

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.027

输电线路岩石嵌固基础关键设计参数研究

洪天炘¹, 郑卫锋², 叶超³

(1. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230022; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 安徽省电力设计院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 岩石嵌固基础已成为山区输电线路常用的基础型式之一, 岩石嵌固基础在进行上拔承载力计算时的关键参数为岩石等代极限剪切强度, 并已成为输电线路工程岩石类基础设计的控制性参数。基于14个场地、62个基础的现场原位试验成果, 分析其抗拔承载性能与破坏特点, 反算得到了岩石等代极限剪切强度参数取值。与现有规范相比, 取值得到显著提高, 特别是强风化岩石时提高50%以上, 经济性显著, 有效支撑规范修编, 供设计参考。

关键词: 输电线路; 岩石嵌固基础; 岩石等代极限剪切强度; 抗拔承载力

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0150-06

Design Parameters Determination of Rock Embedded Foundation in the Transmission Line

HONG Tianxin¹, ZHENG Weifeng², YE Chao³

(1. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei, Anhui 230022, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
3. Ahhui Electric Power Design Institute, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: As one common foundation type of transmission line in mountain areas, the uplift bearing capacity calculation to rock embedded foundation has become the controlling parameters in Ultra High Voltage transmission line engineering. Based on the in-situ test results of 14 sites and 62 experiments to rock embedded foundation, the uplift bearing capacity and failure characteristics are analyzed, the corresponding equivalent ultimate shear stress of rock mass are presented. By inverse calculation, the parameter values for equivalent ultimate shearing strength for different rock mass are obtained. Compared with the existing regulations, the parameter values have been improved significantly which increase more than 50% to highly weathered rocks. The rock embedded foundation have good economic and social benefits. The conclusion can support effectively codes revision and provide references for rock foundation design.

Keywords: transmission line; rock embedded foundation; rock equivalent ultimate shearing strength; load bearing capability

随着特高压工程的快速建设, 输电线路途径的山地地形占比越来越多, 输电线路基础承受的杆塔荷载也越来越大, 当山区中遇到风化岩石时常采用岩石嵌固基础^[1-7]。

岩石嵌固基础是指利用机械或人工在岩石地基中钻或挖成所需的基坑, 将连接锚固件、钢筋骨架和混凝土直接浇筑于岩石基坑内而成的岩石基础。岩

石嵌固基础主要适用于全风化—强风化硬质岩与强风化—中等风化软质岩等岩体地质中^[8]。

岩石嵌固基础设计主要包括基础上拔、下压、倾覆稳定计算。下压计算时, 山区岩石地基的单轴饱和抗压强度均较高, 即使结合风化程度考虑了折减系数, 其岩石地基承载力特征值也较高, 抗压承载力往往满足设计要求; 倾覆计算时, 因岩石抗压强度较

收稿日期: 2017-10-17

修稿日期: 2017-11-25

基金项目: 国家电网公司科技项目(GCB17201400135)

作者简介: 洪天炘(1964—), 男, 安徽黄山人, 高级工程师, 主要从事电网建设、生产运行等工作。E-mail: hongtx155x@ah.sgcc.com.cn

通信作者: 郑卫锋(1977—), 男, 河南温县人, 博士, 高级工程师, 主要从事输变电工程地基基础研究工作。E-mail: zhengwf@epri.sgcc.com.cn

高且岩石嵌固基础立柱截面尺寸大,总体抗水平承载力大,按现有杆塔水平力计算出来的基础侧向压力,均小于岩石的抗压强度,因此可忽略水平力的作用。因此,岩石嵌固基础上拔稳定计算是设计控制条件^[9-11]。

本文根据 14 个场地、62 个基础的现场原位试验成果,分析了岩石嵌固基础的抗拔承载性能与破坏特点,得到关键设计参数“岩石等代极限剪切强度”取值,供设计参考。

1 岩石嵌固基础上拔承载力计算

如图 1 所示,岩石嵌固基础在上拔荷载作用下,岩体将发生直线型或曲线型滑动并将一直延伸到地表。设虚线所示倒圆锥体为假想潜在破裂面,当岩石发生倒圆锥体直线型滑动面破坏时,根据力学平衡原理,基础上拔承载力由基础自身重量与均匀分布于倒圆锥体表面的等代极限剪切应力的垂直分量之和来共同承担。

