

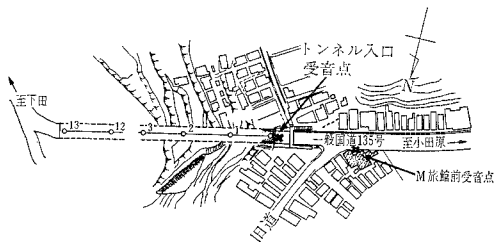
模型実験によるトンネル騒音防止工法の選定

佐藤 正 大*
真藤 和 孝**

1. は し が き

昭和 43 年 12 月 20 日、静岡県熱海市網代地内で、一般国道 135 号改良事業の一部の「新網代トンネル」が開通した。このトンネルは、長さ 525 m の直線トンネルで、路面はコンクリート舗装である。当時、網代地区における 135 号は、幅員が狭いうえに線形も非常に悪く、人家連たん部には直角に曲がる部分もあり、交通渋滞はほとんど慢性化し、特に休日などは 2~3 km にわたって自動車の列が続くこともしばしばあり、この地方最大のネックであった。しかし網代地区は、一方には急勾配の山地が迫り、一方には海が近く、人家はこの間を走る 135 号沿いに密集しているため、全面的な現道拡幅は事実上不可能であった。このために、トンネルおよび海面埋立による「網代バイパス」が計画されたものである。さて、このトンネルが開通すると間もなく、熱海側入口（以下網代口と呼ぶ）付近の住民から、自動車がトンネル内を走る際の騒音が激しい、との苦情が続出した。現場を調査したところ、騒音は相当高く、M 旅館（図-1 参照）においては、雨戸を閉め切った室内で 70 ホン以上に達した。これは、自動車がトンネルに入ってから出るまで、音の減衰が少なく、騒音レベルがほとんど変化しないためであることがわかった。この騒音対策を検討

図-1 一般国道 135 号・新網代トンネル網代口付近平面図



* 静岡県土木部熱海道路建設事務所長

** (株)大林組技術研究所環境研究室主任研究員

するに先だち、建設省土木研究所トンネル研究室長の村上良丸技官（現首都高速道路公団）に現地調査を依頼し、その結果、大要次のような意見が寄せられた。

① 網代トンネルは、内部がコンクリートで平滑に仕上げられており、これが管楽器のような作用をして、自動車がトンネルを通過し終るまで音が減衰せず、高い騒音レベルが継続する。また、自動車も 2 台以上の場合もあり、さらに共鳴現象も考えられる。この対策としては、トンネル内の騒音レベルの残響時間（音源が鳴り終わった瞬間の音圧レベル (dB)^{a)} が 100 万分の 1 に減衰するまでの時間を短縮させる以外にはない。

② 第 12 回および第 13 回の国際道路会議 (PIARC) において発表されたところによれば、ヨーロッパの道路トンネルで、主として天井部分に防音材を取付けて、10~13 秒の残響時間を 1 秒以内にすることに成功した例があるが、新網代トンネルについても、この方法が期待される。ただし、トンネル内の防音設備は、国際道路会議において数年来検討されているが、具体的設置方法、材料等についてはまだ明確でないため、経済性、将来の維持等の問題を考慮し、建築専門家（防音部門）の意見を聞いて決定すべきである。

現在、トンネルのような特殊な断面形状の管内における音の伝ば特性は現在まだ明らかにされておらず、また、防音設備等についても、材料、方法ともに確立されていないため、今回の騒音対策を、模型実験を含む各種の実験によって検討する方針を決めた。なお、実験は、このトンネルの施工にあたって大林組の技術研究所環境研究室が、音響関係の各種施設を備え、音響の研究を行なって

- a) 音の物理量を示す単位、ここでは、以下の 2 件について説明する。
- ① 音の強さのレベル：最小可聴限界の音の強さ I_0 (W/cm²) に対し、 I (W/cm²) の音の強さをあらわす場合
$$\log(I/I_0) = \log I - \log I_0$$
と対数差の形にし、これをベルの単位であらわし、その 10 倍、すなわち $10 \log_{10}(I/I_0)$ をデシベルと名付ける。 I_0 は、国際的に 10^{-16} W/cm² とする。
 - ② 音圧のレベル：音の強さを音圧で比較する場合も、音圧 P と P_0 の音の強さの差を 20 倍（音の強さは、音圧の 2 乗に比例する）したものをデシベルであらわす。 P_0 は国際的に 2×10^{-4} μ bar である。

