

コンクリートクラック深さ測定のための電気的破壊検査法の検討

東北職業能力開発大学校

東北学院大学 工学部

”

奈須野 裕

芳賀 昭

梶山 知宏

Examination of The Electric Non-Destructive Test Method
of A Concrete Crack Depth Measurement

Hiroshi NASUNO and Akira HAGA, Tomohiro KAJIYAMA

要約 一般的に土木建造物は鉄筋コンクリートによって作られているが、クラックから浸入した雨水は鉄筋を腐食しコンクリート構造物の耐久性を著しく低下する。このためコンクリートクラックが表面からどの程度の深さまで伸びているかを知る必要がある。

本研究では、クラックに導電性液体や導電性粉末を溶剤に混合したものを圧入して、モノポールアンテナの原理を利用して共振周波数を用いた周波数ドメインでの測定法により、クラック深さの測定を非破壊的に推定した。またこの実験を確認するためFDTD法によりシミュレーションを行い、実験の妥当性を確認した。

I はじめに

近年急速に整備されてきたわが国の土木建造物も今後、経済の成長があまり期待できない状況では、新設の事業計画はかなり難しいと考えられ、コンクリート構造物の既存の建造物を大切に、長持ちさせることが極めて重要である。このため重大事故の発生を未然に防止し安全性を保つために、コンクリート構造物の性能の劣化を診断できる技術開発は緊急の課題である⁽¹⁾⁽²⁾。

従来、コンクリートクラックの深さの非破壊検査法としては、目視や打音による他に、超音波法とX線造影撮影法が用いられていた。超音波法は、超音波を入力し受信子までの到達時間からクラックの深さを判定する方法であるが、鉄筋を結合させた複合構造である鉄筋コンクリートやアスファルト舗装で覆われたコンクリート橋架床板上部のような複合体の場合には、弾性波の伝搬速度が大きく異なり誤差が生じ、精度が著しく悪く実用に適さない場合もある。また、X線造影撮影法においては、かなりの精度で微細なクラックを非破壊で計測可能であるが、現在のX線装置の出力

エネルギーの関係からみると、0.3m程度の厚みのコンクリート構造物のクラックの計測が限界である。また、ダムやトンネルなどのコンクリート擁壁のように、構造物の裏にX線フィルムを設置できない場合では、この方法は使用できない。このためコンクリート表面から、非破壊的にクラックの検査深度が深く、高精度かつ作業性に富んだ検査法の開発が望まれている。

このような状況を背景に、我々はコンクリートクラック深さを非破壊的に推定することを目的として、E型コアやV型コア励磁による磁気的破壊検査法を提案した^{(3)~(5)}。しかし、推定できるクラックの深さはE型コアの長さの1/2であるため、深いクラックを計測するにはコアの形状が大型になり設備も大型化してしまう問題があった。

本研究では、クラックに導電性液体や導電性粉末を溶剤に混合したものを注入し、モノポールアンテナの原理を用いて共振周波数、入力インピーダンスを測定してクラック深さを推定した。クラックには線状の場合と幅のある板状の場合を考慮して行っている。今回これらの実験結果とFDTD法によるシミュレーション解析を行い比較した結果について報告する。

II モノポールアンテナの原理による コンクリートクラックの測定法

今回提案したコンクリートクラック深さの電氣的非破壊検査法は、Fig.1の原理図に示すように、コンクリート表面からクラックに導電性液体あるいは導体粉を注入している。また、コンクリート表面にはアルミニウム等の導体板を設置し、アースの機能をもたせた。そして、ネットワークアナライザ (HP 8757C) により、クラックに注入した導体とアース板間のインピーダンス及び共振周波数を測定する。

この場合、コンクリートクラックとコンクリート表面のアース板はコンクリート誘電体中の一種のモノポールアンテナを形成しているとみなすことができるので、クラック深さ (モノポールアンテナの長さ) を L とすると $\lambda/4$ の周波数で共振する(1)式の関係が成り立つ^{(6)~(8)}。ただし、コンクリートの導電率 σ は 0 S/m とする。

$$L = \lambda/4 = c / (4 \times f_0 \times \sqrt{\epsilon_s}) \quad (1)$$

ただし、 f_0 : 共振周波数[Hz]
 c : 光速($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 ϵ_s : コンクリートの比誘電率

