

国际原子能机构 安全标准

保护人类与环境

核电厂厂址评价和 地基的岩土工程问题

安全导则

第 NS-G-3.6 号



IAEA

国际原子能机构

国际原子能机构安全相关出版物

国际原子能机构（原子能机构）安全标准

根据原子能机构《规约》第三条的规定，原子能机构授权制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的安全标准，并规定适用这些标准。

原子能机构借以制定标准的出版物以**国际原子能机构安全标准丛书**的形式印发。该丛书涵盖核安全、辐射安全、运输安全和废物安全以及一般安全（即涉及上述所有安全领域）。该丛书出版物的分类是**安全基本法则、安全要求和安全导则**。

安全标准按照其涵盖范围编码：核安全（NS）、辐射安全（RS）、运输安全（TS）、废物安全（WS）和一般安全（GS）。

有关原子能机构安全标准计划的信息可访问以下原子能机构因特网网址：

<http://www-ns.iaea.org/standards/>

该网址提供已出版安全标准和安全标准草案的英文文本。也提供以阿拉伯文、中文、法文、俄文和西班牙文印发的安全标准文本、原子能机构安全术语表以及正在制订中的安全标准状况报告。欲求详细信息，请与原子能机构联系（P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria）。

敬请原子能机构安全标准的所有用户将其使用方面的经验（例如作为国家监管、安全评审和培训班课程的基础）通知原子能机构，以确保原子能机构安全标准继续满足用户需求。资料可以通过原子能机构因特网网址提供或按上述地址邮寄或通过电子邮件发至 Official.Mail@iaea.org。

其他安全相关出版物

原子能机构规定适用这些标准，并按照原子能机构《规约》第三条和第八条 C 款之规定，提供和促进有关和平核活动的信息交流并为此目的充任各成员国的居间人。

核活动的安全和防护报告以其他出版物丛书的形式特别是以**安全报告丛书**的形式印发。安全报告提供能够用以支持安全标准的实例和详细方法。原子能机构其他安全相关出版物丛书是**安全标准丛书适用规定、放射学评定报告丛书**和**国际核安全咨询组丛书**。原子能机构还印发放射性事故报告和其他特别出版物。

安全相关出版物还以**技术报告丛书、国际原子能机构技术文件丛书、培训班丛书、国际原子能机构服务丛书**的形式以及作为**实用辐射安全手册和实用辐射技术手册**印发。保安相关出版物则以**国际原子能机构核保安丛书**的形式印发。

核电厂厂址评价和 地基的岩土工程问题

安全标准调查

国际原子能机构欢迎您回复。请访问网址：

<http://www-ns.iaea.org/standards/feedback.htm>

下述国家是国际原子能机构的成员国：

阿富汗	希腊	挪威
阿尔巴尼亚	危地马拉	巴基斯坦
阿尔及利亚	海地	巴拿马
安哥拉	教廷	巴拉圭
阿根廷	洪都拉斯	秘鲁
亚美尼亚	匈牙利	菲律宾
澳大利亚	冰岛	波兰
奥地利	印度	葡萄牙
阿塞拜疆	印度尼西亚	卡塔尔
孟加拉国	伊朗伊斯兰共和国	摩尔多瓦共和国
白俄罗斯	伊拉克	罗马尼亚
比利时	爱尔兰	俄罗斯联邦
贝宁	以色列	沙特阿拉伯
玻利维亚	意大利	塞内加尔
波斯尼亚和黑塞哥维那	牙买加	塞尔维亚和黑山
博茨瓦纳	日本	塞舌尔
巴西	约旦	塞拉利昂
保加利亚	哈萨克斯坦	新加坡
布基纳法索	肯尼亚	斯洛伐克
喀麦隆	大韩民国	斯洛文尼亚
加拿大	科威特	南非
中非共和国	吉尔吉斯斯坦	西班牙
乍得	拉脱维亚	斯里兰卡
智利	黎巴嫩	苏丹
中国	利比里亚	瑞典
哥伦比亚	阿拉伯利比亚民众国	瑞士
哥斯达黎加	列支敦士登	阿拉伯叙利亚共和国
科特迪瓦	立陶宛	塔吉克斯坦
克罗地亚	卢森堡	泰国
古巴	马达加斯加	前南斯拉夫马其顿共和国
塞浦路斯	马来西亚	突尼斯
捷克共和国	马里	土耳其
刚果民主共和国	马耳他	乌干达
丹麦	马绍尔群岛	乌克兰
多米尼加共和国	毛里塔尼亚	阿拉伯联合酋长国
厄瓜多尔	毛里求斯	大不列颠及北爱尔兰联合王国
埃及	墨西哥	坦桑尼亚联合共和国
萨尔瓦多	摩纳哥	美利坚合众国
厄立特里亚	蒙古	乌拉圭
爱沙尼亚	摩洛哥	乌兹别克斯坦
埃塞俄比亚	缅甸	委内瑞拉
芬兰	纳米比亚	越南
法国	荷兰	也门
加蓬	新西兰	赞比亚
格鲁吉亚	尼加拉瓜	津巴布韦
德国	尼日尔	
加纳	尼日利亚	

原子能机构《规约》于1956年10月23日在纽约联合国总部召开的国际原子能机构规约会议上通过，于1957年7月29日生效。原子能机构总部设在维也纳。原子能机构的主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

国际原子能机构安全标准丛书第 NS-G-3.6 号

核电厂厂址评价和 地基的岩土工程问题

安全导则

国际原子能机构
维也纳·2006年

版权说明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受 1952 年（伯尔尼）通过并于 1972 年（巴黎）修订的《万国版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已经扩大了这一版权，以包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能使用原子能机构印刷形式和电子形式出版物中所载全部或部分内容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。询问事宜应通过电子邮件地址 sales.publications@iaea.org 发至原子能机构出版科或按以下地址邮寄：

Sales and Promotion Unit, Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Wagramer Strasse 5
P.O. Box 100
A-1400 Vienna
Austria
传真：+43 1 2600 29302
电话：+43 1 2600 22417
网址：<http://www.iaea.org/books>

© 国际原子能机构 • 2006 年
国际原子能机构印制
2006 年 3 月 • 奥地利

核电厂厂址评价和地基的岩土工程问题

国际原子能机构，奥地利，2006 年 3 月
STI/PUB/1195
ISBN 92-0-501906-2
ISSN 1020-5853

序

总干事

穆罕默德·埃尔巴拉迪

国际原子能机构《规约》授权原子能机构制定旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的的安全标准。原子能机构必须使这些标准适用于其本身的工作，而且各国通过其对核安全和辐射安全的监管规定能够适用这些标准。原子能机构对这样的一整套安全标准定期进行审查并协助实施这些安全标准已经成为全球安全体制的一个关键要素。

在 20 世纪 90 年代中期，原子能机构开始对其安全标准计划进行大检查，包括修改监督委员会的结构和确定旨在更新整套标准的系统方案。已经形成的新标准具有高标准并且反映成员国的最佳实践。在安全标准委员会的协助下，原子能机构正在努力促进全球对其安全标准的认可和使用。

诚然，只有对这些安全标准在实践中加以适当应用，它们才会是有效的。原子能机构的安全服务——其范围包括工程安全、运行安全、辐射安全、运输安全和废物安全，直至监管事项和组织中的安全文化——协助成员国适用安全标准和评价其有效性。这些安全服务能够有助于共享真知灼见，因此，我继续促请所有成员国都能利用这些服务。

监管核安全和辐射安全是一项国家责任。目前，许多成员国已经决定采用原子能机构的安全标准，以便在其国家条例中使用。对于各种国际安全公约缔约国而言，原子能机构的安全标准提供了确保有效履行这些公约所规定之义务的一致和可靠的手段。世界各地的设计者、制造者和营运者也适用这些标准，以加强电力生产、医学、工业、农业、研究和教育领域的核安全和辐射安全。

原子能机构认真对待世界各地用户和监管者正在面临的挑战，这就是确保世界范围内的核材料和辐射源在使用中的高水平安全。必须以安全的方式管理核材料和辐射源的持续利用以造福于全人类，原子能机构安全标准的目的正是要促进实现这一目标。

编者按

如果列入附录，该附录可被视为标准的一个不可分割的组成部分并具有与主文本相同的地位。如果列入附件、脚注和文献目录，它们可被用来为用户提供可能是有用的补充信息或实例。

英文文本系权威性文本。

援引其他组织的标准不应被解释为国际原子能机构认可这些标准。

国际原子能机构安全标准

通过国际标准实现安全

虽然安全是国家的责任，但是国际安全标准和安全方案可以促进协调一致，有助于确保核和辐射相关技术的安全使用，并有利于国际技术合作和贸易。

安全标准也为各国履行其国际义务提供支持。一项一般的国际义务是一国不得从事可对另一国造成损害的活动。在国际安全相关公约中为缔约国规定了更具体的义务。经国际商定的原子能机构安全标准为各国表明其本国正在履行这些义务提供了依据。

原子能机构的标准

原子能机构的安全标准享有原子能机构《规约》确定的地位。该《规约》授权原子能机构制定适合于核和辐射相关设施和活动的安全标准并规定适用这些标准。

安全标准反映了有关保护人类和环境的高水平安全在构成要素方面的国际共识。

这些安全标准以原子能机构安全标准丛书的形式印发，该丛书分以下3类：

安全基本法则

- 阐述防护和安全的目标、概念和原则以及为安全要求提供依据。

安全要求

- 制定为确保当代和未来人类和环境受到保护所必须满足的要求。这些要求用“必须”来表述，并遵循安全基本法则中提出的目标、概念和原则。如果不能满足这些要求，则必须采取措施以达到或恢复必要的安全水平。安全要求使用监管性语言，以便能将其纳入国家法律和条例。

安全导则

- 就如何遵守安全要求提出建议和指导性意见。安全导则中的建议用“应当”来表述。建议采取规定措施或等效的可替代措施。安全导则介绍国际良好实践并且不断反映最佳实践，以帮助用户努力实现高水平安全。每一安全要求出版物均以若干安全导则作为补充，在制定国家监管导则时可以利用这些安全导则。

原子能机构安全标准需要辅以工业标准，并且必须在适当的国家监管基础结构范围内加以实施，以期充分发挥有效作用。原子能机构印发了广泛的技术出版物，目的是帮助各国制订国家标准和发展国家基础结构。

标准的主要用户

除监管机构及政府部门、政府当局和政府机构外，还有以下单位使用这些标准：核工业当局和营运组织；设计、设备制造和应用核与辐射相关技术的组织，包括各种设施的营运组织；医学、工业、农业、研究和教育领域涉及辐射和放射性物质的用户和其他单位；以及工程师、科学家、技术人员和其他专家。原子能机构本身在其安全评审工作中以及为了编制教育和培训课程也要使用这些标准。

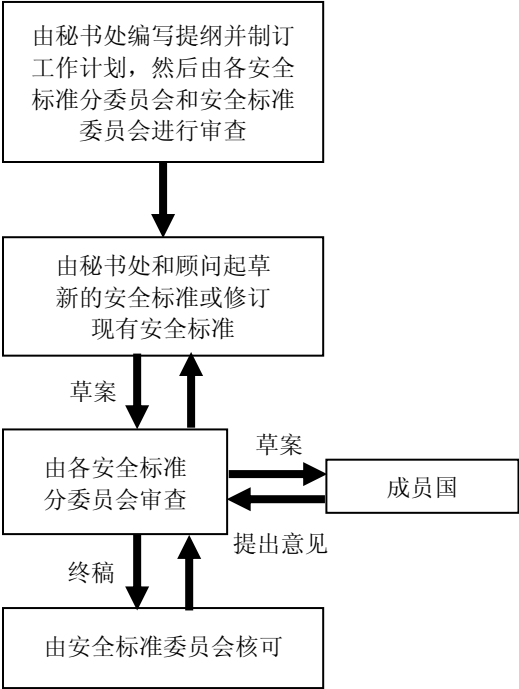
标准的制定过程

编写和审查安全标准的工作涉及原子能机构秘书处及分别负责核安全、辐射安全、放射性废物安全和放射性物质安全运输领域安全的 4 个安全标准委员会（核安全标准委员会、辐射安全标准委员会、废物安全标准委员会和运输安全标准委员会），和 1 个负责监督整个安全标准计划的安全标准委员会。原子能机构所有成员国均可指定专家参加 4 个安全标准委员会的工作，并可就标准草案提出意见。安全标准委员会的成员由总干事任命，并包括负责制订国家标准的政府高级官员。

