

# JTG

中华人民共和国推荐性行业标准

JTG/T 3373—2024

## 公路岩溶隧道设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of Highway Karst Tunnel

2024-07-09 发布

2024-10-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

## 前 言

根据《交通运输部关于下达2021年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函〔2021〕309号）的要求，由广西交通设计集团有限公司承担《公路岩溶隧道设计与施工技术规范》（以下简称“本规范”）的制定工作。

我国碳酸盐岩分布广，岩溶发育复杂，隧道涌水突泥、坍塌等突发性地质灾害破坏力强，严重威胁隧道施工及运营安全。针对我国公路岩溶隧道设计与施工技术需求，编写单位系统总结了近年来我国岩溶地区公路隧道建设经验、科研成果和运营实践经验，并借鉴了铁路、水利水电等行业相关技术标准，通过调研和分析论证，提出了我国公路岩溶隧道设计与施工技术要求，并广泛征求有关单位和专家意见，完成了本规范的编制工作。

本规范分为11章和4个附录，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 勘察、5 总体设计、6 结构设计、7 防水与排水、8 岩溶处治设计、9 岩溶隧道施工、10 超前地质预报、11 监控量测，附录A 岩溶隧道涌水量预测方法、附录B 溶洞土压力计算方法、附录C 落石冲击荷载计算方法、附录D 隧道周边隐伏溶洞安全岩盘厚度估算方法。

本规范由黄德耕、米德才负责起草第1章，徐龙旺、吴秋军负责起草第2章，米德才、叶琼瑶负责起草第3章，叶琼瑶、米德才、邓胜强负责起草第4章，米德才、李洋溢、唐国军负责起草第5章，林志、李洋溢负责起草第6章，李洋溢、周祥负责起草第7章，刘继国、李洋溢负责起草第8章，商崇伦、吴秋军负责起草第9章，何文勇、李春峰负责起草第10章，吴秋军、王劭耘、陈开群负责起草第11章，米德才、叶琼瑶负责起草附录A，林志、李洋溢、吴秋军、周祥负责起草附录B、附录C、附录D。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：吴秋军（地址：广西南宁市青秀区民族大道153号 广西交通设计集团有限公司；邮政编码：530029；电话：4008-110-685；传真：0771-3910002；邮箱：17896675@qq.com），以便修订时参考。

**主 编 单 位：**广西交通设计集团有限公司

**参 编 单 位：**重庆交通大学

中交第二公路勘察设计研究院有限公司

贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

中铁十二局集团有限公司

广西新发展交通集团有限公司

广西交通投资集团有限公司

主 编:黄德耕

主要参编人员:米德才 林 志 吴秋军 刘继国 商崇伦 叶琼瑶  
何文勇 王劫耘 陈开群 唐国军 徐龙旺 李洋溢  
周 祥 邓胜强 李春峰

主 审:郭小红

参与审查人员:刘文连 陈树汪 李伟平 李苍松 许 模 石新栋  
李玉文 苗德海 韩常领 王海林 石大为 李海清  
王万平 梁淦波 许湘华 李 沛 方 林 程崇国  
雷明堂 李治国 赵兴华 母进伟 欧孝夺 付开隆

参 加 人 员:唐正辉 郭 锐 韦勇克 陈云生 毛承英 陈人豪  
虞 杨 杨红运 刘 东 邵 羽 陈 相

交通运输部信息专用  
浏览专用

## 目 次

<b>1</b>	<b>总则</b> .....	1
<b>2</b>	<b>术语和符号</b> .....	2
2.1	术语 .....	2
2.2	符号 .....	3
<b>3</b>	<b>基本规定</b> .....	5
<b>4</b>	<b>勘察</b> .....	11
4.1	一般规定 .....	11
4.2	工程地质勘察 .....	11
4.3	水文地质专项勘察 .....	14
4.4	施工补充勘察 .....	15
4.5	综合地质评价 .....	17
<b>5</b>	<b>总体设计</b> .....	21
5.1	一般规定 .....	21
5.2	隧道选线 .....	22
5.3	隧道布置 .....	22
<b>6</b>	<b>结构设计</b> .....	25
6.1	一般规定 .....	25
6.2	荷载 .....	27
6.3	结构计算 .....	32
6.4	衬砌结构设计 .....	33
<b>7</b>	<b>防水与排水</b> .....	36
7.1	一般规定 .....	36
7.2	防水 .....	36
7.3	排水 .....	38
7.4	辅助排水通道 .....	41
<b>8</b>	<b>岩溶处治设计</b> .....	45
8.1	一般规定 .....	45
8.2	贫水及弱富水溶洞处治设计 .....	45
8.3	中等富水及强富水溶洞处治设计 .....	51
8.4	岩溶裂隙及岩溶管道处治设计 .....	52
8.5	暗河处治设计 .....	52

<b>9 岩溶隧道施工</b> .....	54
9.1 一般规定 .....	54
9.2 施工准备 .....	55
9.3 开挖与支护 .....	56
9.4 防排水施工 .....	57
9.5 岩溶处治施工 .....	59
9.6 注浆 .....	60
9.7 施工防灾 .....	62
<b>10 超前地质预报</b> .....	63
10.1 一般规定 .....	63
10.2 地质调查 .....	65
10.3 物探 .....	66
10.4 超前钻探 .....	68
10.5 超前导洞 .....	69
10.6 隐伏溶洞探测 .....	70
<b>11 监控量测</b> .....	72
11.1 一般规定 .....	72
11.2 支护结构安全监测 .....	72
11.3 水文监测 .....	73
11.4 环境监测 .....	74
<b>附录A 岩溶隧道涌水量预测方法</b> .....	75
A.1 洼地入渗法 .....	75
A.2 简易水均衡法 .....	76
A.3 地下水动力学法 .....	77
A.4 水文地质比拟法 .....	78
<b>附录B 溶洞土压力计算方法</b> .....	79
<b>附录C 落石冲击荷载计算方法</b> .....	82
<b>附录D 隧道周边隐伏溶洞安全岩盘厚度估算方法</b> .....	84
<b>本规范用词用语说明</b> .....	87

# 1 总则

**1.0.1** 为规范和指导公路岩溶隧道勘察、设计、施工，制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于以钻爆法开挖为主的新建、改扩建公路岩溶隧道。

**1.0.3** 公路岩溶隧道建设应遵循安全耐久、绿色环保、经济适用、方便维修的原则。

**1.0.4** 公路岩溶隧道应根据超前地质预报、监控量测等成果，开展动态设计、信息化施工和安全风险管理。

**1.0.5** 公路岩溶隧道设计、施工应注重环境保护和水土保持，减少对生态环境的不利影响。

**1.0.6** 公路岩溶隧道建设应积极稳妥地采用新技术、新材料、新设备、新工艺。

**1.0.7** 公路岩溶隧道的勘察、设计、施工除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 岩溶隧道 karst tunnel

穿越碳酸盐岩的隧道。

#### 2.1.2 岩溶水 karst water

赋存于岩溶化岩体中地下水的总称。

#### 2.1.3 溶洞 karst cave

可溶性岩石在地下水长期作用下形成的洞穴。

#### 2.1.4 暗河 underground river

可溶性岩石在地下水长期作用下形成的具有河流主要特征的地下水通道。

#### 2.1.5 隐伏溶洞 concealed karst cave

与隧道未发生交叉，对隧道施工、运营安全存在潜在影响的溶洞。

#### 2.1.6 岩溶率 rate of karstification

衡量特定范围内岩溶发育程度的定量指标，包括点岩溶率、线岩溶率、面岩溶率、体岩溶率、钻孔遇洞率等。

#### 2.1.7 垂直渗流带 vertical seepage zone

大气降水或地下水受重力作用沿岩溶裂隙、孔洞以垂向渗流为主的地带。

#### 2.1.8 季节变动带 seasonal alternation zone

季节变化引起地下水位升降波动的地带，旱季地下水以垂直渗流为主，雨季地下水以水平渗流为主。

#### 2.1.9 水平径流带 horizontal runoff zone

受当地岩溶排水基准面控制，位于岩溶含水层最低水位以下，地下水以水平渗流为主的地带。

- 2.1.10 深部缓流带** deep slow flow zone  
位于水平径流带之下，在一定水头压力作用下向远方缓慢渗流的深部岩溶水地带。
- 2.1.11 岩溶水文地质单元** karst hydrogeological unit  
具有共同补给边界与统一地下径流场的岩溶地下水系的流域范围。
- 2.1.12 贫水岩溶** poor-water karst  
地下水不发育~较发育的岩溶地带。
- 2.1.13 富水岩溶** rich-water karst  
地下水发育~极发育的岩溶地带。
- 2.1.14 季节性富水岩溶** seasonal rich-water karst  
旱季贫水、雨季富水的岩溶地带，包括季节性富水溶洞、季节性岩溶管道、季节性岩溶裂隙等。
- 2.1.15 施工补充勘察** construction supplementary investigation  
施工阶段针对对施工安全或处治方案具有重大影响的地质疑问开展的地质勘察。
- 2.1.16 安全岩盘** safety rock plate  
保证隧道施工作业与运营安全的洞壁岩体。
- 2.1.17 辅助排水通道** auxiliary drainage tunnel  
为满足隧道排水、泄洪或降低地下水压力等需求，设置在主洞附近的泄水洞、集水廊道、隧底涵洞等集排水设施。
- 2.1.18 排放型衬砌** drainage lining  
围岩渗水能顺畅地排出，基本不承担水压力的隧道衬砌。
- 2.1.19 限排型衬砌** controlled drainage lining  
限制围岩渗水排放，需要承担部分水压力的隧道衬砌。
- 2.1.20 全封闭衬砌** fully-enclosed lining  
未设置衬砌排水系统，不考虑衬砌背后地下水排放的隧道衬砌。

## 2.2 符号

- BQ——岩体基本质量指标；  
[BQ]——岩体质量指标；  
 $K_v$ ——岩体完整性系数；



- $K_0$ ——岩溶影响修正系数；  
 $K_1$ ——地下水状态影响修正系数；  
 $K_2$ ——主要软弱结构面产状影响修正系数；  
 $K_3$ ——初始应力状态影响修正系数；  
 $Q_{\max}$ ——隧道通过含水地段的最大涌水量；  
 $Q_{\text{nor}}$ ——隧道通过含水地段的正常涌水量；  
 $q_{\max}$ ——隧道通过含水体地段单位长度的最大涌水量；  
 $q_{\text{nor}}$ ——隧道通过含水体地段单位长度的正常涌水量；  
 $R_b$ ——岩石单轴饱和抗压强度；  
 $T$ ——隧道与溶洞岩盘厚度；  
 $T_s$ ——隐伏溶洞安全岩盘厚度。

交通运输部信息公开  
浏览专用

### 3 基本规定

**3.0.1** 岩溶隧道应进行岩溶分级，隧道地质勘察、设计、施工、风险管控应与其级别相适应。

#### 条文说明

岩溶隧道工程地质条件和水文地质条件一般较复杂，对隧道岩溶进行分级，统一岩溶现象、特点的描述和评价标准，能够使岩溶隧道地质勘察工作布置、设计方案、施工措施与风险管控等与岩溶分级相协调，提高岩溶隧道设计、施工的科学性。

隧道岩溶分级包括岩溶地质复杂程度分级和溶洞对隧道影响程度分级，岩溶地质复杂程度分级主要是勘察设计阶段根据已有的勘察资料对岩溶隧道各段落进行的分级，溶洞对隧道的影响程度分级是施工开挖揭露溶洞后针对具体段落进行的分级。隧道岩溶分级坚持动态分级原则，随着勘察工作的不断深入、超前地质预报的逐步实施及施工开挖的揭露，岩溶及岩溶水的发育情况会越来越明朗，岩溶分级需要动态调整，才能适时指导设计方案优化和施工方案调整。

**3.0.2** 岩溶地质复杂程度应按岩溶发育程度与岩溶水发育程度分为简单、中等、复杂、极复杂四个级别，并符合下列规定：

1 岩溶地质复杂程度划分标准应符合表 3.0.2-1 的规定。

**表 3.0.2-1 岩溶地质复杂程度划分标准**

岩溶水发育程度	岩溶发育程度			
	弱发育	中等发育	强发育	极强发育
不发育	简单	简单	中等	复杂
较发育	简单	中等	中等	复杂
发育	中等	中等	复杂	极复杂
极发育	中等	复杂	极复杂	极复杂

2 岩溶发育程度应按岩溶发育特征分为弱发育、中等发育、强发育、极强发育四个级别，其划分标准应符合表 3.0.2-2 的规定。

**表 3.0.2-2 岩溶发育程度划分标准**

岩溶发育程度	岩溶发育特征
弱发育	以泥质、硅质、炭质灰岩为主；地表岩溶形态不发育；地下岩溶以溶隙为主，偶见小型溶洞，裂隙透水性差；钻孔遇洞率<10%，钻孔线岩溶率<3%

续表 3.0.2-2

岩溶发育程度	岩溶发育特征
中等发育	以不纯碳酸盐岩为主,多间夹型或互夹型;沿裂隙面、层面溶蚀;地表岩溶形态稀疏发育,地下以溶隙或小型洞穴为主;溶隙连通性较好,沿裂隙可见线状流水,少见集中径流;10%≤钻孔遇洞率<30%,3%≤钻孔线岩溶率<10%
强发育	以次纯碳酸盐岩为主;沿断裂、褶皱、不整合面等溶蚀强烈;地表洼地、漏斗、竖井、落水洞广泛分布,地下大、中型溶洞、暗河发育;有中小型集中径流;30%≤钻孔遇洞率≤60%,10%≤钻孔线岩溶率≤20%
极强发育	以纯碳酸盐岩为主;沿断裂、褶皱、不整合面等溶蚀剧烈;地表洼地、漏斗、竖井、落水洞等密集分布,地下溶洞群、廊道发育;地下洞穴系统基本形成,有大型暗河;钻孔遇洞率>60%,钻孔线岩溶率>20%

3 岩溶水发育程度应根据岩溶水发育特征分为不发育、较发育、发育、极发育四个级别,其划分标准应符合表 3.0.2-3 的规定。

表 3.0.2-3 岩溶水发育程度划分标准

岩溶水发育程度	岩溶水发育特征
不发育	垂直渗流带,主要充水含水层和构造破碎带富水性微弱; 旱季无地下水活动,洞壁干燥或潮湿,雨季点滴状出水; 预测或揭露涌水量≤100m <sup>3</sup> /d,水压不超过0.01MPa,涌水突泥可能性极小
较发育	垂直渗流带~季节变动带,主要充水含水层和构造破碎带富水性弱至中等; 旱季地下水活动较弱,洞壁点滴状出水或流水,强降雨短时涌流水; 预测或揭露涌水量100~1000m <sup>3</sup> /d,水压不超过0.1MPa,发生涌水突泥可能性较小,地下水流失对周边环境影响较小
发育	季节变动带~水平径流带,主要充水含水层和构造破碎带富水性中等至强;部分洞段位于洼地高程之下,地下水补给条件较好; 预测或揭露涌水量1000~10000m <sup>3</sup> /d,水压0.1~0.5MPa,发生涌水突泥可能性中等,地下水流失可能产生地面塌陷或其他环境问题
极发育	隧道部分或全部洞段处于水平径流带或深部缓流带,主要充水含水层富水性强;部分洞段低于沿线洼地、谷地底高程,补给条件好; 构造破碎带发育、导水性强且连通区域强含水层或地表水体,或隧道附近存在河流、水库、水塘等地表水体且水位在设计高程以上; 预测或揭露涌水量>10000m <sup>3</sup> /d,推测可能发生大型、特大型涌水突泥或水压超过0.5MPa的高压涌水,地下水流失可能产生严重的地面塌陷、沉降及其他环境问题

注:表中涌水量指集中涌水量或100m洞长累计涌水量。

4 岩溶地质复杂程度应根据岩溶发育情况分段划分。

5 当预测隧道开挖可能造成地下河干涸、地表水漏失、地面塌陷、重要建(构)筑物损坏等时,岩溶地质复杂程度宜提高一级。

**3.0.3 溶洞对隧道影响程度应按溶洞发育规模、溶洞与隧道位置关系、富水程度、充填物稳定状况、溶腔稳定状况等因素分为弱、中等、强烈三个级别,并符合下列规定:**

1 溶洞对隧道影响程度划分标准应符合表 3.0.3-1 的规定。

表 3.0.3-1 溶洞对隧道影响程度划分标准

溶洞对隧道影响程度分级	弱	中等	强烈
溶洞发育规模	小型~中型	中型~大型	大型~巨型
与隧道位置关系	中距	近距	交叉
溶洞富水程度	贫水~弱富水	弱富水~中等富水	中等富水~强富水
充填物稳定状况	稳定	基本稳定	不稳定
溶腔稳定状况	稳定	基本稳定	不稳定

注：1. 当表中3项及以上影响因素位于低一级时，按低一级标准划分；当2项及以上影响因素位于高一级时，按高一级标准划分；当同时符合两种分级标准时，按高一级标准划分。

2. 当溶洞与隧道未交叉时，不考虑充填物和溶腔稳定状况的影响。

2 溶洞发育规模应按大小分为小型溶洞、中型溶洞、大型溶洞、巨型溶洞，其划分标准应符合表 3.0.3-2 的规定。

表 3.0.3-2 溶洞发育规模划分标准

发育规模	溶洞洞径(m)
小型溶洞	水平<3、竖向<6
中型溶洞	3≤水平<6、6≤竖向<12
大型溶洞	6≤水平<12、12≤竖向≤24
巨型溶洞	水平>12、竖向>24

3 溶洞与隧道位置关系应按隧道与溶洞间岩盘厚度分为远距、中距、近距、交叉四种状态，其划分标准应符合表 3.0.3-3 的规定。

表 3.0.3-3 溶洞与隧道位置关系划分标准

与隧道位置关系	隧道与溶洞间岩盘厚度 $T$ (m)
远距	$T > T_s$
中距	$0.5 T_s < T \leq T_s$
近距	$0 < T \leq 0.5 T_s$
交叉	$T \leq 0$

注：1.  $T$ 为隧道与溶洞间岩盘厚度（m），是指隧道开挖轮廓与溶洞洞壁的最小净距。

2.  $T_s$ 为隐伏溶洞安全岩盘厚度（m），即保证隧道施工作业与运营安全的隐伏溶洞最小洞壁厚度。

4 溶洞富水程度应根据隧道涌水量大小分为贫水、弱富水、中等富水、强富水四种级别，其划分标准应符合表 3.0.3-4 的规定。

表 3.0.3-4 溶洞富水程度划分标准

富水程度	溶洞涌水量 $Q$ (m <sup>3</sup> /d)
贫水	$Q \leq 100$
弱富水	$100 < Q \leq 1\,000$
中等富水	$1\,000 < Q \leq 10\,000$
强富水	$Q > 10\,000$

注：1. 表中溶洞涌水量指集中涌水量或100m洞长累计涌水量。

2. 当为季节性富水溶洞时，可分别按施工期及运营期划分。

5 溶洞充填物稳定状况应根据充填物特征分为稳定、基本稳定、不稳定三种状况，其划分标准应符合表 3.0.3-5 的规定。

表 3.0.3-5 溶洞充填物稳定状况划分标准

充填物稳定状况	充填物特征
稳定	充填物主要为坚硬黏性土,或密实的砂土,或密实、钙质、铁质胶结的碎石土、大块石土等,自稳性较好
基本稳定	充填物主要为可塑~硬塑状的黏性土,或稍密~中密砂质土,或稍密~中密的碎石土、角砾土等,有一定自稳性,可能引起小型坍塌
不稳定	充填物主要为软塑~流塑状的黏性土,或稍密以下的粉细砂,或稍密以下稍湿至潮湿的碎石土、角砾土,或泥砾石、泥块石等,自稳性较差,可能引起中型~大型塌方

6 溶腔稳定状况应按溶腔地质特征分为稳定、基本稳定、不稳定三种状况，其划分标准应符合表 3.0.3-6 的规定。

表 3.0.3-6 溶腔稳定状况划分标准

溶腔稳定状况	溶腔地质特征
稳定	洞顶石钟乳密集分布,节理不发育且无缓倾的结构面,完整岩层厚度与溶洞最大跨度之比大于 0.8,自稳性较好,偶有掉块
基本稳定	洞顶石钟乳稀疏分布,洞底有少量崩塌堆积物,节理较发育且存在缓倾的弱~中风化结构面,完整岩层厚度与溶洞最大跨度之比介于 0.5~0.8,有一定自稳性,可发生小型坍塌
不稳定	洞顶无石钟乳分布,洞底有崩塌堆积物,节理发育且存在缓倾的夹泥或强风化结构面,完整岩层厚度与溶洞最大跨度之比小于 0.5,自稳性差,可发生中型~大型塌方

### 条文说明

1 溶洞对隧道影响程度建议按下述步骤划分：先假定溶洞对隧道影响程度为中等，找到 5 个指标中的处于中等级别 1 项指标，然后看其他 4 个指标是否符合注 1 的前 2 项，如果符合则按前 2 项的方法进行调整，否则就维持中等；如果 5 个指标没有处于中等级别的指标，则看是否符合注 1 的第 3 项，符合则按注 1 的第 3 项调整，不符合则维持中等。例如，先假定溶洞对隧道影响程度为中等，如果溶洞洞径 8m，为中型溶洞，按表 3.0.3-1 确定溶洞对隧道影响程度为弱或中等，先假定为中等；如果其余 4 个指标中有 3 个指标处于弱，如与隧道位置关系为中距、溶洞富水程度为弱富水、充填物稳定状况为稳定，则溶洞对隧道影响程度调整为弱；如果其余 4 个指标中有 2 个指标处于强烈，如与隧道位置关系为交叉、溶洞富水程度为强富水，则溶洞对隧道影响程度调整为强烈。如果 5 个指标没有处于中等级别的指标，有 2 个指标是位于高一级，有 3 项指标是低一级，如溶洞为巨型溶洞、与隧道位置关系为交叉、溶洞富水程度为贫水、充填物稳定状况为稳定、溶腔稳定状况为稳定，则按高一级标准调整，即溶洞对隧道影响程度调整为强烈。注 2，当溶洞与隧道未交叉时，即隐伏溶洞的情况，溶洞充填物和溶腔稳定状况对隧道影响较小，仍然适用上述规则进行划分，即按注 1 进行调整，但注 1 的第 3 项不可能达成，不予考虑。

2 溶洞的发育形态通常不规则，想要准确确定溶洞洞径难度较大，实际工作中，建议按下列方法简单确定溶洞洞径：先确定溶洞纵向，即溶洞空间发育最长的方向，然

后确定与溶洞纵向垂直方向上、隧道影响范围内的最大面积的横断面，其发育宽度可以视为溶洞洞径。由于溶洞水平跨度对隧道影响更大，因此，溶洞发育规模划分时以溶洞水平方向的尺寸为主，竖直方向的尺寸为辅。

3 在溶洞发育特征相同的情况下，隐伏溶洞位于隧道的不同位置，其所需的安全岩盘厚度 $T_s$ 大小不同，因此，利用实际岩盘厚度与所需安全岩盘厚度的大小关系，可以定量区分溶洞距离隧道的远近和相对空间位置关系。

**3.0.4** 公路岩溶隧道勘察应与设计阶段相对应，特长隧道、岩溶地质复杂~极复杂的长隧道，勘察工作深度宜适度加深。

**3.0.5** 公路岩溶隧道应根据公路等级、隧道条件、岩溶隧道地质复杂程度、施工方法、工期和运营要求等，对隧道位置、支护结构、防排水系统、辅助排水通道、运营维护设施、环境保护进行综合设计。

**3.0.6** 公路岩溶隧道防排水设计应考虑水环境保护要求，条件适宜时宜考虑地下水综合利用。

#### 条文说明

我国南方岩溶地区一个重要的特点就是岩溶水时空分布极不均匀：雨季大量降雨补给，岩溶水极为丰富，短时间内大量泛滥，冲毁农田，严重影响当地人民群众的生产、生活。但岩溶发育地区各种地表漏斗、落水洞、竖井与地下岩溶管道、裂隙、溶洞相互连通，且四通八达，雨季大量降雨会流失至深部或其他排泄区，这会造成在旱季少雨的时候，这些岩溶发育地区的地表、浅部地下水十分匮乏，当地人民群众的生产、生活要饱受无水可用的困境。从利国利民的角度，岩溶隧道建设排放的大量岩溶水完全可以利用起来解决当地群众、工程用水问题，比如在洞口附近修建存储岩溶水的水库用于旱季灌溉附近农田、利用岩溶水发电或作为隧道消防用水等，目前在一些岩溶地区已经开展相关研究和应用，取得了一些积极的成果。

**3.0.7** 对于公路岩溶隧道施工揭示的岩溶裂隙、岩溶管道、溶洞、暗河等岩溶现象，应查明岩溶及岩溶水发育情况，采取安全、可靠的工程处理措施，应维持或疏导既有过水通道。

**3.0.8** 公路岩溶隧道地质超前预报应包括隧道掌子面前方和隧道周边隐伏岩溶的探测。

#### 条文说明

常规的隧道超前地质预报主要探测隧道掌子面前方一定范围的地质情况，以指导动态设计和施工。就岩溶隧道而言，由于岩溶发育的隐蔽性、随机性，超前地质预报除了探测掌子面前方的岩溶发育情况外，也要对隧底及周边可能存在隐伏溶洞进行探测，才能确保隧道结构处于安全的围岩环境中。因此，岩溶隧道的超前地质预报要求是立体

的，这是岩溶隧道超前地质预报与非岩溶地质条件隧道最重要的区别。

**3.0.9** 岩溶地质复杂~极复杂的地段宜开展结构安全监测，岩溶水极发育地段应开展水文监测，处于环境敏感地区的公路岩溶隧道，应开展环境监测。

#### 条文说明

环境敏感地区主要包括生态环境敏感地区、建设环境复杂地区等，生态环境敏感地区系指重要的水源保护区、自然保护区、湿地、河流、湖泊、水库等，建设环境复杂地区系指有重要的建（构）筑物的地区，如重要的公路、铁路、水利设施、高压电塔、通信设施等。环境敏感地区生态较为脆弱，损害后会严重影响附近人民群众的生产、生活，且环境自然修复十分困难，影响长久而深远，线位必须通过时，要求进行环境监测。

**3.0.10** 岩溶隧道应根据岩溶地质复杂程度开展隧道风险评估，进行风险动态管理。

#### 条文说明

岩溶隧道是风险较高的一类隧道，对岩溶隧道进行全程风险管理有利于降低施工及运营风险。岩溶隧道的风险管理要求贯穿于勘察设计、施工及运营的全过程。勘察设计阶段，根据勘察成果、设计方案开展风险评估，提出设计、施工及运营中有效降低风险的对策，并在设计方案中执行设计措施；施工阶段，在设计风险评估的基础上，结合施工设备、工艺、技术条件及人员素质、管理水平等进一步评估，提出施工过程中降低风险的对策，并在施工中严格执行；运营阶段，要根据前两个阶段提出的对策进行监控、管理，最终实现岩溶隧道建设及运营全过程风险全程管控。

## 4 勘察

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 公路岩溶隧道应对隧址区工程地质、水文地质、环境条件等进行勘察，划分岩溶地质复杂程度，进行综合地质评价。

**4.1.2** 在开展勘察工作之前，应编制勘察方案，明确勘察方法、工作量、进度安排，提出成果要求及质量、安全、环境、职业健康等保障措施。

**4.1.3** 岩溶隧道勘察可采用遥感、地质调绘、物探、钻探、硃探、测试、试验等多种手段相结合、相互印证的综合勘察方法。

**4.1.4** 岩溶隧道勘察应重视访问调查，重点关注勘察区地下河、泉水、洼地洪水位、各类岩溶现象、地质灾害、洪涝灾害的历史变迁情况。

#### 条文说明

岩溶地区地质勘察，走访调查非常重要，很多溶洞、漏斗、落水洞、竖井等由于地形、植被等原因很容易漏掉，通过走访当地居民可以很好地解决这个问题。另外，对岩溶洼地等历史洪水位确定也需要走访调查。