いるので、これに委託して行なうことにした。以下、各種の実験および測定の結果を示す図表を主体として述べる。

2. トンネル現地におけるテストおよび測定

まず、現地における騒音の伝ば状況を把握するために、各種のテストおよび測定を行なった。これは、深夜、熱海警察署の協力を得て、測定中は一般車両の通行を全面禁止して行なったので、他の騒音の影響は全くなかった。

(1) ダンプトラックによる騒音の実測

ダンプトラックに碎石を満載し、熱海方面から網代口に入り、反対側の伊東口を出るまで、実際に時速 50 km で走行させて、その騒音を M 旅館前で測定した。図-2 中の「コンクリートのままの特性」は、その騒音レベルの変化を示している。なお、C 特性とは音圧レベルで、音の物理量であり、単位は dB (デシベル) である。A 特性は、C 特性を人間の耳に感ずる強さによって修正したもので、単位は dB を読みかえて、ホン、または dB A (デシベルA) である (人間の耳は、音を音圧レベルのとおりに感じない。そこで、A 特性によってあらわす)。

自動車は、ほぼ同じ条件で続いている一般道路を走る

図-2 貨物自動車の騒音の変化

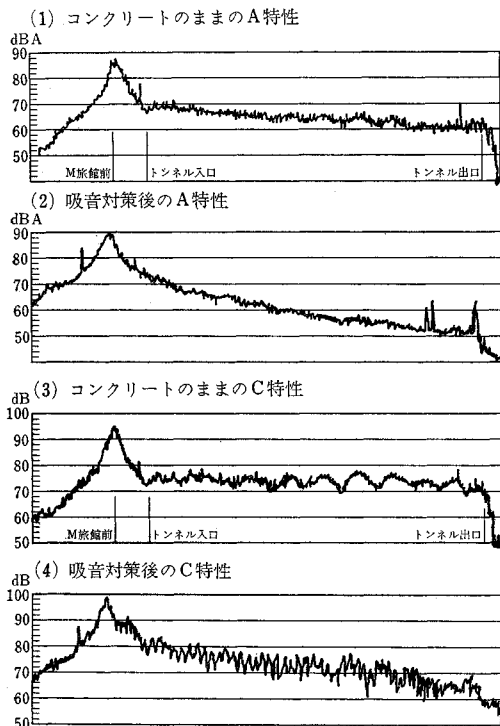


図-3 (1) コンクリートのままの現場測定 (M 旅館前レベル)

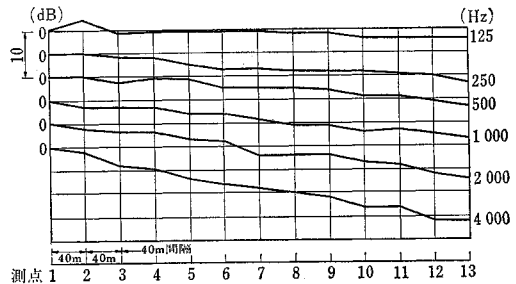
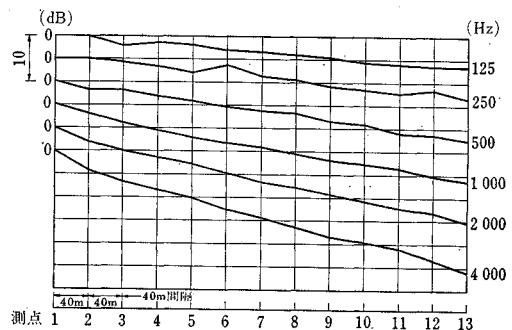


図-3 (2) コンクリートのままの現場測定 (トンネル入口レベル)



場合は、音源である自動車測定点 (受音点) に近づくにつれてグラフは上がり、測定点前にきたときに最高となり、測定点前を通過して遠ざかるにつれて、それまでと対称的に下がるはずであるが、図-2 を見ると、トラックが測定点の M 旅館前を通過するといったレベルは下がり始めるが、トラックがトンネルに入るとともに再び上がり、以後トンネルを出るまで、ほとんど減衰しないことがわかる。

