

発破掘削における低周波対策

Methods of a low frequency sound in tunnel excavation by blasting

土井一豊¹・樋口 隆²・古川哲男³

Kazutoyo Doi, Takashi Higuchi and Tetsuo Furukawa

^{1 2 3}佐藤工業 中国支店 末宗トンネル作業所 (〒679-5321 兵庫県佐用郡佐用町下石井3 4 4-1)

E-mail: Doi@satokogyo.co.jp

This report presents anti-reduction methods of the tunnel-blasting noise that we carried out in the Suemune daiiti tunnel. The noise and vibration occur at the time of a tunnel blasting. In the noise, a low frequency sound has bad influence such as wobbles on a house. There were houses near the tunnel entrance and it was thought that the low frequency noise at the time of tunnel blasting gave the damage to inhabitants. As a method to reduce a low frequency sound, we installed a double soundproofing door in tunnel. It was reduced about 12% low frequency sounds by these methods.

Key Words: tunnel-blasting noise, low frequency sound, soundproofing door

1. はじめに

鳥取自動車道は、兵庫県佐用町から岡山県大原町を經由して鳥取県鳥取市へ至る高速自動車国道で、法定路線名では播磨自動車道と併せて、中国横断自動車道姫路鳥取線（兵庫県姫路市～鳥取県鳥取市）と称されている。この内、兵庫県佐用町～岡山県西栗倉村の区間と、鳥取県智頭町～鳥取市の区間については国土交通省の新直轄方式で、中間部西栗倉～智頭間は国土交通省の直轄で、整備が進められている。

この路線は、山陽、山陰および中国地方の山地沿いの地域を山陽自動車道や中国縦貫自動車道と連結しながら一体的に結ぶもので、輸送時間の短縮、沿道地域の産業、生活や文化の発展に寄与するものと期待されている。

本工事は、2本のトンネル（末宗第一トンネル：L=229m、末宗第二トンネル：L=1,176m）と明り土工（L=192m）から構成されるもので、施工位置については図-1に示すとおりである。

本報文は、先に貫通した末宗第一トンネルの工事概要と施工中に苦心した発破掘削に伴う低周波対策について報告する。

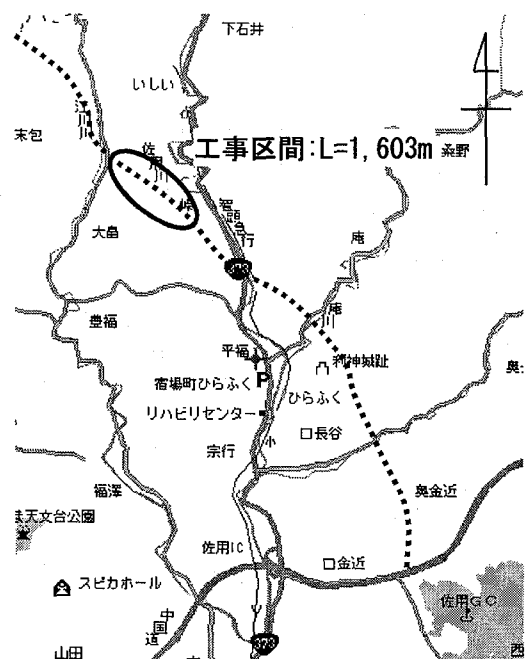


図-1 施工位置図

2. 工事概要

(1) 工事概要

末宗第一トンネルは、車道幅員9.5m、縦断勾配3.9%、トンネル延長229mの2車線道路トンネルである。(図-2参照)平成17年10月にトンネル本体工事に着工し、平成18年2月に無事貫通した。

工事概要は、下記のとおりである

工 事 名：鳥取自動車道末宗トンネル工事

発 注 者：西日本高速道路㈱中国支社

工事箇所：兵庫県佐用郡佐用町延吉～大畠

施工業者：佐藤・若築JV(60:40)

