

図1 電位補助極の配置 (その1)

2.2 電位補助極の配置 (その2)

表1にその他の補助極の配置と理論的検証を示す。測定対象のE極に対して、C極とP極を入れ替えた場合とE極を中心に左右にC極とP極を打ち込む場合である。尚、理論的検証は2.1で述べた手法と同様である。

表1 その他の補助極の配置と理論的検証¹⁾

配置図	理論的検証
<p>P=1.618C</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{P} - \frac{1}{C} + \frac{1}{P-C} \right)$ $= \frac{\rho}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{p} - \frac{1}{c} + \frac{1}{p-c} \right)$ $\frac{1}{p} + \frac{1}{c} - \frac{1}{p-c} = 0$ $p^2 - cp - c^2 = 0$
<p>Pは虚数 (存在しない)</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{P} - \frac{1}{C} + \frac{1}{P+C} \right)$ $= \frac{\rho}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{p} - \frac{1}{c} + \frac{1}{p+c} \right)$ $\frac{1}{p} + \frac{1}{c} - \frac{1}{p+c} = 0$ $p^2 + cp + c^2 = 0$

2.3 電位補助極の配置 (その3)²⁾

C極とP極が直線配置ではない場合を考える。測定対象のE極 (半球状) を角度θでC極とP極が隔たっているものとする

接地抵抗の測定値Rは

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{C} - \frac{1}{P} + \frac{1}{\sqrt{P^2 + C^2 - 2PC \cos \theta}} \right) \dots (5)$$

$$= \frac{\rho}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{c} - \frac{1}{p} + \frac{1}{\sqrt{p^2 + c^2 - 2pc \cos \theta}} \right)$$

ただし、 $p=P/r$, $c=C/r$

ここに、半球状接地極の真値は

$$R_{\infty} = \rho / 2\pi r$$

であるから、式に代入すると

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{\sqrt{p^2 + c^2 - 2pc \cos \theta}} \right) \right\} \dots (6)$$

式のカッコの第2項をゼロとおけば、測定値が真値に等しくなる。すなわち、誤差が無視できることになる。

$$\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{\sqrt{p^2 + c^2 - 2pc \cos \theta}} = 0 \dots (7)$$

式において、 $p/c=a$ として、 $\cos \theta$ を求めると

$$\cos \theta = \frac{(a^2 + 1)(a + 1)^2 - a^2}{2a(a + 1)^2}$$

式において、 $\cos \theta$ をaで微分した値がゼロになればよい。すなわち

$$\frac{d}{da} \cos \theta = 0$$

として求められ、 $a=1$ を得る。これを式に代入すると、 $\cos \theta = 0.875$ となる。これより、 θ を求めると、 $\theta = 28.95^\circ$ となる。図2において、 θ が 28.95° 以内であれば測定誤差を無視できる測定法になる。ちなみに $\theta=0$ とおけば直線状になり、2.1で述べた内容と同じになる。(7)式から角度を考慮した電位補助極Pの適正な配置を図に示す。円周上にP極を打ち込めば精度のよい測定値が得られる。このことは、E極とP,C極が必ずしも一直線でもなく、多少の角度をもっている、離隔距離が円周上の位置であれば誤差の少ない測定になることを意味している。

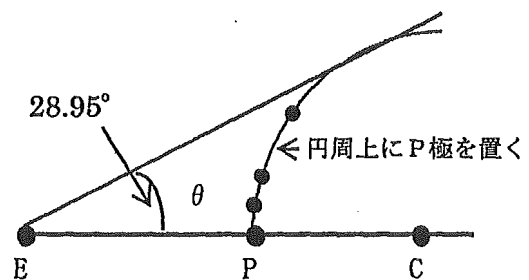


図2 電位補助極の配置 (その3)

3. 接地抵抗測定シミュレーション

電位補助極の配置(その1)から(その2)を直線配置, (その3)を三角配置と略称する。2.1 から 2.3 で述べた理論的検証により, 真値が得られる P 極の配置が複数存在することがわかる。そこで水槽を用いて P 極の打込み箇所における接地抵抗測定シミュレーション実験を行う。

3.1 実験方法

合成樹脂製の水槽(縦 1.0m, 横 0.7m, 深さ 0.6m)に水道水を満たし大地を模擬した。測定回路は通常の水槽モデル実験と同様に商用電源(50Hz, 100V)をスライダックによって電圧を調整し, E 極と C 極の間に電圧を印加, 回路電流(I)を流し, P 極によって得られる電圧(V)との比 V/I を接地抵抗測定値とした。媒質である水道水の抵抗率 ρ は, 導電率計により測定し, 回路に流す電流は媒質中の電極の化学的作用を考慮し 5mA とした。

3.2 測定のための基礎的実験

水槽実験において, もっとも留意すべき点は水槽の側面, 底面の影響である。基礎的実験としてこの影響を極力少なくするような電極配置及び電極寸法について検討した。その結果, 本実験にて使用する E 極に対して C 極の離隔距離は 0.2m 以内となり補助極(P, C 極共)は等価半径 0.0004m の棒状電極とした。図 3 に基礎的実験の結果を示す。X 軸, Y 軸の目盛りは 0.1m (水槽内 0.05m) 間隔である。

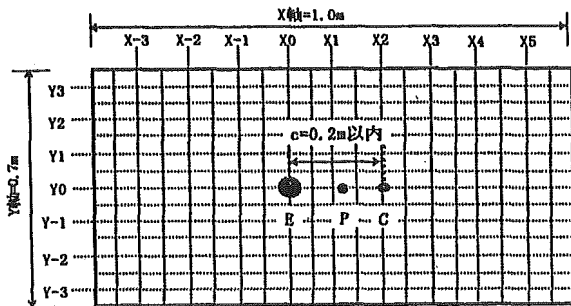


図 3 基礎的実験結果

3.3 直線配置における水槽実験

(1) 実験方法

水槽の中央に E 極, C 極を設置し垂直線上における P 極を測定した。E 極の形状は半球状接地極

とし離隔距離は 0.2m, 測定箇所は 0.02m 間隔とした。図 4 に P 極の測定方法を示す。P 極の測定は, X-Y 軸を自由自在に動く装置を作製し, 任意の点へ移動できるようにした。

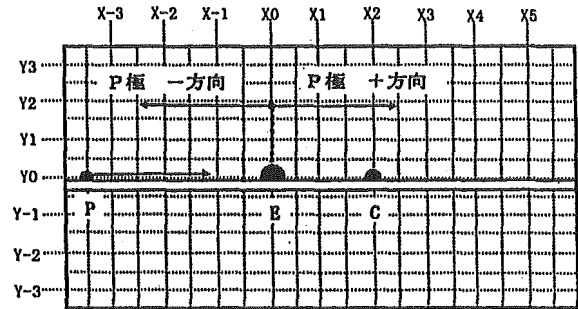


図 4 P 極の測定方法

(2) 実験結果

図 5 に直線配置における実験結果を示す。これは, 半球状接地極 $r=0.015m$, $c=0.2m$ の場合である。直線配置における $p=0.6c$ の測定値すなわち, 測定上の真値は実測の結果 848 Ω となった。

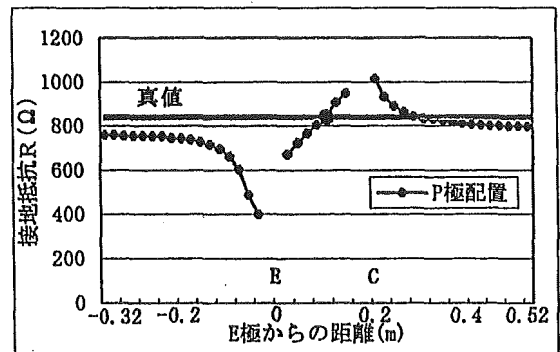


図 5 直線配置における実験結果 (E 極: 半球状 $c=0.2m$ $\rho=80.6 \Omega \cdot m$)

解析解と実験データの真値の比較では, 水道水の抵抗率 $\rho=80.6 \Omega \cdot m$ を半球の解析解 $R=\rho/2\pi r$ にあてはめると接地抵抗値は 855 Ω となる。測定における真値と理論上の算定式は, ほぼ同様の値が得られた。

図中に測定上の真値 848 Ω を示す。実験の結果, E-C 極間よりも遠方側(図中右側)に真値が存在し, E 極より反対側(図中左側)では真値が存在しないことがわかった。また E-C 間における測定上の真値は, C 極の遠方側において, $p=1.6c$ 付近で得ることができた。

3. 4 三角配置における水槽実験

(1) P極の三角配置シミュレーション

2.3(7)式から任意の角度毎にP極の配置を算出し、それぞれの点を結ぶと $\cos\theta=28.95^\circ$ から $\cos\theta=-28.95^\circ$ の範囲で真値の楕円軌道が得られると推測できる。同範囲内において、 $\cos\theta=5^\circ$ 毎にE極からの距離を算出した。表3に $c=0.2\text{m}$ の場合のE-P間の距離計算結果を示す。C極を基準に内側にて真値となる配置をP領域、外側の配置をP'領域とした。その結果、 $\cos\theta=28.95^\circ$ 及び $\cos\theta=-28.95^\circ$ では、 0° を境に上下対称の結果が得られた。表3より得られた $\cos\theta=0^\circ$ から 28.95° の範囲におけるP極の三角配置シミュレーションを図6に示す。尚、C極と直角に交わる垂直線上と楕円軌道の交点はC極から $0.53c, -0.53c$ の位置となった。

表3 E-P間の距離 ($c=0.2\text{m}$ の場合)

P極 ($^\circ$)	E-P (m)	P'極 ($^\circ$)	E-P' (m)
P28.95	0.196	P'28.95	0.196
P25	0.157	P'25	0.255
P20	0.141	P'20	0.283
P15	0.133	P'15	0.302
P10	0.127	P'10	0.314
P5	0.125	P'5	0.321
P0	0.124	P'0	0.324
-P5	0.125	-P'5	0.321
-P10	0.127	-P'10	0.314
-P15	0.133	-P'15	0.302
-P20	0.141	-P'20	0.283
-P25	0.157	-P'25	0.255
-P28.95	0.196	-P'28.95	0.196

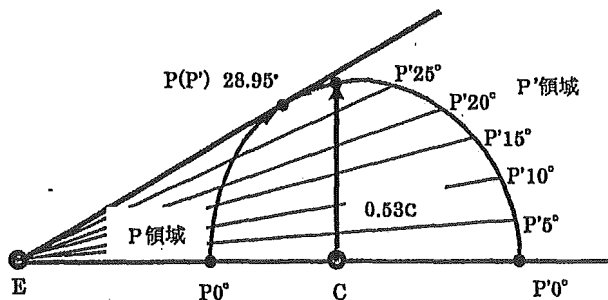


図6 P極の三角配置シミュレーション

(2) 実験方法

3.3の実験と同様の条件下で三角配置におけるP極を測定した。測定に際しては、(1)で算出した円軌道の中心点から角度毎のP領域及びP'領域の配置を容易に測定できる回転可能な装置と先の

実験で使用したX-Y軸を自由自在に動く装置にて、楕円の軌道と水槽全体 (X-Y軸 0.05m 間隔) の測定を行った。図7に楕円軌道の測定方法と図8に真値の分布を調査するための水槽全体の測定方法を示す。また本実験では $p=0.6c$ の測定値と同値となる楕円の軌道を探した。図9に探索方法を示す。

