



T/CECS G XXXX: 2022

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

# 岩溶区公路桥梁桩基设计与施工技术规程

Technical Specification for Design and Construction of Highway Bridge by Pile

Foundation

(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

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范

Technical Specification for Design and Construction of Highway Bridge by Pile Foundation

T/CECS G: XXX—2022

(征求意见稿)

主编单位：贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：2022 年××月××日

×××× 出版社

## 前 言

根据中国工程建设标准化协会建标协字[2018]015号《关于印发<2018年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》要求，编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考国内外相关标准和规范，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分6章和2个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、设计与计算、施工、质量检测与承载力测试。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，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。本规程在执行过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司（地址：贵州省贵阳市观山湖区阳关大道100号；邮编：550081；电话：15285932375；邮箱 tangz@gzjtsjy.com），以便修订时研用。

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

东南大学

同济大学

中交第一公路工程局集团有限公司

贵州省交通建设集团有限公司

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参加审查人员：



目 录

1 总则 ..... - 1 -

2 术语和符号 ..... - 3 -

    2.1 术语..... - 3 -

    2.2 符号..... - 6 -

3 基本规定 ..... - 9 -

4 设计与计算 ..... - 12 -

    4.1 一般规定..... - 12 -

    4.2 桩基设计..... - 14 -

    4.3 承载力计算..... - 19 -

    4.4 稳定性分析..... - 26 -

    4.5 基本构造..... - 29 -

5 施工 ..... - 32 -

    5.1 一般规定..... - 32 -

    5.2 溶洞预处理..... - 34 -

    5.3 冲击成孔灌注桩..... - 35 -

    5.4 人工挖孔灌注桩..... - 38 -

    5.5 旋挖钻成孔灌注桩..... - 40 -

    5.6 灌注混凝土..... - 43 -

    5.7 施工应急处理..... - 44 -

6 质量检测与承载力测试 ..... - 46 -

    6.1 一般规定..... - 46 -

    6.2 质量检测..... - 47 -

    6.3 承载力测试..... - 50 -

附录 A 溶洞的稳定性计算..... - 51 -

附录 B 桩基抗滑移稳定性验算..... - 55 -



# 1 总则

**1.0.1** 为规范和指导岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工，按照安全、耐久、适用、经济、环保的原则，制定本规程。

## 条文说明

我国岩溶地质分布具有范围广、面积大的特点，涉及全国多个省份，约占国土面积的30%以上，尤以西南地区的广西、贵州、云南、湖南和江西等省份为甚。岩溶地质的存在，增加了公路桥梁桩基设计、施工的难度和风险。为规范和指导岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工，编制组在收集了国内外岩溶地区灌注桩设计与施工领域已取得的研究成果，结合我国近年来岩溶灌注桩勘察、设计与施工工程实践的基础上制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于碳酸盐类岩溶地区公路桥梁灌注桩的设计与施工。

## 条文说明

本规程适用于岩溶地区高速公路和其他各等级公路桥梁灌注桩的设计、施工、检测与验收，适用范围限于碳酸盐岩类岩溶，编写内容以桩基设计与施工为主，对岩溶地质勘察、桩基质量检验与验收，以及承载力检测，也提出了基本的工作要点与技术要求。

**1.0.3** 岩溶地区公路桥梁桩基的设计、施工与检测，应积极推广采用新技术、新结构、新材料、新工艺、新检测方法，提高桩基工程的质量。

## 条文说明

在岩溶地区公路桥梁桩基的设计与施工过程中，倡导积极推广采用新技术、新结构、新材料、新工艺、新检测方法。对于采用未列入本规程的新技术、新结构、新材料、新工艺、新检测方法，要求编制不低于本规程水平的质量标准和工

艺要求，并经有关部门批准后方可实施。

**1.0.4** 岩溶地区公路桥梁桩基的设计、施工与检测，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。

征求意见稿

## 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、破坏所形成的空洞。

#### 2.1.2 土洞 soil cave

发育在可溶岩上覆土层中的洞穴，其形成条件为具有易被潜蚀、吸蚀的土，土下基岩中有岩溶洞穴、裂隙存在，在土与岩石间有频繁活动的地下水。

#### 2.1.3 竖井 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深度数十米至数百米的垂直深井通道。

#### 2.1.4 串珠状溶洞 beaded karst cave

串珠状溶洞是由于岩溶作用形成的一系列连串如串珠状的溶洞，有若干个较大的洞室，洞室之间有比较狭窄的洞道连接。

#### 2.1.5 岩溶地基 karst subgrade

岩体中存在溶洞、溶蚀等不良地质现象的地基。

#### 2.1.6 溶洞稳定性分析 stability analysis of karst cave

综合考虑地质构造、岩层产状、岩性和层厚、洞体形态及埋藏条件、顶板情况、溶洞充填情况、地下水、桥梁荷重及重要性等影响溶洞稳定性的因素，采用定性和（或）定量方法分析和评价溶洞顶板的稳定性。

---

### **2.1.7 不良地质 unfavorable geological condition**

由于各种地质作用和人类活动而造成的工程地质条件不良的地质现象的统称。

### **2.1.8 桩基础 pile foundation**

由设置于岩土中的桩和联接于桩顶的承台组成的基础。

### **2.1.9 大直径嵌岩桩 large diameter rock-socketed pile**

直径大于或等于 1.5 m 的嵌岩桩。

### **2.1.10 超长桩 super long pile**

桩长大于或等于 90 m 的钻孔灌注桩。

#### **条文说明**

近年来在岩溶地区的一些大型桥梁工程中, 钻孔灌注桩的长度已接近或超过百米, 这大大超出了普通的桩基长度, 也超出了常用钻孔设备的施工能力。超长桩对施工工艺与其它临时设施有特殊的要求, 为避免引起对岩溶地区超长桩定义的混乱, 有必要对其进行界定, 规定岩溶地区桩长大于等于 90 m 的钻孔灌注桩为超长桩。

### **2.1.11 悬挂式嵌岩桩 suspended pile**

桩体埋设在溶槽或竖井侧壁的稳定岩层内, 设计时不考虑桩端阻力贡献, 只计桩侧阻力即可满足竖向承载力要求的嵌岩桩。

#### **条文说明**

对于以垂直状发育为主的岩溶地质体 (如溶槽、竖井), 若竖向溶槽宽度或竖井直径小于设计桩径, 可将桩体埋设在溶槽或竖井侧壁的稳定岩层内, 在桩长达到一定值后只计侧阻力即可满足桩基竖向承载力的要求, 将这种嵌岩桩称为悬挂式嵌岩桩或空底桩。

### **2.1.12 超流态水泥土 fluid cement soil**

由粘土或弃土、(粉) 细砂、水泥、外加剂和水等按一定比例配置并搅拌均匀, 具有较高流动性, 凝结硬化后具有一定的抗渗性和强度, 用于岩溶地基

止水防渗、填充加固等目的，呈流态状的人工填料。

#### **2.1.13 超流态水泥土岩溶处理 fluid cement soil foundation treatment**

采用超流态水泥土对溶沟（槽）、溶蚀（裂隙、漏斗）、溶洞和伴生土洞等岩溶地质进行填充、加固的一种地基处理方法。

#### **2.1.14 灌注桩后压浆 post grouting pile**

灌注桩成桩后一定时间，通过预设于桩身内的注浆导管及与之相连的桩端、桩侧注浆阀注入水泥浆，使桩端、桩侧土体（包括沉渣和泥皮）得到加固，从而提高单桩承载力，减小沉降。

#### **2.1.15 桩端注浆 pile tip grouting**

桩端注浆通过预设于桩身内的注浆导管及与之相连的桩端注浆阀注入水泥浆，使桩端土体（包括沉渣）得到加固，提高持力层的桩端阻力。

#### **2.1.16 桩侧注浆 pile side grouting**

通过预设于桩身内的注浆导管及与之相连的桩侧注浆阀注入水泥浆，使桩侧土体（包括泥皮）得到加固，提高桩侧摩阻力。

#### **2.1.17 组合压浆 combined grouting**

对同一根桩同时采用桩端注浆和桩侧注浆的联合压浆方式。

#### **2.1.18 负摩阻力 negative skin friction, negative shaft resistance**

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

#### **2.1.19 岩溶塌陷 Karst collapse**

因岩溶作用而产生的地面塌陷现象。

#### **2.1.20 浅层溶洞 Shallow karst cave**

本规程所指浅层溶洞是指埋深不大于 10m 的溶洞。

#### **2.1.21 深部溶洞 Deep karst cave**

---

本规程所指深部溶洞是指埋深大于 10m 的溶洞。

### 2.1.22 稳定液 stabilized solution

在旋挖钻孔施工中为防止地基土坍塌、使地基土稳定的一种液体，以水为主体，其中溶解有以膨润土或 CMC（梭甲基纤维素）为主要成分的各种原材料。

## 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（分项系数取为 1.0），上部结构传递至基础顶面的竖向力，实际验算时可取端阻力设计值；

$F_k$ ——荷载效应的标准组合下，作用于桩基承台顶面的竖向力；

$F_t$ ——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；

$G_k$ ——桩基承台和承台上部土体自重标准值；

$H$ ——基岩顶面的水平力；

$H_k$ ——荷载效应的标准组合下，作用于桩基承台底面的水平力；

$H_{ik}$ ——荷载效应的标准组合下，作用于第  $i$  基桩的水平力；

$M$ ——弯矩；

$M_H$ ——基岩顶面的弯矩；

$M_{xk}$ 、 $M_{yk}$ ——荷载效应的标准组合下，作用于承台底面，绕通过群桩形心的  $x$ 、 $y$  主轴的力矩；

$N_k$ ——荷载效应的标准组合轴心竖向力作用下，基桩的平均竖向力；

$N_{ik}$ ——荷载效应的标准组合偏心竖向力作用下，第  $i$  基桩的竖向力；

$N_{k\max}$ ——荷载效应的标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力；

$P$ ——顶板所受总荷载，为顶板的岩体自重、顶板上覆的土体自重和附加荷载之和；

$P_c$ ——基础顶面的集中荷载；

$T$ ——溶洞顶板的总剪切力；

$V$ ——支座处的剪力；

$W$ ——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；  
 $f_{rk}$ ——桩端岩石的饱和单轴抗压强度标准值；  
 $f_{rki}$ ——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；  
 $f_s$ ——岩体计算抗剪强度；  
 $f_t$ ——岩石计算抗拉强度；  
 $q_{ik}$ ——桩侧第  $i$  层土的侧阻力标准值；  
 $R_h$ ——单桩水平承载力特征值；  
 $R_a$ ——单桩轴向受压承载力特征值；  
 $\gamma$ ——溶洞顶板岩体的重度；  
 $\alpha$ ——外倾滑动结构面的倾角；  
 $\phi$ ——外倾滑动结构面的内摩擦角。

### 2.2.3 几何参数有关符号

$A$ ——桩身截面面积；  
 $A_p$ ——桩端截面面积；  
 $b$ ——垂直于弯矩作用平面的基桩边长；  
 $b_h$ ——滑动面的平均宽度；  
 $b_l$ ——梁板的宽度；  
 $d$ ——桩身直径；  
 $H$ ——顶板岩层的厚度；  
 $H_c$ ——顶板塌落高度；  
 $H_0$ ——坍落前洞体最大高度；  
 $h$ ——溶洞顶板的厚度；  
 $h_i$ ——溶洞隔板厚度；  
 $h_r$ ——桩嵌入完整、较完整基岩中的有效深度；  
 $L$ ——滑动岩体的滑动面长度；  
 $l$ ——溶洞跨度；  
 $l_i$ ——承台底面或局部冲刷线以下第  $i$  层土的厚度；  
 $s$ ——试验荷载作用下桩身弹性压缩量的估算值；  
 $u$ ——桩身周长；  
 $u_l$ ——溶洞平面的周长；  
 $u_m$ ——冲切破坏锥体在  $h/2$  高度处的周长；  
 $V_r$ ——冲切破坏锥体的计算体积；

---

$x_i$ 、 $x_j$ 、 $y_i$ 、 $y_j$ ——第  $i$ 、 $j$  基桩至  $y$ 、 $x$  轴的距离。

#### 2.2.4 计算系数及其它有关符号

$c_1$ ——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；

$c_{2i}$ ——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；

$K$ ——安全系数；

$k_1$ ——根据桩端以下溶洞顶板厚度而定的端阻力折减系数；

$m$ ——嵌岩段计入侧阻力的隔板数；

$n$ ——土的层数；

$n_p$ ——群桩中的桩数；

$\beta$ ——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** 岩溶区公路桥梁勘察除应符合《岩溶区公路工程地质勘察规程》T/CECS G: Dx-01 的规定外, 尚应重点查明以下内容:

- 1 溶洞的几何形态;
- 2 溶洞顶底板及侧面的岩体质量及软弱结构面;
- 3 溶洞填充物和地下水情况;
- 4 串珠状溶洞之间的岩体质量及厚度, 岩体的结构面, 顶板厚度及持力层建议;
- 5 设计要求提供的岩土体物理力学参数。

#### 条文说明

岩溶区桥基勘察应结合岩溶发育强度及对工程的影响程度结合设计需要开展针对性勘察, 查清岩溶发育的地质背景和条件, 岩溶发育特征, 溶洞形态, 对溶洞稳定性进行评价, 并提出设计要求提供的岩土物理力学参数, 给出桩基类型和桩端持力层建议, 对有可能产生负摩阻力时分析其对桩基承载力的影响, 需提供负摩阻力系数和减少负摩阻力的建议措施。评价溶洞稳定性时, 可采取洞体顶板岩样和充填物土样作物理力学性质试验, 必要时可进行现场顶板岩体的载荷试验。对岩溶区桥梁勘察应重视地区经验, 宜采用测绘和调查、钻探并结合综合物探等多种手段和方法进行, 多种勘察方法相互印证, 针对特大型溶洞和地下暗河的情况应进行专门研究, 制定专门的补充勘探方案, 若岩溶区勘察体量较大, 可结合物探方法进行勘察, 对物探结果表明较大(洞高大于 3 m)的溶洞须进行钻探。

