和保持与围岩条件、灌浆工艺有密切关系，条文中给出预应力灌浆的三个程序是国内外灌浆式预应力隧洞的基本做法。

1 围岩都存在裂隙节理，不是一个完整的结构，并且开挖过程中爆破和围岩应力调整使围岩存在松动区，通过固结灌浆改善围岩的完整性，提高围岩的承担内水压力能力，提高围岩的物理力学指标，才能使预压应力的形成和保持达到设计要求。

2 开环是预应力灌浆的重要环节，通过开环后形成的环缝才能施加灌浆预压的作用。通常的做法是在较低压力下 (0.5 MPa) 冲洗灌浆孔，吸水量达到稳定时再逐渐提高压力使之达到开环。

3 开环后回水变清即进行水泥灌浆，灌浆浆液充满开环形成的环缝，水泥在稳压下结石，达到施加预压应力的效果。灌浆时灌浆压力应适当加大，从而获得较高预压应力。

**9.1.7** 在衬砌与围岩界面之间进行高压灌浆是衬砌获得和保持预应力的关键，由于地质条件的千差万别，灌浆工艺、参数、材料是非常重要的，各工程都有共性但又各不相同。为使衬砌获得均匀的预应力，保持较好的预压效果，对灌浆工艺、材料配比、灌浆压力、稳压时间、松弛系数、徐变度、干缩等应进行现场试验。

表 3 给出国内外灌浆式预应力混凝土工程实例供设计人员参考。

表 3 国内外灌浆式预应力混凝土工程实例

工程名称	国别	地质概况和围岩力学特性	隧洞特征					灌浆情况				效果及运行情况
			长度 (m)	内径 (m)	初期厚度 (m)	内水压力 (MPa)	灌浆压力 (MPa)	灌浆孔深 (m)	断面孔数 (个)及间距 (m)			
英占里	前苏联	石灰岩, 岩层具有陡倾角层理, $f = 6 \sim 8$ , 沿层理方向 $k_0 = 100 \text{kg/cm}^2$ , 垂直方向的 $k_0 = 300 \text{kg/cm}^2$	总长 16500, 预应力混凝土段长 13300	9.5	0.5	首端 1.05, 末端 1.55	一期 0.71, 二期 1.53, 三期 3.5~4.0	一期 3.5, 二期 6.5, 三期 5.0	孔数 17, 间距 3	1979 年发电 岩石抗力系数增大 2~4 倍, 岩石渗量减少 90%		
拉马	南斯拉夫	白云灰岩、层状泥灰质灰岩、石英绢云母片岩等, 裂隙不发育, 部分大裂隙均被破碎物充填, 岩体变形模量的垂直方向为 $10 \times 10^4 \text{MPa}$ , 水平方向为 $16 \times 10^3 \text{MPa}$	9500	5	0.3~0.4	最初 0.6, 最后 1.0	2.0~4.0	2.5~3.5	孔数 8, 间距 3	1968 年 10 月开始承受内水压, 每年都对隧洞进行检查, 隧洞内无裂缝也无任何损坏		

续表

工程名称	国别	地质概况和围岩力学特性	隧洞特征					灌浆情况				效果及运行情况
			长度 (m)	内径 (m)	初砌厚度 (m)	内水压力 (MPa)	灌浆压力 (MPa)	灌浆孔深 (m)	断面孔数 (个)及间距 (m)			
戈尔登	澳大利亚	坚硬的石灰岩，岩石初始应力垂直方向为 10MPa，水平方向为 20MPa，岩体变形模量为 $25 \times 10^3$ MPa	总长 250，灌浆 150	8.2	设计 0.4，实际 0.6	3.0	3.5 开始，2.1~2.8	灌浆软管沿圆周设置 $D=127$ mm	间距 2.5	在衬砌与围岩接触缝内做预应力灌浆，岩面上涂脱模剂，1974 年 10 月灌浆，11 个月后预应力未减少		
瓦因别尔格	联邦德国	构造破碎和局部风化的片麻岩	1640	3.5	0.4	1.8	4.0	3.5	孔数 12	运行 6 年后检查无任何损坏，用地震法测得弹性模量达 $20 \times 10^8$ MPa，渗透流量为 0.025L/s，渗透率(通过每 1000m <sup>2</sup> 水道内表面积的内水外渗流量) 1000m <sup>2</sup> 覆盖比 $H/P=0.278$		

