

平行二線線路による鉄筋コンクリートのTV電波吸収特性の測定

フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究

MEASUREMENT OF ABSORPTION CHARACTERISTICS OF VHF WAVES
IN REINFORCED CONCRETE BY PARALLEL WIRE LINE

Study on the absorption characteristics of VHF waves in ferrite mortar

池田 哲夫*, 河辺 伸二**, 下釜 一男***, 岡島 達雄****

Tetsuo IKEDA, Shinji KAWABE, Kazuo SHIMOGAMA
and Tatsuo OKAJIMA

In city area, electromagnetic interference caused by buildings is a very important problem. For example, a well known ghost phenomenon is caused by interaction between incident and reflected waves caused due to the presence of large and tall buildings. The characteristics of the radio waves used in television broad casting absorption have been measured by coaxial-wave-guide unit or curtain wall specimens. But these measurements have some demerits. In this regards, a new measurement technique by panel specimen using parallel wire line was proposed recently.

The electric wave absorption characteristics of the reinforcing rod inside the reinforced concrete structures are examined using the recently proposed technique. A reinforcing rod in horizontal direction influences electric wave absorption characteristics of the concrete. In this paper, an equation for calculation of average electric wave absorption of concrete structures in presence of reinforcement is proposed taking care of the effect of the distribution of the reinforcement. In this method, an equivalent material characteristics of the composite material is calculated. This method has potential of application in other different composite material also.

Keywords : Parallel Wire Line, Return Loss, Reinforced Concrete, Reinforcing Rod

平行二線線路、反射減衰量、鉄筋コンクリート、鉄筋

1. はじめに

近年、建築物の電磁環境は複雑化・多様化し、TVゴースト現象や携帯電話による医療機器の誤作動が社会問題となっている。この改善策として、壁面にフェライトタイルを貼り電波を吸収する方法がとられ、さらに次世代電波吸収体としてフェライト混入セメントモルタルの実用化¹⁾²⁾が図られている。

筆者らは前報³⁾において、平行二線線路を用いたパネル供試体による新しい測定方法を提案し、その精度と信頼性を検証した。この測定方法は従来の同軸導波管を用いた測定法では困難である、鉄筋が挿入されたコンクリートの電波吸収特性の測定や、表面仕上げの評価等が容易である。

一般に壁面のコンクリートは鉄筋で補強されており、鉄筋が電波の反射や吸収に与える影響を把握することは重要である。しかし、測定方法が難しいこともあり、十分な検討がされていない。

そこで本研究では、平行二線線路測定法を用いて、鉄筋コンクリート中の鉄筋がTV電波吸収特性に与える影響を、コンクリートの含水率とかぶり厚、コンクリート中の鉄筋の位置について検討を行う。また測定位置による電波吸収特性の違い、すなわち、鉄筋の位置による局所的な電波吸収特性の違いを平均化する方法を検討し、提案する。

この平均化の方法は、様々な材料で構成された壁面の電波吸収特性

を、一つの材料で構成された壁面の電波吸収特性と等価としてとらえるために応用できる。なお、本研究はフェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する一連の研究ではあるが、コンクリート中の鉄筋の影響を検討するため、本研究ではコンクリートにフェライトを混入していない。

2. 平行二線線路測定法基礎理論

平行二線線路の断面と、電気力線(実線)、磁力線(破線)の分布をFig.1に示す。このように電界・磁界成分は線路の垂直断面内にあるだけで、線路長さ方向には向かない性質を持つ。本研究で用いた平行二線線路は、線路沿いに入射波と反射波の合成波である定在波が発生している。本研究では、定在波の大きさを電圧として測定するため、電圧定在波と呼ぶ。入射波と反射波が同位相となる位置では電圧の大きさ V (実効値)は $|A|$ (入射波)+ $|B|$ (反射波)となり最大である。逆位相となる位置では電圧の大きさは $|A|-|B|$ となり最小である。最大と最小は $\lambda/4$ ごとに生じる。この様子をFig.2(a)に示す。Fig.2(b)は反射波 $=0$ 、つまり完全吸収の状態を示し電圧 V はどの位置でも大きさが変わらない。

電圧定在波の電圧最大値(V_{max})と電圧最小値(V_{min})の比を電圧定在波比(VSWR:Voltage Standing Wave Ratio)といい、式(1)の ρ で表す。

* 名古屋工業大学 教授・工博
** 名古屋工業大学 助教授・工博

*** 名古屋工業大学 大学院生

**** 名古屋工業大学長 工博

Prof., Dept. of Electrical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Environmental Technology and Urban Planning, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Environmental Technology and Urban Planning
Nagoya Institute of Technology
President, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

