論説

Paper

ETC 用電磁波吸収舗装材の開発

齋藤章彦^{*1}, 青柳貴洋^{*2}, 国島武史^{*3}

Development of Magnetic Wave Absorber Pavement Material for Electronic Toll Collection

Akihiko Saito, Takahiro Aoyagi, and Takeshi Kunishima

Synopsis

The electronic toll collection (ETC) and the dedicated short range communication (DSRC) in intelligent transport systems (ITS) are materialized. To improve electromagnetic environment of ITS beacon antenna, a wave absorber pavement material consists of a carbon fiber has been developed. However, the oblique incidence characteristic of the pavement material that has been developed for the ETC is not enough to use for ETC and DSRC. Therefore, this research group is developing the wave absorber pavement that mixed soft magnetic metal powder into asphalt. In this report, the relative complex permeability and permittivity of the pavement material were measured by the free space methods and the waveguide method. Then, the wave absorber pavement of the excellent oblique incidence characteristic was designed using the obtained material constant. The calculated result of oblique incidence characteristics showed good agreement with measured one in their tendency.

1. まえがき

近年、料金所渋滞の緩和やキャッシュレスサービスを目とした ETC (Electronic Toll Collection System: 自動料金支払いシステム) が 5.8 GHz の周波数において実用化されている。このようなシステムでは、舗装道路面や側壁での 2 次反射による電波障害が懸念され、実際、二重課金の問題が発生していることから¹⁾、電磁波吸収機能を付与した舗装材の適用が期待されている^{2)~4)}。ETC の場合、アンテナの指向軸は下方 23° を向いているため、電磁波吸収舗装材には、高角度の斜入射電磁波吸収特性が求められている (Fig.1⁵⁾)。

そこで、本研究グループでは、軟磁性金属粉末をアスファルトに混合した高入射角での斜入射特性に優れた電磁波吸収舗装材の開発を行っている。本報告では、軟磁性金属粉末を混合した舗装材の複素比透磁率と複素比誘電

Fig.1. Reflection of electromagnetic wave at ETC gate.

率を、2 つの自由空間法や導波管法で測定した。次に、得られた材料定数を用いて、2 層電磁波吸収舗装の理論計算を行ったところ、実測値と良い一致を示した。結果として、優れた斜入射特性をもつ 2 層電磁波吸収舗装を得ることができたので報告する。

2005 年 5 月 23 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr., Eng., Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 東京工業大学教育工学開発センター, 工博 (Dr., Eng., Center for Research and Development of Educational Technology, Tokyo Institute of Technology)

* 3 (株)竹中道路 (Takenaka Road Construction Co., Ltd.)

2. 電磁波吸収舗装材

Fig.2 に電磁波吸収舗装の断面を示す。表層部は、舗装表面への滞水を防止する目的でポーラスアスファルト舗装（高性能舗装タイプ）を用い、基層部は、空隙の少ないマスティックアスファルト舗装を用いた。Fig.3 に舗装材の構成を示す。

3. 電磁波吸収舗装材の設計

Fig.4 に電磁波吸収舗装材の設計手順を示す。構成材料の複素比透磁率・誘電率を把握し、その値から舗装の電磁波吸収特性を理論計算し、実測値と比較して、道路舗装材の最適設計を行う。

Fig.2. Cross section of electromagnetic wave absorber pavement.

Fig.3. Structure of electromagnetic wave absorber pavement.

Fig.4. Designing of electromagnetic absorber pavement.

4. 舗装構成材料の複素比透磁率・誘電率

4.1 骨材

舗装材の骨材として、4号砕石を用いた。砕石を 7 mm（外径）× 3.04 mm（内径）× 1 mm（厚さ）に加工し、4つの試料で同軸Sパラメータ法にて、複素比誘電率を測定した。測定結果を Fig.5 に示す。砕石は $\epsilon = 4.92 - 0.188i$ の誘電体である。

4.2 アスファルト

舗装材の骨材の接着剤として用いたアスファルトバインダー（炭酸カルシウム 29 vol% 含有）を導波管（WRJ5, 3.95 ~ 5.85 GHz, 厚さ 1 mm）に鑄造し、測定試料を作製した。導波管 S パラメータ法⁵⁾にて、複素比誘電率を測定した。測定結果を Fig.6 に示す。アスファルトは $\epsilon = 3.76 - 0.0492i$ の誘電体である。

Fig.5. Permittivity of crusher stone.

