

200501010B.

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

200V配線推進に伴う感電災害・電気火災等の予防に関する研究

平成16年度～17年度 総合研究報告書

主任研究者 富田 一

平成18(2006)年 4月

目 次

I. 総合研究報告	
200V 配線推進に伴う感電災害・電気火災等の予防に関する研究.....	1
冨田一	
II. 分担研究報告	
1. 200V 配電系に必要な接地抵抗の検討	3
高橋健彦	
2. 200V 配電系絶縁材料の絶縁劣化評価	7
本山建雄	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	9
IV. 研究成果の刊行物・別刷	10

200V 配線推進に伴う感電災害・電気火災等の予防に関する研究
主任研究者 富田 一（独）産業安全研究所 研究企画調整部

研究要旨

需要家が直接負荷機器を接続して使用できる電圧（以下、使用電圧という）が 200V に昇圧されたときを想定して、感電災害の危険要因を明確にし、安全管理体制の確立などの必要な対策の方向性を検討する。また既に 200V 化が図られた海外の感電防止対策の実情を調査した。災害事例の分析の結果、災害発生現場で使用される機器等の絶縁不良等の割合は比較的小さく、基本的な感電防止対策の実行の重要性が明らかとなった。韓国については漏電遮断器の普及が有効との推定結果が得られた。フランスの調査の結果、漏電遮断器の普及、接地極付きコンセント、配線器具への接地線の取り付けが対策として有効と考えられた。

分担研究者

高橋健彦
関東学院大学
教授

本山建雄
独立行政法人産業安全研究所
部長

う。これらの結果から今後の有効な感電防止対策の方向性を検討する。

また海外の実情調査としてフランス国立安全衛生研究所（INRS）の協力を得て、フランスの感電防止対策の実情を調査した。この際に電気安全担当者からの聞き取りと一般家庭の実地調査を実施した。

（倫理面への配慮）

本研究には生体等を利用せず、純粋に工学的な研究であるため、倫理面での問題はない。

A. 研究目的

現在の使用電圧 100V が 200V に昇圧される場合を想定して、感電災害の事例を分析して我が国の感電災害防止対策の現状と今後の課題を明確にする。また既に 200V 化が図られている海外の感電防止対策の実情を調査する。

B. 研究方法

過去の感電災害事例を基に、感電災害発生件数と接触した電圧の関係、事業場の規模、災害発生現場において使用された機器の損傷の有無、感電を誘発するハザード因子の同定、現場で適用された感電防止対策以外に感電リスク低減のために考えられる対策手法の検討を行

C. 研究結果

- (1) 我が国において平成 7 年～13 年の 7 年間に発生した感電災害の中から 65 人の感電死亡者を調査した結果、アーク溶接作業を除くと、100V と 200V では、100V が 7 人に対し 200V が 22 人で明らかに 200V での災害発生件数が多い。
- (2) 中央労働災害防止協会安全衛生情報センター所有の感電災害事例 78 件を分析した結果、溶接作業の感電災害では全体の 35% で主に溶接棒ホルダーの損傷がみられた。保守、点検作業や修理作業においては災害発生現

