導波管布設のモデル実験

Experiments in Laying Waveguide with Models

吉田博通*福田重穂* Hiromichi Yoshida Shigeho Fukuda

内 容 梗 概

ミリ波導波管は製造時に非常にきびしい寸法精度を要求されるが、その布設に当たり精度、特に管軸の直線偏 差による性能悪化が重要な問題となってくる。ここでは円形導波管の直接埋設につきモデル実験を行ない、 真 直性を保持できる布設条件を見出すため、 堀削みぞの深さ、 地盤や被せ土の構成、 厚さ、 地盤うねり、 支持物、 荷重などの影響につき検討を行なった。その結果、 地盤うねりの影響は砂や砂利を敷いて除去できるし、 導波 管の真直性を保つにはそれが載る面の平たんさと均質さが重要であり、 また固定支持は真直性を悪化させるの で好ましくないことなどがわかった。

1. 緒 言

円形導波管によるミリ波伝送は, TE₀₁ モードの広帯域性と低損失 性とから伝送路の理想的な特性を持っているが, 導波管のわずかな 不完全性によってもその伝送特性が悪化する。不完全性としては, 導波管の直径変化, だ円度および管軸の直線偏差, ならびに接続部 の直径差, くい違い, 折れ曲がりがあるが, この実用化に際しては 般関係式は次式のように書くことができる。

第1表 モデル実験における各因子の縮尺

	11 = X			, .				
因 子	ð	1	<i>p</i>	r_w	rs	EI	K	
縮尺	m	m	m	1	1	m ⁵	1	
第2表 導波管の原型およびモデルの諸元								
導 波	管	原一型	縮	尺	モデル	モディ	レ実測値	
鋼管外径	(mm)	60.5	1/5		12.1	12	.1	
鋼管内径((mm)	53.5	1/5					
らせん内径((mm)	51	1/5			-	a 	
単 長 ((m)	2.5	1/5	1/5 0.5		0.5		
比重量	(g/cm ³)	1.81	1/1		1.81	1	.85	
曲げ剛性	(kg•cm ²)	5.45×10^{7}	1/32	125	1.74×10^{4}	1.72	$\times 10^{4}$	
実験全長	(m)	22.5	1/5		4.5	4	.5	

布設による管軸の直線偏差が大きな問題となってくる。これについては Bell 研究所 Rowe および Warters氏⁽¹⁾,日本電信電話公社電気通信研究所⁽²⁾,日立製作所中央研究所,日立電線株式会社⁽³⁾などから理論的研究や実験結果が報告されている。

導波管線路の布設は地下埋設に比較的安定性があり,経済的にみ ると管路布設より直接埋設のほうが有利であると考えられている が,これに関する報告は非常に少なく,わずかに日本電信電話公社電 気通信研究所⁽²⁾,日立電線株式会社⁽³⁾などの報告にみられるだけで ある。これらは実際の規模で実験を行ない,直接埋設の可能性を実証 して大いに有意義な結果を得ている。しかしまだまだ布設上の問題 点は残されており,そのための実験を布設条件を変えながら実際的 規模で行なうことは非常にたいへんなことである。それでここでは 導波管の直線偏差に注目し布設条件を比較的容易に変えるためにモ デル実験を行ない,その真直性を保持できる最適布設条件につき検 討を行なった。

2. 実 験 方 法

2.1 モデル実験における縮尺

モデル実験では,原型とモデルにおいて起こる二つの物理的また は力学的現象が共通の方程式を満足するようにモデル諸量の縮尺を 決めなければならない。いま問題としているのは布設後の導波管の 直線偏差であり,それに関係すると考えられる諸因子は次のような ものである。

- ô:直線偏差
- 1:標準長さ

p: 土圧,および重量物などによる面圧
 γ_w,*γ_s*: おのおの導波管および土の比重量

いま,標準長さの縮尺をmにとると,各無次元積が原型とモデル で同じ値を保つためには,各因子の縮尺を第1表のようにすればよい。すなわち,導波管の比重量は実物と同じでよく,曲げ剛性の縮 尺はm⁵にしなければならない。