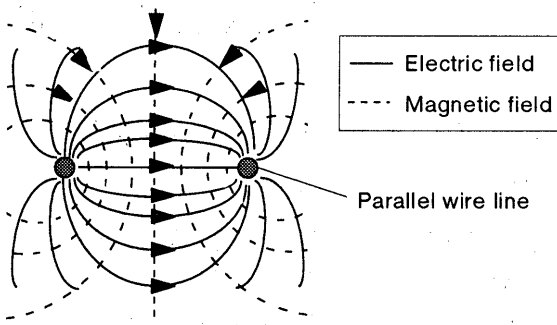


Fig.1 Distribution of electric and magnetic field

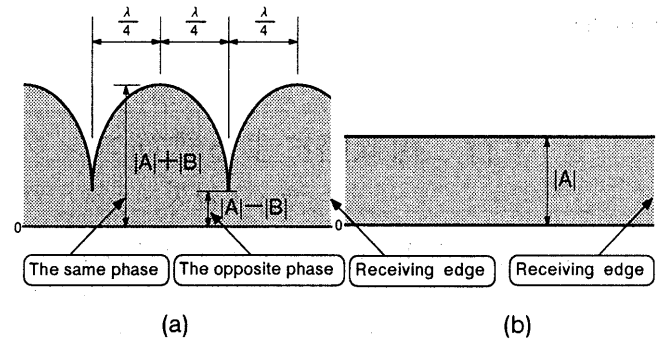


Fig.2 Distribution of voltage standing wave

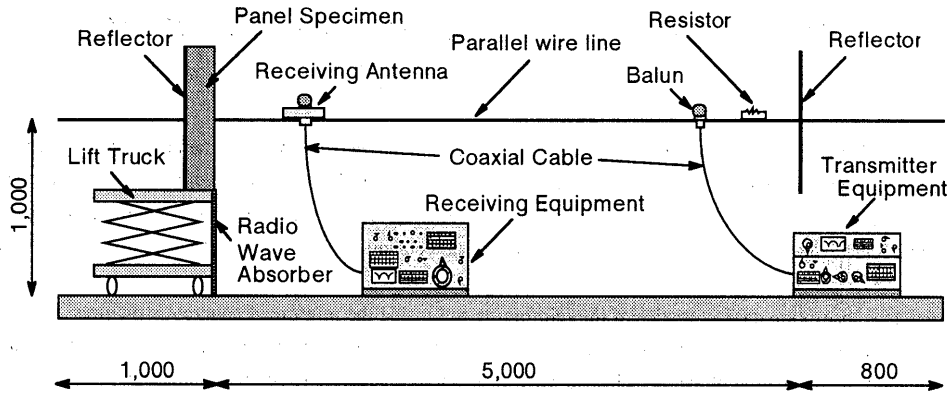


Fig.3 Layout of parallel wire line method (mm)

$$\rho = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{|A|+|B|}{|A|-|B|} = 10^{\frac{(V_{\max} [\text{dB}] - V_{\min} [\text{dB}])}{20}} \quad \dots (1)$$

この値が1に近いほど吸収特性が良く、1より大きくなるほど吸収特性が悪いことを示す。この ρ の値を用いて式(2)より電圧反射係数を計算し、その結果から式(3)を用いて反射減衰量を求める¹⁴⁾。

$$|S| = \left| \frac{B}{A} \right| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \quad \dots (2)$$

$$RL = -20 \log |S| \quad \dots (3)$$

3. 実験装置概要

平行二線線路による実験装置の概要をFig.3に示す。本測定法では、測定精度向上のため、線路の直径と線路間隔より求まる線路の特性インピーダンスが測定対象物の特性インピーダンスに近いことと、線路の間隔が測定周波数帯の波長の1/10より小さいことが要求される。よって線路は直径5mmの銅線を用い、TV電波の周波数帯である90MHz~222MHzの周波数を考慮し、二線の間隔を150mmとする。供試体サイズは線路の両側に二線の間隔と同じ距離である150mmを確保するために476×476×40mmとし、供試体中央に線路を通す孔を2箇所設ける。測定の安定性と精度の向上のため、送信側には反射板と線路の特性インピーダンスに等しい493Ωの抵抗を設置し、線路を整合状態にする。送信器は線路上に固定し、受信アンテナは線路上を自由に滑らすことが可能で、供試体からの位置とその時の電圧定在波を測定する。本実験は周辺環境からの電磁波の影響を受けにくい性質を有しており、よってこれらの測定装置は通常の鉄筋コンクリート建物内

の一室を用いて行った。

平行二線線路による電波吸収特性の測定方法は、線路を通す位置周辺の特性を測定できる。したがって鉄筋を挿入したコンクリートパネル供試体の任意の位置に線路を通すことにより、この周辺の鉄筋が電波吸収特性に与える影響を考察できる。今回の研究では、大きな鉄筋コンクリートパネル供試体を用いて任意の位置に線路を通すのではなく、同一寸法のコンクリートパネル供試体を使用し、一定位置に線路を通し、供試体内の鉄筋の位置を変化させることとした。この方法により、測定時における余分な鉄筋の影響を極力小さくできる。

