

埋設鉄筋の形状・位置の探査法

Search method of shape and location for reinforcing bar

脇田英治*, 清良平**

Eiji Wakita, Ryohei Kiyoshi

*工博, 教授, 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 番地)

** 代表取締役, (有) 計測技術サービス (〒550-0000 大阪市西区京町堀 2 丁目 9 番 10 号)

The radar method is known as a tool of investigating the state of the reinforcing bar embedded to the inside of a concrete structure. However, the radar method has the fault that the state of an exact reinforcing bar cannot be displayed. This research has been conducted in order to improve the problem mentioned above. The experiment using the radar implement was planned for the many kind of cases of the depth and the diameter of the reinforcing bar. The neural network theory was applied to the experiment data, and the theoretical formula materialized between reinforcing bar specification and the parameter of a radar image was proposed. At the result, the analysis theory has been made clear concerning the presumption of the diameter of a reinforcing bar. The validity of the theory has been supported by the experiment.

Key Words: radar, search, neural network, reinforcing bar

キーワード: レーダー, 探査, ニューラルネットワーク, 鉄筋

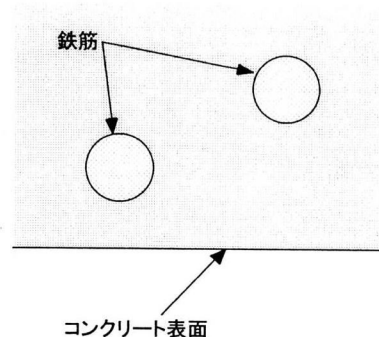
1. はじめに

コンクリート構造物の内部に埋め込まれた鉄筋の状態(径・かぶり深さや配置等)を調査する方法として、超音波法・レーダー法(電磁波)・弾性波法などが知られている。しかし、これらの方法には、実用上、次のような問題があり、普及の妨げになっている。

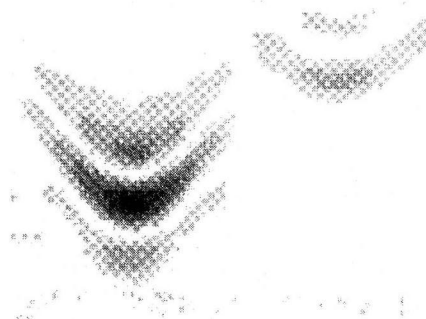
図-1はその問題の例として、レーダー探査の結果を示している。(a)図はコンクリートの中に2本の鉄筋が埋設された状態を示している。(b)図はその状態をレーダー法により探査して得られた画像である。図によると、実際の鉄筋は円形であるが、探査画像では弓状となっている。かつ、実際は1個の鉄筋が探査画像では多重画像となっている。このように、探査画像から正確な鉄筋の形状(径)や位置(かぶり深さ)を正確に推定することは困難である。

以上はレーダー法の欠点であるが、他の超音波法・弾性波法でも同様の問題がある。レーダー法には上述のような欠点はあるが、それでも、他の方法と比べれば、レーダー法が実用面では比較的優れている。

本研究はレーダー法による探査画像を補正することにより、正確な鉄筋の状態を表示させ、上述したレーダー法の問題点を改善することを目指している。



(a) 実際の鉄筋の形状・配置



(b) 鉄筋のレーダー画像

図-1 レーダー法による計測結果(既存技術)

本研究の成果は鉄筋コンクリートに埋設された鉄筋の探査や地盤に埋設された金属管の探査、コンクリートの亀裂の探査等に適用することができる。ここで、コンクリートと地盤という一見、相異なる素材を1つの技術の適用対象として挙げたのは次の理由による。

すなわち、コンクリートと土を比較すると、比誘電率 ε に若干の相違はある（コンクリート： $\varepsilon=9$ 、砂： $\varepsilon=2.6$ ）が、電磁波の透過媒体という特性に関しては、両者の間に大差が無いと考えられるからである。

本研究における当面の課題は探査画像の補正法の理論の確立である。そこで、コンクリートの代わりに扱いやすい砂を用い、砂に埋設された鉄筋の探査実験を実施する。そして、確立された理論を次の段階で鉄筋コンクリートに適用することを目指す。

