

トンネル発破騒音・低周波音予測手法の検討

宇津木 淳一¹・寺本 哲²・須藤 敏明³

¹大成建設株式会社 環境本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:j-utsugi@msd.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:teramoto@ce.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:sudou-n@ce.taisei.co.jp

トンネル発破騒音、低周波音の予測手法としては、船津らが提案した予測式が簡便で精度も高かったことから対策検討のための予測ツールとして広く用いられてきた。ただし、近年の発破技術と計測機器の発達などにより、予測精度に問題が生じる事例が見られるようになった。

トンネル発破騒音に関しては、日本音響学会が提案している「建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2007”」内のトンネル発破騒音に関する予測法を元に、船津の式を参考に総薬量の違いにより発破音レベルが変化できるようにし、予測精度を向上させた。

また、トンネル発破低周波音に関しては、評価量をG特性音圧レベルに変更すると共に、新たに坑内減衰を考慮する等の検討を行い、予測手法の適用範囲を広げると共に予測精度も向上させた。

Key Words : *blasting works of a tunnel, noise, low frequency noise, prediction method*

1. はじめに

トンネル発破騒音、低周波音の予測手法としては、船津らが提案した予測式¹⁾(以下、船津の式と記す)が簡便で使いやすく精度も高かったことから、対策検討のための予測ツールとして広く用いられてきた。

ただし、トンネル発破騒音予測手法に関しては、近年の発破技術の発達により以前より高威力でかつ安全な火薬が用いられるようになったことと、大音量の計測が可能でかつ精度の高いデジタル計測機器の発達により、トンネル発破騒音の実測結果と同条件での予測結果を比較した場合、実測結果の方が値が高くなる傾向が見られるようになった。

また、トンネル発破低周波音予測手法に関しては、超低周波音の人体感覚を評価するG特性音圧レベルが規定されたことと、船津の式にはなかった坑内減衰など、新たな音響特性の問題が無視できない事例がみられるようになった。

これら問題点を解消するため、トンネル発破騒音、低周波音の新たな予測手法について検討した結果について報告する。

2. 船津の式について

(1) 式の概要

船津の式は、トンネル発破騒音、低周波音の測定データを元に、発破音の大きさに寄与すると考えられる要因との回帰式から求められている。なお評価量は、騒音がA特性騒音レベル最大値、低周波音が1～80Hzの範囲の音圧レベルである。船津の式のうち騒音予測式を式(1)に、低周波音予測式を式(2)に、防音扉がない場合のトンネル坑口の指向特性例を図-1に示す。

・トンネル発破騒音

$$L = A + 16 \log_{10} W - 16 \log_{10} D - 20 \log_{10} R - \Delta L \quad (1)$$

L : 予測地点における騒音レベル(dB)
(A特性騒音レベル最大値)

A : 定数 (130 : DS雷管, 136 : MS雷管)

W : 総薬量(kg)

D : 切羽から坑口までの距離(m)

R : 坑口から予測地点までの距離(m)

ΔL : 指向性, 防音扉, 回折減衰などの補正值(dB)

・トンネル発破低周波音

$$L = A + 7 \log_{10} W - 20 \log_{10} R - \Delta L \tag{2}$$

- L : 予測地点における低周波音レベル (dB)
(1~80Hzの範囲の音圧レベル最大値)
- A : 定数 (141 : DS雷管, 148 : MS雷管)
- W : 総薬量 (kg)
- R : 坑口から予測地点までの距離 (m)
- ΔL : 指向性, 防音扉, 回折減衰などの補正值 (dB)

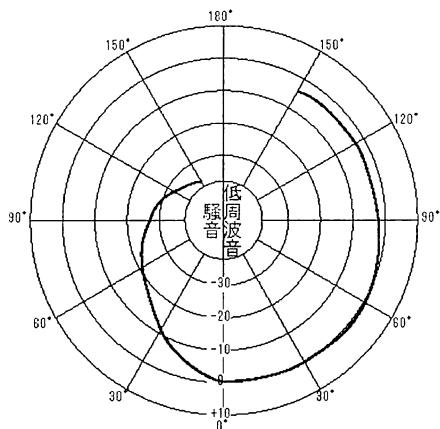


図-1 指向特性例¹⁾

この式の利点としては、発破に係る各種条件を整理して、雷管の種類、総薬量、坑内距離、坑外距離という感覚的にもわかりやすい4つのパラメータを代入することで騒音、低周波音レベルを算出できる点にある。

(2) 船津の式の課題

船津の式は、この簡便さからこれまで環境影響評価での予測式として広く使われてきた。ただし、この式を提案した当時の測定方法は、図-2に示すようにアナログ騒音（低周波音）計の出力をレベルレコーダに接続して、