場で使用された機器等に損傷等の問題は無かった。ケーブル接続、研磨、送電線の塗装等の電気関連作業、その他では約1/4のケースで主に使用機器の漏電がみられた。

- (3) 感電を誘発するハザードとしては高温環境、受変電設備、被修理機器、クレーン、送電線が主なものであった。
- (4) 災害発生現場においては、取り扱う機器等に漏電、絶縁不良がみられたケースは全体の17%と比較的少ない割合であった。これらの課題は交流アーク溶接機の溶接棒ホルダーの損傷、電動工具等の漏電が主なものであった。
- (5) 災害発生現場において、実際の作業時において更なる感電リスク低減策を検討した結果、絶縁用保護具の着用や絶縁用防具の装着、交流アーク溶接機用電撃防止装置の使用などの基本的な対策が必要なが分かった。
- (6) 韓国においては、使用電圧が100Vから200Vへ移行することによって感電災害が多発し、その要因としては従来の電気機器を使用するための変圧器の絶縁不良、漏電遮断器の性能不良が挙げられた。その後の対策として漏電遮断器の普及及び高性能化等の対策を行ったとの情報が得られた。
- (7) 海外での現状について、安全な配電方式として TN 方式が一般的に取り入れている EU を取り上げ、その現状把握を目的にフランスでの感電災害防止対策の現状を調査した。TN 接地は工場で一般的に使用されており、TT 接地は家庭等小規模施設で主に使われている。TT 接地が採り入れられている理由には、地絡が発生した場合の電流が小さく、火災に至る可能性が低いことが挙げられた。漏電遮断器は対象とする電気機器を考慮した特性のものが設置され、あらゆる配線系統に接地線が配線されている点が感電災害防止に

寄与していると考えられた。

D. 考察

感電災害事例の分析によって、災害発生現場における機器の損傷等の割合は多くない状況が把握され、労働安全衛生規則で定められた感電防止対策が実行されていない状況が認められたので、そのような背景を検討し作業者を含めたソフト的な研究を実施する必要があると考えられる。今後使用電圧の200V化においては、感電災害防止対策の徹底した実行と対策の有効性の保持が検討課題と考えられる。

E. 結論

感電災害事例分析の結果、絶縁用保護具や防具が適切に使用されていない状況が多くみられ、基本的な感電防止対策が実行される安全管理体制の確立が昇圧化に伴う感電防止対策にも不可欠と考えられる。今後の昇圧化には安全担当者、作業者を含めたソフト的な研究が重要と考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし。

2. 学会発表

- ・ 富田一、本山建雄、中田健司、“200V 使用電圧における感電災害について”、電気学会全国大会、平成17年3月18日
- ・ 富田一、“感電災害事例の分析”、電気設備学会全国大会、平成18年9月（予定）

G. 知的財産権の出願・登録状況

なし。

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
（総合）研究報告書

1. 200V 配電系に必要な接地抵抗の検討

（分担）研究者 高橋 健彦 関東学院大学 工学部 教授

研究要旨

200V 化を推進するためには感電災害の予防が重要な課題であり、そのためには接地設備を磐石に構築しなければならない。わが国における接地技術は主として 100V 系で体系化が図られているが、200V 系については未検討である。そこで、IEC 規格等を参考にして、接地に関するあり方について検討した。次に、いろいろな形状の接地極の接地抵抗を推定する方法を検討した。この方法は形状係数という概念を導入した内外において極めて新しい知見である。さらに、戸建住宅における接地設備に対応するために、住宅基礎の代用接地極の実用化を目指した研究を行った。

一方、労働安全の見地から変電所の構内では作業員の感電保護のために歩幅電圧や接触電圧の低減対策が行われている。この対策のひとつに砂利を敷く手法がある。IEEE の変電所接地設計指針においてもこの手法が提案されているが、指針の中で感電保護対策として砂利の抵抗率の具体的な指標は見当たらない。より抵抗率を高くするためにシリコン溶剤を数ミクロンの厚さで砂利（玉砂利）に焼付けた砂利（以下シリコン加工砂利という）が考案された。これは撥水性、非保水性に優れた特徴をもつ砂利である。そこで、砂利の抵抗率を知るための抵抗率測定手法を開発した。

さらに、今後の感電保護対策として接地極付コンセントの有意性を示し、今後の接地設備についての提言を行った。

A. 研究目的

接地方式、接地システム、等電位ボンディング等については、IEC 規格の国際整合化の動きをふまえて、わが国に適合したあり方について検討する。

200V 化に対応する接地のあり方を検討するために、基本的課題として、いろいろな形状の接地極に対応する接地抵抗の推定手法を確立する必要がある。そこで、形状係数という新しい概念を導入し、接地シミュレーションを行う。

