

デジタルフィルタ処理によるトンネル発破音の距離減衰の考察

神奈川大学 正会員 ○山崎 徹

神奈川大学 学生 日吉宏和, 永井祐輝

中電技術コンサルタント株式会社 正会員 石田 滋樹

1. 目的

これまでにトンネル発破音解析に統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis Method, 以下 SEA) を適用し, その実用性を確認した⁽¹⁾. そこでは部分的に FEM モデルを併用していたため, モデル作成や解析に時間を要した. そこで SEA モデルだけによる発破音解析を検討し実用的な可能性を見出した⁽²⁾. 一方, SEA の入力データに発破音の周波数毎の音圧レベルの予測が必要となり, オーバーオール値を予測する船津らの式は使用できない⁽³⁾. そのため, 発破空間内の測定音圧を FFT 処理したレベルを対象に, 距離減衰の周波数特性を統計分析し, 周波数バンド毎の発破音圧レベル予測式を提案した⁽⁴⁾. FFT は定常振動の解析に適し時間平均結果となるため, 過渡振動の解析には必ずしも適さず, 各種の時間 - 周波数分析の使用が適している.

そこで著者らは, 発破音の詳細分析を実施し, 効率的かつ低騒音を実現する発破方式の開発を最終目標に, 測定音圧をデジタルフィルタ処理による時間一周波数分析 (以下 DF) ⁽⁵⁾を採用する. 本報では, 第一報として, 発破音の DF 結果から距離減衰の周波数特性を評価し, 発破音圧レベル式を導出し, 文献(4)の統計分析に基づく式と比較考察を行ったことを報告する.

2. 発破音のデジタルフィルタ処理

複数の帯域デジタルフィルタを並列的に用いた時間 - 周波数分析手法⁽⁵⁾により, 発破音 (15 段発) の音圧データを処理した結果例を図 1 に示す. 上図の時刻歴波形より発破は 1 秒で開始されている. 下図の DF 結果では, 周波数成分が時々刻々と変化する状況が観察できるが, 10Hz 以下で 1 秒以前にフィルタ誤差の影響がみられる. また, 10Hz 以下で値が大きく, 4Hz 成分が支配的で時間による減衰が小さい, 50Hz 以上の成分は小さいことなどが分かる. さらに, 1 秒から 0.25 秒間隔で 15 段の発破であるにも関わらず, 横軸 4 秒くらいで 4Hz 以外の影響は観察されない. 段発による低騒音化などについて今後検討する予定である.

図 2 には, FFT と DF の比較の一例を示す. FFT はライン数に応じた時間平均となり, オーバラップやゼロ足しなどの処理で結果は異なる. 一方, DF はフィルタ誤差があるが一意の結果となる. また FFT は周波数の抽出精度はよいが, 値は過小評価される. 一方, DF は値を正しく評価できるが, 周波数幅を持った結果となる. したがって, 図 2 の通り, FFT は値を過小評価している. DF はバンド周波数処理ではバンド和となり, リニア周波数処理より大きめの値となる.

次に, トンネル内 (全長約 1100m) の全長にわたり 6 点で測定した音圧データを図 1 のように DF 処理し, 各周波数での平均値 (積分値と等価) および最大値を算出したものを図 3 に示す. 両結果において, 4Hz 成分が代表するように, 概ね 25Hz 以下の成分では距離減衰が見られない. 一方, それ以上の成分の減衰は顕著であることが可視化されている. また図 3(a)の平均値の方がその傾向が見出しやすい.

