

# Foundation Design and Rock Subgrade Survey for Transmission Lines in Mountain Areas

Wenzhi Yang, Xianlong Lu\*

China Electric Power Research Institute, Beijing  
Email: [angelywz@163.com](mailto:angelywz@163.com), [luxianlong@163.com](mailto:luxianlong@163.com)

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Due to the particularity of transmission line industry and the complexity of mountainous terrain, geomorphology, geology and transportation conditions, the tower foundation selection and design in mountainous areas and the rock subgrade survey have become the difficulty for power grid construction in China. According to the thickness of overburden soil in mountainous area, the excavated rock foundation of transmission line in mountainous area was divided into rock-embedded foundation and rock-socketed pile foundation. The structural model, applicable conditions, bearing capacity calculation model and foundation design parameters of rock anchor bolt, rock-socketed foundation and rock-socketed pile foundation of transmission line in mountainous area were suggested. The results indicated that the uniaxial compressive strength of rock is the key geological parameter for the design of rock bolt, rock-embedded foundation and rock-socketed pile foundation in mountainous area. Therefore, the point load test method was recommended to determine the uniaxial compressive strength of rock mass. Furthermore, the method of selecting design parameters for transmission line tower foundation in mountainous area which are based on the results of point load test was also given. The research results can provide data for the design of transmission line tower foundation in mountainous area.

## Keywords

Transmission Line, Mountain Area, Rock Anchor Bolt, Rock-Embedded Foundation, Rock-Socket Pile, Point Load Strength Test, Unconfined Compressive Strength of Rock

---

# 山区输电线路基础设计与岩石地基勘察研究

杨文智, 鲁先龙\*

---

\*通讯作者。

中国电力科学研究院有限公司, 北京  
Email: angelywz@163.com, luxianlong@163.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月12日; 发布日期: 2019年3月19日

## 摘要

由于输电线路行业的特殊性和山区地形地貌地质环境及交通运输条件的复杂性, 山区杆塔基础选型设计与岩石地基勘测一直是我国电网工程建设的难点。本文根据山区覆盖土层厚度的不同, 将山区输电线路挖孔基础分为岩石嵌固基础和嵌岩桩基础2种型式, 进一步分析了山区输电线路岩石锚杆基础、岩石嵌固基础和嵌岩桩基础的结构型式、适用条件、承载力计算模型及其地基设计参数。结果表明, 岩石单轴抗压强度是岩石锚杆基础、岩石嵌固基础和嵌岩桩基础设计的关键地质参数。根据山区输电线路地基勘察特点, 推荐了利用点荷载试验确定岩石单轴抗压强度的方法, 并给出了基于点荷载试验的山区输电线路杆塔基础设计参数取值计算方法, 研究成果可为山区输电线路杆塔基础工程设计提供借鉴。

## 关键词

输电线路, 山区, 岩石锚杆, 岩石嵌固基础, 嵌岩桩, 点荷载试验, 岩石单轴抗压强度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

杆塔基础是架空输电系统的重要组成部分, 也是电网安全的最基本保障, 其造价、工期和劳动消耗量在整个工程中都占很大比重, 约占整个工期的 50%, 运输量约占整个工程的 60%, 费用约占工程本体造价的 25%~35%, 特殊条件下甚至超过本体总费用的 50% [1]。因此, 杆塔基础工程对电网建设效率、成本、环境保护等都有重要影响。

众所周知, 我国是一个多山的国家, 随着国民经济和社会的快速发展, 我国电网建设规模不断增大。随着输电走廊日趋复杂, 越来越多的输电线路工程需建设在山区, 甚至是分布在高山峻岭和无人区, 极端天气时常出现、地质灾害频发, 山区电网建设面临了新的机遇与挑战。

