

老朽化したコンクリートのレーダ法による強度推定法に関する研究

EVALUATION OF OLD CONCRETE STRENGTH THROUGH RADAR METHOD

金本康宏*・藤原鉄朗*・松山公年*・太田資郎*

Yasuhiro KANEMOTO, Tetsuro FUJIWARA, Kimitoshi MATSUYAMA and Shiro OHTA

Radar is a measurement technology based on electromagnetic echo. Using radar, we can find reinforced steel bars and voids in concrete structures, so radar is now in common use for investigations in civil engineering. Radar measurement has advantages to investigate big structures, such as continuously and non-destructively. This paper presents a study of the application of radar technology to estimate concrete strength. We pay attention to the relation between concrete strength and the electro-characteristics of concrete, such as the velocity and energy loss of electromagnetic waves.

Key Words : *Non-destructive testing, radar measurement, concrete strength, velocity of electromagnetic wave*

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理では、コンクリートや鉄筋などの構造物を構成する材料の健全度を把握することが重要である。そして、コンクリートの健全度を示す指標の 1 つに圧縮強度がある。

現在、構造物のコンクリート強度を調査する場合、構造物からコンクリートコアを採取し、一軸圧縮試験を行う方法が一般的である¹⁾。また非破壊試験法としては、シュミットハンマーで反発度を測定して圧縮強度を推定する方法や、超音波の伝搬速度から圧縮強度を推定する方法がある。しかし、これらの方法を長大な土木構造物に適用した場合、強度に関する情報を効率的に得ることは困難である。また、水路トンネルなどの経年劣化の著しいコンクリートでは、一軸圧縮試験に用いるコア試料を採取できないこともある(写真-1)。

そこで、老朽化したコンクリート構造物の圧縮強度を効率的(非破壊、連続的、短時間)に調査する方法として、電磁波レーダ法(以下、レーダ法)によるコンクリート強度推定法の開発を本研究の目的とした。まず、著者らはコンクリートの物理特性と電気特性の関係を基礎実験から明らかにし、コンクリート強度を推定する方法について提案した。²⁾

本稿では、その後に実施した水路トンネル等におけるレーダ調査結果をもとに、基礎実験で提案したコンクリート強度推定法が既設構造物で同様に適用可能であるかを検討した。

また、本手法で強度が推定されたコンクリート表面からの深さについて、検証を行うための実験を行った。

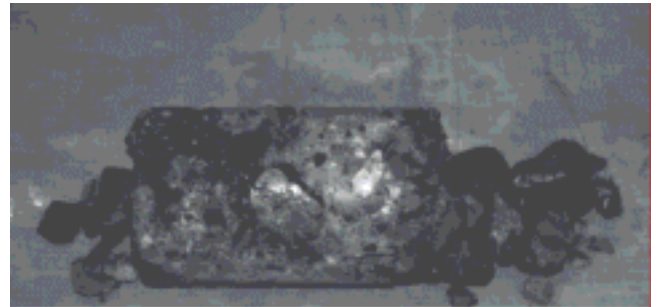


写真-1 老朽化したコンクリートのコア試料

2. レーダ法

(1) レーダ法とは

レーダ法とはアンテナから媒質中へ電磁波を送信し、電気的特性が異なる物質の境界面で反射した電磁波を受信アンテナで捕らえる技術である。よって、電磁波を送受信することで、電気特性の異なる物質の境界面を見つけることができる。この技術は気象レーダや空港の管制塔で用いられているものであり、近年は土木・建築分野でも有効な非破壊試験法として構造調査に適用されている。

* 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部



写真-2 レーダ計測状況(鉄筋探索)