記録したレベル波形の最大値を実測結果としており、近年の大音量の計測が可能で評価量を内部計算できるデジタル積分型騒音（低周波音）計のメモリーに記録、またはデジタル出力をDATなどのデータレコーダに記録しコンピュータにて解析するデジタル計測器の測定方法に比べ、最大値などの瞬時のレベルを正確に捉えることができていなかった可能性がある。

さらに近年の発破技術の発達により、船津の式が提案された1990年代と比べて、より高威力でかつ安全な火薬が用いられるようになったことから、船津の式の精度に課題が生じている可能性があった。

また、低周波音に限っては、超低周波音の人体感覚を評価するための周波数補正特性としてG特性が規定されたことを受けて、評価量をG特性音圧レベルに変更する必要がある。

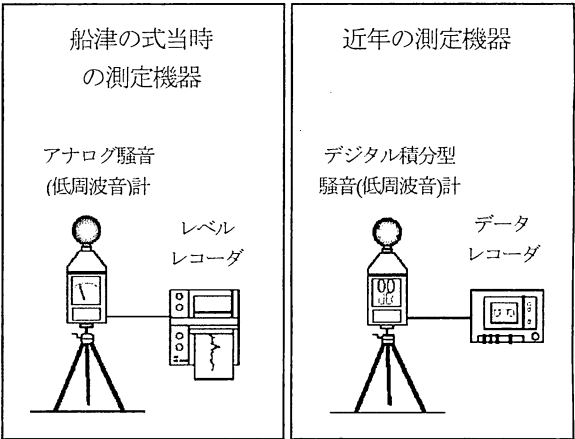


図-2 測定機器の模式図

(3) 船津の式による予測結果と実測結果との比較

大音量の計測が可能なデジタル計測器を用いて、表-1に示す9トンネルで計測した騒音142データ、低周波音91データの実測結果（すべてDS雷管、総薬量：約11~127kgの範囲）を元に、坑外測定点の諸元から船津の式

表-1 トンネル発破騒音、低周波音測定条件の諸元一覧

項目	坑口 断面積	防音扉 の有無	総薬量	切羽-坑口 までの距離	坑口-坑外測定 点までの距離	騒音測定点数			低周波音測定点数		
						坑内	坑外	計	坑内	坑外	計
Aトンネル	約59m ²	有り	約15~74kg	約287~293m	約5~60m	18	15	33	18	2	20
Bトンネル	約67m ²	有り	約15~22kg	約346~349m	約2~25m	9	14	23	9	6	15
Cトンネル	約80m ²	無し	約116~127kg	約2,739~2,741m	約25~28m	4	4	8	6	4	10
Dトンネル	約49m ²	無し	約83~87kg	約3,414~3,415m	約10m	6	2	8	6	2	8
Eトンネル	約80m ²	有り	約11~15kg	約362~364m	約4~39m	6	12	18	0	0	0
Fトンネル	約72m ²	有り	約20~29kg	約170~171m	約59~368m	2	4	6	0	0	0
Gトンネル	約82m ²	有り	約17~108kg	約21~128m	約46~398m	0	46	46	0	5	5
Hトンネル	約74m ²	有り	約13~30kg	約1,210~1,213m	約10~100m	0	0	0	13	8	21
Iトンネル	約74m ²	有り	約43~69kg	約938~1,041m	約27~370m	0	0	0	0	12	12
合 計						45	97	142	52	39	91