**3.0.2** 岩溶地区的桥位布置应尽量避免避开岩溶强烈发育地带、存在稳定性差的大型溶洞、地下暗河或主要地下水通道等地段。

### 条文说明

《铁路桥涵地基和基础设计规范》TB 10093-2017 规定, 岩溶地段的工程地质选线应遵循下列原则: 线路应绕避岩溶强烈发育地带、可溶岩与非可溶岩的接触带、构造发育带、岩溶水富集区及岩溶水排泄带; 线路应绕避地面塌陷分布密集、有土洞分布的覆盖型岩溶地段; 线路应选择在非岩溶化地区或岩溶发育微弱、范围最窄、层数最少、顶板稳固、受岩溶水影响小的地带通过。地下暗河或地下水主要通道修筑桩基可能造成地下水文环境变化, 在上述复杂岩溶地质条件下进行桩基工程施工容易出现漏浆、卡钻、掉钻, 甚至大面积的岩溶塌陷等问题, 影响工程进度甚至无法保证工程的顺利进行, 施工存在较大的安全隐患, 施工质量也难以保证, 同时处治难度大、费用高, 在设计阶段尽量遵循绕避原则。对于桥下溶洞发育差别较大, 个别墩台下溶洞特别发育, 其他墩台不很发育的情况, 通过调整孔跨布置避开串珠状或难以处理的较大溶洞。

#### 3.0.3 岩溶地区桥梁桩基应按照下列两类极限状态进行设计:

- 1 正常使用极限状态: 桩基达到桥梁正常使用阶段的变形限值或达到耐久性要求某项限值的状态;
- 2 承载能力极限状态: 桩基达到最大承载能力、整体失稳破坏或发生不宜继续承载变形或变位的状态。

#### 3.0.4 岩溶区桥梁桩基验算应满足的以下基本要求:

- 1 地基基础应进行承载力和稳定性计算, 必要时尚应进行沉降验算;
- 2 桩基设计应进行附加荷载组合效应作用下溶洞顶板稳定性验算。

### 条文说明

桩基附加荷载组合效应是指桩顶荷载加上桩体自重减去土体的浮重后作用于溶洞顶板的荷载, 附加荷载是导致溶洞失稳的直接因素。

**3.0.5** 存在下列情况之一的岩溶场地, 桩基设计与施工宜进行专门研究与论证, 且勘察手段应加强:

- 1 单一溶洞顶底相对高差大于 8 m;
- 2 钻孔见洞(隙)率大于 60%;
- 3 钻孔线岩溶率大于 30%;
- 4 溶槽或串珠状竖向溶洞发育深度超过 50 m。

### 条文说明

对于钻孔见洞（隙）率大于 60%或线岩溶率大于 30%的场地，岩溶塌陷常见，属于极不稳定地段，严重威胁结构物的安全。结合部分地区施工经验，近年来随着施工技术水平的提高，对于洞高小于 8 m，串珠状溶洞发育深度小于 50 m 的基础施工已有保证。但对于超出这个范围的场地，施工质量较难保证，处理难度和费用都高，工期较难控制。因此，对于这类岩溶场地的桩基施工和设计应进行专门论证。

**3.0.6** 岩溶地区公路桥梁桩基设计采用的作用效应组合与相应的抗力限值，应符合现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 的规定。

**3.0.7** 岩溶地区桥梁桩基的设计使用年限不应低于上部结构的设计使用年限。基础混凝土结构的耐久性设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定。

## 4 设计与计算

### 4.1 一般规定

4.1.1 岩溶地区桥梁的群桩基础，其单桩的桩顶作用应按下列公式计算：

1 轴心竖向力作用下

$$N_k = \frac{N_k + G_k}{n_p} \quad (4.1.1-1)$$

2 偏心竖向力作用下

$$N_{ik} = \frac{N_k + G_k}{n_p} \pm \frac{M_{xk} y_i}{\sum y_j^2} \pm \frac{M_{yk} x_i}{\sum x_j^2} \quad (4.1.1-2)$$

3 水平力作用下

$$H_{ik} = \frac{H_k}{n_p} \quad (4.1.1-3)$$

式中：

$F_k$ ——荷载效应的标准组合下，作用于桩基承台顶面的竖向力（kN）；

$G_k$ ——桩基承台和承台上部土体自重标准值，对稳定的地下水位线以下部分应扣除水的浮力（kN）；

$n_p$ ——群桩中的桩数；

$N_k$ ——荷载效应的标准组合轴心竖向力作用下，基桩的平均竖向力（kN）；

$N_{ik}$ ——荷载效应的标准组合偏心竖向力作用下，第  $i$  基桩的竖向力（kN）；

$M_{xk}$ 、 $M_{yk}$ ——荷载效应的标准组合下，作用于承台底面，绕通过群桩形心的  $x$ 、 $y$  主轴的力矩（kN·m）；

$x_i$ 、 $x_j$ 、 $y_i$ 、 $y_j$ ——第  $i$ 、 $j$  基桩至  $y$ 、 $x$  轴的距离（m）；

$H_k$ ——荷载效应的标准组合下，作用于桩基承台底面的水平力（kN）；

$H_{ik}$ ——荷载效应的标准组合下，作用于第  $i$  基桩的水平力（kN）。

4.1.2 单桩承载力计算应符合下列要求：

## 1 轴心竖向力作用下

$$N_k \leq R_a \quad (4.1.2-1)$$

偏心竖向力作用下，除应满足上式外，尚应符合下式要求：

$$N_{k \max} \leq 1.20R_a \quad (4.1.2-2)$$

式中：

$R_a$ ——单桩轴向受压承载力特征值（kN）；

$N_{k \max}$ ——荷载效应的标准组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力（kN）；

## 2 水平荷载作用下

$$H_{ik} \leq R_h \quad (4.1.2-3)$$

式中：

$R_h$ ——单桩水平承载力特征值（kN）。

**4.1.3** 对利用溶洞顶板作为桩端持力层的桥梁桩基设计，宜遵循溶洞顶板承载力控制为主，变形控制为辅的原则，以定性判断与定量分析相结合的方式进行。

### 条文说明

本条规定对于利用溶洞顶板作为桩端持力层的桥梁桩基，在进行溶洞顶板的强度计算和稳定性分析时应遵循的一般原则，顶板的强度和稳定性问题直接影响桥梁桩基和上部结构的安全，设计人员应予以高度重视。溶洞顶板稳定性的影响因素包括：溶洞顶板厚度、溶洞跨度及形态，岩层产状、节理、裂隙状况及岩石的物理力学性质、荷载情况、岩石含水量与温度变化，以及洞内水流的溶蚀和搬运的机械破坏作用等。目前对岩溶顶板稳定性的定量或半定量评价，仍处于探索阶段，部分技术文献和规程规范中提出了采用结构力学中的梁、板和拱等理论评价方法，但值得注意的是，由于岩体强度参数的变异性和计算边界条件不易明确等限制性因素，理论计算结果难免具有不确定性。考虑到由于岩溶地质条件的复杂性，尚应根据实际情况，在有可靠设计经验与勘探资料的基础上慎重确定，目前实测资料很少，岩溶定量评价缺少经验，现行评价洞体稳定性的方法往往具有较大的安全储备。在工程实践中，应积极创造条件，更多地进行一些洞体顶板试验，积累较多的现场实测资料。

**4.1.4** 溶洞顶板稳定性评价宜采用定性与定量相结合的方法，遵循先定性后定量的基本原则。根据具体工程特点和地区经验进行桩基溶洞顶板稳定性评价，也可结合工程经验类比法对桩基溶洞顶板的稳定性进行评价，必要时可对桩基位移、

围岩应力与变形等实施监测。

### 条文说明

岩溶地质的复杂性使得设计参数的代表值和变异性往往不易掌握,计算理论与预测结果也不一定完全符合实际,此外,由于影响岩溶地基稳定性的因素很多,现行勘探手段一般很难准确查明岩溶特征,目前岩溶地区桥梁桩基的稳定性评价仍然是以定性和经验为主,定量分析为辅的方式进行,其中,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;定量评价方法主要包括稳定系数法、数值分析法和应用统计法;此外,还有较为常用的半定量评价方法,主要有荷载结构法、顶板厚跨比法、估算顶板安全厚度法和现场试验法等。

**4.1.5** 岩溶地区桩端持力层岩体较破碎、岩溶裂隙发育时宜进行后压浆,设计时可将在后压浆处理作为桩基承载力的组成部分。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标准《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》T/CECS G: D67-01 的规定。

## 4.2 桩基设计

### 4.2.1 岩溶地区桥梁桩基选型应符合以下要求:

**1** 对基岩裸露或覆盖层较薄的岩溶场地,应结合溶洞顶板情况对采用嵌入岩层的扩大基础或采用桩基础两种方案进行技术经济比较,当采用扩大基础时应嵌入较完整基岩,采用桩基础时不得使用大直径的短桩;

**2** 基岩埋深较深、基岩下溶洞发育强烈,桩端无较好的持力层时,可采用摩擦型桩,并采用后注浆技术进行加固;

**3** 当基岩面起伏很大且埋深较大时,应对摩擦型群桩和支承于完整基岩内的端承型群桩进行技术经济比较,同一承台下相邻基桩的底面高程不宜有较大差异;

**4** 同一承台下的桩基宜采用相同的桩径,不宜选用压缩性差异较大的土层作桩端持力层,不宜同时采用摩擦型桩和端承型桩。

**5** 当场地岩溶强发育,对串珠状和厅堂式大型溶洞的岩溶地质,宜采用群桩基础。

### 条文说明

由于岩溶地区的基岩面通常起伏较大,溶沟(槽)、溶蚀(裂隙、漏斗)、石芽和伴生土洞往往较发育,且无全风化、强风化岩层过渡等特点,桥梁桩基的设

计与选型,需根据岩溶地质条件、荷载大小、岩(土)层性质、桥梁结构类型和使用要求、桩距、桩径、施工条件及工期、环境影响和工程造价等因素,因地制宜进行综合比较后确定,可采用摩擦桩、端承桩和嵌岩桩。

当采用桩基础比采用扩大基础、箱筏基础或地基加固处理等地基基础方案,在技术经济和施工条件等方面更优越时,可考虑采用桩基础,但无论采用何种基础型式,都应避免因桥梁基础的设置而导致桥址的区域水文地质环境发生显著变化。大直径短桩的刚度大,应力集中现象比较明显,岩溶区桩基设计时不应采用这一桩型。

岩面起伏很大是指邻近桩底的基岩面埋深相差超过 5m,埋深较大(不小于 30m)时,属于典型的土岩组合地基,上覆土质地基压缩性不均匀现象显著,考虑到嵌岩桩桩长变异性过大,嵌岩施工难以实施,桩基设计时可采用直径小、数量多的摩擦型群桩,并采用后注浆加固技术,形成整体性和刚度很大的块体基础,减小基础的不均匀沉降,或者考虑采用支承于完整基岩的端承桩,并保证基础宽度方向的底面高程不宜有较大差异,但需注意此时桩基非嵌岩段的长度会相差较大,起伏岩面也会增加桩基的施工难度。因此,对于岩面起伏很大且埋深较大的岩溶地质,在具体设计时需要结合施工、构造、沉降等多方面的因素,在摩擦型群桩和端承群桩之间比选。

端承桩和摩擦桩的承载力发挥机理和沉降不同,桩径和桩长也是影响桩基承载变位特性的两个重要因素,同一承台下的桩基,当采用部分端承桩型和部分摩擦桩型,以及直径不同和不应选择压缩性差异较大的岩土层作桩基持力层,由于摩擦桩的沉降会大于端承桩,可能导致桥梁结构产生不均匀沉降,而为了消除这种不均匀沉降,承台的厚度势必增大,导致不经济且显著增加施工难度。

当基岩岩溶强发育时,基岩的溶洞较大,串珠状和厅式溶洞相互交错,溶沟、溶槽密布,岩面起伏极大。在一些桩基不合格工程中,经 CT 检查发现,有些桩端一部分支承于基岩上,一部分悬空,桩身缩径严重;所以,单根桩端实际承载力及工作状态与设计相差较大,可靠度不高;群桩相比单桩的优点就是将上部荷载扩散到由基岩的整体承担,而不是由基岩的某一处或某一点来承担;单根桩承台结构破坏的失效概率高于群桩,一个承台下的桩数越多,承台结构破坏的失效概率就越低;从荷载类型来讲,集中荷载较均布荷载对结构作用更为不利,因而单桩对类似溶洞顶板稳固性及破坏性要较面荷载严重的多。

**4.2.2 岩溶地区的桩基设计**,当基岩上覆土层的稳定性有保证,且桩端持力层承载力及厚度满足要求,可利用上覆土层作为桩端持力层。

---

### 条文说明

岩溶地区的嵌岩桩在成孔中常发生漏浆、塌孔和埋钻现象,给施工造成困难,因此应首先考虑利用上覆土层作为桩端持力层的可行性。利用上覆土层作为桩端持力层的条件是上覆土层是稳定的土层,其承载力及厚度应满足要求。

**4.2.3** 当桩端以下 3d 及 5m 深度范围内为完整或较完整岩层时,可利用溶洞顶板作为桩端持力层,并应对顶板进行强度计算和稳定性验算,当溶洞顶板不能作为桩端持力层时,桩端应进入强度和稳定性符合要求的岩层或对溶洞进行处理。

### 条文说明

桩端持力层满足“3 倍桩底直径及 5m 深度范围内为完整或较完整岩层”的规定,是参考国内如《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》TB10093、《岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》GDJTG/T A01 等规范规定,桩端平面以下顶板的最小厚度与围岩类别、洞跨、基础型式、荷载等因素密切有关,其中,岩层“完整或较完整”要求依据《公路工程地质勘察规范》JTG C20 的岩体完整程度划分。从经济角度考虑,溶洞顶板条件满足“3 倍桩底直径及 5m 深度范围无裂隙分布时”可以利用顶板作为桩基础持力层,除考虑其强度外,还应进行稳定性验算。

**4.2.4** 桩径大于竖向溶槽宽度或竖井直径时,可选择嵌岩段基本质量等级为Ⅲ级及Ⅲ级以上的岩体作为桩基持力层,按悬挂式嵌岩桩进行桩基竖向承载力设计,最小嵌岩深度不应小于 5 倍桩径,并于基岩面上加做承台。

### 条文说明

对于竖向发育深度很大的溶槽或溶洞处,欲将基础置于溶槽或溶洞的底板岩体内既不经济施工难度也大,如果设计桩径大于溶槽宽度或溶洞直径,即桩身是嵌入溶槽或溶洞侧壁稳定岩体中的,可采用悬挂式嵌岩桩(即空底桩)模式进行设计计算,只需桩基的侧阻力满足荷载要求,勿需桩底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,同时本条规定嵌岩深度不应小于 5 倍桩径,并于基岩面上加做适当尺寸的承台,以及本规程第 4.3.4 条中竖向承载力计算时侧阻力应等于或大于设计荷载的 1.25 倍的规定,都是从提高安全度的角度考虑的。