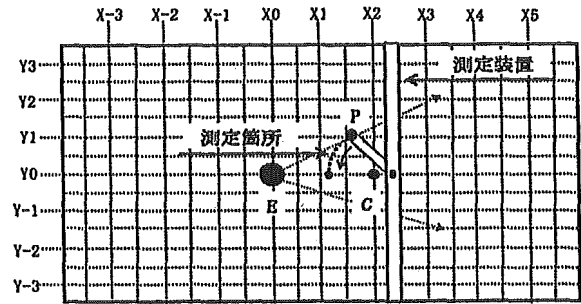


図7 楕円軌道の測定方法

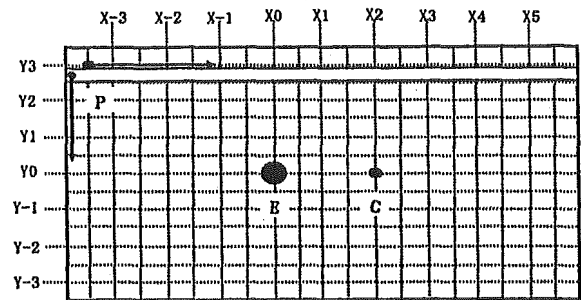


図8 水槽全体の測定方法

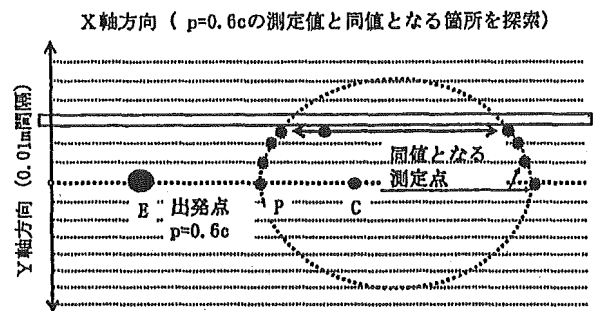


図9 楕円の軌道探索方法

(3) 実験結果

図10に半球状接地極 $r=0.015\text{m}$, $c=0.2\text{m}$ の場合の三角配置における実験結果を示す。出発点である $\cos\theta=0^\circ$ の時の測定値すなわち直線配置における $p=0.6c$ の測定値は 764Ω となった。本実験

の水道水の抵抗率 ρ は測定の結果 $71.7\Omega \cdot m$ となり、これを半球の解析解にあてはめると接地抵抗値は 760.1Ω となる。測定における真値と理論上の算定式とは、ほぼ同様の値が得られた。

測定上の真値に対して各測定点の接地抵抗値は P 領域において、最大 2Ω 、P' 領域では最大 4Ω の差となった。また C 極の直角方向 $p=0.53c$ との交差箇所は 4Ω の差となった。結果、真値に対して各測定点における接地抵抗値の差は 0.5% 以内となる。測定誤差を考慮すると $\cos\theta=28.95^\circ$ から -28.95° の範囲において、(1) のシミュレーションのとおり、楕円軌道にて真値が得られた。

水槽全体の範囲測定と真値の探索を行った結果、水槽内において、楕円軌道以外には真値が存在しないことがわかった。図 11 は水槽内の接地抵抗測定データを示す。マス内の数値は X-Y 軸 $0.05m$ 間隔の接地抵抗測定値 (Ω) で、C 極を囲む楕円は Y 軸方向 $0.01m$ 間隔で測定した $p=0.6c$ と同値となる楕円の軌道である。

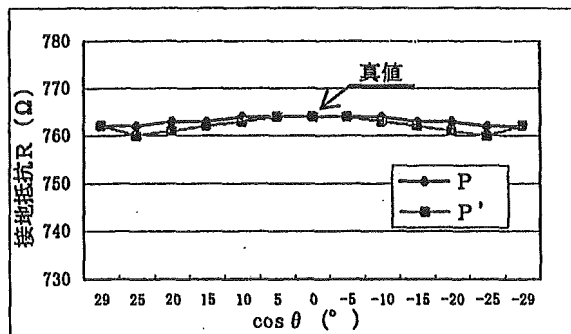


図 10 三角配置における実験結果
(E 極：半球状 $c=0.2m$ $\rho=71.7\Omega \cdot m$)

	X-3	X-2	X-1	X0	X1	X2	X3	X4	X5
Y3	702	700	700	700	702	706	714	720	726
Y2	698	698	698	698	694	694	700	706	712
Y1	696	696	696	696	688	688	690	712	712
Y0	695	694	692	688	678	654	590	612	706
Y-1	696	696	696	696	678	654	590	612	706
Y-2	698	698	698	698	694	694	700	706	712
Y-3	702	700	700	700	702	706	714	720	726

図 11 水槽内の接地抵抗測定データ (Ω)
(E 極：半球状 $c=0.2m$ $\rho=71.7\Omega \cdot m$)

3. 5 埋設物を想定した水槽実験

3.3 及び 3.4 の実験結果より、P 極の様々な配置において、精度の高い測定が可能となった。そこで地中の埋設物を想定し測定に及ぼす影響について実験を行った。

(1) 実験方法

図 12 に埋設物の設定状況を示す。埋設物の深さを任意に変化させ、水中に埋設物がない状態を基準 (ケース 1) とした。また埋設物の材質は導体 (銅板)、深さは水面から $-0.17m$ (ケース 2)、 $-0.09m$ (ケース 3)、 $-0.04m$ (ケース 4)、の 4 パターンとし各々の状態における測定値の比較を行った。測定条件は 3.3、測定方法は 3.4 と同様で水槽の中心に E、C 極を配置し、 $p=0.6c$ の測定値と同値となる楕円軌道の探索と水槽全体の範囲 (X-Y 軸 $0.05m$ 間隔) の計測を実施した。

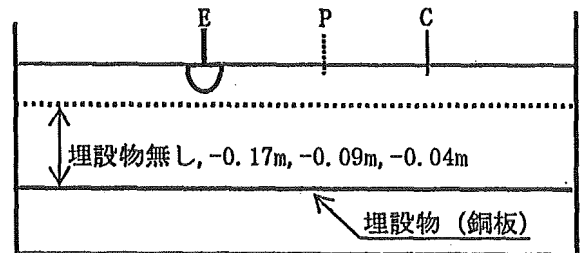


図 12 埋設物の設定状況

(2) 実験結果

図 13 にケース 1、図 14 から図 16 にケース 2 からケース 4 の場合の接地抵抗測定データを示す。共通条件として本実験の水道水の抵抗率 ρ は、測定の結果 $92\Omega \cdot m$ である。直線配置における $p=0.6c$ の測定値はケース 1 にて 984Ω となり、ケース 2 では 966Ω 、ケース 3 は 906Ω 、ケース 4 においては 760Ω となった。図に示すとおり、ケース 1 からケース 3 の実験で真値ルートは C 極を囲む楕円軌道となった。ケース 4 の実験では、 $p=0.6c$ の位置から E 極方向に向かって真値ルートが得られた。また、E 極を中心とした一部の領域 (水槽内左半分) で測定値がほぼ同値となる現象がみられた。図に示すとおり、測定上の真値 760Ω に対して、 $\pm 2\%$ 以内の差となる測定値が広域に分布していることがわかる。銅板の深さを変えて実験した結果、三角配置における真値ルート及び接地抵抗値は埋設物の影響で大幅に変化することがわかった。埋設物 (導体) は地表面に近いほど測定に及ぼす影響が大きくなると言える。

	X-3	X-2	X-1	X0	X1	X2	X3	X4	X5										
cc	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Y3	30	922	920	920	920	922	926	928	931	910	916	932	936	950	950	960	960	960	960
	35	920	918	918	918	920	922	926	927	912	916	930	951	950	960	960	960	960	960
Y2	20	918	918	916	916	914	914	920	920	956	950	960	961	961	961	961	962	962	962
	15	918	916	916	916	912	906	904	908	918	924	956	971	971	976	968	968	962	962
Y1	10	916	916	916	910	906	896	892	818	910	922	960	961	961	960	970	970	960	961
	5	924	924	922	918	910	890	852	786	936	930	1014	1001	1052	1000	950	970	972	966
Y0	0	916	916	912	906	890	876	810	750	932	924	1060	1000	1070	1010	952	970	970	961
	-5	924	924	922	918	910	890	852	786	936	930	1014	1001	1052	1000	950	970	972	966
Y-1	-10	916	916	916	910	906	896	892	818	910	922	960	961	961	960	970	970	960	961
	-15	918	918	918	912	906	892	804	910	910	920	950	971	971	970	968	962	962	962
Y-2	-20	918	918	916	916	914	914	920	920	956	950	960	961	961	961	962	962	962	962
	-25	920	918	918	918	920	922	920	922	912	916	950	961	960	960	960	960	960	960
Y-3	-30	922	920	920	920	922	926	928	931	910	916	932	936	950	950	960	960	960	960

図 13 ケース1(埋設物がない場合)の接地抵抗測定データ

	X-3	X-2	X-1	X0	X1	X2	X3	X4	X5										
cc	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Y3	30	902	902	902	902	902	902	904	900	910	912	914	914	914	914	914	914	914	914
	35	900	900	900	900	900	900	900	900	911	910	920	910	910	910	910	910	910	910
Y2	20	896	896	894	892	890	880	892	890	910	921	922	920	920	920	910	910	910	910
	15	890	892	890	880	870	854	872	864	910	920	940	941	940	930	922	920	910	910
Y1	10	892	890	890	880	868	852	834	830	912	913	950	910	910	910	910	912	922	920
	5	892	890	882	871	856	816	718	684	829	910	1000	1114	1044	960	952	920	920	922
Y0	0	892	892	890	870	850	810	650	570	920	920	1050	1132	1004	900	912	934	930	920
	-5	892	890	882	871	856	816	718	684	829	910	1000	1114	1044	960	952	920	920	922
Y-1	-10	892	890	890	880	868	852	834	830	912	913	950	910	910	910	910	912	922	920
	-15	896	892	890	880	860	822	864	818	860	910	920	940	941	940	930	922	920	910
Y-2	-20	896	896	894	892	890	880	868	868	892	890	910	921	920	920	910	910	910	910
	-25	900	900	898	890	891	890	900	902	900	911	910	920	910	910	910	914	912	912
Y-3	-30	902	902	902	902	902	902	904	900	910	912	914	914	914	914	914	914	914	914

図 14 ケース2(水面下0.17mの場合)の接地抵抗測定データ

	X-3	X-2	X-1	X0	X1	X2	X3	X4	X5										
cc	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Y3	30	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864
	35	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864
Y2	20	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864
	15	864	864	862	860	850	832	810	810	850	860	874	860	874	810	860	860	864	
Y1	10	864	864	862	850	832	810	810	810	850	860	874	860	874	810	860	860	864	
	5	862	862	860	850	834	814	804	804	860	932	1040	970	960	900	870	860	870	
Y0	0	860	862	862	850	832	810	810	810	850	860	874	860	874	810	860	860	864	
	-5	862	862	860	850	834	814	804	804	860	932	1040	970	960	900	870	860	870	
Y-1	-10	864	864	862	850	832	810	810	810	850	860	874	860	874	810	860	860	864	
	-15	864	864	862	850	834	814	810	810	850	860	874	860	874	810	860	860	864	
Y-2	-20	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	
	-25	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	
Y-3	-30	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	864	

