

中国核工业勘察设计协会文件

核设协[2023] 194 号

关于中国核工业勘察设计协会立项的团体标准 《核工程桩基技术规程》公开征求意见的通知

中国核工业勘察设计协会立项的团体标准《核工程桩基技术规程》已经完成草案编制工作。依照《中国核工业勘察设计协会团体标准管理办法》的相关规定，现面向会员单位和社会广泛征求意见。

烦请相关领域的专家查收《核工程桩基技术规程》团体标准编写说明（详见附件 1）和《核工程桩基技术规程（征求意见稿）》（详见附件 2），并于 2023 年 10 月 5 日前将《征求意见表》（详见附件 3）发送至联系人邮箱。

联系人：王海龙

联系电话：18514836356

邮箱：wanghld@cnpe.cc

感谢对中国核工业勘察设计协会团体标准工作的大力支持！

附件：

1. 《核工程桩基技术规程》团体标准编写说明
2. 《核工程桩基技术规程》（征求意见稿）
3. 征求意见表



抄 送：理事长、副理事长、秘书长、副秘书长

中国核工业勘察设计协会秘书处 2023年9月6日印发

附件 1

中国核工业勘察设计协会

《核工程桩基技术规程》团体标准编制说明

一、工作简况

(1) 任务来源

《核工程桩基技术规程》（以下简称本规程）制定任务由中国核工业勘察设计协会文件《关于《核电站施工控制网建造测量标准》等 14 项团体标准立项的通知》（核设协〔2022〕29 号下达，立项编号为 CNIDA-LX-2022-006，标准名称为《核工程桩基技术规程》。

(2) 标准制定的目的和意义

近年来随着核电、核化工等核工程的有序发展，良好的基岩厂址越来越少。核工程走向地质条件复杂厂址（非基岩、软土）将是必然趋势。目前解决复杂场地不良地基首选的可靠保守方案仍然是素混凝土换填，但其经济性往往比较差。桩基技术在一般的民用与工业建筑领域的应用已经十分广泛和成熟，但目前核工程领域缺乏相关规范和标准，这将大大限制核工程中桩基技术的应用和推广，进一步对厂址的选择造成限制。结合中国核电工程有限公司在核工程桩基技术领域的研究和应用实践，与审查、勘察和施工检测单位联合制定适用于核工程安全相关结构的桩基技术规程，是十分迫切和必要的。该标准的制定和推广对于拓宽核工程选址范围，保障核工程安全，提高经济效益具有重要意义。

(3) 主要工作过程

主编单位中国核电工程有限公司接到立项通知后积极响应。

2022 年 4 月 6 日，中国核电工程有限公司召集生态环境部核与辐

射安全中心、中国核工业华兴建设有限公司、河北中核岩土工程有限责任公司于线上召开了《规程》的工作启动会，进一步明确了章节划分并细化了责任分工。各单位都高度重视团体标准《规程》的编制工作，表示后续将持续加大人力投入。在《规程》编制的过程中各方保持紧密沟通，保障团体标准《规程》的编制工作顺利进行。

2023 年 6 月 1 日，各方完成所负责编制的章节，通过邮件发送给中国核电工程有限公司汇总。2023 年 7 月 1 日，中国核电工程有限公司将汇总整理好的初稿以邮件方式发送各参编人员。

2028 年 8 月 8 日，编制组根据各方返回的修改意见和建议对标准进行了修改和完善，在此基础上形成征求意见稿，于 2023 年 8 月 10 日将征求意见稿提交至核工业勘察设计协会。

(4) 起草单位和主要起草人员

本规程由中国核电工程有限公司主编，生态环境部核与辐射安全中心、中国核工业华兴建设有限公司、河北中核岩土工程有限责任公司参编。

主要起草人员

序号	姓名	年龄	职务/职称	工作单位	分工
1	隋春光	44	研高	中国核电工程有限公司	编制组组长,对标准编制总体负责
2	靳金平	43	研高	中国核电工程有限公司	设计相关章节总体把控与协调,负责编制标准第 4 章
3	王海龙	35	工程师	中国核电工程有限公司	编制组对内对外组织协调;总体协调第 6 章,并负责编制 6.1 节,6.2 节和 6.7 节;负责编制附录 A,附录 B 和附录 C
4	朱秀云	38	正高	生态环境部核与辐射安全中心	参与第 6 章及附录 A,附录 B 和附录 C 部分内容的编制
5	陈勇明	50	高工	中国核工业华兴	负责标准第 8 章编制

				建设有限公司	
6	孙立川	56	正高	河北中核岩土工程有限责任公司	负责标准第 9 章编制
7	杨建华	50	研高	中国核电工程有限公司	标准总体技术把控
8	李玉民	57	研高	中国核电工程有限公司	标准总体技术把控
9	林海	42	研高	中国核电工程有限公司	负责第 5 章的编制
10	孙晓颖	43	研高	中国核电工程有限公司	参与第 6 章及部分内容的编制
11	周国良	45	研究员	生态环境部核与辐射安全中心	参与第 6 章及附录 A, 附录 B 和附录 C 部分内容的编制
12	刘辰强	35	工程师	中国核工业华兴建设有限公司	参与标准第 8 章编制
13	陈小峰	51	研高	河北中核岩土工程有限责任公司	负责标准第 9 章编制
14	王健	43	高工	中国核电工程有限公司	负责第 7 章的编制
15	徐浩明	43	高工	中国核电工程有限公司	负责编制第 6 章 6.5 节, 6.6 节
16	陈 斯	30	工程师	中国核工业华兴建设有限公司	参与标准第 8 章编制
17	胡胜波	42	高工	河北中核岩土工程有限责任公司	负责标准第 9 章编制
18	王佳欣	28	工程师	中国核电工程有限公司	负责编制第 6 章 6.3 节, 6.4 节
19	张陆桓	30	工程师	中国核电工程有限公司	负责前言, 第 1 章, 第 2 章和第 3 章的编制, 并负责统稿

二、 标准编制原则和主要内容

(1) 编制原则

本规程的编制过程中遵循以下原则：

1) 体现核电设计特点

本规程着重体现核电厂核安全相关厂房桩基础设计的自身特点。

2) 解决核电设计问题

本规程尽可能地解决了核电厂核安全相关厂房桩基础设计中遇到的各类问题，即其他相关标准中未作规定，而核安全相关厂房桩基础设计中有需求，并有条件列入的内容，均可考虑作为本规程的新增条款。

3) 规范条款有理有据

本规程所列条款均有理有据，本规程不需要编写条文说明。

4) 与国标的一致性及相容性

本规程在术语及符号、材料、设计表达式等方面尽可能与国内标准保持一致；本规程与现行国内相关标准在同类规定上也不存在矛盾。

5) 语句、格式应规范

本规程编写的格式遵守《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》GB/T 1.1-2020的相关规定；同时，标准的条款表述条理清晰，语句应简捷明确。

(2) 本规程主要内容的依据

1) 国内相关规范

《建筑桩基技术规范》（JGJ 94-2008），《核电厂抗震设计标准》（GB50267-20149），《核安全相关结构抗震设计规范》（NB/T 20256-2013），《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010），《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011），《建筑地基基础处理技术规范》（JGJ 79-2012），《码头结构设计规范》（JTS 167-2018），《地下结构抗震设计标准》（GB/T 51336-2018），《城市轨道交通结构抗震设计规范》（GB 50909-2014）等。

3) 美国相关规范

《Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing

Fixed Offshore Platform》(2A-WSD (RP 2A-WSD))

4) 欧洲相关规范

《Design of Offshore Wind Turbine Structures》(DNV-OS-J101, JANUARY 2013)

5) 科研课题：《核工程桩基设计关键技术研究》

6) 核工程核安全相关构筑物桩基试点应用-秦山干法项目

(3) 解决的主要问题

该《规程》主要解决核工程核安全相关结构桩基础的设计、施工与检测问题。

三、 主要试验（或验证）情况

本规程无相关试验验证。

四、 标准中涉及专利的情况

本规程无相关专利。

五、 预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

我国核工业领域有着广阔的发展前景，预计未来一段时间仍是核工程建设的高峰期。而适合核工程建设的基岩厂址原来越少，在非基岩厂址上建造核工程设施将成为必然。采用传统的素混凝土换填方案，支护难度大，施工周期长，费用高；而采用桩基方案，可以缩短工期，同时降低造价。桩基因其独有的安全性和经济性优势，将成为核工程基础方案的重要选项，应用前景广阔。

六、 与国际、国外标准对比情况

目前国际、国外尚无针对核安全抗震 I 类桩基的标准

七、 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准与国家法律、法规、规章、强制性标准和其他标准等文件的关系为一致或配套等。

八、 重大分歧意见的处理经过和依据

征求意见阶段暂无。

九、 标准性质的建议说明

团体标准为自愿性标准。

十、 贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准以推荐性标准发布，本标准可供核工程结构设计、施工和检测人员参考使用。

十一、 废止现行相关标准的建议

本规程不涉及。

十二、 必要专利信息披露情况说明

本规程不涉及。

十三、 其他应予说明的事项

征求意见阶段暂无。

《规程》编写组

2023 年 08 月 15 日

附件 2

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号



体 标 准

T/XXX XXXX—XXXX

核工程桩基技术规程

Technical specification for pile foundations in nuclear engineering

(工作组讨论稿)

(本草案完成时间：2023.3.31)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

发 布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 基本设计规定	2
5.1 一般规定	2
5.2 基本资料	3
5.3 桩的选型与布置	4
5.4 特殊条件下的桩基	5
5.5 耐久性规定	6
6 桩基设计	7
6.1 基本原则	7
6.2 桩基作用效应	8
6.3 桩基竖向承载力	9
6.4 桩基水平承载力	19
6.5 桩基变形与裂缝	23
6.6 桩基承台设计	26
6.7 桩基础结构的楼层反应谱	29
7 桩基构造	30
7.1 桩基构造	30
7.2 承台构造	31
8 桩基施工	31
8.1 施工准备	32
8.2 一般规定	32
8.3 泥浆护壁成孔灌注桩	34
8.4 长螺旋钻孔压灌桩	37
8.5 灌注桩后注浆	37
8.6 混凝土预制桩	38
8.7 承台施工	43
9 桩基检测与验收	44
9.1 一般规定	44
9.2 施工前检验	44
9.3 施工过程检验	45
9.4 施工后检验	45
9.5 桩基验收	46
附录 A（规范性） 考虑桩-土-结构相互作用的非线性弹簧系数法	47

附录 B（规范性）	地震作用下群桩三维整体时域分析方法	52
附录 C（规范性）	设计楼层反应谱的调整	53

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本标准按中国核工业勘察设计协会《》的要求制定。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核工业勘察设计协会提出。

本文件由××××归口。

本文件负责起草单位：中国核电工程有限公司。

本文件参加起草单位：生态环境部核与辐射安全中心、中国核工业华兴建设有限公司、河北中核岩土工程有限责任公司。

本文件主要起草人：×××

本文件审查人：

核工程桩基技术规程

1 范围

本文件规定了核工程桩基的基本设计规定，设计方法，构造要求，施工，检测与验收。
本文件适用于核工程领域与核安全相关的建构筑物桩基的设计、施工及验收。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50007 建筑地基基础设计规范
GB 50010 混凝土结构设计规范
GB 50011 建筑抗震设计规范
GB 50017 钢结构设计标准
GB 50021 岩土工程勘察规范
GB 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
GB 50267 核电厂抗震设计标准
GB 50330 建筑边坡工程技术规范
GB 50909 城市轨道交通结构抗震设计规范
GB 51041 核电厂岩土工程勘察规范
GB 55002 建筑与市政工程抗震通用规范
GB 55003 建筑与市政地基基础通用规范
GB/T 50046 混凝土建筑防腐蚀设计标准
GB/T 50269 地基动力特性测试规程
GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准
JGJ 6 高层建筑筏形与箱形基础技术规范
JGJ 10 钢筋机械连接通用技术规程
JGJ 18 钢筋焊接及验收规程
JGJ 79 建筑地基基础处理技术规范
JGJ 94 建筑桩基技术规范
JGJ 106 建筑基桩检测技术规范
NB/T 20012 压水堆核电厂核安全相关混凝土结构设计规范
NB/T 20105 核电厂厂房设计荷载规范
NB/T 20308 压水堆核电厂核安全有关厂房地基基础设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

桩基 pile foundation

由设置于岩土中的桩和与桩顶连接的承台共同组成的基础或由柱与桩直接连接的单桩基础。

3.2

基桩 foundation plie

桩基础中的单桩。

3.3

单桩竖向承载力 ultimate vertical bearing capacity of a single pile

单桩在竖向荷载作用下到达破坏状态前或出现不适于承载的变形时所对应的最大荷载，它取决于土对桩的支承阻力和桩身承载力。

3.4

极限侧阻力 ultimate shaft resistance

相应于桩顶作用极限荷载时，桩身侧表面所发生的岩土阻力。

3.5

极限端阻力 ultimate tip resistance

相应于桩顶作用极限荷载时，桩端所发生的岩土阻力。

3.6

单桩竖向承载力特征值 characteristic value of the vertical bearing capacity of a single pile

单桩竖向极限承载力标准值除以安全系数后的承载力值。

3.7

变刚度调平设计 optimized design of pile foundation stiffness to reduce differential settlement

考虑上部结构形式、荷载和地层分布以及相互作用效应，通过调整桩径、桩长、桩距等改变基桩支承刚度分布，以使建筑物沉降趋于均匀、承台内力降低的设计方法。

3.8

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。

3.9

下拉荷载 downdrag

作用于单桩中性点以上的负摩阻力之和。

3.10

楼层反应谱 floor response spectra

构筑物在地震作用下，附于不同楼层、单质点体系的最大响应与其自振周期之间的关系曲线。

4 总则

4.1 为了在核工程桩基础的设计和施工过程中贯彻执行国家的核安全和技术经济政策，做到安全适用、技术可靠、经济合理、确保质量、保护环境，制定本规程。

4.2 核工程桩基的设计与施工，应综合考虑工程地质与水文地质条件、上部结构类型、使用功能、荷载特征、施工技术条件与环境；应重视经验积累，因地制宜，注重概念设计，合理选择桩型、成桩工艺和承台形式，科学布桩，安全可靠和节约资源并重；应强化施工质量控制与管理。

4.3 在进行核工程桩基设计、施工及验收时，除应符合本规程外，尚应符合国家和能源行业现行有关标准、规范的规定。

5 基本设计规定

5.1 一般规定

5.1.1 桩基结构设计工作年限不应低于上部结构的设计工作年限。

5.1.2 核工程桩基础应按下列两类极限状态设计：

- a) 承载能力极限状态：桩基达到最大承载能力、整体失稳或发生不适于继续承载的变形；
- b) 正常使用极限状态：桩基达到建筑物正常使用所规定的变形限值或达到耐久性要求的某项限值。

5.1.3 核工程桩基应根据具体条件分别进行下列承载能力计算和稳定性验算：

- a) 应根据桩基的使用功能和受力特征分别进行桩基的竖向承载力计算和水平承载力计算；

- b) 应对桩身和承台结构承载力进行计算；对于桩侧土不排水抗剪强度小于 10 kPa、且长径比大于 50 的桩，应进行桩身压屈验算；对于混凝土预制桩应按吊装、运输和锤击作用进行桩身承载力验算；
 - c) 当桩端平面以下存在软弱下卧层时，应进行软弱下卧层承载力验算；
 - d) 对位于坡地、岸边的桩基应进行整体稳定性验算；
 - e) 对于抗浮、抗拔桩基，应进行基桩和群桩的抗拔承载力计算；
 - f) 对于桩基应进行极限安全地震动（SL-2）和运行安全地震动（SL-1）下的抗震承载力验算；
 - g) 混凝土预制桩运输、吊装和沉桩时桩身承载力验算。
- 5.1.4 摩擦型桩基，对桩基沉降有控制要求的非嵌岩桩和非深厚坚硬持力层的桩基，对结构体形复杂、荷载分布不均匀或桩端平面下存在软弱土层的桩基等，应进行沉降计算。
- 5.1.5 对核工程桩基，应计算其水平位移。桩基的水平位移包括长期水平荷载、水平地震作用以及风荷载等引起的水平位移。
- 5.1.6 应根据核工程桩基所处的环境类别和相应的裂缝控制等级，验算桩和承台正截面的抗裂和裂缝宽度。
- 5.1.7 核工程桩基设计时，应采用《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105 中规定的荷载效应组合，所采用的荷载效应组合与相应的抗力应符合下列规定：
- a) 确定桩数和布桩时，所采用的荷载效应组合的分项系数均取 1.0；相应的抗力应采用单桩承载力特征值。
 - b) 计算荷载作用下的桩基沉降和水平位移时，应采用正常运行工况下的荷载效应组合，但其分项系数均取 1.0；计算水平地震作用、风载作用下的桩基水平位移时，所采用的荷载效应组合的分项系数均取 1.0。
 - c) 验算坡地、岸边建筑桩基的整体稳定性时，所采用的荷载效应组合的分项系数均取 1.0。
 - d) 在计算桩基结构承载力、确定尺寸和配筋时，传至承台顶面的荷载效应组合，应采用相应的分项系数。
 - e) 非地震组合工况应进行承台和桩身裂缝控制验算，荷载效应组合中的各分项系数均取 1.0。
 - f) 当桩基结构进行抗震验算时，其承载力调整系数 γ_{RE} 应按现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的规定采用。
- 5.1.8 核工程桩基一般应采用桩筏基础，筏板应具有一定的刚度，以减小差异沉降。宜进行上部结构—承台—桩—土共同工作分析。
- 5.1.9 对于本规程第 5.1.4 条规定应进行沉降计算的核工程桩基，在其施工过程及建成后使用期间，应进行系统的沉降观测直至沉降稳定。

5.2 基本资料

5.2.1 核工程桩基设计应具备以下资料：

- a) 岩土工程勘察文件：
 - 桩基按两类极限状态进行设计所需用岩土物理力学参数及原位测试参数；
 - 对建筑场地的不良地质作用，如滑坡、崩塌、泥石流、岩溶、土洞等，有明确判断、结论和防治方案；
 - 地下水埋藏情况、类型和水位变化幅度及抗浮设计水位，土、水的腐蚀性评价，地下水浮力计算的设计水位；
 - 按 SL-2 相当的地震水平提供的液化土层资料；
 - 有关地基土冻胀性、湿陷性、膨胀性评价。
- b) 建筑场地与环境条件的有关资料：
 - 建筑场地现状，包括交通设施、高压架空线、地下管线和地下构筑物的分布；
 - 相邻建筑物抗震分类、基础形式及埋置深度；
 - 附近类似工程地质条件场地的桩基工程试桩资料和单桩承载力设计参数；
 - 周围建筑物的防振、防噪声的要求；
 - 泥浆排放、弃土条件；
 - 建筑物所在厂址的设计基准地震动、场地反应谱及相应的时程文件。

- c) 建筑物的有关资料：
 - 建筑物的总平面布置图；
 - 建筑物的结构类型、荷载，建筑物的使用条件和设备、系统管线等对基础竖向及水平位移的要求。
- d) 施工条件的有关资料：
 - 施工机械设备条件，制桩条件，动力条件，施工工艺对地质条件的适应性；
 - 水、电及有关建筑材料的供应条件；
 - 施工机械的进出场及现场运行条件。
- e) 供设计比较用的有关桩型及实施的可行性的资料。

5.2.2 核工程桩基的详细勘察除应满足现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 和《核电厂岩土工程勘察规范》GB 51041 有关要求外，尚应满足下列要求：

- a) 勘探点间距：
 - 对于端承型桩（含嵌岩桩）：主要根据桩端持力层顶面坡度决定，宜为12~24 m。当相邻两个勘察点揭露出的桩端持力层层面坡度大于10%或持力层起伏较大、地层分布复杂时，应根据具体工程条件适当加密勘探点。
 - 对于摩擦型桩：宜按20~35 m布置勘探孔，但遇到土层的性质或状态在水平方向分布变化较大，或存在可能影响成桩的土层时，应适当加密勘探点。
- b) 勘探深度：
 - 宜布置1/3~1/2的勘探孔为控制性孔，至少应布置3个控制性孔。控制性孔应穿透桩端平面以下压缩层厚度，满足下卧层验算要求；一般性勘探孔应深入预计桩端平面以下3~5倍桩身设计直径，且不得小于3 m；对于大直径桩，不得小于5 m。
 - 嵌岩桩的控制性钻孔应深入预计桩端平面以下不小于3~5倍桩身设计直径，一般性钻孔应深入预计桩端平面以下不小于1~3倍桩身设计直径。当持力层较薄时，应有部分钻孔钻穿持力岩层。在岩溶、断层破碎带地区，应查明溶洞、溶沟、溶槽、石笋等的分布情况，钻孔应钻穿溶洞或断层破碎带进入稳定土层，进入深度应满足上述控制性钻孔和一般性钻孔的要求。
- c) 在勘探深度范围内的每一地层，均应采取不扰动试样进行室内试验或根据土质情况选用有效的原位测试方法进行原位测试，提供设计所需参数。

5.3 桩的选型与布置

5.3.1 核工程桩基可按下列规定分类：

- a) 按承载性状分类：
 - 摩擦型桩：
 - 摩擦桩：在承载能力极限状态下，桩顶竖向荷载由桩侧阻力承受，桩端阻力小到可忽略不计；
 - 端承摩擦桩：在承载能力极限状态下，桩顶竖向荷载主要由桩侧阻力承受。
 - 端承型桩：
 - 端承桩：在承载能力极限状态下，桩顶竖向荷载由桩端阻力承受，桩侧阻力小到可忽略不计；
 - 摩擦端承桩：在承载能力极限状态下，桩顶竖向荷载主要由桩端阻力承受。
- b) 按成桩方法分类：
 - 非挤土桩：干作业法钻（挖）孔灌注桩、泥浆护壁法钻（挖）孔灌注桩、套管护壁法钻（挖）孔灌注桩；
 - 部分挤土桩：冲孔灌注桩、钻孔挤扩灌注桩、预钻孔打入（静压）预制桩。
- c) 核工程桩基的桩径（设计直径 d ）一般不应小于 600mm，按大小分类：
 - 中等直径桩： $d < 800\text{mm}$ ；
 - 大直径桩： $d \geq 800\text{mm}$ 。

5.3.2 核工程桩基的桩型与成桩工艺应根据建筑结构类型、荷载性质、桩的使用功能、穿越土层、桩端持力层、地下水位、施工设备、施工环境、施工经验、制桩材料供应条件等，按安全适用、经济合理的原则选择。

5.3.3 核工程桩基的布置应符合下列条件：

- a) 桩基的最小中心距应符合表 1 的规定；当施工中采取减小挤土效应的可靠措施时，可根据当地经验适当减小。

表 1 桩基的最小中心距

土类与成桩工艺		排数不少于 3 排且桩数不少于 9 根的摩擦型桩基	其他情况
非挤土灌注桩		$3.0 d$	$3.0 d$
部分挤土桩	非饱和土、饱和非黏性土	$3.5 d$	$3.0 d$
	饱和黏性土	$4.0 d$	$3.5 d$
钻、挖孔扩底桩		$2 D$ 或 $D+2.0 \text{ m}$ (当 $D>2 \text{ m}$)	$1.5 D$ 或 $D+1.5 \text{ m}$ (当 $D>2 \text{ m}$)
注1: d ——圆桩直径或方桩边长, D ——扩大端设计直径。 注2: 当纵横向桩距不相等时, 其最小中心距应满足“其他情况”一栏的规定。 注3: 当为端承型桩时, 非挤土灌注桩的“其他情况”一栏可减小至 $2.5 d$ 。			