(2) ノイズによるテストおよび測定

網代口を No. 0 とする測点を 40 m おきにトンネル内に設けた (最終区間は 45 m)。そして、125 Hz ~ 4000 Hz の 6 種類の周波数ごとに、その周波数を中心とした 1/3 オクターブのバンドノイズを録音したテープを音源とし、トンネル内の各測点ごとに、トンネルの中心線上で、ライトバンに下向きに取付けたスピーカーから一定音圧レベルでノイズを出して、これをトンネル入口および M 旅館前の 2 ヲ所測定した。ここで、Hz (ヘルツ) とは周波数をあらわし、125 Hz とは、周波数が 125 回/sec を意味する。また、1/3 オクターブバンドノイズを用いたのは、ある周波数の音のみのいわゆる純音は、実験の際わずかの条件にも影響され易いので、このようにバンドノイズを用いるのである。スピーカーを下向きに取付けたのは、実際の騒音はほとんど方向性がないので、これにできるだけ近づけるためにノイズをいったん路面に

あてて各方面に散乱させたのである。図-3の(1)および(2)は、音源がトンネル入口から40m奥にある測点No.1にある場合を基準の±0dBとして、測点ごとの音圧レベルの変化を示したもので、これによると、受音点がM旅館前の場合が減衰しにくく、また、周波数が低いほど減衰しにくいことがわかる。自動車騒音の成分は、低周波数の音が多いので、トンネル内の自動車の発する騒音が、ほとんど減衰しないことが理解できるのである。

3. 模型による実験

騒音の状況は、反対側の伊東口においてももちろん同様な現象があるが、伊東口は道路をへだてて崖下で海に面し、付近には人家は一軒もなく問題はないので、実験は網代だけについて、すなわち非対称に、減音効果と経済性とのバランスのとれた方法を見出すために、入口近くの天井に集中的にある吸音体を配置した効果と、現在多く用いられている吸音パネルをある程度長い区間に設置した場合の効果との組合せを選定して実験し、これとともに、吸音体の材料、構造等についても実験を行なうことにした。この実験は、大林組技術研究所の構内で行った。

(1) 模型実験の相似則

実物を R 、模型を M とし、縮尺を $1/n$ とすると、この実験の相似則は次のようになる。

長さ $L_M : L_R = 1 : n$ 、面積 $S_M : S_R = 1 : n^2$
 周波数 $f_M : f_R = n : 1$ 、吸音率 $\alpha_M : \alpha_R = 1 : 1$
 残響時間 $T_M : T_R = 1 : n$

トンネル模型として、 $\phi 30$ cm、長さ 2.0 m のヒューム管 8本を使用し、断面の一部をコンクリートで埋めて舗装に対応させた。

$4.60 \text{ m (トンネル半径)} \div 32 = 14.4 \text{ cm} \approx 15 \text{ cm}$
 (ヒューム管の半径)
 $525 \text{ m (トンネルの長さ)} \div 32 = 16.4 \text{ m} \approx 16 \text{ m}$
 (ヒューム管 8本の長さ)

上記の計算から $n=32$ となる。

また、実験に用いる音の周波数は 125~4 000 Hz に対応して、 $125 \times 32 = 4 000 \text{ Hz} \sim 4 000 \times 32 = 128 000 \text{ Hz}$ となるが、周波数が高くなると、空気による吸収が多くなり、大気中の実験は不可能であるから、トンネル現場におけるテストで最も減衰しにくい結果を示した 125 Hz に対応する 4 000 Hz を中心とする 1/3 オクターブバンドノイズについてのみ実験することにした。