**4.2.5** 对串珠状竖向岩溶地质极发育的地段,当初选的设计桩长大于 90 m,

且无法找到合适的溶洞顶板时,可将桩端置于厚度不小于 3 m 的完整或较完整的溶洞顶板,按悬挂式嵌岩桩进行设计,同时在基岩面加做承台,并采用后压浆工艺对溶洞顶板进行加固处理。

### 条文说明

对串珠状溶洞发育地区的桥梁桩基,宜选择洞隙群间可能提供足够侧阻力的完整、较完整溶洞顶(隔)板作为桩基持力层;对于串珠状岩溶地质极发育的建设场地,桩基设计时可能会出现一直增加桩长(桩长可达百米)桩端持力层也无法满足“3 倍桩底直径及 5 m 深度范围内为完整或较完整岩层”的要求,而岩溶桩基现场试验结果表明:岩溶溶洞仅在其分布位置对桩基的侧阻力有影响,对其它岩层段的侧阻力影响不大。因此,即使是对位于串珠状岩溶地质极发育地段的嵌岩桩,当桩基嵌岩达到一定深度时,桩侧阻力将承担桩顶的大部分竖向荷载,甚至是全部荷载。鉴于此,桩基设计时可假定桩顶设计荷载全部由桩侧持力层承担,而桩端力作为安全储备,不考虑其对桩基竖向承载力的贡献,即当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,将桩基按悬挂式嵌岩桩(空底桩)进行设计。同时,为保证桩基承载力的安全性,提高桩端持力层顶板的胶结程度、减小桩端沉渣对桩底刚度的不利影响,也为了防止溶洞顶板突然坍塌造成桩基破坏的安全事故,宜同时在基岩面加做适当尺寸的承台,并采用后压浆工艺对桩端持力层进行加固处理。

**4.2.6** 对选择完整或较完整溶洞顶板作为桩端持力层的嵌岩桩,当  $H_1 + H_2 \leq 6d$  ( $H_1$  为嵌岩深度,  $H_2$  为溶洞顶板厚度,  $d$  为桩径) 时,桩基嵌岩深度应遵循“溶洞顶板安全性为首要考虑条件,嵌入基岩宜浅不宜深”的原则,桩基嵌岩深度宜取  $1d \sim 3d$ ,且嵌岩深度不小于 0.5 m。

### 条文说明

溶洞顶板作为桩端持力层时,其安全厚度为顶板总厚度扣除嵌岩深度后的值,因此,对选择完整或较完整溶洞顶板作为桩端持力层的嵌岩桩,应考虑桩基础与岩溶洞室之间的相互影响。结合广东省地方标准《岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》的研究成果,对于溶洞顶板存在双因素相互制约的情况,如图 4.1 所示。当基岩面与溶洞顶面距离(完整持力层厚度)为 5 倍的桩径左右时,若是桩端穿过溶洞也无法找到合适的落脚点,同时穿越多层溶洞也会大大的增加成本和施工风险。因此当嵌岩深度和溶洞顶板厚度一定,尤其两者之和不大于  $6d$  时,

嵌岩深度和桩端下溶洞顶板厚度相互制约的情况下,为了确保溶洞顶板的安全稳定,其厚度应尽可能大,且满足不小于  $3d$  厚度的要求,嵌岩深度应遵循“溶洞顶板安全性为首要考虑条件,嵌入基岩宜浅不宜深”的原则,桩基嵌岩深度宜在  $1d \sim 3d$  之间取值,且嵌岩深度不小于  $0.5\text{ m}$ 。

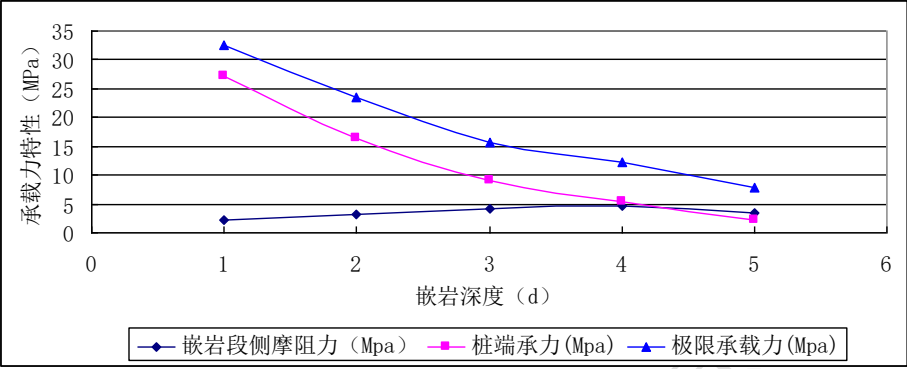


图 4.1 双制约因素下承载力特性分析

**4.2.7 岩溶地区嵌岩桩桩端以下顶板厚度应大于  $2.5d$  且不小于  $4\text{ m}$ 。**

**条文说明**

桩基荷载分担比是影响持力层溶洞安全性的重要影响因素,当采用摩擦型桩设计时,可以有效的减小桩端的应力,提高桩端下溶洞的安全性。同时桩身和桩周土的最大滑移距离是保证桩基侧摩阻力的前提,当溶洞顶板太薄时,桩土相对滑移距离没有达到最大桩侧摩阻力时,溶洞顶板已经破坏。因此为了保证桩土的最大滑移距离,使桩侧摩阻力充分发挥,应保证桩端面以下溶洞顶板厚度大于  $2.5d$  且不小于  $4\text{ m}$ 。

**4.2.8 桩端全断面嵌入完整或较完整硬质岩持力层的深度不宜小于  $0.5d$ , 且不小于  $0.5\text{ m}$ , 对岩溶基岩面倾斜度大于  $30\%$  的地段, 宜根据倾斜度和岩石完整性适当加大桩端入岩深度。**

**条文说明**

关于嵌岩桩的嵌岩深度原则上按计算确定,计算中综合反映荷载、上覆土层、基岩性质、桩径、桩长诸因素,桩端部应全断面嵌入倾斜的完整和较完整岩的深度不宜小于  $0.5d$  (嵌入倾斜的完整和较完整岩的深度按岩面坡下方的深度计),以免桩受力后发生偏斜或滑移,对于倾斜度大于  $30\%$  的中风化岩,宜根据倾斜度及岩石完整程度适当加大嵌岩深度,确保桩基的稳定性。

**4.2.9** 大直径端承桩应确保基底以下一定范围内无影响桩基稳定性的软弱夹层、断裂破碎带、洞隙密集带和大型溶洞，还应满足下列规定：

- 1 基底应力扩散线的位置应低于周边岩洞的底面高程；
- 2 基底向临近洞体临空面的抗冲切验算应处于稳定状态。

### 4.3 承载力计算

**4.3.1** 岩溶地区桥梁桩基竖向承载力的计算，可按下列规定进行：

- 1 承台底面以上的荷载假定全部由桩基承受；
- 2 桥台土压力可自填土前的原始地面起算；
- 3 成孔过程中形成的护壁厚度应不计入桩的设计桩径尺寸内。

**4.3.2** 桩基符合下列条件之一时，应考虑桩侧岩（土）体失稳产生负摩阻力的不利影响，负摩阻力大小可参考行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 的相关公式进行计算：

- 1 地表浅层及岩土接触带存在土洞并有塌陷可能时；
- 2 桩基穿越较厚新近填土、欠固结土和膨胀土时；
- 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时；
- 4 桩基穿越较厚的软弱土层，且附近场地地面可能进行大面积堆载或填土时；
- 5 溶洞顶板属基本质量等级为IV、V级的岩体，成孔过程中可能出现顶板掉块时；
- 6 桩基穿过内部含有较多欠固结软弱填充物的大型溶洞等情况时，应考虑地下水位下降所引起的桩基负摩阻力影响。

#### 条文说明

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

**4.3.3** 满足下列条件时，可不考虑溶洞对桩基承载力的影响：

- 1 当桩端存在偏心溶洞时，若溶洞所处位置在桩端应力扩散影响范围外，可不考虑岩溶对桩基承载力的影响；
- 2 当溶洞顶板厚度大于 5d 时，可不考虑溶洞对桩基承载力的影响。当勘察

资料显示桩端下溶洞高度小于 5m, 其顶板跨度小于临界跨度  $L_{cr}=d+2h\tan(\theta)$  ( $d$  为桩径,  $h$  为顶板厚度,  $\theta$  为岩石应力扩散角) 时, 可不用考虑溶洞对桩基承载力的影响, 且顶板厚度大于  $1d$  且不小于 2m。

### 条文说明

根据桩端应力扩散理论, 当溶洞偏离桩基一定距离溶洞位于桩端应力扩散范围外时, 溶洞存在对桩基稳定性影响很小, 可忽略不计。

**4.3.4** 桩基设计采用的单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$ , 根据桩端持力层类别的不同, 可分为以下两种情形进行计算:

#### 1 土质地基

对于深覆盖型和埋藏型的岩溶地质, 当场地地质条件符合本规程第 4.2.5 条的规定时, 可将桥梁桩基设计为埋置在土体中的摩擦桩, 其单桩轴向受压承载力特征值  $[R_a]$ , 可按现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 中第 6.3.3 条的规定进行计算;

#### 2 岩石地基

$$R_a = c_1 k_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + 0.5 \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (4.3.4-1)$$

式中:

$R_a$ ——单桩轴向受压承载力特征值 (kN), 计算时应考虑桩身自重和浮力的影响;

$c_1$ ——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 4.3.4-1 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 4.3.4-2 采用;

$A_p$ ——桩端截面面积 ( $m^2$ ), 对于阔底桩, 取阔底截面面积;

$f_{rk}$ ——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。在查明沿桩身各个溶洞的分布与形态尺寸, 并合理预估与扣除溶洞顶板可能塌落高度的前提下, 单桩轴向受压承载力计算时才能考虑嵌岩段溶洞隔板的侧阻力;

$c_{2i}$ ——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 4.3.4-1 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;

$f_{rk_i}$ ——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 4.3.4-3;

$l_i$ ——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;

$q_{rk}$ ——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行业标准《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 4.3.4-1 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,  $c_2=0$ ;

(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嵌岩桩, 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 4.3.4-2 端阻力折减系数  $k_1$

| 顶板厚度 ( $d$ ) | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | > 8  |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| $k_1$        | 0.25 | 0.45 | 0.65 | 0.80 | 0.90 | 1.00 |

注: 顶板厚度为桩径  $d$  的倍数。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 4.3.4-3 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  $f_{tk} > 60 \text{ MPa}$  时,  $\zeta_s$  可按  $f_{tk} = 60 \text{ MPa}$  取值;

(3)  $f_{tk} < 2 \text{ MPa}$  时, 按摩擦桩计算。

**3** 根据桩基所在位置处串珠状竖向岩溶地质的不同发育程度, 在使用式 (4.3.4-1) 计算单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  时, 可分为以下两种情形:

(1) 对于串珠状岩溶地质发育的场地, 桩基的设计可穿过多层串珠状溶洞的隔板, 选择厚度大于等于 3 倍桩径且不小于 5 m 的完整、较完整的溶洞顶板作为桩端持力层, 按式 (4.3.4-1) 计算单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$ ;

(2) 对于串珠状岩溶地质极发育的场地, 过大地增加桩长也无法找到合适的桩端持力层的嵌岩桩和设计桩径大于竖向溶槽宽度或竖井直径的嵌岩桩, 可按悬挂式嵌岩桩 (空底桩) 进行桩基竖向承载力设计, 不计式 (4.3.4-1) 中的端阻力计算项, 并保证嵌岩段提供的侧阻力不应低于设计荷载的 1.25 倍。

### 条文说明

本条规定关于岩溶地区桥梁桩基设计采用的单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  的计算方法, 考虑了工程实践中因上覆土层厚度的不同, 桩端持力层可能为土质地基和岩质地基两种不同情形:

1 对于土质地基, 如广东省等地区其岩溶地质的上覆土层可达几十米甚至更大的厚度, 对此类覆土厚度较大 (厚度不小于 30 m) 的碳酸盐岩地层, 如果桩基设计时全部要求桩端嵌入岩层, 则桩长势必显著增加, 成为穿越土层厚度远超常规的嵌岩桩, 对桩基的水平承载力和压屈稳定性不利, 且增加桩基成孔和施工的困难性, 桩基质量也难以保障, 此外, 桩端嵌岩时桩基的沉降量会小于桩周土层的沉降量, 还可能产生桩基负摩阻力问题, 对桩基的竖向承载力也不利。因此, 当建设场地的上覆土层地质条件符合本规程第 4.2.5 条的规定时, 可将桩基设计为摩擦桩, 此时单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  的计算, 可按现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 中第 6.3.3 条的相关规定执行;

2 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, 本规程参考现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 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  $R_a$  可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, 桩基设计时可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极大地增加, 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,洞顶(隔)板岩体的侧阻力就可做到有依据地加以合理利用,计入侧阻力的岩层顶(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)。

3 根据桩基所在位置处串珠状竖向岩溶地质的不同发育程度,单桩轴向受压承载力特征值  $R_a$  的计算,可分为以下两种情形:

(1) 对于串珠状岩溶地质强发育条件下(串珠状竖向溶洞或溶槽发育深度达20 m以上)的嵌岩桩,单桩竖向抗压承载力设计时应根据岩土工程勘察资料,选择厚度大于等于3倍桩底直径且不小于5 m的完整、较完整的溶洞顶板作为桩端持力层,桩基竖向承载力的计算应计入两相邻溶洞之间的隔板产生的侧摩阻力和嵌固段溶洞顶板产生的端阻力,并且条件适宜时可计入上覆土层段的摩阻力。在以溶洞隔板的厚度是否大于等于2.0 m,且岩体的基本质量等级为Ⅰ级或Ⅱ级,作为嵌岩段隔板计入或不计入侧阻力的判定条件时需注意,对于桩基穿越段内两相邻大溶洞之间宽度或直径较小(与桩径相比,溶洞的平面尺寸小于桩径)的溶洞,可不考虑尺寸较小的溶洞对隔板厚度的削减作用;此外,广东省地方标准《岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》GDJTG/T A01 在对岩溶地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,可不考虑溶洞对桩基承载力特性的影响,按一般条件下嵌岩桩设计,广东省地标规定的  $k_1$  取值如表4.1所示:

