構造体接地に係わる鉄筋コンクリートの接地抵抗に関する研究 - 数値計算による検討-

1. まえがき

近年、地絡保護用や避雷針用の保安用接地 電極を個別に設ける個別接地方式から1つの 接地電極に一括して設ける統合接地システム が採用されつつある。この接地電極には鉄筋 コンクリート造の基礎部分を接地電極として 代用する、いわゆる構造体接地が採用される ようになってきた。この時、接地端子に代用 する鉄筋コンクリート中の鉄筋のかぶり厚さ は建築基準法施行令第79条によると、直接土 に接する基礎部分は約60[mm]程度である。こ の間に粗骨材の砂利とモルタルが混合された コンクリートが介在する。

既報^{1),2),3)}では、鉄筋と大地との間に介在 するコンクリートの材齢と電気抵抗の関係を 述べ、実験によって代用電極として利用可能 である根拠を明示した。

本研究では、数値計算により検討するため、 大地、コンクリートおよび鉄筋の配置が垂直 断層構成になっているものと仮定した、電位 計算プログラムを用いて電気抵抗の計算を行 い、実験値と比較を行う。その後、現実規模 の条件で計算をし、代用電極として利用可能 である根拠を明示することを目的とする。

2. 実験方法と模型電極

2.1 試料の概要

Fig.1に示すように、一般的な構造体基礎の 表面付近の一部分を模擬するため、四角柱と した。かぶり厚さは装置の都合上10、15、 20[mm]の3種類とした。ここで、鉄筋を模擬し た真鍮丸棒の直径は10[mm]で、試料内部の長 さは110[mm]である。なお、コンクリート試料 に使用した砂利はふるい分けを行ない、8×

8[mm]以下を小砂利、19×19[mm]以上を中砂利 とした。

2.2 実験装置の概要

水道水を満たした水槽の中央に試料を設置 し、Fig.2に示す回路を構成した。ここでRs は、水槽外部の抵抗を模擬した補正抵抗であ る。

日大生産工(院)	○鷲尾	洋範
日大生産工	蒔田	鐵夫

鉄筋から流出する電流の挙動を考慮して、 模擬鉄筋3本のうち、中心の一本のみの電流を 測定し、抵抗を算出した。



Fig.1 Size of model Fig.2 Measuring electrode circuit

3. 数値計算方法

本研究で用いた電位計算プログラムは、重 ね合わせの理と電気影像法を用いて数値計算 を行うものである。

3.1 電位計算式

鉄筋コンクリートの抵抗値を求めるために、 、鉄筋を大地に対して水平に埋設された場合 の三次元直交座標系における地中の任意点(x ,y,z)の電位計算式(1)式を示す。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi L} \ln \frac{x + \frac{L}{2} + \sqrt{y^2 + z^2 + \left(x + \frac{L}{2}\right)^2}}{x - \frac{L}{2} + \sqrt{y^2 + z^2 + \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}} \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

ここで、 ρ は大地の抵抗率[$\Omega \cdot m$]、Lは回転楕 円体の一要素の長さ[m]、I は全流出電流[A] である。

鉄筋の電気抵抗率は大地の抵抗率に比較し て著しく低いため、鉄筋より大地中に流出す る電流は、鉄筋の表面電位が一定となるよう に、流出する。すなわち、中心からの電流流 出量は少なく、両端から多く流出する様に流 出する。しかし、Fig.3に示す様に電極L₀[m] を分割せずに、その中心軸上に均等電流源が ならんでいると、この電流源の作る等電位面 は回転楕円体となる。この時、V₀とV₀の表面 電位は等しくならないので、表面電位が一定 という条件を満たさない。そこで、1つの導体

Research on the Grounding Properties of Reinforced Concrete Concerning Structure Grounding - Analysis by the Numerical Calculation -

Hironori WASHIO and Tetsuo MAKITA

2-7

を一要素の長さL[m]で分割する。分割した各 要素内の電流が作る回転楕円体状の等電位 面による表面電位 $V_1 \sim V_3$ が等しくなるように 電流が分布すると、鉄筋の表面電位をより一 定として見ることができる。

本研究では1本当たりの電極を3分割にし て計算を行った。

3.2 電気影像法

G.F.Tagg⁴⁾氏の著書中にある電気影像法を 用いて計算する必要がある。Fig.4は電気影 像の概念理図である。なお、図のG.Lは地表 面、Z軸はコンクリートと大地との境界面を 表している。

電気抵抗率 ρ_1 のコンクリート中に存在す る実像電極より流出した電流は ρ_2 (大地側) の影響を受けて流出する。これを考慮するた めに、境界面に対称な位置に電流源の強さkI を有する影像電極1を考える。kは、(2)式に 示す様に $\rho_1 \ge \rho_2$ の比によって定まる反射係 数である。

 $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{1} \cdot \cdot \cdot (2)$

 $\rho_2 + \rho_1$

次に G.L を考える。そのとき実像電極に対 して空気中側に同量同符号の影像電極 2、影 像電極1に対し空気中に同量同符号の影像電 極3を仮定する。この様に仮定すると実像電 極、並びに影像電極1から空気中に電流が流 出することのない、地表面を表す事ができ る。