2. 本研究に関連する既往の研究

本研究に関連する主な既往の研究として次のようなものがある。

西岡等¹⁾は人口衛星等による地球観測（リモートセンシング）データの解析法の一つである合成開口法の埋設物の形状探査への適用性を検討している。それによると、合成開口法等²⁾により地中に埋設された管の上側の一部分の形状が再生されるが、その曲率は現実のものとは異なることが明らかにされている。併せて、独自の埋設物の形状推定法が提案されているが、その方法によっても埋設管の上側の一部分の形状が再生されるが、埋設管の正確な形状が推定できるまでには至っていない。

佐藤等³⁾は埋設物の形状推定法を提案し、その方法を用いて、土槽に埋設されたアルミニウム管の形状推定を行い、その適用性について検討している。その結果によると、地中に埋設された管の上側の一部分の形状が再生されるが、その曲率は現実のものとは異なっている。

小藪等⁴⁾はレーダー計測データを用いて、コンクリートに埋設された多くの鉄筋の配置を3次元的に表示するアルゴリズムとプログラムを開発した。これにより得られるのは鉄筋の平面的な配置と各鉄筋の深度であるが、鉄筋径は不明である。

以上、現在までの研究の結果、埋設物の平面的な配置、および埋設物の深度に関しては推定法がある程度明らかになっている。それに対して、レーダー画像からの鉄筋径の推定に関しては、現在のところ確立された方法はない。

3. 研究のフロー

図-2 は本研究のフローを示している。図に示す各項目の概要は次のとおりである。

- 1) 鉄筋径・かぶり深さを様々に変化させた供試体を用いて、レーダー装置による計測実験を実施する。
- 2) 得られた鉄筋の影像データを用いて曲線近似を行い、曲線式のパラメータを同定する。
- 3) 鉄筋仕様（直径・かぶり深さ）を入力、曲線式のパラメータを出力として、ニューラルネットワーク理論を適用し、ルールを抽出する。
- 4) 現場データを用いてルールのパラメータ・スタディを実施する。

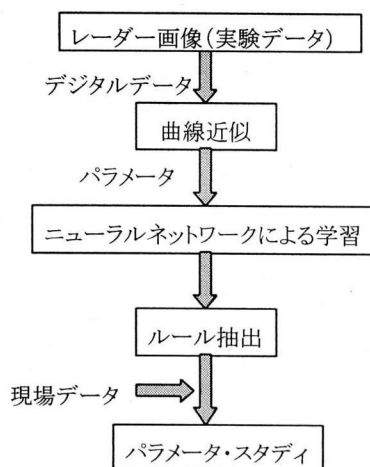


図-2 研究のフロー

以上の手順を1)から4)まで実施することにより、実際の現場に適用可能なシステムを構築できると考えられる。現在のところ、このうち1)から3)まで終了しており、本論文ではその検討結果について報告する。

4. 実験装置および実験方法

図-3、および図-4に示すように、砂（コンクリートの代わりに砂を用いた理由は1.で前述した）の入った容器に6種類の鉄筋（φ9, 16, 22, 25, 32, 38）をそれぞれかぶり深さを変えて設置する。

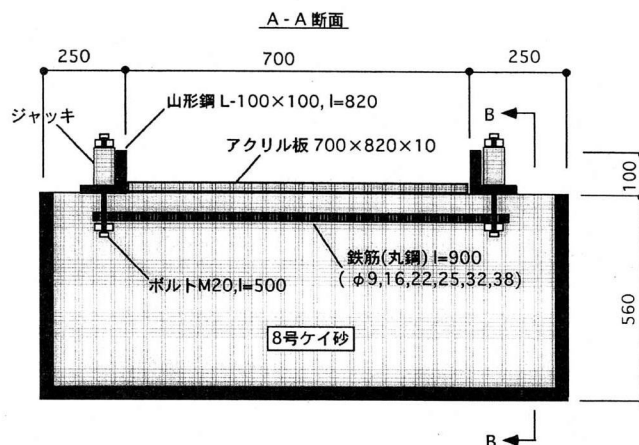


図-3 実験装置 (A - A 断面)