図 15 ケース3(水面下0.09mの場合)の接地抵抗測定データ

	X-3	X-2	X-1	X0	X1	X2	X3	X4	X5										
cc	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Y3	30	770	770	770	770	772	772	772	772	772	772	774	802	802	804	804	804	804	804
	35	770	770	770	770	770	772	772	772	772	772	770	780	802	804	804	804	804	804
Y2	20	770	770	770	772	772	772	772	772	772	772	770	780	802	804	804	804	804	804
	15	760	770	770	772	772	772	772	772	772	770	800	804	804	804	800	800	800	800
Y1	10	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760
	5	760	764	760	752	750	744	710	640	732	750	770	832	810	820	820	824	824	822
Y0	0	764	764	760	750	740	730	690	610	710	740	780	860	820	822	822	822	822	822
	-5	764	764	760	752	750	744	710	640	732	750	770	832	810	820	820	824	824	822
Y-1	-10	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760	760
	-15	760	770	770	770	772	772	770	772	772	772	770	800	804	800	800	800	800	800
Y-2	-20	770	770	770	772	772	772	772	772	772	772	770	780	802	804	804	804	804	804
	-25	770	770	770	770	770	772	772	772	772	772	770	780	802	804	804	804	804	804
Y-3	-30	770	770	770	770	772	772	772	772	772	770	780	802	802	804	804	804	804	804

図 16 ケース4(水面下0.04mの場合)の接地抵抗測定データ

4 あとがき

本稿では、真値を得るための電位補助極の配置について検証したが、シミュレーションの結果、以下のことが明白となった。

(1) 直線配置において、E 極に対する補助極の配置は E-P-C が一般的であるが、E-C-P の配置でも精度の高い測定が可能となる。但し、P 極は 0.618c 及び 1.618c の配置とする。

(2) 直線配置において、E 極 (E-C 極) の反対側では真値の測定が困難である。E-C 間における測定上の真値 0.6c 付近の測定値に対して、反対側では最大で 0.4c 付近の測定値となる。

(3) 三角配置において、 $\cos\theta=28.95^\circ$ から -28.95° 範囲で楕円の軌道上に真値が存在する。

(4) 三角配置において、C 極と直角に交わる垂直線上の配置は C 極から 0.53c、 $-0.53c$ 付近となる。

(5) 水槽内全体を測定した結果、真値が得られる P 極の配置は、直線上配置を含む三角配置の楕円軌道上のみに存在する。

測定現場において、三角配置への P 極への打込みは、場所の特定に手間と時間が掛かることから実用的ではないと考える。そこで、実測においては直線配置の 0.618c 及び 1.618c 付近と三角配置の位置関係より割り出した C 極から直角方向 0.53c、 $-0.53c$ への P 極の打込みを提案する。また測定環境にあわせてこれらを複数組み合わせることにより、信頼性の高い測定が期待できる。

埋設物を想定した水槽実験では、埋設物が接地抵抗の測定に大きな影響を及ぼすことがわかった。実測において、全ての領域で同値が得られるという現象が報告されているが、本実験において、地中の埋設物の影響で測定に不具合が生じていることを証明できる結果となった。導体以外の様々な埋設物が測定に及ぼす影響については、今後の課題としたい。

最後に、本研究は平成 16 年度学術フロンティア推進事業の補助を受けたことを付記する。


参考文献

- 1) G.F.Tagg : 「Earth Resistances」 George Newnes Limited, 1964
- 2) G.F.Tagg : 「Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area」 PROC.IEE, Vol.111, No12 p.2118~p.2130, 1964
- 3) 劉 高橋 川上 : 「接地抵抗測定のための補正手法—棒状接地電極の場合」 電気設備学会誌論文号 vol.15 1995

平成17年2月10日

右 田 理 平 殿
北 村 健 司 殿
高 橋 健 彦 殿

社団法人 電気設備学会
会誌編集委員会
論文委員長



論文査読の結果について

先般ご回答くださいました貴論文は、当論文委員会にて拝見いたしました結果、下記のとおりとなりましたのでご通知いたします。

掲載は、本学会誌平成17年5月号(Vol.25 No.5)を予定しております。

つきましては、著者紹介欄を整備するなど完成原稿をお届けくださるようお願い申し上げます。

記

査読結果 掲載可
受付日 平成16年12月10日
受付番号 04-35
表題 戸建住宅基礎の接地抵抗の推定

戸建住宅基礎の接地抵抗の推定

正会員 右田理平 ((株) 大林組)

准会員 北村健司 (関東学院大学大学院工学研究科), 正会員 高橋健彦 (関東学院大学)

Estimation of the Earthing Resistance for the Foundation of Individual House.

Member, Rihei Uda (Obayashi Corp.)

Sub-member, Kenji Kitamura (Graduate School of Engineering, Kanto-gakuin University)

Member, Takehiko Takahashi (Kanto-gakuin University)

Abstract

With the developments of the society in Information Technology in recent years, electrical equipment for the home is becoming more and more advanced. More electrical appliances for the home are of greater capacity using 200V of single-phase 3 wires and there is more internet enabled information technology equipment.

Protective earthing is required for these home electrical appliances to prevent electric shock and functional earthing to ensure the operation of electronic appliances. Furthermore, there is a trend to equip the panel board with a surge protective device (SPD) for the protection of the electric power line against lightning surges. Earthing is indispensable to this SPD as well.

When we consider the future proliferation of electrical and computerized homes, equipment earthing is critical. This equipment earthing can be used as an earthing electrode. This approach is defined in Electricity Utilities Industry Law Interpretations and the Japanese Industrial Standard (JIS-A-4201) in our country as "Structure Earthing", and it is implemented. As for Germany, reinforced concrete of housing is specifically used as earthing electrode. However, in our country, there is no example where housing foundation is put to practical use as an earthing electrode substitution.

Hence, this paper examined the estimation of earthing resistance of housing foundation used as a substitute earthing electrode, considering the size and form of the foundation.

キーワード ; 戸建住宅基礎, 接地抵抗, 鉄筋コンクリート造, 接地抵抗推定法

1. まえがき

近年の高度情報化社会の進展に伴い住宅の電気設備はますます高機能化されようとしている。住宅で使われている家電機器は単相3線式の200Vを電源とする大容量化、情報技術機器等のインターネット化が進んでいる。これらの家電機器には感電防止のための保安用接地、エレクトロニクス機器の稼動を保証するための機能用接地が必要である。さらに、電力線からの雷サージを防護するために分電盤にサージ防護デバイス(SPD)を装備する動きがある。このSPDにも接地が必要不可欠である。

従前から住宅では、保安用接地を主体に電気設備技術基準解釈第19条に規定しているD種接地工事が施工されて

いる。

今後の全電化住宅、情報化住宅の普及を考えたとき、住宅の接地設備を整備する必要がある。筆者らは1998年頃から、住宅基礎を代用接地極として使用するための基礎的研究を行ってきた。その成果は文献に示すような論文、研究発表等で公表してきた^{1)~9)}。

鉄筋コンクリート造などの建築物の躯体は構造的に一体化され、その電気抵抗も低い。それらの基礎(地下部分)は大きな表面積で自然に大地と接触しており、建築構造体そのものを接地極に代用する、いわゆる「構造体接地」という考え方は、我が国において電気設備技術基準解釈及び日本工業規格(JIS-A-4201)で定義されており、各方面で

実用化されている。一方、特にドイツにおいては住宅の基礎に使われている鉄筋コンクリートが代用接地極として利用されている¹⁰⁾。しかしながら、我が国においては住宅基礎を代用接地極として実用化した例はない。

そこで本稿では、住宅の基礎を代用接地極として実用化するための住宅基礎の形状と大きさを考慮した接地抵抗の推定について検討した。

2. 戸建住宅基礎モデルの接地シミュレーション

戸建住宅基礎を代用接地極としての接地抵抗を推定するためのシミュレーションを以下の項目で行った。

2.1 戸建住宅基礎の形状とモデル化

戸建住宅の基礎は建物規模によって多種多様であるが、我が国の標準的な住宅の布基礎の寸法は図1のようになっている。布基礎とは、建物の外周、間仕切りなどの主要な軸組みの下部に沿って、連続して設ける基礎の一つである。

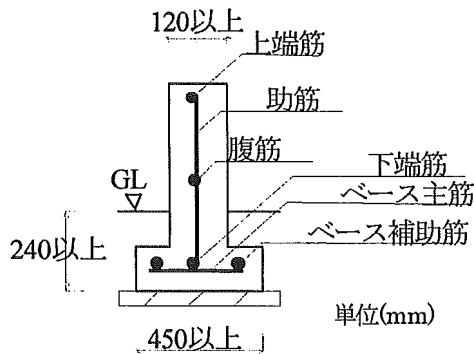


図1 布基礎詳細図¹¹⁾

Fig. 1 Details of the foundation

シミュレーションを行うために、戸建住宅の基礎を模した木製の模型を製作した。戸建住宅の概要を表1に示す。同表に示した戸建住宅モデルは、5社のハウスメーカーの全電化住宅のパンフレットを引用し、それを基に床面積を計算したものである。ここで、同表の住宅モデルの任意の一辺を代表的寸法とし、矢印で示した。また、住宅基礎の縮尺モデルは、3種類(①~④, ⑥~⑦, ⑨)は1/125, 1/150, 1/175。⑤, ⑧, ⑩は1/100, 1/125, 1/150)を製作した。これらの基礎の形状は布基礎とした。

住宅基礎の根入り深さは、一般的には240mm以上という規定がある¹¹⁾。そこで、今回の実験では、根入り深さを300mmとし、模型の縮尺に合わせた厚さの銅板を貼り付けた。

2.2 接地効果面の違いによる接地抵抗の比較

戸建住宅基礎は、基礎の種類によるが、いくつかの面で

表1 戸建住宅の概要

Table. 1 The outline of individual house

モデル	基礎の形状	階床面積(m ²)	代表的寸法(m)
①		111.45	12.60
②		124.00	13.62
③		123.98	14.18
④		164.97	17.80
⑤		98.35	14.18
⑥		79.64	15.75
⑦		158.36	18.23
⑧		68.30	10.26
⑨		152.9	9.23
⑩		81.03	9.18

大地と接触している。接地抵抗を推測するためには、どの面がどの程度の接地抵抗に影響を与えるかを知る必要がある。そこで、モデル電極を製作し、水槽実験を行った。

(1) 実験概要

実験装置は半径 $r=0.75m$ のステンレス製半球状水槽を使用し、水道水で満たし、図2のように、水槽の真中にモデル電極を設置した。この水槽自体をリターン電極として、接地シミュレーションを行った。電源は商用電源(50Hz, 100V)をスライダックによって電圧を調整し、電流を50mAで一定に保ち、オームの法則により接地抵抗を求めた。

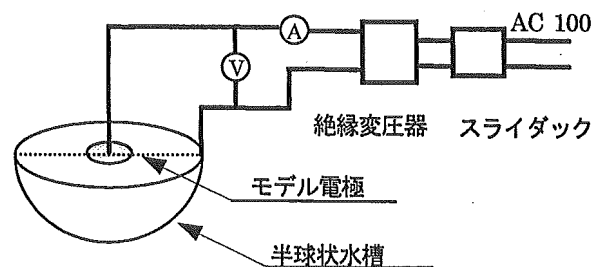


図2 水槽モデル実験回路図

Fig. 2 Experiment circuit of the earthing simulation

(2) モデル電極

戸建住宅の基礎を模した木製の模型を作り、その側面(以下側面(外))と木枠の内側(以下側面(内))、底面に銅板を貼り付けた。また、その際には表面積が等しくなるように銅板の電極の厚さを変えて貼り、リード線を付けた。