**4.1.5** 应重视勘察资料的综合分析研究，加强隧道涌水突泥、拱顶塌方、地下水流失、地面塌陷等重大工程地质问题及环境安全风险的识别、评价。

**4.1.6** 岩溶地质极复杂地段应加强施工阶段地质条件复核，必要时宜开展施工补充勘察。

### 4.2 工程地质勘察

**4.2.1** 工可勘察应以资料收集和地质调绘为主，结合航拍和遥感影像，研究路线区域岩溶水文地质条件，初步分段划分隧道岩溶发育程度、岩溶水发育程度。

**4.2.2** 初步勘察应基本查明下列内容：

- 1 区域地质、水文气象、新构造运动及地震动参数。



- 2 岩溶地貌类型、规模、形态特征、分布及发育规律。
- 3 覆盖层类型、分布、厚度、土质名称、地层结构。
- 4 基岩岩性、地质年代、地层层序、分布、埋深和基岩面起伏变化情况。
- 5 褶皱、断裂、节理的类型、规模、性质、分布和产状。
- 6 土洞、溶洞、溶隙、暗河的分布、规模、充填物、充填程度及其稳定性。
- 7 地下水类型、分布、埋深、富水程度、埋藏条件、水位变化及运动规律。
- 8 地下水与地表水的水力联系，地表水消水位置和洪痕高程。
- 9 隧址区岩溶类型、蓄水构造、垂直渗流带、季节变动带、水平径流带、深部缓流带的分布及其特征，地下水对隧道工程的影响。
- 10 岩溶水害、岩溶塌陷的分布、成因、发育规律和发展趋势。
- 11 隧道进出口危岩、岩堆等不良地质的分布、规模，洞门基底的地质条件，围岩、地基岩土的物理力学性质和承载力。
- 12 隧道周边厂矿、村镇、公路、铁路、电塔、河流、湖泊、水库等环境敏感因素。
- 13 当地治理岩溶、土洞和地面塌陷的工程经验。

**4.2.3** 详细勘察应查明隧址区工程地质条件及水文地质条件，其内容应符合本规范第4.2.2条的规定；岩溶水发育~极发育地段具备观测条件时，宜开展水文地质长期观测。

**4.2.4** 工程地质勘察应根据岩溶地质复杂程度选择勘察方法，宜按表4.2.4执行。

表4.2.4 岩溶隧道工程地质勘察方法选用

岩溶地质复杂程度	勘察方法					
	调绘	物探	钻探	室内试验	现场测试	水文观测
简单	★	●	●	●		
中等	★	★	★	★	△	△
复杂	★	★	★	★	●	●
极复杂	★	★	★	★	★	★

注：“★”为应选方法；“●”为宜选方法；“△”为可选方法。

**4.2.5** 勘察方法及勘探工作量应根据岩溶隧道地质复杂程度、地形地貌条件、技术可行性等，并结合勘察阶段综合确定。

**4.2.6** 勘察应收集地形图、航测遥感、区域地质、水文地质、气象、水文、既有工程、地下水观测等资料，以及地方志、史料中有关岩溶灾害记载等资料。

**4.2.7** 地质调绘应符合下列规定：

1 地质调绘范围应包括隧道进出口及洞身两侧不小于500m的带状区域，并满足岩溶不良地质和主要工程地质问题评价的需要。

2 对重要的工程地质、水文地质和环境要素，应对其位置、高程、规模等进行测量。

- 3 长、特长隧道应编制隧址区综合工程地质调绘图，比例尺不宜小于1:10 000。
- 4 隧道进出口、傍山浅埋段、过沟段，当地质条件复杂时应加强工程地质调绘。
- 5 大型岩溶洞穴、暗河宜进行空间形态测量，调查充填及洞壁稳定情况，比例尺不宜小于1:500。
- 6 地形地貌复杂地区可采用高分辨遥感、无人机、倾斜摄影、三维激光测量、三维地质模型等技术手段进行调绘。

#### 条文说明

6 近年来，随着无人机及小型智能设备的飞速发展，以前难以达到的陡峻岩溶地貌区及大型厅堂型溶洞内可以采用无人机或小型智能设备进行调绘。图4-1是在广西天峨至北海公路（天峨经凤山至巴马段）廷社隧道施工过程中，对局部揭露的大型厅堂型溶洞采用无人机搭载移动式三维激光扫描仪测绘出的溶洞与隧道关系的三维模型，该溶洞与隧道大角度相交，宽40~80m，高30~50m，长1km以上，溶洞内局部低洼处积水、积泥。根据测绘出的三维模型可方便、准确地制定处治方案。

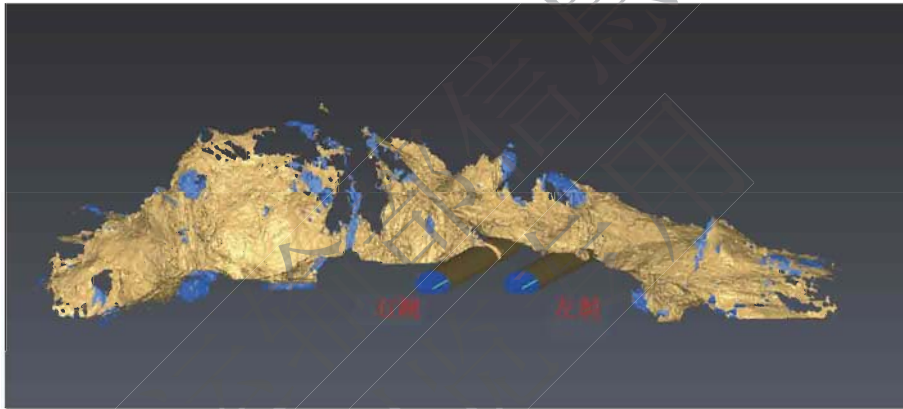


图4-1 采用无人机搭载移动式三维激光扫描仪测绘出的溶洞与隧道关系三维模型

#### 4.2.8 物探应符合下列规定：

- 1 应根据隧址区地形、岩土体物性、地下水发育情况及需查明地质问题性质的需要，选择适宜的综合物探方法；具备条件时，可采用三维物探方法。
- 2 地形条件困难、地面勘探工作难以实施时，可采用航空、半航空物探等技术手段。
- 3 应结合其他勘察资料综合解译。

#### 4.2.9 钻探应符合下列规定：

- 1 钻孔宜结合调查、调绘及物探结果布置，物探显著异常处应布置钻孔。
- 2 可溶岩与非可溶岩地层接触带、断层破碎带等岩溶发育部位应布置钻孔。
- 3 钻孔宜布置于洞壁外侧不小于5m位置。
- 4 钻孔深度应至路线设计高程以下不少于10m，遇溶洞、暗河等不良地质时应至稳定底板以下不小于10m，钻孔应满足岩土水取样和水文地质测试的要求。

5 应记录钻进中异常声响、钻具跳动、冲洗液变化(漏水、涌水、颜色)等情况及其起止深度,统计岩芯RQD值及岩溶率,记录初见和稳定水位。

6 应配合做好声波波速测试、孔内电视等孔内测试和地下水长期观测设施安装施工。

#### 4.2.10 室内试验应符合下列规定:

- 1 地表水、地下水应做水质分析。
- 2 代表性岩层、土层及溶洞充填物应做物理力学性质试验。

#### 4.2.11 现场测试应符合下列规定:

- 1 应根据地形地质条件及设计、施工需要,选择现场测试内容及方法。
- 2 可采用标准贯入、动力触探、静力触探等方法测试岩溶充填物的物理力学性质。

### 4.3 水文地质专项勘察

#### 4.3.1 岩溶水极发育的隧道应开展水文地质专项勘察。

#### 4.3.2 水文地质专项勘察应查明下列内容:

- 1 结合地貌、岩性、地质构造、岩溶、水文地质调查,确定分水岭位置及高程,划分岩溶水文地质单元。
- 2 地表水体(洼地积水、水库、河流、井、泉等)分布情况,水位、流量及其动态变化特征。
- 3 水的物理性质、化学成分及动态变化特征。
- 4 相对隔水层、透水层、含水层的分布,透水层的透水性,含水层的富水性,各含水层的补给、径流和排泄条件,各含水层之间的水力联系及与地表水的补排关系,划分岩溶水系统,圈定储水构造。
- 5 地下水的类型、埋藏条件、流向和运动规律。
- 6 地下水运动、富水区与地质构造、岩溶、地形、岩性及人类活动之间的关系。
- 7 暗河、地下人工水道的位置、走向、规模、水位、流速和流量等。
- 8 地表及地下水开发利用情况。

4.3.3 水文地质专项勘察应在工程地质勘察的基础上进行,充分利用工程地质勘察、超前地质预报及施工开挖获得的各种资料。

#### 4.3.4 水文地质调绘应符合下列规定:

- 1 应在已有水文地质调绘成果的基础上,结合遥感图像解译进行追踪调查;岩溶水文地质单元边界不明确的,调查范围宜适当扩大。
- 2 调查时间应包含旱季和雨季两个外业工作时间段,时间跨度不宜少于1个水文年。
- 3 特长隧道及岩溶水极发育的隧道应编制隧址区综合水文地质图,比例尺不宜小于1:10 000。

**4.3.5** 水文地质物探方法应在水文地质调绘的基础上,根据隧道埋深、地形条件、地表环境及水文地质条件等因素确定。

**4.3.6** 水文地质钻探应符合下列规定:

- 1 水文地质钻孔应在调绘、物探及已有资料深入研究的基础上进行布设。
- 2 钻孔宜布设在物探异常区、负地形、断层破碎带、褶皱核部、可溶岩与非可溶岩接触带。
- 3 钻孔布设宜兼顾工程地质勘察及监测的需要。
- 4 钻孔深度、孔径应满足下管、填砾、取样和水文地质测试的要求。
- 5 岩溶水极发育地段宜设置水文地质长期观测孔。

**4.3.7** 水文地质测试应符合下列规定:

- 1 应选择代表性钻孔进行抽水(提水)试验、注水试验或压水试验。
- 2 对隧道有影响的暗河、有水注入的岩溶管道宜进行连通性试验。
- 3 应分层测量地下水位,对地下水及地表水进行物理化学分析。

**4.3.8** 水文地质观测应符合下列规定:

- 1 观测内容应包括地表水体(洼地积水、水库、河流、井、泉等)及地下水(井、钻孔、暗河等)的水位、流量、洪水痕迹及降雨、蒸发、气温等气象数据。
- 2 观测方式应以自动化观测为主、人工观测为辅。
- 3 观测时间不应少于1个水文年,观测频率旱季不应低于1次/7d,雨季不应低于2次/d,强降雨期间应加密观测。
- 4 应根据观测结果及时校核水文地质参数和隧道涌水量。

**4.3.9** 水文地质综合分析应符合下列规定:

- 1 应划分水文地质单元,对岩溶水进行垂直分带,确定地下水排泄基准面,编制相关图表。
- 2 应分析地下水补径排条件,分析涌水突泥形成条件,预测隧道最大涌水量和正常涌水量,预测隧道可能发生涌水突泥的位置,评价隧道涌水突泥风险,评价涌水突泥对隧道选址、围岩稳定、施工及运营的影响。
- 3 应分析水文地质条件与岩溶相互作用对岩土体性质及隧道工程的影响。
- 4 应分析隧道涌水突泥、水文地质条件改变对环境的影响,评价隧道施工诱发的地面塌陷和地表水漏失等环境问题,提出工程措施建议。

#### **4.4 施工补充勘察**

**4.4.1** 隧道施工过程中,当遇到下列情形且既有勘察不能满足设计施工需要时,应开展施工补充勘察:

- 1 超前地质预报显示存在涌水突泥风险的地段。
- 2 对隧道影响强烈的溶洞、暗河。

- 3 发生涌水突泥灾害的岩溶水极发育地段。
- 4 发生地面沉降、塌陷和地表水体漏失等环境灾害地段。

#### 条文说明

施工补充勘察是前期勘察的延续和补充，当施工过程中揭露或超前地质预报显示的岩溶对隧道施工安全或岩溶处治方案制定有较大影响时，开展补充勘察能够进一步查明岩溶的基本情况，降低施工风险，提高处治方案的针对性和可靠性。

#### 4.4.2 施工补充勘察宜包括下列内容：

- 1 岩溶的边界、空间形态，与隧道的空间关系。
- 2 溶洞充填物的厚度、结构、成分、性状、状态、地基承载力等。
- 3 溶洞顶、底、壁的稳定情况，洞顶岩层厚度、产状、节理、裂隙分布及风化充填情况。
- 4 溶洞或暗河水位（洪痕）、水深、流量、流速、水温、水质等。
- 5 地下水状态，补、径、排路径，地下水类型及动态变化特征。
- 6 已发生涌水突泥的位置、高程、方量、物质成分、持续时间等。
- 7 地表塌陷或沉降的分布范围、位置、形态、数量、规模、发生过程、时间等。
- 8 施工期间的水文及气象资料。
- 9 岩溶处治设计所需的岩土物理力学参数。
- 10 设计施工需要的其他资料。

4.4.3 施工补充勘察宜与水文地质观测、超前地质预报、监控量测相结合，方法互为补充，结果相互验证，并应符合下列规定：

- 1 应重视既有资料的研究利用，熟悉设计图纸和施工工艺，校验前期勘察成果。
- 2 可采用三维激光测量、地质素描等手段揭露无充填溶洞的边界、形态、结构面及风化充填情况。
- 3 可采用取芯或非取芯地质钻机、半自动钻机等设备探测充填溶洞的边界及充填物性状。
- 4 应采用洞内、洞外相结合的勘察方法调查岩溶水的补、径、排及水量、水压、水质等。

#### 4.4.4 施工补充勘察综合分析应符合下列规定：

- 1 应分析溶腔的稳定状况，评价溶洞或隧道发生坍塌的可能性。
- 2 应分析充填物的稳定状况，评价充填物地基承载力。
- 3 应分析岩溶水的发育程度，评价产生涌水突泥、地表水或地下水疏干、地面沉降、塌陷等岩溶水灾害和环境地质问题的可能性。
- 4 应提出灾害防治及岩溶处治方案建议。

## 4.5 综合地质评价

### 4.5.1 公路岩溶隧道综合地质评价应包括下列内容：

- 1 岩溶地质复杂程度评价。
- 2 隧道围岩分级及稳定性评价。
- 3 隧道涌水量预测与评价。
- 4 隧道涌水突泥危险性评价。
- 5 溶洞对隧道影响程度评价。

### 4.5.2 综合地质分析评价应分阶段、分地段进行，并符合下列规定：

- 1 工可勘察应在地质调查的基础上进行隧道岩溶地质复杂程度初步分级，评价岩溶地质条件对路线方案的影响。
- 2 初步勘察、详细勘察应开展隧道围岩分级及稳定性评价、隧道涌水量预测与评价，分析评价涌水突泥危险性及其隧道建设可能诱发的环境地质灾害。
- 3 施工补充勘察应开展溶洞对隧道影响程度评价，提出灾害防治及岩溶处治方案建议。

### 4.5.3 岩溶地质复杂程度评价应符合下列规定：

- 1 工可勘察宜以整座隧道为评价对象进行分级评价。
- 2 初步勘察、详细勘察应分地段进行详细分级评价，初步勘察分段长度不宜大于1000m，详细勘察分段长度不宜大于500m。
- 3 应根据分级结果提出勘察方案布置、隧道布置、监控量测、超前地质预报及施工补充勘察等方面的建议。

### 4.5.4 岩溶隧道围岩分级及稳定性评价应符合下列规定：

- 1 岩溶隧道围岩分级应采用围岩特征定性分析与围岩质量指标定量分级相结合的方法进行。
- 2 围岩特征定性分析应按表4.5.4-1进行。

表4.5.4-1 公路岩溶隧道围岩级别划分

围岩级别	围岩特征	岩体质量指标 [BQ] 值
I	巨厚层至整体块状结构，岩体完整；岩溶弱发育，岩溶水不发育；围岩弹性纵波速度 $v_p > 5.3\text{km/s}$	$\geq 551$
II	厚层至块状结构，岩体完整；岩溶弱发育，岩溶水不发育；围岩弹性纵波速度 $v_p > 5.3\text{km/s}$	550 ~ 451
III	巨厚层或中厚层状或整体块状或块状结构，岩体完整 ~ 较完整；岩溶弱发育 ~ 中等发育，岩溶水不发育 ~ 较发育；围岩弹性纵波速度 $v_p = 4.3 \sim 5.3\text{km/s}$	450 ~ 351
IV	中厚层至镶嵌状结构，节理较发育，层间结合较差且多夹泥，岩体较完整 ~ 较破碎；岩溶弱发育 ~ 强发育、岩溶水不发育 ~ 发育；围岩弹性纵波速度 $v_p = 3.3 \sim 4.3\text{km/s}$ ；主要分布于隧道进出口、浅埋及岩溶和岩溶水发育段落	350 ~ 251

续表 4.5.4-1

围岩级别	围岩特征	岩体质量指标 [BQ] 值
V	镶嵌至散体结构,节理发育且多夹泥,岩体破碎~极破碎;岩溶强发育~极强发育,岩溶水发育~极发育;围岩弹性纵波速度 $v_p = 2.0 \sim 3.3\text{km/s}$ ;主要分布于隧道进出口及浅埋段岩土界面,岩性交接带、负地形断层破碎带、向背斜核部等岩溶强发育~极强发育、岩溶水发育~极发育部位	$\leq 250$
VI	岩溶水极发育地段,软塑~流塑状黏土、泥混块石、饱和粉细砂充填的大型至巨型溶洞	—

3 围岩质量指标[BQ]值应按式(4.5.4-1)计算:

$$[BQ] = BQ - 100(K_0 + K_1 + K_2 + K_3) \quad (4.5.4-1)$$

式中:[BQ]——岩体质量指标;

BQ——围岩基本质量指标,应按式(4.5.4-2)计算:

$$BQ = 100 + 3R_b + 250K_v \quad (4.5.4-2)$$

式中: $R_b$ ——岩石单轴饱和抗压强度;

$K_v$ ——岩体完整性系数;

$K_0$ ——岩溶影响修正系数,应按表4.5.4-2确定;

$K_1$ ——地下水状态影响修正系数,应按表4.5.4-3确定;

$K_2$ ——主要软弱结构面产状影响修正系数,应按表4.5.4-4确定;

$K_3$ ——初始应力状态影响修正系数,应按表4.5.4-5确定。

表 4.5.4-2 岩溶影响修正系数 $K_0$ 

岩溶发育程度	$K_0$
弱发育	0~0.2
中等发育	0.2~0.4
强发育	0.4~0.6
极强发育	0.6~1.0

表 4.5.4-3 地下水状态影响修正系数 $K_1$ 

地下水出水状态	BQ				
	>550	550~451	450~351	350~251	<250
潮湿或点滴状出水, $p \leq 0.1$ 或 $Q_s \leq 25$	0	0	0~0.1	0.2~0.3	0.4~0.6
淋雨状或涌流状出水, $0.1 < p \leq 0.5$ 或 $25 < Q_s \leq 125$	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9
淋雨状或涌流状出水, $p > 0.5$ 或 $Q_s > 125$	0.1~0.2	0.2~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9	1.0

注: $p$ 为水压,单位MPa; $Q_s$ 为围岩渗水量,单位为 $L/(\text{min} \cdot 10\text{m})$ 。

表 4.5.4-4 主要软弱结构面产状影响修正系数  $K_2$ 

结构面产状及其与洞轴线的组合关系	结构面走向与洞轴线夹角 $<30^\circ$ 结构面倾角 $30^\circ \sim 75^\circ$	结构面走向与洞轴线夹角 $>30^\circ$ 结构面倾角 $>75^\circ$	其他组合
$K_2$	0.4~0.6	0~0.2	0.2~0.4

表 4.5.4-5 初始应力状态影响修正系数  $K_3$ 

初始应力状态	BQ				
	$>550$	550~451	450~351	350~251	$<250$
极高应力区	1.0	1.0	1.0~1.5	1.0~1.5	1.0
高应力区	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5~1.0

4 围岩基本质量指标 BQ 应遵守下列限定条件:

- 1) 当  $R_b \geq 90K_v + 30$  时, 取  $R_b = 90K_v + 30$  和  $K_v$  计算 BQ;
- 2) 当  $K_v \geq 0.04R_b + 0.4$  时, 取  $K_v = 0.04R_b + 0.4$  和  $R_b$  计算 BQ。

#### 条文说明

2 岩溶隧道围岩一般是灰岩、白云岩等层状硬质岩石, 因此, 岩溶隧道围岩的稳定性主要由岩体完整程度、岩溶发育程度、溶洞富水性等几个指标来控制, 表 4.5.4-1 是在原来的隧道围岩分级定性分级方法的基础上主要针对岩体完整程度(层厚)、岩溶发育程度、岩溶水发育程度等指标进行细化。在勘察阶段, 对岩溶隧道, 围岩弹性纵波速度也可以作为围岩级别划分的主要指标。表中围岩弹性纵波速度参考了《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 表 4.3.1 中国岩弹性纵波速度划分, 按照 B 类岩石(沉积岩, 即石灰岩、白云岩等碳酸盐类)进行取值。此外, 高密度电法和电磁法也是岩溶隧道勘察常用的方法, 由此测得的视电阻率也可以作为围岩分级的参考指标, 详见表 4-1。

表 4-1 隧道围岩分级电阻率参数

围岩级别	视电阻率 $\rho_v(\Omega \cdot m)$
II	$\geq 9000$
III	1000~9000
IV	300~1000
V	$\leq 300$

鉴于实际工程中视电阻率受地表覆盖层厚度及其导电性能、地层岩性、地下水位埋深、地下水矿化度、岩溶发育、裂隙发育破碎程度等诸多因素影响, 另外, 不同方法(如高密度电法和电磁法)所测视电阻率也存在偏差, 因此, 具体使用视电阻率方法划分时, 建议作为辅助指标使用。

**4.5.5** 岩溶隧道涌水量应根据水文地质条件进行分段预测和整体预测, 并符合下列规定:

- 1 隧道涌水量应分别进行正常涌水量与最大涌水量预测。



2 涌水量预测应采用2种以上方法,可按本规范附录A执行。

### 条文说明

2 岩溶隧道的地下水涌水量预测是一个错综复杂的问题,它的大小与地形地貌、岩溶地质复杂程度、地表水体分布情况、当地的气象水文、隧道埋深等诸多因素相关。由于岩溶及岩溶水发育都具有随机性、隐蔽性,岩溶发育的形态、规模及连通性有较大差异,且地质环境复杂多变,因此,想完全准确预测岩溶隧道的地下水涌水量非常困难。目前尚无公认、通用可行的预测方法,各种方法都有一定的适用范围且受参数取值准确性的影响较大,因此,选择2种以上较为适宜的预测方法,相互校核,综合分析后使用,能一定程度上提高预测的准确性、可靠性。

本条对应的附录A给出了岩溶隧道涌水量预测的几种常用方法:洼地入渗法、简易水均衡法、地下水动力学法、水文地质比拟法。如果隧道位于垂直渗流带,地表存在大量岩溶洼地、岩溶强~极强发育或存在地下暗河,地下水径流方式以管道型为主,降雨补给方式以灌入~渗入为主,一般情况下采用洼地入渗法较为合适。如果岩溶弱~中等发育,隧道位于水平径流带或深部缓流带,此时围岩含水介质相对均匀,则采用简易水均衡法或地下水动力学法较为合适。水文地质比拟法适用性较广,但要求比拟对象的条件要相当且相距比较近才较为合适。总之,上述各种方法各有其适用条件,实际使用时要特别注意匹配。

**4.5.6** 岩溶隧道涌水突泥危险性评价应明确涌水突泥的位置、规模,提出涌水突泥的处治建议。

**4.5.7** 溶洞对隧道影响程度评价应符合下列规定:

1 设计阶段应划分岩溶隧道围岩分级,评价岩溶对隧道围岩稳定的影响,存在的主要工程地质、水文地质、环境地质问题和处治建议。

2 施工阶段应根据开挖揭露或超前地质预报探测的岩溶及岩溶水情况、岩溶分布位置,评价溶洞对隧道的影晌程度,并提出相应的处治措施建议。

## 5 总体设计

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 应基于全生命周期成本最低原则，根据隧址区岩溶地质复杂程度，进行公路岩溶隧道方案综合比选。

#### 条文说明

隧道工程的全生命周期包括工程的决策阶段、实施阶段和使用阶段。对公路岩溶隧道而言，设计方案的综合比选工作一般是在实施阶段的早期——初步设计阶段完成的。在这一阶段，随着勘察工作的逐步深入，对隧址区岩溶地质复杂程度已经有了比较充分的了解，工可阶段确定的走廊带内的一些大型区域地质构造、重大岩溶不良地质等逐渐明朗，而这些地质因素决定了施工难易程度以及安全风险、建设和运营成本的高低。从国内近些年的岩溶隧道工程建设来看，在进行岩溶隧道方案综合比选时，往往比较注重对施工难易以及安全风险、建设成本等实施阶段的研究，而忽视了对运营难度和成本等使用阶段的综合考虑，也就是通常以建设期的概预算造价作为评估方案合理性的唯一依据。这样虽然能使工程建设的成本较低，但由于岩溶及岩溶水发育具有随机性、隐蔽性，建设过程中往往不能完全发现或解决所有的岩溶不良地质问题，这就很容易造成岩溶隧道在投入使用后出现衬砌开裂、渗漏水等病害，严重时甚至发生涌水突泥、路面拱起、衬砌掉块等重大问题，不仅严重影响行车安全，而且维修难度和成本也大幅增加，从全生命周期的综合成本来看，反而是提高的，不符合工程项目全生命周期管理的基本原则。因此，在方案比选阶段，就需要通盘考虑建设阶段和使用阶段的综合成本问题，一些重大的不良地质能避就避，不能避也要降低其影响，从尽量降低全生命周期成本的角度选择合适的公路岩溶隧道方案。

**5.1.2** 公路岩溶隧道宜绕避岩溶极发育、生态环境敏感、建设环境复杂的区域。

**5.1.3** 岩溶隧道平、纵面设计应利于排水，洞口宜布设在地质稳定、利于排水的位置。

#### 条文说明

岩溶水对隧道施工安全及结构安全通常不利，大量的岩溶水壅积不仅容易造成涌水突泥、坍塌灾害，威胁施工人员和设备的安全，而且还会作为荷载作用于衬砌结构上，对衬砌结构的稳定产生严重影响。而岩溶隧道往往都比较富水，因此，岩溶隧道的平、

纵面设计要使隧道内部的地下水尽快排出隧道外，避免壅积在隧道内部，常用的方法包括：减少隧道长度或采用人字坡以减少排水路径长度、将纵坡顶点设置于岩溶地下水分水岭附近以减小反坡排水地段长度、适当加大纵坡坡度等。此外，还要防止洞外水流倒灌进入隧道内部，如洞口不要设置在低洼处、可能出现倒灌的洞口设置横向截水沟和反坡排水路基边沟等。

