



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

输电线路 建设技术

中国电力科学研究院 组编
程永锋 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

输电线路 建设技术

中国电力科学研究院 组编
程永锋 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

加强智能电网关键技术的研发,共同推进智能电网建设与技术发展,对推动我国产业结构调整,加快经济发展方式转变和培养战略新兴产业具有重要意义。在当前各企业日益关注智能电网的时期,《智能电网关键技术丛书》的出版恰逢其时,可给各方研究提供有益的借鉴,避免设备创新风险,促进社会进步。

本分册为《输电线路建设技术》,包括输电线路杆塔基础、杆塔结构、导线、金具、防振防舞、施工和输电线路全寿命周期设计七章内容。

本丛书可供从事智能电网研究、运行、开发、管理人员与设备制造、研制技术人员,以及相关专业人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路建设技术/程永锋主编;中国电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社,2014.12

(智能电网关键技术丛书)

ISBN 978-7-5123-6145-4

I. ①输… II. ①程…②中… III. ①输电线路 IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第144599号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年12月第一版 2014年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12.5印张 215千字

印数0001—2000册 定价50.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编 委 会

主 编 程永锋

副 主 编 王景朝 夏开全

编写人员 鲁先龙 杨靖波 朱宽军 刘胜春

万建成 刘 彬 夏拥军 刘学武

崔 强 张子富 刘 臻 牛海军

马一民 邓元婧

序

进入 21 世纪后,大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显,建立在化石能源基础上的电力工业面临重大挑战,新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。世界范围内电力系统面临如下问题:一是应对大型风能、太阳能等可再生能源发电快速增长对电网的挑战;二是适应小容量分布式电源、电动汽车等对用电结构产生变化的影响;三是适应政府节能减排管制和低碳经济发展的需要;四是网络技术向以能源体系为代表的实体经济渗透和新产业革命的推动。欧美发达国家从应对气候变化、保障能源供应安全、促进经济增长的需要出发,相继提出和建设智能电网。实际上,智能电网正是应对这些重大需求而产生的,是世界电力工业发展的新趋势。

我国高度重视智能电网研究和建设,国务院总理李克强 2014 年主持召开节能减排及应对气候变化工作会议时指出“控制能源消费总量,提高使用效率,调整优化能源结构,积极发展风电、核电、水电、光伏发电等清洁能源和节能环保产业,开工一批新项目,大力推广分布式能源,发展智能电网。”国家科学技术部 2012 年适时启动智能电网重大专题研究,大力推动智能电网关键技术研究和应用示范。国家电网公司 2009 年根据电网建设的整体需要和智能电网顶层设计,率先启动了智能电网的研究、应用示范与工程建设;开展了智能变电站的持续实践,研制完成了智能电网调度控制系统、输电线路状态监测系统并得到广泛应用;构建了规模大、数据处理能力强的用电信息采集系统及电动汽车充换电服务网络;建成了中新天津生态城、张北风光储输等一批智能电网综合示范工程。

实施智能电网发展战略不仅能使用户获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率 and 价格合理的电力供应,还能提高国家的能源安全、改善环境、推动可

持续发展，同时能够激励市场不断创新，从而提高国家的经济竞争力。智能电网是新一轮能源革命的基础平台，对能源革命具有全局性和根本性的推动作用。未来的智能电网，适应大型风电、光伏发电及分布式电源大规模接入，形成广泛覆盖、清洁高效的电力资源配置体系，具有强大的电力资源配置能力；电力网、互联网、物联网等相互融合，构成功能灵活互动的社会公共服务平台，广泛支持配置社会公共服务资源；汇集和分析电力系统广域数据和知识，自动预判、识别电网典型故障和风险，保障电网安全可靠运行；促进用户与各类用电设备广泛交互、与电网双向互动，支撑智能家庭、智能楼宇、智能小区、智慧城市建设，推动生产、生活智慧化。

中国电力科学研究院在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、试验检测能力建设等方面开展了卓有成效的科研工作，为了总结相关技术成果和实践经验，推动我国智能电网技术进步，为我国智能电网建设提供有益参考，特组织专家编写了本套丛书。

本套丛书的编撰出版，凝聚了电网一线科研工作者的汗水和心血。通过本套丛书的出版，希望更多的人士关注、关心智能电网并投身于智能电网的研究和建设中来，共同打造一个安全高效、清洁环保、友好互动的智能电网，并推动构建智能便捷的生产生活新模式。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '周孝信' (Zhou Xiaoxin), written in a cursive style.

