

CMI 報告

トンネル発破音のエネルギー評価と測定方法の留意点

佐野 昌伴

1. はじめに

日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会では、トンネル工事の発破に伴って発生する音（以下「トンネル発破音」という。）の予測・評価法の標準案をASJ CN-Model 2007の中で提案している（以下「予測モデル」という。）。この予測モデルによれば、従来は騒音レベルの最大値で評価されることが多かったトンネル発破音を音のエネルギー量で取り扱っているのが特徴である。

施工技術総合研究所は、予測モデル策定の基礎データを得るために、トンネル発破音の測定と解析を実施した。本稿では、トンネル発破音の特徴、トンネル発破音のエネルギー評価、トンネル発破音の予測計算法、音響エネルギーレベル、および測定方法の留意点を概説する。予測計算法等の詳細については予測モデルを参照いただきたい¹⁾。

2. トンネル発破音の特徴

一般論として、トンネル発破音には以下のような特徴がある。

- ①急激な立ち上がりの衝撃音で、かつ大きく変化し、非常に低い周波数成分を多く含んでいる。
- ②低周波音（100 Hz 程度より低い周波数の音）は、人間にはほとんど感知されないが、建具や窓ガラスががたつくなどの物理的苦情が発生する可能性があり、心理的苦情や生理的苦情の事例もある。
- ③騒音（100 Hz 以上の騒音領域）は指向性が強いが、低周波音はほぼ無指向性である。

- ④騒音、低周波音とも坑口からの屋外伝搬音は、点音源の距離減衰特性（距離が2倍になると音圧レベルが6 dB ずつ低下するという特性）を有している。
- ⑤切羽（トンネル掘削位置）から坑口に到達するまでのトンネル坑内の伝搬音は、騒音に比べて低周波音の減衰が小さい。

3. トンネル発破音のエネルギー評価

道路交通騒音の評価手法が平成10年に統計値である騒音レベルの中央値 L_{50} から騒音のエネルギーの時間的な平均値である時間別等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ に変更された。また、航空機騒音が *WECPNL* から時間帯補正等価騒音レベル L_{den} に変更されるなど、エネルギーベースの評価が主流となり、国際的にも騒音の総暴露量を正確に評価する方向に進んでいる。

等価騒音レベルは、一定の時間における総暴露量をその時間で平均した値である。これに対して、トンネル発破音のように単発的に発生する衝撃音のエネルギーベースでの評価量には、単発音の総暴露量を1s 当りに換算した単発騒音暴露レベル L_{AE} が用いられる。

4. トンネル発破音の予測計算法

予測モデルのうち、障害物での回折を考慮しないケースについての進め方を以下に概説する。説明に際し必要となる部分は、予測モデルからそのまま引用していることをご留意いただきたい^{1), 2)}。

(1) 予測計算の考え方

予測モデルでは、切羽で発生した衝撃音がトンネル内を伝搬して坑口に到達し、外部に放射されるまでの過程を、①切羽から坑口までの伝搬と、②坑口に設定した2次的な仮想点音源から外部への放射、の2段階に分けて考えることを基本としている。

予測計算フローを図—1に示す。ここでは周波数重み付け特性Aを中心に説明するが、C特性による値を求めるときは、記号の添字AをCに代えればよい。

(2) 予測計算法の手順

手順①（騒音源データ）では、工事計画における発破の条件から、切羽における衝撃音源のA特性音響エネルギーレベル $L_{JA,face}$ を設定する。

トンネル発破音の騒音源データは、類似箇所における実測値あるいは既存文献に示されている値に基づいて設定する。表—1は実測値で、岩盤等級がC等級、

10段および15段の段発，総薬量が36～77kgの発破条件で得られた値である。

手順②では，トンネル発破音が切羽から坑口まで伝搬する間の減衰（坑内減衰補正量）を考慮して，トンネル坑口部の断面中央位置に設定した仮想点音源となるA特性音響エネルギーレベル $L_{JA,portal}$ を式(1)により求める。

手順③として，対策工として防音屏が設置されるケースでは，その効果に関する補正量 ΔL_{wall} は，類似箇所における実測値あるいは既存文献で提案されている値を用いる。図-2に4箇所のトンネル工事現場における防音屏の騒音低減効果（挿入損失）の実測例を示す（現地測定で用いた模擬音源は6章を参照）。