表 4.1 顶板厚度与端阻折减系数  $k_1$

| 顶板厚度 ( $d$ ) | 0.5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | > 8  |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $k_1$        | 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嵌岩单桩竖向承载力计算时,参考广东省地标的相关规定,同样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,本规程建议的端阻折减系数  $k_1$  如表4.2所示。为了桩基的安全性,同时引入厚跨比  $\eta$  对广东省地方标准《岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》GDJTG/T A01 中的端阻折减系数  $k_1$  进行折减。

表 4.2 端阻力折减系数  $k_1$

| 顶板厚度 ( $d$ ) | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | > 8  |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| $k_1$        | 0.25 | 0.45 | 0.65 | 0.80 | 0.90 | 1.00 |

注:顶板厚度为桩径  $d$  的倍数。

此外,对土层厚度  $\Sigma l_i < 10$  m 覆盖型岩溶区,且存在未经有效处理的隐伏土

洞时，可不考虑桩侧土的正摩阻力，主要是考虑到岩石作为桩基持力层时，嵌岩段的承载力远大于土层段桩侧正摩阻力，且对于岩溶发育地段往往存在伴生土洞的情形，而覆盖层厚度直接反映土洞稳定的概率，覆盖层薄时，自然拱作用差，较覆盖层厚的地区更易产生塌陷，可能会对桩基产生一定的负摩阻力；此外，对穿越 10 m 厚度的上覆土层通常还包括地表浅层不能提供正摩阻力的填土或腐质土，总的桩侧正摩阻力提供的帮助可能非常有限，忽略其影响是偏于安全和合理的。

(2) 对于串珠状岩溶地质极强发育（串珠状竖向溶洞或溶槽发育深度超过 50 m）的地段，如果桩端持力层必须选择为厚度大于等于 3 倍桩底直径且不小于 5 m 的完整、较完整的溶洞顶板，则可能出现桩长大于等于 90 m 的超长桩，这将显著增加施工难度且桩基质量也无法保证，控制岩溶地区钻（挖）孔灌注桩的长度主要是为了保证桩的稳定性和桩身混凝土质量的可靠性；此外，对于竖向溶槽或竖井发育深度很大，而设计桩径大于竖向溶槽的宽度或竖井直径时，桩基也可与围岩很好地胶结，达到桩体嵌固于基岩的目的。因此，对于竖向溶槽或竖井发育深度很大以及串珠状溶洞极强发育地段的嵌岩桩，经验算岩层侧摩阻力具有一定的安全富余时，可将桩端置于厚度不小于 3 m 的完整或较完整的岩溶顶板（对竖向溶槽或竖井发育深度很大，无法找到厚度不小于 3 m 的完整或较完整的岩溶顶板时，可采取增加入岩深度，提高基岩侧阻力的方式），不考虑桩端岩石阻力而按悬挂式嵌岩桩（空底桩）进行设计，这一设计模式已为很多深挖难以到底的工程所使用，但从提高安全度考虑，需保证桩基嵌岩段提供的侧阻力不应低于设计荷载的 1.25 倍，同时应加强构造措施，如在基岩面加做适当尺寸的承台，并采用后压浆工艺对溶洞顶板进行加固处理。

**4.3.5 岩溶地区桥梁桩基设计采用的单桩水平承载力特征值  $R_h$** ，宜通过现场单桩水平静载试验确定，当有可靠资料和地区经验作为设计参考时，可根据地基水平抗力系数计算确定。

**4.3.6 对岩溶地区承受水平力较大或位于斜坡、陡坡地段，以及河床受水流冲刷作用等条件下的桥梁桩基**，桩基须嵌入基岩，并按桩底嵌固进行设计。桩基嵌入基岩中的有效深度可按下列公式进行计算：

1 对圆形截面桩，可按下列公式计算：

$$h_t \geq \frac{1.27H + \sqrt{3.81\beta f_{rk} d M_H + 4.84H^2}}{0.5\beta f_{rk} d} \quad (4.3.6-1)$$

2 对矩形截面桩，可按下列公式计算：

$$h_r \geq \frac{H + \sqrt{3\beta f_{rk} b M_H + 3H^2}}{0.5\beta f_{rk} b} \quad (4.3.6-2)$$

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顶面的弯矩（kN·m）；

$H$ ——相应于荷载效应标准组合作用于基岩顶面的水平力（kN）；

$f_{rk}$ ——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，可选择地区岩溶桩基设计经验作为取值参考；无地区经验时，可取  $\beta = 0.5 \sim 1.0$ （根据浅部岩层的岩溶发育特征而定，岩溶地质发育的取小值，不发育的取大值）；

$d$ ——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

本条参照行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 中第 6.3.8 条的相关规定制定。岩溶地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，应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，可不考虑覆盖土层、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，尤其是对于深长嵌岩桩而言，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，可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）体原本的完整性遭受到了不同程度的破坏，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，同时还可对浅部岩溶洞穴采取回填等技术措施。

**4.3.7** 对于穿过浅埋岩溶地质体而支撑或嵌固于中风化及中风化以上岩石地基的端承桩或嵌岩桩，以及串珠状岩溶地质条件下桩端持力层的完整、较完整溶洞顶板厚度满足本规程第 4.2.7 条规定的嵌岩桩，可不计算桩基沉降量。

#### 条文说明

工程实践表明对以中等风化或微风化岩石作为持力层的桩基础,其沉降往往很小,此外由于桩侧实际摩阻力分布的复杂性,导致桩基的沉降变形计算困难很大,可按相应公式估算桩身弹性压缩量,而不进行桩基沉降量计算。

### 4.4 稳定性分析

**4.4.1** 对于完整的、较完整的硬质岩地基,当符合下列条件之一时,可不考虑岩溶对地基稳定性的影响:

- 1 洞体较小,桩端尺寸大于溶洞的平面尺寸,并有足够的支承长度;
- 2 顶板岩石厚度大于或等于溶洞的跨度,即溶洞顶板厚跨比  $H/L \geq 1$ ;
- 3 不考虑端阻力的串珠状岩溶场地的悬挂式嵌岩桩(空底桩),且桩底溶洞顶板应满足桩基自重作用下的承载力要求。

#### 条文说明

顶板厚跨比法有效的避免了考虑溶洞顶板的形式和外加荷载的作用,根据顶板厚度  $H$  与上部建筑物基础跨过洞穴的长度  $L$  的比值,即厚跨比 ( $H/L$ ) 确定,一般认为,厚跨比  $H/L \geq 0.5 \sim 0.87$  时可认为顶板是安全的。因为当集中荷载作用于洞体中轴线,  $H/L=0.5$  时,应力扩散线为顶板与洞壁交点的连线,它与水平夹角相当于混凝土的应力扩散角  $45^\circ$ ; 当  $H/L=0.87$  时,相当于松散介质的应力扩散角  $30^\circ$ 。这里偏安全地认为  $H/L \geq 1$  时,顶板厚度是安全的。

**4.4.2** 当不满足 4.4.1 条规定并利用溶洞顶板作为桩端持力层时,应根据溶洞形态、成拱条件和裂隙分布状况等按本规程附录 A 进行溶洞的稳定性分析计算。

**4.4.3** 对倾斜顶板厚度的验算可根据桩基受力形式及其重要性将附录 A 计算的洞顶板厚度乘以 1.0~2.0 倍的安全系数,针对岩体完整性差和重要工程取大值,否则取小值。

#### 条文说明

将溶洞顶板简化为等厚度平板或梁,且水平溶洞顶板安全性最好,但实际工程中溶洞顶板底面并非均呈水平状分布,其倾角变化对桩端阻力产生了一定的影响,因为溶洞顶板倾角增加必将引起桩端溶洞顶板一侧的厚度减小,从而导致溶洞顶板稳定性下降。已有的研究表明随溶洞顶板倾角增大,桩端阻力和桩顶阻力均递减,且溶洞顶板倾角对桩端阻力影响更为明显(如表 4.3 所示),故其

倾斜角度越大溶洞顶板越不安全。

表 4.3 溶洞顶板地面倾斜角度与桩基承载力一览表

| 底面倾角 (°)       | 0     | 10    | 20    | 30   | 45   |
|----------------|-------|-------|-------|------|------|
| 桩顶极限荷载<br>(kN) | 14288 | 13023 | 11629 | 9347 | 6284 |
| 桩端极限荷载<br>(kN) | 10728 | 9463  | 8100  | 5787 | 2724 |

表 4.3 数据表明在溶洞顶板厚度一定的情况下, 溶洞顶板倾斜对桩基强度有较大影响, 但当溶洞直径大于 5 倍桩径时, 继续增大溶洞直径对桩基承载力影响较小, 且 4.4.4 条顶板安全厚度计算与桩基荷载、溶洞跨度、顶板厚度等诸多因素有关, 鉴于倾斜顶板最弱面发生在溶洞跨端而非桩基底部, 综合考虑采用 1.0~2.0 的顶板安全厚度扩大系数可有效确保其安全性, 针对岩体完整性差和重要工程取大值, 否则取小值。

**4.4.4** 串珠状溶洞发育的地区, 在桩基设计中可以优先选取具有足够安全厚度的顶板岩层作为持力层, 其稳定性分析可按下列情况进行考虑:

- 1 溶洞顶板稳定性可按附录 A.0.1 视溶洞大小和顶板岩体完整程度进行溶洞顶板稳定性的验算;
- 2 若桩体贯穿串珠状溶洞时, 可按附录 A.0.3 或 A.0.4 进行桩身溶洞顶板稳定性验算。

#### 条文说明

当串珠状溶洞之间距离小于某一临界值时, 下部溶洞的存在会使溶洞顶板安全厚度比单个溶洞情况下大; 当串珠状溶洞之间距离大于这一临界值时, 溶洞顶板安全厚度与单个溶洞情况下相同。

1 桩端下串珠状溶洞对桩基的影响是逐渐递减的, 但是桩端下第一个溶洞顶板中心的应力会因下覆溶洞影响增大, 鉴于串珠状溶洞空间分布形态, 可按照薄板小挠度模型进行溶洞顶板稳定性验算, 但考虑串珠状溶洞相互影响采用乘以 1.2 的安全系数对求得的溶洞顶板安全厚度进行适当的增大。

2 针对桩身贯穿串珠状溶洞, 桩侧岩层对桩侧提供侧阻力, 当桩—岩界面胶结效果良好时破坏将发生在岩层内部, 发生剪切或冲切破坏。但是当岩层厚度与溶洞跨度之比小于 1 时, 桩体溶洞岩层发生冲切破坏, 而超过此数值将呈冲剪破坏。

**4.4.5** 桩端存在临空面时可按附录 A.0.4 条抗冲切破坏模式进行其稳定性验算。

当桩下岩体存在倾斜软弱结构面时，除满足上述抗剪强度外，还需按附录 B 计算软弱结构滑动面的稳定性。

#### 条文说明

在岩溶地区的工程建设中，经常会遇到覆盖岩溶临空面问题，所谓覆盖岩溶临空面指的是覆盖岩溶场地中建筑物基底应力影响范围内具有陡倾角土岩交界面的一种岩土组合地质体。其是由于溶槽、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。当建筑基础落在陡壁边缘时，陡壁相对于基础就构成临空面。对嵌岩桩，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，故可采用抗冲切计算模型评价其稳定性。岩溶临空面一般是天然稳定的，往往因上部荷载通过桩基传至软弱结构面而因承受外加荷载而失稳。

**4.4.6** 对于存在多个溶洞的稳定性评价，若相邻洞体的间距在相互应力扩散范围以外时可按单体进行评价，若应力重叠时则应按双（群）体进行评价。

**4.4.7** 对位于溶洞顶（隔）板岩体之间且未对溶洞进行填充处理的桩基和穿越深厚覆盖软土层的嵌岩桩，应进行桩身压屈稳定性验算。

#### 条文说明

对穿过深厚覆盖软土层或尚未固结的新近填土层而将桩端嵌入基岩的细长桩，以及位于串珠状溶洞顶（隔）板岩体之间且未对溶洞进行填充处理的桩基，应对桩身进行压屈稳定性验算，具体计算方法可参照《混凝土结构设计规范》GB50010 执行，结合《贵州省建筑桩基设计与施工技术规范》DBJ52/T 088 规定对位于串珠状溶洞顶（隔）板岩体之间且未对溶洞进行填充处理的桩基，需要进行压屈稳定性验算的长细比临界值为 22，实际验算时可将此临界值作为参考。

**4.4.8** 按上述各方法计算的顶板厚度与地基中洞体顶板最小厚度应符合下列要求：

$$H_s = K \times H_j \quad (4.4.9-1)$$

$$H_j = \max(H_1, H_2, H_3, H_4) \quad (4.4.9-2)$$

式中：

$H_s$ ——溶洞顶板最小厚度（m）；

$H_j$ ——洞体顶板计算厚度（m）；

$H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$ ——为多种方法求出的安全厚度。

$K$ ——安全系数，按下列方法确定：溶洞形态为实测时，安全系数取 1.2~1.5；溶洞形态为钻孔  $CT$  测得，若钻孔为 8 个，则安全系数取 1.8~2.1；溶洞形态为钻孔  $CT$  测得，若钻孔为 4 个，则安全系数取 2.4~2.7，针对岩体完整性差和重要工程取大值，否则取小值。

### 条文说明

岩溶地基突出问题不是地基强度而是地基稳定性，尤其是桩端岩体洞隙顶板稳定性问题。由于影响岩溶稳定性的因素很多，现场勘探手段一般难以查明岩溶特征，目前对岩溶稳定性评价仍是以定性和经验为主。对岩溶顶板稳定性的评价，仍处于探索阶段。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。由于边界条件不易明确，计算参数试验获取难度大，结果难免具有不确定性。确定岩溶区桩端持力岩层安全厚度时，安全系数的取值十分关键，应根据岩石的均质性和裂隙发育情况、试验数据的可靠程度、桥梁的重要性等综合考虑。

## 4.5 基本构造

**4.5.1** 桩身混凝土强度等级应满足桩的承载力设计要求，且干法施工时不应低于 C25，当采用强度标准值 400MPa 及以上钢筋时不应低于 C30；水下灌注混凝土时不应低于 C30，护壁的混凝土强度等级宜采用与桩身混凝土相同的强度等级。

### 条文说明

根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 中关于耐久性的规定，处于与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境（IIa 环境）中，设计使用年限为 50 年的混凝土结构，其最低混凝土强度等级为 C25，故本条做出对钢筋混凝土基础的混凝土等级不应低于 C25，水下灌注混凝土时等级适当提高，不应低于 C30 的规定。对采用混凝土护壁的桩基，有规范指出：在桩基竖向承载力计算时桩基直径可计入成孔过程中形成的混凝土护壁厚度，同时要求护壁混凝土的强度等级不低于桩体混凝土的强度等级。本规程对混凝土护壁的强度等级做出类似规定，但桩基承载力计算时桩基直径不计入护壁的厚度。