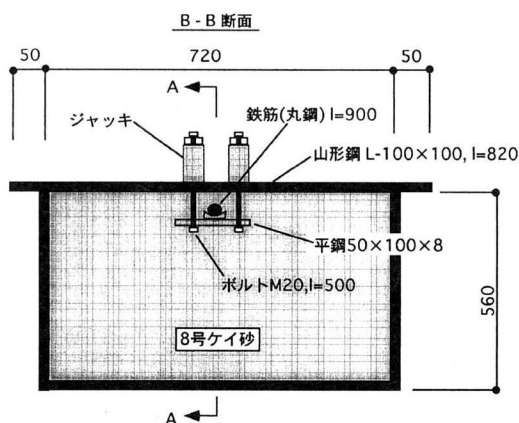


図-4 実験装置 (B - B 断面)

鉄筋設置後、締め固め度を調整しながら容器を砂で満たし、最後にアクリル板で蓋をし、レーダー測定機を鉄筋と交差する方向へアクリル板上で移動させて、計測が行われた。

レーダー測定機として日本無線(株)製のハンディサーチ NJJ-85 を使用した。写真-1 はレーダー測定機による計測中の様子を表している。

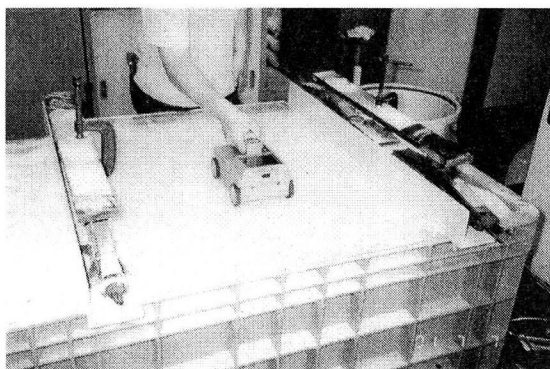


写真-1 実験風景 (レーダー計測中)

レーダー計測の位置は、鉄筋の延長線上の三カ所である。6種類の鉄筋 ($\phi 9, 16, 22, 25, 32, 38$) について、かぶり深さを 25~210mm の範囲で変化させて実験が行われた。実験ケースは全部で 102 ケースである。

5. 実験結果

図-5 は実験の結果、得られたレーダー画像である。このような画像が全 102 ケースについて得られたが、図-5 はそのうちの 1 例 (鉄筋直径 38mm , かぶり深さ 63mm) である。図には電磁波のピクセル値 (画像を構成する画素の濃度を数値で表現したもの) がコンター表示されている。そのコンターの尾根状の部分 (ピクセル値が最も大きい部分) が鉄筋の影像である。

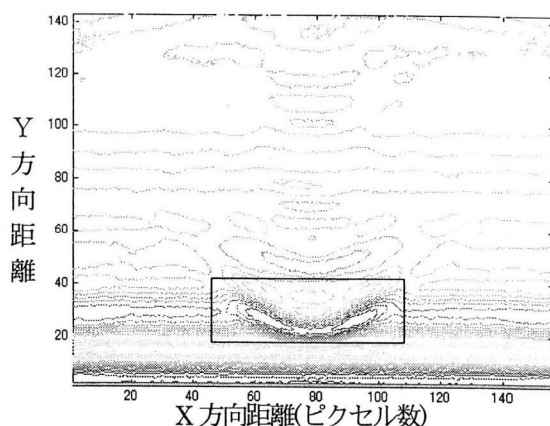


図-5 レーダー画像 (実験結果の一例)

図-5 における四角形で囲った部分を拡大表示したものが、図-6 である。適用したデータ処理プログラムには尾根状の最も高い位置の点を自動的にピックアップする機能がある。図中の●印はこの機能によりピックアップされた尾根位置点群である。後述するデータ解析はこの尾根位置点群のデータを用いて行われている。

図-6 に表示されている大きな楕円は鉄筋の形状・位置を表している。実際の鉄筋は円形であるが、図-6 の縦横比は 1 : 1 でないため、鉄筋が楕円形で表示されている。このように楕円形の鉄筋表示が可能なのは、今回の実験において、鉄筋の径・かぶり深さが予めわかっているからである。それに対して、実際の現場で鉄筋のレーダー計測を実施した場合、図-6 に示すピクセル値のコンター表示までは得られるが、鉄筋位置や形状は不明なので鉄筋表示はそのままでは不可能である。そのため、実際の現場データについて鉄筋表示を行うためには、ピクセル値のコンターデータを解析し、鉄筋の径・かぶり深さを推定する必要がある。