モデル電極は側面(外)、側面(内)、底面、側面(外)+側面(内)、側面(外)+底面、側面(内)+底面、側面(外)+側面(内)+底面の場合を製作し、その接地抵抗を測定した。

(3) 実験結果と考察

測定結果と側面(外)+側面(内)+底面に銅板を貼り付けた抵抗を1とした割合を表2に示す。

表2 測定結果

Table. 2 Measurement results

	銅板の面積(m ²)	抵抗(Ω)	割合
側面(外)	1.1 × 10 ⁻³	430.4	1.17
側面(内)	1.1 × 10 ⁻³	526.0	1.43
底面	1.1 × 10 ⁻³	410.6	1.11
側面(外)+側面(内)	2.2 × 10 ⁻³	398.0	1.08
側面(外)+底面	2.2 × 10 ⁻³	382.4	1.04
側面(内)+底面	2.2 × 10 ⁻³	395.4	1.07
側面(外)+側面(内)+底面	3.3 × 10 ⁻³	369.0	1.00

まず側面(外)、側面(内)、底面を比較すると最も抵抗値が高かったのは側面(内)であった。これは側面(外)や底面に比べて電極が内部にあるため電流の流れが拡散し、外に流れにくくなったからであると推測できる。また、底面の抵抗値が最も低い結果であった。これは深さが関係していると推測できる。つまり、側面(外)や側面(内)に比べて底面の電極は模型の下部にあるために抵抗が低くなったものと推測できる。側面(外)+側面(内)、側面(外)+底面、側面(内)+底面の抵抗値の違いはこれらによるものと考えられる。また、全ての抵抗値を見ればわかるように、多くの面で接している方が低い接地抵抗を得るには有利であることがわかる。

しかし、内側の側面は接地電流の拡散の観点からも接地抵抗の低減は期待できない。また、住宅基礎の下には割栗石等が敷いてあり、底面の接地効果も期待できない。

2. 3 形状係数法による接地抵抗の推定¹²⁾

(1) 形状係数法の原理

接地抵抗は本来、接地電極の周囲の大地の中に含まれており、厳密には無限遠方まで考える必要がある。ところが、接地シミュレーションにおいては水槽(ここではリターン

電極)の大きさが有限であるため、接地抵抗が打ち切られてしまう。有限の水槽に対しては、無限小の電極によらなければ真の接地抵抗値は得られない。しかし、無限小の電極は現実には作れない。そこで、形状係数法は、形状が相似で縮尺率の異なる複数の接地電極があった場合、それらの接地抵抗 R は、媒質の抵抗率 ρ に比例し、代表的寸法 ℓ に反比例する。すなわち次式で示すことができる。

$$R = K \frac{\rho}{\ell} \quad \dots (1)$$

K : 形状係数

ρ : 媒質の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}$) (本実験では、水の抵抗率)

ℓ : 代表的寸法 (m) (本実験では、モデル電極の任意の1辺の長さ)

ここでの K は電極の形状によって定まる定数で、「形状係数」と呼ぶことにする。また、 K は無時限の定数であり、電極を無限小にしてもその電極に特有の電流分布のパターンは維持している。したがって、この K は電極の形状による特性値である。形状係数法による接地シミュレーションの原理を図3に示す。

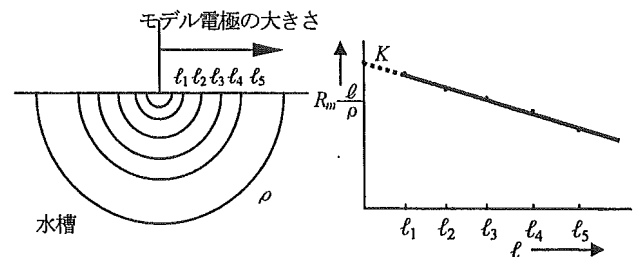


図3 形状係数の原理

Fig. 3 Principle of shape factor method

図3に示すように、x軸に代表的寸法 ℓ 、y軸に $R_m \cdot \ell / \rho$ をプロットし、最小二乗法により直線回帰する。このようにして求めた式において、 $\ell=0$ における y の値が形状係数 K となる。

形状係数を導入することによって、解析解のない電極の接地抵抗を式(1)より精度良く推定することができる¹²⁾。

(2) 水槽実験の概要とモデル電極

図2に示した回路で形状係数を求める実験を行った。戸建住宅基礎の模型を接地極としてみなすために銅板を貼り付けるが、2.2(3)で述べたように、全ての面である程度の接地効果はみられる。安全側、つまり、接地抵抗から得られる面のみを考慮して、接地効果面を外側の側面のみとした。形状係数法の原理に基づき、モデル電極を3ヶ製作した。

(3) 実験結果と考察

表1に示した住宅基礎モデル10パターンの実験の測定結果を最小二乗法により直線回帰を行い、形状係数 K を求めた結果の一部を図4に示す。

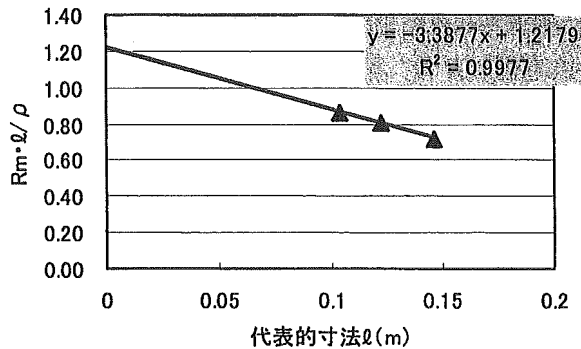


図4 戸建住宅基礎の形状係数 (モデル⑦)

Fig. 4 Shape factor for the foundation of individual house (model 7)

この図より、形状係数 K は y 切片の値である。よって K は 1.2179 である。また、最小二乗法による直線回帰の決定係数 R^2 値は 1.0 に近い値で良好である。①～⑩のすべてのモデルにおいて R^2 値は良好であった。①～⑩の形状係数法によるシミュレーション実験の結果を表3に示す。例として、モデル①の推定接地抵抗値 R_k を求めてみる。表3より、モデル①の形状係数 K は 0.87 である。また、代表的寸法 l は 12.60 である。そこで、(1)式において $K=0.87$, $l=12.60$ を代入すると推定接地抵抗値 $R_k=0.0694 \cdot \rho$ が求まる。

推定接地抵抗値 R_k は大地抵抗率 ρ によっても変化するが、概ね接地抵抗 R_k は、 $0.0611 \cdot \rho [\Omega] \sim 0.0743 \cdot \rho [\Omega]$ の間であることが確認できた。

表3 戸建住宅の形状係数および推定接地抵抗

Table. 3 Shape factor and estimation earthing resistance of individual house

モデル	代表的寸法(m)	形状係数K	推定接地抵抗値 R_k
①	12.60	0.87	$0.0694 \cdot \rho$
②	13.62	0.92	$0.0673 \cdot \rho$
③	14.18	0.94	$0.0663 \cdot \rho$
④	17.80	1.17	$0.0658 \cdot \rho$
⑤	14.18	1.02	$0.0718 \cdot \rho$
⑥	15.75	1.11	$0.0702 \cdot \rho$
⑦	18.23	1.22	$0.0667 \cdot \rho$
⑧	10.26	0.76	$0.0743 \cdot \rho$
⑨	9.23	0.56	$0.0611 \cdot \rho$
⑩	9.18	0.66	$0.0721 \cdot \rho$

2. 4 住宅面積と接地抵抗の関係

表3の推定抵抗値において、大地抵抗率 ρ を $100 \Omega \cdot m$ とした場合の、接地抵抗値と住宅の床面積との関係を図5

に示す。この図より、住宅の規模が大きくなると接地抵抗値は減少することがわかった。

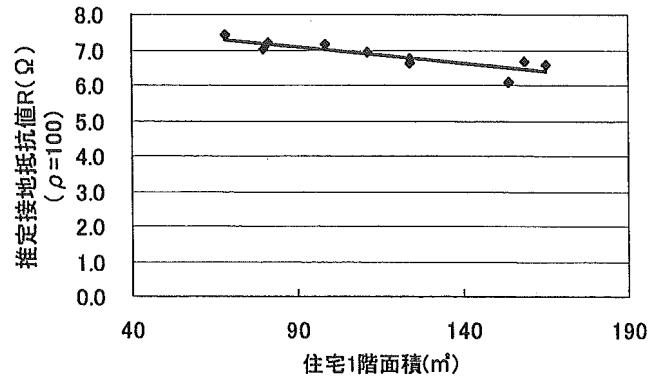


図5 推定接地抵抗 ($\rho=100$ の場合) と床面積の関係

Fig. 5 Relation between estimation earthing resistance ($\rho=100$) and floor area of house

2. 5 鉄筋量を考慮した推定接地抵抗

水槽実験で得られた接地抵抗推定値は、住宅基礎が完全導体として仮定した場合であり、本来の接地抵抗を推定するうえでは、鉄筋コンクリートの電気的特性を考慮に入れて推測する必要がある。

基礎を代用接地極とみなすのは、基礎の中に鉄筋が入っている場合のみであるが、基礎の中にどの程度の鉄筋量が入っているかは、具体的な数値や規定がない。しかし、一般戸建住宅の基礎の形状及び大きさが示してある文献¹⁾から布基礎の形状及び鉄筋の形状、本数を調べ、コンクリート基礎内部の鉄筋量を判断すると、約 0.54% である。

鉄筋量 β は、次式において定義した。

$$\beta = \frac{V_t}{V_0} \times 100 [\%] \quad \dots (2)$$

V_t : 鉄筋の体積 (m^3)

V_0 : コンクリートの体積 (m^3)

また、文献(2)に示したモルタルブロック中の鉄筋がしめる割合の鉄筋量 β を表4に示す。

表4 モルタル中の鉄筋量²⁾

Table. 4 Volume of steel rod in mortar block

		鉄筋の体積 (m^3)	モルタルの体積 (m^3)	鉄筋量 β (%)
鉄筋の本数	1本	1.57×10^{-5}	8.98×10^{-3}	0.175
	2本	3.14×10^{-5}	8.97×10^{-3}	0.350
	3本	4.71×10^{-5}	8.95×10^{-3}	0.526
	4本	6.28×10^{-5}	8.94×10^{-3}	0.702

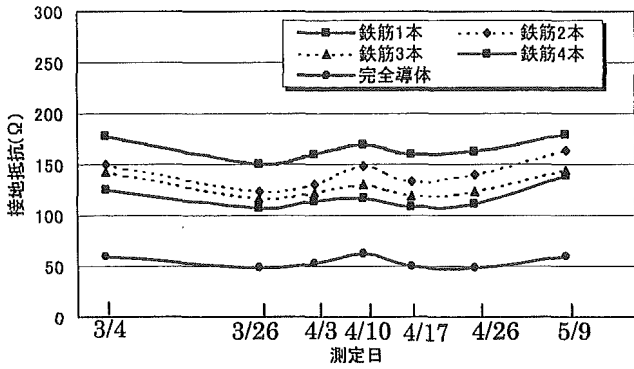


図6 鉄筋1～4本と完全導体の接地抵抗の比較²⁾
 Fig. 6 Comparison of earthing resistance of the block with steel rod and perfect conductor of the block