次に、住宅における 200V 化を推進させる

ためには接地設備を再検討する必要がある。

そこで、住宅基礎を代用接地極として実用化できるかを検討する。

また、変電所等の労働安全を配慮した場合、作業員の感電災害を防止するための新しい手法としてシリコン加工砂利の活用が考えられる。そこで、人体の歩幅・接触電圧を低減するための具体的な指標を見出すためにシリコン加工砂利の抵抗率を測定するための手法について検討する。

さらに、今後の住宅等の電気安全を磐石なものとするための対策として接地極付コンセ

ントの普及は重要である。そこで、今後の住宅の接地設備についての提言を行う。

B. 研究方法

接地方式、接地システム、等電位ボンディング等については、IEC 規格と JIS、電気設備基準の内容を文献によって調査する。

形状係数法による接地抵抗の推定については、水槽を用いた接地シミュレーションによる実験によって研究を行う。住宅基礎の代用接地極については形状係数法による接地抵抗、鉄筋コンクリート造の住宅基礎の模型を製作し、コンクリートの含水率および湿乾状態の数値化を実験によって行う。シリコン加工砂利の抵抗率の推定も測定装置を試作して検討する。住宅における接地設備については、上述の基礎的検討をふまえた上で提言を行う。

C. 研究結果

(1) 接地方式に関する検討

日本における配電系は単相 3 線式、三相 3 線式、三相 4 線式が大部分である。単相 3 線式の線間電圧は 150V、200V で対地電圧は 100V であり、三相 3 線式の線間電圧は 200V であり、対地電圧は 200V、三相 4 線式の線間電圧は 240V、415V であり、対地電圧は 240V である。感電災害においては、特に、対地電圧の評価が重要であり、さらに、接地方式（日本では TT 方式）も重要である。

日本において、200V 化推進するためには三相 4 線式を採用することが考えられるが、その時の対地電圧、接地方式をどのように対応されるのかが問題である。

現在の TT 方式を TN 方式に変更することはインフラ設備に大きな負担をかける。このことが大きな課題である。

(2) 接地システム・等電位ボンディングシステムに関する検討

IEC 規格では、頭記の用語が定義されてい

るが、日本の基準、規格においては、これらの技術的定義が不十分である、つまり、日本には存在しなかった新しい概念である。

現在、学会、協会等でこれらの導入を検討している段階である。200V 化を実現するためには、接地と等電位ボンディングの協調をはかる必要がある。

そのため、IEC-TC64（電気設備と感電保護）の規格の審議動向、ピーゲルマイヤー博士（オーストリア）の研究成果をもとに整理、分析してまとめた。この成果は（社）電気設備学会の委員会の審議結果に反映した。

(3) 韓国における実態調査

2 度の韓国訪問を行い、韓国の指導的役割を果たしている韓国安全学会副会長の Joung 教授、韓国火災協会会長の李教授、大韓電気協会の白副会長、韓国照明・電気設備学会の関係者と面談した。

韓国の 200V 化実施は政府の強い指導のもとに実現できたものであるが、法的整備、技術的研究は協会、学会、電力公社が大きな役割を果たした。200V 化に合わせて、IEC 規格であるクラス I 機器に対応するための接地極付コンセントが普及していることがわかった。このことが感電死亡事故の減少に大きく寄与している。

日本で 200V を推進するためには、韓国が実施したスキームが参考になる。そこで実態調査を踏まえ、現在、韓国語資料の翻訳作業を行いながら、得られた知見をまとめており、200V 化配電における災害防止手法に提案する予定である。

(4) 台湾における実態調査

台湾における屋内配線は戦前から日本の基準・規格をもとに構築されてきた。しかし、接地技術に関しては、まだ日本で一般化していない接地極付コンセントが普及していることがわかった。これは、国家の強力な指導がなければ実現しないわけで、改めてわが国と

の違いを認識した。

(5) 形状係数法による接地抵抗の推定

形状係数という概念を導入し、あらゆる形状の接地極を推定する手法を見い出した。この成果は学会論文として採択された。

(6) 住宅基礎の接地抵抗の推定

鉄筋コンクリート造の住宅基礎の代用接地極の実用化を目指した研究であるが、電気設備技術基準で規定されている接地抵抗を満足することが明らかになり実用化の目途がたった。この成果は学会論文として採択された。

