

接地設計と試験測定

1.接地抵抗を構成する要素.....	130
2.大地抵抗率.....	130
3.接地関連の試験測定方法.....	131
4.形状による接地抵抗予測計算.....	137

接地設計と試験測定

接地を分類すると強電に用いる保安用接地と弱電に用いる回路機能用接地に大別する事が出来る。

保安用接地とは、感電防止、地絡電流の感知等、人体感電保護又は、機器対する過電圧保護を目的として施設される接地システムである。雷保護用接地システム等も雷過電圧から機器及び人畜を保護する保安用接地である。

1. 接地抵抗を構成する要素

接地抵抗は下記の要素により変化する。

- ① 接地線・接地電極の導体抵抗
- ② 接地体の表面とこれに接する土壌との間の接触抵抗
- ③ 接地体を施設する土壌の固有抵抗

この内、③の“土壌の固有抵抗”である大地抵抗率が接地抵抗値を決定する基本的要素である。

2. 大地抵抗率

大地抵抗率 ρ ($\Omega \cdot m$) は土壌が有する固有抵抗で、単一の接地体で同形状を施設した場合、接地抵抗は土壌の抵抗率により抵抗値が変化する。

この大地抵抗率 ρ は、

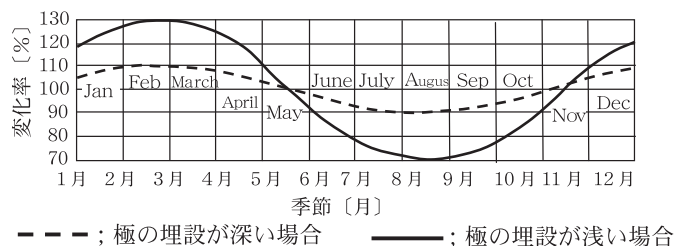
- ① 地質により値が異なる。 (第 2-1図参考)
- ② 土壌の含水率により値が変化する。 (第 2-2図参考)
- ③ 季節の移り変わりにより変化する。 (第 2-3図参考)

第 2-1図 土壌抵抗率の代表的な値

地 質	土壌の抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
粘土質湿地	10~150
畑	10~200
湿地下層砂利質	100~1000
山地粘土	200~2000
山地(砂利岩岩石)	2000~5000
河岸河床跡(砂利玉石)	1000~5000
ローム層 (赤土)	50~500
コンクリート (吸水状態)	20~100
砂岩, 頁岩	10~500
岩盤一般	1000~5000

第 2-2図土壌の抵抗率に対する水分の影響の一例

土の含む水分 〔乾燥した土の重量 に対する [%〕〕	砂まじりの土壌の 抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
2	1800
4	600
6	380
8	290
10	220
12	170
16	130
20	90
24	70
28	60



第 2-3図 大地抵抗率の季節変動

これらの変動を考慮して接地設計をおこなう事が重要である。

また、雷保護システムの接地システムを計画する上では、設計者は計画地域または接地極を施設する付近の大地抵抗率を把握する必要がある。

3. 接地関連の試験測定方法

接地抵抗値を測定する方法は、一般的に 3 電極法が用いられる。

又、接地抵抗は大地の要する固有抵抗（大地比抵抗率： ρ ）と密接な関係にあるので、この大地比抵抗率を試験測定により得る事も接地試験に含まれる。この接地抵抗の測定に用いる試験用機器は、「接地測定器」、「大地比測定器」等の名称で、各測定器メーカーより市販されているが、その測定原理は 3 電極法、四電極法によるもので、操作は各機器により若干異なるが、何れも測定値が目視できる直読方式としている。

3-1 3 電極法による測定原理

接地抵抗の定義は、「1 つの接地極があって、これに電流 I [A] が流入すると、接地極の電位が周辺の大地に比べ V [V] だけ高くなる、この時の電位上昇と接地電流の比 V / I [Ω] をその接地極の接地抵抗とする。」である。