## 5.2 隧道选线

**5.2.1** 岩溶隧道线位宜绕避可溶岩与非可溶岩的接触带、构造发育带、负地形、岩溶水富集区，以及岩溶强烈发育、暗河发育、网状洞穴、巨型溶洞等严重不良地质地段。无法绕避时，应以大角度、短距离通过。

**5.2.2** 岩溶隧道线位宜避免与暗河并行。当需要大角度上跨暗河时，宜保证隧道安全底板厚度。当需要下穿暗河时，宜保证隧道安全顶板厚度，并应论证暗河地下水对隧道的不利影响。

**5.2.3** 越岭岩溶隧道宜选择从岩溶峰丛地形的垂直渗流带通过，应避免从水平径流带通过。

**5.2.4** 峰林谷地、峰丛洼地及溶丘洼地地段隧道线位宜绕避排水不利的低洼地带；隧道洞口设计高程应高于洞口洼地最高洪水位，并应考虑壅水影响。

**5.2.5** 在河谷地区选线时，宜选择从岩溶发育相对较弱的一岸通过，隧道高程宜置于岩溶水最高水位以上。

## 5.3 隧道布置

**5.3.1** 公路岩溶隧道纵断面设计应符合下列规定：

- 1 季节性富水及富水岩溶隧道纵坡宜采用人字坡。
- 2 季节性富水及富水岩溶隧道宜适当加大隧道纵坡坡度，最小纵坡不宜小于0.5%。

### 条文说明

1 采用人字坡方案可明显缩短排水路径，加速岩溶水排出洞外，避免发生涌水灾害时掌子面被淹没，便于工人快速逃生，有利于施工安全，且施工排水可采用自然排水方案，大大节省施工成本，尤其是长、特长隧道以及富水岩溶隧道，纵坡采用人字坡更为合适。

2 对季节性富水及富水岩溶隧道而言，排水系统的排水断面面积和坡度决定了排泄速度的快慢，因此，为了确保岩溶地下水尽可能快速、有效地排到隧道外部，避免岩溶地下水壅积在隧道内部，威胁施工和运营安全，适当加大隧道纵坡以加快地下水排泄

速度是十分必要的。本规范基于加快地下水排泄速度的需要适当提高到不小于0.5%。

### 5.3.2 岩溶隧道横断面设计应符合下列规定：

- 1 岩溶地质极复杂地段，左右洞的净距不宜小于2倍开挖洞径。
- 2 内轮廓应根据隧道功能、结构受力、岩溶及岩溶水对隧道结构的影响以及排水系统布置需求等因素，综合分析确定。
- 3 穿越岩溶水极发育地段需设置限排型衬砌或全封闭衬砌时，宜结合水压加大仰拱曲率、减小仰拱半径。
- 4 岩溶地质极复杂的地段可适当加大隧道内轮廓的富余空间。

#### 条文说明

1 岩溶地质极复杂地段岩溶极强发育、岩溶水极发育，出现巨型溶洞、暗河等严重不良地质的概率很高，对隧道施工及运营安全有很大影响。此时，如果隧道左右洞的净距过小，会叠加左右洞施工相互作用的不利影响，可能会导致该地段的隧道支护结构受力状况恶化，进一步危及施工及运营安全。由此，要求岩溶地质极复杂地段左右洞的最小净距不小于2倍开挖洞径，可以有效降低左右洞的施工开挖相互影响，提高施工安全和结构质量。

2 除需要满足隧道常用功能及结构受力等常规要求外，内轮廓形式在岩溶隧道中一个重要的需求，是要考虑岩溶发育情况对隧道结构受力的影响，尤其是岩溶水压力对隧道结构的影响。此外，由于岩溶隧道涌水量一般较大，需要比普通隧道更多的空间来布置管沟，这部分管沟空间也需要在内轮廓设计时考虑。

3 在岩溶水极发育的地段，衬砌需要抵抗水压力，参考水工隧洞、公路水下隧道的设计理念，通过加大仰拱曲率、减小仰拱半径，使断面趋近于圆形断面，利于结构受力，也有利于加大路面以下排水沟断面大小，增大排泄能力。仰拱加深的深度一般建议为50~70cm。

4 穿越高压富水岩溶管道、大型~巨型溶洞、暗河等极复杂岩溶地段，由于处治方案较为复杂，为了确保处治方案有效及运营安全，一般会建立长期监测机制，因此，内轮廓设计时需要适当预留后期监测、维修加固的富余空间。

**5.3.3 紧急停车带、车行横通道、人行横通道应避免布置在岩溶强发育地段、高压富水地段；无法避免时，应采取切实可行的工程技术措施。**

#### 条文说明

紧急停车带、车行横通道、人行横通道等辅助洞室与主洞交界处一般是三维空间应力状态，局部存在较为严重的应力集中现象，支护结构形式较复杂，施工难度较大，防水处理较复杂，如果将辅助洞室设置在岩溶强烈发育、高压富水地段（本规范中高压富水地段是指岩溶水压力在0.5MPa以上的富水地段），会叠加岩溶水压力，支护结构受力将更加复杂、更加不利，施工难度将更大，防水处理也将更复杂，因此，要求避免将辅助洞室布置在岩溶强发育地段、高压富水地段。

**5.3.4** 地下风机房、配电所等大型机电设施、设备洞室不宜设置在岩溶水极发育地段。

**5.3.5** 在岩溶水极发育地段设置的辅助坑道应具备自排水功能。

#### 条文说明

必须布置在岩溶水极发育地段的辅助坑道，能自然顺畅地排泄岩溶水是确保隧道施工安全和运营安全的重要技术手段，因此，当有多个结构方案时，推荐选用施工横洞、平行导坑、迂回导坑等具有自排水功能的辅助坑道，而不建议选用斜井、竖井等自排水困难、涌水突泥风险很高的辅助坑道，这样既可以降低施工风险，又可以减少抽排水施工费用。

交通运输部信息公示  
浏览专用

## 6 结构设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 应综合考虑岩溶及岩溶水发育情况、围岩条件、防排水措施、岩溶处治方案等因素，选择岩溶隧道支护结构形式，通过工程类比和结构计算综合分析确定支护结构参数。

#### 条文说明

大量的工程实践表明，岩溶隧道，尤其是岩溶发育地段，支护结构的选用需要特别慎重。支护结构形式除了与围岩条件（围岩级别、岩石强度、岩体完整性）有关外，还与岩溶发育情况（岩溶类型、位置、规模、性质、稳定状态等）、岩溶水发育情况（水量、水压等）、防排水措施（以排为主还是以堵为主、防水板全包还是半包等）、岩溶处治方案（回填、架桥、护拱、支顶等）等因素密切相关。支护结构作为永久性建筑物，需要充分考虑岩溶环境下各种因素的耦合作用，确保支护结构具有足够的强度、稳定性；在耐久性方面，需考虑地下水腐蚀性、岩溶的发展性。穿越复杂岩溶区域时，需要通过工程类比和数值分析验算极端水量和水压力情况下支护结构的安全性，确保支护结构具有足够的安全储备。

此外，岩溶隧道的支护结构还需要适应岩溶水可能变化的环境。支护结构选择时需要考虑岩溶及岩溶水发育的不规律性影响，从地形条件、岩溶发育程度、排水系统有效性、运营后环境条件的可能变化等方面，分析隧道工作环境可能存在的不利条件，评估支护结构的可靠性和安全性，并选择适宜的支护结构参数。

**6.1.2** 应根据隧道所处的地形地质条件、岩溶及岩溶水发育情况、岩溶与隧道的位置关系、防排水措施、埋置深度、支护参数、施工方法、相邻隧道间距等因素，确定支护结构的围岩压力和水压力。

#### 条文说明

对岩溶隧道来说，围岩压力和水压力是最重要的两种荷载。

与其他地质条件隧道相比，由于岩溶的存在，隧道周边围岩的均匀性大幅降低，这会导致围岩压力作用的不均匀性增加，进而导致衬砌结构受力不均衡或出现较大的偏压，对结构受力十分不利。在结构计算时，要求考虑围岩压力作用的这种不均匀性，这是岩溶隧道区别于其他地质隧道最重要的力学特征之一。

对富水岩溶隧道，无论是采用以疏为主的防排水措施，还是以堵为主的防排水措

施,衬砌背后都可能有一部分水压力残存,尤其是高压富水地段,水压力往往是导致衬砌结构开裂破坏、渗漏最重要的因素,因此,水压力是富水岩溶隧道最重要的力学特征之一,在结构计算时,也要求重点考虑。

影响岩溶隧道的围岩压力和水压力大小的因素很多,除了所处的地形地质条件、埋置深度、支护参数、施工方法、相邻隧道间距等常规因素外,岩溶发育情况、岩溶水发育情况、岩溶与隧道的位置关系、防排水措施等都与围岩压力、水压力有很强的相关性,在确定时都要一并考虑。

**6.1.3 公路岩溶隧道支护结构计算应考虑岩溶空间效应、水压力、落石冲击、充填物流失或淤积、地基沉降、地震作用等对隧道安全的影响。**

#### 条文说明

与一般隧道相比,岩溶隧道支护结构计算需要考虑更多、更复杂的因素,比如岩溶空间效应、水压力、落石冲击、充填物流失或淤积、地基沉降、地震作用等。岩溶空间效应主要指岩溶类型、位置、规模、性质、稳定状态等导致围岩压力、水压力及其他作用的空间分布不均匀性增加,进而导致衬砌结构受力状况出现较大的不均衡或出现较大的偏压。水压力是富水岩溶隧道支护结构承受的主要荷载之一,在高压富水地段则可能会成为控制结构安全的最不利荷载。落石冲击主要是隧道穿越巨型无充填的不稳定溶腔以及隧道洞口存在危岩体支护结构所要承受的主要荷载,作用时间短暂但冲击力巨大,对结构及运营安全影响显著。在有充填物的溶洞中,充填物一方面可能会作为土压力荷载作用在支护结构上,另一方面也可以作为地基支撑支护结构,溶洞充填物流失或淤积会导致土压力荷载或支护结构地基发生变化,有些变化是不利的;作为地基时,则需要考虑软弱充填物地基的沉降过大或不均匀沉降对支护结构安全的影响。对岩溶隧道而言,地震作用虽然不是主要作用之一,但岩溶地质复杂地段于抗震可能是不利的,尤其是岩溶隧道的构造破碎带、巨型溶腔的洞壁、暗河等地段,地震作用可能会导致灾害发生或加重灾害的危害程度。

**6.1.4 隧道结构体系应根据岩溶发育特点进行针对性设计和结构计算。**

#### 条文说明

对岩溶隧道来说,尤其是洞身揭示有溶槽、溶洞、岩溶管道、暗河、溶蚀破碎带等岩溶现象或岩溶水发育地段,围岩及溶洞的稳定性均较差。此时,一方面要求处治岩溶,不使岩溶不良地质危及支护结构,另一方面也要求设置合适的支护结构以抵抗岩溶不良地质段的围岩压力、水压力等,也就是隧道结构体系要与岩溶处治方式相匹配,即要求根据岩溶发育特点开展针对性设计,充分发挥围岩、支护结构、岩溶处治措施的联合作用形成共同承载体,节省工程投资。

**6.1.5 岩溶隧道应采用曲边墙拱形断面复合衬砌,岩溶水极发育地段宜采用钢筋混凝土二次衬砌,岩溶水发育~极发育地段衬砌应设置仰拱。**

## 条文说明

一般来说, 曲边墙衬砌比直墙式衬砌抵抗水压力能力更强, 因此, 在富水岩溶地段采用该型衬砌以提高结构抗水压能力。即使在贫水岩溶地段, 特别是位于季节变动带的隧道, 雨季降雨下渗也可能使结构局部或全部承受较大的外水压力作用, 这种情况下采用曲边墙衬砌效果会更好。

岩溶水极发育地段, 采用限排衬砌或全封闭衬砌要求衬砌承担较大的水压力, 其大小与排水系统自身的排水能力和有效性相关, 排水畅通时, 作用在衬砌上的水压较小, 但如果运营过程中出现排水系统的结晶、泥沙堵塞则会增大水压力; 即使采用排放型衬砌, 有时候也会因为排水系统有效性的变化承受一部分水压力。从安全角度出发, 岩溶水极发育地段考虑采用钢筋混凝土结构来承担一部分水压力, 以降低后期水压增大带来结构开裂、渗漏的风险, 这是十分必要的。

一般情况下, Ⅲ级围岩地段不要求设置仰拱。但岩溶水发育~极发育段落, 水压力大小、作用范围及其变化规律通常比较复杂, 后期还可能因为排水系统结晶、泥沙堵塞导致排水不畅、水压力增大, 进而导致衬砌开裂、渗漏、路面拱起等。从安全角度出发, 岩溶水发育~极发育地段, 不论围岩什么级别, 都要求衬砌采用带仰拱的封闭式衬砌结构, 不仅能提高支护结构抗水压能力, 还能提高结构整体性, 从而更好地适应地层的变形不连续性。

**6.1.6** 全封闭衬砌、限排型衬砌与排放型衬砌相邻, 或全封闭衬砌与限排型衬砌相邻时, 应将全封闭衬砌或限排型衬砌向水压更小或水量更贫乏地段延伸, 延伸长度应根据两侧围岩地质状况、施工情况、水压大小等综合确定, 不宜小于10m。

## 条文说明

全封闭衬砌和限排型衬砌都要承受一定的水压力, 排放型衬砌则一般不考虑承受水压力, 因此, 全封闭衬砌、限排型衬砌与排放型衬砌相邻时, 要求在中间设置一定的过渡段以逐步消减水压力, 避免接头处水压力剧减、两端受力极不均衡导致结构开裂。过渡段的长度除考虑两侧围岩地质状况以及二次衬砌一次浇筑长度外, 最重要的是考虑水压大小, 水压大则需要长一些, 使水压的消减尽可能平稳一些。过渡段要求沿用承受水压较大一侧的支护参数, 并在与承受水压较小一侧的接头处设置3~5m长的纵向防水隔断, 纵向防水隔断的做法详见本规范第7.2.8条。

**6.1.7** 施工过程中应根据岩溶揭露情况、监控量测结果、超前地质预报及施工补充勘察成果, 开展动态设计, 及时修正围岩荷载, 调整结构形式和设计参数。

## 6.2 荷载

**6.2.1** 岩溶隧道围岩压力应根据围岩级别、溶洞与隧道位置关系、溶洞对隧道的影响程度等因素确定, 分为基本围岩压力和溶洞土压力两部分。

**6.2.2** 岩溶隧道基本围岩压力宜按一般隧道围岩压力计算。拱部有大型~巨型隐伏



溶洞，且与隧道的位置关系为中距或近距时，基本围岩压力宜按浅埋隧道计算，拱顶埋深应按岩盘厚度取值。

### 条文说明

如果隧道拱部中距或近距范围内有大型~巨型隐伏溶洞，则隐伏溶洞已经穿透了可能的平衡拱范围，这将导致隧道拱部围岩无法形成平衡拱，此时只能按照浅埋隧道进行计算，隧道拱顶埋深取岩盘厚度。

**6.2.3** 溶洞与隧道的位置关系为交叉，且溶洞内存在岩溶充填物时，溶洞土压力计算应符合下列规定：

- 1 土压力作用范围应为溶洞与隧道的交接面。
- 2 溶洞土压力大小可按本规范附录B计算。
- 3 溶洞充填物为黏性土时，宜按水土合算考虑。
- 4 溶洞充填物为砂性土时，宜按水土分算考虑。

**6.2.4** 隐伏溶洞与隧道的位置关系为近距或中距时，溶洞土压力计算应符合下列规定：

- 1 土压力作用范围应为安全岩盘可能破裂的区域。
- 2 溶洞土压力大小应按式(6.2.4)计算：

$$q' = q \left( 1 - \frac{T^2}{T_s^2} \right) \quad (6.2.4)$$

式中： $T_s$ 、 $T$ ——隧道周边隐伏溶洞安全岩盘厚度(m)、岩盘厚度(m)；

$q$ 、 $q'$ ——隧道周边隐伏溶洞内充填物产生的原有土压力(kPa)、传递到隧道衬砌上的溶洞土压力(kPa)；水土分算时，包括溶洞内水压力、土压力，但不包括岩盘自重。

### 条文说明

由于岩盘的存在，隐伏溶洞内的充填物产生的土压力有一部分由岩盘承受，因此，传递到隧道衬砌上的溶洞土压力实际上只是一部分。

如图6-1所示，将隐伏溶洞岩盘等效为两端固定的梁，梁高为岩盘厚度 $T$ ，梁跨度为岩盘计算跨度 $l$ ，横向取1.0m。假定梁上承受的土压力为梯形分布，A端土压力集度为 $q$ ，B端土压力集度为 $q + \Delta q$ 。

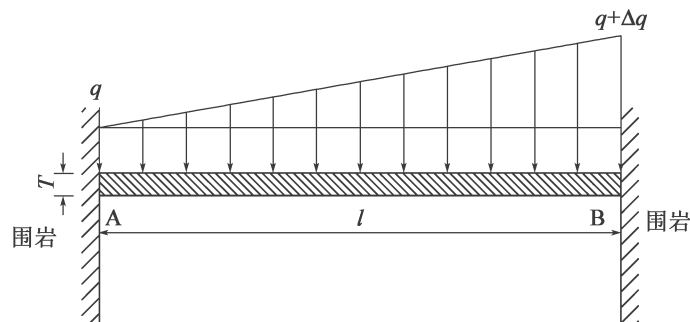


图6-1 隧道周边隐伏溶洞岩盘的梁板模型计算图式

根据结构力学分析, 梯形荷载产生的最大弯矩  $M_B$  位于B端, 大小按式 (6-1) 确定:

$$M_B = \frac{1}{12}ql^2 + \frac{1}{20}\Delta ql^2 \quad (6-1)$$

按抗弯强度控制, 当前岩盘的安全系数  $k$  为岩盘岩体的允许抗拉强度  $[\sigma_t]$  与最大弯矩截面上的最大正应力  $\sigma_{\max}$  的比值, 见式 (6-2):

$$k = \frac{[\sigma_t]}{\sigma_{\max}} = \frac{[\sigma_t]W}{M_B} \quad (6-2)$$

式中:  $W$ ——等效梁截面抵抗系数,  $W = T^2/6$ 。

将  $W$ 、 $M_B$  代入式 (6-2) 后, 可得到当前岩盘的安全系数  $k$ , 见式 (6-3):

$$k = \frac{10[\sigma_t]T^2}{5ql^2 + 3\Delta ql^2} \quad (6-3)$$

进一步可变换为式 (6-4):

$$\frac{1}{k} = \frac{5ql^2 + 3\Delta ql^2}{10[\sigma_t]T^2} \quad (6-4)$$

式 (6-3) 表明当前岩盘的安全系数  $k$  与岩盘厚度的平方  $T^2$  成线性正比关系, 式 (6-4) 表明安全系数的倒数  $1/k$  与作用在岩盘上的土压力  $q$  ( $\Delta q$ ) 成线性正比关系。

式 (6-3)、式 (6-4) 还表明, 要想当前岩盘成为安全岩盘, 有两种方式: 一种方式是增大岩盘厚度至安全岩盘厚度  $T_s$ , 通常是增加支护、加固岩盘岩体强度使岩盘达到安全岩盘厚度  $T_s$  对应的效果, 相当于增加支护力; 另外一种方式是等比例减少作用在岩盘上的土压力  $q$  ( $\Delta q$ ), 使当前岩盘的安全系数达到安全岩盘要求的安全系数  $k_s$ 。这两种方式是等价的, 因此, 当前岩盘需要增加的支护力, 也就是传递到隧道衬砌上的溶洞土压力, 等于等比例减少的作用在岩盘上的土压力。将式 (6-5) 代入式 (6-3), 得到式 (6-6):

$$\begin{cases} q'' = q \frac{k}{k_s} \\ \Delta q'' = \Delta q \frac{k}{k_s} \end{cases} \quad (6-5)$$

$$k' = \frac{10[\sigma_t]T^2}{5q''l^2 + 3\Delta q''l^2} = \frac{10[\sigma_t]T^2}{\left(5q \frac{k}{k_s} l^2 + 3\Delta q \frac{k}{k_s} l^2\right)} = \frac{10[\sigma_t]T^2}{5ql^2 + 3\Delta ql^2} \frac{k_s}{k} = k \frac{k_s}{k} = k_s \quad (6-6)$$

由此可知, 传递到隧道衬砌上的溶洞土压力为原来的溶洞土压力  $q$  ( $\Delta q$ ) 与使当前岩盘成为安全岩盘的土压力  $q''$  ( $\Delta q''$ ) 之间的差值, 大小按式 (6-7) 确定:

$$q' = q - q'' = q - q \frac{k}{k_s} = q \left(1 - \frac{k}{k_s}\right) = q \left(1 - \frac{T^2}{T_s^2}\right) \quad (6-7)$$

从式 (6-7) 可以得出:

(1) 若  $T = T_s$ , 则  $q' = 0$ , 即当前岩盘为安全岩盘, 此时传递到衬砌结构上的溶洞土压力为0, 即由岩盘承受全部溶洞土压力。

(2) 若  $T = 0$ , 则  $q' = q$ , 即溶洞与隧道位置关系为交叉, 此时传递到衬砌结构上的溶洞土压力为全部溶洞土压力, 与本规范第6.2.3条相对应。

(3) 若  $0 < T < T_s$ , 即溶洞与隧道位置关系为中距或近距, 此时传递到衬砌结构上

的溶洞土压力为部分溶洞土压力，与本规范第6.2.4条相对应。

(4) 若  $T > T_0$ ，即溶洞与隧道位置关系为远离，此时溶洞对隧道影响很小，传递到衬砌结构上的溶洞土压力为0。

**6.2.5** 溶洞土压力计算应考虑设计使用年限内充填物流失或淤积的影响。

**6.2.6** 隧道穿越岩溶洞穴采用明挖回填施作时，围岩压力应按支护结构外回填状况进行计算。

**6.2.7** 水压力的确定应综合考虑岩溶及岩溶水发育情况、岩溶与隧道的位置关系、防排水措施、岩溶处治方案等因素。

**6.2.8** 作用在衬砌上的水压力宜根据实测水量-水压变化规律综合分析确定，并符合下列规定：

1 采用排水型衬砌的IV、V级围岩富水地段宜采用50~100kPa水压力进行结构强度校核。

2 采用限排型衬砌的地段，可根据岩溶及岩溶水发育程度、防排水措施综合确定水压力；水压力不宜小于总水头的25%，且不应低于100kPa，不宜高于500kPa。

3 采用全封闭衬砌的地段，水压力应通过渗流分析确定。

条文说明

1 宜万铁路、渝怀铁路等多座岩溶隧道水压力监测结果表明：岩溶水量小，或排水系统的排水能力远大于衬砌背后的地下水量，衬砌背后地下水能够及时排走的地段，采用排水型衬砌，衬砌背后水压力几乎等于0，但考虑到衬砌背后可能会残存岩溶水，水压力不可能完全没有，因此，建议在IV、V级围岩段采用50~100kPa进行校核，以保证安全。

2 限排型衬砌虽然能够抵抗一定的水压力，但大量的工程实践表明，如果要设置能够抵抗水压超过500kPa的限排型衬砌，不仅衬砌施工难度较大、造价较高，实际工程中抗水压效果也不明显，如果后期衬砌背后无水或水压力不大则会造成大量浪费，因此，建议部分地段设置具有抵抗较低水压的限排型衬砌即可。从宜万铁路、渝怀铁路等多座岩溶隧道水压力监测结果来看，限排型衬砌的水压力实测值极少超过300kPa，因此，本条建议在限排型衬砌中水压力不超过500kPa符合实际情况。

**6.2.9** 无实测资料时，岩溶裂隙水作用在岩溶隧道衬砌上的水压力可按式(6.2.9)计算，并应满足本规范第6.2.8条的规定：

$$p_w = \beta(H_w - h_i) \left[ 1 - \left( \frac{Q_0}{Q_s} \right)^\alpha \right] \gamma_w \quad (6.2.9)$$

式中： $p_w$ ——作用在岩溶隧道衬砌结构上的水压力(kPa)；

$H_w$ ——设计最高水位(m)；

$h_i$ ——计算点的高程(m)；

- $Q_s$ ——未施作衬砌前在设计水头作用下预计渗流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), 对初期支护为裸洞状态下预计渗流量, 对二次衬砌为初期支护封闭后预计渗流量;
- $Q_0$ ——施作衬砌后在设计水头作用下的预计渗流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $\gamma_w$ ——岩溶水的重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ );
- $\beta$ ——岩溶隧道衬砌水压力的折减系数, 可按表 6.2.9-1 确定;
- $\alpha$ ——岩溶水排放状况水压力折减指数, 可按表 6.2.9-2 确定。

表 6.2.9-1 岩溶隧道衬砌水压力的折减系数

围岩岩溶发育及渗透情况	建议的折减系数 $\beta$
岩溶弱发育, 洞壁干燥或潮湿	0~0.2
岩溶弱~中等发育, 沿结构面有渗水或滴水	0.2~0.4
岩溶中等~强发育, 沿裂隙或软弱结构面有大量滴水、线状流水	0.4~0.8
岩溶强~极发育, 股状流水或喷水, 沿软弱结构面有小量涌水	0.8~1.0
岩溶极强发育, 股状流水, 断层等软弱带有大量涌水	1.0

表 6.2.9-2 岩溶水排放状况水压力折减指数

围岩地质条件	建议的折减指数 $\alpha$
Ⅲ级及以上地质条件较好的围岩段	0.5~1.0
Ⅳ级围岩段	1.0~1.5
Ⅴ级及以下地质条件较差的围岩段	1.5~2.0

### 条文说明

目前国内外关于水压力的计算方法有很多种, 常见的有折减系数法、理论与经验解析法、解析数值法、渗流应力场耦合分析法、水化学法等。其中, 由于水力边界条件、渗透系数及水文地质结构模拟所需的各种物理条件等参数难以准确获得, 理论解析法、渗流应力场耦合分析法、水化学法等方法在实际应用中受到了较大限制, 而折减系数法参数获取相对而言较为容易, 因此, 已成为最主流的水压力计算方法, 尤其是在水工隧洞、水下隧道的水压力计算等方面应用广泛。

折减系数法将作用在衬砌上的水压力按静水压力, 并考虑衬砌、围岩渗透情况等因素进行折减计算, 具有较为明确的理论意义。但不同于水工隧洞、水下隧道, 岩溶隧道的水压力不仅与岩体渗透性能有关, 还与岩溶及岩溶水的发育情况、隧道防排水系统有效性等密切相关, 更加复杂。此外, 折减系数如何取值目前也处于探讨阶段, 岩溶隧道设计时, 常借用水工隧洞的经验折减系数进行估算, 但宜万铁路、渝怀铁路等多座岩溶隧道水压力测试结果表明, 岩溶隧道水压力折减系数离散性较大, 因此, 设计中根据具体的情况分析确定。

设计中需要充分认识到支护体系中注浆加固圈、初期支护、防排水系统和二次衬砌等4个部分组成的限排型衬砌具有有限排水量和有限抗水压力两层含义, 各部分对于水压力折减系数及隧道渗水量的影响也不尽相同。以下措施可供设计人员参考, 对水压力大小和作用方式进行控制:

(1) 减小衬砌背后水压力大小。如加密或改善排水构造、在衬砌边墙下预留或钻设泄水孔、注浆减小围岩渗透系数、保持或疏通隧道周边过水通道等。

(2) 改变水压力作用方式,如采用半包式防水减小或消除仰拱部的水压力。

(3) 提高衬砌结构对水压力的承载能力。如加固围岩、优化衬砌结构断面形状、加厚衬砌或加大配筋量等。

**6.2.10** 对于岩溶水极发育的隧道,水压力应专门研究确定。

**6.2.11** 支护结构基础设置在岩溶充填物上时,应考虑岩溶充填物地基整体沉降和不均匀沉降对结构的不利影响。

**6.2.12** 当隧道以明洞形式穿越不稳定的大型、巨型溶洞时,应考虑洞壁失稳对隧道结构的落石荷载及其冲击作用,其大小应根据落石重量、掉落高度、拱顶填土厚度等因素综合确定,落石冲击作用可按本规范附录C计算。

### 6.3 结构计算

**6.3.1** 进行结构计算时,宜对下列关键断面进行计算分析:

- 1 岩溶水压力或水位最低与最高的断面。
- 2 充填物最薄与最厚的断面。
- 3 偏压效应较大的断面。
- 4 横向地基承载力变化较大的断面。
- 5 有落石冲击风险的断面。