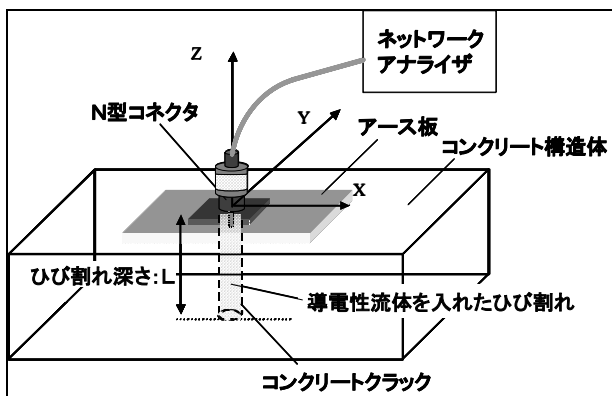


Fig.1 コンクリート中のクラック深さ測定法

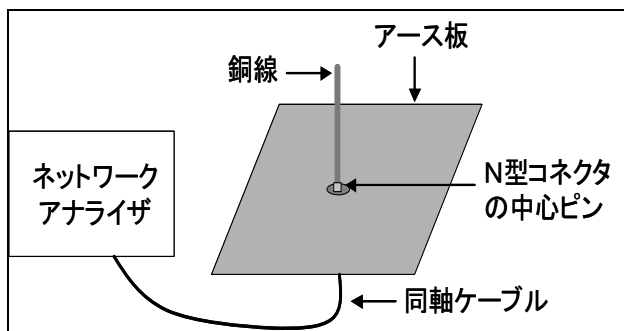


Fig.2 銅線アンテナを使用した実験装置

これよりネットワークアナライザで共振周波数 f_0 を測定し、コンクリートの比誘電率が既知ならば、クラック深さ L を推定できる。

この電氣的非破壊検査法の基礎的実験として、アース板上に立てた銅線を用いて、これをモノポールアンテナとして、空気中とコンクリート中での共振周波数を測定し、これよりクラックに見立てたアンテナの長さを正確に測定できるかを調べている。

具体的なモノポールアンテナ法を用いた測定の実験方法をFig.2に示す。厚さ2mmの正方形アルミ板の中心に、N型コネクタの中心ピンが通るように穴を開け、そこにN型コネクタを固定する。次に、N型コネクタの中心ピンに直径2.5mmの銅線を接続する。そして、N型コネクタとネットワークアナライザを同軸ケーブルで接続する。

これは前述のように、銅線をアンテナ導体、アルミ板をアース板としたモノポールアンテナを形成していると見なせる。そして同軸ケーブルに接続したネットワークアナライザにより入力インピーダンスを測定した。このとき、入力インピーダンスの虚部が零になる周波数を共振周波数とした。そこからアンテナの共振周波数を求め、クラックに見立てたアンテナの長さを(1)式より算出する。

銅線の長さ L は 0.075m から 0.750m の範囲で変えて測定した。またアース板面積による測定精度の違いを調べるためにアース板の大きさも変えて測定した。アース板は正方形で $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 、 $0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$ 、 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ 、 $0.35\text{m} \times 0.35\text{m}$ 、 $0.50\text{m} \times 0.50\text{m}$ 、 $0.75\text{m} \times 0.75\text{m}$ 、 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$ の7種類の正方形アルミ板を使用した。この実験装置を使い、媒質が空気中とコンクリート中の結果を比較検討し、基礎的なモノポールアンテナ動作を調べた。

その結果、正方形アルミ板の一辺がアンテナ長さの2倍以上あれば共振周波数と入力インピーダンスは一定となり、アース機能を有することがわかった。さらに実際のコンクリートのクラックは線状ではなく幅のある板状の形をしている。よって実験では、先に述べた銅線によるモノポールアンテナの原理を用いた測定法と全く同じ方法で、銅線を銅板に変更して基礎的実験を行い共振周波数、インピーダンスを測定している。これらの結果から、銅板の幅が小さいときには銅線とほぼ同じ共振周波数が得られ、幅が大きくなるとコンクリート中での共振周波数は最大で16%程度まで変化することが分かった。また、コンクリート中での共振周波数は、空気中に比べ $1/2.5 \sim 1/3.5$ 程に低下した。

これは媒質であるコンクリートの比誘電率や導電率によるものと考えられる。

銅板での入力インピーダンス実部と銅板の横幅に対する特性は、実験の結果から空気中と同様に銅板の幅を大きくなるほど共振周波数における入力インピーダンスの実部は低下していく傾向が見られた。それゆえ、クラックモデルとしては線状ではなく幅のあるモデルで考察する必要がある。

III FDTDによる解析手法

モノポールアンテナ法を用いた実験を検証するため、モデルクラックのアンテナ導体に銅板を使用しモノポールアンテナの原理を用いた電気的破壊検査法の実験結果をFDTD法(CRC MAGNA/TDM)により解析した。

FDTD(Finite Difference Time Domain Method)法とは、マクスウェルの方程式を時間、空間で差分化し、解析空間の電磁界を電界と磁界を交互に計算する方法を用いて時間的に更新して出力点の時間応答を得る方法である。従って過渡解あるいは周波数応答を直接求めることができる。

FDTD法では、Fig.3に示すように電界はセルの各辺に沿って、磁界は面の中心に垂直に割り当てる。このように配置することによって、電界の回転が磁界を、磁界の回転が電界を与えるというマクスウェルの方程式を満足する配置となる。また、差分法と有限要素法では2階の偏微分を扱うが、FDTD法では1階偏微分により計算を行っている。このようにFDTD法はアルゴリズムが簡単であること、優れた精度を持つこと、複雑な物質の解析や材料定数の異なる物質の解析にも適していることなどが知られている。特に誘電体の解析でも誘電率やタイムステップ数などの定数を変えるだけで良く、比較的簡単に解析ができる。