长期以来, 由于输电线路距离长、跨越区域广, 杆塔塔位呈点状分布, 点多且分散, 先进的基础施工技术应用与施工装备进场往往都受到地形、地质、道路运输条件的限制, 使得我国当前输电线路基础主要还是人力施工为主, 山区输电线路杆塔基础工程建设遇到的困难更加复杂。因此针对山区输电线路工程建设特点, 开展杆塔基础选型优化显得尤为重要。同时, 山区输电线路工程地基勘察是输电线路杆塔基础选型与设计的前提条件。但受到山区地形地貌和道路运输条件的限制, 常规钻探和原位测试设备一般都难以到达现场, 造成了山区输电线路沿线岩土工程勘测资料相对粗浅, 对地基工程性质的了解有限, 设计中地基参数多依靠工程经验“类比”或者直接采用相关技术标准的推荐参数, 从而使得山区输电线路岩土工程勘察已成为工程设计的难点和薄弱点。本文将根据我国山区输电线路杆塔选型及其设计计算模型参数与所需要的关键地质参数, 推荐输电线路工程岩土工程勘测方法与设计参数取值方法。

## 2. 山区输电线路杆塔基础型式

### 2.1. 挖孔基础

挖孔基础是我国山区输电线路工程中最普遍使用的一类基础型式, 可分为岩石嵌固基础和嵌岩桩基础 2 种型式。岩石嵌固基础是指无土层覆盖或覆盖土层厚度较薄(一般小于 0.5 米)的浅埋挖孔基础。岩石嵌固基础可分为圆台型、直柱平底形扩底型、直柱锅底形扩底型 3 种型式, 如图 1 所示。考虑到其计算模型及其施工安全性, 岩石嵌固基础埋深一般不超过 6 m。嵌岩桩基础是适用于无覆盖土层或者有覆盖土层且桩端嵌入一定深度基岩的挖孔基础, 一般适用于杆塔基础荷载较大的塔位, 基础埋深一般都超过 6 m, 根据其计算模型和施工安全性, 嵌岩桩基础宜采用等直径直柱型式, 如图 2 所示。