Fig.6. Permittivity of asphalt.

Table 1. Specifications of samples.

Sample	Soft magnetic metal powder content/ vol%	Type of asphalt pavements	Thickness/ mm	
A	0	Porous	40.8	
B	0.3	Porous	40.5	
C	0.9	Porous	40.9	
D	1.8	Porous	40.6	
E	0	High density	40.9	
F	0.9	High density	40.9	
G	2.8	High density	41	
H	5.6	High density	41.3	
Q	0	Porous	51.8	CF;0.03 wt%
R	0	High density	50.9	CF;0.03 wt%

Table 2. Measurement condition.

Frequency/ GHz	5.5 - 6.1
Incidence angle/ deg.	0, 30, 40, 50, 60, 70
Polarization	TE-wave, TM-wave

5 . 軟磁性金属粉末含有舗装材の複素比透磁率・誘電率

舗装材の基材である砕石やアスファルトは誘電体である。そこで、軟磁性金属粉末をアスファルト中に混合し、複素比透磁率を付与することで、高角度での斜入射吸収特性に優れた電磁波吸収舗装材を検討した。

5 . 1 試料

これまで、軟磁性金属粉末（電磁ステンレスの微粉）含有ゴムを使用した電磁波吸収体の設計や EMC への適用^{6)~9)}を検討してきたが、軟磁性金属粉末含有舗装材においても、その含有量と複素比透磁率・誘電率の関係を把握することにより電磁波吸収体の設計が可能となる。そこで、Table 1 に示す電磁波吸収舗装材を試作した。A から D および Q は表層用、E から H および R は基層用である。Q, R は比較材としてカーボンファイバ (CF) 入りである¹⁰⁾。

5 . 2 測定

電磁波吸収舗装材の複素比透磁率および複素比誘電率の測定は、自由空間法^{11)~13)}で行い、導波管 S パラメータ法⁵⁾、自由空間透過法（VHS 社）と比較した。Fig.7 に自由空間法による測定の概略図を示す。また、Table 2 に測定条件を示す。試料位置に舗装材 No.A ~ R を単層で配置し、TE 波、TM 波の各入射角度における反射係数 (dB) の実測値と計算した反射係数 (dB) との残差 2 乗和が最小になるように複素比透磁率および複素比誘電率を決定した。

Fig.7. Free-space method.

5 . 3 測定結果

Fig.8 に軟磁性金属粉末の含有量に対する複素比透磁率、複素比誘電率の実部の変化を示す。用いた試料は Table 1 に A から D で示した表層用ポーラスアスファルトである。軟磁性金属粉末を増やすことで、透磁率および誘電率は上昇する。導波管法や自由空間透過法と比較して、傾向として一致した。Table 3 に自由空間法による測定結果を示す。また、例として舗装材 D に 0° および 50° の入射角で TE 波を入射させた場合の周波数特性を Fig.9 に示す。実測値と計算値はよい一致を示した。

6 . 2 層軟磁性金属粉末含有舗装材の理論計算と実測

実際の道路舗装は表層と基層の 2 層構造である (Fig.2)。そこで、測定した単層の舗装材の複素比透磁率・誘電率の値を用いて 2 層構造の電磁波吸収特性を理論計算した¹⁴⁾。

Fig.8. Permeability and permittivity.

Table 3. Permittivity and permeability of pavements.

Sample	$\epsilon' r$	$\epsilon'' r$	$\mu' r$	$\mu'' r$
A	3.9	0.4	1.0	0.0
B	4.5	0.2	1.3	0.0
C	5.5	0.2	1.7	0.1
D	6.2	0.3	1.7	0.1
E	5.5	0.5	1.0	0.0
F	5.4	0.3	1.1	0.0
G	6.2	0.3	1.2	0.1
H	6.9	0.3	1.3	0.2
Q	4.4	0.3	1.0	0.0
R	5.6	0.3	1.0	0.0

Fig.9. Reflection of pavement.

Fig.10. Oblique incidence characteristic of sample No. CF.