手順④では，坑口の仮想点音源から予測点までの伝搬を計算し，予測点における単発騒音暴露レベル L_{AE} を式(3)により求める。

手順⑤として，騒音レベルの最大値 $L_{A,Fmax}$ を算出する場合は，式(4)により L_{AE} に補正量 ΔL を加算することで推定する。

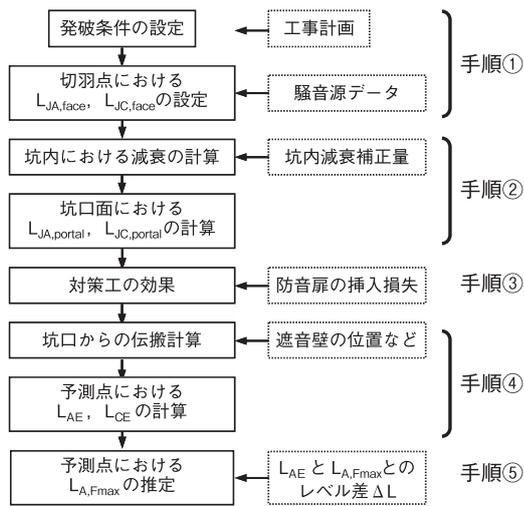


図-1 トンネル発破音の計算フロー

表-1 切羽点におけるトンネル発破音の音響エネルギーレベル $L_{JA,face}$, $L_{JC,face}$ の実測値

	A 特性 ($L_{JA,face}$)	C 特性 ($L_{JC,face}$)
平均値 [dB]	166	172
標準偏差 [dB]	3.3	1.3

$$L_{JA,portal} = L_{JA,face} + \Delta L_{tn} \quad (1)$$

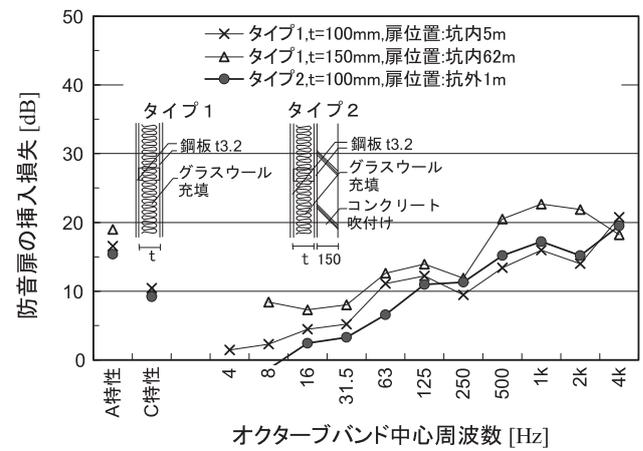
ここで， ΔL_{tn} は坑内における減衰に関する補正量 [dB] で，次式(2)により計算する。

$$\Delta L_{tn} = 10 \log_{10} \left(1 - \frac{ax}{\sqrt{h^2 + (ax)^2}} \right) \quad (2)$$

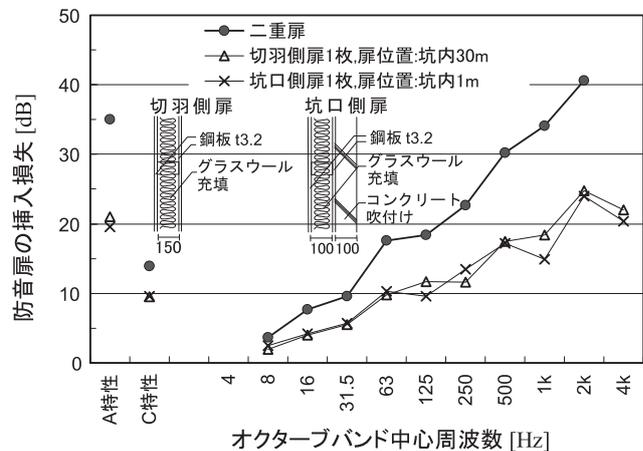
ここで， h は半円形トンネルの半径 [m]， x は切羽と坑口までの坑内距離 [m]。 a はトンネル内の吸音に関するパラメータを意味し，類似箇所における実測値あるいは既存文献に示されている値に基づいて設定する。 a の実測例として，3箇所のトンネル工事現場における実測結果の平均値を表-2に示す。

表-2 トンネル発破音のトンネル内吸音に関するパラメータ a の測定例

	A 特性	C 特性
二次覆工未施工区間	0.34	0.08
二次覆工施工済区間	0.21	0.03



(a) 防音屏 1 基設置



(b) 防音屏 2 基設置

図-2 防音屏の挿入損失の実測例

〔障害物での回折を考慮しない場合〕

$$L_{AE} = L_{JA,portal} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{gmd} + \Delta L_{wall} \quad (3)$$