就安全基本法则和安全要求而言，经安全标准委员会核可的草案须提交原子能机构理事会核准后方可出版。安全导则经总干事核准后出版。

在经历这一过程后，标准已经能够反映出原子能机构成员国的一致意见。在制定标准过程中考虑了联合国原子辐射效应科学委员会的结论和国际专家机构特别是国际放射防护委员会的建议。一些标准的制定是在联合国系统的其他机构或其他专门机构的合作下进行的，这些机构包括联合国粮食及农业组织、国际劳工组织、经合组织核能机构、泛美卫生组织和世界卫生组织。

为了不断更新安全标准，在标准出版 5 年后将对其进行审查，以确定是否有必要进行修订。



新安全标准的制定或现有安全标准的修订程序。

标准的适用和范围

原子能机构《规约》规定原子能机构在实施本身的工作方面安全标准对其有约束力，并且在实施由原子能机构援助的工作方面安全标准对国家有约束力。任何希望与原子能机构缔结有关任何形式的原子能机构援助协定的国家均须遵守安全标准中与协定所涵盖活动有关的要求。

国际公约中也载有与安全标准中所载相类似的要求，这些要求对缔约国有约束力。安全基本法则已被作为制定《核安全公约》和《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》的基础。《核或放射紧急情况准备和响应的安全要求》反映了各国按照《及早通报核事故公约》和《核事故或辐射紧急情况援助公约》应承担的义务。

纳入国家法律和条例并由国际公约和详细的国家要求作为补充的安全标准为保护人类和环境奠定了基础。然而，也将有一些需要在国家一级逐案加以评定的特殊安全问题。例如，有许多安全标准特别是那些涉及安全规划或设计的安全标准意在主要适用于新设施和新活动。原子能机构安全标准中所规定的要求和建议在按照早期标准建造的设施中可能没有得到充分满足。对这类设施如何适用安全标准应由各国自己作出决定。

文本的解释

安全标准在确定国际达成共识的要求、责任和义务时采用“必须”这一表述形式。许多要求并不针对某一特定方，但表明适当的一方或多方应当负责履行这些安全要求。建议则采用“应当”来表述，它表明这样一种国际共识，即为了遵守这些要求，有必要采取所建议的措施（或等效的可替代措施）。

将按照原子能机构《安全术语表》中所述对安全相关术语进行解释（<http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>）。在其他情况下，则采用最新版《简明牛津词典》中赋予明确拼写和意义的词语。就安全导则而言，英文文本系权威性文本。

安全标准丛中每一标准的背景和范畴及其目的、范围和结构均在每一出版物第 1 节的引言中加以说明。

在主文本中没有适当位置的资料（例如对正文起辅助作用或独立于正文的资料；为支持主文本中的陈述而列入的资料；或叙述计算方法、实验程序或限值和条件的资料）以附录或附件的形式列出。

如列有附录，该附录被视为标准一个不可分割的组成部分。附录中所列资料具有与主文本相同的地位，而且原子能机构承认其作者身份。主文本中如列有附件和脚注，这些附件和脚注则被用来提供实例或补充信息或解释。附件不是主文本不可分割的组成部分。原子能机构发表的附件资料并不一定以作者身份印发；在标准中发表的列于其他作者名下的资料可以附件形式列出。必要时将摘录和改编附件中所列外来资料，以使其更具通用性。

目 录

1. 引言	1
背景 (1.1~1.2)	1
目的 (1.3)	1
范围 (1.4~1.8)	1
结构 (1.9)	2
2. 厂址调查	3
调查大纲 (2.1~2.24)	3
数据来源 (2.25~2.34)	9
对复杂地下条件的调查 (2.35~2.47)	13
3. 厂址研究	17
厂址分类 (3.1~3.2)	17
岩土工程剖面参数 (3.3~3.5)	17
自由场地震反应和厂址特定反应谱 (3.6~3.14)	18
液化势 (3.15~3.25)	20
4. 对地基的考虑	24
地基工程 (4.1~4.8)	24
基土-结构相互作用 (4.9~4.26)	27
稳定性 (4.27~4.42)	31
沉降和隆起 (4.43~4.49)	34
诱发振动的影响 (4.50)	35
5. 土建结构	35
一般概念 (5.1)	35
自然斜坡 (5.2~5.6)	36
堤坝 (5.7~5.12)	36
海堤、防波堤和护坡 (5.13~5.16)	37
6. 埋置结构	38
挡墙 (6.1~6.6)	38
嵌入结构 (6.7~6.11)	39

埋设管道、导管和隧道（6.12~6.24）	40
7. 岩土工程参数的监测	42
监测岩土工程参数的目的（7.1~7.2）	42
监测的细则（7.3~7.7）	42
监测装置（7.8）	43
参考文献	45
参与起草和审定的人员	46
安全标准核可机构	47

1. 引言

背景

1.1. 本安全导则是对出版物安全要求《核设施厂址评价》的补充，是在国际原子能机构关于制定与陆上核设施有关的安全要求和安全导则计划下颁布的。

1.2. 本安全导则取代 1986 年颁布的《核电厂的地基安全问题》(No.50-SG-S8)。本修订本主要根据岩土工程技术发展和经验反馈对技术内容进行了更新，并调整了原文结构。在修订过程中，决定添加土建结构的内容，这部分内容以前在安全丛书《核电厂地震设计与评定》(No.50-SG-D15)中讨论过，该出版物现已被参考文献[1]取代。

目的

1.3. 本安全导则的目的是为处理对于核电厂安全至关重要的岩土工程技术问题提供指导。由于地震问题对核电厂安全也有重要影响，因此，本出版物在若干场合参照了确定地震输入运动的安全标准丛书《核电厂地震危险评价》(No.NS-G-3.3[2])。本安全导则对安全要求《核设施厂址评价》[3]做出解释，并就如何执行这些要求提供指导。本导则拟供参与许可证审批过程的安全评定人员或监管人员以及核电厂设计人员使用，并在分析方法和程序方面为他们提供指导，以帮助评定影响核电厂安全的岩土工程问题。

范围

1.4. 在选择核设施新厂址的过程中，需要考虑参考文献[3]中确定的一系列参数。这些参数通常发挥显著作用，最终选定的厂址在岩土工程条件方面很少是理想的（实际上，仅仅因为岩土工程的条件非常恶劣就可能导致

一个厂址落选)。因此,本安全导则为处理现实中可能面对的复杂的岩土工程条件提供指导。

1.5. 本安全导则论述了地下条件的岩土工程技术问题,而不是地质问题,除非地质问题直接影响到地基系统。本导则还论述了为正确认识地下条件而应当执行的调查大纲,它对于决定地下条件是否适合于建造核电厂是必要的。本导则还描述了岩土工程剖面及适合用于核电厂设计所需的岩土工程分析的参数。本导则还论述了在厂区的岩土工程参数的监测。

1.6. 本导则论述了适合于厂址安全评定,尤其是评定地震对厂址影响的分析方法,包括确定厂址特有反应谱和估计液化势。本安全导则还论述了适合于基土与结构之间的静态和动态相互作用影响的安全评价的分析方法,以及承载力与沉降后果的分析方法。参考文献[1]中更加详细地描述了基土-结构相互作用的分析方法。本安全导则仅提及厂址依赖性资料和分析方法。

1.7. 本安全导则论述了地基工程,包括岩土工程剖面和参数的后果,对地基材料的可能改良以及根据基土性能正确地选择地基系统。

1.8. 本导则还论述了土建结构,包括天然斜坡和埋置结构,因为可能需要评价它们的安全性。本安全导则还论述了分析这些结构在静荷载和动荷载下的行为的正确方法。

结 构

1.9. 本导则第 2 节涉及调查大纲,提到该大纲的不同阶段和数据来源,其中一小节专门论述针对复杂地下条件的调查。第 3 节涉及一切建造开始之前的厂址评价和相关分析方法,有小节专门论述软硬厂址特征、描述基土剖面机械特性的相关参数、自由场地震反应谱、厂址特有反应谱和液化势分析。第 4 节集中于与地基有关的考虑,即在施工建造中对被改变厂址的考虑。首先提及的是地基工程,然后是基土-结构相互作用和它们对稳定性和沉降的影响。第 5 节和第 6 节涉及特殊结构。第 5 节涉及土建结构,

有小节论述天然斜坡、堤坝、筑堤、开挖和回填、护坡以及类似结构。第6节涉及广泛意义上的埋置结构，有小节论述挡墙、嵌入结构、埋设管道和隧道；第7节涉及对岩土工程参数的监测。

2. 厂址调查

调查大纲

2.1. 核电厂厂址地下条件调查对厂址评价过程中的各个阶段都是重要的。调查目的是为确定地下物质的性质和适宜性提供资料和基本数据。在厂址评价的各个阶段，调查大纲都应当为正确描述地下特性提供必须的数据。在后面的各阶段中，应当进行详细的地下调查。每个阶段的具体要求都有很大区别。

2.2. 调查大纲应当满足厂址评价过程中各个阶段的要求。对核电厂而言，厂址评价通常包括以下阶段：

- 选址阶段。通过一个大区域调查，否定不适宜厂址，筛选和比较剩下的厂址，从而挑选出一个或多个优先候选厂址。
- 特征描述阶段。本阶段又进一步分为两步骤：
 - 核实，主要根据预先确定的厂址排除准则来核实作为核电厂厂址的适宜性；
 - 验证，为分析目的和详细设计确认所需要的厂址特征。
- 运行前阶段。在核电厂开始建造之后和开始运行之前继续在前面各阶段进行调查研究，以完成和完善对厂址特征的评价。利用获得的厂址数据来最后评价在最终设计中使用的模拟模型。
- 运行阶段。在核电厂寿期内继续进行选定的调查。

2.3. 由于各个阶段的调查大纲不同，因此数据要求大不相同。一般而言，所需的数据将提供用于安全评价或分析的地质和工程相关资料。这些数据可分成以下几类：

- 地质资料（地层和构造）；
- 地下物质的范围和性质描述；
- 土和岩石的特征（在性质方面）描述；
- 地下水资料（地下水体系，水文单元的位置和特征，水的物理化学特性）。

2.4. 应适当地将本节中所描述的有关特定厂址条件（土或岩石）、厂址评价过程和所需的核实分析方面的调查结果形成文件。

2.5. 调查中所用到的各种方法，即利用当前和历史纪录，地球物理和岩土工程现场勘探原位试验和实验室试验，均适用于厂址评价过程中的各个阶段，但适用范围不同。本节表明在预期荷载条件下（静荷载和动荷载）就地下物质和土方工程的性能进行厂址评价所需的调查水平。

选址阶段

2.6. 在厂址选择阶段的调查目的是确定厂址的适宜性。在这个阶段将考虑地质、地貌和岩土工程方面的情况，并且通常鉴定不被进一步考虑的区域或地区。本阶段所调查的地下物质的资料通常从当前和历史文件以及借助包括地质和地形勘查在内的现场踏勘来获得，并用于以下的评价中：