2.2 モデル導波管の寸法および構造

導波管の原型としては次の鋼管外装らせん導波管を考えた。すな わち,内面に心線径 0.23 mm の第1種ホルマール銅線をらせん状に 密巻きし,鋼管を外装体とし,らせんと鋼管との間にガラステープ 強化層および導電性絹テープ損失層を設け,エポキシ樹脂を注入し て成形したものであり,その諸元は第2表に示すとおりである。 いま,実際の導波管全長約 25 m に相当するモデル実験を行なう こととし,実験場所や装置などの関係上モデル全長を約 5 m にと り,したがってモデル縮尺 1/5 で実験を行なうことにした。

次に、これらの諸元を
満足するモデル導波管と
して第1図のような断面
構造のものを製作することにした。これは、直径
8.2 mmの冷間引抜き仕
上げを行なった真直なアルミニウム棒の周囲に接着性のよいエポキシ樹脂を流し込んで成形硬化させたものであり、その比重量および曲げ剛性実測値は第2表に示すとおり第1図



モデル導波管の断面構造

EI: 導波管の曲げ剛性
K: 地 盤 係 数
ここで地盤係数とは、地盤を単位長さだけ沈下させるに要する圧
力である。したがって一般関係式は
$f(\delta, l, p, \gamma_w, \gamma_s, EI, K) = 0$ (1)
となる。ここで次元解析を行ない無次元積を求めると、(1)式の一
* 日立電線株式会社日高工場



で,所要の値を得た。また,その接続はフランジ接続とし,両端に 実物の1/5大の黄銅製フランジをエポキシ樹脂で接着固定して行な うことにした。なお,フランジの接着強度は曲げ試験により十分な 強度を持っていることを確かめておいた。第2図はここで使用した モデル導波管の外観写真である。 $-\frac{11}{720}(\varepsilon_2 - 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{-1} - \varepsilon_{-2}) \Big\} \dots \dots (7)$ ここに、 n: 任意の正整数 h: 測 定 間 隔

565

2.3 モデル導波管の直線偏差測定法

モデル導波管は地下にあるうえに直線偏差が小さいので、その量 を測定するのは困難である。それでここでは導波管の表面にワイヤ ストレインゲージをはり付けて、直線偏差を生ずるときの導波管の 曲げによる縦ひずみを測定し、そのひずみから次の方法で算出する ことにした。

いま,第3図に示すように変形前における導波管の縦主軸に沿って x 軸を,それと垂直下向きに y 軸をとり,導波管の変形後における主軸曲線 NN を

y=f(x)(3) とすると,任意の点における曲率は直線偏差が小さいので

ここに, *ρ*: 曲率半径

と書ける。また一方,曲率半径 ρの点における導波管表面の縦ひず みは

ここに、 ε: 導波管表面の縦ひずみ

2r: 導波管の外径

である。(4)式と(5)式より導波管変形後の主軸曲線は次式のように求まり,直線偏差を知ることができる。

$$y = \frac{1}{r} \iint \varepsilon \, dx \, dx + c_1 x + c_2 \quad \dots \quad (6)$$

ここに, c₁, c₂: 積分定数

ところでひずみ ε はある間隔をもって測定される値なので実際に は数値積分を行なうことになり、ここでは Bessel の補間公式から誘 導される公式⁽⁴⁾を使用することにする。 これは次式に示すとおり で、測定値であるひずみの値がいずれも均等に重さをおかれている。 ε_i: i 番目のひずみ

この数値積分を2回くり返せばよい。なおここでは,主軸曲線の 両端がx軸上にくるように一次傾斜を修正した。これらの数値計算 には電子計算機を使用することができる。

なお、ひずみ測定に使用したワイヤストレインゲージはゲージ長 さ3mmのベークライトゲージであり、モデル導波管軸方向の間隔 hを15mmとし約300箇所で導波管上下にはり付ける2ゲージ法 を行ない温度補償をした。

