

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XXXX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：XXX

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 pile

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:

- 承载力极限状态: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;
- 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:

- 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，在其施工过程中及建成后使用期间，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；
 - 地下水位埋藏情况、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 根的摩擦型桩桩基	其他情况
非挤土灌注桩		$3.0d$	$3.0d$
部分挤土桩	非饱和土、饱和非黏性土	$3.5d$	$3.0d$
	饱和黏性土	$4.0d$	$3.5d$
钻、挖孔扩底桩		$2D$ 或 $D+2.0\text{ m}$ (当 $D>2\text{ m}$)	$1.5D$ 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 $2.5d$ 。			

- 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 $2d$, 砂土不宜小于 $1.5d$, 碎石类土不宜小于 $1d$ 。当存在软弱下卧层时, 桩端以下硬持力层厚度不宜小于 $3d$ 。
- 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 $0.6d$ 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 $0.4d$, 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。

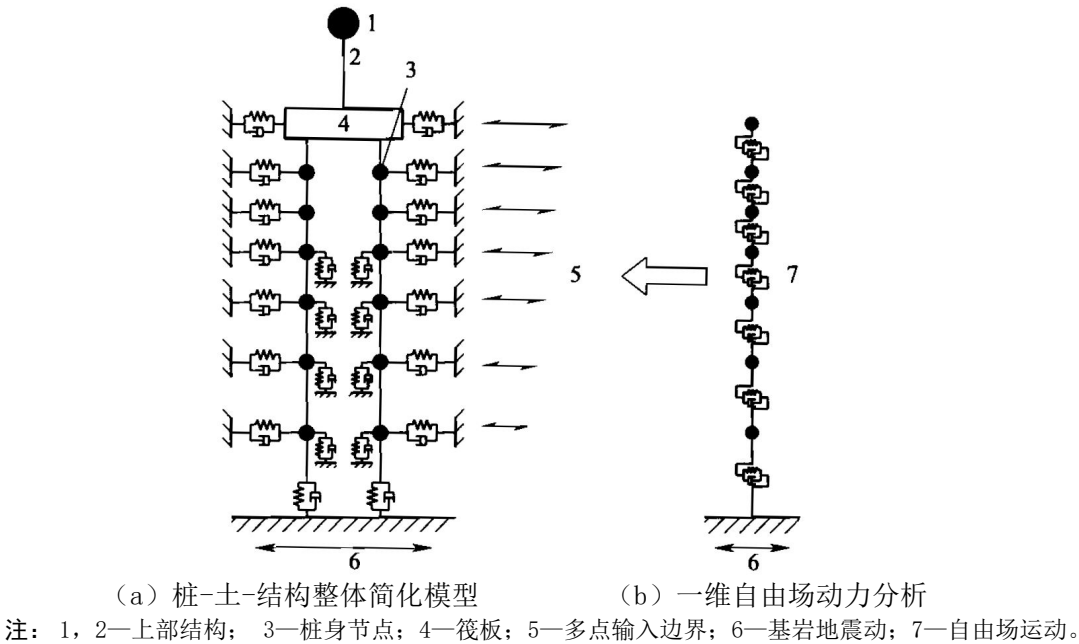


图 1 地震动的非一致输入方法

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

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

偏心竖向力作用下

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

b) 水平力

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

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：

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

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

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 $1.5d$ 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）。

