



T/CECS G: XXX—2024

中国工程建设标准化协会标准

Standards of China Association for Engineering Construction Standardization

# 岩溶区公路桥梁桩基设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of Pile Foundation of  
Highway Bridge in Karst Areas

(报批稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

(空白)

全国团体标准信息平台

中国工程建设标准化协会标准

# 岩溶区公路桥梁桩基设计与施工技术规程

Technical Specifications for Design and Construction of Pile Foundation of  
Highway Bridge in Karst Areas

T/CECS G: XXX—2024

(报批稿)

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

实施日期：2024年××月××日

人民交通出版社股份有限公司

(空白)

全国团体标准信息平台

## 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主持《岩溶区公路桥梁桩基设计与施工技术规程》（以下简称本规程）的编制工作。

规程编制组在调研国内岩溶区公路桥梁桩基设计和施工的基础上，凝练总结相关工程经验和科研成果，参考借鉴了国内外相关标准和技术成果，编制完成本规程。

本规程分为6章和2个附录，主要内容包括：1总则、2术语和符号、3基本规定、4设计、5施工、6质量检验、附录A溶洞顶板稳定性计算、附录B桩基滑移稳定性验算。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程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），或唐志（地址：贵州省贵阳市观山湖区阳关大道附100号；邮编：550081；电话：0851-85876853；邮箱tangz@gzjtsjy.com），供修订时参考。

**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院

东南大学

同济大学

中交一公局集团有限公司

贵州交通建设集团有限公司

主 编：杜 宾

主要参编人员：唐 志 龚维明 吴 云 邢皓枫 杨 健 刘 军  
王瑞甫 张世娟 戴国亮 和海芳 马显红 李春峰  
刘建军 何文勇 张 弢 徐向东 彭 力 姬同旭  
魏小楠 周礼平 杨鸿波 宋春霞 赵振宇 郭华江

主 审：彭元诚

参与审查人员：田克平 孙向东 梅世龙 欧阳平 鲜正洪 刘齐建  
母进伟 李春风 丁望星 吴赞平 史方华 杨 俊  
吴有铭 张胜林 刘经建 王建国 邓家喜 黄生根  
朱俊高 杜思义 赵晓彦

参 加 人 员：徐 峰 张剑锋

## 目次

<b>1 总则</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>2 术语和符号</b> .....	<b>- 2 -</b>
2.1 术语 .....	- 2 -
2.2 符号 .....	- 3 -
<b>3 基本规定</b> .....	<b>- 5 -</b>
<b>4 设计</b> .....	<b>- 9 -</b>
4.1 一般规定 .....	- 9 -
4.2 承载力验算 .....	- 11 -
4.3 稳定性验算 .....	- 16 -
4.4 构造 .....	- 17 -
<b>5 施工</b> .....	<b>- 19 -</b>
5.1 一般规定 .....	- 19 -
5.2 冲击成孔 .....	- 20 -
5.3 旋挖钻成孔 .....	- 21 -
5.4 人工挖孔 .....	- 22 -
5.5 清孔 .....	- 22 -
5.6 混凝土灌注 .....	- 23 -
5.7 施工异常处理 .....	- 23 -
<b>6 质量检验</b> .....	<b>- 25 -</b>
附录 A 溶洞顶板稳定性计算 .....	- 26 -
附录 B 桩基滑移稳定性验算 .....	- 30 -
本规程用词用语说明 .....	- 32 -



## 1 总则

**1.0.1** 为指导岩溶区公路桥梁桩基的设计与施工，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于岩溶区公路桥梁灌注桩基础的设计与施工。

**1.0.3** 岩溶区公路桥梁桩基设计与施工应遵循安全可靠、因地制宜、绿色环保的原则。

**1.0.4** 岩溶区公路桥梁桩基的设计与施工方案应根据水文、地质、地形、荷载、材料、上下部结构形式和施工条件等合理选用。

**1.0.5** 岩溶区公路桥梁桩基设计与施工应以相关勘察资料为依据。勘察资料应能准确反映地形、地貌、地层结构、岩溶地质、岩土的物理力学性质和水文地质条件等情况。

**1.0.6** 岩溶区公路桥梁桩基的设计与施工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 溶洞 karst cave

可溶性岩石被水溶蚀、破坏所形成的洞穴。

#### 2.1.2 溶槽 karst grike

可溶性岩石的节理裂隙受地表水和地下水的溶蚀与侵蚀作用而产生的槽状形态。

#### 2.1.3 岩溶竖井 karst cenote

由消泄岩溶地表水的落水洞进一步发育，或洞穴顶板塌陷而形成的竖向深井通道。

#### 2.1.4 串珠状溶洞 beaded karst caves

由于岩溶作用形成的呈垂直分布的多个溶洞。

#### 2.1.5 岩溶塌陷 karst collapse

覆盖在溶蚀洞穴之上的岩土体，由于岩溶顶板失稳产生的下陷或塌落现象。

#### 2.1.6 钻孔见洞率 rate of hole drilling

揭露出岩溶洞隙的钻孔占勘探钻孔总数的百分比。

#### 2.1.7 钻孔线岩溶率 linear rate of hole drilling

揭露到岩溶洞隙的钻孔，岩溶洞隙进尺之和与总进尺的百分比。

### 2.1.8 溶洞隔板 karst cave partition plate

多层溶洞或串珠状溶洞中位于垂直方向的上、下两相邻溶洞之间的岩层。

### 2.1.9 负摩阻力 negative friction

桩周土由于自重固结、湿陷、地面荷载作用等而产生大于基桩的沉降所引起的对桩表面的向下摩阻力。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用和作用效应有关符号

$F$ ——相应于荷载效应的基本组合，上部结构传递至基础顶面的竖向力；

$F_p$ ——溶洞顶板抗冲切承载力特征值；

$G$ ——基础自重和基础上的土重；

$M$ ——弯矩；

$M_H$ ——基岩有效深度顶面的弯矩；

$P_c$ ——基础顶面的集中荷载；

$Q$ ——顶板支承处的剪力；

$T$ ——溶洞顶板的总剪切力；

$W$ ——滑动岩体（包括基础）的自重。

### 2.2.2 抗力和材料性能有关符号

$c$ ——外倾滑动结构面的粘聚力；

$R_a$ ——单桩轴向受压承载力特征值；

$\sigma_t$ ——岩体抗拉强度；

$\tau$ ——岩体抗剪强度；

$\gamma$ ——溶洞顶板岩体的重度；

$\phi$ ——外倾滑动结构面的内摩擦角；

$\theta$ ——顶板岩体的应力扩散角。

### 2.2.3 几何参数有关符号

$A_p$ ——桩端截面面积；

$b$ ——垂直于弯矩作用平面的基桩边长；

$d$ ——桩身直径；

$H_t$ ——溶洞顶板的厚度；

$h_r$ ——桩嵌入完整、较完整基岩中的有效深度；

$u$ ——桩身周长；

$\alpha$ ——外倾滑动结构面的倾角；

$\varphi$ ——岩坡面的倾角。

#### 2.2.4 计算系数及其它有关符号

$K$ ——安全系数；

$\beta$ ——岩石的垂直抗压强度换算为水平抗压强度的折减系数；

$\lambda$ ——冲跨比；

$\zeta_s$ ——覆盖层土的侧阻力发挥系数。

### 3 基本规定

#### 3.0.1 岩溶区公路桥梁桩基地质勘察应探明下列内容：

- 1 溶洞的基本形态。
- 2 溶洞顶板、侧面的岩体质量，软弱结构面情况。
- 3 串珠状溶洞各层隔板的岩体质量、主要结构面及厚度等。
- 4 溶洞填充物和地下水情况。