- 不可接受的地下条件。那些具有可能影响核电厂安全并无法通过岩土工程处理而被改良或通过建设措施得以补偿的地质条件的厂址是不可接受的。应当鉴定并评价例如地表断裂（见参考文献[3]“在厂区的潜在地表断裂”）、火山活动、塌方、永久冻土带、侵蚀过程、地面沉降和由于地下空穴（自然的和人为活动引起的）造成的塌陷或其他原因引起的地质灾害。调查地区应当合乎所考虑的危害。
- 厂址分类。对一个厂址的地下条件的了解可来自地质和岩土工程资料。厂址可分为岩石厂址、软岩或硬土厂址、软土厂址或上述组合的厂址，还可以按照第 3 节中的规定进行分类。土类型被进一步分为非粘性土和粘性土。但这种粗略的分类可能不适于某些

厂址。例如，第四纪岩层可能呈现出岩石与粘土的复杂分界面，对这些岩石和粘土应当仔细调查和监测。

- 地下水体系。水文地质资料可以帮助估计地下水的位置和体系。（见参考文献[4]）。
- 地基条件。可以确定基土类型、基岩深度和矿藏性质，这有助于初步挑选可接受的岩层类型。

2.7. 在上述地下条件资料的基础上，可根据地基的适宜性排列可能厂址或候选厂址。在这个阶段，应当就地质灾害、地震放大影响、液化势、承载力、可能的沉降和隆起、基土-结构相互作用以及地下水条件做出推论。本阶段之后，在进一步考虑岩土工程条件的基础上选择厂址。

核实阶段

2.8. 在核实阶段，假设已经确定了总平面布置和建筑物荷载，那么在评价中应当考虑以下因素，以应对正常条件和极端条件，例如地震和洪水条件：

- 地质灾害；
- 地质和地下条件；
- 液化势；
- 可行的地基类型；
- 初步承载力和其他地基稳定性因素；
- 初步沉降范围；
- 地下水水位和体系；
- 厂址早先的使用；
- 厂址准备要求。

本阶段，调查大纲应当涵盖整个厂址并且考虑适合于平面布置的较小范围。

2.9. 应当注意下列厂址调查技术和相关要点：

- 旋转钻孔。用这种钻孔方法取全岩心样品以明确厂址的总体条件。这种方法通常包括沿着两条正交线布置钻孔，并在交叉点布置一个通用钻孔；除了采取岩心或其他样品进行岩石或土的性能鉴定和实验室试验以外，钻孔还可用来安装仪器以进行长期现场试验，包括监测地下水体系的仪器。应当调查钻孔对饮用水系的潜在影响[4]。如果需要，应当借助试坑和探洞直接调查地下条件。
- 现场试验。根据地下条件，应当进行各种样品的原位试验以测定地基材料的力学性能。这些试验还应当包括各种原位荷载试验和地下水的压水试验。
- 地震折射和反射勘探。应当进行地震折射和反射勘探，为评价地下条件提供连续的横向和纵向资料。对勘探结果的解释可以提供地层和构造地质方面的资料，地下水位的资料并预测厂址波速。钻孔可为勘探提供竖向的地层资料。
- 实验室试验。应当进行一定的岩石和土样的包括指标和分类的实验室试验。如果在钻探中取到粘土样品，应当对未受扰动的样品进行固结和剪切强度试验，以估计土的强度和沉降。

2.10. 在厂址调查中，应当特别注意鉴定不符合要求的地下特征，例如洞穴地带、膨胀性岩石和页岩、气槽的出现、晶体岩中的软弱或不连续带，以及不稳定的地面下的地层所预示的潜在滑动面。

验证阶段

2.11. 厂址验证阶段的目的是验证前面各阶段所得出的结论。应当采用方格网钻探方案或适合于厂址和所考虑的布置的备选钻探方案在厂址上进行地下勘探和实验室试验大纲。方格网的间距可根据地下特征的几何形状而改变。特别是，具有相对均匀的基土条件的厂址可以采用一致的方格网。在出现不同和不连续的土的条件下，通常勘探中的钻孔间距应当小到足以进行特征探测和适当的评价。应当考虑钻探对地下水体系甚至饮用水的后果。

2.12. 作为最低限度要求，应当考虑潜在洞穴的指示物和地面塌陷的敏感现象：

- 沉降、沉降成的池塘、洞穴和洞窟；
- 潜流；
- 历史的地面沉降；
- 矿山和有关活动的痕迹；
- 天然桥；
- 地表下沉；
- 泉；
- 岩石类型，例如石灰石、白云石、石膏、硬石膏、岩盐、石灰石风化而成的红土、熔岩（蛇绿岩）、松散粘合在一起的碎屑状岩石、煤矿和矿物；
- 可溶岩中的不均匀性。

2.13. 在这个阶段，了解初步的电厂特性，例如荷载、厂房实际尺寸、初步的结构工程标准以及首选的电厂平面图，并根据初步的电厂特性和上一个阶段所明确的岩土工程问题来计划原位试验和实验室试验大纲的内容。

2.14. 所需的钻孔深度将基于不同的厂址条件而变化，但其深度应当足以全面描述影响建筑物的地址条件，并确认先前调查所确定的土和岩石条件。如果土层很厚，为了评价厂址深处可能存在的不稳定性，出于工程考虑，最小钻孔深度应当小于下列两个值：（i）建造过程中或建造完成后，垂直应力的变化小于原位有效超载应力的 10%；或（ii）一个基础直径的深度。

2.15. 如果厂址是岩石厂址，或者如果在未到前面确定的深度就遇到了坚硬的岩石，那么应当一直向下钻探直到达到不连续性或软弱或改变地带可能影响地基稳定性的最大深度。如果是风化页岩或软岩厂址，那么钻孔深度应当与土厂址上的钻孔深度一致。

2.16. 在这个阶段，如果需要，应当进行充分的原位和实验室试验，以估测其承载能力，判断建筑物沉降量和厂区的地震波放大作用，建立基土-结构相互作用参数（动态的和静态的），评价液化势以及厂址特有设计反应谱。除了以上描述的钻孔大纲外，在调查大纲中可能还需要进行几次钻孔，

以建立研究动态土-岩石结构相互作用的土模型。为研究厂区地震波放大作用所需的钻孔，可能需要深于一般岩土工程设计目的所需的钻孔深度。

2.17. 如果认为有必要对厂址地下条件进行改良，那么改良工作应当在本阶段进行，并通过原位试验来确认有效性。

2.18. 本阶段应当进行初步分析，内容包括静态稳定性、对动力荷载的反应、液化势和斜坡稳定性以及堤和坝。应当在现场勘探和实验室试验数据的基础上进行分析。

2.19. 在详细的岩土工程报告中，本阶段的调查成果通常兼容以前各阶段工作得到的基础数据。该报告应当包括以下各项：

- 地质图和剖面图；
- 对地质因素和厂址地质的描述；
- 勘探大纲和基本问题；
- 钻孔位置平面图和横截面；
- 钻探记录和测井记录；
- 原位试验结果；
- 实验室试验成果；
- 地球物理勘探结果；
- 分析描述和结果；
- 地下水体系和地下水物理化学性质的详细描述。

2.20. 厂址核实阶段的结果应当为确立广泛的设计参数以及与厂址及其特性有关的结论提供必要的资料。核实阶段应当与厂址上厂房的最终布置相一致。任何所需的岩土工程方面的进一步信息都将与个别厂房、建筑物和辅助设施直接相关。

2.21. 当建筑物、构筑物 and 辅助设施的最终平面布置已知时，应当区分与安全有关和与安全无关的构筑物。与安全无关的构筑物的地下勘探和试验大纲应当参照标准实践进行。一般而言，每一个与安全相关的构筑物的地

点都应当至少有一个钻孔。在条件变化的地点，钻孔间距选择应当以能查明土和岩石性能的变化为准。

运行前阶段

2.22. 在核电厂建造开始之后至到运行开始之前，应当继续调查，以便结合地基开挖和建造中最新获得的岩土工程数据完善厂址特性评定。应当仔细观察露地表的地下物质并绘成图，以将它们与设计的条件进行比较来确定设计方案。如果必要，可通过基坑开挖补充进行原位试验。

2.23. 可利用由于结构物荷载所造成的沉降和变形方面的实际性能数据来核实预测的地基行为。由于建造序列通常很长，应当利用这些实际性能方面的数据修订沉降模型和土特性。

运行阶段

2.24. 在核电厂运行期间，应当测量构筑物沉降和其他一些参数，例如水位，并与预测值进行对比以更新厂址安全评价。选择测定的参数、要收集的记录类型、测量间隔以及运行期间几乎所有的厂址评价活动都应当描述在维护大纲中。第 7 节也对本阶段进行了论述。

数据来源

2.25. 调查的目的是为可靠地确定地下物质的特性和适宜性提供资料或基础数据。这些数据来源包括：

- 历史和当前的文件；
- 现场勘探；
- 实验室试验。

历史和当前的文件

2.26. 调查的目的是了解相关地区的整体地质条件，可通过实地踏勘以及考察可利用的历史和当前文件，例如：

- 地形图；
- 地质图和工程地质图；
- 基土分布图；
- 地质报告和其他地质文献资料；
- 地球物理图；
- 岩土工程报告和其他岩土工程文献资料；
- 卫星影像和航空摄影；
- 水井报告和供水报告；
- 油井和气井记录；
- 水文地质图、水文和潮汐数据、洪水记录、气候和降雨量记录；
- 采矿历史、已有的采矿计划和沉降记录；
- 地震资料和历史地震记录；
- 塌方、洪水、地震、沉降和其他重要地质事件的当代报道；
- 邻近地区结构物的行为记录。

2.27. 应当考虑其他可能的资料来源，例如个体观察员、大学和学院的地质和工程系、政府地质调查和工程主管部门、其他人在厂址附近所作的工作以及运行期间在采矿场的观察资料。

现场勘探

2.28. 依据调查的范围区分地球物理试验和岩土工程试验，这两种试验都应当进行。

2.29. 地球物理试验提供能够由试验结果分析推导的数据或资料，但仅仅是在弹性变形方面。这些方法通常在深度和地表面积方面覆盖很大的范围，但仅能提供满足厂址评价目的粗略估计的参数，例如地层厚度和它们的力学性能参数。按照这些条件下最好的实践并考虑地下条件，勘察工作应当采用表 1 中所示的部分或全部技术。

2.30. 岩土工程方法涉及近场区（到达的深度至少是反应堆厂房基础的直径），采用多种不同技术，包括钻孔或直接在地面上的工作。应当根据地下条件适当进行表 2 中所列出的试验。

表 1. 土和岩石样品的地球物理调查技术

试验类型	参数测定	问题类型	观测
地震折射/反射	变形时间传播	厂址分类	地表调查
跨孔地震试验	动弹性性能	厂址分类、基土-结构相互作用	深层调查：一个孔激发，一个孔接受
孔口/孔下地震试验	动弹性性能	厂址分类、基土-结构相互作用	深层调查：一个孔既激发也接受
Nakamura 方法	低水平（环境噪音）震动	厂址分类、基土-结构相互作用	
电阻率	流体层容量	内部侵蚀	有效的地表或深层调查
核测井	含水量、密度		需要昂贵的测井技术
微重力测定	重力造成的加速度	渗穴，不均匀性	复杂的地下条件
地质雷达	传播速度	洞穴	复杂的地下条件
磁技术	磁场强度	潮湿地区	堤坝的维护

表 2. 土和岩石样品岩土工程调查使用的技术

试验类型	材料类型	参数测定	问题类型	备注
扁千斤顶试验	岩石	原位正常应力	可变形性、集中	具有很强的时间依赖性性能岩石的可疑结果
水压断裂试验	岩石	原位应力状态	可变形性、集中	受抗拉强度的各向异性影响
直接剪力试验	岩石	剪切强度	稳定性问题	通常需要大量统计控制试验
金属板荷载试验	粘土、沙子、砂砾、岩石	反力模量	击实控制、沉降	用于开挖和筑堤
压力计试验	粘土、沙子、砂砾、岩石	弹性模量、可压缩性	沉降、承载力	需要一个预备孔
静态贯入仪试验	粘土、沙子、砂砾	锥体阻力、不排水粘聚力、剪切强度	沉降、承载力	包括锥形贯入仪试验
动态贯入仪试验	粘土、沙子、砂砾	锥体阻力、相对密度	液化	包括标准贯入试验
叶片剪切试验	软粘土	剪切强度	承载力、斜坡稳定性	不适合于有一定量的砂砾和贝壳的淤泥、沙子或土
抽水试验	粘土、沙子、砂砾	现场渗透性	土渗透率	需要压力计

