隧道工程自然接地体接地电阻的计算方法研究

随着信息化的迅速发展，像地面智能化建筑一样，许多隧道工程也安装了智能化控制、数字化管理系统，有的甚至还具有数据中心的功能。而这些设备与系统的正常运行需要安装在性能良好、可靠的接地系统之上。同时，可靠的接地系统也是保障相关操作人员人身安全的基本要求。因此，在工程的设计与施工过程中，接地系统是非常重要的。根据隧道工程的特点，探讨了隧道工程自然接地体接地电阻值的计算方法，主要包括围护结构与支护锚杆等接地电阻值的计算。

苗朋厚　张国海　郭利平／总参工程兵第四设计研究院

苗朋厚／工程师

关键词／Keywords
接地电阻·
围护结构·
支护锚杆·

目前，常用的接地系统有3种：一是充分利用隧道围护结构内的钢筋网或围岩支护锚杆网等自然接地体；二是在隧道口外设置人工接地体；三是采用新型的接地装置，如离子接地体、化学降阻剂等。由于工程要求，在实施时，首先应采取第1种做法，然后再根据接地电阻情况，酌情采取第2种或第3种做法。由于隧道工程位于地下或山体中，其接地系统的设计与施工并不如民用建筑那样灵活。为了使接地方案更加合理，设计过程中宜对自然接地体的电阻进行计算。而目前参考书中有关工程自然接地体的计算公式一般都是针对民用建筑的，要求建筑物基础的长宽比在1～100之间，而若把隧道的跨度看作宽度，其长宽比一般都是几百，有的甚至上千，明显超出了公式的应用范围。因此，针对隧道工程自然接地体的接地电阻，需要一套新的计算方法。

隧道工程自然接地体接地电阻计算的前提条件

为了简化隧道工程接地电阻的计算过程，首先假设围护结构混凝土的导电性能与周围土壤一致。根据GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》第4.3.5条第2款“当基础采用硅酸盐水泥和周围土壤的含水量不低于4%及基础的外表面无防腐层或有沥青质防腐层时，宜利用基础内的钢筋作为接地装置”，该条文中解释，混凝土的电阻率与其湿度正相关，而土壤的电阻率与湿度也是正相关关系。另外，围护结构通常仅为几百毫米厚，对电气散流的影响小，可假定围护结构混凝土的导电性能与周围土壤一致，即看成单层土壤结构，简化计算公式的推导过程。

其次，假设混凝土内的钢筋网在电气上是良好贯通的。目前结构主体内钢筋网的实际施工做法主要采用绑扎与丝套等连接，而对接地连接有更严格要求的钢筋采用焊接方法。虽然两根钢筋在绑扎点处的电阻可能较大，但由于钢筋的数量众多，纵横交错，布置紧密，在整体上保持良好的电气贯通仍是比较容易的。因此将整个围护结构钢筋网看作一个性能良好的导电体，如同直径较大的钢管一般。

利用结构钢筋作为接地干线自身电阻的计算

对一些民用建筑，弱电设备机房至接地体的距离一般都很短，接地干线自身的电阻可忽略不计。而对隧道工程，常在口外设置人工接地体，这时人工接地体距离弱电设备机房的距离可能比较远，接地干线自身的电阻就不能轻易忽略，而应对其进行计算后确定。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为了节省成本，许多工程利用结构内的纵向主筋兼作接地干线，不同的工程围护结构内采用的钢筋也不一样，根据计算公式$R_a=\rho L/S$很容易计算出其电阻值及并联的钢筋根数。

