



T/CECS G: DX-X-20XX

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

岩溶区公路工程地质勘察规程

Code for Highway Engineering Geological Investigation
in Karst Area
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

岩溶区公路工程地质勘察规程

Code for Highway Engineering Geological Investigation
in Karst Area

T/CECS G: DX-X-20XX

主编单位：贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

施行日期：20XX年XX月XX日

***出版社
2019 贵阳

征求意见稿

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2018 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2018]015 号）的要求，由贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司承担《岩溶区公路工程地质勘察技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

本规程分为 9 章以及 5 篇附录，主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、勘察方法、岩溶区水文地质勘察、可行性研究阶段勘察、初步勘察、详细勘察、工程地质评价、附录 A 岩溶的分类及地貌类型、附录 B 钻孔注水试验形状系数 A 的取值确定、附录 C 岩溶处理主要工程措施、附录 D 地基稳定性评价方法、附录 E 石芽地基或基岩的稳定计算、附录 F 隧道涌水量预测、附录 G 岩溶隧道涌突水危险性评价指标。

本规程是由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或何文勇（地址：贵州省贵阳市观山湖区阳关大道 100 号；邮编 550081；电话：13985441260；电子邮箱：490376638@qq.com），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

参 编 单 位：交通运输部公路科学研究所

中交第一公路勘察设计研究院有限公司

广东省交通规划设计研究院股份有限公司

云南省交通规划设计研究院有限公司

广西交通设计集团有限公司

主 编：何文勇

主要参编人员：

主 审：聂承凯

参与审查人员：

参 加 人 员：

征求意见稿

目次

1	总则.....	1
2	术语和符号.....	2
2.1	术语.....	2
2.2	符号.....	3
3	基本规定.....	5
3.1	一般规定.....	5
3.2	岩溶发育程度分级.....	5
4	勘察基本技术要求.....	9
4.1	一般规定.....	9
4.1	工程地质遥感.....	9
4.2	地质调绘.....	14
4.3	地球物理勘探.....	17
4.4	钻探.....	20
4.5	挖探与轻型勘探.....	22
4.6	观测与测试.....	23
5	岩溶区水文地质勘察.....	27
5.1	一般规定.....	27
5.2	水文地质调绘.....	27
5.3	水文地质测试.....	29
5.4	水文地质参数.....	38
5.5	气象、水文和地下水动态观测.....	46
5.6	资料编制.....	47
6	可行性研究阶段勘察.....	49
6.1	预可勘察.....	49
6.2	工可勘察.....	50

7	初步勘察.....	52
7.1	一般规定.....	52
7.2	路线.....	53
7.3	路基.....	54
7.4	涵洞.....	55
7.5	桥梁.....	56
7.6	隧道.....	58
7.7	资料编制.....	59
8	详细勘察.....	62
8.1	一般规定.....	62
8.2	路线.....	63
8.3	路基.....	63
8.4	涵洞.....	64
8.5	桥梁.....	64
8.6	隧道.....	66
8.7	资料编制.....	67
9	工程地质评价.....	68
9.1	一般规定.....	68
9.2	工程地质选线.....	69
9.3	岩溶场地稳定性评价.....	70
9.3	岩溶路基地基稳定性评价.....	70
9.4	岩溶桥梁地基稳定性评价.....	76
9.5	隧道围岩分级.....	79
9.6	隧道涌水量评价.....	84
9.7	环境影响评价.....	87
附录 A	岩溶的分类及地貌类型.....	89
附录 B	钻孔注水试验形状系数 A 的取值确定.....	91
附录 C	岩溶处理主要工程措施.....	92
附录 D	地基稳定性评价方法.....	94

附录 E 石芽地基或基岩的稳定计算	101
附录 F 隧道涌水量预测	102
附录 G 岩溶隧道涌突水危险性评价指标.....	106
本规程用词说明.....	108

征求意见稿

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范岩溶区公路工程地质勘察，提高勘察质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于岩溶地区各等级新建公路的工程地质勘察。岩溶区改扩建公路的工程地质勘察工作可参照执行。

1.0.3 岩溶区公路工程地质勘察应根据各勘察阶段要求，结合岩溶发育程度、工程结构设置以及不同勘察手段的特性等，采用综合勘察方法开展工作，合理确定勘察工作量。

1.0.4 岩溶区公路工程地质勘察应贯彻国家有关技术经济政策，积极采用成熟可靠的新技术、新设备、新方法。

1.0.5 岩溶区公路工程地质勘察除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 岩溶 Karst

可溶性岩石受溶蚀、侵蚀后形成的各种地质现象或地貌形态的总称，又称喀斯特。

2.1.2 岩溶率 rate of karstification

在一定范围内岩溶空间的规模和密度的定量指标。

2.1.3 线岩溶率 rate of line karstification

单位长度上岩溶空间形态长度之百分比。

2.1.4 面岩溶率 rate of surface karstification

单位面积上岩溶空间形态面积之百分比。

2.1.5 钻孔遇洞率 rate of hole drilling

揭露到岩溶洞隙的钻孔占勘探钻孔总数之百分比。

2.1.6 岩溶塌陷 karst collapse

在岩溶地区，由于下部岩体中的洞穴扩大而导致顶板岩体的塌落；或上覆土层中的土洞顶板因自然或人为因素失去平衡产生下沉或塌落的通称。

2.1.7 岩溶地基 Karst foundation

岩体中存在溶洞、溶蚀裂隙，或岩体表面存在石芽、溶沟、溶槽、溶蚀漏斗，或覆盖层中存在可溶岩类残坡积土、次生沉积土或冲积土、伴生土洞等不良地质现象的地基。

2.1.8 石芽地基 clint subgrade

由溶沟（槽）间突起的石芽与红黏土在水平方向上交替分布组成的地基。

2.1.9 溶洞地基 cave subgrade

岩体中存在溶洞的岩石地基。

2.1.10 溶蚀（裂隙、漏斗）地基 dissolution（fractures, funnel） subgrade

基础持力层为溶蚀（裂隙、漏斗）岩石的地基。

2.2 符号

2.2.1 岩土の力学指标

- c ——岩土の粘聚力；
 φ ——岩土の内摩擦角；
 ν ——岩土の泊松比；
 γ ——岩土の重度；
 k ——岩土の弹性抗力系数；
 E ——岩土の变形模量；
 R_c ——岩石单轴饱和抗压强度；
 R_t ——岩石单轴抗拉强度。

2.2.2 水文地质参数

- K ——渗透系数；
 Q ——出水量；
 s ——水位下降值；
 I ——地下水水力坡度；
 M ——承压水含水层厚度；
 H ——自然状况下潜水含水层厚度；
 \bar{h} ——潜水含水层在抽水试验时的厚度的平均值；
 h ——潜水含水层在抽水试验时的厚度；

L ——过滤器长度；

r ——过滤器半径；

R ——影响半径。

征求意见稿

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 岩溶区公路工程地质勘察应与设计阶段相适应。施工阶段应根据岩溶发育程度、水文地质复杂程度及工程特点开展施工勘察工作。

3.1.2 岩溶工程地质勘察应遵循工程地质调绘分析由面到点、勘探工作由疏到密的原则，宜采用工程地质遥感、地质调绘、钻探、物探、测试等多种手段相结合的综合勘察方法。

3.1.3 当岩溶形态及水文地质条件复杂，对公路工程方案及结构安全有严重影响时，应进行岩溶工程水文地质专项勘察。

3.2 岩溶发育程度分级

3.2.1 岩溶地区勘察应根据场地岩溶发育程度、工程地质条件复杂程度、结构物基础形式及设计要求等选择勘探方法、布置勘探工作量。

增加工可预可岩溶发育程度划分

3.2.2 岩溶的发育程度可按表 3.2.2 划分，岩溶的分类及地貌类型见附录 A。

表 3.2.2 岩溶发育程度分级

岩溶发育程度分级	场地岩溶现象	地表点岩溶率个/km ²	地表面岩溶率%	钻孔遇洞率%	钻孔线岩溶率%
极强发育	地表常见密集的岩溶洼地、漏斗、落水洞、槽谷、石林等多种岩溶形态，溶蚀基岩面起伏剧烈；地下岩溶形态常见巨型溶洞、暗河及大型溶洞群分布；近期发生过岩溶地面塌陷。	>30	>30	>60	>20
强发育	地表常见密集的岩溶洼地、漏斗、落水洞等多种岩溶形态，石芽(石林)、溶沟(槽)强烈发育(或覆盖)，溶蚀基岩面起	10~30	10~30	30~60	10~20

岩溶发育程度分级	场地岩溶现象	地表点岩溶率个/km ²	地表面岩溶率%	钻孔遇洞率%	钻孔线岩溶率%
	伏大；地下岩溶形态常见大型溶洞、暗河分布；有岩溶地面塌陷历史，但近期无岩溶地面塌陷发生。				
中等发育	地表常见岩溶洼地、漏斗、落水洞等多种岩溶形态，石芽(石林)、溶沟(槽)发育（或覆盖），溶蚀基岩面起伏较大；地下岩溶形态以中型溶洞为主，出露岩溶泉。	5~10	5~10	10~30	3~10
弱发育	地表偶见漏斗、落水洞、石芽、溶沟等岩溶形态，溶蚀基岩面起伏较小；地下岩溶以溶隙为主，偶见小型溶洞，裂隙透水性差。	<5	<5	<10	<3

- 注：1. 分级应根据各指标综合确定，工可勘察分级指标以场地岩溶现象为主，初步勘察阶段分级指标以场地岩溶现象、地表点岩溶率为主，详细勘察阶段评价指标以钻孔遇洞率及线岩溶率为主；当采用各指标的评价结果出现矛盾时按不利原则确定岩溶发育程度等级。
2. 当场区岩溶发育程度存在显著差异时应根据岩溶发育程度进行工程地质分区。
3. 表中洞径规模判定标准为：洞径水平大于 12m、竖向大于 24m 为巨型，洞径水平 6m~12m、竖向 12m~24m 为大型，洞径水平 3m~6m、竖向 6m~12m 为中型，洞径水平小于 3m、竖向小于 6m 为小型。
4. 地表点岩溶率指每平方公里场地范围内岩溶洼地、漏斗、落水洞、竖井、地表溶洞（洞径大于 2m）、暗河、岩溶泉露头等各种地表岩溶形态的个数，对于岩溶洼地及漏斗内的落水洞、竖井等不重复统计。
5. 地表面岩溶率指单位面积上岩溶洼地、漏斗、落水洞、竖井、地表溶洞（洞径大于 2m）、暗河、岩溶泉露头等各种地表岩溶形态面积的百分比，对于岩溶洼地及漏斗内的落水洞、竖井等不重复统计。
6. 钻孔遇洞率指钻探中遇岩溶洞隙（高度大于 0.5m）的钻孔与可溶岩钻孔总数的百分比。
7. 钻孔线岩溶率指场地内各钻孔揭示的岩溶洞隙（高度大于 0.1m）的总高度与钻孔穿过可溶岩总进尺的百分比。

条文说明：

岩溶发育程度是一个综合性的评价指标，它受岩溶发育的多项因素影响，是地表、地下岩溶的综合反映。本条将场地岩溶发育程度划分为极强发育、强发育、中等发育、弱发育四个等级，结合地表及地下岩溶形态、溶蚀基岩面起伏程度、岩溶水文地质等场地岩溶现象的定性指标，综合考虑地表点岩溶率、地表面岩溶率、钻孔遇洞率、钻孔线岩溶率四项定量指标，提出了岩溶发育程度的判定标准。岩溶发育程度分级旨在区别对待不同岩溶发育程度场地上的工程地质勘察设计工作，并评价场地岩溶。

一般来讲，岩溶按岩溶形态和分布特征可分为：以垂直向下发育为特征的地

表岩溶(如岩溶洼地、漏斗、落水洞、石芽、石林、溶沟、溶槽等)和以水平方向发育为主的地下岩溶(如水平溶洞、暗河等)。而地表岩溶中,当岩溶形态被上覆土层覆盖,隐伏于覆盖层之下发育的称为隐伏岩溶,当岩溶形态裸露于地表发育的则称为裸露岩溶。

地表岩溶与地下岩溶有着密不可分的关系和必然的联系。一般而言,地表岩溶发育的场地,其地下岩溶往往也较发育。当然,岩溶发育阶段性、成层性、方向性的不同,可能会表现出一定的差异性。

地表点岩溶率、地表面岩溶率主要反映地表岩溶的发育程度。一般而言,地表点岩溶率反映了地表岩溶洞(隙)的密度,地表面岩溶率反映了地表岩溶洞(隙)的规模。如果地表点岩溶率高、地表面岩溶率低,说明场地岩溶规模较小;反之,说明场地岩溶规模较大。如果地表点岩溶率低、地表面岩溶率低,说明场地岩溶规模较小,且岩溶发育程度低。如果地表点岩溶率高、地表面岩溶率高,说明场地岩溶规模较大,且岩溶发育程度高。

钻孔遇洞率、钻孔线溶率则主要反映了地下岩溶的发育程度。一般而言,钻孔遇洞率反映了岩溶洞(隙)出现的频率,钻孔线溶率则反映了岩溶洞(隙)出现的比例。如果钻孔遇洞率高、钻孔线溶率低,说明场地岩溶规模较小;反之,说明场地岩溶规模较大。如果钻孔遇洞率低、钻孔线溶率低,说明场地岩溶规模较小,且岩溶发育程度低。如果钻孔遇洞率高、钻孔线溶率高,说明场地岩溶规模较大,且岩溶发育程度高。

在判定场地岩溶发育程度时,还应该考虑溶蚀沟(槽)和石芽(林)之间(尤其是隐伏岩溶)的基岩面起伏情况,因此本规程对溶蚀基岩面的起伏程度亦作了量化。

为了尽可能使分级便于操作,对各等级分别列出了一些判别条件,这些条件遵循由宏观到微观、由面到点、由表及里的认识过程。勘察工作刚开展时,根据场地的地质测绘成果,对场地的岩溶发育等级进行初步判定,并据此布置勘察工作,随着工作的逐步深入,岩溶发育程度分级根据实际条件及时进行修正。

公路工程属线性工程,在评价范围、指标选取上根据勘察阶段及工程类型有所区别。隧道工程评价范围在满足各阶段工程地质调查范围的前提下,还需根据隧址区岩溶水文地质单元综合确定,分级指标以场地岩溶现象、地表点岩溶率为主。路基工程及桥梁工程初勘阶段评价范围在满足工程地质调查范围的前提下,

还需满足线位比选要求，评价指标以场地岩溶现象、地表点岩溶率为主；详勘阶段评价范围为地基主要受力层影响范围的平面区域，评价指标以钻孔遇洞率、线岩溶率为主。

征求意见稿

4 勘察基本技术要求

4.1 一般规定

4.1 工程地质遥感

4.1.1 公路工程地质遥感勘察的基本工程程序如下：

- 1 按任务要求搜集已有的遥感资料及有关其他资料；
- 2 图像处理；
- 3 建立解译标志；
- 4 初步解译；
- 5 外业调查验证；
- 6 综合解译与成图；
- 7 补充性重点调查验证；
- 8 地质遥感资料的分析整理与工程地质遥感勘察报告的编制。

条文说明：

本条规定了工程地质遥感工作的流程。工程地质遥感工作应循序渐进、由浅入深，应按照准备工作、建立解译标志、初步解译、外业调查验证与复了解译、最终解译与资料编制的流程进行，条文内容与现行《公路工程地质遥感勘察规范》（JTG C20-01）的规定一致。

岩溶区遥感解译标志一般都比较明显，见表 4.1.1。

表 4.1.1 岩溶地区遥感解译标志

地质对象	影像解译标志
岩溶地貌	(1) 岩溶地区地形起伏不平，地表水系不发育，未见明显的分水岭 (2) 岩溶地区特有的地貌，如溶沟、石芽、溶蚀洼地、波立谷、盲谷、峰丛、落水洞、竖井、漏斗、暗河等，在航片上极易辨认 (3) 岩溶地区的漏斗非常发育，往往成群出现，在影像上呈圆形、椭圆形或不规则的岩溶洼地，上大下小，底部呈深灰至浅黑色调，但常被第四系沉积物充填而呈灰白色调
溶蚀漏斗	碳酸盐岩地区的圆形或椭圆形岩溶洼地，常成群出现，在遥感图像上呈斑点状纹理，色调与周围地物具有明显差别

溶蚀洼地	比溶蚀漏斗规模更大的封闭岩溶洼地，形态更不规则，在遥感图像上呈斑状纹理
石芽与溶沟	石芽高度多只有几米，形态上多似犬牙状、锥状或尖棱状。石芽构成溶沟间的石脊，溶沟在石芽间交错分布
岩溶槽谷	图形呈绿色，中间夹有黄色，图形分散破碎，形似蠕虫状、蚂蚁状、橘皮状。可以看出沿谷底发育季节性溪沟流向大干河
落水洞	多发育在漏斗、溶蚀洼地的底部，与暗河和岩溶管道想通。图像上可根据地表径流突然终止处出现的小孔穴（背阳方向有阴影）加以判释，形状多呈不规则的圆形、井状和大裂隙状。一般在裂隙或在几组节理相交处发育，受裂隙的形态所控制
波立谷	比溶蚀洼地规模更大的负地形，一般呈长条状，受构造控制。其中有河流、居民点和耕地
暗河出口或出水溶洞	有明显洞口与流出水线。居平缓地带者水线多较平直，居陡坡地带者因落差较大水线常自洞口散开成数支。个别洞穴较大的暗河出口与出水溶洞在单张航片上即可看到。流量较大的暗河常常是河流源头，位置较高的暗河多有引水渠
岩溶湖	形状呈圆形、椭圆形，有时也可呈长条形，排列无一定方向。一般面积不大，湖水色调较浅，一般是由岩溶漏斗或落水洞背堵，经汇水而成的一类湖泊。一般分布于陡峻的可溶岩区或可溶岩与非可溶岩接触带上。某些分布在构造薄弱带上，受断裂控制表现为上升泉或下降泉
孤峰	分布于溶蚀洼地或波立谷内的孤立山峰，在图像上为斑点状纹理
峰林	一般成排分布，在小比例尺图像上为密集的斑点状纹理，在大比例尺图像上一般为断续分布的棋盘状纹理

4.1.2 工程地质遥感勘察工作应包括下列内容：

- 1 划分岩溶地貌单元，确定岩溶地貌、岩溶形态特征及其分布规律，水系分布状况、形态分类及发育特征，植被发育情况等。
- 2 了解区域地质构造轮廓，划分构造单元及构造体系，包括褶曲、断层等地质构造的位置和性质，断层破碎带的范围，大型节理、节理密集带的位置和延伸方向。
- 3 区分地层岩性、地层界线及接触关系，估测岩层产状要素，解译可溶岩与非可溶岩的空间分布特征，划分岩溶层组，分析第四系地层的分布及成因类型。
- 4 明确岩溶地表、地下水点的分布状况、形态分类及发育特征，分析地下水的补给、径流、排泄条件及暗河、伏流的分布特征，并分析地下水对岩溶区不良地质现象的影响。
- 5 分析岩溶不良地质现象的类型、范围、成因、分布规律，及其危害程度、发展趋势与线路之间的关系。
- 6 工程地质分区、水文地质分区，工程地质条件评价等。
- 7 与岩溶有关的专题图和系列图编制等。

4.1.3 工程地质遥感工作应根据勘察要求和目的、岩溶区工程地质特点等，合理选用遥感数据，宜选择多平台、多波段、多时相遥感数据进行动态解译。

条文说明：

“多平台”遥感数据是指航天、航空地面等不同平台获取的遥感数据；“多波段”遥感数据包括紫外、可见光、红外、雷达，以及多光谱高光谱等遥感数据；“多时相”遥感数据是指不同时间获取的同一区域的多期遥感数据。在不同勘察阶段和解译精度要求时，选择适宜的遥感平台数据；开展地物识别或分类时，宜选择多波段遥感数据；开展目标物动态分析时，应选择多时相遥感数据。

4.1.4 工程地质遥感应选择性地收集解译区域各类地形、地质资料、遥感资料及相关工程资料等。

条文说明：

工程设计资料可用于确定工作范围，制定遥感工作计划；遥感数据资料是开展工程地质遥感工作的基础资料，应重点搜集；地形、地质资料主要用于辅助工程地质遥感解译，解译岩溶区地貌、地层岩性、地质构造及岩溶形态特征等。

4.1.5 工程地质遥感应对遥感数据进行质量检查，遥感数据的质量应满足数据处理和工程地质遥感解译要求。

条文说明：

遥感数据是开展工程地质遥感工作的重要基础资料，遥感数据质量的好坏以及是否齐全，直接影响解译效果。遥感数据质量检查的内容应包括：各类参数、覆盖范围、重叠度、成像时间、清晰度、反差、物理损伤、色调、云量等。在实际工作中，搜集到的遥感数据经常会有缺少参数、文字信息内容不齐全或有质量问题等情况，这时应进行补充搜集或重新获取，以满足工程地质遥感解译的要求。

4.1.6 采用的遥感影像数据分辨率应符合下列规定：

1 可行性研究阶段，航天遥感影像分辨率不宜低于 10m，航空遥感影像摄影比例尺不小于 1:50000，地面遥感应结合调绘比例尺确定。

2 初步勘察阶段，航天遥感影像分辨率不宜低于 3m，航空遥感影像摄影比

例尺不小于 1:10000，地面遥感应结合调绘比例尺确定。

条文说明：

本条规定对航天遥感影响的分辨率做出了规定，主要考虑岩溶区地表岩溶形态大小不一，为能够准确判别地表岩溶形态，宜采用分辨率较高的影像进行分析。

4.1.7 遥感数据处理应根据不同勘察阶段任务的具体要求、解译目的和遥感数据的特点，合理选择处理方法，包括几何校正、图像配准、图像增强、图像融合、镶嵌配准等方法，宜采用多种方法配合使用，使之满足岩溶区公路工程地质遥感勘察的精度要求。

条文说明：

在遥感数据处理中应根据勘察要求、解译目的和遥感数据的特点等，进行条文中所列的全部或部分处理，处理顺序视具体情况可有所不同。

几何校正是指消除或改正遥感数据几何畸变的过程，分为几何粗校正和几何精校正。几何粗校正是针对引起畸变的原因进行的校正，一般情况下，从遥感卫星地面接收站或商业机构获取的遥感数据一般都经过了几何粗校正处理。几何精校正是利用地面控制点进行的几何校正，它是用一种数学模型来近似描述遥感数据（图像）的几何畸变过程，并利用畸变的遥感图像与标准地图之间的一些对应点（即控制点数据对）求得几何畸变模型，然后利用该模型进行几何畸变的校正。几何精校正不考虑畸变的具体形成原因，只考虑如何利用畸变模型来校正遥感数据。

图像配准是指将不同时相、不同波段、不同传感器或不同条件下获取的两幅或多幅遥感图像进行匹配、叠加的过程。通过图像配准可以使不同数据间具有统一的地理坐标及像元空间分辨率，有利于开展数据间的对比分析。工程地质遥感解译使用的多源遥感数据均应进行图像配准。

图像增强是通过改变原图像的结构关系，突出特定目标，扩大图像中不同地物特征之间的差别，提高图像判读和识别效果的图像处理方法。根据处理空间的不同，图像增强方法可分为基于图像空间的空域方法和基于图像变换的频域方法；根据处理范围的不同，可分为全局处理和局部处理。另外，还有将灰度图像变为彩色图像、对多光谱图像进行彩色合成或进行彩色变换的彩色增强方法等。总之，

可选择的图像增强处理方法有很多，实际工作中应在了解和掌握不同方法的原理和适用范围的基础上，根据工作区工程地质特点及解译目的，经测试和对比分析后进行选择，方可取得最佳的解译效果。

图像融合是通过采用一定的算法，实现同一地区不同波段、不同时相、不同分辨率的多源遥感数据“优势互补”的图像处理方法，其目的是使融合后的图像同时具有高空间分辨率数据的纹理信息和高光谱分辨率的光谱信息。

图像镶嵌是将两幅或多幅遥感图像拼接在一起，构成一幅整体图像的过程。当工作区涉及两幅或多幅遥感图像时，需要进行图像镶嵌处理。

4.1.8 初步解译前应确定解译范围和重点解译内容，工程地质遥感调查的范围应符合下列规定：

- 1 可行性研究阶段工程地质遥感解译的范围不应小于拟设线路方案两侧各1000m。
- 2 初步勘察阶段工程地质遥感解译的范围不应小于拟设线路方案两侧各200m。

条文说明：

本条规定结合工程地质调绘的范围综合制定，使得工程地质遥感调查和工程地质调绘相适应，便于结合进行相互验证的工作。

4.1.9 应根据岩溶发育的地质、地貌特点建立具有代表性、实用性和稳定性的解译标志。

条文说明：

解译标志可分为直接解译标志和间接解译标志，应根据地物的色调或色彩、几何形态、波谱特征、空间分布和组合关系等建立，解译标志内容主要包括地貌、水系、地层岩性、地质构造、水文地质的典型特征，以及有指导意义的植被、人类活动痕迹等，并应有必要的文字描述等。

4.1.10 遥感图像解译时，图像上出露范围达 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 及以上的闭合体以及长度达到 5mm 的线状地质体应进行勾绘，勾绘的界线与实际影像误差不得大于 0.5mm 。

4.1.11 外业调查验证应在初步解译的基础上选取有代表性的岩溶类别进行验证。通过对解译标志和初步解译成果的现场调查与验证，修改和完善初步解译成果，对溶沟、溶槽、落水洞、地下暗河及石牙、石笋、石林等岩溶微地貌，验证点不应分别少于 1 个。