工事概要：

トンネル延長 $L=229\text{m}$

仕上り内空 $A=64.793\text{m}^2$

掘削工法 NATM工法

掘削方法 補助ベンチ付全断面発破掘削

地山岩種 安山岩・流紋岩質火砕岩

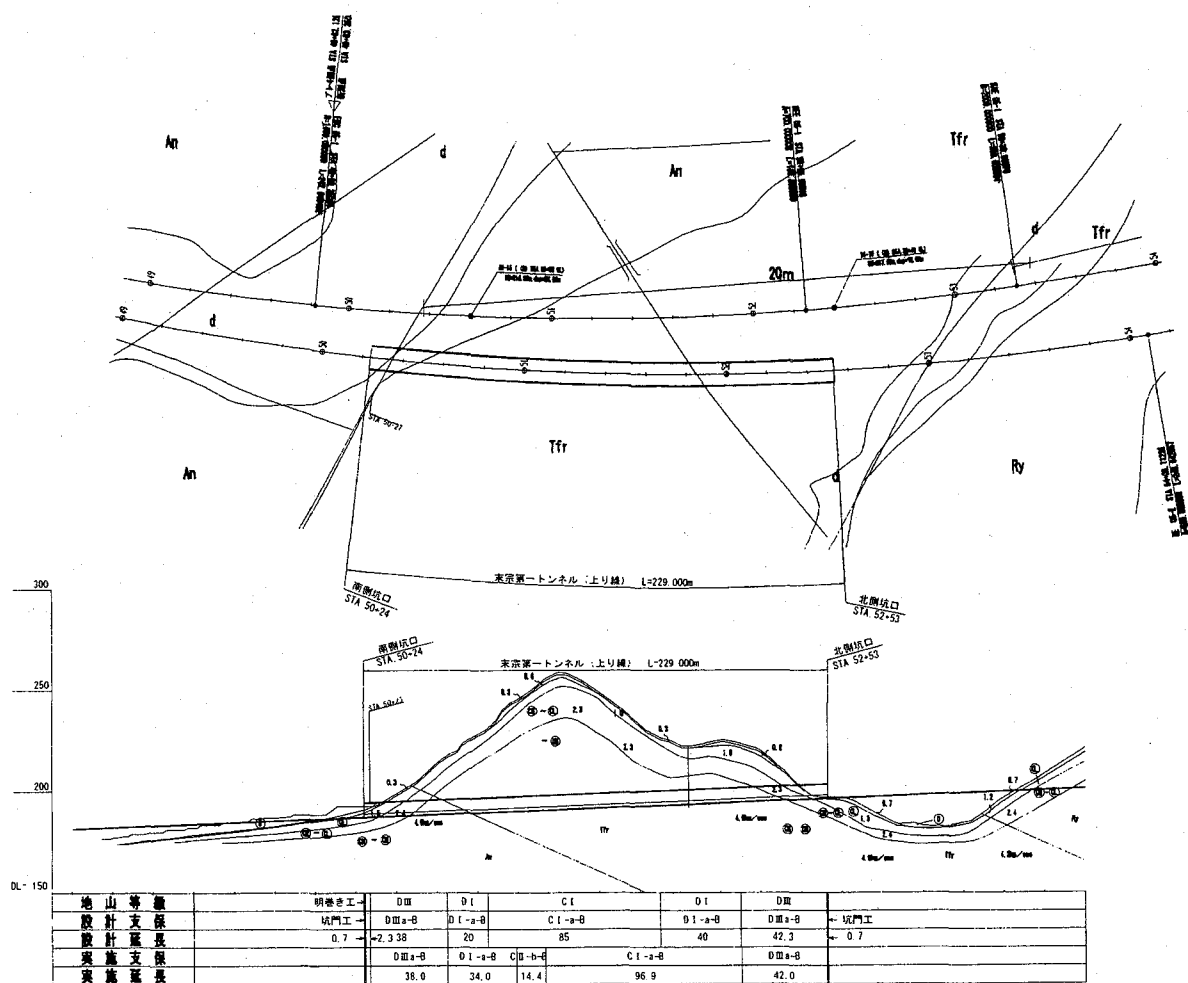


図-2 トンネル計画平面図・縦断図

(2) トンネル坑口周辺状況

図-3及び図-4に示すように、末宗第一トンネル坑口より距離約250m、高低差約20mの位置に集落(9所帯)が存在しており、工事着手前より夜間の工事騒音及び低周波騒音による住民の方々への被害が懸念された。工事騒音に対しては、吹付けプラントを防音パネルタイプにし、また仮設ヤードの端部にH=3mの防音壁を設置することで、夜間の騒音規制値

