

3次元個別要素法によるトンネル自由面発破の波動放射特性評価

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 今野 真精
新潟大学工学部 正会員 阿部 和久
株式会社福田組 正会員 若月 和人
新潟大学工学部 正会員 紅露 一寛

1 はじめに

トンネルの発破掘削では、その際に発生する振動が近接住居等へ及ぼす影響が懸念される。その対策の一つとして、トンネル切羽面にスリット状の溝を掘り新たな自由面を設ける「心抜き自由面発破」と呼ばれる手法が有効とされている¹⁾が、その合理的な設定方法は未だ確立されていない。既往の研究では二次元個別要素法による発破解析を通し、当該工法の振動低減メカニズムについて検討している^{2),3),4),5)}。しかし、スリットを設けない通常の心抜き発破の場合、発破孔が切羽面に対して斜めに設定(Vカット)されるため、その再現解析に二次元モデルを適用するのは適切でない。

本研究では、三次元トンネル発破解析を対象に個別要素・有限要素結合法を用い、個別要素・有限要素境界にエネルギー評価境界を設定することで放射波動エネルギーの評価を行う。解析例を通し、各工法による効果について検討する。

2 心抜き自由面発破の概要

従来の心抜き発破(Vカット)掘削は、掘削面に対して射角になるように発破孔を設け、掘削面手前方向に掘り出すように行われていた。一方、心抜き自由面発破掘削では、発破時に最も負荷がかかる掘削面中心部に、スリット状の自由面(図1)を設けることで、掘削の効率化を図り、振動を低減する。

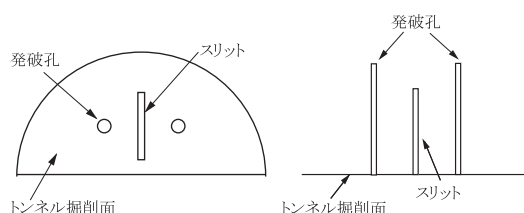


図-1 心抜き自由面発破の概要

3 個別要素解析の概要

個別要素法とは、解析対象を自由に運動できる多角形や円・球の要素の集合体により表わし、個々の要素の運動を計算する方法である。周りの粒子から受ける接触力 $\mathbf{F}$ を知る

ことができれば、質量 m を持つ要素の運動は、ニュートンの運動の第二法則($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$)で表すことができる。求めた加速度 $\mathbf{a}$ を時間積分することで変位が得られ、これを各時刻で繰り返すことで運動する要素群の運動軌跡が求められる。

発破解析では、空隙の無い連続体を初期状態とし、さらに直径5cm程度の発破孔を適切に表現する必要がある。そのため本研究では、初期の要素配置を有限要素メッシュジェネレータで作成し、四面体要素により離散化して、それを個別要素データに変換する。

要素間の接触力は、図2に示すようなVoigtモデルで表現する。法線方向成分と、それに垂直なせん断方向成分に分け、相対変位・速度から各成分を求める。

4 有限要素の結合

個別要素解析は、計算に膨大な時間を要する手法である。そこで本研究では、個別要素に比べて解析時間を大幅に削減できる有限要素を、発破による破壊を生じない外側領域に用いる。個別要素との結合部では、個別要素側で評価した作用力を有限要素節点力として与え、当該外力の下で時間積分を行い応答を求める。有限要素・個別要素結合法による一連の計算過程を図3に示す。

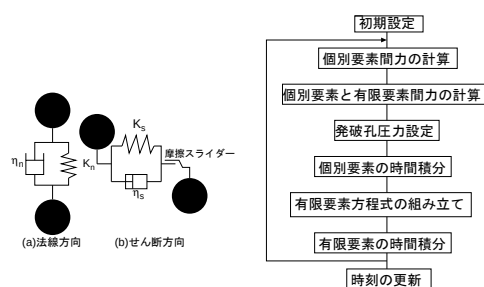


図-2 接触モデル

図-3 解析アルゴリズム

5 エネルギー評価境界の設定²⁾

発破振動の原因となる放射波動エネルギーを評価するために、解析対象域内にエネルギー評価境界を設ける。境界上に位置する要素節点の変位速度と、そこに作用する応力より、境界を通過した無限遠方場での放射エネルギーを評