4. 実験方法

4.1 供試体作製方法

本実験では、鉄筋が電波吸収特性に与える影響を検討するために鉄筋径10mm、鉄筋間隔300mmの鉄筋格子（溶接）を用いた。線路の挿入位置を変えた鉄筋格子挿入コンクリートパネル供試体を作製し、平行二線線路測定法を用いて測定を行う。また、比較のために無筋コンクリートパネル供試体も同時に作製、測定する。パネル供試体は、線路を通すための2つの孔が平行を維持できるように、特別製の鋼製型枠を使用して打設を行った。また、孔と線路との隙間の低減等、測定精度の向上に努めた。本実験では、普通ポルトランドセメントを用い、設計基準強度24MPaの調査で作製したコンクリートを使用した。Table1にその調査を示す。

4.2 測定方法

作製したパネル供試体は、脱型後1ヶ月、養生室内において気中養生させた後測定を行った。さらに一年間気中養生を行った後、再度測定を行った。供試体の含水率は1ヶ月後が約2%、一年後が約1.5%であった。測定にはFig.4に示す通り、2枚の無筋コンクリートパネル

(厚さ40mm)と、Fig.5に示す鉄筋格子が挿入されたパネル(厚さ40mm)を組み合わせると1つの供試体(全体厚さ120mm)とした。測定はVHFのTV電波帯(90~222MHz)を踏まえ、平行二線線路測定装置を用いて80~230MHzを10MHz間隔で行った。平行二線線路による測定では通常供試体の裏面に金属板を配置して測定を行う。しかし、鉄筋コンクリートに金属板を裏当てした状態で測定を行うと、金属板の反射の影響が大きいため、鉄筋の影響を正確に測定できない。そこで本研究は、金属板を用いない状態で測定を行う。

4.3 鉄筋位置

Fig.5に今回検討する鉄筋位置を示す。(a)を基本型として、300mmの鉄筋格子の中に線路を配する。水平鉄筋と線路の間隔は150mm、垂直鉄筋と線路の間隔は75mmとする。(b)は(a)に比べ垂直鉄筋が線路に近づいた場合とする。その間隔は12.5mmとし、鉄筋と線路は短絡させない。(g)は垂直鉄筋が線路の中央に入り、(h)では線路間に入った垂直鉄筋が線路に近づいた場合である。(i)は(a)に比べ、水平鉄筋が線路に近づいた場合とする。水平鉄筋と線路の間隔は75mmとする。(j)はさらに近づき、水平鉄筋と線路の間隔は25mmとなり、(c)はその間隔が12.5mmの場合である。(d)(e)(f)は水平鉄筋を線路に近づけた場合であり、(d)は垂直鉄筋を線路の外側で線路に近接した位置に配置し、(e)は線路の中央に垂直鉄筋を配置し、(f)は垂直鉄筋を線路間の線路に近接した位置に配置した場合である。

5. 測定結果および考察

5.1 含水率の影響

本研究では、養生期間の差による水和進行度の違いよりも、含水率の方が電波吸収特性に与える影響は大きいと考え、2つの養生期間での測定結果を含水率の違いとして考察した。

Fig.6に無筋コンクリートの、Fig.7にFig.5(a)の供試体の2つの含水率(1ヶ月気中養生の供試体は含水率約2.0%、一年間気中養生の供試体は含水率約1.5%)の違いによる電波吸収特性を示す。一般にコ

Table1 Mix proportion of concrete

Unit Volume(kg/m ³)			
Water	Cement	Sand	Gravel
178	312	719	1040

AE Agent=C×0.03%

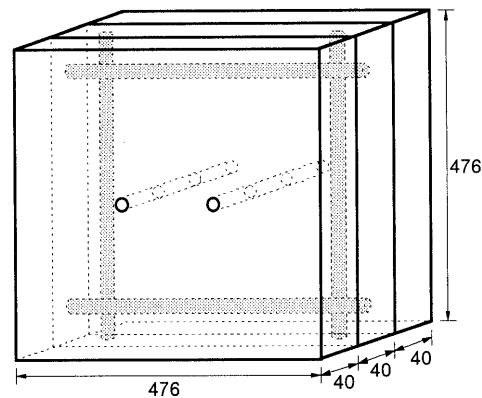


Fig.4 Reinforced concrete panel specimen (mm)