2.4 布設方法および実験条件

導波管埋設後の直線偏差に影響する布設条件は, 堀削みぞの深 さ・幅, 土質, 地盤や被せ土の構成, 厚さ, 比重量, 平たん度, ち 密度,障害物や支持物の有無と間隔,保護物の有無,地表面への荷 重,湿気,温度などが考えられるが、ここではおもに堀削みぞの深 さ,地盤や被せ土の構成,厚さ,地盤うねり,支持物,荷重,砂の 乾湿などの影響について検討を行なうことにした。実験は長期間に わたるので測定や気象条件の関係上屋外で行なうのをやめ,第4図 のように周囲を鋼板で囲ってみぞの代わりとし、その中に土を入れ て埋設する方法をとった。導波管より下部を地盤層および上部を被 せ層ということにする。ここで固定支持およびフィンは導波管の沈 下を防ぐためのもので、前者は装置底面から棒を立て導波管を完全 に固定したものであり,後者はまくら木状に入れて支持面を広くし たものである。荷重は図のように中央にかけ、また地盤のうねりは 中央が山になるようにつけた。地盤は各実験ごとに地盤係数を測定 して一定条件になるように努めた。小さな平板などで手で普通に固 める程度だと、 ローム質土地盤、 乾燥砂および湿気を含む湿潤砂の 地盤係数はそれぞれ 5 kg/cm³, 5.5 kg/cm³ および 6.5 kg/cm³ 程度 となるので毎回この値に合わせることにし、 平たんにするには直線



定規を作ってかきならした。なおここで地盤係数の測定は,直径65 mmの円板(33.2 cm²)上におもりを10kgまで1kgずつ加えて行 なった。 第3表にここで行なった実験条件を総括した。第4図および第3 表を見ながら検討事項別に説明を加えると次のようになる。 (1) 地盤土面および地盤砂面のうねりの影響 地盤土 a 面を堀削地盤と考えてそこにうねりがあった場合の導 665

昭和40年3月

日 立

評 論

第47卷第3号

9

第3表 モ 宝 駼 冬 デ N

				2	第3表 モ	デ	ル	実 験	条	件			
実	験	地 盤	層 厚	被	せ 層	厚	5 :	ねり	荷重	砂	の	支持, フィン	/#. +*.
区分	番号	小石,砂利 <i>h</i> b	砂 hc	砂 ha	小石, 砂利 he	□ - △ 質土 hf	波 長 λ		W (kg)	乾	湿	の有無と状態	1997年1月11日1月11日1月11日1日11日1日11日1日11日1日11日1日1
A		0	20	30	0	100 300 300 200		無	0 0 80 0に厚す	- 乾	燥	固 定 支 持 2点(両 端)	
В		0	20	30	0	300 100 300 300 300		無	0 0 0 80 0に戻す	- - - - - - -	潤	固定支持 2点(両端)	
С	1	0	20	30	0	300		無	0	乾	燥	無	
	1	0	20		0	300		4m.	0	- 湿	潤		
E		0	20	30	0	100 300 300 300 300	800	5	80 0 0 80 160 0に戻す	 	燥	無	
F	$ \begin{array}{r} 6\\ 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\\ \end{array} $	0	20	30	0	300 100 300 300 300 300 300 300	800	5	160 0 80 160 0に戻す 160	湿 湿	潤	無	
G	1 2 3	0	20	30	0	300	800	5	0 80 160	乾	燥	フィン5 個所 1,125 mm 間隔	
н	$\frac{1}{2}$	0	20	30	0	300	800	5	0 80 160	- 湿	潤	フィン5個所 1,125mm間隔	
I	$\frac{1}{2}$	0	20	30	0	100	800	5	0 80	- 湿	潤	無	わちが 100mm のときの
J	$\frac{1}{2}$	0	20	30	0	100	800	5	0 80	- 湿	潤	フィン5 個所 1,125 mm 間隔	荷重の影響
K	$\frac{1}{2}$	0	20	30	0	300	800	5	0	湿	潤	無	埋設数時間後測定 埋設一週間後測定
L	1	0	20	30	0	300	800	5	0	湿	潤	フィン5個所 1 125 mm 間隔	埋設数時間後測定 埋設一週間後測定
M	1	0	20	30	0	300			0	- 湿	潤	固定支持5点 1 125 mm 問隔	主成 恐问及现入
N	1	0	20	30	0	300	800	10	0	- 湿	潤	無	うねり振幅を 10 mm にした 影響
0		0	20	30	0	300	1,600	5	0	- 湿	潤		うねり波長を 1,600 mm に した影響
P	1	0	20		0	100			0	湿	潤		地盤砂 c 面に波長 800 mm,
Q		0	40	30	0	300 100 300 300 300	800	5	0 0 0 80 0に戻す	- 湿	潤	無	振幅3mm のうねりをつけた hc を 40mm にした影響
R	$\frac{1}{2}$	0	20	30	30	270	800	5	0 80 0に戻す	湿	潤	無	eは小石層
S	1 2 3	0	20	30	30	270	800	5	0 80 0に戻す	湿	潤	無	eは砂利層
Т	$\frac{1}{2}$	0	20	0	0	330	800	5	0 80 0に早す	_ 湿	潤	無	h_d を 0 にした影響
U		0	0	30	0	100 300 300 300	- 800	5	0 0 80 0に戻す	_ _ 湿	潤	無	<i>hc</i> =0 であるが地盤 a のうね り部を平たんにするだけの砂 は入れてある
v	1 2 3	15	5	30	0	300	800	5	0 80 0に戻す	_ 湿	潤	無	bは小石層
w	1 2 3	15	5	30	0	300	800	5	0 80 0に戻す	_ _ 湿	潤	無	bは砂利層
X	1 2	0	0	0	0	130 330	無		無 0			無	ローム質土だけで埋設