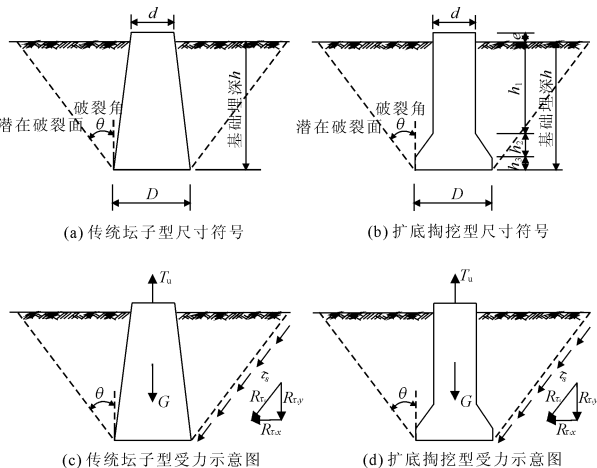


图 1 岩石剪切破坏受力示意图

$$T_u = R_{\tau_s y} + G \quad (1)$$

$$R_{\tau_s y} = \frac{\tau_s}{\cos\theta} \cdot S \quad (2)$$

$$S = \pi \cdot \frac{h}{\cos\theta} \cdot (D + h \tan\theta) \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)可得:

$$T_u = \pi \cdot h \cdot (D + h \tan\theta) \cdot \tau_s + G \quad (4)$$

式中: T_u 为基础极限上拔承载力; h 为基础埋深; D 为基础底部直径; θ 为岩体等代剪切角(又称破裂角); τ_s 为岩石等代极限剪切强度; G 为基础本身自重; $R_{\tau_s y}$ 为倒圆锥体上岩石抗剪强度垂直分量; S 为倒圆锥体的侧向表面积。

岩石等代极限剪切强度 τ_s 并非真正的岩石抗

剪强度参数指标,也不属于基本岩石地基物理力学性质参数,无法通过常规岩土工程勘测手段获得。根据试验成果,结合实践经验,按照计算模型反算后获得^[12]。现行规程^[13]给出了不同岩体地质条件下岩石等代极限剪切强度的取值范围,如表 1 所示。在实际工程设计时,技术人员多凭经验取其下限值,造成不必要的浪费。

表 1 现行规程^[13]岩石等代极限剪切强度取值

岩石类别	不同风化程度岩石极限剪切强度/kPa		
	未风化和微风化	中等风化	强风化
硬质岩	80~150	30~80	17~30
软质岩	40~80	20~40	10~20

根据大量现场试验^[9],岩石破裂角 θ 可取 45° , 根据公式(4)反算岩石等代极限剪切强度 τ_s :

$$\tau_s = \frac{T_u - G}{\pi \cdot h \cdot (D + h)} \quad (5)$$

2 现场试验

2.1 场地地质条件

现场试验共包括甘肃白银、宁夏灵武等 14 个场地,其地质条件简述如下:

(1) 甘肃白银:岩体为粉砂质黏土岩,褐红色,混有风化砾石,裂隙块状结构,岩体风化强烈,节理、裂隙十分发育,结构面以层面、风化裂隙为主,约 4 组结构面将岩体切割为 5 cm~20 cm 见方的岩块,结构面平均间距 5 cm~15 cm,表层约有 0.3 m 基岩残积土,强风化层厚约 1.0 m~1.5 m,以下呈中等风化,产状近水平,浸水易软化崩解。

(2) 宁夏灵武:岩体为砂岩,灰绿色,碎屑结构,水平层理,节理裂隙较发育,全风化—强风化。

(3) 浙江舟山:岩体为强风化—中等风化凝灰岩,呈浅黄褐色,斑状结构,块状构造,硬度高,节理裂隙很发育,岩体破碎成小块状,风化渲染严重,岩石整体性较差,局部破碎带夹泥层。单轴饱和抗压强度 65.5 MPa,坚硬岩;岩块波速测定结果可知,岩体完整程度为破碎。