4.1.12 外业调查验证结束后，应进行遥感图像的最终解译，全面检查解译成果。

4.1.13 遥感解译成果应包括遥感解译说明书、工程地质遥感解译图件。工程地质遥感解译图件应符合下列规定：

1 可行性研究阶段线路遥感图件比例尺不应小于 1:50000，岩溶现象分布图、水文地质图比例尺不小于 1:10000。

2 初步勘察阶段，线路遥感图件比例尺不应小于 1:10000，岩溶现象分布图、水文地质图比例尺不小于 1:5000。

4.2 地质调绘

4.2.1 岩溶区工程地质调绘前应充分收集项目区既有的各类相关资料，包含地形地貌、气象水文、区域地质、水文地质、环境地质、遥感资料、既有工程相关资料等，尤其应重点收集与岩溶相关的调查、观测及记录资料等。

条文说明：

在开展工程地质调绘工作前，充分收集和研究工作区既有的各种地质资料是了解区域地质情况，初步确定工作的重点、难点，制定工作计划，做好工程地质调绘的基础。

4.2.2 岩溶区工程地质调绘内容应重点对岩溶地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、岩溶洞隙、岩溶地面塌陷及土洞等岩溶区工程地质进行调绘。

条文说明：

公路工程沿线构筑物的种类较多，对地质资料的要求不尽相同。本条仅对工程地质调绘的一般内容进行了强调，为满足实际工作需要，尚应结合路线方案比

选及各类构筑物建设场地的勘察做必要的补充调绘。

4.2.3 岩溶区地貌调绘重点应包括下列内容：

- 1 岩溶地貌的成因、类型、规模、形态特征、组合特征以及空间分布特征；
- 2 各岩溶形态的特征、发育规模及分布范围；
- 3 各岩溶形态空间分布发育特征与河流阶地、剥夷面、地质构造的关系。

4.2.4 岩溶区地层岩性调绘应查明下列内容：

- 1 基岩的岩性、地质年代、地层层序、分布范围、埋深和岩面起伏变化情况、风化程度以及溶蚀程度；
- 2 可溶岩与非可溶岩的分布特征、接触关系、夹层厚度、分布层位及其工程地质特征；
- 3 覆盖层的厚度、土质类型、分布范围、地层结构、密实度和含水状态，当存在特殊性土时应符合《公路工程地质勘察规范》(JTG C20)的有关规定。

4.2.5 岩溶区地质构造调绘应重点包括下列内容：

- 1 褶皱、断裂、节理的类型、规模、性质、分布范围和产状；
- 2 断裂的力学性质、产状，断裂带的破碎程度、宽度、胶结程度、阻水或导水条件，以及岩溶发育程度；
- 3 褶皱构造特征，节理、裂隙性质，岩体破碎程度及岩溶发育程度。

4.2.6 岩溶区水文地质调绘应符合本规程第 5.2.4 条的有关规定执行。

4.2.7 岩溶区洞隙调绘应包括下列内容：

- 1 对溶洞、竖井、溶蚀洼地、漏斗、落水洞等岩溶形态，应调查其位置、发育高度、形态、成因、规模、岩性特征等内容，分析其空间分布规律，以及与地质构造、岩溶地下通道的关系。
- 2 对与线路有关，人能进入的溶洞、竖井、暗河等岩溶洞穴还应查明：
 - 1) 洞穴位置、形态、规模、洞底高程、所在层位、岩性及地质构造特征，洞体完整性和稳定性；

- 2) 洞穴的延伸变化、垂直和水平方向的联通情况，分析其空间分布规律；
- 3) 洞穴内地下水位及流量；
- 4) 洞穴内填充情况，沉积物与堆积物组成成分及其物理力学性质。

3 对影响公路工程建（构）筑物的大型岩溶洞穴、暗河应实测平面、典型纵横断面图。

4.2.8 岩溶区地面塌陷调绘应查明下列内容：

- 1 可溶岩分布范围、埋深、岩溶发育程度及其与地质构造关系；
- 2 覆盖层岩性、结构、性质、厚度及其与岩溶塌陷关系；
- 3 岩溶水的赋存状态、水位埋深与动态变化，各含水层间的水力联系；
- 4 塌陷发生的时间、位置，塌陷坑形态、规模、分布特征和规律、密集程度、影响范围等，以及其成因、影响因素和发展趋势。

4.2.9 应查明土洞的分布、形态、规模、埋深、稳定性，以及土洞的成因、发育规律和发展趋势。

4.2.10 工程地质调绘方法应根据比例尺和岩溶区工程地质条件确定。可采用“穿越法和追索法”相结合、“调访与实测”相结合原则布设，宜垂直岩层与构造线走向以及地貌变化显著的方向进行穿越调查。

4.2.11 工程地质调绘精度应符合下列要求：

- 1 对图上宽度大于 2mm 的实测地质体或地质现象应予以调绘。
- 2 对于图上宽度不足 2mm 的重要地质体或地质现象应采用扩大比例尺方式表示，并注明其实际数据。
- 3 对不能表示实际面积、形状的，应采用规定的符号进行表示。

4.2.12 调绘点的布设应符合下列要求：

- 1 岩溶地区工程地质调绘点布设应与路线及沿线构筑物的设置相结合。
- 2 地层接触线、可溶岩与非可溶岩界线、断层、土洞、岩溶塌陷、落水洞、暗河、井及泉点等地下水露头、岩溶水的消水位置和洪水痕迹、覆盖层发育的代

表性路段等应布设调绘点。

3 调绘点在图上的密度每 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 不得少于 4 个，当地质条件复杂时应予加密。

4 调绘点定位在图上误差距离不应大于 3mm，当日测和罗盘仪交汇定位不能满足要求时，宜采用仪器定位或采用相应精度的全球导航卫星系统（GPS）进行定位。

条文说明：

《公路工程地质勘察规范》（JTG C20）对工程地质调绘点的密度规定为在图上每 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 不得少于 4 个，但在实际工作中，应以查明地质条件为准。且工程地质调绘点应布置在各种地质体的边界以及能够说明地质体属性的代表性位置，并综合现场地质条件、地质体距离路线的远近和路线上的工程结构设置情况等确定调绘点的密度，不应机械地采用等间距布置。

4.2.13 工程地质调绘成果应包含工程地质调绘说明、工程地质平面图、工程地质断面图、综合地层柱状图，以及其他影像资料和相关调查图表等内容。

4.3 地球物理勘探

4.3.1 岩溶区工程地质勘探应主要采用地球物理勘探方法查明项目区岩溶发育情况，并应在代表性物探异常点布设钻探、挖探、坑探手段相互验证。

条文说明：

物探应与钻探密切配合，物探一般在钻探之前进行，实现面上控制，并据以布置勘探线和钻孔孔位；在钻探过程中，又可根据实际需要，结合钻探进行物探，对异常点进行控制和圈定；物探成果需以钻探验证，以保证钻探成果的质量。

4.3.2 岩溶区物探应主要查明下列内容：

- 1 覆盖层的厚度、地层界线、基岩面起伏情况及岩体风化程度；
- 2 岩体完整性及其强度特征；
- 3 隐伏断裂位置、规模及发育特征（断层的位置、埋深、产状及破碎带的宽度和含水情况）；

- 4 岩溶洞穴、土洞的空间分布、规模、顶板岩层厚度和充填情况；
- 5 地下水埋藏及分布情况；
- 6 测定场地岩土剪切波速度和特征周期等参数。

4.3.3 物探方法的选择应根据探测目的及现场地形、地质条件，并结合工程类型、结构特点、基础设置和勘察阶段进行确定，岩溶区公路工程常用的物探方法可按表 4.3.3 进行选择，当单一方法不能解决地质问题时应采用综合物探法。

表 4.3.3 岩溶区公路工程常用物探方法

常用物探方法		基本原理	应用范围				
			路基	桥涵	隧道	地下水	水域
直流电法勘探	电测深法	以地下岩土的电阻率、电磁场、极化率及介电常数等物理场为基础，借助物探仪器测量上述物理场的天然或人工场中，空间与时间的变化规律，结合已知地质资料通过分析和研究，推断出地下一定深度范围内，地质体的分布特征及水文地质条件	○	○	○	○	○
	电剖面法		○	○	○	○	
	高密度电法		○	○	○	△	
	自然电位法		△	△	△		
	充电法		○	○	○	○	
	激发极化法		○	○	○		
电磁法勘探	地质雷达法		○	○	○	△	
	瞬变电磁法		○	○	○	△	○
	可控源音频大地电磁法		○	○	○		
	天然场源音频大地电磁法		○	○	○		
	电磁波透射法	○	○	○			
地震勘探与测试	折射波法	利用人工或天然激发的地震波在岩土层中的传播产生的反射、折射及瑞利波变频测深的特征，以研究地下地质体的几何形态及岩土体的物理力学参数	○	○	○	△	
	反射波法		○	○	○	△	
	地震波透射法		○	○	○		
	瑞利面波法		△	△	△		
	水域地震波法						○
CT	弹性波 CT	重建被测范围内岩体弹性波和电磁波参数分布规律图像	○	○	○		
	地震波 CT		○	○	○		
地球物理测井	声波测井	用仪器观测钻井及井间岩土物性差异所引起的天然或人工物理场变化规律，以研究井壁和井周空间地质构造，测定岩土自然状态下物理力学和水文地质参数	△	△	△	△	
	放射性测井		△	△	△	○	
	电视测井		○	○	○	△	
	井温测量					○	
	井径测量		○	○	○		

注：○-主要方法；△-配合方法。

编写说明：

岩溶区物探方法选择应符合下列规定：

- 1 路基、桥梁、隧道等工程场地岩溶勘探宜选用反射波法、电剖面法、高密度电法、电测深法、可控源音频大地电磁法、天然场源音频大地电磁法等，基岩裸露或接地不良时宜选用地质雷达法、反射波法、瞬变电磁法等。疑难地段可选用地球物理测井、地震波透射法、电磁波透射法探测，必要时应采用综合物探；
- 2 水域岩溶勘探宜选用水域地震法、电测深法、瞬变电磁法等；
- 3 追踪与地下水活动有关的岩溶发育带时可选用充电法、电剖面法、井温测量、放射性测井等；
- 4 区分岩溶与炭质岩层引起的异常宜选用自然电位法、激发极化法等。

4.3.4 物探测线应垂直构造线、地下水流向、岩溶发育方向等沿地质特性变化最大的方向，测线布置的密度应根据现场需要确定。

4.3.5 岩溶区物探测线布置应符合下列规定：

- 1 初步勘察阶段，应沿路线中线或垂直岩溶发育带布置纵测线，异常位置布置横测线，当岩溶强或极强发育时宜沿路线左、中、右平行布置纵测线，数量不应少于 3 条。
- 2 详细勘察阶段，应针对需查明的岩溶异常路段，结合工程的类型和基础设施布置测网，测线数量不宜少于 3 条，间距 5m~30m。疑难地段可采用地球物理测井、电磁波透射法探测钻孔周围或钻孔之间的岩溶发育情况。
- 3 追踪岩溶发育带时应沿垂直岩溶发育带走向布置一定数量的测线，测区应满足岩溶工程地质评价的要求。

4.3.6 物探外业工作质量的检查应符合下列规定：

- 1 由不同的操作员在不同日期使用不同仪器时，应进行检查。
- 2 检查点在测区应均匀分布，异常与可疑地段应重点检查。
- 3 质量检查一般应抽查工点总量的 5%，质量不满足要求时应增加，当检查工作量达到工作总量 20%时，质量仍不符合规定，所有数据必须重测。
- 4 检查资料应与正式资料一并提交审核。

4.3.7 岩溶强或极强发育的高边坡、深路堑、隧道等路段，可在施工至路基

高程时进行必要的补充探测。

4.3.8 物探解译应结合其他勘探成果综合分析，成果应包含工程地质物探说明、工程物探成果图、工程物探解译断面图及其他相关资料，其成果可用于地质调绘，指导钻孔布设，地质界线的内插和外延等，并作为工程地质勘察报告编制的基础资料。

4.4 钻探

4.4.1 岩溶区工程地质钻探应在工程地质调绘和物探工作的基础上进行，其勘探点的布设、钻孔护壁方法及材料应根据勘察阶段、工点类型、孔内物探方法、水文地质试验等综合考虑，钻探工艺应根据需要确定。

4.4.2 对下列地段，应进行重点勘察，并加密勘探点：

- 1 地面塌陷或地表水消失的地段；
- 2 地下水强烈活动的地段；
- 3 碳酸盐岩层与非碳酸盐岩层接触的地段；
- 4 碳酸盐岩埋藏较浅且起伏较大的石芽发育地段；
- 5 软弱土层分布不均匀的地段；
- 6 物探成果异常或基础下有溶洞、暗河分布的地段。

4.4.3 岩溶区钻探深度应符合下列规定：

1 填方和挖方路基钻探深度应至基底以下稳定地层内不小于 10m，当地表塌陷发育及存在塌陷可能时，勘探深度应至基岩内 5m~8m，在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 3m~5m。

2 构筑物的浅基础勘探深度应至基底以下基岩中不小于 10m，在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 10m。

3 桩基础勘探深度应至桩端以下基岩中 10m~15m，在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 10m。

4 隧道钻探深度应至基底以下完整基岩中 5m~8m，在该深度内遇岩溶洞穴

时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 8m。

4.4.4 岩溶区钻探孔径应符合下列规定：

- 1 水文地质钻孔终孔孔径应不小于 110mm。
- 2 工程地质钻孔终孔孔径在土层中应不小于 110mm，在岩石中应不小于 91mm。
- 3 进行专门试验的钻孔，其孔径按需要确定。

4.4.5 岩溶区钻孔取芯应符合下列规定：

- 1 钻孔应连续取芯钻进，其中土层应干钻，岩层应清水钻进。
- 2 岩芯采取率
 - 1) 完整和较完整岩层中应大于 90%；
 - 2) 黏性土层中应大于 85%（软塑、流塑体除外）；
 - 3) 砂类土层、较破碎岩层中应大于 65%；
 - 4) 破碎岩层、碎石土层、破碎带、溶洞充填物应大于 50%（软塑、流塑体除外）。

4.4.6 岩溶区钻孔资料的编录除符合钻孔原始记录表的有关要求外，在钻进过程中，还应记录下列内容：

- 1 钻具自然下落和自然减压的起止深度及状况；
- 2 遇空洞、溶隙或破碎岩层时的孔内掉块、钻具跳动等的起止深度；
- 3 钻穿洞穴顶板后应详细记录顶板深度、充填物性质、地下水情况；
- 4 冲洗液变化情况，孔内漏水、涌水和返水颜色突然变化的起止深度；
- 5 岩溶发育情况，测定钻孔线岩溶率。

4.4.7 岩溶钻探过程中工作揭露岩溶现象时，宜采用下列措施：

- 1 为防止钻穿溶洞顶板时岩芯脱落，宜用卡簧或爪簧取芯钻具卡取岩芯。
- 2 在溶蚀破碎地层及溶洞充填物中钻进，宜使用双层岩芯管或无泵钻进。
- 3 钻进至基岩面时应采用低压、慢速钻进，以保证钻头垂直平稳进入岩层。
- 4 钻进时如发现岩层变软、进尺加快、突然漏水、取出岩芯有钟乳石和溶蚀

现象，应采取措施防止掉钻事故。

5 钻进时遇溶洞，应立即停钻，用钻具试探溶洞底板深度，粗径钻具长度不够时应另用长岩芯管拭探，拭探中应详细记录溶洞顶底板深度，有无充填物及其性质。

6 钻穿溶洞后，应根据溶洞深度情况，下入适当直径的导向管或用加长的粗径钻具钻进，采用低压、慢转钻进至溶洞底板下 2m~3m，取出完整岩芯后，下入套管隔离溶洞，导向管或加长岩芯管的长度应比溶洞高度大 2~3 倍。如再次有溶洞，可采用起管扩孔再下套管的办法，不宜轻易采用换径下小一级套管的作法。

7 为探测土洞及溶洞充填物的物理力学状况，土层应采用干钻，溶洞充填物应采用双层岩心管或无泵钻进。

4.4.8 钻探成果资料应包含原始记录、钻孔柱状图、岩芯编录表、岩芯照片等。

4.5 挖探与轻型勘探

4.5.1 挖探与轻型勘探的勘探点应结合钻探及勘察目的需要进行布置。

4.5.2 当勘探深度较浅，或钻探方法难以准确查明地质情况，或难以保证原状土样质量时，宜采用槽探、井（坑）探、洞探等挖探方法进行勘探。

条文说明：

岩溶区地层较为复杂，为了解岩土层界线、构造形迹、破碎带宽度、岩溶形态（溶沟、溶槽、溶蚀裂隙）、浅部土洞发育情况、包气带松散层的渗透系数及采样或现场试验时，可使用坑探或槽探。对影响工程建设安全的溶洞、岩溶管道或暗河，可采用洞探或竖井进一步查明其平面展布、发育深度、充填物性状及岩溶水分布情况。施工开挖期，为进一步查明溶洞平面展布和充填情况，可采用洞探进行追索，为探查地下硐室岩溶涌水情况，可在硐室顶部适当位置布置洞探，以查明岩溶洞穴或管道的延伸方向、长度、规模及连通情况，对地下水出水构造进行追踪，为地下水引排创造条件。

4.5.3 在物探查明的异常区，可使用坑探或槽探揭露地表溶沟、溶槽分布及起伏、充填物情况及石芽风化特征。

4.5.4 在土洞、地表塌陷发育地段，当对地层或不良地质现象等地质体进行鉴别时，可在已开挖的基槽内采用钎探、洛阳铲、轻型钻探等轻型勘探方法。

条文说明：

轻型勘探方法仅作为鉴别时采用，如揭露覆盖层厚度、隐伏土洞或岩溶塌陷发育规模等。

4.5.5 挖探与轻型勘探的勘探深度应符合下列规定：

1 探槽、探坑挖掘深度不宜大于 3m，大于 3m 时，应根据槽壁的稳定情况增加支撑或改用探井方法。

2 探井深度不宜超过地下水位，且不宜超过 20m，掘进深度超过 7m 时，应向井内通风、照明。

3 探洞的深度、长度按工程要求确定，探洞长度大于 20m 时应进行机械通风。

4 轻型勘探深度宜达到基岩面且不宜大于 10m。

4.5.6 挖探应对地层岩性界线、结构、构造特征、岩溶（溶沟、溶槽、溶蚀裂隙、土洞及溶洞、岩溶管道或暗河）特性、水文地质及工程地质特征、取样位置等内容进行详细编录并进行拍照或录像。

4.5.7 挖探成果资料应包含原始记录、展示图、剖面图，轻型勘探成果资料应参照钻探成果要求提供。

条文说明：

探井（坑）除文字描述外，还应绘制展示图，展示图应反映井壁及底部岩性、地层分界的方位、构造特征、取样及原位测试位置。

4.6 观测与测试

4.6.1 岩溶区工程地质观测与测试应符合下列要求：

- 1 暗河发育路段，宜作连通试验。
- 2 水文地质条件复杂的隧道应进行水文地质动态观测。
- 3 岩溶地面塌陷严重路段宜进行地面变形、地面塌陷监测和地表水、地下水水位监测。
- 4 必要时，采取代表性岩土试样测试其矿物成分和化学成分，作溶蚀试验。
- 5 地表水和地下水除常规试验项目外，尚应测试其游离 CO_2 和侵蚀性 CO_2 含量。

4.6.2 当岩溶发育，需查明地下洞穴分布特征或查明岩溶水水力联系时应开展溶洞连通试验，连通试验应符合本规程第 5.3.6 条的有关规定。

4.6.3 水文地质条件复杂的隧道工程应进行水文地质动态观测，并应符合下列要求：

- 1 观测时间不应少于 1 个水文年。
- 2 观测应包含井、泉、暗河、天窗、钻孔及附近的地表水体、积水洼地等。
- 3 井、钻孔、地表水及洼地积水的水位观测应在同一时间进行，观测频率应旱季 1 次/3 日~1 次/5 日，雨季 1 次/日，近河地表水点应增加观测次数。
- 4 泉、暗河、河流的流量观测应与水位观测同步。
- 5 必要时可自建气象观测站逐日观测降雨、蒸发及气温资料。
- 6 水文地质动态观测应提供观测报告及相关成果。

条文说明：

水文地质条件复杂的岩溶区隧道面临隧道突涌水、影响水环境等问题，因此应该开展水文地质观测工作。

水文地质动态观测报告应阐明观测过程，分析观测成果，确定各地下水点间的水力联系，地下水与地表水、大气降雨的联系；提供水位变化图、流量变化图，水位、降雨、蒸发、气温变化图；还应提供包括降雨入渗系数、渗透系数、降雨系数等水文参数。

4.6.4 当岩溶发育且存在岩溶塌陷病害，可能对公路工程造成危害时应开展监测工作，并应符合下列要求：

- 1 监测工作应根据钻探和物探确定塌陷范围和成因。
- 2 监测点应布设在岩溶塌陷发育区、地下水强径流带、人类工程活动（抽排地下水、大型工程开挖）强烈的地区等与致塌作用相关的区域，并应在变形不同位置布置，形成监测网点。
- 3 监测内容主要包含地表位移监测、深部位移监测、地下水动态监测、地表水及大气降水监测，应结合岩溶塌陷诱因选取适宜的监测内容。
- 4 监测宜采用连续监测，连续监测时间不小于 1 个水文年，监测频率不宜超过 20min/次，当监测内容数据变化较大或遇降雨时应增加监测频率。
- 5 监测宜采用自动监测设备。
- 6 监测应提供报告及相关图表。

条文说明：

岩溶塌陷具有潜伏性、突发性。我国岩溶区岩溶塌陷分布广泛，其中贵州、云南、广西、江西、广东、湖南分布最为广泛，岩溶塌陷也给工程带来了极大的危害，据统计大约 97% 的岩溶塌陷地表有覆盖层，这也使得岩溶塌陷具有很强的潜伏性，因此加强岩溶塌陷等变形灾害的监测显得十分重要。岩溶塌陷的成因复杂，目前对于岩溶塌陷的诱因主要有重力、潜蚀、真空吸蚀、冲（气）爆、振动、荷载、溶蚀、压强差等因素，因此针对岩溶塌陷的监测应该在通过物探等勘探手段分析塌陷区岩溶基本情况后开展。对于地面变形监测可采用水准仪、光纤监测、合成孔径雷达测量等方式开展，以总体判别其变形趋势，而由于岩溶地下水诱因塌陷应水位、水气压力、水质、流速流向等，同时还需对地表水及大气降水开展监测，以便通过分析对塌陷进行合理评价和预测。

4.6.5 岩溶地区原位测试应符合下列要求：

- 1 对于取样存在困难或室内试验较难获取准确工程地质参数的岩土体宜根据勘察目的、岩土体工程地质条件选用适宜的原位测试方法进行测试。
- 2 原位测试获取的工程地质参数应结合地区经验综合分析提出。
- 3 原位测试应提供测试记录及相关图表。

4.6.6 岩溶地区岩、土、水试验应符合下列要求：

- 1 地表、地下水样除进行一般试验项目外应增加游离 CO_2 和侵蚀性 CO_2 含

量分析，必要时进行放射性同位素测试。

2 覆盖层土样应作物理力学性质、膨胀性、渗透性试验，必要时进行矿物与化学成分分析；溶洞充填物样应作物理力学性质试验，必要时应作黏土矿物成分分析。

3 代表性岩样应作物理力学性质试验，必要时选样做镜下鉴定、化学分析和溶蚀试验、泥灰岩应增加软化系数试验。

征求意见稿

5 岩溶区水文地质勘察

5.1 一般规定

5.1.1 岩溶发育、形态复杂、岩溶水害严重、对工程方案和施工安全影响较大的可溶岩地段，应进行岩溶水文地质专项研究。

编写说明：

《铁路工程不利地质勘察规程》（2012版），9.1.3条。

5.1.2 岩溶区水文地质勘察宜在初步勘察阶段进行，为工程方案比选及初步设计文件编制提供工程地质资料。

5.1.3 岩溶场区水文地质勘察，应重点查明以下内容：

- 1 地形地貌概况，剥夷面、阶地的发育情况及分布高程，不同地形地貌条件与岩溶发育的关系；
- 2 区域水系分布，水文网演化情况和河谷发育史；
- 3 可溶岩地层展布，岩溶形态类型、分布及发育规律；
- 4 地质构造展布及与岩溶发育的相互关系；
- 5 岩溶地下水特征及补径排条件；
- 6 覆盖层分布及伴生土洞、地面塌陷的发育情况；
- 7 岩溶水对工程建设影响评价。

编写说明：

《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》第8.1.4条。

5.2 水文地质调绘

5.2.1 水文地质调绘工作应收集场地及周边的下列资料：

- 1 区域地质、地貌、第四系地质、水文地质及岩溶资料；

- 2 场区及周边地形图和区域水文地质图及其它地质图；
- 3 卫片及航片；
- 4 邻近地区的气象、水文资料；
- 5 既有岩溶调查和岩溶灾情等。

编写说明：

《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》第 8.1.1 条。

5.2.2 场地水文地质条件复杂时，应扩大水文地质调绘范围，涵盖与工程项目有关的一个或多个完整的岩溶水文地质单元。

编写说明：

贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程第 8.1.2 条。

5.2.3 岩溶水文地质调绘应重点包含以下内容：

- 1 岩溶地貌及岩溶形态调查
 - 1) 溶洞、暗河、漏斗、洼地等的分布、断面形态、延伸方向、长度、深度等，地貌单元与水系沟谷的关系；
 - 2) 雨后溶洞、暗河、漏斗、洼地等汇水、积水、排水情况。
- 2 可溶岩地层应查明富水程度，圈定储水构造
 - 1) 岩溶富水性与岩性的关系；
 - 2) 岩溶富水程度与构造的关系；
 - 3) 可溶岩与非可溶岩接触带的地下水发育情况。
- 3 岩溶水点
 - 1) 出露地层、层位、岩性、环境、形式、高程、水位、埋深、水深、流量及变幅、洪水痕迹；
 - 2) 岩溶水的物理、化学性质，实测水温、气温；
 - 3) 绘制水点示意图，重要水点应摄影。
- 4 既有钻孔和水井
 - 1) 点位、高程、深度、结构及周围地面塌陷史；
 - 2) 出水层位、岩性、含水层厚度，出水量及水位，含砂量变化情况。
- 5 突水人工坑道或洞室