— <u>92</u> —

(注) 単位は mm, 記号は第4図と同じ。
 長さは5倍, 重量は125倍すれば実際数量に相当する。
 実験 K-2, L-2 以外は埋設後数時間程度で測定。

導波管布設のモデル実験 567



第5図 直線 偏差 測 定 結果

波管直線偏差に及ぼす影響を検討するため、うねりの無い場合あるいはうねり波長 λ =800 mm・振幅 α =5 mm, λ =1,600 mm・ α =

雑になるので文章中で述べることにし,図示はしなかった。次に検 討事項別に結果を述べその検討を行なう。ここで()内数量は実 際の場合に相当する数量を示す。

5 mm および λ =800 mm • α =10 mm の場合について実験を行なった。また地盤砂 c 面にうねりがある場合の影響を実験 P で検討することにした。

(2) 固定支持およびフィンの影響

導波管の沈下を防ぐため固定支持やフィンを入れた場合どの程 度効果があるか,またそのために悪影響はないかなどを検討する ため,実験Mでは固定支持を,ならびに実験G,H,JおよびL ではフィンを入れて実験を行なった。また導波管は全体的に一様 に沈下すればその直線性は保たれるはずであるが,沈下しにくい 箇所などがあると影響が表われてくるので,一応実験AおよびB では両端に固定支持を入れて導波管の全体的沈下量を測定するこ とにした。

(3) 荷重, 被せ土厚, 砂利, 砂の乾湿などの影響

地面上に車両などの重量物が載る場合を想定して 80 kg (実際 の 10 t に相当) あるいは 160 kg (同 20 t)の荷重をかけた場合の 沈下量について実験を行ない,また被せ土厚を薄くした場合すな わち埋設深さの浅い場合について実験 I と J,および小石や砂利 を使用した場合の影響について実験 R,S,V および W で実験を 行なった。実験 E と F では一度加えた荷重の除去後再び同荷重 を加えた場合の検討である。また乾燥砂の場合と湿気を含んだ砂 の場合の沈下量の差異を実験 A と B, C と D, E と F および G と H で検討した。

