

表5 交流15Hzから100Hzに対する時間-電流領域 (図5の説明)

領域の呼称	領域の範囲	生理学上の影響
AC-1	0.5mAまで (ラインa)	通常無反応。
AC-2	0.5mAからラインb*	通常有害な生理的影響はない。
AC-3	ラインbから曲線c1まで	通常器質性の損傷は想定されていない。電流が2秒より長く持続する場合、麻痺性の筋収縮や呼吸困難の可能性はある。電流の大きさと時間に従って増大し、心室細動なしに心房細動や一時的心停止を含む心臓の回復可能なインパルスの形成障害と伝導障害。
AC-4	曲線c1から上	大きさと時間と共に増大し、心停止、呼吸停止また重度のやけどといった病理生理学上の危険な影響が領域3の影響に重なって起きることがある。
AC-4.1	c1-c2	心室細動の確率が約5%まで増大。
AC-4.2	c2-c3	心室細動の確率が約50%まで増大。
AC-4.3	曲線c3を越えて	心室細動の確率は、約50%を超えて増大。

\*通電時間が10ms未満では、ラインbの身体電流限度値は200mA一定である。

表6 人体の内部抵抗

経路	人体抵抗 (%)
左手と左足	100
左手と右手	80.7
胸と手	47.2
胸と足	52.8
手と頭	57.2
手と腹	48.5

表7 各電流経路の心臓電流係数

電流経路	心臓電流係数F
左手と左足、右足または両足	1
両手と両足	1
左手と右手	0.4
右手と左足、右足または両足	0.8
背中と右手	0.3
背中と左手	0.7
胸と右手	1.3
胸と左手	1.5
尻と左手、右手または両手	0.7

な経路がより危険である。それらは胸と左手あるいは胸と右手との間であり、大部分の感電時の電流が心臓部を流れる経路は危険性が高い。

#### 4. 感電災害防止技術

感電災害の防止技術には、交流アーク溶接機用自動電撃防止装置 (以下、電防装置という) をはじめ、漏電にともなう感電災害防止を目的に漏電遮断器、二重絶縁機器の使用、非接地電路の採用、超低電圧機器の使用、電位ボンディングなどがある。以下簡単に紹介する。

##### (1) 電防装置

アーク溶接作業では、二次側に80V程度の無負荷電圧が発生している場合が感電危険性が高い。電防装置はアークを切った後、遅動時間 (1.5秒以内) 後に二次側の電圧が30V以下の安全電圧になるように制御する装置である。

電防装置には主接点を溶接機電源の一次側に取り付けたものと、二次側に取り付けたものがある。図6に示す二次側制御の電防装置を例として動作を説明する。アークが発生していないときには主接点S1が開放され、抵抗器で分圧された安全電圧が溶接棒ホルダーの充電部に印加されている。溶接棒が母材に接触すると起動検出装置が作動して、起動コイルに電流が流れて主接点がS1が閉じ、80