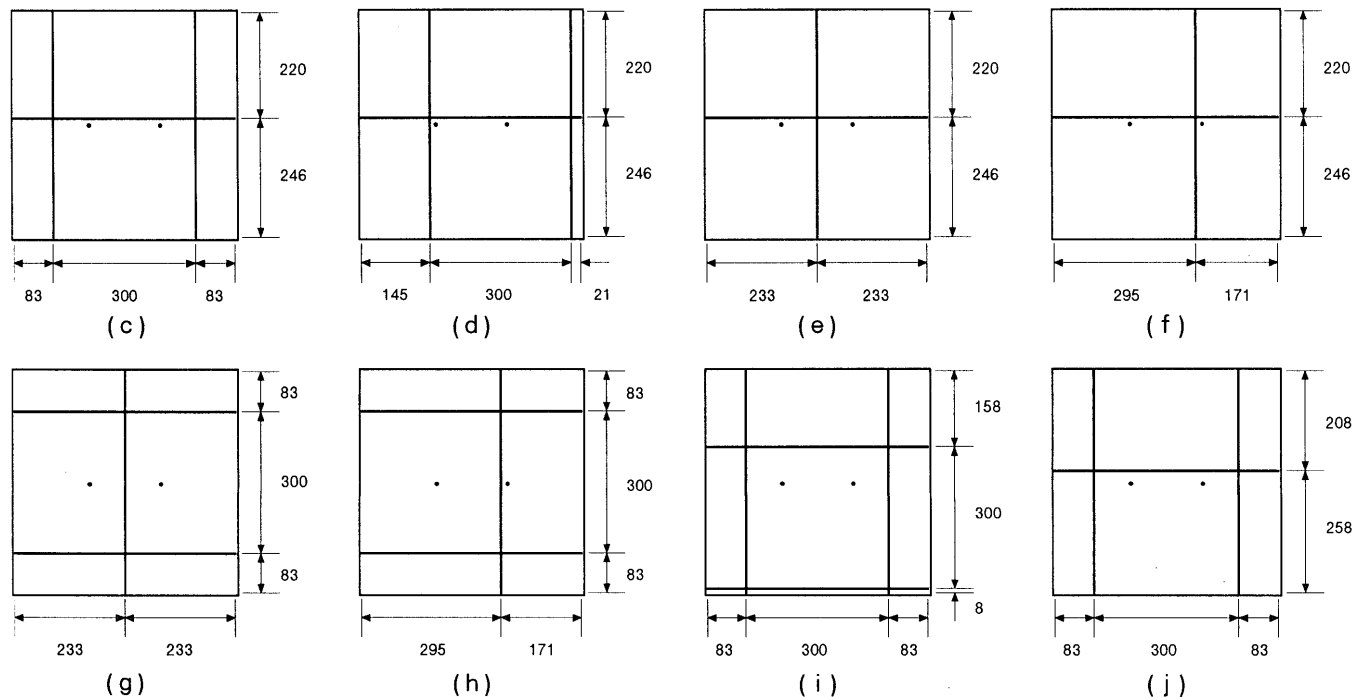


Fig.5 Type of reinforcing rod (mm)

