

58. 振動ふるいから発生する超低周波音防止対策

飛鳥建設(株)：*沼口 栄助・内田 季延

1. はじめに

都市部におけるトンネル工法として、シールド工法が多く採用されている。多くのシールド工法の中でも泥水式シールド工法は、東京湾横断道路や神田川調節池などの大型工事から、小断面管渠工事に至るまで、非常に多くの施工実績をあげている。この工法の問題点として、泥水処理プラント設備から発生する騒音・振動に対する防止措置が、必要不可欠になっていることがあげられる。これら騒音・振動発生の中心的存在が振動ふるいである。振動ふるいは、流体輸送された掘削土砂を脱水、分級するための設備で、その処理能力から他の機械設備に置き換える事は不可能である。

振動ふるいは大きなふるいを振動させることによりその機能を満足させるため、超低周波音の発生を免れない。超低周波音は家屋や建具等をがたつかせたり、人体への圧迫感や振動感を与えることがある。そのため、振動ふるいの設置位置が近隣住宅から近い場合においては、作業時間の制約を受けたり、さらに夜間作業の中止の措置を迫られることがある。

今回、振動ふるいから発生する超低周波音の防止対策を、遮音、吸音などのパッシブな手法から段階的にすすめ、最終的に近年実用化が進みつつあるアクティブノイズコントロール（以下、ANCと略す）技術を応用した超低周波音圧を低減させる装置を考案・製作し、今までにない効果を確認した。

2. 超低周波音とは

一般的に超低周波音とは図-1に示すように、人間の可聴音域（20～20kHz）の下限值20Hz以下の空気振動のことであり、“聞こえない音”とされている。

そもそも音は空気の圧力変化であるから、逆に空气中に圧力の変化が起こると音が発生することになる。圧力変化の起こり方は大きく分けると2つある。一つは爆発等によって直接的に空气中に圧力変化が起こる場合と、他の一つは物体が振動して、その振動面に接する空气中に圧力変化が起こる場合である。その圧力変化の周波数が20Hz以下の場合超低周

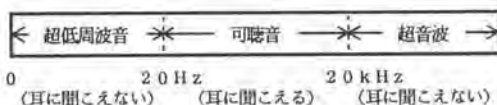


図-1 音の領域

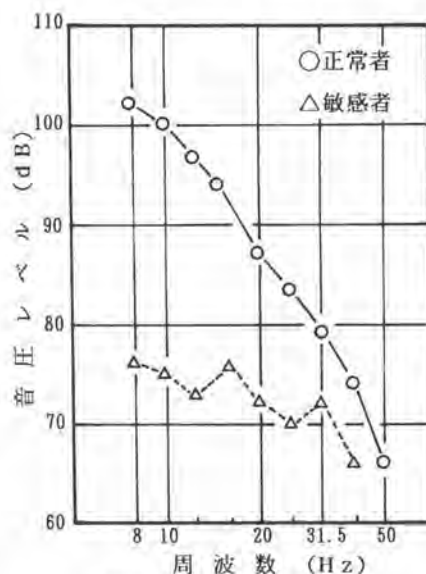


図-2 敏感者の閾値

波音になる。

超低周波音は、人体に与える影響として圧迫感、振動感を与え、生理的、心理的に不快感を引き起こす。超低周波音も一般の騒音と同様、周波数の変化や各個人により感じ方が異なる。図-2に一例を示す。

次に建具類に及ぼす影響として、音圧によりガタガタ音をたてて振動することがあげられ、苦情の多くはこの振動による二次的発生音に対するものである。ガタツキ始める音圧レベルを図-3に示す。図-2“正常者の閾値”の音圧レベルと比較すると、8~20Hz付近ではガタツキ始める音圧レベルの方が低いことが解る。

3. 振動ふるい

泥水シールド工事に用いられる振動ふるいの構造は、図-4に示すように、モーターにより駆動される加振機、ふるい本体、ベースからなる。ふるい本体はコ字型の枠にふるい網を2段或いは3段設置され、加振機によりふるいを斜め上方(通常45°方向)に加振する。ふるい上部には掘削土が混入している泥水を供給するための装置があり、ふるい面に落下される。掘削土砂はふるい面を脱水されながら移動し、ベルトコンベヤ上に落下し運搬される。ふるい面に掘削土砂が載っている場合は、一枚の板が振動していることと同様になる。加振機の回転数は通常900~1200rpm程度に設定されているため、振動ふるいからは15~20Hzの超低周波音を発生する。