续表

工程名称	国别	地质概况和围岩力学特性	隧洞特征					灌浆情况				效果及运行情况
			长度 (m)	内径 (m)	初砌厚度 (m)	内水压力 (MPa)	灌浆压力 (MPa)	灌浆孔深 (m)	断面孔数 (个)及间距 (m)			
雷扎赫	联邦德国	构造破碎和局部风化的片麻岩	1319	4.9	0.4	2.3	4.0	4.5	孔数 12	运行 10 年后检查无任何损坏,覆盖比 $H/P = 0.282$		
罗泽兰—巴迪	法国	页岩、片麻岩和灰岩	12600	4.2	0.2~0.3, 部分用钢筋混凝土	1.16~1.63	8.0	3.0	孔数 12, 间距 2.5			
弗斯捷尼奥格	英国	细粒硬质砂岩	1150	3.25	0.6	2.8	3.5	3.5	1	覆盖比 $H/P = 0.4$ , 灌浆前试验压力 2.8MPa, 灌浆 53L/min, 灌浆后减为 9L/min		
爱库本—士姆特	澳大利亚	砂岩、泥质页岩和石英岩	22000	6.4	0.25	0.75						

续表

工程名称	国别	地质概况和围岩力学特性	隧洞特征						灌浆情况			效果及运行情况
			长度 (m)	内径 (m)	初砌厚度 (m)	内水压力 (MPa)	灌浆压力 (MPa)	灌浆孔深 (m)	断面孔数 (个)及间距 (m)			
白山1号、2号试验洞	中国	1号试验洞为新鲜完整的混合岩，节理不发育，抗压强度182MPa，现场实测静弹模量 $50 \times 10^3$ MPa；2号洞节理较发育，有f16小断层通过，断层泥厚10mm~40mm，岩块强度113.6MPa，实测静弹模量 $23 \times 10^3$ MPa	1号15， 2号20	3	设计0.3， 实际： 1号0.37， 2号0.44	1号1.0， 2号3.0	1号1.0， 2号3.0	0.2, 1.5	孔数8， 间距3	1号在2.5MPa试验内水压力下，衬砌中切向平均应力为零，局部出现0.24MPa拉力；2号内水压力3.0MPa，尚保留12MPa预压应力，至今没有松弛		
白山原型试验	中国	混合岩，通过一小断层与洞轴近正交，弹性模量 $12 \times 10^3$ MPa，单位弹性抗力系数 $K_0 = 10000\text{kg/cm}^3$	48	8.6	设计0.6， 实际0.9~ 1.05	0.6	2.0	3	孔数14， 间距3	1982年5月结束试验时，预应力平均为6.8MPa~7.2MPa，稍有增加，基本稳定		

续表

工程名称	国别	地质概况和围岩力学特性	隧洞特征				灌浆情况			效果及运行情况
			长度 (m)	内径 (m)	初砌厚度 (m)	内水压力 (MPa)	灌浆压力 (MPa)	灌浆孔深 (m)	断面孔数 (个)及间距 (m)	
白山1号引水隧洞	中国	混合岩, 弹模为 $9.5 \times 10^3 \text{MPa} \sim 19 \times 10^3 \text{MPa}$ , $K_0 = 600 \text{kg/cm}^3 \sim 160 \text{kg/cm}^3$	94.5 49	8.6 7.5	0.6 实际平均 0.9	0.6~0.9 1.4	1.0 2.5	3 2.5	孔数 14, 间距 3, 孔数 12, 间距 2.5	1984 年建成运行, 没有发生任何问题
天生桥二级引水隧洞	中国	岩层为灰岩、砂页岩和泥质砂岩, 其中灰岩较好, 砂页岩和泥质岩较差。砂页岩体变形模量为 $5 \times 10^3 \text{MPa}$ , 灰岩为 $15 \times 10^3 \text{MPa}$ , 岩体为层状结构, 多闭合, 主要断面与层面走向基本一致。洞轴线交角为 $45^\circ$	1	8.7	0.6	1	2.0	1	1	在 2.0MPa 灌浆压力下, 围岩得到了充分固结, 原 1.4m 范围的松弛区地质波由 2930m/s 提高到 4190m/s, 承压圈的围岩声速全部达到 4630m/s, 比原来提高 31%, 抗渗能力比原来提高 10~100 倍