实验室试验

2.31. 应当对由直接勘探方法获得的样品进行实验室试验。良好的未扰动样品的复原对实验室试验的全面成功是非常重要的。样品采集后的处理对样品质量而言就像采集它们的过程一样关键。装卸、现场贮存和运输到实验室都应当格外小心。取样工作应当利用坑、沟或洞穴和孔内作业的方法进行。在某些环境下，可能需要冻结“非粘性”土以获得未扰动的样品。

2.32. 实验室试验的目的是补充并确认原位试验数据，以便在整个预期应变范围内，充分和正确地描述厂区的土和岩石的特性。例如土的材料阻尼比率及其他大的应变的力学特性是不容易由原位试验得到的。厂址调查各个阶段和相关的野外和实验室试验应当仔细地规划和执行，这样才能及时真实地评定土和岩石的性能。

2.33. 试验大纲应当对土和岩石的样品进行鉴别和分类。它们的物理性能和工程特性应当由出版的资料或通过测量获得。实验室试验应当针对表 3 中所列出的目的。

2.34. 用于设计剖面的厂址特性参数应当由原位和实验室试验成果导出。应当对原位试验成果与实验室试验成果之间的任何差异予以调查和统一。

对复杂地下条件的调查

2.35. 核电厂厂址调查大纲应当包括研究潜在的复杂地下条件。厂区遇到的这些条件可能对核电厂地基的整体性具有严重影响。复杂地下条件包括可能导致坍塌的潜在的天然或人为的地下洞穴。还应当考虑其他地下条件，例如可能对管道系统和渗出物等造成其他类型有害影响的渗穴和离缝。

表 3. 土和岩石样品的实验室调查技术

特性调查	土类型	试验	参数测量	目的
土指标和分类	粘土	阿太堡限值	含水量(通过流动性和塑性指数)	压缩性和塑性
土的物理和化学性能	所有类型	Dietrich-Frühling 仪器	碳酸盐和硫酸盐	土分类
地下水的物理化学性能	所有类型		含盐量	对渗透性的影响
土的水分-密度关系	所有类型	代理试验、 γ 测量、ASTM ^a 试验(相对密度)	潮湿和干燥密度、含水量、饱和度、相对密度	沉降、固结、承载能力
固结和渗透性特性	所有类型	固结仪	固结测定、杨氏模量、固结系数	沉降、固结
土的剪切强度和变形能力	所有类型	剪切试验箱、三轴压力试验	杨氏模量、排水和未排水条件下的泊桑比粘聚力和摩擦角度	沉降、承载力
岩石的力学性能	岩石	剪切试验、二轴或三轴压缩试验	杨氏模量和泊桑比	稳定性、加固
土的动力特性	所有类型	循环三轴试验、共振柱试验	动态杨氏模量、泊桑比、内阻尼、孔隙压力	厂址分类、基土-结构相互作用、液化

^a ASTM 国际组织是原来的美国试验和材料学会 (ASTM)。

2.36. 对勘探、试验和分析的要求可能依地下条件而变化，很难具体规定包括所有异常地下条件的调查大纲。但复杂地下条件调查大纲的基本内容应当包括预测、探测、评价和处理。

复杂地下条件的预测

2.37. 对可能导致潜在地面塌陷和不连续的岩土工程行为的洞穴和地下不连续性的存在的预测应当作为重要的一步来进行。部分地面之下的构造由于溶解过程或喀斯特现象的结果可能造成地面塌陷。

2.38. 正确评价和了解区域和厂址地质条件可提供表明地面塌陷的可能性。可溶岩通常也是一种沉积岩，它们略溶于水或弱酸性溶液（包括碳酸盐型溶液，主要是石灰石和白云岩）或蒸发（岩盐、石膏、硬石膏是最常见的）。洞穴或地下溶解的大小由地质和环境因素决定。地质因素包括潜在的暗河、地层层序、岩石类型特征和岩体特性。环境因素包括地表水文学和地下水文、气候以及气候变化。

地下洞穴探测

2.39. 厂区地下勘探大纲应当规定地下洞穴探测，并且应当考虑评价洞穴的范围。在勘探大纲的所有方面，都应当考虑对地面塌陷敏感地区探测的可能性。厂址勘探的常规方法都可适用，包括水压试验、遥感、钻探、取样、开挖、钻孔测井和地球物理测量。应当采用厂址调查的标准方法来考虑由地下洞穴系统造成的可能的复杂性。

2.40. 如果怀疑厂区存在地下洞穴，那么定位洞穴的最初地下勘探大纲可以基于概率论方法，例如最适宜的探查理论。

2.41. 一些地球物理方法在用于地下洞穴探测的踏勘模式中是有用的，但它不能描绘出洞穴的深度、大小或几何条件。这些方法包括地表电阻率分布、微重力测定、地震折射测量、地震的扇形爆破和地下探测雷达方法。

2.42. 可用作高清晰度探测技术以确定地下洞穴的深度、大小和几何条件的地球物理方法，包括跨孔地震勘探、跨孔雷达法、电阻勘探、与一个地

下源的声波共振、微重力测定、地震折射、高清晰度地震反射和地下探测雷达法。其中一些技术可与激光断层摄影技术联合应用。

2.43. 地球物理方法应当被小心使用并且通常应当与可提高其效率的钻探和取样技术联合使用。为探测和确定地下洞穴的勘探大纲的结果应当被绘制成图，并以此明示洞穴以及它们与厂址结构的相互关系。

2.44. 但是要探测和描绘厂址上每个可能存在的洞穴或溶蚀特性是不可能的或切实可行的。因此，应当根据可能未被发现的最大洞穴对重要结构的性能的影响，对这种洞穴做出决定。

复杂地下条件的评价和处理

2.45. 对核电厂的地基安全而言，最大的危险来自于在建筑物地基下存在浅层（相对于大小）的被填满的或空的和充满溶液的洞穴。应当评价天然填充物的可压缩性和侵蚀的可能性，以确定他们对承载力、沉降和将来随着地下水体系的可能变化而导致的侵蚀的影响。

2.46. 应当考虑低于地基水平面的天然洞穴的稳定性。洞穴大小、深度、节理型式、节理条件、岩石类型和洞穴上的层面角度，都是影响顶板稳定性和考虑的深度的主要因素。由于结构荷载带来的垂直压力的增加可能造成洞顶的不稳定性。应当避免采用地下可能是一个庞大而复杂的洞穴系统的厂址，因为实际评价这种洞穴系统可能是非常困难的。在一个洞穴大小和几何形状能被可靠地确定的地区，可利用有限元分析法等分析技术来评价洞穴的稳定性。

2.47. 对于一些地基水平下存在复杂地下条件的厂址而言，稳定性评价的结果可以表明需要进行地下处理以确保建筑物的安全性。第 4 节考虑了对改良具有复杂地下条件的地基条件的一般要求。

3. 厂址研究

厂址分类

3.1. 为地震反应分析目的，采用以下厂址分类：

- 1 类型厂址： $V_s > 1100 \text{ m/s}$ ；
- 2 类型厂址： $1100 \text{ m/s} > V_s > 300 \text{ m/s}$ ；
- 3 类型厂址： $300 \text{ m/s} > V_s$ ；

其中， V_s 是直接位于建筑物地基水平下的地基介质在自然条件下（即所有的厂址工作开始之前）对很小应变的最佳估计剪切波速。假如剪切波速不随深度的增加而显著降低，那么厂址分类就是有效的；除了这种情况，应当根据最佳实践进行具体分析。

3.2. 如果上述提到的厂址分类无效，则应当进行基土调查以确定厂址的基土类型，或为进一步分析提供全面的数据。

岩土工程剖面参数

3.3. 应当为进行核电厂建设所必需的岩土工程评价确定一套参数。产生的这套参数和数据被称为剖面。该剖面可定义为地下物质的几何和力学描述，在这种描述中，以直接适用于后续分析的方式确定和描述地基物质特性的最佳估计和变化范围。剖面包括：

- (1) 几何描述，诸如地下地层描述、横向和纵向范围、分层数和层厚；
- (2) 土和岩石的物理和化学性质以及分类指标；
- (3) 原位试验和实验室试验中得到的 S 和 P 波速、应力-应变关系、静态和动态强度特性、固结和渗透性及其他力学性质；
- (4) 地下水位特性、水位设计标高和最大可能的洪水及其它条件引起的最高水位。

3.4. 为获得相关地下物质特性的资料和帮助定义地下模型，作为实施现场勘探和实验室试验大纲的结果，可获得许多岩土工程参数的值。这样，应当根据可利用的资料，挑选一套有代表性的、最适合用于岩土工程分析模型的参数。在这些分析中，应当通过参数研究来确定岩土工程参数中的不确定性对分析结果的可变性的影响。

3.5. 尽管从概念上讲，剖面是一个特定厂址特有的，但应当针对不同目的采取不同的相关设计剖面，以便在分析中考虑不同的假设。在其他节中介绍设计剖面的以下评估：

- 厂址特定反应谱；
- 液化势；
- 地基应力；
- 地基稳定性；
- 基土-结构相互作用；
- 沉降和隆起；
- 土结构的稳定性；
- 土压力和埋置结构的变形。

自由场地震反应和厂址特定反应谱

3.6. 为本安全导则的目的，应当考虑的地震输入水平为 SL-2 级¹，正如安全要求出版物《核设施厂址评价》[3]中所定义的，安全导则《核电厂地震危险评价》[2]中所具体规定的，以及根据参考文献[2]第 5 节所确定的。

¹ 地震水平 1 和地震水平 2 (SL-1 和 SL-2) 是设施设计基准中考虑的地面运动水平（代表地震的潜在影响）。SL-1 对应的是没有 SL-2 严重、但却有更高可能性的地震。在一些国家，SL-1 对应的是超越年概率为 10^{-2} 的水平，SL-2 对应的是超越年概率为 10^{-4} 的水平。

3.7. 应当对除 1 类型厂址（见第 3.1 段）以外的厂址进行自由场条件下的厂址反应计算。厂址反应计算可能是沉降或液化评价和基土-结构相互作用分析所需要的。另外，研究特定厂址反应谱也需要进行厂址反应计算。为进行该计算，应当收集下列数据：

- 输入地面运动（利用参考文献[2]中所描述的程序导出）；
- 一个合适的厂址模型，其根据是：
 - 土层的几何描述；
 - 各地层的 S 波和 P 波的速度；
 - 各土层的相对密度；
 - 描述各土层剪切模量 G 和土的固有阻尼比 η 随着剪应变 γ 明显下降的 $G-\gamma$ 与 $\eta-\gamma$ 曲线；
- 对那些波速随着深度平稳增加的深层土沉积而言，上述参数随着深度而改变。

3.8. 根据工程实践，输入地面运动可以是厂址上或一个坚硬的裸露岩层上的地面运动的代表。对于 3 类型厂址而言，应当提供一个邻近的坚硬裸露岩层（1 类厂址）上的输入地面运动；或者如果这样不可能，应当提供一个相邻的僵硬土裸露层（2 类厂址）上的输入地面运动；或者如果这样还是不可能，则应当提供适当地下水平的输入地面运动。

3.9. 在地表水平的输入地面运动的情况下，应当对自由场条件中的输入运动进行反褶积计算，作为对除 1 类型厂址（见第 3.1 段）外的其他厂址进行的统一基土-结构相互作用分析的初期阶段。应当通过参数研究仔细证明输入地面运动的大的折减是正当的。在地基水平上使用地表水平上提供的输入地面运动来代替反褶积输入运动是一种保守的实践，并且是可接受的。