(2) 実験の方法および種類

実験装置は、現場測定の際と同様に、模型自動車のシ

ャーシーにスピーカーを下向きにセットし、模型トンネル内を移動させ、実際の場合の測点間距離 40 m に対応

写真-1 実験設備と実験状況

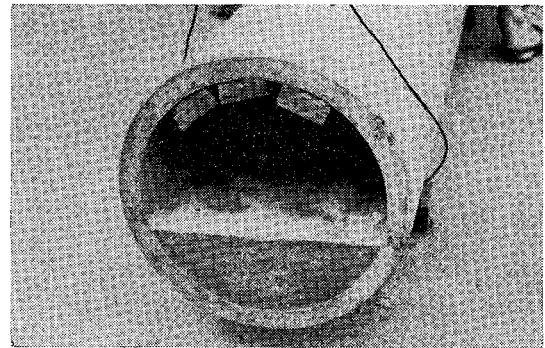
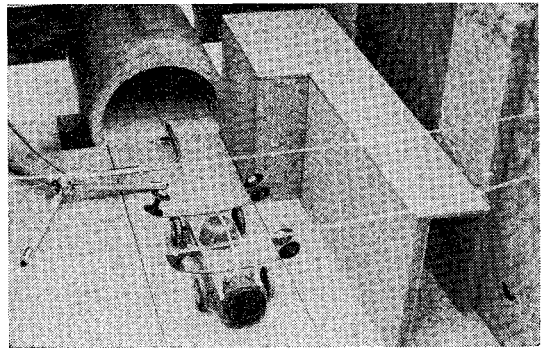
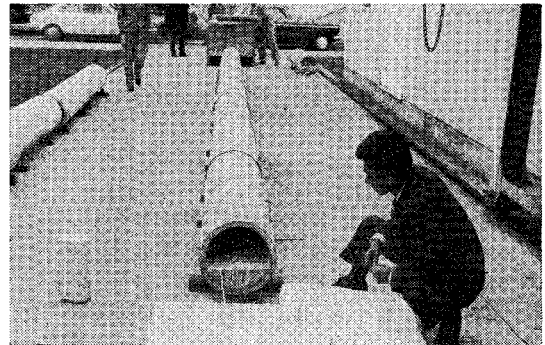


図-4 (1) 吸音体実験の種類

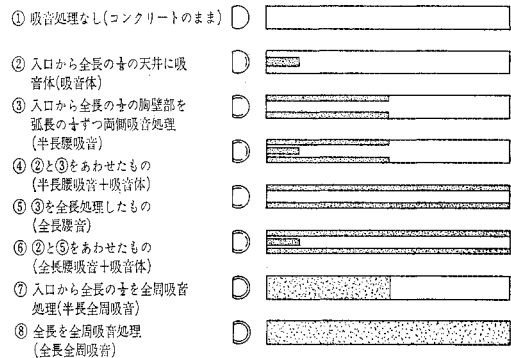
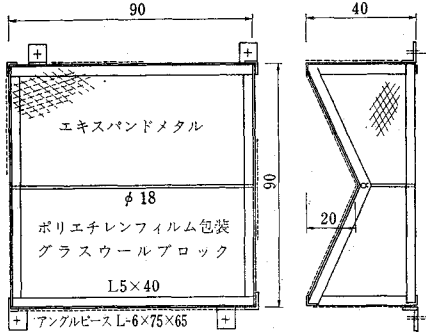


図-4 (2) 天井吸音体の構造



する 1.25 m ごとにノイズを出し、これをマイクロホンでキャッチした。また、受音点も実際と同じく、トンネル入口 および M 旅館前に 相当する 2 ヶ所にした。また、網代口付近には高いコンクリート擁壁があり、これによる反射も考えられるので、これも模型に再現したが、結果的にはその影響は全くなかった。

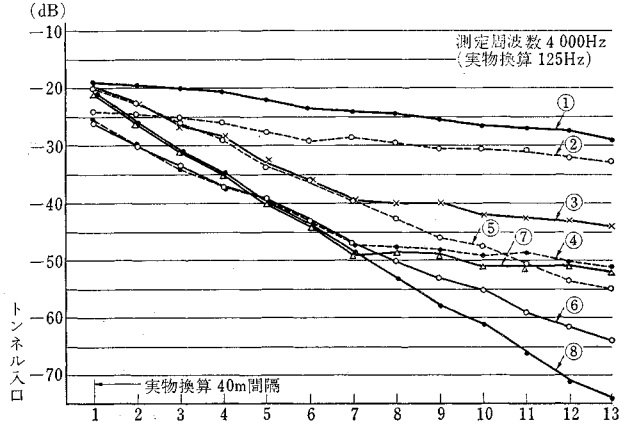
実験はトンネルの弧長の 1/4 ずつ 両側腰壁部に、ポリエチレン包装のグラスウールを裏面に添付した吸音パネルを取付けた場合、および天井に吸音体を取付けた場合を想定し、図-4 の (1) に示す 8 通りについて行なうことにした。なお、実験に用いた材料は表-1 のとおりである。