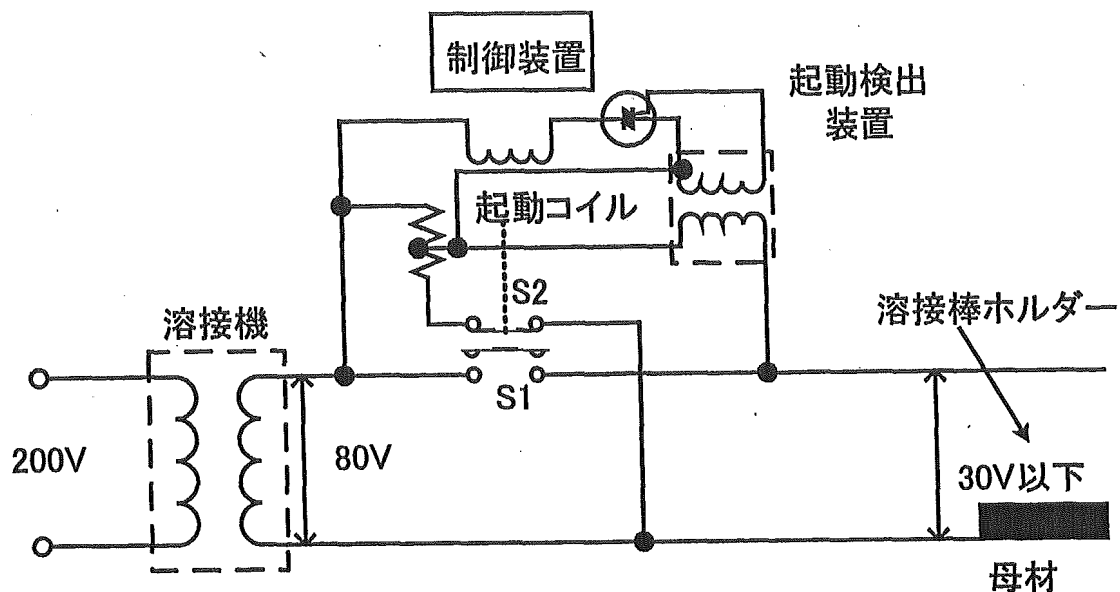


図6 二次側制御の電防装置

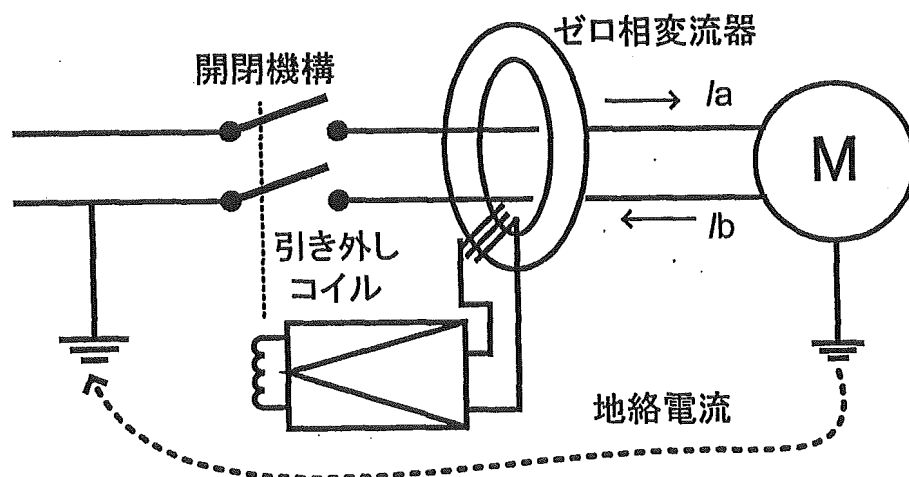


図7 漏電遮断器の構造

V程度の無負荷電圧が溶接棒ホルダーに印加されてアーク作業が開始される。

アーク作業後に、アークが切れると遅動時間後に電防装置によって主接点が開放されて、安全電圧が再び二次側に出力される。

(2) 漏電遮断器

漏電遮断器は、電路から大地に漏れた地絡電流を検出するため、図7に示すように電路

に挿入したゼロ相変流器 (ZCT) を用いる。地絡の発生していないときには  $I_a$  と  $I_b$  は大きさが等しく、電流の流れる方向が反対で相殺されるため、ZCT からの出力はゼロとなる。一度地絡が発生すると、 $I_a$  と  $I_b$  の大きさには不均衡が生じるため、発生した磁界によって ZCT の巻線に電圧が出力される。この出力電圧によって引き外しコイルが励磁されて開閉機構が動作する。

### (3) 二重絶縁機器

電気機器の充電部と非充電部とを二重に絶縁、若しくは二重絶縁と等価な強化絶縁を施すことである。これによって地絡災害を減らして、感電災害対策に資するものである。二重絶縁のうち、機能絶縁といわれるものは、機器の機能上必要とされるもので、感電防止の基本的な絶縁である。また、保護絶縁があり、機能絶縁の絶縁が破壊された場合にも、保護を確実にできるように機能絶縁とは独立に付加されたものである。

### (4) 非接地電路の採用

電気機器で地絡が発生しても、地絡電流の流れる経路が形成されないように、変圧器の低圧側の一端を接地しない方式である。

ただし、線路には浮遊容量があり、実際の電路の絶縁抵抗も有限でもあるためにわずかの地絡電流が流れることとなる。また、変圧器内部で混触が発生すると低圧側に高電圧が発生するため、対策として接地された混触防止板を使用する。

### (5) 超低電圧機器の使用

電源電圧を24V、42Vのように非常に低くすることによって、漏電時に電気機器の筐体に生ずる対地電圧を低減して、地絡電流を小さくするもので、国際的にはクラスⅢ機器と呼ばれている。電源電圧が非常に低くなくとも、同様の効果が得られる例としては、制御装置の電源電圧を変圧器によって超低電圧にして、動力用電源や電気設備と分離する方法がある。

### (6) 等電位ボンディング

建物内部の金属製の導体とその他の機器との電位差を低減することを目的として、これらの間を良好な導体で結合することを主等電位ボンディングという。例えば電気機器で漏電が発生したとき、漏電の電流によって主等電位ボンディングを構成する建築構造体の金属部分などと保護導体とを併せた電圧降下が発生する。この電圧降下を低減すると、漏電箇所に接触した人体に流れる電流が小さくなり、感電危険性が低くなる。

## 5. おわりに

感電災害の傾向、電流の人体への影響、及び災害防止技術を概説した。感電災害は一度発生すると死亡に至る確率が非常に高い危険なものである。感電災害防止のための設備面での対策に加えて、電気作業従事者への安全教育が浸透し、常に安全で快適な作業環境が構築され、感電災害ゼロが達成されることを切に希望する。

## 参考文献

1. “安全衛生年鑑 平成12～15年版”、中央労働災害防止協会
2. IEC60479-1、“Effects of current on human beings and livestock Part 1: General aspects”、1994
3. 竹谷是幸、“IEC規格による電気安全”、理工図書、2001
4. 竹谷是幸、“広義の等電位ボンディングについて”、電気設備学会誌、Vol.23、No.1、p.43～50、2003

社団法人 電気設備学会 テーマ付研究会

## 講演論文集

2004年 第7回

テーマ「接地・等電位ボンディング」

開催日時 2004年12月9日(木) 13:00~17:10

開催場所 社団法人 電気設備学会 4階会議室

## 目次・プログラム

座長 高橋健彦(関東学院大学)

番号	題目	所属	講演者 (○印)	時間	頁
GB04-7-1	接地方式の違いによる雷サージの影響に関する研究	○市川孝誠 福田隆男	鹿島建設株式会社	13:00～ 13:30	1
GB04-7-2	統合接地システムと雷保護との課題に関する研究	○熊谷 悟 鈴木秀也 近藤 弾 蒔田鐵夫 移川欣男	日本大学	13:30～ 14:00	9
GB04-7-3	接地特性に及ぼす大地構成の影響に関する研究(垂直断層の場合)	○鈴木秀也 熊谷 悟 近藤 弾 蒔田鐵夫 移川欣男	日本大学	14:00～ 14:30	15
GB04-7-4	接地抵抗の測定結果に及ぼす近接導体の影響に関する研究	○近藤 弾 熊谷 悟 鈴木秀也 蒔田鐵夫 移川欣男	日本大学	14:30～ 15:00	21
GB04-7-5	某合同庁舎における等電位ボンディング	○小沼 満	(株)日本リスクマネジメ ントシステム	15:10～ 15:40	27
GB04-7-6	戸建住宅基礎の接地抵抗の推定	○北村健司 右田理平 高橋健彦	関東学院大 大林組 関東学院大	15:40～ 16:10	33
GB04-7-7	形状係数法による接地抵抗の推定	○山川修平 高橋健彦	関東学院大	16:10～ 16:40	41
GB04-7-8	電位降下法による接地抵抗測定のシミュレーション	○竹之内章 高橋健彦	関東学院大	16:40～ 17:10	47