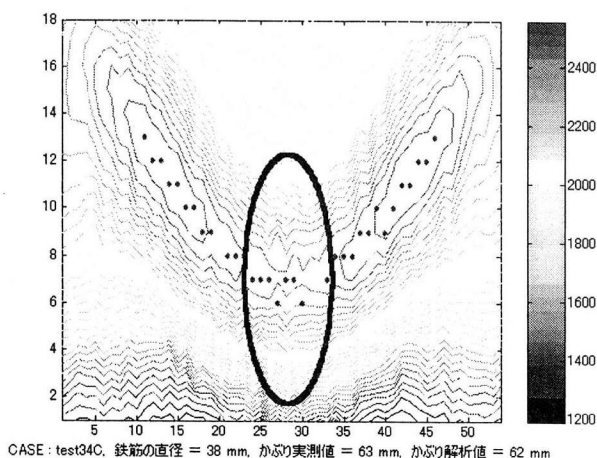


図-6 レーダー画像 (図-5 データの拡大表示)

さらに、図-6 のレーダー画像をコンター表示

ではなく、ピクセル値を鉛直軸にとって3次元表示すると、図-7 のようになる。

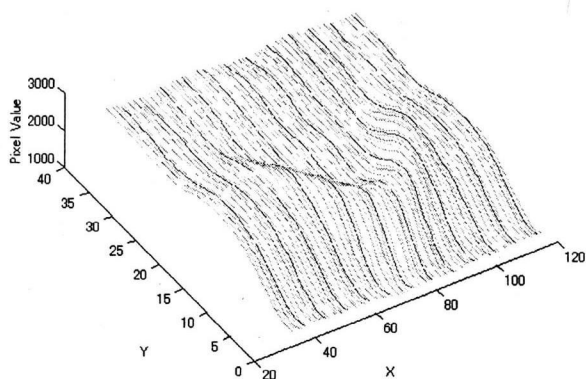


図-7 3次元表示されたレーダー画像

6. 鉄筋の影像が弓状となる原因の考察

前章の図-5, 6, 7 に示したレーダー画像において、実際の鉄筋は円形であるにもかかわらず、その影像は弓状に写る。その原因は次のように考えられる。

図-8 は鉄筋が埋め込まれたコンクリートの表面を電磁波を発生しながらレーダー測定機が移動する様子を表している。レーダー測定機から放射された電磁波は鉄筋部分で反射し、再びレーダー測定機に戻り、それが画像として記録される。したがって、レーダー画像上の鉄筋の位置は距離 L と密接な関係があると考えられる。

図-8 において、ピタゴラスの定理を適用すれば、次の関係式が得られる。

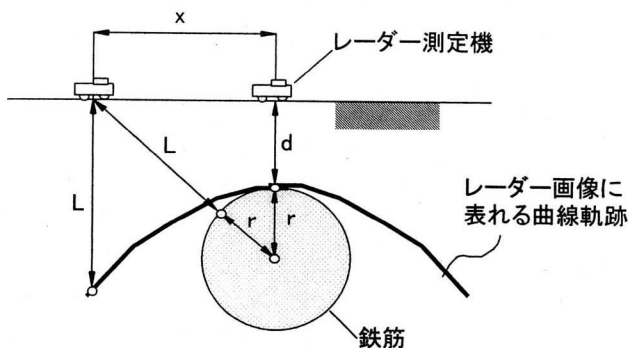


図-8 レーダーによる鉄筋の計測

$$L = \sqrt{x^2 + (d+r)^2} - r \quad (1)$$

ここに、 d はかぶり深さ、 L はレーダー測定機下面から鉄筋表面までの距離、 r は鉄筋径である。 L の軌跡は図-8 に示すような曲線となる。これがレーダー画像に表れる鉄筋の形状が円にはならず、図-8 に示すような弓状になる主要な原因であると

考えられる。

L は測定機下面と鉄筋との距離であるが、それに相当するレーダー画像上の距離を y とし、 L と y の関係が線形であると仮定すると、次式が得られる。

$$y \propto L = \sqrt{x^2 + (d+r)^2} - r \quad (2)$$

$$\longrightarrow y = aL + c = a\sqrt{x^2 + b^2} + c \quad (3)$$

ここに、 a, b ($\propto (d+r)$)、 c はパラメータである。式(3)を以後、ルート関数と呼ぶ。ルート関数の軌跡は図-9 のような曲線となり、図-8 の弓状軌跡の形状と近似している。