- b) 排列桩基时, 宜将桩布置于墙和柱下, 宜使桩群承载力合力点与竖向永久荷载合力作用点重合, 并使基桩受水平力和力矩较大方向有较大抗弯截面模量。
- c) 应选择较硬土层作为桩端持力层。桩端全断面进入持力层的深度, 对于黏性土、粉土不宜小于 $2 d$, 砂土不宜小于 $1.5 d$, 碎石类土不宜小于 $1 d$ 。当存在软弱下卧层时, 桩端以下硬持力层厚度不宜小于 $3 d$ 。
- d) 对于嵌岩桩, 嵌岩深度应综合荷载、上覆土层、基岩、桩径、桩长诸因素确定; 对于嵌入倾斜的完整和较完整岩的全断面深度不宜小于 $0.6 d$ 且不小于 1.0 m , 倾斜度大于 30% 的中风化岩, 宜根据倾斜度及岩石完整性适当加大嵌岩深度; 对于嵌入平整、完整的坚硬岩和较硬岩的深度不宜小于 $0.4 d$, 且不应小于 0.5 m 。

5.4 特殊条件下的桩基

5.4.1 软土地基的核工程桩基设计原则应符合下列规定：

- a) 软土中的桩基宜选择中、低压缩性土层作为桩端持力层；
- b) 桩周围软土因自重固结、场地填土、地面大面积堆载、降低地下水位、大面积挤土沉桩等原因而产生的沉降大于基桩的沉降时, 应视具体工程情况分析计算桩侧负摩阻力对基桩的影响；
- c) 采用部分挤土桩时, 应采取消减孔隙水压力和挤土效应的技术措施, 减小挤土效应对成桩质量、邻近建筑物、道路、地下管线和基坑边坡等产生的不利影响；
- d) 先成桩后开挖基坑时, 必须合理安排基坑挖土顺序和控制分层开挖的深度, 防止土体侧移对桩的影响。

5.4.2 湿陷性黄土地区的核工程桩基设计原则应符合下列规定：

- a) 基桩应穿透湿陷性黄土层, 桩端应支承在压缩性低的黏性土、粉土、中密和密实砂土以及碎石类土层中；
- b) 湿陷性黄土地基中, 桩基的单桩极限承载力, 宜以浸水载荷试验为主要依据；
- c) 自重湿陷性黄土地基中的单桩极限承载力, 应根据工程具体情况分析计算桩侧负摩阻力的影响。

5.4.3 季节性冻土和膨胀土地基中的核工程桩基设计原则应符合下列规定：

- a) 桩端进入冻深线或膨胀土的大气影响急剧层以下的深度应满足抗拔稳定性验算要求, 且不得小于 4 倍桩径及 1 倍扩大端直径, 最小深度应大于 1.5 m ；
- b) 为减小和消除冻胀或膨胀对建筑物桩基的作用, 宜采用钻（挖）孔灌注桩；
- c) 确定基桩竖向极限承载力时, 除不计入冻胀、膨胀深度范围内桩侧阻力外, 还应考虑地基土的冻胀、膨胀作用, 验算桩基的抗拔稳定性和桩身受拉承载力；
- d) 为消除桩基受冻胀或膨胀作用的危害, 可在冻胀或膨胀深度范围内, 沿桩周及承台作隔冻、隔胀处理。

5.4.4 岩溶地区的核工程桩基设计原则应符合下列规定：

- a) 岩溶地区的桩基, 宜采用钻、冲孔桩；

- b) 当单桩荷载较大，岩层埋深较浅时，宜采用嵌岩桩；
- c) 当基岩面起伏很大且埋深较大时，宜采用摩擦型灌注桩。
- 5.4.5 坡地、岸边核工程桩基的设计原则应符合下列规定：
- a) 对建于坡地、岸边的桩基，不得将桩支承于边坡潜在的滑动体上。桩端应进入潜在滑裂面以下稳定岩土层内的深度，应能保证桩基的稳定；
- b) 建筑桩基与边坡应保持一定的水平距离；建筑场地内的边坡必须是完全稳定的边坡，当有崩塌、滑坡等不良地质现象存在时，应按现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 的规定进行整治，确保其稳定性；
- c) 新建坡地、岸边建筑桩基工程应与建筑边坡工程统一规划，同步设计，合理确定施工顺序；
- d) 应验算最不利荷载效应组合下桩基的整体稳定性和基桩水平承载力。
- 5.4.6 核工程桩基的抗震设计原则应符合下列规定：
- a) 桩进入液化土层以下稳定土层的长度（不包括桩尖部分）应按计算确定；对于碎石土，砾、粗、中砂，密实粉土，坚硬黏性土尚不应小于 3~4 倍桩身直径，对其它非岩石土尚不宜小于 5~6 倍桩身直径；
- b) 承台和地下室侧墙周围应采用灰土、级配砂石、压实性较好的素土回填，并分层夯实，也可采用素混凝土回填；
- c) 当承台周围为可液化土或地基承载力特征值小于 40 kPa（或不排水抗剪强度小于 15 kPa）的软土，且桩基水平承载力不满足计算要求时，可将承台外每侧 1/2 承台边长范围内的土进行加固；
- d) 对于存在液化扩展的地段，应验算桩基在土流动的侧向作用力下的稳定性。
- 5.4.7 可能出现负摩阻力的核工程桩基设计原则应符合下列规定：
- a) 对于填土建筑场地，宜先填土并保证填土的密实性，软土地基填土前应采取预设塑料排水板等措施，待填土地基沉降基本稳定后方可成桩；
- b) 对于有地面大面积堆载的建筑物，应采取减小地面沉降对建筑物桩基影响的措施；
- c) 对于自重湿陷性黄土地基，可采用强夯、挤密土桩等先行处理，消除上部或全部土的自重湿陷；对于欠固结土宜采取先期排水预压等措施；
- d) 对于中性点以上的桩身可对表面进行处理，以减少负摩阻力。
- 5.4.8 核工程抗拔桩基的设计原则应符合下列规定：
- a) 应根据环境类别及水、土对钢筋的腐蚀、钢筋种类对腐蚀的敏感性和荷载作用时间等因素确定抗拔桩的裂缝控制等级；
- b) 对于严格要求不出现裂缝的一级裂缝控制等级，桩身应设置预应力筋；对于一般要求不出现裂缝的二级裂缝控制等级，桩身宜设置预应力筋；
- c) 对于三级裂缝控制等级，应进行桩身裂缝宽度计算；
- d) 当基桩抗拔承载力要求较高时，可采用桩侧后注浆、扩底等技术措施。

5.5 耐久性规定

5.5.1 核工程桩基结构的耐久性应根据设计工作年限、现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的环境类别和环境作用等级进行设计。桩基所用的材料、桩段之间的连接，桩基构造等应满足其所处场地环境类别中的耐久性要求。

5.5.2 核工程桩基结构混凝土强度等级不应低于 C30。核工程桩基结构混凝土耐久性应符合《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定，V 类环境下耐久性还应符合《混凝土建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046 的规定。

5.5.3 核工程桩基桩身裂缝控制等级及最大裂缝宽度应根据环境作用等级按表 2 规定选用。

表 2 桩身的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值

环境作用等级	钢筋混凝土桩		预应力混凝土桩	
	裂缝控制等级	$w_{lim}(\text{mm})$	裂缝控制等级	$w_{lim}(\text{mm})$
B	三	0.2 (0.3)	二	0
C	三	0.2	一	0
D	三	0.2	一	0

E	三	0.15	—	0
F	三	0.15	—	0
注1：水、土为强、中腐蚀性时，抗拔桩裂缝控制等级应提高一级；				
注2：环境作用等级为B时，位于稳定地下水位以下的基桩，其最大裂缝宽度限值可采用括弧中的数值。				

5.5.4 对Ⅱ～Ⅴ类环境的核工程桩基结构，受力钢筋宜采用环氧树脂涂层带肋钢筋。

6 桩基设计

6.1 基本原则

- 6.1.1 核工程桩基设计需考虑上部结构引起的惯性相互作用和桩-土间的运动相互作用。
- 6.1.2 核工程桩基设计可以采用拟静力弹簧系数法、非一致输入弹簧系数法和三维整体时域分析方法。
- a) 拟静力弹簧系数法
- 上部结构采用杆模型建模，采用拟静力法计算获得底部剪力、轴力和弯矩后，作用于桩顶筏板。桩身建立非线性弹簧，弹簧系数计算方法参考附录 A。
- 采用一维场地分析程序计算不同高度土层的相对位移，并将位移施加到对应弹簧的上，以获得桩身内力。
- 该方法适用于上部结构形式简单，场地土层分布为均质或水平成层的情况。
- b) 非一致输入弹簧系数法
- 非一致输入弹簧系数法的弹簧确定详见附录 A，非一致输入方法采用图 1 所示方法。

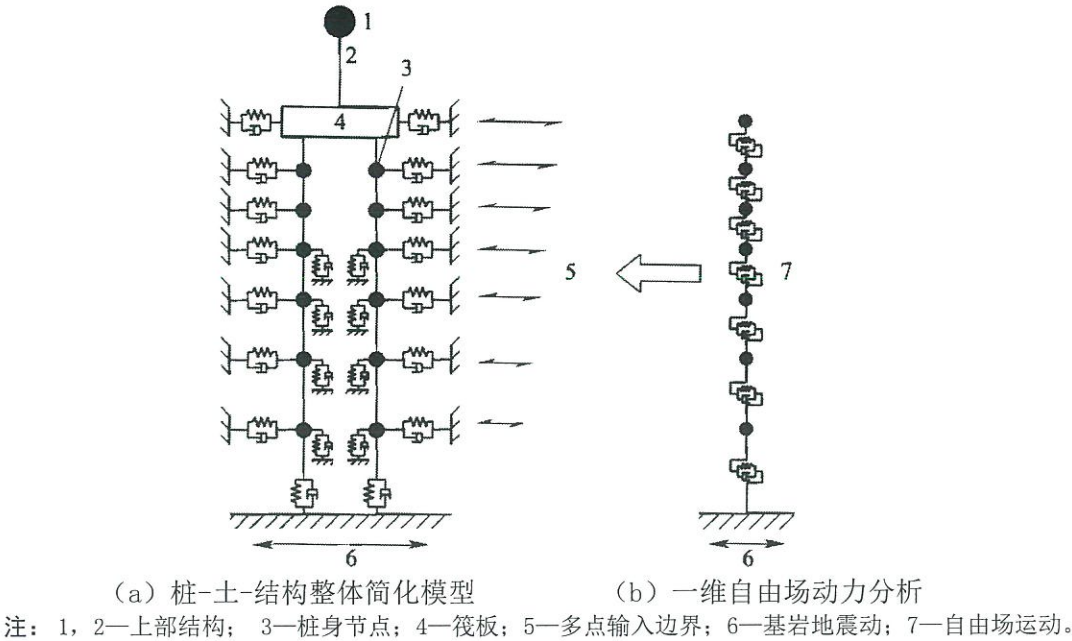


图 1 地震动的非一致输入方法

该方法适用于上部结构较复杂，场地土层分布为均质或水平成层的情况。

- c) 三维整体时域分析方法
- 三维整体时域分析方法是采用三维建模的方法，建立桩-土-结构体系的三维有限元模型。考虑岩土材料的非线性，采用动力人工边界模拟地震波和散射波在截断边界处的透射效应。该方法适用于上部结构复杂，场地土层分布可以是均质成层或复杂无规律分布。三维整体时域分析方法相关规定详见附录 B。
- 6.1.3 核工程桩基设计需要考虑岩土材料的非线性特征
- a) 对于拟静力弹簧系数法、非一致输入弹簧系数法，采用附录 A 中的方法计算非线性弹簧系数。
- b) 对于三维整体时域分析方法中岩土非线性本构选取方法详见附录 B。

6.2 桩基作用效应

6.2.1 静力作用下的桩顶作用效应计算

核工程桩基采用下式计算群桩中基桩的桩顶作用效应：

a) 竖向力

轴心竖向力作用下

$$N_k = \frac{F_k + G_k}{n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

偏心竖向力作用下

$$N_{ik} = \frac{F_k + G_k}{n} \pm \frac{M_{xk} y_i}{\sum y_j^2} \pm \frac{M_{yk} x_i}{\sum x_j^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

b) 水平力

$$H_{ik} = \frac{H_k}{n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

F_k ——荷载效应标准组合下，作用于承台顶面的竖向力；

G_k ——桩基承台和承台上土自重标准值，对稳定的地下水位以下部分应扣除水的浮力；

N_k ——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力；

N_{ik} ——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下，第 i 基桩或复合基桩的竖向力；

M_{xk} 、 M_{yk} ——荷载效应标准组合下，作用于承台底面，绕通过桩群形心的 x 、 y 主轴的力矩；

x_i 、 x_j 、 y_i 、 y_j ——第 i 、 j 基桩或复合基桩至 y 、 x 轴的距离；

H_k ——荷载效应标准组合下，作用于桩基承台底面的水平力；

H_{ik} ——荷载效应标准组合下，作用于第 i 基桩或复合基桩的水平力；

n ——桩基中的桩数。

6.2.2 动力作用下的桩基作用效应计算

当采用拟静力弹簧系数法、非一致输入弹簧系数法和三维整体时域分析方法计算桩-土-结构体系的地震动响应时。桩身可采用梁单元或实体单元模拟。当采用梁单元时，可以直接提取桩身不同位置的轴力、剪力和弯矩；当采用实体单元模拟时，需要对截面应力进行积分获得截面轴力、剪力和弯矩。

当采用拟静力弹簧系数法计算，在获取桩身内力时，可直接提取桩身内力。当采用非一致输入弹簧系数法和三维整体时域分析方法计算，在获取桩身内力时，考虑到非一致输入弹簧系数法和三维整体时域分析方法是时程分析，需要提取桩身内力在不同时刻的内力，然后确定最不利截面。

6.2.3 核工程桩基桩身最大位移角宜小于 1/550。桩顶最大允许位移应按照嵌固点到桩顶的距离乘以最大位移角确定，嵌固点的计算方法见 6.2.4 条。

6.2.4 桩身假象嵌固点的位置可按照下式确定：

$$t = \eta T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{m b_0}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

t ——受弯嵌固点距地表的深度（m）；

η ——取 1.8~2.2，桩顶铰接或桩的自由长度较大时取较小值，桩顶无转动或桩的自由长度较小时取较大值；

T ——桩的相对刚度系数（m）；

E_p ——桩材料的弹性模量（kN/m²）；

I_p ——桩截面的惯性矩（m⁴）；

m ——桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数（kN/m⁴）；

b_0 ——桩的换算宽度（m）。

6.3 桩基竖向承载力

6.3.1 桩基竖向承载力计算应符合下列要求：

非地震荷载效应组合
轴心竖向力作用下：

$$N_k \leq R \quad (1)$$

偏心竖向力作用下除满足上式外，尚应满足下式的要求：

$$N_{kmax} \leq 1.2R \quad (2)$$

式中：

N_k ——相应于 NB/T 20105 中无地震作用效应参与的荷载组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力；

N_{kmax} ——相应于 NB/T 20105 中无地震作用效应参与的荷载组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力；

R ——基桩或复合基桩竖向承载力特征值。

a) 地震作用效应组合
轴心竖向力作用下：

$$N_{Ek} \leq 1.25R \quad (3)$$

偏心竖向力作用下除满足上式外，尚应满足下式的要求：

$$N_{Ekmax} \leq 1.5R \quad (4)$$

式中：

N_{Ek} ——相应于 NB/T 20105 中有地震作用效应参与的荷载组合轴心竖向力作用下，基桩或复合基桩的平均竖向力；

N_{Ekmax} ——相应于 NB/T 20105 中有地震作用效应参与的荷载组合偏心竖向力作用下，桩顶最大竖向力。

6.3.2 单桩竖向承载力特征值 R_a 应按下列公式确定：

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (5)$$

式中：

Q_{uk} ——单桩竖向极限承载力标准值；

K ——安全系数，取 $K=2$ 。

6.3.3 对于端承型桩基或由于地层土性、使用条件等因素不宜考虑承台效应时，基桩竖向承载力特征值应取单桩竖向承载力特征值。

6.3.4 对于符合下列条件之一的摩擦型桩基，宜考虑承台效应确定其复合基桩的竖向承载力特征值：

- 上部结构整体刚度较好、体型简单的建（构）筑物；
- 对差异沉降适应性较强的柔性构筑物；
- 按变刚度调平原则设计的桩基刚度相对弱化区。

6.3.5 考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征值可按下列公式确定：

不考虑地震作用时

$$R = R_a + \eta_c f_{ak} A_c \quad (6)$$

考虑地震作用时

$$R = R_a + \frac{\zeta_a}{1.25} \eta_c f_{ak} A_c \quad (7)$$

$$A_c = (A - nA_{ps})/n \quad (8)$$

式中：

- η_c ——承台效应系数，可按表 3 取值；
- f_{ak} ——承台下 1/2 承台宽度且不超过 5 m 深度范围内各层土的地基承载力特征值按厚度加权的平均值；
- A_c ——计算基桩所对应的承台底净面积；
- A_{ps} ——为桩身截面面积；
- A ——为承台计算域面积。对于柱下独立桩基， A 为承台总面积；对于桩筏基， A 为柱、墙筏板的 1/2 跨距和悬臂边 2.5 倍筏板厚度所围成的面积；桩集中布置于单片墙下的桩筏基础，取墙两边各 1/2 跨距围成的面积，按条基计算 η_c ；
- ζ_a ——地基抗震承载力调整系数，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 采用。
- 当承台底为可液化土、湿陷性土、高灵敏度软土、欠固结土、新填土时，沉桩引起超孔隙水压力和土体隆起时，不考虑承台效应，取 $\eta_c = 0$ 。

表 3 承台效应系数 η_c

$\begin{matrix} S_a/d \\ B_c/l \end{matrix}$	3	4	5	6	>6
≤ 0.4	0.06~0.08	0.14~0.17	0.22~0.26	0.32~0.38	0.50~0.80
0.1~0.8	0.08~0.10	0.17~0.20	0.26~0.30	0.38~0.44	
>0.8	0.10~0.12	0.20~0.22	0.30~0.34	0.44~0.50	
单排桩条形承台	0.15~0.18	0.25~0.30	0.38~0.45	0.50~0.60	
注1: 表中 S_a/d 为桩中心距与桩径之比; B_c/l 为承台宽度与桩长之比。当计算基桩为非正方形排列时, $S_a = \sqrt{A/n}$, A 为承台计算域面积, n 为总桩数。					
注2: 对于桩布置于墙下的箱、筏承台, η_c 可按单排桩条基取值。					
注3: 对于单排桩条形承台, 当承台宽度小于1.5 d 时, η_c 按非条形承台取值。					
注4: 对于采用后注浆灌注桩的承台, η_c 宜取低值。					
注5: 对于软土地基上的桩基承台, η_c 宜取低值的0.8倍。					

I 单桩竖向极限承载力

- 6.3.6 单桩竖向极限承载力标准值应通过单桩静载试验确定，设计初期可按照 6.3.8~6.3.12 条的方法对单桩竖向极限承载力标准值进行估算。
- 6.3.7 单桩竖向极限承载力标准值、极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值应按下列规定确定：
- 单桩竖向静载试验应按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 执行；
 - 对于大直径端承型桩，也可通过深层平板（平板直径应与孔径一致）载荷试验确定极限端阻力；
 - 对于嵌岩桩，可通过直径为 0.3 m 岩基平板载荷试验确定极限端阻力标准值，也可通过直径为 0.3 m 嵌岩短墩载荷试验确定极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值；
 - 桩的极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值宜通过埋设桩身轴力测试元件由静载试验确定。并通过测试结果建立极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值与土层物理指标、岩石饱和单轴抗压强度以及静力触探等土的原位测试指标间的经验关系，以经验参数法确定单桩竖向极限承载力。
- 6.3.8 当根据单桥探头静力触探资料确定混凝土预制桩单桩竖向极限承载力标准值时，如无当地经验，可按下列式估算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \alpha p_{sk} A_p \quad (9)$$

当 $p_{sk1} \leq p_{sk2}$ 时

$$p_{sk} = \frac{1}{2} (p_{sk1} + \beta \cdot p_{sk2}) \quad (10)$$

当 $p_{sk1} > p_{sk2}$ 时

$$p_{sk} = p_{sk2} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- Q_{sk} 、 Q_{pk} ——分别为总极限侧阻力标准值和总极限端阻力标准值；
- u ——桩身周长；
- q_{sik} ——用静力触探比贯入阻力值估算的桩周第*i*层土的极限侧阻力；
- l_i ——桩周第*i*层土的厚度；
- α ——桩端阻力修正系数，可按表4取值；
- p_{sk} ——桩端附近的静力触探比贯入阻力标准值（平均值）；
- A_p ——桩端面积；
- p_{sk1} ——桩端全截面以上8倍桩径范围内的比贯入阻力平均值；
- p_{sk2} ——桩端全截面以下4倍桩径范围内的比贯入阻力平均值，如桩端持力层为密实的砂土层，其比贯入阻力平均值 p_s 超过20 MPa时，则需乘以表5中系数*C*予以折减后，再计算 p_{sk1} 及 p_{sk2} 值；
- β ——折减系数，按表6选用。

表 4 桩端阻力修正系数α值

桩长（m）	$L < 15$	$15 \leq L \leq 30$	$30 < L \leq 60$
α	0.75	0.75~0.90	0.90

注：桩长 $15 \leq L \leq 30$ m， α 值按*L*值直线内插；*L*为桩长（不包括桩尖高度）。

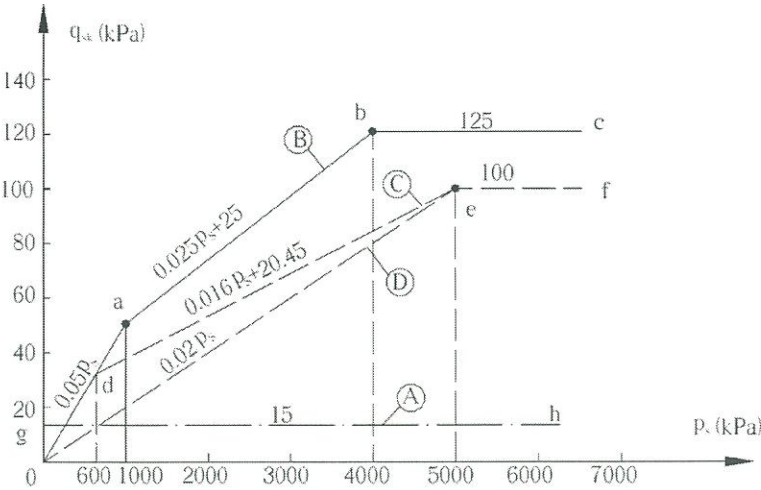
表 5 系数*C*

p_s （MPa）	20~30	35	>40
系数 <i>C</i>	5/6	2/3	1/2

表 6 折减系数β

p_{sk2}/p_{sk1}	≤ 5	7.5	12.5	≥ 15
β	1	5/6	2/3	1/2

注：表5、表6可内插取值。



注1： q_{sik} 值应结合土工试验资料，依据土的类别、埋藏深度、排列次序，按图2折线取值；图2中，直线①（线段gh）适用于地表下6 m范围内的土层；折线②（oabc）适用于粉土及砂土层以上（或无粉土及砂土层地区）的黏性土；折线③（线段odef）适用于粉土及砂土层以下的黏性土；折线④（线段oef）适用于粉土、粉砂、细砂及中砂。