- 1) 突水层位、高程, 突水口形态;
 - 2) 突水地层、岩性、突水量, 突水中泥沙含量及变化情况, 突水持续时间, 疏干范围;
 - 3) 突水原因, 与大气降水、地表水、地面塌陷的关系。
- 6 岩溶水补给、径流、排泄条件
- 1) 岩溶区的汇水和集水面积;
 - 2) 岩溶水补给来源和范围, 覆盖层、植被、地形对降雨入渗的影响;
 - 3) 岩溶含水层性质, 水位埋深, 较集中的岩溶水流分布范围, 岩溶含水层与相邻非可溶岩地层的水力联系, 地下水的流向、流速、水力梯度;
 - 4) 岩溶水的排泄方式、排泄带位置及水量变化特征;
 - 5) 岩溶水与地表水相互转化关系;
 - 6) 岩溶水的垂直分带及与工程设置的关系;
 - 7) 根据工程设置情况, 必要时分析深层岩溶水和承压岩溶水存在的可能性。
- 7 地表分水岭两侧暗河、竖井、既有钻孔的地下水位与地下分水岭位置。
- 8 覆盖型岩溶地段应查明地下水的层数以及其间的水力联系、开采情况、影响半径范围和地面塌陷情况。
- 9 根据工程设置情况和设计要求, 必要时查明与路密切相关的暗河系统。
- 10 为查明与线路密切相关的暗河分布情况, 必要时作示踪试验。

编写说明:

《铁路工程不利地质勘察规程》第 7.2.3 条, 《铁路不良地质勘察规范》9.3.7 条, 《岩溶地区公路工程地质勘察技术指南》第 4.1.8 条。

5.3 水文地质测试

5.3.1 地下水位量测应符合下列规定:

- 1 遇地下水时应量测水位。
- 2 对工程影响的多层含水层的水位量测, 应采取止水措施, 将被测含水层与其他含水层隔开。
- 3 初见水位和稳定性水位可在钻孔、探井或测压管内直接量测, 稳定性水位的间隔时间按地层的渗透性确定, 一般不小于 24h, 并宜在勘察结束后统一量测稳

定水位。

4 量测读数至厘米，量测精度不得低于 $\pm 2\text{cm}$ 。

编写说明：

《工程建设水文地质勘察规范》CECS 241-2008，第 5.4.2 条。

5.3.2 岩溶地下水流向测定可采用几何法，地下水流速测定可采用指示剂法或充电法。

1 地下水流向

地下水流向测定宜采用几何法，在场地内不应少于 3 个测孔（井），孔距按岩石的渗透性、水力梯度、地形坡度确定，一般 50m~100m。同时量测场区内的地下水观测孔水位，绘制等水位线图，等水位线的垂线即为地下水的流向。

2 地下水的流速

地下水流速测定宜采用指示剂法或充电法。

1) 指示剂法

当地下水流向确定后，沿流向线布置两个钻孔，上游钻孔投放指示剂，下游钻孔进行观测。按下式计算流速：

$$u = \frac{l}{t} \quad (5.3.2-1)$$

式中： u ——地下水实际流速（m/h）；

l ——指示剂投放孔与观测孔距（m）；

t ——观测孔内指示剂出现所需时间（h）。

2) 充电法

通过对含水层中电解质低阻带在电场中产生的等电位线随时间的位移，研究地下水流向和地下水流速。按下式计算流速：

$$v = \left[\frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} + \frac{s_3 - s_2}{t_3 - t_2} \right] \times \frac{1}{2} \quad (5.3.2-2)$$

式中： t_1 、 t_2 、 t_3 ——三次测定电位点的时间；

s_1 、 s_2 、 s_3 ——三次测得的等电位点距中心点的位移。

编写说明：

《工程建设水文地质勘察规范》CECS 241-2008，第 5.4.3 条、第 5.4.4 条。

条文说明：

指示剂法：指示剂投放孔与观测孔的距离由含水层的透水条件确定，在岩溶发育地段，观测距离宜大于 50m。为避免指示剂绕观测孔流过，可在观测孔两侧 0.5~1.0m 处各布置一辅助观测孔。

充电法应按下列步骤进行：

1) 把食盐作为指示剂投入井中，盐被地下水溶解后使形成一良导体并随地下水移动的盐水体；

2) 在井中放入由导线联接好的供电电极 A（铅电极或其它金属电极），电极应位于含水层中部；

3) 将供电电极 B 布置在预计来水方向上，B 极距井口的距离应为 A 极距井口距离的 15 倍以下；

4) 对良导盐水体进行充电，并在地表布设夹角为 45° 的辐射状测线。

5) 按一定的时间间隔来追索等位线。

5.3.3 抽水试验应符合下列要求：

1 查明主要含水层的渗透性能及其变化规律时，可采用单孔抽水试验。

2 查明含水层的渗透性和各向异性以及岩土体渗透性分级时，根据水文地质复杂程度，宜选用单孔或多孔抽水试验。

3 抽水试验孔宜根据场地地质调查和钻探揭示的地下水情况，布置在场地主径流带位置，钻孔孔径不宜小于 $\Phi 130\text{mm}$ 。

4 岩溶含水层单位厚度大于 6m 时，抽水孔可采用非完整孔进行分段抽水，过滤器宜置于单层的中部，其长度不宜大于 $1/3$ 单层厚度，但不应小于 2m；单层厚度为 3m~6m 时，亦可采用非完整孔进行分段抽水，但过滤器安放位置及长度宜根据单层厚度及上、下岩土层的渗透性确定；单层厚度小于 3m 时，不宜进行分段抽水。

5 岩溶发育带进行抽水试验，应根据含水层厚度、埋藏情况和均一性确定抽水孔的类型。当含水层全部被揭穿时，抽水孔可采用完整孔。未全部揭穿时，应采用非完整孔。

6 抽水试验前和抽水试验过程中，应同步测量抽水孔和观测孔、点的静止水位和动水位。采用小口径测水管测量动水位时，测水管底端应安装侧压头。

7 抽水试验过程中，每次水位下降结束后，应测量钻孔内的沉淀深度。

8 抽水试验时，应采取措施防止抽出的水排泄在抽水影响范围内，回渗到含水层中。

9 抽水试验动水位的观测，应采用同一方法和同一类工具，抽水孔的动水位精确到厘米，观测孔的动水位精确到毫米。

10 抽水试验出水量的测量，采用堰箱或孔板流量计时，水位测量读数精确到毫米；采用容积法时，量桶充满水的时间不宜少于 15s，读数精确到 0.1s；采用水表时，读数精确到 0.001m^3 。

11 抽水试验每次停泵后的水位恢复，宜按第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 进行观测，以后可每隔 30min 观测一次。

12 抽水试验的观测孔布置，应根据试验目的和计算公式确定，并符合下列规定：

1) 以抽水孔为原点，布置 1~2 条观测线；

2) 布置 1 条观测线时，宜垂直地下水流向；布置两条观测线时，另一条宜平行地下水流向；

3) 每条观测线上的观测孔，宜为 1~3 个；

4) 距抽水孔最近的第一个观测孔，应避开三维流的影响，其距离不宜小于含水层的厚度；最远的观测孔距第一个观测孔的距离不宜太远，并应保证在试验过程中各观测孔内有一定的水位降深值；

5) 各观测孔的过滤器长度宜相等，并安置在同一含水层和同一深度上。

13 稳定流抽水试验应符合下列规定：

1) 稳定流抽水试验的水位降深次数，应根据工程目的确定，宜为 3 次；

2) 水位降深的最大值，潜水含水层宜接近含水层厚度（完整孔）或过滤器长度（非完整孔）的 $1/2$ 深度处，承压含水层最大降深值不宜低于含水层顶板；其余两次水位降深值，宜分别为最大降深值的 $1/3$ 和 $2/3$ ；

3) 各次试验的水泵进水口位置应相同；

4) 勘探孔的出水量较小或试验时出水量已达到极限时，水位降深次数可适当减少，但不得少于 2 次。

5) 抽水试验的稳定标准:

①在抽水稳定延续时间内, 动水位和出水量与时间关系曲线只在一定的范围内波动, 且没有持续上升或下降的趋势。一般情况下动水位波动不应超过平均水位降深值的 1%, 出水量波动值不应超过平均出水量的 3%;

②当水位降深小于 10m, 用空气压缩机抽水时, 抽水孔动水位波动值不得超过 10cm~20cm; 用离心泵、深井泵等抽水时, 动水位波动值不得超过 5cm。

6) 岩溶含水层抽水试验的稳定延续时间为 24h。可根据含水层类型、已有抽水试验资料、补给条件、水质情况和试验目的等, 稳定延续时间可适当调整。

7) 抽水试验时, 动水位和出水量的同步观测时间, 宜在抽水开始后的第 5、10、15、20、25、30 min 各测一次, 以后每隔 30 min 或 60min 测一次; 水温和气温, 宜每隔 2h~4h 同步观测一次。

14 非稳定流抽水试验应符合下列规定:

1) 抽水孔的出水量应保持常量, 其变化幅度不大于 3%;

2) 抽水试验的延续时间, 应按水位降深 (s) 与时间 (t) 的关系曲线确定:

① s (或 Δh^2) - $\lg t$ 关系曲线有拐点时, 延续时间宜至拐点后的线段趋于水平为止;

② s (或 Δh^2) - $\lg t$ 关系曲线无拐点时, 延续时间宜根据试验目的确定;

③承压含水层中抽水时, 采用 $s - \lg t$ 关系曲线; 在潜水含水层中抽水时, 采用 $\Delta h^2 - \lg t$ 关系曲线;

④有观测孔时, 应采用最远观测孔的 s (或 Δh^2) - $\lg t$ 关系曲线;

3) 抽水试验时, 动水位和出水量的观测应同步进行。其观测时间宜按开始后的第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min 进行观测, 以后可每隔 30 min 观测一次。

5.3.4 压水试验应符合下列要求:

1 压水试验宜采用有选择的分段压水方法。当钻孔钻进中发现冲洗介质突然消失或消耗量急剧增大时, 宜停钻进行压水试验。

2 钻孔过程中遇大溶洞时, 应将压水试验改为注水试验, 初步测定溶洞的规模。

3 压水试验钻孔的孔径宜为 60mm~150mm，止水栓塞的长度不应小于 8 倍钻孔孔径。

4 压水试验钻孔宜采用金刚石钻进或采用硬质合金钻进，钻进试验孔段时宜采用清水钻进；应选用不易产生堵塞裂隙和吸附孔壁的冲洗液，不得使用膨润土、植物胶等护壁材料。

5 试验工作应主要包括试验准备、钻孔冲洗、试段隔离、水文观测、实验性压水、压力和流量观测。

6 压水试验段的确定：

- 1) 试验段长度宜采用 5m，透水性较强的岩层和特殊孔段，宜根据具体情况确定，但不得超过 10m；
- 2) 同一试验段不宜跨越透水性相差悬殊的几种岩层；
- 3) 相邻试验段之间应相互衔接，少量重叠，栓塞止水无效时，应将栓塞向上移动，但不宜超过上一试验段栓塞的位置；
- 4) 在同一工程中，试验段长度宜保持一致。

7 压力阶段与压力值的确定：

- 1) 压水试验宜采用三级压力、五个阶段[即 $P_1 - P_2 - P_3 - P_4(=P_2) - P_5(=P_1)$ ， $P_1 < P_2 < P_3$] 进行。 P_1 、 P_2 、 P_3 三级压力宜分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1MPa；
- 2) 试段埋藏较浅时，宜适当降低试段压力；
- 3) 用安设在与试段连通的测压管上的压力计测压时，试段压力应按下式计算：

$$P = P_p + P_z \quad (5.3.4-1)$$

式中： P ——试验段压力（MPa）；

P_p ——压力表指示压力（MPa）；

P_z ——压力表中心至压力计算零线的水柱压力（MPa）；

- 4) 安装在进水管上的压力表测压时，试验段压力应按下式计算：

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (5.3.4-2)$$

式中： P_s ——管路压力损失（MPa）；

其他符号意义同上；

- 5) 倾斜钻孔的水柱压力应进行换算；
- 6) 同一工程中试验总压力值宜一致。

8 压力零线计算:

1) 地下水位在试验段以下时, 以通过试验段 1/2 处的水平线作为压力计算零线;

2) 地下水位在试验段以内时, 以通过地下水位以上试验段 1/2 处的水平线作为压力计算零线;

3) 地下水位在试验段以上, 且属于试验段所在的含水层时, 以地下水位线作为压力计算零线。

9 管路压力损失 P_s 值的确定:

工作管路内径一致, 且内壁粗糙度变化不大时, 管路压力损失应按下式计算:

$$P_s = \lambda \frac{L_p v^2}{d 2g} \quad (5.3.4-3)$$

式中: λ ——摩阻系数 (MPa/m), $\lambda=2 \times 10^{-4}$ MPa/m~ 4×10^{-4} MPa/m;

L_p ——工作管长度 (m);

d ——工作管内径 (m);

v ——管内流速 (m/s);

g ——重力加速度 (m/s^2), g 取 $9.8m/s^2$ 。

10 压水试验水位、压力和流量量测:

1) 下栓塞前应首先观测 1 次孔内水位, 试段隔离后, 再观测工作管内水位;

2) 工作管内水位观测应每隔 5 min 进行 1 次。当水位下降速度连续 2 次均小于 5cm/min 时, 观测工作即可结束, 用最后的观测结果确定压力计算零线;

3) 压水试验前, 应进行不少于 20min 的试验性压水, 其压力应为压水试验时的压力值;

4) 压水试验中试验压力应保持稳定;

5) 压水试验中, 每 1min~2 min 应观测一次压入流量, 流量无持续增大趋势, 且 5 次流量读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%, 或最大值与最小值之差小于 1L/min 时, 本阶段试验即可结束, 取最终值作为计算值;

6) 压水试验过程中, 压入的水应采用水质较好的清水;

7) 压水试验过程中, 应在流量观测的同时测定管外水位的变化, 发现有异常时, 及时检查分析原因, 并立即采取措施;

8) 压水试验过程中, 应对周边可能受到影响的坑、孔、井、泉以及沿裂隙渗

出地表的水等情况进行观测。

11 压水试段的透水率计算宜采用第三阶段的压力值（ P_3 ）和流量值（ Q_3 ）应按下式计算：

$$q = \frac{Q_3}{L \cdot P_3} \quad (5.3.4-4)$$

式中： q ——试段的透水率（Lu）；

Q_3 ——第三阶段的计算流量（L/min）；

P_3 ——第三阶段的压力（MPa）；

L ——试段长度（m）。

5.3.5 注水试验应符合下列要求：

1 岩溶发育或透水性较强的岩体可采用钻孔常水头注水试验；岩溶微发育或渗透性较小的地层可采用钻孔降水头注水试验。

2 钻孔常水头注水试验的方法与步骤应符合以下规定：

1) 注水前应测定孔内的静止水位；

2) 用流量箱连续向孔内注入清水，使管内水位升高到设计的高度后，应控制注水量，使水头、水量保持稳定；

3) 注水开始后，第 1、2、3、4、5、10、15、20、25、30min 同时观测水位、水量，以后每隔 30min 观测一次，至稳定后再延续 2h~4h 即可结束；

4) 注水试验结束后应立即观测钻孔中的水位下降，其时间间隔与注水试验相同，直至水位下降到静止水位为止；当水位下降缓慢到距静止水位 5cm~10cm 时，可停止观测；

5) 注水试验应进行三次水位升高，每次水位升高宜采用 2、4、6m 或更大，间距不宜小于 1m；

6) 注水量允许偏差为 $\frac{Q_{max}-Q_{min}}{Q_{cp}} < 10\%$ ；水头允许波动幅度为 $\pm 1\text{cm}$ 。

3 钻孔降水头注水试验的方法与步骤：

1) 注水前应测定孔内的静止水位；

2) 向孔内注入清水，使管内水位高出地下水位一定高度或至孔口作为初始水头值，停止供水，开始记录孔内水位随时间变化的情况；

3) 孔内水位观测，开始时间为 1min，连续观测 5 次；然后间隔为 10min，观

测 3 次；后期观测时间间隔应根据水位下降速度确定，可按 30min 间隔进行；

4) 应在现场采用半对数坐标绘制水头比与时间 $[\ln(H_t/H_0)-t]$ 关系曲线。当水头比与时间关系曲线不成直线时，应进行检查并重新试验；

5) 试验水头下降到初始试验水头的 0.3 倍或连续观测点达到 10 个以上时，即可结束试验。

5.3.6 连通性测试应符合下列要求：

1 当需要查明场地或周边地下水的补径排特征或者地下水位以下岩溶管道的连通关系，可进行连通示踪试验。通过钻孔、竖井或消水洞将示踪剂注入含水层中，并在预期示踪剂能到达的周边井、孔、泉或坑道进行监测和取样分析。

2 示踪剂应选择无毒、性质稳定、易溶于水、抗吸附、易检测、背景值低且波动小的物质。

3 简易的连通试验可选择食盐作为示踪剂，通过测试水体的电导率对示踪剂进行检测。对环境条件适宜的场地，可进行染色法试验，选择无毒的色素作为示踪剂。复杂的远距离连通示踪试验，可选择具有低背景值、低检出限和高灵敏度的示踪剂，使用专用仪器和方法进行检测。

4 连通示踪试验应在充分调查场地水文地质条件后进行，选择地下水系统的补给区或主径流通道作为投源点，在各可能的径流通道或排泄区进行示踪剂取样和检测。

5 连通示踪试验宜在洪水或平水期进行，当洪水期与平水期补径排条件不一致，宜不同季节都进行试验。为查明同一场地多个地下水流动系统，可同时使用多种不互相干扰的示踪剂进行多元连通示踪。

6 试验前应测定示踪剂的背景值和波动水平，其观测时长应不小于后期试验观测时长的五分之一，不小于 5 个实测数据。示踪剂的用量根据示踪距离、流量、示踪剂背景值和波动水平确定。示踪剂应在地面充分溶解后，快速注入含水层中。

7 宜定量检测示踪剂浓度。应根据地下水和管道的畅通程度、距离、流量等因素，确定示踪剂取样和观测时间，投源初期观测间隔较短，后期可逐渐增加间隔时间；当检测到示踪剂时，应加密观测。

8 连通试验过程中，应搜集下列资料：

- 1) 示踪物的投放点、接收点的位置、高程、地下水流量；
- 2) 投放示踪物的时间、种类、数量；
- 3) 收到示踪物的时间、种类、数量或浓度；
- 4) 接收及检测示踪物的方法。

9 连通试验结束后应编制试验报告，绘制示踪剂浓度—时间曲线，分析试验成果，确定地下水流向，计算地下水流速，推测地下岩溶管道系统特征等。

条文说明：

示踪剂法一般有浮标法、粒子法、化学试剂法、染色法、水位传递法、物探充电法、放射性同位素示踪、地质炸弹示踪及微型电波发射机等方法，示踪剂法是为较常使用的方法连通测试方法，应根据岩溶区水文地质特点、环境选择适宜的方法进行试验。

5.3.7 地下水化学常规试验项目包括：pH 值、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、侵蚀性 CO_2 、游离 CO_2 、 NH_4^+ 、 OH^- 、总矿化度，必要时进行放射性同位素的测试，评价岩溶地下水对混凝土结构的腐蚀性。

条文说明：

《铁路工程水文地质勘察规范》TB 10049-2014，7.2.3 第 5 条规定。

《公路工程地质勘察规范》JTG C20-2011，附录 K。

5.4 水文地质参数

5.4.1 水文地质参数的计算，应在分析工程场区水文地质条件的基础上，合理的选用计算公式。

5.4.2 潜水孔的参数计算，采用观测孔资料时，其使用范围应限制在抽水孔水位下降漏斗坡度小于 1/4 处。

5.4.3 单孔稳定流抽水试验利用抽水孔水位下降资料计算渗透系数时，应按下列公式计算：

- 1 当 $Q - s$ (或 Δh^2) 关系曲线呈直线时：

1) 承压水完整孔

$$K = \frac{Q}{2\pi sM} \ln \frac{R}{r} \quad (5.4.3-1)$$

2) 承压水非完整孔

当 $M > 150r$, $L/M > 0.1$ 时

$$K = \frac{Q}{2\pi sM} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{M-L}{L} \ln \frac{1.12M}{\pi r} \right] \quad (5.4.3-2)$$

当过滤器位于含水层的顶部或底部时:

$$K = \frac{Q}{2\pi sM} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{M-L}{L} \ln \left(1 + 0.2 \frac{M}{r} \right) \right] \quad (5.4.3-3)$$

3) 潜水完整孔

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r} \quad (5.4.3-4)$$

4) 潜水非完整孔

$\bar{h} > 150r$, $L/\bar{h} > 0.1$ 时:

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{\bar{h}-L}{L} \ln \frac{1.12\bar{h}}{\pi r} \right] \quad (5.4.3-5)$$

当过滤器位于含水层的顶部或底部时:

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{\bar{h}-L}{L} \ln \left(1 + 0.2 \frac{\bar{h}}{r} \right) \right] \quad (5.4.3-6)$$

式中: K ——渗透系数 (m/d);

Q ——出水量 (m^3/d);

s ——水位下降值 (m);

M ——承压水含水层厚度 (m);

H ——自然状况下潜水含水层厚度 (m);

\bar{h} ——潜水含水层在抽水试验时的厚度的平均值 (m);

h ——潜水含水层在抽水试验时的厚度 (m);

L ——过滤器长度 (m);

r ——过滤器半径 (m);

R ——影响半径 (m)。

2 当 $Q - s$ (或 Δh^2) 关系曲线呈曲线时, 可采用插值法得出 $Q-s$ 代数多项式, 即:

$$s = a_1 Q + a_2 Q^2 + \dots + a_n Q^n \quad (5.4.3-7)$$

式中： a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_n ——待定系数； a_1 宜按均差表求得后，可相应地将公式（5.4.3-1）、（5.4.3-2）、（5.4.3-3）中的 $\frac{Q}{s}$ 和公式（5.4.3-4）、（5.4.3-5）、（5.4.3-6）中的 $\frac{Q}{(H^2-h^2)}$ 以 $\frac{1}{a_1}$ 代换，分别进行计算。

3 当 s/Q （或 $\frac{\Delta h^2}{Q}$ ）- Q 关系曲线呈直线时，可采用作图截距法求出 a_1 后，按本条第2款代换计算。

5.4.4 单孔稳定流抽水试验利用观测孔中的水位下降资料计算渗透系数时，观测孔中的 s （或 Δh^2 ）值在 s （或 Δh^2 ）- $\lg r$ 关系曲线上能连成直线，应按下列公式计算：

1 承压水完整孔

$$K = \frac{Q}{2\pi M(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.4.4-1)$$

2 潜水完整孔

$$K = \frac{Q}{\pi(\Delta h_1^2 - \Delta h_2^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.4.4-2)$$

式中： s_1 、 s_2 ——在 $s - \lg r$ 关系曲线的直线段任意两点的纵坐标值（m）；

Δh_1^2 、 Δh_2^2 ——在 $\Delta h^2 - \lg r$ 关系曲线的直线段上任意两点的纵坐标值（m²）；

r_1 、 r_2 ——在 s （或 Δh^2 ）- $\lg r$ 关系曲线上纵坐标为 s_1 、 s_2 （或 Δh_1^2 、 Δh_2^2 ）的两点至抽水孔的距离（m）。

5.4.5 单孔非稳定流抽水试验，在没有越流补给的条件下，利用抽水孔或观测孔中的水位下降资料计算渗透系数时，应按下列公式计算：

1 配线法

1) 承压水完整孔

$$K = \frac{0.08Q}{Ms} W(u) \quad (5.4.5-1)$$

$$u = \frac{S}{4KM} \cdot \frac{r^2}{t} \quad (5.4.5-2)$$

2) 潜水完整孔

$$K = \frac{0.159Q}{\Delta h^2} W(u) \quad (5.4.5-3)$$

$$u = \frac{\mu}{4KH} \cdot \frac{r^2}{t} \quad (5.4.5-4)$$

或

$$K = \frac{0.08Q}{hs} W(u) \quad (5.4.5-5)$$

$$u = \frac{\mu}{4Kh} \cdot \frac{r^2}{t} \quad (5.4.5-6)$$

式中： $W(u)$ ——井函数；

μ ——潜水含水层的给水度。

2 直线法

当 $\frac{r^2 S}{4KMt \left(\frac{\text{或 } r^2 \mu}{4Kh} \right)} < 0.01$ 时，可采用下列公式计算：

1) 承压水完整孔

$$K = \frac{Q}{4\pi M(s_2 - s_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (5.4.5-7)$$

2) 潜水完整孔

$$K = \frac{Q}{2\pi(\Delta h_2^2 - \Delta h_1^2)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (5.4.5-8)$$