現在、東名高速道路等に用いられている吸音パネルの吸音率は、周波数 125 Hz の音に対しては 0.15 程度であるが、500 Hz に対しては 0.4 程度である。また、交通騒音の成分の中で、音圧レベルの高い音は 500 Hz 以上の低周波音が多く、騒音レベルは、大体これらによって決まるので、500 Hz の音に対する吸音率が 0.43 のモルトブレーン（発泡軟質合成樹脂・スポンジ状）を用いて実験すれば、実際に即して検討できると考えた。また、天井に取付ける吸音体として実験に用いるグラスウールの吸音率が 1.0 以上であるのは、これを帯状に切断してヒューム管内面に貼るので、貼付面以外に切断面も吸音面として作用するからである。実験測定の結果を、M 旅館前レベルを基準にとり、±0 dB とし て実験の各種別ごとにグラフにあらわしたものが 図-5、および 図-6 である。また 図-7 は、これらの実験に先だって、吸音処理をしないコンクリートのままの状態で行なった模型による測定結果と、同じく、図-3 に示す測定結果とを比較したものであり、伊東口で 4 dB 程度の差があるのみで、よく対応しており、この実験が信頼できることを示している。図-5、6 により次のことがわかる。

表-1 実験に用いた材料

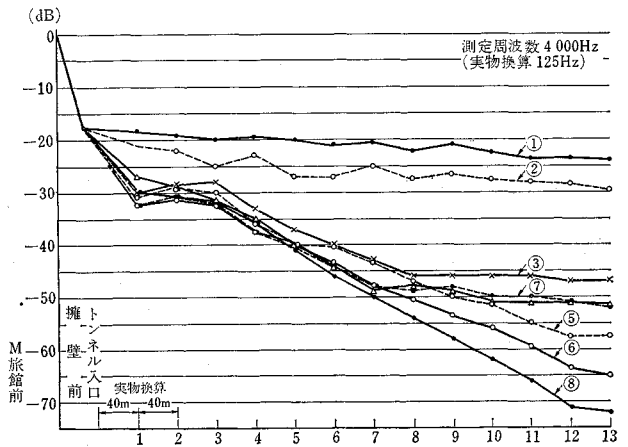
実 際 の 場 合	模 型 実 験	吸音率
腰壁部：スレート吸音パネル	モルトブレーン（厚 3 mm）	0.43
天 井：吸 音 体	グラスウール（厚 25 mm）	1.14

図-5 実験測定図（トンネル入口レベル）



注：①コンクリートのまま、②吸音体、③半長腰吸音、④半長腰吸音吸音体、⑤全長腰吸音、⑥全長腰吸音吸音体、⑦半長全周吸音、⑧全長全周吸音

図-6 実験測定図（M 旅館前レベル）



注：凡例は図-5 と同じ。

(1) ②は、コンクリートのままの場合より、一率に 5 dB 程度減衰する。

(2) ③および⑤は、トンネル入口では同じであるが、自動車吸音処理部分を通るときは、40 m ごとに 3.5 dB 程度ずつ減衰する。

図-7 実物測定結果と模型測定結果の対応

(いずれも、コンクリートのまま、吸音処理をしていないもの)

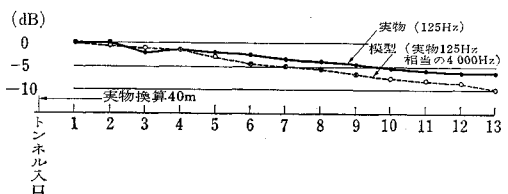
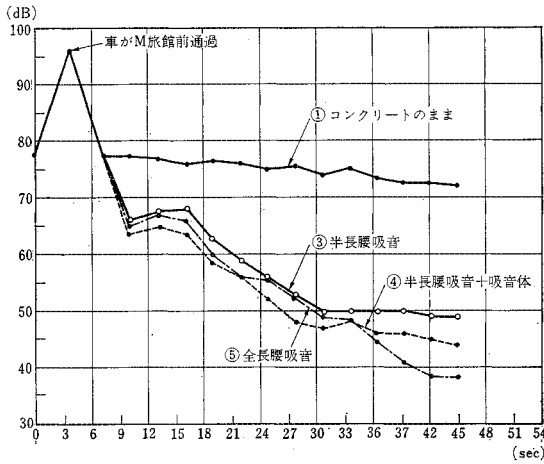
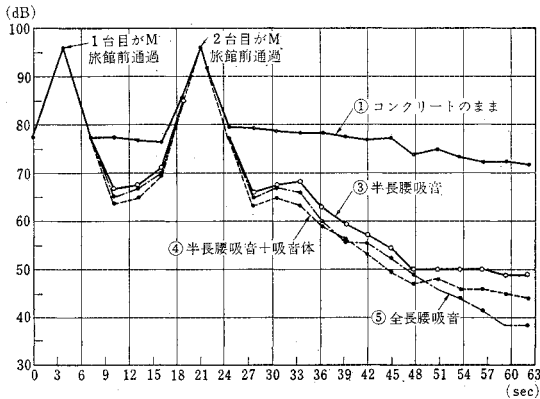