45dB以下をクリア出来た。低周波騒音の管理目標値については、過去の事例によりG特性値で100dB以下を目標に設定した。工事開始当初に図-3に示す①②③④地点での計測を実施し、③地点が他に比較して低周波騒音レベルが高かったので、③地点での計測を実施しながら、掘削方法並びに防音扉の設置等対策の検討を実施した。

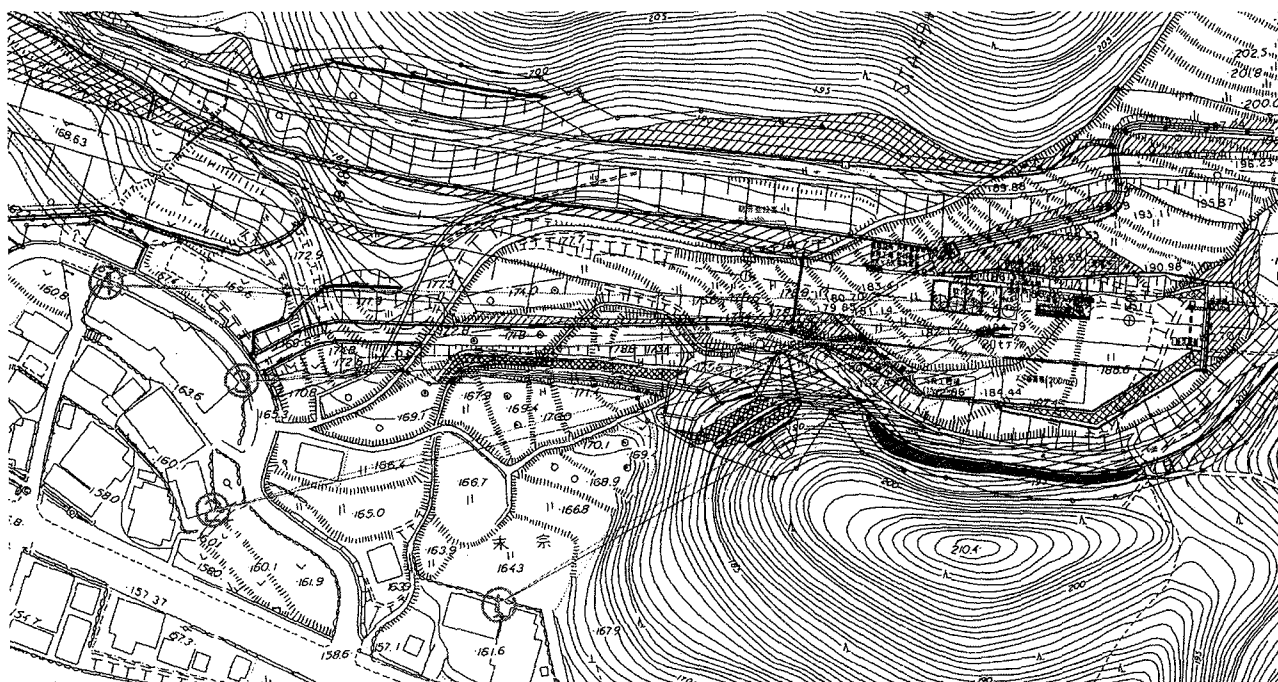


図-3 トンネル坑口周辺平面図

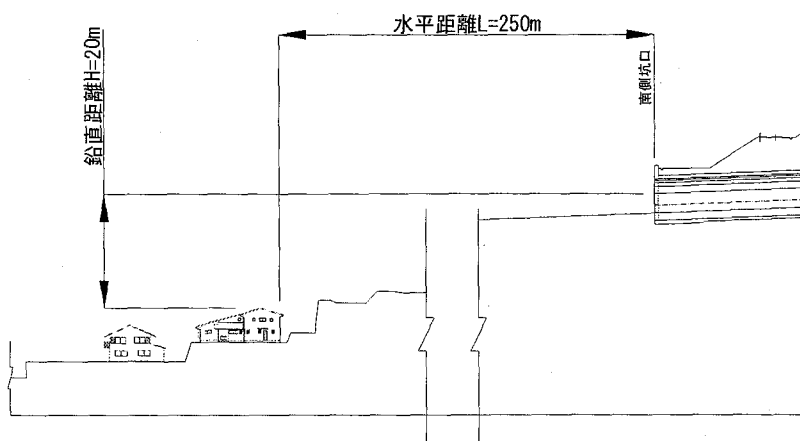


図-4 トンネル坑口～民家の横断図

3. 発破低周波騒音対策

(1) 低周波対策の経緯

平成18年10月18日より昼作業でトンネル掘削に着手し、10月27日から部分的発破掘削を開始した。この時点の防音扉の無い状態での低周波騒音レベルを末尾の表-2に示す。約8kgの爆薬使用量で91dB～117dB（平均101dB）を示した。

掘進24m時点で、当初設計に採用されているコンクリート充填型防音扉を1基坑口に設置した。末尾表-3に防音扉1基設置後の低周波音レベルを示す。8kg程度の爆薬使用時の低周波音レベルは90dB程度であり、10dB程度の減音効果が確認された。その後徐々に爆薬使用量を20kg前後まで増加したが、98～100dBのレベルで地元からの苦情が発生した。今後徐々に岩質強度が増加し使用火薬量も必然的に増えることから、管理目標値および対策工の見直しを行うこととした。

(2) 低周波騒音の目標値の設定

低周波騒音の管理目標値については、施工実績より98dbを苦情発生の一指標と考え、97dbに再設定し、地山区分が想定されるC I 区分となった場合の発破による低周波騒音の予測を行った。C I パターンの爆薬量を0.90kg/m³と設定し1サイクル当たりの爆薬量を算定すると99.0kgとなる。図-5は防音扉1基設置後実測した爆薬量と低周波騒音の関係であるが、この測定結果より求められた近似式より低周波騒音を予測すると、