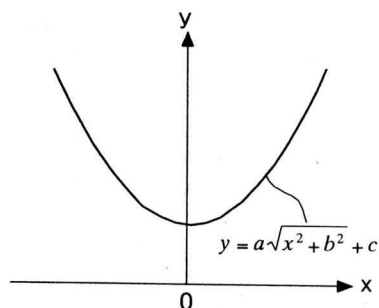


図-9 ルート関数によるレーダー軌跡の近似

ルート関数(式(3))は式(2)における y と L の関係が線形であるとして、誘導されたものである。しかし、この関係が非線形である場合も想定されるので、もう一つのケースとして、 y と L の関係が2次の多項式関数の場合についても検討する。すなわち、

$$y = a'L^2 + b'L + c' \quad (4)$$

である。式(2)を代入して、式(4)を展開すると、次式が得られる。

$$y = a(x-b)^2 + c \quad (5)$$

以後、式(5)を放物線関数と呼ぶ。放物線関数(式(5))の軌跡は図-10 のような曲線となり、図-5, 6, 7 の弓状軌跡の形状と近似している。

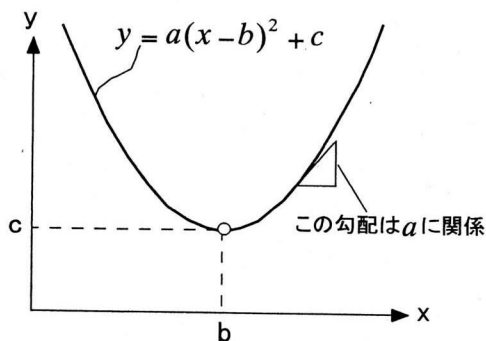


図-10 放物線によるレーダー軌跡の近似

また、図-10 に示すように、パラメータ a, b, c は図上の形状・位置と有意な関係にある。すなわち、 c は y 座標の最小値に、 b はその時の x 座標に対応し、 a は曲線の勾配に対応している。

7. 尾根位置データの曲線近似

前述の図-6 に示された●印の点群（コンター表示されたピクセル値が最大となる位置のピックアップデータ）に対して、前述の式(3)と式(5)の曲線近似を行う。すなわち、●印のデータと仮定した曲線式の値との二乗誤差の合計を目的関数とし、目的関数が最小となるようにパラメータを決定する。図-11 は式(3)の曲線（ルート関数）による近似結果である。

曲線が $1/2$ しか表示されていないのは、曲線が左右対称であるため、曲線の中心位置で折り返して表示しているためである。

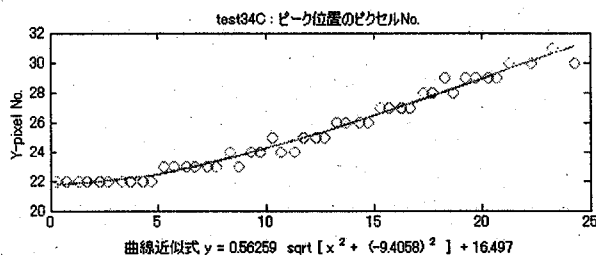


図-11 ルート関数による曲線近似

一方、図-12 は同様に、式(5)の曲線（放物線関数）による近似結果である。

図-11、図-12 を比べると、曲線の近似度に関してこの段階では放物線関数とルート関数の優劣は付けがたい。さらに、同様な曲線近似を他のケースについて行った結果からもその優劣は付けがたい。しかし、次章でルート関数は放物線関数に大きく劣ることが明らかとなる。

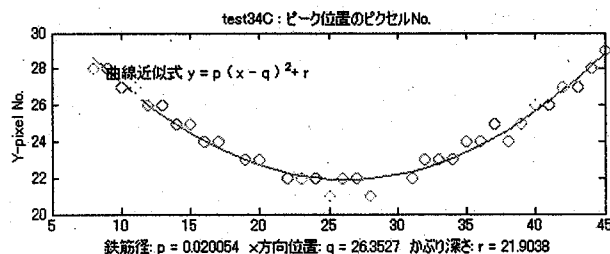


図-12 放物線による曲線近似

8. ニューラルネットワークの誘導

前章までの検討では、曲線近似式として、放物線関数とルート関数の2つを候補として挙げたが、本

章ではそれらのうち、まず放物線関数の場合について検討する。

6. で前述したように、放物線関数(式(5))には3つのパラメータ a, b, c が含まれている。それらのうち b は図-10 に示すように左右対称な探索画像の重心位置に対応しているが、鉄筋の平面的位置はこの重心位置に存在すると考えて良いので、 b の利用法を検討する意義は低い。

