

コンクリート構造物の比誘電率分布の推定

田中 俊幸^{†a)} 遠江 一仁[†] 森山 敏文[†] 竹中 隆^{††}

Estimate of Permittivity Distribution of Concrete Structure

Toshiyuki TANAKA^{†a)}, Kazuhito TONOE[†], Toshifumi MORIYAMA[†],
and Takashi TAKENAKA^{††}

あらまし コンクリート構造物の定期的な安全検査は重要である。非破壊検査の一つに電磁波レーダによる鉄筋探査がある。電磁波レーダを利用すれば鉄筋の有無は容易に確認できる。しかし、コンクリート構造物の強度計算には鉄筋の位置と半径の情報が必要である。特にコンクリート表面から鉄筋の上面までの距離はかぶりと呼ばれ、建築基準法でその安全基準が定められている。かぶりを電磁波レーダで推定するためにはコンクリートの比誘電率の値が必要である。しかし、コンクリートは不均質であり比誘電率分布は未知であるため、コンクリートを均質媒質と仮定してかぶりを推定しているのが現状である。本論文では、非破壊でコンクリートの比誘電率分布と経日変化を測定する方法を提案し、測定結果を示している。また、得られた測定結果から比誘電率分布の深さ依存性と経日変化の近似関数を求め、更に近似関数を鉄筋探査に利用する必要性を述べている。

キーワード 電気定数計測, コンクリート, 比誘電率分布, 電磁波レーダ

1. ま え が き

コンクリートは建造物、橋、トンネル及び堤防を初めとして様々な構造物において幅広く利用されている。しかし近年、コンクリートの老朽化によりトンネルの崩落事故やコンクリート壁の崩落事故が相次いで起こり、構造物の安全検査の重要性が高まっている。コンクリート構造物の検査は大きく分けてコンクリートの品質(強度)調査、内部欠陥(ひび割れ、空隙、剥離、鉄筋の腐食)の評価及び鉄筋探査がある。現在、コンクリートの品質調査や内部欠陥の調査には主に弾性波(音波、超音波、衝撃弾性波、打音波)が用いられ、鉄筋探査には主に電磁波が用いられている [1]。

いずれにしても、探査対象の正確な情報を得るためには、コンクリートの状態を正しく判断する必要がある。

電磁波を利用した鉄筋の探査法として電磁波レーダ法がある [2]~[6]。電磁波レーダ法は一つの送信アン

テナからコンクリート中に電磁波パルスを照射し、並列に配置された受信アンテナで散乱波を受信する。散乱波には、送信アンテナから受信アンテナに直接的に伝わる直達波、コンクリート表面で反射され受信される表面反射波及びコンクリート中の鉄筋によって反射される反射波が含まれている。送信アンテナと受信アンテナを同時に移動させて複数点で散乱波を受信し、鉄筋からの反射波を抽出する。最後に、鉄筋からの反射波の到達時間から鉄筋の位置を推定している。この手法によれば、リアルタイムで鉄筋が埋設されている位置を把握することができる。しかし、かぶりの厚さを正確に推定することはできない。かぶり厚さとは、鉄筋コンクリート建築物で、鉄筋を覆うコンクリートの厚さを表す。コンクリートはアルカリ性で、鉄筋が錆びるのを防ぐが、打設からの経日とともにコンクリート表面から徐々に中性化し、ひび割れなどから水がしみ込むと鉄筋が錆びる原因となるため、かぶりの厚さの最小値は建築基準法で定められている。かぶりの厚さを正確に推定するためには、コンクリートの比誘電率の値が必要である。電磁波レーダ法では、測定者が経験と知識でコンクリートの比誘電率の値を仮定し、かぶりの推定を行うため、正確な推定を行うことができない。我々は、これまでにコンクリートの比誘電率、鉄筋のかぶりと半径を同時に推定する方法を提

[†] 長崎大学大学院工学研究科, 長崎市

Graduate School of Engineering, Nagasaki University, 1-14
Bunkyo-machi, Nagasaki-shi, 852-8521 Japan

^{††} 華南師範大学光及電磁波研究中心, 中国

Centre for Optical and Electromagnetic Research, South
China Normal University, China

a) E-mail: t-toshi@nagasaki-u.ac.jp

案した [7], [8]. しかし, この手法ではコンクリートの比誘電率を一定と仮定する必要がある. 実際のコンクリート構造物では, コンクリートの電気定数は深さとともに大きな値を取る不均質媒質であることが知られている [2], [6]. また, コンクリートの比誘電率は打設からの経日によって, 表面から同じ深さの位置であっても小さくなっていくことが知られている. 我々が知る限りコンクリート構造物の比誘電率の経日変化と深さ方向の変化を測定している例はない.