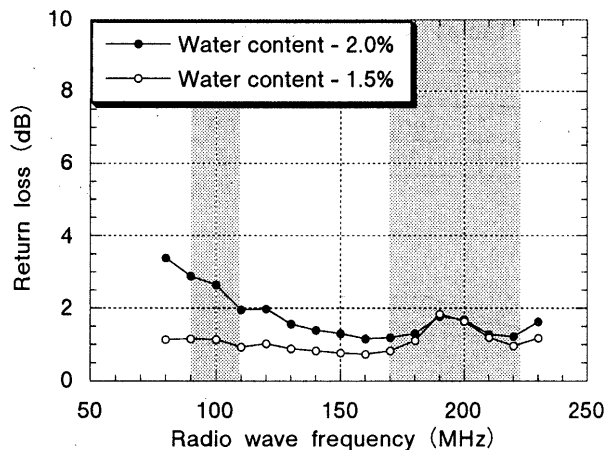


Fig.6 Radio wave absorption of plain concrete

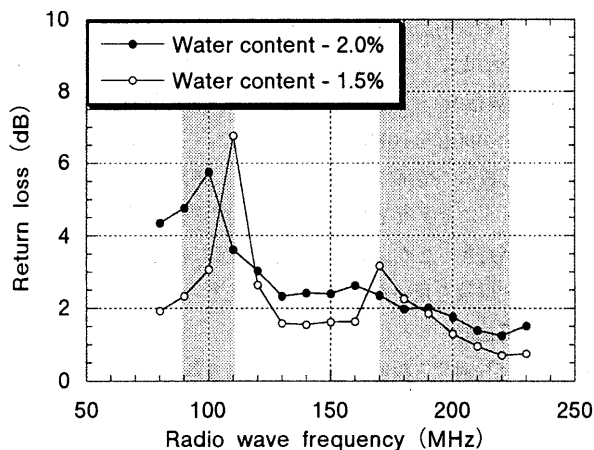


Fig.7 Radio wave absorption of reinforced concrete

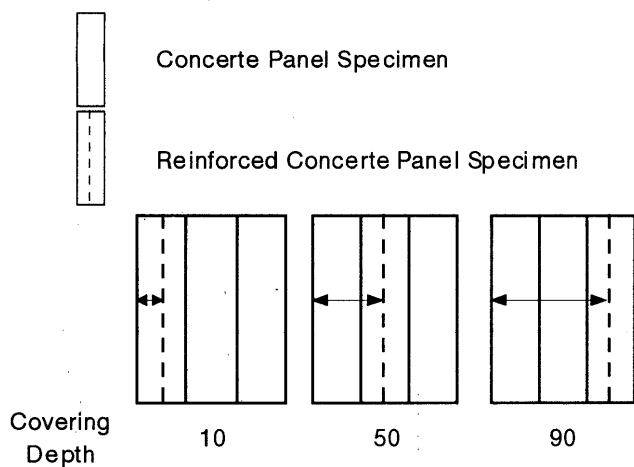


Fig.8 Reinforced concrete panel specimen (mm)

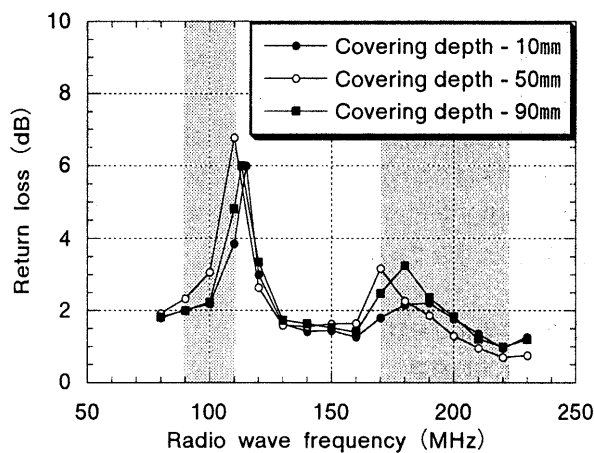


Fig.9 Radio wave absorption of reinforced concrete

ンクリートの含水率が高いと、コンクリートの誘電率が乾燥状態と比べて高くなり、それによる吸収特性の向上が知られている。本実験においては含水率の変化が少ないにも関わらず、吸収特性の向上の傾向は低周波側に大きくなり、供試体の乾燥によって吸収ピークが高周波側に移行している。

5. 2 かぶり厚の影響

Fig.8に示すように、無筋コンクリートパネル2枚とFig.5(a)の鉄筋コンクリートパネル1枚の組合せを変えることによって、異なる3つのかぶり厚 (10mm、50mm、90mm) での電波吸収特性を測定した。以下、含水率1.5%の測定結果をFig.9に示す。それぞれのかぶり厚において多少吸収ピークをとる周波数が異なるが、おおむね同様な結果が得られた。これは、測定周波数 (80MHz~230MHz) における波長がかぶり厚の変化に比べて、非常に大きいためその影響が現れなかったと考えられる。以下、かぶり厚50mmで測定を行う。

5. 3 鉄筋格子挿入コンクリートパネル供試体の電波吸収特性

Fig.10からFig.13に測定結果を示す。測定より、Fig.5に示す(a)と(b)、(c)と(d)、(e)と(f)、(g)と(h)が似た傾向を示した。Fig.10に(a)と(b)の場合の測定結果、Fig.11に(c)と(d)の場合の測定結果、Fig.12に(e)と(f)の場合の測定結果を示す。これらの図に示すように特定の周波数で吸収ピークができていく。この理由は、通常鉄筋に電波が入射すると鉄筋に誘導電流が流れ、その誘導電流が作る電界がコンクリート表面の反射電界と合成され、合成反射電界が大きくなって電波吸収特性が

悪くなるが、ある特定の周波数では誘導電流が作る電界と反射電界が逆位相になり、合成反射電界が小さくなって吸収ピークを作っていると考えられる。この考察より、Fig.13で、無筋コンクリートとはほぼ同じ電波吸収特性を示している(g)と(h)の鉄筋が挿入された鉄筋コンクリートは、測定可能周波数帯以外の周波数で吸収ピークがあると考えられる。

Fig.14、Fig.15では水平鉄筋が線路に近づくほど吸収ピークは高周波側に移動する。このピークの移動の理由は鉄筋によって発生する誘導電流の流れ方の違いによるものと考えられる。また、吸収ピークは低下する傾向にあり、これは水平鉄筋が線路に近づくことによって、鉄筋による反射が多くなったためと考えられる。

垂直鉄筋の位置に関しては、Fig.5に示す(a)と(b)、または(c)と(d)の測定結果に示すように、水平鉄筋の位置が同一であれば、垂直鉄筋の位置 (垂直鉄筋と線路との距離) の影響は小さい。ただし、(e)と(f)の測定結果が示すように垂直鉄筋が線路の内側と外側に存在する場合は特性が異なる。