式中： s_1 、 s_2 ——在 $s - \lg t$ 关系曲线的直线段任意两点的纵坐标值 (m)；

Δh_1^2 、 Δh_2^2 ——在 $\Delta h^2 - \lg t$ 关系曲线的直线段上任意两点的纵坐标值 (m²)；

t_1 、 t_2 ——在 s (或 Δh^2) - $\lg t$ 关系曲线上纵坐标为 s_1 、 s_2 (或 Δh_1^2 、 Δh_2^2) 的两点至抽水孔的时间 (min)。

5.4.6 采用单孔非稳定流抽水试验，在有越流补给（不考虑弱透水层水的释放）的条件下，利用 $s - \lg t$ 关系曲线上拐点处的斜率计算渗透系数时，可按下列公式计算：

$$K = \frac{2.3Q}{4\pi \cdot M \cdot m_i \cdot e^{r/B}} \quad (5.4.6)$$

式中： r ——观测孔至抽水孔的距离 (m)；

B ——越流系数；

m_i —— $s - \lg t$ 关系曲线上拐点处的斜率。

5.4.7 稳定流抽水试验或非稳定流抽水试验，当利用停抽后（抽水孔或观测孔）的水位恢复资料计算渗透系数时，可采用下列公式：

1 抽水试验停抽前，动水位稳定时，可采用本规程公式 (5.4.6) 计算，式中

的 m_i 值应采用恢复水位的 $s - \lg\left(1 + \frac{t_K}{t_T}\right)$ 曲线上拐点的斜率。

2 抽水试验停抽前，当动水位没有稳定，仍呈直线下降时，应按下列公式计算：

1) 承压水完整孔

$$K = \frac{Q}{4\pi Ms} \ln\left(1 + \frac{t_K}{t_T}\right) \quad (5.4.7-1)$$

2) 潜水完整孔

$$K = \frac{Q}{2\pi(H^2 - h^2)} \ln\left(1 + \frac{t_K}{t_T}\right) \quad (5.4.7-2)$$

式中： t_K ——抽水开始到停止的时间（min）；

t_T ——抽水停止后算起的恢复时间（min）；

s ——水位恢复时的剩余下降值（m）；

h ——水位恢复时的潜水含水层厚度（m）。

5.4.8 利用同位素示踪测井资料计算渗透系数时，应按下列公式计算：

$$K = \frac{V_f}{I} \quad (5.4.8-1)$$

$$V_f = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{2\alpha r t} \ln \frac{N_0 - N_b}{N_t - N_b} \quad (5.4.8-2)$$

式中： V_f ——测点的渗透速度（m/d）；

I ——地下水水力坡度；

r ——测试孔滤水管内半径（m）；

r_0 ——探头半径（m）；

N_0 ——同位素在孔中的初始计数率；

N_t ——同位素 t 时的计数率；

N_b ——放射性本底计数率；

α ——流场畸变校正系数；

t ——示踪剂浓度从 N_0 变化到 N_t 所需的时间（d）。

5.4.9 利用压水试验资料计算渗透系数时，可根据不同条件采用相应公式。

1 试段位于地下水位以下，透水性较小（ $q < 10Lu$ ）、P-Q 曲线为层流型时，可按下列公式计算岩体渗透系数：

$$K = \frac{Q}{2\pi Hl} \ln \frac{l}{r_0} \quad (5.4.9)$$

式中：Q——压入流量（m³/d）；

H——试验水头（m）；

l——试段长度（m）；

r₀——钻孔半径（m）。

2 试段位于地下水位以下，透水性较小（ $q < 10Lu$ ），P-Q 曲线为紊流型时，可用第一阶段的压力 P_1 （换算成水头值，以 m 计）和流量 Q_1 代人上式近似地计算渗透系数。

5.4.10 利用钻孔注水试验资料计算渗透系数时，可根据下列不同条件采用相应公式。

1 钻孔常水头注水试验

1) 试验段位于地下水位以下时，按下式计算试验岩土层的渗透系数：

$$K = \frac{16.67Q}{AH} \quad (5.4.10-1)$$

式中：K——试验岩土层渗透系数（cm/s）；

Q——注入流量（L/min）；

H——试验水头（cm），等于试验水位与地下水位之差；

A——形状系数（cm），由钻孔和水流边界条件确定，按附录 B 选用。

2) 试验段位于地下水位以上，且 $50 < \frac{H}{r} < 200$ 、 $H \leq l$ 时，可按下式计算试验岩土层的渗透系数：

$$K = \frac{7.05Q}{lH} \lg \frac{2l}{r} \quad (5.4.10-2)$$

式中：r——钻孔内半径（cm）；

l——试段长度（cm）。

2 钻孔降水头注水试验

$$K = \frac{0.0523r^2}{A} \frac{\ln \frac{H_1}{H_2}}{t_2 - t_1} \quad (5.4.10-3)$$

式中：t₁、t₂——注水试验某一时刻的试验时间（min）；

H₁、H₂——在试验时间 t₁、t₂ 时的试验水头（cm）；

r——套管内半径（cm）。

5.4.11 潜水含水层的给水度和承压水含水层的释水系数，可利用单孔非稳定流抽水试验观测孔的水位降深资料确定，也可采用单孔稳定流抽水试验或室内试验方法确定。采用稳定流抽水试验方法时，可按下列公式确定：

1) 潜水完整孔

$$\mu = \frac{Qt}{\pi \frac{y+h}{2}(x^2-r^2)} \quad (5.4.11-1)$$

式中：Q——抽水稳定出水量（m³/d）；

t——指示剂（荧光红、NaCl、NH₄Cl等）从观测孔投入到抽水孔出现经过的时间（d）；

x——抽水孔到观测孔距离（m）；

r——抽水孔半径（m）；

y——观测孔在抽水水位稳定时自含水层底板计起的厚度（m）。

2) 承压水完整孔

$$S = \frac{Qt}{\pi M(x^2-r^2)} \quad (5.4.11-2)$$

5.4.12 影响半径R，宜按下列方法确定：

1 利用稳定流抽水试验有两个观测孔的水位下降资料计算影响半径时，可采用下列公式：

1) 承压水完整孔

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (5.4.12-1)$$

2) 潜水完整孔

$$\lg R = \frac{\Delta h_1^2 \lg r_2 - \Delta h_2^2 \lg r_1}{\Delta h_1^2 - \Delta h_2^2} \quad (5.4.12-2)$$

2 缺少观测孔的水位下降资料时，影响半径可采用经验数据，也可选用有关公式计算。

5.4.13 在特定水文地质条件地区布置勘探试验孔时，并利用裘布依公式 $s = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{Ry}{r}$ 计算时，可按下列不同边界条件的相应式计算引用补给半径Ry值：

1 在常水头补给的半无限含水层中：

$$R_y = 2b \quad (5.4.13-1)$$

式中： R_y ——隧道涌水地段的引用补给半径（m）；

b ——抽水井至补给边界的距离（m）。

2 在有垂直渗漏或顶托补给及补给层水位不变的无限含水层中：

$$R_y = \frac{1.12}{\sqrt{\frac{K_0}{KMm_0}}} \quad (5.4.13-1)$$

式中： K_0 ——抽水层顶面或底面的相对隔水层的渗透系数（m/d）；

M_0 ——抽水层顶面或底面的相对隔水层的厚度（m）；

M ——承压含水层厚度（m），当为潜水时 M 用 $\bar{h} = \frac{(H+h)}{2}$ 代替。

3 在天然径流补给的无限潜水含水层中：

$$R_y = 2.25 \frac{\bar{h}}{l} \quad (5.4.13-2)$$

式中： \bar{h} ——抽水稳定后含水层的平均厚度（m）， $\bar{h} = \frac{(H+h)}{2}$ 。

4 在两侧是常水头补给边界的条带状含水层中：

$$R_y = 0.63L \sin \frac{\pi l}{L} \quad (5.4.13-3)$$

式中： l ——抽水孔至近侧边界的距离（m）；

L ——条带状含水层的宽度（m）。

5 在一侧是隔水层边界另一侧是常水头边界的条带状含水层中：

$$R_y = 1.27 \cot \frac{\pi l}{2L} \quad (5.4.13-4)$$

5.4.14 降水入渗系数，宜按下列方法确定：

1 在平原地区，利用降水过程前后的地下水水位观测资料计算潜水含水层的一次降水入渗系数时，可采用下式近似计算：

$$\alpha = \frac{\mu(h_{max} - h \pm \Delta h \cdot t)}{x} \quad (5.4.14-1)$$

式中： α ——一次降水入渗系数；

h_{max} ——降水后观测孔中的最大水柱高度（m）；

h ——降水前观测孔中的水柱高度（m）；

Δh ——临近降水前，地下水水位的天然平均降（升）速（m/d）；

t ——从 h 变到 h_{max} 的时间（d）；

X —— t 日内降水总量（m）。

2 在平原、丘陵和山岭地区，当缺少试验资料时，可按下表近似确定岩溶含水层（体）的降水入渗系数。

表 5.4.14 降水入渗系数 α 经验数据

岩溶弱发育	0.10~0.15
岩溶中等发育	0.15~0.20
岩溶强发育	0.20~0.35
岩溶极强发育	0.35~0.50

5.5 气象、水文和地下水动态观测

5.5.1 公路工程进行水文地质勘察时宜根据需要建立临时性观测站（点）。临时性观测站（点）的设置及观测内容，应符合下列规定：

1 气象观测

- 1) 气象观测站（点），宜选择在工程场地附近开阔、平坦的地段；
- 2) 观测内容应根据工程设计的需要和选择的涌水量预测方法确定，宜包括降水量、蒸发量、气温、湿度等项目。

2 水文观测

- 1) 水文观测站（点），宜选择在与工程有关河段的河道顺直、水流平缓、水流集中地段；
- 2) 观测内容应根据工程设计的需要和选择的涌水量预测方法确定；宜包括河流洪水期流量和水位、枯水期流量和水位等项目。

3 地下水动态观测

- 1) 地下水动态观测站（点），宜选择在与工程有影响的暗河出口、岩溶大泉、伏流人口等水点处，并应充分利用既有钻孔、水井和泉眼等；
- 2) 观测的内容应包括水位、水温、水质和流量等项目。

5.5.2 观测的时间和相隔时间，应根据采用的涌水量预测方法确定；观测的延续时间不应少于一个水文年。

5.5.3 观测资料应及时按项目与时间关系整理成图表，并进行综合分析。

5.5.5 当临时性观测站（点）在施工、运营期间仍需保留时，应继续观测，并转为长期观测站（点）。确定的长期观测站（点），应随主体工程移交。

5.5.6 同一地区设置的观测点，应采用同一类设备、同步进行观测。

5.5.7 自流钻孔水头高度、流量观测应符合下列规定：

- 1 水头压力不高时，可接长孔口井管，观测水头高度。
- 2 水头压力较高，不便接管观测时，需安装水压表，测量水压，换算水头高度。
- 3 采用三角堰等量测钻孔自流量，必要时可作为长期观测孔，安排观测，并进行动态变化分析。

编写说明：

《铁路工程水文地质勘察规范》，第 6.4 节。

5.6 资料编制

5.6.1 水文地质勘察资料应按全线综合资料 and 各类工程工点资料分别编制。

5.6.2 全线水文地质勘察资料的编制应包括下列内容：

- 1 水文地质勘察报告（可与工程地质勘察报告合并编制）
 - 1) 勘察概况：包括勘察依据、勘察范围、勘察经过、采用的主要勘察方法、完成的勘探工作量等；
 - 2) 自然地理概况：包括地形地貌、气象特征、地震动参数区划等；
 - 3) 区域地质概况：包括地层岩性、地质构造等；
 - 4) 区域水文地质条件：包括含水岩组分类、地下水类型及分布特征、富水性划分等；
 - 5) 临时观测站(点)的分布、观测情况和观测成果等；
 - 6) 环境水文地质条件评价（包括沿线水质对混凝土侵蚀性评价）；
 - 7) 沿线水文地质条件评价（重点对控制线路方案且水文地质条件复杂地段的分布、特点和工程措施意见进行评价）。

2 水文地质图(必要时做),或与工程地质平面图、工程地质断面图合并编制。

5.6.3 各类工程工点的水文地质勘察资料,可根据水文地质条件的复杂程度,按下列要求、重点突出进行编制:

1 勘察报告(可与工程地质勘察报告合并编制)

1) 工程概况:包括工程名称、里程、受水文地质条件控制情况等;

2) 勘察概况:包括采用的勘察手段和完成的勘探工作量;

3) 水文地质条件:含水岩组的类型及分布情况,地下水类型,富水性分区情况,补给、径流、排泄条件,水质等;

4) 水文地质勘探和试验方法的选用:物探钻探、试验方法及成果,临时观测站(点)的观测情况;

5) 水文地质计算:水文地质参数计算,涌水量预测方法的选择及涌水量预测成果等;

6) 环境水文地质工作情况;

7) 水文地质条件评价及工程措施建议。

2 水文地质图件

1) 重点工程水文地质图,在不遗漏重要水文地质信息的基础上,比例尺可与工程地质图相同;重点工程水文地质纵断面图,比例尺与工程地质纵断面图相同,或与工程地质纵断面图合并编制;

2) 水文地质平面图比例尺宜为 1:2000~1:50000,水文地质剖面图比例尺宜为 1:500~1:10000;

3) 当进行水文地质试验时应编制水文地质试验综合成果图。

编写说明:

铁路工程水文地质勘察规范 6.7.3 节

6 可行性研究阶段勘察

可行性研究阶段包括预可勘察和工可勘察两个阶段。该阶段的工程地质勘察除需要满足《公路工程地质勘察规范》有关要求外，尚需满足下列相关要求。

6.1 预可勘察

6.1.1 预可勘察应了解公路建设项目所处区域存在的岩溶工程地质问题，为编制预可行性研究报告提供工程地质资料。

条文说明：

预可行性研究是公路建设项目前期工作的重要组成部分，是建设项目立项和决策的重要依据。根据实践经验，岩溶对后期公路建设规模、技术标准、建设资金等的影响较大，所以预可行性研究阶段了解公路建设项目所处区域存在的岩溶工程地质问题有着重要的意义。

6.1.2 预可勘察应充分收集区域岩溶地质、构造、水文、第四系、岩溶灾情记载等资料，采用资料分析、遥感工程地质解译、现场踏勘调查等方法，对各线路走廊带或通道的岩溶工程地质条件进行研究，完成下列各项工作内容：

- 1 了解各路线走廊带或通道的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件。
- 2 了解各路线走廊带或通道岩溶的类型、分布范围、发育规律。

条文说明：

本条规定了预可勘察的工作方法和工作内容。在预可行性研究阶段，路线方案通常 1:10000~1:50000 的地形图上进行研究，由于工作深度有限，具体线位难于确定。且预可行性研究阶段路线方案主要是研究路线的起终点，中间控制点及重要大型工点位置。另外项目的工程投资主要根据工程建设经验，结合工点类型、岩溶发育大体情况进行类比估算。所以预可勘察对项目建设区域的工程地质条件更侧重于宏观地质条件的把握，及对路线走廊带或通道岩溶的类型、分布范围、发育规律的了解。从工程实践来看，采用资料收集分析、遥感工程地质解译、现

场踏勘调查相结合的方法对岩溶工程地质条件进行研究，可以达到此目的。

岩溶的类型、分布范围、发育规律与区域地质、构造、水文、第四系等关系密切，既有岩溶调查、观测资料及地方志、史料中有关岩溶灾情的记载有利于了解岩溶发育的历史及趋势。

6.1.3 预可勘察报告应提供下列资料：

1 文字说明：应对拟建工程项目各线路走廊带或通道的岩溶工程地质问题进行说明及评估，对下一阶段的岩溶工程地质勘察工作提出意见和建议。

2 图表资料：1:50000~1:100000 线路工程地质平面图应标明岩溶强烈发育地段、典型岩溶照片等。

条文说明：

对各路线走廊带或通道的岩溶工程地质条件进行研究，对岩溶工程地质问题应进行说明及进行评估，为预可行性研究报告提供工程地质依据。在1:50000~1:100000 线路工程地质平面图应标明岩溶极强~强发育地段，为路线方案布设提供地质依据。

6.2 工可勘察

6.2.1 工可勘察应初步查明公路沿线存在的岩溶工程地质问题，为编制工程可行性研究报告提供工程地质资料。

条文说明：

根据《公路工程可行性研究报告编制办法》有关规定：工程可行性研究阶段投资估算与初步设计概算之差要控制在投资估算的10%以内。而可溶岩地区岩溶工程地质问题是影响投资的较大因素，本条的“初步查明”是指与建设工程可行性研究相适应的勘察深度。

6.2.2 工可勘察应以收集资料和工程地质调绘为主，辅以必要的勘探手段，对项目建设各工程方案的岩溶工程地质条件进行研究，完成下列各项工作内容：

1 了解各路线走廊带或通道的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件及岩溶的类型、分布范围、发育规律。

2 初步查明控制线路及工程方案的可溶岩层分布范围、岩溶发育特性及发展趋势，并对其危害程度和发展趋势做出判断，进行沿线地质分区，对场地的稳定性和工程建设的适宜性做出初步评价，提出拟建路线绕避的可能性或通过的方案。

条文说明：

工可勘察依然在 1:10000 甚至更大比例尺地形图上进行，对项目建设区域的工程地质条件依然更侧重于宏观地质条件的把握，地质勘察深度较预可勘察阶段有所加深，但仍然是粗略的、初步的。所以勘察手段在以收集资料与利用、工程地质调绘为主，辅以必要的物探及钻探。工程地质调绘可以采用现场调绘、遥感技术、航片解译等技术。

6.2.3 工可勘察报告应提供下列资料：

1 文字说明：应阐明岩溶类型、分布及发育规律及其对公路工程的影响和避开的可能性；应对线路方案有重大影响的岩溶水文地质及工程地质问题进行充分论证、评价；特大桥及大桥、特长隧道及长隧道等控制性工程，应结合工程方案的论证、比选，对岩溶工程地质条件进行说明、评价；对下一阶段的岩溶工程地质勘察工作提出意见和建议。

2 图表资料：1:10000~1:50000 线路工程地质平面图、1:10000~1:50000 线路工程地质纵断面图、1:2000~1:10000 重要工点工程地质平面图、1:2000~1:10000 重要工点工程地质纵断面图应标明岩溶强烈发育地段；列表说明岩溶发育特征；典型岩溶照片等。

条文说明：

平面图上标注岩溶极强~强发育地段，有利于路线的比选和方案的确定。

7 初步勘察

7.1 一般规定

7.1.1 初步勘察应基本查明公路沿线及各类构筑物建设场地的岩溶工程地质条件，对工程经过地区的工程地质条件作出评价，为工程方案比选及初步设计文件编制提供工程地质资料，并基本查明下列内容：

- 1 岩溶形态、分布范围、规模、发育程度及发育规律；
- 2 岩溶水的类型、分布、赋存条件、水位变幅及运动规律；
- 3 地表水与地下水的水力联系及相互转化关系，场地消水位置和壅水高程；
- 4 岩溶发育与地层岩性、地质构造及水文地质条件的关系；
- 5 土洞、岩溶水害、岩溶塌陷的分布、形态、成因、发育规律及发展趋势；
- 6 场地内影响公路工程建筑物稳定与安全的岩溶洞穴和土洞的形态、位置、规模、埋深，洞穴顶板岩体厚度，洞穴充填物性状；
- 7 当地治理岩溶、土洞和地面塌陷的工程经验。

7.1.2 本阶段勘察方法以工程地质调绘、综合物探为主，钻探、挖探为辅。地质调查和物探发现的异常区段，应布置代表性钻孔进行验证。

7.1.3 初步勘察岩溶地质调绘除应符合本规程 4.2 的有关规定外，还应符合下列规定：

- 1 岩溶地区工程地质调绘应与路线及沿线构筑物的设置结合，查明勘察范围内岩溶的分布范围、发育程度和地层组合类型。
- 2 控制和影响线路方案的岩溶地段应进行重点地质调绘，内容包括：
 - 1) 查明测区地层、岩性、地质构造、岩溶发育特征，调绘范围宜包括岩溶水的补给边界和隔水边界；
 - 2) 查明与线路有关的暗河、大型溶洞，岩溶泉的流量变化及补给、径流、排泄特点；

- 3) 查明与线路有关的大型岩溶洼地、岩溶槽谷等的分布及特征;
 - 4) 大比例尺工程地质图调绘应使用仪器测绘重要岩溶形态。
- 3 覆盖层发育地带, 与路线设置关系密切的隐伏岩溶、土洞等宜辅以物探、挖探等进行调绘。
- 4 对工程有影响的大型岩溶洞穴、暗河应实测平面、典型纵横断面图。
 - 5 应在工程地质调绘的基础上对岩溶发育情况进行分段。

7.1.4 初步勘察岩溶勘探与测试应符合下列规定:

- 1 岩溶工程地质勘探应在工程地质调绘的基础上进行, 采用钻探、物探、测试等进行综合勘探。
- 2 勘探测试点的数量和位置应根据现场地形地质条件、岩溶发育程度、覆盖层下溶蚀基岩面的起伏变化情况, 以及构筑物的类型及规模等综合确定。
- 3 物探方法的选择宜在方法试验的基础上进行, 应以定性、半定量方法为主。通过物探, 查明沿线不同路段的岩溶发育程度和分布规律, 包括与岩溶有关的较大规模异常带(体)的圈定, 重点解决带状异常探测, 包括岩溶发育带、褶皱破碎带、构造破碎带等探测; 大规模溶洞及充填探测。
- 4 初勘阶段岩溶测试应取地表、地下水样与代表性岩、土样进行试验, 观测与测试应符合本规程第 4.6.1 条的规定。
- 5 与线路有关的暗河、大型溶洞、岩溶泉、岩溶管道等宜进行连通试验, 对以上情况进行调查。
- 6 为查明岩溶富水性和涌水量, 必要时应对岩溶含水带作抽水试验。
- 7 应量测地下水的初见水位和稳定水位。
- 8 岩溶地面塌陷严重地段宜进行地面塌陷监测。

7.1.5 初勘阶段应在本阶段勘察工作的基础上, 初步对影响线路方案的岩溶进行工程地质评价, 评价方法见本规程第 9 章的有关规定。

7.2 路线

7.2.1 路线初勘除应符合本规程第 7.1.1 条的规定外, 尚应查明控制和影响线

路方案的大桥及特大桥、长隧道及特长隧道等控制性工程的岩溶发育情况，并进行分析、评价。

7.2.2 初步勘察应沿路线及其两侧各宽不小于 200m 的带状范围进行路线工程地质调绘，路线工程地质调绘的比例尺为 1: 2 000~1: 10 000，视岩溶复杂程度选用。

7.2.3 路线初勘应对控制和影响线路方案的岩溶路段布置物探，针对岩溶测区有意义的最小探测对象，至少应有两条测线通过，每条测线上至少应有三个相邻点予以控制。

7.2.4 路线初勘应对控制和影响线路方案的岩溶路段布置钻探，规模较大的岩溶物探异常带应开展钻探工作予以验证，岩溶预判结果中的强发育地区应结合物探成果开展钻探工作予以验证，重要的地质体及地质现象（如隐伏较浅的可溶岩和构造破碎带等）应布置控制应钻孔。

7.3 路基

7.3.1 路基初勘除应符合本规程第 7.1.1 条的规定外，尚应结合路线填挖设计，划分工程地质区段，查明控制和影响路基方案的岩溶，并进行分析、评价。

7.3.2 工程地质调绘应符合下列规定：

- 1 路基工程地质调绘的比例尺为 1: 2 000。
- 2 调绘应沿拟定的线位及其两侧进行；路堤调绘宽度不宜小于两倍路基宽度；深路堑调绘宽度不宜小于边坡高度的 3 倍；对存在可能影响路基或工程方案比选的岩溶时，应根据实际情况确定调绘范围。

7.3.3 物探应符合下列规定：

- 1 岩溶发育地段路基应沿路线纵向进行综合物探。岩溶中等~极强发育的填、挖方路段，应布置物探测线，开展必要的物探工作。填方路段宜沿路中线布置不小于 1 条物探测线；挖方路段宜沿勘探横断面方向布置物探测线；岩溶复杂时，

宜增加横向物探测线的数量，其间距不宜大于 50m。

2 路基穿越的构造破碎带、褶皱轴部、可溶岩与非可溶岩接触带和岩溶洞穴、塌陷地带等处，特别是带状异常可能平行或以小角度相交于路线走向时，应垂直线路或垂直岩溶发育方向布置 1~2 条物探测线，测线长度应超过可能异常带范围。

3 勘探点间距宜为 5m~10m，探测深度自岩面以下宜为 15m~20m。

7.3.4 钻探应符合下列规定：

1 岩溶弱发育段勘探钻孔平均间距不宜大于 300m；岩溶中等发育段勘探钻孔平均间距不宜大于 200m；岩溶强发育、极强发育段勘探钻孔平均间距不宜大于 100m；岩溶复杂地段，应根据现场情况增加勘探钻孔。

2 路基勘探孔深度应满足稳定性评价、变形计算、软弱下卧层验算的要求。勘探深度应至基底以下稳定地层内不小于 10m；地表塌陷发育及存在塌陷可能时，勘探深度应至基岩内 5m~8m，在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 3m~5m；覆盖性岩溶地段应适当的增加钻孔数量和钻孔深度，必要时钻孔应穿透土层。

