

電気防食用アノードの接地抵抗に関する検討

防食・補修工法研究会 柏木達夫

1. はじめに

土壌埋設パイプライン、海底パイプラインおよび港湾鋼構造物などのインフラ設備には、腐食による内容物の輸送停止といった重大事故を避けるため、防食工法が適用されるのが常である。防食工法にも色々あるが、防食を施された設備の経時変化を定量的に数値で把握できる利便性を持つ電気防食工法が適用されることが多い。

適用された電気防食工法にとり大事なことは、必要十分な量の防食電流が供給されていることである。電気防食用アノードの供給する防食電流値の決定を左右するものは接地抵抗と言っても過言ではない。即ち、アノードの接地抵抗が最も重要な因子である。

ところで、接地抵抗を決定する計算式は、幾多の先達により静電容量理論を適用したものや、ラボ・フィールド実験の結果を理論化したものなどが提案されているが、フィールドでの適用に当たっては少なくない問題が指摘されている。

そこで、我が国で汎用化されている *Dwight* の接地抵抗式を使用し、水平設置と垂直設置に於ける差異や単独本と複数本設置時の最適化条件などについて思考実験を繰り返し、理論面から検討を加えた。以下に検討経緯の詳細を報告する。

2. 検討方法

2. 1 接地と接地抵抗

物の本によると、接地とは、アノードを大地と電氣的に結び付けることであり、接地抵抗とは、接地に於ける接地電流の流れやすさの目安であるとされている。

アノード接地抵抗 (R_a) の構成要素としては次の三つが挙げられている。先ずアノード自身の抵抗、次にアノードの表面とこれに接する土壌との間の接触抵抗、そして最後にアノード周囲の土壌の示す抵抗である。このアノード接地抵抗に影響を与える最も重要なものは、アノード周囲の土壌抵抗率 (ρ) であり、次に重要なものは、アノードの形状と寸法と言われている。以上の事から接地抵抗はこれら 3 因子の関数として扱うことが出来、数学的には $R_a = f(\rho, \text{形状}, \text{寸法})$ と表現される。

2. 2 アノード接地抵抗式

わが国では *Dwight* や *Tagg* が提案した式を変形したものがアノード接地抵抗式として汎用化されているのが実状である。今、アノードの長さ寸法と口径を L と D 、土壌抵抗率を ρ およびアノードの埋設深さを $S/2$ とすると、*Tagg* の式は以下の様に表される。

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L^2 + 4L\sqrt{S^2 + L^2}}{DS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1 \right) \dots \dots (1)$$

この式を *Maclaurin* 展開し、*S* と *L* の大小で場合分けを行い計算すると、良く知られている以下の *Dwight* の二つの式が得られる。

$$\text{深埋電極 (水平設置) の場合} \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D} - 1 \right) \quad \dots \dots (2)$$

$$\text{浅埋電極 (垂直設置) の場合} \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 \right) \quad \dots \dots (3)$$

3. 検討結果と考察

検討に際しては、国内の施工実態を踏まえ、アノード長さを 1m、直径を 0.2m、土壤抵抗率を 100Ωm、水平埋設時の深さを 1.5m および垂直埋設時を 0m とした。尚、検討条件は、以下の表 1 に示す様な 5 ケースとして検討した。

表 1 検討条件

条 件	水平設置タイプ	垂直設置タイプ	
単独本設置	○	○	
複数本設置	○	横方向	○
		縦方向	○

3. 1 単独本数の解析

3. 1. 1 水平設置

① 埋設深さによる変化

まず、*Tagg* の式(1)と *Dwight* の式(2)の乖離度合いを確認するため、埋設深さ *S/2* を様々に変化させた。表 2 に示す様に埋設深さに拘わらず、差分比率は 10% 以下であり、全く同じ値にするためには 42m の深さが必要である。

② アノード長と口径による変化

表 3 と図 1 に示す様に口径と長さの両者が増加するのに伴い小さくなるが、口径が 0.8m を超えると、これまでとは逆に大きくなる傾向が見られる。

表 2 水平設置時の埋設深さによる接地抵抗の変化

<i>S/2(m)</i>	1.5	2	2.5	5	42
<i>Tagg</i> の式 (<i>Q</i>)	34.4	33.7	33.3	32.6	31.9
<i>Dwight</i> の式 (<i>Q</i>)	31.8				
比 率	1.08	1.06	1.05	1.03	1.00

