



土木研究所資料
第880号

堀割道路の騒音に関する模型実験

交通環境研究室

昭和48年9月

建設省土木研究所

目 次

はしがき

1	堀割道路とこれまでの研究	1
2	実験測定方法	3
3	測定結果の概要	6
4	実験結果の表示方法	8
5	ワイドノイズの実験結果	10
6	$\frac{1}{3}$ オクターブノイズの実験結果	13
7	吸音材設置の効果	17
8	推定計算方法	19
9	堀割道路の特徴	21
	あとがき	22

堀割道路の騒音に関する模型実験

交通環境研究室

は し が き

道路騒音の防除を目的として種々の対策が立案され、実施されているが、この中で、道路構造として特に注目を集めているのが堀割型式の道路である。堀割道路と呼ばれる形態について特に定義はないようであるが、一般に両カット（両切上）型式の道路のことを称しているようである。また現在計画されている同名称の道路では、両側の擁壁が垂直に切り立っている場合が多い。さらに両壁の頂上（地面位）部から蓋を張り出して、蓋の上面を一般道路用または緑地帯用地として利用する計画である。従って堀割内で発生した車両音は、道路中心線上の帯状の開空面から、地上に放出されることとなる。

この実験は、このような形態の堀割道路が音響的にどのような特質を示すものか、すなわち、防音効果の有無、また有効とすればその効果の量的な把握、さらには防音用附帯設備によって得られる効用などを実験的に究明しようとして行なったものである。

1. 堀割道路とこれまでの研究

(1) これまでの研究の堀割道路への適用の可能性

音源と受音点との間に障害物が存在する場合に受音点の音圧は従来は音の回折を計算することによって推定されてきた。たとえば、「無限長障壁による音の減衰」などがそれである。この方法は少なくとも従来の片切上において利用し得ることが確認されている。

これとは別に音波を個々の車両とするのではなく、開空面を音源と見なす考え方がある。したがってこの場合音源は点ではなく面として扱うことになる。

以上の二つはそれぞれ特徴をもっていて、いずれも堀割道路に適用しうる可能性をもっており、本文でも応用されることになるので、以下にその概要を述べる。

(2) 障壁におき換える方法

半無限障壁による減衰は、前川の研究等により現在ではもつぱら、障壁の有無による音の行路長の差 δ を半波長($\lambda/2$)で除した値 $N = 2\delta/\lambda$ から求められる。壁による減衰値 ΔL は、前川の実験曲線の近似式として

$$\Delta L = 10 \log_{10}(N+0.2) + 12 \dots \dots \dots (1)$$

が利用されている。ただし、(1)式は $N < -0.2$ において使用できない。

※
土木研究所では独自の実験の結果(2)式を得ている。

$$\Delta L = -5 \log |N| - 2 \quad (N < -0.1) \quad (21)$$

$$\Delta L = 30N + 6 \quad (-0.1 < N < 0.1) \quad (22)$$

$$\Delta L = 6 \log N + 15 \quad (0.1 < N < 1.5) \quad (23)$$

$$\Delta L = 10 \log N + 14 \quad (N > 1.5) \quad (24)$$

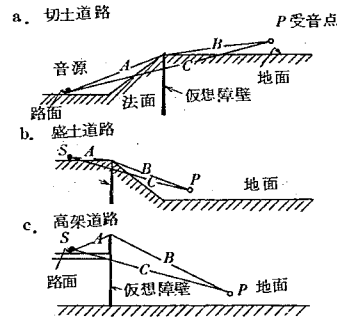
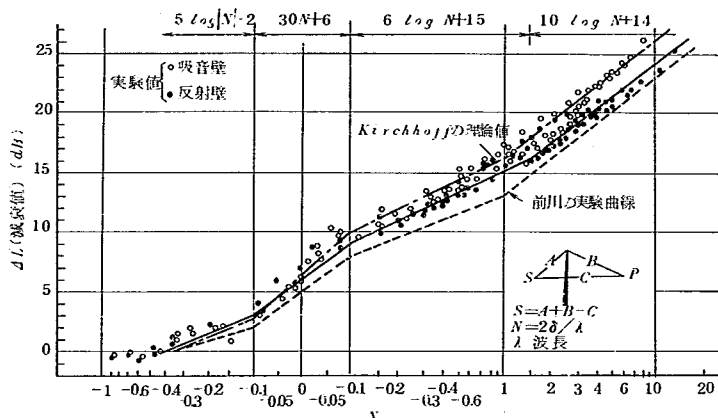


図-1 仮想障壁の考え方

上のような ΔL は、ほぼ無指向性の音源から自由空間に音波が放射されている場合に適用できるものであるから、堀割道路に当てはめるとするならば、車道巾に対して擁壁高が十分に小さい場合にしか応用できないはずである。また、この方法で音圧を推定する場合には音源からの直接音だけでなく、路面あるいは擁壁からの反射音をも考慮し計算すれば、いくぶん実態に近似させうるであろうが、この場合に正反射するという仮定についての保証がない。



図一 2 半無限障壁による減衰値

(3) 面音源として扱う方法

掘割の中では、擁壁および路面の相互反射により、恐らく拡散状態になっているものと想像される。このような場合には掘割内空間と外界空間の接する境界面に音源があり、外界に向かって音波が放射されるものとして扱うことが考えられる。この場合には音源は境界面であるから、面音源として扱う必要がある。建築物の窓から放射される騒音について、このように面音源として扱う例がある。

面音源として扱う場合は、まず、単位面積当りの音響エネルギーを定めてやる必要があるが、これが定まれば任意の音源面形状に対して、微少部分からの音響エネルギーを積分してやることにより、全体からの音圧を求めることができる。この際さらに進んで微少部分のそれぞれが放射指向性をもっているものとして積分することも可能である。

この場合の指向性は、音源面鉛直方向を0度として、鉛直線と任意方向の角度を θ とするならば、 $\theta = 0^\circ$ 方向におけるエネルギーを J_0 とすると

$$J = J_0 \cos^n \theta \dots \dots \dots (3)$$

として扱われるのが常である。無指向性と(3)式において $n = 0$ の場合である。

$n \neq 0$ ならば全体面も指向性を示し、 $n = 0$ ならば測定距離が充分大なる場合全体面は無指向性となる。

また測定点が音源面の至近距離にある場合の音圧は、 $n = 0$ では無限大、 $n \neq 0$ では有限となる。この意味において $n \neq 0$ とした方がより実態に近い。

2. 実験測定方法

(1) 測定室および測定装置

測定室は土木研究所千葉支所に設置されている無音室である。室の内容積は約 180 m^3 ($7\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$) であり、測定点（マイクロホン位置）の設定は隣接する計測室において、遠隔制御ができる仕組みとなっている。本実験の場合は、マイクロホンを直線的に移動しながら音圧を連続記録する方法と、円弧状に移動しながら連続記録する方法の二通りを採用している。

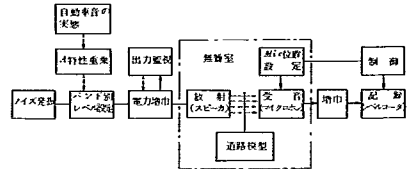


図-3 実験計測ブロック図

全体のブロック図は図-3に示すごとくである。

* 騒音実験室：土木技術資料13-9，昭和46年9月，土木研究会

(2) 音 源

音源ソースには中心周波数5，10，20，40KHzの $1/3$ オクターブバンドノイズと，幹線道路騒音の分析によって得られた周波数構成にA特性を重畳し，さらに40倍（波長で $1/40$ ）した周波数構成を有するワイドノイズの二種を使用している（図-4）。

