

トンネル発破振動の解析評価に関する検討

(株) 銭高組 正会員 ○ 角田 晋相
(株) 銭高組 相羽 均修
(株) 銭高組 森川 淳司

1. はじめに

山岳トンネル工事の掘削方法には発破を用いることが多く、硬岩から軟岩まで幅広い地山に適し効率に優れる利点を持つため広く用いられる。しかし、発破に伴う騒音や振動は周辺に伝搬するため、周辺環境に大きな影響を与え、特に発破振動は周辺の構造物への影響が懸念される。一般に、発破振動の検討は式-1に示す推定式を用いて行われることが多いが、計算に用いる指数や係数（表-1）によって得られる値が大きく異なる。また、現地では地質等の条件により振動の伝搬が異なるため、精度よく振動を予測するには事前に試験発破を行って計算に用いる発破係数を推定するなどの必要がある。

そこで、地盤物性や地形に応じて伝搬する発破振動を表現するため、三次元有限要素法による動的解析を実施し、解析値の妥当性について検討した。ここでは、実際のトンネル工事で計測した発破振動記録と解析値について検討した結果について述べる。

$$V = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad \text{(式-1)}$$
$$V: \text{変位速度} \quad K: \text{発破係数}$$
$$W: \text{装薬量} \quad D: \text{距離}$$

2. 解析モデル

検討に用いたトンネル工事の地質縦断図を図-1に示す。検討は、トンネルの到達側坑口付近とし、現地では図中に示す振動計測点で発破時の振動レベル計測を実施したため、解析値と比較できるよう解析モデル範囲を設定した。解析モデル上の地盤構成は4層とし、表-2に示す地盤物性とした。

解析モデルを図-2、図-3（モデル断面）に示す。地盤内のトンネル掘削部は、実際の発破点と同様の位置に荷重を与えられるようにトンネル縦断方向に細かく分割し、切羽進行に応じて解析が実施できるようにした。また、解析モデルの側面は粘性境界により無限地盤を模擬した。

動的解析に用いる荷重条件として、発破圧力は使用する火薬の諸元から式-2、式-3より算定²⁾し、入力する圧力波形は式-4に示す指数関数³⁾で近似した。

$$P_d = \frac{4.18 \times 10^{-7} \cdot Sg \cdot V_e^2}{1 + 0.8Sg} \quad \text{(式-2)}$$
$$P_B = P_d \cdot \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad \text{(式-3)}$$
$$P_D(t) = 4P_B \left(\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right) \quad \text{(式-4)}$$

P_d : 発破圧力
 P_B : 孔壁面にかかる圧力
 V_e : 爆速
 d_c : 火薬直径
 d_h : 装薬孔直径
 Sg : 比重

表-1 推定式の指数および係数

提案者	指数		発破係数 K
	m	n	
日本火薬	0.75	-2	200 ~ 900
旭化成	2/3	-2	200 ~ 1000
日本油脂	0.75	-1.5	80 ± 40

区分:トンネル発破

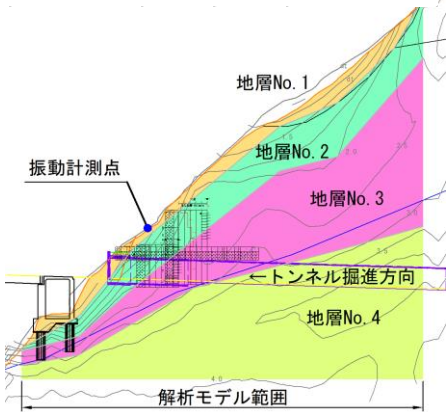


図-1 解析範囲の地質縦断図

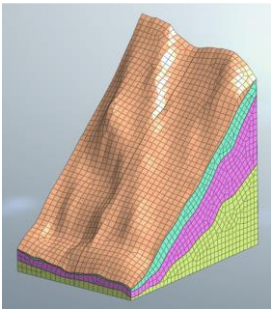


図-2 解析モデル

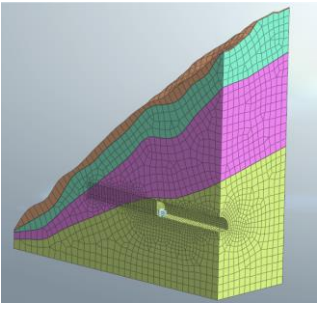


図-3 モデル断面

表-2 解析に用いる地盤物性値

地層 No.	V_p (km/s)	ν	V_s (km/s)	γ (kN/m ³)	G (kN/m ²)	E (kN/m ²)
1	1.000	0.40	0.408	21	357,143	1,000,000
2	1.500	0.35	0.721	25	1,324,568	3,576,334
3	2.500	0.30	1.336	25	4,555,394	11,844,023
4	3.500	0.30	1.871	25	8,928,571	23,214,286

キーワード 発破振動, 有限要素法, 動的解析

連絡先 〒102-8678 東京都千代田区一番町 31 (株) 銭高組 TEL:03-5210-2440 FAX:03-5210-2461

3. 発破動荷重の検討

解析検討区間の発破計画図を図-4 に示す。発破振動は段当たりの火薬量に依存するため、ここでは合計装薬量が最大である 7 段目を対象に解析検討を行った。火薬の諸元および 7 段目の装薬量を表-3 に示す。式-2 から式-4 により算定した圧力波形を図-5 に、解析における圧力波形の入力点を図-6 に示す。本解析では、解析モデル上で発破計画の装薬孔に近い各節点に動的節点荷重として圧力波形を与えた。