表 3 水平設置時のアノード長と口径による接地抵抗の変化

<i>L(m)</i> \ <i>D(m)</i>	0.2	0.4	0.5	1.0
1.0	31.8	20.7	17.2	6.1
1.2	28.9	19.7	16.7	7.5
1.5	25.5	18.1	15.8	8.4
2	21.4	15.9	14.1	8.6

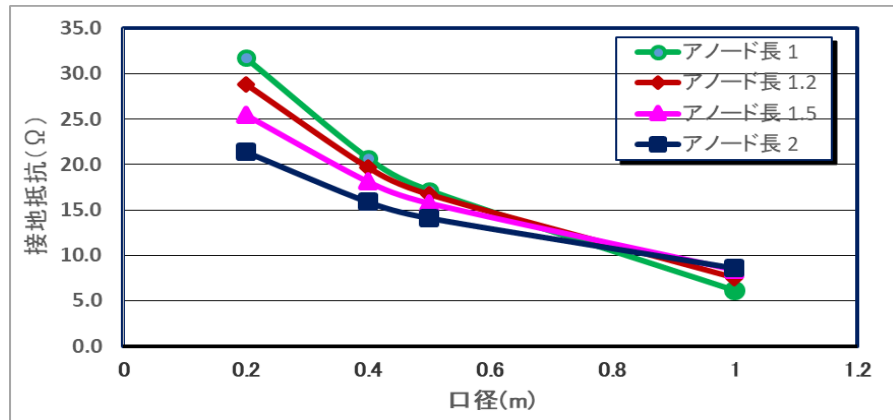


図1 水平設置時のアノード長と口径による接地抵抗の変化

3. 1. 2 垂直設置

① 埋設深さによる変化

式(3)を適用し、水平埋設時と同様の解析を行うと、表4に示す様に埋設深さが0.5mの場合を除き、その深度に拘わらず、差分比率は殆ど無視できることが分かる。

表4 垂直設置時の深さによる接地抵抗の変化

$S/2(m)$	0.5	1.5	2	2.5	5
Tagg の式 (Ω)	39.2	34.4	33.7	33.3	32.6
Dwight の式 (Ω)	42.8				
比率	0.92	0.80	0.79	0.78	0.76

② アノード長と口径による変化

表5と図2に示す様に口径と長さの両者が増加するのに伴い小さくなる。

表5 垂直設置時のアノード長と口径による接地抵抗の変化

$L(m) \backslash D(m)$	0.2	0.4	0.5	1.0
1.0	42.8	31.8	28.2	17.2
1.2	38.1	28.9	25.9	16.7
1.5	32.8	25.5	23.1	15.8
2	26.9	21.4	19.6	14.1

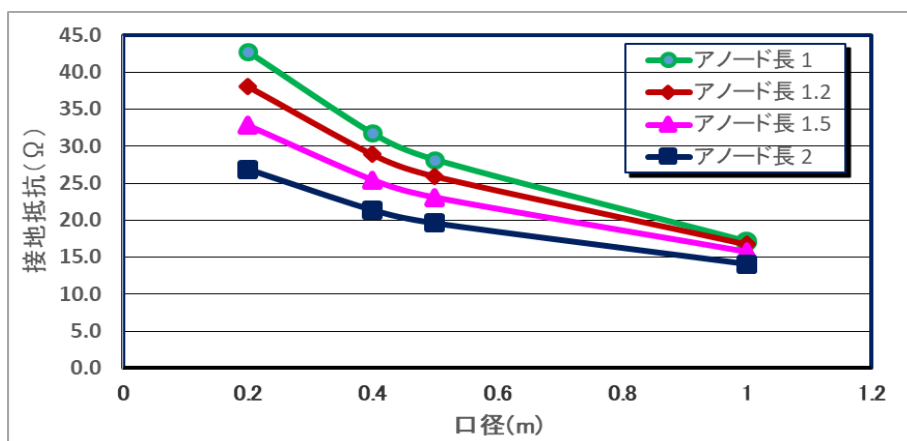
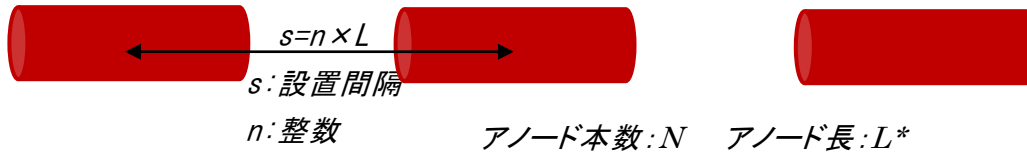