**6.3.2** 符合下列条件时,宜采用荷载-结构模型进行结构内力分析:

- 1 支护结构在稳定洞室过程中起主要作用时。
- 2 支护结构承受较大水压力的地段。
- 3 支护结构穿越岩溶充填物的地段。
- 4 浅埋地段或软弱围岩地段。

**6.3.3** 采用荷载-结构模型计算时应符合下列规定:

- 1 隧道周边有无充填溶洞的部位,可不考虑弹性抗力的作用。
- 2 隧道周边有充填溶洞的部位,应根据溶洞充填物性质或回填材料特性确定弹性抗力系数。
- 3 隧道周边中距范围内有隐伏溶洞的部位,可按岩盘厚度与安全岩盘厚度的比值折减岩盘的弹性抗力系数。

**6.3.4** 符合下列条件时,宜采用地层-结构模型进行结构内力分析:

- 1 外部荷载不明确或不易确定。
- 2 支护结构与洞周支挡结构、基础等设计成整体。

- 3 需要考虑结构纵向强度与变形。
- 4 溶洞巨大且形状复杂。

#### 条文说明

本条给出的一些特殊地段，采用荷载-结构模型计算围岩压力或水压力的困难较大，或确定其作用范围、作用方式的困难较大，故建议采用地层-结构模型进行计算，将围岩压力计算直接隐含在初始应力状态计算中；对水压力计算，建议先进行渗流分析，以渗流分析得到的渗透压力作为水压力作用在地层-结构模型上进行计算分析。

**6.3.5** 隧道支护结构与洞周支挡结构、基础等设计为整体时，宜按三维模型进行分析计算。

#### 条文说明

对于一些大型溶洞内部设置复杂的空间结构，将隧道支护结构与洞周支挡结构、基础等设计成整体，通常不能简化为平面模型，此时建议进行三维计算。

**6.3.6** 岩溶隧道结构应分别按承载能力极限状态基本组合、承载能力极限状态偶然组合和正常使用极限状态标准组合进行计算与验算，并符合下列规定：

- 1 采用限排型或全封闭衬砌时，二次衬砌应按承担水压力设计。
- 2 仰拱未设置防水层时，仰拱应按初期支护与二次衬砌共同承担水压力考虑。
- 3 IV级及以下围岩地段宜对施工过程中初期支护结构安全性进行校核。
- 4 拱顶存在较大范围的空腔，且岩溶水水位超过拱腰或仰拱底部岩溶水压较大时，应对结构的整体抗浮进行验算。

#### 条文说明

4 隧道顶部通常被围岩约束，因此，一般情况下无须考虑抗浮的问题。但是，如果拱顶处于较大溶洞中，失去顶部约束，而底部岩溶水水位较高，结构整体的浮力较大，则有整体有上浮的危险，此时要求验算整体抗浮能力。

## 6.4 衬砌结构设计

**6.4.1** 应根据围岩情况、岩溶及岩溶水发育情况及地下水环境保护要求等因素选用衬砌类型，并符合下列规定：

- 1 围岩渗水量小于隧道排水系统设计排泄能力的岩溶地段，可采用排放型衬砌。
- 2 围岩渗水量大于或等于隧道排水系统设计排泄能力的岩溶地段，需要二次衬砌承担部分水压时，应采用限排型衬砌。
- 3 因环境保护要求必须限制围岩渗水量时，应采用限排型衬砌或全封闭衬砌。

## 条文说明

本条对岩溶隧道衬砌选型进行了规定。

1 如果衬砌背后地下水小于隧道排水系统（包括隧道体内、外排水系统，体内排水系统如中央排水沟等，体外排水系统如泄水洞等）的设计排泄能力，衬砌背后的岩溶水水量和水压力都很小甚至为零，与一般隧道差别不大，可以采用排放型衬砌，即普通隧道衬砌。

2 如果衬砌背后地下水大于或等于隧道排水系统的设计排泄能力，通过注浆堵水限制进入支护结构内部的水量，此时水压力一部分由注浆堵水圈承受，一部分由支护结构来承受，即采用限排型衬砌。

3 如果因为环保的原因限制围岩渗水量，则要求采用限排型衬砌；当完全不允许围岩渗水进入支护结构内部时，则要求采用全封闭衬砌，此时衬砌结构参数需要进行分析研究后确定。

**6.4.2** 限排型衬砌应将注浆堵水加固圈、初期支护和二次衬砌等作为抗水压结构，并符合下列规定：

- 1 应将注浆堵水加固圈、初期支护作为减小渗水量的主要措施。
- 2 衬砌断面宜采用圆形或类似圆形轮廓。
- 3 应根据防排水措施合理确定衬砌承担的水压力。
- 4 施工阶段应根据涌水量和水压力的变化情况，及时调整支护参数，实现动态设计。

**6.4.3** 全封闭衬砌的参数应根据岩溶水压力及围岩压力分析计算确定。

**6.4.4** 岩溶水压力大于1.0MPa的岩溶水极发育地段支护参数应进行专门研究。

**6.4.5** 隧道穿越无充填溶洞且岩溶水不发育段落时，应符合下列规定：

- 1 隧道整体穿越时宜采用回填型明洞结构。
- 2 隧道部分穿越时应考虑偏压作用。

**6.4.6** 岩溶发育地段应加强隧底结构与围岩共同承载的能力，并符合下列规定：

- 1 穿越软硬不均的地质界面时，应采取降低不均匀沉降的措施，并设置钢筋混凝土仰拱。
- 2 隧底采用回填、换填及复合地基地段，应设置钢筋混凝土仰拱。
- 3 采用梁、拱、板、桩及洞内架桥等基础时，仰拱宜与基础浇筑成整体。

**6.4.7** 当隧道周边存在隐伏溶洞时，应根据岩体完整性、隧道断面大小，溶洞的规模、位置、富水充填程度、水压大小等因素，采用工程类比法、结构力学分析法或数值分析法等确定安全岩盘厚度，并符合下列规定：

- 1 安全岩盘厚度不宜小于3m，大型~巨型溶洞不应小于0.5倍的隧道开挖跨度。
- 2 中型~大型溶洞安全岩盘厚度可按本规范附录D计算。

3 大型~巨型溶洞或岩盘计算跨度与岩盘厚度之比小于2.0的溶洞,安全岩盘厚度可采用数值分析法计算确定。

#### 条文说明

3 岩盘计算跨度与岩盘厚度之比小于2.0,即岩盘计算跨度与岩盘厚度尺寸相当时,在结构力学上属于深梁,深梁受荷载作用后的应力与应变分布不同于一般梁,正应力呈非线性分布,正截面应变不符合平截面假定,因此,不能用一般的梁板模型计算安全岩盘厚度。

**6.4.8** 隧道周边隐伏溶洞的岩盘厚度不满足安全要求时,应采取相应的处治措施。

交通运输部信息公开  
浏览专用



## 7 防水与排水

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 岩溶隧道防排水应遵循“以疏为主，截、堵、防、排相结合，因地制宜，综合治理”的原则。

#### 条文说明

目前国内大部分的岩溶隧道采用“以排为主”的防排水设计理念，也有少量岩溶隧道采用“以堵为主”的防排水设计理念。由于岩溶水的分布规律及排泄路径通常非常复杂，采用“以堵为主”的措施往往不可能将全部出水口堵住，如果堵水措施堵塞了天然排泄通道，还可能致使其内的岩溶水不断壅积，水头将越来越高，水压力越来越大，最终可能压裂衬砌导致衬砌破坏、渗漏、路面拱起等，而且堵水措施造价一般相对更高，“以堵为主”往往得不偿失，因此，“以排为主”的理念更符合当前大多数地区岩溶隧道防排水设计的实际情况。本规范在此基础上，进一步提出“以疏为主”的理念，强调不仅仅要尽快排出隧道内的岩溶水，还要尽量疏导原有的天然排泄通道以维持或提高其排泄能力。

**7.1.2** 当岩溶水排泄可能影响生态环境及水资源利用时，应采取措施减少地下水排放的不利影响。

**7.1.3** 岩溶隧道排水系统应与洞外路基桥梁排水系统、既有排水设施、自然水系平顺衔接，并根据需要设置消能、沉淀、拦污等设施，避免对周边环境造成不利影响。

### 7.2 防水

**7.2.1** 岩溶隧道防水应采取“源头截水、围岩堵水、衬砌防渗、接缝防漏、卷材防水”相结合的措施，形成完整的防水系统。

**7.2.2** 地表截水应符合下列规定：

- 1 地表洼地、谷地有明显汇水流入溶洞、消水洞、竖井等岩溶管道，危及隧道施工及运营安全的，可在地表实施截、引、排水措施。
- 2 洼地、谷底截水应引排至洞身影响范围之外。
- 3 地表水截、排水设施应考虑可维护性。

**7.2.3** 岩溶水极发育地段采用全封闭衬砌或限排型衬砌时，应采用注浆堵水措施控制进入初期支护内部的渗水量，并符合下列规定：

- 1 可通过混凝土栓塞、封水墙、注浆等措施控制围岩渗水量。
- 2 注浆堵水后围岩的集中渗水量或100m洞长累计渗水量宜降低至 $100\text{m}^3/\text{d}$ 以下。

**7.2.4** 应根据不同区段岩溶水的发育情况进行分区防水，各分区应具有与其岩溶水发育程度相适应的防水能力，各分区接头处应作为重点部位进行防水设计。

**7.2.5** 衬砌模筑混凝土应满足抗渗要求，岩溶水极发育且采用全封闭衬砌、限排型衬砌地段的二次衬砌混凝土抗渗等级不宜低于P10。

**7.2.6** 接缝防水措施应符合下列规定：

- 1 应采用不少于两道接缝防水措施，且抗水压能力与设计水压力相适应。
- 2 岩溶水极发育地段宜合并设置施工缝、变形缝。

**7.2.7** 防水卷材的厚度、性能应根据岩溶水压力、防水形式等综合确定。防水卷材搭接时，岩溶水较丰富地段防水卷材宜铺设在围岩一侧。

条文说明

如图7-1所示，卷材搭接时，水量更丰富地段的卷材放在内层靠近围岩一侧先铺设，水量更贫乏地段的卷材放在外侧后铺设，降低岩溶水顺卷材搭接处进入卷材外侧的可能性。

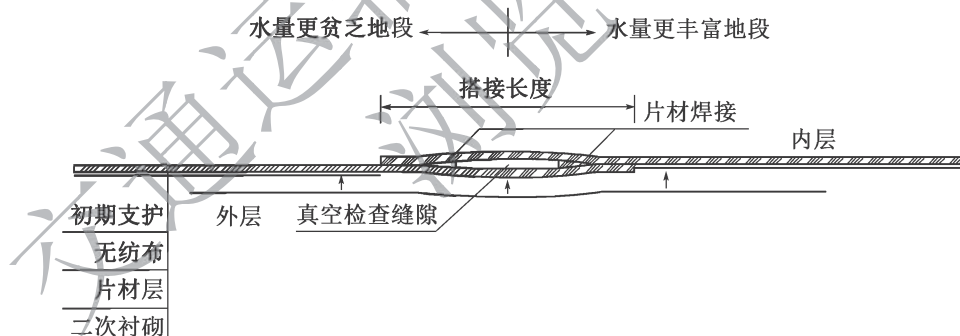


图7-1 卷材搭接示意图

**7.2.8** 全封闭衬砌、限排型衬砌与排放型衬砌相邻时，或全封闭衬砌与限排型衬砌相邻时，应在两种衬砌形式接头处设置纵向防水隔断，并符合下列规定：

- 1 隔断位置宜设置在围岩相对较完整的地段。
- 2 隔断长度宜结合地质条件确定，宜为3~5m。
- 3 隔断处初期支护背后的围岩应进行注浆防渗。
- 4 隔断处应用柔性橡胶垫层取代无纺布。
- 5 隔断处纵向排水管应断开。

## 条文说明

不同衬砌形式接头处一般是防水最为薄弱的部位，尤其是有一定的岩溶水压力的地段，在接头处两侧衬砌的抗水压能力骤然变化，但岩溶水压力却不能立即消散，因此，十分容易击穿接缝材料，导致防水失效、抗水压能力较弱一端衬砌开裂损坏。设置纵向防水隔断措施就是为了防止这一问题出现。如图7-2所示，具体做法是：在衬砌接头附近选择长度3~5m、围岩完整性相对较好的地段进行注浆防渗，减少围岩渗水和围岩内岩溶水纵向串流，然后用柔性橡胶垫层代替无纺布，使防水板紧贴在初期支护表面，进一步阻断二次衬砌背后围岩渗水的纵向串流。柔性橡胶垫层一般采用普通柔性橡胶板，厚度与无纺布厚度相近。

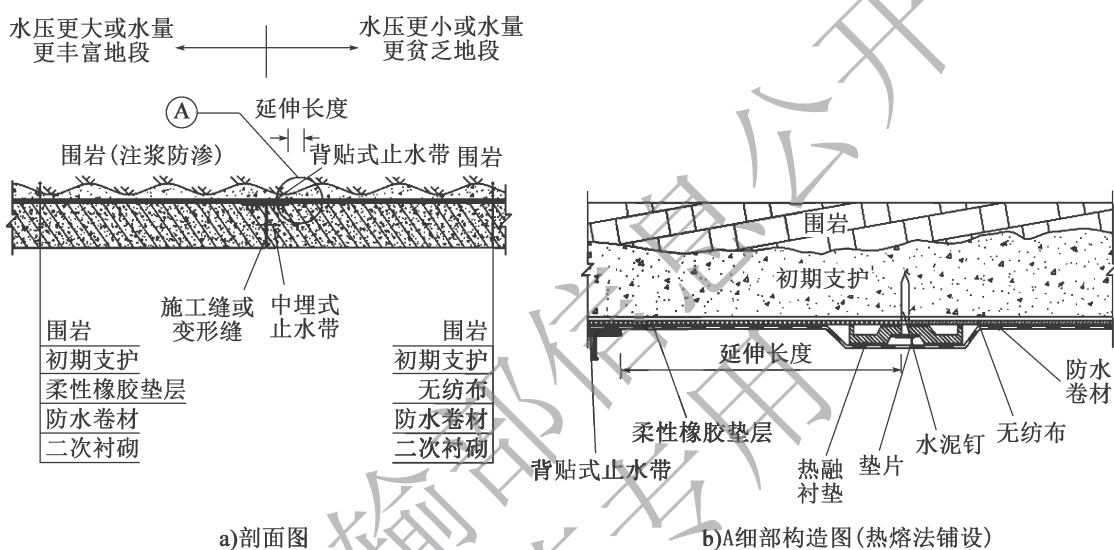


图7-2 防水接头构造示意图

## 7.3 排水

**7.3.1** 岩溶隧道应合理设置集水、导水、排水、沉砂等设施，形成完整、可维护的排水系统。

**7.3.2** 隧道内部排水系统的设计排泄能力应根据岩溶及岩溶水发育特征、设计涌水量、隧道长度、隧道纵坡、隧道路面以下空间尺寸等因素综合确定。

**7.3.3** 应按隧道所处位置岩溶水赋存条件确定设计涌水量，并符合下列规定：

- 1 施工临时排水宜取最大涌水量。
- 2 隧道位于垂直渗流带、季节变动带，隧顶有直接相连的消水洼地或落水洞时，设计涌水量宜取预测最大涌水量。
- 3 隧道位于水平径流带及深部缓流带且隧道围岩较均匀时，设计涌水量宜取预测正常涌水量。
- 4 隧道周边存在富水溶洞、管道、暗河时，设计涌水量宜专门研究。

### 7.3.4 中心水沟设置应符合下列规定：

- 1 宜采用矩形沟，断面尺寸应根据隧道长度、纵坡、设计涌水量等综合确定。
- 2 中心水沟应设置沉砂池、检查井，间距不宜大于50m，沉砂池、检查井可合并设置。
- 3 中心水沟、沉砂池、检查井应考虑可维护性。

### 7.3.5 应采取综合措施确保岩溶水极发育地段排水系统的排泄能力，并符合下列规定：

- 1 纵向排水管直径不宜小于150mm。
- 2 环向排水管纵向间距不宜大于5m。
- 3 横向导水管直径不宜小于150mm，间距不宜大于5m，排水坡度不宜小于3%。
- 4 排水管、沟应考虑防结晶、防泥沙堵塞的措施。
- 5 宜预留后期检查、疏通、维护排水管、沟的措施。

#### 条文说明

4 很多地区的岩溶水中均含有较多的泥沙和化学杂质，泥沙容易堵塞管道，化学杂质会产生结晶附着在管道内壁，严重减小管道的实际排水能力，而且排水管内泥沙堵塞和结晶一旦形成，以目前的技术在运营维护过程中是无法清理的，这是很多岩溶隧道后期出现渗水病害的重要原因之一。国内外针对这种问题进行了大量的研究，获得了一些研究成果，推荐采用的主要措施包括：加大排水管、沟直径，在管、沟口设置篦子阻止泥沙进入，采用光滑内壁的排水管道，在排水管道内加入高性能阻垢剂等。

5 近年来，随着智能机器人技术的发展，在一些市政工程中已经开始应用管道清淤机器人，效果较好，因此，建议在岩溶水发育地段的岩溶隧道管、沟设计中预留一些检修接口，便于后期应用各种管道机器人清淤技术，如纵、环向管、沟的检查孔、检修槽等。

### 7.3.6 岩溶水极发育地段应在隧道路面层以下设置纵横贯通的渗沟排水体系，并接入主排水沟或辅助排水通道。

### 7.3.7 岩溶地下水量较大时，路面下排水应符合下列规定：

- 1 宜扩大中心水沟断面。
- 2 可增设双侧盲沟，双侧盲沟与中心水沟之间应采用横向导水管连接。
- 3 泥沙杂质较多时，可采用口字件中心水沟。

#### 条文说明

岩溶地下水量较大时，采用常规的排水管+中心水沟通常不能满足要求，建议优先扩大洞内中心水沟的排水断面面积增大排泄能力，通常做法包括：

- 1 直接扩大中心水沟面积，但受限于内轮廓、路面结构、两侧管沟以及管沟盖板的限制，中心水沟面积实际上有较大的限制。
- 2 在两侧路面边水沟下部增设盲沟，形成中心盲沟+双侧盲沟的三沟系统，如

图 7-3 所示。中心盲沟和双侧盲沟采用横向导水管连接，双侧盲沟能实现一定的沉砂功能，水量过多时，可以向中心盲沟输送一定量经沉淀后的地下水，而且两侧盲沟沉砂的清理相对中心水沟更为便捷。

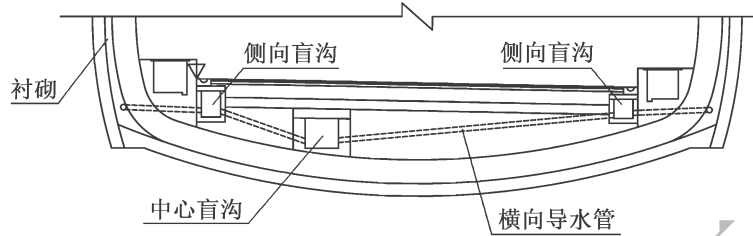


图 7-3 中心盲沟+双侧盲沟的三沟系统

3 采用路面口字件中心水沟，将路面下的排水能力发挥到极致，还可以在一侧预留检查人孔，实现人工或机械清砂，如图 7-4 所示。

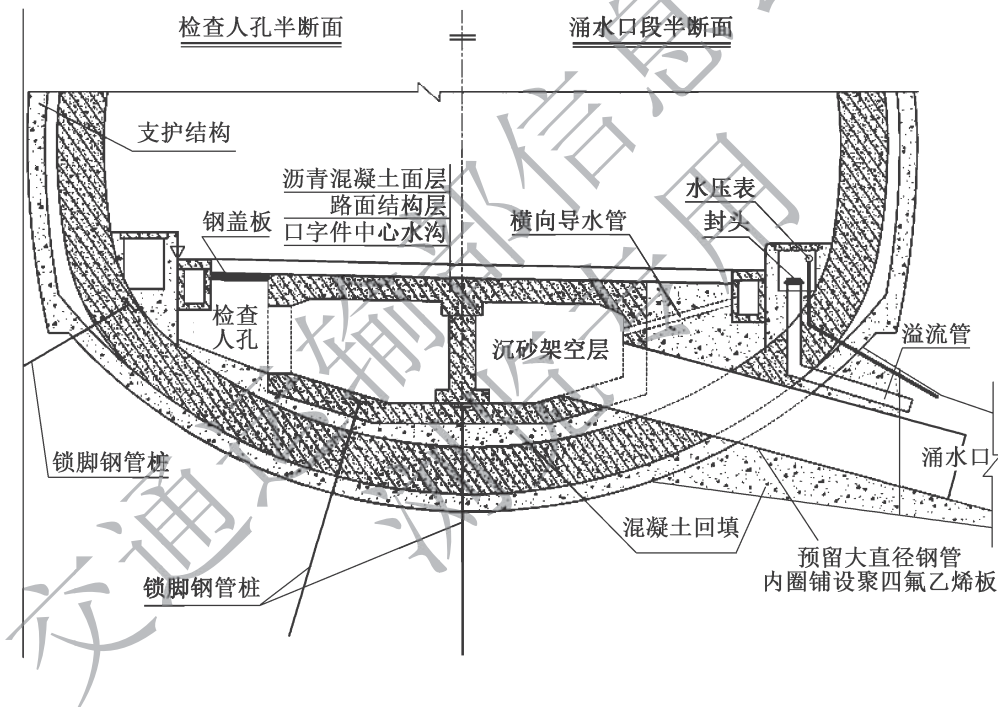


图 7-4 口字件中心水沟

**7.3.8 高压富水地段需要设置泄水孔（管）时应符合下列规定：**

- 1 孔（管）径、孔（管）深、布置形式应结合岩溶水发育情况确定。
- 2 孔（管）应伸入围岩不小于100cm。
- 3 存在岩溶物质流失风险地段应设置反滤设施。
- 4 泄水孔（管）可接入中心水沟或天然排泄通道。

## 7.4 辅助排水通道

**7.4.1** 采用注浆堵水和常规洞内排水措施不能满足地下水排泄要求，经评估可能危及主洞施工及运营安全时，宜在迎水面一侧设置隧底涵洞、集水廊道、泄水洞等辅助排水通道。

**7.4.2** 隧道上跨大型溶洞，需要维持原有排水通道时，可设置隧底涵洞或架设桥梁。隧底涵洞设置应符合下列规定：

1 涵洞洞口上边缘低于溶洞洪痕或与之平齐时，应按有压涵洞设计，并考虑涵洞水压力对隧道的影响；涵洞洞口上边缘高于溶洞洪痕时，可按无压涵洞设计。

2 涵洞管径或断面尺寸应根据岩溶水量、水压、施工及运营维护要求等因素综合确定。

3 隧底涵洞两端宜与原有排水通道连通。

### 条文说明

隧底涵洞有横向、纵向等几种形式，设置于隧道仰或路面下部，横向隧底涵洞可以作为疏排溶洞天然排水通道的措施，纵向隧底涵洞则类似于泄水洞，但设置于隧道底部。根据涵洞洞口与溶洞水位的关系，还可以将隧道涵洞分为有压涵洞、无压涵洞。当涵洞两端较低一侧的洞口上边缘高于溶洞的洪痕时，即使在洪水状态下，涵洞内水流也不会充满整个涵洞，可按无压涵洞设计；反之，如果涵洞两端较低一侧的洞口上边缘低于或平齐于溶洞的洪痕时，在洪水状况下，涵洞内的水流会充满或部分充满涵洞，使之成为有压涵洞，此时，通常要求采用钢筋混凝土圆管涵或箱涵，并要求考虑涵洞水压力对隧道结构的影响。横向、纵向隧底涵洞如图7-5、图7-6所示。

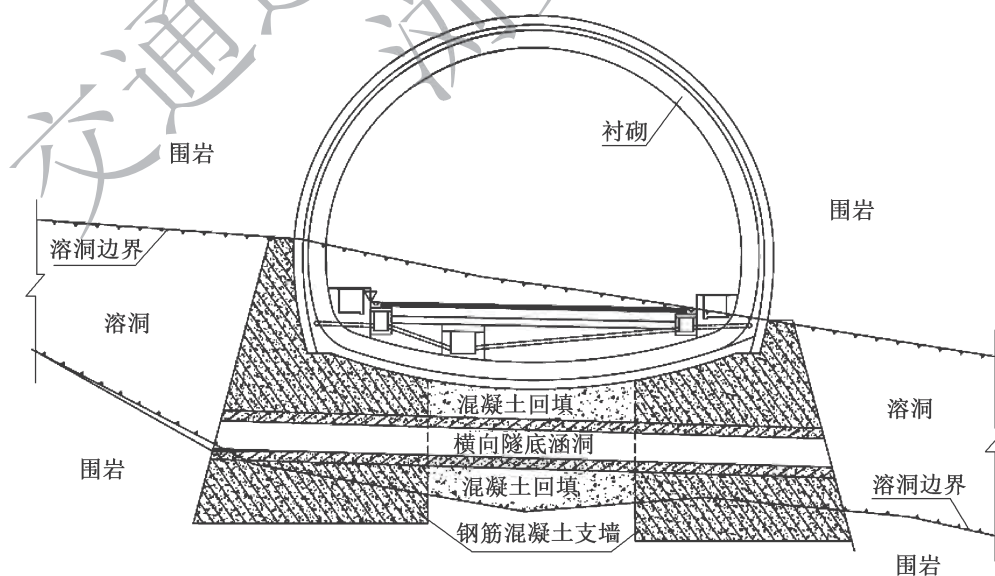


图7-5 横向隧底涵洞示意图

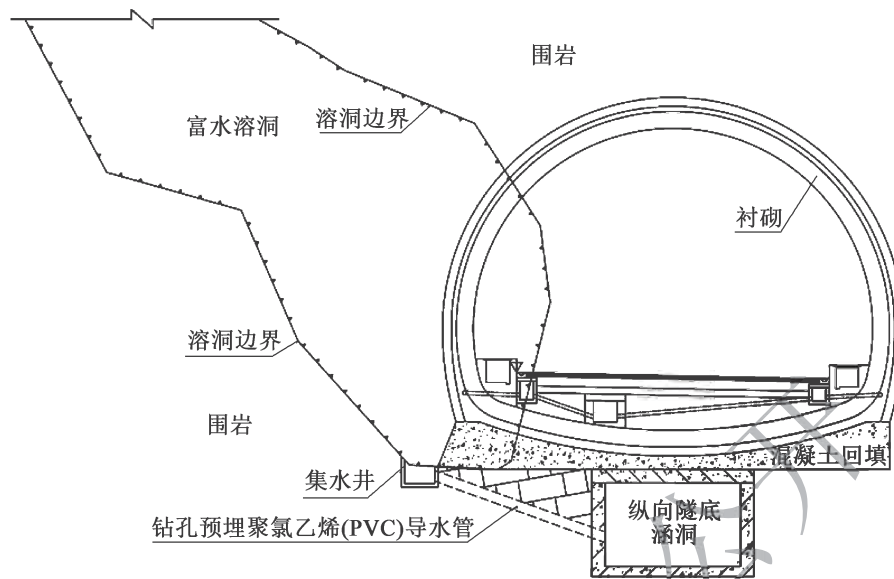


图 7-6 纵向隧底涵洞示意图

**7.4.3** 受季节性涌水影响严重或可能产生严重淤积的局部富水地段，可在隧道一侧或两洞之间设置集水廊道。集水廊道的设置应符合下列规定：

- 1 设置高程应满足沉砂、排水功能。
- 2 断面尺寸可根据岩溶水量、检修便捷性等因素确定。
- 3 可通过泄水孔、集水构造等与岩溶管道、裂隙、集中出水点相连。
- 4 集水廊道宜采用裸洞，软弱破碎围岩地段、与正洞交叉段及有特殊要求地段宜采用喷锚支护或复合衬砌。
- 5 廊道与主洞交叉处，主洞衬砌宜加强。
- 6 应预留维修门洞与集水廊道相通。