## 戸建住宅基礎の接地抵抗の推定

○北村 健司 (関東学院大学大学院工学研究科), 右田 理平 ((株)大林組)  
高橋 健彦 (関東学院大学)

Estimation of the Earthing Resistance for the Foundation of Individual House  
Kitamura Kenji (Graduate School of Engineering, Kanto-gakuin University)  
Uda Rihei (Obayashi Corp.), Takahashi Takehiko (Kanto-gakuin University)

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働を保證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。<sup>1)~9)</sup>

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<sup>10)</sup>。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。

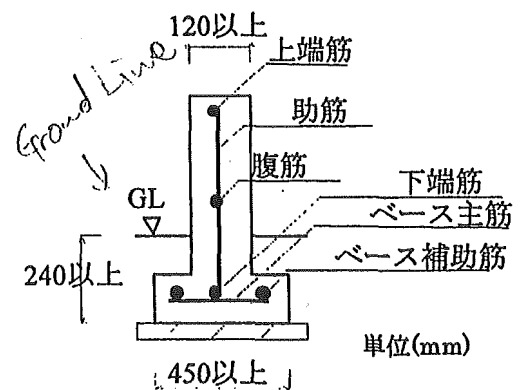


図1 布基礎詳細図<sup>10)</sup>

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。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、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。

表1 戸建住宅の概要

モデル	基礎の形状	1階床面積(m <sup>2</sup> )	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

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<sup>10)</sup>。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  $r=0.75\text{m}$  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。

#### (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、全面の場合を製作し、その接地抵抗を測定した。

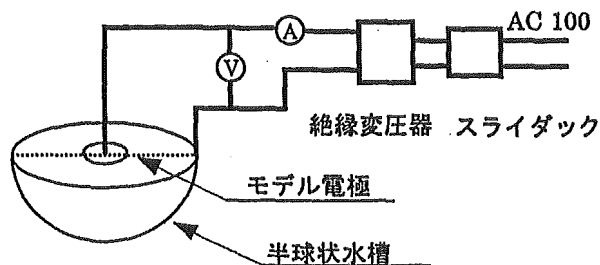


図2 水槽モデル実験回路図

#### (3) 実験結果と考察

測定結果と全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

	抵抗[Ω]	割合
側面(外)	430.4	1.17
側面(内)	526.0	1.43
底面	410.6	1.11
側面(外)+側面(内)	398.0	1.08
側面(外)+底面	382.4	1.04
側面(内)+底面	395.4	1.07
全面	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<sup>2)</sup>

### (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  $\rho$  に比例し、代表的寸法  $\ell$  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

$\rho$ : 媒質の抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ ) (本実験では、水の抵抗率)

$\ell$ : 代表的寸法 (m)

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。

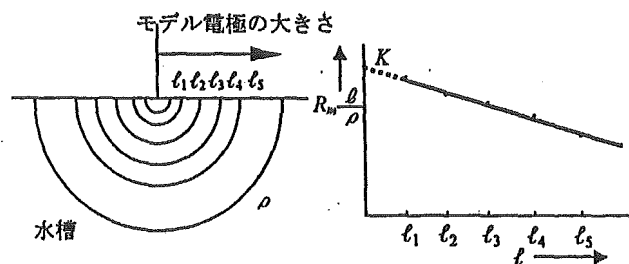


図3 形状係数法の原理

図3に示すように、x軸に代表的寸法  $\ell$ 、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。

### (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電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。

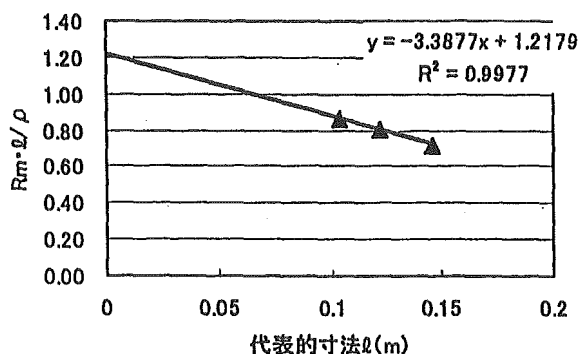


図4 戸建住宅基礎の形状係数(モデル⑦)

この図より、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。また、形状係数を用い、(1)式より求めた推定接地抵抗値  $R_k$  も同表に示す。

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

表3 戸建住宅の形状係数及び推定接地抵抗

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  $\rho$  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。

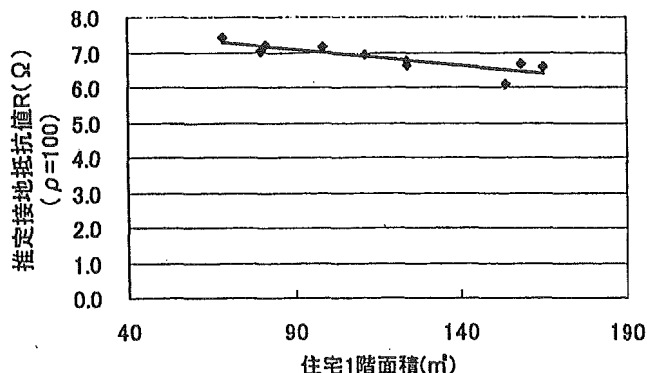


図5 推定接地抵抗 ( $\rho=100$  の場合) と床面積の関係

#### 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<sup>10)</sup>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  $\beta$  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(1)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  $\beta$  を表4<sup>1)</sup>に示す。