一般の接地測定器を使用しての測定は、上記の定義に基づく『電位降下法』による測定である。第 3-1 図における E は測定の対象（主接地）となる接地電極である。

測定用補助電極 P 点（電圧極）、C 点（電流極）を適当な距離に打込み、E C 間に電源をつなぎ、大地に電流 I [A] を流し、この時の E P 間の電位降下（電位差） V [V] を測定し、 V / I [Ω] を接地抵抗の測定値とする。

市販されている接地測定器は、 V / I [Ω] を機器内部でおこない直読できる構造としている。（測定調整は各測定器により異なる。）

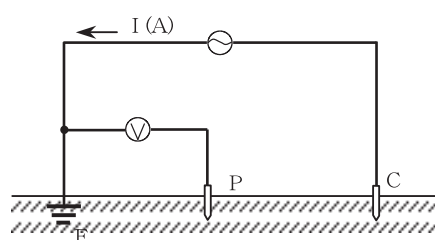
尚、測定用機器の選択には、JIS C1304 の規定による機器が推奨される。

3-2 3 電極法での測定電極配置

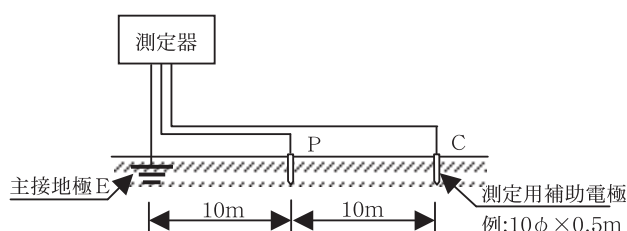
測定における主接地極 E と測定電極（P・C 極）の配置は、基本的には、第 3-2 図に示す 10m の間隔が推奨されている。

しかし、建物が密集する地域では敷地面積が小さく、間隔を最大に広げても 10m の間隔を維持出来ない事がよくあり、判断に窮する事がある。この様に基本とする 10m 間隔の電極（P・C 極）が維持できない場合には、61.8% の法則を参考として行う事が推奨される。61.8% の法則とは、第 3-3 図に示す、E-C 極間の距離に対して 61.8% の位置に電圧極（P 極）を配置する法則で、E-P-C の配置関係から生じる測定値の誤差を最小とする方法である。

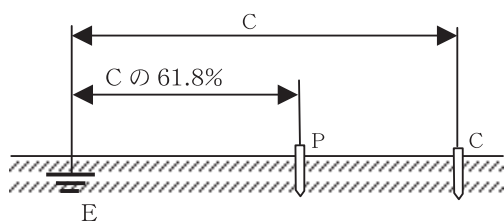
又、電極は直線に配置する事が望ましいが、やむを得ず P・C 極をずらして配置する場合には、その角度を約 30 度程度にする事が推奨される。



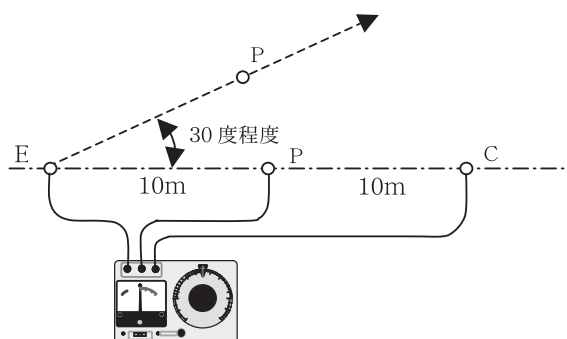
第 3-1 図 電極の配置



第 3-2 図 測定電極（P・C 極）配置



第 3-3 図 61.8% の法則



第 3-4 図 P・C 極の離隔角度

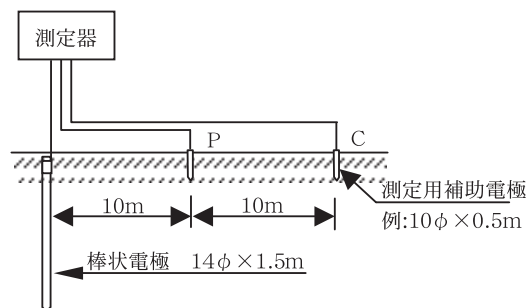
3-2 大地抵抗率測定

大地抵抗率 ρ を測定する方法としては、3 電極法とウェンナーの四電極法が一般的である。それぞれの使い分けは、3 電極法は、測定に使用する電極付近の抵抗率を解析するのに対し、四電極法は GL 面（地表面）において、地中の深層部分の測定及びデータ採取が可能である。したがって、3 電極法は、比較的小規模な接地極を埋設する部分の抵抗率を測定するのに適しており、四電極法は深層に埋設する大規模接地体、例えば構造体利用接地極や網状接地極（メッシュ）等の測定に適しているといえる。