による予測結果を算出した。実測結果と比較した結果を、騒音については図-3に、低周波音については図-4に示す。

なお評価量は、騒音がA特性騒音レベル最大値、低周波音が1～80Hzの範囲の音圧レベル最大値である。

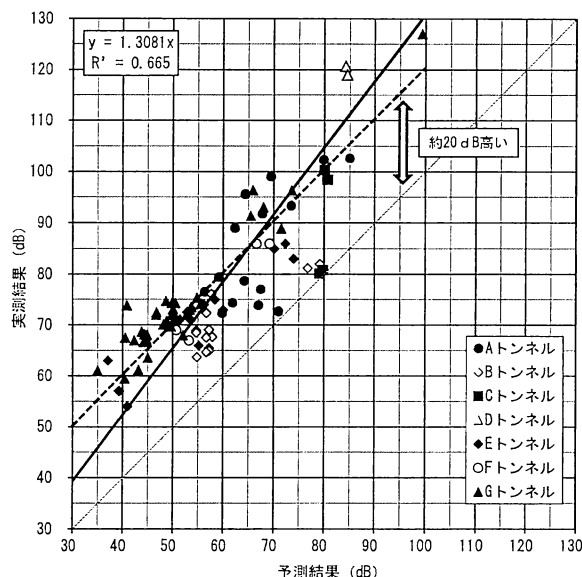


図-3 予測結果（船津の式 騒音）と実測結果の比較

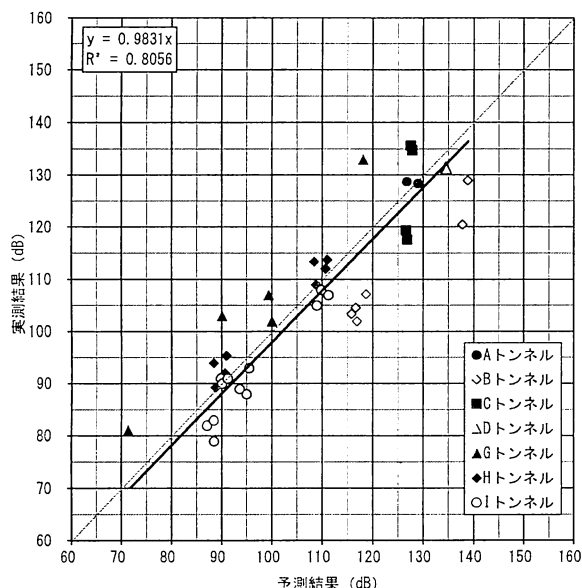


図-4 予測結果（船津の式 低周波音）と実測結果の比較

騒音に関しては、決定係数は0.665で標準偏差は7.016となり、予測結果より実測結果の方が約20dB程度高くなる傾向が見られた。また低周波音に関しては、評価量が音圧レベルの場合、決定係数は0.8056と相関が高かったが、標準偏差は7.386と若干ばらつく傾向が見られた。

よって、トンネル発破騒音に関しては、精度の高い手法の検討を、トンネル発破低周波音については、新たな評価量への対応と、より精度の高い手法の検討を行う必要がある。

3. 新たなトンネル発破騒音予測手法

(1) 建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2007”

トンネル発破騒音予測手法に関しては、2007年に日本音響学会が提案した「建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2007”」²⁾（以下、CN-Model 2007と記す）において、新たにトンネル発破騒音に関する予測法が提案されている。CN-Model 2007によるトンネル発破音の計算フローを図-5に示す。

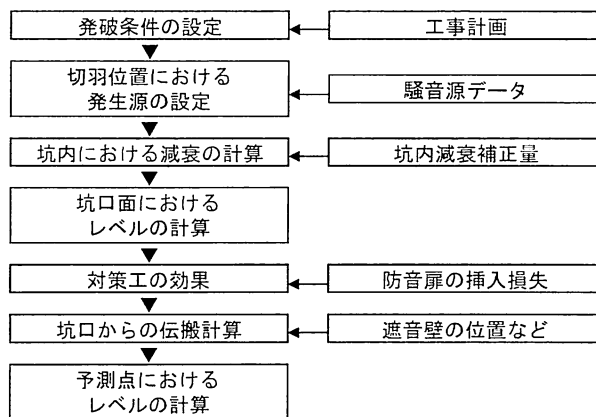


図-5 CN-Model 2007によるトンネル発破音の計算フロー²⁾

この予測モデルの概略は以下の通りである。

評価量は単発騒音暴露レベル L_{AE} （単発的に発生する騒音の1回の発生ごとのA特性で重み付けられたエネルギーと等しいエネルギーを持つ継続時間1秒の定常音の騒音レベル）を用い、騒音レベル最大値 L_{Amax} を算出する場合には、 L_{AE} に補正量 ΔL （4dB）を加算することで推定する。

トンネルのモデル図を図-6に、トンネル坑内における発破音の伝搬式を式(3)、(4)に示す。

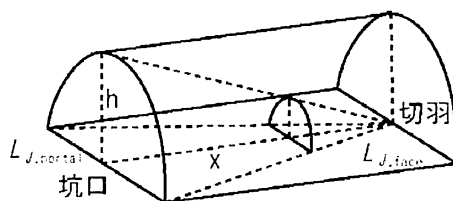


図-6 トンネルのモデル図²⁾

$$L_{JA,portal} = L_{JA,face} + \Delta L_m \quad (3)$$

$$\Delta L_m = 10 \log_{10} \left(1 - \frac{ax}{\sqrt{h^2 + (ax)^2}} \right) \quad (4)$$

$L_{JA,portal}$: 切羽から坑口に到達する
A特性音響エネルギーレベル (dB)

$L_{JA,face}$: 切羽における発破音の
A特性音響エネルギーレベル (dB)

	A特性
平均値(dB)	166
標準偏差(dB)	3.3

ΔL_{in} : 坑内における減衰に関する補正量(dB)

h : 半円形トンネルの半径 (m)

x : 切羽から坑口までの距離(m)

a : トンネル内の吸音に関するパラメータ

	A特性
二次覆工未施工区間	0.34
二次覆工施工済区間	0.21

坑口から外部への伝搬のうち、障害物での回折を考慮しない場合の基本式を式(5)に示す。

$$L_{AE} = L_{JA,portal} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{gnd} + \Delta L_{wall} \quad (5)$$