次に今回作成したコンクリートクラックをモノポールアンテナに見立てたモデル作成について記述する。

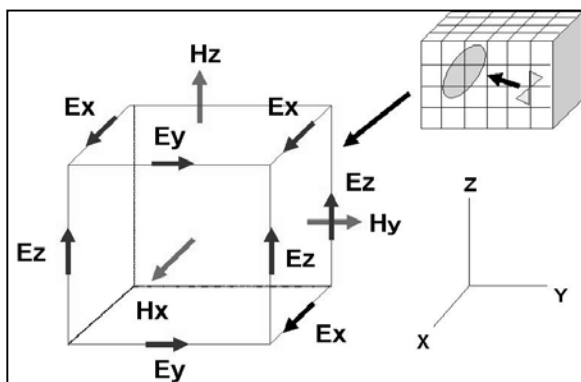


Fig.3 電磁界の配置

本解析では、コンクリートブロックと銅線、銅板のモデルを作成し、コンクリートの比誘電率や導電率、及び銅板の幅を変化させて、共振周波数や入力インピーダンスがどう変化するかを調べた。

今回解析でモデル化した解析モデルの1つをFig.4に示す。銅板での解析条件設定は以下のようにコンクリートブロック[X×Y×Z]:寸法 0.2m×0.2m×0.2m 銅板[Y×X]:寸法 0.075m×0.025m, 0.075m×0.05m, 0.075m×0.075mである。作成アース板[X×Y×Z]の寸法は500mm×500mm×2mmと実験に合わせている。

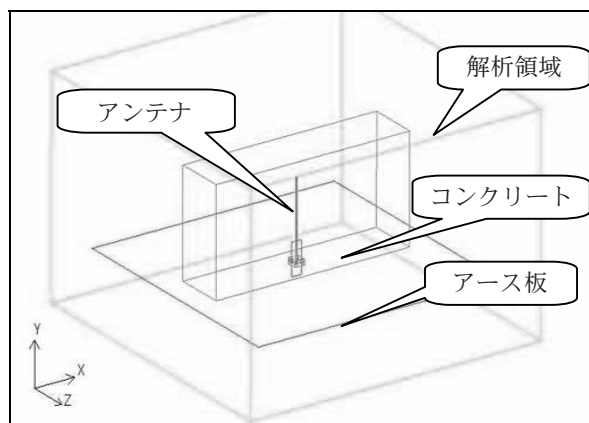


Fig.4 解析モデル

解析モデル作成においては、FDTD法は差分が基本であるから、セルサイズは細かければ細かいほど高い精度の結果を得ることができる。しかし、解析に時間がかかるため今回は下記の設定で行った。

- ・φ2mmの隙間を1mmセルで分割
- ・周りの空間は30mmセルで分割 (これはターゲット周波数を1GHzとし、その1/10λの寸法)
- ・上記のセル寸法に開きが大きいため、セル寸法の調整領域を設定

これより解析では、セル分割数が約27,000セルになった。次に吸収境界条件およびコンクリートの材料設定を行う。解析領域が完全導体で囲まれているような閉領域の問題では、吸収境界条件は必要としないが、アンテナ解析などの開放領域では、解析領域を仮想的な境界で領域を閉じておく必要がある。境界条件が完全でないと反射波が解析領域に戻り、誤差の原因となる。

また、今回のアンテナモデルなどのような電界に対応した解析では、条件の設定として比誘電率と導電率を入力する。

FDTDで使用する励振パルスはガウス波で、周波数スペクトルが滑らかで定式化が容易である。今回アンテナへの入力にはAIRGAP給電でガウス波を入力。このガウス

波は $f = 1\text{GHz}$ までの周波数成分を含む設定にした。

$$\text{分散 } \alpha = (4f)^2 = 1.6 \times 10^{19}$$

$$T_o = 1/f = 1 \times 10^{-9} \quad (\text{持続時間})$$

$$T_e = 5/f = 5 \times 10^{-9} \quad (\text{終了時間})$$

Fig. 5は、このガウス波の入力画面とパルス波の波形である。ここでの計算のステップ数は下記のように設定している。

- ・ 時刻刻み $\Delta \text{time} = 2.2 \times 10^{-12} \text{ sec}$
- ・ ガウス波が十分通過する時間が必要であるため STEP数を約=2000と決定 ($T_e / \Delta \text{time}$)

解析時間は時刻刻み Δtime を細かくすると多くの時間が掛かるので、内容を検討してはじめは荒く計算した方が時間に無駄がない。予想と同じ結果であれば詳しく解析を試みる。

Fig.6は、解析から求めた入力インピーダンスの結果をグラフデータ処理するための画面である。FDTD法により解析した結果より、求める入力インピーダンスの経路（電圧経路、電流経路等）を選択、次に表示周