**4.5.2** 岩溶地区桥梁桩基的桩身配筋应符合下列规定：

1 配筋应按桩身内力大小计算确定，纵向主筋宜沿桩身等截面或变截面通

长配筋；

2 纵向主筋的连接宜采用焊接或机械连接，同一连接区段内的接头数量不得超过 50%，且接头不宜设置在淤泥或淤泥质土、岩溶洞穴和潜在滑裂面等内力较大位置，并应错开布置；

3 桩身纵向主筋的配置应根据计算确定，纵向主筋直径不应小于 16 mm，单根桩的主筋数量不应少于 8 根，主筋净距不应小于 80 mm，且不应大于 350 mm；

4 箍筋应采用螺旋式或焊接环状，直径不应小于主筋直径的 1/4，且不应小于 8 mm，间距宜为 200~300 mm，对位于桩顶、淤泥或淤泥质土、溶洞和潜在滑移面等部位的箍筋还应适当加密，间距不应大于 100 mm。

**4.5.3 承台和横系梁的构造、桩与承台及横系梁的连接应符合现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 的规定。**

**4.5.4 岩溶地区桥梁桩基的布置和中距应符合以下规定：**

1 群桩的布置可采用对称形、梅花形或环形等，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，避免桥台下的部分桩置于溶洞顶部；

2 排列桩基时，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 桩基的中距应符合以下规定：

(1) 摩擦桩

钻孔桩在承台底面处的中距不应小于桩径的 2.5 倍，挖孔桩的中距可参照钻孔桩的标准适当放大。

(2) 端承桩

支承或嵌固于完整基岩中的钻（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

本条规定对岩溶地区桥梁桩基布置和中距的基本要求，主要是为了减少桩基间的应力叠加及桩基施工时对相邻桩的影响，参考了《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 第 6.2.6 条的相关条文进行制定。对于溶洞较大，串珠状和厅堂式溶洞相互交错，溶沟、溶槽密布的岩溶地质强发育地段，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，单桩的实际承载力及工作状态与设计可能相差较大，可靠度往往不如群桩高，桩基实际设计时还应考虑群桩承台底部及四周溶洞分布情况进行适当调整，避免桥台下的部分基桩置于溶洞的顶部。同时还应考虑桩基水平力和力矩的影响，使桩群基础的承载力合力点与竖向永久荷载合力作用点重合，保证桩基础在受水平力和力矩较大的方向上具有较大抗弯截面模量。

征求意见稿

---

## 5 施工

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 岩溶地区应根据桩型、钻孔深度、土层情况、泥浆排放及施工条件等选择桩基成孔方式，并符合下列要求：

- 1 中-微风化等新鲜和坚硬岩层宜采用泥浆护壁冲击成孔灌注桩；
- 2 岩溶中等发育或强发育场地宜采用泥浆护壁冲击（旋挖）成孔灌注桩，同时需储备足够泥浆应对击穿溶（土）洞导致的泥浆流失；
- 3 土层内无地下水或地下水量很少，地势险峻施工场地受限，大型机械设备无法进入的情形宜采用人工挖孔桩；
- 4 在同一施工场地不同桩基可采用不同施工工艺。

#### 条文说明

结合相关研究成果，冲击成孔工艺能广泛适应各种复杂的岩溶地质，适合于处理岩面倾斜、半边岩溶、串珠式溶洞等复杂岩溶形态。岩溶桩基施工工艺的选择应首先考虑地下水的情况，在岩溶地下水量大、且连通性好的情况下，则不宜考虑采用人工挖孔工艺。如地下水埋藏较深、流量较小，岩溶形态之间水力不怎么连通，或采取预注浆等措施可减少岩溶水的影响，不涌水涌泥，方可选择人工挖孔成孔工艺；其次考虑覆盖层的厚度、密实情况及含砾程度，如果覆盖层浅，或为紧密的粘土层，可采用旋挖钻成孔；如果是松散的砂砾层或厚的砂砾层，可采用人工挖孔或冲击成孔；第三考虑岩溶形态的发育情况，一般在岩溶发育区均采用冲击钻成孔，只有少数基岩完整且较坚硬的直径大于 2.5m 的桩基可采用钻孔成孔。此外，在噪声敏感建筑物集中区域内，应慎重选用冲击成孔。目前，常见的施工工艺组合为冲孔+钻孔、人工挖孔+冲孔+钻孔等。

**5.1.2** 桩基施工顺序宜按先大后小、先难后易、先周边后中间的原则，同一承台下两根桩基施工或者相邻区域有多根桩基施工时，宜先施工岩溶发育强烈地段桩基，再施工地质情况较好的桩基，且相邻两桩孔不应同时施工，应间隔交错进行作业。

### 条文说明

桩孔的施工顺序，在充分分析场地内容洞的空间分布规律后，应结合实际情况按照有利于及时封闭溶洞，隔断岩溶裂隙通道、隔孔钻孔的顺序施工，防止成孔过程中对邻桩造成影响。相邻桩在成孔和灌注混凝土时常有干扰现象，如其中一个桩孔冲孔时，相邻桩孔内水面或淤泥面相应翻动。如有的钻孔暂停钻或终孔时，由于受邻桩孔钻进影响，冲洗液互相串通，使岩粉和沉渣增多；在灌注混凝土时，混凝土有时会通过溶隙流入邻近正在施工的桩孔内，影响临近桩孔的正常施工。

**5.1.3** 对岩溶地质、水文地质或技术条件特别复杂的桩基，宜在施工前进行工艺试桩，获得相应的工艺参数后再正式施工。

### 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，是否引起的塌孔等，试成孔是保证工程施工能否顺利进行的必要过程。

**5.1.4** 对岩溶发育区桥梁桩基施工前应制定桩基专项施工方案，对可能发生的桩基施工病害制定处治预案，对施工人员进行全面的技术交底，并配备足够的应急物资。

### 条文说明

在岩溶桩基施工前，除编制整座桥梁的施工组织设计外，应认真分析设计文件中有关地质勘察资料，根据地质勘察资料，详细绘制每一桩孔的地质剖面图或柱状图，了解溶洞、裂隙位置、分布、走向、大小、充填情况、漏水与否、顶板岩性和厚度等，对整个施工场地作综合地质评价并编报施工组织设计，依据每根桩基的具体勘探情况和施工难点，编制具体的详细的逐墩逐桩的成孔工艺和岩溶桩基施工处治方案。对岩溶极强发育的特大桥及大桥，宜召开专题研讨会，邀请专家讨论研究施工方案和对策。

**5.1.6** 桩基施工前应制定相应的安全和环保方案，在施工过程中采取安全技术措施保障人员及设施安全，不污染周围环境。

**5.1.7** 岩溶区桥梁桩基工程施工应具备下列资料：

- 1 建设场地岩土工程详细勘察报告；
- 2 桩基工程施工图设计文件与图纸会审纪要；
- 3 建设场地和临近区域的地面建筑物、地下构筑物与管线等设施的调查资料，以及

预先采取的保护措施和监测手段；

- 4 主要施工机械及其配套设备的技术性能资料；
- 5 桩基工程的施工组织设计及桩基专项施工方案；
- 6 水泥、钢筋、砂子、石子和外加剂等原材料的质量检验报告。

## 5.2 溶洞预处理

5.2.1 当桩基处溶洞较发育且对桩基的承载力有影响时，应对溶洞进行预处理。

5.2.2 浅层溶洞的处理宜满足下列要求：

1 当溶洞内有充填物，属可塑或软塑质亚粘土，且溶洞不漏水的情况下，不需进行处理，可按正常情况进行桩基施工。

2 当桩基处于单层或浅层溶洞区，且溶洞高小于 3m，采用常规成孔法。当进孔至距溶洞顶 1m 左右时，应减小冲程，通过短冲程快速冲击方式逐渐将洞顶击穿，防止因冲程过大导致卡钻。

4 当溶洞高度小于 5m 时，当溶洞体积较小，洞内存在一定的充填物（卵石、碎石、粘土等）时，宜注压水泥砂浆。当溶腔较发育时，宜压小碎石混凝土。

5 采用钻孔桩在钻至地表以下、地下水位以上范围内的浅层溶洞，根据溶洞的大小，采用预先准备充足的小片石（片石直径 10~20cm）、粘土和水泥混合物回填。

6 对于浅层溶洞且溶洞体积较大宜采用钢护筒跟进法处治，采用一边冲（挖）孔，一边接长护筒，通过震动或者重力使其下沉至成孔位置，从而穿过溶洞成功造壁。钢护筒入土深度宜控制在 10~15m 内以保护软弱覆盖层。当表层土层较软弱时且溶洞发育强烈，钢护筒应全面入岩，且不允许落在倾斜岩面上；若下层土层较坚硬密实，且无溶洞发育，钢护筒应进入该密实土层至少 0.5m，护筒顶面中心与设计桩位偏差不得大于 5cm，倾斜度不得大于 1%。

7 钢护筒跟进方法应采用分段驳接振入法，即边成孔边用振动锤振入驳接加长钢护筒，或在确定进入岩面时，直接从孔顶驳入护筒。同时节段间的焊接应密实，不漏水。

8 对浅埋的岩溶土洞，可将其挖开或爆破揭顶，如洞内有塌陷松软土体，应将其挖除，再以块石、片石、砂等填入，然后覆盖粘性土并夯实，再行施工。

5.2.3 深部溶洞的处理宜满足下列要求：

1 埋深大于 10m 且洞高小于 5m 的溶洞，单个溶洞且无充填或半充填的情况下可以采用片石加黏土的反复冲孔或灌注一定的低标号混凝土，然后进行冲孔。

2 埋深大于 10m 且洞高大于 5m 的溶洞，在有充填物情况下，抛填片石与黏土。当充填物为石质时，回填物以填土为主；当充填物为土时，回填物以片石为主。如果漏

浆情况严重，抛填片石、黏土、水泥至孔底，并灌注 C20 水下混凝土加固孔壁。

3 在单个溶洞无填充物情况下，可回填片石和黏土，以片石为主，或填充混凝土、压浆。

4 当基岩存在填充的大溶洞时，溶洞裂隙发育强烈透水性强，冲孔前溶洞内可进行旋喷形成止水帷幕便于后续施工。旋喷浆液中可加入水玻璃，比例为 5%，一般情况下按桩基中心周边 50cm 至 1m 作用影响范围进行旋喷。

#### 5.2.4 串珠状溶洞的处理宜满足下列要求：

1 属于多层溶洞，但溶洞埋深较浅且对地基承载力要求不高的桩基，可采用常规抛石填充法施工。

2 对于埋深较深的串珠状溶洞，可提前在桩基中心周边 0.5~1.0m 的范围内采用静压注浆法或旋喷帷幕法施工。

3 垂直的串状溶洞宜采用钢护筒跟进法施工。当岩溶顶板较脆弱，为了防止出现塌孔、埋锤等现象，必要时可采用多级护筒跟进法施工。

4 对异常发育的垂直串珠状溶洞地基承载力严重不足时，钢护筒跟进也不能顺利进行，可通过地质勘探揭示串珠状溶洞发育的具体位置，并在溶洞顶不同位置分别进钻形成排气桩孔和灌注桩孔，采用灌注混凝土填充法施工。

5 在同等条件下通过桩端压浆法提高或改善桩周岩土性能，提高单桩承载能力，从而满足溶洞顶板厚度，桩身可不穿过溶洞。

5.1.5 遇到岩溶水通道时应遵循“以疏为主，堵排结合，因地制宜，综合治理”的处理原则。

#### 条文说明

岩溶水富集区如需进行地基处理，在处治方法上，将溶洞填充的方法过于粗暴，具备过水作用的空洞被填充后，会导致地表、地下水无法正常排除，从而引起其他问题，因此在进行岩溶地基处治设计时，需要采取尽量减小对地下水通道的扰动的处治措施。

5.2.6 溶洞预处理应进行全程跟踪，施工过程中应随时检查材料报（检）验资料、施工记录和计量记录、分项检验记录等内容。

### 5.3 冲击成孔灌注桩

5.3.1 冲击成孔桩钻机的施工场地及走行道路应满足钻机正常工作和移动的需要。钻

机安装时，机架应支垫稳固，必要时采取风揽稳定等措施。

**5.3.2** 岩溶区冲击成孔灌注桩作业地面应坚实平整，作业过程中地面不得下陷，钻机底部宜进行支撑加固。地面不能满足钻机接地比压要求时，应采取铺设路基板、硬化地面等措施满足要求。

### 条文说明

钻机一般采用吊车安装就位，保证冲击锤底中心与桩中心重合，并设“十”字控制桩在施工中反复校核，同时为防止出现坍孔钻机下沉或倾斜现象，桩机底宜垫设钢网架对钻机底部进行支撑加固，钻机纵、横向支撑应加长，超出预计的坍孔范围，特别是钻机前缘的横向支撑不小于 10 m，一般采用型钢或钢管（壁厚 10 mm 以上，管径 400 mm 左右）作为支撑梁，或在支撑滚筒下垂直于滚筒的方向铺设 2~3 排钢梁，钢梁下再垫上木板、木方等，以扩大受力面积。

**5.3.3** 冲击钻成孔机械选型宜满足下列要求：

1 钻机型号应根据桩基直径、钻孔速度要求、钻锤重量、冲击频率、覆盖土层及岩溶发育情况进行选择。

2 宜选用具备钻塔液压起落，整机液压步履技术的工程钻机。

**5.3.4** 泥浆的调制和使用宜满足下列技术要求：

1 岩溶桩基配制数量为正常地质条件施工下泥浆数量的 2~3 倍，以防成孔过程中的漏浆、钻穿溶洞顶板时或坍孔时的大量漏浆；

2 泥浆宜选用优质黏土拌制；

3 岩溶地质复杂，覆盖层较厚的大直径桩基所用泥浆，宜使用丙烯酰胺即 PHP 泥浆；

4 应经常对钻孔泥浆进行检测和试验，不合要求时，应随时改正。

**5.3.5** 护筒设置宜满足下列技术要求：

1 护筒直径根据桩径而定，内径宜比桩径大 20~40 cm，护筒厚度保证  $1/130 \sim 1/150d$ ，且不少于 10 mm，设置多层护筒时，应预先估算好每一层的护筒直径。桩径大于 2.5 m 时，可用 12~14 mm 厚度钢板卷制。