L_{AE} : 予測地点における
単発騒音暴露レベル(dB)

r : 坑口から予測地点までの直達距離 (m)

ΔL_{gnd} : 地表面の影響に関する補正值 (dB)
(通常は0とする)

ΔL_{wall} : 防音扉の設置などの対策工による
効果に関する補正值 (dB)

なお、先に示した単発騒音暴露レベル L_{AE} の結果から騒音レベル最大値 $L_{A,Fmax}$ を推定する式を式(6)に示す。

$$L_{A,Fmax} = L_{AE} + 4 \quad (6)$$

$L_{A,Fmax}$: 予測地点における
騒音レベル最大値(dB)

L_{AE} : 予測地点における
単発騒音暴露レベル(dB)

なお、ここでは説明を省略するが、遮音壁などの障害物、自然地形での回折を考慮する場合には、トンネル坑口面を10個程度の要素に分割し、各要素の中心に仮想的な点音源を設定し、それぞれ回折減衰補正量を含めた式(5)に準じた計算を行い、その結果を合成する必要がある。

(2) CN-Model 2007の課題

CN-Model 2007によるトンネル発破騒音予測手法では、総薬量が約36～77 kgの条件での実測例としての扱いではあるが、切羽における発破音のA特性音響エネルギーレ

ベル（以下、発破音レベルと記す）は、総薬量の違いによらず166dBとなっている³⁾。

そのため、このままでは一般的に行われている総薬量を少なくし騒音レベルを低減させるという騒音対策に対応できない。

これは、発破音レベルを同様とした実測例での計測数が5データと、施工状況によりレベルのばらつきが起きやすい発破騒音の統計量としては少ないことが原因と考えられ、より多くの測定データを用いた分析を行う必要があると考えられる。

(3) CN-Model 2007による予測結果と実測結果との比較

船津の式の時と同様に、7トンネルで計測した坑外騒音97データに対して、CN-Model 2007による予測結果を算出し、実測結果と比較した結果を図-7に示す。

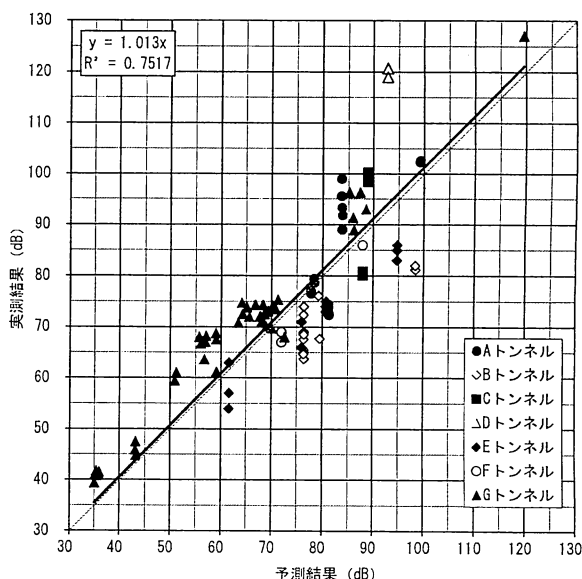


図-7 予測結果 (CN-Model 2007) と実測結果の比較

CN-Model 2007による予測結果は、船津の式による予測結果と比べて改善されており、決定係数も0.7517と相関も高いが、標準偏差は8.270と若干ばらつく傾向があった。

発破音レベルに薬量の違いによる変化をつけることができれば、よりばらつきの少ない予測手法に改良されるのではないかと考えられる。

(4) 薬量の違いを考慮した発破音レベル予測式の検討

6トンネルで計測した坑内騒音45データを元に、上記式(4)に示す坑内における減衰に関する補正量 ΔL_{in} を加算することで基準化した発破音レベルと、船津の式の考え方に則って、総薬量を対数化したデータとの回帰分析を行ったものを図-8に示す。