5. 4 平均電波吸収特性

以上の実験の結果、水平鉄筋の挿入位置によって電波吸収特性に違いがあることが分かった。これは逆に鉄筋コンクリートは測定位置によって局部的に電波吸収特性が違うことを示している。上記の測定結果は線路の電界分布上、パネルの一部分に電波が入射したときの電波吸収特性を示している。しかし、実際の鉄筋コンクリートの壁面には

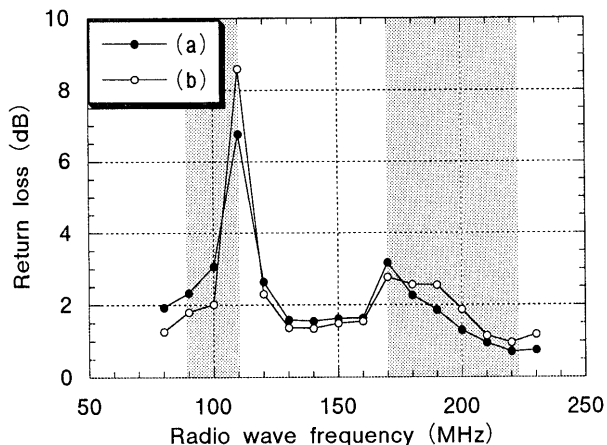


Fig.10 Radio wave absorption of reinforced concrete

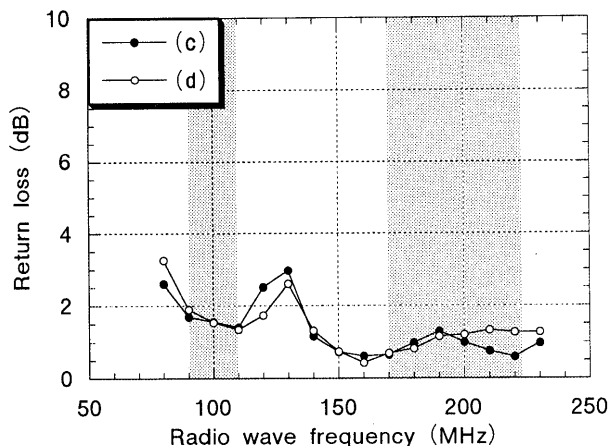


Fig.11 Radio wave absorption of reinforced concrete

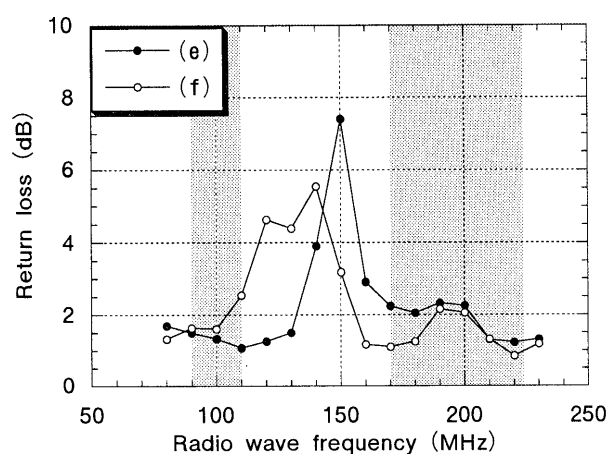


Fig.12 Radio wave absorption of reinforced concrete

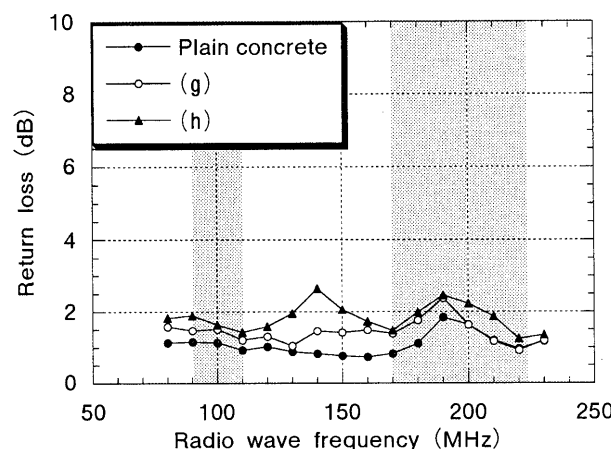


Fig.13 Radio wave absorption of reinforced concrete

TV電波が一様に入射していると考えられ、実際の鉄筋コンクリートの電波吸収特性は、これらの測定位置によって違う電波吸収特性を平均化したものと考えられる。

さらに一般に壁面は、鉄筋コンクリートに限らず様々な材料で構成されている。電波吸収特性を壁面全体として検討する場合、例えば開口部のアルミサッシやガラスなどの特性を考慮に入れる方法としても電波吸収特性の平均化は重要であると考えられる。