(4) 地盤砂や被せ砂のない場合および時間による変化

実験Tでは被せ層に砂や小石を用いないでローム質土だけを用いる場合,実験Uでは逆に地盤層を平たんにするための最小限の 地盤砂しか用いない場合および実験Xでは全部ローム質土だけで 埋設する場合につき検討を行なった。

以上の方法と条件で行なった直線偏差の測定結果を第5図に示

す。ただしここで実験 E-5, E-6, F-5 および F-6 を書くと図が複

3.1 地盤土面および地盤砂面のうねりの影響

第5図の各実験結果を見ると地盤土 a 面のうねり波長 800 mm あ るいは 1,600 mm に相当するうねりは認められない。うねりのない 場合と同様の結果であることから,地盤土面のうねりは影響してい ないといえる。 すなわち埋設するために 堀削した地盤面に 5 mm (25 mm) あるいは 10 mm (50 mm) 程度の高低があっても,その面の 地盤係数が 5 kg/cm³ 程度の場合は砂や砂利などを 20 mm (100 mm) 程度敷いて平たんにすればその影響は除けることがわかる。

次に同図実験 P では地盤砂 c 面 のうねり波長と同じうねりが はっきりと表われていることから, 導波管の直線偏差はその載る面 のうねりから直接影響を受けてほぼその地面の形状に類似すること がわかる。したがって導波管の布設にあたっては, a 面は少々う ねっていてもよいが, c 面を平たんで均質なものにすることが重要 である。

3.2 固定支持およびフィンの影響

第5図実験Mを見ると、固定支持を入れた場合は支持間隔と同じ 波長のうねりが発生しており、その振幅は約0.7mmである。また 同図実験A、Bとほかとの比較により支持中間部の沈下量は埋設深 さが約300mmにおいて1mm前後であり、導波管の全体的沈下量 はこの程度であるといえる。すなわち固定支持を入れることはかえ って導波管の直線偏差(うねり)を生じさせる原因となるので、連続 かあるいは支持間隔を非常に小さくするのでなければ入れないほう がよい。したがって逆に大きな石や岩などのような固定支持に近い 障害物が存在する場合は、それを取除くかあるいは砂や砂利などを 厚めに敷いてその影響を除くことが必要である。

次に導波管下部地盤をあるばね常数を有する弾性体と仮定し*, 等間隔の固定支持で支持する場合の直線偏差を理論的に計算してみ

3. 実験結果と検討	
	の主軸曲線を求める式は次の微分方程式となる。すなわち
が実験 K および L で比較実験を行なった。	方向を x 軸に,それと直角下向きに y 軸をとると,埋設後の導波管
も考えられる。ここでは埋設後数時間後と一週間後だけではある	る。第6図のように固定支持上に支持された導波管の変形前の主軸
また埋設後時間とともに導波管の直線偏差が変化していくこと	等間隔の固定支持で支持する場合の直線偏差を理論的に計算してみ

* この仮定は土質学上しばしば行なわれることであり、鉄道線路の道床の場合も同様で、実際の場合とかなりよく合致するといわれる。

評

論

第47卷第3号



第6図 弾性体上にある導波管の固定支持状況

- ここに, EI: 導波管の曲げ剛性
 - w: 土圧による等分布荷重

k: 弾性体(ここでは地盤)のばね常数 いま支持点間の中点に原点をとり上式を解くと





第7図 固定支持間隔と支持中央点の直線偏差との関係

すなわち初めの荷重による変化は大きいが,あとはあまり大きく変 化しないことがわかった。

3.4 地盤砂や被せ砂の無い場合および時間による変化

第5図実験T,UおよびXからわかるように砂や砂利をほとんど 使用しなくとも土質が均質で導波管の載る面が平たんであれば、砂 のある場合となんら変わりはないようである。しかし一般には石, 岩,そのほかもろもろの障害物があったりして不均質であったり,堀 削地盤を平たんにすることが困難であったりすることが多いので, 砂や砂利を使用するほうが安全かつ容易な道であると思われる。



となる。ここで x=0 とおくと支持中央点における直線偏差を与えることになる。いま実際の導波管についての計算例を第7図に示す。ここでは支持間隔が 3m 程度以上ではもはや導波管の直線偏差(沈下量)は増加しない。

