

発破振動に起因する地表建物内の騒音を制御した合理的なトンネル施工

前田建設工業(株)・(株)三幸工務店建設工事共同企業体 ○松原 健
前田建設工業(株)・(株)三幸工務店建設工事共同企業体 芦田良太
前田建設工業(株)・(株)三幸工務店建設工事共同企業体 八木基徳

1. はじめに

美作岡山道路は、岡山県が事業主体として行う地域高規格道路整備事業の一環で、岡山市東区瀬戸町から勝田郡勝央町を結ぶ延長約 36km の地域高規格道路である。

このうち湯郷第一トンネルは、岡山県美作市にある湯郷温泉の北西に位置し、第一期事業区間となっている湯郷 I C から勝間田 I C の間に、延長 852m、掘削断面積 77m² の道路トンネルを構築するものである。(トンネル名、I C 名は仮称) 本トンネルの掘削方法としては、上半先進ショートベンチカット工法及び補助ベンチ付全断面工法、NATM、発破掘削、タイヤ方式等で計画されている。

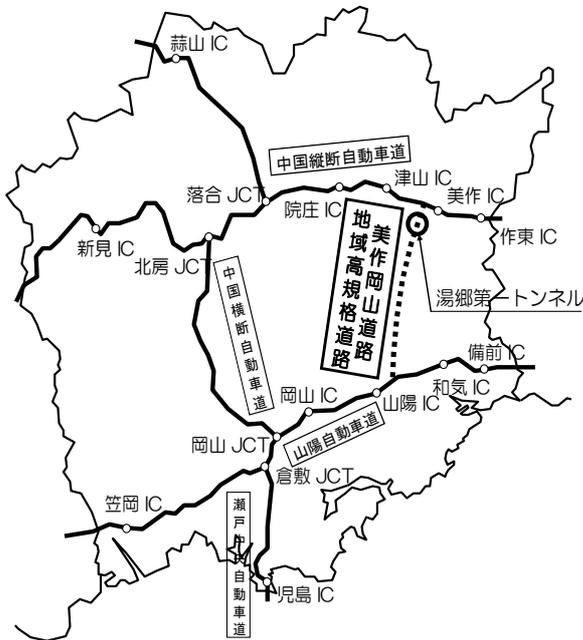


図-1 岡山県高規格道路路線図



図-2 美作岡山道路路線図

本トンネル工事においては、トンネル区間中央部の直上付近に宿泊施設があるため、発破掘削を行うにあたっては、同施設直下を通過する際の宿泊客への影響が懸念されたことから人体、建物及び温泉井戸それぞれについての振動速度 ($kine = cm/sec$) に対する管理基準値が設けられ、影響が予測される宿泊施設及びこれに付随する温泉井戸近傍の前後約 362m 区間を制御発破等で施工するよう設計^{1)~5)}されていた。

事前に宿泊施設等に設置した振動速度計測装置により継続的にトンネル発破振動を計測していった結果設計図書に示された制御発破開始位置にトンネル切羽がほぼ到達した時点で、設計時に予測した振動速度に近づいたことから、計画通り導火管付雷管による制御発破を開始した。同時期に当初予期していなかった発破騒音が宿泊施設内に発生するようになった。切羽進行と共に騒音は次第に上昇し、振動よりはむしろ騒音による宿泊客への影響が懸念されるようになった。

Rational construction of tunnel that controls noise in the building on surface that originates in blasting vibration : Ken Matsubara (Maeda Sanko JV), Ryota Ashida (Maeda Sanko JV), Motonori yagi (Maeda Sanko JV)

本報文は、工事を進める上で重要な課題となった宿泊施設内の騒音に対し、騒音発生メカニズムの解明と対策工の提案、その実施結果を報告するものである。

2. 工事概要

工事名称 : 4-19-4 公共道路工事 湯郷第一トンネル
工事場所 : 岡山県美作市下大谷～中山地内
発注者 : 岡山県美作県民局
施工者 : 前田建設工業(株)・(株)三幸工務店建設工事共同企業体
工期 : 平成20年3月17日～平成22年3月31日
工事内容 : トンネル延長 L=852m 掘削断面 76.3～94.2m²

3. 地形・地質概要

本トンネルは全線が痩せた山地の中にあり、土被りは最小5m、最大約46mで比較的浅い位置に計画されている。

トンネル内の地質は中生代白亜紀の流紋岩質凝灰岩 (RyTf) が主体で、劣化帯や破砕帯による低速度帯を谷部に挟むが、岩級的にはCM～CH級で、一軸圧縮強度が80～100(N/mm²)程度の岩盤が全体の7割を占める。

