

UDC 621.371.091.1 (24):624.195
621.372.822/.823.091.1

任意断面をもつトンネル内電波減衰定数の
近似式について

山口 芳雄 阿部 武雄 関口 利男

山口芳雄, 阿部武雄: 正員 新潟大学工学部情報工学科
関口利男: 正員 東京工業大学工学部電気・電子工学科

On the Approximate Equation for the Attenuation Constant in Tunnels with Arbitrary Cross Section. By Yoshio YAMAGUCHI, Takeo ABE, Regular Members (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan) and Toshio SEKIGUCHI, Regular Member (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152 Japan).

あらまし 断面形状の異なるトンネル内電波減衰定数について、数値解から近似式を得、その成立範囲や断面形状による減衰定数の違いなどを述べている。

1. まえがき

トンネルは損失媒質で囲まれた導波路として作用することが知られており、筆者らは図1に示す円形、だ円形、馬てい形、方形トンネル内の電波伝搬特性を求めてきた^{(1)~(4)}。しかし、伝搬特性を得るには個々の導波路を境界問題としてとらえ、複雑な数値計算を必要とするため、どのような断面にも適用できる簡単な近似式を求めることは大きな意義がある。

本論文では、幅 a 、高さ b の断面寸法をもつトンネル内の電波減衰定数の近似式を提示し、既知の厳密解との比較により、その成立範囲や精度、また、断面形状による減衰定数の違いなどを示す。

2. 減衰定数の近似式

UHF 帯のような周波数領域では、断面寸法が波長 λ に比べて十分大きく、又、トンネルを取り囲む媒質

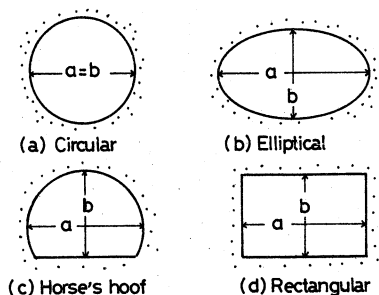


図1 トンネル断面
Fig.1-Cross sections of tunnels.

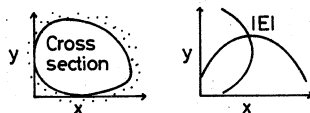


図2 基本モードの断面内電界分布
Fig.2-Field distribution of the dominant mode in tunnels.

の損失角 ($\tan \delta$) は 1 より十分小さい。その結果、トンネルは比誘電率 ϵ_r の誘電体で囲まれたオーバースイズの中空導波路とモデル化できる。この導波路内で減衰の少ない基本モードの電界分布は図2のように断面の中央で最大となり、この性質は水平偏波で電波を励振してできるモードでも垂直偏波のモードでも変わらない。その減衰定数 α は、解析的結果^{(5),(6)}を変形すると次のように与えられる。

方形断面

$$\alpha_h \approx 4.34 \lambda^2 \left(\frac{\epsilon_{r1}}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}-1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \right) \quad [\text{dB/m}]$$

$$\alpha_v \approx 4.34 \lambda^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}-1}} + \frac{\epsilon_{r2}}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \right) \quad (1)$$

$\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$: 側面, 上下面媒質の比誘電率

円形断面

$$\alpha_h = \alpha_v \approx 5.09 \lambda^2 \left(\frac{\epsilon_r}{a^3 \sqrt{\epsilon_r-1}} + \frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_r-1}} \right) \quad (2)$$

これらの式から分かるように、方形と円形での違いは最初の数値係数だけであり、他の部分は全く同一の形式である。又、文献(2),(3)にも示されるように、だ円形や馬てい形の減衰定数もこれらの式の特性とよく一致している。そのため、断面形状にかかわらず、式(1)と同様な形式が成立するように思われる。このことから、幅 a 、高さ b の任意断面をもつトンネルに対し基本モードの減衰定数を次のように仮定する。

水平偏波

$$\alpha_h = K_h \lambda^2 \left(\frac{\epsilon_{r1}}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}-1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \right) \quad (3)$$

垂直偏波

$$\alpha_v = K_v \lambda^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}-1}} + \frac{\epsilon_{r2}}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \right) \quad (4)$$

K_h, K_v : 数値計数

一例として、既に得られている減衰定数の厳密解から K_h, K_v の値を計算すると図3のようになる。この数値を算出したパラメータは、

$\epsilon_r = \epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 5, \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = 0.01 \text{ (S/m)}$, 円形⁽¹⁾, $a = b = 8 \text{ m}$, だ円形⁽²⁾: $a = 8 \text{ m}, b = 6.4$