スピーカーは市販の高音用ツウエイタ（オンキョウTW-7S型）を使用し，片方向につき0.9m間隔に6個，反対方向車線には千鳥に同数個配置した。したがって全体としては0.45m間隔となり，現場寸法で車頭間隔18mに相当する。（走行速度を60km/hとすると交通量3,300台／時に相当）なおスピーカーは，ホーン端部と路面との間隔を10mmにして伏せて設置した。

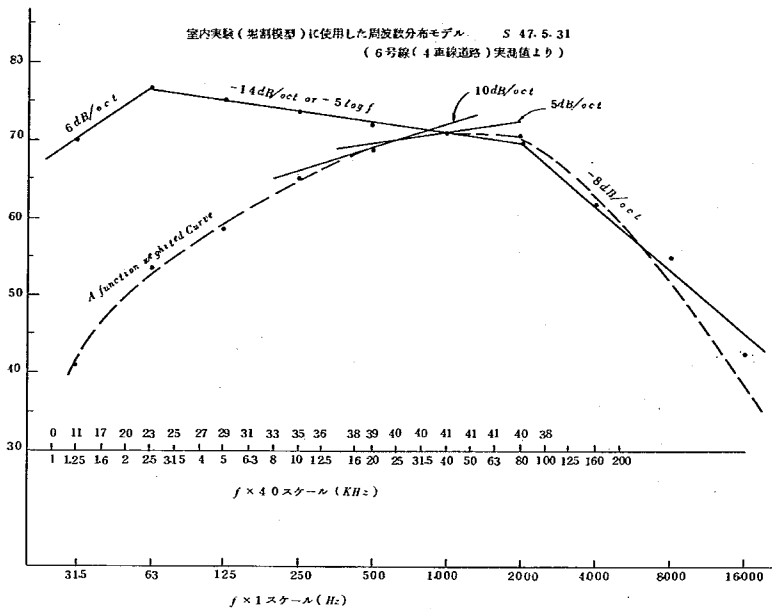


図-4.a ワイドノイズの周波数構成（目標値）

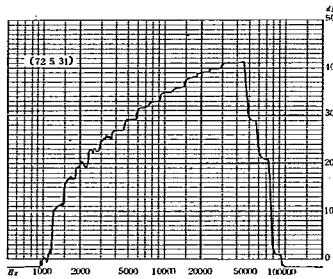


図-4.b ワイドノイズの f 特性

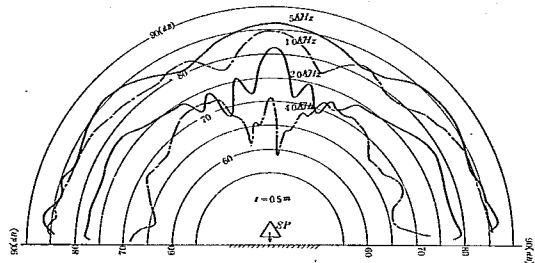


図-4.c $\frac{1}{8}$ OCT ノイズの指向性

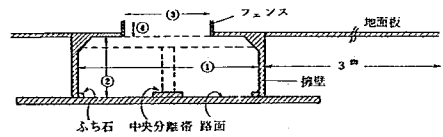
(3) 受信器および記録読みとり

受信用マイクロホンはB・K社製1/2インチ型コンデンサマイクロホンを使用し、バンド別測定の場合には、1/3オクターブフィルタを挿入した。マイクロホン位置は自動的にレベルレコーダに記録されるが、読み取り時には、直線移動の場合は10cm毎に、円弧移動の場合には1°または6°毎に読み取った。

(4) 掘割道路模型

実験の対象とする道路は、関東地方建設局の構想図によった。すなわち車道巾負 2 2.5～4 2 m (4～8車線)，左右擁壁は直立 6.5 m 高とし，上部両サイドオーバーハングは任意に変更できるものとし，さらにオーバーハング末端には落下防止用のガードフェンスを設ける。フェンス高は 0.5，1.5，2.5 m の 3 種とする。以上の原寸に対し縮尺 1/40 で木合板を主材とした模型を製作したものである。以上の各項寸法の組み合わせにより成形し得る条件は非常に多いが，そのうちから下の条件について実験を行なっている。

ワイドノイズを使用した実験では図-5の通りであり，バンドノイズを使用した実験では，図-6のごとくである。図-6のⅠ～Ⅶは防音用の吸音材の効果を見出す目的で行なったものである。



	原型寸法	模型寸法
① 巾 負	56 cm	225 m
② 擁壁高	16 cm	65 m
③ 側空巾	125, 30, 50 cm	5, 12, 20 m
④ フェンス高	125, 625 cm	05, 25 m

図-5 掘割模型断および寸法

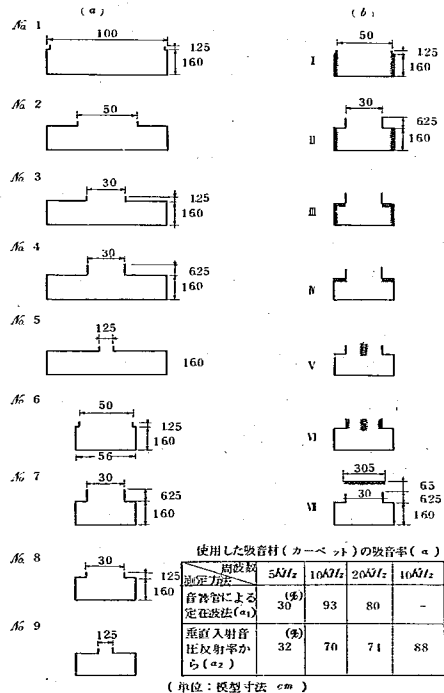


図-6 掘割模型の断面形状

3. 測定結果の概要

(1) 広巾員で正面に音源がある場合の音圧パターン

8車線相当すなわち模型寸法100cm車道、16cm擁壁（現場寸法40m車道、6.5m擁壁）の場合の計算値（障壁による減衰を適用）と実例値を示したのが図-7および図-8である。図-7は地面反射がない場合で、図-8は地面反射が100%の場合である。なお音源は測定点正面に2個だけあるときのものである（現実には1個ずつ測定して合成した）。図のごとく地面に近い点以外では、計算値と実測値の差は±2dB程度である。したがってこのような状況下では障壁による減衰計算を適用して支障ないといえる。ただしその場合反射音をも算入する必要があり、さらに音源が多数個連らなっている現実の場合には、単に正面位置からの音の減衰だけを計算するのではなく、車道方向のそれぞれについて求める必要があるので、非常に計算の手数を要する。後者についての試算の結果は図-9のようになっており、(a) : (b)はおよそ1 : 0.8位となっている。

(2) 中幅負の場合の音圧パターン

4車線相当すなわち模型寸法50cm車道（現場寸法20m車道）の場合の実験値と計算値（障壁減衰による）を示したのが図-10である。計算に際して音源の数（12個）、配置（45cm間隔千鳥）、 $PWL(78\text{ dB})$ はすべて実験条件に合致させたものである。開口方向空間部においては実験値は滑らかで、計算値は複雑に屈曲している。影部においては実測値計算値ともに滑らかではあるが、両者間には約4dBの相異が生

