

新型锚杆基础破坏机理及影响因素研究

鄢秀庆,辜良雨,余国庆,董碧霞,王伸富,王波

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:为克服锚杆基础在山区输电线路中应用的局限,文中提出了一种由自由段和锚固段组成的新型锚杆基础,通过有限元数值方法研究了新型锚杆的应力分布及失效机理,并对黏结强度、锚杆长度、岩石类型及孔杆直径比等因素进行了参数分析。研究表明:注浆体与岩石及锚筋与注浆体之间,其黏结应力的分布范围只在锚固段靠近张拉端的有限长度上且应力分布极不均匀;黏结强度是判断锚杆失效界面类型的重要参数指标,对承载力有较大影响;锚固长度存在峰值,破坏面发生在注浆体和岩石界面时,硬岩承载力明显高于软岩承载力;锚孔直径/锚杆直径的最佳比例为4~5倍。

关键词:新型锚杆基础;有限元分析;影响因素研究

中图分类号:TU 443 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-73-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220313

Research on Failure Mechanism and Influencing Factors of New Type Anchor Foundation

YAN Xiuqing, GU Liangyu, YU Guoqing, DONG Bixia, WANG Shenfu, WANG Bo
(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: In order to overcome the application limitation of anchor foundation in mountainous transmission lines, a new type of anchor foundation composed of free section and anchored section is proposed. The stress distribution and failure mechanism of the new anchor are studied by finite element numerical method, and the factors such as bond strength, anchor length, rock type and hole-rod diameter ratio are analyzed. The results show that: the distribution range of bond stress between grouting and rock and between anchor bar and grouting is only in the limited length of anchored section near the tension end, and the distribution of stress is extremely uneven; the bond strength is an important parameter to judge the failure interface type of anchor rod, and has a great impact on the bearing capacity; there is a critical value of the anchorage length, and the failure surface occurs at the interface between grouting and rock, the bearing capacity of hard rock is obviously higher than that of soft rock, and the optimal ratio of hole diameter to bolt diameter is 4~5 times.

Key words: new type anchor foundation; finite element analysis; influencing factor research

0 引言

现阶段山区输电线路基础主要采用的挖孔桩基础,由于成孔设备重,基坑开挖机械化程度非常低,而人工开挖速度慢且安全性也较差,在部分省区已被列入严格限制使用的范畴^[1-3]。山区机械化施工较为便利的基础为岩石锚杆基础,但其对地形坡度、覆盖层厚度、岩石风化程度和完整性要求较高,在山区输电线路中的应用受限,适用性相对较差^[4-8]。

为了克服挖孔桩基础及锚杆基础应用的局限性,在输电线路领域提出了新型锚杆基础方案。新型锚杆基础主要有基础承台和预应力锚杆组成^[9-10],下压力主要由承台传递,上拔力由锚杆承担。锚杆分自由段和锚固段,自由段布置在表层土层及风化层,锚固段布置在中风化岩层。通过自由段的设置,一方面可以穿透表层松散层,将力传递给锚固段;另一方面,锚杆张拉时,通过自由段的弹性变形对基础施加预应力。通过预应力的施加,可向

承台下土体施加压力,可以提高基础的整体承载力能力及锚杆的抗腐蚀性能力,具有较好的经济效益和社会效益。

1 传力机理

新型锚杆基础如图 1 所示。

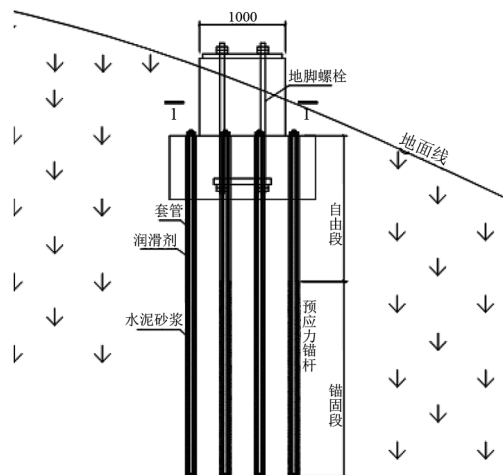


图 1 新型锚杆基础

新型锚杆基础的上拔力主要通过锚杆进行传递,受力过程较为复杂,因此下面主要研究上拔力的传递。上拔荷载通过锚固段传递给地基,锚固段的承载力取决于锚杆与注浆体、注浆体与岩石两个界面的黏结能力。