4. 防止対策の立案・実施

4-1 発進立坑仮設備概要

今回対策を実施した現場の、発進立坑仮設備の概要を図-5に示す。

4-2 事前対策の立案・実施

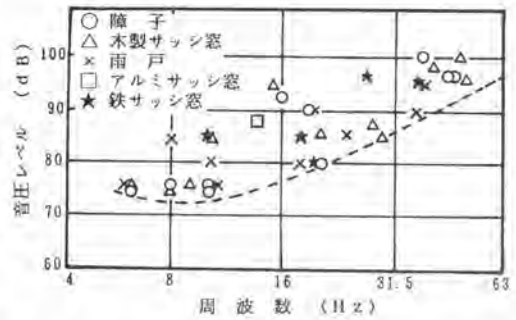


図-3 各種建具がガタツキ始める音圧レベル

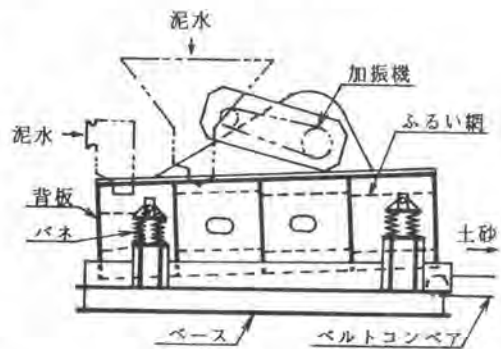


図-4 振動ふるい概要図

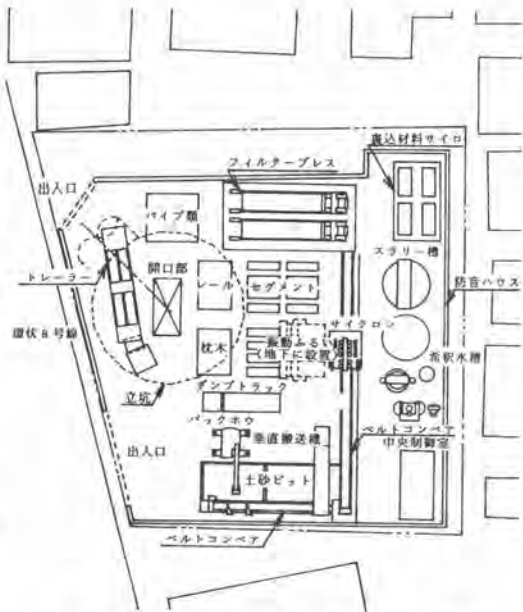


図-5 発進立坑仮設備状況図(地上面)

沿道民家までの距離が作業ヤード防音壁から2～3mと非常に近いため、過去の実例から、超低周波音により苦情が出る可能性が非常に高いことが想定されたので、施工開始に先立ち事前対策を立案し実施した。以下にその主要実施事項を示す。

(1) 音源対策

①振動ふるい背板を構造上許容できる範囲で面積を最小にした。* (図-6 参照)

(*名称『泥水分級脱水用振動ふるい装置』実用新案 第1899464号)