#### 3.0.2 岩溶发育程度应符合表 3.0.2 的规定。

表 3.0.2 岩溶发育程度分级

岩溶发育程度分级	场地岩溶现象	钻孔见洞率 (%)	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、塌陷、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。	>40	>10
强发育	地表常见密集的岩溶洼地、漏斗、落水洞塌陷等多种岩溶形态，石芽(石林)、溶沟(槽)强烈发育(或覆盖)，溶蚀基岩面起伏大；地下岩溶形态常见较大型溶洞、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。	(25, 40]	(5, 10]
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；地下岩溶形态以规模较小的溶洞为主，出露岩溶泉。	(5, 25]	(2, 5]
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	≤2

注：1.同一等级的划分指标中，从高到低，定量指标有 1 个达标即可定为该等级。

2.岩溶发育程度分级以定量指标为主，定性指标为辅。在实际工作中，应结合现场实际情况对岩溶发育程度进行综合判定。

3.0.3 岩石的坚硬程度应符合表 3.0.3 的规定。

表 3.0.3 岩石坚硬程度分级

坚硬程度类别	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩
饱和单轴抗压强度标准值 $f_{rk}$ (MPa)	$f_{rk} > 60$	$60 \geq f_{rk} > 30$	$30 \geq f_{rk} > 15$	$15 \geq f_{rk} > 5$	$f_{rk} \leq 5$

3.0.4 岩石的风化程度应符合表 3.0.4 的规定。

表 3.0.4 岩石的风化程度分级

风化程度	野外特征	风化程度系数指标	
		波速比 $k_v$	风化系数 $k_f$
未风化	岩质新鲜, 偶见风化痕迹	0.9~1.0	0.9~1.0
微风化	结构基本未变, 仅节理面有渲染或略有变色, 有少量风化裂隙	0.8~0.9	0.8~0.9
中风化	结构部分破坏, 沿节理面有次生矿物, 风化裂隙发育, 岩体被切割成岩块。用镐难挖, 岩心钻方可钻进	0.6~0.8	0.4~0.8
强风化	结构大部分破坏, 矿物成分显著变化, 风化裂痕很发育, 岩体破碎, 用镐可挖, 干钻不易钻进	0.4~0.6	<0.4
全风化	结构基本破坏, 但尚可辨认, 有残余结构强度, 可用镐挖, 干钻可钻进	0.2~0.4	—

注: 1. 波速比  $k_v$  为风化岩石与新鲜岩石纵波速之比。

2. 风化系数  $k_f$  为风化岩石与新鲜岩石单轴抗压强度之比。

3. 岩石风化程度除按表列野外特征和定量指标划分外, 也可根据当地经验划分。

3.0.5 岩体的完整程度应符合表 3.0.5 的规定。

表 3.0.5 岩体完整程度分类

完整程度类别	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎
完整性指数	>0.75	(0.55, 0.75]	(0.35, 0.55]	(0.15, 0.35]	≤0.15

注: 完整性指数为岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的平方。

3.0.6 岩体基本质量应符合表 3.0.6 的规定。

表 3.0.6 岩体基本质量分级

岩体基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标 (BQ)
I	坚硬岩, 岩体完整	>550
II	坚硬岩, 岩体较完整; 较坚硬岩, 岩体完整	550~451

岩体基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标 (BQ)
III	坚硬岩, 岩体较破碎; 较坚硬岩, 岩体较完整; 较软岩, 岩体完整	450~351
IV	坚硬岩, 岩体破碎; 较坚硬岩, 岩体较破碎~破碎; 较软岩, 岩体较完整~较破碎; 软岩, 岩体完整~较完整	350~251
V	较软岩, 岩体破碎; 软岩, 岩体较破碎~破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩	≤250

3.0.7 溶洞类型应符合表 3.0.7 的规定。

表 3.0.7 溶洞分类

溶洞类型	洞径 $D$ (m)	高度 $h$ (m)	体积 $V$ ( $m^3$ )
大型溶洞	$D > 6$	$h > 5$	$V > 50$
中型溶洞	$3 < D \leq 6$	$1 < h \leq 5$	$10 < V \leq 50$
小型溶洞	$D \leq 3$	$h \leq 1$	$V \leq 10$

注: 1.洞径  $D$  是指溶洞水平发育方向最大的尺寸。

2.同一类型的三个指标中, 从高到低, 有 1 个达标即可定为该等级。

#### 条文说明

溶洞大小往往反映岩溶发育程度、规模, 影响工程方案、处治措施及施工安全, 本规程洞径规模划分基于工程实践, 并考虑到公路工程的横向宽度特点及桥梁桩基施工对溶洞高度和体积的敏感性。

3.0.8 桩基影响范围之内存在下列情况之一的岩溶发育场区, 宜对桩基设计与施工进行专项研究和论证:

- 1 单一溶洞洞高大于 8 m。
- 2 串珠状溶洞累计高度大于 10 m。
- 3 钻孔见洞率大于 60%。
- 4 钻孔线岩溶率大于 30%。

#### 条文说明

结合部分地区施工经验,对于单一溶洞洞高大于8 m时,施工质量控制难度较大,处理难度和费用都很高。对于串珠状溶洞累计高度大于10 m、钻孔见洞率大于60%或线岩溶率大于30%的场地,常见岩溶塌陷现象,属于极不稳定地段,严重威胁桥梁结构的安全。因此,对于这几类岩溶场地的桩基设计和施工要求进行专项研究和论证。

**3.0.9** 桩基混凝土结构的耐久性设计应符合现行《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310)的规定。

**3.0.10** 桩基施工应加强安全管理和环境保护,并按有关规定采取安全生产、环境保护的措施。

## 4 设计

### 4.1 一般规定

4.1.1 岩溶区桥梁桩基设计应符合下列规定：

- 1 桩身强度应按相关结构设计规范验算。
- 2 桩基应进行承载力与稳定性验算，必要时应进行变形验算。

4.1.2 岩溶区桥梁桩基竖向承载力验算取值应符合下列规定：

- 1 采用作用的频遇组合和偶然组合时，作用组合表达式中的频遇值系数和准永久值系数均应取 1.0，汽车荷载应计入冲击系数。
- 2 承载力特征值乘以相应的抗力系数  $\gamma_R$  应大于相应的组合效应，单桩承载力抗力系数  $\gamma_R$  应按表 4.1.2 的规定取值。

表 4.1.2 单桩承载力抗力系数  $\gamma_R$

受荷阶段	作用组合		$\gamma_R$
使用阶段	频遇组合	永久作用与可变作用组合	1.25
		仅计结构重力、预加力、土的重力、土侧压力和汽车荷载、人群荷载	1.00
	偶然组合		1.25
施工阶段	施工荷载组合		1.25

4.1.3 岩溶区桥梁桩基应根据岩溶发育程度和溶洞顶板状况进行设计，并应符合下列规定：

- 1 岩溶弱发育场地，宜采用端承型桩设计。
- 2 岩溶中等发育、强发育或极强发育场地，当存在可作为桩基持力层的级溶洞顶板时，宜采用端承型桩设计；当无合适持力层时，可采用摩擦型桩设计。