壁面全体の電力反射係数は、各部分の面積を考慮に入れた電力反射係数の総和を壁面全体の面積で除した値で表されると考え、Fig.16と式(4)に示す各周波数の電力反射係数を加重平均する方法を提案する。本研究では、得られた電圧反射係数を2乗して電力反射係数とした。

$$\begin{aligned}
 \left| \overline{S}_i \right| &= \sqrt{\frac{1}{2x_0} \int_{-x_0}^{x_0} |S_i(x)|^2 dx} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2x_0} (a+b+\dots+k+l)} \quad \dots (4)
 \end{aligned}$$

ここに、 i : 80, 90, 100, ..., 230 (MHz)

x_0 : 供試体中央から端部までの距離 (mm)

$|S_i(x)|$: i MHzの電圧反射係数

$\left| \overline{S}_i \right|$: i MHzの平均電圧反射係数

今回の結果と式(4)より求めた平均電波吸収特性をFig.17に示す。これは、Fig.5に示す(a)の鉄筋コンクリートパネルに電波が一様に入射したときの電波吸収特性と言える。平均電波吸収特性の算出は水平鉄筋の位置を考慮に入れ、電力反射係数の加重平均を用いることにより求めることが可能となる。

5. 5 鉄筋コンクリートの電波吸収特性

Fig.17に示すように、実際にこの方法を用いて鉄筋コンクリートと無筋コンクリートの電波吸収特性を比較すると、鉄筋コンクリートの方が電波吸収特性が少しよいことが分かる。これは今回の研究の供試体ではかぶり厚と波長の関係で、鉄筋から再放射された反射電界の位相が供試体表面での反射電界の位相と逆になって、合成反射電界が減ったためと考えられる。

6. 結論

(1) 鉄筋コンクリートの電波吸収特性は、コンクリートの含水率が低くなると吸収ピークが高周波側に移行する。

(2) 90mm以下の鉄筋のかぶり厚は、本実験で用いた80MHz～230MHzの周波数帯では電波吸収特性に影響を与えなかった。

(3) コンクリート内の鉄筋の位置によって局部的に電波吸収特性に違いがある。特定の位置に挿入された場合、ある周波数に吸収ピークができる。

(4) TV電波吸収特性の違いを平均化する方法に電力反射係数の加

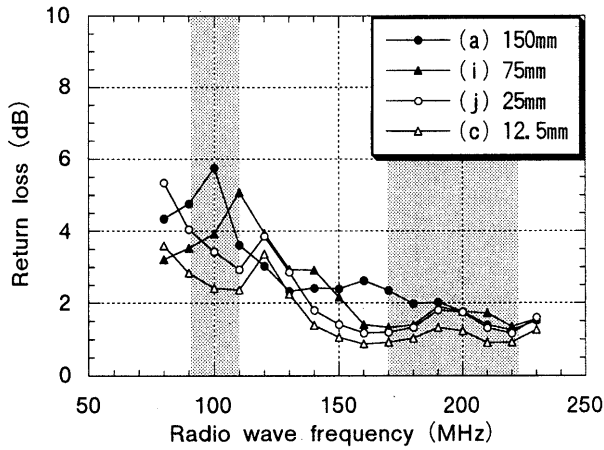


Fig.14 Radio wave absorption of reinforced concrete (water content, 2.0%)

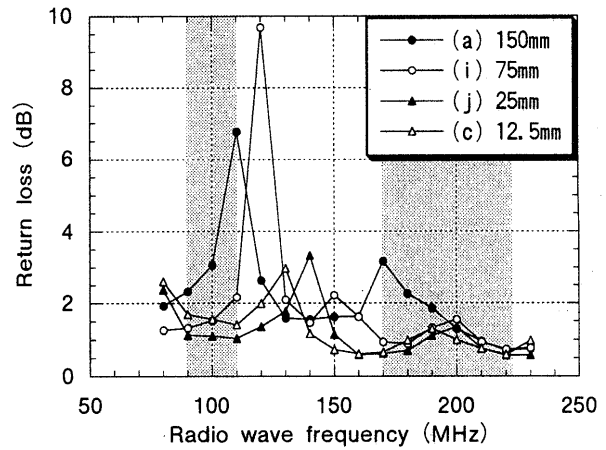


Fig.15 Radio wave absorption of reinforced concrete (water content, 1.5%)