假设设计要求的接地电阻不大于1 Ω，计算出不同工程的接地电阻值，如表1所示。工程长度较短、钢筋直径较大时，接地干线自身电阻可忽略不计，若长度较长，则不能忽略。

表1　接地干线电阻值

接地干线长度/m	人工接地体接地电阻R_1/Ω	接地干线的电阻R_2/Ω	φ8钢筋并联根数	φ10钢筋并联根数/根	φ12钢筋并联根数/根	φ14钢筋并联根数/根	φ16钢筋并联根数/根	φ20钢筋并联根数/根
4 800	0.8	0.2	–	–	20.76	15.25	11.68	7.48
3 000	0.8	0.2	–	–	12.97	9.53	7.3	4.67
1 000	0.8	0.2	9.733	6.229	4.326	3.178	2.433	1.557
1 000	0.9	0.1	19.467	12.459	8.652	6.356	4.867	3.115
500	0.8	0.2	4.867	3.115	2.163	1.589	1.217	0.779
500	0.9	0.1	9.733	6.229	4.326	3.178	2.433	1.557
300	0.8	0.2	2.920	1.869	1.298	0.953	0.730	0.467
300	0.9	0.1	5.840	3.738	2.596	1.907	1.460	0.934

围护结构自然接地体接地电阻的计算

利用钢筋混凝土基础作为接地体的计算公式有两种，一是《工业与民用配电设计手册》第3版中给出的建筑物单个基础接地体接地电阻的计算公式为

$$R_a=1.1K_2\frac{\rho}{L_1} \tag{1}$$

由于隧道工程的长宽比很大，不能得到形状系数K_2的值，因此也无法利用式（1）进行接地电阻计算。

二是《实用接地技术》中给出的计算公式，即

$$R_a=\frac{K\rho}{\sqrt{ab}} \tag{2}$$

同样，系数K的值也无法根据长宽比得出。

根据上文的假设，隧道工程在整体上可看作一根水平敷设的钢管，这样就可采用平放圆钢接地体的计算公式进行计算（作为接地体，钢管与圆钢的效果几乎一样）。《工业与民用配电设计手册》第3版第14章给出的平放圆钢接地体计算公式为

$$R_a=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\left(\frac{2l}{d}+\ln\frac{\sqrt{16t^2+l^2}+l}{4t}\right) \tag{3}$$

式中，ρ为土壤电阻率，Ω·m；l为建筑物的长度，m；d为等效直径，m；t为埋设深度，m。

隧道工程围护结构自然接地体假设成圆钢，夸大了其接地性能，接地电阻的理论计算值略小于实际电阻值。

支护锚杆自然接地体接地电阻的计算

由于安全的需要，目前多数隧道工程在开掘的过程中都采用锚杆支护加固，如图1所示。不同的工程锚杆的布置方式略有不同，有的呈等边三角形布置，有的呈正方形布置。

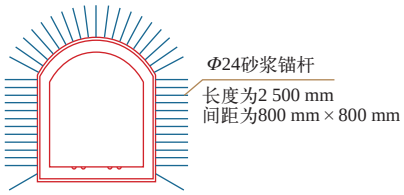

图1　工程锚杆支护布置图

根据图1，锚杆成放射性地深入到土壤中，且与工程主体成垂直状态。这种结构特点完全符合接地装置的布置要求，有效地降低了接地系统的接地电阻值。

1. 多根支护锚杆接地电阻的计算公式

单根支护锚杆接地电阻的计算非常方便，直接利用单根垂直接地体计算公式即可。但计算多根垂直接地体的电阻时，却比较繁琐。因为还需考虑它们之间的互阻。如果相邻垂直接地体之间的距离较

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

远，工程上一般认为最短为5 m，则可忽略互阻。

但是，由于支护锚杆的安装距离为1 m左右，互阻不能忽略，因此最终的电阻值不仅仅是并联电阻，还要考虑到它们之间的互阻。从下文的计算可知，互阻往往起到主要作用。产生互阻的主要原因是接地体之间的屏蔽效应，接地体间的距离越近，屏蔽效应越明显，同时接地体的根数越多，屏蔽效应也越大。