(4) 广东深圳:岩体为强风化混合岩,青灰、灰黄色,原岩结构清晰,裂隙发育。岩芯呈半岩半土状及碎块状,手可折断,底部含块状,强风化较多。

(5) 湖北宜昌:岩体为奥陶系微风化的石灰岩,现场勘探时用铁锤锤击时,铁锤弹击力大,并伴有清脆的响声,勘探人员明显感觉振手,单轴饱和抗压强度 61 MPa。

(6) 陕西勉县:全风化花岗岩,灰黄—灰白色,主要矿物成分为石英、长石、角闪石、云母等,粒状结构,块状构造,夹石英岩脉,裂隙发育,岩体破碎,厚度一般为 0.5 m~2.5 m。花岗岩全风化状态呈砂砾状,强风化状态手捏易碎,岩体十分破碎,力学性质很差。

(7) 陕西略阳 I:全风化千枚岩,灰黄色、银灰色、灰黑色、青灰色等,矿物成分为石英、绢云母、绿泥石等,具丝绢光泽,变晶结构,千枚状构造,节理裂隙发育,岩体破碎,夹石英岩脉。千枚岩岩体较破碎,强风化千枚岩多呈碎块状,强度较低,且千枚岩具有遇水易软化的特性。

(8) 陕西略阳 II:强风化千枚岩,呈现灰黑色、青灰色、灰黄色、银灰色等,矿物成分为石英、绢云母、绿泥石等,具丝绢光泽,变晶结构,千枚状构造,节理裂隙发育—较发育,岩体破碎—较完整,部分岩层夹石英岩脉。厚度为 2.5 m~3.0 m,以下为中风化。千枚岩岩体较破碎,强风化千枚岩多呈碎块状,强度较低,且千枚岩具有遇水易软化的特性。

(9) 安徽太湖:岩体主要为全风化泥质砂岩夹泥岩、强风化泥质砂岩。灰黄色,全风化,已风化成土状,锹镐易挖掘,干钻易钻进,可见原岩结构,具可塑性,手捏可碎。

(10) 安徽六安:岩体为中等风化的石英细砂岩,细沙结构,层状构造,胶结物以泥质为主。灰绿色,遇水稍崩解,粒径 1 cm~5 cm,节理裂隙较发育,岩性较完整,可取到短柱状岩样。

(11) 北京房山:岩体为中等风化的含砂砾岩,节理基本为垂直节理。发育完整节理内有石英填充,石英层厚度约 2 mm~5 mm。岩石呈斑杂色,以红棕、粉灰、灰色、灰白为主,砾状结构,块状构造。岩石具砾状结构,由砾石 75%、砂 15%~20%、填隙物 5%~10% 组成。填隙物主要为黏土质、硅质和铁质。

(12) 华北地区^[14]:强风化安山岩,小块有薄层潮湿黏土、易用手折断。

(13) 辽宁地区^[15]:强风化花岗岩,表面遭受强烈风化剥蚀,开挖前呈整体状,开挖后成松散状。

(14) 湖南地区^[16]:灰色、青灰色的灰岩,中等风化,硬质岩石,夹少量钙质页岩及波曾灰岩,局部风化表面见刀砍状凹痕。节理、裂隙发育,多为张裂隙且均为方解石脉填充,剪裂隙不甚发育。节理线密度为 8 条/m~20 条/m,节理面密度 10 条/m²~45 条/m²。

上述 14 个不同地质条件、不同试验场地的岩体性质参数汇总在表 2 中。

表 2 试验场地的岩体特性汇总表

序号	试验场地	岩石风化程度	岩体硬度	岩石定名
1	甘肃白银	强风化—中等风	软质岩	粉砂质黏土
2	宁夏灵武	全风化—强风化	软质岩	砂岩
3	浙江舟山	强风化—中等风	硬质岩	凝灰岩
4	广东深圳	强风化	硬质岩	混合岩
5	湖北宜昌	微风化	硬质岩	石灰岩
6	陕西勉县	全风化	硬质岩	花岗岩
7	陕西略阳 I	全风化	软质岩	千枚岩
8	陕西略阳 II	强风化	软质岩	千枚岩
9	安徽太湖	全风化—强风化	软质岩	泥质砂岩
10	安徽六安	中等风化	硬质岩	石英细砂岩
11	北京房山	中等风化	硬质岩	砾岩
12	华北地区	强风化	硬质岩	安山岩
13	辽宁地区	强风化	硬质岩	花岗岩
14	湖南地区	中等风化	硬质岩	灰岩