3-2-1 3電極法による測定と抵抗率解析

棒状電極を使用しての3電極法による測定及び解析は下記により行う。

主電極を布設する土壤に棒状電極を打設し、下図に従い。P.C測定電極を配置して棒状電極の接地抵抗値（Ω）を測定する。



第3-5図 3電極法による抵抗率測定電極（P・C電極）配置例

棒状電極の接地抵抗に関する公式：

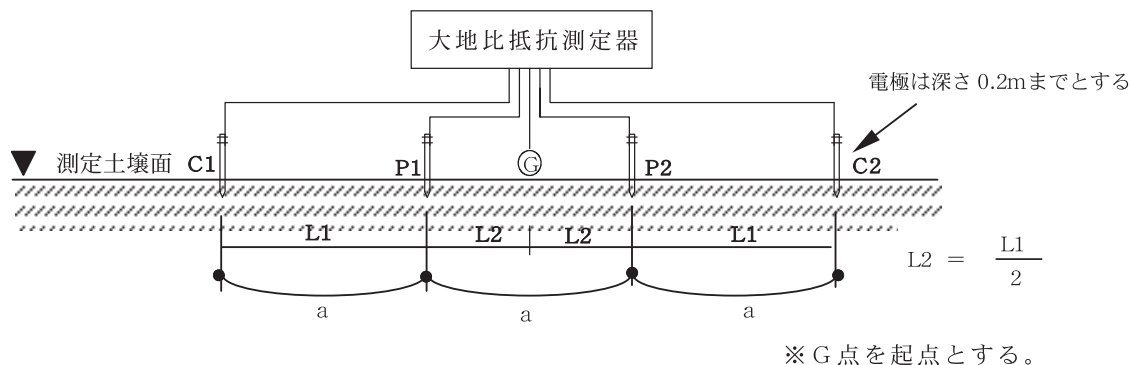
$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad \text{において、} l=1.5 \text{ (m)}, d=0.014 \text{ (m)} \text{ とすると、}$$

$R=0.643\rho$ の関係が得られる。ただし、 R ：接地抵抗（Ω）， ρ ：大地抵抗率（Ω・m）。したがって、次式により大地抵抗率を推定できる。

$$\rho = R / 0.643 \quad (\Omega \cdot m)$$

3-2-2 Wenner四電極法

四電極法では下図のG点を基準点とし、深度に合わせ各P・C点を移動し測定を繰り返す。測定器は大地比抵抗測定器を使用する。



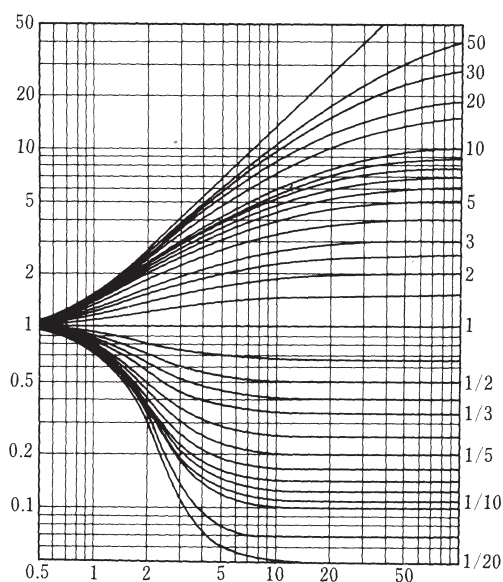
第3-6図 測定電極配置図

第 3-6 図の測定電極配置を基に電極の間隔（ a ）を数箇所設定し、 GL 面より敷地の深度の範囲で（ a ）＝1,2,4,6,8,10,15m～と、任意に各点の測定データを収集する。収集したデータ（ R ）を、表 1-1 のデータ表に基づき、 $\rho = 2 \pi a R$ の計算式により各深度の大地抵抗率 ρ （ $\Omega \cdot m$ ）を算出する。