7.4 涵洞

7.4.1 涵洞初勘除应符合本规程第 7.1.1 条的规定外，尚应查明控制和影响涵洞方案的岩溶，并进行分析、评价。

7.4.2 工程地质调绘应符合下列规定：

1 涵洞工程地质调绘的比例尺为 1：2 000。

2 调绘范围应包括涵洞及其两侧各不小于 20m 的区域；对存在可能影响涵洞或工程方案比选的岩溶时，应根据实际情况确定调绘范围。

7.4.3 物探应符合下列规定：

1 岩溶强、极强发育地段应沿涵洞轴向布置物探断面。

2 涵洞穿越的构造破碎带、褶皱轴部、可溶岩与非可溶岩接触带和岩溶洞穴、塌陷地带等处，特别是带状异常可能平行或以小角度相交于涵洞走向时，应垂直

涵洞走向或垂直岩溶发育方向布置不少于 1 条物探测线。

3 勘探点间距宜为 5m~10m，探测深度自岩面以下宜为 15m~20m。

7.4.4 钻探应符合下列规定：

1 岩溶弱、中等发育地段应布置简易勘探点或挖探点 1~2 个；岩溶强、极强发育地段应结合物探进行综合勘探。

2 涵洞勘探孔深度应满足稳定性评价、变形计算、软弱下卧层验算的要求。勘探深度应至基底以下基岩中不小于 10m。在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 10m。

7.5 桥梁

7.5.1 桥梁初勘除应符合本规程第 7.1.1 条的规定外，尚应查明控制和影响桥梁方案的岩溶，并进行分析、评价，主要包括以下内容：

- 1 桥基及周围一定范围内、对桥基有影响的岩溶发育带、褶皱破碎带、断裂构造及破碎带、节理的类型、规模、性质、分布范围和产状；
- 2 岩溶裂隙、暗河的分布范围、规模及其稳定性；
- 3 桥基周围的溶洞的填充类型，填充物的种类和分布情况。

7.5.2 工程地质调绘应符合下列规定：

- 1 桥梁工程地质调绘的比例尺为 1: 2 000。
- 2 调绘范围应沿路线两侧各不小于 100m 的带状区域；对存在可能影响桥位或工程方案比选的岩溶时，应根据实际情况确定调绘范围。

7.5.3 物探应符合下列规定：

1 应结合桥位岩溶发育情况，沿桥轴线布置纵向物探断面，岩溶中等~极强发育的桥位，应沿桥轴线及桥轴线两侧布置不少于 3 条纵向物探测线。

2 沿桥台、高墩及特大桥、特殊桥型的主墩、主塔布置横向物探测线，每个位置横向物探测线数量不宜少于 1 条。

3 桥梁穿越的构造破碎带、褶皱轴部、可溶岩与非可溶岩接触带和岩溶洞穴、

塌陷地带等处，特别是带状异常可能平行或以小角度相交于路线走向时，应垂直线路或垂直岩溶发育方向布置物探测线。

4 应按下列原则选择适宜的物探方法。

1) 地质条件较好的场地，一般可单独采用直流电法；

2) 地质异常复杂时，可采用地面三维电法勘探，辅以地震波反射法进行综合物探。

5 电法测线应沿桥基纵向物探断面布置 2~3 条勘探线，必要时，横断面布置 1~2 条勘探线。在上述勘探剖面中，横断面至少有一条剖面其有效勘探长度达到 5~7 倍桥位横断面长度(即有效勘探范围要达到桥位两边各延长 2~3 个桥位宽度)；纵断面至少有一条剖面其有效勘探长度达到 1 倍桥位纵断面长度和 4~6 个桥位横断面长度之和。各测线的桥位外部分原则上可以桥位为准两侧对称位置。但下列情况除外：

1) 桥位周边地质条件复杂程度有差异，则测线可以向地质条件复杂一边多延伸；

2) 已有资料显示桥位周边有可疑问题，则测线可以向有可疑问题一边多延伸。

6 地面三维电法布置原则宜采用所有线距、点距均相等且线距与点距也相等、形成正方形勘探区域的布线方式。勘探区域的扩展可以采用“滚动”勘探形式完成。地面三维电法以桥位为主要勘探对象，可适度外延。

7 地震测线应沿桥基纵向物探断面布置 2~3 条勘探线，必要时，横断面布置 1~2 条勘探线。上述各勘探线原则上与电法勘探线重合，以实现剖面结果对比。勘探线长度可以在桥位范围外适度延伸。但下列情况除外：

桥位周边地质条件复杂或已有资料显示桥位周边有可疑问题，则测线可以参照电法的布线原则布置。

7.5.4 钻探应符合下列规定：

1 主墩、主塔、高墩、桥台部位应布置钻孔，并符合表 7.5.4 的规定。

表 7.5.4 初勘桥位钻孔数量表

桥梁类型	岩溶发育程度		
	弱发育	中等发育	强发育、极强发育
中桥	2	2~3	3~5

大桥	4	4~7	5~10
特大桥	>4	>7	>10

2 浅基础勘探深度应至基底以下基岩中不小于 10m。在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 10m。

3 桩基础勘探深度应至桩端以下基岩中 10m~15m。在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进 10m。

7.5.5 桥梁测试与观测应符合现行《公路工程地质勘察规范》（JTG C20）第 5.11.4 条及本规程第 7.1.4 条的规定，必要时，特大桥、特殊性结构桥应增加钻孔电视、声波测试工作。

7.6 隧道

7.6.1 隧道初勘除应符合本规程第 7.1.1 条的规定外，尚应查明控制和影响隧道方案的岩溶，并进行分析、评价，主要还包括以下内容：

- 1 断层对可溶岩地层切割错位情况、断层与岩溶发育关系；
- 2 岩溶发育规律，主要是溶洞的发育位置、规模、充填情况和富水性；
- 3 岩溶水文地质条件，特别是强富水层、强透水带以及与地表连通的断层破碎带、节理密集带和岩溶通道；
- 4 岩溶发育地段产生突水、突泥及塌方冒顶的可能性；
- 5 隧址岩溶类型、蓄水构造、垂直渗流带、季节变动带、水平径流带、深部缓流带的分布位置及其特征，地下水对隧道工程的影响。

7.6.2 地质调绘应符合下列规定：

1 工程地质调绘应沿拟定的隧道轴线及其两侧各不小于 200m 的带状区域进行，对存在可能影响隧道或工程方案比选的岩溶时，应根据实际情况确定调绘范围，调绘的比例尺为 1：2 000。

2 当两个及以上特长隧道、长隧道方案进行比选时，应进行隧址区域工程地质调绘，调绘比例尺为 1：10 000~1：50 000。

3 水文地质条件复杂的特长、长隧道应结合隧道涌水量分析评价进行专项区

域水文地质调绘，水文地质调绘的比例尺为1: 10 000~1: 50 000，其范围应根据水文地质评价的需要确定。

7.6.3 物探应符合下列规定：

- 1 应根据隧道埋深及场地环境条件，合理选择高密度电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法（代表性设备为EH-4）等物探方法。
- 2 在布线范围内，一般宜沿隧道走向布置2~3条纵向物探测线。
- 3 岩溶复杂地段、地表岩溶特征明显地段，特别是带状异常可能平行或以小角度相交于隧道路线走向时，应垂直洞轴线布置1~2条物探横测线，布线长度达到4~6倍隧道勘探宽度。
- 4 在断裂破碎带、褶皱轴部、可溶岩与非可溶岩接触带应布置勘探线。

7.6.4 钻探应符合下列规定：

- 1 勘探点间距宜为100m~200m，岩溶极强发育场地取小值，岩溶弱发育场地区大值。
- 2 可溶岩与非可溶岩地层接触带、含水层、代表性物探异常点、断层破碎带等岩溶发育部位应布置勘探钻孔。
- 3 勘探深度应至基底以下完整基岩中5m~8m。在该深度内遇岩溶洞穴时，应在洞穴底板稳定基岩内再钻进8m。

7.6.5 初步勘察隧道测试与观测应符合《公路工程地质勘察规范》(JTG C20)第五章有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 当需提供水文地质参数时，应开展相应的水文地质试验，测定方法的选择应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》(GB50021)附录E.0.1的规定。
- 2 与隧道有关的暗河、大型溶洞、岩溶泉，宜进行连通试验。
- 3 水文地质条件复杂的隧道应进行水文地质动态观测，水文地质动态观测应符合本规程第4.6.3条的有关规定。

7.7 资料编制

7.7.1 初勘阶段地质勘察资料的编制除满足一般地区勘察资料要求外，还应包括综合资料和工点资料。

7.7.2 综合资料应提交以下文件，并满足相应要求：

1 工程地质勘察报告，应阐明岩溶的分布规律、危害程度、分析、评价及处理原则，提出线路各方案的评价和比选意见，存在问题及详勘注意事项。

2 全线工程地质图，应综合分析主要地质资料和线路中心线两侧 500m 以内岩溶发育资料进行编制，比例尺为 1:10000~1:200000；内容包括综合柱状图，地质纵断面图，公路工程地质条件分区表；应标明各路线方案和大型建筑物的位置，及主要的地貌界线、地层界线、地质构造线、岩层产状、不良地质、岩溶地貌、地震基本烈度分区界线、公路工程地质条件分区界线、岩溶类型及分布范围。

3 详细工程地质图，比例尺为 1:2000~1:5000，应标明单个岩溶形态及范围界限。

4 工程地质分段说明，应阐明岩溶的分布、特征、规模、类型及其对工程影响的评价。

7.7.3 工点资料应提交以下文件，并满足相应要求。

1 工程地质说明，应根据不同的构筑物类型及特点，阐明岩溶勘察的过程和结果，进行工程地质分析与评价，提供工程设计所需参数，建议需要采取的防治措施。

2 岩溶地区工程地质图，比例尺为 1: 10000~1: 50000，应标明单个岩溶形态，特别是大型溶洞和暗河的投影位置，进行岩溶发育强度分区。

岩溶地区工程地质图，应划分岩溶层组类型，进行岩溶发育程度分区。岩溶层组类型可根据岩性、成层特征划分。成层特征可分为：均质层、夹层、互层、间层。岩溶发育程度分区，可根据岩溶层组类型、岩溶发育密度、最大泉流量、钻孔岩溶率划分。

3 大型岩溶洞穴、未充填的落水洞、天生桥、暗河实测或调查成果图，有条件时可提供工程地质纵断面图，工程地质横断面图等，比例尺为 1: 100~1: 500；应填绘建筑物测点位置、测图导线、断面位置，溶洞平、断面投影形态，溶洞充填情况及充填物性质，围岩裂隙产状及充填情况，地下水；说明测图情况和对溶

洞的认识和分析。

4 勘探、测试资料、观测点、地质照片、调查、分析表资料及岩溶现象的其他调查测绘资料。

征求意见稿

8 详细勘察

8.1 一般规定

8.1.1 详细勘察应查明公路沿线及各类构筑物建设场地的岩溶工程地质条件，为施工图设计提供工程地质资料，并查明本规程第 7.1.1 条的有关内容。

8.1.2 详细勘察应在初勘的基础上结合岩溶发育程度预测结果，确定勘察方法，对路线及各类构筑物建设场地的工程地质条件进行勘察，并符合以下规定：

- 1 详细勘察应充分利用初勘成果资料，在确定的线位和构筑物位置上进行，勘察方法以钻探、测试为主，调绘、物探、简易勘探等手段为辅的综合勘察方法。
- 2 浅层溶洞和覆盖土层厚度可用探槽或探井等挖探查明或验证。
- 3 在土洞和塌陷发育地段，可用轻便型、密集型勘探查明或验证，可采用静力触探、轻型动力触探、小口径钻探等手段。

8.1.3 详细勘察岩溶地质调绘应符合以下规定：

- 1 岩溶区工程地质调绘应对初勘工程地质调绘资料进行复核。
- 2 当线位偏离初步设计线位或地质条件需进一步查明时，应进行补充工程地质调绘，补充工程地质调绘的比例尺为 1:2000。
- 3 在人员可以进入的条件下，应大比例尺测绘线路附近的暗河、溶洞、竖井、落水洞、洼地、塌陷坑、漏斗位置和形态，并包括下列内容：
 - 1) 溶洞顶板节理、裂隙分布及充填、胶结程度，岩层产状，单层厚度，洞顶、洞底、洞壁完整程度；
 - 2) 溶洞的形态尺寸，建（构）筑物跨越溶洞的位置、宽度、洞顶板至建（构）筑物基底间的岩层厚度；
 - 3) 洞内沉积物、水痕、积水、水流情况。

8.1.4 详细勘察阶段岩溶勘探与测试应符合本规程第 7.1.4 条的有关规定。

8.1.5 详细勘察阶段应对勘察区域内岩溶发育程度、地基稳定性及环境影响进行综合分析评价，评价方法见本规程第 9 章的有关规定。

8.2 路线

8.2.1 路线详勘除应符合本规程第 8.1.1 条的规定外，尚应查明影响路线方案的岩溶，提供岩土参数，并进行分析、评价。

8.2.2 路线详勘应对影响线路方案的岩溶进行物探，查明岩溶在线路上的分布范围和埋藏深度，并符合本规程第 7.2.3 条的规定。

8.2.3 路线详勘应对影响线路方案的岩溶进行钻探验证，当发现或可能存在危害工程的洞体时，应加密勘探点。

8.3 路基

8.3.1 路基详勘除应符合本规范第 8.1.1 条的规定外，尚应查明影响路基方案的岩溶，提供岩土参数，并进行分析、评价。

8.3.2 路基详勘应对初勘物探圈定的异常地段和钻孔揭示岩溶发育地段补充物探，查明基底溶洞、溶蚀破碎带及土洞。路基详勘物探工作应符合下列规定：

1 浅埋、对未来路基稳定性特别是对填方路基稳定性有影响的溶洞及充填物应做精细探测。

2 对于裸露地段或覆盖层较薄，可以采用地质雷达方法。地质雷达可采用 5m×5m 方格网布置测线，剖面连测模式，应保证每个方向至少布置 2 条勘探线。

3 对于覆盖层较厚或岩石厚度大，可以采用高密度电法。高密度电法可采用 (5~10)m×(5~10)m 方格网布置测线，测点点距 5m。

4 对于较大规模的岩溶发育带、褶皱破碎带、断裂构造及破碎带等可以采用层析成像法进行定位探测。探测溶洞及充填，应在可能存在溶洞两侧布置测试钻孔。岩溶发育带、褶皱破碎带、断裂构造及破碎带等定位，应在异常带两侧各布

置 1 个钻孔。

8.3.3 物探圈定的异常地段应进行钻探验证。钻探工作布置除应符合本规程第 7.3.4 条的规定外，在横向上尚应根据路基宽度进行布置，路基宽度大于等于 50m，横向布置 3~5 个钻孔，路基宽度小于 50m，横向布置 2~3 个孔。遇深溶槽或串珠状溶洞，拟采取梁板跨越时，需查找稳定支点，可适当增加钻孔，钻孔方向宜垂直岩溶发育方向。

8.4 涵洞

8.4.1 涵洞详勘应在确定涵洞的位置上进行，查明涵洞场地的岩溶工程地质条件，其内容除应符合本规范第 8.1.1 条的规定外，尚应查明影响涵洞方案的岩溶，精细探测涵洞基础下方一定深度范围内的溶洞及充填物等，并重点探明影响工程质量或结构安全的岩溶发育情况，提供岩土参数，并进行分析、评价。

8.4.2 初勘物探圈定的异常地段和钻孔揭示岩溶发育地段应布置物探断面进行补充物探。

8.4.3 每座涵洞勘探测试点的数量不宜少于 1 个。地质条件复杂，涵洞长度较长时，宜沿涵洞轴线布置勘探断面，每条勘探断面上的勘探测试点数量不宜少于 2 个。

8.4.4 岩溶弱、中等发育地段钻孔数量不应少于 1 个，岩溶强发育、极强发育地段钻孔数量不应少于 2 个，宜采用物探、钻探进行综合勘探。

8.5 桥梁

8.5.1 桥梁详勘除应符合本规范第 8.1.1 条的规定外，尚应查明影响桥梁方案的岩溶，精细探测桥基下方一定深度范围内的溶洞及充填物等，并重点探明影响工程质量或结构安全的岩溶发育情况，对桥位的各墩（桩）位进行勘察，提供岩土参数，并进行分析、评价。

8.5.2 物探应符合下列规定：

- 1 钻探发现对工程有影响的溶洞后，必要时应采用孔内 CT 透视、孔内录像、综合测井等综合物探手段，查明溶洞形态、规模及洞内填充物等。
- 2 岩溶埋深较浅，探测深度在 20m 以内，可采用地质雷达。
- 3 岩溶发育强烈地段应采用层析成像技术了解溶洞的基本形态、洞穴规模，溶洞顶板的完整程度可用数字钻孔成像技术观测。
- 4 桥基范围内岩溶发育特别复杂且具备弹性波层析成像施工条件时，可采用电磁波层析成像和弹性波层析成像综合应用。
- 5 物探测孔布置应符合下列规定：
 - 1) 钻孔深度要超过勘探深度 5m~10m；
 - 2) 保证至少有一对钻孔剖面跨过可能异常体；
 - 3) 对复杂桥基，应尽量利用多对详勘钻孔，开展三维层析成像，从三维空间上圈定异常体分布；
 - 4) 地质雷达布线按照墩位横断面布 3 条测线并钻孔验证。

8.5.3 桥梁发育地段的桥基应根据墩台位置进行勘探。揭示岩溶时，应根据基础类型和岩溶发育程度布置勘探点，桥梁单个墩台钻孔数量按表 8.5.3 执行。发现对工程有影响的溶洞后，应增加钻孔，必要时结合钻孔物探，查明溶洞范围。

表 8.5.3 详勘单幅桥桥基钻孔数量表

墩台及基础形式		岩溶发育程度		
		弱发育	中等发育	强发育、极强发育
单个桥墩	桩基础	1~2	隔桩布置、桩数一半	逐桩钻探
	扩大基础	1	2~3	4~6
单个桥台	桩基础	2~3	隔桩布置、桩数一半	逐桩钻探
	扩大基础	2	3~5	6~8

8.5.4 桥梁测试与观测应符合本规程第 7.5.5 条的规定，必要时，特大桥、特殊性结构桥应增加管波测试工作。

8.6 隧道

8.6.1 隧道详勘除应符合第 8.1.1 条的规定外，尚应查明影响隧道方案的岩溶，重点查明岩溶洞穴的分布、基本形态、规模大小，洞内充填物的性状，岩溶地下水的水位标高、富水程度、补给、排泄条件，提供岩土参数，并进行分析、评价。

8.6.2 物探应符合下列规定：

1 岩溶发育的隧道应采用综合物探圈定异常类型、异常范围，再采用钻探验证物探异常，利用钻孔进行孔内测试、孔内成像等物探工作，查明岩溶发育特征及规模。

2 探测范围内岩溶发育特别复杂且具备弹性波层析成像施工条件时，可采用电磁波层析成像和弹性波层析成像综合应用。

3 钻孔层析成像的钻孔应尽可能与详勘钻孔结合，一孔多用，钻孔深度要超过隧道底面勘探深度 10m 以上，保证测试剖面跨过可能异常体。

4 物探工作布置应符合第 7.6.3 条的规定，并结合岩溶发育程度，进行适当加密。

8.6.3 钻探应符合下列规定：

1 应结合隧址岩溶发育程度，在初勘的基础上，对勘探点进行加密。

2 除在隧道洞口地段布置钻孔外，不同含水层段及断裂破碎带、褶皱轴部、可溶岩与非可溶岩接触带和已判定的岩溶发育带应布置代表性钻孔，查明岩溶洞穴和岩溶水；综合利用钻孔进行物探、水文地质试验和地下水动态观测。

3 岩溶地区地表水以下和地下水位以下隧道勘察的钻孔除用于探明隧址地层含水层、隔水层性质以外，还应用于物探查明岩溶特征、测试试验查明地下水流向、流速，测试各种水文地质参数。

4 钻孔布置除应符合第 7.6.4 条的有关规定外，尚应符合下列规定：

1) 岩溶弱发育路段按 80m~100m 间距布置，岩溶中等发育路段按 60m~80m 间距布置，岩溶强发育路段按 40m~60m 间距布置；隧道洞口应根据岩土条件复杂程度布置 3 条至 5 条横断面；

2) 在隧道底板 10m 以下、隧道底板以上 3 倍洞径范围内存在岩溶的洞身段，

宜按 40m 间距布置钻孔。

8.7 资料编制

8.7.1 详勘阶段地质勘察资料的编制除满足一般地区勘察资料要求外，还应包括综合资料和工点资料。

8.7.2 综合资料应提交以下文件，并满足相应要求。

1 工程地质勘察报告，应阐明岩溶的工程地质条件、工程地质分析，说明岩溶发育程度，评价建设场地适宜性，提出处理原则，建议施工阶段需进行岩溶勘察的地段和工作内容；

2 全线工程地质图，比例尺为 1: 10000~1: 20000，应补充修改初勘成果；

3 详细工程地质图，比例尺为 1: 2000~1: 5000，应补充修改初勘成果；

4 详细工程地质纵断面图，比例为横 1: 10000，竖 1: 200~1: 1000，应表明岩溶发育情况，特别是溶洞位置。

8.7.3 工点资料除对初勘已有的工点进行补充、修改外，尚应补充以下资料，并满足相应要求。

1 工程地质纵断面图，比例尺为（水平）1: 500~1: 2000，（垂直）1: 100~1: 500，应表明岩溶发育情况，特别是溶洞位置；

2 岩溶地区工程地质横断面图，比例尺为 1: 200~1: 500，应表明岩溶发育情况，特别是溶洞位置；

3 岩溶洞穴实测成果图，比例尺为 1: 100~1: 500，应填绘建筑物测点位置、测图导线、断面位置，溶洞平、断面投影形态，溶洞充填情况及充填物性质，围岩裂隙产状及充填情况，地下水；说明测图情况和对溶洞的认识和分析；

4 某些重要溶洞的工程地质纵、横断面图；

5 地质测绘、勘探、试验等资料。

9 工程地质评价

9.1 一般规定

9.1.1 在岩溶场地进行工程建设时，应查明场地的岩溶发育程度、岩溶发育区与建（构）筑物的空间位置关系，分析评价土洞、岩溶洞隙、岩溶水等对工程建设及环境的影响。

9.1.2 岩溶工程地质评价内容如下：

- 1 工程地质选线评价；
- 2 当公路地基持力层影响范围内存在岩溶洞穴时应进行洞体稳定性评价；
- 3 对覆盖型岩溶地区路基应进行岩溶地面塌陷预测评价；
- 4 隧道围岩分级；
- 5 当隧道存在岩溶涌水问题是应进行隧道岩溶涌水量评价；
- 6 当公路建设中岩溶问题可能对环境造成影响时应进行环境影响评价。

9.1.3 岩溶评价应遵循从面到点，先定性后定量，定性与定量相结合的方法，综合考虑岩溶地基与岩溶洞穴的稳定性，再结合具体工程特点进行综合评价。

条文说明：

初勘阶段，一般先进行定性判断，根据岩溶场地稳定性分区标准进行公路线路场地的分区评价。根据勘察资料，确定不稳定区。

详勘阶段，在查明地基岩溶情况的基础上，要获取岩体完整性和岩石饱和单轴抗压强度资料，再根据公路岩溶地基岩体基本质量分级标准，确定地基岩体基本质量，根据岩体基本质量，结合构造物形式，划分稳定地基和不确定地基。对不稳定地基岩溶顶板，根据岩体基本质量，确定岩体计算参数，进行岩体稳定性评价。在条件许可的情况下，对于基本质量等级为Ⅲ级、Ⅳ级的岩体，宜进行溶洞变形监测或荷载试验，以判断岩溶顶板的稳定性。对于基本质量等级为Ⅴ级的岩体不宜采用上述方法进行定量评价，宜进行原位荷载试验。

对人能进去的溶洞，应通过测量获取岩溶洞穴的形态参数，调绘岩溶顶板裂隙发育情况，确定半定量计算模型进行稳定性评价，安全系数可取低值。计算结果宜通过数值计算进行验证。对于人不能进去的溶洞，通过钻孔与物探相结合的方法来探明溶洞形态，根据岩体基本质量确定半定量计算模型进行稳定性评价，根据钻孔与物探方法的探测精度，分别取不同的安全系数。计算结果宜通过数值计算进行验证。

9.1.4 在场地岩溶勘察和相应岩溶工程地质问题分析评价的基础上，提出岩溶处理措施建议，岩溶处理原则及措施见附录 C（岩溶处理主要工程措施）。

9.2 工程地质选线

9.2.1 岩溶区根据地质条件选线应符合下列规定：

1 路线应避免或以大角度通过岩溶极强发育地带、地面塌陷或土洞分布密集地带，宜选择在非岩溶化地区或岩溶弱发育地带通过。

2 路线应避免沿断裂带、可溶岩与非可溶岩的接触带、有利于岩溶发育的褶皱轴部布线，避开断裂的交汇处、岩溶水富集区及岩溶水排泄区。

3 路线通过孤峰平原区，应选择覆盖层较厚、地下水埋藏较深的地段通过，宜避开多元土层结构、地表水位与地下水位变化幅度较大、地下水埋藏较浅及抽取地下水后可能形成下降漏斗的地段。