本論文では, コンクリート構造物の比誘電率の経日変化と深さ方向の変化の測定について議論している. 比誘電率の測定には斜め切削開放終端同軸プローブ (OCP) [9] をコンクリート内部に埋め込み, コンクリート内部の比誘電率を非破壊で測定している. また, 深さ方向と打設からの日数に対して比誘電率分布の近似式を導出している. 更に, 比誘電率の近似式を用いて経日によるかぶりの推定誤差並びに複鉄筋探査におけるかぶりの推定誤差について議論している. なお, 本研究の最終目標は比誘電率分布を考慮した電磁波レーダ法を提案し, コンクリート構造物の鉄筋検査精度を向上させることである.

2. 比誘電率の測定原理

図 1 に斜め切削開放終端同軸プローブ (OCP) の写真を示す. SMA ケーブルの先端を 30 度にカットした構造である. ベクトルネットワークアナライザ (VNA) により S_{11} を測定し, 式 (1) により測定対象であるコンクリートの複素比誘電率を求めることができる [9]. なお, コンクリートに含まれている骨材の影響をできるだけ抑えるために, 比誘電率の計測面積が広がる先端切削同軸プローブを利用している.

$$\varepsilon_{dut} = \frac{A + B}{(S_{11_open} - S_{11_ref})(S_{11_short} - S_{11_dut})}$$

$$A = \varepsilon_{ref}(S_{11_ref} - S_{11_short})(S_{11_open} - S_{11_dut})$$

$$B = (S_{11_open} - S_{11_short})(S_{11_ref} - S_{11_dut})$$
(1)



図 1 斜め切削開放終端同軸プローブ

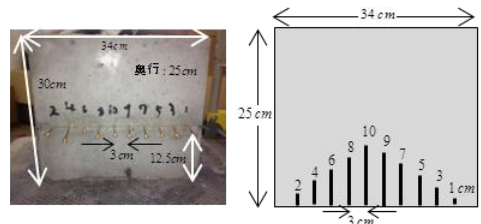
Fig. 1 Obliquely cut open ended coaxial probe.

式 (1) において, 添え字の *open*, *short*, *ref* 及び *dut* は同軸プローブの先端を開放, 短絡, 参照媒質及び測定媒質 (device under test) に挿入を意味する. 本研究では参照媒質には精製水を用いており, 測定媒質はコンクリートである. 自作した OCP による比誘電率の測定結果は, 市販の同軸プローブとソフトウェアによる比誘電率の測定結果と一致することを確認している. なお, 埋め込む前に全てのプローブと校正用プローブに対して *open*, *short*, *ref* の S_{11} を計測しておき, 測定のために校正用プローブの *open*, *short*, *ref* の S_{11} の値が変動していないことを確認している. また, プローブの 90°C までの温度耐久性も確認している. しかしながら, コンクリート凝固によるプローブ断面への応力ひずみの影響は検討しておらず, 今後の課題である.

3. 試験体と比誘電率の測定

図 2 に試験体 I の形状とプローブの配置を示す. $30 \times 34 \times 25 \text{cm}^3$ のコンクリートブロック中に長さ異なる 10 本のプローブを深さ 1cm 刻みで, 1cm ~ 10cm まで 3cm 間隔で挿入した. コンクリートは標準配合比である水 : セメント : 砂 = 1 : 2 : 6 で作成した. プローブの先端には抜けることを防止するためにビニールテープで返しを付けた.