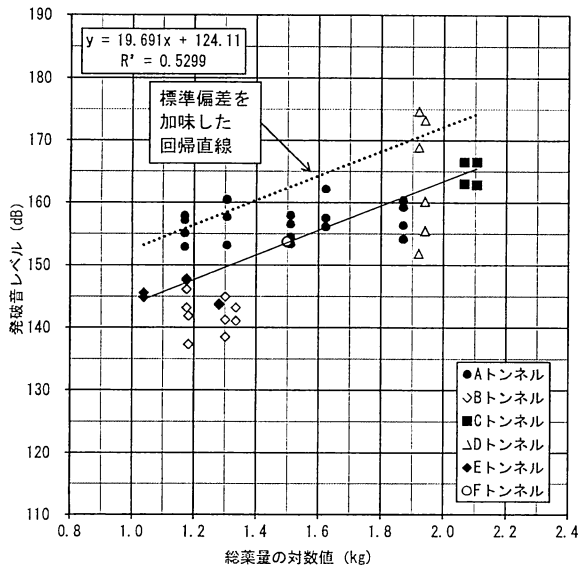


図-8 総重量を考慮した発破音レベル推定

施工状況により、レベルのばらつきが起きやすい発破騒音のため決定係数は0.5299と若干相関は低かったが、式(7)に示す回帰式が得られた。

$$L_{JA,face} = 124.11 + 19.691 \log_{10}(W) \quad (7)$$

$L_{JA,face}$: 切羽における発破音の
A特性音響エネルギーレベル (dB)
 W : 総重量(kg)

標準偏差が8.722とばらついた結果でもあるため、安全側を考慮して定数項に標準偏差を加算して、係数を小数点第一位に調整した式(8)を、重量の違いを考慮した発破音レベル予測式として提案する。

$$L_{JA,face} = 132.8 + 19.7 \log_{10}(W) \quad (8)$$

$L_{JA,face}$: 切羽における発破音の
A特性音響エネルギーレベル (dB)
 W : 総重量(kg)

この予測式を用いて発破音レベルを変化させ、他の部分はCN-Model 2007を用いて再度計算し、実測結果と比較した結果を図-9に示す。

実測結果と比べて、元のCN-Model 2007での予測結果では、決定係数は0.7517で標準偏差は8.270であったが、船津の式を参考に重量の違いを考慮した発破音レベル予測式を用いた改良CN-Model 2007での予測結果では、決定係数は0.8422で標準偏差は6.648と、より相関が高く、ばらつきが少ない結果を得ることができた。

これにより重量の違いを考慮した発破音レベル予測式の有意性を検証することができた。

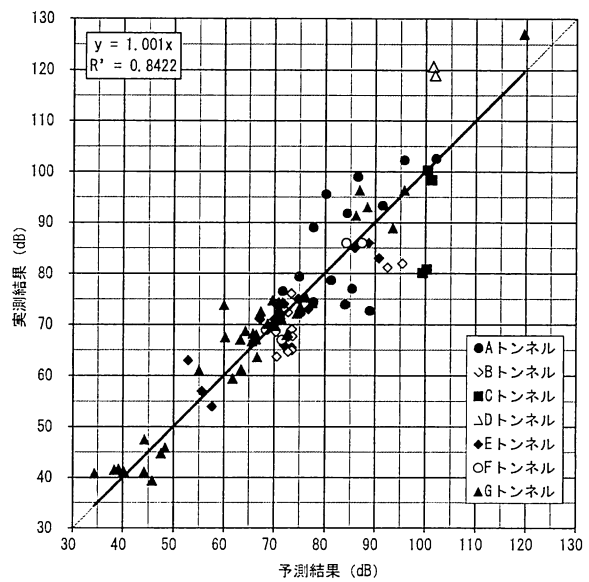


図-9 予測結果（改良CN-Model 2007）と実測結果の比較

4. 新たなトンネル発破低周波音予測手法

(1) 検討の概要

トンネル発破低周波音予測手法に関しては、超低周波音の人体感覚を評価するための周波数補正特性としてG特性が規定されたことを受けて、評価量をG特性音圧レベルに変更し、G特性音圧レベルの実測結果と発破音の大きさに寄与すると考えられる要因との回帰式から、予測手法を再構築する。

具体的には、船津の式の考え方を参考にして、坑内における減衰量、坑口部における開口端反射による減音量、および面積補正量を新たに考慮させた予測手法の検討を行った。

(2) 坑内における減衰量の検討

トンネル坑内で坑内減衰が生じているのか検討するために、5トンネルで計測した坑内低周波音52データ（G特性音圧レベル）を元に、船津の式にある重量補正量を加算することで基準化したレベルと坑内距離との関係を図-10に示す。なお、坑内距離に関しては、トンネル発破騒音における船津の式での坑内減衰の考え方に則って、坑内距離を対数化している。

