

U D C

SL

中华人民共和国水利行业标准

P

S L 2 7 9 — 2 0 0 2

# 水工隧洞设计规范

Specification for design of hydraulic tunnel

2 0 0 2 / 1 2 / 1 0 发布

2 0 0 3 / 0 3 / 0 1 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利行业标准

# 水工隧洞设计规范

**Specification for design of hydraulic tunnel**

**S L 2 7 9 — 2 0 0 2**

主编单位：水利部东北勘测设计研究院

批准部门：中华人民共和国水利部

施行日期：2 0 0 3 年 3 月 1 日

# 中华人民共和国水利部

## 关于批准发布《水工隧洞设计规范》

### S L 2 7 9 — 2 0 0 2 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 S L 2 7 9 — 2 0 0 2，代替原 S D 1 3 4 — 8 4。

本标准自 2 0 0 3 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进行修改的主要内容如下：

- 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。
- 对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

全壮信 宋守平 顾一新 郑太然

赵玉玺

# 目 次

1 总则	( 8 )
2 基本资料	( 9 )
3 隧洞布置	( 1 1 )
3. 1 洞线选择	( 1 1 )
3. 2 进、出口布置	( 1 4 )
3. 3 多用途隧洞的布置	( 1 6 )
4 隧洞压力状态及洞型尺寸	( 1 7 )
4. 1 压力状态选择	( 1 7 )
4. 2 横断面形状	( 1 7 )
4. 3 横断面尺寸	( 1 8 )
5 隧洞水力计算	( 2 0 )
5. 1 计算原则	( 2 0 )
5. 2 高流速的防空蚀设计	( 2 1 )
6 隧洞支护与衬砌	( 2 2 )
6. 1 一般规定	( 2 2 )
6. 2 荷载和荷载组合	( 2 4 )
6. 3 混凝土和钢筋混凝土衬砌	( 2 7 )
6. 4 预应力混凝土衬砌	( 2 8 )
6. 5 不衬砌与锚喷衬砌隧洞	( 2 9 )
6. 6 埋藏式高压钢筋混凝土岔管设计	( 3 2 )
6. 7 衬砌的分缝	( 3 3 )
6. 8 封堵体设计	( 3 4 )
7 不良地质洞段设计	( 3 6 )
8 土洞设计	( 3 9 )
8. 1 土洞支护与衬砌	( 3 9 )
8. 2 土洞衬砌分缝与防渗止水	( 4 0 )
9 隧洞灌浆、防渗和排水	( 4 1 )
9. 1 灌浆	( 4 1 )

9.2 防渗和排水·····	( 4 2 )
10 隧洞安全监测·····	( 4 4 )
11 隧洞运行和维修·····	( 4 5 )
附录 A 高流速防空蚀设计·····	( 4 6 )
附录 B 圆形有压隧洞衬砌结构计算 (弹性力学方法) ···	( 4 8 )
附录 C 灌浆式预应力衬砌的结构计算·····	( 5 0 )
附录 D 混凝土衬砌裂缝及其防止措施·····	( 5 4 )
本规范用词和用语说明·····	( 5 5 )

# 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 G B 5 0 2 0 1 — 1 9 9 4 《防洪标准》和 S L 2 5 2 — 2 0 0 0 《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GB 50287—1999《水利水电工程地质勘察规范》的规定执行，土洞应按SL 237—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，并做出评价。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。

## 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 选择洞线时应针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，kN/m<sup>3</sup>；

$\gamma_r$ ——岩体重度，kN/m<sup>3</sup>；

D——最小覆盖厚度，m；

H——最大内水压力水头，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 2.0 m/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  $60^\circ$ 。对于流速小于 2.0 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  $60^\circ$ 。

**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 S L 2 1 1 — 1 9 9 8《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 8 5 % ~ 9 0 %。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 8 0 % ~ 8 5 %。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 S L 2 5 2 — 2 0 0 0 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 S L 2 5 3 — 2 0 0 0《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 S L 7 4 — 1 9 9 5《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 S D 3 0 3 — 8 8

《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，安全宣泄规定的泄洪流量，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、漩涡消能）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 2.0 m 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 ~ 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。并应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。

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

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 并通过工程类比研究确定。土洞衬砌型式的选择见本规范 8。

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	—

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			

#### 6.1.1.1 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：

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

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

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	0.1~0.40
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 SL 203—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 250 mm，双层钢筋混凝土衬砌厚度不宜小于 300 mm。

**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 28 d 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 S D J 20—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
荷载组合				
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 R 3 0 0，灌浆式衬砌应不低于 R 2 5 0。

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 S D J 2 0 — 7 8 中附录一的规定取值；对灌浆式衬砌应按 S D J 2 0 — 7 8 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 S L T 1 9 1 — 1 9 9 6 《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GB 50086—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 $8\text{ m/s}$ ；锚喷衬砌的临时过水隧洞允许流速不宜超过 $12\text{ m/s}$ 。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 $80\text{ mm}\sim 200\text{ mm}$ ，有钢筋网时宜为 $100\text{ mm}\sim 250\text{ mm}$ 。

**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 $1.2\text{ MPa}$ ；III类围岩不低于 $0.8\text{ MPa}$ ；
- 3 符合GB 50086—2001和SDJ 57—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GB 50086—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GB 50086—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GB 50086—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，并应进行施工期监测。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SDJ 57—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 GB 50086—2001 和 SDJ 57—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 SDJ 20—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 R 250。