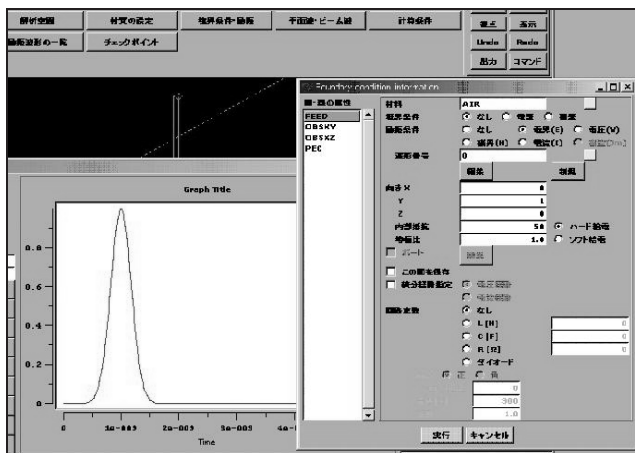


Fig.5 ガウス波設定画面

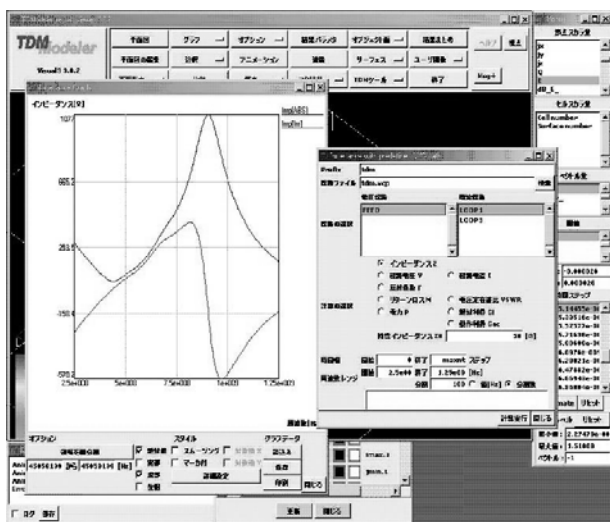


Fig.6 解析結果のグラフデータ処理画面

波数レンジを設定して、計算を実行するとインピーダンスの実部と虚部の両方が表示される。

このときすべての結果を保存すると膨大なメモリが必要となるので、目的に応じ必要となる部分を保存することが実用的である。FDTD法はアンテナの解析法としては時間がかかるという欠点を持つが、計算機の進化に伴って近年かなり注目されている方法である。

IV FDTD法による解析結果

実験を行った結果から、空気中 ($\epsilon_s = 1$) では理論式 $f_o = c / (4L)$ に近くなることがわかった。これよりIIの実験結果に従い、FDTD法による解析を行い共振周波数と入力インピーダンスを求めた。

1 共振周波数の解析

Fig.7に銅板の導電率 $\sigma = 0.085 \text{ S/m}$ 一定にして、比誘電率 ϵ_s を6,8,10,12と変化した場合の共振周波数と比誘電率の特性結果を示す。この図からも分かるように比誘電率が大きくなるに従い共振周波数は低くなって行く。これは(1)式で示した $\sqrt{\epsilon_s}$ の成分が、効いてくるためであり式と一致している。

また、比誘電率 $\epsilon_s = 10$ 一定にして、導電率 σ を0.06,0.08,0.1,0.12 S/m と変化した時の共振周波数と導電率の特性の解析結果をFig.8に示す。先の比誘電率の解析結果と同様に導電率は、(1)式の分母に依存しているために大きくなると共振周波数は低くなる。

次にネットワークアナライザを使用した実験で、虚部が零になる周波数を共振周波数とした結果から、FDTD法解析による解析結果と比較を行った。ただし、このとき銅板の幅Xは長さYで規格化して変化させている。実験から得た共振周波数の測定値と導電率 σ