**4.1.4** 当上覆土层稳定可靠且桩基承载力满足要求时，桩基设计可将桩端置于上覆土层中。若桩端以下4倍桩径范围内存在软弱土层，还应考虑冲切破坏。

#### 条文说明

本条参考了 BS EN1997-1: 2004 的规定：“如果软弱地基的深度小于桩底直径的4倍，则需考虑冲切破坏。”

**4.1.5** 岩溶区遇溶槽或岩溶竖井采用摩擦型桩时，桩身置于岩体基本质量为 I、II、III级岩体中的深度不应小于5倍桩径。

#### 条文说明

对于竖向发育深度很大的溶槽或岩溶竖井，欲将基础置于溶槽或岩溶竖井的底板岩体内既不经济施工难度也大。这种情形下采用摩擦型桩设计，充分利用桩基侧阻力承担桩顶荷载作用，桩端勿需嵌入溶槽或溶洞底部的稳定岩体内，这一设计模式已为很多深挖难以到底的工程所使用。从提高安全度的角度考虑，这里要求桩身置于岩体中的深度不小于5倍桩径。

**4.1.6** 溶洞顶板的岩体基本质量为 I、II、III级时，且桩端以下厚度大于3倍桩径且不小于5m，宜利用溶洞顶板作为桩基持力层，并应验算最不利荷载作用下溶洞顶板的强度和稳定性。

#### 条文说明

桩端以下溶洞顶板的最小安全厚度与围岩类别、洞跨、基础型式、荷载等因素密切相关，本条参考了现行《岩溶地区建筑地基基础技术标准》(GB/T 51238)、《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093)等标准规定的“3倍桩底直径及5m深度范围内为完整或较完整岩层”。

**4.1.7** 端承型桩全断面嵌岩深度不宜小于0.5倍桩径，且不应小于0.5m。对倾斜基岩面应根据倾斜度和岩体完整性加大桩端入岩深度。

**4.1.8** 对于支承或嵌固于溶洞顶板的嵌岩桩，在满足承载力要求和本规程第4.1.7条规定的嵌岩深度要求时，宜减小桩端嵌岩深度。

**4.1.9** 岩溶区桩端持力层的岩体较破碎、岩溶裂隙发育时，可对桩底进行后压

浆，且应按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的有关规定进行承载力验算。

## 4.2 承载力验算

4.2.1 岩溶区桥梁桩基作用的计算，应符合下列规定：

- 1 承台底面以上的荷载全部由桩基承受。
- 2 桥台土压力从填土前的原始地面起算。

4.2.2 桩基符合下列条件之一时应考虑负摩阻力的影响，并按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的相关规定进行计算：

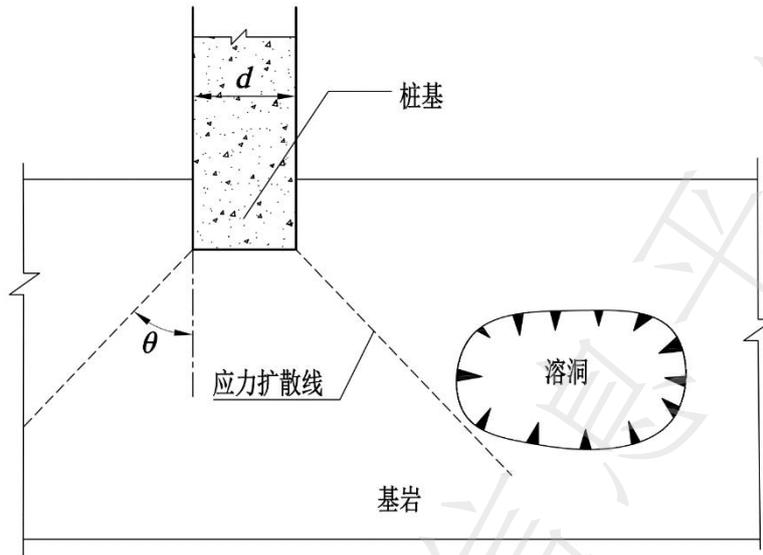
- 1 地表浅层及岩土接触带存在土洞并有塌陷可能。
- 2 桩基穿越较厚新近填土、欠固结土和膨胀土。
- 3 地下水位降低使桩周土体中的有效应力增大，并产生显著压缩沉降。
- 4 桩基穿越较厚的软弱土层，且附近场地可能进行大面积堆载或填土。
- 5 溶洞顶板岩体基本质量分级为IV、V级的岩体，成孔过程中可能出现顶板掉块。
- 6 桩基穿过含有较多欠固结软弱填充物的大型溶洞，且地下水位下降。

### 条文说明

对岩溶区以岩石为持力层的桩基础，需考虑桩侧岩（土）体失稳产生负摩阻力的影响，因岩体掉块产生负摩阻力的相关计算理论目前比较缺乏，一般参考土体负摩阻力理论进行分析计算。

4.2.3 满足下列条件时，可不考虑溶洞对桩基承载力的影响：

- 1 溶洞所处位置在桩端应力扩散范围外，见图 4.2.3。
- 2 溶洞顶板稳定且厚度不小于  $8d$ 。



$\theta$ —岩石应力扩散角, 可取  $45^\circ$ ;  $d$ —桩径

图 4.2.3 溶洞位置示意

4.2.4 对于深覆盖型岩溶地质, 当上覆土层稳定可靠且桩基承载力满足要求时, 桩基设计可将桩端置于上覆土层中, 单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  应按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363) 的规定进行计算, 并按本规程 4.2.2 条考虑负摩阻力的影响。

4.2.5 岩石地基单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  应按式 (4.2.5) 计算。

$$R_a = c_1 k_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (4.2.5)$$

式中:

$R_a$ ——单桩轴向受压承载力特征值 (kN);

$c_1$ ——根据岩石强度、岩石破碎程度等因素而确定的端阻力发挥系数, 按表 4.2.5-1 采用;

$k_1$ ——根据桩端以下溶洞顶板厚度而定的端阻力折减系数, 可按表 4.2.5-2 采用;

$A_p$ ——桩端截面面积 ( $m^2$ ), 对于扩底桩, 取扩底截面面积;

$f_{rk}$ ——桩端岩石的饱和单轴抗压强度标准值 (kPa);

$u$ ——各土层或各岩层部分的桩身周长 (m);

$n$ ——土的层数;

$m$ ——嵌岩段计入侧阻力的隔板数。

$c_{2i}$ ——根据岩石强度、岩石破碎程度等因素而定的第  $i$  层岩层的侧阻力发挥系数，按表 4.2.5-1 采用；

$h_i$ ——嵌岩段大于等于 2.0 m 的中风化及中风化以上的完整或较完整溶洞隔板的厚度 (m)。桩基穿越部位的单个溶洞隔板厚度  $h_i$  变化时，应取钻探揭露的该隔板厚度的最小值进行计算；溶洞顶板的岩面倾斜时，应以坡下方的嵌岩深度为  $h_i$  的计算取值；

$f_{rki}$ ——桩侧与  $h_i$  对应的溶洞隔板岩石的饱和单轴抗压强度标准值 (kPa)；

$\zeta_s$ ——覆盖层土的侧阻力发挥系数，根据桩端岩石的饱和单轴抗压强度标准值  $f_{rk}$  进行确定，见表 4.2.5-3；

$l_i$ ——承台底面或局部冲刷线以下第  $i$  层土的厚度 (m)，扩孔部分不计，当  $\Sigma l_i < 10$  m，且存在未经有效处理或未查明的隐伏土洞时，可不考虑桩侧土的正摩阻力；