価する。

6 解析条件

6.1 自由面発破モデル

本研究では、半径 6m の球を縦方向に 4 分割したモデルを対象とし、四面体要素で分割した。右辺自由面から 30cm 離れた位置に、半径約 25mm の発破孔を奥行 1.4m で設定した。球の中心から半径 4m より外部を有限要素領域と設定し、その内部の個別要素と結合させ、当該境界面をエネルギー評価境界とする (図 4)。右辺の上下 4m に接する要素の水平変位と回転速度を拘束して、対象条件を課す。ただし、中央部 3m はスリット (自由面) を想定し、要素を拘束せず、自由に運動できる状態とする。

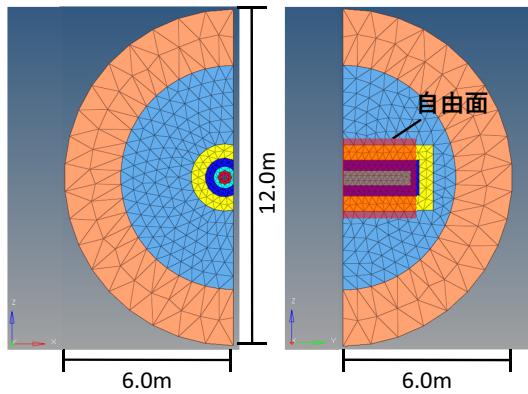


図-4 自由面発破モデル

6.2 V カットモデル

スリット状の自由面を設けない通常の心抜き発破では、発破孔を斜めに設定する。自由面発破モデルとの比較対象として V カットモデルを作成した (図 5)。切羽面の右辺より 85cm 離れた位置から、奥行き 1.4m、右辺より 30cm の位置まで発破孔を設定した。なお、V カットモデルでは自由面を設定しないため、右辺に接する要素は全て拘束する。

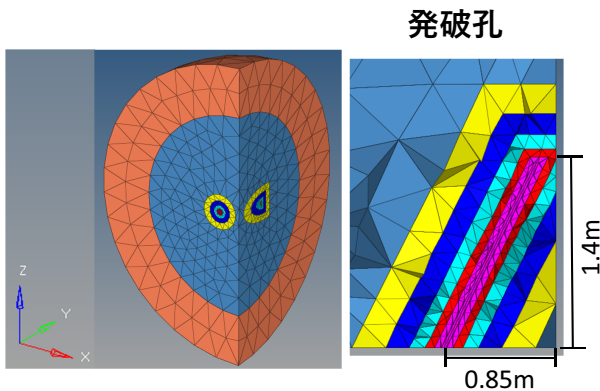


図-5 V カットモデル

6.3 発破孔内圧力の設定

発破孔に作用するガス圧は、発破孔に接する要素面に対し法線方向に規定外力として与える。圧力の基本波形は文献 3) における逆推定結果に基づき、次式により与えた (図 6)。

$$\bar{P}(t) = \begin{cases} P_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & 0 \leq t \leq a \\ P_0 \cos\left(\frac{\pi}{2b}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & a \leq t \leq (b+1)a \\ 0 & (b+1)a < t \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は最大圧力、 a は圧力の立ち上がり時間、 b は圧力が最大値からゼロまで低下する時間を a で除した値である (図 6)。各パラメーターの値は、 $P_0 = 5.75 \times 10^8 \text{Pa}$ 、 $a = 1.33 \times 10^{-4} \text{s}$ 、 $b = 2.75$ と設定した。