4 路线通过峰林谷地、峰丛洼地及溶丘洼地区，宜绕避垭口，路线设计高程应高于岩溶水的最高洪水位。

5 路线通过河谷区，路线宜在岩溶弱发育的一岸布设，避开谷坡上的岩溶负地形和无水溶洞群，避免路线设计高程处于岩溶发育强烈的水平径流带内。

6 越岭地区线路应避免岩溶负地形和岩溶水排泄区；线路高程宜在垂直渗流带中，不宜在季节交替带及水平径流带中；处于水平径流带及深部缓流带中的隧道宜采用人字坡。

7 路线应避免土洞、地面塌陷发育的不良地质地段。

编写说明：

《公路工程地质勘察规范》7.1.3。

9.2.2 线路跨越暗河时，应符合下列规定：

1 线路标高低于暗河时，宜炸开顶板，设桥涵通过；使用长隧道从暗河下方通过时，应采取措施避免涌突水事故的发生。

2 线路标高接近暗河时，应将线路选在暗河出口下游稳定地区通过，或将暗河顶板炸开设桥涵通过。

3 线路标高高于暗河时，如暗河顶板有一定厚度，可用低填或浅挖方通过；如顶板岩层厚度太薄，应加固路基下方暗河空洞。

4 在岩溶地区选线时，应考虑到由于水文地质条件的改变而对当地居民生活与农田灌溉用水的影响。

编写说明：

参考《铁路工程地质手册 第一版》第五篇第二节中关于线路跨越暗河时位置的确定。

9.3 岩溶场地稳定性评价

3.2.3 岩溶场地稳定性可分为不稳定场地、基本稳定场地、稳定场地三类，应综合考虑岩溶发育程度、岩溶水条件、存在及可能发生岩溶塌陷现象等因素。

条文说明：

极不稳定场地是桥梁应避让或跨越的地段，不稳定场地桥梁经过时不宜采用浅基础，中等岩溶发育区场地要在地基评价的基础上采取相应处理措施。

岩溶场地的工程地质分区是以场地的稳定条件作为基本原则。岩溶场地的稳定性除与岩溶有关外，还受其它不良地质现象等因素制约，因此，岩溶场地的稳定性评价要综合考虑各种影响因素。

9.3 岩溶路基地基稳定性评价

9.3.1 当公路路基、隧道岩溶地基存在下列情况之一时，可判定为未经处理不宜作为地基的不利地段：

1 存在洞体或溶洞群，洞径大、浅部岩溶在第四纪覆盖土层中有土洞或松散、饱和砂、砾石层直接覆盖在溶洞之上，且不稳定的地段；

- 2 土层较薄、土中裂隙发育,地表无植被或为新挖方区,地表水入渗条件好,其下基岩有通道、暗流或呈负岩面的地段;
- 3 埋藏的漏斗、槽谷等,并覆盖有软弱土体的地段;
- 4 岩溶覆盖土层为粘性土、岩溶地下水在基岩面上下交替变化、上覆土层易形成土洞、地面有可能塌陷的地段;
- 5 岩溶水通道堵塞、排泄不畅或涌水,可能暂时淹没的地段;
- 6 在地下水位高于基岩表面的岩溶地区、由于人工降低地下水易引起土洞或地表塌陷地区。

条文说明:

土洞的顶板强度低,稳定性差,且土洞发育速度一般很快,因此其对地基稳定性的危害大。故在岩溶发育地区的地基稳定性评价中应对土洞给与高度重视。当遇所列情况时,宜建议绕避或舍弃,否则将会增大处理的工程量,在经济上是不合理的。综合两者,力图从两个相反的侧面,在稳定性评价中,从定性上划出去了一大块,而余下的就只能留给定量评价去解决了。

9.3.2 当公路路基、隧道岩溶地基具备下列条件之一时,可不考虑岩溶稳定性的不利影响:

- 1 基础置于微风化硬质岩石上,近旁为延伸较大裂缝宽度小于 1m 的竖向裂隙和落水洞;
- 2 基础底面下土层的厚度大于地基压缩层厚度,且不具备形成土洞的条件;
- 3 基础底面下土层的厚度小于地基压缩层厚度,但洞内为密实的沉积物充填而又无被水冲蚀的可能;
- 4 基础尺寸大于溶洞平面尺寸,且有足够的支承长度;
- 5 微风化硬质岩石中,顶板厚度接近或大于洞跨,即厚跨比接近或大于 0.5。

条文说明:

第 9.3.1 条从不利角度,归纳出了一些条件,本条根据已有经验,提出几种对工程有利的情况。当前岩溶评价仍处于经验多于理论、宏观多于微观、定性多于定量阶段。本条从有利和肯定的角度提出当符合所列条件时,可不考虑岩溶稳定影响的几种情况。

9.3.3 当岩溶地基不满足 9.3.2 条的条件时，应进行洞体地基稳定性分析，并符合下列规定：

- 1 洞隙稳定性评价方法有定性评价、半定量评价和定量评价，应采取先定性后定量的原则进行评价；
- 2 顶板不稳定，但洞内为密实堆积物充填且无流水活动时，可认为堆填物受力，按不均匀地基进行评价；
- 3 当能取得计算参数时，可将洞体顶板视为结构自承重体系进行力学分析；
- 4 有工程经验的地区，可按类比法进行稳定性评价；
- 5 在基础近旁有洞隙和临空面时，应验算向临空面倾覆或沿裂面滑移的可能；
- 6 当地基为石膏、岩盐等易溶岩时，应考虑溶蚀继续作用的不利影响。

条文说明：

本条提出了如不符合第 9.3.2 条规定的条件需评价稳定性时，需考虑的因素和方法。在解决这一问题时，关键在于查明岩溶的形态和计算参数的确定。当岩溶体隐伏于地下，无法量测时，只能在施工开挖时，边揭露边处理。

9.3.4 当岩溶地基存在下伏溶洞且无法规避时，应进行溶洞顶板的稳定性评价，评价方法宜按本规程附录 D 的有关规定执行。经验算，当溶洞顶板有足够的厚度时，可不考虑溶洞对地基稳定性的不利影响；当溶洞顶板厚度不足时，应按本规程第 9.1.4 条的有关规定进行地基处理或采用桩基础穿过下伏溶洞并嵌入完整基岩一定深度。

条文说明：

由于现行勘探手段一般难以查明岩溶特征，对岩溶稳定性的评价，仍然是以定性和经验为主。定性评价主要是根据已查明的地质条件，确定岩溶发育和分布规律，综合考虑影响溶洞稳定性的各种因素（地质构造、岩层产状、岩性和层厚、洞体形态及埋藏情况、顶板情况、充填情况、地下水等）和基底荷载情况，并结合已有的经验进行分析比较，作出稳定性评价。

岩溶地基稳定性定性评价方法主要有综合分析法、经验比拟法和模糊综合评判法。综合分析法和经验比拟法是综合考虑地层岩性、地质构造、地下水、洞体表面特征、洞底堆积物等因素，将岩洞稳定性分为稳定、较稳定、稳定性差、不

稳定等四级，可按表 D.0.1 进行溶洞稳定性分级评价。

但定性评价主观性较大，分析结果的可靠性较低，主要适用于初勘阶段的场地选择及一般工程的地基稳定分析评价，当对较重要或重要工程的评价无法满足岩溶区地基稳定性评价的要求时，应考虑采用半定量和定量评价方法。

半定量评价方法通常是将单层溶洞简化为梁、板和拱模型进行分析，通过对溶洞顶板安全厚度的估计来评价溶洞顶板的稳定性，相比定性评价方法，分析准确合理，应用性强，但在安全系数的选取上有较大的计算随意性，同时也未考虑节理、裂隙等不稳定结构面对岩体力学行为的控制作用。

定量评价方法是在取得详细的地质资料和岩土体准备的物理力学参数的情况下采用的评价方法，但因涉及的岩土体力学参数和边界条件多且不易确定，一般先由假定条件建立相应的物理力学模型或数学模型，再进行分析计算，依据结果对溶洞顶板稳定性做出评价和判断。定量评价方法的计算结果准确性非常高，但计算过程往往较为繁琐。除了所述定量评价方法外，最常用的还有有限元数值模拟法，其准确度高，应用范围广泛，且已在一些工程中得到应用。但由于有限元数值法使用门槛较高，无法制定统一评价标准，工程实践中有应用条件的可根据工程实际需求选择使用。

本规范提供定性-半定量-定量的综合评价方法，其中，定性评价用于场地选择和公路一般构筑物（路基、小桥、涵道等）的评价；半定量评价和定量评价则需要在查明地质条件的情况下，按照工程重要程度和技术条件酌情选用。有工程案例的可参照类似工程经验进行地基稳定性评价。

编写说明：

在附录 D 中，按定性-半定量-定量三步走详细介绍稳定性评价方法。

征求意见稿中，重点对评价方法的推广适用性进行讨论，删除部分不适合或存在争议的评价方法，增加一些新方法、新技术，力求准确无误且能够形成地基稳定性评价的成套方法。

定性方法中，选取岩溶地基稳定性分级方法。《岩溶地区建筑地基基础技术标准》中使用岩溶地基稳定性评价表进行定性评价，表中对不同评价因素分为“对稳定有利”和“对稳定不利”两种评价指标，在实际使用中过于模糊；本规范中综合编者工程经验及广东省《岩溶地区建筑地基基础技术规范》溶洞稳定性分级

表，制订岩溶地基稳定性分级，共分4级。

半定量评价在工程在相对应用广泛一些，本规范收集了常用的坍塌平衡法、抗弯抗剪验算法、受剪切极限平衡法和成拱分析法，并添加了应用条件相对苛刻的试验测试法，在征求意见稿中希望得到更多有益的意见。

定量评价方法则选取了稳定系数法和弹塑性分析法。目前，定量方法由于地质复杂性及勘察技术手段所限，在各现行规范中均不推荐使用（部分地方标准中有少许规定）。但桥梁在公路中的重要等级高，岩溶对桥梁稳定性的影响不可忽视，评价层次和工作量也理应加深加大。同时，考虑到勘察技术的改进和吸收新方法新技术的目的，在征求意见稿中列出2种可行的定量评价方法进行意见征求。

另一种较常用的定量评价方法为有限元模拟，在学术中应用较广，但技术门槛较高，无法形成统一的使用方法，在征求意见稿中仅对有限元法应用要求进行规定。

9.3.5 对位于溶槽、漏斗、溶沟、岩石陡坎近旁的基础，应考虑地基滑移稳定性，并符合下列规定：

1 当岩体中有倾向临空面的结构面时，应验算地基滑移稳定性，其稳定性验算方法宜按本规程附录E的方法计算。软弱结构面的抗剪强度宜由试验确定，初步确定时，可按现行《建筑边坡工程技术规范》（GB50330）表4.3.1选用。

2 当无倾向临空面方向的结构面时，可根据岩体抗剪强度及现行《建筑边坡工程技术规范》（GB50330）表4.3.3、4.3.4边坡岩体内摩擦角折减系数及等效内摩擦角标准值进行稳定性验算。

条文说明：

在石芽地基中，常存在溶洞、土洞、具有临空面的出露岩体或单个石芽，也常存在有沿软弱结构面滑动和场地滑坡的可能性。由于岩体或石芽与周围土体的抗剪强度和岩体内结构面的抗剪强度一般不能同步发挥，故附录E计算式中为考虑岩体和石芽与周围土体的作用，同时也偏于安全。另外，出露基岩和石芽的稳定验算未考虑滑动岩体受转动力矩的影响，即破坏只是考虑滑动破坏，因此，对于具有陡倾不连续面的陡坡基岩（石芽）还应考虑可能产生的倾倒崩塌破坏。

编写说明：

现行国标《岩溶地区建筑地基基础技术标准》、《建筑地基基础设计规范》和地方标准《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》、《广西岩溶地区建筑地基基础技术规范》等均对岩溶地基的滑移稳定性进行了规定,本条综合各标准整理得到。

9.3.6 在地下水强烈活动于岩土交界面的地区或有土洞分布的场地,应分析土洞的成因和发生、发展趋势,评价土洞对地基稳定性的影响,并应考虑工程建设中岩溶水排泄途径改变对土洞发育的影响。

条文说明:

当勘探查明,场地范围内有土洞分布时,表明地基下岩土界面附近地下水活动较频繁,为此,在进行土洞的详细勘探的同时,应开展系统的场区水文地质调查工作,对地下水环境条件及变化趋势进行全面调查分析。

编写说明:

现行国标《建筑地基基础设计规范》在正文中对土洞的综合分析与处理进行了规定,并在条文说明中特别强调了土洞的存在及发育对地基稳定性的不良影响。桥梁相对常规建筑来说,设计使用年限往往更久,且多位于河谷、沟壑等岩溶强发育地区,土洞的存在可能短期对桥梁安全不构成威胁,但土洞继续发育扩大则可能威胁到桥梁的安全,故在评价过程中不可忽视土洞的存在及发育对地基稳定性的潜在威胁。

由于本规范在 9.4.9 对岩溶处理(包括土洞)进行了详细规定,故本条文仅对土洞的评价进行要求,内容参考《贵州省建筑岩土工程技术规范》。

9.3.7 覆盖型岩溶地区路基地面塌陷预测评价应包括下列内容:

1 地下水位高于基岩表面的岩溶地区,应注意人工降水引起土洞进一步发育或地表塌陷的可能性。塌陷区的范围及方向可根据水文地质条件和抽水试验的观测结果综合分析确定。在塌陷范围内不应采用天然地基,并应注意降水对周围环境和建(构)筑物的影响。

2 公路路基建设场地应选择在地势较高的地段。

3 公路路基建设场地应选择在地下水最高水位低于基岩面的地段。

4 公路路基建设场地应与抽、排水点有一定距离,路基应设在降落漏斗半径之外;若在降落漏斗半径以内时,需控制地下水降深值,使动水位不低于上覆土

层底部，或稳定在基岩面以下，即不使其在土层底部上下波动。

5 公路路基一般应避开抽水点地下水主要的补给方向；但也应注意，当地下水呈脉状流（如可溶岩呈狭长条带状分布）时，下游亦可能产生塌陷。

条文说明：

岩溶塌陷评价与区划采用定性为主、定量为辅的方法进行，统计分析方法可按表 9.3.7 进行。

表 9.3.7 岩溶地面塌陷预测分析参考标准

基本条件	主要影响因素	因素的水平	指标分
水—塌陷动力	水位（40分）	水位能在土、岩界面上下波动	40
		水位不能再土、岩界面上下波动	20
覆盖层—塌陷物质	土的性质与土层结构（20分）	粘性土	10
		砂性土	20
		风化砂页岩	10
		多元结构	20
	土层厚度（10分）	≤10m	10
		10~20m	7
>20m		5	
岩溶—塌陷与储运条件	地貌（15分）	平原、谷地、溶蚀洼地	15
		谷坡、山丘	5
	岩溶发育程度（15分）	漏斗、洼地、落水洞、溶槽、石芽、竖井、暗河、溶洞较多	10~15
		漏斗、洼地、落水洞、溶槽、石芽、竖井、暗河、溶洞稀少	5~9

注：1. 累计指标≥90为极易塌陷区，71~89为易塌陷区，≤70为不易塌陷区；

2. 近期产生过塌陷区，累计指标分应为100；

3. 地表降水入渗致塌陷区，水的指标分为40。

9.4 岩溶桥梁地基稳定性评价

9.4.1 当桥梁地基为坚硬或较坚硬的岩石且满足下列条件之一时，可不考虑岩溶对地基稳定性的不利影响：

1 当基底面积大于溶洞平面尺寸时，对于基本质量等级为Ⅰ级岩体中的溶洞，其基底下的溶洞顶板岩石厚度大于或等于0.3倍洞穴跨度，即厚跨比大于或等于0.3；Ⅱ级岩体中的溶洞，其溶洞顶板厚跨比大于或等于0.4；Ⅲ级岩体中的溶洞，其溶洞顶板厚跨比大于或等于0.5。

2 当基底面积小于溶洞平面尺寸时，对基本质量等级为Ⅰ级或Ⅱ级的岩体，溶洞顶板厚跨比大于或等于2。

编写说明：

按照标准话语“满足下列条件之一时，可不考虑岩溶稳定性的不利影响”。对于坚硬程度较高的岩石，顶板完整且达到一定厚度，往往可以作为桥梁地基的持力层。

标准内容基于编者工程经验，并参考国标《建筑地基基础设计规范》和地方标准《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》、《广西岩溶建筑地基基础设计规范》修订。

9.4.2 当公路一般构造物（小桥、涵洞和通道）地基不满足 9.4.1 的条件，但具备下列条件之一时可不考虑岩溶对地基稳定性的不利影响：

1 基础底面以下土层厚度大于独立基础宽度的 3 倍或条形基础宽度的 6 倍，且不具备形成土洞或其他地面变形的条件。

2 基础底面与洞体顶板间岩土厚度小于 1 规定的情况，但符合下列条件之一时：

- 1) 洞隙或岩溶漏斗被密实的沉积物充填且无被水冲蚀的可能；
- 2) 洞体为基本质量等级为 I 级或 II 级岩体，顶板岩石厚跨比大于或等于 1；
- 3) 洞体较小，基础底面大于洞的平面尺寸，并有足够的支承长度；
- 4) 宽度或直径小于 1.0m 的竖向洞隙、落水洞近旁地段。

编写说明：

国标《建筑地基基础设计规范》的条文规定限定于“地基基础设计等级为丙级且荷载较小的建筑物”，国标《岩土工程勘察规范》的相关条文限定于“二级和三级工程”，具体到桥梁，在本征求意见稿中使用“公路一般构造物（小桥、涵洞和通道）”代替（本规范未对基础等级或工程等级进行规定），条文与《岩土工程勘察规范》规定一致。

9.4.3 当岩溶地基不满足 9.4.1 和 9.4.2 的条件时，应进行地基稳定性评价，评价原则和方法应符合本规程第 9.3.3~9.3.6 的有关规定。在进行桥梁地基稳定性评价时，宜根据工程重要性，适当增加勘察和评价的工作量，结合定性-半定量-定量评价方法进行综合评价。

条文说明：

桥梁岩溶地基和路基的评价原则和方法一致，但评价要求不同。对于中、大

或特大桥梁地基，定性评价通常无法满足岩溶评价的要求，结合定性-半定量-定量评价有利于对地基稳定性进行全面认识，确保工程安全性。

9.4.4 对稳定性不良地段且无法规避时，应因地制宜采用适当的工程治理措施，工程治理措施除符合本规程第 9.1.4 的有关规定外，还应符合以下规定：

1 对不稳定的岩溶洞隙、石芽或地下石林密布、溶沟溶槽特别发育的地段，应以揭露为主，应采用清除换填、浅层楔状填塞、洞底支撑和梁板跨越等地基处理方法。

2 对存在隐伏土洞、地表塌陷或预测地表可能产生塌陷变形的地段，宜采用地表截流、防渗堵漏、挖填灌堵岩溶通道和通气降压等方法进行处理。必要时，应采用梁、板和拱跨越，跨越结构应有可靠的支承面。对于重要性等级较高的桥梁地基，宜优先采用桩基础。

3 当选用桩基时，应使桩端全断面牢固嵌入基岩一定深度。

4 对场地上的岩溶井、泉水和山麓斜坡地段的地下水及其排泄通道，应在查明季节性动态特征的基础上，采用“疏导引流勿堵”的原则处理。

条文说明：

经工程验证，岩溶地基经过恰当处理后，可以作为桥梁地基。在公路线路确定后，桥梁位置常常无法避开岩溶发育区，采用合理可靠的措施对岩溶地基进行处理并加以利用，或应用桩基穿过岩溶发育层嵌入岩溶弱发育或不发育的基岩中，能够达到桥梁安全使用的目的。

1 岩溶处治应在详细查明岩溶问题的基础上，制订对应的自治措施；在遇到具体问题，可参照附录 D 选取地基处理办法。

2 在工程中，应重视土洞的存在对地基稳定性的不利影响。土洞的稳定性评价方法与溶洞相似，但需注意土洞相较溶洞有继续发育的可能性，以及工程建设中岩溶水排泄途径改变对土洞发育的影响。

3 桥梁在公路建设中重要等级相对较高，在岩溶发育地区，桩基础可以有效避免浅层岩溶对地基稳定性的不良影响。桩长、埋置深度及嵌岩深度等应符合现行 JTG D63 《公路桥涵地基与基础设计规范》。当使用小直径桩时，应设置承台。桩身穿越溶洞顶板的岩体，由于岩溶发育的复杂性和不均匀性，顶板情况一般难以

查明，通常情况下不计算顶板岩体的侧阻力。

4 地下水处治应以“疏导”为主，应注意工程建设对地下水排泄的影响。

编写说明：

岩溶治理措施的原则性规定主要参考国家标准《建筑地基基础设计规范》和《火力发电厂岩土工程勘察规范》，共计四条。详细处理措施在附录 D 中详细列出，附录引自地方标准《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》，其总结较为完善且经过工程验证，征求意见过程中可对附录内容的准确性进一步完善。

9.5 隧道围岩分级

9.5.1 岩溶区隧道围岩级别划分除应遵循《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)有关规定外，尚应根据场区岩溶发育情况对岩体基本质量质量指标进行修正，并以修正获得的工程岩体质量指标值按表 9.5.4 确定围岩分级。

条文说明：

隧道围岩分级是设计和施工的基础，现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)中采用了国标 BQ 的分类方法，隧道围岩分级方法考虑了围岩地质条件、力学特征、地下水条件等多因素，采用了定性和定量分析相结合的方式较好地解决公路隧道围岩分级问题，并在公路隧道得到了较好的应用。

然而，岩溶形态对隧道围岩的稳定性影响显著，大量隧道工程案例和研究反映岩溶区隧道施工中存在大量围岩分级变更，隧道施工及运营过程中常出现围岩掉块、坍塌、结构失稳、涌水突泥等灾害现象，带来了重大安全危害和经济损失。

现行规范中《工程岩体分级标准》(GB/T 50218-2014)第 5.1.5 条规定“对易溶性等特殊岩类应根据其特殊的变形破坏特性、岩溶发育程度及其对工程岩体的影响，综合确定岩体级别”。《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008)第 5.1.5 条中第 N.0.10 条规定“对喀斯特化岩体的地下洞室围岩稳定性应专门研究”。《水电工程岩溶工程地质勘察规程》(NB/T 10075-2018)第 6.4.15 条提出对岩溶围岩类别划分有关规定。公路、铁路规范中提及围岩分级对特殊条件的围岩不适用。对发育岩溶的岩体亦属于特殊性围岩，围岩级别的划分与现行规范有一定差异。因此对岩溶区围岩分级评价应结合岩溶进行修正，才能更为客观地对隧道围岩进行

评价。

9.5.2 岩溶隧道围岩基本质量修正值[BQ]可按照式（9.5.2）计算：

$$[BQ] = BQ - 100(K_0 + K_1 + K_2 + K_3) \quad (9.5.2)$$

式中：[BQ]——围岩基本质量指标修正值；

BQ——围岩基本质量指标；

K_0 ——岩溶影响修正系数；

K_1 ——地下水影响修正系数；

K_2 ——主要软弱结构面产状影响系数；

K_3 ——初始应力状态影响修正系数。

其中，围岩基本质量指标、地下水影响修正系数、主要软弱结构面产状影响系数及初始应力状态影响修正系数按照《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)确定，岩溶影响修正系数按表 9.5.2 确定。

表 9.5.2 岩溶影响修正系数

BQ	>450	450~351	350~251	<250
岩溶发育程度				
弱发育	0	0	0.1~0.2	0
中等发育	0.1	0.2~0.3	0.1~0.2	0
强发育	0.2	0.3~0.4	0.5~0.6	0.1
极强发育	0.3~0.4	0.5~0.7	0.8~1.0	0.5

注：岩溶发育程度评定可按本规程第 3.2.3 条确定。

条文说明：

国内外对岩溶围岩稳定性及分级做了一定探索和研究工作，本规范结合工程实践，总结了已有的成果，考虑到与现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)协调适应，岩溶隧道围岩分级评价是在目前公路隧道围岩分级评价的基础上进一步进行折减修正，以合理评价岩溶区围岩的状态。

岩溶发育主要受岩性、地质构造、地下水循环条件、地表水与气候、地形地貌等因素控制。岩溶发育程度是对隧址区的综合评价，应考虑岩溶区隧道围岩可能遭受岩溶裂隙、岩溶水及溶洞等的综合影响，结合岩溶发育形态特征根据条 3.2.3 进行定性判断。

李苍松、靳晓光、江杰等人对岩溶区围岩分级曾做了系统的研究，取得了较好的分级评价准确性，此类方法较适用于施工阶段，在考虑岩溶定性评价指标和

岩溶定量评价指标相结合方法，定性指标主要与岩溶发育程度相对应，定量指标则与岩溶发育不同形态、溶洞空间分布、岩溶充填物及地下水影响因素对岩体基本质量指标进行修正，而勘察设计阶段，相关指标无法准确评价，且难以获取，围岩分级结果准确性难以保证，故不采用此类办法。

9.5.3 岩溶区围岩分级应符合下列规定。

1 对溶隙、溶蚀破碎带、溶蚀断层带、溶蚀碎裂岩体、有充填的洞穴等，应按其性状单独分段进行分类。

2 对岩溶发育程度为不发育或微弱发育，地表无溶洞、落水洞、溶管、溶隙等岩溶现象，仅发育有溶孔等微弱岩溶现象，可不考虑岩溶对围岩类别的影响。

3 对无洞隙或小型洞隙周边岩体完整、无充填、无水者，可不考虑岩溶对围岩类别的影响。

4 对充填型溶洞，除小型者外，宜按岩溶充填物的岩土体性状、强度等确定围岩类别。

5 对中型至巨型溶洞、集中涌水点，应作为特殊岩溶洞段专门处理。

6 隧址区发育溶洞分布在1倍洞径内时，宜适当降低围岩类别。

7 隧址区对溶洞分布在3倍洞径内外，可不考虑岩溶对围岩类别的影响。

条文说明：

本条规定采用岩溶修正围岩基本质量指标的限制条件。特别对岩溶不发育或微弱发育围岩的质量分级结果应与一般岩体围岩分级结果一致，不作岩溶围岩定量指标折减以减少隧道施工阶段围岩分级负变更数量并控制工程投资造价。