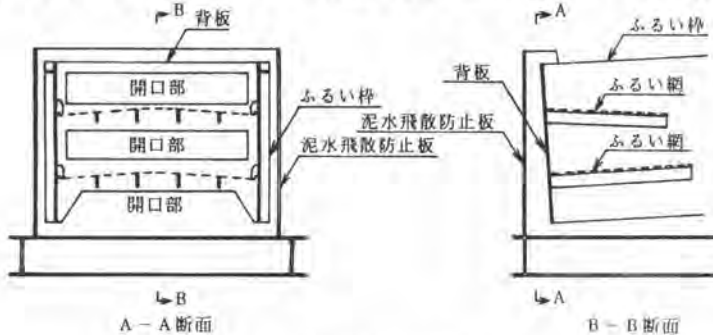


図-6 振動ふるい背板改造図

②インバーター利用により、夜間作業では加振機の回転数を1000rpmから840rpmに減少させ、加振力を低下させた。

③二次音発生防止のため、タンク類、シュート、防音パネルに対して防振対策を実施した。

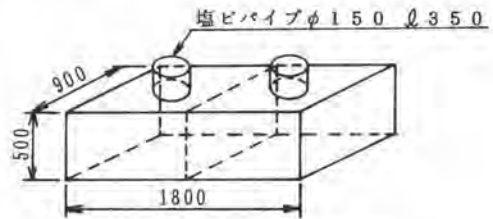


図-7 単一共鳴型吸音器概要図

(2) 伝搬経路対策

①作業ヤード全体を防音ハウスで覆った。

②振動ふるいを地下に格納し、覆工板で覆った。

(3) 吸音対策

①単一共鳴型の吸音器を数個製作し設置した。

(図-7 参照)

4-3 事前対策実施結果

前記対策による測定結果を図-8に示す。

結果から明らかなように、敷地境界において、77～86dBの超低周波音圧レベルを測定した。

また、図-9に示すように、うなり現象を生じている。敷地境界での測定結果を前記建具のガタツキ始める音圧レベルと比較すると(図-10参照)測定結果は全て限界レベルを越えている。そのため苦情発生は避けられないと判断され抜本的な対策が望

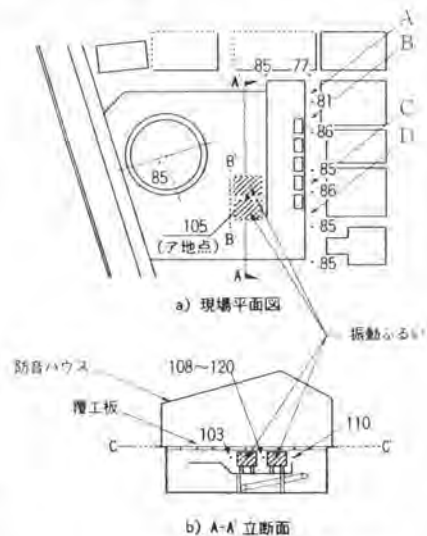


図-8 超低周波音測定結果(dB)

まれた。

4-4 ANCの適用

ANCの基本原理は、図-11に示すように、対象の騒音に逆の波形（逆位相）の音を人工的に作り出し、スピーカなどから放射付加することによって対象騒音に重ね合わせ、干渉作用を利用して音を打ち消すものである。

超低周波音の測定から、

- ①問題となる周波数が、ふるいの振動数（加振体の回転数）に限定されている。
- ②うなり現象が確認されている。
- ③振動ふるい間距離が約2mであり、超低周波音の波長（約20～24m）と比較するとかなり短い。
- ④2台のふるい面積がほぼ同じである。

の特性があるため、“放射音源パワーの低減”を目指して“ダイポール音源による低減”を考えた。すなわち、どちらか一方の振動ふるいの振動数を変化することにより、常にお互いの位相差を180°になるような制御を考案し設計を開始した。

4-5 ダイポール音源による低減原理

ダイポール音源は強さが等しく、符号が反対の2つ（dipole）の点音源（point source）が極めて接近して存在する構造を持つものを言う。図-12に示すように、自由音場において、距離d、角振動数 ω の2つの点音源を考え、それぞれの音の強さをQ、-Qとする。この2つの音源から距離r、 r_1 離れた点の音圧pは、次式で求められる。

$$p = j \frac{\rho c k Q}{4\pi} e^{j\omega t} \left(\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - \frac{e^{-jkr}}{r} \right) \quad \text{--- (1)}$$

ρ : 密度

c : 音の速度

k : 位相定数 ($k = 2\pi/\lambda$)