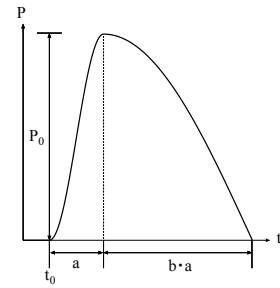


図-6 圧力波形

6.4 時間増分の設定⁶⁾

発破解析では発破孔近傍での要素の移動速度が非常に大きくなり、安定した解を得るには時間増分 Δt を小さくする必要がある。本解析では、要素移動距離の許容最大値 ℓ を設定し、要素速度 v_i から時間増分 Δt_i を決定する。初期値 $\Delta t_i = \Delta t_0$ とし、 $\Delta t_i > \ell/v_i$ であれば、 $\Delta t_i = \Delta t_i/2$ と設定し直す (Δt_0 は最大時間増分)。 $\Delta t_i \leq \ell/v_i$ を満たすまでこれを繰り返す。

要素毎に時間増分 Δt_i が異なるため、現時刻 t と要素の時刻 t_i が一致する場合に限り作用力を評価する (図 7)。

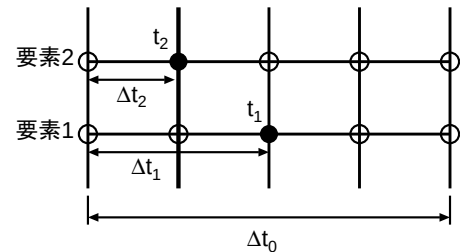


図-7 現時刻 t と要素の時刻 t_i の関係図

また、要素間作用力 F を直接受け渡すことができない。したがって、要素間作用力 F に時間増分 Δt_i を乗じて力積を求め、関連要素の力積に加算していく。 Δt_i 間の力積総量

に基づき時間積分を行い、次ステップにおける速度と変位を更新する。この操作を、要素毎に設定された時間ステップの下で実行する。

当解析では、 $\ell = 1.0 \times 10^{-8}\text{m}$ 、 $\Delta t_0 = 1.0 \times 10^{-8}\text{s}$ とし、各要素で異なる時間増分の下、並列計算を実行する⁶⁾。

6.5 物性値の設定

解析に用いる物性値を表1に示す。

表-1 物性値	
法線方向バネ定数	800(GN/m ³)
接線方向バネ定数	400(GN/m ³)
法線方向粘性定数	22.6(MN・s/m ³)
接線方向粘性定数	10.1(MN・s/m ³)
法線方向粘性定数(破壊後)	3.08(MN・s/m)
粘着力	8.0(MPa)
摩擦係数	0.30
破壊解放エネルギー	270(N/m)

7 解析結果

7.1 自由面発破モデル

上記条件で発破後 $1.0 \times 10^{-2}\text{s}$ までの解析を行った。破壊の様子を図8に示す。発破孔近傍の要素に破壊が生じ、放射状に亀裂が伸びている様子が窺える。また、発破孔から自由面に至る三角形の領域が自由面奥行き方向に一様に破壊している。

放射波動エネルギーの 100Hz,150Hz,200Hz 成分の分布をそれぞれ図9,図10,図11に示す。なお、図には横波と縦波成分を示した。100Hz,150Hz の XZ 平面及び YZ 平面において斜め 45° 方向に横波が卓越しており、指向性が窺え、2次元個別要素解析²⁾図12で得られた結果とも類似した結果を得た。

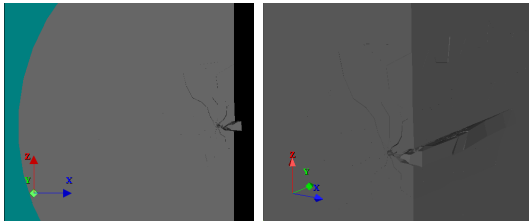


図-8 解析結果
($t=1.0 \times 10^{-2}\text{s}$)