また、地表部の所々に露頭している流紋岩質凝灰岩 (RyTf) は、凝灰角礫岩状で、主としてCM～CL級を呈する。全般に表土は薄い。

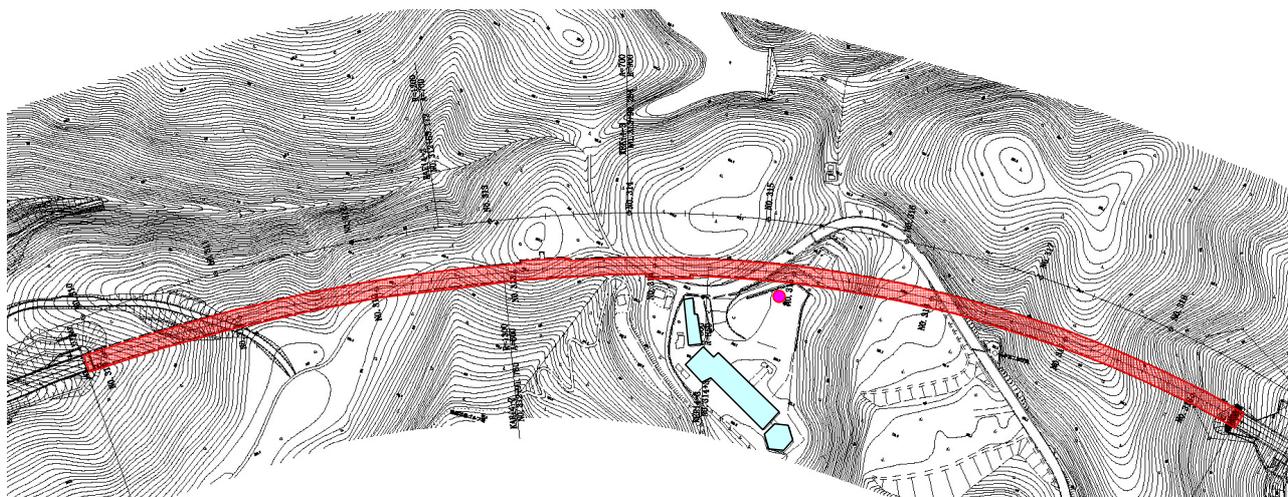


図-3 平面図

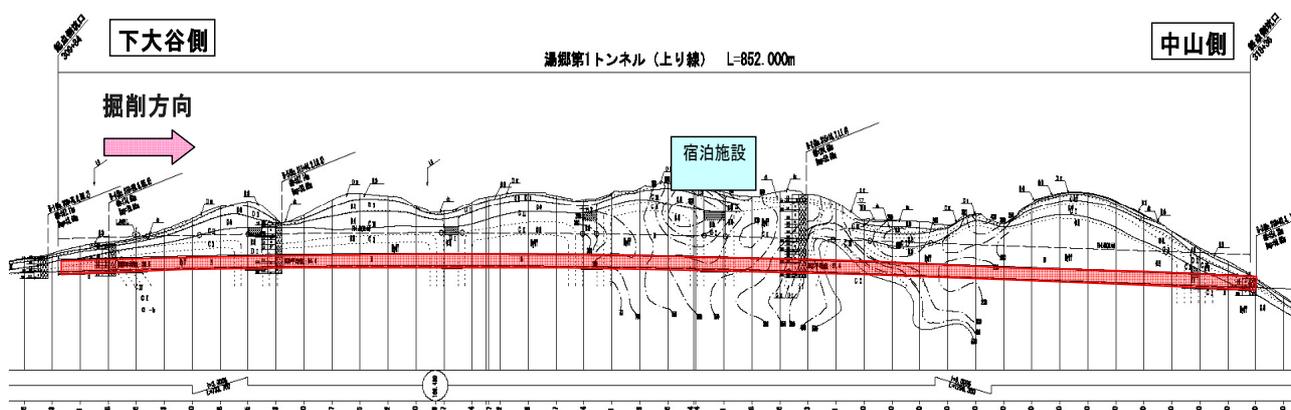


図-4 縦断面図

4. 騒音発生メカニズムの解明

発破騒音は、発破により生じた音が空気中を伝搬して聞こえる場合が一般的である。本件のように発破騒音が空気中の伝搬によらずに、地上部の施設や家屋などに影響を与えた事例は少ない。また、他の事例とは立地環境も含めた施工条件も異なる。このため本トンネルで対策を検討する上では、騒音発生メカニズムを明らかにすることが重要であると考えた。

4.1 対象物件とトンネルの位置

対象となった宿泊施設、温泉井戸及びトンネルの位置関係を図-5、図-6に示す。また、同施設に付属する温泉井戸（図-7）はトンネル側方11.5mに位置し、鉛直に貫いている。

このため当初設計において振動速度（kine）に対する管理値（宿泊施設：昼間0.2kine、夜間0.08kine、温泉井戸：2.5kine）が設けられ、宿泊施設及び温泉井戸近傍の前後362m区間は制御発破で施工するよう計画^{1)~5)}されていた。特に直近の130m区間は、宿泊客への影響を考慮し、昼間1方による制御発破での施工とされていた。