#### 条文说明

集水廊道可以为横向、纵向等几种形式，通常设置于迎水面一侧的局部富水段落，其规模相较于泄水洞小很多，其底部通常比主洞低，可以存储部分降雨下渗的岩溶水，同时沉淀岩溶水的泥沙等杂质，然后通过横向导水管逐步排至隧道路面下的排水沟中，减小降雨急速下渗对隧道结构和防排水体系的危害。设置于富水岩溶管道一侧的横向集水廊道如图 7-7 所示。

**7.4.4** 泄水洞设置应符合下列规定：

- 1 应按永久结构设计，满足结构安全、使用功能及耐久性要求。
- 2 宜布设在主洞结构影响范围之外，出口应设置在公路影响范围外。
- 3 应根据岩溶水水量、水位及主洞洞身、洞口高程等因素综合确定泄水洞高程、纵坡。
- 4 宜采用直墙拱形断面，应根据排水量大小、施工及运营维护要求等因素综合确定断面尺寸，不宜小于 2m（宽）×2.5m（高）。
- 5 长度大于 500m 且采用无轨运输方式的泄水洞应设置错车道，错车道间距不宜大

于300m，长度不宜小于20m。

6 宜打设泄水孔、设置集水廊道或通过疏通岩溶管道、裂隙等与主洞、集中出水点连接，泄水孔直径不宜小于50mm。

7 当主洞存在涌水突泥风险的岩溶管道、溶洞、暗河时，泄水洞布置应专门研究。

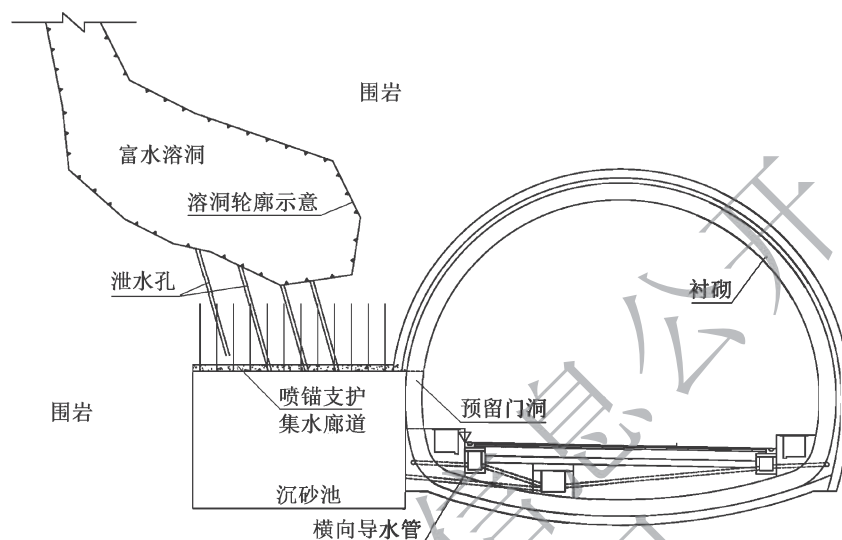


图7-7 集水廊道示意图

#### 条文说明

泄水洞分为横向、纵向等几种形式：横向泄水洞类似于施工横洞，一般是从隧道横向一侧的山体外向内掘进至隧道周边的暗河、巨型富水溶洞或岩溶管道等集中涌水处，将集中涌出的岩溶水排至隧道影响范围外，减少对隧道施工或运营的干扰，也常兼做施工横洞，可增加掌子面加快掘进速度；纵向泄水洞可设置在两主洞中间或迎水面一侧，特别适用于整个长度范围内隧道岩溶水量都很大的情况，纵向泄水洞底部通常设置比主洞更低，用以排出主洞岩溶水，且一般会提前主洞施工，兼做地质平导及起到降低主洞掌子面水位的作用。设于迎水面一侧的纵向泄水洞如图7-8所示。

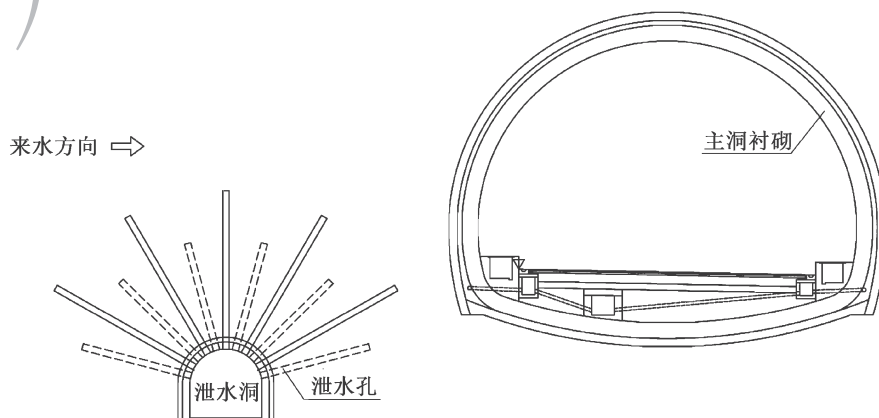


图7-8 设于迎水面一侧的纵向泄水洞示意图



**7.4.5 泄水洞支护结构设计应符合下列规定：**

1 设计参数应根据围岩级别、断面尺寸、施工方法等因素综合确定，采用工程类比或结构计算确定。

2 III、IV级围岩可根据围岩稳定情况和集水需要间隔设置裸洞段或预留泄水孔的喷锚衬砌。

3 V级围岩段、软弱破碎围岩段、洞口段、岔洞段、与主洞交叉段及有特殊要求地段应采用预留泄水孔的复合衬砌。

4 泄水洞与主洞交叉段，主洞衬砌应加强，加强范围应根据围岩条件、空间受力特征等综合确定。

5 裸洞段及喷锚段可设置带矮边墙的混凝土底板，底板厚度不应小于20cm，边墙高度不应小于30cm。

交通运输部信息公示  
浏览专用

## 8 岩溶处治设计

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 应根据开挖揭示岩溶情况、超前地质预报、监控量测和施工补充勘察等开展岩溶处治动态设计。

#### 条文说明

岩溶发育过程漫长，形成规律十分复杂，以目前的勘察技术水平，难以在勘察设计阶段完全准确地掌握岩溶的具体形态特征，因此，通常从工程可行性研究、初步设计、施工图设计至施工，逐步由粗至精地实现对岩溶不良地质的探查。与此对应，公路岩溶隧道的岩溶处治工作一般分两个阶段进行：勘察设计阶段，由于一般不能准确地确定岩溶发育的位置、规模、发育特征，因此，要求这一阶段进行预案设计，即结合已有的工程经验，分门别类地列出可能出现的岩溶不良地质及其处治方案，预估处治工程量；施工阶段，通过超前地质预报、监控量测和施工补充勘察成果及施工揭露状况，确定岩溶的位置、规模、发育特征，动态调整处治方案，进行专项设计，确定最终处治方案和处治工程量。

**8.1.2** 应根据岩溶地质复杂程度、溶洞对隧道影响程度分段进行岩溶处治。

**8.1.3** 岩溶水应按其发育程度分级处治，宜维持或恢复既有排泄通道。

**8.1.4** 高压富水、巨型溶洞及暗河的处治方案应通过专门研究确定。

### 8.2 贫水及弱富水溶洞处治设计

**8.2.1** 位于拱顶、拱腰、边墙的中、小型无充填贫水及弱富水溶洞的处治应符合下列规定：

- 1 溶洞对隧道的影响弱时，可不采取工程措施。
- 2 溶洞对隧道的影响中等时，可采用混凝土、轻质材料等进行回填处理，回填厚度不宜小于3m。

3 回填厚度较大时,内侧宜设置护拱,护拱两侧嵌入岩石内不宜小于50cm,并应采用锚杆与岩石连接,护拱外的空腔可采用轻质材料填实。

4 回填前宜对回填地基进行处理。

### 条文说明

拱顶、边墙中、小型无充填贫水及弱富水溶洞处治示例如图8-1、图8-2所示。

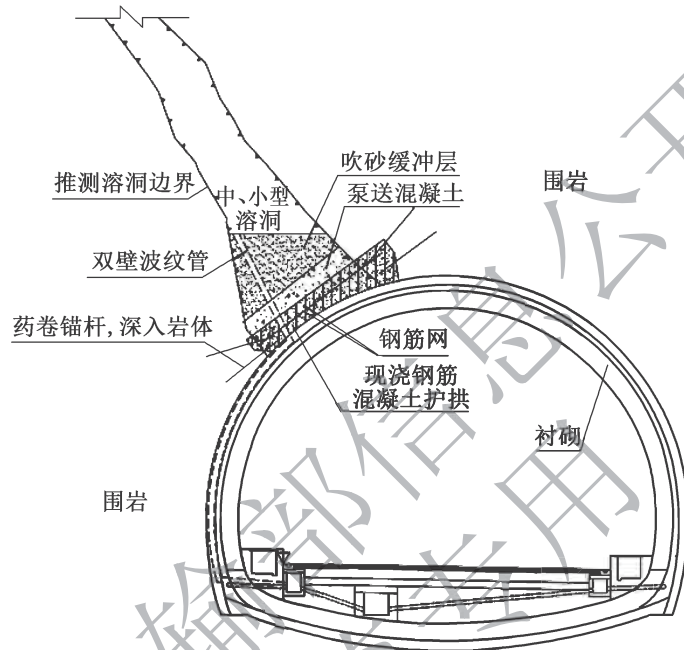


图8-1 拱顶中、小型无充填贫水及弱富水溶洞回填+护拱处治示例

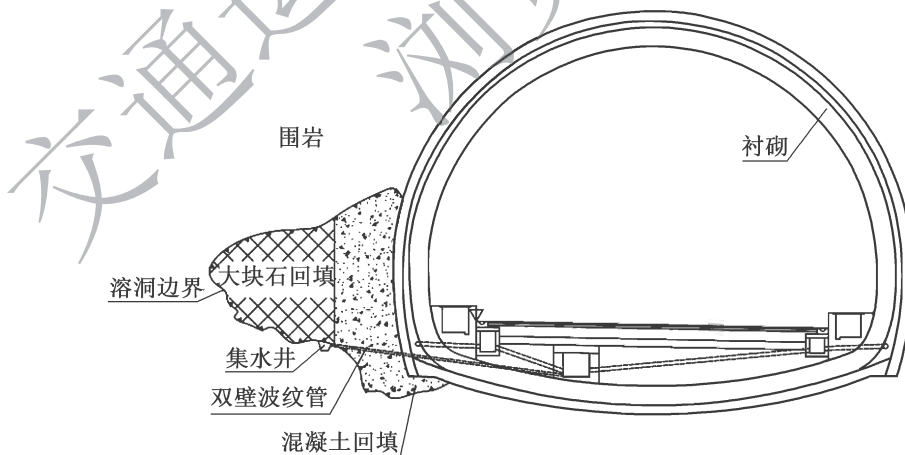


图8-2 边墙中、小型无充填贫水及弱富水溶洞回填处治示例

**8.2.2** 仰拱底部的贫水及弱富水溶洞应根据溶洞对隧道影响程度确定处治方案,影响弱时,可不进行处治;影响中等时,可采取以回填为主的措施;影响强烈时,可采取回填、加固、跨越措施。

## 条文说明

仰拱底部、拱脚贫水及弱富水溶洞处治方案示例如图8-3、图8-4所示。

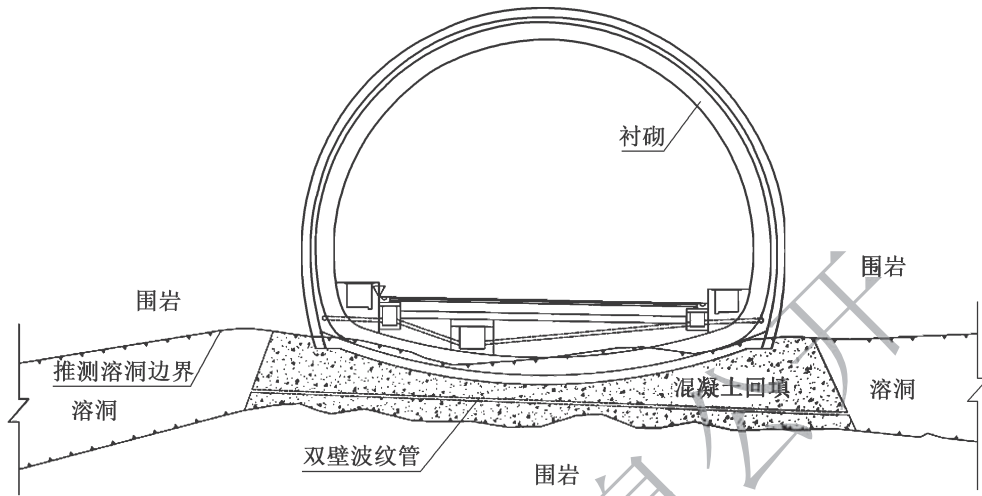


图8-3 仰拱下部贫水及弱富水溶洞回填处治示例

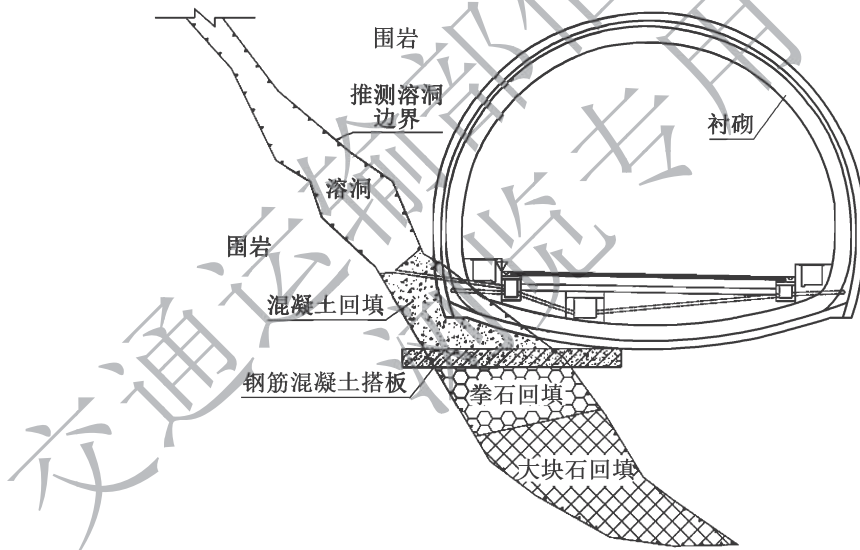


图8-4 拱脚下部贫水及弱富水溶洞梁板跨越处治示例

**8.2.3** 隧道穿越大型、巨型无充填贫水及弱富水溶洞时，应根据隧道与溶洞位置关系、溶洞的稳定性等，选择适宜的处治方案，并符合下列规定：

- 1 溶腔不稳定时，应先加固溶腔或采取护拱、混凝土立柱支顶等措施。
- 2 当溶腔围岩不稳定，溶腔加固风险特别大时，经技术、经济、施工可行性比较后，可采用先回填后暗挖的方法通过。