2 护筒高度宜高出地面 0.3 m，当钻孔内有承压水时，应高于稳定后的承压水位 2.0 m 以上，还应满足孔内泥浆面的高度要求，若采用筑岛施工时应高于筑岛平面 1.0~2.0 m，并应采用稳定护筒内水头的措施。

3 钢护筒入土深度宜控制在 10~15 m 内以保护软弱覆盖层。当表层土层较软弱时

且溶洞发育强烈，钢护筒应全面入岩，且不允许落在倾斜岩面上；若下层土层较坚硬密实，且无溶洞发育，钢护筒应进入该密实土层至少 0.5 m。

4 护筒埋设方法可依据覆盖层的具体情况采用挖坑埋设法或填筑法安设护筒。长护筒应采用边冲孔边跟进方法，用压重、振动、锤击并辅以筒内除土的方法打入埋设。

5 护筒下沉过程中应认真进行轴线偏位检查，护筒倾斜偏差不应大于 1%，平面位置偏差不大于 5 cm。

#### 5.3.6 成孔作业宜满足下列技术要求：

1 遇溶洞时，应减小冲程和悬距，慢慢穿过，必要时可边冲边向孔内投放小片石或碎石，以冲挤到溶洞充填物中作骨架，稳定充填物。

2 采用冲击钻施工当钻头到达溶洞顶板上以 1 m 左右时，应适当减小冲程，通过短冲程快速的冲击方法逐渐将洞顶击穿。当顶板击穿时，先迅速提钻，避免卡钻和掉钻；需投入黏土石块，将孔底填平，用十字形钻头小冲程反复冲捣，慢慢穿过。待穿过该层后，逐渐增大冲程和冲击频率，形成了一定深度的桩孔后，再进行正常冲击。

#### 条文说明

严格控制冲程，在施工过程中细心观察，根据不同的地质情况掌握好冲程。在基岩中采用 3~5 m 的冲程，在靠近溶洞约顶 1 m 处采用 0.5~1.5 m 的小冲程变化钻进，要求轻锤慢打使孔壁圆滑坚固，通过短冲程快频率冲击的方法逐渐将洞顶击穿，防止因冲程过长导致卡钻。溶洞顶板被击穿后，当发现孔内水头迅速下降，护筒也伴随下沉，施工人员应立即提起钻头。

#### 5.3.7 桩基清孔宜满足下列要求：

1 孔深达到设计标高后，应对孔深、孔径进行检查，符合要求后方可清孔。

2 清孔方法有换浆、抽浆、掏渣、空压机喷射、砂浆置换等，具体应根据设计要求、钻孔方法、机具设备条件和地层情况决定。

3 灌注水下混凝土之前在置入钢筋骨架后，应再次检查孔内泥浆性能指标和孔底沉渣厚度，如超过规定，应进行第二次清孔，符合要求后方可灌注水下混凝土。

4 不得用加深桩孔深度的方式代替清孔。

#### 5.3.8 桩基终孔应满足下列要求：

1 钻孔至设计标高以后，应及时捞取钻渣，根据掏渣岩样特征、钻孔记录和钻进速度等综合判断该孔能否终孔，当确认达到设计要求的嵌岩深度时，可以终孔；

2 在无详细勘探资料的情况下，应采用超前钻等方法查明桩端基岩性状，包括岩石

---

强度、顶板厚度等，超前钻应钻入桩端以下不小于 5 m。

**5.3.9** 冲击成孔作业前应根据《建筑机械使用安全技术规程》对冲击成孔设备进行全面检查。

**5.3.10** 如果发现地面出现裂缝并有下沉迹象时，应立即组织在场施工人员撤离到安全地方，待地面下沉稳定后再行处理。

**5.3.11** 冲击锤(钻)操作时，距落锤 6m 范围内不得有人员走动或进行其他作业，非工作人员不准进入施工区域内；因故停钻时，孔口加盖保护并严禁钻锥留在孔内以防埋钻。

**5.3.12** 施工时应加强地下水的保护，禁止随意抽取地下水；作业废水排放时应符合环保要求。

#### 条文说明

岩溶地区地下水系统生态脆弱，水资源异常珍贵，在冲击成孔桩过程中采用循环泥浆作业，对周围生态环境有一定污染，根据《建筑地基基础工程施工规范》(GB 51004) 7.1.7 条要求，对现场用水与废水排放做了规定，以满足国家的相关环保要求。

### 5.4 人工挖孔灌注桩

**5.4.1** 施工前应对临近建筑物、构筑物、架空线等根据需要采取防护措施，预先标明桩位处的地下障碍物。

**5.4.2** 人工挖孔桩工程应按《建筑施工安全技术统一规范》GB50870 编制专项施工方案。

**5.4.3** 人工挖孔桩施工时应满足下列技术要求：

1 挖孔施工应根据地质和水文地质情况，因地制宜选择孔壁支护方案报批，并应经过计算，确保施工安全并满足设计要求。

2 人工挖孔灌注桩混凝土护壁的厚度不应小于 100 mm，护壁应配置直径不小于 8mm 的构造钢筋，竖向筋应上下搭接或拉接。

3 挖孔直径应按照设计规定。挖孔过程中，应经常检查桩孔尺寸、平面位置和竖轴线倾斜情况，如有偏差应随时纠正。

4 孔内遇到岩层须爆破时，应专门设计，宜采用浅眼松动爆破法，严格控制炸药用

量并在炮眼附近加强支护。孔深大于 5m 时，必须采用电雷管引爆；孔内爆破后应先通风排烟 15min 并经检查无有害气体后，施工人员方可下井继续作业。

5 挖孔时如有水渗入孔内，应及时加强孔壁支护，防止孔壁因水浸流而造成塌孔，渗水应及时排除，当遇有流塑状土、流砂、涌水使孔壁坍塌时，应立即停止挖孔，待采取有效措施处理后，才可继续下挖。

6 软质岩开挖至持力层验收合格后应立即浇注混凝土或采用与设计混凝土强度相同的水泥砂浆封底，使基岩与水和空气隔离，防止地基因暴露时间较长产生崩解或软化影响岩石的承载能力。

7 挖孔达到设计持力层后，应及时组织工程相关方鉴定持力层是否符合设计要求，如地质复杂，需进一步探明桩端持力层情况时应由勘察、设计单位提出具体处理措施。

8 当孔底岩层为倾斜产状时，应凿成水平或台阶状。

9 桩孔达到设计要求后，应清除护壁上的泥土和孔底残渣、积水。

10 若孔内产生的空气污染物超过现行《环境空气质量标准》GB3095 规定的三级标准浓度限值时，必须采取通风措施，方可采用人工挖孔施工。

**5.4.5** 人工挖孔桩施工应采取保障施工人员的安全技术措施，桩孔施工时应满足下列安全技术要求：

1 使用的电葫芦、吊笼等应安全可靠，并配有自动卡紧保险装置，超高限位器、吊钩防脱钩装置等应能正常工作；电葫芦宜用按钮式开关，使用前必须检验其安全起吊能力；卷扬机钢丝绳应排列整齐，在滚筒上缠绕圈数不少于 3 圈。

2 在溶洞上部作业时，必须采用有效措施，防止突然塌顶陷落。

3 作业人员进入孔内须带安全帽、穿水鞋，挂好配有自动卡紧保险装置的防坠器；

4 挖出的土石方应及时运离孔口，不得堆放在孔口四周 1m 范围内，机动车辆的通行不得对井壁的安全造成影响，防止压塌孔壁。

5 孔内有人作业时，孔上应配备专人监护。孔上人员必须随时检查吊钩的防脱钩装置是否完好，发现隐患及时修复，防止吊笼(吊桶)与吊钩分离坠落伤人。

6 孔口四周必须设置护栏。暂停施工的孔口，孔口井圈作法应符合相关规定，同时应加设临时全封闭盖板，或封闭四周护栏，并挂“禁止进入”警示牌。

7 斜坡地带上下桩基同时施工时，上方桩的施工平台、走道及栏杆应全部密封；下方桩孔上、走道上应搭设牢固的双层安全防护棚。

8 施工前应对出土出渣路线进行测定，规划行车路线时，应使道路与孔位置保持一定距离，不得影响孔壁稳定。

## 5.5 旋挖钻成孔灌注桩

**5.5.1** 旋挖钻成孔灌注桩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%；地面不能满足旋挖钻机接地比压要求时，应采取铺设路基板、硬化地面等措施满足要求。

### 条文说明

平整场地和保证旋挖钻机的站立稳定是保证成孔垂直度的重要条件。施工前必须对场地的水平度进行检查，场地坡度宜控制在 3.5% 以内，当场地坡度大于 3.5% 时，应将场地整平。对土层强度低的场地，特别是回填场地需进行增强处理，以防提取钻斗时钻机下陷，导致成桩质量或机械事故。

**5.5.2** 旋挖钻成孔灌注桩成孔前，应根据施工地层、造浆原材料、水质等条件合理选配稳定液。不稳定地层应采用稳定液或聚合物溶液护壁，稳定地层可以采用清水护壁或干作业成孔。

### 条文说明

地下水位较高时应采用稳定液护壁，宜采用膨润土制备稳定液。钻孔稳定液的类型，一般分为清水、泥浆、有机高分子溶液等，依地下水位高低和地层漏失情况，根据需要可配置加重材料加大比重或采用泡沫降低比重，针对地层岩土特点亦可配置专用特殊功能钻孔稳定液。如抑制黏土、页岩类地层膨胀钻孔稳定液等。在岩土状态稳定的场地，也可考虑采用干作业成孔钻进。干钻时亦可向孔底加入少许的清水，以便冷却和润滑钻头。

**5.5.3** 稳定液的配合比和配制方法宜通过试验确定，应依据施工地层、造浆原材料、水质等条件合理选配稳定液。

**5.5.4** 旋挖钻成孔灌注桩护筒应满足下列要求：

1 护筒宜选用厚度不小于 10mm 的钢板制作，护筒内径宜大于钻头直径 200mm～300mm，护筒的直径误差应小于 10mm。护筒下端宜设置刃脚；

2 护筒顶端高出地面不宜小于 0.3m；钻孔内有承压水时，护筒顶端应高出稳定后的承压水位 1.5m；

3 护筒埋设时，应确定护筒的中心位置。护筒的中心与桩位中心偏差不得大于 50mm，护筒倾斜度不得大于 0.5%。护筒就位后，应在四周对称、均匀地回填粘土，并分层夯实，夯填时应防止护筒偏斜移位。

**5.5.5** 旋挖钻机就位后应对钻机进行调平对正，施工中应随时通过平衡仪检查钻机水平；开孔时对深度仪进行归零，并应在施工中随时校核深度仪。

**5.5.6** 成孔时钻杆应保持竖直稳固，位置准确，钻进速度应根据地层变化情况及时调整；钻进过程中，应随时清理孔口积土，遇到地下水、塌孔、缩孔等异常情况时，应及时处理。

**5.5.7** 在岩溶地层钻进成孔时，应防止稳定液漏失、塌孔、孔斜和卡钻埋钻等事故，可利用详细勘察、施工勘察孔进行水泥注浆，必要时可在桩位周边布置适量注浆孔，先注浆充填，后旋挖成孔。

#### 条文说明

岩溶地区地质条件复杂，基岩面埋深起伏较大，本身是一种形态奇特且分布不均的自然现象，宏观上虽有特定的发育规律，但实际其分布却是无常的。施工时难以完全查清，可预见性差，有时出现实际施工揭露的地质情况与勘察资料不相符的现象，这无形中就给旋挖成孔施工增加了难度及不确定性，稍有不慎就可能致孔内出现事故，轻则稳定液严重漏失、孔壁坍塌；重则桩孔大面积坍塌而引起地面塌陷等次生灾害，导致无法继续成孔施工，甚至为上部建筑体埋下质量隐患，所以施工成桩前必须严格按相关规定进行施工勘察。为了探准岩溶情况，对于局部较复杂地段采用一桩两孔或多孔。分析对比初勘、详勘和施工勘察阶段的资料，也可采用物探、钻探相结合，掌握场地内岩溶分布状态，有利于降低施工质量风险。岩溶或易塌陷区域，宜采用注浆法预处理，勘察孔，可留作压浆或注浆孔，注浆应采用低压慢灌，可采用重复注浆工艺，复注时间经验值不宜超过 2.0h，注浆压力在岩溶区约 0.3MPa~0.5MPa，若遇注入量大，注浆压力小或无压力，注浆难于终止时，可采用限量、间歇、增黏措施，必要时可采取掺入 3%左右Ⅲ型水玻璃等技术措施处理。

**5.5.8** 采用旋挖钻方法施工在接近溶洞顶板 0.3~0.5 m 时应控制进尺，若发生漏失、偏孔，应提钻并增加稳定液黏度或回填充填材料，在溶洞内升降钻头要缓慢、平稳，以免扰动或触及临时护壁，溶洞较小时可用黏土包将其充填，并轻压慢转反复扫孔。

#### 条文说明

旋挖成孔施工时，在穿越松散地层、溶洞、陡岩面等地层时，如操作不当会导致孔壁失稳坍塌、斜孔和卡钻埋钻等事故，因此，在施工中应密切关注孔内稳定液情况，发现漏液应及时处理。当钻进至溶洞顶面以上 0.3~0.5 m 发生稳定液漏失甚至偏孔时，应

减慢进尺，增加稳定液浓度；当钻进速度明显加快，无偏孔现象，表明已进入溶洞，若发生稳定液漏失应抛填黏土包堵漏，这时在溶洞内升降钻头要缓慢、平稳，以免扰动或触及黏土形成的临时护壁，直至钻进处于平稳状态；根据岩溶区桩基施工的研究成果与工程经验，当溶洞高度小于3 m时，一般可采用黏土包将其充填；当溶洞高度大于3 m时，若填充无效，采用钢护筒跟进可取得较好效果。

**5.5.9** 在穿越溶洞过程中，旋挖机要轻加压，以放慢钻进速度，平稳地通过溶洞区域；当桩基溶洞高度超过钻具的高度时，则要加强钻具的导向能力，以保证成桩的垂直度与桩位准确。

#### 条文说明

由于溶洞的存在，特别是钻到半边岩或串珠状溶洞时，若正常钻进或大力冲钻很容易发生漏浆或旋挖钻头卡钻，这时一定要轻加压、放慢钻进速度，待平稳通过此区域后再加快钻进速度。当溶洞高度超过钻具的高度时，应根据溶洞是否有填充物选用片石土回填或砂浆回填等技术，以保证成桩的垂直度与桩位准确。