根据IEEE Std 80—2010《Guide for Safety in AC Substation Grounding》，多根垂直接地体的工频接地电阻计算公式为

$$\begin{aligned} R_{1r} &= R_1 + R_r = \frac{R_{10}}{n} + \frac{R_b}{n}(\sqrt{n}-1)^2 \\ R_{10} &= \frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln\frac{8l}{d}-1\right) \\ R_b &= 0.213(1+B)\alpha_1\rho/\sqrt{S} \\ \alpha_1 &= \left(3\ln\frac{L_0}{\sqrt{S}}-0.2\right)\frac{\sqrt{S}}{L_0} \\ B &= \frac{1}{1+4.6(h/\sqrt{S})} \end{aligned} \tag{4}$$

式中，R_{1r}为多根垂直接地体的工频接地电阻，Ω；R_1为多根垂直接地体并联且不考虑互阻时的接地电阻，Ω；R_r为多根垂直接地体之间的互阻，Ω；R_{10}为均匀土壤中单根垂直接地体的接地电阻，Ω；R_b为面积为S的薄板的接地电阻，Ω；n为垂直接地体的根数；l为垂直接地体的长度，m；d为垂直接地体的等效直径，m；B为与S和h有关的系数；α_1为S的形状系数；ρ为均匀土壤电阻率，Ω·m；S为垂直接地体布置的面积，m^2；L_0为S的周边长度，m；h为垂直接地体的埋深，m，在本文中与l相等。

2. 多根支护锚杆接地电阻计算公式的应用

首先假设所有相邻支护锚杆都是平行的，由于工程的剖面是拱形的，一些相邻支护锚杆并不平行，这样假设主要为了在对结果影响有限的前提下简化计算过程；其次是除相邻垂直接地体外，忽略其他垂直接地体之间的影响；然后假设锚杆的布置是均匀的，即成等边三角形，且布满整个工程的侧墙与拱顶，这与实际情况较为一致。并且从下文可知，其计算过程也包含了锚杆呈正方形布置的情况。

多根垂直接地体接地电阻计算公式中的多数参数都可根据工程情况直接得出，而下面这些参数需要计算后确定。

（1）锚杆布置面积S

从图1可知，在工程的侧墙和拱顶均布置了锚杆。假设侧墙高度为L_a，顶拱的弧长为L_b，工程的长度为L_c，则锚杆的布置面积$S=(2L_a+L_b)L_c$。

（2）锚杆布置区域的周边长度L_0

锚杆布置区域的周边长度，即S的周长$L_0=2(2L_a+L_b)+2L_c$。

（3）锚杆总根数n

支护锚杆总根数n的计算有些复杂，下面推导其计算过程。

1）锚杆的布置规律。由于锚杆的布置是均匀的，则所有相邻锚杆的间距都相等，相邻锚杆之间组成等边三角形，如图2所示。

若相邻锚杆之间的间距为L_d，则等边三角形的面积$S_a=1/2L_d^2\sin 60$。则等边三角形的总个数$N_a=S/S_a$。

由图2可知，整个区域都由等边三角形组成，每根锚杆是6个等边三角形的顶点，每个等边三角形对应着三根锚杆，由于整个区域内等边三角形的总个数已经确定，则整个区域内锚杆的根数也是确定的。为了导出锚杆根数的计算公式，首先介绍一下皮克定律。

2）皮克定律。皮克定律是奥地利数学家皮克发现的一个计算点阵中多边形面积的公式。如图3所示，若多边形内部的格点数为m_1，多边形边穿过的格点数为m_2，则多边形的面积为