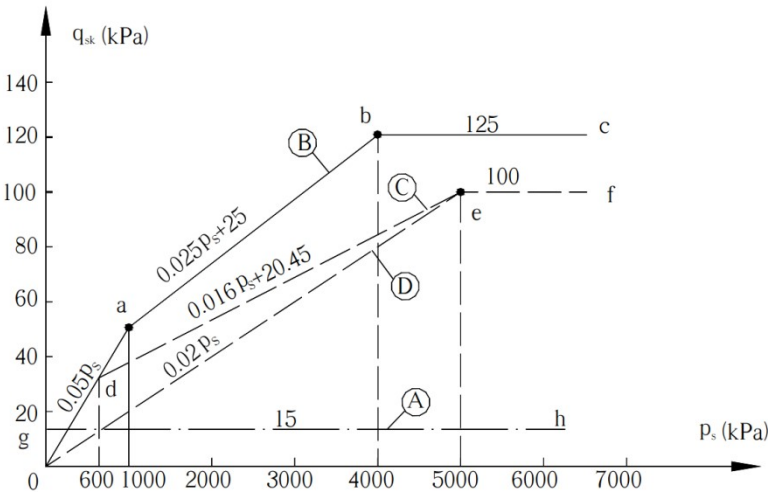
表 5 系数*C*

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）适用于粉土及砂土土层以上（或无粉土及砂土土层地区）的黏性土；折线③（线段odef）适用于粉土及砂土土层以下的黏性土；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，可按下列式计算：

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

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，可按下列公式估算：

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

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

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

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，其标准值可按下式估算：

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

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 12m 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）：

$$\sigma_z + \gamma_m Z \leq f_{az} \dots\dots\dots (18)$$

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

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。

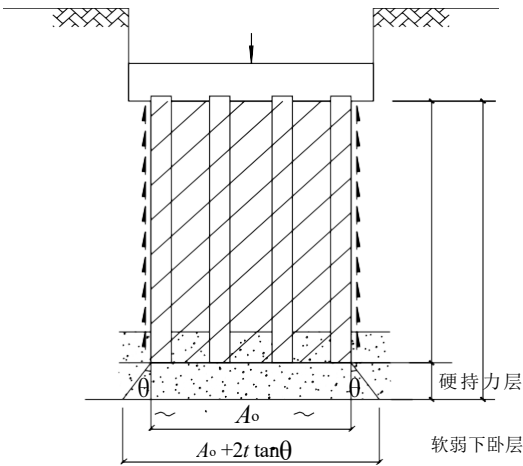


图 3 软弱下卧层承载力验算

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：

$$N_k \leq R_a \quad \text{.....} \quad (20)$$

- 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：

$$N_k + Q_g^n \leq R_a \quad \text{.....} \quad (21)$$

- 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：

$$q_{si}^n = \xi_{ni} \sigma'_{ri} \quad \text{.....} \quad (22)$$

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： $\sigma'_i = p + \sigma'_{ri}$

$$\sigma'_{ri} = \sum_{m=1}^{i-1} \gamma_m \Delta Z_m + \frac{1}{2} \gamma_i \Delta Z_i \quad \text{.....} \quad (23)$$

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：

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

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

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：

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

式中：

u_l ——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：

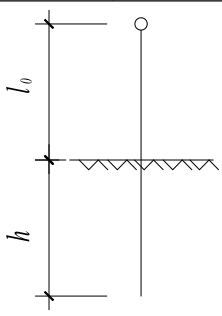
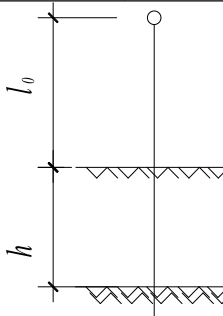
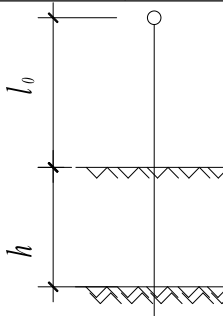
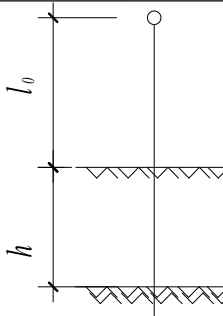
N ——相应于 NB/T 20105 中有地震作用效应参与的荷载组合下的桩顶轴向压力设计值；

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	
$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$	$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$
			
$l_c = 1.0 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.7 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$	$l_c = 0.7 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.7 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$

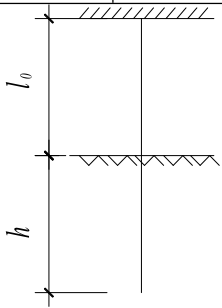
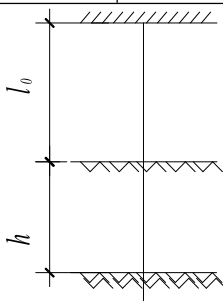
桩顶铰接			
桩顶固接			
桩底支于非岩石土中		桩底嵌入岩石内	
$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$	$h < \frac{4.0}{\alpha}$	$h \geq \frac{4.0}{\alpha}$
			