(7) シリコン加工砂利の抵抗率

抵抗率を測定する手段が無かったが、試行錯誤を重ねて、測定手法を開発し、シリコン加工砂利が高い抵抗率をもつことを確認できた。このことは接触・歩幅電圧の低減対策に大きく寄与する。この成果は学会論文として採択された。

(8) 住宅の接地設備

上述した研究成果をもとに、IEC 規格に整合した住宅の接地設備のあり方を論じ、これからの住宅の電気設備について、わが国で歴史、格式のある雑誌“オーム”の誌上で提言を行った。

D. 考察

日本において、200V 化の推進は約 20 年毎に学会、協会で議題になるが、未だ実現していない。電力の高圧化、省資源化がさわがれている昨今にみて、100V を使用している国は日本だけであることを考えると早期に実現すべきと思われる。

2 年間の研究を通して、接地に関する研究は 3 編の学会査読論文が採択されたことにより一応の成果を得ることができた。

さらに、韓国における調査の一環として、200V 化を経験した主要な人物とのヒアリングを通して、多くの知見を得ることができた。

また、韓国のメディアの取材を受け、電気

安全の重要性、今後の接地技術の展開等について個人的な意見を述べた。

筆者の接地および等電位ボンディングに関する成書 4 冊が韓国語に翻訳され、国際交流に寄与できたと思っている。ちなみに中国語（北京）で 1 冊、中国語（台北）でも 1 冊翻訳されている。

今回の厚生労働科学研究費補助金の交付を受けたことによって、接地研究の成果が内外に及ぼしたことに対して謝意を表すとともに光栄の極めである。

E. 結論

IEC60364（低圧電気設備）規格は電気設備技術基準解釈第 272 条に導入されているが、シリコン加工砂利の研究成果は電気設備技術基準解釈に導入されようとしている IEC61936（高圧電気設備）の国際整合化に基礎的知見を与えるものである。

ちなみに接地極付コンセント普及の研究成果は、内線規程に反映された。

200V 推進は基準・規格に採用されない限り実現は困難である。従って、各方面において、基礎的研究を継続することが肝要であろう。その成果をもとに学会等を経由して基準・規格の改正提案を行うことが必要である。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

1. 論文発表（査読論文）

- ・ 右田理平, 北村健司, 高橋健彦, “戸建住宅基礎の接地抵抗の推定”, (社)電気設備学会誌論文, vol25, No5, pp64~70, 平成 17 年 5 月号
- ・ 山川修平, 高橋健彦, “形状係数法による接地抵抗の推定”, (社)電気設備学会誌論文, vol25, No6, pp59~65, 平成 17 年 6 月号

- ・坂間博樹, 高橋健彦, “シリコン加工砂利の抵抗率” (社)電気設備学会誌論文, vol.26, No.4, pp55～56, 平成18年4月号

2. 学会発表

- ・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, 電気設備学会, 平成16年12月9日
- ・山川修平, 高橋健彦, “形状係数法による接地抵抗の推定”, 電気設備学会テーマ付研究会, 平成16年12月9日
- ・坂間博樹, 鈴木孝治, 高橋健彦, “シリコン加工砂利の抵抗率”, 電気設備学会全国大会, 平成17年9月

3. 雑読発表

- ・高橋健彦, “医療機器の接地システム”, (社)電気設備学会誌, vol. 25, No. 5, pp39～46, 2005
- ・高橋健彦, “建築電気設備における接地技術”, オーム, vol. 93, No. 2, pp12～13, 2006
- ・高橋健彦, “内線規程の改訂に伴うこれからの住宅電気設備 (前編)”, オーム, vol. 93, No. 3, pp79～86, 2006
- ・高橋健彦, “内線規程の改訂に伴うこれからの住宅電気設備 (後編)”, オーム, vol. 93, No. 4, 2006