2.2 试验基础尺寸

为便于分析,统一圆台型或直柱扩底型岩石嵌固基础的尺寸与符号,如图 1 所示。现场试验的 62 个岩石嵌固基础的具体尺寸如表 3 所示。

2.3 试验基础荷载位移曲线

与常规下压试验的荷载位移曲线不同,岩石嵌固基础的上拔荷载位移曲线基本呈现“陡变型”规律^[17-18]。在加载初期,基础位移随上拔荷载的增加呈线性变化,位移增量非常小;加载后期,基础位移随上拔荷载的增加而迅速增加,较小的荷载增量即产生较大的位移增量,岩石出现剪切破坏现象,基础呈现拔出破坏状态。

2.4 岩石等代极限剪切强度计算

根据规范规定^[13],针对“陡变型”曲线,取相应于陡变段起点的荷载值作为竖向极限上拔承载力;针对“缓变型”曲线,取破坏荷载的前一级荷载作为竖向极限上拔承载力,最终获得 14 个现场试验基础的极限上拔荷载与对应上拔位移,如表 3 所示。

根据公式(5),计算获得现场试验基础的岩石等代极限剪切强度 τ_c 取值,如表 3 所示。现场试验结果表明,即使针对特定的岩石地质条件,岩石等代极限剪切强度标准值并不是一个固定值,该值大小与基础结构型式、基础尺寸和试验荷载工况等因素相关。若同一场地只进行 2 个或 3 个基础试验则取平均值,超过 3 组试验进行标准化统计分析。