他の1つのパラメータ c は図-10 に示すように放物線の下端位置に対応しており、鉄筋のかぶり深さと密接な関係にあると考えられるが、これについても、かぶり深さについては既存の推定法(2. で前述した小藪等⁴⁾等)があるので、 c の利用法を検討する意義は低い。

残りのパラメータ a は鉄筋径とかぶり深さのどちらか、または両方に関係があると考えられる。このパラメータ a と鉄筋径・かぶり深さの関係が明らかになれば、レーダー測定データにその関係式を適用することにより、コンクリートに埋設された未知の鉄筋径を推定できると考えられる。

この関係式の解明にニューラルネットワークを用いる。ここで、非線形最小2乗法の代わりに、ニューラルネットワークを用いるのは次の理由による。すなわち、本ケースの場合、どのような関数形になるのか予測が困難であり、関数形を予め設定する必要のないニューラルネットワークが適しているからである。

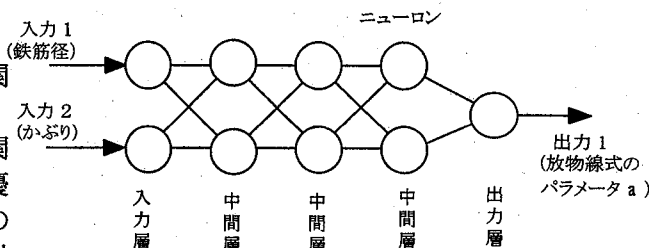


図-13 ニューラルネットワークの解析モデル

図-13 はニューラルネットワークの解析モデルを表している。図に示すように、入力鉄筋径とかぶり深さ、出力は式(5)のパラメータ a である。解析モデルの中間層は1～5層の場合について、試算を行ったが、中間層の総数を変化させても、顕著な差異が見られず、その中でも3層の場合がより良好な応答を示したので、中間層は3層とした。

図-14 はニューラルネットワーク・ルールの誘導フローを示している。この図に示すように、予め計測された入力と出力が既知なデータを教師信号として、図-13 のモデルの出力と教師信号との誤差が最小となるようにチューニングすることにより、モデル内のパラメータを同定する処理を行う。

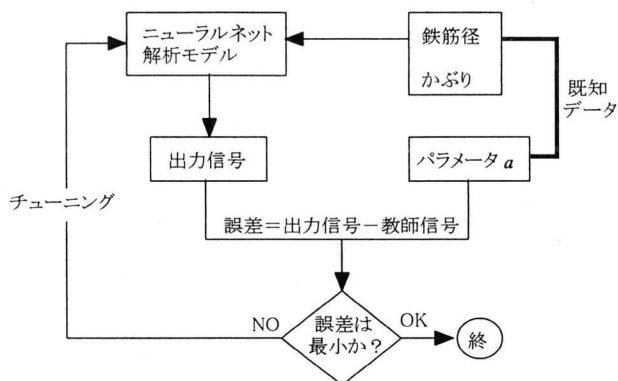


図-14 ニューラルネット・ルールの誘導フロー

図-15 は全実験ケースのデータを用いたニューラルネット・ルールの誘導(図-14)の結果,得られたニューラルネットワーク・ルールを3次元図化表示したものである. x 軸, y 軸に, z 軸に式(5)のパラメータ a をとって表示している.