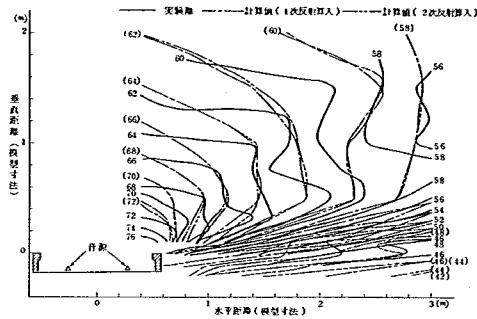


図-7 8車線掘割道路の音圧レベル分布（地面反射なし）

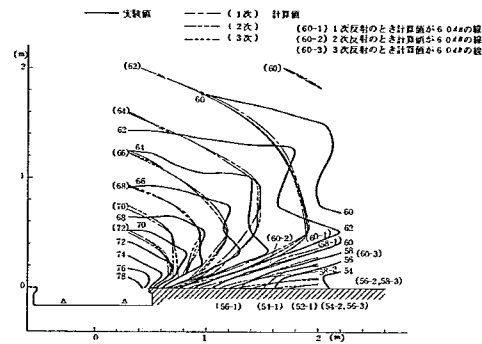


図-8 8車線掘割道路の音圧レベル分布（地面100%反射）

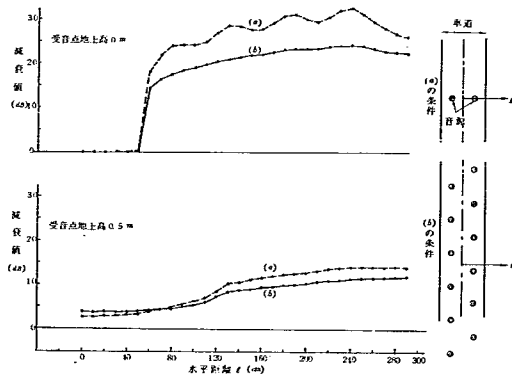


図-9 音源の位置条件による減衰値の相異（2次反射まで算入）

じている。つまり煩雑な計算を行なっても
実態とはかなりかけ離れた結果しか得られ
ないことを示している。

(3) 小開空巾の場合の音圧パターン

4車線堀割道路にオーバーハングを設け、
開空巾を 12.5 cm (現場寸法 5 m)とする
と、前項のごとき手順で求めた計算値とは
さらに差異が大きくなり、特に反射性地面
のある場合にはまったく計算値は役に立た
なくなる(附図-1, e 参照)。

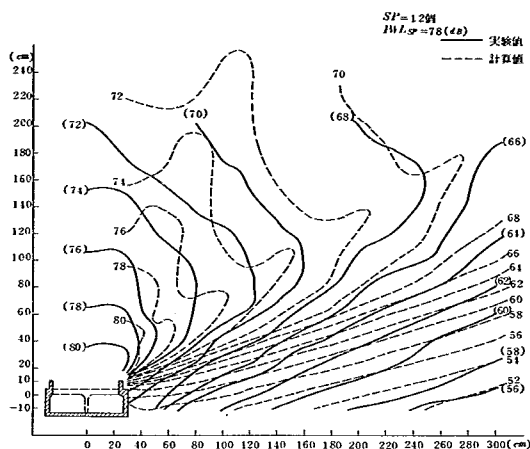


図-10 4車線堀割道路の音圧分布

4. 実験結果の表示方法

(1) 障壁による減衰値の適用

前節で障壁の減衰値を応用した場合、どの程度の対応を示すかについて述べた。この結果、広巾員、広開空巾の場合は適用できるが、中から小開空巾の場合には適用できないことが判った。また障壁減衰値を適用する場合には数次の反射音をも計算しなければならないので、計算そのものが非常に煩雑となり、およそ実用的ではないといえよう。

(2) 指向性面音源としての理論の適用

面音源は理想的には点音源が無数に分布しているものと考えることができる。そして各点音源の位相がまったくでたらめであると仮定するならば、干渉などの波動性が無視できるから、各点からの放射エネルギーを積分してやればよい。この場合各点音源が(3)式のごとき指向性をもっているとし $n = 1$ とするならば、開空面中心から鉛直方向の距離減衰は下の式で求めることができる。^{*}

$$E = \frac{4W}{C\pi} t a n^{-1} \frac{d}{2r} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 E ：受音点におけるエネルギー密度

W ：面音源の単位面積当り放射パワー

d ：開空巾

r ：音源面から受音点までの距離

図-11は(4)式の計算値と実験値を示したものであり、両者はよく一致している。図において D は等価直径と呼ばれるものであり、長方形音源面の寸法が $a \times b$ であるとするならば $D = 2ab/(a+b)$ であるが、図では $D = 2b$ としてこれを単位として距離を示したものである。

鉛直方向外の方角についても、積分によって求めることができるが大変厄介であり、また鉛直方向に対し 90° 以上の角度をなす方向については、

回折をも考慮する必要があるのでさらに複雑になる。(これらのことについては現在近似計算法あるいは計算図表の作製等について研究中である)。

^{*} 騒音対策ハンドブック：昭和41年12月、技報堂、p257

(3) 放射方向性と距離減衰による表示

上述のごとく、障壁減衰または面音源理論そのものを基礎とした解析または表示方式は労の多い割には効用が危ぶまれるので、ここでは面音源の垂直方向の理論値を参考にして、独自の表示方法を採用することとした。すなわち、音源面の中央線からの所定の距離における方向別の音圧を求め、次に各方向に対する距離減衰性状を求める方法である。

すなわち図-12において、音源面の単位面積当りのエネルギー W_s が判れば、垂線上(OA')

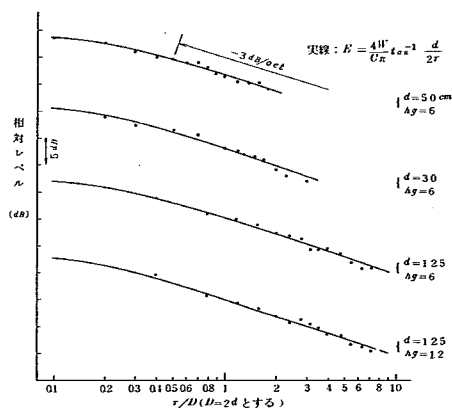


図-11 開口部中央から垂直上方への距離減衰

の音圧は(4)式によって計算することができ、この計算値は実験値ともよい一致をみた。

いま音源面の単位面積当りパワーレベルを PWL_s とすると、音源面中央点から $d/2$ だけ離れた点 A_0 の音圧レベル L は(4)式の性質から $L \doteq PWL_s$ となり、さらに $d/2$ だけ離れた点 A の音圧レベル L_0 は $L_0 \doteq L - 2 \doteq PWL_s - 2$ となる。そして A 点からさらに遠い点の音圧レベルは、 O 点からの距離を r とすると、 $10 \log r$ に比例して減少する。すなわち鉛直線上の任意点 A の音圧レベル L'_0 は下式となる。

$$L'_0 = L_0 - 10 \log \frac{r_A}{r_0} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ただし, } r_0 = \overline{OA} = d \\ r_A = \overline{OA'}$$