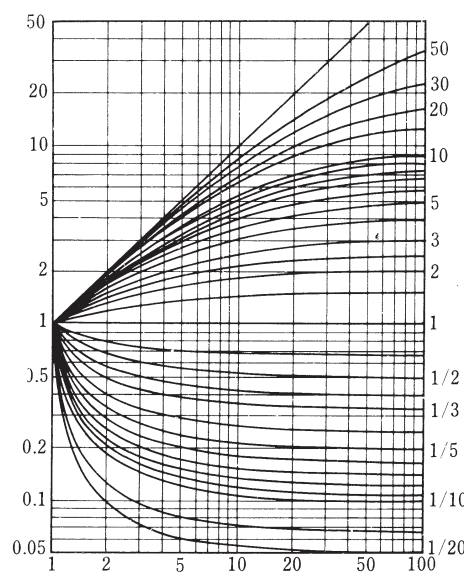
a (m)	G 点よりの長さ		R (Ω)	$\rho = 2 \pi a R$ ($\Omega \cdot m$)
	C (L1+L2)	P (L2)		
1	1.5	0.5		
4	6	2		
10	15	5		

表 1-1 測定記録書（参考）

尚、計算で得た ρ は電極間隔 a に応じた、一定の深さまでの平均化された値であるので、接地極が接する深度の抵抗率（ ρ ）を把握するには、Sundberg の標準曲線及び Hummel の補助曲線を用いて解析を加える必要がある。



Sundberg の標準曲線



Hummel の補助曲線

3-3 電位降下法による接地試験

電位降下法とは 3 電極法の原理による測定である。

主に、「電位降下法」とは、大規模接地極（例えば、構造体接地極、メッシュ接地極、環状接地極等）で、接地抵抗が低抵抗値となり一般の測定器では測定値の読み取りが出来ない場合に行う。

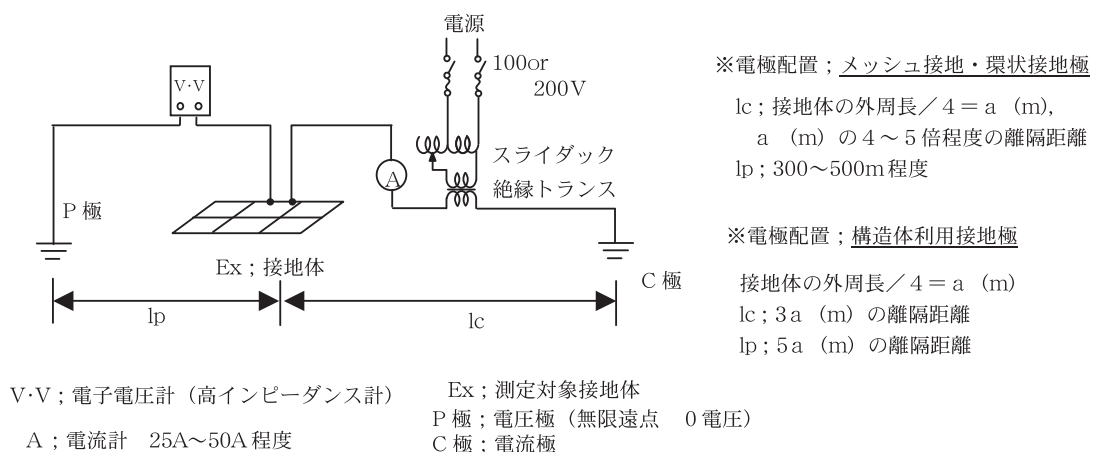
a) 測定電極の配置

この測定は、接地体の接地抵抗が非常に低いので、誘導の影響を受けないよう、測定電流を 10～30A 流す必要がある。測定電極の配置は、3 電極法で述べた主接地極 E と電流極（C 極）の抵抗区域に電圧極（P 極）が設置しない条件を満たすには、電圧極（P 極）を無限遠点に置かなければならないが、現実の測定として無限に離隔する事はできない。よって、測定回路図（第 3-7 図）が示す離隔距離を参考とする。又、電圧極用に布設する測定線と 10～30A の測定電流を流す C 極用測定線が並行に布設すると誘導の問題があるので、電圧極（P 極）は電流回路から 90°（主接地 E を中心に P、C 極を 180° とする事が理想的）以上とすることが望ましい。