λ : 波長

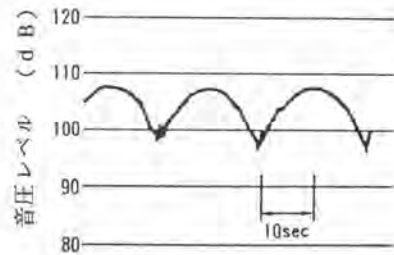


図-9 うなり状況

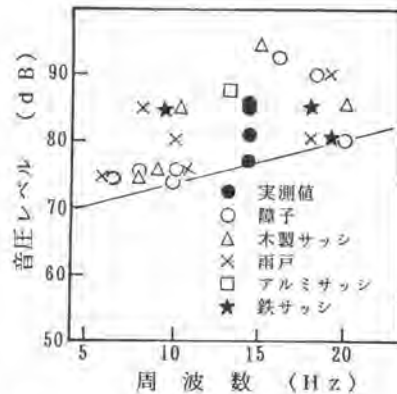


図-10 ガタツキ限界に対する超低周波音測定結果

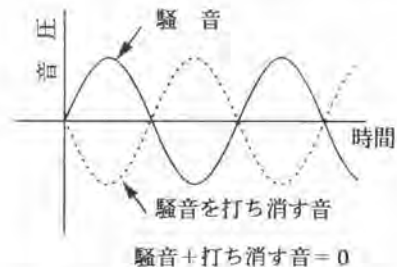


図-11 ANC基本原理図

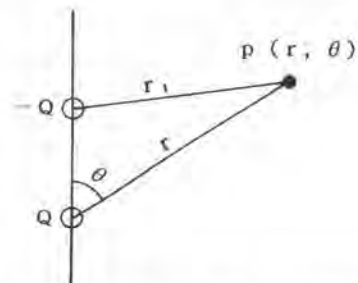


図-12 ダイポール音源（自由音場）

一般にダイポール音源では、2つの音源間の距離と音源の周波数によって効果が異なり、∞形状の指向特性を持つ。

4-6 振動ふるい位相制御装置

図-13に試作した振動ふるい位相制御装置の全体システムを示す。『振動ふるいB』を音源、『振動ふるいA』を2次音源とするANCによりダイポール音源を構成している。今回のシステムでは振動ふるいを2次音源として用いるため、振動ふるいの振動数と位相のみを制御することとした。

加速度センサ1、加速度センサ2で音源及び2次音源の振動ふるい面の振動を検知する。続いてローパスフィルタで不用な高周波成分を除去し、位相解析装置により音源と2次音源を比較する。まず、周波数同調制御を実行し、2次音源のふるい振動数が音源と同じになるようにインバータを調整する。次に位相同調制御に移行し、音源と2次音源の位相差が 180° （逆位相）になるように、2次音源の周波数をわずかにずらして位相を進める（或いは遅らせる）。外乱により位相同調制御が外れても、自動的に周波数同調制御からやり直すシステムになっている。

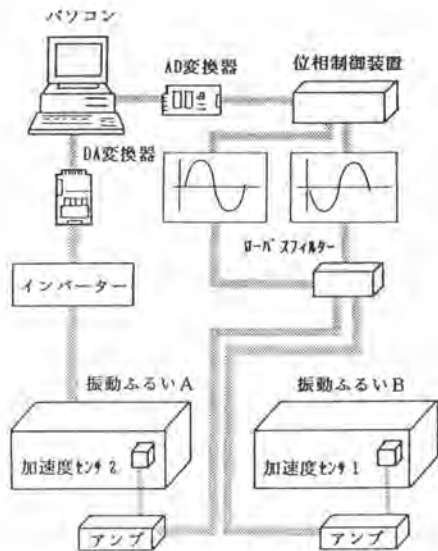


図-13 ANC装置系統図

4-7 ANC対策案実施効果

図-8a)のア地点で測定したANC開始前後の音圧レベル変動を図-14に示す。ANC開始前では、2台の振動ふるいのわずかな振動数の違いによりうなりが生じている。ANC開始後は、まず周波数同調制御開始によりうなりの周期が長くなり、続いて位相同調制御により急速に音圧レベルは低下し、制御開始前のうなりの最小音圧レベル付近を推移する。

図-15は図-8a) B-B'線上で測定した結果と計算値を比較したものである。ダイポールによるANCの指向特性を考えると、2つの音源の中心を通る線上では音圧レベルは急低下する。実測値は中心地点で計算値ほど急な音圧レベルの低下は見られなかったが、その他の地点では、ほぼ同等の結果が得られている。

