

## III-293 トンネル覆工壁面における発破振動評価

西松建設株式会社 正会員○平田篤夫  
西松建設株式会社 正会員 稲葉 力  
西松建設株式会社 正会員 田中義晴

1. はじめに 発破工事を行う際には、発破点からある距離離れた地点の振動予測を行うことがしばしば要求される。振幅値を決定論的に推定するためには、観測振動の振幅スペクトルおよびそれに対応する位相スペクトルを確定する必要がある。しかし、発破による破壊域、減衰、反射、屈折さらに散乱現象などの波動伝播現象および位相速度の分散性等を厳密にモデル化しなければ、位相スペクトルを確定することはきわめて困難である。観測波形の振幅スペクトルは、破壊領域、波動伝播過程および観測点近傍の局所的構造に依存した周波数応答関数の積で表現でき、個々に十分な精度で評価可能である<sup>1), 2), 3)</sup>。筆者等は、推定発破振動スペクトルをもとに、位相スペクトルを確定させる代わりに、確率論的手法<sup>4)</sup>に基づいて、発破振動最大振幅の期待値および標準偏差を予測する方法を提案している<sup>5)</sup>。本研究では、既設トンネル覆工壁面および岩盤中の、新設トンネル掘削にともなう振動波形と提案する予測手法を比較した結果について報告する。

2. 発破振動予測法の概要 発破振動の発生、伝播機構を考慮すると、観測発破振動スペクトル $F(\omega)$ は、震源スペクトル $S(\omega)$ と震源から観測点までの波動伝播特性である伝達スペクトル $D(\omega)$ および観測点近傍の局所的構造特性 $A(\omega)$ との積として、 $F(\omega) = S(\omega)D(\omega)A(\omega)$ のように表現できる。各スペクトルは、動弾性理論に基づきそれぞれ精度よく求めることができる。紙面の都合で詳細な説明は省略するので、参考文献 1)~3), 5)を参照されたい。ただし、観測点がトンネル覆工壁面上にある場合は、観測される振動は、覆工、緩み領域および周辺岩盤からなる系の動的応答結果と考えられ、その応答特性 $A(\omega)$ はBEMによる数値解析によって求めることができる。トンネル掘進にともなう芯抜発破の振動波形 $v(t)$ は、主要動領域においては定常正規確率過程にほぼ従うことがわかっている。そのとき、最大振幅の期待値 $\mu$ および標準偏差 $\sigma$ は、最大値の確率密度関数 $P_{max}$ を用いて次式で表すことができる。

$$\mu = (2\pi)^{-1/2} (M_0 M_1)^{1/4} m^{-1/2} \int_0^{\infty} z P_{max}(z) dz$$

$$\sigma = (2\pi)^{-1/2} (M_0 M_1)^{1/4} m^{-1/2} \left[ \int_0^{\infty} z^2 P_{max}(z) dz - (\mu/\sigma_0)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_n^2 = M_n/T, \quad M_n = \int_0^{\infty} \omega^{2n} G(\omega) d\omega, \quad n=0,1,2$$

ただし、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ および $\sigma_2$ は、 $v(t)$ および $\dot{v}(t)$ の時間に関する1階および2階の導関数の標準偏差で、 $v(t)$ のパワースペクトル $G(\omega)$ の関数である。予測式の未知パラメータは、 $G(\omega)$ と $m$ のみである。ここで、 $G(\omega)$ は、推定可能な $F(\omega)$ の自乗である。 $m$ は主要動区間 $T$ 内の卓越する波数である。

3. 予測結果 図1に示すような緩み領域を有するトンネル覆工壁面のA、Bおよびトンネルの影響範囲外の岩盤中(C)で、トンネル断面内水平方向の振動予測を行った。解析条件は表1のとおりである。図2は震源スペクトル、震源から85mに位置するA点への入射スペクトルおよびA点の予測スペクトルである。震源スペクトルは430Hz付近にピークを有する形状を示している。85mの距離を発破波動が伝播するにともなって、減衰している様子が伺える。A点における予測スペクトルは、緩み領域および覆工から構成されるトンネルに対して、定常平面波を入射した場合の周波数応答をBEMによって計算した結果を入射波に乗じて求めている。この予測スペクトルを用いて、発破振動の最大振幅を予測すると、図3のようである。A、BおよびC点の予測結果は実測値(□)とよく対応していることがわかる。経験式( $V = KW^m D^{-n}$ )では説明できない上に凸な最大振幅の分布特性も、卓越する振動成分が伝播距離によって異なることを考慮しているためにうまく評価できる。AおよびC点における振動予測値は、 $m$ の変動によって、図4に示すように変化する。実測波形の分析によって、AおよびC点では、図5に示すように、 $m = 3$ および2程度であることがわかっている。予測値はその値を用いて算定したが、実際の予測時には $m$ を確定させる必要がある。各