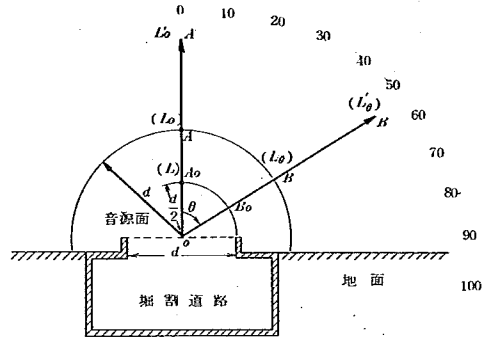


図-12 方向性および方向距離減衰説明書

任意方向における任意距離の点 B の音圧レベル L'_θ は、上と同様、 B 点の音圧レベル L_θ と、 B から B' までの距離減衰性状が判れば求めることができる。

本文においては B 点の音圧レベル L_θ は、 L_0 との差 ΔL_θ を以って表わすこととし、

$$L_\theta = L_0 + \Delta L_\theta \dots\dots\dots (6)$$

B 点以遠の距離減衰 x は

$$x = K_\theta \log \frac{r_B}{r_0} \dots\dots\dots (7)$$

で表わすこととした。

以上により PWL_s 、 ΔL_θ および K_θ から任意点の音圧レベル L'_θ は下の式で求めることができるはずである。

$$L'_\theta = PWL_s - 2 + \Delta L_\theta - K_\theta \log \frac{r}{d} \dots\dots\dots (8)$$

ただし $r > d$ とする。

5. ワイドノイズの実験結果

(1) 音源と音源面パワーレベル

堀割型式のように、一部の開口を除けばすべて剛壁（音響的な反射体）で囲われているような状況下では、内部で発生した音響エネルギーは最終的にはすべて開口部から外界へ放出されるものと考えられる。とすれば開口面での単位面積パワーレベル PWL_s は下式となるはずである。

$$PWL_s = PWL_c + 10 \log n + 10 \log \frac{1}{S} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 PWL_c : 個々の点音源のパワーレベル

n : 点音源の数

S : 開口面の面積

図-13 は上の関係を確かめるために、特に測定した値を示したものである。前節で述べたように r が $D/4 = d/2$ になっている点が PWL_s の値と同じになるはずである。図のごとく $d=0.5^m$ および $d=0.3^m$ の場合は -1 dB の違いが出ているもののほぼ一致しているとみてよからう。

$d=0.125^m$ では -3 dB となりやや差が大きくなる傾向にあるが、これは実験に供した堀割模型の内面がいくらか吸音するためであろうと解される。現実の堀割道路においても、いく分かの吸音が考えられるが、これは安全側となるので、 PWL_s の算出には(9)式を使用して差しつかえないものと考えられる。

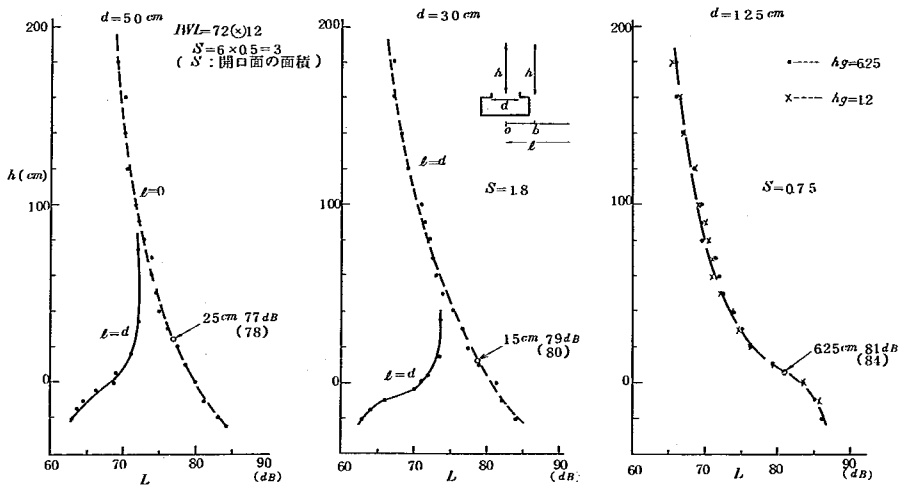


図-13 沿直方向レベルの減衰 ()内は計算上の PWL_s

(2) $r > d$ における距離減衰

附図-1に測定値の一部を等音圧線で示した。次に同図について音源面中心から放射状の直線を引き、その線に沿った音圧の低下の状態を示したのが附図-2である。沿直方向を基準とした各方向 θ 別に距離減衰係数 K_θ ((7)式で説明した)は附表-1のようになった。この K_θ と θ の関係を示したのが図-14である。 θ が 60° を過ぎると K_θ は漸増する。すなわち地面方向 (90°) に近づくほど減衰勾配は急になる。

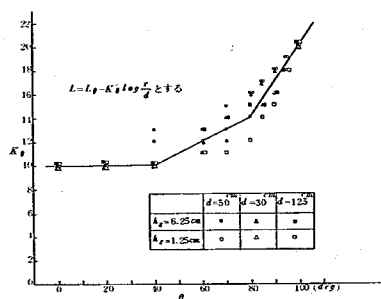


図-14 K の放射方向 θ に対する変化

(3) 測定距離 $r = d$ における指向性

距離 $r = d$ における θ 別の音圧は、前述したごとく、 $\theta = 0$ における音圧との差 ΔL_θ として表示することとした。何故ならば $\theta = 0$ における音圧は、前出の計算で求めることができるから、それとの差が判れば任意の θ についての値も算出可能となるからである。附表-1に θ に対する ΔL_θ を示す。

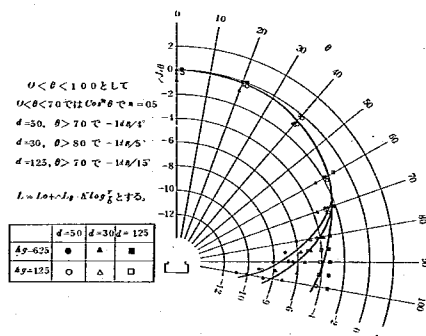


図-15 $r = d$ における指向性

図-15はこれらの関係を図示したものである。

ΔL_θ の絶対値は θ および d とともに増加する。すなわち真上方向よりも地面方向がレベルは低く、同じ地面方向でも開空巾が大きいほどレベル低下が激しい。

(4) ワイドノイズによる実験結果の要約

以上のワイドノイズによる実験結果を要約すれば以下のごとくである。

- ① 鉛直方向のレベルは(4)式で求めた理論値と合致する。
- ② 測定距離 $r = d/2$ のときの音圧レベルは $PW L_s$ と同じ値となる。 $r = d$ のときは $PW L_s - 2$ となる。
- ③ $PW L_s$ は(9)式で求めた値を使用すればよい。
- ④ d および θ に対する ΔL_θ および K_θ の平均的な値は表-1のごとくである。
- ⑤ 以上の結果から(8)式によって任意点のレベル値を求めることができる。

また念のため付け加えるならば

- ⑥ オーバハングをもった掘割型式では、 $PW L_s$ および開空巾が決定的要素であり、車道巾および擁壁高にほとんど関係しない。
- ⑦ $PW L_s$ は内面を吸音性によって低減できる。その場合開空巾が狭いほど効果は大きい。