3 拱顶上方隐伏溶洞岩盘不稳定时，可采用超前泵送混凝土或砂浆等材料回填，回填厚度不宜小于3m，并应加强支护参数。

4 隧道拱腰、边墙溶洞，或隧道外侧隐伏溶洞岩盘不稳定时，可采取护拱措施，并加强支护参数。

5 隧道底部溶洞可根据溶腔的发育特点，采取填筑、钢筋混凝土梁板、托梁+板、型钢混凝土+板、桩基+承台和桥梁等跨越措施。

6 隧底隐伏溶洞岩盘不稳定时，应加固岩盘、加强支护结构，或揭穿溶洞后按隧道底部溶洞处治。

### 条文说明

隧道穿越巨型无充填贫水溶腔处治方案示例如图8-5~图8-7所示。

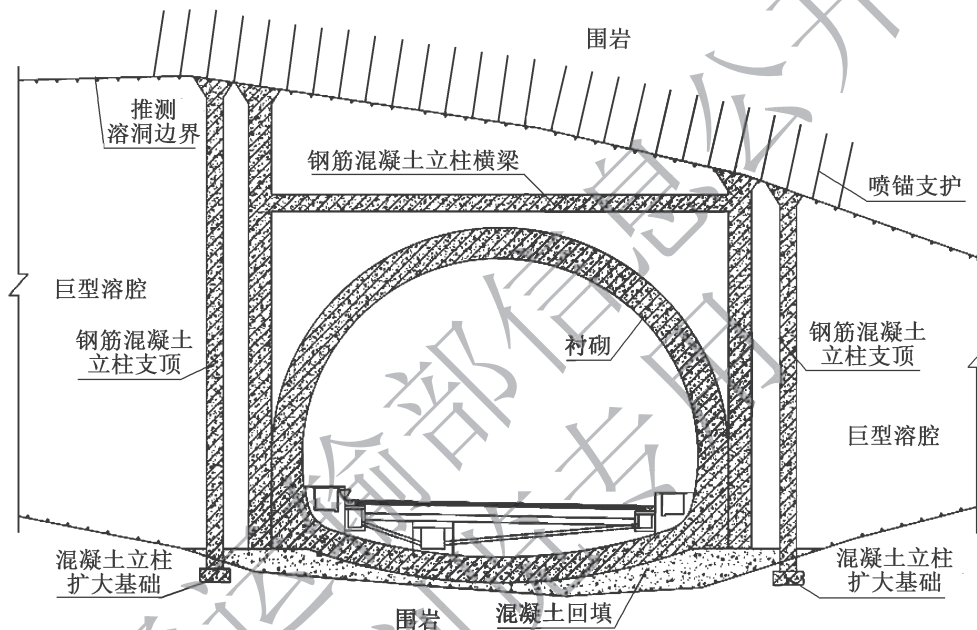


图8-5 隧道穿越巨型无充填贫水及弱富水溶洞立柱支顶处治示例

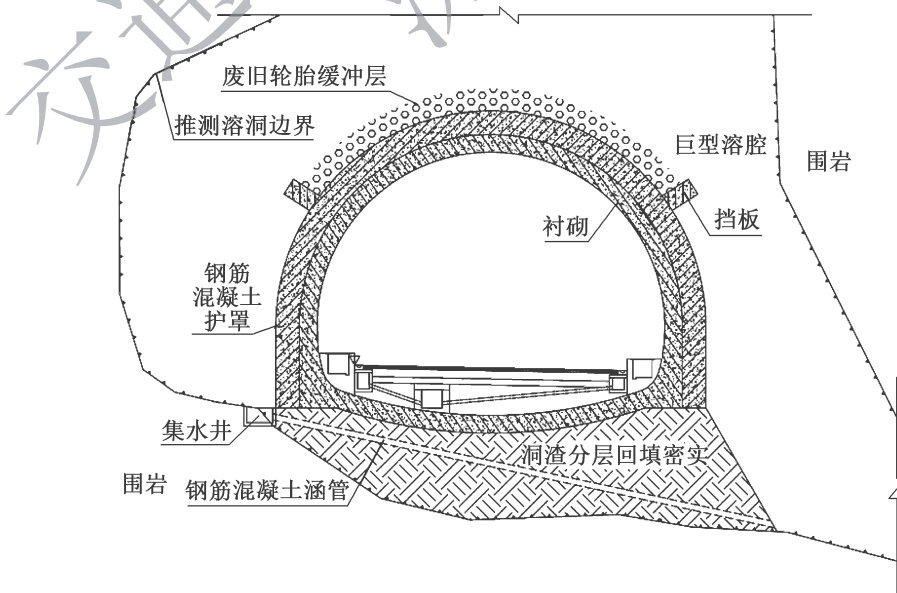


图8-6 隧道穿越巨型无充填贫水及弱富水溶洞拱顶护罩处治示例

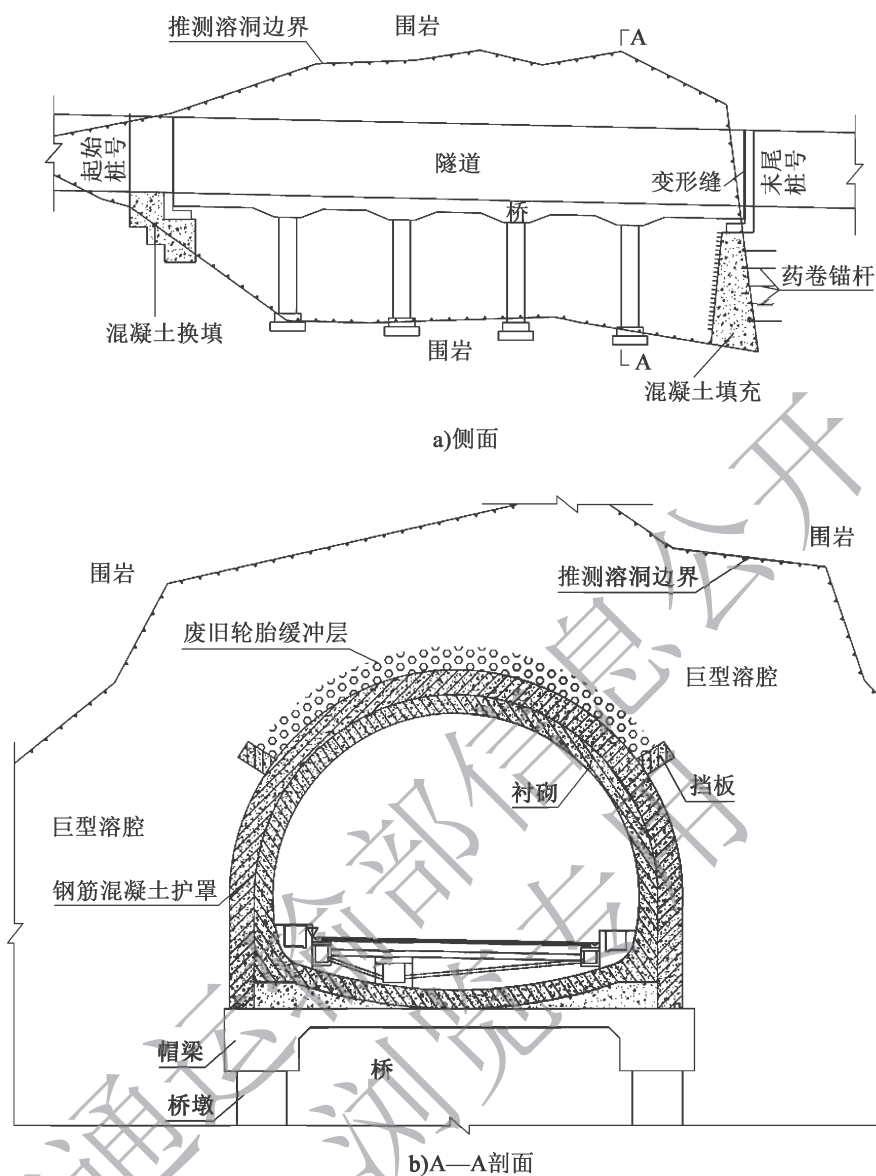


图8-7 隧道穿越巨型无充填贫水及弱富水溶洞桥梁跨越处治示例

**8.2.4** 充填型贫水及弱富水溶洞应根据隧道空间位置、溶洞充填物稳定性确定处治方案，并符合下列规定：

1 溶洞位于拱顶、拱腰、边墙，宜对不稳定充填物进行预加固，以暗挖方式通过，施工中根据监控量测数据调整支护参数和预留变形量，及时封闭成环。

2 溶洞位于隧道底部，可采用换填、复合地基、桩筏、桥梁跨越等处治方式并加强支护参数。

#### 条文说明

充填型贫水及弱富水溶洞处治方案示例如图8-8、图8-9所示。

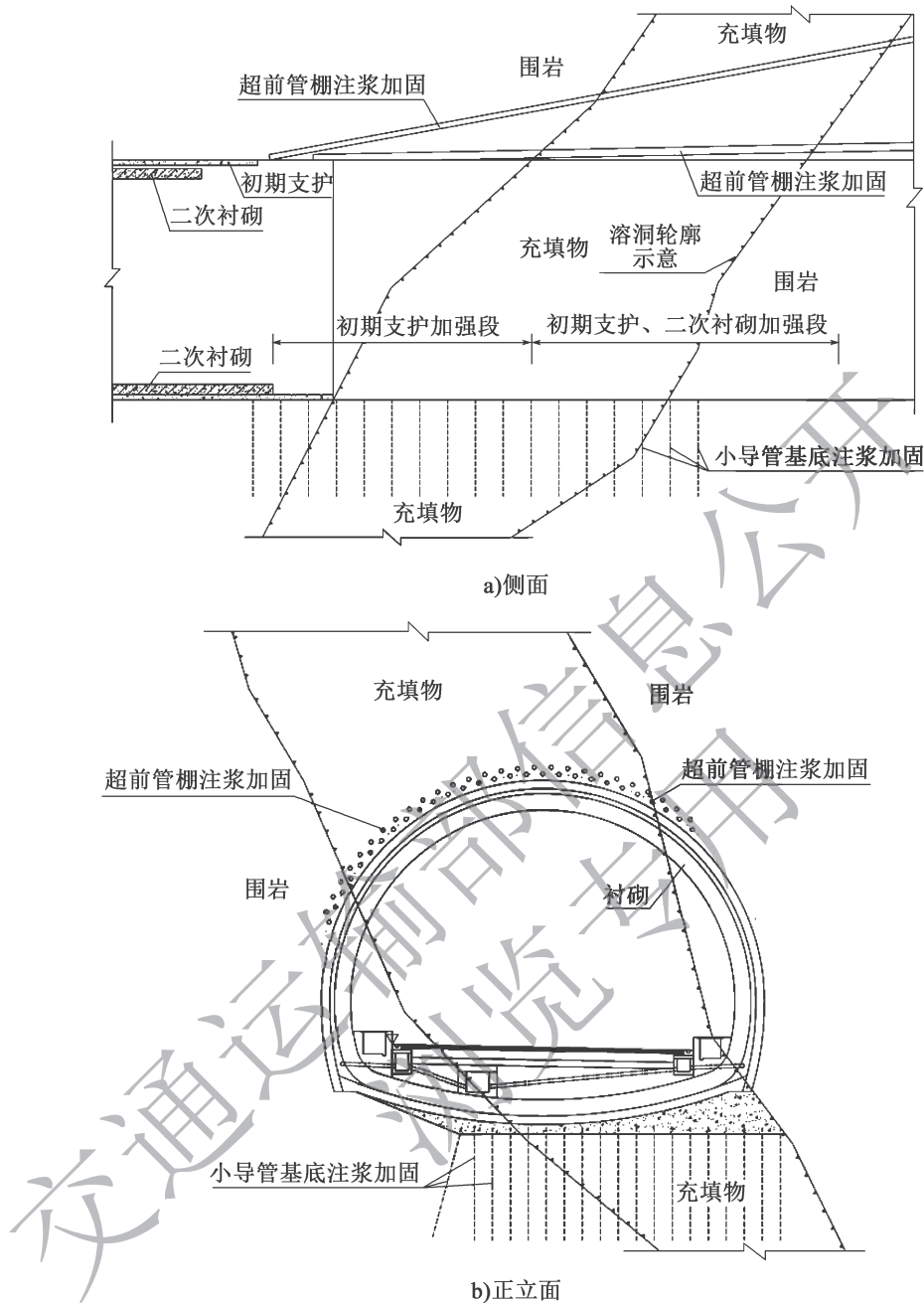


图 8-8 充填型贫水及弱富水溶洞注浆预加固处治示例

**8.2.5** 充填泥沙型贫水及弱富水溶洞应评估泥沙的特性和稳定状态，确定处治方案，防止泥沙的流失、坍塌。

**8.2.6** 充填块石型贫水及弱富水溶洞应评估其稳定性及对衬砌结构的影响，确定处治方案，并符合下列规定：

1 位于拱顶、拱腰部位，稳定性较差、对衬砌结构影响较大的，宜采取超前大管棚、注浆等措施加固块石体。

2 位于拱腰部位，稳定性较好、对衬砌结构影响较小的，可部分清理并回填低强度混凝土。

3 位于边墙或仰拱底部，稳定性好、承载力满足要求的可直接利用，稳定性较差或基底承载力不足时，可视情况采取支挡、注浆加固、复合地基或桩基等措施进行处治。

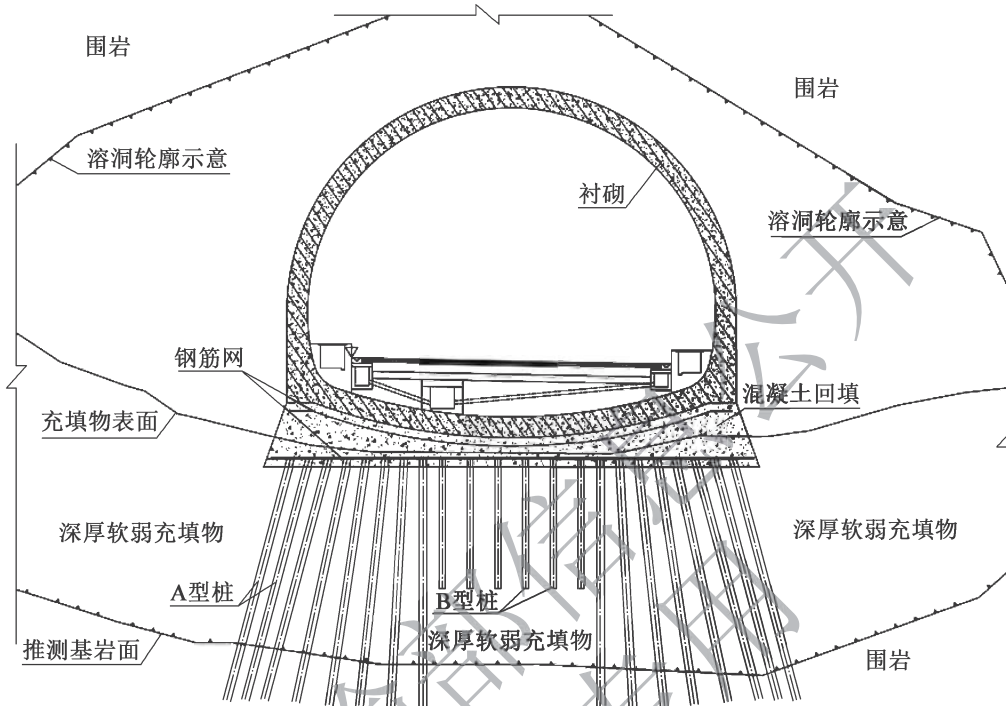


图 8-9 仰拱底部充填型贫水及弱富水溶洞复合地基加固处治示例

**8.2.7** 贫水及弱富水溶洞应设置导水管与隧道排水体系或天然排泄通道相连。

### 8.3 中等富水及强富水溶洞处治设计

**8.3.1** 中等富水及强富水溶洞处治应先评估施工过程中涌水突泥及环境风险，再确定处治方案，并符合下列规定：

1 应在排水降压、注浆堵水等岩溶水处治基础上，按本规范第 8.2 节的处治方法对溶洞进行处治。

2 应加强排水系统排泄能力，必要时，应设置泄水洞、集水廊道、隧底涵洞等辅助排水通道。

3 宜开展支护结构安全及衬砌水压力、水量监测。

**8.3.2** 高压富水溶洞应遵循“排堵结合”的处治原则，宜进行排水降压，并符合下列规定：

1 应在安全岩盘的保护下采用超前钻孔排水降压。



- 2 揭开高压富水溶洞前，应提前施作洞内、外排水引流通道。
- 3 排水降压效果不佳时，可采取注浆堵水或其他措施。

### 8.3.3 季节性富水溶洞处治应符合下列规定：

- 1 宜按富水岩溶进行处治。
- 2 应维持或疏导既有过水通道。
- 3 不宜安排在大雨～特大暴雨期间施工。

8.3.4 隐伏的中等富水及强富水溶洞应根据岩溶及岩溶水发育情况、岩盘厚度等确定处治方案。岩盘不稳定时，可按中等富水及强富水溶洞处治。

## 8.4 岩溶裂隙及岩溶管道处治设计

8.4.1 贫水及弱富水岩溶裂隙、岩溶管道可按贫水及弱富水溶洞进行处治，充填型岩溶管道可按充填型溶洞进行处治。

8.4.2 中等富水及强富水的岩溶裂隙，宜先对岩溶水进行疏排、封堵，再按贫水及弱富水岩溶裂隙进行处治。

8.4.3 中等富水及强富水岩溶管道应先评估管道水对隧道施工安全和运营的影响，再确定处治方案，并符合下列规定：

- 1 宜先维持、疏通原有岩溶管道。
- 2 岩溶管道需要改道时，宜先对岩溶水进行引排、封堵，再结合结构及防排水设计施作排泄通道。
- 3 岩溶管道水压力较大时，隧道结构宜采用护拱方案，并应加强支护参数。

## 8.5 暗河处治设计

8.5.1 隧道附近存在暗河时，应论证暗河对隧道施工及运营安全的影响。

8.5.2 隧道揭穿暗河时，可根据隧道与暗河的位置关系选择适宜的处治方法，并符合下列规定：

- 1 隧道底高程高于暗河洪痕时，宜保持暗河的天然状态，采用涵洞、桥梁跨越。
- 2 隧道底高程不高于暗河洪痕时，可采用渡槽、倒虹吸、泄水洞等导流构筑物。

8.5.3 隧道下穿或旁侧通过暗河且岩盘厚度不能满足安全要求时，宜加固岩盘或加

强支护参数。

**8.5.4** 隧道上跨暗河且岩盘厚度不能满足安全要求时，可设置梁板、桥等跨越构筑物，或在暗河内设置支墩、护拱、支撑隔墙等设施提高岩盘的稳定性。

**8.5.5** 暗河过水不畅影响隧道施工及运营安全时，宜增设辅助排水通道。

**8.5.6** 穿越暗河隧道应合理规划洞内外排水路线和排水防护设施。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 9 岩溶隧道施工

### 9.1 一般规定

9.1.1 岩溶隧道施工应遵循“探测在前、因地制宜、综合施策”的原则，根据超前地质预报和施工补充勘察、监控量测资料等，动态调整施工方案。

9.1.2 岩溶隧道施工前应开展详细的施工调查，岩溶地质复杂~极复杂地段应制定专项岩溶施工方案。

9.1.3 岩溶隧道施工前应制定超前地质预报和监控量测实施方案，并纳入施工工序严格管理。

9.1.4 岩溶隧道施工应开展风险管理，并结合现场实际实施全过程动态管控。

#### 条文说明

岩溶隧道施工安全风险高，尤其是大型~巨型溶洞、富水溶洞及暗河地段，因此，施工过程中需要建立风险管理意识进行“主防主控”。“主防”即主动进行风险判识并制定控制风险发生的措施，“主控”即在发现风险隐患后主动及时处理，特别是需要重视技术交底和过程核查，比如，对高度~极高风险段落超前探孔施作技术交底，明确开孔位置、上仰角等钻孔参数以及每米频次的记录要求；对高度~极高风险超前探孔、管棚等钻孔施作过程中，进行现场核查、抽查，确保钻孔实施及记录的准确性；建立监控量测数据采集、分析、预警信息化管理流程，实现预警信息快速传递，提前判识，及时预警。除此之外，实际施工过程中，还需加强参建各方风险意识，组织开展现场人员地质风险辨识能力培训，增强现场人员风险意识，提高掌子面风险判识水平，特别是要选用有岩溶隧道施工经验的管理及作业人员，遇到突发事件时能合理处置，降低突发事件损失。

9.1.5 对双洞隧道，地下水来水方向、设计高程相对较低一侧的隧道宜先行施工。

#### 条文说明

双洞隧道选择一侧隧道先行施工，其优点在于：

(1) 先行施工更靠近地下水来水方向一侧的隧道，可阻截部分岩溶地下水向后行洞涌出。

(2) 先行施工高程相对较低的隧道，可提前在后行洞室掌子面前方实现一定程度的降水。

因此，原则上选择地下水来水方向、设计高程相对较低一侧的隧道先行施工，可以减少后行洞施工过程中的涌水量，降低岩溶不良地质带来的危害，有利于提高后行洞的施工安全，通常是比较好的选择。

### 9.1.6 高度~极高风险的岩溶地段不宜安排在大雨~特大暴雨期间施工。

### 9.1.7 岩溶隧道施工宜维持既有岩溶过水通道的通畅。

#### 条文说明

岩溶隧道施工过程中遇到过水通道，无论开挖时是否富水，一般都要尽可能维持其原有的过水通道，这样做的好处是不会改变其原有排泄路径，不会降低其排泄能力，不会堵塞岩溶水路，利于维持既有的地下水环境平衡。但如果无法维持，必须处理时，比如隧道截断了部分或全部过水通道，可以先通过清理充填物、扩挖外侧围岩等措施疏通既有过水通道，使隧道施工对既有过水通道的影响降至最低；无法疏通时，也可以埋设导水管，将原有过水通道与中心水沟或泄水洞等设施连接起来，避免岩溶水壅积在截断处，造成安全隐患。

### 9.1.8 岩溶隧道施工应重视环境保护，降低工程建设对周边环境的影响。

## 9.2 施工准备

9.2.1 岩溶隧道施工前应进行实地调查，对照勘察设计文件逐段核查岩溶、岩溶水发育特点及周边环境条件等，编制施工调查报告。施工调查报告应包括下列内容：

- 1 隧址区地貌特征、岩溶发育情况，包括溶洞、洼地、落水洞、漏斗、竖井、塌陷坑等，以及岩溶泉、暗河进出口等的形状、大小、位置、高程等。
- 2 崩塌、滑坡、泥石流等不良地质分布情况。
- 3 隧址区地表水、地下水的水文地质情况。
- 4 隧址区降雨、降雪等气象资料。
- 5 隧道线路影响范围内的村庄、房屋、构筑物等情况。

9.2.2 岩溶隧道施工前应对施工场地及临时工程等进行系统规划，避开危岩崩落、滑坡、泥石流、涌水突泥、地表塌陷、洼地内涝等潜在地质灾害区域。

### 9.2.3 不具备自排水条件的岩溶隧道抽排水设施配备应符合下列规定：

- 1 宜按满足正常施工需求1.2倍以上的抽排能力配备水泵、管路及独立供配电系统。
- 2 备用水泵宜按“二用一备”配置。
- 3 抽排设施在施工过程中应根据实际涌水量进行动态调整。

#### 条文说明

不具备自排水条件的岩溶隧道，为应对可能出现的涌水突泥等突发情况，确保机械、管路等的正常工作，并留有充足的抽排水能力富余是非常有必要的，及时有效抽排出涌水对于降低施工风险意义重大，需要在施工准备阶段做好筹划。

**9.2.4** 高度~极高风险岩溶隧道施工应制定灾害预警体系，储备满足施工抢险要求的抢险器材、物资和设备，制定逃生及应急抢险预案，并组织演练。

#### 条文说明

高度~极高风险隧道一般需要建立应急物资库，配备应急沙袋、型钢、方木、救生衣、救生圈、水泵、发电机等应急物资，洞口附近储备碎石，用于应急反压回填等。

**9.2.5** 岩溶隧道应配置满足施工要求的超前地质预报、高效钻孔设备及其他施工机械，并积极推行大型机械化作业。

#### 条文说明

岩溶隧道施工配备的超前地质预报、钻孔设备的性能、数量要求满足现场抢险救灾的需要，并要求加强设备的维修与保养工作，使设备处于良好工作状态，以备不时之需。施工过程中强化工序协调和管理，推行机械化、信息化施工，减少掌子面作业人员数量，有效降低安全风险。

## 9.3 开挖与支护

**9.3.1** 开挖前应复核地质条件，选择适宜的超前地质预报方法并严格实施。

**9.3.2** 应根据超前预报和安全风险评估结果，制定针对性的开挖方案。

**9.3.3** 施工过程中应监测作业面水量、水压的变化情况；水量、水压不满足带水作业条件时，应及时采取措施降低水量、水压至满足条件后，方可进行下一循环施工。

## 条文说明

不满足开挖施工作业条件，通常包括以下两种情况：一是反坡排水的隧道，受抽排水能力限制，存在淹洞风险；二是掌子面钻孔出水水量较大、水压较高，难以进行爆破装药作业。无论哪种情况都要求先减小水量、降低水压至可以施工的条件下，方可进行下一循环的施工开挖作业。

**9.3.4** 临近溶洞时，后续各工序应紧密衔接，并符合下列规定：

- 1 拱部溶洞宜采用上台阶小断面控制爆破揭示溶洞。
- 2 存在涌水突泥风险的地段应保证每一开挖循环后，掌子面前方预留稳定岩盘厚度。
- 3 当存在充填物不稳定溶洞时，宜对溶洞充填物预加固。

**9.3.5** 溶洞揭穿后，应根据设计方案进行开挖支护，溶洞较大、较高的，可采用施工防护排架和落石防护网保护施工安全。

**9.3.6** 大型~巨型溶洞、高压富水溶洞、暗河应在施工补充勘察、专项设计方案的基础上制定专项开挖支护方案。

**9.3.7** 应加强大型~巨型溶洞、高压富水溶洞、暗河及岩溶水极发育地段的监控量测，及时分析、反馈监控量测数据，调整处治设计及施工方案。

**9.3.8** 围岩软弱、破碎地段应加强开挖支护施工管控，并符合下列规定：

- 1 成孔困难地段超前小导管、管棚施工宜采取跟管钻进措施。
- 2 注浆预加固地段开挖宜逐榀推进，钢架应贴近掌子面安设。
- 3 采用套拱支护时，套拱应与初期支护表面密贴，拱脚应支垫牢靠。

**9.3.9** 施工过程中监控量测出现险情，施工安全风险可接受时，可采取施作套拱、增设临时支撑、反压回填、施作挡水墙等应急加固措施。

**9.3.10** 涌水突泥风险高~极高的隧道应建立地表降雨与洞内出水观测设施及地表变形巡查机制，强降雨期间或发生涌水突泥时应加强观测、巡查。

## 9.4 防排水施工

**9.4.1** 岩溶水极发育或涌水突泥高度~极高风险地段应根据水文地质条件、隧道长度、线路纵坡、施工组织等因素，编制专项排水施工方案，宜采用顺坡排水施工。

**9.4.2 岩溶隧道防水施工应符合下列规定：**

- 1 围岩注浆堵水效果应满足设计要求。
- 2 防水板应铺设平整，保证接缝质量，防止出现破损。
- 3 止水带（条）应定位准确、铺设平整、黏结牢固。
- 4 二次衬砌混凝土的抗渗能力应满足设计要求。

**9.4.3 顺坡掘进应结合排水设计方案提前规划好施工临时排水路径，反坡掘进应合理布置排水泵站和排水管路，排水钢管宜紧跟作业面。**

**9.4.4 设置有泄水洞的隧道，应先行施工泄水洞。**

**9.4.5 开挖揭露的小型岩溶管道、岩溶裂隙等潜在过水通道，宜预埋导水管连接排水沟。**

**条文说明**

目前在岩溶隧道施工过程中，开挖揭露的小型岩溶管道、岩溶裂隙通常不被重视，如果开挖时是干岩溶，很多时候会被直接回填。实际上这些小型岩溶管道、岩溶裂隙也可能是潜在的过水通道，直接回填会阻塞其既有排泄路径，后期可能会对支护结构造成一定的安全隐患，基于安全的原则，建议预埋导水管连接排水沟与小型岩溶管道、岩溶裂隙。

**9.4.6 施工过程中应保持排水管布置平顺，纵、环、横向排水管之间及与中心水沟连接牢固、排泄顺畅。**

**9.4.7 施工过程中应定期组织对防排水系统进行巡检、维护。**

**条文说明**

岩溶隧道排水系统通常受到水质、涌砂、水中钙化物、地表杂物等因素影响，造成堵塞，施工期间需加强检修维护，保持通畅；人工清理泄水孔、泄水洞的施工作业条件困难，需预留管道疏通、侧沟清淤等机械作业条件。施工过程中巡检、维护频率，旱季建议每月至少1次，雨季建议每周至少1次，并建议每次大雨~特大暴雨前组织对防排水系统进行巡检、维护，避免或减少由排水系统不畅通导致的危害。

**9.4.8 交工前应对排水管、沟的通畅性进行检查验收，并符合下列规定：**

- 1 隐蔽的排水管、沟，在混凝土或防水层覆盖前应对其连通、完整、淤积等进行检查。
- 2 路面边水沟、电缆沟、手孔井、洞顶排水沟、洞外截水沟、洞口路基边沟应检查是否存在建筑垃圾、淤泥。

### 3 对可能存在化学结晶或泥沙淤堵的地段应检查防淤堵措施的可靠性。

#### 条文说明

保证岩溶隧道排水管、沟的通畅性是减少岩溶隧道运营过程渗漏水病害最重要的手段，但隧道内部的排水管、沟多为隐蔽工程，施工完成后检查难度非常大，因此，要求在施工过程中适时对排水管、沟进行检查验收。除按现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660) 检查排水管、沟及其检查井、检查孔的尺寸、位置、坡度、高程或高差等常规内容外，最重要的是检查排水管、沟水流是否通畅，相互连通是否可靠，是否存在破损、弯折，是否有垃圾、泥沙淤积等。

## 9.5 岩溶处治施工

### 9.5.1 岩溶处治施工流程应符合下列规定：

- 1 临近岩溶时，应在安全岩盘的保护下，探测岩溶及岩溶水发育状况，岩溶与隧道空间关系，岩溶稳定状况等，确定岩溶类型。
- 2 应根据探测结果，评估施工风险及处治设计方案可行性，编制施工方案。
- 3 应按设计施工方案进行处治，并在施工过程中实时、动态优化、调整。

### 9.5.2 贫水岩溶处治施工应符合下列规定：

- 1 溶洞揭开前，应对影响隧道安全的不稳定充填物进行预加固。
- 2 溶洞揭开后，应对洞顶、洞壁的地质结构进行识别，评价其稳定性，确定溶腔处治加固方案。
- 3 回填处治或结构地基为软弱充填物时，宜对地基承载力进行测试，不满足承载力要求的应加固。
- 4 应对不均匀、软弱地基及结构复杂地段的支护结构受力和变形等进行监测。

### 9.5.3 高压、富水岩溶处治施工应符合下列规定：

- 1 施工前应采取排水降压、注浆堵水等措施将岩溶水量及水压降低至带水安全作业施工条件。
- 2 揭示宜采用远程爆破方式开挖。
- 3 宜对降雨、水量、水压及支护结构受力、变形等进行监测。
- 4 施工期间的水文观测不宜少于一个水文年。

**9.5.4** 隧道穿越暗河时，应加强暗河水文监测，必要时，可结合设计方案，提前实施辅助排水通道；隧道下穿或旁侧通过暗河，应监测穿越暗河段围岩稳定及渗水情况，及时反馈信息，必要时，应采取措施加固岩盘。



**9.5.5** 应加强对隐伏岩溶的探测,评估其对施工、运营的影响,针对性采取注浆加固或加强支护措施。

**9.5.6** 大型~巨型充填型富水溶洞、高压富水溶洞等处理周期较长的溶洞或溶洞群,可结合地质条件和施工需求设置迂回导坑。

**9.5.7** 施工过程中发生岩溶地质灾害地段,应查明灾害性质、规模、原因、机理,专门研究确定处治方案;必要时,宜对支护结构安全及水文进行长期监测。

## 9.6 注浆

**9.6.1** 岩溶隧道注浆处治应根据地质条件、注浆目的、作业环境,确定注浆类型、方法、范围、材料、工艺及参数。

### 条文说明

注浆是岩溶处治中常用的措施,根据主要作用,一般可分为加固注浆、止水注浆和充填注浆等几种类型。加固注浆主要对加固的岩土体进行补强,提高其强度或承载能力,根据注浆方式或部位可分为地表注浆、超前注浆、基底注浆等几种,地表注浆是在地表对隧道浅埋段破碎或松散围岩进行注浆固结;超前注浆是在隧道内对掌子面前方稳定性较差的IV、V级破碎围岩或松散岩溶充填物的注浆固结;基底注浆是对隧道底软弱破碎围岩或溶洞充填物注浆,以提高地基承载力。止水注浆主要对岩土体进行固结防渗,减小孔隙率、降低渗透系数,根据注浆方式或部位可分为帷幕注浆、径向注浆、局部注浆,帷幕注浆适用于涌水突泥的断层破碎带、高压富水岩溶、暗河等高风险地段堵水及流塑状岩溶充填物的超前加固;径向注浆适用于稳定性较好的富水岩溶洞段,需要控制排水量或地下水排放对地表水影响较大洞段的注浆堵水;局部注浆适用于局部破碎围岩段、岩溶裂隙段等加固堵水。充填注浆主要用于充填支护或其他结构背后的孔隙,使之与围岩或其他结构密贴,改善其受力性能,堵塞防渗通道。

**9.6.2** 注浆方案应明确注浆范围、注浆材料、浆液影响半径、钻孔布置、注浆压力、注浆用量、施工方法和顺序、注浆效果评估等内容,并符合下列规定:

1 洞内帷幕注浆、周边注浆的注浆圈厚度应通过分析计算确定,宜为隧道开挖线以外3~8m,周边径向注浆的注浆圈厚度宜为开挖轮廓线外2~5m。

2 洞内帷幕注浆、周边注浆的注浆设计压力应比静水压力大0.5~1.5MPa;当静水压力较大时,宜为静水压力的2~3倍。

3 注浆材料宜采用普通硅酸盐水泥;需要控制注浆扩散范围的,可添加水玻璃等速凝材料;地下水为动水时,应选用凝胶时间短、抗分散性好、早期强度高的注浆材

料；充填注浆可根据充填空间的情况，采用普通水泥浆、砂浆等；止水要求高且普通水泥浆效果较差时，可选择超细水泥或化学浆液。

**9.6.3** 应根据地质超前预报、开挖揭露、施工补充勘察成果，结合注浆设计方案，编制专项施工方案。

**9.6.4** 注浆施工装备应根据注浆工艺要求，选择高效的钻孔和注浆设备。

**9.6.5** 注浆施工前应根据设计要求进行现场注浆工艺试验，验证注浆参数合理性；注浆效果不满足要求时，应及时调整注浆施工方案和工艺参数。

**9.6.6** 注浆施工工艺可采用全孔一次性注浆、分段前进式注浆、分段后退式注浆等，宜按“由外到内、由下到上、间隔跳孔、分序施工”的顺序进行。

**9.6.7** 地表注浆施工应符合下列规定：

- 1 应采用钻机跳孔施钻，自线路边线向线路中心的顺序进行；不应在全部钻孔完毕后再注浆。
- 2 成孔完成插入注浆管后，应及时封堵孔口及附近的地面裂缝。
- 3 注浆施工时，应记录并控制流量和压力，防止浆液漏失，并及时对资料进行整理分析。

**9.6.8** 洞内帷幕注浆施工应符合下列规定：

- 1 应按设计预留止浆岩盘，必要时，可施作加筋喷射混凝土或模筑混凝土止浆墙。
- 2 孔口管应安装牢固，孔口宜采用水囊式止浆塞封堵，高压富水岩溶地段应安设高压闸阀。
- 3 注浆钻孔施工宜采用大功率、快速钻机，钻孔过程中应做好孔号、进尺、起讫时间、岩溶发育情况、涌水位置、涌水量和水压等记录。
- 4 注浆前应进行压水试验，检查管路系统、孔口装置及止浆岩盘的密封性能。
- 5 注浆应根据钻孔涌水量、压水试验以及注浆试验，合理确定注浆压力、浆液配合比、注浆量等参数。
- 6 高压富水岩溶宜采用前进式注浆，可按表9.6.8选择分段注浆长度。

**表9.6.8 孔内注浆分段长度**

钻孔出水量 $Q(\text{m}^3/\text{h})$	孔内注浆分段长度
$Q < 10$	不超过 10m
$10 \leq Q < 30$	5m
$Q \geq 30$	停止钻进，立即进行注浆处理

**9.6.9** 超前注浆施工应预留止浆岩盘；必要时，应施作止浆墙，止浆墙宜嵌入地层不小于50cm，周边预埋注浆管。

**9.6.10** 施工过程中应做好钻孔情况、浆液材料及配比、凝胶时间、注浆时间、注浆压力、浆液流量、异常情况施工记录，并及时分析，反馈指导注浆施工。

**9.6.11** 注浆完成后应进行注浆效果检查，检查方法应与注浆目的相匹配，定量检查与定性评价相结合，并符合下列规定：

- 1 可采用检查孔法、取芯检查法或注浆压力-注浆量-时间曲线法等方法。
- 2 应根据钻孔、注浆记录分析薄弱部位，并进行针对性检查。
- 3 采用检查孔法时，检查孔个数不宜少于总注浆孔的3%~5%，检查孔应无坍孔，涌水量应小于 $0.2 \sim 2\text{L}/(\text{m}\cdot\text{min})$ 。
- 4 可根据工程实际采用不同方法相互校核，综合评价注浆质量。
- 5 检查孔应及时封堵。

**9.6.12** 注浆施作完成后，应对加固、堵水效果进行验证。验证满足要求后，方可进行后续开挖或支护工作；若不满足要求，应补充注浆，直至满足效果验证要求。

## 9.7 施工防灾

**9.7.1** 岩溶隧道应制定施工防灾预案，定期组织作业人员进行演练。

**9.7.2** 岩溶隧道应建立施工防灾报警及逃生系统，系统应包括声光监控报警系统、紧急逃生设施、应急照明设施、应急排水设施设备等。

**9.7.3** 高度~极高风险的岩溶隧道、区段，应在洞口及风险区段设置24h视频监控、报警器、应急通信设备等声光监控报警系统，并由专人进行监视和管理。

**9.7.4** 高度~极高风险的岩溶隧道、区段，应在掌子面附近设置满足逃生要求的紧急逃生设施，并符合下列规定：

- 1 紧急逃生可采用逃生管道、爬梯、逃生车辆、救生圈、救生衣、逃生绳等设施。
- 2 逃生管道应符合强度、刚度要求，逃生管道长度应满足逃生需要。
- 3 可充分利用辅助洞室和辅助坑道作为逃生设施，主洞及辅助坑道均应设置应急照明设施，逃生路径沿途应设置明显的指示标志并保持通畅。
- 4 紧急逃生设施附近应配备应急照明设施及救援药品、救护器械和生活保障品。

**9.7.5** 应急照明、应急排水设施设备应配备专用电源。

## 10 超前地质预报

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 岩溶隧道施工过程中应开展超前地质预报工作，探测掌子面前方及洞周溶洞分布位置、规模、充填情况及岩溶水发育情况等，评价其对隧道施工的影响，提出对策建议。

#### 条文说明

鉴于岩溶发育的随机性、隐蔽性，前期勘察设计阶段难以完全掌握，且勘察精度难以满足施工需要，还要求在隧道施工过程中逐段核实和掌握更为详细的情况，故通过开展超前地质预报工作，探测掌子面前方、周边一定范围的溶洞及岩溶水发育具体情况，预测施工中可能遇到的涌水突泥等问题。