2014 年 11 月

前言

我国自 2009 年正式启动智能电网技术研究和试点示范工作以来,在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、应用示范工程及检验检测能力建设等方面取得了一系列重大成果。为总结智能电网技术研究与应用成果,分析我国智能电网技术发展趋势,与电力科技教育、电力企业及产业公司分享研究成果,中国电力科学研究院组织专家编写了本套丛书。

本套丛书在编写原则上,突出以智能电网诸环节关键技术为核心,优选丛书选题;在内容定位上,突出技术先进性、前瞻性和实用性,并涵盖了智能电网相关技术领域的新知识、新方法、新技术、新设备(系统);在写作方式上,做到深入浅出,既有深入的理论分析和技术解剖,也有典型案例介绍和效果分析。

本套丛书涵盖输变电、配用电及储能等智能电网技术,按照专业技术领域分成 7 个分册,即《输电线路建设技术》《智能高压设备》《智能配电与用电技术基础》《智能电网用电技术》《智能电网与电动汽车》《智能电网广域监测分析与控制技术》《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》。本套丛书既可作为电力企业运行管理专业员工系统学习智能电网技术的专业书籍,也可作为高等院校电气自动化专业师生的教学、学习用书,同时还可供智能电网产品研发工程师参考,实现一书多用。

本分册是《输电线路建设技术》,主要内容如下:第一章对输电线路杆塔基础类型及其可靠性,杆塔基础与上部杆塔结构的配合技术方案、连接方式,基础设计与优化,环境保护与水土保持等进行了介绍。第二章对输电线路杆塔结构设计技术和优化技术等进行了介绍。第三章对输电线路导线技术发展历程、导线分类、增容导线、节能导线以及其他特殊功能导线进行了介绍。第四章对

输电线路金具的标称破坏载荷系列及连接型式、材料及制造工艺、功能、试验等进行了介绍。第五章对导线微风振动及其防治、导线次档距振荡及其防治、导线舞动及其防治等技术进行了介绍。第六章对输电线路基础施工、铁塔组立技术及装备、导引绳展放技术、张力放线技术、物料运输技术及装备等进行了介绍。第七章对输电线路设计使用寿命、全寿命成本分析、全寿命周期设计评价、状态监测设计等进行了介绍。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。

编 者

2014 年 11 月

目 录

序 前言

第一章 输电线路杆塔基础	1
第一节 概述	1
第二节 输电线路杆塔基础类型及其可靠性	2
第三节 输电线路杆塔基础与上部杆塔结构的配合技术方案	9
第四节 输电线路杆塔基础与上部杆塔结构的连接方式	14
第五节 基础设计与优化	20
第六节 环境保护与水土保持	34
第二章 输电线路杆塔结构	37
第一节 概述	37
第二节 输电线路杆塔结构设计技术	45
第三节 输电线路杆塔优化技术	55
第三章 输电线路导线	75
第一节 输电线路导线技术发展历程	75
第二节 输电线路导线的分类	76
第三节 增容导线	77
第四节 节能导线	89
第五节 其他特殊功能导线	93
第四章 输电线路金具	103
第一节 概述	103
第二节 金具的标称破坏载荷系列及连接型式	104
第三节 金具的材料及制造工艺	107
第四节 金具的功能	108
第五节 金具的试验	116

第五章 输电线路防振防舞	118
第一节 概述	118
第二节 导线微风振动及其防治	119
第三节 导线次档距振荡及其防治	125
第四节 导线舞动及其防治	129
第六章 输电线路施工	139
第一节 基础施工	139
第二节 铁塔组立技术及装备	144
第三节 导引绳展放技术	151
第四节 张力放线技术	153
第五节 物料运输技术及装备	156
第七章 输电线路全寿命周期设计	161
第一节 概述	161
第二节 输电线路设计使用寿命	162
第三节 输电线路全寿命成本分析	165
第四节 输电线路全寿命周期设计评价	168
第五节 输电线路状态监测设计	174
索引	185
参考文献	187

输电线路杆塔基础

第一节 概 述

一、杆塔基础定义

输电线路杆塔基础是将杆塔结构固定在土或岩石中，并与杆塔底部连接，将荷载传递于地基土或岩石中的一种结构体。杆塔基础通常用钢筋混凝土、钢材或其他材料制成。杆塔基础型式需根据杆塔结构型式、沿线地形地貌特点、塔位处的地质条件以及施工运输条件等因素综合确定。

