

有限要素解析におけるトンネル発破振動の影響評価に関する検討

A study on dynamic detonation pressure used for finite element simulation of vibration propagation due to tunnel blasting

角田晋相*1 相羽均修*2 森川淳司*3

概 要

山岳トンネル工事の施工では非常に硬い地山を掘進することが多く、掘削方法には発破掘削がよく用いられる。しかし、現地では発破にともなう騒音や振動が周辺に伝搬するため、環境対策が求められる。特に近隣に構造物がある場合は、振動による影響が懸念されるため、影響範囲を推定し対策を行う必要がある。一般に、発破振動の影響範囲は経験による推定式を用いて行われるが、計算に用いる指数や係数によって得られる値が大きく異なる。

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、現地での計測結果との比較検討により解析値の妥当性を検証した。

key words : 山岳トンネル、発破振動、有限要素法、動的解析

1. はじめに

発破掘削は、硬岩から軟岩まで幅広い地山に適し掘削効率に優れる利点を持つため、山岳トンネル工事の掘削方法として広く用いられる。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¹⁾を用いて行われることが多い。推定式は、表-1に示すように幾つかの提案者から計算に用いる指数や係数が提案されており、用いる値によって得られる結果が大きく異なる(図-1)。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、計画段階から発破振動による周辺への影響を精度よく把握することを目的に、地盤物性や地形に応じた振動伝搬を表現するため、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および推定式との比較を行い、動的解析に用いる発破動荷重について検討した結果を示す。

$$V = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad (1)$$

V : 変位速度 K : 発破係数
W : 装薬量 D : 距離

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

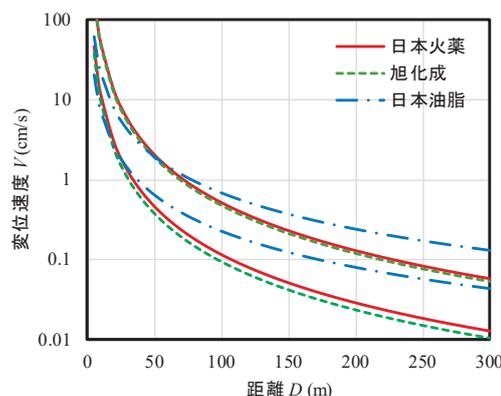


図-1 推定式による計算値

2. 検討対象トンネル

2.1 現場概要

検討対象としたトンネル工事の概要を以下に示す。

工事名 : 奈川渡2号トンネル(その1、その2)工事

工事場所 : 長野県松本市安曇地先

工事内容 : トンネル延長 1,534m (NATM, 発破方式)

発注者 : 国土交通省関東地方整備局

*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主席研究員

*2 Masanobu AIBA

技術本部技術研究所 研究員

*3 Junji MORIKAWA

東京支社土木支店土木部 作業所長



写真-1 トンネル到達坑口部

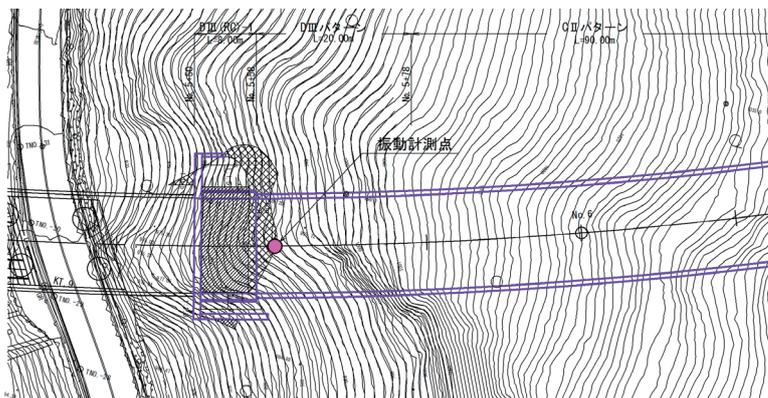


図-2 トンネル到達部の平面図



写真-2 振動レベル計設置状況

表-2 解析に用いる地盤物性

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

当該工事では、写真-1 に示すようにトンネルの到達坑口が急峻な斜面中に露岩した出尾根部に計画されており、その直下には供用中の道路が存在するため、慎重な施工が求められた。到達坑口部の平面図を図-2 に示す。現場では、坑口付近に振動レベル計を設置し(写真-2)、日々発破による振動影響を把握しながらトンネル掘進を行った。