$q_{ik}$ ——桩侧第  $i$  层土的侧阻力标准值 (kPa)，宜采用单桩摩阻力试验值或当地经验值，无试验条件和当地经验时，可根据成桩工艺按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363) 的规定取值，且不宜计入洞内天然填充物产生的侧摩阻力。

表 4.2.5-1 发挥系数  $c_1$ 、 $c_2$

岩石层情况	$c_1$	$c_2$
完整、较完整	0.6	0.05
较破碎	0.5	0.04
破碎、极破碎	0.4	0.03

注：(1) 入岩深度小于或等于 0.5 m 时， $c_1$  乘以 0.75 的折减系数， $c_2=0$ ；当按摩擦桩设计时， $c_1=0$ ；

(2) 对于地下水位以下和采用泥浆护壁的钻、冲孔桩，系数  $c_1$ 、 $c_2$  值降低 20% 采用，对桩端沉渣厚度  $t$ ， $d \leq 1.5$  m 时， $t \leq 50$  mm； $d > 1.5$  m 时， $t \leq 100$  mm；

(3) 对以中风化岩层作为持力层的情况， $c_1$ 、 $c_2$  分别乘以 0.75 的折减系数；

(4) 桩端有扩大头时，扩大头斜面部分取  $c_2=0$ ；

(5) 对于串珠状溶洞或多层溶洞地质条件下的桩基，当溶洞顶（隔）板岩体的基本质量等级为 I 级或 II 级，且厚度大于等于 2.0 m 时，可将溶洞顶（隔）板产生的桩侧摩阻力乘以 0.75 的折减系数。

表 4.2.5-2 端阻力折减系数  $k_1$

桩端下顶板厚度 (m)	$3d$	$4d$	$5d$	$6d$	$7d$	$> 8d$
$k_1$	0.25	0.45	0.65	0.80	0.90	1.00

注：厚跨比  $\eta \geq 0.5$  时， $k_1$  按上表取值； $\eta < 0.2$  时， $k_1$  乘以 0.50 的折减系数； $0.2 \leq \eta < 0.5$  时， $k_1$  的折减系数按线性内插取值。

表 4.2.5-3 覆盖层土的侧阻力发挥系数 $\zeta_s$ 

$f_{rk}$ (MPa)	2	15	30	60
$\zeta_s$	1.0	0.8	0.5	0.2

- 注：(1)  $f_{rk}$  为非表列数值时， $\zeta_s$  可线性内插取值；  
 (2) 当  $f_{rk} > 60$  MPa 时， $\zeta_s$  可按  $f_{rk}=60$  MPa 取值；  
 (3)  $f_{rk} < 2$  MPa 时，可按摩擦桩计算。

### 条文说明

对于岩质地基，当直接利用岩石饱和单轴抗压强度标准值和桩侧土的侧阻力标准值计算单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  时，本规程参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363-2019) 中第 6.3.7 条关于支承在基岩上或嵌入基岩中的钻(挖)孔桩、沉桩的单桩轴向受压承载力特征值的计算表达式，并指出当岩溶桩基的桩端持力层为岩石时，其单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  由上覆土层的摩阻力、嵌岩段的摩阻力和端阻力三部分组成，并给出了  $R_a$  的计算公式，桩基设计时根据具体的地质情况对竖向承载力的三个组成部分进行取舍；串珠状溶洞对于桩身穿过溶洞顶(隔)板的岩体是否计算侧阻力的问题，在工程实践中也是备受关注的问题，若不分具体条件一律不计顶(隔)板岩体的侧阻力，桩基设计时桩长可能会显著增加，这不符合桩基的实际工作特性，而当串珠状溶洞的顶(隔)板厚度较大时岩体的完整性和质量往往就有保障，溶洞顶(隔)板岩体的侧阻力就可做到有依据地加以合理利用，计入侧阻力的溶洞顶(隔)板应首先应满足自身稳定性，成孔过程中不发生掉块现象，并具有一定的厚度(不小于 2.0 m)。

岩溶桩基下伏溶洞对桩端阻力存在不同程度的削弱作用，在对岩溶区单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  进行计算时，引入了根据溶洞顶板厚度而定的端阻折减系数  $k_1$ ，认为当溶洞顶板稳定且厚度达到  $8d$  ( $d$  为桩径) 时，则不考虑溶洞对桩基承载力特性的影响，按一般条件下端承型桩设计。

表 4-1 顶板厚度与桩端阻力折减系数  $k_1$ 

顶板厚度 (m)	$0.5d$	$1d$	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$	$6d$	$7d$	$> 8d$
$k_1$	0.02	0.07	0.15	0.29	0.51	0.69	0.83	0.89	1.00

注：顶板厚度为桩径  $d$  的倍数。

本规程在对以溶洞顶板作为桩端持力层的单桩竖向承载力计算时，参考相关研究，引入了考虑溶洞顶板厚度的端阻折减系数  $k_1$ ，且在桩端顶板厚度小于等于 3 倍桩底直径及 5 m 时均不计端阻力，并对部分系数进行了适当调整，同时引入厚跨比  $\eta$  对阻折减系数  $k_1$  进行折减。

4.2.6 岩溶区桩基按摩擦型桩设计时，侧阻承载力特征值不应低于设计荷载的1.25倍。

4.2.7 岩溶区承受水平力较大、河床受水流冲刷等条件下的桥梁桩基应嵌入基岩，并按桩底嵌固进行设计。桩基嵌入基岩中的有效深度应按下列公式进行计算：

1 圆形截面桩可按式（4.2.6-1）计算：

$$h_r \geq \frac{1.27H + \sqrt{3.81\beta f_{rk} d M_H + 4.84H^2}}{0.5\beta f_{rk} d} \quad (4.2.6-1)$$

2 矩形截面桩可按式（4.2.6-2）计算：

$$h_r \geq \frac{H + \sqrt{3\beta f_{rk} b M_H + 3H^2}}{0.5\beta f_{rk} b} \quad (4.2.6-2)$$

式中：

$h_r$ ——桩嵌入完整、较完整基岩中（不计强风化层、全风化层和局部冲刷线以上，以及桩身穿越溶洞段的基岩）的有效深度（m），且  $h_r$  不应小于 1.0 m；

$M_H$ ——相应于荷载效应标准组合作用于基岩有效深度  $h_r$  顶面的弯矩（kN·m），其值等于桩顶的弯矩设计值扣除有效深度  $h_r$  以上的岩（土）体提供的弯矩；

$H$ ——相应于荷载效应标准组合作用于基岩有效深度  $h_r$  顶面的水平力（kN），其值等于桩顶的水平力设计值扣除有效深度  $h_r$  以上的岩（土）体提供的水平力，桩身穿越溶洞段基岩提供的水平抗力可采用 m 法线性计算；

$f_{rk}$ ——岩石饱和单轴抗压强度标准值（kPa）；

$\beta$ ——岩石的垂直抗压强度换算为水平抗压强度的折减系数，取 0.5~1.0，应根据侧面岩层构造确定，节理发育岩石取小值，节理不发育岩石取大值；

$d$ ——桩身直径（m）；

$b$ ——垂直于弯矩作用平面的基桩边长（m）。

### 条文说明

岩溶区桥梁桩基在以满足水平承载力的基本要求确定其最小嵌岩深度时按桩底嵌固进行设计，为保证桩基在水平荷载作用下的安全稳定性，不考虑覆盖土层、浅层的岩溶裂隙发育带及部分溶洞顶板对桩基水平承载力的作用，公式计算得到的结果为桩基嵌入有效持力层（稳定的完整、较完整基岩）的深度。其中，不考虑覆盖土层、浅层的岩溶裂隙发育带及部分溶洞顶板对桩基水平承载力的贡献是为了安全储备考虑，但实际上桩基受到的水平力通常是由浅部岩