その結果、決定係数は0.5635を若干相関は低くばらつきもあるものの、坑内距離が遠くなるにしたがって基準化レベルも低くなる傾向が見られた。

そこで、坑内実測結果を目的変数に、総重量と坑内距離をそれぞれ対数化したデータを説明変数とした重回帰分析を行った。分析結果を整理して表-2に示す。

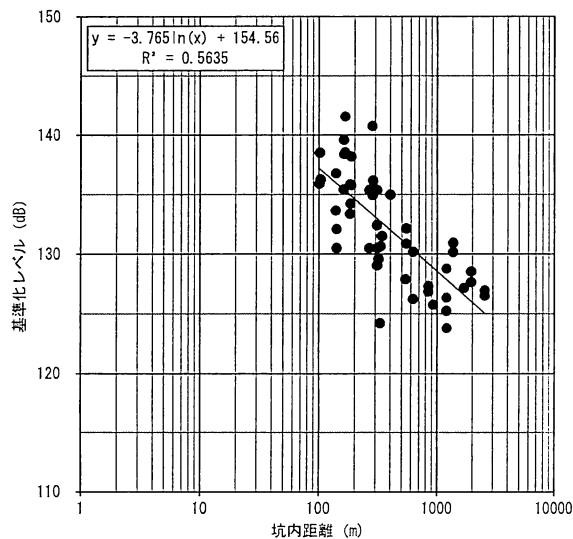


図-10 基準化レベルと坑内距離の関係

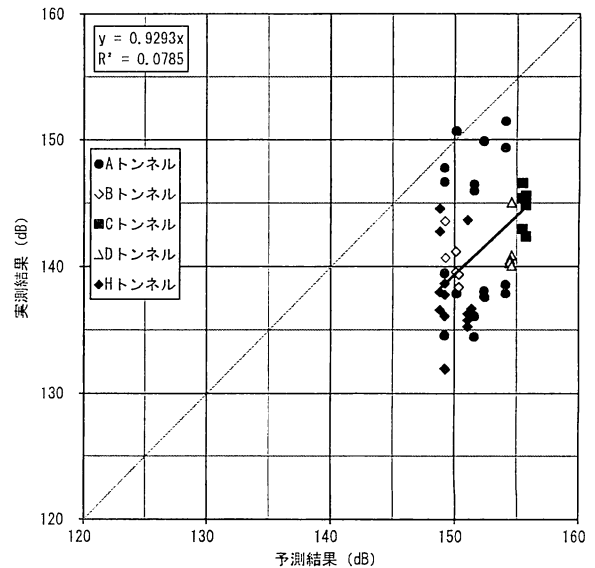


図-11 予測結果（船津の式 坑内）と実測結果の比較

表-2 重回帰分析結果

回帰統計	
重相関係数	0.564
重決定係数	0.318
自由度調整済み決定係数	0.290
標準誤差	3.996
観測数	52

	係数	標準誤差	t	P-値
切片	145.470	3.834	37.941	5.5E-38
坑内距離log	-6.158	1.559	-3.950	0.00025
総薬量log	7.497	1.820	4.119	0.00015

自由度調整済み決定係数は0.290と低い値となったが、これは施工状況により低周波音レベルが大きくばらつくことが原因と考えられる。また、各変数のt検定の危険率（P-値）は0.05以下となり、統計的有意性を確認した。

各係数を小数点第一位に調整して得られた回帰式を式(9)に示す。

$$LL_{pit} = 145.5 + 7.5 \log_{10}(W) - 6.2 \log_{10}(D) \quad (9)$$

LL_{pit} : 坑内の予測地点における

G特性音圧レベル (dB)

W : 総薬量(kg)

D : 切羽から坑内予測地点までの距離(m)

坑内の実測結果に対して、船津の式による予測結果との比較を図-11に、新たに提案する坑内減衰も考慮した式(9)による予測結果との比較を図-12に示す。

船津の式では決定係数は0.0785で標準偏差は4.537であったが、式(9)では決定係数は0.3179と改善され、標準偏差も3.876とばらつきは小さくなった。

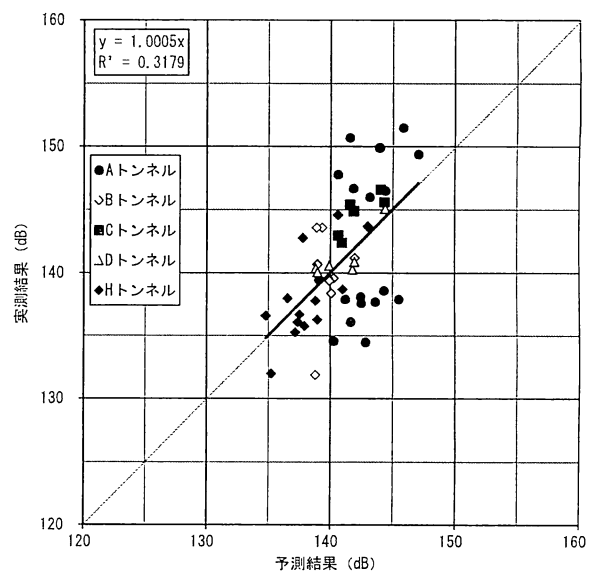


図-12 予測結果（新提案式 坑内）と実測結果の比較

(3) 開口端反射による減音量と面積補正量の計算

実測結果の中には、防音扉がない場合でも、距離差があまりない坑口付近の坑内と坑外の測定結果に6～10dB程度の差が生じる結果があった。これは坑口部にて音響エネルギーすべてが外部に放射されず、低周波成分の一部が坑内に反射されることでレベル減衰が生じる、開口端反射の影響と考えることができる。