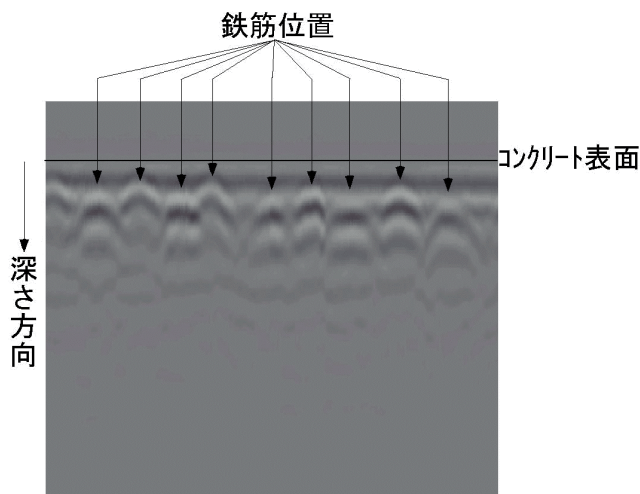


図-2 レーダ法による鉄筋探索結果

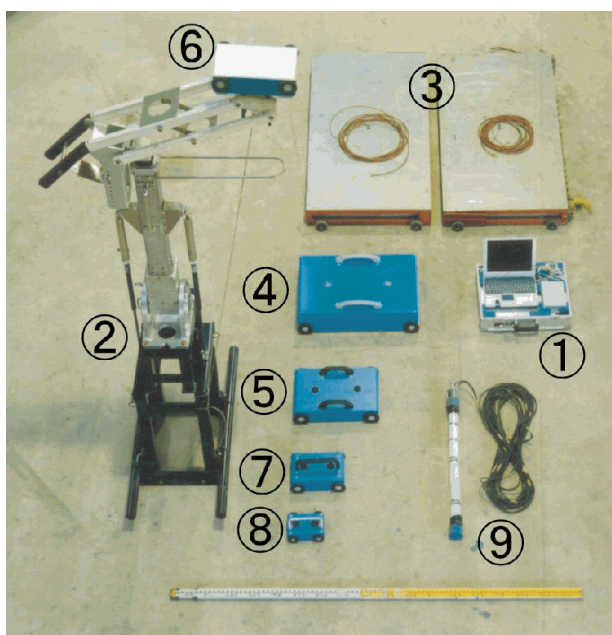


写真-3 多目的レーダ計測システム

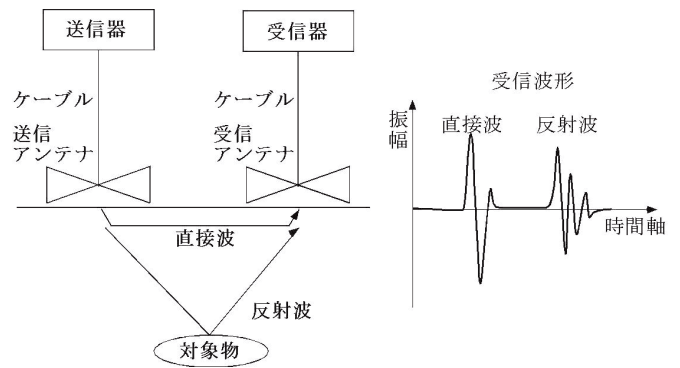


図-1 アンテナから送受信される電磁波

アンテナから送信された電磁波は球面波として媒質中を伝搬する。受信アンテナにはまず、媒質の表面付近を伝搬してきた直接波が受信され、その後から媒質中の電気特性の異なる境界(比誘電率の異なる境界)からの反射波が順次受信される。図-1 にレーダアンテナから送受信される電磁波の模式図を示す。

- ① 計測制御システム
ノートパソコンで計測時の各種設定を制御、計測データの記録
- ② アンテナアーム(アンテナ装着時)
高所の道路トンネル覆工にアンテナを走査させる際に使用、組み立て式
- ③ レーダアンテナ(100MHz)
地下埋設物の探査に使用
- ④ レーダアンテナ(400MHz)
地下埋設物の探査・コンクリートやアスファルトの部材厚・支保工・背後空洞探査に使用
- ⑤ レーダアンテナ(600MHz)
コンクリートやアスファルトの部材厚・支保工・背後空洞探査に使用
- ⑥ レーダアンテナ(800MHz)
コンクリートやアスファルトの部材厚・支保工・背後空洞探査に使用
- ⑦ レーダアンテナ(1GHz)
コンクリート中の配筋探査に使用
- ⑧ レーダアンテナ(1.5GHz)
コンクリート中の配筋探査に使用
- ⑨ ボアホールレーダアンテナ(600MHz)
ボーリング孔を利用したレーダ探査に使用(挿入長15mまで対応)