1.1 应力分布

锚杆基础的荷载应力状态是其力学性能研究的基础,这里采用弹性半无限体明德林(Mindlin)解来表示岩体的应力及位移分布,文献[11]基于此弹性解对注浆体与岩石界面的应力分布、锚杆与注浆体界面的应力分布进行了推导,注浆体-岩石界面上的黏结应力 $t_{gr}(z)$ 沿轴向的分布方程为

$$t_{gr}(z) = \frac{nA_0}{C_b} z e^{(-\frac{n}{2}z^2)} \quad (1)$$

其中:

$$C_b = 2\pi R_b \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{(1+u_r)(3-2u_r)R_b^2} \left(\frac{E_r}{E_{ag}} \right) \quad (3)$$

$$E_{ag} = \frac{E_a A_a + E_g A_g}{A_a + A_g} \quad (4)$$

式中: A_0 为张拉端所施加的轴向拉拔荷载, kN; z 为锚固长度, mm; n 为注浆体岩石界面的综合刚度系数;

u_r 为岩体的泊松比; E_r 为岩体的弹性模量; R_b 为锚孔半径; C_b 为锚孔周长; E_{ag} 为锚固体的当量弹性模量; E_a 为锚筋的弹性模量; E_g 为注浆体的弹性模量; A_a 为钢筋横截面积; A_g 注浆体横截面积。

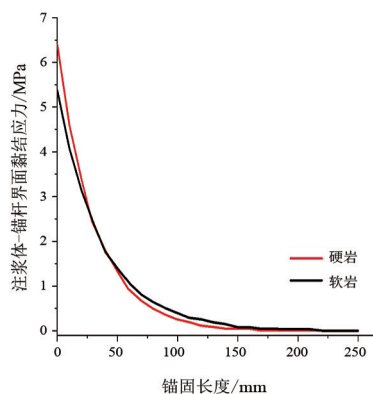
注浆体-锚杆黏结应力沿轴向的分布方程为

$$A_{ag}(z) = A_0 e^{(-\frac{n}{2}z^2)} \quad (5)$$

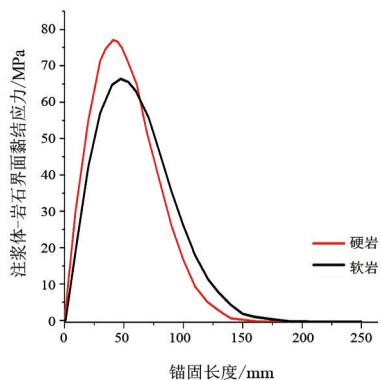
根据上述推导公式,对软质岩石、硬质岩石在上拔力作用下的应力分布进行计算,锚杆、岩石及注浆体力学指标见表 1,得到的界面黏结应力分布见图 2。

表 1 岩石及锚杆、注浆体力学指标

物体	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
软岩	1.66	52	3300	0.15
硬岩	2.68	52	4440	0.1
物体	R_c 直径/mm	面积/mm ²	弹性模量/GPa	密度/(g·mm ⁻³)
锚杆	24	452.2	200	7.85
物体	抗压强度/MPa	抗拉强/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
注浆体	14.3	1.43	30	0.2