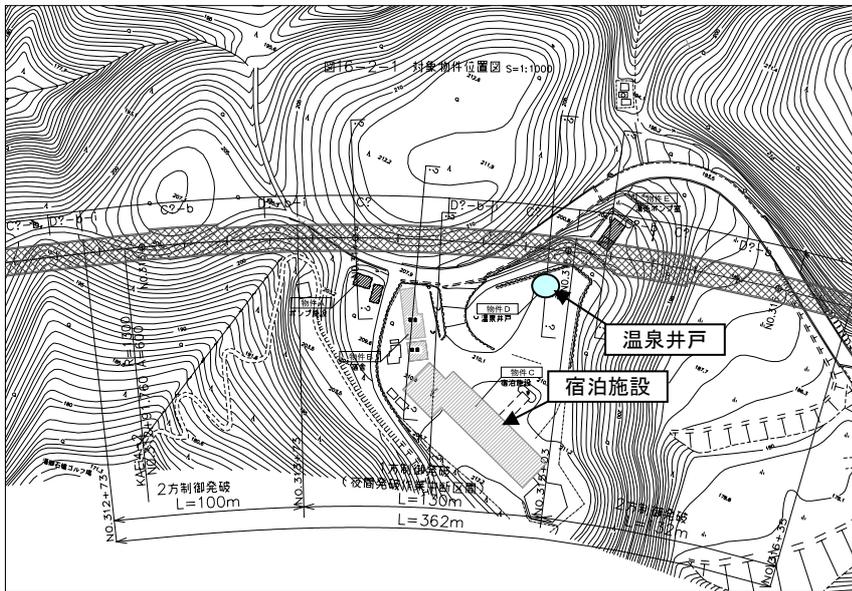


図-5 対象物件位置図

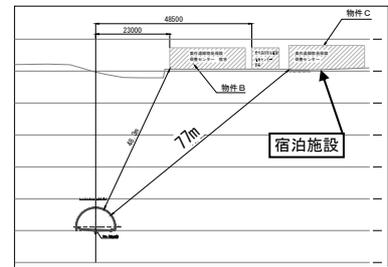


図-6 宿泊施設横断面図

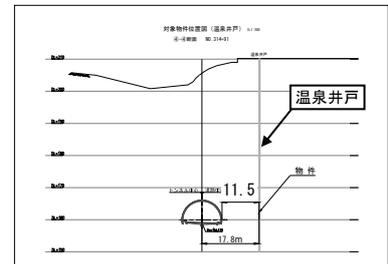


図-7 温泉井戸横断面図

4.2 騒音発生メカニズム

本トンネルでは、宿泊施設内に発生する発破時の騒音のメカニズムを解明するため、まず宿泊施設やトンネル中心線上の振動・騒音の発生状況の調査を行った。

宿泊施設での騒音レベルは、建物外部より建物内部の方が大きくなっている状況が確認された。トンネル中心線上の計測結果では切羽直上の騒音が最も大きく、坑口からの距離減衰による影響は確認できなかった。また、これまでの計測データからも切羽が宿泊施設に近づき、切羽が坑口から遠ざかる状況で建物内での発破騒音は大きくなっていることがわかった。

一般にトンネル発破時に切羽で発生する音はトンネル坑口から伝搬して行き、建物内に伝わるとされる。このため、建物内に伝わる発破音は切羽進行に伴う距離減衰、地形・建物の減衰性能によって建物外部の音より小さくなると考えられる。今回の調査結果はこれらと矛盾する結果となった。

建物内部の音が建物外部より大きくなる原因として次の事が考えられる。

- ① 建物内の共鳴により音が大きくなる。
- ② 特異な伝搬経路が建物内に有り、建物の遮音性能が著しく悪くなっている。

③ 発破振動が地盤から建物に伝わり、建物内の構造物から音が発生している。

騒音発生メカニズムを解明するには、これらの原因を確かめる必要があると考え、宿泊施設の建物内の共鳴、遮音性能、振動放射音の周波数分析などによる音響解析等の調査を実施することとした。

調査結果により以下のような内容が確認された。

- ① 建物内の共鳴は 40Hz, 80Hz, 120Hz で音が大きくなる事が観測者の耳で確認出来たが、騒音に影響を及ぼす特異的なものではない。
- ② 建物内外の騒音同時計測及び建物の壁の音の透過損失計測から、建物内の騒音は、坑口からの騒音が室内に到達した場合の値より 19～22dB 程度大きい(図-8)と推定できた。したがって、建物内の騒音は、坑口から空気中に放出された音が空気中を伝搬したものではない。
- ③ 騒音レベル(dB)と建物床面の振動速度(kine)の間に明確な比例関係(図-9)が認められる。
- ④ 建物の床面の振動速度(kine)と建物内の騒音レベルの周波数(Hz)分布が類似(図-10)し、特にZ方向が良く似ていることが判った。
- ⑤ 宿泊施設の施工記録などから建物は直接岩盤上に構築されていて、この基盤は地表踏査やこれまでの状況からトンネルと連続する岩盤であることが推察された。