**9.1.8** 隔河岩电站引水隧洞采用有粘结后张法预应力衬砌结构，为国内首创，小浪底工程采用无粘结后张法预应力新技术，两项工程都成功运行，为机械式后张法预应力衬砌积累了经验。对有粘结后张式预应力衬砌中的张拉槽与预埋钢质波纹管布设，要求孔道线型准确、绑扎牢固、接头密封、布线平顺，待混凝土强度超过70%设计强度后进行锚索张拉，张拉完毕即时作好孔道灌浆和张拉槽回填，严防漏浆。

**9.1.9** 封堵体属大体积混凝土，由于混凝土的干缩使其周界同围岩（或原衬砌）之间存在缝隙，这些缝隙即是透水通道，故必须做好回填灌浆（顶部）和接触灌浆（周边）。保证封堵正常工作的另一问题是防止出现绕渗。绕渗不仅增加渗漏量（过大时使堵头失效），而且绕过堵头的渗流可能造成围岩软弱结构面或充填物的溶蚀，进而导致围岩渗透破坏、封堵体承载力的下降。故宜根据围岩是否有不利构造影响、是否存在不利结构面、能否保证封堵体正常工作来决定是否进行固结灌浆。

固结灌浆孔的布置及深度应视隧洞的地质条件而定，但考虑到封堵体承受的轴向水推力对围岩的影响深度不大，封堵体主要靠洞周的剪应力平衡，按一般工程做法，在没有围岩深层滑动破坏时，固结灌浆孔深多小于隧洞半径。

**9.1.10** 目前广泛使用的灌浆材料为普通硅酸盐水泥，当地下水有侵蚀性时，可针对其侵蚀性质，选用抗酸等特殊水泥。考虑到火山灰硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥的后加填料易分离，使水泥结石不具备强度，尤其当浆液比大于1:1时不易结石，故工程中的接触灌浆和回填灌浆都不采用该两种水泥。

## 9.2 防渗和排水

**9.2.1** 并非每条水工隧洞都有防渗和排水设计问题，应根据施工、运行检修的要求，实际的工程地质和水文地质条件确定是否进行防渗、排水设计。如无防渗要求的无压洞就不用进行防渗设计，有严格防渗要求的无压洞应做专门的防渗设计；上洞和不良

地质洞段都要做防渗设计；外水压力较大已控制结构设计时应进行排水设计；内水外渗会恶化围岩条件时不仅做防渗设计，也做排水设计。总之，应根据设计条件和要求确定合适的防渗、排水设计。

防渗和排水设计的总原则是堵（如防渗结构、封闭外水水源、固结灌浆）、截（如设防渗帷幕）、排（如排水孔、排水廊道、排水幕、结构外排水管）综合治理，通过技术经济比较选择合适、经济的措施。

**9.2.2** 无严格防渗要求的无压洞，内水外渗虽然压力不高，长期作用对围岩也有一定影响，所以排水孔不宜设在水面线以下。条文的孔位孔深参数是通常采用的数值，宜根据实际条件研究确定。当隧洞跨度较大或侧墙较高，水面线以下是否设置排水孔和锚筋，可视具体抗浮稳定及其他要求决定。