**5.5.10** 桩孔达到设计深度，经终孔检验合格后，应立即采用专用清孔钻头进行清孔，不得用加深桩孔深度的方式代替清孔。对于使用片石、黏土和水泥处理过溶洞的桩的清孔，应以含砂率和沉渣厚度作为主要控制指标。

#### 条文说明

因停置时间较长造成沉渣较厚时，应及时捞渣，属于无循环清孔。其方法是利用双底（平底）钻头清理孔底沉渣。清孔钻头到达孔底后慢速旋转将孔底的沉淀钻渣或孔壁掉渣装入钻斗，提钻时应缓慢提升，防止过度扰动孔壁形成新的孔底沉渣。不得以超挖形成沉淀孔槽的方式消除（冲抵）孔底沉渣。

**5.5.11** 桩基清孔可按本规程第5.3.7条的方法进行处理。

**5.5.12** 钻孔至设计标高以后，判断该孔能否终孔应满足本规程5.3.8条的规定。

**5.5.13** 旋挖钻机或其配合作业的相关机具在工作时，必须有专人指挥，任何人员不得在工作回转半径范围内停留或通过。

**5.5.14** 施工现场应设置排水系统，排水系统不应与稳定液循环系统串联，稳定液废液在排放前，应进行无害化处理。稳定液沟池的容积应满足施工所需的稳定液循环量的

需要，以保证稳定液正常循环并防止外溢。

### 条文说明

稳定液应循环利用，废弃稳定液应及时处理，不得污染环境。稳定液废液宜采取固态和液态分离，分离出的固体物宜进行固化处理。稳定液沟池应经常清理、保证稳定液正常循环防止外溢，排水沟的废水应经沉淀过滤达到标准后方可外排。

**5.5.15** 渣土、废弃稳定液的处置应符合现行国家标准《污水综合排放标准》(GB 8978)及有关环境保护的规定；施工环境保护还应符合现行行业标准《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ 146 的规定。

## 5.6 灌注混凝土

**5.6.1** 孔内无积水时混凝土的灌注施工按《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定进行干作业。人工挖孔桩在桩底水位上升速率大于 6.0 mm/min 时，应严格按照水下灌注混凝土的施工工艺进行施工。

**5.6.2** 灌注水下混凝土按照《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)有关规定执行，并应满足以下要求：

1 灌注水下混凝土之前孔底沉渣厚度指标应符合下列规定：对端承型桩，不应大于 50mm；对摩擦型桩，不应大于 100mm。

2 在灌注过程中，应经常测探井孔内混凝土面的位置且在溶洞发育的高度范围内应加密检测，及时地调整导管埋深。

3 灌注中发生故障时，应查明原因，制订处理方案。

**5.6.3** 灌注混凝土过程中应密切关注混凝土浇筑量，发生大量超方时应及时采取处理措施。

### 条文说明

混凝土灌注过程中大量超方时还应采取措施防止断桩现象发生，灌注过程中可加大导管埋深，混凝土灌至溶洞或裂隙处时，适当增加导管埋深，确认安全后，再提升导管。灌注时要勤测量混凝土面高程，对灌注过程中出现的缓慢下降要有准确的判断，防止混凝土面突然下降导管悬空造成断桩事故。遇到大的溶洞或溶洞失水现象严重的桩，混凝土灌注速度可适当加快，灌注混凝土前可先在钢筋笼上对应于溶洞的位置附设钢护筒包

---

裹处理，护筒高度上、下超过溶洞口 0.5m，避免混凝土流入溶洞。

**5.6.4** 在灌注过程中，应将孔内溢出的水或泥浆引流至适当地点处理，不得随意排放污染环境。

## **5.7 施工应急处理**

**5.7.1** 施工应急处理情况主要包括卡钻、掉钻、埋钻、桩基偏位、塌孔、漏浆、岩溶通道串浆、串孔、混凝土流失及断桩等。

**5.7.2** 卡钻处理宜满足下列要求：

基岩中宜用 3 m~5 m 的冲程，距溶洞顶板 1 m~2 m 处宜用 0.5m~1.5m 的小冲程，轻锤慢打，击穿洞顶顶板岩石宜用短冲程快频率冲击的方法，根据卡钻部位不同宜用正绳器调正钻头、上下活动钻锤等措施。

**5.7.3** 掉钻处理宜满足下列要求：

- 1 如泥渣、塌孔土石覆盖钻锤，宜清孔吸泥；
- 2 侧锤探测钻锤孔底情况，宜钩住钻锤保险绳，缓慢提起钻锤；
- 3 如钻锤倾倒，宜派潜水员潜到孔底将钢丝绳拴住钻锤顶钩，将钻锤提起；
- 4 如钻锤顶面朝下，宜将钢丝绳捆绑于钻锤爪部，再将钻锤提起。

**5.7.4** 当发生埋钻事故进行处理时宜用气举反循环或强力泵冲孔法迅速冲孔，排出沉渣及坍塌土体，将钻锤提出。

**5.7.5** 桩孔偏位处理宜满足下列要求：

- 1 宜向钻孔内抛填块石和黏土，块石强度宜高于岩层强度，再用小冲程、低频率方法冲孔钻进，宜多次回填，反复冲砸；
- 2 当 1 方法不宜纠偏时，宜先掏渣清孔，再向孔内灌注高强度水下混凝土封底。

**5.7.6** 塌孔处理宜满足下列要求：

- 1 如孔壁局部坍塌，孔内水头无明显损失，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，应快速补充泥浆，并分层抛入碎石与黏土混合料、袋装水泥，回填高度 2m~3m，再用小冲程钻进，宜可多次回填，反复冲砸，阻止漏浆后，再重新钻进；
- 3 当岩溶严重发育，2 提出方法达不到处理效果时，宜拔出钢护筒，用黏土回填钻

孔，再重新钻孔。

#### **5.7.7 漏浆处理宜满足下列要求：**

**1** 当岩溶裂隙和小型溶洞、孤立溶洞出现漏浆时，应及时向孔内 补充泥浆，加稠泥浆浓度，向孔内抛填黏土、碎石混合料，小冲程、低频率方法冲孔钻进，宜可多次回填，反复冲砸；

**2** 当中型、大型溶洞漏浆时，宜向孔内抛填水泥、碎石与黏土混合料，分层加入整包水泥包，回填高度超过漏浆位置，再轻放钻锤挤压混合料及水泥包，再小冲程击打，形成水泥土浆，宜停工 12h 以上，待水泥土浆凝固后，再冲击成孔；

**3** 当多层溶洞漏浆时，宜重复 2 工作，直到完成一个桩孔为止；

**4** 当钻孔到达桩底标高后漏浆时，宜采用 2 方法堵漏泥浆；再次出现漏浆现象时，宜抛填碎石，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。

**5.7.8** 当进行岩溶通道串浆、串孔处理时，发生岩溶通道串浆、串孔现象时不可勉强向下施工，应根据地质资料进行判断处理：溶洞较小时可向孔内回填粘土，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，使之无法串通；溶洞较大时可将整袋粘土抛入孔内，分层加入一定量的整包水泥包，防止施工过程中出现漏浆、塌孔现象。

**5.7.9** 当进行混凝土流失及断桩现象处理时，灌注过程中应加大混凝土生产和运输能力，加大混凝土初灌量，灌注过程中加大导管埋深，宜加大混凝土灌注高度；当发生混凝土流失断桩时，立即停止灌注，待水下混凝土达到凝结强度后，再重新冲孔成桩。

---

## 6 质量检测与承载力测试

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 桩基工程应进行桩位、桩长、桩径、垂直度、桩身完整性及桩端持力层性质等质量检验和单桩竖向承载力检测，再进行单桩承载力抽样检测。对承受水平力较大的桩还应进行水平承载力检验。

#### 条文说明

本条规定对桩基工程的质量检验项目和承载力检测的基本要求，按《建筑地基基础施工质量验收规范》GB 50202 和行业标准《公路工程基桩检测技术规程》JTG/T 3512 执行。质量检验项目和承载力检测内容也是直接关系到桩基工程的质量能否达到设计要求的重要评价指标，其中，桩基质量检验包括桩身质量检验和桩端持力层质量检验，而桩端持力层的质量检验按检验时间又可分为终孔时的质量检验和成桩后的质量检验，考虑到桩端持力层质量检验实施的困难性，其检验工作（尤其是对于人工挖孔桩）应以终孔时的质量检验为主，成桩后的质量检验为辅进行。因桥梁桩基以承受竖向力为主，一般情况下只需对桩基进行竖向承载力检测，桩基水平承载力通常通过适当地加强桩基顶部一定范围内的构造措施就有保障。

**6.1.2** 对水泥、钢筋、砂子、石子和外加剂等桩体原材料质量的检验项目和检验方法应符合国家现行有关标准的规定。

**6.1.3** 对于具有下列情况之一的桩基工程，宜通过静载荷试验对工程桩的单桩竖向抗压承载力进行验收检测：

- 1 穿越土层厚度远超过常规的嵌岩桩；
- 2 施工质量出现异常的桩或完整性检测中判定为Ⅲ、Ⅳ类桩；
- 3 工程施工前已进行单桩静载试验，但施工过程中变更了工艺参数，且对承载力不利的桩基；

- 4 岩溶地质条件复杂、成桩质量可靠性较低，难以确定承载力的桩基，如：串珠状溶洞地质极发育，不断加深桩长也无法找到合适的桩端持力层的桩基；
- 5 成桩后的质量检验过程中发现普遍存在一定质量缺陷的桩基；
- 6 新型桩基础或采用新工艺施工的桩基础；
- 7 有其它特殊要求的桥梁桩基础。

## 6.2 质量检测

**6.2.1** 桩基工程施工前应依据桩基轴线控制网、场地测量基准控制点和水准点，严格对桩位进行检验，检验内容包括桩基平面位置、设计桩顶标高与孔口标高的差值。

### 条文说明

桩基定位和桩顶标高检验是桩基工程施工前必须完成的重要工序，并且在施工过程中应经常复核。

**6.2.2** 桩基成孔质量检测应符合现行行业标准《公路工程基桩检测技术规程》JTG T5312 及《灌注桩成孔质量检测技术规程》T/CECS 596 的规定。

**6.2.3** 桩端持力层的承载特性、持力层的厚度及桩端进入持力层的深度，应由勘察、监理、设计和施工单位共同检查确认，并应符合下列规定：

1 对于人工挖孔桩，岩溶地质条件简单时可采用钻探、钎探或孔底观测等进行确认；对岩溶发育或岩体破碎程度较高的大直径嵌岩桩，应采用超前钻孔取芯法并同时结合钻孔地质雷达、数字钻孔成像、管波、声纳等有效物探方法，综合评价桩基持力层范围内岩溶地质的发育特征和岩体质量；

2 对于机械钻（冲）孔灌注桩，可结合地勘资料、出渣情况和钻进速率等判定桩端持力层情况。对于岩溶地质条件复杂的桩孔，当地勘钻孔不足以判定桩底持力层情况时，可采用超前钻孔取芯法并结合钻孔地质雷达、数字钻孔成像、管波、声纳等有效物探方法，综合评价桩基持力层范围内岩溶地质的发育特征和岩体质量；

3 现场检验发现桩端持力层的地质条件与勘察报告和设计文件不一致或遇到异常情况时，应结合具体地质条件提出处理意见。

### 条文说明

桩基工程在成孔过程中，尤其是对于大直径的端承桩，桩端持力层的承载特性、持力层的厚度及桩端进入持力层的深度等，对保证桩基的安全稳定性至关重要，应由勘察工程师、监理工程师、设计和施工技术人员共同检查确认，做到防范于未然。考虑到岩溶地质的隐蔽性和复杂性，现有的各种检测技术或方法还不够成熟，单靠一种检测手段还不能有效地反映岩溶地质的真实状况。因此，桩端持力层的质量检验手段应“多样性和综合性”，采用不同手段相互补充、验证，避免仅依靠单一的岩芯钻探方法，查明桩端以下 3 倍桩底直径及 5 m 深度范围内有无空洞、破碎带、软弱夹层等不良地质条件。地质雷达、管波探测法和层析成像等物探技术，可以作为岩溶现象调查的辅助技术手段，但必须结合钻孔勘探资料进行验证，尤其是对于相同类型的物探异常点应通过适量的钻探验证，才能准确地把握持力层范围内的岩溶空间形态特征和分布规律，并圈定岩溶洞体范围。人工挖孔桩还可直接在桩端持力层进行采样，通过室内力学试验，确定持力层岩体的单轴抗压强度，进而确定极限端阻力或嵌岩段基桩的总极限阻力。文献资料和工程实践表明，桩端持力层的岩性、风化程度和强度等，可以通过成孔过程中的出渣情况和钻进速率进行辅助判断，实际应用时宜结合地方施工经验采取这一方法。

**6.2.4** 人工挖孔桩在成孔过程中应对照地质柱状图和工程地质剖面图进行侧壁的编录，当开挖至设计深度时应进行桩端持力层检验。对于一桩一柱的大直径端承桩或设计有规定的桩孔，应视岩性检验桩端以下 3 倍桩底直径及 5 m 深度范围内有无空洞、破碎带和软弱夹层等不良地质条件。

#### 条文说明

相关研究表明孔壁粗糙度是影响嵌岩桩竖向承载力的重要因素，工程实践中也有适当增加孔壁粗糙度以提升桩基竖向承载力的应用案例。人工挖孔桩宜进行成孔侧壁编录，并对照地质柱状图和工程地质剖面图进行桩侧、桩端持力层检验，具体内容可包括孔壁粗糙度、侧壁岩溶洞隙的发育情况、持力层岩体的强度与风化程度，以及节理、裂隙的分布及胶结状态等，其中，侧壁岩体的粗糙度评定可参照 Barton 提出的 10 条标准粗糙度曲线。成孔侧壁编录可丰富嵌岩桩的现场试验资料，推动桩基工程的理论发展，为规范中嵌岩桩的竖向承载力计算公式引入粗糙度影响因子提供参考依据。

**6.2.5** 采用后压浆工艺的灌注桩应按设计规定的时间进行压浆施工，并对注浆材料、注浆顺序、注浆压力及注浆量等进行检验，同时做好注浆压力和浆液流量的施工记录。

### 6.2.6 桩基成桩后桩端持力层质量的检验应符合下列规定：

1 对桩底沉渣或桩与地层的胶结情况、后压浆桩岩溶及裂隙带内的浆液填充率进行抽样检验时，可将桩身混凝土的取芯钻孔分别延伸至桩底以下不低于 0.5 m 和 1 倍的桩底直径，同时宜对取样检测孔进行孔内数字成像、高密度电阻率法、地质雷达、瞬态面波和弹性纵波速度等综合物探检测，必要时还可结合钻孔芯样的室内力学性质试验和后压浆桩压浆前后的单桩静载试验进行检测；