これらの実像電極と影像電極1,2,3の各電 流による、実像電極中心直上の点Pの電位を (1)式によりV₀, V₁, V₂, V₃[V]を求める。これよ り、電極自身の点Pの電位は(3)式となる。

 $V = V_0 + V_1 + V_2 + V_3 \cdot \cdot \cdot (3)$

以上より、オームの法則から、接地抵抗を 算出することができる。





3.3 仮想電極の導入

本研究で採用した問題の設定をFig.5に複数本ある長い鉄筋の一部を想定するために 配置した仮想電極の状況をFig.6に示す。すなわち、対称電極Bから流出する電流分布が ー定となる長い鉄筋の一部と見なすためBの両端に 仮想電極Cを付加し、周囲の鉄筋の存在を考慮するた め②の上下に仮想電極Aを配置した。この様に対称電 極の周囲の状況を考慮した仮想電極を導入した。



3.4 現実規模の構造体

実際の構造体は一辺が数十メートル以上で鉄筋は メッシュ状に組まれている。本研究では、Fig.7に示 すように地表面から1[m]の所に一辺が30[m]の正方形 とし、地表面から構造体底面までの距離を2[m]から 5[m]とした。なお、対象とする+Y,+Z平面側の1面をメ ッシュサイズ1[m]で分割した。



Fig.7 The outline of a structure

4. 結果

4.1 実験結果

既報^{1),2),3}の実験結果では、コンクリート中の砂利 の粒度が異なっていても、ほぼ同じ様な抵抗値の変化 率の傾向を示した。かぶり厚さ(10,15,20[mm])が相違 しても材齢と抵抗の変化率に大きな違いは見られな い。ただし、測定初日における初期特性は湿潤状態と 乾燥状態の試料とでは異なるが、乾燥状態の試料は 徐々に水分を吸収し、測定を開始後約120分で湿潤状 態の試料と同じ傾向を示した。以降すべて湿潤状態の 試料で述べる。

以上の事を踏まえ、コンクリートとモルタルを比較 した際の材齢日数に対する抵抗の変化率をFig.8に示 す。抵抗の変化率は抵抗

値をρ=50[Ω·m]で換算し、初日の測定は十分に時間 が経過した180分後の抵抗値を100[%]として、正規化 した。コンクリートとモルタルには大きな違いは見ら れないが、モルタルは若干変化が遅い事が分かる。こ れは、砂利を含むコンクリートは、セメントの使用量 が少なく、セメントの主成分より溶出する水酸化カルシウム(導電性物質)の溶出量が少ないためと考えられる。しかし、鉄筋のかぶり部分に砂利が多く介在することは少ないので、大幅な抵抗の変化は起こらないと考えている。



Fig. 8 Relation between change rate of Resistance and elapsed time (wet condition)

4.2 数値計算法による結果

Fig.9は、大地抵抗率を50[$\Omega \cdot m$]一定とし た時のコンクリートの電気抵抗率を50[$\Omega \cdot m$]から10,000[$\Omega \cdot m$]まで変化させた時の、か ぶり深さをパラメータに取った抵抗の変化 率で、コンクリートの電気抵抗率が50[$\Omega \cdot m$] 地点を100[%]としてある。

Fig.9より、抵抗の変化率は、第1に、電 気抵抗率が50~1000[$\Omega \cdot m$]付近では、コン クリートに含まれる導電性物質が大地に流 出していると仮定した様相を示していると 考えることが出来る。第2に、1000[$\Omega \cdot m$]以 上になると、導電性物質が大地中に完全に流 出したものと考えられる様相を示している と考えることが出来る。

かぶり10[mm]、15[mm]、20[mm]を比較すると 最終的に抵抗の変化率が160[%]から180[%] で一定となるが、かぶりが小さい方が変化率 が大きくなる。これは、かぶり10[mm]中に含 まれる導電性物質の割合が他のかぶりより 少ない事を裏付けていると考えられる。

即ち、実験値のFig.8と計算結果のFig.9を 照らし合わせると、実験値のほうが抵抗の 変化率が大きい事がわかる。

この理由として、コンクリートの粗骨材に使用した砂利が原因であると考えられる。すなわちFig.8の結果から、モルタル試料の方がコンクリート試料の変化率の値が小さいからである。この差は全体かの数値から見ても小さいので、Fig.9の数値はコンクリートの場合でも抵抗の変化率の傾向が同様な傾向を示すと考えられる。



Fig.9 Relation between ρ_1 and change Rate of resistance

4.3 現実規模の構造体に関する結果

Fig. 10とFig. 11はFig. 7の構造体の一面のみ(鉄筋 コンクリート構造体)を用いて、構造体側の電気抵抗 率を変化させた時の抵抗特性を示す。大地抵抗率を 50[$\Omega \cdot m$]と一定、構造体側の電気抵抗率を50[$\Omega \cdot m$] から10,000[$\Omega \cdot m$]まで変化させた。