H. 知的財産権の出願・登録状況 特になし

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
（総合）研究報告書

2. 200V 配電系絶縁材料の絶縁劣化特性評価

（分担）研究者 本山 建雄 （独）産業安全研究所（物理工学安全研究グループ）

研究要旨

現在使用されている 100V 配線が 220V（あるいは 230V）に昇圧された場合を想定して、次の項目について研究を実施した。

- ①感電の影響を示す資料（IEC 479-1(1994)）に基づいた電圧による影響の考察
- ②配電電圧昇圧による感電災害への影響
- ③配電電圧昇圧による電気火災への影響
- ④昇圧の危険性の把握と対策
- ⑤トラッキング現象が火災に移行する現象の解明

これらの研究の結果、感電災害、電気火災に対する昇圧による影響は大きいと推定されるが、対策として感電防止用漏電遮断器を使用することにより災害の増加を低減できると推定された。

A. 研究目的

昇圧の影響を人体のインピーダンスから検討する。

韓国と日本の感電災害の推移、電気火災の推移を比較することにより、主な昇圧化の影響を明確にし、影響を低減する主な対策を提案する。

B. 研究方法

感電の影響を示す資料 IEC 479-1(1994) から、人体のインピーダンスが電圧によってどの程度変化するかを資料から算出する。

韓国の大学、安全機関との協力により、韓国の感電災害の推移、電気火災の推移、及び、230V 昇圧率等の資料を収集し、同時期における日本の資料との比較から、配線電圧昇圧に伴う感電災害への影響、電気火災に対する影響等を明らかにする。また、電気火災の原因の一つであるトラッキング現象が火災に移行する過程を実験によって明らかとする。

（倫理面への配慮）

本研究には生態等を利用せず、純粋に工学的な研究であるため、倫理面での問題はない。

C. 研究結果

人体インピーダンスは電圧依存性があり、結果として、人体を流れる電流は、単純に昇圧比に比例した値よりも大きくなり、通電個所によっては有害な影響が出る電流の領域に達する可能性がある。

韓国／日本とも 230／200V での感電災害が 100V よりも多く昇圧による感電災害増加の影響がある。対策として、感電防止用漏電遮断器の使用は感電災害防止に効果があると推定された。

また、電気火災については韓国の国内事情の影響はあるものの、韓国内の場合、昇圧によって増加することが明らかと考えられた。

トラッキング現象については材料の高性能化によって発生する可能性が低くなっている

ものの、塩化ビニルを使用する古い接続機器を使用した場合には火災に至る可能性が高いことが明らかとなった。

D. 考察

有害の影響は電流が流れている時間に関係することから、電圧だけでなく、通電部位と通電時間を含めて考慮する必要がある。

韓国との比較において、電気災害に対する国内事情の影響が大きく、原因の特定は困難であるが、韓国側の研究者の協力によって、昇圧化の影響をある程度、明らかにすることができると思われる。

E. 結論

有害な影響の現れる領域は人体を流れる電流の大きさ、通電部位、通電時間に依存するものの、昇圧による致命的な影響を受ける機会が増加すると考えられる。また、感電災害、電気火災に対する配線電圧昇圧に対する対策として、漏電遮断器の設置が有効であると推定された。

F. 健康危険情報

特段なし。

G. 研究発表

1. 論文発表

- ・ 本山建雄、中田健司、崔光石、富田一，
“低圧配電の昇圧化に伴う電気火災・感電事故の分析－100V/200V の日本と220V/380V 化が終了した韓国との比較－”，
電気設備学会（投稿中）

2. 学会発表

- ・ 本山建雄、富田一、崔光石，“100/220V における感電危険性の比較”，電気学会全国大会，平成 17 年 3 月
- ・ 崔光石、富田一、本山建雄、中田健司，“電

気事故における日韓の比較”，電気設備学会全国大会，平成 17 年 9 月

- ・ 崔光石、富田一、本山建雄、中田健司，“日韓の電気事故に関する一考察”，安全工学研究発表会，平成 17 年 11 月
- ・ 中田健司、崔光石、富田一、本山建雄，“有機絶縁材料のトラッキング劣化における発火と電流の過程”，電気学会全国大会，平成 18 年 3 月