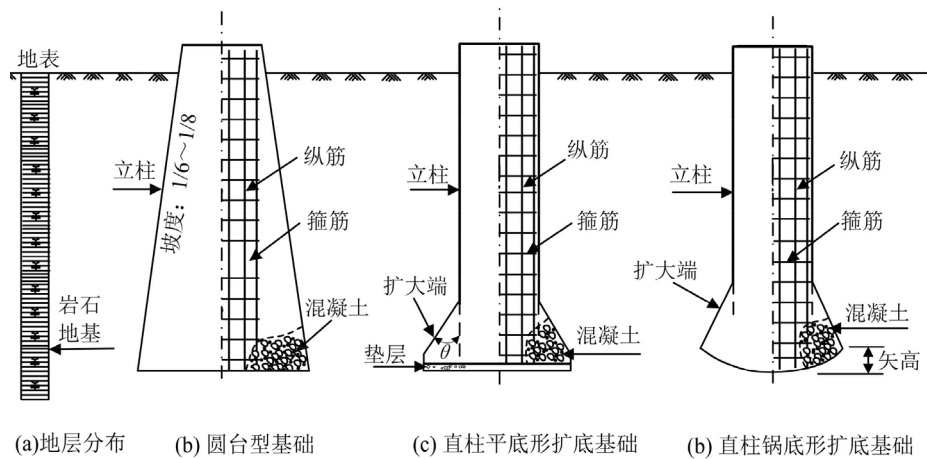


Figure 1. Rock-embedded foundation  
图 1. 岩石嵌固基础

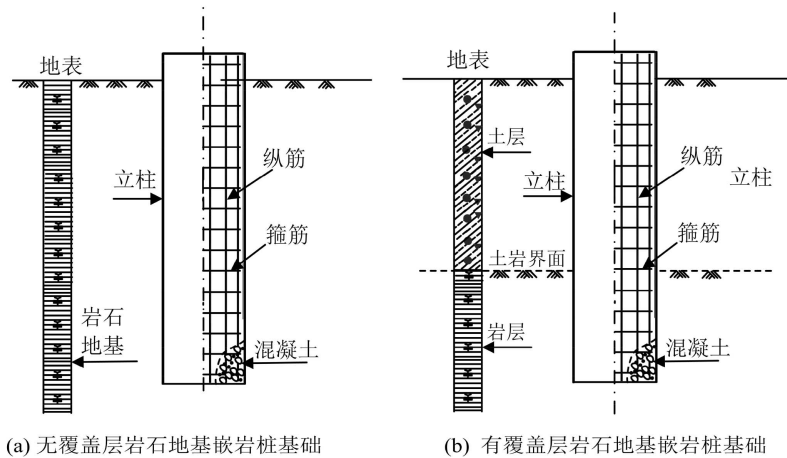
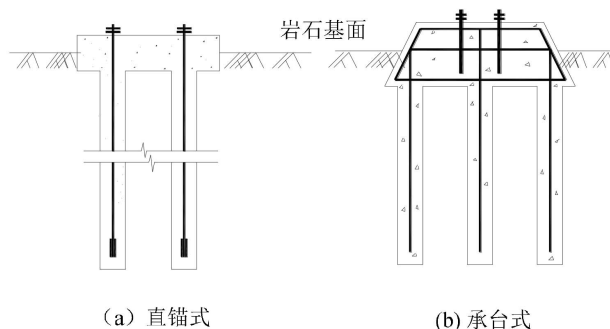


Figure 2. Rock-socketed pile foundation  
图 2. 嵌岩桩基础

### 2.2. 岩石锚杆基础

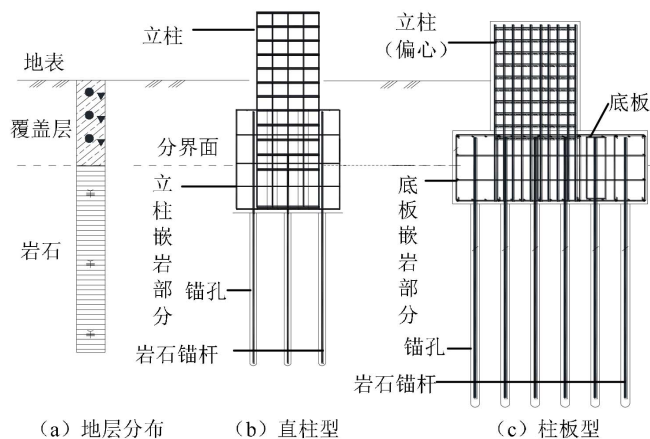
图 3 为我国山区低电压等级输电线路工程常常采用的岩石锚杆基础型式, 可分为直锚式和群锚式 2 种类, 直锚式岩石锚杆基础适用于基岩直接裸露(一般小于 0.3 米)或覆盖层薄岩石地基, 承台式岩石锚杆基础适用于有一定覆盖层的岩石地基中。此外, 直锚式基础一般用于基础作用力较小塔位而承台式基础

主要用于基础作用力较大塔位。



**Figure 3. Rock anchor foundation in transmission line engineering**  
**图 3. 输电线路常规岩石锚杆基础**

随着输电线路荷载越来越大, 图 3 所示的传统岩石锚杆基础难以满足工程需要。此时, 可根据大荷载输电线路塔位岩石地基覆盖层厚不同, 采用图 4 所示的输电线路工程新型岩石锚杆基础型式[2]。



**Figure 4. Rock anchor foundation for transmission tower with large loading**  
**图 4. 大荷载杆塔基础工程中的新型岩石锚杆基础型式**

### 3. 山区输电线路杆塔基础承载力计算模型及其参数

#### 3.1. 嵌岩桩基础

山区输电线路工程嵌岩桩基础的下压和抗拔承载力计算模型分别如图 5 所示, 其下压极限承载力主要由覆盖土层中的桩侧阻力以及嵌岩段桩侧阻力和桩端阻力 3 部分共同组成, 而抗拔承载力则主要由覆盖土层桩侧阻力和嵌岩段桩侧阻力 2 部分组成[3] [4] [5] [6]。考虑到上拔荷载作用下的岩土体泊松效应, 通常需对土层和岩层的极限侧阻力乘以一定的折减系数进行折减, 文献[7]建议该折减系数为 0.7。