注2： p_{sk} 为桩端穿过的中密~密实砂土、粉土的比贯入阻力平均值； p_{sl} 为砂土、粉土的下卧软土层的比贯入阻力平

均值；

注3：采用的单桥探头，圆锥底面积为15 cm²，底部带7 cm高滑套，锥角60°；

注4：当桩端穿过粉土、粉砂、细砂及中砂层底面时，折线①估算的 q_{sik} 值需乘以表7中系数 η_s 值。

图2 $q_{sk} - p_s$ 曲线

表7 系数 η_s 值

p_{sk}/p_{sl}	≤ 5	7.5	≥ 10
η_s	1.00	0.50	0.33

6.3.9 当根据双桥探头静力触探资料确定混凝土预制桩单桩竖向极限承载力标准值时，对于黏性土、粉土和砂土，如无当地经验时可按下式估算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum l_i \cdot \beta_i \cdot f_{si} + \alpha \cdot q_c \cdot A_p \quad (12)$$

式中：

f_{si} ——第*i*层土的探头平均侧阻力（kPa）；

q_c ——桩端平面上、下探头阻力，取桩端平面以上4*d*（*d*为桩的直径或边长）范围内按土层厚度的探头阻力加权平均值（kPa），然后再和桩端平面以下1*d*范围内的探头阻力进行平均；

α ——桩端阻力修正系数，对于黏性土、粉土取2/3，饱和砂土取1/2；

β_i ——第*i*层土桩侧阻力综合修正系数，黏性土、粉土： $\beta_i = 10.04(f_{si})^{-0.55}$ ；砂土： $\beta_i = 5.05(f_{si})^{-0.45}$ 。

注：双桥探头的圆锥底面积为15 cm²，锥角60°，摩擦套筒高21.85 cm，侧面积300 cm²。

6.3.10 根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系，估算桩单桩极限承载力标准值时，可按下式计算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum \psi_{si} q_{sik} l_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (13)$$

式中：

q_{sik} ——桩侧第*i*层土极限侧阻力标准值，应通过地质勘察获得，对于扩底桩变截面以上2*d*长度范围不计侧阻力；

q_{pk} ——极限端阻力标准值，应通过地质勘察获得，对于干作业挖孔（清底干净）可采用深层载荷板试验确定；

ψ_{si} 、 ψ_p ——大直径桩侧阻、端阻尺寸效应系数，当桩径小于800mm时，取1.0；当桩径大于等于800mm时，按表8取值；

u ——桩身周长。

表8 大直径灌注桩侧阻尺寸效应系数 ψ_{si} 、端阻尺寸效应系数 ψ_p

土类型	黏性土、粉土	砂土、碎石类土
ψ_{si}	$(0.8/d)^{1/5}$	$(0.8/d)^{1/3}$
ψ_p	$(0.8/D)^{1/4}$	$(0.8/D)^{1/3}$

注：当为等直径桩时，表中 $D=d$ 。

6.3.11 桩端置于完整、较完整基岩的嵌岩桩单桩竖向极限承载力，由桩周土总极限侧阻力和嵌岩段总极限阻力组成。当根据岩石单轴抗压强度确定单桩竖向极限承载力标准值时，可按下式估算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} \quad (14)$$

$$Q_{sk} = u \sum q_{sik} l_i \quad (15)$$

$$Q_{rk} = \zeta_r f_{rk} A_p \quad (16)$$

式中：

Q_{sk} 、 Q_{rk} ——分别为土的总极限侧阻力、嵌岩段总极限阻力；

q_{sik} ——桩周第 i 层土的极限侧阻力，应通过地质勘察获得；

f_{rk} ——岩石饱和单轴抗压强度标准值，黏土岩取天然湿度单轴抗压强度标准值；

ζ_r ——嵌岩段侧阻和端阻综合系数，与嵌岩深径比 h_r/d 、岩石软硬程度和成桩工艺有关，可按表9采用；表中数值适用于泥浆护壁成桩，对于干作业成桩（清底干净）和泥浆护壁成桩后注浆， ζ_r 应取表列数值的 1.2 倍。

表 9 嵌岩段侧阻和端阻综合系数 ζ_r

嵌岩深径比 h_r/d	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
极软岩、软岩	0.60	0.80	0.95	1.18	1.35	1.48	1.57	1.63	1.66	1.70
较硬岩、坚硬岩	0.45	0.65	0.81	0.90	1.00	1.04				

注1：极软岩、软岩指 $f_{rk} \leq 15$ MPa，较硬岩、坚硬岩指 $f_{rk} > 30$ MPa，介于二者之间可内插取值。
注2： h_r 为桩身嵌岩深度，当岩面倾斜时，以坡下方嵌岩深度为准；当 h_r/d 为非表列值时， ζ_r 可内差取值。

6.3.12 后注浆灌注桩的单桩极限承载力在符合本规程第 8.5 节灌注桩后注浆技术实施规定的条件下，其标准值可按式估算：

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} = u \sum q_{sik} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p \quad (17)$$

式中：

Q_{sk} ——后注浆非竖向增强段的总极限侧阻力标准值；

Q_{gsk} ——后注浆竖向增强段的总极限侧阻力标准值；

Q_{gpk} ——后注浆总极限端阻力标准值；

u ——桩身周长；

l_j ——后注浆非竖向增强段第 j 层土厚度；

l_{gi} ——后注浆竖向增强段内第 i 层土厚度：对于泥浆护壁成孔灌注桩，当为单一桩端后注浆时，竖向增强段为桩端以上 12 m；当为桩端、桩侧复式注浆时，竖向增强段为桩端以上 12 m 及各桩侧注浆断面以上 12 m，重叠部分应扣除；对于干作业灌注桩，竖向增强段为桩端以上、桩侧注浆断面上下各 6 m；

q_{sik} 、 q_{sik} 、 q_{pk} ——分别为后注浆竖向增强段第 i 土层初始极限侧阻力标准值、非竖向增强段第 j 土层初始极限侧阻力标准值、初始极限端阻力标准值；

β_{si} 、 β_p ——分别为后注浆侧阻力、端阻力增强系数应通过试验或当地经验获得。对于桩径大于 800 mm 的桩，应按本规范表 8 进行侧阻和端阻尺寸效应修正。

6.3.13 当满足耐久性要求时，后注浆钢管注浆后可等效替代纵向主筋。

6.3.14 对于桩身周围有液化土层的低承台桩基，当承台底面上下分别有厚度不小于 1.5 m、1.0 m 的非液化土或非软弱土层时，可将液化土层极限侧阻力乘以土层液化折减系数计算单桩极限承载力标准值。土层液化折减系数 ψ_l 可按表 10 确定。

表 10 土层液化折减系数 ψ_l

$\lambda_N = \frac{N}{N_{cr}}$	自地面算起的液化土层深度 d_L (m)	ψ_l
$\lambda_N \leq 0.6$	$d_L \leq 10$	0
	$10 < d_L \leq 20$	1/3
$0.6 < \lambda_N \leq 0.8$	$d_L \leq 10$	1/3
	$10 < d_L \leq 20$	2/3
$0.8 < \lambda_N \leq 1.0$	$d_L \leq 10$	2/3
	$10 < d_L \leq 20$	1.0

注1： N 为饱和土标贯击数实测值； N_{cr} 为液化判别标贯击数临界值； λ_N 为土层液化指数；
注2：桩间土标贯击数达到 N_{cr} 时，取 $\psi_l = 1$ 。

当承台底面上下非液化土层厚度小于以上规定时，土层液化影响折减系数 ψ_l 取 0。

II 特殊条件下桩基竖向承载力验算

6.3.15 对于桩距不超过 $6d$ 的群桩基础，桩端持力层下存在承载力低于桩端持力层承载力 $1/3$ 的软弱下卧层时，可按下列公式验算软弱下卧层的承载力（图 3）：

$$\sigma_z + \gamma_m Z \leq f_{az} \tag{18}$$

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - 3/2(A_0 + B_0) \cdot \sum q_{sik} l_i}{(A_0 + 2t \cdot \tan \theta)(B_0 + 2t \cdot \tan \theta)} \tag{19}$$

式中：

- σ_z ——作用于软弱下卧层顶面的附加应力；
- γ_m ——软弱层顶面以上各土层重度（地下水位以下取浮重度）的厚度加权平均值；
- t ——硬持力层厚度；
- f_{az} ——软弱下卧层经深度 z 修正的地基承载力特征值；
- $A_0、B_0$ ——桩群外缘矩形底面的长、短边边长；
- q_{sik} ——桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值，应通过地质勘察获得；
- θ ——桩端硬持力层压力扩散角，按表11取值。

表 11 桩端硬持力层压力扩散角 θ

E_{s1}/E_{s2}	$t = 0.25 B_0$	$t \geq 0.50 B_0$
1	4°	12°
2	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

注1: $E_{s1}、E_{s2}$ 为硬持力层、软弱下卧层的压缩模量；
注2: 当 $t<0.25B_0$ 时，取 $\theta=0^\circ$ ，必要时，宜通过试验确定；当 $0.25B_0<t<0.50B_0$ 时，可内插取值。

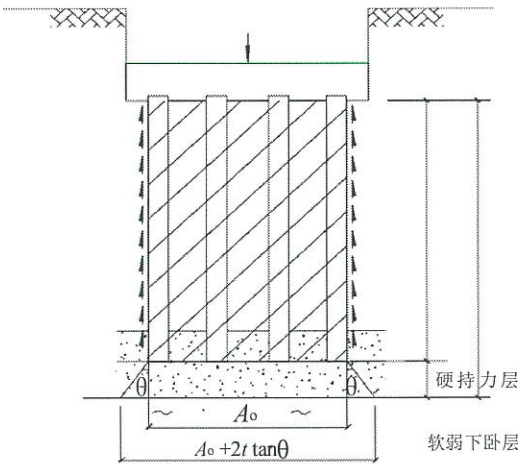


图 3 软弱下卧层承载力验算

6.3.16 符合下列条件之一的桩基，当桩周土层产生的沉降超过基桩的沉降时，在计算非地震工况基桩承载力时应计入桩侧负摩阻力：

- a) 桩穿越较厚松散填土、自重湿陷性黄土、欠固结土、液化土层进入相对较硬土层时；
- b) 桩周存在软弱土层，邻近桩侧地面承受局部较大的长期荷载，或地面大面积堆载（包括填土）时；
- c) 由于降低地下水位，使桩周土有效应力增大，并产生显著压缩沉降时。

6.3.17 桩周土沉降可能引起桩侧负摩阻力时，应根据工程具体情况考虑负摩阻力对桩基承载力和沉降的影响；当缺乏可参照的工程经验时，可按下列规定验算。

- a) 对于摩擦型基桩可取桩身计算中性点以上侧阻力为零，并可按下式验算基桩承载力：

$$N_k \leq R_a \dots\dots\dots (20)$$

b) 对于端承型基桩除应满足上式要求外，尚应考虑负摩阻力引起基桩的下拉荷载 Q_g^n ，并可按下式验算基桩承载力：

$$N_k + Q_g^n \leq R_a \dots\dots\dots (21)$$

c) 当土层不均匀或建筑物对不均匀沉降较敏感时，尚应将负摩阻力引起的下拉荷载计入附加荷载验算桩基沉降。

注：本条中基桩的竖向承载力特征值 R_a 只计中性点以下部分侧阻值及端阻值。

6.3.18 桩侧负摩阻力及其引起的下拉荷载，当无实测资料时可按下列规定计算：

a) 中性点以上单桩桩周第*i*层土负摩阻力标准值，可按下列公式计算：

$$q_{si}^n = \xi_{ni} \sigma_i' \dots\dots\dots (22)$$

当填土、自重湿陷性黄土湿陷、欠固结土层产生固结和地下水降低时： $\sigma_i' = \sigma_{ri}'$

当地面分布大面积荷载时： $\sigma_i' = p + \sigma_{ri}'$

$$\sigma_{ri}' = \sum_{m=1}^{i-1} \gamma_m \Delta Z_m + \frac{1}{2} \gamma_i \Delta Z_i \dots\dots\dots (23)$$

式中：

- q_{si}^n ——第*i*层土桩侧负摩阻力标准值；当按式 25 计算值大于正摩阻力标准值时，取正摩阻力标准值进行设计；
- ξ_{ni} ——桩周第*i*层土负摩阻力系数，应通过地质勘察获得；
- σ_{ri}' ——由土自重引起的桩周第*i*层土平均竖向有效应力； 桩群外围桩自地面算起，桩群内部桩自承台底算起；
- σ_i' ——桩周第*i*层土平均竖向有效应力；
- γ_m 、 γ_i ——分别为第*i*计算土层和其上第*m*土层的重度，地下水位以下取浮重度；
- ΔZ_i 、 ΔZ_m ——第*i*层土、第*m*层土的厚度；
- p ——地面均布荷载。

b) 考虑群桩效应的基桩下拉荷载可按下式计算：

$$Q_g^n = \eta_n \cdot u \sum_{i=1}^n q_{si}^n l_i \dots\dots\dots (24)$$

$$\eta_n = s_{ax} \cdot s_{ay} \left/ \left[\pi d \left(\frac{q_s^n}{\gamma_m} + \frac{d}{4} \right) \right] \right. \dots\dots\dots (25)$$

式中：

- n ——中性点以上土层数；
- l_i ——中性点以上第*i*土层的厚度；
- η_n ——负摩阻力群桩效应系数；
- s_{ax} 、 s_{ay} ——分别为纵横向桩的中心距；
- q_{si}^n ——中性点以上桩周土层厚度加权平均负摩阻力标准值；
- γ_m ——中性点以上桩周土层厚度加权平均重度（地下水位以下取浮重度）。

对于单桩基础或按式28计算的群桩效应系数 $\eta_n > 1$ 时，取 $\eta_n = 1$ 。

c) 中性点深度 l_n 应按桩周土层沉降与桩沉降相等的条件计算确定，也可参照表 12 确定。

表 12 中性点深度 l_n

持力层性质	黏性土、粉土	中密以上砂	砾石、卵石	基岩
中性点深度比 l_n/l_0	0.5~0.6	0.7~0.8	0.9	1.0
注1: l_n 、 l_0 ——分别为自桩顶算起的中性点深度和桩周软弱土层下限深度； 注2: 桩穿过自重湿陷性黄土层时， l_n 可按表列值增大 10%（持力层为基岩除外）； 注3: 当桩周土层固结与桩基固结沉降同时完成时，取 $l_n = 0$ ；				

持力层性质	黏性土、粉土	中密以上砂	砾石、卵石	基岩
注4: 当桩周土层计算沉降量小于20 mm时, l_n 应按表列值乘以0.4~0.8折减。				

6.3.19 承受拔力的桩基,应按下列公式同时验算群桩基础呈整体破坏和呈非整体破坏时基桩的抗拔承载力:

$$N_k \leq T_{gk}/2 + G_{gp} \quad (26)$$

$$N_k \leq T_{uk}/2 + G_p \quad (27)$$

式中:

N_k ——基桩拔力的标准值;

T_{gk} ——群桩呈整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值,可按本规范第6.3.21条确定;

T_{uk} ——群桩呈非整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值,可按本规范第6.3.21条确定;

G_{gp} ——群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数,地下水位以下取浮重度;

G_p ——基桩自重,地下水位以下取浮重度。

6.3.20 基桩的抗拔极限承载力应通过现场单桩上拔静载荷试验确定。单桩上拔静载荷试验及抗拔极限承载力标准值取值可按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 进行。

6.3.21 如无当地经验时,群桩基础基桩的抗拔极限承载力取值可按下列规定估算:

a) 群桩呈非整体破坏时,基桩的抗拔极限承载力标准值可按下列式估算:

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \quad (28)$$

式中:

T_{uk} ——基桩抗拔极限承载力标准值;

u_i ——桩身周长,对于等直径桩取 $u = \pi d$; 对于扩底桩按表13取值;

q_{sik} ——桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值,应通过地质勘察获得;

λ_i ——抗拔系数,可按表14取值。

表 13 扩底桩破坏表面周长 u_i

自桩底起算的长度 l_i	$\leq (4 \sim 10) d$	$> (4 \sim 10) d$
u_i	D	d
注: l_i 对于软土取低值,对于卵石、砾石取高值; l_i 取值按内摩擦角增大而增加。		

表 14 抗拔系数 λ

土类	λ 值
砂土	0.50~0.70
黏性土、粉土	0.70~0.80
注: 桩长 l 与桩径 d 之比小于20时, λ 取小值。	

b) 群桩呈整体破坏时,基桩的抗拔极限承载力标准值可按下列式估算:

$$T_{gk} = \frac{1}{n} u_i \sum \lambda_i q_{sik} l_i \quad (29)$$

式中:

u_i ——群桩外围周长。

III 桩身承载力计算

6.3.22 桩身应进行竖向承载力计算。计算时应考虑桩身材料强度、成桩工艺、吊运与沉桩、约束条件、环境类别诸因素,除按本节有关规定执行外,尚应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《钢结构设计标准》GB 50017 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

6.3.23 钢筋混凝土轴心受压桩正截面受压承载力应符合下列规定：

a) 非地震效应组合

当桩顶以下 $5d$ 范围的桩身螺旋式箍筋间距不大于 100 mm ，且符合本规程第 7.1.1 的规定时：

$$N \leq \psi_c f_c A_{ps} + 0.9 f_y' A_s' \quad (30)$$

当桩身配筋不符合上述条款规定时：

$$N \leq \psi_c f_c A_{ps} \quad (31)$$

式中：

N ——相应于 NB/T 20105 中无地震作用效应参与的荷载组合下的桩顶轴向压力设计值；

ψ_c ——基桩成桩工艺系数，按第 6.3.24 条规定取值；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_y' ——纵向主筋抗压强度设计值；

A_s' ——纵向主筋截面面积。

b) 地震效应组合

当桩顶以下 $5d$ 范围的桩身螺旋式箍筋间距不大于 100 mm ，且符合本规程第 7.1.1 的规定时：

$$N \leq (\psi_c f_c A_{ps} + 0.9 f_y' A_s') / \gamma_{RE} \quad (32)$$

当桩身配筋不符合上述条款规定时：

$$N \leq \psi_c f_c A_{ps} / \gamma_{RE} \quad (33)$$

式中：

N ——相应于 NB/T 20105 中有地震作用效应参与的荷载组合下的桩顶轴向压力设计值；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，按现行国建标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的规定采用。

6.3.24 基桩成桩工艺系数 ψ_c 应按下列规定取值：

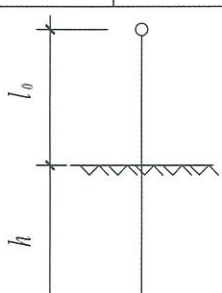
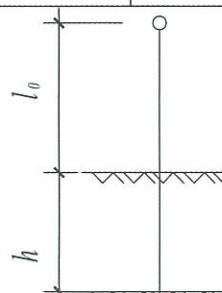
a) 混凝土预制桩： $\psi_c = 0.85$ ；

b) 干作业非挤土灌注桩： $\psi_c = 0.90$ ；

c) 泥浆护壁和套管护壁非挤土灌注桩、部分挤土灌注桩： $\psi_c = 0.7 \sim 0.8$ 。

6.3.25 计算轴心受压混凝土桩正截面受压承载力时，一般取稳定系数 $\phi = 1.0$ 。对于高承台基桩、桩身穿越可液化土或不排水抗剪强度小于 10 kPa 的软弱土层的基桩，应考虑压屈影响，可按本规范式 33、式 34 计算所得桩身正截面受压承载力乘以 ϕ 折减。其稳定系数 ϕ 可根据桩身压屈计算长度 l_c 和桩的设计直径 d （或矩形桩短边尺寸 b ）确定。桩身压屈计算长度可根据桩顶的约束情况、桩身露出地面的自由长度 l_0 、桩的入土长度 h 、桩侧和桩底的土质条件应按表 15 确定。桩的稳定系数可按表 16 确定。

表 15 桩身压屈计算长度 l_c

桩顶铰接			
桩底支于非岩石土中		桩底嵌入岩石内	
$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$	$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$
			
$l_c = 1.0 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.7 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$	$l_c = 0.7 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.7 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$

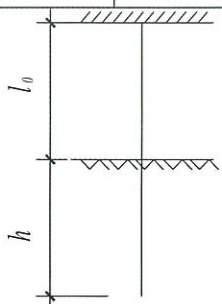
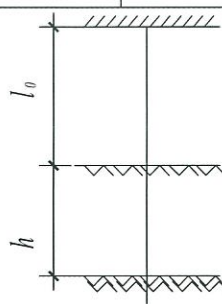
桩顶铰接			
桩顶固接			
桩底支于非岩石土中		桩底嵌入岩石内	
$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$	$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$
			
$l_c = 0.7 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.5 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$	$l_c = 0.5 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.5 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$
注1: 表中 $\alpha = 5\sqrt{\frac{mb_0}{EI}}$; 注2: l_0 为高承台基桩露出地面的长度, 对于低承台桩基, $l_0 = 0$; 注3: h 为桩的入土长度, 当桩侧有厚度为 d_l 的液化土层时, 桩露出地面长度 l_0 和桩的入土长度 h 分别调整为 $l'_0 = l_0 + (1 - \psi_l)d_l$; $h' = h + (1 - \psi_l)d_l$, ψ_l 按表10取值; 注4: 当存在 $f_{ak} < 25kPa$ 的软弱土时, 按液化土处理。			

表 16 桩身稳定系数φ

l_c / d	≤7	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24
l_c / b	≤8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
φ	1.00	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56
l_c / d	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
l_c / b	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
φ	0.52	0.48	0.44	0.4	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19
注: b 为矩形桩短边尺寸, d 为桩直径。											

6.3.26 计算偏心受压混凝土桩正截面受压承载力时,可不考虑偏心距的增大影响,但对于高承台基桩、桩身穿越可液化土或不排水抗剪强度小于 10 kPa（地基承载力特征值小于 25 kPa）的软弱土层的基桩,应考虑桩身在弯矩作用平面内的挠曲对轴向力偏心距的影响,应将轴向力对截面重心的初始偏心 e_i 乘以偏心矩增大系数 η , 偏心距增大系数 η 的具体计算方法可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 执行。

6.3.27 钢筋混凝土轴心抗拔桩的正截面受拉承载力应符合下式规定:

a) 非地震效应组合

$$N \leq f_y A_s \dots\dots\dots (34)$$

式中:

N ——相应于 NB/T 20105 中无地震作用效应参与的荷载组合下桩顶轴向拉力设计值;
 f_y ——普通钢筋的抗拉强度设计值;
 A_s ——普通钢筋的截面面积。

b) 地震效应组合

$$N \leq f_y A_s / \gamma_{RE} \dots\dots\dots (35)$$

式中:

N ——相应于NB/T 20105中有地震作用效应参与的荷载组合下桩顶轴向拉力设计值；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，按现行国建标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002的规定采用。

6.3.28 当考虑地震作用验算桩身抗拔承载力时，应根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定，对作用于桩顶的地震作用效应进行调整。

6.4 桩基水平承载力

6.4.1 受水平荷载的一般建筑物和水平荷载较小的高大建筑物单桩基础和群桩中基桩应满足下式要求：

a) 永久荷载控制下非地震效应组合

$$H_{ik} \leq 0.80R_h \dots\dots\dots (1)$$

b) 其他非地震效应组合

$$H_{ik} \leq R_h \dots\dots\dots (2)$$

c) 地震效应组合

$$H_{iEk} \leq 1.25R_h \dots\dots\dots (3)$$

$$H_{iEkmax} \leq 1.5R_h \dots\dots\dots (4)$$

式中：

H_{ik} ——相应于NB/T 20105中无地震作用效应参与的荷载组合下作用于基桩*i*桩顶处的水平力；

H_{iEk} ——相应于NB/T 20105中有地震作用效应参与的荷载组合下作用于基桩*i*桩顶处的水平力平均值；

H_{iEkmax} ——相应于NB/T 20105中有地震作用效应参与的荷载组合下作用于基桩*i*桩顶处的水平力最大值；

R_h ——单桩基础或群桩中基桩的水平承载力特征值，对于单桩基础，可取单桩的水平承载力特征值 R_{ha} 。

6.4.2 单桩的水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

- a) 单桩水平承载力特征值应通过单桩水平静载试验确定，试验方法可按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 执行。
- b) 对于钢筋混凝土预制桩、灌注桩，非地震工况下可根据静载试验结果取地面处水平位移为 10 mm（对于水平位移敏感的建筑物取水平位移 6 mm）所对应的荷载的 75%为单桩水平承载力特征值；地震工况下可根据静载试验结果取地面处水平位移为基桩反弯点以上桩长 1/550 所对应的荷载的 75%为单桩水平承载力特征值。

表 17 桩顶水平位移系数 ν_x

桩顶约束情况	桩的换算埋深（ αh ）	ν_x
铰接、自由	4.0	2.441
	3.5	2.502
	3.0	2.727
	2.8	2.905
	2.6	3.163
	2.4	3.5526
固接	4.0	0.94
	3.5	0.97
	3.0	1.028
	2.8	1.055
	2.6	1.079
	2.4	1.095
注1：当 $\alpha h > 4$ 时取 $\alpha h = 4.0$ 。		

- c) 对于混凝土护壁的挖孔桩，计算单桩水平承载力时，其设计桩径取护壁内直径。
d) 可按下式估算预制桩、灌注桩单桩水平承载力特征值：

$$R_{ha} = 0.75 \frac{\alpha^3 EI}{v_x} \lambda_{0a} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

EI ——桩身抗弯刚度，对于钢筋混凝土桩， $EI = 0.85E_c I_0$ ；其中 E_c 为混凝土弹性模量， I_0 为桩身换算截面惯性矩：圆形截面为 $I_0 = W_0 d_0^2/2$ ；矩形截面为 $I_0 = W_0 d_0^2/2$ ；

λ_{0a} ——桩顶允许水平位移，通过试验确定，与桩的水平承载力特征值对应；

λ_x ——桩顶水平位移系数，按表17取值。

6.4.3 群桩基础的基桩水平承载力特征值应考虑由承台、桩群、土相互作用产生的群桩效应，可按下列公式确定：

$$R_h = \eta_h R_{ha} \dots\dots\dots (6)$$

考虑地震作用且 $S_a/d \leq 6$ 时：

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_l \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{S_a}{d}\right)^{0.015n_2+0.45}}{0.15n_1 + 0.10n_2 + 1.9} \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta_l = \frac{m \cdot x_{0a} - B'_c \cdot h_c^2}{2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot R_{ha}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\chi_{0a} = \frac{R_{ha} \cdot v_x}{\alpha^3 \cdot EI} \dots\dots\dots (10)$$

其他情况：

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_l + \eta_b \dots\dots\dots (11)$$

$$\eta_b = \frac{\mu \cdot P_c}{n_1 \cdot n_2 \cdot R_h} \dots\dots\dots (12)$$

$$B'_c = B_c + 1 \dots\dots\dots (13)$$

$$P_c = \eta_c f_{ak} (A - n A_{ps}) \dots\dots\dots (14)$$

式中：

η_h ——群桩效应综合系数；

η_i ——桩的相互影响效应系数；

η_r ——桩顶约束效应系数（桩顶嵌入承台长度50~100 mm 时），按表 18 取值；

η_l ——承台侧向土抗力效应系数（承台侧面回填土为松散状态时取 $\eta_l = 0$ ）；

η_b ——承台底摩阻效应系数；

S_a/b ——沿水平荷载方向的距径比；

n_1 、 n_2 ——分别为沿水平荷载方向与垂直水平荷载方向每排桩中的桩数；

m ——承台侧面土水平抗力系数的比例系数，当无试验资料时可按本规范表 20 取值；

x_{0a} ——桩顶（承台）的水平位移允许值，通过试验确定，与桩的水平承载力特征值相对应；

B'_c ——承台受侧向土抗力一边的计算宽度；

B_c ——承台宽度；

h_c ——承台高度（m）；

μ ——承台底与基土间的摩擦系数，可按表 19 取值；

P_c ——承台底地基土分担的竖向总荷载标准值；

η_c ——按第 6.3.5 条确定；
 A ——承台总面积；
 A_{ps} ——桩身截面面积。

表 18 桩顶约束效应系数 η_r

换算深度 αh	2.4	2.6	2.8	3	3.5	≥ 4.0
位移控制	2.58	2.34	2.20	2.13	2.07	2.05
强度控制	1.44	1.57	1.71	1.82	2.00	2.07

注： $\alpha = 5\sqrt{\frac{mb_0}{EI}}$ ， h 为桩的入土长度。

表 19 承台底与基土间的摩擦系数 μ

土的种类		摩擦系数 μ
黏性土	可塑	0.25~0.3
	硬塑	0.30~0.35
	坚硬	0.35~0.45
粉土	密实、中密（稍湿）	0.30~0.40
中砂、粗砂、砾砂		0.40~0.50
碎石土		0.40~0.60
软岩、软质岩		0.40~0.60
表面粗糙的较硬岩、坚硬岩		0.65~0.75

6.4.4 计算水平荷载较大和风载作用的带地下室的建构筑物桩基的水平位移时，可考虑地下室侧墙、承台、桩群、土共同作用，按《建筑桩基技术规范》JGJ 94 附录 C 方法计算基桩内力和变位。

6.4.5 桩的水平变形系数和地基土水平抗力系数的比例系数 m 可按下列规定确定：

a) 桩的水平变形系数 $\alpha(1/m)$

$$\alpha = 5\sqrt{\frac{mb_0}{EI}} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

m ——桩侧土水平抗力系数的比例系数；

b_0 ——桩身的计算宽度（m）；

圆形桩：当直径 $d \leq 1m$ 时， $b_0 = 0.9(1.5d + 0.5)$ ；

当直径 $d > 1m$ 时， $b_0 = 0.9(d + 1)$ ；

方形桩：当直径 $d \leq 1m$ 时， $b_0 = 1.5b + 0.5$ ；

当直径 $d > 1m$ 时， $b_0 = b + 1$ ；

EI ——桩身抗弯刚度，按本规范第 6.4.2 条的规定计算。

b) 地基土水平抗力系数的比例系数 m ，应通过单桩水平静载试验确定，当无静载试验资料时，估算时可按表 20 取值。

表 20 地基土水平抗力系数的比例系数 m 值

序号	地基土类别	预制桩		灌注桩	
		m (MN/m ⁴)	相应单桩在地面处水平位移 (mm)	m (MN/m ⁴)	相应单桩在地面处水平位移 (mm)
1	淤泥；淤泥质土；饱和湿陷性黄土	2~4.5	10	2.5~6	6~12
2	流塑（ $I_L > 1$ ）、软塑（ $0.75 < I_L \leq 1$ ）状黏性土； $e > 0.9$ 粉土；松散粉细砂；松散、稍密填土	4.5~6.0	10	6~14	4~8

3	可塑 ($0.25 < I_L \leq 0.75$) 状黏性土、湿陷性黄土; $e = 0.75 \sim 0.9$ 粉土; 中密填土; 稍密细砂	6.0~10	10	14~35	3~6
4	硬塑 ($0 < I_L \leq 0.25$)、坚硬 ($I_L \leq 0$) 状黏性土、湿陷性黄土; $e < 0.75$ 粉土; 中密的中粗砂; 密实老填土	10~22	10	35~100	2~5
5	中密、密实的砾砂、碎石类土			100~300	1.5~3
注1: 当桩顶水平位移大于表列数值时, m 值应适当降低; 当桩的水平向位移小于10 mm时, m 值可适当提高; 注2: 当水平荷载为长期或经常出现的荷载时, 应将表列数值乘以0.4降低采用; 注3: 当地基为可液化土层时, 应将表列数值乘以本规范表10中相应的系数 ψ_l 。					

6.4.6 对于受水平荷载和地震作用的桩, 其桩身受弯承载力和受剪承载力的验算应符合下列规定:

- 对于桩顶固端的桩, 应验算桩顶正截面弯矩; 对于桩顶自由或铰接的桩, 应验算桩身最大弯矩截面处的正截面弯矩;
- 桩身所承受最大弯矩和水平剪力的计算;
- 桩身正截面受弯承载力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 执行;
- 应验算桩顶及桩身斜截面受剪承载力:
矩形截面受弯钢筋混凝土基桩的斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5f_tbh_0 + 0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (16)$$

式中:

V ——基桩最大剪力设计值;
 b ——矩形桩截面宽度;
 h_0 ——矩形桩截面有效高度;
 f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值;
 f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值;
 A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积;
 s ——沿构件长度方向的箍筋间距。

矩形截面偏心受压钢筋混凝土基桩的斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5f_tbh_0 + 0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.055N \quad (17)$$

式中:

N ——与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值, 当 $N > 0.3f_cA$ 时, 取 $N = 0.3f_cA$, 此处 f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, A 为基桩的截面面积。

矩形截面偏心受拉钢筋混凝土基桩的斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$V \leq 0.5f_tbh_0 + 0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 - 0.25N \quad (18)$$

式中:

N ——与剪力设计值 V 相应的轴向拉力设计值, 当上式右边的计算值小于 $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 时, 应取

等于 $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$, 且 $0.9f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ 值不应小于 $0.36f_tbh_0$ 。

圆形截面桩基可按上述公式计算，但上述公式中的截面宽度 b 和截面有效高度 h_0 应分别以 $1.76r$ 和 $1.6r$ 代替，此处， r 为圆形截面的半径。计算所得的箍筋截面面积应作为圆形箍筋的截面面积。

- e) 当考虑地震作用验算桩身正截面受弯和斜截面受剪承载力时，应根据现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 的规定，采用承载力调整系数 γ_{RE} 对作用于桩顶的地震作用效应进行调整。

6.4.7 预制桩吊运时单吊点和双吊点的设置，应按吊点（或支点）跨间正弯矩与吊点处的负弯矩相等的原则进行布置。考虑预制桩吊运时可能受到冲击和振动的影响，计算吊运弯矩和吊运拉力时，可将桩身重力乘以 1.5 的动力系数。

6.4.8 混凝土预制桩、预应力混凝土桩可按下列规定验算桩身的锤击压应力和锤击拉应力：

- a) 最大锤击压应力 σ_p 可按下列公式计算：

$$\sigma_p = \frac{\alpha \sqrt{2eE\gamma_p H}}{\left[1 + \frac{A_c}{A_H} \sqrt{\frac{E_c \cdot \gamma_c}{E_H \cdot \gamma_H}} \right] \left[1 + \frac{A}{A_c} \sqrt{\frac{E \cdot \gamma_p}{E_c \cdot \gamma_c}} \right]} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- σ_p ——桩的最大锤击压应力；
 α ——锤型系数；自由落锤为 1.0；柴油锤取 1.4；
 e ——锤击效率系数；自由落锤为 0.6；柴油锤取 0.8；
 A_H 、 A_c 、 A ——锤、桩垫、桩的实际断面面积；
 E_H 、 E_c 、 E ——锤、桩垫、桩的纵向弹性模量；
 γ_H 、 γ_c 、 γ ——锤、桩垫、桩的重度；
 H ——锤落距。

- b) 当桩需穿越软土层或桩存在变截面时，可按表 21 确定桩身的最大锤击拉应力。

表 21 最大锤击拉应力 σ_t 建议值 (kPa)

应力类别	桩类	建议值	出现部位
桩轴向拉应力值	混凝土及预应力混凝土桩	$(0.25 \sim 0.33) \sigma_p$	①桩刚穿越软土层时； ②距桩尖 $(0.5 \sim 0.7) l$ 处。
桩截面环向拉应力或侧向拉应力	混凝土及预应力混凝土桩（侧向）	$(0.22 \sim 0.25) \sigma_p$	最大锤击压应力相应的截面

- c) 最大锤击压应力和最大锤击拉应力分别不应超过混凝土的轴心抗压强度设计值和轴心抗拉强度设计值。

6.5 桩基变形与裂缝

I 变形计算

6.5.1 建筑桩基变形计算包括沉降计算和水平位移计算，均不应大于桩基变形允许值。

6.5.2 桩基沉降变形可用下列指标表示：

- a) 平均沉降量；
b) 沉降差；相邻建筑物沉降量的差值；
c) 整体倾斜；建筑物桩基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离之比值。

6.5.3 桩基沉降变形允许值应满足表 22 的规定。

表 22 核安全相关厂房桩基变形允许值

整体倾斜	平均沉降量 (mm)	厂房的沉降差 (mm)
1/500	150	50
注1：厂房的桩基变形还应满足相关工艺管道设计要求； 注2：相邻厂房间的变形缝宽度应考虑整体倾斜的影响。		

6.5.4 对于桩中心距不大于6倍桩径的桩基，其最终沉降量计算可采用等效作用分层总和法。等效作用面位于桩端平面，等效作用面积为桩承台投影面积，等效作用附加压力近似取承台底平均附加压力。等效作用面以下的应力分布采用各向同性均质直线变形体理论。计算模式如图4所示，桩基任一点最

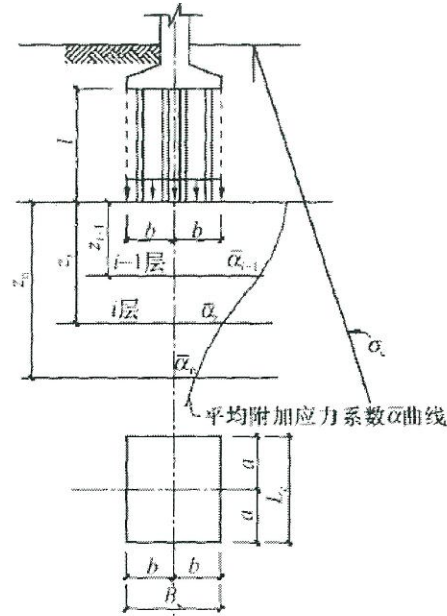


图4 桩基沉降示意图

终沉降量可用角点法按下式计算：

$$s = \psi \cdot \psi_e \cdot s' = \psi \cdot \psi_e \cdot \sum_{j=1}^m p_{oj} \sum_{i=1}^n \frac{z_{ij} \bar{\alpha}_{ij} - z_{(i-1)j} \bar{\alpha}_{(i-1)j}}{E_{si}} \quad (1)$$

式中：

s ——桩基最终沉降量（mm）；

s' ——采用布辛奈斯克（Boussinesq解，按实体深基础分层总和法计算出的桩基沉降量（mm）；

ψ ——桩基沉降计算经验系数，当无当地可靠经验时可按《建筑桩基技术规范》JGJ 94确定；

ψ_e ——桩基等效沉降系数，可按本规范第6.5.7条确定；

m ——角点法计算点对应的矩形荷载分块数；

p_{oj} ——第 j 块矩形底面在NB/T 20105中规定的正常运行工况下的荷载效应组合（分项系数均取1）下的附加压力（kPa）；

n ——桩基沉降计算深度范围内所划分的土层数；

E_{si} ——等效作用面以下第 i 层土的压缩模量（MPa），采用地基土在自重压力至自重压力加附加压力作用时的压缩模量；

z_{ij} 、 $z_{(i-1)j}$ ——桩端平面第 j 块荷载作用面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离（m）；

$\bar{\alpha}_{ij}$ 、 $\bar{\alpha}_{(i-1)j}$ ——桩端平面第 j 块荷载计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面深度范围内平均附加应力系数，可按《建筑桩基技术规范》JGJ 94选用。

6.5.5 计算矩形桩基中点沉降时，桩基沉降量可按式简化计算：

$$s = \psi \cdot \psi_e \cdot s' = 4 \cdot \psi \cdot \psi_e \cdot p_0 \sum_{i=1}^n \frac{z_i \bar{\alpha}_i - z_{(i-1)} \bar{\alpha}_{(i-1)}}{E_{si}} \quad (2)$$

式中：

P_0 ——在 NB/T 20105 中规定的正常运行工况下的荷载效应组合（分项系数均取 1）下承台底的平均附加压力；

$\bar{a}$ 、 $\bar{a}_{(i-1)}$ ——平均附加应力系数，根据矩形长宽比 a/b 及深宽比 $\frac{z_i}{b} = \frac{2z_i}{B_c}$ ， $\frac{z_{i-1}}{b} = \frac{2z_{i-1}}{B_c}$ 可按《建筑桩基技术规范》JGJ 94 选用。

6.5.6 桩基沉降计算深度 z_n 应按应力比法确定，即计算深度处的附加应力 σ_z 与土的自重应力 σ_c 应符合下列公式要求：

$$\sigma_z \leq 0.2\sigma_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_z = \sum_{j=1}^m a_j p_{oj} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

a_j ——附加应力系数，可根据角点法划分的矩形长宽比及深宽比按《建筑桩基技术规范》JGJ 94 选用。

6.5.7 桩基等效沉降系数可按下列公式简化计算：

$$\psi_e = C_0 + \frac{n_b - 1}{C_1(n_b - 1) + C_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

n_b ——矩形布桩时的短边布桩数，当布桩不规则时可按 $n_b = \sqrt{n \cdot B_c / L_c}$ 近似计算，

$n_b > 1$ ； $n_b = 1$ 时，可按本规范式(4.5.14) 计算；

C_0 、 C_1 、 C_2 ——根据群桩距径比 s_a/b 、长径比 l/b 及基础长宽比 L_c/B_c ，按《建筑桩基技术规范》JGJ 94 确定；

L_c 、 B_c 、 n ——分别为矩形承台的长、宽及总桩数。

6.5.8 当布桩不规则时，等效距径比可按下列公式近似计算：

圆形桩

$$s_a / d = \sqrt{A} / (\sqrt{n} \cdot d) \quad \dots\dots\dots (6)$$

方形桩

$$s_a / d = 0.886\sqrt{A} / (\sqrt{n} \cdot b) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

A ——桩基承台总面积；

b ——方形桩截面边长。

6.5.9 当无当地可靠经验时，桩基沉降经验系数可按下表选用。对于采用后注浆施工工艺的灌注桩，桩基沉降经验系数应根据桩端持力层类别，乘以 0.7（砂、砾、卵、石）～0.8（黏性土、粉土）折减系数；饱和土中采用预制桩（不含复打、复压、引孔沉桩）时，应根据桩距、土质、沉桩速率和顺序等因素，乘以 1.3～1.8 挤土效应系数，土的渗透性低，桩距小，桩数多，沉降速率快时取大值。

表 23 桩基沉降计算经验系数 ψ

$\bar{E}_s$ (MPa)	≤ 10	15	20	35	≥ 50
1/500	1.2	0.9	0.65	0.50	0.40
注1: $\bar{E}_s$ 为沉降计算深度范围内压缩模量的当量值，可按下式计算: $E_s = \sum A_i / \sum \frac{A_i}{E_{si}}$ ，式中 A_i 为第 i 层土附加压力系数沿土层厚度的积分值，可近似按分块面积计算；					
注2: ψ 可以根据 $\bar{E}_s$ 内插取值。					

- 6.5.10 计算桩基沉降时,应考虑相邻基础的影响,采用叠加原理计算;桩基等效沉降系数可按独立基础计算。
- 6.5.11 当桩基形状不规则时,可采用等效矩形面积计算桩基等效沉降系数,等效矩形的长宽比可根据承台实际尺寸和形状确定。
- 6.5.12 单桩在水平力和地震作用下的水平位移计算按照本规程第 6.4 条的规定进行。

II 裂缝计算

- 6.5.13 建筑桩身的裂缝控制等级和最大裂缝宽度应满足本规程第 3.5 条的要求。
- 6.5.14 对于正截面受弯(不考虑地震作用)的桩,其桩身受弯下的裂缝宽度计算可考虑如下工况: $D + L + T_0 + R_0 + C_{cr}$ (式中 D 、 L 、 T_0 、 R_0 、 C_{cr} 的具体含义详见 NB/T 20105), 最大裂缝宽度按国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。
- 6.5.15 对于抗拔桩的裂缝控制计算应符合下列规定:
- a) 对于严格要求不出现裂缝的一级裂缝控制等级预应力混凝土基桩,在荷载组合 $D + L + T_0 + R_0 + C_{cr}$ 下混凝土不应产生拉应力,应符合下式要求:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (8)$$

- b) 对于一般要求不出现裂缝的二级裂缝控制等级预应力混凝土基桩,在荷载组合 $D + L + T_0 + R_0 + C_{cr}$ 下的拉应力不应大于混凝土轴心受拉强度标准值,应符合下列公式要求:
在荷载效应标准组合下:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (9)$$

对于允许出现裂缝的三级裂缝控制等级基桩,按荷载组合 $D + L + T_0 + R_0 + C_{cr}$ 计算的最大裂缝宽度应符合下列规定:

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim} \quad (10)$$

式中:

- σ_{ck} 、 σ_{cq} ——荷载效应标准组合、准永久组合下正截面法向应力;
- σ_{pc} ——扣除全部应力损失后,桩身混凝土的预应力;
- f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值;
- $\omega_{\max}$ ——按荷载效应标准组合计算的最大裂缝宽度。可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算;
- $\omega_{\lim}$ ——最大裂缝宽度限值,按本规范 3.5 取用。

- 6.5.16 当桩基承受较大水平荷载时,应根据桩身的受力特征进行受弯、偏心受压或偏心受拉工况下的裂缝验算。裂缝宽度可按《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算。