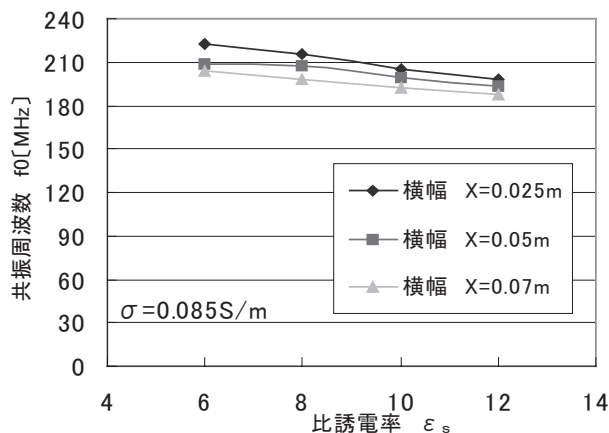


Fig.7 解析による共振周波数と比誘電率の特性

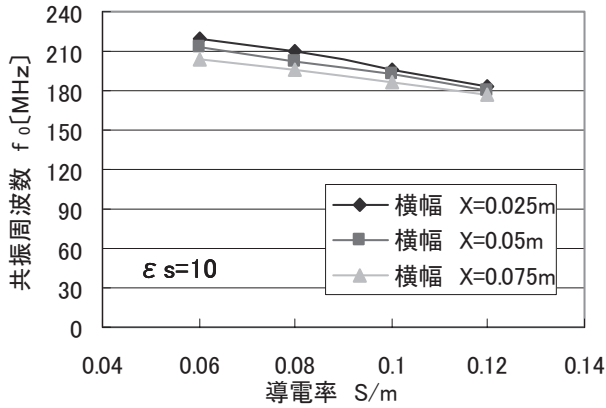


Fig.8 解析による共振周波数と導電率の特性

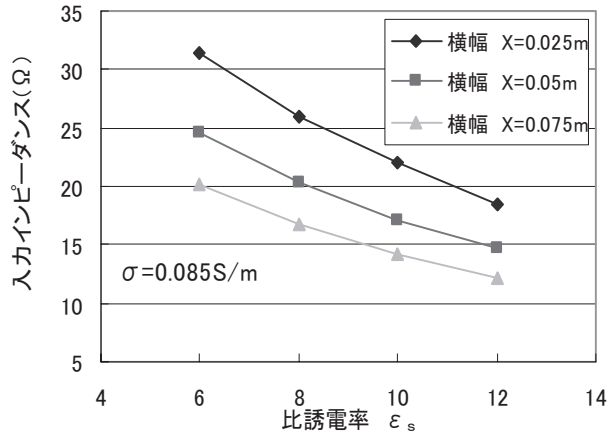


Fig. 10 解析による入力インピーダンスと比誘電率の特性

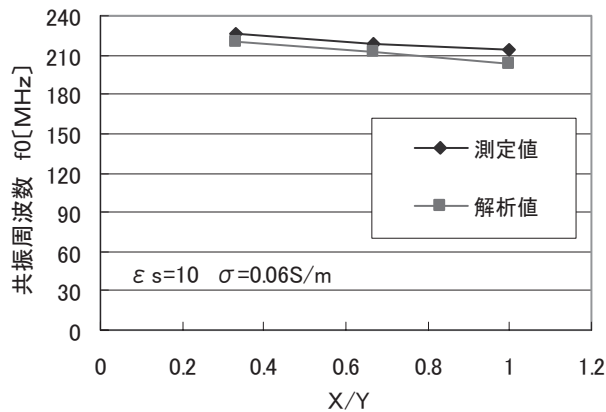


Fig.9 共振周波数の測定値と解析値の比較

=0.06 S/m、比誘電率=10の時の解析から得た共振周波数を比較したグラフをFig.9に示す。この結果から測定値と解析値は良く一致していると言える。このように銅板のX,Y寸法を含めた解析の共振周波数が実験値と良く一致したことは、解析によりコンクリートクラック深さが推測できると思われる。

2 入力インピーダンスの解析

実験で行った共振周波数（虚数部=0）時における、入力インピーダンス測定結果（実部）より、銅線の長さに対するインピーダンスの変化をFDTD法による解析結果と比較した。

共振周波数時の入力インピーダンス実部は、アース板面積や銅線長を変化させることにより変わる。しかし実験の結果から、銅線長に比較してアース板面積が十分に大きければ入力インピーダンスのばらつきが小さいことが分かっている⁽⁹⁾。この結果をもとにFDTD法による解析では、アース板を十分に広く取りモノポールアンテナの原理が応用できるようにして、解析を行っている。

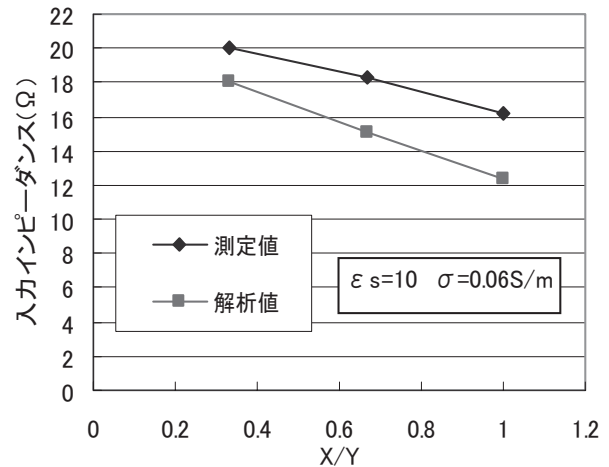


Fig.11 入力インピーダンスの測定値と解析値の比較

Fig.10は導電率 $\sigma=0.085\text{S/m}$ を一定にして、比誘電率 ϵ_s の違いによる入力インピーダンス変化を解析した結果である。これから分かるように比誘電率が大きくなるに従い入力インピーダンスが下がって行くことが理解できる。

次に実験から得られた入力インピーダンスの測定値と、導電率=0.06S/m、比誘電率 $\epsilon_s=10$ の解析結果から得た入力インピーダンスを比較したグラフをFig.11に示す。測定値と解析値の絶対値では、2~3(Ω)程度の誤差があるが、銅板の幅の増加とともに低下する傾向は実験と良く一致している。