表 3 岩石嵌固基础尺寸及试验成果

试验场地	基础编号	基顶 d/m	基底 D/m	埋深 $h(h_1/h_2/h_3)/m$	露头 e/m	极限上拔承载力 T_u/kN	位移 s/mm	τ /kPa	备注
甘肃白银	GSBY-1	0.80	1.80	3.8	0.2	4200	2.88	>61	达到设备加载能力,基础未破坏
	GSBY-2	0.80	1.80	3.8	0.2	3600	4.82	>52	
	GSBY-3	0.80	2.00	4.5	0.2	4200	2.92	>44	
	GSBY-4	0.80	1.90	4.1	0.2	3900	0.60	>49	
	GSBY-5	0.80	1.60	3.4	0.2	5000	3.76	>92	
宁夏灵武	NXLW-1	0.80	1.00	0.5	0.0	250	7.37	103	
	NXLW-2	0.80	1.10	1.0	0.0	540	9.84	79	
浙江舟山	ZJZS-1	0.90	1.04	0.5	0.0	280	0.74	112	
	ZJZS-2	0.90	1.15	1.0	0.0	560	2.80	80	
广东深圳	GDSZ-1	0.80	1.40	0.5	0.0	140	1.00	43	
	GDSZ-2	0.80	1.40	1.0	0.5	320	3.02	39	
湖北宜昌	HBYC-1	0.80	0.90	0.5	0.0	1160	7.76	525	达到设备加载能力,基础未破坏
	HBYC-2	0.80	0.95	0.5	0.0	1300	6.38	568	
	HBYC-3	0.80	0.90	1.0	0.0	3300	1.60	551	
	HBYC-4	0.80	1.00	1.0	0.0	3200	1.61	507	
	HBYC-5	0.80	1.00	1.5	0.0	5600	1.89	>474	
	HBYC-6	0.80	1.00	1.5(1.0/0.3/0.2)	0.0	5400	0.73	>457	
陕西勉县	SZMX-1	0.80	0.95	0.5	0.0	45	11.26	17	
	SZMX-2	0.80	1.10	1.0	0.0	176	7.45	24	
陕西略阳 I	SZLY-1	0.80	0.95	0.5	0.0	70	3.27	28	
	SZLY-2	0.80	1.10	1.0	0.0	140	6.02	19	
陕西略阳 II	SZLY-3	0.80	1.00	1.5	0.0	600	16.30	49	
	SZLY-4	0.80	1.70	3.0	0.0	1800	6.29	39	
	SZLY-5	0.80	1.70	5.0	0.0	3200	17.42	29	
安徽太湖	AHTH-1	0.80	1.10	1.0	0.2	220	8.00	30	
	AHTH-2	0.80	1.25	1.5	0.2	400	1.88	28	
	AHTH-3	0.80	1.40	2.0	0.2	650	6.61	28	
	AHTH-4	0.80	1.55	2.5	0.2	1100	8.73	32	
	AHTH-5	0.80	1.70	3.0	0.2	1600	12.46	34	
	AHTH-6	0.80	1.70	4.0	0.2	2300	19.60	30	
	AHTH-7	0.80	1.70	5.0	0.2	3800	31.06	35	
	AHTH-8	0.80	1.10	1.0(0.5/0.4/0.1)	0.2	290	5.00	41	
	AHTH-9	0.80	1.25	1.5(1.0/0.4/0.1)	0.2	400	3.85	29	
	AHTH-10	0.80	1.40	2.0(1.5/0.4/0.1)	0.2	700	6.22	31	
	AHTH-11	0.80	1.55	2.5(2.0/0.4/0.1)	0.2	1050	12.08	32	
	AHTH-12	0.80	1.70	3.0(2.3/0.6/0.1)	0.2	1700	13.90	37	
安徽六安	AHLA-1	1.00	1.80	1.8	0.2	1820	14.41	86	
	AHLA-2	1.00	1.80	3.6	0.2	4200	16.59	67	
	AHLA-3	1.00	1.80	5.4	0.2	7500	11.56	60	
	AHLA-4	1.00	1.80	1.8(1.3/0.5/0)	0.2	1650	15.43	79	
	AHLA-5	1.00	1.80	3.6(3.1/0/5/0)	0.2	4500	21.68	72	
	AHLA-6	1.00	1.80	5.4(4.9/0.5/0)	0.2	5950	13.23	48	
	AHLA-7	1.40	1.80	1.8(1.3/0.5/0)	0.2	1300	20.25	60	
	AHLA-8	1.40	1.80	3.6(3.1/0/5/0)	0.2	3150	21.85	49	
	AHLA-9	1.40	1.80	5.4(4.9/0.5/0)	0.2	7350	12.86	58	
北京房山	BJFS-1	0.80	1.60	1.0	0.2	550	8.23	64	
	BJFS-2	0.80	1.60	1.8	0.2	1500	16.26	75	
	BJFS-3	0.80	1.60	3.6	0.2	4000	15.31	66	
	BJFS-4	0.80	1.60	1.0(0.5/0.5/0)	0.2	600	5.39	71	
	BJFS-5	0.80	1.60	1.8(1.3/0.5/0)	0.2	1300	7.41	66	
	BJFS-6	0.80	1.60	3.6(3.1/0.5/0)	0.2	5600	12.89	94	
	BJFS-7	1.00	1.60	1.0(0.5/0.5/0)	0.2	750	8.07	88	
	BJFS-8	1.00	1.60	1.8(1.3/0.5/0)	0.2	1500	14.78	76	
	BJFS-9	1.00	1.60	3.6(3.1/0.5/0)	0.2	5500	21.80	92	

续表 3

试验场地	基础编号	基顶 d/m	基底 D/m	埋深 $h(h_1/h_2/h_3)/m$	露头 e/m	极限上拔承载力 T_u/kN	位移 s/mm	τ $/kPa$	备注
华北地区	HB-1	0.25	0.35	0.75	0.0	94	—	36	1964 年试验, 无荷载位移 曲线
	HB-2	0.25	0.35	0.70	0.0	86	—	37	
	HB-3	0.70	1.25	1.73	0.0	710	—	42	
	HB-4	0.60	0.81	1.43	0.0	440	—	42	
辽宁地区	LN-1	1.00	2.00	1.6(0.6/0.8/0.2)	0.0	880	9.10	45	
	LN-2	1.00	2.00	2.0(0.6/1.2/0.2)	0.0	1200	6.90	45	
	LN-3	1.00	2.40	2.5(0.7/1.6/0.2)	0.0	2000	12.50	49	
湖南地区	HN-1	0.60	0.70	1.6	0.0	860	1.27	73	