6.6 桩基承台设计

I 受弯计算

- 6.6.1 桩基承台应进行正截面受弯承载力计算,承台弯矩可按本规程第 6.6.2~6.6.4 条规定计算,受弯承载力和配筋可按《压水堆核电厂核安全相关混凝土结构设计规范》NB/T 20012 计算。荷载效应组合按照 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合,并采用相应的分项系数。
- 6.6.2 箱型承台和筏型承台的弯矩宜考虑地基土性质、基桩分布、承台和上部结构类型和刚度,按地基-桩-承台-上部结构共同作用原理分析计算。
- 6.6.3 对于箱型承台,当桩端持力层为基岩、密实的碎石类土、砂土且深厚均匀时;或当上部结果为混凝土结构墙时,箱型承台底板可仅按照局部弯矩作用进行计算。
- 6.6.4 对于筏型承台,当桩端持力层深厚坚硬、上部结构刚度较好,且柱荷载及柱间距的变化不超过 20% 时,可仅按照局部弯矩作用进行计算。

II 受冲切计算

- 6.6.5 桩基承台厚度应满足柱(墙)对承台的冲切和基桩对承台的冲切承载力要求。
- 6.6.6 轴心竖向力作用下桩基承台受柱(墙)对承台的冲切和基桩对承台的冲切,可按下列规定计算:

- a) 冲切破坏锥体应采用自柱（墙）边或承台变阶处至相应桩顶边缘连线所构成的锥体，锥体斜截面与承台底面之夹角不应小于 45° （图 5）：

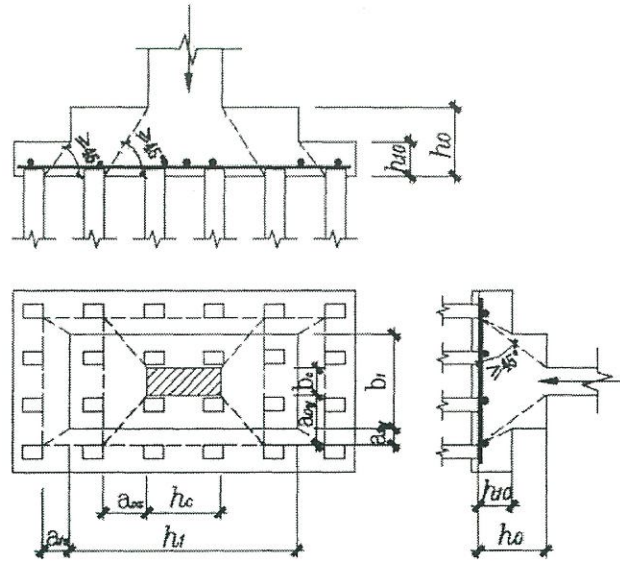


图 5 柱对承台冲切计算示意图

- b) 受柱（墙）冲切承载力可按下列公式计算：
1) 多桩矩形承台受角桩冲切的承载力应按下列公式计算：

$$F_l \leq \beta_{hp} \beta_0 u_m f_t h_0 \quad (1)$$

$$F_l = F - \sum Q_i \quad (2)$$

$$\beta_0 = \frac{0.84}{\lambda + 0.2} \quad (3)$$

式中：

F_l ——不计承台及其上填土自重，在 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合下作用于冲切破坏锥体上的冲切力设计值（kN）；

f_t ——承台混凝土抗拉强度设计值（MPa）；

β_{hp} ——承台受冲切承载力截面高度影响系数，当 $h \leq 800$ mm 时， β_{hp} 取 1.0，当 $h \geq 2000$ mm 时， β_{hp} 取 0.9，其余按线性内插法取值；

u_m ——承台冲切破坏锥体一半有效高度处的周长；

h_0 ——冲切破坏锥体的有效高度（mm）；

β_0 ——柱（墙）冲切系数；

λ ——冲跨比， $\lambda_0 = a_0/h_0$ ， a_0 为柱（墙）边或承台变阶处至桩边的水平距离；当 $\lambda < 0.25$ 时，取 $\lambda = 0.25$ ；当 $\lambda > 1.0$ 时，取 $\lambda = 1.0$ ；

F ——不计承台及其上土重，在 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合下柱（墙）底的竖向荷载设计值；

$\sum Q_i$ ——不计承台及其上土重，在 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合下冲切破坏锥体范围内各桩或复合基桩的反力设计值之和。

6.6.7 对于箱形、筏形承台，可按下列公式计算承台受内部基桩的冲切承载力：

- a) 应按下式计算受基桩的冲切承载力，如图 6（a）所示：

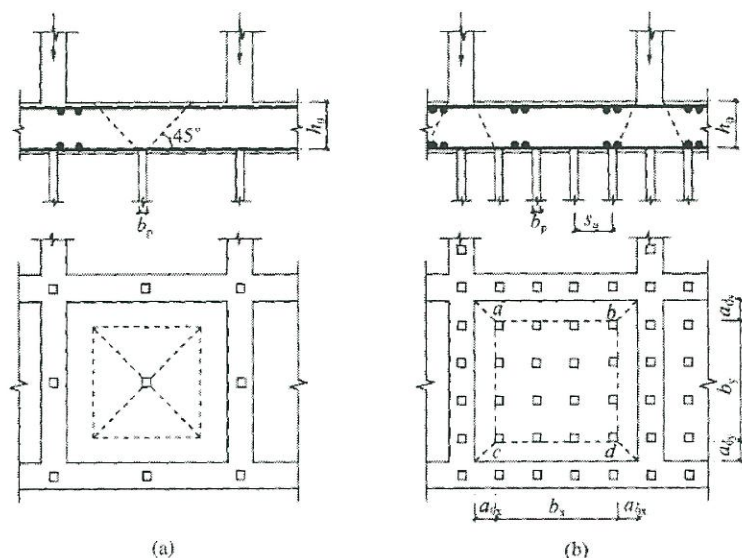
$$N_l \leq 2.8 (b_p + h_0) \beta_{hp} f_t h_0 \quad (4)$$

- b) 应按下式计算受桩群的冲切承载力，如图 6（b）所示：

$$\sum N_{1i} \leq 2[\beta_{0x}(b_y + a_{0y}) + \beta_{0y}(b_x + a_{0x})]\beta_{hp}f_t h_0 \quad (5)$$

式中:

$\sum N_{1i}$ ——不计承台和其上土重,在 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合下,基桩或复合基桩的净反力设计值、冲切锥体内各基桩或复合基桩反力设计值之和。



(a) 受基桩的冲切; (b) 受桩群的冲切

图 6 基桩对筏形承台的冲切和墙对筏形承台的冲切计算示意图

III 受剪计算

6.6.8 柱(墙)下桩基承台,应分别对柱(墙)边、变阶处和桩边联线形成的贯通承台的斜截面的受剪承载力进行验算。当承台悬挑边有多排基桩形成多个斜截面时,应对每个斜截面的受剪承载力进行验算。

6.6.9 承台斜截面受剪承载力可按下列公式计算(图 7):

$$V \leq \beta_{hs} a f_t b h_0 \quad (6)$$

$$a = \frac{1.75}{\lambda + 1} \quad (7)$$

$$\beta_{hs} = \left(\frac{800}{h_0}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

式中:

V ——不计承台及其上填土自重,在 NB/T 20015 中规定的荷载效应组合下,斜截面的最大剪力设计值(kN);

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值;

b ——承台计算截面处的计算宽度(m);

h_0 ——计算宽度处的承台有效高度(m);

β_c ——承台剪切系数;

β_{hs} ——受剪切承载力截面高度影响系数,当 $h_0 < 800\text{mm}$ 时, h_0 取 800mm , 当 $h_0 > 2000\text{mm}$ 时, h_0 取 2000mm , 其间接线性内插法取值;

λ ——计算截面的剪跨比， $\lambda_x = a_x/h_0$ 、 $\lambda_y = a_y/h_0$ ， a_x 、 a_y 为柱边或承台变阶处至 x 、 y 方向计算一排桩的桩边的水平距离，当 $\lambda < 0.3$ 时， λ 取0.3；当 $\lambda > 0.3$ 时， λ 取3.0。

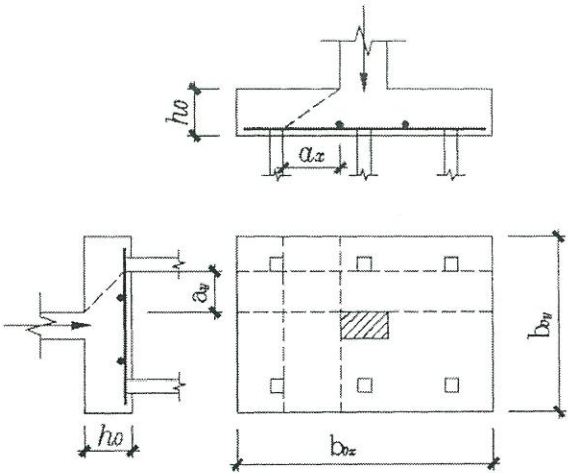


图 7 承台斜截面受剪计算示意图

6.6.10 梁板式筏基承台的梁的受剪承载力可以按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 计算。

IV 局部受压计算

6.6.11 当承台的混凝土强度等级低于柱或桩的混凝土强度等级时，尚应验算柱下或桩上承台的局部受压承载力。

6.7 桩基础结构的楼层反应谱

- 6.7.1 核工程桩基础结构的楼层反应谱计算可以非一致输入弹簧系数法和三维整体时域分析方法。
- a) 当考虑地震三个数据统计独立的空间分量同时作用时，应采用参照点处两个水平平动分量和一个竖向平动分量的加速度响应时程计算相应的反应谱。
 - b) 当地基-结构支承体系分别单独承受地震三个数据统计独立的空间分量作用时，参照点处的总时程用各个分量反应的算术叠加计算。
 - c) 当地基-结构支承体系分别用地震两个水平空间分量和一个竖向空间分量单独进行时程分析时，但没有表明地震的空间分量数据统计独立，应使用各个单独分析的时程计算参照点的反应谱。组合的反应谱应按 SRSS 原则将三个单独分析的反应谱幅值组合得到。
- 6.7.2 采用桩基础的核安全相关结构楼层反应谱计算，设计地震动加速度时程可生成单组或多组，每组应包括两个正交水平方向和一个竖直方向的时程。设计地震动时程时应满足《核电厂抗震设计标准》GB 50267 中 4.3.3 和 4.3.4 条的规定。
- 6.7.3 楼层反应谱一般可由主结构相应楼层（或高程）的地震加速度反应时程计算得出，楼层反应谱应包括两个正交水平方向的谱和一个竖向谱。计算楼层反应谱时，应满足下列要求：
- a) 主结构质量和刚度对称分布时，某一方向的楼层反应谱可由该方向地震动单独输入时的楼层地震加速度反应时程得出；主结构质量和刚度非对称分布时，对于线性分析，每一方向的楼层反应谱可由三向地震动单独输入时该方向楼层地震加速度反应的代数和得出；对于非线性分析需由三向地震动同时输入时获得的各项加速度时程得出反应谱。
 - b) 计算楼层反应谱时，频率增量数值宜按下表确定：

表 24 频率增量数值

频率范围	0.2~3.0	3.0~3.6	3.6~5.0	5.0~8.0	8.0~15.0	15.0~18.0	18.0~22.0	22.0~33.0
频率增量	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	1.00	2.00	3.00

6.7.4 设计楼层反应谱的确定和使用应符合下列规定：

- a) 设计楼层反应谱应是平滑化的反应谱；
- b) 考虑地震动和结构动力参数的不确定性，设计楼层反应谱应对本规程第 6.1 条所述楼层反应谱进行修正，含谱峰值的折减和峰值在频域的拓宽，修正方法应符合本标准附录 C 的规定；
- c) 利用反应谱法进行结构分析时，若子结构有一个以上的自振频率在设计楼层反应谱拓宽的峰值范围内时，可对采用的设计楼层反应谱进行修正，修正方法应符合本标准附录 C 的规定；
- d) 当子结构受楼层扭转振动的影响明显时，应考虑偶然偏心的影响。

7 桩基构造

7.1 桩基构造

I 灌注桩

7.1.1 灌注桩应按下列规定配筋：

- a) 纵筋：核工程基桩的正截面配筋均应通过计算确定，核工程基桩纵筋一般均应全长配置。同时桩身正截面配筋率一般不应小于 0.65%，当桩身直径大于 1500 mm 时可适当降低。
- b) 箍筋：核工程基桩的斜截面配筋均应通过计算确定，箍筋应采用螺旋式，全长配置。直径不应小于 8 mm，间距不宜大于 200 mm；以下部位应进行加密，加密区间距不应大于 100 mm：
 - 1) 桩顶以下 $6d$ 范围内；
 - 2) 位于液化土层范围内；
 - 3) 嵌岩段高出基岩表面 $1.5d$ 以下部分；
 - 4) 土层变化明显的部位，沿土层分界线上、下各 $1.5d$ 范围；
 - 5) 其他受剪力较大的部位。
- c) 当钢筋笼长度超过 4 m 时，应每隔 2 m 设一道直径不小于 12 mm 的焊接加劲箍筋。
- d) 纵筋的连接应优先采用机械连接，当采用焊接时应满足《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的相关要求。
- e) 对于受水平荷载的桩，主筋直径不应小于 16 mm，间距不宜大于 200 mm；对于抗压桩和抗拔桩，主筋不应少于 $6\phi 10$ ；纵向主筋应沿桩身周边均匀布置，其净距不应小于 60 mm；
- f) 箍筋应采用螺旋式，直径不应小于 8 mm，间距不宜大于 200 mm；桩身混凝土及混凝土保护层厚度应符合下列要求：
 - 1) 桩身混凝土强度等级不得小于 C30，混凝土预制桩尖强度等级不得小于 C35；
 - 2) 灌注桩纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度不应小于 50 mm，腐蚀环境中纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度不应小于 55 mm，同时应满足《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 和《工业建筑防腐蚀设计标准》GB 50046 的相关规定。

7.1.2 扩底灌注桩扩底端尺寸应符合下列规定：

- a) 对于持力层承载力较高、上覆土层较差的抗压桩和桩端以上有一定厚度较好土层的抗拔桩，可采用扩底；扩底端直径与桩身直径之比 D/d ，应根据承载力要求及扩底端侧面和桩端持力层土性特征以及扩底施工方法确定；挖孔桩的 D/d 不应大于 3，钻孔桩的 D/d 不应大于 2.5；
- b) 扩底端侧面的斜率应根据实际成孔及土体自立条件确定， a/h_c 可取 $1/4 \sim 1/2$ ，砂土可取 $1/4$ ，粉土、黏性土可取 $1/3 \sim 1/2$ ；
- c) 抗压桩扩底端底面宜呈锅底形，矢高 h_b 可取 $(0.15 \sim 0.20)D$ 。

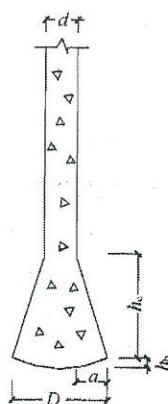


图8 扩底桩构造

II 混凝土预制桩

7.1.3 预制桩的混凝土强度等级不宜低于 C35；预应力混凝土实心桩的混凝土强度等级不应低于 C40；预制桩纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度不宜小于 45 mm，预应力混凝土桩的钢筋混凝土保护层厚度不应小于 35 mm。

7.1.4 预制桩的桩身配筋应按吊运、打桩及桩在使用中的受力等条件计算确定，预制桩的最小配筋率不宜小于 0.8%。其他配筋构造与灌注桩一致。

7.1.5 预制桩的分节长度应根据施工条件及运输条件确定；每根桩的接头数量不宜超过 3 个。

7.1.6 预制桩的桩尖可将主筋合拢焊在桩尖辅助钢筋上，对于持力层为密实砂和碎石类土时，宜在桩尖处包以钢板桩靴，加强桩尖。

7.2 承台构造

7.2.1 桩基承台的构造，除应满足抗冲切、抗剪切、抗弯承载力和上部结构要求外，尚应符合下列要求：

- 桩基承台的边桩中心至承台边缘的距离不应小于桩的直径或边长，且桩的外边缘至承台边缘的距离不应小于 150 mm。当设置承台梁时，桩的外边缘至承台梁边缘的距离不应小于 75 mm。
- 桩基承台的最小厚度不应小于 500 mm。
- 高层建筑平板式和梁板式筏形承台的最小厚度不应小于 400 mm，多层建筑墙下布桩的剪力墙结构筏形承台的最小厚度不应小于 200 mm。
- 高层建筑箱形承台的构造应符合《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》JGJ 6 的规定。

7.2.2 承台混凝土材料及其强度等级应符合结构混凝土耐久性的要求和抗渗要求。

7.2.3 承台的钢筋配置应符合下列规定：

- 筏形承台板或箱形承台板的钢筋构造应满足《压水堆核电厂核安全有关厂房地基基础设计规范》NB/T 20308 的相关要求。当筏板的厚度大于 1000 mm 时，宜在板厚中间部位设置直径不小于 20 mm、间距不大于 300 mm 的双向钢筋网。
- 承台底面钢筋的混凝土保护层厚度，当有混凝土垫层时，不应小于 50 mm，无垫层时不应小于 70 mm；此外尚不应小于桩头嵌入承台内的长度。

7.2.4 桩与承台的连接构造应符合下列规定：

- 桩嵌入承台内的长度对中等直径桩不宜小于 50 mm；对大直径桩不宜小于 100 mm。
- 混凝土桩的桩顶纵向主筋应锚入承台内，其锚入长度不应小于抗震等级为一级的受拉钢筋抗震锚固长度的要求。

7.2.5 承台和地下室外墙与基坑侧壁间隙应灌注素混凝土，或采用灰土、级配砂石、压实性较好的素土分层夯实，其压实系数不宜小于 0.94。

8 桩基施工

8.1 施工准备

8.1.1 灌注桩施工应具备下列资料：

- a) 建筑场地岩土工程勘察报告；
- b) 桩基工程施工图及图纸会审纪要；
- c) 建筑场地和邻近区域内的地下管线、地下构筑物、危房、精密仪器车间等的调查资料；
- d) 主要施工机械及其配套设备的技术性能资料；
- e) 桩基工程的施工组织设计及相关施工方案；
- f) 砂、石、水泥、钢筋、声测管等原材料及其制品的质量证明文件和取样送检报告；
- g) 有关荷载、施工工艺的试验参考资料；
- h) 质保体系文件，包括质量保证大纲、管理程序和工作程序；针对重要物项，质保体系须涵盖下游供货商；
- i) 施组/方案交底和安全技术交底，明确具体作业时应注意的关键点、质量控制敏感点和安全防护重点等要求；
- j) 质量计划（通用、一般、特殊）文件；
- k) 焊接施工工艺评定和作业指导书；
- l) 测量仪器和实验仪器的第三方校验报告。

8.1.2 钻孔机具及工艺的选择，应根据桩型、钻孔深度、地质情况、施工工期、泥浆排放及处理条件综合确定。

8.1.3 施工组织设计应结合工程特点，有针对性地制定相应质量管理措施，主要应包括下列内容：

- a) 施工平面图：标明桩位、编号、施工顺序、水电路和临时设施的位置；采用泥浆护壁成孔时，应标明泥浆制备设施及其循环系统；
- b) 确定成孔机械、配套设备以及合理施工工艺的有关资料，泥浆护壁灌注桩必须有泥浆处理措施（如干湿分离机）；
- c) 施工作业计划和劳动力组织计划；
- d) 机械设备、备件、工具、材料供应计划；
- e) 桩基施工时，对安全、劳动保护、防火、防雨、防台风、爆破作业、文物和环境保护等方面应按有关规定执行；
- f) 保证工程质量、环保、安全生产和季节性施工的技术措施。

8.1.4 机械设备应具有合格证和良好的操作性，机械设备现场组装完成后，应由有资质的第三方进行检验验收并出具合格报告，不得使用不合格机械。

8.1.5 施工前应组织图纸会审，会审纪要连同施工图、变更、澄清等应作为施工依据，并应列入工程档案。

8.1.6 桩基施工用的供水、供电、道路、排水、临时房屋等临时设施，必须在开工前准备就绪，施工场地应进行平整处理，保证施工机械正常作业。

8.1.7 桩基轴线的控制点和水准点应设在不受施工影响的地方。开工前，经复核后应妥善保护，施工中应经常复测。

8.1.8 用于施工质量检验的仪表、器具的性能指标，应符合现行国家相关标准的规定。

8.1.9 承包单位质量保证组织机构的组成人员应包括本单位法定代表人及相关负责人、质量控制人员、质量控制监督人员和质量保证监查人员等四类质量保证人员。

8.1.10 特种作业人员持证上岗，如电焊工（核级焊工）、电工、起重司索工等，其中核级焊工必须取得民用核安全设备焊工资格证书。

8.1.11 人员上岗前组织核安全文化培训宣贯，施工过程中坚持“两个零容忍”，严禁弄虚作假。

8.1.12 现场原材应分类存放并设置信息牌，包括品种、用途、状态等，避免混用、误用、错用。

8.1.13 混凝土应由有资质的实验室进行试配，各项技术指标应满足规范、图纸相关技术要求。

8.1.14 根据核工程质保程序要求应对供货商进行资料评价，针对重要物项（钢筋、混凝土），应进行源地评价。

8.2 一般规定

8.2.1 不同桩型的适用条件应符合下列规定：

- a) 泥浆护壁钻孔灌注桩宜用于地下水位以下的黏性土、粉土、砂土、填土、碎石土及风化岩层；
 - b) 旋挖成孔灌注桩宜用于黏性土、粉土、砂土、填土、碎石土及风化岩层；
 - c) 冲孔灌注桩除宜用于上述地质情况外，还能穿透旧基础、建筑垃圾填土或大孤石等障碍物，且宜用于持力层为微风化和未风化岩层。在岩溶发育地区应慎重使用，采用时，应适当加密勘察钻孔。
- 8.2.2 成孔设备就位后，必须平整、稳固，确保在成孔过程中不发生倾斜和偏移。应在成孔钻具上设置控制深度的标尺，并应在施工中进行观测记录。
- 8.2.3 成孔的控制深度应符合下列要求：
- a) 摩擦型桩：摩擦桩应以设计桩长控制成孔深度；端承摩擦桩必须保证设计桩长及桩端进入持力层深度。
 - b) 端承型桩：当采用钻（冲），挖掘成孔时，必须保证桩端进入持力层的设计深度；摩擦端承桩以桩端进入持力层深度为主，设计桩长为辅。
- 8.2.4 灌注桩成孔施工的允许偏差应满足表 25 的要求。

表 25 灌注桩成孔施工允许偏差

成孔方法		桩径偏差 (mm)	垂直度允许偏差 (%)	桩位允许偏差 (mm)	
				1~3根桩、条形桩基沿垂直轴线 方向和群桩基础中的边桩	条形桩基沿轴线方向和 群桩基础的中间桩
泥浆护壁 钻、挖、冲 孔桩	$d \leq 1000\text{mm}$	≥ 0	1	$d/6$ 且不大于100	$d/4$ 且不大于 150
	$d > 1000\text{mm}$	≥ 0		$100+0.01H$	$150+0.01H$