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし。

【研究成果の刊行】

なし。

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
右田理平, 北村健司 高橋健彦	戸建住宅基礎の接地抵抗の推定	(社)電気設備学会誌論文	vol. 25 No. 5	64~70	2005
山川修平 高橋健彦	形状係数法による接地抵抗の推定	(社)電気設備学会誌論文	vol. 25 No. 6	59~65	2005
坂間博樹, 高橋健彦	シリコン加工砂利の抵抗率	(社)電気設備学会誌論文	vol. 26 No. 4	55~56	2006
高橋健彦	医療機器の接地システム	(社)電気設備学会誌	vol. 25 No. 5	37~46	2005
高橋健彦	建築電気設備における接地技術	オーム	vol. 93 No. 2	12~13	2006
高橋健彦	内線規程の改訂に伴うこれからの住宅電気設備(前編)	オーム	vol. 93 No. 3	79~86	2006
高橋健彦	内線規程の改訂に伴うこれからの住宅電気設備(後編)	オーム	vol. 93 No. 4	73~76	2006

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「打ち切り抵抗 ΔR 」と定義する。

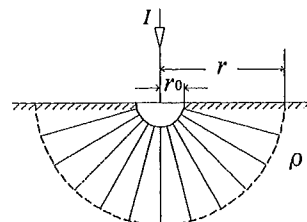


図1 半球状電極と水槽の関係²⁾

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。

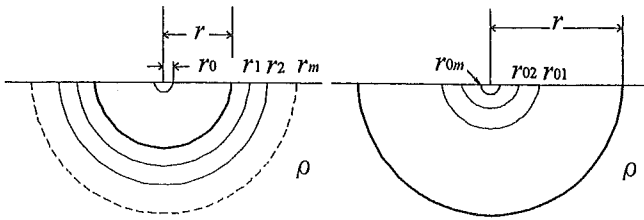


図2 水槽モデル実験の等価性²⁾

(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 π 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。