$$y \text{ (低周波騒音)} = 0.1192x + 95.698 \text{ (dB)}$$

ここで、 $x=99.0$ (kg) : 爆薬量

$$= 107 \text{ (dB)}$$

この結果を踏まえ、約10dB相当の低周波低減対策が必要であると判断した

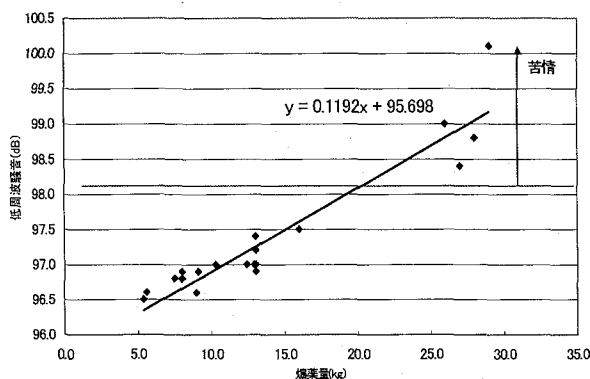


図-5 爆薬量と低周波騒音の関係（防音扉1基）

(3) 低周波騒音対策の選定

一般的な発破騒音対策としては、発破制限と遮音施設による対策が挙げられる。以下にそれぞれの対策例を示す。

① 発破制限による対策

- ・ 発破時間の制限
- ・ 制限発破（分割発破・火薬量制限）
- ・ 割岩工法の採用

② 遮音施設による対策

- ・ 防音扉の増設
- ・ 防音壁の設置

これらの対策案の比較検討を行うと、①の対策案では予定の進捗が得られないため、工程および経済性で②対策案が優れている。また、過去の実績から対策案として、防音扉の増設案（コンクリート充填型防音扉1基増設）を選定した。

* 防音扉の低減効果 低周波音に対する減音：

7～15 dB・・・1基

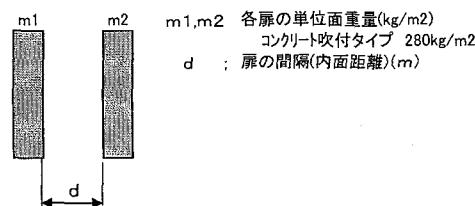
15～25 dB・・・2基

(4) 増設防音扉の設置位置の検討

2重防音扉による低周波騒音低減効果を最大限に生かすためには、共鳴透過の観点からそれぞれの扉と扉の間隔をより大きくすることが望ましい。しかし、必要以上に間隔を開けることは設置時期を遅らせることになり、工程及び作業性に大きく影響する。よって、工程に極力影響しない適切な間隔を設定する必要がある。