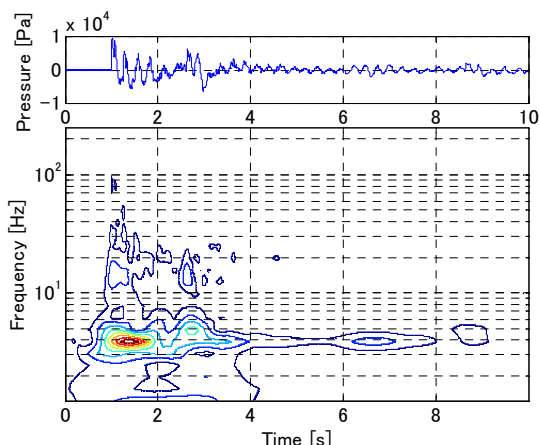


図 1 測定音圧データと DF 結果例

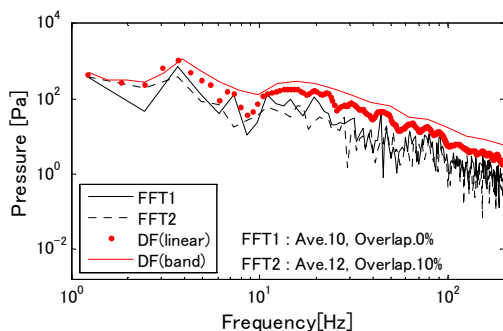
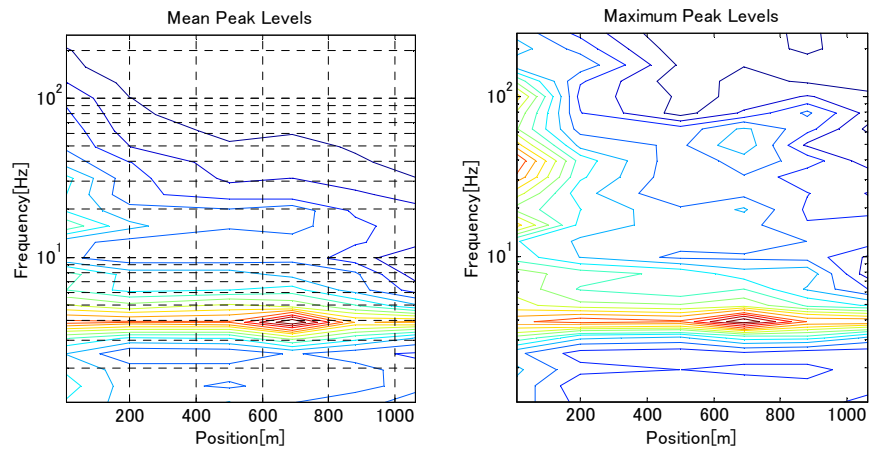


図 2 FFT 結果と DF 結果の比較例

3. 距離減衰の周波数特性の評価

図3(a)から周波数毎、距離毎の音圧値(図4の点)を、指数関数 e^{-aD} (D は坑内距離)で近似し、算出した乗数 a を図5に示す。31.5から80Hzでは $a=0.002$, 100から250Hzでは $a=0.003$ とそれぞれ一定となった。25Hz以下では a はばらつきが大きかった。これにはフィルタ誤差の影響も考えられるが、波長が長く距離減衰はないと考えるのが一般的と思われる。結果として、式(1)



(a) DF 結果より平均値を抽出した場合 (b) DF 結果より最大値を抽出した場合
図3 トンネル内の位置による発破音周波数特性

の前報(4)の発破音予測式と同様に式(2)を導出した。

$$\begin{aligned} L_c &= 123 + 0.08W - 5.16f + 1.37f^2 & (f \leq 4) \\ L_c &= 128 + 0.06W - 0.010D - 0.207f & (4 < f < 80) \\ L_c &= 128 + 0.09W - 0.041D - 0.047f & (80 \leq f) \end{aligned} \quad \cdots(1)$$

$$\begin{aligned} L_c &= 123 + 0.08W - 5.16f + 1.37f^2 & (f \leq 4) \\ L_c &= 125 + 0.06W - 0.207f & (4 < f < 31.5) \\ L_c &= 130 + 0.06W - 0.017D - 0.207f & (31.5 \leq f < 80) \\ L_c &= 121 + 0.09W - 0.017D - 0.047f & (80 \leq f < 100) \\ L_c &= 124 + 0.09W - 0.026D - 0.047f & (100 \leq f) \end{aligned} \quad \cdots(2)$$