结合现行规程^[13]中表 8.2.4.1 的常规表述方式,根据岩石坚硬程度与风化程度,对现场试验得到的岩石等代剪切强度标准值 τ_s 进行统计,统计结果按照从小到大的顺序进行排列,如表 4 所示。

表 4 岩石等代极限剪切强度标准值现场试验统计表

岩石类别	不同风化程度岩石被混剪强度试验值/kPa			
	未风化和微风化	中等风化	强风化	全风化
硬质岩	507(507~568)	61(48~86) 70(64~94) 73 96(80~112)	39(29~49) 41(39~43) 46(45~49)	21(17~24)
软质岩	—	91(79~103) >92	29(28~41) 39(36~42)	24(19~28)

注:括号外为标准化后统计值,括号内为现场试验基础计算得到的最小值与最大值。

2.5 岩石等代极限剪切强度取值建议

根据上述 14 个场地、62 组现场试验数据资料,同时确保输电线路杆塔基础的安全稳定运行,建议岩石等代极限剪切强度取值按照表 5 选择。

表 5 岩石等代极限剪切强度标准值取值建议

岩石类别	不同风化程度岩石极限剪切强度标准值/kPa		
	未风化和微风化	中等风化	强风化
硬质岩	100~250	50~100	25~50
软质岩	60~100	40~60	20~40

(1) 强风化软质岩取值:全风化软质岩最小试验值为 19 kPa,强风化软质岩最小试验值为 28 kPa,结合大量勘察单位的反馈,强风化软质岩下限取 20 kPa;强风化软质岩最大试验值为 42 kPa,建议强风化软质岩上限取 40 kPa。

(2) 中等风化软质岩取值:为与强风化软质岩的上限值相匹配,中等风化软质岩下限取 40 kPa;中等风化软质岩最大试验值为 103 kPa,但针对岩石锚杆基础设计时若 τ_s 取值大于 60 kPa,锚杆基础基本

不受到岩体自身剪切破坏模式控制^[9],考虑到输电线路工程的安全性,中等风化软质岩上限取 60 kPa。

(3) 微风化和未风化软质岩取值:为与中等风化软质岩的上限相匹配,微风化和未风化软质岩下限同样取 60 kPa。微风化软质岩无试验值,考虑到中等风化硬质岩与微风化软质岩的强度相当,可按照中等风化硬质岩的上限来确定。

(4) 强风化硬质岩取值:全风化硬质岩最小试验值为 17 kPa,强风化硬质岩最小试验值为 29 kPa,参考软质岩,建议强风化硬质岩下限取 25 kPa;强风化硬质岩最大试验值为 49 kPa,参考软质岩,建议强风化硬质岩上限取 50 kPa。

(5) 中等风化硬质岩取值:为与强风化硬质岩的上限相匹配,中等风化硬质岩下限同样取 50 kPa。中等风化硬质岩最大值试验值为 112 kPa,建议中等风化硬质岩上限取 100 kPa。

(6) 微风化和未风化硬质岩取值:为与中等风化硬质岩的上限相匹配,微风化和未风化硬质岩下限同样取 100 kPa。微风化硬质岩的最大值试验为 568 kPa,考虑实际情况,建议微风化和未风化硬质岩上限取 250 kPa。

与现行规程^[13]中表 8.2.4.1 对比,现场试验结果取值显著高于规程取值,平均提高幅度 50% 以上,特别是强风化、中等风化的岩体剪切参数的提高,对工程设计意义重大。

3 经济性比较分析

以通用设计中杆塔基础作用力为准,岩性采用为强风化软质岩,分别选用现行规程^[13]中最大值 20 kPa 与现场试验建议值 40 kPa,进行岩石嵌固基础设计分析。图 2 为岩石嵌固基础的混凝土材料用量与基础本体造价对比图。在相同条件下,采用现场试验建议取值,基础混凝土材料量降低 10.7%~31.3%左右,基础造价降低 10.1%~29.5%左右;且