(土)体承担,尤其是对于深长桩基而言,水平荷载传递的深度范围更是十分有限,对于覆盖土层厚度大且土洞不发育的场地,验算桩基的水平承载力时,还需考虑被穿溶洞顶板及其以上土体的水平抗力。由于岩溶作用使岩(石)体原本的完整性遭到不同程度的破坏,使岩层的强度、刚度等大幅度地降低,而降低的幅度又与溶洞发育的空间位置、大小、形态等密切相关,目前尚无有效的量化方法,本条按水平承载力计算最小嵌岩深度的方法只是一种简化的方法,工程中遇到桩前存在溶洞且场地没有足够空间来远离溶洞时,常采用提高桩径及嵌固深度的方法来提高水平承载力,对浅部岩溶洞穴也采取回填等技术措施。

**4.2.8** 溶洞顶板厚度满足本规程第 4.1.6 条规定的端承型桩,可不计算桩基沉降量。

### 4.3 稳定性验算

**4.3.1** 利用溶洞顶板作为桩端持力层时,应按本规程附录 A 进行溶洞顶板的稳定性验算。

**4.3.2** 稳定性验算时,溶洞顶板所受荷载作用应为顶板的岩体自重、顶板上覆的土体自重和附加荷载之和,附加荷载应为最不利荷载组合下的桩端荷载。

**4.3.3** 当桩端以下发育有临空的外倾软弱结构面时,应按本规程附录 B 验算向临空面的滑动稳定性,稳定系数不应小于 1.35。

#### 条文说明

在岩溶区的工程建设中,经常会遇到覆盖岩溶临空面问题,这里的覆盖岩溶临空面指的是覆盖岩溶场地中构筑物基底应力影响范围内具有陡倾角土岩界面的一种岩土组合地质体。由于溶槽、溶沟和石芽等岩溶现象的存在,使得基岩岩面起伏很大,在槽谷或裂隙边缘常形成的陡峭岩壁。当基础落在陡壁边缘时,陡壁相对于基础就构成临空面。岩溶临空面一般是天然稳定的,可能出现上部荷载通过桩基传至软弱结构面而出现失稳的现象。对于端承型桩,要求桩端应力扩散范围内无岩体临空面,也就是需要有足够的岩体厚度,并且需要通过计算确定其稳定性。

**4.3.4** 利用溶洞顶板作为桩端持力层时,溶洞顶板的厚度应满足下列要求:

$$H_t \geq K \times H_j \quad (4.3.4-1)$$

$$H_j = \max(H_1, H_2, H_3, H_4) \quad (4.3.4-2)$$

式中：

$H_t$ ——溶洞顶板的厚度 (m)；

$H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$ ——按本规程附录 A 计算的溶洞顶板厚度。

$K$ ——安全系数，一般取 1.5~2.0，岩体完整性差和重要工程安全系数  $K$  取大值，否则取小值。

## 4.4 构造

### 4.4.1 岩溶区桥梁桩基的布置应符合以下规定：

1 群桩的布置宜采用矩形、梅花形或环形等对称布置，设计时可根据承台底部及周边溶洞的大小与分布情况，对桩距和桩径进行适当调整，减少溶洞对桩基承载力的影响。

2 群桩的布置宜使群桩基础的承载力合力点与竖向永久荷载合力作用点重合，并使桩基在受水平力和力矩较大方向具有较大抗弯截面模量。

3 采用摩擦型桩时，钻孔桩的中距不应小于桩径的 2.5 倍。

4 采用端承型桩时，支承或嵌固于完整或较完整基岩中的钻（挖）孔桩的中距，不应小于桩径的 2.0 倍，当桩底或四周有溶洞时，应按基底附加应力扩散情况（大小和范围）和溶洞尺寸之间的关系分析确定。

### 条文说明

本条规定了岩溶区桥梁桩基布置和中距的基本要求，主要是为了减小桩基间的应力叠加效应及桩基施工时对相邻桩的影响。对于岩溶地质极强发育和强发育地段，基岩面起伏往往很大，在桩距相差几十厘米时，也不乏桩长相差十几米和部分桩端一部分支承于基岩上而一部分悬空、桩身缩径严重的工程实例。因此，桩基布置需综合考虑群桩承台底部及四周溶洞分布情况进行适当调整。

4.4.2 桩身混凝土强度等级、桩与承台及横系梁的连接，应符合现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363) 的规定。

4.4.3 岩溶区桥梁桩基的桩身配筋除应符合现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363) 外，尚应符合下列规定：

1 桩基宜全长配置钢筋。

2 箍筋宜采用螺旋式或环状形式。

3 对位于桩顶、溶洞交界面等剪力较大部位的箍筋宜适当加密，间距不应大于 100 mm。

全国团体标准信息平台

## 5 施工

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 岩溶区桥梁桩基施工应具有逐桩钻孔柱状图、地质纵横剖面图等岩土工程详细勘察资料。

**5.1.2** 岩溶区桥梁桩基施工前应制定专项施工方案和应急处治预案。

**5.1.3** 岩溶区桥梁桩基的施工，应根据设计要求、成孔深度、岩土条件、施工条件等选择合适的成孔方式。

**5.1.4** 施工前宜进行工艺试桩，以获得相应的工艺参数。

#### 条文说明

泥浆护壁成孔桩进行试成孔，一般选择在工程桩外且有代表性的地质钻孔的位置，主要是检验岩土的可钻性、成孔的自稳定、成孔的垂直和倾斜岩面处理的难易程度、地下水丰富时是否引起塌孔等，试成孔是保证工程施工能否顺利进行的必要过程。

**5.1.5** 相邻两桩孔不大于 2.5 倍桩径时，宜间隔交错进行作业。

**5.1.6** 泥浆材料宜选用优质黏土，必要时可增加一定比例的膨润土和烧碱调制。配合比宜根据施工地层、造浆原材料、水质等条件，通过试验确定。

**5.1.7** 泥浆的使用和排放应采取环保措施，施工作业应加强地下水的保护，废弃泥浆及作业废水的处置还应符合现行《污水综合排放标准》（GB 8978）及环境保护有关标准的规定。

## 5.2 冲击成孔

**5.2.1** 冲击成孔应根据桩基直径及岩溶发育情况选择钻机型号。

**5.2.2** 钢护筒的设置应符合下列规定：

1 护筒顶宜高于地面 0.3m 或水面 1.0~2.0m，同时应高于桩顶设计高程 1.0m。当钻孔内有承压水时，护筒顶高度应高于稳定后的承压水位 2.0 m 以上。

2 当岩溶极强发育和强发育时，钢护筒宜全面入岩，护筒底不应落在倾斜岩面上。

3 护筒埋设的倾斜度宜控制在 1%以内，且埋设偏差不应超过 50 mm。

**5.2.3** 短护筒可采用填埋方式进行设置，长护筒宜边成孔边跟进，可采用加压、振动、锤击并辅以筒内除土的方法打入。

**5.2.4** 冲击成孔作业应符合下列规定：

1 当浅层中、小型溶洞内有可塑、软塑质亚黏土等充填物且溶洞不漏水时，宜采用加入片石及黏土冲击成孔施工；当存在一定的卵石、碎石、黏土等充填物时，宜压注水泥砂浆；无充填或半充填的情况下可采用片石加黏土的反复冲孔或灌注低标号混凝土，然后进行冲孔。