b) 測定方法

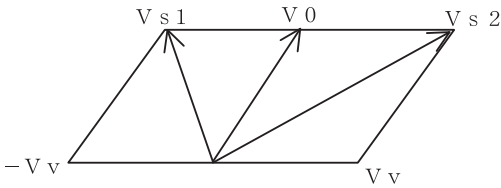
まず、第 3-7 図に示す測定電極を配置する。

予め、測定電流を 10～30A の範囲内で決めた電流 I(A) を、主接地極；Ex と電流極；C 極に絶縁トランス～スライダックを介して流し、無限遠点に配置した電圧極（P 極）にあらわれる電圧を真空管電圧計（現在は電子電圧計又はデジタル電圧計）により読み取る。



第 3-7 図 電位降下法測定回路（例）

メッシュ接地や構造体接地は低抵抗値を得られる反面、誘導障害を受け値が上昇する事を無視する事は出来ないので、電源の極性を差し替え、測定電圧 V_{s1} , V_{s2} を得る。又、測定電流を 0 としたとき、電圧計に浮遊電位 V_0 があらわれる。 V_{s1} , V_{s2} で得た接地電圧は、この浮遊電位 V_0 が加わった値であるので、これを差し引かなければ真値とならない。これらをベクトル図で表すと第 3-8 図となり、実質の抵抗値は第 3-9 図に示す算出計算式により求める。



第 3-8 図 ベクトル図

$$V = \sqrt{\frac{V_{s1}^2 + V_{s2}^2 - 2V_0^2}{2}} \quad [V]$$

$$R = \frac{V}{I} \quad [\Omega]$$

V_{s1} ; 正極で得た測定電圧 V_{s2} ; 逆極で得た測定電圧
 V_0 ; 電圧 0 の時の浮遊電位 I ; 測定電流値
 V ; 計算で得た電圧 R ; 接地抵抗値

第 3-9 図 抵抗値算出計算式

3-4 接地の種別と総合接地抵抗値の算出計算

電気取扱いに関しては、各電路及び電路に関連する金属製配管，金属箱及び金属製工作物に接続する接地極の抵抗値が規定されている。（内線規定，電気技術基準ほか）
 要求される種別及び抵抗値は、第 1-2 表となる。

接地種別	使用目的	規定抵抗値（Ω）
A 種接地	高压電路に使用される配管及び金属工作物	10 Ω 以下
B 種接地	変圧器二次側の中性点	変電容量による
C 種接地	300V を超える低圧配線電路に関わる金属体	10 Ω 以下
D 種接地	300V 以下の低圧配線電路に関わる金属体	100 Ω 以下

第 1-2 表 接地種別と規定抵抗値

又、JIS A4201:1992 の規定では、避雷設備用接地極の単独接地抵抗値は、50Ω 以下とし、総合接地抵抗は 10Ω 以下とするとしている。

ここでの、単独接地抵抗値は、施設された接地極を測定する事でデータ収集はできるが、接地極が 2 箇所以上施設された場合の総合接地抵抗値は、下記の計算式により算出する。

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \cdots \frac{1}{R_n}} \quad \begin{array}{l} R_0 \text{ ; 総合接地抵抗値 } [\Omega] \\ R_1, R_2, R_3 \cdots R_n \text{ ; 単独接地抵抗値 } [\Omega] \end{array}$$