3.10. 如果没有以一种适合于岩土工程研究的形式提供输入地面运动，那么应当确定适当的输入地面运动。应当根据地震强度、震级、震中距、最大加速度、持续时间、频率成分和其他参数来选择输入运动。

3.11. 为了计算厂址反应，下列模型是可接受的：

- 位于黏弹性半空间地层中的黏弹性土系统；

- 水平分层系统；
- 通过固有阻尼分散能量的物质；
- 垂直传播的体波（剪切波和压缩波）。

可以通过等效线性方法使非线性效应接近。土构成关系的等效线性模型应当符合通过对输入地面运动的响应而导出的土剖面的应变水平。这通常会导致一个重复的过程。

3.12. 厂址物质的力学性能中存在的因素，应当在参数研究中予以考虑，至少要考虑剪切模量值。一种方法是改变最佳估计值乘以 $(1+C_v)$ 与最佳估计值除以 $(1+C_v)$ 之间的剪切模量，其中， C_v 被定义为变量系数。 C_v 最小值是 0.5。应当注意，给定土剖面不能在没有对所有考虑因素进行保守分析的情况下假设；也就是说，对反褶积的保守评价对于厂址反应分析可能不是保守的。

3.13. 当厂址位于地震源附近区域时，应当仔细确定厂址响应模型，这样由地震机制产生的输入运动的频率成分可被适当地考虑。

3.14. 在 3 类型厂址的情况下，应当确定厂址特有反应谱；它们至少应当代表在地面的剖面反应情况。

液化势

液化势设计剖面

3.15. 在参考文献[2]中提到了对液化势的评价。易受液化影响的土通常是非粘性土，例如松散堆积条件下水位以下含有少量淤泥和粘土的砂子和砂砾。

3.16. 对于易受液化影响的土而言，评价液化势所需要的设计剖面资料如下：

- (1) 地下水体系 应当利用通过厂址上安装的水位计测量所得到的数据来确定用于液化分析的适当水位。地下水体系应当反应出水位的季

节变化。在分析时可假定适当的保守值，这些假定值可用真实数据或可利用的数据支持。监测井测量到的数据可被用于确定渗透性参数。

- (2) **粒度分布** 对于非粘性土，应当通过从厂址不同地点和深度采集到的土样进行筛分来获得粒度分布。从粒度分布和伴生塑性了解到的粉砂含量是在标准贯入试验（SPT）击数或锥形贯入试验（CPT）记录的基础上判断液化阻力中的重要考虑因素。
- (3) **标准贯入试验** 不同地点的标准贯入试验击数应当按照不同深度绘制成图，最好是在一张相同比例的图纸上。从这些标准贯入试验值中，不排水的循环应力可在经验关系的基础上估算。在粒度试验中，应当注意粉砂含量的百分比，它对这些相互关系有很大的影响。甚至粉砂含量超过 30%的土有时仍然可能液化。在这种情况下，应当测量粉砂土的塑性指数，以便能够利用这些数值正确判断土对液化的敏感性。
- (4) **锥形贯入试验** 测量渗透阻力的锥形贯入试验与标准贯入试验相比有一个优势，即它可以提供非常详细的层化剖面，可以对可液化土的范围进行更好的判断。甚至如果在锥形贯入试验中不能采集土样品，也可以根据锥形上安装的摩擦套筒中测到的摩擦力与锥形阻力之间的比率预测土类型。在锥形贯入试验中，土渗透性随着土密度的增加而减小，这限制它仅仅对松沙的使用。对一些厂址条件而言，标准贯入试验和锥形贯入试验相结合可能更加合适。
- (5) **相对密度** 有时可在标准贯入试验击数的基础上评价非粘性土的原位相对密度，因为它对大致评价不排水循环应力或当钻孔压力 100% 增大时确定土的不稳定性程度可起到一个方便指标的作用。在实验室试验中，土样的相对密度可在砂子的最小和最大密度的基础上予以直接确定，对此标准化试验方法是适用的。
- (6) **不排水循环强度** 地下物质的不排水循环剪切强度可通过在试验室中对未受扰动的或重新塑造的样品进行循环荷载试验更加直接地评价。在大多数工程实践中，通常采用循环三轴试验评价不排水循环强度。为粗略估计实际的现场条件，对在三轴试验中测量的循环强度值应用修正因子。评价为达到给定周期应力幅度下的规定破坏

条件（例如初始液化或轴向应变百分比）所需的周期数。改变循环应力水平和试验其他的样品。在这个试验中，未受扰动样品的质量对液化势可能性可能有重要影响。因此应当建立表明循环应力和导致液化破化所需的等周期数之间的实验曲线。可以为不受固结或预应变效应影响的相对新的土的具有不同相对密度和固结压常工程实践中的固结应力标准化。原位固结应力应当适当选择，因为应力比可能随着中等密实到致密的砂的限制应力的增加而减少。

- (7) 土特性的应变依赖性 需要各地层的 $G-\gamma$ 和 $\eta-\gamma$ 曲线来描述剪切模量和土对剪应变的阻尼比的明显变化。
- (8) 其他土特性 可能需要根据精密分析类型了解其他特性。一些特性可通过附加的实验室试验来调查，例如不排水的无变化荷载剪切试验和固结试验。
- (9) 以往的液化史 除了确定液化分析设计剖面的参数和通过实验室试验表征地下物质的循环强度，还应当收集和仔细研究过去在厂区或厂址附近发生的液化资料。应当执行详细的调查大纲和针对这些地点的特定液化分析。

3.17. 作为数据收集和进行试验的一个结果，应当规定评价液化势所需的下列设计剖面参数的值：

- 地层的厚度和变化；
- 各地层的平均相对密度和变化；
- 各地层的横向展布；
- 与用于液化分析的参考地面运动相关的水位；
- 不同类型土的应力比对荷载循环曲线数；
- 说明实验室条件偏离现场实际条件的修正因子；
- 考虑的代表厂址参考地面运动的等效均匀循环数；
- 用于数字分析的其他土参数；
- 液化的破坏准则。

液化势的评价方法

3.18. 根据地下条件和液化危险水平，可以使用 3 种方法评价液化势。

- 经验方法：基于过去地震中的实际表现，利用标准贯入试验和静力贯入试验数据可以容易地进行评价；
- 传统分析方法；
- 精密分析方法。

经验方法

3.19. 在经验方法中，利用应力比与标准贯入试验或锥形贯入试验贯入阻力的关系图表来评价液化势，这些图表是根据以往的液化案例史凭经验绘制的。应当适当选择这些图表上的地震震级和细粒含量，因为评价结果主要依据这些参数。

传统分析方法

3.20. 传统分析方法包括以下步骤：

- 确定每层中的地基材料的循环强度特征。在考虑了包括相对密度、应力循环次数、局限应力和土的非均匀性（确定把实验结果转换成现场条件的修正因子）在内的诸多因素后定义破坏准则。
- 选择一套适当的加速度谱。
- 计算由加速度谱引起的每层应力。将这些应力变化历程转换成许多等均匀周期。
- 通过比较每层中的循环强度特征与计算的等周期来确定液化势。

3.21. 用于分析结构、系统和部件的最严重地震不一定与考虑地基材料液化时使用的最严重的地震相同。一个持续时间较长的偏远地震事件可以在厂址产生许多低加速度的重要周期，这些周期对于液化很关键。

精密分析方法

3.22. 在精密分析方法中，基土的构成模型被纳入到非线性步进式分析中，以直接评价孔隙压力的增加和动态地面反应。在大多数情况下，进行有效

应力分析，因为它能够模拟孔隙压力中的时间依赖性变化以及它们对基土特性变化的影响。在这种精密分析中，液化势可根据就压力增加或应变增加所选择的地震输入运动直接加以评定。但由于不同的输入运动、土构成模型及其他参数，结果可能大相径庭，最终的评定应当在考虑了差异性程度后做出。

3.23. 通过比较上述分析结果与以下结果来确定安全系数：

- 经验方法的结果；
- 应用分析方法得到的下限解。

3.24. 一般可以利用设计剖面参数的保守假设计算出分析方法中的下限解。对于松砂，地震应力的略微增加都会使土处于一种不稳定状态，甚至可能是大的变形，而在中等密度砂到密实砂中，即使地震应力大幅增加，尽管孔隙压力增加 100%，也只会产生有限的变形。

3.25. 可接受的安全系数不能靠推理来规定，而应当利用按照上面描述得出的结果逐例加以规定。安全系数的选定还应当确保动态诱发的应变或残余应变不会损害地基的性能。

4. 对地基的考虑

地基工程

初步地基工程

4.1. 本节讨论初步地基工程的岩土工程技术问题。在本《安全导则》中，初步地基工程定义为浇注混凝土地基前进行的那些岩土工程活动。这些活动直接影响地基在预期荷载条件下的性能，因此对安全事关重大。它们可以包括：

- 原型试验（包括试验填方和对改进地基材料技术的验证）；

- 挖掘地基或地基系统；
- 脱水及其控制；
- 岩石去除；
- 挖掘测绘；
- 地基材料改进（包括材料和排水改进项目）；
- 结构回填的安置；
- 泥垫或任何类型保护层的安置。

4.2. 这些活动的土木工程方面应当包括对施工适当控制和文件编制的试验要求。试验应当既在现场又在实验室进行，并且贯穿整个施工期。

地基状态改进

4.3. 地基状态改进在这里指的是最广义的，并且包括对地基材料机械性能的改进(如通过基土压实)，用改良材料全部更换松、软材料，或用添加材料改进静态和（或）动态行为。另一种方法是使用如下描述的深地基。

4.4. 如果发生如下情况，地基状态应当加以改进：

- 地基材料不能在不可接受的变形（沉降）的情况下承受建筑荷载；
- 正如第 2 节所讨论的，存在可导致沉降的空穴；
- 在厂房大小的比例上，存在可导致倾斜和（或）不可接受的差异沉降的非均匀性。

4.5. 当地基状态需要改进时，应当完成以下任务：

- 确定现有的原位剖面；
- 确定地基材料所需剖面；
- 选择用于改进地基的特定技术（过度挖掘和压实填土、岩石清除、采用各种方法致密化、水泥固化或永久脱水）；
- 实施原型试验大纲，以实验验证所建议的改进地下条件方法的有效性；

- 建议的技术得到验证后，编写现场作业的技术要求；
- 改进计划完成后，开展一项确定是否满足技术要求的调查；
- 把地基材料的任何改进纳入到评估中使用的的设计剖面中。

地基系统和结构的选择

4.6. 有两种地基系统可用于将上部结构荷载传递到土：浅地基和深地基。当荷载分配足够均匀并且土上层足够坚实时，使用浅地基。在土条件差的情况下，深地基用于将荷载传递到深层更坚硬的土层。由于设计的复杂性，通常首先考虑浅地基，最后考虑选择深地基。

4.7. 在选择地基系统时应当采用以下准则：

- 构筑物的各种作用力应当传递至土而不会引起不可接受的变形；
- 由 SL-2 级地震输入运动引起的基土变形应当与结构设计要求相符；
- 在地基系统的设计和建造中应当考虑与评价地震反应中的不确定性有关的风险；
- 应当考虑与可能具有“侵入性的”地下水有关的风险；
- 每个构筑物应当使用一种单一类型的地基；
- 地基类型的选择应当取决于厂房的类型（核岛应当使用基板，因为它可在静态和动态荷载下提供均匀沉降，并在环境与厂房之间设立屏障）。

4.8. 分析及设计剖面应当体现构筑物在预期荷载条件下的行为，因此地基系统和构筑物的分析应当体现实有的条件。

基土-结构相互作用

静态分析

输入参数

4.9. 从静态-结构相互作用分析中导出地基下面接触压力分布及地下物质引起的应力。除构筑物的弹性及几何参数外，在设计剖面中还应当包含以下地下物质参数，以便能够计算地基接触压力：