FDTD法による解析の結果は、実測値に近い値を得ることができた。これより、解析で求めた値は実験を良くシミュレーションしていると考えられ、数多くの実験が出来ない今回の場合などに有効な手段と言える。

V FDTD法による解析結果からのモデルクラック深さの推定

先の(1)式は媒質となるコンクリートの導電率 σ が0S/mの場合の共振周波数とアンテナ長Lの関係を示したもので、導電率 σ が有限の誘電体中のモノポールアンテナとの関係は未知である。

そこでFDTD法による解析結果からアンテナ長Lを媒質の比誘電率 ϵ_s 、導電率 σ 、共振周波数 f_0 、モデルクラック(銅板)の長さに対する幅の比 p によって表示し推定する近似式を考えた。近似式は解析結果から得られたデータをグラフ化して、この近似曲線から推定式を算出したものである。

Lを求めるために必要な、モデルクラックの長さに対する幅の比 p を共振周波数における入力インピーダンス Z_0 を用いて求めると(2)式となる。

$$p = ((146.425 \epsilon_s^{-0.735} - 44.678 \sigma^{0.277} + Z_0) / 18.859)^{-1/0.33} \quad (2)$$

ただし

- Z_0 : 共振周波数における入力インピーダンス
- ϵ_s : コンクリートの比誘電率
- σ : コンクリートの導電率
- p : モデルクラック(銅板)の横幅と縦の長さの比(X/Y)

この p を用いてアンテナ長Lを求める式が(3)式になる。

$$L = c / (4 \times f_0 \times (2.5769 \epsilon_s^{0.17} + 1.7258 \sigma^{0.24} + 0.20306 p^{0.0663})) \quad (3)$$

ただし

- c : 光速(3.0×10^8 m/s)

これらの(2)、(3)式の妥当性を確認するため使用した、共振時における入力インピーダンスと共振周波数の解析値をTable1、Table2に示す。はじめに(2)式を用いてコンクリートの比誘電率 $\epsilon_s = 10$ を一定にした場合のコンクリートの導電率 σ の変化による p の誤差率を求めた。

Table 1 入力インピーダンス(Ω)

・誘電率 $\epsilon_s = 10$			
導電率 σ [S/m]	X/Y=0.333	X/Y=0.667	X/Y=1.0
0.06	18	15.1	12.4
0.08	21.5	16.8	13.9
0.1	22.9	17.9	14.7
0.12	23.6	18.2	14.9
・導電率 $\sigma = 0.085$ (S/m)			
比誘電率 ϵ_s	X/Y=0.333	X/Y=0.667	X/Y=1.0
6	31.5	24.6	20.1
8	26	20.4	16.7
10	22	17.1	14.2
12	18.5	14.8	12.2

Table 2 共振周波数(MHz)

・誘電率 $\epsilon_s = 10$			
導電率 σ [S/m]	X/Y=0.333	X/Y=0.667	X/Y=1.0
0.06	220	213	204
0.08	210	202	196
0.1	196	192	186
0.12	183	180	177
・導電率 $\sigma = 0.085$ (S/m)			
比誘電率 ϵ_s	X/Y=0.333	X/Y=0.667	X/Y=1.0
6	222	208	204
8	216	207	198
10	205	199	192
12	198	193	187

Fig.12は、同様に(2)式を用いてコンクリートの導電率 $\sigma = 0.085$ S/m一定にした場合のコンクリート比誘電率 ϵ_s の変化による p の誤差率を示す。この結果、算出した p には導電率や比誘電率の変化による誤差が見られた。特に比誘電率の変化による誤差は非常に大きくなった。これよりモデルクラックの長さに対する幅の比を求める(2)式を使用する場合は、比誘電率の値に十分注意して計算する必要がある。

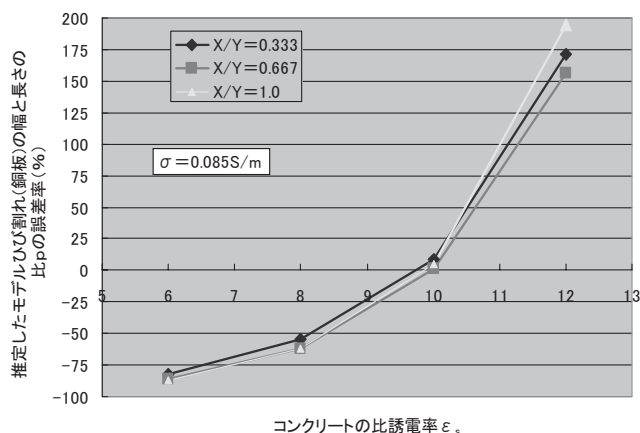


Fig.12 推定した p の誤差率とコンクリート比誘電率の特性

ここで(2)式が、(3)式に与える影響を調べるため(3)式より、 p の項を外した(4)式により(3)式と比較検討した。

$$L = c / (4 \times f_0 \times (2.5769 \epsilon_s^{0.17} + 1.7258 \sigma^{0.24})) \tag{4}$$