随着基础作用力增大,基础混凝土材料量及造价降低越显著。

在保证安全的前提下,提高设计参数后的岩石嵌固基础可有效减少材料用量,减少土石方开挖量,缩短施工工期,经济效益良好,推广后其经济效益将更加显著,有效促进社会的和谐与进步。

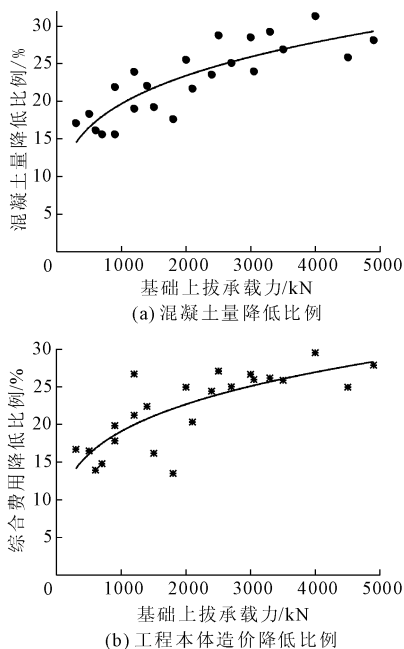


图2 岩石嵌固基础的材料量与工程本体造价影响分析

4 结论

通过14个场地、62组基础现场真型试验,绘制荷载位移曲线,通过计算得到了岩石关键设计参数取值,与现行规程相比,显著提高了岩石嵌固基础的关键设计参数“岩石等代极限剪切强度标准值”取值,为规范修编提供技术参考,经济效益和环保效益显著。

参考文献:

[1] 程永锋,邵晓岩,朱全军.我国输电线路基础工程现状及存在的问题[J].电力建设,2002,23(3):32-34.

- [2] 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,2005,26(11):25-27.
- [3] 陈榕,高宇聪,孟宪彬,等.我国输电线路基础型式对比及其适用性分析[J].东北电力大学学报,2015,35(6):77-85.
- [4] 唐其练,罗斌.新型岩石嵌固基础在500kV线路中的设计与应用[J].江西电力,2000,24(3):6-7.
- [5] 刘生奎.750kV永白输电线路杆塔及基础设计中的环保措施[J].电网与清洁能源,2012,28(4):52-56.
- [6] 王滨,李惠民,黄文芳,等.茂县—银杏220kV输电线路沿线地质灾害成因与特征研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):183-187.
- [7] 丁少梅,赵忠虎,王宁宁,等.岩石强度理论的分类评述[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):95-102.
- [8] 方月舵,郑卫锋,叶超,等.输电线路岩石嵌固基础选型及施工技术研究[J].电力勘测设计,2017(5):10-14.
- [9] 郑卫锋.岩石嵌固基础承载性能试验及其优化设计技术研究[R].北京:中国电力科学研究院,2017.
- [10] 郑卫锋,鲁先龙,程永锋,等.输电线路岩石嵌固式基础抗拔试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):152-157.
- [11] 崔强,孟宪乔,杨少春.扩径率与入岩深度对岩基挖孔基础抗拔承载特性影响的试验研究[J].岩土力学,2016,37(S2):195-202.
- [12] 鲁先龙,杨文智,满银,等.岩石等代极限剪切强度现场试验与应用[J].建筑科学,2016,32(S2):51-56.
- [13] 架空输电线路基础设计技术规程:DL/T 5219—2014[S].北京:中国电力出版社,2014.
- [14] 欧阳道庚.输电线路应用岩石基础的初步分析[J].电力建设,1964(8):23-29.
- [15] 孟庆波,赵义忠,刘桂五.送电线路风化岩石掏挖基础[J].电力建设,1987,4(3):32-35.
- [16] 何洪波.输电线路嵌固式岩石基础抗拔试验[J].电力建设,2007,28(9):18-20.
- [17] Lu X L, Qian Z Z, Zheng W F. Characterization and uncertainty of uplift load-displacement behavior of belled piers[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(2): 211-234.
- [18] 鲁先龙,程永锋.戈壁抗拔基础承载性能试验与计算[M].北京:中国电力出版社,2015.