**9.2.3** 虽然有压洞多采用圆形断面而具有较大的抗外水压力能力，但当外水压力很大或采用整体式非圆形断面时，常出现外水压力控制结构设计的情况，此时应研究在衬砌结构外设置排水设施，以降低外水压力的作用。如衬砌结构外与围岩间设纵向及环向排水管、围岩中设排水廊道、设排水帷幕、采用压力灌浆控制渗漏、设计灌浆帷幕等，其中采用压力灌浆控制渗漏且灌浆管与排水管结合时，应安装单向逆止阀，或者防外水内渗，或者防内水外渗。

对围岩存在软弱构造面，构造面的充填物可能在渗流作用下被溶蚀或带走，进而可能影响围岩的渗透稳定时，则应慎重研究是否设置排水设施。对该种情况，工程上有采用固结灌浆的方法，以减少外水压力对衬砌结构的作用。

**9.2.4** 提出三种情况下应研究内水外渗问题是多年来工程经验的总结，也是与本规范强调渗透稳定相协调。

(1) 有压隧洞出口都有边坡渗流稳定问题，即当内水外渗抬高了地下水位，抬高了原自然状态的出水点高程后，可能恶化有顺坡滑坡体的稳定条件，或者过高的地下水位造成山坡抬动，或

者由于浸水后岩石层面间的物理力学指标降低产生新的不稳定滑坡体。因此，应研究内水外渗可能出现的不利条件，一旦有不稳定问题应及时采取措施。工程中由于对出口内水外渗重视不够未及时采取措施造成山体滑坡的事故也不乏报道，如××电站即为内水外渗抬高了地下水位，渗流梯度加大，使裂隙面的泥化夹层物理力学指标降低，最终导致厂房后山坡失稳。

(2) IV、V类围岩多由地质构造或构造运动造成的，其特点是节理裂隙发育，由于构造面的切割，岩体本身的自稳能力较差（包括渗透稳定）。因此，在内水外渗增大原自然状态的渗流量或渗透梯度时，会恶化其稳定条件。故对IV、V类围岩要求注意内水外渗问题，此要求与本规范6.1.10衬砌型式选择的要求一致。

(3) 不良地质洞段本身抗渗能力就差，一旦出现内水外渗，很可能造成原已不良的地质条件出现难以处理的工程问题，故应采取有效的防渗措施。

(4) 局部洞段不满足覆盖厚度要求时，主要是防止山体在内压下产生抬动，故除加强衬砌结构的防渗能力外，应研究内水外渗造成的影响，防止发生渗透失稳和环境破坏。

(5) 本条主要是从边坡渗透稳定角度考虑的，隧洞遇到所列情况时应从确定防渗要求着手（见本规范6.1.7、6.1.8），特别是一般防渗要求和无防渗要求时应仔细研究内水外渗对山坡、山体渗流场的影响，防止发生渗透失稳。如××工程压力隧洞出口段内水压0.84 MPa~0.95 MPa，山坡45°左右有顺坡裂隙，上覆岩体厚20m~80m，侧向岩体厚51m~102m，原初步设计采用钢筋混凝土衬砌结构，仅出口段20m采用钢板衬砌，经渗流场电渗模拟试验后，发现有山坡失稳的可能。技施设计中根据渗流试验考虑到为保证安全可靠采用加长钢板衬砌（加长到35m），并在压力管道（钢筋混凝土衬砌）顶部设一排水廊道，排水效果很好，至今运行良好。

**9.2.5 钢筋混凝土衬砌是透水结构，由于各种原因钢筋混凝土结构都存在裂隙，长期运行后内水外渗将使围岩的地下渗流场发生**

变化,实测数据表明当衬砌结构与围岩的渗透性处于同一量级时,外水压力与内水压力基本平衡。而钢板衬砌是不透水结构,两种衬砌结构连接时,钢筋混凝土衬砌段的地下渗流场的变化将直接影响钢板衬砌段的地下渗流场。若天然地下水位低于内水压,钢板衬砌段的外水压力将增大,可能改变钢板衬砌的设计条件。内水压比天然地下水位大得较多时,将给钢板衬砌段的运行、检修带来较多问题,甚至引起钢管的外压失稳。因此,为保证钢筋混凝土结构内水外渗时钢管能安全可靠运行,宜在钢筋混凝土衬砌结构的末端设置环向防渗帷幕,应在钢管的首端设止水环,以降低钢管承受的外水压力作用。