2.2 解析モデル

トンネル工事の地質縦断面図を図-3 に示す。解析検討は、トンネルの到達側坑口付近とした。解析モデルは、現地で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-4、図-5 (モデル断面) および図-6 (トンネル掘削部メッシュ) に示す。解析コードはmidasGTS-NX を使用し、直接積分法による線形時刻歴解析とした。地盤内のトンネル掘削部は、図-6 に示すように解析上実際の発破点と同様の位置に荷重を与えるためトンネル縦断方向に細かくメッシュを分割し、現場での切羽進行に応じて解析が実施できるようにした。また、解析モデルの側面および底面は粘性境界により無限地盤を模擬した。

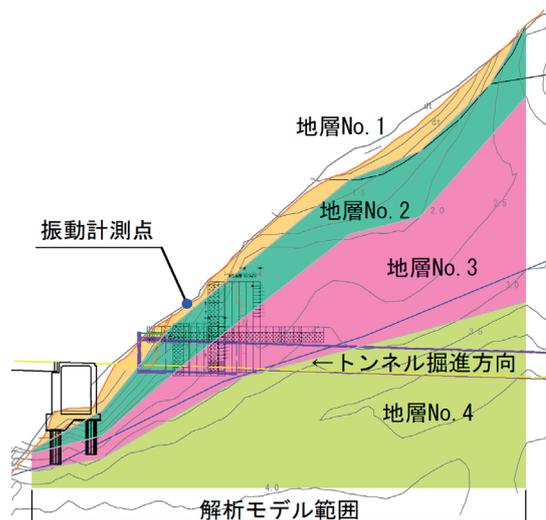


図-3 トンネル到達側坑口付近の地質縦断面図

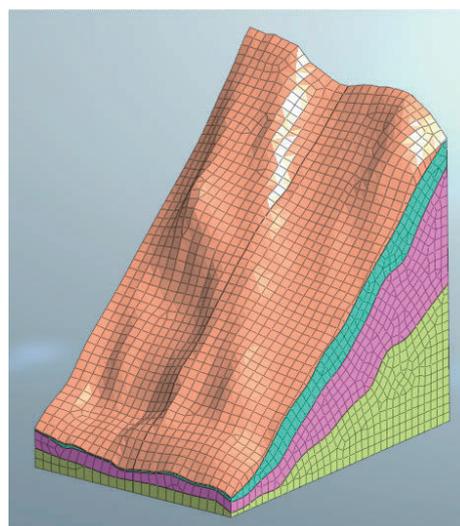


図-4 解析モデル

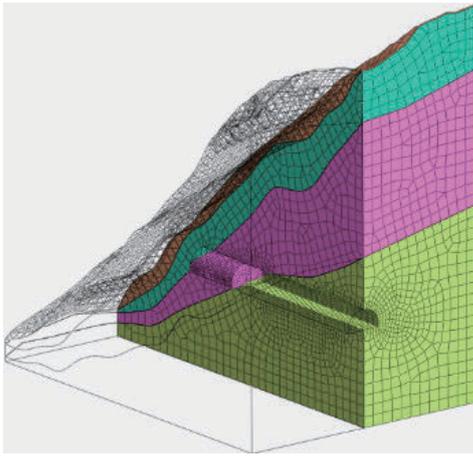


図-5 解析モデル断面

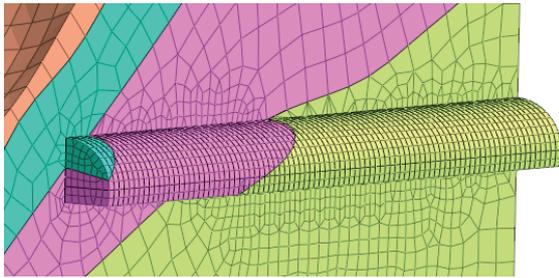


図-6 トンネル掘削部のメッシュ分割

3. 発破動荷重の検討

3.1 発破圧力

動的解析に用いる荷重条件として、発破圧力は火薬の諸元から求める計算式が幾つか提案されており、ここでは以下の6式(式(2)~式(7)²⁾³⁾⁴⁾について比較した。発破孔壁面の空洞側に生ずる圧力は式(8)⁵⁾を用い、入力する波形は式(9)に示す指数関数⁶⁾で近似した。