この開口端反射による減音量を求める式は、図-13に示すバップルがある場合に式(10)、バップルがない場合に式(11)となる⁴⁾。

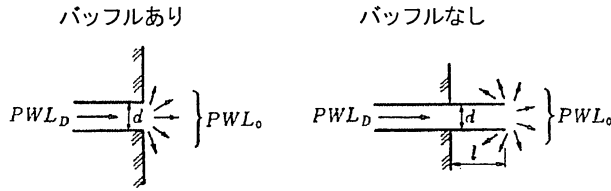


図-13 開口端反射におけるバツフルの模式図⁰⁾

・バツフルあり

$$\Delta L_E = -15 \log_{10}(f \times D) + 30 \quad (10)$$

・バツフルなし

$$\Delta L_E = -20 \log_{10}(f \times D) + 44 \quad (11)$$

$$2D > \frac{c}{f} \text{ の場合 } \Delta L_E = 0$$

ΔL_E : 開口端反射減音量 (dB)

f : 卓越周波数 (Hz)

D : 開口端の等価直径 (m)

$$D = \sqrt{a \times b} = d$$

a, b : 開口端の辺長 (m)

d : 直径 (m)

また、坑口から坑外へ放射される音響エネルギーは、面音源的に坑口全体から発せられることから、坑口部の面積補正を加算することとした。面積補正量を求める式を式(12)に示す。

$$\Delta L_S = 10 \log_{10}(S) \quad (12)$$

ΔL_S : 面積補正量 (dB)

S : 坑口部断面積 (m²)

(4) 新たに提案する低周波音予測式

(2), (3)にて示した各計算式を統合して、坑口から外部への伝搬を含めた基本式を式(13)に示す。

$$LL = 145.5 + 7.5 \log_{10}(W) - 6.2 \log_{10}(D) + \Delta L_E + 10 \log_{10}(S) - 20 \log_{10}(R) - \Delta L \quad (13)$$

LL : 坑外の予測地点における

G特性音圧レベル (dB)

W : 総薬量 (kg)

D : 切羽から坑口までの距離 (m)

ΔL_E : 開口端反射減音量 (dB)

(防音扉がある場合 0)

S : 坑口部断面積 (m²)

R : 坑口から受音点までの距離 (m)

ΔL : 指向性, 防音扉, 回折減衰などの補正值 (dB)

7トンネルで計測した坑外低周波音39データ (G特性音圧レベル) に対して、新たな提案式による予測結果を算出し、実測結果と比較した結果を図-14に示す。

実測結果と比べて、船津の式では決定係数は0.8056で標準偏差は7.386であったが (実測値の評価量は音圧レベル), 新たに提案する予測式では決定係数は0.9086で標準偏差は5.302と、より相関が高くばらつきが少ない結果を得ることができ、新しい低周波音予測手法の有意性を検証することができた。

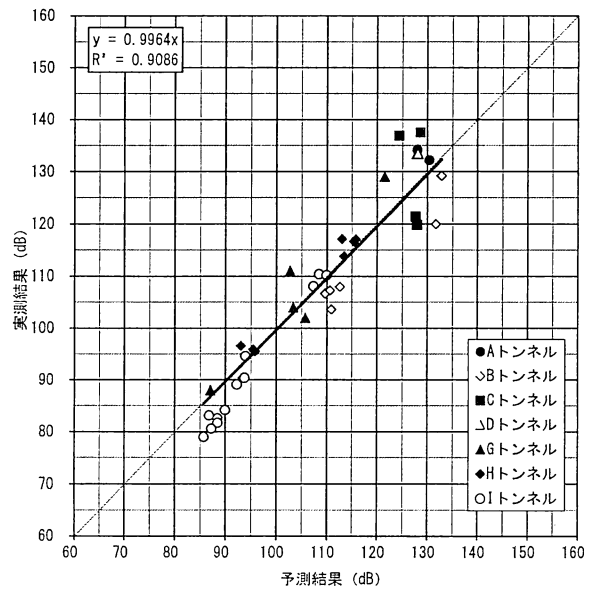


図-14 予測結果 (低周波音新提案式) と実測結果の比較

(5) 新たに提案する低周波音予測式の簡易式

(4)にて示した新たな低周波音予測式は、予測手法の適用範囲を広げると共に予測精度も向上させている。

ただし、新たに取り入れた開口端反射による減音量など、予測のためのパラメーターが多くなり、船津の式の特徴であった簡便さが若干失われる結果となった。

そこで、坑口近傍など特殊な条件でない坑外予測地点での計算においては、坑口断面積を75m²、開口端反射はバツフルあり、及び発破低周波音の卓越周波数を4Hzに固定し、パラメーターを少なくした式(14)を簡易式として提案する。

$$LL = A + 7.5 \log_{10}(W) - 6.2 \log_{10}(D) - 20 \log_{10}(R) - \Delta L \quad (14)$$