(a) 注浆体-锚杆界面



(b) 注浆体-岩石界面

图 2 界面黏结应力分布

由图 2 中的界面黏结应力分布曲线可知:两种黏结应力分布是不均匀的,且在靠近锚固段的张拉端侧黏结应力高度集中,黏结应力的分布范围只在

锚固段靠近张拉端的有限长度上;目前的锚杆基础设计计算中黏结应力沿全长分布的假定与实际情况不符。

1.2 破坏机理

在清楚两个界面的应力分布后,即可分析其破坏机理。锚杆基础一般有两种破坏机理:1)注浆体-锚杆界面破坏;2)注浆体-岩石界面破坏。图3是两种界面的破坏本构关系。

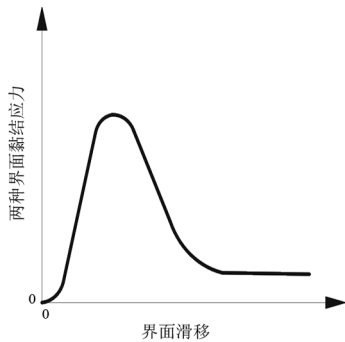


图3 界面黏结应力-滑移曲线

当发生注浆体-锚杆界面破坏时,在外荷载超过一定值时,孔口处的注浆体-锚杆界面黏结应力首先超过注浆体的弹性极限而进入塑性流动状态,界面发生脱黏破坏,锚杆与注浆体黏结应力的峰值沿着张拉端向内锚固段末端传递,并以渐进的方式发生滑动改变黏结应力的分布,最终导致钢绞线从注浆体中旋转拔出,遭到破坏。

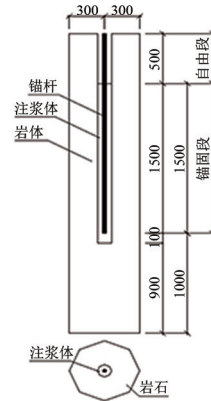
发生注浆体-锚杆界面破坏,其本质是注浆体和岩石剪切破坏。如图3所示,界面黏结强度从弹性阶段到达屈服极限,然后注浆体-岩石黏结界面沿主要糙度起伏齿爬坡,在黏聚力、摩擦力及剪胀效应共同作用下,抗剪强度达到最大值。峰值点过后,剪切应力随应变呈下凹型曲线下降,黏聚力丧失,当抗剪强度逐渐降低至某一点后,达到残余强度,注浆体-岩石黏结界面已经发生剪破断裂。

2 数值分析

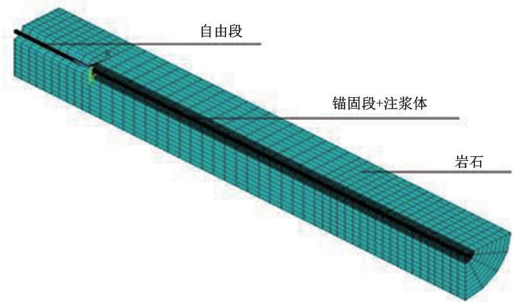
2.1 破坏机理分析

由第1章可知,锚杆基础的失效主要可以分为注浆体-锚杆界面的脱落破坏失效和注浆体-岩石粘结界面的剪切破坏两类。而两种破坏发生的条件并不一致,这里采用ANSYS软件进行锚固桩失效机理数值模拟分析。根据昆柳龙直流工程的工程实践,首先建立1/4实体模型,锚杆直径 R_c 为30 mm,

注浆孔直径为120 mm,自由段长度(未与注浆体接触)为500 mm,锚固段长度为1500 mm,注浆孔长度为1600 mm,岩体总长度为2500 mm,如图4所示。钢筋和岩石采用solid45单元,注浆体采用solid65单元。在对称面上施加对称约束,底面施加竖向约束,外弧面所有自由度均予以约束,在自由段顶面施加拉拔荷载。



(a) 几何模型



(b) 有限元模型

图4 结构几何示意及有限元模型

锚杆采用双线性随动强化 BINK 模型,注浆体采用多线性随动强化 MISO 模型,岩体采用 Druker-Prager 模型作为本构关系。3种材料之间的接触关系采用目标单元 TARGE170 和接触面单元 CONTA173 来模拟锚杆与注浆体、注浆体与岩石的接触面,法向刚度因子取值4,切向刚度取默认值,根据表1中3种材料的特性和文献[12]中的试验数据,接触参数取值见表2。