$$P_d = \frac{4.18 \times 10^{-7} \cdot Sg \cdot V_e^2}{1 + 0.8Sg} \quad (2)$$

$$P_d = 2.5 \times Sg \cdot V_e^2 \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$P_d = 2.1 \times (0.36 + Sg) \times V_e^2 \quad (4)$$

$$P_d = 4.24 \times 10^{-4} \times Sg \cdot V_e^2 (1 - 0.543 \times Sg + 0.193 \times Sg^2) \quad (5)$$

$$P_d = 1.62 \times Sg \cdot V_e^2 \left(\frac{\rho \times V_p}{Sg \times V_e} \right)^{0.25} \quad (6)$$

$$P_d = 2.325 \times 10^{-7} \times Sg \times V_e^2 \quad (7)$$

$$P_B = P_d \cdot \left(\frac{d_c}{d_h} \right)^3 \quad (8)$$

$$P_D(t) = 4P_B \left(\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right) \quad (9)$$

- P_d : 装薬量 1kg 当りの発破圧力
- 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
- ρ : 地盤密度
- V_p : 地盤の縦波速度
- B : 荷重定数

3.2 発破動荷重の設定

発破動荷重は、発破計画を基に設定した。解析検討区間の発破計画図を図-7に示す。現場で使用する火薬の諸元を表-3に、各段の火薬の装薬量を表-4に示す。

発破振動は段当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上半7段目を対象に発破圧力を算定した。

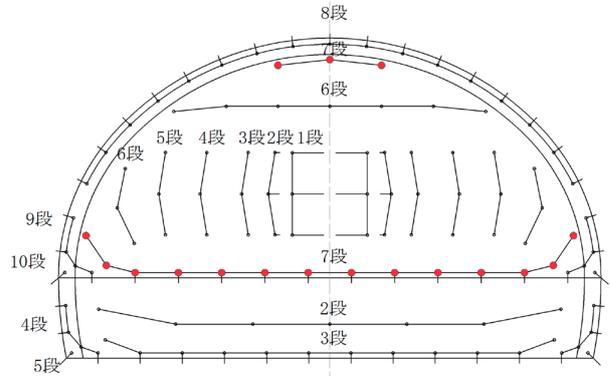


図-7 対象トンネルの発破計画図

表-3 火薬の諸元

火薬の性能・仕様			
比重	爆速	火薬直径	装薬孔径
1.23	6,000 m/s	30 mm	45 mm

表-4 各段の火薬の装薬量

掘削部分	段数	各段孔数 (孔)	各孔装薬量 (kg/孔)	合計装薬量 (kg/段)
上半	1	6	0.8	4.8
	2	6	0.8	4.8
	3	6	0.6	3.6
	4	6	0.6	3.6
	5	6	0.6	3.6
	6	13	0.6	7.8
	7	17	0.6	10.2
	8	17	0.6	10.2
	9	8	0.8	6.4
	10	2	0.8	1.6
下半	2	7	0.6	4.2
	3	12	0.6	7.2
	4	8	0.8	6.4
	5	2	0.9	1.8

上半7段目の各孔装薬量を基に、式(2)~式(7)の発破圧力式および式(9)の指数関数から算定した発破動荷重の圧力波形を図-8に示す。ここで、式(4)に用いる地盤密度 ρ は、表-2の地層No.4の単位体積重量 γ から算出し、地盤の縦波速度 V_p は3.5km/sとした。また、式(9)の指数関数に用いる荷重定数 B は、参考文献³⁾より16,338とした。