表4 モルタル中の鉄筋量  $\beta$ <sup>1)</sup>

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

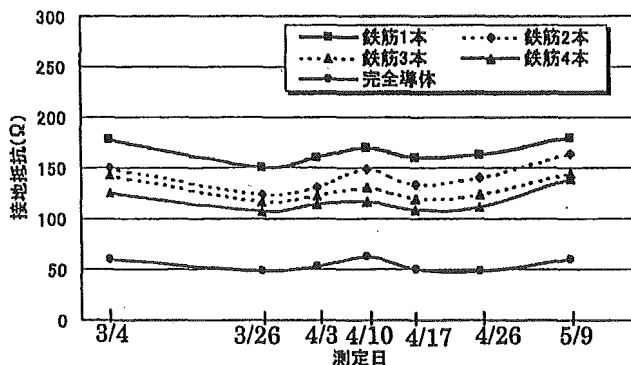


図6 鉄筋1～4本と完全導体の接地抵抗の比較<sup>1)</sup>

モルタルブロックを完全導体(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<sup>1)</sup>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。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  $\beta$  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

一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 $\beta$ が増加するほど $R/R_0$ 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。

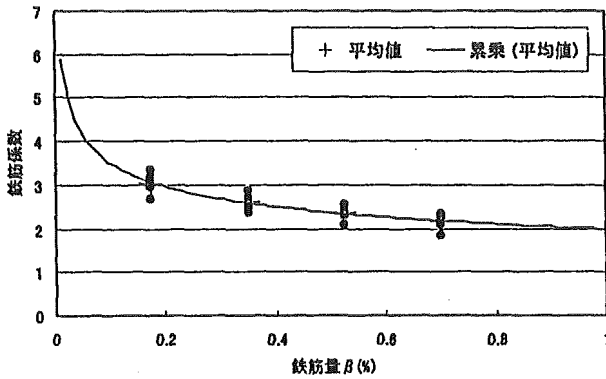


図7 鉄筋量と鉄筋係数の関係

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<sup>9)</sup>

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、 $\rho$ - $a$ 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電極80m、電位補助電極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。<sup>9)</sup>

#### 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。

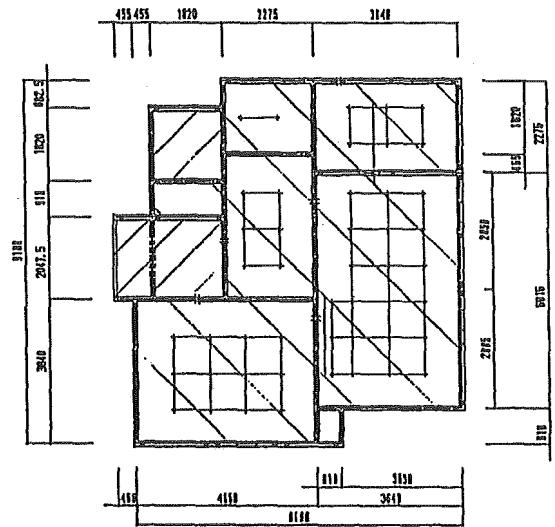


図8 住宅基礎Aの基礎伏せ図

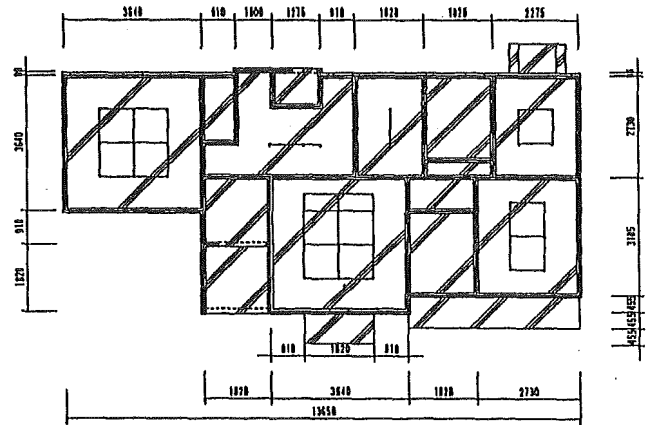
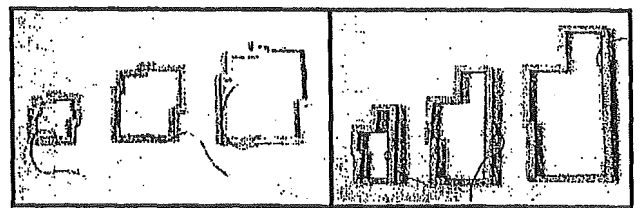