図-8 M 旅館前におけるダンブカー1台のみの走行時の騒音レベル (50 km/h, C 特性は計算による)



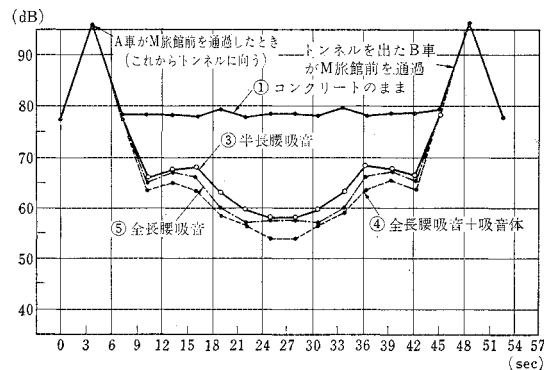
注：①コンクリートのまま，②半長吸音体，③半長腰吸音+吸音体，④全長腰吸音

図-9 M 旅館前におけるダンブカー2台による走行時の騒音レベル (250m 差・50 km/h, C 特性は計算による)



注：凡例は図-8 と同じ。

図-10 M 旅館前におけるダンブカー2台走行時の騒音レベル (50 km/h でトンネル中央部ですれちがう場合, C 特性は計算による)



注：例は図-8 と同じ。

(3) ⑦および⑧は，吸音処理部分を通るときは，40 m ごとに 4.5 dB 程度ずつ減衰する。

(4) ④は，自動車がトンネルに入ってから中央付近まで，すなわち，受音点における騒音レベルが高い範囲で最も効果的，またはそれに近い効果をあげている。

以上の結果から，経済性と吸音効果を考えて，③，④，⑤を選定し，自動車が1台および2台の場合について，騒音のC特性（音圧レベル）の変化を計算によって求めたものが図-8，9，10である。これを見ると，いずれの場合でも，騒音レベルが高い領域においては，④が最も効果的であることがわかる。そこで，交通量，施工の難易，経済性等を考え，④の「半長腰吸音+吸音体」を採用することにした。

4. 天井吸音体

前述のように，方式は④と決定した。このうち，腰壁については最初から吸音パネルを想定していたので実際にこれを用いればよいが，天井の吸音体については実物を想定せず，3. で述べたように，吸音率が 1.14 のグラスウールを用いただけであるから，実物も吸音率がこれと同じか，それ以上でなければ実験と同様の効果は期待できない。そこで，実物のサンプルを製作して吸音効果をテストすることにした。

(1) サンプルによる吸音体の実験

吸音体はある程度の剛性を持ち，施工も容易であり，吸音率も 1.14 以上でなければならないことを考え，図-4 の(2)のような吸音体を考えた。ただし，この図は実際に施工した吸音体の構造図で，サンプルはこの寸法であり，外側のわくやエキスパンドメタルのない，グラスウールブロックだけを用い，これを9個製作し，これにより残響室において実験を行なった。残響室は JIS 規格に基づいてつくられた不整形表面の五角形の室で，室容積 218 m³，室内表面積 215 m² である。実験も JIS に基づいて行なった。これらの実験の種類および結果は，図-11 に示すとおりである。

なお，吸音率および吸音力は，次式によって求めた。

$$\text{吸音率 } \alpha = \frac{55.3 V}{CS} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)$$

ここに

T_1 : 吸音体を入れた場合の残響時間 (sec)

T_0 : 吸音体を入れない場合の残響時間 (sec)

V : 残響室の容積 (218 m³)

S : サンプルの見かけ上の面積 (m²)

C : 音速 $\left(\frac{m}{S} \right) = 331.5 + 0.61 t$, t : 温度

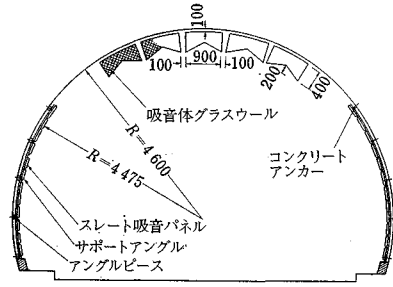
$$\text{吸音力 } A = \frac{55.3 V}{CN} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)$$

A: 吸音力 (m² Sabin)