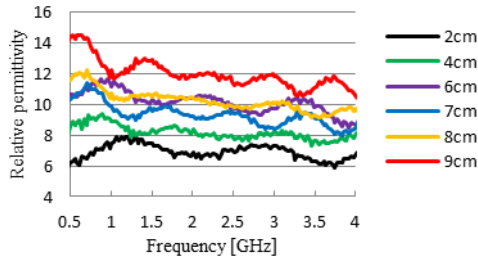
図 3 に試験体を作成後 45 日目の比誘電率の周波数特性を示す. プローブ 1cm, 3cm は VNA のケーブルを繋ぎ替える際にケーブル部分が曲がってしまい, 正確な測定ができなくなった. プローブ 5cm は 6cm の結果に重なっていたため描いていない. 図より周波数が高くなるに連れて, 比誘電率は振動しながら小さくなっていくことがわかる. 比誘電率は周波数が高いほど小さく, そして埋設深さが深いほど大きくなること



(a) コンクリートブロック (b) プローブの配置
(a) Concrete block (b) Layout of OCP

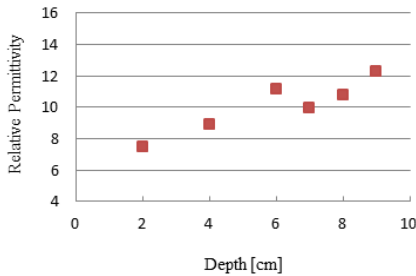
図 2 試験体 I

Fig. 2 Device under test I.



(a) 周波数特性

(a) Characteristic of frequency



(b) 埋込深さ(1.01GHz)

(b) Embedded depth(1.01GHz)

図 3 比誘電率の特性 (45 日)

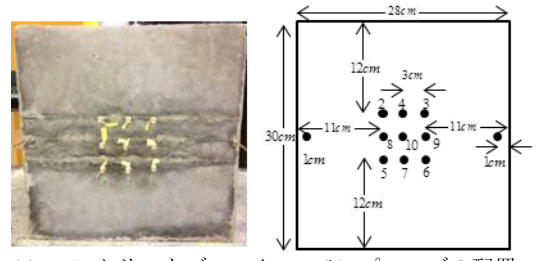
Fig. 3 Characteristic of relative permittivity (45 days).

が理想であるが、図 3 では、理想的な曲線が得られていない。理由は、コンクリートはプローブの表面からだけでなく側面からも乾いていくこと、試験体を作成する際にコンクリートが均質になっていないこと、プローブの断面とコンクリートとの接触面に空気が存在した可能性があることなどが挙げられる。

なお、式 (1) により複素誘電率の虚部も測定できているが、レーダ法による鉄筋探査に直接的に影響を与える比誘電率の実部のみを議論している。虚部の深さ依存性や経日変化は実部のそれと同様である。

図 4 に示すように側面から乾いてくる影響を取り除くために、プローブの埋め込みを試験体の中心に集中させた試験体 II を作成した。コンクリートが一様になるように攪拌にも細心の注意を払った。また、埋め込み深さ 1cm のプローブは側面からの深さが 1cm となるように深さ 12.5cm だけ埋め込んだ。

図 5 に試験体 II を作成後 38 日目の比誘電率の周波数特性を示す。プローブ 2cm, 4cm は比誘電率の値が他の深さの曲線と重なっており、3cm は比誘電率の値が非常に小さな値になっているため示していない。図より試験体 I と比べて周波数の変化に対する小さな振



(a) コンクリートブロック

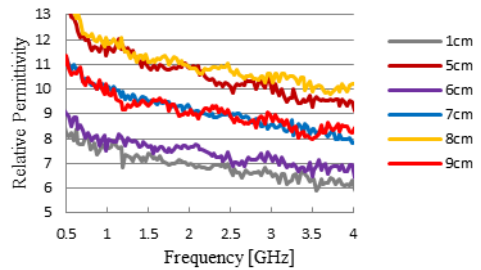
(b) プローブの配置

(a) Concrete block

(b) Layout of OCP

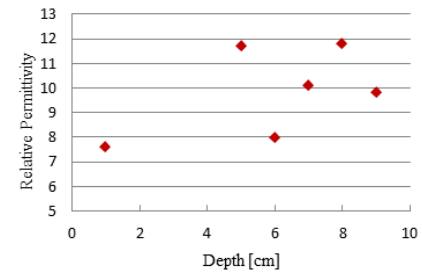
図 4 試験体 II

Fig. 4 Device under test II.