表-1 方向補正值 (ΔL_θ および K_θ) $L_\theta = L_0 + \Delta L_\theta$

	$\frac{\Delta L_\theta}{\text{or}} K_\theta$	d	θ									
			0°	20°	40°	60°	70°	80°	85°	90°	95°	100°
① 地面吸音率 が大なる場 合	ΔL_θ	(m) 20	0	0	-1	-2	-3	-5	-6	-7	-9	-10
		" 12	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
		" 5	0	0	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-5
	K_θ	すべて	10	10	10	12	13	14	15	17	19	20
② 地面吸音率 が小なる場 合	ΔL_θ	すべて	0	0	-1	-4	-5	-6	-7	-7	-8	-7
	K_θ	すべて	10									
③ 通常地面の 場合	θ が 0 ~ 70 においては ①とする											
	"	70 ~ 80	①による L に 1 を加える									
	"	80 ~ 85	"	"	"	2	"					
	"	85 以上	"	"	"	3	"					

6. 1/3 OCTノイズの実験結果

(1) 測定値の整理

測定は円弧状マイクロホン移動装置を使用したもので、結果は附図-3ごとく表示される。同図は横軸に垂直線を0度として90度(水平)までの1/4円を表わし、縦軸は垂直線上のレベルを0 dBとした相対値である。そして音源面の中心からの距離 r をパラメータとしている。

同図を読みとり整理したのが附表-2である。

附図-4は地面反射の無い場合の放射線上の減衰性状を示し、附図-5は地面反射がある場合の同性状を示したものである。

附表-3は ΔL_θ と K_θ の読みとり値をまとめて示したものである。なお ΔL_θ は計算で求めた音源面パワーレベル PWL_s と $r=d$ (測定距離=音源面巾)における差を示している。従って $\theta=0^\circ$ における $\Delta L'_\theta=\Delta L'_0$ から2を差し引いたものが PWL_s について、計算値と実測値の差を示している。

表-2 ΔL_θ および K_θ (地面反射なし)

	$f_o = 5KHz$								$f_o = 10KHz$								$f_o = 20KHz$							
	$d = 1$		$d = 0.5$		$d = 0.3$		$d = 0.125$		$d = 1$		$d = 0.5$		$d = 0.3$		$d = 0.125$		$d = 1$		$d = 0.5$		$d = 0.3$		$d = 0.125$	
θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ
0	0	11	0	10	0	11.1	0	11	0	11	0	9.5	0	11.3	0	10.5	0	10.5	0	11	0	10.9	0	128
10							-0.3	11	+1	9.5	+0.3	10.5	-0.5	11.3	-0.8	9.3	-1	10.5						
20							0	10.8	0	12	-0.8	9.5	-0.8	9.8	-1	9.3	-0.5	13						
30							0	10.8	-1	12	-0.8	8.5	-1.1	9	-1.5	7.8	-0.5	13						
40							-1.3	10	0	12	+0.5	11.8	-1.5	8.1	-1.5	8.8	0	12						
50							-2.3	10	0	11	-1.3	7.8	-0.1	8.6	-1.3	10.5	0	12						
60	-3	11	+0.5	12	-1	10.8	-4.5	9	+1.5	11	-0.3	8.8	-1.3	9.8	-1.5	11	0	13	+0.3	11	-0.3	12.1	-0.5	11.5
66	-3	13	0	12.5	-1.5	9.7	-5	9	+0.5	11	0	10.8	-1.4	10.1	-2.3	12.3	+1	15	+1	16.3	-0.6	12.6	-2.3	11
72	-3	16	-0.8	13.8	-3.1	10.8	-5	9	0	13	-0.3	13.3	-2	11.5	-3	13.3	+1	18	-0.3	16.3	-2.14	-4.3	13	
78	-5	20	-2	13.5	-4.4	11.6	-5	8.8	-2.5	17.5	-2.8	14	-3.8	11.9	-5	11.3	-4	20	-3	16.3	-4.4	14.3	-6.8	13
84	-8	18	-2.5	17.3	-4.9	12.8	-5	10	-7.5	18	-5.3	11.5	-6.5	12.1	-7	10	-9	21	-7	18	-7.6	15.1	-8.5	10.3
90	-8	18	-4.3	17	-5.4	11.5	-5	11.5	-9	18.5	-8.3	13.3	-7.4	14.8	-7	12.3			-10.5	17.5	-9.9	16.6	-7.5	16
$L_o - \frac{(PWL_s - 2)}{+1}$	-0.5		-1.6		-0.8		-5		-3.8		-3.8		-4.8		-6		-5		-5.6		-8			

同表をさらに類別整理すると、地面反射がない場合には表-2となり、地面反射がある場合には表-3となる。

表-3 ΔL_θ および K_θ (地面反射あり)

θ	$f_o = 10 \text{ KHz}$							
	$d = 1$		$d = 0.5$		$d = 0.3$		$d = 0.125$	
	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ
0	0	13	0	11.5	0	11	0	10.3
10	-0.5	12.5	0	12.3	-0.1	9.8	0	10.3
20	-1	9	-1.3	10.3	-0.9	9.9	-0.3	10
30	-1	10.5	-0.5	9.8	-1.1	9.5	-0.5	9.5
40	0	11	-0.5	9.8	-0.9	8.9	-0.3	9.8
50	-1	10.5	-0.5	8.5	-0.8	9.9	-1.3	10
60	0	9.5	-0.5	9.5	-1.1	9.3	-2	10
66	0	9	-1	9.5	-1.4	10.6	-2.8	11.5
72	0	8	-1.3	12	-2.8	10.5	-4.5	11.8
78	-3	10	-2.5	12	-4.1	10.9	-5.3	10.3
84	-8	10	-5.5	11	-6	11	-5.5	10.5
90	-14	10	-6.5	11	-7.5	9.4	-6.3	9.8
$L_o - (PWL_s - 2)$ -3 -3 -3.8 -5								

(2) 音源面パワーレベル

前述の(9)式が正しいものとすれば、理論式(4)の性質から、 $r = d$ における垂線上の音圧レベル L_o は

$$L_o = PWL_s - 2 \dots\dots\dots (10)$$

となるはずである。表-2および表-3の最下欄に示した値 $L_o - (PWL_s - 2)$ が0であるならば(10)式が満足されていることになる。現実には $f_o = 5 \text{ KHz}$ においては約 $\pm 1 \text{ dB}$ の範囲で満足されているが、 $f_o = 10 \text{ KHz}$ では $-3.8 \sim -5$ 、 $f_o = 20 \text{ KHz}$ では $-5 \sim -8$ というように必ずしも(10)式は満足されていない。これは実験に使用した模型道路の材料が 10 KHz 以上の音波に対して吸音作用を有していたと考えることによって納得できるが、現状ではそのように断言することはできない。しかし、(10)式を使用することは少なくとも安全側であるから、現場の推定計算に際しては(10)式を使用して差しつかえないものといえる。これは後述する吸音内装の際にはさらに顕著に現われる。

(3) 横断面指向性

$r = d$ における θ とレベルの関係について検討する。前節のワイドノイズと同様 $\theta = 5^\circ$ 位まで

は θ に無関係であって、さらに f_0 および d とも関係しない。つまり $0 < \theta < 5^\circ$ の範囲では、 θ 、 f_0 、 d などによる変化はなくほぼ一定値となる。ところが $\theta > 5^\circ$ においては、 θ の増加とともに減少する他に、 d および f_0 の増加に従って減少する。すなわち $\theta < 5^\circ$ では $\Delta L_\theta = 0$ 、 $\theta > 5^\circ$ では θ および $d \cdot f$ と関係する。