解析における発破動荷重の入力点を図-9に示す。解析では、モデル上で発破計画図の装薬孔に近い節点に動的節点荷重として圧力波形を与えた。

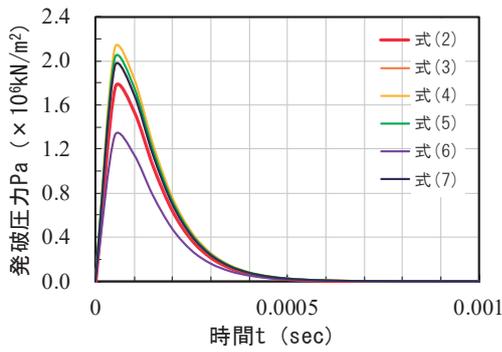


図-8 発破動荷重の圧力波形

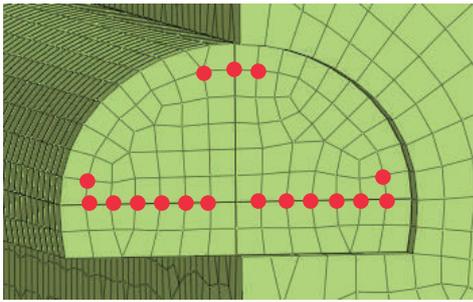


図-9 発破動荷重の入力点

3.3 推定式と解析値の比較

変位速度と発破点からの距離の関係について、式(2)～式(7)で算定した各発破動荷重による解析値と式(1)の推定式による計算値を図-10に示す。ここで、推定式による計算値については、各提案者による発破係数の上限値および下限値により計算した結果を表している。

検討した解析モデルによる変位速度の解析結果は、概ね推定式による計算値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による解析モデルでは、発破点からの距離が近くなるほど、推定式の上限値に近づく傾向がある結果となった。

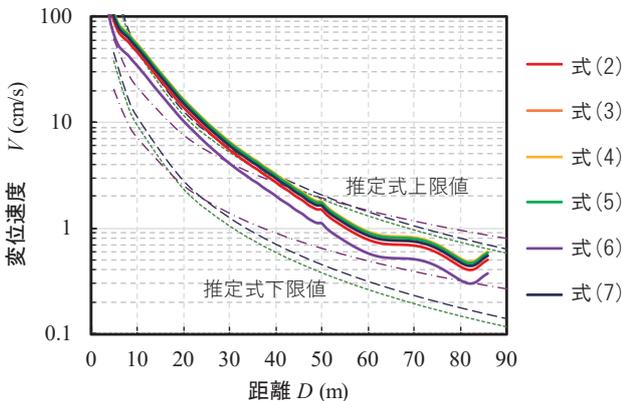


図-10 変位速度と距離の関係

4. 振動伝搬の評価

4.1 発破振動計測

三次元有限要素法による振動解析値の妥当性を評価するため、現地での振動計測の計測記録と比較し検討を行った。

解析モデルの範囲における現場での振動計測記録を図-11に示す。本計測記録は、発破点から振動計測地点までの距離が85～40mの区間の振動記録であり、平常時の振動レベルは40dB程度であるのに対し、発破時には80～94dBの振動レベルが計測された。

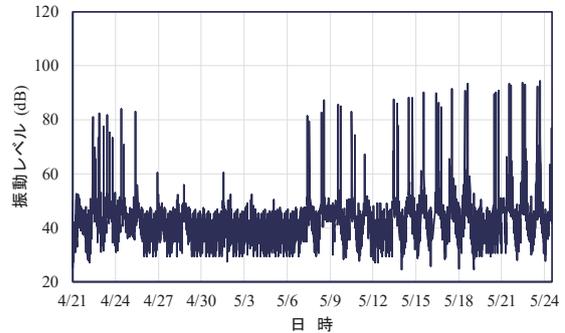


図-11 現場での振動計測記録

4.2 解析による検討ケース

現場での計測した振動計測結果と各切羽進行地点における実際の発破条件を基に、それを模擬した解析モデルにより解析を行った。

解析による検討ケースを表-5に示す。ここでは、解析対象の切羽進行地点における発破時の段当り最大となる火薬の装薬量を示している。同表に示す実孔数および各孔装薬量からケース毎に解析モデルと入力する発破動荷重を設定した。

解析モデル上の発破動荷重の入力点を図-12に示す。ここで、施工における火薬の装薬実孔数は24～33孔であるのに対し、解析モデル上の入力点は16点のため、実孔数と入力点の比を荷重成分として与えた。