岩溶充填物物理力学特性差，加之隧道施工扰动及地下水动力条件影响，极易产生隧道塌方、突泥及涌水等灾害。其危害影响程度与岩溶填充物物理力学特性、充填物规模及与隧道空间分布关系等有关。

溶洞空间分布对隧道围岩稳定性影响与诸多因素有关，根据谭代明、曹茜、赖永标等人研究，特别是溶洞与隧道间距离，溶洞的存在以及其大小变化对远离溶洞侧的隧道围岩塑性区变化影响较小，而对靠近溶洞侧的隧道相应位置处的塑性区影响较大。当溶洞与隧道间净距达到一定程度时，溶洞对隧道影响有限，可不考虑岩溶对围岩类别的影响。溶洞洞径规模可按条3.2.3进行判定。

9.5.4 在工可阶段，隧道围岩分级可采用定性或工程类比方法确定。在初步设计、施工图设计阶段，隧道围岩分级应结合定性分析与定量计算综合评价确定。岩溶隧道围岩分级按表 9.5.4 确定。

表 9.5.4 岩溶隧道围岩级别划分

基本质量级别	岩溶形态定性特征		岩体基本质量指数 [BQ]
	岩溶发育情况	钻孔线岩溶率	
I	以晶孔、溶孔、溶蚀麻面等为主，局部见少量溶隙，但溶蚀轻微，层面与裂面大多闭合，岩体新鲜完整。	<1%	>550
II	以溶隙为主，部分形成串珠状洞穴或溶蚀宽缝，一般溶宽 0.01m~0.5m，宽缝个别可大于 1m，基岩较新鲜完整。	一般在 1%~3%	550~451
III	以溶隙、溶沟、溶槽为主，也有部分裂隙溶井(洞)，部分沟槽交叉成网络状；溶宽常达 0.2m~3m，溶沟溶槽之间地面形态基本可辨，但基岩风化多泥锈面。	一般在 5% 以上	450~351
IV	以溶管、裂隙状溶洞、溶井、管道状溶洞为主和部分溶隙、宽缝等组合诚意管道主要汇水中心的溶蚀系统。除浅部洞穴溶蚀破碎风化多泥外，稍深洞穴周围岩体一般完整较完好。	一般在 10% 以上	350~251
V	由分枝很多的管洞溶蚀系统或纵横交错的沟槽、洞穴组合成网络状、地基成为大小不一的凹凸零乱的石丘、石柱或不规则割离体，岩溶风化破碎多容泥易松动。	一般在 10% 以上	≤250
	沿断层、断层交汇带和构造挤压带等形成的构造破碎和溶蚀的混合类型，宽 3 米以上至数十米。由大块岩石、角砾碎屑和泥质组成。	一般在 15%~40% 以上	

注：1.围岩岩体主要定性特征可按照《公路工程地质勘察规范》(JTGC20-2011)确定。

2.当定性特征与岩体基本质量指标确定级别不一致时，应进一步补充测试、重新观察。

9.5.5 在施工过程中，应结合开挖揭露岩溶特征情况、监控测量及超前地质预报等相关信息，对已划分的隧道围岩分级进行检验及动态修正。

条文说明：

由于岩溶发育区地质情况的复杂性、物探解译精度不足及勘察水平限制，岩溶隧道在勘察设计阶段很难准确评价岩溶发育情况，导致施工过程中围岩实际情况与分级结果存在较大差异。因此，岩溶隧道围岩应采用动态划分，实现岩溶隧道的信息化施工，即在隧道施工前期勘察设计的基础上，施工过程中综合利用各种预报手段和分级方法对已有围岩分级结果进行不断地检验、完善及修正，提高围岩分级结果的准确性，为后续的支护设计和未开挖段围岩级别预测提供依据，确保围岩稳定性及施工期安全。

9.5.6 在施工图设计及施工阶段可对III、IV、V基本级别再进行亚级划分。亚级划分宜符合表 9.5.6 的规定。

表 9.5.6 岩溶隧道围岩亚级划分

基本质量级别	III		IV			V	
	III1	III2	IV1	IV2	IV3	V1	V2
岩体基本质量指标	450~401	401~351	350~311	311~276	275~251	250~211	≤210

9.5.7 岩溶围岩的自稳能力宜根据围岩变形量测与理论计算进行评价，也可按表 9.5.7 的规定予以判断。

表 9.5.7 各级围岩的物理力学指标

围岩级别		自稳能力
基本级别	亚级	
I	/	跨度 > 20m, 可长期稳定, 偶有掉块, 无塌方
II	/	跨度 10m~20m, 可基本稳定, 局部可发生掉块或小塌方; 跨度 < 10m, 可长期稳定, 偶有掉块
III	III ₁	跨度 > 18m, 可发生中~大塌方; 跨度 10m~18m, 可稳定数月, 可发生局部块体位移及小~中塌方; 跨度 < 10m, 基本稳定
	III ₂	跨度 > 14m, 可发生中~大塌方; 跨度 7m~14m, 可暂时稳定, 可发生小~中塌方; 跨度 < 7m, 基本稳定
IV	IV ₁	跨度 > 9m, 可发生中-大塌方; 跨度 7m~9m, 暂时稳定, 可发生小塌方; 跨度 < 7m, 可基本稳定
	IV ₂	跨度 > 7m, 可发生中-大塌方; 跨度 6m~7m, 暂时稳定, 可发生小塌方; 跨度 < 6m, 可基本稳定
	IV ₃	跨度 > 5m, 可暂时稳定~不稳定, 可发生中~大塌方; 跨度 < 5m, 可基本稳定
V	V ₁	跨度 > 6m, 完全无自稳能力; 跨度 4m~6m, 暂时稳定, 可发生中~大塌方; 跨度 < 4m, 可基本稳定
	V ₂	跨度 > 4m, 完全无自稳能力; 跨度 3m~4m, 暂时稳定, 可发生中~大塌方; 跨度 < 3m, 可基本稳定

注: 1.小塌方: 塌方高度 > 3m, 或塌方体积 < 30m³。

2.中塌方: 塌方高度 3m~6m, 或塌方体积 30 m³~100m³。

3.大塌方：塌方高度 > 6m，或塌方体积 > 100m³。

9.5.8 隧址区各级围岩的物理力学指标标准值应按室内或现场试验资料确定。

当无实测数据时，可按表 9.5.8 选用。

表 9.5.8 各级围岩的物理力学指标

围岩级别		重度 γ (kN/m ³)	弹性抗力系数 k (MPa/m)	变形模量 E (GPa)	泊松比 ν	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c (MPa)	计算摩擦角 φ_c (°)
基本级别	亚级							
I		>26.5	1800~2800	>33	<0.2	>60	>2.1	>78
II			1200~1800	20~33	0.2~0.25	50~60	1.5~2.1	70~78
III	III ₁	24.5~26.5	850~1200	10.7~20	0.25~0.26	44~50	1.1~1.5	65~70
	III ₂		500~850	6~10.7	0.26~3	39~44	0.7~1.1	60~65
IV	IV ₁	22.5~24.5	400~500	3.8~6	0.3~0.31	35~39	0.5~0.7	57~60
	IV ₂		300~400	2.4~3.8	0.31~0.35	30~35	0.3~0.5	54~57
	IV ₃		200~300	1.3~2.4	0.33~0.35	27~30	0.2~0.3	50~54
V	V ₁	17~22.5	150~200	<1.3	0.35~0.39	22~27	0.12~0.2	45~50
	V ₂		100~150		0.39~0.45	20~22	0.05~0.12	40~45

条文说明：

9.5.5~9.5.8 参照《公路隧道设计细则》(JTG/T D70-2010)及《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1-2018)，结合近年来公路工程建设经验成果归纳总结后编制而成。

9.6 隧道涌水量评价

9.6.1 符合下列情况之一时，可判定为存在隧道岩溶涌水问题：

- 1 隧道穿越可溶岩与非可溶岩接触带。
- 2 隧道穿越富水的可溶岩层或其它岩溶汇水构造。
- 3 隧道穿越岩溶富水的断层带、断层交汇带、节理溶蚀密集带或其它溶蚀构造破碎带。
- 4 隧道穿越充水溶洞、地下暗河管网等岩溶管道系统。
- 5 隧道位于岩溶地下水水平径流带或深部缓流带。

编写说明：

《贵州岩溶场地岩土工程勘察技术规程》第 11.7.2 条。

9.6.2 岩溶区隧道涌水量预测，应根据水文地质条件，有针对性地选用计算方法，涌水量可采用水文地质比拟法、水均衡法、地下水动力学、同位素法等方法进行估算，并应符合附录 F 中隧道涌水量预测的有关规定。

条文说明：

隧道可能穿越一个或多个水文地质单元，隧道不同段落所处的水文地质条件不同，因此，适用的涌水量计算方法不同，故应根据水文地质条件的差异对隧道涌水量进行分段预测。由于各种涌水量预测方法原理不同，因此，隧道涌水量预测应采用多种方法进行计算，综合分析后选用。

9.6.3 岩溶区隧道涌水量，可根据隧道分段水文地质条件，运用多种方法进行分段计算，进行综合分析评价，并符合以下规定：

1 处于垂直渗流带的岩溶隧道宜采用水均衡法（降雨入渗系数法或洼地入渗法）预测隧道涌水量；

2 处于季节交替带的岩溶隧道宜采用采用水均衡法（地下水径流深度法、径流模数法、降雨入渗系数法）预测隧道涌水量；

3 处于水平流动带的岩溶隧道宜采用水均衡法（地下水径流深度法、径流模数法）结合地下水动力学法预测隧道涌水量。

4 处于深部缓流带的岩溶隧道宜采用地下水动力学法预测隧道涌水量。

条文说明：

垂直渗流带又称包气带，其位于表层带以下，雨季区域最高水以上。垂直渗流带岩体中多发育有裂隙、溶隙和岩溶水管道等导水通道，通过其与地表连通，可以将大气降水和地表水引入地下。因此，处于垂直渗流带的岩溶隧道宜采用降雨入渗系数法或洼地入渗法预测隧道涌水量。

季节变动带一般位于雨季最高水位以下和旱季最低水位以上的岩层位，又称过渡带。其含水量受季节因素影响较大，雨季时，地下水位上升，岩层多处于饱和状态；旱季时，水位下降，岩层多处于枯水状态。若隧道穿越此带，在雨季时节或者大雨天时，容易发生较大的涌突水灾害。因此，宜采用地下水径流深度法、径流模数法及降雨入渗系数法预测隧道涌水量。

位于地下最低水位以下，常年饱水，地下水在重力和水头压力双重作用下，

作水平流动排泄往附近河谷或区域最低基准面，上部岩溶发育强烈，岩溶形态以水平岩溶管道、地下暗河或溶蚀裂隙为主，下部岩溶发育中等，主要发育小的溶洞或溶孔，连通性较差。在近河岸处地下水流集中，水量大，又有与河水交递的混合溶蚀作用，故岩溶发育最强烈，常发育暗河系统，成为水平循环带中的集中径流区，通过岩溶管道流排泄的水量占该含水层总流量的比例很大，有时可达 50% 以上。因此，地下水径流深度法、径流模数法结合地下水动力学法预测隧道涌水量。

处于深部缓流带的岩溶隧道长期位于地下水水位以下，深部缓流带地下水流速慢，一般为层流，地下水运移一般符合达西定律，故隧道开挖宜采用地下水动力学法。

9.6.4 岩溶隧道涌突水危险性等级按表 9.6.4 划分。

表 9.6.4 岩溶隧道涌突水危险性等级划分

THK 评分	>85	65~85	45~65	25~45	0~25
级别	V	IV	III	II	I
类别	危险度极高	危险度高	危险度中等	危险度较低	危险度低
综合描述	产生大规模突发性涌水突泥灾害，短时间淹没施工掌子面和坑道中的施工设施，迫使施工停止，造成人员伤亡及财产损失，环境负效应极为显著	产生大规模突发性涌水突泥灾害，短时间淹没施工掌子面和坑道中的施工设施，在短时间内地下水量达到稳定，迫使施工停止，一般不危及施工人员安全，环境负效应显著	产生中等规模突发性涌水突泥灾害，造成一定财产损失，不危及施工人员安全，环境负效应比较显著	产生小规模涌水、突泥，造成一定财产损失，无人员伤亡，产生一定程度的环境负效应	局部产生小规模涌水、突泥，无人员伤亡，造成一定财产损失，环境负效应较轻或微弱
单点最大涌水量(m ³ /h)	>10 ⁴	10 ³ ~10 ⁴	10 ² ~10 ³	10~10 ²	<10

其中，岩溶隧道涌突水危险性评价指标按下式计算：

$$THK = 0.25K_1 + 0.13K_2 + 0.16K_3 + 0.1K_4 + 0.36K_5 \quad (9.6.4)$$

式中：THK——岩溶隧道涌突水危险性指数；

K_1 ——岩石的可溶性， $K_1 = 0.75K_{11} + 0.25K_{12}$ ；

K_2 ——地质构造条件：对于断裂或褶皱蓄水构造， K_2 按表 G-2 取值；对于单斜蓄水构造， $K_2 = 0.72355K_{21} + 0.1923K_{22} + 0.0833K_{23}$ ；

K₃——地表汇水条件；

K₄——地下水循环交替条件；

K₅——隧道埋深与地下水位的关系。

K₁~K₅的取值按附录 G 中表 G-1~表 G-5 确定。

9.7 环境影响评价

9.7.1 岩溶区公路工程应根据公路工程构筑物不同的建设特点，针对公路周边水环境、岩土体稳定性等方面对岩溶环境地质问题分析评价。

9.7.2 建设项目施工期、运行期可能造成周边地表、地下水环境变化时，应对以下内容进行分析评价：

1 对水位变化的影响。基坑降水、边坡开挖、隧道排水时，应分析预测最大降深时涌水量、周边地表与地下水位下降幅度和影响范围；地基、边坡、隧道进行岩溶管道水封堵处理时，应分析地表与地下水补径排条件和汇流量，预测水位壅水高度和影响范围；根据水位下降或上升情况，评价对周边环境的影响和提出处理措施建议。在水位变化范围内，存在既有建（构）筑物等重要影响对象时，需进一步评价对建（构）筑物的影响。

2 对水量变化的影响。周边地表与地下水位影响范围内，存在水源点、排水设施时，应分析预测供水量、排水量的变化情况及对设施的功能影响，并提出处理措施建议。

3 对水质变化的影响。施工期、运行期有污废水排出时，应预测水质变化情况，分析影响范围，提出保护措施建议。

4 危险废物填埋、固废贮存与处置场等需按照相关标准、规定进行岩溶水文地质勘察与环境影响评价。

9.7.3 建设项目施工期、运行期，可能造成周边岩土体崩塌、滑坡及地表变形、开裂、塌陷时，应对以下内容进行分析评价：

1 根据岩土体物质组成、强度参数、渗透性，岩溶规模和岩溶水文地质条件，以及建（构）筑物开挖、地表地下水抽排条件、水位与水量变化情况等，对影响

岩土体稳定性的主要控制因素、岩土体变形破坏的主要模式及影响范围进行分析评价，并提出处理措施建议。

2 在周边岩土体稳定性影响范围内，存在建（构）筑物等重要影响对象时，应进一步分析评价对建（构）筑物的影响。

征求意见稿

附录 A 岩溶的分类及地貌类型

A.0.1 根据埋藏条件，岩溶可按表 A.0.1 进行分类。

表 A.0.1 岩溶按埋藏条件分类

类型	主要特征
裸露型	可溶性岩层大部分出露地表，低洼地带分布有厚度一般不超过 10m 的第四纪覆盖层，地表岩溶景观显露，地表水与地下水连通密切
浅覆盖型	可溶性岩层大部分被第四系土层覆盖，厚度一般不超过 30m，少部分岩溶景观显露地表，地表水与地下水连通较密切
深覆盖型	可溶性岩层被第四系土层覆盖，厚度一般超过 30m，几乎没有岩溶景观显露地表，地表水与地下水连通不密切
埋藏型	可溶性岩层被非可溶性岩层（如泥岩、砂岩、页岩等）覆盖，没有岩溶景观显露地表，地表水与地下水连通不密切

A.0.2 根据形成的地质年代，岩溶可按表 A.0.2 进行分类。

表 A.0.2 岩溶按地质年代分类

类型	主要特征
古岩溶型	岩溶形成于新生代之前，溶蚀凹槽和溶洞中常见填充有新生代以前沉积的岩石
近代岩溶型	岩溶形成于新生代之后，溶蚀凹槽和洞隙呈空洞状或填充第三系、第四系沉积物

A.0.3 岩溶地貌类型按表 A.0.3 确定。

表 A.0.3 岩溶地貌类型

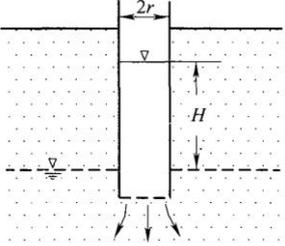
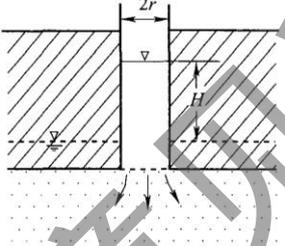
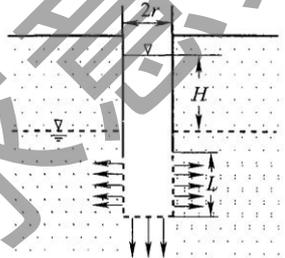
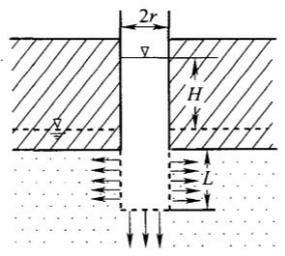
名称	含义及其形成条件	特征
溶痕	地表水沿沿可溶性岩层进行溶蚀所形成的微小沟道	宽仅数厘米到十余厘米，长几厘米至数米，常见于石炭岩或石芽的表面
溶隙	地表水沿可溶岩裂隙渗流溶蚀所形成的沟隙	宽几厘米至 1~2m，长几米至几十米
溶沟溶槽	地表水沿可溶性岩石的裂隙进行溶蚀和机械侵蚀所形成的小型沟槽	深度由数厘米至数米，甚至更大
石芽	溶沟、溶槽间残留的“脊”和笋状的突起	芽和溶沟、溶槽是共生的，其高度一般不超过 3m
落水洞	由岩体中的裂隙受水流溶蚀、机械侵蚀以及塌陷而成的地表通往地下暗河或溶洞的通道	呈垂直、陡倾斜或弯折状，宽度一般很少超过 10m，深可达百米至数百米，按形态可分为圆形、井状、裂隙状
溶洞	由地下水对可溶性岩石进行溶蚀和机械侵蚀而形成的呈水平状通道	大小与形状多种多样，大部分洞身曲折，支洞多，在地下水位以上，无经常流水，常见有不同高程重叠分布的大型复杂溶洞

续上表

名称	含义及其形成条件	特征
暗河	地下水位以下的溶洞	洞中水流汇集成河，有时与干谷相伴存在
漏斗	岩溶地区呈漏斗形或蝶状的封闭洼地，由溶蚀作用或溶洞洞顶塌陷而成	上大下小，底部常有落水洞或竖井
干谷	河水经河谷底部的漏斗和落水洞等流入地下，使原来的河段失去排水作用，形成干涸的河谷	当暴雨季节或地下水排泄不畅时，才有暂时性水流
溶蚀洼地	岩溶作用形成的小型封闭洼地，一般认为溶蚀洼地是由相信漏斗逐渐加宽、合并而成	大多呈狭长形，一般长度大于宽度 1~5 倍，深度小于 30m，长度可达数千米，底部较平坦，有时有小湖泊
岩溶盆地（波立谷）	是一种大致呈椭圆形的大型封闭洼地。在一定的构造条件下，经长期溶蚀侵蚀作用形成，如溶蚀洼地的扩大合并，溶洞、暗河崩塌，地表干谷的扩大加深等	其延长方向常与构造线一致，长达几公里，面积可达数平方公里至数百平方公里，四周斜坡陡峭，谷底平坦，堆积物较厚，常有落水洞、峰林和暗河
岩溶湖	岩溶地区的溶蚀洼地或溶洞底部积水而成的地面或地下的湖泊。由漏斗、落水洞淤塞、积水而成，或由于直接与地下水含水层有水力联系的低洼地区积水而成	一般规模较小。当溶蚀洼地底部为隔水岩层，堆积较厚的残坡积物或湖盆底低于潜水面时，水流汇集成地面的岩溶湖。溶洞中的大型积水洼地为地下岩溶湖，亦称地下湖
峰林	耸立在岩溶平原上的孤立石峰。是在地壳相对稳定的条件下，岩溶地貌发育到后期的产物	山坡陡峭，一般均在 45° 以上，相对高度可达 100~200m，多分布于平原上
石灰华	岩溶泉水至出口处，因环境变化，溶于水的钙质分离沉积而成	经常呈多孔状
石钟乳	含碳酸钙的水从洞顶板下滴时，钙质沉淀形成自上而下的长条形沉积物	挂于洞顶
石笋 石柱	由含碳酸钙的水滴到洞底，钙质沉积而成	发育于溶洞底部的竹笋状突起的，称为石笋；当石钟乳与石笋连接在一起时称为石柱
残余堆积物	由不被水溶解的残余物组成的堆积物	如 Fe ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃
其他堆积物	洞穴坍塌的石灰岩碎块、水流搬运物，及人类、动植物化石等	

附录 B 钻孔注水试验形状系数 A 的取值确定

表 B 钻孔注水试验形状系数 A 的取值确定

试验条件	简图	形状系数 A	备注
试验段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水。		5.5r	
试验段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水，试验土层顶板为不透水层。		4r	
试验段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸孔或下花管，孔壁和孔底进水。		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{ml}{r}}$	$\frac{1}{r} > 8$ $m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ 式中： K_h 、 K_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数
试验段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸孔或下花管，孔壁和孔底进水，试验土层顶板为不透水层。		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{2ml}{r}}$	$\frac{1}{r} > 8$ $m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ 式中： K_h 、 K_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数

附录 C 岩溶处理主要工程措施

表 C 岩溶处理主要工程措施

类型	处理方法	适用条件
工程场地或建（构）筑物地基范围内的地下水处理	导引法	适用于集中出流点，一般采用排水隧洞、排水管道进行疏导，以防止水流通道堵塞，造成场地和地基季节性淹没
	封堵压盖法	适用于流量小、压力不大的涌水点，用反滤料、混凝土直接封堵洞穴涌水点，或用混凝土及其它构筑物在涌水口上压盖
	驱赶推挤法	适用于出流分散，此堵彼漏的涌水点，采用较大体积的混凝土直接浇筑，将涌水出逸点驱赶推挤至基础外排出
	闸阀封闭法	适用于出水处岩体较完整、出流较集中、且有一定压力的涌水，根据出流量大小，在涌水点砌筑有闸阀的水管，将涌水从导管引出，浇筑混凝土封闭出水口，关闭闸阀，将导管埋置于混凝土内
	帷幕灌浆法	适用于岩溶强烈发育基坑，预计突水危险性大，依靠抽水无把握的工程，采用灌浆帷幕截断基坑涌水通道
	截水法	为疏干某一范围，可设置与水流方向垂直的截流盲沟、截水洞、截水墙
	集中引排	当流量、流速较大，或可能淹没农田和工程场地时，可设桥涵、泄水洞、明沟、管道
浅表部岩溶处理	抬水法	为保持岩溶泉正常出水，或保持消水洞消水，或防止消水以及需要提高水位时，可采用围堰、围拦等措施
	充填法或换填法	适用于浅表土洞发育区、且上部附加荷载不大的情况，土洞底部需用块石、片石作填料，中部用碎石，上部用土或混凝土填塞，以保持地下水的原始流通状况，使其形成自然的反滤层
	挖填法	适用于浅埋岩溶洞穴，将其挖开或爆破揭顶，挖除洞内充填物，以块石、片石、砂等回填，然后覆盖黏性土并夯实
岩溶地基稳定问题处理	垫填法	适用于地基浅表部存在溶隙、溶沟、溶槽、石芽的情况，可能引起地基或路基不均匀沉降，将突出物凿平或清除充填物后用圬工嵌补平整
	灌浆法	对埋深较大的溶洞，宜采用密钻灌浆法进行加固，视溶洞充水程度和处理目的来选择材料。用于填塞时，可用黏土、砂石、混凝土、水泥砂浆；用于防渗时，可用水泥浆和沥青；用于充填加固时，可用快干材料或砂石将洞隙先行填塞，开始时压力不宜过高，以免浆料大量流出加固范围；对复杂多层含水溶洞可采用双液化学硅化法进行加固
	顶柱法	当洞顶板较薄、裂隙较多、洞跨较大，顶板强度不足以承受上部荷载，为保持地下水通畅，条件许可时采用附加支撑减少洞跨，一般在洞内做浆砌块石填补加固洞顶并砌筑支墩作附加支柱
	强夯法	在覆盖型岩溶区，处理大面积土洞和塌陷时，强夯法是一种省工省料、快速经济且能根治整个场地岩溶地基稳定性的有效方法
	挤密法	对溶洞中软土较深地段，采用砂柱、石灰柱、松木桩、混凝土桩、钢管打入洞内，使桩端嵌入下伏密实土层，以挤密松散层，形成复合地基，提高地基稳定性和强度
浆砌法	工程基础边缘及影响范围内的溶洞、溶隙、溶沟、溶槽等临空面，可用素混凝土或浆砌块石加固	