表2 接触单元参数

接触面	摩擦系数	黏聚力/MPa
锚杆与注浆体	0.40	0.8
注浆体与硬质岩石	0.65	0.3
注浆体与软质岩石	0.45	0.2

在锚杆上施加105 MPa的荷载进行应力计算

分析。锚杆、注浆体及岩石的应力云图见图 5, 两个界面应力分布见图 6。

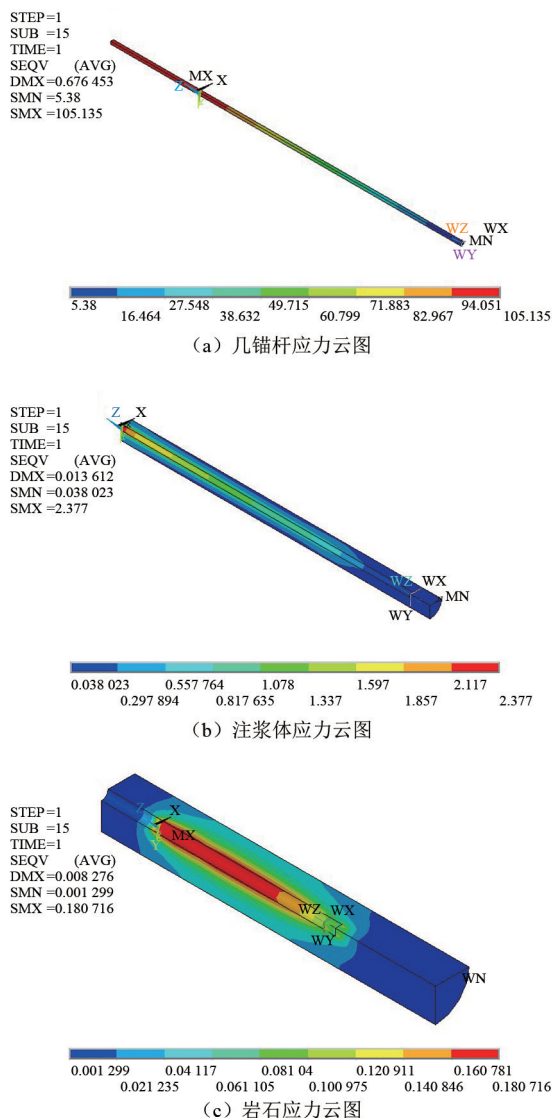


图 5 数值分析界面黏结应力分布

由图 5 可知, 锚杆自由段和锚固段的应力分布截然不同, 自由段无应力传递, 应力分布基本相同; 进入注浆体后, 随着埋深的增加, 应力逐渐扩散, 其应力分布表现为上大下小的规律, 到锚杆端部逐渐降为 0。注浆体的应力分布表现为: 注浆体的位移影响区随着外荷载的增加在逐渐扩散, 且从上到下逐渐减小。

由图 6 可知, 两个破坏界面的最大应力为 2.226 MPa, 处于锚杆与注浆体的接触界面的端部, 已经超过了其界面的黏聚力要求, 达到屈服值; 而注浆体-岩石界面的最大应力为 0.172 MPa, 未达到屈服值, 因此, 锚杆基础的破坏首先发生在注浆体-锚杆界面。随着外荷载的增加, 注浆体受拉屈服

的区段不断增加, 并逐渐退出工作, 应力分布发生了由表及里的转移, 影响区域在逐渐扩散。同样, 两个界面的相对位移量也说明了锚固桩的破坏形态, 锚固段端点位移为 0.38 mm, 注浆体的最大位移为 0.017 mm, 岩石端最大位移仅为 0.008 mm。数值模拟的应力分布和破坏机理也和第 1 章中的描述相印证, 说明了数值模拟的合理性。