表-5 解析による検討ケース

検討ケース	切羽と振動計測点の距離 (m)	段当り実孔数 (孔)	各孔装薬量 (kg/孔)	合計装薬量 (kg/段)	振動計測実測値 (dB)
Case1	83.88	27	1.0	27.0	81.2
Case2	77.98	24	1.0	24.0	81.8
Case3	72.10	25	1.0	25.0	82.9
Case4	66.24	24	1.0	24.0	85.7
Case5	59.45	28	1.0	28.0	88.2
Case6	54.62	33	1.0	33.0	90.3
Case7	48.88	28	1.2	33.6	93.5
Case8	43.21	24	1.0	24.0	92.1

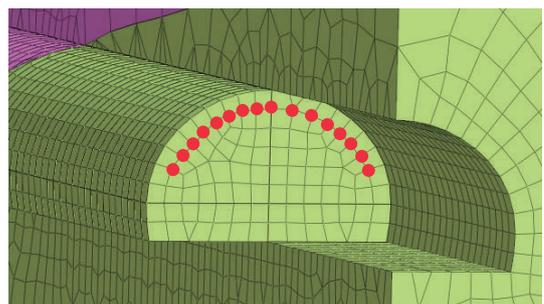


図-12 検討ケースにおける発破動荷重の入力点

4.3 解析値と実測値の比較

解析による着目点は、図-13に示す現場での振動計測点付近の節点とし、鉛直方向の最大応答変位速度で評価した。現地で測定した振動計測値は振動レベルで表されるため、解析結果から得られる変位速度を式(10)¹⁾により振動レベルに換算し比較した。

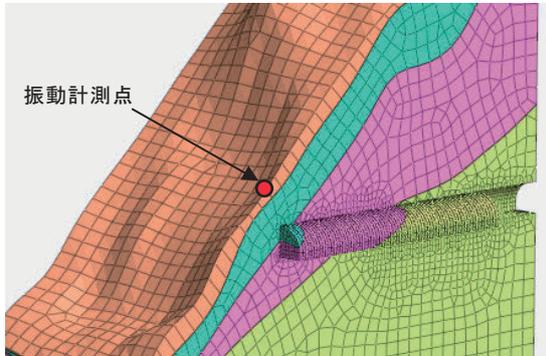


図-13 解析による着目点

$$V_L = 20 \log V + 83 \quad (10)$$

V_L : 振動レベル (dB)
 V : 変位速度 (cm/s)

入力する発破動荷重は式(2)による発破圧力を用いて全ケースの解析を行った。着目点における解析値と実測値の比較を図-14に示す。同図には式(1)による日本火薬の推定式による計算結果も併せて示す。解析値は、実測値に対して全体的に数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。

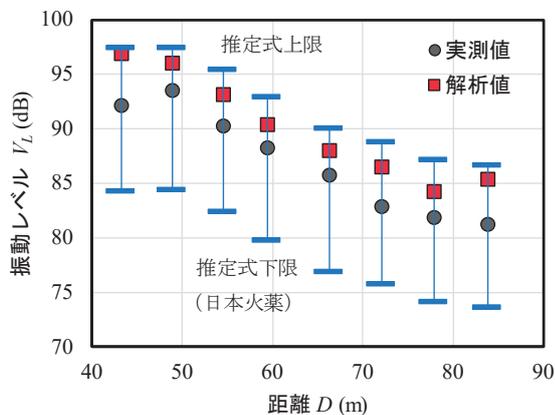


図-14 解析値と実測値の比較

Case2 に対しては、発破圧力を式(2)~式(7)で算出した各発破動荷重による解析を行い、各式による解析値と比較した。各発破圧力式による解析結果と振動計測値の比較を図-15に示す。