図9 住宅基礎Bの基礎伏せ図



住宅基礎A 住宅基礎B  
図10 住宅基礎A、Bの概観図

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。

#### 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。そこで、鉄筋量を考慮した接

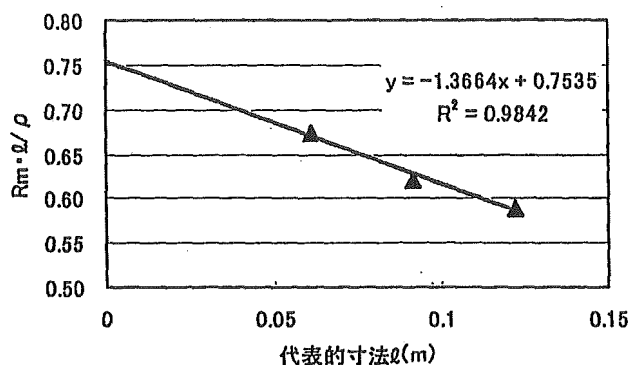


図 1 1 住宅基礎 A の形状係数

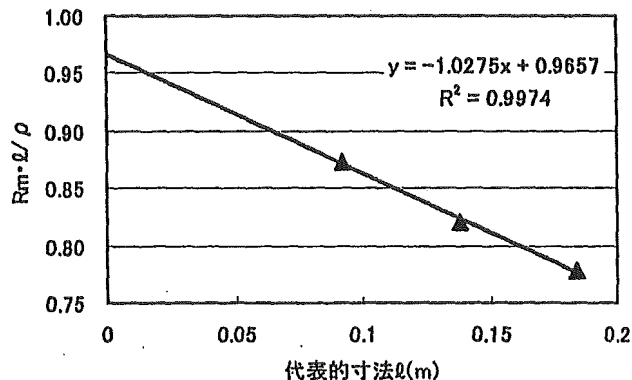


図 1 2 住宅基礎 B の形状係数

地抵抗推定値  $R_0$  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。

表 5 接地抵抗実測値と推定接地抵抗値の比較

モデル	接地抵抗実測値 ( $\Omega$ )	接地シミュレーションの場合			推定接地抵抗値 $R_0$ ( $\Omega$ )
		代表的寸法 (m)	形状係数	推定接地抵抗値 $R_k$ ( $\Omega$ )	
A	3.3	9.2	0.754	1.72	3.99
B	2.7	13.8	0.966	1.41	3.27

#### 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<sup>1)</sup>。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。

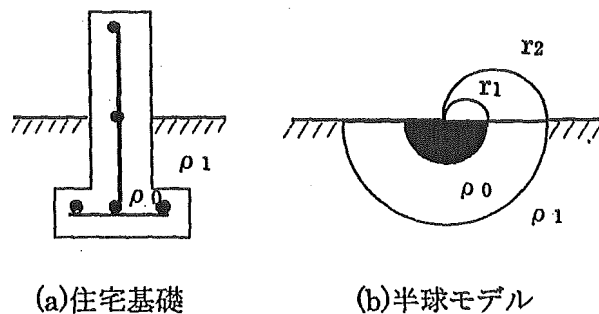


図 1 3 シミュレーションモデル

##### (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  $\rho_0$  と大地抵抗率  $\rho_1$  に左右される。そこで、 $\rho_0$  と  $\rho_1$  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  $\rho_1$  に比べてコンクリートの  $\rho_0$  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  $\rho_0$  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

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、 $\rho_1$  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。同図の接地抵抗は、モデル⑦の住宅基礎の外周の側面の接地効果のみを考慮したもので、接地抵抗としては最も高めに出る場合である。

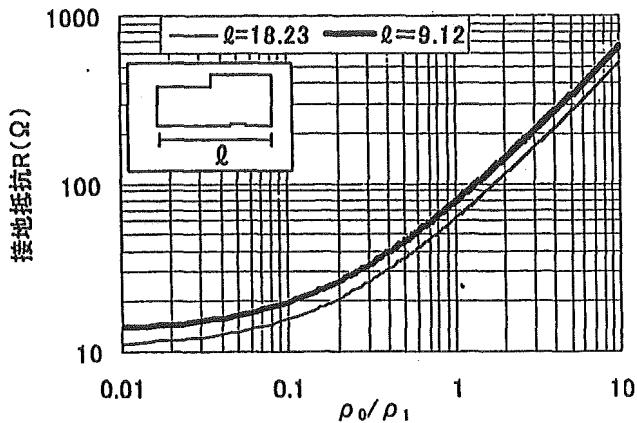


図14 大地の状況と接地抵抗の関係

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。 $\rho_0/\rho_1$  と湿乾係数の関係を図15に示す。

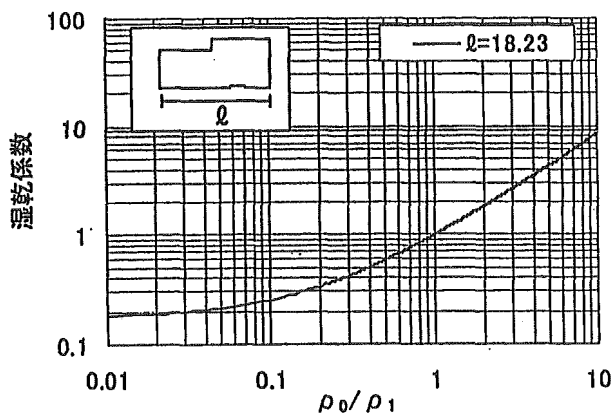


図15  $\rho_0/\rho_1$  と湿乾係数の関係

文献(1)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(7Ω/25Ω)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  $\rho_0$  を考慮した場合、大地の  $\rho_1$  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。

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

表7 戸建住宅基礎の推定接地抵抗

モデル	基礎の形状 (形状係数)	1階床面積(m <sup>2</sup> ) 代表的寸法(m)	推定接地抵抗 (最大値)(Ω)
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	

#### 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  $\rho_1=100\Omega\cdot m$  とする。

算定結果を表 7 に示す。 $\rho_1=100\Omega\cdot m$  とした時、接地抵抗は 49.6~60.3 $\Omega$  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 $\Omega$  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) 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
- 2) 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
- 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) 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
- 11) W.Rudolph:「EMV nach VDE100」, VDE-verlag, 1996 年

## 形状係数法による接地抵抗の推定

○ 山川修平 (関東学院大学工学研究科), 高橋健彦 (関東学院大学)

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

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。大地との電氣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。

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。<sup>1)</sup>

## (1) 打ち切り抵抗の定義

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  $\rho$ )

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  $r$  のところに半径  $r$  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「打ち切り抵抗  $\Delta R$ 」と定義する。