$l_c = 0.7 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.5 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$	$l_c = 0.5 \times (l_0 + h)$	$l_c = 0.5 \times \left(l_0 + \frac{4.0}{\alpha} \right)$
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 乘以偏心距增大系数 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

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

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

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

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

$$H_{ik} \leq 0.80R_h \tag{1}$$

b) 其他非地震效应组合

$$H_{ik} \leq R_h \tag{2}$$

c) 地震效应组合

$$H_{iEk} \leq 1.25R_h \tag{3}$$

$$H_{iEkmax} \leq 1.5R_h \tag{4}$$

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：

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

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，可按下式公式确定：

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

考虑地震作用且 $S_a/d \leq 6$ 时：

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

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

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

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

其他情况：

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

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

$$B'_C = B_C + 1 \quad (13)$$

$$P_c = \eta_c f_{ak} (A - nA_{ps}) \quad (14)$$

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

土的类型		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：

- 平均沉降量；
- 沉降差；相邻建构筑物沉降量的差值；
- 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

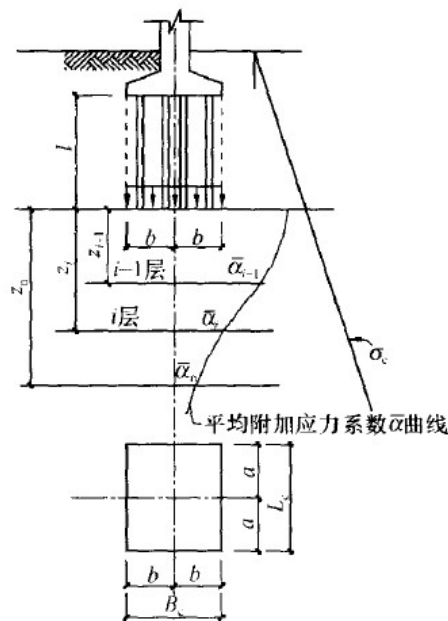


图4 桩基沉降示意图

终沉降量可用角点法按下式计算：

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

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）；

$\bar{a}_{ij}$ 、 $\bar{a}_{(i-1)j}$ ——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，可以按《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，桩基沉降量可按下式简化计算：

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

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，可按下列公式计算: $\bar{E}_s = \sum A_i / \sum \frac{A_i}{E_{si}}$ ，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）：

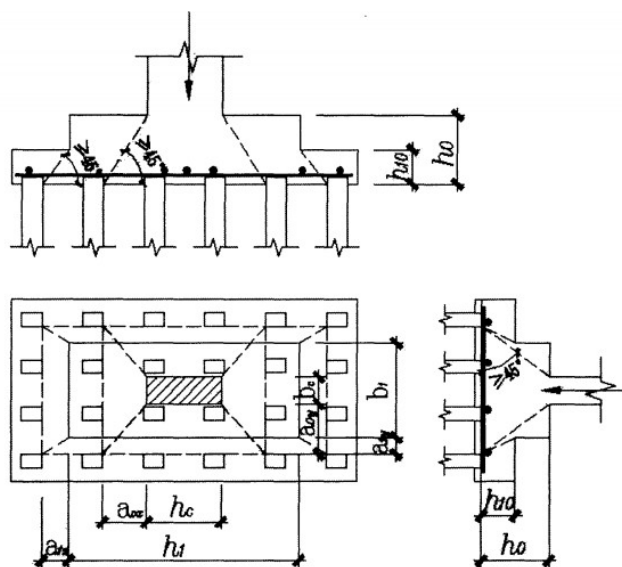


图 5 柱对承台冲切计算示意图

- 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，其余按线性内插法插值；

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) 应按下列公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) 应按下列公式计算受桩群的冲切承载力，如图 6（b）所示：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/966135141122010203>