- 基土的弹性模量及泊桑比及其随深度和应变水平的变化；
- 基床反力；
- 地下物质的单位重量；
- 地下水体系。

4.10. 此外，如果地下物质是土或软岩，应当获得有关地下物质应力历程的信息，以预测沉降和隆起，并评定总体地基（剪切）损坏的危害。为计算此应力历程，至少应当获得以下资料：

- 地质应力历程和计算出的预固结应力和超固结比；
- 作业中受载—卸载历程，如脱水、挖掘、回填和厂房施工，以及干扰空间几何学；
- 适用于地下物质及其随深度变化的构成定律的确定和应用所需的参数；
- 厂房的基础底板及上部结构的几何形状及硬度。

已有计算机程序可供用于进行各种计算和考虑基土的非线性行为。对沉降的评定在本节后面更详细地论述。

分析方法

4.11. 核电厂最广泛采用的基础是底板式基础。应当分析基础底板设计的可能相关的各种类型结构的刚度行为（例如，无限刚度基础、柔性基础或

实际结构刚度)。上部结构的硬度如果在本评价中需要,应当加以考虑。为计算底板式基础下面的接触压力分布,地下基础材料可以利用有限元法(连续式表示法)来模拟或以其硬度对应地基反力系数的一系列弹簧(集总表示法)来表示。

4.12. 对于无限硬度和无限柔性地基的两种极端条件(在基土分布荷载的情况下),文献中可查到解决方法。对于通常在实际中发生的中间条件,通常采取的方法是利用计算机程序得出数值解。应当对构筑物的刚度随施工进展而变化的条件加以考虑。另外,在挖掘、脱水和回填过程中,如果地下物质在承受卸载和再受载时表现出非线性行为,也应当考虑这一点。

4.13. 对于那些位置相邻的构筑物,应当评价毗邻的构筑物对地基土反应影响的可能结果。在这种情况下,应当考虑进行三维分析。

动态分析

动态基土-结构相互作用分析的基本要素

4.14. 动态基土-结构相互作用分析的目标是在综合系统受到外加动态荷载或与地震有关的地面运动时,确定结构的动态反应,并考虑结构与辅助地基介质之间的耦合效应。

4.15. 对于受到外加动态荷载如风、爆炸或振动强制励磁的构筑物,基土-结构系统的动态反应方法包括如下3个基本步骤:

- (1) 确定结构的动态特性(即结构模拟步骤);
- (2) 确定地基介质的作用力位移关系(即地基阻尼步骤);
- (3) 确定耦合的基土-结构对外加荷载的动态反应(即相互作用反应分析步骤)。

4.16. 对于经受与地震有关的地面运动的构筑物,耦合的基土-结构系统的动态响应方法要求,除此处所描述的步骤之外,还要确定地面运动对该系统的输入。确定地面运动输入包括两部分:

- (1) 定义自由场运动（即厂址反应问题（见第 3 节））；
- (2) 确定由于构筑物和挖掘物的存在造成的自由场运动散射（修改）。

4.17. 一般来讲，应当对符合 2 类或 3 类地基材料条件的厂址进行基土-结构相互作用分析（见第 3 节）。在电厂构筑物模型化中可以假设固定基支持，以便对 1 类厂址的地震反应进行分析。

地震基土-结构相互作用分析的步骤

4.18. 完整的地震基土-结构相互作用分析应当包括如下步骤：

- 厂址反应分析；
- 地基散射分析；
- 地基阻尼分析；
- 结构模拟；
- 耦合系统相互作用反应分析。

输入参数

4.19. 在设计剖面中应当提供如下资料，以进行地震的基土-结构相互作用分析：

- 由原地测量技术确定的一定差异的体波（压缩和剪切）速度数据的最佳估计值。
- 粘弹性半空间以上的层数和厚度。层化是按每层具有相同特性（即相同基土类型和相同剪切速度）的方式进行选择的。
- 地下物质的初始条件以微小应变条件下的剪切波速度（或剪切模量）或泊桑比表示。模型的每个地层都要确定这些值。
- 应当利用等线性材料特性考虑的非线性土行为。等线性法所需的设计参数有每个地下土层的剪切模量和阻尼与剪切应变关系。
- 利用参考地面运动进行分析时将使用的水位。
- 每层材料的总单位重量。

- 嵌入地下的深度。
- 地基的尺寸和几何形状。
- 基础底板的硬度。
- 上部结构的质量、硬度和阻尼。

分析方法

4.20. 应当进行基土-结构相互作用分析，以研究以下影响：

- 地基土条件对结构动态反应的影响；
- 埋置结构的影响（如散射效应）；
- 动态压力和变形对埋置结构的影响；
- 地基提升；
- 结构-基土-结构相互作用的影响。

4.21. 应当考虑地基材料设计剖面参数中的不确定性分析的影响。考虑这种变化的影响是为了得到涵盖基土-结构相互作用系统反应的一系列结果，说明不确定性。应当使用与第 3.12 段描述相似的方法。

4.22. 应当考虑不同类型阻尼的贡献（材料阻尼如粘性阻尼和迟滞阻尼以及辐射阻尼）。对于由具有不同阻尼特性的部分（地基系统、构筑物 and 地下结构）组成的基土-结构系统，可以利用合成形式的阻尼进行模型化。一般使用阻尼最高限值，但这将取决于所选择分析的模型和方法。

4.23. 有几种方法可用于表示基土-结构相互作用分析中的地基介质。使用的 4 种主要方法是集总参数基土电阻率法、3 维连续半空间地下结构法、3 维有限元地下结构法及 2 维轴对称有限元指示（一步）法。

4.24. 用于基土-结构相互作用分析的这些方法有各种直接和间接的假设及数学模型，使它们具有不同的能力及局限性，因此适用性也不尽相同。因此应当仔细挑选每种厂址条件将使用的分析法。

4.25. 在基土-结构相互作用的分析中，应当对土层、埋入、应变依赖性的基土特性、地下水位和回填条件的影响加以考虑。

4.26. 由于地基土和各种结构展示出三维动态特性，因此结构-基土-结构相互作用问题是一个三维现象。为适当表示核电厂地基土及各种结构的特性，应当进行三维分析。

稳定性

4.27. 地基稳定性评定应当在静（即永久性的）荷载及由地震输入引起的静荷载和动荷载组合（地震加速度垂直分量应当视为上下作用）下进行。评定应当包括对承载能力、倾覆和滑动的考虑。

输入参数

4.28. 进行稳定性分析所需的资料包括：

- (1) 地基几何数据；
- (2) 将考虑的地基荷载及荷载组合；
- (3) 基土条件，包括地下水位及以下机械特性：
 - 单位重量；
 - 回填材料的单位重量；
 - 粘结力；
 - 有效剪切阻力角度；
 - 基土和结构之间的剪切阻力角度：该角度应当小于或等于现浇地基的有效剪切阻力角度，并且小于或等于预浇地基有效剪切阻力角度的 2/3。

4.29. 由地震输入在地基材料中产生的循环地震力应当通过适当的动态法计算，以得出这些作用力的最大值，并且估算等受载周期的数量，如果这是评定承载能力所需要的。可将这些作用力转换成静态等效作用力，以评定稳定性。

4.30. 该方法也应用于提升和倾覆分析以及地下墙体和挡墙的横向受载计算。应当根据所考虑的项目导出等效静态作用力。

4.31. 对于静荷载，水位应当假定等于由于可能的极限洪水造成的最高水位。地下水假定为确定 SL-2 级地震荷载下承载能力的平均水平。

承载能力

4.32. 如果地下物质是相对均匀的，传统上用于计算最大荷载承载能力的基土力学程序是可接受的。可对平面应变和轴向对称应变进行弹性-塑性平衡分析。最初的困难在于选择土行为的数学模型或其构成(应力-应变-时间)关系。可利用的方案一般限于那些专为传统塑性理论的刚性-塑性固体而开发的方案。此固体假定在剪切破坏前不发生变形，在剪切破坏后塑性流处于恒定应力下。如果考虑中的实际情况满足与这种方法有关的假设，那么这些方案则是可接受的。在非均匀地下条件下，应当利用滑动面法确定极限承载能力。

4.33. 对于粘性土，应当评定短期和长期承载能力。

4.34. 如果地下物质的不均匀性、各向异性或间断性极为明显，应当使用滑动面法代替承载能力公式。在此方法中，对地下物质应当预先确定具有更小滑动安全系数的可能滑动面，并在常规滑动面分析中对初始静荷载和等效地震荷载下的行为进行分析。如果计算得出的安全系数比可接受的系数低，还应当做进一步分析。应当利用初始静荷载下加速度时间历程进行动态分析。在上述所有分析中，应当以保守的方式考虑垂直方向的地震力。

安全系数

4.35. 核电厂在静荷载下地下物质承载能力发生故障的可能性应当低，以便在静荷载下安全裕度高（通常情况都是如此）。上述裕度应当足以满足具有合理安全裕度的 SL-2 级地震荷载条件。

4.36. 如果在保守假设的基础上达到所需的安全系数，一般不再需要进一步分析。应当注意，可接受的安全系数取决于分析方法和其他考虑。在传统的承载能力方法中，安全系数在静荷载下不应当低于 3.0，在涉及 SL-2 级地震输入（倾覆作用）的荷载组合下不应当低于 1.5。对于在涉及 SL-2 级地震输入的荷载组合下的传统滑动面分析，滑动面方法的安全系数应当

大于 2.0。如果计算得出的安全系数低于可接受的系数，则需要进行额外分析。

4.37. 在碎岩石用作地基材料的地方，还应当包括 1 个局部安全系数。局部安全系数定义为在沿着地基下面现有断裂带和风化带可能屈服或局部滑动的每一个点的力与工作应力的比。该系数表明屈服区的范围和材料受到设计荷载后的逐渐失效程度。它在确定地基材料可能需要的改进的位置和程度以及在选择改进所需的适当技术中是很有用的。在涉及 SL-2 级地震输入的荷载组合下，如果此安全系数在可影响结构性能的足够大的区域内小于 1，则应当改善地基条件。但应当根据承载能力和滑动的安全系数判断宏观稳定性。

倾覆

4.38. 在地面运动、地下水位和厂房的几何构型的某些组合下，传统的计算程序可导致势升。但这并不意味着地基一定要提高，而是计算结构反应的常规程序可能不适用于这些情况。如果需要提升的地基的表面面积估计超过地基总面积的 30%，那么应当在动态基土-结构相互作用分析中使用更复杂的方法。预计的地基提升应当限于在考虑基土承载能力和功能要求中可接受的值内。

4.39. 在地基材料承载能力分析中应当考虑地基提升条件。

滑动

4.40. 应当研究地基以下结构滑动的可能性。

4.41. 如果是埋入式地基，基土的主动压力应当视为额外的水平荷载，同时应当根据基土压力的静值，限制地基的可能附加容量。

4.42. 核电厂地基的滑动安全评价不仅应当包括评定阻力与设计荷载之间作用力的平衡，还应当包括在 SL-2 级地震输入运动期间和之后的位移（以适当的方法如有限元法或边界元法进行评价）与可接受值的比较。

沉降和隆起

静态分析

4.43. 应当对静荷载下的沉降进行评定。由于在设施之间各种管道、导管和隧道相联，因此应当对核电厂厂房之间差异沉降或隆起的可能性进行研究。与地基变形相关的沉降和隆起也很重要，它可导致厂房的超应力，并干扰那些如泵和汽轮机等没有与它们的支撑物隔开的机械的运行。