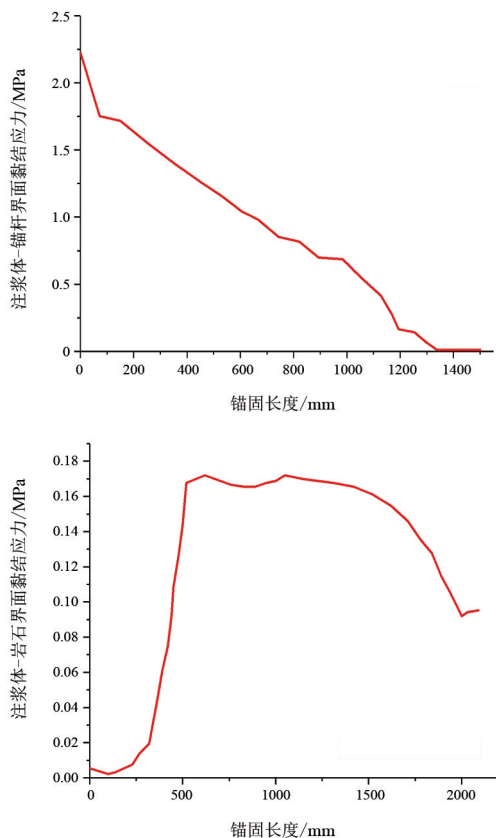


图 6 数值分析界面黏结应力分布

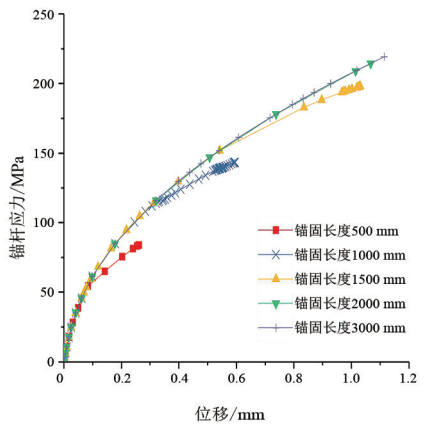
因此, 两种界面的黏结强度是判断其破坏形态的重要指标; 当注浆体-岩石界面的黏结强度较大时, 会首先发生注浆体-锚杆界面屈服失效而导致的第一类破坏, 即锚杆与注浆体黏结面的脱黏破坏, 这也是岩石锚杆基础的主要失效模式; 当注浆体-锚杆界面黏结强度较大时, 破坏面会转移到注浆体-岩石界面, 使其首先屈服失效。

2.2 参数分析

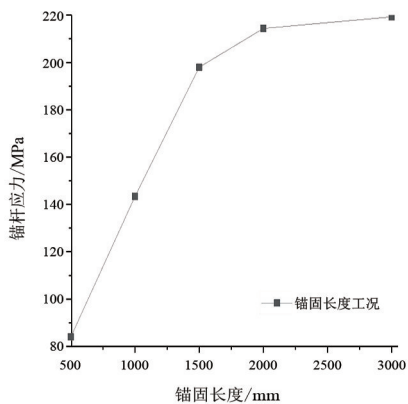
由第 2.1 节可知, 锚固桩的破坏是由于锚杆与注浆体之间发生了较大的位移错动, 最终导致了界面的黏结破坏。为了分析不同参数对锚固性能的影响, 根据锚固桩的受力特性和使用环境, 将考虑黏结强度、锚杆长度、孔杆直径比和岩石类型等 4 种因素对锚固性能的影响。

2.2.1 锚固长度的影响

在工程设计中,锚固长度小于有效锚固段长度时(工程中一般为35倍直径),增加锚杆锚固长度可有效提高抗拔能力^[13-14]。这里锚固长度分别取500 mm、1000 mm、1500 mm、2000 mm、3000 mm进行计算,结果如图7所示。