注1：桩径允许偏差的负值是指个别断面；
注2：H为施工现场地面标高与桩顶设计标高的距离；d为设计直径。

- 8.2.5 钢筋笼制作、安装的质量应符合下列要求：
- a) 钢筋笼制作、安装的质量应符合表 26 要求：

表 26 钢筋笼制作允许偏差

项目	允许偏差 (mm)
主筋间距	± 10
箍筋间距	± 20
钢筋笼直径	± 10
钢筋笼长度	± 100

- b) 分段制作的钢筋笼，其接头宜采用焊接或机械式接头（钢筋直径大于 20 mm），加劲箍筋宜采用焊接，螺旋箍筋宜采用二氧化碳气体保护焊，并应遵守国家现行标准《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 10、《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定；
 - c) 加劲箍宜设在主筋内侧，当桩径较小且导管直径较大时也可置于外侧；
 - d) 导管接头处外径应比钢筋笼的内径小 100 mm 以上；
 - e) 搬运和吊装钢筋笼时，应防止变形，安放应对准孔位，避免碰撞孔壁和自由落下，就位后应立即固定；
 - f) 核工程钢筋焊接须采用核级焊工，并开展工艺评定；
 - g) 钢筋笼应设置保护层，每组保护层间距不大于 2 m，每组不应少于 3 块，且均匀分布在同一截面上，保护层宜采用圆形砂浆垫块，禁用钢筋 U 性垫块；
 - h) 钢筋笼的吊装采用双点起吊，保持笼轴线重合。入孔时需始终保持垂直状态，对准孔位徐徐轻放，避免碰撞孔壁。一旦受阻立即查明原因，禁止左右晃动及旋转、高起猛落、碰撞孔壁和强行冲击下放等。
- 8.2.6 粗骨料可选用卵石或碎石，其骨料粒径不得大于钢筋间距最小净距的 1/3。
- 8.2.7 检查成孔质量合格后应尽快灌注混凝土。直径大于 1 m 或单桩混凝土量超过 25 m³ 的桩，每根

桩桩身混凝土应留有 1 组试件；直径不大于 1 m 的桩或单桩混凝土量不超过 25 m³ 的桩，每个灌注台班不得少于 1 组；每组试件应留 3 件。

8.2.8 桩在施工前，宜进行试成孔。

8.2.9 灌注桩施工现场所有设备、设施、安全装置、工具配件以及个人劳保用品必须经常检查，确保完好和使用安全。

8.3 泥浆护壁成孔灌注桩

I 泥浆的制备和处理

8.3.1 除能自行造浆的黏性土层外，均应制备泥浆。泥浆制备应选用高塑性黏土或膨润土。泥浆应根据施工机械、工艺及穿越土层情况进行配合比设计。

8.3.2 泥浆护壁应符合下列规定：

- a) 施工期间护筒内的泥浆面应高出地下水位 1.0 m 以上，在受水位涨落影响时，泥浆面应高出最高水位 1.5 m 以上；
- b) 在清孔过程中，应不断置换泥浆，直至浇注水下混凝土；
- c) 浇注混凝土前，孔底 500mm 以内的泥浆比重应小于 1.25；含砂率不得大于 8%；黏度不得大于 28s；
- d) 在容易产生泥浆渗漏的土层中应采取维持孔壁稳定的措施，可采用优质化学泥浆护壁；
- e) 泥浆在钻进过程中起到护壁和排渣的作用，要根据不同的地质情况调制出相应性能指标满足施工和规范要求的泥浆，确保成孔质量。泥浆比重一般控制在 1.2~1.5 g/cm³，根据不同土层进行调配，用比重计测量。
- f) 合理控制泥浆比重是保证成桩进度与质量的重要技术措施，在钻进过程中必须加强泥浆的管理工作，经常清理循环系统，定期检查泥浆性能。
- g) 废弃的浆、渣应进行处理，不得污染环境。

II 正、反循环钻孔灌注桩的施工

8.3.3 对孔深较大的端承型桩和粗粒土层中的摩擦型桩，宜采用反循环工艺成孔或清孔，也可根据土层情况采用正循环钻进，反循环清孔。

8.3.4 泥浆护壁成孔时，宜采用孔口护筒，护筒设置应符合下列规定：

- a) 护筒埋设应准确、稳定，护筒中心与桩位中心的偏差不得大于 50 mm；
- b) 护筒宜采用 6~10 mm 厚钢板制作，其内径应大于钻头直径 200 mm，上部宜开设 1~2 个溢浆孔；
- c) 护筒的埋设深度：在黏性土中不宜小于 1.0 m；砂土中不宜小于 1.5 m。钢护筒可采用压埋法或挖埋法。护筒埋放就位后，护筒底部和四周所填粘质土必须分层对称夯实，其高度尚应满足孔内泥浆面高度的要求；
- d) 受水位涨落影响或水下施工的钻孔灌注桩，护筒应加高加深，必要时打入不透水层；
- e) 护筒连接处要求筒内无突出物，应耐拉、压，不漏水。

8.3.5 当在软土层中钻进时，应根据泥浆补给情况控制钻进速度；在硬层或岩层中的钻进速度应以钻机不发生跳动为准。

8.3.6 钻机设置的导向装置应符合下列规定：

- a) 潜水钻的钻头上应有不小于 3 倍直径长度的导向装置；
- b) 利用钻杆加压的正循环回转钻机，在钻具中应加设扶正器。

8.3.7 如在钻进过程中发生斜孔、塌孔和护筒周围冒浆、失稳等现象时，应停钻，待采取相应措施后再进行钻进。

8.3.8 钻孔达到设计深度，灌注混凝土之前，孔底沉渣厚度指标应符合下列规定：

- a) 对端承型桩，不应大于 50 mm；
- b) 对摩擦型桩，不应大于 100 mm；
- c) 对抗拔、抗水平力桩，不应大于 200 mm。

III 冲击成孔灌注桩的施工

- 8.3.9 在钻头锥顶和提升钢丝绳之间应设置保证钻头自动转向的装置。
- 8.3.10 泥浆的制备、使用和处理应符合本规范第 8.3.1~8.3.3 条的规定。
- 8.3.11 冲击成孔质量控制应符合下列规定：
- 灌注桩排桩应采用间隔成桩的施工顺序，已浇筑混凝土的桩与邻桩间距应大于 $5D$ 桩径，或最少间隔不应少于 36 小时，以免影响相邻桩混凝土的质量；
 - 开孔时，应低锤密击，当表土为淤泥、细砂等软弱土层时，可加黏土块夹小片石反复冲击造壁，孔内泥浆面应保持稳定，可按土质情况以正常速度冲击，泥浆比重控制在 $1.2 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ ；
 - 进入基岩后，应采用大冲程、低频率冲击，当发现成孔偏移时，应回填片石至偏孔上方 $300 \sim 500 \text{ mm}$ 处，然后重新冲孔，在各种不同的土层、岩层中成孔时，可按照表 27 的操作要点进行；
 - 当遇到孤石时，可采用高低冲程交替冲击，将大孤石击碎或挤入孔壁；遇基岩面高低不平时，加硬片石回填反复冲打，至正常钻进；
 - 应采取有效的技术措施防止扰动孔壁、塌孔、扩孔、卡钻和掉钻及泥浆流失等事故；
 - 在成孔施工中，通过冲击高度、泥浆指标等参数的调节来控制成孔速度，防止孔斜、缩颈等现象的产生。同时利用孔内泥浆的压力来平衡孔壁压力和水压力，起到护壁的作用；
 - 每钻进 $4 \sim 5 \text{ m}$ 应验孔一次，在更换钻头前或容易缩孔处，均应验孔；
 - 进入基岩后，非桩端持力层每钻进 $300 \sim 500 \text{ mm}$ 和桩端持力层每钻进 $100 \sim 300 \text{ m}$ 时，应清孔取样一次，并应做记录；
 - 钻孔过程中定期检查钢丝绳、卡扣及转向装置，操作时应掌握卷扬钢丝绳的松紧度，以减少钻头、机体晃动；
 - 端承桩以控制持力层入岩深度为标准，入岩深度不小于设计要求；摩擦端承桩采用“双控”指标，即入岩深度和桩长均须满足设计要求；
 - 端承桩必须进行入岩判定，即由地勘单位鉴定岩样，判定是否进入设计持力层；
 - 核工程质量要求高，建议采用超声波成孔质量检测仪检测孔径、垂直度、孔深；
 - 岩芯应在入岩时、终孔时分别取样、留样并作为竣工资料的一部分；
 - 在冲孔过程中应每进尺 5 m 对灌注桩进行测量定位校正，及时发现偏差及时调整，保证不超过孔位偏差值。

表 27 冲击成孔操作要点

项目	操作要点
在护筒刃脚下 2 m 范围内	小冲程 1 m 左右，泥浆比重 $1.2 \sim 1.5$ ，软弱土层投入黏土块夹小片石。
黏性土层	中、小冲程 $1 \text{ m} \sim 2 \text{ m}$ ，泵入清水或稀泥浆，经常清除钻头上的泥块。
粉砂或中粗砂层	中冲程 $2 \text{ m} \sim 3 \text{ m}$ ，泥浆比重 $1.2 \sim 1.5$ ，投入黏土块，勤冲、勤掏渣。
砂卵石层	中、高冲程 $3 \text{ m} \sim 4 \text{ m}$ ，泥浆比重（密度） 1.3 左右，勤掏渣。
软弱土层或塌孔回填重钻	小冲程反复冲击，加黏土块夹小片石，泥浆比重 $1.3 \sim 1.5$ 。
注1：土层不好时提供泥浆比重或加黏土块； 注2：防黏钻可投入碎砖石。	

- 8.3.12 排渣可采用泥浆循环或抽渣筒等方法，当采用抽渣筒排渣时，应及时补给泥浆。
- 8.3.13 冲孔中遇到斜孔、弯孔、梅花孔、塌孔及护筒周围冒浆、失稳等情况时，应停止施工，采取措施后方可继续施工。
- 8.3.14 大直径桩孔可分级成孔，第一级成孔直径应为设计桩径的 $0.6 \sim 0.8$ 倍。
- 8.3.15 清孔宜按下列规定进行：
- 不易塌孔的桩孔，可采用空气吸泥清孔；
 - 稳定性差的孔壁应采用泥浆循环或抽渣筒排渣，清孔后灌注混凝土之前的泥浆指标应按本规范第 6.3.2 条执行；
 - 清孔时，孔内泥浆面应符合本规范第 6.3.2 条的规定；
 - 灌注混凝土前，孔底沉渣允许厚度应符合本规范第 6.3.9 条的规定；
 - 终孔验收后应进行清孔，要求进行两次清孔。第一次清孔，以相对密度较高的优质泥浆泵入孔底，将钻孔内的悬浮钻渣和相对密度较大的泥浆换出，清孔时要保持孔内水头，防止坍孔。

第二次清孔，清孔时应及时向护筒内补充优质泥浆，并添加清水降低泥浆比重，并及时进行分层取样。

- f) 二次清孔泥浆比重在不影响护壁效果的前提下，尽量降低泥浆比重，一般控制在 1.2 左右为宜，更便于混凝土浇筑。

IV 旋挖成孔灌注桩的施工

- 8.3.16 旋挖钻成孔灌注桩应根据不同的地层情况及地下水位埋深，可采用干作业成孔和泥浆护壁成孔工艺。
- 8.3.17 泥浆护壁旋挖钻机成孔应配备成孔和清孔用泥浆及泥浆池（箱），在容易产生泥浆渗漏的土层中可采取提高泥浆比重、掺入锯末、添加化学泥浆、增黏剂提高泥浆黏度等维持孔壁稳定的措施。
- 8.3.18 泥浆制备的能力应大于钻孔时的泥浆需求量，每台套钻机的泥浆储备量不应少于单桩体积。
- 8.3.19 旋挖钻机施工时，应保证机械稳定、安全作业，必要时可在场地铺设能保证其安全行走和操作的钢板或垫层（路基板）。
- 8.3.20 每根桩均应安设钢护筒，护筒应满足本规范第 6.3.5 条的规定。
- 8.3.21 成孔前和每次提出钻斗时，应检查钻斗和钻杆连接销子、钻斗门连接销子以及钢丝绳的状况，并应清除钻斗上的渣土。
- 8.3.22 旋挖钻机成孔应采用跳挖方式，钻斗倒出的土距桩孔口的最小距离应大于 6 m，并应及时清除。应根据钻进速度同步补充泥浆，保持所需的泥浆面高度不变。
- 8.3.23 钻孔达到设计深度时，应采用清孔钻头进行清孔，并应满足本规范第 6.3.2 条和第 6.3.17 条要求。孔底沉渣厚度控制指标应符合本规范第 6.3.9 条规定。

V 水下混凝土的灌注

- 8.3.24 钢筋笼吊装完毕后，应安置导管或气泵管二次清孔，并应进行孔位、孔径、垂直度、孔深、沉渣厚度等检验，合格后应立即灌注混凝土。
- 8.3.25 水下灌注的混凝土应符合下列规定：
- 水下灌注混凝土必须具备良好的和易性，配合比应通过试验确定；坍落度宜为 180~220 mm；水泥用量不应少于 360 kg/m³（当掺入粉煤灰时水泥用量可不受此限）；
 - 水下灌注混凝土的含砂率宜为 40%~50%，并宜选用中粗砂；粗骨料的最大粒径应小于 40 mm；
 - 水下灌注混凝土宜掺外加剂；
 - 每次混凝土浇筑前须见证开仓，并进行坍落度检验，合格后方可出厂。
- 8.3.26 导管的构造和使用应符合下列规定：
- 导管壁厚不宜小于 3 mm，直径宜为 200~250 mm；直径制作偏差不应超过 2 mm，导管的分节长度可视工艺要求确定，底管长度不宜小于 4 m，接头宜采用双螺纹方扣快速接头；
 - 导管使用前应试拼装、试压，试水压力可取为 0.6~1.0 MPa；
 - 每次灌注后应对导管内外进行清洗。
- 8.3.27 使用的隔水栓应有良好的隔水性能，并应保证顺利排出；隔水栓宜采用球胆或与桩身混凝土强度等级相同的细石混凝土制作。使用的隔水板应能有效封堵混凝土料斗孔。
- 8.3.28 灌注水下混凝土的质量控制应满足下列要求：
- 开始灌注混凝土时，导管底部至孔底的距离宜为 300~500 mm；
 - 应有足够的混凝土储备量，导管一次埋入混凝土灌注面以下不应少于 0.8 m；
 - 导管埋入混凝土深度宜为 2~6 m。严禁将导管提出混凝土灌注面，应控制提拔导管速度，派专人测量导管埋深及管内外混凝土灌注面的高差，填写水下混凝土灌注记录；
 - 灌注水下混凝土必须连续施工，每根桩的灌注时间应按初盘混凝土的初凝时间控制，对灌注过程中的故障应记录备案；
 - 应控制最后一次灌注量，超灌高度宜为 0.8~1.0 m，凿除泛浆高度后必须保证暴露的桩顶混凝土强度达到设计等级；
 - 在混凝土浇灌过程中，卸管时须测量混凝土面高度，以控制卸管节数，防止导管拔脱造成断桩。为防止导管拔出混凝土面和埋管太深，导管埋深控制在 2~6 m，严禁将导管提出混凝土

灌注面，并应控制提拔导管速度，应有专人测量导管埋深及管内外混凝土灌注面的高差，填写水下混凝土灌注记录；

- g) 首批混凝土浇灌正常后，必须立即继续进行灌注，不可长时间中断。每车灌注间隙时间一般控制在 5~15 分钟内；
- h) 每根桩灌注结束后应检查混凝土的实际灌注量，充盈系数不得小于 1；
- i) 每根桩均须留置混凝土试块（抗压试块、抗渗试块）；
- j) 混凝土浇筑过程中质量、安全、技术等管理人员需在岗。

8.4 长螺旋钻孔压灌桩

8.4.1 当需要穿越老黏土、厚层砂土、碎石土以及塑性指数大于 25 的黏土时，应进行试钻。

8.4.2 钻机定位后，应进行复检，钻头与桩位点偏差不得大于 20 mm，开孔时下钻速度应缓慢；钻进过程中，不宜反转或提升钻杆。

8.4.3 钻进过程中，当遇到卡钻、钻机摇晃、偏斜或发生异常声响时，应立即停钻，查明原因，采取相应措施后方可继续作业。

8.4.4 根据桩身混凝土的设计强度等级，应通过试验确定混凝土配合比；混凝土坍落度宜为 180~220 mm；粗骨料可采用卵石或碎石，最大粒径不宜大于 30 mm；可掺加粉煤灰或外加剂。

8.4.5 混凝土泵应根据桩径选型，混凝土输送泵管布置宜减少弯道，混凝土泵与钻机的距离不宜超过 60m。

8.4.6 桩身混凝土的泵送压灌应连续进行，当钻机移位时，混凝土泵料斗内的混凝土应连续搅拌，泵送混凝土时，料斗内混凝土的高度不得低于 400 mm。

8.4.7 混凝土输送泵管宜保持水平，当长距离泵送时，泵管下面应垫实。

8.4.8 当气温高于 30℃时，宜在输送泵管上覆盖隔热材料，每隔一段时间应洒水降温。

8.4.9 钻至设计标高后，应先泵入混凝土并停顿 10~20 s，再缓慢提升钻杆。提钻速度应根据土层情况确定，且应与混凝土泵送量相匹配，保证管内有一定高度的混凝土。

8.4.10 在地下水位以下的砂土层中钻进时，钻杆底部活门应有防止进水的措施，压灌混凝土应连续进行。

8.4.11 压灌桩的充盈系数宜为 1.0~1.2。桩顶混凝土超灌高度不宜小于 0.3~0.5 m。

8.4.12 成桩后，应及时清除钻杆及泵（软）管内残留混凝土。长时间停置时，应采用清水将钻杆、泵管、混凝土泵清洗干净。

8.4.13 混凝土压灌结束后，应立即将钢筋笼插至设计深度。钢筋笼插设宜采用专用插筋器。

8.5 灌注桩后注浆

8.5.1 灌注桩后注浆工法可用于各类钻、挖、冲孔灌注桩及地下连续墙的沉渣（虚土）、泥皮和桩底、桩侧一定范围土体的加固。

8.5.2 后注浆装置的设置应符合下列规定：

- a) 后注浆导管应采用钢管，且应与钢筋笼加劲筋绑扎固定或焊接；
- b) 桩端后注浆导管及注浆阀数量宜根据桩径大小设置。对于直径不大于 1200 mm 的桩，宜沿钢筋笼圆周对称设置 2 根；对于直径大于 1200 mm 而不大于 2500 mm 的桩，宜对称设置 3 根；
- c) 对于桩长超过 15 m 且承载力增幅要求较高者，宜采用桩端桩侧复式注浆。桩侧后注浆管阀设置数量应综合地层情况、桩长和承载力增幅要求等因素确定，可在离桩底 5~15 m 以上、桩顶 8 m 以下，每隔 6~12 m 设置一道桩侧注浆阀，当有粗粒土时，宜将注浆阀设置于粗粒土层下部，对于干作业成孔灌注桩宜设于粗粒土层中部；
- d) 对于非通长配筋桩，下部应有不少于 2 根与注浆管等长的主筋组成的钢筋笼通底；
- e) 钢筋笼应沉放到底，不得悬吊，下笼受阻时不得撞笼、墩笼、扭笼。

8.5.3 后注浆阀应具备下列性能：

- a) 注浆阀应能承受 1 MPa 以上静水压力；注浆阀外部保护层应能抵抗砂石等硬质物的刮撞而不致使管阀受损；
- b) 注浆阀应具备逆止功能。

8.5.4 浆液配比、终止注浆压力、流量、注浆量等参数设计应符合下列规定：

- a) 浆液的水灰比应根据土的饱和度、渗透性确定，对于饱和土水灰比宜为 0.45~0.65，对于非饱和土水灰比宜为 0.7~0.9(松散碎石土、砂砾宜为 0.5~0.6)；低水灰比浆液宜掺入减水剂；
- b) 桩端注浆终止注浆压力应根据土层性质及注浆点深度确定，对于风化岩、非饱和黏性土及粉土，注浆压力宜为 3~10 MPa；对于饱和土层注浆压力宜为 1.2~4 MPa，软土宜取低值，密实黏性土宜取高值；
- c) 注浆流量不宜超过 75 L/min；
- d) 单桩注浆量的设计应根据桩径、桩长、桩端桩侧土层性质、单桩承载力增幅及是否复式注浆等因素确定，可按下式估算：

$$G_c = \alpha_p d + \alpha_s n d \dots\dots\dots (1)$$

式中：

α_p 、 α_s ——分别为桩端、桩侧注浆量经验系数， $\alpha_p=1.5\sim1.8$ ， $\alpha_s=0.5\sim0.7$ ；对于卵、砾石、中粗砂取较高值；
 n ——桩侧注浆断面数；
 d ——基桩设计直径（m）；
 G_c ——注浆量，以水泥质量计（t）。

对独立单桩、桩距大于 6d 的群桩和群桩初始注浆的数根基桩的注浆量应按上述估算值乘以 1.2 的系数。

- e) 后注浆作业开始前，宜进行注浆试验，优化并最终确定注浆参数。

8.5.5 后注浆作业起始时间、顺序和速率应符合下列规定：

- a) 注浆作业宜于成桩 2 d 后开始；
- b) 注浆作业与成孔作业点的距离不宜小于 8~10 m；
- c) 对于饱和土中的复式注浆顺序宜先桩侧后桩端；对于非饱和土宜先桩端后桩侧；多断面桩侧注浆应先上后下；桩侧桩端注浆间隔时间不宜少于 2 h；
- d) 桩端注浆应对同一根桩的各注浆导管依次实施等量注浆；
- e) 对于桩群注浆宜先外围、后内部。

8.5.6 当满足下列条件之一时可终止注浆：

- a) 注浆总量和注浆压力均达到设计要求；
- b) 注浆总量已达到设计值的 75%，且注浆压力超过设计值。

8.5.7 当注浆压力长时间低于正常值或地面出现冒浆或周围桩孔串浆，应改为间歇注浆，间歇时间宜为 30~60 min，或调低浆液水灰比。

8.5.8 后注浆施工过程中，应经常对后注浆的各项工艺参数进行检查，发现异常应采取相应处理措施。当注浆量等主要参数达不到设计值时，应根据工程具体情况采取相应措施。

8.5.9 后注浆桩基工程质量和验收应符合下列要求：

- a) 后注浆施工完成后应提供水泥材质检验报告、压力表检定证书、试注浆记录、设计工艺参数、后注浆作业记录、特殊情况处理记录等资料；
- b) 在桩身混凝土强度达到设计要求的条件下，承载力检验应在后注浆 20 d 后进行，浆液中掺入早强剂时可于注浆 15d 后进行。

8.6 混凝土预制桩

I 混凝土预制桩的制作

8.6.1 混凝土预制桩可在施工现场预制，预制场地必须平整、坚实。

8.6.2 制桩模板宜采用钢模板，模板应具有足够刚度，并应平整，尺寸应准确。

8.6.3 钢筋骨架的主筋连接宜采用对焊和电弧焊，当钢筋直径不小于 20 mm 时，宜采用机械接头连接。主筋接头配置在同一截面内的数量，应符合下列规定：

- a) 当采用对焊或电弧焊时，对于受拉钢筋，不得超过 50%；
- b) 相邻两根主筋接头截面的距离应大于 35 d_g （主筋直径），并不应小于 500 mm；
- c) 必须符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 107 的规定。