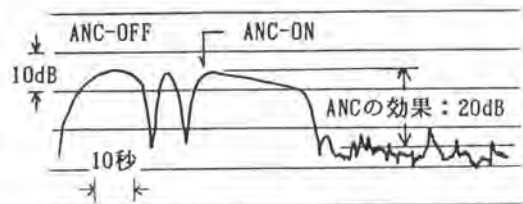


図-14 ANCの効果(図-8a)ア地点)

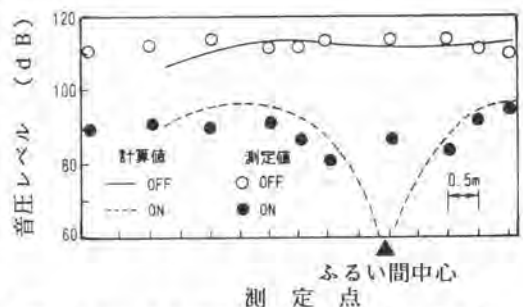


図-15 ANCの効果及び理論値との比較(図-8a)B-B'線上)

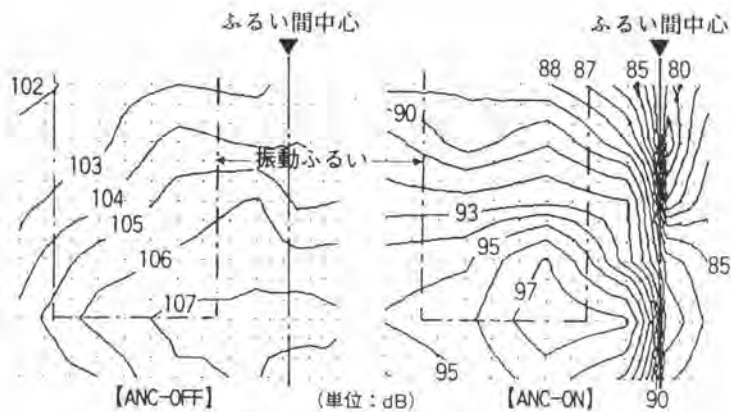


図-16 ANCの効果(図-8a) C-C' 平面上)

図-16は振動ふるい上部、覆工板上約30cm(図-8b) C-C' 平面)で測定したANC開始前後の等音圧線を比較したものである。ANC開始前は108~102dBに緩やかな音圧分布を示しているが、制御開始後は音圧分布が98~79dBに急激に変化している。

図-17は敷地境界付近のANCの効果を見たものである(測定点位置は図-8参照)。効果が0~10dBと場所により異なっている。これは屋外のため、風等による影響や、振動ふるい以外のプラント設備、建屋振動等の影響もあると推定される。

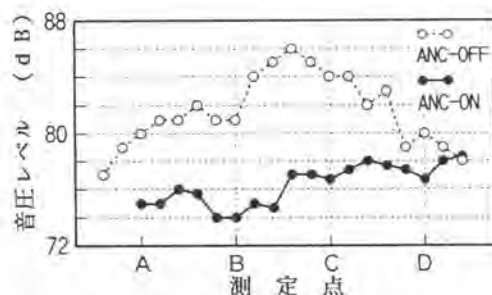


図-17 ANCの効果(測定点図-8a)参照)

5. まとめ

振動ふるいをダイポール化したANC装置により、ふるい近傍で、ほぼ計算値と同じ20dBの減音効果を確認した。また、敷地境界付近においても最大10dBの効果を確認できた。その結果、作業所周辺環境の向上が計れ、夜間での通常作業が実施できた。今後民家等の隣接している工事箇所での泥水シールド工事を行う場合には、今回の方法が有効な手段であると判断している。また、副次的効果として、超低周波音の発生を考慮せずにふるいの振動数を設定できるため、掘削土質に応じた最適な振動数により施工が実施できることになった。今後のテーマとしては、振動ふるいが1台あるいは奇数台の場合に対応できるような、独立した超低周波用2次音源の開発を実施して行きたい。

最後に今回の開発に対し、深い理解を示して頂いた東京都下水道局殿、並びに協力して頂いた関係各位に対し感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 通産省立地公害局編：低周波音防止技術解説書 1983. 10.
- (2) 伊藤毅：音響工学原論、コロナ社、1980. 12.