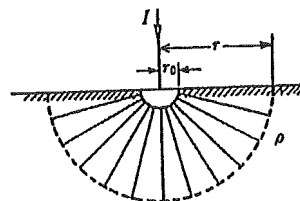
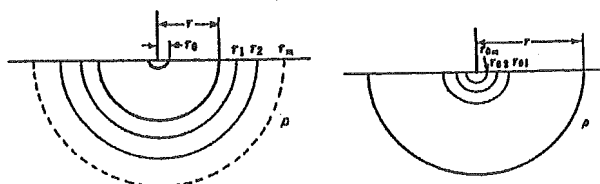


図1 半球状電極と水槽の関係

## (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  $\Delta R$  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  $\Delta R$  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,  $\Delta R$  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。



(a) 水槽を無限大にした場合 (b) 電極を無限小にした場合

図2 水槽モデル実験の等価性

### (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  $\Delta R$ 、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

$$R_m = R - \Delta R \quad \dots(1.1)$$

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  $\rho$  に比例し、代表的寸法  $L$  に反比例する。すなわち、

$$R = K \cdot \rho / L \quad \dots(1.2)$$

(1.1), (1.2)式より次式を得る。

$$R_m \cdot L / \rho = K - \Delta R \cdot L / \rho \quad \dots(1.3)$$

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  $r_0$ )である場合、得られる接地抵抗  $R_m$  は

$$R_m = \int_{r=r_0}^{r=r_c} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho}{2\pi r_0} - \frac{\rho}{2\pi r_c} \quad \dots(1.4)$$

ここで、(1.1)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

$$R = \rho \cdot 1/2\pi \cdot 1/r_0 \quad \dots(1.5)$$

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  $r_0 = 0.7$  [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])選り、それらの接地抵抗  $R_m$  と  $L$ の積を求め、 $x$ 軸に  $L/\rho$ 、 $y$ 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[(1.3)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0.15915である。

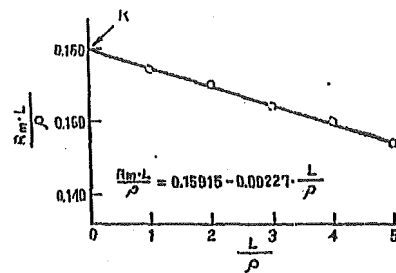


図3 半球状電極の形状係数

### (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( $\rho$ )、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。

$$R = K \frac{\rho}{L} \quad \dots(1.6)$$

## 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で満たし、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。

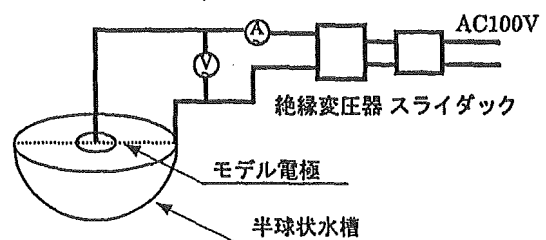


図4 接地シミュレーションの回路図

### 3. 2 棒状電極

#### (1) 実験条件

棒状接地極の一般的な形状である半径0.0075[m]、高さ1.5[m]を参考に、直径：高さ=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、高さ=bとした。

表1 棒状電極の寸法

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

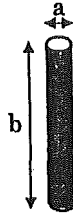


図5 棒状電極

#### (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]は棒状電極の高さの寸法を用いた。 $\rho$ 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、 $\rho$ 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  $R^2=0.983$ であった。ここで、水道水の  $\rho$ は54.59[ $\Omega \cdot m$ ]である。

### 3. 3 板状電極

#### (1) 実験条件

板状接地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。表中のa、bは銅板の縦、横の寸法である。埋設深さは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)の形状係数は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  $\rho$ は61.58[ $\Omega \cdot m$ ]である。

表2 棒状電極の測定結果

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

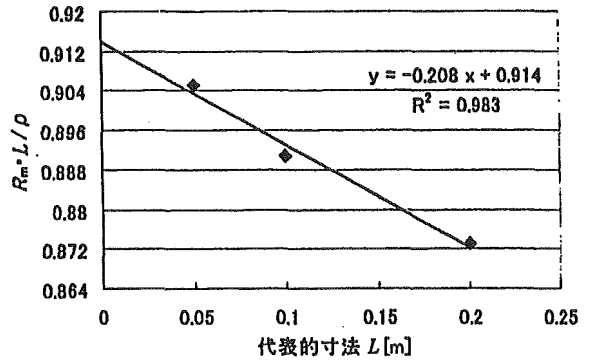


図6 棒状電極の形状係数

表3 板状モデル電極の寸法

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

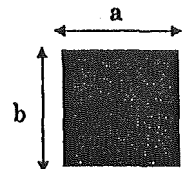


図7 板状電極

表4 板状電極の測定結果

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

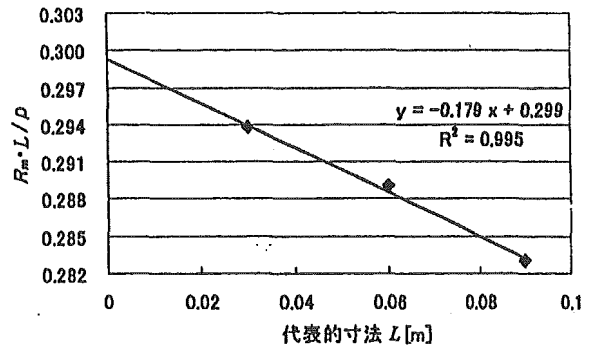


図8 板状電極の形状係数



### 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]である。円板は底面のみが水面に接触するように設置した。

表5 円板状電極の寸法

円板状電極 接地極の寸法 $a$ [m]
0.05
0.10
0.15

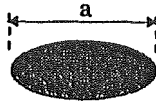


図9 円板状電極

#### (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、板状電極( $a:b=1:1$ )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  $\rho$  は  $57.54[\Omega \cdot m]$  である。