(a) 周波数特性

(a) Characteristic of frequency



(b) 埋込深さ(1.01GHz)

(b) Embedded depth(1.01GHz)

図 5 比誘電率の特性 (38 日後)

Fig. 5 Characteristic of relative permittivity (38 days).

動が軽減され一様な周波数分散特性が得られていることが分かる。しかしながら、比誘電率の値は深さが増えるにつれて単純に大きくなるという理想的な深さ特性を観測できていない。この理由はプローブの測定断面に細骨材(砂)が密着している為である。細骨材の直径は大きいもので 2mm 程度であり、プローブの測定断面と同程度の大きさである。また、乾燥砂の比誘電率は 2~3 であるため、これが同軸プローブの測定断面に密着した場合、セメント部分の比誘電率とな

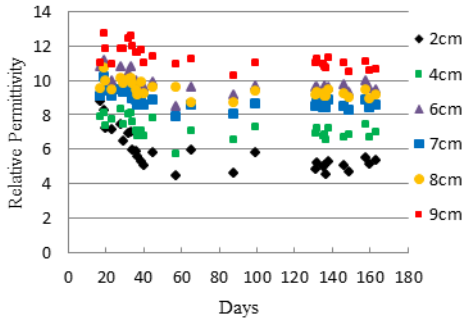


図 6 比誘電率の経日変化
Fig. 6 Variation per day of permittivity.

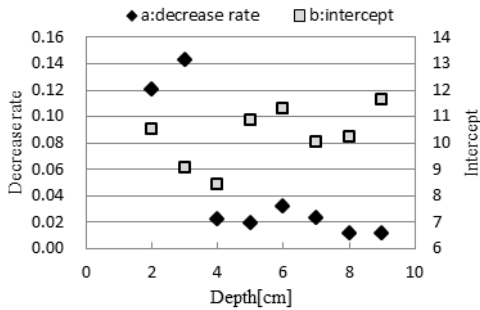


図 7 比誘電率の平均減少率 (17~40 日)
Fig. 7 Average decrease rate of permittivity (17~40 days).

らず比誘電率の値は小さくなってしまふ。このことは、細骨材を加えずに水とセメントだけで比誘電率の変化を観測することによって明らかにした。しかしながら、通常のコンクリートは細骨材が含まれているため、細骨材を除いたコンクリートで比誘電率の分布を調べても意味がない。

図 4 の試験体 II の 1.01GHz に対する比誘電率の経日変化を図 6 に示す。

図 6 より試験体作成から 40 日程度経過するまでは比誘電率の値は小さくなっているが、40 日を経過すると、比誘電率の減少率は極端に小さくなるのが分かる。したがってコンクリート打設から 6 週間程度で比誘電率の分布が形成されることが予想される。これを確かめるために、図 7 にコンクリートの打設後 17 日から 40 日目までの比誘電率の値の変化から比誘電率の 1 日当たりの平均減少率と切片を示す。ここで、平均減少率は各埋め込み深さに対して図 6 の測定データを用いて、比誘電率 ϵ_r を打設日からの経過日数 N_d の 1 次関数として直線近似 ($\epsilon_r(N_d) = -aN_d + b$) したときの傾き a の値をいう。 b は切片である。図 7 よ

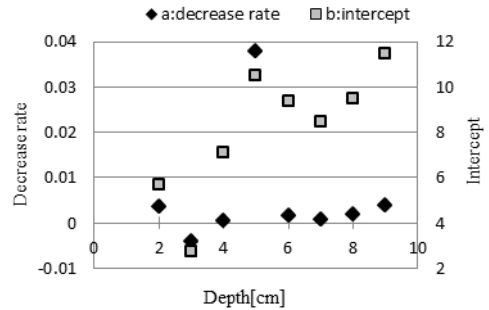


図 8 比誘電率の平均減少率 (45~163 日)
Fig. 8 Average decrease rate of permittivity (45~163 days).