図2 垂直設置時のアノード長と口径による接地抵抗の変化

3. 2 複数本数の解析

3. 2. 1 水平設置

複数のアノードを水平に設置する場合は、**図 3** に示す様な考え方で電極長 L^* を算定する。この n 、 N 、 s を様々に変化させ、得られた値を式(4)に代入すると**表 6** および**図 4** に示す結果が得られる。



$$L^* = nL(N - 1) + L = (nN - n + 1)L$$

図 3 アノードを複数本水平に設置する場合の電極長の算定法

$$R = \frac{\rho}{2\pi L^*} \left(\ln \frac{4L^*}{D} - 1 \right) \dots \dots (4)$$

表 6 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

$n \backslash N(\text{本})$	2	3	5	8	10
3	13.5	9.0	5.6	3.7	3.0
4	11.5	7.4	4.5	2.9	2.4
5	10.0	6.4	3.8	2.5	2.0

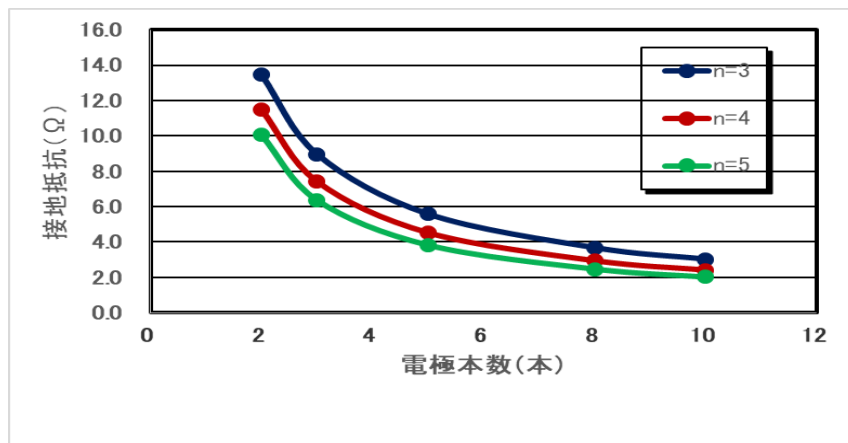
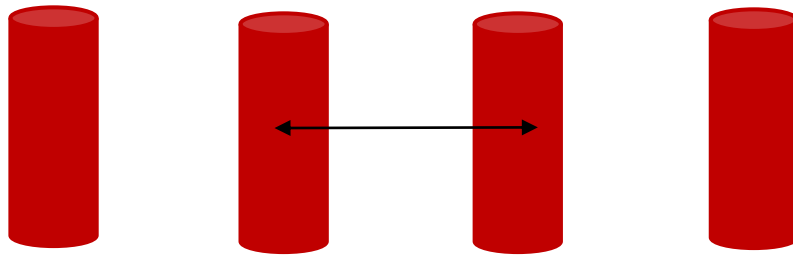


図 4 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

3. 2. 2 垂直横方向設置

複数のアノードを垂直横方向に設置する場合は、**図 5** に示す様な考え方で電極長を算定する。この N 、 s を様々に変化させ、得られた値を式(5)に代入すると**表 7** および**図 6** に示す結果が得られる。



アノード本数: N 設置間隔: s

図5 アノードを複数本垂直横方向に設置する場合の電極長の算定法

$$R = \frac{\rho}{2\pi LN} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 + \frac{2L}{s} \ln(0.656N) \right) \dots \dots (5)$$

表7 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

$s \backslash N$ (本)	2	3	5	8	10
3	22.8	16.7	11.1	7.5	6.3
5	22.3	15.7	10.1	6.7	5.5
10	21.8	15.0	9.3	6.0	4.9