(2) レーダ計測の事例

既設コンクリート構造物の中には、設計図面の紛失や設計図面と異なる施工がされたため、構造が不明なものが少なくない。このような構造物が老朽化し、補修や補強が必要となる場合、現在の構造を把握した上で、合理的な補修・補強設計を行う必要がある。

ここでは一般に土木・建築分野で多く適用されているコンクリート中の鉄筋探査の事例について説明をする。

鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋の配筋状態は補修・補強の計画を策定する上で重要な情報となる。

コンクリートと鉄筋では電気的特性（比誘電率）が異なることからレーダ法を適用すれば、コンクリートをはつることなく鉄筋の位置とかぶり厚さを特定することができる。

写真-2 はコンクリート擁壁の調査状況である。このようにコンクリート表面にレーダアンテナを走査させるだけで、配筋状態を把握することができる。

図-2 はレーダ調査結果の画像である。コンクリート中の鉄筋は図に示すように画像として記録される。鉄筋の位置は矢印で指し示されているブーメラン状模様の頂点に位置している。

(3) 多目的レーダ計測システム

写真-3 は 2001 年に導入した多目的レーダ計測システムである。この計測システムはパルス型レーダであり、その特徴は、周波数 100、400、600、800MHz、1、及び 1.5GHz のアンテナを選択して使用できることである。よって、構造物の形状・構造・内部欠陥調査（対象：道路の路床・路盤、トンネル、滑走路、護岸など）や地下埋設物の調査（対象：杭などの基礎構造物、ガス管、下水管、廃棄物など）へのレーダ法の適用が可能となる汎用性の高い計測システムとなっている。

また、電磁波の伝搬速度を推定する当社独自の計測システム²⁾（特許願、特願平 7-186021 号）が搭載されており、業務における利用のほか、レーダ技術に関する研究への適用も可能な計測システムとしている。

多目的レーダ計測システムは 2000 年 11 月に導入したものであり、2001 年 8 月までに橋脚基礎杭の調査や道路トンネルの調査など 6 件の現場における計測実績がある。

3. レーダ法によるコンクリート強度推定方法²⁾

(1) レーダ法によるコンクリート強度推定方法の原理

過去に実施した室内試験結果²⁾から、コンクリート強度とコンクリートの電気特性を示す複素比誘電率の間に、相関関係が認められた。

表-1 は複素比誘電率とコンクリートの電気特性の関係を示している。この表から複素比誘電率の実数部、虚数部はそ

れぞれ電磁波の伝搬する速さ、電磁波が減衰する割合の代表値であることがわかる。よって、既設のコンクリート構造物で複素比誘電率または電磁波伝搬速度と電磁波の減衰特性を数値化した値を把握できれば、コンクリート強度が推定できると考えた。

検討の結果、現在使用しているレーダ計測システムにおいて、入射時の電磁波のパルス波とコンクリート中を伝搬して減衰したパルス波の比を、減衰特性を示すパラメータとして設定することで、伝搬速度と減衰特性パラメータからコンクリート強度を推定することとした。