モルタルブロックの周囲に銅板を張付けた物体を完全導体(鉄筋量 100%)とした時の接地抵抗より、鉄筋量を考慮した接地抵抗を推定する。図6に鉄筋1～4本と完全導体の接地抵抗を比較したものを示す²⁾。また、完全導体の接地抵抗を1とした場合の鉄筋1～4本の接地抵抗の比率をプロットし、鉄筋の本数ごとに平均値を求め、その平均値を累乗近似したものを図7に示す。ここで、鉄筋量 β に対する R/R_0 の値を鉄筋係数と定義する。ただし、 R は鉄筋コンクリートの接地抵抗の値で、 R_0 は完全導体の接地抵抗の値である。図7より、鉄筋量 β が増加するほど鉄筋係数(R/R_0)は完全導体(鉄筋量 100%)の1に近づいていき、減少すれば鉄筋0%の比率に近づいていく。

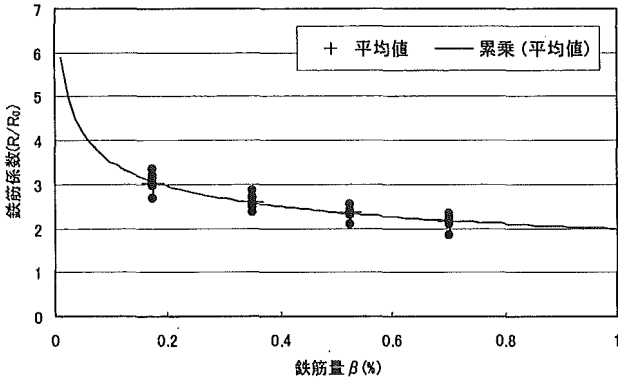


図7 鉄筋量と鉄筋係数の関係

Fig. 7 Relation between steel rod volume and steel rod factor

住宅基礎の一般的な鉄筋量を0.54%とした場合、図6、図7より、鉄筋係数は約2.32である。つまり、鉄筋量を考慮する際には形状係数法で得られた接地抵抗推定値を2.32倍する必要がある。

3. 戸建住宅基礎の接地抵抗実測値とシミュレーション値の比較

3. 1 戸建住宅基礎の接地抵抗の実測⁹⁾

実際に施工されている戸建住宅基礎(場所横須賀市田浦, 田浦開発(株)の協力)の接地抵抗値の測定を行った。

実測を行った土地の大地抵抗率は、ウェンナーの四電極法によって、 ρ - a 曲線データを取り、大地パラメータを解析した結果、当該地はほぼ均質地層であり、深度14mまで約 $21\Omega \cdot m$ の大地抵抗率であることが推定できた。

住宅A, Bの接地抵抗の測定は、電位降下法によって実測した。補助電極までの距離は電流補助極80m, 電位補助極40mとした。当該地は住宅地であり、電磁的環境に関しては何ら問題がなく、測定電流を2Aとした⁹⁾。

3. 2 形状係数法による接地抵抗推定

戸建住宅基礎の基礎伏せ図を図8, 図9に示す。いずれも布基礎である。これらの住宅基礎を模した木製の模型を製作した。その概観を図10に示す。

木製の模型の側面(外)に銅板を貼り、それを電極とし、前述と同様に接地抵抗を測定し、形状係数を求めた。その結果を図11, 図12に示す。

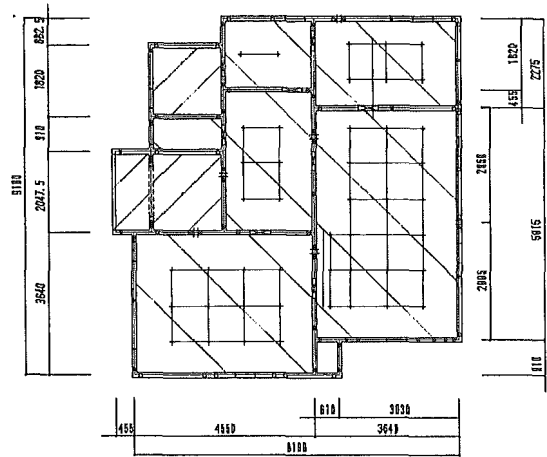


図8 住宅基礎Aの基礎伏せ図

Fig. 8 Foundation of house A

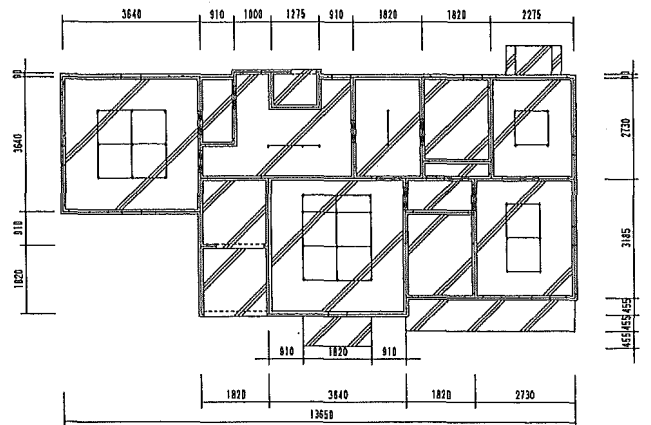
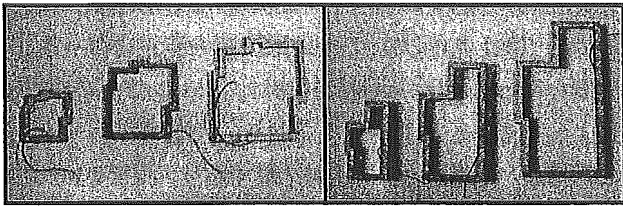


図9 住宅基礎Bの基礎伏せ図

Fig. 9 Foundation of house B



住宅基礎 A 住宅基礎 B

図 10 住宅基礎 A, B の概観図

Fig. 10 Measured model of house A, B

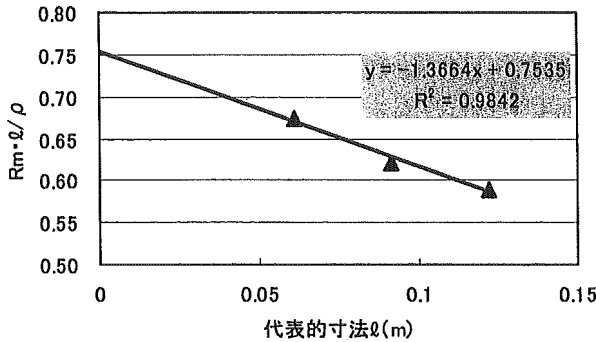


図 11 住宅基礎 A の形状係数

Fig. 11 Shape factor for the foundation of house A

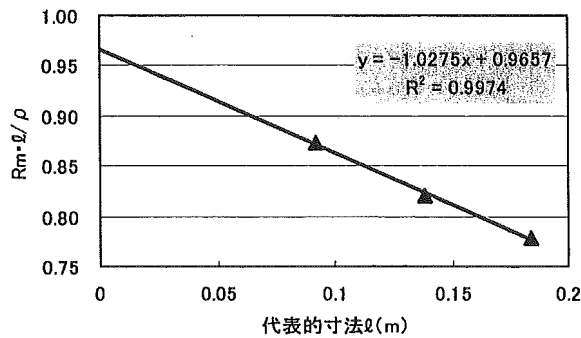


図 12 住宅基礎 B の形状係数

Fig. 12 Shape factor for the foundation of house B

3. 3 実測値との比較

形状係数法により求めた推定接地抵抗値に大地抵抗率を代入し R_k を求めた。この R_k は完全導体の場合である。住宅基礎の一般的な鉄筋量を考慮すると、図 7 より、鉄筋係数は約 2.32 である。

表 5 接地抵抗実測値と推定接地抵抗値の比較

Table. 5 Comparison of earthing resistance of measured values and estimation values

モデル	接地抵抗 実測値 (Ω)	接地シミュレーションの場合			推定接地 抵抗値 R_T (Ω)
		代表的寸 法 (m)	形状係数	推定接地抵 抗値 R_k (Ω)	
A	3.3	9.2	0.754	1.72	3.99
B	2.7	13.8	0.966	1.41	3.27

そこで、鉄筋量を考慮した接地抵抗推定値 R_T は、 R_k を 2.32 倍することにより求まる。その結果表 5 のようになった。表 5 に示すように、住宅基礎 A, B の実測値と推定接地抵抗値は近似している。

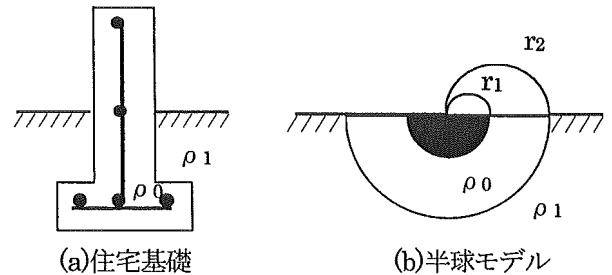
4. 住宅基礎の代用接地極としての評価

4. 1 鉄筋コンクリートの抵抗率を考慮した場合の接地抵抗

住宅基礎は鉄筋コンクリート造であるが接地抵抗を推定する際、コンクリートの湿潤、乾燥状態をみきわめなければならないが、それらの状態の定量化は困難である。そこで、半球モデルによってシミュレーションを行ってみる。

(1) シミュレーションモデル

鉄筋コンクリート造の物体を半球モデルの体積置換法でシミュレーションできることは既に確認されている²⁾。そこで、住宅基礎を半球状電極に置換したモデルを図 13 に示す。 r_1 は住宅基礎内に含まれる鉄筋の体積を半球状に置換した場合の等価半径であり、 r_2 は住宅基礎の体積を半球状に置換した場合の等価半径である。



(a) 住宅基礎

(b) 半球モデル

図 13 シミュレーションモデル

Fig. 13 The simulation model

(2) シミュレーションモデルの接地抵抗計算式

図 13 に示した半球状電極の接地抵抗計算式は次式で表される。

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_0}{2\pi x^2} dx + \int_{r_2}^{\infty} \frac{\rho_1}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho_0 r_2 + (\rho_1 - \rho_0) r_1}{2\pi r_1 r_2} \dots (3)$$

(3) 式によると、接地抵抗はコンクリートの抵抗率 ρ_0 と大地抵抗率 ρ_1 に左右される。そこで、 ρ_0 と ρ_1 の大きさによる接地抵抗の変化をみる。

$\rho_0 / \rho_1 < 1$ の場合は、大地の ρ_1 に比べてコンクリートの ρ_0 が小さい場合であり、つまりコンクリートが湿潤状態である。それに対して $\rho_0 / \rho_1 > 1$ の場合は、コンクリートの ρ_0 が大きい場合で、いわゆる乾燥状態である。

表6 シミュレーションモデルの等価半径

Table. 6 Equivalent radius of simulation model

代表的寸法 $l(m)$	鉄筋量の等 価半径 $r_1(m)$	基礎の等価 半径 $r_2(m)$
18.23	0.257	1.501
9.12	0.204	1.191