4.44. 应当对短期和长期沉降（发生于电厂运行寿期内）进行估算。

4.45. 与时间相关的沉降可以运用传统的固结理论及其他复杂的非线性分析计算。在饱和基土中，应当考虑以下 3 个部分：

- 由于剪切对完全饱和土造成的无排水沉降；
- 由于固结引起的沉降；
- 由于蠕变引起的沉降。

4.46. 以下行动是评价长期沉降所必需的：

- 应当规定地下物质的预期荷载史（挖掘顺序、脱水处理、回填、施工过程）。
- 应当考虑以下参数：预固结压力、固结系数、初始杨氏模量、泊桑比及定义特殊构成关系的其他参数；它们的值应当针对整体利益加以确定。
- 模型的每一层应当根据实验室和现场试验数据来选择。
- 这些模型应当通过对挖掘、脱水、回填和施工过程中的沉降和隆起尺寸解释进行评定和改进。
- 这些模型应当利用预测结果与观察结果进行比较进行修正，以便实施必要的调整，供未来预测中使用。

动态分析

4.47. 应当对厂房地基、相邻厂房之间的连接结构和机械地基的设计进行差异沉降和总沉降的保守评定。

4.48. 如果不进行结构-基土-结构相互影响分析，应当对每个厂房诸个进行基土-结构相互影响分析，各厂房的单个位移应当组合在一起，以获得差异位移的动态部分。应当考虑横向和纵向部件及其组合。

4.49. 对于软土厂址，应当以最佳的手段评价地震后的残余沉降。

诱发振动的影响

4.50. 受振动影响或带有振动荷载的结构地基的设计应当确保振动不会引起过度沉降。为此，应当采取预防措施以确保在脉动荷载频率与地基-地面系统中的临界频率之间不会发生共振。如果这些预防措施不得当，应当通过弹簧或弹簧和垫片系统将振动源与支承结构和土隔离。

5. 土建结构

一般概念

5.1. 与核电厂安全相关的土建结构和埋置结构的设计应当与电厂本身的设计相符。尤其是，防外部危害的电厂设计应当与设计中所选的事件相符；这些事件及相应的荷载应当在与土建结构或埋置结构相关的授权调查范围中列出；所列事件应当以可能挑战这些结构的安全性的特定事件（如果有的话）作为补充。例如：

- 关于一致性：通过与安全相关的堤坝设计获得的地震安全水平应当与核电厂主要设施的安全水平相一致；

- 关于特定事件：就斜坡的稳定性而言，应当考虑大雨，其重现期应当与为考虑电厂设计所选的气象事件的重现期一致。

自然斜坡

5.2. 应当就电厂安全对核电厂重要设施周围的自然斜坡的稳定性进行研究。安全评价很大程度上取决于斜坡的间距及地貌。如果判断斜坡与重要设施相距足够远，其碎片永远不会接触到安全相关结构，则无需防范措施。因此，应当就间距、坡角、高度、地质，以及水份和其他斜坡材料的岩土工程技术条件等因素对有潜在危险的斜坡加以区分。

5.3. 应当在评定自然斜坡的潜在危险的安全评价中考虑地震及大雨的外部影响。

5.4. 如果判断斜坡有潜在危险，应当以适当手段进行稳定性分析。通常进行常规的滑动面分析，以评价滑动破坏的安全系数。

5.5. 地震影响通常被认为是根据地震系数得出的等效静惯性力。为评价等效静力，必要时应当复制斜坡的地震放大率。在惯性力估算中应当使用最大地面加速度；但某些下限值如果经额外研究证明是对的，也可以使用。安全系数应当等于或大于 1.5。如果安全系数不够大，应当在设计地震运动的基础上进行动态反应分析。如有必要，应当对残余变形进行评价，以判定安全系数近似一致的情况中的最终安全性。

5.6. 如果这样评价得出的安全系数低到足以表明有可能发生大的滑动破坏，应当设计和实施相应的对策，来稳定和加固斜坡或防止任何碎片到达安全相关电厂结构。否则，应当改变厂址的平面图。

堤 坝

5.7. 术语“堤”应当用于沿水道的结构，术语“坝”应当仅用于高于 15 m 的结构，在某些情况下，有必要建造核电厂水库上游区。为适当设计坝和堤，应当参考适当的设计手册。

5.8. 在施工前，除进行传统的地球物理学和岩土工程技术试验外，还应当特别注意地基区附近的场址的渗透性。在电厂整个运行寿期内应当监测这种渗透性。

5.9. 除通常的故障模式外，在这些土建结构的设计中还应当考虑取决于以下两个参数的所有可能的故障模式：筑堤内部孔隙压力和筑堤内部水流所引起的内侵蚀。

5.10. 考虑到堤坝故障对电厂安全的后果（如电厂冷却剂失水），堤坝的设计要求应当与电厂本身的设计要求，特别是对自然灾害（地震、降雨或洪水重现期）的评价要求相一致。

5.11. 除工程设计的一般方法外，还应当进行专门的分析，以计算各个构筑物的相关参数（如位移、孔隙压力）。应当将这些参数的值与那些在不同施工时期现场测得的数据进行比较。

5.12. 堤坝的监视（周期性检查）、监测和维护工作应当贯穿整个建造和运行期，以防止发生如堤坝内侵蚀等可能的损害。

海堤、防波堤和护坡

5.13. 海堤、防波堤和护坡是保护核电厂重要设施在暴风雨和海啸中免受海洋或湖泊波浪冲击的土木工程构筑物。这些构筑物应当适当设计，以防止可能危及重要设施安全的土壤侵蚀、洪水和结构损坏。

5.14. 应当在评价海堤、防波堤和护坡的潜在故障中考虑波浪、海啸和地震的外部影响。应当在考虑参考文献[5]中所描述的从水灾评价中得出的最大静水位的情况下，对波浪的动态影响加以评价。

5.15. 应当针对与上述保护功能的可持续性以及潜在故障的影响评价海堤、防波堤和护坡的稳定性。评价方法与前面提到的斜坡的滑动破坏的评价方法类似。在进行评价时，应当适当估计海堤、防波堤、护坡和回填材

料的性质，包括混凝土块、碎石和其他大块。砂质土可能会在这些构筑物底部遇到，可能有必要评价其液化势。

5.16. 应当合理地考虑穿过核电厂设施或从其附近经过的安全相关导管、管道及其他地下设施的这些构筑物（由于其副作用）的故障后果。如果预期到危险效果，应当采取相应对策保护设施或重新考虑厂址布局。

6. 埋置结构

挡 墙

6.1. 挡墙可以分为两类：

- 重力墙，墙的重量或者保持土的重量在其稳定性中起重要作用；
- 嵌入墙，例如板墙，其稳定性取决于基土被动压力和（或）固定装置。

通常，挡墙是两种类型墙的组合。

6.2. 输入参数与评定地基稳定性时使用的参数相似，一般通过有关挡墙后面基土的几何数据加以补充，尤其是地面坡度。在确定水位时应当特别仔细。提供的有关基土数据应当与评定稳定性时所进行的分析相一致。

6.3. 就稳定性评定而言，挡墙后面土的压力可能是主动压力。如果某个要求限制挡墙的容许位移，土的压力应当是静止压力。

6.4. 应当通过考虑在不利方向倾斜的人造重力，评价由于地震造成的土的主动压力。应当考虑地震加速的垂直分量的上或下作用。土的被动压力也要考虑，因可能造成更不利的影响。

6.5. 在稳定性分析中，应当处理涉及挡墙滑动面的故障模式和涉及挡墙保持能力的故障模式。有关的安全因素分别是地基的自然斜坡和地基的承载能力。

6.6. 应当确保地基后面的基土在 SL-2 级地震情况下不易受到液化影响（参见脚注 1）。

嵌入结构

6.7. 嵌入结构是地基很深的构筑物，其地下墙与周围场地的相互作用很明显。应当考虑这种嵌入的以下两个后果：

- 地下墙作为挡墙；这点已经涉及到。
- 这种情况对构筑物本身的后果，这些后果将在本节考虑。

6.8. 评定嵌入结构使用的输入参数与评定地基和挡墙使用的参数相似，因此应当获得有关这些参数的资料。还应当获得有关地下墙安全和适用性要求的补充资料，尤其是有关密封性，这一点在不同的荷载下必须得到满足。为此，在设计地基中应当考虑混凝土的可能破裂（因而需要限制钢筋条和混凝土中的应力），并且应当特别注意构筑物的施工接缝的设计。有关包容物的进一步考虑见参考文献[6]。

6.9. 应当在设计中考虑地下水对嵌入结构的稳定性和密封性的复杂影响。在任何情况下，都应当对低于水位的任何地基加上排水装置，或者应当考虑液体静态压力。在沿海厂址，应当考虑变化的地下水盐分对地基材料和隔离材料的可能不利影响。

6.10. 只有在回填土已被适当压紧后或采取了其他适当措施后，构筑物才可以被认为是已嵌入。在这种情况下，应当考虑嵌入对地基阻尼和对基土—结构相互作用的影响。如果构筑物不是用机械方法嵌入的，那么只应当考虑地基深度的后果，而不考虑基土与地下墙的相互作用影响。

6.11. 在有关地基的第 4 节中给出了对构筑物稳定性分析的建议。即使对于用机械方法嵌入的地基，基土与墙之间的摩擦对于地震荷载下的稳定性分析也应当不予考虑。

埋设管道、导管和隧道

厂址调查大纲

6.12. 埋设管道或导管的布置应当在厂址调查大纲中加以考虑。应当沿着管道路线按适当间隔挖掘钻孔和（或）试坑。应当特别考虑确定在沿着管道路线的地基材料中出现的中断或改变的区域。

6.13. 为调查而挖掘的钻孔或试坑的深度，将取决于管道下面地基材料的地层情况，但是这些钻孔或试坑应当延长到地基水平结构下面适当的基土层。

6.14. 应当在厂址调查大纲中包括对任何腐蚀性环境剂对管道材料的潜在影响的评定。

施工考虑

6.15. 埋设管道应当放置在足够的深度，以防由于地面荷载（例如交通荷载）造成损坏，或者应当设计成能够阻挡预期作用于管道的地面荷载。

6.16. 管道应当放置在合格地基材料上面适当压紧的粒状材料上，以免由于地基材料的沉降或液化造成管道损坏或变形。对于差的地下条件可以采用地基改进技术。

设计考虑

6.17. 与安全有关的埋设系统和隧道应当设计成能够抵抗地震的影响。

6.18. 长的埋设管道系统主要易受到相对位移诱发的应变的影响，而不是受到惯性影响。导致这些应变的主要原因是地震波的经过和构筑物附着点

(固定点)与埋设管道周围场地之间的差异位移。对于长的埋设管道、导管和隧道,应当考虑以下地震诱发荷载:

- 地震波经过时诱发的应变;
- 不同材料区域中的差异位移;
- 接地点或固定点相对于地面的变形和振动;
- 液化、滑坡和沉降等地面故障。

分析考虑

6.19. 在分析由于地震地面振动对管道系统的影响中,应当考虑以下两种类型的荷载:

- 地震波经过周围基土时造成的相对变形或由于基土与固定点之间差异变形造成的相对变形;
- 侧向土压力作用于结构元件截面。

6.20. 除非以其他方式证明是正当的,否则可以假定各段长的线状埋设管道远离固定点,锐弯管或交叉线随着周围基土移动,并且埋置结构相对于周围基土没有移动。在这种情况下,可以通过忽略管道与周围基土之间的摩擦估计最大轴向应变。如果管道与周围基土之间有滑动的可能性,直段的轴向应变远离固定点,锐弯管或交叉线应当在考虑摩擦的情况下加以估计。

6.21. 对这些轴向应变的估计将取决于导致最大地面差异位移的波浪类型。应当考虑的波浪类型有压缩波、剪切波和表面波。

6.22. 除计算由于波浪传播效应对埋设管道的作用力和应变之外,还应当计算由于固定点的动态响应造成固定点与相邻基土之间最大相对移动从而产生的作用力和应变。在计算埋设管道的最大作用力和应变中,应当以保守的方式考虑相邻固定点的运动。