以上のことから、宿泊施設内の騒音は、発破に伴う振動が地盤(岩盤)を伝搬して宿泊施設の建物に伝わり、壁や床面等が振動することにより空気を振動させ、結果的に騒音(固体伝播音)として人に認知されるということが確認できた。

また、振動速度(kine)と宿泊施設内の騒音レベルに明確な比例関係が認められることから、宿泊施設内の騒音を抑制するには、発破振動を抑制する事が最も効果的な施工上の対策と結論づけられた。

5. 対策工の提案

5.1 振動・騒音の事前予測

建物内で発生する振動・騒音が今後どの程度までになり得るかを予測するため、切羽と建物が最接近した時と似かよった条件で地表部における切羽位置前後の振動速度を試験計測し、切羽が近づくにつれてどのような傾向を示すかを確認し、図-11 に示す結果を得た。このデータにより回帰式を求め、建物から切羽迄の距離と振動速度の関係を予測した。

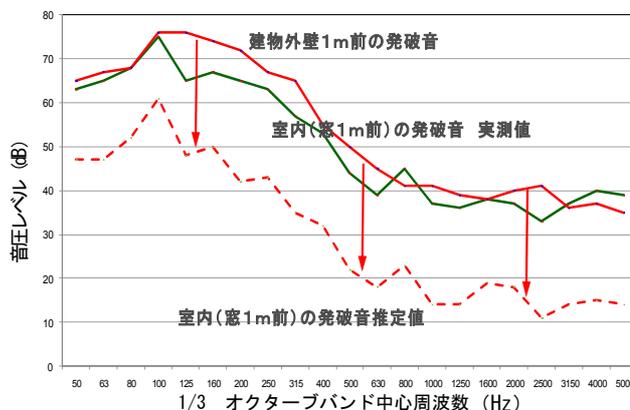


図-8 建物内外の周波数分布

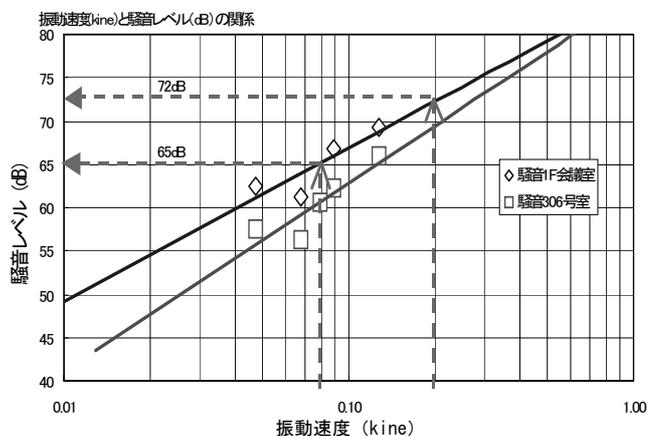


図-9 振動と騒音の関係

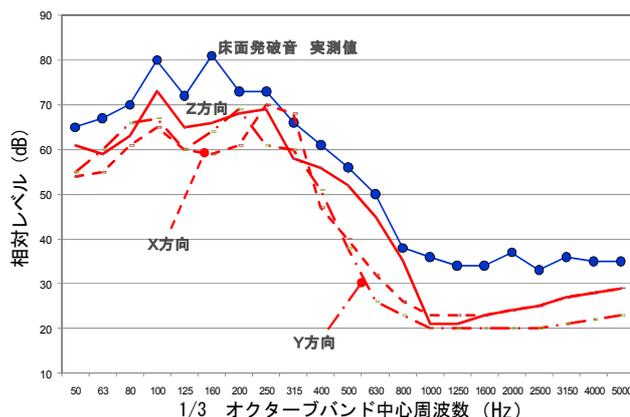


図-10 建物床面の周波数分布

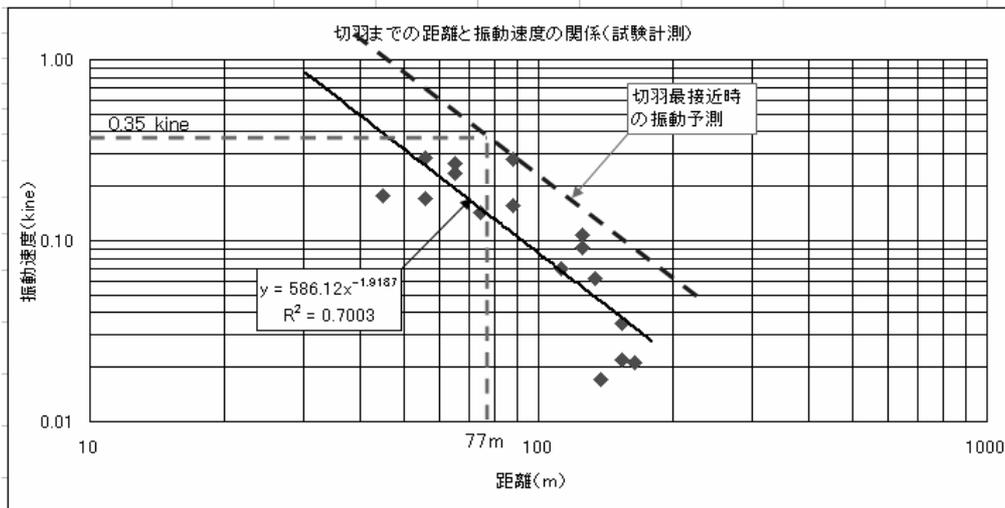


図-11 切羽までの距離と振動速度(kine)の関係

5.2 管理目標値の設定

現在の発破振動の管理値は、昼間 0.2kine、夜間 0.08kine である。また、一般的な発破騒音の管理値は、建物の外部で昼間 85dB、夜間 65dB である。これらを踏まえ、また、以下の宿泊施設の現状を考慮し、本トンネルでの管理目標値を設定することとした。

- ① 発破騒音は、客室内で苦情が出ないように管理する必要がある。
- ② 客室と 1F 会議室との騒音レベルの差が 5dB 程度である。
- ③ 現在、夜間において 1F 会議室で 65dB 程度の騒音レベルが測定されているが、宿泊客からの苦情は確認されていない。
- ④ 昼間 1F 会議室での騒音レベルが 65～70dB で苦情が出ていないことを考慮すると、建物内部での昼間の受忍限度が 65～70dB 程度であると想定できる。

以上より、昼間客室で 70dB 以下を管理目標値とすると 1F 会議室で 75dB 以下を管理目標値として設定しておくことが妥当であると考えた。夜間は、現状では宿泊客からの苦情が出ていないが、従業員からの苦情を考慮すると 1F 会議室で 65dB とし、今後は 1 方で施工する必要があると考えた。また、振動と騒音との関係を整理すると振動値 0.08kine で騒音レベル 65dB、振動値 0.2kine で 72dB 程度となり、夜間、昼間ともに当初設定どおりの発破振動の管理値（昼間 0.2kine、夜間 0.08kine）で制御管理することが有効であるとの結論に至った。

以下に示す表-1 は、これまでの現状から、トンネル切羽接近に伴い 1F 会議室と客室で今後おおよそ発生すると予測される騒音レベルとこれに対応する従業員や宿泊客に対しての想定される影響を示すものである。