$$S_m = m_1 + \frac{m_2}{2} - 1 \tag{5}$$

图2 锚杆布置图

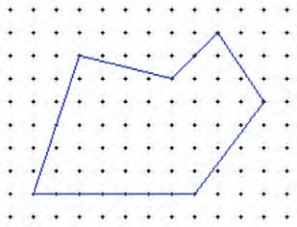

图3 皮克定律格点示意图

3）正方形的个数与格点的关系式。

假设格点的单位为1，同时多边形的边全部由

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

纵向与横向的折线组成，如图4所示，则多边形的面积就等于多边形内正方形的个数N_m，则

$$N_m = m_1 + \frac{m_2}{2} - 1 \quad (6)$$

4）等边三角形的个数与格点的关系。由于一个正方形的面积等于两个等边直角三角形的面积之和，设直角三角形的个数为N_n，则公式可变形为

$$\frac{N_n}{2} = m_1 + \frac{m_2}{2} - 1 \quad (7)$$

进一步，直角三角形也可变形为等边三角形，如图5所示。只要多边形的边不穿过三角形的内部，即沿着三角形的边绘制，则多边形内等边三角形的个数N_a也满足式（7）。

5）锚杆总根数的确定。由上文可知，等边三角形的个数$N_a = S/S_a$，其实这是一个非准确值，因为锚杆的实际布置并不是绝对均匀的，同时在区域的边沿上也并非沿着三角形的顶点布置。但对整体来说，这些因素产生的误差微乎其微，不会对结果产生较大的影响，完全能够满足工程计算的需要。另外，从图3中可以看出，皮克定律本身只是要求多边形的顶点位于格点上，对其边的走向并没有限制，所以上文的推导过程是非常合理的。

在图5中，m_1为多边形内部锚杆的根数，m_2为多边形边上锚杆的根数。根据公式$m_2 = L_0/L_d$确定m_2的值。这个公式的前提是假设L_0完全沿着等边三角形的顶点绘制，实际上并不一定如此，但同N_a一样，误差有限。于是，支护锚杆总根数$n = m_1 + m_2$。

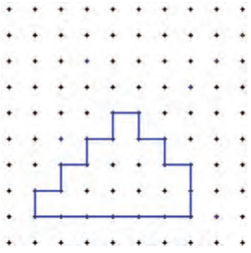

图4　正方形的个数与格点的关系

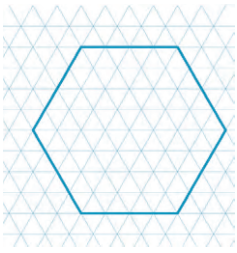

图5　等边三角形的个数与格点的关系

3. 接地电阻的计算

根据上述方法计算了一组数据，如表2所示。其中，拱口锚杆安装周长是根据工程的拱口跨度为9 m、侧墙高度为5 m计算得出的。

表2　工程锚杆接地电阻值

工程总长度/m	拱口锚杆安装周长/m	锚杆长度/m	锚杆的等效直径/m	锚杆安装间距/m	锚杆的总根数	土壤电阻率/Ω·m	接地电阻R_{lr}/Ω
4 800	21	2.50	0.024	0.80	187 948	5 000	2.178 9
4 800	21	2.50	0.024	1.00	121 251	5 000	2.181 7
4 800	21	2.50	0.020	1.00	187 948	5 000	2.182 2
2 000	21	2.50	0.024	0.80	78 327	1 000	0.890 4
1 000	21	2.50	0.024	0.80	39 177	1 000	1.536 5
500	21	2.50	0.024	0.80	19 602	1 000	2.578 4

由表2可知，锚杆的接地电阻值与工程长度、土壤电阻率有较大的相关性，而与锚杆的安装间距、锚杆的长度和锚杆的等效直径的相关性较小，这也符合工程的实际情况。

结束语

主要探讨了隧道工程自然接地体接地电阻的理论计算方法，为接地系统的设计提供一定的数据参照。由于隧道工程位于地下或是山体之中，接地系统的设计存在着其自身的局限性。根据这些数据，将有助于提高工程接地系统设计的准确性和针对性，也有助于降低接地的施工成本。

参考文献

[1] 刘丙江．实用接地技术 [M]．北京：中国电力出版社，2012．

[2] 中国航空工业规划设计研究院．工业与民用配电设计手册 [M]．3版．北京：中国电力出版社，2005．

[3] 王洪泽．复合基地网接地电阻的简化计算 [J]．电网技术，2001，25 (8)：70-72．

[4] 注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会．注册电气工程师执业资格考试专业考试相关标准（发输变电专业）[M]．北京：中国电力出版社，2012．

[5] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc．IEEE Std 80—2000 IEEE guide for safety in AC substation grounding [S]．

（收稿日期：2015－02－04）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net