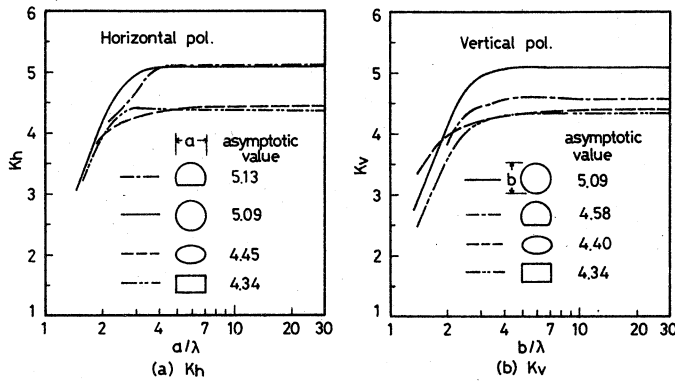


図3 トンネル断面寸法に対する数値係数
Fig.3-Numerical coefficients for tunnel dimensions.

m, 方形⁽⁴⁾: $a = 8$ m, $b = 5$ m
である。

図3から分かるように、波長に対して電界の偏波方向の断面寸法が約4倍以上あれば、どの断面でも K_h , K_v はある一定値に収束している。すなわち、式(3), (4)が成立し、断面形状による減衰定数の違いは数値係数によって表わされることが分かる。

各断面の数値係数を比較すると、方形が最も小さく円形に近づくに従って大きくなる傾向にある。このことは、指定された幅 a と高さ b によって作られる面積の大きな断面ほど減衰が少ないことを意味している。実際のトンネル断面の形状は複雑であるが、円形と方形の間に位置するように思われるので、その数値係数は4.3~5.1の範囲に入ると考えられる。又、馬てい形や方形に近いようなトンネルでの減衰は図3に示した数値係数から比較的精度よく計算できる。

次に、比誘電率に対する近似式の精度を検討するため、前述のパラメータと数値係数を用いて周波数800 MHzを例にとり、厳密解との誤差を図4に示した。ここでは誤差 Δ として次の値で定義した。

$$\Delta = \left| \frac{\alpha_{app} - \alpha_{exact}}{\alpha_{exact}} \right| \times 100 \quad (\%)$$

この図から、近似解の誤差は最大5%以内に入っており、実用上は十分と思われる。なお、図4に対応する垂直偏波の場合は図示していないが、誤差は3%以下である。

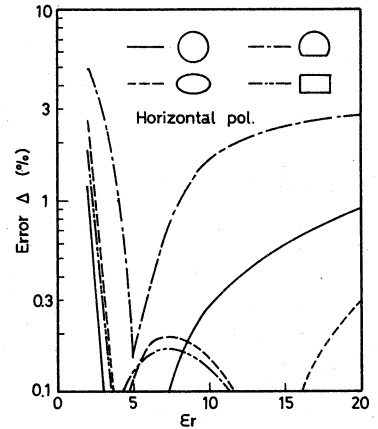


図4 比誘電率 ϵ_r に対する減衰定数の近似解と厳密解の誤差
Fig.4-Error between approximate and exact solution of attenuation constant for relative dielectric constants ϵ_r .

3. むすび

断面形状の異なるトンネル内電波減衰定数の近似式を提示し、断面形状による減衰特性の要因が近似式中の数値係数によって表わされることを示した。

文 献

- (1) 山口, 関口: "損失媒質で囲まれた中空円筒内のモードの伝搬特性", 信学論(B), J62-B, 4, pp.368-373 (昭54-04).
- (2) 山口, 清水, 阿部: "だ円断面をもつトンネル内の基本波の伝搬特性", 信学論(B), J64-B, 9, pp.1032-1038 (昭56-09).
- (3) 山口, 阿部, 関口: "トンネル内の基本モードの伝搬特性", 信学論(B), J65-B, 4, pp.471-476 (昭57-04).
- (4) 山口, 阿部, 関口: "トンネル内電波減衰特性の改善(1)", 信学技報, A-P83-11 (1983-05).
- (5) Marcatili, E.A.J. and Schmeltzer, R.A.: "Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers", Bell Syst. Tech. J., 43, 2, pp.1783-1809 (July 1964).
- (6) Alfred, G.E., Robert, L.L. and Peter, F.S.: "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels", IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-23, 2, pp.192-205 (March 1975).

(昭和58年9月2日受付, 10月20日再受付)