り、平均減少率は埋め込み深さが深くなるにつれて小さくなっていることが分かる。図 8 にコンクリートの打設後 45 日から 163 日間の比誘電率の 1 日当たりの平均減少率と切片を示す。図 8 の平均減少率の値は深さ 5cm の値を除くと図 7 のそれと比べて約 1/10 の大きさであることが分かる。このことはコンクリートの打設から 6 週間程度でコンクリートの電気定数は安定した状態になり、その後は緩やかに減少していくことを示している。

4. 比誘電率分布の推定

4.1 40 日までの比誘電率分布の推定

コンクリートの比誘電率分布を求めるために前節で求めた平均減少率を利用することにする。

図 7 で示した深さに対する比誘電率の平均減少量を指数関数で近似すると次式を得る。

$$f(x) = 0.1295e^{-0.297x} \quad (2)$$

ここで、 x は表面からの深さである。これ以降で現れる x は全て表面からの深さを表す。比誘電率の平均減少率を指数関数で近似した理由は、ある程度の深さになると、表面から乾いてくる影響はほとんどなくなり、比誘電率の値の深さによる変化は零になると考えたことによる。式 (2) を使用すると比誘電率の分布は次式で表すことができる。

$$\epsilon_{r1}(x, N_d) = \epsilon_{r0} - f(x)N_d \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{r0} はコンクリートが凝結直後の比誘電率の値であり、 N_d ($N_d \leq 40$) は打設日からの経過日数である。セメントと水を練り混ぜた後で凝結する前の状態を生コンと呼び、その状態の比誘電率は 20 以上である。生コンはセメントと水の水和反応によって次第

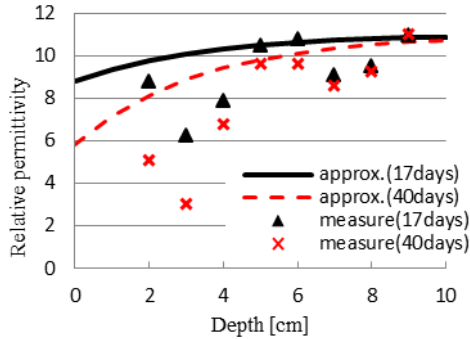


図9 比誘電率の深さ依存
Fig. 9 Depth dependence of permittivity.

に流動性を失い硬くなる。この間発熱、膨張、収縮を行う。コンクリートが凝結するまでの電気定数の値の変化は不明であるため、 ϵ_{r0} はコンクリートが凝結直後の比誘電率の値と考えることが妥当である。図9に式(3)を用いて、打設後17日と40日の1.01GHzの比誘電率の深さ依存を示す。実線及び破線はそれぞれ打設後17日及び40日の式(3)による計算値、 Δ 及び \times のマーカは打設後17日及び40日の実測値を表す。 ϵ_{r0} は打設後17日の比誘電率の計算値が実測値を超えない11.3と設定している。図9では計算値と実測値の差が大きいに思われるが、前述したように実測値はプローブの測定面に細骨材が密接していると、実際の比誘電率の値よりも小さくなることによる。図9は打設からの日数によって比誘電率の値が大きく変わるので、コンクリートレーダによってかぶりを測定するときには、打設後の日数によって、適切な比誘電率の値を設定しなければならないことを示している。

4.2 45日以降の比誘電率分布の推定

図8の測定結果から比誘電率分布の近似式の推定を行う。図8において、深さ3cmの測定値は比誘電率の切片が負になっており、また深さ5cmの平均減少率は他の深さと異なり非常に大きな値であるため、これらの測定点を比誘電率分布の推定から除外した。まず、1日当たりの平均減少量から近似曲線を指数関数で近似すると次式を得る。

$$a(x) = 0.0002e^{0.3038x} \quad (4)$$

次に各深さに対する切片の近似曲線を対数関数で近似すると次式を得る。

$$b(x) = 4.0153 \ln(x + 0.975) + 1.12 \quad (5)$$

式(4)、(5)より打設から N_d 日($N_d \geq 45$)の比誘電

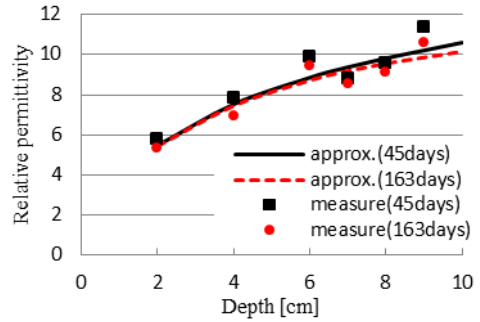


図10 比誘電率の深さ依存
Fig. 10 Depth dependence of permittivity.