ただし、 L_c は坑内予測音圧レベル、 W は総火薬量、 f は周波数。

図6に実測、式(1)、式(2)の距離減衰部分の比較を示す。80Hz以下では式(1)より式(2)の方が精度は良い。しかし、指数関数近似が安定した80Hz以上では式(2)は過大評価となっている。図4中に示す相関係数(R^2)が高い周波数ほど1から離れ、近似精度がよくないことであり、図4の点を見ると、距離によって減衰傾向が異なっているためと思われる。今後、

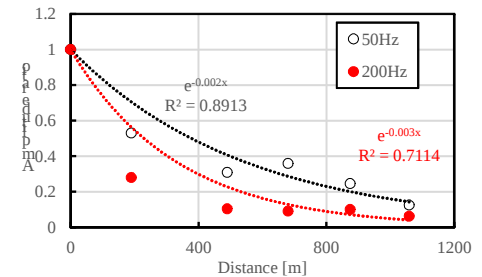


図4 DF 結果の距離に対する指数減衰近似例

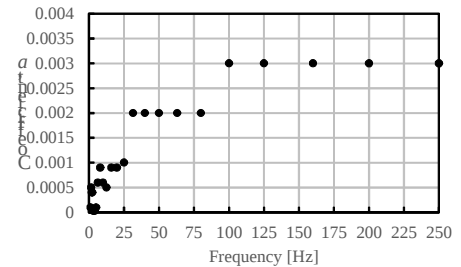


図5 指数減衰近似係数の周波数特性

DFを用いた詳細検討および距離減衰の高精度化、発破音レベル予測式の改善を行う予定である。

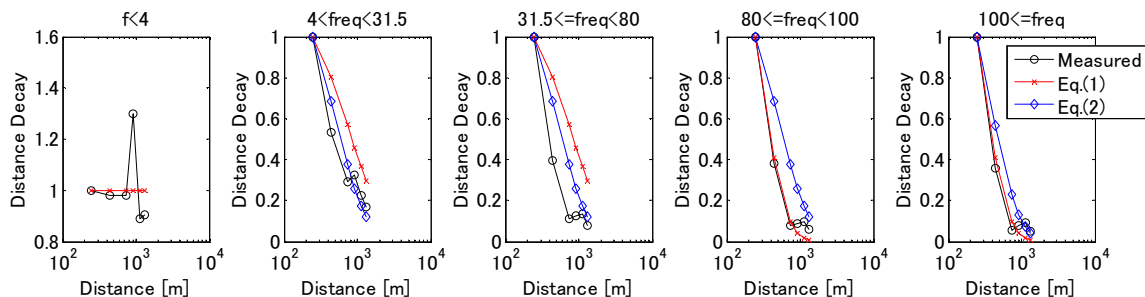


図6 距離減衰の実測値、式(1)および式(2)の比較結果

参考文献

- 1) 石田滋樹, 森厚夫, 進士正人: トンネル防音扉の発破音低減解析への統計的エネルギー解析法の適用, 土木学会論文集 G (環境), Vol.67, No.1, pp.11-20, 2011
- 2) 石田滋樹, 山崎徹: 統計的エネルギー解析法によるトンネル防音扉の効果予測に関する考察, 土木学会全国大会委員会第70回年次学術講演会論文集, 2015年9月発表予定
- 3) 船津弘一郎, 内山恒光: トンネル発破特性と予測, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1-2-1, pp.57-60, 1987.
- 4) 石田滋樹, 柿木寛也, 進士正人: トンネル坑内における発破音の音圧スペクトルレベル予測式の提案, 土木学会論文集 F1, トンネル工学 Vol.67, No.3, pp.81-86, 2011
- 5) 伊東圭昌, 山口尚人, 山崎徹, デジタルフィルタによる時間-周波数分析を用いた振動解析に関する基礎的検討, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻 801 号, pp.1633-1646, 2013