例として、表1、表3より、形状係数Kが最も大きな住宅基礎の形状であるモデル⑦をもとに推定してみる。(3)式における諸元の中で、 r_1 と r_2 は表6に示す値を用い、 ρ_1 の値は $100\Omega \cdot m$ とする。実寸法である $l=18.3$ と、その半分大きさの形状($l=9.13$)の住宅基礎の接地抵抗を試算してみると図14のようになる。

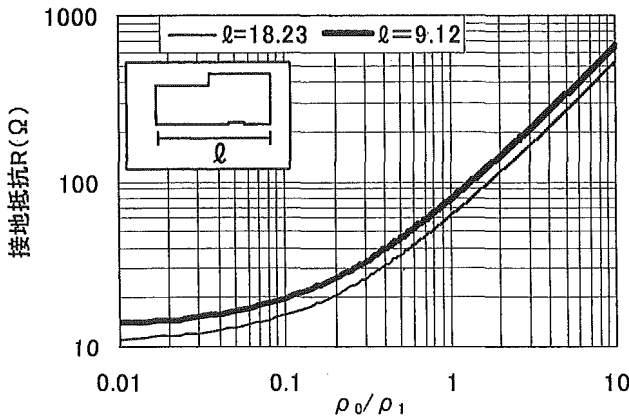


図14 大地の状況と接地抵抗の関係

Fig. 14 Relation between situation of the earth resistivity and earthing resistance

また、図14において $\rho_0/\rho_1=1$ の接地抵抗を1とした場合、 $\rho_0/\rho_1 < 1$ 、 $\rho_0/\rho_1 > 1$ に対する接地抵抗の比を湿乾係数と定義する。 ρ_0/ρ_1 と湿乾係数の関係を図15に示す。

文献(2)において、コンクリートの電気特性についての検討を行っている。それによると、湿潤状態のコンクリートの抵抗率は、乾燥状態の約1/4倍の値($7\Omega/25\Omega$)で一定になっている。このことは、乾燥状態のコンクリートの抵抗率は、最大で湿潤状態の約4倍になることを示している。よって、図15より、乾燥状態 $\rho_0/\rho_1=4$ の場合におけるy軸の値(3.5)が住宅基礎の湿乾係数の最大値と考えることができる。

4. 2 住宅基礎の接地抵抗の推定方法

既に述べてきたように、住宅基礎の形状を模した電極を作成し、接地シミュレーションによって、形状係数を求め接地抵抗を推定することができる。この推定接地抵抗を R_k としたとき、 R_k は完全導体の場合である。住宅基礎は鉄筋

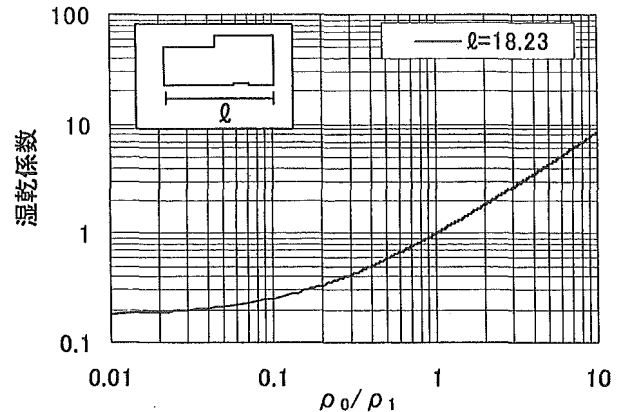


図15 ρ_0/ρ_1 と湿乾係数の関係

Fig. 15 Relation between ρ_0/ρ_1 and wetness and dryness factor

コンクリート造であり、鉄筋量を考慮して接地抵抗を推定しなければならない。鉄筋量と鉄筋コンクリートの接地抵抗(R)との関係は、図7に示したようになっている。さらに、鉄筋コンクリートの ρ_0 を考慮した場合、大地の ρ_1 に対して、湿潤状態である場合は何ら問題はない。しかし、最も懸念される乾燥状態の場合、前述したように、湿乾係数は約3.5である。そこで、住宅基礎の接地抵抗 R_B は次式

表7 戸建住宅基礎の推定接地抵抗

Table. 7 Estimation of the earthing resistance for the foundation of individual house.

モデル	基礎の形状 (形状係数)	1階床面積(m^2)	推定接地抵抗 (最大値)(Ω)
		代表的寸法(m)	
①	0.87	111.45	56.4
		12.60	
②	0.92	124.00	54.7
		13.62	
③	0.94	123.98	53.9
		14.18	
④	1.17	164.97	53.4
		17.80	
⑤	1.02	98.35	58.3
		14.18	
⑥	1.11	79.64	57.0
		15.75	
⑦	1.22	158.36	54.2
		18.23	
⑧	0.76	68.30	60.3
		10.26	
⑨	0.56	152.9	49.6
		9.23	
⑩	0.66	81.03	58.5
		9.18	

で推定することができる。

$$R_B = R_k \times (\text{鉄筋係数}) \times (\text{鉄筋コンクリートの湿乾係数}) \dots (4)$$

4. 3 住宅基礎の接地抵抗の目安値

(4) 式によって、表 1 に示した戸建住宅基礎の接地抵抗の最大値を算定してみる。ここで、鉄筋係数は 2.32 とする。また、鉄筋コンクリートの湿乾係数は 3.5 とし、大地抵抗率は $\rho_i=100 \Omega \cdot m$ とする。

算定結果を表 7 に示す。 $\rho_i=100 \Omega \cdot m$ とした時、接地抵抗は 49.6~60.3 Ω であり、非常に良好な接地抵抗を得ることができた。

5. あとがき

本論では、戸建住宅基礎の接地抵抗を推定するために、住宅基礎の形状を模した電極を作成し、形状係数法を用い接地抵抗を推定した。また、鉄筋量を考慮した接地抵抗の推定も行った。さらに、鉄筋コンクリートの湿潤、乾燥状態を考慮した場合の接地抵抗を推定した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 形状係数法による接地シミュレーションで完全導体の場合の接地抵抗が推定できる。

(2) 鉄筋コンクリート造である場合、鉄筋量をもとに、接地抵抗が推定できる。標準的な鉄筋量に対して鉄筋係数は 2.32 である。

(3) さらに、鉄筋コンクリートの湿乾状態を考慮した場合、湿乾係数を導入することで接地抵抗を推定できる。実際の土壌中の鉄筋コンクリートの湿乾係数を求めることは不可能であるが、シミュレーションの結果から、湿乾係数は最大でも 3.5 であると予想される。したがって、最も懸念されるコンクリートの乾燥時であっても、住宅基礎の場合は、接地抵抗の安全サイドを考慮して湿乾係数を 3.5 と提案する。

(4) (1), (2), (3) をもとに、戸建住宅基礎の接地抵抗算定式を提案した。

(5) 実際に建設されている全電化住宅の基礎を例にとった場合、大地抵抗率が $\rho=100 \Omega$ の場合、接地抵抗は 49.6~60.3 Ω の値であることがわかった。

住宅基礎の接地抵抗の推定方法は、まず形状・寸法を考慮した形状係数を求め、鉄筋係数、湿乾係数をもとに推定することが可能であることを明らかにした。今後、代用接地極として実用化するためには、実測データを集める必要があるが、現実には困難を伴うことが多い。関係各位のご理解、ご協力をお願いしたい。

本研究は、平成 16 年度厚生労働科学研究費補助を受けて

いることを付記する。

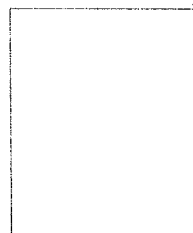
参考文献

- 1) 北村健司, 右田理平, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の接地抵抗の推定」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB04-7-6, 2004 年
- 2) 右田理平, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の代用接地極に関する基礎的検討」, 電気設備学会誌論文号 Vol.24, No.4, pp.296~301, 2004 年
- 3) 右田理平, 高橋健彦: 「導体を入れたモルタルブロックの接地抵抗」, 第 21 回電気設備学会全国大会 A-18 pp.43~44, 2003 年
- 4) 右田理平, 高橋健彦: 「信頼性を考慮した住宅の接地設備」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB03-5-3, pp.11~16, 2003 年
- 5) 高橋健彦: 「住宅における接地設備の課題」, 電気設備学会誌, Vol.23, No.2, pp.116~120, 2003 年
- 6) 中村秀親, 高橋健彦: 「代用接地極としての木造住宅の基礎」, 第 16 回電気設備学会全国大会, E-16, pp.163~164, 1998 年
- 7) 中村秀親, 高橋健彦: 「鉄筋コンクリート代用接地極の導電性」, 第 17 回電気設備学会全国大会, E-12, pp.147~148, 1999 年
- 8) 鈴木秀典, 中村秀親, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の代用接地極としての評価」, 第 18 回電気設備学会全国大会, E-10, pp.173-174, 2000 年
- 9) 鈴木秀典, 高橋健彦: 「戸建住宅の接地抵抗」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB02-2-6, pp.25~29, 2002 年
- 10) W.Rudolph: 「EMV nach VDE100」, VDE-verlag, 1996 年
- 11) 住宅金融公庫: 「木造住宅工事共通仕様書」, (財)住宅金融普及協会, pp.20, 2003 年
- 12) 高橋健彦, 川瀬太郎: 「接地電極の形状係数法の推定法」, 電気学会論文誌 Vol.103-B, No.12, pp.854, 1983 年



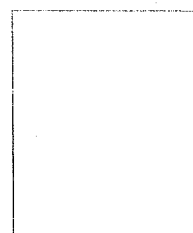
右田理平

1978 年 9 月 1 日大阪府生まれ。2004 年 3 月関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程終了。同年 4 月より (株)大林組勤務。



高橋健彦

1979 年 10 月 17 日神奈川県生まれ。2003 年 3 月関東学院大学建築設備工学科卒業。2005 年 3 月関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程終了。同年 4 月、(株)山下設計入社予定。



高橋健彦

関東学院大学工学部建築設備工学科教授、工学博士(東京大学)、(社)電気設備学会理事、(社)建築設備技術者協会理事、副会長、雷保護システム普及協会理事、(財)関東電気保安協会評議員、(社)電気学会上級会員。

平成17年3月4日

山 川 修 平 殿
高 橋 健 彦 殿



論文査読の結果について

先般ご回答くださいました貴論文は、当論文委員会にて拝見いたしました結果、下記のとおりとなりましたのでご通知いたします。

掲載は、本学会誌平成17年6月号(Vol.25 No.6) を予定しております。

つきましては、著者紹介欄を整備するなど完成原稿をお届けくださるようお願い申し上げます。

記

査読結果 掲載可
受付日 平成16年12月10日
受付番号 04-33
表 題 形状係数法による接地抵抗の推定

形状係数法による接地抵抗の推定

准会員 山川修平 (関東学院大学工学研究科), 正会員 高橋健彦 (関東学院大学)

Estimation of the earthing resistance by the shape factor method
Sub-member Shuhei Yamakawa (Graduate school of Engineering, Kanto-gakuin University)
Member Takehiko Takahashi (Kanto-gakuin University)

Abstract

Earthing is an important technology in the fields of electric power, communication, and lightning protection. The earthing electrode is used as the ground and the electric terminal which comes in various shapes from small scale like rod-shaped and plate-shaped to large scale such as ring-shaped, mesh-shaped etc. When designing earthing, its resistance which is an index of the rise in electric potential must be known. The accurate analytic solution of the earthing resistance excepted for the electrode of the special form such as a rotating ellipsoid electrode cannot be obtained. The earthing resistance of the electrode such as a rod-shaped and a plate-shaped is computed by approximated analysis. There are methods of earthing simulation such as the tank model method or Laplace numerical analysis equation method (for example, the finite element method) used to estimate a shaped earthing resistance without analytic answer.