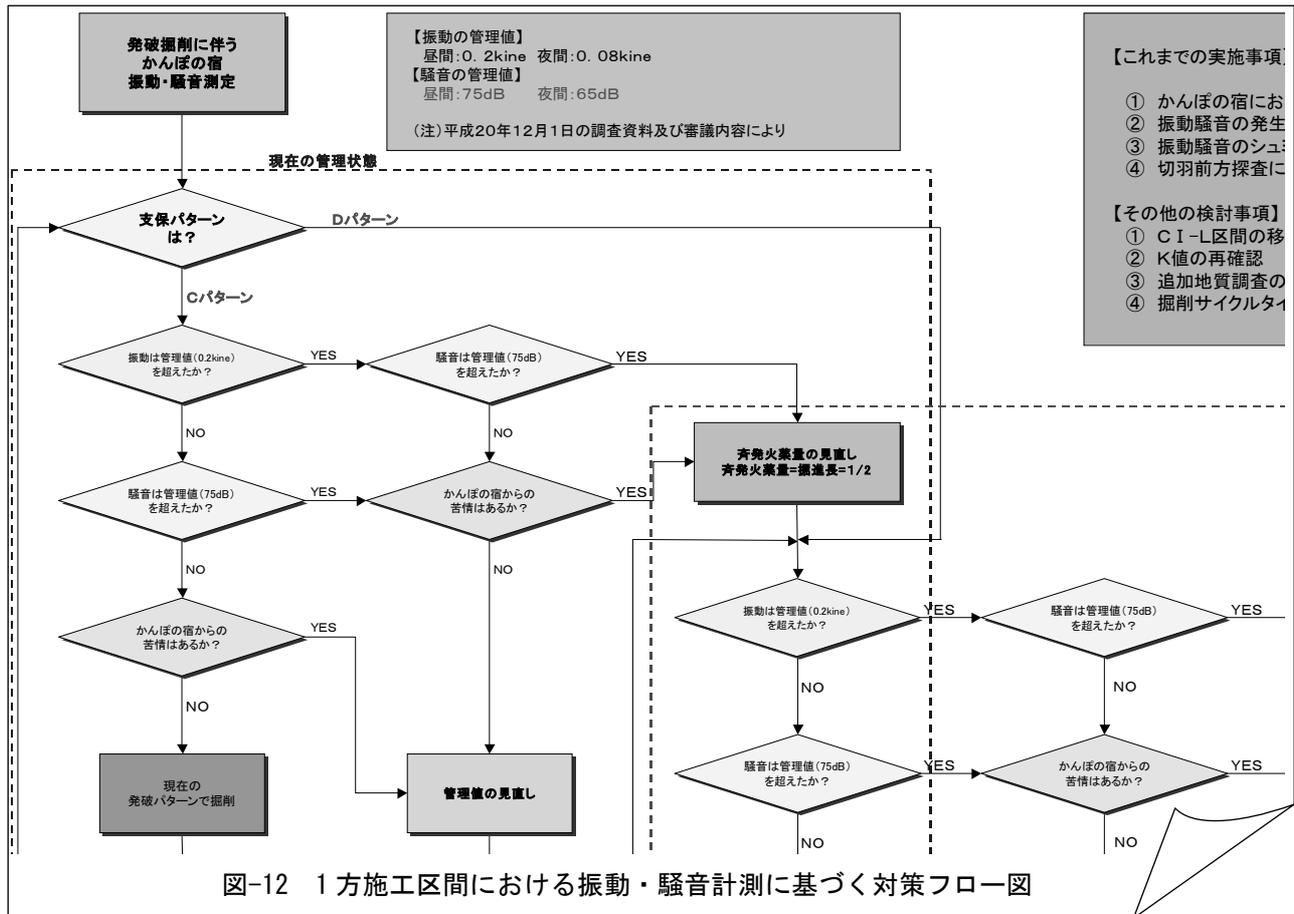
表-1 概略騒音予測と苦情の想定

1F会議室	3～4Fの客室	想定される影響	切羽からの斜距離	対応
85dB	60dB	従業員の睡眠	125～145m	夜間制限
70dB	65dB	宿泊客の睡眠	65～125m	経過観察
75dB	70dB	会話の妨害	～65m	昼夜制限

5.3 対策工の基本方針及び施工フローの検討

施工法については、導火管付雷管による多段発式制御発破工法を基本に、振動の管理基準値（昼間 0.2kine、夜間 0.08kine）及び宿泊施設での現状の騒音の受忍値（1 階会議室：昼間 75dB、夜間 65dB）以下での施工を原則とし、最終的に施設側の苦情が無いことを確認しながら、段階的に発破規模を縮小する管理フロー（図

-12) を計画した。



6. 発破振動及び発破騒音の制御とその結果

6.1 発破振動の制御と施工時の工夫

実施工においては、振動自動計測通信システムと新たに自動騒音計測システムを施設内に設置し、モニタリングを強化して計測結果を都度発破作業にフィードバック出来る管理体制をとった。