网易 NetEase  
WWW.SHUIGONG.COM

## 10 隧洞安全监测

**10.0.2 隧洞安全监测分洞内观测及洞外监测。**洞内观测项目如流量、流速、水面线（压坡线）、脉动压力、掺气量、围岩变形及应力、作用在衬砌结构上的围岩压力和外水压力、渗流量、温度变化以及衬砌结构的应力、变形、裂缝等，各工程的具体观测项目应根据隧洞的用途和围岩条件决定。洞外监测项目如沉陷、位移、震动、地下水及渗漏量等，应根据工程地质和水文地质条件以及对隧洞的防渗要求确定。

**10.0.3 土洞的最大特点是变形时间长，有的土洞变形可达数年。**因此无论是在施工期还是在运行期，掌握和了解洞周土体变形、土压力变化、衬砌结构的工作状态、内水外渗情况、地表沉陷和变形等都是为施工和运行安全所必须的，条文中给出除常规安全监测外针对土洞特点进行的施工监测和安全监测的内容。在土洞施工监测和安全监测设计时，针对具体工程选择有代表性的断面设置必需的仪器设备，可采用自动化控制系统采集数据，也可设地面固定观测站收集数据，既进行施工监测又结合安全监测，发现问题及时采取补救措施，以防造成更大的危害。

(1) 土洞施工中变形很大，易发生坍塌，因此应加强施工观测以保证施工安全。可通过观测数据进行位移反分析，得到正确的设计参数，确认或修改设计，使土洞设计更经济合理、安全可靠。

(2) 土洞洞口边坡失稳会造成严重后果，这方面有过许多教训，应特别引起重视。应设观测点，定时观测和分析整理，随时掌握其稳定性。

(3) 稳定性差的浅埋土洞，开挖时地面下沉时有发生，且很难预防。因此，对浅埋土洞应进行跟踪地面下沉量量测，随时分析施工中的稳定性，以保证施工安全。

(4) 目前对衬砌结构的变形还难以自动化观测，但土洞衬砌

结构的变形不仅反映衬砌结构本身的应力、应变状态，而且直接反映洞周土体的稳定状态。因此，在湿陷性黄土、膨胀土、软粘土等土质较差的洞段，应选择合适的位置设置收敛计，以便在隧洞放空时进行收敛观测，了解和掌握隧洞运行期的工作状态，发现问题及时处理，同时也为验证设计提供可靠的资料。

湿陷性黄土对渗流非常敏感，一旦内水外渗即可改变其原有的物理力学指标，故对该种土洞应严格控制内水外渗的渗流量，应设置专门仪器监测衬砌结构的渗漏。

**10.0.4 不良地质洞段应进行新粤法施工。**通过信息反馈及时确认和修改支护参数，确定是否加强支护、选择加强支护和后继衬砌的时间，以保证施工安全和稳定运行。近年来，监控信息反馈设计在水利水电工程中得到了广泛应用，如引黄工程、引滦工程、引大入秦工程都摸索了监控设计、仪器埋设、现场监测、资料整理及反馈分析等一整套监测信息反馈设计的方法，对成功处理不良地质洞段，改进隧洞工程的设计和施工，提高隧洞工程的技术水平起到了重要作用。

引滦入津工程中隧洞穿过长达 212m 的特大断层带，隧洞断面型式为圆拱直墙形，净宽 6.0m，净高 6.1m，支护采用 150mm 喷射混凝土加系统锚杆；衬砌采用钢筋混凝土结构，拱墙厚 0.7m，底板厚 1.05m。采用新粤法施工，设 17 个施工监测断面，每个断面进行收敛量测、单点位移量测。