式(2)から式(5)および式(7)の発破圧力による解析結果の振動レベルは、現場での実測値に比べ2.4~3.9dB高くなる結果となった。

式(6)による解析結果は、実測値とほぼ一致する結果が得られた。式(6)の発破圧力による解析結果が実測値に近い値となったのは、他式に対対象地盤の密度や縦波速

度を考慮していることも一つの要因であると考えられる。ただし、本解析では実測値に対して低い値あるため、振動の影響を安全側に評価する上では注意が必要である。

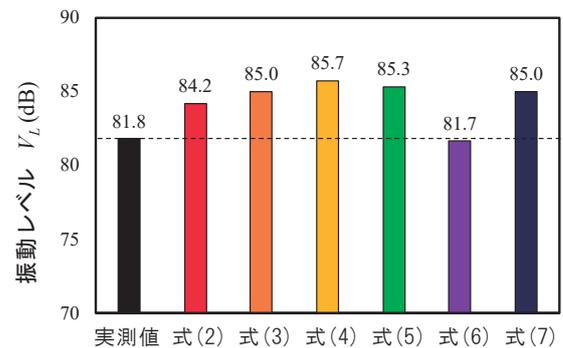


図-15 実測値と各式による解析値の比較

4.4 三次元的な振動伝搬

解析結果の一例として、最大振動レベル分布図を図-16(解析モデル断面内)および図-17(到達斜面側)に示す。三次元有限要素解析を行うことで、発破振動の地形に応じた伝搬や減衰が表現でき、対策の必要性や範囲を推測することができる。

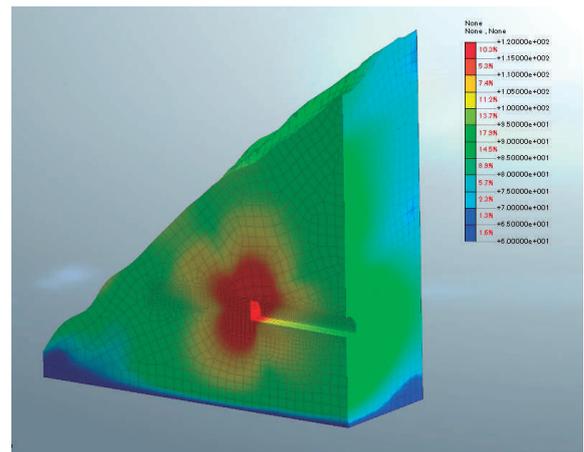


図-16 最大振動レベル分布(解析モデル断面内)

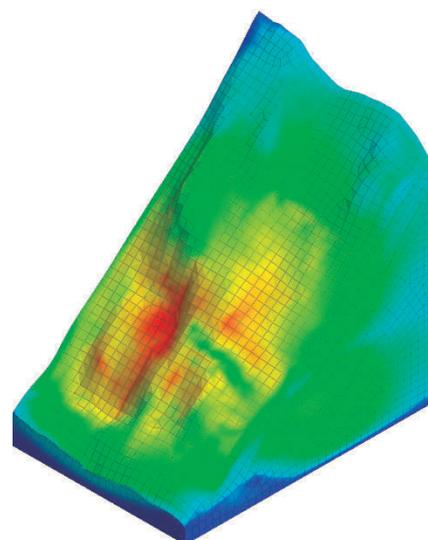


図-17 最大振動レベル分布(到達斜面側)

5. まとめ

本検討において、三次元有限要素法による発破振動解析の妥当性について以下のことが確認できた。

- ①動的解析の結果は、推定式による計算値と同様の傾向があるが、発破点からの距離が短いほど推定式に比べて高い値となる。
- ②解析値は、現地での振動計測値との比較においても概ね良好な結果が得られ、三次元有限要素法による発破振動解析の妥当性が確認できた。
- ③複数の発破圧力式から求めた発破動荷重による解析値の比較では、対象地盤の因子を含んだ圧力式による解析値が実測値とほぼ一致する結果となったが、解析値の方がやや小さい値となっており安全側の評価を行う上では注意が必要となる。

三次元有限要素法による動的解析を行うことで、地形や地盤状況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、発破振動の計測記録を収集し、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伝搬予測の精度を向上させていきたい。

【参考文献】

- 1) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集、2002.3
- 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
- 4) Liu, Q, and Tidman, P : Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blast hole, 1995
- 5) 工業火薬協会：発破ハンドブック、1976.9
- 6) Starfield, A.M. and J.M, Pugliese : Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charge: A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.5, pp.65-77, 1968
- 7) 角田晋相、相羽均修：有限要素解析におけるトンネル発破振動の発破動荷重に関する検討、地盤工学会第55回地盤工学研究発表会、23-8-2-01、令和2年7月
- 8) 角田晋相、相羽均修、森川淳司：トンネル発破振動の解析評価に関する検討、土木学会全国大会第75回年次学術講演会、III-91、令和2年9月