率分布は次式で与えられる。

$$\epsilon_{r2}(x, N_d) = b(x) - a(x)N_d \quad (6)$$

打設日から40日までの比誘電率の近似式(3)では、凝結直後の比誘電率は深さに対して一様だと考えられるため、比誘電率の時間変化を直線近似したときの切片を定数 ϵ_{r0} とした。しかし、打設日から45日経過後の比誘電率の近似式(6)は、45日の時点では既に比誘電率の値に深さ依存性が存在するので、切片も深さの関数とした。なお、測定値と近似関数との2乗誤差が最小になるように、直線、2次関数、指数関数、累乗関数、対数関数の中から対数関数を選択した。

図10に式(6)を用いて、打設後45日と163日の1.01GHzの比誘電率の深さ依存を示す。実線及び破線はそれぞれ打設後45日及び163日の式(6)による計算値、 \blacksquare 及び \bullet のマーカは打設後45日及び163日の実測値を表す。図10より、打設後45日を経過していればその後の変動はわずかであることが確認できる。

図9、10より、近似式(3)による40日後の比誘電率分布と近似式(6)による45日後の比誘電率の分布には浅いときに大きな差が生じている。平均変化率を求める際に打設後40日までと45日以降で別々に評価したためである。そこで、式(3)の40日目の近似式を使用して、式(6)を次のように変形する。

$$\epsilon_{r3}(x, N_d) = \epsilon_{r1}(x, 40) - a(x)(N_d - 40) \quad (7)$$

図11に式(7)を用いて、打設後45日と163日の1.01GHzの比誘電率の深さ依存を示す。実線及び破線はそれぞれ打設後45日及び163日の式(7)による計算値、 \blacksquare 及び \bullet のマーカは打設後45日及び163日の実測値を表す。図11の計算値と実測値とは大きく異なっている。しかし、打設後154日の1GHzの表面

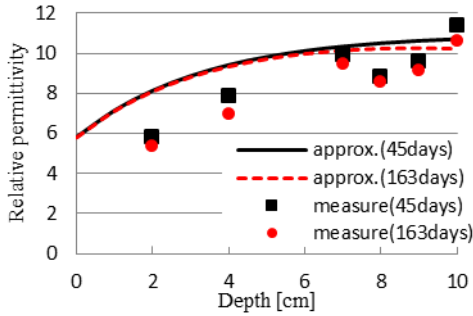


図 11 比誘電率の深さ依存
Fig. 11 Depth dependence of permittivity.

の比誘電率をアジレントの固体用誘電体プローブにより計測した結果 5.9 であり、式 (7) によって求めた表面の比誘電率は 5.8 であることを考慮すると、式 (7) で定義した近似式の方が、実際の比誘電率分布に近いと考えている。

以上より、OCP による比誘電率の測定では、プローブの観測面近傍に砂などの細骨材が存在すると比誘電率は小さな値となるが、比誘電率の 1 日当たりの平均減少率を用いて比誘電率分布の近似式を求めることができる。

5. 比誘電率分布のかぶり探査への影響

比誘電率の誤差がコンクリートレーダによるかぶり推定に与える影響について検討する。送信アンテナと受信アンテナの距離が $2l$ [cm] のコンクリートレーダを使用し、かぶりが h [cm] の鉄筋による反射波の到達時間 τ [s] について考える。送信アンテナと受信アンテナの中心の位置が鉄筋の真上にあるとき、到達時間は最短となり、式 (8) で与えられる。

$$\tau = \sqrt{\bar{\epsilon}_r(h, N_d)} \frac{2\sqrt{h^2 + l^2}}{c} \quad (8)$$

ただし、

$$\bar{\epsilon}_r(h, N_d) = \frac{1}{h} \int_0^h \epsilon_r(x, N_d) dx \quad (9)$$