续上表

类型	处理方法	适用条件
溶洞较深, 挖填困难和不经济, 或浅埋洞体顶板厚度和完整程度难以确定	梁板式跨越法	当基础下遇到深度较大、洞径较小不便于入内施工或洞径虽大、但因有水的溶沟、溶槽或溶洞时, 可根据建(构)筑物性质和基底受力情况, 采用梁板式结构传递上部荷载至两侧岩体上, 或用刚性大的平板基础覆盖, 但支承点必须放在较完整的岩石上, 也可用调整柱距的方法处理
	拱跨法	当基础下遇洞身较宽、深度又大、洞形复杂或有水流的溶洞时, 宜采用浆砌片石拱、混凝土拱、钢筋混凝土拱等拱跨形式, 为增强拱身强度, 拱下可砌筑垂直支撑柱, 对建(构)筑物本身而言, 也可加设拉杆(或锚杆支撑)或其它预应力钢筋混凝土构造
宽大超深的溶沟、溶槽处理		采用桩墩基础进行处理
上宽下窄的漏斗状溶槽地基	钢筋网-混凝土嵌塞法	将溶槽中的填充物清除(清除深度约为1倍槽顶宽度)以混凝土置换, 并在槽顶布置一层双向钢筋网(一般满足构造要求即可, 并要有一定的搭接长度), 再浇筑混凝土至基础底部, 使垫层和嵌塞的混凝土形成一个整体的、上大下小的楔形体嵌塞于溶槽中, 使上部作用通过钢筋网-混凝土楔形体传递到溶槽两侧可靠岩石上
溶洞堆积物处理		堆积物不易清除时, 可换填或风干, 或采用桩基、浮筏式基础
		对建(构)筑物基础下的块石堆积及碳酸钙沉积物(如石笋、石钟乳、石柱等)宜爆破清除
		对较厚的松散块石、碎石堆积物, 宜采用压浆处理
岩溶塌陷治理		对于黏性土、砂类土以及砂砾石、碎石等洞穴堆积物作地基, 可用旋喷桩加固
		地下水位下降造成地面塌陷时, 可采用控制抽排水强度、恢复水位、帷幕、隔板隔水等措施
		雨水渗入土层造成地面塌陷时, 可采用地面排水、封闭路面、压浆等措施
		河水位的涨落引起的地面塌陷, 可采用封闭洞穴、加固地基等措施
		无论何种因素引起的地面塌陷, 可据具体情况分别采用压浆、网格板垫层、强夯、旋喷桩、换填土壤等处理措施

附录 D 地基稳定性评价方法

溶洞地基稳定性评价，可采用定性评价、半定量评价和定量评价多种方法进行综合评判。对于重大工程，除应进行定性评价和半定量评价外，宜增加定量评价。

D.0.1 定性评价

对于公路路基或一般构造物（小桥、涵洞或通道），根据已查明的地质条件，对影响溶洞稳定性的各种因素进行分析比较，可采用经验比拟法按表 D.0.1 对地基稳定性进行分级。

表 D.0.1 岩溶地基稳定性分级

等级	地层岩性	地质构造	地下水	洞体表面特征	洞底堆积物
稳定	厚层至中厚层，无软弱夹层，层面胶结好	无褶皱、断层，裂隙不发育或裂隙较少且呈闭合状，未形成临空切割体	洞内很少滴水，无流水	洞内、侧壁均有钙壳、溶蚀窝状面，洞体表面较平整，无危岩和近期崩塌	洞底平坦，表层堆积物为黏性土或钙质胶结层
基本稳定	厚层至中厚层，层面有一定程度的胶结	有小型断层、褶皱，有 2-3 组连续性差的裂隙，形成的临空切割体体积小	断层中有季节性地下水活动	有少量钟乳石、灰华物，无近期崩塌痕迹，有少量危岩	洞底平坦，表层堆积物有少量块石
稳定性差	中厚层夹薄层，层面胶结差	断层发育，有 3 组以上的胶结差的裂隙，形成较多的临空切割体	顶板、断层中常有地下水活动	钟乳石多、局部地段有危岩和近期崩塌痕迹	有近期崩塌堆积物，有大量块石
不稳定	薄层至中厚层，有软弱夹层，层面胶结差	断层很发育，裂隙在 4 组以上，呈张开状，形成大量的临空切割体	洞内、断层中漏水严重	钟乳石、石笋、石柱等林立丛生、大面积分布，危岩和近期崩塌痕迹多	洞底为暗河或大量近期崩塌物

D.0.2 半定量评价

1 当顶板为中厚层、薄层，裂隙发育，易风化的岩层，顶板有可能坍塌、但能自行填满洞体时，无需考虑其对地基的影响。此时所需塌落高度（ H ）可按下式计算：

$$H = \frac{H_0}{K-1} \quad (\text{D.0.2-1})$$

式中： H_0 ——塌落前洞体最大高度（m）；

K ——岩石松散（涨余）系数，石灰岩 K 取 1.2，黏土 K 取 1.05。

2 当顶板岩层较完整，强度较高，层厚较大，并已知顶板厚度和裂隙切割情况时，可按抗弯、抗剪验算顶板稳定性，且应符合下列规定：

1) 当顶板跨中有裂缝，顶板两端支座处岩石坚固完整时，可按悬臂梁计算：

$$M = \frac{1}{2}pl^2 \quad (\text{D.0.2-2})$$

2) 当裂隙位于支座处，而顶板较完整时，可按简支梁计算：

$$M = \frac{1}{8}pl^2 \quad (\text{D.0.2-3})$$

3) 当支座和顶板岩层均较完整时，可按两端固定梁计算：

$$M = \frac{1}{12}pl^2 \quad (\text{D.0.2-4})$$

4) 计算弯矩和剪力应符合下列公式的要求：

$$\frac{6M}{bH^2} \leq \sigma \quad (\text{D.0.2-5})$$

$$H \geq \sqrt{\frac{6M}{b\sigma}} \quad (\text{D.0.2-6})$$

$$\frac{4f_s}{H^2} \leq S \quad (\text{D.0.2-7})$$

$$H \geq \sqrt{\frac{4f_s}{S}} \quad (\text{D.0.2-8})$$

式中： M ——弯矩（kN·m）；

p ——顶板所受总荷载（kN·m），为顶板的岩体自重、顶板上覆的土体重和附加荷载之和；

l ——溶洞跨度（m）；

σ ——岩体计算抗弯强度（石灰岩一般为允许抗压强度的 1/8）（kPa）；

f_s ——支座处的剪力（kN）；

S ——岩体计算抗剪强度（石灰岩一般为允许抗压强度的 1/12）（kPa）；

b ——梁板的宽度（m）；

H ——顶板岩层厚度（m）。

3 按极限平衡条件计算顶板受剪切承载力时，应符合下列公式的要求：

$$T \geq P \quad (\text{D.0.2-9})$$

$$T = HSL \quad (\text{D.0.2-10})$$

$$H = \frac{T}{SL} \quad (\text{D.0.2-11})$$

式中： P ——溶洞顶板所受总荷载（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）；

T ——溶洞顶板的总抗剪力（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）；

L ——溶洞平面的周长（ m ）；

其余符号意义同前。

4 成拱分析法

当顶板岩体被密集裂隙切割呈块状或碎块状时，可认为顶板将成拱状塌落，而其上荷载及岩体则由拱自身承担，此时破裂拱高 H 为：

$$H = \frac{0.5l + H_0 \tan(90 - \varphi)}{f} \quad (\text{D.0.2-12})$$

式中： φ ——洞壁岩体的内摩擦角（度）；

f ——洞体围岩的坚实系数，一般可根据岩石的单轴抗压强度确定；

其余符号意义同前。

破裂拱高加上部荷载作用所需的岩体厚度为溶洞顶板的安全厚度。若溶洞的顶板呈拱形，拱角以下岩体完整稳定且无横向扩展的可能，可近似地用石砌拱圈厚度加足够安全储备，类比确定拱顶的安全厚度。

5 试验测试法

1) 电阻应变片测试法

对已查明的浅层洞体，可在洞顶施加载荷，沿纵横洞轴方向贴设电阻应变片及布置挠度量测，在加荷过程中追踪测量。根据测得的最大应力与岩体抗剪强度对比，若后者大于前者的 5~10 倍，则认为岩溶洞体的顶板是可靠的。

若洞体内存在裂隙，可在裂隙面上及其一侧分别贴电阻应变片量测，若二者无明显差别，则说明裂隙的存在并不影响顶板整体受力。

2) 载荷试验法

在有代表性的浅层洞体上，将顶板岩体修凿呈一梁状，在底面和侧面贴设电阻应变片，并于洞体上方分级加荷，观察其应力和变形。通过试验了解在特定条件下洞体的变形特征、破坏形式与顺序，反求顶板岩体参数，建立与岩石强度参数、岩体纵波速度等的相关性，借此评价洞体的稳定性。

D.0.3 定量评价

1 稳定系数法

假定洞穴顶板岩土体为松散破碎，在其上部四周形成圆锥形破坏面和柱状塌落体，由朗肯土压力理论，求得塌落岩土体整个高度范围的圆柱体侧表面摩擦阻力 F_1 为：

$$F_1 = \frac{\pi}{2} \gamma h^2 b \cdot \tan \varphi \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \pi h b \left[q \cdot \tan \varphi \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \cdot \tan \varphi \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + 1 \right] \quad (\text{D.0.3-1})$$

式中： γ ——岩土体的容重；

c ——岩土粘聚力；

φ ——松散体的内摩擦角；

q ——均布外荷载；

b ——土柱横截面直径；

h ——土柱高度。

设 K 表示岩溶地基稳定系数，则：

$$K = \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{(W+J+P_0+q+Q_v) \cdot 0.25\pi b^2} \quad (\text{D.0.3-2})$$

式中： F_1 、 F_2 分别为抗塌力和致塌力， W 、 J 、 P_0 、 q 、 Q_v 分别表示岩土自重、地下水垂向渗流力、真空吸蚀力、附加荷载作用力、振动作用力。

当 $K > 1.5$ 时，岩溶地基稳定；当 $K \leq 1$ 时，岩溶地基不稳定。

2 局部破坏时地基稳定性弹塑性分析法

1) 圆形溶洞中产生的次生应力

对于距基岩面以下有一半径为 a 的圆形溶洞，设基岩岩石是均质的、各向同性的弹性体，把在地基中的溶洞围岩应力分布问题视作一个双向受压无限板孔的应力分布问题（如图 D.0.3-1），用极坐标求解的围岩应力公式为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(p+q) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2}(q-p) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(p+q) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2}(q-p) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(q-p) \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.3-3})$$

式中： σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ ——围岩中的径向应力、切向应力、剪向应力；

p 、 q ——作用在岩体上的垂直应力、水平应力；

θ ——与水平角的夹角。

圆形断面溶洞周边（ $r=a$ ）处的应力为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= p(1 + 2\cos 2\theta) + q(1 - 2\cos 2\theta) \\ \sigma_r &= \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.3-4})$$

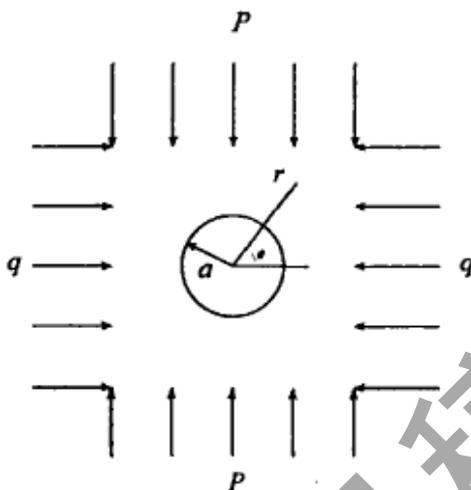


图 D.0.3-1 圆形溶洞围岩上的应力

2) 椭圆形溶洞断面所产生的次生应力

若溶洞为椭圆形断面，其水平轴为 a ，竖直轴为 b ，作用在溶洞围岩上的垂直应力为 p ，水平应力为 q 。巷道周边上任一点的切向应力 σ_{θ} 、径向应力 σ_r 和剪应力值 $\tau_{r\theta}$ 的大小，可根据弹性理论，按椭圆孔复变函数解得。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{p[m(m+2)\cos^2\theta - \sin^2\theta] + q[(2m+1)\sin^2\theta - m^2\cos^2\theta]}{\sin^2\theta + m^2\cos^2\theta} \\ \sigma_r &= \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.3-5})$$

式中： m ——椭圆轴比， $m = \frac{b}{a}$ 。

3) 基础压力对溶洞产生的附加应力

根据弹塑性理论，基础底面压力作用范围有限，当弹塑性体中存在一孔洞时，圆孔周边产生的应力集中影响区域为距溶洞中心 5 倍半径范围以内，其余范围不考虑附加应力对溶洞稳定性的影响。以 $r=5a$ 为界面，采用常规地基附加应力计算方法，分别计算出距溶洞中心距离 $5a$ 处 A 点附加应力、B 点附加应力（如图 D.0.3-2），用基础对 A、B 点处所产生的附加应力，分别作为 A 点的水平面和 B 点的竖直面处的附加应力。

$$\left. \begin{aligned} p &= \alpha_A P_0 + \sigma_{CA} \\ q &= \lambda(\alpha_B P_0 + \sigma_{CB}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.3-6})$$

式中： α_A 、 α_B ——基底至 A、B 点处的附加应力系数，可通过计算或按现行《建

筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 附录 K 选取；

P_0 ——基底附加应力；

σ_{CA} 、 σ_{CB} ——A、B 点处岩土体自重应力；

λ ——岩体侧压力系数。

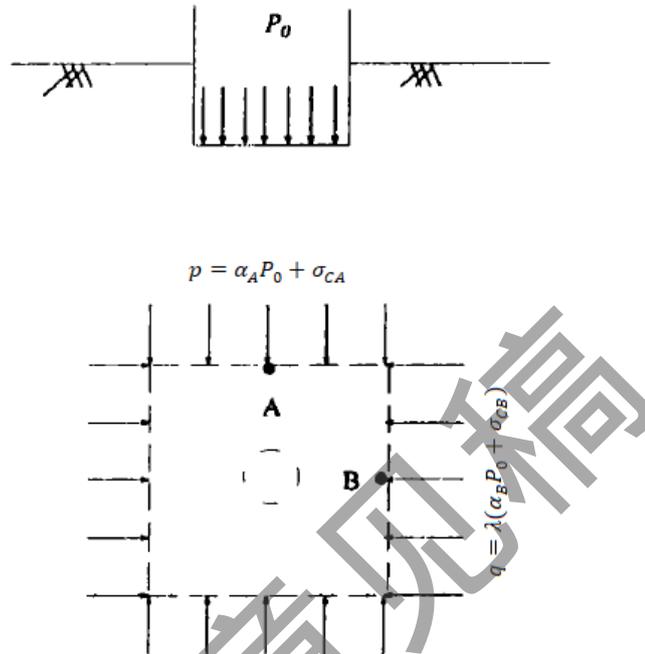


图 D.0.3-2 溶洞地基应力计算示意图

4) 溶洞稳定性评价

将前述计算所得地基中溶洞财力所产生的次生应力，与岩石破裂强度进行对比，可应用格里菲斯破裂准则对岩石地基进行判别。

$$\left. \begin{aligned} R_t &= \frac{-(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)}, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 > 0 \text{ 时} \\ R_t &= \sigma_3, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.3-7})$$

式中： σ_1 、 σ_3 ——最大、最小主应力，以压为正；

R_t ——岩石单轴抗拉强度计算值，本身带负号。

对于求得的溶洞周边次生应力，切向应力 σ_θ 最大或最小， $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$ ，最大或最小主应力出现在溶洞上下两侧和水平两侧处（即 θ 取 0° 、 90° 、 180° 和 270° ），将最大和最小主应力代入式 D.0.3-7 与岩石单轴抗拉强度进行比较，判断溶洞稳定性。

3 有限元法

采用有限元法进行溶洞稳定性评价应符合下列规定：

- 1) 溶洞围岩从整体看是连续完整的，局部有少数断裂或夹层，考虑岩体力学模型时，可将岩体视为连续介质，同时考虑非连续面的影响；
- 2) 溶洞的空间形态、埋藏深度、上覆岩层性质及物理力学指标等计算参数应依据勘察成果合理确定。

征求意见稿

附录 F 隧道涌水量预测

F.0.1 简易水均衡法

1 地下水径流深度法

越岭隧道通过一个或多个地表水流域时，可采用地下水径流深度法预测隧道正常涌水量。

$$Q_s = 2.74h \cdot A \quad (\text{F.0.1-1})$$

$$h = W - D - E - SS \quad (\text{F.0.1-2})$$

$$A = L \cdot B \quad (\text{F.0.1-3})$$

式中： Q_s ——隧道通过含水体地段的正常涌水量（ m^3/d ）；

h ——年地下径流深度（ mm ）；

W ——年降水量（ mm ）；

A ——隧道通过含水体地段的集水面积（ km^2 ）；

D ——年地表径流深度（ mm ）；

E ——某流域年蒸发蒸散量（ mm ）；

SS ——年地表滞水深度（ mm ）；

L ——隧道通过含水体地段的长度（ km ）；

B ——隧道涌水地段 L 长度内对两侧的影响宽度（ km ）。

2 地下水径流模数法

越岭隧道通过一个或多个地表水流域时，可采用地下水径流模数法预测隧道正常涌水量。

$$Q_s = M \cdot A \quad (\text{F.0.1-4})$$

$$M = \frac{Q'}{F} \quad (\text{F.0.1-5})$$

式中： M ——地下水径流模数（ $\text{m}^3/(\text{d km}^2)$ ）；

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

F ——与 Q' 的地表水或下降泉流量相当的地表流域面积（ km^2 ）。

3 降雨入渗系数法

隧道通过潜水含水层且埋藏深度较浅时，可采用降水入渗法预测隧道正常涌水量：

$$Q_s = 2.74\alpha \cdot W \cdot A \quad (\text{F.0.1-7})$$

式中： α ——降水入渗系数，根据经验数据或试验数据确定。

4 洼地入渗法

隧道位于垂直渗流带内，隧顶有直接相连的消水洼地或落水时，可根据洼地集水面积、降雨、蒸发及洼地消水速度，估算洼地入渗量，计算段隧道的涌水量相当于洼地入渗量。

$$Q_w = 1000FX\eta \quad (\text{F.0.1-8})$$

式中： Q_w ——洼地入渗量（ m^3/d ）；

F ——集水面积（ km^2 ）；

X ——降雨强度（ mm ）；

η ——地下水涌入系数。

F.0.2 地下水动力学法

1 隧道通过潜水含水层时，可用下列公式预测隧道正常涌水量：

(1) 裘布依理论式

$$Q_s = L \cdot K \frac{H^2 - h_1^2}{R_y - r} \quad (\text{F.0.2-1})$$

式中： H ——洞底以上潜水含水层厚度（ m ）；

h_1 ——洞外水柱高度（ m ），一般考虑“水跃”值；

K ——含水层的渗透系数（ m/d ）；

R_y ——隧道涌水地段的引用补给半径（ m ）；

r ——隧道洞身横断面之半（ m ）。

(2) 佐藤邦明公式

$$q_s = q_0 - 0.584\bar{\varepsilon} \cdot K \cdot r_0 \quad (\text{F.0.2-2})$$

式中： q_s ——隧道单位长度正常涌水量[$\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$]；

q_0 ——隧道单位长度最大涌水量[$\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$]；

$\bar{\varepsilon}$ ——试验系数，一般取 12.8；

r_0 ——隧道横断面等价圆半径（ m ）。

2 隧道通过潜水含水层时，可用下列公式预测隧道最大涌水量：

(1) 古德曼经验式

$$Q_0 = L \frac{2\pi \cdot K \cdot h_2}{\ln\left(\frac{4h_2}{d}\right)} \quad (\text{F.0.2-3})$$

式中： Q_0 ——隧道最大涌水量（ m^3/d ）；

h_2 ——静止水位至洞身横断面等价圆中心的距离（ m ）；

d ——洞身横断面等价圆直径（ m ）。

(2) 佐藤邦明非稳定流式

$$q_0 = \frac{2\pi \cdot m \cdot K \cdot h_2}{\ln\left[\tan\frac{\pi(2h_2-r_0)}{4h_c} \cot\frac{\pi \cdot r_0}{4h_c}\right]} \quad (\text{F.0.2-4})$$

式中： m ——换算系数，一般取 0.86；

h_2 ——静止水位至洞身横断面等价圆中心的距离（ m ）；

r_0 ——洞身横断面等价圆半径（ m ）；

h_c ——含水层厚度（ m ）。

F.0.3 水文地质比拟法

新建隧道附近有水文地质条件相当的既有隧道或坑道以及岩溶区时，可采用水文地质比拟法预测隧道涌水量：

$$Q = Q' \frac{F \cdot s}{F' \cdot s'} \quad (\text{F.0.3-1})$$

$$F = B \cdot L \quad (\text{F.0.3-2})$$

$$F' = B' \cdot L' \quad (\text{F.0.3-3})$$

式中： Q 、 Q' ——新建、既有隧道（坑道）通过含水层地段的正常涌水量或最大涌水量（ m^3/d ）；

F 、 F' ——新建、既有隧道（坑道）通过含水层地段的涌水面积（ 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 ）。

F.0.4 同位素氡 (T) 法

隧道通过潜水含水层且有给水度或裂隙率资料时,可采用同位素氡 (T) 法预测隧道正常涌水量:

$$Q_s = \frac{L_0 \cdot A \cdot \mu}{365t} \quad (\text{F.0.4-1})$$

$$t = 40.727 \lg \frac{N_0}{N_t} \quad (\text{F.0.4-2})$$

式中: L_0 —— N_0 与 N_t 两样品间的距离 (m);

μ ——含水层给水度 (基岩可用裂隙率代替);

t —— N_0 与 N_t 两样品运动的时间差 (a);

N_0 ——样品中氡含量起始值 (TR);

N_t ——与 N_0 比较的样品中氡含量 (TR)。

征求意见稿

附录 G 岩溶隧道涌突水危险性评价指标

表 G-1 岩溶可溶性 K_1

定量化指标	CaCO ₃ 质量百分含量(%)	>75	50~75	25~50	5~25	0~5	断裂构造岩
定性指标	岩石的定名	灰岩	白云质灰岩、泥质云灰岩	灰质白云岩、白云岩	泥质灰岩、泥质灰云岩	泥质白云岩	
K ₁₁ 评分值		16~20	12~16	8~12	4~8	0~4	12~20
岩石的结构		生物碎屑结构	泥晶结构	粒屑结构	亮晶结构	粗晶结构	
K ₁₂ 评分值		16~20	12~16	8~12	4~8	0~4	

表 G-2 地质构造因素 K_2

断裂蓄水构造	导水断裂	断裂破碎带宽度(m)	>10	2~10	1~2	0.1~1	<0.1
		断裂影响带宽度(m)	>50	20~50	10~20	5~10	1~5
		K ₂ 评分	17~20	14~17	10~14	6~10	0~6
	阻水断裂	断裂破碎带宽度(m)	>10	5~10	1~5	0.2~1	<0.2
		断裂影响带宽度(m)	>50	20~50	10~20	5~10	1~5
		K ₂ 评分	14~17	10~14	6~10	4~6	0~4
褶皱蓄水构造	褶皱形态	宽缓型		中缓型		紧闭型	
	岩层倾角	<30°		30°~60°		>60°	
	K ₂ 评分	0~10		10~16		16~20	
单斜蓄水构造	岩层组合类型	厚层状裂隙-岩溶含水岩组	厚层脉状岩溶-裂隙含水岩组	夹层式层岩-裂隙含水岩组	孔隙-裂隙岩溶含水岩组		
	K ₂₁ 评分	15~20	10~16	4~10	0~4		
	岩层的厚度 d(m)	巨厚层	厚层	中厚层	薄层		
	K ₂₂ 评分	8~12	6~10	2~6	0~2		
	岩层倾角(°)	<30°	30°~45°	45°~60°	>60°		
	K ₂₃ 评分	14~20	10~14	6~10	0~6		

表 G-3 地表汇水条件 K_3

地表出露封闭负地形面积比例(%)	70~100	50~70	25~50	10~25	0~10
K_3 评分	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4
地表岩溶形态	封闭地形	开口沟谷切割			完整斜坡
	峰丛-落水洞、峰林-洼地、溶蚀槽谷	溶蚀平原、缓坡谷地	陡坡谷地、槽谷、溶沟、溶丘		
K_3 评分	16~20	12~16	8~12		0~8
地面坡度	<10°	20~10°	30~20°	45~30°	>45°
K_3 评分	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4

表 G-4 地下水循环交替条件 K_4

方解石的饱和指数 SIC(Ca ²⁺)	<0	0~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	>1.2
K_4 评分	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4

表 G-5 隧道埋深与下水的关系 K_5

定性评价指标	隧道所处垂向循环带	垂直渗流带	交替带	水平径流带		深部循环带
	K_5 评分	0~6	6~12	14~18		8~12
定量评价指标	隧道参照地下水位的埋深(m)	地下水以上	地下水位以下			
			0~50	50~100	100~200	>200
K_5 评分	排泄基准面以上	0~6	2~8	8~14	14~18	18~20
	排泄基准面以下		14~18	16~20	12~16	8~12

本规程用词说明

1 本规程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) 在规程总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在规程条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《×××××》（×××）的有关规定”。

3) 当引用本规程中的其他规定时，应表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应符合本规程第×.×.×条的有关规定”或“应符合按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。