表6 円板状電極の測定結果

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

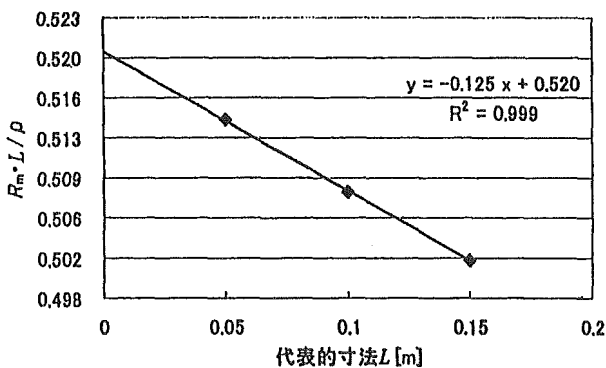


図10 円板状電極の形状係数

### 3. 5 円柱状電極

円柱状電極は棒状電極と円板状電極の中間的な形状である。このため実験では図11のように縦が長い形状の場合と横が長い形状の2種類を製作し、それぞれ比率を変えて測定を行った。

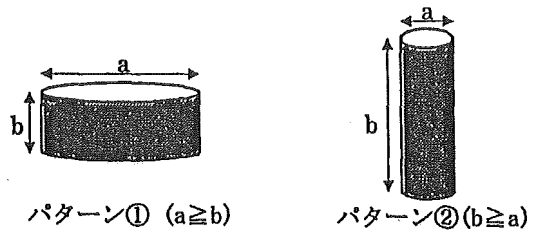


図11 円柱型電極

#### (1) 実験条件パターン① ( $a \geq b$ のとき)

実験は  $a:b$  を  $1:1 \sim 5:1$  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。

#### (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  $\rho$  は約  $58.0[\Omega \cdot m]$  である。

表7 円柱状電極 (パターン①) の測定結果

各モデルの比率( $a:b$ )	$L$ [m]	$R_m$ [ $\Omega$ ]	$R_m \cdot L / \rho$
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
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
5:1	0.12	149	0.309
	0.05	393	0.340
	0.10	191	0.331
	0.15	124	0.322

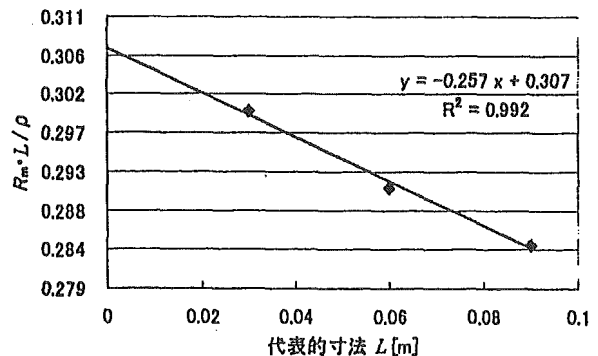


図12 円柱状電極 (パターン①) の形状係数 ( $a:b=3:1$ )

表 8 円柱状電極 (パターン①) の形状係数

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。

(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 R<sup>2</sup> 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

各モデルの比率(a:b)	L [m]	R <sub>m</sub> [Ω]	R <sub>m</sub> ・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

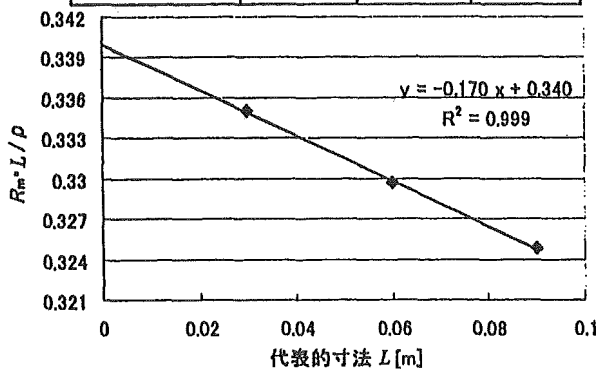


図 13 円柱状電極 (パターン②) の形状係数 (a:b=1:3)

表 10 円柱状電極 (パターン②) の形状係数

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 をもとに次式で求めることができる。

$$R = K \frac{\rho}{L} \quad \dots (4.1)$$

ここで、L は代表的寸法[m]、ρ は大地抵抗率 (Ω・m) である。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、板状は横、円板は直径とした。

表 11 電極の計算条件と接地抵抗

寸法[m]	棒状		板状	円板状
	直径	長さ	横・縦	直径
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。同表に示すように比較してみるとほぼ良好な一致をみた。

表 12 接地抵抗の推定結果の比較 (ρ=100[Ω・m]の場合)

	形状係数法	計算式	誤差率
棒状電極	61Ω	64Ω	4.7%
板状電極	33Ω	35Ω	5.7%
円板状電極	173Ω	167Ω	3.6%

一方、円柱状電極の場合は解析解および近似算定式が存在しないため、半球状電極をもとに等価表面積、等価体積置換法による比較を試みる。その結果を表13に示す。形状係数法で得られた接地抵抗と比較してみると等価表面積置換法による結果が概ね一致していることがわかる。

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。

表 13 円柱状接地極の接地抵抗の比較  
( $\rho=100[\Omega \cdot m]$ の場合)

パターン①

半径[m]	長さ[m] (代表的 寸法L)	形状係数K	推定接地抵抗[ $\Omega$ ]		
			形状 係数 法	等価表 面積置 換法	等価体積 置換法
0.50	1.0	0.231	23	20	22
1.00	1.0	0.267	13	13	14
1.50	1.0	0.307	10	10	10
2.00	1.0	0.328	8	8	9
2.50	1.0	0.349	7	7	7