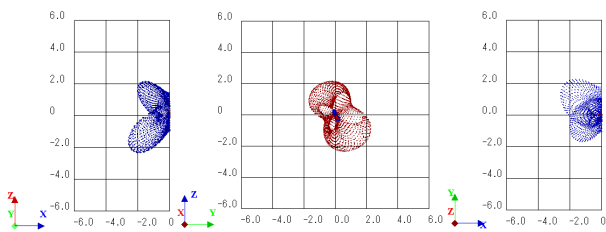


図-9 放射波動エネルギー (100Hz)

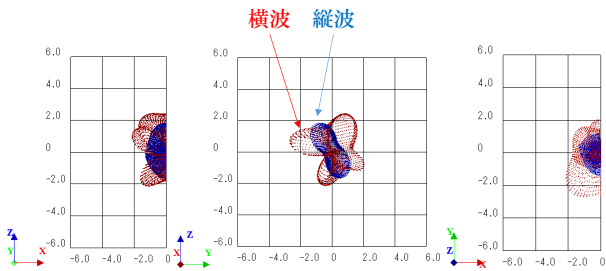


図-10 放射波動エネルギー (150Hz)

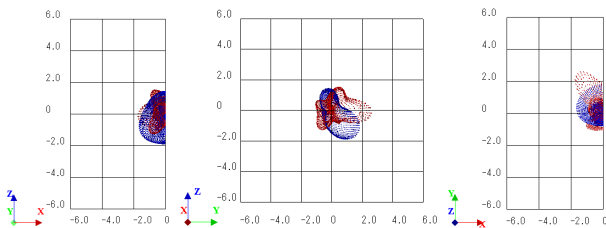


図-11 放射波動エネルギー (200Hz)

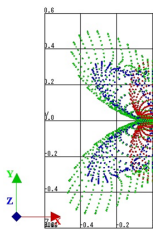


図-12 2次元個別要素解析²⁾

7.2 V カットモデル

発破後 $1.0 \times 10^{-2}\text{s}$ までの解析を行った。結果を図13に示す。細かな亀裂が入っているものの、完全には破壊しきれていない。自由面発破では自由面の存在により効率よく破壊できたが、V カットモデルでは発破圧力が不足していたと考えられる。

放射波動エネルギーの 100Hz,150Hz,200Hz 成分の分布をそれぞれ図14,図15,図16に示す。YZ 平面では Y 軸方向へのエネルギー放射が大きくなっており、XY 平面では斜

め方向への横波が確認できる。これは、斜めに設定した発破孔に対して垂直な方向へ放射波動エネルギーが卓越するためと考えられる。

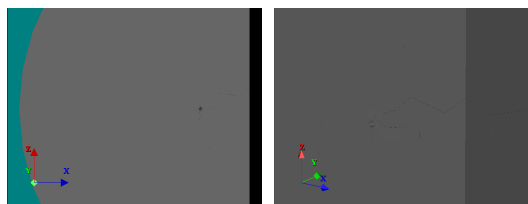


図-13 解析結果
($t=1.0 \times 10^{-2} \text{s}$)

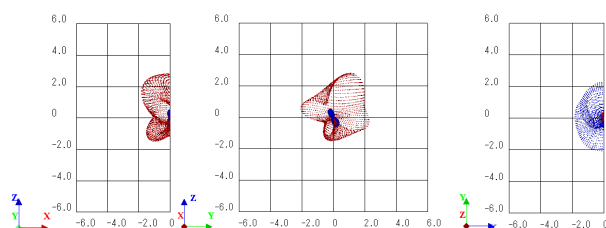


図-14 放射波動エネルギー (100Hz)

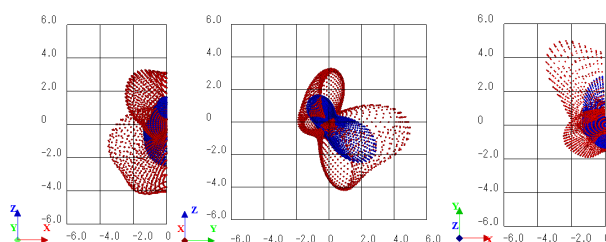


図-15 放射波動エネルギー (150Hz)