监测数据表明支护实施后大部分洞段在 8d~12d 达到基本稳定，仅桩号 10+125m 断面由于开挖底板使边墙的变形速率增大到 2.2mm/d，4 天变形总量达 4mm；支护结构出现 3 条宽 1mm~2mm 的裂缝，进行加强喷射混凝土支护（厚 50mm~100mm）后边墙变形没继续发展。根据监测成果的信息反馈，对原设计进行了两点修改：其一为支护达到基本稳定的洞段即时进行衬砌，衬砌设计考虑的围岩压力减少 25%；其二是将衬砌的浇筑段长度由原 8m 缩减为 4m~5m，以便形成衬砌紧跟的总体步骤。该大型断层的成功施工是施工信息反馈设计的很好实例。

引大人秦盘道岭隧洞是成功进行施工反馈信息设计的又一实例。隧洞为无压圆拱直墙形断面，宽 4.2m，高 4.4m，采用锚喷混凝土支护和钢筋混凝土衬砌的复合衬砌型式。施工监测信息反馈设计提出三项原则，作为支护实施后开始进行衬砌的时间。

(1) 隧洞周边水平相对位移速率小于 0.2mm/d，顶拱或底板位移速率小于 0.1mm/d，认为变形基本稳定；

(2) 隧洞周边水平相对位移、顶拱或底板的垂直位移，其速率明显下降；

(3) 隧洞相对位移已达到回归位移曲线求出的总位移量 90% 以上。

由位移数据分析，大部分测点变形要在 20d 左右达到变形基本稳定，由变形历时曲线和反分析成果，衬砌浇筑定为支护后 30d 左右，实测衬砌所承受围岩压力为 0.2 MPa~0.3MPa。

上述两个施工监测信息反馈设计工程实例，可供类似工程借鉴。

## 11 隧洞运行和维修

**11.0.1** 各个隧洞的用途都不相同，设计单位应结合具体工程的自然条件、设计条件，提出测验项目和运行检修要求，如运行水位、泄放流量、运行方式、闸门等控制设备的启闭方式、安全监测的内容、时间、限制性的运行条件、对运行和检修的其他要求等。对多用途隧洞为防止不同使用工况时防止出现不良情况，应对运行、检修提出特殊要求；设有定期安全监测断面的隧洞，应提出定期放空的时间要求等。

**11.0.2** 实践证明如若排水、充水历时控制不当，稳定时间不够，运行后围岩的渗流场可发生较大变化，造成充、放水时衬砌结构的破坏。近期有几条发电引水隧洞在初期运行放空检查时，因隧洞原质量缺欠，再加上对充水未做出控制要求，充水时大量内水外渗，放空时瞬时间形成较大外水压力，不仅质量缺欠部位开裂、坍塌，也波及相邻洞段，并伴随大量水体反渗入洞内。

一般压力隧洞排水、充水用分级加压（或减压）进行，分级数目均不小于4级，每级间隔不小于24h稳压时间，充水水压变化率不大于10m/h水柱，排水水压变化率不大于2m/h~4m/h。高水头、大直径压力隧洞的充水、放空排水设计，可借鉴天荒坪、广蓄两电站的充放水试验资料进行设计。

渗流率（指通过每1000m<sup>2</sup>水道内表面积的内水外渗流量）是衡量水道内水外渗的指标，作为宏观上判断渗流量稳定与隧洞质量的参数指标。内水外渗情况判断以渗流量不出现突然变化、渗出水不混浊、不夹带围岩内细小颗粒就认为是安全的。充水比较成功的工程，如发现泉涌点或渗流量达150L/s~250L/s时应放空检查。

**11.0.3** 隧洞设计时应根据隧洞投入运行后的日常工程管理和放空的需要，结合工程布置，设置管理和检修所必须的设施。如设

进入孔，预埋钢筋爬梯，设启吊设备所用的吊钩吊环，人员及材料、设备运输所要求的交通，安全监测的洞内及洞外标识，预留固定监测设备用钢板等。在设计这些维修工程结构和设备时，应从重视安全的角度出发，根据具体工程的要求考虑有较大的安全裕度，防止发生维修人员及设备的安全事故。

PDF 规范制作					
扫描	剪切	水印	制作 PDF	助理主管审核	专业编辑审核