表-1 複素比誘電率とコンクリートの電気特性

電気特性	電磁波の伝搬速さ	電磁波の減衰
複素比誘電率	ϵ' (実数部)	ϵ'' (虚数部)
影響される要因	水分・空隙・塩分・骨材	

(2) 既設構造物における強度推定法検証試験

老朽化した既設コンクリートについて室内試験と同様の方法でコンクリート強度を推定する試験を実施した。試験手順を以下に示す。

- ① 対象とする既設コンクリート構造物は水路トンネル(1現場)と基礎構造物(1現場)とする。構造物の任意点において測点を設置する。
- ② 測点においてレーダ計測を行い、測点におけるアンテナ間の電磁波伝搬時間を計測する。
- ③ 測点においてコンクリートコアリングを実施して、コアサンプルを採取する。
- ④ 電磁波の伝搬速度と減衰特性を示すパラメータである減衰相対比を求める。減衰相対比とは減衰特性を示すために本手法で導入した値であり、基準波と直接波の比によって求めることができる。
- ⑤ 採取したコンクリートのコアサンプルを用いて、コンクリートの圧縮試験を実施して、コンクリート強度を求める。
- ⑥ 電磁波の伝搬速度とコンクリート強度の間に相関関係があることを確認する。加えて、電磁波の減衰相対比とコンクリート強度の間に、相関関係があることを確認する。
- ⑦ これらの二つの相関関係を利用して重回帰分析を行い、伝搬時間と減衰相対比からコンクリート強度を推定する推定式を算出する。相関関係がどちらか一つにおいてのみ成り立つ場合には、回帰分析によりコンクリート強度を推定する推定式を算出する。

- ⑧ この推定式の検証を行うため、計測した伝搬時間と減衰相対比を推定式に代入して、推定コンクリート強度を算出する。推定コンクリート強度と実測のコンクリート強度を比較して、本推定方法の検証を行う。

(3) 試験結果と既設構造物におけるレーダ法によるコンクリート強度推定方法の検証

図-3に電磁波の伝搬速度とコンクリート強度の関係を、図-4に電磁波の減衰相対比とコンクリート強度の関係を示す。図-3より伝搬速度とコンクリート強度の間には、室内試験同様に相関関係が認められた。しかし、図-4より減衰相対比とコンクリート強度の間には、相関関係を認めることができなかった。

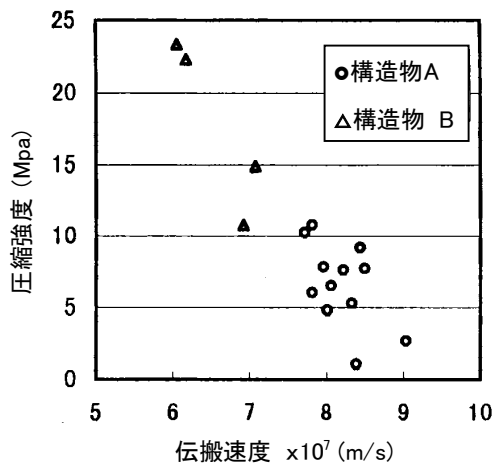


図-3 伝搬速度と圧縮強度の関係

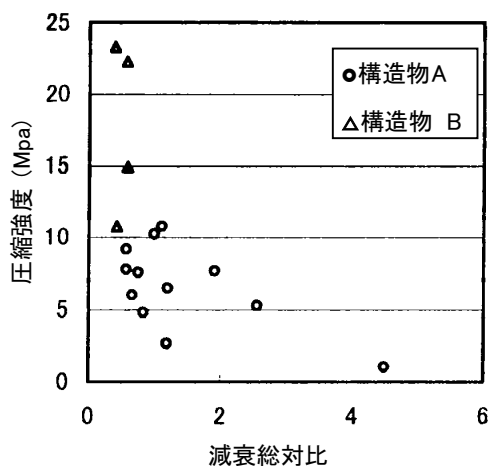


図-4 減衰相対比と圧縮強度の関係

よって、コンクリート強度推定式は、電磁波の伝搬速度とコンクリート強度における回帰分析を行うことにより算出した。算

出した強度推定式を式(1)に示す。図-5は同一測点において推定式(1)から推定された(伝搬速度から推定された)強度と実測強度の比較である。比較の結果、本手法は±2.5MPaの誤差でコンクリート強度を推定できることが検証された。