ここで、二重扉では低音域の共鳴透過周波数 f_r は次式で与えられる。

$$f_r = 600 \times \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \times m_2} \times \frac{1}{d}}$$



※) 通商産業省立地公害局調査委員会・社団法人産業公害防止協会：1984年4月 低周波音防止技術解説書 より

図-6に示すように中空二重扉では、 $d=0$ の場合の質量則 (m_1+m_2) による透過損失と、 d が十分に大きい場合の m_1 による透過損失 TL_1 と m_2 による透過損失 TL_2 の和で合わされる透過損失の間の値をとる。

実際には d が十分大きければ、図-6の実線で示されるように f_r で極端に透過損失は低下し（材料の屈曲振動と入射音波の振動とが一致し、一種の共振状態を起こす：コインシデンス効果）、波数が f_r から離れるに従って TL_1+TL_2 に近づいていく。このとき質量則 (m_1+m_2) に一致する周波数は $\sqrt{2} \cdot f_r$ となる。従って $\sqrt{2} \cdot f_r$ 以上の周波数であれば、二重扉の利用に当たってより有効であるといえる。

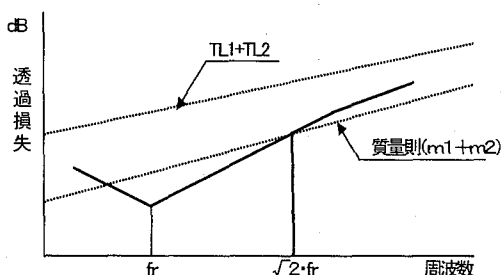


図-6 質量則と共鳴透過の関係

以上を数式で表すと、 $\sqrt{2} \cdot f_r < f_0$ となるように、 f_r を設計する（間隔を決める）必要がある。

$$f_r = 600 \times \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \times m_2}} \times \frac{1}{d} < \frac{f_0}{\sqrt{2}} \text{ (Hz)} \dots\dots \text{①式}$$

m_1, m_2 : 各扉の単位面重量 (kg/m^2) コンクリート吹付タイプ 280 kg/m^2

d : 扉の間隔（内面距離）(m)

f_0 : 発破の周波数 (16Hz)

①式より得られた結果を表-1に示す。

表-1 扉間隔算定結果表

扉の間隔 (m)	f_r (Hz)	<	$f_0/\sqrt{2}$	判定
15	13.1	>	11.3	NG
20	11.3	=	11.3	NG
21	11.1	<	11.3	OK
25	10.1	<	11.3	OK
30	9.3	<	11.3	OK

以上の計算結果より、扉の間隔は21mとした。

(5) 防音扉増設効果の検証

2枚目防音扉設置後の低周波測定結果を末尾表-4並びに図-7に表す。

二重防音扉の増設効果により、通常の施工サイクル（工程）に大きな影響を与えることなく、効率的な掘削が可能となった。また、地域住民への説明と理解を得ながら施工を進めた結果、以後トラブルもなく無事貫通することができた。

4. おわりに

本報告書をまとめるにあたり、本トンネルの施工で技術指導を頂いた西日本高速道路株式会社中国支社 津山工事事務所 関係各位に心から感謝申し上げる。本稿が、類例工事の参考になれば幸いである。