発破方法は、多段発化による斉発火薬量（発破孔に装填した爆薬の起爆は、発破孔群ごとに時間差(250ms)を設けて段階的に起爆する(=段発発破)。斉発火薬量とは、発破孔群あたりの装薬量のことをいう。⁶⁾の制御を基本とした。図-13に示すように斉発火薬量の低減は、振動速度の制御に対し有効な対策である。しかし、通常の電気式雷管が3~4秒に対し、多段発化した場合、最大8秒程度と発破継続時間が長くなり、これまで以上に気になるという苦情が発生した。このため、従業員や宿泊客の心理影響を考慮して発破継続時間をこれまで同様の3~4秒にする必要が生じた。

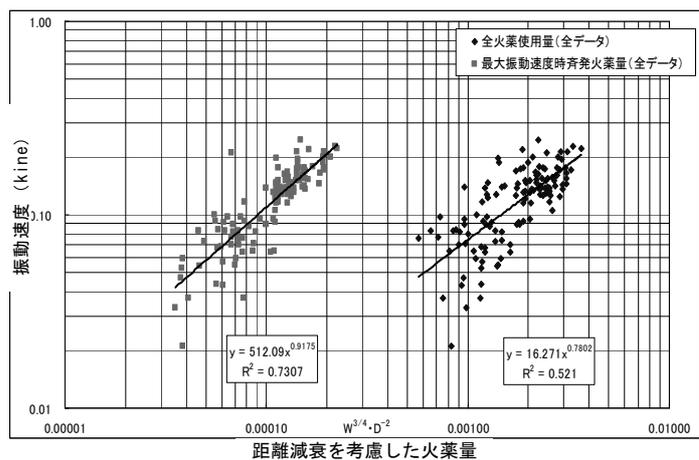


図-13 振動速度と火薬量の関係

このような状況を踏まえ多段発化による振動制御に変わる方法として次の三点を実施し、検証した。

- ① 分割発破による段数の低減
- ② 1発破進行長の低減

③ 薄層発破の実施

分割発破は、安全性や施工性を考慮し、全断面発破から上下半分分割発破に変更した。これにより段数を少なくしても出来るだけ斉発火薬量が増えないように配慮した。また、分割発破でも振動速度を制御できない場合は1発破掘進長を短くし、斉発火薬量をさらに低減した。