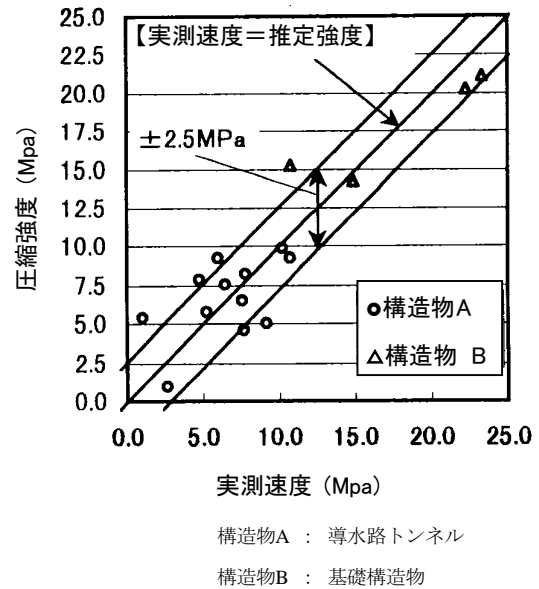


図-5 実測強度と推定強度の関係

算出されたコンクリート強度推定式

$$y = 62.1 - 6.76 \times 10^{-7} x \quad (1)$$

y : 推定強度 (MPa) x : 伝搬速度 (m/s)

(4) 考察

検証の結果から本手法の手順に従えば、コンクリート強度を±2.5MPaで推定できると考えられる。ただし、今後もデータの蓄積を行い、本手法の適用対象について検討を行う必要がある。

室内試験においては減衰特性とコンクリート強度の間に相関関係が認められたが、既設構造物では認めることができなかった。これは既設構造物においてコンクリート表面に微妙な凹凸があることから、レーダ計測を行う際にアンテナとコンクリート表面の距離が一定とならず、反射波形の振幅に大きな影響を与えてしまうことが原因であるものと考えられる。

4. レーダ計測における電磁波の伝搬経路の確認³⁾

(1) 直接波(表面波)の伝搬経路

我々はアンテナ間を伝搬する直接波(表面波)ピークの経路をコンクリート表面付近と仮定し、アンテナの送受信間を直接波の伝搬距離として解析を進めている。ただし、厳密には直接波として送受信される電磁波は、ホイヘンスの原理により図-6のような経路を、最も大きな振幅で最短距離として伝搬する。

ここでは、レーダ法を適用した一連の計測結果や研究結果の精度を向上させるため、レーダアンテナの直接波の伝搬経路を把握することを目的とした実験を行った。

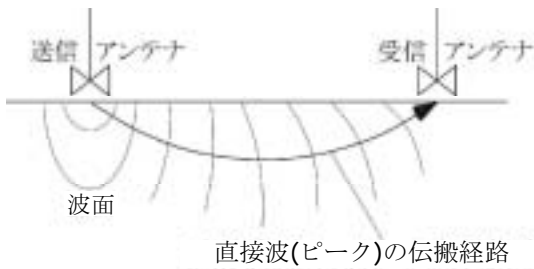


図-6 直接波(表面波)の伝搬経路

(2) 実験方法

図-7 に示すようなコンクリート供試体を作成した。供試体の底面にはステンレス板が設置してある。アンテナを供試体



写真-4 実験状況

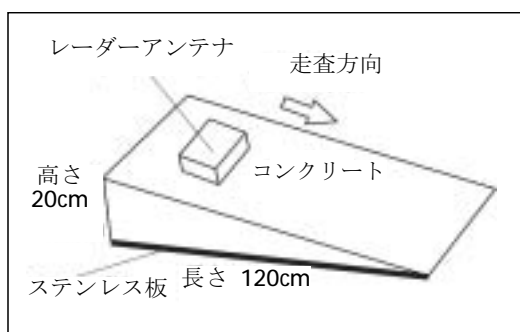


図-7 実験供試体

上で走査させて、厚さの異なるコンクリート中を伝搬する直接波とステンレス板からの反射波を計測した。直接波の伝搬経路と反射波の伝搬経路が重なった位置で、直接波のピークと反射波のピークが合成され、一つのピークを形成することとなる。このときのコンクリート厚さが直接波(ピーク)の伝搬経路の深さであることが考えられる。