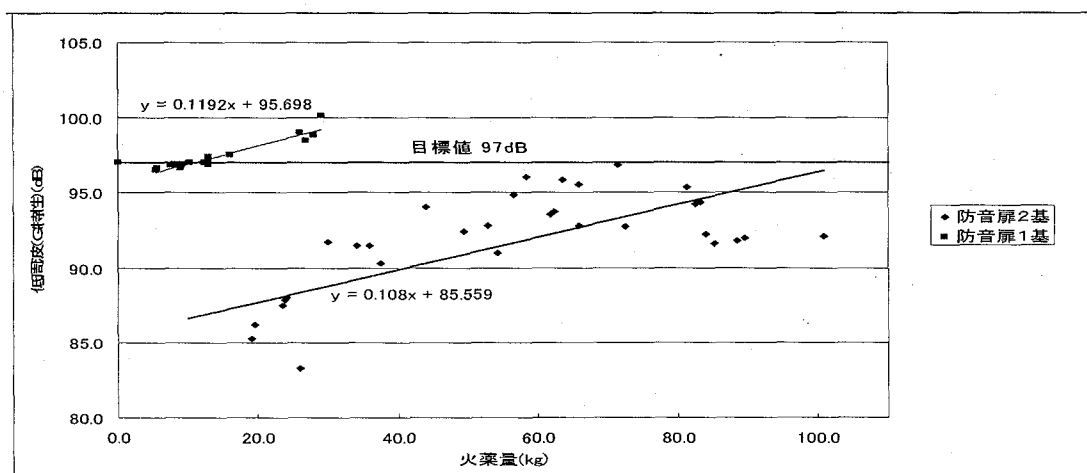


図-7 爆薬量と低周波騒音の関係測定結果

表-2 防音扉無し発破低周波騒音測定結果

月	日	切羽から計測点までの距離	爆薬使用量(kg)	低周波測定値(dB)	摘要
10	27	266	8.0	102.0	DⅢパターン
11	5	270	8.0	91.0	
	5	277	8.0	117.0	
	7	272	8.4	94.0	
	7	278	8.2	97.9	掘進24m

表-3 防音扉1基発破低周波騒音測定結果

月	日	切羽から計測点までの距離	爆薬使用量(kg)	低周波測定値(dB)	摘要
11	15	280	8.0	90.5	
	16	281	13.0	96.9	以後昼夜作業
		282	8.0	90.1	
	17	283	13.0	95.5	
		284	13.0	96.4	
		285	8.0	92.2	
	18	286	13.0	96.8	
		287	13.0	99.6	
	19	288	13.0	100.2	
	21	289	16.0	99.1	
	23	295	23.7	100.7	
	23	296	19.8	99.0	DⅠパターン
	24	299	23.4	99.5	
	25	301	22.0	98.4	地元苦情発生
	29		12.4	96.6	分割発破
		312	5.4	93.1	分割発破
	30		13.0	96.2	分割発破
		314	7.5	97.0	分割発破
			12.9	96.5	分割発破
		315	9.1	96.6	分割発破
12	1		12.4	97.0	分割発破
		317	5.7	96.8	分割発破
			11.8	97.0	分割発破
		318	6.7	96.8	分割発破
	2		13.0	96.4	分割発破
		321	13.0	96.9	分割発破
			13.0	97.0	分割発破
		322	9.9	96.8	掘進68m

表-4 防音扉2基発破低周波騒音測定結果

月	日	切羽から計測点までの距離	爆薬使用量(kg)	低周波測定値(dB)	摘要
12	6	324	23.5	87.5	防音扉2基設置
		325	24.0	88.0	
	7	327	29.9	91.7	
		328	37.5	90.3	
	8	330	23.8	87.9	
		331	34.1	91.5	
	9	334	49.3	92.4	
		335	35.8	91.5	
		336	54.2	91.0	
	10	338	61.7	93.5	CⅡパターン
	12	339	44.0	94.0	
		340	56.0	94.8	
		341	58.3	96.0	
		342	52.7	92.8	
12	13	343	71.5	96.8	
		344	63.5	95.8	
	14	344	62.2	93.7	低周波2dB減衰
		345	65.8	95.5	
	15	348	72.5	92.7	
		348	65.8	92.8	
	16	351	68.1	91.8	
		352	68.5	92.0	
	17	355	68.2	94.3	
	19	356	83.9	92.2	
		357	85.3	91.6	
		359	82.5	94.2	
	20	360	81.2	95.3	CⅠパターン
		361	74.9	92.1	
		362	85.9	95.3	
	21	364	97.2	93.9	
		365	91.2	95.2	
	22	368	87.1	97.6	
	23	371	78.0	98.9	
		372	77.5	95.1	掘進118m