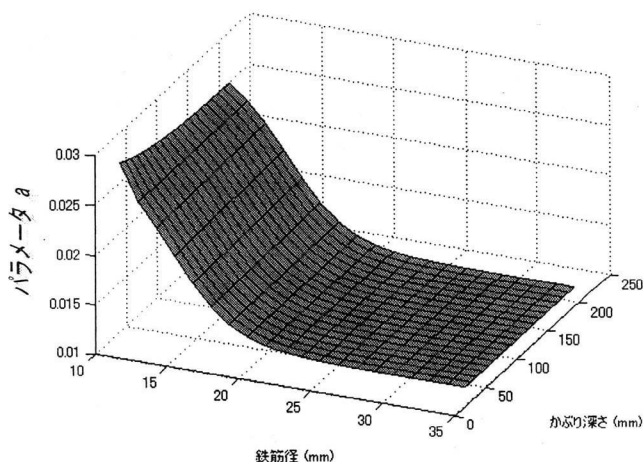


図-15 導出されたニューラルネットルール

9. ニューラルネットルールの精度の検討

図-15によると,式(5)のパラメータ a はかぶり深さに依存していないように見える.一方,鉄筋径とパラメータ a の間には有意な関係が認められる.ただし,21mm以上の鉄筋径に対してはパラメータ a の変化がほとんど無い.したがって,このままでは21mm以上の鉄筋径に対する本解析法の適用性が懸念される.

しかし,将来,今回用いた砂をコンクリートに代えて,実験を行った場合には,この21mmという限界値は変化する可能性が高い.また,鉄筋径・かぶり深さに加え,新たな要因をニューラルネットワークの入力として,ルールを導けば,21mm以上の鉄筋径の判定に本解析法が適用できる可能性はある.

図-15 の関係を用いて,全実験ケースの鉄筋径,かぶり深さに対して式(5)のパラメータ a を推定する.それと同時に,実験結果からそれに対応する式(5)のパラメータ

a を求める.そして,前者を推定値として x 軸に,後者を実測値として y 軸にとりプロットしたのが図-16 である.図中に示す直線は1:1の勾配ラインである.

図-16によると,1:1ライン付近にプロット点が集中しており,推定精度が比較的高いことが解る.

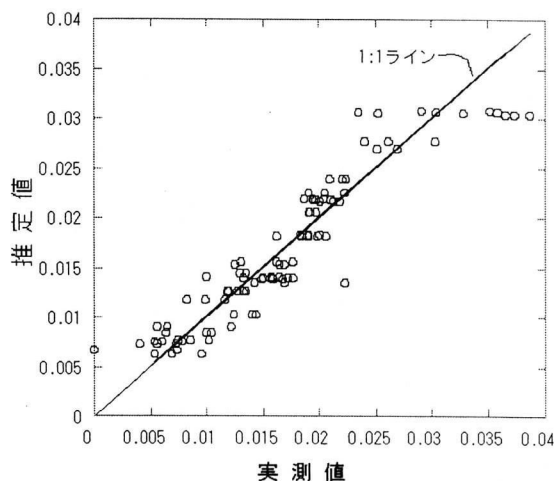


図-16 放物線関数のパラメータ a の推定精度

放物線関数(式(5))の場合のパラメータ a はルート関数の場合,式(3)のパラメータ a に相当する.そのルート関数のパラメータ a について,図-16に相当する関係を求めたものが図-17である.図-17の場合も,図中に示す直線は1:1の勾配ラインである.

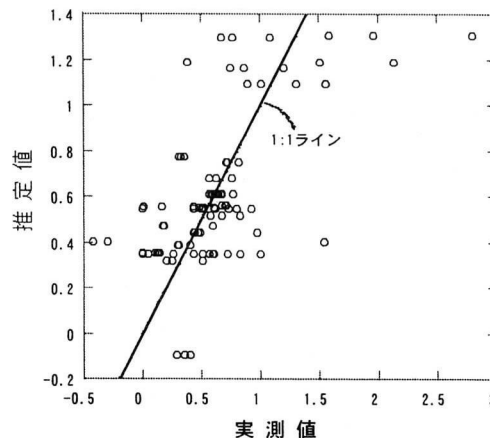


図-17 ルート関数のパラメータ a の推定精度

図-17によるとプロット点は1:1ラインからかなり離れた位置に点在しており,放物線関数の場合の図-16と比べると,ルート関数の場合の推定精度は低いように見える.