(4) 地面反射がない場合の距離減衰性状

距離減衰の勾配を表わすところの K_θ は $r > d$ においてほぼ一定の値となる。したがってここでは $r > d$ における K_θ について検討する。 ΔL_θ と同様に $\theta < 5^\circ$ ではほぼ一定の値を示し、 $\theta > 60^\circ$ では θ とともに増加し、さらに d および f_0 の増加とともに増加する。すなわち $\theta > 50^\circ$ では $K_\theta \neq 10$ 、 $\theta > 50^\circ$ では θ および $d \cdot f$ と関係する。

(5) 地面反射がある場合の距離減衰性状

θ 、 d 、 f_0 などいずれとも関係しない。すなわちすべての条件、方向に対して $K \neq 10$ である。

(6) d/λ と ΔL_θ および K_θ

開空巾 d と周波数 f_0 は ΔL_θ に対して同等な役割をもっているらしいことはすでに述べた。この項では f の代りにその逆数の波長 $\lambda = c/f$ をとり、 d/λ をインデックスとして再整理してみる。表-4 および図-16 は d/λ をパラメータとした θ と ΔL_θ の関係を示したものである。 ΔL_θ の絶対値は $d/\lambda = 2$ では $\theta = 3^\circ$ あたりから θ にともなわずかず増加し、 $d/\lambda = 60$ では $\theta = 70^\circ$ を越えると急激に増加する。そして両者の間は d/λ の小さい順に配列されている。また

表-4 d/λ と ΔL_θ および K_θ

	$d/\lambda=2$		$d/\lambda=4$		$d/\lambda=8$		$d/\lambda=16$		$d/\lambda=30$		$d/\lambda=60$	
	$f_0=5K, d=0.125$		$f_0=5K, d=0.3$ $f_0=10K, d=0.3$ $f_0=10K, d=0.125$		$f_0=5K, d=0.5$ $f_0=10K, d=0.3$ $f_0=20K, d=0.125$		$f_0=5K, d=1$ $f_0=10K, d=0.5$ $f_0=20K, d=0.3$		$f_0=10K, d=1$ $f_0=20K, d=0.5$		$f_0=20K, d=1$	
θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ
0	0	11	0	10.8	0	11.4	0	10.5	0	11	0	10.5
10	-0.3	11	-0.8	9.3	-0.5	11.3	+0.3	10.5	+1	9.5	-1	10.5
20	0	10.8	-1	9.3	-0.8	9.8	-0.8	9.5	0	12	-0.5	13
30	0	10.8	-1.5	7.8	-1.1	9	-0.8	8.5	-1	12	-0.5	13
40	-1.3	10	-1.5	8.8	-1.5	8.1	+0.5	11.8	0	12	0	12
50	-2.3	10	-1.3	10.5	-0.1	8.6	-1.3	7.8	0	11	0	12
60	-4.5	9	-1.3	10.9	-0.4	11.1	-1.2	10.6	+0.9	11	0	13
66	-5	9	-1.9	11	-1.2	11.2	-1.2	12.1	+0.8	13.7	+1	15
72	-5	9	-3.1	12.1	-2.4	12.8	-1.8	14.4	-0.2	14.7	+1	18
78	-5	8.8	-4.7	11.5	-4.2	12.8	-4.1	16.3	-2.8	16.9	-4	20
84	-5	10	-6	11.4	-5.8	13.2	-7	14.9	-7.3	18	-9	21
90	-5	11.5	-6.2	13	-6.4	15.9	-8.7	16	-7.8	18		

$\theta = 90$ でも同様に d/λ の順に配列される。さらに $\theta \neq 80$ では d/λ と関係なく $-4 \sim -5$ となっている。同図を折線で近似したのが図-17である。なお近似に際しては安全側をとっている。

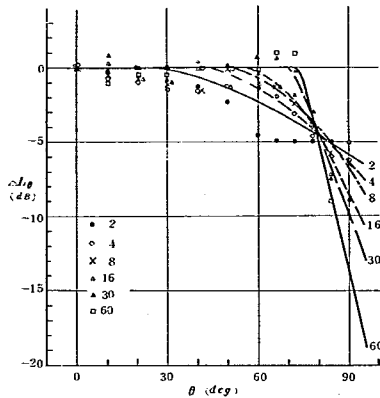


図-16 d/λ 別 θ と ΔL_θ の関係

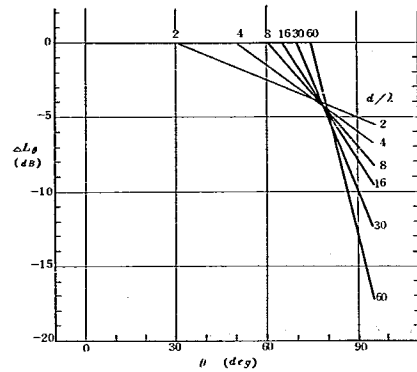


図-17 モデル化した d/λ 別 θ と ΔL_θ の関係

上と同様な手順によって K_θ を示したのが図-18である。 $d/\lambda = 2$ では θ が 90° 近くになってようやく増加するが $d/\lambda = 60$ では 5° あたりから増加が見られる。そしてその間は d/λ の順で配列している。同図を前同様折線で近似したのが図-19である。図-19では増加部分の勾配を d/λ に関係なく一定としたものであり、その勾配は $3/10$ すなわち θ の 1° 増加に対して K_θ が 3 の割合で増加する。

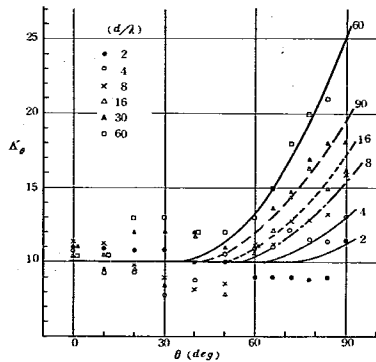


図-18 d/λ 別 θ と K_θ の関係

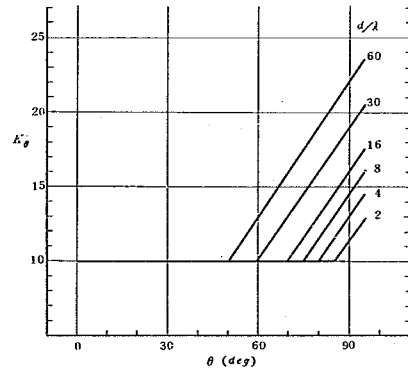


図-19 モデル化した d/λ 別 θ と K_θ の関係

(7) 1/3ノイズによる実験結果の要約

以上1/3オクターブノイズによる結果を要約すれば以下のごとくである。

- ① ワイドノイズ実験結果とよく符合している。
- ② d/λ で仕分けすることができ、その結果ははっきりしたものとなる。
- ③ d/λ 別に整理した結果は、 ΔL_θ については図-17、 K_θ については図-19のごとくとなる。