Fig.7の自由空間法を用い、試料位置に舗装材2層を置き、基準面が試料表面になるように高さを調節し、反射係数(dB)を測定した。測定周波数は5～8GHzである。表層が舗装材C、基層が舗装材Fの5.8GHzにおける反射係数(dB)の斜入射特性をFig.10に示す。いずれの場合も実測値(図中印)と計算値(図中線)は傾向として一致した。

7. 斜入射特性に優れた軟磁性金属粉含有舗装

測定した舗装材の材料定数(Table 3)を用いて、2層構造の電磁波吸収特性を全ての組合せについて理論計算した。その結果、高入射角において優れた特性を持つものがいくつか得られた。Table 4に入射角が60°のTE波およびTM波において、電磁波吸収特性が優れている軟磁性金属粉含有舗装材の例を示す。従来開発材(カーボンファイバ入り舗装材:Q,R)を比較対象とした。Fig.11は、TE波60°およびTM波60°入射時の反射減衰量の実測値と計算値を示す。両偏波とも、計算値と実測値は傾向として一致した。軟磁性金属粉含有舗装材は、従来材に比べ、優れた斜入射特性を示した。TE波の場合、計算値と実測値はその値においてもよく一致した。一方、TM波の場合、

Fig.11. Oblique incidence characteristic of wave absorber pavements.

Table 4. Wave absorber pavements.

Sample	Surface layer	Base layer	Applicable polarization
DH	D	H	TE, TM
DG	D	G	TM
CF	C	F	TE
QR	Q	R

Fig.12. Shin-itabashi ETC toll gate (2005, actualization of wave absorber pavement).

計算値と実測値の値が一致しないのは、 60° 付近に整合が見られるためと考えられる。

8. 実用例

開発した設計手法に基づき、首都高速・新板橋 ETC 出口に電磁波吸収舗装を施工した。Fig.12 に施工時の写真を示す。

9. むすび

軟磁性金属粉末をアスファルトに混合した電磁波吸収舗装材の複素比透磁率と複素比誘電率を、2つの自由空間法および導波管法にて測定した。次に、得られた材料定数を用いて、2層電磁波吸収舗装の理論計算を行ったところ、

実測値と良い一致を示した。軟磁性金属粉末含有舗装材は、高入射角において優れた斜入射電磁波吸収特性を示した。

今後の課題は、基層下部のコンクリートを計算に取り入れた電磁波吸収舗装の設計である。

謝辞

本研究を行うにあたり、有益な御助言をいただいた東京工業大学の西方敦博助教授に感謝する。また、測定にご協力いただいた大同特殊鋼(株)技術開発研究所電磁材料研究部通信環境研究チームの皆様および田中伸明氏に感謝する。

(文 献)

- 1) <http://ny152.air-nifty.com/tennis/2005/03/post.html>
- 2) 岩田武夫: 第8回2002EMCフォーラム, セッションETCと電磁環境 (2002), 3.
- 3) 岩田武夫, 国島武史: 月刊EMC, 14(2002), 8, 33.
- 4) 国島武史, 原川健一, 岩田武夫, 青柳貴洋: 2002信学ソ大, no.SB-2-3 (2002).
- 5) A. Nishikata: MWE'99, (1999), 151.
- 6) 齋藤章彦, 西方敦博: 信学論(B), J84-B(2001), 1834.
- 7) 齋藤章彦, 西方敦博: 信学論(B), J85-B(2002), 400.
- 8) 齋藤章彦, 西方敦博: 信学論(B), J85-B(2002), 1095.
- 9) A. Saito and A. Nishikata: IEICE TRANS. ELECTRON, E85-C(2002), 1684.
- 10) T. Kunishima, A. Saito, and T. Aoyagi: 2004 International Symposium on EMC, Sendai, (2004), 297.
- 11) 清水康敬, 杉浦行: 電磁妨害波の基本と対策, 電子情報通信学会 (1997), 106.
- 12) 橋本修: 電波吸収体入門, 森北出版 (1997), 86.
- 13) T. Aoyagi, A. Saito and, A. Nishikata: 2004 International Symposium on EMC, Sendai, (2004), 329.
- 14) 青柳貴洋: 博士論文, 東工大 (1999)