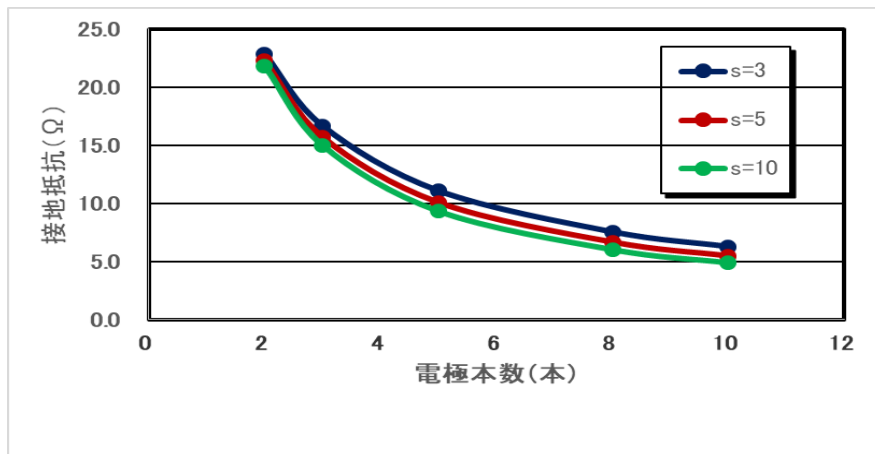


図6 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

3. 2. 2 垂直縦方向設置

複数のアノードを垂直縦方向に設置する場合は、図7に示す様な考え方で電極長 L^* を算定する。

この n 、 N 、 s を様々に変化させ、得られた値を式(6)に代入すると、表8および図8に示す結果が得られる。

$$L^* = nL(N-1) + L = (nN - n + 1)L$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L^*} \left(\ln \frac{8L^*}{D} - 1 \right) \dots \dots (6)$$

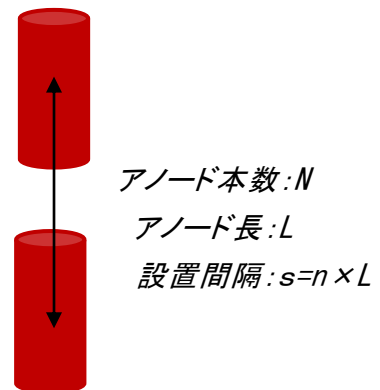


図7 アノードを複数本垂直縦方向に設置する場合の電極長の算定法

表 8 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

n \ N (本)	2	3	5	8	10
3	16.2	10.5	6.4	4.2	3.4
4	13.7	8.6	5.2	3.3	2.7
5	11.9	7.0	4.2	2.7	2.2

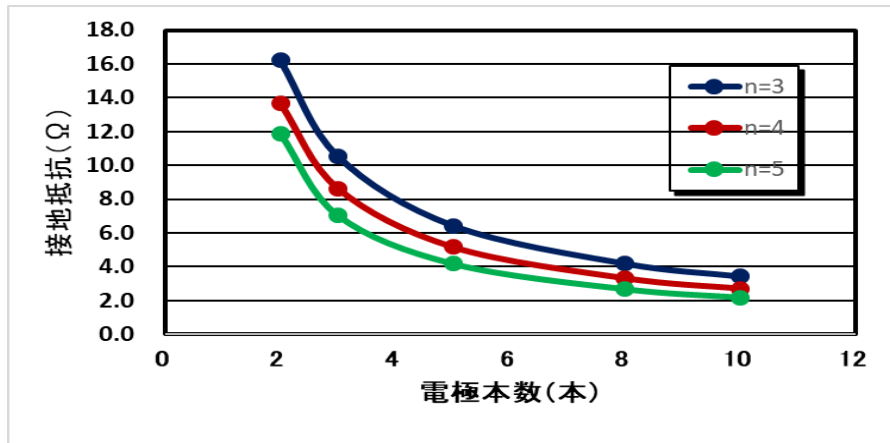


図 8 アノード設置間隔と設置本数による接地抵抗の変化

3. 3 解析・検討結果のまとめ

今般実施した解析・検討により得られた知見を以下にまとめる。

- ① 単独アノードを水平設置する場合、*Tagg* 式より *Dwight* 式で計算した接地抵抗の方が小さく、逆に垂直設置では *Tagg* 式での接地抵抗の方が小さくなる。
- ② アノード長と口径の増加による寄与度は水平設置では大きい、垂直設置では小さい。
- ③ 複数アノードを設置する場合、接地抵抗値が最も小さくなるのは水平設置であり、それほど変わらない垂直縦方向設置が続き、垂直横方向設置では約 2 倍の大きさとなる。
- ④ 水平設置と垂直縦方向設置ではアノード設置間隔の増加に伴い接地抵抗は小さくなる。
- ⑤ これに反し、垂直横方向設置ではアノード設置間隔が接地抵抗に寄与する割合は大きなものではない。

4. まとめ

あくまでも思考実験による理論的な検討から得られた結果であり、実フィールドでの調査が必要ではあるものの、以下の事が判明した。

- ・ 複数アノードの設置に際しては、水平設置ないし垂直縦型設置が推奨される。
- ・ アノードの口径や長さの増加に伴い接地抵抗は小さくなるが、アノードの製造時や施工時の状況や問題点を考慮すると、アノード長は 1.5m、口径は 0.4m までが現実的な値と考えられる。

参考文献

- 1) H. B. Dwight : "Calculation of Resistances to Ground", Electrical Engineering, No.12, 1936
- 2) G.F. Tagg : "Earth resistances", George Newnes Ltd. (1964)