次に第5図で実験 E と G, F と H, I と J および K と L を比 較すると、フィンによる沈下の減少やうねりの発生は認められなく、 ここで用いた 50 mm×20 mm (250 mm×100 mm) 程度のフィンを 約 1,100 mm (約 5.5 mm) 間隔で入れてもほとんど影響はないこと がわかる。しかしこのフィンも大きくなるとかえって固定支持的性 質を持ってきてうねり発生の原因となることも考えられる。また前 述した石や岩などもその大きさによってはフィン的性質を持ってく ることにもなろう。

3.3 荷重, 被せ土厚, 砂利, 砂の乾湿などの影響

荷重による導波管の沈下量は第5図により,被せ土厚300mmで は荷重80kgで約0.2~0.3mmおよび160kgで約0.4~0.5mmで あり,被せ土厚100mmでは荷重80kgで約1mmである。当然な がら被せ土厚の少ないほうが大きく影響を受けている。

また同図実験 R, S, V および W と他とを比較すると,小石や砂 利を用いたほうが特に荷重による沈下がやや少ない。締り具合から 考えると小石だけより砂利のほうがよく締るので良いと思われる。

次に同図実験 A と B, C と D, E と F および G と H の比較に より,砂は乾燥しているものより湿気のあるほうが荷重による影響 も少ないようで後者のほうが 0.2~0.4 mm 沈下量が少なくなってい 最後に同図実験 K および L より一週間以内程度の時間経過では ほとんど変化がないということがいえる。

4. 結 言

以上の結果をさらに要約すると次のようになる。

(1) 堀削地盤面のうねりは,砂または砂利と砂などを実際寸法 で100mm程度敷くことによりその影響をほとんど除去できる。 また導波管の載る面の状態が直線偏差に直接影響を及ぼすので, 堀削地盤面は少々うねっていてもよいから,導波管の載る面を平 たんに均質なものにすることが非常に重要である。

(2) 固定支持はうねり発生の原因となるので間隔が非常に小さいのでなければ入れないほうが良い。またフィンは実際寸法で支持面積が250mm×100mm程度のものを約5.5m間隔に入れたぐらいではなんら影響は表われない。

(3) 荷重による影響は,埋設深さの浅いほど大きい。また地盤 に砂利層を設け,その上に砂を敷いて埋設するのが最も荷重の影 響が少ないようである。砂は湿気のあるほうがよく締め固まり良 好である。

(4) 一週間程度の時間経過では、ほとんど変化はみられなかった。

さらにこれらの結果をフーリェ解析し各種うねり曲りに対する検 討も考えており、なお今後は振動や動荷重による影響、粘土質地盤 の対策、橋梁対策ならびに布設機械の検討なども必要と考える。

終わりにのぞみ,本研究に関しご指導をいただいた日立電線株式 会社山本部長ならびに実験に当たりご協力をいただいた佐々木,恩 田両氏に深謝の意を表する。

参考文献

る。これは湿気のあるほうがよく締め固まり,安定性もよくなるた めと考えられ埋設時には砂を湿めらせて使用しよく突き固めるのが 良いことになる。 また実験 E-5, E-6 および F-5, F-6 は前述の理由で図示しなか ったが,おのおの実験 E-4 および F-4 とあまり変わりがなく,初 めの荷重後それを取り去っても導波管の直線偏差はあまり復帰しな

いし, 再荷重後も初めての荷重後の直線偏差とほぼ同様であった。

 H.E. Rowe & W.D. Warters: Transmission Deviations in Wavguide due to Mode Conversion Theory and Experiment, Proc. I. E. E., 106, Part B, 28 (1960)
 日本電信電話公社電気通信研究所: ミリ波通信方式の研究 電気通信研究所研究発表会論文集第8号(昭38-12)
 御子柴,福田: 昭和37年電気四学会連合大会 No. 921
 乗松立木: 数値計算法, 163(昭-33電気書院)