N: 吸音力吸音体の数=9 個

実験結果を示す 図-11 を見ると、吸音率は 125 Hz から 2000 Hz の間ではいずれも 1.1 以上あり、ほぼ所期の目的は達成されており、最も効果のあるのは④の場合である。また、1 個あたりの吸音力は全般的に③がよいと考えられる。そして、実験は 9 個のサンプルで行なったが、実際にトンネル内に取付ける場合には、③および④を併用し、天井から 10 cm 離し、横断方向には 30 cm 間隔、中心線方向には 10 cm 間隔で取付けた (吸音力の場合の m² Sabin セービンは、たとえば吸音率 50% のものが 10 m² あれば、吸音力は計算上 0.5×10 m² = 5 m² となるが、吸音力の場合は、これを「5 平方メートルセービン」と呼ぶ)。

図-13 吸音処理施工断面図

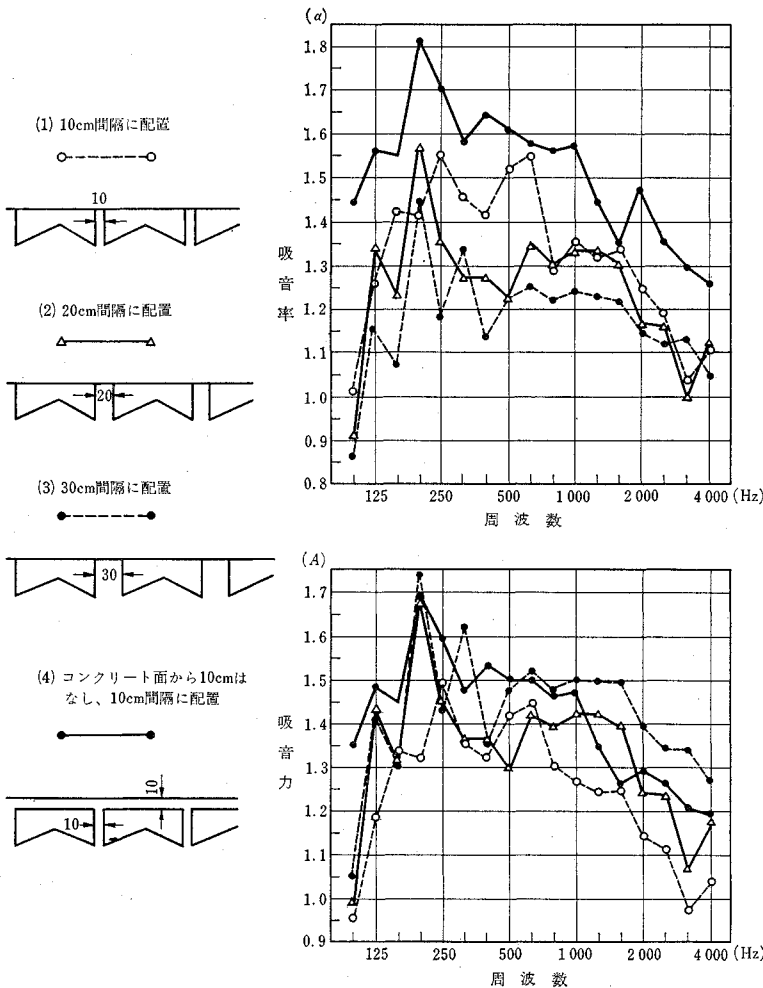


(2) 工事実施

実施した工事は次のとおりである。

腰壁吸音パネル: 片側 12 段両側、延長 264 m
 天井吸音体: 1 列 48 個、5 列 240 個、延長 60 m
 工 費: 19 894 000 円
 完 成: 昭和 45 年 3 月 19 日

図-11 吸音体サンプルテスト



5. 吸音処理後の効果測定

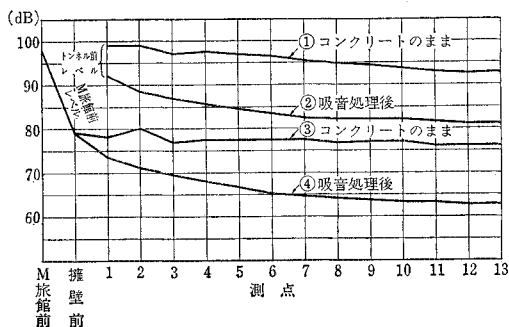
吸音処理工事が完了後、その効果を調査するために 2. と同じ実験を行ない、その結果を吸音処理前と対比させたものが 図-2 および 図-12 である。これは、吸音処理後の音の減衰量は、どの周波数の音についても相当大きな値を示しているが、交通騒音のレベルを決定する 250~500 Hz の音については、吸音パネルの吸音率が相当大きく、また、吸音パネルの吸音率の低い 2000~4000 Hz については、天井吸音体の効果が明瞭にあらわれ、いずれも実験結果からの推察とよく一致した。