二、杆塔基础的工程特点

(1) 输电线路距离长、跨越区域广、沿途地形与地质条件复杂、地基土物理力学性质差异性大，设计和施工中需要考虑的影响因素多。

(2) 杆塔基础所承受的荷载复杂，随外界条件的变化，杆塔基础不仅承受拉/压交变荷载的作用，还承受较大的水平荷载作用。抗拔和抗倾覆稳定计算通常是杆塔基础的设计控制条件，而建筑、交通等行业基础的抗压稳定性计算才是其设计控制条件，因而可供架空输电线路杆塔基础直接借鉴与应用的资料较少。

(3) 架空输电线路基础呈点、线分布，地形地貌情况复杂，基础施工往往受地形、地质、运输条件等限制和影响。

(4) 传统地基基础检测技术应用于输电线路杆塔基础时，会受到不同程度的限制，输电线路杆塔基础试验检测水平往往落后于岩土工程等行业。

三、研究杆塔基础的目的

(1) 控制工期与造价。杆塔基础作为输电线路的一个重要组成部分，其造价、工期和劳动消耗量在整个线路工程中占很大比重。据有关资料统计：输电线路基础工程施工工期约占整个工期的 50%，运输量约占整个工程的 60%，费用占整个工程本体造价的 25%~35%，在特殊工程条件下的线路工程建设中甚

至超过总费用的 50%。由此可见, 研究选择合适的基础方案并进行优化设计, 将有效降低整个工程造价。

(2) 保障电网安全运行。输电线路与一般土木工程结构不同, 是由多跨导线、多级杆塔和基础组成的连续柔性体系, 杆塔基础设计的优劣关系到整条线路的安全运行, 一旦某个杆塔基础出现塌陷、滑坡、拔出等安全事故, 整条线路运行将面临瘫痪, 直接影响电网的安全稳定运行。因此, 针对不同的基础荷载、地质及地形条件, 因地制宜选择基础型式, 不仅可降低工程成本, 还可为线路和电网的安全运行提供必要的保障。

(3) 保护环境。随着我国电网建设的快速发展, 线路走廊及沿线岩土体工程条件越来越复杂, 输电线路工程建设中环境保护问题越来越受到重视。不同的基础型式具有不同的特点, 其承载能力、材料耗量、土石方量以及对环境的影响等各不相同。输电线路各级塔位的微地形一般相当复杂, 预测环境因素变化过程中岩土体的工程性质变化规律及其对杆塔基础稳定性的影响, 采取设计对策减少大规模电网工程建设对环境的破坏作用已凸显重要性。设计中需要根据塔位不同的地质、地形及周边环境因地制宜选择基础型式, 充分利用每个基础的优点, 达到减少土石方, 将工程对环境的影响减小到最小限度。

因此, 就输电线路建设工程造价、安全稳定性以及环境保护和水土保持等方面而言, 杆塔基础选型及其优化设计、基础施工工艺与技术方案等研究内容都具有重要的决定意义。

第二节 输电线路杆塔基础类型及其可靠性

一、杆塔基础常见类型

(一) 开挖回填基础

开挖回填基础是指通过在预先挖好的基坑内支模、浇注混凝土, 拆模后进行土体回填并将回填土夯实而形成的基础体。此类基础以扰动后的回填土作为抗拔土体, 保持基础上拔稳定。回填土虽经夯实, 但难以恢复到原状土的结构强度, 就其抗拔性能而言这类基础不是理想的型式。根据基础结构特征, 开挖回填基础可分为如下基础型式。

1. 刚性台阶基础

刚性台阶基础是传统的基础型式, 适用各类地质条件和各种塔型条件, 其特点是大开挖, 采用模板浇制, 成型后再回填土, 利用土体与混凝土重抗拔, 基础底板刚性抗压, 不配钢筋。基础底板的台阶高宽比不小于 1.0, 其示意图见

图 1-1。

由于刚性台阶基础消耗混凝土量较大、埋置较深、在易塌方的不稳定斜坡地基条件下难以达到设计深度且开方量大，因此工程中应尽量少用。

2. 直柱柔性板式基础

直柱柔性板式基础的主要特点是底板大、埋深浅，底板双向配筋承担由铁塔上拔、下压和水平力引起的弯矩和剪力。主柱计算与刚性台阶基础相同。与刚性台阶基础相比：埋深浅、易开挖成形、混凝土量能适当降低，但钢筋量增加较多，其示意图见图 1-2。