(3) 実験結果

図-8 に計測結果を示す。図-8 は 800MHz のアンテナを供試体上で走査させた際に計測された電磁波の波形を白黒階調で示した図である。ステンレス板からの反射波は、コンクリート厚さが小さくなるに従い直接波に近づいてきていることがわかる。図-9 は 800MHz のアンテナで計測した際の各コンクリート厚さにおける電磁波の波形である。直接波と反射波のピークが重なったときのコンクリート厚さは 4.9cm であった。

実験結果から、各アンテナで直接波として送受信される電磁波が伝搬する深さを表-2 に示す。この深さは各アンテナのコンクリート厚さ測定の限界値を示すことにもなる。

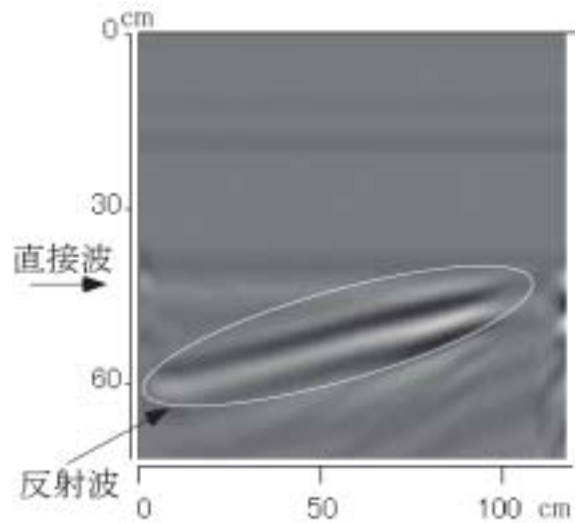


図-8 計測結果(白黒階調表示)

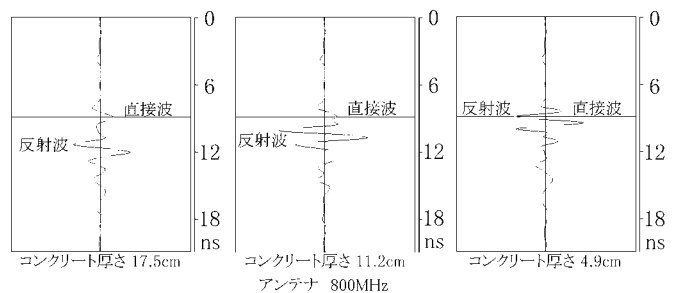


図-9 計測結果(波形)

表-2 周波数の違いによる伝搬経路の深さ

アンテナ	伝搬経路の深さ
800MHz	4.9cm
1GHz	3.3cm
1.5GHz	2.0cm

5. まとめ

ここで検証したレーダ法によるコンクリート強度推定法では、 $\pm 2.5\text{MPa}$ の誤差で推定することができた。ただし、今回対象としたコンクリートは体積水分率の比較的大きなコンクリート(約 20%以上)であり、乾燥したコンクリートで本手法が適用可能であるかは確認が必要である。

レーダ計測における直接波の伝搬経路の確認実験からは、直接波に関する解析ではコンクリート表面から深さ数 cm におけるコンクリートの電気特性が反映されと考えられる。また、直接波の伝搬速度をもとに行うコンクリート強度推定法により推定される強度は、この深さにおける強度を最も反映することが考えられる。

6. 課題

今後の課題として以下の項目があげられる。

- レーダ法によるコンクリート強度推定法の精度向上と適用範囲の絞り込み
- コンクリート強度推定法の精度に見合った利用方法の検討
- 既設構造物におけるデータの取得

参考文献

- 1) 小林一輔:コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法、森北出版
- 2) 金本康宏他:レーダ法によるコンクリート強度推定法に関する研究、第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.87-92、1999.8
- 3) 金本康宏他:レーダアンテナから直接波として送受信される電磁波のコンクリート中における伝搬経路、第 56 回土木学会年次学術講演会概要集 V-411、pp.822-823、2001.10