从图 5 所示的输电线路嵌岩桩及其极限承载力组成分析与计算模型可见, 嵌岩桩基础设计与岩石地基承载性能相关的关键参数为嵌岩段岩石极限侧阻力和嵌岩段桩端阻力。大量的研究表明: 嵌岩段岩石极限侧阻力和嵌岩段桩端阻力与岩石单轴抗压强度具有较好的相关性。鲁先龙等[8]收集整理了国外学者不同时期、不同地区、不同岩石强度和不同嵌岩条件下开展的嵌岩桩竖向向下压承载力试验成果, 分析了桩径、嵌岩深度、嵌岩深径比和岩石强度对嵌岩段极限侧阻力的影响规律, 给出了根据岩石单轴抗压强度按式(1)计算嵌岩段极限侧阻力的方法。类似地, Zhang 和 Einstein [9]给出了根据岩石单轴抗压强度按

式(2)计算嵌岩桩极限端阻力的方法。

$$q_s = 0.436(f_{ucs})^{0.32} \tag{1}$$

$$q_p = 4.83(f_{ucs})^{0.51} \tag{2}$$

式中:  $q_s$  为嵌岩段桩身极限侧阻力, MPa;  $q_p$  为嵌岩段桩端极限侧阻力, MPa;  $f_{ucs}$  为岩石单轴抗压强度, MPa。

从嵌岩段岩石极限侧阻力和嵌岩段桩端阻力计算表达式(1)和式(2)可知, 对山区输电线路工程嵌岩桩基础而言, 其最为重要的岩石地基设计的地质参数为岩石单轴抗压强度。

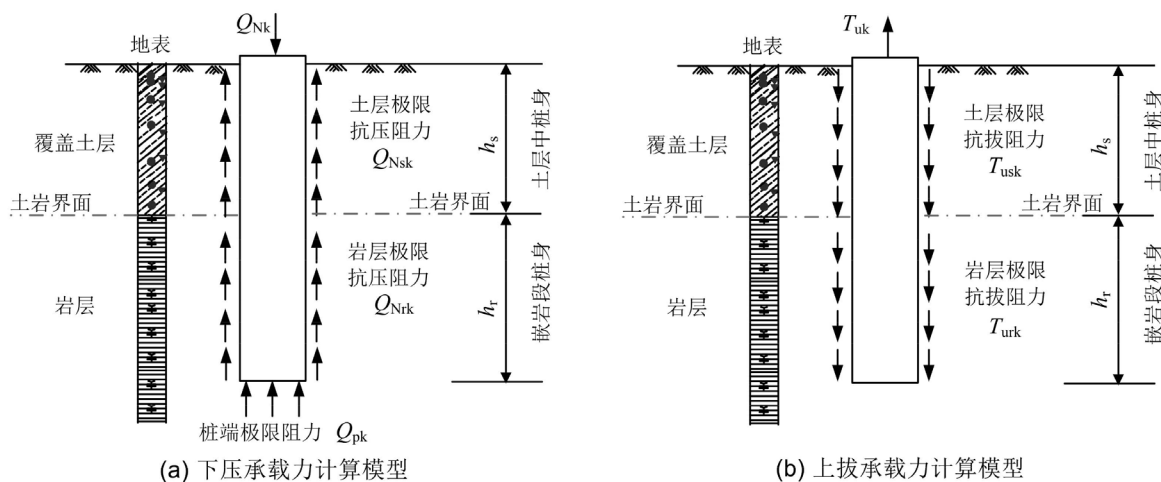


Figure 5. Rock socketed pile in compression with overlying soil layer  
图 5. 嵌岩桩及其极限承载力组成分析与计算模型

### 3.2. 岩石锚杆基础和岩石嵌固基础

上拔荷载作用下, 图 6 所示的岩石群锚基础的破坏模式可能有 5 种情况, 分别是图 5 所示的 4 种单锚基础破坏以及图 7(b)所示的群锚基础的岩石整体剪切破坏[2] [10]。图 6(a)所示锚筋自身拉断破坏主要取决于锚筋材料强度, 而图 6(b)所示的锚筋和细石混凝土的结合面滑动破坏主要取决于锚筋和细石混凝土间的粘结强度, 该值一般由细石混凝土强度决定, 上述两种破坏模式一般与岩石性质无关。图 6(c)所示的细石混凝土和岩体的结合面滑动破坏取决于细石混凝土和岩体间粘结强度, 该值一般根据岩石单轴抗压强度按照表 1 取值[10]。