ここで， r は仮想的な点音源から予測点までの直達距離 [m]， ΔL_{gmd} はトンネル発破音に対する地表面の影響に関する補正量 [dB]， ΔL_{wall} は防音屏の設置などの対策工による効果に関する補正量 [dB]

$$L_{A,Fmax} = L_{AE} + \Delta L \quad (4)$$

$$\Delta L = 4 \quad (5)$$

ここで、 ΔL は実測に基づく補正量であり、4 箇所
のトンネル工事現場において、計 11 回のトンネル発
破音を対象とした実測結果から求めたものである。

5. 音響エネルギーレベル L_J

「音響エネルギーレベル」という用語を聞き慣れな
い方も多と思われる。ここでは、「音響パワーレベル」
と「音響エネルギーレベル」の違いについて、補足説
明する³⁾。

音響パワーレベルは時間平均の概念に基づく量で、
定常的（あるいはある時間で見れば定常とみなせる）
音源については適用できるが、単発的な衝撃音や間欠
音を発生する音源については適用できない。

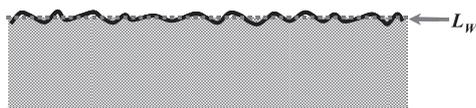
このような音源については、発生ごとの音響エネル
ギーに着目し、それをレベル表示した音響エネルギー
レベルで評価する必要がある。

○音響パワーレベル

定常音を発生する音源の音響パワーをレベル表示し
た量で、次式 (6) で定義される (図—3 参照)。

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (6)$$

ここで、 $P_0 = 10^{-12}$ W (基準の音響パワー)。



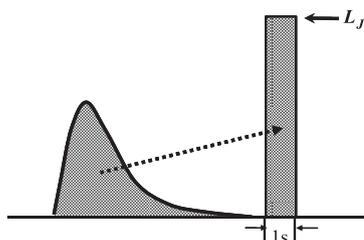
図—3 定常騒音

○音響エネルギーレベル

衝撃音など単発的な音を発生する音源の音響エネル
ギーをレベル表示した量で、次式 (7) で定義される (図
—4 参照)。

$$L_J = 10 \log_{10} \frac{J}{J_0} \quad (7)$$

ここで、 $J_0 = 10^{-12}$ J (基準の音響エネルギー)。



図—4 単発性の間欠・衝撃騒音

上記の「音響エネルギーレベル」と、等価騒音レベ
ルなどをエネルギー的評価量という場合の「エネル
ギー」は意味が異なる。前者は物理的にも本当のエネ
ルギー (単位: J) に着目している。一方、等価騒音
レベルの場合には信号 (音圧) の実効値 (音圧信号の
2 乗の時間積分値の時間平均値) をレベル表示した量
で、一般に「エネルギー平均」あるいは「パワー平均」
という言葉が使われているが、物理的な意味での「エ
ネルギー」とは異なるので留意が必要である。

6. トンネル発破音の測定方法の留意点

(1) 測定機器

騒音計は、トンネル坑内では大音圧測定が可能な
サウンドレベルメータ (プリアンプに特別仕様の 1/4
inch マイクロホンを装着) と低周波音レベル計、ト
ンネル坑外ではサウンドレベルメータと低周波音レベ
ル計を用いた。

トンネル発破音は、非常に大きな音圧を有するた
め、一般の環境騒音の測定に用いられるサウンドレベ
ルメータでは、測定範囲の上限値を超える (オーバ
ーロード) 可能性が高いので留意が必要である。

(2) 模擬音源

トンネル発破音の音響エネルギーレベルの推定は、
置換音源法の原理に基づき行った。音響エネルギーレ
ベルが既知である模擬音源を用いて、切羽から音を
発生させ、トンネル坑内の測定点で音圧レベルを測定し
た値と、同じ測定点で切羽の発破による音圧レベルを
測定した値の差を用いて、トンネル発破音の音響エネ
ルギーレベルを求めた。

また、防音扉を設置するトンネル工事現場では、近
隣住民との合意形成の基に、騒音対策を実施している
ケースが多いため、防音扉を開閉させて、トンネル発
破音を測定することが難しい。そこで、模擬音源を用
いて防音扉開閉時の単発音圧暴露レベルの差を測定
し、防音扉の挿入損失とした。

現地測定では、写真—1 に示すように模擬音源と
音源スピーカの 2 種類を使用した。模擬音源は、直
径 16.5 cm × 長さ 200 cm の円筒状で、この筒の中
に圧縮空気を充填 (ゲージ圧は 3 気圧) し、先端開口部
の PET シートを破ることで、破裂音を発生させる方
式である。周波数特性は、図—5 (平均値と標準偏差)
に示すように広帯域の周波数成分を含む衝撃性音源で
ある。