7. 吸音材設置の効果

(1) 測定値の整理

車道内または開空面近辺に吸音材を設置した場合の効果について調べる。

附図-6はマイクロホンを円弧状に移動して得られた測定値であり、それを読み取ったのが附表-4である。

附図-7は放射状線に沿った音圧の変化を表わしたもので図から求めた ΔL_θ および K_θ を附表-5に示す。

また表-5は $f=10\text{KHz}$ における ΔL_θ と K_θ を示したものである。ここで ΔL_θ は吸音材設置前の値(表-2)を基準にしているの、 ΔL_θ 、 K_θ ともに設置前の値との差が、吸音材設置による効果であるが、ただし先にも述べたように設置前にすでに吸音作用が生じているふしがあり(10KHz以上において)、吸音材の真の効率は単純に両表を比較することからは得られないと考えられる。以下の各項にケースI~VIIについて特徴を述べるが、上の事柄を念頭においておく必要がある。なお実験に使用した吸音材は約4mm厚のカーペットであり、吸音率 α は図-6に示したごとく $f=10\text{KHz}$ において定在波管による測定値で $\alpha_1=93\%$ 、垂直入射音の音圧反射率から計算した値で $\alpha_2=70\%$ である。

表-5 吸音材を設置した場合の ΔL_θ と K_θ ($f=10\text{KHz}$) ただし ΔL_θ は吸音材のない場合との差

	(r=d) I ($\alpha=0.32$)		(r=d) II ($\alpha=0.32$)		(r=d) III ($\alpha=0.52$)		(r=d) IV ($\alpha=0.2$)		(r=d) V ($\alpha=0.125$)		(r=d) VI ($\alpha=0.25$)		(r=2d) VII ($\alpha=0.3$)	
θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ	ΔL_θ	K_θ
0	-0.5	8.5	-1	11.5	-2.5	10	-1.5	11	0	11.5	-2	9.5	-1.5	4
10	-1	10.5	-2	9	-4.5	7.5	-3	10	-0.5	9.5	-1.5	8	-1.5	2.5
20	-1.5	9	-1	13	-3	10	-2	10.5	-0.5	12.5	-1.5	9.5	-1.5	4
30	0	11	-1	10.5	-3.5	8.5	-4.5	6.5	-1.5	10	-3	8	-9.5	3
40	+1.5	15	-2	10	-2.5	9	-1	11	-3	8	-3	7	-9	1.5
50	-2	8.5	-3	9.5	-3.5	8	-1	9.5	-2	9	-4.5	8.5	-8.5	11.5
60	-0.5	11	-2	10	-4	9	-3	8.5	-2	11.5	-2.5	9	-7.5	10
66	-0.5	12	-4	10.5	-4.5	9.5	-4.5	7.5	-2.5	13.5	-2	14	-6	10
72	-1	13	-5.5	11.5	-5	11	-5	11.5	-3	14	-2	16	-5.5	11
78	-2.5	13.5	-6.5	13	-6	13	-7.5	11	-3	16	-4.5	15	-6	13
84	-5	14.5	-8.5	14	-8.5	13	-10	10	-4.5	18	-5.5	17	-4.5	15.5
90	-8	15.5	-12.5	12	-13	14	-13	10	-6	19	-6.5	18	-6	18
96									-7.5	18	-8	18	-7	17.5

(2) I のケースについて

ΔL_{θ} についてはまったく変化が見られない。 K_{θ} については $\theta > 78^\circ$ でやや大きめとなる。このことから、道路近辺では効果なく、遠距離域地面近くにおいてやや効果が生じているとみることができる。

(3) II のケースについて

ΔL_{θ} については、 θ が大きくなるとともに効果が現われ、 $\theta = 90^\circ$ (水平方向) で 5dB の減音となる。 K_{θ} はほとんど変化しない。すなわち道路からの遠近を問わず効果が生ずるが、垂直方向ではわずかであり、地面位において 5dB の減音が生ずる。

(4) III のケースについて

前項 II のケースとほぼ同様である。

(5) IV のケースについて

ΔL_{θ} については II および III と同様であるが、 K_{θ} については減少している。よって水平方向の遠距離においては負の減音となる。

(6) V のケースについて

ΔL_{θ} への効果は見られないが、 K_{θ} については $\theta > 60^\circ$ において増大がみられる。よって近距離においては減音は生じないが、遠距離の地上部においては有効である。

(7) VI のケースについて

垂直方向で減音が認められる他は V のケースと同じである。

(8) VII のケースについて

上方の近距離においては効果は絶大である。このことは構造形式からみて当然予想される。しかし遠距離へ行くにしたがって効果はうすれる。水平方向については、V および VI よりもやや劣る。

8. 推定計算方法

(1) 推定計算法

掘削道路において寸法、交通条件が定まれば本実験結果により、以下の手順で100数10mの範囲内の騒音レベルを計算することができる。しかしすでに述べたごとく PWL_s の算出については現場の確証を得ているわけではないし、また地面の影響についても同様であるから、あくまでも予測値として取り扱うべきものであること勿論である。

- ① 音源面（開空面）の単位面積当りの音響エネルギーを求める。

音源面の単位面積当りエネルギー E_s は

$$E_s = \frac{E_{ct}}{S} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 E_{ct} ：自動車の音響エネルギー

S ：開空面面積

また自動車1台当りの平均エネルギーを E_c 、車頭間隔を H 、開空巾を d とするならば $E_s = E_c / (H \cdot d)$ であるから、単位面積のパワーレベル PWL_s は、自動車1台のパワーレベルを PWL_c として

$$PWL_s = PWL_c + 10 \log \frac{1}{H \cdot d} \text{ (dB)} \dots\dots\dots (9')$$

で求めることができる。現実には PWL_c は平均パワーレベル PWL_c を用いることになるが、そのときは自動車の平均速度を V 、乗用車、小型貨物車、大型車の混入率をそれぞれ a_1 、 a_2 、 a_3 として下の式で求める。

$$PWL_c = 0.2V + 81 + 10 \log_{10} (a_1 + 2a_2 + 10a_3) \text{ (dB(A))} \dots\dots\dots (10)$$

上式で右辺第2項は自動車の指向性を考慮し補正してある。

- ② 目標地点の θ および r を求める。

θ は垂直軸を 0° とした角度、 r は音源面中心線に直角に下した長さである。

- ③ $r = d$ における騒音レベル L_θ を求める

$$L_\theta = L_0 + \Delta L_\theta$$

ただし $L_0 = PWL_s - 2$

ΔL_θ は表-1または図-17等によって求めることができる。

- ④ 距離減衰の係数 K_θ を求める

表-1または図-19で求めることができる。

- ⑤ 騒音レベルを算出する。

求める目標地点の騒音レベル L は下の式によって求めることができる。

$$L = L_\theta - K_\theta \log_{10} \frac{r}{d} \text{ (dB(A))}$$

(2) 計算例

図-20. 1は、 $PWL_c = 100 \text{ (dB(A))}$ 、 $N = 5000 \text{ (台/時)}$ 、 $V = 60 \text{ (km/h)}$ 、 $d = 20 \text{ (m)}$ として表-1による試算結果である。この場合には $H = 12 \text{ (m)}$ 、 $H \cdot d = 240 \text{ (m}^2\text{)}$ 、 $PWL_s = 76 \text{ (dB(A))}$ 、 $L_0 = 74 \text{ (dB(A))}$ となる。