種の発破波形や図5を見ても解るように、 $m$ は1~6程度の範囲にあり、発破種別や岩盤状況の変化に応じてそれほど大きな変化を示さない。むしろ、観測点の状況に依存して変化するようである。しかしながら、図4を見ても解るように、推定期待値に与える $m$ の影響はそれほど大きくない。しかも、観測点の違いを考慮しても、 $m=2$ もしくは3という違いでしかないので、 $m$ の値を大きな違いで推定する可能性は低い。

表1 解析条件

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 破壊圏半径 (m)               | 1.50 |
| 最大作用圧力 (MPa)            | 5.00 |
| P波速度 (km/s)             | 4.00 |
| S波速度 (km/s)             | 2.30 |
| ポアソン比                   | 0.25 |
| 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 2500 |
| Q値                      | 25.0 |

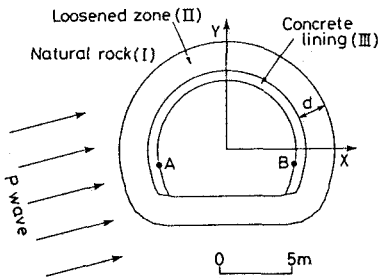


図1 対象トンネル断面

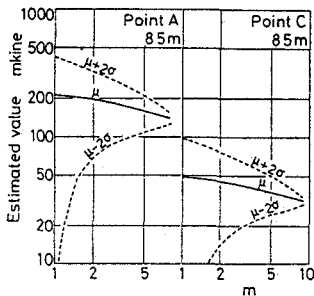


図4 85m地点における $m$ による予測結果の変動

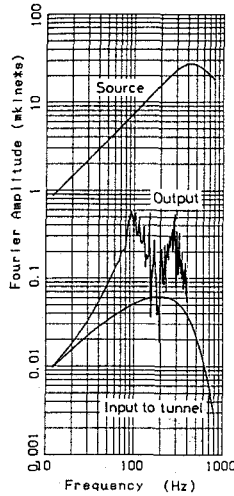


図2 推定スペクトル(85m)

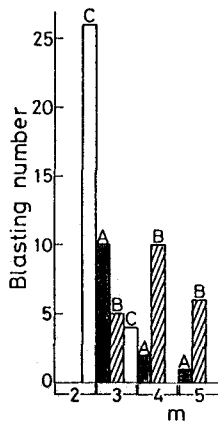


図5 実測波形の $m$ の分布状況

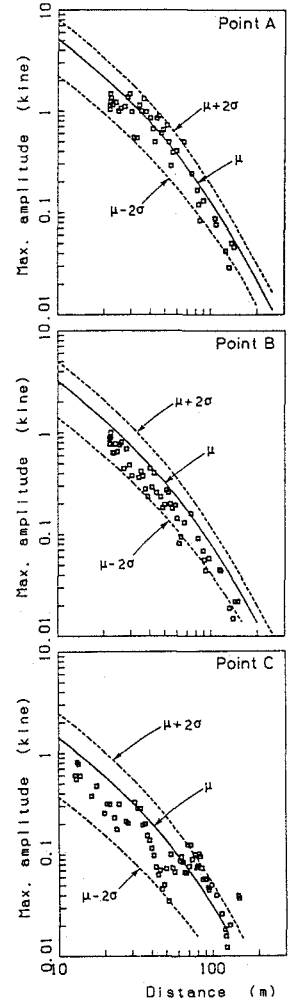


図3 予測結果と実測値の比較

4. おわりに 確率論的手法に基づく発破振動予測法により、トンネル覆工壁面および岩盤中の発破振動最大振幅の平均期待値ならびに標準偏差を予測した。トンネル掘進にともなう発破振動は、岩盤物性変化や発破に関する多くの要因によって大きなばらつきを有するものであるが、20mから150mの範囲の伝播距離を有する実測値の最大振幅分布特性を予測することができた。

[参考文献]1) Hirata, Inaba, Ishiyama, Kaneko and Ohmi: Blasting vibration in jointed rock, Int. Conf. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, April 18-20, 1990 2) 金子, 中村, 平田, 大見: 伝播波形初動形状によるQ値評価法, 物理探査, 第42巻, 第4号, 1989 3) 平田, 金子, 稲葉: 発破振動に励起されたトンネルの動的応答特性, 第8回岩の力学国内シンポジウム 4) 星谷勝: 確率論手法による振動解析, 鹿島出版会 5) 平田, 金子, 稲葉, 石山: 発破振動の予測法, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム, 1991