であり、 $\bar{\epsilon}_r(h, N_d)$ はコンクリート打設後 N_d 日の深さ h までの比誘電率の平均値である。また、 c は真空中の光の速さである。図 12 にかぶりが 5cm と 10cm のときの平均比誘電率の経日変化を示す。鉄筋からの反射波の到達時間 (8) はかぶりまでの平均の比誘電率 (9) の値によって変化する。式 (3) によれば、打設から 17 日目において、かぶりが 5cm の平均比誘電率

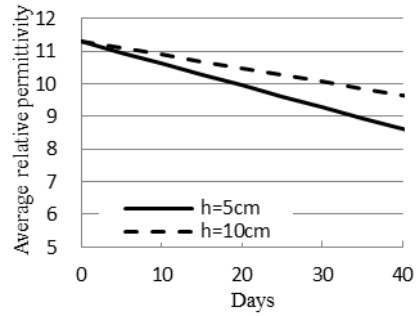


図 12 平均比誘電率の経日変化
Fig. 12 Variation per day of average permittivity.

は 10.15 であるため、到達時間は 1.361ns となる。打設後 40 日目には比誘電率は 8.60 となり、到達時間は 1.253ns となる。したがって到達時間差は 0.108ns である。同じかぶりに対してこの到達時間差はかぶりの推定に誤差を与える。すなわち、打設から 40 日目にもかかわらず、比誘電率を 10.15 と仮定して、かぶりを推定した場合かぶりは 4.33cm となり、誤差 0.67cm である。逆に打設から 17 日目にもかかわらず、比誘電率を 8.60 と仮定してかぶりを推定した場合、かぶりは 5.69cm となり、誤差 0.69cm となる。これらの誤差は比誘電率の経日変化を考慮することにより、ある程度取り除くことができると考えられる。

また、比誘電率が一律でないことは複鉄筋の探査時により大きな影響を与える。複鉄筋とは、コンクリート構造中に異なる深さで鉄筋が埋められている構造である。例えば、表面近くにある鉄筋の深さが 5cm で、表面から離れた所にある鉄筋の深さが 10cm の場合、打設後 40 日において深さが 5cm 及び 10cm までの平均の比誘電率はそれぞれ 8.60 及び 9.65 である。コンクリートレーダで 10cm の位置の鉄筋からの反射波が観測できたとしても、その深さを推定するとき、比誘電率を 8.60 とした場合、5cm の鉄筋は正しく推定されるが、10cm に埋設されている鉄筋の深さは 10.99cm と推定され、0.99cm の誤差が生じることとなる。この場合も比誘電率分布の近似関数を探査アルゴリズムに組み込むことにより、複鉄筋の探査精度の向上が期待できる [10]。

6. む す び

本論文では、コンクリート構造物中の鉄筋探査の精度向上のために、コンクリートの比誘電率の深さ依存性と時間依存性について議論した。

コンクリート試験体に直接複数の斜め切削開放終端同軸プローブを埋め込み、非破壊で比誘電率の深さ分布と経日変化を観測した。比誘電率の経日変化より、コンクリート打設後 40 日程度までは 1 日当たりの比誘電率の減少は大きい、それ以降の比誘電率の減少は 1/10 程度に小さくなることを明らかにした。なお、同軸プローブの先端に細骨材が密着したときには比誘電率の値は小さく測定されるため、直接的に比誘電率を計測することができなかった。しかし、1 日当たりの比誘電率の平均減少率の深さ依存性が得られたため、これを利用して打設後 40 日までと 40 日以降の比誘電率分布の近似式を提案した。コンクリートの比誘電率は経日より連続的に変化するものと考えられるため、比誘電率の経日変化の近似式は一つの関数で与えられるべきである。しかしながら、本論文では測定した全期間に対して比誘電率の経日変化を一つの関数で近似できる近似関数を求めることができなかつたため、近似式を打設後 40 日を基準に二つの近似式に分けることにした。なお、本論文の結果は水：セメント：細骨材(砂) = 1 : 2 : 6 のときの結果であるため、配合比を変えたときの比誘電率分布に対する影響を調べることは今後の課題である。また、比誘電率の深さ分布と経日変化を鉄筋の位置推定に考慮することにより、鉄筋の探査精度が改善されることを示した。本論文では、試験体は 2 種類しか示していないが、円柱状試験体を含めて他に 6 個の試験体を作成し、深さ方向の比誘電率の減衰率が同程度の値になることを確かめている。