図-20. 2は先の例に地面反射が加わった場合である。

図-20. 3は図-20. 1の例の交通条件で $d = 5 \text{ (m)}$ としたものである。

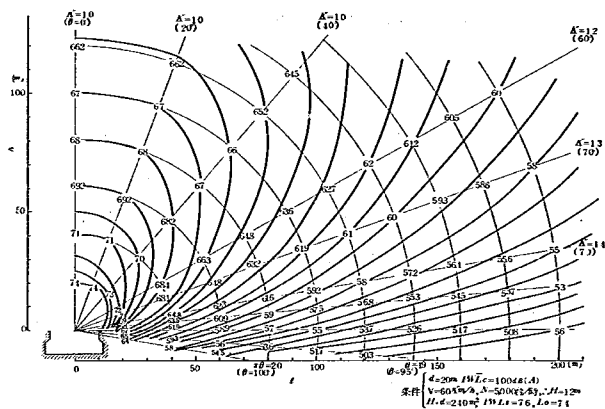


図-20.1 地面反射なし(表-1① $d=20$)の試算結果

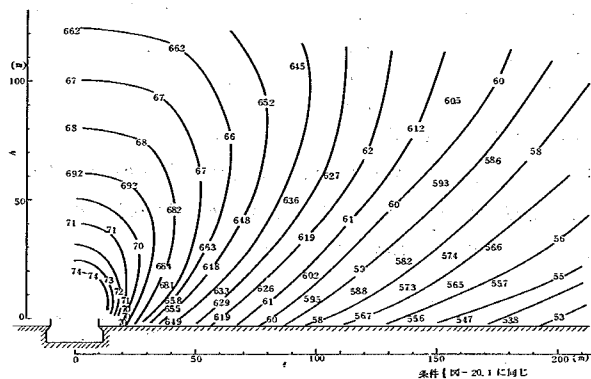


図-20.2 通常地面(表-1③)の試算結果

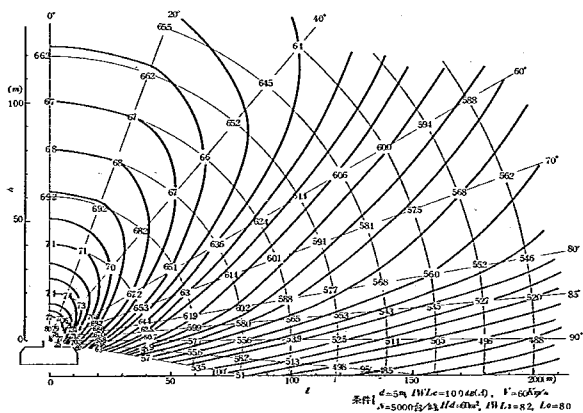


図-20.3 表-1① $d=5$ の試算結果

9. 堀割道路の特徴

(1) 開空巾と周囲の騒音レベル

堀割型式道路の開空巾は周囲にいかなる影響を持っているかを検討する。堀割内の構造および交通条件は全く変らないものとして開空巾 d だけが変化するものとする、すくなくも(4)式および(9)式が成り立つ範囲においては、垂直方向に対しては d による変化はほとんど現われない。地上方向 $\theta = 90^\circ$ においては d とともに変化が生じ、その状態は図-21に示すごとくである。すなわち地上で任意の定点を考えた場合に d が大きいほどレベルは低い。たゞしこれは堀割内面が反射性の場合であって、吸音処理を施した場合には必ずしもそうではない。吸音材は d が狭いほど効果を発揮するからである。

(2) 堀割道路およびその吸音処理の効果

堀割道路の騒音防止上の効果について平面道路と比較して考える。いま交通量 $N=5,000$ 台/時、走行速度 $V=60$ km/h 平均パワーレベル $PWL=103$ dBとすると、地上部の騒音レベルは、平面の場合で図-22の点線に示すごとくとなる。

これに対して堀割道路にしたらどうなるかということを本実験結果から試算すると

$$N = 5,000 \text{ 台/時}$$

$$V = 60 \text{ km/h}$$

$$PWL = 103 \text{ dB(A)}$$

上の PWL は水平方向のエネルギー密度から求めた値であり、車両の全周方向を考慮した真のパワーレベル $PWL_c \doteq PWL-3$ とし、さらに $d=12$ m, $\lambda=1$ m とすると

$$PWL_c = 100$$

$$H=12 \text{ m}$$

$$d=12 \text{ m}$$

$$S=144, 10 \log 1/144 = -22$$

$$\therefore PWL_s = 100 - 22 = 78 \text{ dB(A)} \quad ((9) \text{ 式より})$$

$$\therefore L_o = 78 - 2 = 76$$

考えている方向は地上部であるから $\theta = 90^\circ$ である。

$$\theta = 90^\circ, d/\lambda = 12$$

$$\therefore L_{90} \doteq 7 \quad (\text{図-17より})$$

$$K_{90} \doteq 15 \quad (\text{図-19より})$$

となり同図-22の実線に示したごとくとなる。すなわち平面道路に比し、近距離部で 10 dB、遠

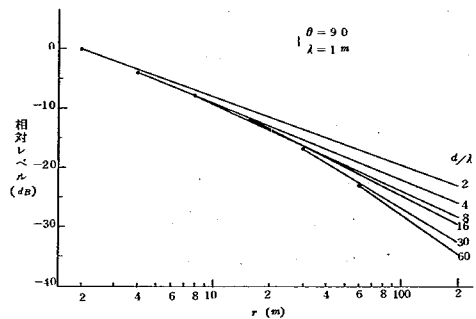


図-21 開空巾 d と地上方向の音圧レベル

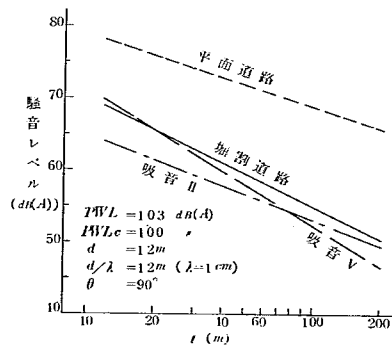


図-22 平面道路と堀割道路との比較

距離部(100 m地点)で13 dBの源音が得られる。

また、吸音処理を施すことにより、さらに最大5 dB位の減音が可能である。

なお、この試算は実験模型の吸音性を無視しているので吸音処理による効果は、図よりも大きめになるものと予想される。

あとがき

堀割道路に関して模型実験の結果を述べ、さらに結果の利用法について述べた。あくまでも本報告は一実験結果であり、現場においてこのまま適用し得るかどうかは今後さらに調査研究を要するものとする。

本実験は当研究室の研究計画の一環として行なったものであるが、最初のワイドノイズの実験を始めてからすでに一年を経過した。にもかかわらず現在に至ってもいまだに不明な点、不充分と考えられる点が多々ある。しかしながら関係各方向面から堀割道路の騒音推定方法に対する強い要望があり、必ずしも充分に解明されてはいないが、あえて資料としてとりまとめたものである。

終りに本実験に直接尽力された方々の氏名を明らかにし、その労に感謝する次第である。

○ 堀割道路の諸元に関して

関東地方建設局道路部道路計画第2課

○ 実験測定および解析に関して

平野 彰 交通環境研究室(現在袖ヶ浦町勤務)

上原万寿雄 交通環境研究室

秋山 清 "

西方 保 "

河原崎親男 埼玉大学理工学部学生(現在千葉県勤務)

(文責 金泉 昭)