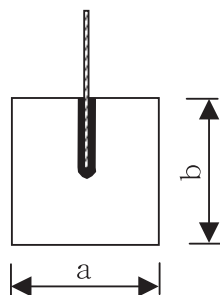
4. 形状による接地抵抗予測計算

接地極の形状により接地抵抗値に変化をもたらす事は、接地工事を経験した方であればお分かり頂けると思う。

接地抵抗値の予測は、先に説明した大地抵抗率を基に、下記に示す形状に則した計算式により行う。

尚、計算式は代表的なものを列挙する。

4-1 板状電極（アース板） ; Tagg（円板電極置換）



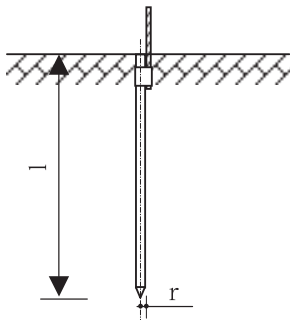
計算式；

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot b}} \quad (\Omega)$$

R ; 板状電極の抵抗値 (Ω) ρ ; 大地抵抗率 (Ω・m)

π ; 円周率 a・b ; 電極の縦・横の寸法 (m)

4-2 棒状電極（アース棒） ; Tagg（回転楕円体解析解）



計算式；

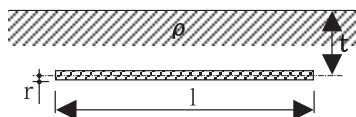
$$R = \frac{\rho}{2 \pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (\Omega)$$

R ; 棒状電極の抵抗値 (Ω) ρ ; 大地抵抗率 (Ω・m)

π ; 円周率 l ; 棒状電極の長さ (m)

r ; 棒の半径 (m) ln ; 自然対数

4-3 線状電極（カウンターポイズ） ; Sunde, Schwarz



計算式；

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2} r t} - 1 \right) \quad (\Omega)$$

R ; 棒状電極の抵抗値 (Ω) ρ ; 大地抵抗率 (Ω・m)

π ; 円周率 l ; 棒状電極の長さ (m)

r ; 接地線の半径 (m) ln ; 自然対数

t ; 埋設深さ (m)

4-4 網状電極（メッシュ接地）；Schwarz

計算式；

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \frac{2L}{a'} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (\Omega)$$

R ；棒状電極の抵抗値（ Ω ） ρ ；大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)

π ；円周率 L ；接地線の全長 (m)

a' ； $\sqrt{2rt}$ （地表面のとき $t = r$ ）

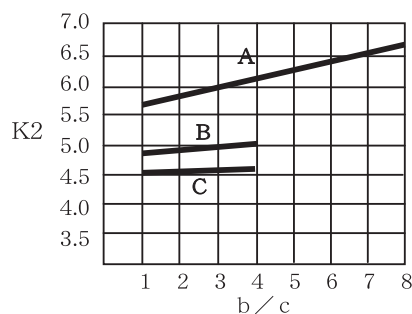
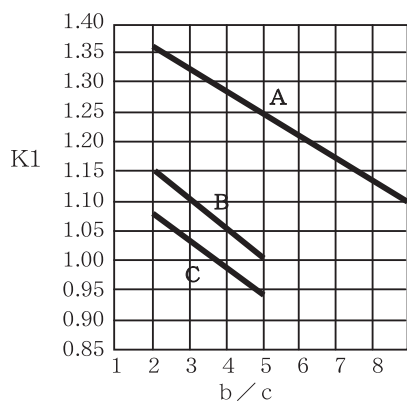
r ；接地線の半径 (m)

t ；埋設深さ (m)

$\ln$ ；自然対数

A ；メッシュ接地の面積 (m^2)