8.6.4 预制桩钢筋骨架的允许偏差应符合表 28 的规定。

表 28 预制桩钢筋骨架的允许偏差

项 目	允许偏差 (mm)
主筋间距	±5
桩尖中心线	10
箍筋间距或螺旋筋的螺距	±20
吊环沿纵轴线方向	±20
吊环沿垂直于纵轴线方向	±20
吊环露出桩表面的高度	±10
主筋距桩顶距离	±5
桩顶钢筋网片位置	±10
多节桩桩顶预埋件位置	±3

8.6.5 确定桩的单节长度时应符合下列规定：

- a) 满足桩架的有效高度、制作场地条件、运输与装卸能力；
- b) 避免在桩尖接近或处于硬持力层中时接桩。

8.6.6 灌注混凝土预制桩时，宜从桩顶开始灌注，并应防止另一端的砂浆积聚过多。

8.6.7 锤击预制桩的骨料粒径宜为 5~40 mm。

8.6.8 锤击预制桩，应在强度与龄期均达到要求后，方可锤击。

8.6.9 重叠法制作预制桩时，应符合下列规定：

- a) 桩与邻桩及底模之间的接触面不得粘连；
- b) 上层桩或邻桩的浇注，必须在下层桩或邻桩的混凝土达到设计强度的 30% 以上时，方可进行；
- c) 桩的重叠层数不应超过 4 层。

8.6.10 混凝土预制桩的表面应平整、密实，制作允许偏差应符合表 29 的规定。

表 29 混凝土预制桩制作允许偏差 (mm)

桩 型	项 目	允许偏差 (mm)
钢筋混凝土实心桩	横截面边长	±5
	桩顶对角线之差	≤5
	保护层厚度	±5
	桩身弯曲矢高	不大于 1‰ 桩长且不大于 20
	桩尖偏心	≤10
	桩端面倾斜	≤0.005
	桩节长度	±20
钢筋混凝土管桩	直径	±5
	长度	±0.5%L
	管壁厚度	-5
	保护层厚度	+10, -5
	桩身弯曲 (度) 矢高	L/1000
	桩尖偏心	≤10
	桩头板平整度	≤2
	桩头板偏心	≤2

8.6.11 本规范未作规定的预应力混凝土桩的其他要求及离心混凝土强度等级评定方法，应符合国家现行标准《先张法预应力混凝土管桩》GB/T 13476、《先张法预应力混凝土薄壁管桩》JC 888 和《预应力混凝土空心方桩》JG 197 的规定。

II 混凝土预制桩的起吊、运输和堆放

8.6.12 混凝土实心桩的吊运应符合下列规定：

- a) 混凝土设计强度达到 70% 及以上方可起吊，达到 100% 方可运输；
- b) 桩起吊时应采取相应措施，保证安全平稳，保护桩身质量；
- c) 水平运输时，应做到桩身平稳放置，严禁在场地上直接拖拉桩体。

- 8.6.13 预应力混凝土空心桩的吊运应符合下列规定：
- 预应力混凝土空心桩的吊运应符合下列规定；
 - 在吊运过程中应轻吊轻放，避免剧烈碰撞；
 - 单节桩可采用专用吊钩勾住桩两端内壁直接进行水平起吊；
 - 运至施工现场时应进行检查验收，严禁使用质量不合格及在吊运过程中产生裂缝的桩。
- 8.6.14 预应力混凝土空心桩的堆放应符合下列规定：
- 堆放场地应平整坚实，最下层与地面接触的垫木应有足够的宽度和高度。堆放时桩应稳固，不得滚动；
 - 应按不同规格、长度及施工流水顺序分别堆放；
 - 当场地条件许可时，宜单层堆放；当叠层堆放时，外径为 500~600 mm 的桩不宜超过 4 层，外径为 300~400 mm 的桩不宜超过 5 层；
 - 叠层堆放桩时，应在垂直于桩长度方向的地面上设置 2 道垫木，垫木应分别位于距桩端 0.2 倍桩长处；底层最外缘的桩应在垫木处用木楔塞紧；
 - 垫木宜选用耐压的长木枋或枕木，不得使用有棱角的金属构件。
- 8.6.15 取桩应符合下列规定：
- 当桩叠层堆放超过 2 层时，应采用吊机取桩，严禁拖拉取桩；
 - 三点支撑自行式打桩机不应拖拉取桩。

III 混凝土预制桩的接桩

- 8.6.16 桩的连接可采用焊接、法兰连接或机械快速连接（螺纹式、啮合式）。
- 8.6.17 接桩材料应符合下列规定：
- 焊接接桩：钢板宜采用低碳钢，焊条宜采用 E43；并应符合现行行业标准《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81 要求。接头宜采用探伤检测，同一工程检测量不得少于 3 个接头。
 - 法兰接桩：钢板和螺栓宜采用低碳钢。
- 8.6.18 采用焊接接桩除应符合现行行业标准《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81 的有关规定外，尚应符合下列规定：
- 下节桩段的桩头宜高出地面 0.5 m；
 - 下节桩的桩头处宜设导向箍。接桩时上下节桩段应保持顺直，错位偏差不宜大于 2 mm。接桩就位纠偏时，不得采用大锤横向敲打；
 - 桩对接前，上下端板表面应采用铁刷子清刷干净，坡口处应刷至露出金属光泽；
 - 焊接宜在桩四周对称地进行，待上下桩节固定后拆除导向箍再分层施焊；焊接层数不得少于 2 层，第一层焊完后必须把焊渣清理干净，方可进行第二层（的）施焊，焊缝应连续、饱满；
 - 焊好后的桩接头应自然冷却后方可继续锤击，自然冷却时间不宜少于 8 min；严禁采用水冷却或焊好即施打；
 - 雨天焊接时，应采取可靠的防雨措施；
 - 焊接接头的质量检查，对于同一工程探伤抽样检验不得少于 3 个接头。
- 8.6.19 采用机械快速螺纹接桩的操作与质量应符合下列规定：
- 安装前应检查桩两端制作的尺寸偏差及连接件，无受损后方可起吊施工，其下节桩端宜高出地面 0.8m；
 - 接桩时，卸下上下节桩两端的保护装置后，应清理接头残物，涂上润滑脂；
 - 应采用专用接头锥度对中，对准上下节桩进行旋紧连接；
 - 可采用专用链条式扳手进行旋紧（臂长 1 m 卡紧后人工旋紧再用铁锤敲击板臂），锁紧后两端板尚应有 1~2 mm 的间隙。
- 8.6.20 采用机械啮合接头接桩的操作与质量应符合下列规定：
- 将上下接头板清理干净，用扳手将已涂抹沥青涂料的连接销逐根旋入上节桩 I 型端头板的螺栓孔内，并用钢模板调整好连接销的方位；
 - 剔除下节桩 II 型端头板连接槽内泡沫塑料保护块，在连接槽内注入沥青涂料，并在端头板面周边抹上宽度 20 mm、厚度 3 mm 的沥青涂料；当地基土、地下水含中等以上腐蚀介质时，桩端板板面应满涂沥青涂料；

- c) 将上节桩吊起，使连接销与Ⅱ型端头板上各接口对准，随即将连接销插入连接槽内；
- d) 加压使上下节桩的桩头板接触，接桩完成。

IV 锤击沉桩

- 8.6.21 沉桩前必须处理空中和地下障碍物，场地应平整，排水应畅通，并应满足打桩所需的地面承载力。
- 8.6.22 桩锤的选用应根据地质条件、桩型、桩的密集程度、单桩竖向承载力及现有施工条件等因素确定。
- 8.6.23 桩打入时应符合下列规定：
- a) 桩帽或送桩帽与桩周围的间隙应为 5~10mm；
 - b) 锤与桩帽、桩帽与桩之间应加设硬木、麻袋、草垫等弹性衬垫；
 - c) 桩锤、桩帽或送桩帽应和桩身在同一中心线上；
 - d) 桩插入时的垂直度偏差不得超过 0.5%。
- 8.6.24 打桩顺序要求应符合下列规定：
- a) 对于密集桩群，自中间向两个方向或四周对称施打；
 - b) 当一侧毗邻建筑物时，由毗邻建筑物处向另一方向施打；
 - c) 根据基础的设计标高，宜先深后浅；根据桩的规格，宜先大后小，先长后短。
- 8.6.25 打入桩的桩位偏差，应符合表 30 的规定。斜桩倾斜度的偏差不得大于倾斜角正切值的 15%（倾斜角系桩的纵向中心线与铅垂线间夹角）。

表 30 打入桩桩位的允许偏差 (mm)

项 目	允许偏差
带有基础梁的桩 (1) 垂直基础梁的中心线	100+0.01H
(2) 沿基础梁的中心线	150+0.01H
桩数为1~3根桩基中的桩	100
桩数为4~16根桩基中的桩	1/2桩径或边长
桩数大于 16 根桩基中的桩 (1) 最外边的桩	1/3 桩径或边长
(2) 中间桩	1/2桩径或边长
注：H为施工现场地面标高与桩顶设计标高的距离。	

- 8.6.26 桩终止锤击的控制应符合下列规定：
- a) 当桩端位于一般土层时，应以控制桩端设计标高为主，贯入度为辅；
 - b) 桩端达到坚硬、硬塑的黏性土、中密以上粉土、砂土、碎石类土及风化岩时，应以贯入度控制为主，桩端标高为辅；
 - c) 贯入度已达到设计要求而桩端标高未达到时，应继续锤击 3 阵，并按每阵 10 击的贯入度不应大于设计规定的数值确认，必要时，施工控制贯入度应通过试验确定。
- 8.6.27 当遇到贯入度剧变，桩身突然发生倾斜、位移或有严重回弹、桩顶或桩身出现严重裂缝、破碎等情况时，应暂停打桩，并分析原因，采取相应措施。
- 8.6.28 当采用射水法沉桩时，应符合下列规定：
- a) 射水法沉桩宜用于砂土和碎石土；
 - b) 沉桩至最后 1~2 m 时，应停止射水，并采用锤击至规定标高，终锤控制标准可按本规范第 8.6.26 条有关规定执行。
- 8.6.29 施打大面积密集桩群时，可采取下列辅助措施：
- a) 对预钻孔沉桩，预钻孔孔径可比桩径（或方桩对角线）小 50~100 mm，深度可根据桩距和土的密实度、渗透性确定，宜为桩长的 1/3~1/2；施工时应随钻随打；桩架应具备钻孔锤击双重性能；
 - b) 应设置袋装砂井或塑料排水板。袋装砂井直径宜为 70~80 mm，间距宜为 1.0~1.5 m，深度宜为 10~12 m；塑料排水板的深度、间距与袋装砂井相同；
 - c) 应设置隔离板桩或地下连续墙；

- d) 可开挖地面防震沟，并可与其他措施结合使用。防震沟沟宽可取 0.5~0.8 m，深度按土质情况决定；
- e) 应限制打桩速率；
- f) 沉桩结束后，宜普遍实施一次复打；
- g) 沉桩过程中应加强邻近建筑物、地下管线等的观测、监护。
- 8.6.30 预应力混凝土管桩的总锤击数及最后 1.0m 沉桩锤击数应根据当地工程经验确定。
- 8.6.31 锤击沉桩送桩应符合下列规定：
 - a) 送桩深度不宜大于 2.0 m；
 - b) 当桩顶打至接近地面需要送桩时，应测出桩的垂直度并检查桩顶质量，合格后应及时送桩；
 - c) 送桩的最后贯入度应参考相同条件下不送桩时的最后贯入度并修正；
 - d) 送桩后遗留的桩孔应立即回填或覆盖。
 - e) 当送桩深度超过 2.0 m 且不大于 6.0 m 时，打桩机应为三点支撑履带自行式或步履式柴油打桩机；桩帽和桩锤之间应用竖纹硬木或盘圆层叠的钢丝绳作“锤垫”，其厚度宜取 150~200 mm。
- 8.6.32 送桩器及衬垫设置应符合下列规定：
 - a) 送桩器宜做成圆筒形，并应有足够的强度、刚度和耐打性。送桩器长度应满足送桩深度的要求，弯曲度不得大于 1/1000；
 - b) 送桩器上下两端面应平整，且与送桩器中心轴线相垂直；
 - c) 送桩器下端面应开孔，使空心桩内腔与外界连通；
 - d) 送桩器应与桩匹配。套筒式送桩器下端的套筒深度宜取 250~350 mm，套管内径应比桩外径大 20~30 mm，插销式送桩器下端的插销长度宜取 200~300 mm，杆销外径应比(管)桩内径小 20~30 mm。对于腔内存有余浆的管桩，不宜采用插销式送桩器；
 - e) 送桩作业时，送桩器与桩头之间应设置 1~2 层麻袋或硬纸板等衬垫。内填弹性衬垫压实后的厚度不宜小于 60 mm。
- 8.6.33 施工现场应配备桩身垂直度观测仪器（长条水准尺或经纬仪）和观测人员，随时量测桩身的垂直度。

V 静压沉桩

- 8.6.34 采用静压沉桩时，场地地基承载力不应小于压桩机接地压强的 1.2 倍，且场地应平整。
- 8.6.35 静力压桩宜选择液压式和绳索式压桩工艺；应根据单节桩的长度选用顶压式液压压桩机和抱压式液压压桩机。
- 8.6.36 选择压桩机的参数应包括下列内容：
 - a) 压桩机型号、桩机质量（不含配重）、最大压桩力等；
 - b) 压桩机的外型尺寸及拖运尺寸；
 - c) 压桩机的最小边桩距及最大压桩力；
 - d) 长、短船型履靴的接地压强；
 - e) 夹持机构的型式；
 - f) 液压油缸的数量、直径，率定后的压力表读数与压桩力的对应关系；
 - g) 吊桩机构的性能及吊桩能力。
- 8.6.37 压桩机的每件配重必须用量具核实，并将其质量标记在该件配重的外露表面；液压式压桩机的最大压桩力应取压桩机的机架重量和配重之和乘以 0.9。
- 8.6.38 当边桩空位不能满足中置式压桩机施压条件时，宜利用压边桩机构或选用前置式液压压桩机进行压桩，但此时应估计最大压桩能力减少造成的影响。
- 8.6.39 当边桩空位不能满足中置式压桩机施压条件时，宜利用压边桩机构或选用前置式液压压桩机进行压桩，但此时应估计最大压桩能力减少造成的影响。
- 8.6.40 最大压桩力不得小于设计的单桩竖向极限承载力标准值，必要时可由现场试验确定。
- 8.6.41 静力压桩施工的质量控制应符合下列规定：
 - a) 第一节桩下压时垂直度偏差不应大于 0.5%；
 - b) 宜将每根桩一次性连续压到底，且最后一节有效桩长不宜小于 5 m；
 - c) 抱压力不应大于桩身允许侧向压力的 1.1 倍。

- 8.6.42 终压条件应符合下列规定：
- 应根据现场试压桩的试验结果确定终压力标准；
 - 终压连续复压次数应根据桩长及地质条件等因素确定。对于入土深度大于或等于 8 m 的桩，复压次数可为 2~3 次；对于入土深度小于 8 m 的桩，复压次数可为 3~5 次；
 - 稳压压桩力不得小于终压力，稳定压桩的时间宜为 5~10 s。
- 8.6.43 压桩顺序宜根据场地工程地质条件确定，并应符合下列规定：
- 对于场地地层中局部含砂、碎石、卵石时，宜先对该区域进行压桩；
 - 当持力层埋深或桩的入土深度差别较大时，宜先施压长桩后施压短桩。
- 8.6.44 压桩过程中应测量桩身的垂直度。当桩身垂直度偏差大于 1% 的时，应找出原因并设法纠正；当桩尖进入较硬土层后，严禁用移动机架等方法强行纠偏。
- 8.6.45 出现下列情况之一时，应暂停压桩作业，并分析原因，采用相应措施：
- 压力表读数显示情况与勘察报告中的土层性质明显不符；
 - 桩难以穿越具有软弱下卧层的硬夹层；
 - 实际桩长与设计桩长相差较大；
 - 出现异常响声；压桩机械工作状态出现异常；
 - 桩身出现纵向裂缝和桩头混凝土出现剥落等异常现象；
 - 夹持机构打滑；
 - 压桩机下陷。
- 8.6.46 静压送桩的质量控制应符合下列规定：
- 测量桩的垂直度并检查桩头质量，合格后方可送桩，压、送作业应连续进行；
 - 送桩应采用专制钢质送桩器，不得将工程桩用作送桩器；
 - 当场地上多数桩的有效桩长 L 小于或等于 15 m 或桩端持力层为风化软质岩，可能需要复压时，送桩深度不宜超过 1.5 m；
 - 除满足本条上述 3 款规定外，当桩的垂直度偏差小于 1%，且桩的有效桩长大于 15 m 时，静压桩送桩深度不宜超过 8 m；
 - 送桩的最大压桩力不宜超过桩身允许抱压压桩力的 1.1 倍。
- 8.6.47 引孔压桩法质量控制应符合下列规定：
- 引孔宜采用螺旋钻干作业法；引孔的垂直度偏差不宜大于 0.5%；
 - 引孔作业和压桩作业应连续进行，间隔时间不宜大于 12 h；在软土地基中不宜大于 3h；
 - 引孔中有积水时，宜采用开口型桩尖。
- 8.6.48 当桩较密集，或地基为饱和淤泥、淤泥质土及黏性土时，应设置塑料排水板、袋装砂井消减超孔压或采取引孔等措施。在压桩施工过程中应对总桩数 10% 的桩设置上涌和水平偏位观测点，定时检测桩的上浮量及桩顶水平偏位值，若上涌和偏位值较大，应采取复压等措施。

8.7 承台施工

I 基坑开挖和回填

- 8.7.1 桩基承台施工顺序宜先深后浅。
- 8.7.2 当承台埋置较深时，应对邻近建筑物及市政设施采取必要的保护措施，在施工期间应进行监测。
- 8.7.3 基坑开挖前应对边坡支护型式、降水措施、挖土方案、运土路线及堆土位置编制施工方案，若桩基施工引起超孔隙水压力，宜待超孔隙水压力大部分消散后开挖。
- 8.7.4 当地下水位较高需降水时，可根据周围环境情况采用内降水或外降水措施。
- 8.7.5 挖土应均衡分层进行，对流塑状软土的基坑开挖，高差不应超过 1 m。
- 8.7.6 挖出的土方不得堆置在基坑附近。
- 8.7.7 机械挖土时必须确保基坑内的桩体不受损坏。
- 8.7.8 基坑开挖结束后，应在基坑底做出排水盲沟及集水井，如有降水设施仍应维持运转。
- 8.7.9 在承台和地下室外墙与基坑侧壁间隙回填土前，应排除积水，清除虚土和建筑垃圾，填土应按设计要求选料，分层夯实，对称进行。

II 钢筋和混凝土施工

8.7.10 绑扎钢筋前应将灌注桩桩头浮浆部分和预制桩桩顶锤击面破碎部分去除，桩体及其主筋埋入承台的长度应符合设计要求，钢管桩尚应焊好桩顶连接件，并应按设计施作桩头和垫层防水。

8.7.11 承台混凝土应一次浇注完成，混凝土入槽宜采用平铺法。对大体积混凝土施工，应采取有效措施防止温度应力引起裂缝。

9 桩基检测与验收

9.1 一般规定

9.1.1 桩基工程应进行桩体原材料、桩位、桩长、桩径、桩身质量和单桩承载力的检验，并填写相关检查记录，编制相应质量检测报告。

9.1.2 桩基工程的检验按时间顺序可分为施工前检验、施工过程检验和施工后检验三个阶段。

9.1.3 对砂、石子、水泥、钢材等桩体原材料质量的检验项目和方法应符合国家现行有关标准的规定。

9.1.4 根据目的不同，基桩检测可分为施工前为设计提供依据的试验桩检测和施工后为验收提供依据的工程桩检测。基桩检测应根据检测目的、检测方法的适应性、桩基的设计条件、成桩工艺等，按表 28 选择适用的检测方法，相关检测方法应符合现行标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、《地基动力特性测试规程》GB/T 50269 等的有关规定。为了有效提高基桩检测结果判定的可靠性，可选择两种或两种以上的检测方法。

表 31 检测方法及其检测目的

检测方法	检测目的
单桩竖向抗压静载试验	确定单桩竖向抗压极限承载力；判定竖向抗压承载力是否满足设计要求；通过桩身应变、位移测试，测定桩侧、桩端阻力。
单桩竖向抗拔静载试验	确定单桩竖向抗拔极限承载力；判定竖向抗拔承载力是否满足设计要求；通过桩身应变、位移测试，测定桩的抗拔侧阻力。
单桩水平静载试验	确定单桩水平临界荷载和极限承载力，推定土抗力参数；判定水平承载力或水平位移是否满足设计要求；通过桩身应变、位移测试，测定桩身弯矩。
群桩水平静载试验	确定桩基水平承载力；通过桩身应变、位移测试，测定桩身弯矩；分析由承台、桩群、土的相互作用产生的群桩效应。
钻芯法	检测灌注桩桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度，判定或鉴别桩端持力层岩土性状，判定桩身完整性类别。
低应变法	检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别。
声波透射法	检测灌注桩桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别。
井下电视	检测桩身完整性。
孔径、孔斜、孔底沉渣厚度测量	检测桩孔直径、孔斜、桩底沉渣厚度。
模型基础动力参数测试	确定以下桩基动力参数：单桩的抗压刚度；桩基抗剪和抗扭刚度系数；桩基竖向和水平回转向第一振型以及扭转向的阻尼比；桩基竖向和水平回转向以及扭转向的共振总质量。

9.1.5 基桩检测用仪器设备应在检定或校准的有效期内；基桩检测前，应对仪器设备进行检查调试。

9.2 施工前检验

9.2.1 施工前应严格对桩位进行检验。

9.2.2 混凝土预制桩施工前应进行下列检验：

- 成品桩应按选定的标准图或设计图制作，现场应对其外观质量和桩身混凝土强度进行检验；
- 应对接桩用焊条、压桩用压力表等材料和设备进行检验。

9.2.3 灌注桩宜使用预拌混凝土，施工前应进行下列检验：

- 预拌混凝土应提供砂、石子、水泥、水的质量合格文件；对原材料质量与计量、混凝土配合比、坍落度、混凝土强度等级等进行检验；
- 钢筋应进行进场验收，合格后方可使用。钢筋笼制作应对钢筋规格、焊条规格、品种、焊口规格、焊缝长度、焊缝外观和质量、主筋和箍筋的制作偏差等进行检查，钢筋笼制作允许偏差应符合表 29 的要求。

表 32 钢筋笼制作允许偏差

项目	允许偏差 (mm)
主筋间距	± 10
箍筋间距	± 20
钢筋笼直径	± 10
钢筋笼长度	± 100

9.2.4 施工前应进行试打桩，对试桩承载力、完整性进行检测，对桩身应力、桩周岩土力学性质进行测试。试验桩检测应依据设计确定的基桩受力状态、试验检测项目，采用相应的静载试验方法确定单桩极限承载力；单桩竖向抗压静载试验应采用慢速维持荷载法，单桩竖向抗拔静载试验、单桩或群桩水平静载试验可采用慢速维持荷载法或设计要求的方法；检测数量应满足设计要求，且在同一条件下不应少于 3 根；当基础范围内地质条件复杂时，应增加试桩数量。试桩应分布在基础施工区域内或地层条件与基础区域相似的邻近区域，试桩结果应具有代表性。静载试验的同时，应进行桩身应力、桩周岩土力学性质及其它设计所需的力学指标的测试。