Fig. 10は構造体底面までの距離は地表面から2[m]、 Fig. 11は地表面から十分に深い5[m]とした。

Fig. 11はFig10に比べ抵抗値が小さくなる事がわかる。これは、大地と構造体が接する面積が増え電流の流出量が増え、抵抗値が下がった。そして両図の、かぶりを比較すると、構造体規模が大きくなると、かぶりの影響は受けにくくなる。

ここで問題となるのが、構造体の抵抗率である。既 報⁵⁾では大地と接しているコンクリートの含水率(水 分率)と抵抗率の関係について報告をしているので、 その結果を引用⁵⁾してTable 1とFig. 12とFig. 13に示 す。Fig. 13はFig. 12の一部を拡大したものである。ま たTable 1は日本大学生産工学部津田沼キャンパス内 の建物の水分率である。

Fig. 12はコンクリートおよびモルタルの含水率に 対する抵抗率特性である。含水率が高くなると、電気 抵抗率は下がる事がわかる。逆に、含水率が少なくな ると電気抵抗率が急に増加する。その変化する場所は Fig12を拡大したFig. 13より4[%]から7[%]となる。こ の範囲での電気抵抗率は約500[Ω・m]以下である。こ の事から、コンクリートの含水率が約4[%]以上になる と電流が流れやすくなる事がわかる。

また、引用文献⁵⁾では実際の構造体の含水率につい て調査が行われた。Table 1より、水分計の設定厚さ は10[mm]から40[mm]となっているが、水分率は約4[%] 以上で推移している事がわかる。この測定は地表面で の水分率を調べているので、地中になるとさらに水分 率が上昇する事が考えられる。

以上の結果より大地に接しているコンクリートの 抵抗率は含水率の関係から、 $500[\Omega \cdot m]$ より小さい値 が一般的な構造体の抵抗率となる。

この値をFig. 10とFig. 11に適用すると、地表面から構 造体底面まで2[m]と[5m]の場合とで数 Ω の違いしか なく、かぶりの影響は小さい事がわかった。



Fig.10 The resistance characteristic on the side of a structure

(Distance from the ground surface to the structure bottom (case of 2[m]))



Fig.11 The resistance characteristic on the side of a structure

(Distance from the ground surface to the structure bottom (case of 4[m]))





Fig. 13 The enlargement of Fig. 12

Table 1 The moisture percentage of the established concrete

コンクリート周囲の状況									
種類	① 砂利		② アスファルト		3 ±				
設定 厚さ (mm)	水分率(%)		水分率(%)			水分率(%)			
	上面	上面	側面	側面	側面	側面	側面	側面 (塗装面)	
10	5.7	5.4	6.8	4.2	4.7	4.6	9.6	F(>12)	
20	4.9	4.8	5.6	3.4	3.8	4.0	6.4	7.4	
30	4.6	4.5	5.2	3.1	3.7	3.5	5.4	6.7	
40	4.3	4.6	5.0	3.4	3.7	3.7	5.6	5.4	

5まとめ

- 、材齢が経つにつれ、試料内部の導電性物質が流れ 出すため変化率は増加していく傾向となる。
- ②、実験値よりかぶり厚さ(10~20[mm])の相違による 材齢経過の変化率に大きな違いは見られない。
- ③、コンクリートはモルタルに比べ若干変化は早いものの同様な傾向となる
- ④コンクリートの抵抗率が50[Ω・m]から約1000[Ω・m]までは抵抗の変化率は急に大きくなるが、変化率が1000[Ω・m]以降ではほぼ一定の値で推移した。
- ⑤、実際の構造体の含水率は約4[%]以上で、コンクリートの抵抗率は500[Ω・m]以下となる。この結果と数値計算法を用いた結果と比較すると、かぶりや構造体の地下部分の深さが異なっていても、ほぼ同じ抵抗値となる。
- ⑥、含水率が増えるとコンクリートの抵抗率が小さくなるので、抵抗値も小さくなる。
- ⑦、①から⑥より、大地に十分水分があれば、鉄筋コンクリート構造体を接地電極の代わりとして使用可能である事がわかった。

「参考文献」

- 1)鷲尾洋範,「建築構造体を採用した場合のコンクリートの接地特性に関する基礎研究」, 2010年,(第28回)電気設備学会全国大会, A-16
- 2) 鷲尾洋範,「建築構造体接地を採用した場合の コンクリートのかぶりと接地特性に関する基 礎研究」,日本大学生産工学部第43回学術講演 会,2-38,p121
- 3) 鷲尾洋範,「建築構造体接地を採用した場合のコン クリートの接地特性に関する基礎研究(2) -数値計算による検討-」,

2011年,(第29回)電気設備学会全国大会,B-8 4)G.F.TAGG,EARTH RESISTANCES,1964,GEORGE

- NEWNES LIMITED, Chapter9 EARTH ELECTRODES IN NON-HOMOGENEOUS SOILS
- 5) 蒔田鐵夫,「コンクリートの基礎的な電気的特性」, 平成21年9月, 電気設備学会誌, Vol. 29, No, 9