2 对于大型溶洞，有松散充填物时可抛填片石或黏土。当充填物为石质时，宜以回填黏土为主；当充填物为土时，宜以回填片石为主。无填充物时可采用钢护筒跟进法施工。

3 对串珠状溶洞，宜采用钢护筒跟进法施工。

**5.2.5** 当冲击成孔至溶洞顶 1.0m 左右时，应减小冲程，通过短冲程快速冲击方式逐渐击穿洞顶，避免卡钻。

**5.2.6** 钻孔过程中应及时进行取样、试验和记录；当与设计岩体强度差别较大时，应及时反馈。

**5.2.7** 钻孔至设计高程后，应进一步探明桩端持力层情况，及时核验持力层是否符合设计要求，并根据钻渣岩样特征、钻孔记录和钻进速度等综合判断，符合设计要求时方可终孔。

### 5.3 旋挖钻成孔

**5.3.1** 旋挖钻成孔作业地面应坚实平整，作业过程中地面不得下陷，工作坡度不得大于 3.5%。

**5.3.2** 旋挖钻成孔工艺的选择应符合下列规定：

- 1 地下水位以上且不易塌孔的地层宜采用干作业旋挖成孔。
- 2 地下水位以下及易塌孔或缩径的地层宜采用泥浆护壁旋挖成孔。
- 3 地下水位较高、有承压性的或难以成孔的地层宜采用护筒护壁旋挖成孔。

**5.3.3** 旋挖钻孔的护筒可采用钢护筒，并应符合下列规定：

- 1 护筒内径宜大于钻头直径 200~300 mm，直径误差应小于 10mm。
- 2 护筒顶端应高出地面 0.3m，钻孔内有承压水时，护筒顶高度应高于稳定后的承压水位 2.0 m 以上。
- 3 护筒埋设的倾斜度宜控制在 1%以内，且埋设偏差不应超过 50 mm
- 4 护筒外应采用黏性土回填夯实。

**5.3.4** 旋挖钻孔施工应符合下列规定：

- 1 施工时钻杆应保持竖直稳固，位置准确，防止钻杆晃动引起扩大孔径，钻进过程中应随时清理孔口积土，钻进速度应根据地层变化情况及时调整。
- 2 当遇溶洞较小时可用黏土包将其充填，并轻压慢转反复扫孔。
- 3 遇到半边岩或串珠状溶洞时，旋挖钻机应轻加压，放慢钻进速度，平稳地通过溶洞区域。
- 4 当桩基溶洞高度超过钻具的高度时，应加强钻具的导向能力，并根据溶洞是否有填充物选用片石土、砂浆、混凝土等进行回填处理。
- 5 当岩层倾斜、岩层表面不平或溶洞（槽、隙）导致钻头受力不均时，可采用混凝土或片石回填，修正钻孔的垂直度。
- 6 如遇孤石，宜采用取芯钻头减压慢钻，保证钻孔的垂直度。

**5.3.5** 旋挖钻孔接近溶洞顶板 0.5 m 时应控制进尺，放慢钻进速度，并准备充足的泥浆及回填材料。当钻透顶板引起孔内泥浆急速下降时，应及时进行处理，避免塌孔。

**5.3.6** 钻孔至设计高程后，应进一步探明桩端持力层情况，及时核验持力层是否符合设计要求，并根据钻渣岩样特征和钻孔记录等综合判断，符合设计要求时方可终孔。

## 5.4 人工挖孔

**5.4.1** 人工挖孔施工应按现行《公路工程施工安全技术规范》(JTG F90)的规定编制专项施工方案。

**5.4.2** 作业人员入孔前应对孔内气体进行检测,孔内空气污染物超过现行《环境空气质量标准》(GB 3095)规定的三级标准浓度限值,且无通风措施时,不得采用人工挖孔施工。

**5.4.3** 人工挖孔施工应符合下列规定:

- 1 应根据水文、地质条件制定孔壁支护方案。
- 2 封口护圈高出地面应不小于 300mm,护壁厚度应不小于 100mm,护壁混凝土强度应不低于 C25。
- 3 孔内遇到岩层需爆破时宜采用浅眼松动爆破法。
- 4 挖孔时当遇有流塑状土、流砂、涌水使孔壁坍塌时,应立即停止施工,待采取有效措施处理后,方可继续施工。
- 5 当孔底岩层为倾斜产状时,应凿平。
- 6 距离桩底 500mm 深度时,应采取人工开挖方式确保岩体完整性。

**5.4.4** 在溶洞上部作业挖穿溶洞顶板 1.0m 前,应采取措施防止突然塌顶坠落。

**5.4.5** 挖孔施工中护壁处理应符合下列规定:

- 1 如遇小型溶洞可采用混凝土填充,桩侧有封闭的较小溶洞时,清孔后可直接浇筑护壁混凝土。
- 2 当遇中型溶洞有充填物难以成型时,应清除全部充填物,将洞底修凿平整,以袋装土、浆砌片石或片石回填,形成桩孔的外壁,并及时灌注护壁混凝土。
- 3 当遇大型溶洞时,宜在溶洞高度范围内设置钢护筒。

**5.4.6** 挖孔达到设计高程后,应进一步探明桩端持力层情况,及时核验持力层是否符合设计要求,并根据孔底岩样特征、挖孔记录等综合判断,符合设计要求时方可终孔。

## 5.5 清孔

**5.5.1** 桩基终孔后应对孔深、孔径和孔的垂直度进行检查,符合要求后方可清孔。

**5.5.2** 应根据设计要求、成孔方法、机具设备条件和地层情况选择换浆、抽浆、掏渣、空压机喷射等方法清孔，孔底沉渣厚度应满足设计要求。

**5.5.3** 在灌注水下混凝土之前，应再次检查孔内泥浆性能指标和孔底沉渣厚度，不符合要求时应进行二次清孔。

## 5.6 混凝土灌注

**5.6.1** 混凝土灌注除应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 在溶洞发育高度范围内应加强探测混凝土面位置，并及时调整导管埋深。

2 应判断孔口泥浆溢出量与混凝土浇筑量是否一致，当泥浆溢出量较少时，应放慢拔管速度继续浇筑混凝土，直至恢复正常。

3 混凝土浇筑完成后，应间隔一定时间检查混凝土面是否出现下降，直至混凝土初凝。

**5.6.2** 灌注桩后压浆的注浆工艺、注浆量控制与质量检验等应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650)和《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》(T/CECS G: D67-01)的有关规定。

## 5.7 施工异常处理

**5.7.1** 对施工中出现的埋钻、塌孔、漏浆、岩溶通道串浆、串孔等异常情况应及时进行处理。

**5.7.2** 出现埋钻情况时，宜采用气举反循环或强力泵迅速冲洗，排出沉渣及坍塌土体后将钻锤提出。

**5.7.3** 塌孔处理应符合下列规定：

1 孔壁局部坍塌，孔内水头无明显损失时，宜向孔内抛填泥浆原料，加大泥浆比重。

2 当穿越小型、中型溶洞造成塌孔时，应快速补充泥浆，并分层抛入片石与黏土混合料，回填高度宜为2~3m，再用小冲程钻进。宜多次回填，反复冲砸，阻止漏浆后再重新钻进。