(a) 不同锚固长度下的荷载位移曲线



(b) 不同锚固长度对承载力的影响

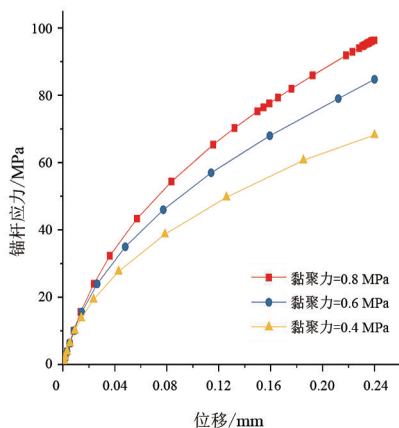
图7 锚固长度参数分析

由图7可知,锚杆应力在500~1500 mm锚固长度内基本呈线性增长,在锚固长度为2000~3000 mm时增长趋势趋缓,进入平台阶段。由此可知,当锚固长度在某一有效范围内时,增加其长度可有效提高承载力;但当锚固长度大于某一临界值时,随着长度的增加,对承载力的提高效果将大大降低。这主要是由于黏结应力沿锚杆轴向呈不均匀分布导致的。此外,当黏结应力达到极限值时出现应力分布向锚杆底部转移。因此,在相同的外荷载下,锚固长度越长,其发生的位移则越小。

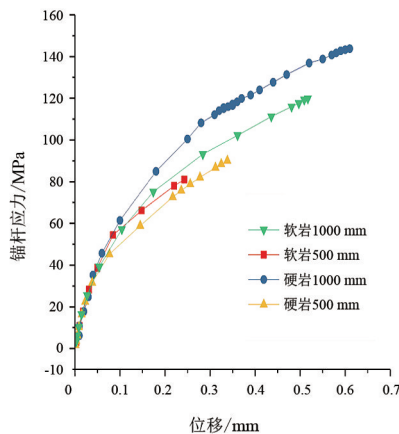
2.2.2 黏聚力的影响

为研究黏结强度对承载力的影响设计0.4 MPa、

0.6 MPa、0.8 MPa 3种黏聚力工况进行分析比较。图8(a)为不同黏结强度下的荷载位移曲线,由图可知,黏结强度和承载力正相关,随着黏聚力的增加,锚杆的上拔承载力明显提高。当位移为0.24 mm时,0.6 MPa与0.8 MPa两种工况的承载力分别是0.4 MPa时的1.24倍和1.41倍。同时,黏聚力的增加也会导致破坏面向注浆体-岩石界面转移。此外,横向比较来看,随着黏聚力的增加,接触面抵抗变形的能力明显加强,相同承载力的情况下,0.8 MPa时变形仅为0.4 MPa时的50%左右。



(a) 不同黏结强度下的荷载位移曲线



(b) 不同岩石类型工况的荷载位移曲线

图8 黏结强度及岩石类型参数分析

2.2.3 岩石类型的影响

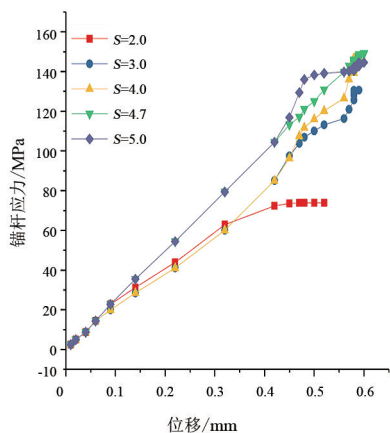
一般情况下破坏首先发生在锚杆-注浆体界面,改变岩石类型对上拔承载力无影响,随着黏结强度的增加,破坏面转移到注浆体-岩石界面时,岩石类型对承载力才会发生明显影响。为研究软质岩石和硬质岩石对上拔承载力的影响,将锚杆与注浆体黏结强度设为1.5 MPa,确保黏结破坏发生在注浆体-岩石界面。分别建立锚固长度 l 为500 mm和1000 mm两种模型,计算结果见图8(b)。锚固长度

l 为 500 mm 时,硬岩的上拔承载力较软岩提高 11%;锚固长度 l 为 1000 mm 时,硬岩的上拔承载力较软岩提高 20%。可见,当黏结破坏发生在注浆体和岩石界面时,锚入硬质岩石的承载力较软质岩石可提高 10%~20%,且随着锚固长度的增加,上拔承载力增加的趋势更加明显,这是因为硬岩的黏聚力更强。