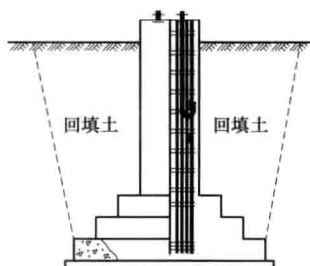


图 1-1 刚性台阶基础

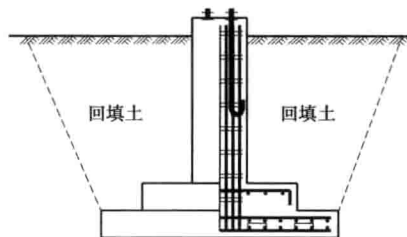


图 1-2 直柱柔性板式基础

直柱柔性板式基础施工方便。设计时，对底板的高厚比应进行一定的控制（悬臂长度：底板厚 $<2.5:1$ ），不足时可在主柱下增加台阶，以减少板的悬臂长度、增加底板厚度。为减小混凝土用量，主柱中心与底板中心可设置偏心，抵消水平弯矩，达到减小底板及配筋的效果。直柱柔性板式基础设计时应控制沉降，对转角塔及荷载较大的直线塔需进行地基沉降变形验算，施工时应尽量减少地基土扰动，清除开挖的全部浮土并做好垫层，必要时使用块石灌浆。

3. 斜柱柔性板式基础

斜柱柔性板式基础主要特点是基础主柱坡度与塔腿主材坡度一致，塔腿主材角钢直接插入基础混凝土中，降低基础水平力对基础底板的影响。一般条件下，基础土体上拔稳定、下压稳定和基础强度计算可忽略水平力的影响。与直柱柔性板式基础相比，由于偏心作用，弯矩总效应大大减小，对于下压稳定控制的基础底板尺寸可相应减小，从而降低了混凝土量和底板配筋量，其示意图见图 1-3。

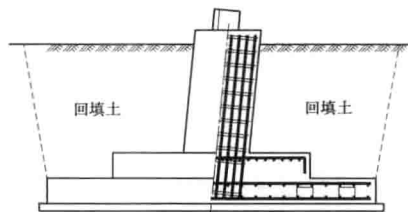


图 1-3 斜柱柔性板式基础

斜柱柔性板式基础在平原、河网地区使用较多，其最大优点就是节省混凝土用量和钢筋用量，施工较为方便；其缺点是施工精度要求高。对于高压缩性软弱土地区，其基础底面地基处理一定要重视基础垫层和基坑排水，并应严格按照有关规定执行。

4. 装配式基础

装配式基础是指采用两个及两个以上金属或混凝土预制构件拼装组合而成的结构体。在缺水、砂石采集困难的地区，采用现场浇注混凝土基础的方法往往较为困难，此时因地制宜地采用装配式基础显得比较经济。装配式基础能够实现基础结构工厂化预制生产、提高机械化作业程度、减少现场人工作业量和作业工序，有效保证施工工期，常应用于山区输电线路工程抢险中。