2 桩端持力层质量检验结果判定为不合格时，应采用原检测方法或准确度更高的检测方法，在未检测桩位处进行扩大抽检。

#### 条文说明

桩基工程在成桩后对桩身质量和桩端持力层质量的检验应综合考虑设计要求、地质条件、施工工艺与施工（异常）记录、各种检测方法的特点及适用范围等因素，合理选择检测方法和检测数量。由于检验时间和成本的限制，对桩底沉渣或桩与地层的胶结情况、桩端持力层后压浆的施工质量进行抽样检验的数量不可能无限制地增加，为了在有限的抽检数量中更充分地暴露桩基工程存在的质量问题，应选择岩溶地质复杂、施工异常等有代表性的桩位作为抽检的检验点，地质条件和施工质量等相近的桩基，则应在整个施工场地内随机抽取检验点，对于在终孔时已经采用钻孔取芯法对桩端持力层的性质进行检验的桩孔，成桩后对桩端持力层的检验可不必钻至桩底以下 3 倍桩底直径且不小于 5 m 的深度。钻孔取芯观测桩底沉渣或桩与地层的胶结情况、水泥结石充填情况是一个比较直观的方法，由于地质体的各向异性和不均匀性，注浆加固的填充区域和方向具有不确定性，加上裂隙的可注性具有一定的宽度界限（ $> 0.2 \text{ mm}$ ），钻孔取芯观测具有一定的偶然性，因此，还宜对取样检测孔进行孔内数字成像、高密度电阻率法、地质雷达、瞬态面波和弹性纵波速度等综合物探检测，必要时还可进行室内力学性质试验和现场单桩静载试验进行辅助检验，为保证注浆效果的客观与直接评价，注浆前、后采用的检测方法应保持一致。此外，成桩后如果采用钻探与物探相结合的持力层质量检验手段，布孔或进行钻孔设计还宜充分考虑钻孔的多种用途。基桩桩身钻孔取芯法检测工作结束后，钻芯孔应采用混凝土或水泥浆从孔底往上回灌封闭，灌浆压力不宜小于 0.5 MPa。

6.2.6 桩基成桩后桩身质量应符合《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1 及《公路工程基桩检测技术规程》JTG T 5312 的相关规定。

## 6.3 承载力测试

**6.3.1** 单桩承载力检测除应符合本规程第 6.1.3 的规定外,尚应满足以下要求:

- 1 岩溶地质条件变化不大时,试桩位置应在整个场地内随机抽取;岩溶地质条件变化较大时,应在较差地段适当增加桩基检测点;
- 2 对于岩溶地质强发育、溶洞高度较大的建设场地,应在试桩桩位处增加地质钻孔,同时结合其它物探方法查明溶洞的分布位置与形态;对采取静载测试的工程桩,则应在测试完成后采用组合压浆对桩基进行加固处理。

### 条文说明

灌注桩的单桩承载力与桩长、桩径、桩端沉渣和桩孔倾斜度等密切相关,对试验桩执行与工程桩完全一致的成孔质量、成桩质量检验标准,在于控制试桩充盈系数在允许范围内,比选试桩代表性,防止因试验桩的自身质量问题而影响静载试验的测试结果,从而达到静载试桩为设计提供依据和评估工程质量的目的。对位于岩溶强发育、溶洞高度较大的建设场地的桩基,宜采用全套管管内取土(岩)或根据溶洞高度及相对标高,采用防止灌注桩桩径变细的外包裹钢筋笼等技术措施,这是因为桩径变粗(如在灌注混凝土过程中,溶沟、溶洞等被混凝土充满)或变细都将显著影响桩基承载力的试验结果,特别是桩身有明显扩径的桩,其竖向抗压或抗拔极限承载力可能远远高于长度和直径相同的非扩径桩,且相同荷载作用下的桩顶变位也会存在明显差别,从而降低桩基静载试验结果的可靠性与代表性。全套管管内取土(岩)成孔灌注桩在施工过程中采用钢外套管全程护壁,无需泥浆等稳定液,在保证孔壁稳定的同时,有效降低或避免了泥皮和桩端沉渣对桩基承载力的削弱效应,对大型溶洞和串珠状溶洞等各类复杂地层中的灌注桩施工均具有较好的适宜性。

**6.3.2** 岩溶地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,应符合现行行业标准《公路工程基桩检测技术规程》JTG/T 5312 的规定;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,应符合现行行业标准《基桩静载试验自平衡法》JT/T 738 的规定。

## 附录 A 溶洞的稳定性计算

**A.0.1** 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：

$$M = \frac{1}{2} pl^2 \quad (\text{A.0.1-1})$$

2) 当裂隙位于支座处，而顶板较完整时，可按简支梁计算：

$$M = \frac{1}{8} pl^2 \quad (\text{A.0.1-2})$$

3) 当支座和顶板岩层均较完整时，可按两端固定梁计算：

$$M = \frac{1}{12} pl^2 \quad (\text{A.0.1-3})$$

4) 计算弯矩和剪力应符合下列公式的要求：

$$\frac{6M}{bH^2} \leq \sigma \quad (\text{A.0.1-4})$$

$$H \geq \sqrt{\frac{6M}{b\sigma}} \quad (\text{A.0.1-5})$$

$$\frac{4f_s}{H^2} \leq \tau \quad (\text{A.0.1-6})$$

$$H \geq \sqrt{\frac{4f_s}{\tau}} \quad (\text{A.0.1-7})$$

式中：\$M\$—弯矩（\$\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}\$）；

\$p\$—顶板所受总荷载（\$\text{kN} \cdot \text{m}/\text{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（\$\text{m}\$）；

\$\sigma\$—岩体计算抗弯强度（石灰岩一般为允许抗压强度的 \$1/8\$）（\$\text{kPa}\$）；

\$f\_s\$—支座处的剪力（\$\text{kN}\$）；

\$\tau\$—岩体计算抗剪强度（石灰岩一般为允许抗压强度的 \$1/12\$）（\$\text{kPa}\$）；

\$b\_l\$—梁板的宽度（\$\text{m}\$）；

\$H\$—顶板岩层厚度（\$\text{m}\$）。

**A.0.2** 针对上覆岩较厚、埋深较大的溶洞，其顶板厚度不应小于破裂拱高度  $H$ 。

$$H = \frac{0.5b + H_0 \tan(90 - \varphi)}{f} \quad (\text{A.0.2-1})$$

式中：

$b$ —溶洞的宽度 (m)；

$H_0$ —溶洞的高度 (m)；

$\varphi$ —岩石内摩擦角 ( $^{\circ}$ )；

$f$ —岩石强度系数， $f = \frac{1}{\tan \varphi}$ 。

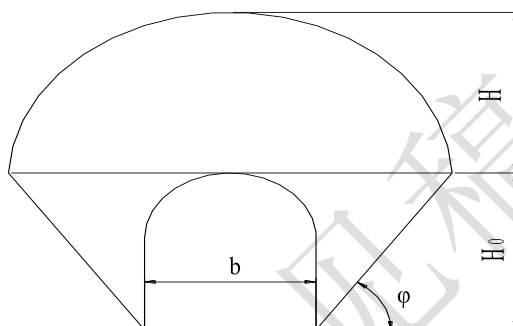


图 A.0.2 破裂拱模型示意

#### 条文说明

采用拱模型验算适用于覆岩较厚、埋深较大的溶洞，此时在溶洞上覆岩层中能形成稳定的压力拱。当顶板岩体被密集裂隙切割呈块状或碎石状时，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。溶洞未坍塌时，相对于与天然拱处于平衡状态，如发生坍塌则形成破裂拱。破裂拱以上的岩体重量由拱承担，因承担上部荷载尚需一定的厚度，故溶洞顶板的安全厚度为破裂拱高加上部荷载作用所需要的厚度，再乘以相应的安全系数。

**A.0.3** 当洞顶板完整、岩层较厚、强度较高，但洞跨较小、剪力为主要控制因素时，采用剪切概念估算顶板安全厚度设桥基范围内溶洞顶板总荷载(自重和附加荷载)为  $P$ ，该范围内顶板抗剪力为  $T$ 。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：

$$H \geq \frac{T}{\tau u_l} \quad (\text{A.0.3-1})$$

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

$u_l$ —溶洞平面的周长 (m)；

其余符号意义同前。

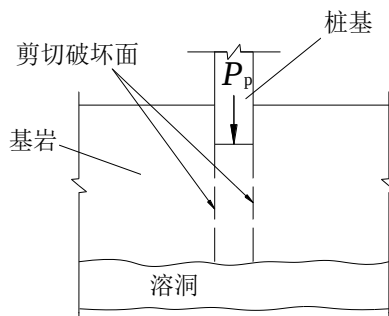


图 A.0.3 溶洞顶板抗剪切计算简图

**A.0.4** 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，宜按冲切破坏锥体验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.0.4-1）进行计算：

$$F_l = \frac{0.24}{\lambda + 0.5} f_t u_m h \quad (\text{A.0.4-1})$$

对于矩形截面基础：  $u_m = 2(b + l + 2\lambda h)$  (A.0.4-2)

对于圆形截面基础：  $u_m = (d + \lambda h) \pi$  (A.0.4-3)

验算时应符合下式要求：

$$F_l \geq F + G + \gamma_r V_r \quad (\text{A.0.4-4})$$

式中：

$F_l$ ——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），上部结构传递至基础顶面的竖向力，实际验算时可取端阻力设计值（kN）；

$G$ ——基础自重和基础上的土重（kN），对于端承桩可取基础自重与承台覆土自重之和；对于穿过串珠状溶洞而嵌固于完整、较完整溶洞顶板的桩基，可取嵌固段与紧邻两个溶洞段的桩基自重；

$\lambda$ ——冲跨比， $\lambda = \tan \theta$ （ $\theta$  为顶板岩体的应力扩散角，°），可取  $\lambda = 0.3 \sim 0.5$ （完整岩体取小值，较破碎岩体取大值，并应考虑岩体结构面的影响）；

$d$ ——桩基直径或阔底段的直径（m）；

$h$ ——溶洞顶板的厚度（m）；

$u_m$ ——冲切破坏锥体在  $h/2$  高度处的周长（m）；

$V_r$ ——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>）；

$f_t$ ——岩石计算抗拉强度（kPa）（ $f_t$  的大小宜由试验确定，初步分析时，石灰

岩一般可取为岩石饱和单轴抗压强度的 1/10~1/20) (kPa)。

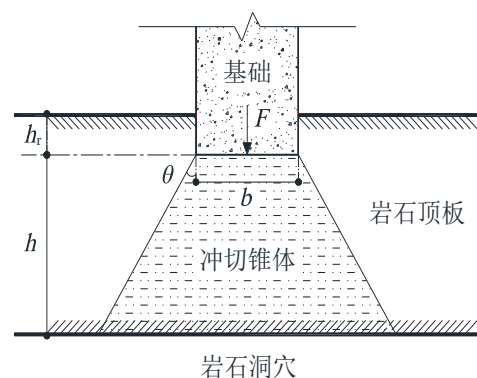


图 A.0.4 溶洞顶板抗冲切计算简图

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。实际设计时应根据岩质地基承载力及顶板抗冲切力的计算结果,取其小值作地基承载力控制值。

## 附录 B 基岩滑移稳定性验算

**B.0.1** 具有单一外倾软弱结构面的出露石芽或基岩（图 B.0.1），其抗滑移稳定性应符合下式要求：

$$\frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cLb_h}{(W + P_c) \sin \alpha} \geq 1.35 \quad (\text{B.0.1-1})$$

式中：

$W$ ——滑动岩体（包括基础）的自重（ $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ ）；

$P_c$ ——基础顶面的集中荷载（ $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ ）；

$\alpha$ ——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（ $\text{kPa}$ ）；

$L$ ——滑动岩体的滑动面长度（ $\text{m}$ ）；

$b_h$ ——滑动面的平均宽度（ $\text{m}$ ）；

$H$ ——滑动岩体的高度（ $\text{m}$ ）；

$\beta$ ——岩体边坡对水平面的坡角（ $^\circ$ ）

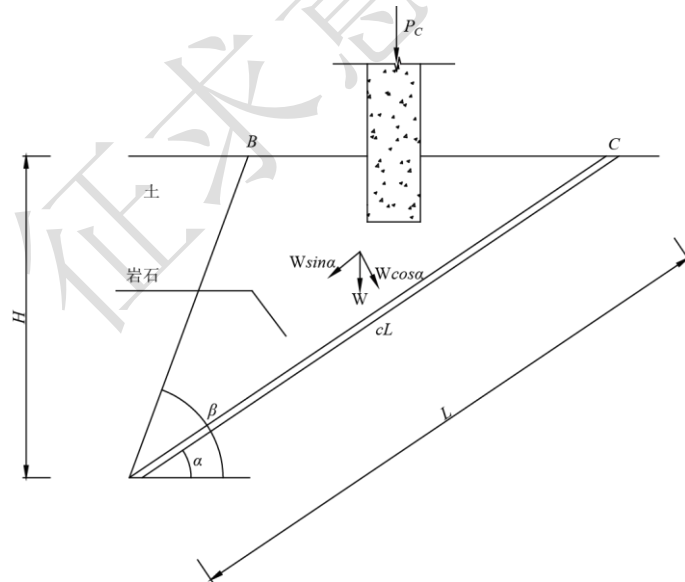


图 B.0.1 抗滑移稳定性验算示意图

## 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，宜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,可方便地查表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的表 D.0.1 和表 D.0.2 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 的表 4.3.1 选用。

**B.0.2** 出露石芽或基岩按式(B.0.1)验算稳定性时,应同时符合下列规定:

- 1 外倾滑动结构面的走向应与基岩坡面平行或接近于平行(约在  $30^{\circ}$  范围以内);
- 2 外倾滑动结构面应在坡面露出,即外倾滑动结构面的倾角( $\alpha$ )应小于基岩坡面的倾角( $\beta$ )。

**B.0.3** 外倾滑动结构面内存在地下水时,还应考虑地下水对桩基抗滑移稳定的不利影响。

#### 条文说明

地基稳定性计算时,应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,大量边坡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,还应考虑地下水对桩基抗滑移稳定的不利影响。

## 用词及用语说明

### 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”。