この式(3)と式(4)を用いて、コンクリートの比誘電率 $\epsilon_s = 10$ 一定にした場合のコンクリートの導電率 σ の変化によるモデルクラック (銅板) の長さ L の誤差を計算した。Fig.13 (a) と (b) は同様に式 (3) と式 (4) を用いて0.075mの銅板を用いた実験から求めたコンクリート中の共振周波数を式に代入し、推定した L の長さを実際の長さ0.075mと比較し誤差率を算出した図である。ただし、このときのコンクリートの導電率 $\sigma = 0.085\text{S/m}$ は一定で、コンクリートの比誘電率 ϵ_s の変化により誤差率を算出した。

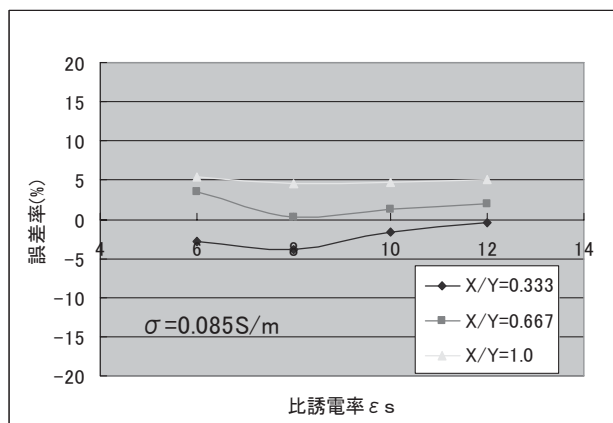
この結果、(3)式はコンクリートの比誘電率が増加しても誤差率は最大でも5%程度で、アンテナの長さ L を推定するのに実用できると考えられる。(4)式は、(3)式に比べるとやや誤差率が大きくなったがそれでも誤差率は最大で10%程である。

これより(2)式が(3)式に与える影響はFig.13で示した(a)と(b)の誤差率の差から考えると少ないと思われる。さらに誤差を少なくするには、Fig.12からコンクリートの比誘電率を的確に求めることで全体誤差を小さく抑えることができ、クラック長さ L が推定できると思われる。

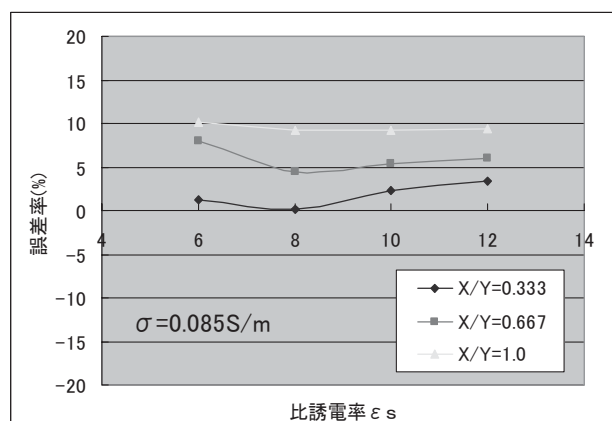
以上の結果からわかるように(3)式の p の項は $0.20306 p^{0.0663}$ と他の分母の比誘電率、導電率に比べると小さく、無視しても実用上使えると思われるが、精度良く推定するためには p の項を考慮した(3)式を使うべきである。

VI 実際のコンクリートクラックを使用しての深さの推定

コンクリートの比誘電率と導電率、アンテナ銅板の横幅と長さの比、及び共振周波数から長さ L を推定する(3)式が実用上有効かどうかは実構造物のコンクリートの検討モデルを作り、判定する必要がある。そこで実際のコンクリートクラックを使用してのモノポールアンテナ法を用いた深さの推定を行った。Fig.14は実験したコンクリートブロックの平面図である。



(a) 式(3)より求めたLの誤差率



(b) 式(4)より求めたLの誤差率

Fig.13 推定したLの誤差率と
コンクリート比誘電率の特性

またFig.15に実験を行った導電性流体を流し込んだコンクリートクラックの実験概略図を示す。このコンクリートブロックは幅0.40m、高さ0.20mで、上面から見るとクラック長さが0.10mになっている。コンクリートブロックのクラックに部分には、導電性流体