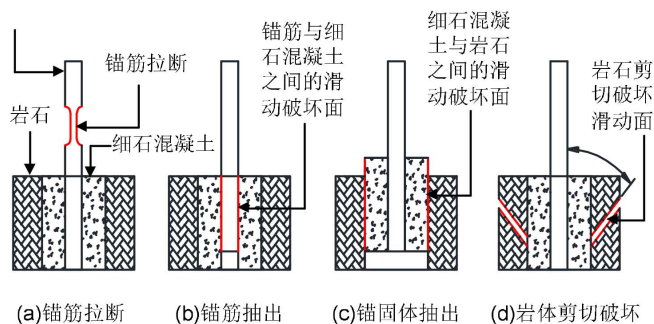


Figure 6. Possible failure modes of rock anchor foundations  
图 6. 岩石锚杆单锚基础的可能破坏模式

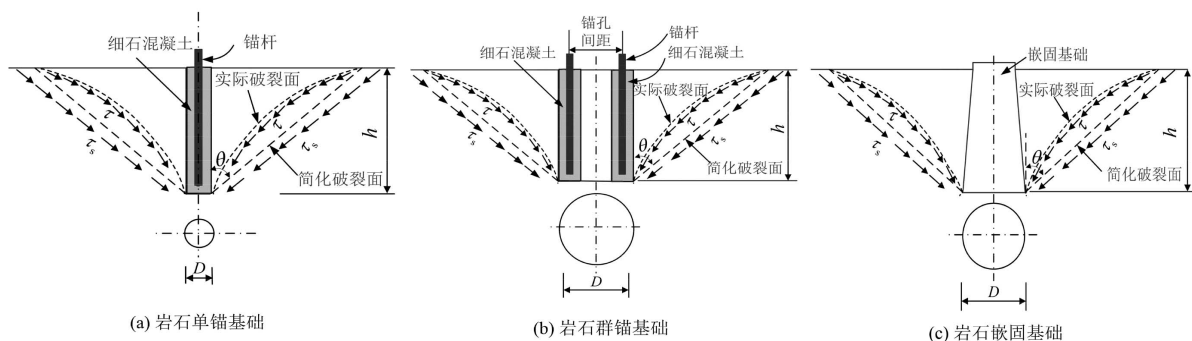


Figure 7. Slipping surface of rock bolt and rock embedded foundations  
图 7. 岩石锚杆和岩石嵌固基础滑动面模型

Table 1. Bond strength between fine concrete and rock mass  $\tau_b$

表 1. 细石混凝土和岩体间粘结强度  $\tau_b$

$f_{ucs}$ (MPa)	$f_{ucs} \leq 5$	$5 < f_{ucs} \leq 15$	$15 < f_{ucs} \leq 30$	$30 < f_{ucs} \leq 60$	$f_{ucs} > 60$
$\tau_b$ (kPa)	150~250	250~600	600~900	900~1500	1500~2500

如图 7 所示, 一般上拔荷载作用下的岩石锚杆单锚基础、岩石锚杆群基础和岩石嵌固基础的实际岩石整体剪切破坏面呈喇叭形的曲面, 为计算简化, 设计中通常假定这一曲面是中心轴对称而形成的旋转面, 且沿曲面的剪切应力处处相等。为进一步计算方便, 将实际曲面破裂面假设为直线型旋转曲, 直线型母线与竖直方向夹角  $\theta$  等于  $45^\circ$ 。同时, 在抗拔极限承载力组成中忽略倒锥体内岩体重量, 采用提高岩体抗剪强度予以补偿, 并将此岩体抗剪强度称为岩石等代极限剪切强度, 记为  $\tau_s$ 。由此确定的岩石单锚基础、岩石群锚基础和岩石嵌固基础抗拔极限承载力由式(3)计算确定[10][11]:

$$T_u = \pi h \tau_s (h + D) + Q_f \tag{3}$$

式中:  $h$  为单锚、群锚或岩石嵌固基础的埋深;  $D$  对单锚为锚孔直径, 对岩石群锚为群锚锚孔外接圆直径, 对岩石嵌固基础扩底直径。

岩石等代极限剪切强度一般根据岩石单轴抗压强度按照表 2 确定[10]。

Table 2. Equivalent ultimate shear strength of rock mass  $\tau_s$

表 2. 岩石等代极限剪切强度  $\tau_s$

$f_{ucs}$ (MPa)	$f_{ucs} \leq 5$	$5 < f_{ucs} \leq 15$	$15 < f_{ucs} \leq 30$	$30 < f_{ucs} \leq 60$	$f_{ucs} > 60$
$\tau_s$ (kPa)	15~25	25~45	45~75	75~90	90~150

因此, 对山区输电线路工程岩石锚杆和岩石嵌固基础而言, 其最为重要的岩石地基设计地质参数也是岩石单轴抗压强度。

## 4. 山区输电线路岩石地基勘测对策

### 4.1. 岩石地基勘测任务及其方法

目前, 我国山区输电线路岩土工程地质勘测的主要目的和任务, 是通过工程地质调查与测绘、物探、钻探、坑探、原位测试及室内试验等多种手段和方法, 评价塔位地基稳定性情况, 探明塔位岩土分布、地下水赋存以及塔位不良地质等方面的情况, 合理进行塔位基础选型, 并确定塔位地基参数设计取值。由于受到山区地形地貌和道路运输条件的限制, 常规工程地质钻机一般都难以到达塔位现场。鉴于此,

可采用质量轻、运输方便的山地轻便多功能钻机和邵尔背包型钻机为主, 进行岩石地基勘测工作。

如前所述, 岩石单轴抗压强度山区输电线路杆塔基础设计的关键地质参数。一般有两种方法可测试确定岩石单轴抗压强度: 一是制作岩石试件在材料试验机上直接进行测试。该法测试精度高, 但对钻孔取样要求高, 试件加工要求严格。特别是对于较为破碎岩石, 钻孔和制作满足要求的岩石试件较困难。二是利用点荷载仪进行测试, 试验样品可直接采用钻孔岩芯, 或从岩石露头、勘探坑槽中采取的岩块试样, 加工要求不高或不需进行加工。点荷载试验可在施工现场随时提供数据, 具有试验成本低、试验周期短的优点, 可较好地适应山区输电线路工程岩石地基勘测特点。

#### 4.2. 基于点荷载试验的岩石强度测试与地基参数取值

点荷载试验是一种使用便携式轻便仪器的强度试验方法[12][13][14][15]。国内外研究表明, 点荷载强度指数与岩石单轴抗压强度间具有较好关联性。Broch 和 Franklin (1972) [16]以及 Bieniawski (1975) [17]推荐的岩石单轴抗压强度和对应的点荷载强度指数之间线性拟合表达式如式(4)所示。

$$f_{ucs} = (23.7 - 24.0)I_{s(50)} \quad (4)$$

式中:  $f_{ucs}$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $I_{s(50)}$  为直径为 50 mm 标准试件的点荷载强度指数, MPa。

国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM) 1985 年推荐了《测定点荷载强度的建议方法》, 被广泛地称为 ISRM 方法[18]。ISRM 方法明确指出岩石单轴抗压强度范围是 20~25 倍岩石点荷载强度指数。Sari M. (2018) [19]通过统计 1036 组岩石单轴抗压强度  $f_{ucs}$  和对应的点荷载强度指数  $I_{s(50)}$  的试验数据, 得到了岩石单轴抗压强度和点荷载强度指数之间散点分布图和对应的线性拟合关系如图 8 所示, 岩石单轴抗压强度和对应的点荷载强度指数之间线性拟合表达式如式(5)所示:

$$f_{ucs} = 15.15I_{s(50)} \quad (5)$$

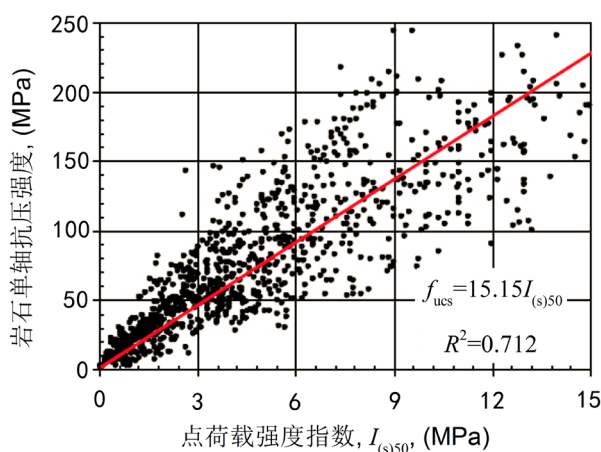


Figure 8. Relationship between uniaxial compressive strength and point load strength index  
图 8. 岩石单轴抗压强度和对应点荷载强度指数间分布关系

## 5. 结语

山区输电线路杆塔基础选型设计与岩石地基勘测一直是我国电网工程建设中的难点和薄弱点。本文总结我国长期山区电网工程建设实践, 根据山区覆盖土层厚度的不同, 给出了山区输电线路岩石锚杆基础、岩石嵌固基础和嵌岩桩基础结构型式、适用条件、承载力计算模型与设计参数。结果表明, 岩石单轴抗压强度是山区杆塔基础设计所需要的关键地质参数。

在山区输电线路工程建设中, 建议首先采用工程地质调查与测绘方法, 应用铁锹、镐、洛阳铲、轻便电动麻花钻等方法探明塔位覆盖土层及其厚度, 为山区输电线路基础选型提供依据, 并可进一步采用质量轻、运输方便的山地轻便多功能钻机和邵尔背包型钻机进行下卧岩石地基勘测工作。在此基础上, 采用点荷载试验确定岩石单轴抗压强度, 从而可根据规范和已有研究成果, 获得山区输电线路岩石锚杆基础、岩石嵌固基础和嵌岩桩基础的关键设计参数。

本文推荐的基础型式选型设计与岩石地基勘测方法, 是我国长期山区输电线路工程实践的总结, 相关成果已经在行业规范和实际工程中得到应用, 具有方便、快捷、安全、可靠的优点, 可较好地指导我国今后山区输电线路工程建设实践。

## 基金项目

本项目研究得到了国家电网公司科技项目《山区输电线路岩石地基挖孔类基础工程应用优化技术研究》(GCB17201600230)的资金资助。

## 参考文献

- [1] 鲁先龙, 程永锋. 我国输电线路基础工程现状与展望[J]. 电力建设, 2005, 25(11): 25-27.
- [2] 侯中伟, 郑卫锋. 特高压输电线路岩石锚杆基础选型与设计[J]. 电力建设, 2014, 35(10): 64-68.
- [3] 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10002.5-2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [5] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 港口工程桩基规范: JTS 167-4-2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [7] AASHTO (1996) Standard Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [8] 鲁先龙, 乾增珍, 杨文智, 郑卫锋. 嵌岩桩嵌岩段岩石极限侧阻力系数研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 29-38.
- [9] Zhang, L. and Einstein, H.H. (1998) End Bearing Capacity of Drilled Shafts in Rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 574-584. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:7\(574\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:7(574))
- [10] 架空输电线路岩石锚杆基础设计规程: DL/T 5554-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [11] 架空输电线路岩石锚杆基础设计规程: DL/T 5219-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [12] 工程岩体分级标准: GB/T 50218-1994[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [13] 工程岩体分级标准: GB/T 50218-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [14] 工程岩体试验方法标准: GBT50266-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [15] ASTM D5731-2016 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. ASTM, West Conshohocken.
- [16] Broch, E. and Franklin, J.A. (1972) The Point Load Strength Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **9**, 669-697. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7)
- [17] Bieniawski, Z.T. (1975) The Point-Load Test in Geotechnical Practice. *Engineering Geology*, **9**, 1-11. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(75\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0013-7952(75)90024-1)
- [18] ISRM (1985) Suggested Methods for Determining Point Load Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **22**, 51-60. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92327-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)92327-7)
- [19] Sari, M. (2018) Investigating Relationships between Engineering Properties of Various Rock Types. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, **5**, 1-25. <https://doi.org/10.15377/2409-5710.2018.05.1>



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)