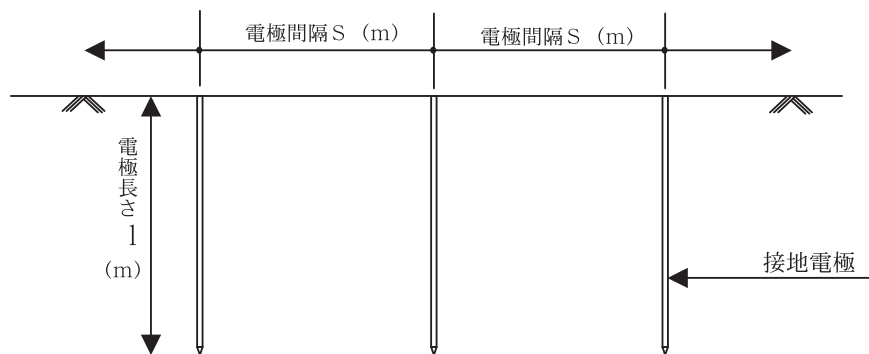
K_1, K_2 ；係数（グラフ参照）



A: $t = 0$ のとき B: $t = \sqrt{A}/10$ のとき C: $t = \sqrt{A}/6$ のとき

4-5 棒状電極並列布設での抵抗予測

棒状電極を並列に布設した場合、電極間の離隔距離により合成抵抗値の低減率が異なる。これは、電極から流出する接地電流が相互干渉するためである。よって、予測計算では、干渉により相殺される低減率を係数を η とし、次式により抵抗値予測を行う。



第 4-1図 並列布設の電極配置

$$\text{計算式；} \quad R_0 = \eta \frac{R}{Z} \quad (\Omega)$$

R_0 ; 合成抵抗値 (目標抵抗値) (Ω) R ; 棒状電極 1 本の抵抗値 (単独抵抗) (Ω)

Z ; 棒状電極の本数 η ; 相互干渉係数

※ 相互干渉に用いる係数 η は第 1-3 表 (深さ 1.5m 並列), 第 1-4 表 (深さ 3.0m 並列) を参照し適合する数値を選択する。尚、表に記された α は、第 4-1 図による電極の間隔と長さの関係より、 $\alpha = S/l$ とする。

第 1-3 表 並列配置の集合係数 η (電極棒 14 ϕ , $l=1.5\text{m}$)

電極間隔/電極長	電 極 数 Z [本]								
$\alpha = S/l$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	1.49	1.90	2.26	2.58	2.87	3.13	3.37	3.60	3.81
0.2	1.38	1.68	1.93	2.15	2.34	2.51	2.67	2.81	2.94
0.3	1.31	1.56	1.75	1.92	2.06	2.19	2.30	2.40	2.50
0.4	1.27	1.47	1.63	1.77	1.88	1.98	2.07	2.15	2.22
0.5	1.23	1.41	1.54	1.66	1.75	1.84	1.91	1.98	2.04
0.6	1.21	1.36	1.48	1.57	1.66	1.73	1.79	1.85	1.90
0.7	1.19	1.32	1.42	1.51	1.58	1.64	1.70	1.75	1.79
0.8	1.17	1.29	1.38	1.46	1.52	1.58	1.63	1.67	1.71
0.9	1.15	1.26	1.35	1.42	1.47	1.52	1.57	1.60	1.64
1.0	1.14	1.24	1.32	1.38	1.43	1.48	1.52	1.55	1.58

第 1-4 表 並列配置の集合係数 η (電極棒 14 ϕ , $l=3.0\text{m}$)

電極間隔/電極長	電 極 数 Z [本]								
$\alpha = S/l$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	1.44	1.81	2.14	2.42	2.68	2.92	3.14	3.34	3.53
0.2	1.34	1.61	1.84	2.04	2.21	2.36	2.50	2.63	2.74
0.3	1.28	1.50	1.68	1.83	1.96	2.07	2.17	2.26	2.35
0.4	1.24	1.42	1.57	1.69	1.79	1.88	1.96	2.04	2.10
0.5	1.21	1.37	1.49	1.59	1.68	1.75	1.82	1.88	1.93
0.6	1.19	1.32	1.43	1.52	1.59	1.65	1.71	1.76	1.81
0.7	1.17	1.29	1.38	1.46	1.52	1.58	1.63	1.67	1.71
0.8	1.15	1.26	1.34	1.41	1.47	1.52	1.56	1.60	1.64
0.9	1.14	1.24	1.31	1.37	1.42	1.47	1.51	1.54	1.57
1.0	1.13	1.22	1.29	1.34	1.39	1.43	1.46	1.49	1.52