LL : 坑外の予測地点における
G特性音圧レベル(dB)

A : 坑口に防音屏がない場合 1573
坑口に防音屏がある場合 1643

W : 総薬量(kg)

D : 切羽から坑口までの距離(m)

R : 坑口から予測地点までの距離(m)

ΔL : 指向性, 防音屏, 回折減衰などの補正值(dB)

7トンネルで計測した坑外低周波音39データ (G特性音圧レベル) に対して, 簡易式による予測結果を算出し, 実測結果と比較した結果を図-15に示す。

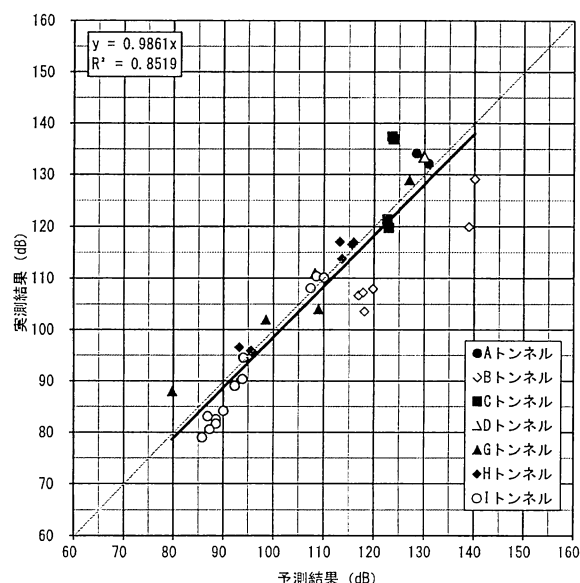


図-15 予測結果 (簡易式) と実測結果の比較

簡易式においても, 決定係数は0.8519で標準偏差は6.775と, 簡易式においても有意性を検証することができた。

4. まとめ

トンネル発破騒音に関しては, 日本音響学会が提案している「建設工事騒音の予測モデル “ASJ CN-Model 2007”」内のトンネル発破騒音に関する予測法を元に, 船津の式を参考に総薬量の違いにより発破音レベルが変化できる予測式を新たに提案し, 予測精度を向上させた。

また, トンネル発破低周波音に関しては, 評価量をG特性音圧レベルに変更すると共に, 船津の式を参考に新たに坑内減衰と開口端反射を考慮する等の検討を行い, 予測手法の適用範囲を広げると共に予測精度も向上させた予測式と, これを簡略化した簡易式を提案した。

今後も測定事例を増やすことで, より精度の高い予測手法の改良を行っていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 船津弘一郎, 坂野良一: トンネル発破工事における振動, 騒音, 低周波音の予測方法, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第2巻, pp.215-220, 1992.10
- 2) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会: “建設工事騒音の予測モデル “ASJ CN-Model2007”, 音響学会誌, 64巻4号, pp.229-260, 2008.4
- 3) 横田考俊, 縄岡好人, 橘秀樹: 広帯域衝撃性音源を用いたトンネル発破音の音響エネルギーレベル推定, 日本音響学会講演論文集, pp.1443-1444, 2008.3
- 4) 日本建築学会編: 実務的騒音対策指針 (第二版), pp.32-33, 技報堂出版株式会社, 1994.

(2012.9.3 受付)

STUDY ON PREDICTION METHOD OF NOISE AND LOW FREQUENCY NOISE GENERATED BY BLASTING WORKS OF A TUNNEL CONSTRUCTION

Junichi UTSUGI, Satoshi TERAMOTO and Toshiaki SUDO

Since the prediction method of the tunnel blast noise and the low frequency noise had the simple prediction relation which Funatsu and others proposed and was high-precision, it has been widely used as a predictive tool for measure examination. However, the example which a problem produces in predictive accuracy came to be seen by blasting technology in recent years and development of measurement apparatus. Based on the predicting method about the tunnel blast noise in "ASJ Prediction Model 2007 for Construction Noise" which Acoustical Society of Japan has proposed, the noise level enabled it to change Funatsu's formula with the differences in the total amount of medicine to reference, and the tunnel blast noise raised predictive accuracy. While changing the amount of evaluations into G-weighted sound pressure level, a tunnel blasting low frequency noise newly inquires in consideration of inside-of-a-pit attenuation etc., and it also raised predictive accuracy while it extended the scope of a prediction method.