图 1-4 和图 1-5 分别表示混凝土装配式基础以及由混凝土板条和金属支架组合而成的装配式基础结构示意图。

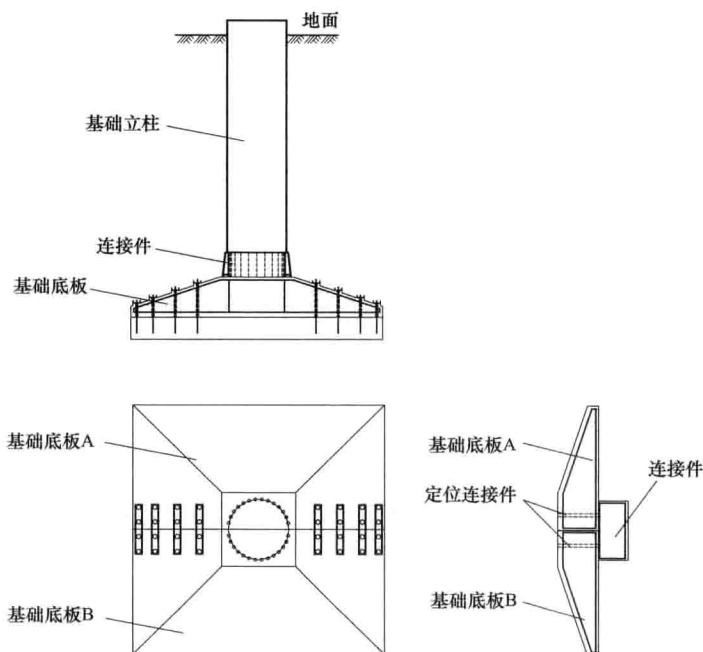


图 1-4 混凝土装配式基础

(二) 原状土掏挖基础

原状土掏挖基础是指先将钢筋骨架放置于掏挖成的土胎内后灌注混凝土而形成的基础体，适用于在施工中掏挖和浇筑混凝土时无水渗入基坑的黏性土体

和强风化岩石地基中。

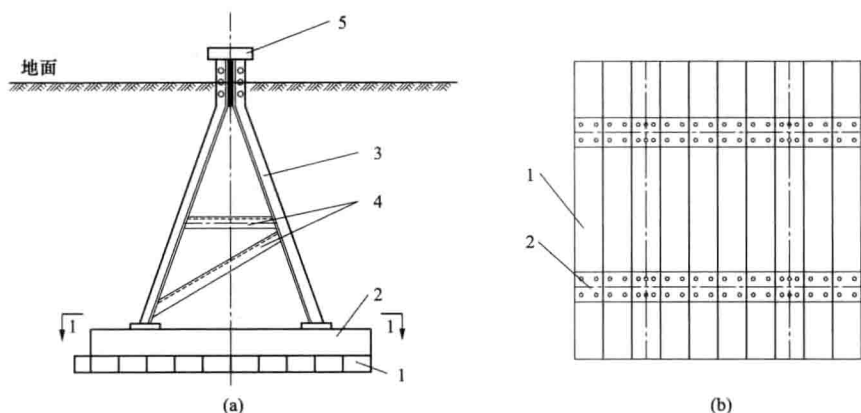


图 1-5 混凝土板条和金属支架组合而成的装配式基础

(a) 基础组装图；(b) 1-1 剖面图

1—底板混凝土板条；2—底板混凝土横梁；3—支架角钢主材；4—支架角钢斜材；5—顶板连接结构

原状土掏挖基础充分发挥地基土的承载能力，具有良好的抗拔和抗倾覆能力，取消了支模和回填工序，加快了工程施工进度、降低了工程造价，在我国输电线路工程中被广泛采用，见图 1-6。

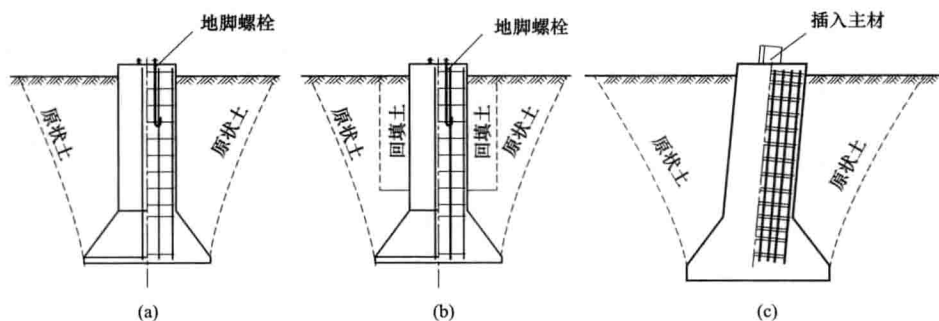


图 1-6 原状土掏挖基础

(a) 直柱全掏挖基型；(b) 直柱半掏挖基型；(c) 斜柱全掏挖基型

原状土掏挖基础分全掏挖和半掏挖两种。基础施工过程中，不扰动原状土，避免了大开挖后再填土对原状土体的扰动。基础承受上拔荷载时，原状土的抗剪承载力得以充分发挥，因此该类基础具有较高的经济效益和社会效益。根据以往工程统计，采用全掏挖基础比用刚性台阶基础节约混凝土 8%~20%。

(三) 人工挖孔桩基础

当输电线路杆塔基础作用力较大时, 为保证基础承载力和变形要求, 合理的底板尺寸和基础埋深对保证基础的安全稳定显得尤为重要。为提高基础的承载能力, 在地形条件复杂的输电线路工程中通常采用如图 1-7 所示的人工挖孔桩基础。