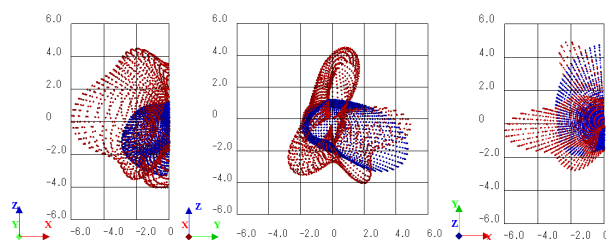


図-16 放射波動エネルギー (200Hz)

7.3 放射波動エネルギーの大きさ

自由面発破、V カットそれぞれの放射波動エネルギー²⁾における、150Hz 成分を図 17, 18 に示す。V カットに比べ、自由面発破の方が放射波動エネルギーの横波成分が小さくなっている。これは、自由面の効果により効率よく破砕しているのに対して、V カットでは完全に破壊できず、発破のエネルギーが波動エネルギーとして放射されたと考えられる。

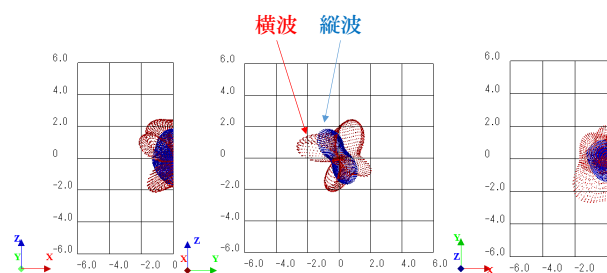


図-17 150Hz 成分 (自由面発破)

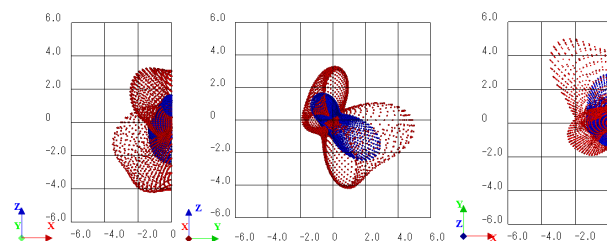


図-18 150Hz 成分 (V カット)

8 おわりに

本研究では、三次元個別要素・有限要素結合解法を構築し、自由面発破モデルと V カットモデルを対象に解析を行った。

また、個別要素と有限要素の境界部分にエネルギー評価境界を設け、無限遠方場における放射波動エネルギーの評価解析を組み込んだ。解析の結果、自由面の効果により効率よく破砕し、放射波動エネルギーを低減することができることがわかった。

今後は、様々なスリットパターンや従来の心抜き発破 (V カット) を対象に解析を行い、その効果について比較検討する予定である。

参考文献

- 1) 若月和人, 木村能隆, 多田芳葉, 高橋 渉: 民家直下における心抜き自由面発破の振動低減効果, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, (2011), VII-387.
- 2) 若月和人, 齋藤 優, 阿部和久, 紅露一寛: 心抜き自由面発破の個別要素解析と振動低減効果の解明, 土木学会論文集 F1, **72**(3)(2016), pp.I.16-I.27.
- 3) 齋藤 優, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛: 個別要素法によるコンクリート供試体発破実験の再現解析, 計算数理工学論文集, **15**(2015), pp.19-24.
- 4) 石沢浩太, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛: 自由面発破による岩盤破壊過程の個別要素解析, 計算数理工学論文集, **13**(2013), pp.61-66.
- 5) 若月和人, 齋藤 優, 阿部和久, 紅露一寛: 自由面発破の実験と個別要素法を用いた数値解析手法の検証, 土木学会論文集 F1, **71**(3)(2015), pp.I.1-I.10.
- 6) 今野真精, 阿部和久, 若月和人, 紅露一寛: トンネル発破解析を対象とした 3 次元個別要素法の計算効率改善, 計算数理工学論文集, **18**, 29-34, 2018.