パターン②

半径[m]	長さ[m] (代表的 寸法L)	形状係数K	推定接地抵抗[ $\Omega$ ]		
			形状 係数 法	等価表 面積置 換法	等価体積 置換法
0.50	1.0	0.231	23	20	22
0.50	2.0	0.279	14	15	17
0.50	3.0	0.340	11	12	15
0.50	4.0	0.381	10	11	14
0.50	5.0	0.407	8	10	13

等価表面積と体積置換法による違いについて述べる。JIS-A-4201の構造体基礎の接地抵抗を推定する方法として等価表面積置換法を用いている。一方、等価体積置換法はわが国ではあまり用いられていないが、ヨーロッパにおいて、近似計算方法のひとつとして採用されている。ここでは参考として2つの置換法を用いて比較してみた。

5. あとがき

解析解のない形状の接地抵抗を推定する方法として形状係数法による接地シミュレーションについて検討した。その結果、解析解のある円板状電極に対しては誤差率3.6%、近似計算式のある棒状、板状電極に対しては誤差率4.7~5.7%であった。さらに、円柱状電極に対しては等価表面積置換法による結果と良好な一致をみた。

このことは、形状係数法の有用性を確認できるものである。この方法は簡便であり、あらゆる形状の応用範囲は非常に広い。

今後、更に精度を高める工夫(例えば半球状水槽の大きさ、モデル電極の加工)を検討し、接地抵抗の推定手法のひとつとして確立していくつもりである。最後に、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) 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

付録：接地抵抗計算式

接地極の種類	施工形態	接地抵抗計算式
棒状電極		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}$ $r = \text{半径} \quad l = \text{長さ}$
板状電極		$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 + \frac{7}{24} \frac{r^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{r^4}{s^4} \right)$ $r = \frac{a}{\sqrt{8}} \quad s = 2t$ $a = \text{長さ} \quad t = \text{厚さ}$
円板状電極		$R = \frac{\rho}{4r}$ $r = \text{半径}$

## 電位降下法による接地抵抗測定シミュレーション

○竹之内 章 (関東学院大学大学院工学研究科), 森田 裕志 (働きんでん)  
高橋 健彦 (関東学院大学)

The simulation of the earthing resistance measurement by the fall of potential method.  
Takenouchi Akira (Graduate School of Engineering, Kanto-gakuin University)  
Morita Hiroshi (Kinden Corporation), Takahashi Takehiko (Kanto-gakuin University)

キーワード: 接地抵抗測定法, 電位降下法, 電位補助極の配置

### 1. まえがき

現在, 接地抵抗の測定は電位降下法による測定方法が主流であり, 国内外を問わず最も広く実用に供されている。しかし, 過密化した地域, 特に都市部では, 敷地の制限, 建物の巨大化, アスファルト・コンクリート舗装などにより測定のためのスペースが十分に得られない。また, 接地極の電気的中心が正確につかめない。さらに, 補助極の打ち込みが容易でないといった問題点がある。大規模なビルの敷地には配管, 電線, コンクリート片などの様々な埋設物があり, それらが接地抵抗測定に影響を及ぼす場合も実例で見受けられる。このような現状にあつて, 接地抵抗測定技術に何らかの改善をしなければならない。そこで, 電位降下法による電位補助極の打ち込み箇所による接地抵抗測定シミュレーションを行う。

### 2. 検討のための準備

G.F.Tagg は, 一連の論文において, 半球状接地極による接地抵抗測定の数値シミュレーションを行い電位降下法に関する検討を行っている。<sup>1)~2)</sup> 本稿では半球状電極の接地抵抗測定シミュレーションを行い, 電位降下法における測定に関する検討を行う。まず, 本稿の課題を検討するために必要な基本的事項について述べる。

#### 2. 1 電位補助極の配置 (その1)<sup>1)</sup>

一般的に行われている電位降下法の測定回路を図1に示す。同図において, E は測定の対象となっている接地極 (以下 E 極と略称) である。C, P は測定用の補助極で, E から適当な距離に打ち込んでいる。C が電流補助極 (以下 C 極と略称), P が電位補助極 (以下 P 極と略称) である。測定の対象となる E 極を半径  $r$  の半球状接地極, 大地

は均質地層とし大地抵抗率を  $\rho$  とする。E 極からの補助極の打ち込み距離は P 極までを  $p$ , C 極までを  $c$  とする。

接地抵抗の測定値  $R$  は次式で与えられる。

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{P} - \frac{1}{C} + \frac{1}{C-P} \right) \quad \dots(1)$$

$$= \frac{\rho}{2\pi r} \left( 1 - \frac{1}{p} - \frac{1}{c} + \frac{1}{c-p} \right)$$

ただし,  $p=P/r$ ,  $c=C/r$

ここに,  $\rho/2\pi r$  は半球状接地極の接地抵抗の真値である。これを  $R_\infty$  とすれば, 接地抵抗の測定値  $R$  は

$$R = R_\infty \left\{ 1 - \left( \frac{1}{p} + \frac{1}{c} - \frac{1}{c-p} \right) \right\} \quad \dots(2)$$

カッコの中の第2項は誤差項ということになる。したがって, これがゼロになるときに測定値は真値に等しくなる。

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{c} - \frac{1}{c-p} = 0 \quad \dots(3)$$

すなわち,

$$p^2 + cp - c^2 = 0 \quad \dots(4)$$

$p$  を変数として, この二次方程式を解くと,  $p=0.618c$  となる。この条件を満たすときに, 測定値は真値に等しくなる。つまり, これは半球状接地極の接地抵抗を測る場合に, 図1のように EC 間の61.8%のところに P 極を打ち込めば正確な値が得られるという意味である。