6. む す び

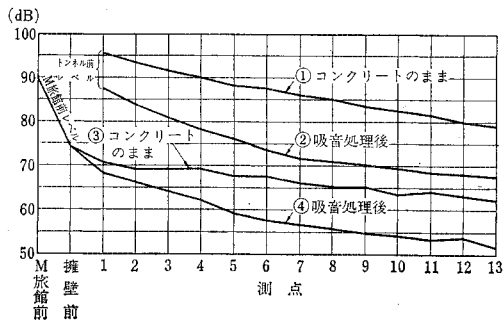
以上の実験およびそれによって得られたこの工法は、長さ 525 m のトンネルについて行なわれたものであるが、これは、たとえば長さが 2 倍の 1040 m のトンネルの場合は、相似的に吸音処理を 2 倍施工すれば同一効果があることを意味するものではない。新網代トンネルの、吸音処理を施工してあ

図-12 吸音処理前後の比較

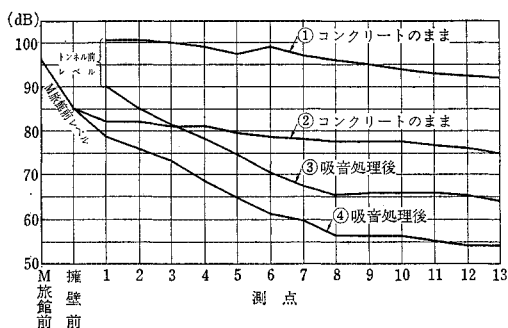
(1) 125 Hz の場合



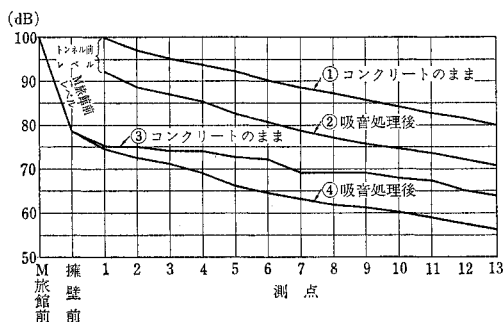
(4) 1000 Hz の場合



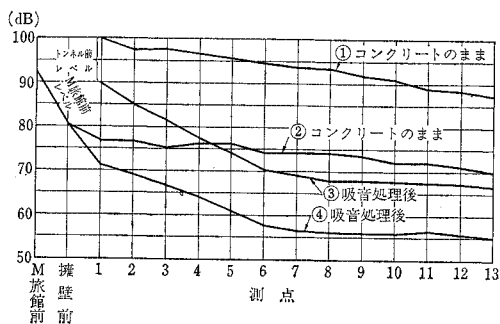
(2) 250 Hz の場合



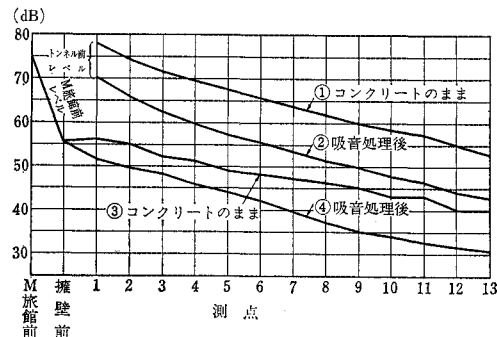
(5) 2000 Hz の場合



(3) 500 Hz の場合



(6) 4000 Hz の場合



注：①コンクリートのまま、②吸音処理後、③コンクリートのまま、④吸音処理後。

る 264 m の部分は、いわば、一種の吸音器と考えるべきもので、断面が同じであれば、この 264 m 間と同じ工法を施工すれば、トンネルの長さのいかにかわららず、今回と同一の減衰を示すものである。したがって、

このいわゆる吸音器を改良することによって、吸音効果を高めることが十分可能であろう。

(1970.9.21・受付)

トンネル標準示方書解説

44年改版

800円

会員

特価 700円(〒80)

シールド工法指針

44年制定

800円

会員

特価 700円(〒80)