薄層発破は、最小抵抗線を短くすることにより、1段当りの負荷を低減し、K値（発破条件や岩盤特性によって変化する値⁶⁾）を抑えようとするものである。薄層にすることで孔数は多くなり、斉発火薬量は増えるが、表-2に示すように削孔数が多いと振動速度が小さくなるという効果を得ることが出来た。

表-2 振動速度と火薬量・削孔数の関係

年月日	時間	切羽位置	火薬使用量	削孔数	振動速度
平成21年4月22日	18:54	No. 315+28.8	112.8	179	0.144
平成21年4月24日	14:29	No. 315+31.2	118.6	194	0.114
平成21年4月27日	13:30	No. 315+39.6	101.6	149	0.159
平成21年4月27日	19:34	No. 315+40.8	109.8	164	0.096
平成21年4月29日	13:38	No. 315+46.8	99.0	138	0.155
平成21年4月29日	18:46	No. 315+48.0	89.2	153	0.072

6.2 発破騒音の制御と施工時の工夫

対策工や施工時の工夫により振動速度は比較的容易に制御することが可能となったものの、図-14に示すように騒音は予想を超え大きな値を示した。

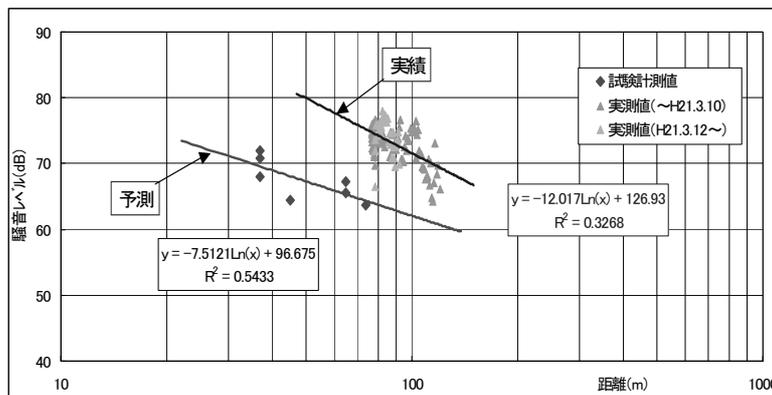


図-14 切羽からの距離と騒音の関係

このような状況がなぜ発生したかを検証するため、振動速度及び騒音レベルと火薬量の関係を対比し、以下のような傾向を確認した。

- ① 斉発火薬量は振動速度に対し高い寄与率を示した。
- ② 総火薬量と振動速度の関係では、斉発火薬量に比べ二分の一程度の寄与率となった。
- ③ 騒音レベルに対しては斉発火薬量、総火薬量ともに図-15に有るようにより比較的高い寄与率 ($R^2 \approx 0.65$) を示した。

以上のことから、発破騒音は斉発火薬量だけでなく1発破当りの総火薬量とも関係が強いことが示された。総火薬量の低減に対しては、振動速度の低減対策と同様に分割発破や1発破進行長の低減が有効であるため、施工においては発破騒音が低減し許容レベルになるまで、前述の対策工（上下半分分割の徹底と進行長の制限の組合せ）の強化、継続を行った。

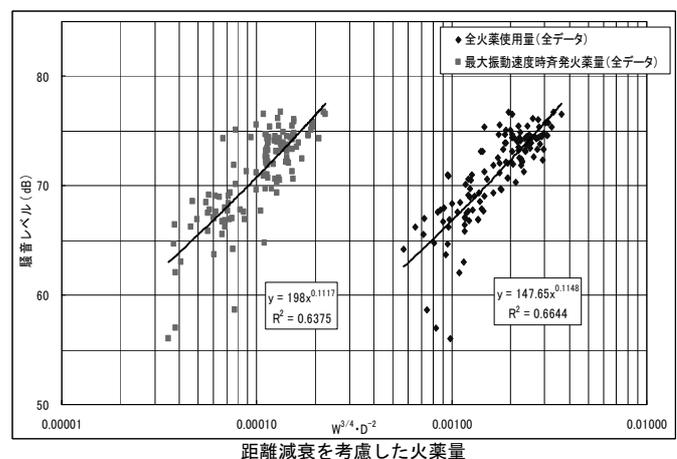


図-15 騒音レベルと火薬量の関係

6.3 施工の結果

結果として振動速度，発破騒音ともに影響範囲が増え，1方施工区間は当初予定の130mに対し290mまで延長された．しかし，これらの対策工の結果，図-16に示すように1方施工区間での管理目標値（振動速度：0.2kine，騒音レベル75dB）をほぼ満足し，施工を完了することが出来ている．