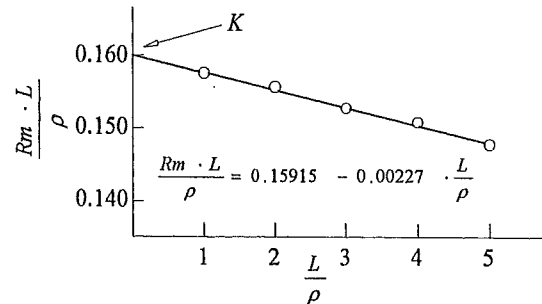


図3 半球状電極の形状係数²⁾

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。

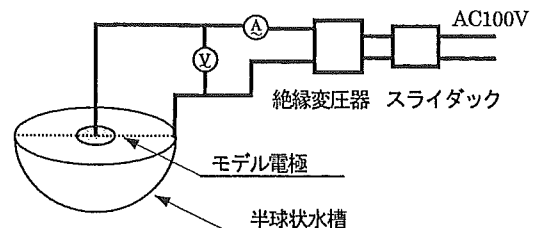


図4 接地シミュレーションの回路図

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

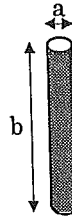


図 5 棒状電極
Fig.5 The driven rod

(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

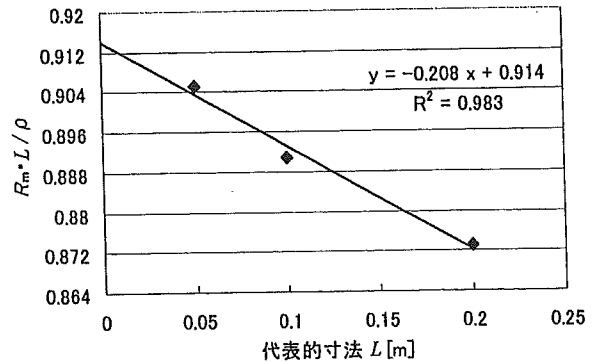


図 6 棒状電極の形状係数

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

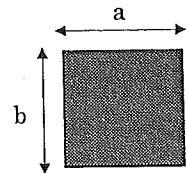


図 7 板状電極
Fig.7 The plate electrode

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

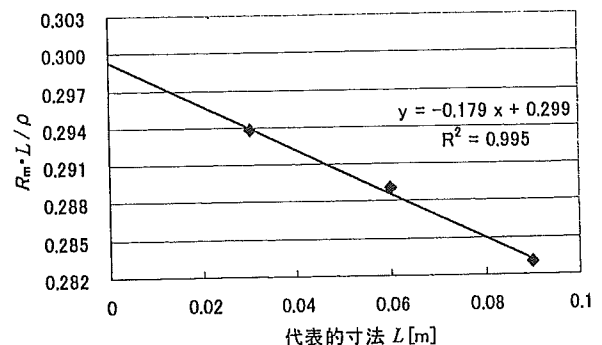


図 8 板状電極の形状係数

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

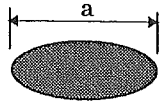


図 9 円板状電極
Fig.9 The disk type electrode

(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

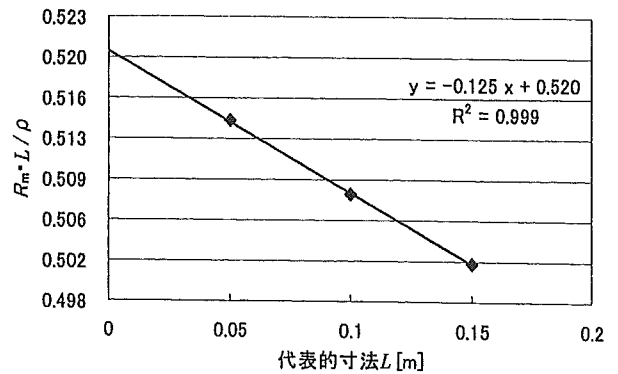


図 10 円板状電極の形状係数
Fig.10 The shape factor of the disk type electrode

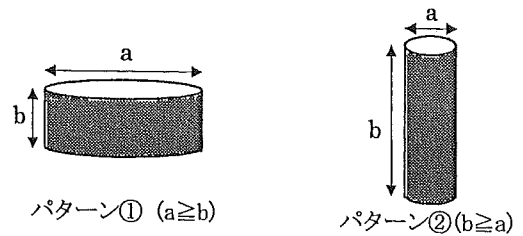


図 11 円柱型電極

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

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 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。

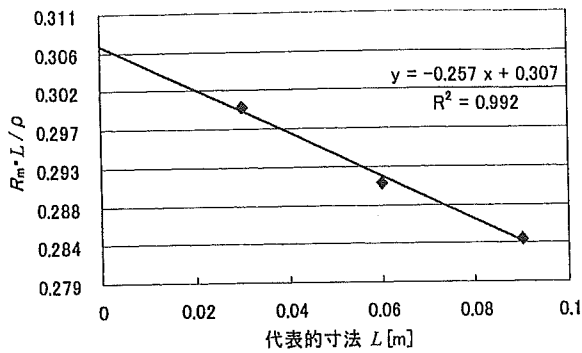


図12 円柱状電極 (パターン①) の形状係数 (a:b=3:1)

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

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

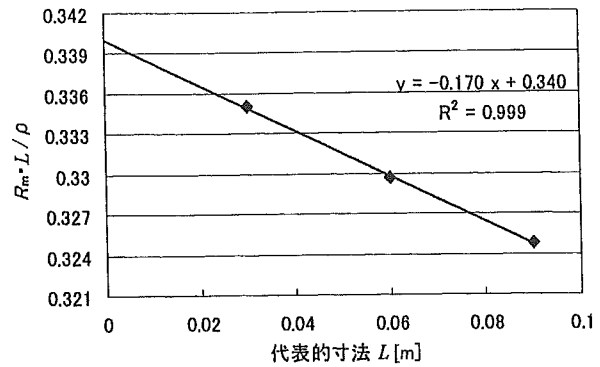


図13 円柱状電極 (パターン②) の形状係数 (a:b=1:3)