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 6 m～12 m。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 1.0 m。

**6.7.6** 土洞的衬砌分缝及防渗止水见本规范 8.2 式规定。

## **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：

$$L \geq P / ([\tau] A) \quad (6.8.3)$$

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  $0.2 MPa \sim 0.3 MPa$ ；

$A$ ——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 SL 62—94《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》的规定。

## 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GB 50086—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SDJ 57—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 6 m~12 m 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  $1.0 \sim 2.0$  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 2 m～4 m，孔深可深入岩石 2 m～4 m，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。

## 1 0 隧洞安全监测

1 0 . 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。

1 0 . 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。

1 0 . 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。

1 0 . 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。

## 1 1 隧洞运行和维修

- 1 1 . 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。
- 1 1 . 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。
- 1 1 . 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。



## 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：

$$\rho = \frac{P_0 + P_a - P_v}{\frac{1}{2} \rho_w v_0^2} \quad (\text{A. 0. 1} - 1)$$

$$P_a = \gamma_w (10.33 - \nabla 900) \quad (\text{A. 0. 1} - 2)$$

$$\rho_w = \frac{\gamma_w}{g} \quad (\text{A. 0. 1} - 3)$$

式中  $P_0$ ——计算断面处的时均动水压力，kPa；当水流流速大于 3.0 m/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(℃)	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)		$\leq 30$	$\leq 25$	$\leq 12$	$\leq 8$	$< 6$	$< 25$	$< 3$	$< 10$	修改设计	$< 6$	
磨成 坡度	正面坡	不处理	P 5	P 10	P 15	P 30	P 5	P 50	P 8		P 10	
	侧面坡	不处理	P 4	P 5	P 10	P 20	P 4	P 30	P 5		P 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. 3 0 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 7 0 m～1 0 0 m，直线段可采用 1 0 0 m～1 5 0 m，对长泄水道应考虑设置多级掺气减蚀设施。

A. 0. 4 I、II 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 6 m 的圆形有压隧洞。计算中所用“结构最小配筋率”按 S D J 2 0 — 7 8 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 S D J 2 0 — 7 8。

**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：

$$f_i = f_0 = \frac{pr_i + k_0 \left[ m - \frac{r_i [Q_g]}{E_g} \right]}{\left[ 1 + \frac{r_i}{r_0} \right]} \quad (\text{B. 0. 2 — 1})$$

式中  $r_i$  ——隧洞衬砌内半径，m；

$r_0$  ——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>；

$f_0$  ——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：

$$\sigma_{gi} = \frac{pr_i \left[ E_0 \frac{f_0}{r_0} + k_0 \right] m}{\left[ f_i + f_0 \frac{r_i}{r_0} \right] + \frac{k_0 r_i}{E_g}} \leq [\sigma_g] \quad (\text{B. 0. 2 — 2})$$

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

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

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

以上式中

$\sigma_{gi}$ ——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；

$E_h$ ——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：

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

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  $1/2 \sim 1/8$ ，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）要求：

$$\sigma_{tp} + \sigma_{tq} \leq 0 \quad (\text{C. 1. 2—1})$$

式中  $\sigma_{tp}$ ——内水压力使衬砌结构产生的切向拉应力，kPa；

$\sigma_{tq}$ ——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）：

$$\sigma_{tp} + \sigma_{tq} + \sigma_{tt} \leq R_l K \quad (\text{C. 1. 2—2})$$

式中  $R_l$ ——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： $\sigma$

$$t_q < 0. 8 R_a \quad (\text{C. 1. 2—3})$$

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：

$$\sigma_{tq_0} = -q_0 \frac{t^2}{t^2 - 1} \left[ 1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right] \quad (\text{C. 2. 1-1})$$

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

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，kN/m<sup>3</sup>。

C. 2. 3 有效灌浆压力的降低值应按式（C. 2. 3）计算：

$$P_t = \frac{[\Delta r_0]}{r_0 \left[ \frac{1}{E_c} \left( \frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \right) + \frac{1}{E_r} (1 + \mu_r) \right]} \quad (\text{C. 2. 3})$$

式中  $E_r$  ——围岩的弹性模量，kPa；

$\mu_r$ ——围岩泊松比；

$[\Delta r_0]$ ——温降时衬砌与围岩的总变位，m。

**C. 2. 4** 衬砌内缘切向温度应力值应按式 (C. 2. 4) 计算：

$$\sigma_u = P_t \frac{2t^2}{t^2 - 1} \quad (\text{C. 2. 4})$$

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

$$\Delta r_{c0} = \alpha_c \Delta T_{r0}$$

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

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

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

$\Delta r_{c0}$ ——温度降低使衬砌外半径减少值，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，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，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  $f\left(\frac{2Cr}{\beta_0^2}\right)$  的值

$\frac{R}{\eta}$	$\frac{2Cr}{\beta_0^2}$	$\frac{R}{\eta}$	$\frac{2Cr}{\beta_0^2}$	$\frac{R}{\eta}$	$\frac{2Cr}{\beta_0^2}$
1. 6	0. 35	6. 6	15. 63	10. 6	43. 32
2. 6	1. 61	7. 6	21. 19	11. 6	52. 61
3. 6	3. 77	8. 6	27. 66	12. 6	62. 49
4. 6	6. 81	9. 6	35. 25	13. 6	73. 21
5. 6	10. 76				



## 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。