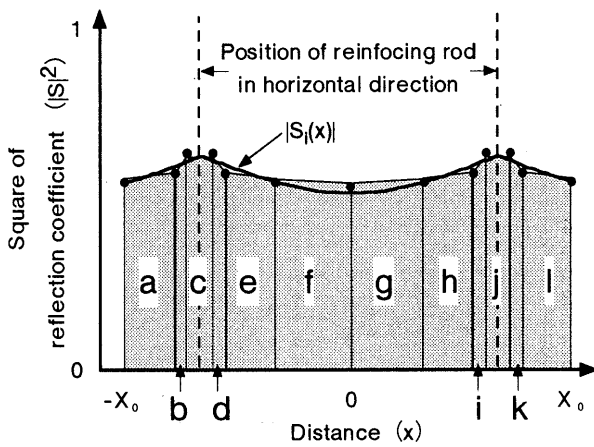


Fig.16 Calculation method of weighted mean

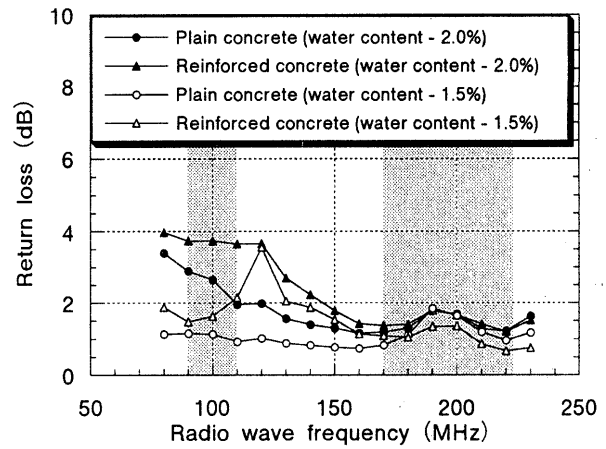


Fig.17 Mean radio wave absorption of reinforced concrete

重平均を用いる方法を提案した。

今後は、TV電波が入射した鉄筋コンクリート内の鉄筋にどのような誘導電流が流れているかを測定し、鉄筋位置に対する周波数の吸収ピークのメカニズムを明らかにしたい。また、多くの材料によって構成される実際の建築物の壁面の平均電波吸収特性について検討を行いたい。

謝 辞

本研究は、竹中有英会建築研究助成金、文部省科学研究費(基盤研究(B)07555469)、セメント協会研究奨励金、豊田理化学研究所研究囑託により行われたものである。ここに謝意を表す。

研究にご協力頂いた当時の卒論生安川猛行氏に厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡島達雄他;モルタルのVHF波吸収特性に与える各種混合材料の影響,セメント・コンクリート論文集No.48, pp.328~333, 1994.12.
- 2) 池田哲夫他;フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究,セメント・コンクリート論文集No.49, pp.904~909, 1995.12.
- 3) 河辺伸二他;フェライトモルタルのTV電波吸収特性の広帯域化,セメント・コンクリート論文集No.50, pp.844~849, 1996.12.
- 4) 岡島達雄他;フェライト混入率や電波吸収体設置方法による吸収効果、フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究,日本建築学会構造系論文集No.482, pp.1~8, 1996.4.
- 5) ヴィグナラージャ・シバクラマン他;電波障害防止材料に関する研究(その1 フェライト混入モルタルの電波吸収特性),日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.385~386, 1994.9.
- 6) 田中秀男他;電波障害防止材料に関する研究(その2 フェライト混入

モルタルの電波吸収特性の改善),日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.387~388, 1994.9.

- 7) 田中一哉他;電波障害防止材料に関する研究(その3 フェライトモルタルPCカーテンウォール模擬試験体の電波吸収特性),日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.161~162, 1995.8.
- 8) ヴィグナラージャ・シバクラマン他;電波障害防止材料に関する研究(その4 フェライトモルタルPCカーテンウォール実大パネルの電波吸収性能),日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.163~164, 1995.8.
- 9) 田中秀男他;TV電波吸収モルタルを用いたPCaカーテンウォールの性能(その1 フェライトモルタルの諸物性),日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.721~722, 1996.9.
- 10) 山田哲夫他;TV電波吸収モルタルを用いたPCaカーテンウォールの性能(その2 フェライトモルタルを用いたPCaカーテンウォールの風動圧試験による耐久性確認),日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.723~724, 1996.9.
- 11) 吉竹増実他;TV電波吸収モルタルを用いたPCaカーテンウォールの性能(その3 TV電波吸収特性),日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.725~726, 1996.9.
- 12) ヴィグナラージャ・シバクラマン他;電波吸収コンクリートカーテンウォール,コンクリート工学, vol.36, No.1, pp.19~23, 1998.1.
- 13) 池田哲夫他;平行二線線路によるTV電波吸収特性の測定方法の提案フェライト混入モルタルのTV電波吸収特性に関する研究,日本建築学会構造系論文集No.496, pp.17~22, 1997.6.
- 14) 雨宮好文;現代電磁波工学,オーム社, 1985.1.

(1998年3月10日原稿受理, 1998年4月16日採用決定)