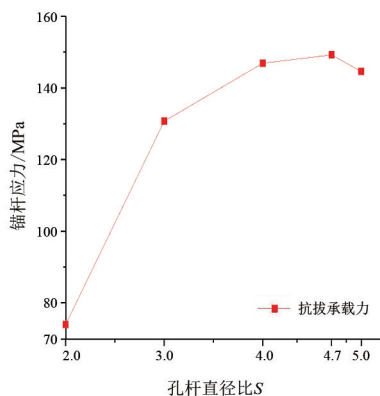
2.2.4 孔杆直径比的影响

同样,孔杆直径比也是锚固桩设计的重要参数。

为分析最佳锚孔/锚杆直径比,通过建立不同的锚孔直径模型,设置孔杆直径比 $S(S=R_b/R_c)$ 分别为 2.0、3.0、4.0、4.7、5.0 的 5 种工况进行比较(锚杆直径为 30 mm)。荷载位移曲线及承载力分布结果见图 9。



(a) 不同孔杆直径下的荷载位移曲线



(b) 承载力分布

图 9 孔杆直径比参数分析

图 9(a) 表明了不同孔杆直径比下的荷载位移曲线,该曲线说明在位移较小的弹性阶段,孔杆直径比的影响不大,随着位移的增大,孔杆直径比的影响增大。由图 9(b) 可知,随着 S 的增大,上拔承载力分布曲线先增大后进入平台阶段不再增大,甚至略有降低,存在最佳孔杆直径比。根据上面分析,

进入平台阶段主要是由于锚孔直径被削弱导致。因此,根据分析结果,推荐锚孔/锚杆直径的最佳比例为 4.7 倍。

3 结论

上面提出了一种新型锚杆基础的设计方法,以满足山区输电线路基础设计的需求。通过有限元软件进行破坏机理数值模拟,验证了数值方法的正确性,并对黏结强度、锚杆长度、岩石类型以及孔杆直径比等参数进行分析,得到以下结论:

1) 理论与模拟结构表明,黏结应力的分布范围只在锚固段靠张拉端的有限长度上,目前锚杆基础设计中假定黏结应力沿全长分布与实际情况不符。

2) 黏聚力强度是判断锚固桩破坏机理的重要指标,通常破坏首先发生在锚杆与注浆体界面。当该界面黏聚力较大时,破坏界面会转移到注浆体与岩石界面。且黏聚力的大小与锚杆基础承载力正相关。

3) 在一定范围内,锚固长度的增长能有效提高锚固桩的承载力。在所设计工况中,锚固长度取 2000 mm 时到达平台阶段。

4) 当破坏面发生在注浆体与岩石界面时,岩石类型对承载力有明显影响,硬岩基础承载力较软岩基础可提高 10%~20%。

5) 随着孔杆直径比的增加,上拔承载力分布曲线有明显峰值,所设计工况最佳孔杆直径比为 4.7。

参考文献

- [1] 能源行业电网设计标准技术委员会. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 崔强, 张学礼, 鲁先龙, 等. 岩石地基中不同结构形式挖孔基础抗拔承载特性研究[J]. 工业建筑, 2018(4): 77-83.
- [3] 费香泽, 程永锋, 苏秀成, 等. 华北地区输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 电力建设, 2007, 28(1): 26-28.
- [4] 能源行业电网设计标准技术委员会. 架空输电线路锚杆基础设计规程: DL/T 5544—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [5] 宋永发. 输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995(4): 89-94.
- [6] 郑卫锋, 邓海骥, 何金业. 输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 建筑科学, 2012(9): 57-59.