比誘電率分布を打設後の日数によらず、一つの関数で近似できる関数を提案すること、同軸プローブ先端の観測面積を広くし、比誘電率の測定精度を向上させること、比誘電率分布の深さ依存性を直接測定する方法を提案することは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は科研費(基盤研究(C):課題番号 26420461)の助成によることを付記し、謝意を表す。

文 献

- [1] 三加 崇, 藤田 学, 浅井 洋, 玉置一清, 斯波明宏, “鉄筋探査機器の測定精度の評価,” 三井住友建設技術開発センター報告, vol.2, no.3, 2004.
- [2] 中村英佑, 森濱和正, 山口順一郎, 松塚忠政, “鉄筋径を利用した非破壊試験による比誘電率分布とかぶりの推定,” JCI コンクリート工学年次論文集, vol.27, no.1, pp.1801-1806, March 2005.
- [3] 竹田宣典, 榎原泰造, 十河茂幸, “かぶり, 鉄筋位置の非破

壊試験における測定誤差に関する検討,” コンクリート工学年次論文集, vol.27, no.1, pp.1807-1812, March 2005.

- [4] 国土交通省大臣官房技術調査課, “非破壊検査によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領,” March 2012.
- [5] (独) 土木研究所, “電磁波レーダー法における鉄筋の位置とかぶり測定が困難な場合の対処方法,” <http://www.pwri.go.jp/jpn/results/offer/conc-kaburi/kaburi.taisyu.pdf>, 2007.
- [6] (独) 土木研究所, “電磁波レーダー法による比誘電率分布(鉄筋径を用いる方法)およびかぶりの求め方,” <https://www.pwri.go.jp/team/structure/download/kaburi.pdf>, 2007.
- [7] 田中俊幸, 眞弓雄一郎, 竹中 隆, “時間フィルタ法と複鉄筋探査への応用,” コンクリート工学年次論文集, pp.1817-1822, July 2006.
- [8] 田中俊幸, 眞弓雄一郎, 竹中 隆, “電磁波レーダを用いた鉄筋の位置・半径とコンクリートの比誘電率の同時推定,” JCI コンクリート工学年次論文集, vol.29, no.2, pp.775-780, July 2007.
- [9] 道山哲幸, 二川佳央, 銀野秀三, “刺入性の優れた終端開放同軸プローブによる半固体状媒質の複素誘電率測定,” 信学論(C), vol.J93-C, no.5, pp.167-174, May 2010.
- [10] 遠江一仁, 田中俊幸, 竹中 隆, 森山敏文, “比誘電率分布を考慮した合成開口処理による鉄筋の推定,” 信学技報, SANE2014-118, Jan. 2015.
(平成 27 年 12 月 21 日受付, 28 年 4 月 18 日再受付, 8 月 9 日公開)



田中 俊幸 (正員)

1984 長崎大・工・電子卒。1989 九大大学院博士後期課程了。同年長崎大学工学部講師に着任。現在、長崎大学工学研究科准教授。以来、電磁波レーダを利用した非破壊検査装置の研究開発に従事。工博。電気学会、コンクリート工学協会各会員。



遠江 一仁 (正員)

2013 長崎大学・工学部卒。2015 同大学院工学研究科博士前期課程了。現在、セントラル硝子株式会社にて自動車用ガラスアンテナの開発に従事。



森山 敏文 (正員)

1972年1月生, 94年新潟大学工学部情報工学科卒, 98年同大学院博士課程了. 博士(工学). 98年4月富士通株式会社入社, 03年~05年独立行政法人通信総合研究所専攻研究員, 06年独立行政法人宇宙航空研究開発機構招聘研究員, 07年長崎大学工学部電気電子工学科助手, 現在同大学院工学研究科准教授.



竹中 隆 (正員)

昭48九大・工・通信卒. 昭53同大学院博士課程単位修得退学. 同年同大・工・助手. 昭60同助教授. 平元長崎大・工・教授, 平27長崎大定年退職. この間, 光伝送及び電磁波の順/逆散乱に関する研究に従事. 工博.