この推定精度の比較を定量的に行うためにAICを用いる.AIC(赤池情報量規準⁵⁾:Akaike's Information Criterion)はモデル式の優劣評価に利用できることは広く知られている.AICが小さいほど良いモデルと判定される.そこで,図-16と図-17について,AICを算定する.ただし,図-16と図

-17 では比較する値のオーダーが相違している。そこで、まずデータの正規化を行い、次に AIC を算定する。正規化は次式による。

$$x_s = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

ここに、 x は正規化前のデータ値、 x_s は正規化後のデータ値、 μ は x の平均、 σ は x の標準偏差である。

AIC の算定結果は次のとおりである。

図-16 (放物線関数) の場合の AIC=392

図-17 (ルート関数) の場合の AIC=407

つまり、図-16 (放物線関数) の場合の方が図-17 (ルート関数) の場合よりも AIC が小さいので、推定精度が高いと判定できる。したがって、放物線関数のほうがルート関数よりも近似式として適していると考えられる。ただし、両者の AIC の差は決定的に大きなものではないので、絶対的な結論とは言えない。

10. ニューラルネットによる推定

学習の結果、図-15 のようなニューラルネット・ルールが得られているので、それを用いることにより、次回からは任意の鉄筋径、かぶり深さが与えられれば、式(5)のパラメータ a を推定することができる。

また、その逆にパラメータ a とかぶり深さが与えられれば、図-15 より鉄筋径を推定することもできる。その場合、パラメータ a はレーダー測定データである図-6 の●印の点を式(5)で曲線近似することにより得られる。また、かぶり深さの方は 8. で前述した既存の方法で推定可能である。つまり、鉄筋径・かぶり深さが未知な現場においてレーダー探査を実施すれば、そのデータに図-15 のルールを適用することにより、鉄筋径・かぶり深さを推定することができる。

ただし、本論文では、コンクリートの代わりに砂を用いた実験を行い、そのデータを用いているので、実用化のためには、現実のコンクリートに埋設された鉄筋データを用いて、再度、ニューラルネットワークによる学習を行う必要がある。

以上で明らかになった鉄筋径の推定手順をまとめると次ようになる。

鉄筋径の推定手順

- 1) 対象とする埋設された鉄筋の表面でレーダー測定を行い、ピクセル値を等高線表示した画像データ (図-6) を得る。
- 2) 画像の尾根位置 (ピクセル値が大きい部分) を構成するピクセル群 (図-6 の●印) の座標値を求める。
- 3) 2) のデータに対して、放物線近似を行い、式(5)のパラメータ a を求める。

- 4) かぶり深さを既存の方法により算出する。
- 5) a の値とかぶり深さの値に該当するニューラルネット・ルール (図-15) 上の点を求めれば、鉄筋径の推定値を得ることができる。

11. おわりに

今回の研究の結果、鉄筋径の推定に関する解析理論を構築することができた。また、実験によりその理論の妥当性を裏づけることができた。

今後、実用化のためには、得られたニューラルネット・ルールを構成するパラメータのパラメータ・スタディが必要である。すなわち、今回の実験で得られたパラメータ値は電磁波を透過する媒体が砂の場合のパラメータ値である。したがって、媒体が砂以外の場合 (たとえば、コンクリート) に適用するためには、その媒体用のパラメータ値が必要である。

また、図-15 の考察で述べたように、鉄筋径・かぶり深さに加え、新たな要因をニューラルネットワークの要因として加えることにより、推定精度を高める検討も必要である。

そこで、今後、鉄筋コンクリートを対象とした実験や現場へ適用を通じて推定精度を高め、本技術の実用化を図っていきたい。

さらに、将来的には、鉄筋径の推定に留まらず、地盤内の埋設管やコンクリート内の空隙・亀裂の位置や範囲の推定も、本技術の延長線上にある技術であり、今後、その研究開発にも取り組みたい。

なお、本研究は (財) 国土技術研究センターの平成 13 年度研究開発助成を受けており、本論文の研究成果はそれに依るところが大きく、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 西岡泰弘, 藤井和也, 宇野亨, 何一偉: 地中探査における埋設物イメージング法の比較, 第 4 回地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 87-93, 1997. 11.
- 2) 日本写真測量学会編: 合成開口レーダ画像ハンドブック, pp. 49-57, 朝倉書店.
- 3) 佐藤亨, 竹村和久, 若山俊夫, 木村磐根: 地下探査レーダーを用いた埋設物体の形状推定とその問題, 第 3 回地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 73-79, 1995. 7.
- 4) 小藪実男: 埋設管・コンクリート配管の 3 次元可視化ソフトウェアの開発, 拝観技術, pp. 75-77, 2000. 3.
- 5) 赤池弘次: 情報量規準 AIC とは何か, 数理科学, No. 153, pp. 5-11, 1976.

(2002年9月13日受付)