- [7] 杨海巍.输电线路岩石锚杆基础试验与破坏模式研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [8] 孙长帅,杨海巍,徐光黎.岩石锚杆基础抗拔承载力计算方法探究[J].岩土力学,2009,30(增刊1):75-78.
- [9] 肖俊,李炳奇,汪小刚.预应力锚索自由段注浆对锚固力影响研究[J].科技创新导报,2013(16):65-68.
- [10] 朱宏伟.锚索自由段嵌固深度设计和确定的理论研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [11] 张永兴,卢黎,饶泉宇,等.压力型锚杆力学性能模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(7):2045-2050.

=====
(上接第45页)

由表2可知,静电感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.317%,平均相对误差为0.138%;电磁感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为2.336%,平均相对误差为0.782%;静电感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.564%,平均相对误差为0.337%;电磁感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为1.68%,平均相对误差为0.683%。通过上述4项对比发现,拟合公式计算结果与仿真结果平均相对误差均在1%以内,吻合程度较高,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了参考。

5 结论

通过对500 kV同塔双回输电线路感应电压、感应电流进行研究,得到以下结论:

1) 当同塔双回线路一回运行、一回停运时,在基准设定参数下,停运线路上产生的最大静电感应电压为34.23 kV,最大电磁感应电压为9.44 kV,最大静电感应电流为8.08 A,最大电磁感应电流为288.42 A。

2) 电磁感应电压和静电感应电流与线路长度近似成正比关系,电磁感应电流随线路长度增加而变小,但逐渐趋于平缓;电磁感应电压和电磁感应电流随输送功率成正比关系显著增加,静电感应电压和静电感应电流随输送功率变化较小;感应电压和感应电流均随运行电压增加而增大;土壤电阻率增大使得电磁感应电压和电磁感应电流有一定的增加,对静电感应电压和静电感应电流影响不大。

3) 感应电压、感应电流拟合公式计算结果与仿

- [12] 饶泉宇.预应力岩锚内锚固段锚固性能及荷载传递机理研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [13] 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.
- [14] 郑卫锋,鲁先龙,程永锋,等.输电线路岩石锚杆基础工程临界锚固长度的研究[J].电力建设,2009,30(9):12-14.

作者简介:

鄢秀庆(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事送电结构设计。

(收稿日期:2021-09-05)

真结果吻合较好,平均相对误差均在1%以内,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了一定参考。

参考文献

- [1] 史华勃,丁理杰,彭施语,等.110 kV同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害研究[J].四川电力技术,2017,40(3):52-55.
- [2] 班连庚,王晓刚,白宏坤,等.同塔架设的220 kV/500 kV输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J].电网技术,2009,33(6):45-49.
- [3] 钟蓉.西宁一日月山750 kV同塔双回线路接地开关选择研究[J].四川电力技术,2011,34(5):54-57.
- [4] 马爱清,徐东捷,王海波,等.500 kV同塔双回输电线路下平行运行0.38 kV线路时的感应电压和感应电荷[J].高电压技术,2015,41(1):306-312.
- [5] 郑云龙,罗日成,邹明,等.330 kV同塔双回输电线路下平行运行的380 V线路感应电压电流仿真计算[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):216-222.
- [6] 刘浩军,阎国增,王少华,等.1000 kV皖南-浙北特高压交流线路静电感应电压分析[J].高电压技术,2015,41(11):3687-3693.
- [7] 龙雄峰.变电站500 kV同塔双回输电线路感应电压研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [8] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [9] 潘俊文,罗日成,吴东,等.500 kV同塔双回输电线路下平行排列油气管道上的感应电压和感应电流仿真分析[J].高压电器,2017,53(10):209-214.

作者简介:

唐浩龙(1994),男,硕士,助理工程师,从事电力设计工作;

樊艳(1979),女,高级工程师,从事电力设计工作;

冯千秀(1982),女,硕士,高级工程师,从事电力设计工作;

牟婷婷(1992),女,硕士,工程师,从事电力设计工作。

(收稿日期:2021-10-30)