**5.7.4 漏浆处理时宜符合下列规定：**

**1** 当岩溶裂隙和小型溶洞、孤立溶洞出现漏浆时，可及时向孔内补充泥浆，加稠泥浆浓度，并向孔内抛填碎石、黏土或混合料，采用小冲程、低频率方法冲孔钻进，可多次回填，反复冲砸。

**2** 当中型、大型溶洞漏浆时，宜向孔内抛填水泥、片石与黏土混合料，分层加入袋装水泥，回填高度宜超过漏浆位置，再轻放钻锤挤压混合料及袋装水泥，小冲程击打，形成水泥石浆；且宜停工 12 h 以上，待水泥石浆凝固后，再冲击成孔。

**3** 当多层溶洞漏浆时，宜重复第 2 款所述工作，直到完成一个桩孔为止。

**4** 当钻孔到达桩底高程后漏浆时，宜采用第 2 款所述方法堵漏泥浆；再次出现漏浆现象时，宜抛填片石，浇筑桩底混凝土，待混凝土达到一定强度后再继续清孔排渣。

**5.7.5 发生岩溶通道串浆、串孔现象时应暂停向下施工，宜根据地质资料采用下列处理方式：**

**1** 对于中、小型溶洞可向孔内回填黏土，并掺入一定量的片石、卵石、漂石等石料，使其形成具有一定强度和厚度的护壁阻隔两孔。

**2** 对于大型溶洞可将整袋黏土抛入孔内，分层加入一定量的袋装水泥，防止施工过程中出现漏浆、塌孔现象。

## 6 质量检验

**6.0.1** 桩基工程应进行成孔、成桩质量检验。必要时应进行单桩竖向承载力检验，对承受水平力较大的桩还应进行水平承载力检验。

**6.0.2** 混凝土、钢筋笼的质量检验应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的有关规定。

**6.0.3** 成孔质量检验应包括孔位、孔深、孔径、垂直度、孔底沉渣厚度及桩端持力层厚度等，并应符合现行《公路工程基桩检测技术规程》（JTG/T 3512）和《灌注桩成孔质量检测技术规程》（T/CECS 596）的有关规定。

**6.0.4** 桩基成桩质量检验应包括钢筋笼的制作与吊放、混凝土灌注、混凝土强度、桩位、桩身完整性等，并应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的有关规定。

**6.0.5** 岩溶区单桩竖向抗压承载力、单桩竖向抗拔承载力和单桩水平承载力的静载试验，应符合现行《公路工程基桩检测技术规程》（JTG/T 3512）的有关规定；采用自平衡法进行单桩竖向抗压承载力和单桩竖向抗拔承载力检测时，应符合现行《基桩静载试验 自平衡法》（JT/T 738）的有关规定。

## 附录 A 溶洞顶板稳定性计算

**A.0.1** 溶洞顶板应进行顶板抗弯、抗剪验算，验算荷载应考虑均布荷载和集中荷载作用，其中桩底荷载按集中荷载考虑，顶板自重、顶板上覆土体（或填充物）自重按均布荷载考虑，且应符合下列规定：

1 由弯矩控制的溶洞顶板岩层厚度应按 (A.0.1-1) 公式计算：

$$H_1 \geq \sqrt{\frac{6M}{b\sigma_t}} \quad (\text{A.0.1-1})$$

2 由剪力控制的顶板支承处岩层厚度应符合下列公式的要求：

$$H_2 \geq \sqrt{\frac{4Q}{\tau}} \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中：

$M$ ——弯矩 (kN·m/m)。

$Q$ ——顶板支承处的剪力 (kN/m)；

$H_1$ ——由弯矩控制的顶板厚度 (m)；

$H_2$ ——由剪力控制的顶板支承处厚度 (m)；

$\sigma_t$ ——岩体抗拉强度 (kPa)；

$\tau$ ——岩体抗剪强度 (kPa)。

### 条文说明

抗弯、抗剪验算顶板厚度是将溶洞顶板简化为梁等力学模型。裂隙位于顶板跨中时简化为悬臂梁；裂隙位于顶板支承处时简化为简支梁；顶板及支承处岩体均完整时简化为两端固定梁，计算顶板承受的最大弯矩、最大剪力。岩体抗拉强度、抗剪切强度与岩石强度及岩体完整性有关，对于石灰岩，岩体抗拉强度一般为岩石抗压强度标准值的 1/8，岩体抗剪切强度一般为岩石抗压强度标准值的 1/12。

**A.0.2** 按极限平衡条件计算桩端岩溶顶板受剪切承载力时，应符合下列公式的要求：

$$H_3 = \frac{F_T}{\tau u_p} + h_r \quad (\text{A.0.2-1})$$

验算时应符合下式要求：

$$F_T \geq F + G + \gamma V_t \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中:

$F_T$ ——溶洞顶板的抗剪切承载力特征值 (kN);

$F$ ——相应于荷载效应的基本组合 (分项系数取为 1.0), 上部结构传递至桩基础顶面的竖向力 (kN);

$G$ ——桩基础自重和基础上的土重 (kN);

$H_3$ ——由桩端抗剪破坏控制的溶洞顶板厚度 (m);

$h_r$ ——溶洞顶板桩基嵌岩深度 (m);

$u_p$ ——桩基的周长 (m);

$\gamma$ ——溶洞顶板岩体的重度 (kN/m<sup>3</sup>);

$V_t$ ——剪切破坏柱体的计算体积 (m<sup>3</sup>);

$\tau$ ——岩体抗剪强度 (kPa)。

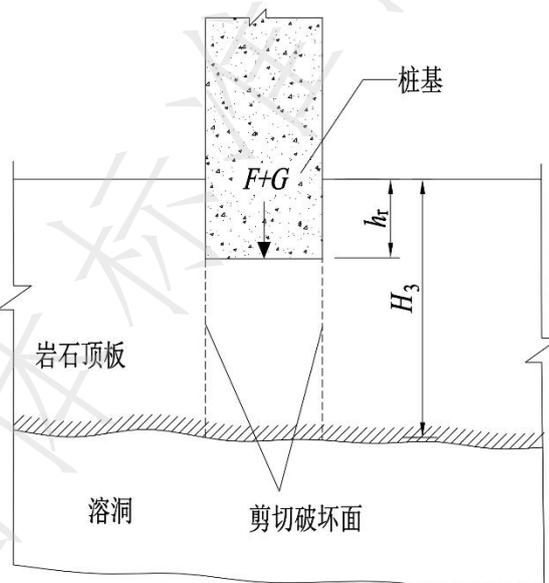


图 A.0.2 溶洞顶板抗剪切计算简图

**A.0.3** 当桩端支承或嵌固于完整、较完整岩体的溶洞顶板, 洞顶岩体的地基反力分布范围较小 (与溶洞的平面尺寸相比) 时, 宜按冲切破坏锥体计算顶板岩体的抗冲切承载力。顶板岩体的抗冲切承载力可按式 (A.0.3-1) 进行计算:

$$H_4 = \frac{F_p (\lambda + 0.5)}{0.24 \sigma_t u_m} + h_r \quad (\text{A.0.3-1})$$

圆形截面:  $u_m = [d + \lambda(H_f - h_r)] \pi \quad (\text{A.0.3-2})$

$$\text{矩形截面: } u_m = u + 4\lambda(H_f - h_r) \quad (\text{A.0.3-3})$$

验算时应符合下式要求:

$$F_p \geq F + G + \gamma V_p \quad (\text{A.0.3-4})$$

式中:

$F_p$ ——溶洞顶板抗冲切承载力特征值 (kN);

$F$ ——相应于荷载效应的基本组合 (分项系数取为 1.0), 上部结构传递至桩基础顶面的竖向力 (kN);

$G$ ——基础自重和基础上的土重 (kN);

$H_4$ ——由桩端冲切破坏控制的溶洞顶板厚度 (m);

$\lambda$ ——冲跨比,  $\lambda = \tan\theta$ , 可取  $\lambda = 0.3 \sim 0.5$  (极软岩取 0.3, 软质岩取 0.4, 硬质岩取 0.5);

$d$ ——桩基直径或扩底段的直径 (m);

$h_r$ ——溶洞顶板桩基嵌岩深度 (m);

$u_m$ ——冲切破坏锥体在  $\frac{(H_4 - h_r)}{2}$  高度处的周长 (m);

$V_p$ ——冲切破坏锥体的计算体积 (m<sup>3</sup>);

$\gamma$ ——溶洞顶板岩体的重度 (kN/m<sup>3</sup>);

$\sigma_t$ ——岩体抗拉强度 (kPa)。

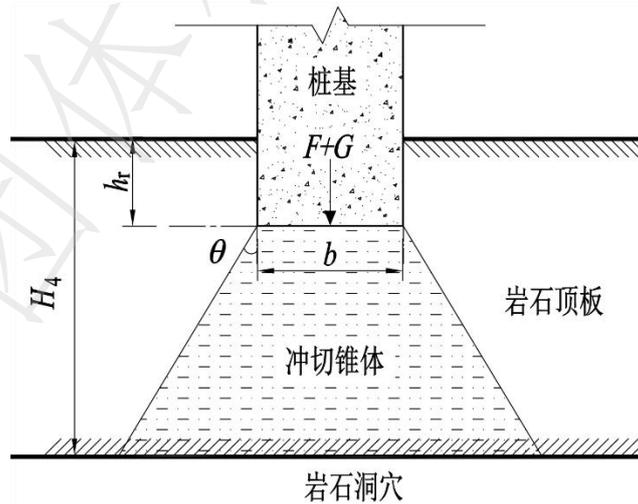


图 A.0.3 溶洞顶板抗冲切计算简图

#### 条文说明

本条列出了顶板抗冲切承载力计算公式, 当洞顶岩体的地基反力分布范围

较小时比较适用。在岩石地基中，岩石一般可视为不可压缩地基，上部荷载通过基础传递到岩石地基时，基地应力以直接传递为主，应力呈柱形分布，当荷载持续增加使岩石裂缝被压密产生微变形时，应力存在向基础底面外有限范围扩散，呈钟形分布。

## 附录 B 桩基滑移稳定性验算

**B.0.1** 桩基以下发育有临空的外倾软弱结构面时 (图 B.0.1), 其抗滑移稳定性应符合下式要求:

$$\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cLb_h}{(W + P_c) \sin \alpha} \geq 1.35 \quad (\text{B.0.1})$$

式中:

$W$ ——滑动岩体 (包括基础) 的自重 (kN);

$P_c$ ——基础顶面的集中荷载 (kN);

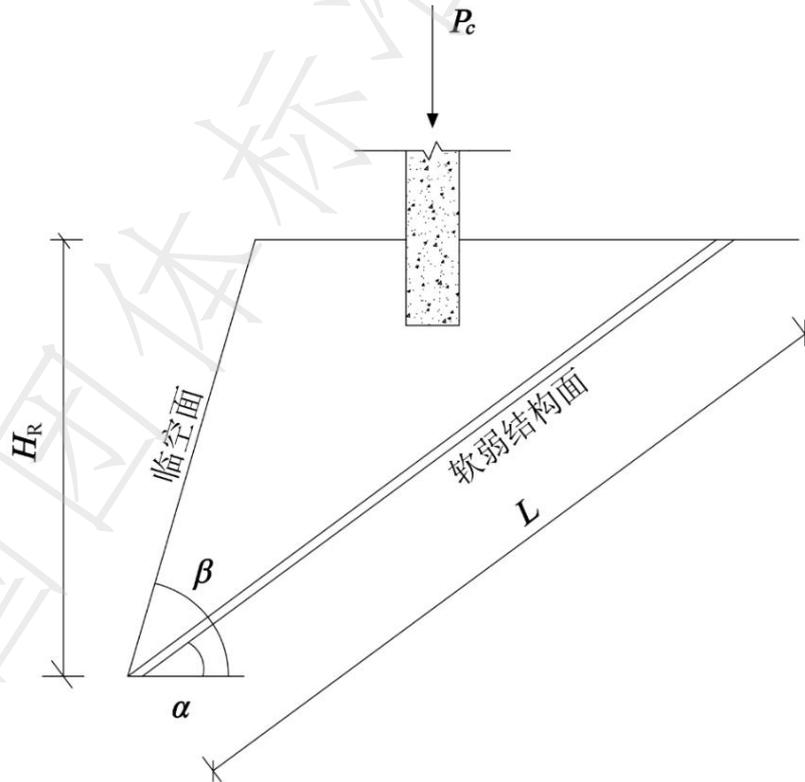
$\alpha$  ——外倾滑动结构面的倾角 ( $^\circ$ );

$\phi$ ——外倾滑动结构面的内摩擦角 ( $^\circ$ );

$c$ ——外倾滑动结构面的粘聚力 (kPa);

$L$ ——滑动岩体的滑动面长度 (m);

$b_h$ ——滑动面的平均宽度 (m)。



$H_R$ ——滑动岩体的高度 (m);  $\beta$ ——基岩坡面的倾角 ( $^\circ$ )

图 B.0.1 抗滑移稳定性验算示意

### 条文说明

因外倾滑动结构面并非完全贯通，即部分胶结和部分张开的组合形式，对于外倾滑动结构面内摩擦角、粘聚力的取值，一般通过现场对控制性软弱结构面的大型直剪试验，同时结合地方设计经验综合分析后确定。但开展现场直剪试验具有难度大、成本高、周期长，且试验结果可能离散性大，试验组数较少时代表性不强的特点。根据对工程岩体划分的级别，通过查表法获得岩体的物理力学参数经验值，而不必进行大量的现场直剪试验，前人已作过大量的深入研究，并积累了较多的成熟经验。因此，关于岩体结构面抗剪强度指标的选取，在无试验资料和地区经验作为参考时，在初步设计阶段可以根据岩体基本质量等级或岩体结构面两侧岩石的坚硬程度及结构面的结合程度，参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)选用，或者根据结构面类型和结构面结合程度，参照《建筑边坡工程技术规范》(GB50330)选用。

**B.0.2** 滑动结构面内存在地下水时，还应考虑地下水对桩基抗剪强度指标的不利影响。

### 条文说明

地基稳定性计算时，一般根据岩土实际性状选择物理力学指标值。地下水在围岩裂隙中存在或流动时，可溶解岩层中的某些矿物，造成岩块崩塌，使岩体抗剪强度降低，削弱岩体的抗滑移稳定性，大量坡体失稳问题几乎都与地下水有关。因此，当外倾滑动结构面内存在地下水时，还需考虑地下水对桩基抗滑移稳定的不利影响。

## 本规程用词用语说明

### 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) 在规程条文及其它规定中，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) 当引用本规程中的其他规定时，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“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。