This paper discusses the results of examining, comparing and analyzing the earthing resistance produced using the shape factor method which focuses on the shape of the earthing electrode.

キーワード: 接地抵抗, 形状係数法, 形状係数, 接地抵抗算定

1. まえがき

接地は電力・通信・雷保護などの分野で重要な技術である。大地との電気的ターミナルとして接地極が用いられるが、その形状は棒状・板状などの小規模なものから、環状、網状などの大規模なものまで、多種多様ある。

接地設計を行う際、電位上昇の指標としての接地抵抗を知る必要がある。回転だ円体電極系などの特殊な形状の電極を除く接地抵抗の厳密な解析解は得られていない。棒状や板状などの電極の接地抵抗は解析解を近似した計算式によって計算されている¹⁾。

解析解のない形状の接地抵抗を推定する方法としては、水槽モデル実験法やラプラス方程式の数値解析(例えば有限要素法)などの接地シミュレーションがあるが、本稿では接地極の形状に着目した形状係数法による接地シミュレーションを行い、得られた接地抵抗を解析解および算定式等で比較検討した結果を示す。

2. 形状係数法の原理

接地抵抗は本来、接地電極の周囲の大地の中に含まれており、厳密には無限遠方まで考える必要がある。ところが、接地シミュレーションにおいては水槽(あるいはリターン電極)の大きさが有限であるため、接地抵抗が打ち切られてしまう。有限の水槽に対しては無限小の電極によらなければ真の接地抵抗が得られない。しかし、無限小の電極は現実には作れない。そこで、真の接地抵抗を得るために、電極の形状係数の概念を導入した接地抵抗の推定法を次に示す²⁾。

(1) 打切り抵抗の定義

いま図1に示すような半球状電極(半径 r_0)を考える。電流 I が電極を通過して大地(抵抗率 ρ)へ放射状に流出しているとする。この場合の接地抵抗 R は $R = \rho / 2\pi r_0$ であり、これを真の抵抗とする。半球状電極の中心から距離 r のところ半径 r の半球面を仮想する。この半球面は等電位面の一つである。この半球を金属水槽に置換すれば、水槽の外側に分布する抵抗分 $\Delta R = \rho / 2\pi r$ は測定されない。すなわち、ここに水槽の有限性によって測定されない抵抗分が存在する。これを「打切り抵抗 ΔR 」と定義する。

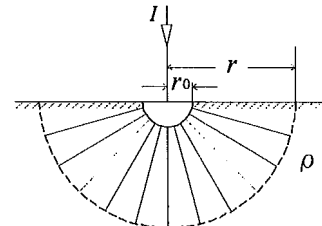


図1 半球状電極と水槽の関係²⁾

Fig.1 Relation between a hemisphere electrode and a metallic tank

(2) 水槽モデル実験の等価性

ここで、水槽を無限大にした場合と電極を無限小にした場合の等価性について考えてみる。図2(a)において、水槽の大きさが r のときは $\Delta R = \rho / 2\pi r$ である。水槽を r_1, r_2, \dots, r_m と大きくしたとき、 $\Delta R \rightarrow 0$ になり、測定される接地抵抗は真値に近づく。一方、同図(b)において、水槽の大きさは r で固定しているから ΔR は変わらない。しかし、電極の大きさを $r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0m}$ と小さくしたとき、測定値 R_m は無限大に近づき、 ΔR は無視できるようになる。すな

わち R_m は真値 R に近づく。したがって、(a)と(b)の操作は等価であると考えられる。

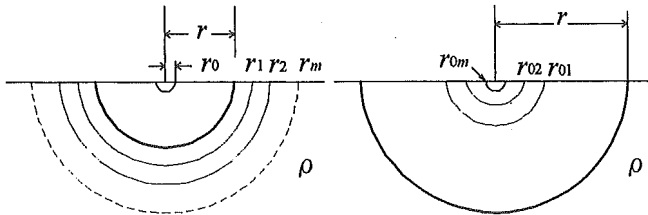


図2 水槽モデル実験の等価性²⁾

(a) 水槽を無限大にした場合 (b) 電極を無限小にした場合

Fig.1 Principle of equivalence for earthing simulation

(a) When a tank is made infinite (b) When electrode is made into the infinitesimal

(3) 形状係数の定義

真の接地抵抗を R 、水槽の有限性によって生じる測定されない接地抵抗を ΔR 、シミュレーションによって測定(あるいは計算)して得られる接地抵抗を R_m とすると

$$R_m = R - \Delta R \quad \dots(1)$$

となる。一方、形状が相似で縮尺率の異なる電極があった場合、その接地抵抗は媒質の抵抗率 ρ に比例し、代表的寸法 L に反比例する。すなわち、

$$R = K \cdot \rho / L \quad \dots(2)$$

(1), (2)式より次式を得る。

$$R_m \cdot L / \rho = K - \Delta R \cdot L / \rho \quad \dots(3)$$

ここで、 K は電極の形状によって定まる定数で「形状係数」と定義する。

(4) 半球状電極の形状係数

解析解のある半球状電極(半径 r_0)を例にとり、接地シミュレーションによる形状係数の推定法を述べる。水槽の形状が半球状(半径 r_c)である場合、得られる接地抵抗 R_m は

$$R_m = \int_{r=r_0}^{r=r_c} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho}{2\pi r_0} - \frac{\rho}{2\pi r_c} \quad \dots(4)$$

ここで、(1)式に対応させると、 $R = \rho / 2\pi r_0$ 、 $\Delta R = \rho / 2\pi r_c$ である。一方、半球状電極の理論式を(2)式に対応させると

$$R = \rho \cdot 1/2\pi \cdot 1/r_0 \quad \dots(5)$$

になる。 $1/2\pi$ は電極の形状を指定している、いわゆる形状係数である。 $1/r_0$ は電極の寸法を指定している。

水槽の大きさ(半径)を $r_c=0.7$ [m]として、半球状模型

電極の代表的寸法(L)である半径を複数個 $r=0.01 \sim 0.05$ [m]選び、それらの接地抵抗 R_m と L の積を求め、 x 軸に L/ρ 、 y 軸に $R_m \cdot L/\rho$ をプロットして、最小二乗法により直線回帰する。このようにして実験式[(3)と同形]を求め、 $x=0$ における y の値を求めれば、 K が決定される。シミュレーションによる結果を図3に示す。推定した形状係数 K は0.159である。

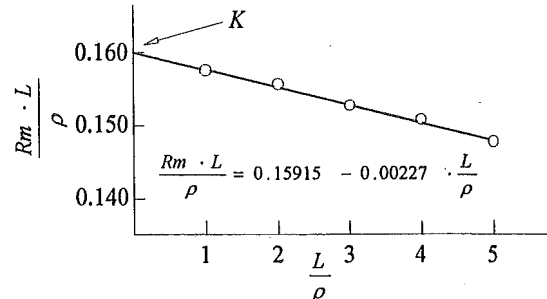


図3 半球状電極の形状係数²⁾

Fig3. The shape factor of the hemisphere electrode

(5) 接地抵抗の推定

電極の実寸法(代表的寸法 L)を用い、施工する場所の大地抵抗率(ρ)、接地シミュレーションで得られた K を用いて接地抵抗(R)は次式で推定できる。

$$R = K \frac{\rho}{L} \quad \dots(6)$$

3. 接地シミュレーションによる形状係数の推定

3.1 接地シミュレーションの方法

形状係数を求めるため、図4に示すようにステンレス製の半球状水槽(半径0.75[m])を用いて接地シミュレーションを行う。半球状水槽には水道水を満たし、同図に示す回路でスライダックによって電流を一定にして実験を行う。電源は安全のため絶縁変圧器を介すことにする。

形状係数法では最低3個の相似形の電極を必要とする。このため実験では相似形のモデル電極を銅板で製作し、半球状水槽の中央に固定して測定をする。

実験では代表的な接地極の形状である棒状・板状電極、解析解のある円板状電極および円柱状電極の形状係数を求めた。

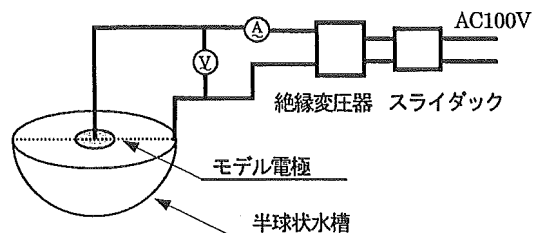


図4 接地シミュレーションの回路図

Fig4. The circuit diagram of the earthing simulation

3. 2 棒状電極

(1) 実験条件

棒状接地電極の一般的な形状である半径 0.0075[m], 長さ 1.5[m]を参考に, 直径:長さ=1:100 のモデル電極を製作した。製作したモデルの寸法を表 1 に示す。表では直径= a , 長さ= b とした。

表 1 棒状電極の寸法
Table 1 The size of driven Rod

棒状電極 比率 $a:b=1:100$	
接地電極の寸法[m]	
a	b
0.0005	0.05
0.001	0.10
0.002	0.20

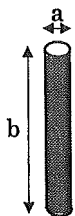


図 5 棒状電極
Fig.5 The driven rod

(2) 実験結果

実験結果を表 2 に示す。形状係数法で接地抵抗を推定するためには, 接地電極の代表的寸法 L [m]が必要である。表中の代表的寸法 L [m]は図 5 の長さ b とした。 ρ は半球状水槽に満たした水道水の抵抗率で, 測定を行うごとに導電率計を用いて計測し, ρ を算出した。 R_m は実験で得られた電極の抵抗値である。表 2 の測定結果をもとに, 代表的寸法 L と $R_m \cdot L / \rho$ との関係を表したグラフを図 6 に示す。このグラフ中でデータを最小二乗法により直線回帰して得られた線と y 軸との交点が棒状電極の特性値である形状係数である。データを処理した結果, 棒状電極 ($a:b=1:100$) の形状係数は 0.914 となり, 最小二乗法による直線回帰の決定係数 R^2 値は $R^2=0.983$ であった。ここで, 水道水の ρ は $54.59[\Omega \cdot m]$ である。

表 2 棒状電極の測定結果

Table 2 The measurement results of driven rod

	接地電極の寸法[m] a,b		
	0.0005, 0.05	0.001, 0.10	0.002, 0.20
L [m]	0.05	0.10	0.20
R_m [Ω]	988	486	238
$R_m \cdot L / \rho$	0.905	0.891	0.873