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。

同表に示すように比較してみると誤差率は-4.7%~3.6%の範囲となり、ほぼ良好な一致をみた。

表 12 接地抵抗の推定結果の比較
($\rho=100[\Omega \cdot m]$ の場合)

Table 12 Comparison of earthing resistance of the electrode (In the case of $\rho=100[\Omega \cdot m]$)

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

等価表面積置換法は、JIS-A-4201:1992³⁾で構造体基礎の接地抵抗を推定する方法として用いられていた手法である。

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。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全体的に等価表面積置換法では近似した値となり、等価体積置換法ではやや高めに計算される傾向がみられた。

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

Table 13 Comparison of earthing resistance of the cylinder type electrode (In the case of $\rho=100[\Omega \cdot m]$)

パターン①

Pattern ①

半径[m]	長さ[m] (代表的寸法L)	形状係数K	推定接地抵抗[Ω]		
			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	0.326	8	8	9
2.50	1.0	0.349	7	7	7

パターン②

Pattern ②

半径[m]	長さ[m] (代表的寸法L)	形状係数K	推定接地抵抗[Ω]		
			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

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それぞれ誤差率-4.7%および-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、あらゆる形状に対する応用範囲は非常に広い。

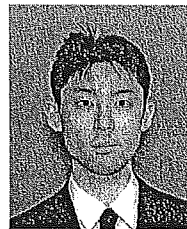
今後、更に精度を高める工夫（例えば半球状水槽の大きさ、モデル電極の加工）を検討し、接地抵抗の推定手法のひとつとして確立していくつもりである。最後に、本研究は平成16年度厚生労働科学研究費補助を受けていることを付記する。

(受付 平成16年12月10日)

参考文献

- 1) 山川修平, 高橋健彦:「形状係数法による接地抵抗の推定」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB04-7-7, 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) JIS-A-4201:1992

やま かわ しゅう へい
山 川 修 平



1979年1月10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、(財)電気安全環境研究所入所予定。

たか はし たけ ひこ
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

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。

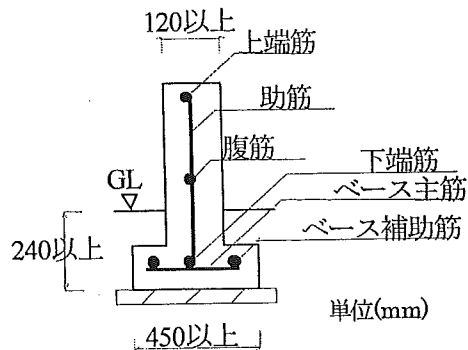


図1 布基礎詳細図¹¹⁾

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	1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 $r=0.75\text{m}$ 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。

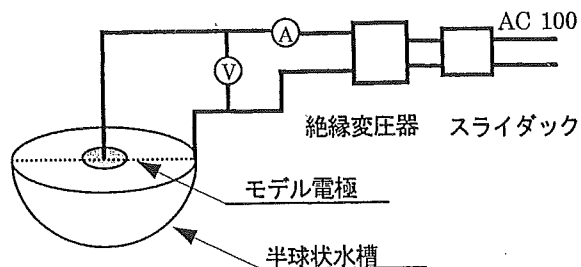


図2 水槽モデル実験回路図

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。

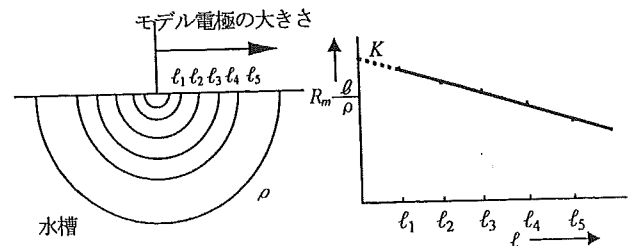


図3 形状係数の原理

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。