6.23. 在分析隧道中,应当考虑由于所有预期的荷载(包括地震运动)造成的应力和变形。可以靠经验或根据数字(例如通过有限元法)评定应力。

6.24. 就深的隧道和井道而言，由于经过的地震波也将产生环向应力和应变，应当在设计中考虑这些环向应变。

7. 岩土工程参数的监测

监测岩土工程参数的目的

7.1. 地下勘探、原位试验和实验室试验应当提供有关适合于预计地基系统在设想荷载条件下的性能的参数值和厂址特征资料。利用这些参数，可以为地基材料和结构在预期荷载下的性能建立基础设计准则。为了证实地基和土建结构的性能，应当从选址活动开始到施工和运行监测它们的实际现场性能。

7.2. 通过监测实际荷载和变形，可以现场核实地基和土建结构的预测性能。由于建造序列一般是长期性的，所以监测数据使得沉降模型可以根据实际性能加以修改。因此可以有合理的把握做出长期性能预测。

监测的细则

7.3. 施工阶段通常包括挖掘、回填和厂房施工。应当在这些阶段中监测基土的性能。在挖掘和回填阶段中，应当监测地下物质的变形（隆起和沉降、侧向位移），并且应当进行荷载评价。应当在电厂的整个寿期中不断地监测。

7.4. 应当监测厂房下面和邻近区域中的地下水体系，以证实设计假设中概述的条件，尤其是如果安装了深排水系统或常设疏干排水系统。

7.5. 应当监测安全相关构筑物（包括挡土结构和土建结构）的有关参数的偏转和位移。

7.6. 应当监测厂址和地下物质的地震性能。还应当考虑对仪表设备的需要，以便为进行液化研究监测孔隙水的原地压力。

7.7. 应当仔细选择监测装置，以便监测系统能够提供设施寿期中的预期信息。应当根据经验反馈进行监测装置的选择。在决定要使用的监测装置数量时，应当考虑它们的预期故障率。

监测装置

7.8. 应当使用以下监测装置来监视地基和有关材料的性能（表 4）。还应当根据厂址的特殊性、要求和电厂类型，使用其他装置监测基土和构筑物（例如变形测定器、荷载和压力盒）。

表 4. 监测装置

装置类型	原 则	位 置	测量的参数	目 的
压强计	液压	钻孔	孔隙压力，地下水水位	地下水水位监测
全球定位系统	卫星瞄准	厂址	厂址地形	厂址评价
沉降界碑	地形瞄准	地表面	位移，沉降	结构沉降
γ射线照相，照相测量	图象叠合	地表面	地形变形	结构变形
原地沉降板	地形	地表面	位移	结构沉降
倾斜计，倾斜仪	机械	钻孔	垂直状态	斜坡稳定性
地震仪	加速计，触发器	自由场，构筑物	加速度时间历程	设施的可行性；结构的地震性能；底部响应谱
液压装置	液压 U 形管，Glötlz 室	墙脚和下面	墙脚的变形和应力	基土-结构系统的行为

参考文献

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.6, IAEA, Vienna (2003).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna (2002).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Standards Series No. NS-R-3, IAEA, Vienna (2003).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.2, IAEA, Vienna (2002).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Flood Hazard for Nuclear Power Plants on Coastal and River Sites, Safety Standards Series No. NS-G-3.5, IAEA, Vienna (2003).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.10, IAEA, Vienna (2004).

参与起草和审定的人员

Elgohary, M.	加拿大原子能有限公司
Kokusho, T.	日本中央大学
Labbé, P.	国际原子能机构
Touret, J.-P.	法国电力公司核电站运行及其工程研究机构

安全标准核可机构

带星号(*)者为通讯成员。通讯成员收到征求意见稿和其他文件,但一般不参加会议。

安全标准委员会

阿根廷: Oliveira, A.; 澳大利亚: Loy, J.; 巴西: Souza de Assis, A.; 加拿大: Pereira, J.K.; 中国: Li, G.; 捷克共和国: Drabova, D.; 丹麦: Ulbak, K.; 埃及: Abdel-Hamid, S.B.; 法国: Lacoste, A.-C.; 德国: Majer, D.; 印度: Sukhatme, S.P.; 日本: Abe, K.; 大韩民国: Eun, Y.-S.; 巴基斯坦: Hashimi J.; 俄罗斯联邦: Malyshev, A.B.; 西班牙: Azuara, J.A.; 瑞典: Holm, L.-E.; 瑞士: Schmocker, U.; 英国: Williams, L.G. (主席); 美利坚合众国: Virgilio, M.; 国际原子能机构: Karbassioun, A.; 欧洲委员会: Waeterloos, C.; 国际放射防护委员会: Holm, L.-E.; 经合组织核能机构: Shimomura, K.

核安全标准委员会

阿根廷: Sajaroff, P.; 澳大利亚: MacNab, D.; *白俄罗斯: Sudakou, I.; 比利时: Govaerts, P.; 巴西: Salati de Almeida, I.P.; 保加利亚: Gantchev, T.; 加拿大: Hawley, P.; 中国: Wang, J.; 捷克共和国: Böhm, K.; *埃及: Hassib, G.; 芬兰: Reiman, L. (主席); 法国: Saint Raymond, P.; 德国: Feige, G.; 匈牙利: Vöröss, L.; 印度: Kushwaha, H.S.; 爱尔兰: Hone, C.; 以色列: Hirshfeld, H.; 日本: Yamamoto, T.; 大韩民国: Lee, J.-I.; 立陶宛: Demcenko, M.; *墨西哥: Delgado Guardado, J.L.; 荷兰: de Munk, P.; *巴基斯坦: Hashimi, J.A.; *秘鲁: Ramírez Quijada, R.; 俄罗斯联邦: Baklushin, R.P.; 南非: Bester, P.J.; 西班牙: Mellado, I.; 瑞典: Jende, E.; 瑞士: Aberli, W.; *泰国: Tanipanichskul, P.; 土耳其: Alten, S.; 英国: Hall, A.; 美利坚合众国: Mayfield, M.E.; 欧洲委员会: Schwartz, J.-C.; 国际原子能机构: Bevington, L. (协调员); 国际标准化组织: Nigon, J.L.; 经合组织核能机构: Hrehor, M.

辐射安全标准委员会

阿根廷: Rojkind, R.H.A.; 澳大利亚: Melbourne, A.; *白俄罗斯: Rydlevski, L.; 比利时: Smeesters, P.; 巴西: Amaral, E.; 加拿大: Bundy, K.; 中国: Yang, H.; 古巴: Betancourt Hernandez, A.; 捷克共和国: Drabova, D.; 丹麦: Ulbak, K.; *埃及: Hanna, M.; 芬兰: Markkanen, M.; 法国: Piechowski, J.; 德国: Landfermann, H.; 匈牙利: Koblinger, L.; 印度: Sharma, D.N.; 爱尔兰: Colgan, T.; 以色列: Laichter, Y.; 意大利: Sgrilli, E.; 日本: Yamaguchi, J.; 大韩民国: Kim, C.W.; *马达加斯加: Andriambololona, R.; *墨西哥: Delgado Guardado, J.L.; *荷兰: Zuur, C.; 挪威: Saxebol, G.; *秘鲁: Medina Gironzini, E.; 波兰: Merta, A.; 俄罗斯联邦: Kutkov, V.; 斯洛伐克: Jurina, V.; 南非: Olivier, J.H.I.; 西班牙: Amor, I.; 瑞典: Hofvander, P.; Moberg, L.; 瑞士: Pfeiffer, H.J.; *泰国: Pongpat, P.; 土耳其: Uslu, I.; 乌克兰: Likhtarev, I.A.; 英国: Robinson, I. (主席); 美利坚合众国: Paperiello, C.; 欧洲委员会: Janssens, A.; 国际原子能机构: Boal, T. (协调员); 国际放射防护委员会: Valentin, J.; 国际劳工局: Niu, S.; 国际标准化组织: Perrin, M.; 国际辐射防护协会: Webb, G.; 经合组织核能机构: Lazo, T.; 泛美卫生组织: Jimenez, P.; 联合国原子辐射效应科学委员会: Gentner, N.; 世界卫生组织: Carr, Z.

运输安全标准委员会

阿根廷: López Vietri, J.; 澳大利亚: Colgan, P.; *白俄罗斯: Zaitsev, S.; 比利时: Cottens, E.; 巴西: Mezrahi, A.; 保加利亚: Bakalova, A.; 加拿大: Viglasky, T.; 中国: Pu, Y.; *丹麦: Hannibal, L.; 埃及: El-Shinawy, R.M.K.; 法国: Aguilar, J.; 德国: Rein, H.; 匈牙利: Sáfár, J.; 印度: Nandakumar, A.N.; 爱尔兰: Duffy, J.; 以色列: Koch, J.; 意大利: Trivelloni, S.; 日本: Saito, T.; 大韩民国: Kwon, S.-G.; 荷兰: Van Halem, H.; 挪威: Hornkjøl, S.; *秘鲁: Regalado Campaña, S.; 罗马尼亚: Vieru, G.; 俄罗斯联邦: Ershov, V.N.; 南非: Jutle, K.; 西班牙: Zamora Martin, F.; 瑞典: Pettersson, B.G.; 瑞士: Knecht, B.; *泰国: Jerachanchai, S.; 土耳其: Köksal, M.E.; 英国: Young, C.N. (主席); 美利坚合众国: Brach, W.E.; McGuire, R.; 欧洲委员会: Rossi, L.; 国际空运协会: Abouchaar, J.; 国际原子能机构: Wangler, M.E. (协调员); 国际民用航空组织: Rooney, K.; 国际民航驾驶员协会联合会: Tisdall, A.; 国

际海事组织: Rahim, I.; 国际标准化组织: Malesys, P.; 联合国欧洲经济委员会: Kervella, O.; 世界核运输协会: Lesage, M.

废物安全标准委员会

阿根廷: Siraky, G.; 澳大利亚: Williams, G.; *白俄罗斯: Rozdialovskaya, L.; 比利时: Baekelandt, L. (主席); 巴西: Xavier, A.; *保加利亚: Simeonov, G.; 加拿大: Ferch, R.; 中国: Fan, Z.; 古巴: Benitez, J.; *丹麦: Øhlenschlaeger, M.; *埃及: Al Adham, K.; Al Sorogi, M.; 芬兰: Ruokola, E.; 法国: Averous, J.; 德国: von Dobschütz, P.; 匈牙利: Czoch, I.; 印度: Raj, K.; 爱尔兰: Pollard, D.; 以色列: Avraham, D.; 意大利: Dionisi, M.; 日本: Irie, K.; 大韩民国: Song, W.; *马达加斯加: Andriambololona, R.; 墨西哥: Aguirre Gómez, J.; Delgado Guardado, J.; 荷兰: Selling, H.; *挪威: Sorlie, A.; 巴基斯坦: Hussain, M.; *秘鲁: Gutierrez, M.; 俄罗斯联邦: Poluektov, P.P.; 斯洛伐克: Konecny, L.; 南非: Pather, T.; 西班牙: López de la Higuera, J.; Ruiz López, C.; 瑞典: Wingefors, S.; 瑞士: Zurkinden, A.; *泰国: Wangcharoenroong, B.; 土耳其: Osmanlioglu, A.; 英国: Wilson, C.; 美利坚合众国: Greeves, J.; Wallo, A.; 欧洲委员会: Taylor, D.; 国际原子能机构: Hioki, K. (协调员); 国际放射防护委员会: Valentin, J.; 国际标准化组织: Hutson, G.; 经合组织核能机构: Riotte, H.

通过国际标准实现安全

“国际原子能机构的标准已经成为促进有益利用核和辐射相关技术全球安全机制中的一项重要内容。

“国际原子能机构安全标准正在适用于核电生产以及医学、工业、农业、研究和教育，以确保对人类和环境的适当保护。”

国际原子能机构
总干事
穆罕默德·埃尔巴拉迪

国际原子能机构
维也纳
ISBN 92-0-501906-2
ISSN 1020-5853