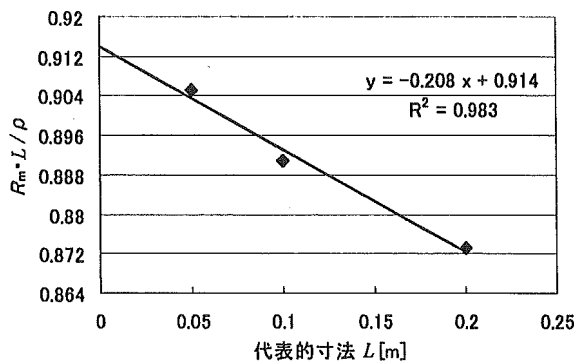


図 6 棒状電極の形状係数

Fig.6 The shape factor of the driven rod

表 3 板状モデル電極の寸法

Table 3 The size of the plate electrode

板状電極 比率 $a:b=1:1$	
接地電極の寸法[m]	
a	b
0.03	0.03
0.06	0.06
0.09	0.09

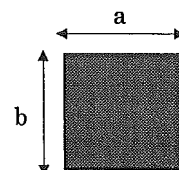


図 7 板状電極
Fig.7 The plate electrode

3. 3 板状電極

(1) 実験条件

板状接地電極の一般的な寸法である縦 0.9[m], 横 0.9[m]を参考に, 縦:横=1:1 のモデル電極を製作した。製作したモデルの寸法を表 3 に示す。板厚さは 0.3[mm]である。表中の a , b は銅板の横, 縦の寸法である。ここで, 代表的寸法 L [m]は図 7 の縦 b とした。板状電極を垂直に置き電極の厚みの部分が水没しないように深さ 0[m]とした。

(2) 実験結果

実験結果を表 4 に示す。測定値をグラフ化したものを図 8 に示す。

測定データを最小二乗法により直線回帰した結果, 板状電極($a:b=1:1$)の形状係数 0.299 という結果であり $R^2=0.995$ と良好な値を得た。ここで, 水道水の ρ は $61.58[\Omega \cdot m]$ である。

表 4 板状電極の測定結果

Table 4 The measurement results of plate electrode

	接地電極の寸法[m] a,b		
	0.03, 0.03	0.06, 0.06	0.09, 0.09
L [m]	0.03	0.06	0.09
R_m [Ω]	603	297	194
$R_m \cdot L / \rho$	0.294	0.289	0.283

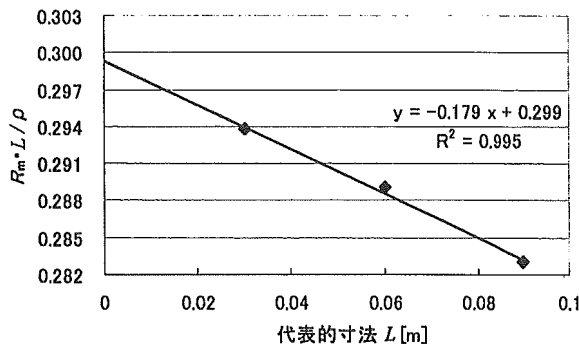


図 8 板状電極の形状係数

Fig.8 The shape factor of the plate electrode

3. 4 円板状電極

(1) 実験条件

円板状電極は、表 5 の寸法でモデル電極を製作した。表中の a は円板の直径寸法[m]で、板厚は 0.3[mm]である。理論式に合わせるために、円板は水平に置き、電極の表面が水没しないようにして、底面のみが水面に接触するように設置した。ここで、代表的寸法 L [m]は図 9 の直径 a とした。

表 5 円板状電極の寸法

Table 5 The size of the disk type electrode

円板状電極 接地極の寸法 a [m]
0.05
0.10
0.15

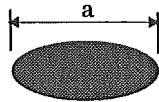


図 9 円板状電極
Fig.9 The disk type electrode

(2) 実験結果

実験結果を表 6 に示し、測定値をグラフ化したものを図 10 に示す。

測定データを最小二乗法により直線回帰した結果、円板状電極の形状係数は 0.520 という結果であり $R^2=0.999$ と良好な値を得た。ここで、水道水の ρ は 57.54[$\Omega \cdot m$]である。

表 6 円板状電極の測定結果

Table 6 The measurement results of disk type electrode

	接地極の寸法 a [m]		
	0.05	0.10	0.15
L [m]	0.05	0.10	0.15
R_m [Ω]	591	292	192
$R_m \cdot L / \rho$	0.514	0.507	0.501

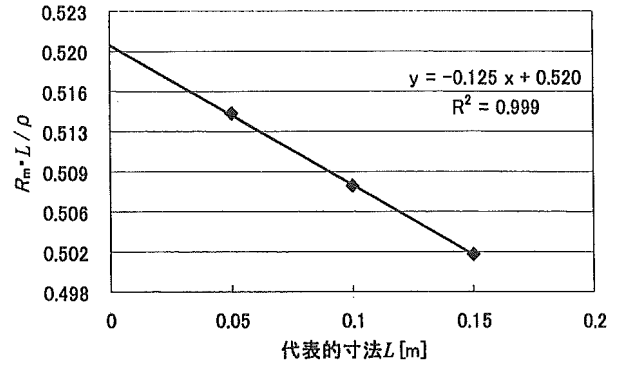


図 10 円板状電極の形状係数

Fig.10 The shape factor of the disk type electrode

3. 5 円柱状電極

円柱状電極は棒状電極と円板状電極の間接的な形状である。このため実験では図 11 のように 2 種類を製作し、それぞれ比率を変えて測定を行った。

(1) 実験条件パターン① ($a \geq b$ のとき)

実験は $a:b$ を 1:1~5:1 まで比率を変化させて円柱状モデル電極を製作した。棒状や板状電極の場合と同様にそれぞれの比率ごとにモデル電極を 3 個ずつ製作し、水槽を用いて測定を行った。ここで、代表的寸法 L [m]は図 11 (パターン①) の直径 a とした。

(2) 実験結果パターン① ($a \geq b$ のとき)

実験結果とデータ処理例を表 7 および図 12 に示す。測定結果から各比率の形状係数を求め、まとめたものを表 8 に示す。いずれの比率の場合も形状係数を求める際の近似式の R^2 は 0.99 以上と良好であった。ここで、水道水の ρ は約 58.0[$\Omega \cdot m$]である。

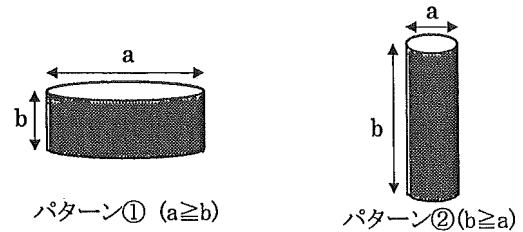


図 11 円柱型電極

Fig.11 The cylinder type electrode

表 7 円柱状電極 (パターン①) の測定結果

Table 7 The measurement results of the cylinder type electrode (Pattern ①)

各モデルの比率(a:b)	L [m]	R_m [Ω]	$R_m \cdot L / \rho$
1:1	0.01	1287	0.221
	0.02	612	0.210
	0.03	390	0.201
2:1	0.02	757	0.263
	0.04	372	0.259
	0.06	244	0.255
3:1	0.03	582	0.299
	0.06	282	0.291
	0.09	184	0.284
4:1	0.04	463	0.320
	0.08	227	0.314
	0.12	149	0.309
5:1	0.05	393	0.340
	0.10	191	0.331
	0.15	124	0.322

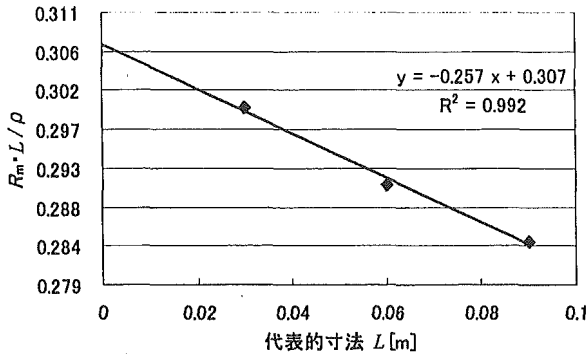


図12 円柱状電極 (パターン①) の形状係数 (a:b=3:1)

Fig.12 The shape factor of the cylinder type electrode (Pattern ①) (a:b=3:1)

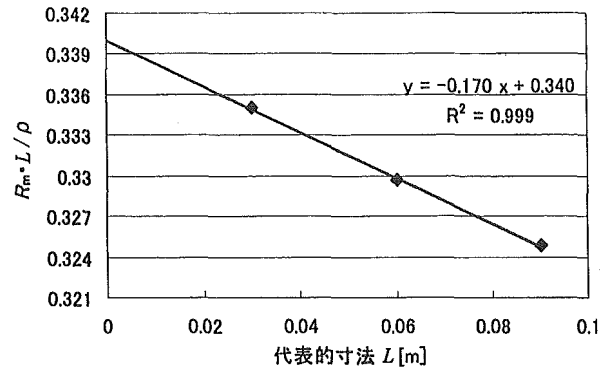


図13 円柱状電極 (パターン②) の形状係数 (a:b=1:3)

Fig.13 The shape factor of the cylinder type electrode (pattern ②) (a:b=1:3)

表8 円柱状電極 (パターン①) の形状係数

Table 8 The shape factor of the cylinder type electrode (Pattern ①)

a:b	1:1	2:1	3:1	4:1	5:1
形状係数K	0.231	0.267	0.307	0.326	0.349

(3) 実験条件パターン② (b ≥ a のとき)

実験は a:b を 1:2~1:5 まで比率を変化させて円柱状モデル電極を製作し、それぞれの場合の形状係数を調べた。ここで、代表的寸法 L[m] は図 11 (パターン②) の長さ b とした。

(4) 実験結果パターン② (b ≥ a のとき)

実験結果とデータ処理例を表 9 および図 13 に示す。測定結果から各比率の形状係数を求め、まとめたものを表 10 に示す。いずれの比率の場合も形状係数を求める際の近似式の R² は 0.98 以上であった。ここで、水道水の ρ は約 57.1[Ω・m] である。

表9 円柱状電極 (パターン②) の測定結果

Table 9 The measurement results of the cylinder type electrode (Pattern ②)

各モデルの比率(a:b)	L [m]	R _m [Ω]	R _m · L / ρ
1:2	0.02	757	0.277
	0.04	377	0.276
	0.06	250	0.275
1:3	0.03	648	0.335
	0.06	319	0.330
	0.09	209	0.325
1:4	0.04	538	0.374
	0.08	266	0.370
	0.12	174	0.363
1:5	0.05	460	0.401
	0.10	226	0.394
	0.15	149	0.389

表10 円柱状電極 (パターン②) の形状係数

Table 10 The shape factor of the cylinder type electrode (pattern ②)

a:b	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
形状係数K	0.231	0.279	0.340	0.381	0.407

4. 接地抵抗の推定

棒状・板状・円板状・円柱状電極の形状係数を求めたが、これをもとにしてそれぞれの接地抵抗の推定を行ってみる。

4. 1 推定方法

前述したように、接地抵抗 R は形状係数 K をもとに (2) 式で求めることができる。

各電極の計算条件を表 11 に示す。条件の中で円板状接地電極は、通常用いられる例がほとんどなく、一般的な寸法が定まっていない。そのため便宜的に直径 a=0.30[m] とした。

ここで、代表的寸法(L)は棒状電極は長さ、板状は縦、円板は直径とした。

表11 電極の計算条件と接地抵抗

Table 11 The calculation conditions of the electrode, and earthing resistance

寸法[m]	棒状		板状	円板状
	直径	長さ	横・縦	直径
	0.015	1.5	0.9	0.30
比率 a:b	1:100		1:1	—
形状係数 K	0.914		0.299	0.520
接地抵抗推定値	0.61 · ρ		0.33 · ρ	1.73 · ρ

4. 2 推定結果と考察

形状係数法で作られた接地抵抗と解析解のある円板状電極、近似計算式のある棒状、板状電極の接地抵抗を比較してみる。その結果を表 12 に示す。誤差率は、解析解と形状係数法との差を解析解で除して求めた。