**10.1.2** 超前地质预报应遵循“宏观指导微观，长距离指导中、短距离”的原则，采用以地质调查为基础，物探与钻探相结合，洞内与洞外相配合的综合超前预报方法，相互验证，综合分析。

#### 条文说明

岩溶诱发的地质灾害往往是地层岩性、地质构造、地下水与岩溶综合作用的结果。在复杂的岩溶地质条件下，单一的预报方法难以取得较好的预报效果。因此，岩溶隧道超前地质预报工作需要采用多种方法进行综合探测和分析，各种地质预报模式如图 10-1 所示。

**10.1.3** 应根据预报内容、预报距离、岩溶隧道地质复杂程度按表 10.1.3 选择适宜的超前地质预报方法。

**10.1.4** 超前地质预报应遵循动态预报原则，根据预报实施过程中掌握的岩溶地质情况，及时调整隧道区段的预报方法和技术要求。

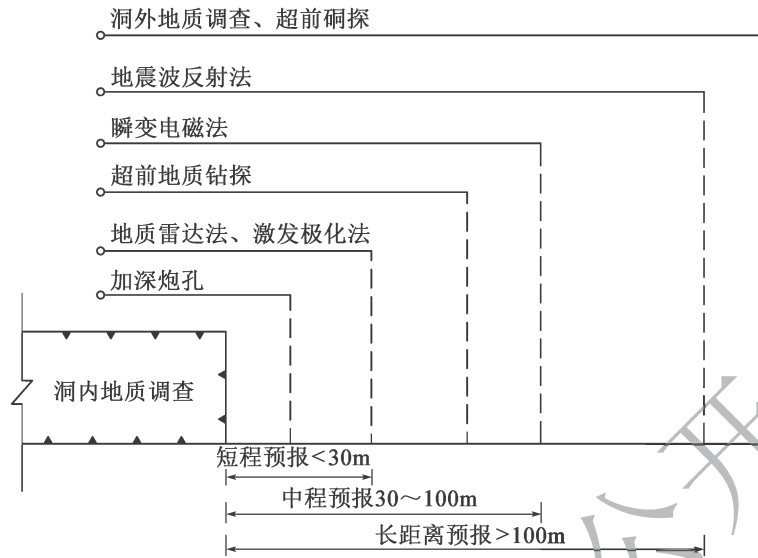


图 10-1 超前地质预报模式

表 10.1.3 岩溶隧道超前地质预报方法选用表

预报方法		主要预报内容	预报距离	岩溶地质复杂程度			
				极复杂	复杂	中等	简单
地质调查		岩溶及岩溶水	各预报距离	★	★	★	★
物探	地震波反射	大型~巨型溶洞、断层破碎带、可溶岩与非可溶岩接触带等	中、长距离	●	●	△	
	地质雷达	岩溶、断层破碎带、可溶岩与非可溶岩接触带、软弱夹层及含水层等	短距离	★	★	△	△
	瞬变电磁	溶洞含水层及其充填情况、含水构造	中、短距离	▲	△	△	
	激发极化	溶洞含水层及其充填情况、含水构造	短距离	▲	▲	△	
超前钻探	超前地质钻探	直接揭露构造、岩溶及其充填、富水情况等	中距离	★	●		
	加深炮孔		短距离	★	★	●	
			短距离	★	★	●	●
超前洞探			同导坑长度	△			

注：“★”为必选方法；“●”为宜选方法；“▲”为富水时宜选方法；“△”为可选方法。

条文说明

在编制隧道超前地质预报方案时，所依据的地质资料以详细勘察阶段地质勘察报告为主，但勘察时物探和钻探方法均不能完全查明隧道岩溶情况，且有遗漏可能。隧道开挖揭露新的岩溶后，需要根据调整后的地质复杂程度分级，重新调整隧道超前地质预报

的预报方法和技术要求。

**10.1.5** 岩溶地质极复杂地段或物探预报发现重大异常地段，应采用超前地质钻探进一步验证。存在大型~巨型溶洞、高压富水溶洞、暗河等高风险岩溶时，应提出施工补充勘察建议。

## 10.2 地质调查

**10.2.1** 岩溶隧道施工期应进行洞内、洞外地质调查。

**10.2.2** 洞内地质调查应对每个开挖循环的洞壁和掌子面进行地质素描，包括下列内容：

- 1 描述岩性、层间结合程度、风化程度、夹泥情况等。
- 2 描述褶皱、断层、节理裂隙特征、岩层产状等，判断岩体完整程度。
- 3 描述岩溶形态、位置、规模、充填物成分和状态，岩溶空间展布及与隧道关系等。
- 4 描述地下水的出水状态、分布、水量、水压、水温、颜色、泥沙含量等，暗河流向及其与隧道位置关系，暗河丰枯期水流量，出水点与地层岩性、地质构造、岩溶、暗河、地表径流、降雨等的关系。
- 5 观测、描述溶洞水体或暗河的发育征兆。

### 条文说明

隧道开挖揭露溶洞后，要求调绘溶洞形态、位置、规模、充填情况、所属地层和构造部位、与隧道准确位置关系，地下水的分布、出水状态、水量、水压、水温、颜色、泥沙含量等，为处治设计和施工方案提供更为准确的资料。

溶洞水体或暗河的发育征兆主要有：裂隙、溶隙间出现较多的铁染锈或夹黏土；岩层明显湿化、软化，或出现淋水现象；小溶洞出现的频率增加，且多有水流、河沙或水流痕迹；有水流声。

**10.2.3** 洞外地质调查宜包括下列内容：

- 1 收集、分析已有勘察设计成果资料，并对其进行核实。地质情况与勘察设计成果资料不相符时，及时进行修正，必要时，提出施工补充勘察建议。
- 2 调查地表充填型落水洞、漏斗、洼地的变形、塌陷及地表建（构）筑物的变形、损坏情况。
- 3 调查地表河流、井泉及暗河等的流量改变或断流情况，岩溶湖的水位变化。

10.2.4 地质调查结果与勘察设计成果不相符时,应及时进行修正。必要时,应提出施工补充勘察建议。

### 10.3 物探

#### 10.3.1 地震波反射法应符合下列规定:

- 1 每循环预报距离宜为100m。隧道位于曲线时,宜缩短预报距离。
- 2 连续预报时,前后预报搭接距离不应小于20m。
- 3 有效弹性波记录道数不应小于记录道数的75%;当有效记录道数小于75%或连续出现无效记录道数时,应重新采集数据。
- 4 应沿隧道洞室侧壁纵向布置1个观测排列,并根据方法特点及现场条件合理布置激发点、接收点。

#### 条文说明

地震波反射法常用观测排列示意如图10-2、图10-3所示。

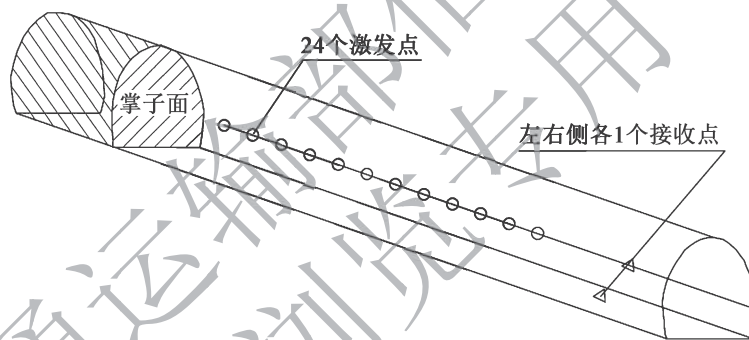


图10-2 隧道地震勘探(TSP)地震波反射法常用观测排列示意图

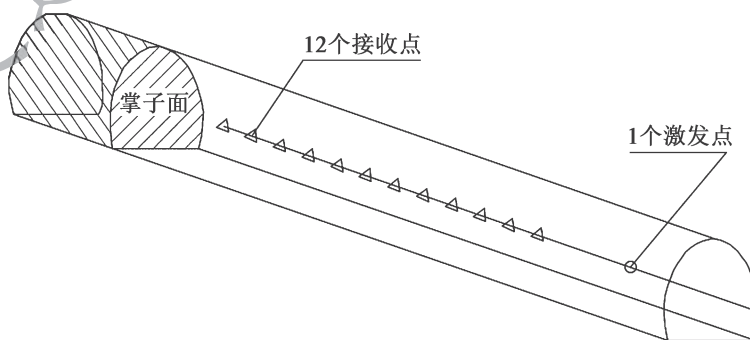


图10-3 负视速度地震波反射法常用观测排列示意图

#### 10.3.2 地质雷达法应符合下列规定:

- 1 每循环预报距离应根据雷达波形判定,不宜超过30m。
- 2 连续预报时,前后预报搭接距离不应小于5m。

3 测线应至少布置两条，宜采用“两横两竖”“两横三竖”布置。上下台阶开挖时，各台阶应至少有一条测线。

4 重点异常区应重复观测，重复性较差时，宜进行多次观测并查明原因。

#### 条文说明

公路隧道的单洞断面一般以两车道、三车道为主，也有单车道和四车道的。地质雷达法测线布置与单洞断面有关，需要根据现场情况合理布置。单车道、两车道断面常常采用“两横两竖”形式，三车道、四车道断面常常采用“两横三竖”形式，必要时还可加密测线。具体实施过程中要求根据掌子面的凹凸情况进行调整，尽量使天线和掌子面耦合良好。常用的地质雷达法测线布置示意图如图10-4所示。

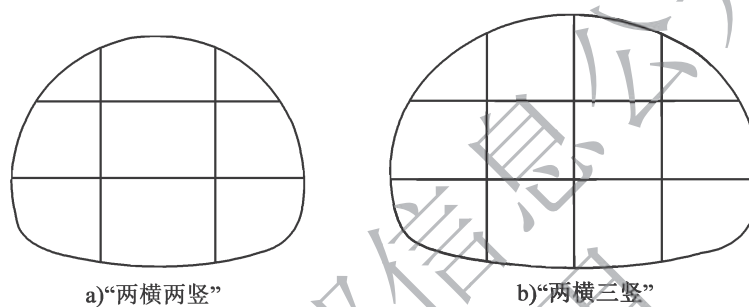


图10-4 常用的地质雷达法测线布置示意图

#### 10.3.3 瞬变电磁法应符合下列规定：

- 1 每循环预报距离不宜超过100m。
- 2 连续预报时，前后预报搭接距离不应小于10m。
- 3 当数据存在单个测点观测曲线与重复观测或检查观测曲线形态和幅值不一致时，应重新采集。
- 4 应沿掌子面横向布置1条以上测线，宜以上倾40°、上倾20°、水平0°、下倾20°、下倾40°多角度沿测线分别进行探测以获得多角度剖面。

#### 条文说明

瞬变电磁法测线布置及多角度探测示意图如图10-5所示。

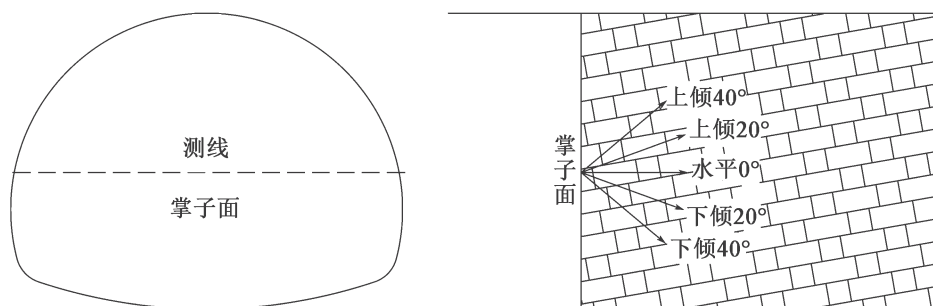


图10-5 瞬变电磁法测线布置及多角度探测示意图



**10.3.4 激发极化法应符合下列规定：**

- 1 每循环预报距离不宜超过30m。
- 2 连续预报时，前后预报搭接距离不应小于5m。
- 3 当采集数据畸点数量大于全部数据10%，或畸点连续出现时，应重新采集。
- 4 应根据选用的观测方式确定测线或测点布置。定点源三极测深类宜在隧底、两侧边墙各布置1条测线；聚焦类探测宜在掌子面呈网状布置测量点。

**10.4 超前钻探****10.4.1 超前地质钻探可用于中、短距离预报，并应符合下列规定：**

- 1 不取芯可采用冲击钻或回转钻，取芯宜采用回转取芯钻。
- 2 掌子面中心应按水平方向钻孔，掌子面边缘应往洞外呈放射状钻孔，外倾角度不应小于 $6^\circ$ ，终孔位置距离开挖轮廓线外不应小于5m。
- 3 钻孔数量应根据隧道所处岩溶地质复杂程度确定，且不应低于表10.4.1的要求，揭示溶洞边界时应增加孔数。

**表 10.4.1 超前地质钻探钻孔布置数量**

预报距离	岩溶地质复杂程度分级			
	极复杂	复杂	中等	简单
中距离	3~5	1~3	—	—
短距离	5~7	3~5	1~3	—

注：当地质较复杂或断面较大时，宜取高值。

- 4 需连续预报时，前后预报搭接长度不应小于5m。
- 5 高压富水地段进行超前地质钻探时必须采取防突措施，应布置1孔测压，并设置关水阀门。

**条文说明**

超前地质钻探的主要特点是比较直观地探明钻孔所经过部位的岩性、岩层完整程度、岩溶及地下水发育情况，具有直观性、客观性的特点。主要适用于不超过100m的中、短距离超前预报，成本相对较高，实施时掌子面需要停止施工，对施工也有一定的影响。但近年来，随着钻机技术的巨大进步，特别是国内隧道建设和施工单位C8钻机的逐渐普及，钻探深度超过100m的长距离超前地质钻探已经比较容易实现，甚至在新疆乌尉高速公路天山胜利隧道中成功应用了长度2km的超长距离水平定向钻探。这些长距离、超长距离钻探有效提高了超前预报效果，在条件允许的情况下可以在岩溶隧道中推广使用。

**10.4.2 加深炮孔可用于10m以内的短距离预报，并应符合下列规定：**

- 1 应结合炮孔设计，直径与其他炮孔相同。
- 2 深度不应小于5m。
- 3 前后搭接长度不应小于2m。
- 4 孔数、孔位应根据开挖断面大小及岩溶地质复杂程度确定，不应少于5个孔，位于掌子面两侧、拱顶、中心等部位。

#### 条文说明

加深炮孔超前钻探目的是在掌子面开挖前方有一定稳定岩盘之前发现前方溶洞位置、充填情况及岩溶水情况，防止施工时出现重大的涌水突泥事故发生。加深炮孔探测在炮孔开孔前实施，布置在隧道断面上、中、下、左、右位置。

**10.4.3** 超前地质钻探过程中应及时鉴定岩芯、岩粉，判定岩性，对于溶洞充填物、代表性岩土等应拍摄照片备查，并选择代表性岩芯整理保存。

**10.4.4** 超前钻探过程中应做好记录，主要包括冲洗液颜色和流量变化、涌水、涌砂、空洞、振动、卡钻、顶钻、突进、凉风冒出等现象。

**10.4.5** 条件适宜时，可采用孔内摄像或其他物探方法探测溶洞、暗河等情况。

**10.4.6** 严禁在爆破残眼中实施超前地质钻探、加深炮孔。

### 10.5 超前导洞

**10.5.1** 岩溶地质条件极复杂，可能产生重大岩溶地质灾害时，可采用正洞超前导洞法、平行超前导洞法等超前导洞法。

#### 条文说明

超前导洞法费用较高，一般只有当岩溶地质条件极复杂，且可能产生重大岩溶地质灾害的公路长、特长岩溶隧道才采用该预报方法，而且一般和排水洞、设备洞或服务洞室等综合使用，降低预报费用。

**10.5.2** 正洞超前导洞法应符合下列规定：

- 1 应利用先行施工的部分断面作为导洞。
- 2 超前距离应根据施工组织确定。

## 条文说明

正洞超前导洞法是在隧道正洞中某个部位开挖一个断面较小的导洞以探明地质情况的方法。例如台阶法施工时，利用上半断面进行超前预报；侧壁导坑法施工时，利用先挖的一侧导坑进行超前预报；连拱隧道利用中导洞进行超前预报。正洞超前导洞法较平行导洞法更直接、准确，而且正洞导洞还兼作隧道施工导洞，成本通常较平行超前导洞法低，但实施预报时导洞掌子面需要停止施工，因此，对施工有一定的影响。

### 10.5.3 平行超前导洞法应符合下列规定：

- 1 平行超前导洞应根据隧道布置、探测目标、导洞其他功能综合确定平面位置；导洞底面高程宜低于隧道开挖底面高程0.5~1.0m。
- 2 净空断面应根据排水、施工组织、防灾救援、工程造价等因素综合确定。
- 3 超前距离可根据围岩地质条件、施工组织等因素综合确定，并应做好排水、防灾工作，防止导洞施工引发地质灾害。

## 条文说明

平行超前导洞法是在隧道正洞一侧一定距离开挖一个平行的小断面导洞，以导洞开挖中遇到的地层、构造、岩溶及地下水等情况作地质记录与分析，预报正洞地质条件的方法。当平行导洞与正洞隧道间距较小，隧址区地层受构造运动影响较小时，预报准确性较高。平行超前导洞由于要单独开挖导洞，成本通常比较高，因此，一般会结合泄水洞、救援通道等实施，以降低成本。

### 10.5.4 双洞隧道宜利用先行隧道开展后行隧道的超前地质预报工作。

### 10.5.5 导洞内应以地质调查法为基础，辅以必要的钻探、物探。

### 10.5.6 预报成果应与后开挖主洞超前预报成果相互验证，指导主洞施工。

## 10.6 隐伏溶洞探测

10.6.1 岩溶强发育地段应开展隧底隐伏岩溶探测，岩溶极强发育地段应开展洞周隐伏溶洞探测。

10.6.2 应采用地质调查法、物探法与钻探相结合，综合分析施工揭露情况，查明隧底及洞周岩溶的位置、规模、充填及延伸情况。

10.6.3 物探可选用地质雷达法、地震反射波法或瞬变电磁法等，必要时，可采用孔间

物探方法详细查明溶洞形态。对已揭露延伸较大的空溶洞，可采用三维激光扫描探测。

**10.6.4** 两车道隧道宜在边墙或拱腰、拱顶、仰拱底部两侧各布置1条纵向物探测线，三车道隧道及岩溶极复杂地段可根据实际情况在拱部及底部适当增设物探测线。

#### 条文说明

隧底及洞周隐伏岩溶探测测线布置示意图如图10-6所示。

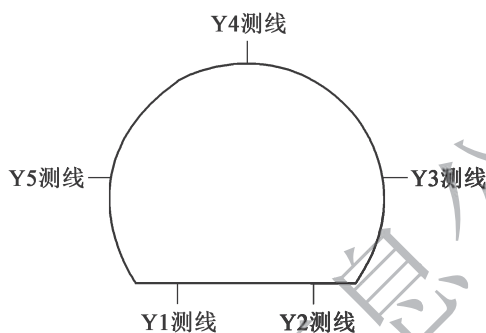


图10-6 隧底及洞周隐伏岩溶探测测线布置示意图

**10.6.5** 物探异常地段应布置钎探、钻探进行验证，探测深度宜根据物探异常情况确定，钎探不宜小于5m。洞周可利用锚杆钻孔加深进行岩溶探测，孔深不宜小于5m。

## 11 监控量测

### 11.1 一般规定

11.1.1 岩溶隧道应根据监控量测设计方案编制实施方案，并根据超前地质预报、开挖揭露情况动态调整。

11.1.2 岩溶地质极复杂、溶洞对隧道影响强烈地段应进行支护结构安全监测，岩溶水极发育地段应进行水文监测，并宜长期监测。

11.1.3 岩溶隧道施工期间应进行视频监控。

11.1.4 已发生涌水突泥等地质灾害严重地段应进行结构安全、水文长期监测。

11.1.5 需长期监测时，施工监测系统应为长期监测预留条件。

11.1.6 宜积极采用非接触、智能化、高精度、高频次监测技术。

11.1.7 施工中应避免开挖爆破、车辆运输等施工作业造成监测点及监测设施损坏、失效。

### 11.2 支护结构安全监测

11.2.1 应根据岩溶及岩溶水发育状况制定安全监测方案，明确结构安全监测的目的、方法、数据处理方法及反馈机制。

11.2.2 充填物不稳定地段的周边位移、拱顶下沉、拱脚下沉等必测项目的监测断面间距宜适当加密。

11.2.3 穿越大型~巨型溶洞、高压富水溶洞、暗河等岩溶地质复杂地段及已发生塌方、涌水突泥等地质灾害地段，宜选择钢架内力及外力、围岩压力、两层支护间压

力、支护及衬砌内应力等1~2项进行监测，监测主要工具、精度可按表11.2.3执行，并应符合下列规定：

1 对钢架内力及外力、围岩压力、两层支护间压力、支护及衬砌内应力等监测项目，每处应设置不少于3个监测断面，包括溶洞与隧道相交的两端、中间部位各1个。

2 每一断面布设不应少于3个监测点，与中型~巨型溶洞、高压富水溶洞、暗河地段相邻的岩盘部位监测点宜适当加密。

表 11.2.3 支护结构安全监测项目

序号	项目名称	主要工具	精度 (MPa)
1	钢架内力及外力	支柱压力计	0.1
2	围岩压力	压力盒	0.001
3	两层支护间压力	压力盒	0.001
4	支护及衬砌内应力	应变计	0.01

11.2.4 发生地表塌陷地段宜进行地表下沉监测，每处应布设不少于5个监测点，量测精度应不低于0.5mm。

11.2.5 结构安全监测的量测时间间隔，平水期可按现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660)的规定执行，丰水期应加密至1~2次/d。

11.2.6 支护结构安全控制基准、管理等级应按设计要求及现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660)的规定执行。

### 11.3 水文监测

11.3.1 岩溶水极发育隧道应进行降雨量观测，并符合下列规定：

- 1 应采用自动雨量计。
- 2 观测点可布设在洞口、洞身岩溶洼地、谷地等部位。
- 3 宜从勘察阶段开始，持续观测时间不应少于1个水文年。

11.3.2 岩溶水极发育地段应进行洞内水文监测，监测项目、方法及工具、测点布置、精度等可按表11.3.2选用。

表 11.3.2 公路岩溶隧道水文监测项目

序号	项目名称	方法及工具	测点布置	精度
1	岩溶水压 (泥浆压力)	渗压计 (泥浆压力传感器)	每代表性地段1~2个断面，每断面3~5个测点	0.01MPa

续表 11.3.2

序号	项目名称	方法及工具	测点布置	精度
2	岩溶水位	水位计或监控量测设备 直接量测	每处3~5个测点,取平均值	10mm
3	岩溶水流量	流量计或三角堰法量测	每代表性地段1~2个断面	±1%

### 11.3.3 洞内水文监测应符合下列规定:

- 1 平水期监测频率不宜小于1次/月;丰水期应根据降雨情况及时调整监测时机及监测频率,监测频率不宜小于1次/7d;存在较大涌水突泥风险时,应进一步加大监测频率至1次/d。
- 2 宜从施工开挖揭露溶洞时开始,持续监测时间不应少于1个水文年。
- 3 洞内水文监测点可布设在集中出水点、暗河、岩溶管道口等位置。
- 4 宜采取自动化监测手段,实时、动态监测水压、水位、水量变化。

## 11.4 环境监测

11.4.1 在环境敏感地区,施工前应编制环境监测方案,建立评价、反馈机制。

11.4.2 隧道施工对附近村庄、电力通信设施、公路、铁路、水利设施等存在潜在安全影响时,宜对地表沉降、建(构)筑物变形进行监测。

11.4.3 施工期间宜对下列地段的地表水、地下水进行定期监测、检测:

- 1 对隧道施工或附近居民生产、生活有重大影响的河流、湖泊、水库、池塘、暗河、井、泉等部位的水位、水量、水质。
- 2 隧道穿越矿藏地段的水质。
- 3 其他环境敏感地段洞内岩溶水的水位、水量、水质。

## 附录 A 岩溶隧道涌水量预测方法

### A.1 洼地入渗法

A.1.1 隧道位于垂直渗流地段，隧顶有直接相连的消水洼地或落水洞时，宜采用洼地入渗法，式 (A.1.1) 预测隧道通过含水地段的最大涌水量：

$$Q_{\max} = 1000 \cdot \alpha \cdot X \cdot A \cdot \eta \quad (\text{A.1.1})$$

式中： $Q_{\max}$ ——隧道通过含水地段的最大涌水量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )；

$\alpha$ ——降雨入渗系数，应根据现场实测确定；缺乏实测资料时，可根据表层岩土类型按表 A.1.1-1 选用；

$X$ ——区域日最大降雨量 ( $\text{mm}$ )，计算采用设计暴雨频率标准宜按表 A.1.1-2 取值；

$A$ ——隧道通过含水地段的集水面积 ( $\text{km}^2$ )；

$\eta$ ——地下水涌入系数，根据岩溶发育程度在 0~1 之间取值，岩溶弱发育取低值，岩溶极强发育取高值。

表 A.1.1-1 降雨入渗系数  $\alpha$  经验值

表层岩土类型	降雨入渗系数 $\alpha$	表层岩土类型	降雨入渗系数 $\alpha$
黏性土	0.001 ~ 0.05	破碎的岩石	0.18 ~ 0.20
砂性土	0.05 ~ 0.24	极破碎的岩石	0.20 ~ 0.25
砂砾土	0.24 ~ 0.30	弱发育的灰岩	0.01 ~ 0.15
完整的坚硬岩	0.01 ~ 0.10	中等发育的灰岩	0.15 ~ 0.20
较完整的较坚硬岩	0.10 ~ 0.15	强发育的灰岩	0.20 ~ 0.30
较破碎的岩石	0.15 ~ 0.18	极强发育的灰岩	0.30 ~ 0.50

表 A.1.1-2 设计暴雨频率标准

隧道类别	公路等级			
	高速公路、一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
特长隧道	1/100	1/100	1/50	1/50
长隧道	1/100	1/50	1/50	1/25
中、短隧道	1/100	1/50	1/25	1/25



## 条文说明

降雨入渗系数 $\alpha$ 可通过一个或多个水文年的地下河或岩溶泉流域内排泄总量与降雨总量资料求得,因此,要尽量收集已有观测资料;缺乏以上资料或监测条件时,也可通过若干场雨的监测数据求得。表A.1.1-1的降雨入渗系数根据《铁路工程地质手册》(铁道部第一勘测设计院主编,第2版,1999年)的经验值制定。

地下水涌入系数 $\eta$ 为涌入岩溶隧道的地下水量与地下水径流总量的比值:《铁路工程不良地质勘察规程》(TB 10027—2022)第9.5.8条的条文说明采用滞后系数表示,其值为观测水位或流量洪峰较降雨滞后时间的倒数;《铁路工程水文地质勘察规程》(TB 10049—2014)第E.1.2条的条文说明采用涌入系数表示;根据宜万铁路多个隧道的科研成果,取值0.2~0.6。本规范考虑到南方岩溶发育程度要远大于北方,故建议取值0~1.0,适应性更广,具体取值视岩溶发育程度确定。

集水面积 $A$ 的确定也是国内外尚未解决的技术难题之一。岩溶隧道大多数无统一的地下水位,各向异性,且存在地下暗河、岩溶管道、导水断层等,使集水面积计算更加复杂。本条在《铁路工程水文地质勘察规范》(TB 10049—2014)第E.4.2条对隧道涌水影响宽度预测的基础上,提供了一种集水面积测算方法,供涌水量预测时参考:

- (1) 利用1:1 000~1:5 000比例地形图描出地表水系及分水岭;
- (2) 隧道集水面积的纵向边界一般是隧道进出口位置;
- (3) 隧道集水面积的横向边界需综合考虑分水岭位置、岩溶地下水的运动条件、构造及地下暗河分布情况等因素确定;
- (4) 根据地下水位埋藏深度和隧道埋深,按不利工况用库萨金公式或库萨金变形公式粗略地估算影响半径(可能影响半径);
- (5) 当隔水体与隧道中心线的距离小于可能影响半径时,该侧的集水面积边界以隔水体为界。反之,大于可能影响半径时,应采用其他方法确定;
- (6) 水文地质复杂的隧道要根据不同水文地质单元分块段圈定集水面积;
- (7) 当隧道通过汇水盆地(封闭洼地、富水构造)时,该汇水盆地可作为该段隧道的集水面积块段;
- (8) 导水断层、向斜、地下暗河、可溶性岩与非可溶性岩接触带等通常作为带状集水块段处理。

## A.2 简易水均衡法

**A.2.1** 隧道位于水平径流带及深部缓流带时,宜采用简易水均衡法。

**A.2.2** 当越岭隧道通过一个或多个地表水流域时,可采用地下径流模数法,式(A.2.2-1)、式(A.2.2-2)预测隧道通过含水体地段的正常涌水量:

$$Q_{\text{nor}} = M \cdot A \quad (\text{A.2.2-1})$$

$$M = \frac{Q'}{A'} \quad (\text{A. 2. 2-2})$$

式中： $Q_{\text{nor}}$ ——隧道通过含水地段正常涌水量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )；

$M$ ——地下径流模数 [ $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{km}^2)$ ]；

$Q'$ ——地下水补给的河流的流量或下降泉流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )，可采用枯水期流量计算；

$A'$ ——与 $Q'$ 对应的地表水或下降泉流量相当的地表流域面积 ( $\text{km}^2$ )。

**A. 2. 3** 当隧道通过潜水含水层且埋藏深度较浅时，可采用降水入渗法，式 (A. 2. 3) 预测隧道正常涌水量：

$$Q_{\text{nor}} = 2.74\alpha \cdot W \cdot A \quad (\text{A. 2. 3})$$

式中： $W$ ——年降雨量 ( $\text{mm}$ )。

### A. 3 地下水动力学法

**A. 3. 1** 隧道位于深部缓流带或裂隙状岩溶含水层，具有统一的地下水位地段，可采用地下水动力学法。

**A. 3. 2** 可采用古德曼经验公式 (A. 3. 2) 预测隧道通过含水地段的最大涌水量：

$$Q_{\text{max}} = \frac{2\pi \cdot K \cdot h_2 \cdot L}{\ln(4h_2/d)} \quad (\text{A. 3. 2})$$

式中： $K$ ——隧道通过含水体的渗透系数 ( $\text{m}/\text{d}$ )；

$h_2$ ——静止水位至隧道洞身横断面等价圆中心的距离 ( $\text{m}$ )；

$d$ ——隧道洞身横断面等价圆直径 ( $\text{m}/\text{d}$ )；

$L$ ——隧道通过含水体的长度 ( $\text{m}$ )。

**A. 3. 3** 可采用佐藤邦明非稳定流公式 (A. 3. 3) 预测隧道通过含水地段单位长度的最大涌水量：

$$q_{\text{max}} = \frac{2\pi \cdot m \cdot K \cdot h_2}{\ln \left[ \tan \frac{\pi(2h_2 - r_0)}{4h_c} \cdot \cot \frac{\pi \cdot r_0}{4h_c} \right]} \quad (\text{A. 3. 3})$$

式中： $q_{\text{max}}$ ——隧道通过含水地段单位长度的最大涌水量 [ $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ]；

$m$ ——换算系数，一般取0.86；

$r_0$ ——隧道横断面的等价圆半径 ( $\text{m}$ )；

$h_c$ ——隧道通过地段含水体的厚度 ( $\text{m}$ )。

**A. 3. 4** 可采用裘布依理论公式 (A. 3. 4) 预测隧道通过含水地段正常涌水量：

$$Q_{\text{nor}} = L \cdot K \cdot \frac{H^2 - h^2}{R_y - r_0} \quad (\text{A. 3. 4})$$

式中： $H$ ——隧道洞底以上潜水含水层厚度（m）；  
 $h$ ——隧道洞内排水沟假设水深（m），一般考虑水跃值；  
 $R_y$ ——隧道涌水地段的引用补给半径（m）。

**A. 3. 5** 可采用佐藤邦明经验公式（A. 3. 5）预测隧道通过含水层地段单位长度的正常涌水量：

$$q_{\text{nor}} = q_{\text{max}} - 0.548 \bar{\varepsilon} \cdot K \cdot r_0 \quad (\text{A. 3. 5})$$

式中： $q_{\text{max}}$ ——隧道通过含水层地段单位长度的最大涌水量 [ $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ]；  
 $\bar{\varepsilon}$ ——试验系数，一般取 12.8。

#### A. 4 水文地质比拟法

**A. 4. 1** 当新建岩溶隧道附近有水文地质条件相当的既有隧道或坑道时，可采用水文地质比拟法，式（A. 4. 1-1）~式（A. 4. 1-3）预测隧道通过含水层地段的正常涌水量或最大涌水量：

$$Q = Q' \cdot \frac{F \cdot s}{F' \cdot s'} \quad (\text{A. 4. 1-1})$$

$$F = B \cdot L \quad (\text{A. 4. 1-2})$$

$$F' = B' \cdot L' \quad (\text{A. 4. 1-3})$$

式中： $Q$ 、 $Q'$ ——新建、既有隧道通过含水层地段的涌水量（正常涌水量或最大涌水量，既有隧道为实测值）（ $\text{m}^3/\text{d}$ ）；

$F$ 、 $F'$ ——新建、既有隧道（坑道）通过含水层地段的涌水面积（ $\text{m}^2$ ）；

$s$ 、 $s'$ ——新建、既有隧道（坑道）通过含水层中自静止水位计起的水位降深（m）；

$B$ 、 $B'$ ——新建、既有隧道（坑道）洞身横断面的周长（m）；

$L$ 、 $L'$ ——新建、既有隧道（坑道）通过含水层地段的长度（m）。

## 附录 B 溶洞土压力计算方法

**B.0.1** 溶洞充填物对隧道支护结构产生的土压力应根据溶洞所处位置、大小、充填物厚度及性质，按深埋、浅埋及超浅埋分别确定。

**B.0.2** 溶洞充填物产生的竖向土压力计算应符合下列规定：

1 当溶洞充填物较厚，隧道处于深埋状态时，可按式 (B.0.2-1)、式 (B.0.2-2) 计算：

$$q = \gamma_r h_q \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$h_q = 0.45 \times 2^{S-1} \times [1 + i \cdot (B_r - 5)] \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中： $q$ ——溶洞土压力作用范围内的拱顶均布垂直土压力 (kPa)；

$h_q$ ——隧道拱部溶洞充填物的等效荷载高度 (m)；

$\gamma_r$ ——溶洞充填物的重度 (kN/m<sup>3</sup>)；

$S$ ——溶洞充填物的围岩级别，按 1、2、3、4、5、6 整数取值；

$B_r$ ——溶洞的宽度 (m)，如图 B.0.2 所示，当小于 5m 时取 5m，大于隧道开挖跨度时取隧道开挖跨度 (m)；

$i$ ——溶洞宽度每增加 1m 时的围岩压力增减率。

2 当溶洞充填物较薄，隧道处于浅埋状态时，可按式 (B.0.2-3) 计算：

$$q = \gamma_r h_r \left( 1 - \frac{h_r}{B_r} \lambda \tan \theta \right) \quad (\text{B.0.2-3})$$

式中： $h_r$ ——隧道拱部溶洞充填物拱顶的厚度 (m)，如图 B.0.2 所示；

$\lambda$ ——隧道拱部溶洞充填物侧压力系数，应按本规范第 B.0.4 条计算；

$\theta$ ——溶洞充填物竖向滑面的摩擦角 (°)，无实测时，可按表 B.0.2 采用。

表 B.0.2 溶洞充填物直滑面的摩擦角  $\theta$  值

溶洞充填物围岩级别	IV	V	VI
$\theta$ 值	$(0.7 \sim 0.9) \varphi_c$	$(0.5 \sim 0.7) \varphi_c$	$(0.5 \sim 0.3) \varphi_c$

注： $\varphi_c$  为溶洞充填物计算内摩擦角 (°)。

3 当溶洞充填物较薄，隧道处于浅埋状态，且填土表面倾角较大时，可考虑溶洞充填物偏压效应。

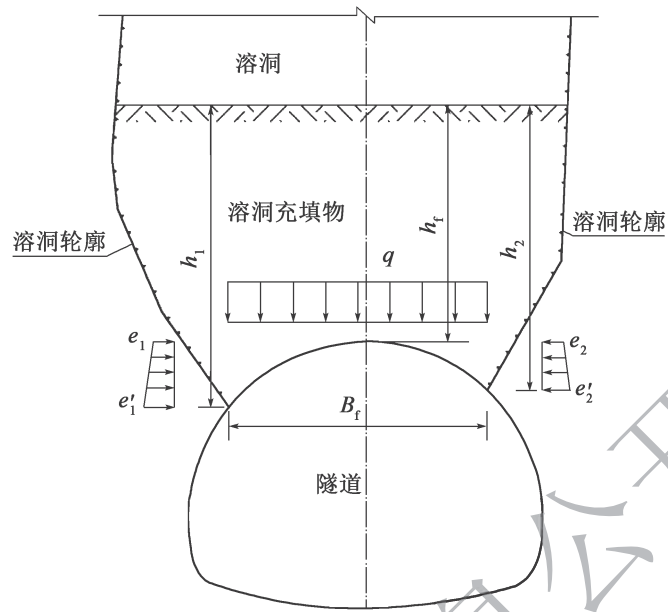


图 B.0.2 溶洞充填物土压力计算图式

## 条文说明

3 这种情况建议参照《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018) 附录 E 浅埋偏压隧道围岩压力计算方法进行计算。

**B.0.3** 溶洞充填物产生的侧向土压力计算应符合下列规定：

1 左侧拱部侧向土压力可按式 (B.0.3-1) 计算：

$$e_1 = \gamma_f h_f \lambda_1 \quad (\text{B.0.3-1})$$

2 左侧底部侧向土压力可按式 (B.0.3-2) 计算：

$$e'_1 = \frac{1}{2} \gamma_f (h_f + h_1) \lambda_1 \quad (\text{B.0.3-2})$$

3 右侧拱部侧向土压力可按式 (B.0.3-3) 计算：

$$e_2 = \gamma_f h_f \lambda_2 \quad (\text{B.0.3-3})$$

4 右侧底部侧向土压力可按式 (B.0.3-4) 计算：

$$e'_2 = \frac{1}{2} \gamma_f (h_f + h_2) \lambda_2 \quad (\text{B.0.3-4})$$

式中：\$e\_1\$、\$e'\_1\$——溶洞充填物产生的左侧拱部、底部的侧向土压力 (kPa)，如图 B.0.2 所示；

\$e\_2\$、\$e'\_2\$——溶洞充填物产生的右侧拱部、底部的侧向土压力 (kPa)，如图 B.0.2 所示；

$h_1$ 、 $h_2$ ——溶洞充填物左侧底部、右侧底部的深度 (m)，如图 B. 0. 2 所示；  
 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ——溶洞充填物左侧侧压力系数、右侧侧压力系数，按本规范第 B. 0. 4 条计算。

**B. 0. 4** 溶洞充填物侧压力系数应考虑左右侧空间关系及充填物性质的差异，计算应符合下列规定：

1 当溶洞充填物属于无限土体且处于深埋状态时，侧压力系数可按式 (B. 0. 4-1) 计算：

$$\lambda = \tan^2\left(45 - \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (\text{B. 0. 4-1})$$

2 当充填物属于无限土体且处于浅埋状态时，侧压力系数计算应符合下列规定：

1) 溶洞充填物表面上倾时，可按式 (B. 0. 4-2) 计算：

$$\lambda = \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \varphi_c}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \varphi_c}} \quad (\text{B. 0. 4-2})$$

2) 溶洞充填物表面向下倾斜时，可按式 (B. 0. 4-3)、式 (B. 0. 4-4) 计算：

$$\lambda = \frac{\tan \theta}{\tan(\theta + \varphi)(1 + \tan \alpha \cdot \tan \theta)} \quad (\text{B. 0. 4-3})$$

$$\tan \theta = \frac{-\tan \varphi + \sqrt{(1 + \tan^2 \varphi_c)(1 + \tan \alpha / \tan \varphi_c)}}{1 + (1 + \tan^2 \varphi_c) \tan \alpha / \tan \varphi_c} \quad (\text{B. 0. 4-4})$$

式中： $\alpha$ ——溶洞充填物表面与水平面的夹角 (°)；

$\varphi_c$ ——溶洞充填物的计算内摩擦角 (°)；

$\theta$ ——溶洞充填物沿竖向滑面的摩擦角 (°)。

3 当充填物属于有限土体且处于浅埋状态时，侧压力系数计算应符合下列规定：

1) 溶洞充填物表面上倾时，可按式 (B. 0. 4-5) 计算：

$$\lambda = \frac{mn}{m - n} \cdot \frac{1 - \mu n}{(\mu + n) \cos \delta + (1 - \mu n) \sin \delta} \quad (\text{B. 0. 4-5})$$

2) 溶洞充填物表面向下倾斜时，可按式 (B. 0. 4-6) 计算：

$$\lambda = \frac{mn}{m + n} \cdot \frac{1 - \mu n}{(\mu + n) \cos \delta + (1 - \mu n) \sin \delta} \quad (\text{B. 0. 4-6})$$

式中： $\delta$ ——侧向土压力与水平线的夹角 (°)；

$m$ ——溶洞充填物表面的坡率， $m = \tan \alpha$ ；

$n$ ——溶腔壁与隧道、溶洞充填物表面交叉点连线的坡率；

$\mu$ ——溶腔壁与溶洞充填物之间的摩擦系数。

## 附录C 落石冲击荷载计算方法

C.0.1 落石冲击力可按式(C.0.1-1)~式(C.0.1-3)进行估算:

$$F_r = \frac{m_r \cdot v_0}{1000t} \quad (\text{C.0.1-1})$$

$$v_0 = \sqrt{2g \cdot H_r} \quad (\text{C.0.1-2})$$

$$t = \frac{1}{100} \left( 0.097m_r \cdot g + 2.21T_b + \frac{0.045}{H_r} + 1.2 \right) \quad (\text{C.0.1-3})$$

式中:  $F_r$ ——落石冲击力(kN),即作用于结构顶部的落石冲击荷载的合力;

$m_r$ ——落石质量(kg);

$v_0$ ——落石冲击速度(m/s);

$t$ ——落石冲击持续时间(s);

$g$ ——重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ );

$H_r$ ——落石的自由落高(m);

$T_b$ ——缓冲层的厚度(m)。

### 条文说明

落石冲击荷载是溶腔内衬砌结构设计的主要荷载之一。落石冲击溶腔内衬砌结构及其缓冲层的过程实际上是一种脉冲式的碰撞行为,碰撞过程中既有弹性、塑性变形,也伴随着黏性、硬化和摩擦能量耗散,结构体系的动力特性也会影响冲击荷载结果,因此,基于经典弹性碰撞Hertz理论、弹塑性碰撞Thornton理论等难以用于落石冲击荷载计算。

目前关于落石冲击荷载的计算方法较多,如《铁路工程设计技术手册·隧道(修订版)》推荐的计算方法,杨其新、关宝树计算方法,日本道路公团计算方法,瑞士计算方法等。

本附录落石冲击荷载计算方法是在《铁路工程设计技术手册·隧道(修订版)》推荐计算方法的基础上,利用杨其新、关宝树计算方法中计算冲击持续时间来考虑缓冲层厚度等因素,修正后的计算方法。

此外,落石冲击动能和冲击荷载还可以采用数值计算方法计算。

**C.0.2** 作用于结构顶部的落石冲击荷载强度可按式 (C.0.2) 计算:

$$p_r = \frac{F_r}{\pi \left( \frac{D_r}{2} + T_b \cdot \tan \beta \right)^2} \quad (\text{C.0.2})$$

式中:  $p_r$ ——落石冲击荷载强度 (kPa):

$D_r$ ——落石的等效直径 (m), 即按体积相等原则等效为球体的直径;

$\beta$ ——缓冲层冲击荷载扩散角 ( $^\circ$ ), 应采用数值分析、试验测试确定, 无实测资料时, 可取  $45 - \varphi_b/2$ ;

$\varphi_b$ ——缓冲层内摩擦角 ( $^\circ$ ).

交通运输部信息公开  
浏览专用



## 附录D 隧道周边隐伏溶洞安全岩盘厚度估算方法

**D.0.1** 隧道顶部隐伏溶洞安全岩盘(图D.0.1)厚度可按式(D.0.1-1)、式(D.0.1-2)分别进行抗弯强度、抗剪强度验算,取较大值:

$$T_s \geq k_s \cdot \frac{\gamma_m l^2 + \sqrt{\gamma_m^2 l^4 + 2[\sigma_t]ql^2}}{[\sigma_t]} \quad (\text{D.0.1-1})$$

$$T_s \geq k_s \cdot \frac{\gamma_m l + \sqrt{\gamma_m^2 l^2 + 2[\tau]ql}}{[\tau]} \quad (\text{D.0.1-2})$$

式中:  $T_s$ ——隧道周边隐伏溶洞安全岩盘厚度(m);

$\gamma_m$ ——隐伏溶洞岩盘岩体的重度( $\text{kN/m}^3$ );

$l$ ——岩盘的计算跨度(m),对隧道顶部隐伏溶洞,取隧道开挖跨度与溶洞跨度中较小值;

$[\sigma_t]$ ——岩盘岩体的允许抗拉强度(kPa),应根据实测结果确定;缺乏资料时,对灰岩,一般可取其饱和单轴抗压强度的1/8,且一般不超过1.5MPa;

$[\tau]$ ——岩盘岩体的允许抗剪强度(kPa),应根据实测结果确定;缺乏资料时,对灰岩,一般可取其饱和单轴抗压强度的1/12;

$q$ ——溶洞充填物压力( $\text{kN/m}$ ),水土分算时,为水压力和溶洞充填物土压力之和;

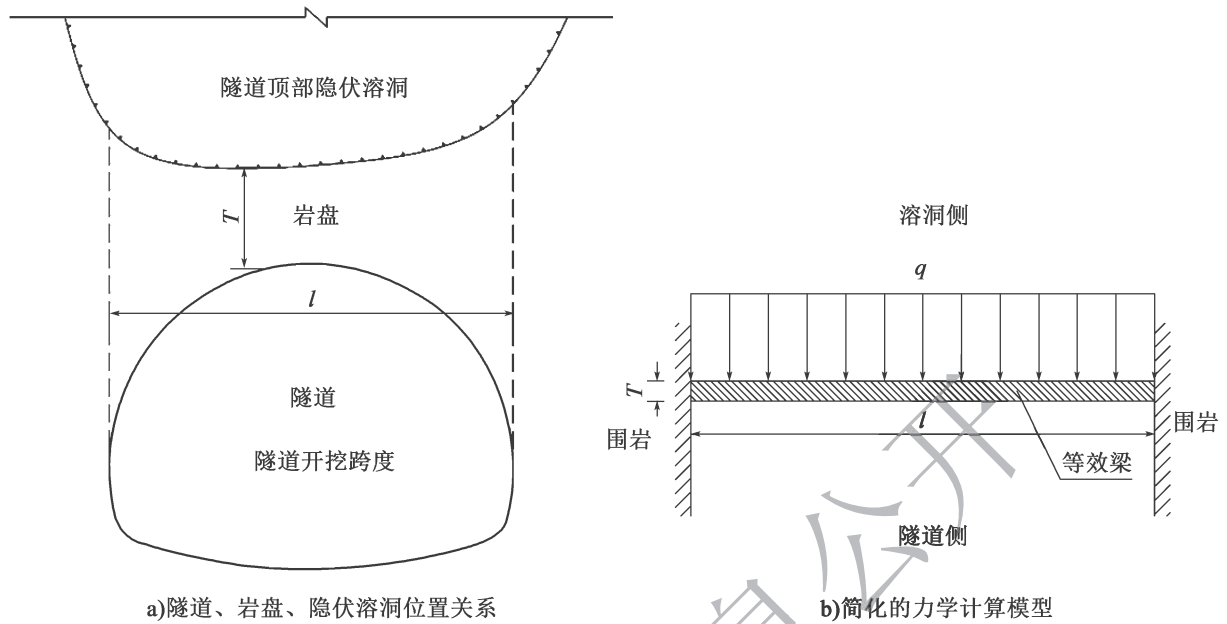
$k_s$ ——安全系数,建议取1.3~1.5。

**D.0.2** 隧道底部隐伏溶洞安全岩盘(图D.0.2)厚度可按式(D.0.2-1)、式(D.0.2-2)分别进行抗弯强度、抗剪强度验算,取较大值:

$$T_s \geq k_s \cdot \frac{-\gamma_m l^2 + \sqrt{\gamma_m^2 l^4 + 8[\sigma_t]ql^2}}{4[\sigma_t]} \quad (\text{D.0.2-1})$$

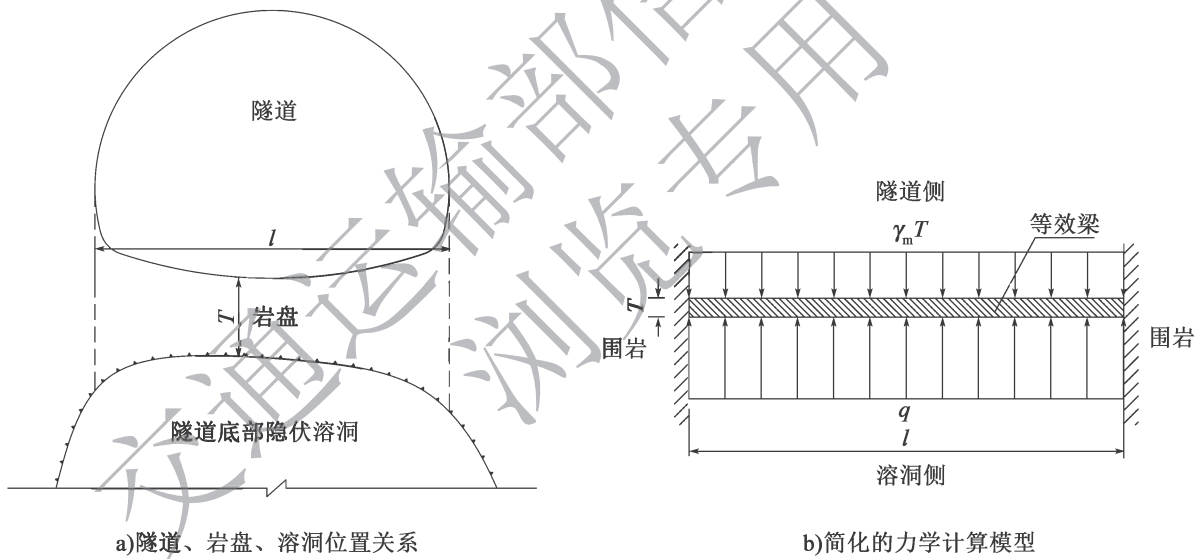
$$T_s \geq k_s \cdot \frac{-\gamma_m l + \sqrt{\gamma_m^2 l^2 + 2[\tau]ql}}{[\tau]} \quad (\text{D.0.2-2})$$

式中:  $l$ ——岩盘的计算跨度(m),对隧道底部隐伏溶洞,取隧道开挖跨度与溶洞跨度中较小值。



图D.0.1 隧道顶部隐伏溶洞岩盘简化模型

$T$ -隧道与溶洞间岩盘厚度 (m)



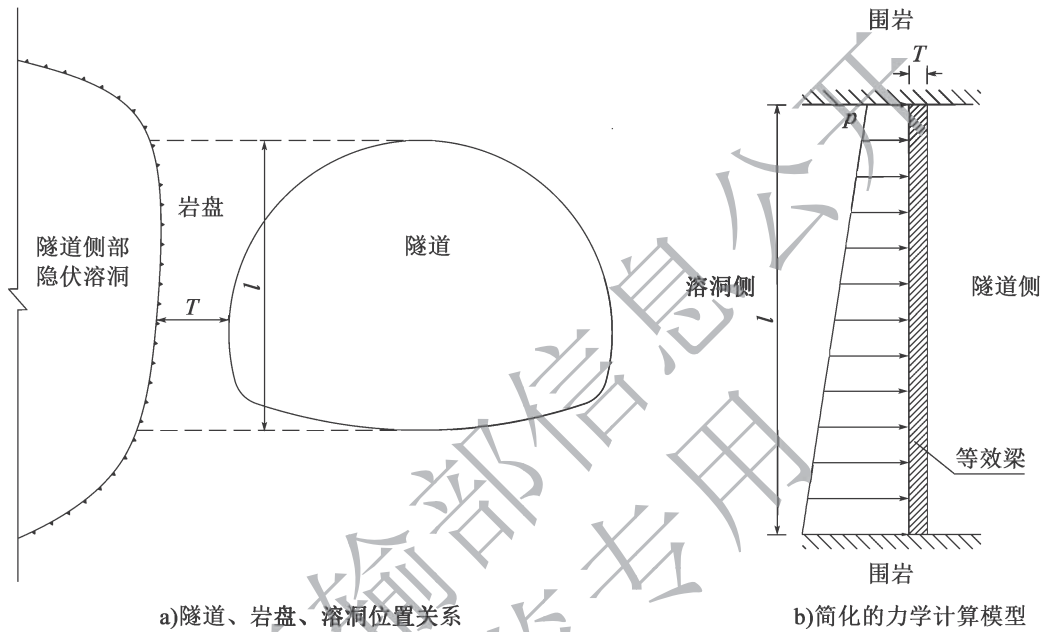
图D.0.2 隧道底部隐伏溶洞岩盘简化模型

**D.0.3** 隧道侧部隐伏溶洞安全岩盘 (图D.0.3) 厚度可按式 (D.0.3-1)、式 (D.0.3-2) 分别进行抗弯强度、抗剪强度验算, 取较大值:

$$T_s \geq k_s \cdot \sqrt{\frac{(k_{af}\gamma_f h + p)l^2 + 6(k_{af}\gamma_f + \gamma_w)l^3}{20[\sigma_t]}} \quad (D.0.3-1)$$

$$T_s \geq k_s \cdot \sqrt{\frac{10(k_{af}\gamma_f h + p)l + 7(k_{af}\gamma_f + \gamma_w)l^2}{5[\tau]}} \quad (D.0.3-2)$$

式中： $k_{af}$ ——溶洞内充填物主动土压力系数；  
 $\gamma_f$ ——溶洞内充填物重度 ( $\text{kN/m}^3$ )；  
 $h$ ——溶洞充填物表面至岩盘顶部的距离 (m)；  
 $\gamma_w$ ——溶洞内水重度 ( $\text{kN/m}^3$ )，取  $10.0\text{kN/m}^3$ ；  
 $p$ ——溶洞内岩盘顶部的静水压力 (kPa)；  
 $l$ ——岩盘的计算跨度 (m)，对隧道侧部隐伏溶洞，取隧道开挖高度与溶洞高度中较小值。



图D.0.3 隧道与侧部隐伏溶洞间岩层简化模型

**D.0.4** 隐伏溶洞位于隧道拱肩、拱脚等部位，可分别按顶部、底部或侧部隐伏溶洞估算安全岩盘厚度，或采用数值方法确定。

## 本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”“应符合本规范第×.×节的有关规定”“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。