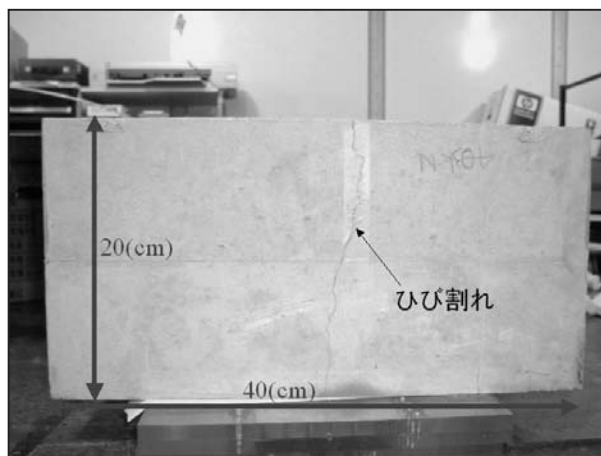


Fig.14 コンクリートブロック平面図

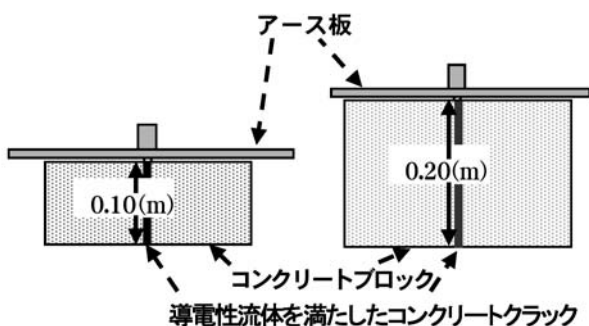


Fig.15 実験用コンクリートブロック図

(水系銀めっき銅塗料) を注入している。

コンクリートの比誘電率 $\epsilon_s=10$ で導電率 $\sigma=0.06\text{S/m}$ として共振周波数を測定した。結果は実際の深さ0.10mの場合、推定したLの長さは0.098mになり、誤差は2%程度であった。しかし、深さ0.20mの場合、計算より推定したLの長さは0.16mになり誤差は20%程度と大きくなった。

このようにコンクリートクラックの深さにより、その特性に違いが出た。これは深さ0.20mの場合クラック中の流し込んだ導電性流体が十分に底辺まで行き届かない状態で測定したものと考えられる。これらの測定結果から考慮して、測定精度の問題は導電性流体の流し込み方法および導電性材料選定などに今後検討が必要と思われる。しかし、モノポールアンテナ法によりクラック深さを推定するための共振周波数の測定は可能である^{(10) (11)}。

VII おわりに

今回コンクリートクラックの深さを電氣的に測定するためにモノポールアンテナの原理を用いた非破壊検査法についての検討を行った。

実験ではコンクリートクラックのモデルに銅線や銅板を用いて空気中とコンクリート中での、共振周波数や入力インピーダンスの違いを測定した。この実験結果をもとにしてFDTD法による解析を行い、銅板の長さLを求める推定式を出した。さらにコンクリートクラックに水系銀めっき銅塗料を注入、共振周波数を測定して、クラック深さを推定式から算出した。

その結果、実際のクラックにおいても共振周波数からクラック深さの推定が可能であった。よってクラックモデルに銅板を使用してFDTD法より求めた深さの推定式は実際のクラックに対しても有効であると考えられる。

しかし、コンクリートクラックの電氣的非破壊検査法の性能を測定できるコンクリートクラックの深さから見ると深いのも浅いものも測定可能であるが、特に深いクラックの測定には共振周波数が低下し測定が容易になる一方で、アース機能を持たせるには大きいアース板が必要になるので、現場での利便性は劣るなどの短所がある。さらに、深いクラックの先端部分まで導電性導体を圧入する方法なども今後の課題である。

測定精度としては、クラックの幅等により5~20%近い誤差が出る可能性があることや、実際のコンクリートクラックでは樹枝上に枝分かれをした複雑な形状をしており、これらに対するの推定式の精度を上げることなども、今後の検討事項となっている。

<<参考文献>>

- (1) 谷川恭雄、山田和夫：コンクリート工学、27、5(1989)
- (2) 大塚浩司：土木学会論文集、451、169 (1992)
- (3) 横内健、奥山朋和、芳賀昭、大塚浩司、八木正昭、松木英敏：日本応用磁気学会誌、22、909-912 (1998)
- (4) 芳賀昭、大塚浩司、須藤昌洋、高橋忍、奈須野裕、松木英敏：日本応用磁気学会誌、23、1537-1540 (1999)
- (5) 田村友邦、佐藤清正、大阪亮、芳賀昭、大塚浩司、松木英敏：東北学院大学工学部研究報告、Vol.34、No.2、67-71 (2000)
- (6) 後藤尚久：図説アンテナ、P187、コロナ社 (1995)
- (7) Y.D.He and L.C.shen:IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing、Vol.30、No.3、pp.624-627 (1992)
- (8) 脇田喜之、山田寛喜、山口芳雄：電子情報通信学論文誌、B-II、Vol.J81-B-II、No.8、pp.797-804 (1998)
- (9) 梶山知宏、芳賀昭、塩川孝泰、奈須野裕、松木英敏：『モノポールアンテナ動作によるコンクリートクラックの深さ測定法の検討』平成15年電気学会全国大会(2003)
- (10) 梶山知宏、芳賀昭、塩川孝泰、奈須野裕、松木英敏：『コンクリートクラックの非破壊検査法の一検討』電気学会マグネティクス研究会資料、MAG-03-44、pp.25-29 (2003)
- (11) 奈須野裕、芳賀昭：『コンクリートクラックの電氣的非破壊検査法の一考察』第14回職業能力開発研究講演会、pp.33-34 (2006)