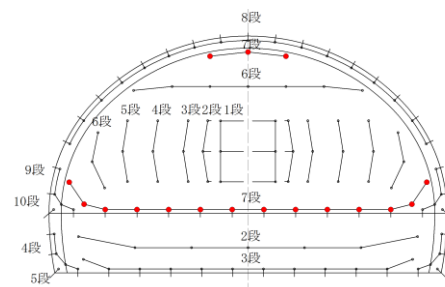


図-4 発破計画図

表-3 火薬の諸元および装薬量

火薬の性能・仕様				7段目数量		
比重	爆速	火薬直径	装薬孔径	孔数	装薬量	合計装薬量
1.23	6,000 m/s	30 mm	45 mm	17	0.6 kg/孔	10.2 kg/段

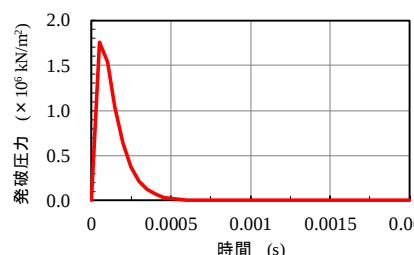


図-5 発破動荷重の圧力波形

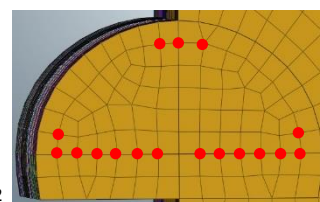


図-6 圧力波形の入力点

変位速度と発破点からの距離の関係について、解析値および推定式による計算値を図-7 に示す。ここで計算値については、各提案者による発破係数の上限値および下限値を用いた結果を表している。検討した解析モデルでは、変位速度の解析値は推定式の上限値と下限値の間に位置する結果となり、発破による振動伝搬は今回の解析手法で概ね表現できることが確認できた。また、検討に用いた地盤物性では、発破点からの距離が近いほど上限値に近くなる傾向がある結果となった。

4. 解析値と振動計測値の比較

トンネル工事で計測した振動計測記録および火薬使用量を基に、計測時の切羽進行地点を模擬した解析モデルにて解析を行った。

解析結果と振動計測値の比較を図-8 に示す。なお、現地での振動計測値は振動レベルで表されるため、解析により得られる変位速度を式-5¹⁾により振動レベルに換算し比較した。今回の解析では、実測値に対し解析値は数 dB 高い値となったが、振動伝搬の予測としては概ね評価できると考えられる。解析結果の一例として最大振動レベル分布を図-9 に示す。三次元 FEM 動的解析により、発破による振動の地形に応じた伝搬や減衰が表現できる。

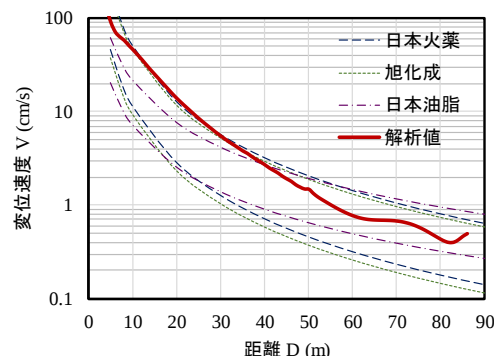


図-7 変位速度と距離の関係

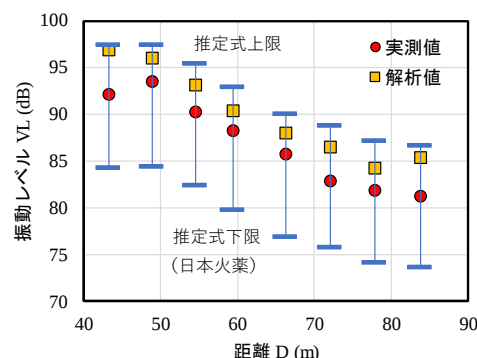


図-8 解析値と実測値の比較

5. まとめ

$$V_L = 20 \log V + 83 \quad (\text{式-5})$$

V_L : 振動レベル (dB)
 V : 変位速度 (cm/s)

今回実施した解析では、発破による振動伝搬は、推定式による距離減衰と解析値は同様の傾向となることが示され、現地の実測値との比較においても概ね良好な結果が得られ、解析値の妥当性が検証できた。

三次元動的解析により、地形に応じた振動の広がり方が可視化できるため、影響を及ぼす場所や対策の必要な範囲を合理的に推測することができる。

今後は、発破振動記録の収集に努め、解析値との比較を数多く行い入力条件を検討することで、解析による振動予測の精度を向上させていきたい。

【参考文献】

- 1) 日本火薬工学会：あんな発破こんな発破 発破事例集，平成 14 年 3 月
- 2) konya,C.J.and Walter,E.j. : Rock blasting and overbreak control, FHWA-HI-92-001,National Highway Institute., 1991
- 3) 久武勝保：トンネルの合理的設計・施工に関する基礎的研究，1982.11

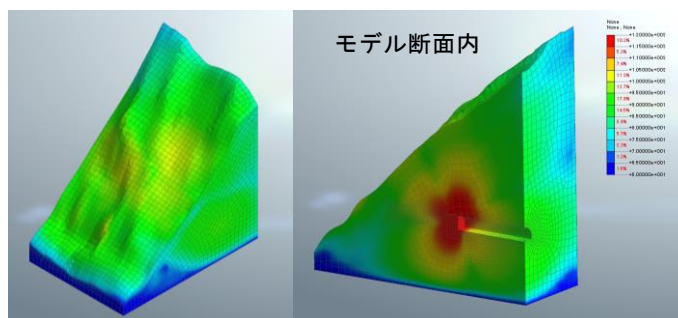


図-9 最大振動レベル分布