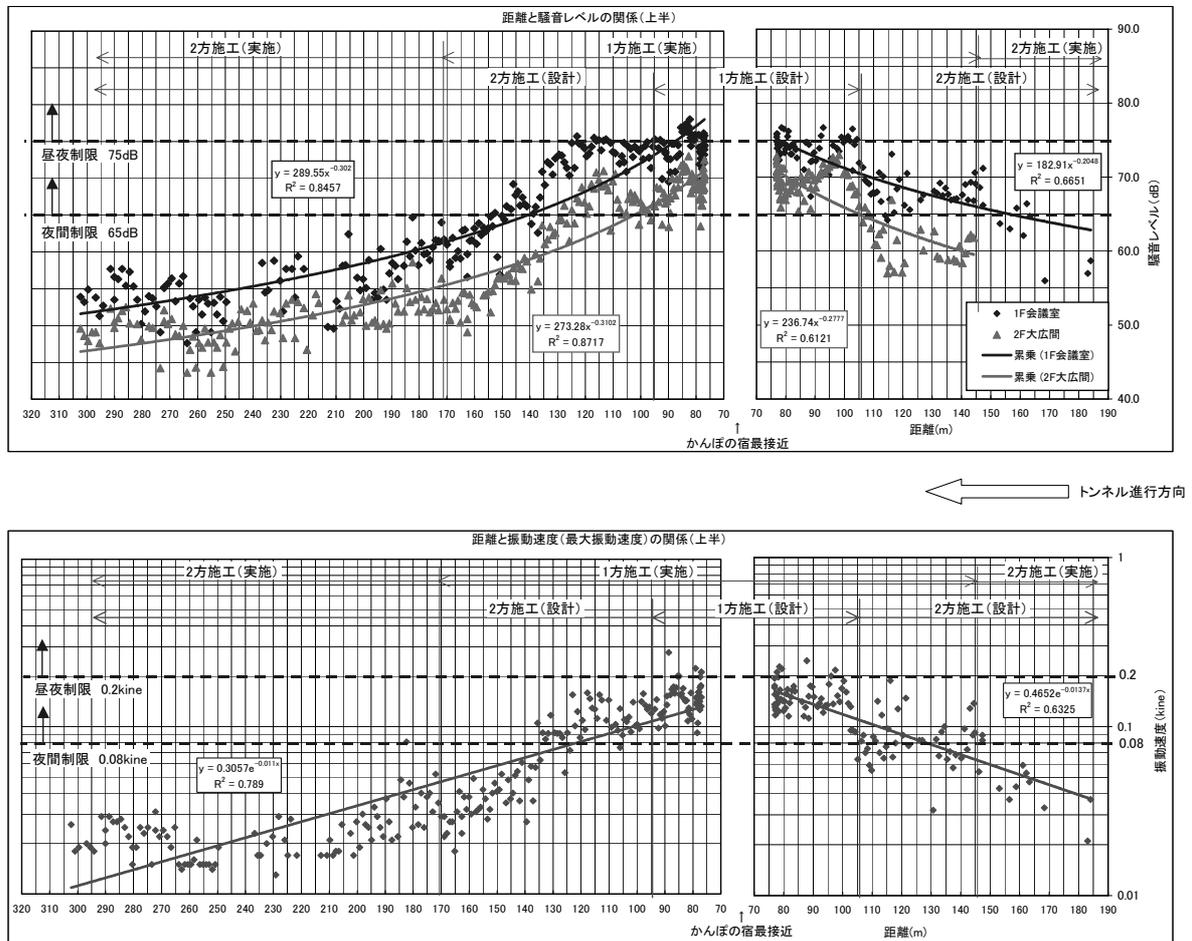


図-16 切羽からの距離と騒音・振動の関係

7. おわりに

本トンネルでは得られた計測データの分析結果を，施工へ忠実に反映することで予期していなかった発破騒音に対応出来たと考えている．また，常に施設側との意見交換を行うなど，客観的データだけでなく主観的データも十分に考慮して施工を行った．結果として工期や経済的負担の大きい他の工法を選択することはなく，最も経済的で合理的な施工が選択できたと考えている．

参考文献

- 1) 岡山県美作県民局美作岡山間道路建設班(2006)：第 4-18-17 公共道路工事（湯郷第 1 トンネル）設計委託業務報告書
- 2) ジェオフロンテ研究会（1996）：現場技術者のための制御発破工法の実際－発破による騒音や振動を制御する技術資料
- 3) 日本トンネル技術協会（1977）：トンネル工事の発破振動及び騒音対策に関する調査報告書
- 4) 雑喉謙（1984）：発破振動の周辺への影響と対策 鹿島出版会
- 5) 日本トンネル技術協会（1982）：トンネル爆破技術指針
- 6) 山田隆昭（2008）：わかりやすいトンネルの発破技術 土木工学社