9.2.5 动力机器部位的桩基应进行模型基础动力参数测试。

9.3 施工过程检验

9.3.1 混凝土预制桩施工过程中应进行下列检验：

- 打入（静压）深度、停锤标准、静压终止压力值及桩身（架）垂直度检查；
- 接桩质量、接桩间歇时间及桩顶完整状况；
- 每米进尺锤击数、最后 1 m 进尺锤击数、总锤击数、最后三阵贯入度、总进尺及桩尖标高等。

9.3.2 灌注桩施工过程中应进行下列检验：

- 灌注混凝土前，应对已成孔的中心位置、孔径、孔深、垂直度、孔底沉渣厚度进行检验；
- 应对钢筋笼安放的实际位置进行检查；
- 干作业条件下成孔后应对大直径桩桩端持力层进行检验；
- 应对灌注混凝土的充盈系数进行检查，当充盈系数过大或小于 1 时，应分析原因；
- 灌注桩混凝土强度检验的试件应在施工现场随机抽取并标识，来自同一搅拌站的混凝土，每浇注 50 m³ 必须至少留置一组试件；直径大于 1 m 或单桩混凝土量超过 25 m³ 的桩，每根桩桩身混凝土应留有 1 组试件；直径不大于 1 m 的桩或单桩混凝土量不超过 25 m³ 的桩，每个灌注台班不得少于 1 组；对于单柱单桩，每根桩应至少留置 1 组试件，每组试件应留 3 件。

9.4 施工后检验

9.4.1 根据不同桩型应按本规程第 8 章的相应规定检查成桩桩位偏差。

9.4.2 工程桩应进行承载力和桩身质量检验。

9.4.3 验收检测的受检桩选择，宜符合下列规定：

- 施工质量有疑问的桩；
- 局部地基条件出现异常的桩；
- 承载力验收检测时部分选择完整性检测中判定的 III 类桩；
- 设计方认为重要的桩；
- 施工工艺不同的桩；
- 除本条 a)～c) 款指定的受检桩外，其余受检桩宜均匀或随机选择。

9.4.4 桩身质量除对预留混凝土试件进行强度等级检验外，尚应进行现场检测。桩的完整性检测方法选择，应符合本规范第 9.1.4 条的规定，可采用可靠的动测法，对于大直径桩还可采取钻芯法、声波透射法，对于端承型桩，当桩长小于 30 d 时，应以钻芯法为主要手段，桩长大于 30 d 的，以声波透射法为主要手段，钻芯法应钻透桩底，并进入持力层不少于 3 d，应对混凝土芯样进行检测，判定其桩身混凝土强度是否满足设计要求；嵌岩桩应对桩端的岩性进行检验，当桩端持力层为中、微风化岩层且岩芯可制作成试件时，应在接近桩底部位 1 m 内截取岩石芯样；遇分层岩性时，宜在各分层岩面取样，对岩石芯样进行单轴抗压强度试验，确定岩石单轴抗压强度，验证桩端持力层的承载力。当一种方法不能全

面评价基桩完整性时，应采用两种或两种以上的检测方法，检测数量应符合下列规定：

- a) 灌注桩工程的检测数量不应少于总桩数的 30%，且不应少于 20 根；
- b) 大直径灌注桩应在本条第 a) 款规定的检测桩数范围内，按不少于总桩数 10% 的比例采用声波透射法和钻芯法检测；
- c) 当符合本规范第 9.4.3 条第 a)、b) 款规定的桩数较多，或为了全面了解整个工程基桩的桩身完整性情况时，宜增加检测数量。

9.4.5 桩基工程应采用静载荷试验进行承载力验收检测。检测数量不应少于同一条件下桩基分项工程总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

9.4.6 对设计有抗拔或水平力要求的桩基工程，单桩承载力验收检测应采用单桩竖向抗拔静载试验、单桩及群桩水平静载试验，检测数量应符合本规范第 9.4.5 条的规定。

9.5 桩基验收

9.5.1 当桩顶设计标高与施工场地标高相近时，基桩的验收应待基桩施工完毕后进行；当桩顶设计标高低于施工场地标高时，应待开挖到设计标高后进行验收。

9.5.2 基桩验收应包括下列资料：

- a) 岩土工程勘察报告、桩基施工图、图纸会审纪要、设计变更及材料代用通知单等；
- b) 经审定的施工组织设计、施工方案及变更单；
- c) 桩位测量放线图，包括工程桩位线复核签证单；
- d) 原材料的质量合格和质量鉴定书；
- e) 半成品如预制桩等产品的合格证；
- f) 施工记录及隐蔽工程验收文件；
- g) 成桩质量检查报告；
- h) 单桩承载力检测报告；
- i) 基坑挖至设计标高的基桩竣工平面图及桩顶标高图；
- j) 其他必须提供的文件和记录。

附录 A

(规范性)

考虑桩-土-结构相互作用的非线性弹簧系数法

A.1 水平非线性弹簧系数法

a) 对于黏性土

桩的侧向极限承载力 按式 (A.1) 确定:

$$\left. \begin{aligned} p_u &= (3s_u + \gamma'X)D + J s_u X && \text{当 } 0 < X \leq X_R \\ p_u &= 9s_u D && \text{当 } X > X_R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma'D}{s_u} + J} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

 p_u ——桩侧向极限承载力; s_u ——粘性土的不排水剪切强度; D ——计算的桩的直径; J ——无量纲经验常数, 变化范围为0.25~0.50, 正常固结土取0.50; X ——土层深度; γ' ——土体的有效容重; X_R ——泥面以下至土抗力减小区底部的深度。对于短期静荷载, p - y 曲线根据式 (A.3) 计算:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} && \text{当 } y \leq 8y_c \\ p &= p_u && \text{当 } y > 8y_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.3)$$

对于循环荷载, p - y 曲线根据式 (A.4)、式 (A.5) 计算:对于 $X > X_R$ 情况:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} && \text{当 } y \leq 3y_c \\ p &= 0.72p_u && \text{当 } y > 3y_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.4)$$

对于 $X \leq X_R$ 情况:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} && \text{当 } y \leq 3y_c \\ p &= 0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R} \right) \frac{y - 3y_c}{12y_c} \right) && \text{当 } 3y_c < y \leq 15y_c \\ p &= 0.72p_u \frac{X}{X_R} && \text{当 } y > 15y_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

 y_c —— $y_c = 2.5\varepsilon_c D$; ε_c ——不排水压缩试验最大应力对应的应变的一半。

b) 对于砂土

桩的侧向极限承载力 由式 (A. 6) 确定:

$$\left. \begin{aligned} p_u &= (C_1 X + C_2 D) \gamma' X & \text{当 } 0 < X \leq X_R \\ p_u &= C_3 D \gamma' X & \text{当 } X > X_R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A. 6)$$

式中:

C_1 、 C_2 、 C_3 ——取决于砂土的内摩擦角 ϕ 。

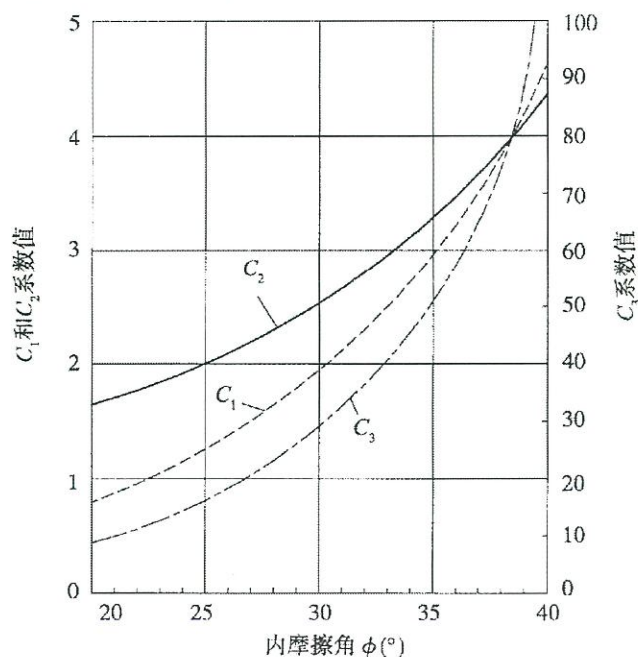


图 A.1 C_1 、 C_2 、 C_3 取值

因此p-y曲线可根据式 (A. 7) 计算:

$$p = Ap_u \tan h \left(\frac{kX}{Ap_u} y \right) \dots\dots\dots (A. 7)$$

式中:

k ——地基反力的初始模量, 取决于砂土的内摩擦角 ϕ 。

关于 k 值得计算公式如下:

水下: $k(\phi) = 0.0004676\phi^3 + 0.114655\phi^2 - 6.60665\phi + 92.38$;

水上: $k(\phi) = -0.004632\phi^3 + 0.7431\phi^2 - 28.713\phi + 330.26$ 。

A ——考虑循环荷载或短期静荷载状态的系数, 按下式计算:

对于循环荷载: $A=0.9$;

对于静力荷载: $A = \left(3 - 0.8 \frac{X}{D} \right) \geq 0.9$ 。

A. 2 竖向非线性弹簧系数法

A. 2.1 轴向极限承载力

桩基础应设计为抵抗静态和循环轴向载荷, 桩身轴向抗力分为土体的侧摩阻力和端承力。

$$Q_d = Q_f + Q_v = fA_s + qA_v \dots\dots\dots (A. 7)$$

式中:

Q_f ——侧摩阻力 (kN);

Q_v ——桩端承载力 (kN);

f ——单位面积摩阻力 (kPa)；

A_s ——桩身侧表面积 (m)；

q ——桩端单位面积承载力 (kPa)；

A_p ——桩端底面积 (m)。

a) 黏土中的桩侧摩阻力和桩端承载力

对于粘性土中的桩侧摩阻力，按照下式计算：

$$f = \alpha c \quad (\text{A. 8})$$

式中：

α ——为无量纲系数，当 $\psi \leq 1.0$ 时， $\alpha = 0.5\psi^{-0.5}$ ；当 $\psi > 1.0$ 时， $\alpha = 0.5\psi^{-0.25}$ 。 $\alpha < 1.0$ ；

c ——该处的不排水剪切强度；

ψ —— $\psi = c/p'_0$ ， p'_0 为超固结有效应力 (kPa)。

对于粘性土中的桩端承载力 (kPa)，按照下式计算：

$$q = 9c \quad (\text{A. 9})$$

b) 砂土中的桩侧摩阻力和桩端承载力

对于砂土中的桩侧摩阻力，按照下式计算：

$$f = K p_o \tan \delta \quad (\text{A. 8})$$

式中：

K ——横向土压力系数；

p_o ——超固结有效应力 (kPa)；

δ ——土与桩壁的摩擦角。

对于砂土中的桩端承载力 (kPa)，按照下式计算：

$$q = p_o N_q \quad (\text{A. 9})$$

式中：

p_o ——桩端超固结有效应力 (kPa)；

N_q ——承载能力系数，无量纲。

A. 2. 2 t-z和Q-z曲线的确定

t-z曲线描述在不同深度下土桩剪切刚度和局部变形之间的关系。桩身与桩侧土的桩侧摩阻作用通过t-z曲线描述，其中 t 为桩周土黏结力 (kPa)， z 为桩身轴向位移 (mm)。

表 A. 1 土桩剪切刚度和局部变形关系

土类型	z/D	$z(\text{mm})$	$t/t_{\max}$
黏土	0.0016		0.30
	0.0031		0.50
	0.0057		0.75
	0.0080		0.90
	0.0100		1.00
	0.0200		0.70~0.90
	∞		0.70~0.90
砂土		0	0.00
		0.254	1.00
		∞	1.00

注： z ——桩身局部变形 (mm)； D ——桩径 (mm)； t ——桩—土间单位接触面积的摩阻力； $t_{\max}$ ——桩—土间单位接触面积的最大摩阻力。

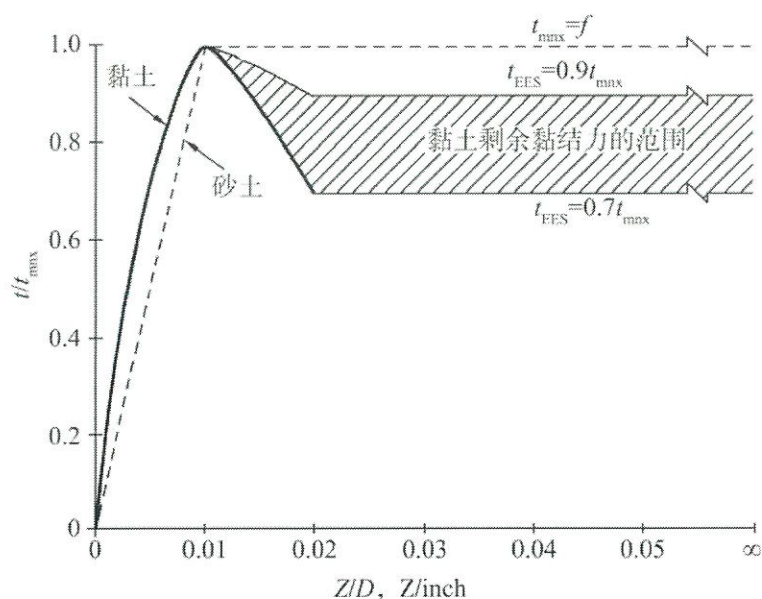


图 A.2 土桩剪切刚度与局部变形关系

同样, 采用Q-z曲线描述桩端轴力与轴向变形之间的关系。

表 A.2 桩端轴力与轴向变形之间关系

z/D	0.002	0.013	0.042	0.073	0.100
Q/Q_p	0.25	0.50	0.75	0.90	1.00

注: Q_p ——为桩端极限端阻力 (kN); z ——桩端轴向位移 (mm); D ——桩径 (mm)。

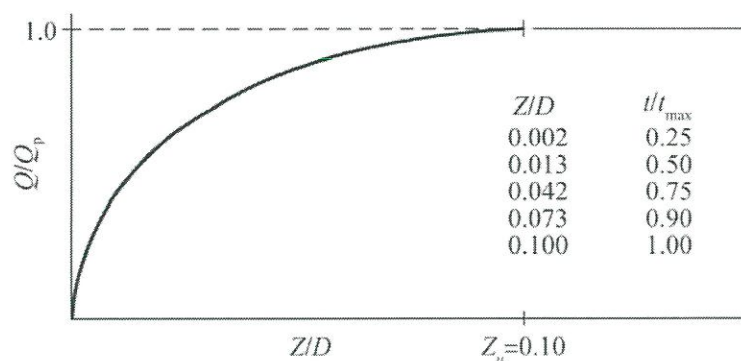


图 A.3 桩端轴力与轴向变形之间关系

在水平力作用下, 群桩中桩的中心距小于 8 倍桩径, 桩的入土深度在不小于 10 倍桩径以内的桩段, 应考虑群桩效应。

桩基础相互影响系数 k

$$k = \begin{cases} 1.0 (L_0 < 0.6h_0) \\ X_n + \frac{1-X_n}{0.6} \cdot \frac{L_0}{h_0} (L_0 < 0.6h_0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

L_0 ——桩在水平地震作用方向所在竖直面内的津距(m);

h_0 ——桩构件埋入地面或局部冲刷线以下的计算深度， $h_0 = 3(D + 1)$ ；

X_n ——与桩构件数目有关的水平地基刚度调整系数，可按下表取值。

表 A.3 水平地基刚度调整系数 X_n

桩数 n	调整系数 X_n
1	1.0
2	0.6
3	0.5
≥ 4	0.45

A.3 当厂房考虑埋置效应时，地下室外墙水平向采用双线性弹簧：

地下室外墙墙侧水平地基弹簧刚度（kN/m）：

$$k_h = K_h A_h \quad (\text{A. 11})$$

式中：

k_h ——墙身水平地基弹簧初始刚度（kN/m）；

A_h ——计算范围内墙身正面受土压计算面积（m²）。

水平地基反力上限值：

$$P_{hy} = [\sigma_p] b_0 \Delta l \quad (\text{A. 12})$$

$$[\sigma_p] = \gamma z (\eta K_p - K_a) + 2c (\eta \sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}) \quad (\text{A. 13})$$

式中：

b_0 ——水平弹簧刚度计算范围内基础侧面土抗力的计算宽度（m），按现行行业标准《铁路桥涵地基与基础设计规范》TB10002.5计算；

Δl ——水平弹簧计算范围的高度；

$[\sigma_p]$ ——基础侧面水平地基压应力强度（kPa）；

η ——系数， $\eta = b_0/b$ ；

b ——垂直于荷载作用方向的基础水平宽度（m）。

附录 B

(规范性)

地震作用下群桩三维整体时域分析方法

B.1 地震作用下群桩三维整体时域分析中,采用桩基-地基-结构整体模型,进行地震动力分析需要考虑地基半无限空间的辐射阻尼效应。截断边界处应设置动力人工边界,人工边界条件的选取应该能保证外行散射波进入外部无限域。其中可选动力人工边界包括但不限于:粘弹性边界、粘性边界、透射边界、剪切边界等。由于动力人工边界建立复杂,涉及自由场的计算、大量边界单元的建立和等效节点力的施加。无论采用哪种边界,均应进行充分的验证。

B.2 人工截断边界的位置受筏板范围的影响。计算模型的侧面边界距筏板边缘的距离不宜小于3倍筏板单边最大尺寸,当结构筏板尺寸较大时可以缩小至1倍筏板单边最大尺寸。核安全相关桩基需采用嵌岩桩,计算模型底面取至基岩面以下即可。

B.3 等效线性化和非线性黏弹性时程分析法需考虑土体的非线性特征,可选用等效线性化本构、粘弹性本构和弹塑性本构等。无论采用哪种非线性本构,土体材料本构模型应能反映应力-应变骨架曲线、阻尼比-应变曲线和滞回曲线随着循环剪切应变幅值的非线性变化特性,并应根据实际地勘与室内试验数据标定材料参数。

等效线性化本构通过迭代的手段来近似反映土体的非线性,采用瑞利阻尼来模拟土体的阻尼效应,适用于地震水平较低,土体应变较小的情况。

粘弹性本构分为线性粘弹性和非线性粘弹性本构,该本构主要采用滞回阻尼来模拟土体的阻尼效应,在地震水平较高,土体应变较大的情况下,依然可以较好的反映土体的非线性特征与阻尼效应。

其中当应变小于0.2%且地震加速度小于0.3g的情况下宜适用线性粘弹性本构,超过该水平宜采用非线性粘弹性本构。

B.4 饱和砂土或粉土采用的本构模型应能反映其超静孔隙水压力的起伏累积、循环大剪切变形和再回结体变特性,同时土体单元应采用符合比奥固结理论的流固耦合单元。弹塑性本构理论模型复杂,需要的参数多,目前工程上应用较少。如采用弹塑性本构进行三维整体时域分析应对参数的可靠性与本构的适用性进行充分的论证与验证。

B.5 三维整体时域分析需要考虑静力的影响,在进行动力分析前需获得合理初始应力场并进行地应力平衡计算。

B.6 三维整体时域分析方法中要尽量保证有限元网格的质量,尽可能多的使用六面体单元,单元的长边与短边之比不宜大于4,同时单元尺寸宜小于八分之一波长。

B.7 底部边界处应作为三维整体时域分析方法地震入射位置,同时侧边界处应输入与场地相匹配的自由场响应。无论是底边界还是侧边界,地震动的输入的形式应为等效地震节点力,一般不能采用加速度、速度或位移作为输入。

附录 C (规范性) 设计楼层反应谱的调整

C.1 按照本标准第 6.7 条规定得出的楼层反应谱满足下列要求，可消减峰值的 15%：

$$B = \frac{\Delta f_{0.8}}{f_c} < 0.3 \quad \text{..... (D. 1)}$$

式中：

$\Delta f_{0.8}$ ——超过反应谱峰值 80% 的频率间距；

f_c ——超过 80% 反应谱峰值的中心频率。

C.2 当主结构地震作用计算考虑地基与结构相互作用时，可改变地基的剪切模量 G ，采用 $G(1 + C_v)$ 和 $G/(1 + C_v)$ 分别计算主结构的地震反应 (C_v 为地基弹性模量的变异系数，取标准差系数)，再根据主结构地震加速度反应时程计算楼层反应谱，计算应符合下列规定：

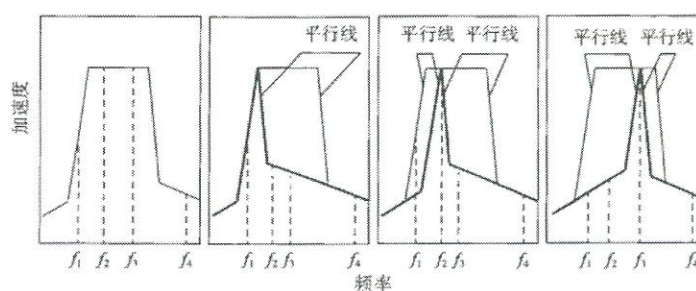
a) 当厂址地基勘察数据充分时， C_v 取值不应小于 0.5，当厂址地基勘察数据欠充分时， C_v 取值不应小于 1.0；

b) 设计楼层反应谱取对应不同剪切模量 G 计算得出的两个反应谱包络。

C.3 当主结构地震反应分析采用概率可靠度方法时，只要抗震系统可靠度不低于 90%，设计楼层反应谱的削峰幅度可不受 15% 的限制。

C.4 计算结构反应谱应考虑由于支承结构频率和地基-结构相互作用分析的不确定性所引起的反应的不确定性。可以采用峰值拓宽法。最小的拓宽应是对最佳期望土体剪切模量条件下反应放大区域中的各个频率拓宽 15%。在不考虑筏板和墙体柔性的条件下，对土体剪切模量的变化的拓宽要控制。最终的反应谱应包络上限和下限。与反应谱峰值拓宽相结合，如果子系统的阻尼小于 10%，允许峰值折减 15%。如果能表明折减过的反应谱非超越概率不低于 90%，允许进一步折减。

C.5 当子结构有一个以上的自振频率在设计楼层反应谱拓宽的峰值范围内时，为了不使计算结果过分保守，设计楼层反应谱可通过平移或延长谱线进行调整，不同的调整方案中取对子结构综合影响最不利者。



注：图中频率 f_1 , f_2 , f_3 为处于原楼层反应谱拓宽的峰值范围内的子结构自振频率。

图 D.1 楼层反应谱调整示例

(粗线为调整后的反应谱，细线为调整前的反应谱)

附件 3

中国核工业勘察设计协会
团体标准编写大纲/标准征求意见表

大纲/标准名称				
意见提出人			所在单位	
联系电话			邮箱	
意见反馈内容				
序号	所在页次	大纲/标准章 条编号	大纲/原标准内容	建议修改及依据

中国核工业勘察设计协会 团体标准征求意见表（续页）

[illegible]

共 页第 页