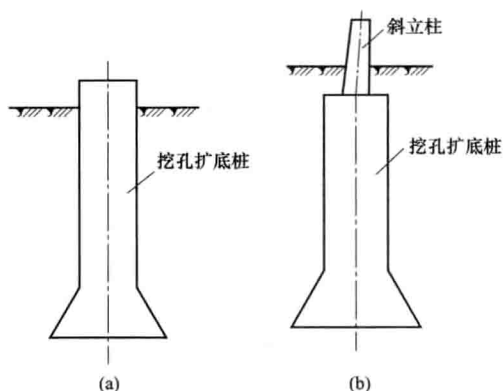


图 1-7 人工挖孔桩基础

(a) 扩底直柱型; (b) 斜立柱配扩底直柱型

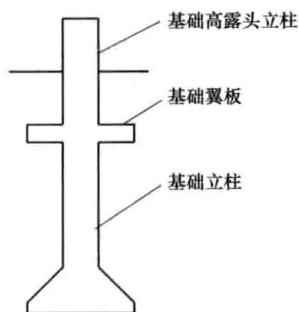


图 1-8 带翼板掏挖式基础

为解决塔位表层浮土侧向抵抗力低的问题, 又可充分利用斜柱基础的结构特点, 在输电线路工程中也常采用如图 1-7 (b) 所示的基础型式, 上部采用斜立柱型式, 下部采用扩底直柱型式。

工程设计中, 为提高山区输电线路杆塔基础的抗倾覆能力, 通常在基础立柱一定埋深处设置合适尺寸的翼板, 形成如图 1-8 所示的基础型式。由于基础立柱翼板的存在增加了土抗力承压面积, 从而其水平承载性能得以提高。

(四) 岩石类基础

1. 岩石锚杆基础

岩石锚杆基础充分利用岩石的强度, 在岩石中直接钻孔、插入锚杆, 然后灌浆, 使锚杆与岩石紧密黏结, 大大降低了基础混凝土和钢材量, 适用于中等风化以上的整体性好的岩石地基中, 其示意图如图 1-9 所示。

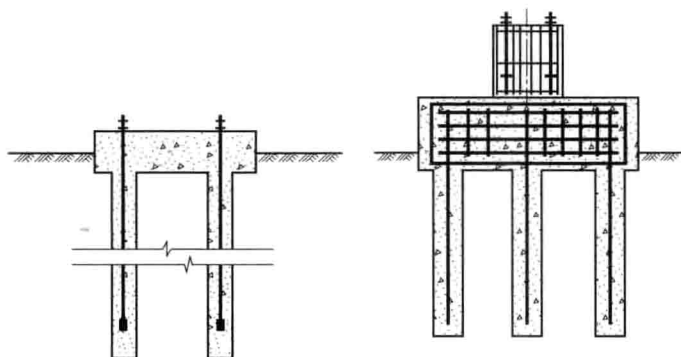


图 1-9 岩石锚杆基础

2. 岩石嵌固基础

岩石嵌固基础适用于覆盖层较浅或无覆盖层的强风化岩石地基，其特点是基坑全部掏挖、底板不配筋、施工不需支模，见图 1-10。该基型充分利用了岩石本身的抗剪强度，具有较强的抗拔承载能力，并且混凝土和钢筋用量少、基坑开方量小、经济性好，在我国输电线路工程中应用广泛。

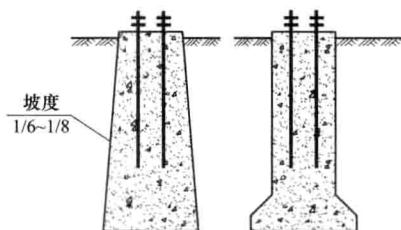


图 1-10 岩石嵌固基础

(五) 复合型基础

近年来，随着特高压工程的快速建设，输电线路杆塔结构越来越趋向于大型化、因地制宜的优化基础设计，合理利用地层受力特性，选择锚杆基础与其他类型基础相配合使用的复合型基础，见图 1-11，能够显著降低基础埋深、减小基础材料耗量、降低基础工程造价、提高基础整体的承载力性能。

二、不同类型输电线路杆塔基础的可靠性

杆塔基础工程可靠性是基础安全性、适用性和耐久性的统称，是一个抽象概念。设 S 为基础荷载效应组合的设计值， R 为基础抗力设计值，且 R 由地基特性、外荷载特征、基础材料性能、基础尺寸参数等诸多随机变量决定，基础设计必须满足

$$\gamma_f S \leq R(\gamma_k, \gamma_s, \gamma_c, c, \varphi, \dots)$$

式中 γ_k ——基础几何尺寸标准值；

γ_s, γ_c ——分别为土及混凝土重度设计值；